

高温超電導材料発見 30 周年を記念して —— 明るい未来に向かって ——

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所
元 名誉所長 塩 原 融



本年 2016 年は高温酸化物超電導材料が 1986 年に発見されて 30 周年を迎えます。この記念すべき年に、株式会社フジクラの研究開発 フジクラ技報の小特集〈超電導〉の巻頭言を述べられる機会を持たせて頂いたことは誠に光栄なことです。

通勤電車に乗り、車内を見まわすと老若男女を問わず混雑の中、スマートフォンあるいは携帯電話（ガラパゴス携帯：ガラケイ）を片手にその画面に見入っている様子が見られる。最近ではかなり見慣れた光景ではあるが、30 年前に目にすると思議な光景に思えたに違いない。1985 年に NTT が肩にかけて持ち運ぶ「ショルダーホン」のポータブルタイプを発売したが、その重量は約 3 kg だった。その後、1987 年に重量 900 g の「携帯電話」が発売され、実用化、多機能化が急速に進み、2007 年に発売が開始された iPhone をきっかけにスマートフォン時代に入り市場が拡大され、現在に至っている。この携帯電話の普及は、携帯電話のパッケージ内に半導体チップが封止されており、そのチップ上に 1 千万個を越える数の素子で構成される大規模集積回路が携帯電話の機能を可能としたことによる。1947 年のトランジスタの発明以降 70 年弱が経過するが、この数十年間で素子の大きさは驚嘆すべき速さで縮小されてきている。現在では素子 1 個の面積は 40 年前の百万分の一にまで縮小されている。この半導体チップ上の大規模集積回路が携帯電話の機能を向上させてきた。今日では、十億個以上の素子が集積されている超々大規模集積回路（ULSI）も存在するまでに開発が進んでいる。この携帯電話の普及・進化は全て半導体産業界がなし得た努力の賜物である。1980 年代後半が日本の半導体産業の黄金期であった。1989 年には半導体売上高トップ 3 を日本の半導体メーカーが独占し、ベスト 10 には 6 社がランキング入りしており、7 割を越えるシェアを勝ち誇っていた。この礎となったのは 1970 年代に旧通産省が主導した超 LSI 技術研究組合であった。国内半導体メーカーの競争力向上だけでなく、製造装置や半導体材料の国産化にも大きな貢献をした。しかし、2000 年にはベスト 10 に 3 社が残り、2011 年には、分社化・統合があるものの、トップ 3 の座を明け渡し、ベスト 10 に何とか 2 社が残っていた。2015 年（予測）では日本企業は 8 位の東芝だけになる状況で、また、東芝は半導体製造関連施設、設備およびその他の関連資産の一部を譲渡する計画であり、その先行きは不透明である。このように我が国では半導体産業の勢いが失いつつある。現在これらの機器を生産している国は、

米国、韓国、台湾、ヨーロッパである。これまでの電子産業はヨーロッパで発明、発見、理論化がなされ、米国で国研・大学が主体となって研究開発が進み、産業化され、日本で製造・生産技術の開発が進み、市場導入が急速に進むという図式であったが、現在では経済的な合理性を考慮しつつ各国で開発・性能向上が進められている。1980年代以前は工業製品の輸出量が多く、貿易立国であった我が国は、この電子機器の輸出が振るわず、貿易赤字国に陥っているのが正直なところである。この半導体産業への我が国の貢献は世界的には大きく評価できるものの、我が国にとっては先進国としての維持を難しくしているとも考えられ、ある意味、我が国の官民による事業化戦略に対しての反省点が伺えるかもしれない。

これまでの半導体産業界における日本企業の衰退の要因は、次の3つであると考えられている。(1) 設計・微細化が自社最終製品に制約される「キャプティブの罠」に陥り、半導体として汎用的な製品の需要を満たすプラットフォームになれなかった。(2) 競合企業との資金調達力格差を軽視し、長期に亘り設備投資に必要な資金調達計画が不明確な中、微細化競争に参加してきた。そして(3) 半導体デザインハウスという発想ではなく、工場を持つ半導体メーカを志向してきたことである。

