

「太陽エネルギー技術研究開発／革新的太陽光発電技術  
研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）」  
事後評価報告書

平成28年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会

平成28年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
理事長 古川 一夫 殿

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会 委員長 小林 直人

NEDO技術委員・技術委員会等規程第33条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。

「太陽エネルギー技術研究開発／革新的太陽光発電技術  
研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）」  
事後評価報告書

平成28年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会

## 目 次

はじめに	1
審議経過	2
分科会委員名簿	3
評価概要	4
研究評価委員会委員名簿	8
研究評価委員会コメント	9
第1章 評価	
1. 総合評価	1-1
2. 各論	
2. 1 事業の位置付け・必要性について	
2. 2 研究開発マネジメントについて	
2. 3 研究開発成果について	
2. 4 実用化に向けての見通し及び取り組みについて	
3. 評点結果	1-19
第2章 評価対象事業に係る資料	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会公開資料	2-2
参考資料1 分科会議事録	参考資料 1-1
参考資料2 評価の実施方法	参考資料 2-1

## はじめに

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「太陽エネルギー技術研究開発／革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）」の事後評価報告書であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第31条に基づき、研究評価委員会において設置された「太陽エネルギー技術研究開発／革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）」（事後評価）研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第47回研究評価委員会（平成28年3月15日）に諮り、確定されたものである。

平成28年3月  
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会

## 審議経過

### ● 分科会（平成27年11月13日）

#### 公開セッション

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法
5. プロジェクトの概要説明

#### 非公開セッション

6. プロジェクトの詳細説明
7. 全体を通しての質疑

#### 公開セッション

8. まとめ・講評
9. 今後の予定、その他
10. 閉会

### ● 第47回研究評価委員会（平成28年3月15日）

「太陽エネルギー技術研究開発／革新的太陽光発電技術研究開発

(革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)」

事後評価分科会委員名簿

(平成27年11月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	まつむら みちお 松村 道雄	大阪大学 太陽エネルギー化学研究センター名誉教授
分科会長 代理	たかくら ひでゆき 高倉 秀行	立命館大学 理工学部 特別任用教授
委員	うじはら とおる 宇治原 徹	名古屋大学 グリーンモビリティ連携研究センター 教授
	こばやし まさかず 小林 正和	早稲田大学 理工学術院／各務記念材料技術研究所 教授
	すぎもと かんぞう 杉本 完蔵	一般社団法人 太陽光発電協会 幹事会 幹事
	のだ すすむ 野田 進	京都大学大学院 工学研究科 電子工学専攻 教授
	やすたけ きよし 安武 潔	大阪大学大学院 工学研究科 精密科学・応用物理学専攻 教授

敬称略、五十音順

## 評価概要

### 1. 総合評価

本プロジェクトは将来のエネルギー問題を解決することを目指した、未来志向的のプロジェクトであり NEDO 事業として異例の長期的将来の目標設定がされているなど、画期的なものである。開発対象は将来の革新的技術であり技術的難易度が高く、公共性の高い事業であるといえる。2050 年の発電コスト 7 円/kWh 未満の達成を目標にして企画され、大学・国研・企業の研究機関の研究者が、オールジャパンに近い形で関わった研究体制で進められた。平成 20 年以降、7 年間にわたり実施された研究開発については、2 段階の中間評価を経てテーマを実現性の高いものに絞り込むと共に、類似テーマを整理してより効率的なものに再編し、体制を進化させつつ推進したことを高く評価できる。その結果、多接合型太陽電池による世界最高の効率の実現のほか、波長スプリッティング型太陽電池などにおいて世界トップレベルの成果を得ることが出来た。中間評価の段階では曖昧であったコスト試算の客観的信頼性が、最終的には無理のないコスト見通しとして示されたことにより、実用化イメージ・出口イメージが明確になり、要素技術を開発していく道筋がかなり具体的になった。

一方、太陽光発電のコストの低減のためには、太陽電池の効率だけでなく、長寿命化とライフサイクルコスト低減も必須要素である。本プロジェクトにおいては、寿命やライフサイクルコストが、どれだけ意識して進められたか疑問が残る。未来志向的な研究を行うときには、フィージビリティスタディに近い内容のものも取り入れることが必要であるが、テーマの選考基準がわかりにくかった。また、2050 年までの長期最終目標に対する中期的目標や短期的目標の設定が曖昧になっている感がある。

革新的太陽光発電技術を世界に先駆けて実用化し、知財権も含めて圧倒的な優位性を確保するためには、基礎研究の段階から多くの企業に関わることが重要であり、より緊密な連携が望まれる。さらに、実用化を目指し革新的太陽光発電技術開発を推進するためには、多くの企業を巻き込み、材料開発、構造開発を同時に進める必要がある。そのためには、基礎研究段階からの NEDO の支援が重要と考えられる。日本企業が基礎研究にほとんど投資をしなくなった現在、基礎研究を含めた開発に対するコストパフォーマンスの高い NEDO のサポートのあり方を検討・整備して行く必要があるのではないかと。

### 2. 各論

#### 2. 1 事業の位置付け・必要性について

エネルギーおよび環境問題の解決に向けた国の政策方針に則り、太陽光発電を重要な電源の一つとして利用するための技術開発である。本事業は、太陽電池の発電効率向上を目標とするとともに、発電コスト 7 円未満/kWh という非常に高い目標を掲げて推進された。現状の太陽電池はシリコン系が主流であるが、発電コスト、効率の劇的な改善にはシリコン以外の材料による技術が必要であることは明らかである。しかしながら、シリコン系以外の太陽電池技術開発を民間だけで行うことには、相当の費用・時間がかかり、また開発の難易度も



高いことから、NEDO 事業として実施するのが適切である。また、太陽電池材料に係わる研究開発等は、長期にわたって継続・実現させる必要があり、NEDO が基礎的研究から実用化まで関与することが最も適切であったと評価できる。

一方、長期目標は明確に示されているものの、中期・短期目標があまり明白とは感じられなかった。個別テーマによっては目標の変換効率を達成しているのにもかかわらず、低コスト化へのアプローチを進めていないことには疑問が残った。NEDO としても状況に応じて逐次戦略を明白に示すべきではないか。集光型多接合型太陽電池は、すでに諸外国ではかなりの規模で実用化されているものの、その限界を追求し世界最高の効率を実現したことは評価される。一方で、現時点で効率を数%向上させたことが、将来の革新技術に繋がるかという点では疑問が残る。目標として数値的には評価しにくい新概念、新構造、新材料といったものも広く取り上げ、それらの問題点も示した上で、将来の太陽光発電に予想される姿を積極的に提示してもよかったのではないか。コンソーシアムとしての具体的シナジー効果も見えにくかった。産官学連携では、民間事業者の活性化を促すインセンティブがあってもよいのではないか。

非常に良い技術でも、事業化がうまく行くためには、開発のフェーズが政治・経済情勢等にうまくマッチする必要がある、常にテーマごとの短期・中期・長期的目標を見極めて、それに応じて予算を調整し、バランスよく投資することが引続き重要と考えられる。

## 2. 2 研究開発マネジメントについて

変換効率に対する 40%超という目標は挑戦的ではあるが適切な範囲であり、かつ発電コスト 7 円/kWh 未満という目標も大変挑戦的であるが、将来必ずや達成すべき目標として適切であった。実施体制として、3つの研究開発テーマを大学・国研が中心機関となる3グループのコンソーシアムに纏め、国際共同研究が補完する姿は、多岐・多分野にわたる研究開発のマネジメントがうまく機能したといえる。中間評価等を踏まえて、多岐にわたる個別テーマを実現性の高いものに絞り込むと共に、類似テーマを整理してより効率的な体制に再編して、各グループリーダーがリーダーシップを発揮して最終目標に到達していることなど、研究開発のマネジメントが機能していると思われる。

今回は、性能に対する達成目標しか設定されなかったが、本事業のように未来志向的なプロジェクトの場合は、目標設定の考え方に工夫が必要だったと思われる。また、7 円/kWh 未満の発電コスト目標の達成は、既存・既知の方式の延長による達成はかなり困難であることが予想され、目標達成のためには新たな概念・構造・材料の探索は不可欠であろう。単にテーマを絞り込むだけでなく、さらに多くのチャレンジングなテーマを順次取り上げて、それらの可能性の評価を行うことも必要ではなかったか。実用化に対して、中期的・短期的な目標設定を明確に行い、産業界への技術移転が行われる道筋を示すべき時期であろう。国際共同研究に関しては、意見交換等による研究シナジーが具体的にどのように反映されたかを示すことでより成果が明確になるとと思われる。

目標設定と一部関連するが、未来志向的なプロジェクトの場合は、現時点では性能評価の難しいチャレンジングな方式、材料等の可能性を探索することも重要であり、さらに性能目

標の達成以上に、原理確認やメカニズム解明がより一層重要となる。今後、限られた分野の専門家だけではなく、評価や理論計算などの研究者等の参加による、より広範な視点からの推進が必要であろう。

### 2. 3 研究開発成果について

変換効率の目標はほぼ達成されたと評価できる。一部成果は市場に投入され、実用化に向けた評価が行われる段階に達している。集光型多接合太陽電池、波長スプリッティング型太陽電池などにおいては、世界最高の効率、世界トップクラスの性能が得られており、比較的近い将来に実用化される可能性がある。量子構造太陽電池が、多接合の一部として有効に働くことを示した成果は、これまで組成の制御がメインであった化合物半導体のバンド制御法に、新たな切り口をあたえて、圧倒的に設計の自由度を高めたところに、大きな可能性を示した。メカニカルスタックデバイス化技術により、Ⅲ－Ⅴ属化合物セル等の直接接合セルで最終目標 30%を超えた 31.6%（非集光）を達成したことにより、今後の量産性や低コストに向かう実用化技術の展開が期待できる。全体的には軌道修正しながら計画に沿って進捗し、2050 年における変換効率および発電コストへのアプローチの探索と可能性の実証という目標は、相当のレベルで達成したと考えられる。

一方、絞り込みにより中止されたテーマには、何らかの問題や継続しない理由があったと思われるが、本プロジェクトのような探索的基礎研究では、将来における太陽光発電技術の飛躍のために、研究の成功例を示すだけでなく、一見失敗例と見られる結果についても、その問題点を積極的に情報発信することも必要ではなかったか。材料開発はもともと非常に時間がかかることは理解しているが、材料開発に関係するフイージビリティスタディの研究成果について、あまり大きな成果が得られていなかったことが残念であった。今回のプロジェクトは多接合もしくはそれに類する方法の追求となり、マルチバンド・ホットキャリア・アップコンバージョン等については、ほとんど検討されていなかったが、これらの検討を行なうことも重要であったかもしれないと思われる。

高品質サンプル作製技術を駆使して技術開発を行い、変換効率の改善を達成したことは大変有意義であったが、それは高コスト化を示すことに他ならない。どのような方法で作製技術を低コスト化させることが可能かを示すことが実用化の上で重要な指針になると考えられるが、その点に対する具体的成果が希薄であった。

探索的基礎研究については、今回の目標設定に基づく、その成果があまり評価できないものが多く出てくる。新原理太陽電池の実用化を加速するためには、新材料の開発指針、デバイス設計原理、新概念の実証や理解度、およびその内容を簡明に説明できるかどうか、といった観点の目標設定ができないか、今後、目標設定と成果の評価のあり方も検討する必要がある。

### 2. 4 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

集光型多接合太陽電池、波長スプリッティング型太陽電池や電極材料など、多くの要素技術について進展が見られており、比較的近い将来に実用につながる可能性が示された。特に

シャープの格子不整合系 3 接合太陽電池は、中東産油国での集光型システム導入に向けた取り組みが既になされつつあり、実用化に近いイメージである。産総研グループのメカニカルスタック技術、東工大グループの低倍率集光システムは、実用化イメージがクリアであり、課題及びマイルストーン、引き継ぐ研究開発体制も明確にされており高く評価できる。他の多くのテーマについても、概ね成果の関連分野への波及効果が期待でき、プロジェクトの実施自体も、当該分野の研究開発や人材育成等を促進する効果が十分にあった。

一方、本研究の目的は、2050 年までの変換効率向上と、発電コスト低減の可能性を追求し実証することであるが、実用化を目指してプロジェクトを進める上では、長期的展望に立ったコスト評価、および社会のエネルギーシステム全般に関する知見をもった専門家の意見を取り入れて、得られた研究成果が将来の太陽光発電にどのように生かされるかの検討が必要であり、その上で実用化のためにはどのような課題があるかについても提示する必要があった。

実用化の面で優先されるのは発電コストであり、本プロジェクトの成果を実用化するため「発電コストが汎用電源未満」を達成するには、「変換効率 40%」を絶対条件とするのではなく、「発電コスト低減」を優先した上で、将来的には設置可能面積の制約が拡大することを踏まえて、太陽光発電システムの面積効率を含めた評価があつてよいのではないかと考える。また、低コスト化においては、材料探索か、プロセスの大きな革新が必要となることから、探索的研究テーマでは太陽電池の性能だけではなく、これらを実用化する目標設定を今後は考慮することが望ましい。

## 研究評価委員会

委員名簿（敬称略、五十音順）

職 位	氏 名	所属、役職
委員長	小林 直人	早稲田大学 研究戦略センター 副所長／教授
委員	浅野 浩志	一般財団法人電力中央研究所 社会経済研究所 副研究 参事
	安宅 龍明	国立研究開発法人産業技術総合研究所 イノベーション 推進本部 上席イノベーションコーディネータ
	稲葉 陽二	日本大学 法学部／大学院 法学研究科 教授
	亀山 秀雄	東京農工大学 名誉教授／シニア教授
	佐久間一郎	東京大学大学院 工学系研究科 附属医療福祉工学開発 評価研究センター センター長／教授
	佐藤 了平	大阪大学 産学連携本部 名誉教授／特任教授
	菅野 純夫	東京大学大学院新領域創成科学研究科 メディカル情報 生命専攻 教授
	丸山 正明	技術ジャーナリスト
	宮島 篤	東京大学 分子細胞生物学研究所 教授
	吉川 典彦	名古屋大学 大学院工学研究科 マイクロ・ナノシステム 工学専攻 教授

## 研究評価委員会コメント

第47回研究評価委員会（平成28年3月15日開催）に諮り、以下のコメントを評価報告書へ附記することで確定した。

- 基礎研究から実用化までをつなげるマネジメントは困難を伴うが、今後のプロジェクト実施にあたっては、時間軸の中での目標設定を重視した研究マネジメントを行っていただきたい。

## 第1章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の箇条書きは、評価委員の主な指摘事項を、参考として掲載したものである。

## 1. 総合評価

本プロジェクトは将来のエネルギー問題を解決することを目指した、未来志向的のプロジェクトであり NEDO 事業として異例の長期的将来の目標設定がされているなど、画期的なものである。開発対象は将来の革新的技術であり技術的難易度が高く、公共性の高い事業であるといえる。2050年の発電コスト7円/kWh未達の達成を目標にして企画され、大学・国研・企業の研究機関の研究者が、オールジャパンに近い形で関わった研究体制で進められた。平成20年以降、7年間にわたり実施された研究開発については、2段階の中間評価を経てテーマを実現性の高いものに絞り込むと共に、類似テーマを整理してより効率的なものに再編し、体制を進化させつつ推進したことを高く評価できる。その結果、多接合型太陽電池による世界最高の効率の実現のほか、波長スプリッティング型太陽電池などにおいて世界トップレベルの成果を得ることが出来た。中間評価の段階では曖昧であったコスト試算の客観的信頼性が、最終的には無理のないコスト見通しとして示されたことにより、実用化イメージ・出口イメージが明確になり、要素技術を開発していく道筋がかなり具体的になった。

一方、太陽光発電のコストの低減のためには、太陽電池の効率だけでなく、長寿命化とライフサイクルコスト低減も必須要素である。本プロジェクトにおいては、寿命やライフサイクルコストが、どれだけ意識して進められたか疑問が残る。未来志向的な研究を行うときには、フュージビリティスタディに近い内容のものも取り入れることが必要であるが、テーマの選考基準がわかりにくかった。また、2050年までの長期最終目標に対する中期的目標や短期的目標の設定が曖昧になっている感がある。

革新的太陽光発電技術を世界に先駆けて実用化し、知財権も含めて圧倒的な優位性を確保するためには、基礎研究の段階から多くの企業に関わることが重要であり、より緊密な連携が望まれる。さらに、実用化を目指し革新的太陽光発電技術開発を推進するためには、多くの企業を巻き込み、材料開発、構造開発を同時に進める必要がある。そのためには、基礎研究段階からの NEDO の支援が重要と考えられる。日本企業が基礎研究にほとんど投資をしなくなった現在、基礎研究を含めた開発に対するコストパフォーマンスの高い NEDO のサポートのあり方を検討・整備して行く必要があるのではないかと。

### 〈肯定的意見〉

- ・ 本プロジェクトは将来のエネルギー問題を解決するために、2050年の発電コスト7円/kWh未達の達成を目標にして企画されたもので、かなりの長期将来を見越しており、公共性の高い事業である。NEDO 事業としても異例の長期的将来の目標設定がされており、今後の長期的視点に立った NEDO 事業の先例となるもの位置づけられよう。
- ・ 本プロジェクトは、将来の太陽光発電に求められる、高い発電効率の実現に道筋をつけることに重点を置いて進められた。その結果、多接合型太陽電池による世界最高の効率の実現のほか、波長スプリッティング型太陽電池などにおいても世界トップレベルの成果を得ることが出来た。また、量子ドット太陽電池など、既存の太陽電池では採用されていない新原理や新材料など、民間では行えない探索的な検討を検討してい

る。

- 研究体制においては、学界・国研・企業の研究機関の研究者が、オールジャパンに近い形で関わり、将来の太陽電池についての有益な情報交換の場を提供することとなった。
- 変換効率の目標はほぼ達成されたと評価する。NEDO のマネジメントも適切であった。それぞれの技術開発で、これが最終の形であるというものが未だ示されていないが、さらに改善の余地を残している技術テーマがあることから、今後の技術開発に期待したい。
- 未来志向的にプロジェクトを開始されたと言う点では NEDO としては画期的であり、評価できる。今回のプロジェクトで、いわゆる複数の太陽電池を組み合わせる方法（多接合型、スプリット型）については、高効率化においては極めて有効であることが、はっきりと証明され、その方向性も明確に示された。今後、このタイプの太陽電池の低コスト化が今後の課題であることもはっきりとした。その意味では、意義深いプロジェクトであった。
- NEDO が長期にわたり太陽電池関連の研究をサポートしてきたことが今日の成果につながっていることは間違いないと認識される。その点に関する評価は極めて高い。
- 平成 20 年以降、7 年間にわたり実施された研究開発は、2 段階の中間評価を経て、最終段階で絞り込まれた各種太陽電池の要素技術においては、より高い目標設定のなかで、性能向上の面では十分な成果が得られたと評価できます。特に、多接合変換効率では、非集光、集光において世界最高記録を達成し明確に成果を出されていること、またナノ材料を介在させたスマートスタック技術開発などは将来の可能性を示唆する有望な成果といえる。また波長スプリッティング太陽電池では低倍率集光型での高効率化への道や、更なる応用開発が開けたといえる。NEDO が中心となった、コンソーシアム方式での研究開発は世界的にも誇れる様々な成果を生むことに貢献できたといえる。
- 革新的太陽光発電技術について、極めて高い成果が達成されたと評価でき、今後の実用化に向けた開発が期待される。
- 本プロジェクトは、将来のエネルギー問題を解決するために企画されたものである。革新的太陽光発電技術について、民間では基礎研究段階から長期的視野に立って支援を行うことが困難であることから、非常に公共性の高い事業といえる。
- 事業の過程では、中間評価等を踏まえて、テーマを実現性の高いものに絞り込むと共に、類似テーマを整理してより効率的なものに再編し、体制を進化させつつ推進したことは高く評価できる。中間評価の段階では、コスト試算の客観的信頼性に疑問が持たれたが、最終的には無理のない形でコスト見通しが示されたことも評価されるべきである。
- 各拠点において多くの要素技術の開発を並行して行い、スマートスタックや波長スプリッティング技術によって太陽電池セルとして評価を行う手法の提案はユニークであると共に、研究開発を加速して成果につなげた点が、評価できる。これらの手法は、



標準化してさらに発展させることにより、今後の革新的太陽電池の実用化開発を加速する手段として利用することが期待される。

- ・ 拠点形成の効果としては、複数の研究機関の要素技術を融合することによって世界トップレベルの成果が生まれ、論文発表、学会発表、知財の取得、展示会参加など成果の普及や一般への情報発信も十分に行われた。この事業によって、実用化イメージ・出口イメージが明確になり、要素技術を段階的に開発していく道筋がかなり見えてきたと感じた。

#### 〈改善すべき点〉

- ・ 将来の太陽電池について、構造、材料、原理など多くの可能性が検討されたが、本プロジェクトを通して、2050年の発電コスト7円/kWh未満の実現の道筋が明確に示されたとは言い難い。現時点での「世界一の効率」にこだわりすぎた嫌いがある。
- ・ 太陽光発電のコストの低減のためには、太陽電池の効率だけでなく、長寿とライフサイクルコストも必須要素である。本プロジェクトにおいて、寿命やライフサイクルコストが、どれだけ意識して進められたか疑問が残る。将来の基幹エネルギー開発を目標とする以上、長期的視点でのコスト評価や、社会全体のエネルギーシステムの中での太陽光発電の位置づけ等、より広い視点からの方針設定と、それを研究に反映させることのできる体制が必要ではなかったか。
- ・ 未来志向的な研究を行うときには、フュージビリティスタディ（FS）に近い内容のものも取り入れていくことは必要とは思われるが、FSテーマの選考の基準がわかりにくかった。
- ・ 2050年までの長期的目標があったとしてもそれに繋ぐべき中期的目標や短期的目標の設定があいまいになっている感がある。
- ・ 中期的、短期的目標設定をはっきりとさせ、それに向けたプロジェクトの展開が行われることが期待される。
- ・ 本研究では、太陽光発電システム化への周辺技術については、研究範囲外と考えられるが、集光型で展開の可能性について、もう少し具体性があるとより全体成果が見えやすくなるのではないか。特に集光型の場合はトラッキングが必要となるが、日射の高い直達光の地域では本研究のシステム価格開発目標を十分に下回る可能性がある。一方で、間達光の多い我国での活用は不利になる。量産性/経済性の面で、将来の日本の技術の集光型としてのグローバル展開の他に、我が国での将来技術として、本要素研究成果が長期的な視点で価格目標と合わせてどのように展開できるかの見方もあってよいのではないかと考える。
- ・ 革新的太陽光発電技術について、特に、第3世代太陽電池を世界に先駆けて実用化し、知財権も含めて圧倒的な優位性を確保するためには、基礎研究の段階から多くの企業が関わり合いを持つべきである。それにより、企業の技術力・研究開発力の向上が期待されるとともに、大学での研究装置購入や装置開発のコストパフォーマンスも向上するはずである。東大グループのテーマに関しては、参加企業が少ないにも関わらず

最も多額の予算を使用しており、コストパフォーマンスの点では改善の余地があった。

〈今後に対する提言〉

- ・ 効率を含めて、現時点での性能が、そのまま長期的将来に通用するわけではない。長期的視野に立ったプロジェクトにおいては、中・短期目標のプロジェクトとは異なる仕方での目標設定と評価基準が必要になるだろう。
- ・ 本プロジェクトを通して明らかになった長期的事業を実施する上での問題点を、今後の長期的視点に立った **NEDO** 事業に反映させていただきたい。
- ・ **FIT** 導入後、発電コストが急速に低下していることから、**2050** 年の目標をできるだけ前倒しすべきである。
- ・ 多接合型の研究については、今後コストダウンが大きな課題となり、それにおいては、材料探索の研究が重要課題と思われます。それにおいては、メカニズムの解明が極めて重要と思われる。評価やメカニズム解明につながる目標も設定したプロジェクトにつなげてほしい。
- ・ 太陽電池変換効率に関する目標がほぼ達成できつつある現状であると委員会での報告から理解された。今後はコストに対するアプローチが、一層重要であろう。その点を意識した個別テーマの絞り込みに期待したい。
- ・ 本研究では、**2050**年までに「変換効率**40%**」かつ「発電コストが汎用電源未満（**7円/kWh**未満）」の実用化を目指した研究開発であり、研究成果はこれまでに、実現に向けた太陽電池の基礎技術の可能性を示す結果をえられている。今後、更に、継続して技術の可能性を実用化に近づける研究を継続実施して頂きたい。また、発電システムとして、コスト低減化への周辺技術の開発も不可欠であり、システム技術への展開への応用も視野にいれて頂きたい。
- ・ 革新的太陽光発電技術について、本気で実用化を目指した開発を推進するためには、基礎研究段階からの **NEDO** の支援が重要と考えられる。多くの企業を巻き込み、コストパフォーマンスと予算配分のメリハリを念頭に置きながら、材料開発、構造開発を同時に進める必要がある。基礎研究については、文部科学省系のプロジェクトとの重複が懸念されてきたが、太陽光発電に関わるテーマについては、文部科学省と **NEDO** の共同プロジェクトにするなど、**NEDO** のサポートによってコスト、資源、電力システムに関する意識付けを行うことが、実用化を加速する鍵になると考えられる。日本企業が基礎研究にほとんど投資をしなくなった現在、基礎研究を含めた開発に対するコストパフォーマンスの高い **NEDO** のサポートのあり方を検討・整備して行く必要があるのではないか。

## 2. 各論

### 2. 1 事業の位置付け・必要性について

エネルギーおよび環境問題の解決に向けた国の政策方針に則り、太陽光発電を重要な電源の一つとして利用するための技術開発である。本事業は、太陽電池の発電効率向上を目標とするとともに、発電コスト7円未満/kWhという非常に高い目標を掲げて推進された。現状の太陽電池はシリコン系が主流であるが、発電コスト、効率の劇的な改善にはシリコン以外の材料による技術が必要であることは明らかである。しかしながら、シリコン系以外の太陽電池技術開発を民間だけで行うことには、相当の費用・時間がかかり、また開発の難易度も高いことから、NEDO 事業として実施するのが適切である。また、太陽電池材料に係わる研究開発等は、長期にわたって継続・実現させる必要があり、NEDO が基礎的研究から実用化まで関与することが最も適切であったと評価できる。

一方、長期目標は明確に示されているものの、中期・短期目標があまり明白とは感じられなかった。個別テーマによっては目標の変換効率を達成しているのにもかかわらず、低コスト化へのアプローチを進めていないことには疑問が残った。NEDO としても状況に応じて逐次戦略を明白に示すべきではないか。集光型多接合型太陽電池は、すでに諸外国ではかなりの規模で実用化されているものの、その限界を追求し世界最高の効率を実現したことは評価される。一方で、現時点で効率を数%向上させたことが、将来の革新技術に繋がるかという点では疑問が残る。目標として数値的には評価しにくい新概念、新構造、新材料といったものも広く取り上げ、それらの問題点も示した上で、将来の太陽光発電に予想される姿を積極的に提示してもよかったのではないか。コンソーシアムとしての具体的シナジー効果も見えにくかった。産官学連携では、民間事業者の活性化を促すインセンティブがあってもよいのではないか。

非常に良い技術でも、事業化がうまく行くためには、開発のフェーズが政治・経済情勢等にうまくマッチする必要がある、常にテーマごとの短期・中期・長期的目標を見極めて、それに応じて予算を調整し、バランスよく投資することが引続き重要と考えられる。

#### (1) NEDOの事業としての妥当性

##### 〈肯定的意見〉

- ・ エネルギーおよび環境問題の解決に向けた国の政策方針に則って進められたものであり、また、民間では行い難い課題も取り上げられており、NEDO 事業として意義のあるものである。
- ・ 本研究開発は、太陽エネルギーを地上の重要な電源の一つとして利用できるようにするため、発電コスト7円未満/kWhという非常に高い目標の元推進されてきたもので、温室効果ガスの排出量削減への寄与も期待されることから公共性が高く、NEDO が関与することが最も適切であったと評価できる。費用対効果も適切であった。
- ・ 太陽光発電に関しては、現状はシリコン材料に基づくものが主流であるが、将来的にはシリコン以外の材料による技術が必要であるのは明らかである。しかしながら、シリコンが主流である民間活動だけでは、コストの観点から新技術開発へのリソースは

十分に得られないため、NEDO 事業として実施するのは適切である。当初に計画されていた内容と照らし合わせた場合、適切であると考ええる。

- ・ 特にNEDOの強みである公的な中立性を保ったなかで、産官学連携の強みが発揮できたのではないかと。
- ・ 事業面においては、長期的・継続的なチャレンジ目標を実施するに当たって、短期的企業経営視点の民間では達成できない内容を、NEDOがリードする形で、国立研究所や、大学での基礎研究を促すことで将来の事業化に生かせる基盤作りとなっている。
- ・ 長期的な高い開発目標に向け、日本の太陽電池開発のトップレベルの研究者による、技術開発は、世界の先端技術を担っている研究にふさわしい。
- ・ 太陽光発電・太陽電池材料に係わる研究開発は、長期にわたって継続・実現させる必要があり、NEDO が基礎的研究から実用化までを、一貫してリードすべきである。この事業は、エネルギーイノベーションに貢献し、公共性が高く、民間のみでは為し得ないという点で、NEDO が遂行すべき重要な事業と考えられる。

#### 〈改善すべき点〉

- ・ 一方、将来の企業の事業化に関しては、長期的な開発ということもあり、要素研究がどこまで実現できる可能性があるかは見えにくい。また、コンソーシアムとしての具体的シナジー効果も見えにくかった。産官学連携では、民間事業者の活性化を促すインセンティブがあってもよいのではないかと。 将来の研究者育成の面からもNEDOの果たす役割は極めて重要といえる。

### (2) 事業目的の妥当性

#### 〈肯定的意見〉

- ・ 本プロジェクトは、太陽電池の発電効率の向上を目標として進められた。発電効率は、国際的な比較等においても、技術レベルを客観的に示す尺度となるもので、一定の意義がある。
- ・ 革新的技術を導入しながら長期的アプローチを進めていることは国家の戦略として極めて有望である。事業やその目的は妥当であると感じられる。技術開発も概ね順当に進んでいる。また国際共同研究により、多くの国で技術のスタンダード化が進んでいることも大変優れた成果であると考えられる。委員会で報告のあった成果の多くは産もしくは学単独では成し得なかった内容であろうことから NEDO が当事業を担当したことに極めた高い評価をする。
- ・ 研究開発開始から、2度にわたる中間評価をおこない、事業環境の変化に応じた見直しのなかで、様々な研究内容を吟味して最終成果を出したことはNEDO事業として評価できる。世界的にも、日本の環境技術をリードする意味においても、本事業の位置づけは適切であったと考える。

#### 〈改善すべき点〉

- 集光型多接合型太陽電池は、すでに諸外国ではかなりの規模で実用化されており、わが国でも高いレベルの研究が行われていた。世界最高の効率を実現したことは評価されるが、現時点で効率を数%向上させたことが、将来の革新技術に繋がるかという点では疑問が残る。数値的には評価しにくい新概念、新構造、新材料といったものももっと広く取り上げ、それらの問題点も示した上で、将来の太陽光発電に予想される姿を積極的に提示してもよかったのではないか。
- いわゆる多接合型の限界を追求したと言う意味では、大きな成果はあったと思われるが、次世代の課題の指針については十分示せたとはいえない。この予算規模であれば、この部分の成果もあったほうがよかった。
- 中期・短期目標があまり明白に伝わってこなかった。個別テーマによっては変換効率目標を達成しているのにもかかわらず、低コスト化へのアプローチを進めていないことには疑問が残った。NEDOとしても逐次戦略を明白に示すべきだったと感じた。
- 2050年への目標に向けた具体的道筋を示すべき時期であろう。曖昧なままにプロジェクトが進むのであれば、将来的に詳細テーマの乱立してしまい、選択と集中がなされないと危惧する。
- 非常に良い技術でも、事業化がうまく行くためには、開発のフェーズが政治・経済情勢等にうまくマッチする必要がある、常に短期・中期・長期的目標のテーマを見極めて、それに応じて予算を調整し、バランスよく投資することが重要と考えられる。投じた予算のコストパフォーマンスについては、評価ポイントに依存して変化するため、十分な説明が必要である。

## 2. 2 研究開発マネジメントについて

変換効率に対する 40%超という目標は挑戦的ではあるが適切な範囲であり、かつ発電コスト 7 円/kWh 未満という目標も大変挑戦的であるが、将来必ずや達成すべき目標として適切であった。実施体制として、3つの研究開発テーマを大学・国研が中心機関となる 3 グループのコンソーシアムに纏め、国際共同研究が補完する姿は、多岐・多分野にわたる研究開発のマネジメントがうまく機能したといえる。中間評価等を踏まえて、多岐にわたる個別テーマを実現性の高いものに絞り込むと共に、類似テーマを整理してより効率的な体制に再編して、各グループリーダーがリーダーシップを発揮して最終目標に到達していることなど、研究開発のマネジメントが機能していると思われる。

今回は、性能に対する達成目標しか設定されなかったが、本事業のように未来志向的なプロジェクトの場合は、目標設定の考え方に工夫が必要だったと思われる。また、7 円/kWh 未満の発電コスト目標の達成は、既存・既知の方式の延長による達成はかなり困難であることが予想され、目標達成のためには新たな概念・構造・材料の探索は不可欠であろう。単にテーマを絞り込むだけでなく、さらに多くのチャレンジングなテーマを順次取り上げて、それらの可能性の評価を行うことも必要ではなかったか。実用化に対して、中期的・短期的な目標設定を明確に行い、産業界への技術移転が行われる道筋を示すべき時期であろう。国際共同研究に関しては、意見交換等による研究シナジーが具体的にどのよう

に反映されたかを示すことでより成果が明確になるとと思われる。

目標設定と一部関連するが、未来志向的なプロジェクトの場合は、現時点では性能評価の難しいチャレンジングな方式、材料等の可能性を探索することも重要であり、さらに性能目標の達成以上に、原理確認やメカニズム解明がより一層重要となる。今後、限られた分野の専門家だけではなく、評価や理論計算などの研究者等の参加による、より広範な視点からの推進が必要であろう。

### (1) 研究開発目標の妥当性

〈肯定的意見〉

- ・ 「変換効率 40%超」かつ「発電コスト 7 円/kWh 以下」という目標は大変挑戦的であるが、将来必ずや達成すべき目標として適切であった。
- ・ 革新的技術の導入を片目で見据えながら従来技術の発展も行っており概ね良好であろう。変換効率に対する目標も挑戦的ではあるが適切な範囲であり、マネジメントがうまくいっていると感じられた。
- ・ 個別テーマで当初の変換効率目標を 30%に据えていたものが後に 40%に目標値を上げたことが委員会の席で報告があった。それに対応できる研究グループだと見越したこと、実際に目標に到達していることなどからも研究開発のマネジメントが機能していると思われる。
- ・ 研究当初の PV 2030 から、事業環境の変化を反映した PV 2030+ のロードマップに沿って、新概念の技術開発、(量子ナノ構造や、新多接合材料等)、を導入し、2050 年のモジュール開発目標を超高率 40%と設定したことは非常に挑戦的であ

る。かつ、発電コストを、汎用電源未満まで下げるという 相反する目標設置をおこなったことは、太陽光発電システムが将来の基幹電源としての可能性を求める開発目標にふさわしい。また、3つの研究開発テーマを、大学、国研の3グループのコンソーシアムに纏め、国際共同研究が保管する姿は、多岐・多分野にわたる研究開発のマネジメントがうまく機能したといえる。特に、大学・企業がもっている様々な技術・特異分野を組み合わせる必要がある中でのマネジメント手腕は高く評価できる。

- ・ 具体的で明確な研究開発目標を定量的に設定する努力がなされたこと、中間評価等を踏まえて、多岐にわたるテーマを実現性の高いものに絞り込むと共に、類似テーマを整理してより効率的な体制に再編したことなど、各プロジェクトリーダーがリーダーシップを発揮して、非常に良い運営がなされたと考えられる。

#### 〈改善すべき点〉

- ・ 7円/kWh未満の発電コスト目標の達成は、既存・既知の方式の延長による達成はかなり困難であることが予想され、その達成のためには新概念、新構造、新材料の探索は不可欠であろう。単にテーマを絞り込むだけでなく、さらに多くのチャレンジングなテーマを、短期間かつ低額の予算であっても、順次取り上げて、それらの可能性の評価を行うことも必要ではなかったか。また、そのようなテーマを取り上げることを通して、異分野の研究者の知識・技術を取り込むことも必要ではなかったか。
- ・ 今回のような未来志向的なプロジェクトの場合は、目標設定の考え方に工夫が必要だったと思われる。今回は、性能に対する達成目標しか設定されなかったが、例えば、ロードマップは2030年まで描いて、2014年時点のマイルストーンを目標として設定することも考慮すべきだったと思われる。また、実用化のところは、一部の企業に多くを依存するところが見受けられた。
- ・ プロジェクト全体での変換効率目標が40パーセントであり、それに到達した個別テーマがあることは理解できるが、その先にさらに高い変換効率を設定したことでコストに対する検討が進まなかったことはマネジメントとして適切だとは評価できない。

#### 〈今後に対する提言〉

- ・ 長期的な展望における事業においては、現時点で有望と思われる方式・材料の極限的可能性を追求するとともに、現時点では評価の難しいチャレンジングな方式、材料等の可能性を探索することも重要であろう。また、限られた分野の専門家だけではなく、より広範な視点からの専門的知見の導入を図る必要がある。
- ・ 効率目標はほぼ達成されたと評価できるが、もう一方の発電コストについての深い分析があまり行われていないように見受けられる。今後7円/kWh未満をどのようにしたら実現できるか、高集光、低集光、非集光それぞれの技術について見通しを明らかにしてほしい。
- ・ 目標設定と一部関連するが、未来志向的なプロジェクトの場合は、性能目標の達成以上に、原理確認やメカニズム解明がより一層重要となる。メンバーに、評価や理論計

算などの研究者ももっと加えるべきである。

## (2) 研究開発計画の妥当性

### 〈肯定的意見〉

- ・ プロジェクトの進行とともに、テーマの絞り込みがされ、研究方向が明確になったが（中間評価においてもそのように勧められた）、一方で、探索的研究が十分になされたかどうかについては疑問が残る。
- ・ 中間評価を2回実施し適宜プロジェクトを見直していることも適切であった。

### 〈改善すべき点〉

- ・ 2050年を見据えた中期的目標や短期目標が曖昧なことはマネジメントとして適当ではないと思う。このことからグループの構成の適切性、計画の適切性に関する評価を行えない。

### 〈今後に対する提言〉

- ・ 開発技術は多岐わたる専門技術であり、知財取得のみならず、周辺特許も含めた特許化が急務。また測定方法などについても他のプロジェクトとも連携し標準化を推進して頂きたい。また、このプロジェクトでの進捗は、次年度以降の基本計画案へ反映して頂きたい。
- ・ 裾野を広げるべき詳細のテーマが存在することは技術開発の観点から極めて重要であるが、目標達成のための指針がないのに裾野を広げるのは所謂「バラマキ」に近い。中期的・短期的な目標設定を明確に行い、産業界への技術移転（実用化）が行われる道筋を示すべき時期であろう。

## (3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

### 〈肯定的意見〉

- ・ 開始当初にはグループ間の担当内容の重複なども見られたが、プロジェクトの進行とともに、各グループ担当内容が整理され、それぞれの方向性が明確にされた。また、テーマの絞り込みを通して、意図を持った研究マネジメントが行われた。
- ・ 「変換効率40%超」かつ「発電コスト7円/kWh以下」という目標は大変挑戦的であるが、この目標を達成するため、限られた数の拠点を指定し、拠点のリーダーの下に、公設研究機関、大学、民間が協働して開発研究を進める体制を築いたことは大変適切であったと評価できる。
- ・ 実施体制としては、我が国を代表する高効率太陽電池の専門家が揃っており、よいと感じた。また、それぞれの基礎研究から実用化までのメンバーが取りそろえられており、しかもサブリーダーのリーダーシップが存分に発揮され、多くの機関が連携して機能していた。
- ・ 豊田工大グループが日本のCPV研究を世界トップレベルに引き上げ、実用化へ向けた



道筋を示した成果と、その研究開発マネジメントにおけるリーダーシップも注目に値する。

〈改善すべき点〉

- ・ 実施体制の面では各要素研が専門分野のため、グループリーダーの力量による部分多くあるなかで、テーマ内での、運営委員会の果たす役割が重要と思われる。
- ・ 国際共同研究の、意見交換等による研究シナジーが具体的にどのように反映されたかを示すことでより成果が明確になる。
- ・ 各プロジェクトリーダーのリーダーシップと実施者および NEDO の十分な連携により、良好な研究開発マネジメントがなされたと思われるが、今回の分科会の中では NEDO の関与が分かり難かった。産総研、東工大、豊田工大グループと NEDO の協力関係は極めて良好であったと思われるが、東大グループの基礎研究については分かり難い。研究開発マネジメントにおける NEDO の成果が示されると、より良かった。

〈今後に対する提言〉

- ・ 企業が参画し易くすること、企業の参加により研究開発のコストパフォーマンスを向上させること、産官学の協力体制を推進することにおいて、より NEDO の力が発揮されることを期待する。

(4) 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

〈肯定的意見〉

- ・ それぞれの拠点が定期的に共同シンポジウム等を開催するなど、情報交換も適切に行われている。

(5) 情勢変化への対応等

〈肯定的意見〉

- ・ 集光型太陽電池の性能評価法が国際連携を通して効果的に推進されこと、波長スプリティング低倍集光システムの目標効率が 30%から 40%に引き上げられたことなど、状況の変化に応じた対応も行われた。
- ・ 特に、東工大グループでは、変換効率の最終目標を H25 年度に 30%から 40%へと引き上げ、最終的には 38%の見通しを得ているが、研究の進展に応じて、より挑戦的な目標に切り替え研究をさらに加速した点は、大いに賞賛される。

## 2. 3 研究開発成果について

変換効率の目標はほぼ達成されたと評価できる。一部成果は市場に投入され、実用化に向けた評価が行われる段階に達している。集光型多接合太陽電池、波長スプリッティング型太陽電池などにおいては、世界最高の効率、世界トップクラスの性能が得られており、比較的近い将来に実用化される可能性がある。量子構造太陽電池が、多接合の一部として有効に働くことを示した成果は、これまで組成の制御がメインであった化合物半導体のバンド制御法に、新たな切り口をあたえて、圧倒的に設計の自由度を高めたところに、大きな可能性を示した。メカニカルスタックデバイス化技術により、III-V 属化合物セル等の直接接合セルで最終目標 30%を超えた 31.6%（非集光）を達成したことにより、今後の量産性や低コストに向かう実用化技術の展開が期待できる。全体的には軌道修正しながら計画に沿って進捗し、2050 年における変換効率および発電コストへのアプローチの探索と可能性の実証という目標は、相当のレベルで達成したと考えられる。

一方、絞り込みにより中止されたテーマには、何らかの問題や継続しない理由があったと思われるが、本プロジェクトのような探索的基礎研究では、将来における太陽光発電技術の飛躍のために、研究の成功例を示すだけでなく、一見失敗例と見られる結果についても、その問題点を積極的に情報発信することも必要ではなかったか。材料開発はもともと非常に時間がかかることは理解しているが、材料開発に関係するフィージビリティスタディの研究成果について、あまり大きな成果が得られていなかったことが残念であった。今回のプロジェクトは多接合もしくはそれに類する方法の追求となり、マルチバンド・ホットキャリア・アップコンバージョン等については、ほとんど検討されていなかったが、これらの検討を行なうことも重要であったかもしれないと思われる。

高品質サンプル作製技術を駆使して技術開発を行い、変換効率の改善を達成したことは大変有意義であったが、それは高コスト化を示すことに他ならない。どのような方法で作製技術を低コスト化させることが可能かを示すことが実用化の上で重要な指針になると考えられるが、その点に対する具体的成果が希薄であった。

探索的基礎研究については、今回の目標設定に基づくと、その成果があまり評価できないものが出てくる。新原理太陽電池の実用化を加速するためには、新材料の開発指針、デバイス設計原理、新概念の実証や理解度、およびその内容を簡明に説明できるかどうか、といった観点の目標設定ができないか、今後、目標設定と成果の評価のあり方も検討する必要がある。

### (1) 目標の達成度と成果の意義

#### 〈肯定的意見〉

- ・ 集光型多接合太陽電池、波長スプリッティング型太陽電池などにおいては、世界最高の効率、世界のトップクラスの性能が得られている。これらの成果は、比較的短期的将来に実用的に用いられる可能性がある。学界・国研・企業の研究機関が緊密に連携して推進されたプロジェクトであり、特許戦略も適切に行われていると判断される。
- ・ 変換効率の目標はほぼ達成されたと評価する。一部市場に投入され、実用化に向けた

評価が行われつつある。高集光太陽電池の性能評価についての標準化に取り組み、成果が生まれていることは大いに評価できる。知的財産権などへの取り組みも適切であった。

- 今回のプロジェクトでは、複数の太陽電池を用いる手法（多接合など）については、その有用性や今後の設計指針などについては、かなりの部分を明らかにし、高効率化の本命であることがほぼ証明されたといつて、過言ではないように思われる。その中でも、量子構造太陽電池が、多接合の一部として有効に働くことを示したことは、これまで組成の制御がメインであった化合物半導体のバンド制御法に、あらたな切り口をあたえて、圧倒的に設計の自由度を高めたところに、大きな可能性を感じた。また、貼り合わせの技術については、多接合太陽電池の最大の課題である格子ミスマッチの問題を一気に解決するものであり、それを低コストに実現する技術は非常に有用であると考えられる。また、スプリット型に関しては、明確にその有用性が示され、今後の一つのストリームとして、開発すべき技術であることが示されたように思う。
- III-V 族半導体太陽電池とその他接合によって 40%を大きく超える太陽電池の開発に成功したことは高い評価である。
- 新技術をサポートするために研究チームを新たに組み込みながら開発を進めていることは評価が高い。
- 集光型太陽電池等、今後必要とされるデバイスやシステムに対する標準評価技術を開発したことは評価が高い。
- ポストシリコン超高効率太陽電池開発のなかでも、格子不整合 3 接合（多接合変換効率）で世界最高記録（非集光・集光）を達成したことや、量子ドット超格子セルで、単相でドット密度の世界最高値を達成したことは非常に大きい成果といえる。
- 高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の開発では、メカニカルスタックデバイス化技術で、III-V 属化合物セルの直接接合セルでは、最終目標 30%を超えた 31.6%（非集光）を達成したことは、今後の量産性や低コストに向かう実用化技術の展開が期待できる。低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池開発では、波長スプリッティングは革新性があり、様々な太陽電池で評価してきたことは高く評価できる。
- 国際共同研究では、国際相互比較や評価技術、共同研究開発については、我が国の研究にとっても効果的である。全体の研究成果の特許出願や、成果発表においても十分な結果を残している。
- 全体的には軌道修正しながら計画に沿って進捗し、2050 年における変換効率および発電コストへのアプローチの探索と可能性の実証という目標は、相当のレベルで達成したと考えられる。世界初あるいは世界最高水準の成果が挙がっており、論文、国際会議、展示会その他で、一般に向けて広く情報発信がなされている。今後の開発と実用化に向け、課題とその解決の道筋も示されおり、十分評価できる。

#### 〈改善すべき点〉

- 絞り込みにより中止されたテーマには、何らかの問題があった、あるいは継続しな

った具体的な理由があったと思われる。長期的将来における太陽光発電の飛躍のためには、研究の成功例を示すだけでなく、一見、失敗例と見られる結果についても、その問題点を積極的に情報発信することも必要ではなかったか。

- 材料開発に関係するフィージビリティスタディの研究成果については、あまり大きな成果が得られていなかったことが残念であった。ただ、これはその研究に課題があるということではなく、研究フェーズとして、本プロジェクトのもう一段階前に据えられるべきものだったように思われる。また、目標設定と関連するが、メカニズム解明、原理確認を目標設定できれば、よかったかもしれない。(材料開発はもともと非常に時間がかかるものなので、そのことは理解している。)
- 個別テーマによっては変換効率目標とコスト目標が乖離している感が残された。高品質サンプル作製技術を駆使し、技術開発を行えば変換効率の改善が達成されることは大変有意義な証左であったが、それは高コスト化を示すことに他ならない。いかに作製技術を低コスト化させることが可能かを示すことが重要な指針になると考えられるが、その点に対する具体的成果が示されていない。変換効率目標を期待値よりも高くに設定したことは挑戦を続けることであり、研究発展の観点からは大いに理解できるのである。しかしながらプロジェクトとして着目すると 1 つ目の目標が達成できたのであるから、2 つ目の目標に近づくべきだと考える方が自然であろう。コストに関するアプローチをもっと明確にすべきであったと考えられる。
- 本研究では、新しい材料による様々な挑戦が行われており、この成果からうまれる派生的な技術にも注目し、材料面の可能性の幅もさらに広げて頂きたい。
- 探索的基礎研究については、今回の目標設定に基づく、その成果があまり評価できないものが多く出てくる。新原理太陽電池の実用化を加速するためには、新材料の開発指針、デバイス設計原理、新概念の実証や理解度、およびその内容を簡明に説明できるかどうか、といった観点の目標設定ができないか、今後、目標設定と評価のあり方も検討する必要がある。

#### 〈今後に対する提言〉

- 長期的な視点でのプロジェクトにおいては、効率等の数値目標の達成による評価とともに、現時点の判断ではうまくいきそうにない方式や材料についての問題点を明示することも重要であろう。問題点が明らかにされて、後にその克服に向けた研究がなされることによって、問題の解決が得られれば、将来の大きな飛躍となる可能性がある。長期目標のプロジェクトにおける目標設定、評価基準には、問題点を明らかにし、そのことを情報発信をすることにも意義をおくべきではないか。
- コスト目標を実現できる具体的な技術を、次期関連プロジェクトでは明確にすること。
- 今回のプロジェクトは多接合もしくはそれに類する方法の追求になったが、マルチバンド、ホットキャリア、アップコンバージョンなどについては、ほとんど検討されていなかった。材料探索の FS の代わりに、これらの検討を行なうのも重要であったかもしれないと思われる。

- ・ 今回で、高効率化における多接合の有用性は、完全に証明されたと言って過言ではない。今後、このタイプの太陽電池を主流と考えるならば、低コストにむけた材料開発、プロセス開発にフェーズは移行していくことになると思うが、その際には、材料探索の手法なども、是非考慮してほしい。
- ・ 新しい材料、量子構造などを活用したときには、キャリアの挙動など、メカニズムを確実に押さえていってほしい。それこそが次世代の材料開発につながる。特に、メンバーに評価のメンバーを入れるべきと思う。
- ・ 2030年や2050年へ向けた具体的なアプローチを明確にすべきである。当日配布の資料からは中期的なコスト目標や変換効率目標が示されていたが、どのテーマからもそれらに対する具体的な戦略が見えてこなかった。たとえば「高効率要素セル（III-V族化合物半導体）の低コスト製造技術開発が必要」と示されているが、どの研究グループが実施し、どのように解決するかを示しているわけではない。机上の空論を行う段階はすでに過ぎているので、従来までの成果をいかに発展させ、必要なものは絞り込んでいき、目標を達成するのかについて戦略を練るべきであろう。
- ・ III-V化合物とメカニカルスタックデバイス化技術の融合は、今後のコスト低減化技術への鍵となることから、融合した技術開発を加速して頂きたい。同様に、波長スプリティング技術や、低倍率集光技術、CIGS太陽電池など、有望な成果を今後の研究開発に活かして頂きたい。
- ・ スマートスタック技術と波長スプリティング低倍集光システムは、新しい提案であり40%を達成できる可能性がある。これらの研究については、革新的太陽電池の開発を加速するためのコアテクノロジーとして活用することも念頭において、さらに継続して支援したい。また、早期に大面積化の検討を開始し、量産性、低コスト化、資源問題の観点から課題を抽出して、より進化したロードマップにつなげることが期待される。

## (2) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

### 〈肯定的意見〉

- ・ 成果の公開等は着実に行なわれている。

## 2. 4 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

集光型多接合太陽電池、波長スプリッティング型太陽電池や電極材料など、多くの要素技術について進展が見られており、比較的近い将来に実用につながる可能性が示された。特にシャープの格子不整合系3接合太陽電池は、中東産油国での集光型システム導入に向けた取り組みが既になされつつあり、実用化に近いイメージである。産総研グループのメカニカルスタック技術、東工大グループの低倍率集光システムは、実用化イメージがクリアであり、課題及びマイルストーン、引き継ぐ研究開発体制も明確にされており高く評価できる。他の多くのテーマについても、概ね成果の関連分野への波及効果が期待でき、プロジェクトの実施自体も、当該分野の研究開発や人材育成等を促進する効果が十分にあった。

一方、本研究の目的は、2050年までの変換効率向上と、発電コスト低減の可能性を追求し実証することであるが、実用化を目指してプロジェクトを進める上では、長期的展望に立ったコスト評価、および社会のエネルギーシステム全般に関する知見をもった専門家の意見を取り入れて、得られた研究成果が将来の太陽光発電にどのように生かされるかの検討が必要であり、その上で実用化のためにはどのような課題があるかについても提示する必要があった。

実用化の面で優先されるのは発電コストであり、本プロジェクトの成果を実用化するため「発電コストが汎用電源未満」を達成するには、「変換効率40%」を絶対条件とするのではなく、「発電コスト低減」を優先した上で、将来的には設置可能面積の制約が拡大することを踏まえて、太陽光発電システムの面積効率を含めた評価があつてよいのではないかと考える。また、低コスト化においては、材料探索か、プロセスの大きな革新が必要となることから、探索的研究テーマでは太陽電池の性能だけではなく、これらを評価する目標設定を今後は考慮することが望ましい。

### 〈肯定的意見〉

- ・ 集光型多接合太陽電池、波長スプリッティング型太陽電池などにおいて、比較的短期の将来に実用につながる可能性が示された。また、太陽電池に関わる学界・国研の研究者とともに企業の研究機関の研究者も多く参画しており、実用化に向けた対応は、自ずと行われていると予想される。また、そのような連携が、人材育成にも有効に機能したと思われる。
- ・ 波長スプリッタや電極材料など、多くの要素技術について進展が見られており、今後実用化技術に生かされていくものと評価できる。それぞれの技術開発で、これが最終の形であるというものが未だ示されていないが、さらに改善の余地を残している技術テーマがあることから、今後の技術開発に期待したい。
- ・ 複数の太陽電池を活用する手法については、その効果を証明したので、実用化の指針を与えた点では大変有意義であると考ええる。
- ・ 変換効率に関する改善は常に進められており、研究成果も出ている。

- ・ 本研究の目的は、2050年までの変換効率向上と、発電コスト低減の可能性を追求し実証することであり、実用化までのステップには、要素研究からラボスケール、さらに商用化のための量産・生産技術の開発が必要であることから、現状では、まだまだ将来技術の可能性のある内容である。その上で、高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の開発研究では各社の基幹技術を持ち寄るためのハードルが高いものの、2050年を見据えたとこの事業性はどこかで使われている可能性を感じる。低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の開発研究では、現行太陽電池パネルでも本技術を適用できる可能性も高く、コスト低減の見通し次第では企業の連携もあるのではないかと推察される。
- ・ シャープの格子不整合系3接合太陽電池は、中東産油国でのCPVシステム導入に向けた取り組みが既になされつつあり、実用化に近いイメージである。産総研グループのメカニカルスタック技術、東工大グループの低倍率集光システムは、実用化イメージがクリアであり、課題及びマイルストーン、引き続き研究開発体制も明確にされており高く評価できる。他の多くのテーマについても、概ねその成果は関連分野への波及効果が期待でき、プロジェクトの実施自体も、当該分野の研究開発や人材育成等を促進する効果が十分にある。

#### 〈改善すべき点〉

- ・ 長期的目標の将来的実用化を目指してプロジェクトを進める上では、長期的展望に立ったコスト評価、および社会のエネルギーシステム全般に関する知見をもった専門家の意見を取り入れて、得られた研究成果が将来の太陽光発電にどのように生かされるか、その「実用化」のためにはどのような課題があるか、といったことも提示すべきではなかったか。
- ・ 実用化については低コスト化が必須となるが、それについては、今回のプロジェクトでは指針が見えてこなかった。
- ・ コストに関する検討が具体的に進められていない感が強い。
- ・ 性能向上の手段として、多接合ならびに、集光技術等のさまざまなアプローチによって検討が行われているが、発電システムとしての可能性や、波及効果についても十分展開できる可能性がみえれば今後の研究開発へむけてより進展が可能。
- ・ 挑戦的なテーマが数多くあったが、それらの成果が今後どのように活かされて行くのかは、やや不明確である。

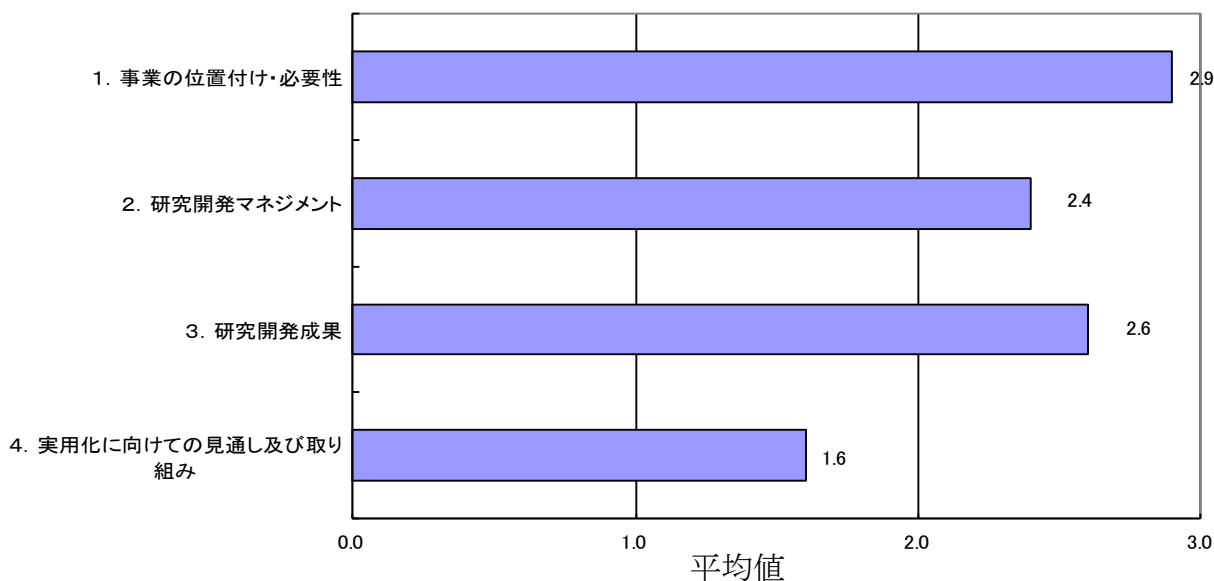
#### 〈今後に対する提言〉

- ・ 長期的目標の将来的実用化を目指してプロジェクトを進める上では、長期的展望に立ったコスト評価、および社会のエネルギーシステム全般に関する知見をもった専門家の意見を取り入れることのできる体制・仕組みを取り入れるべきだろう。
- ・ FIT導入後、発電コストが急速に低下していることから、2050年の目標をできるだけ前倒しすべきである。

- 低コスト化においては、材料探索か、プロセスの大きな革新が必要となる。太陽電池の性能だけではなく、これらを評価する目標設定を今後は考慮してほしい。
- すでに 40%の変換効率を達成しているのであれば、さらなる変換効率改善を目指すことと同程度の比重以上でコストに関する検討を進めるべきであろう。
- 2014年度年の日本の太陽光発電市場は、周辺関連産業まで含めると 3兆円を超えたと想定される。このようななかで、太陽電池の市場は、世界的にコモディティー化の傾向が進み、太陽電池モジュールの国際価格の低下は今後とも著しく低下する状況にある。
- 実用化の面で優先されるのは発電コストであり、「発電コストが汎用電源未満」を達成するには、「変換効率40%」を絶対条件するのではなく、「発電コスト低減」を優先した上で、将来的には設置可能面積の制約が拡大することから、太陽光発電システムの面積効率が高い考えかたもあってよいのではないかと考える。
- 宇宙用や集光型など分野の太陽光発電は特殊な条件でのニッチ市場であり技術開発での可能性を求めることでは挑戦的内容であり、国際競争面で我が国の技術優位性を保つ上で象徴的な意味があるが、将来の基幹電源を担う産業面としての視点からはより安価な発電システムを選択する傾向が強い。一方で、将来的にも太陽光発電産業の市場環境は変化が激しく、かならずしも現在の市場環境の延長にあるとは言えないことや応用技術面でも長期的な面では想定できないブレークスルーもあると想定されることから、市場環境の変化に応じた、継続的な研究開発を期待する。
- これまでに実績があるテーマ、および今回の成果によって良好な効率が出ている研究テーマは勿論であるが、他のテーマについても、波及効果を含めて実用化が期待できる有望なものを見極め、必要なものはサポートすべきである。



### 3. 評点結果



評価項目	平均値	素点 (注)							
1. 事業の位置付け・必要性について	2.9	A	A	A	A	B	A	A	
2. 研究開発マネジメントについて	2.4	B	A	C	B	A	A	A	
3. 研究開発成果について	2.6	B	B	A	A	B	A	A	
4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて	1.6	B	B	C	C	C	B	B	

(注) 素点：各委員の評価。平均値は A=3、B=2、C=1、D=0 とし事務局が数値に換算し算出。

#### 〈判定基準〉

- |                    |                          |
|--------------------|--------------------------|
| 1. 事業の位置付け・必要性について | 3. 研究開発成果について            |
| ・非常に重要 →A          | ・非常によい →A                |
| ・重要 →B             | ・よい →B                   |
| ・概ね妥当 →C           | ・概ね妥当 →C                 |
| ・妥当性がない、又は失われた →D  | ・妥当とはいえない →D             |
| 2. 研究開発マネジメントについて  | 4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて |
| ・非常によい →A          | ・明確 →A                   |
| ・よい →B             | ・妥当 →B                   |
| ・概ね適切 →C           | ・概ね妥当 →C                 |
| ・適切とはいえない →D       | ・見通しが不明 →D               |

## 第2章 評価対象事業に係る資料

## 1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「太陽エネルギー技術研究開発/  
革新的太陽光発電技術研究開発  
(革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)」

事業原簿【公開】

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部
-----	--------------------------------------

## －目次－

概 要	iii
プロジェクト用語集	vi
I. 事業の位置づけ・必要性について	
1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性	I-1
1.1 NEDOが関与することの意義	I-1
1.2 実施の効果	I-1
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I-1
II. 研究開発マネジメントについて	
1. 事業の目標	II-1
1.1 研究開発の目的	II-1
1.2 研究開発の目標	II-1
2. 事業の計画内容	II-1
2.1 研究開発の内容	II-1
2.2 研究開発の実施体制	II-59
2.3 研究開発の運営管理	II-72
2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性	II-73
3. 情勢変化への対応	II-74
4. 中間評価結果への対応	II-75
5. 評価に関する事項	II-76
III. 研究開発成果について	
1. 分野別、課題に対する主要な成果	III-1
2. 個別テーマの成果概要	III-32
3. 成果発表の件数	III-134
IV. 実用化の見通しについて	
1. 実用化の見通し	IV-1
2. 波及効果	IV-12

(添付資料)

添付資料1：プロジェクト基本計画

添付資料2：事前評価関連資料（事前評価書、パブリックコメント募集の結果）

添付資料3：特許論文リスト

概要

最終更新日 平成 27 年 11 月 6 日

プログラム (又は施策) 名	H22FY：エネルギーイノベーションプログラム H20-21FY：新エネルギー技術開発プログラム								
プロジェクト名	太陽エネルギー技術研究開発 革新的太陽光発電技術研究開発 (革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)	プロジェクト番号	07015						
担当推進部	新エネルギー部								
0. 事業の概要	本プロジェクトでは太陽光発電技術に関連し、新材料・新規構造等を利用して飛躍的な高性能化へのアプローチを探索し、可能性を実証することを目標にした研究開発を行う。そのために研究開発の中心となる研究拠点を設置し、他研究機関と協力関係を構築しながら、ブレイクスルーを探る。研究拠点はリーダーシップを発揮しながら研究開発を実施・推進するのみならず、海外との研究協力（人材交流等）、及び、成果と情報の集積・交換の場としての役目を果たす。								
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>①太陽光発電は、総合科学技術会議の「第 3 期科学技術基本計画」（平成 18 年 3 月閣議決定）において戦略重点科学技術に、また、平成 19 年 4 月資源エネルギー庁公表の「エネルギー技術戦略（技術戦略マップ 2007）」において新エネルギーの開発・導入促進に寄与する技術の中でも特に政策目標への寄与が大きいと思われる技術に、それぞれ位置付けられている。更に、平成 19 年 3 月に改定された「エネルギー基本計画」において、自立した環境適合的なエネルギー需給構造を実現するため、太陽光発電をはじめとする新エネルギーの着実な導入拡大を図ることが挙げられている。</p> <p>②また、新・国家エネルギー戦略（平成 18 年 5 月公表）において、新エネルギーの中長期的な成長支援として太陽電池の技術開発支援を進めることが謳われている。本研究開発は太陽光発電システムの技術開発により、経済性・性能を飛躍的に改善することを目標に行うものであり、まさにそういった背景と合致する。</p> <p>③近年、米国のソーラー・アメリカ計画（SAI）や欧州の戦略的研究計画（SRA）が太陽電池に関する技術開発計画として策定された。特筆すべきことに、その双方で新材料・新規構造等による革新的な太陽電池の開発についても述べられており、革新的な太陽電池に関するいくつかの開発プロジェクトが立ち上がっている。これに対し、日本の技術的優位性を超長期に渡って維持するためには、本研究開発を立ち上げ、積極的かつ継続的な研究開発を実施する必要がある。</p> <p>④本研究開発は新材料・新規構造等を用いた革新的な技術開発であることから、開発の推進には斬新な発想も必要になると考えられる。このような斬新な発想を得るためには国内は元より、広く海外からも知的資源を集める必要があり、海外研究機関との研究協力はその有効な手法の一つだと考えられる。</p> <p>本研究開発は研究拠点を中心とした強固な体制で、海外の研究機関との研究協力をを行いながら、従来技術の延長上にはない革新的な技術の開発を推進するものであり、民間のみでは実施しえない技術開発である。更に本研究開発は太陽光発電の技術開発を通じ、温室効果ガスの排出量削減への寄与が期待できるものであり、非常に公共性が高い事業でもあるため NEDO が推進することがふさわしい。</p>								
II. 研究開発マネジメントについて									
事業の目標	2050 年までに「変換効率が 40%」かつ「発電コストが汎用電源未満（7 円/kWh 未満）」の太陽電池を実用化することを旨とした研究開発の中で、本研究開発は変換効率 40%の実現に向けた技術の基礎・探索研究段階と位置づけて研究開発を実施する。								
事業の計画内容	主な実施事項	H20FY	H21FY	H22FY	H23FY	H24FY	H25FY	H26FY	
	ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発	←							→
	高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発	←							→
	低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発	←							→
	革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）		←	→					
	高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）					←	→		
開発予算	会計・勘定	H20FY	H21FY	H22FY	H23FY	H24FY	H25FY	H26FY	総額

(単位：億円) 契約種類：委託	一般会計	0	0	0	0	0	0	0	0
	特別会計（需給）	27.2	17.9	27.2	20.2	21.2	16.8	12.7	143.2
	総予算額	27.2	17.9	27.2	20.2	21.2	16.8	12.7	143.2
開発体制	経済産業省担当原課	資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー対策課							
	プロジェクトリーダー	設置せず。ただし、下記の各グループはグループリーダーとして NEDO が指名 東大 G：中野 義昭 教授 産総研 G：近藤 道雄 センター長（平成 20 年度～平成 24 年度） 仁木 栄 センター長（平成 25 年度～平成 26 年度） 東工大 G：小長井 誠 教授 日 EU 共同開発：山口 真史 教授							
	委託先	『Ⅱ．研究開発マネジメントについて』の図 1～11（実施体制）参照							
情勢変化への対応	<p>【平成 20 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>より強固な体制での研究開発実施の為、当初示達額 18.7 億円に対し、4.7 億円の予算増額を行った。</li> <li>補正予算 5.0 億円で、後年度購入予定装置の一部を前倒し購入し、研究開発を加速した。</li> </ul> <p>【平成 21 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>革新的太陽電池のモジュール評価技術を確立する為に、追加公募を行った。</li> <li>「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」を加速する為に、2.1 億円の予算増額を行った。</li> </ul> <p>【平成 22 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>集光型太陽電池のモジュール設計、評価技術を確立する為に、追加公募を行った。</li> <li>『量子ドット』太陽電池等の開発を加速する為に、4.1 億円の予算増額を行った。</li> </ul> <p>【平成 23 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>中間評価の結果を踏まえ、サブテーマ数を 71 から 56 に絞り込んで本事業を継続した。</li> </ul> <p>【平成 24 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>『3 接合化合物』太陽電池の実用化を加速する為に、2.5 億円の予算増額を行った。</li> </ul> <p>【平成 25 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>中間評価の結果を踏まえ、サブテーマ数を 56 から 45 に絞り込んで本事業を継続した。</li> </ul> <p>【平成 26 年度】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>実用化に向けた性能向上技術および低コスト化技術の開発指針策定を目指し、1.7 億円の予算増額を行った。</li> </ul>								
評価に関する事項	事前評価	平成 19 年度実施（担当部：新エネルギー技術開発部）							
	中間評価	平成 22 年度実施、平成 24 年度実施							
	事後評価	平成 27 年度実施							
Ⅲ．研究開発成果について	<p>【平成 22 年度中間目標及び成果】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ⅲ-V 族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率 33%と集光時の変換効率 42%を達成する。また、新概念太陽電池については動作原理を検証する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子収率を 10%高めることに資する。→非集光時変換効率 35.8%、集光時変換効率 42.1%を達成。量子ドットを利用した 2 段階の光学遷移を実証。GaAs セルで 10%程度の光吸収効率向上を達成。</li> <li>シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セル材料の開発並びにデバイス化により多接合太陽電池で変換効率 20%を達成する。新概念太陽電池については動作原理を検証する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて変換効率 20%に資する。→新概念太陽電池の動作原理を実証。その他は未達。</li> <li>バンドエンジニアリング、薄膜フルスペクトル太陽電池、光のマネジメント・TCO 等の研究開発により、低倍率集光時、真性変換効率 20%（有効受光面積：1cm<sup>2</sup>）を達成する。→20.3%達成。</li> <li>集光型太陽電池の屋内における高精度評価技術の開発を完了すると共に、日本と米国内での屋内外性能測定との比較検証を行う。従来開発した単接合および従来型 2 接合太陽電池の評価技術をベースに、従来より広いスペクトル領域で感度特性を有する Si 系以外および 3 接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池の評価技術の開発を完了する。→目標達成。</li> </ul> <p>【平成 24 年度中間目標及び成果】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ⅲ-V 族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率 36%と集光時の変換効率 45%を達成する。また、新概念太陽電池については動作原理を検証し、窒化物セルにおいて非集光時変換効率 10%（単接合）および 20%（多接合）、量子ドットマルチバンドセルにおいて集光時変換効率 25%を達成する。光マネジメント技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子ナノ構造層の光吸収を 3 倍に高め、上記目標の達成に資する。→非集光時変換効率 37.5%を達成、世界記録更新。集光時変換効率 43.5%を達成、世界タイ記録。量子ナノ構造層の光吸収 3 倍達成。</li> <li>ボトムセルおよびトップセルの要素材料の開発並びにデバイス化を行う。また高度光利用技術、スマートスタック技術を開発し、多接合太陽電池で変換効率 20%を達成する。→21.9%を達成。</li> <li>薄膜フルスペクトル太陽電池の光吸収層、ならびに周辺技術等の研究開発により、低倍率集光時、真</li> </ul>								

	<p>性変換効率 25% (有効受光面積: 1cm<sup>2</sup>) を達成する。→21.8%を達成、世界記録更新。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>セル変換効率 42%以上、モジュール変換効率 33%以上を達成し、集光型太陽電池の高精度測定の問題を明確にする。→セル変換効率 43.5%達成。その他は達成予定。</li> </ul> <p><b>【平成 26 年度最終目標及び成果】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Ⅲ－Ⅴ族系材料による高集光多接合太陽電池で、3 接合セルでは非集光時の変換効率 36%と集光時の変換効率 45%を、4 接合セルでは非集光時の変換効率 39%と集光時の変換効率 48%を達成する。また、新概念太陽電池については変換効率 40%を達成する。→3 接合非集光時変換効率 37.9%を達成、世界記録更新。集光時変換効率 44.4%を達成、世界最高記録。</li> <li>ボトムセルおよびトップセルについて要素セルの高度化ならびに高度光利用技術の組み合わせにより多接合太陽電池で変換効率 30%を達成する。→変換効率 31.6%を達成。</li> <li>薄膜フルスペクトルセルにより、真性変換効率 40% (低倍率集光、有効受光面積: 1cm<sup>2</sup>) を達成する。→波長スプリッティングにより変換効率 38%を達成。</li> <li>セル変換効率: 45%以上、モジュール変換効率: 35%以上を達成する。また、集光型太陽電池の標準測定技術を確立する。(測定再現性±0.5%以内) →集光時変換効率 44.4%を達成。集光型標準測定技術を確立した。</li> </ul>	
	投稿論文	「査読付き」832 件、「その他」73 件 (H27 年 2 月末現在)
	特許	「出願済」150(37)件 (うち国際出願件) (H27 年 2 月末現在)
	その他の外部発表 (プレス発表等)	「研究発表・講演」3,337 件、「新聞・雑誌等への掲載」219 件、「受賞実績」111 件 「展示会への出展」45 件 (H27 年 2 月末現在)
IV. 実用化の見通しについて	<p>太陽光発電ロードマップ PV2030+によれば 2050 年には国内市場向けだけでも太陽光発電産業は約 4 兆円産業に成長すると推定される。</p> <p>本事業は超長期的な技術開発を進め、革新的な技術により太陽光発電の変換効率の向上及び発電コストの低減を目指すものであるが、それらの技術開発は、短期的にも現状の太陽電池の特性向上に役立つ技術への波及効果が期待でき、我が国の太陽光発電産業の国際競争力の維持向上が期待される。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成 20 年 3 月 策定
	変更履歴	<p>平成 20 年 8 月 内容の明確化の為、『拠点』を『中心研究機関』あるいは『グループ』に変更</p> <p>平成 20 年 10 月 達成目標について、委託先と協議の上、詳細な数値を決定し追記</p> <p>平成 21 年 8 月 「革新的太陽電池評価技術の研究開発」を追記</p> <p>平成 22 年 3 月 「新エネルギー技術研究開発」基本計画の研究開発項目⑦「革新的太陽光発電技術研究開発 (革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)」及び新規研究開発項目「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」を統合し新たに「太陽エネルギー技術研究開発」基本計画を制定し、同時に「日・EU エネルギー技術協力 太陽光分野」を追記</p> <p>平成 23 年 3 月 中間評価の結果を踏まえ、達成目標について、平成 24 年度中間目標の追記及び平成 26 年度最終目標の修正</p> <p>平成 24 年 3 月 「日・EU エネルギー技術協力 太陽光分野」を「高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発 (日 EU 共同開発)」に変更し、同時に達成目標について、詳細な数値を追記</p> <p>平成 25 年 3 月 研究開発項目①「革新的太陽光発電技術研究開発 (革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)」の 4. 達成目標の最終目標 (平成 26 年度末) を修正</p> <p>平成 25 年 6 月 研究開発項目①「革新的太陽光発電技術研究開発 (革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)」の 4. 達成目標の (2) 高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発のグループリーダーの変更に伴う修正</p>



## プロジェクト用語集

用語（日本語）	用語（英語）	用語解説
圧電性（or圧電効果）	piezoelectricity	結晶に圧力が加わり格子が歪んだ際に分極が生じること。GaNの様にイオン結合性を有する結晶において、例えば[0001]軸方向にGaとNの格子位置がずれると、分極が生じる。
アライメント	alignment	集光型太陽光発電システムの各構成部材において、各受光面に対する各入射光線がどのような角度関係にあるかを表すもの。
アレイ状メサ	arrayed mesa	規則正しく配置されたメサ（段差）。
イオン液体	ionic liquid	有機分子のイオン対からなる液体で、真空中、室温以上でも蒸発しない。本事業では、これを有機溶媒として、有機単結晶薄膜を真空蒸着するのに用いる。
色収差	chromatic aberration	レンズで太陽光を集光する場合、各波長によってその焦点距離が異なる現象。
ウェット処理	wet treatment	主に化学薬品等の液体に浸漬させる、基板や半導体材料の表面処理技術。一般的な洗浄処理も含まれる。
ウェハ曲率モニタリング	monitoring of wafer curvature	ウェハの曲率（反り具合）の測定。
ウェハボンディング	wafer bonding	ウェハ接合ともいう。表面をクリーニングしたウェハ同士を向き合わせ、圧力をかけて化学的に原子レベルで結合させる技術。
エアロゾル	aerosol	気体中に浮遊する微小液体または固体の粒子。
エキシトン拡散長	exciton diffusion length	光生成した励起子が、再結合によって消滅する前に、材料を介して拡散することができる平均距離。
エッチピット密度（EPD）	etch pit density	結晶中の転位がある部分を選択的にエッチングする溶液を使って現れる凹み（ピット）の密度で、通常は転位密度に等しい。
エピタキシャル成長	epitaxial growth	基板の結晶構造を反映した結晶膜をその上に堆積すること。
階段ポテンシャル量子井戸	step-potential quantum wells	量子構造において、バンド端にエネルギーが階段状になっている構造。組成を段階的に変化させて形成する。
化学パッシベーション	chemical passivation	半導体材料において表面欠陥等に起因する少数キャリアの表面再結合を抑制する目的でなされる表面終端化（安定化）技術の一つで、主に化学薬品への浸漬処理でなされる。一般的な酸化やプラズマ処理、その他薄膜材料形成（堆積）によるパッシベーションと対比される。
化学熱力学	thermochemistry	化学反応を熱力学的に解析する学問であり、電気化学反応における標準電極電位とpHは反応に関わる物質の化学ポテンシャルから求まる。
拡散長	diffusion length	励起子または光キャリアがその寿命の間に広がることのできる距離。
過剰キャリア寿命	excess carrier lifetime	平衡状態より過剰に存在するキャリアが減少していく割合（1/eになる時間）で、太陽電池の効率と相関がある。
カーボンナノチューブ	carbon nanotube (CNT)	カーボンナノチューブは、炭素原子が六員環に組んだ2次元ネットワーク状物質を筒状に丸めた物質である。一層の2次元ネットワーク状の丸め方に応じて単層カーボンナノチューブ半導体にも単層カーボンナノチューブ金属にもなる。
ガラス上ゲルマニウム薄膜基板	germanium-on-glass substrate (GeOG)	ガラス板上に水素イオン注入したゲルマニウムウェハを加熱接合し、注入部でゲルマニウムが剥離することを利用して、薄いゲルマニウム単結晶膜がガラスに接合した構造をもつようにした基板。
ガラス上シリコン薄膜基板	silicon-on-glass substrate (SiOG)	ガラス板上に水素イオン注入したシリコンウェハを陽極接合し、注入部でシリコンが剥離することを利用して、薄いシリコン単結晶膜がガラスに接合した構造をもつようにした基板。
ガルバノメータ	galvanometer	モーター回転軸に取り付けたミラーを高速・高精度に走査あるいは位置決めする光学スキャナ。
貫通転位	threading dislocation	エピタキシャル層において、螺旋転位、刃状転位、混合転位により、発生後成長層上部まで伝搬した転位。
逆オージェ過程	inverse auger process	バンドギャップの2倍以上のエネルギーを持つ光子を吸収して、複数のキャリアを生成する過程。
逆格子点の回折強度分布	distribution of diffraction intensity	結晶は3次元で周期性を持つため、それを反映したBraggピークも3次元で格子状に配列する。これを逆格子点と呼ぶ。理想的な結晶ではB

	y for reciprocal lattice point	raggピーク（逆格子点）でのみX線回折が発生する。結晶が不完全（結晶欠陥、不純物含有）な場合に、逆格子点近傍でも回折強度を有することにより生じる回折強度の分布のこと。これを解析する事により結晶内部の欠陥分布等の知見を得る事が出来る。
キャリア取り出しダイナミクス解析	analysis of carrier-extraction dynamics	量子井戸内部で光励起により形成されたキャリア（電子および正孔）が、ピコ秒からナノ秒の時間スケールにおいて井戸から脱出してp型n型領域に淘汰する過程の解析。
(非)急峻性	(non-) abruptness	結晶組成が原子レベルで急激に変化する（しない）こと。
許容角	acceptance angle	出力性能が90%に低下するような、受光面の法線に対する入射光角度。
金属誘起結晶化	metal induced crystallization	金属を触媒として結晶化温度より低い温度で結晶化すること。
傾斜組成層	graded-content layer	結晶の組成が連続的に変化する層。
傾斜組成バッファ層	graded buffer layer	ある混晶の組成を傾斜変化させた緩衝（バッファ）層の一種。基板とエピタキシャル膜に格子不整合（原子間隔のずれ）がある場合、欠陥の発生を抑制するため、両者の中間の組成の材料を基板からエピタキシャル膜に向けて格子定数が徐々に変化するように調整した層。InGaAsの場合、InとGaの組成比を成長方向に対して傾斜変化させる。太陽電池中の転位密度を低減する役割がある。組成の傾斜方法としてステップ傾斜やリニア傾斜などがある。
コア/シェル構造	core/shell structure	2種類の化学種の一つが核（コア）を形成し、もう一方の化学種がその周囲を取り囲んだ（シェル）構造のこと。
高压ガスプレス	press by high-pressure gases	ソーラーセルの接合に高压ガスをもちいる事により均一に加圧して接合する方法。
格子不整合系	lattice mismatch	格子定数が基板結晶と成長層の間で整合しない材料系。太陽電池材料のバンドギャップエネルギーを自由に制御できるため、熱損失の少ない高効率の太陽電池構造を設計できる。一方、結晶には歪がかかるため、転位などの格子欠陥が発生する。対義語は格子整合系（lattice match）である。
固相成長	solid phase crystallization	固体のまま非結晶物質が結晶化すること。
コンビナトリアル法	combinatorial method	材料物性に影響する因子（組成、種々の作製条件）を系統的に変え、その影響を高速かつ定量的に評価する科学的手法。
サーファクタント原子	surfactant atoms	結晶表面層の改質を起こさせる表面原子のこと。
三段階法	three stage evaporation method	多元蒸着法の一つ。カルコゲナイド系薄膜形成で幅広く使われ、Cu(InGa)Se <sub>2</sub> 太陽電池では20.3%の変換効率が達成されている。
自己形成ナノホール埋め込み層	embedded layer with self-formed nano holes	薄い層で埋め込まれた量子ドットの直上部のみにナノホールが自己形成（熱処理により自然に形成）された埋め込み層のこと。
視野角	view angle	被照射面から光源を臨んだ時の最大入射光角度。
シャドウ	shadow	影になること。
集光型太陽光発電	concentrating photovoltaics (CPV)	集光レンズ、集光鏡等を用いて太陽光を集光し、その光で発電する方法。
集光型太陽電池ユニット	CPV unit	1対の集光型太陽電池セルと集光光学系から構成された、太陽光を受けて発電する単位。
集光倍率	concentrating ratio	集光型太陽電池の集光光学系に入射する光の照度と、集光された後に太陽電池に入射する照度との比率。
少数キャリア拡散長	minority carrier diffusion length	例えばn層ならば注入された過剰正孔、p層ならば注入された過剰電子の密度が1/eになるまでの距離。
シリコン-ゲルマ（シリコンゲルマニウム）	silicon-Germanium (SiGe)	シリコンとゲルマニウムの合金材料。組成を変えることでバンドギャップを0.7-1.1eVの範囲で変えることができ、多接合太陽電池のボトムセル用材料に適する。
ストリーク	streak	特定の条件下で、Braggピーク（逆格子点）近傍の回折強度が線状、縞状の分布となること。
成長ピット	growth pit	GaN系格子不整合ヘテロ接合や高濃度不純物ドーピング層成長時、或いは比較的低温で成長を行う場合、貫通転位や偏析等局所的に歪のあるところでは、主面以外の安定面が発生しやすい場合がある。例

		例えば主面が[0001]面の場合、{10-1-1}面や{11-2-2}で囲われたV字状の穴が生じることがある。この穴を成長ピットと呼ぶ。
接合抵抗率	connecting resistivity	ソーラーセルを直列接続した場合の接続領域に縦方向に電流が流れるときの抵抗率 ( $\Omega \text{cm}^2$ )。
走査型静電容量顕微鏡	scanning capacitance microscopy (SCM)	走査顕微鏡 (SPM) の一種であり、容量 (C) を計測しキャリア濃度分布、p/n極性を観測することができる手法。
双晶	twins	同一の材料に2つ以上の単結晶のドメインが存在し、それぞれのドメインの結晶方位に、幾何学的な特定の規則性があるものを示す。それぞれのドメインの界面 (双晶面) は結晶欠陥となるため、太陽電池特性の低下につながる。
層状結晶性分子化合物半導体	layered crystalline molecular compound semiconductor	層状結晶性を有する分子化合物半導体。従来の分子化合物半導体に比べて製膜性に優れ、薄膜デバイス化に適している。
層状ポリシラン	layered polysilane	平面ポリシランが幾層も重なった構造を有するポリシラン。
素子分離用トレンチ	trench for device isolation	隣接する素子 (この場合はpn接合) を平面内で分離して絶縁するための溝 (トレンチ)。
多元蒸着法	multi-source evaporation method	真空チャンバー内で複数の原料を加熱して蒸発させ、基板に付着させて薄膜を作る技術。
多重キャリア生成	multiple carrier generation (MCG)	ひとつの光キャリアが電子間相互作用を介して玉突き現象的に多数のキャリアを生み出す現象。
多重励起子生成	multiple exciton generation (MEG)	ひとつの光キャリアから複数の励起子が生成する現象。励起子が解離することで複数のキャリアが生成する。
多接合太陽電池	multi-junction Solar Cells	複数の太陽電池 (ソーラーセル) の直列構造からなる素子。各セルで波長を分割して受光することにより、効率的に発電が可能となる。
多波長同時観測	simultaneous observation at multiple wavelengths	光スペクトルを分光して空間的に分散させたものを、複数の光センサで同時に計測することによって、異なる波長の情報を同時に観測すること。
単結晶ラミネート法	single crystal lamination	厚さがサブミクロンから数ミクロンの薄片単結晶を基板上に張り付けることで素子を作製する方法。
単一成分系有機半導体	single-component organic semiconductor	単一成分からなる有機半導体。
中間バンド	intermediate-band	量子ドットのミニバンドが、周りの半導体のバンドギャップの中間付近に形成された場合のこと。それらが形成する3つのバンドで太陽光を吸収するのが中間バンド太陽電池である。
超格子	superlattice	異なる半導体材料を交互に重ねてできる構造。(とくに障壁層の) 厚さが小さい (通常数ナノメートル) 井戸と障壁層が多数繰り返された多重量子井戸量子ドット超格子の場合、量子ドットが規則正しく並んだ構造のこと。
直接接着 (接合)	direct bonding	原子、分子間の結合力を利用した接合技術の総称。概略的には、ファンデルワールス力によるもの、あるいはプラズマ等により接合表面を活性化して原子レベルで結合する方法がある。
直達基準太陽光スペクトル	direct normal reference solar spectrum	放射照度および分光放射照度分布を規定した自然太陽光の直達日射成分のこと。
ツインレーザー型有機フラックス製膜装置	twin-IR laser deposition system for flux-growth of organic crystals and films	赤外レーザーをパルス状に照射して、固体有機材料やイオン液体を真空蒸着する装置。2つの赤外レーザーを用いて、複数の試料を同時蒸着することができる。
抵抗成分	resistance component	太陽電池内部の抵抗の成分。太陽電池内に大きな抵抗成分があると、ジュール熱が発生しエネルギーをロスする。高電流を扱う集光型太陽電池では、抵抗成分を小さくする必要がある。
低倍率集光	low concentration	数倍から50倍程度までの範囲で集光すること。
転位	dislocations, defects	成長する薄膜と基板との格子定数が異なる場合、格子不整合により発生する結晶欠陥。太陽電池性能の劣化の原因となる。

転位挙動解析	analysis of dislocation behavior	転位は格子欠陥の一種で一次元的な線欠陥のこと。結晶のすべり変形によって生成される。キャリアの再結合中心として働くため、太陽電池特性の低下を引き起こす。転位挙動解析は結晶成長中に発生する転位の運動や転位同士の相互作用などを解析すること。
転位のすべり運動	dislocation glide	結晶のすべり変形の担い手。実際のすべり変形は転位がすべり面上をすべり運動することによって局所的に変形が進行する。転位のすべり運動は特定の結晶面上で特定の結晶方向に沿って起こる。
転位密度	dislocation density	結晶中の線状の結晶欠陥の面密度。
電界制御型太陽電池	electric field controlled solar cell	窒化物半導体薄膜の内部に形成される分極電場の向きを、素子構造によって制御した太陽電池。
電界走引	electric-field scanning	光信号の時間応答を調べるため光を光電変換によって電子に変換し、電子の進行方向に垂直に電界を走引することによって、時間軸を空間軸に変換すること。
電荷移動励起	charge-transfer excitation	ドナーからアクセプターへの電子移動に伴う光励起。
電荷整列絶縁体	charge-ordered insulator	固体中に大量に存在する電荷が、強いクーロン相互作用によってお互いに反発し合い、周期的な秩序を組んで局在化している絶縁体。
点欠陥	point defect	原子サイズの結晶の乱れ（欠陥）。結晶中で本来原子が存在すべき位置に原子が存在していない空格子点（原子空孔）や他の元素原子と置き換わる置換原子がある。また、原子が存在すべきでない位置に原子が入り込んだ格子間原子もその一つである。これら結晶格子の乱れはキャリア（電子）の散乱原因になり得る。
透明導電性接着剤	transparent conductive adhesive	太陽光波長範囲で透明かつ導電性を有する接着剤。
トップダウン型合成方法	top-down synthesis	必要な構造を有する化合物のみを取り出す合成方法。
ドーピング	dope	結晶の物性を変化させるために少量の不純物を母材結晶に添加すること。GaAsNにSi原子をドーピングするとGaAsNはn型半導体に変化する。
ドーム型ケーラー光学系	dome-shaped Köhler optics	ドーム状の形をした、平面と点を変換する光学系。光学顕微鏡での標本の照明や、プロジェクタなどの投影機、フォトリソグラフィなどの光源として利用される。
ドライ処理	dry treatment	主に反応性ガスやプラズマ処理などを用いる、化学薬品等の液体を用いない基板や半導体材料の表面処理技術。
トレインサブレーション法	train-sublimation method	有機材料の昇華性を利用した、有機半導体材料の昇華精製法。
トンネル接合抵抗	resistance of tunnel junction	トンネル接合（多接合セルにおいて隣接するpn接合間に形成されたオーム性の電気伝導特性を示す半導体のヘテロ接合）における電気伝導抵抗。
トンネルピーク電流	peak current through of tunnel junction	トンネル接合は限られた電流範囲においてのみオーム性の電気伝導特性を示し、その範囲を超えると負性抵抗など多接合の動作を阻害する伝導特性を生じる。「トンネルピーク電流」とはオーム性の電気伝導特性が得られる範囲の最大電流であり、より高い集光倍率まで多接合セルを動作させるためには大きなピークで電流が必要となる。
トンネル輸送	tunneling transport	量子力学におけるトンネリングの原理に基づいて、キャリアが量子井戸層の障壁を超えて移動すること。
ナノインプリント加工	nano-printing	ナノレベルの微小な凹凸のある「鋳型」（モールド）の型押しによりナノ構造を作る技術。特長としては、ナノからサブマイクロオーダーの3次元超微細形状が容易に形成できる、シンプルな加工プロセス（加熱&プレス）である、プロセスコストが低減でき量産化が容易であるなどが挙げられる。鋳型さえ作れば安価にパターン形成できる為、近年活発に研究されており、実用化をにらんだ鋳型および型押し装置の開発競争が繰り広げられている。次世代半導体製造プロセスの有望技術に留まらず、超高速光通信デバイスやバイオデバイス、次世代大容量ストレージデバイスといった、次世代の多種多様な電子デバイス応用を実現するキーテクノロジーとして期待されている。
ナノホール・スペーサー層	nanohole spacer layer	量子ドットを積層成長する際の量子ドット層間の薄いスペーサー層で多数のナノホールが形成されている層。

ナノ粒子	nanoparticle	物質をナノメートルのオーダー（1-100ナノメートル）の粒子にしたもの。比表面積が極めて大きいこと、量子サイズ効果によって特有の物性を示すことなど、一般的な大きさの固体の材料とは異なることから、様々な分野で利用が進められている。
バイアス印加	bias application	外から電圧を印加すること。
媒体接着（接合）	adhesive bonding	接着剤、シート等を介して接合する技術の総称。太陽電池への応用としては、導電性および透明性を具備した接合特性を有する必要がある。
波長スプリッティング	spectrum splitting	ある決められた波長で太陽光スペクトルを短波長側と長波長側に分離させること。
波長スプリッター	spectrum splitter	ある波長よりも短波長側の光は反射させ、長波長側の光は透過するように設計された光学的なカットフィルターのこと
波長スプリッティング太陽電池	spectrum splitting solar cell	波長スプリッター（カットフィルター）を用いて、太陽光の短波長領域の光をトップセルに、長波長領域の光をボトムセルに照射し、トップセル、ボトムセル別々に出力を取り出すことを基本とした太陽電池
バッファ層	buffer layer	エピタキシャル成長において、成長する薄膜と基板の格子定数が異なる場合、薄膜に転位が伝播しないように薄膜と基板の間に挿入する緩衝層。
貼り合わせ	direct bonding	表面を活性化し、半導体同士を接合する技術。SiMOSトランジスタで開発された。低温において多接合タンデム太陽電池が形成できる。
パルススパッタ法	pulsed sputtering deposition	パルス状に発生したプラズマを用いてスパッタリングを行う薄膜形成手法。安価でスループットが高いことや、低温結晶成長が可能といった利点を有する。
パルスレーザー堆積法	pulsed laser deposition (PLD)	固体ターゲットへのパルスレーザー照射による蒸発（アブレーション）を利用した成膜法。多元素系の酸化膜合成に適した薄膜形成技術として注目されており、結晶性の高い薄膜を低温で容易に形成できるのが特長である。
半導体CNT	semiconducting carbon nanotube	CNTは、その構造によって金属または半導体の特性を有するが、化学的および電気的手法を用いて金属的なCNTを取り除いた、半導体的特性を有するCNT。
バンドオフセット	band offset	異種間半導体材料の接界面で形成されるポテンシャル障壁（エネルギー差）の総称。伝導帯でのそれを $\Delta E_c$ 、価電子帯を $\Delta E_v$ と表記する。
反応性CVD	reactive chemical vapor deposition	低温で自然に反応するガス（シランやゲルマンとフッ素など）を用いて、所望の物質（シリコンやゲルマニウムなど）の膜を堆積する方法。
光変調キャリア検出法	light-modulated carrier detection	光励起により生成したキャリアを電流として検出する方法。
光変調吸収分光	photoinduced absorption spectroscopy	光励起により生成した励起子やキャリアによる吸収スペクトルの変化を測定する方法。
歪緩和過程	strain relaxation mechanisms	歪緩和とは結晶格子に蓄積された歪が転位の発生により、解放（緩和）されること。歪緩和には転位の運動や相互作用に応じて様々な過程が存在する。結晶成長中の歪緩和過程を理解することで、転位の運動や相互作用を制御でき、結果的に太陽電池材料の高品質化に繋がる可能性がある。
歪み補償	strain compensation	基板に対して格子定数が大きい（圧縮歪みを受ける）結晶層と格子定数が小さい（伸長歪みを受ける）結晶層とを交互に堆積し、相互に歪みのバランスをとることで、全体として堆積層にかかる歪みをゼロにする手法。歪みがかかる結晶層を多数堆積するために用いられる。
歪Ge	strained Ge	歪印加により、半導体のバンドギャップを制御する技術。Geに2軸性引っ張り歪を印加することで、直接遷移のバンドギャップが縮小し、吸収係数が増大、吸収層の薄膜化が可能となる。
表面パッシベーション	surface passivation	半導体素子の表面保護膜を作成する工程。
ファンデルワールス力	van der Waals force	電荷を持たない中性の原子、分子間ではたらく凝集力。この力を介して物体間の物理吸着が生じる。
プッシュコート法	push coating method	ポリジメチルシロキサン（PDMS）版を用いて、溶液を押し込むこと

	d	により、高均質・高結晶性のポリマー型薄膜素子の形成を可能とする溶液プロセス技術。
物理気相成長法	physical vapor transport method	不活性ガスをフローさせながら有機材料を加熱することにより、単結晶を気相成長させる方法。
プラズマイオン照射法	plasma ion irradiation method	正イオンと負イオンおよび電子で構成されるプラズマ中に電極を挿入し、負または正の電位を印加することによって、エネルギーを制御して電極上にイオンや電子を衝突させる方法。
プラズマCVD	plasma CVD	プラズマを援用する化学気相成長法（CVD）の一種。化学反応を活性化させるため、高周波などを印加することで原料ガスをプラズマ化させ、薄膜等を堆積させる方法。
プラズモン	plasmon	電子が集団的に振動して擬似的な粒子として振る舞っている状態を指す。金属ナノ粒子ではプラズモンが表面に局在することになるので、局在（表面）プラズモンとも呼ばれる。プラズモンと光の相互作用により強い光散乱が生じることが知られており、最近ではこれを太陽電池に応用する試みが行われている。
フラックス蒸着法	flux-mediated vacuum deposition	イオン液体を介した有機結晶・薄膜の作製方法で、イオン液体をフラックス（溶媒）として、予め結晶化させる有機原料を溶解したイオン液体溶液を冷却するのではなく、真空中でイオン液体中に連続的に有機原料を蒸着供給することで、過飽和状態とし、有機結晶・薄膜を析出させる方法。溶媒を冷却する必要がなく、結晶成長に有利な高温状態で、かつ過飽和度を蒸着速度で制御しやすい結晶成長方法。
フラックス法	flux method	フラックス法は、高温超伝導体のようなセラミックス、光学結晶を、原料を含む溶融塩から冷却して析出させる方法で、原理的には溶媒-冷却法と同じ方法。
ブロック共重合体	block copolymer	性質の異なる2種類以上のポリマーが共有結合で繋がり長い連鎖になったような分子構造の共重合体を呼ぶ。ブロック共重合体の特徴は、その各ポリマー鎖が独立して凝集し、微小な相分離構造を形成することにある。
分光エリプソメトリー	spectroscopic ellipsometry	直線偏光の光を試料に入射させ、試料から反射した光の偏光状態を調べ、膜の物性を記述するのに最適なモデルでフィッティングすることによって、薄膜の屈折率等の物性を測定する方法。
分子化合物半導体	molecular compound semiconductor	ドナーとアクセプター2種類の分子からなる有機材料。分子間電荷移動励起による吸収波長の長波長化により、低光子エネルギー領域での光電変換が期待できる。典型的な強相関電子系を与えることで知られ、これによる多重励起子生成効果も期待される。
分子線エピタキシャル成長 （分子線エピタキシー）	molecular beam epitaxy (MBE)	超高真空中で、複数の金属蒸発源から分子線を発生させ、加熱して清浄化された結晶基板上にそれぞれの材料のもつ付着係数の違いを利用して化学量論的組成比を保ち、半導体結晶を成長させる方法。
分子線エピタキシー装置	molecular beam epitaxy system	分子線エピタキシー法を用いた結晶成長装置。超高真空の成長室内に結晶の構成元素をそれぞれ納めた容器を設置し、これを加熱することで各元素を気化させる。気化した原子や分子の平均自由行程は数メートル以上と大きいためビーム状で基板表面に供給される。使用する原料の状態が固体ソース、ガスソースMBE等に分類される。
平面ポリシラン	polysilane	IV族元素であるケイ素により骨格構造が形成されている平面高分子の総称。
ヘテロ接合	hetero junction	異種材料の接合。例えば、単結晶膜とアモルファス（非晶質）膜との接合。
偏光フーリエ変換赤外分光法	polarized Fourier transform infrared spectroscopy	結晶試料へ偏光赤外線照射し、吸収強度を測定する方法。欠陥の局在振動モードによる赤外吸収強度の偏光方向依存性により、欠陥を構成する原子の結合の向きが分かる。
捕獲断面積	capture cross section	結晶中に存在する捕獲中心、再結合中心といった欠陥における、キャリアの捕獲のしやすさを表す物理量。捕獲断面積が大きい捕獲中心や再結合中心はキャリアを容易に捕獲できるため、キャリア寿命に大きく影響を及ぼす。GaAsN中にはE1と呼ばれる大きな捕獲断面積を有した再結合中心が存在し、キャリア寿命の低下を引き起こす。
ポリフルオレンポリマー	polyfluorene	$\pi$ 共役系高分子発光材料であるフルオレン系ポリマー（PFO）のこと。

ホール濃度	hole concentration	p型半導体中の正孔（ホール）濃度。
マルチホロー放電	multi-hollow discharge	小さなホローを多数設けた電極を使用した放電。放電をホロー中でのみ発生させる点、ホロー中のガス流を精密にコントロールできる点が特徴。
ミスフィット転位	misfit dislocation	格子不整合系ヘテロ接合に於いて、エピタキシャル成長層膜厚が臨界値を超えると、界面で転位を発生して格子緩和する。その際の転位のこと。
ミニバンド	mini-band	量子ドット超格子のドット間隔が数ナノメートル程度になると、ドット中電子の波動関数が重なりを生じ、電子が取り得るエネルギーが幅を持つようになる。それにより形成される新しいエネルギーバンドのこと。
無輻射遷移	nonradiative recombination	生成されたキャリアは再結合によって消滅する。再結合には、光を放つタイプと熱を放つタイプの2種類があり、熱を放って再結合するものを無輻射遷移という。
メカニカルスタック	mechanical stack	一般的には、半導体素子等を機械的接合を介して直列に積層する技術のこと。太陽電池への応用としては、複数セルを直列接続し、多接合太陽電池構造を形成する技術として期待されている。
メサ（表面）	mesa	段差。
モット絶縁体	mott insulator	電子間の強いクーロン反発力のために絶縁体となった物質。遷移金属酸化物によくみられる。
有機強相関材料	organic strongly correlated system	電子間に強い相関をもち、これにより種々の電子相転移を示す有機材料のこと。
有機電荷移動錯体	organic charge-transfer complexes	電子供与性のドナー分子と電子受容性のアクセプター分子間で電荷移動が起こり、錯体を形成する有機結晶化合物のこと。そのいくつかは、有機超伝導体で知られる。
陽極接合	anodic bonding	シリコンとガラスを張り合わせる接合方法の一つ。シリコンウェハとガラスを張り合わせ、400-500°C程度に加熱しながら数100V~1kV程度の電圧を印加するとガラス中のイオンが移動し、強固な接合が形成される。
溶媒-冷却・蒸発法	solvent cooling or vaporization method	溶媒に結晶化させる原料を予め溶解した溶液を、温度を冷却、あるいは溶媒を蒸発させることで、過飽和状態とし、結晶を析出させる方法。
ラダーポリシラン	ladder polysilane	梯子が縦につながった構造を有するポリシラン。
リフトオフセル	lift-off cell	III-V族基板上に太陽電池を成膜した後、太陽電池のみを引き剥がすことで、高価な基板を再利用して低コスト化できると共に、セルの裏面で反射した光が厚い基板によって吸収されることによるロスの低減が可能な太陽電池。
量子ドット	quantum dot	主に半導体において、大きさ数~20ナノメートル程度の粒状の構造を作り、周りをバンドギャップの大きな半導体で覆うと、電子はその領域に閉じこめられ状態密度が離散化する。3次元全ての方向から電子を閉じ込めたものを量子ドットと称する。
励起光強度依存性	dependence on excitation light intensity	試料に光（励起光）を照射し、生成されたキャリアの再結合による発光特性を調べるもので、その励起光強度を変化させたときの発光特性の変化を調べる方法のこと。
ロッキングカーブ	rocking curve	回折条件の変化に対する強度分布のことであり、結晶配向性に関する情報を与える。
ワイドギャップ半導体	wide-gap semiconductors	ワイドギャップ半導体は、SiやGaAsなどと比較して光吸収端が短波長領域に位置し、可視光領域での透過率が比較的高い半導体である。青色LEDなどで広く用いられているGaN材料は、ワイドギャップ半導体の一つである。本事業では、酸化チタンや酸化亜鉛などの紫外光領域に吸収端を有する金属酸化物を中心に検討を行っている。
a面GaN	a-plane GaN	ミラー指数では、GaNの(11-20)面のこと。GaとNが同じ密度で存在し、m面(10-10)面と共に無極性面と呼ばれる。a面で格子不整合ヘテロ接合を形成すると、例えば面内で格子が歪んでも、ヘテロ接合面に垂直な方向に自発分極や圧電分極を生じない。
Ag(InGa)Se <sub>2</sub>	Ag(InGa)Se <sub>2</sub>	Ag(銅)、In(インジウム)、Ga(ガリウム)、Se(セレン)の4元の元素から構成される化合物半導体、Cu(InGa)Se <sub>2</sub> よりワイドバンドギャップの材料系。
a-IGZO	a-IGZO	アモルファスIn-Ga-Zn-Oの略称。
a-SiC:H	a-SiC:H	水素化アモルファスシリコンカーバンドの略

ALD装置	ALD (atomic layer deposition) apparatus	原料の吸着と酸化(還元)を1原子層ずつ繰り返すことで極めて均一性および段差被覆性が高い膜を形成する製膜装置。
BIPV	BIPV	Built-In PV (建材一体型太陽電池モジュール) のこと。
buffer層	buffer layer	アモルファスシリコン太陽電池等でドーピング層と発電層のバンドギャップが異なる場合、ギャップ差を補償して層間に大きなポテンシャル障壁が生じないようにするために挿入する緩衝層
Braggピーク	Bragg peak	結晶にX線を照射した際、結晶中の原子の規則的な配列により、特定の方向に強い回折ピークが現れる。このピークのこと。
CBE法	CBE (chemical beam epitaxy) method	化学線エビタキシー法。ガスソースMBEとも呼ばれる。成長室内が高真空であるため、ガス原料はビームを形成し、基板表面で分解される。
CIGSSe	CIGSSe	半導体Cu(In, Ga)(S, Se) <sub>2</sub> の構成元素の頭文字からとった略称。光吸収層として使われる。
CNT	Carbon nanotube	→カーボンナノチューブ。
Cu(InGa)Se <sub>2</sub>	Cu(InGa)Se <sub>2</sub>	Cu(銅)、In(インジウム)、Ga(ガリウム)、Se(セレン)の4元の元素から構成される化合物半導体。光吸収係数が大きく薄膜太陽電池材料として有望である。
DLTS法	DLTS (deep level transient spectroscopy) method	過渡容量分光法。半導体における深い準位(捕獲中心や再結合中心)を測定する方法。電気容量の過渡応答を利用して、トラップのエネルギー、密度、捕獲断面積を推測することができる。
Eg	Eg	バンドギャップエネルギー、禁制帯幅。
FDTD数値計算	FDTD (finite-difference time-domain method) numerical calculation	電磁界を支配するマクスウェル方程式を、時間に対して差分法で数値的に解く方法。
FF	FF (fill factor)	太陽光発電素子の短絡電流密度×開放端電圧に対し、最大電力を生じる電流密度×電圧の動作点のこと。直列抵抗が大きく、並列抵抗が小さくなるとFFが減少する。
Fission過程	Fission process	有機分子性結晶などにおいて、シングレット状態の励起子が二つのトリプレット励起子に分裂する過程。トリプレット励起子のエネルギーがシングレット励起子の半分以下の時に起こりうる。
FTPS	Fourier Transform Photocurrent Spectroscopy	マイケルソン干渉光を試料に照射して得られる光電流から光吸収係数スペクトルを得る手法
H掃き出しプロセス	Sweep-out process of H	結晶成長過程において、不純物H(水素)が結晶中に取り込まれず、表面側に掃き出されるプロセス。結晶成長時にHが常に表面側に掃き出されることによって残留不純物濃度が下がり、キャリア(電子)の散乱が抑制される。
In表面偏析	surface segregation of indium	MOVPEによる結晶成長中に、In組成が成長表面において他よりも大きくなる現象。
IPCE	incident photon-to-current conversion efficiency	外部量子効率。そのスペクトルは分光感度スペクトルに相当する。
ITO	indium tin oxide	インジウム・スズ合金の酸化物。透明で導電性を有する。
MBE法	MBE (molecular beam epitaxy) method	分子線エビタキシー法。超高真空の成長室内に結晶の構成元素をそれぞれ納めた容器を設置し、これらを加熱することで各元素を気化させる。気化した原子や分子の平均自由行程は数メートル以上と大きいいためビーム状で基板表面に供給される。使用する原料の状態が固体ソース、ガスソースMBE等に分類される。
MOCVD法	MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition) method	有機金属化学気相成長法。有機金属化合物を原料とし、加熱した基板結晶表面に供給することで結晶成長させる。大面積にわたる均一な結晶成長が可能で大量生産向きである。
PLD	pulsed laser deposition	パルスレーザー堆積法。
p-SiO	p-SiO	p型シリコン系酸化膜の略
r面サファイア	r-plane sapphire	ミラー指数では、サファイアの(10-12)面のこと。その上にa面のAlNやGaNが成長する。
RTA処理	RTA (rapid thermal annealing) treatment	急速に温度を上げ、短時間保ったのちに、急速に温度を低下させる処理。



	ment	
SIMS	secondary-ion mass spectrometry	2次イオン質量分析法。
TEM	transmission electron microscope	透過電子顕微鏡。薄膜状の試料に電子線を照射し、試料を透過した電子線を結合レンズ系で拡大する電子顕微鏡。薄膜試料内部の結晶構造、組成、電子状態などの情報が得られる。
X線光電子分光	X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)	被測定試料にX線を照射し、励起された電子のエネルギーを観測する方法。
2次イオン質量分析法	secondary ion mass spectrometry (SIMS)	被測定試料にイオンビームを照射し、衝突によって生じる2次イオンを質量分析する方法。
2層ARコート処理	bi-layer anti-reflection coating	2層の誘電膜を組み合わせて形成された表面反射率を低減させるための構造を形成すること。
3次元逆格子図測定	3 dimensional reciprocal space mapping	結晶欠陥等の3次元的な分布を測定する方法。一般のX線回折法では結晶の周期性および欠陥等によるその乱れをBraggピーク（逆格子点）近傍の1次元あるは2次元に投影した結果しか得られないが、本方法では3次元的な分布を得ることが可能となる。

# I. 事業の位置づけ・必要性について

## 1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

### 1.1 NEDO が関与することの意義

世界的にこれまでにないほど、環境に対する意識が高まっている。その中で 2007 年の「地球温暖化対策に関する内閣総理大臣演説」において、2050 年までに温室効果ガスの排出量を半減する『Cool Earth 50』が発表された。太陽光発電はこの提案に貢献し、持続可能な社会の構築に資する技術の一つとして期待されている。大規模な普及を実現し、期待に応えるためには、太陽光発電の性能の飛躍的な向上が必要である。それにより、住宅や商用施設等での導入促進や、未利用地等での大規模発電等、太陽光発電の適用可能域を抜本的に拡大し、さらに海外の砂漠など全地球的な視点での太陽光発電の利用も可能とするなど、グローバルな展開も期待される。しかしながら、求める性能レベルにまで飛躍的に向上させるためには、従来技術の延長線上にはない革新的な技術の開発が必要不可欠である。

また、我が国の太陽光発電技術は世界のトップ水準にあるが、海外を見渡すと、近年、米国の Solar America Initiative (SAI：ソーラー・アメリカ計画) や欧州の Strategic Research Agenda (SRA：戦略的研究計画) など太陽電池に関する技術開発計画が策定され、その双方で新材料・新規構造等による革新的な太陽電池の開発が取り上げられており、既にいくつかの開発プロジェクトが立ち上がっている。

革新的な太陽電池の開発にあたっては、多岐に亘る可能性の確認と選択を進めることが重要であり、それぞれの技術分野の専門家との協力により知見を積み上げていく必要がある。

このような観点から、温室効果ガスの半減に寄与する技術を確立し、日本の技術的優位性を超長期に亘って維持するためには、我が国においても革新的な超高効率太陽電池の開発を実施する研究グループを形成し、その中心的研究機関を核として、優れた海外の研究者と協力を行いながら積極的かつ継続的な研究開発を推進する必要がある。

新コンセプトの太陽電池等、既存技術の延長にない技術革新を目指した長期視野での研究開発を実施する本事業は、上記ロードマップに従った長期にわたり軸のぶれない取り組みの一環であり、事業リスクが高く、実施期間も長期にわたることから、企業などが自主的に実施することは困難であり、NEDO 事業として行うことの意義は大きく、必要とされている。

### 1.2 実施の効果

地球温暖化対策として温室効果ガスの大幅削減に寄与するために、太陽光発電の性能を飛躍的に向上させることを目的とする。これにより、住宅や商業施設等での導入促進や、未利用地等での大規模発電等、太陽光発電の適用可能域を抜本的に拡大することが可能となる。

また、2050 年に向けた長期的視野に立ち、国内の知見・技術を結集して、新材料・新規構造等を利用した革新的な太陽光発電技術を開発することで、日本の技術的優位性を超長期に亘って維持し、産業競争力強化につながる。

## 2. 事業の背景・目的・位置づけ

太陽光発電は、総合科学技術会議の「第 3 期科学技術基本計画」（平成 18 年 3 月閣議決定）において戦略重点科学技術に、また平成 19 年 4 月資源エネルギー庁公表の「エネルギー技術戦略（技術戦略マップ 2007）」において新エネルギーの開発・導入促進に寄与する技術の中でも特に政策目標への寄与が大きいと思われる技術に、それぞれ位置づけられている。更に、平成 19 年 3 月に改定された「エネルギー基本計画」において、自立した環境適合的なエネルギー需給構造を実現するため、太陽光発電をはじめとする新エネルギーの着実な導入拡大を図ることが挙げられている。

また、新・国家エネルギー戦略（平成 18 年 5 月公表）において、新エネルギーの中長期的な成長支援として太陽電池の技術開発支援を進めることが謳われている。本事業は太陽光発電システムの技術開発により、経済性・性能を飛躍的に改善することを目標に行うものであり、まさにそういった背景と合致する。

本事業は、新コンセプトの太陽電池等、既存技術の延長にない技術革新を目指した長期視野での研究開発を実施することで、太陽光発電の経済性、性能、機能、適用性、利便性等の抜本的な改善を図

るものであり、太陽光発電の制約のない普及拡大を促進するために必要不可欠である。本事業で研究開発を行う低価格・高性能の太陽電池開発、抜本的改革技術の探索は、NEDO が平成 21 年 6 月に「2030 年に向けた太陽光発電ロードマップ (PV2030) 」を改訂した「太陽光発電ロードマップ (PV2030+) 」においても中心的な研究開発課題として位置づけられている。

## Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

### 1. 事業の目標

#### 1.1 研究開発の目的

革新的太陽光発電技術研究開発（以下、本事業）は、地球温暖化対策として温室効果ガスの大幅削減に寄与するために、太陽光発電の性能を飛躍的に向上させることを目的とする。また、2050年に向けた長期的視野に立ち、国内の知見・技術を結集して、新材料・新規構造等を利用した革新的な太陽光発電技術を開発することで、日本の技術的優位性を超長期に渡って維持し、産業競争力強化に資することを目的とする。

#### 1.2 研究開発の目標

2050年までに「変換効率が40%」かつ「発電コストが汎用電源未満（7円/kWh未満）」の太陽電池を実用化することを目指した研究開発の中で、本事業は変換効率40%の実現に向けた技術の基礎・探索研究段階と位置づけて研究開発を実施する。

個別研究開発テーマの最終目標及び中間目標は、テーマごとに取り組む技術の現在の成熟度と、2050年に到達すべき技術レベルから、平成26年度末時点で達成すべき技術レベルを判断し、詳細目標を設定した。（詳細目標は、「2.1.4 研究開発計画」を参照）

### 2. 事業の計画内容

#### 2.1 研究開発の内容

##### 2.1.1 研究開発技術分野

本事業では、太陽光発電技術に関連し、新材料・新規構造等を利用して「変換効率40%」かつ「発電コストが汎用電源未満（7円/kWh未満）」の達成へのアプローチを探索し、可能性を実証することを目標にした研究開発を行う。

本事業では、変換効率向上のためのブレークスルーを探ることを優先的に行い、低コスト化技術については変換効率向上技術の進捗に応じて取り組むこととする。また、海外の先進的な研究機関・大学等と情報や研究人材の交流（研究員の派遣や受入れ等）を実施し、研究開発を促進させる。

本事業では以下の技術分野を対象とした。

- ・多接合型太陽電池
- ・量子ナノ構造太陽電池
- ・光マネジメント構造（波長変換・波長分割構造等）
- ・その他新規概念太陽電池（熱光起電力技術：TPV、プラズモン太陽電池等）

上記目標を達成するため、下記研究開発テーマについて研究開発を実施した。

- ①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発
- ②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発
- ③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発
- ④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）
- ⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日EU共同開発）

##### 2.1.2 研究開発項目の推移

平成20年度には、公募から選定された上記①～③の3件の研究開発を開始した。

平成21年度には、公募から選定された上記④の1件の研究開発を開始した。

平成23年度には、公募から選定された上記⑤の1件の研究開発を開始した。

#### 【平成20～22年度】

研究開発テーマ毎の平成20年度から平成22年度までの開発スケジュールを表1に示す。なお、平成23年度以降のスケジュールについては、第1回中間評価の結果を踏まえ決定する。

表 1. 研究開発の全体スケジュール（平成 20～22 年度）

No	研究開発項目	H20	H21	H22
①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発				
①-1集光型多接合太陽電池				
1	4接合太陽電池の研究開発	←	→	→
2	多接合太陽電池集光動作解析	←	→	→
3	広帯域AlGaInN結晶を用いた多接合太陽電池の開発	←	→	→
4	エピタキシャル成長技術開発（逆エピ、格子整合型4接合）	←	→	→
①-2高効率量子タンデム太陽電池製造プロセス技術開発				
5	MOVPEナノ構造形成技術	←	→	→
6	高倍集光セル微細加工技術	←	→	→
7	次世代プロセス技術開発（InGaN多接合セル）	←	→	→
8	水素MBE法（GaInNAs:Sb/量子ナノ構造）	←	→	→
9	MOVPE法（GaInNAs/量子井戸構造）	←	→	→
10	エピタキシャル成長技術開発（量子構造挿入型、格子整合型4接合）	←	→	→
11	高倍集光セルの開発	←	→	→
①-3量子ドット超格子を基盤とした超高効率太陽電池				
12	量子ドット超格子型	←	→	→
13	量子ドット超格子型（自己組織化量子ドットの積層化）	←	→	→
14	量子ドット・有機ハイブリッド材料による中間バンド型	←	→	→
15	光マネジメント（金属ナノ粒子）	←	→	→
①-4ハイブリッド素材による超高効率多接合型太陽電池				
16	界面電荷移動遷移型セル	←	→	→
17	新概念素子用ハイブリッド光電素材	←	→	→
18	多結晶化合物多接合太陽電池	←	→	→
19	ETA構造による新概念素子	←	→	→
20	金属ナノ粒子/光マネジメント材料	←	→	→
21	金属ナノ粒子吸収型セルの研究開発	←	→	→
22	ナローバンドギャップ太陽電池	←	→	→
②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発				
②-1シリコン系3接合太陽電池の開発				
1	高配向性平面ポリシラン材料の開発	←	→	→
2	配列制御ナノ結晶シリコン材料の開発	←	→	→
3	結晶系ナローギャップ材料太陽電池の開発	←	→	→
4	シリコン-ゲルマニウム-スズ低温エピタキシャル新技術の開発	←	→	→
5	ガラス基板上的シリコン・ゲルマニウム等単結晶シード層形成技術	←	→	→
6	ゲルマニウム系単結晶エピ成長技術の開発	←	→	→
7	フッ素系イオン制御プラズマプロセスの開発	←	→	→
8	擬単結晶固相成長技術の開発	←	→	→
9	ヘテロ接合デバイス化技術の開発	←	→	→
②-2化合物系4接合薄膜太陽電池の開発				
10	ワイドギャップカルコゲナイド系太陽電池の開発	←	→	→
11	構造制御ワイドバンドギャップ化合物太陽電池の開発	←	→	→
12	革新的ワイドギャップ材料太陽電池の開発	←	→	→
13	酸窒化物系ワイドギャップ材料の開発	←	→	→
14	酸化物ワイドギャップ材料の開発A	←	→	→
15	酸化物ワイドギャップ材料の開発B	←	→	→
16	化合物系タンデムセルの開発	←	→	→
②-3新概念新材料の検討				
17	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討A	←	→	→
18	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討B	←	→	→

19	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討C	←	→
20	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討D	←	→
21	単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討A	←	→
22	単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討B	←	→
23	強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討A	←	→
24	強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討B	←	→
25	構造制御ナノ材料を用いた太陽電池	←	→
②-4高度光利用技術の開発			
26	メカニカルスタック技術の開発A	←	→
27	メカニカルスタック技術の開発B	←	→
28	高度光閉じ込め技術の開発A	←	→
29	高度光閉じ込め技術の開発B	←	→
30	高性能透明導電膜の開発	←	→
31	高性能ガラス基板作製技術を使った高性能透明導電膜の開発	←	→
③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発			
③-1バンドエンジニアリング			
1	ナノドット禁制帯幅制御	←	→
2	マルチエキシトン	←	→
3	ナノドット量子効果を有する薄膜の形成技術	←	→
4	Geの遷移型制御	←	→
5	薄膜新素材	←	→
6	ワイド/ナローギャップ材料設計	←	→
③-2薄膜フルスペクトル太陽電池			
7	シリコン系薄膜集光型セル	←	→
8	広バンドギャップシリコン系薄膜	←	→
9	サブセル界面接合技術	←	→
10	カルコパイライト系集光型セル	←	→
11	放熱基板カルコパイライト系集光型セル	←	→
12	構造設計とカルコパイライト系トップセル	←	→
13	光学設計技術	←	→
14	集光型CdTe薄膜	←	→
③-3光のマネジメント・TCO			
15	表面プラズモン	←	→
16	p型透明導電膜	←	→
17	フルスペクトルTCO	←	→
18	グラフェン透明導電膜	←	→
④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）			
1	集光型多接合太陽電池評価技術	←	→
2	薄膜多接合太陽電池評価技術	←	→

【平成 23～24 年度】

研究開発テーマ毎の平成 23 年度から平成 24 年度までの開発スケジュールを表 2 に示す。なお、平成 25 年度以降のスケジュールについては、第 2 回中間評価の結果を踏まえ決定する。

表 2. 研究開発の全体スケジュール（平成 23～24 年度）

No	研究開発項目	H23	H24
①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発			
①-1集光型多接合太陽電池			
1	多接合太陽電池の評価解析	←→	←→
2	多接合太陽電池集光動作解析	←→	←→
3	多接合セル開発（格子不整合系）	←→	←→
①-2多接合用新材料開発			
4	多接合セル開発（格子整合系新材料・ナノ構造）	←→	←→
5	量子井戸ミドルセル	←→	←→
6	GaInNAsミドルセル（CBE）	←→	←→
7	窒素系結晶成長の理論解析	←→	←→
8	GaInNAsミドルセル（水素MBE、MOVPE、量子ドット添加）	←→	←→
9	広帯域AlInGaN結晶を用いた多接合太陽電池	←→	←→
10	InGaN多接合セル新プロセス	←→	←→
11	ナローギャップボトムセル（CuTe）	←→	←→
12	近赤外光吸収材と吸収増強材料を組み合わせた3接合用ボトムセル構築	←→	←→
①-3量子ドットマルチバンドセル			
13	量子ドット超格子セル	←→	←→
14	超高密度量子ドットセル	←→	←→
①-4光マネジメントに資する微細加工技術開発			
15	マイクロ集積集光セル開発	←→	←→
16	光閉じ込め微細構造の開発	←→	←→
17	表面修飾技術開発（ナノ構造修飾）	←→	←→
②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発			
②-1メカニカルスタック・デバイス化技術の開発			
1	メカニカルスタック・デバイス化技術の開発	←→	←→
2	メカニカルスタック技術の開発	←→	←→
3	ヘテロ接合デバイス化技術の開発A	←→	←→
4	ヘテロ接合デバイス化技術の開発B	←→	←→
5	高度光利用技術の開発A	←→	←→
6	高度光利用技術の開発B	←→	←→
②-2ボトムセルの開発			
7	SiGe系薄膜ボトムセルの開発A	←→	←→
8	SiGe系薄膜ボトムセルの開発B	←→	←→
9	SiGe系薄膜ボトムセルの開発C	←→	←→
10	SiGe系薄膜ボトムセルの開発D	←→	←→
11	有機単結晶材料ボトムセルの開発A	←→	←→
12	有機単結晶材料ボトムセルの開発B	←→	←→
13	ナノ材料系ボトムセルの開発A	←→	←→
14	ナノ材料系ボトムセルの開発B	←→	←→
15	強相関材料ボトムセルの開発A	←→	←→
16	強相関材料ボトムセルの開発B	←→	←→
②-3トップセルの開発			
17	ナノ材料系トップセルの開発A	←→	←→
18	ナノ材料系トップセルの開発B	←→	←→
19	ナノ材料系トップセルの開発C	←→	←→
20	化合物系トップセルの開発A	←→	←→
21	化合物系トップセルの開発B	←→	←→
22	化合物系トップセルの開発C	←→	←→
23	化合物系トップセルの開発D	←→	←→

③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発			
③-1トップセル			
1	シリコン系薄膜集光型セル	←→	←→
2	広バンドギャップシリコン系薄膜	←→	←→
3	カルコパイライト系トップセル	←→	←→
4	InGaN薄膜	←→	←→
③-2ミドルセル			
5	Si量子ドット禁制帯幅制御	←→	←→
6	ナノドット量子効果	←→	←→
7	カルコパイライト系集光型セル	←→	←→
③-3ボトムセル			
8	歪Ge	←→	←→
9	非真空CuIn(Se, Te) <sub>2</sub>	←→	←→
10	蒸着CuInTe <sub>2</sub> 系セル	←→	←→
③-4透明導電膜			
11	p型透明導電膜	←→	←→
12	フルスペクトルTCO	←→	←→
13	グラフェン透明導電膜	←→	←→
③-5界面接合			
14	サブセル界面接合技術	←→	←→
③-6光学設計技術			
15	光学設計技術	←→	←→
③-7裏面反射			
16	表面プラズモン	←→	←→
⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日EU共同開発）			
1	新材料・新構造太陽電池の創製及び評価解析技術の開発	←→	←→
2	集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発	←→	←→
3	先進構造による高効率集光型太陽電池の開発	←→	←→
4	集光型太陽電池セル、モジュールの標準測定技術の開発	←→	←→
5	高効率集光型太陽電池モジュールの開発と集光型太陽光発電システム実証	←→	←→

【平成 25～26 年度】

研究開発テーマ毎の平成 25 年度から平成 26 年度までの開発スケジュールを表 3 に示す。

表 3. 研究開発の全体スケジュール（平成 25～26 年度）

No	研究開発項目	H25	H26
①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発			
①-1 格子不整合多接合太陽電池			
1	多接合セル・モジュール開発（格子不整合系）	←→	←→
2	多接合太陽電池評価解析	←→	←→
3	多接合太陽電池集光動作解析	←→	←→
4	III-V系オン・シリコン構造	←→	←→
①-2 格子整合／メカニカルスタック多接合太陽電池			
5	多接合セル開発（格子整合系新材料・ナノ構造）	←→	←→
6	量子井戸ミドルセル	←→	←→
7	GaInNAsミドルセル（水素MBE）	←→	←→
8	GaInNAsミドルセル（CBE）	←→	←→
9	窒素系結晶成長の理論解析	←→	←→
10	AlInGaNトップセル（MOVPE）	←→	←→
11	InGaNトップセル（PSD）	←→	←→



12	ナローギャップボトムセル	←	→
13	ハイブリッド材料ボトムセル	←	→
①-3量子ドット超格子太陽電池			
14	量子ドット超格子セル（セル開発）	←	→
15	超高密度量子ドットセル	←	→
16	量子ドット超格子セル（集光モジュール技術開発）	←	→
②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発			
②-1メカニカルスタック・デバイス化技術の開発			
1	メカニカルスタック・デバイス化技術の開発	←	→
2	メカニカルスタック技術の開発	←	→
3	ヘテロ接合デバイス化技術の開発	←	→
4	高度光利用技術の開発A	←	→
5	高度光利用技術の開発B	←	→
②-2ボトムセルの開発			
6	SiGe系薄膜ボトムセルの開発A	←	→
7	SiGe系薄膜ボトムセルの開発B	←	→
8	SiGe系薄膜ボトムセルの開発C	←	→
9	ナノ材料系ボトムセルの開発A	←	→
10	ナノ材料系ボトムセルの開発B	←	→
11	強相関材料ボトムセルの開発A	←	→
12	強相関材料ボトムセルの開発B	←	→
13	強相関材料ボトムセルの開発C	←	→
②-3トップセルの開発			
14	ナノ材料系トップセルの開発A	←	→
15	ナノ材料系トップセルの開発B	←	→
16	化合物系トップセルの開発A	←	→
17	化合物系トップセルの開発B	←	→
18	化合物系トップセルの開発C	←	→
③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発			
③-1波長スプリッティング-セル・発電特性			
1	薄膜フルスペクトル集光型セル・発電特性	←	→
③-2トップセル			
2	シリコン酸素系トップセル	←	→
③-3ミドルセル			
3	カルコパイライト系剥離セル	←	→
4	カルコパイライト系集光型セル	←	→
③-4ボトムセル			
5	Cu <sub>2</sub> SnS <sub>4</sub> 系セル	←	→
6	CIGS系ボトムセル	←	→
③-5透明導電膜			
7	p型透明導電膜	←	→
8	トップセル用TCO	←	→
③-6界面接合			
9	新型TCO/p-SiO界面技術	←	→
③-7光学設計/システム技術			
10	光学設計/システム化技術	←	→
11	低倍率集光システム構築	←	→
⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日EU共同開発）			
1	新材料・新構造太陽電池の創製及び評価解析技術の開発	←	→
2	集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発	←	→
3	先進構造による高効率集光型太陽電池の開発	←	→

4	集光型太陽電池セル、モジュールの標準測定技術の開発	←	→
5	高効率集光型太陽電池モジュールの開発と集光型太陽光発電システム実証	←	→

### 2.1.3 研究開発予算の推移

各年度の研究開発予算（実績）の推移を表4に示す。

表4. 研究開発予算（実績）の推移（単位：億円）

研究開発テーマ名	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	総額
①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発	14.2	7.3	6.8	6.4	7.9	6.3	5.8	54.7
②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発	6.6	4.8	6.3	6.0	5.5	4.5	3.0	36.7
③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発	6.4	5.5	5.4	6.2	5.8	4.4	2.8	36.5
④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）	—	0.3	8.7	—	—	—	—	9.0
⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日EU共同開発）	—	—	—	1.6	2.0	1.6	1.1	6.3
合計 特別会計（需給勘定）	27.2	17.9	27.2	20.2	21.2	16.8	12.7	143.2

※平成27年2月28日現在

## 2.1.4 研究開発内容

研究開発項目別の開発内容、目標は以下の通りとした。

### ①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

本テーマでは、東京大学を中心として、Ⅲ-V族系材料による高集光多接合太陽電池の逆エピ格子不整合系・量子構造挿入型・InGaAsN(格子整合)挿入型のいずれかタイプにおいて、3ないし4接合を実現して、集光時のセル変換効率48%を実現し(平成26年度)、高集光セルで問題となる電流抵抗ロスの低減についても取り組む。また、これに加えて東京大学を中心として、新概念、新技術の太陽電池の創出を目指した研究開発を実施する。

本テーマ全体目標としては、以下とする。

#### 平成22年度中間目標

Ⅲ-V族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率33%と集光時の変換効率42%を達成する。また、新概念太陽電池については動作原理を検証する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子収率を10%高めることに資する。

#### 平成24年度中間目標

Ⅲ-V族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率36%と集光時の変換効率45%を達成する。また、新概念太陽電池については動作原理を検証し、窒化物セルにおいて非集光時変換効率10%(単接合)および20%(多接合)、量子ドットマルチバンドセルにおいて集光時変換効率25%を達成する。光マネジメント技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子ナノ構造層の光吸収を3倍に高め、上記目標の達成に資する。

#### 平成26年度最終目標

Ⅲ-V族系材料による高集光多接合太陽電池で変換効率45%以上(3接合・1,000倍集光時)、変換効率48%(4接合・1,000倍集光時)を達成する。また、新概念太陽電池については、窒化物セルにおいて非集光時変換効率20%(単接合)および30%(多接合)、量子ドットマルチバンドセルにおいて27%(非集光時)、40%(集光時)を達成する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子ナノ構造層の光吸収を10倍に高め、上記目標の達成に資する。

表 5. 研究開発項目別開発内容、目標①（平成 20～22 年度）

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
①-1集光型多接合太陽電池						
1	20～22	4接合太陽電池の研究開発	豊田工業大学 (再委託：九州大学)	InGaAsN太陽電池の高効率化において、Nに起因した欠陥によるキャリア移動度、キャリア寿命の低下が最大の課題である。成膜時の表面反応過程の制御により欠陥密度低減が可能な、化学ビーム・エピタキシー（CBE）法を用いて、高品質InGaAsN材料の開発を行う。InGaAsN材料の成膜過程、電子物性と欠陥物性を詳細に検討して、材料品質の向上をはかる。さらに、成膜過程の理解のため、III-V-N系半導体成長シミュレータの研究開発を、九州大学に再委託して行う。	<p><b>【22年度中間目標】</b> InGaAsN単接合太陽電池で非集光時変換効率15%を得る。</p> <p><b>【26年度最終目標】</b> シャープ(株)と相互に協力して、AlInGaP/InGaAs/InGaAsN(1eV)/(GeまたはInGaAs)4接合セルにおいて、非集光時変換効率35%、1,000倍集光時変換効率45%を達成する。</p>	
2	20～22	多接合太陽電池集光動作解析	豊田工業大学 (再委託：宮崎大学)	高効率化の観点からサブセル材料のバンドギャップの最適化をはかった格子不整合系3接合セルを対象に、高効率化に不可欠な転位挙動の解析と転位密度低減、ならびに集光動作による高効率化を研究する。格子不整合1.2eVのInGaAsのMBE法によるエピ成長および転位挙動の解析とそれに基づく転位密度低減を検討する。また、集光動作特性解析シミュレータの開発と集光動作特性解析を、宮崎大学に再委託して行う。	<p><b>【22年度中間目標】</b> シャープ(株)に協力して集光型多接合太陽電池の高効率化に寄与し、集光時変換効率42%を達成する。</p> <p><b>【26年度最終目標】</b> InGaAsN結晶成長技術およびシャープ(株)と協力して、3ないし4接合セルの高効率化に寄与し、集光時の変換効率45%を達成する。</p>	
3	20～22	広帯域AlGaInN結晶を用いた多接合太陽電池の開発	名城大学	以下の要素技術を構築しながら研究を遂行する。 GaInN結晶成長技術の確立 低In組成（20年度） 中In組成（21年度） 高In組成（22年度） p型GaInN導電性制御技術 低In組成（20年度） 中In組成（21年度） 高In組成（22年度） GaInNおよびGaInNAs少数キャリア拡散長評価 少数キャリア寿命を各年度ごとに目標を定めて評価する。	<p><b>【22年度中間目標】</b> 1.0eV帯または1.4eV帯の単接合セルにて、変換効率5%を達成する。</p> <p><b>【26年度最終目標】</b> 広帯域AlGaInN結晶を用いた多接合太陽電池を検討し、単接合セルで変換効率10%以上を達成し、かつ、多接合セル製作の為の要素技術を確立する。</p>	
4	20～22	エピタキシャル成長技術開発（逆エピ、格子整合型4接合）	シャープ(株)	格子不整合系の逆積み3接合セルの成長条件の最適化を行う。23年以降は逆積み3接合セル技術を発展させて逆積み4接合セル検討を行い、併せて量子構造形成多接合セル、InGaAsN層導入多接合セル開発も行う。	<p><b>【22年度中間目標】</b> 逆積み3接合セルで非集光時変換効率33%、集光時変換効率42%を達成する。</p> <p><b>【26年度最終目標】</b> 逆積み4接合構造、量子ドット挿入InGaAs(1eV)セル、もしくはInGaAsN(1eV)セルを形成したGe基板上4接合構造セルで</p>	

					非集光時変換効率35%、集光時変換効率45%を達成する。
①-2高効率量子タンデム太陽電池製造プロセス技術開発					
5	20 ～ 22	MOVPE ナノ構造形成技術	東京大学	量子井戸を挿入してGeへの格子整合と長波長化を両立するミドルセルを、高スループットのMOVPEにより作製する。Pによる歪み補償を活用し、InGaAsあるいはInAsの積層量子構造を挿入した1.0 eV帯セルの成長技術を確立する。シャープ(株)と共同で格子整合系3接合あるいは4接合セルを作製し、1,000倍集光で効率45%を達成する。この目的のため、セル作製プロセスに移転可能な量子構造導入セルの成長技術を開発する。	<p><b>【22年度中間目標】</b> InGaAs/GaAsP歪み補償量子井戸を挿入したInGaAsミドルセルを作製し、1.2eV帯まで長波長側の吸収端をのぼし、1.75eVのトップセル下で16mA/cm<sup>2</sup>を達成する。</p> <p><b>【26年度最終目標】</b> 量子井戸を挿入したInGaAsミドルセルを作製し、1.75eVのトップセル下でIsc=17mA/cm<sup>2</sup>（バンドギャップは1.2 eVに相当）、1.4eVのセル下でIsc=14mA/cm<sup>2</sup>（バンドギャップは1.0 eVに相当）を得る。さらに、これらのミドルセルを利用した3または4接合セルをシャープ(株)と共同して製作し、集光時の変換効率効率45%を得る。</p>
6	20 ～ 22	高倍集光セル微細加工技術	東京大学	InGaP/InGaAs多接合セルに微細構造を活用した全波長域に対応する反射防止構造を形成し、高効率化を図る。また、小面積セルを単一基板に集積直列接続し、高集光下でも直列抵抗の寄与を減じた高効率セルを作製する。さらにマイクロ集光システムとハイブリッド集積させたマイクロセルアレイを開発する。	<p><b>【22年度中間目標】</b> シャープ(株)が供給するIII-V化合物系多接合高効率太陽電池に対するエッチング技術を開発し、表面に光り閉じこめ構造を導入して、全波長域（400-1,300nm）の反射率を0.5%以下にすることで、従来の2層ARコート処理セルに対して、2%の短絡電流の向上を達成する。シャープ(株)が供給するIII-V化合物系多接合高効率太陽電池チップを、東京大学で、マイクロチップ化し、シャープ(株)で配線して、マイクロアレイを試作し、課題の抽出を行う。</p> <p><b>【26年度最終目標】</b> 多接合セルの微細加工により、小面積セルのモノリシック集積により直列抵抗を減じたマイクロセルアレイをシャープ(株)と協力して開発し、集光システムとハイブリッド集積し、5,000倍集光下で変換効率40%を達成する。</p>
7	20 ～ 22	次世代プロセス技術開発（InGaN多接合セル）	東京大学	ドーピング制御された高品質・高In濃度InGaNを得ることを目的として、低温PSD成長法によるInGaNの相分離抑制技術の開発、及び、InGaN薄膜へのドーピング技術を開発する。最終的に、InGaN多	<p><b>【22年度中間目標】</b> In組成0.5でX線回折半値幅0.12°以下の結晶性を持つInGaNを実現する。 In組成0.3でホール濃度5×10<sup>17</sup>/cm<sup>3</sup>以上のp型InGaNを作製する。</p>

				接合セル実現のための基礎技術としてバンドギャップ2eV以下のInGaN単接合太陽電池を作製する。	【26年度最終目標】 バンドギャップ2eV以下のInGaN単接合セルを製作し変換効率7%を達成する。
8	20 ～ 22	水素MBE法 (GaInNAs: Sb/量子ナ ノ構造)	東京大学	集光時変換効率45%の4接合タンデムセルを達成するために、1eV帯のサブセル材料としてGaInNAs:Sb薄膜の開発を原子状水素援用分子線エピタキシー法(水素MBE法)により行う。また3接合タンデムセルのミドルセルに多重量子井戸や積層量子ドット構造等を導入した高効率化技術を開発する。	【22年度中間目標】 GaInNAs:Sb薄膜の高品質・長波長帯ヘテロ成長技術(水素MBE法)を開発し、単接合セルで、非集光時変換効率15%を達成する。 3接合セルのGaAsミドルセルにInAs系積層量子井戸・ドットを挿入し、長波長域の吸収により $I_{sc} = 2\text{mA}/\text{cm}^2$ の増大を達成する(これは、1.75eVのトップセル下で $16\text{mA}/\text{cm}^2$ に相当する)。  【26年度最終目標】 シャープ(株)と協力して4接合セルを製作して、集光時の変換効率45%を達成する。 シャープ(株)と協力して3接合セルを製作して、集光時の変換効率42%を達成する。
9	20 ～ 22	MOVPE法 (GaInNAs/ 量子井戸構 造)	東京大学	MOVPE法によりGaAs及びGe基板上GaInNAs(N:1-5%)薄膜・量子井戸構造の長波長化(1eV帯)を行う。22年度までは、急速熱処理(RTA処理)による高品質化技術を中心に開発する。また、GaInNAs薄膜については、24年度までに単接合セルで変換効率15%を達成し、25年度よりシャープ(株)と協力して4接合セルを開発する。GaInNAs量子井戸構造については、24年度までに、長波長域(1eV)まで吸収端をのばし、光電流を増大させ、25年度よりシャープ(株)と協力して3接合セルを開発する。	【22年度中間目標】 GaInNAs(N:1-5%)薄膜・量子井戸構造において、X線半値幅 $0.1^\circ$ 以下およびPL半値幅 $25\text{meV}$ 以下@10Kを達成する。  【26年度最終目標】 GaInNAs薄膜では、シャープ(株)と協力して4接合セルにおいて、集光時変換効率45%を達成する。 GaInNAs量子井戸構造では、シャープ(株)と協力して3接合セルにおいて、集光時変換効率42%を達成する。
10	20 ～ 22	エピタキ シャル成長 技術開発 (量子構造 挿入型、格 子整合型4 接合)	シャープ (株)	第4項に同じ	第4項に同じ
11	20 ～ 22	高倍集光 セルの開 発	シャープ (株)	セルの直列抵抗低減を意図した高倍集光用デバイス設計を行う。光学系一体型モジュールの実現のため集積化による高倍集光セルの開発検討を行う。	【22年度中間目標】 集積化のためのセル化プロセス検討とセル間配線プロセスを検討し、課題を抽出する。  【26年度最終目標】 光学系一体化モジュールにおいて、5,000倍集光時変換効率40%を達成する。
①-3量子ドット超格子を基盤とした超高効率太陽電池					

12	20 ～ 22	量子ドット超格子型	東京大学	pn接合構造中に最適構造のミニバンドを1つ追加した量子ナノ構造（中間バンド型）太陽電池（集光時変換効率の最高理論値60%）を実現する素子構造として、高密度、高均一で3次的に周期配列した量子ドット超格子（ドット結晶）を開発する。歪み補償成長法による中間バンド型量子ドット太陽電池の作製技術を開発し、ポンプ・プローブ法等により非線形光吸収過程の検証を行う。	<p>【22年度中間目標】 サイズ揺らぎ10%、中間層膜厚10nm以下の量子ドット超格子（中間バンド）型太陽電池を作製し、2光子吸収過程の検証とセル効率12%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 量子ドット超格子（中間バンド）の製造技術を確立し、量子ナノ効果の実証とセルで非集光時変換効率15%を達成する。 量子ナノ構造（中間バンド型）タイプの太陽電池が変換効率40%越えを実現する設計技術を確立する。</p>
13	20 ～ 22	量子ドット超格子型（自己組織化量子ドットの積層化）	電気通信大学	量子ドット超格子太陽電池の開発において、良質な量子ドット超格子構造の作製技術の開発が重要な課題であり、化合物半導体量子ドットの高均一化・高密度化およびその積層化の基礎技術を開発し、量子ドット超格子太陽電池への応用開発を進める。	<p>【22年度中間目標】 光吸収波長帯（1,000-1,300nm）を有する化合物半導体量子ドットの単層構造において、量子ドットの不均一幅を20meV以下に抑制し、かつ量子ドット密度を<math>6 \times 10^{10}/\text{cm}^2</math>以上に高密度化するための成長技術を開発する。さらに、上記量子ドット構造の10層以上の多重積層化技術を開発する。</p> <p>【26年度最終目標】 上記量子ドットの多重積層構造における不均一幅を25meV以下に抑制し、試作の量子ドット超格子太陽電池において15%以上の変換効率を達成する。</p>
14	20 ～ 22	量子ドット・有機ハイブリッド材料による中間バンド型	新日本石油(株)	新概念太陽電池創出のため、有機半導体と量子ドットによる3次元超格子構造体を利用した中間バンド型太陽電池を開発する。具体的には、3次元超格子構造体の原料として、化合物系半導体量子ドットと有機半導体からなる量子ドット・有機半導体ハイブリッド材料を開発し、そのハイブリッド材料を利用した、3次元超格子構造の形成技術を開発することで、中間バンド生成と2光子吸収の実証を行う。	<p>【22年度中間目標】 1.8-2.0eVのバンドギャップをもつ有機半導体とこれとエネルギー準位がマッチし、かつ1.0eV程度のギャップをもつ量子ドットからなる中間バンドを有する光吸収層において、光吸収の確認ならびに2光子吸収の実証を行う。</p> <p>【26年度最終目標】 量子ドット・有機ハイブリッド中間バンド型太陽電池を開発し、変換効率10%を達成する。</p>
15	20 ～ 22	光マネジメント（金属ナノ粒子）	東京大学	金属ナノ粒子を用いた光マネジメント技術の開発を行う。金属ナノ粒子が光を吸収すると光近接場を生じる効果を検証する。近接場は、ごく近傍に存在する光吸収体に効率的に光を伝達するアンテナの役目をするることによって、太陽	<p>【22年度中間目標】 金属ナノ粒子による近接場効果により、1.5-2.5eV帯における光吸収係数が10%増強することを実証する。</p> <p>【26年度最終目標】 金属ナノ構造を太陽電池に</p>

				電池が本来有する吸収率を大きく増強させる効果が期待される。この効果を使って量子ドット型太陽電池が十分に光を取り込めるようにする。	作りこみ、吸収係数の増加が量子ドット超格子型セルの変換効率に定量的に反映されることを実証する。	
①-4ハイブリッド素材による超高効率多接合型太陽電池						
16	20 ～ 22	界面電荷移動遷移型セル	東京大学	金属酸化物とジシアノメチレン基を有する有機分子からなる界面錯体の光励起を動作原理（新概念）とするセルを実現することを目的とし、素材探索およびセル構造構築に向けた研究開発を行なう。将来目標である超高効率多接合太陽電池の実現に向けては、本項目で研究開発を行なう界面電荷移動遷移型セル単独での実現を目指す一方で、他項目で開発する新概念/新接合セル(*)との組み合わせも視野に入れている。さらには、本項目の取組みの中で開発する1eV帯で光電変換可能な新概念セルを用いて、①-2、3の各項目で研究開発する無機系多接合セルを補強するなど、幅広い視点からの高効率化を目指す。	【22年度中間目標】 界面電荷移動遷移型セルを利用して、1eV帯領域で光電変換を達成する。  【26年度最終目標】 界面電荷移動遷移型セルで変換効率10%を達成する。	(*)ETA型セルあるいは、大阪大学と兵庫県立大学が中心となり開発する無機新材料および新接合技術により、従来の無機多接合太陽電池では、光電変換が困難であった領域での光電変換を目指す多接合型セル
17	20 ～ 22	新概念素子用ハイブリッド光電素材	東京大学	ETA型セルを中心に新概念や新接合光電変換素子の素材開発を行なうことを目的とし、光吸収、励起状態の寿命、ドナー、アクセプター材料とのエネルギーレベルマッチングおよび電荷注入速度などに着目し、可視から近赤外領域の幅広い光電変換を可能とするための光電変換材料の研究開発を行う。	【22年度中間目標】 電圧ロスの低減と光吸収波長域の拡大が期待されるドナー/色素/アクセプターでの新概念太陽電池（ETA）において、新日本石油（株）に協力して、1.4eV帯および1.0eV帯でのETA構造素子を試作し光電変換を検証する。  【26年度最終目標】 新日本石油（株）に協力して、ETA構造における新概念素子の材料検討による効率向上と光マネージメントの適用により、変換効率10%を達成する。	
18	20 ～ 22	多結晶化合物多接合太陽電池	大阪大学	新概念、新技術の太陽電池の研究開発の一部として、非Ⅲ-V族系化合物半導体材料による新規太陽電池の開発を目的に、その材料開発と、多結晶化合物半導体薄膜を用いた多接合太陽電池作製技術の実証を行う。材料開発においては、その要素技術として、半導体薄膜の電気化学法および塗布法による形成技術を開発、トップセルに用いるバンドギャップが1.8-2.2 eVの半導体の開発、0.6 -1.2 eV領域のボトムセルの開発、ならびに、トップ	【22年度中間目標】 トップセル用のバンドギャップ1.8-2.2 eVの太陽電池材料を開発する。バンドギャップ以上の波長帯に対する単膜での光電流発生率の平均量子収率50%以上（溶液との接合による評価）を達成する。擬似太陽光照射に対する変換効率3%以上を達成する。  【26年度最終目標】 0.6 -1.2 eV領域のボトムセルを開発する。トップセルと連結したタン	



				セルと連結したタンデム型太陽電池の開発を行う。	デム型太陽電池を開発し、変換効率15%以上を達成する。
19	20 ～ 22	ETA構造による新概念素子	新日本石油(株)	新概念太陽電池創出のため、ドナー/色素/アクセプター3元系によるETA構造素子を開発する。具体的には、ETA構造素子に適したドナー/色素/アクセプター3元系相分離構造材料を開発するとともに、中間目標までには素子化検討を行い、光電変換の基本コンセプトを実証する。	【22年度中間目標】 ドナー/色素/アクセプターでの新型太陽電池(ETA)において、1.0eV帯および1.4eV帯でのETA構造による新概念素子を試作し、光電変換を検証する。  【26年度最終目標】 ETA構造による新概念素子の材料検討による効率向上と光マネジメントの適用により、変換効率10%を達成する。
20	20 ～ 22	金属ナノ粒子/光マネジメント材料	新日本石油(株)	高度光利用技術創出のため、金属ナノ粒子アレイ構造を利用した光マネジメント材料を開発する。具体的には、金属ナノ粒子アレイ作製技術の開発と、太陽電池への組み込み技術を開発し、効率向上効果の実証を目指す。	【22年度中間目標】 金属ナノ粒子構造を用いた光マネジメントを、ETA構造素子(又は他の光電変換素子)へ適用し、金属ナノ粒子アレイの効果により量子収率が10%増大することを実証する。  【26年度最終目標】 ETA構造による新概念素子に対して光マネジメントを適用し、変換効率10%を達成する。
21	20 ～ 22	金属ナノ粒子吸収型セルの研究開発	東京大学	金属の種類や形状に依存する様々なプラズモン吸収を利用して、実現しうる光電変換能力を明らかにするために、光電変換の原理解明および系の最適化を進め、新概念セルを開発する。	【22年度中間目標】 光電変換機構を解明し、光電変換を実証する。  【26年度最終目標】 金属ナノ粒子吸収型セルで10%を達成する。
22	20 ～ 22	ナローバンドギャップ太陽電池	兵庫県立大学	ナローバンドギャップ用光電変換材料としては、銅およびニッケルを中心とした元素を含む硫黄系およびセレン系ナノ結晶粒子を第一ターゲットとし、ドーパントを変化させることでバンドギャップコントロールを行なう。化学手法の特徴を生かし、効率良く系統的に材料の研究開発を行ない、それらのナノ結晶粒子を使用して、半導体膜の創製を行うとともに、セル化技術の研究開発を行なう。 4接合太陽電池のナローギャップ領域での光電変換を可能とする第3、4ジャンクションセル、またそれらからなる2接合セルを開発する。	【22年度中間目標】 ナローバンドギャップ太陽電池用として、0.9-1.0eVおよび0.6-0.7eVのバンドギャップを有する硫黄系またはセレン系の材料を開発し、セル化して光電変換を実証する。  【26年度最終目標】 ナローバンドギャップセルからなる2接合太陽電池を作製し、変換効率15%を達成する。

表 6. 研究開発項目別開発内容、目標①（平成 23～24 年度）

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
①-1集光型多接合太陽電池						
1	23 ～ 24	多接合太陽電池の評価解析	豊田工業大学	格子不整合系3接合セルにおける転位挙動の解析とそれに基づく転位密度低減を検討する。	<p>【24年度中間目標】</p> シャープ(株)に協力して集光型多接合太陽電池の高効率化に寄与し、集光時変換効率45%を達成する。	
2	23 ～ 24	多接合太陽電池集光動作解析	豊田工業大学 (再委託：宮崎大学)	集光型太陽電池の電極パターンの最適化や太陽電池セル内部抵抗の解析を実施する。高倍率集光時におけるセル内の温度上昇（局所的含む）に起因する劣化を解析し、長期安定動作上限温度を明らかにする。また、その温度を維持するために必要な冷却構造を実現する。	<p>【24年度中間目標】</p> シャープ(株)に協力して集光型多接合太陽電池の高効率化に寄与し、集光時変換効率45%を達成する。	
3	23 ～ 24	多接合セル開発（格子不整合系）	シャープ(株)	直列抵抗成分であるトップセルのシート抵抗、様々な層で構成されたヘテロ界面での抵抗、電極と半導体層の接触抵抗、受光面電極の抵抗等の低減に取り組む。短絡電流の増大をねらい、電流を律速しているトップセルの窓層高バンドギャップ化による短波長量子効率の改善、反射防止膜の広帯域化、コンタクト層の幅狭化によるシャドーロス低減等に取り組む。	<p>【24年度中間目標】</p> 逆積み3接合セルの構造と成長条件の最適化を進め、集光時変換効率45%（1,000倍集光時）を達成する。逆積み3接合セルに対して光学効率90%を達成する。	
①-2多接合用新材料開発						
4	23 ～ 24	多接合セル開発（格子整合系新材料・ナノ構造）	シャープ(株)	逆積み3接合構造セルと低バンドギャップセル（Geセル等）をスタック化した4接合構造の検討を行う。InGaPトップセル/GaAs2番目セル（当社作製）とInGaAsN3番目セル/Geボトムセル（他グループ作製）をスタック化した4接合構造、量子ドットナノ構造を3番目セルに取り入れた4接合構造等の検討を行	<p>【24年度中間目標】</p> 逆積み3接合セルの構造と成長条件の最適化を進め、集光時変換効率45%（1,000倍集光時）を達成する。逆積み3接合セルに対して光学効率90%を達成する。	
					<p>【26年度最終目標】</p> 4接合セル構造にて非集光時効率38%を達成し、集光時効率48%を達成する。逆積み3接合セルを用いたモジュールで変換効率35%を達成する。	

				う。	率48%を達成する。逆積み3 接合セルを用いたモジュール で変換効率35%を達成す る。
5	23 ～ 24	量子井戸ミ ドルセル	東京大学	量子井戸を挿入してGeへの格子 整合と長波長化を両立する ミドルセルを、高スループ ットのMOVPEにより作製する。P による歪み補償を活用し、 InGaAsあるいはInAsの積層量 子構造を挿入した1.0 eV帯セ ルの成長技術を確認する。	【24年度中間目標】 GaAs基板上量子井戸挿入単 接合セルで非集光時変換効 率20%を得る。項目4、8と連 携して、3接合セルのGaAsミ ドルセルにInGaAs/GaAsP量 子井戸を挿入し、トップセ ル(1.7eV)配置下で短絡電 流16mA/cm <sup>2</sup> (1sun)を達成 する。  【26年度最終目標】 InGaAs/GaAsP量子井戸挿入3 接合セルの開発において、 項目4、8と連携して、変換 効率36%(1sun)、45% (1,000suns)を達成する。
6	23 ～ 24	GaInNAs ミ ドルセル (CBE)	豊田工業 大学	GaAsN材料中のN起因欠陥の解 明、およびCBE成膜中の表面 反応制御によるGaAsN材料の 高品質化をさらに進める。 GaInNAs材料の高品質化の研 究を進める。	【24年度中間目標】 GaInNAs単接合太陽電池にお いて、非集光時変換効率 15%、集光時変換効率18%を 達成する。  【26年度最終目標】 AlInGaP/InGaAs/GaInNAs (1eV) / (Geまたは InGaAs) 4接合セルにおい て、非集光時変換効率38%、 1,000倍集光時変換効率48% を達成する。
7	23 ～ 24	窒素系結晶 成長の理論 解析	豊田工業 大学 (再委託：九州 大学)	原子レベルでの表面反応プロ セスの寄与の検討およびH、C などの不純物取り込み挙動を 明らかにする。不純物の混入 を抑制する成長条件を考察・ 提案し、材料の更なる高品質 化を行う。	【24年度中間目標】 GaInNAs単接合太陽電池にお いて、非集光時変換効率 15%、集光時変換効率18%を 達成する。  【26年度最終目標】 AlInGaP/InGaAs/GaInNAs (1eV) / (Geまたは InGaAs) 4接合セルにおい て、非集光時変換効率38%、 1,000倍集光時変換効率48% を達成する。
8	23 ～ 24	GaInNAs ミ ドルセル (水素 MBE、 MOVPE、量 子ドット添 加)	東京大学	1eV帯のサブセル材料として、 GaInNAs:Sb 薄膜結晶を 原子状水素援用分子線エピタ キシー法(水素MBE法)によ り開発する。MOVPE法により GaAs及びGe基板上GaInNAs薄 膜結晶の長波長化及び高品質 化を図る。3接合タンデムセ ルのミドルセルに積層量子 ドット構造を添加した高効率 セル化技術の開発を行う。	【24年度中間目標】 単接合セルで変換効率15% (1sun)を達成する。また GaAsミドルセル配置下で短 絡電流14mA/cm <sup>2</sup> (1sun) を達成する。4接合セルの第3・ 4セルにあたる GaInNAs:Sb/Ge 2接合セルに おいて、短絡電流7mA/cm <sup>2</sup> (1sun)を実現する。3接合 セルのGaAsミドルセルに InAs/GaNAs系積層量子ド ットを挿入し、トップセル (1.7eV)配置下で短絡電 流16mA/cm <sup>2</sup> (1sun)を達成す

					る。  【26年度最終目標】 GaInNAs結晶薄膜を第3セルとした4接合セルの開発において、変換効率39%（1sun）、48%（1,000suns）を達成する。量子ドット添加3接合セルの開発において、変換効率36%（1sun）、45%（1,000suns）を達成する。	
9	23 ～ 24	広帯域AlInGaN結晶を用いた多接合太陽電池	名古屋大学 (共同実施：名城大学)	サファイア及びGaN基板に加えて、Si基板上またはZnO基板上的GaInN結晶成長技術を開発する。	【24年度中間目標】 単接合変換効率10%以上、多接合変換効率20%以上を達成する。  【26年度最終目標】 単接合変換効率20%以上、多接合変換効率30%以上を達成する。	
10	23 ～ 24	InGaN多接合セル新プロセス	東京大学	ドーピング制御された高品質・高In濃度InGaNを得ることを目的として、低温PSD成長法によるInGaNの相分離抑制技術の開発、及び、InGaN薄膜へのドーピング技術、及び、高品質ヘテロ構造作製技術を開発し、InGaN多接合セル実現の為の基礎技術としてバンドギャップ2eV以下のInGaN単接合太陽電池を作製する。	【24年度中間目標】 InGaNを用いた電界制御型太陽電池構造を提案し、その有効性をスパッタ法による素子作成で実証する。また、スパッタ法を用いてIn組成0.3でキャリア移動度200 cm <sup>2</sup> /V・s以上のInGaNを作製する。  【26年度最終目標】 スパッタ法でバンドギャップ2eV以下のInGaN単接合セルを製作し変換効率7%を達成する。	
11	23 ～ 24	ナローギャップボトムセル(CuTe)	兵庫県立大学	新型低温熔融印刷型半導体Cu <sub>2</sub> Teに熱耐久バッファ層を適用し、高効率印刷太陽電池の作製を行い、さらにドーピングを行うことで0.6-0.7eVのバンドギャップを持つ材料の作製を行う。0.6-0.7eVのナローバンドギャップ半導体窒化物を非真空法で作製する。	【24年度中間目標】 非真空プロセスでのCu <sub>2</sub> Te又は新型窒化物太陽電池により、短絡光電流7mA/cm <sup>2</sup> を達成する。  【26年度最終目標】 非真空プロセスでのCu <sub>2</sub> Te又は新型窒化物太陽電池により、短絡光電流14mA/cm <sup>2</sup> を達成する。	
12	23 ～ 24	近赤外光吸収材と吸収増強材料を組み合わせた3接合用ボトムセル構築	東京大学	無機ホール輸送材料の組成ならびに結晶性などを最適化し、キャリア移動度を向上させる。ナローギャップ材料としては、1,400nm級の波長領域での吸収が可能な近赤外吸収材料（量子ドット、顔料等）の合成を行う。	【24年度中間目標】 3接合太陽電池のボトムセルを想定し、近赤外領域のみで非集光時に、Isc=12mA/cm <sup>2</sup> を得る。変換効率4%を達成する。  【26年度最終目標】 3接合セル、非集光下で変換効率30%を達成する。	
①-3量子ドットマルチバンドセル						
13	23 ～ 24	量子ドット超格子セル	東京大学	pn接合構造中に最適構造のミニバンドを1つ追加した量子ナノ構造（中間バンド型）太陽電池（集光時の変換効率の	【24年度中間目標】 量子ドットの微小化、また面内密度として10 <sup>11</sup> /cm <sup>2</sup> を有する50層積層量子ドット超	

				最高の理論値60%)を実現する素子構造として、高密度、高均一で3次的に周期配列した量子ドット超格子(ドット結晶)を開発する。	格子セルの開発を行い、変換効率25%(低倍集光時)を達成する。光閉じ込め構造を作り込み、量子ドット超格子セルの効率向上に定量的に反映されることを実証する。  【26年度最終目標】 量子ドット超格子(中間バンド)セルの製造技術確立し、光閉じ込め構造を取り入れたセルにおいて、変換効率27%(非集光)、40%(1,000倍集光)を達成する。	
14	23 ～ 24	超高密度量子ドットセル	電気通信大学	分子線エピタキシー(MBE)による面内高密度InAs量子ドットの自己形成技術を開発し、面内高密度量子ドットにおける中間バンドの形成について検証する。また歪み補償層を導入した積層成長を開発し、面内高密度量子ドット層の多重近接積層法を確立する。	【24年度中間目標】 面内密度 $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 以上を達成する。面内高密度量子ドットの5層積層構造を作製する。非集光時変換効率15%を達成する。  【26年度最終目標】 量子ドットマルチバンドセルを作製し、変換効率27%(1sun)、40%(1,000suns)を達成する。	
①-4光マネジメントに資する微細加工技術開発						
15	23 ～ 24	マイクロ集積集光セル開発	東京大学	InGaP/InGaAs等の多接合セルに微細構造を施し、小面積セルを単一基板上に集積直列接続することにより高集光下でも直列抵抗の寄与を減じた高効率セルを作製する。さらにマイクロ集光システムとハイブリッド集積させたマイクロセルアレイを開発する。	【24年度中間目標】 多接合セルの微細加工により、電極などの表面被覆率を20%以下に抑えつつ、マイクロセルの10直列動作を達成する。  【26年度最終目標】 多接合集積直列セルの集光下動作により、モジュール変換効率35%を達成する。	
16	23 ～ 24	光閉じ込め微細構造の開発	東京大学	量子ドット等ナノ構造による長波長領域の光吸収増大を達成してマルチバンドセル実現および効率向上に資する為、表面傾斜屈折率構造、裏面乱反射構造を光学理論に基づいて設計し、微細加工技術を駆使した試作により、その効果を実証する。さらに、ミクロンスケールの凹凸構造を有するpn接合により光の面内伝搬モードを利用した光閉じ込めを検討する。このために、III-V半導体の選択成長、低損傷の中性粒子ビームエッチング、高段差被覆性の製膜技術など、新たな微細加工技術を開発する。	【24年度中間目標】 セル表面・裏面の微細加工により、量子ナノ構造層の吸収を3倍に増加させ、短絡電流の増大を実証する。  【26年度最終目標】 量子マルチバンドセルに光マネジメント技術を適用し、量子ナノ構造層における吸収量を10倍に増加させる。これにより、変換効率27%(非集光)、40%(1,000倍集光)の達成に資する。	
17	23 ～ 24	表面修飾技術開発(ナノ構造修飾)	JX日鉱日石エネルギー(株)	セル表面に修飾構造を形成した際の光の伝播挙動と、セル内部の光吸収挙動をシミュレーションし、太陽電池性能	【24年度中間目標】 量子マルチバンドセルに修飾構造を付与することで、900～1,300nmの領域の光の	

			<p>を予測するシミュレーターの開発を行うとともに、900～1,300nmの波長域で光路長を増大できる修飾構造を設計する。表面凹凸構造を有する量子構造セルに修飾構造を組み込む為に、塗布法や自己組織化法などのナノ構造を作製する手法を検討する。</p>	<p>吸収量が3倍に増加することを示し、短絡電流の増大を実証する。</p> <p><b>【26年度最終目標】</b> 量子マルチバンドセルに光マネジメント構造を適用することで、量子ナノ構造層における吸収量を10倍に増加させる。</p>	
--	--	--	--	---	--

表.7 研究開発項目別開発内容、目標①（平成25～26年度）

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
①-1 格子不整合多接合太陽電池						
1	25～26	多接合セル・モジュール開発（格子不整合系）	シャープ（株）	格子不整合3接合 ・直列抵抗低減による集光倍率向上、短絡電流の向上 ・4 <sup>rd</sup> ウェハプロセス（エピ成長およびセル化）の確立 ・国内外高日射地域（アリゾナ、宮崎）での集光モジュール・システム実証試験 格子不整合4接合 ・逆積み4接合セル開発 ・メカニカルスタック型4接合セル開発	【26年度最終目標】 4接合セル構造にて非集光時効率39%を達成し、集光時効率48%を達成する。逆積み3接合セルを用いたモジュールで変換効率35%を達成する。逆積み3接合セルを用いた集光モジュールの屋外評価データを解析し、逆積み3接合セルを搭載した集光システムで、モジュール原価75円/W（100MW/年生産を想定）の実現性を確認する。	
2	25～26	多接合太陽電池評価解析	豊田工業大学	シャープ社との連携を強化し、転位挙動の解析に基づく転位密度低減を検討し、バッファ層構造を最適化する。	【26年度最終目標】 シャープ（株）と協力して、3ないし4接合セルの高効率化に寄与し、3接合セルで集光時変換効率45%、4接合セルで集光時変換効率48%を達成する。	
3	25～26	多接合太陽電池集光動作解析	豊田工業大学 （再委託：宮崎大学）	シミュレータを使った解析と、豊田工大における集光動作特性の実験結果を相互にフィードバックして、集光動作特性の理解を基に、デバイス設計の最適化を進める。集光型太陽電池のセル温度上昇についての解析をさらに進め、高集光倍率において温度上昇の少ない構造を検討する。	【26年度最終目標】 シャープ（株）と協力して、3ないし4接合セルの高効率化に寄与し、3接合セルで集光時変換効率45%、4接合セルで集光時変換効率48%を達成する。	
4	25～26	III-V系オン・シリコン構造	豊田工業大学 （再委託：宮崎大学）	低コスト化技術として、宮崎大、シャープ社、東大と連携してIII-V on シリコン・セルを検討する。 新規バッファ層構造の検討、およびマスクを用いた選択成長により高品質GaAs薄膜のSi上への成膜を試みる。	【26年度最終目標】 III-V系オン・シリコン構造において、III-V層の貫通転位密度 $10^6/\text{cm}^2$ 以下を実現する。	
①-2 格子整合/メカニカルスタック多接合太陽電池						
5	25～26	多接合セル開発（格子整合系新材料・ナノ構造）	シャープ（株）	InGaPトップセル/GaAs2番目セル（当社作製）とInGaAsN3番目セル/Geボトムセル（他グループ作製）をスタック化した4接合構造、量子ドットナノ構造を3番目セルに取り入れた4接合構造等の検討を行う。	【26年度最終目標】 4接合セル構造にて非集光時効率39%を達成し、集光時効率48%を達成する。	
6	25～26	量子井戸ミドルセル	東京大学	量子井戸を挿入してGeへの格子整合と長波長化を両立するミドルセルを、高スループットのMOVPEにより作製する。 InGaAs/GaAsP歪み補償量子井戸を、格子整合3接合セルのミドルセルに実装する。	【26年度最終目標】 InGaAs/GaAsP量子井戸挿入3接合セルの開発において、シャープと連携して、変換効率36%（1sun）、45%（1,000suns）を達成する。	
7	25～	GaInNAs ミドルセル	東京大学	1eV帯のサブセル材料として、GaInNAs:Sb 薄膜結晶を	【26年度最終目標】 GaInNAs結晶薄膜を第3セル	

	26	(水素 MBE)		原子状水素援用分子線エピタキシー法(水素MBE法)により開発する。シャープと連携して、ウエハシャトルによる格子整合系4接合セルの開発を行う。そのために必要な4接合セルの第3・4セルにあたるGaInNAs:Sb/Ge 2接合セルにおいて、短絡電流14mA/cm <sup>2</sup> を達成する。	とした4接合セルの開発において、変換効率38%(1sun)、48%(1,000suns)を達成する。	
8	25 ～ 26	GaInNAs ミドルセル (CBE)	豊田工業大学	InGaAsN材料の欠陥解析、および九州大学と連携した成膜シミュレーションを基に、高品質成膜技術の開発を進める。セル構造とセル作製プロセスを最適化し、InGaAsN単接合セルの高効率化をはかると共に、シャープ社と相互に協力して、4接合セルの高効率化を実現する。	【26年度最終目標】 GaInNAs結晶薄膜を第3セルとした4接合セルの開発において、変換効率38%(1sun)、48%(1,000suns)を達成する。	
9	25 ～ 26	窒素系結晶成長の理論解析	豊田工業大学 (再委託：九州大学)	成膜シミュレータを用いて不純物取り込み挙動・欠陥生成機構を解析し、実験にフィードバックする。豊田工大との連携を強化し、高品質薄膜作製技術の開発を行う。薄膜の高品質化・低欠陥化により左記変換効率の達成に寄与する。	【26年度最終目標】 GaInNAs結晶薄膜を第3セルとした4接合セルの開発において、変換効率38%(1sun)、48%(1,000suns)を達成する。	
10	25 ～ 26	AlInGaN トップセル (MOVPE)	名古屋大学 (共同実施：名城大学)	n-AlInP/p-InGaN接合形成。スパッタ/ALE/MOVPE併用による p-InxGa1-xN/In0.45Ga0.55N/n-InyGa1-yN DH構造形成。	【26年度最終目標】 AlInP/GaAs/Geに対して+3%以上、または多接合40%以上@1sunの確認	
11	25 ～ 26	InGaN トップセル (PSD)	東京大学	PSD法によるInGaN系太陽電池の結晶成長 PSD法による分極制御InGaN太陽電池の結晶成長	【26年度最終目標】 AlInP/GaAs/Geに対して+3%以上、または多接合40%以上@1sunの確認	
12	25 ～ 26	ナローギャップボトムセル	兵庫県立大学	1000sunで変換効率48%を出力する4接合太陽電池を作製し得る技術となる事を目標とし、AgInTe <sub>2</sub> およびCu <sub>2</sub> Teについて移動度1,000cm <sup>2</sup> /Vs、キャリア寿命10ns(ほぼCdTeの最高値に相当)を有する薄膜をスパッタリングで作製し、1.0eVのミドルセル下で短絡電流14mA/cm <sup>2</sup> 超を達成。	【26年度最終目標】 0.65eV帯のナローバンドギャップ半導体(Cu <sub>2</sub> Te又はAgInTe <sub>2</sub> )セルをスパッタリング製膜法により作製し、メカニカルスタックにより4接合太陽電池を構成することで、1000sunで効率48%を目指す。	
13	25 ～ 26	ハイブリッド材料ボトムセル	東京大学	量子ドット(QD)形状調整：励起子ピーク波長を1.1mm(現状)から1.2mm帯へシフト ・酸化亜鉛ナノロッドの構造制御：厚膜化、欠陥低減、配向性改善 ・プラズモン共鳴領域最適化：QDの低吸収近赤外領域でのプラズモン増強 ・トップ、ミドルセルとの多接合化を加速	【26年度最終目標】 近赤外領域(1eV帯)で、Jsc = 14mA/cm <sup>2</sup> を示す4接合太陽電池用ボトムセルを開発する。同時に、光電変換層の吸収を0.65eVに拡張する。0.65eV(1900nm)帯に吸収を有する量子ドットを用いたボトムセルを用いたメカニカルスタックにより、4接合太陽電池を構築し、変換効率48%(1,000suns)を達成	



					する.	
①-3量子ドット超格子太陽電池						
14	25 ～ 26	量子ドット 超格子セル (セル開 発)	東京大学	(1) 面内密度の増大 ( $10^{11}$ 個/ $\text{cm}^2$ ) (2) 積層構造の最適化 (高ギャップの母材、ドット間距離、50層積層セル) (3) 2段階光吸収レートの増大→量子ドットへのドーピング量の最適化、タイプII超格子によるキャリア寿命増大、集光特性の評価	<b>【26年度最終目標】</b> 超高密度「積層」量子ドットセルを作製し、変換効率27% (×1), 40% (×1,000)を達成する。	
15	25 ～ 26	超高密度量子ドットセル	電気通信大学	面内ドット密度 $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 以上の達成および5層前後の積層成長による超高密度セルの試作。超高密度量子ドットの光学遷移の解明とそのキャリアの長寿命化 (PL decay time 10 ns以上) による高効率化。集光特性の評価解析。	<b>【26年度最終目標】</b> 超高密度「積層」量子ドットセルを作製し、変換効率27% (×1), 40% (×100)を達成する。	
16	25 ～ 26	量子ドット超格子セル (集光モジュール技術開発)	東京大学・シャープ(株)	・裏面および表面テクスチャによる多重反射構造を用いた量子ドットセルの作製 ・長波長 ( $2 \mu\text{m}$ 帯) に吸収を持つ光多重反射構造の開発	<b>【26年度最終目標】</b> 超高密度「積層」量子ドットセルを作製し、変換効率27% (×1), 40% (×1,000)を達成する。	

## ②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

本テーマでは、40%を超える高効率のために最適な複数のバンドギャップを有する高度秩序薄膜材料を新たに設計・創製する。それら新材料をシリコン系 3 接合および化合物系 4 接合デバイスに適用し、波長選択型導電層を介して 2 端子メカニカルスタック太陽電池を形成する。また光マネジメント技術、多重エキシトン生成、二光子利用技術などの新原理検証についても検討を行う。開発された新材料は最終的に最適なものを選択して相互に利用する。

本テーマ全体目標としては、以下とする。

### 平成 22 年度中間目標

シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セル材料の開発並びにデバイス化により多接合太陽電池で変換効率 20%を達成する。新概念太陽電池については動作原理を検証する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて変換効率 20%に資する。

### 平成 24 年度中間目標

ボトムセルおよびトップセルの要素材料の開発並びにデバイス化を行う。また高度光利用技術、スマートスタック技術を開発し、多接合太陽電池で変換効率 20%を達成する。

### 平成 26 年度最終目標

ボトムセルおよびトップセルについて要素セルの高度化ならびに高度光利用技術の組み合わせにより多接合太陽電池（非集光）で変換効率 30%を達成する。またこれをコスト 50 円/W で可能とする技術を開発する。

表 8. 研究開発項目別開発内容、目標② (平成 20～22 年度)

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
②-1シリコン系3接合太陽電池の開発						
1	20～22	高配向性平面ポリシラン材料の開発	産業技術総合研究所	平面ポリシラン薄膜を用いて高効率多接合太陽電池に適したシリコン系トップセルを開発する。この開発のために、バンドギャップ1.8eV以上の平面ポリシランの薄膜作製技術開発と物質・薄膜・デバイス特性の実証を行う。	<p>【22年度中間目標】</p> バンドギャップ1.8eV以上の平面ポリシラン薄膜を用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。 <p>【26年度最終目標】</p> バンドギャップ1.8eV以上の平面ポリシラン薄膜を用いた単接合太陽電池で変換効率12.5%を達成する。	
2	20～22	配列制御ナノ結晶シリコン材料の開発	東京農工大学	量子サイズナノ結晶シリコンにおけるバンドエンジニアリングとヘテロ接合界面の欠陥低減と電気的特性向上という当グループが蓄積してきた二つの知見を発展させ、太陽電池の革新に不可欠なバンドギャップ制御に取り組み、最適ワイドバンドギャップトップセル用材料形成のための要素技術開発と実証を行う。	<p>【22年度中間目標】</p> バンドギャップ1.8eV以上の単接合nc-Si太陽電池で変換効率10%を達成する。その際の特性値としては、FF=0.8、Voc=0.7 V、Isc=18 mAを目標とする。 <p>【26年度最終目標】</p> バンドギャップ1.8eV以上の単接合nc-Si太陽電池で変換効率12.5%を達成する。	
3	20～22	結晶系ナローギャップ材料太陽電池の開発	産業技術総合研究所	高効率多接合太陽電池に用いるシリコン系ボトムセルの高効率化を目指して、高品質結晶系ナローギャップ材料の開発、精密制御ヘテロ接合の開発を行い、太陽電池試作を通じて開発した技術を実証する。	<p>【22年度中間目標】</p> バンドギャップ0.9eVのシリコンゲルマニウムを用いた太陽電池で変換効率8%を達成する。その要素技術として、シリコンゲルマニウムの少数キャリア寿命100 $\mu$ s、ヘテロ界面再結合速度1000cm/sを目標とする。 <p>【26年度最終目標】</p> バンドギャップ0.9eVのシリコンゲルマニウムを用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。	
4	20～22	シリコン-ゲルマニウム-スズ低温エピタキシャル新技術の開発	産業技術総合研究所	シリコン-ゲルマニウム-スズを用いた高効率多接合太陽電池に適したシリコン系ボトムセルの開発を目的として、シリコン-ゲルマニウム-スズ系擬単結晶作製技術開発とそれを用いた太陽電池作製によるデバイス実証を行う。	<p>【22年度中間目標】</p> バンドギャップ0.9eVのSiSn系混晶薄膜を用いた太陽電池で変換効率8%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ0.9eVのSiSn系混晶薄膜で直接遷移を確認し、欠陥密度10 <sup>16</sup> /cm <sup>3</sup> を目標とする。 <p>【26年度最終目標】</p> バンドギャップ0.9eVのSiSn系混晶薄膜を用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ0.9eVのSiSn系混晶薄膜で直接遷移を確認し、欠陥密度10 <sup>15</sup> /cm <sup>3</sup> を目標とする。	

