

ナノテク・部材イノベーションプログラム、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

「低炭素社会を実現する新材料パワー 半導体プロジェクト」(事後評価)

(2010年度～2014年度 5年間)

プロジェクトの概要 (公開)

NEDO

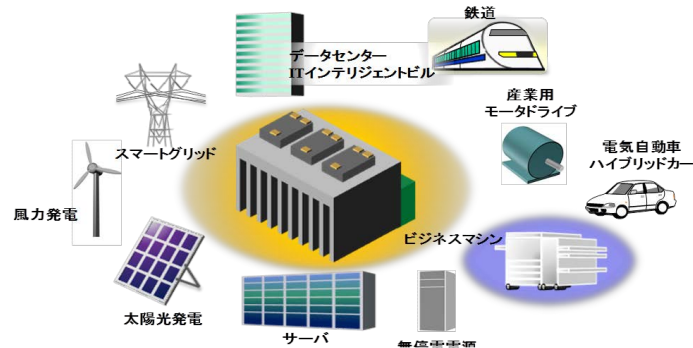
電子・材料・ナノテクノロジー一部

柚須圭一郎

2015年 6月 18日

プロジェクトの概要

資源枯渇、地球温暖化に対して、省エネ化と低炭素化社会の実現に向けた技術開発
本格普及が見えてきたSiCパワー半導体の事業本格化に必要な技術を開発

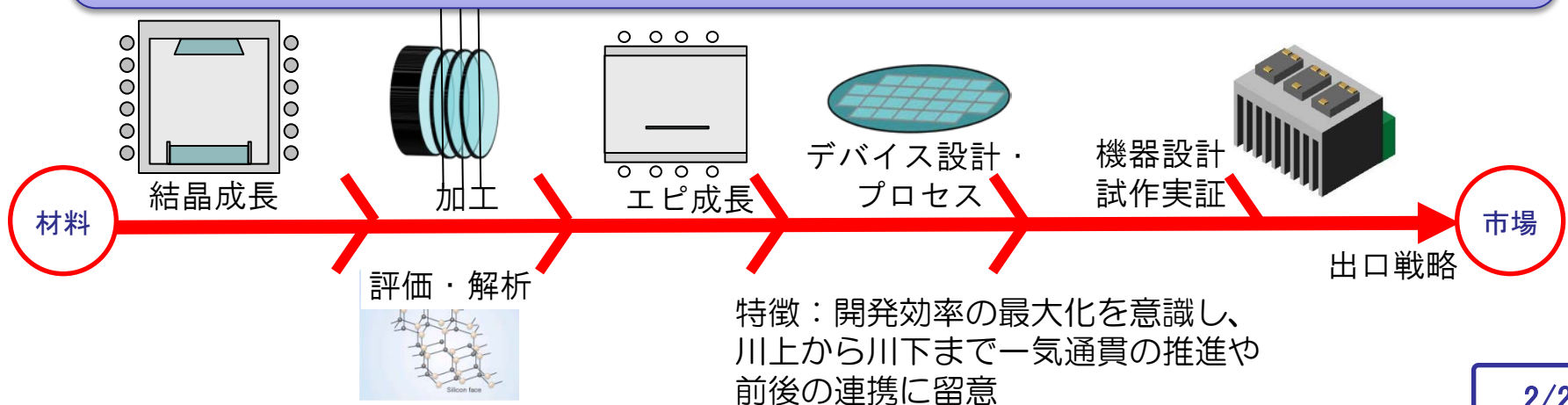


SiCパワーエレクトロニクスの
広範囲への適用が期待されている

技術進展により本格事業展開が視野に。
しかし、2010年当時の市場規模は限定的。
(4インチウエハ、1kV級デバイスは市販開始)
事業本格化のおもな要件は
デバイス低価格化
(ウエハ大口径化・高品質化)と
デバイス・機器の適用範囲の拡大
(デバイス高信頼化・高耐圧化・高効率化)

実施内容：

高品質大口径（6インチ）ウエハの安定供給に必要な技術の確立、各種プロセス装置開発、
高耐圧（3kV）デバイス設計技術、デバイス作製プロセス技術等の開発



発表内容

1. 事業の位置づけ・必要性
2. 研究開発マネジメント
3. 研究開発成果
4. 実用化、事業化の見通し

事業目的

社会的背景

資源枯渇、地球温暖化対策が喫緊の課題

→ 課題解決に向けた技術開発が必要

産業的背景

我が国関連産業の国際的地位向上の重要性

→ 新規性の高いキー技術の早期創出が必要



事業の目的

SiCパワーエレクトロニクスによる省エネ／低炭素社会実現への貢献

新材料SiC・新規デバイス・新規機器技術による産業の競争力強化

政策上の位置付け 経済産業省研究開発プログラム (関連事項を抽出)

ナノテク・部材イノベーションプログラム

情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新(ジャンプアップ)をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を目指す。

エネルギーイノベーションプログラム

我が国、そして世界がエネルギー需給構造の抜本的な改革が不可避な状況。特に、エネルギー需給の8割超を輸入に頼るという脆弱なエネルギー需給構造を有する我が国にとっては、革新的なエネルギー技術の開発、導入・普及によって、各国に先んじて次世代型のエネルギー利用社会の構築に取り組んでいくことが不可欠である。このため、省エネルギー技術、新エネルギー技術、燃料技術、原子力・電力技術の各分野で、中長期的視点から実用化、普及段階までを見通した革新的なエネルギー技術の開発を積極的に推進する。

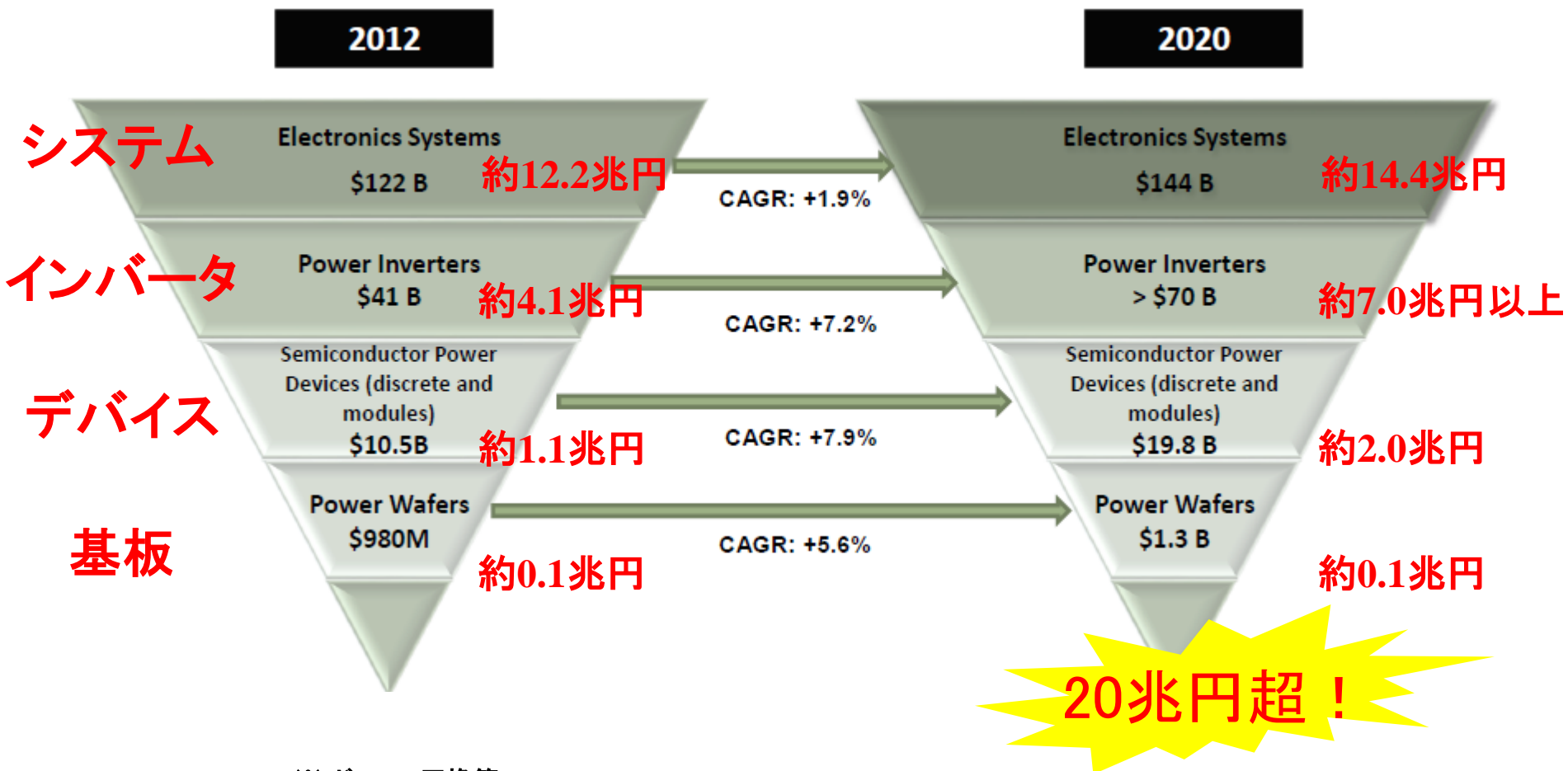
ITイノベーションプログラム

高度情報通信ネットワーク社会の構築に向け、情報化の進展に伴うエネルギー消費量の増大等の課題にも考慮しつつ、その基盤となる情報通信機器・デバイス等の情報通信技術を開発し、実社会への利用を促進する。また、情報システム・ソフトウェアについて品質、信頼性及び生産性の向上を推進するとともに、組込みソフトウェア産業の強化、オープンソースソフトウェアを安心して活用するための環境整備等を進めることによって、ITの利活用の深化・拡大を図る。

実行
プログラム
(経済産業
省)

パワーエレクトロニクスに関連市場

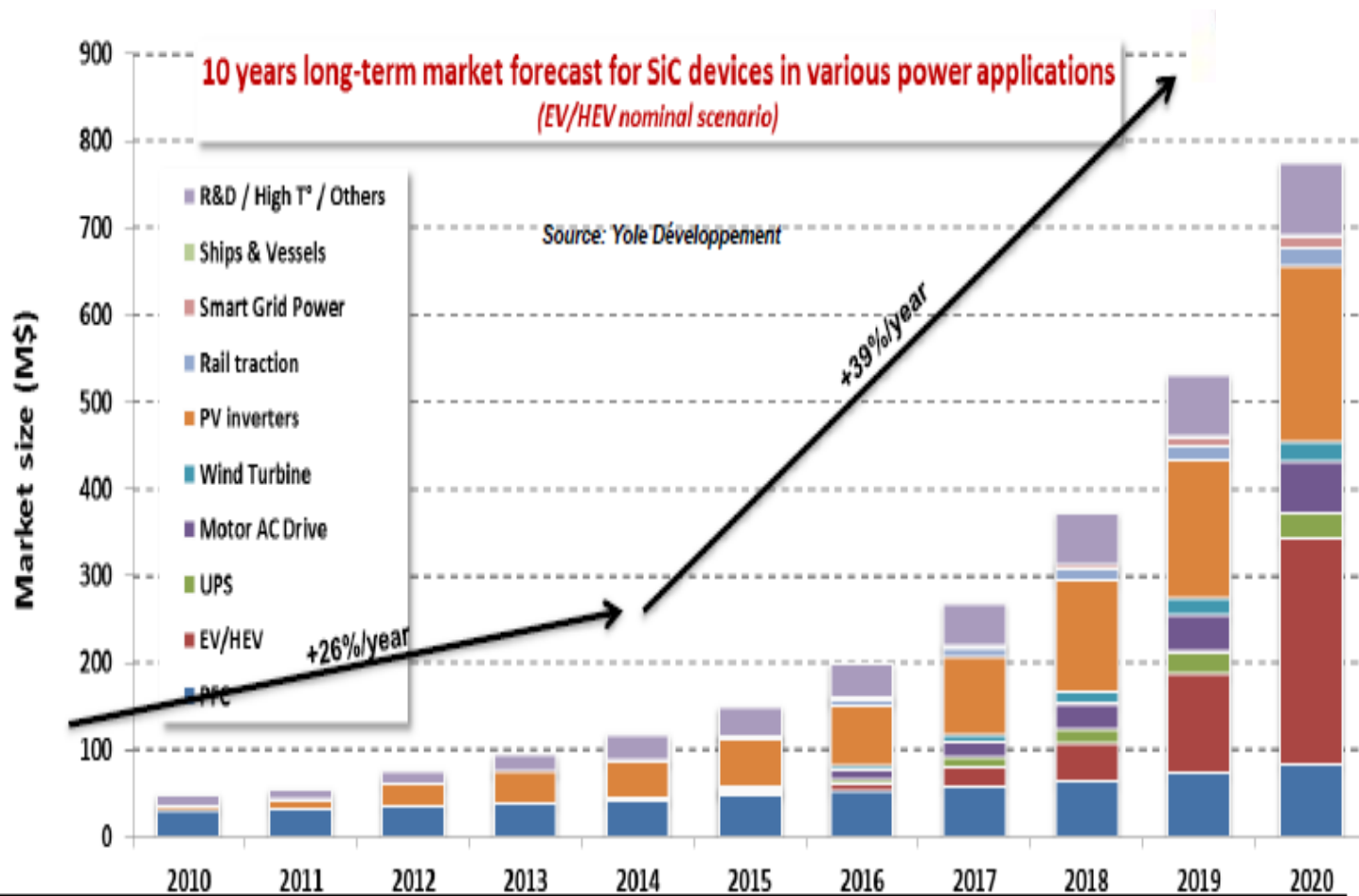
■パワーエレクトロニクス向けのウエハ、デバイス、インバータ、システムの市場は、2020年に向けて大きく成長



