

SiC 半導体のパワーデバイス開発と実用化への戦略

— 新規半導体デバイス開発における産総研の役割 —

荒井 和雄

SiC半導体のパワーデバイスの実現は、その省エネルギー効果により大きな期待が持たれている。SiCのような新規半導体のデバイスとしての実用化には、乗り越えなくてはならないいくつかの技術上の壁がある。産総研が関与した国家プロジェクトを中心として、15年を越える実用化に向けての研究開発活動を、産総研内の組織の変遷に対応させて、1) 研究目標、2) 個別課題の設定と解決のための戦略およびその成果、3) 戦略の妥当性の評価に分けて記述し、最後に今後の課題について述べる。

キーワード: シリコンカーバイド、ワイドギャップ半導体、ウェハ技術、パワー半導体デバイス、パワーエレクトロニクス

R&D of SiC semiconductor power devices and strategy towards their practical utilization

– The role of AIST in developing new semiconductor devices –

Kazuo Arai

The realization of SiC semiconductor power devices has been highly expected to contribute to energy saving, however, it requires overcoming various technological barriers. AIST has been contributing to this objective for more than 15 years mainly through participation in national projects. Corresponding to the changes of organization of the institute, in this paper, R&D activities for the past years are described in three parts, i.e., 1) the R&D targets, 2) the major issues and strategies for overcoming them and the main results, 3) the evaluation of the validity of the strategies, and lastly, future issues are suggested.

Keywords: Silicon carbide, wide-gap semiconductor, wafer technology, power semiconductor device, power electronics

1 はじめに

1990年代産総研の前身である旧工業技術院傘下の15研究所では、材料研究者は全体の半数を越していたと思う。息の長い材料研究において、どのような形でその存在意義を社会に示して行くかは周期的な議論的であった。1980年代後半米国は不況下で、基礎研究者が自分の研究のセールスに日本に来る状況にあったが、当時の日本の国立研究所は、より先鋭的な基礎研究に注力すべきであるとの流れ、いわゆる「基礎シフト」にあった。材料研究では、往々にして自分の専門を武器に流行りものの材料を渡り歩く研究スタイルが見られたが、電子技術総合研究所（以降、電総研という）では「使われてこそ材料」を標榜して、意識改革を進めていた。シリコンLSIの最先端技術開発から取り残されつつあった電総研にあって、材料分野としてはパイオニア的研究開発が始まっており、低損失・高周波動作と高温・高放射線耐性が期待できる炭化珪素（SiC）をはじめとするワイドギャップ半導体（窒化ガリウム（GaN）、ダイヤモンド）を将来のデバイス産業化の夢を持

てる材料群として取り組むべきと結論した（図1）。

本稿では、SiC半導体のパワーデバイス開発とその実用化に向けてのこれまでの活動を、産総研内の組織の変遷に対応させて、1) 研究目標、2) 個別課題の設定と解決のための戦略およびその成果、3) 戦略の妥当性の評価に分けて記述し、最後に今後の課題について述べたい^{註1}（表1）。

2 各時期における研究開発の目標

2.1 研究開発の全体としての位置づけ

最近我が国で、資源と環境の制約のもとでの2100年のエネルギーのあり方が議論され、それに向かつての技術開発の方向付けがされた¹⁾。そこでは再生可能エネルギーの大量導入と原子力エネルギーを基軸とし、効率・利便性・経済性にすぐれた電気エネルギーの利用による省エネルギーの徹底により、持続的発展が初めて可能となると推測されている。パワーエレクトロニクスが、電気エネルギー有効利用のキーとなる共通基盤技術として重要であることは言うまでもない。パワーエレクトロニクスのキー技術は

産業技術総合研究所 イノベーション推進本部イノベーション推進企画部 〒305-8568 つくば市梅園1-1-1 中央第2
Planning Division, Research and Innovation Promotion Headquarters, AIST Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba 305-8568, Japan
E-mail: arai-kazuo@aist.go.jp

Original manuscript received March 6, 2009, Revisions received March 15, 2010, Accepted March 29, 2010

表1 活動の流れ

組織	電総研 材料科学部 (1993~2001.3)	産総研パワーエレクトロニクス研究センター (2001.4~2008.3)	産総研エネルギーエレクトロニクス 半導体ラボ (2008.4~)
主たる活動	・調査研究(1994~1995年度)及び 先導研究 (ハードエレクトロニクス) (1996~1997年度)	・「超低損失電力素子基盤技術開発」 (1998~2002年度) ・省エネルギー提案公募2課題 (2003~2005年度) ・産総研委託3課題 (モジュール、電源、システム) (各2002、2004、2003~2006年度) ・「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」 (2006~2008年度)	・産業変革研究イニシアティブ (SiC素子試作ライン)(2008~2011) ・次世代パワーエレクトロニクス 基盤技術開発(2009~2012年度)
目標	・目標の明確化 →パワーデバイス	・トータルソリューション戦略 (ウエハーデバイス-機器並行開発)	・実証・基盤・先行研究 並行展開
主たる成果	・NEDOプロジェクト 立ち上げ	・国内におけるSiC基盤技術の構築 ・SiCパワーデバイス・機器の可能性の明確化 (ウエハ品質、デバイス低損失&信頼性、機器高パワー密度) ・ウエハベンチャー(LLP)の設立	・機器応用実証への展開(産業界との共研)
特記事項		・GaNデバイスの並行開発 ・産業界からのシニア人材の参画 ・デバイス作製ラインの構築	・国際交流・連携

パワーデバイスであり、現在のシリコン半導体のパワーデバイスでは、デバイス構造の工夫により性能の向上が図られてはいるものの、シリコンの物性値から予測される理論限界に近付いている。パワーデバイスの重要な性能指標は低損失であることで、そのためには低オン抵抗(通電時の抵抗が低いこと)と高スイッチング速度が求められている。シリコンに比べバンドギャップが約3倍大きなSiCワイドギャップ半導体では絶縁破壊電界がシリコンに比べ約1桁大きいために、オン抵抗の理論限界値は2桁以上小さい。シリコンでは、スイッチング速度が遅いもののオン抵抗を下げられるパワーデバイス(IGBT)が開発されているが、その適用範囲は限られる。広い使用耐電圧域で低オン抵抗と高速スイッチングの実現が可能なSiCパワーデバイス(MOS-FETや接合FET)は、シリコンパワーデバイスのこの制約を軽減する。低オン抵抗と高速スイッチングによりデバイス動作時の電力損失が抑えられ、放熱機構(放熱フィンやファン)の小型化や簡略化とともに、高周波化

による受動部品の小型化によりインバータ等のパワーエレクトロニクス機器の大幅なコスト削減が期待でき、省エネに寄与する。電力変換器(以降、変換器という)の高パワー密度化(すなわち小型化)は変換器を社会に導入するに当たっての重要な指標であり、ロードマップの示すところである(図2)。加えるに、SiCパワーデバイスの持つ高耐電圧性、高温動作や高破壊耐性は、パワーエレクトロニクス機器の新しい応用分野を開くものと期待できる。徹底した省エネルギーを支える「ユビキタスパワーエレクトロニクスの実現」のためには、SiC素子の実用化が極めて重要な役割を果たすものと考えられる。

2.2 電総研時代(1993年~2000年)の目標

材料研究は物質科学としての探究に止まらず、広義のデバイス化によって原理的優位性を明確にし、実用化を目指すべきである。SiC、GaNおよびダイヤモンドの電子デバイスとしての可能性を精査し、研究対象と目標の絞り込みを図った。そして「ワイドバンドギャップ半導体の中で、

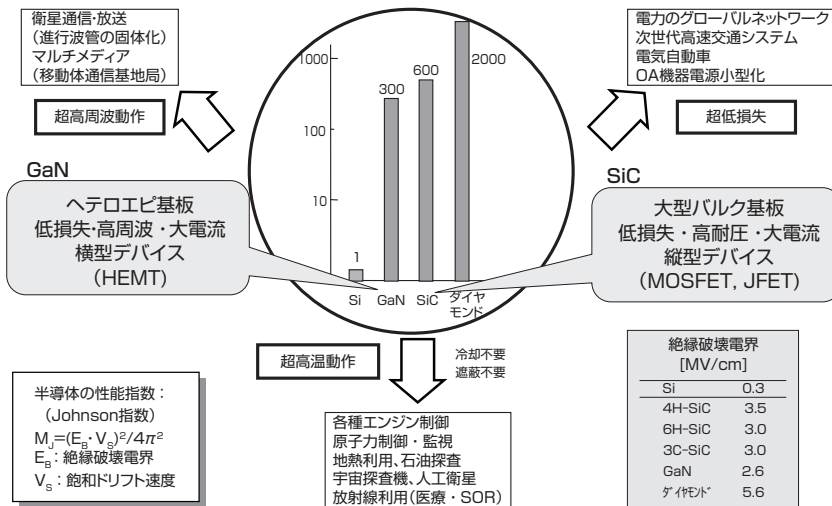


図1 ハードエレクトロニクス(ワイドギャップ半導体の世界)
ワイドバンドギャップ半導体では、絶縁破壊電界が大きく飽和移動速度も大きい。そのため半導体の性能指数がシリコン半導体デバイスに比べ、桁で大きくなる。SiCパワーデバイスの通電損失はSiの1/200になると推測される。