5	20 ～ 22	ガラス基板 上のシリコ ン・ゲルマ ニウム等単 結晶シード 層形成技術	コーニン グホール ディング ジャパン 合同会社	透明なガラス基板のシリ コン等の単結晶薄膜を基板と して用い、当該シリコン等単結 晶薄膜上にエピタキシャルに よる単結晶成長を行う事によ り、低欠陥のシリコン・ゲル マニウム等の狭バンドギャ ップ単結晶シード層薄膜を開 発する。本項目では、ガラス 上単結晶シリコン等薄膜を、 太陽電池用に適した膜厚まで 成長させるエピタキシャル技 術と、成長に適した基板の要 件を探索する。	【22年度中間目標】 シリコン・ゲルマニウム等 単結晶薄膜を単結晶シード 層としたバンドギャップ 0.9eVの単接合太陽電池で 変換効率8%を達成する。そ の要素技術として単結晶薄 膜の転位密度として $10^8/cm^2$ を目標とする。  【26年度最終目標】 シリコン・ゲルマニウム等 単結晶薄膜を単結晶シード 層としたバンドギャップ 0.9eVの単接合太陽電池で 変換効率10%を達成する。そ の要素技術として単結晶薄 膜の転位密度として $10^7/cm^2$ を目標とする。	
6	20 ～ 22	ゲルマニ ウム系単結 晶エピ成長 技術の開発	東京工業 大学	変換効率40%を目指すSi系3接 合薄膜太陽電池の開発に資す るボトムセル用ナローギャ ップ太陽電池材料として、Si基 板上へのGeの低温エピタキ シャル成長技術の開発とそれ を用いたナローギャップヘテ ロ接合太陽電池技術の実証を 行う。	【22年度中間目標】 SiとGe単結晶薄膜のヘテロ 接合を用いたボトム用単接 合太陽電池で変換効率8%を 達成する。その要素技術と してGe単結晶薄膜のキャ リア拡散長としてGeエピタ キシャル膜のウェハレベル での膜厚と同程度（キャ リア寿命 $10\mu s$ ）を目標とする。  【26年度最終目標】 ガラス基板上に形成した単 結晶Si基板上に単結晶Ge薄 膜を活性層として作製した ボトムセル用ヘテロ接合型 太陽電池で変換効率10%を 達成する。	
7	20 ～ 22	フッ素系イ オン制御プ ラズマプロ セスの開発	東北大学	HIT太陽電池におけるアモル ファスパッシベーション時の ダメージ等に代表される欠陥 生成によるデバイス劣化を抑制 するため、気相および表面 において荷電粒子の物理的衝 撃および紫外線照射を抑制で きるビーム技術を使用して、 気相反応および表面反応の高 精度制御が実現できる薄膜成 長技術を検討する。フッ素中 性粒子ビーム、フッ素負イ オンビームあるいは水素中性粒 子ビーム、水素負イオンビ ームを用いてシラン系ガス ( $SiH_4$ 、 $SiF_4$ ) およびゲル マン系ガス ( $GeH_4$ 、 $GeF_4$ ) と の気相反応および表面反応を 制御することにより、プラズ マ気相成長法に比べ低温で欠 陥や不純物の少ない結晶質ゲ ルマニウム系薄膜成長の可能 性実証を行う。	【22年度中間目標】 産業技術総合研究所と協 力してバンドギャップ0.9eV のGeあるいはSi/Geによる 単接合太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素 技術として成長温度 $400^\circ C$ 以下でバンドギャップ0.9eV の結晶質ゲルマニウム系薄 膜で欠陥密度（ダングリン グボンド密度）を $10^{16}/cm^3$ 台とすることを目標とする。  【26年度最終目標】 産業技術総合研究所と協 力してバンドギャップ0.9eV のGeあるいはSi/Geによる 単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素 技術として成長温度 $400^\circ C$ 以下でバンドギャップ0.9eV の結晶質ゲルマニウム系薄 膜で欠陥密度（ダングリン グボンド密度）を $5 \times 10^{16} /cm^3$ 以下とすることを目標とする。	

8	20 ～ 22	擬単結晶固相成長技術の開発	東海大学	シリコン系ナローギャップ材料の開発として、金属誘起結晶化によるゲルマニウム及び高ゲルマニウム組成シリコンゲルマニウムの大粒化を目指し、結晶構造、電気的特性の最適化を検討する。得られた大粒径薄膜をシード層とし、擬単結晶光活性層を形成する。これにより高効率多接合太陽電池に適したボトムセルを開発する。	<p>【22年度中間目標】</p> <p>バンドギャップ0.9eVの擬単結晶ゲルマニウム等を用いた太陽電池で変換効率8%を達成する。その要素技術として、波長1,000nmで30%以上の分光感度を目標とする。</p> <p>【26年度最終目標】</p> <p>バンドギャップ0.9eVの擬単結晶ゲルマニウム等を用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。その要素技術として、波長1,000nmで50%以上の分光感度を目標とする。</p>	
9	20 ～ 22	ヘテロ接合デバイス化技術の開発	産業技術総合研究所  三菱重工業(株)  京セラ(株)	単接合トップセル、単接合ミドルセルならびに単接合ボトムセルを組み合わせることで、メカニカルスタックシリコン系3接合太陽電池を実現する。このための要素技術として、単結晶あるいは擬単結晶シリコン-ゲルマニウム-スズ薄膜を用いたナローギャップセルの温度係数を改善し、高温でも発電効率の低下を防ぐヘテロ接合を有する太陽電池デバイスを開発する。なお、シリコン系材料のみならず、化合物系材料も視野に入れ、トップセル、ミドルセル、ボトムセルそれぞれに最適な材料を選択する。さらに、3接合太陽電池の作製には、他チームで開発するメカニカルスタック技術を取り入れる。また、高度光閉じ込め技術も取り入れることにより、高効率化を図る。	<p>【22年度中間目標】</p> <p>バンドギャップ0.9eVのシリコン-ゲルマニウム、シリコン-ゲルマニウム-スズなどを用いたヘテロ接合太陽電池で、変換効率8%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】</p> <p>ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ0.9eVの単接合太陽電池で変換効率10%を達成する。</p>	
②-2化合物系4接合薄膜太陽電池の開発						
10	20 ～ 22	ワイドギャップカルコゲナイド系太陽電池の開発	産業技術総合研究所	Cu(In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> )(S <sub>y</sub> Se <sub>1-y</sub> ) <sub>2</sub> 系材料(CIGSSe)を用いて高効率多接合太陽電池に適した化合物系トップセルを開発する。	<p>【22年度中間目標】</p> <p>バンドギャップ1.7eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率9%を達成する。その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命1ns以上、開放電圧0.9V以上、近赤外から吸収端近傍の波長での内部量子効率90%以上を得ることを目標とする。</p> <p>【26年度最終目標】</p> <p>バンドギャップ1.8eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率12%を達成する。</p>	
11	20 ～ 22	構造制御ワイドバンドギャップ化合物太陽電池の開発	パナソニック電工(株)	化合物系ワイドギャップ材料を用いたトップセルの高効率化を目的として、光吸収層のバンドギャップ分布制御、窓層-光吸収層の界面制御、裏	<p>【22年度中間目標】</p> <p>バンドギャップ1.7eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率9%を達成する。その要素技術として、硫化物系</p>	

				面コンタクト制御、光吸収制御等の構造制御の要素技術開発を行い、高効率化技術を実証する。	薄膜のキャリア寿命1ns以上、開放電圧0.9V以上、近赤外から吸収端近傍の波長での内部量子効率90%以上を得ることを目標とする。  【26年度最終目標】 バンドギャップ1.8eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率12%を達成する。
12	20 ～ 22	革新的ワイドギャップ材料太陽電池の開発	産業技術総合研究所	超高効率多接合太陽電池の開発においては、ワイドギャップ材料である第1セルの高効率化が重要である。ワイドギャップ材料として有望なInGaP系等のエピタキシャル薄膜成長技術を開発し、高効率多接合太陽電池に適したトップセルを開発する。特にこれまでに報告例の無いIn <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> P/GaP量子ナノ構造太陽電池を開発し、その動作実証を行う。また、本拠点で既に確立している高度なGaAs/(In)GaAs量子ドット作製技術を用いて、量子ドット太陽電池の吸収波長帯を長波長帯に大幅に拡大するとともに、ドット中のサブバンド間エネルギーを制御し中間バンドの設計技術を高度化することにより、太陽電池の高効率化を目指す。	【22年度中間目標】 バンドギャップ1.8eV以上系太陽電池での変換効率9%を達成する。その要素技術として、ワイドギャップ材料において少数キャリア寿命1ns以上、拡散長0.3μm以上。1.9eV以上（波長650nm以下）で光吸収を持つ（量子効率3%以上）GaP基板上In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> P量子ドット太陽電池の作製。 10層以上のInAs量子ドット超格子を形成し、顕微PL測定により、中間バンド形成が出来ていることを確認する。In(Ga)As系量子ドット太陽電池において波長1,100nmで量子効率で10%以上を達成する。  【26年度最終目標】 InGaP/GaP量子ドットを用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。 InAs、InGaAs系量子ドットを用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。
13	20 ～ 22	酸窒化物系ワイドギャップ材料の開発	物質・材料研究機構	化合物系半導体をベースにした4接合型太陽電池を用いてタンデム型太陽電池の高性能化を図ることを目的として、トップセルとして酸窒化物系ワイドギャップ材料のバンドギャップ制御および価電子帯制御に関する要素技術開発とトップセルとしての太陽電池特性を向上させる技術の実証を行う。	【22年度中間目標】 バンドギャップ2.8eV程度のInGaNを用いた太陽電池において変換効率5%を達成する。そのための要素技術として2.8eV程度のInGaNで、1nsのライフタイム、InGaNをp型化し、キャリア濃度1x10 <sup>18</sup> /cm <sup>3</sup>  【26年度最終目標】 バンドギャップ2.5eV程度のInGaNを用いた太陽電池において変換効率12%を達成する。そのための要素技術として2.5eV程度のInGaNで5nsのライフタイムを目標とする。
14	20 ～ 22	酸化物ワイドギャップ材料の開発A	東京工業大学	バンドギャップが～2eVの酸化物半導体を新たに探索し、これを用いた高エネルギー領域の太陽光に対応する太陽電池の開発を目的とし、酸化物半導体の探索とその欠陥密度	【22年度中間目標】 高品位ワイドギャップ酸化物半導体を用いたバンドギャップ～2eVの太陽電池で変換効率5%を達成する。その要素技術として、結晶シ

				の制御技術の開発と酸化物を用いた太陽電池作製技術の実証を行う。	リコンよりもイオン化ポテンシャルが0.5eV以上大きいバンドギャップが~2eVのp型酸化物半導体で裾状態密度 $10^{19}/\text{cm}^3$ 以下を目標とする。  【26年度最終目標】 ワイドギャップ酸化物半導体を用いた太陽電池で、変換効率12%を達成する。	
15	20 ～ 22	酸化物ワイドギャップ材料の開発B	豊橋技術科学大学	光吸収層用高品質ワイドバンドギャップ酸化物材料ならびに多接合型太陽電池トップセルを開発することを目的として、 $\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O}$ 系ならびに $\text{Cu}^{1+}\text{-Ag}^{1+}\text{-O}$ 系光吸収層用高品質酸化物材料の電気化学的形成技術、 $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^{1+}$ ならびに $\text{Cu}/\text{Ag}$ 比制御によるバンドギャップ制御技術などの要素技術を開発すると共に、多接合型太陽電池トップセルに好適なバンドギャップ1.7-1.8eV程度の $\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O}$ ならびに $\text{Cu-Ag-O}$ 層を用いた単接合太陽電池を形成し、ワイドバンドギャップ酸化物材料、バンドギャップ制御技術ならびに高品質化技術の実証を行う。	【22年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率5%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ1.7-1.8eVの $\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O} \cdot \text{Cu-Ag-O}$ 単一配向膜を実現し、これを用いて0.8Vの開放電圧を目標とする。  【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eV以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率12%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ1.7-1.8eVの $\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O} \cdot \text{Cu-Ag-O}$ 単一配向膜にて移動度 $100\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}^1$ を目標とする。	
16	20 ～ 22	化合物系タンデムセルの開発	産業技術総合研究所	メカニカルスタック型及びモノリシック型の化合物系多接合太陽電池の作製技術を開発し、太陽電池の高性能化を図ることで、全体目標の達成を目指す。	【22年度中間目標】 化合物多接合太陽電池で変換効率20%を達成。Ge基板上でバンドギャップ1.0-1.4eVのCIGS系太陽電池により変換効率13%を達成。  【26年度最終目標】 化合物多接合太陽電池で変換効率25%を達成。	
②-3新概念新材料の検討						
17	20 ～ 22	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討A	産業技術総合研究所	ナノシリコン結晶と高分子の混合物を用いた太陽電池で多重励起子の生成による超高効率太陽電池の作製を目的として、ナノシリコン/ナノカーボン複合材料における多重励起子生成の原理検証と本材料を用いた新概念太陽電池開発によるデバイス実証を行う。	【22年度中間目標】 閾値エネルギー $2.5E_g$ ( $E_g$ はバンドギャップエネルギー)以上で多重励起子生成を実現する。 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して励起子生成の量子収率150%以上を達成する。 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して入射光強度の $n$ 乗 ( $n \geq 1.2$ )の依存性を有する光電流を実現する。  【26年度最終目標】 Siナノ微結晶/高分子構造等を用いた単接合太陽電池において変換効率10%を達成する。	
18	20 ～ 22	ナノシリコン/ナノカーボンを用い	産業技術総合研究所	半導体単層カーボンナノチューブ(CNT)を活用することにより、従来にない優れ	【22年度中間目標】 半導体CNTの純度を90%以上まで向上させる。CNTのバン	

		た新概念太陽電池の検討B		た特性を有する高効率太陽電池の実現を目指す。具体的には、半導体単層CNTの特異な形状・構造・光・電子特性を利用して広い波長範囲で光電変換機能を実現する。更に、半導体単層CNTを用いた太陽電池で多重励起子の生成を検証し、将来の超高効率太陽電池に寄与が可能であるか検討する。	ドギャップを遠赤外域の0.2-1.3eVの範囲で制御し、0.1-0.5Vの開放電圧を達成する。バルクヘテロ接合CNT太陽電池の量子効率の最大値を50%以上とする。エネルギー $>3E_g$ 、強度 $<1\text{mJ}/\text{cm}^2$ の光入射において、1光子の吸収において2個以上の電子-正孔対の生成を確認する。  【26年度最終目標】 CNTを用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。	
19	20～22	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討C	九州大学	ナノ結晶シリコン中でバンドギャップの2倍以上の光子エネルギーの光子1個で2個以上の多重励起子を生成できることを利用して、シリコン中で生じる多重励起子生成を利用した太陽電池の開発を目的として、励起子を高効率に電子と正孔に分離し電流として外部に取り出すために、マイクロpin接合シリコン材料を作製し、これを用いて多重励起子生成と光電流の取り出しが可能であることを実証する。そして、多重励起子生成を利用した太陽電池を開発する。	【22年度中間目標】 閾値エネルギー $2.5E_g$ ( $E_g$ はバンドギャップエネルギー)以上で多重励起子生成を実現する。 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して励起子生成の量子収率150%以上を達成する。 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して入射光強度の $n$ 乗 ( $n \geq 1.2$ )の依存性を有する光電流を実現する。  【26年度最終目標】 多重励起子太陽電池で変換効率10%を達成する。その要素技術として、 $h\nu \geq 3.5E_g$ の光に対して光電流量子収率100%以上を目標とする。	
20	20～22	ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討D	東北大学	アルカリ-フラーレン、アルカリ-ハロゲン等の異種異極性イオンプラズマ中の基板バイアス法によって形成された強固なn型半導体CNT、強固なp型半導体CNT、pn接合内蔵CNT等の進化CNTを利用した新概念太陽電池を検討する。進化CNTの中で強固なn型半導体CNTと強固なp型半導体CNTを各々p-Siとn-Siに薄膜状で密着させてヘテロ界面上にpn接合を形成するヘテロ界面CNT太陽電池および電極間に単独1本のpn接合内蔵CNTのみを架橋させるpn接合内蔵CNT太陽電池を検討する。それぞれにおいて、擬似太陽光及び近赤外領域の光照射下での電圧-電流曲線測定等の特性評価、及びCNTのバンドギャップの3倍以上のエネルギーの光を入射することによる多重励起子生成を利用した太陽電池特性発現の原理実証を行う。高効率化を目的とし、束状進化CNTを一定間隔で2次元、3次元に分散整列した場合の太陽電池を評価する。	【22年度中間目標】 CNTの構造制御により $E_g$ を0.2-1.3 eVの範囲で制御し、 $V_{oc}=0.1-0.5V$ を達成する。エネルギー $>3E_g$ 、強度 $<1\text{mJ}/\text{cm}^2$ の光入射において、ヘテロ界面及びpn接合内蔵CNTを用いた多重励起子生成利用太陽電池の原理を実証する。(1光子吸収2個以上電子-正孔対形成を確認する。)  【26年度最終目標】 pn接合内蔵CNT太陽電池で変換効率10%を達成する。	



21	20 ～ 22	単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討A	産業技術総合研究所	有機半導体単結晶薄膜の形成技術を開発し、有機半導体単結晶を用いた太陽電池が将来の超高効率太陽電池に寄与が可能であるか検討する。これまでの有機半導体を用いた太陽電池はアモルファスやせいぜい微結晶混合状態であり、有機半導体の励起子拡散や電荷輸送において損失が大きく十分な変換効率が得られていないと考えられる。そこで、不純物や欠陥の少ない有機単結晶薄膜でヘテロ接合を形成することで、従来値を覆す高い変換効率の有機太陽電池の創出の可能性を模索する。そのために、まず不純物・欠陥の極めて少ない有機単結晶薄膜を超高真空中で成長させる技術を開発する（単結晶性有機薄膜形成技術）。また、有機単結晶薄膜を太陽電池へ実装するために、有機単結晶薄膜の無機基板へのヘテロ接合の形成技術を開発する（有機/無機ヘテロ接合形成技術の開発）。	<p>【22年度中間目標】 有機/無機ヘテロ接合セルで変換効率1%、<math>V_{oc}=E_g-0.3V</math>を達成する。そのための要素技術として、単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で100nmを目標とする。</p> <p>【26年度最終目標】 単結晶性有機薄膜ヘテロ接合セルで変換効率10%、<math>V_{oc}=E_g-0.1V</math>を達成する。そのための要素技術として、単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で1<math>\mu m</math>を目標とする。</p>	
22	20 ～ 22	単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討B	東京工業大学	薄膜気相成長に溶液プロセスを導入したフラックス気相成長法を新たに用いた太陽電池用有機半導体材料の革新的高品質化プロセスの開発により、励起子拡散長の飛躍的増大、および接合界面での電圧損失の抑制による開放電圧の向上を試み、有機半導体材料が変換効率40%を達成するためのキーマテリアルとなる可能性を検証する。	<p>【22年度中間目標】 有機/無機ヘテロ接合セルで変換効率1%、<math>V_{oc}=E_g-0.3V</math>を達成する。そのための要素技術として、単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で100nmを目標とする。</p> <p>【26年度最終目標】 単結晶性有機薄膜ヘテロ接合セルで変換効率10%、<math>V_{oc}=E_g-0.1V</math>を達成する。そのための要素技術として、単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で1<math>\mu m</math>を目標とする。</p>	
23	20 ～ 22	強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討A	産業技術総合研究所	1eV以下のバンドギャップを有する分子化合物半導体を用いた太陽電池において、低エネルギーフォトンの有効利用と、高エネルギーフォトンによる多重励起子の生成の検証により、将来の超高効率太陽電池に寄与が可能であるか検討することを目的として、飛躍的な効率向上とコスト低減を目指したショットキー接合型/ヘテロ接合型セルの開発と広帯域フォトン有効利用の実証を行う。	<p>【22年度中間目標】 有機強相関ヘテロ接合太陽電池を作製し、1eV以下の低光子エネルギー領域で分光量子効率として5%以上、<math>2eV (&gt;2E_g)</math>以上の光子エネルギー領域において、ポンプ-プローブ分光で定量化したキャリア生成増幅率200%以上を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 有機強相関ヘテロ接合太陽電池で変換効率10%を達成する。</p>	
24	20 ～ 22	強相関材料を用いた新概念太陽電池	理化学研究所	強相関材料の電荷秩序光崩壊による多重励起子生成を利用した太陽電池を開発する。酸	<p>【22年度中間目標】 強相関ヘテロ接合太陽電池を作製し、吸収光子数で規</p>	

		池の検討B		化物系の強相関材料における電荷秩序相が光照射により崩壊して金属相に相転移する現象に着目し、1光子あたり複数個のキャリアが生成する可能性を実証し、接合の内部電界により電子と正孔とに分離する機構について、その原理を理論的に構築するとともに実験的に検証する。また、この原理に好適な材料を設計し、多重キャリア生成を利用した太陽電池を開発する。	格化した外部電流で定義される分光量子効率として5%以上を達成する。ポンププローブ分光でキャリア増幅を確認し、薄膜ヘテロ接合の基礎吸収端光に比した短波長光照射下での量子効率の増幅率として2倍以上を目標とする。  【26年度最終目標】 強相関酸化物ヘテロ接合太陽電池で変換効率10%を達成する。その要素技術として、p,n層の化学ポテンシャル差と開放電圧の関係を明らかにして開放電圧0.5V以上を目標とする。	
25	20 ～ 22	構造制御ナノ材料を用いた太陽電池	産業技術総合研究所	金属ナノ材料とナノ半導体材料を組み合わせ、構造制御した金属ナノ粒子の光学非線形特性に着目した新概念太陽電池を開発することを目的として、高効率太陽電池としての要素技術開発とプラズモン電荷分離技術の実証を行う。	【22年度中間目標】 金属ナノ材料を用いた太陽電池で変換効率1%を達成する。そのための要素技術として、拡散長100nmを目標とする。  【26年度最終目標】 金属ナノ材料を用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。そのための要素技術として、拡散長10 $\mu$ mを目標とする。	
②-4高度光利用技術の開発						
26	20 ～ 22	メカニカルスタック技術の開発A	産業技術総合研究所	異なる太陽電池のメカニカルスタックを目的として、接合技術の開発と接合による2端子型太陽電池の製造技術の開発を行う。	【22年度中間目標】 分光感度の異なる2種類の太陽電池を接合させ、2端子セルとする際に、接着抵抗0.5 $\Omega$ /cm <sup>2</sup> 以下、接着部の透過率90%以上を達成し、メカニカルスタックセルにおいて、電流を律則する要素セルの80%以上の電流密度を得る。  【26年度最終目標】 メカニカルスタック技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率25%を達成する。	
27	20 ～ 22	メカニカルスタック技術の開発B	東京農工大学	高融点無機半導体太陽電池から有機半導体太陽電池まで多種類の材質の太陽電池間の接合を実現するために太陽電池多接合用透明導電接着フィルム(T-ACF)要素技術開発とその実証を行う。	【22年度中間目標】 T-ACFで接着抵抗0.5 $\Omega$ /cm <sup>2</sup> 以下、実効屈折率1.8-2.0、実効消光係数3-5 $\times 10^{-5}$ 、光透過率70%を達成する。  【26年度最終目標】 T-ACFを用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率25%を達成する。	
28	20 ～ 22	高度光閉じ込め技術の開発A	産業技術総合研究所	薄膜多接合太陽電池の高効率化にとって極めて重要な光マネジメント、すなわち各発電	【22年度中間目標】 周期構造を利用したフォトリソニック基板を単接合太陽電	

				層における光吸収の促進、ならびに入射光の各発電層間への効率的な分配を実現することを目的として、多接合太陽電池の最裏面に用いる光散乱基板（フォトニック基板）と、個別の発電層間を繋ぐための波長分別機能を有した中間層（フォトニック導電膜）を開発する。	池に適用し、従来技術に較べて近赤外領域の波長感度を20%向上させる。その要素技術として、半導体中を伝搬する近赤外光の散乱量50%以上を目標とする。多層構造を利用した新規なフォトニック導電膜において、従来の単層中間層に較べて波長分別率を50%向上させる。  【26年度最終目標】 周期構造を利用したフォトニック基板を単接合太陽電池に適用し、従来技術に較べて近赤外領域の波長感度を20%向上させる。	
29	20 ～ 22	高度光閉じ込め技術の開発B	大阪大学	金属ナノ粒子を用いたプラズモン効果を基盤技術として、新規な透明導電層を形成し、テイラーメイドな散乱波長選択性を有する多接合型太陽電池用の高機能透明導電層を開発する。特に、プラズモン活用による光散乱波長選択制御技術検証に注力する。	【22年度中間目標】 プラズモン活用型透明導電層を用いた新規な光閉じ込め構造の作製技術を確立し、単接合薄膜太陽電池において、従来技術に較べて長波長光感度を20%向上させる。ミドル層およびボトム層に必要な波長域において、光散乱波長選択制御が可能であることを実証する。  【26年度最終目標】 新規に開発する光閉じ込め構造により、従来技術に較べて長波長光感度を30%向上させる。	
30	20 ～ 22	高性能透明導電膜の開発	産業技術総合研究所	幅広い波長領域に感度を有する高効率太陽電池に必要な窓電極の開発を目的として、透明導電膜の移動度の支配的要因の明確化と高い透明性と高い導電性を兼ね備えた低エネルギー損失窓電極の材料開発を行う。	【22年度中間目標】 可視・近赤外領域（波長400-1,700nm）で透明な導電性酸化物において抵抗率 $3 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ 以下、波長1,700nmにおける吸収係数 $6.0 \times 10^3 / \text{cm}$ 以下を同時に達成する。200℃以下の低温プロセスで上記酸化物を作製する薄膜形成技術を開発する。  【26年度最終目標】 本技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、変換効率25%を達成する。	
31	20 ～ 22	高性能ガラス基板作製技術を使った高性能透明導電膜の開発	東京工業大学	酸化物表面の原子レベル構造制御技術を使って、ナノスケールで規則的な凹凸を持つナノ秩序表面構造ガラス基板を作製し、その上での均一な透明導電膜の結晶成長によって、25%以上の変換効率を有する薄膜多接合型太陽電池における高性能透明導電膜を開発することを目的として、ナノパターンガラス基板作製お	【22年度中間目標】 ナノパターンガラス基板（1cm角以上）上での透明導電膜において、従来（例えばSnO <sub>2</sub> ）に比して、おおむね2倍の移動度（80-100cm <sup>2</sup> /V・s）および半分の電気抵抗率（ $2 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$ ）を達成する。  【26年度最終目標】	

				よび透明導電性薄膜の高品質結晶成長に関する要素技術開発を行う。	ナノパターンガラス基板（10cm角以上）上で、近赤外域を含む光透過波長域を拡大した、低抵抗・高移動度の高性能透明導電膜を作製する。	
--	--	--	--	---------------------------------	---	--

表9. 研究開発項目別開発内容、目標②（平成23～24年度）

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
②-1メカニカルスタック・デバイス化技術の開発						
1	23～24	メカニカルスタック・デバイス化技術の開発	産業技術総合研究所	透明導電膜同士の接合技術を開発する。また、導電性微粒子を含有し、電気・光学的接合を可能とする樹脂フィルムの製造技術を具体化し、導電性微粒子および樹脂の材料を検討する。前記フィルムと太陽電池の電氣的接続を行う透明導電膜の開発もあわせて行う。またファンデルワールス力等による直接接合技術なども検討する。	<p>【24年度中間目標】 接着抵抗<math>2\Omega\text{cm}^2</math>以下、吸収損失10%以下の接合技術を開発する。接合技術を多接合太陽電池に適用し、変換効率20%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 接合技術の高度化により多接合太陽電池で変換効率25%を達成する。</p>	
2	23～24	メカニカルスタック技術の開発	東京農工大学	透明導電性接着剤について、接合抵抗低減を目的として、ITOあるいはZnOの粒径均一化とプラズマ酸化還元法を用いた導電率制御を検討する。4インチサイズの接合プロセス技術を開発する。特に低温、低圧接合条件を開発する。金属粒子を用いたACFの低温、低圧大面積接合条件を開発する。開発した接着剤の試験を実用レベルのセルを用いて行い、熱サイクル等環境安定性の特性を取得する。	<p>【24年度中間目標】 接着温度<math>150^\circ\text{C}</math>以下、接着圧力<math>0.5\text{MPa}/\text{cm}^2</math>以下、接合面積4インチサイズ、接合抵抗<math>2\Omega\text{cm}^2</math>以下を達成する。環境安定性として<math>-20\sim 100^\circ\text{C}</math>のヒートサイクル100回で特性評価を行う。</p> <p>【26年度最終目標】 接着温度<math>130^\circ\text{C}</math>以下、接着圧力<math>0.3\text{MPa}/\text{cm}^2</math>以下、接合面積4インチサイズ、接合抵抗<math>1.5\Omega\text{cm}^2</math>以下かつ光透過率80%以上（波長域500-1,300nm）を達成する。環境安定性として<math>-30\sim 130^\circ\text{C}</math>のヒートサイクル1,000回で特性評価を行う。</p>	
3	23～24	ヘテロ接合デバイス化技術の開発A	三菱重工業(株)	単結晶あるいは擬単結晶の高度秩序シリコン-ゲルマニウム系ナローバンドギャップ材料を光電変換層に用いたナローギャップセルの温度係数を改善し高温でも発電効率の低下を防ぐ界面処理・ヘテロ接合形成技術を開発する。	<p>【24年度中間目標】 バンドギャップ<math>0.9\text{eV}</math>以下の単接合太陽電池の変換効率9%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 バンドギャップ<math>0.9\text{eV}</math>以下の単接合太陽電池の変換効率10%を達成する。</p>	
4	23～24	ヘテロ接合デバイス化技術の開発B	京セラ(株)	バンドギャップ $0.9\text{eV}$ のシリコン-ゲルマニウム、シリコン-ゲルマニウム-スズなどの基板を用いて、低ダメージ成膜にてヘテロ接合技術開発及びヘテロ接合材料の絞込みを行い、バンドギャップ $0.9\text{eV}$ 基板に対して最適なヘテロ接合条件を確立する。	<p>【24年度中間目標】 バンドギャップ<math>0.9\text{eV}</math>の単結晶基板を用いたヘテロ接合太陽電池で、変換効率9%を達成する。その際の特性値として、開放電圧<math>0.3\text{V}</math>以上を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ<math>0.9\text{eV}</math>の単接合太陽電池で変換効率10%を達成する。</p>	
5	23～24	高度光利用技術の開発A	産業技術総合研究所	光閉じ込め効果を向上させたフォトニック基板を開発する為の新規材料及び新規構造を検討する。また、上記基板の	<p>【24年度中間目標】 相対変換効率向上15%以上を達成する。</p>	

				特性を補う高度光利用技術の開発も実施する。	【26年度最終目標】 メカニカルスタックセルで 相対変換効率向上20%以上を 達成する。	
6	23 ～ 24	高度光利用 技術の開発B	大阪大学	金属ナノ粒子を用いたプラズ モン効果を基盤技術として、 新規な透明導電層を形成し、 テイラーメイドな散乱波長選 択性を有する多接合型太陽電 池用のプラズモン散乱基板を 開発する。	【24年度中間目標】 単接合薄膜太陽電池におい て、従来技術に較べて15%以 上の変換効率向上を達成す る。  【26年度最終目標】 本技術を用いて産業技術総 合研究所等と協力して、メ カニカルスタック太陽電池 で相対変換効率20%向上を達 成する。	
②-2ボトムセルの開発						
7	23 ～ 24	SiGe系薄膜 ボトムセル の開発A	産業技術 総合研究 所	SiGe系エピタキシャル薄膜中 の不純物密度の低減を図ると ともに、傾斜バッファ層の利 用などにより成長時の初期 層、膜成長法の改善を行い、 薄膜中の転位密度を低減す る。短絡光電流の向上に加え、 開放電圧の向上にも着目し てSiGe系薄膜ヘテロ接合太 陽電池の特性向上を図る。	【24年度中間目標】 バンドギャップ0.9eV以下の 単接合太陽電池セルで変換 効率9%以上を達成する。  【26年度最終目標】 バンドギャップ0.9eVの単接 合太陽電池セルで変換効率 10%を達成する。	
8	23 ～ 24	SiGe系薄膜 ボトムセル の開発B	コーニン グホール ディング ジャパン 合同会社	結晶成長装置の改良を行っ て、SiGe等単結晶薄膜のエピ タキシャル成長の安定性や均 一性の向上を図り、不要な不 純物密度を1桁程度以上低減 する。SiまたはGe単結晶基板 上にバンドギャップ0.9eV以 下のSiGe等単結晶薄膜のボ トムセルを作製し、変換効率 の向上に最適なエピタキシャル 成長条件を見出す。ガラス上 Si等単結晶基板上的エピタキ シャル成長SiGe等単結晶薄膜 中の転位密度を低減する目的 で、傾斜組成や低温成長の バッファ層を挿入する。	【24年度中間目標】 ガラス基板上SiGe等単結晶 薄膜を基体としたバンド ギャップ0.9eV以下の単接合 太陽電池で、変換効率9%を 達成する。その要素技術と して、単結晶薄膜の転位密 度として $5 \times 10^7/cm^2$ 以下を 達成する。  【26年度最終目標】 ガラス基板上SiGe等単結晶 薄膜を基体としたバンド ギャップ0.9eV以下の単接合 太陽電池で、変換効率10%を 達成する。その要素技術と して、単結晶薄膜の転位密 度として $1 \times 10^7/cm^2$ 以下を 達成する。	
9	23 ～ 24	SiGe系薄膜 ボトムセル の開発C	東京工業 大学	Si基板におけるGeの成長界面 の形成法に着目し、基板近傍 での貫通転移の抑制に必要な 条件や処理方法を開拓し、Si 基板上的Geエピ膜の高品質化 をはかる。Si <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 、SiH <sub>4</sub> を用い てSi基板上にp-、または、 n-Geヘテロエピ膜を作製し、 a-Si:Hを用いたHIT型太陽電 池を試作する。	【24年度中間目標】 バンドギャップ0.9eV以下で 変換効率9%を達成する。  【26年度最終目標】 バンドギャップ0.9eV以下で 変換効率10%を達成する。	
10	23 ～ 24	SiGe系薄膜 ボトムセル の開発D	東海大学	島状結晶を核とした擬単結晶 SiGeの成長を検討する。固相 成長の出発材料である非晶質 SiGeの特性や作成条件につい て最適化を行う。	【24年度中間目標】 バンドギャップ0.9eVの擬単 結晶Ge等を用いた太陽電池 で変換効率9%を達成する。 要素技術として、粒径5μm 以上の単一配向シード層を	

					得る。  【26年度最終目標】 バンドギャップ0.9eVの擬単結晶Ge等を用いた太陽電池で変換効率10%を達成する。エミッター層としての機能を兼ねる粒径5 $\mu$ m以上の単一配向シード層を得る。	
11	23 ～ 24	有機単結晶材料ボトムセルの開発A	産業技術総合研究所	p型半導体としてルブレンおよびテトラセン、n型半導体としてフラーレンを用いた単結晶接合技術を確立する。その為に、ルブレンおよびテトラセン単結晶上でのフラーレン結晶のエピタキシャル成長による接合形成技術、Si単結晶等の上でのエピタキシャル成長を利用した有機単結晶の接合形成技術を開発する。	【24年度中間目標】 有機単結晶を用いた単接合太陽電池で変換効率4%を達成する。  【26年度最終目標】 有機単結晶材料を用いた単接合太陽電池で変換効率10%を達成する。	
12	23 ～ 24	有機単結晶材料ボトムセルの開発B	東京工業大学	ナノパターンを施した表面ナノ構造制御ガラス基板（1cm角以上）を作製する技術を確立する。ツイインレーザ型有機フラックス製膜装置を用いて、太陽電池効率として、マルチエキシトン効果が期待される有機電荷移動錯体の高品質単結晶・薄膜を作製するプロセスを確立する。	【24年度中間目標】 p型、n型太陽電池用有機単結晶材料からなる太陽電池を作製し、変換効率4%を達成する。  【26年度最終目標】 p型、n型太陽電池用有機単結晶材料からなる太陽電池を作製し、変換効率10%を達成する。	
13	23 ～ 24	ナノ材料系ボトムセルの開発A	産業技術総合研究所	高純度（99%以上）半導体単層CNTの大量抽出の為に分散・分離・抽出・濃縮の方法を向上し、連続・循環型高度分離方法の開発を行う。抽出した高純度半導体CNTからドーピングによりp/n型の半導体CNTを形成し、ヘテロ接合またはバルクヘテロ接合薄膜太陽電池の作製・評価を行う。半導体CNTにおける、多重励起子や多重キャリア(MEG)効果を実証する。	【24年度中間目標】 高純度（99%以上）半導体CNTの抽出率20wt%以上を達成する。CNT利用太陽電池の変換効率4%以上を達成する。半導体単層CNTで多重励起子や多重キャリア(MEG)効果を確認する。  【26年度最終目標】 高純度（99%以上）半導体CNTの抽出率30wt%以上を達成する。CNT利用太陽電池の変換効率10%以上を達成する。	
14	23 ～ 24	ナノ材料系ボトムセルの開発B	東北大学	「ヘテロ界面CNT太陽電池」については、短絡電流を増加する為にCNT薄膜の密度を増加させる。また、直列抵抗を低減する為に、CNTと電極との接触面積を増加する。「pn接合内蔵CNT太陽電池」については、単独1本のCNTのみならず複数本の束状のpn接合内包CNTを電極間に架橋する技術を開発する。	【24年度中間目標】 pn接合内蔵CNT太陽電池で変換効率4%を達成する。明確な多重励起子生成(MEG)効果を確認する。  【26年度最終目標】 pn接合内蔵CNT太陽電池で変換効率10%を達成する。	
15	23 ～ 24	強相関材料ボトムセルの開発A	産業技術総合研究所	積層化に必要な薄膜高均質化を達成する為の各種の気相成長法（真空蒸着法・物理気相成長法）、液相成長法（ラングミュアブロッケット法・イ	【24年度中間目標】 有機強相関材料を用いた積層型ヘテロ接合素子を作製し、1eV以下の低光子エネルギー領域で分光量子効率6%	

				ンクジェット印刷法) による薄膜作製技術の開発を行うと共に積層化技術の開発を行う。高効率積層型素子の構築に取り組む。	以上を達成する。有機強相関材料を用いた積層型ショットキー素子を作製し、多重励起生成効果にもとづくキャリア増倍率300%以上を達成する。  【26年度最終目標】 有機強相関ヘテロ接合太陽電池で変換効率10%を達成する。	
16	23 ～ 24	強相関材料 ボトムセル の開発B	理化学研 究所	光励起によって電荷整列状態が融解する際の電荷とスピンの時間緩和のメカニズムを明らかにする。多重生成されたキャリアを外部に有効に取り出すデバイス設計に資するシミュレーション技術を構築する。微細加工技術や自己組織化を利用して電荷整列絶縁体をナノ構造化し、光キャリアを電流として外部に取り出す効率を更に高める。	【24年度中間目標】 エネルギーが1eV以下の光照射に対し、吸収光子数で規格化した外部電流で定義される分光量子効率として6%以上を達成する。薄膜ヘテロ接合の基礎吸収端光に比べて短波長光照射下での量子効率の増幅率として3倍以上を達成する。  【26年度最終目標】 強相関酸化物ヘテロ接合太陽電池で変換効率10%を達成する。その要素技術としてp,n層の化学ポテンシャル差と開放電圧の関係を明らかにして開放電圧0.5V以上を達成する。	
②-3 トップセルの開発						
17	23 ～ 24	ナノ材料系 トップセル の開発A	産業技術 総合研 究所	平面ポリシラン系材料の合成技術を開発し合成した種々の平面ポリシラン系材料を用いて、平面ポリシラン系薄膜のバンドギャップを制御できる作製技術を開発する。ナノSi、構造制御ナノ材料等を用いたナノマテリアル増感型太陽電池の作製とデバイス特性の検証を行い、電極材料や構造、レドックス電解液等の最適化、ならびにキャリア移動メカニズムの評価、解析を行う。	【24年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上の単接合太陽電池で変換効率10%を達成する。  【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eV以上の単接合太陽電池で変換効率12%を達成する。	
18	23 ～ 24	ナノ材料系 トップセル の開発B	東京農工 大学	ナノシリコン自立膜の面積化、バンドギャッププロファイルの最適制御、界面トラップ低減によりトップセルの特性を向上させる。また、ナノシリコンに特有の光電子機能を究明し、光電変換への利用を検討する。	【24年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上の単接合ナノシリコン太陽電池で10%の変換効率を達成する。  【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eV以上の単接合ナノシリコン太陽電池で12%の変換効率を達成する。	
19	23 ～ 24	ナノ材料系 トップセル の開発C	九州大学	ダブルマルチホロー放電法を用いてSiC、SiNなどを表面修飾剤としてナノドットを作製する。表面修飾層の膜厚、組成比、ナノドットのサイズ・サイズ分散、バンド	【24年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上のシリコンナノドットを実現し、多重励起子生成太陽電池で変換効率10%を達成する。	



				ギャップなど重要パラメータとプラズマパラメータの相関を明らかにするとともに、量子ドット増感太陽電池を試作して、ナノドットの重要パラメータと多重励起子生成の相関を明らかにする。	【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eV以上のシリコンナノドットを実現し、多重励起子生成太陽電池で変換効率12%を達成する。	
20	23 ～ 24	化合物系 トップセル の開発A	産業技術 総合研究 所	カルコゲナイド光吸収層の制御技術を確認し、またトップセルに適したバッファ層を検討することで、トップセルの高性能化を図る。InGaP/InGaAs系量子ドット構造の作製技術の開発を行う。	【24年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上の太陽電池で変換効率10%を達成する。InGaP/InGaAs量子ドット太陽電池で変換効率10%を達成する。 【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eVの太陽電池で変換効率12%を達成する。InGaP/InGaAs量子ドット太陽電池で変換効率12%を達成する。	
21	23 ～ 24	化合物系 トップセル の開発B	パナソニック (株)	複数の液体ソースを用いてバンドギャップの異なる層を多段階に形成する製膜技術を開発し、液体ソースの組成制御と膜厚の精密制御によるバンドギャップ分布の最適化を行う。窓層-光吸収層の界面制御、裏面コンタクト制御、光吸収制御等の構造制御の要素技術開発を行い、高効率化技術を実証する。	【24年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率10%を達成する。その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命10ns以上、内部量子効率90%以上、バンドギャップ以下の波長の全線透過率80%以上を達成する。 【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率12%を達成する。	
22	23 ～ 24	化合物系 トップセル の開発C	東京工業 大学	酸化物半導体の探索とその欠陥密度の制御技術の開発と酸化物を用いた太陽電池作製技術の実証を行う。	【24年度中間目標】 ワイドギャップ酸化物半導体（バンドギャップ1.7eV以上）を用いた太陽電池で、変換効率10%を達成する。 【26年度最終目標】 ワイドギャップ酸化物半導体（バンドギャップ1.7eV以上）を用いた太陽電池で、変換効率12%を達成する。	
23	23 ～ 24	化合物系 トップセル の開発D	豊橋技術 科学大学	Cu-0系ならびにCu-Ag-0系光吸収層用高品質酸化物材料の電気化学的形成技術、Cu/0ならびにCu/Ag比制御によるバンドギャップ制御技術などの要素技術を開発すると共に、多接合型太陽電池トップセルに好適なバンドギャップ1.7eV以上のCu-0単接合太陽電池を形成し、ワイドバンドギャップ酸化物材料、バンドギャップ制御技術ならびに高品質化技術の実証を行う。	【24年度中間目標】 バンドギャップ1.7eV以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率10%を達成する。その要素技術としてバンドギャップ1.7eV以上のCu-0において50cm <sup>2</sup> /V・sを達成し、Cu-0/ZnO単接合太陽電池形成技術を確認する。 【26年度最終目標】 バンドギャップ1.7eV以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率12%を達成する。その要素技術としてバンドギャップ1.7eV以上のCu-0単一配向膜にて移動度100cm <sup>2</sup> /V・sを達成する。	

表 10. 研究開発項目別開発内容、目標② (平成 25～26 年度)

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
②-1メカニカルスタック・デバイス化技術の開発						
1	25 ～ 26	メカニカルスタック・デバイス化技術の開発	産業技術総合研究所	導電性ナノ粒子配列を用いた接合技術に関し、量産性および信頼性の検討を行う。また、高度光利用技術のメカニカルスタック構造への適用を行い、高効率化の検討を行う。メカニカルスタック型太陽電池を試作し、最適設計のもと変換効率を達成する。	【26年度最終目標】 接合技術の高度化により、高度光利用技術と組み合わせて多接合太陽電池（非集光）で変換効率30%を達成する。メカニカルスタック型太陽電池における、実用化に適う信頼性に関する課題を明らかにする。	
2	25 ～ 26	メカニカルスタック技術の開発	東京農工大学	太陽電池多接合用透明導電接着層形成のための要素技術開発とその実証を行う。	【26年度最終目標】 3～4インチφサイズにおいて、トップセルを透過する（トップセルの光吸収ロス及びトップセル表面での光反射ロスを除いた）光スペクトル強度の積分強度に対し、ボトムセルに入る当該光積分強度を70%以上にする。4インチφあるいは4インチ角基板において接合抵抗率1 Ω cm <sup>2</sup> 以下を安定的に実現する。4インチφあるいは4インチ角基板において、-40℃～80℃ヒートサイクル1000 hの条件下で3 Ω cm <sup>2</sup> 以下を実現する技術を確認する。4インチφあるいは4インチ角基板におけるメカニカルスタック工程数を、24年度末に比較して20%削減する。産業技術総合研究所と協力して実効効率30%を実現する。3あるいは4インチφ基板サイズの多接合セルを試作し、実効効率25%を実現する。	
3	25 ～ 26	ヘテロ接合デバイス化技術の開発	京セラ(株)	光吸収層の高品質化技術、窓層-光吸収層の界面制御、裏面コンタクト制御、光吸収制御等の構造制御の要素技術開発を行い、高効率化技術を実証する。さらに、開発したトップセルをメカニカルスタック技術へ適用して多接合太陽電池の開発を行い、高効率化技術を実証する。	【26年度最終目標】 バンドギャップ1.8eV以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率16%を達成する。硫化物系薄膜のキャリア寿命30 ns以上、開放電圧1.2V以上、内部量子効率90%以上を得る。	
4	25 ～ 26	高度光利用技術の開発A	産業技術総合研究所	新規構造や新規材料を検討しフォトニック基板の光閉じ込め能力の向上を図る。開発したフォトニック基板並びに他の高度光利用技術を従来型及びスタック型の太陽電池に適用し、課題抽出と最適化を行って発電効率の向上を図る。	【26年度最終目標】 メカニカルスタックセルで相対変換効率向上20%以上を達成する。	
5	25 ～	高度光利用技術の開発B	大阪大学	金属ナノ粒子を用いた局在表面プラズモン効果を活用し、	【26年度最終目標】 新規に開発する光閉じ込め	

	26			テイラーメイドな散乱波長選択性を備えた高度光マネージメント用透明導電層を開発し、微結晶シリコン単接合太陽電池やメカニカルスタック太陽電池の光入射層、中間層ならびに裏面層に適用することによって、高変換効率化に資することを実験的に検証する。	構造により、微結晶シリコン単接合太陽電池において、従来技術に較べての相対効率を20%向上させる。	
②-2ボトムセルの開発						
6	25 ～ 26	SiGe系薄膜ボトムセルの開発A	産業技術総合研究所	高品質シリコン-ゲルマニウム薄膜形成技術、高品質接合形成技術の2つの要素技術開発を行う。	【26年度最終目標】 バンドギャップ0.9eV以上の単接合太陽電池で、1.4eV以下の光に対して電流密度15mA/cm <sup>2</sup> 以上、外部量子効率80%以上を達成する。	
7	25 ～ 26	SiGe系薄膜ボトムセルの開発B	東京工業大学	変換効率40%を目指すSi系3接合薄膜太陽電池の開発に資するボトムセル用ナローギャップ太陽電池材料として、Si基板上へのGeの低温エピタキシャル成長技術の開発とそれを用いたナローギャップヘテロ接合太陽電池技術の実証を行う。	【26年度最終目標】 太陽電池を試作し、バンドギャップ0.9eV以上の単接合太陽電池で、1.4eV以下の光に対して電流密度15mA/cm <sup>2</sup> 以上を達成する。その達成に必要な、Geエピタキシャル膜の膜厚と同程度キャリア拡散長（キャリア寿命10μ秒）を達成し、素子レベルでV <sub>oc</sub> >0.2eVを目標とする。	
8	25 ～ 26	SiGe系薄膜ボトムセルの開発C	東海大学	擬単結晶シリコン-ゲルマニウム薄膜の形成を検討し、これをシード層とし擬単結晶シリコン-ゲルマニウム発電層を成長させる。50円/Wを実現する高効率多接合太陽電池のボトムセルを開発する。	【26年度最終目標】 バンドギャップ0.9eV以上の単接合太陽電池で、1.4eV以下の光に対して電流密度15mA/cm <sup>2</sup> 以上を達成する。	
9	25 ～ 26	ナノ材料系ボトムセルの開発A	産業技術総合研究所	導体単層カーボンナノチューブにおける多重キャリア生成による電流の取り出し（=外部量子効率100%超）を確認して、将来の超高効率太陽電池の可能性を探る。	【26年度最終目標】 高純度（99%以上）半導体CNTの抽出率30wt%以上を達成する。半導体CNT利用太陽電池で外部量子効率100%以上を実現する。	
10	25 ～ 26	ナノ材料系ボトムセルの開発B	東北大学	「ヘテロ界面CNT太陽電池」および「ホモ界面CNT太陽電池」を作製する。さらに、「pn接合内蔵CNT太陽電池」を検討する。	【26年度最終目標】 CNT利用太陽電池で外部量子効率100%以上を実現する。	
11	25 ～ 26	強相関材料ボトムセルの開発A	産業技術総合研究所	単結晶薄膜化や製膜性に優れ、かつ高効率化が期待できる材料合成・特性制御を実施する。縦型単結晶薄膜デバイス化と、電流密度の最大化のための界面制御技術の開発を実施する。	【26年度最終目標】 縦型素子の電流密度を現状の1000倍（1mA/cm <sup>2</sup> ）に向上する。	
12	25 ～ 26	強相関材料ボトムセルの開発B	東京工業大学	太陽電池用ガラス基板表面にナノスケールで規則的な凹凸をつけ、その上に気相法により作製する透明導電膜の大粒径化や高品質結晶化を促進させる技術を開発し、高性能なナノテンプレート透明導電膜	【26年度最終目標】 強相関材料系有機単結晶薄膜太陽電池における縦型素子の電流密度を現状の1000倍（1mA/cm <sup>2</sup> ）に向上する。上記電流密度の向上に資するナノ周期パターンを施し	

				を開発する。高効率太陽電池用強相関系有機単結晶材料を作製する。	たナノテンプレートガラス基板を作製する。開発するガラス基板が現状の約3倍である2インチ（約5cm直径）サイズを作製する技術の確立をめざす。
13	25 ～ 26	強相関材料ボトムセルの開発C	東北大学	イオン液体液体フラックス法による高品質有機電荷移動錯体単結晶・薄膜の作製及び、太陽電池デバイス化のためのイオン液体除去技術の開発を行う。	【26年度最終目標】 強相関材料系有機単結晶薄膜太陽電池における縦型素子の電流密度を現状の1000倍（1mA/cm <sup>2</sup> ）に向上する。イオン液体を介して有機電荷移動錯体単結晶薄膜を作製し、そのグレインサイズが50μm以上とする。洗浄後の有機電荷移動錯体単結晶薄膜表面に残存するイオン液体の量が現状の1/100とする。
②-3 トップセルの開発					
14	25 ～ 26	ナノ材料系トップセルの開発A	東京農工大学	ナノシリコン自立膜によるセル化技術を固め、基本特性を評価する。ナノシリコン膜の素子化とトップセルとしての特性向上の研究開発を行う。	【26年度最終目標】 バンドギャップ1.8eV以上の単接合nc-Si太陽電池で16%の変換効率を達成する。
15	25 ～ 26	ナノ材料系トップセルの開発B	九州大学	ナノ粒子増感型太陽電やナノ粒子有機ハイブリッド太陽電池など新規MEG型太陽電池セルを開発し、バンドギャップの2倍以上のエネルギーを有する光子の入射で、励起子を電子と正孔に分離し電流として高効率に外部に取り出し、外部量子効率100%以上を実証する。	【26年度最終目標】 シリコン、ゲルマニウム等のナノドット太陽電池で外部量子効率100%以上を実現する。
16	25 ～ 26	化合物系トップセルの開発A	産業技術総合研究所	化合物系半導体材料を用いたトップセルの開発を行う。リン系Ⅲ-V族化合物半導体の製膜技術の高度化を図り、これらを用いたトップセルの高性能化を行う。	【26年度最終目標】 バンドギャップ1.8eVの太陽電池で変換効率16%を達成する。開放電圧1.35V、短絡電流密度15mA/cm <sup>2</sup> を目標とする。本技術を用いた単接合セルによって、多接合太陽電池での変換効率30%達成に寄与する。InGaP/In(Ga)As量子ドット太陽電池で2段階光吸収を確認し、量子ドット構造導入により40%の電流密度向上を目指す。
17	25 ～ 26	化合物系トップセルの開発B	パナソニック(株)	バンドギャップ1.0eV以下のナローギャップ材料に適したヘテロ接合構造のデバイス化技術を開発する。	【26年度最終目標】 ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ0.9eVの単接合太陽電池で1.4eV以下の光に対して電流密度15mA/cm <sup>2</sup> 以上を達成する。
18	25 ～ 26	化合物系トップセルの開発C	東京工業大学	Sn-O-S系薄膜を作製するとともに組成とバンドギャップの関係を明らかにする。ドーピングによるp/n両極性の制御に取り組む。良好なホモ接合界面作製条件を確立し、ホモ接合太陽電池を作製する。	【26年度最終目標】 Sn-O-S系材料でバンドギャップ1.8eV以上のホモ接合太陽電池を作製する。その要素技術としてバンドギャップ1.8eV以上のSn-O-S系材料で移動度0.1cm <sup>2</sup> /Vs以上達成する。

### ③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

本テーマでは、大面積化が可能な薄膜系で、将来、エネルギー変換効率 40%を実現するため、ワイドギャップからナローギャップの広い禁制帯幅の領域で、今までにない光吸収層材料を開発するとともに、広い波長範囲で有効に光子を利用するため光のマネジメント技術開発を行う。これらの要素技術をもとに、5-6 接合からなる低倍率集光型薄膜太陽電池を試作し、エネルギー変換効率 30%を達成する。

本テーマ全体目標としては、以下とする。

#### 平成 22 年度中間目標

バンドエンジニアリング、薄膜フルスペクトル太陽電池、光のマネジメント・TCO 等の研究開発により、低倍率集光時、真性変換効率 20%（有効受光面積：1cm<sup>2</sup>）を達成する。

#### 平成 24 年度中間目標

薄膜フルスペクトル太陽電池の光吸収層、ならびに周辺技術等の研究開発により、低倍率集光時、真性変換効率 25%（有効受光面積：1cm<sup>2</sup>）を達成する。

#### 平成 26 年度最終目標

小面積の 5-6 接合薄膜フルスペクトルセルにより、真性変換効率 40%（低倍率集光、有効受光面積：1cm<sup>2</sup>）を達成する。

表 11. 研究開発項目別開発内容、目標③ (平成 20～22 年度)

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
③-1バンドエンジニアリング						
1	20～22	ナノドット禁制帯幅制御	東京工業大学	薄膜フルスペクトル太陽電池のミドルセル用光吸収層材料として、1.1-1.6eVの範囲で禁制帯幅制御が可能なSiC/Siナノドットを開発する。	<p>【22年度中間目標】 SiC/Siナノドットの欠陥密度を<math>1 \times 10^{17}/\text{cm}^3</math>以下にまで低減する技術を開発することにより、単接合セルで真性変換効率5%を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 Siナノドット単接合セルで真性変換効率10%を達成する。多接合太陽電池のミドルセルへ適用し、セルレベルでの動作を実証する（ナノドットセルからの真性変換効率3%）。</p>	
2	20～22	マルチエキシトン	東京工業大学	シリコン量子ドットのバンドエンジニアリング、並びに、状態密度制御によるフォノン散乱抑制、マルチエキシトン生成による変換効率向上などの諸効果の原理実証と、薄膜太陽電池へ適用可能性を検証するため、薄膜シリコン系技術と整合性があり、かつ、高品質なシリコン量子構造形成可能なSi/CaF <sub>2</sub> ヘテロエピタキシャル量子ドット構造を用いて、原理検証のための研究を行う。	<p>【22年度中間目標】 Si量子ドットの遷移エネルギー <math>E_g &lt; 3.3\text{eV} (@1\text{nm})</math> 領域における、マルチエキシトン生成 (2Eg) 等による量子効率の増倍効果に関する原理実証を目標として、光生成電流が観測可能なSi量子ドット結晶層及び素子構造を形成する。</p> <p>【26年度最終目標】 pinセル構造の変換効率を明らかにするとともに、多接合型シリコン薄膜太陽電池に適用可能な素子構造と変換効率最適化への指針を提示する。</p>	
3	20～22	ナノドット量子効果を有する薄膜の形成技術	三洋電機(株)	高品位マトリクス形成技術の開発を行い、ナノドット粒子配置法の開発、及び量子効果の検証を行う。さらにナノドット量子効果を用いた高効率太陽電池デバイスの開発を行う。	<p>【22年度中間目標】 ナノドット量子効果を有するボトム層対応高品位薄膜で、バンドギャップ制御幅約0.2eV、欠陥準位密度<math>5 \times 10^{18}/\text{cm}^3</math>以下。</p> <p>【26年度最終目標】 単接合セルで変換効率7%。</p>	
4	20～22	Geの遷移型制御	東京工業大学	遷移型制御の理論予測及び最適構造設計と歪Ge膜の結晶成長技術の開発を行う。	<p>【22年度中間目標】 歪Ge膜の作製技術の開発において、間接遷移型半導体から直接遷移型半導体への転換を実証するために、光子エネルギー0.7eV付近における光吸収係数の1桁以上の増大を確認する。</p> <p>【26年度最終目標】 直接遷移型へと転換した歪Geを用いた単接合太陽電池において、真性変換効率5%を達成する。</p>	
5	20	薄膜新材料	岐阜大学	アモルファス/微結晶化合物	【22年度中間目標】	

	～ 22		(再委託：岐阜工業高等専門学校)	薄膜新素材の開発と組成比等による禁制帯幅制御技術確立する。さらに、ゲストフリーSiGe系クラスレート薄膜の開発を行う。金属およびシリコンの蒸着による金属Si混合薄膜の作製技術を開発し、金属Si混合薄膜から金属内包Siクラスレート薄膜を作製する。さらに、この薄膜の熱処理により、ゲストフリーSiクラスレート薄膜を作製する。	禁制帯幅2.2eV程度で、光電気伝導を示し、欠陥密度 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 以下のアモルファス/微結晶化合物新素材薄膜を開発し、それを用いた単接合太陽電池にて開放電圧1.0V以上を達成する。光電気伝導を示し、欠陥密度 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 以下のゲストフリー/希ガス内包Siクラスレート薄膜を作製する。  【26年度最終目標】 単接合太陽電池にて開放電圧1.2V以上を達成する。ゲストフリー/希ガス内包 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ クラスレート薄膜において、理論値1.3-2eVをもとに連続的に制御可能な禁制帯幅を明らかにする。禁制帯幅1.8eV程度のクラスレート薄膜を用いた太陽電池にて変換効率5%を達成する。	
6	20 ～ 22	ワイド/ナローギャップ材料設計	龍谷大学	ワイドバンドギャップ光吸収層材料として $E_g=1.7-2.0\text{eV}$ 、ナローバンドギャップ光吸収層として $E_g=0.6-1.0\text{eV}$ の直接遷移型化合物半導体の組成、結晶構造、結晶配向を設計する。材料設計で得られた特性を実験結果と比較して材料設計の有効性を確認する。この成果を、中心機関と連携して太陽電池に適用する。	【22年度中間目標】 中心機関と連携して太陽電池に適用し、低倍率集光時、真性変換効率20% (有効受光面積 $1\text{cm}^2$ ) を得る。  【26年度最終目標】 5-6接合からなる低倍率集光型化合物系薄膜太陽電池材料 ( $0.6-2.0\text{eV}$ ) の材料設計を行い、中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率30% (有効受光面積 $1\text{cm}^2$ ) を達成する。	
③-2薄膜フルスペクトル太陽電池						
7	20 ～ 22	シリコン系薄膜集光型セル	東京工業大学 (再委託：奈良先端科学技術大学院大学)	シリコン系薄膜、CdTe薄膜、カルコバイライト薄膜、ならびに、これらを組み合わせた薄膜フルスペクトル太陽電池を開発する。さらに、これらの薄膜フルスペクトル太陽電池を低倍率集光下で有効に動作させるためのデバイス技術を開発する。	【22年度中間目標】 低倍率集光で真性変換効率20% (有効受光面積 $1\text{cm}^2$ ) を達成する。  【26年度最終目標】 低倍率集光多接合セルで真性変換効率30% (有効受光面積 $1\text{cm}^2$ ) を達成する。	
8	20 ～ 22	広バンドギャップシリコン系薄膜	シャープ(株)	短波長の光子エネルギーを有効に電力変換するためにエネルギーバンドギャップの大きなシリコン系合金薄膜材料を活性層に用いた薄膜太陽電池により高い電圧で電流を取り出せるようにして、これを光入射セルに適用した積層型マルチバンドギャップ多接合太陽電池に適用して変換効率の向上を図る。	【22年度中間目標】 単接合型薄膜太陽電池で開放電圧1.2V以上 (サイズ $1\text{cm}^2$ 以上)。多接合型薄膜太陽電池で真性変換効率15%以上。  【26年度最終目標】 多接合型薄膜太陽電池で真性変換効率17%以上 (サイズ $1\text{cm}^2$ 以上)	

9	20 ～ 22	サブセル界面接合技術	三菱電機(株)	超高効率の薄膜フルスペクトル太陽電池を実現するために、低倍率集光時(～50suns)に問題となるフィルファクタの低下を防止するサブセル界面接合技術を開発する。	<p>【22年度中間目標】</p> <p>サブセル界面におけるトンネル伝導評価の基本技術およびサブセル界面に電氣的に作用する薄膜構造体の開発により、サブセル界面抵抗<math>300 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2</math>(サブセル界面部電圧降下<math>0.15\text{V}</math>以下)を得ることを目標とする。</p> <p>【26年度最終目標】</p> <p>トンネル伝導評価手法の高精度化およびサブセル界面のトンネル伝導促進技術の完了により、サブセル界面抵抗<math>100 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2</math>(サブセル界面部電圧降下<math>0.05\text{V}</math>以下)を得ることを目標とする。</p>
10	20 ～ 22	カルコパイライト系集光型セル	東京工業大学	Ag系ワイドバンドギャップ材料の開発を行う。1.1eV集光セルの開発、1.4eV帯カルコパイライト系材料の高品質化、カルコパイライト系太陽電池貼り合わせ技術の開発を行う。	<p>【22年度中間目標】</p> <p>最終目標を達成する為のAg系及びCu系カルコパイライト材料を用いた太陽電池の必要特性を明らかにする。バンドギャップ1.1eVのCu(InGa)Se<sub>2</sub>薄膜太陽電池を用いて、低倍率集光時真性変換効率20%(単接合、有効受光面積<math>1\text{cm}^2</math>)を得る。Ag(InGa)Se<sub>2</sub>薄膜太陽電池において開放電圧<math>0.9\text{V}</math>以上を得る。対向する透明導電膜付きガラス基板上にCu(InGa)Se<sub>2</sub>薄膜太陽電池を貼り合わせ、変換効率15%を達成する。貼り合わせによる2層タンデム構造の課題を抽出する。</p> <p>【26年度最終目標】</p> <p>メカニカルスタック型2-3層タンデム太陽電池において、低倍率集光時真性変換効率25%(有効受光面積<math>1\text{cm}^2</math>)を得る。</p>
11	20 ～ 22	放熱基板カルコパイライト系集光型セル	青山学院大学	CuInTe系薄膜形成と太陽電池の試作を行う。放熱基板上でのCIGS太陽電池の作製を行う。さらに集光型太陽電池における放熱基板温度シミュレーション及び冷却機構の検討を行う。	<p>【22年度中間目標】</p> <p>放熱基板上のカルコパイライト系集光セルを開発することにより、真性変換効率10%(ナローギャップ単接合、低倍集光、受光面積<math>0.5\text{cm}^2</math>程度)および20%(ミドルギャップ単接合、低倍集光、受光面積<math>0.5\text{cm}^2</math>程度)を達成する。中心機関と連携して最終目標を達成する為に放熱基板上のカルコパイライト系を用いた太陽電池の必要特性を明らかにする。</p> <p>【26年度最終目標】</p> <p>放熱基板上のカルコパイラ</p>



					イト系集光セルで真性変換効率25%（単接合、低倍集光、有効受光面積0.5cm <sup>2</sup> ）を実現する。	
12	20 ～ 22	構造設計とカルコパイライト系トップセル	立命館大学	高効率薄膜フルスペクトル太陽電池達成の道筋を明示することを目的として、計算機を用いて低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の総合的なデバイス構成・要素セル設計を行う。 高効率薄膜フルスペクトル太陽電池達成に必須な、トップセルとなる高効率ワイドギャップ Cu(In,Al)S <sub>2</sub> (CIAS) 太陽電池の開発を行う。	【22年度中間目標】 デバイス構成（セル数・集光倍率）と各要素セルの仕様（E <sub>g</sub> 、η、J <sub>sc</sub> 、V <sub>oc</sub> 、FF、サブバンドギャップの透過率）を明示する。テーマ全体の最終目標達成のためのデバイス構成・各要素セルの仕様を理論的に明示する。 CIAS薄膜（E <sub>g</sub> =1.9-2.3eV）について基礎的な成長技術開発を行い、真性変換効率5%を得る。  【26年度最終目標】 変換効率40%実現に必要なデバイス構成・各要素セルの仕様を明示する。ならびにデバイス構成・各要素セルと実デバイスとの差異を明示する。 TCO上でのCIAS薄膜の成長技術開発を行い、CIAS単接合太陽電池で真性変換効率10.5%を得る。	
13	20 ～ 22	光学設計技術	(株)カネカ	低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の光学設計技術として、太陽光スペクトルを短波長光と長波長光に分離し、閉じ込めるオプティカルカップリング・オプティカルスプリッティングによる光マネジメント構造の設計方法を開発する。さらに、中心機関で作製されたシリコン系・化合物系の薄膜太陽電池を活用して薄膜フルスペクトル太陽電池を実現する。	【22年度中間目標】 変換効率30%を達成する為のオプティカルカップリング構造を提案する（シミュレーションによる光学設計）。 オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を有する低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池において、光学設計により変換効率が3%向上することを実証する。  【26年度最終目標】 オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率30%（有効受光面積1cm <sup>2</sup> ）を達成する。	
14	20 ～ 22	集光型CdTe薄膜	木更津工業高等専門学校	集光型CdTe太陽電池を開発し、シリコン系薄膜太陽電池などと組み合わせて多接合セルあるいは波長スプリッティングによる集積型セルを開発する。	【22年度中間目標】 直列抵抗0.5Ωcm <sup>2</sup> を得る。シリコン系薄膜/CdTe 4端子タンデム太陽電池に適用し、低倍率集光時真性変換効率20%（有効受光面積1cm <sup>2</sup> ）を得る。	

					【26年度最終目標】 直列抵抗 $0.2\Omega\text{cm}^2$ を得る。低倍率集光多接合セルで真性変換効率30%（有効受光面積 $1\text{cm}^2$ ）を達成する。	
③-3光のマネジメント・TCO						
15	20 ～ 22	表面プラズモン	東京工業大学	半導体太陽電池に適用可能な金属ナノ粒子の表面プラズモンによる効果を明確化し、その効果を有効に利用できる太陽電池構造を検討することで、変換効率向上を目指す。また、得られた知見から表面プラズモンを薄膜フルスペクトル太陽電池へ適用する方法を提案する。	【22年度中間目標】 半導体太陽電池における表面プラズモン効果を明確にする（ピーク波長における光電流の5%向上）。  【26年度最終目標】 表面プラズモンによりピーク波長での光電流を10%向上し、表面プラズモンを薄膜フルスペクトル太陽電池へ適用する方法を提案する。	
16	20 ～ 22	p形透明導電膜	龍谷大学（共同実施：新潟大学）	集光型セル用p型透明導電膜への要求特性を満足する新材料の探索研究を行い、材料の薄膜作製技術開発を行う。	【22年度中間目標】 基本特性として $E_g > 3.0\text{eV}$ 、 $\sigma > 10\text{S/cm}$ を達成する。中心機関と連携して、p型透明導電膜をシリコン系薄膜太陽電池に適用してp型透明導電膜の有効性を確認し、また化合物系薄膜太陽電池の裏面電極に適用して長波長光を透過させた状態で真性変換効率10%を達成する。  【26年度最終目標】 基本特性として $E_g > 3.0\text{eV}$ 、 $\sigma > 10^3\text{S/cm}$ を達成する。	
17	20 ～ 22	フルスペクトルTCO	旭硝子(株)	多接合薄膜フルスペクトルセルに適用可能な透明電極の開発を目的として、太陽光のフルスペクトルにわたって透明でかつ高い導電性を有する膜材料の開発と、フルスペクトルにわたって透過率を有する透明導電基板の開発を行う。	【22年度中間目標】 2,000nmまで透明なTCOとして可能性のある材料を探索し、概ね400-1,400nmで光吸収率が5%以内（浸液法で測定したTCO基板としての透過率で87%）、比抵抗 $1 \times 10^{-2}\Omega\text{cm}$ 以下を実現する。  【26年度最終目標】 選定された材料の成膜プロセスに改良を加え、フルスペクトルに対して有効な光散乱・光閉じ込め効果を有する表面テクスチャ形状を付与する手法を開発する。概ね400-2,000nmの波長で光吸収率が5%以内、ヘイズ率40%以上で比抵抗 $1 \times 10^{-2}\Omega\text{cm}$ 以下を達成する。	
18	20 ～ 22	グラフェン透明導電膜	富士電機ホールディングス(株)	超高効率太陽電池で必須となる赤外領域においても透過率が高い透明導電膜の開発を目的として、新規材料であるグラフェンを透明導電膜へ適用するための技術開発を行う。	【22年度中間目標】 導電率 $6 \times 10^3\text{S/cm}$ 以上、透過率80%以上（380-2,000nm）を達成する。  【26年度最終目標】 シート抵抗 $10\Omega/\square$ 以下、透過率90%以上（380-2,000nm）を達成する。	

表 12. 研究開発項目別開発内容、目標③ (平成 23～24 年度)

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
③-1 トップセル						
1	23 ～ 24	シリコン系 薄膜集光型 セル	東京工業 大学 (再委託：木更 津工業高等専門学 校)	シリコン系薄膜、カルコパイ ライト系等薄膜、ならびに、 これらを組み合わせた5接合 等の薄膜フルスペクトル太陽 電池を開発する。さらに、こ れらの薄膜フルスペクトル太 陽電池を低倍率集光下で有効 に動作させるためのデバイス 技術、ならびに薄膜フルスペ クトル太陽電池の特性評価技 術を開発する。	【24年度中間目標】 低倍率集光型シリコン系薄 膜太陽電池で変換効率20%を 達成する。また5接合薄膜フ ルススペクトル太陽電池によ り、変換効率25% (開放電圧 3.72V、短絡電流 9.0mA/cm <sup>2</sup> 、曲線因子0.75、 10倍程度の集光時) を達成 する。  【26年度最終目標】 低倍率集光型シリコン系薄 膜太陽電池で変換効率22%を 達成する。また5接合薄膜フ ルススペクトル太陽電池によ り、変換効率30% (開放電圧 4.0V、短絡電流9.6mA/cm <sup>2</sup> 、 曲線因子0.78、10倍程度の 集光時) を達成する。	
2	23 ～ 24	広バンド ギャップシ リコン系薄 膜	シャープ (株)	短波長光の光子エネルギー損 失を低減できる太陽電池の開 発を目的として、広バンド ギャップシリコン系薄膜太陽 電池の材料開発と接合界面で の電子構造制御技術開発を行 う。	【24年度中間目標】 開放電圧 1.06V (集光時 1.16V)、短絡電流密度 9.0mA/cm <sup>2</sup> (有効受光面積 1cm <sup>2</sup> ) を達成する。  【26年度最終目標】 開放電圧 1.10V (集光時 1.20V)、短絡電流密度 9.6mA/cm <sup>2</sup> (有効受光面積 1cm <sup>2</sup> ) を達成する。	
3	23 ～ 24	カルコパイ ライト系 トップセル	立命館大 学	カルコパイライト相変化分析 用XRD加熱ステージを導入 し、成長条件と異相生成の関 係を明らかにすることで、異 相を含まない高品質CIAS薄 膜を実現する。CIAS薄膜中のAl 濃度制御や新バッファ層等 の高効率デバイス技術を駆使 し、CIAS太陽電池を作製す る。	【24年度中間目標】 裏面電極がTCOであるスー パーストレート型CIAS太陽 電池で、低倍率集光下で変 換効率6%を達成する。  【26年度最終目標】 裏面電極がTCOであるスー パーストレート型CIAS太陽 電池で、低倍率集光下で変 換効率8%を達成する。	
4	23 ～ 24	InGaN薄膜	岐阜大学	禁制帯幅2.0eV程度のトップ セルに使用可能なInGaNの製 膜技術と高品質化技術の開発 を行う。さらに2.0eV程度の 禁制帯幅のInGaN薄膜太陽電 池の開発を行う。	【24年度中間目標】 1.10V (1sun)、1.20eV (10suns) の開放電圧を達 成する。  【26年度最終目標】 1.18V (1sun)、1.30eV (10suns) の開放電圧を達 成する。	
③-2 ミドルセル						
5	23 ～ 24	Si量子ドッ ト禁制帯幅 制御	東京工業 大学	1.1-1.5eVの禁制帯幅の範囲 で、高効率を示すSi系量子 ドット太陽電池を開発する。 具体的には、TiO <sub>2</sub> :Nbを高 温耐性透明導電膜、ならびに	【24年度中間目標】 TiO <sub>2</sub> :Nbを高温耐性透明導 電膜、ならびにドーパントの 拡散バリア層として用いた 禁制帯幅1.4eV程度のSi系	

				ドーパントの拡散バリアー層として用いたSi系量子ドット太陽電池の高品質化技術、フルスペクトル太陽電池としてのデバイス設計技術開発を行う。	量子ドットシングル接合太陽電池で変換効率7%を達成する。  【26年度最終目標】 Si系量子ドット系太陽電池で変換効率10%を達成する。
6	23 ～ 24	ナノドット量子効果	パナソニック(株)	マトリクス相原料として非真空系プロセスの適用が可能な材料を用い、ナノドット材料との最適な組合せを可能にする要素技術の開発とその太陽電池への実証を行い、これにより単接合セルの開発を行う。	【24年度中間目標】 変換効率10%（低倍率集光時）を達成する。  【26年度最終目標】 変換効率11.4%（低倍率集光時）を達成する。
7	23 ～ 24	カルコパイライト系集光型セル	東京工業大学	直接貼り合わせ技術を用いた、カルコパイライト系タンデム型薄膜太陽電池を開発する。トップセル材料としては1.8eV帯のAg(InGa)Se <sub>2</sub> 、ミドルセル材料としては1.4eV帯の高Ga組成Cu(InGa)Se <sub>2</sub> （平均Ga組成70%）、ボトムセル材料としては1.1eV帯の低Ga組成Cu(InGa)Se <sub>2</sub> （Ga組成30%）を開発する。	【24年度中間目標】 a-Si太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、あるいはカルコパイライト系太陽電池/カルコパイライト系太陽電池の作製により、低倍率集光多接合セルで変換効率25%を達成する。  【26年度最終目標】 a-Si太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、あるいはカルコパイライト系太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、さらに歪Ge太陽電池を含めたさらなる多接合化により、低倍率集光多接合セルで変換効率30%を達成する。
③-3ボトムセル					
8	23 ～ 24	歪Ge	東京工業大学	歪Ge膜の成長時に基板からGaおよびAs拡散が生じ、歪Ge膜が低抵抗化する問題に対し、表面窒化拡散バリア層形成などに取り組み、これら問題点を解決することでエピタキシャル歪Ge膜の高品質化に取り組む。更にダブルヘテロ接合型太陽電池を作製する。	【24年度中間目標】 1.1eV以下の低エネルギー光照射下において変換効率2%（低倍率集光）を達成する。  【26年度最終目標】 1.1eV以下の低エネルギー光照射下において変換効率3%（低倍率集光）を達成する。
9	23 ～ 24	非真空CuIn(Se, Te) <sub>2</sub>	龍谷大学	メカノケミカルプロセスにより合成したCuIn(Se, Te) <sub>2</sub> 微粉末を原料に用いてスクリーン印刷/高圧焼結法でCuIn(Se, Te) <sub>2</sub> 膜を作製する。	【24年度中間目標】 第5層セル（禁制帯幅=0.85-0.90eV）として変換効率2%（低倍率集光時）  【26年度最終目標】 第5層セル（禁制帯幅=0.85-0.90eV）として変換効率3%（低倍率集光時）
10	23 ～ 24	蒸着CuInTe <sub>2</sub> 系セル	青山学院大学	ナローギャップCuInTe <sub>2</sub> 系薄膜の高品質製膜技術を開発する。製膜法としては、MBE装置を用いた多源蒸着法、およびTe化法を用いる。また、生成膜の結晶学的、光学的、	【24年度中間目標】 CuInTe <sub>2</sub> 系ボトムセルで変換効率2%（低倍率集光）を実現する。  【26年度最終目標】

				電氣的諸特性を調べ、光吸収層としての最適製膜条件を確立する。また、不純物添加によるキャリア濃度制御技術の開発を行う。	CuInTe <sub>2</sub> 系ボトムセルで変換効率3% (低倍率集光) を達成する。	
③-4透明導電膜						
11	23 ～ 24	p型透明導電膜	龍谷大学 (共同実施：新潟大学)	各種p型透明導電膜の光学および電気特性の向上に取り組む。そのために、薄膜作製プロセスの検討を行うとともに、第一原理計算による材料設計技術も応用する。さらに、新たにp型透明導電膜形成装置を導入して、Si系や化合物薄膜系太陽電池に応用するための薄膜を積極的に作製し、得られたp型透明導電膜を太陽電池に応用した際の問題点を明らかにする。	<p>【24年度中間目標】 基本特性としてE<sub>g</sub>&gt;3.0eV、<math>\sigma &gt; 300\text{S/cm}</math>を達成する。従来のSnO<sub>2</sub>やZnOよりも開放電圧を50mV以上増加する。</p> <p>【26年度最終目標】 基本特性としてE<sub>g</sub>&gt;3.0eV、<math>\sigma &gt; 10^3\text{S/cm}</math>を達成する。</p>	
12	23 ～ 24	フルスペクトルTCO	旭硝子(株)	別元素添加による結晶誘電率制御を試みる。成膜条件、元素種類を検討し、結晶誘電率制御の効果を検証する。また成膜条件の調整により、結晶粒径を増大化し、移動度を向上する。また、光閉じ込め機能を追加するため、ガラス基板エッチング、TCOエッチングの検討を行う。	<p>【24年度中間目標】 400-2,000nmの波長での平均光吸収率が7%以内、波長1,000nmでヘイズ率80%以上、波長1,200nmでヘイズ率60%以上、比抵抗<math>1 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}</math>以下を達成する。</p> <p>【26年度最終目標】 400-2,000nmの波長での平均光吸収率が5%以内、波長1,000nmでヘイズ率80%以上、波長1,200nmでヘイズ率60%以上、比抵抗<math>1 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}</math>以下を達成する。</p>	
13	23 ～ 24	グラフェン透明導電膜	富士電機(株)	グラフェンの高品質化を目的にMBEによるグラフェンの製膜技術の開発を行う。主に成長のパラメータの抽出・最適化、表面制御を行う。MBEの技術を元に太陽電池への適応を想定した大面積化、低コスト化可能な製膜技術の原理検討を行う。	<p>【24年度中間目標】 シート抵抗<math>30 \Omega / \square</math>以下、透過率90%以上(380-2,000nm)を達成する。また、ITOなどのn型の透明導電膜使用時に比べ開放電圧を50 mV以上増加させる。</p> <p>【26年度最終目標】 シート抵抗<math>10 \Omega / \square</math>以下、透過率90%以上(380-2,000nm)を達成する。</p>	
③-5界面接合						
14	23 ～ 24	サブセル界面接合技術	三菱電機(株)	p型およびn型透明導電膜材料・製膜プロセスの高度化を行う。接合抵抗-電流密度の関係から伝導メカニズムを明確化し、接合抵抗が電流密度に依存しないオーミック接合を形成することを指標として要素技術の高度化を行う。サブセル界面構造を多接合セルに挿入し、セル特性の曲線因子に与える効果を検証する手法の開発も行う。	<p>【24年度中間目標】 サブセル界面抵抗として<math>200\text{m} \Omega \text{cm}^2</math> (測定電流密度<math>0.5\text{A/cm}^2</math>)を得る。</p> <p>【26年度最終目標】 サブセル界面抵抗として<math>100\text{m} \Omega \text{cm}^2</math> (測定電流密度<math>0.5\text{A/cm}^2</math>)を得る。</p>	
③-6光学設計技術						

15	23 ～ 24	光学設計技術	(株)カネカ	低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の光学設計技術として、太陽光スペクトルを短波長光と長波長光に分離し、閉じ込めるオプティカルカップリング・オプティカルスプリッティングによる光マネジメント構造の設計手法を開発する。化合物半導体太陽電池と薄膜シリコン太陽電池で直列・並列接続を組み合わせ形成する直並列多接合薄膜太陽電池を形成する技術開発を実施する。	<p><b>【24年度中間目標】</b> オプティカルカップリング構造の効果を確認する。光学的損失8%以下を達成する。カット波長を800-1,000nmの範囲で任意に変更できることを確認する。直並列3接合素子構造と通常の直列3接合とを比較し変換効率向上を確認する。</p> <p><b>【26年度最終目標】</b> 光学的損失5%以下を達成する。直並列4接合素子で変換効率30%以上の達成する。</p>
③-7裏面反射					
16	23 ～ 24	表面プラズモン	東京工業大学	特定の波長に対して反射・透過する、SiO <sub>2</sub> をマトリックスとする金属ナノ粒子膜を作製する。	<p><b>【24年度中間目標】</b> a-SiO/a-Si/<math>\mu</math>c-Siトリプル接合セルの裏面反射膜として作製し、<math>\mu</math>c-Siボトムセルからの光電流を2mA/cm<sup>2</sup>以上向上させ、トリプル接合セルの短絡電流密度9mA/cm<sup>2</sup>以上を達成する。</p> <p><b>【26年度最終目標】</b> a-SiO/a-Si/<math>\mu</math>c-Siトリプル接合セルの裏面反射膜として作製し、トリプル接合セルの短絡電流密度9.6mA/cm<sup>2</sup>以上を達成する。</p>

表 13. 研究開発項目別開発内容、目標③ (平成 25～26 年度)

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
③-1波長スプリットティングセル・発電特性						
1	25 ～ 26	薄膜フルスペクトル集光型セル・発電特性	東京工業大学 (再委託：木更津工業高等専門学校、岐阜大学)	シリコン系、カルコパイライト系などの薄膜、ならびに、これらを組み合わせた5接合等の薄膜フルスペクトル太陽電池を開発する。また、これらの薄膜フルスペクトル太陽電池を低倍率集光下で有効に動作させるためのデバイス技術を開発するとともに、薄膜フルスペクトル太陽電池の特性評価技術開発、屋外発電特性にもとづく最適設計技術を開発することによって、最終目標である真性変換効率40%を達成する。	【26年度最終目標】 (a) a-Si0トップセル開発 Voc=1.10V (1sun) 、1.20V(10 suns) Isc=9.5mA/cm2 (3.5-2.1eVまでの光電流計算値) (b) 量子ドットミドルセル 第3層セルとして Voc=0.78V 、Isc=9.5mA/cm <sup>2</sup> (1.7-1.4eV) (c) a-Si/c-Si系集光型多接合セル開発 初期変換効率 16%(1sun) 、18%(10suns) (d) 波長スプリットティングセル開発 変換効率30% (1sun)、40%(集光下) (e) 波長スプリットティング・低倍率集光薄膜フルスペクトル太陽電池の最適設計 低倍率集光型波長スプリットティングモジュールの屋内および屋外での発電特性評価技術の開発、および発電特性評価結果にもとづく年間発電量を最大化する最適設計技術の開発。	
③-2トップセル						
2	25 ～ 26	シリコン酸素系トップセル	シャープ(株)	シリコン酸素系トップセルでは、多接合薄膜太陽電池のシリコン系トップ層の太陽電池として、短波長光の光子エネルギー損失を低減できる太陽電池の開発を目的として、広バンドギャップa-Si0(C)膜の材料開発と接合界面での電子構造制御技術開発を行う。	【26年度最終目標】 開発した単接合セルの高開放電圧化技術を東工大へ移管、多接合化したシリコン系多接合セルのトップ層での開放電圧1.10V(集光時1.20V)、短絡電流密度9.5mA/cm <sup>2</sup> (3.5eV～2.1eVまでの計算値)を達成する。これと並行しながらシリコン系多接合セルでの接合界面の電子構造並びに屈折率変化の最適化技術の開発を進め、東工大でのシリコン系多接合セル作製をサポート、小面積の5接合薄膜フルスペクトルセルにより、真性変換効率40%(低倍率集光、有効受光面積：1cm <sup>2</sup> )を達成する。	
③-3ミドルセル						
3	25 ～ 26	カルコパイライト系剥離セル	立命館大学	サブストレート構造のカルコパイライトセルの剥離と裏面電極が透明なスーパーストレート剥離セルの作製技術を確立する。さらに、剥離セルを下部セルと貼り合せ、多接合セルを作製する。	【26年度最終目標】 二接合セルで変換効率9.7%(1sun)、11.2%(10sun)を、三接合セルで11.2%(1sun)、13.5%(10sun)を達成する。低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池を作製し、低倍率集光多	

					接合セルで真性変換効率40% (有効受光面積: 1cm <sup>2</sup> ) を達成する。	
4	25 ～ 26	カルコパイ ライト系集 光型セル	東京工業 大学	第2層のトップセルとしてAg(InGa)Se <sub>2</sub> セルの高効率化を図る。高Vocを有するセルを開発する。第3層のミドルセルとして高Ga組成のCu(InGa)Se <sub>2</sub> セルの高効率化を図る。高品質化のための高温製膜に取り組む。	【26年度最終目標】 (a) Ag(InGa)Se <sub>2</sub> トップセルの開発 Voc=0.95V(1sun)、 1.05V(10sun) Isc=9.5mA/cm <sup>2</sup> (2.1eV - 1.68eVまで) (b) Cu(InGa)Se <sub>2</sub> ミドルセルの開発 Voc=0.78V(1sun)、 0.88V(10sun) Isc=9.5mA/cm <sup>2</sup> (1.68eV-1.38eVまで)	
③-4ボトムセル						
5	25 ～ 26	Cu <sub>2</sub> SnS <sub>4</sub> 系セル	龍谷大学	低倍集光薄膜フルスペクトル太陽電池の第4層をCu(InGa)Se <sub>2</sub> (1.2eV程度)としたときの、第5層セル(0.8eV)として、非真空プロセスによりCu <sub>2</sub> SnS <sub>3</sub> 系薄膜およびセルを開発する。	【26年度最終目標】 Cu <sub>2</sub> SnS <sub>3</sub> 系ボトムセル(禁制帯幅0.8eV)でVoc=0.4 eV、フィルター透過光(1.1eV以下)でJsc=10.2mA/cm <sup>2</sup> を達成する。	
6	25 ～ 26	CIGS系ボトムセル	東京理科大学	高性能なナローギャップCIGS系ボトムセル(第4層)を開発し、低倍率集光で40%を狙うための要素技術を開発する。	【26年度最終目標】 CIGS系ボトムセルの効率、 3.8(4.5)% (Eg=1.38eVのCIGSフィルター下)、Voc=0.5(0.6)V、 Jsc=9.5mA/cm <sup>2</sup> 、FF=0.80 (感度波長域899～1127nm、 ( )内は低倍集光時。)を達成する。	
③-5透明導電膜						
7	25 ～ 26	p型透明導電膜	龍谷大学 (共同実施: 新潟大学)	低倍集光薄膜フルスペクトル太陽電池用p型TCOへの要求特性を満足するp型透明導電膜の材料および薄膜作製技術の開発を行う。	【26年度最終目標】 Mo等の不透明電極材料を用いた場合と同等の太陽電池特性を達成する。また、n型透明導電膜との組み合わせによる太陽電池特性の向上を確認する。	
8	25 ～ 26	トップセル用TCO	旭硝子 (株)	a-Si <sub>0</sub> /a-Siタンデムセルのスペクトル感度帯域で透過率を最大化するために、TCO、ガラス/空気界面AR、ガラス/TCO界面ARの開発を行う。あわせてa-Si/μc-Si/μc-Siタンデム向けの高ヘイズ・高透過TCO基板の開発も行う。	【26年度最終目標】 シート抵抗5Ω/□以下、エネルギー透過率91%以上 (AM1.5スペクトルの350～766nmでの平均。透過率はIM法で測定)を達成する。	
③-6界面接合						
9	25 ～ 26	新型TCO/p-Si <sub>0</sub> 界面技術	三菱電機 (株)	TCO材料のバンドギャップを増加させて光透過率を向上すると共にバンドギャップの広いp-Si <sub>0</sub> との界面ポテンシャルを改善して接合抵抗を低減することで、太陽光の集光照射下での光損失が少なく、TCO/p-Si <sub>0</sub> 界面を貫通時の電圧降下を抑制して電流を流せるTCO及び接合技術を開発する。	【26年度最終目標】 新型TCOに用いる透明導電膜材料・構造の開発により吸収端波長として320nm、1100nmの透過率80%を、TCO/p-Si <sub>0</sub> 界面瀬接合層材料・作製プロセスの開発により、TCO/p-Si <sub>0</sub> 接合抵抗として100mΩ cm <sup>2</sup> を得る。	
③-7光学設計/システム技術						



10	25 ～ 26	光学設計/システム化技術	(株)カネカ	低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の光学設計技術およびシステム化技術を開発する。太陽光スペクトルを短波長光と長波長光に分離するオプティカルスプリッティングによる光マネージメント構造の研究開発により薄膜フルスペクトル太陽電池の高効率化に対する効果を実証する。あわせて屋内と屋外の評価システムの検証により、フルスペクトル太陽電池の発電システムを設計するための要素技術を開発する。	<b>【26年度最終目標】</b> 貼り合わせおよびオプティカルスプリッティングによる変換効率40%の達成。低倍率集光で変換効率40%を達成するためのオプティカルスプリッタ開発。光学的損失を5%以下まで低減。低倍率集光によるオプティカルスプリッティング構造の屋外暴露システムにおける課題抽出し、暴露による屋外出力変動を取得する。
11	25 ～ 26	低倍率集光システム構築	パナソニック(株)	集光・追尾システム技術の開発を行い、集光率10倍以上のシステムを構築する。開発した集光・追尾システム技術を中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池及び屋外計測システムに適用し、実績発電量より集光・追尾システム技術の実用性を検証する。	<b>【26年度最終目標】</b> 集光・追尾システム技術を低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池及び屋外計測システムに適用、集光効率90%を実現する集光・追尾システム技術を確立する。

④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）

本テーマでは、集光型多接合太陽電池、薄膜多接合太陽電池の高精度な評価技術を米国の研究機関と共同で開発し、それに基づき各国間で国際的に整合性のある測定技術の確立・標準化を目指す。多接合太陽電池の屋内試験技術に強い日本と、晴天率・直達光比率が高い地域を多く持つ米国での蓄積を組みあわせ、共同で革新的太陽電池の評価試験技術を確立し、もって革新的太陽電池の研究開発の加速に資する。

本テーマの全体目標としては、以下とする。

平成 22 年度最終目標

集光型多接合太陽電池について、集光型太陽電池の屋内における高精度評価技術の開発を完了すると共に、日本と米国内での屋内外性能測定との比較検証を行う。

薄膜多接合太陽電池について、従来開発した単接合および従来型 2 接合太陽電池の評価技術をベースに、従来より広いスペクトル領域で感度特性を有する Si 系以外および 3 接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池の評価技術の開発を完了する。

表 14. 研究開発項目別開発内容、目標④（平成 21～22 年度）

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
1	21 ～ 22	集光型多接合太陽電池評価技術	産業技術総合研究所	セル単体の高強度光源による評価、および集光光学系+セルからなる集光太陽電池ユニットの高平行度光源による評価の両方を日米で実施、比較し、セル性能・集光系性能両方の測定精度を検証する。日米における太陽電池からの出力および直達光拡散光・分光放射照度スペクトル等をはじめとする気象条件を測定する。	【22年度最終目標】 3接合以上の多接合で集光倍率500倍以上に対応できる国際的整合性を持った高精度な評価技術及び屋外での出力に与える影響を定量的に比較、予測および解析する技術の完成	
2	21 ～ 22	薄膜多接合太陽電池評価技術	産業技術総合研究所	革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池に予測される集積型モジュール構造での評価に対応できる技術を開発する。革新的太陽電池およびそれに用いられる新材料の部材・組成・不純物等評価および基本的な光・熱等の環境に対する信頼性を検証する。	【22年度最終目標】 Si系以外および3接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池の評価技術の完成	

⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）

本テーマでは、高効率集光型太陽光発電デバイスの新構造と製造プロセスに関する研究開発、並びに、それらのデバイスに適した新たな特性評価技術の開発を、重点開発項目とし、更に、高効率集光型太陽電池セル、モジュール用新材料の開発も行う。

本テーマの全体目標としては、以下とする。

平成 24 年度中間目標

セル変換効率 42%以上、モジュール変換効率 33%以上を達成し、集光型太陽電池の高精度測定の課題を明確にする。

平成 26 年度最終目標

セル変換効率 45%以上、モジュール変換効率 35%以上を達成し、集光型太陽電池の標準測定技術（測定再現性 $\pm 0.5\%$ 以内）を確立する。

表 15. 研究開発項目別開発内容、目標⑤ (平成 23～26 年度)

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
1	23～26	新材料・新構造太陽電池の創製及び評価解析技術の開発	豊田工業大学 (再委託：宮崎大学、旭化成(株))	Ⅲ-V-N系薄膜のX線による三次元逆格子マップを測定し、N組成増加による転位挙動、転位伝播速度、伝播方向等を立体的に解析する。光学特性を、レーザー変調光反射(PR)法、圧電素子光熱変換分光(PPT)法やクライオスタットによる一軸圧力下でのフォトルミネッセンス(PL)測定、および時間分解PL測定等により検討し、Ⅲ-V-N系薄膜のバンド端構造及びN原子起因の欠陥準位に関する知見を得る。	【24年度中間目標】 Ⅲ-V-N系新材料、Ⅲ-V系オン・シリコン新構造の評価解析技術を確立する。  【26年度最終目標】 Ⅲ-V-N系新材料、Ⅲ-V系オン・シリコン新構造太陽電池でセル変換効率30%以上を達成する。	
2	23～26	集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発	東京大学 (再委託：神戸大学、タカノ(株))	集光型3接合タンデムセルの実現に向けて、Geボトムセルと格子整合し、1.1-1.2eV帯のエネルギー領域をカバーする量子・ナノ材料、構造の開発を行う。量子・ナノ構造における光励起キャリアダイナミックスの評価解析技術を開発する。	【24年度中間目標】 量子・ナノ材料、構造におけるキャリア励起・緩和ダイナミックス、キャリア寿命等の評価解析技術、また量子・ナノ構造セル特性評価解析技術を確立する。  【26年度最終目標】 量子・ナノ構造セルにおいてセル変換効率30%以上を達成するSi系以外および3接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池の評価技術を完成する。	
3	23～26	先進構造による高効率集光型太陽電池の開発	シャープ(株)	①「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」において開発された集光型太陽電池セルとモジュールをカスタマイズすることにより、標準測定技術の確立に寄与する。また、項目1、2で開発する新材料、新構造を適用した高効率集光型太陽電池の開発を実施する。	【24年度中間目標】 セル変換効率42%以上を達成する。  【26年度最終目標】 セル変換効率45%以上を達成する。	
4	23～26	集光型太陽電池セル、モジュールの標準測定技術の開発	産業技術総合研究所	集光型太陽電池セルの評価を日本およびEUにて実施、比較し、性能評価の測定精度を検証する。集光型太陽電池ミニモジュール(太陽電池セル+集光光学系)の高平行度ソーラーシミュレータによる屋内評価技術を開発する。	【24年度中間目標】 各種集光型太陽電池の200倍から1,000倍程度の集光時に於ける性能評価において、測定精度の検証と高精度化のための課題を明確にする。  【26年度最終目標】 多接合集光型太陽電池の性能評価において、変換効率の測定再現性が±0.5%以内の測定技術をEU側研究機関と共同で確立する。	
5	23～26	高効率集光型太陽電池モジュール	大同特殊鋼(株)	標準測定技術確立の為に、標準レシーバと標準ユニットを開発する。集光型太陽電池用	【24年度中間目標】 モジュール変換効率33%以上を達成し、既存集光型太陽	

		の開発と集光型太陽光発電システム実証		日射品質指標や屋外校正技術も開発する。実用面と性能面ともに優れる集光光学系の開発も行う。	光発電システムのデータ収集・解析を完了する。  【26年度最終目標】 モジュール変換効率35%以上を達成し、50kW集光型太陽光発電システムのデータ収集・解析、発電量予測を完了する。	
--	--	--------------------	--	--	--	--

## 2.2 研究開発の実施体制

本事業を実施するための基本計画については、平成19年12月、平成20年1月に外部有識者による革新型太陽光発電技術開発に係る検討委員会ならびに平成20年1月に外部有識者による太陽光発電技術委員会においてその方向性を審議し、平成20年3月に策定された。また、平成21年8月に「革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）」を追加し改訂された。更に、平成22年3月に「高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日EU共同開発）」を追加し改訂された。

本事業は、NEDOが選定する企業、大学、民間研究機関、あるいは独立行政法人等（以下、「委託先」）が、NEDOと業務委託契約を締結し実施した。

実施した公募の状況は以下のとおりである。

### 【平成20年度】

公募期間：

平成20年3月19日から4月21日

審査項目・基準：

- 1) 提案内容が本公募要領に記載の「事業の概要」に示す目的・要件と合致していること。
- 2) 提案内容に新規性・革新性があり、技術的に優れていること。
- 3) 共同提案の場合、研究開発テーマ内の各研究機関の提案内容が相互補完的であること。
- 4) 提案された研究内容・研究計画は実現可能であること。（技術的可能性、計画、目標の妥当性等）
- 5) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有していること。
- 6) 応募者が当該研究開発を行うことにより国民生活や経済社会への波及効果が期待できること。
- 7) 総合評価

採択審査委員会（敬称略）：

- 委員長 黒川 浩助（東京工業大学 特任教授）  
委員 工藤 一浩（千葉大学 教授）  
委員 田中 一宣（科学技術振興機構 上席フェロー）  
委員 渡辺 征夫（九州電気専門学校 校長）

件数：

応募7件、採択3件

### 【平成21年度】

公募期間：

平成21年8月28日から9月28日

審査項目・基準：

- 1) 提案内容が本公募要領に記載の「事業の概要」に示す目的・要件と合致しているか。
- 2) 提案内容に新規性・革新性があり、技術的に優れているか。
- 3) 共同提案の場合、研究開発テーマ内の各研究機関の提案内容が相互補完的であるか。
- 4) 提案された研究内容・研究計画は実現可能であるか。（技術的可能性、計画、目標の妥当性等）
- 5) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有しているか。（関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究予定先等を含めた実施体制、優秀な研究者の参加等）
- 6) 応募者が当該研究開発を行うことにより国民生活や経済社会への波及効果が期待できるか。
- 7) 総合評価

採択審査委員会（敬称略）：

- 委員長 黒川 浩助（東京工業大学 特任教授）  
委員 小長井 誠（東京工業大学 教授）  
委員 山口 真史（豊田工業大学 教授）

委員 和田 隆博（龍谷大学 教授）

件数：

応募1件、採択1件

【平成22年度】

公募期間：

平成22年7月20日から11月25日

審査項目・基準：

1) 提案内容の妥当性について

- ・ 研究内容と目標設定は本事業の目的に対応して妥当かつ明確か
- ・ 提案内容は、新規性があり、技術的に優れているか
- ・ 研究計画内容は目標達成の観点から効率的かつ妥当か

2) 研究実施体制等の妥当性について

- ・ 目標達成をするための具体的な研究手順は適切であるか
- ・ 研究開発の管理体制や管理手順が適切であるか
- ・ 提案者は本研究開発を遂行するための高い能力を有し、関連分野での実績は十分であるか
- ・ 予算配分や研究者等の研究実施体制は適切であるか

3) 波及効果について

- ・ 本研究開発を行うことにより、ECのワークプログラムあるいはNEDOの基本計画に言及されている波及効果に貢献しているか
- ・ プロジェクトの成果の普及や活用及び知的財産権の管理等の対策が適切であるか

4) 日EU共同実施の重要性について

- ・ 欧州と共同で実施することにより、両者にとってメリットのある研究内容であるか
- ・ 共同実施体制は妥当であるか（相互補完性、明確な役割分担とそのバランス等）

採択審査委員会（敬称略）：

委員長 黒川 浩助（東京工業大学 特任教授）

委員 田中 一宣（科学技術振興機構 上席フェロー）

委員 桑野 幸徳（太陽光発電技術研究組合 理事長）

件数：

応募2件、採択1件

研究開発の実施体制を図1～11に示す。

図1. 実施体制①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発  
(平成20～22年度)

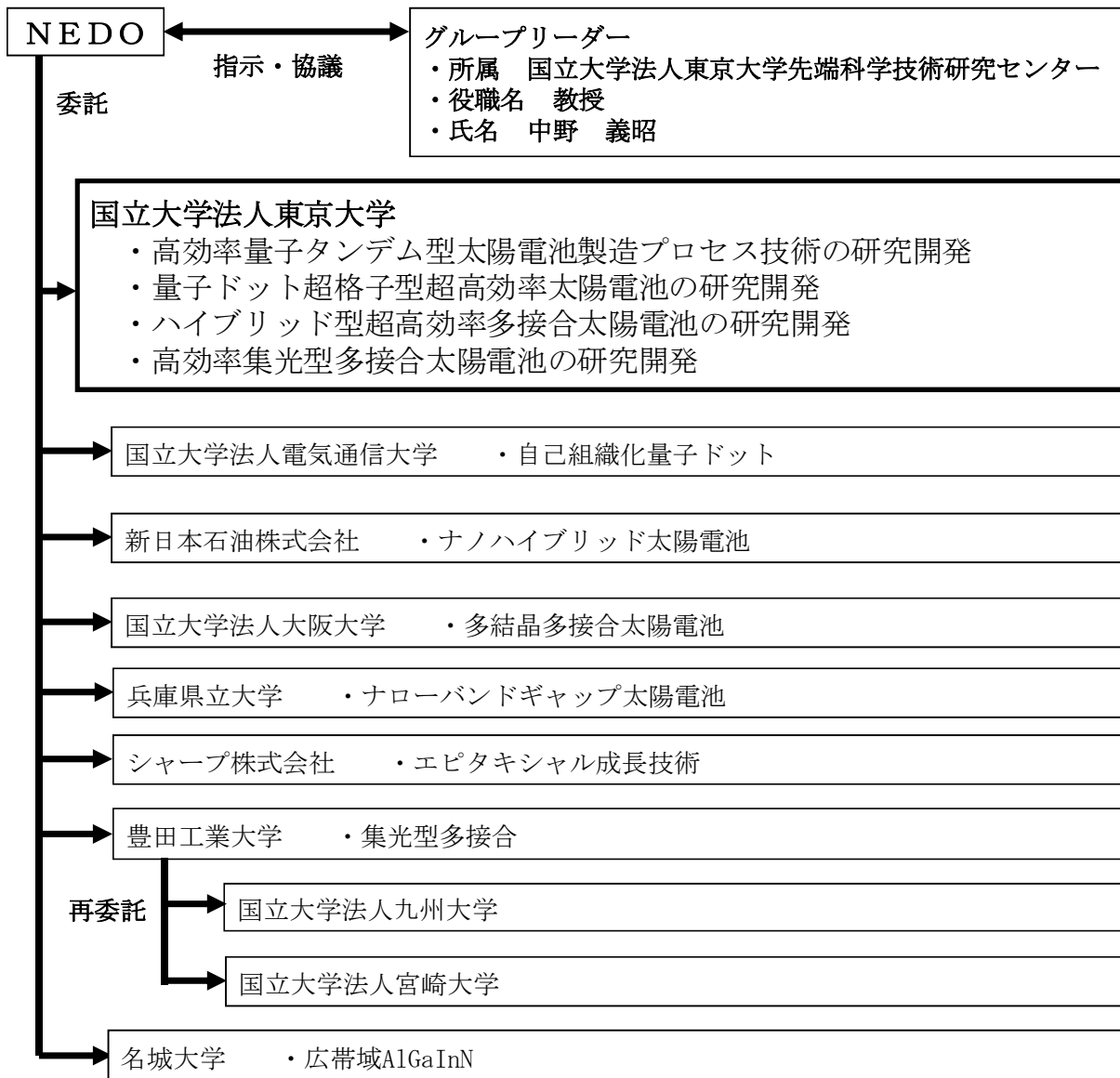




図2. 実施体制①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発  
(平成23～24年度)

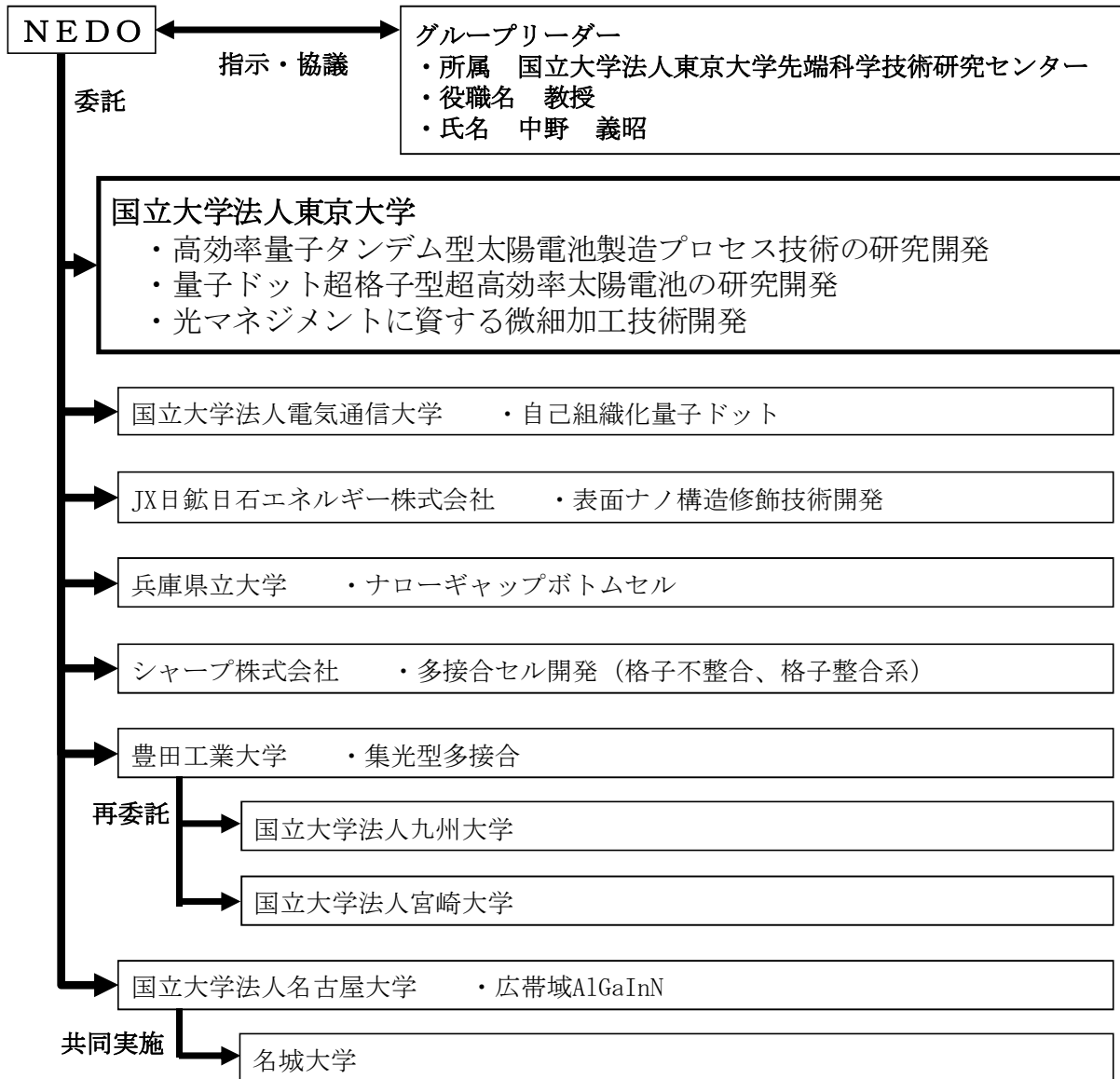


図 3. 実施体制①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発  
(平成 25～26 年度)

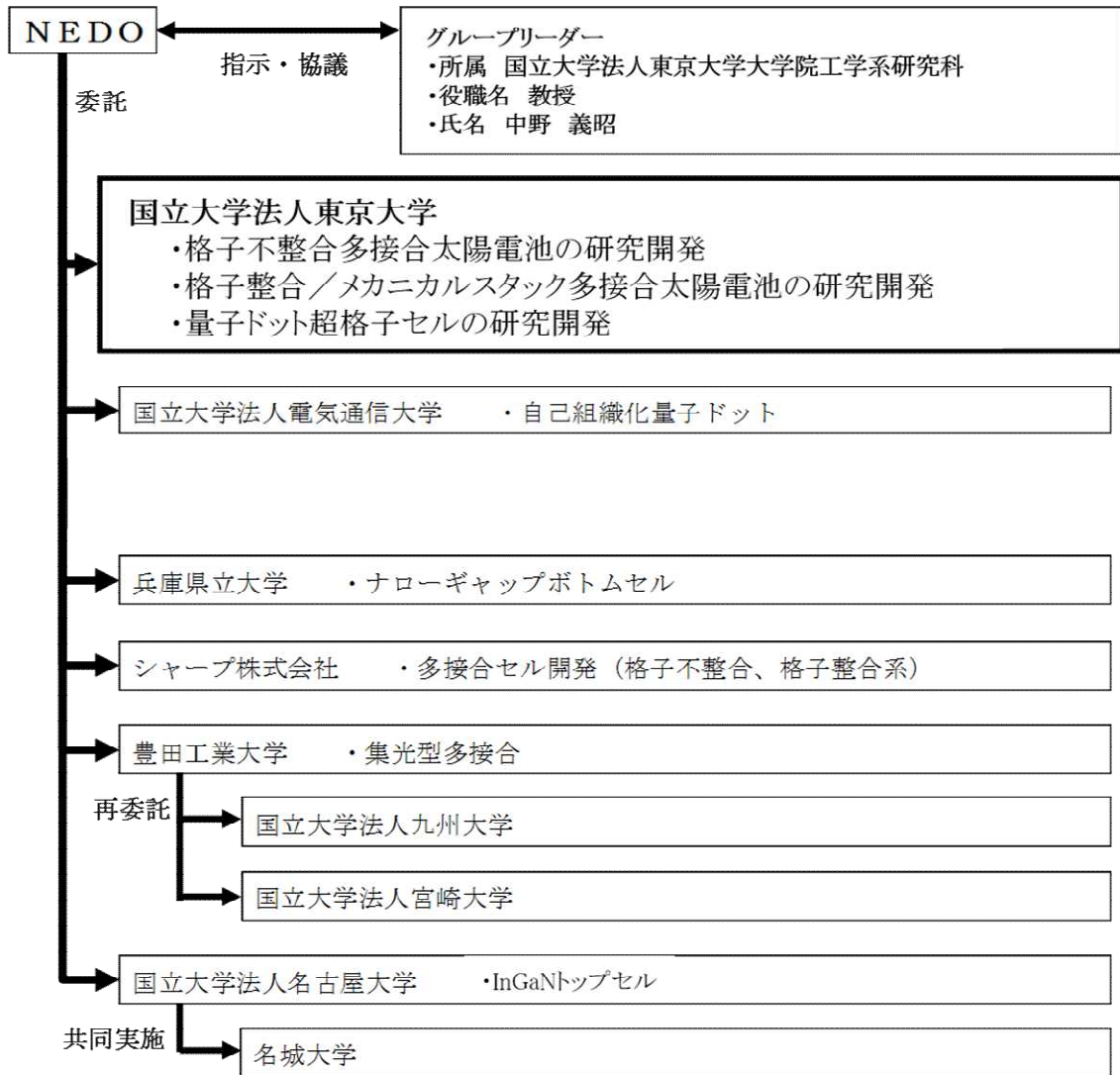


図 4. 実施体制②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発  
(平成 20～22 年度)

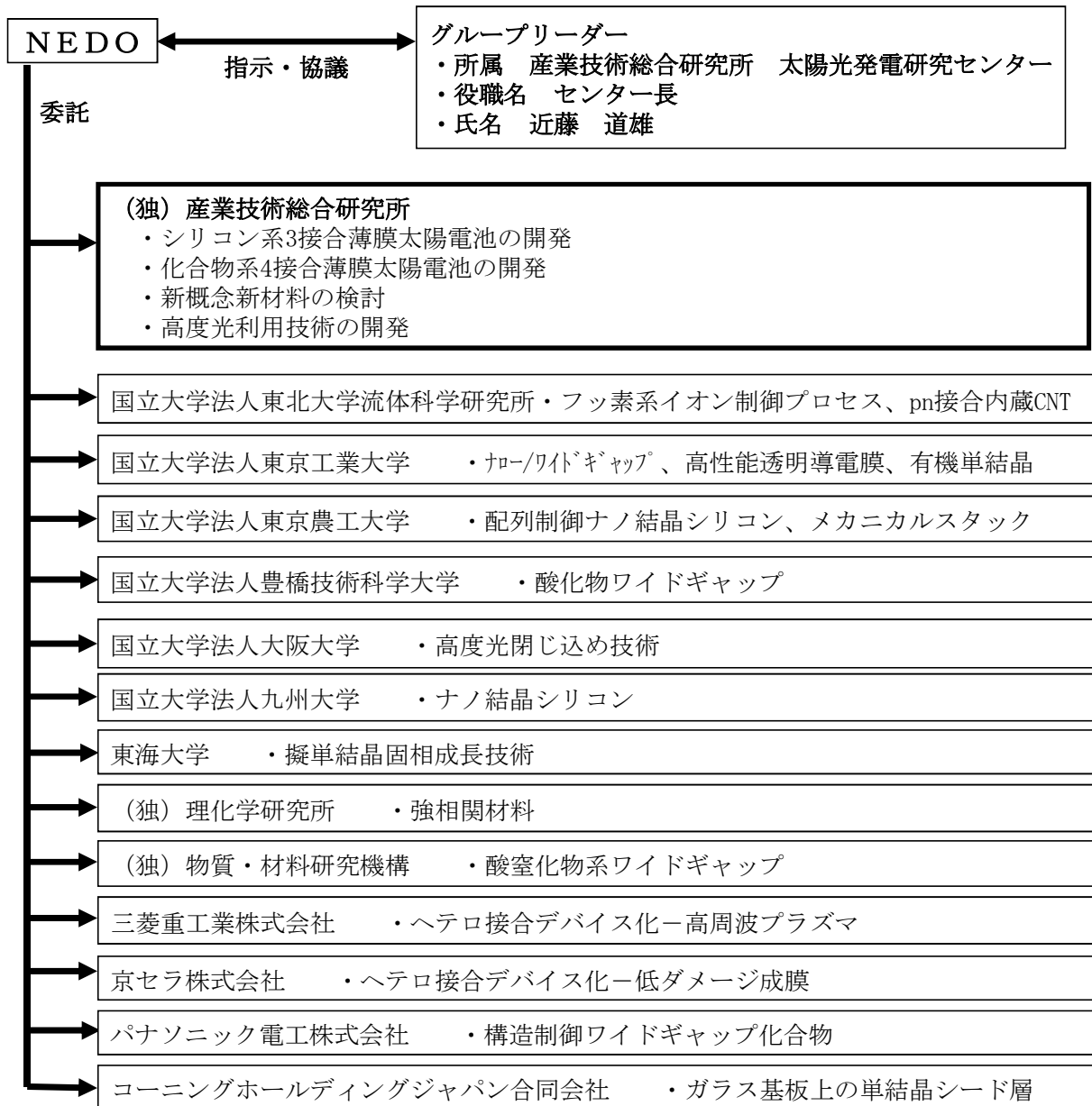


図 5. 実施体制②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発  
(平成 23～24 年度)

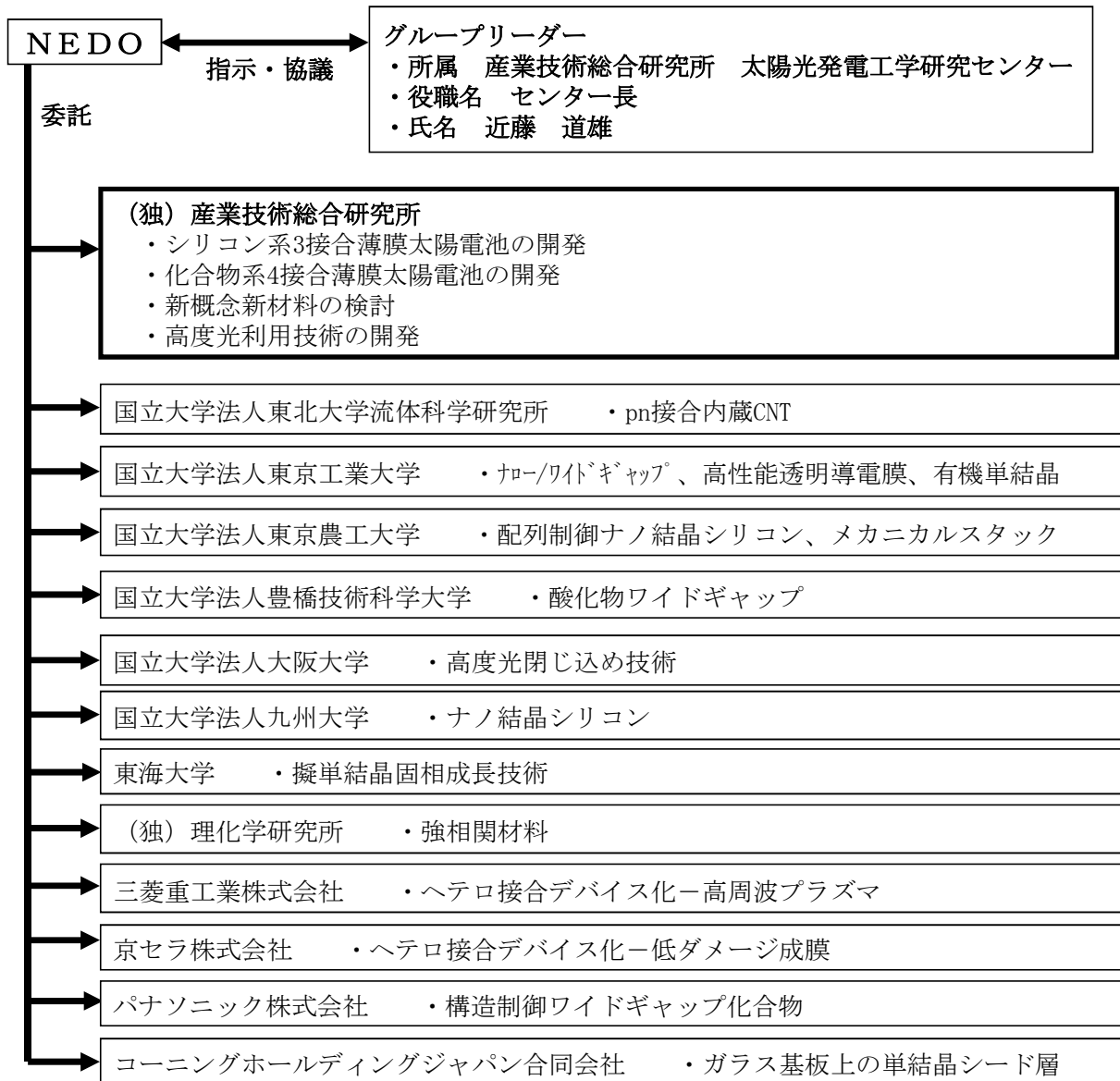


図 6. 実施体制②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発  
(平成 25～26 年度)



図 7. 実施体制③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発  
(平成 20～22 年度)

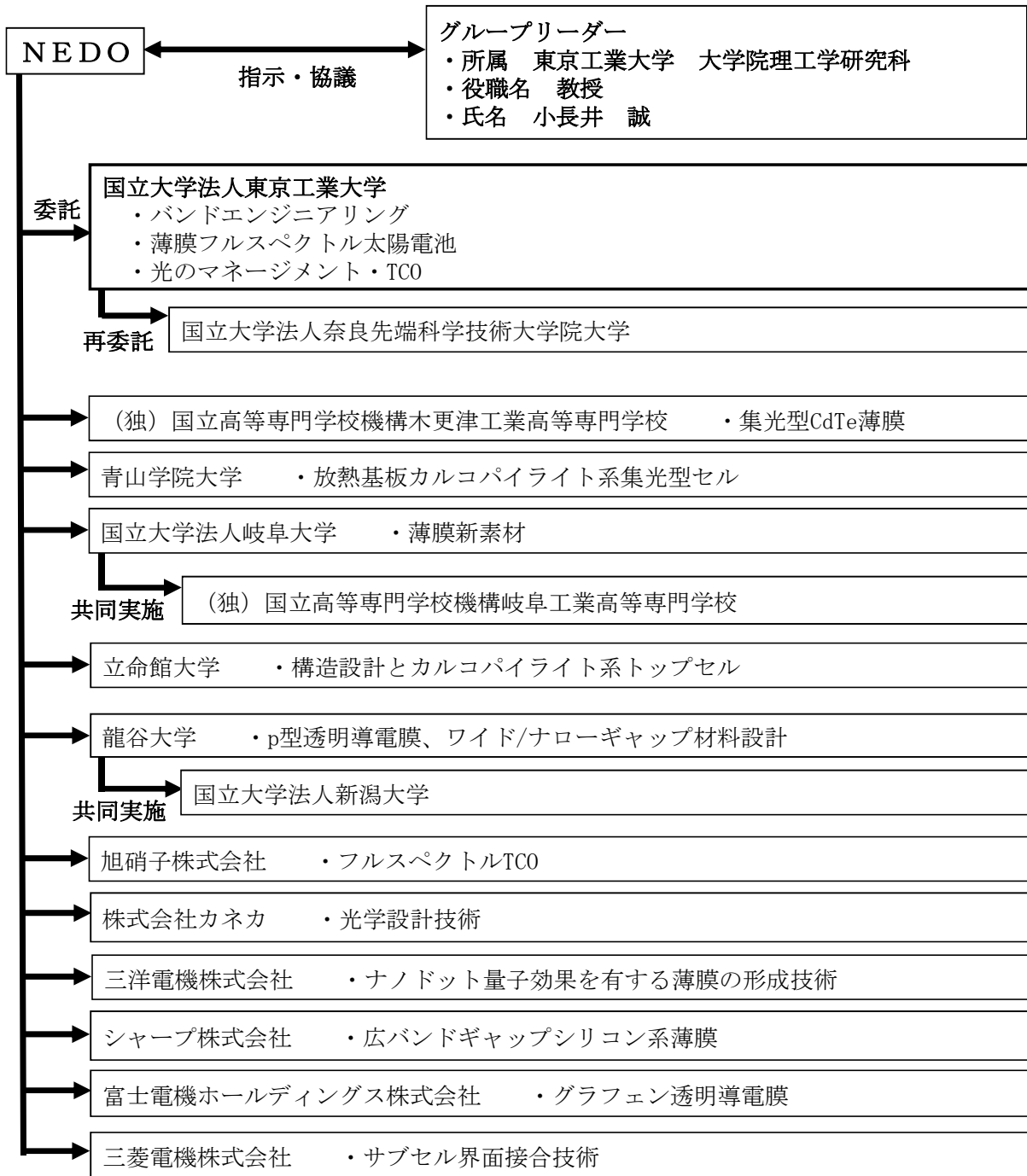


図 8. 実施体制③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発  
(平成 23～24 年度)

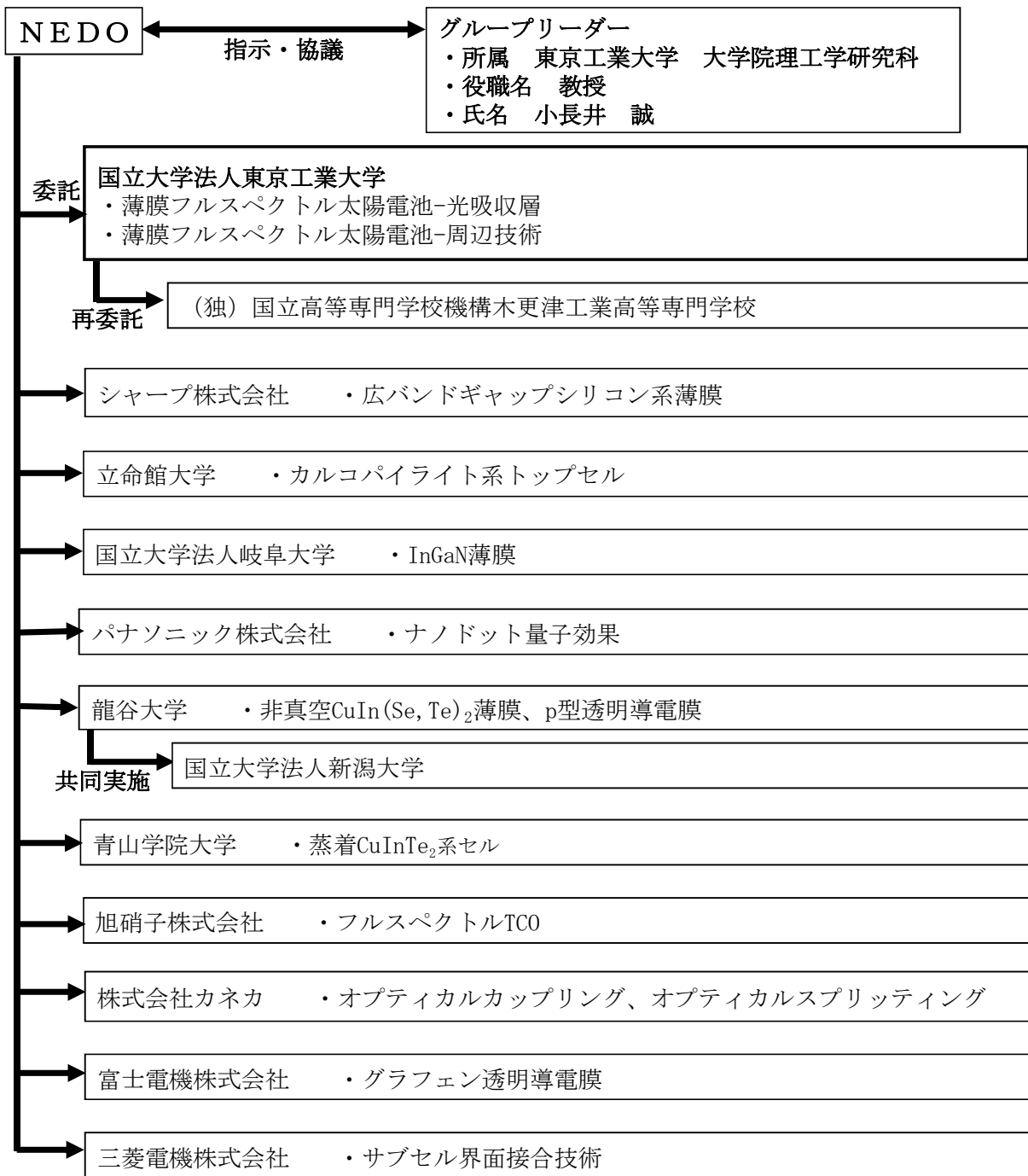


図9. 実施体制③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発  
(平成25～26年度)

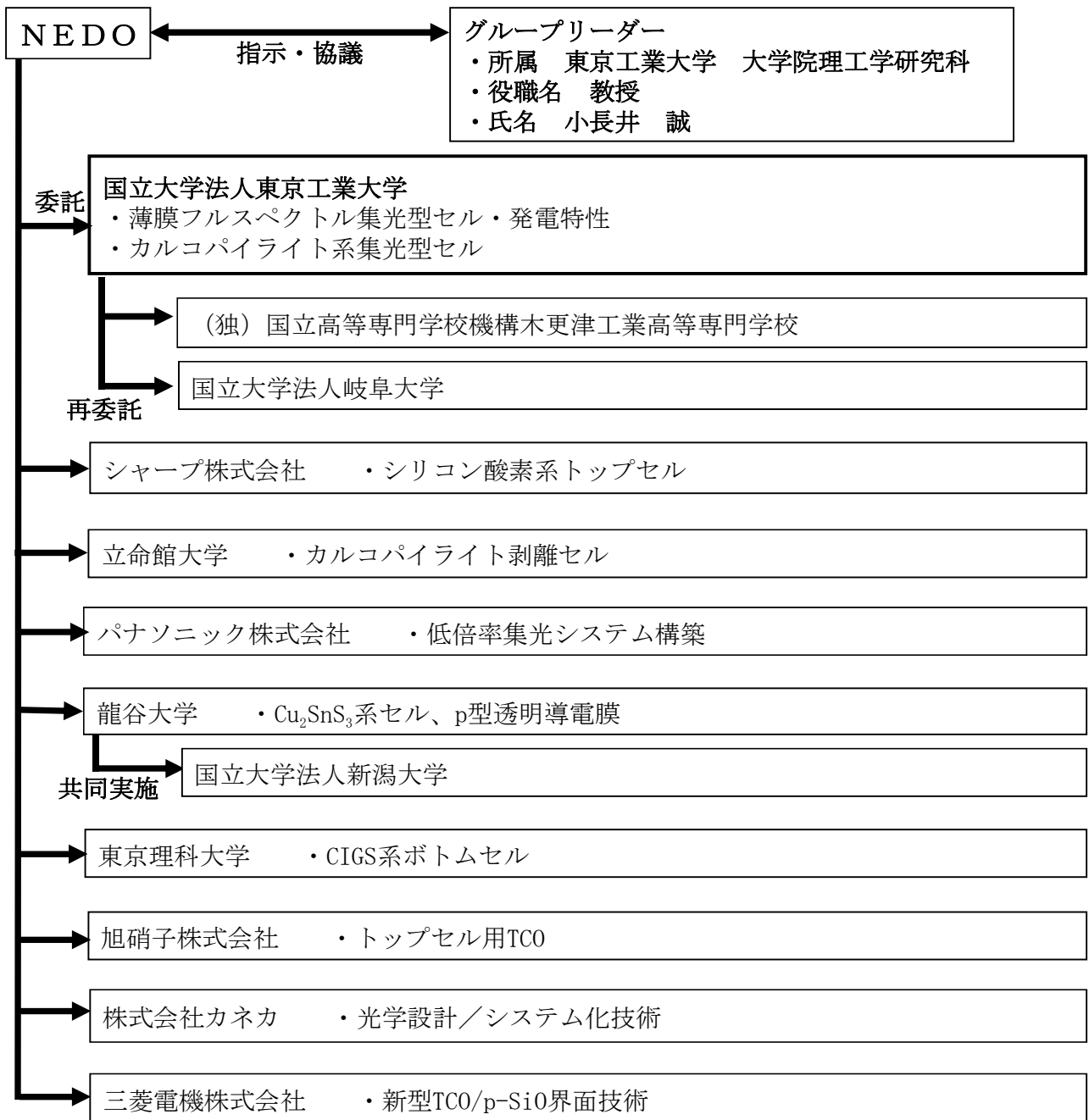




図 10. 実施体制④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）  
（平成 21～22 年度）

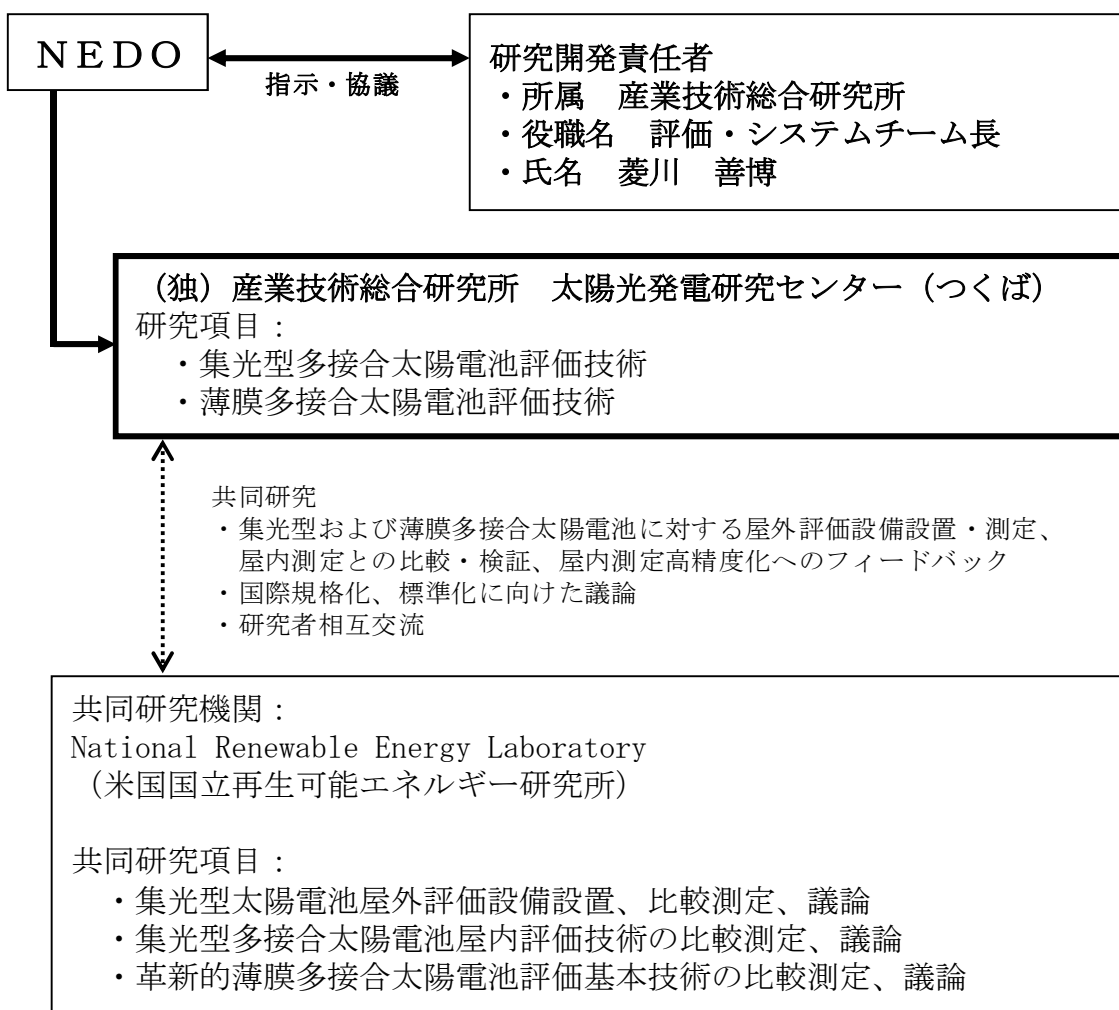
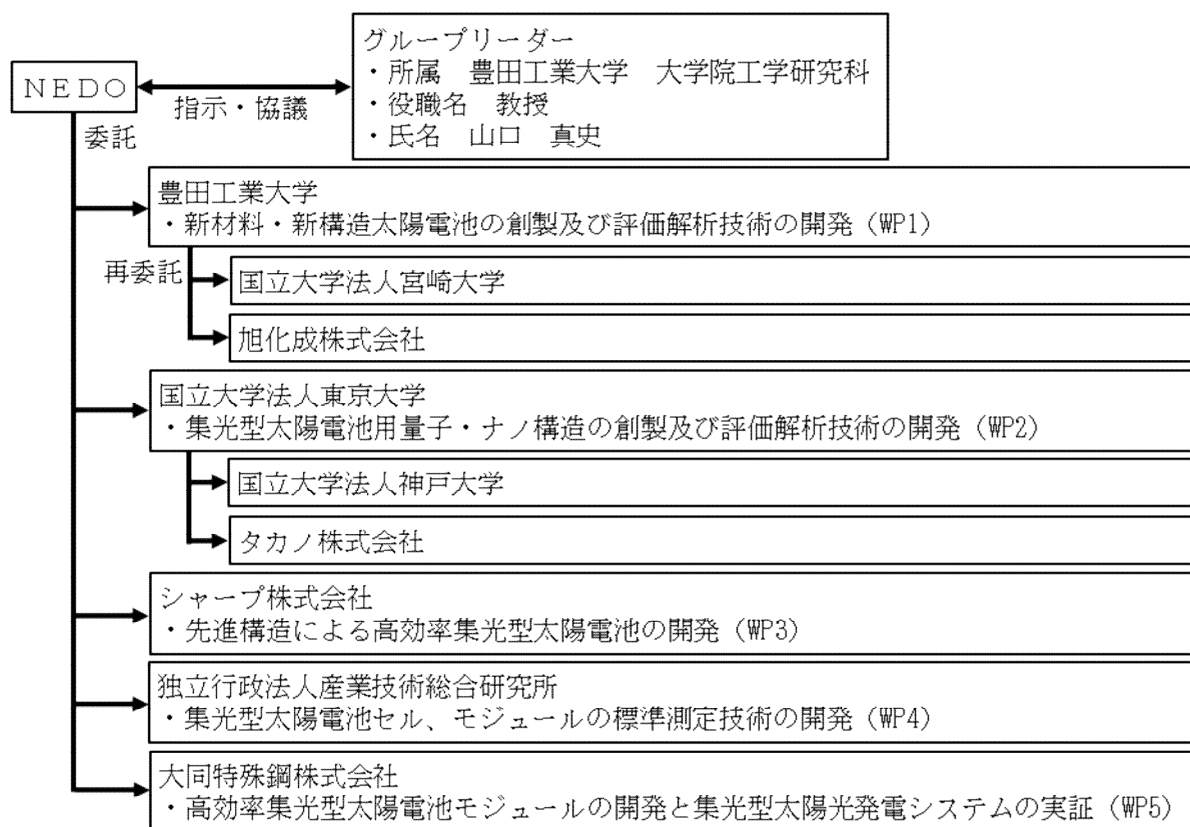


図 11. 実施体制⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発  
 (日 EU 共同開発) (平成 23~26 年度)



↑  
 共同開発  
 ↓

**【共同開発機関】**  
 UPM : Universidad Politécnica de Madrid  
 FhG-ISE : Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme  
 ICSTM : Imperial College of Science Technology and Medicine  
 ENEA : Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l' energia e lo sviluppo economico sostenibile  
 BSQ : Compañía Española de Alta Eficiencia Fotovoltaica BSQ Solar, SL  
 CEA-INES : Commissariat à l' Energie Atomique - Institut National de l' Energie Solaire

### 2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任と決定権をもつ NEDO は、経済産業省と密接な関係を維持しつつ、研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施した。また NEDO 新エネルギー部で実施する太陽光発電技術開発に関する全事業のあり方やロードマップの策定等について、外部有識者の意見を聴取するために太陽光発電技術委員会を開催し、運営管理に反映させた。

具体的に本プロジェクトに関しては、平成 19 年 12 月の「第 1 回革新型太陽光発電技術開発に係る検討委員会」から、平成 20 年度以降の技術開発・研究開発の中で取り上げられ、それ以後、技術開発の進め方や公募の開発課題に関する意見を求め、公募要領に反映した。またプロジェクト実施期間中においては、その方向性や実施内容について意見を求め、研究開発の運営に反映した。（表 16 参照）

表 16. 太陽光発電技術委員会の実施状況

実施時期	実施項目	内容
平成 19 年 12 月	第 1 回革新型太陽光発電技術開発に係る検討委員会	「革新型太陽電池国際研究拠点整備事業」においてとりあげる技術分野、プロジェクトの構築方法など
平成 20 年 1 月	第 2 回革新型太陽光発電技術開発に係る検討委員会	「革新的太陽光発電技術研究開発」の全体スキームおよび当面の実施の方向
平成 20 年 2 月	第 10 回太陽光発電技術委員会	平成 20 年度研究開発体制、「太陽光発電システム未来技術研究開発」中間評価結果、各プロジェクト基本計画（案）、実施方針（案）
平成 21 年 6 月	第 12 回太陽光発電技術委員会	平成 21 年度の実施方針と平成 22 年度以降の新規プロジェクト、PV2030+の公開など

また、5 グループにおいてそれぞれ GL（グループリーダー）主催による進捗報告会を年に数回開催した。進捗報告会においては、GL が進捗状況について委託先から報告を受け、開発の方向性などを審議し、必要に応じて開発内容を修正を行ってきた。（表 17 参照）

表 17. 進捗報告会の実施状況

実施項目	開催時期
東大グループ全体会議 （ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発）	平成 20 年 9、11 月、平成 21 年 2、4、6、8、10 月、平成 22 年 1、3、4、6、12 月、平成 23 年 2、4、5、10 月、平成 24 年 4、7 月、平成 25 年 4 月、平成 26 年 3 月、平成 27 年 2 月
産総研グループ全体会議 （高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発）	平成 20 年 11 月、平成 21 年 8 月、平成 22 年 1、7 月、平成 23 年 2、9 月、平成 24 年 2、12 月、平成 25 年 9 月、平成 26 年 1、8 月、平成 27 年 2 月
東工大グループ全体会議 （低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発）	平成 20 年 8、12 月、平成 21 年 7、10 月、平成 22 年 5、10 月、平成 23 年 3、7、11 月、平成 24 年 3、6 月、平成 25 年 10 月、平成 26 年 4、10 月、平成 27 年 2 月
日米共同開発全体会議 （革新的太陽電池評価技術の研究開発）	平成 22 年 6、10、12 月、平成 23 年 2、3 月
日 EU 共同開発全体会議 （高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発）	平成 23 年 6、8、12 月、平成 24 年 3、4、7、11 月、平成 25 年 4、7、10、11 月、平成 26 年 4、5、10、11 月

さらに成果の発信・公表の場として、年度毎の成果報告会を、他の太陽電池関連事業と共に実施している。（表 18 参照）

表 18. 成果報告会等の実施状況

実施項目	開催時期	場所
平成 20 年度成果報告会	平成 21 年 7 月 17 日	はまぎんホールヴィアマール (横浜市みなとみらい)
平成 21 年度成果報告会	平成 22 年 7 月 27-28 日	東京国際フォーラム (東京都千代田)
平成 22 年度成果報告会	平成 23 年 11 月 8 日	はまぎんホールヴィアマール (横浜市みなとみらい)
平成 23 年度成果報告会	平成 24 年 12 月 20 日	はまぎんホールヴィアマール (横浜市みなとみらい)
平成 24 年度成果報告会	平成 25 年 12 月 16 日	パシフィコ横浜 (横浜市みなとみらい)
平成 25 年度成果報告会	平成 26 年 9 月 18 日	パシフィコ横浜 (横浜市みなとみらい)

加えて、成果の発信・公表ならびに情報交換の場として、本事業の 3 グループ（東大・産総研・東工大）合同開催で国際シンポジウムを実施している。（表 19 参照）本シンポジウムでは、さらなる研究加速の為に、欧米等から研究員を招聘して世界の最先端研究についての講演も行っている。

表 19. 革新的太陽光発電国際シンポジウムの実施状況

実施項目	開催時期	場所
第 1 回 革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 21 年 3 月 2-3 日	東京大学先端科学技術研究センター (東京都目黒区)
第 2 回 革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 21 年 12 月 7-8 日	つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
第 3 回 革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 22 年 10 月 7-8 日	東京工業大学大岡山キャンパス (東京都目黒区)
第 4 回 革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 24 年 3 月 5-6 日	東京大学先端科学技術研究センター (東京都目黒区)
第 5 回 革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 25 年 1 月 21-22 日	つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
第 6 回 革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 26 年 1 月 20-21 日	東京工業大学大岡山キャンパス (東京都目黒区)
第 7 回 革新的太陽光発電国際シンポジウム	平成 27 年 1 月 19-20 日	東京大学先端科学技術研究センター (東京都目黒区)

また他の太陽電池関連事業も含めて、ホームページや展示会による広報、事業紹介パンフレットの作成、学会やシンポジウムでの講演、国際学会への参加と発表、雑誌への寄稿などを通じて成果の発信に努めている。

#### 2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

研究開発成果の実用化に向けては、進捗報告会などを用いた迅速な進捗状況の把握を行い、進捗が著しいテーマについて、補正予算、加速流用予算等の予算手当てを行い、実証評価を行える段階に進めるようマネジメントした。一例として、「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」では、セル変換効率が目標通りに向上していることから、新たにモジュール開発も研究開発項目として設定し、実証評価を行うこととした。

また、本事業は基礎・基盤に位置づけられる超長期の事業であるが、常に出口候補企業の事業方針を確認し、実証評価を行うことと実用化がリンクするように調整をした。

知的財産権についても、事業の進捗に併せ、出口候補企業と中心機関等が密接に連動するよう留意した。

### 3. 情勢変化への対応

#### 【平成 20 年度】

予算総額 29.0 億円（当初示達額 20.0 億円、補正示達額 5.0 億円、加速流用額 4.0 億円）  
次年度繰越額 2.0 億円

平成 20 年度の公募では、採択審査委員会で特に優良な評価を受けた以下 3 件を採択候補とした。

KPV20-001 提案者：国立大学法人東京工業大学

KPV20-003 提案者：独立行政法人産業技術総合研究所

KPV20-005 提案者：国立大学法人東京大学

しかしながら、KPV20-005 については太陽電池研究開発で実績のある研究者が、他採択候補と比較して不足していると考えられ、成果の創出に向けⅢ-V 族化合物系太陽電池の技術に実績のある研究者を充当することが必要であると判断された。採択審査委員会では、この点を補う為に、別提案である KPV20-002（提案者：豊田工業大学）の一部を組み込んで実施することが下記の理由から有効との結論に至り、上記 3 提案（KPV20-001、KPV20-003、KPV20-005）のみを採択する場合には当初示達額の範囲内で実施出来る見込みではあったが、加速流用予算を手当てし、より体制を強化し研究開発を推進することとした。

豊田工業大学の山口真史教授等はⅢ-V 族化合物系太陽電池の研究に関し 20 年以上の実績があり、特に結晶成長表面反応の制御等による欠陥密度の低減に研究実績がある。太陽電池とは直接的に関係してこなかった研究者が多い東京大学の研究に、豊田工業大学の知見を生かすことで新しい概念の太陽電池においても結晶中の欠陥密度の低減やキャリア濃度の制御が早期に達成され変換効率の向上に大きく貢献することが期待される。

また、補正予算として 5.0 億円を手当てし、平成 21 年度又は平成 22 年度に購入予定とした装置の一部を平成 20 年度に前倒し購入することで研究開発を加速した。

#### 【平成 21 年度】

予算総額 28.2 億円（当初示達額 15.0 億円、補正示達額 9.0 億円、前年度繰越額 2.0 億円、  
加速流用額 2.2 億円）  
次年度繰越額 10.2 億円

平成 21 年度の公募では、革新的太陽電池の実用化に向け必要となるモジュール評価技術を確立する為に、補正予算として 9.0 億円を手当てし、1 件を採択した。

「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」の内、研究開発の進捗により新たな課題が明確となった、研究開発項目「高倍集光セル微細加工技術」「量子ドット超格子型」を中心として加速流用予算を手当てし研究開発を加速した。

#### 【平成 22 年度】

予算総額 29.2 億円（当初示達額 19.0 億円、前年度繰越額 10.2 億円）

平成 22 年度の公募では、集光型太陽電池の実用化に向け必要となるモジュール設計・評価技術を確立する為に 1 件を採択した。なお、事業開始は平成 23 年度からとし予算手当てを行った。

『量子ドット』太陽電池等の開発を加速する為に、「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」「高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発」を中心に当初予算から 4.1 億円を手当てした。

#### 【平成 23 年度】

予算総額 20.6 億円（当初示達額 20.6 億円）  
次年度繰越額 0.3 億円、他事業への流用額 0.1 億円

中間評価結果を踏まえ、「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」「高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発」「低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発」のサブ

テーマ数を 71 から 56 に絞り込み事業を継続することとした。

【平成 24 年度】

予算総額 23.9 億円（当初示達額 23.6 億円、前年度繰越額 0.4 億円）  
他事業への流用額 1.8 億円

『3 接合化合物系』太陽電池の実用化を加速する為に、「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」「高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）」に対し、当初予算から 2.5 億円を手当てした。

【平成 25 年度】

予算総額 17.0 億円（当初示達額 17.0 億円）  
次年度繰越額 0.03 億円、他事業への流用額 0.2 億円

【平成 26 年度】

予算総額 14.0 億円（当初示達額 14.0 億円、前年度繰越額 0.03 億円）  
他事業への流用額 1.0 億円

4. 中間評価結果への対応

4. 1 第 1 回中間評価(平成 22 年)

【提言】

- 1) 本事業は変換効率 40%を実現する為の実用化研究が大きな目標の一つであるが、実用化に向けての道筋がやや不明確である点も見受けられる。本研究期間内の目標は変換効率のみに特化している為、量産性、低コスト化、資源問題の観点という本来の実用化に対する視点での戦略が明確でない。この点を明確にして、個別テーマの見極めによる選択と予算の集中が必要である。
- 2) 国際状況は急速に変化しており、国際競争力の状況、国際貢献の可能性等に対して、本事業で我が国の特色が明確に打ち出されたかどうかについてはやや不明瞭である。世界をリードするためには今後どの点を強化すべきかについての評価と検討が必要であろう。

【対応】

- 1) NEDO では「PV2030+」の方針に従い、2030 年の量産化開始に向けて基盤技術開発（シーズ探索等）、要素技術開発（セル化技術等）、実用化開発（量産化技術等）のフェーズを経て実用化につなげるシナリオを描いている。本事業は、基盤技術開発（シーズ探索等）のフェーズのものであるが、ご指摘を踏まえ、「太陽光発電システム普及委員会」等も活用して実用化に対する筋道をより明確にした上で、それを反映した戦略を策定して参りたい。そして、平成 23 年度以降の実施方針において、量産性、低コスト化、資源問題の観点も踏まえた上で、変換効率 40%超を見込めるテーマに選択と集中を図っていく。具体的には、「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」「高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発」「低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発」のチーム体制を見直すとともに、個別のサブテーマを整理し、サブテーマ数を 71 から 56 に絞り込んだ。
- 2) 本事業では、材料技術等の日本が強みを有し独自に技術の高度化を図る分野については一層の強化を図る。一方、評価技術のように海外研究機関と協力する分野については必要性を見極めた上でさらに国際協力を進め我が国の技術力向上に繋げる。例えば、集光型太陽電池の評価について、本事業の一環として平成 23 年度より日 EU 共同にて標準化への取り組みを実施する。

4. 2 第 2 回中間評価(平成 24 年)

【提言】

- 1) 産業の状況が急変し、国際競争が激しさを増していることから、集中と選択を更に進め、将来に向けた必須技術、他国に差別化できる技術の研究開発に予算を重点化する必要がある。また、本プロジェクトの開始時とは状況が異なり、基礎研究については JST などの事業でも大型の支援が行われているため、実用化に対する開発進捗状況を鑑み NEDO が支援を行うべきかどうか十分な棲み分けを

行う必要がある。

- 2) 今後、開発した技術を守るために特許化が必要で、周辺特許を含め強い特許とすることが重要である。また、事業化に向けての知財戦略と併せて、特性評価技術、実装技術、入出力条件、安全性等の国際標準化の活動を推進するべきである。

#### 【対応】

- 1) 基盤技術開発（シーズ探索等）フェーズの事業であるという位置づけは維持しつつも、グループ毎に実用化に対する道筋（参画企業の戦略等）を確認して、テーマの絞り込み、研究実施計画に反映した。
- 2) 将来に向けた必須技術、差別化技術の観点から、研究テーマの更なる絞り込みを実施した。具体的には、「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」「高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発」「低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発」のチーム体制を見直すとともに、個別のサブテーマを整理し、サブテーマ数を 56 から 45 に絞り込んだ。
- 3) 状況変化を踏まえて技術開発戦略（ロードマップ）の見直しを進め、本プロジェクトの進捗を、平成 27 年度開始事業の基本計画立案に反映した。
- 4) 知財取得はもちろん、測定方法等については、他のプロジェクトとも連携して標準化を推進した。

#### 5. 評価に関する事項

##### 【事前評価】

評価実施時期：平成 19 年度

評価手法：外部評価

評価事務局：新エネルギー技術開発部

評価項目・基準：「標準的評価項目・基準」

評価委員：

委員長 小長井 誠（東京工業大学 教授）

委員 荒川 裕則（東京理科大学 教授）

委員 有本 智（三菱電機株式会社 中津川製作所 太陽光発電システム部 部長）

委員 大和田野 芳郎（産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 部門長）

委員 岡本 博明（大阪大学 教授）

委員 黒川 浩助（東京農工大学 教授）

委員 近藤 道雄（産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター長）

委員 佐賀 達男（シャープ株式会社 ソーラーシステム事業本部 副本部長）

委員 高塚 汎（三菱重工業株式会社 長崎造船所太陽電池事業ユニット 技師長）

委員 田中 誠（三洋電機株式会社 ソーラーエナジー研究部 部長）

委員 太和田 善久（株式会社カネカ イノベーション企画部 部長）

委員 和田 隆博（龍谷大学 教授）

##### 【第 1 回中間評価】

評価実施時期：平成 22 年度

評価手法：外部評価

評価事務局：評価部

評価項目・基準：「標準的評価項目・基準」

評価委員：

分科会長 庭野 道夫（東北大学 電気通信研究所 副所長）

分科会長代理 堀越 佳治（早稲田大学 教授）

委員 一木 修（株式会社資源情報システム 代表取締役社長）

委員 工藤 一浩（千葉大学 教授）

委員 中嶋 一雄（京都大学 客員教授）

委員 野田 進（京都大学 教授）

委員 安武 潔（大阪大学 教授）

【第2回中間評価】

評価実施時期：平成24年度

評価手法：外部評価

評価事務局：評価部

評価項目・基準：「標準的評価項目・基準」

評価委員：

分科会長	堀越 佳治（早稲田大学 教授）
分科会長代理	小林 光（大阪大学 教授）
委員	宇佐見 徳隆（東北大学 准教授）
委員	小西 博雄（株式会社NTT ファシリティーズ ソーラープロジェクト本部 部長）
委員	松永 大輔（東京エレクトロン株式会社 PVE 本部 室長）
委員	安武 潔（大阪大学 教授）
委員	谷内 利明（東京理科大学 教授）



### Ⅲ. 研究開発成果について

本事業の研究開発は、太陽光発電の経済性、性能・機能、適用性、利便性等の抜本的な改善を図り、太陽光発電の普及拡大を促進するため、現状技術の延長にない技術革新を目指した超長期的視野でテーマを募集し、その中から優れた提案を採択し実施した。目標設定が挑戦的で、高い目標を掲げたテーマが多いこともあり、成果達成への道のりがかなり厳しいテーマもあった。その場合でも、いろいろな材料・構造・製造方法等のアプローチの中で、実施したアプローチが、所期の目標達成につながらなかった理由、目標達成への道筋が明確にできれば、次期事業の研究開発へとつながる。

現段階では、各要素技術の開発・検証を主に研究開発を行っているが、一部では、開発成果を集約した太陽電池の製作に至っている。研究開発の主要な成果を表 20～31 に示す。今後もこれらの成果を元に本事業の目標である「変換効率 40%超」かつ「発電コストが汎用電源未満（7 円/kWh 未満）」の実現に向けさらに研究開発を行っていく。

#### 1. 分野別、課題に対する主要な成果

##### ①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

主要な成果、達成度、今後の課題について表 20～22 に示す。

表 20. 主要な成果①（第 1 回中間評価時：平成 20～22 年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
エピタキシャル成長技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・逆積み3接合セルのバッファ層成長条件の最適化、電流整合により、非集光時変換効率33%</li> <li>・トンネルピーク電流密度15A/cm<sup>2</sup>以上、コンタクト/電極接触抵抗、シート抵抗等直列抵抗の低減により、集光時変換効率42%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・バッファ層成長条件の最適化及びサブセルの電流整合の改善により、非集光時変換効率35.8%（AIST測定）を達成（世界最高）</li> <li>・トンネル接合構造の改良（ピーク電流密度56A/cm<sup>2</sup>）、コンタクト/電極接触抵抗及びシート抵抗の改善等により、集光時変換効率42.1%（230suns、自社測定）を達成</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・集光時変換効率45%達成の為、逆積み4接合をメインに検討</li> <li>・公的機関による集光時変換効率測定</li> <li>・直列抵抗成分の更なる改善</li> </ul>
MOVPEナノ構造形成技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・InGaAs/GaAsP歪み補償量子井戸を挿入した(In)GaAsミドルセルを作製</li> <li>・1.2eV帯まで長波長側の吸収端を拡張</li> <li>・1.75eVのトップセル下でIsc=16mA/cm<sup>2</sup>（GaAs単セルの値から2mA/cm<sup>2</sup>増大）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・歪み補償量子井戸セルを作製</li> <li>・in situモニタによる歪み調整技術確立</li> <li>・階段型量子井戸で吸収端1.24eVを実現</li> <li>・障壁層の薄層化+界面制御により、GaAs単セルからの短絡電流増大3.3mA/cm<sup>2</sup>を実現</li> </ul>	◎	量子井戸挿入セルにおける量子井戸からのキャリア脱出メカニズムの解明による、短絡電流のさらなる増大と開放電圧の低下抑制
量子タンデムセル技術	3接合セルのGaAsミドルセルにInAs系積層量子井戸又はドットを挿入し、短絡電流2mA/cm <sup>2</sup> の増大を達成	量子ドット挿入型GaAs中間層を用いたGaAsセルにより、GaAsセルに比べて最大6mA/cm <sup>2</sup> の短絡電流増大を達成	◎	3接合タンデムセル、集光セルの開発

量子ドット超格子型	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子ドットのサイズ揺らぎの低減10%以下</li> <li>中間層膜厚10nm以下</li> <li>2光子吸収過程の原理実証</li> <li>セル変換効率12%以上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子ドットのサイズ揺らぎの低減8.7%を達成</li> <li>中間層膜厚15nm以下を達成</li> <li>2光子吸収過程の原理実証は測定準備中</li> <li>セル変換効率16.1%を達成</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>GaAs(311)B基板を用いた量子ドット成長技術の開発</li> <li>歪み補償構造の更なる最適化</li> <li>量子ドット構造、測定技術の開発</li> <li>量子ナノ効果の寄与を実証し集光技術と融合</li> </ul>
量子ドット超格子構造太陽電池の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sb導入法によるInAs量子ドット(QD)の高密度化(<math>6 \times 10^{10}/\text{cm}^2</math>以上)</li> <li>近接積層QDの高均一化(PL半値幅20meV以下)</li> <li>GaNAs層による歪補償のための構造最適化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>QD密度<math>6 \times 10^{10}/\text{cm}^2</math>かつPL半値幅19meVのQD構造を達成</li> <li>Sb導入法によりQD密度<math>4 \times 10^{11}/\text{cm}^2</math>の超高密度化(面内超格子化)を達成</li> <li>Type II QD構造によりキャリア寿命5ns以上を達成</li> <li>GaNAs層成長条件の検討</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>QDサイズ微小化および歪補償層、歪緩和層の導入による結晶性の向上</li> <li>GaNAs歪補償層の導入による多重近接積層化</li> <li>Sb導入法による面内QD超格子構造の作製技術の開発</li> <li>高密度、高均一QDのセル構造への導入と特性評価</li> </ul>
界面電荷移動遷移型セルの研究開発	界面電荷移動遷移を利用して、1eV帯領域で光電変換を達成する	新原理に基づく近赤外領域での光電変換達成	○	光電変換領域の拡張と効率向上

※達成度(平成22年度末見込)

◎: 大幅達成、○: 達成、△: 未達(次年度達成見込)、×: 未達(次年度達成見込無)

表 21. 主要な成果①(第2回中間評価時:平成23~24年度)

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
多接合太陽電池の評価解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>格子不整合セルのバッファ層における転位挙動解析</li> <li>変換効率45%の達成に向けたセル作製プロセスの最適化と特性向上</li> </ul>	<p>格子不整合系セルにおいて、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>転位密度低減に有効な傾斜組成<math>\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}</math>バッファ層の歪緩和過程を、3次元X線逆格子マッピングでリアルタイム観測(世界初)</li> <li>オーバーシューティング(OS)層の膜厚を変化させることでトップ層の歪を圧縮から引張まで制御できることを実証</li> <li>シャープ(株)と連携し、4接合化に向けたバッファ層の歪緩和過程を検討中</li> </ul>	○	シャープ(株)との連携を強化し、転位密度低減手法を明確化
多接合太陽電池の集光動作解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>集光型太陽電池の電極パターンの最適化や太陽電池セル内部抵抗の解析</li> <li>高集光倍率において温度上昇の少ない構造の検討</li> <li>集光条件に適した多</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>集光時における太陽電池セル内部抵抗による局所的な電力消費(ジュール熱)の解析に成功し各層の抵抗成分の最適化が可能となった</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>局所的なジュール熱(発熱)や熱収支から、温度対策指針を確立し、高温動作に強い太陽電池を設計</li> <li>上記解析をもとに各吸収層等の太陽電池構造の最適化設計</li> </ul>

	<p>接合太陽電池光吸収層の設計</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実環境下における太陽電池セルの実動作温度の測定に成功し入射光と動作温度上昇（熱収支）の関係に関する詳細な知見を得た</li> </ul>		
<p>多接合セル開発（格子不整合系、格子整合系）</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・逆積み3接合構造セルの電流整合</li> <li>・コンタクト/電極接触抵抗、シート抵抗、トンネル抵抗等直列抵抗を低減し、最大集光倍率を向上する</li> <li>・シャドーロスの低減、電極間隔、セルサイズの最適化</li> <li>・上記施策により、集光時変換効率45%を達成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・トンネル接合抵抗の低減、反射防止膜の最適化により、非集光時変換効率37.5%（AIST測定）を達成し、平成21年度に達成した世界記録35.8%を更新。</li> <li>・トンネル接合抵抗の低減に加え、受光面の電極間隔の最適化により、世界タイ記録となる集光時変換効率43.5%（300-500suns）を達成</li> </ul>	<p>◎（非集光） / ○（集光）</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直列抵抗成分の更なる改善</li> <li>・集光時変換効率48%達成の為、4接合化検討を加速</li> </ul>
<p>量子井戸ミドルセル</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GaAs基板上量子井戸挿入単接合セルで非集光時変換効率20%</li> <li>・GaAsミドルセルに量子井戸を挿入した3接合セルを作製し、<math>I_{sc}=16\text{mA}/\text{cm}^2</math>を得る</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・超格子の挿入による、<math>I_{sc}</math>の増分<math>3.0\text{mA}/\text{cm}^2</math>、<math>V_{oc}</math>の低下<math>0.02\text{V}</math>、反射防止コーティングにより、GaAs基板上量子井戸挿入単接合セルで非集光時変換効率24%</li> <li>・200倍集光にて超格子挿入GaAsセルの<math>V_{oc}=1.1\text{V}</math>（参照セルからの低下ほぼゼロ）</li> <li>・シャープ(株)が作製したGeボトムセル上に量子井戸挿入ミドルセルを成長</li> </ul>	<p>○</p>	<p>量子井戸挿入上のInGaPトップセル成長をシャープ(株)にて実施しプロセスを改善</p>
<p>GaInNAsミドルセル(CBE)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・4接合太陽電池用新規1eV帯材料GaInNAsの高品質化</li> <li>・GaInNAs単接合セルにおいて、非集光時変換効率15%、集光時変換効率18%を達成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CBE成膜時の表面反応制御により、N起因散乱体の密度低減を達成</li> <li>・電気的特性を劣化させる再結合中心の1つ（E1）を特定</li> <li>・GaAsN単接合セルで変換効率7.2%（Suns-Vocによる測定で13.7%：直列抵抗損失を無視）を達成</li> <li>・単接合セル効率改善の指針を明確化（現在の材料品質で変換効率16.5%</li> </ul>	<p>○</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・N起因欠陥生成にかかわる成膜過程の解明と制御</li> <li>・In添加による基板との格子整合</li> <li>・セル作製プロセス（電極形成、接合界面）とセル構造の最適化</li> <li>・集光特性の検討</li> </ul>

窒素系結晶成長の理論解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子レベルでの表面反応プロセスの明確化</li> <li>不純物（キャリア散乱体）を低減するための成長指針の提案</li> </ul>	を達成見込み) <ul style="list-style-type: none"> <li>成長条件（温度、供給ガス分圧）と表面構造の関係を原子レベルで解明</li> <li>水素(H)不純物の混入機構を解明し、混入を抑制する成長指針を提案</li> <li>検証実験による確認</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>炭素(C)などの他の不純物の混入機構解析への適用</li> <li>⑤-1および⑥における結晶成長条件最適化に援用し、格子整合4接合セル変換効率48%（1,000倍集光時）の達成に貢献</li> </ul>
GaInNAsミドルセル（水素MBE、MOVPE、量子ドット添加）	<ul style="list-style-type: none"> <li>GaInNAs:Sb薄膜（水素MBE法）、GaInNAs薄膜（MOVPE）の高品質ヘテロ成長技術開発</li> <li>タンデムセルの電流整合に向けて、電流14mA/cm<sup>2</sup>（1sun）を達成</li> <li>4接合セルの第3,4セルにあたるGaInNAs:Sb/Ge2接合セルにおいて、電流7mA/cm<sup>2</sup>（1sun）を達成</li> <li>3接合セルのミドルセルにInAs/GaNAs系積層量子ドットを挿入し、トップセル（1.7eV）配置下で電流16mA/cm<sup>2</sup>（1sun）を達成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>GaInNAs:Sb単接合セルにおいて、GaAsセル配置下で、9.6mA/cm<sup>2</sup>を達成</li> <li>GaInNAs:Sb単接合セルで効率8.6%</li> <li>GaInNAs:Sb/Ge2接合セルにおいて電流10.9mA/cm<sup>2</sup>を達成</li> <li>InAs/GaNAs積層量子ドットセルで、トップセル配置下で電流15.2mA/cm<sup>2</sup>を達成</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>4接合タンデムセルに向けて、n-on-p構造セルへの技術移転</li> <li>集光セル技術の開発</li> </ul>
広帯域AlGaInN結晶を用いた多接合太陽電池の研究開発	単接合で変換効率5%以上を達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>低直列抵抗構造+ITO電極の採用で変換効率4%（200sun）を達成（窒化物単接合では世界最高、反射防止膜により目標の5%を達成可能）</li> <li>非極性面上InGaN太陽電池を試作し、1sunにおいて、窒化物系では最大の短絡電流密度&gt;5mA/cm<sup>2</sup>を実現</li> <li>多接合素子作製のためのトンネル接合形成技術確立</li> <li>スパッタリングバッファにより、Si基板上への窒化物多接合太陽電池の成長技術確立し、InGaN/Si多接合素子の基礎技術を確立</li> <li>窒化物太陽電池の変換効率の温度依存性を評価、Si系やCIS系の-0.4%/℃と比較して-0.18%/℃という同材料の優れた耐環境性を確認</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>非極性面上やN面上高In組成（In&gt;0.5）InGaN成長技術確立</li> <li>高正孔濃度p型高In組成（In&gt;0.5）InGaN成長法確立</li> </ul>

InGaN多接合セル新プロセス	<ul style="list-style-type: none"> <li>・InGaNを用いた電界制御型太陽電池構造の提案とその有効性の実証</li> <li>・スパッタ法を用いてIn組成0.3でキャリア移動度<math>200\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}</math>以上のInGaNを作製</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・スパッタ法における結晶成長モニタリング技術を開発することにより高品位化を実現し、In組成0.3のInGaNでキャリア移動度<math>228\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}</math>を達成</li> <li>・In組成0.4のInGaN薄膜で世界最大の量子収率(48%)を達成</li> <li>・極性面上に電界制御型InGaN太陽電池(In組成30%)を試作し、c面窒化物系では最大の短絡電流密度を実現</li> <li>・スパッタ法による世界初の3原色LED、高電子移動度トランジスタの作製に成功</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高In組成InGaN(In組成&gt;30%)のさらなる高品位化</li> <li>・電界制御型太陽電池の高効率化</li> </ul>
ナローバンドギャップボトムセル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・(H23)第3層ナローバンドギャップ材料(0.9-1.0eV)および第4層ナローバンドギャップ材料(0.6-0.7eV)の開発、およびそれらを使用した太陽電池で変換効率5%を達成</li> <li>・(H24)新型材料により、印刷型太陽電池で変換効率8%の低価格太陽電池を実現</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1eVおよび0.6eVのナローバンドギャップ材料の開発に成功</li> <li>・印刷プロセスでセルを作製し、太陽電池で変換効率5%達成</li> </ul>	○	新ナローバンドギャップ材料(AgInTe <sub>2</sub> 、Cu <sub>2</sub> Te、等)とスパッタリングを用いてナローバンドギャップセルからなる2接合太陽電池を作製し、変換効率15%を達成
近赤外吸収材と吸収増強材を組合せた3接合用ボトムセル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・(H23)光電変換層(近赤外吸収材、電子・正孔輸送材)と吸収増強材を検討し、1,200nmでの吸収ならびに光増強確認</li> <li>・(H24)新素材合成(光電変換、吸収増強)および多接合化技術の課題を抽出し、1,400nm領域での光吸収ならびに光増強、多接合化に向けた接合層を検討</li> <li>・3接合ボトムセルを想定し、近赤外領域のみで非集光時<math>I_{sc}=12\text{mA}/\text{cm}^2</math>を得、変換効率4%達成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・量子ドット径の調整により、1,400nm領域での光電変換達成</li> <li>・量子ドットとZnOとの電荷分離界面の拡大を狙い、ZnOナノワイヤ構造構築</li> <li>・吸収増強材料の長波長化(1,200nm以上)を実現</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・量子ドットおよびZnOの構造制御</li> <li>・ZnOナノワイヤと量子ドットを組合せた太陽電池の作製と評価</li> <li>・吸収増強材を組み込んだボトムセルの作製と評価</li> <li>・吸収増強材の最適化(吸収領域の拡張など)</li> </ul>
量子ドット超格子セル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・量子ドットの面内密度として<math>10^{11}/\text{cm}^2</math>を有する50層積層量子ドット超格子セルを開発</li> <li>・変換効率25%(低倍集光時)達成</li> <li>・2光子吸収過程の原理実証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・平均直径24nm、面内密度<math>5\times 10^{10}/\text{cm}^2</math>を有する50層積層InAs/GaNAs歪み補償量子ドット超格子セルを開発</li> <li>・変換効率20.3%(100倍集光)を達成(世界最高水準)</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GaAs(311)B基板上InAs/GaAsSbType II量子ドットセルの最適化により、変換効率25%以上(1sun)</li> <li>・光閉じ込め技術、集光技術との融合</li> <li>・量子ドット超格子における光吸収、キャリア</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>・中間バンドセルの動作確認を室温で実証（世界初）</li> <li>・InAs/GaAsSb系Type II 量子ドットセルで効率17.3% (1 sun) を達成（世界初）</li> </ul>		ダイナミクスの評価結果に基づくセル構造の改良および高効率化）
超高密度量子ドットセル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・面内高密度型量子ドット超格子セルを作製</li> <li>・面内密度<math>5 \times 10^{11}/\text{cm}^2</math>以上を達成</li> <li>・面内高密度量子ドットの5積層構造を作製</li> <li>・非集光時変換効率15%を達成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・面内超高密度<math>6 \times 10^{11}/\text{cm}^2</math>を達成</li> <li>・PL測定による面内結合によるバンド化を検証</li> <li>・変換効率の量子ドット密度依存性を理論計算</li> <li>・面内超高密度量子ドット層を用いた新型量子ドット太陽電池を提案、試作</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・面内QD密度のさらなる向上</li> <li>・面内超高密度QDの多重積層化</li> <li>・新型面内超高密度QDセルの構造最適化による変換効率の向上</li> <li>・面内超高密度QD層の基本物性評価</li> </ul>
マイクロ集積集光セル開発	多接合セルの微細加工により、電極などの表面被覆率を20%以下に抑えつつ、マイクロセルの10直列動作を達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GaAs単セル表面に微細加工を施し、10直列化に挑戦。1セルのみショートし、9直列化に成功</li> <li>・バイパスダイオードをモノリシック集積し、動作を実証</li> <li>・シャープ(株)と共同しInGaP/GaAs 2接合セルのマイクロ集積化を進行中</li> </ul>	○	新規導入したALD装置による素子分離層完全パッシベーションで加工歩留まりを向上
光閉じ込め微細構造の開発	セル表面、裏面の微細加工により、量子ナノ構造層の吸収を3倍に増加させ、短絡電流の増大を実証	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高倍率集光に必須の中継光学系とセルを含めた光マネジメント構造を提案</li> <li>・半絶縁基板を用いた光マネジメント検証セルを作製（表面コンタクトセル）し、裏面テクスチャにより量子井戸の吸収増大3倍を実証</li> <li>・表面光屈曲構造を作製する為、中性粒子ビームエッチングGaAs無損傷加工の効果を実証</li> </ul>	◎	量子ドット中間バンドセルおよび量子井戸挿入GaAsセルに本技術を適用し、量子構造の吸収増大による効率向上を実証
表面修飾技術開発（ナノ構造修飾）	量子マルチバンドセルに修飾構造を付与することで、900-1,300nmの領域の光の吸収量が3倍に増加することを示し、短絡電流の増大を実証する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・金属ナノ構造の光吸収量増大効果のシミュレーション手法を確立</li> <li>・上記シミュレーションにより光吸収量増大効果に影響する構造パラメー</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・最適な金属ナノ構造形成手法の確立</li> <li>・リフトオフ素子作成手法確立と金属ナノ構造適用</li> </ul>

		<p>タを把握し、最適化することで吸収量4.5倍の金属ナノ構造を設計</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>量子マルチバンドセルの裏面への金属ナノ構造作製手法の検討を行い、1.4倍の光吸収量増大効果を実験的に確認</li> </ul>		
--	--	---	--	--

※達成度（平成24年度末見込）

◎：大幅達成、○：達成、△：未達（次年度達成見込）、×：未達（次年度達成見込無）

表.22 主要な成果①（事業終了時：平成25～26年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
多接合セル・モジュール開発（格子不整合系）	4接合セル構造にて非集光時効率39%を達成し、集光時効率48%を達成する。逆積み3接合セルを用いたモジュールで変換効率35%を達成する。逆積み3接合セルを用いた集光モジュールの屋外評価データを解析し、逆積み3接合セルを搭載した集光システムで、モジュール原価75円/W(100MW/年生産を想定)の実現性を確認する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>逆積み3接合構造では、3接合で世界最高の非集光時効率37.9%と集光時効率44.4%を達成した。</li> <li>メカニカルスタック型4接合で非集光時効率39%達成の目途付けができた。</li> <li>逆積み3接合セルを用いたモジュールで変換効率35.4%(自社測定値)を達成した。</li> <li>逆積み3接合セルを用いた集光モジュールの屋外評価を実施</li> <li>解析し、モジュール原価75円/Wの実現の可能性を試算した。</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>低コスト化のためのエピタキシャルリフトオフ(ELO)、基板再利用技術開発を実施する。</li> <li>低コストモジュール開発の実施。</li> </ul>
多接合太陽電池評価解析	シャープ(株)と協力して、3ないし4接合セルの高効率化に寄与し、3接合セルで集光時変換効率45%、4接合セルで集光時変換効率48%を達成する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>基板のオフ方向により、優先的に生成する転位の種類が異なり、面内異方性の膜厚変化の様子が異なることを明らかにした。</li> <li>[110]方向にオフしたGaAs微傾斜基板は、転位の対消滅が促進され、転位密度の低減に有効であることを示した。シャープ(株)のセル作製技術に理論的な裏付けを与えた。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>転位挙動の解析に基づくバッファ層の最適設計と膜厚低減</li> </ul>
多接合太陽電池集光動作解析	シャープ(株)と協力して、3ないし4接合セルの高効率化に寄与し、3接合セルで集光時変換効率45%、4接合セルで集光時変換効率48%を達成する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>伝熱モデルを用いて集光動作時の動作温度および熱応力の解析を行った。</li> <li>光学シミュレーション、回路シミュレーション、熱解析シミュレーションを組み合わせることにより、集光型太陽電池の動作を正確に解析することに成功し</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>本プロジェクトで開発した各種シミュレータによる集光型太陽電池モジュールの最適化設計</li> </ul>

		た。		
III-V系オン・シリコン構造	III-V系オン・シリコン構造において、III-V層の貫通転位密度 $10^6/cm^2$ 以下を実現する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・III-V系オン・シリコンの新規III-VI族バッファ層構造の提案と、単相で層状構造<math>In_2Se_3</math>を得るための条件を確立した。</li> <li>・加工基板上へのGaAs成長において、ナノワイヤー(NWs)の形成を確認し、NWsもしくは薄膜を作り分けられる条件を見いだした。</li> <li>・マスクパターン付きSi基板においては、マスク開口部への均一なGaAs成膜に成功した。</li> <li>・目標は未達であるが、新規手法を提案・検討し、今後の研究開発につながる上記成果を得た。</li> </ul>	×	本手法を最適化、発展させて、シリコン基板上への均一なGaAs膜の形成、転位密度の低減によるセル効率の向上
多接合セル開発(格子整合系新材料・ナノ構造)	4接合セル構造にて非集光時効率39%を達成し、集光時効率48%を達成する。	東京大学との間でウエハシヤトルによる4接合セルと3接合セルの試作と評価を実施するに至った。	△	多接合セル・モジュール開発(格子不整合系)に同じ
量子井戸ミドルセル	InGaAs/GaAsP量子井戸挿入3接合セルの開発において、シャープと連携して、変換効率36%(1sun)、45%(1,000suns)を達成する。	実効バンドギャップ1.2 eVのInGaAs/GaAsP歪み補償超格子について、6°オフ基板上に階段状ポテンシャル量子井戸を実装、トップセルフィルター下で短絡電流 $17.4 mA/cm^2$ と3接合の電流整合に十分な値を達成した(世界最高水準)。 本超格子ミドルセルをシャープとのウエハシヤトルにより3接合セルに実装し、量子効率スペクトルの積分値から電流整合の実現を確認した。	○	1000倍までの高倍集光下の特性に関しては、コンタクト抵抗低減のための構造・プロセス最適化と、3接合の受光波長領域に対応した反射防止膜の最適化が今後必要
GaInNAsミドルセル(水素MBE)	GaInNAs結晶薄膜を第3セルとした4接合セルの開発において、変換効率38%(1sun)、48%(1,000suns)を達成する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1.0eV GaInNAs:Sb単接合セルにおいて、GaAsフィルタ下の短絡電流密度<math>12.2 mA/cm^2</math>を達成した(世界最高水準)。</li> <li>・シャープとの連携によりウエハシヤトルを実施し、GaInNAs:Sb/Ge 2接合セルにおいて、短絡電流密度<math>19.6 mA/cm^2</math>を達成した。</li> <li>・InGaP/GaAs/GaInNA</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Geセル上へのGaInNAs:Sbセルのさらなる高効率化</li> <li>・GaInNAs:Sbセル上へのInGaP/GaAsエピタキシャル積層技術の高品質化</li> <li>・4接合セルの変換効率50%の実現に向けた材料設計の最適化</li> </ul>



		sSb 3 接合セル、及び InGaP/ GaAs/GaInNAsSb/Ge 4接合セルの作製に 成功し、ウエハシヤト ルプロセスによる多接 合セル化の有効性を 示した。		
GaInNAsミドルセル (CBE)	GaInNAs結晶薄膜を第3セル とした4接合セルの開発 において、変換効率38% (1sun)、48%(1,000 suns)を 達成する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>セル特性劣化につな がる窒素起因欠陥の 明確化と、欠陥密度 の低減を実現した。</li> <li>In未添加のため、多 接合セルのデバイス シミュレーションを行 い、CBE成膜の GaAsN膜が、4接合、 1000倍集光で45%の 変換効率が達成可能 な材料品質であることを 示した。</li> </ul>	×	<ul style="list-style-type: none"> <li>In添加による格子整合系 多接合セルの作製</li> <li>セル構造とセル作製プロ セスの最適化</li> </ul>
窒素系結晶成長の 理論解析	GaInNAs結晶薄膜を第3セル とした4接合セルの開発 において、変換効率38% (1sun)、48%(1,000 suns)を 達成する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>新たな格子振動数 計算モデルを提案し 低計算コストでの振動 数解析に成功した。</li> <li>複合欠陥の格子振 動数解析および FTIR スペクトルとの比較検 討により薄膜中に存 在する複合欠陥の構 造を解明した。</li> <li>得られた知見を実験 にフィードバックした。</li> </ul>	△	
AllnGaNトップセル (MOVPE)	AllnP/GaAs/Ge に対して +3%以上、または多接合40% 以上@1sunの確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>AlGaInN と AllnP/GaAs/Geの貼り 合わせ技術の確立を 確認 *AlGaInNによってトン ネル接合の形成によ る効率向上を確認し た。</li> <li>シミュレータによる半 極性および非極性面 の活用の有用性を確 認した。</li> <li>AlGaInN と AllnP/GaAs/Geの貼り 合わせによる多接合 化によって開放電圧 の向上を確認した。</li> </ul>	△	接合部の低抵抗化 InN組成の向上および厚膜 化 半極性面の活用
InGaNトップセル (PSD)	AllnP/GaAs/Ge に対して +3%以上、または多接合40% 以上@1sunの確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>窒素極性面上にお いて、In 組成 10 から 46%の InGaN 量子井 戸構造の作製と、p 型 GaN における正 孔の高濃度化(<math>3 \times 10^{18}/\text{cm}^3</math>)を実現し、 太陽電池動作を確 認した。</li> <li>通常よりも結晶欠陥 密度が1桁少ないバ</li> </ul>	△	低結晶欠陥密度の基板の 利用。  メカニカルスタック技術の 構築。

