

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 中間評価

“プロジェクト全体計画と研究開発成果概要” (公開版)

2012.8.24

プロジェクトリーダー 奥村 元

発表内容

3. 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) 現在までの主要成果(進捗、知財、成果発表)

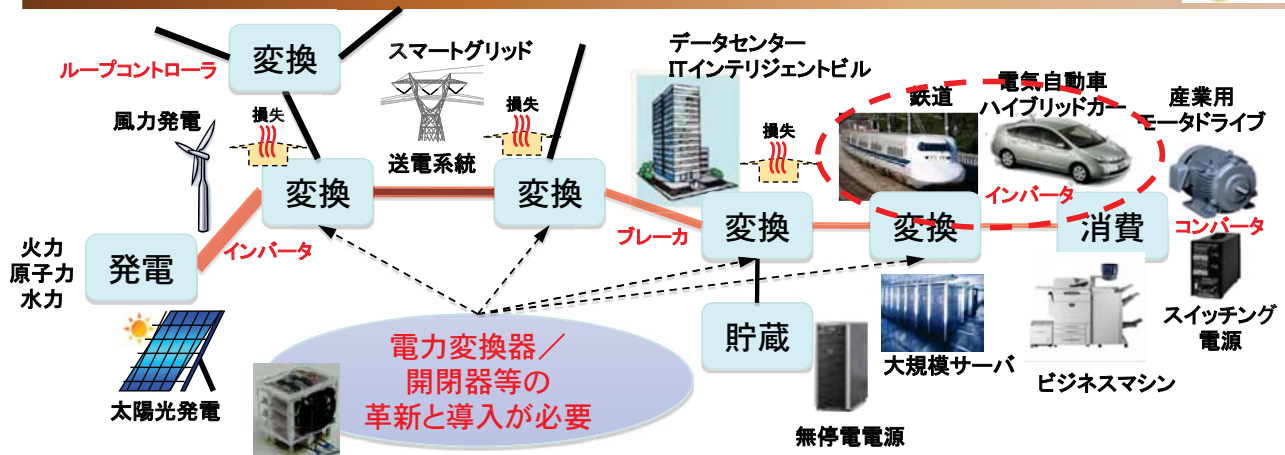
4. 実用化、事業化の見通し

- (1) つくば集中研
- (2) 分室

3. 研究開発成果概要

(1) 背景と技術課題

電力エネルギーの流れとパワーエレクトロニクス



- 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。

3. 研究開発成果概要

(1) 背景と技術課題

プロジェクトの対象技術課題



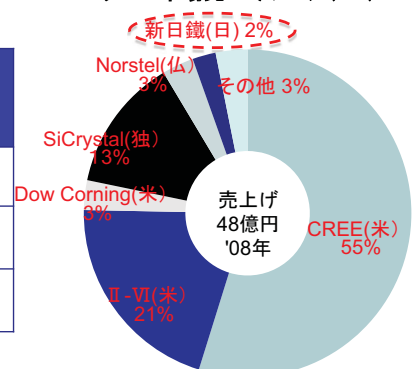
■ 本研究プロジェクトの対象技術課題と終了時の技術レベル

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~1000 /cm²、表面欠陥0.5 /cm²以下、平坦度:0.1nm@2μm□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
 - 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

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 (< 2kV素子)	耐圧vs.オン抵抗 (> 3kV素子)
日本	◎	△	◎	—
米国	○	◎	○	○
欧州	△	○	△	—

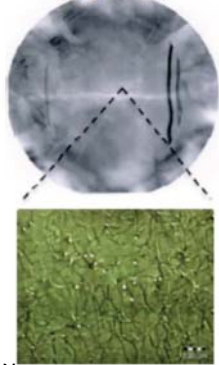
SiCウエハ市場売上上げシェア('08)



現状でのSiC結晶品質の比較

(X線トポグラフ)

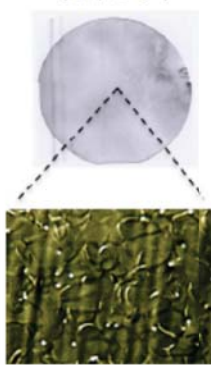
米国製市販品
(4インチ)



転位密度

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)