※1ドル100円換算

(出所)YOLE社 Status of the power electronics industry 2013

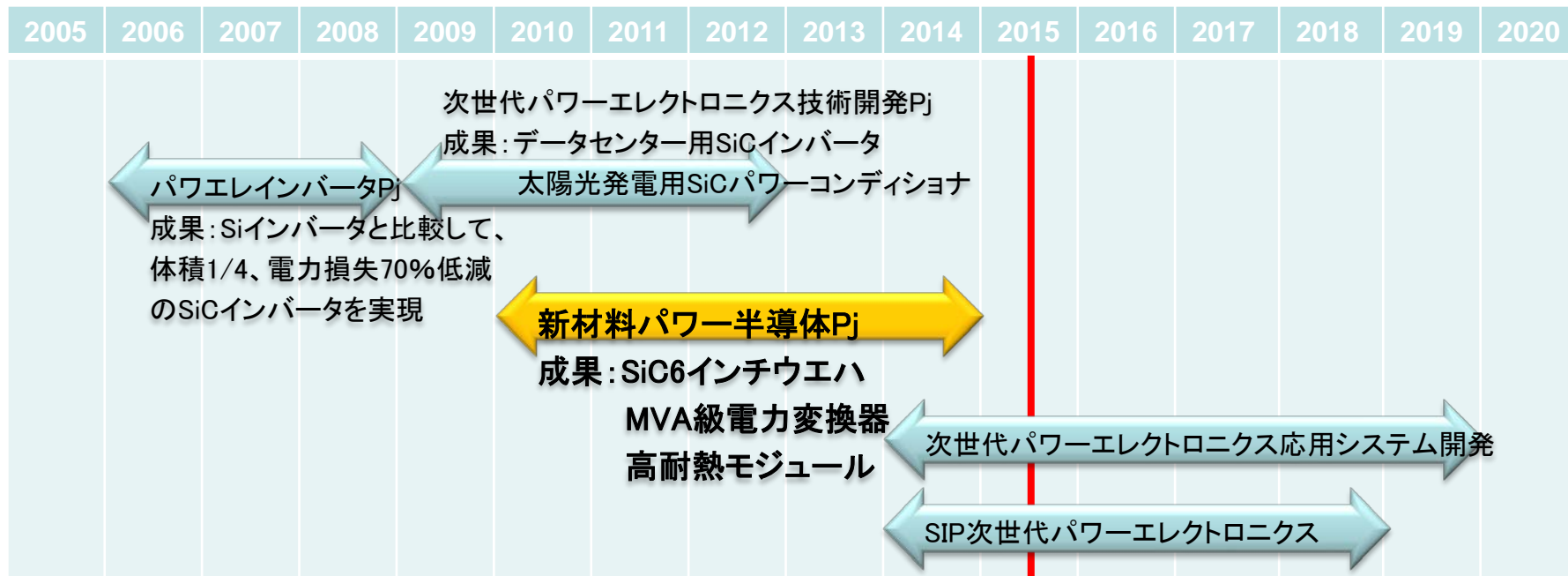
SiCパワーデバイスの市場予測



出典: Yole Développement 2013

◆ 2020年のSiCデバイス市場は800億円弱

SiCパワーエレクトロニクス関連プロジェクトの変遷



事業の妥当性

- ◆ これまでのプロジェクト成果を将来に生かすための量産化技術開発
 1. 6インチSiCウエハの量産化技術開発
 2. MVA級電力変換器開発
 3. 高耐熱統合パワーモジュール化技術開発

予算と期待効果との比較

新材料パワー半導体プロジェクトの総事業費: 122億円 (H22fy~H26fy)

経済効果

- ・パワエレ市場はデバイスのみで数兆円の市場規模
- ・うち10%がSiCデバイスになるとして数千億円程度
- ・かつ、高い年率(約40%以上)での成長が見込まれる。

事業規模(全研究開発項目)

単位: 百万円

	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	H26fy	総額
全体	2,000	3,957(助成含む)	2,120	2,160	1,980	12,217
(1)~(4)	2,000	1,938	1,722	1,729	1,445	8,834
(5)~(8)	-	2,019	-	-	-	2,019
(9)	-	-	398	431	535	1,364

省エネ効果

SiCパワー半導体の普及効果によって、国内だけでも、数百万キロワット(原発数基分)の省エネ効果が見込まれる(2020年時点の普及率からの予想)。

国内外の開発動向(技術内容)

- 開発当初はウエハ量産技術で米国に遅れをとるも、徐々にシェアを獲得。
- デバイスでは、SiCダイオードの製品化で欧州(Infenion)に実績あり。

	企業	概要	動向
日本	三菱電機／ローム／日立／東芝／パナソニック／デンソー／富士電機／新日鐵住金／昭和電工など	長年の基礎研究の結果、技術レベルは実用化検討段階に到達。ウエハに関してはステップフロー成長法(京大)など実用化に不可欠な基本技術に加え、RAF法(デンソー)などの差別化技術を有する。	新日鐵住金とデンソー・昭和電工が6インチウエハを発表。デバイスはロームが1kV級MOSFETを外販開始。三菱電機・富士電機・東芝がインバータの報道発表。ロームはドイツSiCrystal社を買収。
米国	Cree／Semisouth／Dow Corning/GEなど	DARPA資金により育成されたCree社のウエハ、エピ、デバイス技術は世界トップレベルで、ウエハはGaN-LED用基板としてビジネスが成立。SemisouthほかはJFETを外販。	ウエハのトップシェアCree社を中心に展開、同社は2010年9月に6インチ化を発表したほか、MOSFET外販開始。ダウコーニングが良質エピ技術を開発。
欧州	Infineon/STマイクロエレクトロニクス／SiCrystalなど	Siemens から派生したInfineon社はSiCダイオード製品化の先駆、ノートPCのACアダプタ、ハイエンドPC電源等の低電圧用に拡販中、MOSFETも販売開始。STマイクロ社もSBD量産。	有力ウエハメーカーSicystal社はロームが買収。デバイスはInfineon社が積極的。リンチョーピン大学が韓国LG電子に技術供与。

- 高品質ウエハの供給体制確立がその後の開発すべてを制する。我が国の差別化技術を生かして産業を育成すべき。

国内外の開発動向(支援体制)

国	創設主体	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017 年度	
日本	NEDO			低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクス20億円/年								
	内閣府			FIRST(10kV~ 超高耐圧SiCデバイス)34.8億円 SIPパワエレ22億円/年								
欧州	仏産業革新庁	G2REC(SiC、GaNウエハ;22億円)										
	仏政府					IEED Super Grid(>15kV高耐圧デバイス;94.4億円)						
	独文科省				NEULAND(SiC、GaNデバイス;6.1億円)							
	EURIPIDES and CATRENE			Programs THOR (Si、SiC、GaN、SOIデバイス;91億円)								
米国	エネルギー省			SiC HEV charger development; 3.9億								
	NSF	CPES(材料~実装;70億円/10年)										
	NSF	FREEDM(材料~システム;40億円/年) CREE,GE等)										
	DARPA	スマートグリッド応用のデバイス・システム・受動部品開発(CREE, GeneSiC等)										
	DOE					Power America (雇用創出);150億円/年						
						NY-PEMC (SiC、GaN);500億円						

地域別支援戦略の傾向

- 日本: 材料からシステムまで幅広く開発(1.2~6.5kV)、SiCに重心
- 欧州: 系統電力応用など高耐圧デバイス開発に注力、SiCからGaNまでカバー
- 米国: 系統電力と軍事応用が主、材料からシステムまで、2014年に2大プロジェクト発足

2. 研究開発マネジメントについて (1)研究開発目標の妥当性

事業の目標(概略)

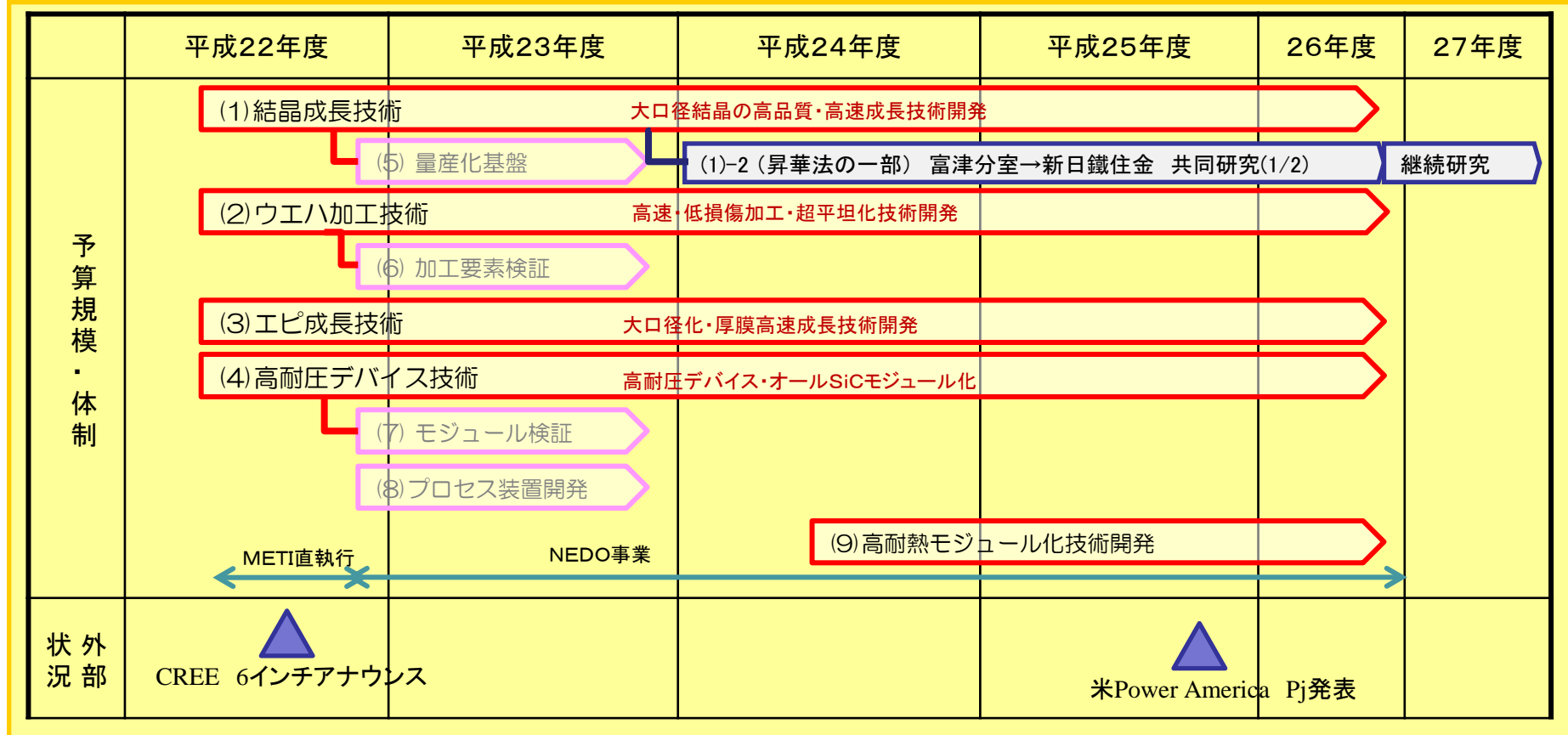
研究開発項目	平成24年度末 中間目標 (詳細仕様は事業原簿参照)	平成26年度末 最終目標 (詳細仕様は事業原簿参照)	根拠
(1)結晶成長技術開発	昇華法では、下記を満たす直径6インチ結晶を実現する技術を確立。 ①10 ³ 個/cm ² 台の低転位密度、及び ②0.5 mm/h以上の高速成長 ガス法または液相法で、直径2インチ・1mm厚の単結晶を実現。	昇華法では、直径6インチで下記を達成 ①転位密度10 ³ 個/cm ² 以下、及び ②転位密度5x10 ³ 個/cm ² 以下と 成長速度0.5mm/h以上の両立 ガス法または液相法で、直径2インチ・20mm厚の結晶を実現し、昇華法に対する技術優位性を示す。	<ul style="list-style-type: none"> ・世界一の高品質を、大口径化、高速成長と両立し、低コスト化を可能にする ・これまでにない連続成長の実現とさらなる供給安定化への見通しが必要
(2)ウエハ加工技術開発	直径3インチ結晶を対象に、150 μm/分など仕様を満たす高速・多数枚同時切断を実現し、一貫プロセスの最適化方針を決定	直径6インチ結晶を対象に、300 μm/分など仕様を満たす高速・多数枚同時切断を実現し、インゴットからRms = 0.1nmの超平坦化まで24時間で完了する技術を実証。	<ul style="list-style-type: none"> ・ウエハコストの中で加工コストは大きな要素。抜本的な対策が必須。
(3)エピ膜成長技術	大口径化に向けて、みなし6インチ径で所定の均一性と欠陥密度を実現。高耐圧化に向けて、50 μm厚以上の厚膜・低欠陥エピ成長を実現。	大口径化に向けて、6インチ・3枚以上の同時エピ成長で所定の均一性と品質を達成。高耐圧化に向けて、100 μm/h以上の高速成長と所定の均一性と品質を達成。	<ul style="list-style-type: none"> ・大口径で世界最高水準の高品質エピ成長技術が必要 ・超高耐圧デバイスには高品質エピ膜の高速成長が必要。
(4)高耐圧デバイス技術	耐圧3kVのMOSFETを実現し、SiC-MOSFET、SBDを適用した耐圧3kV以上のモジュールを試作	耐圧3kV以上でオン抵抗15mΩ cm ² 以下のMOSFETを実現し、耐圧3kV以上のデバイスを用いたMVA級電力変換器でSi比50%以下の損失を実証。	<ul style="list-style-type: none"> ・高耐圧デバイスの設計/プロセス技術、実装、評価、大容量電力変換器設計技術が必要。

事業の目標(概略)

