

掲載内容 (サマリー) :

トピックス :

- ISTEC 理事長の交代
- 「世界初のイットリウム系超電導変圧器」の開発について、電気学会「電気学術振興賞 進歩賞」を受賞

特集 : 超電導技術動向報告会報告

- 超電導技術動向報告会 2011 開催報告
 - 超電導百周年を迎えて—酸化物超電導技術の台頭—
 - 超電導線材の歴史と今後
 - 超電導線材の交流損失低減技術の過去・現在・未来
 - Y系酸化物超電導の可能性
 - 電力機器等エネルギー応用
 - 超電導デジタル回路の歴史と将来
 - 電子顕微鏡搭載 (LTS) 超電導 X線検出装置とそれをを用いた材料分析
 - 高温超電導デバイス技術と SQUID 応用の進展
 - Y系線材の臨界電流とその評価法
 - 超電導技術における国際標準化の動向
 - 超電導の歴史と今後
-
- 超電導関連 2011年7-8月の催し物案内
 - 新聞ヘッドライン (5/18-6/17)
 - 超電導速報—世界の動き (2011年4-5月)
 - 隔月連載記事—イットリウム系超電導線材の開発の道のり (その4)
 - 読者の広場(Q&A)—最近、強力超電導磁石で「卓上MRI」実現へ道開くという記事がありました。どのような特長を有していてどのような応用が期待されるのでしょうか?

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

〈発行者〉

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13

Tel (03) 3536-7283 Fax(03) 3536-7318

超電導 Web21 トップページ : <http://www.istec.or.jp/web21/web21.html>



この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



トピックス : ISTEK 理事長の交代

財団法人国際超電導産業技術研究センター
常務理事 田島克己

財団法人 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) は、平成 23 年 6 月 15 日に芝パークホテルで開催した第 48 回通常理事会、第 38 回評議員会において、勝俣恒久理事長 (東京電力株式会社取締役会長) の退任に伴う後任の新理事長として、関西電力株式会社 取締役会長 森詳介氏を満場一致で選任した。



森理事長 新任挨拶

勝俣理事長は、昨年の 6 月に荒木浩理事長の後任として理事長に就任したので、約 1 年で理事長を退任することとなったが、この間、超電導技術開発の進展、ISTEC の発展等に多大な貢献をされた。

理事会終了後、新旧理事長の挨拶が行われ、勝俣理事長は、「超電導は夢の技術だと思っていたが、実用化が見通せる段階にある現実の技術であることがわかり、頼もしく感じた。電力機器等の超電導機器の実用化は、まだ道半ばであるので、森新理事長のもとで、引き続き技術開発に邁進されるようお願いしたい」との挨拶をされた。また、森新理事長は、「超電導関連プロジェクトが順調に進捗していることを実感でき、大変心強く思った。超電導機器の一日も早い実用化に向け全力を尽くして参る所存なので、関係する皆様方の引き続きのご支援、ご協力をお願いしたい」との挨拶をされた。

また、本理事会・評議員会では、上記に加え、「平成 22 年度事業報告及び収支決算」等の議案が、原案通り可決された。

なお、議事の終了後、経済産業省の福島研究開発課長より「我が国の研究開発の状況について」という演題で講演が行われた。

[超電導 Web21 トップページ](#)

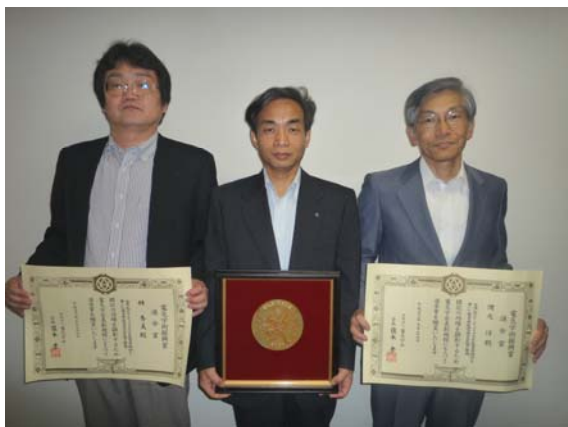
トピックス：「世界初のイットリウム系超電導変圧器」の開発について、電気学会「電気学術振興賞進歩賞」を受賞

