

「次世代照明等の実現に向けた窒化物半導体等
基盤技術開発／
次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」

事業原簿（公開）

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 電子・材料・ナノテクノロジー部
-----	--

—目次—

概 要.....	i
プロジェクト用語集	iii
I. 事業の位置づけ・必要性について	I-1
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（費用対効果）	I-8
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I-14
2.1 事業の背景	I-14
2.2 事業の目的	I-14
2.3 事業の位置づけ	I-14
II. 研究開発マネジメントについて	II-1
1. 事業の目標	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 研究開発スケジュール	II-6
2.3 研究開発予算	II-7
2.4 研究開発体制	II-8
2.5 研究開発の運営管理	II-8
2.6 研究開発の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性	II-13
3. 情勢変化への対応	II-19
III. 研究開発成果について	III-1
1. 事業全体の成果	III-1
2. 事業の成果詳細	III-4
2.1 研究開発項目①(a)LED 照明：窒化物等結晶成長法の高度化	III-4
2.2 研究開発項目①(b)LED 照明：基板の応用	III-18
2.3 研究開発項目①(2)有機 EL 照明：高効率・高品質化の研究	III-24
IV. 実用化、事業化の見通しについて	IV-1
1. LED 照明の実用化、事業化の見通し	IV-1
2. 有機 EL 照明の実用化、事業化の見通し	IV-1
3.波及効果	IV-3
添付資料	添付資料-1
プロジェクト基本計画	添付資料-1
技術戦略マップ（分野別技術ロードマップ）	添付資料-16
事前評価関連資料	添付資料-20

概要

最終更新日

平成 23 年 6 月 3 日

プログラム (又は施策) 名	IT イノベーションプログラム/ナノテク・部材イノベーションプログラム						
プロジェクト名	次世代高効率・高品質照明の 基盤技術開発	プロジェクト番号			P09024		
担当推進部/担当者	新エネルギー・産業技術総合開発機構 電子・材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 工藤 祥裕、高井 伸之 (平成 22 年 3 月～平成 23 年 6 月現在)						
0. 事業の概要	地球温暖化問題は、世界全体で早急に取り組むべき最重要課題である。これを実現するために省エネルギー化が期待できる化合物半導体や有機物半導体などの新材料を用いたデバイスに関する基盤技術を推進する必要がある。白熱電球や蛍光灯といった従来照明を LED や有機 EL へ置き換えることにより省エネルギー化や高機能化が期待できる照明分野がターゲットとなる。しかし寿命・発光効率・演色性の観点で高効率・高品質な性能に加えて、材料、並びに製造プロセスのコストを低減させる必要があり、その為には既存技術の改良にとどまらない基盤的な研究開発が不可欠である。本プロジェクトでは、これら課題を解決するための基盤技術開発を行うことにより、我が国のエネルギー消費量削減に貢献するとともに、地球温暖化抑制につなげることを目的として実施する。						
I. 事業の位置付け・必要性について	まだ開発リスクが高いながら今後の日本を代表する基盤技術として有望な次世代照明の基盤技術開発を行うことにより、エネルギー消費の高い民生部門の照明分野への次世代照明の早期普及を実現し、省エネルギー化を推進する。						
II. 研究開発マネジメントについて							
事業の目標	蛍光灯と比較して消費電力を半分にする発光効率 (130 lm/W 以上) と演色性 (平均演色評価数 80 以上) を両立しつつ、蛍光灯並みのコスト (寿命年数及び光束当たりのコスト 0.3 円/lm・年以下) で量産可能な次世代照明の実現を目指すための基盤技術開発を行い、当該照明の早期実用化を図る。						
事業の 計画内容	主な実施事項	H21FY	H22FY	H23FY	H24FY	H25FY	H21~H23 総額 (百万円)
	(1) LED 照明 窒化物等結晶成長 法の高度化-1 (HVPE 改良法)		(1,160)	(450)			1,610
	(1) LED 照明 窒化物等結晶成長法 の高度化-2 (Na フラックス法)		(1,798)	(350)			2,148
	(1) LED 照明 基板の応用		(507)				507
	(2) 有機 EL 照明 高効率・高品質化-1 (真空蒸着法)		(1,445)	(300)			1,745
	(2) 有機 EL 照明 高効率・高品質化-2		(802)	(300)			1,102
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位: 百万円)	会計・勘定	H21FY	H22FY	H23FY	H24FY	H25FY	H21~H23 総額 (百万円)
	一般会計		5,407	—	—	—	5,407
	特別会計 (本予算) (需給)	—	—	1,400	—	—	1,400
	加速予算 (成果普及費を含)	—	305				305

	総予算額（実績）	5,712	1,400			7,112
開発体制	経産省担当原課	商務情報政策局情報通信機器課				
	委託先*委託先が管理法人の場合は参加企業数および参加企業名も記載）	三菱化学（株）、シチズン電子（株）、NECライティング（株） （株）イノベーション・センター、大阪大学、名古屋大学 エルシード（株）、名城大学 パナソニック電工（株）、出光興産（株）、タツモ（株）、長州産業（株）、山形大学、青山学院大学 コニカミノルタ・テクノロジーセンター（株）				
情勢変化への対応	以下の情勢変化の対応を行った。 ●有機EL照明の低コスト化実現に向けた効率化・確実化のために、平成22年4月、製造プロセス術を保有するパナソニック電工、長州産業株式会社に対して、実用化普及加速に向けて、加速資金を投入して目標の高度化見直しを行った。 ●LED照明の本研究開発後の速やかな実用化・事業化のため、平成23年5月、事業家のリコー（株）に再委託先としてプロジェクト参画した。					
評価に関する事項	事前評価	平成21年度実施				担当部 電子・材料・ナノテクノロジー部
Ⅲ. 研究開発成果について	研究開発項目①（1）「LED照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発」 （a）窒化物等結晶成長手法の高度化に関する基盤技術開発 5～10mm 角サイズの結晶成長をHVPE法、Naフラックス法の2通りの異なるアプローチで実施した。本結晶を用いてLEDデバイスを作成・評価して、ステージI目標の発光効率175 lm/W以上、平均演色評価数80以上の性能が達成できることを検証した。 （b）基板の応用によるデバイス技術の開発 5～10mm 角サイズの結晶の作成およびLEDデバイスとしての試作・評価を行った。ステージI目標の発光効率175 lm/W以上、平均演色評価数80以上の性能を実現するための課題を抽出した。					
	研究開発項目②(2)「有機EL照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発」 発光面積100cm ² 以上で発光効率130 lm/W以上、平均演色評価数80以上、輝度1,000cd/m ² 以上、輝度半減寿命4万時間以上の有機EL照明実現に当たり、真空蒸着製法及び塗布製膜製法の異なるアプローチについて技術課題を明確にした上で本課題を解決する実行計画を策定した。本性能を実現する上で重要な青色燐光材料の開発に着手し本燐光材料を適用した白色発光デバイス、および本性能を引き出す層設計技術と光取り出し技術を開発した。発光面積25cm ² 以上の有機ELパネルのプロトタイプ試作を行い、効率50 lm/W以上、平均演色評価数80以上、輝度1,000cd/m ² 以上、輝度半減寿命1万時間以上の性能が達成できることを検証した。加えて生産効率を向上させる製造プロセス技術として、一貫性蒸着製膜プロセス技術開発、及びRtoR製造プロセス技術開発に着手して、製造プロセスに要求される条件を明確にした。					
	投稿論文	「査読付き」15件				
	特許	「出願済」46件、「登録」0件、「実施」0件（うち国際出願2件）				
	その他の外部発表（プレス発表等）	フランクフルトLight+Building2010展示会出展（平成22年4月）など87件				
Ⅳ. 実用化、事業化の見通しについて	計画終了後は本技術開発の成果に基づき、LED光源、有機EL光源を装飾照明等の新規市場のみならず一般照明（白熱電球、蛍光灯）市場に向けて平成26年度から実用化・製品化を予定。2020年度までにフローベースで蛍光灯を代替する予定。					
Ⅴ. 基本計画に関する事項	作成時期	平成21年12月 制定				
	変更履歴	平成22年3月 改訂（ナノエレ窒化物プロジェクトとの統合）				

プロジェクト用語集

用語	説明
有機 EL 素子	<p>発光を伴う物理現象を利用した有機発光素子であり、有機発光層内に注入されたホールと電子の再結合によって発光を生じるもの。有機 LED、OLED (Organic Light Emitting Diode) とも称される。</p> <p>陽極と陰極の間に数十～数百 nm の有機薄膜を備えた構造であり、</p> <p>一般的な構造として、ガラス基板／透明電極（陽極）／ホール注入層／ホール輸送層／発光層／電子輸送層／電子注入層／金属陰極などが知られている。</p>
発光ユニット	<p>例えば、ホール注入層・輸送層／発光層／電子輸送層・注入層から形成される有機 EL 素子の構成。</p> <p>（発光ユニットを電極間に形成すると、一般的な有機 EL 素子として機能する。）</p>
マルチユニット素子	<p>陽極と陰極との間に、複数の発光ユニットを備える素子。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・発光ユニット間には、発光ユニットを電気回路的には直列に接続する機能を果たす中間層が設けられている。 ・本構造を取ることで、同一発光ユニットを2つ備えるマルチユニット素子の場合、一定電流を流した時の発光強度が約2倍、駆動電圧も約2倍、となり、低電流でも高輝度を得ることが可能となる。また、同一発光強度を得るための電流量を半減できるために、長寿命化が可能である。 ・異なる発光色のユニットを組み合わせることで、混色が可能である。 ・薄膜を積層した光学多層構造であるため、光学設計は複雑化する。 <p>他に、タンデム素子、マルチフォトン素子 とも称される。</p>
中間層	<p>マルチユニット素子において、発光ユニット間に挿入され、両発光ユニットを電気回路的に直列接続する機能を果たす層。</p> <p>光が透過するため透明性が高く、また熱的・電氣的に安定性が高いことが必要である。</p>
輝度	<p>面状の光源がある方向に単位立体角あたりに放射する光の、光源における単位面積あたりの明るさ。単位はカンデラ毎平方メートル (cd/m²)。</p>
平均演色評価数 (Ra)	<p>基準光源による色彩の再現の忠実性を指数で表したもので、原則として 100 に近いほど演色性が良いと判断される。JIS (日本工業規格) で定められた基準光との比較の上で測定対象となる光源が、演色評価用の色票を照明したときに生じる色ずれを指数として表した演色評価数 (R1～R15) の内、R1～R8 を平均した</p>

	もの。
量子効率	電流（エレクトロン）から光（フォトン）への変換効率
発光効率	<p>光源の効率を評価する指標であり、光源に投入する電力（W）に対する光源から発する光束（lm）で表し、単位は、単位電力あたりの全光束 1m/W（ルーメン毎ワット）で表す。量子効率とは、白色光の原理的な変換効率（約 240lm/W）を用いて、下記式で関連づけられる。</p> <p>なお、下記式中の電圧ロス率とは、理論的限界駆動電圧（約 2.7V）と実駆動電圧の比である（=2.7/実駆動電圧）。</p> $\text{発光効率 (lm/W)} = \text{量子効率} \times (1 - \text{電圧ロス率}) \times 240 \text{ (lm/W)}$

輝度半減寿命	ある輝度で発光させた有機ELデバイスの初期輝度が半減するまでの時間。なお初期の輝度が半分になる時間を L50 半減寿命と言い、70%になる時間を L70 半減寿命と言う。
保管寿命	規定の条件で保管する場合の故障寿命
ホスト	発光層を構成する主材料であり、主として電荷輸送と、再結合エネルギーのドーパントへのエネルギー移動を司る。
ドーパント	発光層を構成する副材料・発光材料であり、発光を司るとともに、電荷輸送も一部担う。
ITO	インジウムスズ酸化物(Indium Tin Oxide)。 スパッタ法等によって成膜され、 10^{-4} Ωcm 程度の比抵抗を有する透明電極として使用される。
IZO	インジウム亜鉛酸化物(Indium Zinc Oxide)。 スパッタ法等によって成膜され、 10^{-4} ~ 10^{-3} Ωcm 程度の比抵抗を有する透明電極として使用される。
インピーダンス分光法	微小正弦波電圧信号を素子に印加し、その応答電流信号の振幅と位相からインピーダンスを算出し、印加電圧信号の周波数の関数としてインピーダンススペクトルを得る測定法。有機EL素子の有機層を、抵抗や静電容量などで表現した等価回路を決定することが可能となり、動作解析や劣化解析に有用である。
スパッタ	金属表面に高エネルギー粒子を当てると金属表面から原子が飛び出すこと。
スパッタリング	真空チャンバー内に薄膜としてつけたい金属をターゲットとして設置し、高電圧をかけてイオン化させた希ガス元素や窒素を衝突させることにより、ターゲット表面の原子がはじき飛ばされ、基板に到達して膜が形成される金属成膜技術。
NPD (α-NPD)	有機ELに用いられるホール輸送材料。 以前から使用されてきた比較的シンプルかつ性能にも比較的優れ

	た材料の一つであり、さらに分子構造を改良することによって、より優れたホール輸送材料も開発されている。
スリットコート	固形分が溶解および／または分散した塗布液を、スリットノズルから移動する基板上に均一に塗布し、乾燥して薄膜を得る成膜方法。
スリットノズル	前記スリットコート装置に備えられている塗布液吐出口。
メニスカス	ノズル－基板間に形成される液膜。
CAE	Computer-aided engineering / experiment の略。 コンピュータを使用した設計あるいは実験。
ホットウォール	成膜対象物質の蒸発温度以上に加熱した壁面。 蒸着源で気化された成膜対象物質は、ホットウォールの壁面に衝突するため飛散方向が制限され、かつ壁面温度が高いため、基本的には弾性衝突（あるいは付着－最蒸発）によって壁面には付着しない この結果、成膜レートおよび材料使用効率を大幅に向上させることが可能。
インラインプロセス	対象物を移動させながら対象工程（本研究の場合は蒸着）を行う方法。対象物を停止させ作業を行う（バッチプロセス）に対して、作業性が高い。
膜厚プロファイル	領域内に形成された膜厚の分布。
蒸着	金属や酸化物などを蒸発させて、素材の表面に付着させる薄膜を形成する方法の一種。
モルフォロジー	有機 EL の分野では、電極上に形成された薄膜層の膜質およびその代替としての表面形状を意味することが多い。
インライン蒸着	<p>基板をライン状に並んだ複数の蒸着源に沿って移動させることによって、連続的に蒸着する方法。一般的に用いられているクラスター型蒸着プロセスに対して、以下の特徴を有する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・複数の基板に対する連続的な成膜が可能であるために、処理能力が高い ・大面積基板に適用する際に、より高い材料使用効率を実現しやすい、蒸着源には、幅方向の均一成膜性が求められる ・一定の構造の有機 EL 素子を連続的に生産することに適する
	<p>The diagram illustrates two evaporation processes. On the left, the 'In-line evaporation process' shows a series of rectangular substrates moving in a line from left to right, passing over a single evaporation source. On the right, the 'Cluster evaporation process' shows multiple substrates arranged in a cluster, moving from the center outwards, passing over a central evaporation source. Labels with arrows point to the 'In-line evaporation process', 'Cluster evaporation process', 'Substrate movement', and 'Vacuum evaporation chamber with evaporation source'.</p>
封止	金属やガラスなどを用いて有機 EL デバイスへの水分や酸素の進入を抑制し、有機 EL の劣化を防ぐこと。
OLLA	2004年10月～45ヶ月間実施された欧州の有機 EL 照明開発プロ

(high brightness Organic Light emitting diodes for ICT & Lighting Applications)	プロジェクト名称。 第6次フレームワーク (EU の最大の研究開発支援制度: 2002~2006年) の支援を受けたもの。 本プロジェクトの目標は、照明用高輝度高効率有機 EL の開発と、照明としてのデモンストレーションである。
OLED100	2008年9月~36ヶ月間実施中の欧州の有機 EL 照明開発プロジェクトのフレームワークの支援を受けたもの 本プロジェクトの目標は、欧州に於ける主照明としての高性能有機 EL のすべての要素技術を開発すること。
OPAL (OPAL2008) (Organic Phosphorescent lights for Applications in the Lighting market 2008)	1cm ² あたり数ユーロを実現できる、高性能白色有機 EL の製造技術の開発を目標とするドイツのプロジェクト名称。 German Ministry of Science and Technology (BMBF) が支援している。
黒体軌跡	黒体 (完全放射体) というエネルギーを完全に吸収する理想的な物体は、温度が上昇していくと、発する光の色が赤→黄色→白と変化していく。このときの絶対温度 T(K) を色温度という。又、この温度と色の軌跡を黒体軌跡という。
配光	照明器具又は光源より発した光の空間分布を称して配光という。
発光素子	電気エネルギーを光に変換することで表示する素子のこと。
EQE	外部量子効率の略。
RtoR	ロール・ツー・ロールの略。
チップ	GaN 基板上にエピタキシャル成長法により形成した励起用発光素子。
デバイス	チップを実装用基板上に固定し、必要な配線と蛍光体を設置し白色発光可能としたもの。
ランプ	デバイスに反射/透過光学系、通電用リード線等を設置し、商用電源に接続すると使用可能となる電球状の灯具のこと。
器具	LED ランプと組み合わせた照明装置。
アスペクト比	一般的にはある対象物について、X、Y、Z 軸のうちの 2 つの軸における長さの比のこと。
GaN	窒化ガリウム
Na フラックス法	Ga-Na 混合融液に窒素ガスを溶かし込むことで、液中で GaN 単結晶が成長する。Ga のみでは 1 万気圧以上の高圧が必要であった溶液中での GaN 単結晶育成が数十気圧程度で可能になる方法。
アモノサーマル法	アモノサーマル (Ammonothermal) 法 超臨界アンモニアに GaN を溶解・析出させることで GaN 結晶を育成する方法。結晶析出にはアルカリ性、もしくは酸性の鉍化剤を溶液に溶解することが必要である。アルカリ性鉍化剤では 4000 気圧以上、

	酸性鉍化剤では1500気圧以上の高圧条件が必要となる。
エピタキシ成長法	結晶成長の方法として、固相結晶を基板の配向性を維持させながら晶出させる方法。
LPE 法	液相エピタキシ(Liquid Phase Epitaxy)法 結晶成長の方法として、溶液から固相結晶を基板の配向性を維持させながら晶出させる方法である。気相成長などに比べ成長速度が速く、また熱平衡に近い条件で結晶成長させるため厚膜化しても結晶性の低下が小さいなどの特徴を持つ。
HVPE 法	HVPE (Hydride Vapor phase Epitaxy) 法 バルク GaN 結晶育成方法としては最も広く研究されており、試験的に出荷されているものはこの方法で育成されたものである。基本原理は以下の反応式で表される。 $\text{GaCl} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{GaN} + \text{HCl} + \text{H}_2$ この反応では、GaCl ガスと NH ₃ ガスがサファイア等の基板上で反応することで GaN 結晶が成長する。サファイア基板上に成長した GaN 結晶は、その後サファイアと分離させ、研磨することで単体の GaN 基板となる。
MOVPE 法	有機金属化合物気相エピタキシャル成長法 (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy) といい、原料として有機金属化合物およびガスを用いた結晶エピ成長方法、及びその装置である。
内部量子効率 (IQE)	LED に電流を流すことによって発生する電子と正孔の対は、光を放射して再結合するか、結晶中に存在する欠陥を介在して光を放射しないか、あるいは別な波長もつ光を放射して再結合する。内部量子効率はこの電流となる電子と正孔の対が、どれだけ目的の波長をもった光を放射して再結合するかの割合を示す。したがって、この値は、結晶中の欠陥の濃度や発光機構などの材料の物性によって決まり、100%が理想的な値となる。実用レベルでの LED では、10%以上の内部量子効率が要求される。
ナノワイヤ	太さ数～数十 nm の単結晶半導体ワイヤを特にナノワイヤと呼ぶ。基板にマスクパターンを施し、一部に大きき数～数十 nm の穴をあけて成長させる方法や、自然に形成される結晶成長核を利用して成長させる方法、大きき数 nm 程度の金属などの微粒子触媒を用いて成長させる方法などがある。
ワイヤボンド実装	半導体チップの電極部とリードフレーム及び基板上の導体などを用いて細いワイヤを用いて接続実装する方法。
フリップフロップ実装	チップ表面上に突起電極(バンプ)を形成して、直接配線基板上の端子電極と接合する フェイスダウン方式の実装であり、ワイヤーボンド方式に比べ小型化できる特徴がある。

XRD 法	X線回折法 (X-Ray Diffraction)。単一波長の X 線を結晶に照射し、結晶格子で回折を起こす現象を利用して結晶構造を調べる方法。結晶内部の原子配列や、格子面間隔等を精密に調べることができ、照射 X 線の平行性を上げると共に、照射面積を狭小化することによって、微小部での結晶格子の歪分布などが分る
エッチピット法	化学薬品等の腐食・溶解作用により物質表面をエッチングする技術を利用して、結晶転位（結晶欠陥）の位置を調べる方法。結晶表面に存在する結晶転位の部位では、転位の無い部位に比べて結晶格子の歪みや電氣的不均一性によりエッチング速度が異なり、結果として窪みのような形状が形成され、この窪みをピットと称している。
TEM 観察	透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope)：電子を高電圧で加速させて薄片化した試料に照射し、試料を透過した電子や散乱された電子を結像させて結晶構造や組成を観察する方法。試料に結晶転位などの格子欠陥が存在すると、結晶格子に歪み場が生じ、転位の無い部位と透過電子の回折の仕方が異なる。この電子回折の差による回折コントラストを利用して転位の構造を調べることが出来る。
SSL	Solid State Lightng の略。LED、有機 EL 照明が含まれる。

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

エネルギー分野は、第3期科学技術基本計画(2006年3月閣議決定)において、推進4分野のひとつに位置づけられ、総合エネルギー効率の向上に資する技術はエネルギー基本計画(2007年3月閣議決定)において重点課題として位置づけられている。我が国において照明用途でのエネルギー消費量は国内ではオフィスの全エネルギー消費量の約21%、家庭の全エネルギー消費量の約16%、これをCO₂排出量に換算すると照明用途にて国内全体に占めるCO₂排出量の約20%を占める(図I.1.1.1参照)。省エネルギー、CO₂排出量削減という地球規模の課題に影響を与える照明の高効率化を目指した研究開発は、高い公益性を持つものと考えられる。

政府からは2007年12月、温暖化対策の一環として、発光効率が悪い白熱電球の国内製造・販売を数年以内に中止する方針の見通しが打ち出された。

また経済産業省は2010年6月、総合資源エネルギー調査会の総合部会及び基本計画委員会合同会合において「資源エネルギー政策の見直しの基本方針」を示し、大幅な省エネ性能の向上が見込まれる次世代照明については、既存照明(白熱電球、蛍光灯)を置き換えて、2020年までに流通ベースで100%、2030年までにストックベースで100%とすべく、研究開発の加速、導入支援策、省エネ基準の強化等を通じて、普及拡大を図るという方針が発表された(図I.1.1.2)。

具体的には、次世代照明の研究開発の加速、導入支援策、省エネ基準の強化等を通じて、経済産業省研究開発プログラム「ITイノベーションプログラム」及び「ナノテク・部材・イノベーションプログラム」にて次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発を行い2013年度までに従来型照明の2倍の総合効率を実現する次世代照明の基盤技術の確立と標準化の推進を行い、その後はトップランナー制度、エコポイントなどの施策によって次世代照明の普及を後押しすることが計画化された。

国内照明のCO₂排出量

【内電力由来のCO₂排出量】
(2008年)

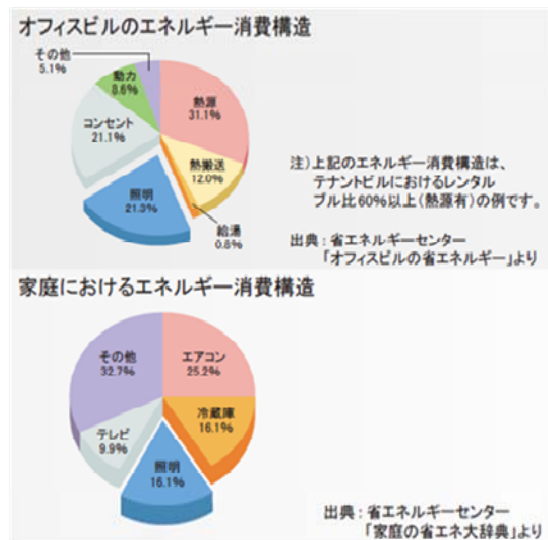
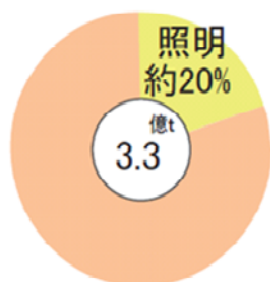
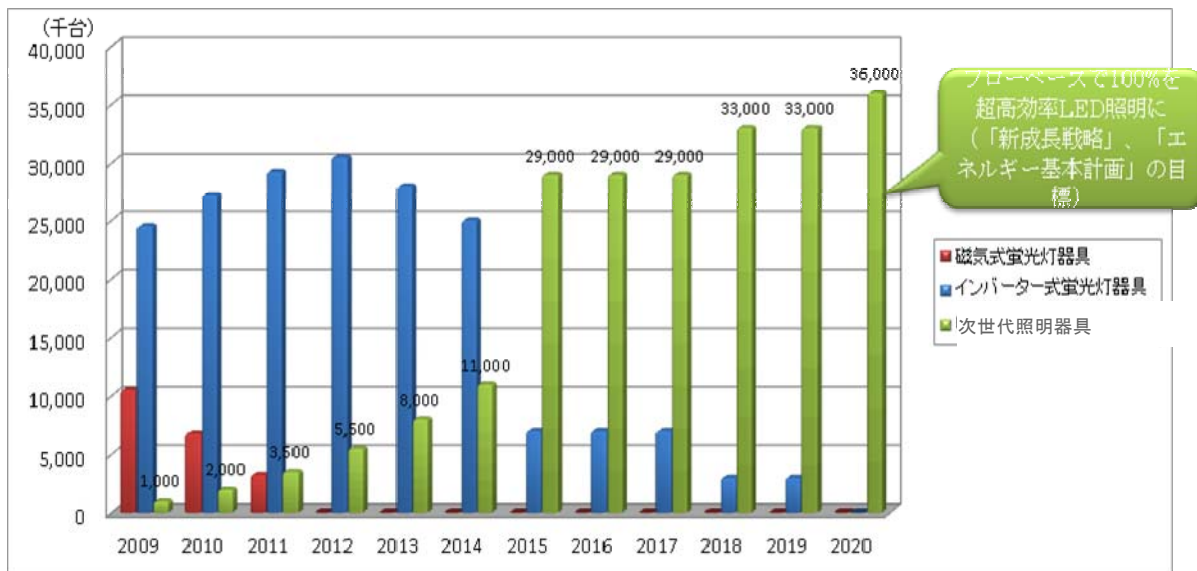


図 I.1.1.1 国内照明の電力消費量グラフ



項目	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	代替対象 「蛍光灯」の スペック	
政策	研究開発					量産化 準備	導入支援策			トップランナー基準				
消費電力 (lm/W)	67.5							-130					150	67.5
単価 (円/㎡・年)	1.3							0.4				-0.3		0.3
生産量 (千台)	80,000	48,900	39,900	32,500	28,500	21,600	18,000	14,700	12,000	10,000	10,000	10,000	10,000 12,000	

研究開発目標：130lm/W以上の照明器具を実現

研究開発目標：0.3円/㎡・年以下で量産

図 I.1.1.2 次世代照明の普及シナリオ ((2010 経済産業省予測資料より))

日本は2020年までに1990年比で25%の温室効果ガスを削減するという国際公約を発表したが、本公約を実現することは容易なことではなく、国がリーダーシップをとって省エネルギー問題の抜本的解決に取り組まなければ目標達成は困難な状況にある。加えて東日本大震災の影響により、原子力発電による電力供給停止により、抜本的な国内省電力化が強く望まれる状況がある。その実現のために経済・社会活動を支えるあらゆる分野で省エネルギー化を図る画期的な技術革新や、技術の導入・普及の促進活動が必要である。

さらにNEDOでは中期目標のひとつに、「高度な情報通信社会の実現」を掲げ、高機能化、省エネルギー化、生産性の向上といった共通課題に取り組むこととしている。本研究開発は、これらの国の産業技術政策、及びそれを受けたNEDOの中期目標に基づき、高度な情報通信社会を実現するための中核技術であるユーザビリティ分野に該当する照明技術の高効率化・高性能化に資することを目的とするものである。

一般照明として普及している白熱電球、蛍光灯を置き換える次世代の高効率照明として世界的にもLEDと有機ELに対する期待が大きい。(表I.1.1)

LEDは点光源として、有機ELは面発光光源としての特質を有しており(図I.1.1.3)、担う役割が異なる。既存の一般照明の省エネルギー化を図るためには、次世代照明として高効率なLEDと有機ELによる置き換えが必要であり、両照明が既存照明を凌駕する性能、コスト、品質が確保できれば相互補完しながら白熱電球と蛍光灯の迅速な代替普及を進めることが可能である。

図I.1.1.4に、NEDO電子・材料・ナノテクノロジー部の電子・情報技術に関する取り組みをま

とめて示す。ここで示す5つの技術分野（半導体技術、ストレージ・メモリ技術、コンピュータ技術、ネットワーク技術、ユーザビリティ技術）は、経済産業省の「技術戦略マップ」における情報通信分野の区分、及びNEDOの「技術ロードマップ」の区分に対応するものである。NEDOでは、本プロジェクトを、ユーザビリティ分野に位置づけ、省エネルギー化、CO₂削減、低消費電力化の促進に取り組む。

表 I.1.1 各国の次世代照明の普及シナリオ

種類	ターゲット	光源	今後の予測
拡散光源 (シーリング ライトなど)	先進国	有機 EL	2015年頃から、LED平面光源を効率およびコストの面で上回り、その後は一般照明は全て有機ELに置き換えられる。
	途上国	蛍光灯	イニシャルコストが高額のため、引き続き蛍光灯が大部分を占める。ただし、途上国においても、新たに照明器具が導入されるエリアは、最初からLED or 有機ELが普及する可能性がある。
指向性光源 (スポットラ イトなど)	ワールドワイド	LED	2015年頃から効率、寿命、コストの面で、現行のハロゲン光源などを上回り、全てがLEDに置き換えられる。
その他光源	ワールドワイド	LED	ディスプレイのバックライト、車のライトなど、小型で高い輝度を必要とする領域は、全てLEDに置き換えられている。
新規用途光源	先進国	LED 有機EL	LED、有機ELともに、白熱電球や蛍光灯には無い、新しい価値（高効率、長寿命、薄い、軽い等々）を活かした新たな用途展開を期待（建材との融合、医療・農業・漁業用途の利用等）。



図 I.1.3 LED と有機 EL 照明の棲み分け



図 I.1.1.4 NEDO 電子・材料・ナノテクノロジー部の取り組む技術分野

本プロジェクトは、次の視点から NEDO が関与する必要性・意義がある。

(1) 公益性

省エネルギー化、CO₂削減、節電対策は国家として取り組まなければならない課題である。前述したように、照明によるエネルギー消費量は、家庭用エネルギー消費量の約 16%を占めており、これは年間電力消費量換算して、1,355 億 kWh/年 (CO₂換算量で、約 5,285 万 t 相当) に達する。効果的な省エネルギー化、CO₂削減、さらに水銀レスによるエコロジー化促進を達成するためには次世代照明の高効率化加速と実用化普及加速を行う抜本的技術開発が望まれる状況にある。

(2) 産業力強化

LED 照明は、現在は実用化導入段階にある。エコポイント制度等の後押しもあり普及が進んでいる。白色 LED 照明の発光効率は白熱電球を上回っているが現在のサファイア基板ベースでの白色 LED の発光効率向上は鈍化傾向にあり緑色 LED 等の一部の LED については高発光効率を実現しているものは存在するものの、白色 LED 照明としては目覚ましい進展は困難な状況にある。サファイア基板による白色 LED の発光効率限界は 130~150lm/W(平均演色評価数 80 前提)と想定されるのに対して、特性上、GaN 基板による白色 LED の発光効率限界は 200lm/W 以上(平均演色評価数 80 前提)であり、図 I.1.1.5 に示す通り、サファイア基板の約 2 倍を超える発光効率が期待できる(注)。GaN 基板は加えて高い放熱性、高い発光均一性等の特性を保有しており品質面でもサファイア基板に比べて優位である。高発光効率が期待される GaN 基板ではあるが、現在はサファイア基板と比較してコスト面では大きく劣る。(図 I.1.1.6)

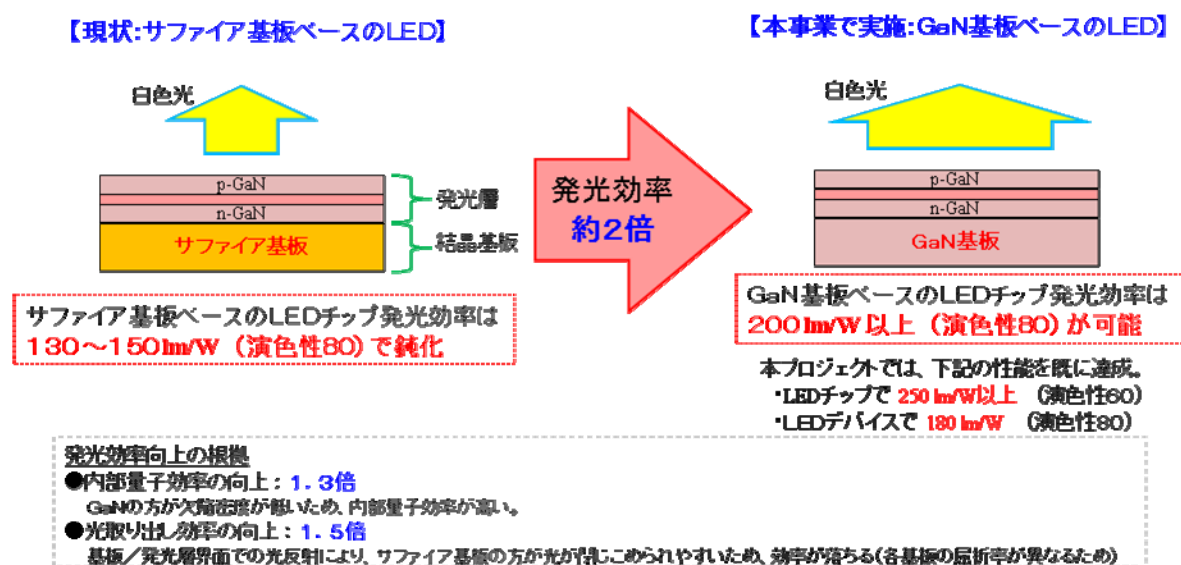


図 I.1.1.5 GaN 基板とサファイア基板の比較

図 I.1.1.6 に示すように、LED デバイス全体に占める GaN 基板コストは 50%以上を占める。GaN 基板 LED デバイスについて剥離コストはサファイア基板 LED デバイスより優れているものの、GaN 基板コストが非常に高価(2 インチ相当でサファイア基板 \$17、GaN 基板 \$1,500)であるために、GaN 基板 LED の全体コストが現在高くなり、一般照明の置き換え普及の際には大きな阻害要因となることが予想される。GaN 基板の生産効率が向上して、GaN 基板製造コストを低減することができれば、サファイア基板 LED デバイスを凌ぐ低コスト LED デバイスの実現が可能である。もし GaN 基板のコストの課題が高品質大口径結晶成長技術開発等により解消することができれば、高効率・低コストな LED 照明の急速な普及を図ることができ、さらに LED 競争で激化する国際的照明市場での普及、産業力育成強化、省エネルギー化の促進に大きく貢献することが可能である。

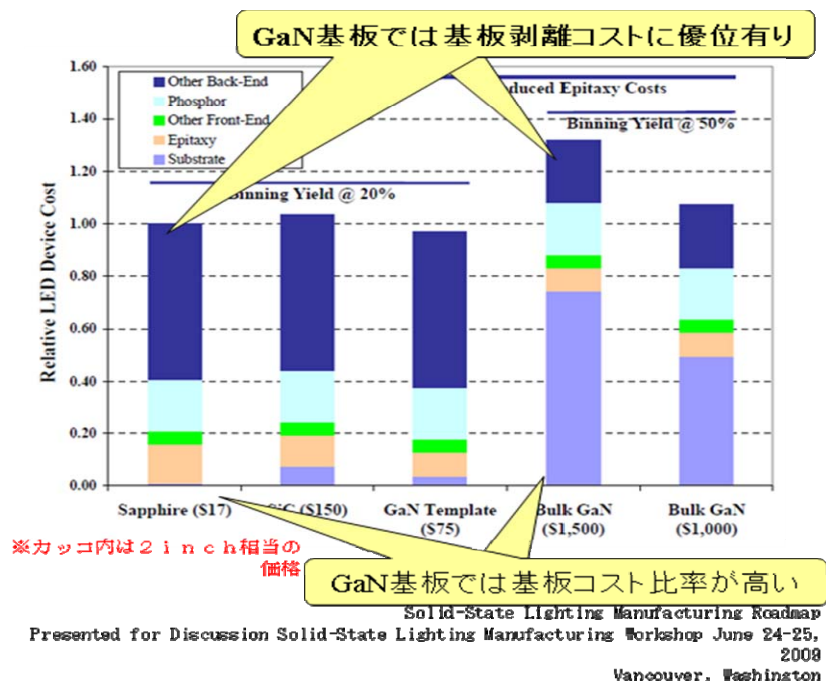


図 I.1.1.6 LED 製造コスト RoadMap

(注) GaN 基板とサファイア基板の発光効率比較：発光効率は、内部量子効率*光取り出し効率に比例する。
GaN 基板はサファイア基板と比較して GaN の方が欠陥密度が低いので内部量子効率で 1.3 倍以上、基板/発光層界面での光反射により、サファイア基板の方が光が閉じこめられやすいため光取り出し効率で 1.5 倍以上の効率差があり、将来、 $1.3 * 1.5 = 1.95$ 倍以上の発光効率の比較差が生じる。