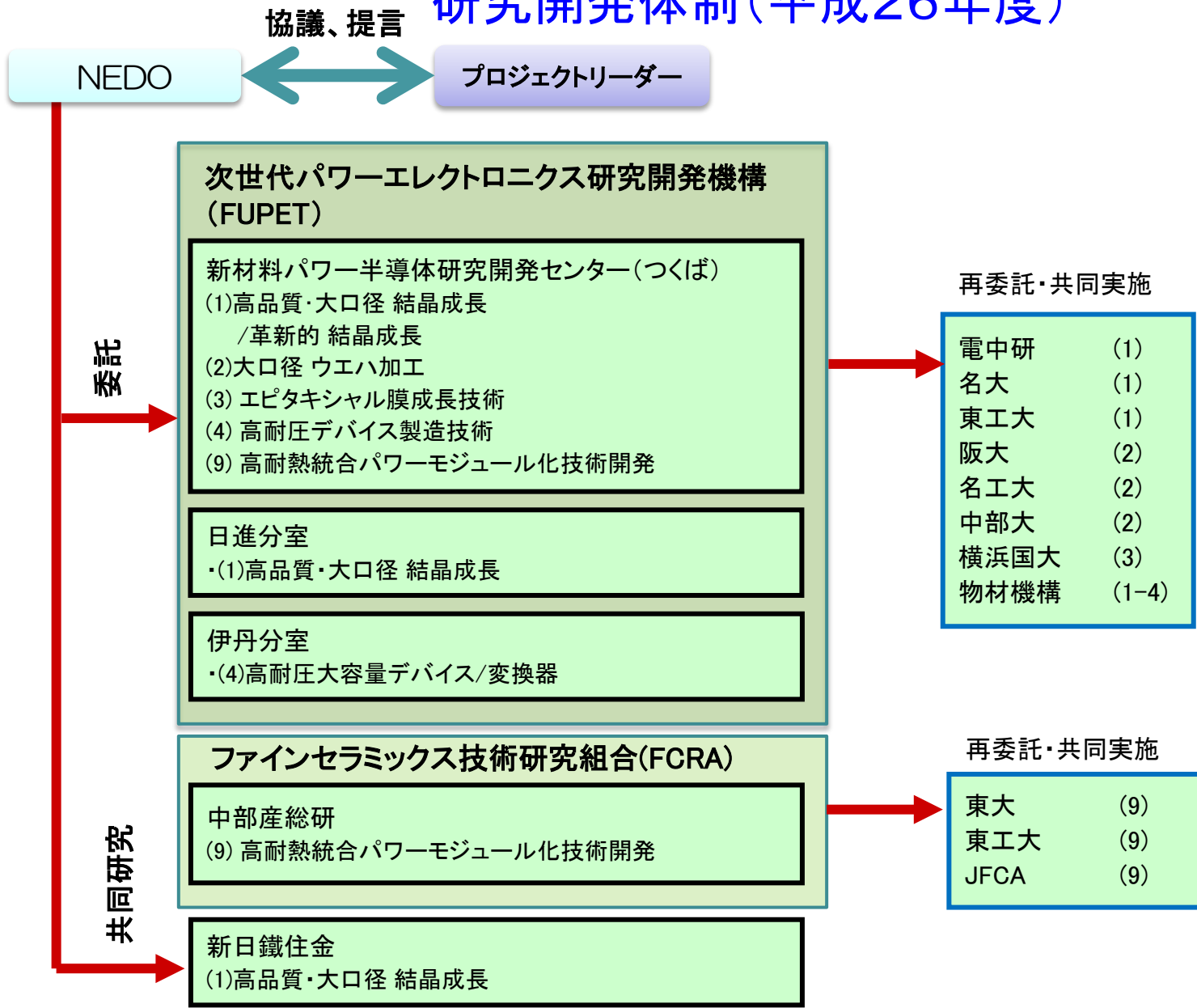
以下は、モジュール開発のために平成24年度より追加した事業。

研究開発項目	平成26年度末 最終目標 (詳細仕様は事業原簿参照)	根拠
(9)高耐熱統合パワーモジュール化技術開発	<ul style="list-style-type: none">・耐熱温度250℃、熱サイクルー40～250℃をクリアしたコンデンサ、抵抗、放熱基板、配線基板、を使って1200V-50A級モジュールを試作・評価し、課題と対策を得る。・材料～部材～部品の国際標準化戦略を策定する。また、部品の標準化活動と連携し、材料及び部材に関する戦略的標準化項目のISO化のための技術的検討(草案策定)及び海外ネットワークづくり等の基盤整備を行う。	<ul style="list-style-type: none">・国内メーカーが強みを持つデバイス技術に比べて、相対的に弱いモジュール技術を開発する意義は高い。・システムメーカーへ仕様を提案するためにも、モジュール分野での国際標準化が急務。

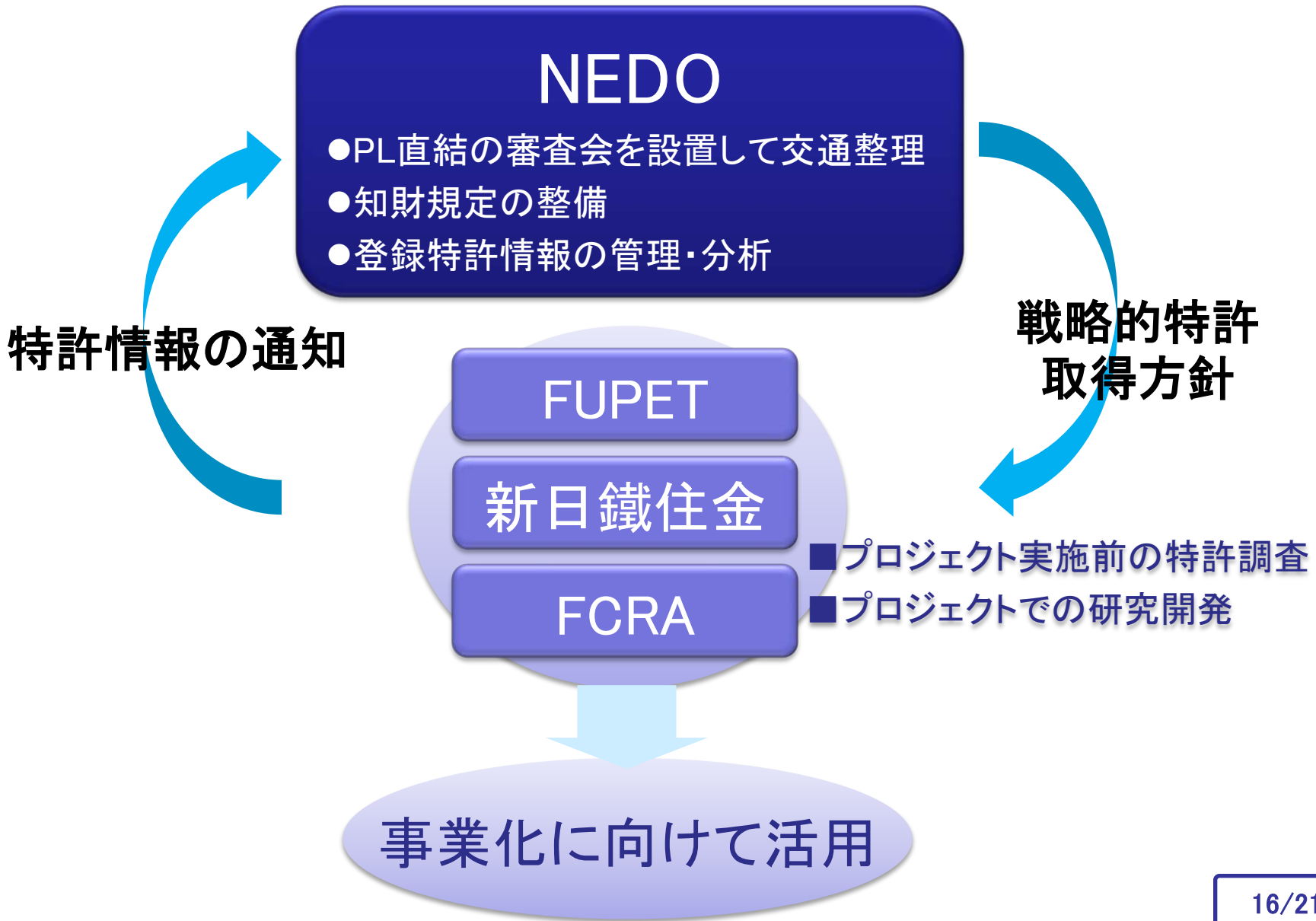
全体スケジュール



研究開発体制(平成26年度)



知財マネジメント



事業化を意識したマネジメント

定期的なヒアリング

実施者から定期的な成果ヒアリングを実施。軌道修正に反映(年2回)
実用化・事業化の見通しについても同時に確認

特許を戦略的に出願

積極的に出願する一方で戦略的な不出願も選択(ノウハウ開示の防止)

学会活動などを通じてアピール

国際会議、技術成果報告会 等
NEDOも協力(CEATEC、NANOTECH、ウェブ紹介)

- CEATEC展示の様子
- 27テーマ中2番目の注目度



情勢変化への対応

外部状況を踏まえ、実施体制の組み替え・重点項目への予算充当・委託から助成・共同研究への変更等を行う(後述)

2. 研究開発マネジメントについて (5) 情勢変化等への対応

実施体制の変遷

平成22年度

経産省

委託

次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構 (FUPET)

新材料パワー半導体研究開発センター (つくば)

- (1) 結晶成長
- (2) ウエハ加工
- (3) エピタキシャル膜成長
- (4) デバイス技術

日進分室 (デンソー)

- (1) 結晶成長,

富津分室 (新日鉄)

- (1) 結晶成長

伊丹分室 (三菱)

- (4) デバイス/変換器

平成23年度

NEDO

委託

助成

次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構 (FUPET)

新材料パワー半導体研究開発センター (つくば)

- (1) 結晶成長
- (2) + (6) ウエハ加工
- (3) エピタキシャル膜成長
- (4) デバイス技術

日進分室 (デンソー)

- (1) 結晶成長

富津分室 (新日鉄)

- (1) 結晶成長

伊丹分室 (三菱)

- (4) + (7) デバイス/変換器

デンソー・昭和電工
(5) ウエハ量産化基盤技術

新日鉄・新日鉄マテリアルズ
(5) ウエハ量産化基盤技術

日新イオン機器
(8) 大口径対応プロセス装置開発

日立国際電気
(8) 大口径対応プロセス装置開発

平成26年度

NEDO

委託

共同研究

次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構 (FUPET)

新材料パワー半導体研究開発センター (つくば)

- (1) 結晶成長
- (2) ウエハ加工
- (3) エピタキシャル膜成長
- (4) デバイス技術
- (9) 高耐熱モジュール技術

日進分室 (デンソー)

- (1) 結晶成長,

伊丹分室 (三菱)

- (4) デバイス/変換器

ファインセラミックス技術研究組合 (FCRA)

中部産総研

- (9) 高耐熱モジュール技術

新日鉄住金

- (1) 結晶成長

量産化を見据えた共同研究移行

新日鉄住金
(1) 結晶成長

(再委託・共同実施先は省略)

H22補正予算による
(実施期間はH23単年度)

2. 研究開発マネジメントについて (5)情勢変化等への対応

対応実績(項目追加・加速資金投入)

件名	目的・内容	成果
(平成22年度補正予算で実施)		
平成23年度		
ウエハ量産技術強化 (助成事業)	最重要な大口径ウエハ供給体制の確立のため、量産技術立ち上げ中心に実施。	6インチウエハ(新日鐵)・RAF法6インチインゴットを実証(デンソー)し、量産体制を構築(新日鉄マテリアルズ、昭和電工)。
6インチ対応デバイスプロセス装置 開発(助成事業)	6インチでのデバイス製造ライン構築に不可欠な装置を開発。	完成度の高い高温イオン注入・高温アニール装置が完成。
6インチウエハ加工技術加速	ボトルネックである加工技術の限界を追求。一貫プロセス確立を加速する。	超高速・高張力ワイヤーソーを実現し、全体最適化に向けたデータを蓄積。
ハイブリッドモジュール化検証	早期に技術を押える必要が高い、インフラ系機器の設計技術を中心に加速。	3.3kV-SBD実現。Si-IGBTと組み合わせ1000Aの大電流スイッチングを実証。
平成24年度		
「高耐熱部材統合モジュール化」追加	Siで真似できない機器を実現するため、高温で使える部品や基板を開発する。	耐熱温度250°C、熱サイクル-40~250°Cをクリアした高耐熱部品を使って1200V-50A級モジュールを試作・評価し、課題と対策を得た。
加速資金により結晶/ウエハの欠陥分析体制充実	6インチ実証に伴い、事業化を急ぐため、ウエハ検査技術を充実する。	高速エピ成長を実現できるハライド法開発に資金を集中し、副作用の無い高速成長100μm/h以上を確認した。
平成25年度		
MVA級電力変換器の開発加速	SiC素子間の特性バラツキを解消するために、加工技術を改善する。	高精度加工装置を導入した結果、素子間特性バラツキが改善し、MVA級電力変換器を半年早く完成させた。
6インチウエハ品質改善に係る開発加速	SiCエピ付きウエハ特性を改善するために、影響を与えるウエハ表面特性を把握する必要がある。	導入したウエハ表面研削装置とCV測定装置を使って、ウエハ表面特性とエピ膜中ドーパ分布の相関を取りエピ付きウエハ品質改善の目処を得た。