九州電力株式会社
総合研究所 電力貯蔵技術グループ
グループ長 林 秀美

電気学会第99回通常総会（5月27日）において、九州電力と九州大学らが共同で実施した世界初の「イットリウム系超電導線材を用いた電力用超電導変圧器」の開発が「電気学術振興賞進歩賞」を受賞し、併せて、茂田総合研究所長に「研究者育成に対する感謝状」が贈呈された。本賞は、電気に関する学術・技術に於いて新規な理論やシステム等を提案・実証し、顕著な成果を挙げた者に与えられる賞である。

今回受賞した400kVAイットリウム系超電導変圧器では、実用変圧器の技術確立を目指して、線材の耐短絡技術や電流均一化技術など独自の技術を開発した。また、電力系統の事故時等に発生する短絡電流とその電流による強大な電磁力に耐えうる性能の実証により、Y系超電導変圧器の実用化に向けて大きく前進した。今回の受賞はこれらの成果が評価されたものである。今後は、本技術を進め、冷却システムを含む小型で高効率な2MVA級超電導変圧器を開発する予定である。

なお、本技術は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から受託して進める「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトのうち「Y系超電導変圧器の技術開発」において、国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム及びファイナセラミックスセンター（JFCC）と共同に開発している。（[超電導 Web21,2010年10月号参照](#)）



電気学術振興賞進歩賞を受賞した
左から岩熊准教授、林グループ長、岡元主幹

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会報告

「超電導技術動向報告会 2011 開催報告」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
普及啓発部
部長 宮崎 智

財団法人国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) は、2011 年 5 月 23 日 (月) 9:30~17:00、都市センターホテル (東京都千代田区平河町 2-4-1) で超電導技術動向報告会 2011 を開催しました。

本報告会は ISTEC が受託し進めているイットリウム系超電導電力機器技術開発を始めとした各種プロジェクトの成果について報告すると共に、超電導技術に関連した研究開発を進めている企業・大学・研究機関から最新のトピックスについて報告いただき、超電導技術の産業化への展望や研究開発の方向性等を討議する機会として、財団法人 JKA から競輪の補助金を受けて毎年開催しております。

本年の報告会は、ISTEC 清川寛 専務理事の開会挨拶で始まり、経済産業省 福島洋 産業技術環境局 研究開発課長、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 佐藤嘉晃 エネルギー対策推進部長から来賓祝辞を頂きました。講演は、午前に 5 つ、午後に 7 つ行われ、2011 年は超電導現象発見 100 年目の節目の年であるため、これらの講演において超電導技術の歴史や動向についても触れられました。

午前の基調講演では、ISTEC 超電導工学研究所 塩原融所長が、「超電導百周年を迎えて一酸化物超電導技術の台頭」と題して、東日本大震災の被災者の皆様方へのお見舞いの言葉の後、超電導技術の歴史や Y 系線材の構造や作成プロセスの動向、今後の我が国における超電導研究開発の方向性等について報告しました。

午後の基調講演では、独立行政法人物質・材料研究機構 戸叶一正 リサーチアドバイザーが、「超電導の歴史と今後」と題して、超電導現象発見当時の黎明期、金属系材料による高磁場応用、銅系酸化物高温超電導体や新たな超電導体 (鉄系や金属系材料) について、そして今後の応用等の展開について報告しました。

また、青山学院大学 秋光純 教授が、「新超電導物質探索 (Hg から MgB₂、今後への期待)」と題した講演で、MgB₂の概要やその応用 (MRI、ナノ微細加工)、ダイヤモンドや SiC 半導体等の超伝導特性等について報告しました。

最後に ISTEC 田島克己 常務理事の閉会挨拶を持って、報告会は約 150 名の参加を頂き、盛況のうちに終了しました。この場を借りて御礼申し上げます。

ISTEC は、今後も超電導技術の実用化の推進の一助となるよう本報告会を企画、開催して参ります。引き続きご支援ご協力を賜りますようよろしくお願いいたします。



基調講演 (SRL 塩原所長)