		<p>ルクGaN基板を用いることで、InGaNセルのFFが25%から50%に改善した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N量子井戸層を100周期積層する技術を開発し、短絡電流が増加することを実証した。多接合化に必要な基本特性を確認した。</li> </ul>		
ナローギャップボトムセル	0.65 eV帯のナローバンドギャップ半導体(Cu <sub>2</sub> Te又はAgInTe <sub>2</sub> )セルをスパッタリング製膜法により作製し、メカニカルスタックにより4接合太陽電池を構成することで、1000 sunで効率48%を目指す。	AgInTe <sub>2</sub> 作製時のスパッタリング条件およびドーピングの最適化により移動度8,500cm <sup>2</sup> /Vs、キャリア寿命はミリ秒オーダーの非常に長寿命の半導体薄膜の太陽電池材料作製に成功し、1 sunでの短絡電流が13.8 mA/cm <sup>2</sup> の太陽電池の作製に成功した。しかし、1.0 eVのミドルセルとなるフィルター下では僅かに1 mA/cm <sup>2</sup> であった。	×	大きな問題点は、AgInTe <sub>2</sub> からキャリアを取り出す材料の選択にあるものと考えられる。現在は、新しいNEDOプロジェクトであるペロブスカイト太陽電池との組み合わせを検討中。
ハイブリッド材料ボトムセル	近赤外領域(1eV帯)で、J <sub>sc</sub> = 14mA/cm <sup>2</sup> を示す4接合太陽電池用ボトムセルを開発する。同時に、光電変換層の吸収を0.65eVに拡張する。0.65eV(1900nm)帯に吸収を有する量子ドットを用いたボトムセルを用いたメカニカルスタックにより、4接合太陽電池を構築し、変換効率48%(1,000suns)を達成する。	量子ドットの励起子吸収ピークを1.25 μm(1.0eV)程度まで拡張を行い、J <sub>sc</sub> としては、14mA/cm <sup>2</sup> を達成した。一方、吸収端(E <sub>g</sub> )に関しては、1450nm(0.85eV)にとどまった。	△	量子ドット粒径を9nm程度の粒径を有するコロイド量子ドットを合成。金属ナノ粒子を組み込んだセル構造の最適化。
量子ドット超格子セル(セル開発)	超高密度「積層」量子ドットセルを作製し、変換効率27%(×1)、40%(×100)を達成する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>•低温形成及び50層積層により~10<sup>13</sup>/cm<sup>2</sup>の超高密度積層量子ドットを有するInAs/AlGaAsセルを開発した(世界最高水準)。</li> <li>•電界減衰層を導入し、開放電圧0.942Vを有するInAs/AlGaAs量子ドット太陽電池の開発に成功した。</li> <li>•低電流・高電圧型量子ドット太陽電池を提唱・試作し、26.8%(72倍集光)を達成した(世界最高水準)。</li> <li>•2段階光吸収過程を評価解析するための分光計測法を確立し、中間バンドから伝</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>•中間バンド動作原理に基づく、室温における高効率化の実現に向けた定量的な指針の解明</li> <li>•超高密度「積層」量子ドット、光閉じ込め技術、集光技術の更なる融合</li> <li>•量子ドット超格子中間バンド型太陽電池において、45%の変換効率実現に向けた技術開発</li> </ul>

		導帯への光吸収による△EQE スペクトルの計測に成功した(世界初)。		
超高密度量子ドットセル	超高密度「積層」量子ドットセルを作製し、変換効率27% (×1), 40% (×100) を達成する。	セル特性の量子ドット密度依存性の理論計算により、設計指針を得た。面内密度 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ を達成した(世界最高水準)。面内超高密度量子ドット層における光学遷移を解明し、type-II バンド構造の導入による長い蛍光寿命(8 ns)を得た。2 段階光励起効果の実験検証を行い、セルの低集光特性を確認した。	△	得られた成果を基にセル構造の最適設計を進め、その構造の実現と集光時における特性改善が必要。
量子ドット超格子セル(集光モジュール技術開発)	超高密度「積層」量子ドットセルを作製し、変換効率27% (×1), 40% (×100) を達成する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ELO法を用いて薄膜InAs/GaAs量子ドット太陽電池を作製し、広帯域な電流増大を確認し、集光下で中間バンド動作を確認した。</li> <li>・プラズマ加工モス・アイ構造による反射防止で、片面95.5%、両面99%超の広帯域高透過率を実現した。</li> <li>・モノリシック集積マイクロ直列セル構造を提案し、10直列セルを制作してその有効性を実証</li> <li>・光閉じ込め構造の実装により、量子構造由来の光吸収を増大させ、量子井戸セルにおいて垂直光入射に比べて5倍の実効光路長を実現し、変換効率を20%に向上させた(世界最高水準)。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高効率と低コストを両立する低倍集光モジュールの設計と試作</li> <li>・セルの薄膜化やLC効果を積極的に利用した高効率化の実現</li> <li>・計算による設計と試作による実装の双方向評価に基づく、光マネジメント構造の最適化</li> </ul>

※達成度 (平成 26 年度末)

◎ : 大幅達成、○ : 達成、△ : 一部を除いて達成、× : 未達

②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

主要な成果、達成度、今後の課題について表 23~25 に示す。

表 23. 主要な成果② (第 1 回中間評価時 : 平成 20~22 年度)

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
ヘテロ接合デバイス化技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・微結晶SiGe発電層での試作と温度特性評価 (ヘテロ接合界面制御の影響調査)</li> <li>・ヘテロ接合デバイスの作製および評価 (単接合太陽電池で変換効率8</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・バッファ層挿入により特性改善</li> <li>・Geに対し特定の界面処理が変換効率向上に非常に有効</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・無し (済み)</li> <li>・界面処理効果の分析と最適化、基板面方位と抵抗率の最適化、構成</li> </ul>

	%)	であることを見出し、4.23%まで向上		膜の最適化（ヘテロ材料、反射防止膜の適用など）
構造制御ワイドバンドギャップ化合物太陽電池の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>光吸収層のバンドギャップ分布制御（キャリア寿命1ns以上）</li> <li>界面制御技術（開放電圧0.9V以上）</li> <li>裏面コンタクト制御（量子効率90%以上）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>バンドギャップ制御に成功し、不純物混入防止で効率3.8%達成</li> <li>開放電圧0.74V達成</li> <li>シミュレーションから短絡電流増加に目処</li> </ul>	○ ○ ○	<ul style="list-style-type: none"> <li>バンドギャップ分布制御を最適化しキャリア寿命測定法立上げ</li> <li>界面層と光吸収層の相互拡散抑制</li> <li>裏面コンタクト層形成法の確立</li> </ul>
革新的ワイドギャップ材料太陽電池の開発	GaAs基板上InAs、InGaAs量子ドット太陽電池を開発し、 <ul style="list-style-type: none"> <li>10層以上量子ドット超格子の中間バンド形成の確認</li> <li>InAs、InGaAs系量子ドットを用いた太陽電池で変換効率10%（最終目標）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>20層InGaAs量子ドット超格子のミニバンド形成確認</li> <li>12.6%ですでに達成</li> </ul>	◎ ◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>ミニバンド形成した量子ドット超格子の太陽電池への応用</li> <li>中間バンド太陽電池の動作実証</li> </ul>
ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討B	<ul style="list-style-type: none"> <li>高純度半導体単層CNTを抽出する技術開発（90%以上）</li> <li>半導体単層CNTのバンドギャップ制御（バンドギャップ0.2-1.3eV、開放電圧0.1-0.5V）</li> <li>バルクヘテロ接合CNT太陽電池の量子効率の最大値を50%以上とする</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>95%以上</li> <li>バンドギャップ0.8-1.3eV、開放電圧0.14-0.57V</li> <li>量子効率の最大65%（最高73%）</li> </ul>	◎ ○ ◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>純度99%以上、抽出率10wt%以上とする</li> <li>平均直径1.1nm以上の単層CNTを用いてバンドギャップ0.6-1.3eVを達成</li> <li>広いエネルギー範囲で量子効率の最大値を70%以上</li> </ul>
メカニカルスタック技術の開発B	<ul style="list-style-type: none"> <li>透明導電性接着剤特性（透過率70%以上、接合抵抗0.5Ωcm<sup>2</sup>）</li> <li>多接合セル実証（ソーラーセルによる2端子セル作製）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>透過率80%、接合抵抗2.5Ωcm<sup>2</sup></li> <li>ソーラーセルによる2端子セル作製成功</li> </ul>	○ ◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>低抵抗化、大面積均一化</li> <li>多種類のセルにおける実証</li> </ul>
高性能透明導電膜の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギー損失窓電極の開発（近赤外領域：400～1,700nm）で透明な導電性酸化物において抵抗率3×10<sup>-4</sup>Ωcm以下、波長1,700nmにおける吸収係数6.0×10<sup>3</sup>/cm以下を同時に達成</li> <li>200℃以下の低温プロセスで上記酸化物を作製する薄膜形成技術を開発する</li> </ul>	最大プロセス温度200℃において抵抗率2.2×10 <sup>-4</sup> Ωcm、波長1,700nmの吸収係数約5×10 <sup>3</sup> /cmと中間目標を上回る特性を得た	◎	可視高移動度を維持した状態で更に低抵抗率化を図る

※達成度（平成22年度末見込）

◎：大幅達成、○：達成、△：未達（次年度達成見込）、×：未達（次年度達成見込無）

表24. 主要な成果②（第2回中間評価時：平成23～24年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
メカニカルスタック・デバイス化技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>接着抵抗2Ωcm<sup>2</sup>以下、吸収損失10%以下の接合技術開発</li> <li>多接合太陽電池で変換効率20%達成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>媒体接着および直接接合技術を検討し、特に後者でナノ粒子配列を用いた技術を開発、接着抵抗2Ωcm<sup>2</sup>以下</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>接合技術高度化（接着条件等の最適化）</li> <li>様々な種類の太陽電池への適用を試みるとともに、実用化に向けて信頼性の確認など</li> </ul>

		、吸収損失2%以下達成 ・直接接合法により (GaInP/GaAs) 2 接合太陽電池と InGaAsP 太陽電池を接合した太陽電池で変換効率21.85%を達成		
メカニカルスタック技術の開発	4インチ以上、シリコン以外の材料の貼合わせ技術	高圧ガス加圧法を用いたプレス技術による貼合せ接合技術を開発し、4インチGe及びGaAs基板の貼合わせに成功 (成功率100%)	◎	Ge、GaAs、CIGS等ソーラーセルの接合試験、6インチ実用セル試験
ヘテロ接合デバイス化技術の開発A	単接合太陽電池の変換効率9%達成	Ge単接合太陽電池で変換効率6.54%	○	a-Si:H(i)層製膜条件の最適化、各種界面評価手法でのデバイス評価及びデバイス作製条件の最適化など
高度光利用技術の開発A	相対効率向上15%以上	相対効率8%向上	○	光学シミュレーションを通して明確化した、現状基板比で30%の効率向上を実現するフォトニック基板の具体的設計及び作製プロセスに従い素子を試作し、プラズモン効果の確認と結果の計算へのフィードバックを行うことで最適化
SiGe系薄膜ボトムセルの開発A	薄膜中の転位密度を低減	組成傾斜バッファ層の導入により転位密度の大幅な低減 (当所従来構造比1/1,000以下の $10^6/cm^2$ 台以下) に成功	◎	・薄膜中の点欠陥の制御と密度低減 ・高ゲルマニウム組成領域に適用可能な新規バッファ層構造の開発
SiGe系薄膜ボトムセルの開発B	ガラス基板上SiGe等単結晶薄膜を基体としたバンドギャップ0.9eV以下の単接合太陽電池で、変換効率9%またはそれに相当する過剰キャリア寿命を達成	・Si基板上にバッファ層なしで成長した $Si_{0.2}Ge_{0.8}$ 膜/a-Siヘテロ接合セルで1,400nm(0.89eV)までの分光感度を確認 ・ガラス上Si薄膜基板に $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ 膜を成長する際に傾斜組成SiGeバッファ層を挿入することで、過剰キャリア寿命が0.062 $\mu s$ から16.3 $\mu s$ に向上	○	SiGe単結晶薄膜中の不純物および転位密度の低減、ドーピング、電極取出し構造などの最適化
有機単結晶材料ボトムセルの開発A	有機単結晶を用いた単接合で変換効率4%を達成	有機結晶/無機太陽電池で3.1%、電極/p型界面ドーピングにより2.6%	○	活性化率の高いMg以外のn型ドーパントの探索及び界面ドーピング
ナノ材料系ボトムセルの開発A	高純度半導体単層CNTの大量抽出技術開発 (純度99wt%以上、抽出率20wt%以上)	200°C、1時間、真空中で加熱し、残分 (主にPF0ポリマー) を取り除き、純度を向上することで半導体CNTの純度99wt%と	◎	大量抽出技術開発

		抽出率30wt%達成		
ナノ材料系ボトムセルの開発B	pn接合内蔵CNT太陽電池で変換効率4%を達成	熱拡散法により合成したカリウム内包半導体CNT太陽電池において、1,550nmで3.8%、1,650nmで11.4%を達成	◎	プラズマイオン照射法のイオン照射エネルギー等の制御により内包率を向上させたセシウム内包半導体CNT太陽電池において、変換効率10%実現
ナノ材料系トップセルの開発B	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ナノ結晶シリコン自立膜の作製と大面積化（直径：1-10cm）</li> <li>・自立膜による単層セル作製技術を確立し、変換効率10%を達成（Voc=0.7V、Jsc=18mA/cm<sup>2</sup>、FF=0.8）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・p型、n型、pn接合基板の全てで自立膜の作製法を確立し、直径8cmの自立膜作製にも成功</li> <li>・電極堆積法を固め、自立膜セルを実現し、Vocは目標を大きく上回る0.87Vを得たが、JscとFFについては向上が必要</li> </ul>	◎  △	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ナノ結晶シリコン自立膜の薄型化</li> <li>・単層膜では内蔵電界が不十分な為、自立膜をより薄くし、両端にヘテロ接合を構成することで内蔵電界を高め、変換効率の増大を図る（26年3月達成予定）</li> </ul>
化合物系トップセルの開発A	InGaP/InGaAs量子ドット太陽電池で変換効率10%	InGaP/InGaAs系量子ドット成長技術を開発し、太陽電池の変換効率10.3%	◎	Vocの向上による変換効率の向上
化合物系トップセルの開発B	<ul style="list-style-type: none"> <li>・内部量子効率90%以上</li> <li>・光吸収層のバンドギャップ以下の波長の全線透過率80%以上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・波長390nmで量子効率90%達成</li> <li>・全線透過率70%以上達成</li> </ul>	○  ○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・相互拡散抑制構成でのZCIS膜の高温製膜によるバルク再結合低減</li> <li>・界面層、挿入層、光吸収層の屈折率と膜厚の整合</li> </ul>

※達成度（平成24年度末見込）

◎：大幅達成、○：達成、△：未達（次年度達成見込）、×：未達（次年度達成見込無）

表 25. 主要な成果③（事業終了時：平成25～26年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
メカニカルスタック・デバイス化技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・接合技術の高度化により、高度光利用技術と組み合わせて多接合太陽電池（非集光）で変換効率30%を達成する。</li> <li>・メカニカルスタック型太陽電池における、実用化に伴う信頼性に関する課題を明らかにする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・GaAs/InP系4接合太陽電池で31.6%達成、また異種材料の組み合わせであるGaAs/CuInGaSe系で24.2%達成。</li> <li>・信頼性試験として加速劣化試験/温度サイクル試験を行い、長期にわたる実用信頼性を確証。推定素子寿命17万時間以上@60℃を初期的に導出。</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・量産性、低コストに適う実用技術への展開（ELO剥離技術、実装技術等の高度化）</li> </ul>
メカニカルスタック技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・4インチ基板で接合抵抗率1Ωcm<sup>2</sup>以下の安定実現</li> <li>・中間接着層反射ロス低減、実効透過率0.7以上</li> <li>・-40℃～80℃ヒートサイクル1000hの条件下</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・接合抵抗率1Ωcm<sup>2</sup>以下実現</li> <li>・IGZO無反射薄膜導入で中間層実効透過率0.9達成</li> <li>・-40～85℃ヒートサイクル1500hの</li> </ul>	◎  ◎  ◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プロセスコスト低減のための無反射薄膜形成技術の開発</li> <li>・耐環境高信頼性貼り合わせ技術開発</li> <li>・ワイドバンドギャップ材料を用いた有効性検証。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>で剥離無し及び抵抗率<math>3 \Omega \text{ cm}^2</math>以下</li> <li>・3～4インチφ基板サイズ多接合セル実効効率25%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>条件下で剥離無し及び抵抗率<math>1.5 \Omega \text{ cm}^2</math>以下達成</li> <li>・3インチセルにて実効効率31.4%、<math>0.8 \Omega \text{ cm}^2</math>低接合抵抗率確認</li> </ul>	◎	
ヘテロ接合デバイス化技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・バンドギャップ0.9eVのヘテロ単接合太陽電池で1.4eV以下の光に対して電流密度<math>15 \text{ mA/cm}^2</math>以上</li> <li>・多接合太陽電池への適用で変換効率30%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Geヘテロ接合太陽電池で<math>V_{oc}</math> 290mV。Eg=0.97eV付近のSiGeエピ基板で作製したヘテロ接合太陽電池で1.4eV以下の光に対する電流密度<math>0.9 \text{ mA/cm}^2</math>。</li> <li>・多接合素子用素子作製未達。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>×</li> <li>×</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ナローギャップ材料基板の高品質化</li> <li>・プラズマダメージレスヘテロ接合形成技術の開発</li> </ul>
高度光利用技術の開発A	<ul style="list-style-type: none"> <li>・相対効率向上20%以上</li> <li>・変換効率30%達成への貢献</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・相対効率25%向上金属ナノ粒子分散技術が多接合太陽電池での変換効率30%達成に貢献</li> </ul>	◎	高度光利用技術の低コスト化
高度光利用技術の開発B	局在表面プラズモン (LSP) 活用型透明導電層を用いた新規な光閉じ込め構造を開発し、微結晶シリコン単接合太陽電池において、従来型に比較して長波長光感度を20%、相対効率として15%向上させる。	薄膜シリコン材料として光吸収波長領域の異なる2つの材料に対し、適する局在プラズモン応用基板を作製し、特に長波長領域において20%の効率向上を達成	◎	金属による光吸収を低減し、更なる光電変換効率向上を図る必要がある。
SiGe系薄膜ボトムセルA	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高ゲルマニウム組成領域に適用可能な新規バッファ層構造の開発</li> <li>・バンドギャップ0.9eV以上のSiGe太陽電池で、1.4eV以下の光に対して電流密度<math>15 \text{ mA/cm}^2</math>以上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Ge組成0.42～0.84の広範囲でSi基板上に成長したSiGe薄膜の低転位密度化（転位密度<math>1/10000</math>以下）を実現</li> <li>・Ge組成0.84のSiGe太陽電池において1.4 eV以下の光に対する電流密度：<math>3.4 \text{ mA/cm}^2</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎</li> <li>×</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・光マネージメントのさらなる検討</li> <li>・少数キャリア寿命などのバルク物性パラメータの解析によるデバイス設計の再構築</li> </ul>
SiGe系薄膜ボトムセルの開発B	バンドギャップ0.9eV以上の単接合太陽電池で、1.4 eV以下の光に対して電流密度 $15 \text{ mA/cm}^2$ 以上を達成する。その達成に必要な、Geエピタキシャル膜の膜厚と同程度キャリア拡散長（キャリア寿命 $10 \mu \text{ s}$ ）を達成し、素子レベルで $V_{oc} > 0.2 \text{ eV}$ を目標とする。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・熱アニール、および、2段階成長法によりSi基板上に直接成長したGe膜において、貫通転移密度<math>5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}</math>を得た。</li> <li>・<math>\text{PH}_3</math>による高抵抗化した2段階成長Ge単結晶薄膜において、セルを作製し太陽電池特性を（<math>V_{oc}: 0.045 \text{ V}</math>、<math>I_{sc}: 33.32 \text{ mA}</math>、<math>\text{FF}: 0.284</math>）</li> </ul>	×	Ge単結晶薄膜中の不純物およびドーピング等の最適化





		<ul style="list-style-type: none"> <li>・溶液法により大面積薄膜結晶化技術の開発にも成功</li> </ul>		
強相関材料ボトムセルの開発B	<p>強相関有機薄膜用の2インチサイズ以上のナノテンプレート非晶質基板の作製と縦型電流密度を現状の1000倍 (1mA/cm<sup>2</sup>) への向上。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・約4cm角のナノテンプレート非晶質ポリマー基板 (0.3nm高さの単原子ステップアレー) の作製</li> <li>・強相関材料系有機単結晶薄膜の高品質化基板面因子の解明</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ナノテンプレートポリマー基板上での有機薄膜太陽電池における電流密度の飛躍的な向上。</li> </ul>
強相関材料ボトムセルの開発C	<ul style="list-style-type: none"> <li>・イオン液体フラックス法による高品質有機電荷移動錯体単結晶・薄膜の作製でグレインサイズ50μm以上</li> <li>・イオン液体除去技術の開発で、洗浄後、残存するイオン液体が現状の1/100以下</li> <li>・ナノインプリントテンプレート基板上の有機薄膜で、光吸収効率、成長配向性を向上させる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・グレインサイズが50μm程度のC8BTBT-TCNQ単結晶膜を作製することに成功した。</li> <li>・超純水+真空乾燥で、洗浄前後で、有機電荷移動錯体単結晶表面に残留するイオン液体量を1/100にすることができ、太陽電池動作を可能にした。</li> <li>・ペンタセン真空蒸着膜の相制御、面内配向を実現</li> </ul>	◎  ○  ○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・イオン液体膜中での均一核形成を実現し、均一な薄膜を作製すること。</li> <li>・様々なイオン液体、有機半導体の組み合わせに対し、より一般的なイオン液体除去技術を開発する。</li> <li>・C8BTBT-TCNQでも実現し、太陽電池の効率が向上することを検証する。</li> </ul>
ナノ材料系トップセルの開発A	<ul style="list-style-type: none"> <li>・バンドギャップが1.7 eV以上のナノ結晶シリコン自立膜の作製と薄型化(&gt;40μm)・大面積化(直径: 1-10 cm)</li> <li>・自立膜による単層セル作製技術を確立し、変換効率16%を達成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・p型、n型、pn接合基板の全てでバンドギャップ要件を満たす自立膜の作製法を確立し、薄型化・大面積化に成功</li> <li>・pn接合基板から剥離した自立膜によりセル化を実現した。トップセルに適う分光感度を観測し、ナノシリコン系では例を見ない高いV<sub>oc</sub> (0.87 V) を得た。J<sub>sc</sub>には向上の余地がある。</li> </ul>	◎  ×	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ナノ結晶シリコン自立膜の連続剥離技術の開発とさらなる大面積化</li> <li>・素子構造制御とパッシベーションの手法を適切に複合し、高い光起電圧を維持してJ<sub>sc</sub>を増大し、光電変換効率を目標に近づける。</li> </ul>
ナノ材料系トップセルの開発B	<ul style="list-style-type: none"> <li>・hv &gt; 2E<sub>g</sub>の光に対して内部量子効率100%以上を実現</li> <li>・多重励起子生成による2割以上の効率向上を実証</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・粒径約4 nm (E<sub>g</sub> = 約1.8 eV) のSiナノ粒子を用いたショットキーセルにおいて、130%の外部量子効率を観測。</li> <li>・Siナノ粒子/Ru色素ハイブリッド増感型太陽電池にお</li> </ul>	○  ○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高効率化が期待できるヘテロ型セル、増感型セルにおいても100%以上の外部量子効率を実現する。</li> <li>・Siナノ粒子の欠陥低減技術、表面終端技術の開発により、Siナノ粒</li> </ul>



③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発  
 主要な成果、達成度、今後の課題について表 26～28 に示す。

表 26. 主要な成果③（第 1 回中間評価時：平成 20～22 年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
ナノドット禁制帯幅制御	シングル接合セルで変換効率5%を達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ SiC/Siナノドットに酸素添加することにより変換効率の大幅アップを実現し、世界最高の開放電圧518mVを達成</li> <li>。ITO側から光照射する構造で光電流 <math>5.4\text{mA}/\text{cm}^2</math> を達成</li> <li>・ 現状で得られている <math>V_{oc}</math>、<math>I_{sc}</math>、FF それぞれの最高値が同時に達成できれば3.8%の変換効率</li> </ul>	◎	ITO側から光照射する構造の最適化、膜剥離の問題の解決
薄膜新材料	アモルファス/微結晶化合物薄膜ならびにゲストフリーSiGe系クラスレート薄膜の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ アモルファスInGa Nで光感度252倍を達成</li> <li>・ 約1.5eVのバンドギャップのSiクラスレートで、世界で初めて光電気伝導度<math>\sim 1 \times 10^{-7} \text{S}/\text{cm}</math>を観測</li> </ul>	○	一層の高品質化により欠陥密度 $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ を実現
ワイド/ナローギャップ材料設計	ナローバンドギャップ材料の設計 (0.6-1.0eV)	CuIn( $\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x$ ) <sub>2</sub> 系の $x=0.5$ で $E_g=0.88\text{eV}$ が得られた	◎	薄膜の一層の高品質化
シリコン系薄膜集光型セル	低倍率集光で真性変換効率20%	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 微結晶Si太陽電池では、低倍率集光で変換効率が大幅にアップ (1sun 8.7%、7suns 9.4%) することを世界で初めて見出し、a-Si/mc-Siタンデムセルで変換効率10.1%、高電圧型a-Si<sub>0</sub>/a-Siタンデムセルで9.4% (開放電圧1.92V) を達成</li> <li>・ 現状技術でトリプルセルを接合すれば、16%程度の変換効率が得られることを理論解析で明確化</li> </ul>	○	シリコン薄膜系2接合、3接合太陽電池の最適設計と、低倍率集光特性の検討
サブセル界面接合技術	サブセル界面トンネル伝導構造の開発によりサブセル界面抵抗 $300\text{mWcm}^2$	サブセル界面抵抗 $500\text{mWcm}^2$	○	成膜条件、ドーブ濃度等の最適化、材料の組合せ、後続プロセス条件の最適化
カルコパイライト系集光型セル	低倍率集光時において真性変換効率20% (単接合、有効受光面積 $1\text{cm}^2$ )	バンドギャップ約1.1eVのCIGSを用いて、約7倍集光により、変換効率20.3%を	◎	1.4eV帯、高Ga組成CIGS太陽電池の効率向上によるミドルセル用太陽電池の開発

		達成		
放熱基板カルコパイライト系集光型セル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CuInTe系薄膜形成と太陽電池の試作</li> <li>・放熱基板上でのCIGS太陽電池で変換効率20%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CuInTe薄膜の低温製膜技術(200℃)を確立し、変換効率5%(非集光)</li> <li>・金属基板上CIGSセルで18%(非集光)</li> </ul>	○	Teフラックス制御および不純物効果による更なる高効率化、集光時の動作確認
光学設計技術	新規直並列多接合薄膜太陽電池の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シリコン系と化合物系太陽電池からなる新規多接合薄膜太陽電池を提案し、数値計算により3%の変換効率向上を確認</li> <li>・世界で初めて微結晶シリコンセルとCISセルの直列タンデム構造の作製に成功</li> </ul>	◎	新規太陽電池セル作製方法の検討と、光学調整を中心とする構造最適化の検討
p型透明導電膜	基本特性として $E_g > 3.0\text{eV}$ 、 $\sigma > 10\text{S/cm}$ を達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・禁制帯幅<math>E_g(\text{CuAlO}_2) = 3.1\text{eV}</math>、<math>E_g(\text{新材料}) = 2.6\text{eV}</math></li> <li>・可視光透過率80%(新材料)</li> <li>・電気導電率<math>21\text{S/cm}</math>(新材料)</li> </ul>	◎	開発したp型透明導電膜を用いて、アモルファスSiシングル接合セルを作製し、セル特性からp型TCO利用の特質を明確化
グラフェン透明導電膜	グラフェン成膜技術の開発(導電率 $6 \times 10^3\text{S/cm}$ 以上、透過率80%以上@380-2,000nm)	導電率 $2 \times 10^4\text{S/cm}$	○	MBEによるエピ成長技術開発

※達成度(平成22年度末見込)

◎:大幅達成、○:達成、△:未達(次年度達成見込)、×:未達(次年度達成見込無)

表 27. 主要な成果③(第2回中間評価時:平成23~24年度)

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
シリコン系薄膜集光型セル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・a-Si<sub>0</sub>、a-Si、a-SiGeCならびに<math>\mu\text{c-Si}</math>からなる低倍率集光型シリコン系薄膜太陽電池で変換効率20%を達成</li> <li>・シリコン系薄膜太陽電池、ならびに第4層、第5層セルと組み合わせた5接合薄膜フルスペクトル太陽電池により、変換効率25%(開放電圧3.72V、短絡電流9.0mA/cm<sup>2</sup>、曲線因子0.75、10倍程度の集光時)を達成</li> <li>・透明裏面電極を適用し、低倍率集光多接合セルで変換効率25%を達成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・光学的な損失を極限まで減少させるa-Si/<math>\mu\text{c-Si}</math>タンデム型太陽電池を考案し、1sunでの変換効率13.6%を達成</li> <li>・シリコン薄膜太陽電池とCIGSセルとを組み合わせた波長スプリット型薄膜フルスペクトル太陽電池を作製したところ、薄膜系では世界最高の変換効率21.8%(1sun)を達成</li> <li>・透明裏面電極用のアクセプタドーピング法により14.9%を得た。</li> </ul>	◎(非集光) / ○(集光)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・集光時は15%以上が得られる見通し</li> <li>・波長スプリット型セルの集光動作により、変換効率25%は達成可能</li> <li>・アクセプタ添加や熱処理による効果を明らかにし、ITO、ZnO等についても検討(25年9月達成予定)</li> </ul>
広バンドギャップシ	広バンドギャップi層を用	$E_g = 1.90\text{eV}$ のi層、 $E_g$	○	透明導電膜とp層の界面

リコン系薄膜	いた単接合セルにて、開放電圧1.06V（低倍率集光時1.16V）、短絡電流密度9.0mA/cm <sup>2</sup> （有効面積1cm <sup>2</sup> ）を達成	=2.11eVのp層にて、開放電圧0.996V、短絡電流密度11.6mA/cm <sup>2</sup> （有効面積1cm <sup>2</sup> ）を達成		にバンド構造制御層を導入
カルコパイライト系トップセル	ワイドギャップCu(In,Al)S <sub>2</sub> (CIAS) 太陽電池で、変換効率6%を達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>変換効率2.0% (E<sub>g</sub>=1.7eV) と1.0% (E<sub>g</sub>=2.0eV) を得た</li> <li>多接合を実現するための引き剥がし基礎技術を確立</li> </ul>	○	CIASの高品質化、新型バッファによるセル構造最適化
InGaN薄膜	禁制帯幅2eV程度のInGaN薄膜を用いた単接合太陽電池において1SUNで1.10V、10SUNで1.20Vの開放電圧を達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>InGaN（禁制帯幅2.36eV）を用いた単接合太陽電池（p型a-SiC/i型a-Si:H/i型InGaN/n型InGaN構造）において、1sunで開放電圧0.58V（変換効率1.57%）を得た</li> <li>p層とバッファ層にa-SiOを用いたトップセル用単接合太陽電池で、初めて太陽電池動作を確認し、開放電圧0.16V（変換効率0.13%）を得た</li> </ul>	△	作製条件の調整等によるInGaNの更なる高抵抗、高光感度化と、InGaN光吸収層に適したp層材料ならびに接合界面へ挿入するバッファ層を探索し、単接合太陽電池において1sunで1.10eV以上の開放電圧を達成（26年3月達成予定）
Si量子ドット禁制帯幅制御	TiO <sub>2</sub> :Nbを高温耐性透明導電膜、ならびにドーパントの拡散バリア層として用いた禁制帯幅1.4eV程度のSi系量子ドットシングル接合太陽電池で変換効率7%を達成	TiO <sub>2</sub> :Nb膜によりドーパントの拡散を抑制することに成功し、禁制帯幅1.4eV程度のSi系量子ドットシングル接合太陽電池にて、世界最高の変換効率0.39%、低倍率集光下で開放電圧649mVを達成	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>水素プラズマ処理条件の最適化によるSi量子ドット層の高品質化</li> <li>Si量子ドット層の厚膜化による短絡電流密度の向上（26年3月達成予定）</li> </ul>
ナノドット量子効果による薄膜形成技術	ナノドット量子効果を検証し、変換効率10%（低倍率集光時）を実現	ドットの高密度化（70wt%）を達成し、ナノドットの量子サイズ効果を確認。ウエットプロセスで形成したナノドットとn型a-Si膜を組み合わせた太陽電池セルにおいて、世界最高のVoc0.71Vを達成（変換効率2.02%）	○	高Vocの特徴を生かしたセル構造の最適化により、変換効率10%達成見通し
カルコパイライト系集光型セル	a-Si太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、あるいはカルコパイライト系太陽電池/カルコパイライト系太陽電池の作製により、低倍率集光多接合セルで変換効率25%を達成	波長614nmのスプリットティングにより、AIGS/CIGS太陽電池において変換効率12.2%及びトップセル用AIGS、ミドルセル用CIGS太陽電池において開放電圧0.976V、0.770Vを達成	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>波長スプリットティングによるタンデム太陽電池の効率向上、並びに直接ボンディングによるタンデム太陽電池の実現</li> <li>AIGSおよび高Ga組成を有するカルコパイライト材料の高温製膜による高品質化、およびセル化による実証</li> </ul>
歪Ge	ダブルヘテロ接合型太陽電池を作製し、1.1eV以下	ダブルヘテロ接合型バルクGe太陽電池を	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>バルクGeを用いたダブルヘテロ接合太陽電池</li> </ul>

	の低エネルギー光照射下において変換効率1.35%（非集光）を達成	作製し、AM1.5、100 mW/cm <sup>2</sup> 照射下において変換効率2.31%（非集光）を達成		による高効率化技術の確立 ・歪Ge層を光吸収層としたダブルヘテロ接合太陽電池の作製
非真空CuIn(Se, Te) <sub>2</sub> 膜	第5層セル（禁制帯幅=0.85-0.90eV）として変換効率2%（低倍率集光時）	非真空プロセスでCuIn(S <sub>0.5</sub> Te <sub>0.5</sub> ) <sub>2</sub> 膜を作製し、禁制帯幅=0.87eVを確認	○	0.7-0.87eVで禁制帯幅の制御が可能な新材料を開発し、非真空プロセスでCuIn(S <sub>0.5</sub> Te <sub>0.5</sub> ) <sub>2</sub> 膜および新開発膜を用いて第5層セルを試作
蒸着CuInTe <sub>2</sub> 系セル	CuInTe <sub>2</sub> 系ボトムセルで変換効率2%（低倍率集光）	CuInTe <sub>2</sub> セルで変換効率4.4%（5suns）、CuIn <sub>3</sub> Te <sub>5</sub> セルで変換効率7%（1sun）を達成	○	CuInSe <sub>2</sub> との混晶化によるCuIn(SeTe) <sub>2</sub> 薄膜作製とキャリア濃度制御および禁制帯プロファイル制御による高効率化
p型透明導電膜	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Eg&gt;3.0eV、<math>\sigma &gt; 300\text{S/cm}</math>を達成</li> <li>・p型透明導電膜をシリコン系薄膜太陽電池に適用してp型透明導電膜の有効性を確認し、従来のSnO<sub>2</sub>やZnOよりも開放電圧50mV以上の増加を目指す</li> <li>・p型透明導電膜をCIGS太陽電池等の下部電極として適用し、従来用いていた電極と同等の特性を達成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Eg=2.6eVのCu-Nb-O系薄膜（特許出願済）で、可視光透過率70%、116S/cmを達成</li> <li>・Eg=3.6eVのNiO薄膜で可視光透過率74%、104S/cmを達成</li> <li>・Eg=3.6eVのNiO系材料（特許出願済）で可視光透過率59%、180S/cmを達成</li> <li>・BaCuSeF等のp型TCOを化合物系太陽電池の裏面電極に適応し、太陽電池特性を確認</li> </ul>	○	Eg=3.6eVのNiO系材料について、特性の向上を図るとともに、薄膜形成時の基板温度の低温化に取り組み、シリコン系薄膜太陽電池およびCIGS太陽電池等に应用展開
フルスペクトルTCO	波長400-2,000nmでの平均光吸収率が7%以内、波長1,000nmでヘイズ率80%以上、波長1,200nmでヘイズ率60%以上、抵抗率1×10 <sup>-3</sup> Ω cm以下を達成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・SnO<sub>2</sub>:Fで移動度81.3cm<sup>2</sup>/V·sを達成（世界最高）</li> <li>・RIEガラス上に高移動度膜を作製する技術を開発</li> <li>・平均吸収率6.1%、ヘイズ率77%（1,000nm）、65%（1,200nm）、抵抗率9×10<sup>-4</sup>Ω cm（Fドープ層）達成</li> </ul>	○	ガラス形状の微調整でヘイズ率を向上
グラフェン透明導電膜	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シート抵抗30Ω/□以下、透過率90%以上@380-2,000nmのグラフェン薄膜を得る</li> <li>・ITOなどのn型の透明導電膜使用時に比べ開放電圧が50mV以上増加すること</li> </ul>	シート抵抗121Ω/□、透過率90%を達成（4層換算）	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・キャリア密度を1×10<sup>13</sup>/cm<sup>2</sup>から5×10<sup>13</sup>/cm<sup>2</sup>に増加させ、現状のシート抵抗を1/5にする</li> <li>・太陽電池への適用実験を行い、開放電圧向上の効果を確認</li> </ul>
サブセル界面接合技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サブセル界面抵抗として200mΩ cm<sup>2</sup>（測定電流密度0.5A/cm<sup>2</sup>）を得る</li> <li>・太陽電池多接合セルに適用し、低倍率集光（～50倍）時の曲線因子0.75以上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サブセル界面接合層として低抵抗酸化半導体p/n接合層を開発し、サブセル界面接合抵抗として80mΩ cm<sup>2</sup>（測定電流密度0.</li> </ul>	○	太陽電池多接合セルでの最適化を実施し、曲線因子0.75以上を達成

		5A/cm <sup>2</sup> ) を達成 ・ a-Si/ $\mu$ c-Si タン デムセルに適用し 曲線因子0.72を得 た		
光学設計技術	・5接合太陽電池の組み合 わせに最適な光学制御 構造を設計 ・オプティカルスプリッ タの光学的損失を8%以 下まで低減し、カット 波長を任意に変更でき ることを確認	オールシリコン系の 擬似薄膜フルスペク トル太陽電池構造で 21.9%の変換効率を 確認	◎	更なる反射/透過特性の 向上
表面プラズモン	特定の波長に対して反射/ 透過する金属ナノ粒子膜 を、a-SiO <sub>2</sub> /a-Si/ $\mu$ c-Si トリプル接合セルの裏面反 射膜として作製し、 $\mu$ c-S iボトムセルからの光電流 を2mA/cm <sup>2</sup> 以上向上	金属ナノ粒子膜をa- SiO <sub>2</sub> /a-Si/ $\mu$ c-Si ト リプル接合セルの裏 面反射膜として用い た場合1.68mA/cm <sup>2</sup> 程 度の電流密度増加が 期待できる“SiO <sub>2</sub> 膜 によって安定化され た”金属ナノ粒子膜 の作製に成功	○	金属ナノ粒子膜の作製方 法をさらに工夫するなど し、トリプル接合セルの 裏面反射膜として、ボト ムセルからの光電流を2 mA/cm <sup>2</sup> 以上向上

※達成度（平成24年度末見込）

◎：大幅達成、○：達成、△：未達（次年度達成見込）、×：未達（次年度達成見込無）

表 28. 主要な成果③（事業終了時：平成25～26年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
①-1 薄膜フルスペクトル 集光型セル・発電特 性	ワイドギャップからナロ ーギャップの広い禁制帯 幅の領域で、今までにない 光吸収層材料を開発する とともに、広い波長範 囲で有効に光子を利用 するため光のマネージ メント技術開発を行う。 これらの要素技術をもと に、低倍率集光型薄膜太 陽電池を試作し、エネル ギー変換効率40%を達成 する。	本研究ならびに他研 究機関で開発された セルを持ち寄り、波 長スプリッティング 特性の測定を行い、 以下の成果を得た。 ・ a-Si//CIGS波長ス プリッティングによ り変換効率 $\eta$ =22.9 % ・ a-Si//高効率Siセ ルの組み合わせで $\eta$ =25.1 % ・ InGaP//GaAs//CIG Sで $\eta$ =28.9% (1sun) ・ InGaP//GaAs// c-Siで $\eta$ =33% (1sun) ・ InGaP//GaAs //c-Siで $\eta$ =39% (50sun、電極の最適 設計によりセルの直 列抵抗を十分下げら れた場合の推定値)	○	・集光度に対する最適電 極設計 ・集光時におけるセルの 測定温度制御 ・低倍率集光薄膜フルス ペクトルセルで $\eta$ =30%を 得るためのトップセル、 ミドルセルの高品質化 ・ Proof-of-Concept セル で $\eta$ =40%の実証 ・波長スプリッティング 低倍率集光測定技術の いっそうの測定精度向上
①-1 薄膜フルスペクトル 集光型セル・発電特 性 再委託：SiO評価	・ESR、光吸収評価によるS iOの欠陥評価とセル構造 での光吸収評価によるSi Oの迅速な欠陥評価技術 の確立 ・評価結果を東工大にフ ィードバックし、SiOト ップ層の高効率化に貢献	・酸素組成比が13.5% 以下で、欠陥密度 8.37 $\times$ 10 <sup>16</sup> cm <sup>-3</sup> 以下 、光感度7610以上 のa-SiO <sub>x</sub> :Hの作製 に成功 ・Siダングリングボ ンド密度がa-SiO <sub>x</sub> : Hの電気的特性に 影響を与えること	○	・欠陥に関する光吸収 を利用してセル構造試 料から欠陥密度の絶対 値を算出

		を示唆 ・セル構造での光吸収層欠陥評価の基盤技術を確立		
①-1 薄膜フルスペクトル集光型セル・発電特性 再委託：屋外出力計測	屋外発電特性評価用波長スプリットング低倍率集光系の構築と年間発電特性計測・評価	GaAs太陽電池、InGaP太陽電池を用いたシステムで屋外計測を実施し、年間総発電量34 Wh/cm <sup>2</sup> 、年間直達日射量に対する変換効率25.7%を達成。	○	CIGS太陽電池などの薄膜太陽電池を用いた屋外計測・年間発電特性評価
①-2 広バンドギャップシリコン系薄膜	多接合セルのトップ層として、開放電圧1.10V（低倍率集光時1.20V）、短絡電流密度9.5mA/cm <sup>2</sup> （3.5eV～2.1eVまでの計算値）を達成	・ a-SiCセルにおいて Voc=1.030V（集光時1.080V）、Jsc=10.17mA/cm <sup>2</sup> （～2.1eVまでの計算値8.02mA/cm <sup>2</sup> ）を達成。 ・ a-Siセルにおいて Voc=0.937V、Jsc=15.83mA/cm <sup>2</sup> （～2.1eVまでの計算値9.49mA/cm <sup>2</sup> ）が得られ、a-SiC/a-Siタンデムセルにおいて、変換効率10.02%を達成。	○	多接合を考慮した設計（Topセルのn層による光吸収の低減など）と集光を考慮した電極設計。
①-3 カルコパイライト系剥離セル	2接合セルで変換効率9.7%（1sun）、11.2%（10sun）を、3接合セルで11.2%（1sun）、13.5%（10sun）を達成する。	多接合化のためのカルコパイライトの剥離技術とカルコパイライト裏面とオーミック接触を実現する透明電極を開発。	×	ワイドギャップセルのはく離技術の確立
①-4 カルコパイライト系集光型セル	Ag(InGa)Se <sub>2</sub> トップセルの開発 Voc = 0.95V（1sun） 1.05V（10sun） Isc = 9.5mA/cm <sup>2</sup> （2.1eV - 1.68eV）  Cu(InGa)Se <sub>2</sub> ミドルセルの開発 Voc = 0.78V（1sun） 0.88V（10sun） Isc = 9.5mA/cm <sup>2</sup> （1.68eV - 1.38eV）	・ AIGS太陽電池において変換効率9.95%を達成した（Voc=0.976V, 1sun）。光エネルギー2.1eV-1.68eVの波長領域において、短絡光電流8.7mA/cm <sup>2</sup> を達成。 ・ ミドルセル用CIGS太陽電池において、変換効率14.4%を達成（Voc=0.72V, 1sun）。光エネルギー1.68eV-1.38eVの波長領域において、短絡光電流9.2mA/cm <sup>2</sup> を達成。	○	AIGS太陽電池の変換効率向上は、光吸収層の正孔濃度向上が重要  ミドルセル用CIGSの開放電圧は、ほぼ目標値に近いと、タンデム化による性能評価および実証
①-5 Cu <sub>2</sub> SnS <sub>3</sub> 系薄膜およびセル	Cu <sub>2</sub> SnS <sub>3</sub> 系ボトムセル（禁制帯幅0.8eV）でV <sub>oc</sub> =0.4V、フィルター透過光（1.1eV以下）でJ <sub>sc</sub> =10.2mA/cm <sup>2</sup> を達成する。	非真空プロセスで作製したCu <sub>2</sub> SnS <sub>3</sub> 太陽電池（禁制帯幅0.87eV）で変換効率1.58%（V <sub>oc</sub> =149mV, J <sub>sc</sub> =32.5mA/cm <sup>2</sup> , FF=0.328）、Cu <sub>2</sub> (Sn <sub>0.6</sub> Ge <sub>0.4</sub> )Se <sub>3</sub> 太陽電池で変換効率2.43%（V <sub>oc</sub> =334mV, J <sub>sc</sub> =20.4mA/cm <sup>2</sup> , FF=35.5%）を達成した。	△	Cu <sub>2</sub> SnS <sub>3</sub> 系薄膜の高品質化とCu <sub>2</sub> SnS <sub>3</sub> 系太陽電池に適したデバイス設計
①-6 CIGS系ボトムセル	CIGS系ボトムセルで変換効率3.8（低倍集光時4.5）%	CIGS系ボトムセルで変換効率5.5（低倍	◎	KF-PDT等によるCIGS光吸収層の欠陥制御技術、各



	<p>(<math>E_g=1.38\text{eV}</math>の CIGS フィルター下、<math>V_{oc}=0.5</math> (集光時 <math>0.6</math>)V、<math>J_{sc}=9.5\text{mA}/\text{cm}^2</math>、<math>FF=0.80</math>、感度波長域 <math>899\sim 1127\text{nm}</math>) を達成。</p> <p>中心機関 (東京工業大学) と連携して波長スプリッティングセルを共同開発する。</p>	<p>集光時 <math>5.8</math> ) % (<math>880\text{nm}</math> スプリッター下、<math>V_{oc}=0.59</math> (集光時 <math>0.63</math>) V、<math>J_{sc}=12.7\text{mA}/\text{cm}^2</math>、<math>FF=0.731</math>) を達成。</p> <p>東工大と連携し、a-Si/CIGS および InGaP/GaAs/CIGS 波長スプリッティング型セルで変換効率 <math>22.2\%</math> および <math>27.3\%</math> (非集光) を達成。</p>		<p>層の最適製膜技術開発等によるナローギャップ CIGS 系ボトムセルの高効率化、および低倍集光セルの電極設計による更なる高効率化技術開発。</p>
②-1 p型透明導電膜 (新潟大学の一部を共同実施)	<p>Mo等の不透明電極材料を用いた場合と同等の太陽電池特性を達成する。また、n型透明導電膜との組み合わせによる太陽電池特性の向上を確認する。</p>	<p>BaCuSeF系薄膜をCdS/CdTe太陽電池の裏面電極に適用して通常用いられているカーボン電極とほぼ同等の変換効率 <math>11.6\%</math> を達成した。</p>	◎	<p>CuInSe<sub>2</sub>系太陽電池の裏面電極への適用とタンデム太陽電池への応用</p>
②-2 フルスペクトルTCO (トップセル用TCO)	<p>シート抵抗 <math>5\ \Omega/\square</math> 以下、エネルギー透過率従来比 <math>6\%</math> 向上 (AM1.5スペクトルの <math>350\sim 766\text{nm}</math> での平均。透過率は積分球内設置法で測定) を達成する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・エネルギー透過率従来比 <math>6.1\%</math> 向上</li> <li>・新評価方法 (積分球内設置法) を考案</li> </ul>	○	<p>セル効率を向上させるTCO表面形状の最適化</p>
②-3 新型TCO/p-SiO界面技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・新型TCOに用いる透明導電膜材料・構造の開発により吸収端波長として <math>320\text{nm}</math>、<math>1100\text{nm}</math> の透過率 <math>80\%</math> 以上</li> <li>・TCO/p-SiO界面瀬接合層材料・作製プロセスの開発により、TCO/p-SiO接合抵抗として <math>100\text{m}\ \Omega\ \text{cm}^2</math> 以下。</li> <li>・開発した技術を中心機関と連携してトップセルに適用し、開放電圧 <math>1.1\text{V}</math> 以上。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・酸化亜鉛マグネシウム (ZnMgO) からなるTCOテクスチャの材料および成膜プロセスを開発し、吸収端波長 <math>320\ \text{nm}</math> 以下、<math>1100\text{nm}</math> の透過率 <math>80\%</math> 以上を達成</li> <li>・TiO<sub>2</sub>/MoO<sub>3</sub>接合層を積層したZnMgO/ITO積層TCO電極を開発し、a-SiCセルで <math>V_{oc} = 1.05\ \text{V}</math> と接合抵抗低減を実証。材料選定、プロセス最適化により <math>1.1\ \text{V}</math> 超の <math>V_{oc}</math> が実現できる見通しを検証</li> </ul>	○	<p>発電層のワイドバンドギャップ化、接合層材料の高仕事関数化による更なる <math>V_{oc}</math> 向上</p>
②-4 光学設計/システム化技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・貼り合わせおよびオプティカルスプリッティングによる変換効率 <math>40\%</math> の達成</li> <li>・低倍率集光で変換効率 <math>40\%</math> を達成するためのオプティカルスプリッタ開発</li> <li>・光学的損失: <math>5\%</math> 以下まで低減</li> <li>・低倍率集光によるオプティカルスプリッティング構造の屋外暴露システムにおける課題抽出し、暴露による屋外</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・光学的損失 <math>4\%</math> 以下のオプティカルスプリッタを開発。</li> <li>・ペロブスカイト型太陽電池とヘテロ接合太陽電池を用いたスプリッティング構造により真性効率 <math>28\%</math> を達成。</li> <li>・各種スプリッタを作製し、外部機関に提供。</li> <li>・屋外低倍率集光装置へオプティカルスプリッティング構造</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各種太陽電池へのスプリッタの適用</li> <li>・一軸追尾低倍率集光システムにおけるスプリッタへの太陽光の広角入射による出力低下の抑制。</li> </ul>

	出力変動を取得する	を導入し、課題抽出、及び、屋外出力評価を実施。		
②-5 低倍率集光システム	多接合太陽電池モジュールの構造に対応した集光ロスが少ないミラー反射型集光・追尾システムを開発し、これを屋外計測システムに適用することにより、集光効率90%を実現する集光・追尾システム技術を確立する。	太陽光に含まれる散乱光を捕集し、発電に寄与させることが可能な散乱光捕集光学系を開発し、屋外発電テストを実施した結果、従来の集光・追尾システムに対し、3.7%~3.9%の集光効率の向上を実証した。これより、集光効率を推定した結果、集光効率90%の実現が可能であることの証左を得た。	○	フルスペクトル集光用のワイド/ナローギャップのセルを用いた発電検証

※達成度（平成26年度末）

◎：大幅達成、○：達成、×：未達

④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）

主要な成果、達成度、今後の課題について表29に示す。

表29. 主要な成果④（第2回中間評価時：平成21~22年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
集光型太陽電池屋内評価技術	従来の単接合太陽電池の高精度評価技術をベースとして、3接合以上の多接合で集光倍率500倍以上に対応できる国際的整合性を持った高精度な評価技術を開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>集光倍率500倍以上で集光型多接合太陽電池セルを高精度に測定可能な技術を開発し、NRELと共同で測定精度について検証</li> <li>集光型太陽電池ユニット評価を光線平行度約0.5度以内の定常光で高精度に評価する技術を開発</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>1,000倍以上の照度への対応、測定精度の不確かさの検証や改善検討</li> <li>国際比較測定の継続等による、整合性の高い評価技術の確立、標準化</li> <li>集光型太陽電池発電量評価技術の確立（IEC62670-2 Draft）</li> <li>集光型太陽電池出力の補正技術の開発（IEC62670-3 Draft）</li> </ul>
集光型太陽電池屋外評価技術	集光型太陽電池システムを日米両国に設置し、屋内評価結果と併せて屋外での性能評価技術を開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>国内外の3種の多接合型太陽電池を使用した集光型太陽光発電設備（30kW）を岡山市とコロラド州に設置し、異なる気候環境下での実際の発電データを取得</li> <li>各種気象条件および設置精度がおよぼす集光型太陽電池システムの発電性能を実証的に明らかにした</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>CPVに特有なアライメント等を考慮した高精度な発電量評価技術開発と検証、標準化</li> <li>集光型太陽電池発電量評価技術の確立（IEC62670-2 Draft）</li> <li>集光型太陽電池出力の補正技術の開発（IEC62670-3 Draft）</li> </ul>
革新的薄膜多接合太陽電池性能評価技術	従来より広いスペクトル領域で感度特性を有するSi系以外および3接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合	<ul style="list-style-type: none"> <li>Si系以外および3接合以上を含めた多接合太陽電池モジュール（集積型構造）の高精度な</li> </ul>	○	新型薄膜モジュールでの評価精度、整合性検証

	太陽電池に予測される集積型モジュール構造での評価に対応できる技術を開発	性能評価に対応可能な技術を開発し、基本的性能を検証 <ul style="list-style-type: none"> <li>・新概念太陽電池等、集光用太陽電池の性能評価に重要となる照度、面性等の定義測定方法について日米で議論し整合を図った</li> </ul>		
革新的薄膜多接合太陽電池信頼性評価技術	革新的太陽電池およびそれに用いられる新材料の部材、組成、不純物等の評価および基本的な光、熱等の環境に対する信頼性を検証	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CIGS 光吸収層の中に形成されるミクロンサイズの粒子の組成分析を行いCIGS膜の性能を阻害する要因を元素とそのサイズに関して明確にした</li> <li>・光電子分光測定と分光エリプソメトリー装置等を用いたバンドギャップ測定より得られるヘテロ接合界面のバンドオフセット量評価が新規太陽電池開発に有効である事を<math>a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x</math>:H/c-Geヘテロ接合型太陽電池を用いて確認</li> <li>・薄膜X線回折を用いてルブレン結晶上に成長させたC60結晶の面内方位分布の測定を行い、高品質の有機単結晶が得られていることを確認</li> <li>・Si量子ドットの過渡発光スペクトル測定によりSi量子ドット/有機ハイブリッド型太陽電池を評価</li> <li>・走査型プローブ顕微鏡により薄膜多接合太陽電池に用いられる中間層材料/透明導電材料の評価を実施し、微視的組成や特性と電気特性との相関を明らかにした</li> <li>・UV光を照射し集光用レンズ部材（アクリル）の光照射試験前後での材料特性変化を評価</li> </ul>	○  ○  ○  ○  ○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・これらの手法をより発展させ、デバイス構造を有する試料およびデバイスの評価へ展開</li> <li>・各種部材のUV光への耐性を評価し部材開発へフィードバック</li> </ul>

※達成度（平成 22 年度末） ◎：大幅達成、○：達成、×：未達（次年度達成見込無）

⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）  
 主要な成果、達成度、今後の課題について表 30、31 に示す。

表 30. 主要な成果⑤（第 2 回中間評価時：平成 23～24 年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
新材料・新構造太陽電池の創製及び評価解析技術の開発	Ⅲ-V-N新材料、Ⅲ-V オンSi新構造の評価解析技術を確立	<b>【Ⅲ-V-N新材料】</b> ・偏光、時間分解FT-IR測定により、N-H欠陥の構造や電荷状態に関する知見を得た ・欠陥解析結果をフィードバックし、(In)GaAsNセルの効率向上を達成 <b>【Ⅲ-V オンSi】</b> ・成膜時のその場X線逆格子マッピングを実施し、透過型電子顕微鏡観察と合わせて、欠陥を解析 ・新規バッファ層による欠陥低減を検討 <b>【量子ナノ構造】</b> ・PPT法、PL法、SPV法を組み合わせて、量子ナノ構造のキャリア再結合過程を解析	◎	Ⅲ-V-N新材料、Ⅲ-V オンSi新構造、量子ナノ構造の基礎的理解と品質向上に向け、さらなる評価、解析の継続
集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発	量子・ナノ材料、構造におけるキャリア励起・緩和ダイナミクス、キャリア寿命等の評価解析技術、また量子・ナノ構造セル特性評価解析技術を確立	・歪補償InGaAs/GaAs量子井戸集光型セルのデバイス構造決定 ・高速PL減衰測定による量子ドット内の非輻射再結合、量子井戸内のホットキャリア評価	○	・量子ナノ構造の基礎的理解と品質向上に向け、さらなる評価解析の継続 ・量子井戸、量子ドット効果の明確化
先進構造による高効率集光型太陽電池の開発	セル変換効率42%以上を達成	・逆エピ成長、直列抵抗損失、シャードイング損失低減によるInGaP/GaAs/InGaAs3接合セルの高効率化 ・FhG-ISEによる世界最高効率43.5%（240-306倍集光）の認定 ・逆エピ構造InGaP/GaAs/InGaAs集光型3接合セルのWP4への提供 ・Geボトムセル等のWP1、WP2への提供	◎	・効率45%以上の世界最高効率集光型太陽電池の実現 ・先進集光型3接合セルのWP4への提供の継続 ・サブセルのWP1、WP2への提供の継続

集光型太陽電池セル、モジュールの標準測定技術の開発	各種集光型太陽電池の200倍から1,000倍程度の集光時に於ける性能評価において、測定精度の検証と高精度化のための課題の明確化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・FhG-ISEとのCPVセルラウンドロビンを実施し、1sun下での性能比較で1.8%（相対値）以内での測定結果一致を確認</li> <li>・CPVセル測定技術の改善</li> <li>・CPVモジュールのラウンドロビン測定準備</li> <li>・CPVモジュールの測定技術の改善</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・CPVセルの標準測定技術の確立</li> <li>・CPVモジュールの標準測定技術の確立</li> </ul>
高効率集光型太陽電池モジュールの開発と集光型太陽光発電システム実証	モジュール変換効率33%以上を達成し、既存集光型太陽光発電システムのデータ収集・解析を完了	<ul style="list-style-type: none"> <li>・集光型モジュール要素技術の改善（光学系、熱管理、信頼性）</li> <li>・ミニモジュール変換効率31.62%（～300cm<sup>2</sup>）</li> <li>・UPM、宮崎大へのCPVモジュールの提供</li> <li>・50kWCPVシステム用CPVモジュールの製造、設置</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・当面、変換効率34%以上の高効率CPVモジュールの実現</li> <li>・50kWCPVシステム実証試験、評価</li> <li>・CPVシステムの発生電力予測</li> <li>・CPVシステムの最適化</li> </ul>

※達成度（平成24年度末見込）

◎：大幅達成、○：達成、△：未達（次年度達成見込）、×：未達（次年度達成見込無）

表 31. 主要な成果⑤（事業終了時：平成25～26年度）

テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題
新材料・新構造太陽電池の創製及び評価解析技術の開発	<p>新キャラクターゼーション技術の確立</p> <p>&lt;III-V-N 新材料のN-H欠陥解析、III-VオンSiの歪緩和過程のリアルタイム観測、量子ナノ構造のキャリア再結合過程解析&gt;</p> <p>III-V-N系新材料、III-V系オン・シリコン新構造太陽電池のセル変換効率30%以上</p>	<p>【III-V-N新材料】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・偏光・時間分解・一軸圧印加FT-IR測定により、N-H複合欠陥の構造や分類に関して、主な赤外吸収ピークとの対応を明確化した。</li> <li>・欠陥解析結果を「ポストシリコン」プロジェクトにフィードバックし、(In)GaAsNセルの効率向上につなげた（効率13.7%）。</li> </ul> <p>【III-VオンSi】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・成膜時のその場X線逆格子マッピングを実施し、成長前のIn供給による双晶低減メカニズムを明確化した。</li> <li>・新規バッファ層を検討し、300nm程度の薄膜バッファ層で、複雑な熱処理を行うことなくGaAs中の欠陥密度を<math>5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}</math>まで減少させた。</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・欠陥評価解析により得られた知見を基に、高品質ヘテロエピタキシャル技術の開発（転位密度<math>2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \Rightarrow 10^5 \text{ cm}^{-2}</math>）</li> </ul>
			×	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高効率（効率&gt;30%）III-V/Siタンデムセルの開発</li> </ul>

		<p>理論的に目標の30%を超える効率が期待できる貫通転位密度を達成した。</p> <p>【量子ナノ構造】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ InGaAs/GaAsP歪補償量子井戸太陽電池に対し、フォトルミネッセンス法、圧電素子光熱変換分光法、表面光起電力分光法を適用し、吸収層でのキャリア再結合損失割合の評価手法の開発を行った。</li> </ul>		
集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発	<p>新キャラクターゼーション技術の確立</p> <p>&lt;量子井戸・量子ドット集光型セル中キャリアダイナミクス、量子・ナノ構造集光型セルの特性評価解析システム&gt;</p> <p>量子・ナノ構造太陽電池のセル変換効率30%以上</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 歪補償InGaAs/GaAsP量子井戸 (QW) 集光型セルのデバイス構造の検討 (インペリアルカレッジ, フラウンホーファー研との共同成果)</li> <li>・ 超高速分光法による量子ドット (QD), QW内のホットキャリア緩和過程の評価解析</li> <li>・ QDセルにおいて、1-sun, 72-sunsで、各々、効率17.3%、26.8%を達成</li> <li>・ インペリアル・カレッジと東大との連携により、多重量子井戸 (MWQ) セルの4, 5接合太陽電池用としての有効性を確認 (効率&gt;50%)</li> <li>・ 新型多接合・量子構造セルの評価解析装置の設計・構築</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 中間バンド型QDセルにおける2段階光吸収過程のメカニズムの理解による、セルの高効率化に反映</li> <li>・ QD, 超格子の効果を明確にし、セル特性の改善に反映させる。</li> </ul>
先進構造による高効率集光型太陽電池の開発	セル変換効率45%以上	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 逆エピ成長、直列抵抗損失、シャドローイング損失低減によるInGaP/GaAs/InGaAs 3接合セルの高効率化</li> <li>・ FhG-ISEによる世界最高効率44.4% (250~300倍集光) の認定。</li> <li>・ ウエハボンディングによるGaInP/GaAs/GaInAs/Ge 4接合セル: 1-sun効率36.3%、188倍集光下効率38.5% (FhG-ISE)</li> <li>・ CPVセルの加速寿命試験</li> <li>・ 逆エピ構造 InGaP/GaAs/InGaAs集光型</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 効率50%以上の世界最高効率集光型太陽電池の実現</li> <li>・ III-V/Siタンデムセルの開発</li> <li>・ ウエハボンディング技術の開発</li> </ul>



## 2. 個別テーマの成果概要

### ①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

【平成 20～22 年度】（第 1 回中間評価時）

#### 1) 4 接合太陽電池の研究開発（豊田工業大学、再委託：九州大学）

<H22 中間目標：InGa<sub>n</sub> 単接合太陽電池で変換効率 15%（非集光）。H26 最終目標：シャープ(株)と協力し AlInGaP/InGaAs/InGaAsN(1eV)/（Ge または InGaAs）4 接合セルにおいて、変換効率 35%（非集光）、変換効率 45%（1,000 倍集光）>

##### a) InGaAsN 材料の成膜過程の解明と高品質化

N 添加の効果を明らかにするため、In を添加しない GaAsN 材料の成膜を検討した。成膜時の表面反応過程の制御には、基板表面のステップ密度制御（微傾斜 GaAs[001]基板使用）、成膜速度制御の 2 つの手法を試みた。これまで、GaAsN 材料の移動度を低下させる N 起因の散乱体密度は、MBE 法や MOCVD 法など、その成膜方法によらず、N 濃度に比例することが報告されていた。一方、本研究開発で上記の 2 つの手法で表面反応を制御した GaAsN 膜では、N 起因の散乱体密度を大幅に減少できることを世界で初めて示した。これは、従来限界と考えられていた N 添加によるキャリア移動度の減少を、他の方法に比べて CBE 法では大きく改善できることを示すものである。また、キャリア寿命を評価した結果、成膜速度減少とともにキャリア寿命の大幅な改善を確認した。窒素濃度 0.85% の GaAsN 膜で 0.9ns のキャリア寿命を達成し、さらにこの試料をアニール処理することにより、1ns を超えるキャリア寿命を得た。これは、太陽電池化した時に単接合で変換効率 10%以上が期待できる値である。低成膜速度の CBE 法は、キャリア移動度、キャリア寿命の両方の改善に有効であることが示された。

##### b) III-V-N 系半導体成長シミュレータの研究開発（九州大学）

III-V-N 系（(In)GaAsN 系）太陽電池開発では、N に関連した点欠陥の導入が電子（正孔）の散乱を引き起こし、ひいては変換効率の低下を招くことが見出されてきている。本研究開発では、まず、熱力学解析手法を基本とするシミュレーションコードの開発を行い、世界で初めて III-V-N 系半導体薄膜の組成（N 取り込み量）予測シミュレーションを行った。本シミュレーションでは、第一原理計算を基本とする解析を用いて、格子歪み、構造多形（立方晶/六方晶）が N 取り込み量に与える影響を考慮している。また、各種 V 族原料ガスと N 取り込み量の関係を検討するため、各種生成反応に対する平衡定数の解析を行った。As 系原料の反応に関する物性（平衡定数）の系統的なデータを公表するのも世界初である。今後、豊田工業大学と九州大学との連携を更に強化して共同研究を進展させ、ここで求めた N 取り込み量と N に関連した点欠陥の導入プロセスを原子レベルで解析し、III-V-N 系多接合太陽電池の変換効率向上に貢献する。

##### c) InGaAsN 材料の電子物性と欠陥制御

過渡容量分光（DLTS）法を用いて GaAsN 材料中の欠陥評価を行い、複数の電子捕獲準位の存在を明らかにした。本研究開発で見出した再結合中心が InGaAsN 材料における特性劣化の主要な原因である事が示唆された。GaAsN 材料中の N-H 複合欠陥に関して、起源及び構造に関して検討を行い、N-H 結合に起因した複数の赤外吸収ピークが、異なる欠陥構造のピークである事を明らかにした。フォトルミネッセンス（PL）測定で得た発光スペクトルの解析から、GaAsN 材料のバンドギャップ、およびバンド端近傍の欠陥準位について検討した。特性劣化との関係が指摘されている発光について、その起源に関する考察を行った。

##### d) InGaAsN 単接合セルの開発評価

Si ドープ n 型 GaAsN とアンドープ p 型 GaAsN とのホモ接合で単接合セルを試作し、良好な pn 接合特性を得た。セル構造の最適化がまだ不十分であり、少数キャリア寿命 0.1 ns の GaAsN 膜（N 組成 0.6%）を用いた単接合セル（反射防止膜無し）で、変換効率 4%（V<sub>oc</sub>=0.625V）と低いが、従来の結果に比べて高い V<sub>oc</sub> を実現した。上記 1ns の少数キャリア寿命を有する GaAsN 膜を用いることにより変換効率 10%以上の達成の見通しを得た。さらには成膜条件とセル構造の最適化で効率 15%以上の中間目標の達成が見込める。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：16（13）、研究発表・講演：143、新聞・雑誌等への掲載：7、展示会出展：5

#### 2) 多接合太陽電池集光動作解析（豊田工業大学、再委託：宮崎大学）

<H22 中間目標：シャープ(株)と協力し変換効率 42%（集光時）。H26 最終目標：InGaAsN 結晶成長技術及びシャープ(株)と協力して、3 ないし 4 接合セルにおいて、変換効率 45%（集光時）>



#### a) 転位挙動の解析と転位密度低減

格子不整合系 1.7eV/1.2eV/0.67eV の 3 接合セルの実現の為、格子不整合 1.2eV の InGaAs の MBE 法による転位挙動解析を行った。大型放射光施設 SPring-8 の MBE-XRD 装置により、InGaAs/GaAs[001]成長中の歪緩和の様子を 3 次元逆格子マッピングにより世界で初めてリアルタイム観測した。この結果を基に、InGaAs の歪緩和の面内非対称性の発現、消失の起きる膜厚領域の同定と転位のすべり運動を阻害するブロッキング過程を反映した歪と結晶性の膜厚変化を得た。

さらに、本手法を、転位密度の低減に有効とされる傾斜組成  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  バッファ層に応用し、歪緩和のリアルタイム解析を行った。その結果、In 組成の高い 2 層目の成長が 1 層目の歪緩和を促進していることが確認できた。本手法を傾斜組成  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  バッファ層に応用することで、各 InGaAs 層の歪緩和過程を同時に解析でき、転位密度の低減に有効なバッファ層の構造設計に有用であることが示された。本知見は、シャープ(株)が達成した格子不整合系 3 接合セルの高効率化 (非集光時 35.8%、集光時 42.1%) に、間接的に寄与した。今後、シャープ(株)との連携をさらに強化することで、格子不整合系 3 接合セルの集光時の効率 45% (最終目標) の達成に寄与する。(シャープ(株)は中間目標の集光時の効率 42%を達成済)

#### b) 集光動作特性解析シミュレータの開発と集光動作特性解析 (宮崎大学)

集光型太陽電池には光学系により様々な面内分布や色収差を持った光が入射され、それらの分布を考慮した太陽電池開発が必須となる。本研究開発では、照射光の分布を 3 次元 (3D) 的に考慮することができる 3D 多接合型太陽電池等価回路を開発した。このモデルを用いて計算した多接合型太陽電池の集光時動作特性が実測値と一致することを確認し、本研究開発により導出されたパラメータおよびモデルが適当であることが示された。また、この手法は太陽電池温度が変化したときにも有効であることを実測値との一致により示し、集光動作をより詳細に解析できるようになった。光学計算手法を確立し、レンズ等の光学系により太陽電池にどのような分布の光が照射されるかを計算することが可能となった。さらに、3D 等価回路モデルを組み合わせることにより、どのような光学系を用いると、どのような太陽電池特性が出力されるかを総合的に計算することが可能となった。本手法を活用することにより、光学系から太陽電池構造までを総合的に最適化設計することが可能となった。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 0 (0) 、研究発表・講演 : 36、新聞・雑誌等への掲載 : 12、展示会出展 : 5

### 3) 広帯域 AlGaInN 結晶を用いた多接合太陽電池の研究開発 (名城大学)

<H22 中間目標 : 1.0eV 帯または 1.4eV 帯の単接合セルにて変換効率 5%を達成する。H26 最終目標 : 広帯域 AlGaInN 結晶を用いた多接合太陽電池の検討をし、単接合セルで変換効率 10%以上を達成し、かつ、多接合セル作製の為の要素技術を確立する>

当初予定していた中間目標を達成するために、着実に実施内容を遂行している。平成 22 年度も順調に研究を遂行することによって、当初目標とした変換効率 5%という AlGaInN 太陽電池を単セルで実現できる見込みである。また、LED と太陽電池を同一素子で実現するという当初の計画ではなかった成果も得られている。

#### a) GaInN 結晶成長技術の確立

In 組成 0.4 を超える高品質 GaInN の作製技術を確立した。また、GaN 基板上にダブルヘテロ (DH) 構造広帯域 AlGaInN 太陽電池を試作し、波長約 400nm において内部量子効率 90%以上を実現した。AM1.5 のソーラーシミュレータ ( $155\text{mW}/\text{cm}^2$ ) を用いた評価によって、変換効率 1.4%という世界最高レベルの AlGaInN 太陽電池を実現した。

#### b) p 型 GaInN 導電性制御技術

In 組成 0.2-0.4 において、室温での正孔濃度  $>10^{19}/\text{cm}^3$  の p 型 GaInN (世界最高レベル) を実現した。

#### c) GaInN および GaInNAs 少数キャリア拡散長評価

蛍光寿命測定装置を使用して GaInN の蛍光寿命の評価を行った。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 3 (0) 、論文 (査読付) : 20 (20) 、研究発表・講演 : 34、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

### 4) エピタキシャル成長技術 (逆エピ、格子整合型 4 接合) (シャープ)

<H22 中間目標 : 逆積み 3 接合セルで変換効率 33% (非集光時) 、42% (集光時) 。H26 最終目標 : 逆積み 4 接合構造、量子ドット挿入 InGaAs(1eV)セル、もしくは InGaAsN(1eV)セルを形成した Ge 基板

上 4 接合構造セルで変換効率 35% (非集光時)、45% (集光時) >

逆積み 3 接合セルにおいて、組成勾配バッファ層及び格子不整合系ボトムセルの成長条件最適化を実施した。トップセル/ミドルセル/ボトムセルの電流バランス改善を図った。逆積み 3 接合セルにおいてバッファ層の成長条件の最適化及びサブセルの電流整合を改善した結果、非集光時変換効率においては平成 26 年度最終目標を上回る 35.8%を達成した。(独)産業技術総合研究所による測定値であり、世界最高記録であることが認められた。

<成果発表件数>特許出願(外国):4(1)、論文(査読付):1(0)、研究発表・講演:27、新聞・雑誌等への掲載:2、展示会出席:3

#### 5)MOVPE ナノ構造形成技術(東京大学)

<H22 中間目標:InGaAs/GaAsP 歪み補償量子井戸を挿入した(In)GaAs ミドルセルを作製し、1.2eV 帯まで長波長側の吸収端をのぼし、1.75eV のトップセル下で 16mA/cm<sup>2</sup> を達成する。H26 最終目標:量子井戸を挿入した(In)GaAs ミドルセルを作製し、1.75eV のトップセル下で I<sub>sc</sub>=17mA/cm<sup>2</sup> (バンドギャップは 1.2eV に相当)、1.4eV のセル下で I<sub>sc</sub>=14mA/cm<sup>2</sup> (バンドギャップは 1.0eV に相当)を得る。これらのミドルセルを利用した 3 または 4 接合セルを製作し、集光時の変換効率 45%を得る。>

InGaAs/GaAsP 歪み補償量子井戸の設計を行い、その場観察を活用した MOVPE 技術の開発とあわせて、目標を達成する量子井戸セルの開発に成功した。歪み補償階段ポテンシャル量子井戸により、吸収端を 1.24eV まで長波長化し、目標値である 1.2eV 帯をクリアした。吸収電流に関しては、障壁層を世界最高記録の 5nm まで薄層化し、トンネルによるキャリア輸送の効率化を達成し、GaAs 単セルからの短絡電流増大 3.3mA/cm<sup>2</sup> を実現した。これは、目標である GaAs 単セルからの短絡電流増大 2mA/cm<sup>2</sup> を大きく上回る成果である。なお、高効率の量子井戸セルを得るためには、i 層における量子井戸の位置を中心から p 層側に多少ずらすという巧妙な構造が必須であることをシミュレーションと実験の両面から解明し、成果につなげている。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):5(5)、研究発表・講演:45、新聞・雑誌等への掲載:11、展示会出席:2

#### 6)高倍集光セル微細加工技術(東京大学)

<H22 中間目標:III-V 化合物系多接合高効率太陽電池に対するエッチング技術を開発し、表面に光り閉じこめ構造を導入して、全波長域(400-1,300nm)の反射率を 0.5%以下にすることで、従来の 2 層 AR コート処理セルに対して、2%の短絡電流の向上を達成する。シャープ(株)が供給する III-V 化合物系多接合高効率太陽電池チップを、東京大学で、マイクロチップ化し、シャープ(株)で配線して、マイクロアレイを試作し、課題の抽出を行う。H26 最終目標:多接合セルの微細加工により、小面積セルのモノリシック集積により直列抵抗を減じたマイクロセルアレイをシャープ(株)と協力して開発し、集光システムとハイブリッド集積し、5,000 倍集光下で変換効率 40%を達成する。>

TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の 2 層誘電膜に対して、電子線リソグラフィとドライエッチングにより 400nm ピッチ程度でナノ凹凸構造を形成し、500-1,100nm における広波長域において反射率の低減を達成した。これは、目標である 400-1,300nm における低反射率化をほぼ達成したものと見える。本構造の特徴を維持しつつ低コストかつ大面積展開が可能な手法として TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の 2 層誘電膜上に SiO<sub>2</sub> ナノ粒子を自己組織化配列する手法を開発し、GaAs 単セルの短絡電流を 3%向上させた。これは、目標である短絡電流の 2%増大を上回る成果である。III-V 多接合セルのマイクロ集積化に関しては、シャープ(株)の提供する多接合セルのドライエッチングによる素子分離に取り組んでおり、平成 22 年度末に表面再結合電流などの性能評価を完了できる見込みである。

<成果発表件数>特許出願(外国):1(0)、論文(査読付):0(0)、研究発表・講演:5、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出席:0

#### 7)次世代プロセス技術開発(InGaN 多接合セル)(東京大学)

<H22 中間目標:In 組成 0.5 で X 線回折半値幅 0.12° 以下の結晶性を持つ InGaN を実現する。In 組成 0.3 でホール濃度 5×10<sup>17</sup>/cm<sup>3</sup> 以上の p 型 InGaN を作製する。H26 最終目標:バンドギャップ 2eV 以下の InGaN 単接合セルを作製し変換効率 7%を達成する。>

In 組成 0.5 で X 線回折半値幅 0.06° (世界最高品質)の結晶性を持つ InGaN を実現。In 組成 0.3 でホール濃度 6×10<sup>17</sup>/cm<sup>3</sup> の p 型 InGaN を実現。スパッタ法による世界初の III-V 族 LED、太陽電池の作製。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):17(17)、研究発表・講演:30、

新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

8) 水素 MBE 法 (GaInNAs:Sb/量子ナノ構造) (東京大学)

<H22 中間目標 : GaInNAs:Sb 薄膜の高品質・長波長帯ヘテロ成長技術 (水素 MBE 法) を開発し、単接合セルで、非集光時変換効率 15%を達成する。3 接合セルの GaAs ミドルセルに InAs 系積層量子井戸・ドットを挿入し、長波長域の吸収により  $I_{sc}=2\text{mA}/\text{cm}^2$  の増大を達成する (1.75eV のトップセル下で  $16\text{mA}/\text{cm}^2$  に相当)。H26 最終目標 : シャープ(株)と協力して 4 接合セルを製作して、集光時の変換効率 45%を達成する。シャープ(株)と協力して 3 接合セルを製作して、集光時の変換効率 42%を達成する。>

水素 MBE 法による GaInNAs:Sb 薄膜成長の高品質化を行った。pin 構造単接合セルの試作を行い、GaInNAs:Sb 層の長波長域 ( $\lambda=900\text{--}1,000\text{nm}$ ) の量子効率として、最大約 80% (世界トップデータ) を達成した。また i 層膜厚=0.6mm のとき、GaAs フィルター下での GaInNAs:Sb 層のみからの短絡電流の寄与は、 $9.6\text{mA}/\text{cm}^2$  であり、4 接合セルの電流整合の最適条件となる  $14\text{mA}/\text{cm}^2$  に近づけることができた。3 接合セルの GaAs ミドルセルに InAs/GaNAs 歪み補償積層量子ドットを挿入し、長波長域の吸収を増大させることを試みた。10 層積層させた量子ドット太陽電池において、量子ドット層が無い従来型の GaAs ホモ接合太陽電池と比較して、短絡電流は  $2.24\text{mA}/\text{cm}^2$  増大し (世界トップデータ)、当初の目標 ( $2.0\text{mA}/\text{cm}^2$  増) をクリアした。

<成果発表件数> 特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 23、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

9) MOVPE 法 (GaInNAs/量子井戸構造) (東京大学)

<H22 中間目標 : GaInNAs (N:1-5%) 薄膜・量子井戸構造において、X 線半値幅  $0.1^\circ$  以下および、PL 半値幅 25meV 以下@10K を達成する。H26 最終目標 : GaInNAs 薄膜では、シャープ(株)と協力して 4 接合セルにおいて、集光時の変換効率 45%を達成する。GaInNAs 量子井戸構造では、シャープ(株)と協力して 3 接合セルにおいて、集光時の変換効率 42%を達成する。>

N 濃度 3.1%までの GaAs 基板上 GaInNAs 薄膜、単一量子井戸 (SQW)、多重量子井戸 (MQW) 構造を MOVPE 法により作製し、RTA 処理による効果を検討した。界面平坦性を維持しつつ、フォトルミネッセンス (PL) 発光効率の増大や、キャリアの局在状態の減少等、高 N 濃度 GaInNAs 薄膜・量子井戸構造を高品質化・均質化する RTA 処理技術を確認した。Ge 基板上 GaInNAs の MOVPE 成長技術の開発においては、低温成長した薄い GaAs バッファ層を介し、結晶成長条件を最適化することにより、Ge 基板に格子整合した GaInNAs 薄膜の作製に成功した。また、2 段階 GaAs バッファ成長技術を導入することにより、X 線半値幅 ( $2\theta/\omega$ ) を  $0.09^\circ$  から  $0.06^\circ$  へ、PL 半値幅@10K においては 134meV から 34meV へと狭線化に成功し、大幅な高品質・均質化を実現した。

<成果発表件数> 「8) 水素 MBE 法」に記載の件数を含む

10) エピタキシャル成長技術開発 (量子構造挿入型、格子整合型 4 接合) (シャープ)

<H22 中間目標/H26 最終目標 : 「4) エピタキシャル成長技術開発 (逆エピ、格子整合型 4 接合)」に同じ。>

「4) エピタキシャル成長技術開発 (逆エピ、格子整合型 4 接合)」に同じ。

11) 高倍集光セルの開発 (シャープ)

<H22 中間目標 : 集積化のためのセル化プロセス検討とセル間配線プロセスを検討し、課題を抽出する。H26 最終目標 : 光学系一体化モジュールにおいて 5,000 倍集光時変換効率 40%を達成する。>

逆積み 3 接合セルの集光特性を向上するために、トンネルピーク電流の向上、コンタクト層と電極の接触抵抗の低減、シート抵抗低減のための検討を行った。トンネル接合構造の改良を行い、1,000 倍集光動作時に必要な  $15\text{A}/\text{cm}^2$  を上回る  $56\text{A}/\text{cm}^2$  のトンネルピーク電流密度と  $4\text{m}\Omega/\text{cm}^2$  程度の低抵抗を実現した。コンタクト層と電極の接触抵抗は  $4 \times 10^{-4} \Omega/\text{cm}^2$  程度、表面シート抵抗については約  $600 \Omega/\text{sq}$  を達成したが、500 倍集光が可能なレベルであり更に改善が必要である。集光セル特性としては 230 倍集光時に 42.1% (自社測定値) が得られ、平成 22 年度目標をクリアした。

<成果発表件数> 「4) エピタキシャル成長技術開発 (逆エピ、格子整合型 4 接合)」に記載の件数を含む

## 12) 量子ドット超格子型 (東京大学)

<H22 中間目標: サイズ揺らぎ 10%、中間層膜厚 10nm 以下の量子ドット超格子 (中間バンド) 型太陽電池を作製し、2 光子吸収過程の検証とセル変換効率 12%を達成する。H26 最終目標: 量子ドット超格子 (中間バンド) の製造技術を確立し、量子ナノ効果の実証とセルで非集光時の変換効率 15%を達成する。量子ナノ構造 (中間バンド型) タイプの太陽電池が変換効率 40%越えを実現する設計技術を確立する。>

InAs/GaNAs 系歪み補償構造の最適化を行い、100 層以上の多重積層化、および量子ドットサイズ揺らぎ 10%を達成した。このときの中間層膜厚は 20nm で、現在、ミニバンドの形成が見込まれる 10nm 以下を目指して改善を進めている。また、50 層積層量子ドット超格子型セルを作製し GaAs ホモ接合太陽電池と比較した結果、短絡電流は増大し  $26.1\text{mA}/\text{cm}^2$  を達成した。変換効率は 16.1% (世界最高) が得られ、当初目標の 10%以上を達成した。現在、2 段階光吸収の検証を行っているが、より詳細に調べるためには時間分解測定が必要であるため、測定装置を現在構築中である。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 14 (14) 、研究発表・講演 : 81、新聞・雑誌等への掲載 : 11、展示会出展 : 2

## 13) 量子ドット超格子型 (自己組織化量子ドットの積層化) (電気通信大学)

<H22 中間目標: 光吸収波長帯 (1,000-1,300nm) を有する化合物半導体量子ドットの単層構造において、量子ドットの不均一幅を 20meV 以下に抑制し、かつ量子ドット密度を  $6 \times 10^{10}/\text{cm}^2$  以上に高密度化するための成長技術を開発するとともに、量子ドット構造の 10 層以上の多重積層化技術を開発する。H26 最終目標: 量子ドットの多重積層構造における不均一幅を 25meV 以下に抑制し、試作の量子ドット超格子太陽電池において 15%以上の変換効率を達成する。>

### a) サーファクタント原子の導入による高密度量子ドット構造の開発

Sb サーファクタント効果の導入法により、InAs 量子ドット成長における  $6 \times 10^{10}/\text{cm}^2$  以上の高密度化の成長条件を確立した。さらに自己形成 GaAs ナノホール・スペーサー層を導入した近接 2 重積層 InAs 量子ドット構造において Sb 導入法を適用し、 $6 \times 10^{10}/\text{cm}^2$  以上の高密度化の成長条件を確立した。InAs ドット成長の初期過程において見出したライブニング効果 (ドット密度の減少、ドットサイズの均一化) を考慮した新たな成長手法を考案し、 $1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$  のドット密度で、発光半値幅 28meV を達成した。Sb 導入法においてライブニング効果を考慮した精密な成長制御により、量子ドット密度  $4 \times 10^{11}/\text{cm}^2$  の超高密度化を実現した。超高密度 InAs 量子ドット構造の発光特性を調べ、面内量子ドット超格子構造の可能性を示唆した。これにより、面内量子ドット超格子構造を導入した中間バンド型太陽電池の試作、原理検証実験への展開が見込まれる。

### b) 自己形成ナノホール埋め込み層を用いた高均一量子ドット構造の開発

自己形成ナノホール層を介した近接 2 重積層構造において、発光半値幅 19meV を達成した。これにより、中間目標である不均一幅 20meV 以下で、かつドット密度  $6 \times 10^{10}/\text{cm}^2$  以上の高密度・高均一量子ドットの自己形成技術の開発を達成した。Sb 導入法による高密度量子ドットの自己形成において、量子ドット成長後の成長中断中に Sb 照射を施す手法を提案し、量子ドットの高品質化に有効であることをその場 X 線回折測定により明らかにした。

### c) 歪補償層を導入した高密度・高均一ドットの超格子構造の開発

面内量子ドット超格子層上に歪緩和 GaAsSb 埋め込み層を導入することにより、5-11ns のキャリアの長寿命化を達成した。これは太陽電池の高効率化に向けた重要な結果である。近接多重積層成長による量子ドットの縦型超格子化の実現に向けた GaNAs 歪補償層の成長条件について検討を進めており、GaNAs スペーサー層を導入した多重積層成長を検討中である。

### d) 面内量子ドット超格子構造の作製とその多重化技術の開発

面内量子ドット超格子層の多重積層成長の成長条件について検討し、GaAsSb 層 6nm+GaAs 層 44nm のスペーサー層において良質な 5 重積層構造を作製した。この 5 重積層構造における量子ドット総密度は  $2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$  に達し、従来の量子ドット構造の約 50-100 層の積層構造に相当する超高密度構造である。現在、中間目標にある 10 層積層化を検討中である。面内量子ドット超格子層を導入した中間バンド型太陽電池の試作を進めており、分光量子効率スペクトルおよび太陽電池特性の評価解析を検討中である。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 1 (1) 、研究発表・講演 : 43、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 14) 量子ドット・有機ハイブリッド材料による中間バンド型（新日本石油）

＜H22 中間目標：1.8-2.0eV のバンドギャップをもつ有機半導体とこれとエネルギー準位がマッチし、かつ 1.0eV 程度のギャップをもつ量子ドットからなる中間バンドを有する光吸収層において、光吸収の確認ならびに 2 光子吸収の実証を行う。H26 最終目標：量子ドット・有機ハイブリッド中間バンド型太陽電池を開発し、変換効率 10%を達成する＞

中間バンド形成に必要な構造要件（有機半導体材料内において、nm レベルで量子ドットを近接させる）を満たす材料の探索を行った結果、有機半導体材料でこの要件に適合し光電変換性能の高い材料がなく、中間バンド構造の形成は困難であることが分かった。そこで、中間バンド型と同程度の高効率が期待でき、必要な構造要件が少なく、より簡便に作製できる可能性がある多励起子生成（MEG）型の検討にシフトした。溶液に分散した PbS 量子ドットから MEG に起因するシグナルを確認した。PbS とハイブリッド化する材料として、エネルギー準位や材料の透明性の観点から適切な電子輸送材や、ホール輸送材を選定した。電子輸送材、PbS、ホール輸送材のハイブリッド化手法を検討し、その過程で使用する材料を選定した。中間目標である、「量子ドットからなる光吸収層での効果実証」に関しては、上記選定した材料の組合せで、MEG 効果の確認を実施予定。

＜成果発表件数＞「19)ETA 構造による新概念素子」に記載の件数に含む

#### 15) 光マネジメント（金属ナノ粒子）（東京大学）

＜H22 中間目標：金属ナノ粒子による近接場効果により、1.5-2.5eV 帯における光吸収係数が 10%増強することを実証する。H26 最終目標：金属ナノ構造を太陽電池に作りこみ、吸収係数の増加が量子ドット超格子型セルの変換効率に定量的に反映されることを実証する。＞

直径 15nm、高さ 50nm の銀ナノ粒子を周期 20nm で配置した金属ナノ粒子配列について、本系を太陽電池表面に配置した際に生じる太陽電池層による光吸収増大効果を、FDTD 数値計算により検証した。これまでの知見とは異なり、金属ナノ粒子-太陽電池基板間の電磁気相互作用に近接場効果は見られなかった。しかし、金属ナノ粒子配列を均質な有効媒質として記述することで、FDTD 数値計算を良好に再現できた。金属ナノ粒子配列の有効誘電率は、ナノ粒子の局在プラズモン共鳴周波数を境に大きく変化した。共鳴周波数よりも低エネルギー側では、ナノ粒子配列は高誘電率薄膜とみなすことができ、太陽電池上で反射防止膜として機能した。本計算においては、適切な構造を用いることで、特定の波長における基板表面における反射を 90%以上抑制できることを示した。一方で、共鳴周波数よりも高エネルギー側において薄膜は負の誘電率を示し、太陽電池基板の光吸収を抑制する方向に作用した。以上の計算結果は、これまで近接場による効果とされてきた過去の文献による報告ともよく一致した。

＜成果発表件数＞「12)量子ドット超格子型」に記載の件数に含む

#### 16) 界面電荷移動遷移型セル（東京大学）

＜H22 中間目標：界面電荷移動遷移を利用して、1eV 帯領域で光電変換を達成する。H26 最終目標：界面電荷移動遷移型セルで変換効率 10%を達成する。＞

ナフタレン環を含むジシアノメチレン化合物と酸化チタンナノ多孔体中の酸化チタン表面で合成した界面錯体を用いた界面電荷移動遷移型セルにおいて、1 $\mu$ m 付近で光電変換を達成。その他にも、1eV 帯での高効率光電変換に向けた幾つかの成果を得た。ジシアノメチレン化合物にドナー性置換基を導入すると長波長領域の光電変換が高効率化できることを見出した。また、共吸着剤（デオキシコール酸）をジシアノメチレン溶液に適量添加すると、変換効率が向上（80%以上@470nm）することなども明らかにした。

＜成果発表件数＞特許出願（外国）：1（1）、論文（査読付）：5（3）、研究発表・講演：43、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会展出：0

#### 17) 新概念素子用ハイブリッド光電素材（東京大学）

＜H22 中間目標：電圧ロスの低減と光吸収波長域の拡大が期待されるドナー/色素/アクセプターでの新概念太陽電池（ETA）において、新日本石油(株)に協力して、1.4eV 帯および 1.0eV 帯での ETA 構造素子を試作し光電変換を検証する。H26 最終目標：新日本石油(株)に協力して、ETA 構造における新概念素子の材料検討による効率向上と光マネジメントの適用により、変換効率 10%を達成する。＞

近赤領域で光電変換するハイブリッド材料の開発を行ってきた。その結果、分子自己組織化体と酸化チタンナノ粒子とのハイブリッド構造の中で、分子自己組織化体の励起子生成に対応する吸収を用いて、約 900nm(約 1.4eV)で光電変換が可能な素材を見出した。有機分子の酸化チタンナノ粒子

への吸着条件などの検討を行い、ハイブリッド素材の高性能化に向けた指針を得た。近赤外領域で強い吸収を示す PbS などの無機化合物半導体量子ドットが、ハイブリッド光電素材として適用可能であることを明らかにした。量子ドットの粒子径を調整することで、1eV での光吸収を発現させることが可能であることも確認している。現状では、750nm に吸収ピークを持つ PbS 量子ドットと酸化チタンのハイブリッド素材を用いることで、1,000nm(1.2eV)における光電変換を達成している。

<成果発表件数> 「16) 界面電荷移動遷移型セル」に記載の件数を含む

#### 18) 多結晶化合物多接合太陽電池 (大阪大学)

<H22 中間目標> トップセル用のバンドギャップ 1.8-2.2eV の太陽電池材料を開発し、バンドギャップ以上の波長帯に対する単膜での光電流発生時の平均光量子収率 50%以上 (溶液との接合による評価) を達成して、擬似太陽光照射に対する変換効率 3%以上を達成する。H26 最終目標: 0.6-1.2eV 領域のボトムセル、及びトップセルと連結したタンデム型太陽電池を開発し、変換効率 15%以上を達成する。

##### a) 化合物半導体の研究開発

トップセル用のバンドギャップ 1.8-2.2eV の太陽電池材料の開発においては、塗布法 (おもにスプレー熱分解法) によるカルコパイライト薄膜 ( $\text{CuInS}_2$ ) の組成制御に取り組んだ。これまでに、 $\text{CuInS}_2$  の Cu、In を Ag や Zn で部分置換した薄膜により、2.06eV までバンドギャップを広げること成功している。

##### b) 多結晶多接合太陽電池の研究開発

電気化学法による  $\text{CuInS}_2$  薄膜の堆積技術をほぼ確立し、バンドギャップ以上の波長帯に対する単膜での光電流発生時の平均光量子収率 50%以上を達成した。電気化学法により作製した  $\text{CuInS}_2$  薄膜において、擬似太陽光照射に対する変換効率として約 7%を実現した。これは、非真空プロセスによる同様の太陽電池としては世界最高レベルである。

<成果発表件数> 特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 15、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会展出 : 0

#### 19) ETA 構造による新概念素子 (新日本石油)

<H22 中間目標> ドナー/色素/アクセプターでの新型太陽電池 (ETA) において、1.0eV 帯および 1.4eV 帯での ETA 構造による新概念素子を試作し、光電変換を検証する。H26 最終目標: ETA 構造による新概念素子の材料検討による効率向上と光マネジメントの適用により、変換効率 10%を達成する。

ドナー/アクセプターの相分離構造評価手法としてモルフォロジー評価および移動度評価の手法を確立した。ETA 構造に利用可能な各種色素のイオン化ポテンシャル測定を行い、P3HT/PCBM 系に適合するエネルギーレベルを有する色素を選定した。選定した色素を用いて P3HT/色素/PCBM の ETA 構造素子の試作を行い、光電変換特性を評価し、近赤外域での光電変換を確認した。中間目標の 1.0eV 帯および 1.4eV 帯での光電変換特性を平成 22 年度中に確認予定。

<成果発表件数> 特許出願 (外国) : 2 (1)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 5、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会展出 : 0

#### 20) 金属ナノ粒子/光マネジメント材料 (新日本石油)

<H22 中間目標> 金属ナノ粒子構造を用いた光マネジメントを、ETA 構造素子 (又は他の光電変換素子) へ適用し、金属ナノ粒子アレイの効果による量子収率が 10%増大することを実証する。H26 最終目標: ETA 構造による新概念素子に光マネジメントを適用し、変換効率 10%を達成する。>

アノード酸化条件とナノホールアレイの形成状態の相関を調べ、ナノホールアレイテンプレート法を用いた金属ナノ粒子サイズおよび分布の制御手法を確立した。本手法で形成した金属ナノ粒子アレイを既存ドナー/アクセプター2成分系太陽電池へ組み込み、量子収率向上効果を確認中。

<成果発表件数> 「19)ETA 構造による新概念素子」に記載の件数を含む

#### 21) 金属ナノ粒子吸収型セルの研究開発 (東京大学)

<H22 中間目標> 光電変換機構を解明し、光電変換を実証する。H26 最終目標: 金属ナノ粒子吸収型セルで 10%達成する。>

光電変換を実証し、加えて、波長 900nm(1.4eV)まで光電変換に利用できることを示した。光励起された金ナノ粒子から酸化チタンへの電子移動を直接明らかにし、機構の一部を解明した。電荷分

離への局在電場の寄与を明らかにするとともに粒子の単分散性を高めて効率を向上するため、ナノスフィアリソグラフィ (NSL) 法による粒子アレイ作製法を導入した。また、効率向上のため、金属ナノ粒子の増強電場による色素増感系の光電流増強を測定する系を確立した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 4 (4) 、研究発表・講演 : 11、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

## 22) ナローバンドギャップ太陽電池 (兵庫県立大学)

<H22 中間目標 : ナローバンドギャップ太陽電池用として、0.9-1.0eV および 0.6-0.7eV のバンドギャップを有する硫黄系またはセレン系の材料を開発し、セル化して光電変換を実証する。H26 最終目標 : ナローバンドギャップセルからなる 2 接合太陽電池を作製し、変換効率 15% を達成する。>

化学的手法により合成した硫黄・セレン系ナノ結晶粒子を使用して、半導体膜の創製を行った。さらにそのナローバンドギャップ半導体膜を使用して太陽電池セルの開発を行い、その光電流・電圧の発生に成功した。得られた膜のバンドギャップが 0.98eV となり、「0.9-1.0eV のバンドギャップを有する硫黄・セレン系の材料を開発し、セル化して光電変換を実証する」という目標を達成した。また材料によっては、25mA/cm<sup>2</sup> もの大きな光電流を発現するものも開発された (現在特許申請処理中)。さらに、ドーピングおよび材料の試行を繰り返し、ナローバンドギャップ材料となる半導体膜の新材料創製に成功し、それを使用した太陽電池を作製し、光電流・電圧の発生に成功した (現在特許申請処理中)。そのナローバンドギャップ材料は 0.5eV となり、「0.6-0.7eV のバンドギャップを有する硫黄系またはセレン系の材料を開発し、セル化して光電変換を実証する」という目標からは、ほんの僅かにナローバンド側にずれた結果となったが、この枠においてはローバンドギャップ化の方が難しく、ワイドバンドギャップ化は容易なため、現在そのワイドバンドギャップ化の研究を進めている (0.5eV⇒0.6eV)。ゆえに、中間目標はほぼ達成できたと考えられ、中間評価に向けての達成度は 90% と考えられる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 0 (0) 、研究発表・講演 : 8、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

### 【平成 23~24 年度】 (第 2 回中間評価時)

#### 1) 多接合太陽電池の評価解析 (豊田工業大学)

<H24 中間目標 : シャープ (株) と協力し変換効率 45% (集光時) 、H26 最終目標 : GaInNAs 結晶成長技術及びシャープ (株) と協力して、集光時の変換効率 45% (3 接合セル) 、48% (4 接合セル) >

格子不整合系 1.7eV/1.2eV/0.67eV の 3 接合セルの高効率化の為、格子不整合 1.2eV の InGaAs の MBE 法による転位挙動解析を行った。格子不整合太陽電池では、転位密度の低減 (10<sup>5</sup>/cm<sup>2</sup> 以下) が大きな課題であり、これまで様々な構造のバッファ層の提案が試みられてきた。その一つのアプローチとして、オーバーシュートイング (OS) 層と呼ばれる高 In 組成の In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 層を挿入した傾斜組成バッファ層が転位密度の低減に有効であるとされてきた。しかし、OS 層の挿入による格子歪の緩和効果や太陽電池層に与える影響は不明である。そこで大型放射光施設 (SPring-8、BL11XU) の結晶成長その場 X 線回折装置を用いることで、OS 層の歪緩和の様子を世界で初めてリアルタイム観測し、太陽電池層に与える影響を検討した。その結果、OS 層の膜厚を変化させることで太陽電池層を想定したトップ層の歪を圧縮から引張まで制御できることが明らかとなった。転位密度の低減に有効なバッファ層の構造設計に、本手法が有効に活用できることが示された。現在、シャープ (株) と連携し、4 接合化に向けたバッファ層の歪緩和過程の解析を検討中である。今後、シャープ (株) との連携をさらに強化することで、中間目標および最終目標の達成に寄与する。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 4 (4) 、研究発表・講演 : 18、新聞・雑誌等への掲載 : 12、展示会出展 : 0

#### 2) 多接合太陽電池集光動作解析 (豊田工業大学、再委託 : 宮崎大学)

<H24 中間目標/H26 最終目標 : 「1) 多接合太陽電池の評価解析」に同じ。>

本研究開発では、照射光の分布を 3 次元 (3D) 的に考慮することができる 3D 多接合型太陽電池等価回路を開発した。このモデルを用いて計算した多接合型太陽電池の集光時動作特性が実測値と一致することを確認し、本研究開発により導出されたパラメータおよびモデルが適当であることが示された。このモデルを用い、太陽電池セル内部抵抗における消費電力の解析を行った。光がセル中央に集中した場合、電極およびトップ層の抵抗成分では大きな消費電力 (発熱) が局所的に現れた。ミドル層およびボトム層での消費電力は電極およびトップ層での消費電力より小さく、リング状を

示した。局所的な消費電力は、各サブセルで発生する光起電流がセル中央部に集中し、さらに色収差の影響により電流マッチングが崩れたことが原因である。各サブセルの電流ミスマッチは、ミドル層およびボトム層での消費電力の増加の原因となった。また、局所的な電力消費は、局所的な発熱を発生させるため、改善が必要となる。さまざまな条件（入射光強度、外気温度、放熱条件）において、太陽電池セルの動作温度の上昇について測定を行った。これらの測定結果からセルでの熱収支の解析を行った。これにより、セル内部での局所的な発熱および熱収支を用いて、高集光倍率において温度上昇の少ない構造の最適化に寄与することが可能となる。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：9（9）、研究発表・講演：34、新聞・雑誌等への掲載：23、展示会出席：0

### 3) 多接合セル開発（格子不整合系）（シャープ）

<H24 中間目標：逆積み 3 接合セルで変換効率 36%（非集光時）、45%（集光時）。H26 最終目標：逆積み 4 接合構造、量子ドット挿入 InGaAs(1eV)セル、もしくは InGaAsN(1eV)セルを形成した Ge 基板上 4 接合構造セルで変換効率 38%（非集光時）、効率 48%（集光時）を達成する。>

逆積み 3 接合セルにおいて、トンネル接合抵抗の低減、反射防止膜の最適化により、非集光時変換効率 37.5%（AIST 測定）を達成し、平成 21 年度に達成した世界記録 35.8%を更新した。また、トンネル接合抵抗の低減に加え、受光面の電極間隔の最適化により、世界タイ記録となる集光時変換効率 43.5%（300-500suns）を達成した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：8、新聞・雑誌等への掲載：4、展示会出席：1

### 4) 多接合セル開発（格子整合系新材料・ナノ構造）（シャープ）

<H24 中間目標/H26 最終目標：「3) 多接合セル開発（格子不整合系）」に同じ。>

量子ドット挿入 InGaAs(1eV)セル、もしくは InGaAsN(1eV)セルを形成するための Ge セル基板を成長し、東京大学と豊田工業大学へ提供した。

<成果発表件数>「3) 多接合セル開発（格子不整合系）」に記載の件数を含む

### 5) 量子井戸ミドルセル（東京大学）

<H24 中間目標：GaAs 基板上量子井戸挿入単接合セルで非集光時変換効率 20%を得る。項目 4)、8) と連携して、3 接合セルの GaAs ミドルセルに InGaAs/GaAsP 量子井戸を挿入し、トップセル(1.7eV)配置化で短絡電流 16mA/cm<sup>2</sup> (1sun) を達成する。H26 最終目標：InGaAs/GaAsP 量子井戸挿入 3 接合セルの開発において、項目 4)、8) と連携して、変換効率 36% (1sun)、45% (1,000suns) を達成する。>

InGaAs/GaAsP 量子井戸について、in situ ウェハ曲率モニタリングを活用した正確な歪み補償、高歪み InGaAs/GaAsP ヘテロ界面への原子層レベルの傾斜組成層挿入、さらに歪み由来の In 表面偏析や界面 As/P 組成の非急峻性を抑制するためのガス切り替えシーケンスの構築により、結晶欠陥がきわめて少なく、原子層レベルで界面組成が精密制御された量子井戸を MOVPE により多数積層する技術を確立した。この技術を用い、有効バンドギャップを電流整合 3 接合のミドルセルに適した 1.2 eV へと狭窄化しつつ、井戸の積層数 100 以上を結晶品位の劣化を伴わずに実現した。このような高品位の量子井戸を用い、各種条件下での光電流測定、および時間分解フォトルミネッセンス測定に基づく量子井戸からのキャリア取り出しダイナミクス解析の結果、以下の知見を得た。

○歪み補償の制約のなかでは、障壁を低く（GaAsP の P 組成を小さく）厚くしたほうがキャリア取り出し速度が大きい。

○しかし、障壁厚さ 10 nm 以上の量子井戸は、50 層以上積層すると動作点の順バイアス条件下でキャリア取り出し効率が著しく悪化する。

○したがって、電流増大を得るための量子井戸の十分な光吸収と、高効率の量子井戸からのキャリア取り出しを両立できる構造設計は大変困難である。

以上のことから、開放電圧および曲線因子を良好に保ちつつ電流増大を図るためには、障壁層の厚さを 3 nm 以下に抑えてトンネル輸送によるキャリア取り出しを活用するべきであるという指針を導いた。そこで、InGaAs5nm、GaAsP3nm の 110 層積層超格子を GaAs 単セルに実装した。従来も同様な試みが行われていたと思われるが、本研究開発で開発した InGaAs/GaAsP ヘテロ界面処理技術があつて初めて、結晶欠陥が少なく非発光再結合を抑制した超格子の作製が可能になった。超格子挿入セルは、短絡電流の増分 3.0mA/cm<sup>2</sup> (InGaAs キャップ下で短絡電流 16mA/cm<sup>2</sup> 以上に相当) を達成しつ



つ開放電圧の低下を 0.02V にとどめることに成功した。また、量子井戸周囲の GaAs 層構造を最適化し反射防止コーティングを施した結果、量子井戸を挿入した GaAs 単セルの変換効率 25%を達成した。このような良好な特性を示す超格子挿入セルの集光下での光電変換特性を検証した。量子構造の挿入によりもっとも影響を受けるのは開放電圧であるので、まずは開放電圧の集光による増大を観察した。参照とする GaAs 単セルは理論通り集光に伴い開放電圧が増大したが、超格子挿入セルでは、開放電位の集光に伴う増大が GaAs 単セルに比べて急峻であった。その結果、200 倍程度の集光で超格子セルは GaAs 単セルとほぼ等しい開放電圧 1.1V を示した。量子井戸挿入セルの最大の欠点とみなされている開放電位の参照セルに対する低下は、超格子を高倍集光下で動作させた場合ほとんど無視できる。すなわち、バンド端を長波長側に拡張した結果である電流増大の恩恵は最大限活用しつつ、GaAs 単セルと同等の開放電位を得ることができるため、超格子挿入は多接合セルの高効率化にはきわめて有効であるという見通しが得られた。これは、バルク材料である GaInNAs にはない特長であるといえる。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：16（16）、研究発表・講演：52、新聞・雑誌等への掲載：2、展示会出展：0

#### 6) GaInNAs ミドルセル（CBE）（豊田工業大学）

<H24 中間目標：GaInNAs 単接合セルにおいて、変換効率 15%（非集光）、変換効率 18%（集光時）。H26 最終目標：シャープ(株)と協力し AlInGaP/InGaAs/GaInNAs(1eV)/（Ge または InGaAs）4 接合セルにおいて、変換効率 38%（非集光）、変換効率 48%（1,000 倍集光時）>

##### a) GaInNAs 材料の欠陥制御と高品質化

Ga(In)NAs 材料の実用化に向けた最大の課題は、N 混入に伴い N 起因の複合欠陥が導入され、キャリア移動度、キャリア寿命が低下することである。これまでに、電気的特性を劣化させる欠陥として、大きな捕獲断面積を持った再結合中心（E1）を確認しており、E1 再結合中心密度と、ケミカル・ビーム・エピタキシー（CBE）法での成膜条件、アニール条件との関係を検討した。その結果、E1 再結合中心密度の低減には、Ga 原料に対して、十分な量の As 原料を供給する必要があることが分かり、高 As 原料流量下では、N 濃度を増加しても少数キャリア寿命が低下しないことが示された。原料流量の最適化により、窒素濃度 0.85%の GaAsN 膜で 0.9ns のキャリア寿命を達成した。

##### b) GaInNAs 単接合セルの開発評価と多接合セルの試作

Si ドープ n 型 GaAsN とアンドープ p 型 GaAsN とのホモ接合で単接合セルを試作した。変換効率は 7.2%（Suns-Voc による測定では 13.7%（AP size））を達成し、平成 22 年度達成の 4.3%から大きく改善した。Suns-Voc は、直列抵抗損失を無視して太陽電池特性を測定できる手法であり、この測定で効率が大きく向上していることは、電極形成などのセル作製プロセスに主な問題があることを示すものである。これまでに達成した GaAsN 材料の品質（移動度  $\mu = 200 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、少数キャリア寿命  $\tau = 0.9 \text{ns}$ ）から、理想的な構造で得られる太陽電池特性を計算すると、変換効率 16.5%、さらに高品質化（ $\mu = 470 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ）をはかれば 21.0%が期待できる。したがって、セル作製プロセスとセル構造の最適化により、変換効率 15%以上の中間目標の達成が見込める。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：8（8）、研究発表・講演：42、新聞・雑誌等への掲載：11、展示会出展：0

#### 7) 窒素系結晶成長の理論解析（豊田工業大学、再委託：九州大学）

<H24 中間目標/H26 最終目標：「6) GaInNAs ミドルセル（CBE）」に同じ。>

(In)GaAsN 結晶中への点欠陥の導入が電子（正孔）の散乱を引き起こし、キャリア寿命/変換効率の低下を招くことが知られている。本研究開発では結晶の成長過程で混入する不純物（特に水素）に着目し、その混入機構の解明および混入を抑制するための成長指針の提案を行った。原子レベルでの理論解析により、実験条件の範囲内では GaAs[001]-c4x4 表面再構成構造が安定であること、表面 N 原子は H を伴って安定化することを解明した。すなわち、N 原子の結晶中への取り込み過程で H 不純物も同時に混入されやすいことが示唆された。これを回避する方法として、成長速度を遅くし、成長過程における H 掃き出しプロセスの時間を十分に確保する方法が提案される。この提案・指針に基づき豊田工業大学において検証実験を行ったところ、キャリア寿命の向上（ $\tau > 1 \sim \text{ns}$ ）が成果として確認された。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：2（2）、研究発表・講演：7、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 8) GaInNAs ミドルセル (水素 MBE、MOVPE、量子ドット添加) (東京大学)

<H24 中間目標 : GaInNAs:Sb 薄膜 (水素 MBE 法)、GaInNAs 薄膜 (MOVPE 法) の高品質・長波長帯ヘテロ成長技術、単接合セルで変換効率 15% (1sun)、GaAs ミドルセル配置下で電流  $14\text{mA}/\text{cm}^2$  (1sun)、及び 4 接合セルの第 3・4 セルにあたる GaInNAs:Sb/Ge2 接合セルにおいて、電流  $7\text{mA}/\text{cm}^2$  (1sun) を達成する。また 3 接合セルの GaAs ミドルセルに InAs/GaNAs 系積層量子ドットを挿入し、トップセル (1.7eV) 配置下で電流  $16\text{mA}/\text{cm}^2$  (1sun) を達成する。H26 最終目標 : シャープ(株)と共同で、GaInNAs 薄膜を第 3 セルとした 4 接合セルの開発において、効率 39% (1sun)、48% (1,000 倍集光)、量子ドット添加 3 接合セルの開発において、変換効率 36% (1sun)、45% (1,000 倍集光) を達成する。>

本研究開発では、GaInNAs:Sb の製膜条件 (水素 MBE) 及びセル構造の最適化を行い、GaAs ミドルセル配置下で、 $9.6\text{mA}/\text{cm}^2$  (1sun) を達成した。単接合 GaInNAs:Sb セルの効率は 8.6%、最終目標の 15% は達成できる見込みである。次に GaInNAs:Sb/Ge2 接合セルの試作に着手した。Ge ボトムセルはシャープ(株)の提供による。試作セルにおいて短絡電流  $10.9\text{mA}/\text{cm}^2$  が得られ、4 接合タンデムセルで必要とされる  $14\text{mA}/\text{cm}^2$  に近づけることができた。一方、InAs/GaNAs 系積層量子ドット挿入型のタンデムセル開発では、50 層積層させた量子ドットセルにおいて、トップセル (1.7eV) 配置下で短絡電流  $15.2\text{mA}/\text{cm}^2$  (1sun) を達成した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 11、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 9) 広帯域 AlInGaIn 結晶を用いた多接合太陽電池 (名古屋大学、共同実施 : 名城大学)

<H24 中間目標 : 1.0eV 帯または 1.4eV 帯の単接合セルにて変換効率 5% を達成する。H26 最終目標 : 広帯域 AlGaInN 結晶を用いた多接合太陽電池の検討を実施し、単接合セルで変換効率 10% 以上を達成し、かつ、多接合セル作製のための要素技術を確立する。>

##### a) InGaIn 結晶成長技術の確立

2 層超格子構造の採用によるミスフィット転位の伝搬抑制と高効率キャリア取り出しを実証し、200 倍集光で変換効率 4% を達成した。Si 上の疑似多接合型で 5.9% の報告はあるが、窒化物単独での効率は世界最高である。また、窒化物の 100 倍を超える集光での高い変換効率は他では実現された例は無く、高結晶欠陥密度の証左である。更に今回の試作では反射防止膜を利用していないため、反射防止膜形成により推定 5% を達成した。r 面サファイア上の a 面利用により、1sun で窒化物では世界最高の短絡電流密度  $5\text{mA}/\text{cm}^2$  を達成した。今後結晶品質の向上により、開放電圧を改善し、本年度中に変換効率 5% 以上を目指す。スパッタリングにより形成したバッファ層を用いた Si 基板上の厚膜 InGaIn の低温成長法の確立に成功し、Si 太陽電池との多接合により、理論効率 30% 以上を目指すための基盤技術が確立した。

##### b) p 型 InGaIn 導電性制御技術

In 組成 0.2-0.4 において、室温での正孔濃度  $>10^{19}/\text{cm}^3$  の p 型 GaInN (世界最高レベル) を実現した。更に多接合素子形成の基幹技術であるトンネル接合の成長に成功した。

##### c) InGaIn および GaInNAs 少数キャリア拡散長評価

ダブルヘテロ構造の採用により、デバイス設計の自由度が増し、少数キャリア拡散長の影響低減が可能であることが分かった。一方窒化物では圧電性の影響が大きく、結晶面やドーピングプロファイルに工夫が必要であることを明らかにし、実際に結晶面を圧電効果の大きい c 面から変えることにより高効率化が可能であることを世界で初めて示した。また、開放電圧及び FF 減少の成因而として、貫通転位では無く成長ピットが原因であることを突き止め、成長ピット発生の抑制方法を確立している。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 7 (7)、研究発表・講演 : 25、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

#### 10) InGaIn 多接合セル新プロセス (東京大学)

<H24 中間目標 : InGaIn を用いた電界制御型太陽電池構造を提案し、その有効性をスパッタ法による素子作成で実証する。スパッタ法を用いて In 組成 0.3 でキャリア移動度  $200\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  以上の InGaIn を作製する。H26 最終目標 : バンドギャップ 2eV 以下の InGaIn 単接合セルを作製し変換効率 7% を達成する。>

パルススパッタ法による低温成長を行うことで、全組成領域に亘って InGaIn および InAlN の高品質結晶成長技術を開発した。また、電界制御型太陽電池を試作し、c 面窒化物系太陽電池では最大の

短絡電流密度  $4.06 \text{ mA/cm}^2$  を得た。パルススパッタ法における結晶成長プロセスの制御性を向上させる目的で、レーザー光を用いた成長速度および歪みなどの *in situ* 観察技術を開発した。これにより InGa<sub>N</sub> 結晶の高品質化が実現し、In 組成 0.4 の InGa<sub>N</sub> 薄膜において世界最大の量子収率や、In 組成 0.3 の InGa<sub>N</sub> 薄膜において  $228 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  という高いキャリア移動度が得られた。また、本技術を用いることでスパッタ法による 3 原色の発光ダイオードや高電子移動度トランジスタの作製が可能となった。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 8 (8) 、研究発表・講演 : 43、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 11) ナローバンドギャップボトムセル (CuTe) (兵庫県立大学)

<H24 中間目標 : ナローバンドギャップ太陽電池用として、 $0.9\text{--}1.0\text{eV}$  および  $0.6\text{--}0.7\text{eV}$  のバンドギャップを有する硫黄系またはセレン系の材料を開発し、印刷型太陽電池で変換効率 8%の低価格太陽電池の実現。H26 最終目標 : ナローバンドギャップセルからなる 2 接合太陽電池を作製し、変換効率 15%を達成する。>

化学的手法により合成した硫黄・セレン系ナノ結晶粒子を使用して、半導体膜の創製を行った。その結果、 $0.97\text{eV}$  ( $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ) および  $0.7\text{eV}$  ( $\text{AgInTe}_2$ ) の半導体材料の作製に成功した。さらにそのナローバンドギャップ半導体膜を使用して太陽電池セルの開発を行い、その光電流・電圧の発生に成功した。 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  においては 4.9%の変換効率の太陽電池となり、印刷プロセス太陽電池としては現在の日本国内最高値を出した (未発表データ)。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (0) 、論文 (査読付) : 7 (7) 、研究発表・講演 : 13、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 12) 近赤外光吸収材と吸収増強材料を組み合わせた 3 接合用ボトムセル構築 (東京大学)

<H24 中間目標 : 太陽電池のボトムセルを想定し、近赤外領域のみで非集光時に  $I_{sc}=12\text{mA/cm}^2$  を得る。H26 最終目標 : 3 接合セル、非集光下で変換効率 30%を達成する。>

ワイドギャップ半導体と化合物半導体量子ドットで作る光電変換層と、光捕集効率の向上を狙いとした金属ナノ粒子で作る光捕集アンテナとを組合せた 3 接合用ボトムセルの研究開発を実施した。ワイドギャップ半導体と化合物半導体量子ドットのみで作製した太陽電池セルで、波長  $1,500\text{nm}$  付近から短波長での光電変換を達成した。一方、近赤外領域でのプラズモン共鳴による電場増強に向けて、金や銀のナノ粒子を光捕集アンテナとして利用し、局在表面プラズモン共鳴による光電流増強を試みた。その結果、金や銀のナノ粒子によって、波長  $1,200\text{nm}$  以上での光吸収を達成した。また、光電流増強において、金ナノ粒子と色素との距離は  $10\text{nm}$  程度が最適であることを明らかにしているが、さらに、金ナノ粒子のサイズは  $100\text{nm}$  が最適であることを明らかにした。化合物半導体量子ドットと酸化亜鉛ナノ構造の最適化並びに、局在表面プラズモン共鳴効果を組合せ、 $850\text{--}1,400\text{nm}$  の波長領域で IPCE 値を 50%程度に向上させることで、中間目標の達成が見込める。中間目標を満足するボトムセルの研究開発と合わせて、他項目で開発するミドルセルとの接合技術の研究を進めることで、最終目標の達成が期待できる。当面はメカニカルスタック技術の構築により、早期の目標達成を目指す。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 5 (5) 、研究発表・講演 : 18、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 13) 量子ドット超格子セル (東京大学)

<H24 中間目標 : 量子ドットの微小化、また面内密度として  $10^{11}/\text{cm}^2$  を有する 50 層積層量子ドット超格子セルの開発を行い、変換効率 25% (低倍集光時) を達成する。H26 最終目標 : 光閉じ込め構造を取り入れたセルにおいて、変換効率 27% (非集光) 、40% (1,000 倍集光) を達成する。>

本研究開発では、量子ドットの微小化と高密度化に向けて水素 MBE 法による製膜技術の最適化を行い、平均直径  $24\text{nm}$ 、面内密度  $5 \times 10^{10}/\text{cm}^2$  を有する 50 層積層 InAs/GaNAs 歪み補償量子ドット超格子セルを開発した。このセルにおいて、変換効率 20.3% (100 倍集光) を達成した。これはロシア・科学アカデミーの 24.9%に次ぐ世界記録であり、目標の 25%は達成できる見込みである。また、量子ドット (中間バンド) を介した 2 段階光吸収によるセル動作の原理実証が最重要課題であったが、これを室温で観測・実証することに世界で初めて成功した。さらに、量子ドット中でのキャリア再結合寿命を長くするために、InAs/GaAsSb 系の Type II 量子ドットセルの開発を行い、効率 17.3% (1sun) を達成した。本セルにおいても室温で 2 段階光吸収動作を確認することができた。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 11 (11)、研究発表・講演 : 16、新聞・雑誌等への掲載 : 6、展示会出展 : 0

#### 14) 超高密度量子ドットセル (電気通信大学)

<H24 中間目標 : 面内密度  $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$  以上を達成し、面内高密度量子ドットの 5 層積層構造を作製した面内高密度型量子ドット超格子セルを作製する。その非集光時変換効率 15%を達成する。H26 最終目標 : 量子ドットマルチバンドセルを作製し、変換効率 27% (1sun)、40% (1,000suns) を達成する。>

低コスト化に重要な GaAs[001] 基板上に、世界最高の  $6 \times 10^{11}/\text{cm}^2$  の面内超高密度 InAs 量子ドットの自己形成技術を開発した。この面内高密度量子ドット層における発光特性の温度・励起光依存性の解析により、局在した中間バンドの形成について検証した。GaAsSb/InAs 系 Type II 量子ドット構造を作製し、蛍光寿命が 15ns を超える長寿命化を実現した。また量子ドットセルにおける理論電力変換効率のドット密度依存性を計算し、量子ドット密度の目標値を明確にした。面内超高密度量子ドット層を導入した新しい量子ドットセル構造を提案し、試作開発を進めた。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 1 (0)、論文(査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 13、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 15) マイクロ集積集光セル開発 (東京大学/シャープ)

[東京大学担当]

<H24 中間目標 : 多接合セルの微細加工により、電極などの表面被覆率を 20%以下に抑えつつ、マイクロセルの 10 直列動作を達成する。H26 最終目標 : 多接合集積直列セルの集光下動作により、モジュール変換効率 35%を達成する。>

半絶縁基板上に作製した GaAs 単セルに対して微細加工を施し、10mm 角の受光面積を  $5 \times 2\text{mm}^2$  のサブセルに分割し、マイクロ集積 10 直列セルを作製した。このとき、素子分離および直列配線の表面被覆率を 17.5%に抑えることに成功した。同時に、バイパスダイオードを各セルに並列に配置し、シャドーによるセルの破壊防止、電力出力低減の最小化に成功した。本デバイス製造プロセス開発の過程で、ドライエッチング条件が最適化され、ドライエッチングが引き起こす開放電圧および曲線因子の悪化を回復するための表面ウエット処理およびアニーリングの条件が得られた。また、素子分離用トレンチに施す表面絶縁処理および配線形成のための平坦化処理がデバイス作製の歩留まり向上に大きく貢献することが判明した。これらの知見をもとに、シャープ(株)が作製した InGaP/GaAs<sub>2</sub> 接合ウエハに対して 10 直列加工を行った。単接合セルに比べて深い素子分離が必要になるため、絶縁膜の形成がより困難になるが、導入した ALD 装置を用いて被覆性の良い絶縁膜を形成できた。現在プロセスの歩留まり向上に取り組んでおり、平成 24 年度中に 10 直列動作を実証できる見込みである。また、500 倍までの集光下における特性評価を行い、配線の直列抵抗による性能劣化をほぼ完全に防止できることを実証する。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 1 (0)、論文(査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 3、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

[シャープ担当]

<H24 中間目標 : 薄型で高光学効率を実現する集光モジュールを設計試作し、逆積み 3 接合セルに対して光学効率 90%を達成する。H26 最終目標 : 逆積み 3 接合セルを用いたモジュールで変換効率 35%を達成する。>

15mm 角で高さ 30.8mm の薄型非球面形状単位モジュールを作製し評価。光学効率 89%を確認。また小サイズのセルを加工、直列配線接続し、集積化する技術検討を共同で行うため、東京大学にタンデム構造エピタキシャルウエハを提供した。

<成果発表件数>「3)多接合セル開発(格子不整合系)」に記載の件数を含む

#### 16) 光閉じ込め微細構造の開発 (東京大学)

<H24 中間目標 : セル表面・裏面の微細加工により、量子ナノ構造層の吸収を 3 倍に増加させ、短絡電流の増大を実証する。H26 最終目標 : 量子マルチバンドセルに光マネジメント技術を適用し、量子ナノ構造層における吸収量を 10 倍に増加させる。これにより、変換効率 27% (非集光)、40% (1,000 倍集光) の達成に資する。>

量子ドット等ナノ構造による長波長領域の光吸収増大を達成してマルチバンドセル実現および効

率向上に資するため、表面傾斜屈折率構造、裏面乱反射構造を光学理論に基づいて設計し、微細加工技術を駆使した試作により、その効果を実証した。さらに、ミクロンスケールの凹凸構造を有する pn 接合により光の面内伝搬モードを利用した光閉じ込めを検討した。具体的な成果を以下にまとめる。

- 高倍集光モジュールにおけるトータル光マネジメント技術として、中継光学系とセルの表面・界面における反射を最小化する表面傾斜屈折率構造を数値シミュレーションによって決定した。その際、現時点で最適化された中継光学系の構造を模した系によって計算を行いパラメータを決定した。今年度中にその構造を作製する予定である。
- GaAs 吸収端よりも長波長側の量子ナノ構造の吸収に対応する波長について、裏面乱反射によって光閉じ込めを行うための実装の容易な構造を設計した。項目 17) と共同して行った光路追跡計算により、基板を除去してセルを数ミクロンまで薄層化し、セルの裏面に乱反射構造を実装することで、量子ナノ構造の長波長光吸収を約 5 倍まで増強できることが明らかになった。ついで、項目 5) と共同して長波長領域の自由キャリア吸収が少ない半絶縁基板上に表面コンタクト型量子井戸挿入セルを作製し、裏面乱反射構造を実装することによる量子井戸の吸収増大を量子効率の増大として観察できる実験手法を開発した。このような実証用セル裏面にウェットエッチングにより数ミクロンピッチのアレイ状メサを形成し、量子井戸の光吸収に由来する量子効率を 3 倍に増加させることに成功した。さらに、メサ表面に ALD で形成する極薄酸化膜と金属ミラーを積層することで、更なる量子効率増大を達成できる見込みである。
- セル表面に施す光屈曲構造の形成法として、低損傷の中性粒子ビームエッチング技術の適用可能性を実証した。GaAs 表面に通常のドライエッチングを施すとダメージが導入され、表面再結合速度が著しく増加してセルの特性を劣化させる懸念がある。そこで、中性粒子ビームを用いた GaAs 表面のダメージレス加工の可能性を検討した。ダメージの指標として GaAs 表面近傍に形成した量子井戸からのフォトルミネッセンス (PL) を採用し、量子井戸の端から 10nm 程度まで中性粒子ビームエッチングで孔を掘った。通常のドライエッチングであればダメージに由来する非発光緩和により量子井戸からの PL はほとんど観察されないが、中性粒子ビーム加工の場合はエッチングによっても PL 強度はほとんど変化しなかった。これにより、中性粒子ビームエッチングによる表面テクスチャ形成は光マネジメントに大変有用なプロセスであることが明らかになった。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 1 (1) 、研究発表・講演 : 7、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 17) 表面修飾技術開発 (ナノ構造修飾) (JX 日鉱日石エネルギー)

<H24 中間目標 : 量子マルチバンドセルに修飾構造を付与することで、900-1,300nm の領域の光の吸収量が 3 倍に増加することを示し、短絡電流の増大を実証する。H26 最終目標 : 量子マルチバンドセルに光マネジメント構造を適用することで、量子ナノ構造層における吸収量を 10 倍に増加させる。

>

量子マルチバンドセルの裏面に金属ナノ構造を形成した場合の光吸収量増大効果をシミュレーションする手法を確立した。そのシミュレーションにより、金属ナノ構造の径、間隔等の光吸収量増大効果への影響を明らかにすると共に、それらのパラメータを最適化することで、量子井戸セルの吸収量が 4.5 倍になる金属ナノ構造を設計することができた。一方で、量子井戸セルの裏面への金属ナノ構造作製手法の検討を行い、1.4 倍の光吸収量増大効果を実験的に確認した。光吸収増大効果が小さい原因は、基板の吸収が大きいこと、設計通りの金属ナノ構造が作製できていないことであるため、基板吸収を最小化したリフトオフセルの作製手法および最適なナノ構造作製手法の検討を年度内に実施し、それらを組合せることで中間目標を達成する見込み。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 5 (2) 、論文 (査読付) : 0 (0) 、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

【平成 25~26 年度】 (事業終了時)

#### 1) 多接合セル・モジュール開発 (格子不整合系) (シャープ)

<H26 最終目標 : 4 接合セル構造にて非集光時効率 39%を達成し、集光時効率 48%を達成する。逆積み 3 接合セルを用いたモジュールで変換効率 35%を達成する。逆積み 3 接合セルを用いた集光モジュールの屋外評価データを解析し、逆積み 3 接合セルを搭載した集光システムで、モジュール原価 75 円/W (100MW/年生産を想定) の実現性を確認する。>

逆積み 3 接合セルにおいて、InGaP トップセル構造と反射防止膜の最適化により、非集光時変換効率 37.9% (AIST 測定)を達成し、平成 24 年度までに達成した世界記録 37.5%を更新した。またシート抵抗、トンネル抵抗等の直列抵抗低減とコンタクト層幅を低減する電極形成プロセス改善により、3 接合セルとしては世界最高の集光効率 44.4%(フラウンホーファー研測定)を達成した。また反射防止膜の改善によりさらに電流を 1%以上向上し、45%達成の目途付けをした。4 接合セル開発ではバンドギャップ 0.75eV の InGaAs ボトムセルにおいて、メカニカルスタック型で 3 接合下、非集光効率 1.1%を実現し、上記効率 37.9%の逆積み 3 接合セルと合わせて効率 39%実現の可能性を示した。4 インチエピウエハでの逆積み 3 接合セル特性は、世界最高効率を達成した 2 インチウエハ特性の 92%を超えるレベルであった。集光モジュール開発では逆積み3接合セルを用いた高効率モジュールにおいて、目標値を上回る 35.4%(自社測定)を達成した。フィールドテスト開始初期の一定期間において設計通りの性能を確認することができ、駆動系、架台部分を含め、集光システムの実用化に向けた目処を得ることができた。フィールドテストで得られたデータや量産時の部材コストについて収集した情報に基づき、モジュールコスト 75 円/W の実現の可能性があると試算した。

<成果発表件数>特許出願(外国):8(2)、研究発表・講演:54、プレス発表:7、展示会出展:1

## 2) 多接合太陽電池評価解析(豊田工業大学)

<H26 最終目標:シャープ(株)と協力して、3 ないし 4 接合セルの高効率化に寄与し、3 接合セルで集光時変換効率 45%、4 接合セルで集光時変換効率 48%を達成する。>

格子不整合太陽電池の高効率化に寄与するため、InGaAs/GaAs 格子不整合系バッファ層における成膜中の歪緩和過程を、3 次元 X 線逆格子マッピングでリアルタイム観測し、転位挙動の解析と転位密度低減を研究した。基板の結晶面を僅かに傾斜(オフ)させた微傾斜 GaAs(001)基板上の InGaAs 膜成長では、転位種類( $\alpha$ ,  $\beta$ )の密度の面内異方性がオフの方向や角度に応じて大きく変化することが知られており、本研究では、この転位種類の面内異方性について、上記手法により、転位を4種類に分類して解析を行った。その結果、基板のオフ方向により、表面ステップ構造による拘束の影響で優先的に生成する転位の種類が異なり、面内異方性の膜厚変化の様子が異なることを明らかにした。さらに、[110]方向にオフした GaAs 微傾斜基板(シャープ社でも使用)では、転位の異方性が大きいことにより、転位の対消滅が促進され、転位密度の低減に有効であることが示唆された。これらは、シャープ社のセル作製技術に理論的な裏付けを与え、さらなる最適化に資するものである。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):5(5)、研究発表・講演:29、新聞・雑誌等への掲載:2、展示会出展:0

## 3) 多接合太陽電池集光動作解析(豊田工業大学(再委託:宮崎大学))

<H26 最終目標:シャープ(株)と協力して、3 ないし 4 接合セルの高効率化に寄与し、3 接合セルで集光時変換効率 45%、4 接合セルで集光時変換効率 48%を達成する。>

屋外において集光型太陽電池モジュールの動作温度の詳細な測定を行った。また、熱解析シミュレータを導入し、伝熱解析により太陽電池セルでの熱分布を解析した。屋外測定において、集光型太陽電池モジュールの太陽電池直下とシャーシ裏面との温度差は最大で 6.2 K であった。この時の直達日射量(DNI)は 706.3W/m<sup>2</sup>、外気温度は 306.2 K であった。屋外での測定結果をもとに、伝熱モデルの合わせ込みを行った。伝熱モデルの解析より、太陽電池セルからシャーシ裏面までの熱抵抗  $R_{th,stage-chassis}$  が増加すると AI ステージの温度は増加した。 $R_{th,stage-chassis}$  が増加するとステージからシャーシへの熱伝導が滞り、ステージの温度上昇および太陽電池セルの温度上昇を引き起こした。さらに、熱解析シミュレータを用いて太陽電池セルにかかる熱ストレスの解析を行った。集光用レンズによって集められた日射が太陽電池セル中心部に集中する場合、セル中心部が 129.8<sup>o</sup> C となった。一方、日射が二次光学系によってセルに均一に照射する場合、セルの温度は 85.3<sup>o</sup> C となった。太陽電池セル、特に Ag 電極にかかる熱ストレスの解析を行い、日射がセルに均一に入射する場合バス電極に熱ストレスが集中し、日射がセル中心部に集中する場合、セル中心部が高温となるため、熱ストレスがフィンガー電極中心部において大きくなることを見出した。本モデルは、集光動作時の太陽電池セルの温度解析および効果的な放熱性能の検討が可能であり、高効率集光型太陽電池の開発に有効である。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):12(12)、研究発表・講演:27、新聞・雑誌等への掲載:18、展示会出展:0

## 4) III-V 系オン・シリコン構造(豊田工業大学、再委託:宮崎大学)

<H26 最終目標:III-V 系オン・シリコン構造において、III-V 層の貫通転位密度 10<sup>6</sup>/cm<sup>2</sup> 以下を実現する。>

豊田工大では、Si 基板上に良好な GaAs を成膜させる手段として、III-VI 族層状化合物(InGa)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> をバッファ層に用いる事を検討し、GaAs(111)基板上に単相で層状構造 In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> を得るための条件を確立した。層状化合物は、大きな格子不整合率でも良好なエピタキシャル膜を得ることができ、格子定数差、熱膨張係数差による歪を有

効に緩和することが期待できる。宮崎大では、ALE 法および MBE 法を併用し、加工 Si 基板あるいは SiO<sub>2</sub> マスクパターン付き Si 基板上への GaAs 薄膜の作製を試みた。加工基板上への GaAs 成長において、{111}フェセット上へのナノワイヤー(NWs)の形成を確認し、NWs もしくは薄膜を作り分けられる条件を見いだした。一方、マスクパターン付き Si 基板においては、マスク開口部への均一な GaAs 成膜に成功した。両機関ともに、Si 基板上に均一な GaAs 薄膜を形成するに至っておらず、目標値は達成することができなかったが、新規手法を提案・検討し、今後の研究開発につながる重要な成果を得ることができた。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):0(0)、研究発表・講演:6、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出席:0

#### 5)多接合セル開発(格子整合系新材料・ナノ構造)(シャープ)

<H26 最終目標:4 接合セル構造にて非集光時効率 39%を達成し、集光時効率 48%を達成する。>

量子ドット挿入 InGaAs(1eV)セル、もしくは InGaAsN(1eV)セルを形成するための Ge セル基板を成長し、東京大学と豊田工業大学へ提供した。東京大学で InGaAsNSb (Eg=1eV)を材料とする3番目セルを成長し、再度当社で InGaP(1番目セル)/GaAs(2番目セル)からなる 2 接合セルの成長を行いウエハシヤトルによる 4 接合構造を試作し、量子効率は小さいものの 4 接合セルになっていることが確認された。また東京大学でバンドギャップが 1.2eV の InGaAs/InGaP 歪超格子を形成し、その上に当社で InGaP トップセルを成長する 3 接合構造の試作と評価も実施し、各サブセルで 80%以上の良好な量子効率が確認された。

<成果発表件数>「1)多接合セル・モジュール開発(格子不整合系)」に記載の件数に含む

#### 6) 量子井戸ミドルセル(東京大学)

<H26 最終目標:GaInNAs 結晶薄膜を第 3 セルとした 4 接合セルの開発において、シャープと連携して、変換効率 36%(1sun)、45%(1,000suns)を達成する。>

格子整合系高効率3接合太陽電池の実現に向け、実効バンドギャップ 1.2 eV の InGaAs/GaAsP 歪み補償超格子について、結晶成長法の開発とキャリア回収を効率化する構造設計を行った。キャリアのトンネルを促進するために GaAsP 障壁層を 3 nm 以下にするとともに、InGaAs 吸収層との間に GaAs 中間層 2.6 nm を挿入することで、電子・正孔ともに高効率で回収できる超格子を開発した。成長の低温化と Ga 原料を TEGa に変更することで、本構造を3接合セルにおいて標準となっている6° オフ基板上に規則的に成長することに成功した。これらにより、トップセルフィルター下で短絡電流 17.4 mA/cm<sup>2</sup>と電流整合に十分な値を得た。さらに、本超格子ミドルセルをシャープとのウエハシヤトルにより3接合セルに実装し、量子効率スペクトルの積分値から InGaP トップセルと超格子挿入ミドルセルとの間で電流整合を達成した。1000 倍までの高倍集光下の特性に関しては、コンタクト抵抗低減のための構造・プロセス最適化と、3接合の受光波長領域に対応した反射防止膜の最適化が今後必要であるが、これらを、最適化格子整合3接合セルの電流整合による高効率化が可能なことを実証した。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):19(19)、研究発表・講演:55、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出席:0

#### 7)GaInNAs ミドルセル(水素 MBE)(東京大学)

<H26 最終目標:GaInNAs 結晶薄膜を第 3 セルとした 4 接合セルの開発において、変換効率 38%(1sun)、48%(1,000 suns)を達成する。>

本研究開発では、GaInNAs:Sb 薄膜成長技術の開発と太陽電池の高品質化を進めた。太陽電池応用に必要なサブミクロン～ミクロンオーダーの膜厚を有する GaInNAs:Sb 薄膜に対する Sb 供給の効果を詳細に調べ、最適量の Sb 供給により、窒素起因の局在準位や、深準位欠陥の低減への効果、および光学特性や電気特性が改善されること、その結果として太陽電池特性の改善に有効であることを明らかにした。またバンドギャップ 1.0 eV を有し十分な光吸収を得るため厚さを 2.0 μm まで拡張した GaInNAs:Sb 薄膜を用いた n-GaAs/i-GaInNAs:Sb/p-GaAs ダブルヘテロ太陽電池において、高水準の光キャリア収集特性が得られ、GaAs フィルタ下の短絡電流密度として 12.2 mA/cm<sup>2</sup>の世界トップレベルの GaInNAsSb 太陽電池を実現した。

多接合セル化手法としてウエハシヤトルをシャープと連携して実施し、GaInNAs:Sb/Ge 2 接合セルにおいて短絡電流 19.6 mA/cm<sup>2</sup>を達成した。さらに、InGaP/GaAs/GaInNAs:Sb 3 接合セル、及び InGaP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge 4 接合セルを試作し、ウエハシヤトルプロセスの有効性を示した。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):3(3)、研究発表・講演:11、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出席:0

#### 8) GaInNAs ミドルセル(CBE)(豊田工業大学)

<H26 最終目標:GaInNAs 結晶薄膜を第 3 セルとした 4 接合セルの開発において、変換効率 38%(1sun)、48%

(1,000 suns)を達成する。>

豊田工大では、GaAsN 材料の欠陥評価と高品質化に重点をおいて研究した。中間評価時までには、化学ビーム・エピタキシー (CBE) 法により成長した GaAsN 膜において、成膜後のアニール無しに 0.9ns の少数キャリア寿命を達成している。高品質成膜において、CBE 法の優位性を示すものである。一方、課題は残留キャリア濃度が  $10^{17}\text{cm}^{-3}$  程度と高いことである。欠陥解析を実施し、残留キャリアの要因ともなる N-H 複合欠陥や、窒素起因の再結合中心に関して、特性を劣化させる欠陥を明確化するとともに、これら欠陥特性が、基板の面方位、ステップの方向や密度、原料供給方法により大きく異なることを見出した。

GaAsN 材料の高品質成膜が可能になった一方で、試作した GaAsN ホモ接合太陽電池の変換効率は、中間評価時と同じ値に留まった。セル構造と作製プロセスに問題があることが示された。本研究では、GaAsN 材料の欠陥評価と高品質化に重点をおいたため、In を添加して Ge や GaAs に格子整合した GaInNAs 膜を得るには至っていない。そこで、多接合セルに関しては、デバイスシミュレーションを行った。その結果、1 eV GaInNAs のトラップ密度が現状の GaAsN の場合と同じであると仮定すれば、CBE により作製した 1 eV GaInNAs 材料を用いた 4 接合太陽電池において、約 1000 倍集光で 45% の変換効率が達成可能であることが予想された。以上のことから、目標のセル効率は達成できなかったが、理論計算により、4 接合太陽電池で 45% の変換効率が達成可能な材料品質を有する GaAsN 材料を成膜できた。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):18(18)、研究発表・講演:62、新聞・雑誌等への掲載:2、展示会出席:0

#### 9) 窒素系結晶成長の理論解析(豊田工業大学(再委託:九州大学))

<H26最終目標:「8) GaInNAsミドルセル(CBE)」に同じ。>

(In)GaAsN 結晶中への不純物や複合型の点欠陥の導入が電子(正孔)の散乱を引き起こし、キャリア寿命・変換効率の低下を招くことが知られている。本研究開発では、不純物の取込み挙動および欠陥形成機構を理論的に解析し、得られた知見を実験にフィードバックすることで最終目標の達成に寄与することを目的としている。H24 年度までに薄膜成長に対する H の役割を解明し、その利点の活用法および欠陥の抑制法を提言した。H25、26 年度は、H に関する複合欠陥の構造と形成機構についての解析を遂行した。具体的には薄膜中に混入した H 不純物に関する複合欠陥の格子振動数解析を行い FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) スペクトルとの比較検討を行うことで複合欠陥構造とその形成機構を解析した。実験との比較により実際に薄膜中に存在している複合欠陥の構造を明らかにした。得られた知見を実験にフィードバックし最終目標の達成に寄与した。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):2(2)、研究発表・講演:11、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出席:0

#### 10) AlInGaN トップセル(MOVPE)

<H26 最終目標:AlInP/GaAs/Ge に対して+3%以上、または多接合 40%以上@1sun の確認>

\*InGaN のピエゾ分極に関して注目を行い、デバイスシミュレータを活用したその分極電界の影響を検討した。その結果としてピエゾ分極がデバイス特性に大きな影響を及ぼすことを見出し、半極性・非極性面の有用性を明らかにし a 面太陽電池の試作を行った。さらに InGaN トップセルに用いる構造を検討するために、結晶成長技術によるトンネル接合技術の確立、さらにはそれによるデバイスでの実証を行った。結果として、窒化物半導体によるトンネル接合による多接合太陽電池を世界で初めて実現し発表した。さらには AlGaInN と AlInP/GaAs/Ge のメカニカルスタック技術の検討を行い、様々なメカニカルスタック法を活用して加熱・加圧によって作製する方法が最適であることを確認した。さらには AlGaInN トップセルと AlInP/GaAs/Ge<sub>3</sub> 接合セルをメカニカルスタックによって太陽電池を試作し、開放端電圧の向上まで確認した。その一方で、直接メカニカルスタックでは、直列抵抗の大きな増大が確認されてしまったため、中間層として ITO 等を用いることが重要であることが確認されたため、それに関しては今後の検討課題となった。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):3(3)、研究発表・講演:6、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出席:0

#### 11) InGaN トップセル(PSD)(東京大学)

<H26 最終目標 AlInP/GaAs/Ge に対して+3%以上、または多接合 40%以上@1sun の確認>

パルススパッタ法を用いた InGaN トップセルの作製に向けて、分極電場を制御した窒化物太陽電池セルの開発とバルク GaN 基板を用いた高品質 InGaN 成長技術開発を行った。窒化物結晶内の分極電場を制御した太陽電池セル構造を作製するため、窒素極性面上へ結晶成長技術開発に取り組み、世界最高品質の窒素極性 GaN 結晶成長を実現するとともに高 In 組成 InGaN 量子井戸構造の作製と、窒素極性 p 型



GaN における正孔の高濃度化を実現した。これにより紫外から近赤外域までの波長に対応するバンドギャップを有した窒素極性面上の素子作製が可能となり、太陽電池としての基本動作を確認した。

バルク GaN 基板上への高品質 InGaN セル開発では、通常よりも結晶欠陥密度が1桁少ないバルク GaN 基板(転位密度:  $10^7/\text{cm}^2$ )を用いて InGaN セル構造の作製を行った。その結果、低結晶欠陥密度の基板を用いることでフィルファクタを改善できることが明らかになり、10nm 程度の薄い InGaN 活性層を用いてセルを作製したところ、Voc は 1.52V、FF は 50%であった。特に、FF は従来のサファイア基板上に作製した場合の 25%に比べて大幅な改善が見られた。また、InGaN 量子井戸層を 100 層以上積層する技術を開発し、InGaN 層の組成および厚さの増加によって短絡電流密度が増加することを見出した。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):4(4)、研究発表・講演:8、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

#### 12) ナローギャップボトムセル(兵庫県立大学)

<平成 25~26 年度分最終目標: 0.65eV 帯のナローバンドギャップ半導体(AgInTe<sub>2</sub> 又は Cu<sub>2</sub>Te)セルをスパッタリング製膜法により作製し、メカニカルスタックにより 4 接合太陽電池を構成することで、1000 sun で効率 48%を目指す。>

最終目標は NEDO プロジェクト全体の総目標になる事項であり、非常にチャレンジングなものであった。0.65eV 帯のナローバンドギャップ半導体(AgInTe<sub>2</sub> 又は Cu<sub>2</sub>Te)セルをスパッタリング製膜法による事が限定された。最適化の実施およびドーピングの影響により、AgInTe<sub>2</sub> の半導体特性(キャリア移動度、励起キャリア寿命、キャリア密度)は太陽電池応用には非常に良好なものになった。さらに、亜鉛をドーピングすることで AgInTe<sub>2</sub> は良好な p-type 半導体に、ニッケルをドーピングすることで AgInTe<sub>2</sub> は良好な n-type 半導体になる事が判明した。また、金属ドーピングをすることで AgInTe<sub>2</sub> の結晶性が向上することが判明し、さらにナローバンドギャップ化することも確認された。しかしながら得られた AgInTe<sub>2</sub> 薄膜から励起キャリアを導き出すことは非常に難しく、現在考えられる材料(Si、Ge、CdS、In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>、など)との組み合わせを行ったが、太陽電池として得られた電流値は 14 mA/cm<sup>2</sup> 程度で、ボトムセルとして使用するにはさらなる新たな大きな発見が必要であることが考えられた。

結論として、本プロジェクトによって今後の太陽電池作製の為には非常に有意義な情報が得られたものと考えており、我々は高効率低価格太陽電池の実現の為に、引き続き研究を行っている。まずは、AgInTe<sub>2</sub> 又は Cu<sub>2</sub>Te を使用して、鉛ハライドペロブスカイト半導体とのヘテロ接合を行う研究開発を実施している。また、今回の AgInTe<sub>2</sub> および Cu<sub>2</sub>Te に関する研究の知見を活かし、新たなテルル化合物の設計を行い、現状市場で最も低い「製造価格/発電量」の数値を挙げているカドミニウム・テルル太陽電池を量が出る新型テルル化合物の実現の為に、さらなる研究開発を継続中である。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):4(4)、研究発表・講演:9、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

#### 13) ハイブリッド材料ボトムセル(東京大学)

<H26 最終目標:近赤外領域(1eV 帯)で、Jsc = 14mA/cm<sup>2</sup> を示す 4 接合太陽電池用ボトムセルを開発する。同時に、光電変換層の吸収を 0.65eV に拡張する。0.65eV(1900nm)帯に吸収を有する量子ドットを用いたボトムセルを用いたメカニカルスタックにより、4 接合太陽電池を構築し、変換効率 48%(1,000suns)を達成する。>

コロイド状 PbS 量子ドットと ZnO ナノ構造体を組み合わせたバルクヘテロ構造に、金属ナノ粒子を組み込んだ、4 接合ボトムセル(プラズモン増強 PbS/ZnO-NW 太陽電池)の研究開発を実施してきた。PbS/ZnO-NW 太陽電池セルの高効率化の重要な要因である ZnO ナノワイヤアレイ構造の最適化を試みた。その結果、直径が小さく、高密度化している ZnO ナノワイヤアレイで作製したセルにおいて、最も高い EQE を得た。特に、近赤外領域に於いては、コロイド量子ドットを用いたセルに於いて報告例の無い 60%程度(@1 μm)の値にまで達した。その結果、Jsc としても 30mA/cm<sup>2</sup> を超える値を達成できた。次に、数%のエネルギー変換効率をもつ PbS 量子ドットと酸化亜鉛ナノワイヤからなるバルクヘテロ接合セルの光電流増強を試みた。ナノ粒子としては銀ナノキューブを用いた。ナノキューブを導入する位置と量を最適化した結果、導入に伴ってエネルギー変換効率を 4.5%から 6.0%に増強することができた。化合物半導体トップセルとの多接合化を想定し、擬似太陽光源(AM1.5G, 100mW/cm<sup>2</sup>)に近赤外フィルタ(R85)を装着し、800nm よりも長波長領域で太陽電池特性を測定した。PbS ドット径を拡大し、光電変換領域の拡張を行った。これまでの検討で、励起子吸収ピークを 1.25 μm(1.0eV)程度まで拡張を行い、Jsc としては、H26 年度最終目標の一つである 14mA/cm<sup>2</sup> を達成した。一方、吸収端(Eg)に関しては、1450nm(0.85eV)であり、最終目標値(Eg=0.65eV)に対して、8 割程度の達成率と考えている。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):18(18)、研究発表・講演:25、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:2

#### 14)量子ドット超格子セル(セル開発)(東京大学)

<H26 最終目標:超高密度「積層」量子ドットセルを作製し、変換効率 27% (×1), 40% (×1,000) を達成する。>

本研究開発では、50 層の InAs/AlGaAs 積層量子ドットを基板温度 450 °C の低温下で形成し、合計 $\sim 10^{13}$  /cm<sup>2</sup>の超高密度量子ドットを実現した。また、InAs/AlGaAs 量子ドット太陽電池において、量子ドット層と p 型エミッタ層の間に電界減衰層を導入することで、高い開放電圧( $V_{oc} = 0.942$  V)を有する量子ドット太陽電池の開発に成功した。さらに、直列抵抗によるジュール損失を低減する目的で、電流制御した低電流・高電圧型量子ドット太陽電池構造を考案し、72 倍集光下で 26.8%の変換効率を達成した。

量子ドット超格子太陽電池において、中間バンド型動作による高効率化を達成するために必須となる 2 段階光吸収過程を評価解析するための分光計測法を確立した。電圧バイアス依存性、温度依存性、スペクトル分解計測、時間分解計測など種々の分光計測法を駆使することで、2 段階光吸収による高効率な電流増大を得るための指針を示した。特に、中間バンドから伝導帯への 2 段階目の光吸収による $\Delta EQE$  スペクトルを、世界で初めてスペクトル分光計測することに成功した。

<成果発表件数>特許出願(外国):1(0)、論文(査読付):11(11)、研究発表・講演:32、新聞・雑誌等への掲載:4、展示会出展:2

#### 15) 超高密度量子ドットセル(電気通信大学)

<H26 最終目標:超高密度「積層」量子ドットセルを作製し、変換効率 27% (×1), 40% (×100) を達成する。>

<成果>

中間バンド型量子ドット太陽電池の高効率化に必要な不可欠な面内超高密度量子ドット構造の指針を得るための理論的な計算を行い、量子ドット密度の目標値を設定し、それに向けた作製技術の研究開発を進めた。その結果、GaAsSb バッファ層の導入において $6 \times 10^{11}$  cm<sup>-2</sup>の面内密度を達成し、さらに InAsSb 濡れ層の導入により $1 \times 10^{12}$  cm<sup>-2</sup>の世界最高の面内密度を達成した。その面内超高密度量子ドット層における光学特性の実験評価解析では、太陽電池に重要なキャリア長寿命化を目指した type-II バンド構造を有する量子ドット層の基本特性とその光学遷移を明らかにした。また、面内超高密度量子ドット層における 2 段階光励起効果を実験的に検証した。さらに面内超高密度量子ドット層を導入した太陽電池構造を試作し、その集光特性より中間バンド型太陽電池の基本動作特性を確認した。

<成果発表件数>特許出願(外国):1(0)、論文(査読付):2(1)、研究発表・講演:12、新聞・雑誌等への掲載:2、展示会出展:0

#### 16)量子ドット超格子セル(集光モジュール技術開発)(東京大学・シャープ(株))

<H26 最終目標:超高密度「積層」量子ドットセルを作製し、変換効率 27% (×1), 40% (×1,000) を達成する。>

エピタキシャルリフトオフ(ELO)法を用いて薄膜 InAs/GaAs 量子ドット太陽電池を作製し、900 nm 以上の長波領域での電流増大( $\sim 0.16$  mA/cm<sup>2</sup>)とともに、700~900 nm の短波長域においても電流生成の増加( $\sim 0.91$  mA/cm<sup>2</sup>)を確認した。外部量子効率(EQE)評価では、多重共鳴ピークが明瞭に観測された。また、集光下でのELO-InAs/GaAs 量子ドット太陽電池の電流電圧特性を評価し、中間バンドの特徴を有していることを示した。

集光モジュール用光学素子表面へのプラズマ加工によって、モス・アイ(moth-eye)構造を検討した。B270 ガラスを用いてのモス・アイ構造作製は、CHF<sub>3</sub> ガスによる反応性イオンエッチングと、この過程で発生する異物を除去するための O<sub>2</sub> エッチングからなる。プロセス最適化の結果、最終的な透過率は 95.5%を超え、これは片面のみの反射防止効果がほぼ極限まで到達していることを示している。実際、両面処理を行ったところ透過率は 99%を超え、ほとんど限界の反射防止効果が得られた。さらにこれらの光学系を搭載した集光モジュールのフィールドテストをマドリードの評価施設で行った。

集光モジュールへのセルの適用に際して、直列抵抗による高電流下ジュール損失を低減するためのモノリシック集積マイクロ直列セル構造を提唱し、GaAs 単セルおよび InGaP/GaAs 2 接合セルに対して作製プロセスを開発、バイパスダイオードを含む 10 直列セルを実際に制作してその有効性を実証した。

量子井戸や量子ドットの GaAs サブバンドギャップ領域での量子効率を、セル内の光閉じ込めによる光吸収増大で達成すべく、表面反射防止と裏面光散乱構造を有する薄膜セルを作製し、量子井戸挿入 GaAs 単セルにおいてその効果を実証した。表面反射防止には、2 層誘電体膜にシリカ粒子を自己組織化配列し、ドライエッチングで多層膜/モス・アイのハイブリッド構造を形成することで、特に多層誘電体膜では困難であった紫外から可視光領域での反射率低減を達成した。裏面光散乱体を有する光閉じ込め薄膜セルは、基板による寄生的な光吸収を除去するためのレイヤートランスファープロセスを開発することで実装可能となった。量子井戸を挿

入した GaAs 単セルに本構造を適用することで、量子井戸への垂直光入射に比べて5倍の実効光路長を実現し、変換効率を20%に高めた。

<成果発表件数>特許出願(外国):2(1)、論文(査読付):5(5)、研究発表・講演:10、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

## ②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

【平成20～22年度】(第1回中間評価時)

### 1)高配向性平面ポリシラン材料の開発(産業技術総合研究所)

<H22 中間目標:バンドギャップ 1.8eV 以上の平面ポリシラン薄膜を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。H26 最終目標:バンドギャップ 1.8eV 以上の平面ポリシラン薄膜を用いた単接合太陽電池で変換効率 12.5%を達成する。>

平成20年度には、空気中で安定な架橋ポリシランをトルエンなどの汎用溶媒に溶かした溶液から基板上に塗布した塗布膜を真空下 400℃以上で加熱するだけで、近赤外光を吸収するポリシラン薄膜を簡単に作製できることを見出した。また、加熱温度と加熱時間をコントロールすることにより、ポリシラン薄膜のバンドギャップを紫外光から近赤外光まで連続的に変化させることができることも分かった。平成21年度には、鎖状ポリシラン薄膜に、光照射することにより鎖状ポリシラン同士を架橋させ、その後、真空下で加熱すると平面性が向上して、吸収が長波長側にシフトすることを見出した。さらに、鎖状ポリシランに結合している置換基の種類を、アルキル基、フェニル基、ナフチル基、アンスリル基と変えることにより、加熱後の薄膜のバンドギャップを制御できることも分かった。さらに、平成22年度には、加熱処理することにより 1.8eV にバンドギャップが制御された平面ポリシラン薄膜を用いてフラーレンとの積層タイプの太陽電池デバイスを作製した。このデバイスの AM1.5 の擬似太陽光照射下での IV 特性を評価したところ、 $V_{oc}=0.33V$ 、 $J_{sc}=0.15mA/cm^2$ 、 $FF=0.16$ を得た。

<成果発表件数>特許出願(外国):2(0)、論文(査読付):0(0)、研究発表・講演:14、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

### 2)配列制御ナノ結晶シリコン材料の開発(東京農工大学)

<H22 中間目標:バンドギャップ 1.8eV 以上の単接合 nc-Si 太陽電池で変換効率 10%を達成する。その際の特性値としては  $FF=0.8$ 、 $V_{oc}=0.7V$ 、 $I_{sc}=18mA$  を目標とする。H26 最終目標:バンドギャップ 1.8eV 以上の単接合 nc-Si 太陽電池で 12.5%の効率を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

#### a)ナノ結晶シリコン層の形成プロセス技術

任意の厚さの nc-Si 層を均一に形成するプロセス技術を確立した。ナノ構造に適した低温酸化アニール法および乾燥技術を導入した。連続プロセスによってセルフスタンディング膜を基板から剥離する技術を開発し、大面積化も実現した。

#### b)粒径制御によるバンドギャップエンジニアリング

フォトルミネセンスと光吸収スペクトル解析により、バンドギャップの拡大および目標範囲(1.8 eV 以上)での可変性を実証した。また入射光スペクトルに合わせてバンドギャップ分布を制御する基本技術を開発した。

#### c)界面のキャリアトラップ低減

ナノ構造表面に高品質のトンネル酸化膜を形成し、界面の欠陥を低減した。また超臨界乾燥の導入により光導電感度を向上できることを見いだした。

#### d)太陽電池要素としての評価

基礎となる光導電の測定評価を先行して実施し、想定する波長域での光電材料としての有用性を確認した。また、試作セルで変換効率 3%を得た。引き続き、その向上を追求中である。さらに光キャリア増倍、青色燐光など、光電変換に関する新規現象を見いだした。

<成果発表件数>特許出願(外国):1(1)、論文(査読付):12(12)、研究発表・講演:14、新聞・雑誌等への掲載:4、展示会出展:3

### 3)結晶系ナローギャップ材料太陽電池の開発(産業技術総合研究所)

<H22 中間目標:バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウムを用いた太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として、シリコンゲルマニウムの少数キャリア寿命  $100\mu s$ 、ヘテロ界面再結合速度  $1,000cm/s$  を目標とする。H26 最終目標:バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウムを

用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

分子線エピタキシー (MBE) でシリコンゲルマニウム (SiGe) の形成を行い、膜成長条件と膜の組成、歪の関係を明らかにした。Si 基板上に Ge 組成 60%の SiGe 膜を太陽電池に必要な厚さ  $5\mu\text{m}$  まで成長可能であることを確認した。SiGe の膜質評価指標として少数キャリア寿命に注目し、その正確な測定に必要な Ge、SiGe の表面不活性化技術を世界で初めて確立した。この手法で作製した膜に適用したところ、膜中の欠陥密度が高いことを反映して、少数キャリア寿命は Ge 組成 10%の膜で  $0.9\mu\text{s}$ 、Ge 組成 90%の膜で  $0.3\mu\text{s}$  と低い値であることが判明した。伝導帯側のバンド不連続が小さく、価電子帯側のバンド不連続が大きい、アモルファスシリコン、GaP、InGaP が SiGe とのヘテロ接合形成に適していることを見出し、アモルファスシリコン/SiGe 接合、GaP/SiGe 接合を実際に試作した。ヘテロ界面の再結合速度の評価を予定している。Ge 組成 10%で変換効率は 1.3%と改善の余地が大きいが、MBE 法で作製した SiGe 薄膜を用いたヘテロ接合太陽電池をおそらく世界で初めて試作した。なお、このセルではヘテロ接合形成にアモルファスシリコンを使用し、SiGe 膜の厚さは  $4.6\mu\text{m}$  であった。SiGe 薄膜セルでは少数キャリア寿命が短くても (この場合  $0.9\mu\text{s}$ )、ヘテロ接合の採用と適切なセル設計で変換効率の向上が可能であることを、セル試作を通じて確認した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 4、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 4) シリコン-ゲルマニウム-スズ低温エピタキシャル新技術の開発 (産業技術総合研究所)

<H22 中間目標 : バンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の SiSn 系混晶薄膜を用いた太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の SiSn 系混晶薄膜で直接遷移を確認し、欠陥密度  $10^{16}/\text{cm}^3$  を目標とする。H26 最終目標 : バンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の SiSn 系混晶薄膜を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として、バンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の SiSn 系混晶薄膜で直接遷移を確認し、欠陥密度  $10^{15}/\text{cm}^3$  を目標とする。>

シラン、水素、テトラメチルスズを原料ガスとして反応容器に導入し、プラズマ CVD 法により SiSn 薄膜 (Sn 濃度 0-30at%) の作製を行った。XRD、ラマン散乱スペクトル測定により作製した SiSn 混晶薄膜の構造解析を行った。また、膜中 Sn 濃度の評価には EDX、XPS スペクトル測定を用いた。その結果、膜中 Sn 濃度 1at%以下のものに関しては、微結晶化した SiSn 薄膜の作製に成功しているが、膜中 Sn 濃度 1at%以上のものに関してはアモルファス状態である事を確認した。透過-反射スペクトル測定より吸収スペクトルを算出し、さらに得られた吸収スペクトルをタウト-プロットする事により光学バンドギャップの見積もりを行った。その結果、膜中 Sn 濃度の増加に伴い、光学バンドギャップがレッドシフトすることを確認した。さらに、アモルファス状態ではあるが、膜中 Sn 濃度  $\sim 20\text{at}\%$  で光学バンドギャップ  $0.9\text{eV}$  の SiSn 混晶薄膜の作製に成功した。太陽電池材料としては、光照射時のコンダクティビティーが重要となるため、SiSn 単膜に Al のコプラナー電極を蒸着し、明/暗状態のコンダクティビティーの測定を行った。その結果、Sn 濃度 13at% (光学バンドギャップ  $\sim 1.2\text{eV}$ ) までの光起電流の存在を確認した。上記の実験結果を基に、ヘテロ接合型 SiSn 薄膜太陽電池の作製を開始した。構造は、Asahi U 基板 (ガラス基板にテクスチャー付き  $\text{SnO}_2$  膜の付いた基板) 上に p/i/n 層をプラズマ CVD 法で堆積したスーパーストレート型 (Asahi U/p(a-SiC)/i(SiSn)/n(a-Si:P)/裏面電極) である。作製した SiSn 薄膜太陽電池の外部量子効率スペクトルの測定を行った結果、膜中 Sn 濃度の増加に伴い長波長領域の光感度が大幅に上昇することが確認された。さらにこの実験により、外部量子効率スペクトルにおける長波長領域における立ち上がり位置 (エネルギー位置) は、タウト-プロットより求めた光学バンドギャップのエネルギー位置とほぼ等しい事が確認された。今後、デバイス性能を上昇させるため、デバイスにおける条件出しを試みる予定である。なお、高品質な i 層 (SiSn) 薄膜を作製するためには、気相中で発生するラジカル種の挙動を理解し、それらを制御する必要がある。そこで、プラズマ発光スペクトル (OES) の測定による気相診断を行い、気相中で発生するラジカル種と膜質との相関を調べている。しかし、製膜前駆体の特定には至っていない。一方、膜質向上の観点から、ESR による欠陥密度測定に着手した。しかし、膜中の荷電欠陥が原因と見られる ESR 信号強度の大幅な低下が見られ、正確に欠陥密度測定が行えていない。太陽電池デバイスの特性測定においても、i (SiSn) 層内で電界が弱められキャリア収集効率の低下を招いている事を示唆する結果が得られている。今後、荷電欠陥の起源をより詳細に調べ、それを低減できる製膜法を検討する予定である。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 5、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 1

#### 5) ガラス基板上的シリコン・ゲルマニウム等単結晶シード層形成技術（コーニング）

＜H22 中間目標＞シリコン・ゲルマニウム等単結晶薄膜を単結晶シード層としたバンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として単結晶薄膜の転位密度として  $10^8/\text{cm}^2$  を目標とする。H26 最終目標：シリコン・ゲルマニウム等単結晶薄膜を単結晶シード層としたバンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として単結晶薄膜の転位密度として  $10^7/\text{cm}^2$  を目標とする。＞

バンドギャップ 0.9eV に相当する Ge 組成約 0.5 の SiGe 単結晶薄膜を、MBE 法により厚さ約  $3\mu\text{m}$  までガラス上 Si 薄膜基板の上にエピタキシャル成長した。反応性熱 CVD 法では厚さ  $7\mu\text{m}$  の Si 単結晶薄膜成長をガラス上 Si 薄膜基板の上に実現し、Ge 薄膜についても既に成膜実験を開始している。目標の SiGe 膜を今年内には成長できることを見込んでいる。さらに、ガラス上 Ge 薄膜基板については加熱温度  $500^\circ\text{C}$  まで問題がないことを確認したので、同様に SiGe 単結晶薄膜の成長を行い、今年内にガラス上 Si 薄膜基板との比較および最適化を行う予定である。単接合太陽電池の作製は、これまで結晶成長条件の把握に時間を要したため未実施であるが、7 月には最初の試作および特性評価を行う予定である。Si 単結晶薄膜の転位密度評価として、Dash エッチャントによるエッチピット密度評価法が有効であることを確認した。MBE 法によりガラス上 Si 薄膜基板の上にエピタキシャル成長した SiGe 単結晶薄膜について、Ge 組成 0.3 ではエッチング法で  $10^8/\text{cm}^2$  以下の転位密度を示唆する結果を得たが、Ge 組成 0.5 の試料ではエッチピット観察に成功していないため、TEM による転位密度評価を 7 月までに予定している。

＜成果発表件数＞特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：5、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：3

#### 6) ゲルマニウム系単結晶エピ成長技術の開発（東京工業大学）

＜H22 中間目標＞Si と Ge 単結晶薄膜のヘテロ接合を用いたボトム用単接合太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として Ge 単結晶薄膜のキャリア拡散長として Ge エピタキシャル膜のウェハレベルでの膜厚と同程度（キャリア寿命  $10\mu\text{s}$ ）を目標とする。H26 最終目標：ガラス基板上に形成した単結晶 Si 基板上に単結晶 Ge 薄膜を活性層として作製した、ボトムセル用ヘテロ接合型太陽電池で変換効率 10%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。＞

$\text{Si}_2\text{H}_6$ - $\text{GeF}_4$  系原料ガスを用いる反応性熱 CVD 法により、Ge[100]基板を用いたホモエピタキシャル成長の条件を検討し、 $350^\circ\text{C}$  で表面モルフォロジーに優れたホモエピ膜の作製条件を確立した。Si[100]基板を用いて、平成 21 年度に確立したホモエピタキシャル成長条件を用いて、Si 上の Ge のヘテロエピタキシャル成長条件を検討した。この条件では、結晶性、及び、Ge 組成が低下するという問題点が明らかとなり、ガス流量比、反応圧力、基板温度について再度、検討を進めた。その結果、 $300^\circ\text{C}$  以下（ $275^\circ\text{C}$ ）の条件において、堆積速度は遅いものの表面モルフォロジーに優れた Ge 組成の高いエピ膜を作製できることを明らかにした。この条件を用いて Si 基板上に Ge を堆積し、太陽電池の試作を行ったが、Ge 膜厚が予想以上に薄く、発電を確認するに至らなかった。この問題を解決するため、見出した Si のヘテロエピタキシャル条件により、Ge のエピタキシャル seed 層を作製し、Ge のホモエピタキシャル成長条件との組み合わせによる Ge 膜の成長の検討の取り組みを開始した。これを用いて、太陽電池の再試作を行う予定である。

＜成果発表件数＞特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：3（3）、研究発表・講演：7、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 7) フッ素系イオン制御プラズマプロセスの開発（東北大学）

＜H22 中間目標＞産業技術総合研究所と協力してバンドギャップ 0.9eV の Ge あるいは Si/Ge による単接合太陽電池で変換効率 8%を達成する。その要素技術として成長温度  $400^\circ\text{C}$  以下でバンドギャップ 0.9eV の結晶質ゲルマニウム系薄膜で欠陥密度（ダングリングボンド密度）を  $10^{16}/\text{cm}^3$  台とすることを目標とする。H26 最終目標：産業技術総合研究所と協力してバンドギャップ 0.9eV の Ge あるいは Si/Ge による単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として成長温度  $400^\circ\text{C}$  以下でバンドギャップ 0.9eV の結晶質ゲルマニウム系薄膜で欠陥密度（ダングリングボンド密度）を  $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  以下とすることを目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。＞

平成 20 年度は、中性粒子ビームによる Ge 成長のため、 $\text{GeH}_4$  および  $\text{GeF}_4$  供給対応のガス導入系を導入し、既設の中性粒子ビーム装置に接続して、初期的な成膜可能性について検討した。平成 21 年

度は、上記水素中性粒子ビームと  $\text{GeF}_4$  による Ge 堆積を試み、 $\text{GeF}_4$  の吸着確率の違いから、Ge 成膜速度の基板種類依存性が大きいことがわかった。特に Si や  $\text{SiO}_2$  に比べプラスチック基板への成長速度が速いことが分かった。しかし、結晶性の評価では膜は Ge 結晶ではなく  $\text{GeO}_x$  になっていることが判明した。チャンバーからの酸素放出の抑制や吸着確率の向上のためにパルス変調プロセスを適用して効果が見られた。しかし、このガス系では高速で緻密な成膜は難しいと判断した。平成 22 年度は、更なる高付着率を持つ M0 プリカーサを用いてより緻密で高速な成膜を目指して、中性ビームエネルギー、フラックス、プロセス室圧力、基板温度の依存性を評価した。高付着率を持つプリカーサを用いることで、膜中にカーボンの成分が若干残るものの、デポレートは大きく向上した。また、ビームのパルス化、基板温度の極低温化を行うことで、プリカーサの吸着確率および表面反応を促進させ、不純物濃度を低減、高密度な成膜が可能になることを確認した。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 8) 擬単結晶固相成長技術の開発(東海大学)

<H22 中間目標 : バンドギャップ 0.9eV の擬単結晶ゲルマニウム等を用いた太陽電池で変換効率 8% を達成する。その要素技術として、波長 1,000nm で 30%以上の分光感度を目標とする。H26 最終目標 : バンドギャップ 0.9eV の擬単結晶ゲルマニウム等を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として、波長 1,000nm で 50%以上の分光感度を目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

金属誘起結晶化によるシード層形成では、SiGe シード層形成過程において、Si と Ge の共晶温度 ( $420^\circ\text{C}$ ) 以下のプロセスでは、SiGe の結晶化は起こるものの、1 週間以上時間を要し実用的ではないこと、また  $450^\circ\text{C}$ まで上昇させることで処理時間は 4 時間程度にまで短縮できるが、Ge の分離が著しいことが分かった。現在、 $430^\circ\text{C}$ 程度に SiGe 結晶化と処理時間の両者を両立できる条件を模索中であり、平成 22 年度末までには良質な SiGe シード層の実用的な形成法が得られる見込みである。結晶シリコン基板をシード層とし、擬単結晶 Ge の成長を検討している。電子ビーム蒸着及びスパッタにより擬単結晶を直接製膜する方法と非晶質製膜後の固相成長により結晶化させる方法を夫々比較した結果、直接製膜と固相成長の双方で電子ビームによって製膜した試料から擬単結晶を得ることに成功した。現在、原因について究明中であるが、酸素や水素等の不純物が影響している可能性が高い。この擬単結晶 Ge 膜を用いて現在太陽電池の試作中であり、今年度中に報告の予定である。欠陥処理については、水素プラズマ、高圧水蒸気等の検討を行ったが、Ge 濃度が高い程処理効果は少なく、現状では有効な手法は見つかっていない。今後、水素以外の元素による処理の検討を予定している。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 2 (0)、論文(査読付) : 6 (6)、研究発表・講演 : 21、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 9-1) ヘテロ接合デバイス化技術の開発(産業技術総合研究所)

<H22 中間目標 : バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウム、シリコンゲルマニウムスズなどを用いたヘテロ接合太陽電池で、変換効率 8%を達成する。H26 最終目標 : ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

光電子分光法により、n 型単結晶シリコンとアモルファスシリコンならびに酸素濃度 4at%のアモルファス酸化シリコンの価電子帯におけるバンドオフセットを評価したところ、それぞれ 0.11eV ならびに 0.27eV であった。単結晶シリコンとアモルファス炭化シリコンの価電子帯におけるバンドオフセットは、炭素濃度を 8at%から 15at%に増加させると、0.25eV から 0.36eV に増加した。単結晶シリコンと i 層の価電子帯におけるバンドオフセットの増加につれて、HIT 型ヘテロ接合太陽電池の曲線因子が減少することが明らかになり、太陽電池特性を向上させるためには、バンドオフセットの小さい材料を採用すべきことが示唆された。単結晶ゲルマニウム基板に対してフッ酸洗浄を行うと表面に酸化ゲルマニウム膜が残存し、当該基板を用いた HIT 型ヘテロ接合太陽電池の特性を低下させることが示唆された。単結晶ゲルマニウム基板を過酸化水素中でいったん酸化させ、その後のアニール処理により酸化ゲルマニウムを熱脱離させることで、清浄なゲルマニウム表面が得られることが明らかになった。酸化と熱アニールの組合せによる洗浄を施した p 型単結晶ゲルマニウム基板に対して、アモルファスシリコンの i 層、n 層を用いて作製した HIT 型ヘテロ接合太陽電池において、基板と i 層のバンドギャップ差が大きいにも関わらず、1,900nm 程度までの長波長領域においても電流を取り出すことができた。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 2、新

聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

9-2)ヘテロ接合デバイス化技術の開発ー超高周波プラズマ（三菱重工業）

＜H22 中間目標：単結晶あるいは擬単結晶シリコン-ゲルマニウム-スズ薄膜を用い、これにヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 8%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。H26 最終目標：ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。＞

a)微結晶 SiGe 発電層での試作と温度特性評価

ヘテロ接合界面の組成をステップ状に変更したバッファ層を設けることで、結晶性、発電効率、温度特性が改善されることを見出した。

b)ヘテロ接合デバイスの作製および評価

現状利用可能なナローバンドギャップ材料である単結晶 Ge を用いてヘテロ接合デバイスの作製、評価を行っている。ここで、Ge は清浄表面を得るのが難しい材料であるが、AES と LEED を用い、ケミカルプロセスとドライプロセスを組み合わせることで清浄表面が得られていることを観測した。また、a-Si を用いヘテロ接合を形成、a-Si の膜厚や c-Ge の界面処理による影響を調査し、特定の界面処理が変換効率向上に非常に有効であることを見出した。最適化を行うことで変換効率を 4.23%まで向上させた。

c)温度特性の評価

同開放電圧の Ge ホモ接合セル（理論値）よりも良好な温度特性が得られていることを確認した（ホモ：-1.8%/℃、作製したセル：-1.3%/℃）。バンドオフセット評価についても IPE を用いて a-Si/c-Ge 電導帯のオフセット評価を実施。

＜成果発表件数＞特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：4、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