一方、有機 EL 照明技術は、日本から発祥して、現在もなお世界をリードする日本有数の最先端技術である。有機 EL 照明は今後世界的にも蛍光灯を代替する次世代照明として期待されている点、薄膜、軽量、フレキシビリティ等の特性から新規用途の市場開拓の期待されている点から将来の事業化の期待は大きく技術開発による進展は日本の国際競争力に寄与する。

最近では、世界の 3 大照明企業と言われるオスラム（欧州）、フィリップス（欧州）、GE（米国）を含み複数の照明企業が次世代照明の研究開発に力を入れつつある。オスラム、フィリップスは日本に追いつくため、OLLA や OLED100 等の国家プロジェクトにて欧州各国から資金を得て、高発光効率かつ長寿命の有機 EL 照明の技術開発に注力している。GE は、米商務省国立標準技術研究所 (NIST) との共同研究開発成果を活用し有機 EL 照明の基盤技術の強化と実用化をめざしている。このように、欧米の企業は、将来の有機 EL 照明の事業化を見据えて、国家資金を得て、日本を追い越すべく急加速な技術開発を進めている。（表 I.1.2.1）

日本においても国家プロジェクトにより有機 EL 照明技術開発を支援して国際競争力を維持・強化していくことが国内産業育成に必要である。特に日本の総力を結集して材料メーカ、装置メーカ、器具メーカ等の複数の事業レイヤの企業群と、基礎研究を推進する大学等の研究機関が協力した産学連携体制を築くことが国際競争力を強化につながる。

新しい世代照明産業としても、表 I.1.2 に示すように、材料、デバイス、照明器具、製造装置等の上流～下流までのレイヤに分かれた新たな産業構造創出が考えられる。各産業レイヤにて新たな事業化が期待でき、国際的な企業競争が発生することが予想される。

表 I.1.2 次世代照明の事業レイアと対応する実施者プレイヤー

【LED 照明】

【有機 EL 照明】

産業レイヤー	プレイヤー	産業レイヤー	プレイヤー
材料 (GaN 基板、蛍光体等)	三菱化学、リコー、豊田合成、日本ガイシ、ブリヂストン、エルシード、三菱樹脂等	材料 (有機材料等)	出光興産、コニカミノルタ等
LED デバイス (エピ、実装等)	シチズン電子、豊田合成、スタンレー、エルシード等	有機 EL 照明デバイス	パナソニック電工、コニカミノルタ等
LED 照明器具	三菱化学、NEC ライティング、ウシオライティング等	製造装置 (蒸着、塗布)	タツモ、長州産業、コニカミノルタ、日立造船等

(3) 民間企業ではリスクのある研究開発内容

白色 LED 照明は実用化が始まったものの、効率化の点では高効率蛍光灯や高効率電球と大きな差がない。また LED の製造コストが全面的普及の阻害要因となっている。LED 照明の効率化向上のためには、現在利用されているサファイア基板ではなく高効率な GaN 基板を適用する必要があるが、まだ GaN 基板のバルク結晶を生成方式がまだ確立していない。高効率かつ低コストな LED 照明の提供のためには、GaN 基板のバルク結晶成長方式を確立する必要がある。

一方、面発光光源のため拡散損がほとんどない有機 EL 照明の発光効率性の高さは周知の事実であるが、まだ研究段階の技術であり有機 EL 照明の実用化には時間を要する。有機 EL 照明の発光効率等の性能を引き上げるためには光取り出し方式、有機発光材料、白色光生成方式、製造プロセスなどの技術的難易度が高い課題を解決する研究開発が必要であり、企業が取り組むには開発リスクが高く、将来を見据えて国が主導的に低消費電力化技術の開発支援が必要な分野である。もし有機 EL 照明にて蛍光灯を凌駕する発光効率、高性能、蛍光灯並みの低コストを同時に実現できれば、有機 EL 照明の蛍光灯の代替が進むことが期待できる。

以上のように、本研究開発によって世界に先駆けて高性能の次世代照明を実現することは、省エネルギー化及び CO₂ 削減に貢献するとともに、新たな高付加価値製品の創出によって、我が国の照明関連産業の活性化、国際競争力強化に貢献することが期待できる。一方で、LED は本研究開発のためには結晶成長炉等の設備の構築・改造も必要である。また有機 EL も真空蒸着設備や塗布設備導入や新規開発する高価な有機材原料が必要であり、投資負担が非常に大きい。さらに今後、開発するべき課題の技術的難易度が高く、基盤的要素技術の革新的ブレークスルーが必要であることから照明産業・材料産業・装置産業といった産業間の連携、加えて大学の英知を結集して取り組む必要があり、国家プロジェクトとして NEDO が関与すべきものと考えられる。

1.2 実施の効果（費用対効果）

経済性の観点では、省エネルギー、低コストで省資源化を図る高性能高品質の次世代照明の普及加速が将来期待できる。現在の白熱電球、蛍光灯等の照明市場規模は、国内で8,000億円、世界市場は8兆円と推測されており（日経ビジネス 2008.2）、本基盤研究開発により次世代照明の付加価値化が実現して既存照明の置き換え加速が図られれば、日本産業の活性化に貢献できる。さらに次世代照明は薄膜、軽量等の特性を生かした新規市場創出による経済効果の期待も大きい。

2020年には発光デバイスの市場（国際）は1.45兆円、関連部材販売額（国際）は4.950億円、照明器具の市場規模（国内）は3,600億円（前提：36百万台/年、10,000円/台）、と予測される（LED関連市場総調査2010（富士キメラ総研）より引用）。また既存照明の置き換え以外の新市場でも60億ドル（100円/\$換算で6,000億円）の売り上げ規模も予測されている。（米DisplaySearch社予測（2009.3）より引用。）加えて、昨今の国内節電対策の需要への対応も大いに期待が高まっている。

エネルギー技術 個別技術	2010	2015	2020	2025	2030～
高効率照明 高効率蛍光灯	発光効率、寿命 50～100 lm/W 1万時間			高効率性能を前倒し で達成	
	高効率蛍光材料 高効率無水銀蛍光灯 熱損失低減技術				
高効率照明 高効率LED照明	発光効率、寿命 65lm/W 4万時間	100 lm/W	200 lm/W 6万時間		
	高効率LED素子 白色LED用蛍光材料（高効率近紫外誘起蛍光材料） 低コスト化				
高効率照明 有機EL照明			発光効率 100 lm/W 寿命	135 lm/W 4万時間	200 lm/W 6万時間
	高輝度白色EL 高効率化 長寿命化 大面積化				

図 I.1.2.1 経済産業省 技術戦略ロードマップ 2008（エネルギー分野）より

省エネルギー化の観点では、当初、2020年達成が見込まれていたLED照明の発光効率（LEDデバイスで200lm/W）及び2023年～2025年達成が見込まれていた有機EL照明の発光効率（有機ELデバイスで130lm/W）を、本研究開発にて7年～10年前倒しして2013年に達成する（図I.1.2.1参照）。さらに2年後の2015年には本高効率照明による事業化が見込まれる。本前倒しにより、2020年には本プロジェクト成果として、51億kWh（注1）の省エネルギー化が予測される。これは原油換算で、120万kl、CO₂換算で282万トンに相当する省エネルギー効果である。加えて、本プロジェクト成果による次世代照明の性能向上（既存照明と同程度の価格且つ2倍の発光効率）により、既存照明の置き換え需要自体が大幅に加速される効果も十分期待できる。なお、2020年に全既存照明（白熱電球、蛍光灯）を本プロジェクト成果の高効率な本次

世代照明に置き替えた場合には、577 億 kWh/年の省エネルギー効果が見込まれる。

(注 2) これは全国内の全 CO₂ 排出量の約 10%に相当する。

さらに本プロジェクト成果による次世代照明の性能向上（既存照明と同程度の価格且つ 2 倍の発光効率）により、既存照明の置き換え自体が大幅に加速される効果も期待できる。

加えて、エコロジーの観点では、LED 照明は無機物、有機 EL 照明は有機物であるため、蛍光灯と異なり、水銀レスで照明を実現できる利点がある。蛍光灯の代替が今後実現すれば、国際的なエコロジー化にも貢献可能である。

また LED 照明により開発される GaN バルク結晶成長技術は、今後の高周波高耐圧パワーエレクトロニクスデバイス分野への応用が可能であり、国内産業力育成強化の波及効果が期待できる。

(注 1) 算出根拠

現在の普及状況より白熱電球、蛍光灯から省エネ効果のある白色 LED 照明、有機 EL 照明への置き換えが、2009 年より立ち上がり、2015 年より年本格化して 2020 年までに既存照明をフローベースで置き換えると想定。(図 I.1.1.2 経済産業予測より)

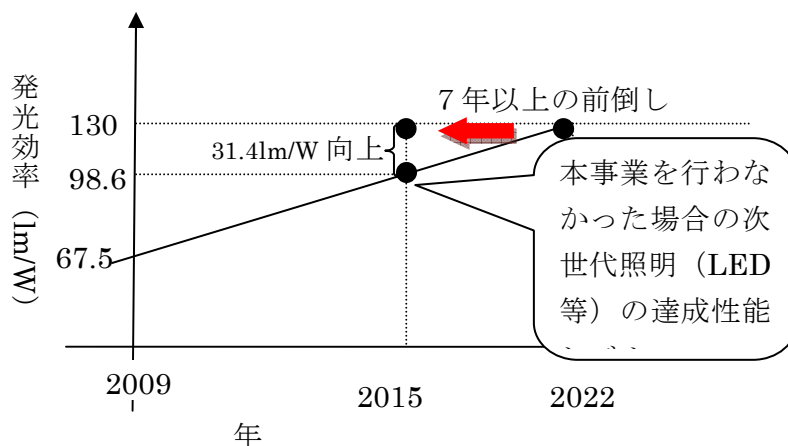
一方、性能面では本研究開発を行わなかった場合、当初 LED 光源 200lm/W (器具効率が 65%として LED 照明器具の発光効率 130lm/W) が研究開発レベルで達成されるのは、2020 年、有機 EL 照明器具 130lm/W が達成されるのは、2000 年～2025 年と予測され (図 I.1.2.1 経済産業省 技術戦略ロードマップ 2008 (エネルギー分野))、その事業化・普及は 2 年後の 2022 年以降と仮定。

本研究開発により次世代照明の発光効率 130 lm/W を 7 年以上前倒しして、2013 年に研究開発レベルで達成して 2015 年より事業化・普及することを仮定。当初の 2015 年の事業レベルの白色次世代照明の発光効率を、比例配賦により 98.6 lm/W と仮定。(図 I.1.2.1 及び下図のとおり)

2015 年より 29,000 千台、以降 2020 年まで随時次世代照明が普及して、2020 年の次世代照明の出荷台数を 189,000 千台と仮定。

照明利用の前提として、1 日 10 時間で一般的光束 2320lm にて利用するものと仮定。

(『省エネルギー技術戦略に関する調査「次世代省エネデバイス技術」(平成 20 年 3 月 10 日)』((財)光産業技術振興協会発行より)



以上から、

本技術開発の省エネルギー効果としては、

$$(a) (2320 \text{ lm} / (130\text{lm/W} - 98.6 \text{ lm/W})) * 10\text{HR} * 365 \text{ 日} * 189,000 \text{ 千台} = 5,097 \text{ 百万 kWh}$$

$$(b) \text{ 原油換算すると、} (a) * 2.36\text{E-}4 = 120 \text{ 万 kl}$$

$$(c) \text{ CO}_2 \text{ 換算すると、} (a) * 0.000555 = 282 \text{ 万トン}$$

(注2)算出根拠

白熱電球（効率 15 lm/W）と蛍光灯（効率 65 lm/W）を継続使用した場合の年間 CO2 排出量（3,820 万トン）から、LED・有機 EL（効率 130 lm/W）で置き換えた場合の年間 CO2 排出量（618 万トン）の差分を CO2 削減量として計算。計算式詳細は以下を参照。

(a)（蛍光灯の全消費電力量）

$$= (\text{個数 } 340,487 \text{ 千個}) * (\text{消費電力 } 0.03 \text{ kW}) * (\text{年間使用時間 } 10 \text{ 時間} * 365 \text{ 日})$$

$$= 37,283 \text{ 百万 kWh}$$

(b)（白熱電球の全消費電力量）

$$= (\text{個数 } 144,059 \text{ 千個}) * (\text{消費電力 } 0.06 \text{ kW}) * (\text{年間使用時間 } 10 \text{ 時間} * 365 \text{ 日})$$

$$= 31,549 \text{ 百万 kWh}$$

(c)（LED・有機 EL にて蛍光灯を置き換えた LED/有機 EL の全消費電力量）

$$= (\text{蛍光灯効率 } 65 \text{ lm/W}) * (\text{器具効率 } 0.5) * (\text{a}) / (\text{次世代照明効率 } 130 \text{ lm/W})$$

$$= 9,320 \text{ 百万 kWh}$$

(d)（LED・有機 EL にて白熱電球を置き換えた LED/有機 EL の全消費電力量）

$$= (\text{白熱電球効率 } 15 \text{ lm/W}) * (\text{器具効率 } 0.5) * (\text{b}) / (\text{次世代照明効率 } 130 \text{ lm/W})$$

$$= 1,820 \text{ 百万 kWh}$$

(e)（蛍光灯と白熱電球を継続使用した場合の年間 CO2 排出量換算）

$$= [(\text{a}) + (\text{b})] * 0.000555 = 3,820 \text{ 万トン}$$

$$(\text{a}) + (\text{b}) = 68,832 \text{ 百万 kWh}$$

(f)（LED・有機 EL にて全て置き換えた場合の年間 CO2 排出量換算）

$$= [(\text{c}) + (\text{d})] * 0.000555 = 618 \text{ 万トン}$$

$$(\text{c}) + (\text{d}) = 11,140 \text{ 百万 kWh}$$

(g)（LED・有機 EL の置き換えによる CO2 削減効果）

$$= (\text{e}) - (\text{f}) = 3,202 \text{ 万トン}$$

$$(\text{電力換算} : 68,832 \text{ 百万 kWh} - 11,140 \text{ 百万 kWh} = 57,692 \text{ 百万 kWh})$$

表 I.1.2.1 に海外の LED 技術開発プロジェクトとの比較、表 I.1.2.2 に、海外の有機 EL 技術開発プロジェクトとの比較を示す。性能では国際的にトップの水準にある（図 I.1.2.3、図 I.1.2.4、図 I.1.2.5）が、投資額では海外との差があり、目標に対する投資効果が高いことを示している。

表 I.1.2.1 日米欧の次世代照明（LED 照明）技術開発の公的支援

地域	プロジェクト	期間	国家投資額 下段括弧（）内は、その事業 規模全体	備考
欧州	EPSRC（英）		数百万 £ [約数億円] (注)（現在実施中）	民間企業向け助成（高品質 GaN 成長、LED 照明システムの効率化等）
米国	ARRA 資金による SSL 研究開発	2009～2019	37.8 百万ドル [約 31 億円] (注) (66.3 百万ドル)	投資費用は 2010 年度の予算。固体照明の基礎・応用研究（主として大学向け）、プロトタイプ作成による試験・改良（民間企業）、低コスト化・高品質化を目指す製造技術開発（民間企業）の 3 つのプログラムから構成されている。大学、GE Lumination, Cree Inc, Phosphortech Corp., OSRAM, Philips 等が参加。
中国	半導体照明プロジェクト（第二期）	2006～2010	3.5 億元 [約 50 億円] (注) (10.5 億元)	民間企業向け支援。LED チップ、パッケージに資源を集中。2010 年までに白色 LED チップの発光効率を国際水準（130lm/W）にする。科学技術部：地方政府：参加企業の費用負担は 1：1：1。
台湾	推動六大振興産業 （うち、グリーンエネルギー）	2009～2012	373 億元 [約 1,044 億円] (注)	テーマは、発光効率や演色性の向上を目指す基礎研究、国際展開をする上で障害となるパテントの分析、街路灯や信号の LED 化推進等。
韓国	LED 照明 15 / 30 プロジェクト	2006～	750 億ウォン [約 67 億円] (注) (2010 年迄の概算)	LED のチップ、パッケージ、照明器具に関する基礎研究への政府投資金額。これに自治体からの追加予算や民間企業の持ち出しが追加される。2012 年までに、発光効率 140lm/W、民間投資規模 4 兆ウォン、雇用 3 万人等を目指す。
日本	本プロジェクト (LED 分のみ)	2009～2010	35 億円	三菱化学、シチズン電子、NEC ライティング、東北大学、三菱樹脂、名古屋大学、大阪大学、イノベーション・センター、エルシード、名城大学、リンシヨピン大学、ブリヂストン、スタンレー、ウシオライティング

(注) 1£=142.49 円 1€=119.28 円 1米ドル=82.99 円 1元=14.2 円 1台湾元=2.8 円 100ウォン=8.92 円

1ユーロ=116.42 円 (2011.6.21MTUG 販売レートより)

表 I.1.2.2 日米欧の次世代照明（有機 EL 照明）技術開発の公的支援

地域	プロジェクト	期間	投資費用	メンバー
欧州	OLLA	2004～2008 (完了)	1,200 万 Euro [約 14 億円] (注)	Philips Technologie, Philips Lighting, Osram Opto Semicon., Fraunhofer, Philips Research Lab., Siemens, Merck, Aixtron, Novalled, 他計 23 団体/企業
	OLED100	2008/09～ 2011/08 (36 ヶ月)	1,250 万 Euro [約 15 億円] (注)	Philips Research, Osram Opto Semicon., Fraunhofer, Novalled, Siemens, 他計 15 団体/企業
	OPAL	2006～2010	6,000 万 Euro [約 70 億円] (注)	BASF, AIXTRON, Schott, Philips, Merck, Novalled, 他計 33 団体/企業
	合計 (欧州)		8,450 万 Euro [約 99 億円]	
米国	DoE プロジェクト	2004～2009	50.0 百万ドル [約 41 億円] (注)	Universal Display Corp., , Santa Barbara, GE Global Research 他計 37 団体
		2008～2010	17.8 百万ドル [約 15 億円] (注)	Universal Display Corp., GE Global Research 他計 8 団体
	合計 (米国)		67.8 百万ドル [約 56 億円]	
日本	照明用高効率有機 EL 技術研究開発と先導調査研究	2004～2006	8 億円	山形大、有機エレクトロニクス研究所
	有機発光機構を用いた照明技術の開発	2007～2009	16 億円	パナソニック電高効率工 (株)、出光興産 (株)、タツモ (株)
	本プロジェクト	2009～2010	22 億円	パナソニック電工 (株)、出光興産 (株)、タツモ (株)、長州産業 (株)、コニカミノルタテクノロジーセンター (株)、山形大学、青山学院大学
	合計 (日本)		46 億円	

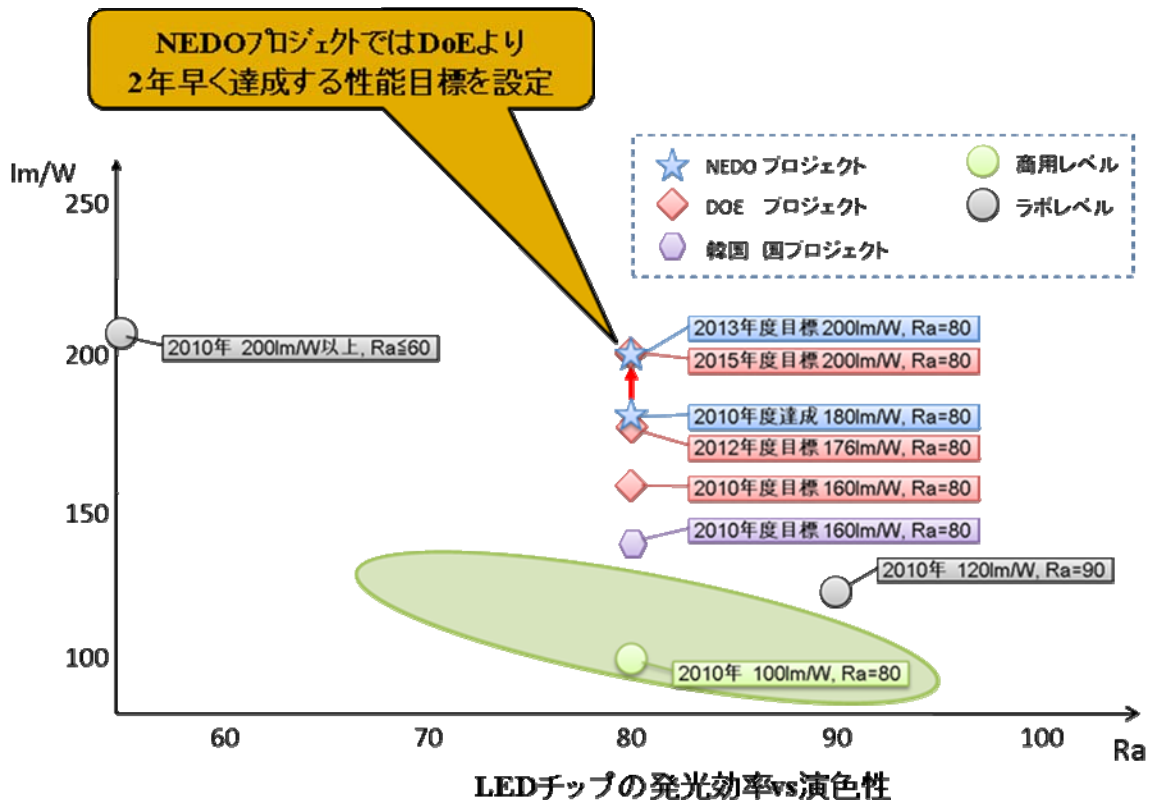


図 I . 1 . 2 . 3 LED 光源に関する目標の国際的な位置づけを示す技術マップ(発光効率-演色性)

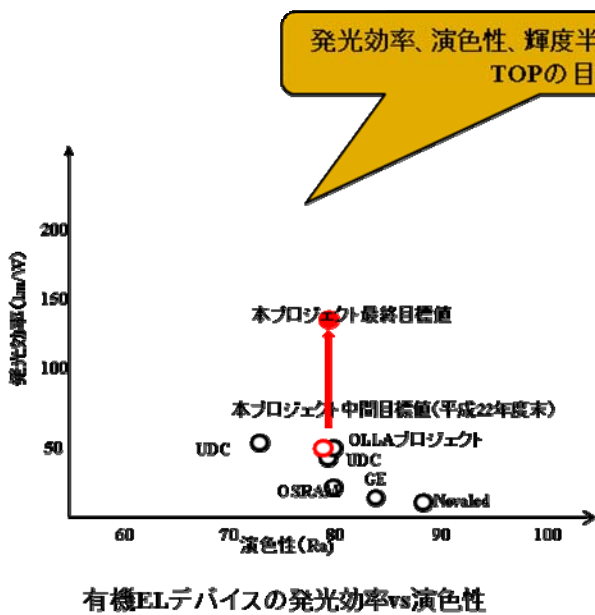


図 I . 1 . 2 . 4. 有機 EL 光源に関する目標の国際的な位置づけを示す技術マップ(発光効率-演色性)

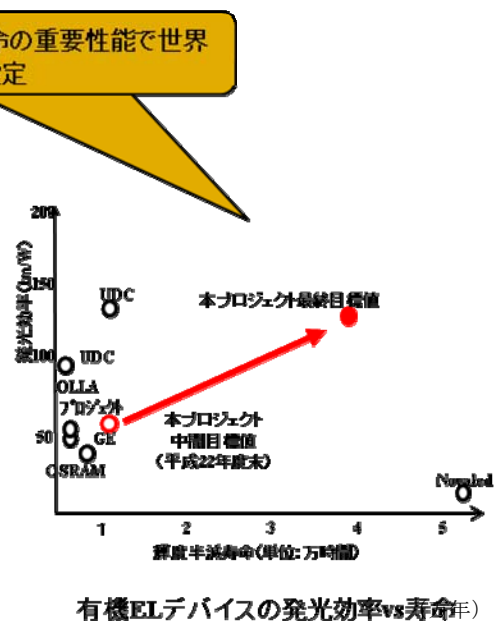


図 I . 1 . 2 . 5. 有機 EL 光源に関する成果の国際的な位置づけを示す技術マップ(発光効率-輝度半減寿命)

2. 事業の背景・目的・位置づけ

2.1 事業の背景

2.1.1 社会的背景

前述のとおり、エネルギー分野は、第3期科学技術基本計画(2006年3月閣議決定)において、推進4分野のひとつに位置づけられ、総合エネルギー効率の向上に資する技術はエネルギー基本計画(2007年3月閣議決定)において重点課題として位置づけられている。また NEDO では中期目標のひとつに、「高度な情報通信社会の実現」を掲げ、高機能化、省エネルギー化、生産性の向上といった共通課題に取り組むこととしている。家庭の消費電力中、約15%を占める照明に対して、地球温暖化抑制のため、白熱電球、蛍光灯を代替する省エネルギー効果の高い有機 EL 照明の早期の実用化が求められている。

蛍光灯は先進的な環境保全施策である欧州特定有害物質使用規制 (RoHS) にて特定有害物質として使用を制限される水銀を含有し、適切な代替手段がないことから RoHS の適用免除となっているものの、早期に代替手段の確立が望まれている。

2.1.2 技術的背景

次世代照明である LED は指向性光源のため、スポットライト、ダウンライト等に適しており、①高指向性、②長寿命、③高効率の特性がありスポットライト、ダウンライト等の用途の他、サイン表示やディスプレイのバックライト等の多目的光源としての置換需要が高い。一方、有機 EL 照明は、面発光光源として蛍光灯光源の理論限界を超える高効率を実現できる可能性があり、家庭用メイン照明を置き換える高効率次世代照明として期待される。さらに①面発光性、②高演色性、③折り曲げが可能で凹凸のある壁面にも実装可能な柔軟性、④水銀を使用しないエコロジー性、⑤紙以上に薄く製造できる超薄膜性、⑥超軽量等、優れた特性を有していることから、これまでにない新しい分野への利用により新事業の創出及び新市場への拡大も大いに期待されている。このように次世代照明として LED と有機 EL 照明への期待は高く、今後は次世代照明の高効率性と低コスト化が実現できれば図 I.1.3 に示した LED 照明と有機 EL 照明に適した利用分野において白熱電球、蛍光灯の代替が急速に進むことが予想される。

白色 LED 照明は実用化が開始され、国際的にも普及し始めたが、現在のサファイア基板ベースでは発光効率の向上に限界があり、高効率化を目指す研究開発に未だ十分な成果が上がっていない。

有機 EL 照明は新しい利用分野、事業分野を切り開く起爆剤として期待されていたものの、まだ実用化に至っていない。今後、国際的な技術競争が加速化することが予想される状況下、白色有機 EL 照明を最初に実現してこれまで研究開発成果を積み上げてきた日本に、まだ技術的アドバンテージがある状況にある。

2.2 事業の目的

本プロジェクトでは、次世代高性能照明となる LED 照明と有機 EL 照明の迅速な普及促進のため、高性能照明光源の開発、及び低コスト化を実現する製造技術の開発に取り組む。

2.3 事業の位置づけ

本事業は、IT イノベーションプログラムの一環で、次世代照明である LED 照明、有機 EL 照

明の迅速な普及促進を狙いとして事業終了後、2年以内に高効率な次世代照明白色LEDと有機EL照明の市場導入を行うための技術開発と位置づける。将来的には白熱電球、蛍光灯の代替普及だけでなく、装飾照明や壁照明などの多目的照明に向けた新市場の創出、及び国際的事業の拡大を狙いとして基盤技術を確立する。

次に本研究開発の国際的位置づけについて述べる。次世代照明の実用化に必要な性能としては発光効率だけでなく長寿命化、高演色性が重要な焦点となっている。これらの性能は相互にトレードオフの関係にあり、他の性能項目を犠牲にして一部の性能向上を行うことは可能であるが、実用化のためには3つの性能項目全てをバランス良く向上させる必要がある。各国で研究開発が進んでいるが、本プロジェクトの基盤技術開発により、高性能・高品質次世代照明デバイスとして効率、寿命、演色性の性能面で世界トップの成果をあげており、今後の日本の照明事業において優位な立場にある。図I.1.2.3～図I.1.2.5の次世代照明の本プロジェクト成果と海外企業の実績比較を表す技術マップにより本事業の国際的な位置づけを示す。

本事業原簿の対象である「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」が含まれるNEDOプログラム「次世代照明等の実現に向けた窒化物半導体等基盤技術開発」の構成を下図に示す。本プログラムには、「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」の他に、次世代照明の標準活動である「戦略的国際標準化推進事業（LED、有機EL）」及びパワーデバイス向け研究開発である「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発」が含まれるが、本事業原簿の対象外である。

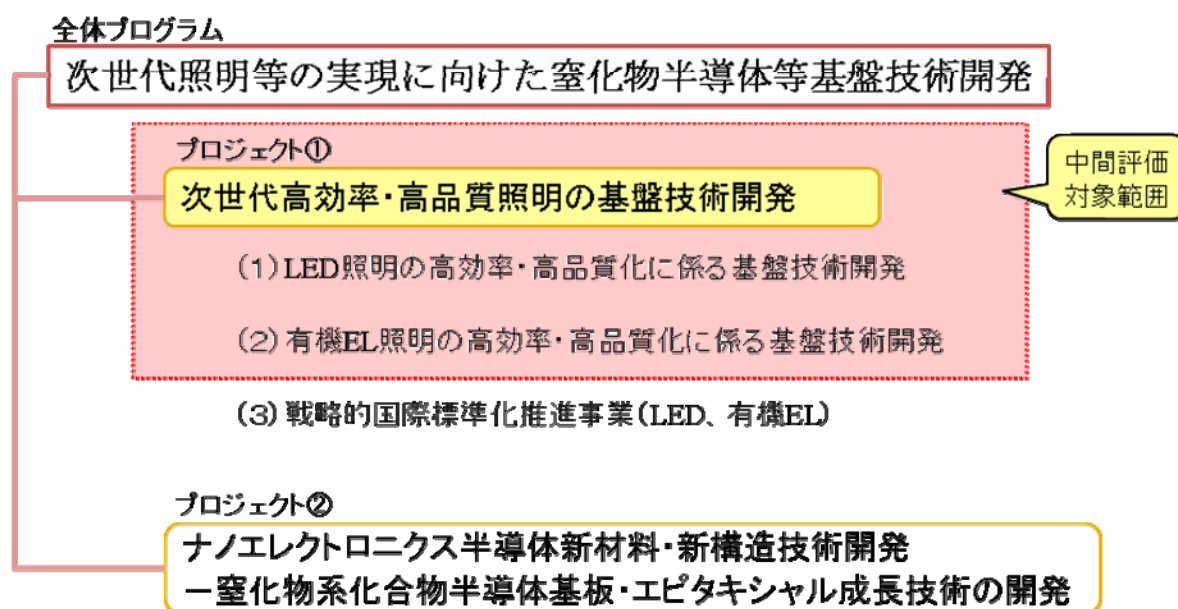


図 I . 2 . 2 . 1 次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発の位置づけ

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

日本の家庭で消費されるエネルギーのうち、照明用途で約 16%を占め、世界的に見ても、広く使用されている白熱電球や蛍光灯などを置き換える高効率照明光源技術の開発が、エネルギー消費量削減のための重要かつ緊急の課題である。

生活照明への適用に際しては、発光効率だけでなく高演色性照明が要求される。例えば、家庭用途に広く消費される環形蛍光灯のうち 90%以上を高演色性の照明が占める。また、オフィスや店舗で多用される直管形蛍光灯でも約半数が高演色性の照明である。そのため蛍光灯照明の代替を促進する上で、高演色性が必要とされる。さらに生活用の照明として一般家庭に受け入れられるためには、高品質発光（均一発光・長寿命など）、発光体の形状（点光源及び面光源）、さらに低コスト（現状の照明器具に代替できる程度の低価格化）などの要求を満たしていくことが望まれる。

本プロジェクトでは、IT イノベーション／ナノテク・部材イノベーションプログラムの一環として、生活照明を代替できる次世代照明を早急に実用化するため、2013 年度までに、高効率であるとともに低コスト化を踏まえた次世代照明の基盤技術を確立する研究開発を行う。これにより高効率照明の早期実用化を図り、省エネルギー化促進に寄与することを目標とする。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

蛍光灯並みの製造コストで蛍光灯の 2 倍以上の効率を実現する高性能・高品質照明光源として次世代照明を実用化して省エネルギー化に貢献するために、「研究開発項目① LED 照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発」と、「研究開発項目②有機 EL 照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発」の 2 項目の研究開発を並行して総合的に取り組む。各 2 項目の詳細研究項目は以下の通りである。

研究項目① (1)LED 照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発

高効率（LED デバイスレベルで 200 lm/W以上）かつ高品質（平均演色評価数 80 以上）LED 照明の低コスト化を実現するため、窒化物等の照明用基板の生産性向上を目的とした結晶成長技術の開発や LED 素子構成構造の最適化等デバイスの高度化についての技術開発を行う。

(a) 窒化物等結晶成長手法の高度化に関する基盤技術開発

バルク結晶方式、板状結晶方式等の手法を用いて、低歪・低転位窒化物等結晶成長技術を高度化するための開発を実施する。

具体的には、結晶核から大口径の低歪・低転位種結晶作製のための成長方位制御や大口径種結晶基板上に窒化物等結晶を高速・長時間成長を目指すバルク結晶方式、異種基

板上での大口径窒化物等結晶低歪化技術及び大口径窒化物等結晶の高速・長時間成長技術を目指す板状結晶方式等、結晶成長手法の高度化を可能とするための技術を開発する。

あわせて、発光効率 200 lm/W以上かつ平均演色評価数 80 以上を達成する LED デバイスを実現するための技術開発を行う。

(b) 基板の応用によるデバイス技術の開発

基板の特殊ドーピングや LED デバイス構造の最適化等、窒化物等結晶成長技術の高度化以外のアプローチにより、発光効率 200 lm/W以上かつ平均演色評価数 80 以上の LED 照明を低コスト化するための技術開発を行う。

研究項目①（２）有機 EL 照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発

高効率（発光効率 130 lm/W以上）高品質（平均演色評価数 80 以上、輝度 1,000 cd/m² 以上、輝度半減寿命 4 万時間以上）を実現する有機 EL 照明デバイス技術開発を行う。具体的には、光学干渉の影響を抑制して効率を向上させる光取り出し技術、気密性を高めて品質を向上させる封止技術、製造工程の高速化を図るプロセス制御技術、材料の利用効率向上を図る薄膜層形成技術等の技術開発を行う。加えて有機 EL を構成する基板・透明電極・有機層等について高効率・高品質化且つ低コスト化に向けた材料開発を行う。

各研究項目における具体的な目標を以下に列記する。

なお、本研究開発は、5 年間の開発期間を平成 21～22 年度末のステージ I と平成 23 年度～25 年度のステージ 2 の 2 段階に分け、各ステージでの目標を定める。

ステージ II では蛍光灯の 2 倍以上の発光効率と蛍光灯並みの低コストを達成するために必要な最終目標設定を定め、ステージ I では、現在の技術レベルを見極めた上で、ステージ II の最終目標を達成する過程で平成 21 年度末から平成 22 年度の期間の約一年間で達成すべき中間目標を定めた。

研究項目①（１）LED 照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発

＜ステージ I 達成目標（平成 22 年度末）＞

5～10mm 角サイズの結晶の作成および LED デバイスとしての評価を行い、発光効率 175 lm/W以上、平均演色評価数 80 以上の達成可否を検証する。

＜ステージ II 達成目標（平成 25 年度末）＞

バルク結晶成長方式で、結晶欠陥 10^4 cm^{-2} 以下、LED 発光波長領域において光吸収が極めて少なく、かつ研磨後の基板サイズが 4 インチ以上となる結晶成長技術を、板状結晶成長方式で、結晶欠陥が 10^6 cm^{-2} 以下、LED 発光波長領域において光吸収が極めて少なく、かつ研磨後の基板サイズが 6 インチ以上となる結晶成長技術を、それ以外の手法においては、上記基板サイズの大型化に相当する生産性を実現する技術をそれぞれ確立する。

いずれの手法においても、LED デバイスとして発光効率 200 lm/W以上かつ平均演色評価数 80 以上を達成する。また LED デバイスにした場合のコストを評価するための試算を行う。

研究項目①（２）有機EL照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発

＜ステージⅠ達成目標（平成22年度末）＞

発光面積 100 cm^2 以上で発光効率 130 lm/W 以上、平均演色評価数 80 以上、輝度 $1,000\text{ cd/m}^2$ 以上、輝度半減寿命4万時間以上の有機EL照明実現の技術課題を明確にして、具体化する実行計画を策定する。理論解析・光学シミュレーション等により実現方式の光学設計を行い、プロトタイプ試作により発光面積 25 cm^2 以上で発光効率 50 lm/W 以上、平均演色評価数 80 以上、輝度 $1,000\text{ cd/m}^2$ 以上、輝度半減寿命1万時間以上の有機EL照明光源を実現する。