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会報告

「超電導百周年を迎えて－酸化物超電導技術の台頭－」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
所長 塩原 融

はじめに

3月11日に発生いたしました東日本大震災により、被害に遭われた皆様には謹んでお見舞い申し上げますと共に一日も早い復興を衷心よりお祈り申し上げます。

大地震、大津波、原子力発電所の事故が一時に襲う未曾有の国難の中、電力供給量不足による計画停電の実施、放射能環境汚染などが社会不安を与える結果となり、我が国にとって過去に例を見ない非常事態に直面しています。

我が国政府においても策定途上にあった第4期科学技術基本計画の再検討を行い、これまで培ってきた知識と成果を活用し、科学技術が果たすべき役割を明確化して、この難局の克服に貢献していくと、3月31日に科学技術政策担当大臣が当面の対応を発表しています。

超電導技術に関しては、経済産業省資源エネルギー庁及び独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が今年3月に策定した「省エネルギー技術戦略2011」の中で、今後の省エネルギー技術の展開として、我が国の卓越した省エネルギー技術の飛躍に向けて、「世界をリードしている日本の超電導技術をコア技術として、省エネルギーシステムに仕上げるなどの戦略的アプローチが望まれる」と記述されています。このように我が国の超電導技術は省エネルギー革新技術の切り札になるものと大いに期待されています。

今年は、1911年のオランダのカメリン・オンネス卿による水銀の超電導現象発見から百周年を迎える記念すべき年になります。

今回開催された「超電導技術動向報告会2011」においては、この百周年を機会に超電導の歴史を振り返ると共に今後への期待を、新超電導物質の探索、高温超電導線材、薄膜電子デバイス、電力機器等エネルギー応用を含めた超電導機器応用の分野において、第一線で活躍されている先生方、ならびに研究者から報告されました。

1. 超電導現象発見以降の線材開発の進展

超電導百周年を振り返ると、1911年にカメリン・オンネス卿により4.2Kで水銀の電気抵抗が零になることが発見された。その後、種々の金属系低温超電導材料の発見、第2種超電導体機構、バーディーン、クーパー、シュリファーによるBCS超電導機構の解明と続き、NbTi超電導商用線材の実用化、低温超電導機器応用に繋がった。1986年のベドノルツ、ミュラーによる酸化物超電導体の発見以降、超電導臨界温度が液体窒素温度の沸点(77K)を超えるイットリウム(YBCO)系、ビスマス(BSCCO)系、タリウム(TBCCO)系、水銀(HgBCCO)系等の銅酸化物系の高温超電導材料の発見が続き、高温超電導フィーバーが世界中で駆け巡った。当初この酸化物系超電導材料がセラミックであることからその脆性を回避する銀シース線材の作製が試みられた。作製された各種銀シース線材の臨界電流密度(@77K,自己磁場)の測定結果として、各々YBCO: 4.1×10^3 A/cm²、BSCCO: 3.5×10^4 A/cm²、TBCCO: 1.0×10^4 A/cm²、が発表された。Y系超電導線材の臨界電流密度の値が低かったことから、将来の応用に対して危惧する意見が噴出した。特に、超電導応用にとって臨界温度に加えて重要な臨界電流が高温超電導体では本質的に低いとの意見は、フィーバーを一時沈静化させた。