9-3)ヘテロ接合デバイス化技術の開発ー低ダメージ成膜（京セラ）

＜H22 中間目標：バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウム、シリコンゲルマニウムスズなどの単結晶基板を用いたヘテロ接合太陽電池で、変換効率 8%を達成する。その際の特性値として、開放電圧 0.3V 以上を目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。H26 最終目標：ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。＞

a)ヘテロ接合形成前表面処理

エッチングガスを用いた大面積均一エッチング条件を確立した。表面ラフネス増大回避のため、低エッチングレート（約 4nm/min）で Si 基板上の熱酸化膜除去を確認した。繰り返し再現性・エッチング潜伏期間の有無などについても調査した。また、Si[111]両面ミラー基板においてダブルヘテロ構造を作製した。 $\tau$ は、ウェット処理（希 HF 処理）の方がドライエッチング処理よりも大きく、ドライエッチング処理で低 $\tau$ となる原因（プラズマダメージ、表面終端状態など）を調査中である。ウェット処理による $\tau$ 改善評価については、処理法を探索中である。現在までに、化学パッシベーション（キンヒドロン/メタノール処理）による $\tau$ 値の約 50%まで到達している（ $\tau$ は大気中測定）。引き続き Ge 基板も用いて条件最適化・再現性向上・表面状態安定化などの改善を実施していく。

b)薄膜堆積（セル作製）

平成 22 年度に使用装置の新チャンバーを立ち上げる。低電力 RF 電源を導入し、プラズマダメージの低減とプロセス条件の安定性確保を図る。

c)バンドオフセット制御

使用チャンバーへの Ge ガス系統増設、および新チャンバーへの各種ガス系統導入準備、不純物ガス検出用 Q-MASS 設置などを行った。

＜成果発表件数＞特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：2、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

10)ワイドギャップカルコゲナイド系太陽電池の開発（産業技術総合研究所）

＜H22 中間目標：バンドギャップ 1.7eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 9%を達成する。そ

の要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命 1ns 以上、開放電圧 0.9V 以上、近赤外から吸収端近傍の波長での内部量子効率 90%以上を得ることを目標とする。H26 最終目標：バンドギャップ 1.8eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 12%を達成する。>

a) 硫黄系太陽電池の開発

CIGSSe 系材料製膜装置を設計・導入し、CIGSSe 系薄膜の堆積実験に着手した。また、ワイドギャップ CIGSSe 太陽電池の高効率化技術の検討を行い、バンドギャップ 1.7eV の CuGaSe<sub>2</sub> 太陽電池で変換効率 9.7%を達成した。さらに、硫黄系ワイドギャップ太陽電池の作製と高性能化に着手した。

b) 単結晶太陽電池作製技術

ワイドギャップ材料バルク単結晶育成装置を導入した。この装置を用いて、CuInSe<sub>2</sub> のバルク単結晶の育成に成功した。また、CIGSSe 系混晶のバルク単結晶の育成に着手した。これを基板として CIGSSe 薄膜の作製を行う予定である。

c) 評価技術の開発

CIGSSe 系材料の欠陥および表面・粒界・バルクの評価に着手した。また、粒界領域のバンド湾曲の組成依存性の評価に着手し、局所領域の禁制帯幅の計測装置を設計した。さらに凹凸<10nm の縦貫断面を作製可能な技術を確立した。また、光-走査ケルビンプローブ顕微鏡を用いて、積層方向の電位プロファイルを評価する技術を確立した。

本研究開発を進めるにあたり、海外の研究協力機関である Helmholtz Zentrum Berlin の CIGS 系太陽電池研究グループの代表者である H. W. Schock 氏を招き、評価技術に関する課題を議論するとともに、今後の方向性について議論した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：2、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

11) 構造制御ワイドバンドギャップ化合物太陽電池の開発（パナソニック電工）

<H22 中間目標：バンドギャップ 1.7eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 9%を達成する。その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命 1ns 以上、開放電圧 0.9V 以上、近赤外から吸収端近傍の波長での内部量子効率 90%以上を得ることを目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。H26 最終目標：バンドギャップ 1.8eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 12%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

a) 光吸収層のバンドギャップ分布制御技術

デバイス・シミュレーションからステップ形のバンドギャップ分布で高効率化を確認。液体ソースを用いたスプレー塗布熱分解法（SPD）で光吸収層 Cu(In,Ga)S<sub>2</sub> 膜の膜厚、組成比、バンドギャップ制御を達成。また、溶液調製等で太陽電池に適した抵抗率 100-10,000 Ω cm への制御に成功。目標バンドギャップ 1.7-1.8eV に制御できる光吸収層に適した材料に目処が立った。また、製膜装置からの不純物混入による効率低下原因を究明。不純物混入防止策を施した結果、基本構成の CuInS<sub>2</sub> 太陽電池の短絡電流が約 5 倍に増加し、効率 3.8%を得た。

b) 界面制御技術

SPD 法により、太陽電池に適した低キャリア濃度 10<sup>12</sup>/cm<sup>3</sup>、高移動度 30cm<sup>2</sup>/V・s の界面層 In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 膜の作製に成功。また、界面層 In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 膜の大気アニールでの酸化による低抵抗化が太陽電池短絡発生の原因であることを究明。界面層と光吸収層の連続製膜で短絡防止に成功。初期的な結果ながら、ワイドバンドギャップ光吸収層と組み合わせた太陽電池で開放電圧 0.71V を達成した。

c) 裏面コンタクト制御

デバイス・シミュレーションから光吸収層と裏面コンタクト層のバンドギャップ構成の最適化で短絡電流増加を確認した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：6（2）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：8、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

12) 革新的ワイドギャップ材料太陽電池の開発（産業技術総合研究所）

<H22 中間目標：バンドギャップ 1.8eV 以上系太陽電池での変換効率 9%を達成する。その要素技術として、以下を目標とする。ワイドギャップ材料において少数キャリア寿命 1ns 以上、拡散長 0.3 μ m 以上。1.9eV 以上（波長 650nm 以下）で光吸収を持つ（量子効率 3%以上）GaP 基板上 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>P 量子ドット太陽電池の作製。10 層以上の InAs 量子ドット超格子を形成し、顕微 PL 測定により、中間バンド形成が来ていることを確認する。In(Ga)As 系量子ドット太陽電池において波長 1,100nm で量



子効率で 10%以上を達成する。H26 最終目標：InGaP/GaP 量子ドットを用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。InAs、InGaAs 系量子ドットを用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

MBE 法において、As<sub>2</sub> 分子線や成長中断法を用いることにより、歪補償層を用いることなく、100 層以上整列した In<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As 量子ドット多積層構造の作製に成功した。また、各ドットが電子的に結合した多積層量子ドット超格子を形成するため、量子ドット間を 2nm として 20 層の多積層化にも成功した。フォトルミネッセンスの励起光強度依存性から、世界で初めて 20 層以上の多積層量子ドット超格子のミニバンド（中間バンド）の形成を確認した。これらの技術を用いて試作した量子ドット太陽電池の変換効率はソーラーシミュレータで測定した実測値でも 12.6%を示し、世界トップレベルである。歪補償技術による量子ドット太陽電池では、量子ドット間バリア層の薄膜化に伴って N 濃度を増加する必要がある、それによって Voc が低下する問題がある。本研究では歪補償層を用いないため、ドット間を 3nm としても Voc はほとんど低下しないことがわかった。

また、In<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As 量子ドット層上に 2nm の In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As キャップ層を成長することにより、量子ドットの光応答特性が 1,100nm にまで長波長化することを見出した。50 層の In<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As/In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs 量子ドット太陽電池の作製により、1,100nm で外部量子効率 2.5%を達成している。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：9（4）、研究発表・講演：13、新聞・雑誌等への掲載：2、展示会出展：0

### 13) 酸窒化物系ワイドギャップ材料の開発（物質・材料研究機構）

<H22 中間目標：バンドギャップ 2.8eV 程度の InGaN を用いた太陽電池において変換効率 5%を達成する。そのための要素技術として 2.8eV 程度の InGaN で、Insec のライフタイム、InGaN を p 型化しキャリア濃度  $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$  以下を目標とする。H26 最終目標：バンドギャップ 2.5eV 程度の InGaN を用いた太陽電池において変換効率 12%を達成する。そのための要素技術として 2.5eV 程度の InGaN で 5nsec のライフタイムを目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 薄膜の高品質化と良好な接合を形成することが本項目達成にとって重要である。InGaN 薄膜の E<sub>g</sub> を InN 量を増大させることで 2.6eV まで低減化し、時間分解フォトルミネッセンスから InGaN 薄膜で 280psec のライフタイムを確認した。InGaN 薄膜へ  $10^{19}/\text{cm}^3$  レベルの Mg ドーピングを行い、光電子分光測定から p 型化を示唆するフェルミレベルのシフトとゼーベック効果による p 型傾向も確認することができた。太陽電池として、GaN と透明高分子膜とのショットキー接合から FF=0.69 を達成。InGaN 薄膜を用いて短絡電流の向上を確認することができたが、FF=0.3 と性能の向上が望まれる。SPring8 での光電子分光を用いて評価した価電子帯トップのエネルギー位置をもとにバンドギャップを考慮して、In 組成に対する伝導帯ボトムエネルギーを求めた。キャリア輸送の観点からバンドオフセットを見積もることができた。InGaN 薄膜の向上と p 型化を示唆するデータから pn 接合太陽電池に向け接合を形成できる段階になってきたと考えられる。酸化物材料として、ZnO 系薄膜を有機金属化学堆積法で作製した。品質を向上させるために薄膜成長表面での理論的な理解を試みた。c 軸配向しやすい ZnO 系材料は c 面方向に極性構造を持つために薄膜成長様式・水素雰囲気に対する安定性に大きな差が生じることが明らかとなった。

<成果発表件数>特許出願（外国）：3（1）、論文（査読付）：6（6）、研究発表・講演：16、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

### 14) 酸化物ワイドギャップ材料の開発 A（東京工業大学）

<H22 中間目標：高品位ワイドギャップ酸化物半導体を用いたバンドギャップ $\sim 2\text{eV}$  の太陽電池で変換効率 5%を達成する。その要素技術として、結晶シリコンよりもイオン化ポテンシャルが 0.5eV 以上大きいバンドギャップが $\sim 2\text{eV}$  の p 型酸化物半導体で裾状態密度  $10^{19}/\text{cm}^3$  以下を目標とする。H26 最終目標：ワイドギャップ酸化物半導体を用いた太陽電池で、変換効率 12%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

#### a) ワイドギャップ酸化物半導体の探索

価電子帯上端がカチオンの s<sup>2</sup> 軌道から構成され高いホール移動度が期待できる新規酸化物 p 型半導体として SnO の高品位薄膜の作製を行い、Cu<sub>2</sub>O を除く他の Cu 系 p 型酸化物半導体に比べて高い移動度を示す薄膜が得られる条件を確立した。さらにこの新規 p 型酸化物半導体 SnO のカチオン置換ドーピングによる n 型化を試みた。ドーパントには Sb<sup>3+</sup>を選択し、SnO に Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を添加した焼結体をターゲットに用いた PLD 法により薄膜試料を作製した。ノンドーパ試料が p 型の伝導性を示すこと

に対し Sb ドープ試料は n 型となった。Sb10%添加試料の電子濃度と移動度はそれぞれ  $9.9 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 、 $0.4 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  であった。

b) アモルファス酸化物半導体 a-IGZO 薄膜の高品位化

まず n 層として期待される n 型アモルファス酸化物半導体であるアモルファス In-Ga-Zn-O (a-IGZO) の太陽電池への可能性を探るために光電流測定を行った。a-IGZO 薄膜は室温で製膜しても高移動度、低欠陥濃度で TFT のチャンネル層として高い性能を示している酸化物半導体である。様々な条件で製膜した a-IGZO の  $\eta$ 、 $\mu$ 、 $\tau$  vs.  $\sigma_D$  を  $h\nu=3.1\text{eV}$ 、 $\text{photon flux} < 5 \times 10^{13}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$  の条件下で求めたところ、a-IGZO 薄膜の  $\eta$ 、 $\mu$ 、 $\tau$  は  $\sigma_D$  の増加に従って直線的に増加した。この結果からフェルミ準位の上昇に伴って再結合中心が減少しキャリア寿命が延びたと考えることができる。この結果より太陽電池としての可能性が期待されるが、実験条件などを更に詳細に詰める必要がある。

c) p 型酸化物半導体  $\text{Cu}_2\text{O}$  薄膜の高品位化

既存の酸化物 p 型半導体  $\text{Cu}_2\text{O}$  高品位薄膜作製に取り組み、単結晶と同等な輸送特性を示す高品位薄膜の作製条件を確立した。しかしながら光学測定によるギャップ内準位の評価により  $\sim 10^{18}/\text{cm}^3$  程度のギャップ内準位の存在が示唆され、これらギャップ内準位の低減が次なる課題となっている。

d) ギャップ内準位の硬 XPS 測定による観察

ギャップ内準位の存在は n 型の a-IGZO、p 型の  $\text{Cu}_2\text{O}$  何れにおいても光学スペクトルで観察されているが、これではギャップ内のどこにどのような準位があるか不明であった。そこで SPring-8 のビームラインを用いて硬 XPS 測定を行ったところ、a-IGZO、 $\text{Cu}_2\text{O}$  ともに価電子帯直上に多量の準位が存在していることが明らかとなった。またこれらの準位は製膜条件の最適化で低減できることも明らかとなった。

e) 高品位 SnO 薄膜の作製

先にも述べたとおり新規酸化物半導体 SnO の高品位薄膜作製に取り組み、PLD 法によるエピタキシャル薄膜の作製手法を確立し、高移動度 p 型薄膜、ドーピングによる n 型薄膜の実現につながった。ヘテロ接合の作製については、高品位  $\text{Cu}_2\text{O}$  薄膜を用いたデバイス作製に取り組んでいるが、芳しいデータは得られていない。そこで  $\text{Cu}_2\text{O}$  薄膜上に他の薄膜を成長させる際の Cu の価数変化を詳細に調べたところ、界面付近では Cu の価数が 2 価になっていることが明らかとなってきた。 $\text{Cu}_2\text{O}$  を用いた高性能デバイス実現には界面における Cu の価数制御技術確立が課題であり、界面作製条件の最適化に取り組んでいる。また、 $\text{Cu}_2\text{O}$  の問題とは区別して a-IGZO の太陽電池としての可能性を評価するために p-Si と n 型の a-IGZO のヘテロ接合を用いた太陽電池を試作した。変換効率は 6.1% を達成したが  $V_{oc}$  が  $\sim 0.38\text{mV}$  と小さい。これを改善するために In-Ga-Zn の組成比を変えることでバンドオフセットを大きくすることに取り組んでいる。新規酸化物半導体 SnO で p/n 両型の伝導性制御が実現したことから、これを用いたホモ接合を試作し評価を行った。整流特性は得られたものの逆バイアス印加時のリーク電流が大きいなど問題点があり、SnO のキャリア濃度制御手法の確立などと合わせて改善に向け取り組んでいる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 4 (4)、研究発表・講演 : 12、新聞・雑誌等への掲載 : 3、展示会出展 : 0

15) 酸化物ワイドギャップ材料の開発 B (豊橋技術科学大学)

<H22 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率 5% を達成する。その要素技術としてバンドギャップ 1.7-1.8eV の  $\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O}$ ・ $\text{Cu-Ag-O}$  単一配向膜を実現し、これを用いて 0.8V の開放電圧を目標とする。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率 12% を達成する。その要素技術としてバンドギャップ 1.7-1.8eV の  $\text{Cu}^{1+}\text{-Cu}^{2+}\text{-O}$ ・ $\text{Cu-Ag-O}$  単一配向膜にて移動度  $100\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  を目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25% 達成に寄与する。>

a) 多接合太陽電池の光吸収層用ワイドバンドギャップ高品質酸化物材料の開発とバンドギャップ制御技術の確立

0.95-1.65eV-CuO 層ならびに 2.1eV- $\text{Cu}_2\text{O}$  層形成ならびにバンドギャップ制御技術、単配向・高光電流応答 CuO 層ならびに単配向・室温バンド端発光  $\text{Cu}_2\text{O}$  層形成など高品質化技術の確立を達成した。

b) 単接合太陽電池の形成と高性能化

サブストレート型ならびにスーパーストレート型  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$  太陽電池形成技術、ならびに極めて優れた整流性を有する  $[111]\text{Cu}_2\text{O}/[0001]\text{ZnO}$  高品質積層体を形成する高品質積層体形成技術を開発した。

c) 多接合太陽電池の構築

Ga:ZnO/ $\text{Cu}_2\text{O}$  積層体の形成に着手しオーミック電極選定の見込みである。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0) 、論文(査読付) : 0 (0) 、研究発表・講演 : 42、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 16) 化合物系タンデムセルの開発(産業技術総合研究所)

<H22 中間目標 : 化合物多接合太陽電池で変換効率 20%を達成。Ge 基板上でバンドギャップ 1.0-1.4eV の CIGS 系太陽電池により変換効率 13%を達成。H26 最終目標 : 化合物多接合太陽電池で変換効率 25%を達成。>

タンデム太陽電池を作製するために必要な要素技術がほぼ確立できており、中間目標は今年度中に達成可能と考える。

##### a) モノリシックタンデム技術

透明導電膜上太陽電池の高効率化に関して、Na の導入法の検討を行い、Na の拡散を促進する手法を見いだした。また、セレンラジカルを用いることで、通常の製膜温度より 100°C も低い 450°C でも変換効率 16%以上の高効率を実現した。

##### b) メカニカルタンデム技術

GaAs 基板から太陽電池層を剥離する技術を確立した。また、剥離した太陽電池層を TC0/ガラス基板上に接着する技術の開発に着手した。また、剥離した GaAs 系太陽電池と他の太陽電池のメカニカルスタックによるタンデム太陽電池の作製に成功した。

##### c) ボトムセルの開発

Ge 基板の表面処理技術を開発し、組成を制御することでエピタキシャル薄膜の成長に成功した。また、Ge 基板上の CIGS 太陽電池の作製に着手した。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0) 、論文(査読付) : 0 (0) 、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 17) ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 A(産業技術総合研究所)

<H22 中間目標 : 閾値エネルギー  $2.5E_g$  ( $E_g$  はバンドギャップエネルギー) 以上で多重励起子生成を実現する。 $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して励起子生成の量子収率 150%以上を達成する。 $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して入射光強度の  $n$  乗 ( $n \geq 1.2$ ) の依存性を有する光電流を実現する。H26 最終目標 : Si ナノ微結晶/高分子構造等を用いた単接合太陽電池において変換効率 10 %を達成する。>

ナノシリコン結晶は、電気化学エッチングおよび液体中でのレーザーアブレーション法により作製した。この方法により、発光強度が強く、かつ、バンドギャップエネルギーが異なる 2 種類のナノシリコン結晶を得た。水中でナノ秒レーザーアブレーションにより作製したナノシリコン結晶は、青色発光を示し、大気中でも安定であった。また、溶液中に浮遊する小さなナノシリコン結晶の  $TiO_2$  ナノチューブテンプレートへの堆積法を開発した。このような複合物はガラス基板上に分散したナノシリコンよりも速い PL 発光強度の減衰を示したが、ナノシリコン結晶における励起子多重生成の存在を実証するに至っていない。しかし、ナノシリコンと  $TiO_2$  の複合物は太陽電池特性を示しており、ハイブリッド太陽電池の可能性を示している。これまでの研究から、ガラス上に分散させたナノシリコン結晶において、PL 強度および光起電流が励起エネルギーに対し非線形増加する事を確認している。そこで、この現象を利用し、本研究開発では、高分子 (MEH-PPV および P3HT) とナノシリコン結晶間においてエネルギー移動することを確認した。このような複合材料の系では、増強された PL 発光の減衰がナノシリコン結晶のみの系と比較し、より強いことを明らかとした。しかし、高分子によるバックグラウンドの発光強度が非常に強く、ナノシリコン結晶中において励起子多重生成現象の有無を実証するに至っていない。一方、ナノシリコン結晶と高分子を混ぜ合わせた材料では、ナノシリコン結晶と高分子界面でバルクヘテロ接合が形成され、光起電力が発生する事を実験的に観測することに成功した。そこで、このような複合材料系におけるバルクヘテロ接合の最適化と、さらなる性能向上のため、ナノシリコン結晶と高分子の特性自体について研究を行った。その結果、グローブボックス内で p 型のナノシリコン結晶を高分子とブレンドした複合材料では、光安定性が飛躍的に改善される事が明らかとなった。特に、ナノシリコン結晶と P3HT とをブレンドした複合材料では、コンダクティビティーの明/暗比が 156 まで増大した。さらに、この系における光起電力は、ナノシリコン結晶の濃度が最大 40wt%まで発生し、この光起電流はナノシリコン結晶の濃度の関数として表すことができる事を見出した。しかし、現段階では太陽電池の最適化を行っておらず、太陽電池性能は低い。ブレンドした材料内における励起子の解離条件を満たしつつ、キャリアの輸送特性を改善するため、ポーラス状の  $TiO_2$  ナノチューブ内にナノシリコン結晶/P3HT 複合材料を詰め込み、縦方向に配列させた。その結果、キャリア輸送特性が大幅に改善されることが明

らかとなった。また、ナノシリコン結晶/ナノカーボンハイブリッド型太陽電池セルを開発するため、レーザーアブレーション法を水中で用い、光感受性のある自己組織化したナノシリコン結晶構造体の合成にも着手している。この工程では、連続的にプラズマと熱処理を施すことが可能であり、フラーレンやカーボンナノチューブのような有機材料をナノ構造体に堆積させる事ができる。そのため、この手法によって作製したナノシリコン結晶にフラーレンを堆積したハイブリッド材料では、ナノシリコン結晶とフラーレンが電氣的に結合する。その結果、このような系で受光感度を有するヘテロ接合が形成される事を明らかにした。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0) 、論文(査読付) : 18 (16) 、研究発表・講演 : 25、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 1

#### 18) ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 B (産業技術総合研究所)

<H22 中間目標 : 半導体 CNT の純度を 90%以上まで向上させる。CNT のバンドギャップを遠赤外域の 0.2-1.3eV の範囲で制御し、0.1-0.5V の開放電圧を達成する。バルクヘテロ接合 CNT 太陽電池の量子効率の最大値を 50%以上とする。バンドギャップの 3 倍以上のエネルギーかつ  $1\text{mJ}/\text{cm}^2$  以下の強度の光に対して、1 光子の吸収において 2 個以上の電子-正孔対の生成を確認する。H26 最終目標 : CNT を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

単層 CNT 粉末の分散・分離、超音波・超遠心分離機の最適条件を検討し、95%以上高純度半導体単層 CNT を抽出する技術を開発した(世界トップクラス)。また、平均直径 1.1nm を持つ単層 CNT を用いて、簡単かつ合理的な方法で、バンドギャップを遠赤外域の 0.8-1.3eV の範囲で制御を達成した。更に、バルクヘテロ接合太陽電池において開放電圧 ( $V_{oc}$ ) 0.57V (P3HT-PCBM/半導体単層 CNT) 、0.37V (P(NDI2OD-T2)/半導体単層 CNT) 、0.14V (ナノシリコン/半導体単層 CNT) を達成した。さらに、P3HT-PCBM バルクヘテロ接合有機太陽電池に半導体単層 CNT を加えることにより、量子効率は可視光領域で最大 65%以上(最高 73%) を達成し、変換効率は従来の 2.9%から 3.15% (最高 3.4%) まで向上した。本研究開発で開発した技術は様々なバルクヘテロ接合有機太陽電池に応用することができる。現時点においては P3HT-PCBM-半導体単層 CNT バルクヘテロ接合太陽電池の変換効率と量子効率の励起エネルギー依存性から、MCG 効果は確実に証明できていない。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0) 、論文(査読付) : 0 (0) 、研究発表・講演 : 3、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 1

#### 19) ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 C (九州大学)

<H22 中間目標 : 閾値エネルギー  $2.5E_g$  ( $E_g$  はバンドギャップエネルギー) 以上で多重励起子生成を実現する。 $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して励起子生成の量子収率 150%以上を達成する。 $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して入射光強度の  $n$  乗 ( $n \geq 1.2$ ) の依存性を有する光電流を実現する。H26 最終目標 : 多重励起子太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として  $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して光電流量子収率 100%以上を目標とする。>

「閾値エネルギー  $2.5E_g$  ( $E_g$  はバンドギャップエネルギー) 以上で多重励起子生成を実現する」という目標に対しては、量子ドット増感太陽電池の光電流の照射光強度依存性を光子エネルギーをパラメータとして測定し、照射光の光子エネルギーの増加に伴い、依存性が linear から superlinear へと変化する多重励起子生成を示唆する結果を得た(中間目標の達成に目処)。また、「 $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して励起子生成の量子収率 150%以上を達成する」という目標に対しては、量子ドット増感太陽電池の光電流の照射光波長依存性を測定し、波長 500nm 以下でキャリア生成を確認した。光電流生成効率は短波長ほど増加した。今後、絶対値較正により、量子収率を得る予定である(中間目標の達成に目処)。「 $h\nu \geq 3.5E_g$  の光に対して入射光強度の  $n$  乗 ( $n \geq 1.2$ ) の依存性を有する光電流を実現する」という目標に対しては、量子ドット増感太陽電池の光電流の照射光強度依存性を測定して、光子エネルギーが  $2.8E_g$  の光に対して、照射光強度の 2 乗の依存性を有する光電流を実現した(中間目標を達成)。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0) 、論文(査読付) : 7 (2) 、研究発表・講演 : 48、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 20) ナノシリコン/ナノカーボンを用いた新概念太陽電池の検討 D (東北大学)

<H22 中間目標 : カーボンナノチューブの構造制御により  $E_g$  を 0.2-1.3eV の範囲で制御し、 $V_{oc}=0.1-0.5V$  を達成する。エネルギー  $>3E_g$ 、強度  $<1\text{mJ}/\text{cm}^2$  の光入射において、ヘテロ界面及び pn 接合内蔵 CNT を用いた多重励起子生成利用太陽電池の原理を実証する。(1 光子吸収 2 個以上電子-

正孔対形成を確認する。) H26 最終目標: pn 接合内蔵 CNT 太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

プラズマ CVD によるカーボンナノチューブ合成時の触媒膜圧、合成温度、ガス圧力、合成時間等を制御することによって、 $E_g=0.2-1.3\text{eV}$  の範囲の CNT を合成することに成功した。また、CNT にフラーレンを内包させることによって、仕事関数を制御した CNT を形成した。この構造制御した空の CNT 及びフラーレン内包進化 CNT を用いた薄膜状太陽電池を作製し、ソーラーシミュレータ及び発光ダイオードを用いて、紫外・可視領域、及び近赤外領域の光照射下で電流-電圧特性評価を行い、最大で各々  $V_{oc}=0.53\text{V}$  と  $0.32\text{V}$  を達成した。CNT で構成された太陽電池の場合に、強度が単位時間あたり  $3\text{mJ}/\text{cm}^2$  以下の光入射において、エネルギーを変化させて出力電力を測定し、エネルギーが約  $2\text{Eg}$  以上の条件で、変換効率が徐々に増加する傾向が観測された。この現象は、Ag/n 型 Si の太陽電池の場合には観測されていないため、CNT における多重励起子生成の可能性を示唆している。また、単独 1 本の pn 接合内包 CNT の形成に成功し、直径  $1\mu\text{m}$  に集光したレーザー照射による電圧-電流測定を遂行中である。

<成果発表件数>特許出願(外国): 0 (0)、論文(査読付): 9 (9)、研究発表・講演: 51、新聞・雑誌等への掲載: 0、展示会出展: 0

## 21) 単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討 A (産業技術総合研究所)

<H22 中間目標: 有機/無機ヘテロ接合セルで変換効率 1%、 $V_{oc}=E_g-0.3\text{V}$  を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で  $100\text{nm}$  を目標とする。H26 最終目標: 単結晶性有機薄膜ヘテロ接合セルで変換効率 10%、 $V_{oc}=E_g-0.1\text{V}$  を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で  $1\mu\text{m}$  を目標とする。>

有機分子線蒸着装置や昇華精製(トレインサブレーション)装置を導入し、基板上の  $C_{60}$  の結晶成長技術や、有機半導体として最も高い移動度を示すルブレンの結晶成長技術を確立した。結晶の評価を X 線回折および AFM により行った結果、数  $10\mu\text{m}$  以上におよぶ高品質の単結晶が得られていることを確認した。特に、昇華精製法では、数 mm 角かつ厚み数  $\mu\text{m}$  の薄片状のルブレン単結晶の作製に成功している。ルブレン単結晶は静電的吸着により基板への実装が可能であり、太陽電池化に適している。実際に、単結晶ルブレン(p 型)に対して  $C_{60}$ (n 型)薄膜を成長させて、有機半導体単結晶の太陽電池化技術を確立した。一方、ルブレンおよび  $C_{60}$  単結晶の励起子拡散長は、現在過渡吸収分光を導入して測定中である。また、n 型半導体  $C_{60}$  の不純物ドーピング制御を目的として、有機分子線蒸着法によるマグネシウムのドーピング技術を開発した。マグネシウムドーピング量を精密に制御することで、膜の導電率、界面抵抗およびトラップ密度の制御を可能とした。更に、このドーピング膜を陰極バッファ層として導入した  $C_{60}$  と Pc の p-n 接合セルを作製し、太陽電池特性の高性能化に成功した。更に、Si/ $C_{60}$  の有機/無機ヘテロ接合セルは、現在作製中である。また、有機 p-n ヘテロ接合太陽電池の構造最適化により、まず、ルブレン- $C_{60}$  などにおいて高開放電圧  $V_{oc}=E_g-0.3\text{V}$  の発電機構を明らかにした。更に、平成 23 年度から展開予定の研究項目、単結晶性有機薄膜ヘテロ接合太陽電池の開発を、現在前倒しで行っている。具体的には、有機ヘテロ接合セル実現に向けて、有機ヘテロエピタキシャル成長技術の検討を行い、ルブレン単結晶のステップエッジでの  $C_{60}$  結晶の成長を確認した。これは、有機半導体での単結晶-単結晶接合の可能性を示唆するものである。

<成果発表件数>特許出願(外国): 0 (0)、論文(査読付): 0 (0)、研究発表・講演: 5、新聞・雑誌等への掲載: 0、展示会出展: 0

## 22) 単結晶有機半導体を用いた新概念太陽電池の検討 B (東京工業大学)

<H22 中間目標: 有機/無機ヘテロ接合セルで変換効率 1%、 $V_{oc}=E_g-0.3\text{V}$  を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で  $100\text{nm}$  を目標とする。H26 最終目標: 単結晶性有機薄膜ヘテロ接合セルで変換効率 10%、 $V_{oc}=E_g-0.1\text{V}$  を達成する。そのための要素技術として単結晶性有機薄膜の励起子拡散長で  $1\mu\text{m}$  を目標とする>

新規にイオン液体を用いた有機薄膜・単結晶合成のための有機フラックス製膜装置を開発した。また、イオン液体のコンビナトリアル蒸着技術を確立した。イオン液体をフラックスとして用いて、 $C_{60}$  では  $10\mu\text{m}$  程度、ペンタセン、ルブレンでは数  $100\mu\text{m}$  の単結晶の育成にも成功した。また、項目 21) と共同で、ルブレン/ITO 基板上にイオン液体を介して  $C_{60}$  薄膜を堆積し、イオン液体の効果により、大きいグレインサイズの  $C_{60}$ /ルブレン有機/有機ヘテロ接合を作製できた。さらに、極薄のイオン液体の表面張力を活かした接合技術を検討し、長期間にわたる接合力を確認した。中間評価に向けての達成度として、 $C_{60}$  のグレインサイズ  $10\mu\text{m}$  は達成され、さらに他の有機結晶についてもフリースタンディングの数  $100\mu\text{m}$  の単結晶ができるなど、予想以上の成果を得た。一方、励起子拡散

長の測定では、測定自体が難しく、評価できていないので、今後、産業技術総合研究所と共同でさらに検討する。有機/有機ヘテロ接合作製において、イオン液体の効果を確認できた事は大きな成果であるが、太陽電池特性評価までには至っていないので、早急に評価する。また、無機/有機ヘテロ接合の太陽電池については、作製プロセスの検討に着手した。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 3 (1)、研究発表・講演 : 25、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

#### 23) 強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討 A (産業技術総合研究所)

<H22 中間目標 : 有機強相関ヘテロ接合太陽電池を作製し、1eV 以下の低光子エネルギー領域で分光量子効率として 5%以上、2eV (>2Eg) 以上の光子エネルギー領域において、ポンプ-プローブ分光で定量化したキャリア生成増幅率 200%以上を達成する。H26 最終目標 : 有機強相関ヘテロ接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

有機化合物半導体と分子性導体 (TTF-TCNQ 等) との接合を形成し、一般的な金属電極との接合に比べて数倍高い電荷分離効率が得られることを見出した。これらの接合を用いて有機化合物半導体の MIM 型プロトタイプ単結晶デバイスを構築し、有機化合物半導体として世界で初めて光起電力効果の確認に成功した。さらに、本デバイスにおいて、従来の有機太陽電池では不可能であった 1eV 以下の赤外領域の光電変換に成功した。また、単結晶デバイスにおいて励起子拡散長を評価する手法を開発した。本手法を用いて、有機化合物半導体の励起子拡散長が一般的な(単成分)有機半導体の値(数 10nm) よりはるかに大きい 20  $\mu\text{m}$  以上であることを見出した。以上から有機化合物半導体が太陽電池用半導体材料としてきわめて有望なことを確認し、かつ光電変換特性と界面電子状態の相関について重要な知見を得た。これらの作製した素子は単結晶プレーナ型であるため、電極間の電位勾配が小さく正確な分光量子効率の評価には至っていないが、逆バイアス下での測定から 2eV で 2%の量子効率を得た。今後、短チャネル化、薄膜多層化、及び接合に用いる電極の最適化によって目標達成の見込みである。多重励起子生成について、有機化合物半導体 TTF-CA 単結晶において、低温で 2.25eV の光子エネルギーのポンプ光励起により 8-20 個の電荷移動励起子が生成することが明らかになった。今後、キャリア増倍の可能性について検証を進める。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 1 (0)、論文(査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 15、新聞・雑誌等への掲載 : 2、展示会出展 : 0

#### 24) 強相関材料を用いた新概念太陽電池の検討 B (理化学研究所)

<H22 中間目標 : 強相関ヘテロ接合太陽電池を作製し、吸収光子数で規格化した外部電流で定義される分光量子効率として 5%以上を達成する。また、ポンプ-プローブ分光でキャリア増幅を確認し、薄膜ヘテロ接合の基礎吸収端光に比した短波長光照射下での量子効率の増幅率として 2 倍以上を目標とする。H26 最終目標 : 強相関酸化物ヘテロ接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として p、n 層の化学ポテンシャル差と開放電圧の関係を明らかにして開放電圧 0.5V 以上を目標とする。>

10 種類の強相関酸化物と n 型半導体である Nb ドープ SrTiO<sub>3</sub> との整流性接合を作製し、電気特性や光電流アクションスペクトルを評価して、バンド接続の材料依存性を明らかにした。多重キャリア生成が期待しにくい系ではあるが、LaMnO<sub>3</sub> との単一接合で、疑似太陽光下で効率 0.01%、FF=0.63 を達成し、分光量子効率の最大値は 3%程度を達成した。多重キャリア生成が期待できる電荷整列材料では Nb ドープ SrTiO<sub>3</sub> との接合でノッチやスパイクが形成されキャリアを電流として引き抜けないことが明らかとなった。多重キャリア生成に好適な材料を用いて実験的に光電流で増幅効果を検出するためには、光生成電流にこだわることなく、逆バイアスを印加した光検出器モードでの評価を行う必要がある。また、ノッチやスパイクを形成せずにバンド接続にグラデーションをかけるなどデバイス構造の工夫が必要である。一方で、強相関酸化物では少数キャリアの拡散長が 8nm と短いことが解った。これを解決するため、有機太陽電池で採用されているバルクヘテロ接合を可能にする酸化物の組み合わせを探索し、ZnO とペロブスカイトの組み合わせが有効であることが解りはじめた。強相関電子の光励起とこれが生み出す多重キャリア生成のシミュレーションを実行可能な、長時間量子ダイナミクス電子状態計算アプリケーションのプロトタイプを開発した。このアプリケーションを用いることにより、2 次元強相関電子系における多重励起キャリア生成の鍵となる諸量、例えば照射光エネルギーの閾値や多重キャリアの生成量などの定量的評価が可能となった。今後は、現実のモット絶縁体に即したパラメータと多重キャリア生成の関係を吟味して、実証実験に好適な材料やデバイス構造への提言を行っていく。ポンプ-プローブ分光によるキャリア増幅は 5 倍を達成

した。実際の接合で光電流としてキャリアの増幅効果を観測するためには、上記の実験上の工夫が必要不可欠である。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：9（9）、研究発表・講演：31、新聞・雑誌等への掲載：1、展示会出展：0

#### 25) 構造制御ナノ材料を用いた太陽電池（産業技術総合研究所）

<H22 中間目標：金属ナノ材料を用いた太陽電池で変換効率 1%を達成する。そのための要素技術として拡散長  $0.1\mu\text{m}$  を目標とする。H26 最終目標：金属ナノ材料を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。そのための要素技術として拡散長  $10\mu\text{m}$  を目標とする。>

##### a) プラズモン電荷分離技術

平成 20 年度に、単電極特性を調べるために光電気化学的な光電流電圧測定装置を立ち上げた。既存の太陽電池性能評価装置で太陽電池としての評価を行ったが、ほとんど応答は得られなかった。レーザー分光測定のアクションスペクトルからは、プラズモン由来の光電流ではない機構も考えられた。平成 21 年度には、キセノン灯から分光器を通して得られる単色光に対する光応答が殆んど無かった状況から、金属担持方法を様々に変更した結果、銀ナノ粒子の場合、光電流のアクションスペクトルが吸光スペクトルと対応する結果を得、プラズモン励起に起因する光応答であることが示された。IPCE1%（425nm）を確認した。これは従来比で 10 倍以上の値である。また、金属ナノ粒子からの光励起電子が酸化チタン中を移動可能な距離について、光短絡電流値を指標にして光電気化学的に調べたところ、約  $1\mu\text{m}$  の酸化チタン膜厚でも光電流を確認した（拡散長の目標達成）。平成 21 年度後半から現在までに、金や銀のナノ粒子の形状を棒状や三角形状に調製して、光吸収波長を赤外域まで自在に制御する技術を確認した。

##### b) 高効率太陽電池化要素技術

平成 20 年度に、酸化チタンナノ粒子からなる Au ナノコロイド電極を作製し、レドックス電解液を用いた太陽電池を作製、光電変換特性を評価した。一般的に用いられるヨウ素レドックス電解液では Au コロイドが溶解し、光電変換特性を示さなかった。一方、 $\text{WO}_3$  ナノチューブを用いた薄膜電極を作製し、光半導体電極として機能することを明らかにした。平成 21 年度には、Au ナノコロイドならびに酸化チタンナノ粒子からなる光電極ならびにポリマー電解質を用いた太陽電池デバイスの作製、特性評価をおこなった。加えて、CdSe 量子ドット系ならびに色素系において、酸化チタンナノ粒子からなる電極表面をオルトケイ酸テトラエチル（TEOS）により処理することにより、太陽電池の光電流が大幅に向上し、変換効率 2%を達成した。

中間評価に向けての達成度としては、本研究開発では、担当研究員の特色を活かして各要素技術開発を進めてきており、目標値を越える結果も得られ、着実に成果を挙げてきたといえる。これまでに、例えば、金や銀のナノ粒子の形状に異方性を持たせて、光吸収波長を赤外域まで自在に制御する技術を確認した。また、光電流のアクションスペクトルが銀ナノ粒子の吸光スペクトルと対応する結果を得、プラズモン励起に起因することが示され、IPCE1%（425nm）を達成した。最近では棒状の金ナノ粒子（アスペクト比約 3）の光応答の方が球状の金ナノ粒子に比べて数倍大きい結果も得られている。拡散長についても、光短絡電流値を指標にして光電気化学的に調べたところ、約  $1\mu\text{m}$  の膜厚でも光電流を確認できた（目標値の約 10 倍）。さらに、酸化チタンナノ粒子からなる電極表面をオルトケイ酸テトラエチル（TEOS）により処理することにより、CdSe 量子ドット系ならびに色素系における太陽電池の光電流を向上させ、変換効率 2%を達成した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：5（5）、研究発表・講演：16、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 26) メカニカルスタック技術の開発 A（産業技術総合研究所）

<H22 中間目標：分光感度の異なる 2 種類の太陽電池を接合させ、2 端子セルとする際に、接着抵抗  $0.5\Omega/\text{cm}^2$  以下、接着部の透過率 90%以上を達成し、メカニカルスタックセルにおいて、電流を律則する要素セルの 80%以上の電流密度を得る。H26 最終目標：メカニカルスタック技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率 25%を達成する。>

##### a) Si 系単結晶薄膜太陽電池の開発に必要な基板の作製

陽極接合法を応用し、シリコンウェハ/TCO/ガラス基板の接合体を形成できることを見出した。接合機構としては、ガラス中に含まれる陽イオンが陰極側に移動し、接合界面近傍のガラス中に負に帯電した陽イオン欠乏層が形成され、TCO 薄膜とガラス側の酸素イオンが化学結合することによって接合しているものと考えられる。また、接合に必要な温度・電界の関係を把握し、TCO の抵抗率は、

陽極接合後においても低抵抗 ( $<1 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ ) であることを確認した。

b) セル間の電気・光学・機械的接合を可能にする接合方法の検討

表面ラフネス  $R_{ms} 0.3 \text{ nm}$  以下の平坦性に優れた非晶質  $\text{In}_2\text{O}_3$  薄膜を形成させ、同薄膜同士を圧着・加熱し、非晶質相を固相結晶化させることにより電気・光学的接続が可能であることを見出した (抵抗率約  $3 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ 、波長  $400\text{--}1,700 \text{ nm}$  の範囲で吸収  $10\%$ 以下)。現在のところ接合強度は弱く、強度改善を図るため材料及び表面処理方法を検討している。また、フラットパネルディスプレイのドライバーIC を実装するなど電氣的接続材料として使用されている市販の異方導電接着フィルム (導電粒子を均一分散させたエポキシ系樹脂フィルム) の導電粒子分散量を減少させ透明性を改善させた樹脂 (波長  $500\text{--}1,700 \text{ nm}$  の範囲で吸収  $10\%$ 以下) を用い、TCO/樹脂/TCO の接着抵抗の確認 (約  $5 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ )、2 端子メカニカルスタック太陽電池の試作と評価、接合部での課題抽出を行った。張り合わせる太陽電池として、スーパーストレート型 a-Si:H 太陽電池と a-Si:H/c-Si ヘテロ接合型 (HIT) 太陽電池を作製し、前者の裏面電極および後者の表面電極として ITO を用い、導電粒子を両 ITO 電極に接着させることで電氣的接続を図った。その結果、開放端電圧  $1.435 \text{ V}$  (シングルセルの足し合わせ  $1.463 \text{ V}$ )、短絡電流密度  $11.2 \text{ mA/cm}^2$ 、曲線因子  $0.719$ 、変換効率  $11.6\%$  と 2 端子セルとして動作すること、電圧ロス、曲線因子ロスが殆どないことを確認することができた。なお、セル面積は上部セルサイズ (上部 a-Si:H セル  $1.08 \text{ cm}^2$ 、下部 HIT セル  $0.90 \text{ cm}^2$ ) にあわせて計算した。現状の課題として、張り合わせ時のボトムセルの分光感度がやや低いことが挙げられ、接着部の樹脂層の厚さが  $10 \mu \text{ m}$  程度と厚いことによる横方向の光の逃げあるいは導電粒子での吸収等が要因と考えられる。今後、要因を明らかにし、太陽電池に適した樹脂、導電粒子の種類およびサイズを検討する。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 6 (4)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 6、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

27) メカニカルスタック技術の開発 B (東京農工大学)

<H22 中間目標 : T-ACF で接着抵抗  $0.5 \Omega / \text{cm}^2$  以下、実効屈折率  $1.8\text{--}2.0$ 、実効消光係数  $3\text{--}5 \times 10^{-5}$ 、光透過率  $70\%$  を達成する。H26 最終目標 : T-ACF を用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率  $25\%$  を達成する。>

a) 接合特性理論的検討

シミュレータを用いて電氣的・光学的に最適な接合材料の検討を行った。結果、透過率  $70\%$ 、接合抵抗  $0.5 \Omega \text{ cm}^2$  を個別開発目標と定めた。

b) 透明酸化物導電粒子開発

透明酸化物導電体微粒子製造装置を導入し、サブ  $\mu \text{ m}$  の微粒子形成に成功した。さらに種々導電体粒子の調査を行った。

c) 透明有機バインダー開発

さまざまなバインダーを調査し、 $150^\circ \text{C}$  で硬化し、安定して使用できる透明性ポリイミドを見出した。

d) 透明導電性接着剤特性

$70 \mu \text{ m}$  ITO 粒子を分散したポリイミド接着剤を開発した。可視-近赤外域で光学透過率  $80\%$ 、接合抵抗  $2.5\text{--}10 \Omega \text{ cm}^2$  を達成した。

e) 多接合セル実証

産業技術総合研究所提供の a-Si:H p-i-n セルと HIT シリコンセルを  $70 \mu \text{ m}$  ITO 粒子分散ポリイミド接着剤を用いて接合し 2 端子セル動作に成功した。Voc= $1.34 \text{ V}$  と高い値を得た。本実証により 2 端子セルを実証する平成 22 年度中間目標を達成した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 3 (3)、研究発表・講演 : 5、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

28) 高度光閉じ込め技術の開発 A (産業技術総合研究所)

<H22 中間目標 : 周期構造を利用したフォトニック基板を単接合太陽電池に適用し、従来技術に較べて近赤外領域の波長感度を  $20\%$  向上させる。その要素技術として半導体中を伝搬する近赤外光の散乱量  $50\%$  以上を目標とする。多層構造を利用した新規なフォトニック導電膜において、従来の単層中間層に較べて波長弁別率を  $50\%$  向上させる。H26 最終目標 : 周期構造を利用したフォトニック基板を単接合太陽電池に適用し、従来技術に較べて近赤外領域の波長感度を  $20\%$  向上させる。本技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率  $25\%$  を達成する。>



a) 光散乱基板（フォトリソグラフィ）光学設計

光学計算ソフトを用い、効果的な光閉じ込め効果が期待できる光散乱基板の設計パラメータを探した。結果、Ag 反射板上に適切な回折格子を形成することにより、半導体中を伝搬する近赤外光の 50%以上を散乱させる基板パラメータ（周期 0.6-1.6  $\mu\text{m}$ 、アスペクト比 0.25 以上）を明らかにした。

b) 光散乱基板（フォトリソグラフィ）作製技術

今回想定する光散乱基板の作製技術となる TCO 膜の製膜、回折格子構造のパターニング（周期 2  $\mu\text{m}$  以下）、埋め込み製膜、平坦化処理（CMP）の個々について開発を行い、必要とされる構造を実現するための技術を確立した。今回実現した TCO 膜自体への 2 次元高精細パターニングは太陽電池の分野でこれまで報告例の無い新規性ある技術である。また、作製した TCO 回折格子構造の角度分解した光学特性を調べ、設計通りの回折挙動が実現できることを確認した。

c) 光散乱基板（フォトリソグラフィ）の太陽電池構造における原理実証

Ag 反射層/TCO 次元回折格子からなるフォトリソグラフィ基板を開発し、これを薄膜微結晶 Si 太陽電池に適用した。その結果、平坦基板に較べて近赤外感度を 100%向上させることに成功した（ただし、平坦化未処理）。平坦化した場合にも近赤外感度の大幅向上は十分実現可能と見込まれる。

d) 波長弁別中間層（フォトリソグラフィ導電膜）光学設計

光学シミュレーションツールを用い、従来構造に較べて波長弁別率を 50%以上向上させる波長弁別中間層（3 層構造、カットオフ波長 800nm）を設計し、パラメータを確立した。

e) 波長弁別中間層（フォトリソグラフィ導電膜）原理実証

スパッタ法並びに CVD 法により実際に波長弁別中間層（3 層構造）をガラス基板上に作製し、設計通りの光学特性が得られることを確認した。またこれを 2 接合薄膜シリコン太陽電池に適用し、トップセルの光電流が向上することを確認し、原理実証に成功した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：5（2）、研究発表・講演：7、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：1

29) 高度光閉じ込め技術の開発 B（大阪大学）

<H22 中間目標：プラズモン活用型透明導電層を用いた新規な光閉じ込め構造の作製技術を確立し、単接合薄膜太陽電池において、従来技術に較べて長波長光感度を 20%向上させる。ミドル層およびボトム層に必要な波長域において、光散乱波長選択制御が可能であることを実証する。H26 最終目標：新規に開発する光閉じ込め構造により、従来技術に較べて長波長光感度を 30%向上させる。本技術を用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率 25%を達成する。>

a) プラズモン活用型透明導電層

ナノサイズの Ag 孤立粒子を作製し、サイズや形状、ならびに透明導電膜層などの環境媒質を調節することによって、光散乱波長域を制御することができることを実証した。（平成 22 年度中間目標をほぼ達成）

b) 微結晶シリコン単接合太陽電池における技術検証

上記のプラズモンを裏面光散乱/拡散層に適用して、従来技術に較べて、800nm より長波長領域での光感度を 20%以上向上させることができた。（平成 22 年度中間目標を達成済み。プロセス整合性を吟味中。）

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：9（9）、研究発表・講演：32、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

30) 高性能透明導電膜の開発（産業技術総合研究所）

<H22 中間目標：可視・近赤外領域（波長 400-1,700nm）で透明な導電性酸化物において抵抗率  $3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$  以下、波長 1,700nm における吸収係数  $6.0 \times 10^3 / \text{cm}$  以下を同時に達成する。200°C以下の低温プロセスで上記酸化物を作製する薄膜形成技術を開発する。H26 最終目標：本技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率 25%を達成する。>

a) 透明導電膜の移動度の支配的要因の明確化

$\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$  薄膜の構造、光学特性、および電気特性の関係を、XRD、TEM、TDS（昇温脱離ガス分析）、SE（分光エリプソメトリー）、および Hall 測定装置を用いて調べた。その結果、結晶化（170-180°C）に伴いキャリア濃度は減少（約  $4 \times 10^{20} / \text{cm}^3 \Rightarrow 2 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ）、移動度は増加（約  $40 \text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s} \Rightarrow 120 \text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ ）すること、薄膜内部からのガス（ $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、In、InO など）の熱脱離過程と電気特性に関連があり、非晶質領域あるいは結晶粒内部の状態（薄膜内に導入された H、OH、 $\text{H}_2\text{O}$  とアト

ム～ナノスケールの欠陥の状態)が電気特性に大きく関与していること、結晶化に伴う電氣的・光学的移動度の大幅な増加は、有効質量の変化のみでは説明することはできず、キャリアの散乱が大幅に低減していること、結晶化によりキャリアの生成過程が変化(酸素欠損が抑制されHがドナーとして活性化する)し、それによりキャリア散乱が大幅に抑制されていることが示唆されること、などが分かった。

#### b) 低エネルギー損失窓電極の開発

上記の結果より、高い移動度を示す  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$  薄膜を得るには非晶質および結晶質層内部の状態が非常に重要であること、その状態を間接的に調べる方法として TDS が有効であることが分かった。その結果を受け、薄膜製造時の  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_2$  量を正確に制御することにより薄膜内部の組成・構造を制御し、その結果、高移動度を維持した状態で低抵抗率の薄膜を作製できることを見出した。最大プロセス温度  $200^\circ\text{C}$ において抵抗率  $2.7 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$ 、波長  $1,700\text{nm}$  の吸収係数約  $5 \times 10^3/\text{cm}$  と中間目標を上回る特性を得た。現在のところ、抵抗率  $2.2 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$  の薄膜が得られている。また、新たな添加物等を添加することにより、高い透明性を維持した状態で更なる低抵抗率化を検討している。

一方、平成 20 年度の段階で  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{H}$  を微結晶シリコン薄膜太陽電池の窓電極に適用した。その結果、窓電極に ITO を用いた場合に比べ、可視～近赤外域の分光感度の向上、それに伴う電流密度、変換効率の向上を確認した。したがって、現在開発中の透明導電膜は、薄膜型多接合太陽電池においても反射・吸収損失を低減させ、高効率化に寄与するものと考えられる。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 6 (3)、研究発表・講演 : 15、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

### 31) 高性能ガラス基板作製技術を使った高性能透明導電膜の開発(東京工業大学)

<H22 中間目標 : ナノパターンガラス基板(1cm 角以上)上での透明導電膜において、従来(例えば  $\text{SnO}_2$ )に比して、おおむね 2 倍の移動度( $80\text{--}100\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )および半分の電気抵抗率( $2 \times 10^4 \Omega\text{cm}$ )を達成する。H26 最終目標 : ナノパターンガラス基板(10cm 角以上)上で、近赤外域を含む光透過波長域を拡大した、低抵抗・高移動度の高性能透明導電膜を作製する。本技術を用いて産業技術総合研究所等と協力して多接合太陽電池で変換効率 25%を達成する。>

#### a) ナノインプリントした高性能ガラス基板技術の開発

平成 20 年度は 1cm 以上のサイズのガラス基板へのナノインプリント技術の開発を達成し、平成 21 年度はナノインプリント中の真空環境導入により、平成 21 年度中に 2cm サイズの達成の目途は得た。平成 22 年度では、より一層の加熱加圧条件の最適化により 10cm 以上サイズのガラス基板へのナノインプリント技術の開発を達成出来る見込みである。

#### b) 高性能ガラス基板を使った高性能透明導電膜の開発

平成 20 年度には、直線状のナノ凹凸を持つナノパターンガラス基板上への ITO 膜の堆積実験の結果、配向性が向上することを明らかにした。平成 21 年度には、直線状ナノパターンガラス基板上への ITO 膜の堆積では、ナノ壁付近での結晶核分布が、通常のガラス基板とは大きく異なることを見出した。その結果、配向性が向上し、さらに粒径の増大によるキャリア散乱の低下と移動度向上に寄与する可能性を明らかにした。平成 22 年度においては、上記基板を利用したより低抵抗のナノパターン透明導電膜の形成とその上へのシリコン系半導体や液晶分子の単結晶あるいは配向膜の合成条件の検討において、ガラス基板表面と成膜条件のより一層の最適化により目標を達成出来る見込みがある。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 20 (20)、研究発表・講演 : 27、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

### 【平成 23～24 年度】(第 2 回中間評価時)

#### 1) メカニカルスタック・デバイス化技術の開発(産業技術総合研究所)

<H24 中間目標 : 接着抵抗  $2 \Omega\text{cm}^2$  以下、吸収損失 10%以下の接合技術を開発する。接合技術を多接合太陽電池に適用し、変換効率 20%を達成する。H26 最終目標 : 接合技術の高度化により多接合太陽電池で変換効率 25%を達成する。>

化合物薄膜系の接合技術として、透明導電性テープを用いた媒体接着技術およびファンデルワールス力を用いた直接接合技術の開発を行った。特に後者に関しては、ブロック共重合体を介して接合部に導電性ナノ粒子配列(Pd、Au 等)を挿入した新技術を開発した。ナノ粒子ドメインは、接合界面に微小( $\sim 50\text{nm}$ )かつ高密度( $\sim 10^{10}/\text{cm}^2$ )に配列するため、低抵抗かつ高透明性を有する。接合品質としては、接着抵抗  $2 \Omega\text{cm}^2$  以下、吸収損失 2%以下(波長  $1,100\text{nm}$ )であり、これは平成 24 年

中間目標を満足する特性である。また、これらの接合技術を用いて化合物薄膜系多接合太陽電池を試作した。特に、新直接接合法により GaInP (Eg-1.89eV) /GaAs (Eg-1.42eV) 2 接合太陽電池と InGaAsP (Eg-1.15eV) を接合した太陽電池を試作し、変換効率 21.85%を得た。本接合法の有効性は確認されたので、今後はさらなる高効率化とともに、さまざまな種類の太陽電池での接合を試みるとともに、実用化に向けて信頼性の確認や大面積化の方策を検討する。

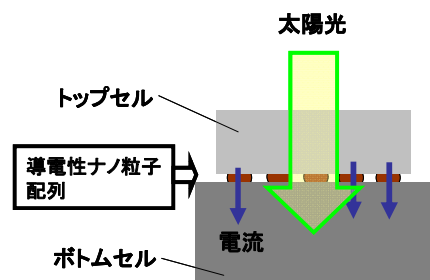


図 12. 導電性ナノ粒子配列を用いた直接接

非晶質透明導電膜の固相結晶化を利用した接合につ

いても検討した。接合強度を支配する要因について詳細に調べ、表面平坦性と同時に結晶化時の結晶粒サイズおよび脱ガスが重要な要因であることを見出した。なお、抵抗率は約  $3 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ 、波長 400-1,700nm の範囲で吸収 10%以下と電気・光学的接続は問題ないことを確認している。Si 系単結晶薄膜太陽電池の開発に必要な基板の作製については、これまでに、陽極接合法を用いることにより、Si ウェハ/ITO/ガラス基板の接合基板を形成できることを見出してきた。今回、ITO/ガラス接合部が原子レベルで接合していること、陽極接合過程において Si/ITO 界面が電気特性に悪影響を与えないことを本接合基板を用いて作製したヘテロ接合型太陽電池 (ITO/n 型 a-Si:H/i 型 a-Si:H/p 型 c-Si ウェハ/ITO/ガラス) の電流-電圧特性より確認した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 2 (2)、研究発表・講演 : 10、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

## 2) メカニカルスタック技術の開発 (東京農工大学)

<H24 中間目標 : シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セル材料の開発並びにデバイス化により多接合太陽電池で変換効率 20%を達成する。H26 最終目標 : シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セルの高度化ならびに高度光利用技術の組み合わせにより多接合太陽電池で変換効率 25%を達成する。>

20  $\mu\text{m}$  級 ITO 粒子をエポキシ系透明接着剤に分散した透明導電性接着剤を開発した。透過率 80%、接合抵抗  $1.8 \Omega \text{cm}^2$  を達成した。この接合抵抗は 10cm 角サイズの試料に、1V で約 110A を流す能力を意味しており、20%超の高効率多接合ソーラーセル作製に十分対応できる低抵抗レベルである。また-30~+60°Cのヒートサイクル試験を実施しており 300 時間経過段階では接着特性に変化はない。高圧ガス加圧法を用いたプレス技術及び装置を開発した。本技術を用いて、4 インチ Ge 及びGGaAs 基板の貼り合わせに成功した。Ge 及び GaAs 基板は偏加圧により破損しやすい材料である。本技術により、シリコンのみならず様々な半導体大面積ソーラーセルの多接合化の可能性が確認できた。上記低接合抵抗は本ガス加圧法により達成したものである。ITO 粒子以外にも仕事関数の異なる Au、Sn、Ni 及び Cr 粒子による導電接着剤開発を検討している。Sn 粒子により  $5 \Omega \text{cm}^2$  の接合抵抗が得られている。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 2 (1)、研究発表・講演 : 3、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

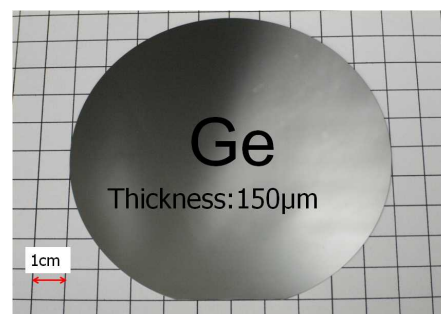


図 13. 4 インチ Ge 基板を ITO 分散接着剤にて張り合わせた試料

## 3) ヘテロ接合デバイス化技術の開発 A (三菱重工業)

<H24 中間目標 : 単結晶あるいは擬単結晶の高度秩序シリコン-ゲルマニウム系ナローバンドギャップ材料を用いたボトムセルの高効率化材料に適した界面処理・ヘテロ接合形成技術を開発し、同材料を用いたバンドギャップ 0.9eV 以下の単接合太陽電池の変換効率 9%を達成する。メカニカルスタック多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。H26 最終目標 : 単結晶あるいは擬単結晶の高度秩序シリコン-ゲルマニウム系ナローバンドギャップ材料を用いたボトムセルの高効率化材料に適した界面処理・ヘテロ接合形成技術を開発し、同材料を用いたバンドギャップ

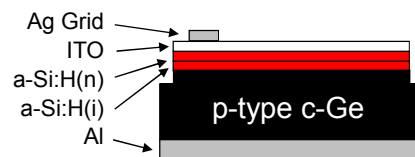


図 14. 作製したデバイス構造

0.9eV 以下の単接合太陽電池の変換効率 10%を達成する。メカニカルスタック多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

平成 22 年度までに p 型単結晶 Ge 基板を用いたヘテロ接合太陽電池の高効率化にホスフィン (PH<sub>3</sub>) を用いた界面処理が有効であることを見出し、変換効率 6.54%を得ている。この値は Ge 基板を用いたヘテロ接合太陽電池としては世界最高効率である。平成 23 年度より、この界面処理技術をさらに高度化するために、以下のことを行った。

a) 界面に存在するリン(P)の定量化

界面に P が残留していること、PH<sub>3</sub> 界面処理条件により P 残留量が制御可能であることを SIMS を用いて確認した。太陽電池特性は P 残留量に依存しており、界面処理条件によって太陽電池特性が制御できることが示された。

b) 界面バンド構造の観測

走査型キャパシタンス顕微鏡 (Scanning Capacitance Microscopy : SCM) を用いてヘテロ接合界面のバンド構造を観測した。PH<sub>3</sub> 暴露処理の有無により Ge 基板中のキャリア濃度勾配に明らかな差が生じており、界面に存在する P がドナーとして働き、界面処理によってバンド構造の制御が可能であることが示された。

c) ヘテロ接合のバンドオフセットの観測

XPS による a-Si:H(i)/c-Ge のバンドオフセット評価を行った。X 線により励起された電子が離脱可能な膜厚の a-Si:H(i) を製膜した試料と、離脱不可能な膜厚を製膜した試料で価電子帯スペクトルを比較し、価電子帯オフセットが約 0.62eV、伝導帯オフセットが約 0.42eV であると見積もられた。

d) ヘテロ接合形成条件の影響把握

界面処理と同様に Ge 表面への処理であり、太陽電池特性に影響を与えらるる a-Si:H(i) 層の製膜条件の影響を確認した。その結果、界面処理と同様に太陽電池特性を大きく左右することが示された。

以上の結果より、ヘテロ接合太陽電池の特性改善にはヘテロ接合界面の制御が非常に重要であることが示され、今後、これまでに確立した評価手法を用いて界面処理条件および a-Si:H(i) 層製膜条件の最適化を行うことで、目標値の達成が可能であると考えている。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (1)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

4) ヘテロ接合デバイス化技術の開発 B (京セラ)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 0.9eV のシリコンゲルマニウム (SiGe)、シリコンゲルマニウムスズ (SiGeSn) などの単結晶基板を用いたヘテロ接合太陽電池で変換効率 9%、特性値として開放電圧 0.3V 以上を達成する。更に本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。H26 最終目標 : ヘテロ接合を形成することで、バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池効率 10%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。>

ヘテロ接合形成工程を、a)ヘテロ接合形成前表面処理、b)薄膜堆積 (セル作製)、c) バンドオフセット制御の三段階でプロセス開発を行ない、セル特性評価までの各段階で少数キャリアライフタイム ( $\tau$ ) をモニターすることで効果を定量的に比較検証している。各段階の評価では Si 及び Ge 単結晶基板を用い、各段階の問題解決には以下の方針で取り組んでいる。a) ドライ又はウェット処理による高  $\tau$  化、b)PCVD 低電力堆積条件によるプラズマダメージの低減、c)不純物元素の導入によるバンド制御。

a)ヘテロ接合形成前表面処理

平成 22 年度までの温水処理による Si 基板の大幅な  $\tau$  向上の成果がヘテロ接合の高品質化にどの程度寄与するかと、界面の状態を確認するために、同処理基板への a-Si 膜堆積と SIMS による不純物分析を実施した。a-Si 膜堆積後のライフタイム評価では従来の HF 処理と差が無い結果となり、前処理方法に適した a-Si 堆積条件の探索が必要との知見を得た。また温水処理では界面での酸化物層の増加とともに不純物としてアルミが検出された為、従来の純水設備に加え超純水の使用が可能な実験環境を整えた。効果については今後確認する予定である。また断面 TEM 観察から、同じ a-Si 膜

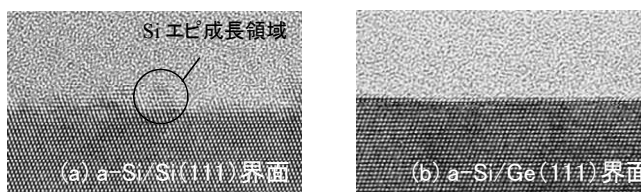


図 15. ヘテロ界面の TEM 断面像

堆積条件下でも、Si 基板上では界面品質劣化の要因となる Si エピ領域の形成が認められたのに対し、Ge 基板上では認められず、Ge 基板における a-Si 膜堆積条件のプロセスウインドの広さが予見できる結果を得た。Ge 基板の表面処理については a-Si 堆積後のライフタイム評価で HF 処理比約 4 倍の値が高濃度塩酸処理で得られた。

b) 薄膜堆積（セル作製）

平成 23 年度に低電力実験用チャンバーが復旧したことから実験を再開している。平成 22 年度に Si 単結晶基板上で効果のあった a-Si 低電力堆積条件を Ge 単結晶基板上に適用し、更に圧力条件を振ることで Si 基板との傾向の違いをライフタイム評価から確認し、比較的抵抗の p 型 Ge 基板において 48  $\mu$  sec のライフタイムが達成できた。セル化評価については今上期中に実施予定である。

c) バンドオフセット制御

モノゲルマンガスの使用準備が完了しているが、装置トラブルによる研究の遅れとベースとなる a-Si 膜の低電力堆積条件の実験データが不十分の為、未着手である。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（1）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：0、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

5) 高度光利用技術の開発 A（産業技術総合研究所）

<H24 中間目標：開発した光閉じ込め構造を太陽電池に利用し、相対効率向上 15%以上を達成する。開発した光閉じ込め構造を他のサブテーマで開発されたデバイスプロセスと組み合わせ、変換効率 20%達成に資する。H26 最終目標：開発した光閉じ込め構造を実際のスタックセルに適用し、相対効率向上 20%以上を達成する。開発した光閉じ込め構造を他のサブテーマで開発されたデバイスプロセスと組み合わせ、変換効率 25%達成に資する。>

平成 22 年度までに開発した技術をベースに、表面平坦性を保ちながら光散乱性を有するフォトニック基板を開発した。作製したフォトニック基板を薄膜シリコン太陽電池に適用し、相対発電効率向上 8%を得た。特筆すべきはフォトニック基板に期待される高い開放電圧・曲線因子を維持したまま光電流のみを増加させる効果が実証できた点であり、今後の効率改善への重要な成果が得られた。更に、海外研究機関と協力しながらフォトニック基板を高度化するための方策を光学シミュレーションにより検討した。その結果、屈折率分布形状の適正化及び材料の吸収損失抑制を行うことで、現状構造と比較して 30%以上の光電流増加が可能であることが示され、中間目標の相対発電効率 15%以上は十分達成可能と考えられる。現在は中間目標の達成に向けて計算結果に基づく高性能フォトニック基板の作製プロセスの開発に注力している。また並行して多接合薄膜太陽電池へのフォトニック基板適用も進め、現時点までにモノリシック型の多接

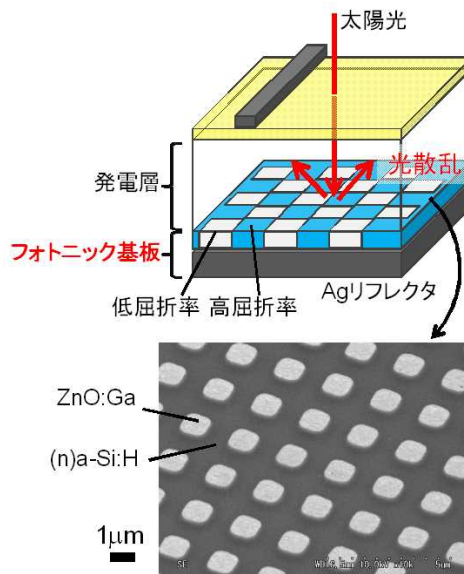


図 16. フォトニック基板の概念図と作製した基板の SEM 像

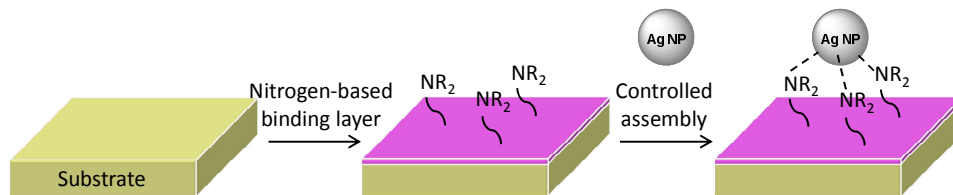


図 17. ウェットケミカル手法による金属ナノ粒子の分散

合薄膜シリコン太陽電池において発電効率 10.1%を得るとともに、課題抽出を行っている。また、フォトニック基板を補完する光利用技術としてのプラズモン効果実証のために、薄膜シリコン太陽電池作成プロセスに適用可能なウェットケミカル手法を用いた金属ナノ粒子構造作製手法を開発した。はじめにフラットな基板上に作製したスーパーストレート型薄膜シリコン太陽電池を用いて、純粋なプラズモニック光散乱による光電流増加を確認し、近赤外領域において 75%の外部量子効率向上を確認した。現在、これらの結果を基に、より精密なパターンニングを可能とするプラズモニック

光閉じ込め構造作製手法としてフレキシブルスタンプを用いる印刷手法の開発を進めており、光学シミュレーションとの比較検討により構造最適化を図り、太陽電池への適用を行なっていく。  
 <成果発表件数>特許出願(外国)：1(0)、論文(査読付)：6(2)、研究発表・講演：9、新聞・雑誌等への掲載：1、展示会出展：2

6) 高度光利用技術の開発 B (大阪大学)

<H24 中間目標：プラズモン活用型透明導電層を用いた新規な光閉じ込め構造の作製技術を確立し、微結晶シリコン単接合太陽電池において、従来技術に較べて長波長光感度を 20% 向上(相対効率 15% 向上)させる。ミドル層およびボトム層に必要な波長域において、光散乱波長選択制御が可能であることを実証する。H26 最終目標：新規に開発する光閉じ込め構造により、微結晶シリコン単接合太陽電池において、従来技術に較べての相対効率を 20% 向上させる。また、本技術を用いて産業技術総合研究所等と協働して多接合太陽電池で変換効率 25% を達成する。>

a) プラズモン活用型透明導電層

ナノサイズの Ag 孤立粒子を作製し、サイズや形状、ならびに透明導電膜層などの環境媒質を調節することによって、光散乱波長域を制御できることを実証した。(平成 24 年度中間目標を達成)

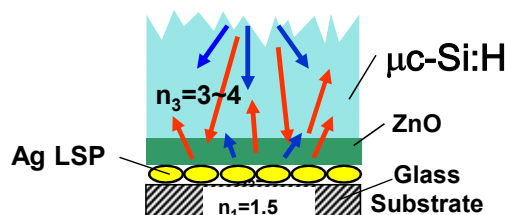


図 18. プラズモン効果の概念図

b) 微結晶シリコン単接合太陽電池における技術検証

上記のプラズモンを裏面光散乱/拡散層に適用して、従来技術に比較して、800nm より長波長領域での光感度を 7~35% 以上向上させるとともに、相対効率で約 8% 増大を得た。(光感度向上については、平成 24 年度中間目標を達成済みで、変換効率改善に向けての研究開発を遂行中)

<成果発表件数>特許出願(外国)：0(0)、論文(査読付)：4(4)、研究発表・講演：10、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

7) SiGe 系薄膜ボトムセルの開発 A (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標：バンドギャップ 0.9eV 以下の単接合太陽電池セルで変換効率 9% 以上を達成する。H26 最終目標：バンドギャップ 0.9eV の単接合太陽電池セルで変換効率 10% を達成する。>

○SiGe エピタキシャル成長における Ge 原料の坩堝の選定、成長温度を検討し、残留不純物の低減化に成功した。SiGe 薄膜にガリウムを均一にドーピングする手法を開発し、正孔濃度の精密制御法を確立した。

○Si 基板上と SiGe 薄膜層の間に組成傾斜バッファ層の導入を検討した。組成傾斜層を導入しない場合、 $10^9/cm^2$  台の高密度の貫通転位が伝搬するのに対して、導入することにより転位密度が  $10^6/cm^2$  以下まで大幅に低減した。

○SiGe ヘテロ接合太陽電池 ( $E_g \sim 1.0eV$ ) を作製した。外部量子効率感度は波長 1,200nm まで長波長化し、光電変換効率は 0.98% であった。デバイスシミュレータを用いて SiGe 薄膜太陽電池の系統的な動作解析を行い、特性改善の指針を検討した。SiGe 薄膜太陽電池において、少数キャリア寿命の増大が効率向上に最も重要であることを明らかにし、現在の開発指針の妥当性を確認した。

○高効率化に向けた新しいデバイス構造として両面ヘテロ接合を検討した。Ge 基板で両面ヘテロ接合太陽電池を世界で初めて試作し、開放電圧と短絡電流の向上および温度係数の改善を確認し、両面ヘテロ接合化が Ge 系太陽電池でも有効であることを明らかにした。

<成果発表件数>特許出願(外国)：0(0)、論文(査読付)：4(3)、研究発表・講演：17、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

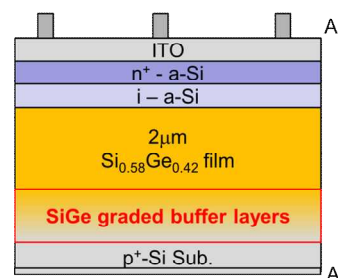


図 19. 試作した SiGe ヘテロ太陽電池の構造

8) SiGe 系薄膜ボトムセルの開発 B (コーニング)

<H24 中間目標：ガラス基板上シリコン・ゲルマニウム等単結晶薄膜を基体としたバンドギャップ 0.9eV 以下の単接合太陽電池で、変換効率 9% を達成する。その要素技術として、単結晶薄膜の転位密度として  $5 \times 10^7/cm^2$  を目標とする。H26 最終目標：ガラス基板上シリコン・ゲルマニウム等単結

晶薄膜を基体としたバンドギャップ 0.9eV 以下の単接合太陽電池で、変換効率 10%を達成する。その要素技術として、単結晶薄膜の転位密度として  $10^7/\text{cm}^2$  を目標とする。>

○バンドギャップ 0.9eV 以下に相当する Ge 組成約 0.5-1 で厚さ  $3\mu\text{m}$  以上の SiGe 単結晶薄膜を、バルク Si および Ge 結晶基板、ガラス上 Si および Ge 薄膜基板のそれぞれに、反応性 CVD 法により初めて、世界最高水準の成長速度  $2\text{nm/s}$  以上で成長することに成功した。同様に MBE 法により厚さ  $1.4\mu\text{m}$  以上の SiGe 単結晶薄膜をガラス上 Ge 薄膜基板の上にエピタキシャル成長し、Ge

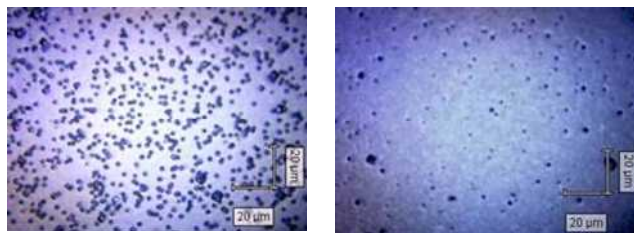


図 20. SiO<sub>2</sub> 基板の上にバッファ層無 (左) 有 (右) で反応性 CVD 成長した Si<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub> 膜のエッチング後顕微鏡写真

組成 1.0 の薄膜では  $1,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  を越える良好な移動度を得た。また、反応性 CVD 法で Si 基板の上にバッファ層なしで成長した厚さ  $4.7\mu\text{m}$  の Si<sub>0.2</sub>Ge<sub>0.8</sub> 膜をアモルファス Si と積層したヘテロ接合セルを作製し、波長  $1,400\text{nm}$  ( $0.89\text{eV}$ ) までの分光感度を確認した。一方、ガラス上 Si 薄膜基板に反応性 CVD 法で厚さ  $5.9\mu\text{m}$  の Si<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub> 膜を成長する際、産業技術総合研究所で開発された MBE 法による厚さ  $1.5\mu\text{m}$  の傾斜組成 SiGe バッファ層を中間に挿入することで、過剰キャリア寿命が  $0.062\mu\text{s}$  から  $16.3\mu\text{s}$  に大幅に向上することを見出した。シミュレーションにより、このキャリア寿命から 10%を超えるセルの変換効率が期待され、現在セル作製の準備を進めている。

○ガラス上 Si 薄膜基板に反応性 CVD 法で厚さ  $5.9\mu\text{m}$  の Si<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub> 膜を成長する際、産業技術総合研究所で開発された MBE 法による厚さ  $1.5\mu\text{m}$  の傾斜組成 SiGe バッファ層を中間に挿入することで格子不整合を緩和し、表面のエッチピット密度を  $5\times 10^6/\text{cm}^2$  から  $1\times 10^6/\text{cm}^2$  に低減することに成功した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (1)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 9) SiGe 系薄膜ボトムセルの開発 C (東京工業大学)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 0.9eV 以下で 9%以上の変換効率を達成する。H26 最終目標 : バンドギャップ 0.9eV 以下で 10%の変換効率を達成する。>

SiGe 系薄膜作製のための反応性熱 CVD の原料ガスとして GeF<sub>4</sub>-Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 系と GeF<sub>4</sub>-SiH<sub>4</sub> 系について検討している。GeF<sub>4</sub>-Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 系では気相反応の抑制が可能な基板温度  $350^\circ\text{C}$  における成長により、堆積速度は  $0.2\text{nm/s}$  と遅いが、膜厚  $1,210\text{nm}$  で  $7\times 10^5/\text{cm}^2$  の低転位密度が得られた。膜厚  $600\text{nm}$ 、Ge 組成 97%のエピ膜においては、Hall 移動度  $767\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  が得られており、結晶性の高い Ge 膜が作製できているものと判断される。GeF<sub>4</sub>-SiH<sub>4</sub> 系では、 $490^\circ\text{C}$  の成長温度で、GeF<sub>4</sub> のエッチングの寄与により、基板界面から  $100\text{nm}$  程度の領域において貫通転移の終端が見られ、高速堆積 ( $2.37\text{nm/s}$ ) にもかかわらず、膜厚  $427\text{nm}$  の膜で転位密度  $1\times 10^6/\text{cm}^2$  が得られた。この二つの系における結果は GeF<sub>4</sub> を原料ガスに用いる系の特質を良く表しており、基本的に、目指すべき方向が明確となった。GeF<sub>4</sub>-Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 系では、今後、これらの条件で成長したエピ膜を用いて、太陽電池を試作し、素子特性を評価する予定である。GeF<sub>4</sub>-SiH<sub>4</sub> 系については、初期膜の堆積条件 (エッチング条件) を詳細に検討したうえで、最適条件を決定し、太陽電池の試作を進める予定である。

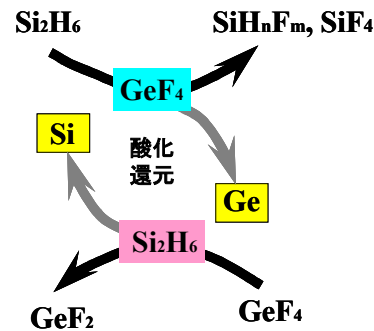


図 21. GeF<sub>4</sub>-Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 系の反応

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 10) SiGe 系薄膜ボトムセルの開発 D (東海大学)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 0.9eV の擬単結晶 SiGe 及び Ge 等を用いた太陽電池で変換効率 9%を達成する。要素技術として、粒径  $5\mu\text{m}$  以上の単一配向シード層を得る。H26 最終目標 : バンドギャップ 0.9eV の擬単結晶 Ge 等を用いた太陽電池で変換効率 10%を達成する。エミッター層として機能を兼ねる粒径  $5\mu\text{m}$  以上の単一配向シード層を得る。>

○Al を用いた非晶質 SiGe (Ge 組成比 30%) の金属誘起結晶化において、ほぼ均一な結晶 SiGe 層が

ら数  $\mu\text{m}$ ～数  $10\mu\text{m}$  の SiGe 島状結晶まで形状を制御してガラス基板の上に形成することに成功した。これらの結晶は[111]面方向に配向する傾向があり、擬単結晶の粒径  $5\mu\text{m}$  以上の単一配向シード層を得るという平成 24 年度中間目標は達成できたと考えられる。

- 電子ビーム蒸着法を用いて非晶質 Ge を作成することで、固相成長によるシード層からのエピタキシャル成長に成功した。エピタキシャル成長は非晶質材料の製法によって大きく影響され、K セル蒸着やスパッタ法ではランダム成長を示す。今後は非晶質の構造や不純物濃度などを詳細に検討することで、より安価な作製法を開発する。
- 固相成長のシード層として、n 型の[100]結晶方位が最も適していることを見出した。固相成長はシード層の伝導型、結晶方位に大きく依存しており、その他のシード層では他方位の結晶成長が生じやすい。但し、上記はシード面から縦方向の成長であり、基板に沿った横方向の結晶成長では異なる可能性もあり、継続して詳細を検討する必要がある。
- 今後は年度末に向けて、シード層上の結晶成長について、シード層形状及び非晶質材料特性を最適化することで良質のナローギャップ発電層を形成し、中心機関における変換効率 9%達成へ貢献できると考えている。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 4 (4) 、研究発表・講演 : 20、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

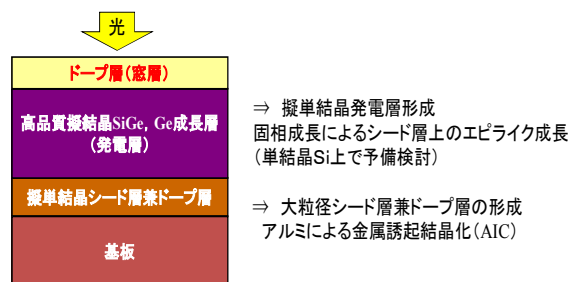


図 22. 目標とする SiGe 系薄膜ボトムセルの構造

### 11) 有機単結晶材料ボトムセルの開発 A (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標 : 有機単結晶を用いた単接合で変換効率 4%を達成する。H26 最終目標 : 有機単結晶材料を用いた単接合で変換効率 10%を達成する。>

有機単結晶のヘテロエピタキシャル技術として、Si[100]基板上に  $\text{C}_{60}$  薄膜のエピタキシャル成長を試み、 $\text{C}_{60}$  単結晶のエキソン拡散長を通常の 10nm から倍の 20nm まで増加させることに成功した。さらに結晶  $\text{C}_{60}/\text{Si}$  の単接合セルを作製し、有機/無機ヘテロ接合による太陽電池の変換効率を最大 3.1%まで向上させた。また、有機単結晶太陽電池作製において重要な技術の一つである電極とのオーミック接合の最適化のため、分子線蒸着法によるキャリアドーピング技術を開発した。Mg および CuI、2 種類のドーパントを用いて、膜の導電率、仕事関数の精密制御を可能とした。また、電極/有機半導体界面へドーピングした pn 接合有機太陽電池を作製した。p 型半導体界面への CuI ドーピング層挿入により、変換効率は 0.8%から 2.6%に改善された。n 型半導体界面に Mg ドーピング層を挿入することで、目標変換効率 4%へ到達する見込みである。更に、ルブレンの単結晶で見出された Fission 現象を利用した多重励起子による太陽電池の原理検証を行った。ルブレン単結晶および薄膜を用いて、Fission による励起子生成から電荷分離までを過渡吸収分光法等を用いて評価した。Fission 過程は 10ps 程度であり、その後生成したトリプレット励起子のフラーレンへの電荷分離過程は数 100ns の過程であることが分かった。高効率化には電荷分離速度の向上が望まれる。

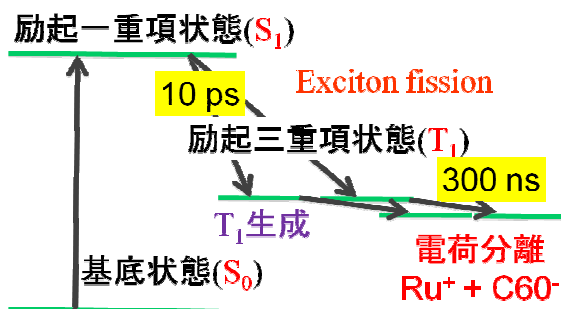


図 23. ルブレン単結晶での Fission 過程

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0) 、論文 (査読付) : 3 (2) 、研究発表・講演 : 17、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

### 12) 有機単結晶材料ボトムセルの開発 B (東京工業大学)

<H24 中間目標 : ナノパターンを施した表面ナノ構造制御ガラス基板 (1cm 角以上) を作製する技術を確認し、その上への高性能透明導電膜の作製を行い、p 型、n 型太陽電池用有機単結晶からなる太陽電池を試作し、変換効率 4%を達成する。H26 最終目標 : 高性能ガラス基板および透明導電膜作製の本技術を用いて、p 型、n 型太陽電池用有機単結晶材料からなる太陽電池を試作し、変換効率 10%



を達成する。>

a) イオン液体を用いた有機電荷移動錯体単結晶のフラックス気相成長法の開発

これまでに、シングルレーザーを用いた有機フラックス製膜装置を用いて、有機電荷移動錯体結晶作製の予備検討を開始し、数  $10\mu\text{m}$  の板状結晶が形成される事を確認した。また、開発したツインレーザー型有機フラックス製膜装置を用い、蒸着ソースを独立に制御した有機電荷移動錯体結晶の作製に着手した。当初の計画外ではあるが、結晶作製条件の最適化やこれら有機単結晶・薄膜を用いた太陽電池デバイスの作製には、イオン液体中での核形成を再現性よく制御することが重要との観点から、蒸着状態をモニターするデジタルスコープを本装置に搭載し、イオン液体膜やイオン液体中でのペンタセンの核形成と成長過程を実時間観察することが可能なシステムの開発を併せて行った。これにより、中間目標に向けて、ツインレーザーを用いた有機電荷移動錯体結晶のイオン液体フラックス合成の条件最適化を加速的に推進し、さらに太陽電池デバイス作製の歩留まりを大幅に向上させることができるものと期待される。

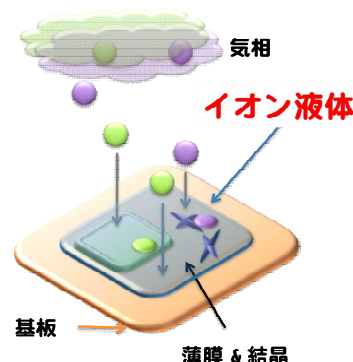


図 24. フラックス気相成長法

b) イオン液体を用いて気相成長させた有機半導体単結晶からなる太陽電池の試作

これまで、ペンタセンとフタロシアニンを用いたイオン液体フラックス法で成長させたハイブリッド型の p 層に n 層である PCBM を塗布し、太陽電池を作製した。デバイス構造が最適化されていないので、効率の絶対値は低いですが、イオン液体を用いない場合と比較して、効率が 2 倍になったことを確認した ( $\sim 0.07\%$ )。これについて、現在目標達成のために解決すべき課題として、残留するイオン液体が再結合中心になって、分離効率が著しく小さいこと、通常のバルクヘテロ接合にくらべ、p 層と n 層の界面が著しく小さいため、十分な電流値が得られないこと、が考えられる。イオン液体を介して作製したペンタセンや  $\text{C}_{60}$  結晶をチャンネル材料として試作した電界効果トランジスタの移動度が、ペンタセンで  $\sim 5\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、 $\text{C}_{60}$  では、大気中の測定にもかかわらず、 $\sim 6\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  と大きな値であったことから、太陽電池による励起子拡散長は見積もれていないものの、イオン液体で作製した有機半導体そのものの特性は十分に高いものと考えられる。したがって、太陽電池の高効率化は、先の 2 つの課題を解決する事で、大いに期待できる。中間目標に向けて、これらの対策として、残留イオン液体を除去するためのソフトプラズマ処理を名古屋大学との共同研究で行う予定である。また、ツインレーザー型有機フラックス製膜装置を用いて、イオン液体中に p 層と n 層を同時供給し、イオン液体を介したバルクヘテロ接合を形成し、界面を著しく増大させる事を試みる。この方法では、通常気相法による共蒸着とくらべ、イオン液体を介すことで、個々の結晶の品質を向上させつつ、界面での電子・正孔の分離界面をバルクヘテロ接合並みに増大させることができ、結果として、著しい発電効率の向上が期待される。

c) 周期的ナノ壁構造を持つ太陽電池用高性能ガラス基板の開発

有機分子薄膜の高結晶性薄膜を得るためには、透明導電膜 (インジウムスズ酸化物: ITO) をコートしたガラス基板上での有機分子結晶核の生成数を制御することが重要である。核生成数を増加させるために、ガラス基板表面に周期的なナノ溝配列をナノインプリント手法により作製し、その上に ITO 薄膜を堆積して周期的ナノ壁構造を持つ太陽電池用高性能透明導電膜ガラス基板を作製することができた。

d) 2cm 角サイズ以上の 200nm 高さのピコステップガラスの開発について

2cm 角のサイズを持つガラス板を使って、200nm 高さの階段状原子ステップ配列を持つサファイアモールドを使い、ナノインプリント時の条件として、真空中、 $600^\circ\text{C}$ 、3 MPa、300sec プレスにおいて、整列した 200nm 高さのピコステップガラスの作製に成功した。

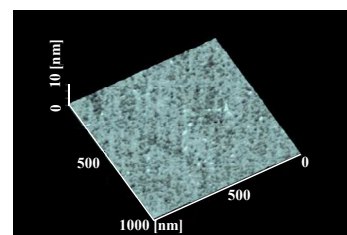


図 25. ピコステップガラスの AFM 像

e) 市販の ITO ガラス基板の表面平坦化プロセスの検討について

市販の ITO ガラス基板を、一軸圧縮のナノインプリントプロセスに適用し、ITO 下地のガラス基板表面の熱軟化を誘起して、平坦な ITO 薄膜が簡単に得られるかどうかを検討した。最適な温度や圧力の検討段階であるが、これまでの予備的なナノインプリント実験により、市販の ITO ガラス基板の表面粗さ (RMS 値) が、約 10% 程度平坦になることを見出しており、本プロセスが市販の ITO ガラス基板の表面平坦化に有効である知見を得た。

f) 集光効率向上のための構造色を持つ光路制御型ナノパターンガラス板の開発について

表面ナノ周期構造に基づいて、光干渉して構造発色するガラス板の作製条件を検討している。これまでに約 5mm サイズの範囲で構造発色を確認することに成功した。  
 <成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 27 (27)、研究発表・講演 : 46、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

13) ナノ材料系ボトムセルの開発 A (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標 : 高純度半導体 CNT (99wt%以上) の抽出率は 20wt%以上を達成する。東北大学と協力して CNT 利用太陽電池の変換効率は 4%以上を達成する。半導体単層 CNT で多重励起子や多重キャリア (MEG) 効果を確認する。H26 最終目標 : 高純度半導体 CNT (99wt%以上) の抽出率は 30wt%以上を達成する。東北大学と協力して CNT 利用太陽電池の変換効率 10%以上を達成する。>

a) 高純度半導体単層 CNT の大量抽出技術開発

単層 CNT 粉末の分散・分離、超音波・超遠心分離機の条件を最適化し、半導体単層 CNT の純度 99wt%、抽出率 30wt%を達成した。更に、CNT の純度を向上させる為に、200°C、1 時間、真空中で加熱する事により、残分 (主に PFO ポリマー) を取り除くことに成功した。また、高純度半導体単層 CNT は蒸着不可能であること、スピコート方法ではロスが多いことから、スプレー法を用いた CNT の製膜技術開発を行った。

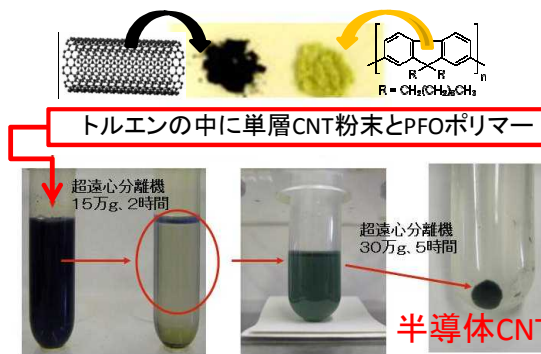


図 26. 半導体 CNT の抽出工程

b) 半導体 CNT を用いた太陽電池

高純度半導体単層 CNT とフラーレン材料を用いてヘテロ接合有機太陽電池を試作した。試作した太陽電池 (セル面積 4mm<sup>2</sup>) の特性は、変換効率 0.14%、Jsc=1.3mA/cm<sup>2</sup>、Voc=0.24V、FF=0.46、遠赤外域 (0.8-1.3eV) での量子効率最大 22%、可視光領域での量子効率最大 62%であった。今後、変換効率目標を達成する為には、半導体 CNT へのドーピングと CNT の配列制御などのデバイス最適化により Jsc と遠赤外域での量子効率を向上させることが必要である。

c) 半導体 CNT における、多重励起子や多重キャリア (MEG) 効果の実証

一本の半導体 CNT での MEG 効果は東北大学で確認されている。現在、半導体 CNT とフラーレンを用いたヘテロ接合薄膜太陽電池での MEG 現象の観測を試みている。2Eg 以上の光照射下において非線形な効果が確認されており、MEG 現象であるかどうかの確認を進めている。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 4、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

14) ナノ材料系ボトムセルの開発 B (東北大学)

<H24 中間目標 : pn 接合内蔵 CNT 太陽電池で変換効率 4%を達成する。明確な多重励起子生成 (MEG) 効果を確認する。H26 最終目標 : pn 接合内蔵 CNT 太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

熱拡散法によりカリウムを部分的に内包した単一半導体 CNT を合成し、その電流-電圧特性を測定することで、pn 接合内蔵 CNT 太陽電池の赤外光照射時の発電を初めて観測した。また、1,550nm、1,650nm の赤外光照射時における発電効率は、それぞれ 3.8%、11.4%であり、CNT の光吸収効率に依存していることも明らかになった。また、プラズマイオン照射法によりセシウムを部分的に内包した単一半導体 CNT を合成し、その電流-電圧特性から、1,100nm の赤外光照射時の発電効率が 1.1%であることが分かった。プラズマ照射条件を最適化することによって、年度内に 4%以上の発電効率を実現できる予定である。また、CNT への内包処理に要する時間が、熱拡散法の 48 時間と比較して、プラズマイオン照射法では 15-60 分と極めて短いため、実用化のためにはプラズマイオン照射法が適していることを実証した。直径の異なる CNT を用いることで、CNT 太陽電池における多重励起子生成 (MEG) 効果に対する CNT のバンドギャップの依存性を調べた結果、バンドギャップの増大に伴い MEG が生じる入射光エネルギーの値も比例して増大することが分かった。さらに、MEG が生じる入射光エネルギー値は、バンドギャップの 2 倍のエネルギーより約 0.1eV 大きく、そのメカニズムについて詳細

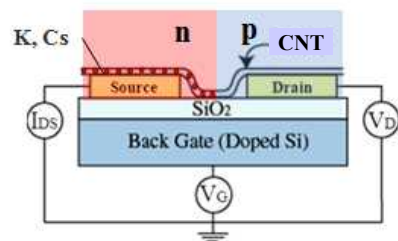


図 27. pn 接合内蔵 CNT 太陽電池

に調べているところである。

<成果発表件数>特許出願（外国）：3（0）、論文（査読付）：14（14）、研究発表・講演：65、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

### 15) 強相関材料ボトムセルの開発 A（産業技術総合研究所）

<H24 中間目標：有機強相関材料を用いた積層型ヘテロ接合素子を作製し、1eV 以下の低光子エネルギー領域で分光量子効率 6%以上を達成する。有機強相関材料を用いた積層型ショットキー素子を作製し、多重励起子生成効果にもとづくキャリア増倍率 300%以上を達成する。H26 最終目標：有機強相関ヘテロ接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

- 真空蒸着法において、基板を低温（約 100 K）に冷却することで、分子化合物の高均質薄膜素子を作製し、整流効果を確認することに成功した。
- ポリマー半導体成膜の独自技術であるプッシュコート法を用いて、単一成系有機半導体を対象としたセル形成を行い、1%程度の光電変換効率を得ることに成功した。現在、分子化合物材料および同様な系であるドナー・アクセプター型ポリマーについて、本手法による高均質な積層型薄膜素子の開発に取り組んでいる。
- 物理気相成長法を用いて、DBTTF-TCNQ、DBTTF-PMDA、PTZ-TCNQ、TMB-TCNQ の 4 種類の分子化合物について、高均質薄片単結晶を作製することに成功した。さらに、DBTTF-TCNQ について、単結晶ラミネート法により積層型素子を作製し、横型素子に比べて電流密度を 1,000 倍に改善することに成功した。
- 6 種類の分子化合物について、光電荷キャリアの拡散長を評価し、CT ギャップが大きな材料で拡散長が長くなる傾向を見出した。これにより、高効率化にむけた分子化合物半導体の材料選定指針が得られた。
- 光変調キャリア検出法により、分子化合物半導体内に生成した、電子と正孔の寿命が同一であることを見出し、両者の再結合が拡散長を制限していることを明らかにした。
- 光励起エネルギーを 0.8-4.7eV の範囲で可変な、光変調吸収分光測定装置を整備した。現在、励起エネルギーを変えた測定により、エネルギーギャップ 2 倍以上の領域でのキャリア増倍効果を検証中である。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：1（1）、研究発表・講演：11、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：1

### 16) 強相関材料ボトムセルの開発 B（理化学研究所）

<H24 中間目標：強相関電子酸化物において、光誘起多重キャリア生成を起こす材料を開拓する。また、強相関電子酸化物を用いた接合において、逆バイアス印加によって電流増幅を行い、量子効率 100%以上を目指す。さらに、現実の太陽電池に即して、2 種類の強相関電子材料の接合において、光励起から電子-正孔対分離までをシミュレートできるアプリケーションプログラムを開発する。H26 最終目標：強相関酸化物ヘテロ接合に疑似太陽光を照射した際の発電効率が 10%以上であることを目標とする。そのため、p、n 層の化学ポテンシャル差と Voc の関係を明らかにして 0.5V 以上を達成する。また、多重生成したキャリアを外部へ効率よく取り出す p-i-n 接合のバンド接続の条件を明らかにする。>

これまでに、強相関電子酸化物と普通の半導体から成る pn 接合において、強相関電子酸化物での光吸収による光起電力を観測できたが、100%以上の量子効率を得ることはできなかった。そこで、逆バイアス印加による取り出し電流の増幅を目指して、強相関電子酸化物の一つである LaMnO<sub>3</sub> を用いた pn 接合を作製し、逆バイア

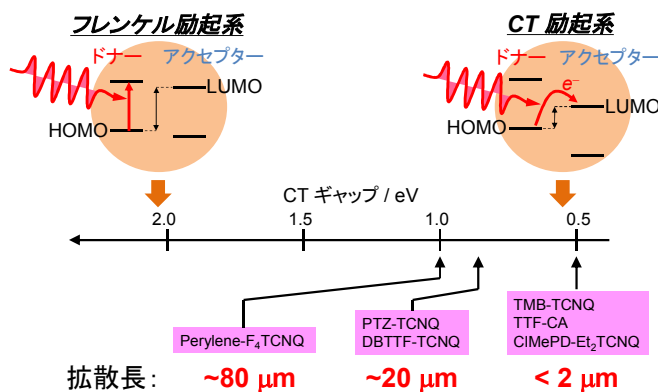


図 28. 拡散長と CT ギャップの関係

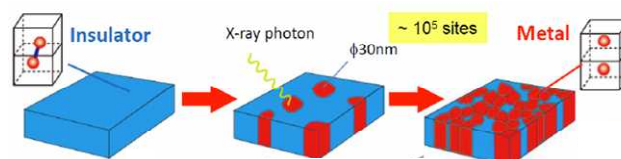


図 29. W:VO<sub>2</sub> における多重キャリア生成

スを印加しながら光電流を測定した。その結果、LaMnO<sub>3</sub> 中の空乏層幅が広がることによる光電流の増加を観測した。この結果を元に、強相関電子酸化物中の空乏層幅やキャリア密度を評価することに初めて成功した。また、これまでに、強相関電子酸化物における光誘起の多重キャリア生成現象をポンプ-プローブ分光により明らかにしてきた。この光誘起多重キャリア生成を伝導特性で実証するため、X線照射効果を調べた。タングステンをドープした二酸化バナジウム (W:VO<sub>2</sub>) の薄膜に X線を照射したところ、絶縁体から金属への相転移が観測された。この相転移の際に、X線の光子 1 個当たり 10<sup>5</sup> 個のキャリアが生成されていることがわかり、光誘起多重キャリア生成を伝導特性から明確に実証することができた。これまでに開発してきた理論的手法を発展させ、現実の系を電子スピンの相互作用や電子のバンド構造にモデリングし、接合系での光励起から電子-正孔対分離までをシミュレートできるアプリケーションプログラムを開発した。このシミュレーションでは、多重キャリア生成がおよそ 100%を超える量子効率の増加をもたらす効果を示すことが明らかとなった。今後は、より現実を詳細にモデリング出来るアプリケーションの開発を進め、高効率太陽電池の理論設計を目指す。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (1) 、論文 (査読付) : 6 (6) 、研究発表・講演 : 21、新聞・雑誌等への掲載 : 2、展示会出席 : 0

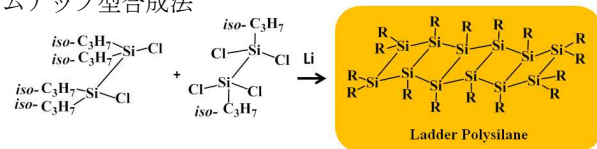
17) ナノ材料系トップセルの開発 A (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の単接合太陽電池で変換効率 10%を達成する。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の単接合太陽電池で変換効率 12%を達成する。>

平面ポリシラン材料の合成技術については、有機合成化学的手法により、ラダーポリシランを四塩化ケイ素から段階的に合成するボトムアップ型合成方法、ならびにケイ素化カルシウムから層状ポリシランを合成するトップダウン型合成方法を確立した。種々の分光的手法により、構造の同定ならびに薄膜のバンドギャップ特性を明らかにした。バンドギャップ制御したラダーポリシランや層状ポリシランの薄膜を用いて、現在太陽電池デバイスを作製中であり、今年度中には特性評価を行う予定である。CdS/CdSe 量子ドット増感型 TiO<sub>2</sub> 太陽電池において、セル変換効率 2.1%を得た。SiO<sub>2</sub> による絶縁層のコートにより、再結合が抑制され変換効率が向上することを明らかにした。トップセル用の吸収波長領域を有する有機色素分子を用いた TiO<sub>2</sub> 太陽電池において、変換効率 6.2%を達成した (トップセル用の透明 TiO<sub>2</sub> 電極と透明対極を使用)。ともに、今後のセル条件の最適化により、さらなる効率の向上が期待できる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 24 (14) 、研究発表・講演 : 25、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出席 : 0

ボトムアップ型合成法



トップダウン型合成法

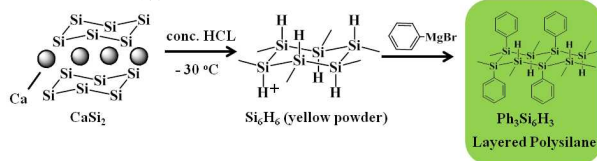


図 30. ラダーポリシラン、層状ポリシラン

18) ナノ材料系トップセルの開発 B (東京農工大学)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の単接合ナノ結晶シリコン (nc-Si) 膜太陽電池で変換効率 10%を達成する。その特性値としては Voc=0.7V、Jsc=18mA/cm<sup>2</sup>、FF=0.8 を目標とする。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.8eV 以上の単接合 nc-Si 太陽電池で 12.5%の変換効率を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

量子サイズナノ結晶シリコン (nc-Si) のトップセル材料への適合性を、プロセス技術と光電特性の両面から確認した。

a) ナノ結晶シリコン自立膜の作製プロセス技術の開発

新規の剥離技術とアニールにより直径 8cm の自立膜を得た。p 型、n 型、pn 接合基板のすべてに対して、内蔵電界を有する nc-Si 単層セルを作製する技術を確立した。

b) 光電変換特性の測定

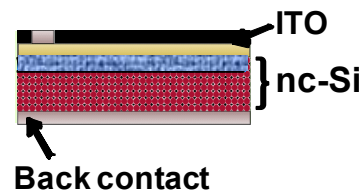


図 31. ナノ結晶シリコン自立膜セルの構造

全試料のバンドギャップがトップセルの要件を満たすことを確認、すべての単層セルで光電変換効果を観測し、特に pn 接合基板から作製したセルでは目標を大きく上回る  $V_{oc}=0.87V$  を得た。光電流の分光感度ピークが所望の短波長域にあることを裏付けた。

c) 関連光電子機能の解析

ホットエレクトロンの生成と電離衝突の過程を理論的に明らかにし、nc-Si ではバルクに比べて光キャリア増倍が発現しやすいことを見いだした。ドープした色素分子への光エネルギー伝達を裏付けた。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 7 (7) 、研究発表・講演 : 14、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

19) ナノ材料系トップセルの開発 C (九州大学)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上のシリコンナノドットを実現し、多重励起子生成太陽電池で変換効率 10%を達成する。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.8eV 以上のシリコンナノドットを実現し、多重励起子生成太陽電池で変換効率 12%を達成する。>

a) バンドギャップ 1.7eV 以上のシリコンナノドットの生成

- マルチホロープラズマ CVD 法により、結晶 Si ナノ粒子の生成に成功し、更に Si ナノ粒子径の減少に伴う、光吸収端の短波長側シフトを確認した。粒径 17nm で 2eV の光吸収端を実現した。
- Si ナノ粒子生成用プラズマ源、表面処理ラジカル生成用プラズマ源を同一真空容器内にもつダブルマルチホロープラズマ CVD 法を開発し、1.7eV 以上のバンドギャップ ( $E_g$ ) を有するコア/シェル構造 Si ナノ粒子によるポーラス膜のコンビナトリアル生成に成功した。

b) 多重励起子生成太陽電池で変換効率 10%を達成

- コア/シェル構造 Si 量子ドット増感型太陽電池において、 $2E_g$  以上の短波長領域で、効率の急激な上昇を観測し、約 70%の内部量子効率を達成した。(多重励起生成を示唆する結果)
  - $TiO_2$  ナノ粒子表面に ZnO バリア層を形成する新規セル構造を考案し、キャリア電子の電解液へのリークを低減し、初期の約 10 倍に相当する  $1mA/cm^2$  以上の短絡電流値を達成した。
  - 短波長側の光吸収を Si ナノ粒子で、長波長側の光吸収を色素で行うことを目的とした Si 量子ドット/Ru 色素ハイブリッド増感型太陽電池を開発し、効率 3%を実現した。現在、高効率化のために、PEDOT:PSS 層を用いた Si 量子ドット/有機ハイブリッド型太陽電池の実験を行っている。
- <成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 5 (1) 、研究発表・講演 : 19、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

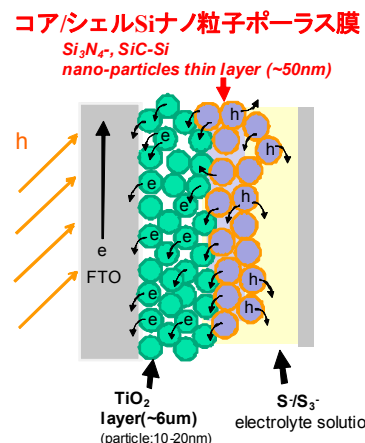


図 32. コア/シェル構造 Si 量子ドット増感型太陽電池の構造

20) 化合物系トップセルの開発 A (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の太陽電池で変換効率 10%を達成する。InGaP/InGaAs 量子ドット太陽電池で変換効率 10%を達成する。H26 最終目標 : バンドギャップ 1.8eV の太陽電池で変換効率 12%を達成する。InGaP/InGaAs 量子ドット太陽電池で変換効率 12%を達成する。>

a) カルコゲナイド半導体トップセルの開発

$Cu(In_{1-x}Ga_x)(Se_{1-y}S_y)_2$  (CIGSSe) の多元蒸着製膜 (三段階法製膜) において安定性と制御性の高い硫黄原料供給法を確立するために硫黄ラジカルセルを開発した。これにより S/(S+Se)比を変化させることが可能になり、1.0eV から最大 2.0eV の  $E_g$  を持つ CIGSSe 太陽電池を作製することができた。S/(S+Se)比が 0.8 の高濃度 S 太陽電池 ( $E_g=1.7eV$ 、反射防止膜なし) で、開放電圧 0.83V、短絡電流密度  $9.2mA/cm^2$ 、曲線因子 0.71、変換効率 5.3%が達成された。開放電圧、曲線因子は高特性が得られたことから、高濃度に S を添加しても結晶品質を損なうことな

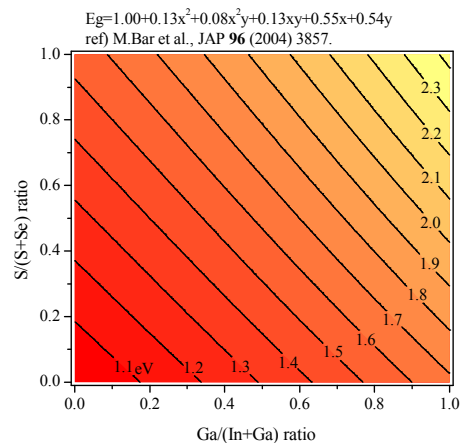


図 33. CIGSSe の組成とバンドギャップの関係

く硫黄の混晶化がされているといえる。電流密度が低特性であったのは、デプスプロファイル測定・キャリア濃度測定・外部量子効率測定による評価から、膜表面近傍に S/(S+Se) 比の非常に高い領域が形成されていたことが原因であることがわかった。実際に S/(S+Se) 比を 0.9 まで増加させバンドギャップを 1.8eV 付近まで高めても、組成分布の最適化（バンドエンジニアリング）を行うことで電流密度 12.3mA/cm<sup>2</sup> が得られ電流の向上が確かめられた。直近の成果では硫黄の発光スペクトルと光強度を成長その場でモニタリングする機能を硫黄ラジカルセルに付加し、原料供給の精度を高めることができた。現在はこのモニタリング技術と製膜プロセスの改良による詳細なバンドエンジニアリングと薄膜高品質化から電池特性を向上させ目標達成を目指している。

#### b) P 系ワイドギャップ材料

固体ソース MBE を用いて、バンドギャップ 1.9eV の InGaP 成長技術の高度化を行った。成長温度 480°C、成長速度 1.0 μm/h の時の膜質が最も良好であり、その条件で成長した InGaP 太陽電池は、AR コート無しで 8.2%の変換効率を達成した。これは、固体ソース MBE を用いた InGaP 太陽電池作製の、初めての系統的な研究である。理想的なバンド構造を持つ中間バンド太陽電池作製のため、InGaP 上の In(Ga)As 量子ドット形成を試みた。InGaP 上に InGaAs 量子ドットを直接成長した場合、わずか 1 分子層の成長で量子ドットが形成され始めることがわかった。また InGaP と In(Ga)As ドットの間には GaAs スペーサ層を導入し、量子ドットの量子準位が InGaP バンドギャップ中で制御可能であることを初めて見出し、中間バンド太陽電池の理想的なバンド構造に近づくことがわかった。現在は InGaP ベースの GaAs/InGaAs 量子ドット超格子の作製に着手しており、ミニバンド形成が期待できる。InGaP をベースとした GaAs/InGaAs 量子ドット太陽電池を世界で初めて試作した。20 層までの多積層量子ドット太陽電池において、ドット層数の増加に応じて外部量子効率、変換効率ともに増加することがわかった。変換効率は、10 層で 9.6%、20 層で 10.3%であり（AR コート有）、中間目標を達成した。GaAs ベースの InGaAs 量子ドット電池の場合はドット層数の増加に伴って変換効率は減少したが、InGaP 上の場合には 20 層まで単調に増加した。これは InGaP ベースの量子ドット太陽電池の有効性を示すものである。

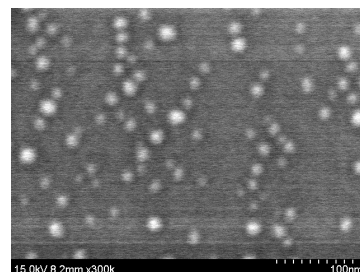


図 34. InGaP 上 InGaAs 量子ドット (1 分子層堆積後)

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：10（5）、研究発表・講演：26、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

### 21) 化合物系トップセルの開発 B（パナソニック）

<H24 中間目標：バンドギャップ 1.7eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 10%を達成する。その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命 10ns 以上、内部量子効率 90%以上、バンドギャップ以下の波長の全線透過率 80%以上を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 20%達成に寄与する。H26 最終目標：バンドギャップ 1.7eV 以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率 12%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

#### a) 吸収層のバンドギャップ分布制御技術

液体ソースを用いたスプレー塗布熱分解法（SPD）で Zn を固溶した新規ワイドギャップ光吸収層 ZnCuInS<sub>2</sub>（ZCIS）膜を開発し、Zn 固溶率 0.2-0.3 でバンドギャップ 1.7-1.8eV の制御を達成。また、組成比と製膜温度の制御で ZCIS 膜のキャリア寿命 4ns を達成。バンドギャップ 1.8eV の ZCIS 膜を用いた太陽電池で変換効率 4.4%達成。

#### b) 界面制御技術

n 形界面層 In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 膜上への p 形光吸収層 ZCIS 膜の形成での元素相互拡散による電圧低下要因を把握。In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> と ZCIS 膜の間に光吸収層よりバンドギャップが広い ZCIS 層を形成し、光吸収層 ZCIS 膜の高温製膜による相互拡散を抑制することで、波長 390nm で量子効率 90%を達成。さらにワイドギャップ挿入層との屈折率調整で ZCIS 膜の吸収端波長より長波長での透過率 70%以上を達成。界面への挿入層の最適化で高効率化に目処。

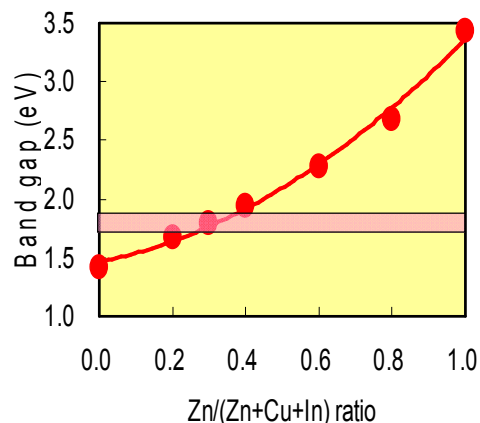


図 35. ZCIS の組成とバンドギャップ

c)裏面コンタクト制御

裏面コンタクト層として p 形ワイドギャップ材料を検討し、CuGaS<sub>2</sub> を用いることで、短絡電流密度 (J<sub>sc</sub>) が約 2 倍に増加。ただし、V<sub>oc</sub> は低下。組成の最適化等による V<sub>oc</sub> 低下抑制を検討予定。

d)吸収制御技術

ヘイズ率 90%以上の拡散フィルムを用いることで、J<sub>sc</sub> が増加し、効率 1.1 倍に増加。フィルムに代わる光散乱層を独自に開発しヘイズ率 90%以上を達成。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (1)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 4、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

22)化合物系トップセルの開発 C (東京工業大学)

<H24 中間目標 : ワイドギャップ酸化物半導体 (バンドギャップ 1.7eV 以上) を用いた太陽電池で、変換効率 10%を達成する。その要素技術として、バンドギャップが~2eV の酸化物半導体を新たに探索し、その欠陥密度の制御技術の開発と酸化物を用いた太陽電池作製技術の実証を行う。H26 最終目標 : ワイドギャップ酸化物半導体 (バンドギャップ 1.7eV 以上) を用いた太陽電池で、変換効率 12%を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

a)ワイドギャップ酸化物半導体の探索

5s<sup>2</sup> 電子配置を持つ SnO の両極性発現に平成 22 年度まで注力した影響で遅れていたアモルファス In-Ga-Zn-O (a-IGZO) のナローギャップ化について、平成 23 年度から主に取り組み、Cd-Ga-O 系において製膜条件や組成比を制御することで a-IGZO よりバンドギャップの小さいアモルファス酸化物半導体が見出された。

b)ITO コートガラス基板上への p 型 Cu<sub>2</sub>O 薄膜の高品位化

単結晶基板上への Cu<sub>2</sub>O 製膜では Cu<sub>2</sub>O 単結晶に近い移動度 (~100cm<sup>2</sup>/V・s) を有する薄膜製膜条件を既に確立したが、太陽電池を作製するためには透明電極上へ高品位薄膜を製膜する必要がある。そのため、ITO コートガラス基板上に高品位薄膜が得られる条件を探索した。その結果、高移動度薄膜を得るためには室温製膜後のポストアニール処理が有効であることを見出し、Cu<sub>2</sub>O が[200]配向し移動度が 13cm<sup>2</sup>/V・s に達する薄膜の製膜条件を確立した。しかしながら現状では、電気・光学特性の膜厚依存性が大きく、膜厚の増加と共にギャップ内準位が著しく増加する等課題も残されている。

c)ヘテロ接合作製

平成 22 年度までの研究で明らかになってきた界面における Cu の価数制御技術の確立に取り組んだ。実用化も見据え汎用性の高いスパッタリング法による製膜も開始した。スパッタリング法の場合、Cu<sub>2</sub>O 上へ酸化物を製膜すると直ちに表面の Cu が酸化され Cu<sup>2+</sup>になること、Cu<sub>2</sub>O 薄膜成長初期においても Cu の価数は 2 価であるため製膜順序を変えても界面における Cu が 2 価であること、ポストアニール処理で Cu を 1 価に還元できるが膜厚の増加と共にその効果が薄れることなどが明らかとなったが、現時点ではこの問題を完全に解決するには至っていない。一方でスパッタ法よりプラズマの酸化力が弱いと考えられる PLD 法を用いて a-IGZO/Cu<sub>2</sub>O 太陽電池を試作したが、リーク電流が大きく J<sub>sc</sub> が小さい特性しか得られておらず、ここでもやはり Cu の価数を如何に制御していくかが大きな課題である。p 型 Si/n 型 a-IGZO 太陽電池については a-IGZO 層の組成を変える (具体的には Ga 濃度を増やす) ことで伝導帯下端の位置の最適化を図り、高 V<sub>oc</sub> 化を目指した研究に取り組んだ。Ga の増加に伴い E<sub>g</sub> を増加させることができた。しかしながら E<sub>g</sub> の増加は伝導帯下端の上昇のみではなく価電子帯上端の低下も引き起こした。これに加えて欠陥準位の増加も認められ、当初期待したような高 V<sub>oc</sub> 化を実現することはできなかった。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 3 (3)、研究発表・講演 : 6、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

23)化合物系トップセルの開発 D (豊橋技術科学大学)

<H24 中間目標 : バンドギャップ 1.7eV 以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率 10%を

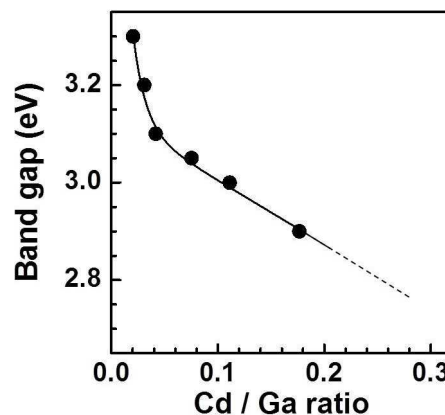


図 36. アモルファス Cd-Ga-O のバンドギャップ

達成する。その要素技術としてバンドギャップ 1.7eV 以上の Cu<sub>2</sub>O において 50cm<sup>2</sup>/V・s を達成し、Cu<sub>2</sub>O/ZnO 単接合太陽電池形成技術を確立する。H26 最終目標：バンドギャップ 1.7eV 以上の酸化物材料を用いた太陽電池において変換効率 12%を達成する。その要素技術としてバンドギャップ 1.7eV 以上の Cu<sub>2</sub>O 単一配向膜にて移動度 100cm<sup>2</sup>/V・s を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率 25%達成に寄与する。>

a) 多接合太陽電池の光吸収層用ワイドバンドギャップ高品質酸化物材料の開発とバンドギャップ制御技術の確立

電気化学ヘテロエピタキシャル成長により Cu<sub>2</sub>O 層（バンドギャップ 1.7-2.1eV）を単配向化することによって移動度を約 30 倍向上させると共に、加熱処理により移動度がさらに向上することを明らかにした。現状の移動度は 21cm<sup>2</sup>/V・s だが、成長ならびに加熱条件の最適化により 50cm<sup>2</sup>/V・s は達成可能である。また、Ag を電気化学的にドーピングすることによってキャリア密度が向上することも明らかにした。

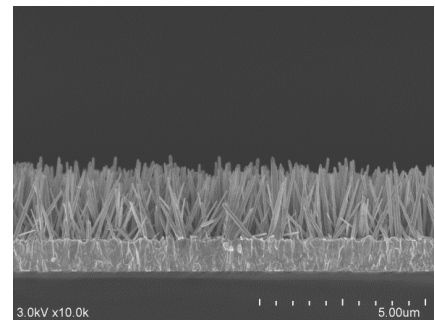


図 37. ナノピラーZnO

b) 単接合太陽電池の形成と高性能化

光アシスト電気化学製膜法を新規に提案しサブストレート型 Cu<sub>2</sub>O/ZnO 太陽電池が形成できること、バッファ層として CdS、SiO<sub>2</sub> が有効であること、ナノピラーZnO を導入することによって均一層の場合に比べ短絡電流密度が 86%増加することを示した。

c) 多接合太陽電池の構築

多接合化を念頭に置いた FTO/Cu<sub>2</sub>O/ZnO/GZO 積層体の形成に着手した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：5（5）、研究発表・講演：13、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

【平成 25～26 年度】（事業終了時）

1) メカニカルスタック・デバイス化技術の開発（産業技術総合研究所）

<H26 最終目標：(a)接合技術の高度化により、高度光利用技術と組み合わせて多接合太陽電池（非集光）で変換効率 30%を達成する。(b)メカニカルスタック型太陽電池における、実用化に伴う信頼性に関する課題を明らかにする。>

(a)前期間に開発した導電性ナノ粒子を用いたスマートスタック技術において接合条件等の最適化を行い、接着抵抗 1Ωcm<sup>2</sup> 以下、光損失 2%を実現した。また、化合物系トップセル（テーマⅢ-2-1）の進捗により個別セルの性能向上また設計の最適化等により、GaAs/InP 系 4 接合素子において変換効率 31.6%を実現、最終目標効率を達成した。さらに、実用上で重要である GaAs/Si 系、GaAs/CIGSe 系等の異種接合構造も検討し、特に後者の GaAs/CIGSe 系 3 接合素子において変換効率 24.2%（世界最高性能）を達成した。

(b)信頼性においては、スマートスタック法により試作した接合素子に対し、加速劣化試験（130℃/1000hr～150℃/100hr）および温度サイクル試験（-40℃～+85℃/200 サイクル）を行った。いずれの試験においても接合品質に起因する性能劣化は観測されず、特に加速劣化試験では推定素子寿命 17 万時間以上@60℃を確認した。これより、初期的ではあるがスマートスタック法による太陽電池の実用信頼性が確認された。

今後は、将来の実用化に向けて、量産性、低コストに適う技術に高度化する必要がある。特に重要なのは ELO 剥離技術、実装技術の完成度を上げることである。

<成果発表件数>特許出願（外国）：2（1）、論文（査読付）：3（3）、研究発表・講演：18、新聞・雑誌等への掲載：11、展示会出展：2

2) メカニカルスタック技術の開発（東京農工大学）

<H26 最終目標：1. 大面積低抵抗接合技術開発：4 インチ基板で接合抵抗率 1Ωcm<sup>2</sup> 以下の安定実現 2. 高度光利用技術開発：中間接着層反射ロス低減、実効透過率 0.7 以上、3. 耐環境安定性技術開発：-40℃～80℃ヒートサイクル 1000 h の条件下で剥離無し及び抵抗率 3 Ωcm<sup>2</sup> 以下、4. 高効率非集光多接合セル実証：3～4 インチφ基板サイズ多接合セル実効効率 25%>

非集光高効率多接合ソーラーセル用メカニカルスタック技術開発を実施した。1) ITO 透明導電粒子を透明接着剤に分散混合した透明導電中間接着剤を開発した。ガスプレス法を開発し、ITO 分散混合



透明導電セメダイン接着剤を用いて 4 インチサイズの半導体基板接合を安定的に達成した。そして、ITO 量とガスプレス条件の最適化により接合抵抗率  $1 \Omega \text{cm}^2$  以下を安定的に達成した。2) さらに、IGZO 膜を半導体と接着層の間に形成して光反射ロス低減に成功し反射ロスを 0.1 以下に低減できた。3) ITO 分散混合透明導電セメダイン接着剤を用いたシリコン基板接合試料において、(1) 温度  $80^\circ\text{C}$ 、湿度 85%、1000h の条件下で  $3 \Omega \text{cm}^2$  以下を達成した。また (2)  $-40^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$  ヒートサイクルにおいて 1500h 後の接合抵抗率  $1.5 \Omega \text{cm}^2$  を達成した。原理的耐環性能を確認した。4) 本メカニカルスタック技術を用いて a-Si/c-Si 多接合セル及び InGaP/GaAs/Ge 多接合セルの作製に成功した。さらに  $8 \times 4 \text{ cm}^2$  サイズ、31.6% 効率 InGaP/GaAs/Ge 三接合セルのシリコン基板に貼り合わせを行い効率 31.4% (効率ロス 0.2%) を確認した。また、上記  $8 \times 4 \text{ cm}^2$  サイズセルの Ge を薄膜化した薄膜 InGaP/GaAs/Ge 三接合セルをシリコン基板に貼り合わせを行い、効率 27.8% を確認した。以上のように本プロジェクトで開発した ITO 分散透明導電接着層は 30% 級の大面积高効率多接合ソーラーセルの製造に十分使用できる低抵抗接合、高光透過性能を有することを実証した。本メカニカルスタック技術は非集光大面积高効率多接合ソーラーセル製造技術として期待できる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 4 (4)、研究発表・講演 : 13、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 1

### 3) ヘテロ接合デバイス化技術の開発—低ダメージ成膜 (京セラ)

<H26 最終目標 : ヘテロ接合を形成することでバンドギャップ  $0.9 \text{ eV}$  の単接合太陽電池で  $1.4 \text{ eV}$  以下の光に対して電流密度  $15 \text{ mA/cm}^2$  以上を達成する。又、本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所の提供し多接合太陽電池の変換効率 30% 達成に寄与する。>

#### a) ナローギャップ材料に適用可能な表面終端手法の開発

バンドギャップ  $1.1 \text{ eV}$  の CZ-Si 基板への温水処理手法の開発で Q/M CP 処理に相当する  $200 \mu\text{s}$  超の実効  $\tau$  と  $100 \text{ cm/s}$  を下回る表面再結合速度が得られた。次いで  $0.7 \text{ eV}$  相当の CZ-Ge 基板に適した塩酸処理手法を開発し、CZ-Ge 単結晶基板上に a-Si 層を PCVD 装置で形成したヘテロ接合太陽電池素子プロセスに適用する事で  $260 \text{ mV}$  超の  $V_{oc}$  が得られた。

#### b) Ge ヘテロ接合素子の特性向上と SiGe エピ基板でのヘテロ接合素子試作評価

a-Si/Ge ヘテロ接合太陽電池素子プロセスの最適化で  $290 \text{ mV}$  超の  $V_{oc}$  が得られた。また、 $E_g = 0.97 \text{ eV}$  付近の SiGe エピ基板で作製したヘテロ接合素子特性において、光子エネルギー  $1.4 \text{ eV}$  以下の光に対する電流密度で  $0.9 \text{ mA/cm}^2$  が得られた。その他、N 型基板ヘテロ接合素子プロセスへの適用では N 型 (111) Si 基板で作製した a-Si/c-Si ヘテロ接合素子で  $V_{oc}$   $670 \text{ mV}$  超が得られた。また、PCVD 装置を用いない低プラズマダメージの新規ヘテロ接合プロセスの検証を行い、Si 単結晶基板と Ge 単結晶基板の双方で試作したヘテロ接合太陽電池素子でリークのない素子特性が得られた。

#### c) 最終年度目標の達成度について

CZ-Si 基板と CZ-Ge 基板の双方でデバイスプロセスの開発と最適化を行い、其々、技術的成果は得られたが、ターゲットとした  $0.9 \text{ eV}$  の高品質なナローギャップ材料基板の入手が困難であり、最終年度目標は未達成となった。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

### 4) 高度光利用技術の開発 A (産業技術総合研究所)

<H26 最終目標 : 周期構造を利用したフォトニック基板を単接合太陽電池に適用し、従来技術に較べて近赤外領域の波長感度を 20% 向上させる。本技術を薄膜型多接合太陽電池に適用し、発電効率 30% を達成する。>

#### a) 高度光閉じ込め基板の開発

独自の平坦型光閉じ込め基板 (FLiSS) 構造を提案・開発した。第二期までに開発した FLiSS 構造に対し、光散乱効果改善に向けた設計変更を行った。新規 FLiSS 構造を薄膜微結晶シリコン太陽電池に適用した結果、平坦化無しの基板に較べ変換効率の 25% 向上を実現し、目標値 (20%) を上回る成果を達成した。また、高効率メカニカルスタック多接合太陽電池への展開を目指し、代表的な III-V 族化合物太陽電池である GaAs 薄膜太陽電池に FLiSS を展開することを試みた。FLiSS 及び金属ナノ粒子分散貼り合せ技術を活用することにより、薄膜 GaAs 太陽電池に FLiSS の貼り合わせることに成功し、2 倍の膜厚に相当する長波長感度向上と、良好な発電特性が得られることを確認した。

#### b) プラズモン利用光閉じ込め技術

スタンプ転写による銀ナノ構造作製手法を薄膜微結晶シリコンおよびアモルファスシリコン太陽電池に適用し、それぞれ 11%、4%の相対変換効率向上を確認した。また、本技術開発から派生した金属ナノ粒子利用貼り合せ技術は、メカニカルスタック型多接合太陽電池における重要技術の一つとなり、発電効率 30%超の実現に大きく寄与した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：8（5）、研究発表・講演：13、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：1

#### 5) 高度光利用技術の開発 B（大阪大学）

<H26 最終目標：新規に開発する光閉じ込め構造により、微結晶シリコン単接合太陽電池において、従来技術に較べての相対効率を 20%向上させる。また、本技術を用いて産業技術総合研究所等と協働して多接合太陽電池で変換効率 30%達成に資する>

##### a) プラズモン活用型透明導電層

ナノサイズの Ag 孤立粒子を作製し、サイズや形状、ならびに透明導電膜層などの環境媒質を調節することによって、光散乱波長域を制御することができることを実証した。

##### b) 微結晶シリコン単接合太陽電池における技術検証

上記のプラズモンを裏面光散乱/拡散層に適用して、従来技術に比較して、800nm より長波長領域での光感度を 20%以上向上させることができた。

##### c) アモルファスシリコン単接合太陽電池における技術検証

項目 b) とは異なる光吸収波長領域を持つアモルファスシリコン単接合太陽電池においても、項目 a) の成果を踏まえたプラズモン活用型透明導電層を新たに設計・製作し、長波長領域での光吸収量の向上を観測した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：4（4）、研究発表・講演：12、新聞・雑誌等への掲載：1、展示会出展：0

#### 6) SiGe 系薄膜ボトムセルの開発 A（産業技術総合研究所）

<H26 最終目標：バンドギャップ 0.9eV 以上の SiGe 太陽電池で、1.4eV 以下の光に対して電流密度 15mA/cm<sup>2</sup> 以上>

SiGe 膜の高品質・低転位密度技術として、階段状の組成傾斜層、歪み反転層、急速アニールを組み合わせたバッファ層技術を確立した。組成傾斜層のステップ数を制御する極めて簡便な手法により、Ge 組成 0.42~0.84 の広範囲で Si 基板上に成長した SiGe 薄膜の低転位密度化を実現した。SiGe 膜中の貫通転位密度はバッファ層を用いていない場合の 1/10000 以下に低減した。このようにして得られた高品質 SiGe 結晶薄膜を用いて、0.9~1.0 eV 帯用の SiGe 太陽電池の系統的な研究開発を世界で初めて行った。SiGe 太陽電池の外部量子効率における吸収端は Ge 組成の増大に伴い単調に長波長化し、SiGe 膜の吸収係数も増大し 600 nm 以上の波長の分光感度が顕著に増大することを確認した。短絡電流密度 ( $J_{sc}$ ) は Ge 組成を増大させるに従って単調に増大し、Ge 組成 0.84 の SiGe 太陽電池において 24.0 mA/cm<sup>2</sup> が得られたが、1.4 eV 以下(880 nm 以上)の光に対する  $J_{sc}$  はこの太陽電池においても 3.4mA/cm<sup>2</sup>にとどまった。今回の太陽電池試作に用いた 3 $\mu$ m 厚 SiGe 薄膜では十分な光吸収が得られておらず、目標の達成には光マネージメントのさらなる検討と、少数キャリア寿命などのバルク物性パラメータの解析によるデバイス設計の再構築が必要である。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：3（3）、研究発表・講演：7、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 7) SiGe 系薄膜ボトムセルの開発 B（東京工業大学）

<H26 最終目標：太陽電池を試作し、バンドギャップ 0.9eV 以上の単接合太陽電池で、1.4eV 以下の光に対して電流密度 15mA/cm<sup>2</sup> 以上を達成する。その達成に必要な、Ge エピタキシャル膜の膜厚と同程度キャリア拡散長（キャリア寿命 10 $\mu$ s）を達成し、素子レベルで Voc>0.2eV を目標とする。>

Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>-GeF<sub>4</sub> 系原料ガスを用いる反応性熱 CVD 法により、Ge[100]基板上に得られるヘテロエピタキシャル成長した Ge 単結晶膜の結晶性の向上と貫通転移密度の低減を図るため、熱アニールを検討し、650°C20 分程度の熱処理により、約 1 桁の貫通転移密度の低減（ $\sim 5 \times 10^5$ cm<sup>-2</sup>）を図ることができた。この成果を活かし、Si 基板上に形成した低温形成の Ge 単結晶膜をシード層として、熱アニールにより高品質化を図り、2段階で Ge 膜を成長する 2 段階成長法により、貫通転移を Ge/Si 界面に留めることができることを断面 TEM 観察から確認した。太陽電池の試作に当たり、反応性熱 CVD 法におけ

る PH3 による n 型ドーピング手法を確立し、Ge の高抵抗化を図った。これらの手法を組み合わせ、Ag-ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/Ge/p-Si/Al セルを作製し、太陽電池を試作した。その結果、特性は極めて悪いが、ボトムセルでの発電特性 ( $V_{oc}$ :0.045V、 $I_{sc}$ :33.2mA、FF:0.284) を観測した。成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):4(4)、研究発表・講演:2、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出席:0

#### 8) SiGe 系薄膜ボトムセルの開発 C (東海大学)

<H26 最終目標:バンドギャップ 0.9eV 以上の単接合太陽電池で、1.4eV 以下の光に対して電流密度 15mA/cm<sup>2</sup> 以上を達成する。>

高効率薄膜太陽電池を実現するために、積層型太陽電池の最下層を担う擬単結晶薄膜シリコンゲルマニウム(SiGe)の光電変換層の開発を、結晶 Si 基板上に形成した非晶質 SiGe または Ge を融点以下の熱処理により固体のまま結晶化させる固相成長による作製を検討した。その結果、前駆体である非晶質材料の密度が小さいと、固相成長する前に大気中から多くの不純物を取り込み結晶成長が阻害されることを発見した。結晶化を起こさない範囲で非晶質前駆体の製膜温度を高くすることで密度を増加させ不純物の取り込みを抑えることで、下地基板の結晶方位に沿ったエピタキシャル成長が可能であることが分かった。また、結晶シードとなる下地基板の結晶方位と導電型が固相成長に大きく影響することが分かった。n 型(100)方位の基板上では、下地基板に沿ったエピタキシャル成長が最も早く進行し、ランダムな結晶成長が起こる前にエピタキシャル成長が完了するため、本研究に最も適している。p 型(100)基板や n 型(111)基板上では、エピタキシャル成長の進行が遅く不純物を多く含む非晶質前駆体ではエピタキシャル成長が完了する前にランダムな結晶成長が現れる。一方、p 型(111)基板上では基板の結晶方位に沿ったエピタキシャル成長が起こらない。以上の結果は SiGe 光電変換層を成長させる際の重要な指針を与えるものであり、ナローギャップ光電変換層の作製に貢献すると考えられる。しかしながら、素子化の検討が計画通りに進捗せず、期間内に目標に見合った変換効率の達成は出来なかった。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):2(2)、研究発表・講演:23、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出席:0

#### 9) ナノ材料系ボトムセルの開発 A (産業技術総合研究所)

<H26 最終目標:①高純度半導体単層カーボンナノチューブ(CNT) (99wt%以上)の抽出率 30wt%以上を達成する。②東北大と協力して、半導体 CNT 利用太陽電池で外部量子効率 100%以上を実現する。>

1) 高純度半導体単層カーボンナノチューブ(CNT)の大量抽出技術開発を行った。単層 CNT 粉末の分散・分離、超音波・超遠心分離機の条件を最適化し、半導体単層 CNT の純度 99%wt、抽出率 30%wt を達成した。更に、CNT の純度を向上させる為に、150-200°C、1 時間、真空中で加熱する事により、残分(主に PF0 ポリマー)を取り除くことに成功した。

2) 東北大に高純度半導体単層 CNT を提供して、協力して太陽電池の作製・評価・議論を行った。更に、半導体単層カーボンナノチューブ(CNT)における多重励起子生成(MEG 効果)を研究する為に、高純度半導体単層 CNT を用いた ITO/PEDOT-PSS/半導体 CNT/LiF/Al の太陽電池を作製し、 $J_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、FF、変換効率の光強度依存性を、レーザー光を用いて調べた。その結果、一定の光強度(400mW 波長 1045nm)を超えると  $J_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、変換効率が約 4 倍増加した。この結果のメカニズムとしては MEG 効果だけではなくオージェ再結合(Auger recombination)効果も考えられる。変換効率が約 4 倍に増加する光強度は約 500 SUN 以上であり、この現象を利用するには高倍集光が必要である。

<成果発表件数>特許出願:0、論文:2、研究発表・講演:1、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出席:0

#### 10) ナノ材料系ボトムセルの開発 B (東北大学)

<H26 最終目標:CNT 利用太陽電池で外部量子効率 100%以上を実現する。>

##### a) ホモ界面 CNT 太陽電池の創製

プラズマイオン照射法とフォトリソグラフィを活用することにより、半導体 CNT に対する空間選択的セシウム原子の内包に成功した。これにより、大面積 CNT 薄膜デバイスを使った pn 接合素子の創製を実現し、さらに明確な太陽光発電特性を得ることに初めて成功した。

##### b) ヘテロ接合 CNT 太陽電池の創製

CNT と Si を用いたヘテロ接合太陽電池の創製に関して、ヘテロ界面薄膜 CNT 太陽電池(CNT-Si)の作製、及び明確な発電特性の観測に成功した。さらに、多重励起子生成に起因すると考えられる

発電効率の急激な上昇が観測された。CNT の被覆率を考慮することで、原理的には外部量子効率 100%以上を達成できることを示した。

さらなる発電効率の向上を図るべく、Si 以外の半導体材料を用いたヘテロ接合 CNT 太陽電池の創製を試みた。半導体材料としては、近年原子層薄膜として大きな注目を集めている遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)に着目した。TMD と半導体 CNT 薄膜の一部が重なるヘテロ接合デバイスを形成し、ソーラーシミュレータによる光照射強度依存性を測定した結果、照射光強度の増大に伴い、明確な短絡電流 ( $4.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) と開放電圧 (0.25 V) が生じることが明らかとなり、CNT/TMD を用いたヘテロ接合太陽電池の創製、及び明確な発電特性の観測に成功した。また、詳細な発電機構の解明を目的に、照射光エネルギー依存性を測定した結果、近赤外光 ( $1.5 \mu\text{m}$ ) と可視光領域 (750 nm) に発電ピークが観測され、それらがそれぞれ CNT 及び TMD の光吸収に由来することが明らかになった。これにより CNT/TMD ヘテロ接合太陽電池を用いることで、赤外光領域での高効率発電実現の可能性が示唆された。今後デバイス構造の最適化、およびCNTの多重励起子生成を組み込むことにより高効率ボトムセルとしての実現を継続して研究する予定である。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 18 (18) 、研究発表・講演 : 94、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 11) 強相関材料ボトムセルの開発 A (産業技術総合研究所)

<H26 最終目標 : 薄膜積層化により、電流密度を横型単結晶素子の 1000 倍 ( $1\text{mA}/\text{cm}^2$ ) に向上する。>

本研究課題では、構成分子の組み替えにより近～中赤外の幅広い領域でバンドギャップの制御が可能な強相関有機材料 (分子化合物半導体) を用いた革新型太陽電池の構築について検討を行った。H24 年度までの単結晶素子による実証研究から、強相関有機材料が、近赤外 ( $\sim 1 \text{eV}$ ) での光電変換が可能なこと、通常の単一成系有機半導体に比べて例外的に長い拡散長 ( $> 10 \mu\text{m}$ ) を有し、光電変換材料として極めて有用な性質を備えていることを明らかにしている。H26 年度からは、上記研究を通して明らかとなった優れた強相関有機材料の性質を高効率化に結実させるための方策として、薄膜積層型素子の開発に取り組んだ。具体的には、アルキル側鎖を有する棒状分子が 2 次元的な結晶成長様式を示すことに着目し、これを構成分子に用いることで、高均質・高結晶性の薄膜を形成可能な分子化合物半導体の開発に取り組んだ。その結果、 $\text{diC}_8\text{-ベンゾチエノベンゾチオフェン}$  ( $\text{diC}_8\text{BTBT}$ ) とテトラシアノキノジメタン (TCNQ) 誘導体組み合わせた新しい分子化合物半導体の開発に成功し、その単結晶構造解析から、両分子のパイ電子骨格がアルキル鎖層で挟まれた層状結晶性を示すことを明らかにした。また得られた ( $\text{diC}_8\text{BTBT}$ ) (TCNQ) において、組成を緻密に制御した共蒸着法により均質性の高い分子化合物薄膜の作製に成功し、これらを用いた薄膜積層型素子の光電変換特性の評価を行った。その結果、得られた素子が近赤外の幅広いエネルギー領域で電荷移動吸収にもとづく光電変換と、高いキャリア輸送特性 (移動度  $> 0.1 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ) を示すことを明らかにした。さらに各種の正孔輸送層を導入したヘテロ接合型素子において、適切なバンドアラインメント効果により、電荷分離後のキャリアを効率的に取り出せることを示し、これにより  $0.06 \text{mA}/\text{cm}^2$  の電流密度での発電に成功した。さらに真空蒸着法と比べて環境負荷の少ない溶液法 (印刷法) による薄膜形成にも取り組み、きわめて広い範囲 ( $\sim 1 \text{mm}$ ) にわたって厚さが均質 ( $30\sim 80 \text{nm}$ ) な層状結晶性単結晶薄膜の構築に成功した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0) 、論文 (査読付) : 5 (5) 、研究発表・講演 : 27、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 12) 強相関材料ボトムセルの開発 B (東京工業大学)

<H26 最終目標 : 強相関有機薄膜用の 2 インチサイズ以上のナノテンプレート非晶質基板の作製と縦型電流密度を現状の 1000 倍 ( $1\text{mA}/\text{cm}^2$ ) に向上>。

a) 大型サイズ (2 インチ以上) のナノテンプレート非晶質ポリマー基板 (0.3nm 高さの単原子ステップアレー) の開発

薄膜太陽電池用の高い結晶性を持ち導電性が良好な有機分子薄膜を得るためには、基板上での有機分子結晶核の生成数と核成長を原子レベルで制御することが重要となる。これまでに作製に成功したガラス状非晶質ポリマー基板として有用な PMMA アクリル樹脂製の約 5cm 以上のナノパターン基板に続き、耐水性により優れた光応用有機系ガラス基板であるシクロオレフィンポリマー (COP) 基板上および薄膜太陽電池用基板として有望な高耐熱ポリイミド基板上に、0.3nm 高さの単原子ステップ配列を有する表面を、大気中ナノインプリント装置を使った表面加工プロセスに

より作製することができた。さらに、酸化ガラス基板の中で一番耐熱性のある高純度石英ガラス基板に対して、1000℃で熱ナノインプリント加工し、世界初の単原子ステップ石英ガラス基板（約2インチサイズ）の開発に成功した。また、単原子ステップパターンを有する種々のポリマー基板の形状安定性を調べたところ、1年経過後の原子ステップ形状はほとんど変化がなく、非常に安定していることがわかった。一方、強相関材料ボトムセルの開発の一環として、単原子ステップナノプレートポリイミド基板上にITO透明導電膜を約300℃で高温成膜し、単原子ステップを有するITO薄膜を合成することに成功した。

b) 強相関材料系有機単結晶薄膜の高品質化と基板面因子の解明

強相関材料系有機単結晶薄膜太陽電池における縦型素子の電流密度を向上すべく、ポリマー系ナノパターン基板上へのペンタセンなどの有機結晶薄膜の堆積研究を行い、電流密度を増加させる大きな因子として結晶粒子サイズとナノパターン基板との相関関係および種々の基盤要素技術を見極められ、1mA/cm<sup>2</sup>以上の高電流密度を有する有機単結晶薄膜太陽電池の実現に向けての課題を明確にすることができた。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：20（20）、研究発表・講演：27、新聞・雑誌等への掲載：1、展示会出展：0

13) 強相関材料ボトムセルの開発C（東北大学）

<H26 最終目標：①イオン液体フラックス法による高品質有機電荷移動錯体単結晶・薄膜の作製でグレインサイズ50μm以上、②太陽電池デバイス化のためのイオン液体除去技術の開発で、洗浄後、残存するイオン液体が現状の1/100、③ナノインプリントプレート基板上に有機電荷移動錯体を作製し、光吸収効率、成長配向性を向上させる>

赤外レーザー蒸着システムを2系統含むツイン赤外レーザー共蒸着装置を用いて、有機電荷移動錯体のアクセプター、ドナー分子の両論組成を精密に制御しながら、イオン液体を介した有機電荷移動錯体単結晶の育成を試みた。その結果、成長条件を最適化することで、グレインサイズはほぼ50μmを達成した。

次に、イオン液体除去技術の開発では、真空加熱や溶媒処理を適宜組み合わせることで、残留イオン液体の比率を、ペンタセン結晶では1/20、C8BTBT-TCNQ錯体では、1/100まで減少させることが可能となった。その結果、イオン液体を介して作製したペンタセン、C8BTBT-TCNQ錯体を用いた太陽電池で、効率は極めて小さかったが、発電を確認する事ができた。

最後に、ナノインプリントプレート基板を用いたペンタセンの製膜では、平坦ガラス基板上ではペンタセンの薄膜相が得られる条件で、NWガラス基板上にペンタセンを蒸着したところ、単相のバルク相が成長し、2回対象で面内に配向していることを見いだした。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：2（1）、研究発表・講演：13、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

14) ナノ材料系トップセルの開発A（東京農工大学）

<H26 最終目標：バンドギャップ1.7eV以上の単接合nc-Si太陽電池で16%の効率を達成する。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率達成に寄与する。>

a) nc-Si 自立膜の形成プロセス技術

n型、p型、およびpn接合の4インチ基板でnc-Si自立膜を剥離する技術を開発し、面積・厚さの目標を達成した。そのさい、多くのパラメータの中で重要なものを把握する事前検討を十分に行った上でそれを優先的に変化させ傾向を捉えるという方針をとったことにより、早い段階で任意の導電型やpn接合構造に対応しうる普遍的なセル化技術を開発できた。

b) 光電物性の解析

上記のプロセス技術が確立したことで試料作製の安定性が高まり、再現性のある光電物性測定が可能となった。これは解析の信頼性に良い影響をもたらし、バンドギャップに関する目標達成、nc-Si固有の光電子機能の実験的・理論的な検証につながった。これにより、トップセルに必要なバンドギャップと制御性を実現し、固有の光導電機能も含めて目標を達成した。

c) 光電変換特性の評価

目標値は未達成だが、V<sub>oc</sub>についてはナノシリコン材料としてはこれまでにない高い値（0.87V）を得た。また、トップセルに適う短波長域の分光感度を観測し、量子サイズ材料としての光電変換性能を実証した。それを光キャリアの収集に結びつけるため、nc-Siドット表面・界面の欠陥密度低

減に重点をおいて種々のパッシベーションを行い、 $J_{sc}$ を  $0.4 \text{ mA/cm}^2$  まで改善したが、その値はまだ不十分で、表面・界面処理を徹底する必要がある。本研究を通して光キャリアの伝導を制約している要因と打開策は絞られた。素子構造制御とパッシベーションの手法を適切に複合して nc-Si に固有の潜在性能を引き出すことで、高い光起電圧を維持して光電変換効率を目標に近づけていく。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 1 (0)、論文(査読付) : 9 (9)、研究発表・講演 : 20、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

#### 15) ナノ材料系トップセルの開発 B (九州大学)

<H26 最終目標 : シリコン、ゲルマニウム等のナノドット太陽電池で外部量子効率 100%以上を実現する。>マルチホロー放電プラズマ CVD で作製した粒径約  $4 \text{ nm}$  ( $E_g = \text{約 } 1.8 \text{ eV}$ ) の Si ナノ粒子を用いて、ショットキーセルを作製した。 $E_g$  の 2 倍以上のエネルギーを有する光の入射で、外部量子効率は急激に上昇し、最終的に 130%の外部量子効率を観測した。この結果は、多重励起子生成を示唆する可能性がある。世界で初めて Si ナノ粒子を増感型太陽電池に適用し発電に成功した。Si ナノ粒子の添加により、発電効率は  $0.002\%$  から大きく上昇し、セルの各要素を最適化することにより、 $0.26\%$  の光電変換効率を達成した。また、Ge ナノ粒子を用いた増感型太陽電池からの発電にも世界で初めて成功した(発電効率  $0.02\%$ )。Ru 色素増感型太陽電池に Si ナノ粒子を添加した Si ナノ粒子/Ru 色素ハイブリッド増感型太陽電池の開発を行った。色素セルに Si ナノ粒子を添加することにより、発電効率が  $5.72\%$  から  $6.57\%$  へと 2 割程度増大した。本研究により Si ナノ粒子の添加が、色素増感型太陽電池の効率向上に貢献できることが明らかになった。有機 P3HT 層に Si ナノ粒子を添加した有機/無機ハイブリッド型太陽電池の開発を行った。表面酸化膜をフッ酸でエッチング処理した Si ナノ粒子を有機 P3HT 層に添加することにより、発電効率が  $0.69\%$  から  $1.20\%$  へと増大した。本研究により有機太陽電池に適切な表面処理を施した Si ナノ粒子を添加することにより、発電効率が  $0.5\%$  程度上昇することが明らかになった。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 12 (12)、研究発表・講演 : 34、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 16) 化合物系トップセルの開発 A (産業技術総合研究所)

<H26 最終目標 : (1) バンドギャップ  $1.8 \text{ eV}$  の太陽電池で変換効率  $16\%$  を達成する。本技術を用いたセルによって、多接合太陽電池での変換効率  $30\%$  達成に寄与する。(2) InGaP/In(Ga)As 量子ドット太陽電池で 2 段階光吸収を確認し、量子ドット構造導入により  $40\%$  の電流密度向上を目指す。>

固体ソース分子線エピタキシー法 (MBE) を用いた InGaP 成長技術の高度化を行い、バンドギャップ  $1.9 \text{ eV}$  で変換効率  $16.1\%$  を得て、プロジェクト最終目標を達成した。また InGaP/GaAs タンデムトップセルにおいて変換効率  $22.6\%$  を実現し、4 接合セルのトップセルとすることで、全体の最終目標達成に貢献した。さらなる高効率トップセル作製を目指し、世界で初めて固体ソース MBE により InGaP/AlGaAs/GaAs 3 接合トップセルを試作し、開放電圧  $3.1 \text{ V}$  を実現した。各セルの膜厚が薄いため短絡電流密度が低いだが、この結果は MBE を用いて高品質な 3 接合トップセルが作製できることを示唆している。

中間バンド太陽電池として理論的に理想的なバンド構造を有する InGaP ベースの InGaAs 量子ドットについて、世界で初めて太陽電池構造に応用し、量子ドット層数の増加に伴い外部量子効率および変換効率が上昇することを見出した。20 層の InGaAs 量子ドット構造を導入することにより短絡電流密度  $55\%$  向上を実現した。また、InGaP 上にドット間  $4.5 \text{ nm}$  で InGaAs 量子ドット超格子を作製することに成功し、フォトルミネッセンス発光強度の励起光依存性からミニバンドが形成されていることを確認した。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 13 (6)、研究発表・講演 : 27、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 17) 化合物系トップセルの開発 B (パナソニック株式会社)

<H26 最終目標 : ・バンドギャップ  $1.8 \text{ eV}$  以上の硫化物系薄膜太陽電池で変換効率  $16\%$  を達成する。その要素技術として、硫化物系薄膜のキャリア寿命  $30 \text{ ns}$  以上、開放電圧  $1.2 \text{ V}$  以上、内部量子効率  $90\%$  以上を得ることを目標とする。本技術を用いた単接合セルを産業技術総合研究所に提供し、多接合太陽電池での変換効率  $30\%$  達成に寄与する。>

カルコパイライト構造となる組成範囲が広い  $\text{CuGaSe}_2$  に Zn を固溶した新規光吸収層  $\text{ZnCuGaSe}_2$  (以下 ZCGS と略す) を開発した。Zn/(Cu+Ga+Zn) 比によるバンドギャップ制御を図り、Zn/Metal 比  $0.4$

でバンドギャップ 1.80eV に到達した。効率向上を図るために、焼成プロセスの改善により結晶成長を促進し、ZCGS 膜の深さ方向の Zn 分布の均一化等を行った結果、変換効率 10.2% (開放電圧  $V_{oc}=0.877V$ , 短絡電流密度  $J_{sc}=16.8 \text{ mA/cm}^2$ , 曲線因子  $FF=0.689$ , 開口面積: $0.51\text{cm}^2$ , AR コート有り) を達成した。この値は、化合物薄膜のワイドギャップ太陽電池としては、世界トップレベルの変換効率である。また、この太陽電池の外部量子効率は 90%以上を示した。さらに、同様な構成、製法の太陽電池において開放電圧 0.91V を達成した。以上の結果から、高効率化に資する要素技術を確立した。これらの技術の高度化等で多接合太陽電池の高効率化と低コスト化が見込まれる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 3 (3) 、研究発表・講演 : 7、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 18) 化合物系トップセルの開発 C (東京工業大学)

<H26 最終目標 : Sn-O-S 系材料でバンドギャップ 1.8 eV 以上のホモ接合太陽電池の作製を目指し、その要素技術としてバンドギャップ 1.8eV 以上の Sn-O-S 系材料で移動度  $0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  以上を目標とする。>

##### a) SnS の高品位薄膜の作製と伝導型制御

SnS ( $E_g = 1.1 \text{ eV}$ ) は吸収係数が  $\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$  と大きく、 $\sim 10^2 \text{ cm}^2(\text{Vs})^{-1}$  と移動度も大きい p 型半導体である SnS を太陽電池に応用するためには化学量論比を保った高品位薄膜の作製が欠かせない。そこでプロセスガスに Ar/H<sub>2</sub>S 混合ガスを用いた PLD 法により SnS エピタキシャル薄膜の作製に取り組んだところ、Sn:S = 1:0.997 と化学量論比を保つ薄膜が実現した。この薄膜の移動度は  $37 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  に達し、n-Si との接合で太陽電池を試作し効率 1.2% を得た。

また SnS の n 型化に取り組み、Sn<sub>1-x</sub>Pb<sub>x</sub>S (移動度  $7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ )、SnS<sub>1-y</sub>Cl<sub>y</sub> ( $8 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) において再現性のある良好な n 型を実現した。加えて SnS のアモルファス化によりバンドギャップを 1.35 eV まで拡張できることを明らかとした。さらに結晶構造が確定していなかった立方晶系 SnS 準安定相が岩塩型構造を有していることを明らかとし、バンドギャップが 1.7 eV となることを明らかとした。

##### b) アモルファス InGaZnO<sub>4-x</sub>S<sub>x</sub> 半導体におけるバンドギャップ制御

アモルファス In-Ga-Zn-O (a-IGZO) の太陽電池への応用を目指した際の課題として広いバンドギャップと深い伝導帯下端位置が挙げられた。そこでバンドギャップの縮小と浅い伝導帯下端位置を有する新規アモルファス半導体の実現をめざし、a-IGZO 中の O を S で置換したアモルファス InGaZnO<sub>4-x</sub>S<sub>x</sub> に着目して薄膜作製と物性評価、第一原理計算による構造・電子状態の解析に取り組んだ結果、 $0 < x \leq 4$  の範囲でアモルファス薄膜を得ることができ S の導入により 1.6 eV までバンドギャップが狭まることが明らかとなった。S の導入による価電子帯上端 (VBM) と伝導帯下端 (CBM) の変化を知るために VASP による第一原理計算を行った結果、VBM は S の増加に伴い単調に上昇するのに対し、CBM は  $x = 2$  までは下降してから上昇に転じることが明らかとなった。O を完全に S で置換したアモルファス InGaZnS<sub>4</sub> においては  $E_g = 2.6 \text{ eV}$  と可視光も吸収できるバンドギャップを有しつつ a-IGZO に比べて 0.7 eV 浅い CBM を実現することが明らかとなった。

##### c) アモルファス Cd-Ga-O 系酸化物半導体におけるバンドギャップ制御

CdO-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系にて移動度  $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  以上を有する n 型アモルファス酸化物半導体 (a-CGO) を実現し、そのバンドギャップを 2.3 eV から 4.1 eV の範囲で制御できることを明らかにした。またそのバンドアライメントから、いずれの a-CGO においても典型的な p 型酸化物半導体 Cu<sub>2</sub>O と type-II 型のヘテロ界面を形成することが明らかとなった。さらに価電子帯上端位置の制御には Cu<sup>+</sup> や Ag<sup>+</sup> の添加が有効であることが明らかとなった。膜厚方向で  $E_g$  を制御することで各波長の光を効率よく吸収できる太陽電池実現への道が開けた。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 5 (5) 、研究発表・講演 : 18、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### ③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

【平成 20~22 年度】 (第 1 回中間評価時)

##### 1) ナノドット禁制帯幅制御 (東京工業大学)

<H22 中間目標 : SiC/Si ナノドットの欠陥密度を  $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  以下にまで低減する技術を開発することにより、シングル接合セルで真性変換効率 5% を達成する。H26 最終目標 : Si ナノドット・シングル接合セルで真性変換効率 10% を達成する。多接合太陽電池のミドルセルへ適用し、セルレベルでの動作を実証する (ナノドットセルからの真性変換効率 3%) 。>

#### a) Si ナノドット膜の欠陥密度低減

これまでに欠陥密度は、現状で  $7 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  まで低減した。a-SiC バリア層に N を添加するなどの新技術開発を行ったところ、熱処理後の導電率が大幅に低下することが観察された。さらに微量の酸素添加を試みたところ、量子ドット太陽電池の大幅な特性向上に成功した。さらに最適化を行うことで中間目標（欠陥密度を  $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$  以下）を達成の見通しである。

#### b) 不純物拡散の抑制

この課題については、ドーピング層を最初に結晶化させ、それに引き続いて量子ドット層の熱処理を行うことで、ほぼ解決できた。

#### c) Si ナノドット太陽電池の開発

a-SiC バリア層に N を添加することにより量子ドット太陽電池の開放電圧が、165mV から 289mV まで向上した。これに引き続いて、微量の酸素添加を行ったところ、開放電圧がさらに 518mV まで向上した。この値は、M.Green らのグループにより得られた値よりも高く、Si 量子ドットセルとしては、世界最高の値である。また、厚い n 型 Si 側から光を照射する構造のセルを試作したため、短絡電流が低く、変換効率は 0.1% であるが、ITO 側から光照射する構造を作製すれば、3.8% まで変換効率が向上すると解析結果を得た。ITO 側から光照射する構造の開発とその構造の最適化により電流値を向上させることにより、中間目標（真性変換効率 5%）を達成の見込みである。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：1（1）、研究発表・講演：14、新聞・雑誌等への掲載：3、展示会出展：2

### 2) マルチエキシトン（東京工業大学）

<H22 中間目標：Si 量子ドットの遷移エネルギー  $E_g < E < 3.3\text{eV}$  @ 1nm 領域における、マルチエキシトン生成（2Eg）等による量子効率の増倍効果に関する原理実証を目標として、光生成電流が観測可能な Si 量子ドット結晶層及び素子構造を形成する。H26 最終目標：p-i-n セル構造の変換効率を明らかにするとともに、多接合型シリコン薄膜太陽電池に適用可能な素子構造と変換効率最適化への指針を提示する。>

#### a) バンドエンジニアリング

光電子分光法（XPS）により、Si と  $\text{CaF}_2$  の化学結合状態を調べ、Si と  $\text{CaF}_2$  が明確に相分離しており、副次的な化合物相が形成していないことを確認した。これと透過型電子顕微鏡の観測結果を併せて、ナノサイズのシリコン量子ドットの存在を確認することが出来た。吸収係数、透過係数の分光特性の測定を行い、量子ドットサイズ・密度との関係を明らかにし、サイズ効果による状態密度低減を実証した。光吸収係数の分光特性を測定することにより、吸収端波長の量子ドットサイズ依存性、および作製プロセス依存性を明らかにし、ドットサイズ 3-4nm に制御することにより、吸収端波長 750-1,100nm @ 1,000/cm にバンドギャップ制御可能であることを実証し、目標値 800-1,100nm をクリアした。

#### b) 光生成電流測定

光導電率の波長依存性が測定可能な Si 量子ドットの形成条件および測定条件が明らかになった。量子効率・移動度・寿命時間の積の光波長依存性を求めた。ドットサイズ 3.3nm 試料にて光生成電流の分光感度特性が観測され、中間目標を達成できた。

#### c) p-i-n 構造形成

クラッキングセルを用いて、 $\text{CaF}_2/\text{Si}$  量子ドット層と、Si ドーピング層の接合形成と、ドーピング濃度制御に関する基礎データを取得した。その結果、不純物濃度  $10^{17}-10^{19}/\text{cm}^3$  の範囲で制御するプロセスを明らかにした。セル構造の形成プロセスを設計し、ドーピング制御技術（ $10^{17}-10^{19}/\text{cm}^3$ ）を確立できた。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：5、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

### 3) ナノドット量子効果を有する薄膜の形成技術（三洋電機）

<H22 中間目標：ナノドット量子効果を有するボトム層対応高品位薄膜の開発。バンドギャップ制御幅約 0.2eV、欠陥準位密度  $5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$  以下。H26 最終目標：単接合セルで変換効率 7%、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30%（有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ）。>

#### a) 高品位マトリクス形成技術の開発

最適マトリクス相形成技術の発掘・選択を行い、マトリクス相薄膜形成技術開発、膜特性の検討などのマトリクス相形成法の探索を行った。ナノドット量子効果発現が可能なマトリクス相の改質



技術の開発を行った。湿式法を用いて緻密な薄膜をテクスチャ基板上に形成できることを確認でき、中間目標欠陥準位密度 ( $5 \times 10^{18}/\text{cm}^2$ ) をほぼクリアできる見通しである。

b) ナノドット粒子配置法の開発、及び、量子効果の検証

ナノ粒子分散に必要な物性、要求事項等の調査研究を行い、ナノ粒子の入手・形成検討を行った。マトリクス相前駆体中へのナノ粒子分散について検討を行い均一分散を達成した。湿式形成マトリクス薄膜中のナノ粒子の分散、PL 発光を確認し、中間目標 (バンドギャップ制御幅約 0.2eV) 達成の見通しである。

c) ナノドット量子効果を用いた高効率太陽電池デバイスの開発

ナノドット分散薄膜の形成が可能となったため中間目標 ( $V_{oc} \geq 0.1V$ ) 達成の見通しである。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 4、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

4) Ge の遷移型制御 (東京工業大学)

<H22 中間目標 : 歪 Ge 膜の作製技術の開発において、間接遷移型半導体から直接遷移型半導体への転換を実証するために、光子エネルギー 0.7eV 付近における光吸収係数の 1 桁以上の増大を確認する。H26 最終目標 : 直接遷移型へと転換した歪 Ge を用いた単接合太陽電池において、真性変換効率 5% を達成する。>

a) 遷移型制御の理論予測及び最適構造設計

本研究開発の中間目標は「直接遷移型半導体への転換の実証」であり、その目標に対しては、理論計算により、光吸収係数が歪量に依存することを明らかにした。そこで、歪量の最適値の明確化と変換効率向上確認を目標とした。最大変換効率を得られる歪量を明らかにするため、光吸収係数増大を考慮した太陽電池の動作解析を行ない、歪量約 0.5% が太陽電池応用の最適値であることを明確にした。この時、歪 Ge 太陽電池は、無歪 Ge 太陽電池の 1/400 の膜厚で同程度の変換効率を示すことを見出した。

b) 歪 Ge 膜の結晶成長技術の開発

InGaAs 仮想基板を用いて歪 Ge の製膜技術を開発、上記太陽電池応用及び直接遷移転換が可能な歪量 1.55% という世界最高の伸張歪を有する Ge 薄膜の製膜に成功した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 2 (2)、研究発表・講演 : 6、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 2

5) 薄膜新材料 (岐阜大学、再委託 : 岐阜工業高等専門学校)

<H22 中間目標 : 「a) アモルファス/微結晶化合物薄膜新素材の開発」禁制帯幅 2.2eV 程度で、光電気伝導を示し、欠陥密度  $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  以下のアモルファス/微結晶化合物新素材薄膜を開発。それを用いた単接合太陽電池にて開放電圧 1.0V 以上を達成。「b) ゲストフリー-SiGe 系クラスレート薄膜の開発」光電気伝導を示し、欠陥密度  $2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  以下のゲストフリー/希ガス内包 Si クラスレート薄膜を作製。H26 最終目標 : 「a) アモルファス/微結晶化合物薄膜新素材の開発」単接合太陽電池にて開放電圧 1.2V 以上を達成。低倍率集光型多接合太陽電池にこれを適用し、真性変換効率 30% (有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ) を達成。「b) ゲストフリー-SiGe 系クラスレート薄膜の開発」ゲストフリー/希ガス内包  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  クラスレート薄膜において、理論値 1.3-2eV をもとに連続的に制御可能な禁制帯幅を明らかにする。禁制帯幅 1.8eV 程度のクラスレート薄膜を用いた太陽電池にて変換効率 5% を達成。>

a) アモルファス/微結晶化合物薄膜新素材の開発

室温で結晶サイズが数 10nm 程度の微結晶 InGa<sub>N</sub> の製膜を可能にした。In ターゲットへの投入電力制御により、In 組成比ならびに光学バンドギャップ制御が可能であることを示し、禁制帯幅 2.2eV 程度の微結晶 InGa<sub>N</sub> において光電気伝導度  $6.4 \times 10^{-4}\text{S}/\text{cm}$  (光感度 6.51) を得た。N<sub>2</sub> ガス分圧比 N<sub>2</sub> を増加することで、膜中の N 組成比を増加させ、光感度を 1.5 から 39.2 に改善できた。また、Ga と In の代わりに GaN、InN ターゲットを使用し、InGa<sub>N</sub> の N 組成比を増加させ、窒素欠陥を改善し、禁制帯幅 2.2eV 程度で、光電気伝導度  $1.4 \times 10^{-4}\text{S}/\text{cm}$  (光感度 252) を得た。中間目標値の平成 22 年度中の達成は厳しいと思われるが、最終目標に向け方向性は明確にできた。

b) ゲストフリー-SiGe 系クラスレート薄膜の開発 (岐阜工業高等専門学校)

金属内包 II 型 Si クラスレートを高い収率で作製するための条件、クラスレートの前駆体であるジニチル相 NaSi の熱処理条件を探索した。さらに内包する金属元素を抜くための真空熱処理条件を確立し、II 型 Si クラスレート  $\text{Na}_x\text{Si}_{136}$  において Na 含有量を  $x=1-2$  まで低減できた。得られた焼結体を押固めた薄膜試料において、光吸収スペクトル (光音響分光法) からダイヤモンド構造の c-Si よ

り大きなバンドギャップエネルギー1.5eVを有する半導体であることを示した。また、I型(金属)とII型(半導体)の混合試料で世界初めての光電気伝導度 $\sim 1 \times 10^{-7} \text{ S/cm}$ を観測できた。作成条件の精密化による更なる不純物低減と焼結体熱処理等による欠陥精製を抑制して中間目標( $2 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 以下)を実現できる見込みである。岐阜工業高等専門学校での希ガスの利用については、希ガス/Si混合薄膜の合成に成功し、クラスレートに対応するX線回折ピークを確認できており、ほぼ中間目標を達成できる見通しである。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):1(1)、研究発表・講演:38、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

#### 6) ワイド/ナローギャップ材料設計(龍谷大学)

<H22 中間目標:ワイドバンドギャップ光吸収層材料として  $E_g=1.7-2.0\text{eV}$ 、ナローバンドギャップ光吸収層として  $E_g=0.6-1.0\text{eV}$  の直接遷移型化合物半導体の組成、結晶構造、結晶配向を設計する。材料設計で得られた特性を実験結果と比較して材料設計の有効性を確認する。この成果を、太陽電池に適用し、低倍率集光時、真性変換効率 20% (有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ) を得る。H26 最終目標:5-6 接合からなる低倍率集光型化合物系薄膜太陽電池材料 ( $0.6-2.0\text{eV}$ ) の材料設計を行う。材料設計で得られた特性を実験データと比較して材料設計の有効性を確認する。この材料設計を、低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ) を達成する。>

##### a) 第一原理計算による材料設計

$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  の Sn を Ge や Si に置換した化合物について、第一原理計算を用いて相の安定性と電子構造の評価を行い、太陽電池用光吸収層の材料設計の指針を得た。4 元系化合物半導体  $\text{Cu}_2\text{ZnIVSe}_4$  (IV=Si, Ge, Sn) をワイドギャップ材料候補として見いだした。最適組成にて太陽電池に適用されることにより、中間目標(真性変換効率 20%)を達成する見通しである。

##### b) 結晶構造解析

$\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  の合成プロセスを明らかにし、 $\text{Cu}_{2-2x}\text{ZnSnSe}_4$  の単一相が得られる領域を決定し、次に X 線リートベルト法で  $\text{Cu}_{2-2x}\text{ZnSnSe}_4$  の結晶構造の解析を行った。 $\text{Cu}_{2-2x}\text{ZnSnSe}_4$  ( $0 \leq x \leq 0.0875$ ) の結晶構造は Cu/(Zn+Sn)比の減少とともに、格子定数  $a$ 、 $c$  は小さくなり、 $c/a$  も小さくなることを明らかにした。

##### c) 物性評価

スクリーン印刷/焼結法を用いて CZTSe や CuIn(Se, Te)系固溶体膜を作製し、可視・近赤外吸収スペクトルから禁制帯幅を決定した。CZTSe 膜は  $1,100\text{nm}$  近傍に吸収端を持つ。直接遷移半導体を仮定して、 $h\nu$  に対し  $(\alpha h\nu)^2$  をプロットすることで CZTSe の禁制帯幅を求めたところ、 $1.05\text{eV}$  であった。また、CuIn( $\text{Se}_{1-x}\text{Te}_x$ )<sub>2</sub> 固溶体の  $x=0.5$  で  $E_g=0.88\text{eV}$  が得られ、ナローバンドギャップ ( $0.6-1.0\text{eV}$ ) 材料として期待できることを明らかにし、中間目標を達成できた。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):5(5)、研究発表・講演:30、新聞・雑誌等への掲載:1、展示会出展:3

#### 7) シリコン系薄膜集光型セル(東京工業大学、再委託:奈良先端科学技術大学院大学)

<H22 中間目標:低倍率集光で真性変換効率 20% (有効受光面積  $1\text{cm}^2$ )。H26 最終目標:低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積  $1\text{cm}^2$ )。>

##### a) 集光型 Si 薄膜太陽電池の最適設計・試作

アモルファス Si ならびに、微結晶 Si シングル接合セルの集光特性を詳細に検討した。a-Si シングル接合セルの特性は、 $1\text{sun}$  から集光比を高めていくと、曲線因子が低下する。これは、i 層内の過剰キャリア濃度が増加し、電界分布が変化することと、TCO のシート抵抗による影響が無視できなくなるためである。電界分布の変化に関しては、i 層を薄く設計することにより、改善されることが分かった。シート抵抗については、微細電極を設けることにより改善を図った。以上の結果、数倍集光までは、変換効率が向上することが確認できた。一方、微結晶 Si セルは、もともと開放電圧が低いいため、集光比に伴う開放電圧増加の効果が大きくなるため、10 倍集光程度まで変換効率が向上すること、また、微結晶 Si セルに対しては、ヘテロ接合構造が効率向上に大きな効果のあることが分かった。2 層タンデムの開発に関しては、中間層を挿入した a-Si/ $\mu\text{c-Si}$  セルで変換効率 10.1%、a-SiC/a-Si タンデムセルで変換効率 8.8% が得られた。以上の結果、アモルファス Si 太陽電池では、i 層の高注入効果が曲線因子を低下させる現象を見出し、その解決策を明確化でき、微結晶 Si 太陽電池では、低倍率集光で変換効率が大幅にアップすることを世界で初めて見出した。中間目標(真

性変換効率 20%) は達成の見込みである。

b) a-Si:H/CdTe2 接合セルの最適設計・試作

木更津工業高等専門学校で作製した CdTe のガラス基板側に、プラズマ CVD でアモルファス Si を製膜する際、原子状水素等によるネガティブな現象がでないことを実験的に確認した。CdTe 太陽電池のガラス基板上にアモルファス Si を堆積させた場合の CdTe セルへの光透過率特性の検討と、オプティカルカップリングの最適設計から、変換効率 9.2% の a-Si セルと、変換効率 15.4% の CdTe 太陽電池で 4 端子タンデム太陽電池を構成すれば、変換効率 15.8% が得られるとのシミュレーション結果を得た。実際の 4 端子デバイスで実証し、シリコン系 2 接合と、CdTe の組み合わせを検討することにより高効率化が可能である。

c) フルスペクトルセル・トモグラフィ解析 (奈良先端科学技術大学院大学)

薄膜素子におけるエレクトロルミネッセンスのスペクトル分光解析により、バンドギャップに対応した波長を有するスペクトルの測定に成功した。薄膜構造における電流フローの発光による解析において、エレクトロルミネッセンス強度の空間分布より透明導電膜の抵抗を非破壊で評価する技術を確立した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (0)、論文 (査読付) : 10 (10)、研究発表・講演 : 66、新聞・雑誌等への掲載 : 2、展示会出展 : 4

8) 広バンドギャップシリコン系薄膜 (シャープ)

<H22 中間目標 : 広バンドギャップで、光伝導度  $1.0 \times 10^{-6} \text{S/m}$  以上、新規薄膜評価技術の確立、単接合型薄膜太陽電池で開放電圧 1.2V 以上 (サイズ  $1\text{cm}^2$  以上)、多接合型薄膜太陽電池で真性変換効率 15% 以上。H26 最終目標 : 多接合型薄膜太陽電池で真性変換効率 17% 以上 (サイズ  $1\text{cm}^2$  以上) >

a) 広バンドギャップ材料の開発

RF、VHF、マイクロ波の広い周波数領域でのプラズマにより、膜成長表面での構造緩和を制御し、広バンドギャップ材料の高品質化を図った。バンドギャップ 2.0eV、光伝導度  $3.9 \times 10^{-6} \text{S/m}$  を達成し、中間目標をクリアした。

b) 広バンドギャップセルの開発

開発した広ギャップ材料を活性層に用い、不純物添加層や p/i 界面層の開発により出力電圧の高い薄膜太陽電池を開発した。バンド準位評価技術を確立するとともに、a-SiC 広バンドギャップ ( $E_g=1.95\text{eV}$ ) 材料を用いた単接合セルを作製した。界面制御による高開放電圧化技術を開発し、開放電圧 0.928V (変換効率 5.39%) を達成した。高開放電圧を維持しながら短絡電流の増大化を図ることで中間目標を達成する見込みである。

c) 多接合型薄膜太陽電池の開発

開発した広バンドギャップセルを光入射側セルに応用し、非晶質シリコン、狭バンドギャップセルと組み合わせた多接合薄膜太陽電池設計技術を開発し、高効率化を図った。広バンドギャップセル形成後の非晶質シリコン・微結晶シリコンセルの作製環境を整備した。製膜条件の最適化を実施完了。a-SiC:H 単接合セル変換効率 5.4% ( $E_g=1.95\text{eV}$ ) をベースに今後、多接合型太陽電池にて高効率化を図る。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (1)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

9) サブセル界面接合技術 (三菱電機)

<H22 中間目標 : サブセル界面抵抗  $300\text{m}\Omega\text{cm}^2$  (サブセル界面部電圧降下 0.15V 以下) を得ることを目標とする。H26 最終目標 : サブセル界面抵抗  $100\text{m}\Omega\text{cm}^2$  (サブセル界面部電圧降下 0.05V 以下) を得ることを目標とする。>

a) サブセル界面トンネル伝導評価技術の開発

集光により太陽電池セルに大量の電荷を生成させた条件で、サブセル界面に関わる電気特性を計測し、トンネル伝導に寄与する諸特性を定量的に評価する技術を開発した。雰囲気・温調機構を備えたセル特性評価装置を製作した。微結晶 Si/微結晶 Si セルにおける短絡電流密度および開放電圧は集光に伴う照射強度の増加に比例して向上するのに対し、フィルファクタは逆に低下して効率の制限要素となることを実証した。これを改善するためには、サブセル界面での低抵抗化が不可欠であることを明確化できた。サブセル界面の低抵抗化に重要な役割を果たす再結合準位を定量的に把握するため、その密度・エネルギー分布を静電容量の時間依存性から導出する技術を構築した。サブセル界面の電気特性を評価するためのテストデバイスを考案・試作、サブセル界面抵抗を直接計

測する技術を確立した。

b) 低抵抗サブセル界面トンネル伝導構造の開発

サブセル界面の低抵抗化には、n/p 接合における n 型膜伝導帯と p 型膜価電子帯との間のポテンシャル差を小さくすることが有効であることをシミュレーションで検証した。その第一の手法として、n/p 接合界面でのポテンシャル制御によるバンドの曲がりを引き起こす構造を開発。誘電体材料の酸素欠損形成による固定電荷量とポテンシャル変化（フラットバンドシフト）の関係から、固定電荷形成によるポテンシャル制御を実証した。バンドの曲がりにより、サブセル界面抵抗を低減できる可能性を示し、ポテンシャルの最適制御による低抵抗化を実施中である。第二の手法として、ポテンシャル差が小さい酸化物半導体材料の n/p 接合を挿入する構造を開発した。n 型 ZnO : Al/p 型 NiO : Li 接合構造の挿入により、サブセル界面抵抗  $500 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  を実証した。今年度中にポテンシャル差が NiO : Li に比べ  $0.2\text{eV}$  小さい  $\text{Cu}_2\text{O}$  等の p 型酸化物半導体を適用することにより、中間目標値  $300 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  を達成する見込みである。

<成果発表件数>特許出願（外国）：6（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：4、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

10) カルコパイライト系集光型セル（東京工業大学）

<H22 中間目標：バンドギャップ  $1.1\text{eV}$  の  $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$  薄膜太陽電池を用いて、低倍率集光時において真性変換効率 20%（単接合、有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ）を得る。Ag(InGa)Se<sub>2</sub> 薄膜太陽電池において開放電圧  $0.9\text{V}$  以上を得る。対向する透明導電膜付きガラス基板上に  $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$  薄膜太陽電池を貼り合わせ、貼り合わされた状態において変換効率 15%を達成する。貼り合わせによる 2 層タンデム構造の課題を抽出する。H26 最終目標：メカニカルスタック型 2-3 層タンデム太陽電池において、低倍率集光時において真性変換効率 25%（有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ）を得る。この開発した技術を低倍率集光型フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30%（有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ）を達成する。>

a) Ag 系ワイドバンドギャップ材料の開発

同時蒸着法と 3 段階法を用いて Ag(InGa)Se<sub>2</sub> 薄膜太陽電池を作製、3 段階法により変換効率を 5.31%から 6.03%まで向上させた。Voc= $0.812\text{V}$  という値を得て中間目標をほぼクリアできた。1.1eV 集光セルの開発及び 1.4eV 帯カルコパイライト系材料の高品質化を図り、集光下において、CIGS 薄膜太陽電池の特性を評価、変換効率 20.3%を達成し、中間目標を達成した。Se クラッキング、Ga イオン化、多段階成長法を新規に提案、高 Ga 組成 CIGS 太陽電池作製に向けた技術開発を行った。

b) カルコパイライト系太陽電池貼り合わせ技術開発

ITO 同士の貼り合わせに成功し、貼り合わせ時の表面平坦性（ $<1\text{nm}$ ）が重要であることを明確化できた。タンデム太陽電池作製への目処を確立した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：4（4）、研究発表・講演：20、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