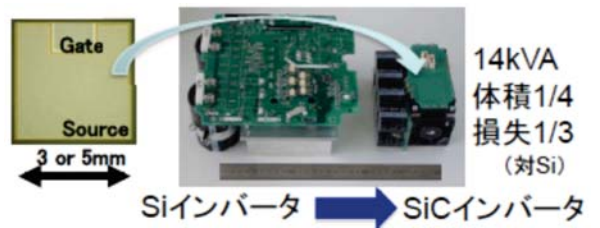


2,000/cm²

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



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

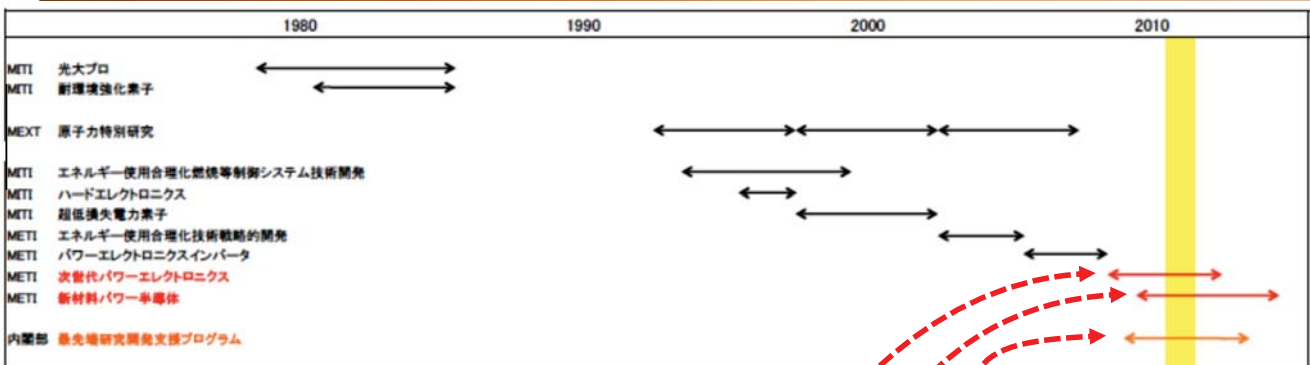
■ 終了後の研究開発等により最終的には、

- 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。

3. 研究開発成果概要

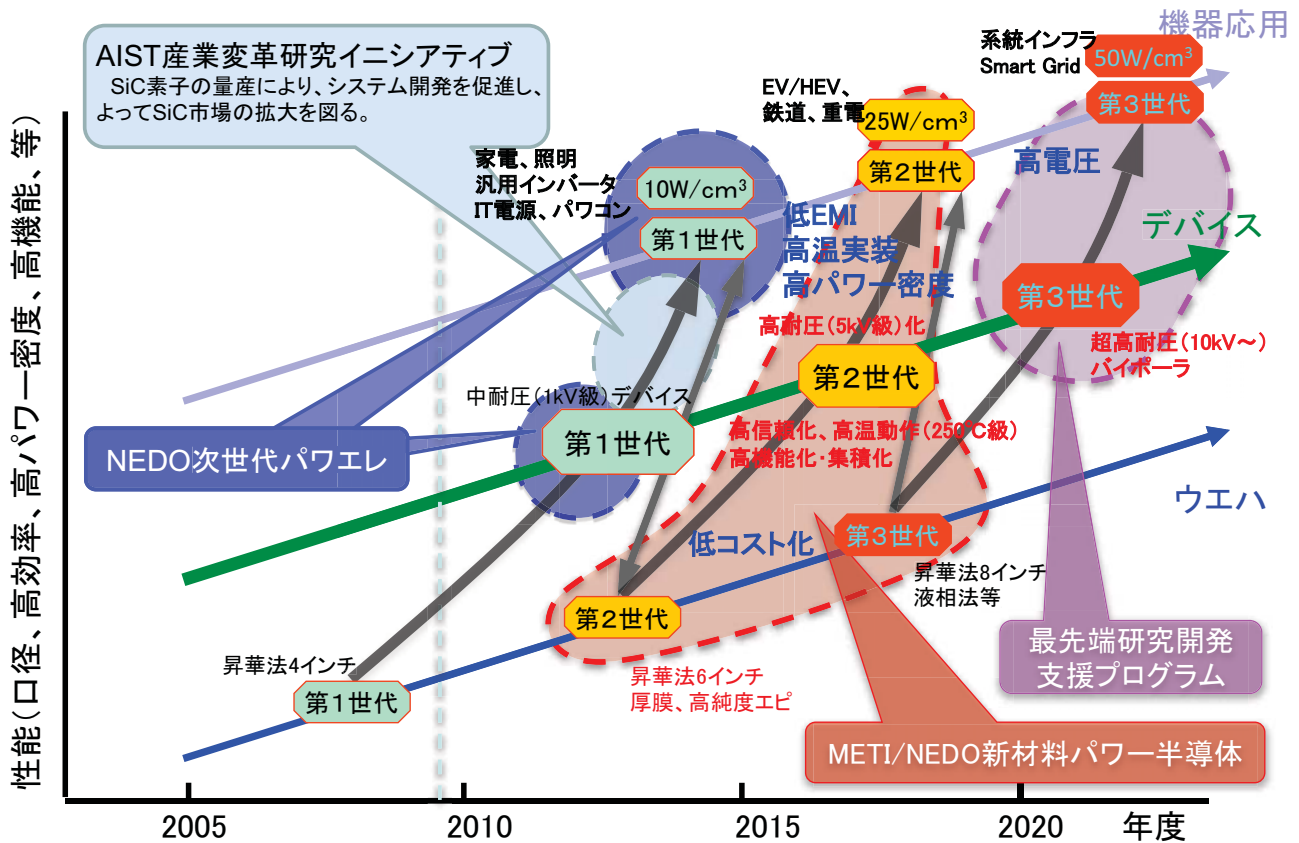
(2) 関連国家プロジェクトとの関係

SiC関連国プロの経緯



- ◆ 2008より、SiCパワエレ関連R&Dへの関心の高まり
 - 次世代パワエレ(グリーンIT)の立案
 - 秋期より補正予算案件
 - ◇ 複数ルートでSiCパワエレ関連のテーマが挙がる(経団連COCN:グリーンパワエレ、産総研)
 - エンドユーザからの国プロ要請
- ◆ 2009
 - 次世代パワエレ(グリーンIT)開始
 - 最先端研究開発支援プログラム採択と減額、年度末に開始
 - 新材料パワー半導体の立案(予算改要求)
- ◆ 2010
 - 新材料パワー半導体開始(次世代パワエレから移管されたデバイステーマ、ウェハテーマも含む)(2012から実装新規サブテーマの開始)