H24年度実施の中間評価結果と対応方針

指摘事項	対応方針	評点			
		位置付	マネジ	成果	実用化
SiC基板は、高性能化だけでは既存技術との置き換えは困難であり、高品質化と低コスト化の両立が国際競争に勝利する道である。参画企業間の連携をさらに強化し、それらの成果を融合させ、いかにして産業を支える技術に仕上げるべきか、開発の進捗に応じて議論を重ね続ける必要がある。	平成25年より、結晶開発グループから加工グループへ6インチSiCインゴットを供給させることで、加工技術を効率的に向上させ最終目標を大幅に上回る10時間以内の加工技術を確立した。また結晶開発グループにとっても、加工データを得ることでウエハビジネスの一助となった。	3.0	2.1	2.4	2.4
高速エピ成長技術の一部(ハライド法)は、現在のアプローチでは海外と特段の差異は無く、後追いの感は否めない。したがって、先行技術を凌駕するコンセプトで、革新的な高速エピ成長技術の開発を目指していたきたい。	高速エピ成長技術の有力候補として、ハライド法開発に加速資金を投入した結果、その特徴について早期に見極めた上で、今後の方向性に指針を与えた。				

情勢変化に対応した新規プロジェクトとの関係性

2012 2013 **2014** 2015 2016 2017 2018

内閣府

FIRST

最先端研究開発支援プログラム

低炭素社会創成へ向けた炭化珪素(SiC)革新
パワーエレクトロニクスの研究開発

- ・ ウエハ、デバイスから回路までの各技術を一気に通貫に連携させて研究開発
- ・ 電力変換用、自動車用等のSiC, GaNに関する基盤的技術(ウエハ、デバイス、回路、モジュール等)の研究
- ・ 将来のパワーエレクトロニクス(新材料、新構造)に関する革新的研究

SIP

戦略的イノベーション創造プログラム
「次世代パワーエレクトロニクス」

低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクス

新材料パワー半導体プロジェクト
SiCのウエハからデバイス・モジュールまでの
要素技術開発

- ・ 6インチSiCウエハ、
- ・ 3.3kV-SiC-MOSFET等

情報交換

・ 新材料パワーデバイス等を用いた応用システムの試作・実証

成果となるウエハ、
デバイス技術等を適宜展開

次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発

- ・ 産業機器、自動車、民生機器、応用志向の研究開発、及び先導研究等

新世代Siパワーデバイス技術開発

- ・ 極限の材料及びデバイス構造の開発

共通技術を共有

経済産業省

低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト (事後評価)

(2010年度～2014年度 5年間)

研究開発成果、実用化・事業化に向けての見通し
および取り組み(公開)

プロジェクトリーダー 奥村 元

2015年6月18日

Ⅲ．技術開発成果概要

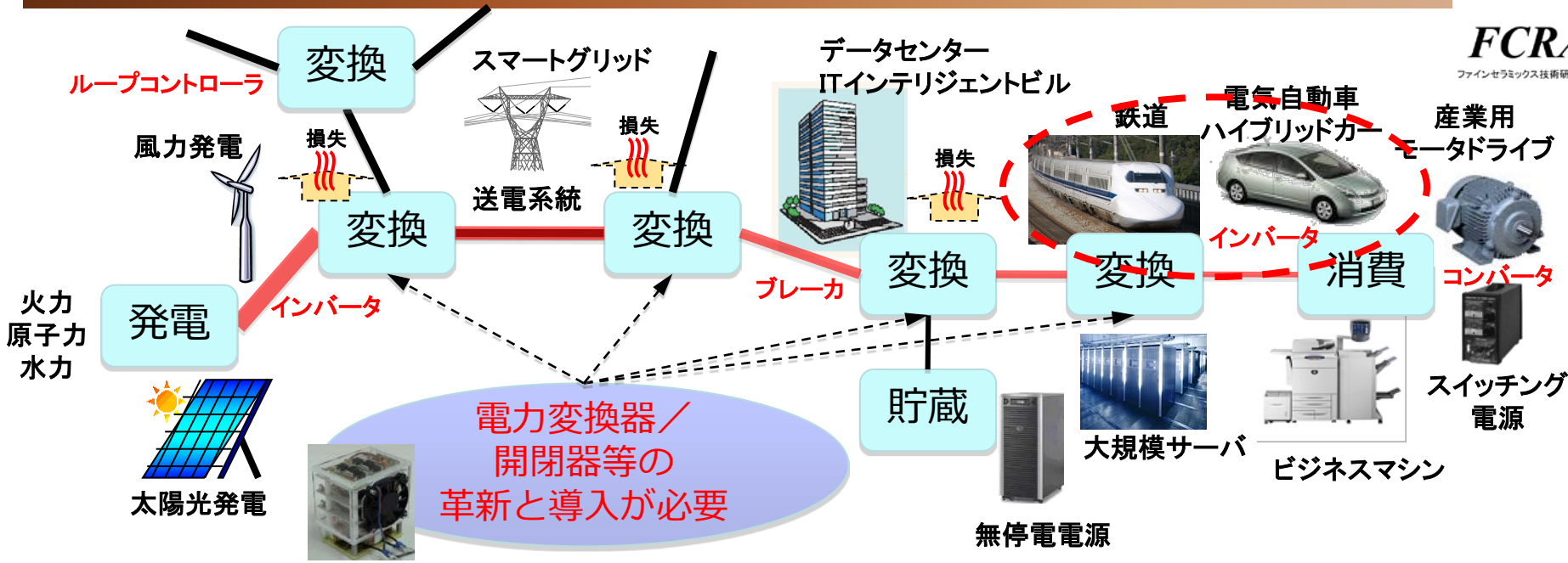
- (1) 背景と技術課題
- (2) 関連国家プロジェクトとの関係
(SiCパワーエレクトロニクスロードマップ)
- (3) 基本計画と研究開発課題
- (4) 基本計画目標
- (5) 研究開発実施体制
- (6) 主要成果(達成状況、知財、成果発表)

Ⅳ．実用化、事業化の見通し

- (1) つくば集中研
- (2) 分室

3. 研究開発成果概要 (0) 課題と取り組み
電力エネルギーの流れとパワーエレクトロニクス

(1) 背景と技術課題



- 地球温暖化問題への対応が重視される中、電力エネルギー利用の効率化、及びCO₂を排出しない電力システム(太陽光発電、電気自動車など)への要請は極めて大きい。

低炭素社会の実現、グリーンイノベーション

- 発電から消費までの電力フローの中で、電力変換/制御技術の占める役割は大きく、当該技術を対象としたエレクトロニクス(=パワーエレクトロニクス)の革新が必須。
- 次世代高効率電力変換器(インバータ等)/開閉器(ブレーカ)技術の確立により、
 - 既存電力変換器の高効率化(現在90数%)
 - 当該技術が未だ活用されていない分野(産業用モーターなど)への新規導入効果
 (モータの消費電力は全消費電力の約60%、その内でインバータ化率は10%)
- SiC関連技術は、我が国の**国際産業競争力**、及び**安全保障**にとって極めて重要。

プロジェクトの対象技術課題

(1) 背景と技術課題

■ 新材料パワー半導体プロジェクトの技術開発目標

1. 高品質・低コストな大口径SiCウエハ製造技術の確立

- 6インチ、転位密度 $\sim 1000 / \text{cm}^2$ 、表面欠陥 $0.5 / \text{cm}^2$ 以下、平坦度: $0.1 \text{nm} @ 2 \text{mm} \square$ のSiCウエハを実用的に製造できる技術(成長速度 0.5mm/h 級、長尺 50mm 級)
- 将来に向けて革新的なウエハ技術を取り上げ、技術的可能性を検証(2インチ、 20mm)

2. SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術の確立

- 3~5 kV領域における低損失MOSFETデバイス($15 \text{m}\Omega \text{cm}^2 @ 3 \text{kV}$ 超)
- メガVA級SiC電力変換器モジュールの動作と有効性の実証(損失50%減@対Si変換器)

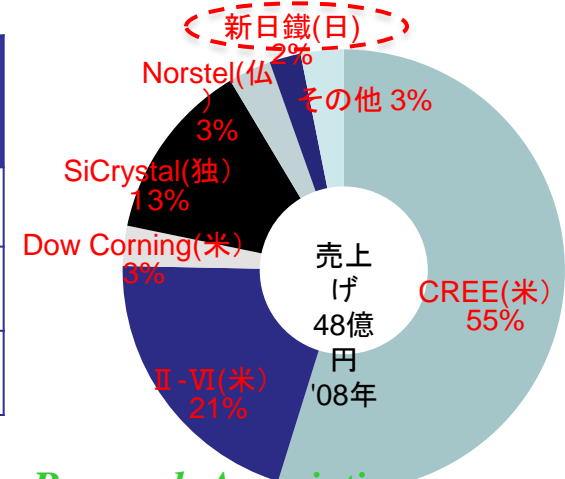
3. 高温部材／実装技術の確立(H24追加テーマ)

- 250°C での実用に耐えられる周辺部材
- 当該耐熱部材の実装/設計技術、立体実装/設計技術

SiCパワーエレクトロニクス関連技術比較

	ウエハ トップ品質	ウエハ 市場化	耐圧vs.オン抵抗 ($< 2 \text{kV}$ 素子)	耐圧vs.オン抵抗 ($> 3 \text{kV}$ 素子)
日本	◎	△	◎	—
米国	○	◎	○	○
欧州	△	○	△	—

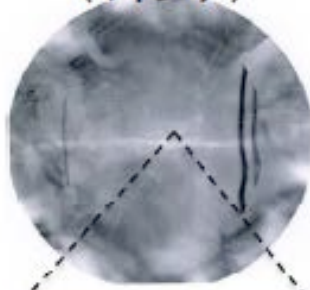
SiCウエハ市場売上げシェア('08)



現状でのSiC結晶品質の比較

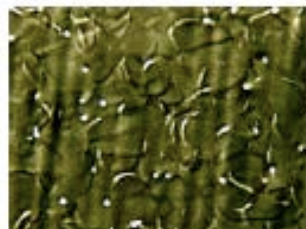
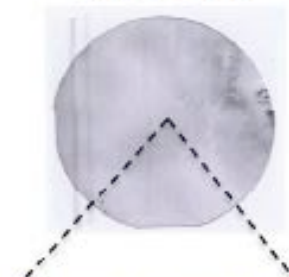
(X線トポグラフ)

米国製市販品
(4インチ)



20,000/cm²

米国製市販品
(3インチ)



8,000/cm²

日本製R&D品
(2インチ)



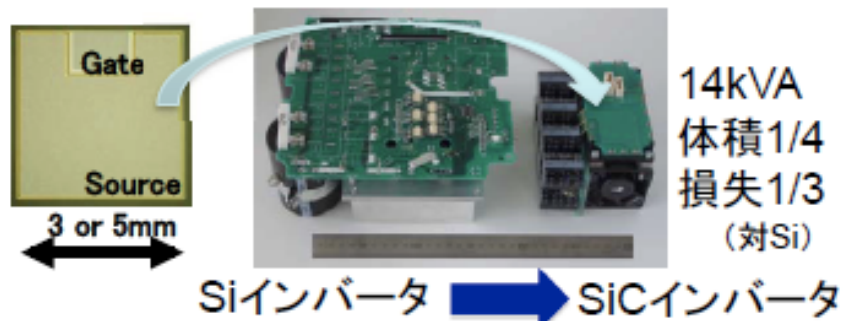
2,000/cm²

転位
密度

高品質化要素技術で勝る →
大口径化、安定的製造能力へ展開

SiCデバイス/変換器開発の現状

日本 1.2kV MOSFET



Siインバータ → SiCインバータ

米国 3kV級以上の素子で優位性

	三菱電機	三菱電機	ローム	Cree	Cree	Cree	Cree
耐圧(V)	1200	1700	1350	1200	1800	3300	10000
オン抵抗(mΩ)	22	90	75	29	114	116	410
電流(A)	60	10	20	60	-	30	10
発表年	2006	2007	2008	2008	2006	2009	2009

1kV級素子性能で勝る →
3kV級以上のデバイス/変換器へ展開

■ 終了後の研究開発等により最終的には、

- HEV・PEV等の自動車、ソーラーシステム含めた電力網、高速鉄道網等、**SiCデバイスの社会への実装**を早期に実現する。(国内&国際展開)
- 低炭素社会の実現に不可欠な**パワーエレクトロニクス革命**を先導し、**環境対応車の普及**などを通じて、地球規模の環境負荷低減に貢献。

SiCパワーエレクトロニクスロードマップ (実用化時期)