SiC が現行のシリコンに対してパワーデバイス応用において原理的優位性を持つとともに、その実用化においてほかのワイドバンドギャップ半導体に比べ先駆性を持つことを示す」ことが目標であった。

2.3 産総研時代 (2001年～2007年) の目標

(独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の研究プロジェクト「超低損失電力素子技術開発」(1998年度～2002年度) において集中研究方式の役割を果たしている途中で、電総研から産総研への組織再編が行われた。プロジェクトのもとで進められていた「次世代パワー半導体実用化調査委員会」におけるパワーエレクトロニクス応用サイドの研究開発者との議論を通じて、「パワーデバイスがパワーエレクトロニクスのキーであるとしても、その実用化の実現のためには、変換器、システム応用開発との連携開発が不可欠である」との認識を得た。それに基づいて産総研内に、材料からデバイス開発、そして変換器、システム応用を含む一貫した研究開発を行う「パワーエレクトロニクス研究センター」(PERC) を設立することを提案し、採択された。そしてこの研究センターの目標として、「SiC パワーデバイスの高性能化を図るとともに、そのシステム応用への見通しを立てることによって、ユビキタスパワーエレクトロニクス (パワーエレクトロニクスにおける言うならば革新) への貢献を明確にすること」を掲げた。

2.4 産総研時代 (2008年～) の目標

パワーエレクトロニクス研究センターの活動実績が認められ、「研究開発集団として一体で活動し、次の展開を図るべきである」との評価が産総研内で下され、2008年に後継の研究組織として「エネルギー半導体エレクトロニクス研究ラボ」(ESERL) が設立された。次なる目標を「ウェ

ハ・材料技術、デバイス技術、システム化技術の一貫した総合的取り組みを継承し、SiC パワーデバイスの実用・普及化を加速することによってパワーエレクトロニクスの革新を目指す」とした。

3 各時期における課題設定と解決のための戦略およびその成果

3.1 電総研時代の戦略と成果

–国内のSiCパワーデバイス開発基盤の構築–

電総研では、SiC 結晶の低温多形である 3C-SiC (立方晶) をシリコンウェハ上にヘテロエピタキシャル成長させて、ダイオードやトランジスタを試作し、デバイス特性を実証する先駆的研究開発があった^[2]。1980年代の国支援の SiC デバイス研究開発のプロジェクトは、「次世代産業基盤技術研究開発制度」のもとに、「超格子素子」プロジェクトや「3次元回路素子」プロジェクトと一緒にスタートしたが、耐環境 (耐熱・放射線) 強化素子 (GaAs デバイスが中心) を主たる目標としたのでは産業としての魅力が乏しく、細々とプロジェクト研究を続けている状態にあった。1990年代初頭は、30 mm 径の SiC 単結晶 (六方晶) が米国から市販され、SiC のパワーデバイスへの期待が起りつつあった時期である。

3.1.1 SiCのパワーデバイス化への絞り込みとプロジェクトの集中研究方式

米国では、SiC やダイヤモンドは米国防総省高等研究計画局 (DARPA) の支援のもとに軍事応用の電子デバイスとしての研究開発が活発化していた。これに対し、日本では産業応用への展開を目的としたワイドギャップ半導体研究開発の位置づけを明確にする必要があった。1994年(社) 日本電子工業振興協会のもとでニーズ分野とシーズ技術の調査を開始し、SiC、GaN、ダイヤモンドの一連のワイドギャップ半導体は、高パワー・高周波・耐過酷環境という極めて厳しい (ハード) スペックに耐えるデバイスを可能とする半導体材料である「ハードエレクトロニクス」という新しいエレクトロニクス分野を拓くものであるとの主張を行った^[3]

(図1)。その後、1996年より2年間のNEDOの先導研究 (NEDO 先導研究「ハードエレクトロニクス」(1996～1997年度)) を経て、2インチのウェハの市販が始まっていた SiC を中心に、最も産業的インパクトの大きな低損失のパワーデバイスの基盤技術を開発することに目的を絞り込むことによって、1998年から5年間のNEDOプロジェクト「超低損失電力素子技術開発」を立ち上げることができた (NEDO プロジェクト「超低損失電力素子技術開発」(1998～2002年度) (財) 新機能素子研究開発協会、「NEDO プロジェクト超低損失電力素子技術開発」)。「現在は米国

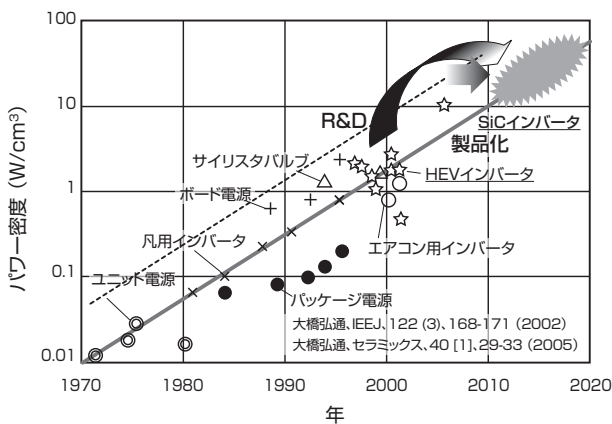


図2 パワー密度からみた電力変換器のロードマップ
この30年で2桁向上していることがわかる。変換器の効率の向上は飽和の傾向にあるが、パワー密度の向上は変換器の低コスト化につながり、普及の重要なポイントとなる。製品化の10年前倒しで実用化の実証が必要 (R&D ライン)。

では軍事目的の研究開発でも、将来、産業として花開く可能性のある基盤研究は通産省（現経済産業省）が支援すべきである」との主張だけでなく、SiC 半導体を用いた新デバイス産業が興り、SiC パワーデバイスの導入によって大きな省エネ効果が期待できることを提示したことがプロジェクト化の力になった（図3）。

「超低損失電力素子基盤技術開発」プロジェクトにおいては、基礎研究が中心であった国内で、パワーデバイス開発の基盤となるウェハ技術とデバイス・プロセス技術を早急に構築する必要があった。そこで、すでに実用レベルの素子開発が行われていたショットキーダイオードは主要な対象

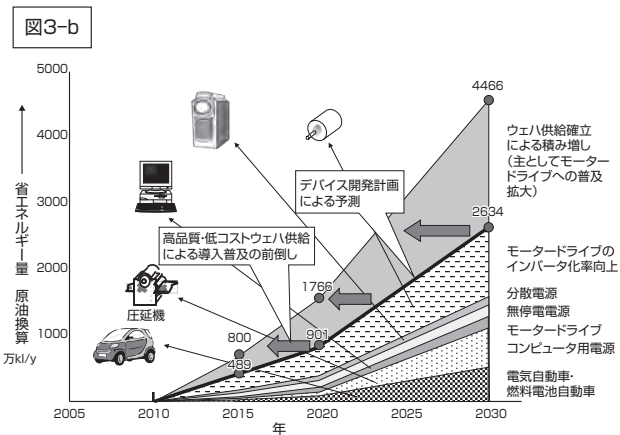
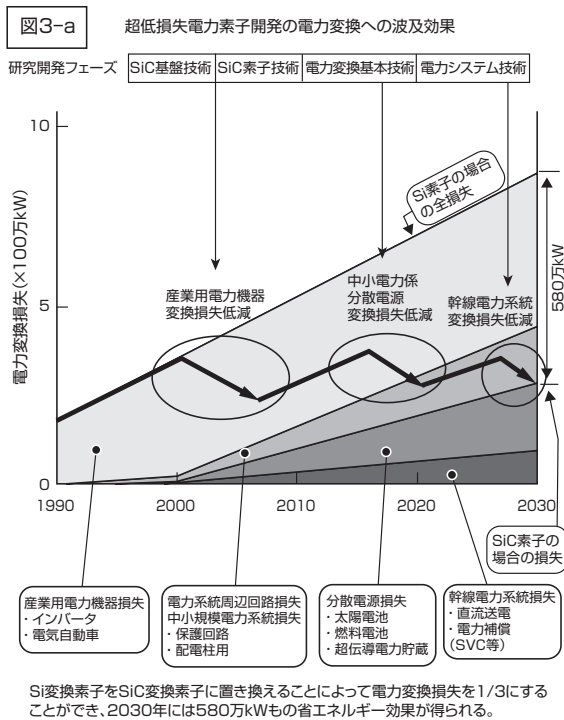