内閣府
最先端研究開発
支援プログラム
への提案



基本計画と研究開発課題

①高品質・大口徑SiC結晶成長技術開発／革新的SiC結晶成長技術開発(委託)

昇華法の抜本的な高度化のほか、飛躍的な品質や生産性の向上が期待される革新的な結晶成長技術(ガス法、液相法等)の開発を行う。また、大口徑・高品質SiC結晶の評価技術を開発する。

②大口徑SiCウエハ加工技術開発(委託)

切断、研削、研磨の各技術について、6インチウエハに対応した高精度化、高速化及び低コスト化に資する加工技術の開発を行う。

③SiCエピタキシャル膜成長技術(大口徑対応技術／高速・厚膜成長技術)(委託)

大面積で均一かつ低欠陥な膜を...成長できるエピタキシャル膜成長技術、及び厚膜を高均一・高純度かつ高速で成長できるエピタキシャル膜成長技術を開発する。また、その両者に対応した大口徑／厚膜SiCエピタキシャルウエハ評価技術を開発する。

④SiC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／高耐圧大容量デバイス)(委託)

3~5kV級の高耐圧かつ低損失なSiCスイッチングデバイスを製造するための新規耐圧構造の設計／作製技術、高耐圧デバイス酸化膜信頼性向上技術、限界性能向上技術、高耐圧デバイス実装技術、高耐圧デバイス評価技術、大容量電力変換器設計技術の開発を行う。