また高効率な製造プロセス実現に必要とされる要件を明確にして設計・製作及び基本データの収集を行い、要件を充足していることを検証する。

＜ステージⅡ達成目標（平成25年度末）＞

発光面積 100 cm^2 以上で発光効率 130 lm/W 以上、平均演色評価数 80 以上、輝度 $1,000\text{ cd/m}^2$ 以上、輝度半減寿命4万時間以上の有機EL照明光源を実現すると同時に、コストを評価するための試算を行う。

以下に、各目標値の設定理由について示す。

研究項目①（１）LED照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発の目標設定理由

（i）平均演色評価数(Ra)

照明とは単に照らすだけの光源ではなく、生活空間を創造するために必須の光源である。生活照明への適用に際しては、発光効率だけでなく自然光と同等に見えることが望ましく、その性質を演色性と呼ぶ。一般照明に適用する場合、照明には高い演色性が要求される。演色性の評価指数は、自然光との比較係数である平均演色評価数（Ra値）で表わし、自然光と同一の光スペクトルは、Ra=100である。100に近ければ近いほど、自然光に近く演色性は高い。次世代照明として蛍光灯を代替していくためには、一般的な蛍光灯の演色性（Ra=60～80）を達成する目標として平均演色評価数Ra=80を設定した。Ra=80レベルの高演色性の光源が実現できれば、自然な色に囲まれた、極めて快適な生活空間が実現可能である。

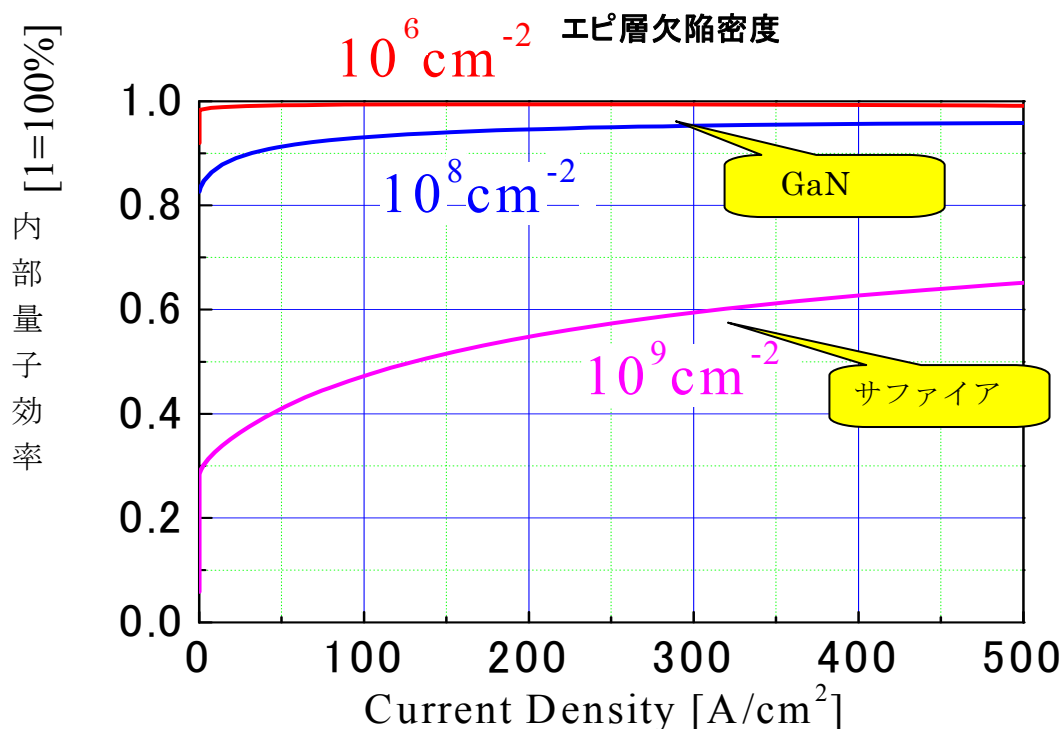
（ii）発光効率

国際公約により、2020年のCO₂25%削減を実現するためには抜本的対策が必要である。特に震災の影響により、今後、原子力発電の拡大普及によるCO₂削減は今後期待することは困難な状況にある。その中で、国内総エネルギー消費の16%を占めている照明の省エネルギー化は重要な位置づけにある。次世代照明で蛍光灯の発光効率の2倍に向上させることができれば、蛍光灯、白熱電球をCO₂削減量を1/5以下にすることが可能である。本プロジェクトでは、一般的な蛍光灯の発光効率を65lm/W、LED照明に実装した場合の器具効率（LEDデバイスを照明器具にセットして用いるときに、反射板での反射、白色カバーによる散乱や吸収等によってロスされる光量を考慮して算出した光の有効利用率）を65%と想定して、LEDデバイスの発光効率の最終目標を、 200 lm/W （LED照明の発光器具効率を $200\text{ lm/W} \times 65\% = 130\text{ lm/W}$ ）に設定した。またステージゲート評価に向けた中間目標として、 175 lm/W に設定した。

(iii) 結晶欠陥

結晶欠陥は少ないほど内部量子効率が高くなり、その結果、発光効率が向上する。現在主流のサファイア基板と比較して、GaN基板は、欠陥密度を小さくし、その結果高い内部量子効率を実現できる。

なお、GaN基板では、図Ⅱ.2.1.1のように、 10^6cm^{-2} でほぼ内部量子効率はピーク（100%）を達成可能であることから、本プロジェクトでのGaN基板の結晶欠陥密度は、 10^6cm^{-2} に設定した。



図Ⅱ.2.1.1 サファイアとGaNの内部量子効率と欠陥密度の関係

(iv) 基板サイズ

現在、GaN 結晶は1～2インチレベルのサイズであるために基板価格が高価であるが、結晶成長方式を開発してバルク結晶を生成することにより、複数基板を効率的に作成することが可能である。現在可能性があり且つ適正なコストが期待できる基板サイズとして、企業ヒアリングの結果から基板サイズを板状結晶成長方式に関しては6インチ、バルク結晶成長方式に関しては4インチに設定した。

研究項目① (2) 有機EL照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発

(i) 平均演色評価数 (Ra)

研究項目①と同様に次世代照明としては、蛍光灯を代替していくためには、一般的な蛍光灯の演色性 (Ra=60～80)を達成する目標として平均演色評価数Ra=80を設定した。

(ii) 発光効率

LED照明と同様に、本プロジェクトの目標として、一般的な蛍光灯の発光効率を 65 lm/W と想定して、有機 EL デバイスの照明器具に実装時の器具効率はほぼ 100%と想定して、LED と同様の 2 倍の発光効率として 130lm/W を設定した。またステージゲート評価に向けた中間目標として、平成 21 年度の有機 EL 光源の研究開発レベルと最終目標を鑑みて、50lm/W に設定した。

(iii) 輝度半減寿命

現行の主たる照明光源である蛍光灯の寿命が1万時間～1.5万時間、器具は4万時間（1日10時間使用するとした場合に10年間の利用）を想定して、輝度半減寿命目標（輝度1,000 cd/m²を4万時間に設定した。なおステージゲート評価に向けた中間目標として、1万時間に設定した。

(iv) 輝度

照明用途への展開が可能となる最低限必要輝度として、一般照明を参考に1,000 cd/m²を設定した。

(v) 発光面積

面状光源である有機ELは、それを複数並置することによって光束を増大させることが容易に可能である。また、大面積化によって歩留まりの急激な低下が起り得ること、今後の輝度向上に伴い、より高い信頼性が必要とされることを考慮してサイズを決定すべきである。

これらの観点から、有機EL照明を構成する歩留まり・信頼性の高い発光ユニットとして使用する時に適したサイズ目標として「発光面積100cm²以上」を設定した。なおステージゲート評価に向けた中間目標とし発光面積25 cm²以上のプロトタイプ試作を設定した。

2.2 研究開発スケジュール

研究開発スケジュールは以下の通り。

技術開発基盤の
研究設備に重点投資

研究開発項目	21~22年度	23年度	24年度	25年度	21~23年度合計
(1) LED照明の高効率化・高品質化に係る基盤技術開発 (イノベーション・センターチーム)	重点化 大型Naフลักス炉の導入	NaP炉改造(機枠、Ga連続供給) MO装置高圧化改造	NaP炉改造(上下移動、Na連続供給) InGaNナノワイヤ配置法最適化		補正: 1,798 本予算: 350 合計: 2,148
(1) LED照明の高効率化・高品質化に係る基盤技術開発 (三菱化学チーム)	重点化 新型HVPE炉大型化、各種結晶分析装置導入	新型HVPE炉4inch化対応改造、多数枚炉製造	多数枚炉製造連続(4inch対応)	多数枚炉製造連続(6inch対応)	補正: 1,160 本予算: 450 合計: 1,610
(1) LED照明の高効率化・高品質化に係る基盤技術開発 (エルシードチーム)	重点化 蛍光SiC基板品質向上のための評価分析装置導入				補正: 507
(2) 有機EL照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発 (ハナソニック電工チーム)	重点化 高効率デバイス構造設計 蒸着プロセス装置設計・導入	新高効率材料合成・開発(青色蛍光材料) 蒸着プロセス装置試作・評価	デバイス試作・評価検証・大面積化 一貫製造プロセス装置改造・最適化		補正: 1,140 加算: 305 本予算: 300 合計: 1,745
(2) 有機EL照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発 (コニカミノルタチーム)	重点化 RtoRプロセス装置設計・導入	RtoRプロセス装置試作・評価/ 通用高効率材料合成・開発	RtoR製造プロセス装置改造・最適化・高速化/ 通用高効率材料合成・開発		補正: 802 本予算: 300 合計: 1,102
合計	5,712	1,400	1,500	1,500	7,112 10,112

図 II. 2. 2. 1 研究開発スケジュール

2.3 研究開発予算

開発項目別の研究予算は以下の通り。

表Ⅱ.2.3.1 開発項目別予算表

(単位：百万円)

NO	実施者	再委託先 ・共同実施者	研究概要	費用 (単位：百万円)	
				平成 21-22 年度	平成 23 年度
1	〈三菱化学チーム〉 三菱化学 シズン電子 NEC ライティング	三菱樹脂 東北大学	研究開発項目① (1) (a) HVPE 改良法による GaN バルク結晶 成長方式を開発する。材料メー カ、デバイスメーカ、照明メーカ による垂直統合関係を構築。	1,160	450
2	〈イノベーション・センターチー ム〉 大阪大学 名古屋大学 イノベーションセンター	なし	研究開発項目① (1) (a) Na フラックス法により GaN バルク 結晶成長方式を開発する。また外 部量子効率 100%に近い構造を作 成して高演色白色 LED を実現。	1,798	350
3	〈エルシードチー ム〉 エルシード 名城大学	リソビオン大学 ブリジストン スタンレー電気 のライティング	研究開発項目① (1) (b) 蛍光 SiC 結晶及び窒化物半導体を 独自の結晶成長技術により高演 色性、低コスト、長寿命の照明用 白色 LED を実現。	507	委託事 業終了
4	〈パナソニック電工チー ム〉 山形大学 青山学院大学 パナソニック電工 出光興産 タモ 長州産業	なし	研究開発項目① (2) 基材・電極の屈折率マッチングに よる高光取り出し基板、高効率・ 長寿命を兼備する燐光素子用有 機材料、長期耐久性を実現する高 放熱狭幅封止技術、高効率有機 EL 素子と封止との複合構造方式を 開発して高性能有機 EL 光源を実 現。	1,445 (うち加 速：305)	300
5	〈コニカミノルタ チーム〉 コニカミノルタテ クノロジーセンタ ー	日立造船 東北大学 北陸先端大 学 大阪府立大 学	研究開発項目① (2) 量産可能な次世代照明の実現を 目指し塗布型ロールツーロール プロセス技術を開発する。	802	300)
合計				5,712	1,400

2.4 研究開発体制

(1) 研究開発の実施体制

先進性、効率性且つ早期実用化を重視して機器メーカー、材料メーカー、製造装置メーカー等の異なる事業レイヤの企業群と、基礎研究を推進する大学研究機関が協力した産学連携体制を目指して実施体制は以下の通りとした。

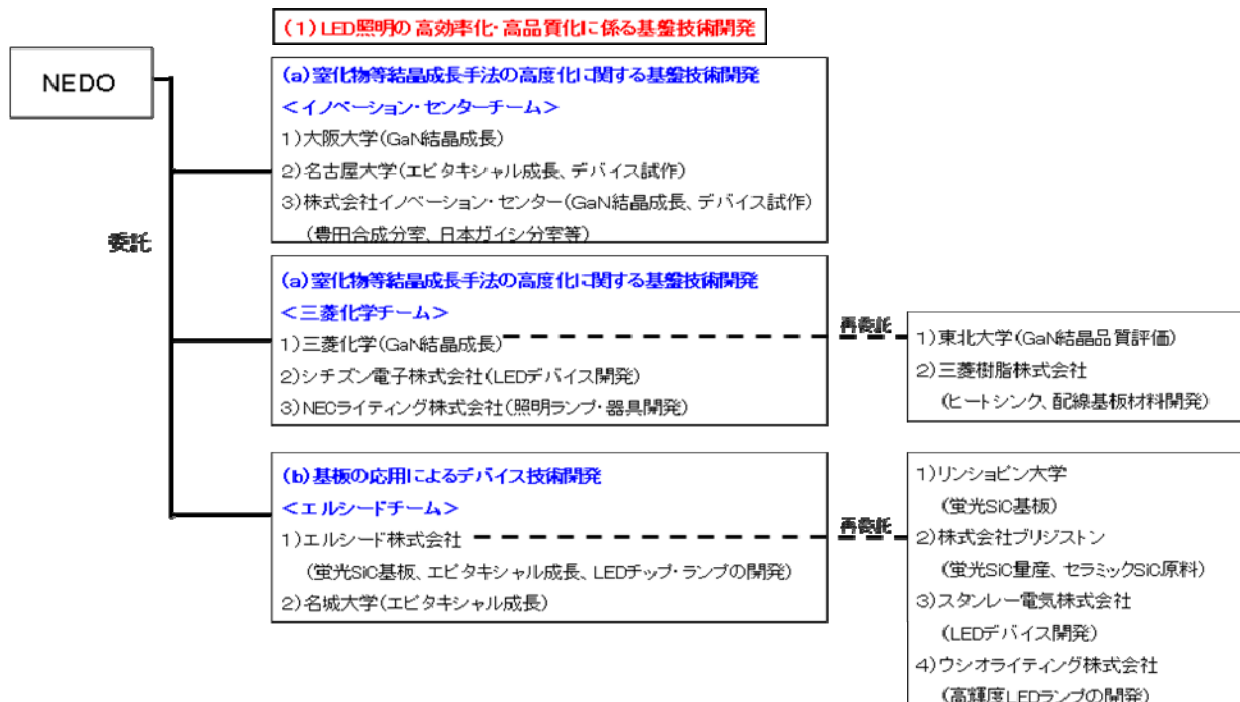


図 II. 2. 4. 1 LED 照明の高効率化・高品質化に係る基盤技術開発 体制図

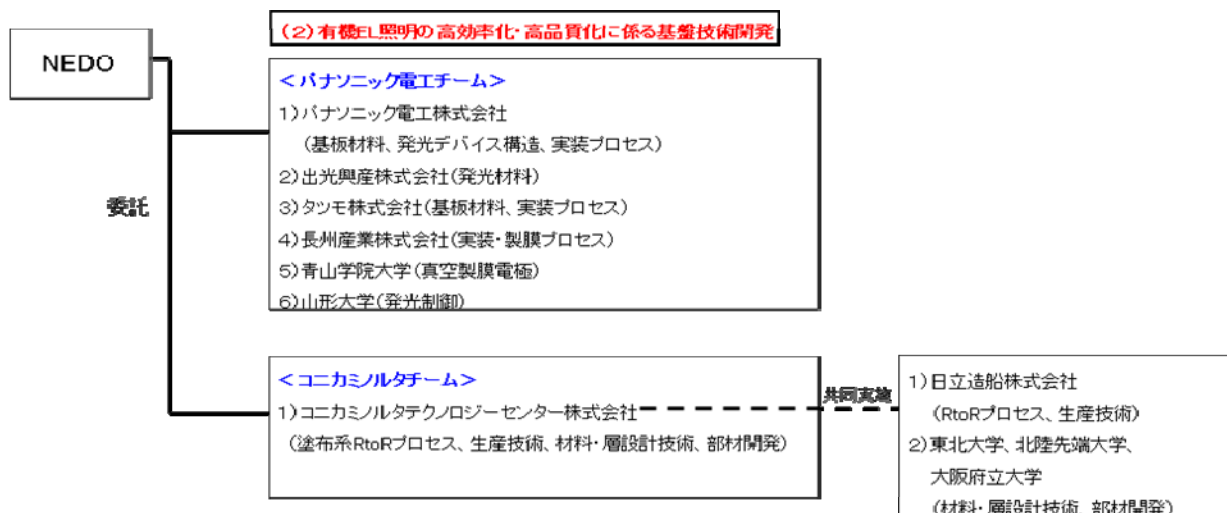


図 II. 2. 4. 2 有機 EL 照明の高効率化・高品質化に係る基盤技術開発 体制図

2.5 研究開発の運営管理

2.5.1 プロジェクトマネジメント方針

実現の難易度は高いものの、達成しなければならないゴール（技術的達成要件）を実現するための技術的アプローチを公募により募集し、その中から 有望な提案を複数採択する方針を採

った。

採択されたチームは、研究開発完了後に速やかに実用化、事業化が可能となるように研究開発結果を事業に結びつける可能性の高い企業連携チーム、例えば、LED 基板結晶から LED 照明器具までを製造できる企業グループを形成するチームや製造の上流から下流までを連携する企業グループを形成するチームが主に、複数採択された。

採択されたチーム同士は相互補完関係ではなく、競争・競合関係にある。選択と集中及び成果に基づく投資の効率性を図るために、各チームを対象にステージゲート評価方式を採用した。プロジェクトの中間段階で研究成果と今後の計画のフィージビリティ等の評価を行い、目標達成の目途があり継続して研究開発すべきチームの絞り込みを中間段階で行った。このようなステージゲート評価によりチーム間の研究開発競争状況を創出して、より高い成果をあげ、研究開発のスピードアップを図るようプロジェクト運営を図った。

なお最先端の技術開発についてはチーム同士は競合関係にあるが、事業化に向けた標準化活動においては 相互が協力し合うオール Japan 体制を奨励する運営を図っている。

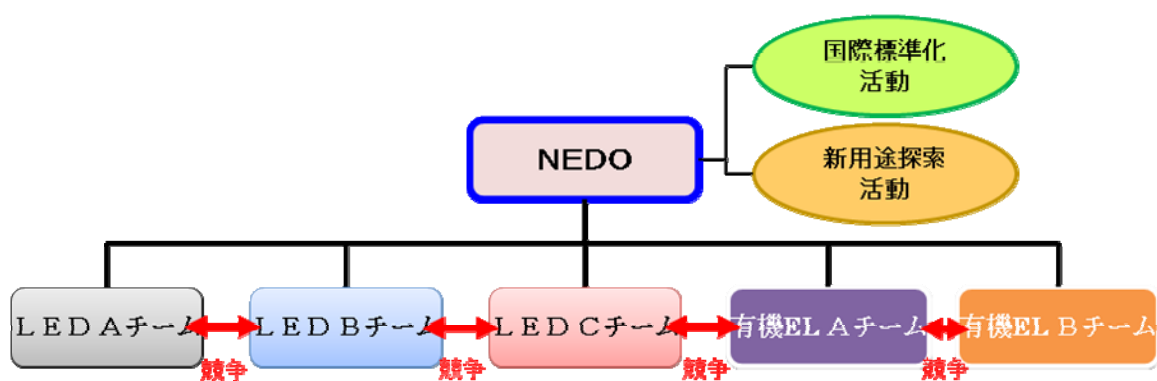


図 II.2.5.2 NEDO のプロジェクトマネジメント方針

2.5.2 研究開発の運営管理

2.2 に示した実施体制に基づいて、研究開発の運営管理は以下のように行った。

NEDO と委託先間、委託先内の情報交換としての会議や打ち合わせを以下に示す。NEDO では、本プロジェクト委託先と秋に定例ヒアリングを開催して、研究開発内容の進捗状況確認を行うとともに、課題の共有や開発計画の見直し、加速資金の必要性などを議論する場を設けた。委託先間では、効率的な進捗管理運営のため、プロジェクト運営会議を定期的に行った。実施者の各会議にはオブザーバとして NEDO 電子・材料・ナノテクノロジー部も適宜参加して、速やかな課題把握と対策に努めた。

運営管理としては、研究開発項目毎に企業情報共有が可能な 5 つのチーム単位で、ヒアリング及びプロジェクト運営会議を開催した。

●秋ヒアリング (NEDO 主催)

- －主催者：NEDO 電子・材料・ナノテクノロジー部
- －出席者：NEDO 電子・材料・ナノテクノロジー部、委託先、経済産業省
- －開催頻度：年 1 回 (秋)
- －議事内容：研究開発内容の進捗状況報告

●プロジェクト運営会議（実施者主催）

- －主催者：各チーム代表委託先
- －出席者：各チーム参画委託先、再委託先
- －開催頻度：必要に応じて年数回
- －議事内容：研究開発成果・状況報告

以下に秋ヒアリング及び本プロジェクト運営会議を列記する。このほかにも、共同研究者間の技術的打ち合わせ、その他のミーティングは必要の都度、実施した。

(1) 秋ヒアリング

表Ⅱ.2.5.1 秋ヒアリング実績

日時	場所	メンバ	内容
2010/10/25	NEDO 川崎オフィス	ユニカテクノロジーセンター、NEDO、経済産業省	進捗状況報告、課題対策
2010/11/29	NEDO 川崎オフィス	エルシード、名城大、NEDO、経済産業省	進捗状況報告、課題対策
2010/11/29	NEDO 川崎オフィス	大阪大、名古屋大、NEDO、経済産業省	進捗状況報告、課題対策
2010/12/6	NEDO 川崎オフィス	三菱化学、シチズン電子、NECライティング、三菱樹脂、NEDO、経済産業省	進捗状況報告、課題対策
2010/12/8	NEDO 川崎オフィス	パナソニック電工、出光興産、タツモ、長州産業、山形大、青山学院大、NEDO、経済産業省	進捗状況報告、課題対策

(2) プロジェクト運営会議

(i) 研究開発項目①(a)LED照明：窒化物等結晶成長法の高度化

表Ⅱ.2.5.2 プロジェクト運営会議実績 HVPE改良方式採用（三菱化学チーム）

NO	開催日	会議名	場所	メンバ	内容
1	2010/5/11	キックオフ会議	三菱化学(本社)	三菱化学、シチズン電子、NECライティング、三菱樹脂、NEDO	実施概要確認、実施計画確認、研究方針の検討実
2	2010/6/10	第2回 NEDONEDO プロジェクト運営会議(第1回)	シチズン電子(東京事業所)	三菱化学、シチズン電子、NECライティング、三菱樹脂、NEDO	進捗状況報告、今後の計画すり合わせ
3	2010/7/8	第3回 NEDONEDO プロジェクト運営会議(第2回)	NECライティング(滋賀工場)	三菱化学、シチズン電子、NECライティング、三菱樹脂、NEDO	進捗状況報告、今後の計画すり合わせ
4	2010/8/24	第4回 NEDONEDO プロジェクト運営会議(第3回)	三菱樹脂(本社)	三菱化学、シチズン電子、NECライティング、三菱樹脂、NEDO	進捗状況報告、今後の計画すり合わせ
5	2010/9/28	第5回 NEDONEDO プロ	三菱化学(本	三菱化学、シチズン電子、NEC	進捗状況報告、今後の計

		プロジェクト運営会議（第4回）	社）	ライティング、三菱樹脂、NEDO	画すり合わせ
6	2010/11/2	第6回 NEDONEDO プロジェクト運営会議（第5回）	シチズン電子（東京事業所）	三菱化学、シチズン電子、NECライティング、三菱樹脂、NEDO	進捗状況報告、今後の計画すり合わせ
7	2011/1/28	第7回 NEDONEDO プロジェクト運営会議（第6回）	三菱化学（本社）	三菱化学、シチズン電子、NECライティング、三菱樹脂、NEDO	進捗状況報告、今後の計画すり合わせ
8	2011/3/1	第8回 NEDONEDO プロジェクト運営会議（第7回）	シチズン電子（東京事業所）	三菱化学、シチズン電子、NECライティング、三菱樹脂、NEDO	進捗状況報告、今後の計画すり合わせ

(ii) 研究開発項目①(a)LED 照明：窒化物等結晶成長法の高度化

表Ⅱ.2.5.3 プロジェクト運営会議実績 Na フラックス方式採用（イノベーション・センターチーム）

NO	開催日	会議名	場所	メンバ	内容
1	2010/5/25	キックオフ会議兼プロジェクト運営会議（第1回）	名古屋大学	名大、阪大、イノベーション・センター、NEDO	実施概要確認、実施計画確認、研究方針の検討
2	2010/6/22	プロジェクト運営会議（第2回）	名古屋大学	名大、阪大、イノベーション・センター、NEDO	進捗確認、課題と対策、設備関係の内容検討
3	2010/8/18	プロジェクト運営会議（第3回）	名古屋大学	名大、阪大、イノベーション・センター、NEDO	進捗確認、研究方針の検討
4	2010/10/27	プロジェクト運営会議（第4回）	名古屋大学	名大、阪大、イノベーション・センター、NEDO	進捗確認、研究スケジュール検討
5	2010/7/21	リーダー会議（第1回）	大阪大学	名大、阪大、イノベーション・センター	進捗確認、研究内容の検討
6	2010/9/28	リーダー会議（第2回）	名古屋大学	名大、阪大、イノベーション・センター	進捗確認、研究内容の検討
7	2010/11/29	リーダー会議（第3回）	名古屋大学	名大、阪大、イノベーション・センター	進捗確認、研究内容の検討
8	2010/12/17	リーダー会議（第4回）	JRCM（港区西新橋）	名大、阪大、イノベーション・センター	進捗確認、発注予定確認、事業化検討
9	2011/2/9	リーダー会議（第5回）	スカイコー ト川崎	名大、阪大、イノベーション・センター	進捗・入荷状況確認、研究内容検討
10	2011/3/7	リーダー会議（第6回）	名古屋大学	名大、阪大、イノベーション・センター	研究実績報告、今後の課題検討

(iii) 研究開発項目①(b)LED 照明：基板の応用

表Ⅱ.2.5.4 プロジェクト運営会議実績 SiC 蛍光方式採用 (エルシードチーム)

NO	開催日	会議名	場所	メンバ	内容
1	2010/5/20	キックオフ会議	名古屋大学 及び名城大 学	エルシード、名城大、NEDO	実施概要確認、研究方針 の検討
2	2010/9/30	プロジェクト運営会 議 (第2回)	名古屋大学	エルシード、名城大、NEDO	進捗確認、設備関係の内 容検討

(iv) 研究開発項目②有機 EL 照明：高効率・高品質化の研究

表Ⅱ.2.5.5 プロジェクト運営会議実績 蒸着方式採用 (パナソニック電工チーム)

NO	開催日	会議名	場所	メンバ	内容
1	2010/6/7	2010年度キック オフ兼プロジェ クト運営会議 (第1回)	パナソニック電 工 大阪本社	出光興産、タツモ、長州産業、パ ナソニック電工、NEDO	実施概要確認、実施計画 確認、研究方針の検討
2	2010/9/14	2010年度プロジ ェクト運営会議 (第2回)	パナソニック電 工 大阪本社	出光興産、タツモ、長州産業、パ ナソニック電工、NEDO	2010年度の研究開発状況 報告
3	2010/11/15	2010年度プロジ ェクト進捗会議 (第1回)	パナソニック電 工 東京本 社	出光興産、タツモ、長州産業、パ ナソニック電工、NEDO	研究進捗状況報告と、研 究開発内容に関するディ スカッション
4	2010/11/26	2010年度プロジ ェクト運営会議 (第3回)	パナソニック電 工 大阪本社	出光興産、タツモ、長州産業、パ ナソニック電工、NEDO	2010年度の研究開発状況 報告と目標達成見込み
5	2011/1/14	2010年度プロジ ェクト進捗会議 (第2回)	パナソニック電 工 東京本社	出光興産、タツモ、長州産業、パ ナソニック電工、NEDO	研究進捗状況報告と、研 究開発内容に関するディ スカッション

(v) 研究開発項目②有機 EL 照明：高効率・高品質化の研究

表Ⅱ.2.5.6 プロジェクト運営会議実績・塗布方式採用 (エコミナルテクノロジーセンターチーム)

NO	開催日	会議名	場所	メンバ	内容
1	2010/5/25	2010年度キック オフ会議	エコミナルテクノロジー センター(株) 本社	エコミナルテクノロジーセンター(株)、NEDO	実施概要確認、実施計画 確認、研究開発状況報告
2	2010/6/7	プロジェクト運 営会議 (第1回)	エコミナルテクノロジー センター(株) 本社	エコミナルテクノロジーセンター(株) 日立造船(株)	共同開発の進捗報告及び ディスカッション
3	2010/7/27	プロジェクト運 営会議 (第2回)	エコミナルテクノロジー センター(株) 本社	エコミナルテクノロジーセンター(株) 日立造船(株)	共同開発の進捗報告及び ディスカッション

4	2010/8/20	プロジェクト運営会議（第3回）	エコミナルテクノロジーセンター(株) 本社	エコミナルテクノロジーセンター(株) 日立造船(株)	共同開発の進捗報告及びディスカッション
5	2010/10/26	プロジェクト運営会議（第4回）	エコミナルテクノロジーセンター(株) 本社	エコミナルテクノロジーセンター(株) 日立造船(株)	共同開発の進捗報告及びディスカッション
6	2010/11/18	プロジェクト運営会議（第5回）	エコミナルテクノロジーセンター(株) 本社	エコミナルテクノロジーセンター(株) 日立造船(株)	共同開発の進捗報告及びディスカッション
7	2010/11/22	共同実施先技術会議（第1回）	東北大学	東北大学：大井秀一、佐藤徹雄 コニカミノルタ：北弘志、石毛修	中間進捗確認と今後について検討
8	2010/11/25	共同実施先技術会議（第2回）	大阪府立大学	大阪府立大学：内藤裕義 コニカミノルタ：若松秀明、鍋田博之	中間進捗確認と今後について検討
9	2010/11/30	プロジェクト運営会議（第6回）	エコミナルテクノロジーセンター(株) 本社	エコミナルテクノロジーセンター(株) 日立造船(株)	共同開発の進捗報告及びディスカッション
10	2010/12/8	プロジェクト運営会議（第7回）	日立造船(株) 事業・製品開発本部	エコミナルテクノロジーセンター(株) 日立造船(株)	共同開発の進捗報告及びディスカッション
11	2010/10/13	共同実施先技術会議（第3回）	北陸先端大学院大学	北陸先端大：村田英幸 コニカミノルタ：中山知是	共同実施進捗討議
12	2010/12/21	プロジェクト運営会議（第8回）	エコミナルテクノロジーセンター(株) 本社	エコミナルテクノロジーセンター(株) 日立造船(株)	共同開発の進捗報告及びディスカッション
13	2011/1/14	プロジェクト運営会議（第9回）	エコミナルテクノロジーセンター(株) 本社	エコミナルテクノロジーセンター(株) 日立造船(株)	共同開発の進捗報告及びディスカッション
14	2011/2/4	プロジェクト運営会議（第10回）	日立造船(株) 事業・製品開発本部	エコミナルテクノロジーセンター(株) 日立造船(株)	共同開発の進捗報告及びディスカッション
15	2011/2/22	プロジェクト運営会議（第11回）	エコミナルテクノロジーセンター(株) 本社	エコミナルテクノロジーセンター(株) 日立造船(株)	共同開発の進捗報告及びディスカッション

2.6 研究開発の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性

(1) 総合的研究開発マネジメント

本プロジェクトの研究開発の成果を迅速且つ効果的に実用化、事業化に展開するために、次世代照明の技術開発を段階的・継続的に進める戦略的アプローチを採用している。図Ⅱ.2.6.1に示すように、「技術開発」のみでなく、「標準化」、「市場拡大」を含む3つの活動を密接に連携したマネジメントを行い、国際的競争力のある研究開発マネジメントに効果的に取り組んでいる。以下に技術開発戦略、標準化戦略、市場拡大戦略を連動した研究開発マネジメントについて説明する。

次世代照明研究開発マネジメント の全体像



図Ⅱ.2.6.1 次世代照明戦略

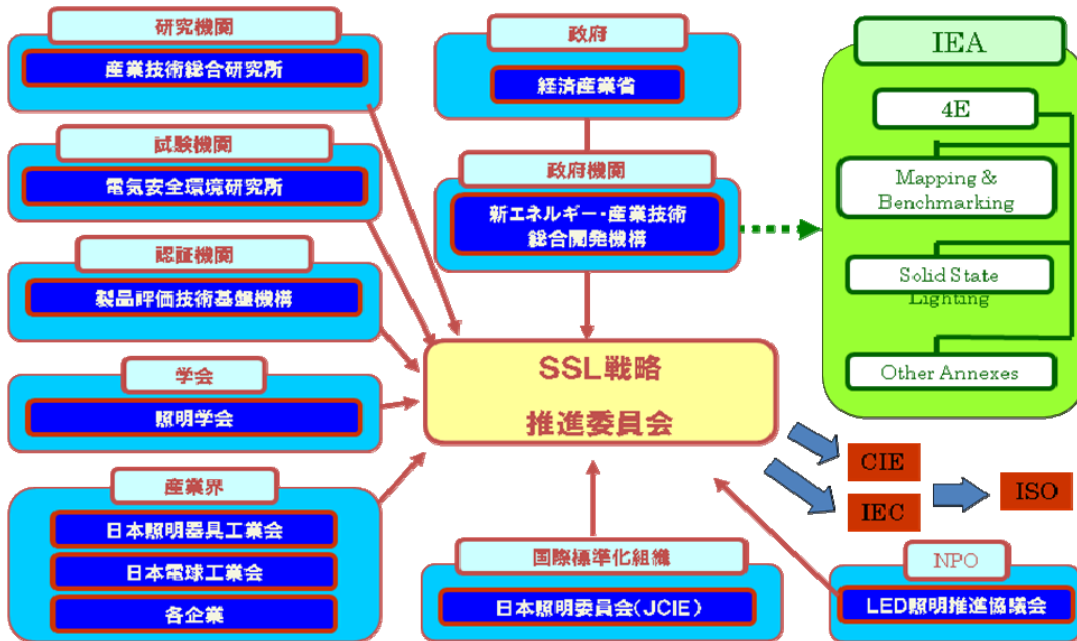
最初の「技術開発」活動は本事業原簿の主題である本「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」プロジェクトが対応する。

「標準化」活動は本事業原簿（中間評価）の対象外であるが、「技術開発」と密接に関係しているため、簡単に以下に述べる。次世代照明はまだ標準化については十分な整備が行われていない。例えばLED照明は実用化されたものの、従来の蛍光灯と異なる特色があるために標準化の整備が急務である。有機EL照明については製品化が国際的にも未だ進んでいないが、研究開発完了後、1～2年後には量産化が進み市場が立ち上がる状況にあることを考慮すると、標準不統一による不良品の流通阻止や国際的事業の展開を踏まえて標準規格化が望まれる状況にある。そのため、「標準化」活動のため、「戦略的国際標準事業」プロジェクトにて技術開発の成果が有効に事業化に結び付けられるようにLED照明と有機EL照明の国際標準化活動に取り組んでいる。参考として、LED照明の標準化活動の体制を図Ⅱ.2.6.2に、有機EL照明の標準化活動の体制図を図Ⅱ.2.6.3に示す。標準化体制として経済産業省、工業会、（独）産業技術総合研究所等をメンバーに含むオール Japan 体制を構築して関係機関と連携しつつ標準化を進める。LEDについてはIEA-4E SSL Annexを足がかりに、LED照明の色再現性能評価技術、グレア評価技術及び配光測定技術、有機EL照明は測光・測色評価技術に取り組み標準規格を策定する際の裏付ける研究に注力する。