このような意見が世界的に著名な物理学者からでたことで、また世界的科学誌“Science”にタイトルが“Superconductivity: Is the party over?”という衝撃的な解説が掲載され、2週間後には New York Times 紙が“Superconductors showing a flaw that dims hope; may be inherently incapable of carrying enough current”、朝日新聞等にも「高温超電導の送電等の応用は困難？」という記事紹介された。すなわち超電導応用には電気抵抗零でいかに大電流を流せるかという課題が突きつけられた状況になった。その後、Bi系では銀シース線材で、超電導相(2223相)の単相化、高密度化(酸素分圧制御・高圧熱処理法)等により長尺線材が開発された。Y系超電導材料の線材化においては、結晶粒の面内高配向化技術の研究開発から進められ、IBAD法、RABiTS法、ISD法等が開発された。結晶粒界面弱結合の課題は、結晶粒高配向化技術により解決が可能であるとの研究成果が出て、再度Y系超電導線材の本格的な研究開発競争が世界中で繰り広げられた。最近では、IBAD法とRABiTS法が結晶粒の配向化技術として採用されている。特にIBAD法では(株)フジクラによるIBAD法の開発に続き、ISTECによりPLD法等との組み合わせで、より高速に結晶粒の面内高配向が得られる技術が開発され、長尺化が更に進められることになった。最近では超電導層をホットウォール型RTR加熱方式でのPLD法による成膜技術により長さ方向での I_c の均一性が±1.35%の実績も報告されている。

図1に臨界電流(I_c)と線材単長(L)の積の値を指標として、高温超電導材料の発見後のBi系及びY系超電導線材の開発の進展を示す。前述のように、発見当初はBi系銀シース超電導線材での開発が進み、その後遅れてY系超電導線材の開発が急速に進んだ状況が伺える。尚、ほぼ同一の線材断面積約1.1 mm²(Bi系:4.4 mm幅x250 μm厚, Y系:10 mm幅x110 μm厚)での臨界電流(@77 K, s.f.)で比較した。

図2にはY系超電導線材開発の国際比較を、縦軸に臨界電流 I_c (@77K, s.f.)と、横軸に線材単長L(m)で纏めた。日米におけるY系超電導線材の開発戦略の相違が伺える。すなわち、我が国

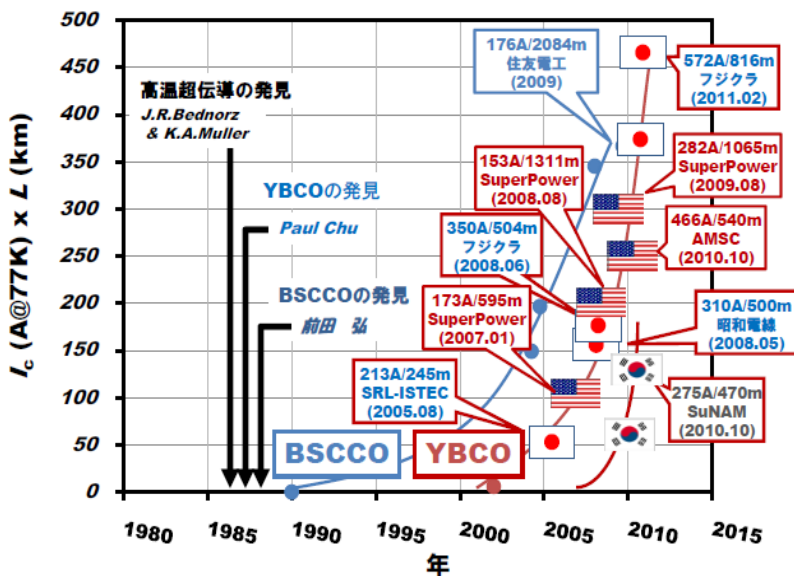


図1. 高温超電導線材の開発の進展

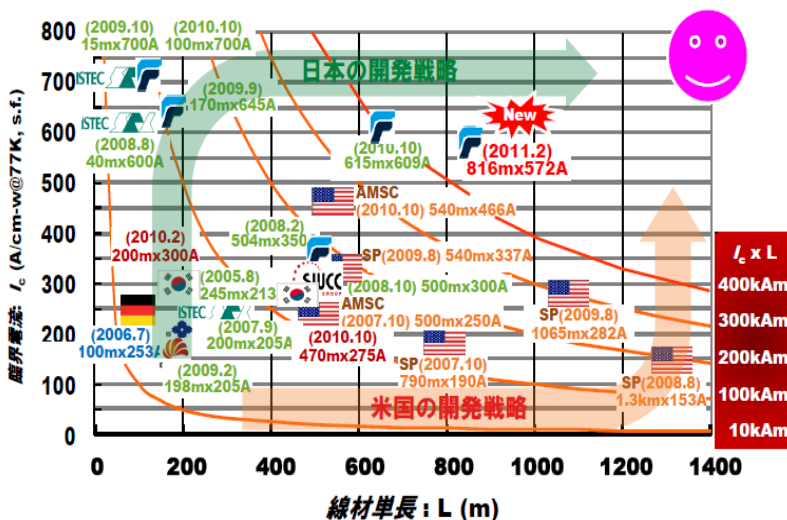


図2. Y系超電導線材開発の国際比較(2011.2)