図3 SiC デバイスが導入された時の日本における省エネルギー効果
オリジナルの図面は工業技術（1997.8 石井格）に掲載（図3-a）。幾度かの改定の後、「省エネルギー技術戦略」（図3-b）に採用されている。

とせず、パワーエレクトロニクスに革新をもたらすスイッチングデバイスの基盤技術の開発に的を絞った。FET デバイスを作製できるまでの力のあるデバイスメーカー3社（株）日立製作所、三菱電機（株）、新日本無線（株）が異なるタイプのFET（MOSFET、JFET、MESFET）の試作開発を目指すとともに、産総研に産官学が結集して材料・プロセス・デバイスの一貫した基盤研究開発を一体的に行うプロジェクト（参加研究者が一か所に集まる集中研究方式で、新機能素子研究開発協会との共同研究開発）として進めた（図4）。重要な要素技術ごとに産学官の混成グループを形成し、Si 半導体とは異なる要素技術を必要とする SiC 半導体の技術開発を進めた。このプロジェクトは、1994 年より6年間の京都大学松波弘之教授（現プラザ京都館長）をリーダーとして関西で進められた NEDO 重要地域技術開発（重要地域技術研究開発「エネルギー使用合理化燃焼等制御システム技術開発」（1994 年度～1999 年度）、NEDO）とともに、SiC パワーデバイス研究開発の国内における基盤を構築することに貢献することができた。2000 年5月には国際ワークショップを開催し、日本における国家的 SiC 研究開発を国際的にもアナウンスした^{注2}。これは、研究者人口の少ないこの分野において国際協力を進める上で有効であった。次項でこのプロジェクトにおける特徴ある開発アプローチと成果を示す。

3.1.2 「超低損失電力素子技術開発」プロジェクトの成果

当時 SiC ウェハの供給は、米国クリー社の独占状態にあった。デバイス製造企業がデバイスの製品化に安心して投資するには、安定してウェハ供給ができるセカンドソースを必要とする。独占状態では、ウェハ供給の安全性に懸念があるだけでなく、ウェハ価格と品質の向上が一社に握られてしまい、デバイスのコスト低減や性能向上に直結するウェハへのデバイスからの要求が通りにくいからである。

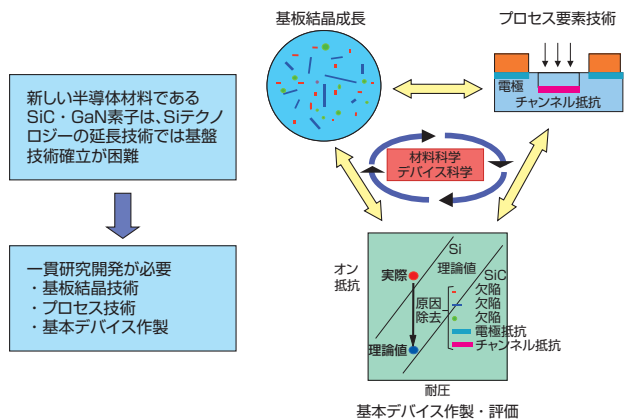


図4 NEDO プロジェクト「超低損失電力素子基盤技術開発」の開発コンセプト

プロジェクトでは、SiC 単結晶成長を開始していた電総研と2企業（昭和電気（株）、（株）デンソー、後期においては新日本製鉄（株）の参加）が集中研究方式でグループを結成し、研究開発を開始した。研究開発のアプローチとしては、結晶成長プロセスのエクソ線トポグラフィその場観察手法とシミュレーションによる炉内可視化を主として採用した（図5）^{註3}。デバイス作製ではウェハにマイクロオーダーの貫通した螺旋状欠陥（マイクロパイプ）があると致命的になるので、プロジェクトの目標としては、マイクロパイプがない2インチの基板の作製と、外径4インチの結晶成長とを掲げた。重要な技術的貢献は、それまでノウハウとして公表されてこなかった結晶成長技術を学会等において科学的に提示したことである。開発された技術はプロジェクト終了後、結晶作製を希望する国内の企業数社に技術移転した。

高耐圧・高パワー縦型パワーデバイスでは、基板結晶としてはできるだけ高濃度に不純物（通常窒素ドーパでN型化）を入れて低抵抗化している。したがって、所望のデバイス特性を実現するためには、膜厚と不純物濃度を精密に制御してそのSiCの単結晶上に薄膜を形成するホモエピタキシャル単結晶薄膜成長技術は非常に重要である。京都大学の松波弘之教授のグループによりオフ角を導入することによって比較的低温（～1600℃）で良質な成長ができるステップ制御エピタキシーが開発されていた。プロジェクトでは、定評のある海外のエピ装置を導入し、成長条件のチューニングによりデバイス作製グループに必要なエピ膜を供給した。一方においては、新規高速エピ装置の開発を行った。（これは後年、3インチ基板で約100μm/h以上の成長速度を実証した）。プロジェクト終了間際であったが、これまでのデバイス作製結晶面であるシリコン面に加えて、その反対側の面であるカーボン面で不純物を制御できるエピ薄膜成長技術を見だし、MOSFETのチャネル移動度が

シリコン面に比べて桁が違うほど大きいことを示し、カーボン面デバイスの基本的なデバイス特許を取得した（図6）。現在、まだカーボン面デバイスプロセスには解決すべき問題が残されているが、実用化にとって重要な技術に育ってきている。

SiCは熱酸化によってSiO₂絶縁膜が形成できることが利点であるが、酸化によって得られるMOSFETのチャネル移動度がバルクに比べ極めて低い（通常の熱酸化ではバルクの移動度より2桁小さい）。シリコンプロセスで威力を発揮している不純物の熱拡散はSiCプロセスでは利用できず、高温イオン注入とその後の高温活性化プロセスが必要となる。デバイスに必要な低抵抗のコンタクト形成技術の開発も急がれた。またデバイス設計に必要なデバイスパラメーターが不確かだったり、揃っていないかった。集中研究方式では、これらの問題について系統的に取り組みデバイス・プロセスの基盤技術の構築に貢献した。必要な物性・プロセス評価については、大学や外部機関の協力を仰いだ。これらの結果は、分散研究方式におけるシリコンを上回る試作SiCパワーデバイスの性能実証とともに、デバイス技術開発という点で遅れていた我が国のこの分野における基盤構築に貢献した。

このプロジェクトのもう一つの重要な特長は、実用化調査研究をシステム応用の研究開発に重心を置く別の協会（（財）エンジニアリング振興協会）のもとに行ったことであった（「NEDOプロジェクト超低損失電力素子技術開発：次世代パワー半導体デバイス実用化調査」（1998～2002年度）（財）エンジニアリング振興協会）。この活動により基盤研究分野と応用分野との交流が進み、パワーデバイスを産業応用に展開する上でSiCがシリコンに対して原理的に優位であることを見通すことができた。

これらのすべての成果を広く一般に普及させるために単行本としてまとめた^[4]。

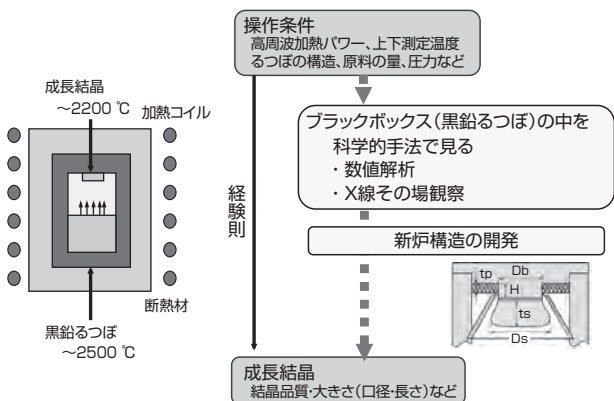


図5 SiC 単結晶成長技術開発のアプローチ
炉内構造等は学会でも発表されることがほとんどなかった。

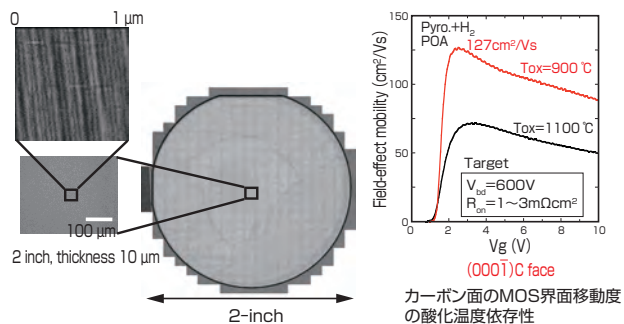


図6 カーボン面デバイス技術の開発
カーボン面（C面）へのエピ成長技術の開発とその面上で作製されたMOSのチャネル移動度（エピ表面のモルフォロジー。水跡様のシミは画像のアーティファクト）。