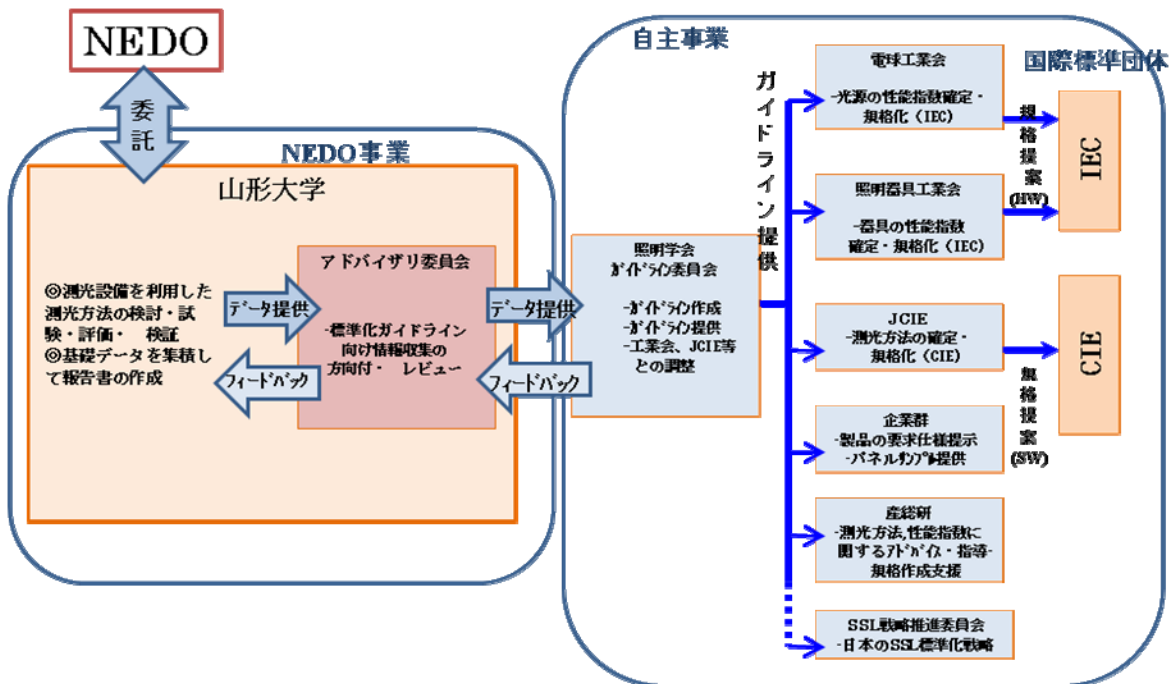
最後に「市場拡大」活動も、本事業原簿（中間評価）の対象外であるが「技術開発」と密接に関係しているため、同様に以下に簡単に紹介する。次世代照明は、既存照明を置き換える高効率照明として期待されるだけでなく、既存照明の用途を超えた新規利用分野を創出する照明として期待されている。例えば、LED照明は自動車照明、ディスプレイのバックライトや植物速成照明として利用されるだけでなく、今後は産業用途での使用が期待されている。有機EL照明は壁や窓ガラスが全面に光る新建築材等、今後多くの新規用途への応用が期待される。このよ

うな新しい利用用途のアイデア発掘のため、次世代新用途探索アイデアのコンペにも取り組んでいる。

このように、「技術開発」を「標準化」、「市場拡大」を連携させて3つの施策を連動して次世代照明の研究開発マネジメントを行うことにより、国際的な省エネルギー化に貢献するとともに本分野での日本の産業力強化を図ることを狙いとしている。



(ご参考) 図 II.2.6.2 LED照明標準化体制 (中間評価対象外)



(参考) 図 II.2.6.3 有機EL照明標準化体制 (中間評価対象外)

(2) 段階的研究開発マネジメント

NEDO 電子・材料・ナノテクノロジー部では先導研究、基盤研究、実用化開発等のように段階的に「技術開発」の課題に取り組んでいる。前段の研究開発の成果を生かしながら次の段階に有機的に結び付けていくことにより効率的に研究開発を進めることを狙いとしている。例として有機 EL 照明技術の研究開発の従来からの研究開発の系譜を図 II.2.6.4 に示す。基礎調査を含む先導研究を経て、2007 年～2009 年に一般照明への可能性を追求する技術開発を行った結果、一般照明への目途が立った。さらに本成果を基盤として本格的に蛍光灯の 2 倍の効率を実現して、蛍光灯等の一般照明を有機 EL 照明を含む次世代照明で置き換える上で必要な基盤技術開発を行う本プロジェクトを 2009 年度末より始動した。

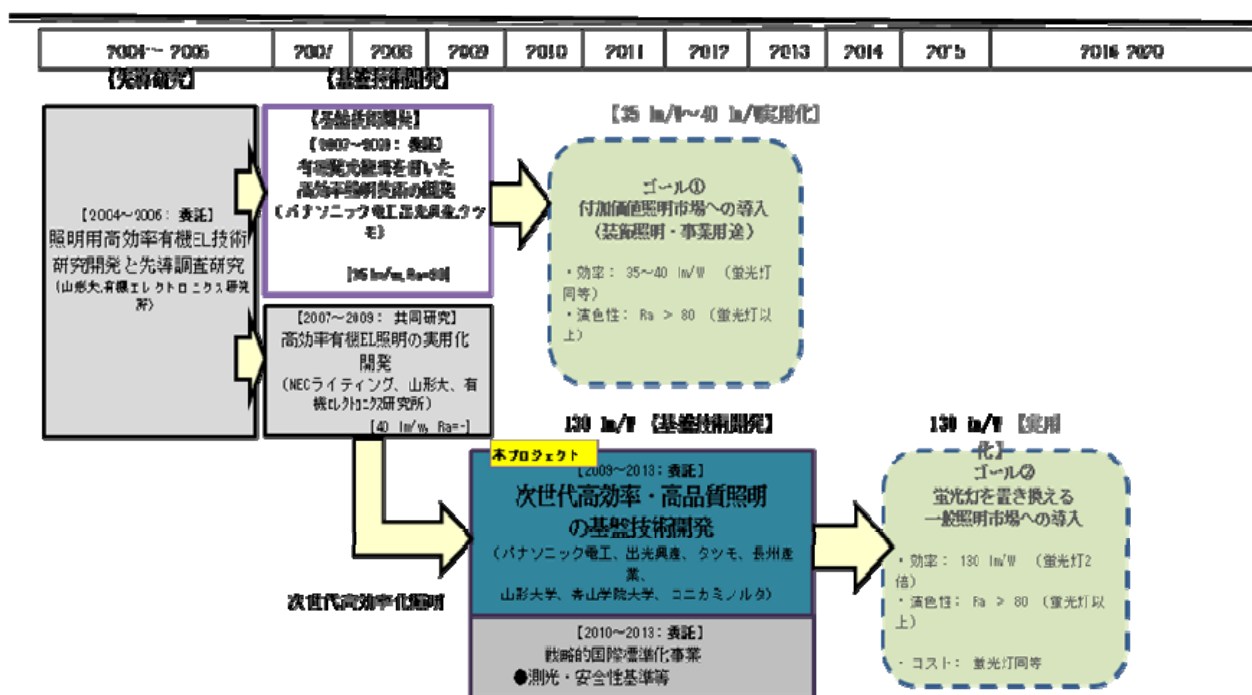


図 II.2.6.4 有機 EL 照明開発プロジェクトの連携

なお、LED 照明については、1998 年～2002 年に実施した「高効率電光変換化合物半導体開発 (21 世紀あかり計画)」以降、実用化・事業化段階に進出したため、これまで継続的な研究開発は行っていないが、省エネルギー化と国内産業力強化の観点から、国家戦略として LED 照明基盤技術開発として今回合わせて取り組んでいる。

(3) ステージゲート評価方式の採用

本プロジェクトでは前述したようにハードルの高い目標設定をしているために実現性のリスクが高い。プロジェクト開始時には異なる研究開発アプローチで目標を達成する可能性の高い複数のチームを採択した後、中間時点 (前半 2 年のステージ I、後半 3 年のステージ II の間) にそれまでの研究成果と今後の見通しを評価して、引き続き目標を実現して研究開発を継続すべき有力な実施者を絞り込むステージゲート評価を行う方針を採り、平成 23 年 2 月に

ステージゲート評価委員会を開催した。ステージゲート評価の概要は以下のとおり。

ーステージゲート評価経緯

- ・2011/1/12：各実施者からのステージゲート評価資料の提出
(ステージⅠ成果とステージⅡ実施計画の提出)
- ・2011/1/14～2/04：ステージゲート評価委員（本技術分野の有識者）による書面評価
- ・2011/2/09：LED照明技術に対するステージゲート評価委員会開催（実施者ヒアリング含）
- ・2011/2/14：有機EL照明技術に対するステージゲート評価委員会開催（実施者ヒアリング含）
- ・2011/2/28：ステージゲート評価結果確定 及び実施者への通知

ステージゲート評価要領としては、

本事業に参画する実施者チーム単位（研究項目① LED照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発：3チーム、研究開発項目②有機EL照明：高効率・高品質化の研究：2チームの計5チーム）を評価対象として、評価項目としてステージⅠの中間目標達成度、ステージⅡの実施計画の最終目標充足度、技術的新規性・競争優位性、ステージⅡの実現性、研究実施遂行能力、プロジェクト終了後の事業化の見込み、社会への波及効果の7点について評価項目毎に5段階評価（A、B+、B、B-、C）にて評価した。加えて定性評価意見も募った。評価の結果、総合評価点（全項目の平均点）が、合格基準（評価点B）以上の場合(*)には、基本的には合格とするが、上記の場合でも半数を超える評価委員が評価点にCの評価を行った評価項目が全評価項目中1項目でもある場合等、今後の継続研究にて目標達成が困難と評価委員会で判断された場合には不合格と判断した。

ーステージゲート評価結果

ステージゲート委員会での評価結果を踏まえて、ステージⅡに進む実施者チームは

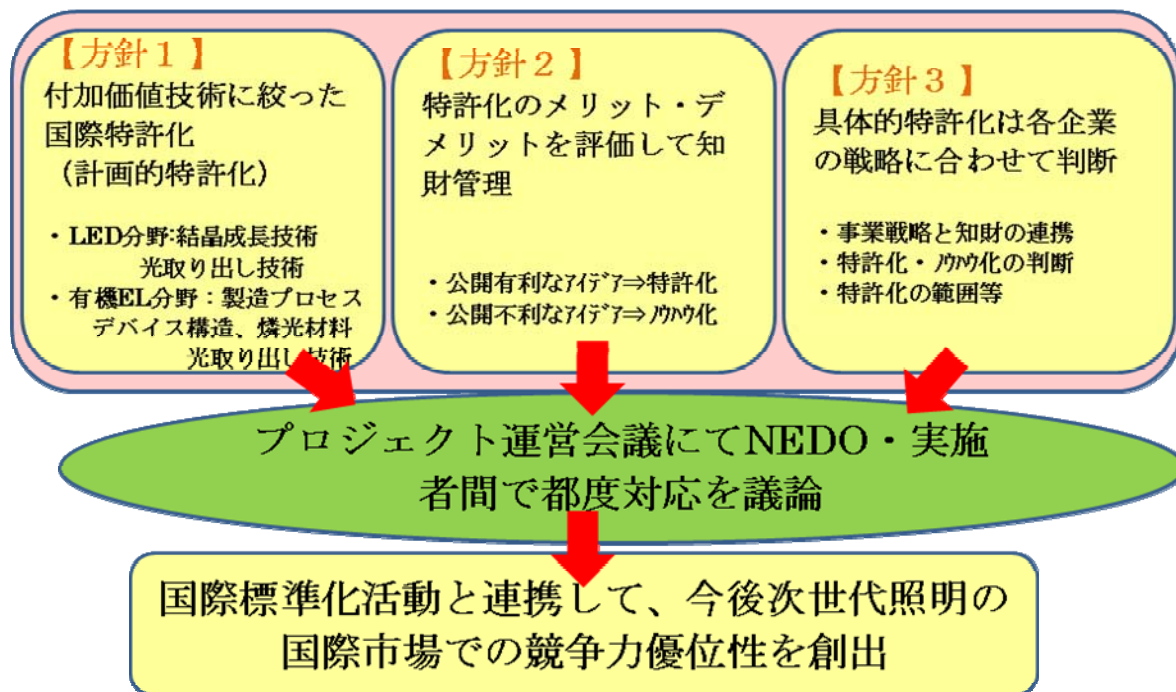
LED照明技術に取り組む三菱化学チーム（参加委託先：三菱化学、シチズン電子、NECライティング）、イノベーション・センターチーム（参加委託先：イノベーション・センター、大阪大学、名古屋大学）、有機EL照明技術に取り組むパナソニック電工チーム（参加委託先：パナソニック電工、出光興産、タツモ、長州産業、山形大学、青山学院大学）、コニカミノルタテクノロジーセンター チーム（参加委託先：コニカミノルタテクノロジーセンター株式会社）の計4チームに決定した。なおステージゲート評価後も、中間評価、技術委員会等を毎年開催して適宜、進捗確認、情勢の変化に対する計画の見直しをタイムリに行う予定である。

(4) 知財マネジメント

本プロジェクトは国内事業だけでなく、国際的事業展開への適用も可能な基盤技術開発に取り組んでいる。そのためには実用化を見据えた知財マネジメントとして国際特許化活動を推進する必要があるが、研究開発で得られたアイデア全てを海外出願して出願件数を海外企業と争うのではなく、追従できない付加価値技術アイデアに絞り込み特許化を進める方針で知財マネジメントに取り組んだ。詳細は各企業戦略に準じるが、基本的な方向としてはLEDについては結晶成長技術、光取り出し技術、有機EL照明についてはデバイス構造、光取り出し技術、製造プロセス技術、有機材料に重点を置き積極的に特許化していくことを薦める知的財産権管理を行った。また材料の包括的合成手法は特許で防御するが、材料構成等で包括化が困難なアイデアは特許化することにより近辺の類推発案が可能で、特許化で却って不利になる場合にはノウハウ管理する場合もあり特許化のメリット、デメリットを評価した上で知財管理する柔軟な判断を行った。

知財マネジメントのやり方としては運営会議などで、NEDO および各社で重要と思われる技術開発内容に関して、出願すべき内容の議論を都度抽行った。

具体的な知財戦略と事業戦略の連携、国際標準化活動との連携、本戦略に基づく特許とノウハウの峻別、具体的特許作成方針は、各社の事業戦略と知財戦略に従う。



図Ⅱ.2.6.5 知財マネジメント

3. 情勢変化への対応

(1) これまでの情勢変化への対応

本プロジェクト推進に当たり、随時発生する事象について、適宜対策を講じて、目標達成を図った。

主要な対策は以下の通り。

表Ⅱ.3.1.1 情勢変化への対応推移

時期	情勢の変化	対策	投入加速資金 (単位：百万円)
2010年5月	既に製品化されているLED等照明の市場でコストダウンが進展しており、当初想定していた最終目標の0.3円/1m年以下のコストダウンが望ましいと判断された。	生産性を向上させる製造プロセス技術として、複数の蒸着製膜を連続して実施できる一貫製造プロセスの技術開発を追加するため、 加速資金を投入(305百万円) 。 2013年度の製造コストに係る目標を、 0.3円/1m年 → 0.25円/1m年 に上方修正した。	305
2011年4月	ステージゲート評価の結果、イノベーション・センターチームにおける将来の研究開発成果を実用化する社が明確になるよう、体制強化を求められた。	Naフラックス法を推進するイノベーション・センターチームに、高品質な種結晶を開発するリコー(株)を再委託先として参画させる体制を構築した。 リコー(株)参画により、プロジェクト完了後に本技術を適用する事業家参画により速やかに事業化を行い、次世代照明普及速やかな立ち上げが実現できる体制を確立した。	50
2011年6月	有機EL照明技術開発の実施者において、ステージIの研究成果を活用した事業化のため、研究の目的を達成した研究資産の早期有償取得を急遽要望された。	NEDOにて研究開発成果を活用した早期事業化は有効と判断して、 当該成果の事業化に合わせて早期に有償譲渡処理を行った。	-
合計			355

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

本研究開発に当たっては研究開発項目毎に複数の実施者が体制を組んで異なるアプローチで取り組んだ。

研究項目①（１） LED 照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発に関しては、さらに

- (a) 窒化物等結晶成長手法の高度化に関する基盤技術開発と、それ以外のアプローチとして
- (b) 基板の応用によるデバイス技術の開発 の2つの研究開発項目に分かれる。

前者の (a) 窒化物等結晶成長手法の高度化に関する基盤技術開発については、HVPE 改良方式でアプローチする三菱化学チーム（参加委託先：三菱化学、シチズン電子、NECライティング）と、Na フラックス法でアプローチするイノベーション・センターチーム（参加委託先：イノベーション・センター、大阪大学、名古屋大学）の2チームが研究開発に取り組んだ。

(b) 基板の応用によるデバイス技術の開発については、SiC 蛍光体を用いてデバイス開発を行うエルシードチーム（エルシード、名城大学）の1チームが研究開発に取り組んだ。

一方、研究開発項目①（２）有機 EL 照明：高効率・高品質化の研究 に関しては、主に真空蒸着方式でアプローチするパナソニック電気チーム（パナソニック電気、出光興産、タツモ、長州産業、山形大学、青山学院大学）と、ロール・ツー・ロールを指向する塗布方式でアプローチするコニカミノルタテクノロジーセンターチーム（コニカミノルタテクノロジーセンター）の2チームが、研究開発開発に取り組んだ。

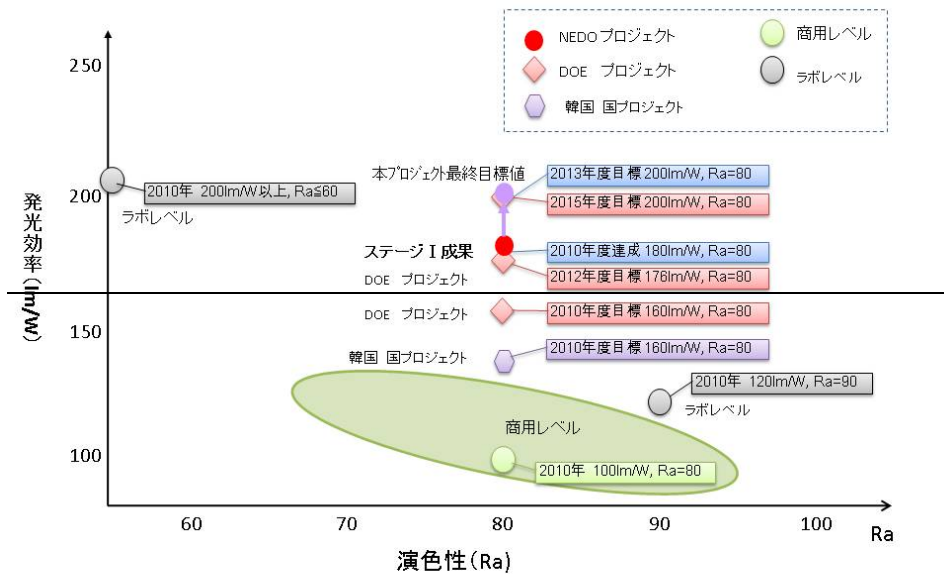
LED 照明技術及び有機 EL 照明技術については各々、中間目標及び最終目標を設定している。下記にステージ I（平成21年度～平成22年度）に設定した中間目標に対する達成度を示す。下表のとおり、設定した中間目標を全て達成することができた。

表Ⅲ. 1. 1. 1 中間目標の達成度

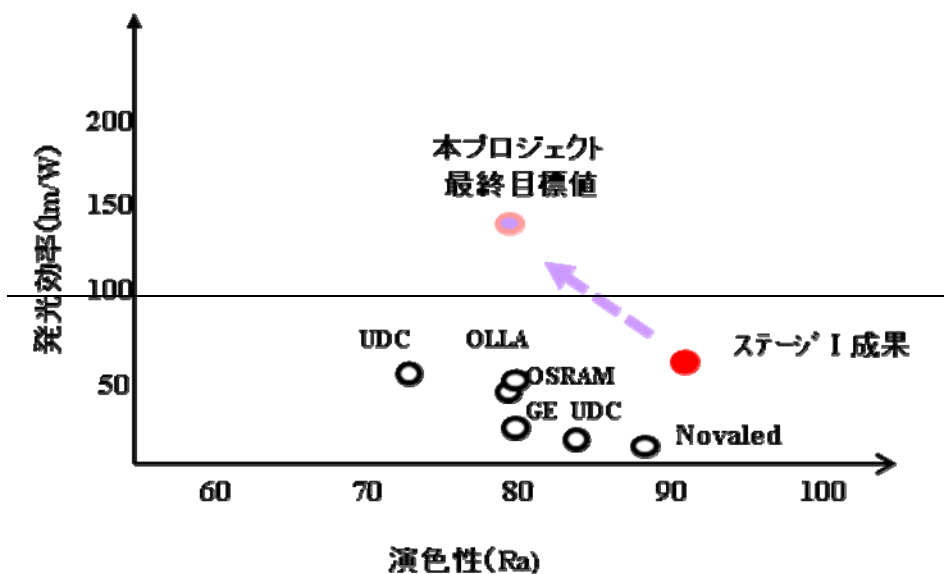
研究開発項目①（１）LED 照明の高効率高品質に関わる基盤技術開発		
ステージ I 目標（平成22年度末目標）	進捗状況（平成22年度末）	目標達成度
5～10mm 角サイズ以上結晶で 効率：175 lm/W 以上	直径 89mm で 180 lm/W を実現	◎（達成）
上記条件で 平均演色評価数：80 以上	80 を達成	◎（達成）
研究開発項目①（２）有機 EL 照明の高効率高品質に関わる基盤技術開発		
ステージ I 目標（平成22年度末目標）	進捗状況（平成22年度末）	ステージ I 達成度
発光面積 25cm ² 以上で 効率：50 lm/W 以上	56 lm/W を実現。	◎（達成）
上記条件で 半減寿命：1 万時間以上（輝度：1,000 cd/m ² ）	15 万時間を達成	◎（達成）
上記条件で 平均演色評価数：80 以上	91 を達成	◎（達成）
製造プロセス実現の要件の明確化	製造プロセス技術の要件を 検討して実現方式を提案	◎（達成）

上記実績によりに加えて、平成 21～22 年度の期間に、ステージⅡ（平成 23～25 年度）にて最終目標を実現する方式とシナリオを検討して、LED 照明及び有機 EL 照明各々の高効率高品質化に関わる基盤技術開発について実現性の高い実施計画が策定された。

これらの結果から、本中間成果段階では図Ⅲ. 1. 1、図Ⅲ. 1. 2 のように世界 TOP レベルの性能水準を達成できている。また市販製品と比較しても、それをはるかに超える性能達成により、これらを切り口として今後、新市場開拓（建築材分野、自動車分野、エンタテインメント分野等）への期待が可能な状況といえる。本成果は今後の国際競争力強化、CO2 削減、省エネルギー化、節電への貢献が今後期待できる。



図Ⅲ. 1. 1 LED 光源に関する成果の国際的な位置づけ



図Ⅲ. 1. 2 有機 EL 光源に関する成果の国際的な位置づけ

上記研究開発結果については適宜、各実施者により研究発表、論文、特許申請を行った。その結果は以下のとおり。

表Ⅲ. 1. 1. 2 研究発表、論文、特許等の成果

実施者 項目	三菱化学・ シチズン 電子・ NECラ イティン グ	イノベーション・ センター・ 大阪大学・ 名古屋大学	エルード・ 名城大学	パナソニック 電工・ 出光興産・ タツモ・ 長州産業・ 山形大学・ 青山学院大学	コニカミナルテクニ ロジーセンター	合計
研究発表・講演 件数	21	41	8	14	3	87
論文 件数 (査読有)	3	6	3	3	0	15
特許出願件数 (うち海外出 願)	5	0	0	16(2)	25	46(2)
その他(プレス 発表) 件数	0	0	0	0	3	3

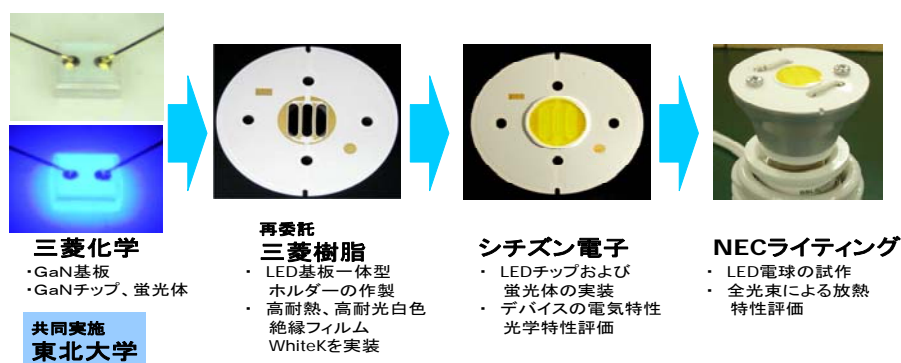
2. 事業の成果詳細

以下に、各研究開発項目毎の成果詳細を説明する。

2.1 研究開発項目①(a)LED照明：窒化物等結晶成長法の高度化

2.1.1 HPVE改良法によるGa_N結晶成長手法の高度化に関する基盤技術開発

本方式については、三菱化学（再委託先：三菱樹脂、共同実施先：東北大学）、シチズン電子、NECライティングにて、下図の役割分担にて実施する。



図Ⅲ. 2. 1. 1. 1 LED デバイス応用展開例

【本研究全体の成果】

以下に、本プロジェクトの成果をサブテーマごとに記載する。

(1) 大型 HVPE 装置の開発

GaN 基板の製造コストを大幅に削減することを目的として、次世代の大型 HVPE 装置の開発を取り進めている。製造コスト削減策として、a) Ga_N 結晶径の大型化、b) Ga_N 結晶の厚膜化、c) 原料利用効率の向上、d) 結晶成長速度の向上等が効果的である。H22 年度は大型 HVPE 装置設計の観点から、c) 原料効率の向上、d) 結晶成長速度の向上について検討を実施した。

HVPE 法での Ga_N 基板の製造には、原料として GaCl (Ga と HCl の反応により生成) と NH₃ が使用される。このうち、原料コストの大部分を占める Ga の利用効率は、従来の成長条件では 5% 程度と低かった。この Ga 利用効率を向上させることで、Ga_N 基板製造プロセスの変動費を大幅に削減することが可能となる。一方、成長速度の向上は 1 炉あたりの生産能力を向上させ、固定費の削減につながる。低コスト製造プロセスの実現には、現状 100 μm/hr 程度である結晶成長速度の向上が必須である。

まず反応・流体シミュレーションを利用して、高 Ga 利用効率、高成長速度となる成長条件の探索を行った。汎用流体解析ソフトウェア「FLUENT」を用い、リアクタ内のガス流動と拡散、温度分布、結晶表面での Ga_N 成長反応等について考慮したシミュレーションを実施した。シミュレーション結果より、結晶成長速度、結晶面内の成長速度分布等の予測が可能となる。さらに、上記のシミュレーションを汎用最適化支援ツール「modeFRONTIER」と組み合わせ、成長条件の最適化を行った。最適化検討の結果、Ga 利用効率及び成長速度が最大となる、最適な成長

条件を見出すことができた。

そこで、シミュレーション検討より得た最適成長条件について、従来型の成長装置での検証実験を実施した。結果を、表Ⅲ. 2. 1. 1. 2 に示す。検討の結果、N₂分圧増加、V/Ⅲ比(フィードガス中のNH₃とGaClの比)増加、及び温度低下が、Ga利用効率向上に効果があることを確認した。さらに、これらの条件を組み合わせた最適条件で結晶成長を行った結果、Ga利用効率は従来条件の5.2%より10.5%まで向上し、目標値であるGa利用効率10%を達成することができた。結晶成長速度も、234μm/hrと大きく向上した。最適化条件で成長した結晶は鏡面かつ透明であり、結晶品質についても従来条件で得た結晶と同等であることを確認した。

表Ⅲ. 2. 1. 1. 2 成長速度とGa利用効率

装置配置	成長条件	結果	
		成長速度 (μm/hr)	Ga利用効率
従来配置	従来条件	159	5.2%
	N ₂ 分圧増加	181	5.4%
	V/Ⅲ比増加	199	8.9%
	温度低下	184	5.8%
	成長条件最適化	234	10.5%
新型配置	初期検討条件	232	13.2%

本検討により、Ga利用効率向上を達成できたとともに、Ga利用効率の更なる向上のための指針を得た。現状のHVPE成長プロセスでGa利用効率が依然として低い原因のひとつとして、装置配置に問題があることが明らかとなった。そこで、基板配置位置、ガス導入方式等についての改善策を提案し、プロトタイプの新機リアクタを試作した。本装置で結晶成長実験を実施した結果を表1-1に追記する。装置配置の改良を行った結果、結晶2枚合計でのGa利用効率は初期検討条件においても13.2%と高い値となり、予想通り、従来の装置配置よりもGa利用効率が向上することを実証することができた。また、新型装置配置についてのシミュレーション検討を実施した結果、装置配置の更なる改善により、Ga利用効率を20%程度まで向上できる可能性があることも明らかになった。成長した結晶は鏡面かつ透明であり、結晶品質についても従来型の装置配置で得た結晶と同等であることを確認した。

以上の検討の結果、成長条件の最適化、及び装置配置の最適化により、Ga利用効率の大幅向上を達成することが出来た。NEDOステージⅡ検討では、今回の検討で得た知見をベースとした、次世代の大型HVPE装置の開発を行う予定である。

(2) バルク成長技術の開発

気相成長法による大型バルク結晶実現を実証することを目的として、ステージⅠの開発目標としてはφ76.2mm×L10mmバルク結晶の実現を掲げ検討を実施した。

現有2インチ用HVPE装置の改造を実施した。これは大口径化に伴う単なるウエハを保持するサセプターの改造にとどまらず、長時間成長に対応した排気管の改造、寄生成長を抑制するためのリアクタ内部構造の改造を含むものである。従来長時間のバルク成長においては、リアクタ壁やウエハを保持するサセプター等への多結晶体の付着(寄生成長)が大きな問題となっ

いた。内部形状、材質、ガス導入方法の最適化及び改造を実施し、寄生成長を抑制することに成功した。

結晶を大口径化することにより、結晶成長中のクラック発生や、成長後の結晶の反り増大が懸念されていた。今回再成長界面に微細加工を施すことにより成長中の応力をコントロールを実現した。具体的にはシード基板の上に微細な溝加工を施し再成長を実施したところ、成長初期に発生するクラックを防止することができた。本成果を応用することにより成長中のクラック抑制や結晶のそり低減ができ、品質向上が期待できる。

成長条件の最適化においては、結晶品質のみならず低コストでの成長を実現すべく、結晶成長速度 200 um/h 、Ga 利用率 10% を目標に掲げ条件検討を実施した。成長温度、ガス流量、ノズル形状等を最適化することにより結晶成長速度 216 um/h を達成した。しかしながら Ga 利用率は 8.7% と目標未達である。これは4インチ下地上の成長では膜厚分布が悪いことに起因している。膜厚分布の改善はステージ II で実現する。

上記のような要素技術検討の成果を融合させ、 $\phi 89 \text{ mm}$ (実効径 76.2 mm 以上)、成長厚 1.3 mm (中心) という、目標値を超える大型バルク GaN 結晶を実現した。

高品質な大口径バルク GaN 結晶を得るためには現在、サファイアを始めとする異種基板の上に成長させるヘテロエピタキシャル成長、もしくはそのようなヘテロエピタキシャル成長により得られた GaN 基板上へのホモエピタキシャル成長を利用している。どちらの場合も、ヘテロエピタキシャル成長に起因する結晶の不完全性を評価・把握・制御する必要がある。そのために、

- ① ラマン分光法によるバルク結晶残留応力分布解析技術の確立
- ② XRD 法による精密格子定数測定技術の確立
- ③ エッチピット法等による転位分布解析技術の確立
- ④ 熱処理結晶品質改善検討
- ⑤ ①～③の手法及びその他分析・解析手法による検討結晶の評価・解析を進めた。

以下、それぞれの取り組み成果を記載する。

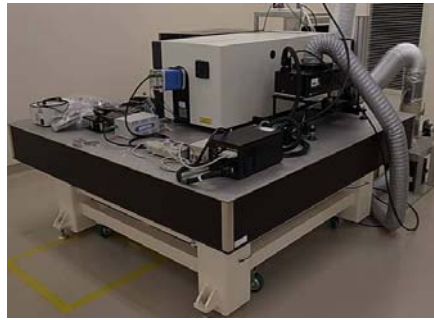
① ラマン分光法によるバルク結晶残留応力分布解析技術の確立

4インチ $\phi 30 \text{ mm}$ 厚みの大口径バルク GaN 結晶の残留応力分布を高精度で測定するために、

- ・ xy 方向 100 mm 、z 方向 30 mm の電動自動ステージ
- ・ 30 mm 厚結晶を想定して結晶内部の残留応力測定のための超長作動対物レンズ
- ・ 数 MPa レベルの残留応力評価を実現するための高分解能分光システム
- ・ 高い波数再現性を得るための標準光源同時機構
- ・ 蛍光顕微鏡像を測定場所モニタできるオプション

を装備した応力測定用高性能ラマン分光装置を設計・導入した。装置外観図を図 III. 2. 1. 1. 2 に示す。本装置を用いて HVPE 成長後のアズグロン GaN バルク結晶の評価を行い、結晶内部も含めて非破壊で残留応力評価できることを確認した。

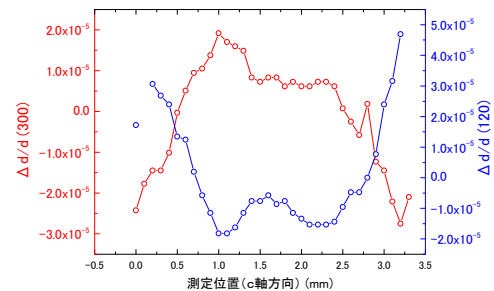
導入後は、高品質な大口径バルク GaN 結晶を得るために成長実験及び加工、熱処理した各種 GaN 結晶の残留応力評価手法として活用し、残留応力の少ない高品質な結晶の開発に活用した。



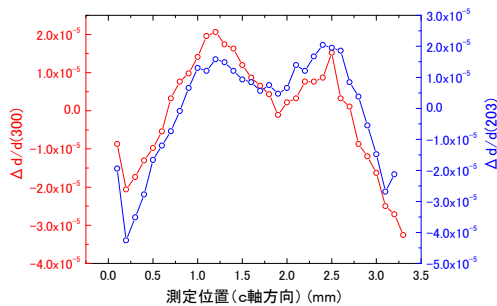
図Ⅲ. 2. 1. 1. 2 導入したラマン分光装置

② XRD 法による精密格子定数測定技術の確立

GaN バルク結晶の微小領域 X 線回折測定により格子面間隔の局所的な変化を精密に調べた。図Ⅲ. 2. 1. 1. 3 (a) は c 面成長バルク結晶の m 断面の格子面間隔を c 軸方向に沿って連続測定した結果である。ビーム径は 100x200um と 100um 間隔で測定を行った。(300)面と(203)面の格子面間隔の増減の変化の方向はほぼ一致しており、これから周方向の m 面格子面間隔と c 軸長の増減の変化一致していることがわかる。これに対して図Ⅲ. 2. 1. 3 (b) のように径方向の a 軸長情報を含む(120)の格子面間隔の増減の変化の方向はこれらと逆の傾を示す。これから c 面内で異方性を有する特異な歪が存在することがわかった。



し
子
れ
が
1.
面
向
み



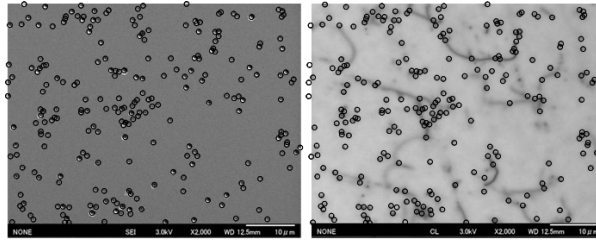
図Ⅲ. 2. 1. 1. 3 (a) 微小領域 XRD 測定結果 1

図Ⅲ. 2. 1. 1. 3 (b) 微小領域 XRD 測定結果

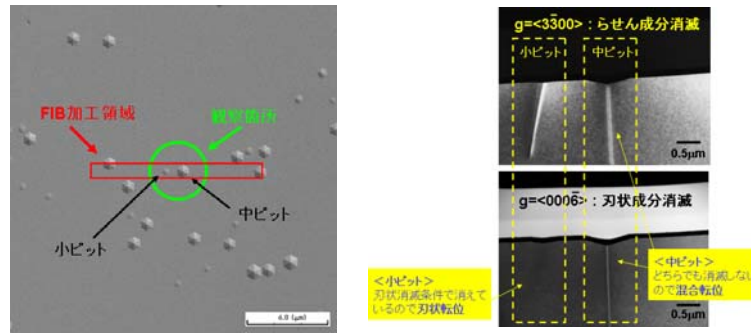
③ エッチピット法等による転位分布解析技術の確立

GaN 基板の転位分布及び種別の解析のため、液相エッチング法を検討した。酸系のエッチャントを用いて最適化した条件で形成したエッチピットを転位分布 (CL 像) に 100% 対応させることに成功した。(図Ⅲ. 2. 1. 1. 4)

また異なるサイズのエッチピットに対して断面 TEM 観察を行い、刃状、螺旋、混合転位種がエッチピットサイズにそれぞれ対応していることも判り、液相エッチングが転位種の判別に可能なことが分った。(図Ⅲ. 2. 1. 1. 5)



図Ⅲ. 2. 1. 1. 4 5 エッチピット分布 (○で囲っている部位) と CL 像の対比 (左 : SE 像 右 : CL 像)



図Ⅲ. 2. 1. 1. 5 異なるサイズのエッチピット部位での断面 TEM 観察.
中ピットは混合転位、小ピットは刃状転位

④ 熱処理結晶品質改善検討

大口径バルク結晶の高品質化を目的として、熱処理検討 (温度・時間、雰囲気ガス等) を実施した。一連の条件検討において最適化された条件での熱処理により、格子欠陥再配列と、格子定数変化ならびに残留応力の低減を確認した。本成果は、GaN 結晶の効果的な熱処理条件を初めて見いだすことに成功したものであり、その成果の一部は 2011 年 7 月の ICNS (International Conference on Nitride Semiconductor) にて対外的に発表する予定である。