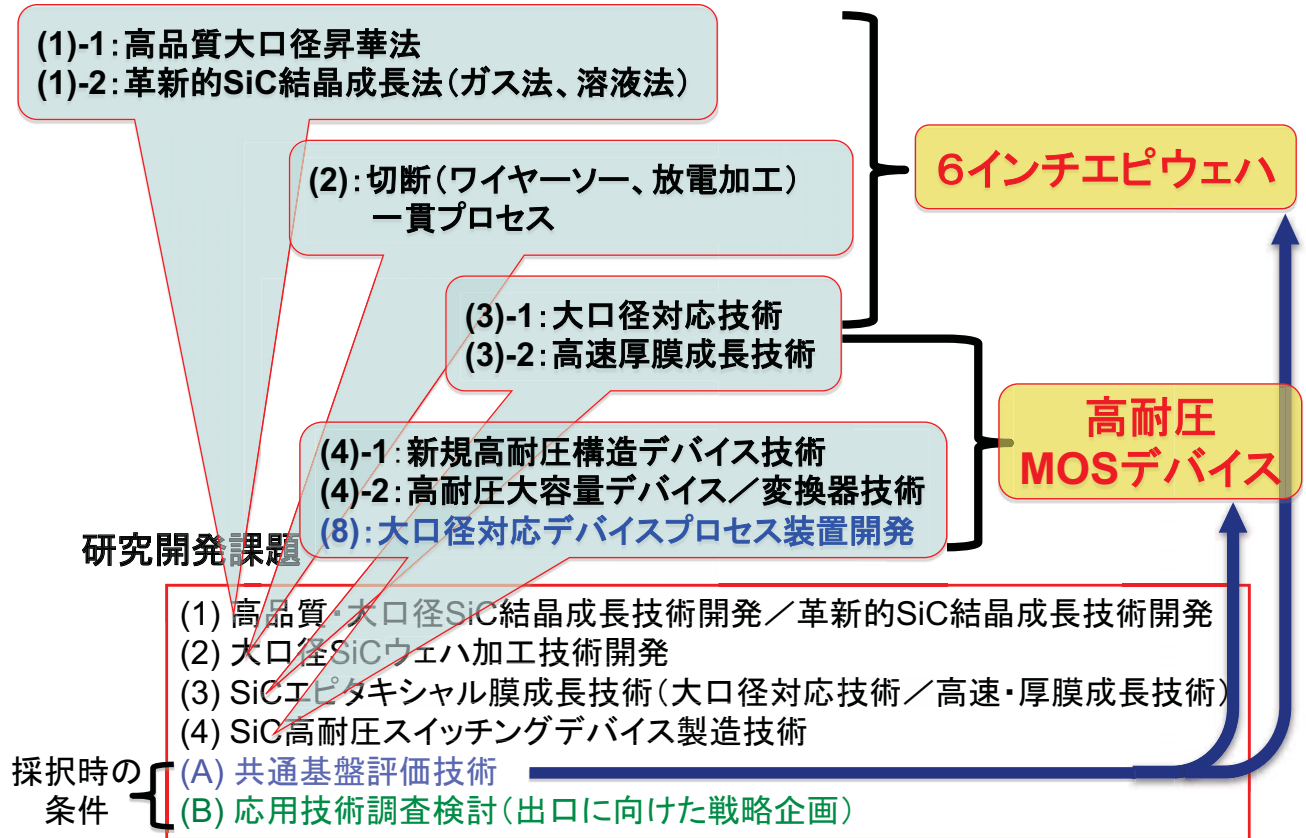
SiC半導体の研究機関のみならず、それを使用するユーザー企業(自動車、鉄道等)とも連携することによって、オールSiC電力変換器(ダイオード、スイッチングデバイスともにSiC半導体素子を用いた電力変換器)を用いたハイブリッド／電気自動車の試験走行やその鉄道用途級モーターへの試装着を行うなど出口を見据えた研究開発を行う体制とする。

研究開発課題

- (1) 高品質・大口徑SiC結晶成長技術開発／革新的SiC結晶成長技術開発
- (2) 大口徑SiCウエハ加工技術開発
- (3) SiCエピタキシャル膜成長技術(大口徑対応技術／高速・厚膜成長技術)
- (4) SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術

採択時の
条件

- (A) 共通基盤評価技術
- (B) 応用技術調査検討(出口に向けた戦略企画)



①高品質・大口径SiC結晶成長技術開発/革新的SiC結晶成長技術開発(委託)

昇華法の抜本的な高度化のほか、飛躍的な品質や生産性の向上が期待される革新的な結晶成長技術(ガス法、液相法等)の開発を行う。また、大口径・高品質SiC結晶の評価技術を開発する。

②大口径SiCウエハ加工技術開発(委託)

切断、研削、研磨の各技術について、6インチウエハに対応した高精度化、高速化及び低コスト化に資する加工技術の開発を行う。

③SiCエピタキシャル膜成長技術(大口径対応技術/高速・厚膜成長技術)(委託)

大面積で均一かつ低欠陥な膜を...成長できるエピタキシャル膜成長技術、及び厚膜を高均一・高純度かつ高速で成長できるエピタキシャル膜成長技術を開発する。また、その両者に対応した大口径/厚膜SiCエピタキシャルウエハ評価技術を開発する。

④SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術(委託)

3~5kV級の高耐圧かつ低損失なSiCスイッチングデバイスを製造するための新規耐圧構造の設計/作製技術、高耐圧デバイス酸化膜信頼性向上技術、限界性能向上技術、高耐圧デバイス実装技術、高耐圧デバイス評価技術、大容量電力変換器設計技術の開発を行う。

補正予算テーマ

⑤SiCウエハ量産化技術開発(助成)

昇華法をベースとした既存技術活用により、6インチ4H-SiCインゴットの実現と共に、その量産化に向けた課題抽出を進める。

⑥大口径SiCウエハ加工要素プロセス検証(委託)