(2) 関連国家プロジェクトとの関係

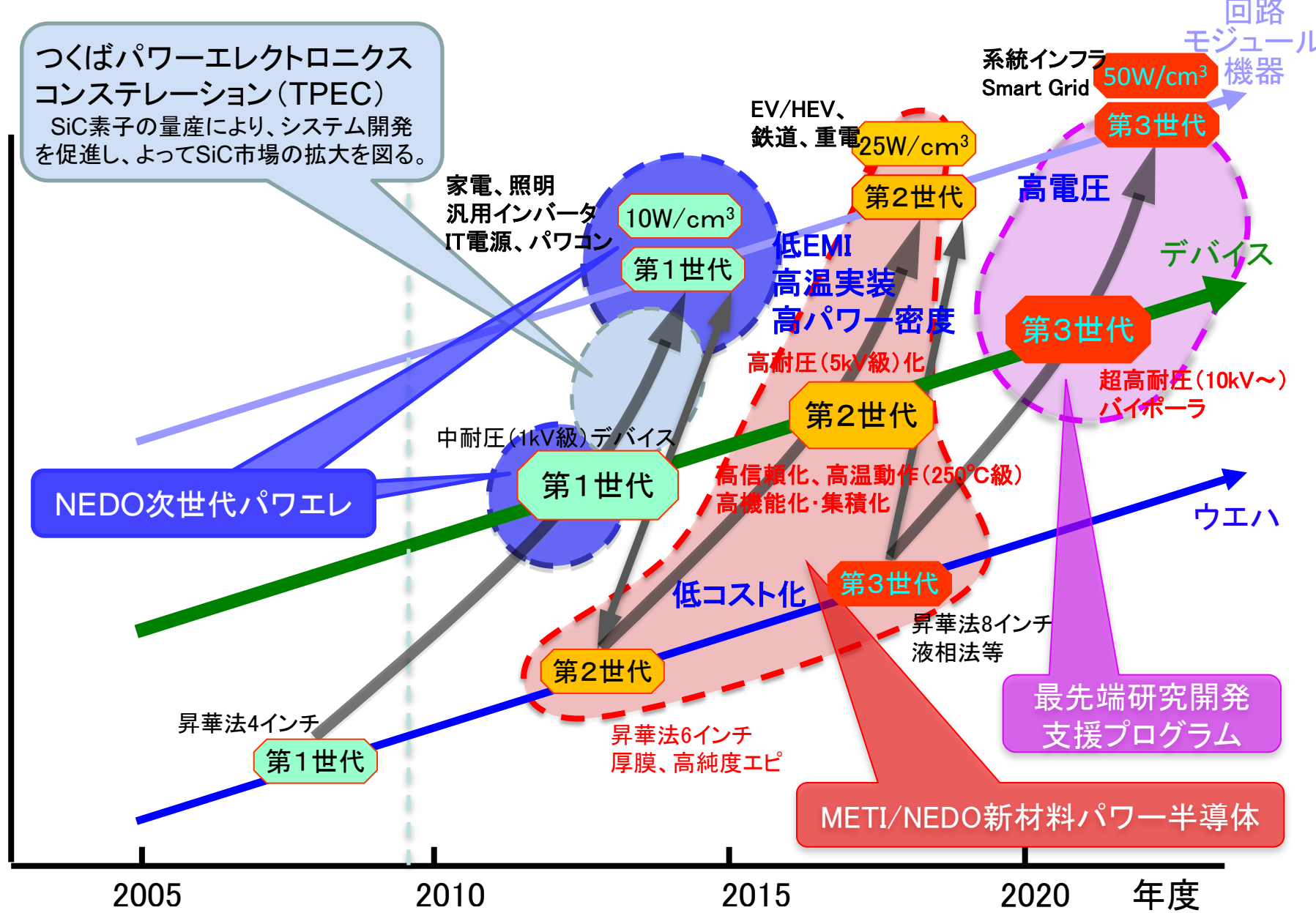
性能(口径、高効率、高パワー密度、高機能、等)

つくばパワーエレクトロニクス
コンステレーション(TPEC)
SiC素子の量産により、システム開発
を促進し、よってSiC市場の拡大を図る。

NEDO次世代パワエレ

METI/NEDO新材料パワー半導体

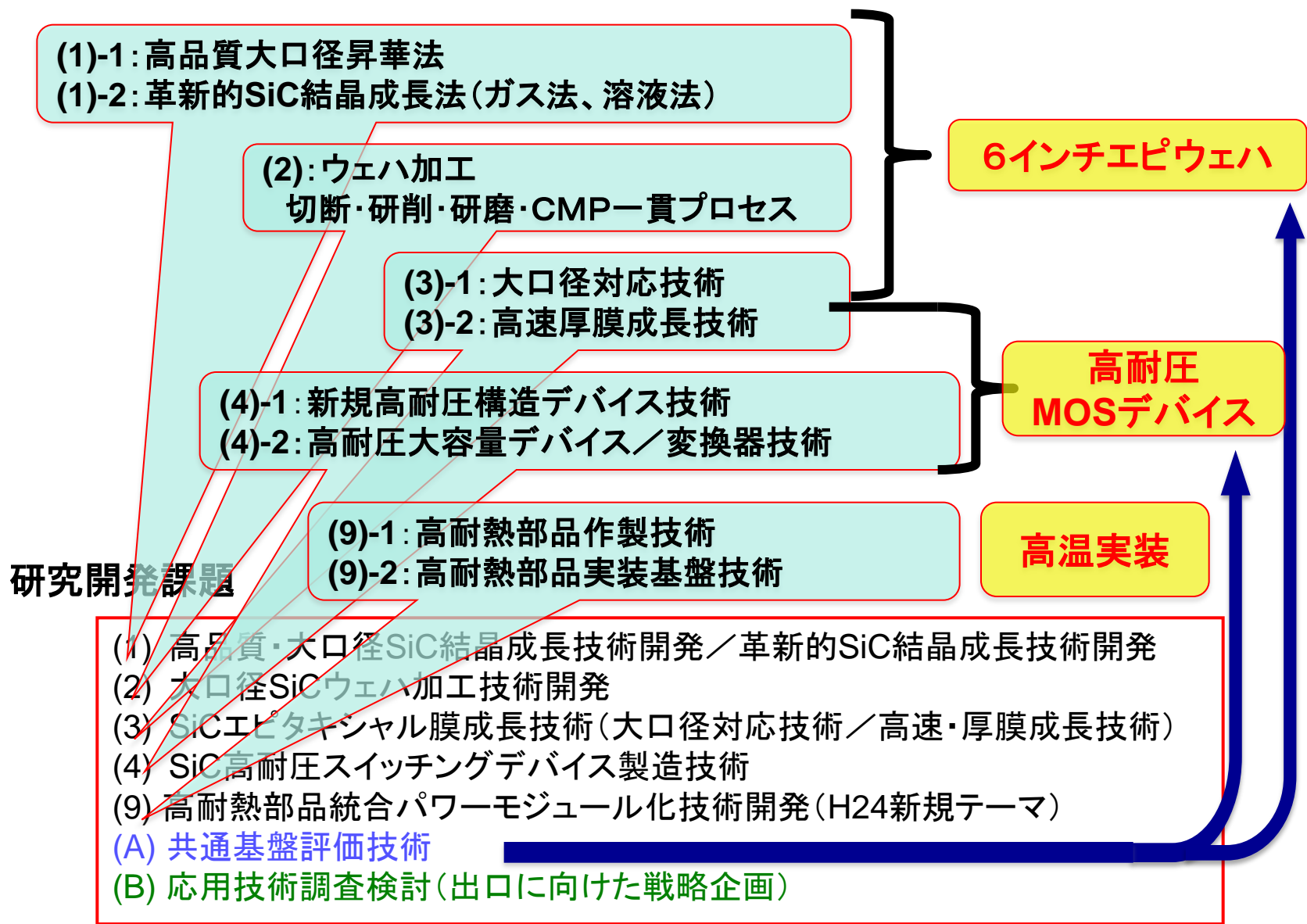
最先端研究開発
支援プログラム



3. 研究開発成果概要 (0) 課題と取り組み方

(3) 基本計画と研究開発課題

基本計画と研究開発サブテーマ



個別研究開発項目の狙いと最終目標

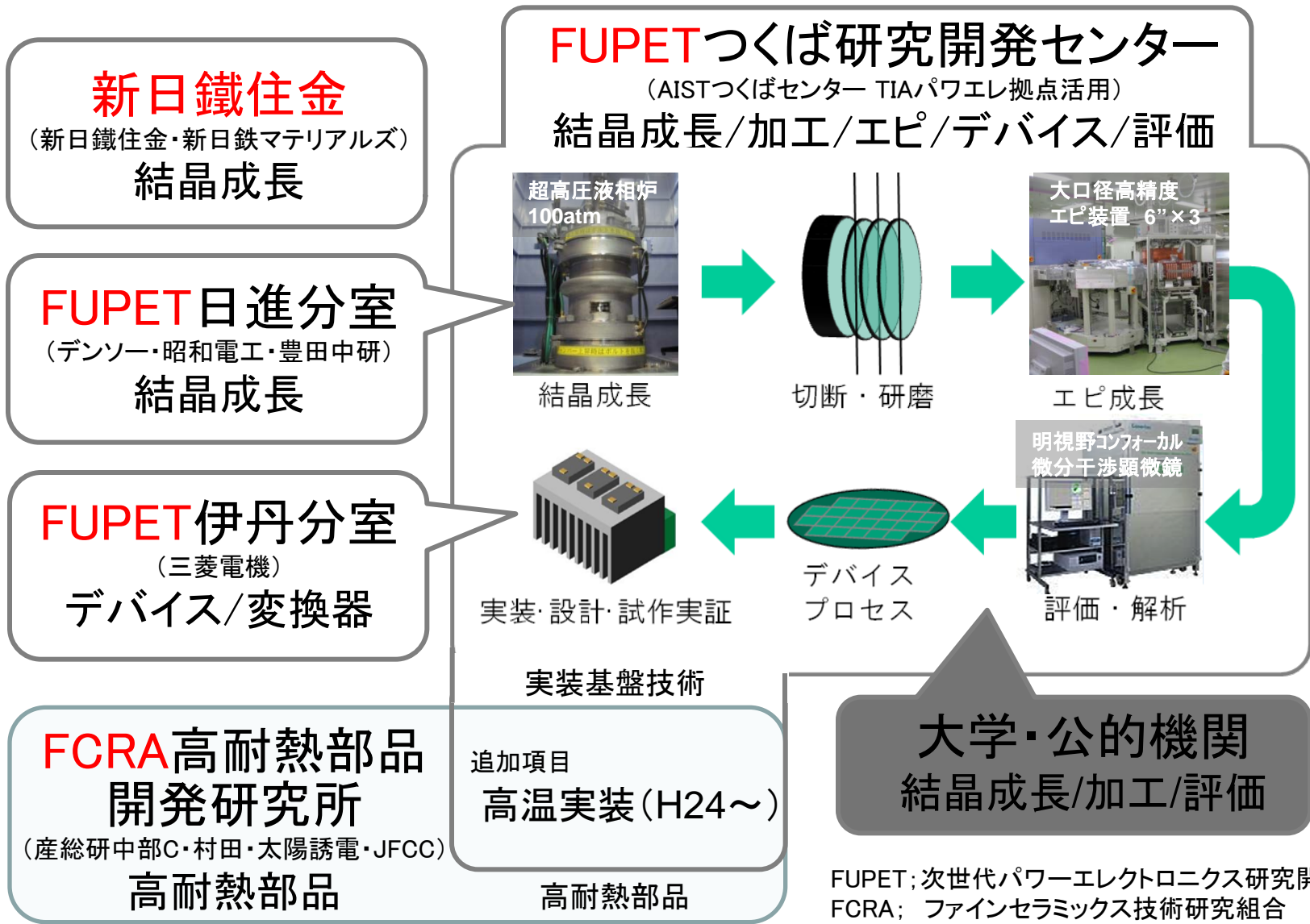
(4) 基本計画目標

テーマ		狙い	実施項目名	最終目標	
結晶成長	昇華法	大口径ウエハの 早期実現	(1)-1 高品質・大口径SiC結晶成長技術開発	6" × 50mm以上で ・DD ≤ 1 × 10 ³ 個/cm ² ・GR ≥ 500 μm/h、DD ≤ 5 × 10 ³ 個/cm ²	
	革新的成長法 (ガス法、溶液法)	高品質・低コスト化	(1)-2 革新的SiC結晶成長技術開発	2" × 20mm以上の4H-SiC単結晶実現 昇華法に対する優位性を検証	
加工	トータル最適化	効率: 3日/枚 ⇒ 24hr/枚	(2) 大口径SiCウエハ加工技術開発	@6" ・切断速度 ≥ 300um/分 × 10枚、 ・切り代 ≤ 250um、・Rms ≤ 0.1nm @2um [□] ・プロセス時間 < 24hr以内	
エピ成長	大口径	6インチエピウエハ 早期実現	(3)-1 SiCエピ膜成長技術 (大口径対応技術)	@6" × 3枚 ・均一度: 厚さ ± 5%、濃度 ± 10% ・品質: エピ起因表面欠陥密度 ≤ 0.5個/cm ²	
	厚膜・高速化	3. 3~5kV用 (高速鉄道、系統) 方式検討 ⇒ 設備開発導入 (ハライド、ガスフロー制御)	(3)-2 SiCエピ膜成長技術 (高速・厚膜成長技術)	@4"、膜厚 ≥ 50um、成長速度 ≥ 100um/h ・純度: 残留キャリア濃度 ≤ 3 × 10 ¹⁴ /cm ³ ・均一度: 厚さ ± 2%、濃度 ± 10% ・品質: エピ起因表面欠陥密度 ≤ 1個/cm ²	
デバイス	高耐圧デバイス	プレーナ	現行要素技術を集積し高耐圧化 AIST独自構造	(4)-1 SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術 (新規耐圧構造デバイス)	・耐圧 ≥ 3kV、RonA ≤ 15mΩ cm ² の高耐圧SiC-MOSFET
		トレンチ			
	大容量変換器	3~5kV級実用化	(4)-2 大容量デバイス/変換器	・耐圧 ≥ 3kV、Ron ≤ 80mΩ (RT)、 出力 ≥ 100A/cm²の高耐圧SiC-MOSFET、MVA級電力変換器損失 ≤ 50% (vs.Si) を実証	
高耐熱パワーモジュール	部品	高耐熱部品開発	(9)-1 高耐熱部品作製技術	抵抗、コンデンサ、放熱基板、配線基板@250°C	
	部品実装	高耐熱部品の実装可能性	(9)-2 高耐熱部品実装基盤技術	高温動作 (225°C以上) するSiCパワー素子近傍に新規開発部品を配置したパワーモジュールで 各実装部品間の相互の影響を検証	
評価	一貫評価	結晶 ⇄ 加工 ⇄ エピ ⇄ デバイス 座標共通化してシステム構築	(10) 共通基盤評価技術	一貫評価システム構築 ・結晶品質と加工、・加工とエピ膜質 ・エピ膜質とTEG歩留りの 相関明確化 ・TEG評価手法と欠陥評価手法確立	

3. 研究開発成果概要 (0) 課題と取り組み方

(5) 研究開発実施体制

研究開発の実施参画者と実施体制



FUPET; 次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構
FCRA; ファインセラミックス技術研究組合