11) 放熱基板カルコパイライト系集光型セル（青山学院大学）

<H22 中間目標：放熱基板上のカルコパイライト系集光セルを開発することにより、真性変換効率 10%（ナローギャップ単接合、低倍集光、受光面積  $0.5\text{cm}^2$  程度）および 20%（ミドルギャップ単接合、低倍集光、受光面積  $0.5\text{cm}^2$  程度）を達成する。放熱基板上のカルコパイライト系を用いた太陽電池の必要特性を明らかにする。H26 最終目標：放熱基板上のカルコパイライト系集光セルで真性変換効率 25%（単接合、低倍集光、有効受光面積  $0.5\text{cm}^2$ ）を実現する。この開発した技術をワイドギャップセルと組み合わせて低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30%（有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ）を達成する。>

a) CuInTe 系薄膜形成と太陽電池の試作

Cu-In-Te 系薄膜を同時蒸着法により生成膜およびセル特性の Te フラックス量依存性について検討し、セル作製プロセスの最適化により、非集光で変換効率 5.1%（Voc= $0.335\text{V}$ 、Jsc= $28.2\text{mA}/\text{cm}^2$ 、FF= $0.539$ ）を得た。

b) 放熱基板上での CIGS 太陽電池の作製

放熱基板（Ti）基板上で CIGS 太陽電池を作製し、1sun 変換効率 17.9%を得た。今後、集光特性を測定するが、中間目標は達成の見通しである。

c) 集光型太陽電池における放熱基板温度シミュレーション及び冷却機構の検討

表面温度上昇を  $4^\circ\text{C}$  に抑える冷却機構を明らかにし、最終目標に向けた方向性を見いだした。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 4 (4)、研究発表・講演 : 6、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 12) 構造設計とカルコパイライト系トップセル (立命館大学)

<H22 中間目標 : デバイス構成(セル数、集光倍率)と各要素セルの仕様( $E_g$ 、 $\eta$ 、 $J_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、FF、サブバンドギャップの透過率)を明示する。テーマ全体の最終目標達成のためのデバイス構成・各要素セルの仕様を理論的に明示する。CIAS 薄膜( $E_g=1.9-2.3\text{eV}$ )について基礎的な成長技術開発を行い、真性変換効率 5%を得る。H26 最終目標 : 変換効率 40%実現に必要なデバイス構成・各要素セルの仕様を明示する。ならびにデバイス構成・各要素セルと実デバイスとの差異を明示する。TCO 上での CIAS 薄膜の成長技術開発を行い、CIAS 単接合太陽電池で真性変換効率 10.5%を得る。低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ) を達成する。>

##### a) 構造設計

高効率薄膜フルスペクトル太陽電池達成の道筋を明示することを目的として、計算機を用いて低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の総合的なデバイス構成・要素セル設計を行った。要素セルの性能が単結晶太陽電池並みである場合に、3 スタックではサブ  $E_g$  の透過率が 80%以上、4 スタックでは同透過率が 90%以上の場合に効率 30%以上が達成可能であることを明らかにした。効率 30%達成のための要素セルの性能、サブ  $E_g$  の透過率、最適  $E_g$  の組み合わせを明示できたため、本開発項目の目標を達成したといえる。

##### b) カルコパイライト系トップセル

高効率薄膜フルスペクトル太陽電池達成に必須な、トップセルとなる高効率ワイドギャップ  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Al})\text{S}_2$  (CIAS) 太陽電池の開発を行った。性能目標の変換効率 5%は  $\text{CuInS}_2$  で達成したので、平成 22 年度中に CIAS での中間目標の達成を目指している。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 0 (0)、論文(査読付) : 2 (2)、研究発表・講演 : 18、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 13) 光学設計技術 (カネカ)

<H22 中間目標 : 低倍率集光型シリコン系/化合物系多接合薄膜太陽電池において、変換効率 30%を達成するためのオプティカルカップリング構造の提案(シミュレーションによる光学設計)し、オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を有する低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池において、光学設計による 3%の変換効率向上を実証する。H26 最終目標 : オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ) を達成する。>

##### a) オプティカルカップリング構造形成技術の開発

短波長光の反射と長波長光の透過に関する波長選択性の高いオプティカルカップリング構造体の設計を行った。さらなる検討により透過・反射光の波長範囲を自由に設計することが可能となった。カップリング構造作製手法の検討によりシミュレーションと同等の選択性を持つカップリング構造体の作製に成功した。オプティカルカップリング構造を有する 4 接合セルの数値計算により、変換効率 30%となるフルスペクトル太陽電池の設計に成功し、中間目標を達成した。

##### b) 新規直並列多接合薄膜太陽電池の開発

シリコン系と化合物系太陽電池からなる新規多接合薄膜太陽電池の一例として、直列並列接続からなるシリコン系、及び化合物系太陽電池構造を提案し、数値計算により 3%の変換効率向上が見込めることを見出した。新規直並列多接合薄膜太陽電池作製に向けて、世界で初めて微結晶シリコンセルと CIS セルの直列タンデム構造の作製に成功した。今年度中にフルスペクトル太陽電池トータルとしての最適化を行い、3%の変換効率向上を実証する。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 4 (1)、論文(査読付) : 2 (1)、研究発表・講演 : 5、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 14) 集光型 CdTe 薄膜 (木更津工業高等専門学校)

<H22 中間目標 : 直列抵抗  $0.5\Omega\text{cm}^2$  以下を得る。シリコン系薄膜/CdTe4 端子タンデム太陽電池に適用し、低倍率集光時、真性変換効率 20% (有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ) を得る。H26 最終目標 : 直列抵抗  $0.2\Omega\text{cm}^2$  を得る。低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ) を達成する。>

##### a) 直列抵抗の低減

CdTe 光吸収層の膜質改善としては、CSS 製膜でのソースへの  $\text{CdCl}_2$  添加効果を検討し、ソース中の

CdCl<sub>2</sub>濃度が 10mol%程度 のとき太陽電池特性が向上することを明らかにした。また、電極作製条件などの最適化を試み、CdTe 膜厚 5.5 μm で変換効率 15.2% (J<sub>sc</sub>=26.5mA/cm<sup>2</sup>、V<sub>oc</sub>=0.829V、FF=0.692) を達成したが、直列抵抗は 4Ωcm<sup>2</sup>程度となっており、中間目標の達成は厳しい。

b) 集光型 CdTe 太陽電池の設計・試作

CdTe 太陽電池上に a-Si:H 膜の堆積を行うなどの基礎的検討を行ったが、4 端子タンデム太陽電池の作製に至っていない。今後、中間目標達成に向けて検討を進めるが、現時点において中間目標への CdTe 薄膜の寄与は期待できない。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 11、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

15) 表面プラズモン (東京工業大学)

<H22 中間目標 : 半導体太陽電池における表面プラズモン効果の明確化 (ピーク波長における光電流の 5%向上)。H26 最終目標 : 表面プラズモンによるピーク波長での光電流の 10%向上、および表面プラズモンを薄膜フルスペクトル太陽電池へ適用する方法の提案。>

粒径および分布の異なる表面修飾した金属ナノ粒子を合成し、シリコンウェハ上への金属ナノ粒子薄膜の作製に成功した。作製した銀ナノ粒子複合薄膜は、銀ナノ粒子の局在表面プラズモンに由来する吸収ピークをもち、マトリックスおよび銀ナノ粒子に由来する反射防止効果を示した。単結晶 Si ウェハを用いて Si 太陽電池を作製し、金属ナノ粒子分散有機薄膜の表面塗布によって Si 太陽電池の短絡電流を 9%向上させ、ピーク波長における光電流を 22.3%向上させることに成功した。したがって、中間目標を達成し、さらに最終目標をも大幅に上回る成果を得た (特許出願済み)。Si ウェハの陽極酸化によってポーラスシリコンを形成し、そのナノ多孔体中に金属ナノ粒子を担持することに成功し、表面プラズモンによる大幅な反射率低減にも成功した。更に作製したポーラスシリコンによって太陽電池を作製することで、電場増強効果による効率向上も期待できる (特許出願済み)。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 3 (2)、論文 (査読付) : 7 (7)、研究発表・講演 : 41、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

16) p 型透明導電膜 (龍谷大学、共同実施 : 新潟大学)

<H22 中間目標 : 基本特性として E<sub>g</sub>>3.0eV、σ>10S/cm を達成する。p 型透明導電膜をシリコン系薄膜太陽電池に適用して p 型透明導電膜の有効性を確認し、また化合物系薄膜太陽電池の裏面電極に適用して長波長光を透過させた状態で真性変換率 10%を達成する。H26 最終目標 : 基本特性として E<sub>g</sub>>3.0eV、σ>10<sup>3</sup>S/cm を達成する。開発した p 型透明導電膜を低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm<sup>2</sup>) を達成する。>

a) 新規 p 型 TCO 材料探索と PLD 法による薄膜形成 (龍谷大学)

SrCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系透明導電膜の高性能化について検討した。SrCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub>の Cu/Sr 比を変えたターゲットを用いてパルスレーザー蒸着 (PLD) 法により SrCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 薄膜を作製し、その光学特性と電気特性を評価した。また、CuAlO<sub>2</sub>や SrCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub>とは別の材料系で材料探索と薄膜作製を行った。SrCu<sub>2</sub>O<sub>2</sub>や BaCuSeF 薄膜においては目標値を上回る電気伝導性を示す薄膜の作製に成功した。また、新規 p 形 TCO 薄膜の開発にも成功し、最も高い電気伝導率と高い可視光透過率を示した。禁制帯幅 E<sub>g</sub>=3.1eV (CuAlO<sub>2</sub>)、E<sub>g</sub>=2.6eV (新材料)、電気伝導率 12S/cm (BaCuSeF)、21S/cm (新材料) を達成し、中間目標をクリアした。

b) 溶液法とスパッタ法による薄膜形成 (新潟大学)

溶液法とスパッタ法を用いて p 型透明導電膜を作製するための基礎技術を確認した。溶液法においては、硝酸金属原料溶液の塗布膜を窒素中熱処理する方法により、p 型 CuAlO<sub>2</sub>薄膜は 800℃以上で、p 型 CuYCaO<sub>2</sub>薄膜は 900℃以上で作製できることがわかった。また、スパッタ法においては、Ar 希釈酸素ガスと Cu と Al の金属ターゲットを用いた反応性スパッタ法により薄膜を堆積し窒素中 800℃以上で熱処理することにより p 型 CuAlO<sub>2</sub>相が出現することがわかった。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 5 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 19、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 3

17) フルスペクトル TCO (旭硝子)

<H22 中間目標 : 400-1,400nm で光吸収率 5%以内 (浸液法で測定した TCO 基板としての透過率で 87%)、比抵抗 1×10<sup>-3</sup>Ωcm 以下。この開発した TCO 基板を太陽電池に適用し、低倍率集光時、真性

変換効率 20% (有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ) を得る。H26 最終目標:  $400\text{--}2,000\text{nm}$  の波長で光吸収率 5%以内、ヘイズ率 40%以上で比抵抗  $1\times 10^{-3}\ \Omega\text{cm}$  以下を達成する。この開発した TCO 基板を低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ) を達成する。>

膜材料と成膜条件を探索して、概ね  $1,400\text{nm}$  までの透明性と電気伝導性を両立する薄膜を作製するべく、検討を進めた。平成 22 年度中間目標である透明性・電気伝導性を達成するために、Drude モデルにて必要特性の見積もりを行い、目標値を移動度  $80\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  以上、シート抵抗  $12\ \Omega/\square$  以下と設定した。成膜条件を検討することで、移動度  $70\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  は達成することができた。(常圧 CVD での従来の特性は  $58\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  程度)。膜厚方向の移動度分布を検討したところ、部分的には移動度  $80\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  を達成出来ていることが確認出来た。この膜材料の光吸収率は 8.6%であり、中間目標値には至っていない。平成 22 年度中の目標達成は一部未達になる可能性がある。

<成果発表件数>特許出願(外国): 1 (0)、論文(査読付): 0 (0)、研究発表・講演: 8、新聞・雑誌等への掲載: 0、展示会出展: 0

#### 18) グラフェン透明導電膜 (富士電機ホールディングス)

<H22 中間目標: 導電率  $6\times 10^3\text{S}/\text{cm}$  以上、透過率 80%以上@ $380\text{--}2,000\text{nm}$  を得る。H26 最終目標: シート抵抗  $10\ \Omega/\square$  以下、透過率 90%以上@ $380\text{--}2,000\text{nm}$  を得る。>

##### a) グラフェン製膜技術の基礎研究

製膜技術として湿式法(化学的剥離)と CVD 法を選定した。湿式法では合成手法の最適化によるシートサイズの向上、CVD 法については追試、及び、より高品質化が見込める MBE 装置による製膜を行うこととした。湿式法で作製したグラフェン膜を用い、膜質評価技術(ラマン分光、XPS、AFM)、透明導電膜特性評価技術(分光光度計、ホール測定)の修得、立上げも併せて行った。

##### b) グラフェン製膜技術の開発

基礎研究において提案した新規製膜装置を設計・導入し、製膜条件最適化および膜物性と製膜条件の明確化を行った。CVD による成長と任意基板への転写について追試を実施。2 層程度 ( $0.7\text{nm}$ ) での導電率は  $20,000\text{S}/\text{cm}$  程度と非常に高い導電率が得られた。この技術を用いて透明導電膜を作製することにより、中間目標を達成できる見通しである。

<成果発表件数>特許出願(外国): 8 (0)、論文(査読付): 0 (0)、研究発表・講演: 7、新聞・雑誌等への掲載: 4、展示会出展: 0

#### 【平成 23~24 年度】(第 2 回中間評価時)

##### 1) シリコン系薄膜集光型セル (東京工業大学、再委託: 木更津工業高等専門学校)

<H24 中間目標: a-SiO<sub>2</sub>、a-Si、a-SiGeC、ならびに  $\mu\text{c-Si}$  からなる低倍率集光型シリコン系薄膜太陽電池で変換効率 20%を達成する。また、上記のシリコン系薄膜太陽電池、ならびに第 4 層、第 5 層セルと組み合わせた 5 接合薄膜フルスペクトル太陽電池により、変換効率 25% (開放電圧  $3.72\text{V}$ 、短絡電流  $9.0\text{mA}/\text{cm}^2$ 、曲線因子 0.75、10 倍程度の集光時)を達成する。H26 最終目標: 小面積の 5-6 接合薄膜フルスペクトルセルにより、真性変換効率 30% (低倍率集光、有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ) を達成する。>

##### a) シリコン系集光型薄膜太陽電池の最適設計・試作

アモルファス Si シングル接合セル、2 接合タンデムセル、3 接合トリプルセルの集光特性向上を目指し、シミュレーション、材料開発、デバイス物理に至る広い範囲で検討を行った。まず、p 層、n 層、トンネル接合部などに SiO<sub>x</sub> を用いた新型高効率タンデム構造を開発した。具体的には、ガラス基板と透明導電膜ならびに透明電導膜と p 層の界面にプラズマ法で形成した SiO<sub>x</sub> を挿入することにより、表面反射を抑えることが可能となった。また SiO<sub>x</sub> を n 層とセル間中間層、ならびに n 層と裏面反射層を兼用することにより、吸収ロスを抑えることができた。これにより、a-Si/ $\mu\text{c-Si}$  タンデム太陽電池により、現在までに 13.6%という高効率が得られた。また、a-SiO<sub>2</sub>/a-Si/ $\mu\text{c-Si}$  トリプルセルに代わる新しい構造として、超高ヘイズ ZnO のガラス基板上に高禁制帯幅を有する a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ / $\mu\text{c-Si}$  トリプルセルを開発した。アモルファス Si シングル接合では、集光比とともに変換効率が減少してしまうが、今回、開発した微結晶 Si を 2 層含むトリプル構造では、低倍率集光下でも、曲線因子の低下が見られず、変換効率が大幅にアップ (1sun9.45%、7suns10.7%) することを見出した。

##### b) 薄膜フルスペクトル太陽電池の試作・評価

アモルファス Si 太陽電池と、CIGS 太陽電池で 4 端子構成のタンデム太陽電池を開発した。メカニ

カルスタック型 4 端子セルの場合、トップセルとボトムセル間の光学的ロスを低減するため、屈折率が最適値に近いジオードメタンを使用し、高効率化を図った。その結果、現在までに、変換効率 14.9% が得られた。一方、波長スプリッティング法で、スプリッタ波長が 614nm の場合、約 25% という高い変換効率を得られることが理論解析で明らかになった。スプリッタのカット波長が、これよりも短波長でも長波長でも変換効率は減少する。現在の最適カット波長は、トップセルのアモルファス太陽電池の性能と、ボトムセルの CIGS 太陽電池の性能とのバランスで決まっている。まず市販の波長スプリッタを用いて、太陽電池特性を測定したところ変換効率 18% が得られた。しかし、市販のスプリッタでは、吸収損や反射損の多いことが総合効率を制限していることが分かった。以上の成果をもとに、本グループメンバーで開発した最高性能のパーツを持ち寄り、波長スプリッティング特性を測定した。その結果、スプリッタ波長が 620nm の時、21.8% という変換効率を得られた。アモルファス Si、CIGS それぞれのセル単体では、変換効率はそれぞれ 10%、17% であるが、波長スプリッティングにより、アモルファス Si セルからの寄与が 9.15%、CIGS セルからの寄与が 12.4% となり、総合変換効率 21.8% を達成した（光の強度補正後）。これらの測定成果は、世界初であり、また薄膜系としては世界最高の性能である。ここで、Si 薄膜セルは東京工業大学小長井研究室、CIGS セルは青山学院大学、波長スプリッタはカネカでの試作によるものである。

#### c) 裏面透明電極作製技術（木更津工業高等専門学校）

1.5eV 程度の禁制帯幅を有する薄膜太陽電池を用いて透明裏面電極の開発を行うことを目的として、龍谷大学で開発している p 型透明導電膜を薄膜太陽電池の裏面電極材料に適用した。龍谷大学と連携し、木更津工業高等専門学校で作製した膜上に、裏面電極として Cu-Nb-O 系薄膜および BaCuSeF 薄膜を製膜して太陽電池を作製した。現在までのところ、Cu-Nb-O 薄膜および BaCuSeF 薄膜を裏面電極に用いたとき、変換効率は非常に低い値となった（変換効率 0.01% 程度）。CdTe 層への Cu 拡散を目的として熱処理を行ったところ、太陽電池特性は改善されたがまだ不十分である（Cu-Nb-O : 0.05% 程度、BaCuSeF : 0.4% 程度）。そこで、Cu ドープカーボン裏面電極形成後の熱処理に替わる、透明裏面電極形成用の Cu ドーピング法を検討した。CdTe 層への Cu 添加方法として、Cu を添加したジエチレングリコールモノブチルエーテル (DEGEBE :  $C_8H_{18}O_3$ ) を  $CdCl_2$  処理後の CdTe 層へ適量塗布し、熱処理を行った。その結果、Cu を添加していない場合（変換効率約 1.8%）と比較して、太陽電池特性が大きく改善した（変換効率約 12.2%）。この結果より、Cu ドープ DEGEBE を塗布して熱処理を施すことにより Cu が CdTe 層にドーピングされたと考えられる。透明裏面電極用の CdTe 層へのアクセプタードーピング法として Sb 添加効果を検討した。原料中の Sb 濃度  $10^{18}/cm^3$  以下の範囲では Sb 濃度の増加に伴い、太陽電池特性が改善し、変換効率 14.9% ( $V_{oc}=0.822V$ 、 $J_{sc}=26.1mA/cm^2$ 、 $FF=0.693$ ) を達成した。一方、Sb 濃度を  $10^{19}/cm^3$  以上になると、変換効率が急激に低下した。C-V 法により、CdTe 層中のアクセプター密度を測定したところ、この手法による Sb 添加によるアクセプター密度の増加は観測されなかった。一方、表面形態を観測したところ、粒径の増大が観測された。粒径の増大などの結晶性の向上より、変換効率が増加したと考えられる。

<成果発表件数>特許出願（外国）：2（1）、論文（査読付）：6（6）、研究発表・講演：37、新聞・雑誌等への掲載：2、展示会出展：1

## 2) 広バンドギャップシリコン系薄膜（シャープ）

<H24 中間目標：広バンドギャップ i 層を用いた単接合セルにて、開放電圧 1.06V 以上（集光時 1.16V）、短絡電流密度  $9.0mA/cm^2$ （有効受光面積  $1cm^2$ ）を達成する。H26 最終目標：多接合化したシリコン系多接合セルのトップ層での開放電圧 1.10V（集光時 1.20V）、短絡電流密度  $9.6mA/cm^2$ （有効受光面積  $1cm^2$ ）を達成する。小面積の 5 接合薄膜フルスペクトルセルにより、真性変換効率 30%（低倍率集光、有効受光面積  $1cm^2$ ）を達成する。>

### a) 広バンドギャップ材料の開発

ワイドバンドギャップ化で急激に導電率が低下する a-SiC:H 膜の膜質改善検討を行った。SIMS 測定と FT-IR 測定の結果から膜中に取り込まれた炭素は Si-CH<sub>3</sub> 結合が支配的となり、炭素濃度が  $4 \times 10^{21}/cm^3$  以上では急激に導電率が低下することが分かった。プラズマ周波数、水素希釈等の製膜条件では改善できず、i 層のバンドギャップを 1.90eV に固定し、p 層のワイドギャップ化検討を行った。p 層も i 層と同様に膜中の炭素量の増加に伴って Si-CH<sub>3</sub> 結合が増加する。E<sub>g</sub>=2.11eV の p 層が得られたが、 $\sigma=1.8 \times 10^{-9}S/cm$  と導電率は低い。

### b) 広ギャップセルの開発

開発した i 層、p 層を用いたセル試作の結果、E<sub>g</sub>=1.90eV の i 層、E<sub>g</sub>=2.11eV の p 層にて、短絡電流密度  $11.6mA/cm^2$ 、開放電圧 0.996V、曲線因子 0.551、変換効率 6.36% の a-SiC:H セルが得られた。



n層の最適化、TCO/p界面制御層の導入により、開放電圧1.06Vを達成見込みである。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):1(1)、研究発表・講演:1、新聞・雑誌等への掲載:0、展示会出展:0

### 3)カルコパイライト系トップセル(立命館大学)

<H24 中間目標:多接合セルのトップセルとして、裏面電極がTCOであるスーパーストレート型Cu(In,Al)S<sub>2</sub>(CIAS)太陽電池で、低倍率集光下で変換効率6%を達成する。H26 最終目標:多接合セルのトップセルとして、裏面電極がTCOであるスーパーストレート型CIAS太陽電池で、低倍率集光下で変換効率8%を達成する。低倍率集光多接合セルで真性変換効率30%(有効受光面積1cm<sup>2</sup>)を達成する。>

高効率薄膜フルスペクトル太陽電池の達成に必須な、トップセルとなる高効率ワイドギャップカルコパイライト薄膜太陽電池の開発を行う。光吸収層としてCIASを検討し、禁制帯幅(E<sub>g</sub>)としては1.7-2.0eV付近を目指し、主に紫外線領域を吸収するセルの実現を目指す。

#### a)高品質CIAS薄膜の成長とCIAS太陽電池の作製

Cu、In、Al、Sの同時蒸着法によってCIAS薄膜を2μm程度、Mo/ガラス基板上に成長させた。Cu、In、Al源には通常のクヌーセンセルを、S源にはバルブドセルを用いて蒸気圧の高いS蒸気を制御した。典型的な基板温度は550°Cであった。Alを添加していないCuInS<sub>2</sub>では数μmの大きな粒径を持つ柱状の結晶が得られた。光生成キャリアは膜厚方向に走るため、これは太陽電池にとって好ましい結晶成長である。一方で、Al/(In+Al)=0.3の組成を持つCIASでは結晶が小粒径化しており、膜厚方向に複数の結晶粒が見られ、結晶サイズとしては1μm程度となった。Alを添加することによって、結晶成長が阻害された。今後、高品質なCIAS薄膜を実現するために、従来とは違い、CIASに相応しい結晶成長法・条件(高温での成長や相制御)を行っていく。次にITO/ZnO/CdS/CIAS/Mo/ガラス構造の太陽電池を作製した。この構造は、従来の高効率Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>太陽電池の構造と同様である。擬似太陽光下における電流-電圧(I-V)特性を測定したところ、E<sub>g</sub>=1.7eVで効率2.0%、さらにAl濃度を増加させてE<sub>g</sub>=2.0eVとすると効率が1.0%まで低下した。開放端電圧も0.4V程度にとどまった。これはpn接合が良好でないことと、上述のようにCIASの結晶性が不十分であることが原因と考えられる。

#### b)ワイドギャップカルコパイライトに適した新型バッファ層の開発

CIASはCu(In,Ga)Se<sub>2</sub>やCuInS<sub>2</sub>に対して電子親和力が小さく、伝導帯の位置が高い。つまり、従来の高効率Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>太陽電池で用いられているCdSなどのバッファ層はCIASでは最適ではない。伝導帯位置が制御可能で、かつCdフリーのバッファとして、ZnOとZnSの混晶であるZnO<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>を開発した。S比xを変化させたZnO<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>バッファをCuInS<sub>2</sub>太陽電池に適用し、S比の最適化を行った。その結果x=0.5付近で効率が最大値を示し、比較のCdSバッファを用いたセルよりも高い効率が得られた。今回は、比較的良質な結晶が得られているCuInS<sub>2</sub>を用いてZnO<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>バッファの効果を確認した。一方、CIASではAl添加に伴って伝導帯位置が上昇するために、最適なS比はCuInS<sub>2</sub>に比較して大きな値になると予想される。今後は、CIAS太陽電池に対するZnO<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>のS比の最適化を行い、良好なpn接合を実現する事によって開放端電圧の向上を実現する。

#### c)多接合化のためのカルコパイライト薄膜の引き剥がしと界面制御技術の開発

様々なE<sub>g</sub>を持つ高効率カルコパイライト太陽電池セルをそれぞれ作製し、引き剥がし技術によって各セルを組み合わせることで多接合化できれば、高効率薄膜フルスペクトル太陽電池の実現に大きく貢献できる。フルスペクトル太陽電池に用いられるカルコパイライト材料のうち、Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>は良好に引き剥がすことができることを既に確認している。今回は、項目7)で作製されたAu(In,Ga)Se<sub>2</sub>(AIGS)薄膜の引き剥がしを試みた。東京工業大学でAIGSを同時蒸着法でMo上に形成し、これを立命館大学にて引き剥がし処理を行った。Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>と比較して、Moとの密着強度は強かったものの、良好な引き剥がしに成功した。ただし、AIGSの成長条件によっては、密着強度が強すぎて引き剥がしができないものもあった。引き剥がしに成功した界面(すなわち、AIGSの裏面側とMoの表面側)を分析すると、お互いの構成元素に加えて、セレン化合物や酸化物が確認された。すなわち、Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>の場合と比較して、光吸収層と裏面電極が相互拡散(反応)を起こしているために、密着性が強くなっていると考えられる。また、Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>とAIGSでは成長条件が異なるために、引き剥がし性に重要な役割を果たすMoSe<sub>2</sub>の結晶配向性が変わっていることも考えられる。今後は、高効率化と引き剥がれ性を両立させるAIGSの成長条件の模索や、引き剥がしセルの作製を行っていく。

<成果発表件数>特許出願(外国):0(0)、論文(査読付):6(6)、研究発表・講演:22、新

#### 4) InGaN 薄膜 (岐阜大学)

<H24 中間目標：禁制帯幅 2eV 程度の InGaN 薄膜を用いた単接合太陽電池において 1sun で 1.10V、10suns で 1.20V の開放電圧を達成する。H26 最終目標：InGaN 薄膜を用いた単接合太陽電池において、1sun で 1.18V、10suns で 1.30V の開放電圧を達成する。この InGaN 薄膜を用いた太陽電池を、低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm<sup>2</sup>) を達成する。>

##### a) 基板温度上昇ならびにポストアニールによる光感度の改善

まず、基板温度の上昇により表面反応を促進させて窒素組成比を増加させることで光感度の改善に取り組んだ。その結果、基板温度を室温から 100°C に上昇することで、N 組成比は 0.73 から 0.93 に増加したが、100°C 以上では大きな変化はなかった。また、暗電気伝導度と光電気伝導度の比で表される光感度 ( $\sigma_p/\sigma_d$ ) は、基板温度が室温から 200°C まで上昇することで、252 から 1,175 に増加した。これは、再結合センターとして働く欠陥密度が、基板温度の上昇により減少したためと考えられている。しかし、さらに基板温度を上昇すると、逆に光感度は減少した。以上の結果より、基板温度を 100-200°C 程度に上昇して作製することで、光感度を大きく改善できることが分かった。次に、Asahi-U 基板/p 型 a-SiC/i 型 a-Si:H バッファ層/i 型 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/n 型 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 構造の太陽電池を、i 型 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 層を基板温度を室温および 100°C で作製し、その発電特性の変化を調べた。なお、室温および 100°C で作製した i 型 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N の光学バンドギャップエネルギーはそれぞれ 2.36eV および 2.45eV、光感度は 147 および 1,087 であった。また、i 型 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 層以外の層については同じ作製条件により作製した。その結果、i 型 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 層を室温で作製した太陽電池試料の発電特性は、変換効率 1.57%、短絡電流密度 5.85mA/cm<sup>2</sup>、開放電圧 0.58V、曲線因子 0.46、100°C で作製した太陽電池試料の発電特性は、変換効率 1.42%、短絡電流密度 6.58mA/cm<sup>2</sup>、開放電圧 0.50V、曲線因子 0.44 であった。基板温度の上昇により、短絡電流密度が増加した。また、Asahi-U 基板/p 型 a-SiC/i 型 a-Si:H バッファ層/n 型 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 構造の試料を作製し、その電流-電圧特性を評価した結果、整流性を得ることができなかった。以上の結果より、a-Si:H バッファ層を用いた太陽電池で i 型 InGaN が光吸収層として働いており、基板温度上昇による短絡電流密度の増加は、i 型 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 層の光感度の増加が関係しているものと考えられる。また、ポストアニールにより、室温で作製した In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 薄膜の光感度改善も試みた。アニール温度を 200°C に上昇することで、光感度は 16,881 に増加した。しかし、300°C 以上では逆に光感度が減少した。以上の結果から、200°C 程度のポストアニールによっても光感度の大きな改善が可能であることが分かった。

##### b) 全層ワイドギャップ材料を用いた InGaN 単接合太陽電池

InGaN 太陽電池のトップセルとしての適用を目指し、p 層およびバッファ層にワイドギャップ材料である a-SiO を用いた InGaN 単接合太陽電池を作製し、評価した。なお、太陽電池試料の構造は、Asahi-U 基板/p 型 a-SiO/i 型 a-SiO バッファ層/i 型 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/n 型 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N で、i 型 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 作製時の基板温度は室温である。発電特性を評価した結果、整流性は得られたものの、逆方向のリーク電流が大きく、また太陽電池としての動作は確認できなかった。その原因の一つとして、i 型 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N の欠陥密度が多いため、i 型 a-SiO バッファ層との界面特性が悪いことが考えられた。そこで、ポストアニールによる InGaN 太陽電池の特性改善を試みた。その結果、ポストアニールにより、逆方向のリーク電流を低減することができた。また、変換効率は 0.13%、開放電圧は 0.16V と小さいものの、全層ワイドギャップ材料を用いて作製したトップセル用 InGaN 単接合太陽電池において、初めて太陽電池動作を確認することができた。これは、ポストアニールによる i 層の欠陥密度の減少とバッファ層/i 層界面の特性改善によると考えられる。以上の結果は、更なる i 層の高品質化ならびに界面特性の改善により、トップセル用 InGaN 太陽電池の高効率化の可能性を示していると考えられる。

##### c) 装置改良と作製条件調整による光感度の改善

InGaN 薄膜の高品質化を図るため、平成 23 年度にスパッタ装置の改良を行った。それに伴って作製条件 (Ar と N<sub>2</sub> ガスの流量) の調整を行った。その結果、光感度 5,780 (暗電気伝導度 9.7×10<sup>-9</sup>S/cm、光電気伝導度 5.6×10<sup>-5</sup>S/cm) を示すアモルファス InGaN 薄膜を室温製膜することができた。作製した試料の窒素組成比 In/(Ga+In) が 1.12 であったことから、装置の改良と作製条件の調整により残留ドナーとして働く窒素欠損が減少して暗電気伝導度が増加した結果光感度が向上した可能性が考えられる。以上の結果より、さらに作製条件を調整することで、InGaN 薄膜のさらなる高光感度化が可能であると考えられる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 10、新

聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

5) Si 量子ドット禁制帯幅制御（東京工業大学）

<H24 中間目標：TiO<sub>2</sub>:Nb を高温耐性透明導電膜、ならびにドーパントの拡散バリア層として用いた禁制帯幅 1.4eV 程度の Si 系量子ドットシングル接合太陽電池で変換効率 7%を達成する。H26 最終目標：量子ドットの禁制帯幅を 1.1-1.5eV の範囲で制御し、禁制帯幅と太陽電池特性の関係を明確にする。Si 系量子ドット系太陽電池で変換効率 10%を達成する。>

a) 新型透明導電膜 TiO<sub>2</sub>:Nb を用いた不純物拡散の抑制

これまでに酸素添加した Si 量子ドット超格子 (Si-QDSL) 構造を発電層とする太陽電池構造を作製し、Si 量子ドット薄膜太陽電池において、開放電圧 518mV、曲線因子 0.51 を達成した。さらなる変換効率の向上には、Si 量子ドット超格子膜を作製する際の高温アニール処理によるドーピング層から Si-QDSL 層への不純物拡散を抑制する必要がある。今回は新しい透明導電膜として注目され、高い熱安定性を有する TiO<sub>2</sub>:Nb を採用した。まずは単膜評価として、マグネトロンスパッタ法により作製された TiO<sub>2</sub>:Nb 膜を 900°Cにてアニール後、TiO<sub>2</sub>:Nb 膜の結晶構造と導電率、及び内部透過率の測定を行った。結晶構造はアニール後もアナターゼ型を維持することに成功し、247S/cm という比較的高い導電率を得ることができた。また、内部透過率は可視光領域にてほぼ 90%以上の高い透過率を維持しており、太陽電池動作に影響を与えないことを確認した。続いて、900°Cでのアニール前後の n 型 a-Si/TiO<sub>2</sub>:Nb/Si-QDSL 積層膜中の P 濃度を 2 次イオン質量分析法により測定したところ、アニール前後で Si-QDSL 中の P 濃度に変化はなく、拡散が起こっていないことがわかった。このことから、TiO<sub>2</sub>:Nb は 900°Cという高温下においても高いドーパント拡散抑制効果があることを確認した。

b) TiO<sub>2</sub>:Nb を用いた Si ナノドット太陽電池構造の作製

TiO<sub>2</sub>:Nb を n++型多結晶 Si 層と Si-QDSL 層の間に挿入した太陽電池構造を作製した。TiO<sub>2</sub>:Nb 層の有無による Si 量子ドット太陽電池の I-V 特性を比較すると、TiO<sub>2</sub>:Nb 層を導入することで、開放電圧 (328→529mV)、短絡電流 (0.18→1.60mA/cm<sup>2</sup>)、曲線因子 (0.28→0.46) のすべてのパラメータが向上していることがわかった。これまでに世界最高の変換効率 0.39%を達成した。これは、ドーパント拡散による発電層品質の劣化が抑制されたことが理由として挙げられる。開放電圧はこれまでで最高の 529mV を達成することに成功した。また、短絡電流も 1.60mA/cm<sup>2</sup> まで向上しており、本プロジェクト初期と比べると、変換率はおよそ 250 倍まで向上したこととなる。今後は TiO<sub>2</sub>:Nb 層のシート抵抗の低減、界面品質及び Si 量子ドット膜の品質の向上を行うことでさらなる変換効率の向上を目指す。また、低倍集光下における Si 量子ドット太陽電池の I-V 特性評価を世界に先駆けて行った。開放電圧は入射光強度の増加とともに急激に上昇していることがわかった。これは、入射光強度が上昇することによって、Si-QDSL 層の欠陥による再結合が抑制されたためであると考えられる。19.7suns の照射時に、開放電圧 649mV を得ることに成功した。曲線因子は Si 量子ドット層内の直列抵抗成分及び n++型多結晶 Si 層のシート抵抗により、集光倍率とともに低下したが、開放電圧の急激な上昇によって、変換率が向上しており、Si 量子ドット太陽電池の低倍集光下での応用に期待の持てる結果となった。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 8、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 1

6) ナノドット量子効果 (パナソニック)

<H24 中間目標：ナノドット密度 30wt%以上、ナノドット量子効果の検証を実施し変換効率 10% (低倍率集光時) を達成する。H26 最終目標：単接合セルで変換効率 11.4% (低倍率集光時) を達成する。また低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30% (有効受光面積 1cm<sup>2</sup>) を達成する。>

ナノドットとして PbS を用いて、ナノドット分散液の溶媒最適化、ナノドット表面改質等のナノドット分散技術の開発、及び、ナノドットを用いたセルの試作と量子サイズ効果の検証を行った。その結果、以下の成果が得られた。

○塗布プロセス開発によりナノドットの高密度・均一分散を可能にした (ドット密度約 70wt%)。

○ナノドットのサイズ (φ=2.3、3.6、4.6nm) を制御した膜を用いたセルの外部量子効率において、ドットサイズに起因したピーク位置の変化 (E<sub>g</sub>=0.90-1.40eV に相当) を確認し、ナノドット発電におけるその量子サイズ効果を確認した。

○上記技術を用いてナノドット膜と n 型 a-Si 膜とを積層した独自構造のセルを試作し、V<sub>oc</sub>=0.71V、J<sub>sc</sub>=6.3mA/cm<sup>2</sup>、FF=0.45、変換効率 2.02%を得た。

今回得られた V<sub>oc</sub>=0.71V は、ウエットプロセスで形成したナノドット層を用いたセルとしては世

界最高の値である。これは、ナノドット膜と n 型 a-Si 膜を組み合わせた独自の積層構造により実現できたものである。今後、高 Voc の特徴を生かしたデバイス構造の最適化により変換効率 10% (低倍率集光時) を達成する見込みである。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (1) 、論文 (査読付) : 0 (0) 、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 7) カルコパイライト系集光型セル (東京工業大学)

<H24 中間目標 : a-Si 太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、あるいはカルコパイライト系太陽電池/カルコパイライト系太陽電池の作製により、低倍率集光多接合セルで変換効率 25%を達成する。

H26 最終目標 : a-Si 太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、あるいはカルコパイライト系太陽電池/カルコパイライト系太陽電池、さらに歪 Ge 太陽電池を含めたさらなる多接合化により、低倍率集光多接合セルで変換効率 30%を達成する。>

##### a) バンドギャップ制御技術開発

カルコパイライト系タンデム型太陽電池を実現するために、トップセル材料としてバンドギャップ 1.7eV の Ag(InGa)Se<sub>2</sub> 薄膜太陽電池、ミドルセルとして高 Ga 組成を有するバンドギャップ 1.4eV の Cu(InGa)Se<sub>2</sub> 薄膜太陽電池の開発を行っている。Ag(InGa)Se<sub>2</sub> においては Ag-Se の熔融温度が 616°C と高いため、通常の 3 段階法では Ag が十分に拡散しないことを分析型透過型電子顕微鏡観察により新たに見出した。この時の変換効率は、6%台であった。そこで Ag の拡散を促すため製膜温度の高温化を試みたが、単純に温度を上げたのでは蒸気圧が高い In-Se 系化合物が離脱してしまい、膜組成がずれ、変換効率は向上しないことが明らかとなった。これを解決するため、本研究開発では 2 段階法の最終段階において表面に Ag-Se 層を設け、1 段階目に形成する (InGa)-Se 層をキャッピングする手法を新たに提案した。このキャッピング層の導入により、基板温度 630°C 程度まで膜組成を保ったままで AIGS が形成可能となり、製膜温度の上昇に伴い変換効率が単調に向上し、7.5%台の変換効率が達成された。さらに、この Ag(InGa)Se<sub>2</sub> 薄膜太陽電池を 200°C で空気アニールした結果、変換効率は約 10% (トータル面積) まで向上した。この時の Ag/III 比は 0.89、Ga/III は 0.75 である。注目すべき点は開放電圧であり、約 1V を示している。今後は、曲線因子を向上させ、高効率化を図って行く。高い Ga 組成を有する Cu(InGa)Se<sub>2</sub> 薄膜太陽電池においては、3 段階法による製膜時における Ga の拡散係数が問題となっている。Ga 組成 30%では、製膜時の In と Ga の拡散係数の違いにより V 字型のバンドプロファイルが自然に設けられ、高い変換効率を有する Cu(InGa)Se<sub>2</sub> を製膜することができる。しかし、Ga 組成が 70%程度になると、バンドプロファイルの勾配が大きくなり過ぎ、逆に少数キャリアの収集を妨げてしまう。この解決法として、平成 23 年度に 5 段階法を提案し、変換効率が大きく改善することを見出した。その時の変換効率は、14.9% (Voc=0.671V、Jsc=30.7mA/cm<sup>2</sup>、FF=0.720) であった。そこで、計算による最適バンドプロファイルの設計、ならびに高温製膜を試みた。その結果、製膜温度 530°C においては Ga が膜上部と下部に偏析し、粒径が小さいものの製膜温度 630°C では Cu(InGa)Se<sub>2</sub> の粒成長が進み、また Ga の膜内分布が改善されることを確認した。これにより平均 Ga 組成 70%の CIGS 太陽電池において、変換効率が 4.2%から 10.2% (Voc=0.770V、Jsc=22.7mA/cm<sup>2</sup>、FF=0.584) に向上した。高温製膜のセルでは、5 段階法に比べて開放電圧が高いことが特徴であるが、これは膜質の向上を意味すると考えている。

##### b) タンデム化技術開発

本研究開発では、製膜温度が高いカルコパイライト系太陽電池を用いて、タンデム太陽電池を作製するために、直接貼り合わせ技術を提案してきた。これまでの研究により、透明導電膜同士の貼り合わせに成功している。しかしながら、貼り合わせ前の両面の表面荒さを 1nm 以下にする必要があることと、このための有効な手法である化学機械研磨 (CMP) 法において研磨時の砥粒が表面に残ってしまうなどの問題点があることが確認された。そこで、これらの問題を解決するために、透明導電膜上に a-Si 膜を設けることを試みた。貼り合わせに用いた構造は、ガラス上に ZnO 薄膜を製膜、その上に a-Si を製膜したものである。サンプルは、基板同士に酸素プラズマによる表面活性化を行った後、貼り合わせを行った。透明導電膜である ZnO 同士の接合では、接合界面に間隙が生じ、干渉縞が観測された。しかしながら、a-Si 膜を用いた場合には、このような干渉縞は見られず、強固な接合が形成されていることが分かった。a-Si を用いたことにより、新たな光吸収が生じるが、この貼り合わせ構造の上にはバンドギャップ 1.7eV 程度のトップセルが積層されるため、透明導電膜間に a-Si があっても吸収係数のロスが少ない。貼り合わせ界面の評価として、単にサンプルを対向させた構造と直接貼り合わせにより作製した構造との透過率および反射率の比較を行った。その結果、波長 700nm において透過率は 35.7%から 73.0%、反射率は 61.0%から 23.6%へと向上し、直接

貼り合わせにより作製したサンプルの方が、光学特性が優れていることを明らかにした。平成 24 年度は、タンデム化の新たな試みとして波長スプリティングによるタンデム型太陽電池の作製に着手した。その結果、614nm の波長スプリッタを用いて、AIGS および CIGS 太陽電池を用いて変換効率 12.2%を達成した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：3（3）、研究発表・講演：8、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 8) 歪 Ge（東京工業大学）

<H24 中間目標：ダブルヘテロ接合型太陽電池を作製し、1.1eV 以下の低エネルギー光照射下において変換効率 1.35%（非集光）を達成する。H26 最終目標：直接遷移型へと転換した歪 Ge を用いた単接合太陽電池において、真性変換効率 5%を達成する。>

これまでの研究により、InGaAs 仮想基板上への歪 Ge 膜の作製技術を確立した。さらに、フォトルミネッセンス（PL）法を用いて歪 Ge 膜のバンドギャップ評価を行い、理論から予想されるバンドギャップ縮小効果を初めて観測することに成功した。これらの成果を踏まえ、歪 Ge を用いた太陽電池作製技術の確立をバルク Ge を用いて行った。歪 Ge 膜は、2 軸性伸張歪により直接遷移に対応するバンドギャップが縮小する。これにより膜の吸収係数が増大し、薄膜においても十分な光吸収を得ることができる。しかしながらそれに伴い、開放電圧が減少するという欠点を有する。本研究開発では、光吸収の増大効果と開放電圧の維持を両立させるために、ヘテロ接合型太陽電池を提案している。具体的には、太陽電池の吸収層に p 型の Ge 基板を用い、表面側には n 型と i 型の水素化アモルファスシリコン膜（a-Si:H）を、裏面側には i 型と p 形の水素化微結晶酸化シリコン膜（ $\mu\text{c-SiO:H}$ ）を設けることとした。これにより、HIT 構造バルク Ge 太陽電池を作製した。a-Si 及び  $\mu\text{c-Si}$  の作製には、プラズマ CVD 法を用いた。用いた Ge 基板は Ga ドープの p 型片面研磨基板であり、抵抗値は 0.005-0.027  $\Omega\text{cm}$ 、基板厚は 328  $\mu\text{m}$  である。表面側の i 型 a-Si:H と n 型 a-Si:H 層の膜厚は、それぞれ 4nm と 20nm であり、裏面の i 型と p 型  $\mu\text{c-SiO:H}$  層の膜厚は、それぞれ 5nm と 30nm とした。作製したダブルヘテロ型 Ge 太陽電池に対して光照射下（AM1.5、100mW/cm<sup>2</sup>、25°C）での電流-電圧特性（I-V 特性）の評価を行った。その結果、開放電圧 213mV、短絡電流 29.9mA/cm<sup>2</sup>、曲線因子 0.36、変換効率 2.31%のセルの作製に成功した。このセルに関して、他の研究機関と特性を比較した結果、高い開放電圧が得られていることが分かった。これは、HIT 構造を採用した結果である。一方で、短絡電流を比較すると低い結果となっていた。得られたセルの量子効率より、Ge の直接遷移吸収端である 1,560nm 付近での立ち上がりを確認することに成功した。しかし、分光感度特性の最大値が 70%程度であり、また 1,560nm までの長波長領域に向かって量子効率が低下していることが明らかとなった。この分光感度特性は外部量子効率である。そこで、反射率等を加味した内部量子効率を求めた。その結果、波長 700-1,500nm にわたって、80%程度の高い内部量子効率を有していることが分かった。この結果より、高効率 Ge 太陽電池（歪 Ge 太陽電池）を実現するためには、表面反射率の低減ならびに光閉じ込め構造の導入が必要であり、結晶 Si 系太陽電池で採用されている表面テクスチャ化など、高効率化技術の採用が必要であることが明らかとなった。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：1（1）、研究発表・講演：3、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 9) 非真空 CuIn(Se, Te)<sub>2</sub>（龍谷大学）

<H24 中間目標：第 5 層セル（禁制帯幅 0.85-0.90eV）として変換効率 2%（低倍率集光時）、非真空 CuIn(Se, Te)<sub>2</sub> 太陽電池を、低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 25%（有効受光面積 1cm<sup>2</sup>）を達成する。H26 最終目標：第 5 層セル（禁制帯幅 0.85-0.90eV）として変換効率 3%（低倍率集光時）、非真空 CuIn(Se, Te)<sub>2</sub> 太陽電池を、低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30%（有効受光面積 1cm<sup>2</sup>）を達成する。>

##### a) 印刷/高圧焼結法による CuIn(Se, Te)<sub>2</sub> 膜の作製

メカノケミカルプロセスにより合成した CuIn(Se, Te)<sub>2</sub>（CIST）微粉末を原料に用いてスクリーン印刷/高圧焼結法で作製した CuIn(Se<sub>0.5</sub>Te<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub> 組成の CIST 膜で禁制帯幅 0.87eV を確認した。高圧焼結の条件としては、加圧圧力を 5kN に固定して、焼成温度を 450°C、500°C、550°C、600°C と変化させ、焼成時間は 30 分と一定にした。この X 線回折から焼成温度が高くなるとともに、CuIn(Se<sub>0.5</sub>Te<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub> の回折ピークが大きくなり、CuIn(Se<sub>0.5</sub>Te<sub>0.5</sub>)<sub>2</sub> 薄膜の結晶性が高くなることがわかった。スクリーン印刷/高圧焼結法で 450°C、500°C、550°C、600°C の各種温度で高圧焼成した

CuIn( $\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ )<sub>2</sub>膜を 500°C と 550°C で Se+Te 雰囲気中で熱処理した。この熱処理により、膜の組成が CuIn( $\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ )<sub>2</sub> から Te が減少して Se が増加することが明らかになった。この組成変化は高圧焼結時の温度が低い CuIn( $\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ )<sub>2</sub> 膜で著しかった。600°C で加圧焼結した結晶性の良い CuIn( $\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ )<sub>2</sub> 膜については、500°C や 550°C での熱処理ではほとんど組成が変化しないことを確認した。これらのことから、高い温度で高圧焼成した方が結晶性の良い CIST 膜が得られ、結晶性の良い CIST 膜は後で熱処理を行っても組成変化が起こりにくいことが明らかになった。非真空プロセスで CuIn( $\text{Se}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ )<sub>2</sub> 膜を作製し、禁制帯幅 0.87eV を確認。

b) 印刷/高圧焼結法による Cu<sub>2</sub>Sn(S, Se)<sub>3</sub> の合成と薄膜化

薄膜フルスペクトル太陽電池の第 5 層セルに最適な 0.7-0.87eV で禁制帯幅の制御が可能な Cu<sub>2</sub>Sn(S, Se)<sub>3</sub> 系新材料を開発した。非真空法による、Cu<sub>2</sub>Sn(S, Se)<sub>3</sub> (CTSSe) 系材料を合成し、禁制帯幅を決定し、印刷/高圧焼結法を用いて膜を作製した。Cu<sub>2</sub>Sn(S<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>3</sub> 固溶体 (x=0.0-0.6) の拡散反射スペクトルから、Se の固溶量が増加するにしたがって吸収端が長波長側にシフトし、Cu<sub>2</sub>Sn(S<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>3</sub> 固溶体の禁制帯幅が狭くなることがわかった。そして、Cu<sub>2</sub>Sn(S<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>3</sub> の禁制帯幅は Se の固溶量が 0.0、0.2、0.4、0.6 と増加するとともに、0.87、0.82、0.76、0.67eV と直線的に減少する。次に、Cu<sub>2</sub>Sn(S<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>3</sub> 固溶体の禁制帯幅の組成依存性を参考にして、第 5 層セル (禁制帯幅 0.85-0.90eV) の作製を目的に、Cu<sub>1.9</sub>Sn(S<sub>0.8</sub>Se<sub>0.2</sub>)<sub>3</sub> 組成の CTSSe 膜をスクリーン印刷/高圧焼成法を用いて作製した。CTSSe 膜の結晶粒は小さいが、比較的緻密な微構造であった。得られた膜の透過スペクトルから、直接遷移型半導体を仮定して、 $(\alpha h\nu)^2 = h\nu - E_g$  の式を用いて決定した Cu<sub>2</sub>Sn(S<sub>0.8</sub>Se<sub>0.2</sub>)<sub>3</sub> 膜の禁制帯幅は 0.84eV で、拡散反射スペクトルから求めた値 0.82eV とほぼ一致した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 2 (2)、研究発表・講演 : 8、新聞雑誌等への掲載 : 1、展示会への出展 : 0

10) 蒸着 CuInTe<sub>2</sub> 系セル (青山学院大学)

<H24 中間目標 : CuInTe<sub>2</sub> 系ボトムセルで変換効率 2% (低倍率集光) を達成する。H26 最終目標 : CuInTe<sub>2</sub> 系ボトムセルで変換効率 3% (低倍率集光) を達成する。>

a) ナローギャップ CuInTe<sub>2</sub> 系薄膜形成技術の開発

3 元同時蒸着法により基板温度 250°C および高 Te フラックス下で、単相 CuInTe<sub>2</sub> 薄膜を得た。X 線回折から [112] 優先配向が認められるが、表面平坦性に劣る。今後、製膜条件の最適化により緻密で表面平坦性に優れた CuInTe<sub>2</sub> 薄膜を形成する必要がある。また、光学的に求めた禁制帯幅は 0.97-0.98eV であり、CuInSe<sub>2</sub> 薄膜より禁制帯幅が狭いことを確認した。

b) CuInTe<sub>2</sub> 系薄膜太陽電池の試作と特性評価

製膜条件を最適化した CuInTe<sub>2</sub> 薄膜を用いた太陽電池の作製とセル特性の評価を実施した。a) の CuInTe<sub>2</sub> 薄膜を用いて ZnO:Al/ZnO/CdS/CuInTe<sub>2</sub>/Mo/SLG 構造を有する太陽電池を試作した結果、変換効率 0.33% (Voc=85.1mV、Jsc=13.8mA/cm<sup>2</sup>、FF=0.277) となった。しかしながら、このセルの CuInTe<sub>2</sub> 薄膜に KCN 処理 (10wt%、1min) をした結果、変換効率は 1.1% (Voc=154mV、Jsc=23.2mA/cm<sup>2</sup>、FF=0.295) に改善した。したがって、化学量論的組成の CuInTe<sub>2</sub> 薄膜内に、前述の XRD や Raman 分光では検出できなかった微量の Cu<sub>2-x</sub>Te 相が混在していると推測される。実際に、Cu/In=0.84 の CuInTe<sub>2</sub> 薄膜セルでは KCN 処理なしで変換効率 2.1% (Voc=221mV、Jsc=20.6mA/cm<sup>2</sup>、FF=0.462) が得られた。このセルを暗室 (20-25°C、25-30%RH) にて 5 ヶ月間保管後、Voc と FF の改善により変換効率 3.5% (Voc=324mV、Jsc=19.2mA/cm<sup>2</sup>、FF=0.561) まで向上した。セル特性改善の理由として酸素による CuInTe<sub>2</sub> 光吸収層内の電気的に活性な欠陥 (VTe) のパッシベーションや混在する Cu<sub>2-x</sub>Te 相によるシャント・パスの低減により、漏れ電流が低減したためと考えられる。今後、更なる高効率化のためには CuInTe<sub>2</sub> 薄膜層の高品質化が必要である。

c) 低倍率集光下における CuInTe<sub>2</sub> 薄膜太陽電池の特性評価

集光型ソーラーシミュレータを用いて 10 倍集光までセル特性の測定・評価をした。集光倍率の増大に伴い、Voc が向上し FF が単調に低下した。その結果、5-10 倍集光で変換効率が最大 4.4% (7 倍集光) となった。本実験に用いたセルでは、暗時 J-V 特性から求めた n 値は 1.9 であったので、5 倍集光で 31mV、10 倍集光で 49mV 程度だけ Voc が理論値より低くなった。この原因として、ナローギャップ・セルの冷却不足が挙げられ、今後放熱性の良い金属基板上にセルを作製することで、Voc の損失を改善できる。また、高い集光度における FF の低下は CuInTe<sub>2</sub> 層の膜質改善と TCO 層の低抵抗化および Al グリッド電極の設計の見直しにより改善できると考えられる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 3 (3)、研究発表・講演 : 3、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

11) p 型透明導電膜 (龍谷大学、共同実施：新潟大学)

<H24 中間目標：基本特性として  $E_g > 3.0\text{eV}$ 、 $\sigma > 300\text{S/cm}$  を達成する。p 型透明導電膜をシリコン系薄膜太陽電池に適用して p 型透明導電膜の有効性を確認し、従来の  $\text{SnO}_2$  や  $\text{ZnO}$  よりも開放電圧 50mV 以上の増加を目指す。また、p 型透明導電膜を CIGS 太陽電池等の下部電極として適用し、従来用いていた電極と同等の特性を達成する。H26 最終目標：基本特性として  $E_g > 3.0\text{eV}$ 、 $\sigma > 10^3\text{S/cm}$  を達成する。>

a) PLD 法による p 型透明導電膜の作製技術開発

○PLD 法による Cu-Nb-O 系 p 型 TCO 膜 ( $E_g = 2.6\text{eV}$  の Cu-Nb-O 系薄膜) で、可視光透過率 70%、 $116\text{S/cm}$  を達成した。しかし、基板温度  $500^\circ\text{C}$  で Cu-Nb-O 膜を CIS 太陽電池や CdTe 太陽電池の裏面電極として形成したのでは、CdS バッファ層と CIGS 層の界面や CdS 層と CdTe 層の界面で拡散が起り、太陽電池特性を劣化させてしまう。そのため、CIS 太陽電池や CdTe 太陽電池への応用を目指して PLD 法で Cu-Nb-O 膜の形成時の基板温度の低温化に取り組んだ。基板温度  $300^\circ\text{C}$  で形成した Cu-Nb-O 膜の熱処理前には平均可視光透過率約 10%、電気伝導率  $1.39 \times 10^{-1}\text{S/cm}$  と特性は非常に低かったが、 $\text{N}_2$  雰囲気 で 2h 熱処理することにより平均可視光透過率約 26%まで向上したが、電気伝導率は  $1.10 \times 10^{-1}\text{S/cm}$  でほとんど変化しなかった。しかし、熱処理温度を  $350^\circ\text{C}$  まで高くしたところ、平均可視光透過率 58%、電気伝導率  $8.75\text{S/cm}$  まで向上した。

○PLD 法による NiO 膜 ( $E_g = 3.6\text{eV}$  の NiO 薄膜) の作製で可視光透過率 74%、 $10^4\text{S/cm}$  を達成した。ホウケイ酸ガラスを基板に用いて、基板温度を  $500^\circ\text{C}$  に設定した。導入ガスとチャンバー内の圧力を変化させて次の 3 種類の NiO 膜を作製した。イ) 導入ガス  $\text{O}_2$ 、チャンバー内の圧力 1.0mTorr、ロ) 導入ガス  $20\%\text{O}_2\text{-}80\%\text{N}_2$ 、チャンバー内の圧力 1.0mTorr、ハ) 導入ガス  $20\%\text{O}_2\text{-}80\%\text{N}_2$ 、チャンバー内の圧力 0.1mTorr である。膜の厚さはイ) 260nm、ロ) 205nm、ハ) 90nm であった。いずれの条件で形成した膜も X 線回折により NiO の [111] 回折が観察され、NiO が結晶化していることが確認出来た。いずれの NiO 膜も可視光領域で 60%以上の透過率を示し、禁制帯幅はすべて 3.6eV と大きく p 型 TCO として十分に大きな値であった。いずれの膜も p 型の電気伝導性を示したが、イ) およびロ) の NiO 膜は電気伝導率は非常に低かった。それに対して、ハ) の NiO 膜の電気伝導率は高く、 $10^4\text{S/cm}$  を示した。

○PLD 法による NiO 系新材料膜 ( $E_g = 3.6\text{eV}$  の NiO 系新材料) の作製で 59%の可視光透過率と  $180\text{S/cm}$  の電気伝導率を達成した。ホウケイ酸ガラスを基板に用いて、基板温度を  $500^\circ\text{C}$  に設定した。導入ガス  $20\%\text{O}_2\text{-}80\%\text{N}_2$ 、チャンバー内の圧力 1.0mTorr で膜を作製した。得られた膜は NiO 膜と類似の X 線回折を示した。

○BaCuSeF 等の p 型 TCO を化合物系太陽電池の裏面電極に適応し、太陽電池特性を確認した。ワイドギャップ薄膜シリコン太陽電池の表面電極や、CdTe 太陽電池や CIS 太陽電池の裏面電極への応用を目指して、東京工業大学や木更津工業高等専門学校、立命館大学と共同して p 型透明導電膜の太陽電池への適用について検討を行った。その中で、CdTe 太陽電池の裏面電極として BaCuSeF 系 p 型 TCO を適用したところ太陽電池特性を確認し、CIS 太陽電池の裏面電極として BaCuSeF 膜を適用したところダイオード特性を確認した。

b) 溶液法及び反応性スパッタ法による p 型透明導電膜の作製技術開発 (新潟大学)

PLD 法による Cu-Nb-O 系薄膜の p 型高導電性の成果に引き続き着目し、Ar 希釈酸素ガス中で Cu と Nb のターゲットを交互に堆積する対向ターゲット式反応性スパッタ法において、堆積時間比及び周期や酸素濃度などを変化させて薄膜の作製・評価を行った。銅系酸化物系の p 型導電性では、 $\text{O}^{2-}$  の 2p 軌道への  $\text{Cu}^+$  の 3d 軌道の混成が正孔局在化緩和に重要と解釈されていることを踏まえて、基礎的実験として Cu のみのスパッタによる薄膜を基板非加熱条件で作製したところ、その X 線回折パターンは低酸素ガス濃度では  $\text{Cu}^+$  酸化物  $\text{Cu}_2\text{O}$  のピークのみだったが、高酸素ガス濃度では  $\text{Cu}^{2+}$  酸化物の  $\text{CuO}$  のピークも出現した。また、低酸素ガス濃度で Nb のみのスパッタによる薄膜では、組成が  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  に対応していたものの X 線回折ピークは観られなかった。これらの結果を踏まえ、低酸素ガス濃度で Cu-Nb-O 薄膜作製を行った。大気圧下窒素雰囲気  $400^\circ\text{C}$  の熱処理も行った。薄膜の作製条件及び熱処理の有無に依らず、X 線回折パターンでは特徴的ピークが観られず、アモルファスもしくは微結晶構造とみなせる。Cu/Nb 比は、PLD 法で p 型導電性が報告されている範囲 (約 0.3-1.7) にほぼ対応している。また、Cu/Nb 比増加と共に  $\text{Cu}_2\text{O-CuNbO}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$  擬混晶組成線よりもやや酸素欠損になると共に、熱処理による酸素含有比の減少傾向が観られる。薄膜がホットプローブ法で p 型を示したことは、薄膜の組成が  $\text{Cu}^{2+}$  を含む  $\text{CuO-Cu}_3\text{Nb}_2\text{O}_8\text{-CuNb}_2\text{O}_6\text{-Nb}_2\text{O}_5$  擬混晶系組成線よりも  $\text{Cu}^+$  を含む  $\text{Cu}_2\text{O-CuNbO}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$  擬混晶系組成線に近いことに矛盾しない。低導電性を有していたことは、 $\text{Cu}^+$  の擬混晶系組成線よりもやや酸素欠損であったことから、酸素空孔ドナーの補償効果の可能性も考えられる。

熱処理前の透過率では、Cu/Nb 比の増加に伴った吸収端の長波長シフト及び透過率減少傾向が生じていた。なお、熱処理による透過率スペクトルの変化がほとんどなかったことは、熱処理による Cu/Nb 比の変化が小さかったことに対応しているようにみえる。堆積及び熱処理条件に対する薄膜の組成制御性の向上を図ると共に、電気的特性の組成依存性の明確化が必要であることがわかった。これまでの溶液法による CuAlO<sub>2</sub> 薄膜および CuYO<sub>2</sub> 薄膜などの作製評価データを基に、酢酸金属原料を用いたスピコート法により NiO 薄膜を作製し、Cu 不純物添加による p 型導電性制御を試みた。石英基板上に酢酸金属水溶液をスピコートし、空気中での加熱処理を施して、無添加および Cu 添加薄膜を作製した。薄膜の組成は、やや酸素過剰であったものの、その金属組成比は原料溶液中の金属組成比にほぼ対応していた。この薄膜の X 線回折結果から、低 Cu 濃度では NiO のみであるが、高 Cu 原料濃度では CuO も出現することを確認した。作製した薄膜の透過率スペクトルにおける吸収端は、報告されている NiO の光学バンドギャップにほぼ対応している。また、Cu 原料濃度増加に伴う透過率減少の傾向は、CuO 相出現に関連していると考えられる。薄膜はホットプローブ法で p 型伝導を示し、Cu 添加により導電率が 10<sup>-4</sup>S/cm から 10<sup>-3</sup>S/cm へ増加した。これは、Ni 空孔または格子間 O のアクセプター真性欠陥の可能性に加えて、Ni サイト置換 Cu アクセプターの可能性を示唆している。組成比および不純物添加条件等の最適化による高導電化が期待される。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 1 (0) 、論文 (査読付) : 1 (1) 、研究発表・講演 : 16、新聞雑誌等への掲載 : 0、展示会への出展 : 1

## 12) フルスペクトル TCO (旭硝子)

<H24 中間目標 : 400-2,000nm の波長での平均光吸収率が 7%以内、波長 1,000nm でヘイズ率 80%以上、波長 1,200nm でヘイズ率 60%以上、抵抗率 1×10<sup>-3</sup>Ωcm 以下を達成する。H26 最終目標 : 400-2,000nm の波長での平均光吸収率が 5%以内、波長 1,000nm でヘイズ率 80%以上、波長 1,200nm でヘイズ率 60%以上、比抵抗 1×10<sup>-3</sup>Ωcm 以下を達成する。この開発した TCO 基板を、低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率率 30% (有効受光面積 1cm<sup>2</sup>) を達成する。>

### a) 必要な移動度、キャリア濃度の明確化

これまでの検討により、移動度が 70cm<sup>2</sup>/V·s を超える SnO<sub>2</sub>:F 膜を作成することが出来るようになった。目標の光吸収率を達成するために必要な移動度、キャリア濃度を算出するために、様々な膜厚 (0.8-3.2μm) 、キャリア濃度を持つサンプルの光吸収率とキャリア濃度の関係を調べた。その結果、波長 1,000nm 以上の近赤外の波長域の吸収率、波長 400-2,000nm の平均吸収率が、単位面積当たりのキャリア濃度 (シートキャリア濃度と呼ぶ) に比例していることが分かった。これは Drude モデルから理解できる挙動である。シートキャリア濃度対平均吸収率 (波長 400-2,000nm) を直線でフィッティングし、400-2,000nm の平均吸収率が 7%以下にするためにはシートキャリア濃度を 7.8×10<sup>15</sup>/cm<sup>2</sup> 以下にする必要があることが明確になった。また、光吸収率の膜厚依存性はほとんど無いことも分かった。目標には抵抗率 1×10<sup>-3</sup>Ωcm 以下という項目も挙げられている。しかし本研究開発で開発した TCO では、シートキャリア濃度が光吸収率を決めていて膜厚には依存していないという結果から、抵抗率は目標値には適していないことが分かった。なぜならば例えば膜厚が 500nm と 1,000nm の TCO があり、それらが同じシートキャリア濃度と移動度を持っていれば、光吸収率、シート抵抗ともに等しいので、TCO の性能としては同等になる。しかし膜厚が 2 倍なので抵抗率も 2 倍となってしまうため、抵抗率は TCO の性能を示す指標としては不十分だと考えられる。そこで本研究開発ではシート抵抗 12Ω/□以下という項目を目標値に加えて開発を行った。なお、前述したシートキャリア濃度 7.8×10<sup>15</sup>/cm<sup>2</sup> 以下、シート抵抗 12Ω/□以下を満たすためには、移動度 69cm<sup>2</sup>/V·s 以上が必要であることが計算できる。

### b) RIE 基板上高移動度・低キャリア濃度膜の開発

前述の通り移動度 70cm<sup>2</sup>/V·s を超える SnO<sub>2</sub>:F 膜は出来ているが、波長 1,000nm でのヘイズ率が 1%程度と、目標の 80%に比べ大幅に低いことが分かっている。そこで高ヘイズ率化のためにガラス基板を Reactive Ion Etching (RIE) 処理することで表面を凹凸にし、ヘイズ率を上げることを検討した。膜厚約 900nm の SnO<sub>2</sub>:F 膜を RIE 基板上に作成すると、30 分以上の RIE 処理によりヘイズ率は目標値にほぼ到達することが分かった。しかし移動度は平坦基板 (RIE 時間 0) では 70-80cm<sup>2</sup>/V·s の高い値を示すが、RIE 基板上では 35cm<sup>2</sup>/V·s 程度に低下することが分かった。RIE 基板上での移動度を向上させるために厚膜化することを考えた。実験の結果、厚膜化により移動度は向上する事がわかったが、膜厚に比例してシートキャリア濃度も増加するため a) で求めたシートキャリア濃度 7.8×10<sup>15</sup>/cm<sup>2</sup> 以下を満たせなかった。そこで、シートキャリア濃度を増加させずに厚膜化するために、ノ



ンドープ層の上にドープ層を積層する構成の検討を行った。その結果、ノンドープ層 2.7  $\mu\text{m}$ 、ドープ層 500nm とすることで、シートキャリア濃度は一定に保ったまま移動度を 79.8  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  に改善することができた。

#### c) 開発品の特性

前述の RIE 基板とノンドープ層の上にドープ層を積層する構成（以下開発品イ）と呼ぶ）によって、高移動度・低シートキャリア濃度（高透過率）を保ったまま、ヘイズ率を向上させることに成功した。また、平坦な基板の上にノンドープ・ドープ層を積層する構成（以下開発品ロ）と呼ぶ）や、平坦な基板の上にドープ層のみを成膜する構成（以下開発品ハ）と呼ぶ）によって、電気特性・透過率は同等に保ったままヘイズ率のみを大幅に変えることができるようになったので、その特性を記載する。各波長でのヘイズ率は開発品イ）で 94.8%、76.5%、65.3%（波長 550nm、1,000nm、1,200nm。以下同様。）、開発品ロ）で 38.5%、7.9%、4.0%、開発品ハ）で 5.3%、0.6%、0.2%である。なお Asahi-U のヘイズ率は 17.9%、1.9%、1.0%である。また、開発品イ）、ロ）、ハ）の表面を SEM 観察したところ、テクスチャ周期が開発品イ）の 2  $\mu\text{m}$  程度から開発品ハ）の 200nm 程度まで大きく変化していることが分かった。上記のように透過率・電気特性は一定に保ったまま、ヘイズ率、テクスチャサイズを大幅に変化させることが出来るようになったので、今後これらの TCO を用いて薄膜シリコン太陽電池の高効率化を検討する。

<成果発表件数> 特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：1（1）、研究発表・講演：5、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

### 13) グラフェン透明導電膜（富士電機）

<H24 中間目標：シート抵抗 30  $\Omega/\square$  以下、透過率 90%以上@380-2,000nm のグラフェン薄膜を得る。また、ITO などの n 型の透明導電膜使用時に比べ開放電圧が 50mV 以上増加することを目標とする。H26 最終目標：シート抵抗 10  $\Omega/\square$  以下、透過率 90%以上@380-2,000nm の透明導電膜を開発すること。>

#### a) はじめに

平成 22 年度終了時点で得られているグラフェンのシート抵抗は 250  $\Omega/\square$ @90%であった。目標の 30  $\Omega/\square$ @90%を達成するためにはグラフェンの移動度とキャリア密度を向上させることが必須となる。グラフェンの移動度を向上するためには膜質はもちろんであるが転写プロセスでのダメージを排除しなければ、折角膜質が高いグラフェンを製膜したとしても結局特性は低下してしまう。そこで、まず転写プロセスでのダメージ対策を行った。具体的には基板をエッチングする際に付着する残渣の除去、および、基板を選ばず、剥離、亀裂無く均一に転写する手法の開発を行った。

#### b) 残渣除去プロセスの開発

平成 23 年度の実験結果より、作製したグラフェンの表面にはエッチングの際の残渣などが付着していることが分かった。表面のみの材料であるグラフェンにとって、このような付着物はキャリアの移動を妨げることとなり、移動度が低下するとともにシート抵抗が増加する原因となる。エッチング中の主要な付着物としては金属イオンの析出などによる微粒子が考えられるため、今回エッチングに使用するエッチャントの違いによる付着物の評価を実施した。エッチャントとしては鉄系の  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 、 $\text{FeCl}_3$ 、および酸系の  $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}_2$  を用いた。付着物の評価は TEM により行い、サンプルはグラフェンを TEM 測定用の Cu グリッドに転写し、水素雰囲気中にて 300°C、1h 加熱することで PMMA の残渣を完全に燃焼させたものである。なお、TEM の加速電圧は 80kV である。TEM による評価を行った結果、 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  にてエッチングした場合、グラフェンの表面には微粒子が付着しており、TEM-EDX 組成分析より、鉄と銅の微粒子であることが分かった。また、 $\text{FeCl}_3$  を用いた場合においても、細長い形状の鉄微粒子と、球状の銅微粒子が観測された。これに対して、 $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}_2$  を用いた場合には、銅微粒子のみが観測された。これらの結果から、鉄微粒子の原因は鉄系エッチャント中に含まれる鉄イオンの析出であることが分かった。また、銅微粒子については、Mo グリッドを用いた TEM 測定では観測されていないことから、TEM 測定において用いた Cu グリッドが汚染源であると考えられる（水素アニールの際に Cu グリッドの表面の酸化銅が還元され、銅微粒子となりグラフェンに付着したと考えられる）。以上の結果より、酸系のエッチャントである  $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}_2$  を用いることで、グラフェンへの表面の汚染を最小限に抑えたエッチング技術の開発に成功した。

#### c) 転写技術の高度化

CVD と転写によって作製したグラフェンの移動度は、転写前（PMMA 上）では 500  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  程度であるのに対し、任意の基板に転写すると 100  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  程度に低下してしまう。この主な原因は基板への転写の際に発生するグラフェンの剥離、亀裂である。これは、グラフェン/PMMA を基板に圧着する際

の PMMA の変形や、グラフェンと PMMA の熱膨張係数の違いなどにより発生すると考えられる。そこで、PMMA の厚さを  $1\mu\text{m}$  以下（従来は数  $10\mu\text{m}$ ）とし、PMMA を軟化させることでグラフェンを基板にマイルドに付着させて、剥離、亀裂の低減を行った。転写の手順としては CMP 研磨した Cu ホイル上に CVD にてグラフェンを成長し、その上に 10wt%（クロロベンゼンにて希釈）の PMMA を  $20\mu\text{L}$  塗布した後、4,000rpm、30sec の条件でスピコート、 $40^\circ\text{C}$ 、30min 乾燥させることで  $1\mu\text{m}$  以下の PMMA を形成した（従来は塗布を行い、乾燥させるのみであった）。その後、Cu ホイルを  $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}_2$  を用いてエッチングし、超純水にて数回洗浄、乾燥することによりグラフェン/PMMA サンプルを形成した。このサンプルを所望の基板上に配置し、加熱炉にて  $180^\circ\text{C}$ 、30min の条件で加熱する。このとき、PMMA のガラス転移温度が  $106^\circ\text{C}$  であるため、PMMA が軟化し、グラフェンを基板の形状に沿って付着させることができる。その後、PMMA をアセトンで取り除き、超純水で洗浄した。最後に水素雰囲気中にて  $300^\circ\text{C}$ 、1h 加熱し、PMMA の残渣を完全に燃焼させた。上記手法を用いて、 $\text{SiO}_2/\text{Si}$ 、石英、PET 各基板（10mm 角）上にグラフェン（5mm 角）を転写した結果、各基板においてサンプル全面（5mm 角）で剥離がほとんど無く、さらに、1,000 倍では亀裂が観測されず、完璧な転写を実現することに成功した。次に、この転写したグラフェンの電気伝導特性の評価を行った結果、各基板上の移動度は  $1,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  程度と基板による顕著な差は見られず、以前よりも大幅な移動度の向上が見られた。また、シート抵抗は  $480\text{--}800\Omega/\square$  程度であり、サンプル毎でのキャリア濃度のバラツキがあるためシート抵抗にもバラツキが生じている。なお、このシート抵抗の値は単層グラフェンのものであり、透明導電膜に適用する際には透過率 90%が見込める 4 層程度を積層する。したがって、現状では 4 層積層で換算すると  $141\Omega/\square@90\%$  が得られている事となる。以上より、転写後のグラフェンの移動度はミリメートルオーダーのサンプルとしては先行研究と同等程度の値が得られている。このような高度な転写が実現されて初めて太陽電池への転写が可能となる。

<成果発表件数>特許出願（外国）：4（3）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：5、新聞・雑誌等への掲載：2、展示会出席：0

#### 14) サブセル界面接合技術（三菱電機）

<H24 中間目標：サブセル界面抵抗として  $200\text{m}\Omega\text{cm}^2$ （測定電流密度  $0.5\text{A}/\text{cm}^2$ ）を得る。更に、この開発した技術を太陽電池多接合セルに適用し、低倍率集光（ $\sim 50$  倍）時の曲線因子 0.75 以上を実現する。H26 最終目標：サブセル界面抵抗として  $100\text{m}\Omega\text{cm}^2$ （測定電流密度  $0.5\text{A}/\text{cm}^2$ ）を得る。更に、この開発した技術を太陽電池多接合セルに適用し、低倍率集光（ $\sim 50$  倍）時の曲線因子 0.78 以上を実現する。>

##### a) サブセル界面評価技術の開発

サブセル界面抵抗計測技術およびイオン化ポテンシャル・フェルミ準位評価技術を駆使することにより、各接合界面での抵抗の発生原因を明らかにし、これに基づいた接合層形成プロセスの改善を行った。また、サブセル界面抵抗の低減に伴い、タンデムセルの曲線因子が増加することを実証した。更に、サブセル界面抵抗以外の表面透明電極や発電層等に関わる抵抗成分を定量化、これら抵抗成分の低減が曲線因子目標の実現に不可欠であることを明らかにした。

##### b) 低抵抗サブセル界面構造の開発

p/n 接合における p 型膜価電子帯と n 型膜伝導帯との間のポテンシャル差の縮小によりサブセル界面抵抗を低減する方針に基づき、透明導電膜（TCO）の p/n 接合を挿入する構造の開発を進めた。

###### 1) TCO-p/n 接合抵抗低減

p-TCO と n-TCO の導電性を発現させるためには、それぞれ酸素過剰および酸素欠乏の状態が必要となる。それに対し TCO-p/n 界面接合構造においては、p-TCO を酸素過剰で形成する製膜プロセスが先に形成した下地の n-TCO の欠乏酸素を減少させるため、TCO-p/n 界面にキャリアの空乏層が発生、接合抵抗が増加してしまう。そこで、上記現象を回避するため n-TCO として酸化の影響を受けにくい  $\text{InZnO}$  を、p-TCO として  $\text{NiO}:\text{Li}$  を用い、酸化抑制雰囲気スパッタで製膜して抵抗低減と光透過率向上を両立した。上記アプローチにより、接合抵抗  $80\text{m}\Omega\text{cm}^2$ （測定電流密度  $0\text{--}0.5\text{A}/\text{cm}^2$  でほぼ一定）を実現した。これは中間目標からさらに進んで最終目標である  $100\text{m}\Omega\text{cm}^2$  以下を達成したことになる。

###### 2) TCO-p/n 接合層のタンデムセル曲線因子に与える効果

a-Si セル/ $\mu\text{c-Si}$  セルのタンデムセルに上記サブセル界面構造を適用し、接合抵抗が低いほど低倍率集光による曲線因子の低下が抑制されることを明らかにした。現状、低倍率集光（5 倍）時の曲線因子として 0.72 が得られており、今後、接合層の改善、セル間での電流バランスの最適化、

セル全体の直列抵抗の低減を実施し、中間目標の集光時の曲線因子として 0.75 以上を達成できる見込みである。

<成果発表件数>特許出願（外国）：4（1）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：2、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 15) 光学設計技術（カネカ）

<H24 中間目標：低倍率集光系 Si 系/化合物系多接合薄膜太陽電池において、シミュレーション技術により、中心機関で選択された 5 接合太陽電池の組み合わせに最適な光学制御構造を設計する。さらに、設計した光学制御構造を作製しオプティカルカップリング構造の効果を確認する。オプティカルスプリッタを開発し、光学的損失 8%以下、カット波長が 800-1,000nm の範囲で任意に変更できることを確認する。直並列 3 接合素子構造を実現し、通常の直列 3 接合と比較した効率の向上を確認する。H26 最終目標：オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 30%（有効受光面積  $1\text{cm}^2$ ）を達成する。>

オプティカルスプリッティング構造形成技術の開発に関して、以下の成果を得た。

○ 光学シミュレーション技術として、所望の波長における光の透過・反射量を計算し、ターゲットとする光学特性を達成するための多層膜構造を最適化するためのソフトウェアを導入し、斜入射条件におけるオプティカルスプリッタの最適設計を実施・検証する事を可能とした。

○ 導入したソフトウェアによりオプティカルスプリッタの構造を検討し、任意の波長で透過反射が分離でき、かつ広い範囲にわたって 90%以上の透過・反射特性を維持した光学ロスが少ないスプリッタを設計する事ができた。

○ 設計したオプティカルスプリッティング構造を光学薄膜作製技術により作製し、作製したスプリッタが設計した特性と同等の光学特性（透過・反射率の角度特性を含む）を有することを確認し、本研究開発で確立した技術が薄膜フルスペクトル太陽電池のスプリッタの作製に適用可能であることを確認した。

○ 作製したオプティカルスプリッタを用いて、トップセルにアモルファスシリコン太陽電池、ボトムセルにヘテロジャンクション太陽電池を用いたオールシリコン系擬似薄膜フルスペクトル太陽電池構造を世界で初めて作製し、オールシリコン太陽電池では従来想定していたよりも短波長側で波長分離をする事でトータルの変換効率が向上する効果があることを見出し、最終的に単セルでの測定よりも絶対値で 1%高い変換効率である 21.9%の変換効率がトータルで得られることを確認した。

○ 中心機関が必要とする光学特性（スプリット波長）を有するオプティカルスプリッタを作製し、提供することで中心機関の変換効率向上の成果達成に寄与する事ができた。

さらに、新規の直並列構造薄膜フルスペクトル太陽電池構造を作成する事に成功し、世界で初めてのコンセプトを有する新たな多接合太陽電池を実デバイスとして実現する事ができた。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：4、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 16) 表面プラズモン（東京工業大学）

<H24 中間目標：特定の波長に対して反射・透過する金属ナノ粒子膜を、a-Si<sub>0</sub>/a-Si/ $\mu$ c-Si トリプル接合セルの裏面反射膜として作製し、 $\mu$ c-Si ボトムセルからの光電流を  $2\text{mA}/\text{cm}^2$  以上向上させる。H26 最終目標：特定の波長に対して反射・透過する金属ナノ粒子膜を、a-Si<sub>0</sub>/a-Si/ $\mu$ c-Si トリプル接合セルの裏面反射膜等として作製し、トリプル接合セルの短絡電流密度  $9.6\text{mA}/\text{cm}^2$  以上を達成する。>

局在表面プラズモンは、金属ナノ粒子に光が入射した際に励起される自由電子の集団振動である。局在表面プラズモン効果として入射光の散乱効果、局所電場増強効果などが挙げられる。本研究開発では、金属ナノ粒子の局在表面プラズモン効果による太陽電池の変換効率向上に取り組んでいる。薄膜シリコン系太陽電池利用の裏面反射膜として利用される銀反射薄膜は、波長 900nm 以上の光はほぼ 100%反射するが、それ以下の波長の反射率は低い。一方、金属ナノ粒子は特定波長の光を反射する性質を持っている。本研究開発では、金属ナノ粒子膜の局在表面プラズモン効果による、光トラッピングを含む反射と透過の光の制御によって、薄膜フルスペクトル太陽電池の各セル間の電流マッチングを向上させ、変換効率を向上させることを目的としている。

a) 有機分散剤を用いない金属ナノ粒子膜の作製

耐熱性の向上のために有機分散剤を用いない金属ナノ粒子膜の作製をおこなった。液相還元法により作製した銀ナノ粒子 (AgNP) を tert-ブチルアルコールに一定濃度となるよう分散させ、銀ナノ粒子のコロイド溶液を作製した。その溶液を石英基板上にスピコート (SC) し銀ナノ粒子膜を作製し、光学特性を測定した。438nm にプラズモンピークが見られ、有機分散剤を用いない金属ナノ粒子膜の作製に成功した。

#### b) Si 薄膜太陽電池への応用

シリコン系太陽電池裏面における反射率を測定するため、スパッタリング法により作製したアモルファスシリコン膜上に金属ナノ粒子膜を作製し、光学特性を評価した。さらにその構造の薄膜フルスペクトル太陽電池への応用を検討するため、金属ナノ粒子膜上に SiO<sub>2</sub> 膜をスパッタリングすることにより金属ナノ粒子膜を安定化させ、耐熱性・耐久性の向上を目指した。スパッタリング法により、石英ガラス上にアモルファスシリコン膜を作製した。Ar0.7Pa 雰囲気下で電力 100W、スパッタリング時間 180sec の条件で作製したところ、膜厚が約 20nm のアモルファスシリコン膜が得られた。得られたアモルファスシリコン膜の光学特性を測定した後、銀ナノ粒子コロイド溶液をスピコートすることでアモルファスシリコン膜と銀ナノ粒子膜の複合膜を作製した。複合膜の光学特性とアモルファスシリコン膜の光学特性の差から、アモルファスシリコン膜上での銀ナノ粒子膜の光学特性を算出した。さらに、銀ナノ粒子膜上にスパッタリング法により SiO<sub>2</sub> 膜を保護膜として作製し、光学特性を測定した。また、作製した銀ナノ粒子膜の反射スペクトルと、擬似単接合太陽電池 [ZnO/p(μc-Si<sub>1-x</sub>O<sub>x</sub>:H)/i(μc-Si:H)/n(μc-Si:H)] の透過率および単結晶シリコン太陽電池の量子収率を用いて、薄膜フルスペクトル太陽電池に応用した際の電流密度向上値を見積もった。アモルファスシリコン膜を透過した光を基準とした銀ナノ粒子膜の反射スペクトルから、アモルファスシリコン膜上での銀ナノ粒子膜は 600nm 付近に反射スペクトルのピークが確認できた。銀ナノ粒子膜により反射される光による各波長における光電流密度向上を見積もるため、各波長での電流密度の増加予測値を積算した結果、銀ナノ粒子膜にさらに SiO<sub>2</sub> 膜を作製した場合は約 1.68mA/cm<sup>2</sup> 程度の電流密度増加が期待できることがわかった。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 4 (4) 、研究発表・講演 : 15、新聞・雑誌等への掲載 : 5、展示会出展 : 0

### 【平成 25～26 年度】 (事業終了時)

#### 1) 薄膜フルスペクトル集光型セル・発電特性 (東京工業大学)

<H26 最終目標 : ワイドギャップからナローギャップの広い禁制帯幅の領域で、今までにない光吸収層材料を開発するとともに、広い波長範囲で有効に光子を利用するため光のマネジメント技術開発を行う。これらの要素技術をもとに、低倍率集光型薄膜太陽電池を試作し、エネルギー変換効率 40% を達成する。>

ワイドギャップからナローギャップの広い禁制帯幅の領域で、今までにない光吸収層材料を開発するとともに、広い波長範囲で有効に光子を利用するため光のマネジメント技術開発を行った。開発した要素技術をもとに波長スプリットング低倍率集光型薄膜太陽電池を試作したところ、1 sun で変換効率 33 % を達成するとともに、50 suns まで集光可能となればエネルギー変換効率 39% が達成可能であるとの結論を得た。

##### (a) a-SiO トップセル開発

100°C という低温での製膜と多量の水素希釈を併用することにより、膜中水素量を増加させ、高品質でワイドギャップな a-Si 及び a-SiO を製膜する技術を開発した。低温で製膜した a-SiO 膜は、従来の 200°C で製膜した膜よりも、光学的禁制帯幅 E<sub>opt</sub> が大きく、しかも高い光感度特性を示すことが明らかとなった。この技術を用いて低温形成された a-SiO セルで、変換効率 8.4% が得られた。開放電圧が 1.014V と高いのが特徴である。また、本手法を用いて a-SiO/a-Si タンデム太陽電池を試作したところ、変換効率 9.24% が得られた。

##### (b) 量子ドットミドルセル

これまでに開発した①酸素添加した a-SiC を用いた Si-QDSL 構造、②ニオブドープ酸化チタン (TiO<sub>2</sub>:Nb) をドーピング層と Si-QDSL 層の間に挿入する技術、さらに③水素プラズマ処理技術、を組み合わせて Si-QDSL 太陽電池を試作した。現状、20 倍の集光下では 649 mV という高い開放電圧が得られているが、光吸収層が 0.15μm と薄く短絡光電流が低いため、変換効率は 1% 以下と低い。今後の膜質改善と厚膜化により変換効率 10% 以上が期待される。

##### (c) a-Si/μc-Si 系集光型多接合セル開発

まず微結晶シリコン (μc-Si) ボトムセルの変換効率向上に注力した。VHF プラズマ CVD 法による高品

質  $n\text{-}\mu\text{c-SiO}$  膜ならびに  $p/i$  界面への  $\mu\text{c-SiO}$  膜の導入によって変換効率が 9.0%まで向上した。また、短絡電流を増加させるために、 $3\ \mu\text{m}$  以上の膜厚を有する  $i$  層の製膜技術、ならびに、凹凸サイズが  $2\ \mu\text{m}$  以上となる  $W\text{-textured ZnO}$  の製膜技術開発を行った。具体的には、 $\text{ZnO}$  の製膜前にガラス表面をエッチングする条件の最適化により、凹凸形状が  $10\ \mu\text{m}$  の  $W\text{-textured ZnO}$  が製膜可能となった。この  $W\text{-textured ZnO}$  基板上に厚さが  $3\ \mu\text{m}$  の微結晶セルを作製した結果、長波長感度を上げる事に成功し  $27.4\ \text{mA/cm}^2$  という高い短絡電流が得られた。

#### (d) 波長スプリッティングセル開発

MOCVD 法による表面電極  $\text{ZnO}$  及び新規ナローギャップ CIGS を採用した長波長吸収セル（東京理科大学）を使用して、 $620\text{nm}$  のカットフィルターを用いた  $a\text{-Si//CIGS}$  波長スプリッティング特性を測定した。その結果、変換効率 23.0% が得られた。つぎに、 $\text{GaInP}$ 、 $\text{GaAs}$  セル（いずれもシャープ製）を用いて、波長スプリッティング特性評価を行った。その結果、 $\text{GaInP//CIGS}$  系で変換効率 25.9% が得られた。また、 $\text{GaInP}$ 、 $\text{GaAs}$  ならびに  $\text{CIGS}$  を用いて、2 枚のスプリッターを用いた場合には 28.9% の変換効率が、 $\text{GaInP//GaAs//c-Si}$  では、31.2% の変換効率を得られた。さらにレンズによる吸収補正を行い、50 倍までの集光を行えば、38% の変換効率が見通しを得た。

#### (e) 波長スプリッティング・低倍率集光薄膜フルスペクトル太陽電池の最適設計

波長スプリッティング・低倍率集光薄膜フルスペクトル太陽電池の最適設計技術の開発においては、波長スプリッティング低倍率集光に対応した屋内用評価装置と二つの屋外用評価装置を開発、導入した。屋内用のソーラーシミュレータでは、波長スプリッターを自由に交換し、レンズを用いて 10 倍程度までの集光を行いながら太陽電池の発電特性の測定が可能となった。屋外用の評価装置の一つは木更津高専に導入した。2 軸追尾制御で常時計測が可能なシステムであり、気象計測機器も同時に設置した。もう一方のシステムはミラー集光に対応した屋外用評価装置であり、東工大に導入して発電特性を評価した。屋外用発電電力量の評価においては、木更津高専にて計測した気象データを用い、散乱光の影響のほか、屋内計測等で得られた波長スプリッターの特性、集光特性などを考慮し、発電電力量の推定を行い、システムに用いた太陽電池に最適な切替波長を算出するなど、発電電力量を最大化する最適なシステムを設計するための基盤となる知見を得た。

#### (f) $\text{SiO}$ 評価（国立大学法人岐阜大学へ再委託）

酸素 (O) 組成比  $0/(\text{Si}+0)$  が異なる光学バンドギャップエネルギーが  $1.90\sim 1.97\text{eV}$  の  $i$  型  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  薄膜に対して、電子スピン共鳴 (ESR) 法を用いた欠陥評価ならびに電気的特性評価を行った。その結果、 $g$  値が 2.005 および 2.012 程度の 2 種類の ESR 信号が得られることが分かった。 $g$  値が 2.005 程度のスピン密度が  $2.38\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$  から  $8.37\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$  へ増加するのに伴い、光電気伝導度は  $2.33\times 10^{-6}\text{S/cm}$  から  $3.70\times 10^{-7}\text{S/cm}$  まで減少するのに対して、 $g$  値が 2.012 程度のスピン密度による大きな変化は見られないことが分かった。また、 $g$  値と半値幅から、 $g$  値が 2.005 程度の ESR 信号は、 $\text{Si}$  ダングリングボンドに起因するものと考えられた。さらに、 $0$  組成比が 8.7% から 13.5% へ増加するのに伴い、 $\text{Si}$  ダングリングボンドに起因するスピン密度は  $2.73\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$  から  $8.37\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$  まで増加することが分かった。これは、格子に酸素が組み込まれることに伴う構造乱れの増加による可能性を示した。以上の結果より、 $0$  組成比 13.5% 以下では、 $i$  型  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  薄膜の電気的性質は、主に  $\text{Si}$  ダングリングボンド密度に影響されることを明らかにし、高品質  $i$  型  $a\text{-SiO}_x\text{:H}$  薄膜の作製において  $\text{Si}$  ダングリングボンドの低減が重要であることを示した。

セル構造での光吸収層欠陥評価を目指して、光吸収係数評価システムとしてフーリエ変換光電流 (FTPS) 測定系を新たに構築した。その結果、欠陥が関係する光吸収に比例係数  $1.01\times 10^{16}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$  を乗じることで欠陥密度を算出できることを示した。

#### (g) 屋外出力計測（独立行政法人国立高等専門学校機構 木更津工業高等専門学校へ再委託）

太陽光追尾機構（2 軸追尾）を搭載した屋外用発電特性評価用低倍率集光波長スプリッティングモジュールを設置し、屋外出力計測を実施した。平成 26 年 4 月 20 日～8 月 9 日に長波長用に  $\text{GaAs}$  太陽電池、短波長用に  $\text{InGaP}$  太陽電池を設置し、波長スプリッターの切り替え波長を  $637.5\ \text{nm}$ 、集光倍率を 2.5 倍とした。直達日射量と短絡電流密度との関係を調べたところ、散乱光が  $20\ \text{mW/cm}^2$  以下と少ない場合に比べて、 $50\ \text{mW/cm}^2$  以上では短絡電流が大きくなっていることがわかった。この結果は集光倍率 2 倍程度では散乱光も発電に寄与していることを示している。また、散乱光強度、直達日射強度と発電特性の関係を導いた。短絡電流と発電量はほぼ比例した。一方、短絡電流と直達日射強度は比例していなかったため、2 次関数を用いてフィッティングを行った。その結果を用いて月間発電量を計算したところ、平成 26 年 5 月から 8 月の計測結果とよく一致した。この結果を用いて年間総発電量の推定したところ、約  $34\ \text{Wh/cm}^2$  という値が得られた。年間直達日射量に対する変換効率は約 25.7% と見積もられた。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 3 (1)、論文(査読付) : 13 (13)、研究発表・講演 : 43、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 2

## 2) 広バンドギャップシリコン系薄膜(シャープ)

<H26 最終目標 : 開発した単接合セルの高開放電圧化技術を本テーマの中心機関である東京工業大学へ移管し、多接合セルのトップ層として開放電圧 1.10 V (集光時 1.20 V)、短絡電流密度 9.5 mA/cm<sup>2</sup> (3.5 eV~2.1 eV までの計算値) を達成する。これと並行しながら多接合セルでの接合界面の電子構造並びに屈折率変化の最適化技術の開発を進め、東京工業大学での多接合セル作製をサポートし、小面積の 5 接合薄膜フルスペクトルセルにより、真性変換効率 40% (低倍率集光、有効受光面積 : 1 cm<sup>2</sup>) を達成する。>

### (a) 広バンドギャップセルの開発

a-SiC セルでは、アニール条件、p/i 界面、i/n 界面、n 層 2 層化 (a-Si/mc-SiO) などの検討により、各特性を向上させた。さらに、TCO/p 界面の電子構造に着目し、価電子帯上端の準位が浅い p 層 a-SiC を TCO との界面に入れることで、Voc を維持したまま F.F. を改善させることに成功した。結果として、Jsc = 10.17 mA/cm<sup>2</sup> (8.02 mA/cm<sup>2</sup> @ ~2.1 eV)、Voc = 1.030 V (1.080 V @ 10 倍集光)、F.F. = 0.571、変換効率 5.98% の a-SiC セルが得られた。また、a-SiC セル検討時に開発した p 層 a-SiC により a-Si セルの特性向上に成功し、Jsc = 15.83 mA/cm<sup>2</sup> (9.49 mA/cm<sup>2</sup> @ ~2.1 eV)、Voc = 0.937 V、F.F. = 0.677、変換効率 10.05% が得られた。

### (b) タンデムセルの開発

上記 a-SiC セルと a-Si セルを積層した a-SiC/a-Si タンデムセルの開発では、Jsc = 7.64 mA/cm<sup>2</sup>、Voc = 1.928 V、F.F. = 0.680、変換効率 10.02% が得られた。また、オプティカルスプリッター (614 nm) を使用した条件下では、Jsc = 4.01 mA/cm<sup>2</sup> (補正值 4.64 mA/cm<sup>2</sup>)、Voc = 1.936 V (2.033 V @ 10 倍集光)、F.F. = 0.686、変換効率 5.33% (補正值 6.16%) が得られた。Top セルの n 層と Bottom セルの p 層による光吸収を低減し、また、集光を考慮した設計ができれば、さらに高い特性が期待できる。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 1 (0)、論文(査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 2、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

## 3) カルコパイライト系剥離セル(立命館大学)

<H26 最終目標 : 中心機関と連携して、二接合セルで変換効率 9.7% (1sun)、11.2% (10sun) を、三接合セルで 11.2% (1sun)、13.5% (10sun) を達成する。さらに、中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池を作製し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 40% (有効受光面積 : 1cm<sup>2</sup>) の達成に貢献する。>

### (a) カルコパイライト剥離セルの開発

カルコパイライト剥離セルの作製では、Mo 裏面電極上にカルコパイライトセルを形成後に剥離処理を行う。その際に、裏面電極とカルコパイライトの界面で剥離するため、トップセルに用いるにはカルコパイライト裏面に透明電極を形成する必要がある。しかし、カルコパイライトの価電子帯上端が深いいため、透明電極である ZnO:Al (AZO) や In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Sn (ITO) を従来と同様な条件で堆積してもオーミック接合を形成することは困難であり、ダブルダイオード特性を示す。これを解決するために、意図的に透明電極/カルコパイライト界面に欠陥を導入することで、界面欠陥を介したキャリア再結合の促進によるオーミック接合の形成を試みた。具体的な材料としては AZO と ITO を用いて、スパッタ成膜時の基板とターゲットの配置やスパッタ電力を調整した。基板(カルコパイライト)とターゲットを正対させてスパッタすることによってダメージを効果的に与えることができ、AZO と ITO のいずれにおいても CIGS とオーミック接合が形成できた。AZO ではターゲット-基板間距離やスパッタ印加電力によってオーミック接合の形成が敏感であったが、ITO の場合にはターゲットと基板を正対させておけば良好なオーミック接合を比較的容易に形成しやすかった。これは ITO 成膜時に導入する酸素が影響している可能性がある。これらの AZO、ITO のダメージ付加条件を用いて、CIGS 剥離セルを作製した。その結果、AZO と ITO の両方で、従来見られていたダブルダイオード特性を解消することができ、このスパッタダメージを活用した透明電極の形成技術は有用であることがわかった。ITO を用いた方が AZO を用いたセルよりも良好な直列抵抗値を得ることができた。最終的には、引き剥がし前のセルに対して、ITO を用いた剥離セルで同等の Voc が得られた。一方で、FF が若干低く、引き剥がし前のセルに対して 80% 弱の変換効率に留まった。ダメージと ITO の低抵抗値を両立できれば FF の向上が可能であることがわかった。

#### b) 多接合セルの開発

二接合セルの開発を行った。高 Ga 濃度 CIGS を用いて剥離セルを作製したが、シャント抵抗が低くなってしまったため、良好な太陽電池特性を得ることができなかった。しかし、従来の低 Ga 濃度 CIGS を用いて剥離セルを作製し下部セルと貼り合わせることで、貼り合わせ多接合セルの基本的な作製技術の確立には成功した。また、光学シミュレーションの結果、トップセルを通過するサブバンドギャップ光の 80% がボトムセルに入射可能であることがわかった。この値は、透明電極の薄膜化やその他構成層の膜厚最適化によって向上できる可能性があることがわかった。

< 成果発表件数 > 特許出願 ( 外国 ) : 0 ( 0 ) 、論文 ( 査読付 ) : 2 ( 2 ) 、研究発表・講演 : 6、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 4) カルコパイライト系集光型セル ( 東京工業大学 )

< H26 最終目標 : Ag(InGa)Se<sub>2</sub> トップセルの開発としては、2.1eV~1.68eV までの波長帯域を使用し、V<sub>oc</sub>=0.95V (1sun)、1.05V (10sun)、J<sub>sc</sub>=9.5mA/cm<sup>2</sup> の AIGS 太陽電池を実現すること、Cu(InGa)Se<sub>2</sub> ミドルセルの開発としては、1.68eV~1.38eV までの波長帯域を使用し、V<sub>oc</sub>=0.78V (1sun)、0.88V (10sun)、J<sub>sc</sub>=9.5mA/cm<sup>2</sup> の CIGS 太陽電池を実現することを最終目標に掲げた。 >

##### (a) Ag(InGa)Se<sub>2</sub> トップセルの開発

トップセル用 Ag(InGa)Se<sub>2</sub> (AIGS) 太陽電池の高効率化を目指し、研究開発を行った。3段階法での最適化、高温製膜の提案、大気アニールの導入を行うことによって、世界最高レベルの変換効率 10.7% を達成した。しかしながら、得られた太陽電池の開放電圧及び曲線因子は低かった。そこで裏面の電気特性を評価したところ、裏面には MoSe<sub>2</sub> 層が形成されておりオーミック性を示すことが明らかとなった。このため、新規に開発した引き剥がし・AC ホール測定法により光吸収層である AIGS のキャリア濃度を評価したところ、正孔濃度は 10<sup>14</sup>cm<sup>-3</sup> 台と極めて低いことが示された。さらに、このキャリア濃度を用いてデバイス解析を行ったところ、曲線因子が低下すること、正孔濃度を一桁程度高めることによりタンデム型太陽電池のトップセルとして利用できる高い変換効率が得られることが明らかとなった。最後に、最終目標である 2.1eV~1.68eV のフィルタ下における太陽電池特性を評価した。その結果、変換効率 7.0% (V<sub>oc</sub>=0.82V) の太陽電池を用いて、電圧値 (0.95V) は目標を下回ったものの、光学ロスを加味した電流値は 8.7mA/cm<sup>2</sup> となり、最終目標に近い値を得ることに成功した。

##### (b) Cu(InGa)Se<sub>2</sub> ミドルセルの開発

ミドルセル用バンドギャップ 1.4eV の Cu(InGa)Se<sub>2</sub> (CIGS) 薄膜太陽電池においては、変換効率 14.4% を達成した。しかしながら、本研究がターゲットとするバンドギャップ約 1.4eV (Ga 組成 70%) の CIGS 太陽電池においては、世界的に高い変換効率が得られていない。CIGS 太陽電池は CdS とのヘテロ接合構造となっており、ヘテロ接合界面での再結合が効率制限の一要因となっていると考えられた。そこで本研究では最初に、ヘテロ接合界面の特性が太陽電池に及ぼす影響をデバイス解析により求めた。その結果、効率向上には価電子帯のバンドオフセット制御 ( $\Delta E_v$ ) が有効であることを示し、 $\Delta E_v=0.3\text{eV}$  を設けることにより 25% 近い変換効率が得られることを明らかにした。このような  $\Delta E_v$  を制御する材料系の候補としては Cu(InGa)<sub>3</sub>Se<sub>5</sub> 相 (1:3:5 相)、Cu(AlInGa)Se<sub>2</sub> などが考えられた。実際に膜厚 30 nm の 1:3:5 相を CdS/CIGS 界面に導入することにより先の変換効率 14.4% が実現された。この変換効率の値は、平均バンドギャップ 1.4 eV としては、世界最高レベルの値である。以上の結果は、高い Ga 組成を有する CIGS 太陽電池において、 $\Delta E_v$  制御が変換効率を向上させるためのブレークスルーとなり得ることを示唆している。最後に最終目標である 1.68eV~1.38eV のフィルタ下における 14.4% の太陽電池の特性を評価した。目標の電圧値 0.78V、電流値 9.5mA/cm<sup>2</sup> に対して光学ロスを加味した電流値は 9.2 mA/cm<sup>2</sup> であり、ほぼ最終目標を達成することに成功した。

< 成果発表件数 > 特許出願 ( 外国 ) : 0 ( 0 ) 、論文 ( 査読付 ) : 3 ( 3 ) 、研究発表・講演 : 13、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 5) Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub> 系薄膜およびセル ( 龍谷大 )

< H26 最終目標 : Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub> 系ボトムセル ( 禁制帯幅 0.8eV ) で V<sub>oc</sub>=0.4 eV、フィルター透過光 (1.1eV 以下) で J<sub>sc</sub>=10.2 mA/cm<sup>2</sup> を達成する。そのことにより、中心機関が低倍率集光多接合セルで真性変換効率 40% (有効受光面積 : 1cm<sup>2</sup>) を達成するのに寄与する。 >

本開発の Cu<sub>2</sub>Sn(S<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub>)<sub>3</sub> (CTSSe) 固溶体を用いることで禁制帯幅を x=0.0 の 0.87eV から x=0.6 のところで 0.67eV まで制御可能なことを見いだした。この領域の禁制帯幅は薄膜フルスペクトル太陽電池のボトムセルの光吸収層の禁制帯幅として望ましい値である。そこで、スクリーン印刷/高圧

焼結法で  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  (禁制帯幅:0.87eV) 太陽電池を作製したところ変換効率 1.38% ( $V_{oc} = 182 \text{ mV}$ ,  $J_{sc} = 21.7 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 0.35$ ) が得られた。また、 $\text{Cu}_2\text{Sn}(\text{S}_{0.7}\text{Se}_{0.3})_3$  (禁制帯幅 0.80eV) 太陽電池では変換効率 1.0% ( $V_{oc} = 209 \text{ mV}$ ,  $J_{sc} = 15.0 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 0.33$ ) であった。さらに、酸化物を原料に用いた印刷/焼結法で  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  太陽電池を作製したところ、変換効率は 1.58% ( $V_{oc} = 149\text{mV}$ ,  $J_{sc} = 32.5\text{mA/cm}^2$ ,  $FF = 0.328$ ) まで向上した。また、 $\text{Cu}_2(\text{Sn}_{0.6}\text{Ge}_{0.4})\text{Se}_3$  組成の太陽電池を試作したところ、変換効率 2.43% ( $V_{oc} = 334 \text{ mV}$ ,  $J_{sc} = 20.4 \text{ mA/cm}^2$ ,  $FF = 35.5\%$ ) が得られた。今回得られた  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  系ボトムセルの変換効率は最終目標に対しては十分ではなかったが、 $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$  系太陽電池が薄膜フルスペクトル太陽電池のボトムセルとして十分なポテンシャルを有していることを示した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 6 (5)、研究発表・講演 : 6、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 6) CIGS 系ボトムセル (東京理科大学)

<H26 最終目標 :  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  系ボトムセルの最終目標効率を 3.8 (4.5) % ( $E_g=1.38\text{eV}$  の CIGS フィルター下、 $V_{oc}=0.5$  (0.6) V、 $J_{sc} = 9.5\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=0.80$ 、感度波長域 899~1127nm)、( )内は低倍集光時) とし、この開発した技術を中心機関 (東京工業大学) と連携してワイドギャップセルと組み合わせた低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光型波長スプリッティングセルを共同開発する。>

まずデバイス・シミュレーション (SCAPS3.2) により、スプリッティングフィルター (620nm および 880nm、カネカ製) 下における最適な低 Ga 領域長  $x$  および最小禁制帯幅  $E_{g_{min}}$  を求めた。さらに、膜表面付近における価電子帯上端 (VBM) プロファイルを求めた。その結果、620nm および 880nm スプリッティングフィルター下では各々  $E_{g_{min}} = 1.12\text{eV}$ 、 $x = 600\text{nm}$ 、および  $E_{g_{min}}=1.04\text{eV}$ 、 $x \sim 900\text{nm}$  で最高変換効率となることがわかった。さらに価電子帯上端 (CBM) の最適プロファイルを、表面硫化領域  $d$  および  $\Delta\text{VBM}$  を変化し、AM1.5 でセルパラメータを算出した。その結果、 $\Delta\text{VBM} \sim 0.2\text{eV}$ 、 $d = 300\text{nm}$  で最大変換効率となることがわかった。

つぎに上記のデバイス・シミュレーション結果に基づき、CIGS 薄膜形成を試みた。基本的には MBE 装置を用いた 3 段階法であるが、第 3 段階で In、Se およびごく僅かな Ga を同時に照射する点が従来法と異なる。得られた CIGS 薄膜を SIMS 分析した結果、硫化前の CIGS 薄膜はほぼ設計通りの、シングル・グレーディングのバンドプロファイルとなっていることが分かった。また、表面硫化により開放電圧が改善され、変換効率が向上することが実証された。この理由を調べるため、硫化前後の膜について XPS、UPS で VBM を調べた結果、硫化による VBM の低下が認められ、シミュレーションの結果とほぼ一致した。

上記結果をもとにナローギャップ CIGS 系ボトムセルの高効率化技術開発を実施した。CIGS 系ボトムセルでは AM1.5 で発電する CIGS 太陽電池と異なり 880nm 以上の長波長光で高効率を得ることが必須である。CIGS 光吸収層では上述したようなバンドプロファイルの最適化が必要であるが、光入射側の窓層の透過率も考慮する必要がある。そこで、長波長領域で透過率が高い MOCVD-ZnO:B 透明導電膜を通常使用されている ZnO:Al に変え、EQE の改善を図った。一方、880nm 以下の短波長光はボトムセルの発電に無関係なため、バッファ層としては CBD-CdS を使い、Ni/Al/ZnO:B/ZnO/CdS/CIGS/Mo/SLG 構造の太陽電池を作製した。電流-電圧 (J-V) 特性およびスペクトル感度特性 (EQE) を測定した結果、1 sun、AM1.5 (100mW/cm<sup>2</sup>) 下では  $E_{g_{min}}=1.15\text{eV}$  のときに変換効率が最大となり 17.7% を得た。また、620nm スプリッター下では  $E_{g_{min}}=1.15\text{eV}$  のときに最大変換効率となり 13.1%、さらに 880nm スプリッター下では  $E_{g_{min}}=1.05\text{eV}$  のときに変換効率が最大となり 5.47% ( $V_{oc}=0.589\text{mV}$ 、 $J_{sc}=12.7\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=0.731$ ) を得た。また、低倍集光 (2.6 倍集光) 特性を測定した結果、5.8% ( $V_{oc}=630\text{mV}$ 、 $J_{sc}=12.8\text{mA/cm}^2$ 、 $FF=0.730$ ) を得ており、最終目標効率を大幅に上回る性能を達成した。

次に、本研究で得られた、ナローギャップ CIGS 太陽電池をボトムセルとし、東工大で開発した a-Si/CIGS および InGaP/GaAs/CIGS トップセルにより、波長スプリッティング型太陽電池を試作し、変換効率 22.2% および 27.3% (非集光) を得た。以上の結果から、本研究で得られたナローギャップ CIGS 太陽電池はボトムセルとして有効であることを実証できた。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 15 (4)、研究発表・講演 : 11、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 7) p 型透明導電膜 (龍谷大学 新潟大学と共同実施)

<H26 最終目標 : Mo 等の不透明電極材料を用いた場合と同等の太陽電池特性を達成する。また、n 型



透明導電膜との組み合わせによる太陽電池特性の向上を確認する＞

PLD 法で形成した BaCuSeF 膜を CdS/CdTe 太陽電池の裏面電極に適用したところ、2.82%の変換効率であった。そこで、CdTe 表面を NH<sub>3</sub> 水でエッチングしてから BaCuSeF 膜を形成したところ、変換効率は大きく向上して、8.31%になった。このことから裏面電極形成前の表面処理が有効であることが明らかになったので臭化水素水で CdTe 表面をエッチングしたあと BaCuSeF 膜を形成したところ変換効率はさらに向上して 9.91%になった。BaCuSeF の Se を S で置き換えた BaCuSF 膜を作製して、BaCuSeF 場合と同様に CdTe 太陽電池の裏面に適用したところ、BaCuSeF を用いた場合よりも高い変換効率 11.0%が得られた。さらに SrCuSeF を適用することで変換効率は 11.6%まで向上した。この構成の CdTe 太陽電池で通常カーボン電極を用いた場合の変換効率が 12.0%なので、BaCuSeF 系 p 型透明導電膜の化合物薄膜太陽電池の電極としての性能は、カーボン電極とほとんど遜色ない結果であった。本開発の BaCuSeF 系 p 型導電膜は 10<sup>19</sup>/cm<sup>3</sup>以上のキャリア濃度を有するので、n 型透明導電膜とトンネル接合を形成することで、太陽電池特性の向上に期待が持てる。このように、本開発の BaCuSeF 系 p 型透明導電膜は、従来用いられていた不透明電極を用いた場合と同等の太陽電池特性が得られることを実証したことから、最終目標は達成した。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 4 (4)、論文(査読付) : 8 (4)、研究発表・講演 : 25、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 2

#### 8) フルスペクトル TCO (トップセル用 TCO) (旭硝子株式会社)

<H26 最終目標 : シート抵抗 5 Ω/□以下、エネルギー透過率従来比 6%向上 (AM1.5 スペクトルの 350~766nm での平均。透過率は積分球内設置法で測定)を達成する。この開発した TCO 基板を中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用し、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 40% (有効受光面積 : 1cm<sup>2</sup>) を達成する。>

これまで開発を進めてきた低抵抗・高透過率 TCO 基板のガラス/空気界面、ガラス/TCO 界面に反射防止膜を挿入することと高透過ガラス基板を採用することによって、エネルギー透過率を従来比 6.1%向上することができた。これにより平成 26 年度の TCO 基板単体の性能の最終目標を達成した。また、従来 TCO 基板の特性を評価する際に用いられてきた IM 法の問題点 (CH<sub>2</sub>I<sub>2</sub> の短波長での吸収) を解消する新測定方法 (積分球内設置法) を考案し、有用性を示した。

開発した TCO 基板を用いてセル評価を実施したが、量産品の VU 基板を上回る効率は得られなかった。透過率は向上しているため、効率が低い原因は光閉じ込め能力不足と考えられる。平成 24 年度までにヘイズ率を広い範囲で調整する技術を確立しているため、これを適用し調整を行えば、VU 基板を上回る効率を得ることは十分に可能と考えられる。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 2 (0)、論文(査読付) : 3 (3)、研究発表・講演 : 4、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0

#### 9) 新型 TCO/p-SiO 界面技術 (三菱電機)

<H26 最終目標 : 新型 TCO に用いる透明導電膜材料・構造の開発により吸収端波長として 320nm、1100nm の透過率 80%を、TCO/p-SiO 界面瀬接合層材料・作製プロセスの開発により、TCO/p-SiO 接合抵抗として 100mΩ cm<sup>2</sup>を得る。更に開発した技術を中心機関と連携してトップセルに適用し、開放電圧 1.1V 以上を達成する。>

##### (a) ZnMgO テクスチャを用いた高透過高光散乱 TCO 電極の開発

低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池において、透明導電膜 (Transparent Conductive Oxide : TCO) ・シリコン酸素系 (SiO) トップセル界面接合部における光損失の低減を目的として、高光透過と低抵抗を両立する新型 TCO の開発と、TCO/p 型シリコン系酸化膜 (p-SiO) 接合技術の開発を行った。

酸化亜鉛マグネシウム (ZnMgO) からなる TCO テクスチャの材料および成膜プロセスを開発し、Mg 組成比を上昇させることで、目標である吸収端波長 320 nm 以下、1100nm の透過率 80%以上を達成した。また、ZnMgO の結晶構造を評価した結果、Mg 組成比が 36 at.%までの領域では ZnO と同様の結晶構造を保ち、テクスチャ形状が U 字状の凹部を有していることを確認した。その結果、800 nm におけるヘイズ率は 40%以上となり、光散乱性能が ZnO と同等であることを実証した。更に、ZnMgO と導電層である ITO 層とを積層した TCO 電極を作製、高透過低抵抗の ITO 層を加えることで ZnMgO の持つ光透過性と光散乱性を維持したままシート抵抗を低減させることに成功した。

##### (b) ZnMgO-TCO 電極を用いた高開放電圧セルの開発

ZnMgO/ITO 積層 TCO 電極を用いて a-Si セルを作製した結果、従来 TCO と比べて同等の Voc と FF を確保しつつ、短波長の光吸収量の増加による Jsc 向上に成功した。加えて、高 Voc を実現するため、発電層に a-SiC:H を用いて、製膜時の CH<sub>4</sub> 比や製膜温度、buffer 層、p 層の製膜条件などプロセスの最適化を図り、ZnMgO/ITO 積層 TCO 電極上で Voc = 1.023V を実現した。更に a-SiC セルの p 層との接合特性を改善させるため TiO<sub>2</sub>/MoO<sub>3</sub> 接合層を積層した ZnMgO/ITO 積層 TCO 電極を開発、a-SiC セルを作製して Voc = 1.05 V と直列抵抗低減を達成した。以上から、発電層のワイドバンドギャップ化、より高い仕事関数を有する材料の接合層適用により、目標である 1.1 V 超の Voc が実現できる可能性を実証できた。

<成果発表件数>特許出願（外国）：4（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：11、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### 10) 光学設計技術（カネカ）

<H26 最終目標：オプティカルカップリング・オプティカルスプリッティング構造を中心機関と連携して低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池に適用することで以下の目標を達成する事で、低倍率集光多接合セルで真性変換効率 40%（有効受光面積：1 cm<sup>2</sup>）を達成する。(1) 貼り合わせおよびオプティカルスプリッティングによる変換効率 40%の達成(2) 低倍率集光で変換効率 40%を達成するためのオプティカルスプリッタ開発(3) 光学的損失：5%以下まで低減(4) 低倍率集光によるオプティカルスプリッティング構造の屋外暴露システムにおける課題抽出し、暴露による屋外出力変動を取得する>

まず、最適設計したオプティカルスプリッタの作製技術を検討することで、長波長側の透過率が高く、光学的損失が 4%以下と極めて少ないオプティカルスプリッタを作製することができ目標を達成した。

ついで作製したオプティカルスプリッタは、中心機関を中心に研究グループの他機関に提供することでグループ全体の研究進捗を促進させ、さらに短波長から長波長まで様々な選択波長をもったスプリッタを作製することで二回光分離構造を中心機関で実現させて超高効率を達成するための手助けをおこなった。さらにペロブスカイト型太陽電池とヘテロ接合太陽電池を組み合わせたスプリッティング構造において、1 sun 条件下でトータル変換効率 28.0%（アクティブ面積効率）を達成し、スプリッティング構造における高効率実現の可能性を示した。

さらに低倍率集光システムへオプティカルスプリッタを導入するためのボックスを導入し、アモルファスシリコン太陽電池及びヘテロ接合太陽電池モジュールを用いた屋外発電量の評価を実施することに成功した。システムの運用によるデータ蓄積・解析の結果、一軸追尾低倍率集光システムにおける課題として、特に冬季におけるスプリッタへの太陽光の入射角が大きくなり、太陽電池特性が低下することを見出し、屋外暴露システムにおける出力変動の取得により、屋外暴露システムの課題を抽出した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（1）、論文（査読付）：2（2）、研究発表・講演：3、新聞・雑誌等への掲載：1、展示会出展：0

#### 11) 低倍率集光システム（パナソニック）

<H26 最終目標：多接合太陽電池モジュールの構造に対応した集光ロスが少ないミラー反射型集光・追尾システムを開発し、これを屋外計測システムに適用することにより、集光効率 90%を実現する集光・追尾システム技術を確立する。>

多接合太陽電池モジュールによる発電方式（波長スプリッティング方式）に対応したトラフ（樋）型反射ミラーを搭載した10倍集光の集光光学系を設計・開発した。集光効率90%の実現に対し、太陽光に含まれる散乱光を捕集し、発電に寄与させることが可能な散乱光捕集光学系を開発し、屋外での発電テストを実施した結果、従来の集光・追尾システムに対し、3.7%~3.9%の集光効率の向上を実証した。この散乱光捕集効果を考慮して、集光効率を推定した結果、集光効率90%の実現が可能であることの証左を得た。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：2、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

#### ④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）

【平成 21~22 年度】（第 2 回中間評価時）

##### 1) 集光型多接合太陽電池評価技術

a) 集光型太陽電池屋内評価技術

<H22 最終目標：従来の単接合太陽電池の高精度評価技術をベースとして、3 接合以上の多接合で集光倍率 500 倍以上に対応できる国際的整合性を持った高精度な評価技術を開発する。>

太陽電池における評価手法の確立は極めて重要であるが、集光型太陽電池の評価手法については未だ統一された方法が無く、測定精度に課題があるのが現状である。本研究開発では、集光型太陽電池（集光型太陽電池セルおよび集光型太陽電池ユニット）の高精度な屋内評価技術を米国研究機関と共同で開発した。

h) 集光型太陽電池セル性能評価技術

集光倍率 500 倍以上に対応できる集光型太陽電池セル単体の性能評価を屋内で高精度に実現するため、評価用光源（ソーラーシミュレータ）として、照度調整機構（可変範囲 50-1,000suns 以上）および 6 波長域での分光放射照度スペクトル調整機構を備え、6 接合構造まで対応可能なパルス発光型光源を導入し、高精度評価技術を開発した。高精度な屋内測定を行う上で必須となる性能確認・光学系の最適化を行った。パルス発光時間は約 1ms と短パルス型であり、高集光下におけるセル温度上昇を防いで、測定の高精度化を図るのに有利である。正確な基準太陽光との分光放射照度スペクトル合致度（合致度約±10%以内、class A for ASTM Standard E927-10）および多接合太陽電池の各要素セルに入射する実効的な照度およびそのバランス（基準太陽光比±2%以内）、有効照射面内における照度均一性（約 5cm 角内において±2%以内）を確認した。

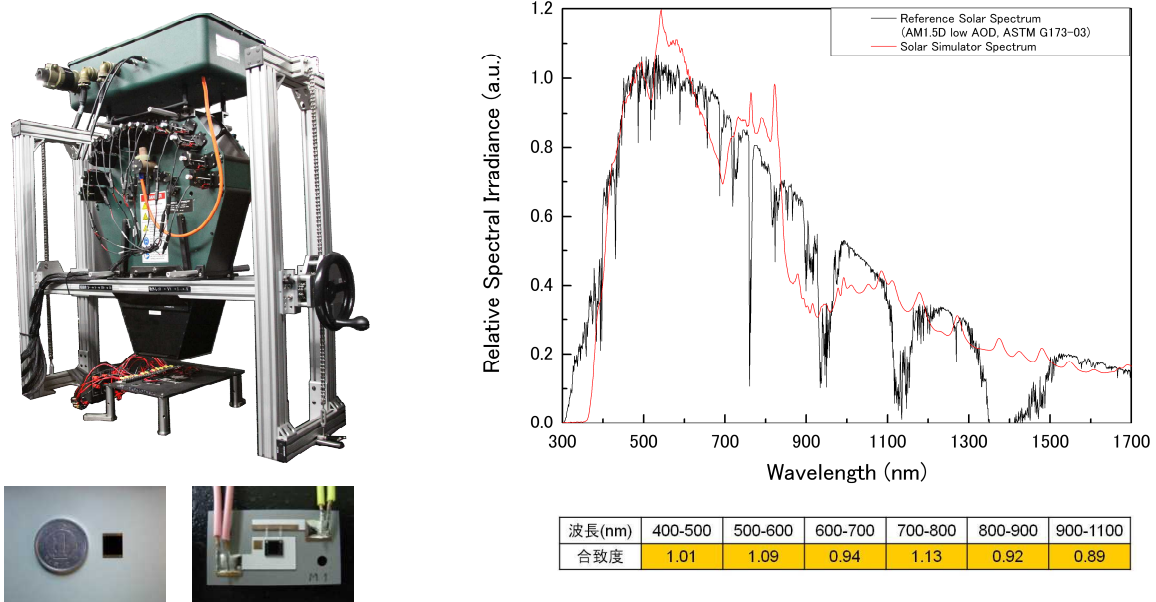
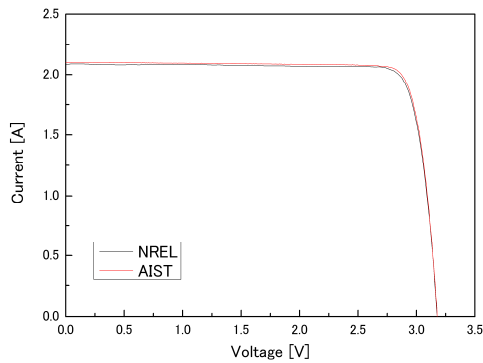


図 38. 照度および分光放射照度スペクトル調整機構を備えた集光型太陽電池セル評価用光源（左上図）および集光型太陽電池セルの一例（左下図）。高精度測定を行う上で必須となる性能の一つである基準太陽光とのスペクトル合致度（右図）は約±10%以内であり、ASTM 規格 E927-10 において class A を満たしている（黒線：基準太陽光の分光放射照度スペクトル、赤線：ソーラーシミュレータの分光放射照度スペクトルの一例）。

国際的整合性を持った性能評価技術を推進・検証するために、集光型 3 接合太陽電池セル（GaInP/GaAs/Ge 構造）について、米国 National Renewable Energy Laboratory (NREL) との測定結果の比較を実施し、測定精度の検証を実施した。NREL は米エネルギー省 (DOE) 傘下の国立研究所であり、所在地はコロラド州ゴールデン市。照度約 500suns において、性能指標となる短絡電流  $I_{sc}$ 、開放電圧  $V_{oc}$ 、最大出力  $P_{max}$ 、曲線因子 FF の各パラメータにおいて約 1.2% の範囲内で、測定結果の良好な一致を確認した。集光型太陽電池において、1,000suns 程度以上の更に高照度を目指したデバイス・集光系・システムの開発が進んでおり、今後の課題として 1,000suns 以上での高照度下における照度依存性を含めた測定結果の比較・検証、測定精度の不確かさ検証やその改善に向けた検討、および様々な種類の材料・構造の集光型太陽電池セルについても同様に国際比較測定を継続することで国際的整合性を持った高精度評価技術を確立すること、が挙げられる。



性能指標の比較項目	AIST	NREL	差(NREL/AIST)
照度 (kW/m <sup>2</sup> )	499.1	500.1	+ 0.20%
短絡電流Isc (A)	2.103	2.086	- 0.81%
開放電圧Voc (V)	3.177	3.176	- 0.03%
最大出力Pmax (W)	5.77	5.707	-1.10%
曲線因子Fill Factor (%)	86.3	86.1	-0.21%
変換効率 Efficiency (%)	35.1	34.7	-1.15%

図 39. AIST (赤線) および NREL (黒線) の集光型太陽電池セル性能測定結果の比較。約 500suns の照度での各性能指標パラメータにおいて約 1.2%の範囲内で、測定結果が一致していることを確認した。

#### ロ) 集光型太陽電池ユニット性能評価技術

集光型太陽電池の評価においては、セル単体だけでなく、集光光学系を含めた集光型太陽電池ユニット（もしくはサブモジュール）の性能評価が実用上非常に重要である。集光型太陽電池ユニット性能を屋内で高精度に評価するために、太陽光球の視野角（±0.26 度）または集光型太陽電池ユニットの許容角（通常は±0.5 度～±1.0 度前後）と同程度の光束平行度を持ち、かつ、基準太陽光に近似した分光放射照度スペクトルを備えた集光型太陽電池ユニット評価用光源（高平行度ソーラーシミュレータ）および性能評価技術の開発を実施した。高平行度ソーラーシミュレータの基本性能の一つである光束平行度について、高精度な光入射角度センサを用いて実測し、装置構造から算出した理論的な視野角（±0.49 度以内）と非常に良く一致することを確認した。また実際の集光型太陽電池ユニットを本ソーラーシミュレータによって測定する場合は、光入射面のサイズにより見込み角の大きさが増加するため、その程度を予め把握しておくことが高精度な測定を行う上で必要となる。光束平行度を有効照射面内（17cm 角）で実測・平均化することにより、増加すると予想される見込み角の大きさについて定量的に確認した。

集光型太陽電池ユニット性能を高精度に評価する上で必須となる性能確認・光学的調整に関しては、有効照射面内における照度均一性（18cm 角内において±2%以内）、直達基準太陽光との分光放射照度スペクトル合致度（合致度：約±10%以内、class A for ASTM Standard E927-10）を確認した。また集光型多接合太陽電池の性能は、入射光スペクトルに依存した各要素セルで発生する光電流バランスに大きく影響を受けるため、基準太陽光下において各要素セルで発生する光電流バランスを再現するように入射光スペクトルの調整が必要となる。評価用光源内部の光学系に、分光透過率特性の異なる光学フィルタを適切に選択・挿入することで柔軟にスペクトル調整可能な機構を実現した。

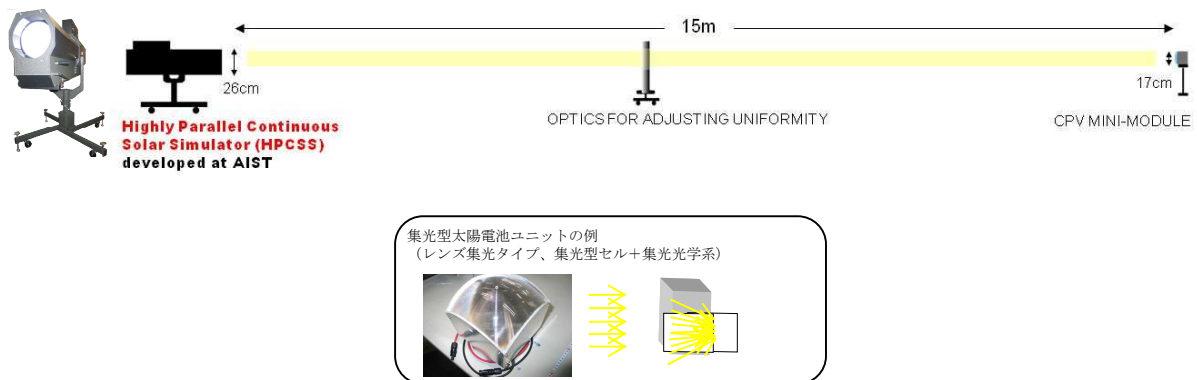


図 40. 集光型太陽電池ユニット評価用光源および性能評価の基本設計。光源の光出射部から被照射面までの距離を 15m とすることにより照射面中心からの視野角±0.5 度を実現した。また光路上に金属製メッシュを配置することにより、有効照射面における照度均一性が調整可能である。

設計・開発した高平行度ソーラーシミュレータを用いて、集光型太陽電池ユニット（集光型 3 接合太陽電池セル（GaInP/GaAs/Ge 構造）および集光光学系（約 17cm 角の 1 次集光光学系＋セルにマウントされた 2 次集光光学系）で構成、設計集光倍率は 550 倍）の電流・電圧特性測定および測定精度の検証を実施した。測定結果から、性能指標となる測定パラメータ（短絡電流  $I_{sc}$ 、開放電圧  $V_{oc}$ 、最大出力  $P_{max}$ 、曲線因子 FF）について、約±0.6%以内の再現性を確認した。ややばらつきが大きい原因として、ソーラーシミュレータの照度安定性、電流・電圧測定時の電圧掃引速度、時定数などが考えられる。今後の課題として、測定精度の不確かさ検証やその改善に向けた検討、様々な種類の材料・構造の集光型太陽電池ユニットについて米国 National Renewable Energy Laboratory (NREL) との国際比較測定の実施等による国際的整合性を持った高精度評価技術の確立が挙げられる。

b)集光型太陽電池屋外評価技術

<H22 最終目標：集光型太陽電池システムを日米両国に設置し、屋内評価結果と併せて屋外での性能評価技術を開発する。>

PV システムの発電量を正確に予測する評価方式を開発するため、同一の集光型太陽光発電システム（CPV システム）を日米 2 サイトに設置し、発電性能の同時検証（比較）を行った。CPV システムは、レンズを用いて自然太陽光を通常の数 100 倍の光強度で集め、その光で小面積の集光型太陽電池によって発電する電源設備である。実証実験では、天候、特に快晴率や太陽光スペクトルの差による影響を評価するため、快晴率が高く乾燥した米国サイト（コロラド州オーロラ）と温暖湿潤な日本サイト（岡山市）を実験場として選んだ。また、日米欧 3 カ国で製造された、異なる性能の多接合型太陽電池セル 3 種を用いて同種の光学系・パッケージで作成された 3 種の CPV モジュールを CPV システムに搭載した。米国側のカウンターパートは、米国国立再生可能エネルギー研究所（NREL）である。設置場所は、SolarTAC（Solar Technology Acceleration Center）とした。SolarTAC は、米国最大の太陽エネルギー研究施設として、現在コロラド州オーロラに実験場を建設中の研究団体で、NREL はそのメンバー団体の一つ。日本では、岡山県岡山市の京山ソーラー・グリーン・パーク内に設置した。CPV システムは、そのポールマウントという設置工法の特徴から平坦地だけでなく傾斜地に設置することも可能であり、今回は国内で初めて丘陵地への設置を試みた。このため、岡山市街に位置しつつも、日当たりが良く、日射障害のない、実験環境が得られた。両サイトにおいてリアルタイムにデータを収集し、NREL と共有することで効率的に共同研究を実施する体制を整えた。

1)屋外集光型太陽電池システム

日米両サイトとも年間の気温変化が大きいという共通性があるが、岡山と比較して米国サイトは、日照時間が長く、気温が低く、降雨量が少なく湿度が低い（より乾燥している）と言う気候の差がある。また、日本サイトは岡山市（人口 70 万人超）の市街地に位置しているが、米国サイトは、デンバー国際空港近傍の（日本人から見れば）砂漠のような平原であり、人為起因のエアロゾルの多少や、吹き上げられた砂塵の多少が両サイトにおける日射量や分光日射強度（スペクトル）に影響を与える可能性がある。気候的な差違について表 32 にまとめた。

表 32. 日本サイト（岡山市）と米国サイト（オーロラ市）の気候

	岡山市	オーロラ市 (Aurora)
◆地理		
緯度・経度	N34.67、E133.91	N39.7、W104.8
標高	80m (市街)	1,600m
◆気象		
日照時間	中程度 (2,000 時間)	高い (3,000 時間)
直達日射	中程度	高い
エアロゾル	多い	少ない
大気水分	多い	少ない
平均気温	中程度 (16℃)	低い (10℃)

集光型太陽光発電（CPV）システムは、ほぼ同一仕様のものを両サイトに導入した。僅かな差違は、系統連系のためインバータが各国仕様のものであること、地形に合わせたレイアウト（システムの

配置)の違い、後述するリファレンス PV システムの架台の構造、程度である。CPV システムには、14kW タイプを採用した。米国 NREL との協議により、システムとしては米国製を導入せずに日本製のみを導入し、太陽電池セルに日本製と米国製を導入することにした。これは、気候差およびセルの性能差が発電量に与える影響を分析すると共に、システム（主に追尾装置）が与える影響を取り除くために、システムは同一仕様であるべきと判断されたためである。このため、各サイトについて同一のシステムを2式ずつ導入した。集光レンズの幾何学倍率は550倍。CPV アレイは0.5度未満の精度で太陽を追尾することになっている。強風時には、CPV アレイは真上を向く待避モードに自動移行するため、年間の設備稼働率に、設置場所の風況が影響する可能性がある。太陽電池セルは、日本製と米国製に加えて、ドイツ製の多接合型太陽電池セルを搭載し、比較することとした。メーカーはそれぞれ、SHARP、SpectroLab、Azur Space である。太陽電池セル単体の、集光下での変換効率は、メーカーによる公称値でそれぞれ40%近くであるが、CPV モジュールに組み込むと、モジュールとしての変換効率は25%となった。セル効率とモジュール効率の差を引き起こす要素としては、モジュール内の集光系の有効面積・温度・スペクトル・照度・構成セル間の均一性、等の、平板型太陽電池と共通の項目に加えて、CPV に特有な集光光学系の透過率・集光効率・追尾精度等の項目があり、CPV の評価は平板型よりも多くの要素を考慮する必要がある。今回使用したモジュール仕様は表33の通りである。

表 33. 設置した集光型太陽電池モジュールの仕様

セル種類	InGaP/GaAs/Ge ※1 社の例
セル数	25
面積	0.68m <sup>2</sup>
外形寸法	830×830×229mm
重量	15kg
筐体素材	アルミニウム合金
集光レンズ素材	PMMA 樹脂
幾何学集光倍率	550 倍
許容角度	約±1 度
適合する追尾架台の許容追尾誤差	±0.7 度

本研究開発では CPV システムの発電性能を広く普及している結晶シリコン型の平板式太陽電池 FPV モジュールと比較するために、CPV システムの近傍に設置した平板式太陽電池モジュールの系統連系型システムを併設した。リファレンスシステムと呼ぶ。照度温度特性が解析し易い平板型の太陽電池を併設することは、CPV システム評価のための様々な解析に有用である。日米両サイト共に結晶シリコン型太陽電池を約 1kW 搭載した。架台の構造については、両国での普及形態を考慮し、日本では固定傾斜架台、米国では2軸追尾架台を採用した。気象観測システムは日米両サイト共に、全天日射計を平板システムの架台に設置した。風速・風向計、温度・湿度計も両サイトに設置した。風速データは、追尾架台を強風時に退避させる「退避モード」にも利用されている。1 分間平均風速が 15m/s 以上の場合、退避モードとなる。CPV アレイ（追尾架台）には、直達日射計、全天日射計を付設した。CPV システムは 10kW インバータ 3 台により系統連系運転を行い、リファレンス PV システムも同様にインバータ 1 台により系統連系運転を行っている。システムの概観を図 41、42 に示す。



図 41. CPV システム  
(左：日本 岡山サイト、右：米国 オーロラサイト)



図 42. レファレンス PV システム  
(左：日本 岡山サイト、右：米国 オーロラサイト)

ロ) 発電データおよび発電特性解析結果

集光型太陽光発電 (CPV) システムおよびレファレンス PV (平板型太陽光発電 FPV) システムは、日米両サイト共に平成 23 年 1 月 1 日よりデータ取得を開始した。CPV システムの日平均発電量・日平均直達日射量ともに、米国が、日本の 2 倍以上あり米国で導入が進む実情を反映している。発電性能を表す指標として、下式で定義されるシステム出力係数 (PR) を用いた。

システム出力係数 (PR)

$$PR = \frac{\text{発電量}[kWh] \times \text{定格日射強度}[kW/m^2]}{\text{定格出力}[kW] \times \text{日射量}[kWh/m^2]}$$

現状では集光型太陽電池の性能評価に関する国際規格 (IEC) は審議中であり国内・国外ともに統一された基準が整備されていないため、今回は定格出力にメーカー公称出力、定格日射条件にメーカー公称出力測定条件 (1kW/m<sup>2</sup>) を PR の算出に用いた。最も大きな発電量が期待される夏季の発電性能は、一般的な FPV の場合、PR が 0.8-0.9 程度で推移することが多いのに対して、本研究開発の CPV の場合、日本、米国ともに PR 0.9 以上と高い発電性能を示すことが実証された (図 43)。また日米の発電量比較や気象因子等の情報を含めて分析した結果、米国は、主にスペクトル効果により 6% 近く発電性能が高いことが実証的に明らかになった。このスペクトル効果は、サブモジュールレベルでも追認しており想定以上にスペクトルによる発電性能の変化が大きいが明らかになった。集光型および非集光型の年間平均発電効率について、米国サイトおよび日本サイトの比較検証を実施 (図 44)。集光型の発電効率は、非集光型の 2 倍程度で推移し、日米間の比較では、年間を平均すると顕著な差がないことを明らかにした。ただし米国サイトは冬期に影の影響を大きく受け効率低下が確認されている。

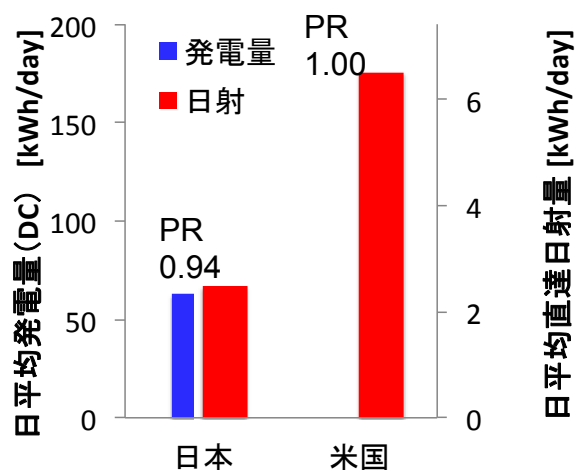


図 43. 日米発電性能 (PR) 比較 (日平均発電量と日平均直達日射量)

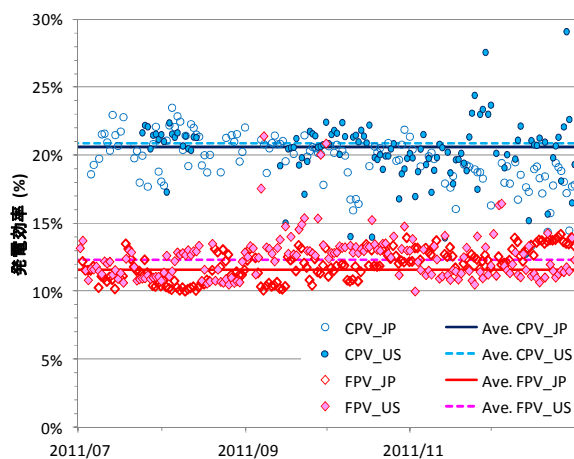


図 44. 日米発電効率比較 (集光型および非集光型)

集光型 (日本サイト) CPV\_JP、集光型 (米国サイト) CPV\_US、非集光型 (日本サイト) FPV\_JP、非集光型 (米国サイト) FPV\_US

3社のセルを搭載したサブモジュール (セル+集光光学系から成る、CPV モジュール構成要素) により、屋外におけるレンズ集光下におけるセル性能評価法について検討を行った。暴露前に屋内高精度評価技術 (集光型太陽電池ユニット性能評価技術 (前述)) により事前評価を実施した。この屋内測定評価を基に屋外評価を実施した。3社のセル比較 (図 45、46) では、セルの発電性能差よりもアライメント精度、特に追尾架台の追尾精度およびモジュールの設置精度に大きく影響を受け、年間を通してその傾向は変わらないことを確認した。この内容は審議中の国際規格 (IEC) に今後提言し、反映させる予定である。



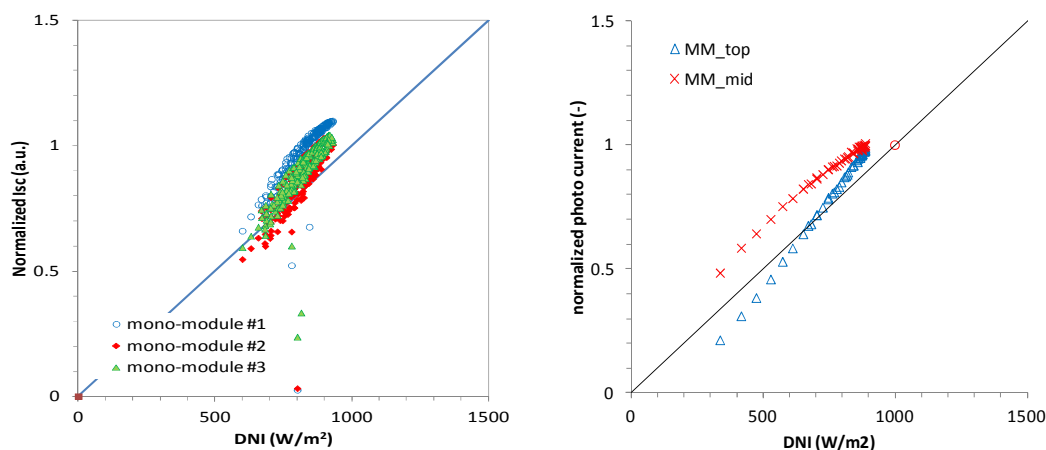


図 45. スペクトルによる発電性能変化 (左: 実測、右: シミュレーション)

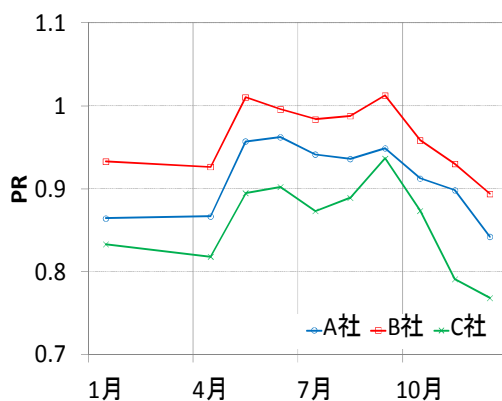


図 46. 3社のセル性能 (PR) 比較

集光型太陽光発電システムの評価手法を検討するために、レファレンスシステムとの性能比較を実施した。岡山 (日本) サイトの CPV と FPV システム DC 発電効率を比較した冬期の一例では、CPV システムの DC 発電効率は、ピーク時に約 22%。FPV システムの DC 発電効率は、ピーク時に約 15%であった。CPV システムの DC 発電効率は、太陽高度の上昇とともにレファレンス PV システムを上回り、南中時には 1.5 倍以上となる。CPV および FPV システム共に冬季は、日出から午前 10 時、午後 2 時半から日没まで陰の影響がある。

単位面積あたりのピーク DC 出力について CPV システムと FPV システムの比較 (ただし対象面積は、トータルエリア (パネル面) とした) の結果、CPV システムの単位面積あたりのピーク AC 出力は、FPV システムの 2-4 倍程度で推移し、面積あたりの発電量は CPV が優位である (図 47、48)。ラベル出力値に対するピーク AC 出力について CPV システムと FPV システムを比較した場合、冬季は、太陽高度が低く CPV システムが FPV システムを下回る。今回の対象期間 (平成 23 年 1 月 1 日~2 月 12 日) において直達日射強度が  $1,000\text{W}/\text{m}^2$  を上回る観測日はなく、日本国内の平野で  $1,000\text{W}/\text{m}^2$  を超える事は稀である。したがって、直達日射強度が  $1,000\text{W}/\text{m}^2$  の条件で値付けされている CPV モジュールで構成されたシステムの出力は、日本国内ではラベル値に対して低い値となる。CPV と FPV の PR を比較したもので CPV は夏の日射条件の良い時期に優れた発電性能を示し、平均発電効率は FPV の約 2 倍であった (図 49)。今後 PV 導入が進む高温高照度 (サンベルト) 地域で CPV が優位であることが今回の結果からも定量的に検証された。

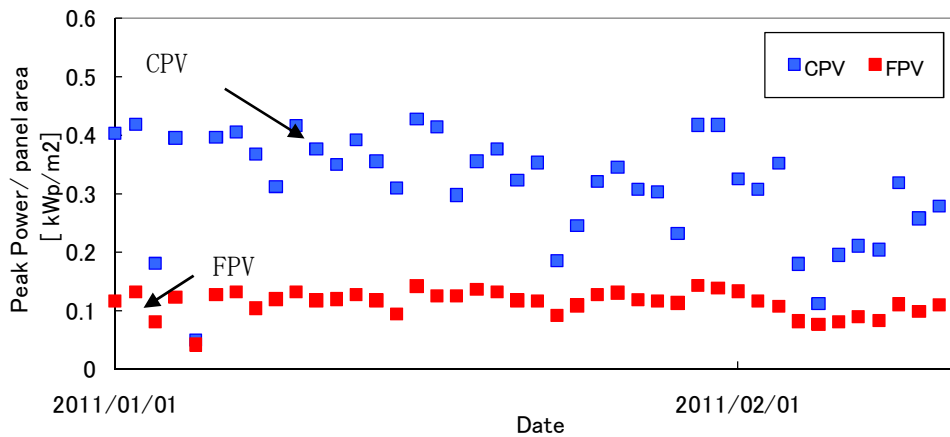


図 47. 単位面積あたりのピーク AC 出力比較 (2011 年 1 月 1 日～2 月 12 日)  
 青■：集光型太陽光発電システム (CPV)、赤■：レファレンス PV システム (FPV)

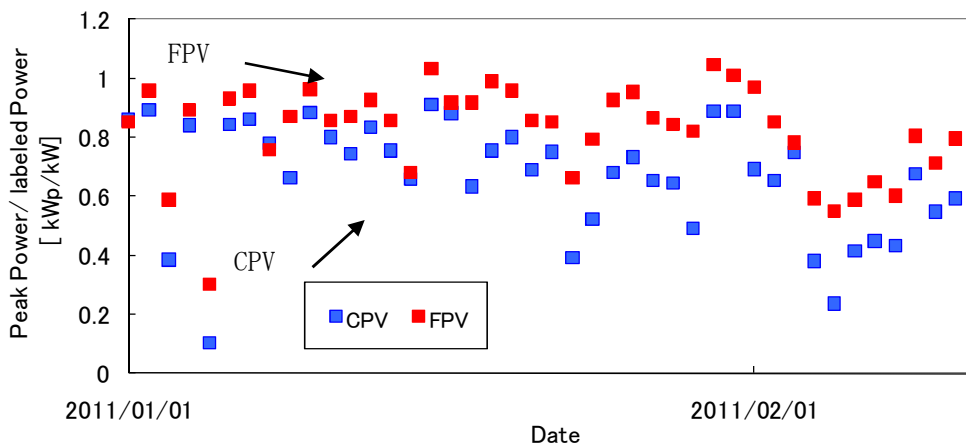


図 48. ラベル出力値あたりのピーク AC 出力比較 (2011 年 1 月 1 日～2 月 12 日)  
 青■：集光型太陽光発電システム (CPV)、赤■：レファレンス PV システム (FPV)

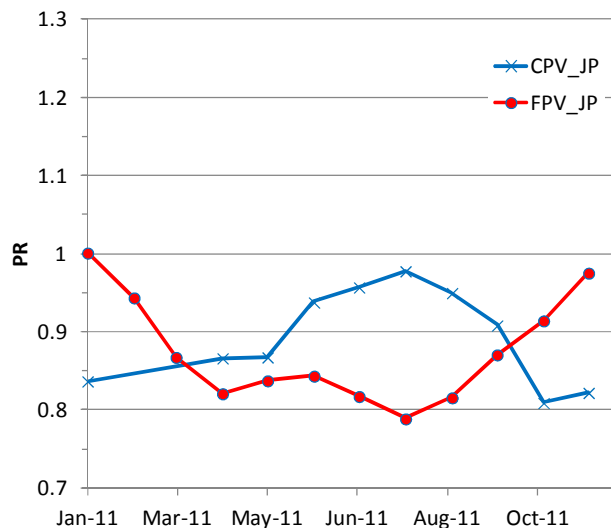


図 49. パフォーマンスレシオ (PR) の比較 (日本サイト)  
 青線：集光型太陽光発電システム (CPV)、赤線：レファレンス PV システム (FPV)

集光型太陽光発電システムは、優れた発電効率と発電性能を有している。しかし米国に比べて日本の気象環境は、全天日射強度に占める直達日射強度の割合が低く、現在のモジュール効率では従来型の先端の非集光結晶シリコンシステムを上回る発電量は得られていない。一方で集光型多接合

太陽電池の変換効率は近年著しく向上しており、今後も向上が期待できる。したがって、システム全体の効率が向上する余地は大きく期待できる。課題は、セル効率、集光の光学効率（光学ロスの低減）およびアライメント精度の向上が挙げられる。

集光型システムは、放熱性能に発電性能が影響を受けるため、環境条件（気温・風速・風向）等が重要である。また角度依存性が強く太陽周辺光（CSR）等にも影響を受ける。そのため国際標準化委員会（IEC TC82 WG7）では、屋内性能評価と共に屋外評価技術が重要であるとされ、屋内と屋外の評価を併用する方向で議論を進めている。現在審議中であるがエネルギー定格（IEC62670-1 CD）における集光型太陽電池の屋外標準条件（CSOC）として、直達日射強度  $900\text{W}/\text{m}^2$  が提案されている。日本の気象条件で直達日射が  $900\text{W}/\text{m}^2$  に到達するケースは、日射条件の良い地域に限定されかつ期間も限定される。また、基準太陽光スペクトル（AM1.5D low AOD）と比較してエアロゾル（AOD 高い）が多くレッドリッチスペクトルになるケースが多い。したがって、屋外標準条件に換算するための変換法（IEC62670-3 Draft）が重要となる。正確に換算するためには、日射条件、スペクトル、温度等多角的な検討が必要であり非常に複雑である。この問題は、対応する屋内評価技術と合わせて開発する必要があり今後の課題である。

## 2) 薄膜多接合太陽電池評価技術

### a) 革新的薄膜多接合太陽電池性能評価技術

<H22 最終目標：従来より広いスペクトル領域で感度特性を有する Si 系以外および 3 接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池に予測される集積型モジュール構造での評価に対応できる技術を開発する。>

### 1) 革新的薄膜多接合太陽電池性能評価技術

従来より広いスペクトル領域で感度特性を有する Si 系以外および 3 接合以上の集積型薄膜太陽電池をモジュール構造で評価できる測定技術を開発した。3 接合、4 接合もしくはそれ以上の多接合太陽電池モジュールを測定するために、各要素セルの基準太陽光スペクトル下における出力電流を、高精度に再現する必要がある。産業技術総合研究所の従来の多接合モジュール測定技術では従来型薄膜 Si 系太陽電池モジュール（3 接合以下）の測定が可能である。一方革新型太陽電池では、各要素セルの分光感度特性が従来とは異なり、更に大幅に変化する可能性があるため、従来以上に柔軟かつ広範囲・高精度に分光放射スペクトルを制御することが必要となり、従来の技術では対応できなかった。この目的を達成するために、モジュールサイズに対応した有効照射面積内で  $\pm 1.5\%$  以内の良好な照度均一性と、任意の光学フィルタを挿入した状態で達成可能な均一照射光学系を備えた革新型多接合太陽電池モジュール用ソーラーシミュレータを開発した。分光放射照度の可変性、照度均一性、安定性等の基本的な性能を確認し、従来より広いスペクトル領域で感度特性を有する Si 系以外および 3 接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池に予測される集積型モジュール構造での高精度な性能評価に対応できることを確認できた。

研究開発が進む革新型太陽電池では、集光型を前提とした構造等も含まれ、従来型の太陽電池と電極・外形等の構造が異なる可能性が高いと考えられるので、性能評価において重要となる照度・面積等の定義が重要となる。1sun 以上での性能評価に経験が深い NREL と議論し、集光型を含む革新型太陽電池セルにおいて、多く用いられる設計面積（designated area）の定義はセル周辺の外部取出し用集電極は除外するがセル内の集電用のグリッド電極は含める運用とした。革新型太陽電池で多く想定される 1sun ( $1\text{kW}/\text{m}^2$ ) 以上における照度の計測法について、現状では、まず 1sun で校正した基準太陽電池セルを用いてサンプルの 1sun における性能を評価し、その上でサンプルの短絡電流  $I_{sc}$  が照度に比例するとして照度を測定する方法がとられている。現状では線形性が良いとされている結晶 Si、III-V 族ではその方法が最も現実的な精度が高いと思われる。ただし革新型太陽電池で新材料が使用される場合には、その線形性を事前に確認した上で、サンプルの短絡電流が照度に比例しない場合には、線形性の確認された基準太陽電池セルを用いて照度を規定する方法が必要と考えられる。その場合にはソーラーシミュレータの照度による均一性やスペクトルの変化を更に精密に把握する必要があり、今後の課題である。

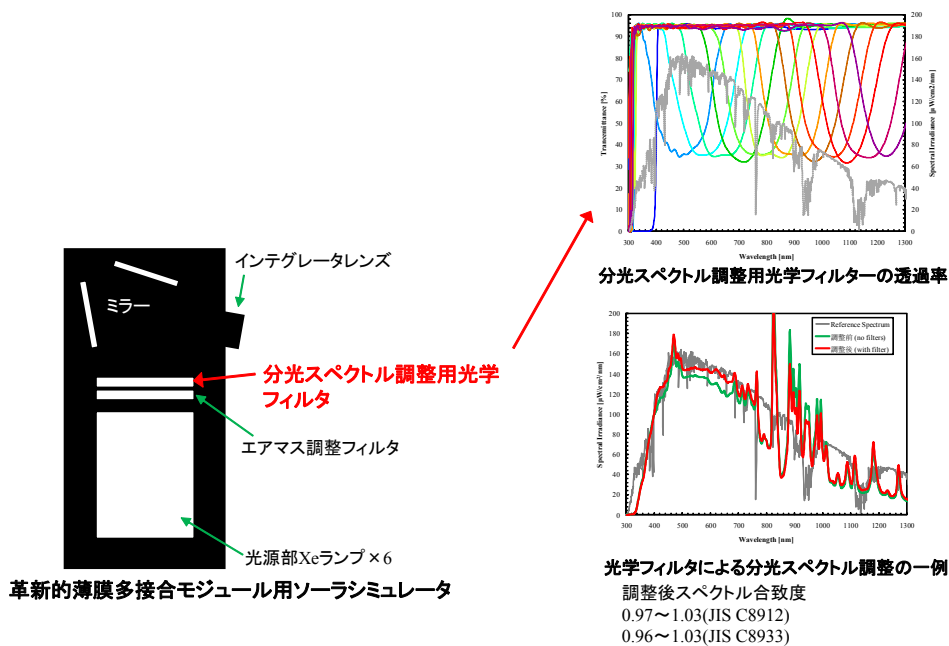


図 50. 革新的薄膜多接合モジュール性能評価用ソーラシミュレータと、3 接合以上に対応したスペクトル調整技術

b) 革新的薄膜多接合太陽電池信頼性評価技術

<H22 最終目標：革新的太陽電池およびそれに用いられる新材料の部材・組成・不純物等評価および基本的な光・熱等の環境に対する信頼性を検証する。>

1) 革新的太陽電池組成分布評価技術

マイクロなレベルでの多接合太陽電池の評価を行うことを目的に、薄膜の微小領域での組成分布測定が可能な太陽電池材料組成分布評価装置を導入した。本装置は、細く絞られた電子線を試料に照射し、発生した特性 X 線の強度を測定することによって、微小な領域の元素組成や元素濃度を評価することができる装置である。変換効率が高く、禁制帯幅が制御可能であるなど、多接合太陽電池として優れた性能を有する CIGS 系太陽電池においては、その組成の面内均一性や不純物粒子の存在がその太陽電池特性に大きく影響を与える。この装置を用いて CuInGaSe<sub>2</sub> (CIGS) 系薄膜太陽電池の評価を行った。薄膜太陽電池の光吸収層として優れた特性を誇る CIGS 薄膜は 3 段階法と呼ばれる蒸着プロセスで安定して作製されるが、ときどき表面に黒ずんだ部分を生じるものがあり、そのような膜を用いて作製したセルは一般に良い性能をもたらすことはない。本研究開発では、その斑点が生成される原因を探るべく目標部位に「太陽電池材料組成分布評価装置」を適用して、微小領域の組成分析を試みた。SEM 像において CIGS 膜中にミクロンサイズの黒い斑点が観察された。この粒子の組成を分析したところ、高濃度の Na と O が検出された。この Na は青板ガラス基板から過剰に拡散してくるものと考えられる。CIGS 膜の性能を阻害する要因を元素および大きさに関しておよそ明らかにすることができた。今後はさらに製膜実験と詳細な観測を重ねてこの損傷形成のメカニズムを見出し製膜技術の高度化に繋げるように研究開発を進める。

2) 革新的太陽電池ヘテロ接合界面評価技術

革新的薄膜多接合太陽電池のヘテロ接合界面のバンドオフセット評価を行うことを目的に、モノクロ X 線源装置を用いた光電子分光測定と分光エリプソメトリー装置等を用いたバンドギャップ測定より得られるヘテロ接合界面のバンドオフセット量評価が新規太陽電池開発に有効である事を a-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H/c-Ge ヘテロ接合型太陽電池を用いて確認した。高効率を示す a-Si:H/c-Si ヘテロ接合型太陽電池の特徴として、開放電圧が高いことと開放電圧の温度依存性が小さいことが挙げられる。これらは a-Si:H/c-Si ヘテロ界面の価電子帯オフセット量および伝導帯オフセット量が大きく関与している。一方 c-Ge 系太陽電池は、III-V 族多接合型太陽電池のボトムセルとして用いられているが、c-Ge セル単体の研究は少ない。また、禁制帯幅が小さいため、c-Ge セルでは高い電流密度を得られるものの、開放電圧は低く、またその温度依存性は大きい。そのため、高温環境下では特に開放電圧が著しく低下するために変換効率も低下する。近年、我々はこの問題を解決すべくヘテロ接合の概念を c-Ge セルに適用し、開放電圧が高く温度依存性が小さい a-Si:H/c-Ge ヘテロ型太陽電池を作成できることを見出した。本研究開発では、a-Si:H/c-Ge ヘテロ界面でのバンドオフセットがセ

ル特性に与える影響を明らかにするために、バンドギャップが連続的に可変な  $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$  膜を用いてセルを作成し、Ge 組成とオフセットとの相関を調べた。その結果、 $x$  の増加と共に価電子帯オフセット ( $\Delta\text{EV}$ ) が減少することが分かった。分光エリプソメーターで  $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$  薄膜のバンドギャップ ( $E_g$ ) を算出し、伝導帯オフセット ( $\Delta\text{EC}$ ) を算出した。その結果、Ge 添加により  $\Delta\text{EV}$  と  $\Delta\text{EC}$  は共に減少することが分かった。p 型 Ge 基板を用いて作成した  $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}/c\text{-Ge}$  ヘテロ接合型太陽電池の特性は、Ge 組成の増加とともにすべてのパラメーター (短絡電流密度、開放電圧、曲線因子) が低下した。開放電圧の低下は、 $\Delta\text{EV}$  の減少によりキャリアの逆方向への拡散が増加したことが一因と考えられる。一方、順方向電流を阻害する方向に存在する  $\Delta\text{EC}$  が先に示した通り減少したにもかかわらず、曲線因子には顕著な改善が見られなかった。これは、 $a\text{-Si:H}$  への Ge の導入がバンドオフセットの減少と同時に表面パッシベーション能力の低下を引き起こしたことが原因と推察される。以上より、高電圧かつ曲線因子の良好な Ge ヘテロ接合太陽電池の実現には、表面パッシベーションを良好に保ちながら、 $\Delta\text{EC}$  を減少させずに  $\Delta\text{EV}$  を低減可能な材料の開発が必要であると考えられる。

#### h) 有機太陽電池結晶構造評価技術

従来の有機薄膜太陽電池では、有機薄膜固有の短いエキシトン拡散長およびキャリア拡散長が変換効率の向上を制限していると考えられてきた。即ち、一般に有機薄膜のエキシトン拡散長は数 10nm であり、バルクヘテロ接合などの独自の構造を導入しても、太陽電池の最大膜厚は 200-300nm 程度に留まっている為十分な光吸収を阻んでいると言える。そこで、従来には無いアプローチとして、有機半導体を単結晶化させた新概念太陽電池を提案した。結晶性を向上させることでエキシトンの減衰因子を減らし、エキシトン拡散長を伸ばすことが目的である。これまでに報告例のないヘテロエピタキシーによる有機 p/n の作製を行い、構造を評価した。ルブレン単結晶はトレインサブリメーション法により作製した。ガラス基板上に静置したルブレン単結晶上に  $\text{C}_{60}$  を 1nm 真空蒸着し、 $\text{C}_{60}$  の初期成長過程を観測した。 $\text{C}_{60}$  は基板温度、蒸着速度に依存してさまざまな成長様式を示した。例えば蒸着速度 0.01nm/s (室温) における  $\text{C}_{60}$  薄膜の原子間力顕微鏡 (AFM) 像によると、 $\text{C}_{60}$  はステップとテラスで異なる成長をした。 $\text{C}_{60}$  はステップでは凝集し、テラスでは fcc[111]面であると考えられる六角形、三角形の結晶核が形成されることが明らかになった。更に詳細な構造を調べるために、試料水平型薄膜 X 線回折を用いてルブレン結晶上に成長させた  $\text{C}_{60}$  結晶の面内方位分布の測定を行った。 $\text{C}_{60}$  の [220] 回折のロックンガープを測定した結果、12 回対称を示すピークが得られた。 $\text{C}_{60}$  結晶が [111] 面では 6 回対称であることから、ルブレン単結晶上で 2 種類の面内方位で配向していることが考えられる。即ち、ルブレン単結晶上に  $\text{C}_{60}$  結晶が高い整合性で有機ヘテロエピタキシャル成長しており、高品質の有機単結晶が得られていることが確認された。

#### こ) 革新的太陽電池材料過渡特性評価技術

励起子多重生成現象を利用した革新型太陽電池材料性能評価として、フェムト秒レーザーを用いた超高速時間分解発光スペクトル測定法の有用性に関し検討を行った。励起子多重生成は、逆オージェ過程と考えられており、その現象を捉えるためには超高速分光法が必要となる。試料には、革新型太陽電池デバイスとなり得る Si 量子ドットを有機物で表面パッシベーションしたバルクヘテロ構造をもつ有機/無機ハイブリッド材料を用いた。その結果、Si 量子ドットの表面パッシベーションが不完全なため、光誘起キャリアが表面欠陥準位を経てエネルギー緩和し、励起子多重生成が確認出来ないことを明らかとした。これは、材料内で生成したキャリアの過渡応答を調べる事で初めて明らかとなった現象であり、より完全に Si 量子ドットの表面をパッシベーションする事で、Si 量子ドット内で励起子多重生成の発生に期待が持てる結果である。このようにフェムト秒レーザーを用いたキャリアの超高速過渡現象測定は、未知の材料開発・改善に有効であることが示された。

#### か) 革新的太陽電池微視的構造評価技術

薄膜太陽電池モジュールは、一般にガラスなどの大型基板上に一括作製されるが、その発電特性は多くの場合微視的な欠陥や不具合に左右される。従って、太陽電池内部の微視的な情報を得ることは、発電特性や歩留まりの向上・劣化要因の解明の観点から極めて重要である。特に多接合化が進む薄膜シリコン太陽電池の分野では、多接合化によって生じる新たな技術的課題が多数存在し、それらの克服には微視的な評価が不可欠なことが多い。例えば、多接合太陽電池に挿入する中間層材料の開発と評価、広帯域な多接合太陽電池に適した光閉じ込め用テクスチャ構造の開発と、テクスチャ構造上に製膜された発電層に発生する微視的構造・欠陥の影響評価、が挙げられる。また、透明導電膜の高品質化も極めて重要な課題となっている。本研究開発では、これらのうち中間層と透明導電膜に着目し、中間層の局所導電性、TCO のアニールによる結晶粒系変化等、微視的評価を通じて薄膜多接合太陽電池の高性能化に資する知見を得た。

#### ハ)信頼性評価技術

革新的太陽電池およびそれに用いられる新材料の部材・組成・不純物等評価および基本的な光・熱等の環境に対する信頼性を検証するために、太陽電池材料信頼性加速試験装置を設計・仕様の検討を行い、つくば研究センター第二事業所内に導入した(図 51)。以下に仕様の概略を記す。

- ・収納モジュール：フルサイズ(1.4m×1.1m)2枚
- ・チャンバー両面から光照射
- ・1面は白色照明
- ・1面は紫外光・青色光・赤色光・赤外光の4波長混合
- ・LED照射とすることで、長期間ランプ交換をせずに連続試験が可能

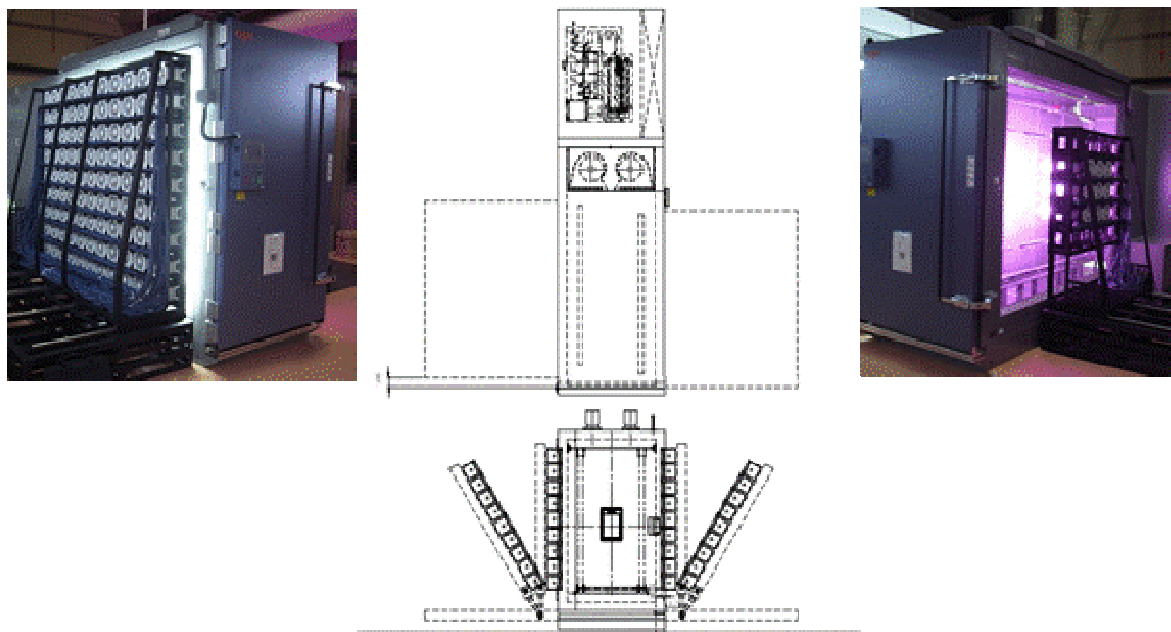


図 51. LED 式光照射試験装置

装置は、光源として LED を用いることを特色としており、この特色を活かした長時間(5万時間)ランプ交換無しで連続運転も可能である。また、LED 光源は所定の照度で安定するまでの時間が短時間で可能であることを活かした光デューティサイクル試験や特定部位ごとに照度を変えることができるため、ホットスポット試験とダンプヒート試験などを組み合わせた試験も可能と考える。これと平行して、メタハラ光源による試験を進めるために、レンズ部およびレンズ材料の入手を進め、試験前後での材料特性変化を評価した(図 52)。試験後は、400-500nm、1,400nm 近辺、1,800-2,000nm で透過率が低下していることが明らかとなった。

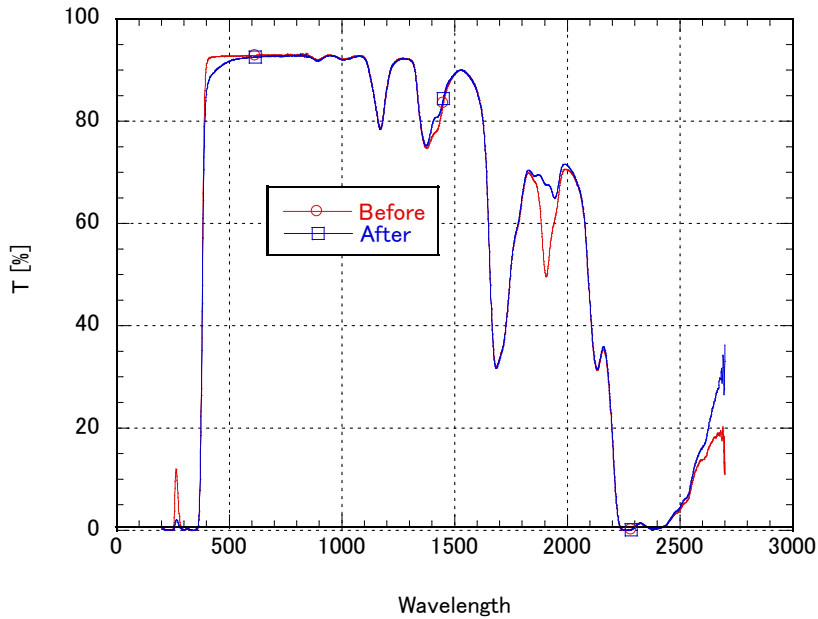


図 52. 集光型太陽電池のレンズ部材（アクリル）の光照射試験結果

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：0、新聞・雑誌等への掲載：3、展示会出展：0

⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）

【平成 23～24 年度】（第 2 回中間評価時）

1) 新材料・新構造太陽電池の創製及び評価解析技術の開発（豊田工業大学、再委託：宮崎大学、旭化成）

<H24 中間目標：Ⅲ-V-N 系新材料、Ⅲ-V 系オン・シリコン新構造の評価解析技術確立。H26 最終目標：Ⅲ-V-N 系新材料、Ⅲ-V 系オン・シリコン新構造太陽電池のセル変換効率 30%以上>

a) Ⅲ-V-N 系新材料タンデム構造太陽電池の研究開発

Ⅲ-V-N 系新材料(In)GaAsN 太陽電池の実用化に向けた最大の課題は、N 起因の複合欠陥が導入され、キャリア移動度、キャリア寿命が低下することである。N 起因の複合欠陥の起源を原子スケールで理解して、欠陥を低減することが、太陽電池の効率向上に必要な不可欠である。そこで、N 起因の複合欠陥の一つである N-H 複合欠陥の構造解析を偏光フーリエ変換赤外分光 (FT-IR) 法により行った。N-H 複合欠陥に帰属できる複数の FT-IR ピークの偏光成分を解析して、これらのピークの一部を異なる欠陥構造に分類し、その欠陥構造の結晶方位依存性を検討した。さらに、GaAsN のバンドギャップを光励起して、これら N-H 複合欠陥に生じる変化を時間分解赤外分光法により調べた。その結果、波数 962/cm に FT-IR ピークを持つ N-H 複合欠陥に光励起キャリアがトラップ、あるいは接近することでピーク位置が 990/cm にシフトする可能性が示された。以上の結果から、N-H 複合欠陥の構造や電荷状態に関する有用な知見が得られた。さらに、Sb サーファクタントの添加が GaInNAs 結晶品質に及ぼす効果の検討を行った。原子状水素援用 MBE 法による GaInNAs 結晶成長時に、最適量の Sb を照射することによりポテンシャル揺らぎを約 1/3 まで改善させることができ、また N に起因した電子トラップ準位の改善効果に関して、最適量の Sb を照射することによりトラップ密度を 1/5 程度まで低減させることに成功した。このことから Sb サーファクタントが N 原子の結晶中への均一な取込みに有効であることを明らかになり、これを基に GaInNAsSb 太陽電池の試作評価を行った。

b) Ⅲ-V-N 系新材料の欠陥構造解析（宮崎大学）

CBE 法を用いて作製した GaAsN 薄膜に関して 3 次元逆格子図 (3D-RSM) 測定を適応し、各逆格子点の回折強度分布を得る事に成功した。面内方向 (HK 面) で [110] 方向への散漫散乱が見られ、Ⅲ族元素を中心とした格子不整合転位形成が示唆された。V 族元素を中心とした格子不整合転位形成は確認出来ず、N の混入によりⅢ族中心転位の形成促進、あるいは V 族転位形成伝搬阻害の可能性が示唆

された。

#### c) III-V系オン・シリコンタンDEM構造の研究開発

GaAs/Si 太陽電池は、安価な Si を利用することにより、比較的 low コストで高変換効率を目指した多接合太陽電池である。GaAs/Si 太陽電池の課題は、4%程度の大きな格子不整合度により生じる欠陥の電気特性への影響である。この課題への取り組みとして、欠陥を封じるバッファ層の開発を検討中である。バッファ層の最適な組成や成長条件を求めるために、現在、バッファ層の成長中における欠陥生成機構の観察と理解を目的とした研究を行っている。Si 基板上 GaAs の成長と、成長中における格子緩和、もしくは転位生成過程の観察には、SPring-8 ビームライン 11XU における、高輝度 X 線回折装置を組み込んだ分子線エピタキシー装置 (MBE-XRD) を用いる。更に、成長後における欠陥評価手法を合わせることで、GaAs/Si 中の欠陥生成機構を解析する。現在、SPring-8 における予備実験と成膜後の試料の断面 TEM 観察による欠陥評価を実施している。

#### d) III-V系化合物半導体の欠陥構造解析 (宮崎大学)

また、GaAs on Si の結晶成長中に 3D-RSM 測定を適用し、10-20ML 成長するごとにリアルタイムでの測定に成功した。成長と共に GaAs の Bragg ピーク近傍に [111] 方向のストリークが発生する様子が明瞭に観察され、成長中の [111] 面欠陥形成過程に関する知見が得られると期待される。

#### e) 新規バッファ層構造の探索 (旭化成)

Si 基板上に化合物半導体からなる太陽電池を作製することは、チップコストやプロセスの安定性で利点があるが、格子ミスマッチによる欠陥の導入などが原因となってエネルギー変換効率を著しく低下させる。この問題を解決して良好な結晶性を持つ化合物半導体層を成長するため、MBE 法を用いて新規バッファ層の探索を実施する。

#### f) 種々の化合物半導体成長条件の把握

on Si で比較的良好な結果が得られている InSb の成長条件を参考に、欠陥低減につながる buffer 層についての知見の収集を狙いとして、MBE を用いて種々の半導体 (GaAs, AlAs, InAs, AlSb, GaSb, InSb) を成長した。上記の共通条件として、基板は Si [111] 面を用い、HF により自然酸化膜を除去後、MBE に導入して As 照射条件下で加熱した後、低温成長 (LT) / 高温成長 (HT) の 2 段階成長で化合物半導体層を成長している (詳細は既出願特許: W008/123141 による)。成長後の各薄膜について、[111] 面内の回転双晶の様子を観察するため、非対称 [220] 面に対して  $\phi$  方向の全周 scan を行った。その結果、GaAs, AlAs, GaSb, AlSb では 60 度の回転双晶が確認されたものの、InSb, InAs においては双晶は観察されずシングルドメインとなった。すなわち III 族に In を用いると回転双晶の生成を抑止する効果が期待できる。そこで GaAs 成長においても成長初期に In を 1layer 相当分導入し比較した結果、回転ドメインの割合が大幅に減少し、In 初期成長層の効果を確認した。

#### g) Sb 系バッファ層の検討

InSb などの Sb 系半導体の成長では、ミスマッチの大きなヘテロ成長においても格子緩和が非常に早く、良好な平坦性が得られていることから、2 次元的な結晶成長モードに移行させることを狙いとして、Sb を同時照射しながら GaAs を成長することを検討した。基板には Si [111] を用い、膜厚 1  $\mu$ m の GaAs:Sb 膜を成長して結晶性、平坦性を比較した。まず Sb の照射量を変えて成長した膜の表面を AFM で観察したところ、Sb 照射量の増加に従って成長核の広がりが大きくなり、平坦性が向上している傾向が見られた。また、成長温度を変えて表面を比較したところ、成長温度が高いほど平坦性も高くなっており、2 次元的な成長が維持されていることを確認した。これらの効果を平面 TEM によって比較したところ、Sb 照射によって積層欠陥密度が大幅に低減出来ていることが分かった。