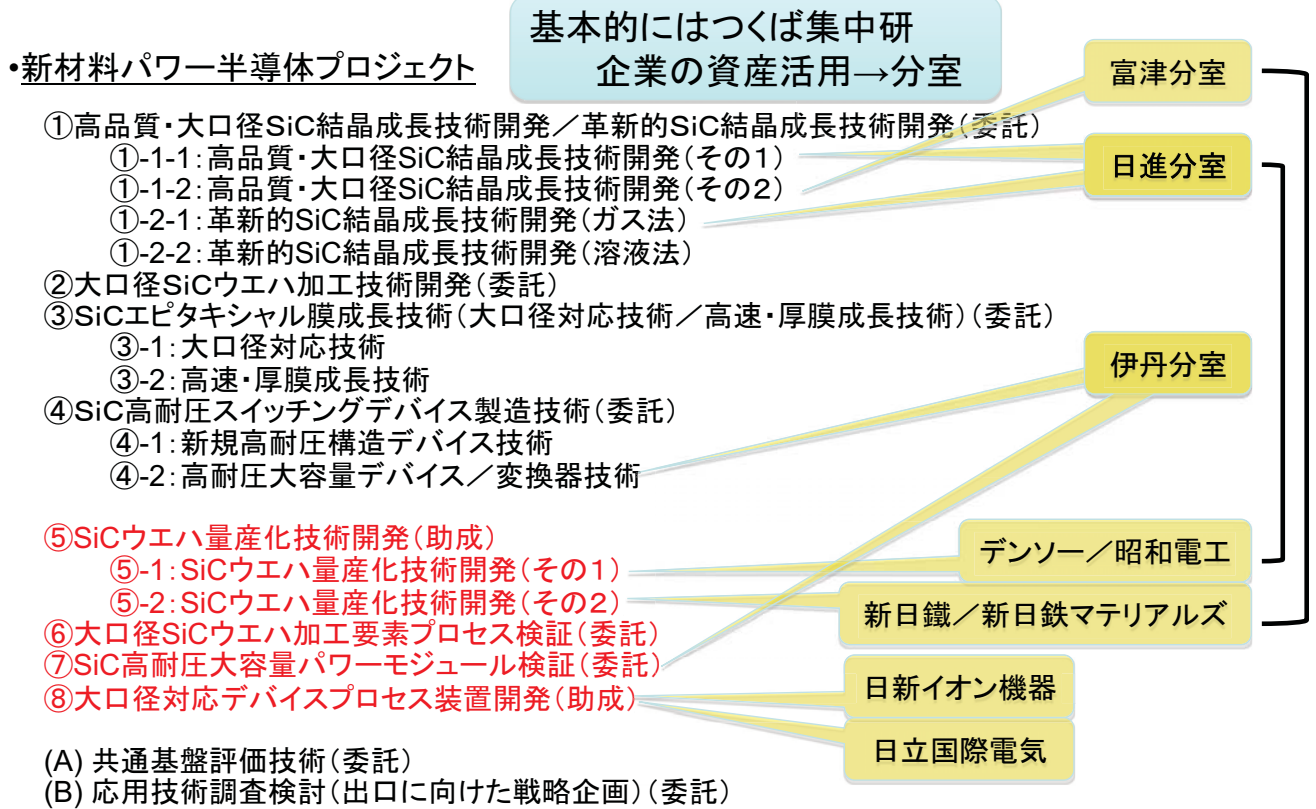
試加工実験を通して、現状技術の能力限界・個別課題の抽出を進め、高速一貫加工プロセスへの適用性を検証する。

⑦SiC高耐圧大容量パワーモジュール検証(委託)

高耐圧(3.3kV級)かつ低損失なSiCショットキーバリアダイオードのための新規耐圧構造設計/作製プロセス技術、高耐圧デバイス評価技術の開発を行う。

⑧大口径対応デバイスプロセス装置開発(助成)

Siデバイスプロセスとは異なる高温プロセス技術、或いは透明基板対応技術に関して、6インチウエハ対応装置を開発する。



1. 高品質・大口径SiC結晶成長技術開発／革新的SiC結晶成長技術開発

- ①昇華法: 口径**6インチ**、長さ**50mm以上**で、
 - ・転位密度 1×10^3 個/cm²以下の結晶を実現
 - ・転位密度 5×10^3 個/cm²以下の結晶を成長速度**0.5mm/h**以上で実現
- ②革新的結晶成長法: 口径**2インチ以上**、長さ**20mm以上**の4H-SiC単結晶。昇華法に対する優位性検証