⑤. ①～③の手法及びその他分析・解析手法による検討結晶の評価・解析

検討結晶の評価は、上記①～③に確立した手法に加えて、一般・汎用的評価方法、最先端評価方法を活用して以下の通り実施した。

【アズグロン結晶】

残留応力分布 (Raman)、曲率 (XRD)、形状反り、結晶品質 (XRC)

【研磨基板】

残留応力分布 (Raman)、曲率 (XRD)、形状反り、結晶品質 (XRC)
貫通転位分布 (SEM-CL、エッチピット)、キャリア濃度

【詳細検討試料】

上記に加えて、不純物 (SIMS)、横方向転位 (断面 SEM-CL)、
精密格子定数 (XRD)、格子像・欠陥 (TEM)、吸光度、熱伝導率
微小部格子定数 (マイクロビーム XRD@SPring-8)、エピ評価
更に、特に注目した試料については以下の評価・解析も実施した。
基礎的評価 (OM、AFM、XRD)
点欠陥 (陽電子消滅)
光学特性、輻射・非輻射再結合ダイナミクス解析
PL 測定、TRPL 測定、時空間分解 CL 測定

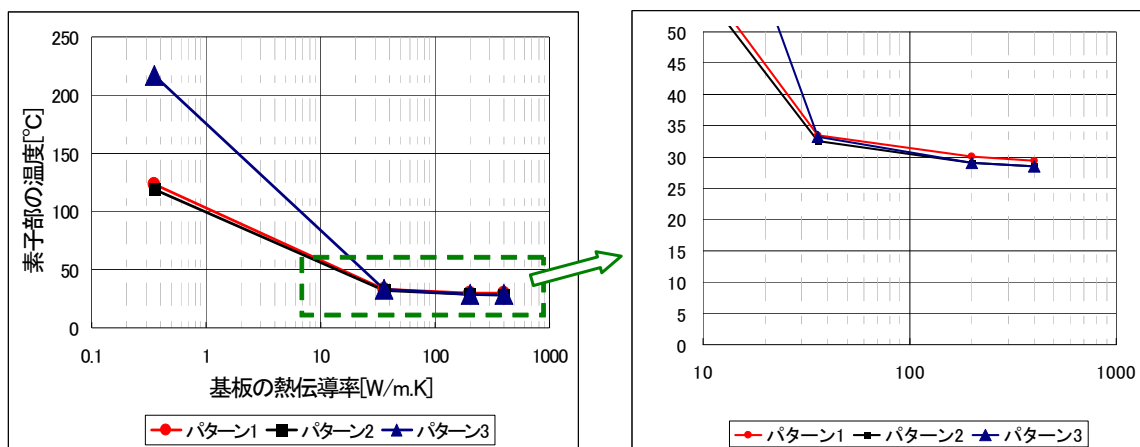
(3) デバイス基板技術

GaN基板チップを実装する基板に関する検討を行った。チップ実装デバイスの発光効率を向上させるためには、高反射率かつ高熱伝導率を有する基板を用いる必要がある。

まず、高反射アルミ基板と配線基板部材として三菱樹脂（株）製“WhiteK™”を用いて評価を行った。“WhiteK™”は耐熱性、耐光性に優れ基板コスト低減に効果がある配線基板部材である。ワイヤボンダ実装においては既存メタル基板と同等の性能で試作可能なことを確認した。次ステップとしてGaN基板チップに必須なフリップチップ実装が可能な配線基板部材の構造検討を行った。なお、本開発においては高反射基板として高反射銀メッキ基板を用いている。

次にチップ実装電極パターン、基板材料の熱伝導率の違いによる伝熱特性を熱シミュレーション解析により検討した。熱伝導率は樹脂、アルミナ、窒化アルミなどを想定。電極パターンは3種類（パターン1：n電極/p電極を交互に配置、パターン2：p電極大、パターン3：p電極小）で検討を行った。

図Ⅲ. 2. 1. 1. 6に基板電極パターンと基材熱伝導率の違いによる伝熱特性シミュレーション結果を示す。基材の熱伝導率に関してはある値（30～40W/mK）以上であれば、素子温度に大きな変化は生じない結果となった。また、基板電極パターンに関しては、特に基材の熱伝導率が低い場合に差異がみられ、GaN基板チップのp電極を実装する電極パターン面積を広くすることで素子温度が低下した。今回の解析結果よりチップ実装デバイスに最適な基板電極パターン形状、熱伝導率を把握し、デバイス設計へフィードバックし、デバイス作製を行った。



図Ⅲ. 2. 1. 1. 6 伝熱特性シミュレーション結果

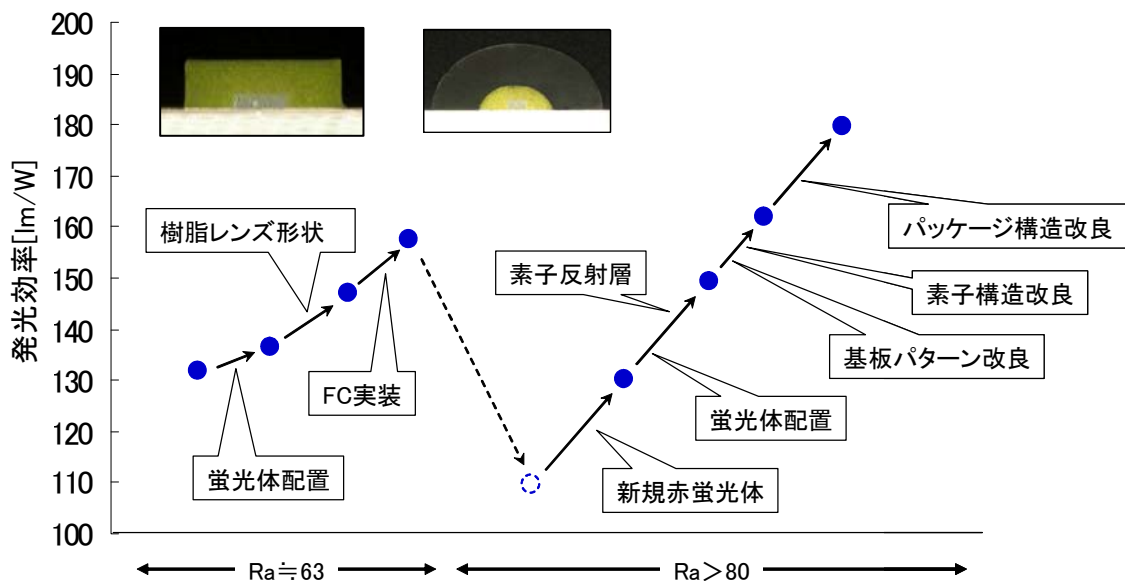
(4) 蛍光体配置・パッケージ構造

チップ実装デバイスの発光効率を向上させる手段として、前述の①実装形態（フリップチップ実装）、②GaN基板チップのGaN基板上面の表面加工（光取り出し面処理）、③蛍光体形成（新規赤蛍光体を含む3種類の蛍光体とその配合）、④基板パターン（基板材料と基板電極パターン）の他に、GaN基板チップに対する蛍光体の配置と封止樹脂・パッケージ構造の最適化検討とチップ実装デバイス作製を行った。

蛍光体の配置に関しては、封止樹脂内に蛍光体を均一に分散させる方法（蛍光体分散法）や、封止樹脂内で蛍光体を沈降させる方法（蛍光体沈降法）などが知られている。今回、封止樹脂形状との組み合わせも含めて発光効率が向上する蛍光体配置方法をシミュレーションとチップ実装デバイスの作製・評価により検討した。蛍光体沈降法は蛍光体分散法より発光効率がわず

かに向上する結果が得られた。GaN基板チップ周辺に蛍光体を配置する方法（蛍光体素子周り配置法）を用いると、より点発光に近い形となり、かつ封止樹脂形状をレンズ形状とすることで、封止樹脂と空気層との界面における反射を低減でき、光取り出し効率、発光効率が向上することが確認された。なお、封止樹脂のレンズ形状に関しては、光学シミュレーションと実際のデバイス試作・評価により、曲率・形状に関して最適なものを求めたが、半球の形状が最適であった。さらに、封止樹脂をボール形状とすることで、封止樹脂から空気層への光取り出し面積を増やし、かつ、基板における反射を少なくすることで発光効率が向上し、前述の蛍光体組み合わせと併用することで発光効率180lm/W、Ra>80のチップ実装デバイスを実現した。

以上の本開発の経過と結果をまとめると図Ⅲ．2．1．1．7になる。図Ⅲ．2．1．2－4はチップ実装デバイスの発光効率を向上させる手段と発光効率の関係をあらわしている。Ra≒63の領域は青色発光LED素子と黄色蛍光体の組み合わせでの結果であり、①蛍光体配置（蛍光体均一分散法から蛍光体沈降法へ）、②封止樹脂レンズ形状、③実装形態（ワイヤボンダ実装からフリップチップ実装へ）により発光効率は向上した。Ra>80の領域は青色発光LED素子と演色性を高めるため新規赤蛍光体を含む3種類の蛍光体の組み合わせでの結果であり、⑤蛍光体配置（蛍光体素子周り配置）、⑥基板パターン改良（基板電極パターン）、⑥パッケージ構造改良（封止樹脂ボール形状）およびGaN基板チップの改良（素子反射層、素子構造改良）により発光効率180lm/Wを実現した。



図Ⅲ．2．1．1．7 チップ実装デバイス構造と発光効率

(5) LED 照明ランプ・器具の開発

各種点灯回路方式の検討を実施し、40W 形ハロゲン電球・ミニクリプトン電球代替 LED 照明を実現するための新規制御回路を採用し、その効果を確認した。

始めに、ベンチマークとして、LED 電球の市場調査にて、最も一般的に使用されていた「電流ピーク検出降圧回路」を用い、電流検出部位をスイッチング FET のソース電流として試作を実施した。

この際の試作品は図Ⅲ． 2． 1． 1． 8 の通りで、LED に供給する電力を点灯回路に入力する電力で割った電源効率は 82% となった。

本回路構成は、LED の順方向電流を検出するのではなく、その代用特性として FET のソース電流を検出して、出力を安定化させている。さらに、電流波形のピーク値のみを検出しているため、周囲温度や入力電圧の変動に弱い傾向がある。

今回、LED 電球に組み込んだ際の安定度向上を目指して、複数種類の回路を試作・検討し、出力安定化のための電流検出部位を LED の順方向電流とする新規制御回路を採用するに至った。

この際の試作品はミニクリプトン電球代替 LED 電球が写真 2、およびハロゲン電球代替 LED 電球用が写真 3 の通りで、電源効率はミニクリプトン電球代替で 84.8%、ハロゲン電球代替で 88.6% となった。



図Ⅲ． 2． 1． 1． 8 LED 器具試作

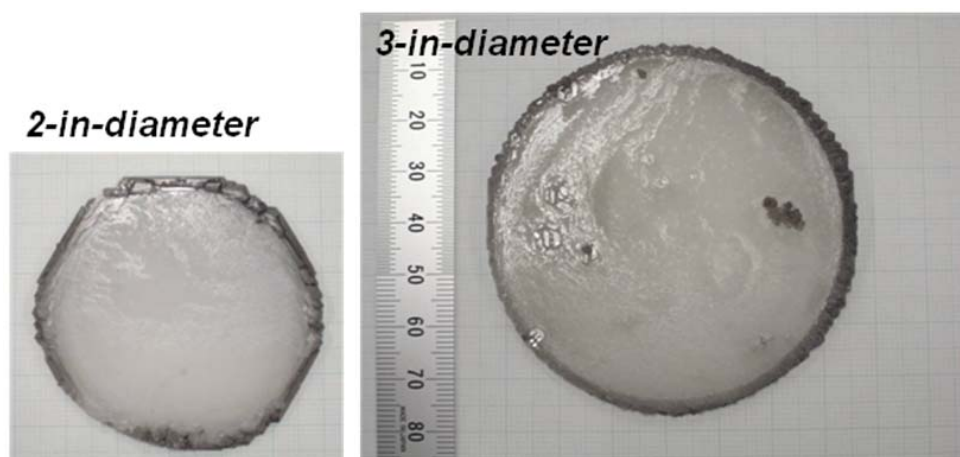
2.1.2 Na フラックス法による GaN 結晶手法の高度化に関する基盤技術の研究開発

Na フラックス法による GaN 結晶成長技術、及び高演色性・高効率 LED デバイス作製技術開発について、イノベーション・センター、大阪大学、名古屋大学の 3 者連携により取り組む。

高品質 GaN 結晶の低コスト・量産化技術の開発成果について以下に記述する。

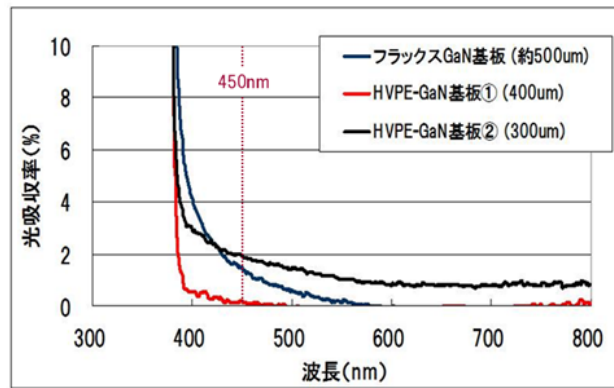
(1) バルク GaN 結晶育成に向けた基盤技術の研究開発

板状種結晶上への LPE 成長では、種基板を大口径化することで LPE 結晶の大口径化が容易である。しかし、種基板と LPE 結晶の熱膨張係数の違いや、種基板に残存する歪が原因で、しばしば LPE 結晶にクラックが発生する問題がある。大阪大学では、種基板として HVPE 法で作製された低反り自立 GaN 基板を用い、Na フラックス法で LPE 成長を行うことで、これまでで最も高品質かつ大口径の 3 インチクラックフリー GaN 結晶の作製に成功している(図Ⅲ. 2. 2. 1)。これらの平板状 GaN 結晶は、長尺化によるバルク状 GaN 結晶育成のための種結晶となる。さらに、本プロジェクトでは、この技術を用いて LED 作製用種結晶を作製・供給している。



図Ⅲ. 2. 2. 1 自立 GaN 基板(HVPE 法)上に成長させたクラックフリー2 インチ GaN、及び 3 インチ高品質 GaN 基板

GaN 基板を用いた LED 構造において高い光取り出し効率を実現するため、透過率の高い(光吸収率の低い)基板の作製が重要である。図Ⅲ. 2. 2. 2 は Na フラックス法で作製された c-GaN 基板と市販 HVPE 製 c-GaN 基板の光吸収率比較である。LED の発光波長である 450 nm 付近における各種基板の光吸収率は、HVPE-GaN 基板の 0.15 ~ 1.92 % に対し、フラックス GaN 基板は 1.40 % (吸収係数の概算値 : 0.27/cm) で、市販品 HVPE と同程度の光吸収率であり、高効率 LED 作製用基板として現状でも問題無く活用できることが分かった。また、この光吸収率は、育成溶液中の窒素溶解度を向上させることでさらに向上できることがこれまでの実験結果から示唆されている。参考までに、アモナーマル法で育成された GaN 結晶の吸収係数は改善されても 8/cm 程度であることが報告されている。この着色は、アモナーマル法で育成した GaN 結晶に含まれる $10^{19}/\text{cm}^3$ 以上の酸素不純物に起因していると考えられているが、一方、Na フラックス法では GaN 結晶中の酸素不純物濃度が $10^{16}/\text{cm}^3$ 台と低濃度である。



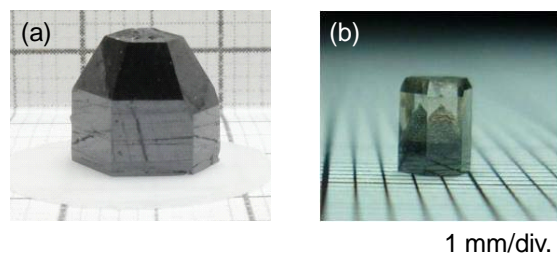
図Ⅲ. 2. 2. 2 各種 GaN 基板の光吸収率の波長依存性

種結晶、及び LED 作製用ウエハ表面においては、原子レベルで平坦であり、機械的ダメージが存在しないことが重要である。本プロジェクトでは、中性溶液中で、GaN 表面を紫外光で酸化させながら固体酸触媒と接触させることで、Ga 酸化膜凸部より選択的に溶解させる触媒表面基準エッチング法を開発した。Na フラックス法で作製された GaN 結晶(10×14 mm²)表面において、原子レベルでの平坦化に成功した。フォトルミネッセンス測定の結果、CARE 加工によりバンド端発光強度が飛躍的に上昇したことから、平坦性と高品質化を同時に実現できることが示されたと言える。

(2) 板状種結晶長尺化によるバルク GaN 結晶育成技術の研究開発

板状種結晶からのバルク GaN 結晶成長には、成長方位制御技術が重要となる。溶液組成制御により、成長速度、及び Habit 制御が可能であることが明らかになったが、低 Ga 組成においても(10-11)が残存する。そこで、Ga/Na 溶液に微量元素を添加し、Habit の制御を試みた。図Ⅲ. 2. 2. 3 (a)～(b)は、それぞれ Ba 0.05 mol%、Ca 0.05 mol% + Li 0.13 mol% 添加した系で得られた GaN 単結晶である。いずれの系においても(10-11)の発達は抑制され、主に(0002)、(10-10)からなる六角柱状の Habit を示すことが分かった。Ba 添加系で得られた図Ⅲ. 2. 2. 3 (a)の結晶は、直径 1 mm 以下の微小種結晶上に 192 時間の成長で得られたものであり、高さ 7.5mm、幅 9mm の結晶が得られている(c 軸成長速度: 38 μm/h)。また、(10-10)の X 線ロッキングカーブ半値幅は 20~50 arcsec であり、高い結晶性を有することが分かった。Ba 添加系では、Ba は結晶中に取り込まれないことが分かっている。これらの結晶育成では小型マッフル装置を使用しているため、まだ溶液攪拌を行っていないが、今後、溶液攪拌技術の適用により、一層の高速成長が可能となる。

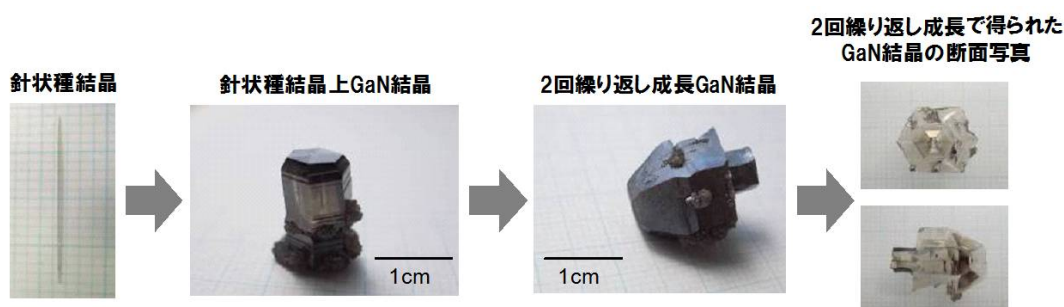
Ca-Li 添加系で得られた図Ⅲ. 2. 2. 3 (b)の結晶は、Ca 添加系に特有の六角柱状の Habit を示し、かつ透明性が向上した。Li 添加による効果は、過去、大阪大学より報告されており、Ga/Na 溶液中への窒素溶解度の増加が透明性を向上させると考えられている。Ca-Li 添加系の結果は、Na フラックス法において複数元素の共添加により、複数効果が同時発現する可能性を示唆するものである。



図Ⅲ. 2. 2. 3 (a)Ba、(b)Ca-Li 添加系で得られた結晶写真

(3) 針状種結晶太径化によるバルク GaN 結晶育成技術の研究開発

針状種結晶の太径化は、長尺種を用いることにより、微小種結晶を用いる場合よりも、より短時間で容易に長尺バルク単結晶の作製が可能となる。図Ⅲ. 2. 2. 4は 15 mm 長さの針状種結晶を繰り返し太径化させた GaN 単結晶写真である。2 回成長により、15 mm 径の GaN 単結晶成長にも成功している。スライス後のウェハ写真からも分かる通り、針状種結晶上では、大部分で透明性の良い GaN 結晶が得られることが明らかになっている。これは、微小種結晶から (10-11) 方向に成長した表面よりも、(10-10) 方向などの横方向成長した場合の方が窒素欠陥は発生しにくいということを示唆している。最近では横方向の成長速度が一方方向で $40 \mu\text{m/h}$ という結果も得られていることから、高温高压下で高速の溶液流れを誘起することで、高速太径化結晶育成が可能となると考えている。

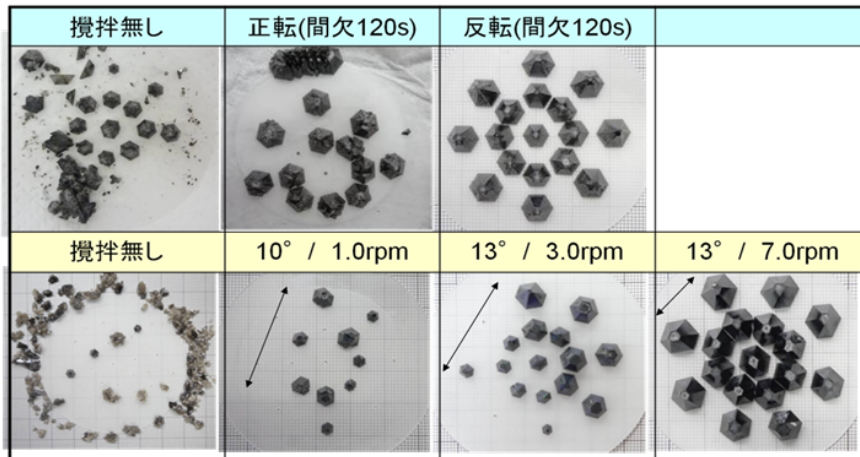


図Ⅲ. 2. 2. 4 針状種結晶上に成長した GaN 結晶、及びスライス後のウェハ写真

(4) 溶液攪拌、及び高温高压育成効果と新型装置開発

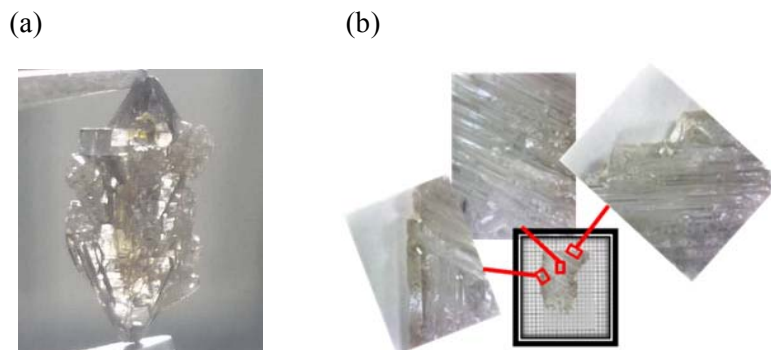
低コスト高品質化技術の確立に向けて、攪拌による成長速度の増加と、複数種の同時成長方法を検討した。攪拌手法として、1 軸揺動機構および回転攪拌機を採用し、各攪拌手法において、攪拌速度と成長速度の関係を調査した。種結晶は点状 GaN 結晶を用い、2 インチ径内で 17 個の種結晶を同心円状に配置した。

各攪拌パターンにおける結晶成長の結果を図Ⅲ. 2. 2. 5に示す。溶液攪拌を行わない条件では種結晶上成長量が少なく、坩堝壁上に大量の多結晶が晶出した。加えて、種結晶上に成長した結晶のほとんどは結晶表面に大きな凸凹ができる骸晶化が観測された。溶液攪拌の速度を増やすにつれ、種基板上以外での多結晶発生は抑制されることが分かった。また、溶液攪拌速度が増すにつれて結晶成長速度、及び結晶品質ともに向上した。育成条件は最適化されていない場合においても、c 軸方向の成長速度は $40 \mu\text{m/h}$ 以上となった。



図Ⅲ. 2. 2. 5 各攪拌手法・攪拌条件における結晶成長結果

LED 構造において高い光取り出し効率を実現するためには、基板として用いられる GaN 結晶に高い透過率が求められる。Na フラックス法を用いた GaN 結晶成長の場合、c 面 GaN LPE 結晶は十分高い透過率を有するものの、種結晶から (10-11) 方向に成長した表面は黒色に着色する問題がある。黒色化の原因は、窒素欠陥の発生であると考えられる。そこで、育成温度を従来の 860 °C から、窒素溶解度の高い 900 °C とし、ロッド状 GaN 結晶、及び GaN テンプレート上への結晶育成を行った。その結果、育成温度の高温化により、透明度が著しく向上することが明らかになった(図Ⅲ. 2. 2. 6 (a)、(b))。一方、高温条件では、溶液中の GaN 自身の溶解度も上昇するため成長速度が低下する問題がある。この問題は、原理的には育成窒素圧力を増加させることで解決される。



図Ⅲ. 2. 2. 6 (a)ロッド種結晶上、及び(b)GaN テンプレート上に成長した透明 GaN 結晶写真

以上の結果から、高品質大型バルク GaN 結晶育成のためには、従来よりも若干高温高压条件下において溶液を攪拌しながら育成することが良いことが明らかとなった。そこで、平成 22 年度では、プロペラ攪拌等、高速溶液流れを実現できる溶液攪拌技術を開発し、新しく高温高压結晶育成装置(最高温度 1000°C、最高圧力 100 気圧)を作製した。平成 23 年度では、これらの新規装置により透明大型 GaN 結晶の高速育成技術の開発を目指す。

(5) 究極効率 LED 構造実現に向けた微細構造成長技術開発

微細構造成長技術として水酸化カリウム(KOH)水溶液による低コスト光取り出し構造形成について検討した。

最初塩素により高速円柱エッチングを行い、次にアルゴンで等方的エッチングを行う 2 段エッチングによる加工を行った。図Ⅲ. 2. 2. 7にその結果を示す。次に安価で且つ化学的に安定な(1-10-1)面形成によるア

スペクト比 1 以上の円錐形成が可能と考えられる KOH による加工を試みた。比較的低濃度、低温では図 III. 2. 2. 8 に示す様に円柱形状であったが、高温、高濃度 KOH により図 III. 2. 2. 9 に示す様に、ほぼ理想的な円錐形状(詳細には六角錐形状)の形成が可能であることが分かった。

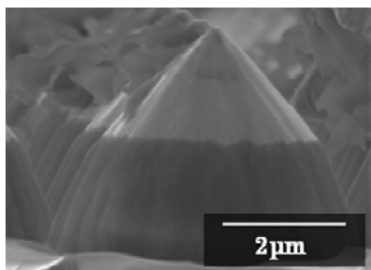


図 III. 2. 2. 7 2 段 ICP による光取り出し加工後の N 面 GaN

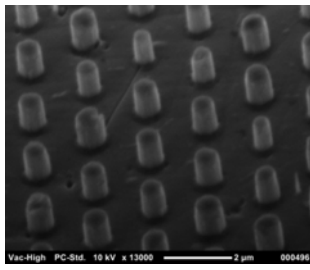


図 III. 2. 2. 8 KOH による光取り出し加工後の N 面 GaN(40°C、25 wt%)

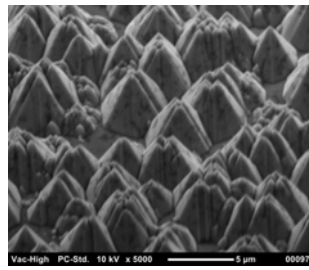


図 III. 2. 2. 9 KOH による光取り出し加工後の N 面 GaN(100°C、40 wt%)

図 III. 2. 2. 10 に、第 1 回目の試作 LED (効率 25lm/W) と第 2 回目の試作 LED における Moth-eye 加工の有無による光出力の比較を示す。Moth-eye 加工により、光出力は 4.3 倍に向上した。また、第 1 回目の試作 LED と比較すると、11.7 倍もの向上により、演色性 60 において換算効率 250 lm/W 以上を確認した。

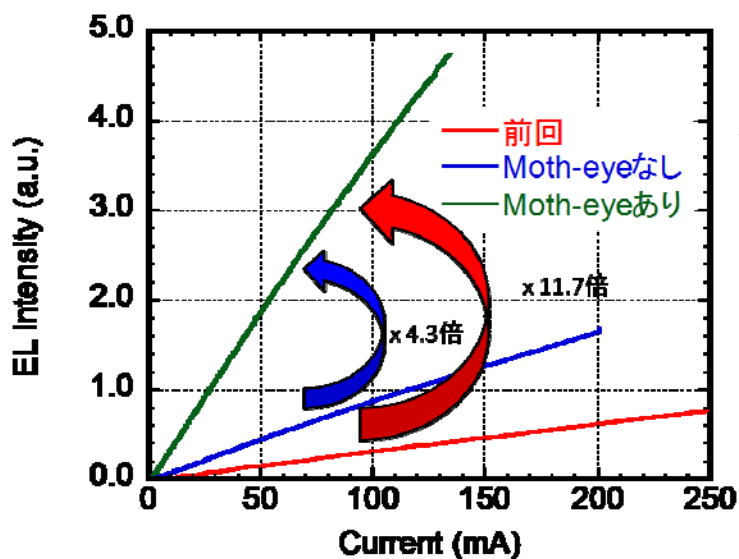
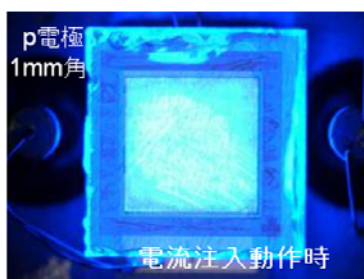


図 III. 2. 2. 10 第 1 回の試作 LED(25lm/W)と第 2 回目の試作 LED の Moth eye 加工前後の光出力の比較

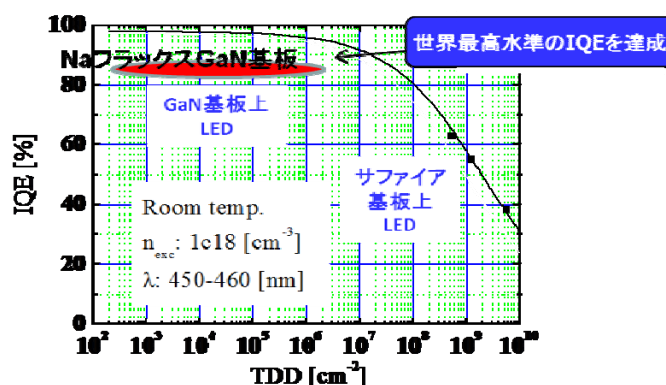
(6) Na フラックス GaN 基板上青色 LED の内部量子効率

Na フラックス法で作製された貫通転位密度 10^5 cm^{-2} 以下の高品質 GaN 基板上に、MOVPE 法を用いて青色 LED を試作し、IQE 及び光出力評価を行った。第 1 回目の試作 LED の写真及び結果である。図 III. 2. 2. 11 に動作時の光取り出し面からの写真、図 III. 2. 2. 12 には注入キャリア密度 10^{18} cm^{-3} 時の IQE の基板の貫通転位密度依存性を示す。p 電極の面積は 1 mm^2 角である。第 1 回目の試作 LED では、裏面に光取り出し構造を施していないので、発光パターンが明確に観測できる。金属は Ag 系の反射電極を用いたが、プロセス上の問題で密着性が悪く、中心部と端部では強度が異なる。極めて単純な pn 電極横並び構

造であり、n 電極が下側に薄く見えるが、厚い導電性 GaN 基板を用いているために、大型チップにもかかわらず、電流拡がりにはサファイア上の薄膜 LED と比較して極めて良好である。Na フラックス基板上に試作した青色 LED の IQE は何れも 85~90% であり、世界最高水準の IQE である。サファイア基板上と比較して、更に 1.5 倍程度の出力・効率向上を見込むことができることがわかる。図Ⅲ. 2. 2. 12 中実線は、内部圧電電界の効果を考慮せずにシミュレーションした結果であり、サファイア基板上では比較的良い一致を示しているが、Na フラックス基板上では若干のずれが観測される。何れも c 面であるが、このずれの原因は今のところ不明である。本素子試作の目的は Na フラックス法 GaN 基板の優位性の確認であった。サファイア基板上の同一構造素子と比較して、1.25 倍程度の向上が確認され、基板の高品質化、即ち TDD の減少による IQE の向上の効果が示された。一方で、光取り出し向上のための構造を全く施していないことのほかに、直列抵抗が 6[Ω]と大きい問題が明らかとなった。



図Ⅲ. 2. 2. 11 Na フラックス GaN 基板上の青色 LED。N 面からの写真。



図Ⅲ. 2. 2. 12 注入キャリア密度 10^{18} cm^{-3} 時のサファイア基板上及び Na フラックス GaN 基板上青色 LED の IQE の貫通転位密度 (TDD) 依存性。

表Ⅲ. 2. 2. 1 図Ⅲ. 2. 2. 12 の第 1 回試作 LED の評価結果

内部量子効率~90%
光取り出し効率~15% ⇒ 外部量子効率:13.6%
発光効率 25 lm/W@350mA (サファイア上では 20 lm/W)
演色評価数 60
ピーク波長 461 nm , $\Delta \lambda$: 23nm
直列抵抗:6Ω (※直列抵抗が高いため駆動 電圧が高い。)

2.2 研究開発項目①(b)LED照明：基板の応用

2.2.1 基板の応用によるデバイス技術の開発

基板の応用により、高効率 LED 光源を実現する技術開発を、名城大学、エルシード（株）の連携体制にて実現する。本研究開発成果は参考情報として以下に示す。

【本研究全体の成果】

（1）不純物添加 SiC 原料の開発

サブテーマ（1）のセラミック SiC 原料開発においては、試作はブリヂストンが保有するノウハウを用いたため、委託研究期間からは形状、不純物濃度などの要求仕様を提出することで、その使用通りの原料基板の提供をしてもらった。なお、開発当初は 30mmf のサイズからスタートしたが、8 月以降は 2 インチサイズへとサイズアップし、合計 60 枚の原料基板を提供してもらった。密度としては 2 種類、また B 濃度を 1×10^{18} 、 2×10^{18} 、 4×10^{18} 、 6×10^{18} 、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の 5 種類の試作を行った。作製方法はブリヂストン社ノウハウのため、非開示である。

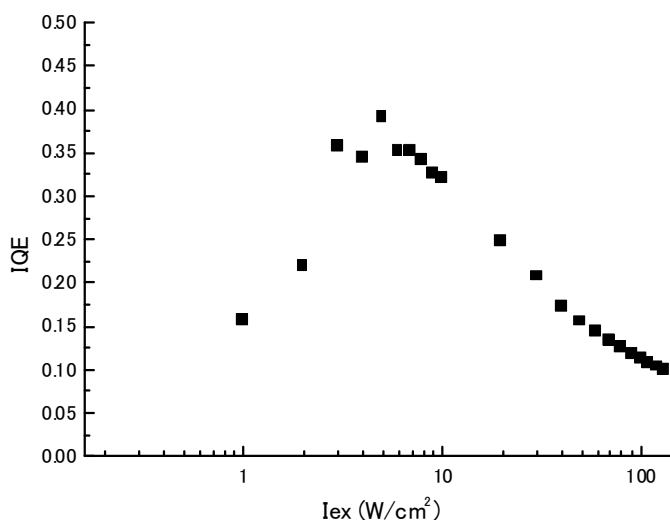
（2）蛍光 SiC の開発

第 1 ステージでは、N, B ドープ蛍光 SiC による高品質化、高効率化と、Al の付加による高演色性発光の確認を行った。スウェーデン、リンショピン大学の FSGP 法をエルシードに移転することから着手した。9 月には国内での FSGP 法結晶成長がスタートした。なお、それ以前には従来の近接昇華法を使用して、ブリヂストン製原料の B が、単結晶中に移動する転送率を実験により導出した。平均で 70% の転送率があることがわかった。N ドーピング濃度制御は、成長温度が近接昇華法と FSGP 法では大きく異なるため、FSGP 法への移行が完了してから、実験に着手した。その結果、X 線回折幅から見た結晶性は大きく向上させることができた。しかしながら DAP 発光の量子効率としては、FSGP 法による結晶においても改善が見られなかった。これまでに最も高い内部量子効率 (IQE) が得られたサンプルの内部量子効率の励起パワー依存性を図 2. 2. 1 に示す。このサンプルにおける不純物濃度は、B が $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、N が $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。励起パワーが 4 W/cm^2 付近で IQE は最大値の約 40% を示している。強励起時には、励起光強度とともに IQE が減少するのは、DAP 準位が飽和し、キャリアが欠陥準位に捕獲される割合が増えるためと考えられる。不純物濃度を高める必要がある。なお、LED としての動作時には、 10 W/cm^2 程度の励起状態となることから、この励起レベルまで IQE が低下しないほどのドーピング濃度が必要となる。

