

巻頭言

基礎研究と実用化 ―パワー半導体 SiC の進展―

昭和 37 年卒 京都大学名誉教授 松 波 弘 之



京都大学電気系教室が発刊する技術情報誌「Cue」の巻頭言を書くように依頼された。高邁な科学論、技術論などを持ち合わせていないので、自らが関与してきた基礎研究を、如何にして実用化に持ち込んだかを紹介し、その端々で実感したこと、得たことを書いてみたい。

コンピュータ、通信、情報などエレクトロニクス分野は、半導体技術と ICT との組み合わせによって社会に大きなパラダイムシフトを起こした。残念ながら、日本におけるこのエレクトロニクス関連の産業は、現在たいへん厳しい状況にある。一方、エネルギーが関係する分野は、再生可能エネルギー導入による電力系統の安定制御や、電気エネルギーの有効利用（省エネ）を可能にする科学技術の開発を含むグリーンイノベーションとして、新産業創出を目指した大きな期待がかけられている。

この分野を支えているパワーエレクトロニクス（パワエレ）は半導体シリコン（Si）を主役とするが、材料の物性限界に近付いており、飛躍的な進展が難しいとされていて、高性能パワー半導体シリコンカーバイド（SiC）へ注目が集まっている。直流を交流に変換するインバータに SiC を用いると、高耐圧、低損失、高速スイッチング、高温動作、小型、簡易冷却のインバータができるので、電気・電子関連の企業が一斉に力を入れている。今でこそ、パワエレというキーワードが社会認識され始めたが、そもそも、縁の下の力持ち的立場の仕事で、注目度は低かった。京都大学における SiC に関する基礎研究があって、パワエレに陽の目が当たりつつあり、電気・電子業界が取り組んでいることはたいへん喜ばしい。

好奇心と若気の怖さ知らずで、半導体 SiC が優れた物性を持っているのに、実用されていないことを慨嘆し、半導体社会で市民権を持たすべく、この材料の研究に取り組んでから、40 年以上が経過した。初期の 20 年は、苦労の連続で、ようやく Si 基板上に成長させた SiC を使って MOSFET（金属（M）-酸化膜（O）-半導体（S）電界効果トランジスタ）を世界ではじめて試作したが、性能が満足できなかった。SiC 基板上への成長を模索したが、市販基板がなかったので、研磨材、耐火煉瓦用に製造されている Acheson 結晶を使わざるを得なかった。（0001）面から数度傾けたオフ基板上で成長すれば、基板結晶と同形の超高品質単結晶が得られることを見いだし（1987 年）、「ステップ制御エピタキシー」法と名付けた。これを用い、1990 年代初期に高性能ショットキーダイオード（SBD）を開発した。海外企業が感心を示したが、国内では、バブルが弾けた後で、産業界での研究開発ができない状況であった。

高性能の SiC-SBD が 2001 年にドイツ企業から上市された。国内においては 2010 年春から市販が始まり、その年の暮れには、スイッチング用の MOSFET も市販され始めた。Si-IGBT（絶縁（I）-ゲート（G）-バイポーラ（B）-トランジスタ（T））と SiC-SBD のハイブリッドインバータを地下鉄電車に用いて 30% 以上の電力損失低減が可能となった。SiC-MOSFET と SiC-SBD を用いた all-SiC インバータを使って、高速エレベータでは電力損失低減が 65% と報告され、ハイブリッド車への搭載試験が始まるなど、著しい省エネ効果が示されている。このほか、エアコン用インバータなど家電製品、太陽光発電用パワーコンバータ（PCU）への浸透も始まっている。今後は、産業用電気機器、自動車、ロボット、電力系統へ展開して行くであろう。課題であった SiC 基板も直径 6 インチ（150mm）が入手できる。

1980年代後半、研究開始から約20年が経過して得た「ステップ制御エピタキシー」法による高品質単結晶は「ほんまもの」であることを確信し、企業の参画なしには実用化は困難と判断して、産学連携でデバイス化を図りたいと思った。しかし、当時は、半導体業界はランダムアクセスメモリ（DRAM）で超多忙であり、相手にされなかった。1993年、Washington DCでの国際会議で高性能のSBDを発表後、世界の風潮が変わり、基礎研究からデバイス開発へと進んだ。あいにくバブルが弾けて、日本の企業に開発資金の余力がなく、パワー半導体デバイス開発の国家プログラム立ち上げが必要との周囲からの要請に応じて行動を起こし、以後、いくつものSiCに関する国家プロジェクトに関与してきた。はじまりは、1994年からの関西地区を中心とするもので、関西圏の数企業がSiC技術の手習いを行った。続いて1998年から5年間の国家プロジェクトで、電気電子企業が世界のキャッチアップをすることに成功した。

2010年からの内閣府支援による「最先端研究開発（FIRST）」応募から風向きが変わった。産学官を含む研究開発のスキームを考案し、幸いなことに500以上の応募の中から、30課題の1つとして、採択が決まった。いろいろな経緯から、大きな変遷があり、FIRSTでは大学を中心とした将来の電力インフラ用デバイスの基盤研究を行うことになった。京都大学を中心とする大学群・電中研・産総研のチームが、耐圧13 kV以上のバイポーラデバイスの成果を出したことは、まさに世界の最先端を進んでおり、胸を張ってよい。一方、産業界を中心に、基板・エピ成長、デバイス、モジュールなど幅広い分野を取りこんだユニポーラデバイスに関する別枠の大型プロジェクトが動いていて、成果が出つつある。これまで多くのプロジェクトは、同業数社相手の要素技術「technology push」開発に向けられ、userが期待する「vision pull」的開発は注目されなかった。現在、出口を明確にして、高性能システム開発を意図し、それに必要な異業種のplayerを集め垂直統合で展開して行くことが、パワエレを核とした新規事業化につながることを強調している。

パワエレの主演Si-IGBTとは大きく異なる動作をするSiC-MOSFETを使いこなせるパワエレ専門家が数少ない。単なるSiの置き換えではなく、パワエレが替わるとシステムを替えることができ、総合的に大きな省エネが図れる。電気回路、制御、高性能システムの重要性を認識した人材育成を期待する。

大学での研究は真理探究・好奇心の観点からテーマ設定を行うことが必須であろう。研究には、「他人のやらないことをやる勇気を持つこと」、しかし、「core competence（独創性、創造性）を明確にし、常にbench markを置きながら、研究を進める」ことがたいへん重要であると思っている。「目標は高く、目線は低く」でstep-successの積み上げをモットーにしてきた。5年に一度ほどは、エポックメーキングな成果を得て、研究の継続性を維持した。「ステップ制御エピタキシー」をSiC技術のブレークスルーとして、大学での基礎研究の成果が、社会で実用されるフェーズに入り、2012年朝日賞を受賞するなど研究者冥利を味わっている。研究室スタッフ、大学院生、卒研生に感謝する。退官後、8年間にわたり、科学技術振興機構（JST）のイノベーションプラザ京都にて、地域産学連携の支援をした。大学とは異なる分野を経験し、いろいろなことを学んだ。「how to make」に加え、「what to make」を考える若い人たちを育成することが強く要請されている。