では当初、性能(I_c)の向上から開発が進められ、その後企業により長尺化が進められている。一方、米国では、当初から一貫して線材長尺化が進められてきている。尚、現時点では臨界電流(I_c)と線材単長(L)の積の値では、我が国の(株)フジクラが世界で唯一 400 kAm を超えた実績を発表しており、線材開発では日本が世界をリードしていることが伺える。今後更なる性能向上、長尺化、歩留り向上、低コスト化、量産化が進められることを期待している。

2. Y系超電導電力機器開発

我が国の送変電損失の年度推移を図3に示す。送変電損失は、この30年に亘り、年間総発電電力量(約1兆kWh)の約5%でほぼ飽和状態にあると言える。資源エネルギー庁の概算によれば、2000年度の1年間での約458.07億kWhの損失は、100万kW級の原子力発電機ほぼ6基分(100万kW×24時間×365日×12/13(稼働率)×6基=485.2億kWh)の発電量に相当する。尚、送変電損失の内訳は送電線2.5%、発電所1.9%、柱上変圧器の無負荷損0.8%と報告

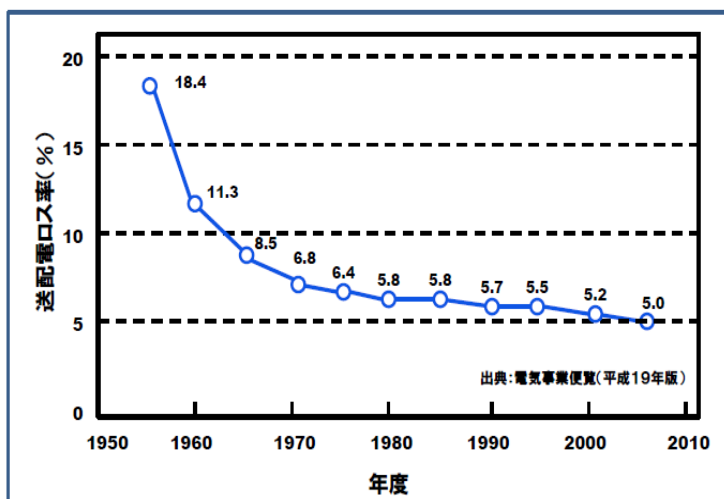


図3. 送配電ロス率の推移

されている。このように飽和状態にあるような損失の低減には、革新的な超電導技術の適用が大きく期待されることである。本来、超電導線材は電気抵抗に起因したジュール損失が無視できることから、交流損失の低減により、冷却ペナルティを含めて損失を大幅に低減できる。

2.1 超電導ケーブル

これまでの送電ケーブルの超電導化開発の歴史を表1に示す。1970年代に金属系低温超電導(Nb_3Sn)線材を用いたケーブルの開発が米国で開始されていた。1986年の高温超電導材料の発見後、1999年から2000年代前半にかけて日本、米国、欧州、中国でBi系超電導線材を用いた交流送電ケーブルの開発が進められてきた。その後2008年以降から世界中の送電ケーブルの開発が、Y系超電導ケーブルの研究開発にシフトしつつあることが伺える。