さて、本題の高温超電導材料の研究開発に戻る。1986年にスイスのIBMのBednorz & Müller博士により酸化物超電導材料が発見され、更に翌年の1987年には米国Houston大学のChu博士により超電導臨界温度が液体窒素温度(摂氏マイナス196度)を超えるイットリウム系銅酸化物超電導材料が発見され、世界中で「超電導フィーバー」が巻き起こったが、1989年に世界的な科学ジャーナルの“Science”誌、さらには購読者の多い新聞“The New York Times”にこの酸化物超電導材料には期待されるほどの電流が流れないことから、“Superconductivity: Is the Party Over?”, “Superconductors showing a flaw that dims hope”の見出しで、それぞれ悲観的、否定的な報告、報道がなされ、世界中で多くの研究者が高温超電導研究開発から撤退した。これは、この高温超電導材料が、当時既にMRI等で実用化され、液体ヘリウム温度(摂氏マイナス269度)で運転されているNb系の低温超電導材料と同様な性能が液体窒素温度で発揮するものと期待されていたからである。高温超電導材料は臨界温度が高いこととリンクして、超電導における電子対(クーパー対)の空間的広がりを表わす長さの尺度であるコヒーレンス長(ξ)が4~6ナノメートルと短く、欠陥に敏感であり、約40ナノメートルの ξ を有するNb系の低温超電導材料では超電導電流パスに障壁ではなかった大傾角結晶粒界を超電導電流が流れなくなる。また、酸化物であることから、脆くてその線材応用には期待が持てなかったからである。

この致命的とも言われた課題を解決する製法を最初に開発したのが、(株)フジクラの飯島氏で、1991年にイオンビームアシスト蒸着(IBAD)法を開発し、高強度多結晶金属基板上への中間層としての酸化物を成膜し、結晶粒を配向させ、粒界傾角を数度以下に抑えることに成功し、その中間層上の超電導層を流れる超電導電流密度が1平方センチメートル当たり数百万アンペア($>MA/cm^2$)を超えることを確認した。この成功により、一気に高温超電導酸化物を用いた線材が夢ではなく真のものと世界中で認識され、その後、特に日米間で熾烈な開発競争が繰り広げられることとなった。その後、1999年には旧通産省(現経産省)から新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)を通じた国家プロジェクトに参画し、研究開発が進められ、2001年には世界初の10mのイットリウム系超電導線材(Y系線材)の開発に成功した。このプロジェクトでは小職が所属する(公財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)内の超電導工学研究所(SRL)とともに研究開発が進められ、SRLの成果(例えば、 CeO_2 中間層による高速成膜、Y系からGd系超電導への希土類元素の変更による高性能化等々)も活用するとともに、大型装置の導入・開発をプロジェクトで実施し、2004年には100m、2005年には200mの超電導線材の開発に成功し、2008年には臨界電流($I_c: 350 A$) \times 長さ($L: 504 m$)の積で世界最高値を記録し、2011年には更に、($I_c: 572 A$) \times ($L: 816 m$)の積で世界記録を更新した。この開発は日米で熾烈な競争が繰り広げられ、我が国の経産省と米国のエネルギー省(DOE)との研究開発競争でもあり、毎年のように $I_c \times L$ の世界記録保持者が日米で入れ替わる競争であった。この競争で(株)フジクラが日本の代表として常に世界をリードしてきたことは賞賛に値する。

最近になって、この日米の開発競争に割って入ってきたのが韓国であり、現時点の世界記録($I_c: 625 A$) \times ($L: 1,000 m$)は韓国のSuNAM社が有している。さらにロシア、中国の開発も追従してきており、目が離せない状況にある。これまでの超電導線材の研究開発は日米間の競争が主体であったが、他の視点でこれまでの研究開発を

振り返ると、世界中で国研、大学等の公共研究機関で基礎研究は進められてきたが、線材の実用化を目指した開発は我が国を除いて、殆どはベンチャー企業が主体となって進められている。ある意味、死に物狂いで、開発、事業化、市場導入、販売を進めているベンチャー企業の動きは、前述の半導体産業の開発競争に酷似している状況にあることに危惧している。