3.2 産総研時代（2001年～2007年）の戦略と成果 — ウェハからシステムまでトータルソリューションの提案 —

NEDO プロジェクトを2年残す段階で、2001年工業技術院研究所から産総研への組織再編が行われた。そこでは、特定のミッションを持つユニットとしての研究センターが設計された。研究開発フェーズとしてはSiC パワーデバイスの展開が見え始めた時であった。新規デバイスがパワーエレクトロニクスとして実用化するかどうかはデバイスの性能だけでなく、往々にしてトレードオフ関係にある各種要素技術をいかに最適に統合していくかが重要であると明確に認識していた（図7）。またこの時期、国内産業界におけるパワーエレクトロニクス研究開発は、システム側のインフラへの投資抑制にともない困難な状況にあった。新規パワー半導体デバイスの実用化をめざした研究開発には、長期的研究開発を担う公的機関の役割が重要であると考えた。そうした考えのもとに、一研究ユニットの中で材料からデバイス・プロセス開発、そして変換器、システム応用への展開をすべて含んだ一貫した基盤研究開発（トータルソリューション）を行い、「革新的パワーデバイスによるパワエレの革新」を実現することを掲げ、5グループからなる「パワーエレクトロニクス研究センター」（PERC）が設立された。

研究センターの前半期は「超低損失電力素子」プロジェクトの目標達成に注力したが、それも含めて「革新的パワーデバイスによるパワエレの革新」という目標に向けて本格的に活動を開始した。常勤専従職員14人で、回路・実装チームは常勤職員ゼロ、実装チーム、システム応用チームは産総研内の他研究ユニットからの併任研究者でのスタートであった。発足時には選択と集中の観点から、この統合的

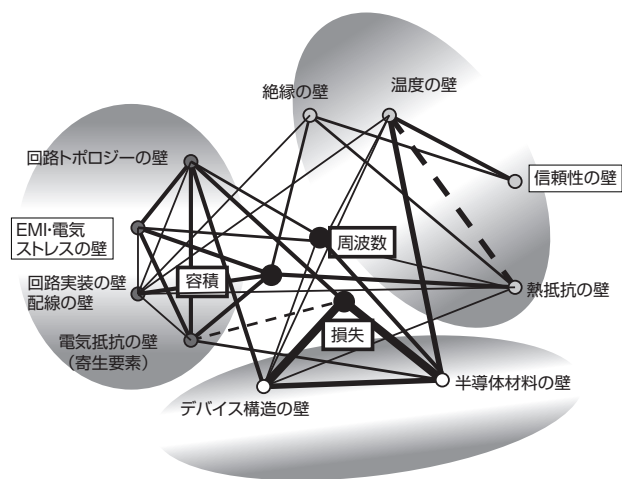


図7 パワーモジュール技術の諸問題
いろいろな要素課題は複雑に関係しており、統合的に解決していかなければならない（次世代パワー半導体デバイス調査委員会 大村一郎氏（株）東芝）作成。

アプローチへの批判もあったが、産総研の「第2種基礎研究を軸にした本格研究」推進と軌を一にしていることで次第に認知され、職員数も2007年には18人に増員し、併任研究者5人と常駐メンバーを合わせると陣容は80人を超すまでになった。

「超低損失電力素子」プロジェクトが終了した後、その成果をもとに、より実用化への貢献を意図したNEDO提案公募型省エネルギー先導研究開発の2課題（2003年度～2005年度）（「超低損失デバイスとMOS信頼性と変換器の高パワー密度化の基盤研究」と「先進的ダイオード開発」）（企業との共同提案）を中心に研究開発を進めた。それらの成果により、三菱電機（株）の変換器実証を柱とするNEDOプロジェクト「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術」（略称「インバータ」プロジェクト）（2005年度～2007年度）へと展開することができた。ここではパワーデバイスの実用化を保证する大容量化、高信頼化（MOS酸化膜）、変換器の高パワー密度化の可能性を明確化する研究開発を企業との集中研究方式で進めた。

3.2.1 ウェハ課題への貢献

プロジェクトで開発した技術は学会等で公表するとともに、積極的に産業界に移転した。日本で開発された結晶欠陥低減成長法（RAF法）をも踏まえて、欠陥の低減と大口径化の開発を進めるとともに、ウェハの実用化に不可欠な切断・研磨技術の開発とその技術移転も行った（図8）。エピについては、C面ではオフなし面でも成長が可能であり、かつC面上に形成したMOS界面の移動度が高いという発見を基に、エピ技術の実用化を促進するために、（財）電力中央研究所／昭和電工（株）／産総研が共同研究体

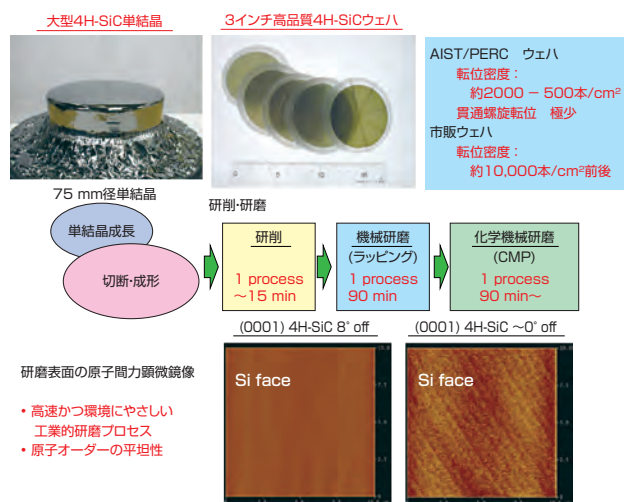


図8 SiC単結晶ウェハ作製技術
ウェハの高品質化、低コスト化はSiCパワーデバイス実用化の最重要課題である。低コスト化には、単結晶切断・研磨等の周辺技術の開発も重要である。

制を構築した。その研究サポートのもとに共同でエシキャットジャパンというベンチャー (有限責任事業組合「LLP」) をつくり、研究開発の律速になっているエピウェハ供給体制を構築し、「インバータ」プロジェクトでの活用と育成を図った。この活動は 2007 年には昭和電工 (株) に引き継いだ。

3.2.2 パワーデバイスの原理的実証から変換器への展開

スイッチング素子については接合 FET (JFET) の開発が先行して進められ、数アンペアクラスのデバイスが市販されたが、ノーマリーオンデバイス (ゲート電圧ゼロでは通電状態にあるデバイス) であることもあって普及には至っていない。MOSFET は MOS チャンネル移動度が上がらないことと、酸化膜の信頼性が不透明であるため市販には至っていない。産総研では、カーボン面の高チャンネル移動度を活用

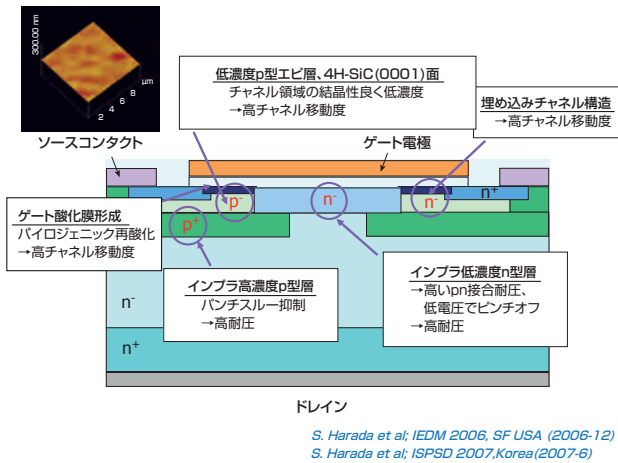


図 9 カーボン面上に作製された IEMOSFET (Implantation and Epitaxial MOSFET) のデバイス構造とその効用エピ成長技術とイオン注入技術を駆使してチャンネル形成面を平坦化し (AFM 像表示)、MOS チャンネル移動度の向上をはかった。