2. 大口径SiCウエハ加工技術開発

- 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**300μm/分**以上、同時切断枚数**10枚以上**、切り代**250μm**以下。
 - ・インゴットから表面仕上げ精度Rms(表面荒さ)**0.1nm@2μm×2μm**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**

3. SiCエピタキシャル膜成長技術

- ①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、
 - ・均一度:**厚さ±5%、ドーピング濃度±10%**、品質 エピ成長起因の表面欠陥密度:**0.5個/cm²以下**
- ②高速・厚膜成長技術
 - 成長速度**100μm/h**以上で作成した口径**4インチ**、膜厚**50μm**以上のエピタキシャル膜に対し、
 - ・純度 残留キャリア濃度: **3×10^{14} /cm³以下**
 - ・均一度:**厚さ±2%、ドーピング濃度±10%**、品質 エピ成長起因の表面欠陥密度:**1.0個/cm²以下**

H24中間目標は、中間時点としての値を設定

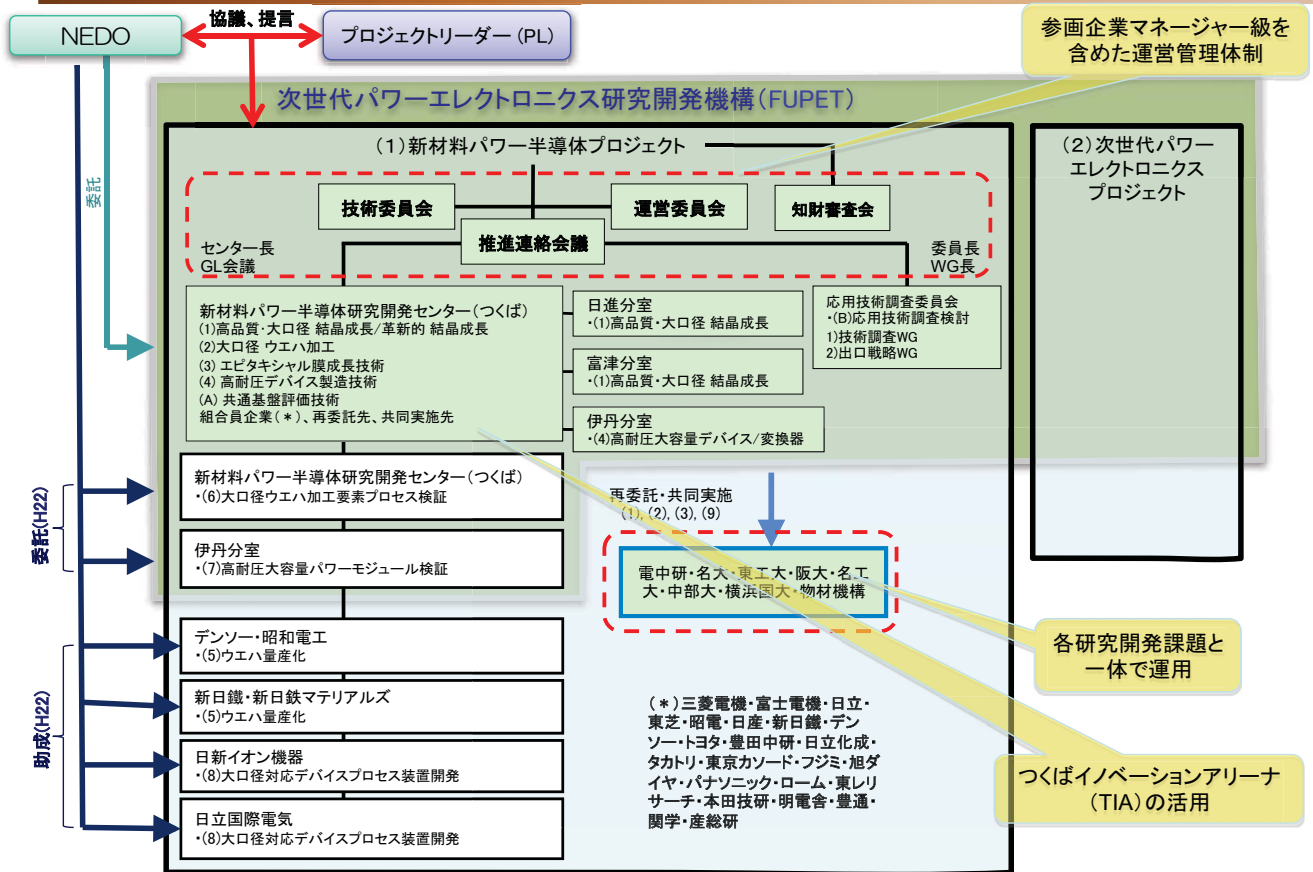
4. SiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術