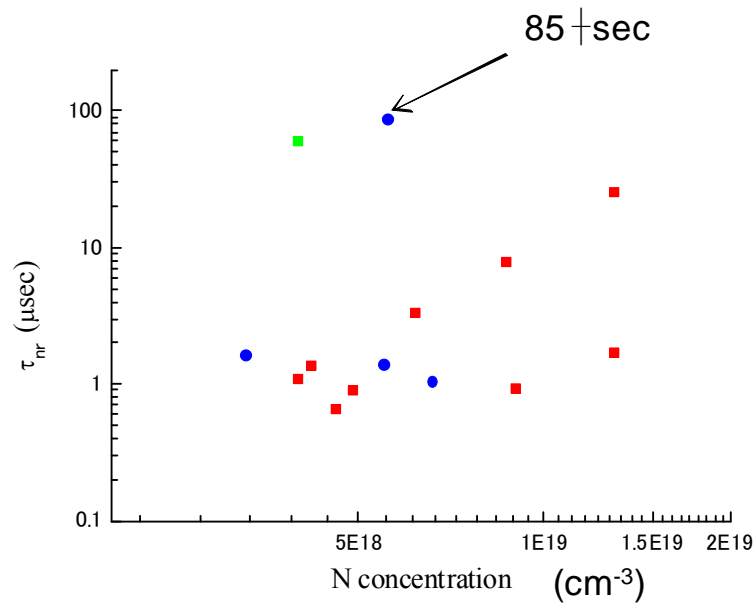
FSGP 法によるマクロな結晶品質の向上のみでは高効率化に直接結びつかないことがわかった。IQE とキャリア寿命の両方を測定することで、非発光再結合寿命を求めた。非発光再結合寿命は、ミクロな結晶品質に相当する。特に N 濃度の増加による非発光再結合寿命の変化が懸念されるため、図 III. 2. 2 に示すような N 濃度の非発光再結合寿命依存性をプロットした。非発光再結合寿命は N 濃度に依存しないか、むしろ高い N 濃度時に長くなる蛍光が見られる。しかしサンプルの多くは数・sec 付近に分布している。3 サンプルで $10 \cdot \text{sec}$ を大きく超える非発光再結合寿命が得られているが、これはこれまで SiC で観測された最高値 $13 \cdot \text{sec}$ よりも長い。すなわち、成長条件の制御性を高めることで、極めて高いポテンシャルを持っていると言える。IQE が最高値を記録したサンプルでは非発光再結合寿命が $55 \cdot \text{sec}$ であり、これとドーピング濃度が比較的良好な条件であったために高い効率が得られたと推

察される。また、FSGP 法で作製したサンプルにおいて最高 85・sec の非発光再結合寿命が観測されている。なお、非発光再結合の原因となる欠陥は、C 空孔に関連する欠陥だということが SiC 研究者の共通認識であり、我々の結果も同様と考えることができる。したがって、C サイトに置換する N をある程度添加すると、キャリア寿命が長くなる場合がある。今後の研究開発に多大なるヒントを与えている。

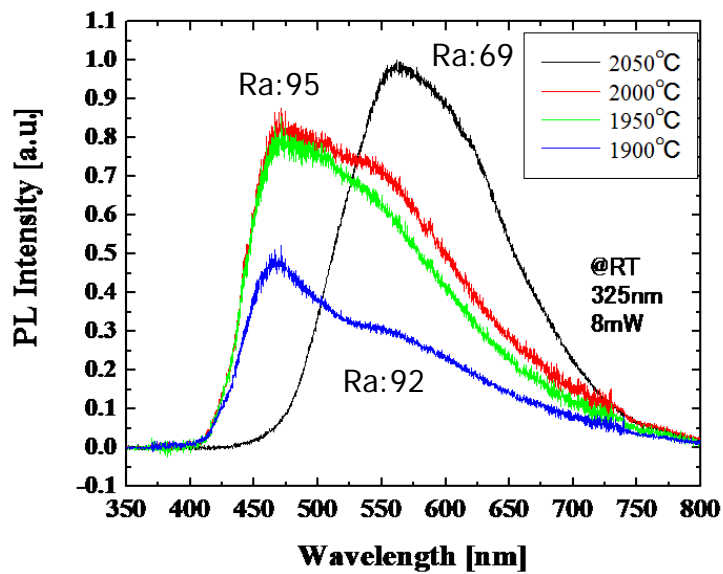
なお、ベストサンプル同様に非発光再結合寿命として 55msec が安定的に得られると仮定し、不純物濃度が増加した場合に推定される IQE の励起パワー依存性を実験で得られた発光再結合寿命を用いて掲載した結果を図Ⅲ. 2. 3. 5 に示す。B 濃度が $9 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ (N 濃度は B 濃度 $+2 \times 10^{18}$ に固定) とした場合には励起パワー 10W/cm^2 まで低下することなく 100%近い値を維持できることがわかる。非発光再結合寿命がさらに延びれば、より低濃度の不純物濃度でもこの状態を維持できる。極めて有望な結果を考えられる。図Ⅲ. 2. 2. 3 には、この蛍光 SiC にさらに Al を付加した場合の蛍光スペクトルを示す。Al 濃度は測定していないが、成長温度とともに Al 濃度は増加し、推定 $10^{17} \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の範囲であると思われる。なお、B 濃度はより大きく増加するため、 2050°C のみは N-Al の DAP 発光が消失し、N-B のみの発光となっている。平均演色評価数は、N-Al の発光が付加されれば 90 以上の値を示し、最高で 95 が観測された。高演色性のポテンシャルを十分に持っていると言える。また、ポーラス化した蛍光 SiC では Al を付加することなく同様の演色性が得られることもわかった。



図Ⅲ. 2. 2. 1 蛍光 SiC の内部量子効率 (IQE) の励起パワー依存性



図Ⅲ. 2. 2. 2 非発光再結合寿命・ τ_{nr} のN濃度依存性



図Ⅲ. 2. 2. 3 Alを付加した蛍光SiCの蛍光スペクトル

(3) 窒化物半導体エピタキシャル成長技術の開発

蛍光 SiC 基板上に高効率近紫外 LED を形成するための、エピタキシャル成長条件によりデバイス構造の最適化を行った。蛍光 SiC の吸収特性を考慮して発光ピーク波長として 385nm に定め、目標とする内部量子効率 80%の実現を目指した。まず、テンプレート層となる n-GaN 層の低転位化に取り組んだが、最終的にはナノコラム技術を導入し、転位密度 $5 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ が

目標となる。しかし第 1 ステージではナノコラム技術は要素技術開発に留め、通常のエピ成長での成長条件等の最適化を優先し、 $1 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ に近付けることとした。

AlN バッファ層の成長温度、膜厚を最適化し、その上の GaN 成長時に SiN ナノマスクを導入する方法にて最高 $2 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ までの転位密度を得ることができた。ただし自己形成 SiN ナノマスク形成には不安定性が存在し、安定して得られる転位密度は $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ であった。一方、積層構造の最適化も並行して進め、MQE 活性層中の AlGaIn バリア層の導入、p-AlGaIn 電子ブロック層成長時の Mg ドーピングプロファイルの最適化などを行った。図 III. 2. 2. 4 に近紫外 LED の改善アプローチと内部量子効率の推移を示す。後半では内部量子効率は 60% 付近で飽和する傾向となった。これは転位密度による非発光再結合が内部量子効率を支配しているためと考えられる。サファイア基板上での内部量子効率の転位密度依存性を実験により求め、図 2. 2. 5 の実線に示すシミュレーション結果と比較すると、よい一致が見られる。すなわち 385nm では、転位密度 $5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ の場合に転位によって決まる内部量子効率は 60~70% の範囲となっている。これ以上の高効率化のためには、転位密度のさらなる低減が必須であることがわかる。

一方、第 2 ステージで本格的に導入する予定の GaN ナノコラム結晶の検討も並行して進めた。ナノインプリント技術によるパターン形成、その後の選択成長条件の検討により、現状ナノコラムが形成できるようになった。未だ均一性が低い、ナノコラム内への転位の伝搬はなく、無転位結晶が形成できることがわかった。均一性を高めることが課題として残されるが、それを解決した後、LED テンプレート層への導入を行い、内部量子効率向上を進める。

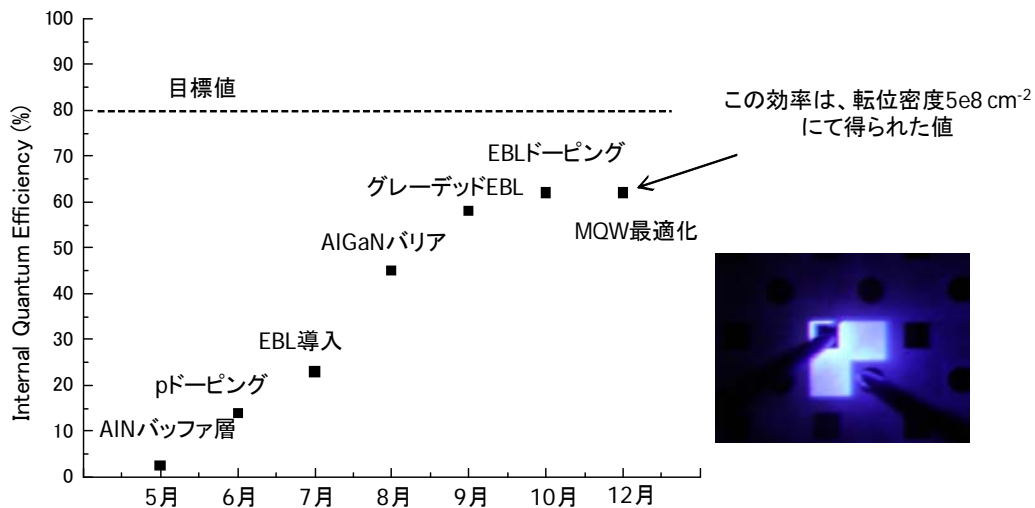
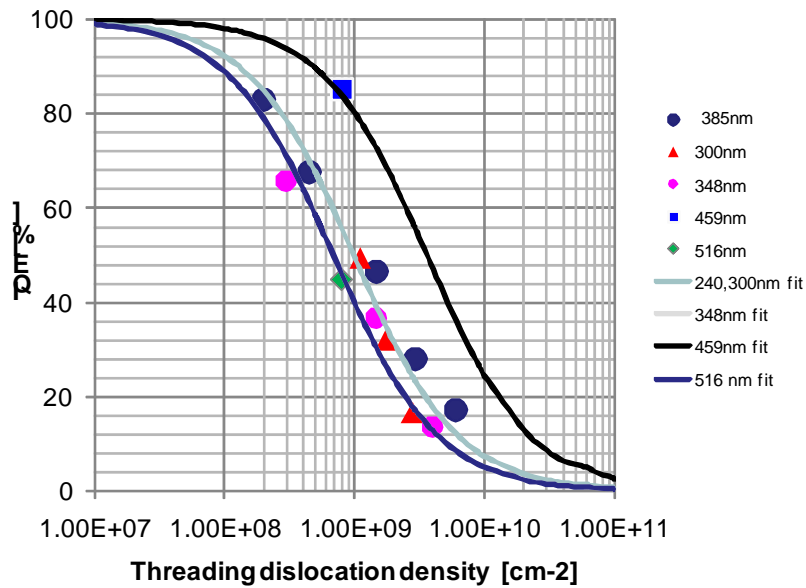


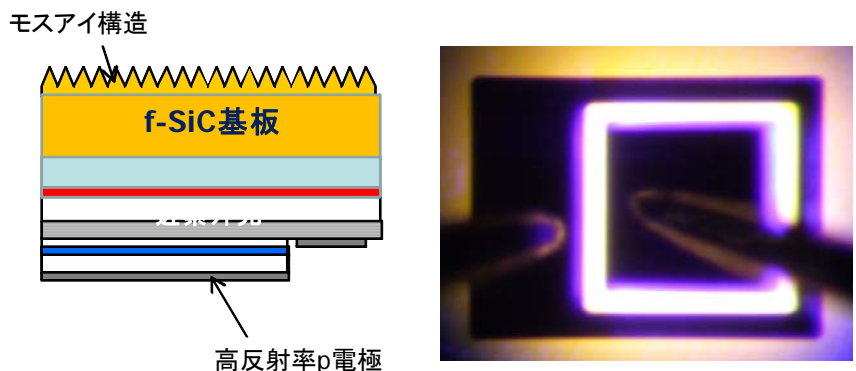
図 III. 2. 2. 4 窒化物系近紫外 LED の内部量子効率の推移



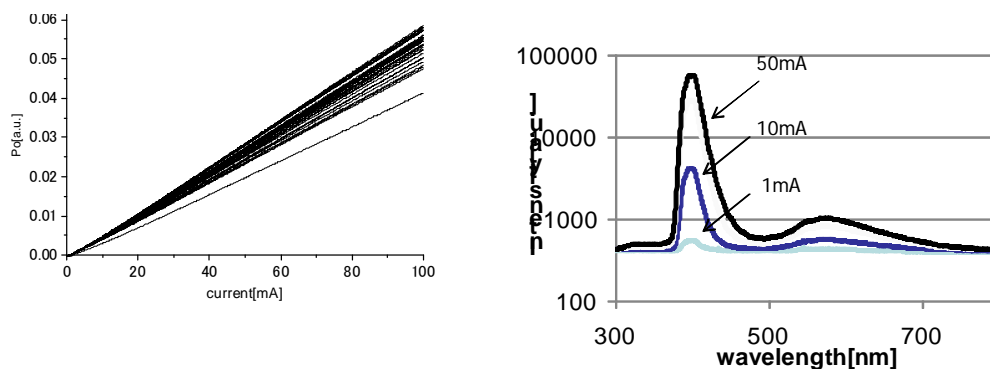
図Ⅲ. 2. 2. 5 近紫外 LED の内部量子効率 (IQE) の転位密度依存性

(4) 白色 LED の特性

蛍光 SiC の高効率化を安定的には達成できなかったが、原理確認のため、白色 LED の試作を行った。素子構造およびプローブによる電流注入時の動作写真を図Ⅲ. 2. 3. 7 に示す。作製に使用した蛍光 SiC 基板の弱励起時の内部量子効率は 5% である。LED 素子のサイズは $500 \cdot \mu\text{m} \times 300 \cdot \mu\text{m}$ で発光面積は $200 \cdot \mu\text{m}$ 角である。図Ⅲ. 2. 2. 6 にて基板からの発光による暖白色が確認できる。また、実装した LED の電流-光出力特性および発光スペクトルを図Ⅲ. 2. 2. 7 に示す。光出力の絶対値は低いため、測定していない。スペクトルから蛍光 SiC からの 580nm 付近にピークを持つ発光が確認されたが、近紫外 LED の透過光よりも強度が低い。今後の改善が必要である。



図Ⅲ. 2. 2. 6 白色 LED の構造と、プローブによる動作時の写真



図Ⅲ. 2. 2. 7 白色 LED の電流－光出力特性と発光スペクトル

目的に照らした達成状況（共同研究、再委託研究による成果を含む。）

目標値である発光効率、175lm/W、平均演色評価数 80 以上に対して、平均演色評価数は達成できたが発光効率の実績は大きく下回った。ほぼ 1 年という限られたステージ I の開発期間において、蛍光 SiC の発光メカニズムを解明し、結晶成長条件による制御を行うことが困難であったためと思われる。しかしながら、効率を支配する非発光再結合速度として、世界トップの値を得ることができ、また不純物濃度を高めることで効率の目標値を達成できる見通しを得たことで、開発の早期成功を確信できるに至った。

この LED は、従来のアプローチと大きくことなり、蛍光 SiC 基板が全ての可視光を生む出しことや、実装前の LED チップの状態ですでに白色光を放出すること、高注入・高出力時においても効率の低下がない近紫外 LED を励起ソースに使用することなどから、単位 1m 当たりの大幅なコストダウンができること、また演色性を高めても効率がトレードオフの関係を持たず、両者を両立できることなど、依然照明用途に対しての大きなアドバンテージを持っている。

2.3 研究開発項目①(2)有機 EL 照明：高効率・高品質化の研究

2.3.1 真空蒸着方式による有機 EL 照明の高度化の研究

有機 EL 照明技術として蛍光灯代替高性能照明光源の開発及び高性能照明光源の高生産性製造技術の開発に、パナソニック電工（株）、出光興産（株）、タツモ（株）、長州産業（株）、山形大学、青山学院大学の体制で取り組む。

【本研究全体の成果】

Stage II の最終目標の達成には、青色リン光材料技術の確立と、これを組みこんだ青・緑・赤オールリン光白色素子の実現が不可欠であるが、青色リン光の技術開発の難易度が非常に高いため、開発に時間を要することを考慮し、Stage I では、

①蛍光リン光ハイブリッドマルチユニット素子と高光取り出し基材、複合実装構造の活用による

Stage I 目標達成のための開発

②Stage II で用いる、オールリン光系および各種要素技術の開発の 2 つの開発を実施した。すなわち、Stage I では、青色蛍光発光ユニットと赤・緑色リン光発光ユニットを組み合わせたハイブリッドマルチユニット構成での目標達成と、Stage II 目標達成に必要な要素技術の開発（青色リン光の開発など）、技術課題の抽出、および開発方針の策定を行った。加えて、低コスト化のためのプロセス技術およびパネル構造に関する検討を行った(③)。

①に対しては、下記の特性を有する白色発光素子を開発・実現し、基本計画に記載の Stage I 目標をすべて達成した。

発光面積：25 cm²

発光効率：56 lm/W

平均演色評価数：91

輝度：1,000 cd/m²

輝度半減寿命：推定 15 万時間以上

パネル厚み：約 5 mm

色度：(0.43, 0.40) ※下記、固体照明に関する規格の指定色度範囲内

基本計画に記載の Stage I 目標：
発光面積 25 cm² 以上で発光効率 50 lm/W 以上、平均演色評価数 80 以上、
輝度 1,000 cd/m² 以上、輝度半減寿命 1 万時間以上

本素子の特性は、独自に設定した下記目標値もすべて達成したものである。

独自提案の目標：
発光効率 55 lm/W 以上、輝度半減寿命 10 万時間以上、パネル厚み 8 mm 以下、
発光色度：“ENERGY STAR® Program Requirements for Solid State Lighting
Luminaires, Eligibility Criteria”（固体照明に関する規格）の
色度範囲内

②に関しては、青色リン光材料、塗布型電極材料／プロセス技術、一貫成膜プロセス技術の開発を行った。各テーマの成果については、後に述べる。

また③に関しては、本事業における各 Stage の白色発光素子性能を設定したマーケティング活動を併行して実施し、当該特性の有機 EL が実現された際の有機 EL 照明市場規模を推定した。当該規模の有機 EL 照明を製造する際のコストを、開発を行った白色発光素子の構造およびプロセスを前提として、プロセスの進化、生産量増大による部材/プロセスコストの低下などを想定して検討した結果、将来的なコスト可能性として¥1.9 / 1m・年を試算することができた。なお、前記①②の目的と各サブテーマとの関係は、以下の通り（主たる関係を記載）。

- A-1 高光取り出し基材の開発
 - A-3 高効率・長寿命・低電圧駆動材料の開発
 - A-4 高性能発光デバイスの開発
 - A-5 複合実装構造の開発
 - B-4 複合実装構造形成プロセスの開発

- A-2 低抵抗・高透過率電極材料の開発
 - B-1 塗布型電極形成プロセスの開発
 - B-2 高品質基板プロセスの開発
 - B-3 一貫成膜プロセス技術の開発

以下、各サブテーマの開発内容および成果を以下に記す。

（1）蛍光灯代替高性能照明光源の開発

A-1 高光取り出し基材の開発（パナソニック 電工株式会社）

基材と電極界面の屈折率段差に由来する全反射を抑制することを意図し、前記界面に挿入する屈折率段差低減層を検討した。具体的には、電極および有機層と同等の屈折率を有する高屈折率成分を選定し、発光素子内部の光の挙動を踏まえた光学的構造の解析および実験的検討によって、界面の光透過率を向上可能な構造を設計した。また、陰極近傍の反射率調整を行い、素子内部での多重反射に由来する光のロスが少ないデバイス構造を設定した。当該構造を有する高光取り出し基材を微細構造形成技術によって実際に形成し、A-4 で開発した高性能発光デバイスとの組み合わせ評価に供したところ、約 40% の高い光取り出し効率を確認できた（※通常のガラス基板を用いた場合の光取り出し効率を 20%と仮定して推定算出）。

A-2 低抵抗・高透過率電極材料の開発（パナソニック 電工株式会社）

低い抵抗値と優れた光学特性との両立を意図した、塗布型インジウムレス電極材料の開発を実施した。導電性を確保するための材料として金属ナノ材料を選定し、導電性と光透過性の両立、導電性の面内均一性確保、平坦性制御を行うための補助材料との複合化検討を行った。特に有機 EL 素子の駆動時信頼性向上に必要な平坦性確保のため、電極表面への平坦化層形成検討を併行して実施し、抵抗、透過率、表面平滑性を同時に満足する塗布型材料およびその形成基本プロセスを構築した。また本電極を用いた小面積の有機 EL 素子を試作し、駆動特性に大きな問題がないことを確認した。

A-3 高効率・長寿命・低電圧駆動材料の開発（出光興産株式会社）

（i）青色発光材料の開発

第 1 次標準材料として選定した青色発光材料に関する高純度・高収率合成法を確立し、得られた高純度材料をパナソニック 電工に提供した。また別途、複数系統の錯体の合成・評価を実施し、得られた材料に対して、電気化学測定による耐久性評価を行った。その結果、検討した中で第 1 次標準材料の系統が最も有望であることがわかった。

(ii) 青色リン光用ホスト材料の開発

出光興産が保有するホスト材料から、第1次標準材料として、長寿命を示す化合物を抽出し、パナソニック電工に提供した。また、出光興産が保有するホスト材料から、低電圧を示す化合物を抽出するのに加えて、新たに創案した10種の基本構造の物性を、量子化学計算を用いて予測した。良好な物性の発現が示唆された約20の化合物に対して合成・評価を行い、低電圧化に有望な4系統を選別し、これらの系統の誘導体に関する検討を展開した。Stage IIに向けて、青色リン光ホスト材料向けの有望分子骨格を複数見出した。

(iii) 電荷輸送材料の開発

駆動電圧の膜厚依存性から素子内の電圧分布を解析し、発光層および電子輸送層の低電圧化が白色素子の特性向上に極めて有効であることを見いだした。(2)で検討したホスト材料の中から低電圧が期待できる骨格をベースに、さらに電子輸送性向上の検討を行い、低電圧化に寄与する電子輸送材料を見出した。また、本材料の誘導体の分子設計と合成を実施した。本材料を用いた素子のインピーダンス測定により電荷注入過程を詳細に解析した。

以上の材料を用いて、青色リン光発光素子の評価を行った。ホスト材料、電子輸送材料の組み合わせを含む種々検討の結果、電圧・半減寿命のそれぞれでStage Iの目標を達成する構成を見いだした(駆動電圧3.0V(100 cd/m²時) / 推定輝度半減寿命0.4万時間(初期輝度1,000 cd/m²時), および3.8V / 0.5万時間(同条件))。Stage IIでは、Stage Iの知見をもとに低電圧と長寿命を両立する材料骨格の選定と、その誘導体の展開による材料開発を実施する。

A-4 高性能発光デバイスの開発

(i) 発光デバイスの開発 (パナソニック電工株式会社)

H19~H21年度に実施した「有機発光機構を用いた高効率照明技術の開発」事業で構築してきた蛍光リン光ハイブリッドマルチ素子を基本構造として、一部の材料の見直し、キャリアバランスの再調整、構造の再最適化などを行うことによって、更なる高効率化、長寿命化を達成した。さらにA-1で開発した高光取り出し基材との光学的マッチングを行うとともに、基板内での光学挙動の変化に対応した光学設計を適用することによって、好適な光取り出し特性を有する白色発光デバイスを実現した。

一方オールリン光系素子については、A-3で開発された各種の材料を用いた白色素子検討を行った。今回用いた白色素子構造は、前記ハイブリッドマルチ素子におけるリン光ユニットの構造を展開した暫定的なものである。A-1の高光取り出し基材との併用によって、60~80 lm/W、初期輝度1,000 cd/m²時の推定半減寿命として最大6万時間程度、平均演色評価数80以上の白色発光素子を実現した。

(ii) 多色発光制御技術の開発 (国立大学法人山形大学・パナソニック電工株式会社)

蛍光発光材料とリン光発光材料を含む発光層において、高い発光効率、長寿命を実現するために、両材料間のエネルギー移動に関する解析を行った。青色蛍光発光材料の三重項準位を、適切な補助材料との混合・分散等によって精度高く評価する方法を見だし、正確に評価した。また発光層内の発光領域および発光挙動を、分光配光および量子効率の解析によって特定した。これらの結果を用いて、発光層のキャリア輸送性設計を行い、発光領域および励起エネルギー移動の制御によって、発光色の電流密度依存性低減のための方策を見いだした。本法は発光色の安定化に貢献するものであり、Stage IIで検討するオールリン光白色素子への展開を図る。

(iii) 高性能電極の開発（青山学院大学・パナソニック電気株式会社）

有機膜上に形成することを踏まえたインジウムレス電極材料として、Al ドープ Zn 酸化物（AZO）を選定し、その電氣的・光学的特性と成膜方式に関する検討を行った。まず dc スパッタ法による成膜条件の検討を行い、屈折率の制御因子であるキャリア密度や膜厚方向の膜質分布に関する情報を得た。また基板温度依存性に関する検討を進め、有機膜上に適用できる低温領域（具体的には 100℃台前半）では、抵抗値に改善の必要があることを確認した。このため、成膜法として青山学院独自開発の制御システムを搭載した反応性スパッタ法を新たに選定して検討を進めた結果、成膜電圧の急激な変化のない安定成膜と、100℃台前半の低温成膜でも $1 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ に到達する低抵抗を実現した。一方反射電極としては、高反射率金属材料の合金化による膜質安定性の向上可能性について、スパッタ法での検討を行った。合金化によって、表面平滑性、膜密度、比抵抗を純粋な金属膜に対して改善することができた。またこの種の合金膜を電極に用いた有機 EL 素子は、純粋な金属からなる電極を用いたものに対して同等以上の初期特性、寿命特性を示すことを確認した。

A-5 複合実装構造の開発（パナソニック電気株式会社）

A-1 で開発した高光取り出し基材および A-4 の発光デバイスに適した、有機 EL パネル構造の開発を行った。光取り出し構造と電極構造との複合実装化に関する検討を行い、発光面 25 cm² の有機 EL 素子に於いて、高効率・長寿命・均一発光を同時に実現可能な構造を開発した。また光取り出し基材に由来する寿命への影響についての検討を行い、有機 EL 素子成膜前の処理を適切に行うことによって寿命への悪影響を排除でき、一般的なガラス基板を用いた場合と同等以上の寿命特性を確保できることを見いだした。なお本 25 cm² 素子の光取り出し特性は A-1 で確認した約 40%と同等であり、電氣的構造との複合化によるトレードオフがないことを確認した。

(2) 高性能照明光源の高生産性製造技術の開発

B-1 塗布型電極形成プロセスの開発（タツモ株式会社）

塗布型電極材料の高速・均一成膜プロセスの実現を目指し、塗布材料の液特性および塗布・乾燥プロセス全体を詳細に解析した結果、特に乾燥プロセスが最終的に得られる膜の均一性を支配することを見いだした。これらの結果に基づき塗布・乾燥プロセス条件を最適化し、同時に B-2 で開発した塗布対象物の表面エネルギー調整プロセスを併用することによって、150 mm/s \pm 5%以下の精度を有する塗布型電極形成プロセスを実現した。また得られた電極を部分的に除去してパターンニングされた膜を得るための処理プロセスも併行して検討を行い、導通のないレベルにまで電極材料を高精度に除去することが可能な要素技術を見いだした。

B-2 高品質基板プロセスの開発（タツモ株式会社）

B-1 の塗布型電極材料塗布に先立ち、基材表面を適切なエネルギー状態にする処理方法について検討を行い、基材表面に形態的ダメージを与えることなく表面状態を改質し、塗布型電極インクの濡れ性を向上させるとともに、塗布型電極の密着性を向上させることが可能な方法を見いだした。また、塗布型電極上にホール注入層を積層成膜するプロセスを、各種塗布パラメータ制御によって構築し、均一なホール注入層を形成する条件・方法を見いだした。

B-3 一貫成膜プロセス技術の開発

(i) 高速搬送対応マスク機構の開発（長州産業株式会社）

インライン成膜プロセスの成膜時間に悪影響を与えるマスク交換時間（成膜待機時間）

を排除するための機構の開発を実施した。具体的には、異物発生の抑制を指向した高速基板搬送機構、高精度搬送制御機構、高速アラインメント付きマスク交換機構などの各要素技術を開発し、インライン蒸着装置への組み込みを行った。本装置を用いて、有機ELの成膜面へのコンタミネーション、傷などを生じない一連のプロセスとしての実証検討を行った結果、成膜待機時間を要さず、連続的なマスク交換が可能であることを確認した。

(ii) 特性支配因子の解明 (パナソニック電気株式会社)

インライン蒸着プロセスにおける高生産性を意図し、基板の高速搬送および高速蒸着条件下における、デバイス特性に影響する支配因子の解析を行った。有機EL素子を構成する種々の材料に関し、分子流密度や材料温度、蒸着源温度などの成膜雰囲気、またこれらの設定値と関連する基板温度などをパラメータとした膜質および素子特性の依存性評価・解析を実施し、特性支配因子のマッピングを完成させた。

(iii) 高精度雰囲気制御技術の開発 (長州産業株式会社・パナソニック電気株式会社)

低温揮発材料成膜室など、異なる管理を要する各成膜室の雰囲気管理を独立に行い、インラインプロセスの成膜室間のゲートバルブを不要とするための技術開発を行った。圧力および雰囲気確保のための気体分子補足機構、補足機構の大面积・均一化、およびこれらの機構を有効活用するための排気システム、基板搬送システムなどの開発、検討を行い、成膜室毎の雰囲気確保が可能であることを実証した。

B-4 複合実装構造形成プロセスの開発 (パナソニック電気株式会社)

A-5で開発した複合実装構造を形成する、光取り出し基材の有機EL成膜前処理プロセス、光取り出し構造と電極構造との位置精度確保方式および複合実装化プロセスなど、各種のプロセス要素技術を開発した。A-5に示した25 cm²の有機EL素子は、これらの要素技術の活用によって、A-1の高光取り出し基材、A-4の高性能発光デバイスを融合したものである。またこれらの要素技術を盛り込んだ実装プロトタイプラインを構築し、開発した要素技術の拡張性、信頼性に関する検討を開始した。

2.3.2 塗布型ロール・ツー・ロール製造プロセスの研究開発

有機 EL 照明光源の塗布型ロール・ツー・ロール製造プロセスの研究開発にはでコニカミノルタテクノロジーセンターチームが担当する。

【本研究全体の成果】

発光面積 100cm² 以上、高効率（発光効率 130lm/W 以上）、高品質（平均演色評価指数 80 以上、輝度 1,000cd/m² 以上、輝度半減寿命 4 万時間以上）を実現する有機照明デバイス技術開発を行う（Stage II）。委託開発事業において、上記有機 EL 照明実現の技術課題を明確にして、具体化する実行計画を策定し遂行した。

平成 22 年度の目標を 発光面積 25cm² 以上、発光効率 50lm/W 以上、平均演色評価指数 80 以上、輝度 1,000cd/m² 以上、輝度半減寿命 10,000 時間以上（Stage I）とした。

理論解析・光学シミュレーション等により実現方式の光学設計を行い、青色燐光材料開発に着手し、本燐光材料を適用して、上記目標を引き出す層設計技術・光取出し技術を開発する事により、発光面積 25cm² 以上、発光効率 61lm/W、平均演色評価指数 83、輝度 1,000cd/m²、輝度半減寿命 20,000 時間のサンプルを作製し、Stage I 目標が達成できる事を実証した。

一方、ラボ条件のスケールアップを含め塗布型ロール・ツー・ロール製造プロセスに必要な生産技術を導入したパイロットラインを平成 22 年晩秋に稼働させた。このパイロットラインを用いて、塗布型デバイスの試作検証を行い、ロール・ツー・ロール製造プロセスの量産化に向けた生産技術開発課題が、(1) 高速製膜積層化技術、(2) 高速電極形成技術、(3) 高速洗浄技術、(4) 高速封止技術、(5) 高速搬送技術、(6) 高速ベーク技術、及び(7) 高速品証技術にある事を確認し、それらの達成技術開発にも着手した。

Stage II に向けた要素技術開発にも着手した。材料・層設計技術開発の材料技術においては、独自の分子計算法を開発し、発光性予測が可能となり、ドーパント及びホストの組み合わせに着目した分子設計が可能となった。層設計技術においては、燐光素子劣化主要因を絞込み対策指針を策定した。光取出し技術においては、燐光素子光学特性解析を完了し、性能向上指針を策定した。評価・解析法技術において、燐光有機 EL 素子劣化機構についてはモデル素子を用いて、通電キャリアによる劣化の基本解析法を確立したり、発光層が主因である事も明らかとした。

(1) 材料・層設計技術

開発項目	Stage I の目標	研究開発成果	達成度
材料・層設計技術開発	プロトタイプ試作 発光面積 $\geq 25\text{cm}^2$ 発光効率 $\geq 50\text{lm/W}$ 平均演色指数 ≥ 80 輝度 $\geq 1,000\text{cd/m}^2$ 半減寿命 $\geq 10,000\text{hrs}$	発光面積 25cm^2 発光効率 61lm/W 平均演色指数 83 輝度 $1,000\text{cd/m}^2$ 半減寿命 $20,000\text{hrs}$	達成
(1) 材料技術	Stage I 用プロトタイプ検討素材の選択	検討用素材の選択を終了、スケールアップ処方完了。	達成
(2) 層設計技術	Stage I 用層構成の開発	Stage I 用層構成を選択、発光ドープメント最適化により平均演色評価指数を改良し、蒸着 5cm^2 発光面積のプロトモデルにて Stage I 目標を達成。	達成
(3) 光取出し技術	Stage I 用光取出しシートの選定	Stage I 用光取出しシートの選択を完了。材料、層設計と合わせ Stage I 目標を達成。	達成

(2) 生産技術(パイロットライン立上げ)

開発項目	Stage I の目標	研究開発成果	達成度
パイロットライン立上げ (1) RtoR プロセス検証	パイロットライン立上げ(動作確認・プロセス機能確認)	各単体設備の課題対応を実施した。重要課題は、100%対応終了。	達成
		全ライン(設備)のプロセス動作・機能確認し、重要課題は、100%対応終了。	達成
	パイロットラインを用いた RtoR デバイス試作/評価によりラボ条件の性能及びスケールアップ確認と課題抽出	デバイス試作の為に各プロセスの条件及び処方条件を設定し、試作を繰り返し、確認済み。	達成

本プロジェクトの位置付けを改めて考えてみる。生活照明を代替できる高性能照明となる有機 EL 照明は、有害物質を含有する蛍光灯の代替に加えて、有機 EL の特徴である面発光、軽量化及び省エネ等により、歴史上考えられなかったマーケットを創出する可能性を秘めている。又、現在日本が抱えている東日本大震災による福島第一原子力発電所事故による東日本電力供給不足問題に対しても、日本における家庭用電力の約 17% を占めると言われている照明用において省エネの観点では、LED 照明と共に、日本ばかりでなく世界中の必要電力を削減し、電力供給のための今後の発電所の考え方に対しても色々な可能性を拓けるもので

ある。

又、上記状況下で、日本でいち早く次世代照明を開発し、新たな照明市場を切り開く事も本プロジェクトの目標の一つである。

世界中の照明を念頭に置くと、白色照明に於いては、ヨーロッパ、アメリカ大陸及びアジア大陸で好まれる色温度が異なり、それぞれの市場にマッチした照明が要求される。この要求に対し、本プロジェクトは、R/G/B の材料配合比率変更にて対応可能であり、生産工程の大幅な変更が不要なため、世界中の照明を代替できる。

本プロジェクトは、Stage I の目標を十分に達成したと判断できるが、今後 Stage II 目標に向け開発技術を進化・高度化し、又、有機 EL 照明の実現に必要な他の技術を開発するための活動を継続して行う事が、Stage I の成果を活用し、Stage II の目標を達成するために必要である。

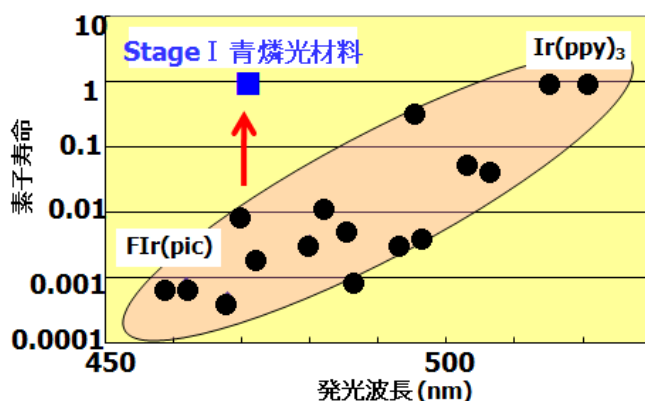
【研究開発項目毎の成果】

(1) 材料・層設計技術

Stage I に向けて開発した主要技術は、5 技術である。(a) 素子寿命の向上のために耐久性に優れた高堅牢性青発光材料を開発した。(b) 駆動電圧の低減のために高移動度電子輸送層を設計した。(c) 発光効率、素子寿命の向上のために開発材料に適した発光層の設計を行った。(d) 駆動電圧の低減、素子寿命の向上のためにキャリア注入障壁を低減した層設計を施した。(e) 演色性向上のために発光ドーパント選択を最適化した。

(a) 高堅牢性青発光材料

従来の配位子骨格を変えずに置換基だけで短波化しようとする、短波化=高 T1 エネルギー化=ワイドバンドギャップ化= π 共役系の縮小または切断によって分子が不安定になると言う図式になり、結果として短波化と寿命は好ましくない相関になってしまう。そこで、新たな配位子を探しトレードオフとならない独自の配位子を見出した。この Stage I 用青色燐光材料は、従来のトレンドから逸脱した長寿命化を達成した。