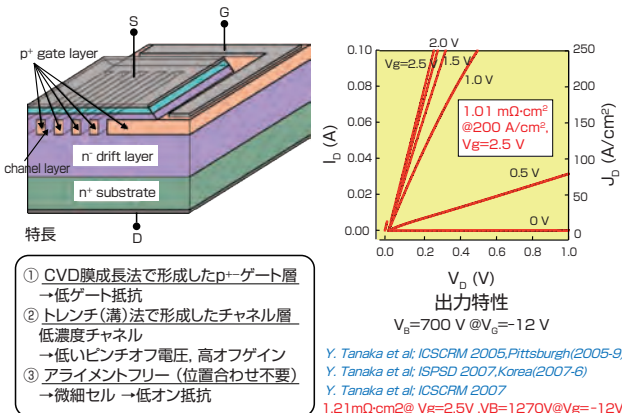


図 10 埋め込みゲート型の SIT の構造と静特性 ノーマリーオン (ゲート電圧をかけないとオフにならないこと) であるが、極めて通電損失が小さい。このデバイスもエピ成長技術が重要な役割を果たしている。

して MOSFET のエピプロセスの活用とデバイス構造を工夫した IEMOS を開発し、世界最高レベルの低損失デバイスの原理的実証に成功した。また、JFET ではエピ技術を活用した埋め込みゲート構造 (SIT) により、さらなる性能の向上には基板抵抗の低減が課題になるほどの低オン抵抗の原理的実証に成功した (図 9、図 10、図 11)。デバイス・プロセス技術は知的財産化するとともに、適宜、産業界へ技術移転を行った。

IEMOS については、「インバータ」プロジェクトにおいてアンペア級の超低損失デバイスを試作・提供し、プロジェクト終了時に 50 W/cm³ の高パワー密度の変換器を実現する条件を明確化することができた。また、研究センターの技術開発成果のマイルストーンを示すために、産総研内にもつくり技術を促進するために設けられた「ハイテクものづくり」研究制度を 2006 年に活用した。そこでは結晶基板、エピ膜、IEMOS とショットキーバリアダイオードデバイス、チョッパー回路を、研究センター内の三つの研究チームの共同で作製し、発電モーターの制御を実現してトータルソリューションの実証を行った (図 12)。JFET (SIT) および PIN ダイオードについては、酸化膜の信頼性への懸念がなく、変換器への応用に必要なデバイスの供給が可能な歩留まりまで作製技術が進んだため、2007 年頃から企業とのシステム応用の共同研究が開始され、2008 年から成果が出始めている。

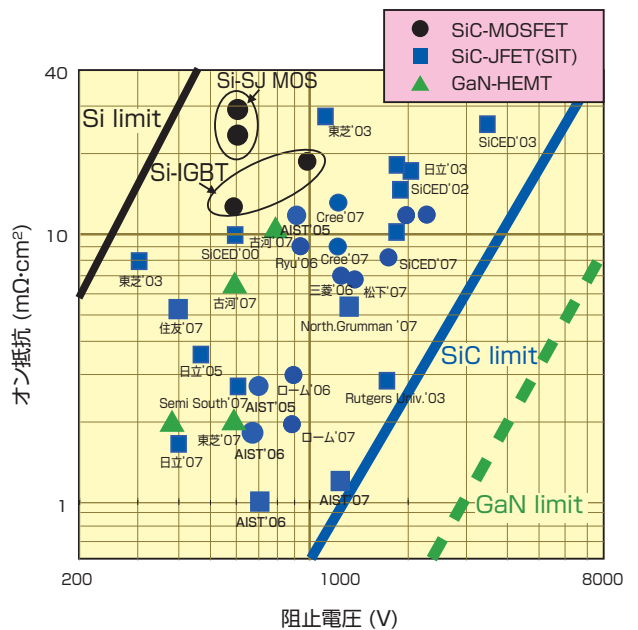


図 11 アンペア級スイッチのオン抵抗と阻止電圧のトレンド 産総研は世界のトップクラスの成果を出している。最近の IGBT や SJ-MOS の Si デバイスの動向や世界の SiC パワーデバイスの動向については、オーム 2009.11 号「次のステップに進むパワーエレクトロニクスの技術革新・応用」(荒井和雄) 参照。

3.2.3 素子の大容量化・高信頼化とウェハ品質

実用化を目指したパワーデバイスの実証には、数十 A から 100 A クラスのチップを必要とする。2005 年の段階で、ショットキーバリアダイオードにおいては大容量化の報告が始まっていたが、スイッチング素子では開発が遅れていた。この事実は、ウェハ品質（結晶欠陥等）が重要な要因と考えられた。省エネルギー先導研究の成果を踏まえ、「インバータ」プロジェクトでは、100 A 級の大容量チップを実現するウェハ品質を明らかにすることを目標とした。現状では単結晶基板は約 1 万 /cm² の結晶欠陥（転位）を持っていたため、素子の大容量化と MOS の信頼性について、これまで真向から取り組まれていなかった結晶欠陥との相関を明確にする課題に取り組んだ。産総研において高いポテンシャルを持つ放射光を用いた結晶欠陥評価手法を軸として活用した。結論から言えば、ある種の結晶欠陥の低減は望ましいが、デバイスを作製する結晶基板上に形成されるエピタキシャル薄膜の成長技術（エピ成長時に発生する表面欠陥の極小化、結晶欠陥種の変換法等）の高度化と、デバイスプロセス（チャンネル移動度と信頼性の両立するゲート酸化膜形成法、高温イオン注入と活性化プロセス等）の工夫により、現状の結晶品質でもデバイス応用展開へのステップを切れるとの結論を得た。

3.2.4 変換器設計手法の構築と高パワー密度化への適用

パワーエレクトロニクス機器は使われる動作条件、環境がさまざま、これまでの開発では試行錯誤的手法でその最適化が図られることが多い。求められるデバイスの性能も用途によって重点が異なる。特に SiC パワーデバイスでは、大容量・高耐圧の条件で高速スイッチングさせるため、デバイスの性能を最大限に活用するためのデバイス・回路 - 受動部品 - 変換器構成の統合的設計手法が重要になる

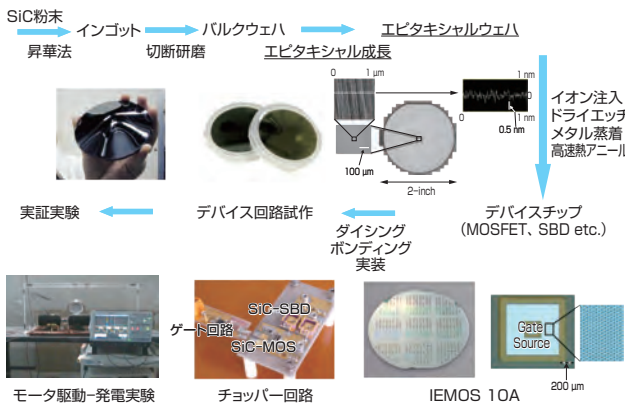


図 12 「ハイテクものづくり」プロジェクト（本文参照）における全 PERC 技術（ウェハ - デバイス - 変換器）によるトータルソリューションのデモンストレーション

（図 13）。例えば高周波化が進むとそれまで考慮しなくてもよかった浮遊容量や浮遊リアクタンスの影響が顕在化するるので、その評価と低減が必要である。産総研では先行的にデバイスシミュレーション、フィルター性能、制御手法等からなる回路統合設計方法を開発し、「インバータ」プロジェクトにおいて「変換器損失統合設計シミュレータ」として展開した。開発した低損失 SiC-MOSFET の試作評価と合わせて、50 W/cm³ の高パワー密度を実現する条件を明らかにした。

3.3 産総研時代（2008年～）の戦略と成果

-実用化のボトルネック解消へ向けて-

2008 年以降産総研では、ウェハ、デバイス、変換器において原理実証を終えたものはそれぞれ下流での実証研究へと進めているが、この流れは SiC 実用化にとって重要なアプローチである。この時期産総研は、さらに研究開発の螺旋を一段上がったところで必要な、より高度な目標を持つ基盤研究、さらにこの分野の発展に貢献する先行研究を合わせて進めることを目標に掲げた。

「インバータ」プロジェクトにおける企業による 14 kVA インバータの損失の 70 % 低減の実証と、集中研究方式による現状の結晶品質でのデバイス応用への展開可能性を踏まえて、2008 年度からは、グリーン IT プロジェクトの枠組みのなかで「次世代パワーエレクトロニクス基盤研究開発」（2008 ～ 2011 年度）がスタートした。そこでは、（株）日立製作所および三菱電機（株）による応用を明確に定めたパワーエレクトロニクス機器の実証開発と、産総研が三度目の集中研究方式で高パワー密度を目標にした基盤技術開発（超低損失デバイス開発と高パワー密度変換器のプロトタイプ実証）を進めている。