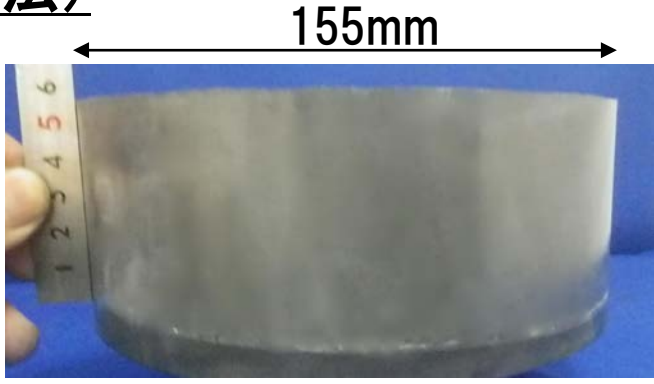
主要成果; 項目(1)-1

(6) 主要成果

(1)-1 SiC 6インチ高品質結晶成長技術(昇華法)

SiCインゴットの6インチ化実現

- 長尺: 50mm
- 高品質: 転位密度 $\leq 1000/cm^2$
- 高速成長: $\geq 500 \mu m/h$



成長結晶写真

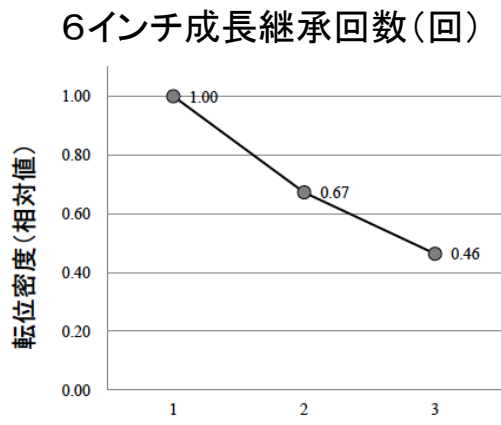
~6インチSiCウェハの実現~

2011.12.06: 新日鉄プレスリリース

国内初の6インチ実現
(富津分室)

2012.08.23: デンソープレスリリース

世界最高品質*6インチ実証
(日進分室)



実現されたRAF種結晶成長インゴットの転位密度

転位種	密度(個/cm ²)
総数	863
貫通螺旋転位	296
貫通刃状転位	511
基底面転位	56

高品質6インチウェハの低コスト化に見通し

(1)-2 革新的高品質結晶成長技術

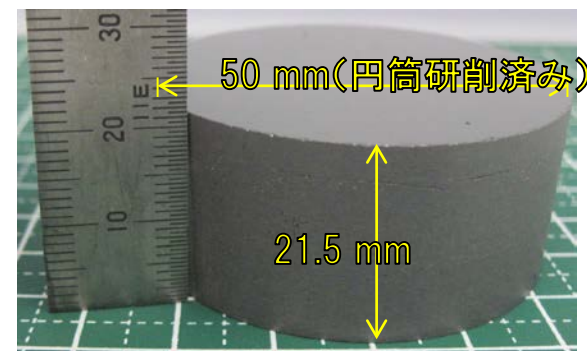
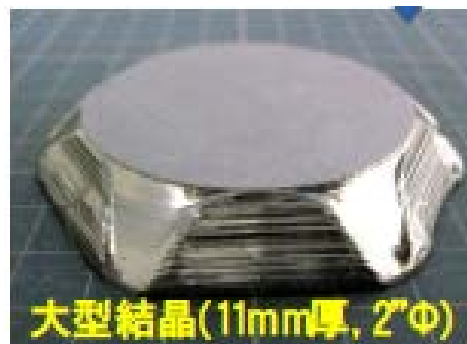
- ・ 第3世代技術として
高速低欠陥が期待される
ガス成長、液相成長(非昇華法)

ガス法



- 4インチ、43mm
- 成長速度: 3.6mm/h

溶液法



- Al, Nの同時添加でp, n両伝導型の制御
- 拡大成長部で超低欠陥化

高品質低コスト化のための新規成長技術としてのポテンシャル実証

主要成果; 項目(2)

(2) 大口径SiCウェハ加工技術

- 大口径対応新規ウェハ加工要素プロセスの高度化
- 一貫加工プロセスとしての高効率化

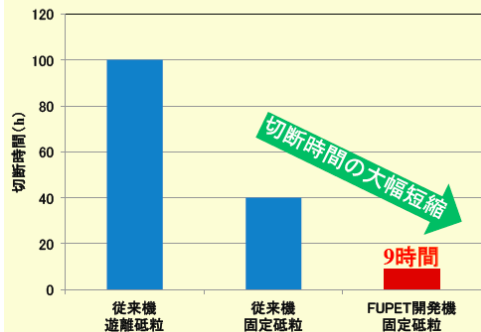
～高効率ウェハ加工一貫プロセス～

切断・研削・粗研磨・CMPの統合プロセス: 高速/高品位/高精度

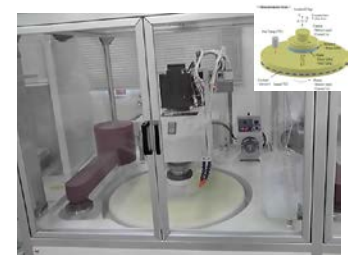
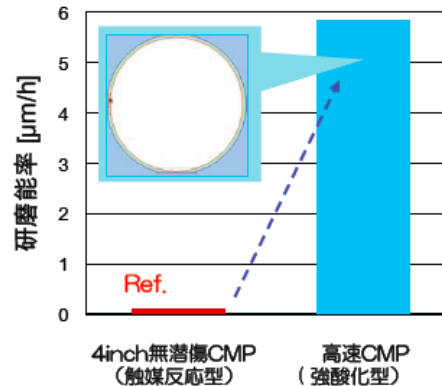
各工程の効率向上とその最適組み合わせで
 6インチ一貫加工工程: **9.7H**を実現

切断(9h) + 中間工程[研削・研磨](20min以内) + CMP(約20min)

6インチインゴットの切断時間の比較



マルチワイヤーソーで
 線速3000m/minを実現



6μm/hの無潜傷
 高速CMP

高品質6インチウェハの低コスト化に見通し

主要成果; 項目(3)

(6) 主要成果

(3) SiCエピタキシャル膜成長技術

- 大口径対応成長技術(6インチ) ← パワーデバイスのドリフト層形成
- 高速厚膜成長技術(100μm/h)

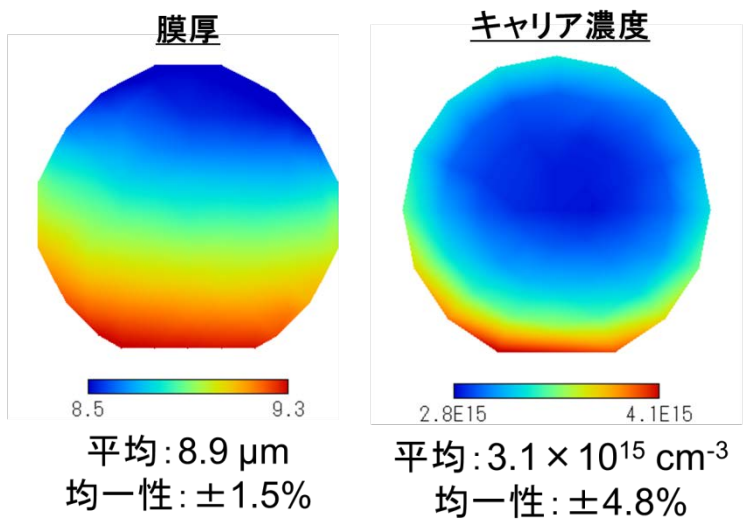
ポイント

- 大口径均一性(膜厚、ドーピング濃度)
- スループット
- 表面欠陥、界面転位
- 基板種(Si面、C面、8°-off, 4°-off, 2°-off, 微傾斜)

成長パラメータ ⇔ 諸特性の両立

	成長温度	成長圧力	水素流量	C/Si比
欠陥密度	→	↙	↘	↙
均一性	→	↙ ↘	↙ ↘	↙ ↘
ステップバンチング	←	→	→	↙

4インチ微傾斜基板の成果

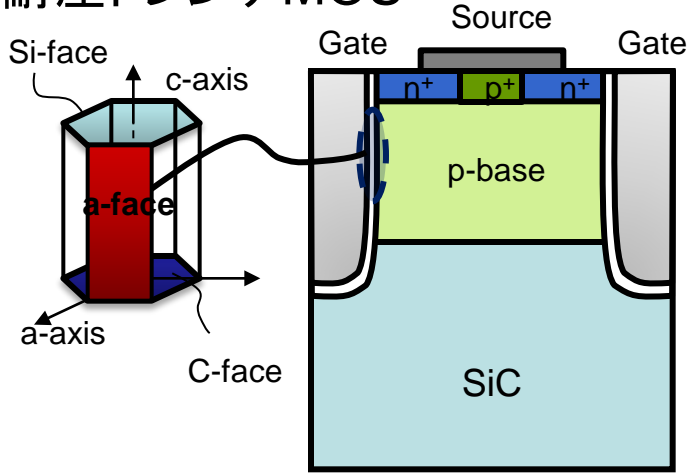


主要成果; 項目(4)-1

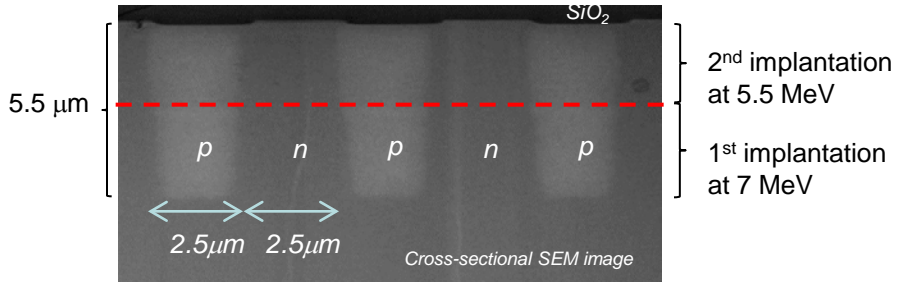
(6) 主要成果

(4)-1 SiC 高耐圧パワー-MOSFET技術

• 高耐圧トレンチMOS

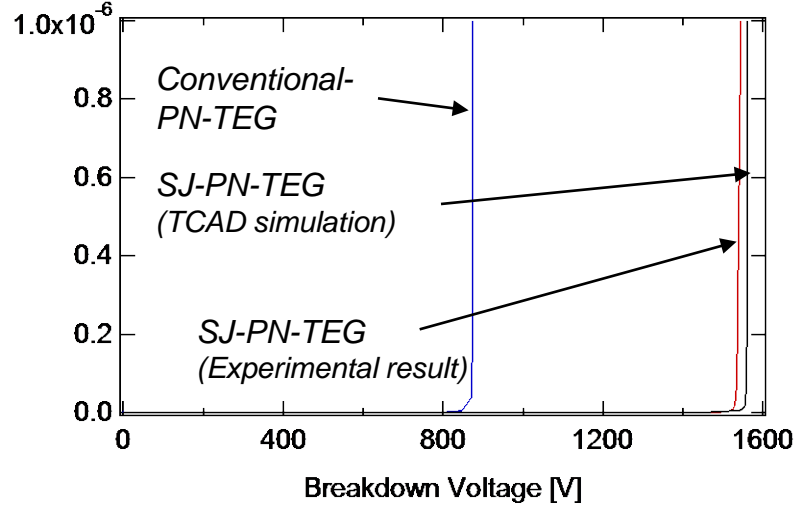
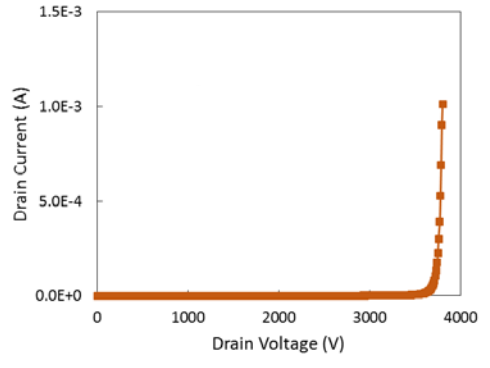
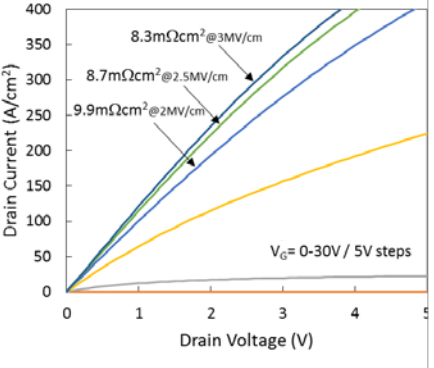


• スーパー Junction構造



特性オン抵抗: $8.3\text{m}\Omega\text{cm}^2$

耐圧: 3800V



Best Paper Award@ISPSD2014

高耐圧領域でのSiC新規構造デバイスのポテンシャル実証

主要成果; 項目(4)-2

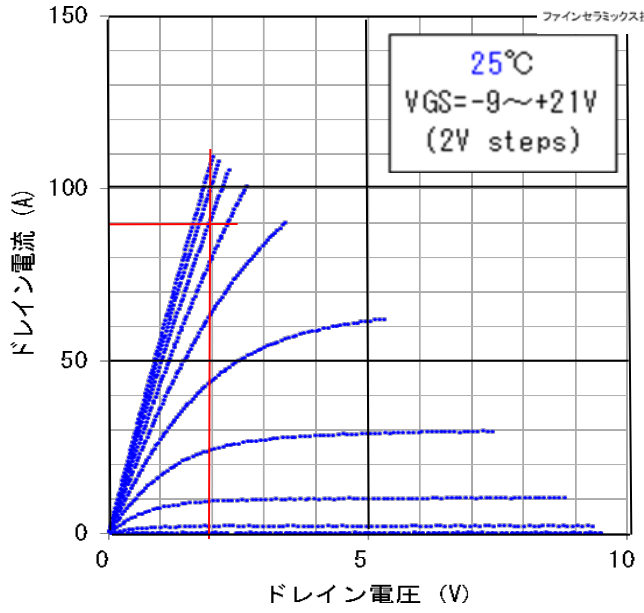
(4)-2 SiC 高耐圧パワーMOSFET技術

- 大容量高耐圧MOS

$V_{ds}=2V$ で約80A (@ $V_{gs}=15V$) の通電を実現
 ($R_{on}=23m\Omega$)



小田急電鉄株式会社1000形車両



入力電圧	直流1500V
主回路方式	大容量フルSiCパワーモジュール適用 2レベル方式VVVFインバーター(PWM方式、電力回生ブレーキ付き)
制御方式	190kWモーター×4台並列制御×2群
冷却方式	走行風自冷方式

2014年4月30日
 三菱電機HP

三菱電機株式会社は、小田急電鉄株式会社1000形更新車両に、直流1500V架線対応の「フルSiC適用VVVFインバーター装置」が採用されました…….3.3kV/1500A定格対応の大容量フルSiCパワーモジュールを適用した鉄道車両用インバーター装置の採用は、世界で初めてです。
 ……1000形(4両)の1編成に搭載され、各種走行試験を実施の上、12月から営業運転に使用される予定です。…….