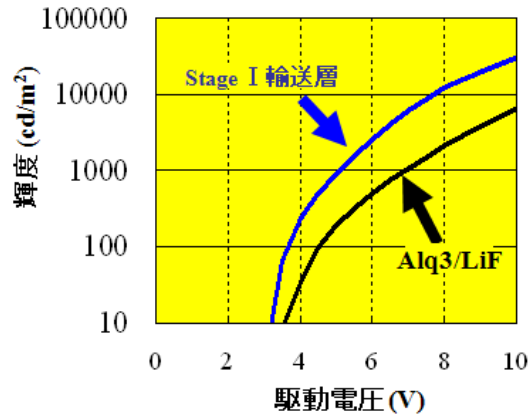


燐光素子寿命の発光波長依存性

Stage I で使用する青燐光材料は、
従来トレンドを打破する長寿命を達成

(b) 高移動度電子輸送層設計

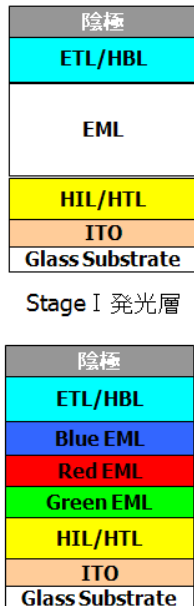
電子輸送材料として最適化された材料、その電子輸送材料とのマッチングの良いホスト材料、及び添加剤等の開発により、電子移動度が高まり低電圧化を達成できた。



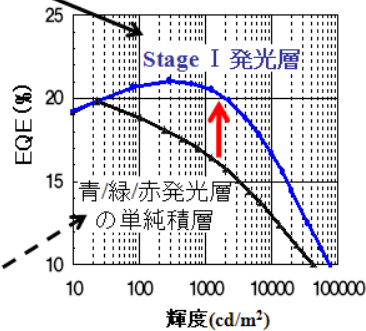
有機EL素子の輝度-電圧特性

青線がStage I 開発の輸送層を使用した素子。輸送層の電子移動度を高めたことにより、従来標準輸送層(黒線)に比し顕著に低電圧化。

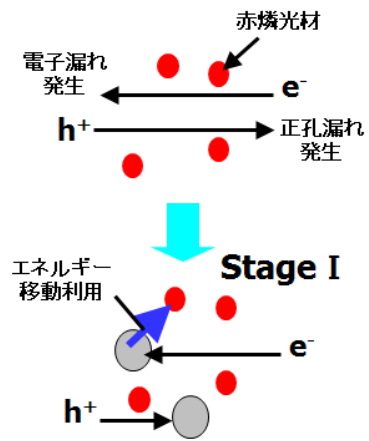
(c) 発光層設計



青緑赤発光層単純積層



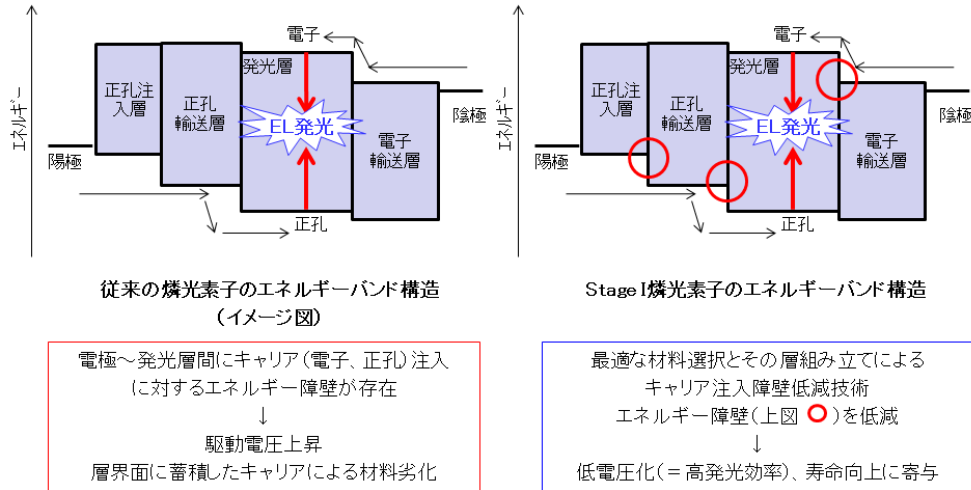
有機EL素子の発光効率(EQE)-輝度特性



Stage I 発光層の効率向上効果の作用の概念図

発光層からの電子、正孔の漏れ(損失)を防止し、発光効率を向上させる効果。

(d) 発光層へのキャリア注入障壁低減層設計



・ 5cm²発光素子性能

<輝度 1,000cd/m²における素子性能>

特性項目		Stage I 目標	Sample
発光効率	lm/W	50以上	61
半減寿命	hrs	10,000	20,000
EQE	%	—	31
駆動電圧	V	—	3.5
色度 (CIE1931)	—	—	0.469, 0.440
色温度	K	—	2,800
平均演色指数(Ra)	—	80以上	83

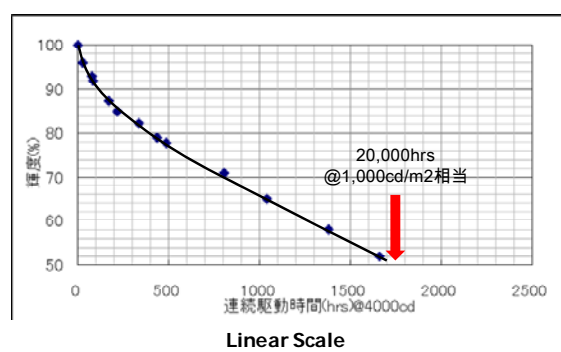
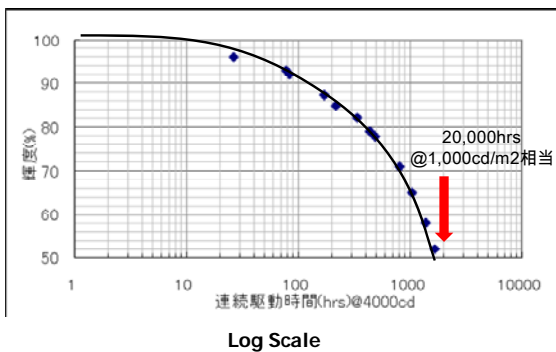
Stage I の性能課題の平均演色指数(Ra)改良に対し、新規ドーパントによる発光スペクトル最適化で改良。目標の Ra ≥ 80 が得られた。

・ 発光効率及び駆動電圧が輝度特性に及ぼす影響

初期輝度 1,000 cd/m²における発光効率は 61lm/W。

・ 連続駆動が輝度特性に及ぼす影響

(初期輝度 4,000cd/m²測定。1,750hrs が初期輝度 1,000cd/m²で 20,000hrs に相当)



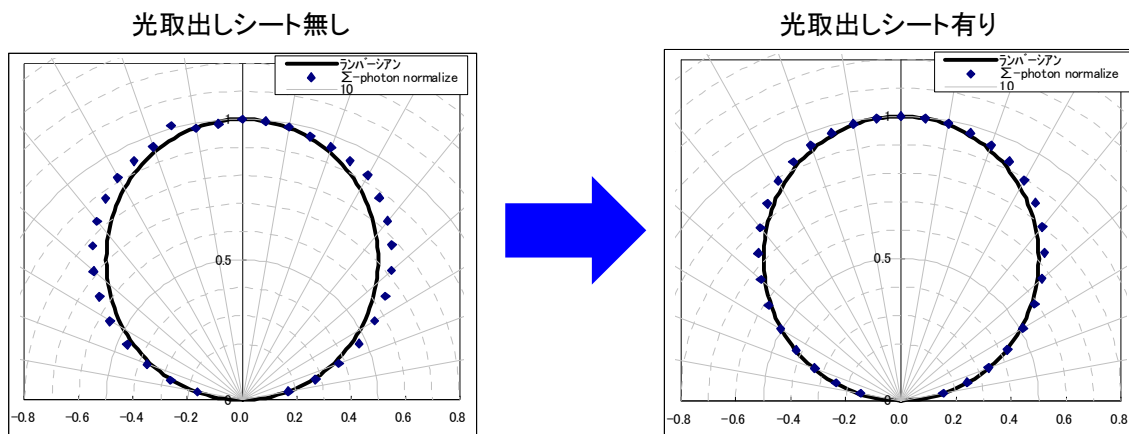
初期輝度 1,000 cd/m² で 20,000 時間に到達。

・光取出しシートを選択

種類	構造	光取出し効率 相対値	配光特性	備考
A	散乱型	92%	○	
B	散乱型	101%	△	
C	散乱型	100%	○	Stage I に採用
D	散乱型	95%	○	
E	プリズム型	99%	△	

光取出し効率と配光特性の観点から総合的に優れた光取出しシートを選定
(* 配光特性はランバーシアン配光を目標とした。)

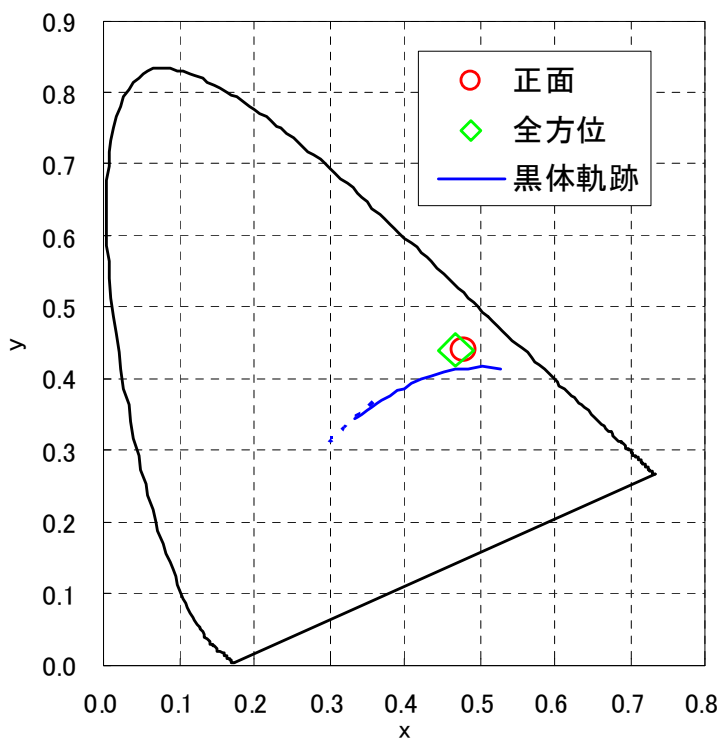
・ EL 発光の配光特性



光取出しシートの最適化により、ランバート分布の配光特性を達成。

・ EL 発光の色度座標

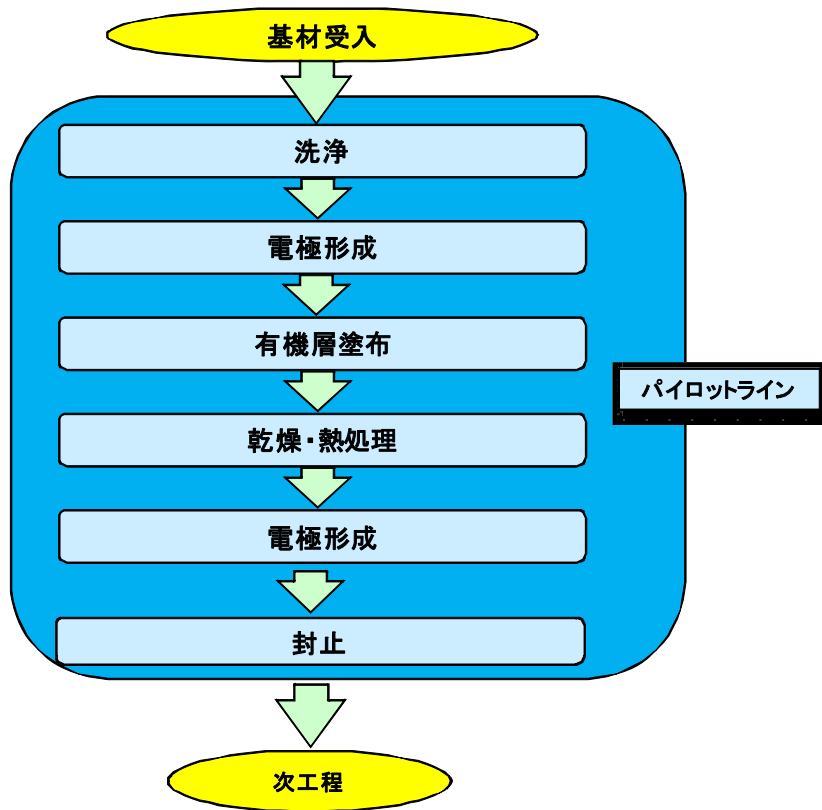
色度座標は黒体軌跡に近似レベル



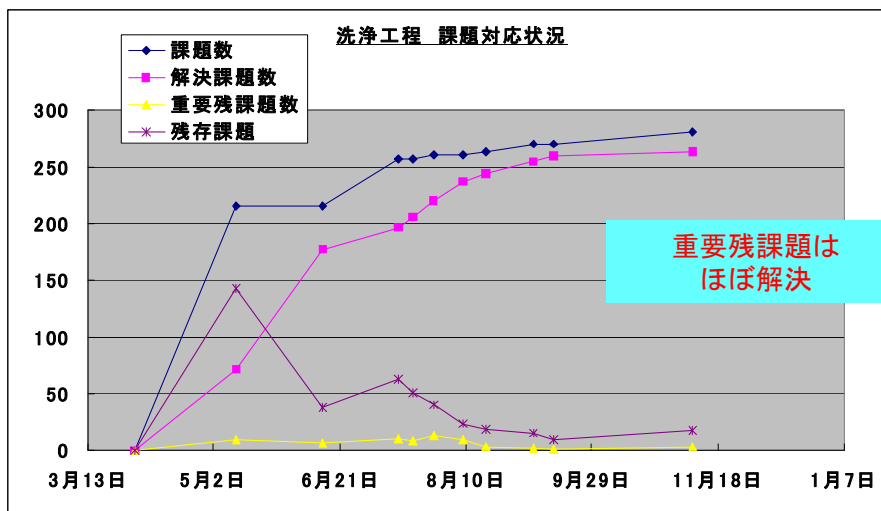
(2) 生産技術

・パイロットラインフロー

基材を受入れてからパイロットラインは、洗浄工程、電極形成工程、有機層塗布工程、乾燥・熱処理工程、電極形成工程及び封止工程がある。



パイロットライン(洗浄工程)では、立上げまでの間に発生した課題をさらに重要課題と分け、その発生件数と課題解決件数を下記のような、経時による管理図を作成し、明視化し、管理する事で、目標日程に間に合わせる管理を行い、重要課題解決に向け集中的に工数をかけ解決してきた。

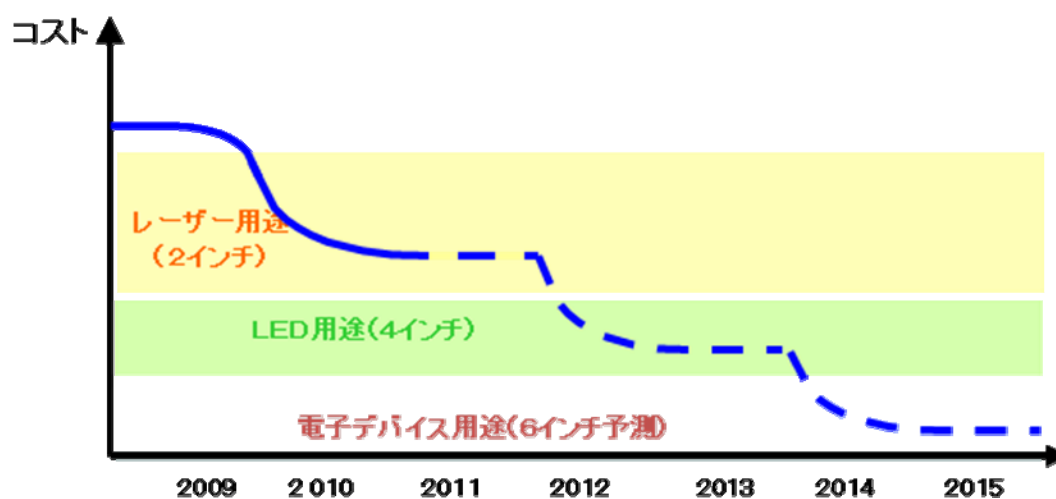


IV. 実用化、事業化の見通しについて

1. LED 照明の実用化、事業化の見通し

現在、既に LED 照明は実用化されているものの、効率、価格の面で必ずしも蛍光灯を代替する次世代照明としては不十分な点がある。LED 照明市場としても、2008 年は約 800 億円規模であるが 2015 年には一兆円を超えるものと予測される。

本プロジェクトの成果により、高性能・高品質と同時に図IV. 1.1 のように世界に先駆けて大口径化（2 インチ→4 インチ→6 インチ）による低コスト化を実現できれば国際的省エネルギー化のリーダーシップを採り国際市場での事業拡大が可能である。



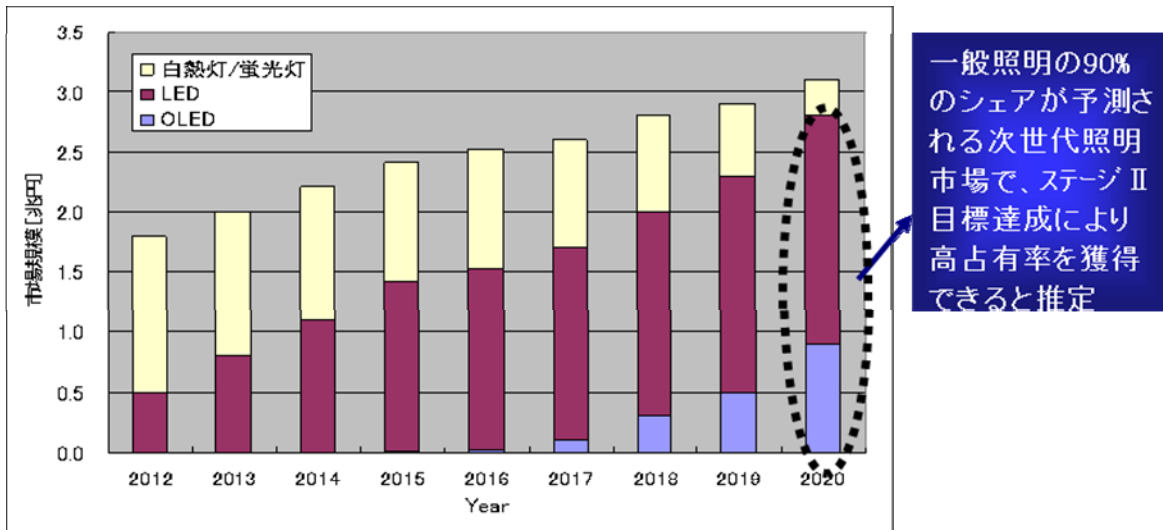
図IV. 1.1 LED デバイスのコスト推移予測

2. 有機 EL 照明の実用化、事業化の見通し

有機 EL 照明は現在まだ研究段階であり、サンプル出荷はされているが本格的な事業段階にはない。

しかし 2018 年には新規市場を含め国際市場にて 2,000 億円、2020 年には、1 兆円近くまで成長すると推定される。(図IV. 2.1) 日本が先端的な技術開発をリードして本プロジェクト目標が達成できれば、本市場でのシェア 20%~50% (2 千億円~5 千億円) の事業拡大が期待できる。

なお LED を含めた次世代照明としても、2020 年には全照明市場の 90%を占め、約 3 兆円の市場規模が予想される。



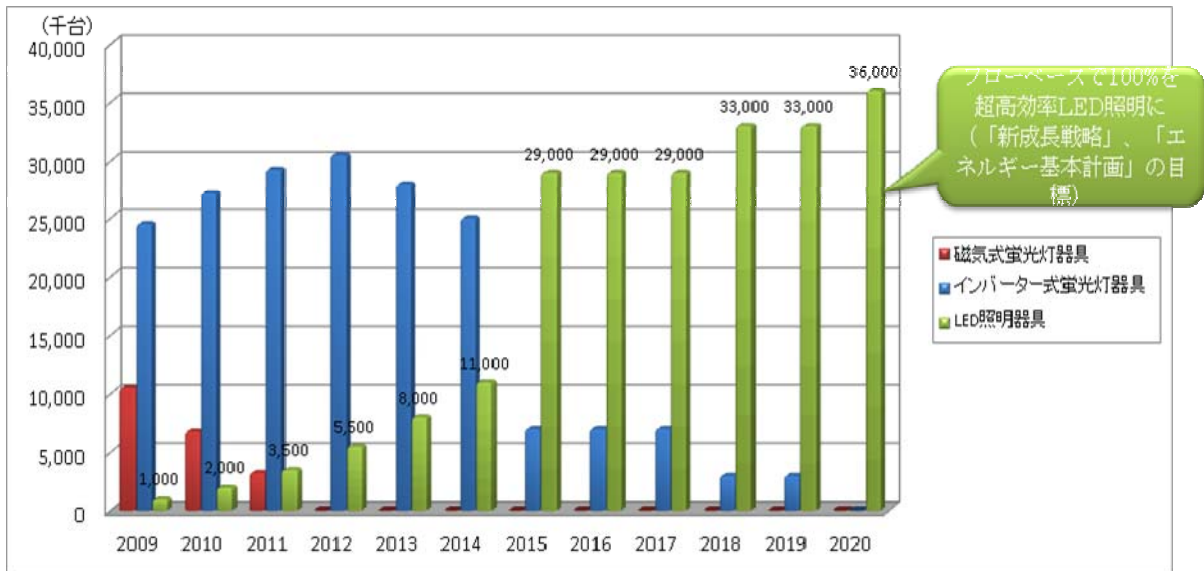
図IV. 2.1 次世代照明の市場予測

本事業の開発成果を活用した、有機EL照明デバイスの商品ロードマップの一例を図IV. 2.2に示す。2011年から、高演色性光源の特徴を活用した放送用照明器具、美術館照明などで照明市場にエントリーして2012年には、上記分野での市場展開を加速すると共に、新たな高付加価値エントリ市場の開発を実施可能である。2013年度からは、高性能化素子を市場投入することで、店舗照明、サイン照明、車載を中心用途開発を進める。2016年度からは、効率が100lm/Wを超える効率と低コストを実現することで、住宅、店舗、オフィス等の主照明で蛍光灯の置換えを進める。

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 有機ELのネームバリュー 薄型面光源 調光容易 			<ul style="list-style-type: none"> 長寿命 大面積 透明・調色 			<ul style="list-style-type: none"> 高効率&高輝度&長寿命 フレキシブル 低コスト 			
商品イメージ	照明モジュール	美術館照明	誘導灯	ハンダント照明	車載照明	フラッドライト	フィルムライト	ベースライト	光る天井材、壁材	
	機器短込照明	デスクスタンド	店舗照明	屋内サイン						

図IV. 2.2 商品ロードマップ

なお経済産業省が発表している本高効率照明技術開発に基づく次世代照明普及予測を以下に示す。



項目	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	代替対象 「蛍光灯」の スペック
政策	研究開発					量産化 準備	導入支援策			トップランナー基準			
消費電力 (lm/W)	67.5							-130				150	67.5
単価 (円/m・年)	1.3							0.4				-0.3	0.3
生産量 (千台)	80,000	48,900	39,900	32,500	28,500	21,600	18,000	14,700	12,000	10,000	10,000	10,000	10,000 12,000

研究開発目標：130lm/W以上の照明器具を実現

研究開発目標：0.3円/m・年以下で量産

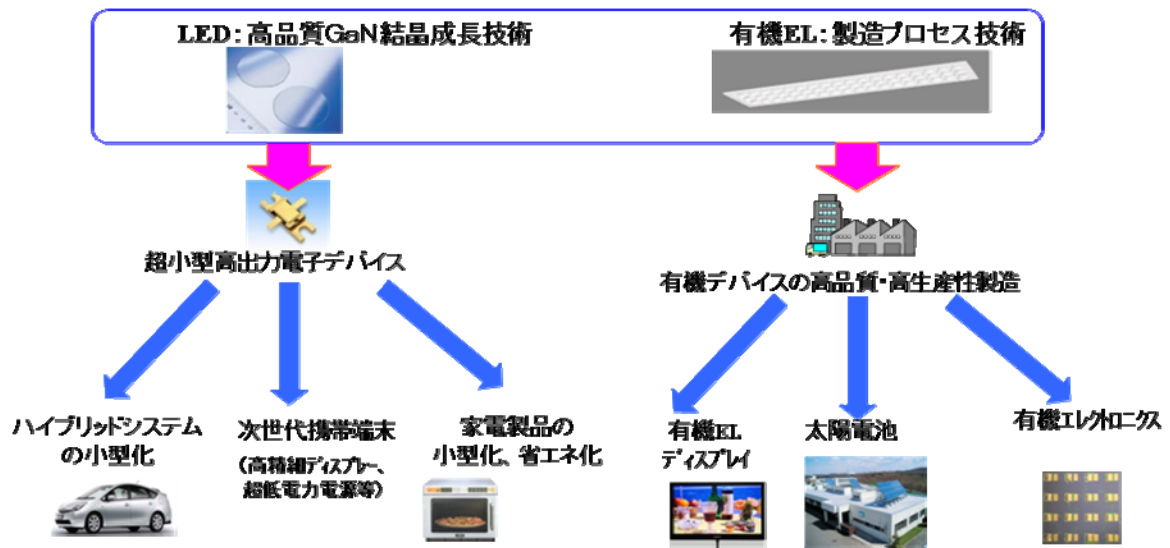
図IV. 2. 3 次世代照明の普及シナリオ (2010 経済産業省予測資料より)

3.波及効果

本事業で開発した次世代照明技術は、日本の産業力強化により、照明事業の活性化にとどまらず、次世代照明固有の特徴を生かした新規市場の創出効果が期待できる。また発光効率向上による省エネルギー化、CO₂削減の他にも様々な波及効果が期待できる。(図IV. 2. 3)

例えば GaN 結晶成長技術により、GaN バルク結晶を生成する技術は LED のみならず、パワーデバイス分野、特に小型高出力電子デバイスへの適用が可能である。本デバイスは、自動車や高周波出力が必要な次世代携帯端末、小型省エネルギー化が今後要求される家電製品への需要に対応することが可能である。

また有機 EL 照明で開発した有機 EL 製造プロセス技術は、有機素子の応用分野として期待される、有機 EL ディスプレイ、太陽電池、電子ペーパー・タッチパネル用などの、各種電子薄膜の有機 EL エレクトロニクスデバイスの製造プロセスにも展開して、低コスト化、生産性向上、材料利用効率の向上が期待できるため、本基板技術開発による事業的効果は高い。



図IV. 2. 4 次世代照明技術の他分野への展開

添付資料

プロジェクト基本計画

プロジェクト基本計画は、NEDO のプロジェクトを効率的かつ効果的に実施するために、次に掲げるプロジェクトの基本事項を定めるものである。

- ① プロジェクトの目的・目標・内容
- ② プロジェクトの実施方式
- ③ 研究開発の実施期間
- ④ 評価に関する事項
- ⑤ その他の重要事項

基本計画は、原則として全研究期間に渡り、有効であるが、技術評価の結果や内外の研究開発動向、政策動向、研究開発予算の状況などの外部状況変化、あるいは研究体制、当該研究開発の進捗状況などの内部変化に対して適宜、その内容を適正に変更する。

本プロジェクト「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」は、研究開発項目①の位置づけで「次世代照明等の実現に向けた窒化物半導体等基盤技術開発」基本計画に平成 23 年 3 月統合したので本基本計画を次頁に示す。

(エネルギーイノベーションプログラム・ITイノベーションプログラム・ナノテク・部材イノベーションプログラム)

「次世代照明等の実現に向けた窒化物半導体等基盤技術開発」基本計画

電子・材料・ナノテクノロジー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

地球温暖化問題は、世界全体で早急に取り組むべき最重要課題であり、経済・社会活動と地球環境との調和を実現することが求められており、情報、環境、安全・安心、エネルギー等、経済・社会活動を支えるあらゆる分野で省エネルギー化を図る画期的な技術革新が求められている。

これを実現するためには、従来のデバイスと比較して、機能・特性の向上や新機能の発現により、更なる省エネルギー化が期待できる化合物半導体や有機物半導体などの新材料を用いたデバイスに関する基盤技術を推進する必要がある。

新材料デバイスの適用領域としては、白熱電球や蛍光灯といった従来照明をLEDや有機ELへ置き換えることにより省エネルギー化や高機能化が期待できる照明分野や、情報通信機器のみならず自動車や医療機器など広範な分野の製品の省エネルギー化、高機能化が期待される窒化物半導体を用いたワイドバンドギャップ半導体の分野がターゲットとなる。

しかし、照明に関しては、寿命・発光効率・演色性の観点で高効率・高品質な性能に加えて、材料、並びに製造プロセスのコストを低減させる必要があり、そのためには既存技術の改良にとどまらない基盤的な研究開発が不可欠である。また、LEDや有機ELといった次世代照明の普及促進のためには、国際標準化フォローアップ活動や次世代照明の用途探索活動など、研究開発以外の側面支援も必要である。

また、窒化物半導体に関しては、高周波演算素子やパワーデバイス等の高性能デバイスを実現する上で十分な品質の結晶作製が実現しておらず、既存のバルク半導体単結晶成長技術やエピタキシャル成長技術を超える基盤技術の確立が不可欠である。

本プロジェクトでは、これら課題を解決するための基盤技術開発ならびに国際標準化等の研究開発支援を行うことにより、我が国のエネルギー消費量削減に貢献するとともに、地球温暖化抑制につなげることを目的として実施する。

(2) 研究開発の目標

蛍光灯と比較して消費電力を半分にする発光効率(130 lm/W以上)の高さと自然光に限りなく近い演色性(平均演色評価数80以上)を両立しつつ、蛍光灯並みのコスト(寿命年数及び光束当たりのコスト0.3円/lm・年以下)で量産可能な次世代照明の実現を目指すための基盤技術開発を行い、当該照明の早期実用化を図る。併せて、今後我が国が次世代照明を健全に普及させるとともに、海外市場を開拓して産業を発展させていくために、性能評価等の国際規格策定に関する活動を行い、次世代照明の国際標準を確立するための側面支援を行う。

また、ハイパワー・超高効率の電力素子、超高速電子素子などの作成に必要な窒化物半導体結晶成長技術を目指して、4インチ有極性単結晶基板及び3～4インチ無極性単結晶基板の開発、並びに無欠陥ヘテロ接合構造実現のための低欠陥高品質GaN及び混晶エピ層を実現するエピタキシャル成長法をそれぞれ開発するとともに、窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価として、有極性、無極性それぞれの単結晶基板で作成したFETの特性の差違、利害得失の明確化や、広い混晶範囲における耐圧と結晶欠陥の相関の明確化を行う。

(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。

研究開発項目① 次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発

- (1) LED照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発
[委託][共同研究 (NEDONEDO 負担率：1/2)]
- (2) 有機EL照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発
[委託][共同研究 (NEDONEDO 負担率：1/2)]
- (3) 戦略的国際標準化推進事業[委託]

研究開発項目② ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発

—窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発

- (1) 高品質大口径単結晶基板の開発[委託]
- (2) 大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術[委託]
- (3) 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価[委託]

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、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDONEDO」という。）が、単独ないし複数の原則本邦の企業等の研究機関（原則、本邦の企業等で日本国内に研究開発拠点を有していること。なお、国外企業等（大学、研究機関を含む）の特別の研究開発能力、研究施設等の活用または国際標準獲得の観点から国外企業等との連携が必要な部分を国外企業等との連携により実施することができる。）から公募によって研究開発実施者を選定し、委託して実施する。

なお、研究開発項目②に、研究開発に参加する各グループの研究開発ポテンシャルを最大限活用することにより効率的な研究開発の推進を図る観点から、NEDOが委託先決定後に指名する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）国立大学法人福井大学 葛原正明氏を置き、その下

に研究者を可能な限り結集して効果的な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、経済産業省および研究開発責任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、必要に応じて設置される技術推進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、四半期に一回以上、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

研究開発は、平成 19～25 年度に実施する。

研究開発項目①次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発の(1)、(2)は、ステージ I として 2 年間(平成 21～22 年度)、ステージ II として 3 年間(平成 23～平成 25 年度)それぞれ実施する。(3)については、平成 22～25 年度の 4 年間実施する。

研究開発項目②ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－窒化物系化合物半導体基板は、5 年間(平成 19～平成 23 年度)実施する。

4. 評価に関する事項

NEDO は、技術的および政策的観点から見た技術開発の意義、目的達成度、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を行い、必要に応じてプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。研究開発項目①次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発のうち、(1)(2)については平成 23 年度、研究開発項目②ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－窒化物系化合物半導体基板については平成 21 年度に中間評価を実施する。

また、事後評価については、研究開発項目①次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発については平成 26 年度に、研究開発項目②ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－窒化物系化合物半導体基板については平成 24 年度に実施する。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などに応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

また、研究実施主体が競争的に研究開発を行うことによりイノベーションを加速させることを目的として、研究開発項目①次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発の(1)、(2)については「ステージゲート制度」を導入する。具体的には、プロジェクト実施期間を前半 2 年間の「ステージ I」(平成 21～22 年度)と後半 3 年間の「ステージ II」(平成 23～25 年度)に分割し、「ステージ I」の最終段階(平成 22 年度)にステージゲート評価を実施する。ステージゲート評価では、ステージ I の研究目標に対する達成度、ステージ II の研究目標に対する実現性を中心に、定性的・定量的に評価を行い、「ステージ II」における研究開発主体の選定を行う。「ステージ II」へ移行するにあたり、研究開発の進捗状況を踏まえ、必要に応じて、ミッション及び実施体制を見直すこととする。また、本プロジェクト終了後に事後評価を実施し、最終的なミッションの達成度を定性的・定量的に評価する。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取り扱い

①成果の普及

得られた研究開発成果のうち、共通基盤技術に係るものについては、プロジェクト内で速やかに共有した後、NEDO および実施者が協力して普及に努めるものとする。

②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。

(2) 基本計画の変更

NEDO は、基本計画の内容の妥当性を確保するために、社会・経済的状況、内外の技術開発動向、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。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、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 2 号に基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 平成 23 年 3 月 「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」と「ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発」及び「戦略的国際標準化推進事業」（LED 及び有機 EL に関する標準化）の基本計画の統合

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目① 次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発

(1) LED 照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発

1. 研究開発の必要性

LED 照明を高効率かつ高品質にするには、現在一般的に LED 照明用基板の材料として使われているサファイアを窒化物材料等にするなど、基板部分を高性能な材料にすることが有効であるが、サファイア以外の基板については、基板の価格が非常に高額であるため、バルク化や大口径化等、基板の低コスト化に繋がる手法の確立が求められている。同時に、照明用 LED として高効率な性能を実現するために、基板の結晶欠陥を極力減少させることも求められている。

これらの問題を解決し、高効率かつ高品質 LED 照明の作製を低コスト化することを目的として、LED 照明用窒化物等基板の製造等に関する研究開発を実施する。

2. 研究開発の具体的内容

高効率 (LED デバイスレベルで 200 l m/W 以上) かつ高品質 (平均演色評価数 80 以上) LED 照明の低コスト化を実現するため、窒化物等の照明用基板の生産性向上を目的とした結晶成長技術の開発や LED 素子構成構造の最適化等デバイスの高度化についての技術開発を行う。

(a) 窒化物等結晶成長手法の高度化に関する基盤技術開発

バルク結晶方式、板状結晶方式等の手法を用いて、低歪・低転位窒化物等結晶成長技術を高度化するための開発を実施する。

具体的には、結晶核から大口径の低歪・低転位種結晶作製のための成長方位制御や大口径種結晶基板上に窒化物等結晶を高速・長時間成長を目指すバルク結晶方式、異種基板上での大口径窒化物等結晶低歪化技術及び大口径窒化物等結晶の高速・長時間成長技術を目指す板状結晶方式等、結晶成長手法の高度化を可能とするための技術を開発する。

あわせて、発光効率 200 l m/W 以上かつ平均演色評価数 80 以上を達成する LED デバイスを実現するための技術開発を行う。

(b) 基板の応用によるデバイス技術の開発

基板の特殊ドーピングや LED デバイス構造の最適化等、窒化物等結晶成長技術の高度化以外のアプローチにより、発光効率 200 l m/W 以上かつ平均演色評価数 80 以上の LED 照明を低コスト化するための技術開発を行う。

3. 達成目標

それぞれの方式について、以下の目標を達成する。

(a) 窒化物等結晶成長手法の高度化に関する基盤技術開発

<ステージ I 達成目標 (平成 22 年度末) >

5~10mm 角サイズの結晶の作成および LED デバイスとしての評価を行い、発光効率 175 l m/W 以上、平均演色評価数 80 以上の達成可否を検証する。

<ステージ II 達成目標（平成 25 年度末）>

バルク結晶成長方式で、結晶欠陥 10^4 cm^{-2} 以下、LED 発光波長領域において光吸収が極めて少なく、かつ研磨後の基板サイズが 4 インチ以上となる結晶成長技術を、板状結晶成長方式で、結晶欠陥が 10^6 cm^{-2} 以下、LED 発光波長領域において光吸収が極めて少なく、かつ研磨後の基板サイズが 6 インチ以上となる結晶成長技術を、それ以外の手法においては、上記基板サイズの大型化に相当する生産性を実現する技術をそれぞれ確立する。