ウェハ技術の開発では、2007 年末に国産の 4 インチウェ

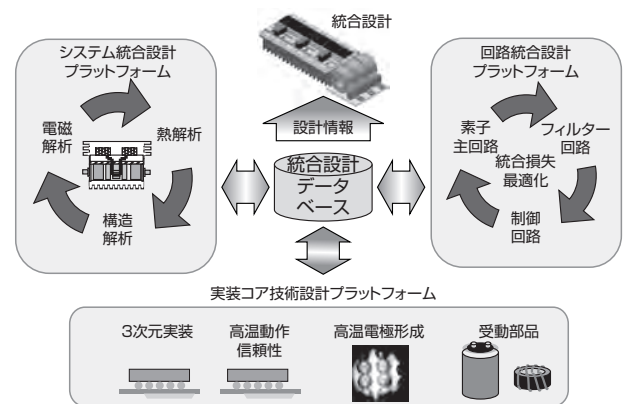


図 13 電力変換器の統合設計の概念図
素子 - フィルター（磁性体） - 制御の統合損失をシミュレーションして、回路設計において損失の最適化を図れる。受動部品のデータベースと構造要因を統合して、変換器統合損失設計シミュレーションが可能となる。

ハの開発がなされ、実用化への加速となった。昇華法結晶ではデバイスのコスト低減に向けての口径の拡大（6 インチ以上）や切断・研磨等の加工技術を含む生産性等コストにかかわる課題等が残っている。デバイス構造の形成にとってエピ技術が重要な役割をもっており、高品質エピ技術の汎用化も重要である。また、さらなる結晶品質の向上のための昇華法に代わる新成長技術の可能性の追求も必要であり、それらを視野に入れた活動を開始している。

SiC パワーエレクトロニクスはウェハ、デバイス開発において進捗がみられ、現在実用化への機運も高まってきていると言える。しかし、ウェハ業界にとっては需要予測が不透明で大規模な投資がしにくく、デバイス業界にとっては、ウェハの品質とコストを踏まえた市場予測の不透明性ゆえに、本格的な生産の決断がしにくい。また、デバイスのシステム応用をめざす企業にとっては、デバイスの入手が困難な状態にあり、いわば三^{すく}棘^{まき}的な状態が続いてきた。この関係が相互に正のフィードバックになるような支援が重要である。高額なエピ成長装置が産業化のネックになっているウェハ業界に対する技術支援がエシキャットジャパン（LLP）の設立であった。

産総研においては、これまでイノベーションを生み出す産学官大型連携プロジェクト「産業変革研究イニシヤティブ」をいくつかの課題について行ってきた。2008 年度末より産業変革研究イニシヤティブ「SiC デバイス量産試作およびシステム応用実証」が 3 年間を目的に開始された。ここでは、デバイス企業（富士電機ホールディングス（株））等との連携により、デバイスチップの実用レベルでの生産技術を確立し、システムでの変換器応用を目指す企業や大学等に早期にデバイスチップを供給し、応用分野の可能性を明らかにしていくことを目指している。

4 戦略の評価

4.1 電総研時代

4.1.1 開発目標のSiCパワーデバイスへの絞り込み

調査研究や政策企画担当者との意見交換によって、「ハードエレクトロニクス」の目標をウェハ開発が先行する SiC 半導体に絞り込んでパワーデバイスを目的としたことにより、新産業創出と省エネルギーへの貢献というビジョンが明確になった。長期に亘る調査研究により、国家プロジェクトへの体制づくりができた。産業界の状況に柔軟に対応し、デバイス開発を目指す分散研究方式（3 社）と基盤技術の構築を目指す集中研究方式の体制は有効に機能し、その後のこの分野の発展において役立った。

4.1.2 研究開発立ち上げのためのスペースと人材の確保

電総研では、材料・物性研究者を中心に所内からの参

加者とポストクの集団としてスタートした。集中研究方式では、企業からの参加者の果たす役割は企業の施設の活用とともに大きかった。ポストクとして採用した材料・物性研究者がデバイスプロセスまで担当できるように成長を促し、簡単なデバイス試作を行うまでになった。ミーティングを密に行う等運営にも留意し、全体のポテンシャルをあげることに努めた。施設の導入に必要なスペースの確保も極めて厳しい状態にあった。より適切なスペースがあれば移動する等したが、移動にともなう現場の負担が大きく、デバイス開発におけるインフラの重要性をあらためて痛感した。プロジェクト当初、集中方式の研究開発は結晶成長やエピタキシャル成長で十分ではないかとの意見もあったが「デバイスまで仕上げてみて初めて材料の本質に迫れる」として、デバイス試作へ向けての努力をしたことは、長い目でみれば研究開発の継続にとってよい判断であったと考えている。

4.2 産総研時代（2001年～2007年）

4.2.1 研究センター化とトータルソリューションの提案

自由経済の波が日本社会を変える前までの電力や通信といった社会インフラ型研究開発は、電力会社や電電公社（現日本電信電話（株））等が主導し、その潤沢な研究資金によって民間企業が積極的に協力して進められてきた。そうした恵まれた技術開発のもとでは、過剰なスペックとも言える高い技術成果は国内での需要に応えることで十分であった。しかし、自由競争による経営環境の厳しさが増すなかで、限られた国内需要予測と研究開発費の削減により、企業サイドの開発意欲が急激に低下し、こうしたインフラ研究開発分野の縮小・企業間統合等が進められ、インフラ研究開発のみならずパワーエレクトロニクス全体として、研究開発環境が急激に弱体化していた。世界的にはシーメンス、ABB、GE 等世界的企業は、開発途上国を視野にこの分野の開発を強力に進めていた。こうした産業界の状況にあって、パワーエレクトロニクスにおいて中心的役割を果たす公的研究機関の存在意義は大きいと考えていた。

材料研究からスタートした産総研では、ウェハ開発やデバイスプロセスの開発は比較的順調に進められたが、変換器において使用できる実デバイスの開発や変換器の実装については経験を持つ人材がほとんどおらず、産業界からベテラン研究者を招聘することによって初めて可能となった。これら招聘研究員の存在は、産総研内のエネルギー技術研究部門、エレクトロニクス研究部門や計測標準研究部門からの協力とともにトータルソリューションの実行には極めて重要な役割を果たした。「ハイテクものづくり」研究制度による一貫した基盤研究開発の実証はトータルソリューションの象徴的な成果であった。経済産業省の産総研委

託費による産総研内のほかの研究ユニットとの先進的な共同研究は、施設の充実とさらなる展開に大きな役割を果たした（「超低損失電力モジュール技術開発」（2002～2006年度）、「オンCPU 高速・大容量電源技術開発」（2004～2006年度）、「電力平準化システム運用・制御技術開発」（2003～2006年度））。また、取得した特許を統合する「IP インテグレーション」研究制度によって先取り研究もできたことは、超高耐電圧デバイスの開発等、これからの研究開発を進める上で潜在的な力となった。

SiC のパワーデバイス開発を軸に、これからの省エネルギーの重要な共通基盤技術であるパワーエレクトロニクスの国内における中核的研究センターを産総研につくるべきだとの考えへの見通しは2008年までには得られなかった。その大きな理由は、構築した研究開発試作ラインでは想定される応用分野に対して実デバイスの供給が十分に行われる程度にデバイス試作のレベルが上がっていなかったためである。その実現のためにはデバイスファンドリーの構築と、デバイスの性能に対して要求仕様を明示できるシステム応用の研究開発者の参画・連携が不可欠と考えている。2008年以降になって、産業変革研究イニシアティブのように前者の可能性は見えている。後者の実現も期待したい。

4.2.2 省エネルギー提案公募課題でのデバイス技術の向上

最初の5年の基盤開発プロジェクトの後、経済産業省のプロジェクト担当部署は実用化を急ぎ、プロジェクトでの基盤研究の継続を認めなかった。その時期に「省エネルギー技術戦略」^{注4}において、将来技術として取り上げてもらうとともに、姿を見せ始めたSiCパワーデバイスに対し、官からは省エネへの期待を、ユーザー企業からは応用分野を語ってもらうシンポジウムを開きSiC実用化への気運を高めた^{注5}。そのかいもあり、3年間のNEDO省エネルギー提案公募型課題5件を産官連携で行うことができた。この3年間では、企業においては数Aクラスのデバイスを実証することができ、産総研においてはMOSFETが超低損失であることの原理的実証が行えた。また、企業と共同して、いち早く変換器での性能実証に結び付けられる高性能ショットキーバリアダイオードや、PINダイオードの開発ができた。これらの成果がNEDO「インバータ」プロジェクトへの展開に繋がった。