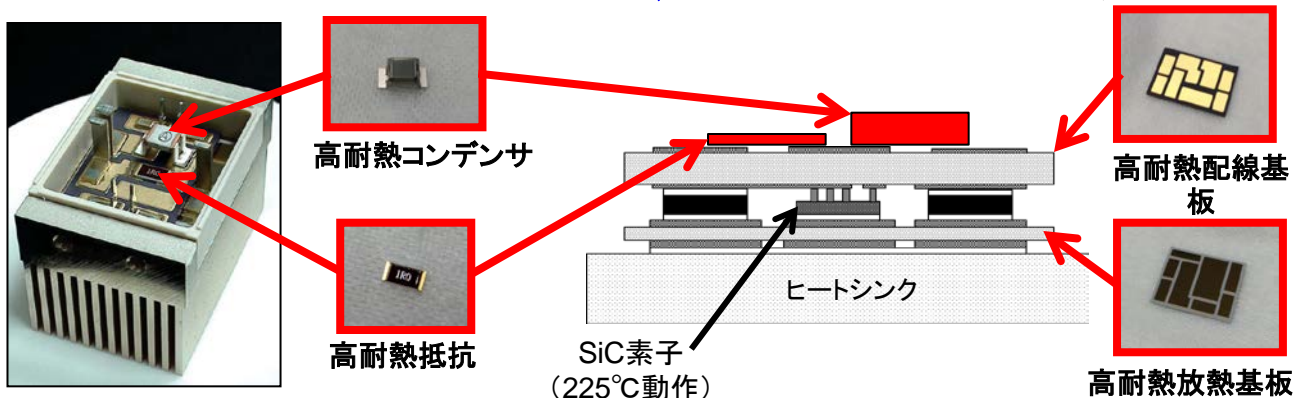
高耐圧SiCデバイスのシステム実装

主要成果; 項目(9)

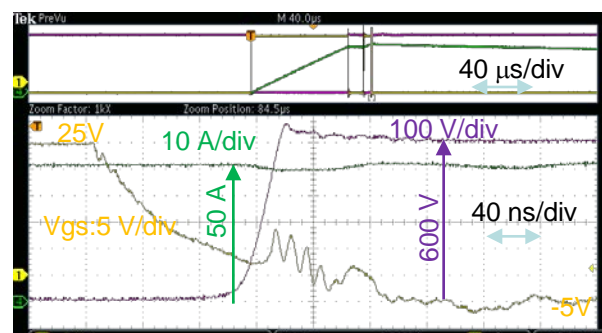
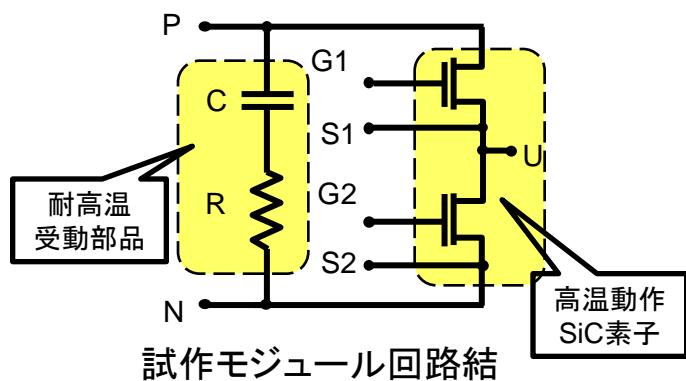
(6) 主要成果

(9) 高耐熱部品統合パワーモジュール化技術開発

- 高耐熱部品の開発
- SiC素子の近傍に**高耐熱部品を実装**する技術(立体実装)



試作した受動部品混載形高温動作モジュール(1.2kV-50A、最大接合温度250°C)



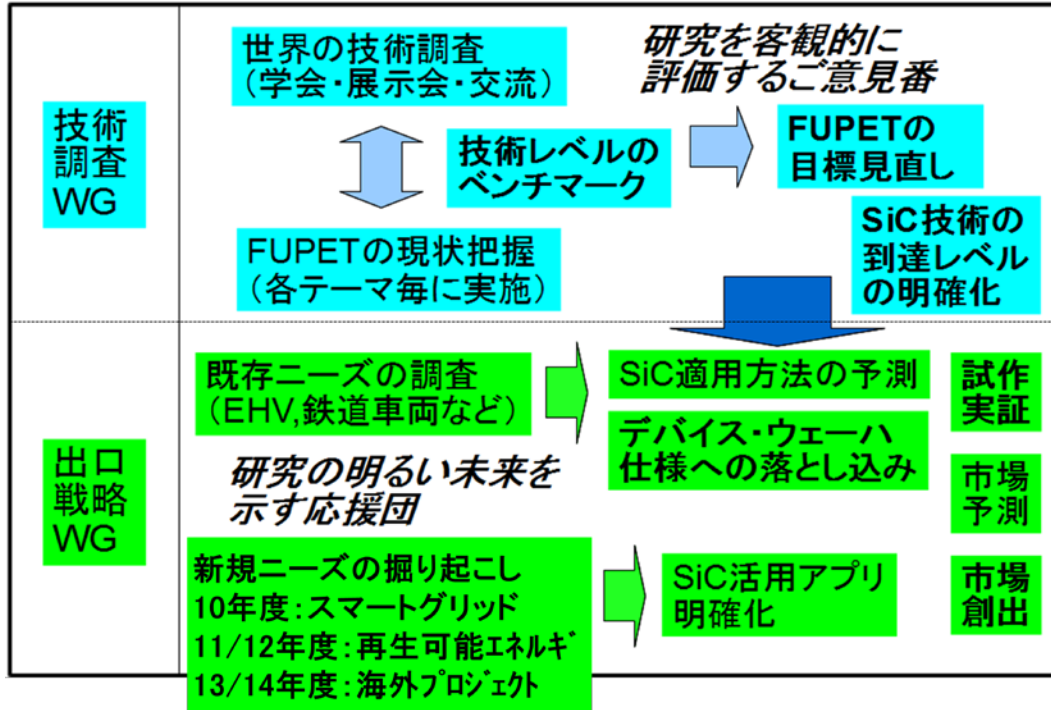
225°Cホットプレート上で50Aスイッチング動作を確認

耐熱部品を用いた高温実装技術の可能性実証

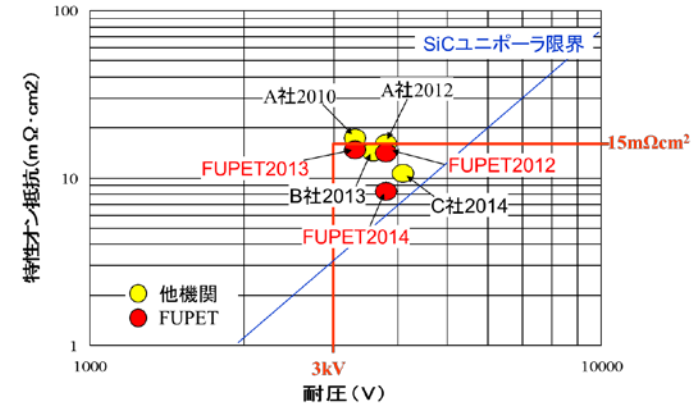
主要成果; 項目(B)

(6) 主要成果

(B) 応用技術調査検討



ベンチマーク例: デバイス



オールSiCカー



- プロジェクト期間の5年間を通じて活動を行うことにより、
1. 技術のベンチマークを実施し、目標を適切に見直し
 2. 学会報告の調査などにより、到達レベルの明確化
 3. SiCのニーズを明確にし、ニーズに向けた開発加速
 4. 市場の活性化に向け、公道走行車デモなどを実施

研究項目		最終目標	達成度
結晶成長技術 ①、⑤	高品質・大口径SiC 結晶成長技術開発	口径6インチ、長さ50mm以上で有効面積(端部3mmを除く)全域において、 ・転位密度 1×10^3 個/cm ² 以下の結晶を実現 ・転位密度 5×10^3 個/cm ² 以下の結晶を成長速度0.5mm/h以上で実現	高品質化:達成 高速化:達成
	革新的SiC結晶成長 技術開発	口径2インチ、厚さ20mm以上の4H-SiC単結晶を実現した上で、昇華法に対する優位性を検証	ガス法:達成 溶液法:達成
ウェハ加工技術 ②、⑥		6インチ結晶/ウエハを対象に、以下の効率性を実現 ・切断:速度300 μ m/分以上、同時切断枚数10枚以上、切り代250 μ m以下 ・インゴットから表面仕上げ精度Rms(表面荒さ)0.1nm @2 μ m \times 2 μ mのベアウエハを実現する統合加工プロセスとして、プロセス時間24時間以内	効率・品質とも達成
エピタキシャル 成長技術 ③	大口径対応技術	口径:6インチ、処理枚数:3枚以上のエピタキシャル膜に対し、以下を実現 ・均一性:厚さ $\pm 5\%$ 、ドーピング濃度 $\pm 10\%$ ・品質:エピ成長起因表面欠陥密度:0.5個/cm ² 以下	均一性・品質とも達成
	高速・厚膜成長技術	口径4インチ、成長速度100 μ m/h以上、膜厚50 μ mの膜で、以下を実現 ・残留キャリア濃度: 3×10^{14} cm ⁻³ 以下 ・表面欠陥密度:1.0 cm ⁻² 以下 ・膜厚均一性: $\pm 2\%$ 以内 ・ドナー濃度均一性: $\pm 10\%$ 以内	品質・均一性とも達成

研究項目		最終目標	達成度
デバイス技術 ④、⑦	新規耐圧構造デバイス	必要な各種要素技術を高度化し、耐圧:3kV以上で特性オン抵抗:15mΩ cm ² 以下の高耐圧SiC-MOSFETを実現する。	達成
	高耐圧大容量デバイス	耐圧:3kV以上、オン抵抗80mΩ以下(室温環境下)、定格出力電流密度100A/cm ² 以上の高耐圧SiC-MOSFETを開発し、当該デバイスを用いたMVA級電力変換器を試作して、その動作時の電力損失が同耐圧のSi電力変換器の50%以下であることを実証する。	達成
装置技術 ⑧	イオン注入装置	<ul style="list-style-type: none"> ・低温から800°Cまでの全領域でのイオン注入 ・温度均一性:6インチ面内:±15°C ・Al注入イオン電流:200 μA上 	達成
	活性化熱処理装置	<ul style="list-style-type: none"> ・熱処理温度:1,800°C以上 ・温度均一性:6インチ面内:±30°C ・一度に25枚以上処理可能なこと 	達成
共通基盤評価技術 (A)		SiCベアウェハからMOSキャパシタまでの各種評価データを統合したSiC統合評価プラットフォームを具体的に構築し信頼性評価手法としての有効性を示す。 (自主目標)	達成

研究開発目標の達成度(3)

研究項目	最終目標	達成度	
高耐熱パワーモジュール ⑨ (つづき)	高耐熱コンデンサ	<ul style="list-style-type: none"> ・250°C耐熱、0.1 μF、1 kV級、体積40 mm³以下 ・共振周波数10 MHz級 ・-40~250°Cの容量変動が± 10 %以下 	高比抵抗材料系・複合ペロブスカイト材料系とも達成
	高耐熱抵抗	<ul style="list-style-type: none"> 250°C耐熱、10 Ω 級、1W級の抵抗体において、 ・-40~250°Cの抵抗値変動が± 10%以下 ・10 MHzまでの周波数の抵抗値変動が± 10%以下 ・体積20 mm³以下(例えば、6.3×3.1×1 mm) 	材料・プロセス、抵抗器とも達成
	メタライズ放熱基板	<ul style="list-style-type: none"> ・熱伝導率180W/(m·K)以上、曲げ強度600MPa以上、破壊靱性6MPa·m^{1/2} 以上の絶縁素材 ・サイズ5000mm²以上の薄板基板製造プロセス ・サイズ5000mm²以上、厚み1/80 inch(0.32 mm)以下の両面メタライズ放熱基板 ・耐電圧1200V以上 ・-40~250°C耐ヒートサイクル1000回以上 	素材、製造プロセス、メタライズ技術とも達成
	配線基板	<ul style="list-style-type: none"> ・250°C耐熱 ・1200 V、50A級の通電が可能な内部配線 ・内部配線の位置精度$\pm 20 \mu$m以下 	ビアアレイ配線方式・肉厚内層配線方式とも達成
	実装基盤技術	<ul style="list-style-type: none"> ・225°C以上動作のSiCパワー素子近傍に、新規開発の高耐熱受動素子を配置したパワーモジュールを試作し、実装部品間の相互影響を検証する。 ・試作パワーモジュールの評価を通じ、高温動作の課題抽出と、解決の見通しを示す。 	部品間相互干渉の検証、課題抽出と解決策提示とも達成