- ①新規耐圧構造デバイス
 - ・耐圧:**3kV**以上で特性オン抵抗:**15mΩcm²以下**の高耐圧SiC-MOSFETを実現。
- ②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/cm²**以上の高耐圧SiC-MOSFETを開発。
 - ・**MVA級**電力変換器を試作、同耐圧のSi電力変換器の**50%以下**の電力損失実証。

3. 研究開発成果概要

(5) 研究開発実施体制

研究開発の実施参画者と実施体制



事業原簿Ⅱ-46~49

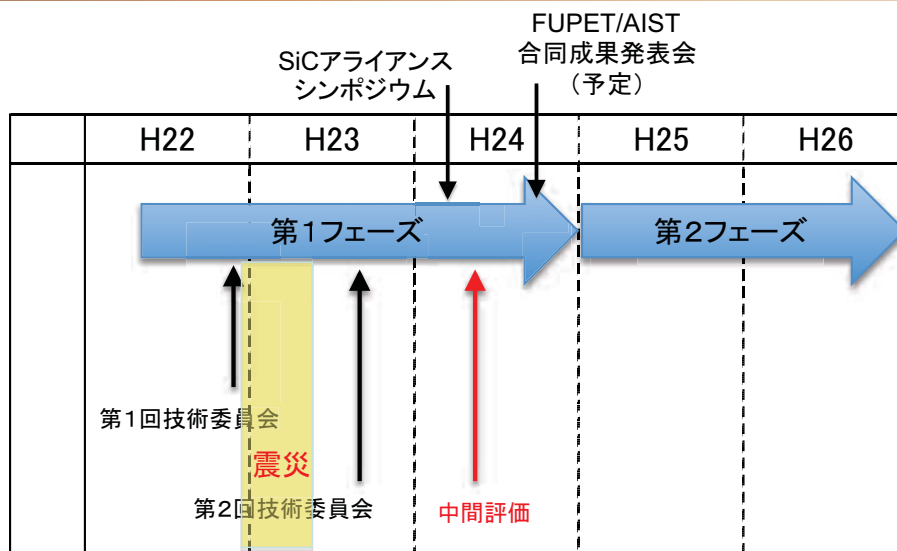
技術研究組合 次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構

13

3. 研究開発成果概要

(6) 現在までの主要成果

全体スケジュール



- 第1フェーズ(H22~H24):基盤要素技術開発で技術的目処の明確化
- 第2フェーズ(H25~H26):各要素技術の統合化で技術の実証/確立
- 各研究項目の密接な連携(結晶 → 加工 → エピ → デバイス → 変換器:評価)
- 実用化に向けた戦略企画

事業原簿Ⅱ-49~50

技術研究組合 次世代パワーエレクトロニクス研究開発機構

14

現在までの主要成果(1)




(1) SiC 6インチエピウェハ技術

- 6インチSiCウェハの実現
- 大口径対応新規ウェハ加工要素プロセスのポテンシャル確認
- 大口径エピ成長技術で実用レベルの均一性実証(高温デバイスプロセス装置でも)


～6インチSiCウェハの実現～

～高精度、高速切断技術～




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)

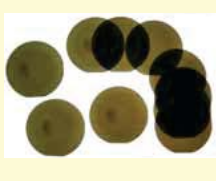


2012.08: デンソー プレスリリース予定

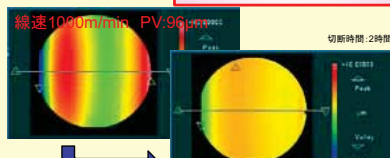
世界最高品質*6インチ実証
(日進分室)*転位密度: 10³個/cm²台



線速2000m/minの
実現



2インチを1時間で
10枚同時切断
(6インチ換算で約9時間)



線速1000m/min PV:96μm 切断時間:2時間

線速2000m/min PV:33μm

高線速によりウェハの反りが低減

高品質6インチウェハの低コスト化に見通し

現在までの主要成果(2)

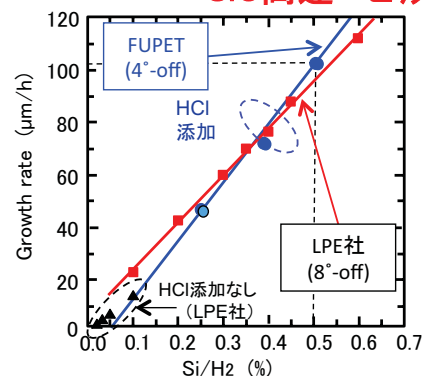


(2) SiC 高耐圧パワーMOSFET技術

- 2手法(ガスフロー制御、ハライド)でのSiC高速厚膜成長のポテンシャル確認
- 3.3kV75A SiC SBDの実証、3.3kV/1000A級ハイブリッドモジュールの動作確認