#### h) 多接合太陽電池材料の集光動作解析 (宮崎大学)

集光型太陽電池モジュールは、レンズとセルのペアが 25 個、直列につながった構造をしている。モジュールの面内には温度分布が生じており、真ん中のセルの温度が高く、端のセルの温度が低い。これまでの回路シミュレータでは、このように、様々なセル温度を考慮した計算ができなかったが、今回、それぞれのセルに温度に対応したパラメータを設定することで、モジュール内の温度分布を考慮した、集光型太陽電池モジュールの動作解析シミュレーションが可能となった。本手法を用いることで、ソーラーシミュレータで測定した実測値だけでなく、屋外で実測した実験結果にも非常に精度よく一致する計算結果を得ることができた。

#### i) 集光型太陽光発電システムの実証 (宮崎大学)

集光型太陽電池は直達光のみを利用できるため、レンズ表面に汚れが付いた場合、その部分に照射された光は散乱光となり発電に寄与できなくなる。そのため、レンズ表面に汚れがつかないように保つことが重要である。集光型太陽電池のレンズ材料として主に用いられる PMMA を基板として防



汚コーティングを施した。防汚コートが有りのサンプルおよび無しのサンプルを、屋外に暴露した。サンプルの透過率および太陽電池の分光感度、さらに太陽光スペクトルを用いることにより、集光型太陽電池の電流を予測することが可能であり、暴露時間と電流減少率を調べた。8 か月暴露後、防汚コート無しのサンプルでは電流減少率が 9.6%になってしまうのに対し、防汚コート有りのサンプルでは電流減少率を 3.3%に抑えることができた。

<成果発表件数>特許出願（外国）：1（0）、論文（査読付）：21（19）、研究発表・講演：86、新聞・雑誌等への掲載：34、展示会出展：0（受賞実績：1）

## 2) 集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発（東京大学、再委託：神戸大学、タカノ）

<H24 中間目標：量子・ナノ構造の評価解析技術確立。H26 最終目標：量子・ナノ構造太陽電池のセル変換効率 30%以上>

### a) 量子・ナノ構造セルの研究開発

多重量子井戸構造をミドルセルに導入した 3 接合・4 接合集光型タンデムセルの開発に向けて、平成 23 年度はまずインペリアルカレッジ、ブラウンホフナー研究所と共同で試作セルの量子井戸構造を決定した。次に InGaAs/GaAsP 歪み補償量子井戸挿入 GaAs セルの変換効率向上に向けて、1.2 eV の吸収端を有する階段ポテンシャル量子井戸を作製し、低温やバイアス印加条件下でのフォトルミネッセンス、時間分解フォトルミネッセンスを測定し、キャリア取り出しの効率化に関する評価を行った。またヘテロ界面の組成急峻化を目指したガス供給シーケンスの改良を行い、100 層以上の歪み補償成長を満たしつつ障壁層の厚さを 3.1nm まで薄くすることに成功した。高精度のウェハ曲率モニタリングにより積層量子井戸成長における 1 層ごとの歪みの蓄積・開放を高精度で観察することが可能となり、これにより InGaAs/GaAsP 量子井戸型集光セルの作製が高精度で行うことができるようになった。集光型中間バンド量子ドット太陽電池の開発では、まず InAs/GaNAs 歪み補償量子ドットセルにおいて、量子ドット層を直接ドーピングすることにより期待されるセル特性の改善効果の評価を行った。量子ドット 1 個あたりに Si 原子約 1 個の割合でドーピングを行った量子ドット太陽電池において短絡電流はアンドープの量子ドットセルの約 1.27 倍にあたる  $30.6\text{mA}/\text{cm}^2$  を達成し、Si の直接ドーピングによる太陽電池特性の改善を明らかにした。またマドリッド工科大学と協力して、この不純物ドーピングセルを中心にフォトリフレクタンス測定を行い、量子ドット部の吸収帯の評価を行った。一方、50 積層 InAs/GaNAs（ドーピングなし）量子ドットセルでは、マドリッド工科大学で集光特性の評価を行い、開放電圧が集光倍率の増大とともに早く回復し、レファレンスセルの  $V_{oc}$  に近づいていく理論計算でも裏付けられる傾向を観測した。このとき変換効率は 21.2%（1,000 倍集光）が得られた。

### b) 量子・ナノ構造集光型セルの評価解析技術の開発（神戸大学）

太陽電池動作における効率の良い電流の取り出しと動作中のキャリアの平衡状態は、ナノスケールの量子構造に顕著に影響を受けるため、その特性の詳細な解析はセルの開発に不可欠である。そこで光生成されたキャリアの変化を動的に追跡するために、超高速発光寿命評価解析技術の開発を行った。透過損失を生みだす太陽電池で最も重要な波長である近赤外光に応答する量子・ナノ構造材料を精密に評価するために、近赤外に最適化したストリークカメラを使用した。ストリークカメラは多波長同時に発光スペクトルの時間発展を計測できる装置で、入射する発光を光電変換と電子に変換し、電界走引によって 2 次元イメージで発光のダイナミクスを高感度にとらえる技術である。本研究開発で用いたストリークカメラの時間分解能は 20ps、最大繰り返し周波数は 20MHz の世界最高性能を有する。発光寿命に応じてパルスを間引くシステムを同時に構築し、集光型セルに使用する量子・ナノ構造の詳細な評価を行った。平成 24 年度は不純物制御した InAs/GaAs 量子ドットにおける無輻射遷移の抑制効果を調べ、Si-dope 試料では高エネルギー側にて無輻射再結合成分が顕著に抑制されていることを明らかにした。無輻射再結合過程の抑制が顕著になる励起エネルギーでは入射光は量子ドット層にまで到達しておらず、量子ドット直上のキャップ層に存在する無輻射再結合中心が発光強度の減少に起因しており、ドーピングした Si から供給される電子が非輻射再結合中心を飽和（中性化）させていることを示している。すなわち、ドーピングを行わない量子ドットにおける非輻射再結合の起源として、電子トラップの存在が重要な役割を果たしていることを示唆するものである。この結果は、太陽電池セルにおける光生成キャリアの拡散過程における再結合損失を抑制していることに相当しており、集光型セルへの応用が期待できる。さらに、東大、インペリアルカレッジと共同で多重量子井戸におけるホットキャリアの時間的変化についても研究を進め

た。

#### c) 量子・ナノ構造集光型セル特性評価解析システムの開発 (タカノ)

量子・ナノ構造タンデム太陽電池を実現する上で、試作したセルの分光感度等の特性評価が必要となるが、従来既存の装置では本研究開発で目的とする評価解析が十分行えない。平成 23 年度は、評価解析の目標とその詳細内容を協議し開発仕様を明確にするとともに、必要な技術調査を進めて詳細な設計開発を具体的に着手するための検討期間とした。開発する評価解析システムでは、サブセルごとに分光感度・量子効率の測定が行える。太陽光スペクトルの広い波長範囲 (300-2,000nm) の光源を搭載するだけでなく、量子・ナノ構造セルの評価に必要な波長範囲も網羅できるようにすることとして機構的な設計検討を進めた。なかでも本装置の特徴の一つは、各サブセルが持つ感度波長のレーザースポット光源を搭載し、これをガルバノメーターで走査してセルからの起電流変化を画像化することができることである。これにより、分光特性や電氣的な測定だけでは解析できない各サブセルの発電分布ムラや不良部を可視化することが可能になり、製膜プロセスの改善や発電不良原因を解析する有効な手段として使用することができる。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 13 (13) 、研究発表・講演 : 31、新聞・雑誌等への掲載 : 5、展示会出展 : 0

#### 3) 先進構造による高効率集光型構造太陽電池の開発 (シャープ)

<H24 中間目標 : セル変換効率 42%以上。H26 最終目標 : セル変換効率 45%以上。>

「①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」で開発し、1sun 変換効率 36.9%と世界最高効率を更新した逆積み 3 接合セルについて、セルサイズや電極ピッチのカスタマイズ化を行い (4×4mm<sup>2</sup> サイズ、電極ピッチ 200 μm) 、レシーバー化し、産業技術総合研究所およびフラウンホーファー太陽エネルギーシステム研究所において集光特性を評価した。フラウンホーファー太陽エネルギーシステム研究所の測定で、240.7-306.3 倍において世界最高タイ記録であり平成 24 年度中間目標をクリアする 43.5%の変換効率を確認した。先進構造太陽電池開発として、3 番目セルを Eg=1eV の InGaAsN セルや量子構造挿入の GaAs セルとする格子整合系 4 接合セルの検討に着手した。シャープでボトムセルとなる Ge セルを形成し、3 番目セルの成長検討を行ってもらうために豊田工業大学及び東京大学に提供した。平成 23 年 6 月マドリッドにおいて開催された本研究開発の日 EU 同会議で決められたマイルストーン実施のために、技術者 2 名をフラウンホーファー太陽エネルギーシステム研究所に派遣し、集光セル効率測定技術や Si 上の III-V 族化合物成長技術、ウェハボンディング技術に関わる情報交換を相互に実施した。

<成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0) 、論文 (査読付) : 2 (2) 、研究発表・講演 : 15、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0

#### 4) 集光型太陽電池セル、モジュールの標準測定技術の開発 (産業技術総合研究所)

<H24 中間目標 : 各種集光型太陽電池の 200-1,000 倍程度の集光時に於ける性能評価において、EU 研究機関との比較測定を行い、測定精度の検証と高精度化のための課題を明確にする。H26 最終目標 : 多接合集光型太陽電池の性能評価において、変換効率の測定再現性が±0.5%以内の測定技術を EU 研究機関と共同で確立する。>

##### a) 集光型太陽電池セル評価技術

集光型多接合太陽電池セル単体の性能評価技術に関して、フラウンホーファー研究所とのラウンドロビン測定実施のための性能確認・調整および高精度化を行い、測定に必要な照度均一性 (±2%以内、約 5cm 角内) 、多接合太陽電池の各要素セルに入射する実効照度およびそのバランス (基準太陽光比で±2%以内) 、照度の時間変動率・再現性 (1%以内) を含むパルス安定性、接触抵抗を低減するプローブ (プローブ先端は低抵抗の BeCu 製、耐疲労性・弾性係数等に優れた特性を持つ) の選定、等を検証・確認した。2 種類の集光型 3 接合太陽電池セル (GaInP/GaAs/Ge 構造および GaInP/GaAs/InGaAs 構造) について約 700suns までの集光下における電流-電圧特性の評価が可能であることを確認し、同一の集光型太陽電池セルについてフラウンホーファー研究所との第 1 回ラウンドロビン測定を実施した。外部量子効率および 1sun での電流-電圧特性を比較した結果、電流-電圧特性パラメータにおいて約 1.8%の範囲内で測定結果の一致を確認した。今後更に高精度化を図る

とともに、高照度化でのラウンドロビン測定を行う。

b) 集光型太陽電池ミニモジュール評価技術

集光光学系を含めた集光型太陽電池ミニモジュールの屋外実環境における性能評価技術開発を考慮し、屋内評価用ソーラーシミュレータとして開発した高平行度定常光光源（照射面中心からの視野角±0.5度）の性能確認・調整および高精度化を実施した。上記検討に加えて、光入射面のサイズにより増加する見込み角の程度の詳細を定量的に評価するため、受光面から見た照度の光入射角度依存性（0.65度以内に90%、0.9度以内に100%）、ミニモジュール性能の角度依存性評価、等の技術検討を実施し、ブラウンホーファー研究所とのラウンドロビン測定の日本側測定を実施した（現在ブラウンホーファー研究所での測定中）。ミニモジュール性能を屋外環境で評価する為の太陽光追尾架台等を整備した。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：0（0）、研究発表・講演：5、新聞・雑誌等への掲載：0、展示会出展：0

5) 高効率集光型太陽電池モジュールの開発と集光型太陽光発電システム実証（大同特殊鋼）

<H24 中間目標：モジュール変換効率 33%以上、既存集光型太陽光発電システムのデータ収集・解析。H26 最終目標：モジュール変換効率 35%以上、50kW 集光型太陽光発電システムのデータ収集・解析、発電量予測。>

高効率と低コスト（高精度を必要としない追尾架台、設置工事）を両立させる新型光学系（ドーム型ケーラー光学系）の設計を完了した。1,000倍集光にも関わらず±1.2度の広い許容精度を有している。平成24年度末までには本光学系を用いた光学系及びモジュールの試作が完了する見込みである。集光モジュールの高効率化についても効率37.7%の市販セルを用いてモジュール効率31.7%が確認された（自社評価）。これは効率43%セルを用いた場合、36.2%のモジュール効率に相当する。集光型太陽光発電システムにおいては、モジュール効率だけでなく、実際の発電量も重要である。温度上昇によるモジュール効率低下およびレンズの汚れに対する効率低下を最低限に抑制しなければならない。宮崎大学と共同で防汚コーティング、筐体構造の最適化、放熱コーティング技術を開発した。これら技術を取り入れた50kW発電システムをスペインに建設し、実証試験を開始した。これらの技術は高性能化のみならず、低コスト化および施工容易化に大きく供することになるものであり、平成27年度末までに実用化を目指す。

<成果発表件数>特許出願（外国）：0（0）、論文（査読付）：7（7）、研究発表・講演：14、新聞・雑誌等への掲載：1、展示会出展：1

【平成25～26年度】

1) 新材料・新構造太陽電池の創製及び評価解析技術の開発（豊田工業大学、再委託：宮崎大学、旭化成）

<H26 最終目標：Ⅲ-V-N系新材料、Ⅲ-V系オン・シリコン新構造太陽電池でセル変換効率30%以上を達成する。>

a) Ⅲ-V-N系新材料タンデム構造太陽電池の研究開発

Ⅲ-V-N系新材料 InGaAsN では、N 添加に伴う N 起因欠陥が太陽電池特性を劣化させることから、N 起因欠陥の解明が重要である。本研究開発では、不純物である水素 H と、窒素原子との複合欠陥（N-H 複合欠陥）に着目し、N-H 結合の局在振動による赤外吸収を①偏光赤外分光法、②一軸圧下における赤外分光法、③時間分解赤外分光法で測定した。また、試料を熱処理することで N-H 欠陥の濃度、構造が変化することから、N-H 赤外吸収ピーク強度の熱処理温度・時間依存性を検討した。これら複数の観測手段を適用することで、N-H 複合欠陥の構造や分類に関して、主な赤外吸収ピークとの対応を明確化した。また、GaAsN 膜の伝導帯サブバンドをフォトリフレクタンス法により直接測定し、N 添加に伴う電気的特性劣化の起因と考えられる窒素原子ペア起因の準位（NN）やクラスターの形成が成膜条件により変化することを確認した。流量変調 CBE 法で作製した GaAsN 膜では N 原子が比較的均一に分布していることが示唆された。これらは、良質な InGaAsN を成膜する為の有益な知見である。以上のことから、Ⅲ-V-N系新材料 InGaAsN に関して、新規の評価解析技術を適用することで、欠陥解明や欠陥密度低減に向けた知見が得られ、評価解析技術確立の研究目標を達成できたと考える。また、本研究開発で得られた研究成果は関連プロジェクトである「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発（集光型多接合）」にフィードバックされ、Ⅲ-V-N系新材料の高品質化、セル変換効率の向上に寄与した。

b) Ⅲ-V系オン・シリコンタンデム構造の研究開発

Ⅲ-V系オン・シリコン新構造では、中間評価時までには、シリコン上 GaAs 成膜で成長前の In 供給が双晶低減に有効であることを見出した。この双晶低減について、高輝度放射光施設 SPring-8 の X 線回折装置を組み込んだ分子線エピタキシャル成長装置(MBE-XRD)による X 線逆格子マッピングのその場観察により解析し、双晶低減メカニズムを検討した。In 供給は初期の双晶平均粒径を減少させ、回転双晶軽減には成長初期の島サイズを小さくする事が重要であると考えられる。また、EU との共同研究として、九州シンクロトロン光研究センターの X 線トポグラフィ測定装置を用いて、ブラウンホーファー研究所が作製した GaP/Si 試料の貫通転位密度の評価を行った。これら、高輝度放射光施設の設備を用いたⅢ-V系オン・シリコン新構造の評価解析により、シリコン上Ⅲ-V化合物層の高品質化に向けた知見が得られ、評価解析技術確立の研究目標を達成できたと考える。

また、Ⅲ-V系オン・シリコン新構造における新規バッファ層探索の成果として、Sb を同時照射する方法を用いて、300 nm 程度の薄膜バッファ層で、複雑な熱処理を行うことなく GaAs 中の欠陥密度を  $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$  まで減少させた。Si 基板上単接合太陽電池の試作を行い、バッファ層の有用性を確認した。単接合セルの材料品質の向上に注力したため、多接合セルの変換効率では目標を達成できていないが、理論的に目標の 30%を超える効率が期待できる貫通転位密度を達成した。

#### c) 集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発

InGaAs/GaAsP 歪補償量子井戸太陽電池に対し、フォトルミネッセンス法、圧電素子光熱変換分光法、表面光起電力分光法を適用し、吸収層でのキャリア再結合損失割合の評価手法の開発を行った。MQWs では井戸内でのキャリアが非発光的に再結合する過程は通常のバルク試料とは異なることが示唆された。i 層に量子井戸構造を用いた p-i-n 構造太陽電池の i 層におけるキャリア再結合損失を抑えるには、超格子構造を用いてミニバンドからのトンネル効果を利用することが有効であることを示した。

#### d) 先進構造による高効率集光型太陽電池の開発

集光型太陽電池モジュールに適した熱伝導モデルの構築および解析を行った。直接測定が困難な太陽電池セルの動作温度を見積もることで、効果的な放熱性能の検討を可能とした。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 5 (0)、論文(査読付) : 23 (22)、研究発表・講演 : 114、新聞・雑誌等への掲載 : 9、展示会出展 : 0 (受賞実績 : 1)

### 2) 集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発 (東京大学、再委託 : 神戸大学、タカノ)

<H26 最終目標 : 量子・ナノ構造太陽電池のセル変換効率 30%以上>

#### a) 量子・ナノ構造セルの研究開発

量子井戸の構造設計と MOVPE 技術の改善、単接合セルとしての性能評価を行った。1.15 eV は量子井戸セルでは未踏領域であるが、1.15 eV に吸収端を持ちキャリア収集に優れた量子井戸を実現することができた。開放電圧が同等の吸収端を持つバルクに比べて高いという量子井戸セルの特長が、吸収端を長波長化しても維持されることが明らかになった。今後格子整合 4 接合セルに必要な量子井戸セルを実現できる見通しが立った。

さらに集光下での応用に向けて、量子ドットセルを搭載した集光型モジュールを初めて試作し特性評価を行った。集光型中間バンド量子ドット太陽電池の開発では、2 段階光吸収による電流増大についてフォトリリング効果を考慮した定量評価法を確立した。集光型多接合太陽電池セルに適したシステムを開発し、各サブセルの電流電圧特性の測定結果を基に、サブセル毎の直列抵抗や並列抵抗などの特性値を数値解析で求める新しい方法を確立した。さらに、集光動作下でサブセル間の光学的なカップリング(ルミネッセンスカップリング)の影響を明らかにした。

#### b) 量子・ナノ構造集光型セルの評価解析技術の開発 (神戸大学)

超高速ストリークカメラを駆使してポンプ・プローブ方式の独自の超高速発光寿命評価解析技術を開発し、ナノスケールの量子構造における光励起キャリアの励起・緩和過程を超高速で追跡して、ダイレクトドーピングによる無輻射緩和抑制効果やサブバンド間光吸収特性と光励起キャリアの再捕獲特性を詳しく調べた。特に、InAs/GaAs 量子ドットにおける 2 段階光励起過程をピコ秒の時間スケールで追跡することに世界で初めて成功し、これまで不明であったサブバンド間光吸収係数を実験的に見積もった。また、量子ドット超格子構造を利用して電子の寿命を制御し、20%を超える光電流の増加を観測した。

<成果発表件数>特許出願(外国) : 3 (1)、論文(査読付) : 28 (28)、研究発表・講演 : 34、新聞・雑誌等への掲載 : 5、展示会出展 : 1 (受賞実績 : 4)

- 3) 先進構造による高効率集光型構造太陽電池の開発 (シャープ)  
 <H26 最終目標：セル変換効率 45%以上。>  
 逆エピ 3 接合セルの集光効率については平成 24 年度の間目標は公的機関測定値として達成できたが、平成 26 年度最終目標の 45%に対してはあと一步の 44.4%達成にとどまった。反射防止膜改良によって電流を 1%以上向上したセル作製には成功したので、45%達成の目途付けまではできたものと考えているが、45%達成に至らなかったのは、44.4%セルレベルの Voc や FF が得られていない、すなわち結晶性の再現ができていないためと分析している。またモジュールについては、他機関の検討結果も参考にしながら屋内測定と屋外測定の測定値の乖離要因を明確にすること、測定精度の向上が課題として残った。  
 <成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 0 (0)、研究発表・講演 : 7、新聞・雑誌等への掲載 : 1、展示会出展 : 0 (受賞実績 : 1)
- 4) 集光型太陽電池セル、モジュールの標準測定技術の開発 (産業技術総合研究所)  
 <H26 最終目標：多接合集光型太陽電池の性能評価において、変換効率の測定再現性が±0.5%以内の測定技術を EU 研究機関と共同で確立する。>  
 a) 集光型太陽電池セル評価技術  
 多接合集光型太陽電池の性能評価において、変換効率の測定再現性が±0.5%以内の測定技術を EU 側研究機関と共同で確立することを最終目標として研究開発を行い、セル測定、ミニモジュールの測定においてその目標を実現することができた。さらに、セル測定についてはフラウンホーファー研究所と比較測定を繰り返し最終的に良好な一致が確認できた。  
 b) 集光型太陽電池ミニモジュール評価技術  
 ミニモジュール測定については屋外測定との比較を実施し、比較的良い一致が得られている結果もあるが、屋外測定での経時変化とみられる現象もあり測定精度の検証は今後の課題である。  
 <成果発表件数>特許出願 (外国) : 0 (0)、論文 (査読付) : 1 (1)、研究発表・講演 : 3、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0 (受賞実績 : 0)
- 5) 高効率集光型太陽電池モジュールの開発と集光型太陽光発電システム実証 (大同特殊鋼)  
 <H26 最終目標：モジュール変換効率 35%以上、50kW 集光型太陽光発電システムのデータ収集・解析、発電量予測。>  
 集光型太陽光発電モジュール、システムの開発を、日欧共同で実施した。  
 集光光学系開発では、設計を欧州が担当し、日本のものづくり技術により実現させた。たとえば、レンズや 2 次光学系については、最初に欧州側から提示された設計は光学的には高度であったが設計不可能であった。何度も欧州側と議論と設計変更を重ね、最終的に光学シミュレーションで予測された通りの性能の光学系を実現できた。モジュール化の過程では新型光学系のアライメントをどうとるかが課題となったが、欧州側が開発した評価計測技術により、試作改良を行い、最終的に目標通りの光学性能を実現させた。  
 最終的に、37.7%セルを用いた 53 台 (計 16 kW) の中量試作で平均効率 31.3%が得られた。これは、プロジェクト全体の開発目標である 45%セルを用いた場合、37.8%のモジュール効率に相当し、開発目標を達成することができた。また、1,000 倍といった高い幾何学的集光倍率であるにもかかわらず、±1° の広い許容精度と、わずか 1% (標準偏差) の発電出力バラツキといった安定した性能が得られ、実用的な観点からも十分満足できる結果が得られた。  
 本モジュールを搭載した 15 kW システムを欧州側が評価した結果、標準動作条件での平均効率として 27.8%が得られた。これまで論文などで発表されているシステムでの効率としては 27%が最高であり、本成果はこれを上回るものであった。  
 <成果発表件数>特許出願 (外国) : 2 (1)、論文 (査読付) : 9 (9)、研究発表・講演 : 19、新聞・雑誌等への掲載 : 0、展示会出展 : 0 (受賞実績 : 2)

### 3. 成果発表の件数

各研究開発項目の成果発表件数を表 34 に示す。

表 34. 成果発表の件数

研究開発項目	特許出願		論文 (査読付)	研究発表 ・講演	新聞・雑 誌等掲載	受賞 実績	展示会 への出展
	国内	外国					
ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発	24	3	304 (297)	1,316	107	44	11
高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発	51	14	376 (315)	1,127	32	32	16
低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発	66	18	121 (119)	566	22	25	16
革新的太陽電池評価技術の研究開発	0	0	0 (0)	0	3	0	0
高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発	9	2	104 (101)	328	55	10	2
合計	150	37	905 (832)	3,337	219	111	45

平成 27 年 2 月末現在

※一部小項目の発表件数が重複しているため、表中の数と各項目の発表件数の総数とは一致しない。

## IV. 実用化の見通しについて

### 1. 実用化の見通し

本事業の研究開発終了時点における目標は、2050年における変換効率および発電コスト目標の達成へのアプローチを探索し、可能性を実証することである。

従って本事業での研究開発は、一般には実用化までもう一段、即ち次段階の実用化研究（量産化技術開発、スケールアップ研究開発、企業との共同研究など）に引き継がれる必要がある。

ここでは、現時点で考えられる各研究開発項目における実用化について表 35 にまとめる。

表 35. 各研究開発項目における実用化の状況・見通し

開発項目分野	実用化の状況・見通し
<b>①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発</b>	
1) 3接合太陽電池（格子不整合系）	<p>格子不整合系逆エピ3接合セル(InGaP/GaAs/InGaAs)において、非集光で37.9%(発表当時(2013年4月)全ての太陽電池での世界最高記録。2015年9月現在も3接合型では世界最高)、300-500倍集光下で44.4%(発表当時世界最高記録)を樹立した。本研究で得られた高効率化の成果は集光型太陽光発電の普及に大きな影響を与えていくと考えられる。つまり変換効率の向上分だけ、発電システム全体の導入単価(円/W)が低下することで、日射条件によっては結晶Siモジュール等の他方式と比較して発電コスト(円/kWh)が安価になる可能性につながる。特に高温高日射地域での発電コスト低減には本技術が非常に有効であり、本研究開発で実施した集光型システムのフィールドテストで取得したデータでは、国内の約2倍の日射量のある米国アリゾナ州で同容量の結晶Si太陽電池と比較して1.2倍以上の発電量が得られている。</p> <p>世界における集光型太陽光発電(CPV)の導入状況としては、Amonix、Guascor Foton、Soitec、Solar Systems など民間企業による 10MW 級大規模発電の導入が進んでいる。今後の大規模 CPV 導入にあたっては、モジュール変換効率向上による必要面積の低減が導入コストの削減に大きく貢献する。日本は CPV の世界展開において後れを取っているが、本研究開発の成果をもとに 1,000 倍集光の超高効率モジュールを市場投入し、トータルコスト面での競争力を武器にシェアを増やすことは可能である。ただし、海外の高照度地域へのシステム導入には、国内のセル・モジュールベンダーだけでなく、国内プラントエンジニアリング企業、さらに現地企業との密接な協力が不可欠である。また、中東産油国は高照度と豊富な資金により大規模太陽光発電の導入対象として魅力的、経済合理性の高い市場と目されるが、文化の差異など我が国の市場参入には障壁が大きい。このような課題を解決して世界規模での大規模太陽光発電の導入を図るため、東京大学では寄付講座”Global Solar+ Initiative”(GS+I)を設置し、サウジアラビア等中東産油国への大規模太陽光発電導入に向けた経営戦略・技術両面からのアプローチを行っている。本事業の主要メンバーであるシャープもGS+I のなかで活動している。このような取り組みを通して、本研究開発の成果である超高効率太陽光発電モジュールが米欧豪など既存の CPV 普及国だけでなく新たな市場に導入される日は間近であると考えている。</p>
2) 3接合（格子整合系）、4接合	<p>量子井戸あるいはGaInNAs(量子ドット挿入型を含む)をミドルセルに用いる格子整合系3接合セルは、先に高効率セルの実証が進んでいる格子不整合系に比べてエピタキシャル成長の層厚を大幅に低減でき、コスト削減のために魅力的である。実際、シャープと集光セルの最高効率を競っているSolar Junction社の3接合セルは、GaInNAsを用いた格子整合系3接合である。本事業における格子整合系3接合の開発状況としては、すでに量子井戸あるいはGaInNAsミドルセル単体での性能において、最終目標とする3接合セルの効率45%を達成するのに十分な性能を実証している。また、</p>

	<p>東京大学・シャープ間のウェハシャトルにより量子井戸超格子をミドルセルに含む格子整合系3接合セルを実装し、電流整合が確認されている。本成果をもとに、電極・コンタクト抵抗の低減など格子不整合セルで行われてきた構造最適化を進めることで、格子不整合セルと同様の世界最高水準の変換効率を近い将来達成できると考えられる。</p> <p>一方、4接合セルに関しては、最終目標値として3接合セルを上回る変換効率48%を掲げているが、現在もっとも開発が進んでいる格子不整合系で4接合を実現するには解決すべき課題が多い。格子整合系では、GaInNAsミドルセル単体で4接合化に十分なバンドギャップ1.0eVをすでに達成しており、水素MBE法により開発したGaInNAs:Sb薄膜を用いたn-GaAs/i-GaInNAs:Sb/p-GaAsダブルヘテロ太陽電池では、GaAsフィルタ下の短絡電流として12.2mA/cm<sup>2</sup>の世界トップレベルの値を実現した。また、実際にシャープとのウェハシャトルにおいて、GaInNAs:Sb/Ge 2接合セルにおいて短絡電流19.6mA/cm<sup>2</sup>を達成し、またInGaP/GaAs/GaInNAs:Sb 3接合セル、及びInGaP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge 4接合セルを試作検討し、ウェハシャトルの有効性を示した。</p> <p>なお、結晶成長プロセスの観点からは、量子井戸ミドルセルを用いた格子整合系3接合セルは1台のMOVPE装置でボトムセルからトップセルまで連続して作製可能である(東京大学で開発した量子井戸の成長技術をシャープに移転する。)。一方、GaInNAsに関してはMBEによって高性能の結晶を得ることに成功したが、MOVPEによって同等性能の結晶を得るにはさらなる研究開発が必要である。したがって、GaInNAsを用いた格子整合系多接合セルの作製には、生産性に優れたMOVPEをベースにGaInNAsのみMBEで成長するというウェハシャトルプロセス(本事業での開発ターゲット)が当面のスタンダードになると考えられる。これらのセルは、すでにモジュール実証に取り組んでいる格子不整合3接合セルに対して、コスト削減(格子整合系3接合)、変換効率向上(4接合)というメリットを有しており、集光モジュールの設計を変更することなくセルのみ置換することが可能である。したがって、まずは現在高性能を達成している格子不整合系3接合セルを用いてモジュールレベルの性能実証を推進し、その後、よりメリットの大きなセルの実用見通しが立った際にセルのみを置換することが可能となる。</p>
<p>3) メカニカルスタック トップセル・ボトムセル</p>	<p>多接合セルの表面あるいは裏面に別のセルをメカニカルスタックし、数%の変換効率向上を目指すアプローチは、新たに付加するセルがメインの多接合セルに比べて十分低コストであれば効率向上の手段として魅力的である。</p> <p>多接合セルの表面に450nmよりも短波長を吸収するInGaNトップセルをスタックするアプローチに関しては、すでに実用に十分な単セルの性能が得られている。多接合セルとのメカニカルスタックを作製し、開放電圧の向上は確認したが、素子抵抗の増大などの課題も確認できた。したがって、現在中間層に透明電極であるITOを挿入する構造を検討しておりその効果を実証するための検討を開始しているところである。なお、このアプローチで最高の変換効率を得るためには、ベースとなる3接合セルについて青色光がなくても完璧な電流整合をとれるよう、結晶組成を若干調整する必要があるが、十分対応可能な範囲である。窒化物半導体の結晶成長はLED用途で大幅な低コスト化をすでに達成しており、メインとなるInGaP/GaAs/Ge3接合セルに比べて十分低コストで付加すべきInGaNトップセルを作製できる。なお、このアプローチは、窒化物半導体デバイスにおける世界のメッカともいえる米国UCSB大と、多接合セル発展の祖であるNRELが共同で取り組んでいるものであり、競争は激しいが、その分実用性が高い(極めてフィージビリティの高い)ターゲットであるといえる。一方、Geボトムセルの下部に設置するナローギャップセルに関しては、本事業で適切なバンドギャップで光電変換できるナノ材料の開発までは完了しており今後多接合セルとのメカニカルスタックに必要なナローギャップセルの性能向上に継続して取り組んでいく。</p>



4) InGaN多接合セル	<p>シリコンボトムセル上にInGaNセルをスタックした多接合セルは、現在LED用途に開発されているシリコン基板上の低コストInGaN結晶成長・プロセス技術を応用できるため、変換効率35%程度の低コスト多接合セルとして実用上魅力的である。この目的のためにはLED用途に比べて高In組成のInGaN結晶が必要であるが、本研究開発において独自技術であるパルススパッタ法でIn組成0.5までの高品位InGaN結晶の成長に成功し、単セルの性能評価を行った。実用化に向けて残る課題は、Si上のInGaN結晶成長およびInGaNサブセル間のトンネル接合形成である。これまでにPSD法を用いたSi基板上への窒化物系素子作製技術を開発し、InGaNを用いた青色LEDやAlGaIn/GaN系HEMTが正常に動作することを確認しており、素子応用可能な品質の窒化物半導体薄膜が成長可能であることを見出している。現在、本事業において構築したInGaN成長技術を用いて、Si基板上へのInGaNセル構造作製技術のブラッシュアップに取り組んでいる。</p>
5) 量子ドット中間バンドセル	<p>平均直径24nm、面内密度<math>5 \times 10^{10}/\text{cm}^2</math>を有する50層積層InAs/GaNAs歪み補償量子ドット超格子セルの開発に成功する一方、光マネジメントにより量子ドットの吸収を4倍に増強するめども立っており、量子ドット中間バンドセルに必要なデバイス構造を作製する技術は完成域に達しつつある。また、量子ドット(中間バンド)を介した2段階光吸収によるセル動作を室温で実証(世界初)し、中間バンドセルの効率改善を進めた。中間審査の段階では、100倍集光下で20.3%が最高効率であったが、その後電流制御した低電流・高電圧型量子ドットセル構造を考案し、72倍集光下で26.8%(認証機関データ)、230倍集光で29.6%(自前測定)の世界最高効率を達成した。集光動作に適したセル設計を進めることにより効率35%以上が見込み、集光効率40%(最終目標)の達成及び実用化にめどをつけた。さらに、本事業終了後も継続して量子ドットの構造設計および薄膜セル化を進めることにより、平成32年頃には、低倍集光で効率30%以上の低コストセルの実現を目指している。なお、製造プロセスに関しては、当面はMBEによる結晶成長を考えている。MOVPEに比べて生産性は低いが、中間バンドセルは多接合セルに比べて必要な層厚が1/3程度であるため、大きな問題にはならないと見込んでいる。一方、本事業の成果として得られた高効率量子ドット中間バンドセルの構造を、本事業終了後の取り組みにおいてMOVPEにより作製可能にすれば、多接合セルに比べて層厚が小さい分、生産性の高い低コストな作製プロセスを構築可能である。すなわち、量子ドット中間バンドセルは、その完成形態において、変換効率および太陽光スペクトルの変動に対する耐性の強さにおいて既存の多接合セルを凌駕するのみならず、多接合セルに比べて十分低コストなセルとして市場に普及できる可能性を持っている。</p>
6) 量子構造挿入極薄GaAsセル	<p>量子構造(井戸・ドット)挿入GaAsセルからGaAs基板を除去して極薄化し、裏面に光の多重反射を誘起するテクスチャを形成することで、光閉じ込めにより量子構造(井戸・ドット)の光吸収を4倍以上に増強し、効率30%超のGaAs単セルを作製できる見通しを得た。</p> <p>平成24年5月、米国Alta Devicesが、厚さ数<math>\mu\text{m}</math>のGaAsセルにより、従来のGaAs単セルでの変換効率記録を大きく凌駕する28.3%という変換効率を実証し、新たな市場を開拓する高効率薄膜単セルとして世界中の注目を集めている。本研究開発で目指す極薄セルは、Alta Devicesのセルと極薄である点は類似しているが、量子構造を挿入して裏面テクスチャを施す点でより高度なセルであるといえる。しかし、作製コストに関してはAlta Devicesのセルと大差なく、より高効率を達成できる点で優位性を持つと考えられる。</p> <p>このような極薄セルは、GaAsを使用しているものの、基板を再利用することで原料コストの大幅低減を図っており(現在、米Microlinkが計5回まで基板を再利用する技術を開発している)、100倍程度の中規模集光システムと組み合わせることで既存のシリコンパネルに対して十分価格競争力を持つと考えられる。一方、モジュール効率として25%は達成できる見込みであり、現状のシリコンパネルに対して、同一設置面積で2倍程度の電力が得られ</p>

	<p>ることは極めて大きな魅力である。したがって、太陽電池の設置可能面積に対して、より大きな発電量を要する商業施設、公共施設、さらにマンションなどの屋上設置用途に対して大変魅力的なソリューションであるといえる。</p> <p>ただし、このような低倍集光システムの有用性はごく最近認識されたばかりであり、本事業に続くプロジェクトにより高効率モジュールの実現と低コスト化技術の開発を推進している。</p>
<p><b>②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発</b></p>	
<p>1) メカニカルスタック・デバイス化技術の開発</p>	<p>メカニカルスタック技術の開発により、実用的な多接合太陽電池の基本技術は確立したと考える。個別セルの性能向上および最適設計により、世界最高性能である変換効率 40% (非集光) も可能である。また、本技術は、III-V系、Si系、カルコゲナイド系等の異種材料セルを融合する技術であり、これらの自在組み合わせにより高効率・低コストを両立する太陽電池の扉を開くものである。本成果は、次期 NEDO プロジェクトテーマ「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発／革新的新構造太陽電池の研究開発／超高効率・低コスト III-V 化合物太陽電池モジュールの研究開発」に継承されるが、早期に量産性等の実用化技術に目途をつけ、次世代高効率/低コスト太陽電池のキーテクノロジーとして適用をはかる。</p> <p>ヘテロ接合デバイス化技術において開発した a-Si 系ヘテロ接合層のバンドオフセット評価技術とバンドギャップ最適化技術は、現行の単結晶シリコン系ヘテロ接合太陽電池にも適用可能であり、波及効果として早期の応用が期待できる。また開発したヘテロデバイス化プロセスは量産ベースで低 Eg 材料プロセスに適用可能であり、デバイス特性の向上が図れれば早期の実用化が期待できる</p> <p>高度光閉じ込め基板 (FLiSS) の概念は、材料を問わず各種薄膜太陽電池に適用可能な汎用性を持つものであり、実際に、本研究開発において薄膜シリコン系および GaAs 太陽電池において長波長感度の向上を確認した。従って、超高効率多接合太陽電池にも展開可能である。また、基板平坦性が特に重視される有機薄膜太陽電池においても有用な技術となり得る。実用化に向けては、本コンセプトを低コストに実現する製造技術の確立が必要とされる。一方、プラズモン応用高度光利用技術については、金属ナノ粒子という比較的簡便な方法で粒形状などの条件によって光増強波長を調整可能であるため、多接合構造を持つ太陽電池で広く応用することが可能であると考えられる。</p>
<p>2) ボトムセルの開発</p>	<p>SiGe 系薄膜ボトムセルの開発では、バルク Si 基板上に形成する SiGe 単結晶薄膜の高品質成長のために組成傾斜バッファ層を開発し、極めて低い転移密度が得られ、SiGe 太陽電池を開発する上での基本的技術を確認できたと考える。今後、ヘテロ接合作製技術のようなデバイス化技術を更に進展させることにより変換効率の更なる向上が見込まれ、実用化が期待できる。なお、この組成傾斜バッファ層を用いた高品質 SiGe 薄膜作製技術は太陽電池以外のデバイス応用においても有効であり、波及効果が極めて大きいと期待される。一方、SiGe 系薄膜作製技術として、反応性 CVD 法は構成が単純で、成膜速度も速く、大面積化も容易であることを実証できており、また、低温形成のバッファ層の形成と熱アニールによって形成したシード層を用いた 2 段階成長法は貫通転移の局在化と密度の低減を実現しており、フッ素による不純物汚染を十分に抑制できる装置設計を行えば、SiGe 系の単結晶薄膜の低温高速成長法として実用化の見通しは十分にあり、セルの最適化により実用化が期待できる。また、固相成長法でも、配向した SiGe 結晶薄膜形成に成功しており、今後の応用展開に期待が持てる。</p> <p>近～中赤外の幅広い領域でバンドギャップの制御が可能で光電変換材料として有望な強相関有機材料について、本研究を通して、単一成</p>

	<p>分系有機半導体に比べて例外的に長い拡散長を有し、かつ近赤外での光電変換が可能なが示されるとともに、新たな材料設計により、実用化において重要な高均質な薄膜化が可能なが実証されており、新たな電子機能性有機材料として様々な分野での実用化が見込める。イオン液体を用いた高温真空下での有機薄膜・結晶の作製は、既存の溶媒-冷却法と比べて、遥かに短時間で作製することができるが、このような高速合成は、実用化において重要な要素である。また、作製した有機単結晶・薄膜は、電界効果トランジスタによる移動度の評価から、半導体としての特性にも優れ、有機太陽電池としての動作も確認しており、新たな有機単結晶合成法として様々な分野での実用化が見込める。有機単結晶のテンプレートとしての応用を念頭に本事業で作製に成功した種々のナノパターンを施したガラスやポリマー基板は、量産性もあり、有機薄膜成長での多形や配向制御に有効であるが確認され、さまざまな分野で十分に実用性があると期待される。実際、当該ナノパターン基板については、ガラスやポリマー化学関連および電気エネルギー関連企業からの問い合わせも受けている。</p> <p>半導体 CNT の大量抽出技術では純度 99wt%、抽出率 30wt%を達成しているが、高純度半導体 CNT は最先端ナノエレクトロニクス（トランジスタなど）への波及効果も期待できる。一方デバイスとしては、単一半導体 CNT で作製した素子において赤外光吸収による太陽電池動作を実証し、変換効率 4%以上、外部量子効率 100%以上（CNT 面積換算）を達成した。また多重励起子生成と考えられるピークの観測に成功し、赤外光利用太陽電池の高効率化につながる要素技術として期待できる。さらに高純度半導体 CNT 薄膜への空間選択的原子・分子内包技術の開発に成功し、面内 pn 接合太陽電池において太陽光発電の観測に成功している。空間選択的ドーピング技術はその他の最先端ナノエレクトロニクス分野への波及効果も期待できるものである。</p>
3) トップセルの開発	<p>量子サイズナノ結晶シリコンにおいては、自立膜の面積化など作製技術の高度化、バンドギャッププロファイル制御、光電子特性の発現と基礎評価などの要素技術に関しては当初目標をほぼ達成した。太陽電池素子としての可能性も実証でき、ナノシリコン系としては例を見ない高い開放電圧を確認した。短絡電流密度と曲線因子が不足しているが、それらを制限している主因子は判明し、改善する具体策を定めた。その方法で自立膜セルを作製し、トップセルに適う分光感度と高い開放電圧を維持して光電変換効率が高まることを確認した。</p> <p>III-V 化合物系トップセルについては、その作製コストの削減が最も重要な課題である。次期 NEDO プロジェクトテーマ「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発／革新的新構造太陽電池の研究開発／超高効率・低コスト III-V 化合物太陽電池モジュールの研究開発」において、新しい結晶成長技術の開発により低コストトップセルの実現を目指す。スマートスタック技術を用いて低コスト Si、または CIGS ボトムセルと多接合化を行い、実用化を目指す。量子ドット太陽電池については、変換効率の大幅な向上に寄与するほどの 2 段階光吸収効果が確認されていない。実用化のためにはその実現が急務であり、InGaP 系を用いた理想的な中間バンド太陽電池により研究の進展が期待されているが、いまだ不十分である。タイプ II 構造量子ドットの利用等、今後のさらなる研究展開が必要である。</p> <p>カルコゲナイド系化合物は、構成元素やその組成比でバンドギャップを制御できるため、多接合用トップセル材料として有望である。本事業では、Cu(InGa)(SSe)<sub>2</sub> や ZnCuInS<sub>2</sub>、ZnCuGaSe<sub>2</sub> などの新規ワイドギャップ材料に対し系統的に太陽電池の作製と評価を実施しており、実用化に向けた高効率化のための要素技術を確認した。また、開発し</p>

	<p>たS供給量の in-situ 制御技術は、多くの製膜プロセスに応用可能であり、大きな波及効果が期待される。一方、スプレー塗布法による均質薄膜の作製と焼成法による結晶成長の要素技術の確立から、塗布の特長である面積の調整により、様々なサイズの高効率太陽電池を提供することで、BIPV 等さまざまな応用展開の可能性が高まった。</p>														
<p><b>③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発</b></p>															
<p>(1) 低倍率集光システムの早期実用化</p> <p>本テーマでは、波長スプリットティングと低倍率集光を組み合わせた新しいPVシステムを提案したが、本格的な実用化を目指し、まず低倍率集光システムの有効性を年間発電量という観点、ならびに発電コストという観点で検証する必要がある。その際、用いる太陽電池は、CIGS太陽電池あるいは、結晶Si太陽電池が有望である。</p> <p>CIGS太陽電池に関しては、低倍率集光下で、本テーマで変換効率20.3%(6.5 suns)、NRELでは変換効率23.3%(15 suns)という素晴らしい成果が得られている。また、低倍率集光 (LCPV) 用 Si太陽電池については、米国SunPower社が精力的に市場開拓を行っており、2019年にはLCPV用の自社生産量が年間1.5 GWになるとの見通しを公表している。また低倍率集光であれば、現在、同社で製造しているSiセルを何分割かして、そのまま集光用に利用できることが報告されており、発電コストの低減に有効である。低倍率集光を用いれば、1 GWのセル製造で、低倍率集光 (10suns) により、10 GWの出力が得られる。</p> <p>これらの低倍率集光システムを図りつつ、本テーマで開発を行った薄膜系光吸収層材料の高品質化を図れば、2020年以降には、次第に幅10cm、長さメートルサイズの波長スプリットティング用長尺モジュールが試作されるものと期待される。</p> <p>一方、Si 薄膜太陽電池をトップセルに用いた場合は、熱放射ならびに透明導電膜のシリーズ抵抗の問題を解決する必要がある。これらの課題を解決するには、従来のガラス基板に代わり、熱放熱の優れたメタル基板を用いたセル構造が望まれる。</p> <p>また、アモルファス Si 系トップセルの利点を生かすには、低緯度帯での実用化が望まれる。これは、アモルファス Si 太陽電池は、短波長感度に優れるため、平均太陽光スペクトルが AM1.5 より AM1 に近い地域での動作が有利となるためである。また、アモルファス太陽電池は、温度特性に優れることから低緯度帯での実用化が魅力的である。</p> <p>(2) オール Si タンデム太陽電池への適用</p> <p>本テーマの考え方、すなわち波長スプリットティング・低倍率集光方式は、現在、福島復興事業として実施されている文部科学省「革新的エネルギー研究開発拠点形成事業 ―ナノワイヤー太陽電池」</p> <p>研究総括： 小長井 誠（東京工業大学大学院理工学研究科 教授）  事業実施期間： 平成 24 年度～平成 28 年度（5 年間）  拠点形成支援機関： 独立行政法人科学技術振興機構</p> <p>にも引き継がれている。この事業では、Si のみを用いて変換効率 30%以上を狙うという挑戦的な課題に取り組んでおり、将来的には、ワイヤー型トップセルと c-Si ボトムセルを用いた波長スプリットティング太陽電池の実現を目指している。</p>															
<p>1) シリコン系薄膜集光型セル</p>	<p>本研究ならびに他研究機関で開発されたセルを持ち寄り、波長スプリットティング特性の測定を行い、以下の成果を得た。</p> <table border="0"> <tr> <td>a-Si//CIGSで変換効率</td> <td><math>\eta=23.0\%</math></td> </tr> <tr> <td>InGaP//GaAs//CIGSで</td> <td><math>\eta=28.9\%</math></td> </tr> <tr> <td>a-Siと高効率Siセルで</td> <td><math>\eta=25.1\%</math></td> </tr> <tr> <td>InGaP//高効率Siセルで</td> <td><math>\eta=29.5\%</math></td> </tr> <tr> <td>InGaP//GaAs//CIGSで</td> <td><math>\eta=28.9\%</math> (1sun)</td> </tr> <tr> <td>InGaP//GaAs//c-Siで</td> <td><math>\eta=31.2\%</math> (1 sun)</td> </tr> <tr> <td>InGaP//GaAs//c-Siで</td> <td><math>\eta=38\%</math> (50 sun) (推定値)</td> </tr> </table> <p>この他  ペロブスカイト//c-Siで<math>\eta=28.0\%</math> (1 sun)  を得るなど、当初の開発目標をほぼ達成することができた。</p>	a-Si//CIGSで変換効率	$\eta=23.0\%$	InGaP//GaAs//CIGSで	$\eta=28.9\%$	a-Siと高効率Siセルで	$\eta=25.1\%$	InGaP//高効率Siセルで	$\eta=29.5\%$	InGaP//GaAs//CIGSで	$\eta=28.9\%$ (1sun)	InGaP//GaAs//c-Siで	$\eta=31.2\%$ (1 sun)	InGaP//GaAs//c-Siで	$\eta=38\%$ (50 sun) (推定値)
a-Si//CIGSで変換効率	$\eta=23.0\%$														
InGaP//GaAs//CIGSで	$\eta=28.9\%$														
a-Siと高効率Siセルで	$\eta=25.1\%$														
InGaP//高効率Siセルで	$\eta=29.5\%$														
InGaP//GaAs//CIGSで	$\eta=28.9\%$ (1sun)														
InGaP//GaAs//c-Siで	$\eta=31.2\%$ (1 sun)														
InGaP//GaAs//c-Siで	$\eta=38\%$ (50 sun) (推定値)														

	<p>一方、実際に波長スプリットング特性を測定したところ、低倍率集光型波長スプリットング太陽電池の実用化を図るには、さらに以下の技術課題を解決する必要性のあることが分かった。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) ワイドギャップSi系薄膜セル、ワイドギャップCIGS系薄膜セルのいっそうの高品質化、高効率化。</li> <li>2) 10倍程度の低倍率集光動作に適した電極の設計。</li> <li>3) 低倍率集光に相応しいセルの冷却装置。</li> <li>4) 波長スプリットング特性の標準測定法の確立。</li> <li>5) 低倍率集光型波長スプリットング太陽電池の屋外出力特性の長期データの蓄積と、発電特性予測、発電コスト予測、特質の明確化。</li> </ol>
1)-1 再委託 SiO評価	<p>光吸収評価を用いて、セル構造から直接にSiO光吸収層の欠陥を評価する基盤技術を確立した。この評価技術は、セル構造での光吸収評価が可能のため、高効率太陽電池の実現に向けた迅速かつ有益な情報が得られる評価技術の一つと考えられ、今後各種太陽電池の評価技術としての利用が期待できる。</p>
2) 広バンドギャップ シリコン系薄膜	<p>広バンドギャップシリコン系薄膜 (a-SiC:H, a-SiO:H) については、広バンドギャップ化による高 Voc 化に成功しており、一般的な現行の生産設備に対して小さな負荷で適用可能であることから、今後更なる改善が進めば、多接合セルのトップセルとして実用化の可能性は高い。また、バンドギャップの可変域が広いことから、波長スプリットング構造の分割波長に合わせた最適設計が可能となるため、波長スプリットング構造の実用化に重要な役割を担っている。なお、信頼性については課題があり、実用化の際には十分な検討が必要である。</p>
3) カルコパイライト系 剥離セル	<p>カルコパイライト系材料は高効率太陽電池の光吸収層として期待されているものの、成長温度に500°C程度が必要とされるため、多接合セル作製の際には透明電極やpn接合の熱的耐久性を考慮しなければならない。連続的にボトムセル上にトップセルを形成すると、ボトムセルのpn接合が破壊されるために高効率化することが難しい。この問題は、トップセルとボトムセルとなるカルコパイライトセルを個別に作製し、トップセルを剥離してボトムセルと接合すること解決でき、高効率多接合セルの実現に繋がる。本プロジェクトでは、カルコパイライトの機械的な剥離技術とカルコパイライト裏面にオーミック接合を形成可能な透明電極を開発し、カルコパイライト剥離セル作製の基本技術を確立した。本技術は今後の高効率多接合カルコパイライト太陽電池への適用ならびにその他の化合物薄膜太陽電池への適用も期待できる。さらに、透明かつフレキシブルな貼りつけ基板を用いれば、高効率・フレキシブルなカルコパイライト太陽電池へも展開できる。</p>
4) カルコパイライト系 集光型セル	<p>カルコパイライト系集光型セルにおいては、トップセルの効率制限要因、およびミドルセルの高効率化の指針を明らかにしてきた。即ち、トップセルのAg(InGa)Se<sub>2</sub>に関しては光吸収層の正孔濃度が低いこと、ミドルセルのCu(InGa)Se<sub>2</sub>においてはCdS/CIGS界面の価電子帯オフセット(ΔEv)が重要であることを示してきた。また、これら技術開発として、AIGSへのNa添加、CIGSへのCu(InGa)<sub>3</sub>Se<sub>5</sub>相の挿入と、それぞれの開発項目を明確にしている。プロジェクト終了後は、本研究開発で得られた成果を元に、事業化・実用化研究を実施することにより、高効率化セルを用いた発電システム事業へとその展開が期待される。</p>
5) Cu <sub>2</sub> SnS <sub>3</sub> 系薄膜 およびセル	<p>Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub>系太陽電池は非真空プロセスで変換効率2.43%を達成していることから、さらにプロセスを最適化することで、高効率化が期待で</p>

	<p>きる。Cu<sub>2</sub>SnS<sub>3</sub>系太陽電池は禁制帯幅の狭い化合物薄膜太陽電池として有望であることから、タンデム型太陽電池のボトムセルとしての実用化が期待出来る。</p>
6) CIGS系ボトムセル	<p>CIGS系ボトムセルについては、デバイス・シミュレーションに基づく最適ナローギャップCIGS製膜法を開発し、最終目標効率を上回る変換効率5.5%を880nmスプリター下で達成した。これをボトムセルとした波長スプリティング型セルで22%以上の高効率が得られたことから、本研究で開発したナローギャップCIGS太陽電池のボトムセルとして有効性を実証できた。近い将来、さらなる高性能化により、ナローギャップの特性を活かしたタンデム型太陽電池のボトムセルとして実用レベルに達する見通しである。また、800nmフィルター下での変換効率も7%以上であることから、ペロブスカイト太陽電池をトップセルとした薄膜タンデム型セルへの応用展開、実用化が期待できる。</p>
7) p型透明導電膜 (新潟大学の一部を共同実施)	<p>本研究により、BaCuSeF系p型透明導電膜が化合物薄膜太陽電池の裏面電極としてカーボン等の従来用いられていた不透明電極と同等の性能を示すことを実証した。また、BaCuSeFの構成元素を他の元素で置換することにより、価電子帯のトップのエネルギーレベル制御可能であることも確認した。今後、これらの薄膜を他の太陽電池へ展開することで、実用化への可能性がさらに高まる。p型透明導電膜は太陽電池以外の幅広い分野への応用も期待出来、その波及効果は非常に大きい。</p>
8) フルスペクトルTCO (トップセル用TCO)	<p>界面での反射防止、高透過基板の採用によって、従来比6%以上の高透過率を有するTCO基板の開発を行った。平成24年度までにヘイズ率制御技術も確立しており、薄膜太陽電池の高効率化、実用化が期待できる。</p>
9) 新型TCO/p-SiO界面技術	<p>新構造TCO電極は薄膜フルスペクトル太陽電池トップセルへの適用に必要な吸収端波長320nm以下、1100nmの透過率80%以上の性能目標を達成し、且つ従来技術で作製可能なため実用化の可能性は極めて高い。 TCO/p-SiO界面接合技術はa-Si系太陽電池セルにてVoc=1.05Vの高Vocを実証してVoc=1.1V超を達成できる可能性を検証できたため、材料選定や作製プロセス改善により実用化が期待できる。</p>
10) 光学設計/システム化技術	<p>オプティカルスプリッタについては、大面積化・量産化が容易な領域であり、本プロジェクトで検討したスプリッタの設計方法、及び、市販されている大型のマルチソーススパッタ装置や蒸着装置を用いる事で量産化が可能である。また、フルスペクトル太陽電池のシステム構造にも容易に導入する事が可能であり、実用化が近い技術である。 前回実施したオプティカルスプリッタによるオールシリコンの多接合太陽電池での高変換効率の実証に加え、今回は更に、世界で初めてペロブスカイト型太陽電池とヘテロ接合結晶シリコン太陽電池によるオプティカルスプリティング構造を検証し、非常に高い変換効率を得ることができた。これにより、オプティカルスプリッタの光学ロスが極めて小さいことを、実際のオプティカルスプリティング構造で示すことができたと考える。また、このように、製造プロセスの異なる様々な太陽電池を容易に組み合わせることが出来る点も、本技術の早期実用化に向けた利点である。 更に今回は、トラフ型一軸追尾低倍率集光システムにボックスを導入し、その中に15cm角のオプティカルスプリッタを搭載したオプティカルスプリティング構造を封入する形で屋外評価を実施し、屋外においても十分システムが機能することを実証した。同時に、集光時の低角入射による光学ロスや封入方法等、実用化に向けた課題出しも行うことができた。 本プロジェクトにより、オプティカルスプリティング構造における高変換効率実現の可能性、及び、屋外システムへの導入の可能性を</p>

	<p>実証することができ、実用化に向けた足掛かりを構築できたと考える。今後は、信頼性の向上や、コスト低減等に関する技術課題の解決により、オプティカルスプリッティング構造の早期実用化が実現すると考える。</p>
11) 低倍率集光システム	<p>集光・追尾システムにおける散乱光の捕集技術は、将来、太陽光パネルに対し、太陽光追尾を求める要望が生じた際、大きな効果を持つものであり、実用化による価値創出が期待できる。</p>
<b>④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）</b>	
1) 集光型多接合太陽電池評価技術	<p>本研究開発の実用化とは、開発された集光型太陽電池の屋内性能評価技術・屋外性能評価技術が太陽電池出力定格または発電量定格等に関する JIS 規格・IEC 国際規格等の標準に採用され産業界に使用されること、および評価技術の普及により集光型太陽電池の技術開発・大量導入・国際競争力の醸成等に貢献することを指す。実用化の見通しとしては、汎用性の高い評価技術、具体的には様々な集光方式やシステム構造等に対応した公正かつ高精度な評価手法を開発し、開発した評価手法・実証データ等を規格委員会に提案および審議を進めることにより可能となる。</p> <p>現在、引き続き NREL と屋内・屋外性能評価技術についてデータ計測・議論・比較検証による評価技術開発検証を進めるとともに、IEC/TC82/WG7 において集光型太陽電池関連の評価に関する「集光型太陽電池発電量評価技術（IEC62670-2 Draft）」および「集光型太陽電池出力の補正技術（IEC62670-3 Draft）」の規格審議が進んでおり、産業技術総合研究所からも会議・議論に参加している。同じく IEC/TC82/WG2 と連携して、既存の平板型太陽電池評価に関する規格に集光型太陽電池に必要な内容を盛り込むための審議も「基準太陽光スペクトル下での評価（IEC60904-3）」および「太陽電池評価用ソーラーシミュレータ（IEC60904-9）」等が進んでおり、審議に参加している。これらを通して本研究開発の成果が採用され実用化される可能性は高い。</p>
2) 薄膜多接合太陽電池評価技術	<p>本研究の性能評価開発に関わる実用化とは、①と同様に開発された集光型太陽電池の屋内性能評価技術・屋外性能評価技術・信頼性評価技術が太陽電池出力定格または発電量定格等に関する JIS 規格・IEC 国際規格等の標準に採用され産業界に使用されること、および評価技術の普及により集光型太陽電池の技術開発・大量導入・国際競争力の醸成等に貢献することを指す。</p> <p>革新的太陽電池開発において、ヘテロ接合界面の価電子帯および伝導帯のバンドオフセットを知ることは、デバイス構造を設計あるいは太陽電池諸特性を理解するうえで非常に重要である。従って、今回得られた成果などを基本として、各種半導体層を接合させた際のバンドアライメントライブラリーを作製することにより、革新的太陽電池の作製、太陽電池の高性能化に貢献できると思われる。太陽電池開発に特化した評価手法及び装置の実用化の可能性が期待される。</p> <p>走査型プローブ顕微鏡等を用いた薄膜多接合太陽電池の微視的評価は高性能化・太陽電池生産に直接貢献するものではないが、革新的太陽電池開発においては、ナノ構造等の微視的構造が基本的な重要性を持つ材料群が積極的に利用される傾向があり、その諸特性の基本的な理解及び性能向上に向けた指針を得ることは重要な課題である。従って、今回得られた成果などを基本として、太陽電池開発に特化した微視的評価手法及び装置の実用化の可能性が期待される。</p> <p>薄膜 X 線回折装置を用いた薄膜多接合太陽電池の材料評価において、高性能化・太陽電池生産に必要な不可欠のものである。特に、革新的太陽電池開発においては、新概念太陽電池、例えば有機単結晶、ナノカーボン、ナノシリコン、強相関材料のセル中の結晶構造、化合物</p>

太陽電池の組成による結晶構造、メカニカルスタックによる界面構造などの精密な制御が高性能化に重要である。将来的な大量生産において、これらの太陽電池材料の構造制御によるセル化において、その生産管理に用いられると期待される。

短パルスレーザーを用いた革新的材料評価技術として、革新的太陽電池材料開発のための評価手法として、本設備を用いた超高速時間分解発光スペクトル法は、解析・評価ツールとして有効であり、今後新たな革新的材料開発・分析のための評価手法として大いに期待できる。

**⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日EU共同開発）**

日EUの共同研究開発により、集光型太陽光発電の研究開発の効率化と加速化が可能で、本事業の2050年ターゲット「モジュールの変換効率40%以上、電力コスト7円/kWh以下」の早期達成（2025年）に資する。

高効率・低コストの集光型太陽光発電の本格的実用化の早期達成が期待できる。平成26年度末までに、変換効率45%以上の集光型多接合太陽電池の高効率化、変換効率35%以上の集光型多接合太陽電池モジュールの高効率化に加え、集光型太陽電池・モジュールの標準特性評価技術の確立、大規模太陽光発電システム構築に向けた集光型太陽光発電システムの技術実証が可能である。さらに、集光型太陽電池用新材料、新構造の創製と評価解析が進み、高効率・低コスト太陽電池への応用が期待される。

これにより、EU提唱の20-20-20ターゲットや、日本の2020年までに1990年比25%CO<sub>2</sub>削減のターゲットの達成への貢献が期待できる。さらには、図53に示すように、2030年には、集光型太陽電池モジュール生産量が40GWになり、大規模太陽光発電など広範な太陽光発電の導入・普及と低炭素化社会の実現に貢献することが期待される。

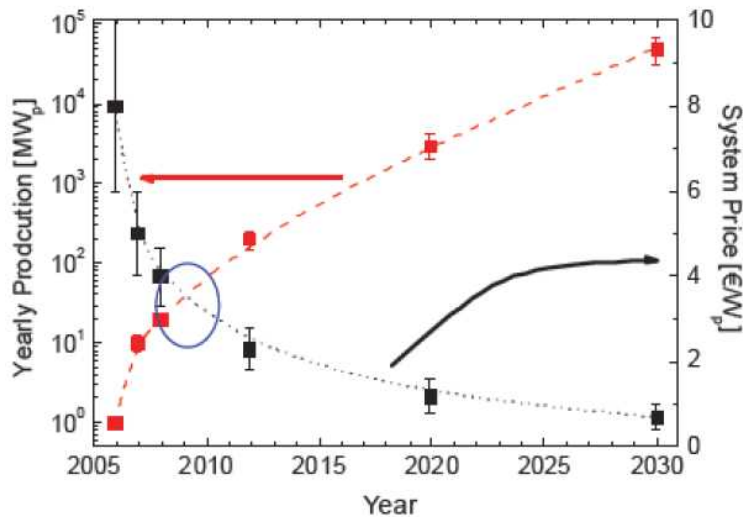


図53. 集光型太陽電池の年生産量増加シナリオ

[A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology - Report of the EU PV Technology Platform (EC, 2007)]

図 53 に示すような集光型太陽光発電の広範な導入普及のためには、集光型太陽電池・モジュール・システムのさらなる高性能化、長寿命化、低コスト化が必要である。今後、本事業の推進、後継事業の提案と推進により、集光型太陽電池変換効率 50%、モジュール変換効率 40%の実現と、モジュールコスト 40 円/W、システムコスト 100 円/W の実現を目指す。本事業と後継事業により、表 36 に示すように、2020 年頃からの本格的実用化（事業化）を目指す。表 36 には、各ワークパッケージ（WP）の連携による実用化シナリオを示す。



表 36. 各ワークパッケージ (WP) の連携による実用化シナリオ

WP (主要機関)	技術開発 内容	実用化シナリオ 2015 2020 2025
WP 1 (豊田工大等)	III-V/Si タンデム等新材料セル開発	後継プロジェクトで低コスト化 高効率新材料セル 低コスト化
WP 2 (東大等)	量子・ナノ構造 新型セル開発	高効率新型セル 低コスト化
WP 3 (シャープ等)	超高効率セルの 高効率化	宇宙用太陽電池 集光型セル、 として実用化 システムの逐次 実用化 集光型セル、 システムの本格的 実用化 低コスト技術開発
WP 4 (産総研等)	集光型セル、モ ジュールの標準 測定技術開発	集光型セル・モジュールの標準 測定技術確立
WP 5 (大同特殊鋼→ 住友電工等)	集光型モジュ ールの低コスト化	集光型モジュール 集光型モジュール、システム の逐次実用化 さらなる低コスト化 本格的実用化

1) 新材料・新構造太陽電池の創製及び評価解析技術の開発	表 1 に示すように、項目 3)、5) と連携して、本事業および後継事業を通して、集光型太陽電池、モジュール、システムのさらなる高性能化、長寿命化、低コスト化を実現し、2020 年頃からの集光型太陽光発電の本格的実用化（事業化）に貢献して行く。
2) 集光型太陽電池用量子・ナノ構造の創製及び評価解析技術の開発	表 1 に示すように、項目 3)、5) と連携して、本事業および後継事業を通して、集光型太陽電池、モジュール、システムのさらなる高性能化、長寿命化、低コスト化を実現し、2020 年頃からの集光型太陽光発電の本格的実用化（事業化）に貢献して行く。
3) 先進構造による高効率集光型太陽電池の開発	逆積み 3 接合セルの実用化に向けて、量産エピ技術開発を継続し、早期に技術を確立する。実用化時のエピ生産はファンドリーを使うことも視野に入れ、ファンドリー候補先の技術情報を入手していく。逆積み 3 接合セルにおいては、シャドーロスと直列抵抗の低減により 1,000 倍以上の最大集光倍率と、45% 以上の効率を早期に実現すると共に、新規開発セルの信頼性評価を進める。また市場となる高日射地域での集光システムの実証試験（平成 24 年度試験開始予定）を通して、実用化への道筋をつける。また宇宙航空研究開発機構（JAXA）との連携を継続し、逆積み 3 接合セルの宇宙実証を行う。耐環境性などの評価試験を実施し、平成 25 年度以降に認定試験を経て国内衛星向けセルとして実用化していく
4) 集光型太陽電池セル、モジュールの標準測定技術の開発	EU との比較測定・技術協力等により開発した信頼性の高い集光型太陽電池評価技術が太陽電池出力定格または発電量定格等に関する JIS 規格・IEC 国際規格等の標準に採用されて産業界に使用されること、および評価技術の普及により集光型太陽電池の技術開発・大量導入・健全な市場醸成等により貢献することにより、実用化に貢献する。実用化の見通しとしては、様々な集光方式やシステム構造等に対応した公正かつ高精度な評価手法を開発し、開発した評価手法・実証データ等を規格委員会に提案および審議を進めることにより可能となる。
5) 高効率集光型太陽電池モジュールの開発と集光型太陽光発電システム実証	本研究を受託した大同特殊鋼は社内事情により集光型太陽光発電システム事業から撤退したが、シャープ、パナソニック、住友電工の 3 社が事業化に向けて開発を精力的に進めている。また、集光レンズや追尾架台などの要素技術に関しても、クラレ、THK などが精力的に開発を進めている。本事業の成果から、集光モジュール・システムに関する知見が多く得られ、この知見を用いて国内各社の逐次実用化が期待できる。集光型モジュールのさらなる高性能化、長寿命化、低コスト化により、2020 年頃からの本格的実用化（事業化）を目指す。

## 2. 波及効果

本事業は、2050年までに変換効率40%超の超高効率の実現を目指し、新材料、新規構造等を利用した革新的な太陽光発電技術の開発を目的としている。

本事業の太陽電池分野での波及効果として、集光型太陽電池技術の宇宙用・自動車用への適用、メカニカルスタックによる多様な多接合太陽電池の出現、光マネジメントの他太陽電池への適用等の可能性がある。

また、太陽電池以外への波及効果としては、量子ドットを用いた高速通信デバイスの高度化、新規な3次元実装デバイスの出現（オプトエレクトロニクスにも展開可能）、単結晶薄膜による低コスト高性能デバイスの発展（民生応用も）、新材料の開発による多様な応用の創製、透明導電膜のディスプレイへの適用開発の可能性などがある。

なお、本事業により、日本の技術優位性の維持による技術基盤強化・産業競争力向上が見込める。

現時点で考えられる各研究開発項目の波及効果を以下にまとめる。

### ①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

集光型太陽電池の本格普及は、太陽電池=半導体パネルという既存概念を打破し、太陽電池市場に新たなプレーヤーの参入を促す。

太陽電池セルの高効率化技術、特に、多接合化による高効率化技術は、他の太陽電池の高効率化に有用である。結晶シリコンの高効率化については、単接合での高効率化に限界があるため、低コスト材料セルとの多接合化に注目が集まっており、本研究で得られた知見が役に立つ。

加えて、集光システム開発で得られた技術は、低倍集光システム等の高効率化、信頼性強化に有用である。高効率結晶シリコンを用いた低倍集光システムは、本件（高倍集光システム）と同様に、高日射地域で最安コストの発電が期待されており、国内においても、一軸低倍集光システムの開発に注目が集まっている。

追尾型集光システムの発電シミュレーション技術は、直達光、散乱光に対する発電予測を可能にするため最近の平板追尾型システムの高度な発電量予測に有用である。

集光光学系には新概念の設計と高品質かつ低コストな機械製造技術が求められる。これは、ヘッドライト等照明器具、天体観測用の光学装置など従来太陽電池に縁がなかったメーカーの参入を促すものである。我が国には当該分野に優れた技術力を有する企業が多数存在しており、集光型太陽電池の大規模導入は我が国が世界的な技術的優位性を誇る分野における新規産業の創成、拡大の契機となり得る。

また、集光モジュールは、既存の太陽電池パネルに比べて局所に太陽光エネルギーを集中させるため、セル近傍が高温になりやすい。これは集光型太陽電池の技術課題とみなされることが多いが、逆に、太陽光発電と太陽熱利用のコジェネレーションを行う上で、極めて好ましいシステム形態であるといえる。すなわち、セルの冷却を現在主流の空冷から流体による強制冷却に改めることで、セルでの発電に用いられた残りの熱を回収し、熱電デバイスによるもう一段の発電、空調用熱源としての利用、給湯での利用など多段階のエネルギー利用を組み合わせた高効率エネルギー利用システムを構築することが可能である。このようなシステムはごく最近その重要性が認識され、未だ大規模な研究開発には至っていない。しかし、集光型太陽電池を中心に様々な技術シーズを集めてシステム化するアプローチは、再生可能エネルギー利用システムとして新たな産業を興すポテンシャルを十分に有しており、政策的な後押しが望まれる。

### ②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

本事業の太陽電池分野での波及効果として、CIS やシリコン、有機系などの薄膜太陽電池の高効率化にも有用な技術がすでに得られており、それらの分野でいち早く本研究開発で得られた技術が実用化されることが期待される。宇宙用・自動車用超高効率太陽電池への適用においても、シリコンをベースとした化合物太陽電池と組み合わせて、低コストでかつ30%を超える非集光型太陽電池の実現可能性が広がると期待される。たとえば薄膜シリコン太陽電池は単接合で11%程度の効率が得られているが、ボトムセルとして単結晶シリコン薄膜太陽電池とメカニカルスタックで組み合わせると最高で20%程度の変換効率が期待できる。単結晶シリコン太陽電池をInGaP系ワイドギャップ太陽電池と組み合わせれば30%を超える効率が期待できる。もちろんメカニカルスタック技術は汎用技術であるため、集光型太陽電池においても格子不整合系の組み合わせに活用することは可能であるし、4接合以上の多接合ではメカニカルスタック技術を導入せざるを得ないと考えられる。

### ③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

本研究開発で開発を行ってきた低倍率集光方式は、現在、発展途上にあるⅢ-V族化合物半導体・超高効率太陽電池にも適用可能である。特に 1000 倍程度の高倍率集光では、散乱光を十分集光することは難しく、結果的に年間発電量の減少の一因となる。一方、低倍率集光系はすでに、安価に販売されており、Ⅲ-V 化合物半導体太陽電池の低コスト製造技術が進展すれば、超高効率・低倍率集光システムとして実用化が可能となろう。

本研究で波長スプリッティング太陽電池が提案され、具体的に高い変換効率の測定結果が公表されるにつれ、特にペロブスカイト系の研究者で、本手法が採用されつつある。波長スプリッティング方式は、ペロブスカイトと Si 太陽電池のように、製法が全く異なる材料系の組み合わせに有効である。特に、本事業へ参画企業であるカネカより、ペロブスカイト//ヘテロ接合 Si 太陽電池で 28.0%の変換効率が得られたことは、世界中の研究者に大きなインパクトを与えることとなった。

本事業で開発した光マネジメント技術は、その他の太陽電池系への適用等の可能性がある。新規薄膜材料からなる太陽電池は、建材一体型の高効率シースルー太陽電池への応用や、超高効率フレキシブル太陽電池の実現によるユビキタスデバイスや自動車ルーフなどへの更なる応用分野の拡大が期待される。

### ④革新的太陽電池評価技術の研究開発（日米共同開発）

本事業の太陽電池分野での波及効果として、光マネジメント、微視的構造評価技術が他太陽電池への適用等の可能性がある。

また、太陽電池以外への波及効果としては、同じく集光系を用いる集光型太陽熱発電（CSP）開発の可能性もある。

### ⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）

集光型太陽光発電（CPV）の実証試験による CPV の完成度向上、市場拡大に向け、現行の 50kW の CPV システムに加え、新たな CPV システムの実証試験を提案して行きたい。日射条件が良いが、過酷な環境条件下での CPV の実証試験、例えば、中東地域での実証試験により、砂漠仕様の CPV セル、モジュール、システムの開発および事業化が期待できるし、日本企業参入の機会、石油産油国における市場開拓、インフラ構築への貢献が期待できる。

## 添付資料

添付資料 1 : プロジェクト基本計画

- ・「太陽エネルギー技術研究開発」基本計画

添付資料 2 : 事前評価関連資料

- ・事前評価書
- ・「革新的太陽光発電技術研究開発(革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)  
(案)に対するパブリックコメント募集の結果について

添付資料 3 : 特許論文リスト

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

環境と調和した健全な経済産業活動と安全・安心な国民生活の実現を図るため、クリーンエネルギーである太陽光発電の更なる普及が要望されている。太陽光発電の更なる普及を実現するためには、これまでに蓄積した技術の更なる高効率化、共通基盤技術の発展及び低コスト化を可能とする革新的技術の開発が不可欠である。本プロジェクトは、経済性・出力安定性といった課題を克服し、新エネルギー等の自律的な普及を図ることを目標とするエネルギーイノベーションプログラムの一環として実施する。

太陽光発電の急速な普及を背景に、海外においても、太陽光発電技術の開発が精力的に取り組まれており、太陽光発電ロードマップ（PV2030+）で示された技術課題の解決に向け、まさに、グローバルな開発競争となっている。我が国は太陽光発電の技術開発及びその導入量・生産量において長らく世界一を誇っていたが、欧州を中心に行われている導入普及政策により、市場の中心は欧州へと移り始めており、我が国の地位確立のためには、これまで以上の技術開発が必要となっている。このため、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）は、産学の科学的知見を結集して太陽光発電の技術開発を行い、これを産業技術へ繋げていくとともに、社会の共通基盤として情報の整備、提供を通じて、行政、産業界、地域住民等の間で科学的知見に基づいた正確かつ適切な認識の醸成を図ることを目的に、本プロジェクトを実施する。

(2) 研究開発の目標

太陽光発電ロードマップ（PV2030+）に示された2020年の発電コスト14円/kWh、2030年の7円/kWh、2050年の7円/kWh未満達成に資する技術の開発を目標とする。

なお、個々の研究開発項目の目標は別紙「研究開発計画」に定める。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

【委託事業】

革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）〔委託事業〕

②太陽光発電システム次世代高性能技術の開発〔委託事業、共同研究事業（負担率：2／3）〕

【助成事業】

③有機系太陽電池実用化先導技術開発〔助成事業（負担率：2／3）〕

## 2. 研究開発の実施方式

### (1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDOが、単独ないし複数の企業、大学等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない）から公募によって研究開発実施者を選定し実施する。

NEDOは、研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルを検討し、これを最大限活用することにより効率的な研究開発を図る観点から、必要に応じて研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を指名し、その下に効果的な研究を実施する。

### (2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて外部有識者による技術検討委員会等を設置し、開発内容について審議し、その意見を運営管理に反映させる他、プロジェクトリーダーを指名しているプロジェクトは、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

## 3. 研究開発の実施期間

本研究開発の実施期間は研究開発項目ごとに以下のとおりとする。

革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）

本研究開発の期間は、平成20年度から平成26年度までの7年間とする。

太陽光発電システム次世代高性能技術の開発

本研究開発の期間は、平成22年度から平成26年度までの5年間とする。

有機系太陽電池実用化先導技術開発

本研究開発の期間は、平成24年度から平成26年度までの3年間とする。

## 4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価及び事後評価を実施する。なお、中間評価結果を踏まえ必要に応じてプロジェクトの加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。なお、評価の実施時期や方法は、研究開発項目毎に別紙研究開発計画に記載する。

## 5. その他重要事項

### (1) 研究開発成果の取扱いについて

成果の普及

本研究開発で得られた研究成果についてはNEDO、委託先、助成先とも普及に努めるものとする。

知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備又は標準化等との連携を図るため

データベースへのデータ提供、開発した技術を搭載した太陽電池の国内外への普及を見据えた標準案の検討や提案及び規制に係る情報提供等を積極的に行う。

### ③知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

なお、開発した太陽電池システムの事業化を支える知財戦略の構築と適切な知財管理を必要に応じて実施することとする。

## (2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

## (3) 根拠法

革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）

「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第1号イ」

太陽光発電システム次世代高性能技術の開発

「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第1号イ」

有機系太陽電池実用化先導技術開発

「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第3号」

## 6. 改訂履歴

- (1) 平成22年3月、「新エネルギー技術研究開発」の研究開発項目⑦「革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）」及び新規研究開発項目「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」を統合して新たに制定。
- (2) 平成23年3月、研究開発項目①「革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）」の4. 達成目標の中間目標（平成24年度末）の追記及び最終目標（平成26年度末）を修正。
- (3) 平成24年3月、新規研究開発項目「有機系太陽電池実用化先導技術開発」を新たに制定したこと等による修正。
- (4) 平成25年3月、研究開発項目①「革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）」の4. 達成目標の最終目標（平成26年度末）を修正。
- (5) 平成25年6月、研究開発項目①「革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）」の4. 達成目標の（2）高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発のグループリーダーの変更に伴う修正。

## (別紙) [研究開発計画]

研究開発項目 「革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業）」

### 1. 研究開発の必要性

現在、世界的にこれまでにないほど、環境に対する意識が高まっている。その中で2007年の「地球温暖化対策に関する内閣総理大臣演説」において、2050年までに温室効果ガスCO<sub>2</sub>の排出量を半減する『Cool Earth 50』が発表された。太陽光発電はこの提案に貢献し、持続可能な社会の構築に資する技術の一つとして期待されている。大規模な普及を実現し、期待に応えるためには、太陽光発電の性能の飛躍的な向上が必要である。それにより、住宅や商用施設等での導入促進や、未利用地等での大規模発電等、太陽光発電の適用可能域を抜本的に拡大し、さらに海外の砂漠など全地球的な視点での太陽光発電の利用も可能とするなど、グローバルな展開も期待される。しかしながら、求める性能レベルにまで飛躍的に向上させるためには、従来技術の延長線上にない革新的な技術の開発が必要不可欠である。

また、我が国の太陽光発電技術は世界のトップ水準にあるが、海外を見渡すと、近年、米国のSolar America Initiative (SAI:ソーラー・アメリカ計画) や欧州のStrategic Research Agenda (SRA:戦略的研究計画) など太陽電池に関する技術開発計画が策定され、その双方で新材料・新構造等による革新的な太陽電池の開発が取り上げられており、既にいくつかの開発プロジェクトが立ち上がっている。

革新的な太陽電池の開発にあたっては、多岐に亘る可能性の確認と選択を進めることが重要であり、それぞれの技術分野の専門家との協力により知見を積み上げていく必要がある。

このような観点から、温室効果ガスの半減に寄与する技術を確立し、日本の技術的優位性を超長期に亘って維持するためには、我が国においても革新的な超高効率太陽電池の開発を実施する研究グループを形成し、その中心的研究機関を中心として、優れた海外の研究者と協力をしながら積極的かつ継続的な研究開発を推進する必要がある。

### 2. 目的

地球温暖化対策として温室効果ガスの大幅削減に寄与するために、太陽光発電の性能を飛躍的に向上させることを目的とする。これにより、住宅や商業施設等での導入促進や、未利用地等での大規模発電等、太陽光発電の適用可能域を抜本的に拡大することが可能となる。

また、2050年に向けた長期的視野に立ち、国内の知見・技術を結集して、新材料・新構造等を利用した革新的な太陽光発電技術を開発することで、日本の技術的優位性を超長期に亘って維持し、産業競争力強化に資することを目的とする。

### 3. 研究開発の具体的内容

本研究開発では、太陽光発電技術に関連し、新材料・新構造等を利用して「変換効率40%超」かつ「発電コストが汎用電力料金並み（7円/kWh）」の達成へのアプローチを探索し、可能性を実証することを目標にした研究開発を行う。

本研究開発では、変換効率向上のためのブレークスルーを探ることを優先的に行い、低コスト化技術については変換効率向上技術の進捗に応じて取り組むこととする。また、海外の先進的な研究機関・大学等と情報や研究人材の交流（研究員の派遣や受入れ等）を実施し、研究開発を促進させる。



本研究開発では以下の技術分野を対象とする。

- ・多接合型太陽電池
- ・量子ナノ構造太陽電池
- ・光マネジメント構造（波長変換・波長分割構造等）
- ・その他新概念太陽電池（熱光起電力技術：TPV、プラズモン太陽電池等）
- ・革新的太陽電池評価技術

本研究開発では、公募によって複数の研究グループを選定し、研究開発を委託により実施する。ただし、本研究開発にあたっては新たな研究施設等の建設は行わない。

平成23年度から実施する「高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日EU共同開発）」については、国際共同研究・実証等に係る事業であり、委託により実施する。

#### 4. 達成目標

2050年までに「変換効率が40%」かつ「発電コストが汎用電源未満（7円/kWh未満）」の太陽電池を実用化することを目指した研究開発の中で、本研究開発は変換効率40%の実現に向けた技術の基礎・探索研究段階と位置づけて研究開発を実施する。

個別研究開発テーマの最終目標及び中間目標は、テーマごとに取り組む技術の現在の成熟度と、2050年に到達すべき技術レベルから、平成26年度末時点で達成すべき技術レベルを判断し、以下の通りとする。

##### (1) ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

国立大学法人東京大学先端科学技術研究センター 所長 中野 義昭氏をグループリーダーとして以下の目標で研究開発を実施する。

中間目標（平成22年度末）

- ・Ⅲ－V族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率33%と集光時の変換効率42%を達成する。
- ・新概念太陽電池については動作原理を実証する。
- ・高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子収率を10%高めることに資する。

中間目標（平成24年度末）

- ・Ⅲ－V族系材料による高集光多接合太陽電池で非集光時の変換効率35%と集光時の変換効率45%を達成する。
- ・新概念太陽電池については変換効率15%を達成する。
- ・高度光利用技術については量子ナノ構造層吸収を3倍に高めることに資する。

最終目標（平成26年度末）

- ・Ⅲ－V族系材料による高集光多接合太陽電池で、3接合セルでは非集光時の変換効率36%と集光時の変換効率45%を、4接合セルでは非集光時の変換効率39%と集光時の変換効率48%を達成する。
- ・新概念太陽電池については変換効率40%を達成する。

(2) 高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

平成20年度～24年度の期間については、独立行政法人産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター センター長 近藤 道雄氏を、平成25年度～26年度の期間については、独立行政法人産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター 研究センター長 仁木 栄氏をグループリーダーとして以下の目標で研究開発を実施する。

中間目標（平成22年度末）

- ・シリコンおよび化合物多接合太陽電池について要素セル材料の開発並びにデバイス化により、多接合太陽電池で変換効率20%を達成する。
- ・新概念太陽電池については動作原理を実証する。
- ・高度光利用技術においてはデバイスプロセスと組み合わせて変換効率20%の達成に資する。

中間目標（平成24年度末）

ボトムセルおよびトップセルの要素材料の開発並びにデバイス化を行う。また光マネージメント技術、スマートスタック技術を開発し、多接合太陽電池で変換効率20%を達成する。高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて変換効率20%の達成に資する。

最終目標（平成26年度末）

ボトムセルおよびトップセルについて要素セルの高度化ならびに高度光利用技術の組み合わせにより多接合太陽電池で変換効率30%を達成する。

(3) 低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

国立大学法人東京工業大学大学院理工学研究科 電子物理工学専攻 教授 小長井 誠氏をグループリーダーとして以下の目標で研究開発を実施する。

中間目標（平成22年度末）

バンドエンジニアリング、薄膜フルスペクトル太陽電池、光マネージメント・TCO等の研究開発により、低倍率集光時、真性変換効率20%（有効受光面積：1 cm<sup>2</sup>）を達成する。

中間目標（平成24年度末）

開発した薄膜フルスペクトルの光吸収層ならびに周辺技術等を用いた5～6接合薄膜フルスペクトルセルにより、真性変換効率25%（低倍率集光、有効受光面積：1 cm<sup>2</sup>）を達成する。

最終目標（平成26年度末）

薄膜フルスペクトルセルにより、真性変換効率40%（低倍率集光、有効受光面積：1 cm<sup>2</sup>）を達成する。

(4) 革新的太陽電池評価技術の研究開発

独立行政法人産業技術総合研究所太陽光発電工学研究センター センター長 近藤 道雄氏をグループリーダーとして以下の目標で研究開発を実施した。

最終目標（平成22年度末）

集光型多接合太陽電池評価技術の開発  
薄膜多接合太陽電池評価技術の開発

(5) 高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日EU共同開発）

豊田工業大学大学院工学研究科 特任教授 山口 真史氏をグループリーダーとして以下の目標で研究開発を実施する。

中間目標（平成24年度末）

- ・セル変換効率：42%以上、モジュール変換効率：33%以上
- ・集光型太陽電池の高精度測定の課題明確化

最終目標（平成26年度末）

- ・セル変換効率：45%以上、モジュール変換効率：35%以上
- ・集光型太陽電池の標準測定技術の確立（測定再現性±0.5%以内）

## 5. 評価の時期及び方法

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成22年度及び平成24年度に実施し、研究開発テーマごとに進捗を判断し、技術分野及び研究開発テーマの見直し・絞り込み等を行い、必要に応じて研究グループの整理を行う。(4) 革新的太陽電池評価技術の研究開発については、事後評価を平成24年度の中間評価と同時に実施する。また、その他の事後評価を平成27年度に実施する。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

## 研究開発項目 「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」

### [研究開発の目的]

#### 1. 政策的な重要性

本事業はエネルギーに関する技術開発を目的とする「エネルギーイノベーションプログラム」の一環として実施する。本プログラムに加え、太陽光発電は「Cool Earth—エネルギー革新技术計画」の中でCO<sub>2</sub>大幅削減を可能とする重要技術に位置づけられ、また、新成長戦略（2009年閣議決定）等の種々の政策の中でその重要性・必要性について言及されている。

#### 2. 我が国の状況

我が国は高度成長期の負の側面である公害問題や二度にわたる石油危機を技術革新の契機として活用することで克服し、世界最高の環境技術を獲得するに至った。

ところが今日では、数年前まで世界一を誇った太陽光発電がドイツ・スペインの後塵を拝するようになり、我が国が本来持つ環境分野での強みを、必ずしも活かすことができなくなっている。

#### 3. 世界の取り組み状況

米国や欧州においても国家レベルで太陽光発電の技術開発に取り組んでおり、米国やドイツの研究開発費は日本の2倍以上である。さらに太陽光発電システムの各種普及支援施策（フィードインタリフや余剰電力購入、補助金など）が取られている。この結果、2008年における太陽光発電システムの年間導入量は、スペイン、ドイツ、イタリア、米国、韓国、そして日本という順番になっている。

#### 4. 本事業のねらい

本事業では、低炭素社会の実現のため我が国政府が打ち出した目標（2009年4月9日内閣総理大臣講演）（太陽光発電の導入規模を2020年に現状の20倍（28GW）にする）の達成に資する研究開発として、モジュール高効率化及びコスト低減の観点から、各種太陽電池の変換効率の向上、原材料・各種部材の高機能化、モジュール長寿命化、評価技術等の共通基盤技術等の開発を行うことを目的とする。

### [研究開発の目標]

#### 1. 過去の取り組みとその評価

平成18年度から21年度まで実施した「太陽光発電システム未来技術研究開発」及び「太陽光発電システム共通基盤技術研究」等により、2020年における発電コスト目標（14円/kWh）達成に必要な要素技術の開発などが行われ、目覚ましい成果が得られた。一方、平成21年度に実施した（前倒し）事後評価委員会では、太陽光発電システム普及の鍵となるグリッドパリティー実現に向けての、さらなるコスト低減や耐久性向上等に向けた技術開発を国が継続して行う必要性について提言を受けた。

#### 2. 本研究開発の目標

太陽光発電ロードマップ（PV2030+）に記載の発電コスト目標：14円/kWh（2020年）、モジュール製造コスト目標：75円/W、モジュール変換効率目標：20%（2015～2020年時点）の実現に資する各種太陽電池の高効率化、低コスト化に係る技術を確立することを目標とする（各太陽電池種別の具体的な達成目標は後述）。

### 3. 本研究開発以外に必要なとされる取り組み

本事業とは別に、NEDOでは、平成20年度から「革新的太陽光発電技術研究開発」の取り組みを行っており、2050年にCO<sub>2</sub>排出量半減を実現するための画期的な太陽光発電技術の開発（「変換効率40%超」かつ「発電コストが汎用電力料金並み（7円/kWh）」を実現可能とする超長期的課題への取り組み）を実施している。

### 4. 全体としてのアウトカム目標

2020年における太陽光発電導入量2,800万kW（現状の20倍）の実現に寄与する。この導入実現により、1,500万トンのCO<sub>2</sub>削減効果が期待される。

#### [研究開発の内容]

上記目標を達成するため、以下の研究開発について実施する。

#### [委託事業、(共同研究事業(NEDO負担率：2/3))]

- (イ) 結晶シリコン太陽電池
- (ロ) 薄膜シリコン太陽電池
- (ハ) CIS等化合物系太陽電池
- (ニ) 色素増感太陽電池
- (ホ) 有機薄膜太陽電池
- (ヘ) 共通基盤技術

本研究開発項目は、(1) 実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ち寄り協調して実施する事業、又は(2) 試験・評価方法、基準・プラットフォームの提案等、国民経済的には大きな便益がありながらも、民間企業の研究開発投資に見合うものが見込めない「公共財の研究開発」事業であり、原則、委託事業として実施する。ただし、(1)については、上記以外のもの<sup>(※1)</sup>は、共同研究事業(NEDO負担率：2/3)として実施する。

- 1 民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独等、産学官連携とならないもの。

## (イ) 結晶シリコン太陽電池

### 1. 研究開発の必要性

結晶シリコン太陽電池は変換効率の高さの点で、今後も太陽電池の普及において中心的役割を果たすことが期待されており、普及拡大のためにはコスト低減と高効率化を同時に実現することが必須である。

結晶シリコン太陽電池は、従来厚さ200  $\mu\text{m}$ 程度の結晶シリコン基板を用いており、シリコン材料のコストが太陽電池全体のコストに占める割合が大きく、低コスト化を阻害している。また、近年の結晶シリコン太陽電池の生産規模の急激な拡大はシリコン原料の需給逼迫を招き、今後の結晶シリコン太陽電池の普及拡大を制約することが懸念されている。また、シリコン基板の超薄型化に伴う効率低下をおこさずに、モジュール変換効率20%の水準を目指すことが重要である。

これらの課題を解決するため、低コストシリコン材料の製造技術、100  $\mu\text{m}$ 程度の超薄型シリコン基板スライス技術、100  $\mu\text{m}$ 程度の超薄型セル高効率化技術の開発が重要である。

### 2. 研究開発の具体的内容

結晶シリコン太陽電池において、コスト低減と変換効率の向上を図るため、以下の研究開発を実施する。

#### i) コスト低減

- ・ソーラーグレードの原料シリコンを安価に製造する技術、結晶シリコンを安価に製造する結晶成長技術等を開発する。
- ・厚さ100  $\mu\text{m}$ 程度のセルに対して反り、割れ等が生じない電極形成工程、スライス技術の最適化、スライス後の洗浄処理が不要、カーフの回収・再利用が可能等の新技術等を開発する。

#### ii) 高効率化

- イ) モジュール変換効率向上に資する太陽電池形成プロセス（光及びキャリア閉じ込め、接合形成、パッシベーション等）の手法・条件の抜本的な見直しと、ヘテロ接合等新構造・新手法を開発する。
- ロ) 高品位な結晶シリコンを製造する結晶成長技術を開発する。

### 3. 達成目標

#### i) コスト低減

- ・結晶シリコンを安価に製造する技術を開発し、シリコン製造コスト等を試算する。達成目標（中間目標を含む）は設定した製造規模でのシリコン製造コストで表し、その値は各研究テーマ毎に設定し実施計画書に記載する。
- ・カーフロス120  $\mu\text{m}$ 未満、又はカーフを生じない新たな製法等を確立する。

#### ii) 高効率化

##### イ) モジュール

##### <中間目標>

- ・厚さ100  $\mu\text{m}$ 程度、15 cm角程度のセルにおいて変換効率20%、モジュールでの変換効率18%以上を達成する。

<最終目標>

- ・厚さ100  $\mu\text{m}$ 程度、15 cm角のセルにおいて、変換効率25%以上、モジュールの変換効率20%以上を達成する。

ロ) 高品位シリコン製造技術

15 cm角程度のセルにおいて、以下の目標値を達成する。

<中間目標>

- ・キャリア寿命：100  $\mu\text{s e c}$  (拡散長 約1 mm) 以上
- ・シリコン純度：6 N以上

<最終目標>

- ・キャリア寿命：400  $\mu\text{s e c}$  (拡散長 約2 mm) 以上
- ・シリコン純度：7 N以上

## (ロ) 薄膜シリコン太陽電池

### 1. 研究開発の必要性

厚さ数  $\mu\text{m}$  のシリコン系薄膜により構成される薄膜シリコン太陽電池は、シリコン原料の使用量が少ないため、現在市場の主流である結晶シリコン太陽電池と比較して製造コスト、ひいては発電コストの大幅な低減が見込まれ期待されている。また、軽量基板上への太陽電池形成が可能であることから、多用途化にも適している。しかしながら、現状ではモジュール変換効率が低く 12% 程度であり、より一層の改善が必要である。また、更なる低コスト化のためには、製造プロセス及び生産性改善等による製造コストの低減等が必要である。

本研究開発は、以上の背景に基づき、薄膜シリコン太陽電池の変換効率向上及び製造コスト低減を目指して実施する。

### 2. 研究開発の具体的内容

モジュール高効率化及び生産性向上を図るため、以下の研究開発を実施する。

#### i) 高効率化

光マネジメントとして入射光の反射・屈折の制御等による光閉じ込め技術の高度化、高品質（低欠陥密度、低抵抗、高透明度）な透明導電膜の開発等を行う。

多接合化として光劣化抑制技術、界面へのバッファ層導入や粒界制御による開放電圧向上、欠陥密度の低減と価電子制御技術、バンドギャップ設計と材料高品質化、高効率化のためのパッシベーション技術、各薄膜と透明電極及び裏面金属電極との接合界面並びに各薄膜間の接合界面の高品質化の開発等を行う。

#### ii) 製造コスト低減

新概念を導入した製膜装置の開発による高速製膜技術の開発、大面積基板（ガラス、フィルム基板等）に高品質な薄膜を高スループットで製膜し得る製膜技術及び製膜装置・プロセスの開発等を行う。

### 3. 達成目標

#### i) 高効率化

<中間目標>

- ・  $30 \times 40 \text{ cm}$  程度の基板に製膜した 2 接合以上の多接合薄膜シリコン太陽電池においてモジュール変換効率 13% 以上（安定化効率）を達成する。

<最終目標>

- ・  $30 \times 40 \text{ cm}$  基板に製膜した 2 接合以上の多接合薄膜シリコン太陽電池においてモジュール変換効率 14% 以上（安定化効率）を達成する。

#### ii) 製造コスト低減

<中間目標>

- ・ 装置の設計・作製と条件出しを完了し、任意サイズの基板において製膜速度  $1.0 \text{ nm/sec}$  以上を達成する。

<最終目標>

- ・ 幅 1 m 以上の基板において製膜速度  $2.5 \text{ nm/sec}$  以上、膜厚分布  $\pm 5\%$  以下を達成する。



なお、高生産性実現において、製膜速度向上以外の手法でも同等と認められる提案は、別途協議のうえ採用する。

## (ハ) C I S 等化合物系太陽電池

### 1. 研究開発の必要性

C I S 等化合物系薄膜太陽電池は、結晶シリコン太陽電池、薄膜シリコン太陽電池に続いて市場投入された太陽電池であるが、現在C d T e 太陽電池等との激しい価格競争の中にあり、高い経済性が求められている。

C I S 等化合物系薄膜太陽電池は、結晶シリコン太陽電池に匹敵する高い変換効率を実現できる可能性があり、また、軽量基板上への太陽電池形成が可能であることから多用途化にも適している。更に、最近では、従来と異なる新規なプロセスを開発して低コスト製造を実現しようとする試みが見られるようになってきた。

しかし、現時点では、変換効率は30cm角モジュールで13から16%程度で、この太陽電池に期待されるレベル（結晶シリコン太陽電池並み）に到達しておらず、また、軽量基板上での製造技術や新規な低コスト製造プロセスも実用化までには今一步のところにある。

また、海外では集光型太陽電池で一定規模の市場がすでに形成されており、日本がこの市場に遅れることなく参入するためには、集光型太陽電池システムの低コスト化が早急に必要とされる場所である。

### 2. 研究開発の具体的内容

C I S 等化合物系薄膜太陽電池では、実用化規模の大面积及び材料のポテンシャルを引き出すために小面積モジュールでそれぞれ高効率化を図る。また、軽量基板上での製造技術や新規な低コスト製造プロセスの実用化に向けた開発を実施する。

集光型太陽電池では、システム全体としてのコストダウンを目指し、太陽電池セル以外に光学系や追尾架台等の低コスト化技術開発を実施する。

#### i) C I S 等化合物系高効率化

光吸収層の高品質化、接合界面特性の改善、集積化技術、ワイドギャップ材料の高品質化技術（欠陥密度低減等）等の開発を行う。

#### ii) C I S 等化合物系製造プロセスの開発

軽量基板を用いた低コスト製造プロセス、従来の製造法と異なるC I S 等化合物系太陽電池の低コスト製造プロセス（非真空プロセス等）等の開発を行う。

#### iii) 集光型太陽電池の低コスト化技術開発

-V族化合物／シリコンモノリシックタンデム等低コスト集光型太陽電池、低コスト集光系・ミラー・レンズ、低コスト架台・システム等の開発を行う。

### 3. 達成目標

#### i) C I S 等化合物系高効率化

<中間目標>

- ・サブモジュール（30cm角程度）で変換効率17%以上を達成する。
- ・小面積セル（1cm角程度）で変換効率22%以上を達成する。

<最終目標>

- ・サブモジュール（30cm角程度）で変換効率18%以上を達成する。
- ・小面積セル（1cm角程度）で変換効率25%以上を達成する。

ii) C I S等化合物系製造プロセスの開発

軽量基板上での製造技術や、新規な低コスト製造プロセス等により製造したサンプルを供試する。達成目標（中間目標を含む）は単位出力当たりの製造コスト等（円/W）で表し、その値は研究テーマ毎に設定し実施計画書に記載する。

iii) 集光型太陽電池の低コスト化開発

開発した光学系や追尾架台等を用いたモデルシステムを実際に建設し、そのコストを基にプラント建設コストを算出する。達成目標（中間目標を含む）は例えば単位面積当たりの建設コストで表し、その値は研究テーマ毎に設定し実施計画書に記載する。

## (二) 色素増感太陽電池

### 1. 研究開発の必要性

色素増感太陽電池はコストの点でシリコン材料を用いないので高純度シリコン価格高騰の影響を受けない。また、高真空プロセスを用いず、スクリーン印刷、ロールツーロール等の工程で製造が可能なので低コスト化が期待されている。機能面の点では光入射角度依存性が小さく、発電出力の温度依存性が小さいため、夏季でも発電特性が落ち込まない等の利点がある。

課題は変換効率が低いことであり、現時点で環境試験・耐久性試験で相対効率低下10%以内をクリアしているセルでは変換効率は3%程度である。また、信頼性においても水分の進入等による劣化等の問題がある。

コスト面、性能面での色素増感太陽電池のメリットを生かし実用化を実現するためには、変換効率及び信頼性の向上が必要である。

### 2. 研究開発の具体的内容

高効率化と耐久性向上を図り、以下のモジュール製造プロセスの研究開発を実施する。

#### i) 高効率化

- ・新規色素（長波長応答色素）、高性能半導体電極、タンデム構造色素太陽電池の開発等を行う。

#### ii) モジュール化技術開発・耐久性向上

- ・封止構造形成技術、不揮発性電解質の開発、スクリーン印刷、ロールツーロール等のプロセス技術の導入による量産化検討、半導体電極の低温形成技術の開発等を行う。
- ・劣化メカニズムの解明及び耐久性向上のための技術開発を行う。

### 3. 達成目標

高効率かつ耐久性に優れたモジュールを開発する。モジュールは以下の効率と耐久性を同時に満たすことを目標とする。

#### i) 高効率化

<中間目標>

- ・セル変換効率（安定化効率） 11%（1cm角程度）以上
- ・モジュール変換効率（安定化効率） 7%（30cm角程度）以上

<最終目標>

- ・セル変換効率（安定化効率） 15%（1cm角程度）以上
- ・モジュール変換効率（安定化効率） 10%（30cm角程度）以上

#### ii) モジュール化・耐久性向上

<中間目標>

- ・JIS規格C8938の環境試験、耐久性試験（温湿度サイクル、耐熱性、耐湿性、温度サイクル、光照射の各試験）において相対効率低下10%以内

<最終目標>

- ・JIS規格C8938の環境試験、耐久性試験（温湿度サイクル、耐熱性、耐湿性、温度サイクル、光照射の各試験）において相対効率低下10%以内

## (ホ) 有機薄膜太陽電池

### 1. 研究開発の必要性

有機薄膜太陽電池はコストの点でシリコン材料を用いないので高純度シリコン価格高騰の影響を受けない。また、高真空プロセスを用いず、スクリーン印刷、ロールツーロール等の工程で製造が可能なので低コスト化が期待されている。機能面の点では光入射角度依存性が小さく、発電出力の温度依存性が小さいため、夏季でも発電特性が落ち込まない等の利点がある。

課題は変換効率が低いことであり、現時点ではセルで6%程度である。また、信頼性においても水分の進入等による劣化等の問題がある。

コスト面、性能面での有機薄膜太陽電池のメリットを生かし、実用化を実現するためには、変換効率と信頼性の向上が必要である。

### 2. 研究開発の具体的内容

高効率化と耐久性向上を図り、以下のモジュール製造プロセスの技術開発を実施する。

#### i) 高効率化

- ・有機半導体（特にp型）、電子・ホール輸送層等の材料探索、短絡電流向上のための光電変換部分の増大（バルクヘテロ接合）、新デバイス構造構築、積層化に係る技術開発等を行う。

#### ii) モジュール化技術開発・耐久性向上

- ・スクリーン印刷、ロールツーロール等のプロセス技術の導入による量産化検討、劣化メカニズムの解明及び耐久性向上のための技術確立等を行う。

### 3. 達成目標

高効率かつ耐久性に優れたモジュールを開発する。モジュールは以下の効率と耐久性を同時に満たすことを目標とする。

#### i) 高効率化

<中間目標>

- ・セル変換効率（安定化効率） 8%（1cm角程度）以上
- ・モジュール変換効率（安定化効率） 6%（30cm角程度）以上

<最終目標>

- ・セル変換効率（安定化効率） 12%（1cm角程度）以上
- ・モジュール変換効率（安定化効率） 10%（30cm角程度）以上

#### ii) モジュール化技術開発・耐久性向上

<中間目標>

- ・JIS規格C8938の環境試験、耐久性試験（温湿度サイクル、耐熱性、耐湿性、温度サイクル、光照射の各試験）において相対効率低下10%以内

<最終目標>

- ・JIS規格C8938の環境試験、耐久性試験（温湿度サイクル、耐熱性、耐湿性、温度サイクル、光照射の各試験）において相対効率低下10%以内

## (へ) 共通基盤技術

### 1. 研究開発の必要性

太陽光発電システムの利用拡大や技術発展のためには、システムを構成するモジュール等の性能、耐久性、安全性、システムとしての発電量算定評価や信頼性評価等の各種評価方法の確立、国際的な規格化・標準化、システムの認証、リサイクル・リユースの技術開発等の産業基盤の整備が必要である。また、各電池に共通した部材の高機能化、長寿命化を図る必要がある。さらに、諸外国の研究機関との連携、国際エネルギー機関（IEA）への参画等による戦略的な活動は、産業競争力の確保と国際貢献の双方を意識した国の活動として重要である。

### 2. 研究開発の具体的内容

以下の研究開発項目を実施する。

- i) 発電量評価技術等の開発
  - ii) 信頼性及び寿命評価技術の開発
  - iii) リサイクル・リユース技術の開発
  - iv) 共通材料・部材・機器及びシステム関連技術開発
  - v) 標準化支援事業及びIEA国際協力事業等
- i) 発電量評価技術の開発
- イ) 発電量評価  
発電量評価技術として、きめ細かい範囲でのスペクトルを含めた日射量のデータベースを構築し、測定した当日の日射量・気象データから特定地域の翌日の発電量を推定する技術を開発する。
  - ロ) 太陽電池の性能評価  
太陽電池評価技術として、光照射効果を考慮した実効性能評価技術を開発する。また、高精度屋外性能評価技術を開発する。さらに、新材料・新技術に対応した新型太陽電池の評価技術を開発する。  
基準太陽電池校正技術の研究開発として、高精度絶対放射計とその校正技術の開発を行う。また、絶対分光感度法による一次基準セルの校正技術を開発する。さらに、二次基準モジュールの校正精度の向上を図る。
- ii) 信頼性及び寿命評価技術の開発
- 信頼性評価技術の開発として、太陽電池モジュールや太陽光発電システムの屋外曝露試験データを取得、分析評価し、劣化要因を抽出する。また、これと併せてモジュール、封止材等の長寿命化技術の開発を行う。試作モジュール等も用いて劣化メカニズムを解明し屋内での部材も含めた寿命評価試験方法を開発し、規格化を推進する。
- 更に、太陽光発電システムの長寿命化等に寄与する可能性がある各電池に共通した高機能材料の寿命試験方法を確立する。

iii) リサイクル・リユース技術の開発

新たな種類の太陽電池や破損、粉砕された太陽電池モジュール等のリサイクル等の関連技術の開発を行う。また、リユース及び補修回収技術の開発並びに安全性等評価を行い、そのための基準を定める。更に、LCA評価として、これまでの評価の見直しとリサイクル等の廃棄処理まで考慮した評価を実施する。

なお、必要に応じ環境関連技術、低コスト化技術、高効率化技術等について問題抽出や課題解決のための方向性検討・調査等を行う。

iv) 共通材料・部材・機器及びシステム関連技術開発

結晶シリコン、薄膜シリコン、CIS等化合物系太陽電池等の各種太陽電池に適用でき、コスト低減（省プロセス化、信頼性向上）、高効率化が見込める共通材料、部材・機器及びシステム関連技術の開発を行う。

v) 標準化支援事業及びIEA国際協力事業等

標準化調査研究において、太陽電池の性能評価及び太陽光発電システムに関する国内外の標準策定に向けた活動を行う。

諸外国の技術開発動向や政策動向等について、IEA活動等から調査・分析し、諸外国の動向等を把握し、技術開発の方向性や分析・評価手法等について検討する。

### 3. 達成目標

i) 発電量評価技術の開発

イ) 発電量評価

- ・スペクトルを含めた日射量のデータベースを構築する。
- ・地域の日射量・気象データから発電量を推定する技術を開発する。

ロ) 太陽電池の評価技術

- ・実効性能評価技術：光照射効果（1年以上）を考慮した実効性能評価技術を確立する。
- ・高精度屋外性能評価技術の開発：測定再現性2%以内の評価方法を確立する。
- ・各種新型太陽電池評価技術：NEDOの開発成果も含めて基礎データを収集、分析、評価し、必要に応じ規格化を図りつつ基本的評価手法を確立する。
- ・基準太陽電池校正技術：WRRファクター0.5%以内の構成技術を確立する。
- ・絶対分光感度法による一次基準セルの校正技術：校正の不確かさ0.5%以内の構成技術を確立する。
- ・二次基準モジュールの校正精度：校正の不確かさ1.0%以内を達成する。

ii) 信頼性及び寿命評価技術の開発

20～30年の屋外曝露に相当する屋内での寿命評価試験方法等について、モジュール及びシステムとして基本的な評価技術を開発し、規格化に向けた技術要件を整理する。

また、工程管理で信頼性確保を判定できる方法を確立し、簡易に寿命を判定できる方法を確立する。

さらに、モジュールやシステムの屋外曝露試験を行い、電氣的物理的な劣化状況に

関するデータを収集、分析、評価等を行うとともに、システムも含めた劣化要因について抽出する。

iii) リサイクル・リユース技術の開発

新たな種類の太陽電池にも対応したリサイクル関連技術を確立する。

また、リユース及び補修回収技術の開発並びに安全性等の評価を行い、そのための基準を定める。

さらに、LCA評価の見直しを行い、新型太陽電池の廃棄を含めたLCA評価を完了する。

iv) 共通材料・部材・機器及びシステム関連技術開発

具体的な開発目標及び実施内容は、採択テーマごとにNEDOと実施者との間で協議の上個別に設定することとする。

v) IEA国際協力事業及び標準化支援事業等

・ IEC・JISに係る標準化活動を行う。

・ 諸外国の技術動向や政策動向等を調査・分析し、諸外国の動向を把握した上で、技術開発の方向性や、分析・評価手法の開発方針等を明確にする。



## 〔研究開発の実施方法〕

### (1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDOが単独ないし複数の原則本邦の企業、大学等（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点から国外企業との連携が必要な場合はこの限りでない。）から公募によって選定した研究開発実施者（又は研究開発グループ）が、NEDOが委嘱したプロジェクトリーダーである豊田工業大学大学院工学研究科 特任教授 山口 真史氏（（イ）から（ホ））、東京工業大学統合研究院 特任教授 黒川 浩助氏（（へ））の下で、それぞれの研究テーマの目標達成を実現すべく研究開発を実施する。

### (2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、太陽光発電技術委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

本プロジェクトへの参加者は、これらのNEDOのマネジメントに従い、我が国政府が打ち出した目標（太陽光発電の導入規模を2020年に現状の20倍（28GW）、2030年に40倍（53GW）にする）の達成に必要な取り組みに協力するものとする。

## 〔評価に関する事項〕

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義及び将来の産業への波及効果等について、外部有識者による中間評価を平成24年度、事後評価を平成27年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等適宜見直すものとする。

## 〔その他重要事項〕

- ・若手研究者の育成を図るため、学生等の研究参加を促進する環境を整備する。
- ・産業界が実施する研究開発との間で共同研究を行う等、密接な連携を図ることにより、円滑な技術移転を促進する。

## 研究開発項目 「有機系太陽電池実用化先導技術開発」

### 1. 研究開発の必要性

NEDOは、太陽光発電の普及拡大に向けて技術開発等に取り組んでいるところであるが、取り組みの1つとして、製造原価を安く、軽量に作製することができ、かつ、設置場所の制約の少ない有機系太陽電池の要素技術開発を行っている。

有機系太陽電池は、これまでの技術開発の成果等により、実用化が間近な状況に到達しつつあるが、この成果を事業化につなげるためには、有機系太陽電池を実際の使用環境下で実証し、実用化に向けた課題の改善を図っていく必要がある。

### 2. 目的

有機系太陽電池を使用した太陽光発電システムの設計・試作を行い、その性能や品質を実証・評価し、実用化に向けた課題を抽出し、技術開発にフィードバックすることにより、有機系太陽電池の実用化を促進する。

### 3. 研究開発の具体的内容

有機系太陽電池を使用した太陽光発電システムを設計・試作・設置し、実使用環境下で発電量・耐久性等を実証・評価することで、実用化に向けた開発課題を抽出し、実用化検討にフィードバックする。また、実証試験の結果得られるデータの課題分析については、NEDOは実証試験課題検討委員会を設置し、当該委員会で実証データを分析・課題抽出を行い、対策検討に至るまで支援する。さらに、本実証研究を通じ、有機系太陽電池の市場要件（コスト・発電量・設置条件・耐久性・信頼性・デザイン等）を把握し、用途開拓を行う。

なお、本事業では、公募によって高い技術力を有し、かつ、将来の事業化を企図する企業等を助成事業者として選定し、最適な研究開発体制を構築する。

### 4. 達成目標

有機系太陽電池の実用化に向けた具体的な開発課題を抽出し、技術開発にフィードバックすることに加え、ユーザーが求める市場要件を明確にし、用途拡大のシナリオを明らかにする。

### 5. 評価の時期及び方法

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義及び将来の産業への波及効果等について、外部有識者による事後評価を平成27年度に実施する。また、研究の進捗状況を踏まえ必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等適宜見直すものとする。

## 事前評価書

		作成日	平成20年2月17日
1. 事業名称 (コード番号)	革新的太陽光発電技術研究開発 (政府予算案：革新型太陽電池国際研究拠点整備事業) <span style="float: right;">(P07015)</span>		
2. 推進部署名	新エネルギー技術開発部		
3. 事業概要	<p>(1)概要                      2050年までに温室効果ガスの排出量を半減させることを目標とした技術の開発が急がれている。太陽光発電システムが温暖化効果ガスの半減に寄与するためには大量に導入される必要があるが、現状の技術およびその延長では大量導入の前提となる経済性・性能が得られない。そこで、本研究開発では「変換効率が40%超」かつ「発電コストが汎用電力料金並み(7円/kWh)」を達成する太陽光発電システム技術を2050年までに実用化するために、新材料・新規構造等を利用しての達成へのアプローチを探索し、可能性を実証することを目標にした研究開発を行う。</p> <p>本研究開発では、変換効率向上のためのブレークスルーを探ることを優先的に行い、低コスト化技術については変換効率向上技術の進捗に応じて取り組む。また、海外の先進的な研究機関・大学等と情報や研究人材の交流(研究員の派遣や受入れなど)を実施し、研究開発を促進させるとともに効率化を図る。</p> <p>(2)事業規模                      平成20年度 20億円(委託)</p> <p>(3)事業期間                      平成20～26年度(7年間)</p>		
4. 評価の検討状況	<p>(1)事業の位置付け・必要性</p> <p>①太陽光発電は、総合科学技術会議の「第3期科学技術基本計画」(平成18年3月閣議決定)において戦略重点科学技術に、また平成19年4月資源エネルギー庁公表の「エネルギー技術戦略(技術戦略マップ2007)」において新エネルギーの開発・導入促進に寄与する技術の中でも特に政策目標への寄与が大きいと思われる技術に、それぞれ位置付けられている。更に、平成19年3月に改定された「エネルギー基本計画」において、自立した環境適合的なエネルギー需給構造を実現するため、太陽光発電をはじめとする新エネルギーの着実な導入拡大を図ることが挙げられている。</p> <p>②また、新・国家エネルギー戦略(平成18年5月公表)において、新エネルギーの中長期的な成長支援として太陽電池の技術開発支援を進めることが謳われている。本研究開発は太陽光発電システムの技術開発により、経済性・性能を飛躍的に改善することを目標に行うものであり、まさにそういった背景と合致する。</p> <p>③近年、米国のソーラー・アメリカ計画(SAI)や欧州の戦略的研究計画(SRA)が太陽電池に関する技術開発計画として策定された。特筆すべきことに、その双方で新材料・新規構造等による革新的な太陽電池の開発についても述べられており、革新的な太陽電池に関するいくつかの開発プロジェクトが立ち上がっている。これに対し、日本の技術的優位性を超長期に渡って維持するためには、本研究開発を立ち上げ、積極的かつ継続的な研究開発を実施する必要がある。</p> <p>④本研究開発は新材料・新規構造等を用いた革新的な技術開発であることから、開発の推進には斬新な発想も必要になると考えられる。このような斬新な発想を得るためには国内は元より、広く海外からも知的資源を集める必要があり、海外研究機関との研究協力はその有効な手法の一つだと考えられる。</p>		

本研究開発は研究拠点を中心とした強固な体制で、海外の研究機関との研究協力を行いながら、従来技術の延長上にはない革新的な技術の開発を推進するものであり、民間のみでは実施しえない技術開発である。更に本研究開発は太陽光発電の技術開発を通じ、温室効果ガスの排出量削減への寄与が期待できるものであり、非常に公共性が高い事業でもあるため NEDO 技術開発機構が推進することがふさわしい。

(2) 研究開発目標の妥当性

基本計画案では「研究開発テーマ毎に最終目標及び中間目標を設定する」としており、具体的な目標値の設定が出来ていない。ただ、本研究開発は、『新材料・新規構造等を利用して「変換効率が 40%超」かつ「発電コストが汎用電力料金並み (7 円/kWh)」の達成へのアプローチを探索し、可能性を実証することを目標にした研究開発を行う』超長期の研究開発であることから、幅広い技術分野が対象となっている。そのため、公募の時点で、どのような提案がなされるかはわからず、具体的な目標の設定は難しいという背景がある。

このような背景はあるが、公募の開始時には具体的な目標値が示されていることが望ましいため、少なくとも公募要領等に、何らかの目標水準は記載すべきと思われる。

(3) 研究開発マネジメント

本研究開発は 2050 年の温室効果ガス排出量の半減を目指した超長期の視野に立った技術開発であることから、研究期間を 7 年という長期に設定しており、実施開始から 3 年目と 5 年目に中間評価を計画している。この中間評価により、事業の方向性の修正等を図ることが期待出来る。

また、研究拠点を中心とした提案を、限られた数 (~5 件以内) 採択し、実施することを想定しており、研究拠点のリーダーシップの下に連携をとって研究開発を行う計画となっている。このように密接な連携を維持しつつ最大 7 年という長期間に渡って継続的に研究開発を実施することで、重要分野に関する技術の蓄積をはかることが期待出来る。

(4) 研究開発成果

本研究開発で取組む革新的な技術開発では、様々な太陽光スペクトルの吸収に適した新材料の開発や量子ナノ構造を用いた半導体材料の物性制御法の開発などこれまでとは異なる技術の開発による成果が想定され、将来の太陽電池市場における日本の競争力の強化が期待される。

特に、多くの論文や特許の創出も期待され、我が国の科学技術の優位性を高めることが期待できる。

(5) 実用化・事業化の見通し

太陽電池生産量は 2006 年末時点で世界全体において日本企業のシェアが約 1/3 である。一方、太陽光発電協会による「日本の産業ビジョン」によれば 2030 年の太陽光発電の市場規模は 2 兆円にのぼり、太陽光発電産業は今後非常に大きな産業となっていくと思われる。

本研究開発は超長期的な技術開発を進め、革新的な技術により太陽光発電の変換効率の向上及び発電コストの低減を目指すものであるが、それらの技術の開発は、短期的にも現状の太陽電池の特性向上に役立つ技術への波及効果が期待でき、我が国の太陽光発電産業の国際競争力の維持向上につながっていくものと期待される。

(6) その他特記事項

特になし

5. 総合評価	<p>本研究開発は研究拠点を中心とした強固な体制で、海外の研究機関との研究協力も行いながら、従来技術の延長上にはない革新的な技術の開発を推進するものであり、民間活動のみでは実施しえない分野の技術開発である。また、本研究開発は太陽光発電の技術開発により新エネルギー利用の中長期的な成長支援を行い、温室効果ガスの排出量削減への寄与が期待できるものであると同時に、我が国の太陽光発電産業の国際競争力の維持向上につながっていくものであり NEDO 事業として推進していくことが適切である。</p>
---------	--

「革新的太陽光発電技術研究開発(革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)」(案)に対するパブリックコメント募集の結果について

平成20年3月18日  
NEDO技術開発機構  
新エネルギー技術開発部

NEDO POST 3において標記基本計画(案)に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。  
お寄せいただきましたご意見を検討し、別添の基本計画に反映させていただきました。  
みなさまからのご協力を頂き、ありがとうございました。

1. パブリックコメント募集期間  
平成20年2月22日～平成20年2月28日
2. パブリックコメント投稿数<有効なもの>  
計0件
3. パブリックコメントの内容とそれに対する考え方  
なし

以上

【特許リスト】

①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	シャープ株式会社	2009-026416	国内	2009/2/6	登録	化合物半導体太陽電池及び化合物半導体太陽電池の製造方法	安居院高明、高本達也
2	東京大学、新日本石油株式会社	WO 2009/110618	PCT	2009/3/7	公開	複合材料、光電変換材料、色素増感太陽電池、色素増感太陽電池素子、光電変換素子製造法、および酸化チタン結晶構造分析方法	瀬川浩司、藤沢潤一、内田聡、久保貴哉
3	シャープ株式会社	2009-294377	国内	2009/12/25	登録	多接合型太陽電池	佐々木和明、安居院高明
4	シャープ株式会社	PCT/JP2010/051389	PCT	2010/2/2	国際公開	化合物半導体太陽電池および化合物半導体太陽電池の製造方法	安居院高明、高本達也
5	JX日鉱日石エネルギー株式会社、東京大学	2010-135152	国内	2010/6/14	公開	反射防止膜	中山慶祐、渡邊良祐、宮野健次郎
6	名城大学	2012-009785	国内	2010/6/28	公開	Ⅲ族窒化物系太陽電池及びその製造方法	岩谷素顕、竹内哲也、上山智、赤崎勇、天野浩
7	名城大学	2012-009784	国内	2010/6/28	公開	半導体素子、及び半導体素子の転位低減方法	岩谷素顕、竹内哲也、上山智、赤崎勇、天野浩
8	名城大学	2012-009783	国内	2010/6/28	公開	Ⅲ族窒化物系太陽電池	岩谷素顕、竹内哲也、上山智、赤崎勇、天野浩
9	JX日鉱日石エネルギー株式会社	2010-218826	国内	2010/9/29	公開	光電変換素子	中山慶祐、後藤正直
10	シャープ株式会社、東京大学	2010-270658	国内	2010/12/9	出願	反射防止膜、太陽電池セル、反射防止膜の製造方法、および太陽電池セルの製造方法	佐々木和明、肥後昭男他
11	シャープ株式会社	PCT/JP2010/073572	PCT	2010/12/27	国際公開	多接合型化合物半導体太陽電池	佐々木和明

12	JX日鉱日石エネルギー株式会社	PCT/JP2011/005406	PCT	2011/9/27	公開	光電変換素子	中山慶祐、後藤正直
13	JX日鉱日石エネルギー株式会社	2011-130574	国内	2011/6/10	出願	光電変換素子	林慎也、中山慶祐、後藤正直
14	JX日鉱日石エネルギー株式会社	2011-135564	国内	2011/6/17	出願	光電変換素子	林慎也、中山慶祐、後藤正直
15	兵庫県立大学	2011-047878	国内	2011	出願	光電変換素子及びその製造方法	伊藤省吾、ドイコンニユーエン
16	兵庫県立大学	2011-047868	国内	2011	出願	光電変換素子及びその製造方法	伊藤省吾、漁俊宏
17	電気通信大学	2012-042360	国内	2012/2	出願	量子ドットの形成方法および太陽電池	山口浩一
18	JX日鉱日石エネルギー株式会社、東京大学	2012-085552	国内	2012/4/4	出願	光電変換素子	中山慶祐、後藤正直、林慎也、大内太、中野義昭、宮野健次郎、渡辺健太郎、杉山正和
19	JX日鉱日石エネルギー株式会社	PCT/JP2012/003285	PCT	2012/5/18	出願	光電変換素子	林慎也、中山慶祐、後藤正直
20	JX日鉱日石エネルギー株式会社	101120635	外国	2012/6/8	出願	光電変換素子	林慎也、中山慶祐、後藤正直
21	シャープ株式会社	2012-206443	国内	2012/9/20	審査請求	集光型太陽光発電装置の太陽電池	大木和樹
22	シャープ株式会社	2012-215910	国内	2012/9/28	出願	集光型太陽光発電装置の太陽電池	十楚博行
23	電気通信大学	2013-034949	国内	2013/2	出願	量子ドットの形成方法および太陽電池	山口浩一
24	シャープ株式会社	2014-042804	国内	2014/3/5	審査請求	化合物半導体太陽電池および化合物半導体太陽電池の製造方法	安居院高明、高本達也
25	東京大学	2013-260712	国内	2013/12/18	出願	ガラス部材の製造方法及びガラス部材	岡田至崇、宮野健次郎、杉山正和、Efrain E. Tamayo R.、渡辺健太郎、星



							井 拓也、玉 置 亮
--	--	--	--	--	--	--	---------------

【特許リスト】

②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	産業技術総合研究所	2008-277853	国内	2008/10/29	出願	近赤外光を吸収するポリシラン薄膜及びその製造方法	橋浩昭
2	産業技術総合研究所	2009-028871	国内	2009/2/10	公開	光電変換素子およびその製造方法	近藤道雄、鯉田崇
3	産業技術総合研究所、東北大学	2009-044457	国内	2009/2/26	審査請求	薄膜太陽電池用基板およびそれを用いた薄膜太陽電池	齋均他
4	産業技術総合研究所、コーニングホールディングジャパン合同会社	2009-080627	国内	2009/3/27	公開	多接合型光学素子	近藤道雄、永井武彦、湯田洋平、野毛宏
5	物質・材料研究機構	2009-077948	国内	2009/3/27		ショットキー型接合素子とこれを用いた光電変換素子及び太陽電池	松木伸行、色川芳宏、伊高健治、鯉沼秀臣、角谷正友
6	産業技術総合研究所	2009-096581	国内	2009/4/13	出願	可視光吸収性薄膜及びその製造方法	橋浩昭
7	科学技術振興機構	2009-276867	PCT→ 日本	2009/12/4	公開	n型半導体薄膜、ホモpn接合素子及び薄膜太陽電池並びにn型半導体薄膜及びホモpn接合素子の製造方法	細野秀雄、神谷利夫、平野正浩、小郷洋一、野村研二、平松秀典
8	パナソニック電気株式会社	2009-166837	国内	2009/7/15	出願	p型半導体膜及び太陽電池	根上卓之、山本輝明
9	産業技術総合研究所	2009-170244	国内	2009/7/21	出願	有機光電変換装置	長谷川達生、山田寿一
10	産業技術総合研究所	2009-184330	国内	2009/8/7	公開	多積層量子ドット構造体および製造方法、それを用いた太陽電池素子および発光素子	菅谷武芳
11	物質・材料研究機構	2009-233602	国内	2009/10/7		ワイドギャップ半導体のバンドギャップ電子物性の計測方法	中野由崇、松木伸行、色川芳宏、角谷正友
12	パナソニック電気株式	2010-011382	国内	2010/1/21	出願	太陽電池	根上卓之、山本輝

	会社						明
13	学校法人東海大学	2010-045049	国内	2010/3/2	公開	多結晶ゲルマニウムおよび多結晶シリコンゲルマニウム	磯村雅夫
14	物質・材料研究機構	PCT/JP2010/055574	PCT	2010/3/26		ショットキー型接合素子とこれを用いた光電変換素子及び太陽電池	松木伸行、色川芳宏、伊高健治、鯉沼秀臣、角谷正友
15	東京農工大学	2010-074336	国内	2010/3/29	審査未請	ソーラーセルの接合方法及び接合型ソーラーセル装置	鮫島俊之
16	理化学研究所	2010-094361	国内	2010/4/15	公開	太陽電池	小椎八重航、中村優男、川崎雅司、永長直人、田口康二郎、十倉好紀、古川信夫
17	産業技術総合研究所、三菱重工業株式会社	13/391971	PCT→米国	2010/6/10	出願	多接合光電変換装置、集積型多接合光電変換装置、並びにその製造方法	近藤道雄、鯉田崇、竹内良昭、坂井智嗣、山内康弘
18	産業技術総合研究所、三菱重工業株式会社	10811587.4	PCT→EPO	2010/6/10	出願	多接合光電変換装置、集積型多接合光電変換装置、並びにその製造方法	近藤道雄、鯉田崇、竹内良昭、坂井智嗣、山内康弘
19	産業技術総合研究所、三菱重工業株式会社	201080037798.7	PCT→中国	2010/6/10	出願	多接合光電変換装置、集積型多接合光電変換装置、並びにその製造方法	近藤道雄、鯉田崇、竹内良昭、坂井智嗣、山内康弘
20	産業技術総合研究所、三菱重工業株式会社	2011-528689	PCT→日本	2010/6/10	出願	多接合光電変換装置、集積型多接合光電変換装置、並びにその製造方法	近藤道雄、鯉田崇、竹内良昭、坂井智嗣、山内康弘
21	パナソニック電気株式会社	2010-138574	国内	2010/6/17	出願	太陽電池	根上卓之、山本輝明
22	産業技術総合研究所、三菱重工業	99119704	PCT→台湾	2010/6/17	公開	多接合光電変換装置、集積型多接合光電変換装置、	近藤道雄、鯉田崇、竹内良

	株式会社					並びにその製造方法	昭、坂井智嗣、山内康弘
23	京セラ株式会社	2010-147853	国内	2010/6/29	みなし取下げ	半導体基板の表面処理方法	黒部憲一
24	パナソニック電気株式会社	2010-204615	国内	2010/9/13	出願	半導体膜及び太陽電池	根上卓之、山本輝明
25	三菱重工業株式会社、産業技術総合研究所	2010-226840	国内	2010/10/6	公開	光電変換装置の製造方法	中野慎也、竹内良昭、近藤道雄、松井卓矢
26	学校法人東海大学	2010-239605	国内	2010/10/26	公開	光電変換素子	磯村雅夫
27	パナソニック電気株式会社	100102162	台湾	2011/1/20	出願	太陽電池	根上卓之、山本輝明
28	パナソニック電気株式会社	PCT/JP11/051010	PCT	2011/1/20	出願	太陽電池	根上卓之、山本輝明
29	東京農工大学	2010-021463	PCT→日本	2011/2/20	出願	電子源電極を用いた固体薄膜の形成方法	越田信義、太田敢行
30	Riken	2011/0253204	米国	2011/4/7	出願	SOLAR CELL	Wataru Koshibae, Masao Nakamura, Masashi Kawasaki, Naoto Nagaosa, Yasujiro Taguchi, Yoshinori Tokura, Nobuo Furukawa
31	産業技術総合研究所、コニングホールディングジャパン合同会社	2011-115630	国内	2011/5/24	みなし取下げ	半導体薄膜結晶の製造方法および装置	永井武彦、近藤道雄、野毛宏
32	パナソニック電気株式会社	PCT/JP2011/063047	PCT	2011/6/7	公開	半導体膜及び太陽電池	根上卓之、山本輝明
33	京セラ株式会社	PCT/JP2011/064921	PCT	2011/6/29	公開	半導体基板の表面処理方法、半導体基板、および太陽電池の製造方法	黒部憲一

34	東京工業大学、栃木県、トーマイダイヤ	2011-144393	国内	2011/6/29	出願	金属担持ダイヤモンド微粉の製造方法および金属担持ダイヤモンド微粉	吉本護他
35	パナソニック電気株式会社	2011-159280	国内	2011/7/20	出願	化合物薄膜及び太陽電池	根上卓之、山本輝明
36	東京工業大学	2011-179997	国内	2011/8/9	公開	半導体基材およびその製造方法	半那他
37	三菱重工業株式会社、産業技術総合研究所	2011-211025	国内	2011/9/27	出願	光電変換装置の製造方法及び光電変換装置	中野慎也、竹内良昭、近藤道雄、松井卓矢
38	三菱重工業株式会社、産業技術総合研究所	WO 2012/046606	PCT	2011/9/28	公開	光電変換装置の製造方法	中野慎也、竹内良昭、近藤道雄、松井卓矢
39	産業技術総合研究所	2011-227787	国内	2011/10/7	出願	半導体素子の接合方法および接合構造	水野英範、牧田紀久夫
40	産業技術総合研究所	2011-227787	国内	2011/10/17	出願	半導体素子の接合方法および接合構造	水野英範、牧田紀久夫
41	東京農工大学	2012-059935	国内	2012/3/16	審査未請	積層ソーラーセルの製造方法	鮫島俊之
42	産業技術総合研究所	2012-098950	国内	2012/4/24	出願	多積層量子ドット構造体および製造方法、それを用いた太陽電池素子	菅谷武芳
43	産業技術総合研究所、コニングホールディングジャパン合同会社	PCT/JP2012/063352	PCT	2012/5/24	出願	半導体薄膜結晶の製造方法および装置	永井武彦、近藤道雄、野毛宏
44	産業技術総合研究所	2011-176765	国内	2012/8/12	出願	太陽電池セルを設計する方法及び太陽電池セルの特性を求めるためのシミュレーションプログラム	宮寺哲彦
45	東北大学	2011-225534	国内	2011/10/13	出願	単層カーボンナノチューブの製造方法	島山力三、加藤俊頭
46	東北大学	2011-111890	国内	2011/5/18	出願	窒素内包フラーレンの製造装置、及び、製造方法	島山力三、金子俊郎他
47	東北大学	2011-174235	国内	2011/8/9	出願	ニッケル内包フラーレンの製造方法、及び、製造装置	金子俊郎、島山力三他

48	東京農工大学	特願2013-045433	国内	2013/3/7	公開	積層ソーラーセルの製造方法	鮫島俊之
49	産業技術総合研究所	2013-138702	国内	2013/7/2	出願	表面に多数のナノ金属体を転写した構造体の製造方法	水野 英範
50	産業技術総合研究所 日本化薬（株）	2014-039627	国内	2014/2/28	公開	電荷移動錯体およびその結晶、その結晶の製造方法、電界効果トランジスタ、並びに、光電変換素子	長谷川達生、堤潤也、山田寿一、松岡悟志、貞光雄一、濱田雅裕
51	東京農工大学	特願2015-031822	国内	2015/2/20	出願	処理装置及び薄膜の製造方法	越田信義、白樫淳一、須田隆太郎、八木麻実子

【特許リスト】

③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	東京工業大学	2009-188108	国内	2009/8/14	出願	金属ナノ粒子分散膜を表面に有する太陽電池	伊原学、田中佑宜
2	東京工業大学	2010-063647	PCT→ 日本	2010/3/19	出願	細孔の中に金属ナノ粒子が担持されている多孔質構造を有する太陽電池	伊原学、鉢村浩徳、田中佑宜
3	東京工業大学	2011-056804	PCT→ 日本	2011/3/22	出願	細孔の中に金属ナノ粒子が担持されている多孔質構造を有する太陽電池	伊原学、鉢村浩徳、田中佑宜
4	奈良先端科学技術大学院大学	2009-181850	国内	2009/8/4	出願	太陽電池の評価方法および評価装置ならびにその利用	冬木隆
5	奈良先端科学技術大学院大学	2009-181855	国内	2009/8/4	出願	薄膜太陽電池の評価方法、評価装置および製造方法、並びに透明導電膜電極における直列抵抗の評価方法および評価装置	冬木隆
6	国立高等専門学校機構	2011-039061	国内	2011/2/24	出願	太陽電池用テルル化カドミウム粉末、太陽電池用テルル化カドミウム膜および太陽電池	岡本保
7	シャープ株式会社	2010-055877	国内	2010/3/12	出願	光発電素子および多接合薄膜太陽電池	宮西晋太郎、高秀樹、高場芳朗、宮本亮史、五來敦、松原弘、原潤一、斉藤潤、町田智弘
8	シャープ株式会社	PCT/JP2011/055781	PCT	2011/3/12	出願	光発電素子および多接合薄膜太陽電池	宮西晋太郎、高秀樹、高場芳朗、宮本亮史、五來敦、

							松原弘、 原潤一、 斉藤潤、 町田智弘
9	龍谷大学	2010-020343	国内	2010/2/1	公開	酸化物薄膜およびその製造方法、並びにターゲットおよび酸化物焼結体の製造方法	山添誠司、 和田隆博
10	龍谷大学	2010-020344	国内	2010/2/1	公開	酸化物膜及びその製造方法、並びにターゲット及び酸化物焼結体の製造方法	山添誠司、 和田隆博
11	龍谷大学	2010-170331	国内	2010/7/29	公開	酸化物膜及びその製造方法、並びにターゲット及び酸化物焼結体の製造方法	山添誠司、 和田隆博
12	龍谷大学	PCT/JP2010/073700	PCT	2010/12/28	公開	酸化物膜及びその製造方法、並びにターゲット及び酸化物焼結体の製造方法	山添誠司、 和田隆博
13	龍谷大学、新潟大学	2011-026678	国内	2011/2/10	出願	酸化物膜の製造方法	山添誠司、 和田隆博、 坪井望
14	旭硝子株式会社	2011-022815	国内	2011/2/4	出願	フッ素ドーパ酸 化スズ膜形成方法	一色眞誠
15	富士電機株式会社	2009-217357	国内	2009/9/18	審査請求	グラフェン薄膜の製造方法とグラフェン薄膜	藤井健志、 清水了典
16	富士電機株式会社	2009-264804	国内	2009/11/20	出願	グラフェン薄膜の製造方法	藤井健志、 清水了典
17	富士電機株式会社	2010-034150	国内	2010/2/19	出願	グラフェン膜の製造方法	藤井健志、 清水了典
18	富士電機株式会社	2010-034152	国内	2010/2/19	出願	グラフェン膜の製造方法	藤井健志、 清水了典
19	富士電機株式会社	2010-062772	国内	2010/3/18	出願	グラフェン膜の製造方法	藤井健志
20	富士電機株式会社	2010-173264	国内	2010/8/2	出願	グラフェン薄膜の製造方法	藤井健志、 佐藤まり子
21	富士電機株式会社	2010-261336	国内	2010/11/24	破棄（国内優先）	（グラフェンを含む導電性薄膜および透明導電膜	藤井健志、 荻本泰史



22	富士電機株式会社	2010-275728	国内	2010/12/10	出願	グラフェンとその製造方法	藤井健志、佐藤まり子
23	三菱電機株式会社	2009-220506	国内	2009/9/25	出願	光電変換装置とその製造方法	金本恭三、小西博文、時岡秀忠、山向幹雄、淵上宏幸
24	三菱電機株式会社	2009-271596	国内	2009/11/30	出願	積層型光電変換装置及びその製造方法	小西博文、時岡秀忠、山向幹雄、金本恭三、淵上宏幸
25	三菱電機株式会社	2010-042791	国内	2010/2/26	出願	光電変換装置とその製造方法	金本恭三、小西博文、時岡秀忠、山向幹雄、淵上宏幸
26	三菱電機株式会社	2010-044201	国内	2010/3/1	出願	太陽電池の製造方法	山向幹雄、金本恭三、小西博文、時岡秀忠、淵上宏幸
27	三菱電機株式会社	2010-061574	国内	2010/3/17	出願	光電変換装置とその製造方法	金本恭三、時岡秀忠、淵上宏幸
28	三菱電機株式会社	2010-288704	国内	2010/12/24	破棄（国内優先）	光電変換装置とその製造方法、および光電変換モジュール	金本恭三、小西博文、時岡秀忠、山向幹雄、淵上宏幸
29	株式会社カネカ	2009-209553	国内	2009/9/10	出願	透明電極	口山崇、山本憲治
30	株式会社カネカ	2009-275740	国内	2009/12/3	出願	化合物半導体太陽電池	口山崇、山本憲治
31	株式会社カネカ	2010-052517	PCT→日本	2010/2/19	出願	薄膜太陽電池モジュール	吉河訓太、市川満、山本憲治
32	株式会社カネカ	2010-194495	国内	2010/8/31	出願	並列光電変換積層デバイスとその直列集積光電変換装置	宇津恒、市川満、口山崇、小泉玄介、山本憲治
33	パナソニック株式会社	2011-034681	国内	2011/2/21	出願	量子ドット半導	曾谷直哉

	会社					体膜及びその形成方法	
34	東京工業大学	2011-257310	国内	2011/11/25	出願	シリコン太陽電池およびその製造法	小長井誠
35	東京工業大学	2011-096055	PCT→日本	2011/4/22	出願	シリコン太陽電池およびその製造法	小長井誠
36	龍谷大学	2012-068695	国内	2012/3/26	出願	酸化物膜及びその製造方法	和田隆博
37	パナソニック株式会社	PCT/JP2011/079305	PCT	2011/12/19	出願	量子ドット半導体膜及びその形成方法	曾谷直哉
38	パナソニック株式会社	2012-046396	国内	2012/3/2	出願	光電変換装置及び光電変換装置の製造方法	大山達史他
39	旭硝子株式会社	2011-244570	国内	2011/11/8	出願	フッ素ドーパ酸化スズ膜形成方法	一色眞誠、池田徹
40	富士電機株式会社	2011-100765	国内	2011/4/28	出願	グラフェンの製造方法	藤井健志、佐藤まり子
41	富士電機株式会社	2011-203509	PCT→日本	2011/9/16	出願	グラフェンの製造方法	藤井健志、佐藤まり子
42	富士電機株式会社	2011-203514	PCT→日本	2011/9/16	出願	グラフェンの製造方法	藤井健志、佐藤まり子
43	富士電機株式会社	2012-512126	PCT→日本	2012/3/5	出願	グラフェンを含む導電性薄膜および透明導電膜	藤井健志、荻本泰史
44	三菱電機株式会社	2011-097642	国内	2011/4/25	破棄（国内優先）	光電変換装置とその製造方法、および光電変換モジュール	金本恭三、小西博文、時岡秀忠、山向幹雄、淵上宏幸
45	三菱電機株式会社	2011-260856	国内	2011/11/29	出願	光電変換装置とその製造方法、および光電変換モジュール	金本恭三、小西博文、時岡秀忠、山向幹雄、淵上宏幸
46	三菱電機株式会社	13/334892	米国	2011/12/22	出願	Photoelectric converter and manufacturing method	金本恭三、小西博文、時岡秀忠、山向幹雄、淵上宏幸
47	三菱電機株式会社	2012-045647	国内	2012/3/1	出願	光電変換装置とその製造方法、および光電変換	金本恭三、小西博文、時岡

						モジュール	秀忠、山向幹雄、 淵上宏幸
48	東京工業大学	2012-027100	PCT	2012/2/10	出願	光学制御層を有する太陽電池セル	Manabu Ihara, 学伊原, Yuki Tanaka, 佑宜田中, Hironorihachimura, 浩徳鉢村
49	東京工業大学 富士電機株式会社	2013-183793	国内	2013/9/5	出願	薄膜太陽電池及び薄膜太陽電池の形成方法	藤井健志、佐藤マリ子、小長井誠
50	東京工業大学、旭硝子株式会社	2012-181713	国内	2012/8/20	出願	透明導電性酸化物膜付き基体およびその製造方法	一色眞誠、小長井誠
51	シャープ株式会社	2015-003767	国内	2015/1/13	出願	太陽電池及びその製造方法	齊藤潤
52	龍谷大学	PCT/JP2013/055646 W02013/146095 A1	PCT	2013. 03. 01	公開	酸化物膜及びその製造方法	山添 誠司, 和田隆博
53	龍谷大学	14/387, 219 US2015/0048281 A1 (公開日2015. 02. 19)	米国	2014. 09. 22	公開	酸化物膜及びその製造方法	山添 誠司, 和田隆博
54	龍谷大学	201380015666. 8 CN104204279A	中国	2014. 09. 22	公開	酸化物膜及びその製造方法	山添 誠司, 和田隆博
55	龍谷大学	2014-7029160	韓国	2014. 10. 17	出願	酸化物膜及びその製造方法	山添 誠司, 和田隆博
56	旭硝子株式会社	2012-18722	国内	2012/8/20	出願	透明導電性酸化物膜付き基体およびその製造方法	一色眞誠
57	三菱電機株式会社	2013-039790	国内	2013/2/28	審査請求	光電変換装置およびその製造方法	小西 博文、津田祐樹、 金本 恭三、時岡秀忠、 淵上 宏幸
58	三菱電機株式会社	2014-078857	国内	2014/4/7	出願	光電変換装置およびその製造方法	小西 博文、津田祐樹、 品川 友

							宏、時岡 秀忠、 淵上 宏 幸
59	三菱電機株式会社	2014-241460	国内	2014/11/28	出願	薄膜太陽電池及 びその製造方法	津田 祐 樹、小西 博文、 品川 友 宏、時岡 秀忠、 淵上 宏 幸
60	三菱電機株式会社	2015-000835	国内	2015/1/6	出願	薄膜太陽電池お よびその製造方 法	小西 博 文、津田 祐樹、 品川 友 宏、時岡 秀忠、 淵上 宏 幸
61	三菱電機株式会社	2015-081413	国内	2015/4/13	出願	薄膜太陽電池、 及び薄膜太陽電 池の製造方法	津田 祐 樹、小西 博文、 品川 友 宏、時岡 秀忠、 淵上 宏 幸
62	株式会社カネカ	2014-143758	PCT→ 日本	2014/7/12	出願	複合太陽電池、 太陽電池モジュ ール、および集 光太陽電池	宇津 恒 、市川 満、日野 将志、 目黒 智 巳、山本 憲治

【特許リスト】

⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	旭化成株式会社	2012-053445	国内	2012/3/9	公開	化合物半導体基板およびその製造方法	外賀寛崇 諸原理
2	旭化成株式会社	2012-159816	国内	2012/7/18	公開	化合物半導体基板およびその製造方法	森安嘉貴 外賀寛崇 諸原理
3	旭化成株式会社	2013-029329	国内	2013/2/18	公開	化合物半導体積層体及びその製造方法	諸原理 外賀寛崇
4	旭化成株式会社	2013-049231	国内	2013/3/12	公開	化合物半導体積層体及び半導体装置	諸原理 外賀寛崇
5	旭化成株式会社	2013-185361	国内	2013/9/6	公開	化合物半導体基板の製造方法及び化合物半導体基板	外賀寛崇 諸原理
6	旭化成株式会社	2014-162823	国内	2014/8/8	公開	化合物半導体基板	諸原理 外賀寛崇
7	大同特殊鋼株式会社	2013-250882	国内	2013/12/4	公開	フレネルレンズ	荒木建次 永井宏和 鈴木政也 徳安大地 保浦健二
8	大同特殊鋼株式会社	2014-223929	海外	2014/11/4	出願	フレネルレンズ	荒木建次 永井宏和 鈴木政也 徳安大地 保浦健二
9	国立大学法人 神戸大学	特願 2012-198903	国内	2012/9/10	出願	半導体装置及び半導体装置の製造方法	喜多隆 原田幸弘 別所侑亮 保田英洋
10	国立大学法人 神戸大学	PCT 国際 出願 PCT/JP2013/005332	PCT	2013/9/9	出願	半導体装置及び半導体装置の製造方法	喜多隆 原田幸弘 別所侑亮 保田英洋
11	国立大学法人 神戸大学	特願 2014-113313	国内	2014/5/30	出願	高変換効率太陽電池およびその調整方法	喜多隆 原田幸弘 渡部大樹 朝日重雄

【論文リスト】

①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名・ページ番号	査読	発表年
1	Ryuji Oshima, Ayami Takata, Yoshitaka Okada	東大	Strain-compensated InAs/GaNAs quantum dots for use in high- efficiency solar cells	Applied Physics Letters 93, 083111	有	2008
2	Ayami Takata, Ryuji Oshima, Hidemi Shigekawa, Yoshitaka Okada	東大	Growth of GaNAs films with As <sub>2</sub> source in atomic hydrogen- assisted molecular beam epitaxy	Journal of Crystal Growth, 310, 2234	有	2008
3	Ryuji Oshima, Yuta Nakamura, Ayami Takata, Yoshitaka Okada	東大	Optical properties of multi-stacked InAs/GaNAs strain- compensated quantum dots	Journal of Crystal Growth, 310, 3710	有	2008
4	Daisuke Iida, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, H. Alam, Hiroshi Amano, Isamu Akasaki	名城大	One-sidewall- seededepitaxial lateralovergrowth of a- plane GaN by metalorganicvapor- phaseepitaxy	Journal of Crystal Growth, 311, pp.2887- 2890	有	2008
5	Daisuke Iida, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Hiroshi Amano, Isamu Akasaki	名城大	Control of p-type conduction in a-plane Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> N (0<x<0.10) grown on r-plane sapphire substrate by metalorganic vapor- phase epitaxy	Journal of Crystal Growth, 310, pp.4996- 4998	有	2008
6	Daisuke Iida, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Hiroshi Amano, Isamu Akasaki	名城大	High hole concentration in Mg-doped a-plane Ga <sub>1- x</sub> In <sub>x</sub> N (0<x<0.30) grown on r-plane sapphire substrate by metalorganic vapor phase epitaxy	Applied Physics Letters, 93, p.182108	有	2008
7	M. Iwaya, A. Miura, R. Senda, T. Nagai, T. Kawashima, D. Iida, S. Kamiyama, H. Amano, I. Akasaki	名城大	Control of stress and crystalline quality in GaInN films used for green emitters	Journal of Crystal Growth, 310, pp.4920- 4922	有	2008
8	Y. Kawai, S. Ohsuka, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, I. Akasaki	名城大	InGaN growth on ZnO (0001) substrate by metalorganic vapor phase epitaxy	physica status solidi, (c)5, pp.3023- 3025	有	2008
9	M. Iwaya, A. Miura, R. Senda, T. Nagai, T. Kawashima, D. Iida, S. Kamiyama, H. Amano, I. Akasaki	名城大	Control of stress and crystalline quality in GaInN films used for green emitters	Journal of Crystal Growth, Vol. 310, pp.4920-4922	有	2008
10	Yoshitaka Okada, Ryuji Oshima, Ayami Takata	東大	Characteristics of InAs/GaNAs strain- compensated quantum dot solar cell	Journal of Applied Physics, 106, 024306	有	2009

11	Naoya Miyashita, Shuhei Ichikawa, Yoshitaka Okada	東大	Improvement of GaInNAsSb films fabricated by atomic hydrogen-assisted molecular beam epitaxy	Journal of Crystal Growth, 311, 3249	有	2009
12	Ayami Takata, Ryuji Oshima, Yasushi Shoji, Yoshitaka Okada	東大	Optical studies on InAs/InGaAs/GaNAs strain-compensated quantum dots grown on GaAs (001) by molecular beam epitaxy	Journal of Crystal Growth, 311, 1774	有	2009
13	Ryuji Oshima, Yasushi Shoji, Ayami Takata, Yoshitaka Okada	東大	Growth of InGaAs/GaNAs strain-compensated quantum dot superlattice on GaAs (311)B by molecular beam epitaxy	Journal of Crystal Growth, 311, 1770	有	2009
14	T. Kubo, H. Segawa	東大	Current situation and future prospects of next-generation organic photovoltaics	Proceedings of 6th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, pp. 683-688	無	2009
15	K. Shimomoto, J. Ohta, T. Fujii, R. Ohba, A. Kobayashi, M. Oshima, H. Fujioka	東大	Epitaxial growth of InN films on lattice matched EuN buffer layers	J. Cryst. Growth, 311, 4483	有	2009
16	R. Ohba, J. Ohta, K. Shimomoto, T. Fujii, K. Okamoto, A. Aoyama, T. Nakano, A. Kobayashi, H. Fujioka, M. Oshima	東大	Epitaxial growth of high purity cubic InN films on MgO substrates using HfN buffer layers by pulsed laser deposition	J. Solid State Chemistry, 182, 2887	有	2009
17	K. Shimomoto, A. Kobayashi, K. Ueno, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka, H. Amanai, S. Nagao, H. Horie	東大	Room-temperature epitaxial growth of high-quality m-plane InGaN films on ZnO substrates	Phys. Status Solidi Rapid Research Letter 3, 124	有	2009
18	J. Ting DY, K. Tamaki, Y. Sanehira, J. Nakazaki, S. Uchida, T. Kubo, and H. Segawa	東大	Meso-meso Linked Porphyrin Dimers for Dye-sensitized Solar Cells	Electrochemistry Vol. 77, 206-209, 2009	有	2009
19	久保貴哉、藤沢潤 一、瀬川浩司	東大	有機無機ハイブリッド太 陽電池の新展開	電気化学および工業物 理化学, 77, 977	無	2009
20	T. Yayama, Y. Kangawa, K. Kakimoto, A. Kokitu	九州大	Method for theoretical prediction of indium composition in coherently grown InGaN thin films	Jpn. J. Appl. Phys., 48, pp. 088004-088005	有	2009

21	山口真史	豊田工大	高効率太陽電池の現状と課題	応用物理, 第78巻第5号, pp. 416-421	無	2009
22	T. Sasaki, K. Arafune, W. Metzger, M. J. Romero, K. Jones, M. Al-Jassim, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Characterization of carrier recombination in lattice-mismatched InGaAs solar cells on GaAs substrates	Solar Energy Materials and Solar Cells, 93(6-7), pp. 936-940	有	2009
23	Takuo Sasaki, Hidetoshi Suzuki, Akihisa Sai, Jong-Han Lee, Masamitsu Takahashi, Seiji Fujikawa, Koji Arafune, Itaru Kamiya, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	In situ Real-Time X-ray Reciprocal Space Mapping during InGaAs/GaAs Growth for Understanding Strain Relaxation Mechanisms	Applied Physics Express, 2(8), 085501	有	2009
24	Daisuke Iida, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Hiroshi Amano, Isamu Akasaki	名城大	Activation energy of Mg in a-plane Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> N (0<x<0.17)	Physica Status Solidi B, 246, pp.1188-1190	有	2009
25	Tetsuya Matsubara, Ryota Senda, Daisuke Iida, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Hiroshi Amano, Isamu Akasaki	名城大	Growth of thick GaInN on grooved (10-1-1) GaN/ (10-1-2) 4H-SiC	Journal of Crystal Growth, 311, pp. 2926-2928	有	2009
26	Yohjiro Kawai, Shinya Ohsuka, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Hiroshi Amano, Isamu Akasaki	名城大	InGaN growth with various InN mole fractions on m-plane ZnO substrate by metalorganic vapor phase epitaxy	Journal of Crystal Growth, 311, pp. 2929-2932	有	2009
27	Y. Kawai, S. Ohsuka, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, I. Akasaki	名城大	Improvement of crystalline quality of InGaN epilayers on various crystal planes of ZnO substrate by metal-organic vapor phase epitaxy	physica status solidi, (c)6, pp. S486-S489	有	2009
28	R. Senda, T. Matsubara, D. Iida, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, I. Akasaki	名城大	Realization of high-crystalline-quality and thick GaInN films	physica status solidi, (c)6, pp. S502-S505	有	2009
29	Alec M. Fischer, Zhihao Wu, Kewei Sun, Qiyuan Wei, Yu Huang, Ryota Senda, Daisuke Iida, Motoaki Iwaya, Hiroshi Amano, Fernando A. Ponce	名城大、アリゾナ州立大	Misfit Strain Relaxation by Stacking Fault Generation in InGaN Quantum Wells Grown on m-Plane GaN	Applied Physics Express, 2, 041002	有	2009
30	高本達也	シャープ	高効率III-V族化合物半導体太陽電池	日本結晶成長学会誌, 2010年1月号	無	2010



31	佐々木和明、高本達也	シャープ	化合物太陽電池	KEC 情報誌 (No. 215号)	無	2010
32	Katsuhisa Yoshida, Yoshitaka Okada, Nobuyuki Sano	東大	Self-consistent simulation of intermediate band solar cells: Effect of occupation rates on device characteristics	Applied Physics Letters, 97, 133503	有	2010
33	Ayami Takata, Ryuji Oshima, Yasushi Shoji, Kouichi Akahane, Yoshitaka Okada	東大	Growth of multi-stacked InAs/GaNAs quantum dots grown with As <sub>2</sub> source in atomic hydrogen-assisted molecular beam epitaxy	Physica E 42, 2745	有	2010
34	Ryuji Oshima, Ayami Takata, Yasushi Shoji, Kouichi Akahane, Yoshitaka Okada	東大	InAs/GaNAs strain-compensated quantum dots stacked up to 50 layers for use in high-efficiency solar cell	Physica E 42, 2757	有	2010
35	Yasushi Shoji, Ryuji Oshima, Ayami Takata, Yoshitaka Okada	東大	The effect of spacer layer thickness on vertical alignment of InGaAs/GaNAs quantum dots grown on GaAs(311)B substrate	Physica E 42, 2768	有	2010
36	Yasushi Shoji, Ryuji Oshima, Ayami Takata, Yoshitaka Okada	東大	Structural properties of multi-stacked self-organized InGaAs quantum dots grown on GaAs (311)B substrate	Journal of Crystal Growth, 312, 226	有	2010
37	Yosuke Saito, Akira Ogawa, Satoshi Uchida, Takaya Kubo, Hiroshi Segawa	東大	Energy-Storable Dye-Sensitized Solar Cells with Interdigitated Nafion/Polypyrrole-Pt Comb-Like Electrodes	Chem. Lett., 39, pp.488-489	有	2010
38	Yosuke Saito, Kentaro Iwata, Satoshi Uchida, Takaya Kubo, Hiroshi Segawa	東大	Evaluation Methods of Energy-Storable Dye-Sensitized Solar Cells	Trans. Tech. Periodicals, 658, pp.507-510	有	2010
39	Yosuke Saito, Satoshi Uchida, Takaya Kubo, Hiroshi Segawa	東大	Surface-Oxidized Tungsten Layers for Energy-Storable Dye-Sensitized Solar Cells	Thin Solid Films, 518, pp.3033-3036	有	2010
40	Y. Wang, R. Onitsuka, M. Deura, W. Yu, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	In situ reflectance monitoring for the MOVPE of strain-balanced InGaAs/GaAsP quantum-wells	J. Cryst. Growth, vol.312, no.8, pp.1364-1369	有	2010
41	R. Onitsuka, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	High material efficiency MOVPE growth with in situ monitoring	J. Crystal Growth, 312, pp.1343-1347	有	2010
42	T. Fujii, A. Kobayashi, K. Shimomoto, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka	東大	Structural Characteristics of GaN/InN Heterointerfaces Fabricated at Low Temperatures by Pulsed Laser Deposition	Appl. Phys. Express 3, 021003	有	2010

43	T. Kajima, A. Kobayashi, K. Shimomoto, K. Ueno, T. Fujii, J. Ohta, H. Fujioka, M. Oshima	東大	Layer-by-layer growth of InAlN films on ZnO(000-1) substrates at room temperature	Appl. Phys. Express 3, 021001	有	2010
44	K. Ueno, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka	東大	Structural and optical properties of nonpolar AlN (11 $\bar{2}$ 0) films grown on ZnO (11 $\bar{2}$ 0) substrates with a room-temperature GaN buffer layer	Jpn. J. App. Phys., 49, 060213	有	2010
45	K. Shimomoto, A. Kobayashi, K. Mitamura, K. Ueno, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka	東大	Characteristics of m-plane InN films grown on ZnO substrates at room temperature by pulsed laser deposition	Jpn. J. App. Phys., 49, 080202	有	2010
46	K. Shimomoto, A. Kobayashi, K. Ueno, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka	東大	Characteristics of thick m-plane InGaN films grown on ZnO substrates using room temperature epitaxial buffer layers	Appl. Phys. Express 3, 061001	有	2010
47	T. Fujii, K. Shimomoto, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka	東大	Growth orientation control of semipolar InN films using yttria-stabilized zirconia substrates	Jpn. J. App. Phys., 49, 080204	有	2010
48	K. Ueno, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka	東大	Improvement in the crystalline quality of semipolar AlN (1 $\bar{1}$ 0 $\bar{2}$ ) films using ZnO substrates with self-organized nanostripes	Appl. Phys. Express 3, 041002	有	2010
49	S. Inoue, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka	東大	Investigation into conversion efficiency of InGaN solar cells fabricated on GaN and ZnO substrates	Phys. Status Solidi, (RRL)4, 88	有	2010
50	A. Kobayashi, K. Shimomoto, J. Ohta, H. Fujioka, M. Oshima	東大	Optical polarization characteristics of m-plane InGaN films coherently grown on ZnO substrates	Phys. Status Solidi, (RRL)4, 188	有	2010
51	A. Kobayashi, S. Kawano, K. Ueno, J. Ohta, H. Fujioka	東大	Improvements in optical properties of semipolar r-plane GaN films grown using atomically flat ZnO substrates and room-temperature epitaxial buffer layers	Jpn. J. App. Phys., 49, 100202	有	2010
52	K. Ueno, A. Kobayashi, J. Ohta, H. Fujioka	東大	Structural properties of semipolar Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N (1 $\bar{1}$ 0 $\bar{3}$ ) films grown on ZnO substrates using room temperature epitaxial buffer layers	Phys. Status Solidi, (A)207, 2149	有	2010

53	T. Fujii, A. Kobayashi, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka	東大	Structural characteristics of semipolar InN (11_21) films grown on yttria stabilized zirconia substrates	Phys. Status Solidi, (A)207, 2269	有	2010
54	T. Kajima, A. Kobayashi, K. Ueno, K. Shimomoto, T. Fujii, J. Ohta, H. Fujioka, M. Oshima	東大	Room-temperature epitaxial growth of high quality m-plane InAlN films on nearly lattice-matched ZnO substrates	Jpn. J. App. Phys., 49, 070202	有	2010
55	T. Kubo, K. Akitsu, S. Uchida, H. Segawa, N. Otani, M. Tomura, T. Tamura, and M. Matsumura	東大	Polymer-Sensitized Solar Cells with Novel Soluble Polythiophene Derivatives	Journal of Photopolymer Science and Technology Vol. 23, 283-286, 2010	有	2010
56	岡田至崇, 八木修平, 大島隆治	東大	解説: 量子ドット超格子による高効率太陽電池の開発	応用物理 Vol. 79, 206, 2010	有	2010
57	Y. Arai, and H. Segawa	東大	J-Aggregation of Protonated meso-Tetrakis(sulfonatothienyl)porphyrin Isomers: Morphological Selection of Self-Assembled Nanostructures from Structurally Similar Zwitterionic Porphyrins	Chemical Communications Vol. 46, 4279-4281, 2010	有	2010
58	A. Takata, R. Oshima, Y. Shoji, K. Akahane, and Y. Okada	東大	Growth of multi-stacked InAs/GaNAs quantum dots grown with As <sub>2</sub> source in atomic hydrogen-assisted molecular beam epitaxy	Physica E Vol. 42, 2745, 2010	有	2010
59	Kensuke Nishioka, Tsuyoshi Sueto, Masaki Uchida, Yasuyuki Ota	宮崎大	Detailed analysis of temperature characteristics of an InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell	Journal of Electronic Materials, vol. 39, pp. 704-708	有	2010
60	T. Yayama, Y. Kangawa, K. Kakimoto, A. Kokitu	九州大	Theoretical analyses of In incorporation and compositional instability in coherently grown InGaN thin films	Phys. Stat. Solidi, (c)7, pp. 2249-2251	有	2010
61	N. Kakuda, T. Kaizu, M. Takahasi, S. Fujikawa, K. Yamaguchi	電通大	Time-Resolved X-ray Diffraction Measurements of High-Density InAs Quantum-Dots on Sb/GaAs Layers and the Suppression of Coalescence by Sb-Irradiated Growth Interruption	Jpn. J. App. Phys., 49, pp. 095602 1-4	有	2010

62	Boussairi Bouzazi, Kenichi Nishimura, Hidetoshi Suzuki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Properties of Chemical Beam Epitaxy grown GaAs <sub>0.995</sub> No <sub>0.005</sub> homo- junction solar cell	Current Applied Physics, 10, S188- S190	有	2010
63	山口真史	豊田工 大	超高効率化合物太陽電池 －材料・技術動向と課題 －	工業材料, 第 58 巻第 4 号, pp. 49-53	無	2010
64	Hidetoshi Suzuki, Makoto Inagaki, Takahiko Honda, Yoshio Ohshita, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Improvements in Optoelectrical Properties of GaAsN by Controlling Step Density during Chemical Beam Epitaxy Growth	Japanese Journal of Applied Physics, 49, 04DP08	有	2010
65	Boussairi Bouzazi, Hidetoshi Suzuki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Nitrogen Related Electron Trap with High Capture Cross Section in n-Type GaAsN Grown by Chemical Beam Epitaxy	Applied Physics Express, 3, 051002	有	2010
66	Jong-Han Lee, Hidetoshi Suzuki, Xiuxun Han, Katahiko Honda, Tomohiro Tanaka, Jong-Ha Hwang, Boussairi Bouzazi, Makoto Inagaki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Relation between N-H complexes and electrical properties of GaAsN determined by H implantation	Current Applied Physics, 10, S431- S434	有	2010
67	Boussairi Bouzazi, Hidetoshi Suzuki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Nitrogen-Related Recombination Center in GaAsN Grown by Chemical Beam Epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 49, 051001	有	2010
68	T. Sasaki, H. Suzuki, A. Sai, M. Takahasi, S. Fujikawa, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工 大	In situ Study of Strain Relaxation Mechanisms During Lattice- mismatched InGaAs/GaAs Growth by X-ray Reciprocal Space Mapping	Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 1268, EE06-02	有	2010
69	Hidetoshi Suzuki, Takuo Sasaki, Akihisa Sai, Yoshio Ohshita, Itaru Kamiya, Masafumi Yamaguchi, Masamitsu Takahasi, Seiji Fujikawa	豊田工 大	Real-time observation of anisotropic strain relaxation by three- dimensional reciprocal space mapping during InGaAs/GaAs (001) growth	Applied Physics Letters, 97, 041906	有	2010
70	山口真史、大下祥 雄、小島信晃、佐々 木拓生	豊田工 大	多接合太陽電池開発と評 価解析	表面, 第 48 巻第 10 号, pp. 313-330	無	2010
71	Boussairi Bouzazi, Hidetoshi Suzuki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Properties of a Nitrogen-Related Hole Trap Acceptor-Like State in p-Type GaAsN	Jpn. J. Appl. Phys., 49, 121001	有	2010

			Grown by Chemical Beam Epitaxy			
72	Y. Fujiyama, Y. Kuwahara, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, I. Akasaki	名城大	GaN/GaN p-i-n light-emitting solar cells	physica status solidi, (c)7, pp. 2382-2385	有	2010
73	Z. H. Wu, K. W. Sun, Q. Y. Wei, A. M. Fischer, F. A. Ponce, Y. Kawai, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, I. Akasaki	名城大	Misfit strain relaxation in m-plane epitaxy of InGaN on ZnO	Appl. Phys. Lett., 96, 071909	有	2010
74	Y. Kuwahara, Y. Fujiyama, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, I. Akasaki	名城大	Nitride-based light-emitting solar cell	physica status solidi, (c)7, pp. 1807-1809	有	2010
75	Daisuke Iida, Kensuke Nagata, Takafumi Makino, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Hiroshi Amano, Isamu Akasaki, Akira Bandoh, Takashi Udagawa	名城大	Growth of GaInN by Raised-Pressure Metalorganic Vapor Phase Epitaxy	Applied Physics Express, 3, 075601	有	2010
76	Daisuke Iida, Kenta Tamura, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Hiroshi Amano, Isamu Akasaki	名城大	Compensation effect of Mg-doped a- and c-plane GaN films grown by metalorganic vapor phase epitaxy	Journal of Crystal Growth, 312, pp. 3131-3135	有	2010
77	Ryota Senda, Tetsuya Matsubara, Daisuke Iida, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Hiroshi Amano, Isamu Akasaki	名城大	Strong Emission from GaInN/GaN Multiple Quantum Wells on High-Crystalline-Quality Thick m-Plane GaInN Underlying Layer on Grooved GaN	Applied Physics Express, 2, p. 061004	有	2010
78	Z. H. Wu, K. W. Sun, Q. Y. Wei, A. M. Fischer, F. A. Ponce, Y. Kawai, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, I. Akasaki	名城大、アリゾナ州立大	Misfit strain relaxation in m-plane epitaxy of InGaN on ZnO	Applied Physics Letters, 96, p. 071909	有	2010
79	Yosuke Kuwahara, Takahiro Fujii, Yasuharu Fujiyama, Tohru Sugiyama, Motoaki Iwaya, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano	名城大、名古屋大	Realization of Nitride-Based Solar Cell on Freestanding GaN Substrate	Applied Physics Express, 3, 111001	有	2010
80	高本達也	シャープ	化合物多接合型太陽電池	日経エレクトロニクス	無	2011

81	高本達也	シャープ	超高効率太陽電池の最新動向	オプトニューズ誌「テクノロジー・トレンド」	無	2011
82	Ayami Takata, Kouichi Akahane, Naoki Yamamoto, Yoshitaka Okada	東大	Optical gain of multi-stacked InAs quantum dots grown on InP (311)B substrate by strain-compensation technique	physica status solidi, (c)8, 254	有	2011
83	Ryuji Oshima, Yoshitaka Okada, Ayami Takata, Shuhei Yagi, Kouichi Akahane, Ryo Tamaki, Kenjiro Miyano	東大	High-density quantum dot superlattice for application to high-efficiency solar cells	physica status solidi, (c)8, 619	有	2011
84	Ayami Takata, Ryuji Oshima, Yasushi Shoji, Kouichi Akahane, Yoshitaka Okada	東大	Evaluation of multi-stacked InAs/GaNAs self-assembled quantum dots on GaAs (001) grown using different As species	Journal of Crystal Growth, 324, 158	有	2011
85	Yoshitaka Okada, Takayuki Morioka, Katsuhisa Yoshida, Ryuji Oshima, Yasushi Shoji, Tomoya Inoue, Takashi Kita	東大	Increase of photocurrent by optical transitions via intermediate quantum states in direct-doped InAs/GaNAs strain-compensated quantum dot solar cell	Journal of Applied Physics, 109, p. 024301	有	2011
86	Takayuki Morioka, Yoshitaka Okada	東大	Dark current characteristics of InAs/GaNAs strain-compensated quantum dot solar cells	Physica E, 44, p. 390	有	2011
87	Ryuji Oshima, Yoshitaka Okada, Ayami Takata, Shuhei Yagi, Kouichi Akahane, Ryo Tamaki, Kenjiro Miyano	東大	High-density quantum dot superlattice for application to high-efficiency solar cells	physica status solidi, (c)8, p. 619	有	2011
88	R. Watanabe, K. Miyano	東大	Metal nanoparticles in a photovoltaic cell: Effect of metallic loss	AIP Advances 1, 042154/1-12	有	2011
89	Y. Wang, M. Deura, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	Post and in situ characterization of strain control and crystal quality in quantum well solar cell structure	Materials Science Forum, v 675 677, pp. 73-76	有	2011
90	Ryusuke Onitsuka, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano	東大	High material-efficiency MOVPE of GaAs without degradation of photovoltaic performance	Journal of Crystal Growth, vol. 315, issue 1, pp. 53-56	有	2011

91	Masakazu Sugiyama, Kenichi Sugita, Yunpeng Wang, Yoshiaki Nakano	東大	In situ curvature monitoring for metalorganic vapor phase epitaxy of strain-balanced stacks of InGaAs/GaAsP multiple quantum wells	Journal of Crystal Growth, vol.315, issue 1, pp.1-4	有	2011
92	S.Ma, H.Sodabanlu, K.Watanabe, M.Sugiyama, Y.Nakano	東大	Strain-compensation measurement and simulation of InGaAs/GaAsP multiple quantum wells by metal organic vapor phase epitaxy using wafer-curvature	J. Appl. Phys., vol.110, p.113501	有	2011
93	Y.Wen, Y.Wang, K.Watanabe, M.Sugiyama, Y.Nakano	東大	Effect of GaAs step layer on InGaAs/GaAsP quantum well solar cells	Appl. Phys. Express, vol.4, pp.122301 1-3	有	2011
94	J.W.Liu, A.Kobayashi, S.Toyoda, H.Kamada, A.Kikuchi, J.Ohta, H.Fujioka, H.Kumigashira, M.Oshima	東大	Band Offsets of Polar and Nonpolar GaN/ZnO Heterostructures Determined by Synchrotron Radiation Photoemission Spectroscopy	Phys. Status Solidi, (B)248, 956	有	2011
95	H.Tamaki, A.Kobayashi, J.Ohta, M.Oshima, H.Fujioka	東大	Dependence on composition of the optical polarization properties of m-plane $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ commensurately grown on ZnO	Appl. Phys. Lett., 99, 061912	有	2011
96	K.Okubo, A.Kobayashi, J.Ohta, H.Fujioka, M.Oshima	東大	Polarity dependence of structural and electronic properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InN}$ interfaces	Appl. Phys. Express 4, 091002	有	2011
97	T.Kajima, A.Kobayashi, K.Shimomoto, K.Ueno, T.Fujii, J.Ohta, H.Fujioka, M.Oshima	東大	X-ray reciprocal space mapping study on semipolar InAlN films coherently grown on ZnO substrates	Phys. Stat. Solidi, RRL5, 400	有	2011
98	K.Ueno, A.Kobayashi, J.Ohta, M.Oshima, H.Fujioka	東大	Demonstration of enhanced optical polarization for improved deep ultraviolet light extraction in coherently-grown semipolar $\text{Al}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{N}/\text{AlN}$ on ZnO substrates	Appl. Phys. Lett., 99, 121906	有	2011
99	A.Kobayashi, K.Ueno, J.Ohta, H.Fujioka	東大	Coherent growth of r-plane GaN films on ZnO substrates at room temperature	Phys. Status Solidi, (A)208, 834	有	2011
100	A.Kobayashi, T.Ohnishi, M.Lippmaa, Y.Oda, A.Ishii, J.Ohta,	東大	Polarity replication across m-plane GaN/ZnO interfaces	Appl. Phys. Lett., 99, 181910	有	2011

	M. Oshima, H. Fujioka					
101	J. W. Liu, A. Kobayashi, S. Toyoda, H. Kamada, A. Kikuchi, J. Ohta, H. Fujioka, H. Kumigashira, M. Oshima	東大	Band offsets of polar and nonpolar GaN/ZnO heterostructures determined by synchrotron radiation photoemission spectroscopy	Phys. Status Solidi, (B)248, 956	有	2011
102	F. Y. Shih, A. Kobayashi, S. inoue, J. Ohta, M. Oshima, H. Fujioka	東大	Growth of group III nitride nanostructures on nano-imprinted sapphire substrates	Thin Solid Films, 519, pp. 6534-6537	有	2011
103	Y. Takahashi, T. Tatsuma	東大	Solid State Photovoltaic Cells Based on Localized Surface Plasmon-Induced Charge Separation	Appl. Phys. Lett., 99, 182110	有	2011
104	Y. Sakai, I. Tanabe, T. Tatsuma	東大	Orientation-selective removal of upright Ag nanoplates from a TiO <sub>2</sub> film	Nanoscale, 3, pp. 4101-4103	有	2011
105	E. Kazuma, T. Yamaguchi, N. Sakai, T. Tatsuma	東大	Growth behaviour and plasmon resonance properties of photocatalytically deposited Cu nanoparticles	Nanoscale, 3, pp. 3641-3645	有	2011
106	T. Kawawaki, Y. Takahashi, T. Tatsuma	東大	Enhancement of Dye-Sensitized Photocurrents by Gold Nanoparticles: Effects of Dye-Particle Spacing	Nanoscale, 3, pp. 2865-2867	有	2011
107	Y. Liu, H. Lin, J. Ting DY, K. Tamaki, J. Nakazaki, D. Nakayama, S. Uchida, T. Kubo, and H. Segawa	東大	N-Fused Carbazole-Zinc Porphyrin-Free-Base Porphyrin Triad for efficient Near-IR Dye-Sensitized Solar Cells	Chemical Communications, Vol. 47, 4010-4012, 2011	有	2011
108	C-H. Huang, X-Y. Wang, M. Igarashi, A. Murayama, Y. Okada, I. Yamashita, and S. Samukawa	東大	Optical absorption characteristic of highly ordered and dense two-dimensional array of silicon nanodisks	Nanotechnology Vol. 22, 105301, 2011	有	2011
109	R. Jono, J. Fujisawa, H. Segawa, and K. Yamashita	東大	Theoretical Study of the Surface Complex between TiO <sub>2</sub> and TCNQ showing Interfacial Charge Transfer Transitions	Journal of Physical Chemistry Letters Vol. 2, 1167-1170, 2011	有	2011
110	Y. Arai, and H. Segawa	東大	Cl <sup>-</sup> Complexation Induced H <sup>-</sup> and J <sup>-</sup> Aggregation of meso-Tetrakis(4-sulfonatophenyl)porphy	Journal of Physical Chemistry B Vol. 15, 7773-7780, 2011	有	2011



			rin Diacid in Aqueous Solution			
111	Y. Arai, K. Tsuzuki, and H. Segawa	東大	Homogeneously Mixed Porphyrin J-aggregates with Rod-shaped Nanostructures via Zwitterionic Self-assembly	Physical Chemistry Chemical Physics Vol. 14, 1270-1276, 2012	有	2011
112	R. Oshima, J. Y. Huang, N. Miyashita, K. Matsubara, Y. Okada, and F. A. Ponce	東大	Transmission electron microscopy study of GaInNAs(Sb) thin films grown by atomic hydrogen-assisted molecular beam epitaxy	Applied Physics Letters Vol. 99, 191907, 2011	有	2011
113	Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大	Tracking Error analysis of Concentrator Photovoltaic Module Using Total 3 - Dimensional Simulator	AIP Conference Proceedings, 1407, pp. 281-284	有	2011
114	N. Shibata, Y. Ota, Y. Sukurada, Y. Takahashi, I. Kumagai, K. Araki, K. Nishioka	宮崎大	Output comparison of CPV and flat-plate systems in Japanese meteorological condition	AIP Conference Proceedings, 1407, pp. 281-284	有	2011
115	Y. Sakurada, Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大	Temperature Characteristics Analysis of Triple - Junction Solar Cell under Concentrated Conditions using Spice Diode Model	AIP Conference Proceedings, 1407, pp. 216-219	有	2011
116	Y. Sakurada, Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大	Simulation of Temperature Characteristics of InGaP/InGaAs/Ge Triple-Junction Solar Cell under Concentrated Light	Japanese Journal of Applied Physics, 50, No. 4, 04DP13	有	2011
117	川野潤、寒川義裕、屋山巴、伊藤智徳、柿本浩一、瀬瀬明伯	九州大	GaAsN 気相エピタキシーにおける混晶組成の理論的検討	日本結晶成長学会誌 38, 128	有	2011
118	J. Kawano, Y. Kangawa, T. Yayama, K. Kakimoto, A. Koukitu	九州大	Thermodynamic analysis for the prediction of N composition in coherently grown GaAsN for a multi-junction solar cell	Proceedings of 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, #148	有	2011
119	Duy-Cuong Nguyen, Kenji Takehara, Toshihiro Ryo, Seigo Ito	兵庫県立大	Back Contact Materials for Superstrate CuInS <sub>2</sub> Solar Cells	Energy Procedia, 10, pp. 49-54	有	2011
120	T. Ryo, D. - C. Nguyen, M. Nakagiri, N. Toyoda, H. Matsuyoshi, S. Ito	兵庫県立大	Characterization of superstrate type CuInS <sub>2</sub> solar cells deposited by spray pyrolysis method	Thin Solid Films, 519, pp. 7184-7188	有	2011