4.2.3 エシキャットジャパン (LLP) の設立

デバイス作製には、不純物濃度を制御した高品質のエピ膜を形成することが不可欠であるが、エピウェハの供給は米国クリー社の独占状態にあった。2005年度にエピ成長に経験と実力のある昭和電工(株)と(財)電力中央研究所、産総研の共同研究支援を前提に3者でLLP「エシキャット

トジャパン」を立ち上げた。産総研が開発したカーボン面・微小オフ角面エピウェハの実用化を技術課題とした。前出「インバータ」プロジェクトは、直接的にはウェハ開発を含んでいないが、国内ウェハメーカーを中心にウェハ調達とデバイス性能とウェハ品質の相関についての情報交換による開発支援を行った。期待に応え、国内でも高品質の4インチ基板の供給が開始され、プロジェクトにおいては、最終局面でショットキーバリアダイオードの4インチ試作でエピウェハ品質が実用レベルにあることを実証した。こうした活動を通じて国内におけるエピウェハサプライチェーンの形成に貢献した。

4.2.4 GaNの研究開発との共存

2001年以降の活動において、SiCかGaNかの選択を迫られたことがよくあったが、両者の得失を常に比較しながら、パワーエレクトロニクスの革新を思い描くことは、意義のあることと主張してきた。これまでの2回のSiCのNEDOプロジェクトにおいても、SiCとの比較をするために小さな課題としてGaNデバイス課題を含めてきた。現時点では、SiCがkV級の大容量デバイスに適し、GaNは移動度の大きな利点から、横型パワー素子としてkV以下の比較的耐圧領域の高速スイッチング素子として有望と判断している。産総研におけるGaN研究は、携帯電話の基地局の低消費電力化を直近の応用とするGaN高周波デバイスの実用化のプロジェクトにおいて、共同研究の集中研究方式として材料研究の側面からプロジェクトを支えた「窒化物半導体低消費電力型高周波デバイス開発」（2002年度～2006年度）、NEDO）。また、GaNデバイスは産総研としてはやや遅れてデバイスフェーズに展開し、NEDOの省エネルギー提案公募の課題においてACアダプター用の低損失デバイスの開発で可能性を明らかにした。GaNは低コストウェハが期待できるSiウェハ上のGaNヘテロ基板の高品質化が実用化の大きなカギと思われる。2008年以降は、継続してGaNデバイスの先進的な応用開拓をめざした研究が進められている。

4.2.5 デバイスプロセスラインの構築

材料研究からスタートし、デバイス、変換器、システム化と戦線を拡大したために、人材、施設・設備とも常に不足で、その充実をはかることが必須であった。クリーンルーム施設(リソグラフィー等の重要機器を含む)については、初期においては産総研内のエレクトロニクス研究部門に全面的に依存した。変換器での実証を狙った実デバイス・回路・モジュール開発を進めるための研究開発資金の確保は、産総研の1研究ユニットとしては限界に近いものがあった。2回に亘るNEDOプロジェクトにおける集中研究の役割とNEDOの提案公募課題への積極的な応募採択、

経済産業省からのより基盤的研究開発を促進する産総研委託費、研究所の大型設備導入補助、ナノテクノロジー研究棟の新規建設等、タイミングのよい研究所の理解と支援により、2 インチデバイス試作ラインを構築することができた。それによって産業界との研究開発の場としての2 インチラインの充実が図られ、ノウハウの共有、知的財産の移転により企業との連携が図られた。加えるに、このラインにより先に述べた超低損失 SIT、PIN ダイオードが歩留まりよく作製できるようになり、企業との共同研究により、それぞれ直流配電系の遮断機（NTT ファシリテイズ等）や大容量変換器の開発（東芝三菱電機産業システム（株）：TMEIC 等）が進められている。

4.2.6 人材の育成、国際交流・連携

人材の育成という点では、産総研の研究センターの7年におよぶ経験により、確実にそれぞれ技術の下流を意識したり、踏み込んだりできる研究者が育ってきた。産業界への人材の供給も行ってきた。学会への貢献としては、（社）応用物理学会の研究会の活動、2 回の SiC 主要国際会議（ICSCRM）への貢献が上げられる^{注6}。国際的連携としては、パワーエレクトロニクスニューウエーブワークショップ（PENW）^{注7}の活動がある。国際学会等での交流において、パワーエレクトロニクスは重要ではあるが、社会の下支え的存在で社会的認知度が低いとの共通認識が議論された。同じ思いを有する米国（CPES）、EU のパワーエレクトロニクスセンター（ECPE）と産総研の3 者で情報交換をするとともに、パワーエレクトロニクスの共通ロードマップを作成するためにPENW を開催した。この活動により国際的連携の足場を作ったといえる。米国が2009年にオバマ政権になってからは、環境・エネルギーを重要な課題として取り上げており、この分野の研究開発の強化が進められている。CPESの後継として、全米科学財団（NSF）の支援のもと再生可能エネルギーを大幅に取り込んだ次世代マイクログリッドの構築を目標とするセンターが設立された¹⁵。グリッドの標準化等における世界的な競合・連携がこれからさらに重要な課題になる。我が国として国際的視野に立った遅れない取り組みが必要であると考え。

4.3 産総研の産業変革イニシャティブ活動

SiC のショットキーバリアダイオードについては市販が開始されている。スイッチングに際してのリカバリー電流が小さい利点から、Si-IGBT デバイスと組み合わせた還流ダイオードとして SiC ショットキーバリアダイオードを導入するだけで、30～40%の損失低減が図れることから、ダイオードへの応用は確実なものといえる。SiC デバイスの市場規模の広がりが見えてきて、三竦みの膠着状態から各分野において正のフィードバック状態へと展開していくことが期待

できる時代に入った。産総研における産業変革研究イニシャティブの研究課題は、デバイスチップの供給がないために遅れがちな変換器応用の関連知財を国内で確保するうえでも時宜を得た決断と考える。アプリケーションによってデバイスに対する主要な要求仕様が異なる（図14）。

また、変換器メリットからシステムメリットを考察するだけでなく、システム変更や新しいシステムをも構想することが重要であると考えられるが、それには多くの応用開発分野との交流・意見交換にとどまらず、現物の SiC デバイスを使った効果を企業関係者が実感したり、あるいは不足な点を指摘するような具体的な共同作業の場が肝要である。言うならば、基本ソフトウェアのソースコードを開示してその後の展開をユーザーから広く求めたリナックス方式的な開発が必要な時であり、この活動はまさに新規半導体デバイスの実用化を目指した本格研究における大きなステップといえる。今後のさらなる省エネルギーシステム開発を進める上での重要なインフラの構築事業と位置付けられる。こうした大型研究開発課題を迅速に実行するうえで、予算、施設、共同研究契約等について統合した指揮を可能とする職責（産総研の名称：産業技術アーキテクト）の果たした役割は大きい。デバイスはシステムからの要求仕様を受けて進化する。デバイスとシステム応用を継ぐ人材が極めて重要な役割を果たすフェーズになりつつある。産総研としての総合的取り組みに期待したい。

5 今後の課題

2009年9月に発足した日本の新政権は、「2020年までに1990年比25%の温暖化ガス削減」を世界に呼びかけている。つくば地区においては、欧州のIMECや米国のAlbanyにおける産学連携共同研究体を参考に、ナノテクノロジー拠点形成の計画が進められており、パワーエレ

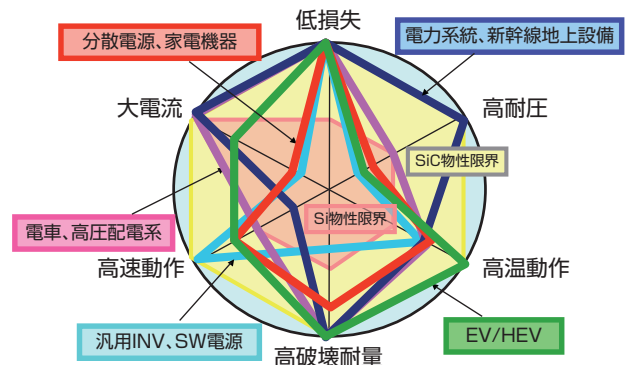


図14 アプリケーションと要求デバイス性能の概念図
デバイス性能のあるものはトレードオフ関係にある（例えば低損失－高破壊耐量－高速動作）。アプリケーションによるデバイス性能の最適化（チューニング）が重要である。