超電導技術は、エネルギーシステムにおいて高効率化、省エネ、CO2 排出削減など社会への貢献が期待されており、電力機器、産業応用機器、輸送機器、診断・医療機器などへの幅広い応用が期待される技術である。技術的に実用化が近づきつつあり、その経済性が重要な開発課題と認識されてきた。そのため、高温超電導技術の活用が超電導応用機器開発の中心になってきており、第 2 世代線材と称される Y 系線材の市場導入の始まりに伴い、この Y 系線材を利用した機器開発が盛んになってきた。Y 系線材応用機器では、その磁場中特性における圧倒的な優位性から、マグネット応用（例えば、SMES、モータ、発電機、加速器、NMR・MRI、研究用超高磁場マグネット等）に向けた開発が進められている。大量の線材を使用する機器用マグネットのコイル（巻線）に Y 系線材を適用する場合、磁場中臨界電流特性の更なる向上、長尺化、量産化、歩留り向上、低コスト化のみならず、応力や環境の変化といった外乱の影響によって変化することを阻止するロバスト性、安定性ととも、直流機器と言えども、その昇磁・減磁の際の磁化損失（ヒステリシス損）の低減、磁化の緩和及び遮蔽電流・遮蔽磁場による時間的・空間的なコイル発生磁場の不均一性の解消のための技術開発が必要不可欠であり、まだまだ開発課題が山積された状況である。高温超電導線材である Y 系線材の構造、超電導特性及び熱的、電磁的、機械的特性は、現在汎用されている Nb 系低温超電導線材とは大きく異なる。このため、Y 系線材の特性に対応したコイル開発と協調した研究開発が重要である。

我が国の施策として、2014 年 4 月に閣議決定されたエネルギー基本計画には「・・・超電導技術などの基板技術を加速する。」と記されており、超電導技術の重要性が示されているとともに、2015 年 7 月の経済産業省資源エネルギー庁が発表した長期エネルギー受給見通しでは「・・・約 10 億 kWh 以上のエネルギー削減への貢献が見込めることから、HTS（高温超電導）適用機器の早期の社会実装が期待される」と報告されている。また、2015 年 8 月、経済産業省産業技術環境局が要求した平成 28 年度産業技術関係概算（科学技術関係予算）要求の概要には、次世代の市場創出につながるナノテク・材料分野等に対する戦略的基盤技術研究開発の推進分野の一つに、「高温超電導実用化促進技術開発（新規）プロジェクト」が含まれており、「大きな市場創出が期待される高磁場コイル分野や送配電分野において、超電導技術を世界に先駆けて社会実装することを目指し、・・・」の内容のプロジェクトで、平成 28 年から平成 32 年までの 5 年間の事業として紹介されている。その内容には、「液体窒素温度でも確実に性能が発揮できる線材の性能向上、線材の大量生産プロセス技術の確立、冷却システムの効率向上などに取り組みます。」との記述があることから、経産省も高温超電導線材の開発を 2016 年度から支援を復活・開始する計画があり、期待できると考えられる。

最後に、(株)フジクラが超電導産業界で世界をリードする地位を保ち、さらに大きく飛躍するために、以下のコメントをさせて頂きたい。歴史から明らかなように、科学技術は世界を巡る。古くは造船、鉄鋼産業、近年では自動車等の輸送機器産業、半導体産業、光ファイバー等通信機器産業、IT 産業の開発はその主体が日米欧のみならず韓国、BRICs 諸国（ブラジル、ロシア、インド、中国）を含めた生産拠点・役割分担が年々変化してきている。超電導産業もいずれはアジアが主たる生産拠点になるであろう。その時に我が国がどのような立場・地位を占めているかが問題である。そのためにも前述の我が国の半導体産業の轍を踏まないように、要因の分析を行い、グローバルな時代にふさわしい研究開発、事業化体制の構築が望まれ、コア技術をしっかりと押さえて、オープンイノベーションマインドで明るい未来を目指した(株)フジクラの更なる発展を期待するものである。