121	Norihisa Hoarano, Duy-Cuong Nguyen and Seigo Ito	兵庫 県立大	Superstrate CuInS <sub>2</sub> Solar Cells Fabricated by Spray-Pyrolysis Methods	Journal of Advanced Oxidation Technologies, Volume 16, Number 1(5) pp. 102-106.	有	2011
122	Boussairi Bouzazi, Hidetoshi Suzuki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	A recombination center in p-type GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Solar Energy Materials & Solar Cells, 95, pp.281-283	有	2011
123	Makoto Inagaki, Hidetoshi Suzuki, Kazumasa Mutaguchi, Atsuhiko Fukuyama, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Shallow Carrier Trap Levels in GaAsN Investigated by Photoluminescence	Japanese Journal of Applied Physics, 50(4), 04DP14	有	2011
124	Takuo Sasaki, Hidetoshi Suzuki, Akihisa Sai, Masamitsu Takahasi, Seiji Fujikawa, Itaru Kamiya, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Growth temperature dependence of strain relaxation during InGaAs/GaAs(001) heteroepitaxy	Journal of Crystal Growth, 323(1), pp.13-16	有	2011
125	Boussairi Bouzazi, Jong-Han Lee, Hidetoshi Suzuki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Origin Investigation of a Nitrogen-Related Recombination Center in GaAsN Grown by Chemical Beam Epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 50(1), 051001	有	2011
126	Takahiko Honda, Kazuma Ikeda, Makoto Inagaki, Hidetoshi Suzuki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Effect of Low Growth Rate in Chemical Beam Epitaxy on Carrier Mobility and Lifetime of p-GaAsN Films	Japanese Journal of Applied Physics, 50(8), 08KD06	有	2011
127	Takuo Sasaki, Hidetoshi Suzuki, Masamitsu Takahashi, Yoshio Ohshita, Itaru Kamiya, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	X-ray reciprocal space mapping of dislocation- mediated strain relaxation during InGaAs/GaAs(001) epitaxial growth	Journal of Applied Physics, 110(11), 113502	有	2011
128	Tatsuro Nakao, Takahiro Fujii, Toru Sugiyama, Shota Yamamoto, Daisuke Iida, Motoaki Iwaya, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano	名城 大、名 古屋大	Fabrication of Nonpolar a-Plane Nitride-Based Solar Cell on r-Plane Sapphire Substrate	Applied Physics Express, 4, 101001	有	2011

129	Yousuke Kuwahara, Takahiro Fujii, Toru Sugiyama, Daisuke Iida, Yasuhiro Isobe, Yasuharu Fujiyama, Yoshiki Morita, Motoaki Iwaya, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano	名城 大、名 古屋大	GaN <sub>N</sub> -Based Solar Cells Using Strained-Layer GaInN/GaInN Superlattice Active Layer on a Freestanding GaN Substrate	Applied Physics Express, 4, 021001	有	2011
130	Toru Sugiyama, Yosuke Kuwahara, Yasuhiro Isobe, Takahiro Fujii, Kentaro Nonaka, Motoaki Iwaya, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano	名城 大、名 古屋大	Microstructures of GaInN/GaInN Superlattices on GaN Substrate	Applied Physics Express, 4, 015701	有	2011
131	Takahiro Fujii, Yousuke Kuwahara, Daisuke Iida, Yasuharu Fujiyama, Yoshiki Morita, Toru Sugiyama, Yasuhiro Isobe, Motoaki Iwaya, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano	名城 大、名 古屋大	GaN <sub>N</sub> -based solar cells using GaInN/GaInN superlattices	physica status solidi, (c)8, pp.2463-2465	有	2011
132	K. Narahara, Y. Shoji, H. Tanaka, R. Hasegawa, K. Nakano, T. Kita, Y. Okada	東大	Properties of closely- stacked InAs/GaNAs self-organized quantum dot structure	Physica E, 査読中	有	2012
133	Y. Shoji, K. Akimoto, Y. Okada	東大	Optical properties of multi-stacked InGaAs/GaNAs quantum dot solar cell fabricated on GaAs (311)B substrate	Journal of Applied Physics, Vol. 112, 064314, 2012	有	2012
134	Y. Shoji, K. Narahara, H. Tanaka, T. Kita, K. Akimoto, Y. Okada	東大	Effect of spacer layer thickness on multi- stacked InGaAs quantum dots grown on GaAs (311)B substrate for application to in intermediate band solar cells	Journal of Applied Physics, 111, 074305	有	2012
135	N. Ahsan, N. Miyashita, M. M. Islam, K. M. Yu, W. Walukiewicz, Y. Okada	東大	Two-photon excitation in an intermediate band solar cell structure	Applied Physics Letters, 100, 172111	有	2012

136	Y. Okada	東大	High-efficiency Quantum Nanostructure Solar Cells: Present and Future Opportunities (Special article)	Journal of the Japan Institute of Energy 91, 382	有	2012
137	K. Yoshida, Y. Okada, N. Sano	東大	Device simulation of intermediate-band solar cells: Effect of doping and concentration	SPIE Photonics West 2012, San Francisco	有	2012
138	Haibin Wang, Jotaro Nakazaki, Takaya Kubo, Hiroshi Segawa	東大	Excitation Energy Transfer from Quantum Dots to Porphyrin J-aggregates in Hybrid LangmuirBlodgett Multilayers	Chemistry Letters, 41, 122	有	2012
139	H. Sodabanlu, S. Ma, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	Effects of Strain on the Performance of InGaAs/GaAsP Multiple-Quantum-Well Solar Cells Correlated with In situ Curvature Monitoring	Appl. Phys. Express, vol. 5, pp.062301 1-3	有	2012
140	Y. Wang, K. Watanabe, Y. Wen, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	Strain-balanced InGaAs/GaAsP superlattice solar cell with enhanced short-circuit current and a minimal drop in open-circuit voltage	Appl. Phys. Express, v5, n5, pp.052301 1-3	有	2012
141	H. Fujii, Y. Wang, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	High-aspect-ratio Structures for Efficient Light Absorption and Carrier Transport in InGaAs / GaAsP Multiple Quantum Well Solar Cells	IEEE J. Photovoltaics, v 3, n 2, p 859-67, (2013).	有	2012
142	M. Sugiyama, Y. Wang, K. Watanabe, T. Morioka, Y. Okada, Y. Nakano	東大	Photocurrent Generation by Two-Step Photon Absorption with Quantum-Well Superlattice Cell	IEEE Journal of Photovoltaics, in press	有	2012
143	Y. Wang, Y. Wen, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	A Superlattice Solar Cell With Enhanced Short-Circuit Current and Minimized Drop in Open-Circuit Voltage	IEEE J. Photovoltaics, vol.2, no. 3, pp.387-392	有	2012
144	Y. Wen, Y. Wang, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	Enhanced Carrier Escape in MSQW Solar Cell and Its Impact on Photovoltaics Performance	IEEE J. Photovoltaics, vol.2, no. 2, pp.221-226	有	2012
145	Y. Wang, S. Ma, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	Management of highly-strained heterointerface in InGaAs/GaAsP strain-balanced superlattice for photovoltaic application	J. Crystal Growth, Volume 352, Issue 1, pp.194-198	有	2012

146	H. Fujii, Y. Wang, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	Suppressed lattice relaxation during InGaAs/GaAsP MQW growth with InGaAs and GaAs ultra-thin interlayers	J. Crystal Growth, Volume 352, Issue 1, pp.239-244	有	2012
147	S. Ma, Y. Wang, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	Effect of hetero-interfaces on in situ wafer curvature behavior in InGaAs/GaAsP strain-balanced MQWs	J. Crystal Growth, Volume 352, Issue 1, pp.245-248	有	2012
148	Kentaroh Watanabe, Yugo Yamada, Minato Senou, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano	東大	Fabrication of Monolithic Integrated Series-Connected GaAs PV Cells for Concentrator Applications	Jpn. J. Appl. Phys., in press	有	2012
149	Hiromasa Fujii, Kentaroh Watanabe, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano	東大	Effect of Quantum Well on the Efficiency of Carrier Collection in InGaAs / GaAsP Multiple Quantum Well Solar Cells	Jpn. J. Appl. Phys., in press	有	2012
150	Hassanet Sodabanlu, Shaojun Ma, Kentaroh Watanabe, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano	東大	Impact of Strain Accumulation on InGaAs/GaAsP Multiple Quantum Wells Solar Cells: Direct Correlation Between In Situ Strain Measurement and Cell Performances	Jpn. J. Appl. Phys., in press	有	2012
151	Hassanet Sodabanlu, Shaojun Ma, Kentaroh Watanabe, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano	東大	Effects of Background Zn Doping on the Performance of InGaAs/GaAsP Multiple Quantum Wells Solar Cells Grown by a Planetary MOVPE Reactor	Jpn. J. Appl. Phys., in press	有	2012
152	ShaoJun Ma, Hassanet Sodabanlu, Kentaroh Watanabe, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano	東大	Optimization of gas-switching sequence for InGaAs/GaAsP superlattice structures using in situ wafer's curvature monitoring	Jpn. J. Appl. Phys., in press	有	2012
153	I. Tanabe, T. Tatsuma	東大	Size- and Shape-Controlled Electrochemical Deposition of Metal Nanoparticles by Tapping Mode Atomic Force Microscopy	J. Phys. Chem. C, 116, pp.3995-3999	有	2012
154	A. Kogo, N. Sakai, T. Tatsuma	東大	Photoelectrochemical Analysis on Size-Dependent Electronic Structures of Gold Clusters Supported on TiO <sub>2</sub>	Nanoscale, 4, 4217	有	2012
155	T. Yamaguchi, E. Kazuma, N. Sakai, T. Tatsuma	東大	Photoelectrochemical Responses from Polymer-Coated Plasmonic Copper Nanoparticles on TiO <sub>2</sub>	Chem. Lett., in press	有	2012

156	T. Kinoshita, J. Fujisawa, J. Nakazaki, S. Uchida, T. Kubo, and H. Segawa	東大	Enhancement of Near-IR Photoelectric Conversion in Dye-Sensitized Solar Cells Using an Osmium Sensitizer with Strong Spin-Forbidden Transition	Journal of Physical Chemistry Letters Vol. 3, 394-398, 2012	有	2012
157	M. F. Budiman, W. Hu, M. Igarashi, R. Tsukamoto, T. Isoda, K. M Itoh, I. Yamashita, A. Murayama, Y. Okada, and S. Samukawa	東大	Control of optical bandgap energy and optical absorption coefficient by geometric parameters in sub-10 nm silicon-nanodisc array structure	Nanotechnology Vol. 23, 065302, 2012	有	2012
158	K. Nishikawa, Y. Takeda, K. Yamanaka, T. Motohiro, D. Sato, J. Ota, N. Miyashita, and Y. Okada	東大	Over 100 ns intrinsic radiative recombination lifetime in type II InAs/GaAs <sub>1-x</sub> Sb <sub>x</sub> quantum dots	Journal of Applied Physics Vol. 111, 044325, 2012	有	2012
159	K. Nishikawa, Y. Takeda, T. Motohiro, D. Sato, J. Ota, N. Miyashita, and Y. Okada	東大	Extremely long carrier lifetime over 200 ns in GaAs wall-inserted type II InAs quantum dots	Applied Physics Letters Vol. 100, 113105, 2012	有	2012
160	A. Kogo, N. Sakai, and T. Tatsuma	東大	Photoelectrochemical Analysis on Size-Dependent Electronic Structures of Gold Clusters Supported on TiO <sub>2</sub>	Nanoscale Vol. 4, 4217-4221, 2012	有	2012
161	Y. Okada, K. Yoshida, and Y. Shoji	東大	Quantum Dot Solar Cells	Advanced Solar Cell Materials, Technology, Modeling and Simulation, 2012	有	2012
162	T. Kaizu, Y. Tamura, M. Igarashi, W. Hu, R. Tsukamoto, I. Yamashita, S. Samukawa, and Y. Okada	東大	Photoluminescence from GaAs nanodisks fabricated by using combination of neutral beam etching and atomic hydrogen-assisted molecular beam epitaxy regrowth	Applied Physics Letters Vol. 101, 113108, 2012	有	2012
163	T. Kinoshita, J. Fujisawa, J. Nakazaki, S. Uchida, T. Kubo, and H. Segawa	東大	Visible to Near-Infrared Photoelectric Conversion in a Dye-Sensitized Solar Cell Using Ru(II) Porphyrin with Azopyridine Axial Ligands	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 51, 10NE02, 2012	有	2012
164	S. Manzhos, J. Fujisawa, H. Segawa, and K. Yamashita	東大	Isotopic Substitution as a Strategy to Control Non-Adiabatic Dynamics in Photoelectrochemical Cells: Surface Complexes between TiO <sub>2</sub>	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 51, 10NE03, 2012	有	2012

			and Dicyanomethylene Compounds			
165	K. Akitsu, T. Kubo, S. Uchida, H. Segawa, N. Otani, M. Tomura, T. Tamura, and M. Matsumura	東大	Polymer-Sensitized Solar Cells Using Polythiophene Derivatives with Directly Attached Carboxylic Acid Groups	Japanese Journal of Applied Physics Vol.51, 10NE04, 2012	有	2012
166	Y. Arai, and H. Segawa	東大	Significantly Enhanced Adsorption of Bulk Self-Assembling Porphyrins at Solid/Liquid Interfaces through the Self-Assembly Process	Journal of Physical Chemistry B Vol.16, 13575-13581, 2012	有	2012
167	Y. Liu, H. Lin, J. Li, J. Ting DY, K. Tamaki, J. Nakazaki, D. Nakayama, C. Nishiyama, S. Uchida, T. Kubo, and H. Segawa	東大	Ethynyl-linked Push-pull Porphyrin Heterodimers for Near-IR Dye-sensitized Solar Cells: Photovoltaic Performances versus Excited-state Dynamics	Physical Chemistry Chemical Physics Vol. 14, 16703-16712, 2012	有	2012
168	K. Yoshida, Y. Okada, and N. Sano	東大	Device simulation of intermediate band solar cells: Effects of doping and concentration	Journal of Applied Physics Vol.112, 084510, 2012	有	2012
169	A. Kobayashi, K. Ohkubo, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka	東大	Polarity control and growth mode of InN on yttria-stabilized zirconia (111) surfaces	physica status solidi (a) Vol.209, 2251, 2012	有	2012
170	D. Sato, J. Ota, K. Nishikawa, Y. Takeda, N. Miyashita, and Y. Okada	東大	Extremely long carrier lifetime at intermediate states in wall-inserted type II quantum dot absorbers	Journal of Applied Physics Vol.112, 094305, 2012	有	2012
171	N. Miyashita, N. Ahsan, M. Inagaki, M. M. Islam, M. Yamaguchi, and Y. Okada	東大	High electron mobility in Ga(In)NAs films grown by molecular beam epitaxy	Applied Physics Letters Vol.101, 222112, 2012	有	2012
172	M. M. Islam, N. Miyashita, N. Ahsan, T. Sakurai, K. Akimoto, and Y. Okada	東大	Identification of defect types in moderately Si-doped GaInNAsSb layer in p-GaAs/n-GaInNAsSb/ n-GaAs solar cell structure using admittance spectroscopy	Journal of Applied Physics Vol.112, 114910, 2012	有	2012
173	岡田至崇	東大	量子ドット太陽電池の現状と将来展望	Journal of Vacuum Society of Japan Vol. 55, 556, 2012	有	2012

174	Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大	Two-Dimensional Mapping of Power Consumption Due to Series Resistance Evaluated by Simulator for Concentrator Photovoltaic Module	Japanese Journal of Applied Physics, 51, No. 2, 02BP03	有	2012
175	Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大	Three-dimensional simulating of concentrator photovoltaic modules using ray trace and equivalent circuit simulators	Solar Energy, 86, pp. 476-481	有	2012
176	Yuya Sakurada, Yasuyuki Ota, Hiroki Watanabe, Hideyuki Murata, Kensuke Nishioka	宮崎大	Evaluation of Organic Thin Film Solar Cells Using 3-Diode Equivalent Circuit Model with Inverted Diode	Materials Science Forum, Volume 725, pp. 179-182	有	2012
177	Yasuyuki Ota, Yuya Sakurada, Kensuke Nishioka	宮崎大	2-Dimensional Mapping of Power Consumption Due to Electrode Resistance Using Simulator for Concentrator Photovoltaic Module	Materials Science Forum, Volume 725, pp. 183-186	有	2012
178	Hiroto Yano, Hirokazu Nagai, Kazuyuki Tamura, Kenji Araki, Kensuke Nishioka	宮崎大	Two-Dimensional Mapping of Localized Characteristics of Concentrator Photovoltaic Module	Materials Science Forum, Volume 725, pp. 187-190	有	2012
179	Y. Ota, H. Nagai, K. Araki, K. Nishioka	宮崎大	Temperature distribution in 820X CPV module during outdoor operation	AIP Conference Proceeding, 1477, pp. 364-367. (reviewed proceedings)	有	2012
180	K. Nishioka, K. Ikematsu, Y. Ota, K. Araki	宮崎大	Sandblasting durability of acrylic and glass Fresnel lenses for concentrator photovoltaic modules	Solar Energy, 86, pp. 3021-3025.	有	2012
181	K. Nabemoto, Y. Sakurada, Y. Ota, K. Takami, H. Nagai, K. Tamura, K. Araki, K. Nishioka	宮崎大	Effect of Anti-Soiling Layer Coated on Poly(methyl methacrylate) for Concentrator Photovoltaic Modules	Japanese Journal of Applied Physics, 51, 10ND11.	有	2012
182	J. Kawano, Y. Kangawa, T. Ito, K. Kakimoto, A. Koukitu	九州大	Thermodynamic analysis of vapor-phase epitaxial growth of GaAsN on Ge	J. Cryst. Growth 343, 105	有	2012
183	J. Kawano, Y. Kangawa, K. Kakimoto	九州大	N substitution in GaAs(001) surface under an atmosphere of hydrogen	Japanese Journal of Applied Physics 51 (2012) 10ND17.	有	2012
184	K. Sakamoto, Y. Kondo, K. Uchida, K. Yamaguchi	電通大	Quantum-Dot Density Dependence of Power Conversion Efficiency of Intermediate-Band Solar Cells	J. Appl. Phys., 112, (2012) pp. 124515 1-4.	有	2012



185	E. Saputra, J. Ohta, N. Kakuda and K. Yamaguchi	電通大	Self-Formation of In-Plane Ultrahigh-Density InAs Quantum Dots on GaAsSb/GaAs(001)	Appl. Phys. Express, 5, (2012) pp.125502 1-3	有	2012
186	D. -C. Nguyen, S. Ito, M. Inoue, S. Yusa	兵庫県立大	Superstrate CuInSe <sub>2</sub> -Printed Solar Cells on In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> /FTO/Glass Plates	Energy Science and Technology 3, pp.1-8	有	2012
187	D. -C. Nguyen, Y. Mikami, K. Tsujimoto, T. Ryo, S. Ito	兵庫県立大	Spray-pyrolyzed 3-D CuInS <sub>2</sub> solar cells on nanocrystalline-titania electrodes	Jpn. J. Appl. Phys., in press	有	2012
188	D. -C. Nguyen, S. Ito	兵庫県立大	Cu <sub>2</sub> Te Solar Cells Fabricated by Printing	Int. J. Nanotechnology, in press	有	2012
189	S. Ito, T. Ryo	兵庫県立大	Segregation of Cu-In-S Elements in the Spray-Pyrolysis-Deposited Layer for Solar Cells	Int. J. Nanotechnology, in press	有	2012
190	Duy-Cuong Nguyen, Yuki Mikami, Kazuki Tsujimoto, Toshihiro Ryo, and Seigo Ito	兵庫県立大	Spray-Pyrolyzed Three-Dimensional CuInS <sub>2</sub> Solar Cells on Nanocrystalline-Titania Electrodes with Chemical-Bath-Deposited In <sub>x</sub> (OH) <sub>y</sub> Sz Buffer Layers	Japanese Journal of Applied Physics 51, 10NC23	有	2012
191	Seigo Ito and Toshihiro Ryo	兵庫県立大	Segregation of Cu-In-S Elements in the Spray-Pyrolysis-Deposited Layer of CIS Solar Cells	Advances in Materials Science and Engineering Volume 2012, Article ID 136092	有	2012
192	Duy-Cuong Nguyen and Seigo Ito	兵庫県立大	Narrow Band Gap AgInTe <sub>2</sub> Solar Cells Fabricated by Printing Method	Energy Science and Technology, Vol. 4, No. 2, pp. 1-5	有	2012
193	Takuo Sasaki, Hidetoshi Suzuki, Makoto Inagaki, Kazuma Ikeda, Kenichi Shimomura, Masamitsu Takahashi, Miwa Kozu, Wen Hu, Itaru Kamiya, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Real-Time Structural Analysis of Compositionally Graded InGaAs/GaAs(001) Layers	IEEE Journal of Photovoltaics, 2(1), pp. 35-40	有	2012
194	Xiuxun Han, Tomohiro Tanaka, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi, Shinichiro Sato	豊田工大	Growth orientation dependent photoluminescence of GaAsN alloys	Applied Physics Letters, 100(3), 032108	有	2012
195	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Effect of Thermal Stress on a N-Related Recombination Center in GaAsN Grown by Chemical Beam Epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 51(2), 02BP02	有	2012

196	Takuo Sasaki, Kenichi Shimomura, Hidetoshi Suzuki, Masamitsu Takahasi, Itaru Kamiya, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Observation of In-Plane Asymmetric Strain Relaxation during Crystal Growth and Growth Interruption in InGaAs/GaAs(001)	Japanese Journal of Applied Physics, 51(2), 02BP01	有	2012
197	Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Japanese R&D Activities of High Efficiency III- V Compound Multi- Junction and Concentrator Solar Cells	Energy Procedia, 15: 265-274	無	2012
198	Masafumi Yamaguchi (共著)	豊田工 大	Volume1:Photovoltaic Solar Energy, Technology, 1.22 Multiple Junction Solar Cells(Pages 497-514)	Comprehensive Renewable Energy	無	2012
199	Tomoyuki Tanikawa, Yoshio Honda, Masahito Yamaguchi, Hiroshi Amano, Nobuhiko Sawaki	名古屋 大、愛 知工業 大	Strain relaxation inthick (1-101) InGaNgrown on GaN/Sisubstrate	Physica Status Solidi, (B)249, pp. 468-471	有	2012
200	Mikiko Mori, Shinichiro Kondo, Shota Yamamoto, Tatsuro Nakao, Takahiro Fujii, Motoaki Iwaya, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano	名城 大、名 古屋大	Correlation between Device Performance and Defects in GaInN-Based Solar Cells	Applied Physics Express 5, 082301	有	2012
201	Shota Yamamoto, Mikiko Mori, Yosuke Kuwahara, Takahiro Fujii, Tatsuo Nakao, Shinichiro Kondo, Motoaki Iwaya, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki, Hiroshi Amano	名城 大、名 古屋大	Properties of nitride- based photovoltaic cells under concentrated light illumination	Physica Status Solidi, (RRL)6, 145	有	2012
202	ShaoJun Ma, Yunpeng Wang, Hassanet Sodabanlu, Kentaro Watanabe, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano	東大	Optimized interfacial management for InGaAs/GaAsP strain- compensated superlattice structure	J. Crystal Growth, v 370, p 157-62, 1 (2013)	有	2013
203	E. Kazuma, T. Tatsuma	東大	Photoelectrochemical Analysis of Allowed and Forbidden Multipole Plasmon Modes of Polydisperse Ag Nanorods	Journal of Physical Chemistry C Vol.117, 2435-2441, 2013	有	2013

204	Yu Wen, Yunpeng Wang, Kentaroh Watanabe, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano	東大	Effect of GaAs Step Layer Thickness in InGaAs/GaAsP Stepped Quantum Well Solar Cell	IEEE Journal of Photovoltaics, v 3, n 1, p 289-94, Jan. (2013).	有	2013
205	M. Sugiyama, Y. Wang, H. Fujii, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Nakano	東大	A quantum-well superlattice solar cell for enhanced current output and minimized drop in open-circuit voltage under sunlight concentration	Journal of Physics D: Applied Physics, v 46, n 2, p 024001 (11 pp.), Jan. (2013).	有	2013
206	K. Okubo, A. Kobayashi, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka	東大	Electron mobility of ultrathin InN on yttria-stabilized zirconia with two-dimensionally grown initial layers	Applied Physics Letters Vol.102, 022103, 2013	有	2013
207	M. Nyman, K. Akitsu, N. Otani, M. Matsumura, T. Kubo, H. Segawa, R. ?sterbacka	東大	Charge Transport Studies on Novel PT-derivatives with Hydrophilic Anchoring Groups	Synthetic Metals Vol.164, 60-63, 2013	有	2013
208	M. Komatsu, J. Nakazaki, S. Uchita, T. Kubo, and H. Segawa	東大	A Donor-Acceptor Type Organic Dye Connected with A Quinoidal Thiophene for Dye-Sensitized Solar Cells	Physical Chemistry Chemical Physics Vol. 15, 3227-3232, 2013	有	2013
209	T. Tatsuma	東大	Plasmonic Photoelectrochemistry: Functional Materials Based on Photoinduced Reversible Redox Reactions of Metal Nanoparticles	Bulletin of the Chemical Society of Japan Vol.86, 1-9, 2013	有	2013
210	T. Kawawaki, Y. Takahashi, and T. Tatsuma	東大	Enhancement of Dye-Sensitized Photocurrents by Gold Nanoparticles: Effects of Plasmon Coupling	Journal of Physical Chemistry C Vol.117, 5901-5907, 2013	有	2013
211	Y. Shoji, K. Akimoto, and Y. Okada	東大	Self-organized InGaAs/GaAs quantum dot arrays for use in high-efficiency intermediate-band solar cells (invited paper)	Journal of Physics D: Applied Physics Vol. 46, 024002, 2013	有	2013
212	N. Miyashita, N. Ahsan, M. M. Islam., and Y. Okada	東大	Effect of antimony on uniform incorporation of nitrogen atoms in GaInNAs films for solar cell application	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol.111, 127, 2013	有	2013
213	M. M. Islam., N. Miyashita, N. Ahsan, T. Sakurai, K. Akimoto, and Y. Okada	東大	Photocapacitance study of MBE grown GaInNAsSb thin film solar cells	Journal of Crystal Growth Vol.378, 57, 2013	有	2013
214	Y. Guo, S. Inoue, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka	東大	Theoretical Investigation of the Polarity Determination for c-plane InN Grown on Yttria-Stabilized	Applied Physics Express Vol. 6, 021002, 2013	有	2013

			Zirconia (111) Substrates with Yttrium Surface Segregation			
215	M. M. Islam., N. Miyashita, N. Ahsan, and Y. Okada	東大	Defect study of molecular beam epitaxy grown undoped GaInNAsSb thin film using junction-capacitance spectroscopy	Applied Physics Letters Vol.102, 074104, 2013	有	2013
216	N. Sakai and T. Tatsuma,	東大	One-Step Synthesis of Glutathione-Protected Metal (Au, Ag, Cu, Pd, Pt) Cluster Powders	Journal of Materials Chemistry A Vol.1, 5915-5922, 2013	有	2013
217	ShaoJun Ma, Yunpeng Wang, Hassanet Sodabanlu, Kentaroh Watanabe, Masakazu Sugiyama and Yoshiaki Nakano	東大	Optimized interfacial management for InGaAs/GaAsP strain-compensated superlattice structure	J. Crystal Growth, v 370, p 157-62, 1 (2013)	有	2013
218	G. Giorgi, J. Fujisawa, H. Segawa, and K. Yamashita	東大	Unraveling the Adsorption Mechanism of Aromatic and Aliphatic Diols on the TiO <sub>2</sub> Surface: A Density Functional Theory Analysis	Physical Chemistry Chemical Physics Vol.15, 9761-9767, 2013	有	2013
219	E. Kazuma and T. Tatsuma	東大	Photoelectrochemical Analysis of Allowed and Forbidden Multipole Plasmon Modes of Polydisperse Ag Nanorods	Journal of Physical Chemistry C Vol.117, 2435-2441, 2013	有	2013
220	N. Ahsan, N. Miyashita, M. M. Islam, K. M. Yu, W. Walukiewicz, and Y. Okada	東大	Effect of Sb on GaNAs Intermediate Band Solar Cells	IEEE Journal of Photovoltaics Vol.3, 730, 2013	有	2013
221	Y. Arai, and H. Segawa	東大	Anion-controlled Aggregation of a Porphyrin at Solid-Liquid Interfaces: A Distinguished Effect of Different Aggregates in Dye-sensitized Solar Cells	Chemistry Letters Vol.42, 918-920, 2013	有	2013
222	Y. Tamura, T. Kaizu, T. Kiba, M. Igarashi, R. Tsukamoto, A. Higo, W. Hu, C. Thomas, M. E. Fauzi, T. Hoshii, I. Yamashita, Y. Okada, A. Murayama, and S. Samukawa	東大	Quantum size effects in GaAs nanodisks fabricated using a combination of the bio-template technique and neutral beam etching	Nanotechnology Vol.24, 285301, 2013	有	2013

223	A. Kogo, Y. Takahashi, N. Sakai, and T. Tatsuma	東大	Gold Cluster-Nanoparticle Diad System for Plasmonic Enhancement of Photosensitization	Nanoscale Vol. 5, 7855-7860, 2013	有	2013
224	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, T. Kinoshita, and H. Segawa	東大	PbS-Quantum-Dot-Based Heterojunction Solar Cells Utilizing ZnO Nanowires for High External Quantum Efficiency in the Near-Infrared Region	Journal of Physical Chemistry Letters Vol. 4, 2455-2460, 2013	有	2013
225	R. Jono, J. Fujisawa, H. Segawa, and K. Yamashita	東大	The Origin of the Strong Interfacial Charge-Transfer Absorption in the Surface Complex between TiO <sub>2</sub> and Dicyanomethylene Compounds	Physical Chemistry Chemical Physics Vol. 15, 18584-18588, 2013	有	2013
226	Y. Okada, K. Yoshida, Y. Shoji, and T. Sogabe	東大	Recent progress on quantum dot intermediate band solar cells	IEICE Electronics Express Vol. 10, 20132007, 2013	有	2013
227	H. Fujii, Y. Wang, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	Compensation doping in InGaAs / GaAsP multiple quantum well solar cells for efficient carrier transport and improved cell performance	J. Appl. Phys., v 114, n 10, 103101, 2013	有	2013
228	T. Kawawaki and T. Tatsuma,	東大	Enhancement of PbS Quantum Dot-Sensitized Photocurrents by Plasmonic Gold Nanoparticles	Physical Chemistry Chemical Physics Vol. 15, 20247-20251, 2013	有	2013
229	N. Miyashita, N. Ahsan, M. M. Islam., and Y. Okada	東大	Composition control of quinary GaInNAsSb alloy grown by molecular beam epitaxy	physica status solidi (c) Vol. 10, 1369, 2013	有	2013
230	A. Kobayashi, K. Ueno, J. Ohta, M. Oshima, and H. Fujioka	東大	Atomic scattering spectroscopy for determination of the polarity of semipolar AlN grown on ZnO	Applied Physics Letters Vol. 103, 192111, 2013	有	2013
231	T. Sogabe, T. Kaizu, Y. Okada, and S. Tomi?	東大	Theoretical analysis of GaAs/AlGaAs quantum dots in quantum wire array for intermediate band solar cell	Journal of Renewable Sustainable Energy Vol. 6, 011206, 2013	有	2013
232	K. Nishioka, Y. Ota, K. Tamura, K. Araki	宮崎大	Heat reduction of concentrator photovoltaic module using high radiation coating	Surface and Coatings Technology, 215, pp. 472-475.	有	2013
233	Y. Ota, T. Sueto, H. Nagai, K. Araki K. Nishioka	宮崎大	Reduction of Operating Temperature in 25 Series-Connected 820X CPV	Japanese Journal of Applied Physics, 52, 04CR03.	有	2013

234	H. Al Husna, N. Shibata, N. Sawano, S. Ueno, Y. Ota, T. Minemoto, K. Araki, K. Nishioka	宮崎大	Impact of spectral irradiance distribution and temperature on the outdoor performance of concentrator photovoltaic system	AIP Conference Proceedings, 1556, pp.252-255. (reviewed proceedings)	有	2013
235	Y. Ota, H. Nagai, K. Araki, K. Nishioka	宮崎大	Thermal Transfer Simulation For Concentrator Photovoltaic Receiver Under Concentration Condition	AIP Conference Proceedings, 1556, pp.18-21. (reviewed proceedings)	有	2013
236	K. Nishioka, Y. Ota	宮崎大	Heat release effect of thermal emission coating on concentrator photovoltaic module	Applied Mechanics and Materials, 372, pp. 559-562.	有	2013
237	T. Hirohata, Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大	Effect of anti-soiling coating on performance of Fresnel lens for concentrator photovoltaic module	Applied Mechanics and Materials, 372, pp. 575-578.	有	2013
238	T. Sueto, Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大	Suppression of dust adhesion on a concentrator photovoltaic module using an anti-soiling photocatalytic coating	Solar Energy, 97, pp. 414-417.	有	2013
239	J. Kawano, Y. Kangawa, T. Yayama, K. Kakimoto, A. Koukitu	九州大	Thermodynamic Analysis of Coherently Grown GaAsN/Ge: Effects of Different Gaseous Sources	Japanese Journal of Applied Physics 52 (2013) 045601.	有	2013
240	T. Yayama, Y. Kangawa, K. Kakimoto	九州大	Theoretical investigation of the effect of growth orientation on indium incorporation efficiency during InGaN thin film growth by metalorganic vapor phase epitaxy	Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 08JC02.	有	2013
241	Duy-Cuong Nguyen, Ken Fukatsu, Keiji Tanimoto, Shigeru Ikeda, Michio Matsumura, and Seigo Ito	兵庫県立大	The Effect of Annealing Temperature and KCN Etching on the Photovoltaic Properties of Cu(In, Ga) (S, Se) <sub>2</sub> Solar Cells Using Nanoparticles	International Journal of Photoenergy Volume 2013, Article ID 416245.	有	2013
242	Noriyuki Kitagawa, Seigo Ito, Duy-Cuong Nguyen, Hitoshi Nishino	兵庫県立大	Copper Zinc Sulfur Compound Solar Cells Fabricated by Spray Pyrolysis Deposition for Solar Cells	Natural Resources, 4, pp. 142-145	有	2013
243	Duy-Cuong Nguyen and Seigo Ito	兵庫県立大	Cu <sub>2</sub> Te solar cells fabricated by printing	Int. J. Nanotechnology, Vol. 10, Nos. 3/4, pp. 269-278	有	2013
244	Duy-Cuong Nguyen, Toshihiro Ryo, Laurent Lombez, and Seigo Ito	兵庫県立大	Effect of Na and Ti-doping on photovoltaic properties of CuInS <sub>2</sub> solar cells	Int. J. Nanotechnology, Vol. 10, Nos. 3/4, pp. 279-287	有	2013

245	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Capacitance-voltage and current-voltage characteristics for the study of high background doping and conduction mechanisms in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Journal of Alloys and Compounds, 552: 469-474	有	2013
246	山口真史	豊田工 大	超高効率を目指す次世代太陽電池 (解説論文)	応用物理, 82(3): 264-267	無	2013
247	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Analysis of Current Transport Mechanisms in GaAsN Homojunction Solar Cell Grown by Chemical Beam Epitaxy	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, 3(2):909-915	有	2013
248	Kazuma Ikeda, Masafumi Yamaguchi, Boussairi Bouzazi, Hidetoshi Suzuki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita	豊田工 大	III-V-N Materials for Super High Efficiency Multi-junction Solar Cells	Japanese Journal of Applied Physics, 52(8):08JH11	有	2013
249	山口真史	豊田工 大	高効率太陽電池の研究開発動向と今後の展望 (解説論文)	電子情報通信学会技術研究報告 信学技報	無	2013
250	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Effect of electron and proton irradiation on recombination centers in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Current Applied Physics, 13(7):1269-1274	有	2013
251	Nobuaki Kojima, Crisforo Morales, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Ga <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> and (InGa) <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> as novel buffer layers in the GaAs on Si system	AIP Conference Proceedings , 1556:38-40	有	2013
252	Toshiaki Nishi, Takuo Sasaki, Kazuma Ikeda, Hidetoshi Suzuki, Masamitsu Takahasi, Kenichi Shimomura, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Real-time observation of crystallographic tilting InGaAs layers on GaAs offcut Substrates	AIP Conference Proceedings , 1556:14-17	有	2013
253	Hiroyuki Kowaki, Kan-Hua Lee, Takuto Kojima, Makoto Inagaki, Kazuma Ikeda, Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi, N. J. Ekins-Daukes	豊田工 大	Optical DLTS for the study of recombination centers in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	AIP Conference Proceedings , 1556:41-44	有	2013
254	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Analysis of defects in GaAsN grown by chemical beam epitaxy on high index GaAs substrates	AIP Conference Proceedings , 1556:30-33	有	2013
255	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima,	豊田工 大	Effect of arsenic source flow rate on the lattice defects in	physica status solidi, 10(11):1477-1480	有	2013

	Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi		GaAsN grown by chemical beam epitaxy			
256	Kazuma Ikeda, Makoto Inagaki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Preferential N-H bond direction in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	physica status solidi, 10(11):1513- 1516	有	2013
257	T. Hamamura, J. Ting DY, K. Tamaki, J. Nakazaki, S. Uchida, T. Kubo, and H. Segawa	東大	Dye-Sensitized Solar Cells using Ethynyl- Linked Porphyrin Trimers	Physical Chemistry Chemical Physics Vol.16, 4551-4560, 2014	有	2014
258	E. Nakamura, K. Ueno, J. Ohta, H. Fujioka, and M. Oshima	東大	Dramatic reduction in process temperature of InGaN-based light- emitting diodes by pulsed sputtering growth technique	Applied Physics Letters Vol.104, 051121, 2014	有	2014
259	M. Oseki, K. Okubo, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka	東大	Field-effect transistors based on cubic indium nitride	Scientific Reports Vol.4, 3951, 2014	有	2014
260	T. Hamamura, J. Nakazaki, S. Uchida, T. Kubo, and H. Segawa	東大	Dye-Sensitized Solar Cells using Ethynyl- Linked Porphyrin Trimers with an Anchoring Group at Long-Axis End or Short- Axis End	Chemistry Letters Vol.43, 796-798, 2014	有	2014
261	S. Tomi?, T. Sogabe, and Y. Okada	東大	In-plane coupling effect on absorption coefficients of InAs/GaAs quantum dots arrays for intermediate band solar cell	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol.23, 546, 2014	有	2014
262	Y. K.-Shimizu, R. Patterson, A. Milekhin, K. Akahane, Y. Shoji, D. R.T. Zahn, Y. Okada, and G. Conibeer	東大	Study of phonons in self-assembled InAs quantum dots embedded in an InGaAlAs matrix	Physica E Vol.57, 1, 2014	有	2014
263	T. Sogabe, Y. Shoji, M. Ohba, K. Yoshida, R. Tamaki, H.-F. Hong, C.-H. Wu, C.-T. Kuo, S. Tomi?, and Y. Okada	東大	Intermediate-band dynamics of quantum dots solar cell in concentrator photovoltaic modules	Scientific Reports Vol. 4, 4972, 2014	有	2014
264	A. Fukuyama, T. Aihara, Y. Yokoyama, M. Kojima, H. Fujii, H. Suzuki, M. Sugiyama, Y. Nakano, T. and Ikari	東大	Effect of internal electric field on non- radiative carrier recombination in the strain-balanced InGaAs/GaAsP multiple quantum well solar cells	Phys. Status Solidi A, 211, pp. 444-448. (2014)	有	2014



265	H. Sodabanlu, Y. Wang, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	Growth of InGaAs/GaAsP multiple quantum well solar cells on mis-orientated GaAs substrates	Journal of Applied Physics, v 115, n 23, 233104 (2014)	有	2014
266	J. W. Shon, J. Ohta, K. Ueno, A. Kobayashi, and H. Fujioka	東大	Structural properties of GaN films grown on multilayer graphene films by pulsed sputtering	Applied Physics Express Vol. 7, 085502, 2014	有	2014
267	K. Toprasertpong, H. Fujii, W. Yunpeng, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	Carrier Escape Time and Temperature-Dependent Carrier Collection Efficiency of Tunneling-Enhanced Multiple Quantum Well Solar Cells	IEEE J. Photovoltaics, vol. 4, pp. 607-613 (2014)	有	2014
268	Kentaroh Watanabe, Boram Kim, Tomoyuki Inoue, Hassanet Sodabanlu, Masakazu Sugiyama, Masanao Goto, Shinya Hayashi, Kenjiro Miyano, and Yoshiaki Nakano	東大	Thin Film InGaAs/GaAsP MQWs Solar Cell with Backside Nano-Imprinted Pattern for Light-Trapping	IEEE J. Photovoltaics, v 4, n 4, p 1086-1090, 2014	有	2014
269	H. Fujii, K. Toprasertpong, Y. Wang, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	100-period, 1.23-eV bandgap InGaAs/GaAsP quantum wells for high-efficiency GaAs solar cells: Toward current-matched Ge-based tandem cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v 22, n 7, p 784-795 (2014)	有	2014
270	H. Fujii, K. Toprasertpong, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	Evaluation of Carrier Collection Efficiency in Multiple Quantum Well Solar Cells	IEEE J. Photovoltaics, vol. 4, pp. 237-243 (2014)	有	2014
271	岡田至崇	東大	次世代高効率太陽電池～基礎研究から実証実験まで～	日本結晶成長学会誌, 特集, Vol. 41, No. 2, pp. 56, 2014	有	2014
272	T. Aihara, A. Fukuyama, Y. Yokoyama, M. Kojima, H. Suzuki, M. Sugiyama, Y. Nakano, T. Ikari	東大	Detection of miniband formation in strain-balanced InGaAs/GaAsP quantum well solar cells by using a piezoelectric photothermal spectroscopy	Journal of Applied Physics, v 116, n 4, p 044509 (6 pp.), 2014	有	2014
273	Y. Okada, T. Sogabe, and Y. Shoji	東大	Intermediate Band Solar Cells	Advanced Concepts in Photovoltaics, 2014	有	2014
274	B. T?rngren, K. Akitsu, A. Ylinen, S. Sand?n, H. Jiang, J. Ruokolainen, M. Komatsu, T. Hamamura, J.	東大	Investigation of Plasmonic Gold-Silica Core-Shell Nanoparticle Stability in Dye-Sensitized Solar Cell Applications	Journal of Colloid and Interface Science Vol. 427, 54-61, 2014	有	2014

	Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa, and R. ?sterbacka, J. Sm?tt					
275	E. Nakamura, A. Kogo, N. Sakai, and T. Tatsuma,	東大	Gold Cluster/Titanium Dioxide Heterojunction Photovoltaic Cell	Applied Physics Letters Vol.105, 083113, 2014	有	2014
276	R. Tamaki, Y. Shoji, Y. Okada, and K. Miyano	東大	Spectrally resolved intraband transitions on two-step photon absorption in InGaAs/GaAs quantum dot solar cell	Applied Physics Letters Vol. 105, 073118, 2014	有	2014
277	K. Watanabe, Y. Wang, H. Sodabanlu, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	Strain effect for different phosphorus content of InGaAs/GaAsP super-lattice in GaAs p-i-n single junction solar cell	J. Crystal Growth, v 401, p 712-716, 2014	有	2014
278	M. M. Islam, N. Miyashita, N. Ahsan, T. Sakurai, K. Akimoto, and Y. Okada	東大	Effect of antimony on the deep-level traps in GaInNASb thin films	Applied Physics Letters Vol. 105, 112103, 2014	有	2014
279	T. Sogabe, Y. Shoji, P. Mulder, J. Schermer, E. Tamayo, and Y. Okada	東大	Enhancement of current collection in epitaxial lift-off InAs/GaAs quantum dot thin film solar cell and concentrated photovoltaic study	Applied Physics Letters Vol.105, 113904, 2014	有	2014
280	S. Yagi, S. Noguchi, Y. Hijikata, S. Kuboya, K. Onabe, Y. Okada, and H. Yaguchi	東大	Enhanced optical absorption due to E+-related band transition in GaAs:N $\delta$ -doped superlattices	Applied Physics Express Vol.7, 102301, 2014	有	2014
281	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東大	PbS Colloidal Quantum Dot/ZnO-based Bulk-heterojunction Solar Cells with High Stability under Continuous Light Soaking	physica status solidi (RRL) - Rapid Research Letters Vol. 8, 961-965, 2014	有	2014
282	H. Fujii, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama and Y. Nakano	東大	InGaAs/GaAsP superlattice solar cells with reduced carbon impurity grown by low-temperature metal-organic vapor phase epitaxy using triethylgallium	J. Appl. Phys. 116, 203101 (2014)	有	2014
283	K. Toprasertpong, N. Kasamatsu, H. Fujii, T. Kada, S. Asahi, Y. Wang, K. Watanabe, M.	東大	Carrier Time-of-Flight Measurement Using a Probe Structure for Direct Evaluation of Carrier Transport in	IEEE J. Photovoltaics, vol 4, no 6, pp. 1518-25, 2014	有	2014

	Sugiyama, T. Kita, Y. Nakano		Multiple Quantum Well Solar Cells			
284	K. Nishioka Y. Ota	宮崎大	Impact of Spectral Irradiance Distribution and Temperature on Concentrator Photovoltaic System	Advanced Materials Research, 893, pp.773-776.	有	2014
285	K. Nishioka, K. Sato Y. Ota	宮崎大	Impact of Sandblasting on Fresnel Lens for Concentrator Photovoltaic	Advanced Materials Research, 894, pp.250-253.	有	2014
286	Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大	Estimation of thermal stress in concentrator cells using structural mechanics simulation	AIP Conference Proceedings, 1616, pp.25-28. (reviewed proceedings)	有	2014
287	K. Nomura, Y. Ota, T. Minemoto K. Nishioka	宮崎大	Output Estimation of Concentrator Photovoltaic Using Mappings of Environmental Factors and Performance Ratio	ACTA PHYSICA POLONICA A, 125, pp.1021-1023.	有	2014
288	K. Nomura, Y. Ota, T. Minemoto, K. Nishioka	宮崎大	Seasonal variation of performance in concentrator photovoltaic system	physica status solidi (c), 11, pp.1427- 1430.	有	2014
289	Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大	Estimation of operating temperature and energy output of concentrator photovoltaic module under concentration conditions	Japanese Journal of Applied Physics, 53, 122301.	有	2014
290	Yoshihiro Kangawa, Tomonori Ito, Akinori Koukitu, Koichi Kakimoto	九州大	Progress in theoretical approach to InGaN and InN epitaxy: In incorporation efficiency and structural stability	Japanese Journal of Applied Physics 53 (2014) 100202	有	2014
291	山口浩一	電通大	光デバイス応用に向けた III-V族半導体量子ドットの 結晶成長技術の進展	OPTRONICS (No. 394, 2014年10月) pp.79- 84	無	2014
292	山口浩一	電通大	半導体量子ドットのデバ イス応用における作製技 術の課題と展望	研究開発リーダー (3 月号) 技術情報協会 (2014年) pp.38-42.	無	2014
293	Yoshio Ohshita, Kazuma Ikeda, Hidetoshi Suzuki, Hideaki Machida, Hiroshi Sudoh, Tomohiro Tanaka, Takahiko Honda, Makoto Inagaki, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	NH related defects in GaAsN grown through chemical beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 53(3):031001	有	2014
294	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Effect of surface morphology on the density of energy states in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 53(4):04ER08	有	2014

295	Koshiro Demizu, Kazuma Ikeda, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Wagging and stretching modes of NH complexes in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 53:05FV02	有	2014
296	Kazuma Ikeda, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Correlations between NH local vibrational modes in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 53(7):071001	有	2014
297	Omar Elleuch, Boussairi Bouzazi, Hiroyuki Kowaki, Kazuma Ikeda, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工 大	Analysis of the main acceptor defect in p- type GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 53(9):091201	有	2014
298	山口真史(共著)	豊田工 大	第7章超高効率太陽電池 1. 超高効率太陽電池の 基礎 (pp.260-266)	化合物薄膜太陽電池の 最新技術 II	無	2014
299	Masafumi Yamaguchi (共著)	豊田工 大	Chapter7 Super-High- Efficiency IIIIV Tandem and Multijunction Cells(pages307-338)	Clean Electricity from Photovoltaics 2nd Edition	無	2014
300	Hironori Kurokawa, Mitsuru Kaga, Tomomi Goda, Motoaki Iwaya, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki and Hiroshi Amano	名城 大、名 古屋大	Multijunction GaInN- based solar cells using a tunnel junction	Applied Physics Express Vol. 7 (2014) 034104	有	2014
301	R. Tamaki, Y. Shoji, Y. Okada, and K. Miyano	東大	Spectrally Resolved Interband and Intraband Transitions by Two-Step Photon Absorption in InGaAs/GaAs Quantum Dot Solar Cells	Journal of Photovoltaics, Vol.5, 229, 2015	有	2015
302	E. E. Tamayo R., K. Watanabe, R. Tamaki, T. Hoshii, M. Sugiyama, Y. Okada, K. Miyano, A. Cvetkovic, R. Mohedano, and M. Hernandez	東大	Plasma etching antireflection nanostructures on optical elements in concentrator photovoltaic systems	Journal of Photonics for Energy Vol.5, 057006, 2015	有	2015
303	S. Naitoh and Y. Okada	東大	Efficiency Estimations for Multijunction and Intermediate Band Solar Cells Using Actual Measured Solar Spectra in Japan	Journal of Solar Energy Engineering Vol.137, 034504, 2015	有	2015
304	B. Behaghel, R. Tamaki, N. Vandamme, K. Watanabe, C. Dupuis, N. Bardou, H. Sodabanlu, A. Cattoni, Y. Okada, M. Sugiyama, S. Collin, and J.-F. Guillemoles	東大	Absorption enhancement through Fabry-Pérot resonant modes in a 430nm thick InGaAs/GaAsP multiple quantum wells solar cell	Applied Physics Letters Vol.106, 081107, 2015	有	2015

305	T. Aihara, A. Fukuyama, H. Suzuki, H. Fujii, M. Sugiyama, Y. Nakano, T. Ikari	東大	Effect of number of stack on the thermal escape and non-radiative and radiative recombinations of photoexcited carriers in strain-balanced InGaAs/GaAsP multiple quantum-well-inserted solar cells	J. Appl. Phys., vol 117, no 8, p. 084307 (6 pp.) 2015	有	2015
306	Kasidit Toprasertpong, Hiromasa Fujii, Tomos Thomas, Markus Fhrer, Diego Alonsolvarez, Daniel J. Farrell, Kentaroh Watanabe, Yoshitaka Okada, Nicholas J. Ekins-Daukes, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano	東大	Absorption threshold extended to 1.15eV using InGaAs/GaAsP quantum wells for over-50%-efficient lattice-matched quad-junction solar cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, in press, DOI:10.1002/pip.2585	有	2015
307	Warakorn Yanwachirakul, Hiromasa Fujii, Kasidit Toprasertpong, Kentaroh Watanabe, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano	東大	Effect of Barrier Thickness on Carrier Transport Inside Multiple Quantum Well Solar Cells Under High-Concentration Illumination	IEEE Journal of Photovoltaics, v 5, n 3, p 846-53 (2015)	有	2015
308	T. Kawawaki, H. Wang, T. Kubo, K. Saito, J. Nakazaki, H. Segawa, and T. Tatsuma	東大	Efficiency Enhancement of PbS Quantum Dot/ZnO Nanowire Bulk-Heterojunction Solar cells by Plasmonic Silver Nanocubers	ACS nano, in press	有	2015
309	T. Inoue, K. Watanabe, K. Toprasertpong, H. Fujii, M. Sugiyama	東大	Enhanced light trapping in multiple quantum wells by thin-film structure and backside grooves with dielectric interface	IEEE J. Photovoltaics, vol. 5, no. 2, p 697-703 2015.	有	2015
310	H. Fujii, H. Sodabanlu, M. Sugiyama, Y. Nakano	東大	Low-temperature MOVPE using TEGa for suppressed layer undulation in In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As/GaAs <sub>1-y</sub> Py superlattice on vicinal substrates	J. Crystal Growth, vol 414, pp. 3-9, 2015.	有	2015
311	Hiromasa Fujii, Takumi Katoh, Kasidit Toprasertpong, Hassanet Sodabanlu, Kentaroh Watanabe, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano	東大	Thickness-modulated InGaAs/GaAsP superlattice solar cells on vicinal substrates	J. Appl. Phys. 117(15):154501-1-9, (2015)	有	2015

312	Seigo Ito	兵庫県立大	Printable solar cells	Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment 4, pp. 51-73.	有	2015
313	Omar Elleuch, Li Wang , Kan Hua Lee, Koshiro Demizu, Kazuma Ikeda, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Hole traps associated with high-concentration residual carriers in p-type GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Journal of Applied Physics, 117:045712	有	2015
314	Kazuma Ikeda, Yoshio Ohshita, Tomohiro Tanaka, Takahiko Honda, Makoto Inagaki, Koshiro Demizu, Nobuaki Kojima, Hidetoshi Suzuki, Hideaki Machida, Hiroshi Sudoh, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Effects of source gas molecules on NH- and ND-related defect formations in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 54(4):041001	有	2015
315	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Fundamentals and R&D status of III-V compound solar cells and materials (Invited Article)	physica status solidi (c) pp.1-11	無	2015

【論文リスト】

②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
1	M. Ghulinyan et al.	東京農工大	Stabilized porous silicon optical superlattices with controlled surface passivation	Appl. Phys. Lett. 93, 061113	有	2008
2	B. Gelloz, H. Koyama, N. Koshida	東京農工大	Polarization memory of blue and red luminescence from nanocrystalline porous silicon treated by high-pressure water vapor annealing	Thin Solid Films 517, 376	有	2008
3	Cheol-hyun Lim, Jeong-Woo Lee, Jun-ichi Hanna	Tokyo. Inst. Tech.	CVD-Produced Polycrystalline Silicon Thin Film Prepared by Fluorine-Mediated Crystal Growth on a Glass Substrate and its Thin Film Transistor Application	Chem. Vapor. Depo., Vol. 14, No. 5-6, pp.107-110	有	2008
4	Cheol-hyun Lim, Jeong-Woo Lee, Jun-ichi Hanna	Tokyo. Inst. Tech.	Nucleation and growth of poly-Si films deposited directly on glass substrate in reactive thermal-chemical vapour deposition	Thin solid films, Vol. 517, No. 8, pp.2627-2632	有	2008
5	Hiroki Kawauchi et al.	東海大	Microcrystalline Silicon-Germanium Thin Films Prepared by the Chemical Transport Process Using Hydrogen Radicals	J. Non-Cryst. Solids 354, pp.2109-2112	有	2008
6	Masatoshi Sugita et al.	東海大	Microcrystalline Germanium Thin Films Prepared by the Reactive RF Sputtering Method	J. Non-Cryst. Solids 354, pp.2113-2116	有	2008
7	磯村雅夫他	東海大	反応性スパッター法による微結晶シリコンゲルマニウム半導体薄膜の作製	J. Vac. Soc. Jpn. 51, pp.663-667	有	2008
8	V. Švrcek	産総研	Fabrication of filled carbon nanotubes with fresh silicon nanocrystals produced in-situ by nanosecond pulsed laser processing in environment	J. Phys. Chem. C 112, 13181	有	2008

			ally friendly solutions			
9	V. Švrcek, H. Fujiwara, M. Kondo	産総研	Phosphorous and boron doped colloidal silicon nanocrystals in conjugated copolymers	Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Volume 1102E, Warrendale, PA, L101-08	有	2008
10	V. Švrcek, *D. Mariotti, *R. Halilstone, H. Fujiwara, M. Kondo	産総研、*Rochester Institute of Technology	Luminescent colloidal silicon nanocrystals prepared by nanoseconds laser fragmentation and ablation in water	Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Volume 1066, Warrendale, PA, A18-10	有	2008
11	H. Toyosaki, 1, M. Kawasaki, 2, 3, Y. Tokura, 1, 2, 4	1ERATO-Multiferroics, JST, 2CMRG, RIKEN, 3WPI-AIMR, Tohoku Univ., 4Dept. of Appl. Phys., Univ. of Tokyo.	Electrical properties of Ta-doped SnO <sub>2</sub> thin films epitaxially grown on TiO <sub>2</sub> substrate	Appl. Phys. Lett. 93, 132109	有	2008
12	H. Okamoto, Y. Sobajima, T. Toyama	Osaka University	Stretched Exponential Relaxation in Disordered System	J. Non-Cryst. Solids 354, pp.2905-2908	有	2008
13	T. Toyama, M. Nishino, T. Kawabe, Y. Sobajima, H. Okamoto	Osaka University	Photocarrier Diffusion Lengths of High-Growth-Rate Microcrystalline Silicon	J. Non-Cryst. Solids 354, pp.2223-2226	有	2008
14	T. Toyama, W. Yoshida, Y. Sobajima, H. Okamoto	Osaka University	Influence of Boron Doping on Roughness Evolutions of Microcrystalline Silicon	J. Non-Cryst. Solids 354, pp.2204-2207	有	2008
15	Y. Sobajima, S. Nakano, M. Nishino, T. Toyama, H. Okamoto,	Osaka University	Microstructures of High-Growth-Rate (up to 8.3nm/s) Microcrystalline Silicon Photovoltaic Layers and Their Influence on the Photovoltaic Performance of Thin-Film Solar Cells	J. Non-Cryst. Solids 354, pp.2407-2410	有	2008
16	鯉田崇、藤原裕之、近藤道雄	産総研	Improved spectral sensitivity in Si-based solar cells by high-mobility hydrogen-doped In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> transparent conductive oxide	Proceedings of 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp.1145-1148	無	2008
17	O. Sakata, J. M. Soon, A. Matsuda, Y. Akita, M. Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech.	Transformation from an atomically stepped NiO thin film to a nanotape structure:	Appl. Phys. Lett., vol. 93, pp.241904-241906	有	2008



			A kinetic study using x-ray diffraction			
18	S. Kaneko, K. Akiyama, T. Ito, Y. Hirabayashi, H. Funakubo, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Supercell structure on continuous growth of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ film	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 47, p. 5602-5604	有	2008
19	B. Gelloz and N. Koshida	東京農工大	Long-lived blue phosphorescence of oxidized and annealed nanocrystalline silicon	Appl. Phys. Lett. 94, 201903	有	2009
20	Y. Hirano, K. Okamoto, S. Yamazaki, N. Koshida	東京農工大	Avalanche multiplication of photo-carriers in nanometer-sized silicon dot layers	Appl. Phys. Lett. 95, 063109	有	2009
21	N. Mori et al.	東京農工大	Quasi-ballistic electron transport through silicon nanocrystals	J. Phys. Conf. Ser. 193, 012008	有	2009
22	A. Chouket et al.	東京農工大	Multiple energy transfer in porous silicon/Rh6G/RhB nanocomposite evidenced by photoluminescence and its polarization memory	Thin Solid Films 518, S212	有	2009
23	A. Chouket et al.	東京農工大	Effect of high-pressure water-vapor annealing on energy transfer in dye-impregnated porous silicon	J. Luminescence 129, 1332	有	2009
24	Yuki Tomita et al.	東海大	Microcrystalline Silicon thin films deposited by the reactive RF magnetron sputtering system	Sol. Energy Mater. & Sol. Cells 93, pp. 816-819	有	2009
25	T. Kaneko, M. Kondo	東工大、産総研	Photoelectron spectroscopy measurements of valence band discontinuities for a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells	Materials Research Society Symposium Proceedings, vol. 1153, pp. 195-200	有	2009
26	菅谷武芳、上川由紀子、古江重紀、天野建、森雅彦、仁木栄	産総研	InGaAs Quantum Dot Superlattices for Solar Cell Applications	Abstr. of Int. Symp. On Advanced Nanostructures and Nano-Devices, Hawaii, 2009, pp. 176-177	無	2009
27	N. Matsuki, Y. Irokawa, T. Matsui, M. Kondo, M. Sumiya	NIMS、AIST	Photovoltaic action in polyaniline/n-GaN Schottky diodes	Applied Physics Express, vol. 2, iss. 9, 092201-1~3	有	2009
28	Y. Irokawa, N. M	NIMS、中部	Low-frequency capaci	Physica Status	有	2009

	atsuki, M. Sumiya, Y. Sakuma, T. Sekiguchi, T. Chikyo, Y. Sumida, Y. Nakano	大	tance-voltage study of hydrogen interaction with Pt-AlGaN/GaN Schottky barrier diodes	Solidi Rapid Research Letters, vol. 3, iss. 7-8, 266~268		
29	H. Matsumura, Y. Kanematsu, T. Shimura, T. Tamaki, Y. Ozeki, K. Itoh, M. Sumiya, T. Nakano, S. Fuke	阪大、NIMS、静岡大	Lateral control of GaN polarity using sapphire substrates treated with focused laser irradiation	Appl. Phys. Express 2, 101001	有	2009
30	Eiji Fujimoto, Masatomo Sumiya, Tsuyoshi Ohnishi, Kenji Watanabe, Mikko Lippmaa, Yuji Matsumoto, Hideomi Koinuma	NIMS、東大新領域、東大物性研	Hetero-Epitaxial Growth of ZnO Film by Temperature-Modulated Metalorganic Chemical Vapor Deposition	Appl. Phys. Express 2, 045502	有	2009
31	Y. Ogo, H. Hiramoto, K. Nomura, H. Yanagi, T. Kamiya, M. Kimura, M. Hirano, H. Hosono	東工大	Tin monoxide as an s-orbital-based p-type oxide semiconductor: Electronic structures and TFT application	Phys. Status Solidi A, 206, 2187	有	2009
32	V. Švrcek	産総研	Colloidal silicon nanocrystallites for low-cost solar cell development	Nano-Micro Letters 1, 40	有	2009
33	V. Švrcek, M. Kondo	産総研	Blue luminescent silicon nanocrystals prepared by short pulsed laser ablation in liquid media	Applied Surface Science 255, 9643	有	2009
34	V. Švrcek, I. Turkevych, M. Kondo	産総研	Photoelectric properties of silicon nanocrystals/P3HT bulk-heterojunction ordered in titanium dioxide nanotube arrays	Nanoscale Research Letters, 4 1389	有	2009
35	V. Švrcek, H. Fujiwara, M. Kondo	産総研	Top-down silicon nanocrystals and a conjugated polymer-based bulk heterojunction: Optoelectronic and photovoltaic applications	Acta Materialia 57 5986	有	2009
36	V. Švrcek, *D. Mariotti, *K. Kalia, M. Kondo	産総研、*Rochester Institute of Technology	Photosensitive self-assembled nanoarchitectures containing surfactant-free silicon nanocrystals produced	Chem. Phys. Lett. 478 224	有	2009

			by laser fragmentation in water			
37	V. Švrcek, M. Kondo	産総研	Bulk-heterojunction based on blending of red and blue luminescent silicon nanocrystals and P3HT polymer.	Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1153. A15-02	有	2009
38	V. Švrcek, H. Fujiwara, M. Kondo	産総研	Luminescent Properties of doped freestanding silicon nanocrystals embedded in MEH-PPV	Solar Energy Materials & Solar Cells 93 774	有	2009
39	V. Švrcek, M. Kondo	産総研	Blue light emitting silicon nanocrystals prepared by laser ablation of doped Si wafers in liquid	Proc. of the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, Kobe C222. (1-6)	無	2009
40	V. Švrcek, M. Kondo	産総研	Bulk-heterojunction performance influenced by polymer structure and silicon nanocrystals micrograins doping	Proc. of the 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia 1, 978	無	2009
41	V. Švrcek, *D. Mariotti, M. Kondo	産総研、*Rochester Institute of Technology	Ambient-stable blue luminescent silicon nanocrystals prepared by nanosecond-pulsed laser ablation in water	Optics Express 17 520	有	2009
42	V. Švrcek	産総研	Insight of the kinetics carbon nanotubes growth and functionalization with freestanding silicon nanocrystals	Book chapter in Carbon Nanotubes: New Research, Nova Science Publisher, pp. 81-99	有	2009
43	Kazunori Koga, Yuuki Kawashima, William Makoto, Nakamura, Hiroshi Sato, Masatoshi Tanaka, Masaharu Shiratani, Michio Kondo	Kyushu Univ、AIST	Conductivity of nc-Si films deposited using multi-hollow discharge plasma CVD method	Proceedings of PSS-2009/SPP-26, 226	無	2009
44	Yuuki Kawashima, Hiroshi Sato, Kazunori Koga, Masaharu Shiratani, Michio Kondo	Kyushu Univ、AIST	Synthesis of Si nanoparticles for multiple exciton generation solar cells using multi-hollow discharge plasma CVD	Proceedings of 2009 International Symposium on Dry Process, 107	無	2009

45	白谷正治	九州大学	太陽とエネルギー変換 (2) 光電効果・太陽電池への応用	空気調和・衛生工学, Vol. 82, No. 11, pp. 911-914	無	2009
46	Y. F. Li, T. Kaneko, J. Kong, R. Hatakeyama	Tohoku University	Photoswitching in Azafullerene Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotube FET Devices	J. Am. Chem. Soc., 131, pp. 3412-3413	有	2009
47	T. Kato, R. Hatakeyama, J. Shishido, W. Oohara, K. Tohji	Tohoku University	P-N Junction with Donor and Acceptor Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotubes	Appl. Phys. Lett., 95, 083109-1-3	有	2009
48	Y. F. Li, R. Hatakeyama, W. Oohara, T. Kaneko	Tohoku University	Formation of p-n Junction in Double-Walled Carbon Nanotubes Based on Heteromaterial Encapsulation	Applied Physics Express 2(9) 095005-1-3	有	2009
49	丸山伸伍、松本祐司	東工大	CW-IRレーザーによるイオン液体の真空蒸着技術の開発	レーザー加工学会誌, 16, 48	無	2009
50	D. Okuyama, 1, M. Nakamura, 1, Y. Wakabayashi, 2, H. Itoh, 3, R. Kumai, 4, H. Yamada, 4, Y. Taguchi, 1, T. Arima, 5, M. Kawasaki, 1, 6, Y. Tokura, 1, 3, 7	1CMRG, RIKEN, 2Osaka Univ. 3ERATO-Multiferroics, JST, 4AIST, 5IMRAM, Tohoku Univ. 6WPI-AMR, Tohoku Univ. 7Dept of Appl. Phys. Univ. of Tokyo	Epitaxial-strain effect on charge/orbital order in $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{MnO}_3$ thin films	Appl. Phys. Lett. 95, 152502	有	2009
51	W. Koshibae, 1, N. Furukawa, 2, 3, N. Nagaosa, 1, 4	1CMRG, RIKEN, 2Aoyama-Gakuin University, 3ERATO-Multiferroics, JST, 4Dept. of Appl. Phys., Univ. of Tokyo	Real-Time Quantum Dynamics of Interacting Electrons: Self-Organized Nanoscale Structure in a Spin-Electron Coupled System	Phys. Rev. Lett. 103, 266402	有	2009
52	L. Du, A. Furube, K. Hara, R. Kato, M. Tachiya	産総研	Plasmon induced electron transfer at gold/TiO <sub>2</sub> interface under femtosecond near-IR two-photon excitation	Thin Solid Films, 518, pp. 861-864	有	2009
53	L. Du, A. Furube, K. Yamamoto, K. Hara, R. Kato	産総研	Plasmon-induced charge separation and recombination dynamics	J. Phys. Chem. C, 113, pp. 6454-6462	有	2009

	h, M.Tachiya		in gold-TiO <sub>2</sub> nanoparticle systems: dependence on TiO <sub>2</sub> particle size			
54	M. Hasumi, M. Shimokawa, K. Ukawa, T. Haba, Y. Mizutani, T. Samehima	Tokyo University of Agriculture & Technology	Defect Passivation of Solar Cells by High Pressure H <sub>2</sub> O Vapor Treatment	2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (Sendai, 2009) P-14-6	有	2009
55	H. Kakemoto, M. Hasumi, T. Samehima	Tokyo University of Agriculture & Technology	Development of Multi-junction technique for Semiconductor substrates by using Transparent and conductive polymer for Solar cells' application	Proc in 6th Thin Film Materials & Devices Meeting, (Kyoto, 2009) p100228041-1-5	有	2009
56	T. Toyama, Y. Sobajima, H. Okamoto	Osaka University	Fractal Study of Surface Nanostructures of Microcrystalline Silicon Films: From Growth Kinetics to Electronic Transport	Philos. Mag. 89, 2491	有	2009
57	Y. Sobajima, M. Nishino, T. Fukumori, T. Higuchi, S. Nakano, T. Toyama, H. Okamoto	Osaka University	6.3% Efficiency Solar Cell Employing High Deposition Rate (8 nm/s) Microcrystalline Silicon Photovoltaic Layer	Sol. Energy Mater. & Sol. Cells 93, pp. 980-983	有	2009
58	鯉田崇	産総研	低赤外吸収・高移動度 In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 透明導電膜の開発	材料の科学と工学, 46-1, pp. 26-31	無	2009
59	鯉田崇	産総研	低赤外吸収 In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系透明導電膜の太陽電池応用	ディスプレイ, 15-5, pp. 51-56	無	2009
60	鯉田崇、藤原裕之、近藤道雄	産総研	High mobility hydrogen-doped In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> transparent conductive oxide for a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS, 93-6-7, pp. 851-854	有	2009
61	Y. Akita, Y. Kato, M. Hosaka, Y. Ono, S. Suzuki, A. Nakajima, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Nanostripe Patterning of Glass Surface by Nanoimprint Using Self-organized Oxide Mold	Materials Science and Engineering B, 161, pp. 151-154	有	2009
62	Y. Kato, Y. Akita, Y. Ono, M. Hosaka, N. Shiraiishi, N. Tsuchimine, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Fabrication and Characterization of electrically functional boride system thin films on the ultra-smooth sapphire substrate	Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 1148, PP12-02-06	有	2009

63	M. Hosaka, Y. Akita, Y. Sugimoto, K. Koyama, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Low-Temperature Heteroepitaxial Growth of $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Thin Films on NiO Layers by Pulsed Laser Deposition	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 48, pp. 088003-088005	有	2009
64	Y. Ono, Y. Kato, Y. Akita, M. Hosaka, N. Shiraiishi, M. Yamaguchi, O. Sakata, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Fabrication of Electrically Active Si-based Thin Films by Pulsed Laser Deposition of SiO/C Dual Targets	Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 1148, PP03-39-43	有	2009
65	M. Hosaka, Y. Akita, Y. Sugimoto, Y. Kato, Y. Ono, A. Matsuda, K. Koyama, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Low-Temperature Selective Growth of Heteroepitaxial $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Thin Films on a NiO Layer by the Electron-Beam Assisted PLD Process	Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 1150, RR04-04-08	有	2009
66	S. Kaneko, K. Akiyama, Y. Hirabayashi, T. Ito, Y. Motoizumi, K. Yoshida, T. Horiuchi, M. Soga, M. Yasui, M. Kano, M. Kumagai, H. Funakubo, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Polar Coincident Site Lattice Figure - Multiple Domain Growth of Bismuth Cuprate Superconducting Film	Trans. Mater. Res. Soc. Japan, vol. 34(4), pp. 777-780	有	2009
67	Y. Akita, Y. Sugimoto, M. Hosaka, Y. Kato, Y. Ono, O. Sakata, M. Mita, H. Oi, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Fabrication of nanostructured ITO thin films on nanoimprinted glasses by pulsed laser deposition	Proc. SPIE, Vol. 7201, 72011A1-72011A9	有	2009
68	K. Nakamura, T. Somekawa, Y. Baba, K. Horiuchi, Y. Matsuzaki, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Expansion and shrinkage in the redox process of (Mg,Ni)O solid solutions for preparation of steam reforming catalysts in SOFCs	J. the Ceramic Soc. of Japan, vol. 117(2), pp. 166-170	有	2009
69	Y. Akita, Y. Sugimoto, M. Hosaka, Y. Kato, Y. Ono, O. Sakata, M. Mita, H. Oi, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Fabrication and Characterization of Indium Tin Oxide Thin Films on Nanoimprinted Glasses	Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 1109, 1109-B06-12	有	2009
70	Y. Akita, Y. Sugimoto, K. Kobayashi, T. Suzuki, H. Oi, M. Mita, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Crystal Growth Control of Functional Oxide Thin Films on Nanopatterned Substrate Surfaces	J. Laser Micro/Nanoengineering, Vol. 4, pp. 202-206	有	2009

71	Y. Kato, S. Kane ko, N. Shiraishi, N. Tsuchimine, S. Kobayashi, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Epitaxial Growth of LaB <sub>6</sub> Thin Films on the Ultrasmooth Sapphire Substrate with an Epitaxial SrB <sub>6</sub> Buffer by Laser MBE	J. Laser Micro/ Nanoengineering , Vol.4, pp.197 -201	有	2009
72	B. Gelloz, N. Ko shida	東京農工大	Stabilization and op eration of porous si licon photonic struc tures from near-ultr aviolet to near-infr ared using high-pres sure water vapor ann ealing	Thin Solid Film s 518, 3276	有	2010
73	R. Mentek, B. Ge lloz, N. Koshid a	東京農工大	Fabrication and opti cal characterization of self-standing wi de-gap nanocrystalli ne silicon layers	Jpn. J. Appl. P hys. 49, 04DG22 -1	有	2010
74	Y. Hirano et al .	東京農工大	Development of dry-p rocessed silicon nan o-dot planar cold ca thode and its electr on emission properti es	J. Vac. Sci. Te chnol. B 28, C2 B6	有	2010
75	T. Djenizian et al.	東京農工大	Direct electropolyme rization of poly(par a-phenylene)vinylene films on Si and por ous Si	J. Electrochem. Soc. 157, H534	有	2010
76	A. Chouket et a l.	東京農工大	Multiple energy tran sfer in porous silic on/Rh6G/RhB nanocomp osite evidenced by p hotoluminescence and its polarization me mory	Thin Solid Film s 518, S212	有	2010
77	Masatoshi Waka gi, Isao Suzum ura, Akiko Kag atsume, Haruhi ko Asanuma, Et suko Nishimura , Mieko Matsum ura, Tsutomu H osoi, Jun-ichi Hanna	東工大	Properties of SiGe F ilms Fabricated by R eactive Thermal Chem ical Vapor Depositio n using Lamp Heating	Jpn. J. Appl. P hys., Vol.49, 0 4DH11-1-04DH11- 6	有	2010
78	Takehiro Iwasa et al.	東海大	Polycrystalline sili con germanium thin f ilms prepared by alu minium-induced cryst allization	Phys. Status So lidi A 207, pp. 617-620	有	2010
79	N. Yoshida et a	東海大	Microcrystalline Ger	Sol. Energy Mat	有	2010

	1.		manium Thin Films Prepared By Reactive RF Sputtering	er. & Sol. Cells, 95, pp.175-178		
80	菅谷武芳、古江重紀、小牧弘典、天野建、森雅彦、小森和弘、仁木栄、沼上理、岡野好伸	産総研、東京都市大	Highly stacked and well-aligned In <sub>0.4</sub> Ga <sub>0.6</sub> As quantum dot solar cells with In <sub>0.2</sub> Ga <sub>0.8</sub> As cap layer	Appl. Phys. Lett., 97, 183104	有	2010
81	菅谷武芳、天野建、森雅彦、仁木栄	産総研	Miniband formation in InGaAs quantum dot superlattice	Appl. Phys. Lett., 97, 43112	有	2010
82	菅谷武芳、古江重紀、沼上理、天野建、森雅彦、小森和弘、岡野好伸、仁木栄	産総研、東京都市大	Highly stacked In <sub>0.4</sub> Ga <sub>0.6</sub> As quantum dot solar cells with In <sub>0.2</sub> Ga <sub>0.8</sub> As cap layer	Proceedings of 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp.195-198	無	2010
83	菅谷武芳、古江重紀、沼上理、天野建、森雅彦、小森和弘、岡野好伸、仁木栄	産総研、東京都市大	Characteristics of Highly Stacked Quantum Dot Solar Cells Fabricated by Intermittent Deposition of InGaAs	Proc. 35th IEEE PVSC, pp.1863-1867	無	2010
84	大島武、佐藤真一郎、森岡千晴、今泉充、菅谷武芳、仁木栄	原研、JAXA、産総研	Change in the Electrical Performance of InGaAs Quantum Dot Solar Cells due to Irradiation	Proc. 35th IEEE PVSC, pp.2594-2598	無	2010
85	菅谷武芳、古江重紀、上川由紀子、沼上理、天野建、森雅彦、小森和弘、岡野好伸、仁木栄	産総研、東京都市大	Highly Stacked InGaAs Quantum Dot Solar Cells	Proc. Renewable energy 2010, OP-13-6	無	2010
86	菅谷武芳、天野建、森雅彦、仁木栄、近藤道雄	産総研	Highly Stacked and High Quality Quantum Dots Fabricated by Intermittent Deposition of InGaAs	Jpn. J. Appl. Phys., 49 (3) 030211	有	2010
87	菅谷武芳、天野建、森雅彦、仁木栄	産総研	Highly Stacked InGaAs Quantum Dot Structures Grown with Two Species of As	J. Vac. Sci. Technol., B28, (3) c3c4-c3c8.	有	2010
88	S. Ito, M. Sumiya, M. Mieno, H. Koinuma	NIMS、東大新領域	Growth of Mg <sub>x</sub> Zn <sub>1-x</sub> O film equipped laser heating system	Materials Science and Engineering B, Vol. 173, pp.11-13	有	2010
89	Liwen Sang, Ma	NIMS	Phase Separation Res	Appl. Phys. Exp	有	2010



	saki Takeguchi, Woong Lee, Y oshiko Nakayama, Mickael Lozac' h, Takashi Sekiguchi, Masatomo Sumiya		ulting from Mg Dopin g in p-InGaN Film Gr own on GaN/Sapphire Template	ress 3, 111004		
90	D. -H. Lee, K. Kawamura, K. Nomura, H. Yanagi, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono	東工大	Steady-state photoco nductivity of amorph ous In-Ga-Zn-O	Thin Solid Film s, 518, 3000	有	2010
91	Dong Hee Lee, Ken-ichi Kawamura, Kenji Nomura, Toshio Kamiya, Hideo Hosono	東工大	Large Photoresponse in Amorphous In-Ga-Z n-O and Origin of Re versible and Slow De cay	Electrochem. So lid-State Lett. ,13 H324	有	2010
92	Hideo Hosono, Yoichi Ogo, Hiroshi Yanagi, Toshio Kamiya	東工大	Bipolar Conduction i n SnO Thin Film	Electrochem. So lid-State Lett. ,14 H13	有	2010
93	V. Švrcek, I. Turkevych, K. Har a, M. Kondo	産総研	Ordered titanium dio xide nanotubes fille d with photoluminesc ent surfactant-free silicon nanocrystals	Nanotechnology, 21, 2150203,	有	2010
94	V. Švrcek	産総研	Funcionalization of carbon nanotubes wit h luminescent silico n nanocrystals upon nanosecond laser pro cessing in liquid me dia	book chapter in Carbon Nanotub es	有	2010
95	V. Švrcek	産総研	Excitation energy tr ansfer in conjugated polymer/silicon nan ocrystal based bulk- heterojunction	Pure and Applie d Chemistry, 82 , pp.2121-2135	有	2010
96	V. Švrcek, M. Kondo	産総研	Blue light emitting silicon nanocrystals prepared by laser a blation of doped Si wafers in liquid	Journal of Lase r Micro/Nanoeng ineering, 5, pp .103-108	有	2010
97	Y. Kawashima, K .Yamamoto, M. S ato, K. Nakahara, T. Matsunaga , W. Nakamura, D. Yamashita, H .Matsuzaki, G. Uchida, K. Kama taki, N. Itagak	Kyushu Univ .、AIST	Si quantum dot-sensi tized solar cells us ing Si nanoparticles produced by plasma CVD	Proceedings of 35th IEEE Photo voltaic Special ist Conference, pp.003347-0033 51	無	2010

	i, K.Koga, M.Shiratani, M.Kondo					
98	Y.Kawashima, K.Nakahara, H.Sato, G.Uchida, K.Koga, M.Shiratan, M.Kondo	Kyushu Univ .、AIST	Quantum dot-sensitized solar cells using Si nanoparticles	Transaction of Materials Society of Japan Vol . 35, No. 3, pp .597-599	有	2010
99	Y.Kawashima, K.Yamamoto, M.Sato, T.Matsunaga, K.Nakahara, D.Yamashita, H.Matsuzaki, G.Uchida, K.Koga, M.Shiratan	Kyushu Univ	Photoluminescence of Si nanoparticles synthesized using multi-hollow discharge plasma CVD	Proceedings of IEEE TENCON 2010, pp.2222-2224	有	2010
100	内田儀一郎、古閑一憲、白谷正治	九州大学	マルチホロー放電プラズマCVDによる量子ドット増感太陽電池用シリコンナノ結晶粒子の作製	ケミカルエンジニアリング12月号, 55(12), pp.947-954	無	2010
101	Y.F.Li, T.Kaneko, Y.Hirotsu, R.Hatakeyama	Tohoku University	Light-Induced Electron Transfer Through DNA-Decorated Single-Walled Carbon Nanotubes	Small 6(1), pp.27-30	有	2010
102	Y.F.Li, T.Kaneko, S.Miyana, R.Hatakeyama	Tohoku University	Synthesis and Property Characterization of C <sub>69</sub> N Azafullerene Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotubes	ACS Nano, 4, pp .3522-3526	有	2010
103	Z.Ghorannevis, T.Kato, T.Kaneko, R.Hatakeyama	Tohoku University	Narrow-Chirality Distributed Single-Walled Carbon Nanotubes Growth from Nonmagnetic Catalyst	J. Am. Chem. Soc., 132, pp.9570-9572	有	2010
104	R.Hatakeyama, Y.F.Li, T.Y.Kato, T.Kaneko	Tohoku University	Infrared Photovoltaic Solar Cells Based on C <sub>60</sub> Fullerene Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotubes	Appl. Phys. Lett, 97, 013104	有	2010
105	T.Kato, R.Hatakeyama	Tohoku University	Direct Growth of Short Single-Walled Carbon Nanotubes with Narrow-Chirality Distribution by Time-Programmed Plasma Chemical Vapor Deposition	ACS Nano 4(12) pp.7395-7400	有	2010
106	T.Kato, R.Hatakeyama	Tohoku University	Growth of Single-Walled Carbon Nanotubes	Journal of Nanotechnology 2010	有	2010

			by Plasma CVD	0 256906-1-11		
107	松本祐司、丸山伸伍、武山洋子	東工大	イオン液体の真空蒸着技術とコンビナトリアル新材料開発への応用	工業材料 58, pp. 60-63	無	2010
108	S. Maruyama, Y. Takeyama, H. Taniguchi, H. Fukumoto, M. Itoh, H. Kumigashira, M. Oshima, T. Yamamoto, Y. Matsumoto	東工大	Molecular beam deposition of nano-scale ionic liquids in ultra-high vacuum	ACS Nano, 4 pp. 5946-5952	有	2010
109	J. Tsutsumi, T. Yamada, H. Matsui, S. Haas, T. Hasegawa	産総研、東大	Competition between Charge-Transfer Exciton Dissociation and Direct Photocarrier Generation in Molecular Donor-Acceptor Compounds	Phys. Rev. Lett. 105, 226601	有	2010
110	T. Kajitani, 1, Y. Miyazaki, 1, K. Hayashi, 1, K. Yubuta, 2, X. Y. Huang, 3, W. Koshibae, 4	1Dept. of Appl. Phys. Tohoku Univ., 2IMR Tohoku Univ., 3Shanghai Inst. Ceramics, Chinese Acad. Sci., 4CMRG, RIKEN	Thermoelectric Energy Conversion and Ceramic Thermoelectrics	Science Forum 671, 1	有	2010
111	K. Shibuya, 1, M. Kawasaki, 1, 2, Y. Tokura, 1, 3	1CMRG, RIKEN, 2AIMR, Tohoku, 3Univ. Dept. of Appl. Phys. Univ. of Tokyo	Metal-insulator transition in $\text{TiO}_2/\text{VO}_2$ superlattices	Phys. Rev. B 82, 205118	有	2010
112	M. Nakamura, 1, J. Fujioka, 2, M. Kawasaki, 1, 3, Y. Tokura, 1, 2, 4	1CMRG, RIKEN, 2ERATO-Multiferroics, JST, 3AIMR, Tohoku, 4Univ. Dept. of Appl. Phys. Univ. of Tokyo	Interface band profiles of Mott-insulator / Nb:SrTiO <sub>3</sub> heterojunctions as investigated by optical spectroscopy	Phys. Rev. B 82, 2211021	有	2010
113	J. S. Lee, 1, M. Nakamura, 2, D. Okuyama, 2, R. Kumai, 3, T. Arima, 4, M. Kawasaki, 2, 5, Y. Tokura, 1, 2, 6	1ERATO-Multiferroics, JST, 2CMRG, RIKEN, 3AIMR, 4IMRAM, Tohoku Univ. 5WPI-AIM	Competing electronic orders in anisotropically strained $(\text{Pr}_{0.6}\text{Ca}_{0.4})_{1-x}(\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4})_x\text{MnO}_3$ thin films	Phys. Rev. B 82, 052406	有	2010

		R, Tohoku Univ., 6Dept. of Appl. Phys. Univ. of Tokyo				
114	K. Lai, 1, M. Nakamura, 2, W. Kundhikanjana, 2, M. Kawasaki, 2, 3, Y. Tokura, 2, 4, M. A. Kelly, 1, Z. -X. Shen, 1	1Stanford Univ., 2CMRG, RIKEN, 3WPI-AIMR, Tohoku University, 4Dept. of Appl. Phys. Univ. of Tokyo	Mesoscopic percolating resistance network in a strained manganese thin film	Science, 329, 190	有	2010
115	M. Nakamura, 1, D. Okuyama, 1, J. S. Lee, 2, T. Arima, 3, Y. Wakabayashi, 4, R. Kumai, 5, M. Kawasaki, 1, 6, Y. Tokura, 1, 2, 7	1CMRG, RIKEN, 2ERATO-Multiferroics, JST, 3IMRAM, Tohoku Univ. 4Osaka Univ. 5AIST, 6WPI-AIMR, Tohoku Univ., 7Dept. of Appl. Phys. Univ. of Tokyo	Magnetically tunable metal-insulator superlattices	Adv. Mater. 22, 500	有	2010
116	Z. Liu, Z. Zhao, Y. Cui, K. Hara, M. Miyauchi	産総研	Block copolymer templated nanoporous TiO <sub>2</sub> for quantum-dot-sensitized solar cells	Journal of Materials Chemistry, 20, pp.492-497	有	2010
117	Z. Liu, M. Miyauchi, Y. Uemura, Y. Cui, K. Hara, Z. Zhao, K. Sunahara, A. Furube	産総研	Enhancing the performance of quantum dot sensitized solar cell by SiO <sub>2</sub> surface coating	Appl. Phys. Lett., 96, 233107	有	2010
118	M. Miyauchi, Z. Liu, Z. Zhao, S. Anandan, K. Hara	産総研	Single crystalline zinc stannate nanoparticles for efficient photoelectrochemical devices	Chem. Commun., 46, pp.1529-1531	有	2010
119	J. Takenezawa, M. Hasumi, T. Sameshima, T. Koيدا, T. Kaneko, M. Karasawa, M. Kondo	Tokyo University of Agriculture & Technology, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Stacked Solar Cells using Transparent and Conductive Adhesive	2010 International Conference on Solid State Devices and Materials (Tokyo) 196	有	2010
120	H. Sai, H. J. Jia	産総研	Impact of front and	J. Appl. Phys.	有	2010

	, M. Kondo		rear texture of thin-film microcrystalline silicon solar cells on their light trapping properties	108, 44505		
121	H. Sai, M. Kondo	産総研	IMPACT OF FRONT AND REAR-SIDE TEXTURING ON LIGHT TRAPPING IN THIN-FILM SILICON SOLAR CELLS	Proc. 35th IEEE PVSC, pp.295-300	無	2010
122	H. Sai, M. Kondo	産総研	IMPACT OF FRONT AND REAR TEXTURING ON LIGHT TRAPPING IN THIN-FILM SILICON SOLAR CELLS	Proc. Renewable Energy 2010, OP-14-13	無	2010
123	H. Sai, M. Kondo	産総研	INFLUENCE OF FRONT AND REAR TEXTURES AND PARASITIC ABSORPTION ON LIGHT TRAPPING IN THIN-FILM SILICON SOLAR CELLS	Proc. 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2987	無	2010
124	H. Okamoto, Y. Sobajima, T. Toyama, A. Matsuda	Osaka University	Laplace Meyer-Neldel relation	Physica Status Solidi (a) 207 pp.566-569	有	2010
125	Y. Sobajima, T. Higuchi, J. Chantana, T. Toyama, C. Sada, A. Matsuda, H. Okamoto	Osaka University	Gas-temperature control in VHF-PECVD process for high-rate (>5nm/s) growth of microcrystalline silicon thin films	Physica Status Solidi (c) 7 pp.521-524	有	2010
126	J. Chantana, T. Higuchi, T. Nagai, S. Sasaki, Y. Sobajima, T. Toyama, C. Sada, A. Matsuda, H. Okamoto	Osaka University	The relationship between $I_{H\alpha}=(I_{SiH^*})_2$ and crystalline volume fraction in microcrystalline silicon growth	Physica Status Solidi (a) 207 pp.587-590	有	2010
127	鯉田崇、近藤道雄、堤浩一、坂口明生、鈴木道夫、藤原裕之	産総研、ジェーエーウーラムジャパン、岐阜大	Hydrogen doped $In_2O_3$ transparent conducting oxide films prepared by solid-phase crystallization method	JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 107-3, pp.033514-1-033514-11	有	2010
128	鯉田崇、齋均、近藤道雄	産総研	Application of hydrogen-doped $In_2O_3$ transparent conductive oxide to hydrogenated microcrystalline Si thin-film solar cells	THIN SOLID FILMS, 518-11, pp.2930-2933	有	2010
129	Y. Kato, N. Shiraishi, N. Tsuchimine, S. Kobayashi	Tokyo. Inst. Tech.	Fabrication of semiconducting $SrB_6$ thin films on ultrasmooth	J. Crystal Growth, vol.312 pp.378-381	有	2010

	ashi, M. Yoshimoto		sapphire substrates by laser molecular beam epitaxy			
130	Y. Akita, Y. Sugimoto, H. Oi, M. Mita, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Atomic-scale pattern control of surfaces on functional oxide thin films and glass plates	e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, Vol.8 pp.44-47	有	2010
131	Y. Sugimoto, Y. Akita, Y. Nakasone, M. Mita, H. Oi, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Nanoimprinted Glass Substrates for Nanoscale Growth Control of Transparent Conducting Oxide Films	Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Vol.1228, pp.1228-KK11-16~KK11-21	有	2010
132	S. Kaneko, T. Nagano, K. Akiyama, T. Ito, M. Yasui, Y. Hirabayashi, H. Funakubo, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Constriction of lattice constant in epitaxial magnesium oxide thin film	J. Appl. Phys. Vol.107, pp.073523-1~073523-3	有	2010
133	N. Shiraishi, Y. Kato, H. Arai, N. Tsuchimine, S. Kobayashi, M. Mitsuhashi, M. Soga, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Heavy Doping of Li <sup>+</sup> ion into NiO Epitaxial Thin Films via Un-equilibrium Room-temperature Processing for New Functionalization	MRS Online Proceedings Library / Vol.1214, 1214-U04-38-U04-43	有	2010
134	S. Kaneko, K. Akiyama, T. Ito, M. Yasui, M. Soga, Y. Hirabayashi, H. Funakubo, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Large Lattice Misfit on Epitaxial Thin Film: Coincidence Site Lattice Expanded on Polar Coordinate System	Jpn. J. Appl. Phys. Vol.49, 08JE02-1-08JE02-3	有	2010
135	N. Shiraishi, Y. Kato, H. Arai, N. Tsuchimine, S. Kobayashi, M. Mitsuhashi, M. Soga, S. Kaneko, M. Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Room-Temperature Epitaxial Growth of (Li, Ni)O Thin Film with Li Content up to 60 mol%	Jpn. J. Appl. Phys., 49, 108001-1-108001-2	有	2010
136	B. P. Swain, H. Takato, I. Sakata	産総研	Ambient stability of wet chemically passivated germanium wafer for crystalline solar cells	Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 95, p.84	有	2011
137	H. Sai, Y. Kanamori, M. Kondo	産総研	Flattened light scattering substrate in thin film silicon solar cells for improved infrared response	Appl. Phys. Lett. 98, 113502	有	2011
138	T. Sameshima, J. Takenezawa, M.	東京農工大	Multi-junction Solar Cells Stacked With	Jpn. J. Appl. Phys, 50, 03CA03	有	2011

	.Hasumi, T.Koi da, T.Kaneko, M.Karasawa,M. Kondo		Transparent and Cond uctive Adhesive			
139	J.Takenezawa, M.Hasumi, T.Sa meshima, T.Koi da, T.Kaneko, M.Karasawa, M. Kondo	東京農工大	Heat Treatment of Am orphous Silicon p-i n Solar Cells with H igh-Pressure H <sub>2</sub> O Vapo r	The 24th Inte rnational Conf erence on Amorp hous and Nanocr ystalline Semic onductors, P-31	無	2011
140	Hitoshi Sai, Y oshiaki Kanamo ri, Michio Kon do	AIST	Flattened light scat tering substrate in thin-film Si solar c ells for improved in frared response and photovoltaic perform ance	Proc. 26th EUPV SC, pp.2336-233 9	無	2011
141	Hidenori Mizun o, Hitoshi Sai , Koji Matsuba ra, Michio Kon do	AIST	Chemical Assembly of Silver Nanoparticle s for Light Trapping in Thin Film Silico n Solar Cells	Technical Diges t of 21st PVSEC , 3A-20-02	無	2011
142	Hitoshi Sai, Y oshiaki Kanamo ri, Michio Kon do	AIST	Flattened light scat tering substrate and its application to thin-film Si solar c ells	Technical Diges t of 21st PVSEC , 4A-20-09	無	2011
143	水野英範、齋均 、松原浩司、近 藤道雄	AIST	微結晶シリコン太陽電 池におけるプラズモニ ック光閉じ込め	第3回薄膜太陽電 池セミナー, PP- 25	無	2011
144	J.Chantana, Y. Yang, Y.Sobaji ma, C.Sada, A. Matsuda, H.Oka moto	Osaka Unive rsity	Importance of Starti ng Procedure for Fil m Growth in Substrat e-Type Microcrystall ine-Silicon Solar Ce lls	Jpn. J. Appl. P hys, 50, 45806	有	2011
145	Y.Sobajima C.S ada, A.Matsuda , H.Okamoto	Osaka Unive rsity	Control of Materials and Interfaces in $\mu$ c-Si:H-based Solar Cells Grown at High Rate	MRS Proc., 1321 , 1321-a02-01	有	2011
146	B.P.Swain, H.T akato, I.Sakat a	AIST、RCPVT	Passivation of Germa nium Surfaces by a Q uinhydrone-methanol Solution Treatment	Jpn. J. Appl. P hys., 50, 71302	有	2011
147	T.Kaneko, M.K ondo	AIST、RCPVT	Temperature Coeffici ent in Crystalline G ermanium Solar Cells Using a Heterojunct ion Structure with a Hydrogenated Amorph ous Silicon Thin Lay er	Jpn. J. Appl. P hys., 50, 12020 4	有	2011

148	山田利宜、片岡拓朗、畑野雄太、磯村雅夫	東海大	反応性スパッタ法による微結晶ゲルマニウム薄膜における不純物添加効果	東海大学紀要 工学部, 51, 77	有	2011
149	山口智明、井口正太郎、磯村雅夫	東海大	電子ビーム蒸着法により単結晶Si基板上に成長させた結晶Ge薄膜	東海大学紀要 工学部, 51, 83	有	2011
150	N. Ohashi et al.	産総研	Mg <sub>x</sub> C <sub>60</sub> Fabricated by Using Mg:C <sub>60</sub> Co-evaporation Method for Carrier Doping	Mol. Cryst. Liq. Cryst., 538, pp.193-198	有	2011
151	Shingo Maruyama, Yoko Takeyama, Yuji Matsumoto	東工大応セラ研	Electrochemical Characterization of Pentacene Thin Films in Vacuum with an Ionic Liquid as Electrolyte	APEX, 4, 51602	有	2011
152	Yoko Takeyama, Shingo Maruyama, Yuji Matsumoto	東工大応セラ研	Growth of Single-Crystal Phase Pentacene in Ionic Liquids by Vacuum Deposition	Crystal Growth & Design, 11, p.2273-2278	有	2011
153	Yoko Takeyama, Shingo Maruyama, Yuji Matsumoto	東工大応セラ研	Development of compact CW-IR laser deposition system for high-throughput growth of organic single crystals	Sci. Technol. Adv. Mater, 12, 2 54210-1-5	有	2011
154	S. Maruyama, H. Taniguchi, Y. Takeyama, M. Itoh, Y. Matsumoto	東工大応セラ研	High-throughput CW-IR Laser deposition and laser microscope imaging of binary ionic liquids in vacuum	Sci. Technol. Adv. Mater, 12, 0 54204-1-4	有	2011
155	K. Akiyama, T. Kadowaki, Y. Hirabayashi, M. Yoshimoto, H. Funakubo, S. Kaneko	Tokyo Inst. Tech. et al.	Epitaxial Growth of (100)-oriented $\beta$ -FeSi <sub>2</sub> Film on 3C-SiC(100) plane	J. Cryst. Growth, 316, 10	有	2011
156	Satoru Kaneko, Takeshi Ito, Kensuke Akiyama, Manabu Yasui, Chihiro Kato, Satomi Tanaka, Yasuo Hirabayashi, Takeshi Ozawa, Akira Matsuno, Takashi Nire, Hiroshi Funakubo, Mamoru Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Effect of CW Laser Annealing on Silicon Surface for Application of Power Device	Engineering and Technology, 74, 1150	有	2011



157	Yasuyuki Akita, Yumiko Miyake, Hirokazu Nakai, Hideo Oi, Masahiro Mita, Satoru Kaneko, Masahiko Mitsuhashi, Mamoru Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Evolution of atomically stepped surface of indium tin oxide thin films grown on nanoimprinted glass substrates	Appl. Phys. Express, 4, 035201-1	有	2011
158	Satoru Kaneko, Takeshi Ito, Kensuke Akiyama, Manabu Yasui, Chihiro Kato, Satomi Tanaka, Yasuo Hirabayashi, Akira Mastuno, Takashi Nire, Hiroshi Funakubo, Mamoru Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Nano-strip grating lines self-organized by a high speed scanning CW laser	Nanotechnology, 22, 175307-1	有	2011
159	S. Kaneko, K. Akiyama, T. Ito, M. Yasui, Y. Hirabayashi, T. Ozawa, A. Matsuno, T. Nire, M. Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Effect of Surface on Silicon Substrate Irradiated by Infrared and Ultraviolet CW Lasers - Temperature Analysis using Finite Element Method	The Papers of Technical Meetings on Optical & Quantum Devices, OQD-11-007, 31	有	2011
160	Yuta Nakasone, Hirokazu Nakai, Yumiko Miyake, Ryosuke Yamauchi, Nobuo Tsuchimine, Susumu Kobayashi, Yoshifumi Sano, Nobutaka Takezawa, Masahiko Mitsuhashi, Satoru Kaneko, Hiroshi Funakubo, Mamoru Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Synthesis of Mica Thin Film by Pulsed Laser Deposition	Appl. Phys. Express, 4, 055502-1	有	2011
161	N. Takezawa, T. Yamanoi, K. Iizuka, T. Hiraide, H. Yoshikawa, Y. Ando, M. Mita, H. Oi, M. Takahashi, M. Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Fabrication of a Diamond-Based Imprint Mold by Applying Diamond CVD on Silicon Master Molds for a Glass Microlens Array	Diamond and Related Materials, 20, 866	有	2011
162	Hideki Arai, R	Tokyo Inst.	Fabrication of Ferro	Jpn. J. Appl. P	有	2011

	yosuke Yamauchi, Takanori Kiguchi, Koji Koyama, Keisuke Kobayashi, Toshimasa Suzuki, Takao Sasagawa, Yushi Kato, Nobuo Tsuchimine, Susumu Kobayashi, Masahiko Mitsuhashi, Satoru Kaneko, Mamoru Yoshimoto	Tech. et al.	magnetic Ni(111) Nanoparticles Embedded Epitaxially in (Mg,Ni)O Matrix by Reduction of (Mg <sub>0.5</sub> Ni <sub>0.5</sub> )O(111) Epitaxial Thin Film	Phys., 50, 070206-1		
163	Satoru Kaneko, Takeshi Ito, Yasuo Hirabayashi, Takeshi Ozawa, Yu Motoizumi, Kiyoto Hirai, Yasuhiro Naganuma, Masayasu Soga, Mamoru Yoshimoto, Koji Suzuki	Tokyo Inst. Tech. et al.	Optimizing Coverage of Metal Oxide Nanoparticle Prepared by Pulsed Laser Deposition on Nonenzymatic Glucose Detection	Talanta, 84, 579	有	2011
164	Yumiko Miyake, Yasuyuki Akita, Hideo Oi, Masahiro Mita, Satoru Kaneko, Kohji Koyama, Kazuhiro Sunagawa, Kazuhiro Tada, Yoshihiko Hirai, Mamoru Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Nanoimprint Fabrication and Thermal Behavior of Atomically Ultrasmooth Glass Substrate with 0.2nm-Height Steps	Jpn. J. Appl. Phys., 50, 078002-1	有	2011
165	T. Yatsui, K. Hirata, Y. Tabata, Y. Miyake, Y. Akita, M. Yoshimoto, W. Nomura, T. Kawazoe, M. Naruse, M. Ohtsu	Tokyo Inst. Tech. et al.	Self-organized near-field etching of the sidewalls of glass corrugations	Appl. Phys. B, 103, 527	有	2011
166	Takashi Naito, Takuya Aoyagi, Yuichi Sawai, Shinichi Tachizono, Kei Yoshimura, Yuji Hashiba, Mamoru Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Lead-free low-melting & semiconductive vanadate glass applicable to low-temperature sealing	Jpn. J. Appl. Phys., 50, 088002-1	有	2011

167	Ryosuke Yamauchi, Keisuke Kobayashi, Makoto Hosaka, Toshimasa Suzuki, Kohji Koyama, Akifumi Matsuda, Hideki Arai, Yushi Kato, Masahiko Mitsuhashi, Satoru Kaneko, Mamoru Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Fabrication of Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Ni Heteroepitaxial Junction by Post Hydrogen Reduction of NiO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /NiO Tri-layered Epitaxial Thin Film	Jpn. J. Appl. Phys., 50, 98004	有	2011
168	Yushi Kato, Hideki Arai, Ryosuke Yamauchi, Nobuo Tsuchimine, Susumu Kobayashi, Kazuhiko Saeki, Nobutaka Takezawa, Satoru Kaneko, Masahiko Mitsuhashi, Hiroshi Funakubo, Mamoru Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Buffer-layer-enhanced growth of a single-domain LaB <sub>6</sub> (100) epitaxial thin film on a MgO (100) substrate via pulsed laser deposition	J. Cryst. Growth, 330, 39	有	2011
169	Satoru Kaneko, Kensuke Akiyama, Takeshi Ito, Manabu Yasui, Takeshi Oza, Masayasu Soga, Yu Motoizumi, Mamoru Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Effect of post annealing on MgO thin film prepared on silicon(001) substrate in high oxygen pressure and high substrate temperature by pulsed laser deposition	Materials Science and Engineering, 18, 022018-1	有	2011
170	K. Tada, M. Yasuda, G. Tan, Y. Miyake, H. Kawata, M. Yoshimoto, Y. Hirai	Tokyo Inst. Tech. et al.	Atomic step patterning in nanoimprint lithography : Molecular dynamics study	J. Vac. Sci. Technol. B, 29, 06FC11-1	有	2011
171	V. Svrcek, S. Cook, S. Kazaoui, M. Kondo	産総研	Silicon Nanocrystals and Semiconducting Single-Walled Carbon Nanotubes Applied to Photovoltaic Cells	Journal of Physical Chemistry Letters, 2, 1646	有	2011
172	T. Kato et al.	Tohoku University	Diameter Tuning of Single-Walled Carbon Nanotubes by Diffusion Plasma CVD	J. Nanomater., 490529	有	2011
173	T. Umakoshi et al.	Tohoku University	Encapsulation of Nickel Atom inside Fullerene by Energetic I	Plasma Fusion Res., 6, 1206015	有	2011

			on Irradiation			
174	R.Hatakeyama et al.	Tohoku University	Plasma-Synthesized Single-Walled Carbon Nanotubes and Their Applications	J. Phys D:Appl. Phys., 44, 174004	有	2011
175	T. Kaneko et al.	Tohoku University	Structural and Reactive Kinetics in Gas-Liquid Interfacial Plasmas	Plasma Sources Sci. Technol., 20, 034014	有	2011
176	Y.F.Li et al.	Tohoku University	Harvesting Infrared Solar Energy by Semiconducting-Single-Walled Carbon Nanotubes	Appl. Phys. Express, 4, 065101	有	2011
177	Y.F.Li et al.	Tohoku University	Electrical Transport Properties of C <sub>59</sub> N Azafullerene Encapsulated Double-Walled Carbon Nanotube	Open J. Microphys., 1, 23	有	2011
178	N.T.Cuong et al.	Tohoku University	Origin of the n-Type Transport Behavior of Azafullerene Encapsulated Single-Walled Carbon Nanotubes	Appl. Phys. Lett., 99, 053105	有	2011
179	Q.Chen et al.	Tohoku University	Effects of DNA on Gold Nanoparticle Synthesis Using Gas-Liquid Interfacial Pulse Discharge Plasma	Trans. Mater. Res. Soc. Jpn., 36, 483	有	2011
180	Q.Chen et al.	Tohoku University	Characterization of Pulse-Driven Gas-Liquid Interfacial Discharge Plasmas and Application to Synthesis of Gold Nanoparticle-DNA Encapsulated Carbon Nanotubes	Current Appl. Phys., 11, S63	有	2011
181	堤潤也、長谷川達生	産総研	有機半導体における分子間電荷移動励起を用いた光電変換	固体物理, 46, 309	有	2011
182	Koshibae, N.Furukawa, N.Nagasa	CMRG-RIKEN, Aoyama-Gakuin Univ., ERATO-MF, Univ. of Tokyo	Photo-induced insulator-metal transition of a spin-electron coupled system	Europhys. Lett., 94, 27003	有	2011
183	Shibuya, D.Okuyama, R.Kumai, Y.Yamasaki, H.Nakao, Y.Murakami, Y.Taguchi, T.Arima, M.Kawasaki, Y.To	CMRG-RIKEN, AIST, KEK, Tohoku Univ. RIKEN-Spring8, Univ. of Tokyo, ERATO-MF	X-ray induced insulator-metal transition in a thin film of electron-doped VO <sub>2</sub>	Phys. Rev. B, 83, 165127	有	2011

	kura					
184	Y. Yamasaki, D. Okuyama, M. Nakamura, T. Arima, M. Kawasaki, Y. Tokura, T. Kimura, Y. Wakabayashi	Osaka Univ., CMRG-RIKEN, Tohoku Univ., Univ. of Tokyo	Interfacial Structure of Manganite Superlattice	J. Phys. Soc. Jpn., 80, 73601	有	2011
185	H. Tachibana, T. Mizuno, S. Ishibe	AIST	Optical Properties of Siloxene Films Prepared by High-Temperature Heat Treatment from Thin Films of Polysilane Containing Anthryl Groups	Jpn. J. Appl. Phys., 50, 04DK18	有	2011
186	T. Mizuno, Y. Akasaka, H. Tachibana	AIST	Poly(methylphenylsilane) (PMPS) Solar Cell	Technical Digest of PVSEC-21, 4D-5P-22	無	2011
187	K. Hara et al.	AIST	Nanocrystalline Electrodes Based on Nanoporous-Walled WO <sub>3</sub> Nanotubes for Organic-Dye-Sensitized Solar Cells	Langmuir, 27, 12730	有	2011
188	J. McKenna, J. Patel, S. Mitra, N. Soin, V. Švrcek, P. Maguire, D. Mariotti,	AIST	Synthesis and surface engineering of nanomaterials by atmospheric-pressure microplasmas	Eur. Phys. J. Appl. Phys., 56, 24020	有	2011
189	Y-W. Zhong, L. Li, D-Y. Zhong, V. Švrcek	AIST	Facile template synthesis of polypyrrole microcontainers based on honeycomb polystyrene/FeCl <sub>3</sub> hybrid films	Journal of Nanoscience Letters, 2, 143	有	2011
190	V. Švrcek, D. Mariotti, K. Kalita, C. Dickinson, M. Kondo	AIST	Formation of single-crystal spherical particle architectures by plasma-induced low-temperature coalescence of silicon nanocrystals synthesized by laser ablation in water	J. of Phys. Chem. C, 115, 6235	有	2011
191	V. Švrcek, D. Mariotti, T. Nagai, Y. Shibata, I. Turkevych, M. Kondo	AIST	Photovoltaic Applications of Silicon Nanocrystal Based Nanostructures Induced by Nanosecond Laser Fragmentation in Liquid Media	J. of Phys. Chem. C, 115, 5084	有	2011
192	V. Švrcek, T. Yamamori, Y. Shib	AIST	Tailoring of hybrid silicon-nanocrystal-	Acta Materialia, 59, 764	有	2011

	ata, M.Kondo		based bulk heterojunction photovoltaic properties upon nanocrystal laser processing in liquid medium			
193	V. Švrček	AIST	Fabrication of Silicon Nanocrystal Based Structures with Nanosecond Laser Ablation Processings in Liquid Media	Book Chapter in Laser Ablation Effects and Applications (Ed.), S.H.Black, Nova Science Publisher, New York, 127	無	2011
194	V. Švrček	AIST	Hybrid optoelectronic and photovoltaic materials based on silicon nanocrystals and conjugated polymers	Book Chapter in Optoelectronic devices and properties (Ed.), O.Sergiyenko, INTECH, 197	無	2011
195	V. Švrček, D. Mariotti, K. Matsubara, M. Kondo	AIST	Integration of surfactant free silicon nanocrystals in hybrid solar cells	Technical digest of 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21), 3D-5P-21	無	2011
196	V. Švrček	AIST	Electronic interactions of silicon nanocrystals and nanocarbon materials : Hybrid solar cells	Proc. 21st International Symposium on Fine Chemistry and Functional polymers and 7th IUPAC International Symposium on Novel materials and their Synthesis, D44	無	2011
197	V. Švrček, D. Mariotti, S. Cook, S. Kazaoui, Y. Shibata, M. Kondo	AIST	Silicon nanocrystals surface engineering and their electronic interaction with nanocarbon materials	Proc. IEEE PVSC, 91-1-91-5	無	2011
198	V. Švrček, D. Mariotti, M. Kondo	AIST	Electronic coupling of silicon nanocrystals with engineered surface by nanosecond laser processing in liquid media	Proc. of the 12th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (LPM2011), 181	無	2011
199	N. Koshida, T. Ohta, Y. Hirano, R. Mentek, B. G	東京農工大	Functional Device Applications of Nanosilicon	Key Eng. Materials, 470, 20	有	2011

	elloz					
200	T. Ohta, B. Gelloz, N. Koshida	東京農工大	Multilayered Thin Metal Film Deposition by Sequential Operation of Nanosilicon Electron Emitter in Metal--Salt Solutions	Jpn. J. Appl. Phys., 50, 06GG03	有	2011
201	N. Koshida, T. Ohta, B. Gelloz, A. Kojima	東京農工大	Ballistic electron emission from quantum-sized nanosilicon diode and its applications	Current Opinion in Solid State and Materials Science, 15, 183	有	2011
202	Y. Wang, M. Sato, T. Matsunaga, N. Itagaki, H. Seo, G. Uchida, K. Koga, M. Shiratani	Kyushu Uni.	Properties and performance of Si quantum dot-sensitized solar cells with low temperature titania paste	Proceedings of The 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 3D-5P-09	無	2011
203	M. Sato, Y. Wang, K. Nakahara, T. Matsunaga, H. Seo, G. Uchida, K. Koga, M. Shiratani	Kyushu Uni.	Quantum dot-sensitized solar cells using nitridated Si nanoparticles produced by double multi-hollow discharge	Proceedings of The 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 3D-5P-12	無	2011
204	Y. Wang, M. Sato, H. Seo, G. Uchida, N. Itagaki, K. Koga, M. Shiratani	Kyushu Uni.	Performance enhancement of Si quantum dot-sensitized Solar cells by surface modification using ZnO barrier layer	Proceedings of The 33rd International Symposium on Dry Process, 133	無	2011
205	M. Sato, Y. Wang, K. Nakahara, T. Matsunaga, H. Seo, G. Uchida, K. Koga, M. Shiratani	Kyushu Uni.	Deposition of FeSi <sub>2</sub> nano-particle Film	Proceedings of Plasma Conference, 23P009-0	無	2011
206	Sugaya et al.	産総研、東京都市大	Tunnel current through a miniband in InGaAs quantum dot superlattice solar cells	Solar Energy Materials & Solar Cells, 95, pp. 2920-2923	有	2011
207	Sugaya et al.	産総研	Multi-stacked quantum dot solar cells fabricated by intermittent deposition of InGaAs	Solar Energy Materials & Solar Cells, 95, pp. 163-166	有	2011
208	Sugaya et al.	産総研、東京都市大	Increased current density by tunneling through a miniband in InGaAs quantum dot solar cell	Technical Digest of 21th Int. PVSEC, 2B-40-05	無	2011
209	Ohshima et al.	原研、産総	Radiation Degradatio	Technical Diges	無	2011

		研、JAXA	n of the Electrical Performance of InGaAs Quantum Dot Solar Cells and its Recovery at Room Temperature	t of 21th Int. PVSEC, 4B-40-10		
210	Sugaya et al.	産総研、東京都市大	Ultra-high stacks of InGaAs quantum dot superlattices for high efficiency solar cells	Proc. Int. Symp. Advanced Nano devices and Nanotechnology, pp. 7-8	無	2011
211	菅谷他	産総研、東京都市大	超多積層InGaAs量子ドット太陽電池	第8回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム予稿集, pp. 242-243	無	2011
212	Kyeongmi Lee, Kenji Nomura, Hiroshi Yanagi, Toshio Kamiya, Hideo Hosono	Tokyo Institute of Technology, University of Yamanashi	Electronic Structure and Photovoltaic Properties of n-Type Amorphous In-Ga-Zn-O and p-Type Single Crystal Si Heterojunctions	Electrochemical and Solid-State Letters, 14, H346	有	2011
213	Fariza binti Mohamad, Junji Sasano, Tsutomu Shinagawa, Seiji Watase, Masanobu Izaki	豊橋技術科学大学、大阪市立工業研究所	Electrochemical construction of (0001)-ZnO/(111)-Cu <sub>2</sub> O heterojunction diode with excellent rectification feature	Advanced Materials Research, p. 287-290, pp. 1412-1415	有	2011
214	Binti Mohamad Fariza, Junji Sasano, Tsutomu Shinagawa, Hiromi Nakano, Seiji Watase, Masanobu Izaki	豊橋技術科学大学、大阪市立工業研究所	Electrochemical Growth of (0001)-n-ZnO Film on (111)-p-Cu <sub>2</sub> O Film and the Characterization of the Heterojunction Diode	Journal of The Electrochemical Society, 158(10), D621-D625	有	2011
215	Tsutomu Shinagawa, Seiji Watase, Masanobu Izaki	豊橋技術科学大学、大阪市立工業研究所	Size-Controllable Growth of Vertical ZnO Nanorod Arrays by a Pd-Catalyzed Chemical Solution Process	Crystal Growth & Design, 11, p. 5533-5539	有	2011
216	T.koida et al.	産総研他	Correlation between oxygen stoichiometry, structure, and opto-electrical properties in amorphous In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :H films	J. Appl. Phys., 111, 63721	有	2012
217	T.koida et al.	産総研	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :H transparent conductive oxide films with high mobility and near-infrared transparency for optoelectronics applicat	Surf. Eng., 28, 102	有	2012



			ions			
218	Shinya Nakano, 1, Yoshiaki Takeuchi, 1, Tetsuya Kaneko, 2, Michio Kondo, 2, 3	1Mitsubishi Heavy Industries Ltd., 2Tokyo Institute of Technology, 3National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Influence of surface treatments on crystalline germanium heterojunction solar cell characteristics	Journal of Non-Crystalline Solids, 358, pp.2249-2252	有	2012
219	Hidenori Mizuno, Hitoshi Sai, Koji Matsubara, Michio Kondo	AIST	Light Trapping by Ag Nanoparticles Chemically Assembled inside Thin-Film Hydrogenated Microcrystalline Si Solar Cells	Jpn. J. Appl. Phys., 51, 42302	有	2012
220	Hitoshi Sai, Yoshiaki Kanamori, Michio Kondo	AIST	Flattened Light Scattering Substrate and Its Application to Thin-Film Silicon Solar Cells	Jpn. J. Appl. Phys., in press	有	2012
221	Y. Sobajima, C. Sada, A. Matsuda, H. Okamoto	Osaka University	Effect of thermal annealing and hydrogen-plasma treatment in boron-doped microcrystalline silicon	J. Non-Cryst. Solids, in Press	有	2012
222	J. Chantana, Y. Yang, Y. Sobajima, C. Sada, A. Matsuda, H. Okamoto	Osaka University	Localized Surface Plasmon Enhanced Microcrystalline-Silicon Solar Cells	J. Non-Cryst. Solids, in Press	有	2012
223	H. Kawanami, H. Takato, Z. X. Liu, I. Sakata	AIST, RCPVT	Calculation of Crystalline SiGe Solar Cell Performances by PCID	Technical Digest of 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 5A-10-02	無	2012
224	T. Nagai, Z. X. Liu, T. Ivan, M. Kondo	AIST, RCPVT	Improvement of Photoconductivity in Silicon Tin (SiSn) Thin Films	Journal of Non-Crystalline Solids, DOI information	有	2012
225	Hiroshi Noge, Akira Okada, Michio Kondo et al.	Corning Holding Japan GK, AIST	Rapid Epitaxial Growth of Si and SiGe Monocrystalline Films on Silicon-on-Glass Substrates by Reactive CVD Using SiH <sub>4</sub> , GeH <sub>4</sub> , and F <sub>2</sub>	Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 1426, DOI	有	2012
226	Atsushi Suzuki	東海大	Crystalline growth o	J. Non-Cryst. S	有	2012

	, Masao Isomura		f germanium thin films on single crystal silicon substrates promoted by solid phase crystallization	solids, in press		
227	Takeru Sagisaka, Takahiro Takatsu, Masao Isomura	東海大	High-Pressure H <sub>2</sub> O Vapor Treatment for Poly-Crystalline Germanium Thin Films	J. Non-Cryst. Solids, in press	有	2012
228	N. Ohashi et al.	産総研	Hybrid Solar Cells with Ordered C <sub>60</sub> films on Si (100)	Technical Digest of PVSEC-21, 4D-5P-43	無	2012
229	T. Miyadera et al.	産総研	Analytical model for the design principle of large-area solar cells	Sol. Energ. Mat. & Sol. Cells, 97, pp.127-131	有	2012
230	Y. Takeyama, S. Maruyama, H. Taniguchi, M. Itoh, K. Ueno, Y. Matsumoto	東工大応セラ研	Ionic liquid-mediated epitaxy of high-quality C <sub>60</sub> crystallites in a vacuum	CrystEngComm, 14, pp.4939-4945	有	2012
231	Yushi Kato, Ryosuke Yamauchi, Hideki Arai, Geng Tan, Nobuo Tsuchimine, Susumu Kobayashi, Kazuhiko Saeki, Nobutaka Takezawa, Masahiko Mitsuhashi, Satoru Kaneko, Mamoru Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Buffer-layer enhanced crystal growth of BaB <sub>6</sub> (100) thin films on MgO(100) substrates by laser molecular beam epitaxy	Appl. Surf. Science, 258, 4000	有	2012
232	S. Kaneko, H. Torii, M. Soga, K. Akiyama, M. Iwata, M. Yoshimoto, T. Amazawa	Tokyo Inst. Tech. et al.	Epitaxial Indium Tin Oxide Film Deposited on Sapphire Substrate by Solclass-Source ECR Plasma	Jpn. J. Appl. Phys, 51, 01AC02	有	2012
233	Ryosuke Yamauchi, Geng Tan, Daishi Shiojiri, Koji Koyama, Satoru Kaneko, Akifumi Matsuda, Mamoru Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Influence of Rapid Thermal Annealing and Substrate Terrace Width on Self-Organizing Formation of Periodic Straight Nanogroove Array on NiO(111) Epitaxial Thin Film	Jpn. J. Appl. Phys, in press	有	2012
234	Satoru Kaneko, Takeshi Ito, Kensuke Akiyama, Manabu Yasui, Yasuo Hiraba	Tokyo Inst. Tech. et al.	Nano-cube MgO formed on silicon substrate using pulsed laser deposition	J. Nanoscience and Nanotechnology, in press	有	2012

	yashi, Masayasu Soga, Yumiko Miyake, Mamoru Yoshimoto					
235	Satoru Kaneko, Takatoshi Nagano, Takeshi Ito, Manabu Yasui, Takeshi Ozawa, Masayasu Soga, Yu Motoizumi, Hiroshi Funakubo, Mamoru Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Effect of Point Defects on Lattice Constant in MgO Thin Film Deposited on Silicon (001) Substrate	European Physical Journal of Applied Physics, in press	有	2012
236	Satoru Kaneko, Takeshi Ito, Manabu Yasui, Chihiro Kato, Satomi Tanaka, Takeshi Ozawa, Yasuo Hirabayashi, Akira Matsuno, Takashi Nire, Mamoru Yoshimoto	Tokyo Inst. Tech. et al.	Periodic nano trench structure fabricated by high speed scanning CW laser	Proc. SPIE, in press	有	2012
237	Q. Chen et al.	Tohoku University	Rapid Synthesis of Water-Soluble Gold Nanoparticles with Control of Size and Assembly Using Gas-Liquid Interfacial Discharge Plasma	Chem. Phys. Lett, 521, 113	有	2012
238	S. C. Cho et al.	Tohoku University	Highly Efficient Synthesis of Nitrogen-Atom Endohedral Fullerene by Controlling Plasma Ion Behaviors	Appl. Phys. Express, 5, 026202	有	2012
239	S. C. Cho et al.	Tohoku University	Control of C <sub>60</sub> Behavior for High Yield Synthesis of N@C <sub>60</sub> in RF-Plasma	Trans. Mater. Res. Soc. Jpn, in press	有	2012
240	Q. Chen et al.	Tohoku University	Reductants in Gold Nanoparticle Synthesis Using Gas-Liquid Interfacial Discharge Plasmas	Appl. Phys. Express, in press	有	2012
241	Y. F. Li et al.	Tohoku University	Performance Enhancement of Solar Cells Based on Single-Walled Carbon Nanotubes by Au Nanoparticles	Appl. Phys. Lett., in press	有	2012
242	J. Fujioka, M. Nakamura, M. Kaw	CMRG-RIKEN, ERATO-MF,	Photocarrier collection from depletion l	J. Appl. Phys., 111, 16107	有	2012

	asaki, Y. Tokura	Univ. of Tokyo	layer of LaMnO <sub>3</sub>			
243	H. Wadati, J. Okamoto, M. Garganourakis, V. Scagnoli, U. Staub, Y. Yamasaki, H. Nakao, Y. Murakami, M. Mochizuki, M. Nakamura, M. Kawasaki, Y. Tokura	Univ. of Tokyo, KEK, Swiss Light Source, CMRG-RIKEN	Origin of the large polarization in multiferroic YMnO <sub>3</sub> thin films revealed by soft and hard x-ray diffraction	Phys. Rev. Lett., 108, 47203	有	2012
244	Z. Sheng, M. Nakamura, F. Kagawa, M. Kawasaki, Y. Tokura	CMRG & CERG-RIKEN, Univ. of Tokyo	Dynamics of multiple phases in a colossal-magnetoresistive manganite as revealed by dielectric spectroscopy	Nature Communications, 3, 944	有	2012
245	V. Švrcek, T. Yamamori, D. Mariotti, K. Matsubara, M. Kondo	AIST	Enhancement of hybrid solar cell performance by polythieno[3,4-b]thiophenebenzodithiophene and microplasma-induced surface engineering of silicon nanocrystals	Appl. Phys. Lett., 100, 223904	有	2012
246	J. Ding, J. Gong, H. Bai, L. Li, Y. Zhong, Z. Ma, V. Švrcek	AIST	Constructing honeycomb micropatterns on nonplanar substrates with high glass transition temperature polymers	J. of Colloid and Interface Science	有	2012
247	D. Mariotti, V. Švrcek, W. J. Hamilton, M. Schmidt, M. Kondo	AIST	Silicon nanocrystals in liquid media : Optical properties and surface stabilization by microplasma induced non equilibrium liquid chemistry	Adv. Funct. Mater., 22, 954	有	2012
248	J. Gong, L. Sun, Y. Zhong, C. Ma, L. Li, S. Xie, V. Švrcek	AIST	Fabrication of multi-level carbon nanotube arrays with adjustable patterns	Nanoscale, 4, 278	有	2012
249	V. Švrcek, D. Mariotti, K. Matsubara, M. Kondo	AIST	Silicon nanocrystals surface engineering by nanosecond laser processing in water	The Review of Laser Engineering, 40, 2	有	2012
250	V. Švrcek, D. Mariotti, K. Matsubara, M. Kondo	AIST	Carriers Multiplication in Neighboring Surfactant-free Silicon Nanocrystals Produced by 3D-surface Engineering in Liquid	Proc. IEEE PVSC, 36-D13	無	2012

			Medium			
251	V. Švrček	AIST	Microplasma induced surface engineering of silicon nanocrystals in liquid medium	Proc. ISPlasma, 62	無	2012
252	V. Švrček	AIST	Photovoltaic applications of microplasma 3D-surface engineered silicon nanocrystals with quantum confinement effects	Proc. iPlasma Nano-III, 63	無	2012
253	T. Mizuno, Y. Akasaka, H. Tachibana	AIST	Photovoltaic Properties of Solar Cells Based on Poly(methylphenylsilane) and C <sub>60</sub>	Jpn. J. Appl. Phys., in press	有	2012
254	H. Tachibana, T. Mizuno, Y. Akasaka	AIST	Spectral Changes in Thin Films of Cyclic silanes and Polysilanes by Heat Treatment	Journal of Physics:Conference Series, in press	有	2012
255	R. Mentek, B. Gelloz, N. Koshida	東京農工大	Photovoltaic Property of Wide-Gap Nanocrystalline Silicon Layers	Jpn. J. Appl. Phys., 51, 02BP05	有	2012
256	N. Mori, H. Minari, S. Uno, H. Mizuta, N. Koshida	東京農工大	Strain Effects on Avalanche Multiplication in a Silicon Nanodot Array	Jpn. J. Appl. Phys., 51, 04DJ01	有	2012
257	N. Koshida, T. Ohta, B. Gelloz	東京農工大	Ballistic Electron Emission from Nanosilicon Diode and its Application to Ultra-Thin Film Deposition of Silicon and Germanium	ECS Transactions, 45, 221	有	2012
258	B. Gelloz, N. Koshida	東京農工大	Blue Phosphorescence in Oxidized Nano-Porous Silicon	ECS Transactions, 45, 177	有	2012
259	G. Uchida, K. Yamamoto, M. Sato, Y. Kawashima, K. Nakahara, K. Kamataki, N. Itagaki, K. Koga, M. Shiratani	Kyushu Uni.	Effect of nitridation of Si nano-particles on the performance of quantum-dot sensitized solar cells	Jpn. J. Appl. Phys., 51, 01AD01-1	有	2012
260	Sugaya et al.	産総研、京都市大	Ultra-high stacks of InGaAs/GaAs quantum dots for high efficiency solar cells	Energy & Environmental Science, 5, pp.6233-6237	有	2012
261	菅谷武芳	産総研	InGaAs量子ドット超格子による高効率太陽電池	光学, 41, pp.311-317	有	2012

262	菅谷他	産総研、東 京都市大	InGaP上のInGaAs/GaAs 量子ドット太陽電池	第9回「次世代の 太陽光発電シス テム」シンポジ ウム予稿集, pp. 141-142	無	2012
263	H. Komaki, M. Ii oka, A. Yamada, S. Furue, S. Is hizuka, K. Mats ubara, H. Shiba ta, S. Niki	産総研	Fabrication and Char acterization of Cu(I n, Ga) (S, Se) <sub>2</sub> -Based So lar Cells	Jpn. J. Appl. P hys., in press	有	2012
264	Kyeongmi Lee, Kenji Nomura, Hiroshi Yanagi , Toshio Kamiy a, Hideo Hoson o	Tokyo Insti tute of Tec hnology, Un iversity of Yamanashi	Photovoltaic propert ies of n-type amorph ous In-Ga-Zn-O and p -type single crystal Si heterojunction s olar cells: Effects of Ga content	Thin Solid Film s, 520, 3808	有	2012
265	Kyeongmi Lee, Kenji Nomura, Hiroshi Yanagi , Toshio Kamiy a, Eiji Ikenag a, Takeharu Su giyama, Keisuk e Kobayashi, H ideo Hosono	Tokyo Insti tute of Tec hnology, Un iversity of Yamanashi	Band alignment of In GaZnO <sub>4</sub> /Si interface b y hard X-ray photoel ectron spectroscopy	Journal of Appl ied Physics, in press	有	2012
266	Masanobu Izaki , Shunsuke Sas aki, Fariza bin ti Mohamad, T sutomu Shinaga wa, Tkayuki oh ta, Seiji Wata se, Junji Sasa no	豊橋技術科 学大学、大 阪市立工業 研究所	Effects of preparati on temperature on op tical and electrical characteristics of (111)-oriented Cu <sub>2</sub> O f ilms electrodeposite d on (111)-Au film	Thin Solid Film s, 520, pp.2261 -2264	有	2012
267	Fariza binti M ohamad, Junji Sasano, Tsutom u Shinagawa, S eiji Watase, M asanobu Izaki	豊橋技術科 学大学、大 阪市立工業 研究所	Light-assisted elect rochemical construct ion of (111)Cu <sub>2</sub> O/(000 1)ZnO heterojunction	Thin Solid Film s, 520, pp.2261 -2264	有	2012
268	T. Ohta, B. Ge lloz, and N. K oshida	東京農工大	Liquid phase deposit ion of thin Si films by ballistic electr o-reduction.	Appl. Phys. Let t. 102, 022107	有	2013
269	N. Mori, M. To mita, H. Inari , T. Watanabe, and N. Koshid a	東京農工大	Disorder-induced enh ancement of avalanch e multiplication in a silicon nanodot ar ray.	Jpn. Appl. Phys . 52, 04CJ04	有	2013
270	N. Koshida, N. Ikegami, A. K	東京農工大	Ballistic electron e	ECS Trans., Vol . 53 (4), 95	有	2013

	ojima, R. Mentek, and B. Gelloz		ffects in nanosilicon and their applications (Invited).			
271	B. Gelloz and R. Mentek, and N. Koshida	東京農工大	Ultraviolet and long-lived blue luminescence of oxidized porous silicon (Invited).	ECS Trans., Vol. 53 (4), 103	有	2013
272	Satoru Kaneko, Takeshi Ito, Chihiro Kato, Satomi Tanaka, Yosuke Ono, Tokuo Yodo, Hiroyasu Nakata, Akira Matsuno, Takashi Nire, Akifumi Matsuda and Mamoru Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Functional surface on periodical nanostructure self-organized by laser scanning with scanning speed of 300 m/min	Optics and Lasers in Engineering, Vol.51, pp. 294-298.	有	2013
273	Mamoru Yoshimoto, Ryosuke Yamachi, Daishi Shijiri, Geng Tan, Satoru Kaneko and Akifumi Matsuda	Tokyo. Inst. Tech.	Room-temperature synthesis of epitaxial oxide thin films for development of unbalanced structure and novel electronic functionalization	J. Ceram. Soc. Japan, Vol.121, pp1-9.	有	2013
274	Daishi Shiojiri, Ryosuke Yamachi, Satoru Kaneko, Akifumi Matsuda, and Mamoru Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Homoepitaxial growth of $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> thin films on atomically stepped sapphire substrates by pulsed laser deposition at room-temperature	J. Ceram. Soc. Japan, Vol.121 [5], 467-469.	有	2013
275	T. Sameshima, T. Nakamura, S. Yoshidomi, M. Hasumi, T. Ishii, Y. Inouchi, M. Naito, and T. Mizuno	東京農工大	Activation of Silicon Implanted with Dopant Atoms by Microwave Heating	Ext. Abstr. Solid State Devices and Materials, 2013 PS-15-1	有	2013
276	S. Yoshidomi, M. Hasumi and T. Sameshima	東京農工大	Transparent and Conductive Adhesive for Fabricating Multi-Junction Solar Cells	MRS-JSPS Joint Symposium, 2013, Kyoto	有	2013
277	M. Hasumi, T. Nakamura, S. Yoshidomi, and T. Sameshima	東京農工大	Microwave Annealing of Phosphorus Implanted p-type Silicon	MRS-JSPS Joint Symposium, 2013, Kyoto	有	2013
278	T. Sameshima, S. Yoshidomi, and M. Hasumi	東京農工大	Multi-Connected Solar Cells Using Band-Gap Induced Cascaded Light Absorption	MRS-JSPS Joint Symposium, 2013, Kyoto	有	2013

279	T. Sameshima and S. Shibata	東京農工大	Annihilation of Photo-Induced Minority Carrier Caused by Ion Implantation and Rapid Thermal Annealing	Proc. 2013 Workshop on Active Matrix Flat Panel Displays (Kyoto, 2013) P.215	有	2013
280	S. Yoshidomi, C. Akiyama, J. Furukawa, M. Hsumi, T. Ishii, T. Sameshima, Y. Inouchi, and M. Naito	東京農工大	Activation of Silicon Implanted with Phosphorus Atoms by Microwave Heating	Proc. 2013 Workshop on Active Matrix Flat Panel Displays (Kyoto, 2013) P.181	有	2013
281	J. Furukawa, S. Yoshidomi, M. Hasumi, and T. Sameshima	東京農工大	Minority Carrier Annihilation at Crystalline Silicon Surface in MOS Structure	Proc. 2013 Workshop on Active Matrix Flat Panel Displays (Kyoto, 2013) P.185	有	2013
282	H. Seo, Y. Wang, G. Uchida, K. Kamataki, N. Itagaki, K. Koga, M. Shiratani	Kyushu University	Analysis on the effect of polysulfide electrolyte composition for higher performance of Si quantum dot-sensitized solar cells	Electrochim. Acta 95, pp. 43 - 47	有	2013
283	H. Seo, Y. Wang, G. Uchida, K. Kamataki, N. Itagaki, K. Koga, M. Shiratani	Kyushu University	Growth control of ZnO nano-rod with various seeds and photovoltaic application	J. Phys. : Conference Series, 441, pp. 0012029-1 - 0012029-6	有	2013
284	H. Seo, M. Son, H. Kim, Y. Wang, G. Uchida, K. Kamataki, N. Itagaki, K. Koga, M. Shiratani	Kyushu University	Study on the Fabrication of Paint-Type Si Quantum Dot-Sensitized Solar Cells	Jpn. J. Appl. Phys. 57, pp. 10MB07-1 - 10MB07-5	有	2013
285	H. Seo, Y. Wang, M. Sato, G. Uchida, K. Koga, N. Itagaki, K. Kamataki, M. Shiratani	Kyushu University	The improvement on the performance of quantum dot-sensitized solar cells with functionalized Si	Thin Solid Films 546, pp. 284 - 288	有	2013
286	H. Seo, Y. Wang, D. Ichida, G. Uchida, N. Itagaki, K. Koga, M. Shiratani, S. Nam, J. Boo	Kyushu University	Improvement on the Electron Transfer of Dye-Sensitized Solar Cell Using Vanadium Doped TiO <sub>2</sub>	Jpn. J. Appl. Phys. 52, pp. 11NM02-1 - 11NM02-4	有	2013
287	G. Uchida, Y.	Kyushu Univ	Characteristics of C	Jpn. J. Appl. P	有	2013



	Wang, D. Ichida, H. Seo, K. Kamataki, N. Itagaki, K. Koga, M. Shiratani	University	Crystalline Silicon/Si Quantum Dot/Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) Hybrid Solar Cells	Phys. 52, p. 11N A05		
288	Y. Sobajima, H. Muto, C. Sada, A. Matsuda, and H. Okamoto	Osaka University	Control of electron temperature in SiH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> plasma for obtaining high photovoltaic performance in microcrystalline silicon solar cells	J. Phys.: Conf. Series 441, 012026.	有	2013
289	武山洋子、丸山伸伍、松本祐司	東北大院工	イオン液体を介した真空蒸着法による薄膜形成技術の開発	表面科学 34 198-203 (2013) 研究紹介	無	2013
290	Kazaoui Said	産総研	Semiconducting Single Wall Carbon Nanotubes Applied to OPVs	Hybrid and organics Photovoltaics Conference in Nanoenergy Symposia Vol. 12, 227 頁~ 228 頁	有	2013
291	Vladimir Svrcek D. Mariotti, S. Mitra, T. Kaneko, L. Li, U. Cvelbar, K. Matsubara, and M. Kondo	AIST, Ulster University	Built-In Charges and Photoluminescence Stability of 3D Surface-Engineered Silicon Nanocrystals by a Nanosecond Laser and a Direct Current Microplasma	J. Phys. Chem. C 2013, 117, 10939-10948	有	2013
292	K. Makita, H. Mizuno, H. Komaki, T. Sugaya, R. Oshima, H. Shibata, K. Matsubara, and S. Niki	産総研	Over 20% efficiency mechanically stacked multi-junction solar cells fabricated by advanced bonding using conductive nanoparticle alignments	Material Research Society (MRS) Online Proceeding Library, 1538, mrss13-1538-ff02-08	有	2013
293	大島 隆治、山中 光之、川浪 仁志、高遠 秀尚、松原 浩司、坂田 功	産総研	Fabrication of Si <sub>1-x</sub> Gex heterojunction solar cells grown with stepwise graded buffer layers	Proceedings of IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference, p. 2247	有	2013
294	菅谷武芳、大島隆治、松原浩司、仁木栄	産総研	InGaAs quantum dot superlattice with vertically coupled states in InGaP matrix	JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, vol. 114, No. 1, 014303	有	2013
295	菅谷武芳、大島隆治、松原浩司、仁木栄、	産総研	In(Ga)As quantum dots on InGaP layers grown by solid-source molecular beam epitaxy	JOURNAL OF CRYSTAL GROWTH, vol. 378, pp. 430-434	有	2013
296	菅谷武芳、武田	産総研他	InGaP solar cells fa	JOURNAL OF CRYSTAL GROWTH, vol. 378, pp. 430-434	有	2013

	明紘、大島隆治、松原浩司、仁木栄、岡野好伸		bricated using solid-source molecular beam epitaxy	TAL GROWTH, vol. 378, pp. 576-578		
297	Vladimir Svrcek, Katerina Dohnalova, Davide Mariotti, Minh Tuan Trinh, Rens Limpens, Somak Mitra, Tom Gregorkiewicz, Koiji Matsubara, and Michio Kondo	AIST, Ulster University	Dramatic Enhancement of Photoluminescence Quantum Yields for Surface-Engineered Si Nanocrystals within the Solar Spectrum	Adv. Funct. Mater., 23, 6051-6058	有	2013
298	堤潤也、松崎弘幸、金井直之、山田寿一、長谷川達生	産総研	Charge Separation and Recombination of Charge-Transfer Excitons in Donor-Acceptor Polymer Solar Cells	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY C, 116, 23957.	有	2013
299	K. Makita, H. Komaki, H. Mizuno, H. Sai, T. Sugaya, R. Oshima, H. Shibata, K. Matsubara, and S. Niki	産総研	GaAs/CuInGaSe mechanical stacking multi-junction solar cells using direct bonding method with conductive nanoparticle alignments	28th European Photovoltaic Solar Energy Conference Proceedings, 2279-2281	有	2013
300	T. Kaneko, S. Takahashi, and R. Hatakeyama	Tohoku University	Controlled Functionalization of Carbon Nanotubes with Nanoparticles Using Gas-Liquid Interfacial Discharge Plasmas	ECS Transactions 45(31) pp.21-26	有	2013
301	Q. Chen, T. Kaneko, N. Matsuda, and R. Hatakeyama	Tohoku University	Potential Structure of Discharge Plasma inside Liquid Directly Measured by an Electrostatic Probe	Applied Physics Letters 102(24) pp.244105-1-4	有	2013
302	T. Kato, B. Xu, H. Suzuki, and T. Kaneko	Tohoku University	Fabrication of Au Nanoparticle-Decorated Standing Graphene/Carbon Paper Composite	JSM Nanotechnology & Nanomedicine 1(3) pp.1018-1-3	有	2013
303	T. Kato, M. Morikawa, H. Suzuki, B. Xu, R. Hatakeyama, and T. Kaneko	Tohoku University	Catalyst-Free Growth of High-Quality Graphene by High-Temperature Plasma Reaction	Nanoscience & Technology 1(1) pp.01-1-4	有	2013
304	K. Xu, Y. Li, F. Yang, W. Yang, L. Zhang,	Tohoku University	Controllable Synthesis of Single and Double-Walled Carbon Na	Carbon 68 pp.511-519	有	2013

	C. Xu, T. Kaneko, and R. Hatkeyama		notubes from Petroleum Coke and Their Application to Solar Cells			
305	菅谷武芳、武田明紘、大島隆治、松原浩司、岡野好伸、仁木栄	産総研他	Miniband Formation in InGaAs Quantum Dot Superlattice with InGaP Matrix for Application to Intermediate-Band Solar Cells	Proceedings of 2013 39th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, pp.326-329.	無	2013
306	大島武、佐藤真一郎、中村徹也、今泉充、菅谷武芳、松原浩司、仁木栄、武田明紘、岡野好伸	産総研他	Electrical Performance Degradation of GaAs Solar Cells with InGaAs Quantum Dot layers due to Proton Irradiation	Proceedings of 2013 39th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, pp. 2779-2783.	無	2013
307	菅谷武芳、牧田紀久夫、武田明紘、大島隆治、松原浩司、岡野好伸、仁木栄	産総研他	InGaP/GaAs double junction solar cells fabricated using solid-source MBE	Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 567-578	無	2013
308	H. Mizuno, T. Kaneko, I. Sakata, K. Matsubara	産総研	Capturing by self-assembled block copolymer thin films: transfer printing of metal nanostructures on textured surfaces	CHEMICAL COMMUNICATIONS, 50, 362 (2013)	有	2013
309	Ke Tao, Yoshinori Kurosawa, Jun-ichi Hanna	東工大	Low-temperature epitaxial growth of high quality Si <sub>1-x</sub> Gex (x ≥ 0.99) films on Si(001) wafer by reactive thermal chemical vapor deposition	Appl. Phys. Lett., Vol. 102, No. 18, pp. 182109 - 182109-5	有	2013
310	Ke Tao, Jun-ichi Hanna.	東工大	Epitaxial growth of germanium-rich silicongermanium films on Si(0 0 1) substrate by reactive thermal chemical vapor deposition	Appl. Surf. Sci., Vol. 282, pp. 472-477	有	2013
311	菅谷武芳、牧田紀久夫、水野英範、武田明紘、大島隆治、松原浩司、岡野好伸、仁木栄	産総研他	量子ドット及びスマートスタック多接合化技術を用いた化合物半導体高効率太陽電池	平成25年度多元系化合物・太陽電池研究会年会講演会本稿集、pp. 2-5	無	2013
312	N. Koshida, A.	東京農工大	Electro-deposition o	ECS Solid State	有	2014

	Kojima, T. Ohta, R. Mentek, B. Gelloz, N. Mori, J. Shirakashi		f thin Si and Ge films based on ballistic hot electron injection.	Lett. 3(5), P57		
313	N. Koshida, N. Ikegami, A. Kojima, R. Mentek, R. Suda, M. Yagi, J. Shirakashi, B. Gelloz, and N. Mori	東京農工大	Ballistic hot electron effects in nanosilicon dots and their photonic applications (Invited).	ECS Trans. Vol. 61 (5), 47	有	2014
314	N. Koshida, R. Suda, M. Yagi, A. Kojima, R. Mentek, B. Gelloz, N. Mori, and J. Shirakashi	東京農工大	Low-temperature deposition of thin Si, Ge, and SiGe films using reducing activity of ballistic hot electrons.	ECS Trans. Vol. 64 (6), 405	有	2014
315	R. Mentek, B. Gelloz, D. Hippo, and N. Koshida	東京農工大	Photovoltaic effect with high open circuit voltage observed in electrochemically prepared nanocrystalline silicon membranes.	Mater. Sci. & Eng. B 190, 33	有	2014
316	Geng Tan, Naoya Inoue, Tomoyuki Funabasama, Masahiro Mita, Norimichi Okuda, Junichi Mori, Koji Koyama, Satoru Kaneko, Masaru Nakagawa, Akifumi Matsuda and Mamoru Yoshimoto	Tokyo. Inst. Tech.	Formation of 0.3-nm-High Stepped Polymer Surface by Thermal Nanoimprinting	Appl. Phys. Exp. (APEX) Vol.7 [5], 055202(1)-(3).	有	2014
317	Mikuri Kanai, Yuji Kojima and Masao Isomura	Tokai University	Preferential crystal-growth of germanium by solid phase crystallization	Can. J. Phys. 92, 576-581	有	2014
318	F. Y. Ran, Z. Xiao, H. Hiramatsu, H. Hosono, T. Kamiya	東工大	Growth of high-quality SnS epitaxial films by H <sub>2</sub> S flow pulsed laser deposition	Applied Physics Letters, 104, 072106	有	2014
319	Po-Ching Hsu, Chung-Chih Wu, Hidenori Hiramatsu, Toshio Kamiya, and Hi	東工大	Film Texture, Hole Transport and Field-Effect Mobility in Polycrystalline SnO <sub>2</sub> Thin Films on Glass	ECS Journal of Solid State Science and Technology 3 [9] (2014) Q3040-Q3044	有	2014

	deo Hosono					
320	T. Sameshima, S. Yoshidomi, and M. Hasumi	東京農工大	Multi Junction Solar Cells Using Band-Gap Induced Cascaded Light Absorption	Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 05FV07-1-4.	有	2014
321	M. Hasumi, T. Nakamura, S. Yoshidomi, and T. Sameshima	東京農工大	Activation of Silicon Implanted with Phosphorus and Boron Atoms by Microwave Annealing with Carbon Powders as a Heat Source	Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 05FV05-1-6.	有	2014
322	T. Sameshima, J. Furukawa, T. Nakamura, S. Shigeno, T. Nozode, S. Yoshidomi, and M. Hasumi	東京農工大	Photo induced Minority Carrier Annihilation at Crystalline Silicon Surface in Metal Oxide Semiconductor Structure	Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 03I301-1-6.	有	2014
323	T. Sameshima, S. Yoshidomi, K. Makita, and K. Matsubara	東京農工大	Multi Junction Solar Cells Formed by Transparent and Conductive Adhesive	6th International Symposium on Innovative Solar Cells	有	2014
324	H. Seo, D. Ichida, G. Uchida, K. Kamataki, N. Itagaki, K. Koga, M. Shiratani	Kyushu University	Analysis on the photovoltaic property of Si quantum dot-sensitized solar cells	Int. J. Precision Eng. Manuf. 15, pp. 339 - 343	有	2014
325	H. Seo, M. Son, H. Kim, M. Shiratani	Kyushu University	The enhancement of dye adsorption in dye-sensitized solar module by an electrical adsorption method	Thin Solid Films 554, pp. 118 - 121	有	2014
326	H. Seo, M. Son, S. Park, M. Jeong, H. Kim, G. Uchida, N. Itagaki, K. Koga, M. Shiratani	Kyushu University	Electrochemical impedance analysis on the additional layers for the enhancement on the performance of dye-sensitized solar cell	Thin Solid Films 554, pp. 122 - 126	有	2014
327	H. Seo, D. Ichida, G. Uchida, N. Itagaki, K. Koga, M. Shiratani	Kyushu University	Performance dependence of Si quantum dot-sensitized solar cells on counter electrode	Jpn. J. Appl. Phys. 53, p. 05FZ01	有	2014
328	H. Seo, D. Ichida, S. Hashimoto, G. Uchida, N. Itagaki, K. Koga, M. Shiratani	Kyushu University	Performance enhancement of dye and Si quantum dot hybrid nanostructured solar cell with TiO <sub>2</sub> barrier	Trans. Mater. Res. Soc. Jpn. 39, pp. 321 - 324	有	2014
329	Y. Kitani, T.	Osaka University	Boron Doping in a-Si	Canadian Journal	有	2014

	Maeda, S. Kaki moto, K. Tanaka, R. Okumoto, Y. Sobajima, C. Sada, A. Matsuda, and Hiroaki Okamoto	rsity	O:H	l of Physics 92 (7/8) 586-588		
330	Y. Sobajima, S. Kinoshita, S. Kakimoto, R. Okumoto, C. Sada, A. Matsuda, and H. Okamoto	Osaka University	Control of Growth Process for Obtaining High Quality a-SiO:H	Canadian Journal of Physics 92 (7/8) 582-585	有	2014
331	Takehiko Nagai, Tetsuya Kaneko, Zhengxin Liu, Ivan Turkevych, Michio Kondo	産総研他	Influence of hydrogen dilution on a-SiSn:H film growth and solar cell properties	Journal of Non-Crystalline Solids, 386, 85	有	2014
332	Y. Takeyama, S. Mantoku, S. Maruyama, Y. Matsumoto	Tohoku Univ.	Growth behaviours of pentacene films confined in engineered shapes of ionic-liquid in vacuum	CrystEngComm 16 684-689	有	2014
333	H. Mizuno, H. Sai, K. Matsubara, M. Kondo	産総研	Plasmonic Light Trapping in Amorphous Si Solar Cells Using Periodic Ag Nanodisk Structures	MRS Proceedings, 1627, mrsf-13-105-03	有	2014
334	鯉田 崇、齋 均、柴田 肇、近藤 道雄	産総研	Bilayer contacts composed of amorphous and solid-phase crystallized transparent conducting oxides for solar cells	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 53-5S1, pp. 05FA08-1-05FA08-1	有	2014
335	堤 潤也、松崎 弘幸、山田 寿一、長谷川 達生	産総研、東大	Formation of relaxed charge-transfer excitons in donor-acceptor-type polymer solar cells	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 53, 05HB12.	有	2014
336	菅谷武芳、牧田紀久夫、武田明紘、大島隆治、松原浩司、岡野好伸、仁木栄	産総研他	InGaP/GaAs tandem solar cells fabricated using solid-source molecular beam epitaxy	Jpn. J. Appl. Phys., 53-5S1, 05FV06-1	有	2014
337	大島 隆治、山中 光之、川浪 仁志、坂田 功、松原 浩司	産総研	Fabrication of 0.9 eV bandgap a-Si/c-Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> heterojunction solar cells	Proceedings of IEEE 40th Photovoltaic Specialists Conference, p. 0205	有	2014
338	S. Kazaoui, S. Cook, N. Izar	産総研他	Photocurrent quantum yield of semiconduc	JOURNAL OF PHYSICAL CHEMISTRY	有	2014

	d, Y. Murakami, S. Maruyama, N. Minami		ting carbon nanotubes: Dependence on excitation energy and exciton binding energy	C, 118 卷 31 号 18059 頁 ~ 18063 頁		
339	堤潤也、山田寿一、長谷川達生	産総研、東大	Electroabsorption Study of Charge-Transfer Excited State in Donor-Acceptor-Type Polymer	Transactions of the Materials Research Society of Japan 39, 217.	有	2014
340	H. Mizuno, H. Sai, K. Matsubara, H. Takato, M. Kondo	産総研	Transfer-printed silver nanodisks for plasmonic light trapping in hydrogenated microcrystalline silicon solar cells	APPLIED PHYSICS EXPRESS, 7, 11 2302	有	2014
341	大島隆治、山中光之、川浪仁志、坂田功、松原浩司、菅谷武芳	産総研	Fabrication of hydrogenated amorphous Si/crystalline Si <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> (x ≤ 0.84) heterojunction solar cells grown by solid source molecular beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 54, 012301.	有	2014
342	R. Suda, M. Yagi, A. Kojima, R. Mentek, N. J. Shirakashi, and N. Koshida	東京農工大	Deposition of thin Si and Ge films by ballistic hot electron reduction under a solution dripping mode and its application to the growth of thin SiGe films.	Jpn. J. Appl. Phys. 54, 04DH11	有	2014
343	山本輝明、根上卓之、松原浩司、仁木栄	パナソニック、産総研	Improvement of In <sub>2</sub> S <sub>3</sub> /ZnCuInS <sub>2</sub> interfaces for wide-gap solar cells	Phys. Status Solidi C, 769-772	有	2014
344	山本輝明、根上卓之、松原浩司、仁木栄	パナソニック、産総研	Wide-gap solar cells using a novel ZnCuGaSe <sub>2</sub> absorber	Japanese Journal of Applied Physics, 08KC17	有	2014
345	Masao Isomura and Mikuri Kanai	Tokai University	Epitaxial growth of germanium thin films on crystal silicon substrates by solid phase crystallization	Jpn. J. Appl. Phys. 54, 04DR08-1-5	有	2014
346	S. Yoshidomi, S. Kimura, M. Hasumi, and T. Sameshima	東京農工大	Mechanical Stacking Multi Junction Solar Cells Using Transparent Conductive Adhesive	Energy Procedia 60 (2014) 116-122.	有	2014
347	S. Yoshidomi, M. Hasumi and	東京農工大	Investigation of Conductivity of Adhesive	Applied Physics A	有	2014

	T. Sameshima		e Layer Including Indium-Tin-Oxide Particles for Multi Junction Solar Cells	s00339-014-8415-2		
348	H. Seo, D. Ichida, S. Hashimoto, G. Uchida, N. Itagaki, K. Koga, M. Shiratani	Kyushu University	Photovoltaic application of Si nanoparticles fabricated by multihollow plasma discharge CVD: Dye and Si co-sensitized solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 54, p. 01A D02	有	2014
349	堤潤也、松岡悟志、井上悟、峯廻洋美、山田寿一、長谷川達生	産総研、東大	N-Type Field-Effect Transistor Based on Layered Crystalline Donor-Acceptor Semiconductors with Dialkylated Benzothienobenzothiophenes as Electron Donors	JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY C 3, 1976.	有	2014
350	T. Sugaya, K. Makita, H. Mizuno, T. Mochizuki, R. Oshima, K. Matsubara, Y. Okano, and S. Niki	産総研他	InGaP/GaAs/InGaAsP triple junction solar cells grown using solid-source molecular beam epitaxy	Journal of Crystal Growth, vol. 425, pp. 322-325.	有	2014
351	R. Hatakeyama, T. Kato, Y. Li, and T. Kaneko	Tohoku University	Plasma Processing Based Synthesis of Functional Nanocarbons	Plasma Chemistry and Plasma Processing 34(3) pp.377-402	有	2014
352	T. Kaneko, S. Takahashi, and T. Kato	Tohoku University	Structure Controlled Nanoparticle Conjugates Synthesized by Gas-Liquid Interfacial Plasmas	Materials Science Forum 783-786 pp.1996-2001	有	2014
353	B. Xu, T. Kato, K. Murakoshi, and T. Kaneko	Tohoku University	Effect of Ion Impact on Incubation Time of Single-Walled Carbon Nanotubes Grown by Plasma Chemical Vapor Deposition	Plasma and Fusion Research: Rapid Communications 9 pp.1206075-1-3	有	2014
354	H. Suzuki, T. Kato, and T. Kaneko	Tohoku University	Improvement of Electrical Device Performances for Graphene Directly Grown on a SiO <sub>2</sub> Substrate by Plasma Chemical Vapor Deposition	Plasma and Fusion Research: Rapid Communications 9 pp.1206079-1-3	有	2014
355	Y. Abiko, T. Kato, R. Hatakeyama, and T. Kaneko	Tohoku University	Fabrication of Stable PN Junction Single-Walled Carbon Nanotube Thin Films by Position Selective Cs	Journal of Physics: Conference Series 518 pp. 012013-1-5	有	2014



			Plasma Irradiation Method			
356	S. Takahashi and T. Kaneko	Tohoku University	Effects of the Electron Irradiation Energy on Synthesis of Gold Nanoparticles Using Gas-Liquid Interfacial Plasma	Journal of Physics: Conference Series 518 pp. 012022-1-5	有	2014
357	T. Kato and T. Kaneko	Tohoku University	Optical Detection of a Highly Localized Impurity State in Monolayer Tungsten Disulfide	ACS Nano 8(12) pp.12777-12785	有	2014
358	菅谷武芳、牧田紀久夫、水野英範、武田明紘、望月透、大島隆治、松原浩司、岡野好伸、仁木栄	産総研他	MBE-grown InGaP/GaAs/InGaAsP triple junction solar cells fabricated by advanced bonding technique	Proceedings of 2014 40th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, pp. 542-545.	無	2014
359	中村徹哉、住田泰史、今泉充、菅谷武芳、松原浩司、仁木栄、望月透、武田明紘、岡野好伸、佐藤真一郎、大島武	産総研他	Radiation response of fill-factor for GaAs Solar Cells with InGaAs Quantum Dot layers	Proceedings of 2014 40th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, pp. 2886-2891.	無	2014
360	菅谷武芳、望月透、牧田紀久夫、大島隆治、松原浩司、岡野好伸、仁木栄	産総研他	Investigation of InGaP/(In)AlGaAs/GaAs Triple Junction Top Cells for Smart Stacked Multijunction Solar Cells Grown using Molecular Beam Epitaxy	Proceedings of 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 757-758.	無	2014
361	Olindo, Isabella, Hitoshi Sai, Michio Kondou, Miro Zeman	TU Delft, 産総研	Full-wave optoelectrical modeling of optimized flattened light-scattering substrate for high efficiency thin-film silicon solar cells	Prog. Photovoltaic: Res. Appl. 22:671-689 (2014)	有	2014
362	H. Sai, H. Mizuno, K. Makita, M. Kondo, K. Matsubara, S. Niki	産総研	Flattened Light Scattering Substrates (FLiSS) for Enhancement of Light Absorption in Thin-Film Solar Cells	Grand Renewable Energy 2014 proceedings, 0-Pv-11-1 (2014)	無	2014
363	H. Mizuno, K. Makita, H. Sai, T. Sugaya, R. Ohsima, H. T	産総研	Metal Nanostructures Applied in Solar Cells	Grand Renewable Energy 2014 proceedings, 0-Pv-12-1 (2014)	無	2014

	akato, K. Matsubara, M. Kondo					
364	H. Mizuno, K. Makita, Y. Hozumi, H. Sai, K. Matsubara, H. Takato,	産総研	Thin-Film GaAs Solar Cells Mechanically Stacked on Plasmonic Substrates	Technical Digest of WCPEC6	無	2014
365	Min Liao, Zewen Xiao, Fan-Yong Ran, Hideya Kumomi, Toshio Kamiya and Hideo Hosono	東工大	Effects of Pb Doping on Hole Transport Properties and Thin-Film Transistor Characteristics of SnO Thin Films	ECS J. Solid State Sci. Technol., 4, (2015) Q26-Q30.	有	2014
366	Hiroshi Yanagi, Chiyuki Sato, Yota Kimura, Issei Suzuki, Takahisa Omata, Toshio Kamiya, and Hideo Hosono	東工大	Widely bandgap tunable amorphous Cd-Ga-O oxide semiconductors exhibiting electron mobilities $\geq 10 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	Applied Physics Letters, 106, (2015) 082106.	有	2014
367	H. Mizuno, H. Sai, K. Matsubara, H. Takato, M. Kondo	産総研	Integration of Light Trapping Silver Nanostructures in Hydrogenated Microcrystalline Silicon Solar Cells by Transfer Printing	Journal of Visualized Experiments	有	in press

【論文リスト】

③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年
1	Seung Yeop Myong, Kobsak Sriprapha, Yasutoshi Yashiki, Shinsuke Miyajima, Akira Yamada, Makoto Konagai	東工大	Silicon-based thin-film solar cells fabricated near the phase boundary by VHF PECVD technique	Solar Energy Materials & Solar Cells, Volume 92, pp.639-645	有	2008
2	Shuichi Hiza, Akira Yamada, Makoto Konagai	東工大	Characterization of Defects-Location in Hydrogenated Microcrystalline Silicon Thin Films and Its Influence on Solar Cell Performance	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 47, No.8, pp.6222-6227	有	2008
3	IA. Yunaz, K. Hashizume, S. Miyajima, Akira Yamada, Makoto Konagai	東工大	Fabrication of amorphous silicon carbide films using VHF-PECVD for triple junction thin-film solar cell applications	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS, Volume 93, Issue 6-7, pp.1056-1061	有	2009
4	Sorapong Inthi-sang, Kobsak Sriprapha, Shinsuke Miyajima, Akira Yamada, Makoto Konagai	東工大	Hydrogenated Amorphous Silicon Oxide Solar Cells Fabricated near the Phase Transition between Amorphous and Microcrystalline Structures	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 48, 122402	有	2009
5	Jaran Sritharithikhun, Fangdan Jiang, Shinsuke Miyajima, Akira Yamada, Makoto Konagai	東工大	Optimization of p-Type Hydrogenated Microcrystalline Silicon Oxide Window Layer for High-Efficiency Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 48, 101603	有	2009
6	Zhang Li, Mitsutaka Nishijima, Akira Yamada, Makoto Konagai	東工大	Growth of Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> thin films using ionization Ga source and application for solar cells	Phys. Status Solidi C, Vol.6, pp.1273-1277	有	2009
7	Yutaka Hoshina, Kojiro Iwasaki, Akira Yamada, Makoto Konagai	東工大	First-principles Analysis of Indirect-to-Direct Band Gap Transition of Ge under Tensile Strain	Jpn. J. Appl. Phys., Volume 48, 04C125-1-04C125-6	有	2009
8	Y. Hoshina, A. Yamada, M. Konagai	東工大	Growth and Characterization of Highly Tensile-Strained Ge on In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As Virtual Substrate by	Jpn. J. Appl. Phys., Volume 48, 111102-1-111102-4	有	2009

			Solid Source Molecular Beam Epitaxy			
9	M. Kawamura, T. Fujita, A. Yamada, M. Konagai	東工大	Cu(In, Ga)Se <sub>2</sub> thin-film solar cells grown with cracked selenium	Thin Solid Films, Vol. 311, pp. 753-756	有	2009
10	Shinsuke Terasawa, Takeru Inoue, Manabu Ihara	東工大	Fabrication of b-FeSi <sub>2</sub> /Si composite films for photovoltaic applications by using scanning annealing	Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 93, pp. 215-221	有	2009
11	T. Inoue, T. Shinsuke, M. Ihara	東工大	Control of the crystal phase in Fe/Si films by using thin film Zone Melting Crystallization	ECS Transactions, 16(40), pp. 93-103	有	2009
12	H. Shibuya, S. Inoue, M. Ihara	東工大	Evaluation of Dye-Sensitized Solar Cells using Forward Bias Applied Impedance Spectroscopy Under Dark	ECS Transactions, 16(50), pp. 93-105	有	2009
13	Taweewat Krajangsang, Ihsanul Afdi Yunaz, Shinsuke Miyajima, Makoto Konagai	東工大	Effect of p- $\mu$ c-Si <sub>1-x</sub> O <sub>x</sub> :H layer on performance of hetero-junction microcrystalline silicon solar cells	CURRENT APPLIED PHYSICS, 10(3), pp. S357-S360, Suppl. 1	有	2010
14	Do Yun Kim, Ihsanul Afdi Yunaz, Shunsuke Kasashima, Shinsuke Miyajima, Makoto Konagai	東工大	Preparation of narrow-gap a-Si:H solar cells by VHF-PECVD technique	PROCEEDINGS OF MRS SPRING MEETING, 1245(A07-7)	有	2010
15	Aswin Hongsingthong, Taweewat Krajangsang, Ihsanul Afdi Yunaz, Shinsuke Miyajima, Makoto Konagai	東工大	ZnO Films with Very High Haze Value for Use as Front Transparent Conductive Oxide Films in Thin-Film Silicon Solar Cells	APPLIED PHYSICS EXPRESS, 3 (5) 051102	有	2010
16	Yasuyoshi Kurokawa, Shigeru Yamada, Shinsuke Miyajima, Akira Yamada, Makoto Konagai	東工大	Effects of oxygen addition on electrical properties of silicon quantum dots/amorphous silicon carbide superlattice	CURRENT APPLIED PHYSICS, 10(3), pp. S435-S438, Suppl. 1	有	2010
17	W. L. Wang, H. Lin, J. Zhang, A. Yamada, M. Konagai, J. B. Li	東工大	Experimental and simulation analysis of the dye sensitized solar cell /Cu(In, Ga)Se <sub>2</sub> solar cell tandem structure	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS, 94(10), pp. 1753-1758	有	2010
18	Masahiro Kawamura, Tomoyuki	東工大	Grain Boundary Evaluation of Cu(In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> )Se <sub>2</sub> Solar	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 49	有	2010

	Yamada, Naoki Suyama, Akira Yamada, Makoto Konagai		ar Cells	(6) 062301, Part 1		
19	Manabu Ihara, Manami Kanno, Siho Inoue	東工大	Photoabsorption-enhanced dye-sensitized solar cell by using localized surface plasmon of silver nanoparticles modified with polymer	Physica E, Vol.42, p.p.2867-2871	有	2010
20	Mikio Enomoto, Katsuhiko Taniguchi, Manabu Ihara	東工大	Dye-sensitized solar cells using localized surface plasmon of gold and silver nanoparticles with comb-shaped block copolymer	ECS Transactions, 25(42), pp.37-48	有	2010
21	Yuki Tanaka, Hironori Hachimura, Takayoshi Mishima, Manabu Ihara	東工大	Plasmon effect in Si solar cells coated with a thin polymer film containing silver or gold nanoparticles	ECS Transactions, in press	有	2010
22	Noya Loew, Shun Ikenouchi, Manabu Ihara	東工大	Peptide Nucleic Acids in Dye-Sensitized Solar Cells - Functional Component and a Means of Immobilizing Silver Nanoparticles	ECS Transactions, in press	有	2010
23	Ihsanul Afdi Yunaz, Hiroshi Nagashima, Daisuke Hamashita, Shinsuke Miyajima, Makoto Konagai	東工大	Wide-gap a-Si <sub>1-x</sub> C <sub>x</sub> :H solar cells with high light-induced stability for multijunction structure applications	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS, 95(1), pp.107-110	有	2011
24	Aswin Hongsthong, Ihsanul Afdi Yunaz, Shinsuke Miyajima, Makoto Konagai	東工大	Preparation of ZnO thin films using MOCVD technique with D <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub> O gas mixture for use as TCO in silicon-based thin film solar cells	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS, 95, pp.171-174	有	2011
25	A.Kitiyanan, A.Ogane, A.Tani, T. Hatayama, H.Yano, Y.Urakawa, T.Fuyuki	奈良先端科学技術大学院大学	Comprehensive study of electroluminescence in multicrystalline silicon solar cells	J. Appl. Phys., Vol.106, 043717	有	2009
26	A.Ogane, A.Kitiyanan, Y.Urakawa, T.Fuyuki	奈良先端科学技術大学院大学	High-pressure water vapor or heat treatment for enhancement of SiO <sub>x</sub> or SiN <sub>x</sub> passivation layers of silicon solar cells	Jpn. J. Appl. Phys., Vol.48, 066504	有	2009
27	T.Minemoto, Y.Abe, T.Anegawa	立命館	Lift-off Process for Flexible Cu(InGa)Se <sub>2</sub> Solar	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 49,	有	2010

	, S. Osada, H. Takakura		Cells	04DP06-1-04DP06-3		
28	S. Osada, T. Minemoto, H. Takakura	立命館	Cu(In, Ga)Se <sub>2</sub> Solar Cells with Superstrate Structure using Lift-off Process	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS, 95, 223-226	有	2011
29	T. Narita, H. Ueno, T. Baba, T. Kume, T. Ban, T. Iida, H. Habuchi, H. Natsuhara, S. Nonomura	岐阜大 岐阜高専	Preparation of NaSi thin films for the guest free Si clathrate thin films by heat resistance apparatus using NaSi target materials	Phys. Status Solidi C, 7, pp.1200-1202	有	2010
30	S. Nakamura, T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	Electronic structure of stannite-type Cu <sub>2</sub> ZnSnSe <sub>4</sub> by first principles calculations	phys. status solidi, (c)6, No.5, pp.1261-1265	有	2009
31	T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	Characteristics of chemical bond and vacancy formation in chalcopyrite-type CuInSe <sub>2</sub> and the related compounds	phys. status solidi, (c)6, No.5, pp.1312-1316	有	2009
32	T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	Electronic Structure and Characteristics of Chemical Bonds in CuInSe <sub>2</sub> , CuGaSe <sub>2</sub> and CuAlSe <sub>2</sub>	Jpn. J. Appl. Phys., 49 No.4, 04DP07	有	2010
33	S. Nakamura, T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	Phase stability and electronic structure of In-free photovoltaic materials, Cu <sub>2</sub> ZnSiSe <sub>4</sub> , Cu <sub>2</sub> ZnGeSe <sub>4</sub> and Cu <sub>2</sub> ZnSnSe <sub>4</sub>	Jpn. J. Appl. Phys., 49, 121203	有	2010
34	Takeshi Yagioka, Tokio Nakada	青学大	Cd-free flexible Cu(In, Ga)Se <sub>2</sub> thin film solar cells with ZnS(0,OH) buffer layers on Ti foils	Appl. Phys. Express, Vol.2, No.7, 072201-1-3	有	2009
35	T. Mise, T. Nakada	青学大	Microstructural properties of (In, Ga) <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> precursor layers for efficient CIGS thin-film solar cells	Solar Energy Materials & Solar Cells, 93, pp.1000-1003	有	2009
36	T. Mise, T. Nakada	青学大	Microstructural and Optical Properties of CuIn <sub>3</sub> Te <sub>5</sub> Thin Films for Solar Cells	Solar Energy Materials & Solar Cells, 94(6), pp.1132-1136	有	2010
37	T. Mise, T. Nakada	青学大	Effects of substrate temperature and film thickness on properties of CuIn <sub>3</sub> Te <sub>5</sub> thin films and solar cells	Thin Solid Films, 518(19), pp.5604-5609	有	2010
38	A. Nakajima, M. Gotoh, T. Sawada, S. Fukuda, M.	カネカ	Development of thin-film Si HYBRID solar module	Solar Energy Materials and Solar Cells, 93, pp.1163-1166	有	2009

	.Yoshimi, K.Yamamoto, T.Nomura					
39	K.Yamamoto	カネカ	Development and Perspective of Thin Film Si Solar Cell Module	Journal of Japan Institute of Electronic S Packaging	無	2009
40	S.Inthisang, T.Krajangsang, P.Sichanugrist, T.Watahiki, S.Miyajima, A.Yamada, M.Konagai	東工大	Effect of Hydrogen Dilution on the Metastability of Hydrogenated Amorphous Silicon Oxide Solar Cells	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 50, No.11, 111401-1-111401-5	有	2011
41	Makoto Konagai	東工大	Present Status and Future Prospects of Silicon Thin-Film Solar Cells	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 50, NO. 3, 030001-1-030001-12	有	2011
42	Do Yun Kim, Ihsanul Afdi Yunaz, Shunsuke Kasashima, Shinsuke Miyajima, Makoto Konagai	東工大	Fabrication of a-SiGeC:H solar cells using monomethyl germane by suppressing carbon incorporation for narrowing optical bandgap	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS, 95, No. 3, pp.829-837	有	2011
43	Sorapong Inthisang, Taweewat Krajangsang, Ihsanul Afdi Yunaz, Akira Yamada, Makoto Konagai, Christopher R. Wronski	東工大	Fabrication of high open-circuit voltage a-Si <sub>1-x</sub> O <sub>x</sub> :H solar cells by using p-a-Si <sub>1-x</sub> O <sub>x</sub> :H as window layer	Phys. Status Solidi, (C)8, No.10, pp.2990-2993	有	2011
44	Taweewat Krajangsang, Shunsuke Kasashima, Aswin Hongsingthong, Porponth Sichanugrist, Makoto Konagai	東工大	Effect of p-c-Si <sub>1-x</sub> O <sub>x</sub> :H Layer on Performance of Hetero-Junction Microcrystalline Silicon Solar Cells under Light Concentration	Current Applied Physics, 12, 515	有	2012
45	Krajangsang Taweewat, Hiza Shuichi, Hayashi Teruaki, Aswin Hongsingthong, Shinsuke Miyajima, Makoto Konagai	東工大	Quantitative Analysis of Surface Morphology of Boron-Doped Zinc Oxide for Microcrystalline Silicon Solar Cells	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, vol.51, No.5, 051101	有	2012
46	S.Miyaniishi, H.Koh, Y.Takaba, R.Miyamoto,	シャープ	Observation of band structure on amorphous silicon surface and perfor	Journal of Non-Crystalline Solids	有	2011

	A. Gorai, H. Matsubara, J. Hara, M. Saitoh, T. Ishii, T. Machida		mance of solar cells with controlled band offsets on hetero-junctions			
47	Y. Abe, T. Minemoto, H. Takakura	立命館	Origin of Crossover in Current Density-Voltage Characteristics of Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> Thin Film Solar Cell Fabricated Using Lift-Off Process	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 50, 040201-1-040201-3	有	2011
48	A. Okamoto, T. Minemoto, H. Takakura	立命館	Application of Sputtered ZnO <sub>1-x</sub> S <sub>x</sub> Buffer Layer for Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> Solar Cells	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 50, 04DP10-1-04DP10-3	有	2011
49	S. Fukamizu, T. Kondo, Y. Oda, T. Minemoto, H. Takakura	立命館	Surface Morphology and Device Performance of CuInS <sub>2</sub> Solar Cells Prepared by Single and Two Step Evaporation Methods	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 50, 04DP11-1-04DP11-3	有	2011
50	Y. Abe, T. Minemoto, S. Osada, H. Takakura	立命館	Lift-Off Process Reducing Crack Formation and its Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> Thin Film Solar Cell Applications	SOLAR ENERGY, 85, pp. 2101-2107	有	2011
51	R. Hamazaki, Y. Oda, S. Fukamizu, A. Yamamoto, T. Minemoto, H. Takakura	立命館	Optimization of Compositional Ratio of Zn(O,S) Window Layer in CuInS <sub>2</sub> Solar Cells	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, in press	有	2012
52	Y. Abe, S. Osada, S. Fukamizu, Y. Oda, T. Minemoto, K. Nakanishi, T. Ohta, H. Takakura	立命館	Transfer of CuInS <sub>2</sub> Thin Film by Lift-Off Process and Application to Superstrate-Type Thin-Film Solar Cells	THIN SOLID FILMS, in press	有	2012
53	T. Itoh, S. Hibi no, T. Sahashi, Y. Kato, S. Koi so, F. Ohashi, S. Nonomura	岐阜大	In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N films deposited by reactive RF-sputtering	Journal of Non-Crystalline Solids, in press	有	2012
54	Yasuyoshi Kurokawa, Shigeru Yamada, Makoto Konogail	東工大	Numerical Approach to the Performance of Silicon Quantum Dots Superlattice Solar Cells Taking into Account the Quantum Effect	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, in press	有	2012
55	Satoshi Oonishi, Masahiro Kawamura, Naoaki Takano, Daisuke Hashimoto,	東工大	Characterization of Cu(InGa)Se <sub>2</sub> grain boundary properties by electron- and tip-probe methods	Thin Solid Films, 519(21), pp. 7347-7350	有	2011



	Akira Yamada, Makoto Konagai					
56	Xianfeng Zhang, Tsuyoshi Kobayashi, Yasuyoshi Kurokawa, Yoshiyuki Tashiro, Masahiro Ohtsuka, Tomoyuki Yamada, Akira Yamada	東工大	Comparison of Interface Characterization between Ag(In,Ga)Se <sub>2</sub> and Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> Solar Cells by High-Angle-Annular Dark-Field Scanning Transmission Electron Microscopy	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 50, 126603	有	2011
57	Yoshiaki Hirai, Hiroshi Nagashima, Yasuyoshi Kurokawa, Akira Yamada	東工大	Experimental and theoretical evaluation of Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> concentrator solar cells	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 51(1)	有	2012
58	Yutaka Hoshina, Masayuki Shimizu, Akira Yamada, Makoto Konagai	東工大	Numerical Analysis of a Solar Cell with Tensile-Strained Ge as a Novel Narrow-Band-Gap Absorber	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 50(4), 04DP08	有	2011
59	T.Wada, T.Maeda	龍谷大学	Characteristics of Chemical Bonds in CuInSe <sub>2</sub> and its Thin Film Deposition Processes Used to Fabricate Solar Cells	Jpn. J. Appl. Phys., 50, 05FA02	有	2011
60	S.Yamazoe, S.Yanagimoto, T.Wada	龍谷大学	Wide band gap and p-type conductive Cu-Nb-O films	Phys. Status Solidi RRL, Rapid Research Letters 5, pp.153-155	有	2011
61	T.Mise, T.Nakada	青学大	Effects of substrate temperature and film thickness on properties of CuIn <sub>3</sub> Te <sub>5</sub> thin films and solar cells	J. Applied Physics, 110(1), 014504/1-014504/7	有	2011
62	T.Mise, T.Nakada	青学大	Effect of tellurium deposition rate on the properties of Cu-In-Te based thin films and solar cells	J. Crystal Growth, 314(1), pp.76-80	有	2011
63	T.Mise, T.Nakada	青学大	Narrow-bandgap CuIn <sub>3</sub> Te <sub>5</sub> thin-film solar cells	Progress in Photovoltaics, DOI:10.1002/pip.1191	有	2011
64	T.Mise, T.Nakada	青学大	Effect of tellurium deposition rate on the properties of Cu-In-Te based thin films and solar cells	J. Crystal Growth, 314(1), pp.76-80	有	2011
65	M.Yoshikawa, S.Yamazoe, T.Wada	龍谷大学	P-type Wide Bandgap BaCuSeF Thin Films Fabricated by Pulsed Laser Deposition	Jpn. J. Appl. Phys., in press	有	2012

66	M. Isshiki, T. Ikeda, J. Okubo, T. Oyama, E. Shidoji, H. Odaka, P. Sichanugrist, M. Konagai	旭硝子 東工大	Improving mobility of F-doped SnO <sub>2</sub> thin films by introducing temperature gradient during low-pressure chemical vapor deposition	Jpn. J. Appl. Phys., in press	有	2012
67	Yuki Tanaka, Hironori Hachimura, Takayoshi Mishima, Manabu Ihara	東工大	Plasmon Effect in Si Solar Cells Coated with a Thin Polymer Film Containing Silver or Gold Nanoparticles	ECS Transactions, 33(17), pp.81-91	有	2011
68	Noya Loew, Shun Ikenouchi, Manabu Ihara	東工大	Peptide Nucleic Acids in Dye-Sensitized Solar Cells - Functional Component, and Structural Component to Immobilize Silver Nanoparticles	ECS Transactions, 33(17), pp.139-150	有	2011
69	Noya Loew, Shun Ikenouchi, Manabu Ihara	東工大	Combination of the Opposing Effects of Silver Nanoparticles and Peptide Nucleic Acids on Dye-Sensitized Solar Cells to Enhance their Respective Positive Influence	ECS Transactions, 41(6), pp.211-221	有	2011
70	Hironori Hachimura, Kwanwoo Nam, Yuki Tanaka, Manabu Ihara	東工大	Fabrication of Composite nanoporous Si films with gold nanoparticles to enhance the efficiency of silicon solar cells	ECS Transactions, 41(45), pp.1-11	有	2012
71	Bancha Janthong, Yuki Moriyama, Aswin Hongsinthong, Porponth Sichanugrist and Makoto Konagai	東工大	Management of light-trapping effect for a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H tandem solar cells using novel substrates, based on MOCVD ZnO and etched white glasses	Solar Energy Materials and Solar Cells, 119, 209-213	有	2013
72	Shigeru Yamada, Yasuyoshi Kurokawa, Shinsuke Miyajima, and Makoto Konagai	東工大	Improvement of Electrical Properties of Silicon Quantum Dots Superlattice Solar Cells with Diffusion Barrier Layers Development of thin-film solar cells using solar spectrum splitting technique	Jpn. J. Appl. Phys. 52, 04CR02	有	2013
73	Sinae Kim, Shunsuke Kasashima, Porponth Sichanugrist, Taizo Kobayashi,	東工大、 東京理科大	Development of thin-film solar cells using solar spectrum splitting technique	Solar Energy Materials and Solar Cells 119, 214-218	有	2013