クトロニクスもその1課題となっている。また、SiCのさらなる基盤技術の充実と可能性を明らかにする課題が、我が国の「最先端研究開発支援プロジェクト」30課題の一つに採択された。新規半導体の実用化の研究開発は、「ウェハ→デバイス→システム応用」といったように逐次的に展開するものではない。例えばデバイスの開発の進展により、さらなるウェハの口径拡大、品質の向上が求められるといったように螺旋的にそれぞれの研究開発が進む。実用化を揺るぎないものにするための先取りした基盤研究開発が、産学官で融合的に進められることを期待している。エネルギーインフラ変革を支えるキーテクノロジーとしてのパワーエレクトロニクスの将来を見据えた総合的研究開発が必要である。

謝辞

SiC材料・デバイス研究開発のパイオニアであり、一貫してこの活動を支援してくださっている吉田貞史埼玉大学教授（現産総研招聘研究員）による本稿に対する適切な助言に感謝します。

注1) 本構成は、査読者からの本誌の目的に照らした構成の在り方の要請に従いました。活動母体の存続時期とプロジェクト期間等は必ずしも一致していません。

注2) 1st International Workshop on Ultra-Low-Loss Power Device Technology (UPD2000), May31-June2, 2000, Nara, Japan (新機能素子研究開発協会主催)。

注3) シミュレーションについては、グルノーブルにあるフランス国立科学研究センター (CNRS) のマダール教授のグループに協力いただいた。

注4) 「省エネルギー技術戦略」2002年6月12日資源エネルギー庁省エネルギー技術対策課：パワーエレクトロニクス応用装置における省エネルギーの重要性が取り上げられた。現在の改訂版においては、パワエレにおける省エネルギーデバイス技術としてSiCが認知されている。

注5) 特別シンポジウム「省エネルギー技術開発の新しい息吹～パワーエレクトロニクスの新展開」(2002年11月25日) 東京、全共連ビル、産総研技術情報部門主催。

注6) 応用物理学会「SiC及び関連ワイドギャップ半導体研究会」、国際会議 Int.Conf.Silicon Carbide and Related Materials ICSCRM01 (つくば)、ICSCRM07 (大津)。

注7) 第1回パワーエレクトロニクスニューウエーブ (PENW) 国際ワークショップ (2005年4月11日) 東京、発明会館、産総研主催、新機能素子協会協賛。第2回 (2006.6.15) PERC主催、新機能素子協会協賛、第3回 (2008.1) つくば産総研。

ECPE: European Center for Power Electronics (ドイツ) シーメンスを中心とした産学官連合 (2003年設立)

CPES: Center for Power Electronics System (米国) バージニア工科大学を中心に5大学80以上の企業からなるNSF支援のエンジニアリングセンターの一つ (1998年設立)

参考文献

- [1] (財)エネルギー総合工学研究所: 超長期エネルギー技術ロードマップ報告書
http://www.iae.or.jp/research/result/cho06.html
- [2] 吉田貞史他: 特集-耐放射線半導体基礎技術-, 電子技術総合研究所彙報, 58 (2) (1994).

- [3] 「ハードエレクトロニクス調査研究報告I」(社)日本電子工業振興協会(平成7年3月)及び「ハードエレクトロニクス調査研究報告II」(社)日本電子工業振興協会 (平成8年3月).
- [4] 荒井和雄, 吉田貞史編: SiC素子の基礎と応用, オーム社 (2003).
- [5] FREEDM Systems Center
http://www.freedm.ncsu.edu/

執筆者略歴

荒井 和雄 (あらい かずお)

1966年3月東京大学工学部物理工学科卒業。1969年4月通商産業省電気試験所入所。1993年1月～2001年3月まで電子技術総合研究所材料科学部長。1998年10月～2003年3月「超低損失電力素子研究開発」プロジェクトリーダーを務める。2001年4月から2008年3月(独)産業技術総合研究所パワーエレクトロニクス研究センターの研究センター長として超低損失電力素子の材料、プロセス開発から、素子のシステム応用を目指したモジュール化の研究開発に従事。2006年7月から2009年3月までNEDO「パワーエレクトロニクスインバータ基盤技術開発」プロジェクトリーダー。現在、産業技術総合研究所イノベーション推進本部招聘研究員。工学博士。



査読者との議論

議論1 全体構成

コメント (大和田野 芳郎: 産業技術総合研究所環境・エネルギー分野)

初稿は時の経過を追って、社会状況、考え方、研究実施の経緯と成果等が混在して書かれています。このため、解説としては興味深いのですが、論文としての論理展開が理解しにくい状態です。

「構成学」としてある程度一般化して今後の議論に供するためには、例えば、以下のような構成に組み直して記述してはいかがでしょうか。

- 1) 研究目標、2) 個別課題の設定、3) 課題解決のための戦略、4) 実施と成果、5) 戦略の評価、6) 今後の課題と戦略

コメント (立石 裕: 新エネルギー・産業技術総合開発機構)

初稿は全体として記述形式が、過去20年間のSiCデバイス開発の年代記/解説のようになっており、シンセシオロジーの研究論文に合うように構成と論理展開の見直しをしてください。

回答 (荒井 和雄)

少々記述が重複しますが、意見を取り入れて改訂しました。

議論2 研究戦略の明確化

コメント (大和田野 芳郎)

初稿の「パワーエレクトロニクスのイノベーション」は重要な内容を含んでおり、むしろ冒頭で議論されるべきと思われます。その際、シリコン代替を狙うのか、現状でも充分機能しているとされる機械的な遮断機・リレーの代替を狙うのか、その場合の利点は何か等の論点を整理してください。

回答 (荒井 和雄)

深く議論するだけの力量はありませんが、可能性の提示と開発ポイントを示しました。コストがシリコン並みで信頼性が確立すれば、今の>~kVクラスのパワーデバイスはSiCになることは間違いないと思います。

議論3 パワーエレクトロニクスとSiCを選択する理由

コメント（大和田野 芳郎）

エネルギーを電力として利用できる割合（電力化率）の増大は重要であることは事実ですが、それがパワーエレクトロニクスの普及拡大には直結していないことを認識すべきでしょう。パワーエレクトロニクスでなければならない、しかも SiC でなければならない用途とその拡大を提示してください。

回答（荒井 和雄）

まさに直結していないことが現在の問題で、それはパワーエレクトロニクスのコストと信頼性に問題と疑念があるからだと思います。その払拭こそがイノベーションで、SiC デバイスにはそのポテンシャルはありますが、解決すべき課題がまだあり、それを外的条件を踏まえてどうやって乗り越えるかが実用化の戦略だと思います。

議論4 SiCを選んだ理由

コメント（立石 裕）

出発点として、ワイドギャップ半導体の中でなぜ SiC を中心的課題として選んだのか、簡単な説明があった方がいいのではないのでしょうか。研究担当者には自明なことかもしれませんが、非専門家にとっては素朴な疑問です。

回答（荒井 和雄）

3.1.1 項の冒頭部に記述しました。まさに SiC の選択が出发点であったと思います。

議論5 研究戦略の変遷

コメント（立石 裕）

最初から一貫した長期的戦略が必ずしもあったわけではなく、研究の進展に伴い、「材料→使える材料→デバイス→システム」の関係をにらんで、スペックや戦略自体が進化していったのではないのでしょうか。

回答（荒井 和雄）

これは 2001 年時点での重要なポイントで、3.2 節の冒頭部で記述

しました。

議論6 「トータルソリューション」と「パワエレの革新」の内容

コメント（大和田野 芳郎）

「トータルソリューション」という言葉の元々の意味は、ある大きな課題を解決するためにさまざまな方策を総合して対処する、という意味だと思います。「一貫研究」とは必ずしも意味が同じではないと思います。解決すべき課題を明示して「パワエレの革新」という用語の意味を明確にしてください。

回答（荒井 和雄）

- 1) 「トータルソリューション」は、ある大きな課題を解決するためにさまざまな方策を総合して対処する、という意味で用いています。新規半導体を実用化にまで持ち込むために解決すべき大きな課題は、「三疎み状態の解消」であると思います。それには「ウェハ→デバイス→応用開発」のリニアモデルの研究開発ではうまくいかなく、これら三方向（方策）から総合して対処する必要があると考えています。
- 2) 「（低損失+高周波化）→低コスト変換器→ユビキタスパワエレ機器」という展開を「パワエレの革新」と考えています。

議論7 「一貫研究」の内容

コメント（大和田野 芳郎）

「一貫研究」においても、時間の経過に伴う重点のシフト、有限なリソースの分散、テーマ間の壁等の課題があったと思いますが、どう対処したかという記述があると大変参考になると思います。

回答（荒井 和雄）

本研究はほとんどゼロからの立ち上げでしたので、必要なものからガムシャラに立ち上げていったので常に飢餓状態であったと思います。デバイスが自前でできなければその先の展望が開けないので、大きな金額を必要とするデバイスプロセスの機器・施設に資金を投入しました。この辺の事情を追記しました。