いずれの項目も最終目標を達成し、SiCの社会実装を加速
 — 6インチライン製造、鉄道・自動車への実装、性能最大化PM*の方向性提示 —

知財権 及び 成果発表

☆研究開発項目(8)デバイスプロセス装置開発を除く総合計

	H22	H23	H24	H25	H26	計
特許出願(うち外国出願)	1(0)	16(0)	47(16)	43(10)	28(5)	135(31) 件
[レシピ登録]					16	16件
論文(査読付き)	2	14	18	44	46	124件
研究発表・講演	10	58	101	129	134	432件
受賞実績	0	0	1	0	5	6件
新聞・雑誌等への掲載	0	1	4	5	5	15件
展示会への出展	0	3	4	2	3	12件

※ : 平成27年5月28日現在

(1) つくば集中研

プロジェクト参画企業による自社への持ち帰り

- 要素技術
- 典型例は加工技術

TIA-nano、並びにTPECの活用

- 一貫技術
- 産業技術開発拠点としてのTIA-nano*
- 異業種連携による共同研究連合体としてのTPEC*

新しい実用化促進
スキーム
(オープンイノベーション)

(2) 分室／助成事業

プロジェクトにおけるR&D設備の迅速な事業化活用

実用化促進のための助成

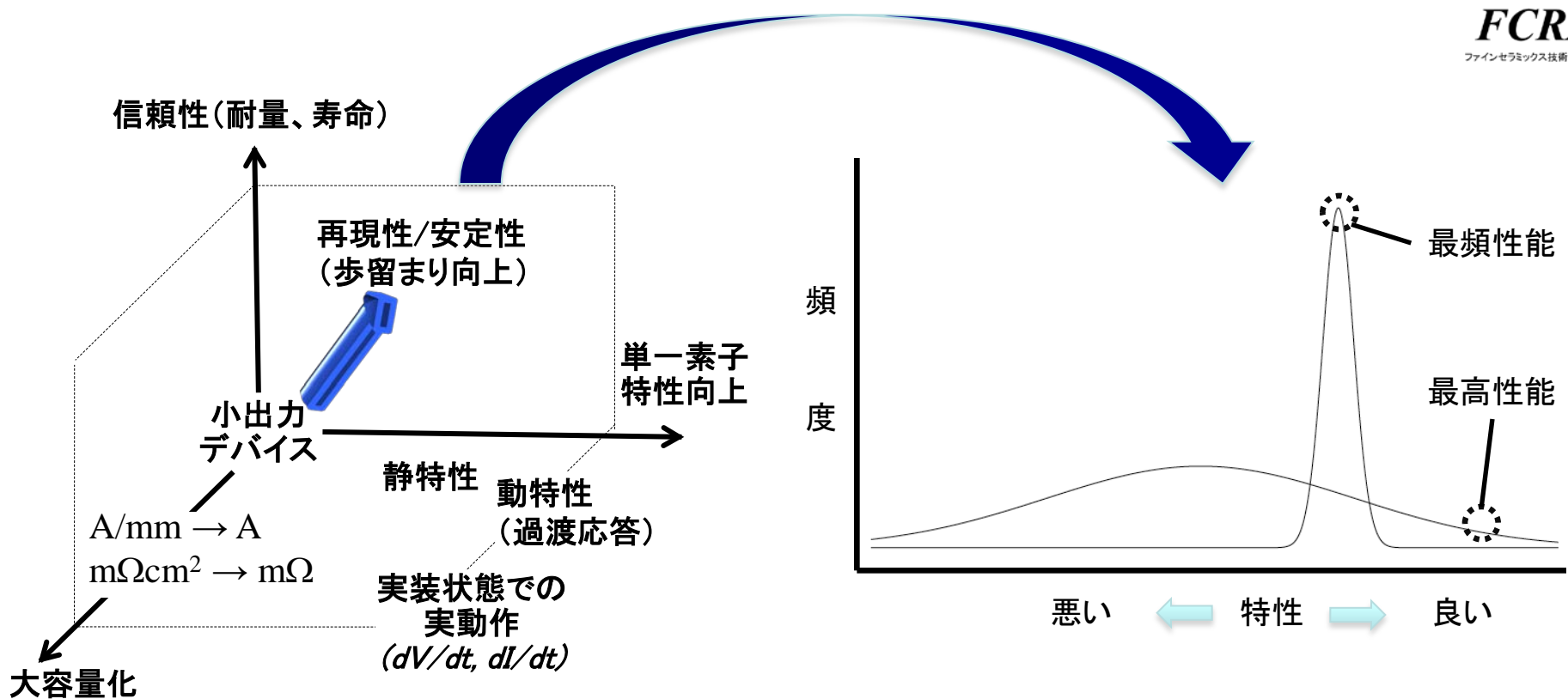
事業部隊の参画と具体的事業化計画立案

早期実用化に
目処
(特にウエハ)

* TIA-nano : Tsukuba Innovation Arena

TPEC : Tsukuba Power Electronics Constellations

「橋渡し」研究とオープンイノベーション



SiCデバイス専用試作ライン@つくば



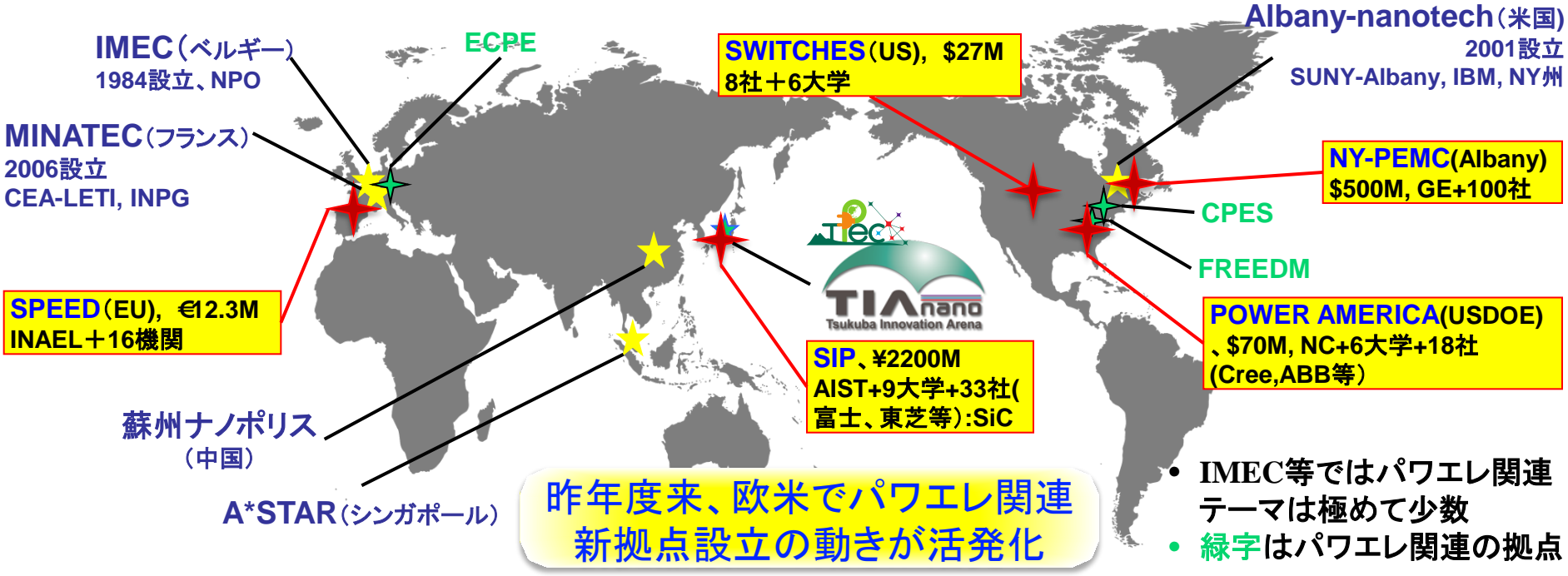
国プロ後の
 適用先に応じた
 技術最適化開発の必要性

オープンイノベーションで
 規模を担保、リスクを共有
 (死の谷の克服)

・ SiC関連技術の産業界への
 橋渡し機能のコア施設

世界のナノテク拠点とTIA

- ・日本経済・産業の行き詰まり **一技術の複雑化、複合化一**
- ・**オープンイノベーション**に応える研究開発体制への取組み



2009年6月 TIA-nano共同宣言

世界水準の先端ナノテク研究設備・人材が集積するつくばにおいて、産業技術総合研究所（産総研）、物質・材料研究機構（NIMS）、筑波大学が中核となって世界的なナノテク研究拠点形成を目指す。

先行する海外拠点に先駆けて、
パワエレ関連拠点を構築



1970年代からのSiC半導体
関連研究開発の実績

日本型オープンイノベーション・パワーエレ開発拠点

産業変革研究イニシアティブ (H20～H23 FY)

- 企業との大型共同研究
- SiCデバイス専用の量産試作ラインの構築

プラットフォームとしての
SiCデバイス試作用の

TIA-nanoの活用
既設コア施設に立脚

国家プロジェクト

- 次世代パワーエレクトロニクス
- 最先端研究開発支援プログラム
- 新材料パワー半導体

つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション(TPEC) (H24 FY～)

- 企業との大型共同研究コンソーシアム
- パワーエレクトロニクスのためのオープン/ラディカルイノベーション
- アカデミアを含めたつくばにおけるR&Dハブ / 拠点の確立

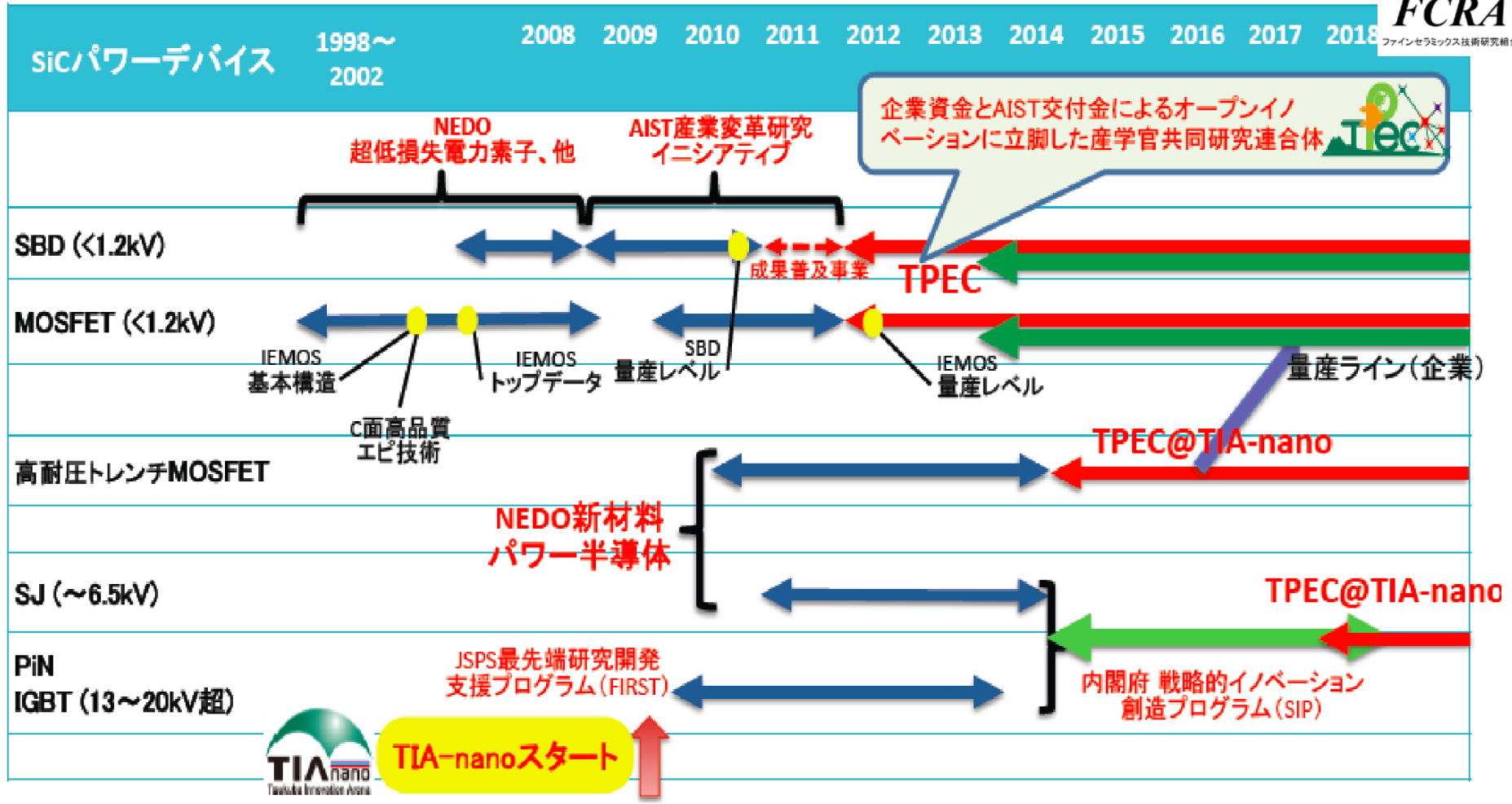
◇参画者のメリット:

- ①コストシェアによる技術開発コスト削減、リスク低減
- ②オープンキャンパス化による研究人件費の低減
- ③共通インフラ、基礎基盤技術開発への国の投資・支援
- ④知財の相互利用

研究開発, 技能養成,
知識の獲得
ビジネスモデル構築

4. 実用化・事業化の見通し

TPECを活用した成果実用化への中期的展望



目的基礎



橋渡し



実用化