	Tokio Nakada, and Makoto Konagai					
74	Toshimasa Suzuki, Shun Hibino, Ruichi Katayama, Yoshinori Kato, Fumitaka Ohashi, Takashi Itoh and Shuichi Nonomura	岐阜大	Effects of substrate temperature on properties of amorphous In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N films deposited by reactive radio frequency sputtering	Jpn. J. Appl. Phys. 52, 11NG05	有	2013
75	Zhang Xianfeng, Tsuyoshi Kobayashi, Yasuyoshi Kurokawa, Shinsuke Miyajima, Akira Yamada	東工大	Deposition of Ag(In, Ga)Se <sub>2</sub> Solar Cells by a Modified Three-Stage Method Using a Low-Temperature-Deposited Ag-Se Cap Layer	Jpn. J. Appl. Phys. 52, pp. 055801	有	2013
76	Shigeru Yamada, Yasuyoshi Kurokawa, Shinsuke Miyajima, and Makoto Konagai	東工大	Improvement of Electrical Properties of Silicon Quantum Dot Superlattice Solar Cells with Diffusion Barrier Layers	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 52, 04CR02	有	2013
77	Syohei Yoshioka, Takayoshi Mishima, and Manabu Ihara	東工大	The Effect of TiO <sub>2</sub> Microstructure and Introduction of Silver Nanoparticles on Conversion Efficiency of Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> Sensitized Semiconductor Solar Cells	ECS Transactions Vol. 50, No. 51, 33-44	有	2013
78	Kwanwoo NAM, Hironori Hachimura, Kazuki Hirano, Manabu Ihara, P. Sichanugrist, and M. Konagai	東工大	Optical Management by Localized Surface Plasmon of Metal Nanoparticles and Application to a Solar Cell	ECS Transactions Vol. 50, No. 51, 77-90	有	2013
79	T. Okamoto, R. Hayashi, S. Hara and Y. Ogasawa	木更津高専	Cu Doping of CdTe Layers in Polycrystalline CdTe Thin-Film Solar Cells for Top Cells of Multijunction Solar Cells	Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 52, 102301-1~102301-3	有	2013
80	Shigeru Yamada, Yasuyoshi Kurokawa, Shinsuke Miyajima, and Makoto Konagai	東工大	Investigation of hydrogen plasma treatment for the improvement of silicon quantum dot superlattice solar cells with amorphous silicon carbide matrix	Nanoscale Research Letters 9: 72 DOI: 10.1186/1556-276X-9-72	有	2014

81	Sinae Kim, Porponth Sichanugrist and Makoto Konagai	東工大	Amorphous Solar Cell on Multilayer of SnO <sub>2</sub> /ZnO TCO Substrate for Full Spectrum Splitting Solar Cell Application	Canadian Journal of Physics 92, Issue 7/8, p.917	有	2014
82	Masanobu Isshiki, Yasuko Ishikawa, Toru Ikeda, Takuji Oyama, Hidefumi Odaka, Porponth Sichanugrist, Makoto Konagai	旭硝子、東工大	SnO <sub>2</sub> :F with Very High haze Value and Transmittance in Near Infrared Wavelength for Use as Front Transparent Conductive Oxide Films in Thin-Film Silicon Solar Cells	MRS Online Proceedings Library, Vol.1536 pp 63-69	有	2014
83	Masanobu Isshiki, Porponth Sichanugrist, Yusuke Abe, Takuji Oyama, Hidefumi Odaka, Makoto Konagai	東工大、旭硝子	New method to measure whole-wavelength transmittance of TCO substrates for thin-film silicon solar cells	Current Applied Physics 14, 1813-1818	有	2014
84	Dong-Won Kang, Porponth Sichanugrist, and Makoto Konagai	東工大	Novel application of MgF <sub>2</sub> as a back reflector in a-SiO <sub>x</sub> :H thin-film solar cells	Applied Physics Express 7, 082302, 4 pages	有	2014
85	Yoshiaki Hirai, Yasuyoshi Kurokawa, and Akira Yamada	東工大	Numerical study of Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> solar cell performance toward 23% conversion efficiency	Jpn. J. Appl. Phys. 53, 012301	有	2014
86	Shigeru Yamada, Yasuyoshi Kurokawa, Shinsuke Miyajima, Makoto Konagai	東工大	Silicon quantum dot superlattice solar cell structure including silicon nanocrystals in a photogeneration layer	NANOSCALE RESEARCH LETTERS 9, 246 DOI: 10.1186/1556-276X-9-246	有	2014
87	Toshimasa Suzuki, Ryuichi Katayama, Shun Hibino, Yoshinori Kato, Fumitaka Ohashi, Takashi Itoh, Shuichi Nonomura	岐阜大	Effect of Thermal Annealing in a-In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N Films Prepared by Reactive RF-Sputtering	Canadian Journal of Physics 92 (2014) 943	有	2014
88	Fumitaka Ohashi, Sunao Koiso, Shun Hibino, Tatsuro Sahashi, Takashi Itoh, Shuichi Nonomura	岐阜大	Post-nitriding on $\mu$ c-In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N Films Using Hot-Wire Chemical Vapor Deposition Technique	Thin Solid Films 575 (2015) 96	有	2015
89	T. Umehara, S. Iinuma, A. Sado, Y. Kurokawa	東工大	Electrical characterization of Cu(In,Ga)Se <sub>2</sub> thin films peeled off from	Jpn. J. Appl. Phys. 54, 018001 (2015) doi:10.7567/JJAP.54.01	有	2015

	awa and A. Yamada		m Mo-coated soda-lime glass substrate by AC Hall measurement	8001		
90	T. Itoh, R. Katayama, K. Yamakawa, K. Matsui, M. Saito, S. Sugiyama, P. S. Srichanugrist, S. Nonomura, M. Konagai	岐阜大、シャープ、東工大	Electrical Characterization of Hydrogenated Amorphous Silicon Oxide Films	Jpn. J. Appl. Phys., 54, 08KB11	有	2015
91	T. Nomura, T. Maeda, T. Wada	龍谷大	Preparation of narrow band-gap Cu <sub>2</sub> Sn(S,Se) <sub>3</sub> and fabrication of film by non-vacuum process	Jpn. J. Appl. Phys. 52 04CR08 (2013). (DOI: 10.7567/JJAP.52.04CR08)	有	2013
92	T. Nomura, T. Maeda, K. Takei, M. Morihama, T. Wada	龍谷大	Crystal structures and band-gap energies of Cu <sub>2</sub> Sn(S,Se) <sub>3</sub> (0 < x < 1.0) solid solution	Phys. Status Solidi C 10, No. 7-8, 1093-1097 (2013). (DOI: 10.1002/pssc.201200867)	有	2013
93	T. Nomura, T. Maeda, T. Wada	龍谷大	Fabrication of Cu <sub>2</sub> SnS <sub>3</sub> solar cells by screen-printing and high-pressure sintering process	Jpn. J. Appl. Phys. 53, 05FW01 (2014). (doi:10.7567/JJAP.53.05FW01)	有	2014
94	K. Yamamoto <sup>1</sup> , H. Okamoto <sup>1</sup> , H. Sakakimal, R. Hayashi <sup>2</sup> , Y. Ogawa <sup>2</sup> , T. Okamoto <sup>2</sup> , T. Wada <sup>1</sup>	龍谷大 <sup>1</sup> 木更津高専 <sup>2</sup>	Fabrication of transparent p-type conductive BaCuSeF films by pulsed laser deposition and their application to CdS/CdTe solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 53, 05FX02 (2014). (doi:10.7567/JJAP.53.05FX02).	有	2014
95	M. Morihama, T. Maeda, I. Yamauchi, T. Wada	龍谷大	Crystallographic and optical properties of narrow band gap Cu <sub>2</sub> GeSe <sub>3</sub> and Cu <sub>2</sub> (Sn <sub>1-x</sub> Ge <sub>x</sub> )Se <sub>3</sub> solid solution	Jpn. J. Appl. Phys. 53, 05FW06 (2014). (doi:10.7567/JJAP.53.05FW06)	有	2014
96	A. Shigemi, T. Maeda, T. Wada	龍谷大	First-principles calculation of Cu <sub>2</sub> SnS <sub>3</sub> and related compounds	Phys. Status Solidi B, (DOI: 10.1002/pssb.201400346)	有	2015
97	K. Yamamoto <sup>1</sup> , H. Sakakimal, Y. Ogawa <sup>2</sup> , A. Hosono <sup>2</sup> , T. Okamoto <sup>2</sup> , T. Wada <sup>1</sup>	龍谷大 <sup>1</sup> 木更津高専 <sup>2</sup>	Fabrication of CdS/CdTe solar cells with transparent p-type conductive BaCuSeF back contact	Jpn. J. Appl. Phys. 54, 08KC01 (2015). (doi:10.7567/JJAP.54.08KC01)	有	2015
98	H. Sakakimal, M. Nishitani <sup>2</sup> , K. Yamamoto <sup>1</sup> ,	龍谷大 <sup>1</sup> 大阪大 <sup>2</sup>	Theoretical and experimental studies on wide band gap p-type conducti	Jpn. J. Appl. Phys. 54, 08KC07 (2015). (doi:10.7567/JJAP.54.0	有	2015

	T. Wada1		ve BaCuSeF and related compounds	8KC07)		
99	R. Ishikawa1, Y. Furuya1, R. Arakil, T. Nomoto1, Y. Ogawa2, A. Hosono2, T. Okamoto2, N. Tsuboi1	新潟大1 木更津高専2	Preparation of p-type NiO films by reactive sputtering and their application to CdTe solar cells	Jpn. J. Appl. Phys.	有	2015
100	Zacharie Jehl Li Kao, T. Kobayashi, T. Nakada	東京理科大学	CuIn(Se1-x, Tex)2 Solar Cells with Tunable Narrow-bandgap for Bottom Cell Application in Multijunction Photovoltaic Devices	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 119 (2013)144-148	有	2013
101	Taizo Kobayashi, Toyokazu Kumazawa, Zacharie Jehl Li Kao, Tokio Nakada	東京理科大学	Cu(In, Ga)Se2 thin film solar cells with a combined ALD-Zn(O, S) buffer and MOCVD-ZnO:B window layers	Solar Energy Materials and Solar Cells 119, December (2014)129-133.	有	2014
102	Zacharie Jehl Li Kao, Taizo Kobayashi, Tokio Nakada	東京理科大学	Modeling of the surface sulfurization of CIGSe-based solar cells	Solar Energy, 110, December (2014)50-55.	有	2014
103	Zacharie Jehl Li Kao, Hirofumi Fukai, Isamu Matsuyama, and T. Nakada	東京理科大学	Optimization of CIGSe bottom cell for spectral splitting device application	Phys. Status Solidi C 12, No. 6, (2015) 676-679	有	2015
104	Hisashi Uzu, Mitsuru Ichikawa, Masashi Hino, Kunihiro Nakano, Tomomi Meguro, José Luis Hernández, Hui-Seon Kim, Nam-Gyu Park, and Kenji Yamamoto	カネカ	High efficiency solar cells combining a perovskite and a silicon heterojunction solar cells via an optical splitting system	Applied Physics Letters 106, 013506 (2015)	有	2015

【論文リスト】

⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発（日 EU 共同開発）

番号	発表者	所属	発表タイトル	発表媒体	査読	発表年月日
1	Takuo Sasaki, Hidetoshi Suzuki, Masamitsu Takahashi, Yoshio Ohshita, Itaru Kamiya, Masafumi Yamaguchi	豊田工業大学	X-ray reciprocal space mapping of dislocation-mediated strain relaxation during InGaAs/GaAs(001) epitaxial growth	Journal of Applied Physics,110(11):113502	有	2011/12/1
2	山口真史	豊田工業大学	世界最高効率 45%以上を目指した集光型太陽電池の共同研究開発（解説論文）	未来材料, 11(12):48-53	無	2011/12/10
3	Xiuxun Han, Tomohiro Tanaka, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi, Shinichiro Sato	豊田工業大学	Growth orientation dependent photoluminescence of GaAsN alloys	Applied Physics Letters,100(3):032108	有	2012/1/20
4	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工業大学	Effect of Thermal Stress on a N-Related Recombination Center in GaAsN Grown by Chemical Beam Epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics,51(2):02B P02	有	2012/2/20
5	Takuo Sasaki, Kenichi Shimomura, Hidetoshi Suzuki, Masamitsu Takahashi, Itaru Kamiya, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工業大学	Observation of In-Plane Asymmetric Strain Relaxation during Crystal Growth and Growth Interruption in InGaAs/GaAs(001)	Japanese Journal of Applied Physics,51(2):02B P01	有	2012/2/20
6	Masafumi Yamaguchi	豊田工業大学	Japanese R&D Activities of High	Energy Procedia, 15: 265-274	有	2012/4/1

			Efficiency III-V Compound Multi- Junction and Concentrator Solar Cells			
7	Koshiro Kashima, Atsuhiko Fukuyama, Yosuke Nakano, Makoto Inagaki, Hidetoshi Suzuki, Masafumi Yamaguchi, Tetsuo Ikari	豊田工業 大学	Nitrogen Related Deep Levels in GaAsN Films Investigated by a Temperature Dependence of Piezoelectric Photothermal Signal	Materials Science Forum (Volume725) Defects- Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors XIV, 725: 93-96	有	2012/7/1
8	Masafumi Yamaguchi	豊田工業 大学	Volume1:Photovoltaic Solar Energy, Technology, 1.22 Multiple Junction Solar Cells(Pages 497-514)	Comprehensive Renewable Energy	有	2012/7/1
9	A. Ogura, T. Morioka, P. Garca- Linares, E. Hernandez, I. Ramiro, I. Artacho, E. Antoln, A. Mart, A. Luque, Masafumi Yamaguchi, Y. Okada	豊田工業 大学	MODELLING OF QUANTUM DOT SOLAR CELLS FOR CONCENTRATOR PV APPLICATIONS	Proc. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC37), pp.2642-2645	有	2012/10/1
10	Suguru Wada, Tomohiro Tanaka, Makoto Inagaki, Kazuma Ikeda, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工業 大学	IDENTIFICATION OF HYDROGEN INCORPORATION INTO GaAsN BY GROWTH WITH DEUTERATED PRECURSORS	Proc. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC37), pp.560-563	有	2012/10/1
11	Makoto Inagaki, Shunsuke Kimura, Kazuma Ikeda,	豊田工業 大学	EFFECT OF N- INDUCED SCATTERING CENTERS ON ELECTRON MOBILITY IN CBE	Proc. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC37), pp.493-495	有	2012/10/1



	Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi		GROWN GaAsN FILMS			
12	Kazuma Ikeda, Makoto Inagaki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工業大学	LOWERING SYMMETRY AROUND N-CLUSTER BY BREAKING Ga-N BOND IN GaAsN	Proc. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC37), pp.489-492	有	2012/10/1
13	Boussairi Bouzazi, Hidetoshi Suzuki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工業大学	NITROGEN-RELATED DEFECTS AND THEIR EFFECT ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF GaAsN GROWN BY CHEMICAL BEAM EPITAXY	Proc. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC37), pp.454-458	有	2012/10/1
14	A.B. Cristbal, A. Mart, G. Sala, A. Bett, N. J. Ekins-Daukes, F. Roca, I. Luque-Heredia, W. Warmuth, J. Merten, Y. Okada, Y. Hishikawa, T. Takamoto, K. Araki, A. Fukuyama, N. Kuze, T. Kita, A. Kotagiri, Masafumi Yamaguchi, A. Luque	豊田工業大学	NGCPV: A NEW GENERATION OF CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC CELLS, MODULES AND SYSTEMS	Proc. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp.244-248	有	2012/11/1
15	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi	豊田工業大学	Capacitance-voltage and current-voltage characteristics for the study of high background doping and conduction mechanisms in	Journal of Alloys and Compounds, 552: 469-474	有	2013/3/5

	Yamaguchi		GaAsN grown by chemical beam epitaxy			
16	山口真史	豊田工業大学	超高効率を目指す次世代太陽電池（解説論文）	応用物理, 82(3):264-267	無	2013/3/10
17	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工業大学	Analysis of Current Transport Mechanisms in GaAsN Homojunction Solar Cell Grown by Chemical Beam Epitaxy	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAIC S, 3(2):909-915	有	2013/4/1
18	Kazuma Ikeda, Masafumi Yamaguchi, Boussairi Bouzazi, Hidetoshi Suzuki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita	豊田工業大学	III-V-N Materials for Super High Efficiency Multi-junction Solar Cells	Japanese Journal of Applied Physics, 52(8):08JH11	有	2013/7/22
19	山口真史	豊田工業大学	高効率太陽電池の研究開発動向と今後の展望（解説論文）	電子情報通信学会技術研究報告 信学技報	無	2013/8/1
20	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工業大学	Effect of electron and proton irradiation on recombination centers in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Current Applied Physics, 13(7):1269-1274	有	2013/9/1
21	Nobuaki Kojima, Crisforo Morales, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工業大学	Ga <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> and (InGa) <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> as novel buffer layers in the GaAs on Si system	AIP Conference Proceedings, 1556:38-40	有	2013/9/27
22	Toshiaki Nishi, Takuo Sasaki, Kazuma Ikeda, Hidetoshi Suzuki, Masamitsu Takahashi, Kenichi	豊田工業大学	Real-time observation of crystallographic tilting InGaAs layers on GaAs offcut Substrates	AIP Conference Proceedings, 1556:14-17	有	2013/9/27

	Shimomura, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi					
23	Hiroyuki Kowaki, Kan-Hua Lee, Takuto Kojima, Makoto Inagaki, Kazuma Ikeda, Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi, N.J. Ekins- Daukes	豊田工業 大学	Optical DLTS for the study of recombination centers in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	AIP Conference Proceedings , 1556:41-44	有	2013/9/27
24	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工業 大学	Analysis of defects in GaAsN grown by chemical beam epitaxy on high index GaAs substrates	AIP Conference Proceedings , 1556:30-33	有	2013/9/27
25	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工業 大学	Effect of arsenic source flow rate on the lattice defects in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	physica status solidi, 10(11):1477-1480	有	2013/9/30
26	Kazuma Ikeda, Makoto Inagaki, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工業 大学	Preferential N-H bond direction in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	physica status solidi, 10(11):1513-1516	有	2013/10/23
27	Masafumi Yamaguchi, Yoshio Ohshita, Koji	豊田工業 大学	Importance of Photovoltaics Learned from the Fukushima Nuclear Power Plant Accident	Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and	有	2013/12/1

	Arafune		in Japan	Exhibition, pp.4623-4628		
28	A.Datas , A.B. Cristbal , G. Sala , I. Antn, J.C. Miano, P. Benitez, A.W. Bett, G.Siefer, N. J. Ekins- Daukes, F.Roca, C. Cancro, I.Luque- Heredia, W. Warmuth, M. Baudrit, Y. Okada, M. Sugiyama, Y. Hishikawa, T.Takamoto, K. Araki, A. Fukuyama, K. Nishioka, H. Suzuki, N. Kuze, Y. Moriyasu, T. Kita, A. Kotagiri, Nobuaki Kojima, A.Mart, Masafumi Yamaguchi, A. Luque	豊田工業 大学	NGCPV: A New Generation of Concentrator Photovoltaic Cells, Modules and Systems	Proc. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp.88- 93	有	2013/12/1
29	Yoshio Ohshita, Kazuma Ikeda, Hidetoshi Suzuki, Hideaki Machida, Hiroshi Sudoh, Tomohiro Tanaka, Takahiko Honda, Makoto Inagaki, Masafumi	豊田工業 大学	NH related defects in GaAsN grown through chemical beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 53(3):031001	有	2014/2/13

	Yamaguchi					
30	Boussairi Bouzazi, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工業大学	Effect of surface morphology on the density of energy states in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 53(4):04ER08	有	2014/2/14
31	Kazuma Ikeda, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, and Masafumi Yamaguchi	豊田工業大学	Correlations between N-H local vibrational modes in GaAsN Grown by Chemical Beam Epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 53(7):071001(2014)	有	2014/6/12
32	Omar Elleuch, Boussairi Bouzazi, Hiroyuki Kowaki, Kazuma Ikeda, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita, and Masafumi Yamaguchi	豊田工業大学	Analysis of the main acceptor defect in p-type GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 53(9):091201(2014)	有	2014/8/29
33	M. Yamaguchi, H. Yamada, Y. Fujioka,	豊田工業大学	Overview of PV R&D Project in Japan	Proc. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 3961-3964 (2014)	有	2014/11/7
34	M. Yamaguchi, K. Ikeda, N. Kojima, Y. Ohshita, T. Takamoto	豊田工業大学	Overview of Loss Mechanisms for Super High-Efficiency Multijunction Solar Cells	Proc. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 2050 -2053 (2014)	有	2014/11/7
35	N. Kojima, H. Nakamura, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Growth of (InXGa1-X)2Se3 Buffer Material for Spalling a III-V Overlayer via Van Der Waals Interface	Proc. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 2063-2065 (2014)	有	2014/11/7
36	K. Kashima, A. Fukuyama,	宮崎大学	Nitrogen related deep levels in GaAsN films investigated by a	Materials Science Forum 725, pp. 93-96 (2012)	有	2012/6/1

	Y. Nakano, M. Inagaki, H. Suzuki, M. Yamaguchi, and T. Ikari		temperature dependence of piezoelectric photothermal signal			
37	H. Suzuki, T. Sasaki, S. Yamamoto, Y. Ohshita, A. Fukuyama, and M. Yamaguchi	宮崎大学	Distribution of Misfit Dislocations at the InGaAs/GaAs(001) Interface Observed by Monochromatic X-ray Topography	Materials Science Forum 725, pp. 85-88 (2012)	有	2012/6/1
38	H. Yano, H. Nagai, K. Tamura, K. Araki, K. Nishioka	宮崎大学	Two-Dimensional Mapping of Localized Characteristics of Concentrator Photovoltaic Module	Materials Science Forum, Volume 725, 187-190, 2012	有	2012/6/1
39	K. Nishioka, K. Ikematsu, Y. Ota, and K. Araki	宮崎大学	Sandblasting durability of acrylic and glass Fresnel lenses for concentrator photovoltaic modules	Solar Energy, Volume 86, Issue 10, 3021-3025 (2012)	有	2012/10/1
40	K. Nabemoto, Y. Sakurada, Y. Ota, K. Takami, H. Nagai, K. Tamura, K. Araki, and K. Nishioka	宮崎大学	Effect of Anti-Soiling Layer Coated on Poly(methyl methacrylate) for Concentrator Photovoltaic Modules	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 51, No. 10, Issue 2, 10ND11.1-3 (2012)	有	2012/10/1
41	K. Nishioka, Y. Ota, K. Tamura, and K. Araki	宮崎大学	Heat reduction of concentrator photovoltaic module using high radiation coating	Surface and Coatings Technology, Volume 215, 472-475 (2013)	有	2013/1/1
42	H. Suzuki, A. Fukuyama and T. Ikari	宮崎大学	Acceptor levels due to a complex including the nitrogen-hydrogen bond in GaAsN films grown by chemical beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics 52, pp. 051001-1-5 (2013)	有	2013/1/1
43	Y. Ota, T. Sueto, H. Nagai, K. Araki and K. Nishioka	宮崎大学	Reduction of Operating Temperature in 25 Series-Connected 820X CPV	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 52, 04CR03-1~4 (2013)	有	2013/3/1
44	K. Yoshino, K. Nishioka, A. Fukuyama,	宮崎大学	Photovoltaic systems in University of Miyazaki	Applied Mechanics and Materials 372, pp. 555-558 (2013)	有	2013/3/1

	H. Suzuki, and M. Otsubo					
45	H. Suzuki D. Ito, A. Fukuyama. T. Ikari	宮崎大学	Reduction of rotational twin formation by indium pre-evaporation in epitaxially grown GaAs films on Si(111) substrate	Journal of Crystal Growth 380 (2013) 148-152	有	2013/10/1
46	T. Sueto, Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大学	Suppression of dust adhesion on a concentrator photovoltaic module using an anti-soiling photocatalytic coating	Solar Energy, Volume 97, 414-417 (2013)	有	2013/11/1
47	H. Suzuki A. Suzuki, A. Fukuyama. T. Ikari	宮崎大学	Nitrogen-Induced Localized Level Observed by Photorefectance in GaAsN Thin Films Grown by Chemical Beam Epitaxy	Journal of Crystal Growth 384 (2013) 5-8	有	2013/12/1
48	K. Nomura, Y. Ota, T. Minemoto and K. Nishioka	宮崎大学	Output Estimation of Concentrator Photovoltaic Using Mappings of Environmental and Performance Ratio	ACTA PHYSICA POLONICA A, Volume 125, No. 4, 1021-1023 (2014)	有	2014/4/1
49	<u>A.</u> Fukuyama, T. Aihara, Y. Yokoyama, M. Kojima, H. Fujii, H. Suzuki, M. Sugiyama, Y. Nakano, and T. Ikari	宮崎大学	Effect of internal electric field on non-radiative carrier recombination in strain-balanced InGaAs/GaAsP multiple quantum well solar cells	Physica Status Solidi A 211, pp. 444-448 (2014)	有	2014/5/1
50	K. Nomura, Y. Ota, T. Minemoto, and K. Nishioka	宮崎大学	Seasonal variation of performance in concentrator photovoltaic system	physica status solidi (c), Volume 11, Issue 7, 1427-1430 (2014)	有	2014/9/1
51	T. Aihara, A. Fukuyama, Y. Yokoyama, M. Kojima, H. Suzuki, M. Sugiyama, Y. Nakano, and T. Ikari	宮崎大学	Detection of miniband formation in strain-balanced InGaAs/GaAsP quantum well solar cells by using a piezoelectric photothermal spectroscopy	Journal of Applied Physics 116, 044509-1-6 (2014)	有	2014/10/1
52	Osamu	旭化成	Sb Irradiation effect	Journal of Crystal	有	2013/9/1

	Morohara, Hirohata Geka, Yoshitaka Moriyasu, Naohiro Kuze	(株)	on Growth of GaAs Thin Film on Si (111) Substrate	Growth 378:113- 116		
53	Y. Okada, K. Yoshida, Y. Shoji, A. Ogura, P. G.-Linares, A. Martí, and A. Luque	東京大学	The effect of concentration on the performance of quantum dot intermediate-band solar cells	AIP Conference Proceedings Vol. 1477, 10, 2012	有	2012年4 月
54	N. Miyashita, N. Ahsan, M. Inagaki, M. M. Islam, M. Yamaguchi, and Y. Okada	東京大学	High electron mobility in Ga(In)NAs films grown by molecular beam epitaxy	Applied Physics Letters Vol.101, 222112, 2012	有	2012年11 月
55	R. Oshima, J. Huang, N. Miyashita, K. Matsubara, Y. Okada, and F. A. Ponce	東京大学	Transmission electron microscopy study of GaInNAs(Sb) thin films grown by atomic hydrogen- assisted molecular beam epitaxy	Applied Physics Letters Vol. 99, 191907, 2011	有	2012年11 月
56	M. M. Islam, N. Miyashita, N. Ahsan, T. Sakurai, K. Akimoto, and Y. Okada	東京大学	Identification of defect types in moderately Si-doped GaInNAsSb layer in p-GaAs/n- GaInNAsSb/n-GaAs solar cell structure using admittance spectroscopy	Journal of Applied Physics Vol.112, 114910, 2012	有	2012年12 月
57	N. Miyashita, N. Ahsan, M. M. Islam., and Y. Okada	東京大学	Effect of antimony on uniform incorporation of nitrogen atoms in GaInNAs films for solar cell application	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 111, 127, 2013	有	2013年1 月
58	M. M. Islam., N. Miyashita, N. Ahsan, T. Sakurai, K. Akimoto, and Y. Okada	東京大学	Photocapacitance study of MBE grown GaInNAsSb thin film solar cells	Journal of Crystal Growth Vol. 378, 57, 2013	有	2013年1 月
59	M. M.	東京大学	Defect study of	Applied Physics	有	2013年2



	Islam., N. Miyashita, N. Ahsan, and Y. Okada		molecular beam epitaxy grown undoped GaInNAsSb thin film using junction-capacitance spectroscopy	Letters 102, 074104, 2013		月
60	F. K. Tutu, P. Lam, J. Wu, N. Miyashita, Y. Okada, K-H. Lee, N. J. Ekins-Daukes, J. Wilson, and H. Liu	東京大学	InAs/GaAs quantum dot solar cell with an AlAs cap layer	Applied Physics Letters Vol. 102, 163907, 2013	有	2013年4月
61	T. Sogabe, A. Ogura, M. Ohba, and Y. Okada	東京大学	Self-consistent electrical parameter extraction from bias dependent spectral response measurements of III-V multi-junction solar cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2013 (online available)	有	2013年6月
62	F. K. Tutu, J. Wu, P. Lam, M. Tang, N. Miyashita, Y. Okada, J. Wilson, R. Allison, and H. Liu	東京大学	Antimony mediated growth of high-density InAs quantum dots for photovoltaic cells	Applied Physics Letters Vol. 103, 043901, 2013	有	2013年7月
63	K. Watanabe, Y. Wang, H. Sodabanlu, M. Sugiyama, Y. Nakano	東京大学	Analysis for current-voltage characteristics of the InGaAs/GaAsP super-lattice solar cells under optical concentration	AIP Conference Proceedings Vol. 1556, 62, 2013	有	2013年8月
64	N. Miyashita, N. Ahsan, M. M. Islam., and Y. Okada	東京大学	Composition control of quinary GaInNAsSb alloy grown by molecular beam epitaxy	Physica Status Solidi C Vol. 10, 1369, 2013	有	2013年10月
65	T. Sogabe, A. Ogura, C.-Y. Hung, V. Evstropov, M. Mintairov, M. Shvarts, and Y. Okada	東京大学	Experimental characterization and self-consistent modeling of luminescence coupling effect in III-V multijunction solar cells	Applied Physics Letters Vol. 103, 263907, 2013	有	2013年12月
66	T. Sogabe,	東京大学	Analysis of bias	Journal of	有	2014年2

	A. Ogura, Y. Okada		voltage dependent spectral response in Ga <sub>0.51</sub> In <sub>0.49</sub> P/Ga <sub>0.9</sub> 9In <sub>0.01</sub> As/Ge triple junction solar cell	Applied Physics Vol. 115, 7, 074503, 2014		月
67	T. Sogabe, Y. Shoji, M. Ohba, K. Yoshida, R. Tamaki, H.-F. Hong, C.-H. Wu, C.-T. Kuo, S. Tomić, and Y. Okada	東京大学	Intermediate-band dynamics of quantum dots solar cell in concentrator photovoltaic modules	Scientific Reports Vol. 4, 4972, 2014	有	2014年4月
68	A. Ogura, T. Sogabe, M. Ohba, and Y. Okada	東京大学	Extraction of electrical parameters in multi-junction solar cells from voltage dependent spectral response without light bias	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 53, 066601-1~5, 2014	有	2014年4月
69	H. Sodabanlu, Y. Wang, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東京大学	Growth of InGaAs/GaAsP multiple quantum well solar cells on mis-orientated GaAs substrates	Journal of Applied Physics, Vol. 115, 233104, 2014	有	2014年7月
70	岡田至崇	東京大学	次世代高効率太陽電池～基礎研究から実証実験まで～	日本結晶成長学会誌, 特集, Vol. 41, No. 2, pp. 56, 2014	有	2014年7月
71	R. Tamaki, Y. Shoji, Y. Okada, and K. Miyano	東京大学	Spectrally resolved intraband transitions on two-step photon absorption in InGaAs/GaAs quantum dot solar cell	Applied Physics Letters Vol. 105, 073118, 2014	有	2014年8月
72	P. G. Linares, E. López, I. Ramiro, A. Datas, E. Antolín, Y. Shoji, T. Sogabe, Y. Okada, A. Martí, A. Luque	東京大学	Voltage limitation analysis in strain-balanced InAs/GaAsN quantum dot solar cells applied to the intermediate band concept	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 132, 178~182, 2014	有	2014年9月
73	M. M. Islam, N. Miyashita, N. Ahsan, T. Sakurai, K. Akimoto,	東京大学	Effect of antimony on the deep-level traps in GaInNAsSb thin films	Applied Physics Letters Vol. 105, 112103, 2014	有	2014年9月

	and Y. Okada					
74	K. Toprasertpong, H. Fujii, T. Thomas, M. Führer, D. Alonso-Álvarez, D. J. Farrell, K. Watanabe, Y. Okada, N. J. Ekins-Daukes, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Absorption Threshold Extended to 1.15 eV Using InGaAs/GaAsP Quantum Wells for Over-50%-efficient Lattice-matched Quad-junction Solar Cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2014 (online available)	有	2014年11月
75	Y. Ikeuchi, T. Inoue, M. Asada, Y. Harada, T. Kita, E. Taguchi, and H. Yasuda	神戸大学	Multidirectional Observation of Photoluminescence Polarization Anisotropy in Closely Stacked InAs/GaAs Quantum Dots	Applied Physics Express Vol. 4, 062001, 2011	有	2011年6月
76	W. G. Hu, Y. Harada, A. Hasegawa, T. Inoue, O. Kojima, and T. Kita	神戸大学	Intermediate Band Photovoltaics Based on Interband-intraband Transitions Using In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As/InP Superlattice	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol. 19, 1~9, 2011	有	2011年8月
77	T. Kita, R. Hasegawa, and T. Inoue	神戸大学	Suppression of Nonradiative Recombination Process in Directly Si-doped InAs/GaAs Quantum Dots	Journal of Applied Physics Vol. 110, 103511, 2011	有	2011年11月
78	O. Kojima, N. Tobita, T. Kita, and K. Akahane	神戸大学	Dynamics of Above-Barrier State Excitons in Multi-Stacked Quantum Dots	Journal of Applied Physics Vol. 110, 093515, 2011	有	2011年11月
79	T. Kita, T. Maeda, and Y. Harada	神戸大学	Carrier Dynamics of the Intermediate State in InAs/GaAs Quantum Dots Coupled in a Photonic Cavity Under Two-Photon Excitation	Physical Review B Vol. 86, 035301, 2012	有	2012年7月
80	H. Tanaka, O. Kojima, T. Kita, and K. Akahane	神戸大学	Enhancement of Optical Anisotropy by Interconnection Effect along Growth Direction in Multistacked	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 52, 012001, 2012	有	2012年12月

			Quantum Dots			
81	A. Takahashi, T. Ueda, Y. Bessho, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	One-Dimensional Miniband Formation in Closely Stacked InAs/GaAs Quantum Dots	Physical Review B Vol. 87, 235323, 2013	有	2013年6月
82	Y. Harada, T. Maeda, and T. Kita	神戸大学	Intraband Carrier Dynamics in InAs/GaAs Quantum Dots Stimulated by Bound-to-Continuum Excitation	Journal of Applied Physics Vol. 113, 223511, 2013	有	2013年6月
83	Y. Bessho, Y. Harada, T. Kita, R. Taguchi, and H. Yasuda	神戸大学	Control of Stacking Direction and Optical Anisotropy in InAs/GaAs Quantum Dots by In Flux	Journal of Applied Physics Vol. 114, 033517-1~5, 2013	有	2013年7月
84	喜多隆	神戸大学	自己形成過程を原子レベルで制御した量子ドットの作製と高機能光応答の実現	スマートプロセス学会誌, Vol. 2, No. 5, 206~212, 2013. 9	有	2013年8月
85	M. Suwa, A. Takahashi, T. Ueda, Y. Bessho, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Polarization Controlled Emission from Closely Stacked InAs/GaAs Quantum Dots	Physica Status Solidi (c) Vol. 10, 1492~1495, 2013	有	2013年10月
86	喜多隆	神戸大学	(Invited Paper)半導体量子ドット配列構造による新規光機能の実現	Nanotech Japan Bulletin, Vol. 6, No. 6, 1~9, 2013	有	2013年12月
87	Y. Harada, M. Yamamoto, T. Baba, and T. Kita	神戸大学	Epitaxial Two-Dimensional Nitrogen Atomic Sheet in GaAs	Applied Physics Letters Vol. 104, 041907-1~4, 2014	有	2014年1月
88	O. Kojima, K. Hayashi, T. Kita, and K. Akahane	神戸大学	Pulse Modulation Towards Low-Power Operation Based on the Quantum Beat of Excitons in a GaAs/AlAs Multiple Quantum Well	Journal of Physics D Vol. 47, 105101-1~5, 2014	有	2014年1月
89	N. Kasamatsu, T. Kada, A. Hasegawa, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Effect of Internal Electric Field on InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cells	Journal of Applied Physics Vol. 115, 083510-1~5, 2014	有	2014年2月
90	喜多隆、原田幸弘	神戸大学	中間バンド型高効率太陽電池—量子ナノ構造中における光キャリアダイナミクス—	応用物理, 解説, Vol. 83, No. 5, pp. 348-355, 2014	有	2014年5月
91	S. Asahi, H. Teranishi,	神戸大学	Suppression of Thermal Carrier	Journal of Applied Physics	有	2014年8月

	N. Kasamatsu, T. Kada, T. Kaizu, and T. Kita		Escape and Efficient Photo-Carrier Generation by Two-Step Photon Absorption in InAs Quantum Dot Intermediate-Band Solar Cells Using a Dot-in-Well Structure	Vol. 116, 063510, 2014		
92	O. Kojima, S. Okumura, T. Kita, and K. Akahane	神戸大学	Effect of Exciton Oscillator Strength on Up-conversion Photoluminescence in GaAs/AlAs Multiple Quantum Wells	Applied Physics Letters Vol. 105, 181901, 2014	有	2014年10月
93	D. Watanabe, N. Kasamatsu, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Hot-Carrier Solar Cells Using Low-Dimensional Quantum Structures	Applied Physics Letters Vol. 105, 171904, 2014	有	2014年10月
94	高本達也	シャープ(株)	化合物多接合型太陽電池	日経エレクトロニクス	有	2011/5/1
95	高本達也	シャープ(株)	超高効率太陽電池の最新動向	オプトニューズ誌「テクノロジー・トレンド」	有	2011/5/1
96	D.Nishi, T.Ueda and Y.Hishikawa	(独)産業技術総合研究所	Approach to precise indoor characterization of multi-junction CPV cells using concentrator component cells	AIP Conference Proceedings 1556, 133	有	2013/7/5
97	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Kazuyuki Tamura	大同特殊鋼(株)	Fatigue Failure of Concentrator III-V Solar Cells - Does Forward Bias Current Injection Really Kill III-V CPV Cells?	AIP Conf. Proc. 1477, pp. 281-284	有	2013/7/5
98	Kenji Araki	大同特殊鋼(株)	Two Interactive and Practical Methods for Optimization of Tracker Allocation in a Given Land	AIP Conf. Proc. 1477, pp. 244-247	有	2013/7/5
99	Kenji Araki	大同特殊鋼(株)	Proposal of an energy rating method fair to countries of lower irradiance resources	AIP Conf. Proc. 1477, pp. 344-347	有	2013/7/5
100	Kenji Araki	大同特殊鋼(株)	Solving Optimization Problem of Space Factor of Multiple CPV Trackers Using "Butterfly Approach	AIP Conf. Proc. 1616, pp. 224 - 227.	有	2013/7/5
101	Yasuyuki Ota, Kenji	宮崎大学	Impact of volcanic ash on CPV system in	AIP Conference Proceedings (8TH	有	2012/4/1

	Araki, and Kensuke Nishioka		Miyazaki Japan	INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCENTRATING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: CPV-8), Volume 1477, 340-343		
102	Yasuyuki Ota, Hirokazu Nagai, Kenji Araki, and Kensuke Nishioka	宮崎大学	Temperature distribution in 820X CPV module during outdoor operation	AIP Conference Proceedings (8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCENTRATING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: CPV-8), Volume 1477, 364-367	有	2012/4/1
103	Yasuyuki Ota, Hirokazu Nagai, Kenji Araki, Kensuke Nishioka	宮崎大学	Thermal Transfer Simulation For Concentrator Photovoltaic Receiver Under Concentration Condition	AIP Conference Proceedings (9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCENTRATING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: CPV-9), Volume 1556, 18-21	有	2013/4/1
104	Husyira Al Husna, Naoki Shibata, Naoki Sawano, Seiya Ueno, Yasuyuki Ota, Takashi Minemoto, Kenji Araki, Kensuke Nishioka	宮崎大学	Impact of spectral irradiance distribution and temperature on the outdoor performance of concentrator photovoltaic system	AIP Conference Proceedings (9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCENTRATING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: CPV-9), Volume 1556, 252-255	有	2013/4/1

## 2. 分科会における説明資料

次ページより、プロジェクト推進部署・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

# 「革新的太陽光発電技術研究開発」

(2008年度～2014年度 7年間)

事後評価説明資料 (公開)

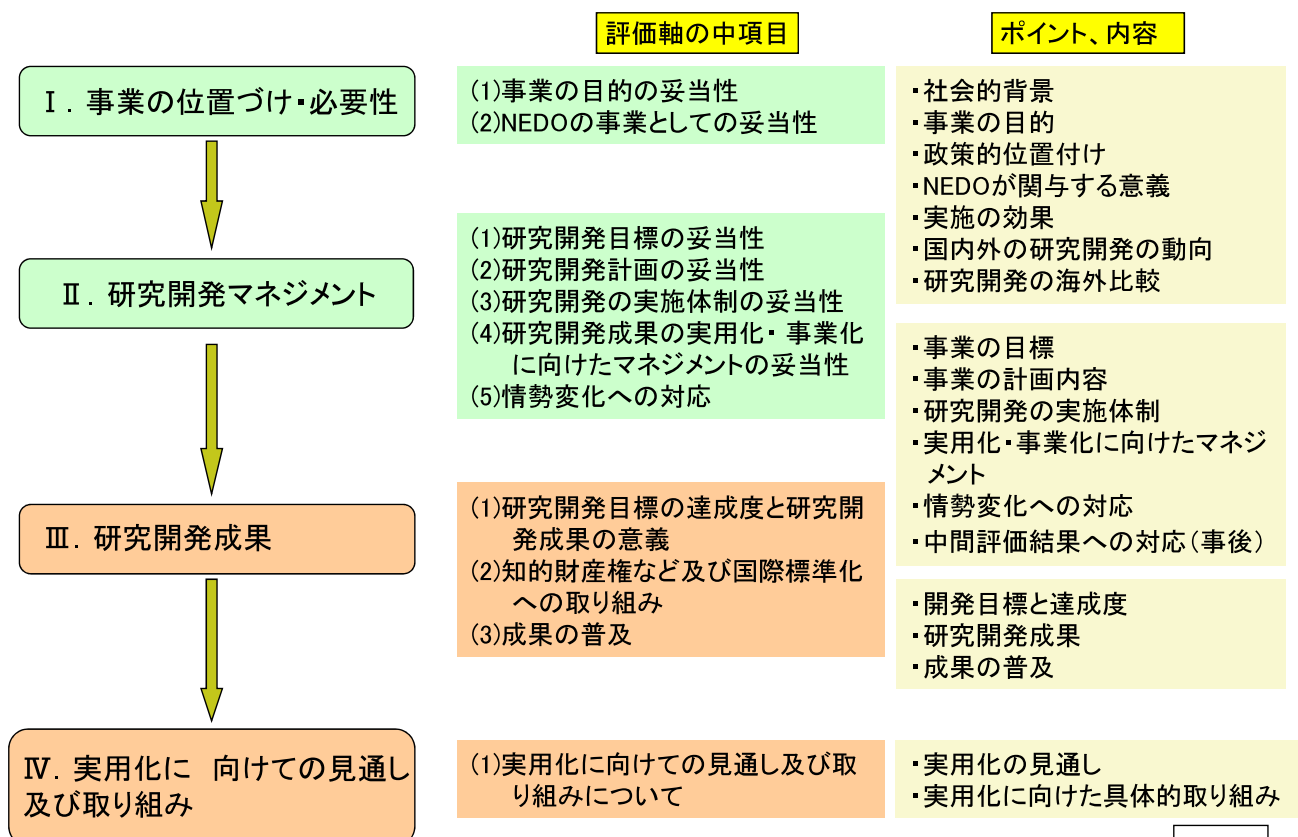
NEDO

新エネルギー部

2015年 11月 13日

1 / 42

## 発表内容



2 / 42



－上位施策の概要－

**新エネルギー技術開発プログラム**（経済産業省 2005年3月制定）＜抜粋＞

目的：新エネルギーは各種メリットが期待できる貴重なエネルギーであるが、現時点では出力の不安定や高コスト等の課題を抱えている。このため当面は補完的エネルギーと位置づけつつ、コスト低減や性能向上等の技術開発等について、産学官関係者が協力して戦略的に取り組むことにより、長期的にはエネルギー源の一翼を担うことを目指した研究開発を実施する。

**エネルギーイノベーションプログラム**（経済産業省 2008年4月制定）＜抜粋＞

目的：資源に乏しい我が国が将来に渡り持続的発展を達成するためには、革新的なエネルギー技術の開発・導入・普及によって、各国に先んじて次世代のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。エネルギー安全保障の確立や世界全体の温室ガスを2050年までに半減するという長期目標を達成するため以下に政策の柱毎に目的を示す。

1-Ⅲ 新エネルギー等の開発・導入促進：太陽光、風力、バイオマスなどの新エネルギーはエネルギー源の多様化や地球温暖化対策の観点から重要である。しかし、現時点では経済性や出力安定性といった普及へ向けての課題が存在する。そのため、これらの課題解決に向けた技術開発の推進及び新エネルギーの導入促進のための関連施策の実施により、更なるエネルギーの普及を推進する。

**Cool Earth－エネルギー革新技術計画**（経済産業省 2008年3月制定）＜抜粋＞

エネルギー分野において、世界トップ水準の技術を有する我が国は、世界をリードできる技術分野に研究開発資源を重点化し、技術開発を加速・推進することにより、我が国の競争力を強化・維持しつつ、技術は我が国の貴重な資源であるとの認識に立った上で、国際的な連携を強力に推進し、世界全体での2050年までの大幅削減に積極的に貢献していくことが必要である。2050年の大幅削減に向け我が国として重点的に取り組むべき技術を特定した上で、長期にわたる技術開発を着実に進めるためのマイルストーンとして、各技術の開発に向けたロードマップを作成した。

－上位施策の概要－

Cool Earth－エネルギー革新技術計画（2008年3月）

－計画の狙い－

- 「世界全体の温室効果ガス排出量を2050年までに半減」という長期目標達成に向け、
  - ・従来の延長線上にない革新的なエネルギー技術開発が不可欠。
  - ・我が国が誇る世界トップ水準のエネルギー技術によって、世界をリード。
- このため、重点的に取り組むべき技術を特定、ロードマップを作成するとともに、国際連携のあり方を検討。

－重点的に取り組むべき「21」のエネルギー革新技術－



## －「太陽エネルギー技術研究開発」基本計画の概要－

### 目的

環境と調和した健全な経済産業活動と安全・安心な国民生活の実現を図るため、クリーンエネルギーである太陽光発電の更なる普及が要望されている。太陽光発電の更なる普及を実現するためには、これまでに蓄積した技術の更なる高効率化、共通基盤技術の発展及び低コスト化を可能とする革新的技術の開発が不可欠である。本プロジェクトは、経済性・出力安定性といった課題を克服し、新エネルギー等の自律的な普及を図ることを目標とするエネルギーイノベーションプログラムの一環として実施する。

太陽光発電の急速な普及を背景に、海外においても、太陽光発電技術の開発が精力的に取り組まれており、太陽光発電ロードマップ（PV2030+）で示された技術課題の解決に向け、まさに、グローバルな開発競争となっている。我が国は太陽光発電の技術開発及びその導入量・生産量において長らく世界一を誇っていたが、欧州を中心に行われている導入普及政策により、市場の中心は欧州へと移り始めており、我が国の地位確立のためには、これまで以上の技術開発が必要となっている。このため、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）は、産学の科学的知見を結集して太陽光発電の技術開発を行い、これを産業技術へ繋げていくとともに、社会の共通基盤として情報の整備、提供を通じて、行政、産業界、地域住民等の間で科学的知見に基づいた正確かつ適切な認識の醸成を図ることを目的に、本プロジェクトを実施する。

### 目標

太陽光発電ロードマップに示された2020年の発電コスト14円/kWh、2030年の7円/kWh、**2050年の7円/kWh未満達成に資する技術の開発を目標とする。**

### 内容：

- ①革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事業） [委託事業]
- ②太陽光発電システム次世代高性能技術の開発 [委託事業、共同研究事業（負担率：2/3）]
- ③有機系太陽電池実用化先導技術開発 [助成事業（負担率：2/3）]

5/42

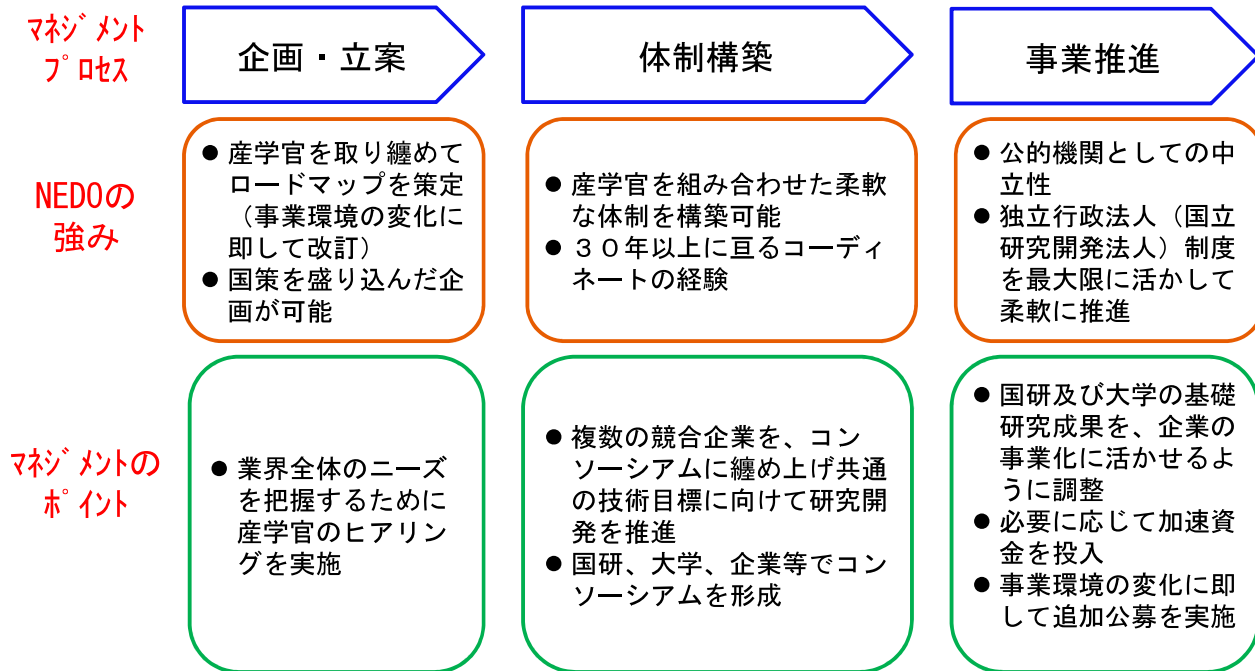
## －公的関与の意義－

・・・エネルギー技術開発は長期間を要するとともに大規模投資を伴う一方で将来の不確実性が大きいことから、民間企業が持続的な取組を行うことは必ずしも容易ではない。このため政府が長期を見据えた将来の技術進展の方向性を示し、官民双方がこの方向性を共有することで、長期にわたり軸のぶれない取組の実施が可能となる。・・・

（エネルギーイノベーションプログラムから抜粋）

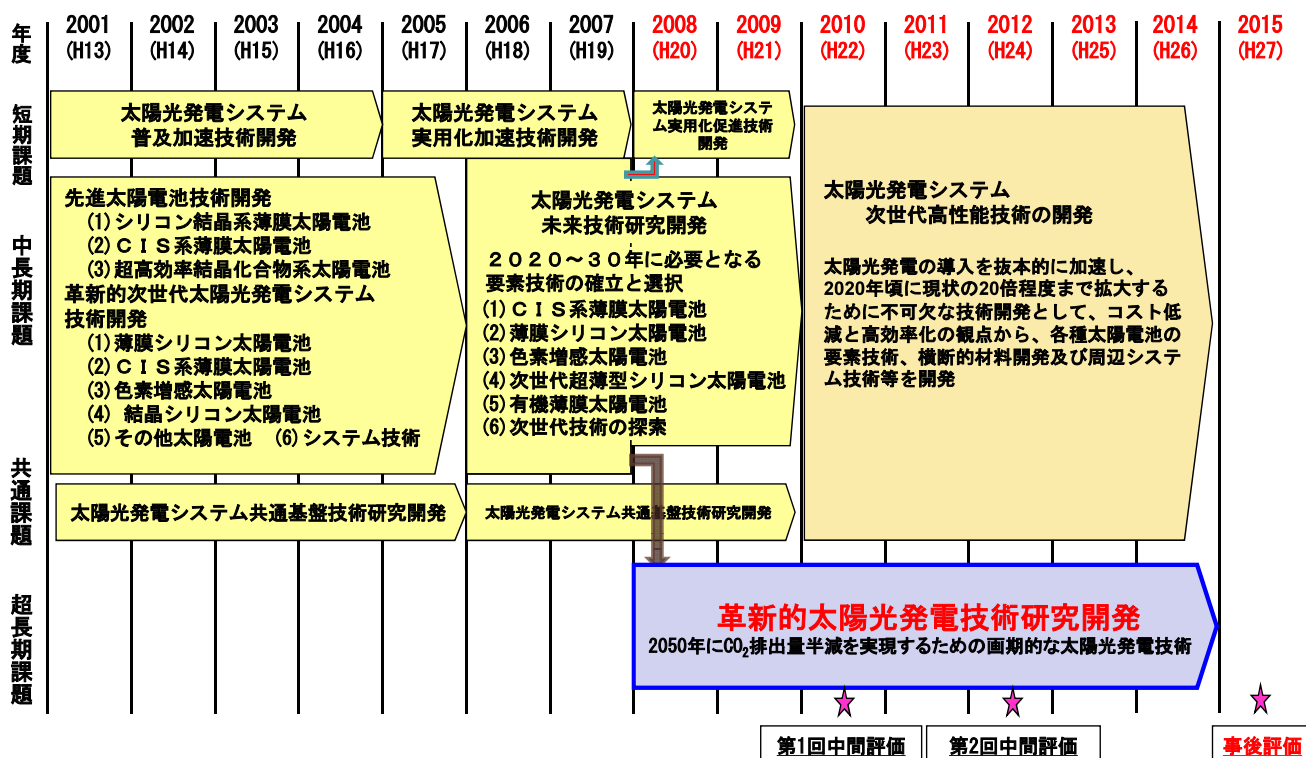
6/42

—NEDO関与の意義—



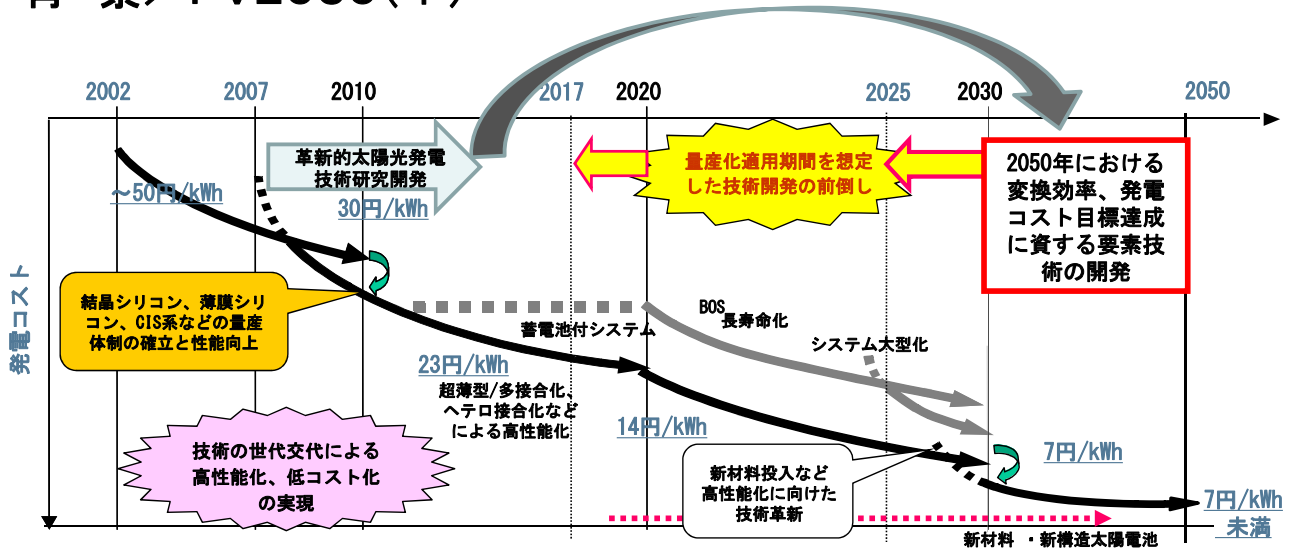
長期的視野に立った技術開発戦略「太陽光発電ロードマップ（PV2030+）」に沿った技術開発

—位置づけ—



2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

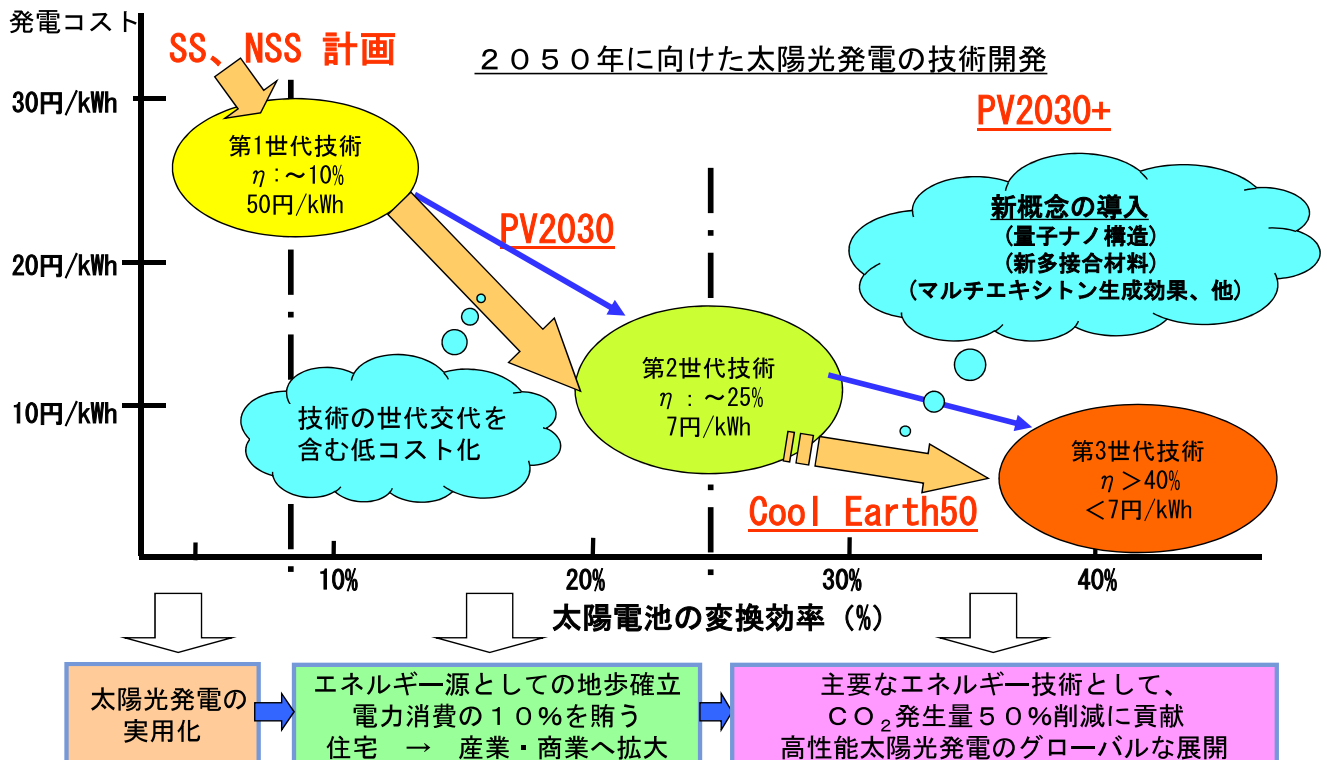
—背景/PV2030(+)—



実現時期(開発完了)	2010~2020年	2020年(2017年)	2030年(2025年)	2050年
発電コスト	家庭用電力並 23円/kWh程度	業務用電力並 14円/kWh程度	汎用電源並み 7円/kWh程度	汎用電源未滿 7円/kWh未滿
モジュール変換効率 (研究レベル)	実用モジュール16% (研究セル20%)	実用モジュール20% (研究セル25%)	実用モジュール25% (研究セル30%)	超高効率モジュール 40%
国内向生産量(GW/年)	0.5~1	2~3	6~12	25~35
国外向生産量(GW/年)	~1	~3	30~35	~300

2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

—背景/PV2030(+)—



## －背景/PV2030(+)－

2050年に向けた太陽電池セル・モジュール変換効率目標 (%)

	太陽電池 <sup>1)</sup>	現状※		2017年		2025年		2050年
		モジュール (%)	セル <sup>5)</sup> (%)	モジュール (%)	セル <sup>5)</sup> (%)	モジュール (%)	セル <sup>5)</sup> (%)	モジュール (%)
個別技術の開発目標	結晶Si <sup>2)</sup>	～16	25	20	25	25	(30)	40%の 超高効率 太陽電池 (追加開発)
	薄膜Si	～11	15	14	18	18	20	
	CIS系	～11	20	18	25	25	30	
	化合物系 <sup>3)</sup>	～25	41	35	45	40	50	
	色素増感	－	11	10	15	15	18	
	有機系 <sup>4)</sup>		5	10	12	15	15	

- 1) セルは技術の到達水準を示す指標で、研究室での小面積セル。モジュールは実用化技術段階。  
 2) 結晶シリコンは単結晶、多結晶などを区別せず、シリコン基板を用いた太陽電池として設定。  
 3) 集光時の変換効率。  
 4) 新しい太陽電池として有機系太陽電池にも開発目標を設定した。  
 5) モジュール目標を達成するために最低限必要なセルの変換効率。  
 ※PV2030+策定時(2009年6月時点)

## －事業の目標－

2050年までに「変換効率が40%」かつ「発電コストが汎用電源未満(7円/kWh未満)」の太陽電池を実用化することを目指した研究開発の中で、本研究開発は変換効率40%の実現に向けた技術の基礎・探索研究段階と位置づけて研究開発を実施する。

2. 研究開発マネジメント (2) 研究開発計画の妥当性

ー全体スケジュール・予算ー

研究開発テーマ名	中間評価			中間評価		事後評価	
	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度	H26年度
①ポストシリコン 超高効率太陽電池の研究開発	8件			7件		6件	
②高度秩序構造を有する 薄膜多接合太陽電池の研究開発	14件			13件		9件	
③低倍率集光型 薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発	12件			11件		9件	
④革新的太陽電池評価技術の研究開発 (日米共同開発)	1件						
⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール 及びシステムの開発(日EU共同開発)				5件		5件	
委託先数合計	34	35	35	36	36	29	29

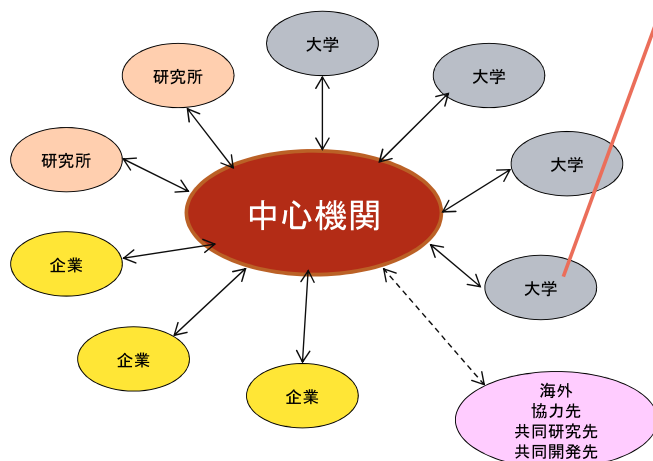
研究開発予算(実績)の推移 [単位: 億円]

研究開発テーマ名	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度	H26年度	総額
①ポストシリコン 超高効率太陽電池の研究開発	14.2	7.3	6.8	6.4	7.9	6.3	5.8	54.7
②高度秩序構造を有する 薄膜多接合太陽電池の研究開発	6.6	4.8	6.3	6.0	5.5	4.5	3.0	36.7
③低倍率集光型 薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発	6.4	5.5	5.4	6.2	5.8	4.4	2.8	36.5
④革新的太陽電池評価技術の研究開発 (日米共同開発)	—	0.3	8.7	—	—	—	—	9.0
⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール 及びシステムの開発(日EU共同開発)	—	—	—	1.6	2.0	1.6	1.1	6.3
合計 特別会計(需給勘定)	27.2	17.9	27.2	20.2	21.2	16.8	12.7	143.2

2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性

ー実施体制ー

東大、産総研、東工大が中心機関となり3グループで研究開発を実施  
更に、米国・EUとの共同開発も追加実施



**国際協力・共同開発**  
世界の最先端技術を持つ研究機関等と協力し研究開発を進める  
(意見交換、サンプル評価等の協力を実施)

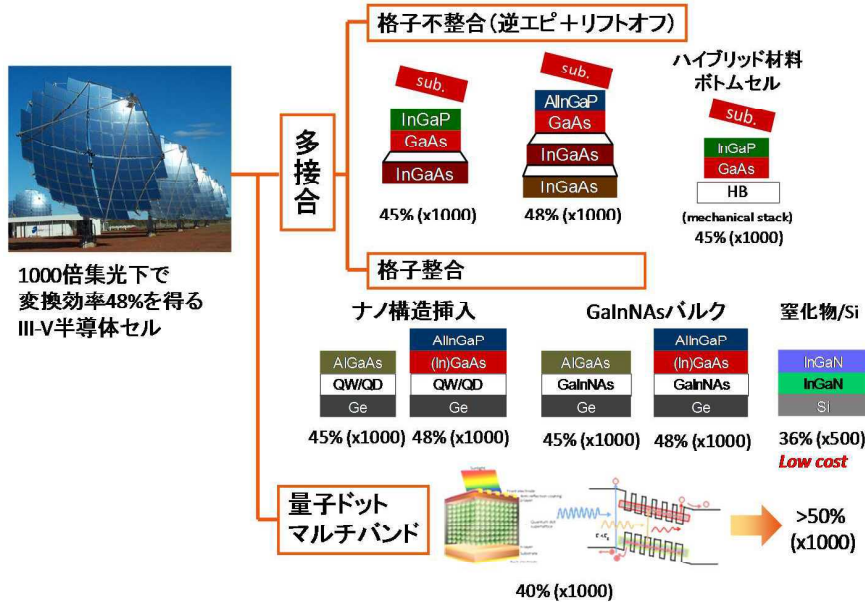
- (東大G)  
マドリッド工科大学 (スペイン)  
フラウンホーファー研究所 (独) 等
- (産総研G)  
ユーリッヒ研究所 (独)  
ヘルムホルツベルリン研究所 (独) 等
- (東工大G)  
ペンシルベニア州立大学 (米)  
ステュットガルト大学 (独) 等
- (日米共同開発)  
NREL (米)
- (日EU共同開発)  
マドリッド工科大学 (スペイン)  
フラウンホーファー研究所 (独) 等

これらの機関は協力先かつコンペティター  
該当機関他の動向について国際学会等で情報  
収集し本研究開発へ反映

一ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発一

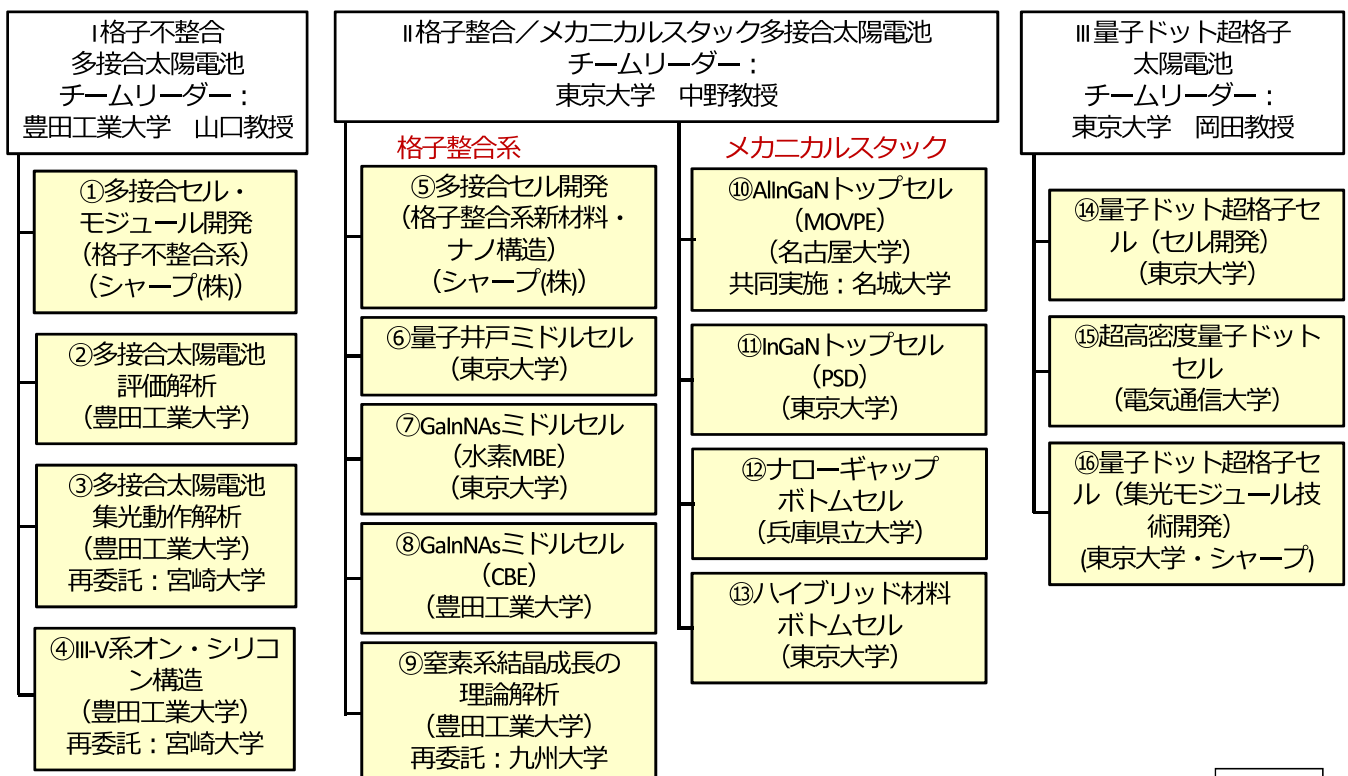
<最終目標>

- III-V族系材料による高集光多接合太陽電池で変換効率45%以上（3接合・1,000倍集光時）、変換効率48%（4接合・1,000倍集光時）を達成する。
- 新概念太陽電池については、窒化物セルにおいて非集光時変換効率20%（単接合）および30%（多接合）、量子ドットマルチバンドセルにおいて27%（非集光時）、40%（集光時）を達成する。
- 高度光利用技術についてはデバイスプロセスと組み合わせて量子ナノ構造層の光吸収を10倍に高め、上記目標の達成に資する。



一ポストシリコン超高効率太陽電池（東大グループ）実施体制 一

プロジェクトリーダー：東京大学大学院工学系研究科・先端科学技術研究センター 教授 中野 義昭

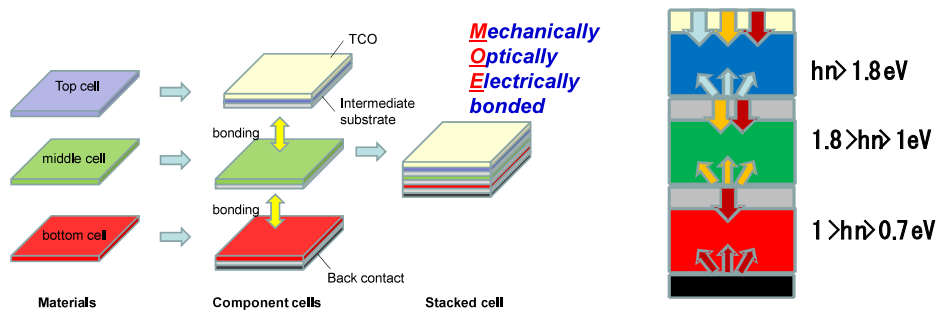


一高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発一

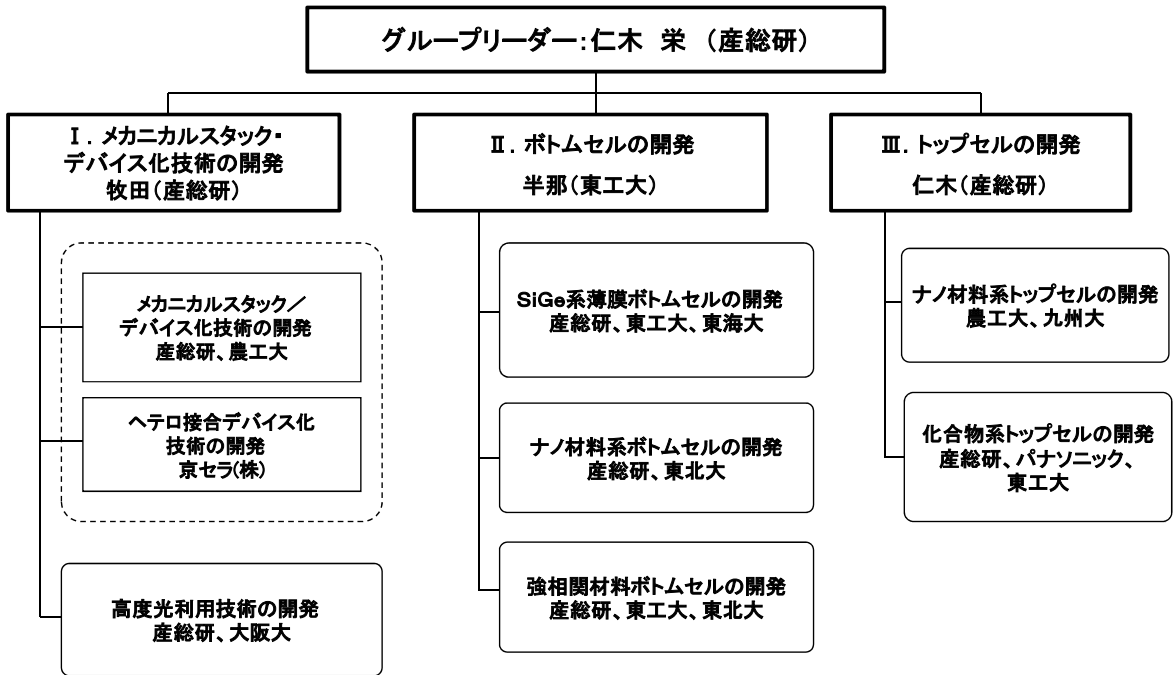
<最終目標>

ボトムセルおよびトップセルについて要素セルの高度化ならびに高度光利用技術の組み合わせにより多接合太陽電池（非集光）で変換効率30%を達成する。またこれをコスト50円/Wで可能とする技術を開発する。

- ◆非集光、低コスト → 薄膜、シリコンやCIS技術も活用
- ◆高効率 → 多接合、秩序構造（単結晶、多結晶薄膜）  
3~4接合（実用性考慮）
- ◆新概念（量子ドット、プラズモン、多重励起子）
- ◆柔軟性 → メカニカルスタック（2端子モノリシック）
- ◆高度光利用 → フォトニック構造、高性能TCO



一高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池（産総研グループ）実施体制一



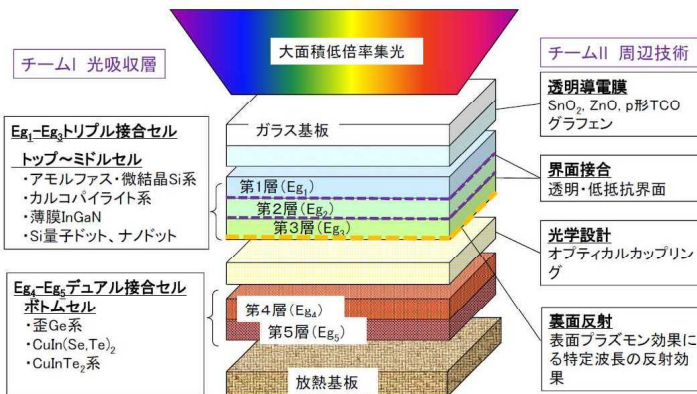


一低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発一

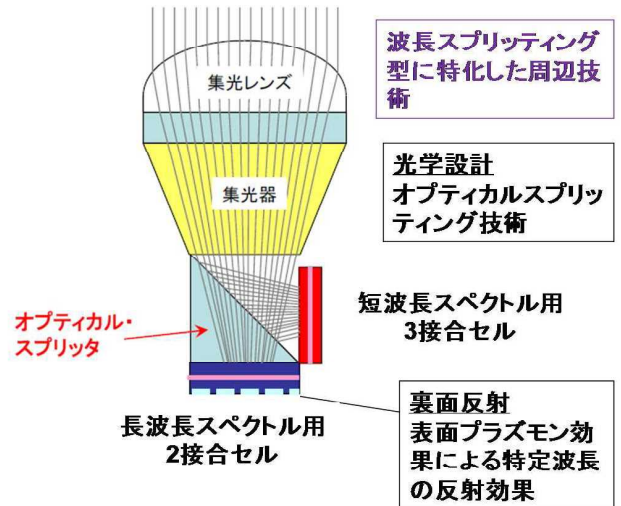
<最終目標>

小面積の5~6接合薄膜フルスペクトルセルにより、真性変換効率40% (低倍率集光、有効受光面積: 1cm<sup>2</sup>) を達成する。

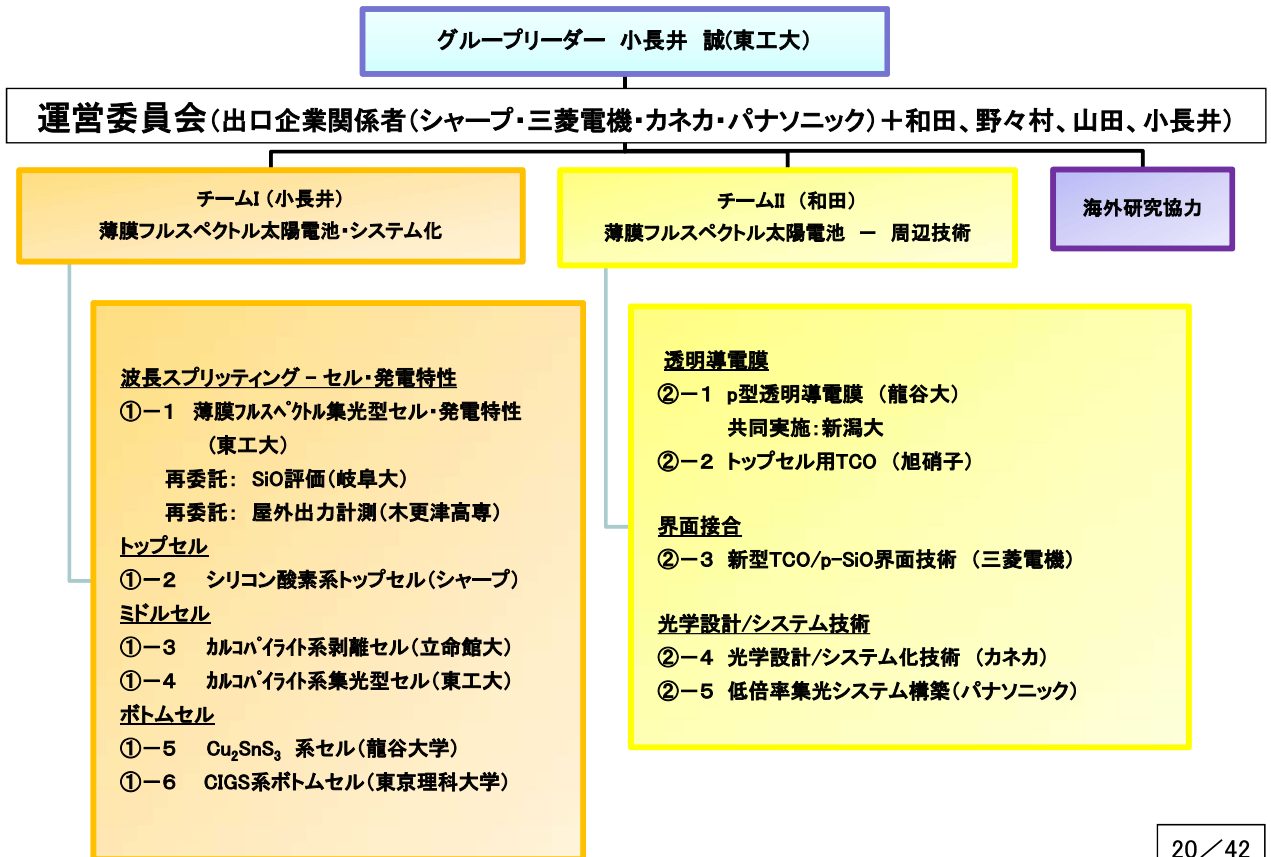
①メカニカルスタック型5接合



②波長スプリッティング型5接合



一低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池 (東工大グループ) 実施体制 一



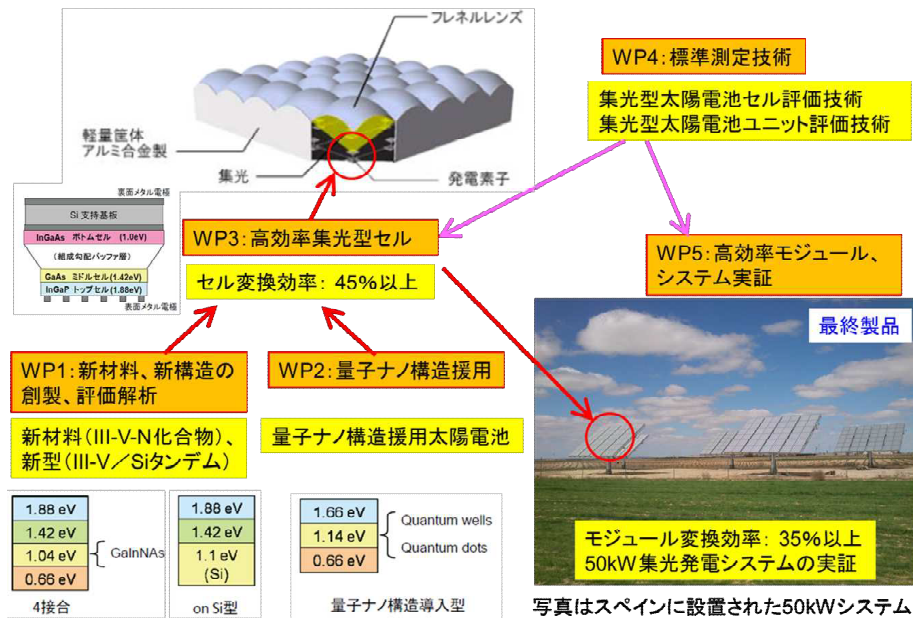
2. 研究開発マネジメント (3)研究開発の実施体制の妥当性

—超高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発(日EU共同開発)—

<最終目標>

- セル変換効率45%以上を達成する。
- モジュール変換効率35%以上を達成する。
- 集光型太陽電池の標準測定技術を確立する。(測定再現性±0.5%以内)

最終製品とサブテーマ(WP)



2. 研究開発マネジメント (3)研究開発の実施体制の妥当性

—超高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発(日EU共同開発) 実施体制—

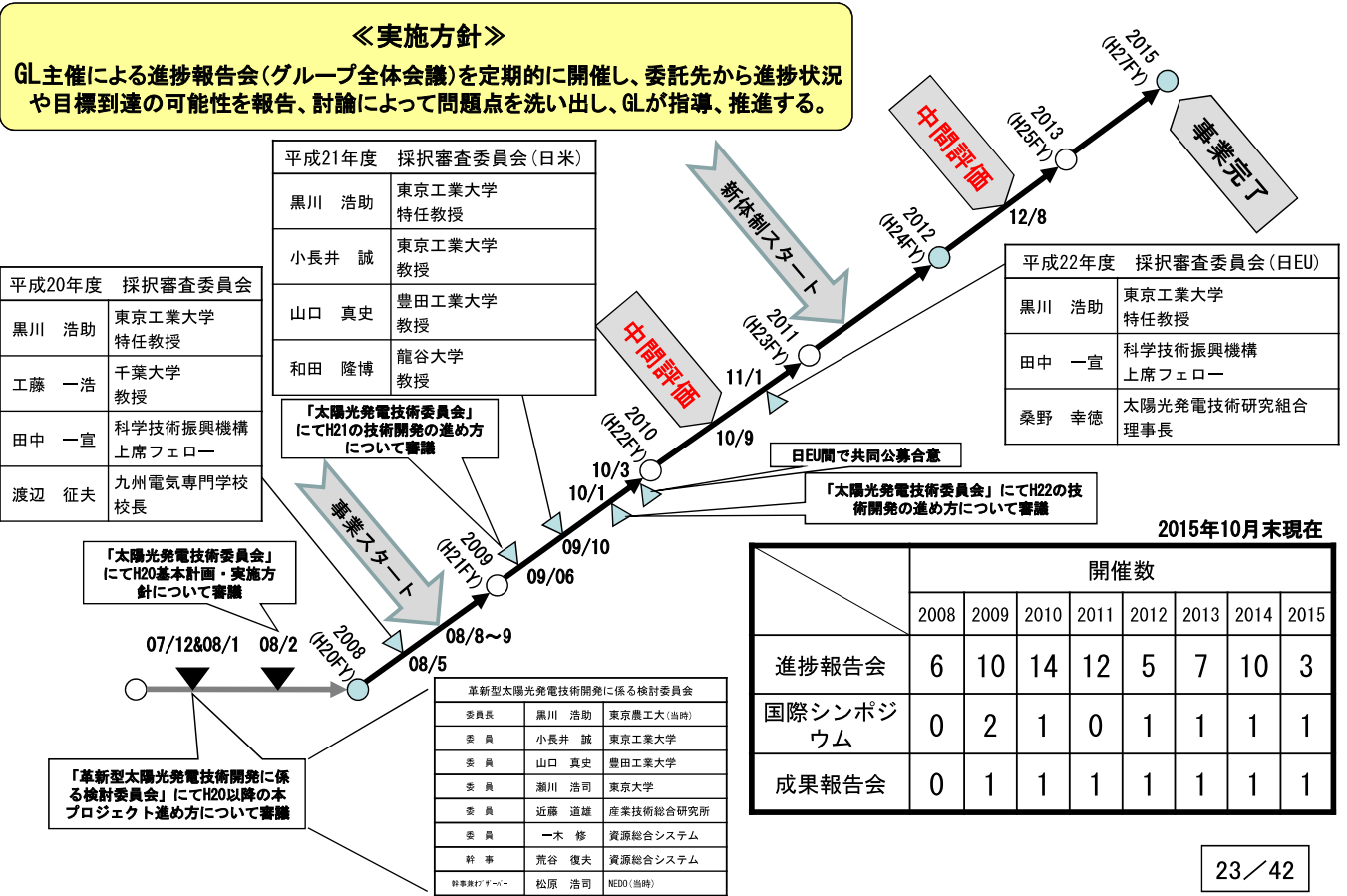
New Generation CPV

次代を担う超高効率集光型太陽光発電の共同研究開発  
A new generation of concentrator photovoltaic cells, modules and systems (NGCPV)  
リーダー: 山口真史(豊田工大)、A. Luque (UPM)  
サブリーダー: 岡田至崇(東大)、A. Bett (Fraunhofer ISE)

- WP1: 新材料、新構造の創製、評価解析  
豊田工大、UPM、東大、宮崎大、旭化成、神戸大、タカノ、FhG-ISE、IC-STM
- WP2: 量子ナノ構造援用  
東大、UPM、豊田工大、宮崎大、神戸大、FhG-ISE、IC-STM
- WP3: 高効率集光型セル  
FhG-ISE、シャープ、豊田工大、宮崎大、UPM
- WP4: 標準測定技術  
産総研、FhG-ISE、大同特殊鋼、UPM、IC-STM、ENEA、BSQ、CEA-INES
- WP5: 高効率モジュール、システム実証  
UPM、大同特殊鋼、宮崎大、BSQ、CEA-INES

UMP: マドリッド工科大<スペイン> FhG-ISE: フラウンホーファー太陽エネルギーシステム研究所<ドイツ>  
IC-STM: インペリアル・カレッジ・ロンドン<イギリス> ENEA: イタリア・新技術・エネルギー・環境庁<イタリア>  
BSQ: BSQソーラー<スペイン> CEA-INES: CEA国家太陽エネルギー研究所<フランス>

2. 研究開発マネジメント (4)研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性  
(5)情勢変化等への対応



2. 研究開発マネジメント (4)研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性  
(5)情勢変化等への対応

—情勢変化への対応—

研究開発の進捗に合わせ、予算増額、追加公募およびテーマの絞り込みを実施

【平成20年度】

- ・より強固な体制での研究開発実施の為、当初示達額18.7億円に対し4.7億円の**予算増額**
- ・補正予算5.0億円で、後年度購入予定装置の一部を前倒し購入し研究開発を加速

【平成21年度】

- ・革新的太陽電池のモジュール評価技術を確立する為、**追加公募**
- ・「ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発」を加速する為、2.1億円の**予算増額**

【平成22年度】

- ・集光型太陽電池のモジュール設計、評価技術を確立する為、**追加公募**
- ・『量子ドット』太陽電池等の開発を加速する為、4.1億円の**予算増額**

【平成23年度】

- ・中間評価の結果を踏まえ、サブテーマ数を71から56に**絞り込み**

【平成24年度】

- ・『3接合化合物』太陽電池の実用化を加速する為、2.5億円の**予算増額**

【平成25年度】

- ・中間評価の結果を踏まえ、サブテーマ数を56から45に**絞り込み**

【平成26年度】

- ・実用化に向けた性能向上技術および低コスト化技術の開発指針策定に向け、1.7億円の**予算増額**

—前回の中間評価結果への対応—

1) 産業の状況が急変し、国際競争が激しさを増していることから、集中と選択を更に進め、将来に向けた必須技術、他国に差別化できる技術の研究開発に予算を重点化する必要がある。また、本プロジェクトの開始時とは状況が異なり、基礎研究についてはJSTなどの事業でも大型の支援が行われているため、実用化に対する開発進捗状況を鑑みNEDOが支援を行うべきかどうか十分な棲み分けを行う必要がある。

- ・ 基盤技術開発(シーズ探索等)フェーズの事業であるという位置づけは維持しつつも、グループ毎に実用化に対する道筋(参画企業の戦略等)を確認。
- ・ 研究テーマの絞り込みを実施。(56 ⇒ 45)
- ・ 状況変化を踏まえて技術開発戦略(ロードマップ)の見直しを進め、本プロジェクトの進捗は、平成27年度開始事業の基本計画立案に反映。

2) 今後、開発した技術を守るために特許化が必要で、周辺特許を含め強い特許とすることが重要である。また、事業化に向けての知財戦略と併せて、特性評価技術、実装技術、入出力条件、安全性等の国際標準化の活動を推進するべきである。

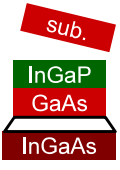
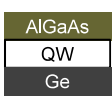
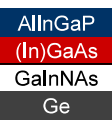
- ・ 知財取得はもちろん、測定方法等については、他のプロジェクトとも連携して標準化を推進。

NEDOの技術開発指針の見直しと技術開発プロジェクト

	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度	平成32年度	...	平成42年度	...		
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020		2030			
<b>【NEDO戦略】</b>	PV2030+							太陽光発電開発戦略 NEDO PV Challenges										
発電コスト低減	革新的太陽光発電技術研究開発							高性能・高信頼性 太陽光発電の 発電コスト低減技術開発										
信頼性向上								太陽光発電システム 次世代高性能技術の開発									太陽光発電システム効率向上 ・維持管理技術開発プロジェクト	
リサイクル										太陽光発電リサイクル 技術開発プロジェクト								
立地制約の解消										有機系太陽電池 実用化先導技術開発								
高付加価値化										太陽光発電多用途化 実証プロジェクト								

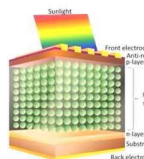
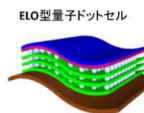
3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度と研究開発成果の意義

－ポストシリコン超高効率太陽電池研究開発の目標と達成状況－

テーマ	最終目標	達成状況	今後の取り組み
<p>格子不整合多接合太陽電池</p>  <p>格子不整合3接合 <math>\eta=45\%</math> (x1000)</p>	<p>格子不整合3接合 <math>\eta=45\%</math> (x1000)</p>	<p><math>\eta=37.9\%</math> (x1) <math>\eta=44.4\%</math> (x302) (ともに世界最高記録)</p>	
<p>格子整合／メカニカルスタック多接合太陽電池</p>  <p>格子整合3接合 <math>\eta=45\%</math> (x1000)</p>	<p>量子井戸挿入3接合セルの開発において、変換効率36%(1sun)、45%(1,000suns)を達成</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>E_g=1.2</math> eVのミドルセル開発は完了</li> <li>3接合セルに実装し、電流整合を確認</li> </ul>	<p>現状のウエハシャトル(原理検証)からMOVPE一貫成長による3接合セル形成に移行電極等の最適化により<math>\eta=45\%</math> (x1000)を実現</p>
<p>格子整合／メカニカルスタック多接合太陽電池</p>  <p>4接合(格子整合) <math>\eta=48\%</math> (x1000)</p>	<p>GaInNAs結晶薄膜を第3セルとした4接合セルの開発において、変換効率38%(1sun)、48%(1,000suns)を達成</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>E_g=1.0</math> eVのGaInNAsセル開発完了</li> <li>ウエハシャトルによりInGaP/GaAs/GaInNAs/Ge 4接合セル動作実証済み</li> </ul>	<p>ウエハシャトルプロセスにおける再成長手法改良、および材料設計の最適化による4接合セル効率向上<math>\eta=48\%</math> (x1000)</p>

3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度と研究開発成果の意義

－ポストシリコン超高効率太陽電池研究開発の目標と達成状況－

テーマ	最終目標	達成状況	今後の取り組み
<p>量子ドット超格子太陽電池</p>  <p>量子ドット超格子セル <math>\eta=40\%</math> (x1000)</p>	<p>超高密度「積層」量子ドットセル <math>\eta=27\%</math>(非集光) <math>\eta=40\%</math>(x1,000)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>単層でドット密度<math>10^{12}</math> /cm<sup>2</sup>を達成(世界最高値)</li> <li>変換効率26.8%(x72)を達成、&gt;35%達成見込み</li> <li>50層積層で<math>&gt;10^{13}</math> /cm<sup>2</sup>のInAs/AlGaAsドットセル開発</li> <li>2段階光吸収特性の実証と評価解析(世界初)</li> </ul>	<p>超高密度・多重積層技術、光閉じ込め技術、素子構造の更なる改良とELO技術の導入により、低コストの量子ドットセル(低倍集光で効率30%)を実現する</p>
<p>量子ドット超格子太陽電池</p>  <p>量子構造挿入極薄GaAsセル <math>\eta=40\%</math> (x1000)</p>	<p>超高密度「積層」量子ドットセル <math>\eta=27\%</math>(非集光) <math>\eta=40\%</math>(x1,000)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ELO法による薄膜InAs/ GaAs量子ドットセルの作製</li> <li>モノリシック集積マイクロ直列セル構造の提案と10直列セルの製作</li> <li>光閉じ込め効果により量子井戸の光吸収を5倍に増大(変換効率20%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高効率と低コストを両立する低倍集光モジュールの設計と試作</li> <li>設計と実装の双方向評価に基づく、光マネジメント構造の最適化</li> </ul>

3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度と研究開発成果の意義

－高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の目標と達成状況－

テーマ	最終目標	達成状況	今後の課題
メカニカルスタック・デバイス化技術	接合技術の高度化により、高度光利用技術と組み合わせて多接合太陽電池(非集光)で変換効率30%を達成する	III-V族化合物セルの直接接合で31.6%	量産性、低コストに適う実用技術への展開(ELO剥離技術、実装技術等の高度化)
高度光利用技術の開発	開発した光閉じ込め構造を用いた太陽電池で相対効率向上20%以上を達成する	微結晶シリコン単接合多層電池において、従来光閉じ込め基板使用時に比べ相対効率向上25%	高度光利用技術の低コスト化
ボトムセルの開発	バンドギャップ0.9eV以上の単接合太陽電池で、1.4eV以下の光に対して電流密度15mA/cm <sup>2</sup> 以上を達成する	SiGe系ヘテロ接合デバイスで1.4eV以下の光に対して電流密度3.4mA/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 薄膜中の不純物およびドーピング等の最適化</li> <li>● デバイス設計の最適化</li> </ul>
トップセルの開発	バンドギャップ1.8eVの太陽電池で変換効率16%を達成する	バンドギャップ1.9eVのInGaP太陽電池で変換効率16.1%	新しい結晶成長技術の開発による作製コストの削減

29 / 42

3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度と研究開発成果の意義

－低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の目標と達成状況－

テーマ	最終目標	達成状況	今後の課題
薄膜フルスペクトル集光型セル・発電特性	ワイドギャップからナローギャップの広い禁制帯幅の領域で、今までにない光吸収層材料を開発するとともに、広い波長範囲で有効に光子を利用するため光のマネージメント技術開発を行う。これらの要素技術をもとに、低倍率集光型薄膜太陽電池を試作し、エネルギー変換効率40%を達成する。	波長スプリットング特性 <ul style="list-style-type: none"> <li>● a-Si:H//CIGS : <math>\eta = 22.9\%</math> (1sun)</li> <li>● a-Si:H//c-Si : <math>\eta = 25.1\%</math> (1sun)</li> <li>● InGaP//CIGS : <math>\eta = 25.9\%</math> (1sun)</li> <li>● InGaP//c-Si : <math>\eta = 29.5\%</math> (1sun)</li> <li>● InGaP//GaAs//CIGS : <math>\eta = 28.9\%</math> (1sun)</li> <li>● InGaP//GaAs//c-Si : <math>\eta = 31.2\%</math> (1 sun)</li> <li>● InGaP//GaAs//c-Si : <math>\eta = \text{約 } 38\%</math> (50 sun)</li> </ul> * (Rs=0と仮定して理論計算)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 集光度に対する最適電極設計</li> <li>● セルの測定温度制御</li> <li>● 低倍率集光薄膜フルスペクトルセルで<math>\eta=30\%</math>を得るためのトップセル、ミドルセルの高品質化</li> <li>● Proof-of-Conceptセルで<math>\eta=40\%</math>の実証</li> <li>● 波長スプリットング低倍率集光測定技術の確立</li> </ul>
光学設計/システム化技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低倍率集光で変換効率40%を達成するためのオプティカルスプリッタ開発</li> <li>● 光学的損失:5%以下</li> <li>● 低倍率集光によるオプティカルスプリットング構造の屋外暴露システムにおける課題を抽出し、暴露による屋外出力変動を取得</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 分離波長を自由に設定可能で、損失の少ないオプティカルフィルターを開発</li> <li>● 低倍率集光装置の屋外設置</li> <li>● a-Siセルとヘテロ接合セルを用いたスプリットング構造にて真性変換効率25%、ペロブスカイトを用いて28%を達成</li> <li>● 屋外低倍率集光装置へのオプティカルスプリットング構造の導入、及び、屋外出力評価を実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 屋外システムの出力変動取得</li> <li>● 実用化に向けた研究開発</li> </ul>

30 / 42

3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度と研究開発成果の意義

－革新的太陽電池評価技術(日米共同開発)の目標と達成状況－

テーマ	最終目標	達成状況	事業終了後の状況
①a)集光型太陽電池屋内評価技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来より高精度太陽電池の高精度評価技術をベースとして、3接合以上の多接合で集光倍率500倍以上に対応できる国際的整合性を持った高精度な評価技術を開発する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>集光倍率500倍以上で集光型多接合太陽電池セルを高精度に測定可能な技術を開発し、米国NRELと共同で測定精度について検証した</li> <li>集光型太陽電池ユニット評価を光線平行度約0.5度以内の定常光で高精度に評価する技術を開発した</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1,000倍以上の基本的な測定可能性を確認した。</li> <li>測定精度の不確かさ検証や改善検討 →スペクトル面内均一性補正等により、高精度化を実現した。上記と共に集光型太陽電池の高精度評価の実施を通してデバイス高性能化、多接合太陽電池測定規格化等に貢献。</li> <li>国際比較測定の継続等による、整合性の高い評価技術の確立、標準化(IEC62670-2 IEC62670-3) →IEC62670-3の屋内測定法の一部として反映されるとともに、高平行度シミュレータの規格化へ貢献</li> </ul>
①b)集光型太陽電池屋外評価技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>集光型太陽電池システムを日米両国に設置し、屋内評価結果と併せて屋外での性能評価技術を開発する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>国内外の3種の多接合型太陽電池を使用した集光型太陽光発電設備(30kW)を岡山市とコロラド州に設置し、異なる気候環境下での実際の発電データを取得した</li> <li>各種気象条件および設置精度がおよぼす集光型太陽電池システムの発電性能を実証的に明らかにした</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CPVに特有なアライメント等を考慮した高精度な発電量評価技術の開発と検証・標準化(IEC62670-2 IEC62670-3) →日米実証データにより、アライメントによる損失が認知され、システム全体の発電性能指標測定法としてIEC62670-2が発行(May, 2015)された。日本を含む亜熱帯地域等のスペクトル特性がIEC62670-3に反映されるよう審議中</li> </ul>

3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度と研究開発成果の意義

－革新的太陽電池評価技術(日米共同開発)の目標と達成状況－

テーマ	最終目標	達成状況	事業終了後の状況
②a)革新的薄膜多接合太陽電池性能評価技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>従来より広いスペクトル領域で感度特性を有するSi系以外および3接合以上を含めた革新的材料および構造を持つ薄膜多接合太陽電池に予測される集積型モジュール構造での評価に対応できる技術を開発する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>革新的多接合太陽電池モジュールの高精度な性能評価に対応可能な技術を開発し、基本性能を検証した</li> <li>新概念太陽電池の照度・面積等の定義測定方法を日米で議論し整合を図った</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>新型薄膜モジュールでの評価精度・整合性の検証 →各種多接合太陽電池の評価を実施し、欧米との比較測定等により精度と整合性を確認した。有機を含めた新型モジュール評価を実施し、デバイス開発、多接合太陽電池測定規格化等に貢献。</li> </ul>
②b)革新的薄膜多接合太陽電池信頼性評価技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>革新的太陽電池およびそれに用いられる新材料の部材・組成・不純物等の評価および基本的な光・熱等の環境に対する信頼性を検証する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CIGS光吸収層の中に形成されるミクロンサイズ粒子の組成分析を行い、CIGS膜の性能を阻害する要因を元素とそのサイズに関して明らかにした</li> <li>ヘテロ接合界面のバンドオフセット量評価が新規太陽電池開発に有効であることをa-Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>:H/c-Geヘテロ接合型太陽電池を用いて確認した</li> <li>薄膜多接合太陽電池に用いられる中間層材料/透明導電材料の評価を実施し、微視的組成や特性と電気特性との相関を明らかにした</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>より発展させ、デバイス構造を有する試料およびデバイスの評価へ展開する →デバイス構造を有する試料のヘテロ接合界面における元素の相互拡散の程度や添加不純物元素の濃度分布を測定し、高性能デバイスの評価に貢献。この評価技術は、後続のNEDOプロジェクト(太陽光発電システム次世代高性能技術の開発)でも有効に活用された。</li> </ul>

3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度と研究開発成果の意義

—超高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発 (日EU共同開発)の目標と達成状況—

テーマ	最終目標	達成状況	今後の課題
新型量子、ナノ構造太陽電池	量子井戸・量子ドット集光型セル中キャリアダイナミクスの評価解析技術の開発<集光効率30%>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● QDセルで、1-sun、72-sunsで、各々、効率17.3%、26.8%を達成</li> <li>● インペリアル・カレッジと東大との連携により、多重量子井戸(MWQ)セルの4、5接合太陽電池用としての有効性を確認(効率&gt;50%)</li> <li>● 新型多接合・量子構造セルの評価装置の設計・構築</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● QD、超格子の効果を明確にし、セル特性の改善に反映させる</li> <li>● N:Sb 3接合太陽電池および量子ドットセルを早期に実現する</li> </ul>
集光型(CPV)セルの標準測定技術の確立	ラウンドロビンによるCPVセル評価において、測定精度の検証、高精度化のための課題明確化<5%以内の整合達成>(測定再現性±0.5%以内)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● FhG-ISEとのCPVセルラウンドロビン実施(1-sun下での性能比較・1.8%(相対値)以内で測定結果の一致を確認)</li> <li>● CPVセル測定技術の改善</li> <li>● シャープ製CPV3接合セルの世界最高効率(44.4%)(FhG-ISE測定)</li> <li>● FhG-ISEグループ製CPV4接合セルの世界最高効率(46.0%)(産総研測定)</li> </ul>	CPVセルの標準測定技術のさらなる高精度化

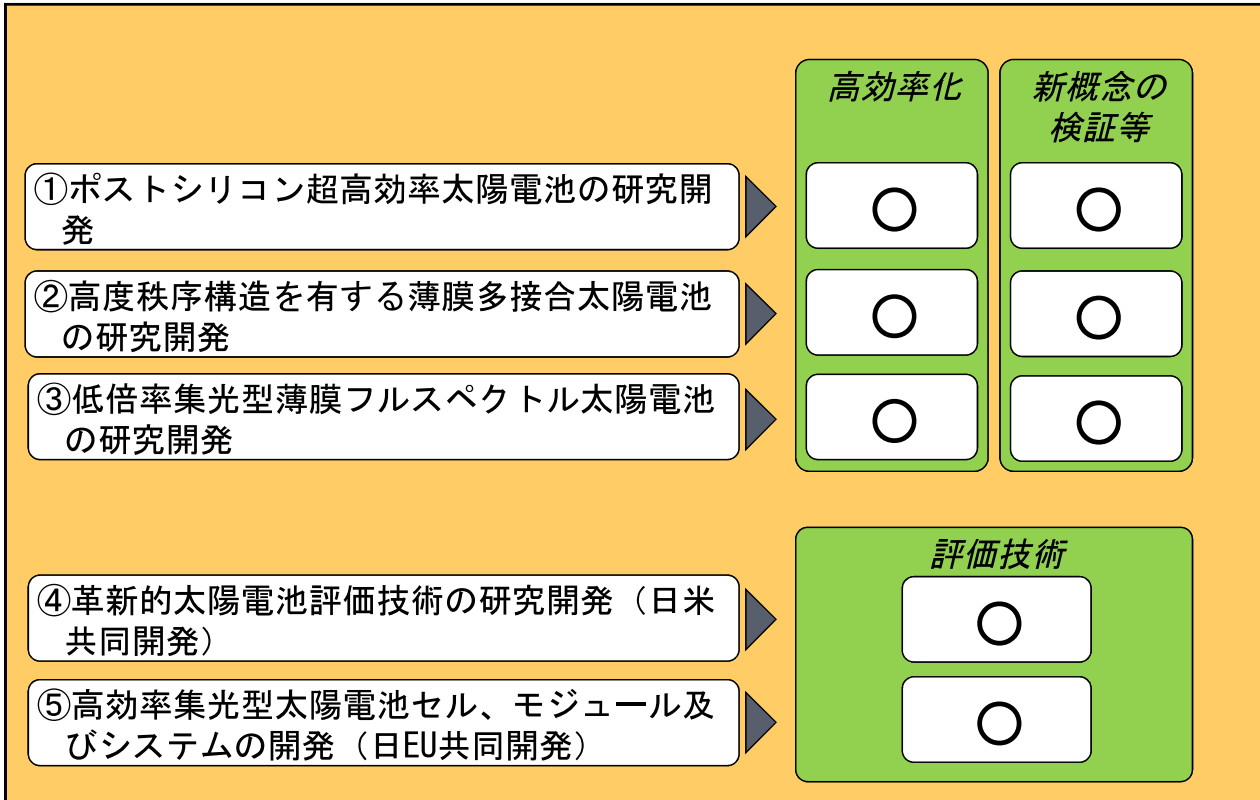
3. 研究開発成果について (1)研究開発目標の達成度と研究開発成果の意義

—超高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発 (日EU共同開発)の目標と達成状況—

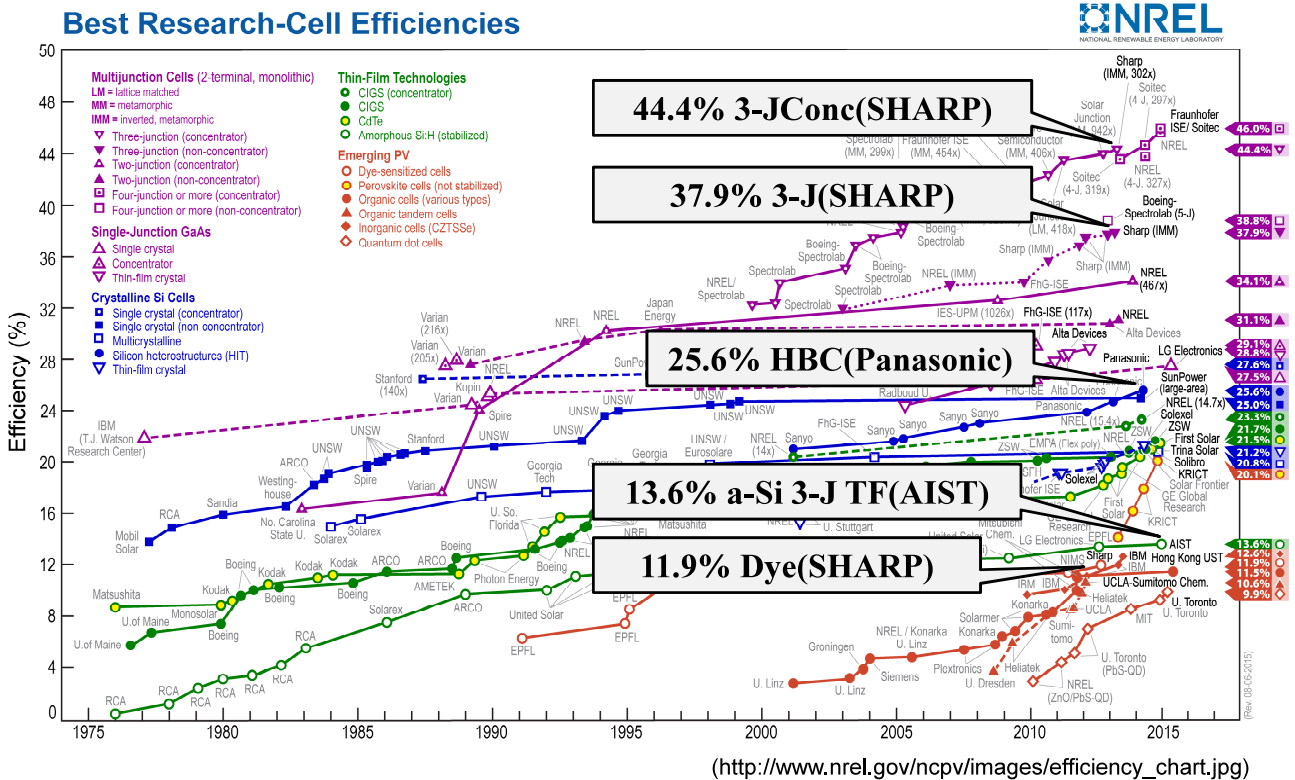
テーマ	最終目標	達成状況	今後の課題
世界最高効率35%集光型モジュール(ロードマップ上では、2025年までに、40%)	モジュール効率35%	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 集光型モジュール要素技術の改善(光学系、熱管理、信頼性)</li> <li>● ミニモジュール: 効率34.6%(302.8cm<sup>2</sup>)</li> <li>● 大面積モジュール(1m<sup>2</sup>): 効率32.0%(平均31.4%)</li> <li>● UPM、宮崎大へのCPVモジュールの提供</li> </ul>	CPVモジュールの高効率化、低コスト化
50kW CPVシステムの実証試験、発生電力予測	50kW CPVシステムの実証試験、発生電力予測	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 50kWおよび15kW CPVシステム用CPVモジュール製造</li> <li>● 50kW および15kW CPVシステム設置</li> <li>● 15kW CPVシステム: DC効率28%(平均27.8%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● CPVシステムの発生電力予測の継続</li> <li>● CPVシステムの最適化</li> <li>● 追尾系の低コスト化</li> <li>● 新たなCPVシステムの実証試験を期待</li> </ul>



— 開発成果のまとめ —



— セル変換効率の現状 —



### 3. 研究開発成果について (2)知的財産権など及び国際標準化への取り組み

#### ―特許出願―

(2015年2月末時点)

項 目	特許出願	
	国内	外国
①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発	24	3
②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発	51	14
③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発	66	18
④革新的太陽電池評価技術の研究開発 (日米共同開発)	0	0
⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発 (日EU共同開発)	9	2
計	150	37

#### ―国際標準化―

集光型太陽電池の高精度な発電量評価技術の標準化

- IEC62670-2  
日米実証データにより、アライメントによる損失が認知され、システム全体の発電性能指標測定法として発行。
- IEC62670-3  
屋内測定法の一部に反映。高平行度シミュレータの規格化へ貢献。  
日本を含む亜熱帯地域等のスペクトル特性が反映されるよう審議中。

37 / 42

### 3. 研究開発成果について (3)成果の普及

#### ―成果発表―

##### ◆積極的な学会発表等の実施 (実施者)

(2015年2月末時点)

項 目	論文 (査読付)	研究発表・ 講演	新聞・雑誌 等への 掲載	受賞 実績	展示会 への出展
①ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発	304 (297)	1,316	107	44	11
②高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発	376 (315)	1,127	32	32	16
③低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発	121 (119)	566	22	25	16
④革新的太陽電池評価技術の研究開発 (日米共同開発)	0 (0)	0	3	0	0
⑤高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの開発 (日EU共同開発)	104 (101)	328	55	10	2
計	905 (832)	3,337	219	111	45

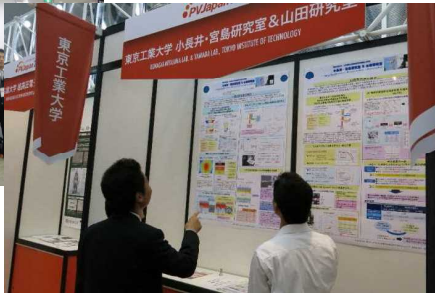
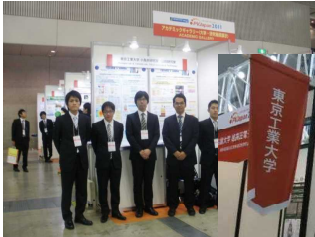
##### ◆公表チャンネルを利用した事業の広報 (NEDO)

- ・ NEDOホームページ
- ・ 事業紹介パンフレット
- ・ 学会、展示会、シンポジウム等での発表
- ・ NEDO成果報告会
- ・ 雑誌等への寄稿

38 / 42

3. 研究開発成果について (3) 成果の普及

— 成果の普及 —  
展示会への出展

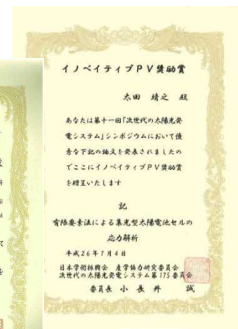
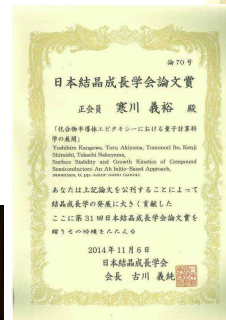
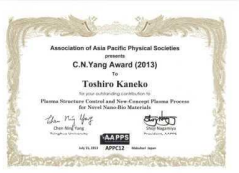


PV Japan

RE2014

3. 研究開発成果について (3) 成果の普及

— 成果の普及 —  
学会賞等の受賞



The PVSEC AWARD  
FOR OUTSTANDING CONTRIBUTIONS  
TO PHOTOVOLTAIC SCIENCE  
AND TECHNOLOGY



TATSUYA TAKAMOTO  
at the  
6TH WORLD CONFERENCE ON  
PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY  
CONVERSION  
Kyoto, Japan  
November, 2014



The WCPEC AWARD  
FOR OUTSTANDING CONTRIBUTIONS  
TO ADVANCEMENT OF PHOTOVOLTAIC  
SCIENCE AND TECHNOLOGY



MASAFUMI YAMAGUCHI

6TH WORLD CONFERENCE ON  
PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY  
CONVERSION  
Kyoto, Japan  
November, 2014



－波及効果－

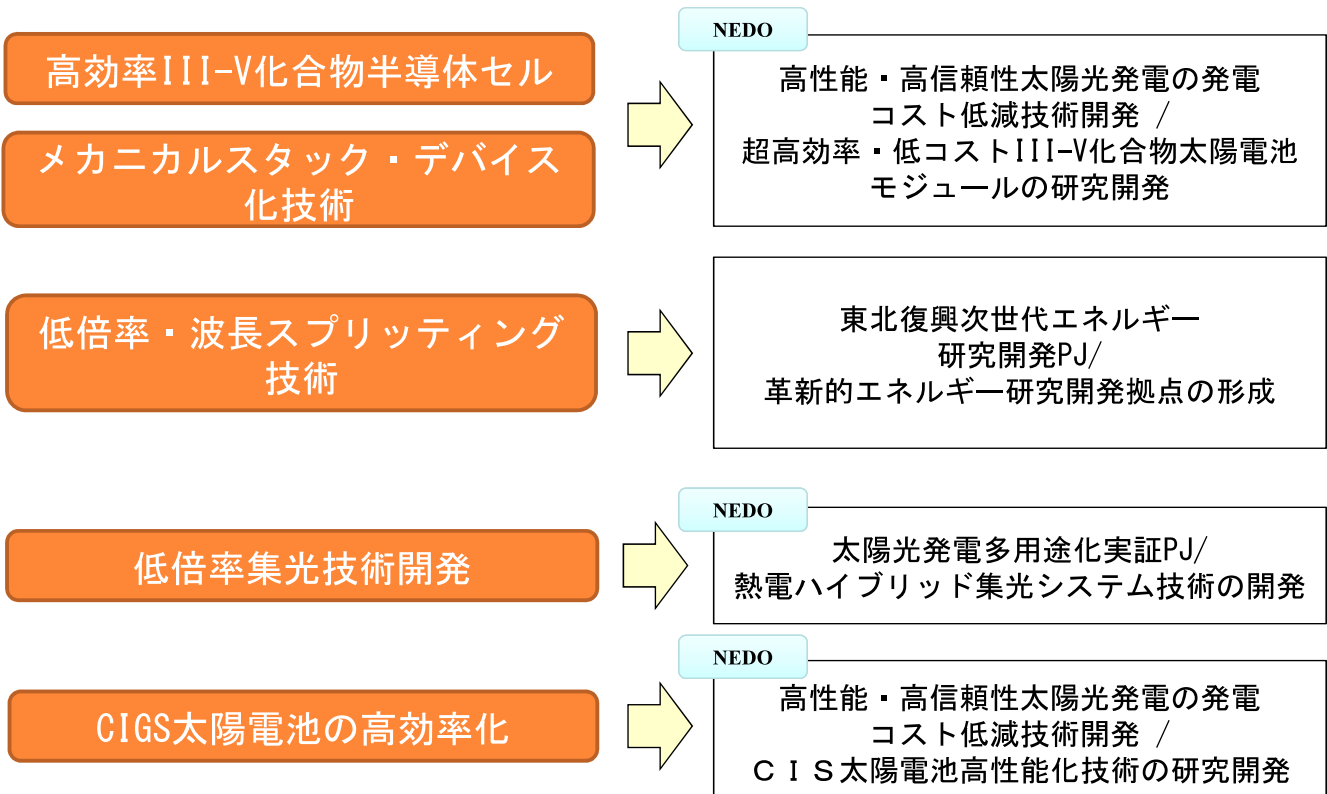
太陽電池としての波及効果

- 集光型太陽電池技術の宇宙用・自動車用への適用
- メカニカルスタックによる多様な多接合太陽電池の出現
- 光マネジメントの既存太陽電池への適用

材料やデバイスとしての波及効果

- 新規な3次元実装デバイスの出現 → オプトエレクトロニクスにも展開可能
- 透明導電膜のディスプレイへの適用開発 → 民生応用も
- 単結晶薄膜による低コスト高性能デバイスの発展 → 太陽電池以外にも
- 量子ドットを用いた高速通信デバイスの高度化

－事業終了後の展開－



## 参考資料 1 分科会議事録

研究評価委員会  
「革新的太陽光発電技術研究開発」(事後評価) 分科会  
議事録

日 時：平成27年11月13日(金) 9:45~17:30

場 所：WTC カンファレンスセンター Room A

〒105-6103 東京都港区浜松町2-4-1 世界貿易センタービル 3階

出席者(敬称略、順不同)

<分科会委員>

分科会長	松村 道雄	大阪大学 太陽エネルギー化学研究所 名誉教授
分科会長代理	高倉 秀行	立命館大学 理工学部 特別任用教授
委員	宇治原 徹	名古屋大学 グリーンモビリティ連携研究センター 教授
委員	小林 正和	早稲田大学 理工学術院 各務記念材料技術研究所 教授
委員	杉本 完蔵	一般社団法人 太陽光発電協会 幹事会 幹事
委員	野田 進	京都大学 大学院工学研究科 電子工学専攻 教授
委員	安武 潔	大阪大学 大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻 教授

<推進部署>

松本 真太郎	NEDO 新エネルギー部 部長
山田 宏之	NEDO 新エネルギー部 主任研究員
佐々木 崇水	NEDO 新エネルギー部 主査
豊田 富美穂	NEDO 新エネルギー部 主査

<実施者※メインテーブル着席者のみ>

中野 義昭	東京大学先端科学技術研究センター 教授
山口 真史	豊田工業大学大学院 工学研究科 特任教授
小長井 誠	東京都市大学総合研究所 教授
仁木 栄	産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター センター長

<評価事務局等>

保坂 尚子	NEDO 評価部 統括主幹
内田 裕	NEDO 評価部 主査

## 議事次第

### (公開セッション)

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法
5. プロジェクトの概要説明
  - 5.1 「事業の位置づけ・必要性」及び「研究開発マネジメント」
  - 5.2 「研究開発成果」及び「実用化に向けての見通し及び取り組み」
  - 5.3 質疑

### (非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明
  - 6.1 ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発
  - 6.2 高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発
  - 6.3 高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの研究開発
  - 6.4 低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発
7. 全体を通しての質疑

### (公開セッション)

8. まとめ・講評
9. 今後の予定、その他
10. 閉会

## 議事内容

(公開セッション)

### 1. 開会、資料の確認

- ・配布資料確認 (評価事務局)

### 2. 分科会の設置について

研究評価委員会分科会の設置について、資料1に基づき評価事務局より説明。

メインテーブル着席者 (分科会委員、推進部署、実施者、評価事務局) の紹介。

### 3. 分科会の公開について

評価事務局より資料2及び3に基づき説明し、議題6.「プロジェクトの詳細説明」、議題7.「全体を通じたの質疑」を非公開とした。

### 4. 評価の実施方法について

評価の手順を評価事務局より資料4-1～4-5に基づき説明した。

### 5. プロジェクトの概要説明

#### 5.1 「事業の位置づけ・必要性」及び「研究開発マネジメント」について

推進部署より資料6.1に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

#### 5.2 「研究開発成果」及び「成果の実用化に向けた取り組み及び見通し」について

推進部署より資料6.1に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

#### 5.3 質疑

推進部署より資料6.1に基づき行われた説明に対して、以下の質疑応答が行われた。

**【松村分科会長】** ありがとうございます。

今、NEDO様のほうからご説明いただきましたけれども、今のご説明の内容に関して、ご意見、ご質問等ありましたら、お願いいたします。

先ほども少しご説明ありましたが、技術の詳細につきましてはこの後の議題6で議論することになります。ですから、ここでは事業の位置づけ、必要性、マネジメント、そういうことについてのご意見をお願いいたします。委員の先生方、よろしくお願ひいたします。

**【杉本委員】** 太陽光発電協会の杉本でございます。非常にチャレンジングな目標に対して、それなりの成果を出されたこと、特に多岐にわたる研究の中で、これだけ広い研究をまとめられた成果というのは非常に評価できるのではないかと思います。

もともとCool Earthで想定された目標達成といえますのは、あくまでいわゆるモジュール効率だと思っておりますけれども、やはりこの7円/kW以下を達成するためには、できればシステムのなところの低下が必要だろうと思っております。そういう意味では、まさに今回出た成果をいわゆる7円/kWにシステムとして下げるための評価をぜひご検討いただきたいと思っております。よろしくお願ひいたします。

**【山田主研】** ありがとうございます。まさにご指摘のとおりでございますし、また、このプロジェクト立ち上げ時と発電コストというものに対する要求といえますか、算出方法の厳しさというのは大分変わってきておまして、私どももシステムとしての着眼、考え方というのは非常に重要だと思っております。

それで、開発戦略を見直し、ロードマップを見直したというお話をしましたけれども、そこでもそのシステムとしてこの発電コストをどのように検討するかというところを抜本的に見直した上で、改めてこの40%以上のモジュールを使った太陽光発電システムがいかにあるべきかということを検討し、次の技術開発プロジェクトでは、改めて開発計画を見直した取り組みをしているところでございます。

そこにおきましても、ここで開発された成果、モジュールとして十分高い性能を発揮するものの開発に



については引き続き取り組んでまいり所存でございます。どうもありがとうございます。

【松村分科会長】 ほかはよろしいでしょうか。

【小林委員】 早稲田大学の小林ですけれども、済みません、素人的なというのでしょうか、少しよくわからないので教えていただきたいことが1つ、2つございまして、5枚目の基本計画の概要というところがございます2030年の7円というのと2050年の7円未満。その違いというのでしょうか。何で7円と7円未満が違うのかというのをまず教えていただきたいのですけれども。

【山田主研】 まず、7円というのは従来型、結晶シリコン太陽電池や、また、究極、あるいは、第2世代と呼ばれた薄膜系の太陽電池、さらには、その組み合わせで到達できる限界といえますか、最高の究極の目標として、PV2030という以前のロードマップでも掲げていた目標でございます。

この7円未満というのは、7円よりも先というのが6円がいいのか、5円がいいのか、4円がいいのかという検討は当時あまり行われていませんでしたけれども、高い効率の太陽電池を安くつくることができれば、必ずしも、必ずや従来型の太陽電池では到達できなかった領域にも到達できるだろうということで、新概念の技術を導入したさらに上の目標ということで掲げたものでございまして、7円と7円未満の違いというのは取り組むべき技術が全く新しいものという違いでございます。発電コストとしては、6.9円ならいいということではなくて、全く新しいエネルギー供給技術をつくり上げるという意味で、7円よりもさらに低いコストを目指そうということに重きがあったというふうに理解しております。

まさに、そのあたりはCool Earth革新技術計画の中にも記載がございまして、新しい技術、新概念を導入して到達するというその差別化が一つのポイントだというような説明があったと記憶しております。

【小林委員】 ありがとうございます。6.9円でないということが少しわかりましたので、新しい技術を入れるということもよく理解できました。

【山田主研】 ありがとうございます。

【小林委員】 そうしますと、12ページなのですけれども、多分この事業の目標をご説明いただいたのではないかと理解しているのですけれども、この日本語の読み方が難しくよくわからないのですけれども、今回のこの事業の目標としては、40%であればいいというふうなことで、7円を目指していないというふうにも読めるのですけれども、そこら辺について少しご説明いただけないでしょうか。

【山田主研】 ここの40%と7円未満を目指すということは「かつ」で結ばれておりまして、これは目指すという意味では両方目指しています。ただ、まだ基礎・探索研究段階でございますので、例えば7円を確認するためには、製造コストでありますとか、実用化というフェーズに入らなければならないですし、また、先ほど杉本委員からもご指摘あったように、システムとしての評価というものも大事になってまいります。ただ、その確認まではこのスコープには入れられていません。目指す方向としては両方を目指すんだということでもあります。

技術開発のターゲットとしては、本研究開発プロジェクトでは変換効率40%の実現をまずするための研究を行うということにとどめているという理解でございます。

【小林委員】 そうすると、これはどなたにお伺いしたらいいのか少しわからないのですけれども、今回の評価結果の利用例というxyの座標が先ほどご紹介いただいたのですけれども、研究開発の成果というについてはある程度客観的に評価ができるのですけれども、その実用化、事業化に向けての見通しということについては、相当主観的に評価してよろしいというふうなことで理解していいのでしょうか。

【山田主研】 方法については、私から言っているかわかりませんが、見通しについて、私ども、次の開発を続ける、成果の一部を使って開発を継続するというご説明をしましたので、そこに対して見通しとして適切かどうかをご評価いただければいいのではないかなど。

【内田主査】 評価部から補足いたしますけれども、4番目の実用化の見通しについては本プロジェクト終了時で実用化できたという評価ではなくて、この先、実用化ができる可能性がきちんと見えているか、見え

ていないかという立場で判断いただければと思います。

【杉本委員】 当然、今おっしゃったとおりだと思うのですが、やはりこの成果をもって将来実用化の可能性があるというのが見えればいいのではないかと私は思っているのですが、その辺でよろしいのでしょうか。

【内田主査】 はい。その考え方で結構です。

【山口 GL】 23 枚目のスライドですけど、この革新太陽電池の研究開発のスタートに当たって、検討委員会がこの表で下のほうにありますけど、東京農工大の黒川先生が委員長で議論したんですけど、結局、山田主研もおっしゃったように、超々長期のテーマなので、すぐには実用化は難しいでしょうということで、第 1 期、7 年間はその 40% をターゲットしてやったほうがいいのかという結論になって、第 2 期でそれを絞り込んで、そのさっきの 7 円/kWh 未満の研究開発をやったほうがいいのかというストーリーにはなっていると思うんですけど。

【松村分科会長】 今おっしゃっている第 2 期というのは、この中間評価の後、このプロジェクトの後ということですね。

【山口 GL】 そうですね。

【松村分科会長】 このプロジェクトの後ですね。

【山口 GL】 ええ。

【松村分科会長】 そういうプロジェクトの中での議論、共通の理解があったということで。

【山口 GL】 それから始まっていると思うんですけど。

【松村分科会長】 今のご説明でよろしいでしょうか。

これ、2050 年目標ですから、相当先のことで、NEDO のプロジェクトでも異例の長期ではないかな、太陽電池に関しては少なくとも長期ではないかなと思いますね。だから、そんな先のことはなかなか今から予想にくいというところもあって、そこは少しこの評価としては難しいところだと思います。

ですけれども、やっぱり 2050 年を視野に入れているというところが非常に大事なところではないかなと思いますけれども。

【保坂統括主幹】 少し補足させていただきます。冒頭に評価について説明した中で、評価項目、評価基準、これ、先生方にお配りしているものですが、資料 4-2 の 3 ページ、4. に「実用化に向けての見通し及び取り組みについて」という項があります。そこに書いてございますように、成果の実用化の見通しというものにつきましては、実用化イメージに基づき、課題及びマイルストーンが明確になっているか、それから、成果の実用化に向けて、誰がどのように引き続き研究開発に取り組むのか明確になっているかというような視点でご評価いただければと思います。

【松村分科会長】 この辺、この後の技術的なところの評価というか、その中でもポイントになってくると思いますので、もう一度確認したいのですが、40% というのは、だから、この今のプロジェクトの中で一つの数値的な目標になっていると。ですけれども、その中で、新概念として幾つかの新しいものも取り組まれたし、幾つか可能性あることも取り組まれていて、全てが 40% である必要も必ずしもないと思うのですが、それも共通の理解でいいのでしょうかね。1 つの、だから、数値としては 40% あるけれども、取り組んでいる課題が全てが 40% 目標だというわけではないですね。

だから、その 40% というのはあくまで 2050 年で、先ほどのコストのことも含めて、そういうものを目指していて、この期間の中で 40% 実現できればいいなというのはあるけれども、それはある限定的なもので理解したらいいのかなと私は思ったのですが、

【山田主研】 目指すところは 40% でございますけれども、中に個々のサブテーマ、これ、探索研究という位置づけもございまして、サブテーマをたくさん設けております。中には、さっき少し触れましたが、48% という数字を掲げているところもあれば、30% だけでも革新的な製造技術につながるようなテーマに取

り組んでいるものもございまして、そこはブレークダウンしていくとさまざまな目標がございます。中で、その価値、バリューについてご評価いただければと思います。

【松村分科会長】 ほかはどうでしょうか。

【宇治原委員】 同じような話ばかりで大変恐縮ですけれども、先ほど、マイルストーンが重要だという、私もマイルストーンが重要だと思っているのですが、40%の理解もテーマによって、2015年の時点で、14年の時点で40%行くものもあれば、これ、最終的には2050年なので、あと35年もありますので、その間に40%行く芽があるというものもあると思うので、この後の非公開のところでもいいのですが、重要なものについては、どういうマイルストーンが達成されていけば、ちゃんと2050年で40%が見込めるのかというのが少し我々だけでは少し多岐にわたり過ぎて、どの技術がどの時点で40%になるのかというのがわかりにくいので、もし補足いただけるのだったら、そこを補足いただきたいと思いました。

というのと、あと、もう一点、途中で中間評価のときに見直しをされたという話があったのですが、少し僕、奇妙な感じがしました。何かというと、産業界と、要は近年の動向に応じて、産業界と相談して、マイルストーン、ロードマップを書き直したみたいな説明があったのですが、すごく違和感があって、まず、1点、率直に言って、2050年の出口戦略を一体誰が考えたのだと、それを企業が考えたのかというのがすごく奇妙でした。

この事業の価値というのは、おそらく今後ほかの分野においても、2050年の出口戦略を考えるのは国しかないというのをある意味宣言していただいていると思うのですが、なので、何でそのとき、そうなったのかなというのは少し違和感を覚えました。

なぜそのとき、そうなったのかというのは少し教えていただきたいのと、本当はどうしたかったのかというのを少し聞きたいのですが、

【山田主研】 まず、1つ目のご質問につきましては、非公開セッションもあるのでありますが、この資料で、テーマごとに、私が公開セッションでお示ししているのはほんの一部でございますが、目標と達成状況の後に、今後の取り組みという項目もございまして、ここも少し参照していただければと思います。具体的には、詳細につきましては後ほどご確認いただければと、リーダーの先生方にはご紹介いただきますようお願いいたします。

そして、2つ目のご質問でございますが、まず、基盤技術開発、シーズ探索というフェーズであるという位置づけはこれは前提として残した上で、中間評価後のそのフィードバックといいますか、見直しをかけています。それがまず、そこは前提として崩していないということでもあります。

そして、一方で、実用化についてある程度道筋を検討しなさいというコメントに対して、探索研究だから全く何もしませんということではなくて、企業の方々も参加されているので、まず、この成果をどのように、2050年ではなくても、どのように実用化を進めていくのかという、そういうお考えを各参加企業に確認した上で、そこにつながるものはそこにつながる開発を強化しようと、そういう細かいチューニングをしたというふうにご理解いただければと思います。以上2つですかね。

ロードマップの見直しにつきましては、このプロジェクトとは別のマネジメントとして、NEDOが太陽光発電技術開発にどうやって取り組んでいくかというもう少し大きなスコープで議論をしております。その中では、とりあえず今回、2030年をターゲットとした議論をしています。2050年を目指したこの開発の成果を、その2030年をターゲットとした戦略の中でどう反映することができるか、それが次のプロジェクトの企画時に大変有効に活用できたというふうにご考えています。

【松村分科会長】 今も少しご指摘がありました2050年目標との関係ですけれども、それは各プロジェクトのテーマでご説明いただくときに、その辺のところを触れていただいて、またそれを技術的なところとあわせてやっていったらいいのかなと思います。

お願いします。

**【安武委員】** 先ほどのご質問と全く同じことを少し思っていたのですけれども、今ちょうど出ているこの絞り込みのところのご説明がやっぱり違和感を持ちました。これが始まったときに、七十何テーマですか、それが絞られてきてという、第1回の中間評価のときに、かなりこの点が議論されたと思うのですけれども、私はこの探索段階である、基礎研究が必要だと、これをNEDOがやるということは全然問題はないと思うのです。

もともと、新エネルギー開発ですから、実用化が相当遠いことに対しても国が基礎研究から支援するというのはいいと思うのですけれども、この絞り込みのところの今のご説明ですね。参画企業の戦略を参考にして絞り込まれたというところなのですから、そのそれぞれのテーマで参画企業ってあんまり多くないと思うのですよね。

前回の1回目のときにも少しご質問したのですけれども、こういう基礎研究段階から、実力のある企業でやりたいと思っている企業はあったと思うのですけれども、それをどんどんその時点から取り込んで一緒に企業を交えてやっていったら、ここの説明は非常にじっくりきたのですけれども、今回のこの絞り込みは、本当はどういう絞り込みだったのかなというのが少し今のご説明ではよくわからなかったというのがあります。

**【山田主研】** ありがとうございます。多分、私の説明が良くなかったのだと思いますが、まず、1つ目のポツに書いてあるのは、その実用化に対する道筋、参加企業の戦略等を確認したということであります。

これを踏まえた部分もありがとうございますけれども、こちらのテーマの絞り込みはこれだけではありません、もちろん、1回目の絞り込みと同様に、成果の進捗を踏まえた絞り込み、探索研究でございましたので、広く始めて、少しずつ絞っていくと、その一般的なマネジメントの一環であります。

どっちが多いかという評価は、切り分けが難しいので、企業の戦略にあわせているものを何件というようなカウントの仕方はしておりませんが、成果の進捗を踏まえての絞り込みもあるということであります。どちら、実際どうだったんですかという、企業の戦略とあわせてといっても、先ほどからご指摘ありますように、2050年の戦略というのは明確にあるわけではございませんから、企業の戦略に対するお話というのはそれに踏まえて実用化が近いものはそこを加速しましょうという話、成果の進捗に、技術開発の進捗にあわせて絞り込みをするという話とは少し確かに観点は違うということであります。

**【安武委員】** ありがとうございます。本当に有望な技術を企業が入っていないから、そこで落とすということにはむしろやらないほうが良いと、そういう考えだったのですよね。

**【山田主研】** ありがとうございます。実際は多分そうはなっていないと思います。

**【安武委員】** 今後、その企業がどんどん参画できたら、NEDOの事業としては全く違和感がなくなると思いますので、よろしくお祈りします。

**【松村分科会長】** はい。

**【野田委員】** 非常にわかりやすくご説明いただいて、今回、私も1回目の中間評価は参加させていただいたのですけど、位置づけ等、よくわかりました。ありがとうございました。

私は逆に、絞り込みはしっかりなされて、もちろん今おっしゃったように、重要な技術をなくしてしまうというのは大変まずいと思うのですけど、しかし、真摯に中間評価の結果を踏まえて、少しずつ絞り込みをされているという点においては非常によかったのではないかなという気がしています。

1点教えてほしいのですけれども、発電のコストの話ですけど、これも1回目のとき、いろいろ議論があったのですが、そもそも発電コストというのは太陽電池ってどう考えたらいいのかなと最近思うようになりまして、火力発電とかだとやっぱり輸入するガス、オイルとか天然ガスで決まりますよね。原発はつくるときは膨大なお金がかかりますけど、ウランとかを購入することを考えると、安くなると。あるいは、その後の事故で物すごいお金がかかるので、実質的な発電コストというのは定義によって相当変わるような気がする。

太陽電池の場合だと、ちゃんとできて、あとは耐用年から出ているだけだったら、ちょっとしたメンテで済むのであれば、それほどコストは要らないだろうと。この太陽電池におけるコストの定義というのはどのようにここでは考えたらいいかというのを少し教えてほしいなと思いました。

【山田主研】 ありがとうございます。非常に難しい議論ではあるのですがけれども、まず、ほかの電源との比較につきましては、このプロジェクトのスコープとは違うんですけども、国のほうで、発電コストワーキングというワーキンググループが設けられまして、5月、6月でしょうか、一度結論が出て、結論といいますか、検討結果が公表されています。その中では、発電設備としての算出のほか、政策的経費をどうカウントするかでありますとか、重大なインシデントに対する評価をどうするかというような検討もなされておりますということをご紹介します。

このプロジェクトで発電コストをどう考えているかでございますけれども、これはもうプロジェクトといえますか、どちらかという戦略のほうで考えております。PV2030あるいは30+の段階では、はっきり言って、発電コスト算出するに十分な情報が足りないということで、どちらかというインシリアルだけを考えたような、つまり、メンテナンスフリーであるというような仮定のもと、考えた節がございます。現在は、それだけでは済まない、ランニング、メンテナンス、オペレーション・アンド・メンテナンスもありますし、そういったファクターも考慮して検討するというような取り組みをしています。これが2つ目です。

それでは、このプロジェクトでそれをどう計算しているかということですが、7円を目指しますが、その目標は間違いないのですが、このプロジェクトは変換効率40%の実現に向けた基礎・探索研究段階と位置づけてやっております、その発電コストの算出には至っておりません。また、本当に算出するのであれば、製造コストでありますとかシステムとしての効率も議論しなければなりませんので、ここではそこには至っていないと。至っていないというのが及んでいないという意味ではなくて、そこはスコープに入れていないということでございます。

【野田委員】 既存の7円/kWhというのは、これは原発と最初おっしゃいましたと思うのですが、これはランニングコストだけで出されているわけでもないですか。

【山田主研】 当時の検討で、当時の議論でございますけれども、資料名は今失念しましたので不正確かもしれませんが、公表されている発電コストのデータがございまして、それを参照して、この目標を掲げたというふうに認識しております。

【野田委員】 クリアでないというお答え、要するに、要は建設費、太陽電池、同じように扱えば、作成コストはもう発電の費用から除去すれば、相当、太陽電池、安いはずなのですよね。

【山田主研】 済みません、質問の意図を私が理解できてなかったのですが、まず、目標設定の段階では、積み上げではございませんで、ターゲットとして相手を決めてそこを目指そうという議論でありました。それでは、いざ積み上げて計算するに当たってどうなりますかというご質問であるとしたら、太陽電池は、ランニングは燃料費は確かにかかりませんので、非常に安いということは間違いないと思います。ただ、ゼロではないというのが最近の反省でございます。

【野田委員】 もちろんそうです。それでは、あんまり、だから、発電コストは議論しても、1回目もそうだったのですが、少し意味がないかもしれないと思っただけですかね。

あと、もう一点は、確かに40%達成するというのは非常にすばらしい目標だと思うのですが、やり方によっては30%であっても、20%であっても、コストは7円を達成するかもしれませんよね。

【山田主研】 7円までは行けると。

【野田委員】 要するに、発電の効率が必ずしも40%でなくても、コストはある程度は下がることもあり得るようにも思うのですがそれは、今回はもう40%という位置づけにおいて考えると、つまり、途中段階にあるのもやがては40%を目指していくような位置づけとして考えたらいいかですかね。済みません、少しそ

の辺が。

【山田主研】 いえ、多分私の説明が要領を得てないのだと思いますが、このプロジェクトでは、新しい革新的な技術を開発するということがポイントでございまして、その要素技術の中には、必ずしも効率ではなくて、メカニカルスタックのような製造技術も含まれております。

40%でなくても7円は到達するのではないかとご指摘についてはイエスです。ただ、それがどういうシナリオになるのか、今のシリコンでこうぎゅっと利益を削って到達するのか、差別化技術で到達するのか、いい、悪いではなくて、異なるシナリオになるのではないかと考えています。

【野田委員】 わかりました。ありがとうございます。

【杉本委員】 コメント、よろしいでしょうか。発電コストのことが出たのですが、国の発電コスト評価委員会等においても示されているとおり、いわゆるライフをどう考えるかによって価格は違うわけです。今回の先端技術に関しては、エンド・オブ・ランがどれぐらいとするか、システム寿命と発電コストについては一体ですが、今回の議論ではそこは視野の外だと思います。むしろ、ある意味、性能面でチャレンジしている部分を評価すべきだと思いますし、むしろ、発電コスト自体のいわゆるコストを下げることであれば、30年のサイクルのもの、あるいは、40年のサイクルのものを考えれば、まさに7円以下ができるわけですね。その辺は、切り分けて考えたほうがいいのではないかとごうに私は考えます。

【松村分科会長】 非常に大事なところですけど、なかなか難しいところでもあると思います。

時間になっているのですけれども、コストとかその辺のところでは集中してまいりましたので、少しほかの観点で1つだけ確認したいのですけれども、このプロジェクトが国際拠点形成がありまして、EU との関係が大分強調されましたけど、それは途中からそれを取り込んだと。

最初は日米が取り上げられていて、ほとんど説明はなかったんですけど、それがうまくいかなかったからEU にシフトしたとか、そういうことなのでしょうか。

【山田主研】 いえ。私の説明が拙くて申しわけありません。国際拠点の観点ですけれども、拠点といっても建物を建てるわけではないですが、研究の拠点として、まず、3 つ、東京大学様、産総研様、東京工業大学様、この3 つが国際連携の拠点として位置づけられております。それと並行して、日米、あるいは、日EU との関係において、革新的な技術開発を一緒にやろうよという機運が高まったこともあって、途中で追加的に両者を実施するに至っております。したがって、国際交流研究拠点につきましては、日EU と日米だけではないということをごましく申し上げます。

日米につきましては、別にうまくいかなかったからやめたものではありません、もともとその日米との協力において予定していた期間がそれで終わったということです。例えば日EU につきましても、昨年の11月で、これはEU 側の研究計画とあわせる形で終わっています。これは途中で打ち切ったわけでもありません。そういう計画だったということでございます。

【松村分科会長】 わかりました。

【小長井GL】 グループリーダーとして1つコメントよろしいでしょうか。

先ほど少し伺っていると、少し議論が噛み合っていないところがあって、1 つは、中間評価のときにいろいろテーマを絞った、その絞り方について、少し何か齟齬があるような感じがしたので、これはもちろん、私どもはNEDO さんと協議してテーマをだんだん絞っていったわけですが、決して、例えばうちだったら、参画している企業さんと相談して、これ、やめようかなと、そんなことはしておりません。あくまでも私は自分のリーダーシップで目標に向かってうまく絞っていったというふうに理解しています。もちろんNEDO さんと協議してですけどね。

それから、もう一つは、このNEDO さんの革新のプログラムというのは大変僕は画期的だったと思うのですが、これが始まった当時は、文部省ではこういう基礎的なプロジェクトってなかったのですよ。ですから、逆に私は文部省にいつも、君たちが遅いから、NEDO さんがこういうことをやっていただいたのだと

いう説明をしていたわけですけど、これが始まってから、文部省、JSTでも、さきがけ、CREST、ALCA等ありまして、かなり長期展望で基礎的なものを取り上げるようになったわけですね。

ですから、私のチームの中でも、アカデミックにいうと物すごくおもしろくて、だけど、今難しいから長期的になるというやつは、泣く泣くほかのものにアプライしてもらおうというようなこともあったという、そんな感じでご理解いただければと思います。

**【松村分科会長】** 非常に大事なポイントを議論できたと思います。ありがとうございました。

時間が大分越えてしまいましたので、まだ技術のところが必要があれば、こういう問題、取り上げたいと思います。そういうことで、議題5をここで終了させていただきたいと思います。

(非公開セッション)

## 6. プロジェクトの詳細説明

### 6.1 ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発

省略

### 6.2 高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発

省略

### 6.3 高効率集光型太陽電池セル、モジュール及びシステムの研究開発

省略

### 6.4 低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発

省略

## 7. 全体を通しての質疑

省略

(公開セッション)

## 8. まとめ・講評

**【松村分科会長】** それでは、本当の最後のところですけども、「まとめ・講評」を扱わせていただきます。

15分予定されていて、委員お1人、ですから、2分以内になります。安武委員から順番にご講評をお願いいたします。

それで、これ、記録に残すために、同じ、もう先に言われたから言わないというふうになるとよくないということで、記録としてやっぱり複数の方が同じことを言われているという、その記録が大事だということですので、委員の方は、先の誰かがおっしゃっても、前が言われたように私もという感じで、同じことをおっしゃっていただきたいと思います。よろしく願いいたします。

安武先生から。

**【安武委員】** 最初、この事業のスタートのときに、すごくテーマがあふれていて、混沌とした感じで、少し頭がパニックになるような感じだったのですけれども、だんだんと進められているうちに、非常にすっきりと目標もやり方もなってきた、今日お聞きしたら、それぞれ非常にすばらしい成果を上げておられるということで、研究成果はすばらしいなと思いました。それによって、次につながる道も何か明るいものが見えてきたように私は感じられました。

特に、各リーダーの先生方のマネジメントがすばらしくて、新しい材料の開発は非常に時間がかかって、地道な研究が非常にたくさん必要で大変だと思うのですが、例えばスマートスタックとか波長スプリッティングとかということで、各セル、トップ、ミドル、ボトムですか、それぞれいろいろ分けて開発して、それをあわせるというような手法で非常に研究を加速されて、それで、成果も非常に上がったので

はないかと思いました。そういうことで、総じて非常に私は高い評価をしたいと思っております。

先ほどの話で、この基礎的な研究が結構あって、それは、それまで文科省があまりそこを取り入れなかったもので、NEDO さんという、何かそういう都合であったようなお話で、今後は NEDO さんはどうされるのかというのが少し気になったのですが、やはりこういう基礎的な部分も含めたものもやってもあり得ると、その状況によってはあり得るのではないかと思いました。

以上です。

**【松村分科会長】** それ、お答えあるとすれば、また最後にまとめてお願いしたいと思います。

では、次、お願いいたします。

**【野田委員】** 本日、最初のほうにも少し申させていただいたのですが、最初に山田さんのほうから全体の事業の位置づけ等を説明いただきまして、先ほども先生がおっしゃったように、1 回目の中間評価のときは少しやっぱりわかりにくかったのですが、今日は大変すっきりと、どういうふうな位置づけでこのプロジェクトを進め、それがどうつながっているかということが大変よくわかったのと、それから、成果もすごく、山田さんのやつで整理されていて、後の先生方の発表が大変聞きやすかったというのが大変よかったなというふうに思いました。

中間の1回目のとき、私、参加させていただいたのですが、あのとき、先ほど先生もおっしゃったように、少しやはりテーマがおそらく基礎的なところから始めるということで大変多かったと思うのですが、それをうまく、この1回目、2回目と絞り込まれて、本当に明解になったなというのが正直な感想です。

3 チームプラス1 と、国際研究、あれも進めてやられているのですが、それぞれの分担も、少しのオーバーラップは当然あるのですが、非集光と低倍、それから、高集光というふうによく分けられて、これも明解だったなというふうに思います。

それぞれ目指しておられるところも、非集光の場合は特にボンディングという新しいボンディング法をベースにしなが、ボトムセル、トップセルというのをいろいろ、これこそいろんな基礎的なところを探られて、結果的には半導体、今のところは半導体がよさそうなのですが、ぜひ今後もその探索を続けていただいて、新しい展開をしてほしいなというふうに思いました。

それから、低倍で50倍まで、小長井先生のほうは特にやっぱり40%を達成するというところに30から変えられたと。それも信念を持って、先ほど聞いたところでは、変えられたということで、だから、重点も少しフィルターのところの新しい設計のところに入れられたところが感銘を受けました。私の知り合いもアメリカの人もやっていますが、確かにすごくきっちり設計をされている様子がわかりました。

あと、先ほど言いましたように、CIGS、先生が一生懸命やられたやつを、ぜひほかにもいろんなところに生かしてほしいなというのが私の要望かなと思いますね。

それから、あと、高集積のところは大変立派な、それぞれそうなのですが、最高記録を更新されたという点でも高く評価できまして、それをヨーロッパの方々と協力して評価方法まで確立されたという意味において、先ほどの先生もおっしゃったように、高く評価できるのではないかなというふうに思います。

だから、中間評価のときはすごくフラストレーションがあり、ストレスがたまったのですが、今日は非常にすっきりと聞かせていただいて、気分よく帰れそうです。済みません。

**【松村分科会長】** 杉本委員、お願いします。

**【杉本委員】** ありがとうございます。私は小長井先生が先ほどおっしゃられていました通り、太陽光は多分、基幹電源に間違いなくなくなると思います。そういう意味では、やはり面積効率を求めるとか、今回設定されます2050年の姿というのは基本的に達成していかなくないことだと思います。

当初、私が、PV2030や、2030+策定作業にかかわったときのことを思い出しますと、やはり当時の状況に比べますとかなりうまくマネジメントでき、プロジェクトの内容も絞られたのだと思うのですね。今日



お話を聞きまして、それぞれの中できちっと成果が出ていること。なおかつその中でも、できたこと、できないことがはっきりしていると。そういう意味では、非常にわかりやすいし、ある意味では、そのプロジェクトがうまくいったのかなと思っています。

特に、これから NEDO さんが実際に実用化含めて展開していく中で、本日その効率とコストというところが出たのですが、やはり実用化の面からいけばコストが優先されると思います。一方、普及の面からいけば、効率も必要との市場要求もあり、やっぱり両方やっていかなきゃいけないんだと思います。

そういう意味で、やはり民間だとか実際我々産業界が必要なのは産業技術です。だから、そこはやっぱり 50 年のところとどうつなげるかということを経済 NEDO さんの今後のプロジェクトの中に、今回のプロジェクトの成果として生かせるものはいっぱいあると思うのですね。ぜひよろしくお願ひしたいと思います。

**【松村分科会長】** それでは、小林委員、お願ひします。

**【小林委員】** 今日は長い間、いろいろ勉強させていただきまして、ありがとうございます。

最初に、順番にお話しさせていただきたいのですが、太陽電池が 1970 年ぐらいから始められたということで、そこに目をつけていただいた NEDO さんというのは多分すごかったのではないかと。こういうプロジェクトがあったからこそ、でき上がった技術というのは相当あるのではないかと思いますので、ここはそういう先見の明があったのだなということにはよく理解できました。

ただ、その先ですかね。2050 年まで、本当にこのプロジェクトを続けるということは、逆にいうと、民間がそんなに伸びていかないのだというふうなことにもなったような気がするのですが、本当に 2050 年まで続ける必要があるのかということ、疑問というわけではないのですが、少しくエスチョンマークがついた感じがいたしました。

今日のお話でいろいろ細かいことを専門家の方々に伺ったのですが、正直、全体的なところで見ると、40%ということについては非常に皆さんの意識の中でしっかりと根づいていらっしゃるって、それが大体達成できているということがよく理解できました。

片や、もう一方のほうの 7 円ということに関しましては、おぼろげなベンチマークというのは何となく見えていたのですが、具体的なこころ辺がマイナスとなっているよとか、そういうところが少しよくわからなかったなというのが若干残念なところ。難を言うと、ということなのですが、全部褒めちやいけなかもしれないので、少し言わせていただくと、それがあったかなと思います。

例えば、中野先生のテーマに関しましては、もう既に問題なく、何も問題なくいいデータがいっぱい出ているという状況で、なおかつ、40%って与えられた課題を 48%、49%まで持っていくというふうなことをされているので、それ自体についてはいいと思うのですが、そこで 7 円のほうにももう少し持っていけば、もう少しすっきりと方針が見えたのかなというようなことを、大変僭越ながら感じさせていただきました。

仁木さんのほうのが、やっぱりスタックという技術をしっかりと持っていて、それを伸ばすのだということ、いろんなシーズを伸ばしていきたいのだと、種をまきたいのだということ伺って、いや、やっぱりこれはそういった研究をやっていただかないと、多分、材料をやっている先生方が大変困ると思いますので、ぜひこのスタイルは続けていただきたいなというふうに思いました。

山口先生の実証技術の評価技術、ヨーロッパともかわりながらやっていったという、これもやっぱり、こういった機会があったからこそできたようなテーマかもしれないんですけど、十分にいい成果になっているのではないかなというようなことを感じました。

小長井先生のも、全スペクトルということで大変おもしろく伺わせていただきまして、1,000 suns とか、そういうことでなくて、10 suns とか 20 suns、50 suns ぐらいでやるというのが大変新鮮で、それも、数字の上というようなことでご謙遜されていましたが、40%はもう十分に見えるというふうなお話だ

ったんで、これも全然問題なく、いいプロジェクトとしてでき上がっているのではないかなというふうに感じました。

以上です。

【松村分科会長】 宇治原委員、お願いします。

【宇治原委員】 今日はどうもありがとうございました。

全体的に、2050年、どうなるのだろうと純粋にすごく興味があって最初から聞かせていただいたのですが、まず、全体を通して思ったのは、やっぱり多接合というか、そのスプリットも含めてですけど、これは王道なのだなというのを今日改めて思いました。

あと、もう一つ、中野先生とかもおっしゃったその中間バンド型で、ここをやっぱり新しい物理のものがどこまで本当に行けるのかというのが、個人的にはすごく興味があるのですが、少しずつ原理的な証明もされてきたということだったので、楽しみだなと思いました。

あと、もう一方、そういう意味では、多接合とかスプリットとか、そういう複数のセルを使うやり方というのはもうかなり先生方の成果で基礎的な技術とか、これから新しい材料が出てくるときでも応用ができそうな技術とかがかなりこの場で出てきたのではないかと思ったのですが、もう一方で、多分それ以上にやっぱり新しい材料をつくるというのは難しいのだなというのももう一方で思いました。

少しこういう太陽電池の報告とか発表とか聞いていますと、どうしてもやっぱりさっきの効率40%とか、そういうほうばかりになるので、分光感度が出て、I-Vが出てという話になるのですが、今どきでいうと、例えばオペランド測定みたいな、動作環境下での例えばキャリアの挙動がどうなっているとか、応用に近づくと、基礎、応用という言葉は、僕はあまり好きではないのですが、最後のもう一步を行くところにも基礎研究は必要だと思っているのですが、ぜひとも、これは先生方というのもそうですし、NEDOの皆さんにもという意味かもしれませんが、最後のもう一步を行くためには、今言ったみたいに、動作環境下での基礎研究みたいなものが多分必要になってくると思っています。

なので、ぜひとも、単に効率と書くような目標にするのではなくて、その動作環境時のキャリアの挙動が本当にどうなっているのかというようなことが、次のプロジェクトのときにそういうグラフがいっぱい出てくるような報告会になったほうが、多分新しい材料を見つける上でのヒントにもなると思いますし。

あと、もう一言だけ言うとすると、新しい材料のときに、もう一つ難しいのは、理想的な材料と実際の材料の違いというのがあると思うのですが、それというのは、簡単に言うと、欠陥とかそういうのがすごく問題になってくるのですが、今、例えばNIMSとかマテリアルズ・インフォマティクスとかというふうにやって、新物件探索の研究というのがどんどん進んでいるのですが、本当はそこに欠陥インフォマティクスみたいなものがある、リアルな材料インフォマティクスみたいなものをつくっていかなくちゃいけないと思うのですが、多分、太陽電池ってその貢献をすごく受ける分野だと僕、思っていますので、ぜひともその太陽電池のところをきっかけに、今のマテリアルズ・インフォマティクスをリアル・マテリアルズ・インフォマティクスにするような、そういうようなビジョンも持っていただくと、2050年というのがすごく何かもっとリアルに感じられるのかなというふうに思いました。

以上です。

【松村分科会長】 高倉委員、お願いします。

【高倉分科会長代理】 今日、全体をお聞きしまして、それぞれのリーダーが非常に高い目標をお持ちになって、非常に努力されていい成果を出されて、まさに日本が世界の太陽光のリーダーとしてあり続けるということに非常に貢献されたので、非常に立派な成果だったと思います。特に、なかなか日本人、なじまないのですが、自己評価をきっちりされて、だめなものはだめと、いいものはいいというのをきっちり自己評価されたところにおいても非常に評価できるのではないかなというふうに思っております。

ほかの委員の先生方と違う点で、少し申し上げたいのですが、このプロジェクトの評価として、

このコメントがいいのか悪いかわかりませんが、1 つは、新しいマネジャーを育ててきたかという。つまり、小長井先生もよくご存じだと思うのですが、やっぱり当初、サンシャイン計画が始まったころに、それこそ東大の青木先生、東工大の高橋先生、阪大の濱川先生、京大の松波先生、それから、梅野先生、こういうもうもう本当に最初に走り出された先生方の下で、小長井先生も私もひいひい言いながら追いついてきたところだと思います。小長井先生も定年になってしまったんですけども、次のリーダーをきちっと育てていかなきゃいけないというのが少し残っていると思います。その人たちにこれから受け継いでもらわなきゃいけないという。

かつて、NEDOのプロジェクトは、NEDOが開催するいろんな委員会がありまして、そこに若い人たちを、会社の人も含めて、若い技術者を集めて、いろいろな委員会でかんかんがくがくやりましたけれども、その辺が、2000年代に入ってから、いわゆる提案公募型に切りかわった段階で、なかなかそういう機会が持たなくなってきて、新しいリーダーの姿がなかなか見えなくなってきちゃったのではないかなという気がしまして、その辺のシステムをもう少し考え直さなきゃいけないのではないかなということを少し老婆心ながら今感じております。

もう一点ですけれども、2回目の中間評価はちょうどFITが始まったころに出されていて、その後、FITが始まって、現状、今、3年ほどたちましたのですが、かなり状況が変化してきていますですね。国民目線でも、やっぱりFITに対して電気代を国民全員が負担している、この負担がどんどん増えていくのだということを皆さん、もうご存じになって、いつまで国民が負担しなきゃいけないんだということをだんだん思われることになっていると思います。

そういう意味で、1つだけ申し上げたいのは、やっぱり2050年はいかにも遠過ぎる。もっと、2030年ぐらいにこのあたりが実現できるような、そういう少し加速的なプロジェクトマネジャー、マネジメントが要るのではないかなというふうに、これはNEDOさん向けに話しているのですが、そういうふうにやっていただけたらいいなというふうに思いました。

以上です。

**【松村分科会長】** ありがとうございます。

それでは、最後ですけれども、今日発表をお聞きして、まさにこの分野の中心になって、日本の、世界のと言ったほうがいいのかもかもしれませんけれども、分野のリードをされた先生方のご発表をお聞きして、さすがだなというふうに思いました。

その先生のグループの中に、それぞれ研究者、あるいは、会社、そういう日本のトッププレーヤーのメンバーがそろって、日本の実力がここでいかに示されたのだなと思って、これまでのご研究、そのご努力に敬意をあらわしたいと思います。本当にありがとうございました。

それで、そういう意味で、特に批判的なことは何もないのですが、今少し重なってくるころ、それで、そのほうが記録のためにもそれがいいということで、コストのことがやっぱり大分ここで話題になりました。

それで、2050年、私は長期のビジョンをもって進むというのは非常に大事なことで、もう少し短期のものをあわせて行ったらいいと思うのですが、その7円というのが本当にどれだけ根拠があるかというのは個人的には非常に疑問を持っています。素人だからそう思うのかもしれませんが、あるいは、14円も本当かなという気もします。

それで、こういう長期のビジョンに対して、やっぱり経済の方とかコストを評価できる方とか、あるいは、将来のやっぱり太陽光発電を考える上で、安全性とか、もっと研究者、太陽光発電、その技術の研究者だけではない、もっと広い視点からどうあるべきか、こういうことを満足しなかったらできないとか、何かそういう広い視点が必要ではないか、特に長期のビジョン、プロジェクトに関してはそんなことを思いました。

それから、この後、我々委員のほうは、先ほどの話で、A、B、C、D、そこに採点票を書かないといけないのですけれども、先生方の中で、◎、○、△、×とあったんですけれども、それがなかなか難しいところ、お互い難しいのですけれども、こういう長期の目標の研究に対して、数値目標があって、それができなかったから×というのは本当になじむだろうかという思いもします。これ、やったことによって、ここはだめだというのがわかったというのもそれは本当◎ではないかと思うのですね。

ですから、こういう長期ビジョンのプロジェクトに関して、評価がどうあるべきかというの、NEDOさん、あるいは、我々、考えていかないといけない問題ではないかと思うのです。

特に、だんだんプロジェクト、これ、進む中で、私も前のほうの資料を見ますと、やっぱり何か仕分けもはっきりしないなという感じもして、それがだんだん非常にすっきりしてきたのは非常に結構なことだと思うのですけれども、何か最後のほう、目標達成のためにこれを残していったという、そういうところがあると、やっぱり少し長期ビジョンのプロジェクトとしては少し本来違うのではないのという感じもしないではありません。

ですから、小長井先生のお話で、これからはやっぱりそういう将来的なもの、あるいは、原理的なものはJSTとかそういう文科省のほうに責任を負っていくのかもしれませんが、NEDOとして、そういう長期的なものを扱う場合には、その辺の取り組みの仕方、それも検討していかないといけないのかなというふうに思いました。

その絞る中で、例えば、私も途中で言いましたけど、例えば医薬品なんかの最後に残るものといったら、何千の中から1つなのですね。ですから、そういう意味では、あんまり最初の段階から絞らないで、やっぱり長期のものはいろんな可能性を見て、これはだめだろうけど、ちょっとおもしろいなというのを発掘することも非常に大事ではないかなというふうにも思いました。長期のプロジェクトの進め方として、今後もNEDOさんに検討していただけたらと思います。

以上ですけど、大体、先ほど申しましたように、本当に今までのご努力に対して、本当に敬意をあらわしたいと思います。以上です。

それでは、今、委員からの講評、ありましたけれども、それを受けて、もし何か推進者、あるいは、実施者のほうから何かコメントありましたら、ご意見ありましたら、お願いいたします。山田さん、何かありますか。

**【山田主研】** まず、ご講評、非常に参考になりました、今後のマネジメントにぜひ反映してまいりたいと思います。貴重なご意見、ありがとうございます。

質疑応答ではないと思うので、あまり細かい点は少し控えたいと思いますけれども、最後の評価の話は、多分これからの作業に影響すると思いますので、少しだけ触れさせていただきますと、最後、委員長、分科会長からお話があったように、目標を達成しているかしてないかということで○か×かというのはこのプロジェクトに見合わないのではないかというご指摘につきましては、これ、私が言う話ではないかもしれませんが、評価の方法のところ、例えば資料4-2の研究開発成果についてというところを見ますと、成果、目標を達成しているかという視点は確かに一番上に書いてあるのですが、それ以外に、さまざまな視点で評価の話が出ています。

例えば、達成できなかったとしても、課題解決の方針が明確になっているとか、設定された目標以外にも、技術的成果があるとか、汎用性のある成果については云々とか、さまざまな視点がございます。グループリーダーの先生、非常に真面目で、真剣に本件、取り組んでくださりまして、厳し目の自己評価をしておりますが、今日の発表内容も含めて、ご評価いただければ、さまざまな視点で評価いただければと思います。

評点のところを見ましても、目標を達成しているか、してないかではなくて、研究開発成果について、非常によいか、妥当ではないかというような聞き方をしていますので、その点もご考慮いただければとい

うことで、回答になるかなと思っております。

また、NEDO のマネジメントにつきましては非常に勉強になりましたので、今後の進め方等、また機会があれば、ぜひご相談させていただきたいなど、委員の先生方にはご相談したいと思いますし、戦略も見直しておりますので、今日の評価の対象ではございませんけれども、機会があれば、そういった点もご紹介させていただければと思うところでございます。

**【松村分科会長】** ありがとうございます。先ほど、研究者、グループリーダーの先生方への謝意というか敬意をあらわしましたが、支えていただいた NEDO の方々も本当にありがとうございます。立派な研究がおかげさまで進められたのだと思いますので、感謝申し上げます。

9. 今後の予定、その他

10. 閉会

## 配布資料

- 資料1 研究評価委員会分科会の設置について
- 資料2 研究評価委員会分科会の公開について
- 資料3 研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘と非公開資料の取り扱いについて
- 資料4-1 NEDOにおける研究評価について
- 資料4-2 評価項目・評価基準
- 資料4-3 評点法の実施について
- 資料4-4 評価コメント及び評点票
- 資料4-5 評価報告書の構成について
- 資料5 事業原簿
- 資料6-1 プロジェクトの概要説明資料（公開）
- 資料6-2 プロジェクトの概要説明資料（非公開）
- 資料7 今後の予定
- 参考資料1 NEDO技術委員・技術委員会等規程
- 参考資料2 技術評価実施規程

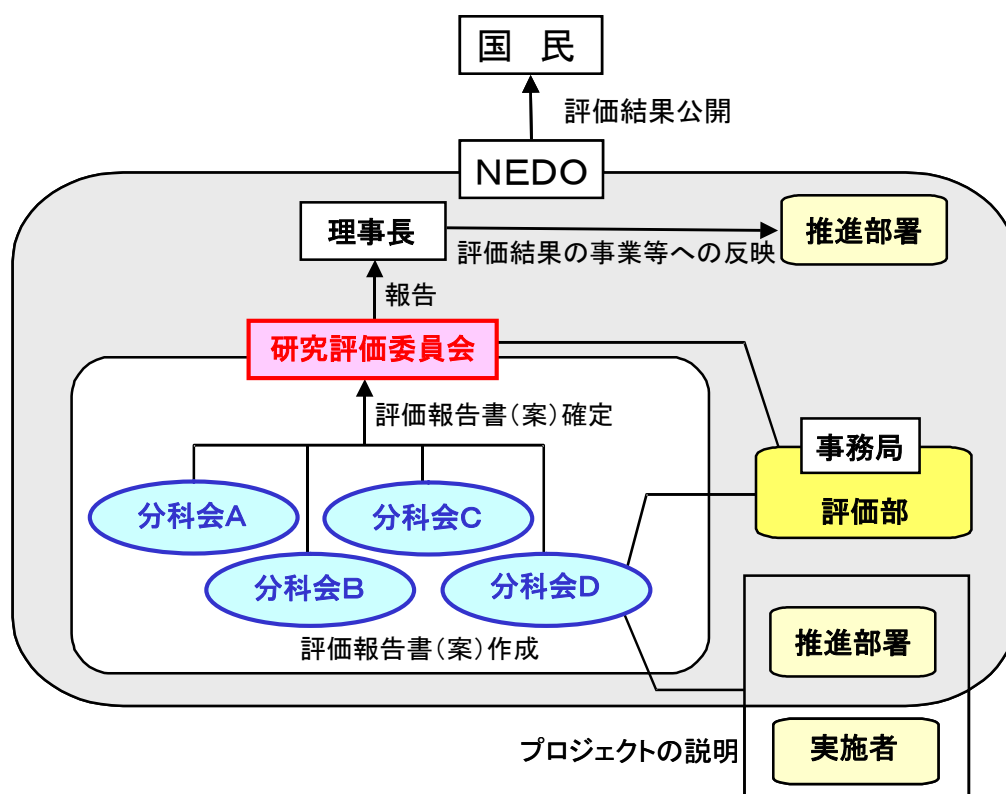
以上

## 参考資料 2 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて実施する。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における研究評価の手順は、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置





## 1. 評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
  - 社会に対する説明責任を履行するとともに、経済・社会ニーズを取り込む
  - 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を促進する
- としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

## 2. 評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員選定に当たっては以下の事項に配慮して行う。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題、国際標準、その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、委員を分科会委員名簿の通り選任した。

なお、本分科会の事務局については、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構評価部が担当した。

## 3. 評価対象

「太陽エネルギー技術研究開発／革新的太陽光発電技術研究開発（革新型太陽電池国際研究拠点整備事）」を評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

#### 4. 評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び実施者からのヒアリングと、それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価及び実施者側等との議論等により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

#### 5. 評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、NEDOが定める「標準的評価項目・評価基準」をもとに、当該事業の特性を踏まえ、評価事務局がカスタマイズしたものである。

評価対象プロジェクトについて、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義、実用化に向けての取り組みや見通し等を評価した。

「太陽エネルギー技術研究開発／革新的太陽光発電技術研究開発  
(革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)」  
に係る評価項目・評価基準

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（エネルギーイノベーションプログラム）の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、市場動向、政策動向等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断できる具体的かつ明確な開発目標を設定しているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 適切な研究開発実施体制になっており、指揮命令系統及び責任体制が明確になっているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 知的財産取扱（実施者間の情報管理、秘密保持、出願・活用ルール含む）に関する考え方は整備され、適切に運用されているか。

(4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化シナリオに基づき、成果の活用・実用化の担い手、ユーザーが関与する体制を構築しているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダーが選任されている場合、成果の実用化シナリオに基づき、適切な研究開発のマネジメントが行われているか。
- ・ 成果の実用化につなげる知財戦略(オープン/クローズ戦略等)が明確になっており、かつ妥当なものか。

(5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向等に機敏かつ適切に対応しているか。

### 3. 研究開発成果について

(1) 目標の達成度と成果の意義

- ・ 成果は目標を達成しているか。
- ・ 成果は将来的に市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。
- ・ 目標未達成の場合、達成できなかった原因が明らかで、かつ目標達成までの課題を把握し、この課題解決の方針が明確になっているなど、成果として評価できるか。
- ・ 設定された目標以外に技術的成果があれば付加的に評価する。
- ・ 世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、または汎用性のある成果については、将来の産業につながる観点から特に顕著な成果が挙げられている場合は、海外ベンチマークと比較の上で付加的に評価する。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 大学または公的研究機関で企業の開発を支援する取り組みを行った場合には、具体的に企業の取り組みに貢献しているか。

(2) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。

(3) 成果の普及

- ・ 論文等の対外的な発表は、将来の産業につながる観点から戦略的に行われているか。
- ・ 成果の活用・実用化の担い手・ユーザー等に対して、適切に成果を普及している

- か。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

#### 4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

##### 本事業における「実用化」の考え方

- ・ 当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることを言う。

##### (1) 成果の実用化の見通し

- ・ 実用化イメージに基づき、課題及びマイルストーンが明確になっているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

##### (2) 実用化に向けた具体的取り組み

- ・ 成果の実用化に向けて、誰がどのように引き続き研究開発に取り組むのか明確になっているか。

## はじめに

本「標準的評価項目・評価基準」は、「技術評価実施規程」に定める技術評価の目的<sup>\*</sup>を踏まえ、NEDOとして評価を行う上での標準的な評価項目及び評価基準として用いる。

本文中の「実用化・事業化」に係る考え方及び評価の視点に関しては、対象となるプロジェクトの特性を踏まえ必要に応じ評価事務局がカスタマイズする。

※「技術評価実施規程」第5条(技術評価の目的) ①業務の高度化等自己改革の促進、②社会への説明責任、経済・社会ニーズの取り込み、③評価結果の資源配分反映による、資源の重点化及び業務の効率化促進

なお「評価項目」、「評価基準」、「評価の視点」は、以下のとおり。

- ◆評価項目：「1. . . .」
- ◆評価基準：上記、各項目中の「(1) . . .」
- ◆評価の視点：上記、各基準中の「・」

## 評価項目・基準・視点

### 1. 事業の位置付け・必要性について

#### (1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（プログラム）、制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

#### (2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

## 2. 研究開発マネジメントについて

### (1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断できる具体的かつ明確な開発目標を設定しているか。

### (2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマごとの配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

### (3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 適切な研究開発実施体制になっており、指揮命令系統及び責任体制が明確になっているか。
- ・ 研究管理法を經由する場合、研究管理法が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 知的財産取扱（実施者間の情報管理、秘密保持、出願・活用ルール含む）に関する考え方は整備され、適切に運用されているか。

### (4) 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

（基礎的・基盤的研究開発及び知的基盤・標準整備等研究開発の場合は、「事業化」を除く）

- ・ 成果の実用化・事業化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化・事業化シナリオに基づき、成果の活用・実用化の担い手、ユーザーが関与する体制を構築しているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダーが選任されている場合、成果の実用化・事業化シナリオに基づき、適切な研究開発のマネジメントが行われているか。
- ・ 成果の実用化・事業化につなげる知財戦略(オープン/クローズ戦略等) や標準化戦略が明確になっており、かつ妥当なものか。

### (5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向等に機敏かつ適切に対応しているか。

### 3. 研究開発成果について

#### (1) 目標の達成度と成果の意義

- ・ 成果は目標を達成しているか。
- ・ 成果は将来的に市場の拡大あるいは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。
- ・ 目標未達成の場合、達成できなかった原因が明らかで、かつ目標達成までの課題を把握し、この課題解決の方針が明確になっているなど、成果として評価できるか。
- ・ 設定された目標以外に技術的成果があれば付加的に評価する。
- ・ 世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、又は汎用性のある成果については、将来の産業につながる観点から特に顕著な成果が上がっている場合は、海外ベンチマークと比較の上で付加的に評価する。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 大学又は公的研究機関で企業の開発を支援する取り組みを行った場合には、具体的に企業の取り組みに貢献しているか。

#### (2) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、又は実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

#### (3) 成果の普及

- ・ 論文等の対外的な発表は、将来の産業につながる観点から戦略的に行われているか。
- ・ 成果の活用・実用化の担い手・ユーザー等に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

#### (4) 成果の最終目標の達成可能性(中間評価のみ設定)

- ・ 最終目標を達成できる見込みか。
- ・ 最終目標に向け、課題とその解決の道筋が明確に示され、かつ妥当なものか。



#### 4. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

##### 本項目における「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることであり、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することを言う。

なお、評価の対象となるプロジェクトは、その意図する効果の範囲や時間軸に多様性を有することから、上記「実用化・事業化」の考え方はこうした各プロジェクトの性格を踏まえ必要に応じカスタマイズして用いる。

##### (1)成果の実用化・事業化の見通し

- ・ 産業技術としての見極め(適用可能性の明確化)ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
- ・ 成果は市場やユーザーのニーズに合致しているか。
- ・ 実用化に向けて、競合技術と比較し性能面、コスト面を含み優位性は確保される見通しはあるか。
- ・ 量産化技術が確立される見通しはあるか。
- ・ 事業化した場合に対象となる市場規模や成長性等により経済効果等が見込めるものとなっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

##### (2)実用化・事業化に向けた具体的取り組み

- ・ プロジェクト終了後において実用化・事業化に向けて取り組む者が明確になっているか。また、取り組み計画、事業化までのマイルストーン、事業化する製品・サービス等の具体的な見通し等は立っているか。

#### ◆プロジェクトの性格が「基礎的・基盤的研究開発」である場合は以下を適用

#### 4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

##### (1)成果の実用化の見通し

- ・ 実用化イメージに基づき、課題及びマイルストーンが明確になっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2) 実用化に向けた具体的取り組み

- ・ 成果の実用化に向けて、誰がどのように引き続き研究開発に取り組むのか明確になっているか。

◆プロジェクトの性格が「知的基盤・標準整備等の研究開発」である場合は以下を適用

4. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

(1) 成果の実用化の見通し

- ・ 整備した知的基盤についての利用は実際にあるか、その見通しが得られているか。
- ・ 公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されているか、その見込みはあるか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ J I S 化、標準整備に向けた見通しが得られているか。注) 国内標準に限る
- ・ 一般向け広報は積極的になされているか。
- ・ プロジェクトの直接の成果ではないが、特に顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)がある場合には付加的に評価する。

(2) 実用化に向けた具体的取り組み

- ・ 成果の実用化に向けて、誰がどのように引き続き研究開発に取り組むのか明確になっているか。

本研究評価委員会報告は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

NEDO 評価部  
部長 徳岡 麻比古  
統括主幹 保坂 尚子  
担当 内田 裕

\* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。

([http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu\\_index.html](http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html))

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地  
ミューザ川崎セントラルタワー20F  
TEL 044-520-5161 FAX 044-520-5162