～SiC高速エピ成長の実現～

～1000A級SiC変換器のスイッチング～





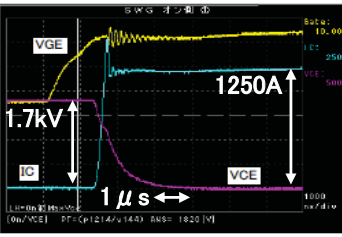
200μm

- ◆4度オフ基板で102.4μm/hを達成
- ◆±5nm程度のバンチングがあるが、ほぼ鏡面
- ◆GDMS分析で重金属汚染なし



3.3kV/75A
SiC SBD

ターンオン特性



1.7kV, 1250A, 1μs

リカバリーのない
ターンオン特性を実証

高耐圧領域でのSiCデバイスのポテンシャル実証

(3) 共通評価技術と応用調査

- ウェハ統合評価システムの構築
- 新規表面欠陥と酸化膜寿命の関係明確化

デバイス信頼性のウェハ段階での予測に道筋

☆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)	15(0)	9(3)	-	-	25(3)件
論文(査読付き)	0	2	15	-	-	17件
研究発表・講演	7	54	4	-	-	65件
受賞実績	0	0	1	-	-	1件
新聞・雑誌等への掲載	0	1	0	-	-	1件
展示会への出展	0	3	0	-	-	3件

※ : 平成24年度7月31日現在

()内はH23補正分

研究項目		中間目標	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インチで、 10^3 個/cm ² 台の転位密度を実現するのに必要な高品質化にかかわる基盤技術、0.5mm/h以上の結晶を実現するのに必要な成長速度向上にかかわる基盤技術の確立。(6インチ結晶で転移密度 1×10^4 個/cm ² 以下、6インチで成長速度0.25mm/h以上の6インチ結晶で転移密度 5×10^4 個/cm ² 以下)	高品質化: 達成 高速化: 達成見込み (達成)
	革新的SiC結晶成長 技術開発	高速性、高品質性、長尺化/口径拡大等の各課題に対する要素技術を確立し、口径2インチ、厚さ1mmの4H-SiC単結晶の成長	ガス法: 達成 溶液法: 達成
ウエハ加工技術 ②、⑥		・3インチ結晶で切断速度150 μ m/分以上、同時切断枚数10枚以上、切り代300 μ m以下(最大ワイヤー速度: 約4,000m/min、最大張力: 70N) ・研削、粗研磨、仕上げ研磨の各要素工程の最適化、および接続最適化を行い、6インチSiC結晶/ウエハ加工の高速・高品質な一貫プロセス最適化の方針を決定(高速一貫プロセス確立に資する総合的なデータを蓄積)	達成見込み (達成)
エピタキシャル 成長技術 ③	大口径対応技術	みなし6インチ径で ・均一度: 厚さ $\pm 10\%$ 、ドーピング濃度 $\pm 20\%$ ・エピ成長起因の表面欠陥密度: 2個/cm ² 以下 6インチ成長プロセスにおける問題点の把握	4"オフSi面で達成 4"オフC面で達成見込み
	高速・厚膜成長技術	口径2インチ、膜厚50 μ m以上の膜で ・残留キャリア濃度: 3×10^{14} /cm ³ 以下 ・表面欠陥密度: 5個/cm ² 以下	残留キャリア濃度: 達成 表面欠陥密度: 達成見込み

()内はH23補正分

研究項目	中間目標	達成度
デバイス技術 ④、⑦	新規耐圧構造デバイス	より低損失化が可能な新規高耐圧デバイス構造とその作製要素プロセスを開発し、耐圧3kV以上の高耐圧SiC-MOSFETを実現 達成見込み
	高耐圧大容量デバイス	耐圧3kV以上の高耐圧SiC-MOSFETの実現とSiC-MOSFET、SiC-SBDを適用した3kV以上の電力変換器モジュールの試作、及び当該電圧領域のスイッチング及び多並列接続に関する要素技術の確立（耐圧3.3kV定格電流75AのSiC-SBDの開発、Si-IGBTと組み合わせて1,000A級大容量パワーモジュールの試作・実証） 達成見込み (達成)
装置技術 ⑧	イオン注入装置	・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	・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その動作を確認する。 (自主目標) 達成	

いずれの項目も

中間目標は達成見込み、最終目標達成への道筋明確化
一部目標は上方修正を検討

(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