いずれの手法においても、LED デバイスとして発光効率 200 lm/W 以上かつ平均演色評価数 80 以上を達成する。また LED デバイスにした場合のコストを評価するための試算を行う。

(b) 基板の応用によるデバイス技術の開発

<ステージ I 達成目標（平成 22 年度末）>

5~10mm 角サイズの結晶の作成および LED デバイスとしての評価を行い、発光効率 175 lm/W 以上、平均演色評価数 80 以上の達成可否を検証する。

<ステージ II 達成目標（平成 25 年度末）>

LED デバイスとして発光効率 200 lm/W 以上、平均演色評価数 80 以上を達成する。また LED デバイスにした場合のコストを評価するための試算を行う。

(2) 有機EL照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発

1. 研究開発の必要性

有機EL照明は、均一発光が可能な効率的な面発光光源であるため、今後の省エネルギー化を促進する照明として期待されている。

現在の有機EL照明技術は、課題とされていた演色性、寿命等において蛍光灯と同等以上の性能を実現できるレベルにある。今後、有機EL照明が蛍光灯を代替するためには、演色性、寿命のみならず、さらに効率性においても蛍光灯を大幅に凌ぐ性能向上が要求される。さらに普及の観点からは蛍光灯と同等以上の低コスト化も望まれる。

有機EL照明の効率性を大幅に向上させると同時に低コスト化を図ることができれば、蛍光灯の代替普及が急速に進み、省エネルギー化に貢献できる。そのために、高効率・高品質及び低コスト化を同時に実現する革新的な技術開発を行う。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 高効率・高品質有機EL照明デバイス技術開発

高効率（発光効率 130 lm/W以上）高品質（平均演色評価数 80 以上、輝度 1,000 cd/m² 以上、輝度半減寿命 4 万時間以上）を実現する有機EL照明デバイス技術開発を行う。具体的には、光学干渉の影響を抑制して効率を向上させる光取り出し技術、気密性を高めて品質を向上させる封止技術、製造工程の高速化を図るプロセス制御技術、材料の利用効率向上を図る薄膜層形成技術等の技術開発を行う。加えて有機ELを構成する基板・透明電極・有機層等について高効率・高品質化且つ低コスト化に向けた材料開発を行う。

3. 達成目標

(1) 高効率・高品質有機EL照明デバイス技術開発

<ステージ I 達成目標（平成 22 年度末）>

発光面積 100 cm² 以上で発光効率 130 lm/W以上、平均演色評価数 80 以上、輝度 1,000 cd/m² 以上、輝度半減寿命 4 万時間以上の有機EL照明実現の技術課題を明確にして、具体化する実行計画を策定する。理論解析・光学シミュレーション等により実現方式の光学設計を行い、プロトタイプ試作により発光面積 25 cm² 以上で発光効率 50 lm/W以上、平均演色評価数 80 以上、輝度 1,000 cd/m² 以上、輝度半減寿命 1 万時間以上の有機EL照明光源を実現する。

また高効率な製造プロセス実現に必要とされる要件を明確にして設計・製作及び基本データの収集を行い、要件を充足していることを検証する。

<ステージ II 達成目標（平成 25 年度末）>

発光面積 100 cm² 以上で発光効率 130 lm/W以上、平均演色評価数 80 以上、輝度 1,000 cd/m² 以上、輝度半減寿命 4 万時間以上の有機EL照明光源を実現すると同時に、コストを評価するための試算を行う。

(3) 戦略的国際標準化推進事業

(a) LED 光源並びに LED 照明器具の性能評価方法の国際標準化に係る研究開発

1. 研究開発の必要性

近年、白熱電球や蛍光灯に代わる省エネルギー光源として、LED 光源および LED 照明器具（以下、LED 照明）は国内外で広く普及しつつある。性能の向上は著しく、また今後も、現在主に用いられている蛍光灯や H I D ランプ（高輝度放電ランプ）の性能を超えるような著しい性能向上が期待されることから、二酸化炭素の大幅な排出削減が見込まれる次世代の照明として、LED 照明の世界市場が急速に拡大していくことが予想される。

しかし、LED 照明は半導体の固体発光素子に基づく全く新しい光源であり、従来の白熱電球や蛍光灯とは発光形態が大きく異なるため、白熱電球や蛍光灯で定められた国際規格および国内規格による定義、測定方法、照明方法などは、多くの場合、そのまま適用できない。すなわち現在、LED 照明の性能を評価する基準の多くには、国際的な統一基準が存在していないため、消費者が LED 照明器具を同じ基準で比較検討し適切に選択することができず、LED 照明の世界的な普及の阻害要因となっている。

今後我が国の LED 照明等の次世代照明を健全に普及させるとともに、海外市場を開拓して産業を発展させていくためには、LED 照明の性能が正しく評価される世界共通の「ものさし」をつくることが重要であるとともに、性能評価の国際標準化の分野において主導的役割を果たせるようにすることが必要である。

そのため、本事業は、LED 照明の性能評価方法に関する基盤技術を開発し、国際標準化に向けた活動に繋げることを目的とする。

2. 研究開発の具体的内容

本事業は、我が国の研究開発による成果を国際市場に普及してくために、国際標準化に向けた研究開発等を実施することで、研究開発成果を早期に上市し、国際市場の獲得に結びつけるための環境作りに寄与することを目標とし、事業を実施する。

具体的には、国際標準化獲得に向けた戦略を十分に検討した上で、光の強さ、色、寿命等、LED 照明の性能を正しく試験評価するために必要な課題を設定し、これを克服するための研究開発を実施するとともに標準化に向けた活動を行う。

3. 達成目標

LED 照明の評価技術に関して、それぞれ以下の課題を達成することを目標とする。

(i) LED 照明利用技術に関わる評価技術開発

(ア) LED 照明の色再現性能評価技術開発

現在 C I E で検討が行われている現行の演色性評価方法の改訂を踏まえて、LED 照明の特徴を踏まえた新しい演色性評価方法の確立に向けて、試験色の選定、視感評価を行うと共に、LED 用の演色性評価方式についての検討を行う。

(イ) LED 照明のグレア評価技術開発

LED 照明は高輝度発光体の集合体で構成されていることから、現行の C I E によるグレア評価方法では正確に評価出来ず、照明設計の実際面において大きな支障になっています。そのような課題を踏まえ、LED 照明に特徴に対応した新しい評価手法の確立を検討する。具体的には、評価用の照明器具を試作すると共に LED 照明のグレアの評価実験を行い、現行法の課題を整理する。併せて、C I E 等の動向も踏まえつつ LED 用計測システムの検討を行い、技術開発の方向性や現状の問題点の明確化を行う。

(ii) LED 照明の測光技術開発

(ア) LED 照明の配光測定技術開発

現状測定が不可能とされている LED 照明の全光束、配光、器具効率の測定を実現するため、多受光方式配光測定装置による配光・全光束一括測定技術の検討および手法の確立を行う。併せて、より汎用的な測光技術の確立についても検討を行う。

(イ) LED 照明環境における視作業効率測光技術

現在 C I E において検討されている屋外照明の明るさ効率評価方法に対する規格変更に対応するため、薄暮から夜間における視作業効率に関する測光方法の確立を目指す。視作業効率測光装置を設計・試作するとともに、現在当該分野で主導的な位置付けにある N I S T 等とも意見交換を行いつつ、本装置の評価を行う。

(b) 有機EL照明に関する標準化

1. 研究開発の必要性

有機EL照明は、一般照明である蛍光灯を将来代替する高効率の次世代照明として急速に進化しつつある。現在は研究開発段階であるが、一部のパネルメーカーからはサンプル出荷が始まっており、数年以内には次世代照明として製品化されて国際的な競争が始まろうとしている。

有機EL照明は日本が世界に先駆けて開発し、現在も研究開発の最先端を走っている技術分野である。今後、製品化段階で日本の有機EL照明技術が生かされるためには、製品を規定する国際標準が本技術レベルを踏まえて決定されなければならない。照明の国際標準規定には通常は3～4年を要することを考慮すると、現段階から標準化活動を開始することが必須である。

また有機EL照明の標準化は、照明業界にとっては世界に先駆けて日本から初めて発信する先取り標準化活動であり、照明業界での日本の国際的な地位向上にもつながる。

2. 研究開発の具体的内容

従来の照明器具の標準を土台に、有機EL照明の課題に絞り標準化を進める。標準化の課題として光源／器具の測光方法、光源／器具の性能に取り組む。

3. 達成目標

標準推進団体にて標準規格化を行う際に必要な光源／器具測光方法・測色方法の研究として、測光設備を利用した測光方法の検討・試験・評価・検証を行い、標準化を提案に必要な裏付けデータを集積して報告する。本活動結果は、照明学会ガイドライン委員会にて平成23年度末に作成される標準化ガイドラインに反映され、国際照明委員会での日本規格提案の根拠として活用される予定である。さらに国際照明委員会での情報収集、提案支援を行い国際標準化活動に貢献する。

研究開発項目② ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発－窒化物系化合物半導体基板

1. 研究開発の必要性

(1) 低損失で高出力の電子デバイスとして期待される窒化物半導体ウェハは、現在GaN系ヘテロ構造がSiやSiC等の異種基板上に作製されている。このため電子デバイス構造としては横型に限定される上に大きな格子不整合によりデバイス内部に多数の欠陥が発生し、耐圧、オン抵抗等のデバイス特性についても物性値から期待されるような十分な特性は得られていない。また電源などで重要なノーマリオフ動作についても実用的な高出力デバイスとしては実現されていない。

このような問題を解決するためには、本質的に結晶構造が等価で格子整合する高品質窒化物単結晶の有極性、或いは無極性基板上にデバイス構造を成長・作製することが必要不可欠である。また、横型デバイス用の高抵抗ウェハ、縦型デバイス用の低抵抗ウェハ実現に向けて、単結晶基板の伝導度制御技術の確立が重要となる。

窒化物単結晶基板を成長するにはHVPE法やNa系フラックス溶液成長法、昇華法等が知られているが、現状電子デバイス用の高品位な結晶性を持つ大口径単結晶基板の育成は実現されていない。そこで本研究開発では、窒化物半導体電子デバイス作製に必要とされる4インチ級の究極的高品質有極性バルク単結晶、及び無極性バルク単結晶を育成する技術を開発し、Siデバイスと同等、或いはそれ以上の安定性を有する高出力デバイスの実用化に資する。

(2) 化合物半導体エピ材料の特徴としては、ヘテロ接合を用いたデバイスを作製できることにあり、中でも窒化物は高速化、高出力化、高耐圧化、省エネ化などに優れた性能を発揮できる物性を有している。このような特性を実現するためには、これらデバイス構造中のチャンネル層やドリフト層を形成する薄膜成長技術、即ち結晶欠陥や残留キャリアの低減、ヘテロ接合界面でのキャリアの散乱を抑制するための界面組成急峻性や広い範囲での平坦性、多層構造はもちろんのこと、極めて薄いチャンネル層を作製するための組成や不純物濃度を原子層レベルで制御できる薄膜成長技術が必須である。加えてGaN-AlN-InN系窒化物は、AlGaNやInGaNでも格子不整合が大きく、分極電界や転位、欠陥、クラックなどの問題が生じている。

自動車用インバータなどでは例えば、オン抵抗 $<1.5\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、耐圧 $>2\text{KV}$ で高gm、かつノーマリオフ型等の省電力タイプの電子デバイスの実現が望まれている。しかしSiCやSi基板上でのエピ成長ではヘテロエピタキシーの制約のため、デバイス特性からの要求品質或いは物性値から期待される特性を十分に満足する段階には未だ達しておらず、高機能の横型、及び縦型窒化物半導体電子デバイス実現のためには、今後窒化物単結晶基板上でAlN-GaN-InNの高範囲に渡る高品質大口径エピタキシャル混晶成長技術が必要である。

また、これら混晶成長に関して、高In組成領域では線欠陥、原料の気相反応に基づく反応物による点欠陥、成長中の熱分解が大きな問題であり、高Al組成領域では、酸素および炭素などの不純物の混入を抑制すると共に、効率の良いドーピング技術の開発によるキャリア濃度の向上が必須である。

更に、実用的な電子デバイス用エピタキシャルウェハとしては、厚みやキャリア濃度等のウェハ特性に関して、4インチ級の大口径にわたる均一性が要求される。

(3) 現在窒化物電子デバイスは、端緒についたばかりであり、実用化したデバイスはSiCなどの基板上に形成したGaNチャンネルを用いたFET構造のみである。その応用は2-5GHz

の携帯電話基地局用の 200-400W 増幅器と 30GHz 帯の小型 20W 級増幅器に限定されている。窒化物系半導体が元来有する物性を考慮すると、今後は AlN-GaN-InN 系材料を広範囲に自由に組み合わせたヘテロ接合トランジスタの実現が望まれ、その応用は高周波高出力ばかりでなく、高温動作デバイス、高耐圧デバイス、超高速デバイスなど、広い応用範囲が実現可能である。

例えば 2-5GHz では 1kW 以上の増幅器が実現可能となり、基地局ばかりでなく、固体デバイスを用いた超小型マイクロ波加熱（電子レンジ、半導体プロセス装置）、マイクロ波送電などに応用可能である。

またパワーエレクトロニクスにおいても、高電圧動作と高周波動作が同時に実現できるため、例えば数 kW 級のインバータ回路は、従来は周波数が低いためコイルやコンデンサが大型化し、モノリシック集積化が不可能であった。窒化物半導体を用いれば高電圧のまま高周波に対応可能であるためパワーエレクトロニクス機器の小型化を推進でき、エアコンなどの家電製品、情報家電、自動車におけるインバータの画期的な性能向上などその応用範囲は極めて広い。

このような電子デバイスを実現するためには、高品質窒化物半導体基板の開発、及び理論的に可能で現在までに検討されなかった新しいエピタキシャル成長技術・不純物ドーピング技術の開発をベースに、可能な限り広い範囲の組成のヘテロ接合構造や面方位の組み合わせによるデバイス構造を従来の異種基板上ウェハーや各種窒化物半導体ウェハー上に実際にデバイスレベルで試作して、高耐圧性、低損失性、高速性などの諸特性を比較・検証するとともに、その結果を課題①、②の基板・エピ開発にフィードバックすることが必要である。

1. 研究開発の具体的内容

(1) 高品質大口径単結晶基板の開発

(a) 窒化物単結晶成長における基礎技術の検討

窒化物半導体バルク成長法における、成長初期過程制御技術、核発生制御技術等を最適化し、必要な有極性、及び無極性窒化物単結晶育成要素プロセスの開発を行う。

転位等の欠陥挙動を解明し、転位低減化、高品質化を図る。さらに 2～4 インチ級への大口径化、長尺化を検討し、大型単結晶育成に必要な要素技術を明らかにする。

(b) 大口径種結晶の開発

結晶成長に必要な種結晶として、格子整合が良く、4 インチ級の大口径が得られる有極性、及び無極性面成長と剥離に適した下地基板の選択を行い、大口径の数百 μm 厚結晶自立基板を作製する。V/III 比、成長温度などの成長条件の最適化、横方向成長等の結晶欠陥低減手法の導入、また成長の阻害となる不純物の低減など、表面性や結晶欠陥制御を検討して 2～4 インチ種結晶の実現を図る。

(c) 高導電性窒化物単結晶基板の開発

結晶の高品質化、大口径化を行うと同時に、固体、有機珪素化合物、ガスなどを用いて結晶への不純物添加を検討して、効率的なドーピング技術による導電性制御を行い、縦型デバイス動作に必要な低抵抗率の基板を実現する。

(d) 高抵抗化窒化物単結晶基板の開発

結晶の高品質化、大口径化を行うと同時に、炉環境の清浄化や原料高純度化などにより結晶への不純物混入を極力低減して、単結晶の高純度化を図り、不純物キャリア濃度の低減による高抵抗化

を目指す。また高純度化に加えて欠陥の低減、アクセプター性不純物の効果的ドーピングを検討し、添加元素の種類、添加量、添加条件などを最適化することにより直流から高周波迄の用途に適する均一で安定した高抵抗単結晶の基板を実現する。

(2) 大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術

課題(1)で開発された大口径高品質窒化物単結晶基板等を用い、4インチ級の有極性、及び無極性窒化物半導体大口径基板上でのエピタキシャル成長に関して、転位等の結晶欠陥や残留キャリアを低減し、原子層レベルでの膜厚、平坦性、不純物を均一に制御する技術を開発するとともに、AlInN/InGaNやAlGaN/InGaNなどのヘテロ接合を実現する成長技術を開発する

(a) 高In組成窒化物層成長技術

有極性、及び無極性窒化物半導体基板上への高均一、高In組成InGaN層を用いた高品質電子デバイス用大口径ウエハの成長技術、および当該InGaN層への不純物高濃度ドーピング技術を開発する。

(b) 高Al組成窒化物層成長技術

有極性、及び無極性窒化物半導体基板上への高均一高Al組成AlGaN層を用いた高品質電子デバイス用大口径ウエハの成長技術、および当該AlGaN層への不純物高濃度ドーピング技術を開発する

(c) 高Al組成窒化物層成長技術

有極性、及び無極性窒化物半導体基板上への高均一高Al組成AlGaN層を用いた高品質電子デバイス用大口径ウエハの成長技術、および当該AlGaN層への不純物高濃度ドーピング技術を開発する

(d) 結晶成長その場観察評価技術

基板上での原料のマイグレーションを促進して成長面をナノレベルで平坦化するため、成長速度、歪、組成等をその場観察して、原子層レベルの成長制御を最適化し、気相反応を抑制する技術を開発する。

(3) 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

(a) 横型電子デバイスの評価

横型のパワー高周波素子、パワースイッチング素子を想定して、評価デバイスパターンを標準化し、エピ材料・構造・品質とデバイス特性との相関関係を、プロセス要因を極力排除した評価を通して検討する。

課題(2)で開発された大口径高品質窒化物エピタキシャルウエハー等を用い、簡素なソース/ゲート/ドレイン電極構造による評価トランジスタパターンにおいて、キャリア濃度特性、I-V特性、C-V特性などの基本特性評価を行う。また、ゲート長を短くした実用デバイスに近いFET構造において、耐圧、オン抵抗、リーク電流、高周波特性などより実際的な特性の評価を行う。

(b) 縦型電子デバイスの評価

縦型のパワー高周波素子、パワースイッチング素子を想定して、評価デバイスパターンを標準化し、エピ材料・構造・品質とデバイス特性との相関関係を、プロセス要因を極力排除した評価を通して検討する。

課題(2)で開発された大口径高品質窒化物エピタキシャルウエハー等を用い、簡素なソース/

ゲート/ドレイン電極構造による評価トランジスタパターンにおいて、キャリア濃度特性、I-V特性、C-V特性などの基本特性評価を行う。

(c) 窒化物単結晶基板上デバイスの優位性確認

窒化物単結晶基板上に成長したエピタキシャルウェハーをもとに、その上の各種デバイス特性を従来のサファイア、SiC等の基板上デバイスの特性と比較検討し、その優位性を確認する。

(d) 有極性、及び無極性デバイス構造の比較

有極性、及び無極性面方位をもつ高品質窒化物基板上に成長したエピタキシャルウェハーをもとに、その上の各種デバイス特性の比較検討を行う。電圧未印加時に電流の流れないエンハンスメント型の動作、電流コラプスを抑制した低オン抵抗化、高In系チャネル導入による高速化、高Alバリア導入による高耐圧化など、将来の家電・通信・交通システムへの応用を目指したデバイス構造を試作・評価して、有極性面上と無極性面上での長所、短所を明確化し、それらのデバイス可能性を検討する。

2. 達成目標

(1) 高品質大口径単結晶基板の開発

4インチ有極性単結晶基板、及び3～4インチ無極性単結晶基板を実現し、前者では転位密度 $<5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 、後者では転位密度 $<10^5 \text{ cm}^{-2}$ 、積層欠陥密度 $<10^3 \text{ cm}^{-1}$ の特性を得る。また、それらの伝導度制御として、導電性基板では比抵抗 $<10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 、高抵抗基板では比抵抗 $>10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ の特性を得る。

(2) 大口径基板上の高品質エピタキシャル結晶成長技術

無欠陥ヘテロ接合構造を実現するために、高品質、高導電性制御されたエピタキシャル成長法を開発し、口径4インチの有極性、及び口径3～4インチの無極性窒化物半導体バルク基板上において、以下の低欠陥高品質GaN、及び混晶エピ層を実現する。

AlGaN、及びInGaN混晶エピ成長層において、Al又はIn組成 $1 \geq x \geq 0.5$ で
転位密度 $<10^6 \text{ cm}^{-2}$

ドーピング不純物濃度 N型 $>10^{18} \text{ cm}^{-3}$ P型 $>10^{17} \text{ cm}^{-3}$

面内均一度：厚み $\pm 5\%$ 、組成： $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$

また、GaNホモエピ成長層において

残留ドナー濃度 $<10^{15} / \text{cm}^3$

転位密度：有極性基板上で $<5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 、無極性基板上で $<10^5 \text{ cm}^{-2}$

面内均一度：厚み $\pm 5\%$ 、ドーピング不純物濃度 $\pm 10\%$ 、

ドーピング精度 $\pm 20\%$

また、上記エピ層からなる窒化物半導体ヘテロ構造において

2次元電子ガス移動度 $>2,500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

(3) 窒化物半導体単結晶基板上電子デバイスの評価

有極性単結晶基板上FETと無極性単結晶基板上FETの特性の差違、及びその利害得失の明確化を実施する。また、広い混晶組成範囲における耐圧と結晶欠陥の相関の明確化と課題①、②へのフィードバックを実施する。

技術戦略マップ（分野別技術ロードマップ）

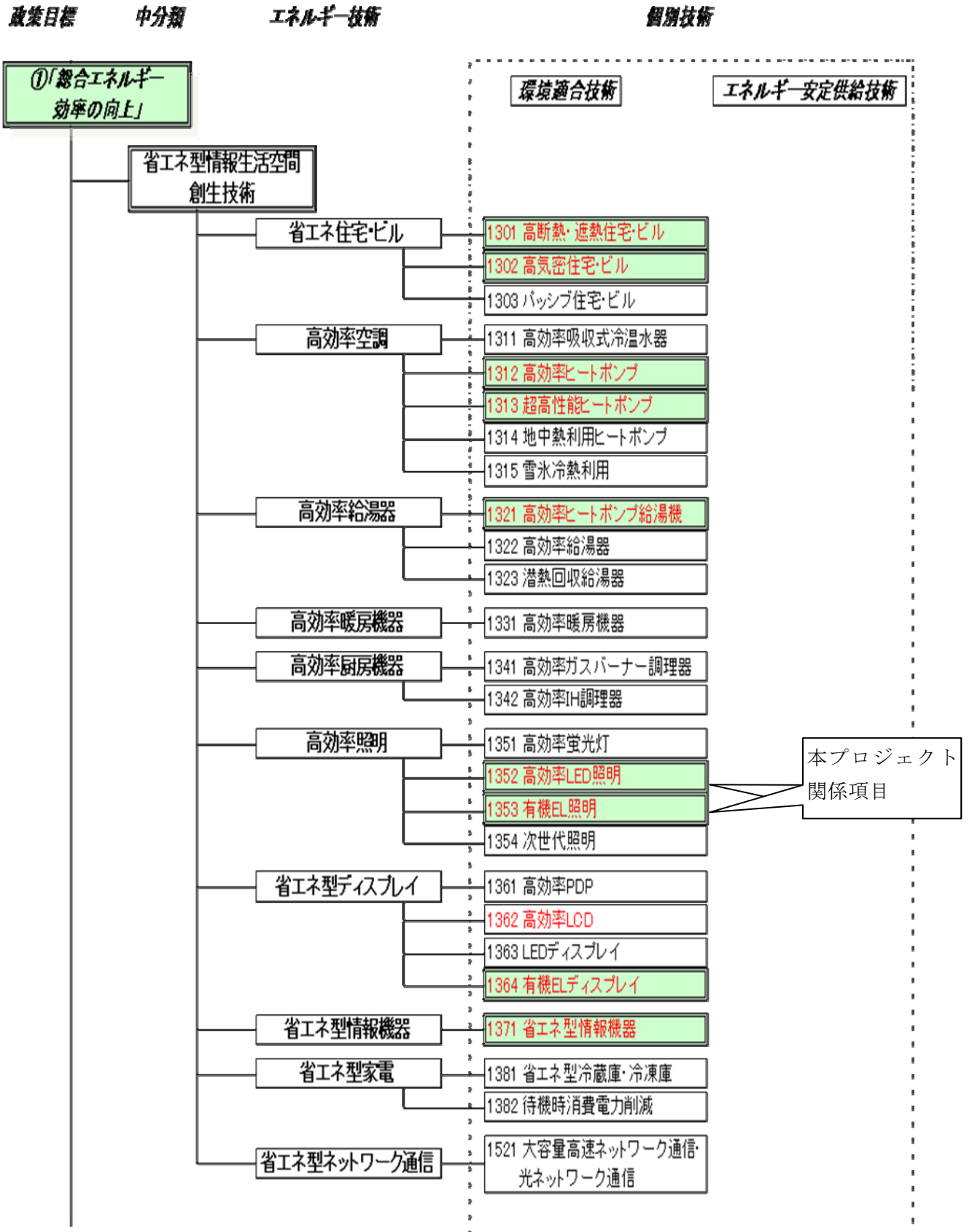
技術戦略マップは、新産業を創造していくために必要な技術項目や製品・サービス・コンテンツの需要を創造するための方策を示したものであり、経済産業省およびNEDOが、産学官の専門家の英知を結集してとりまとめたものである。

照明技術については、従来は白熱電球、蛍光灯などが主流であったが、次世代照明技術が創造され、新世代へ向かって2020年には蛍光灯並み、2030年には蛍光灯の2倍以上の発光効率の実現が予想されていた。本プロジェクトにより、2030年に実現される蛍光灯の2倍以上の発光効率を前倒しして2013年末に実現することが期待される。





照明に関するロードマップを以下に示す。

(2) エネルギー技術マップ

※それぞれの政策目標への寄与が大きいと思われる個別技術を赤字で示す。



(3) エネルギー分野におけるロードマップ (抜粋)

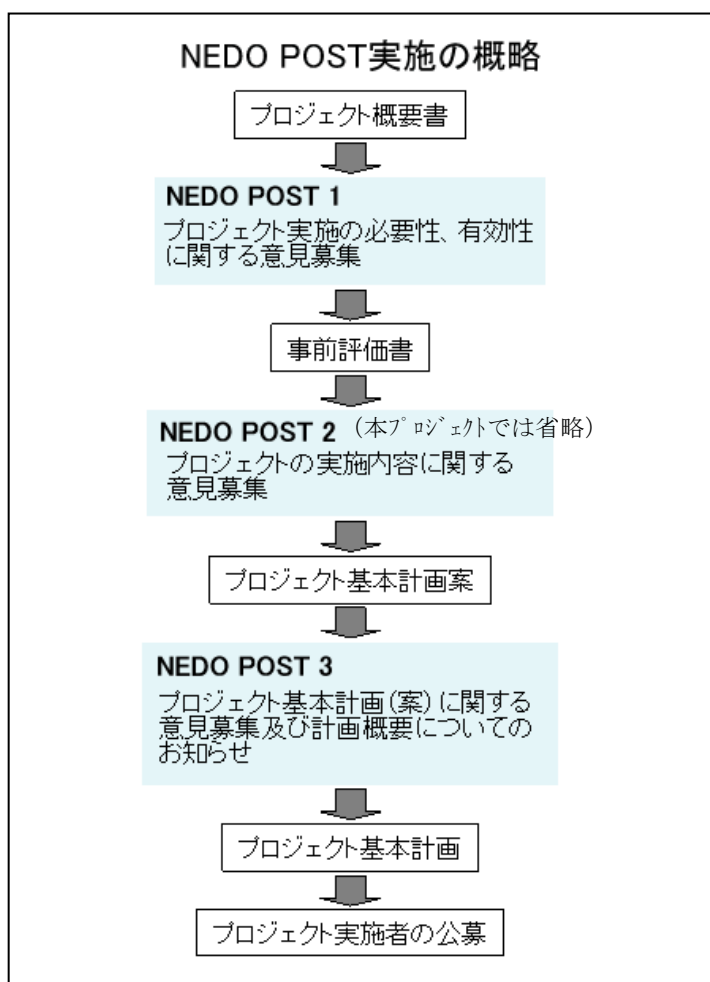
エネルギー技術 個別技術	2010	2015	2020	2025	2030～
高効率照明	発光効率、寿命 50～100 lm/W 1万時間				
高効率蛍光灯	 <p>高効率蛍光材料 高効率無水銀蛍光灯 熱損失低減技術</p>				
高効率照明	発光効率、寿命 65lm/W 100 lm/W 200 lm/W 4万時間 6万時間				
高効率 LED 照明	 <p>高効率 LED 素子 白色 LED 用蛍光材料 (高効率近紫外励起蛍光材料) 光センサー/人感センサーとの組み合わせ 低コスト化</p>				
高効率照明	発光効率 100 lm/W 200 lm/W 寿命 6万時間				
有機 EL 照明	 <p>高輝度白色 EL 高効率化 長寿命化 大面積化</p>				
高効率照明	次世代照明				
	 <p>高効率高演色白色光源 マイクロキャビティ クラスター発光 蓄光技術、燐光材料 光伝送技術</p>				

事前評価関連資料

事前評価資料として、NEDOPOST および事前評価書を示す。

NEDOPOST とは、NEDO が新規に研究開発プロジェクトを開始するのに当たって、プロジェクト案の概要を示し、ウェブを活用して広くパブリック・コメントを集める手段であり、その結果をプロジェクト検討に役立てることによって、より社会のニーズに適合したプロジェクトを効率的に実施するためのコミュニケーションツールである。図のようにフェイズ毎に意見収集を行い、プロジェクト基本計画策定などに利用している。これによって事業目的、目標設定根拠の明確化、実施内容の重複排除等を行い、事業の効率的かつ効果的な実施を行っている。

事前評価書は NEDOPOST 等を通して取得した情報を元にして作成した本プロジェクト立ち上げに関する評価報告書である。本プロジェクト立ち上げに当たって公開された NEDOPOST および事前評価書を次頁に示す。





研究テーマ名 次世代高効率・高品質照明の低コストに向けた基板技術の研究開発

研究目的

○背景、目的、必要性(政策的位置付け、市場ニーズ、技術ニーズ)

- ①背景 我が国で費やされているエネルギー源の40%以上が電力であり、そのうち家庭では16%以上の電力を照明で消費している。このような状況で、従来の白色電球や蛍光灯を、エネルギー効率の高いLEDや有機ELを用いた次世代照明に置き換えることにより省エネルギー化が進むことが期待されている。その省エネ効果は620億kWh/年と予想される。
- ②市場ニーズ(目的) 蛍光灯並みのコストで、蛍光灯を凌ぐ高効率の次世代照明が実用化されれば普及が加速されることが予想される。
- ③技術ニーズ 次世代照明に対して、高品質(高演色、高輝度、長寿命)を提供しながら、高効率と低コストを実現するための基盤技術開発が求められている。

研究内容概略

○研究開発課題(目的達成のための技術課題)

- ①高効率・高品質LED照明用基板の低コスト化に係る基盤技術開発
(窒化物等の照明用基板の生産性向上を目的とした結晶成長技術やLED素子構成構造の最適化等デバイスの高度化に向けた技術の開発)
- ②有機EL照明の高効率・高品質化に係る基盤技術開発
(有機EL照明の高効率・高品質化及び低コスト化を同時に実現するデバイス技術開発)

○キーテクノロジー、ブレークスルーのポイント、オリジナリティ(課題を解決するためのポイントおよびその現状)

- ①LED照明の高効率・高品質化と低コスト化の両立に向けた結晶成長技術や基板作製技術が必要である。
- ②有機EL照明の高効率化に向けた光取り出し技術や新規材料生成、高品質化に向けた封止技術、低コスト化に向けたプロセス制御技術や薄膜形成技術が必要である。

プロジェクトの規模

○事業費と研究開発期間(目安として)

- ①平成21年度事業費54.7億円(未定)
- ②研究期間:「ステージⅠ」2年(平成21～22年度)
「ステージⅡ」3年(平成23～25年度)

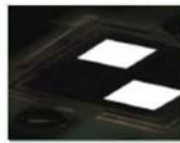
技術戦略マップ上の位置付け

- ①「総合エネルギー効率の向上に寄与する技術のロードマップ」の高効率照明技術に重要技術として位置づけられている。
- ②ITイノベーションプログラム、ナノテク・部材イノベーションプログラムとして、取り組むプロジェクトである。

その他関連図表



LED高品質GaN基盤



有機EL高効率パネル



実用化・普及



オフィス



住宅



店舗

2009年12月 現在

事前評価書

(注) 事業名称「次世代高効率・高品質照明の低コストに向けた基盤技術開発」は「次世代高効率・高品質照明の基盤技術開発」の事前評価段階での事業名称である。

	作成日	平成21年12月22日
1. 事業名称 (コード番号)	次世代高効率・高品質照明の低コストに向けた基盤技術開発	
2. 推進部署名	電子・情報技術開発部	
3. 事業概要	<p>(1) 概要：省エネルギー効果の高い LED、有機 EL を用いた次世代照明の普及を大きく加速させるために、高効率・高品質と低コストを両立させるための基盤技術開発を行う。</p> <p>(2) 事業規模：平成21年度事業費(国費分)54.7億円(委託)</p> <p>(3) 事業期間：ステージⅠ 2年間(平成21～22年度) ステージⅡ 3年間(平成23～25年度)</p>	
4. 評価の検討状況	<p>(1) 事業の位置付け・必要性</p> <p>地球温暖化対策は世界的に早急に取り組むべき最重要課題であり、経済・社会活動を支えるあらゆる分野で省エネルギー化を図る画期的な技術革新が必要である。我が国で消費されるエネルギー源の40%以上が電力であり、家庭用電力では約16%を照明用途が占めており、その効率化が必要である。そこで、一般的な照明光源である白熱電球、蛍光灯をエネルギー効率の高い LED、有機 EL を用いた次世代照明に置き換えることでの省エネルギー化が期待されている。この次世代照明の普及を大きく加速させるために、高効率・高品質と低コストを両立させるための基盤技術開発の必要性は高い。</p>	

(2) 研究開発目標の妥当性

電力当たりの発光効率については、基本的には蛍光灯代替による省エネルギー効果を狙いとして、蛍光灯の効率（想定 65 lm/W）の約 2 倍を目標としている。具体的には LED については、照明器具に組み込む際の均一面発光拡散による約 65% の効率低下を考慮して次世代照明ロードマップ上 2020 年に達成目標としていた 200 lm/W 以上を、前倒して目標を設定した。有機 EL については面発光拡散が不要なため、次世代照明ロードマップ上、2020 年～2030 年に達成目標としていた 130 lm/W 以上を前倒しして目標を設定した。

演色性の尺度である平均演色評価数 Ra については、国際照明委員会にて蛍光灯の高演色性領域として定義されている Ra80 以上を LED と有機 EL 共通の目標として設定した。

有機 EL については、輝度半減寿命と製造コストの目標を設定した。寿命については、次世代照明ロードマップから 2010 年～2030 年に達成目標の 4 万時間（輝度 1,000cd/m²）を設定した。製造コストについては、蛍光灯の単位光束・半減寿命当たりのコストとほぼ同等の 0.3 円/lm・年以下を目標として設定した。

なお達成目標の設定値については、研究開発実施にあたっての必須の目標値のみを基本計画に設定することで、委託先公募において広く提案を収集し、優れた提案を採択する。したがって、提案者が技術の優位性を示したい場合には、達成目標等を適時追加または改訂することによって対応できるものとする。またこれら目標設定については今後も委員会ならびに有識者ヒアリングなどで聴取した意見を適切に反映させる。

(3) 研究開発マネジメント

公募を通じて、高い技術を有する民間企業、大学、公的研究機関等による最適な実施体制を構築する。必要に応じて、外部有識者の意見を求め、その結果を踏まえて事業全体の予算配分や計画について見直しを行い、適切な運営管理に努める。さらに別途定められた技術評価に係る指針、および技術評価実施要領に基づき、技術的、および産業技術政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義、将来の産業への波及効果等について、外部有識者による評価を実施する。また、研究実施主体が競争的に研究開発を行うことによりイノベーションを加速することを目的として、「ステージゲート制度」を導入する。

(4) 研究開発成果

LED、有機 EL を用いた次世代照明に関する基板、発光層等の材料、並びに製造技術などに係る基盤技術を確立し、高効率・高品質、かつ低コストの次世代照明を実現する。

(5) 実用化・事業化の見通し

LED、有機 EL による照明用デバイスは、世界的に注目される技術であり、一般照明においても市場が立ち上がり始めたところである。本プロジェクトは、次世代照明の普及をさらに加速させるものであり、省エネルギー化に貢献すると共に、関連産業の発展を支援すると考えられる。

(6) その他特記事項

特になし。

5. 総合評価

本プロジェクトは、高効率・高品質と低コストを兼ね備えた次世代照明を前倒しして実現するために、材料や製造プロセスに関して、基板、発光層、封止等、多岐にわたる基盤的技術開発を行う必要があり、リスクを伴う挑戦的な技術開発である。民間企業単独で開発を実施することは極めて困難であるので、NEDO が実施する事業として適切であると判断する。