Y系超電導ケーブル開発のメリットは、従来の地中送電線の損失(ロス)を1/3に低減し、省エネルギーに貢献し、更にはCO₂排出量の大幅な削減に繋げることである。また更には、大電流送電により、コンパクト大容量送電も可能となる。Y系超電導ケーブルのメリットと特徴を図4に示す。架空送電線は安全性、景観の関係から、先進国では地中送電への切り替えが盛んに進められている。従来の電力ケーブルは、都市部において洞道と呼ばれる直径約2~3mのトンネルに布設されている。今後の電力需要増大を想定した場合、洞道の新規布設費用は莫大であり、超電導電力ケーブルに置換われれば、地中に埋設された約760mm角の管路内の内径約150mmの管内に挿入することが可能で、図のように管路と呼ばれる既設設備の有効利用により、コンパクト大容量化ケーブルの敷設が可能となる。一方、既設の電力ケーブルのうち、2020年頃にはOF(Oil Filled)ケーブルやPOF(Pipe-type Oil Filled)ケーブルは、布設後約40年が経過するものも多くなることが見込まれており、老朽化に伴う漏油の問題等の理由から、地中化率の増加と共に順次取替が必要となってくると考えられる。更に、超電導ケーブルの特徴を活かした大電流送電により、過負荷系統への超電導電力ケーブルを適用すること、また、154kVの回線を66kVの大電流送電回線へ置き換えることも可能となり、系統の簡略化も期待される。

表1. 超電導ケーブル開発の歴史

年代	超電導ケーブル	
1900	1911	Hg 超電導発見
	1967	100GW DC-ケーブル提案 (IBM) (Nb ₃ Sn, 1000km, 100GW, DC200kV/500kA, LHe@4.2K)
	1972	Brookhaven Superconducting AC-Power Transmission System研究開発開始
	1982	同上運転開始 (Nb ₃ Sn, 115m, 138kV-3相, 980MVA, @ 9K)
2000	1986~	高温超電導 発見 (YBCO :1987, BSCCO:1988)
	1999	30m 単相Biケーブル (住友電工, 東京電力)
	2000	Southwire (USA) 単心3相Biケーブル (12.5kV, 1.25kA, 30m)
	2001	3心一括型Biケーブル (住友電工, 東京電力) (66kV, 1kA, 100m)
		Detroit Edison (USA) 単心3相Biケーブル (24kV, 2.4kA, 120m)
		Copenhagen単心3相Biケーブル (36kV, 2kA, 30m)
	2003	雲南プロジェクト(中国)単心3相Biケーブル (35kV, 2kA, 33.5m)
		蘭州プロジェクト(中国)単心3相Biケーブル (10.5kV, 1.5kA, 75m)
	2004	単心Biケーブル (Super-Ace: 電中研, 古河電工) (77kV, 1kA, 500m)
	2006	Columbus (USA) 3相同軸Biケーブル (13.2kV, 3kA, 200m)
2007		Albany (USA) 3心一括型Bi (Bi/Y) ケーブル (34.5kV, 800A, 350m/30m (Y))
		韓国電力 (KEPCO) 3心一括型Biケーブル (22.9kV, 1.25kA, 100m)
		3心一括型Yケーブル (NEDO応用基盤プロジェクト) (66kV, 1kA, 20m)
	2007	DAPASプロジェクト(韓国)3心一括型Biケーブル (22.9kV, 1.26kA, 100m)
		3心一括型Biケーブル (NEDO実証プロジェクト) (66kV, 3kA, 200'300m)
	2008	LIPA (USA) 単心3相Biケーブル (138kV, 2.4kA, 600m)
		HYDRA (USA) 3相同軸Yケーブル (13.8kV, 4kA, 300m)
		3心一括型Yケーブル (NEDO:Y系プロジェクト) (66kV, 5kA, 15m)
		単心Yケーブル (NEDO:Y系プロジェクト) (275kV, 3kA, 30m)
		GENIプロジェクト(韓国)単心3相Yケーブル (22.9kV, 1.26kA, 500m)
2009	Russianプロジェクト(ロシア)単心3相Biケーブル (20kV, 1.5kA, 200m)	
	Super3C (EU, スペイン)単心Yケーブル (10kV, 1kA, 30m)	
2010	New Orleans (USA) 3相同軸Yケーブル (13.8kV, 2kA, 1760m)	
2012	北京プロジェクト(中国)Yケーブル (110kV, 3kA, 1000m)	
計画中	Neuon プロジェクト (Amsterdam, オランダ) 3相同軸Yケーブル (50kV, 3kA, 6000m)	

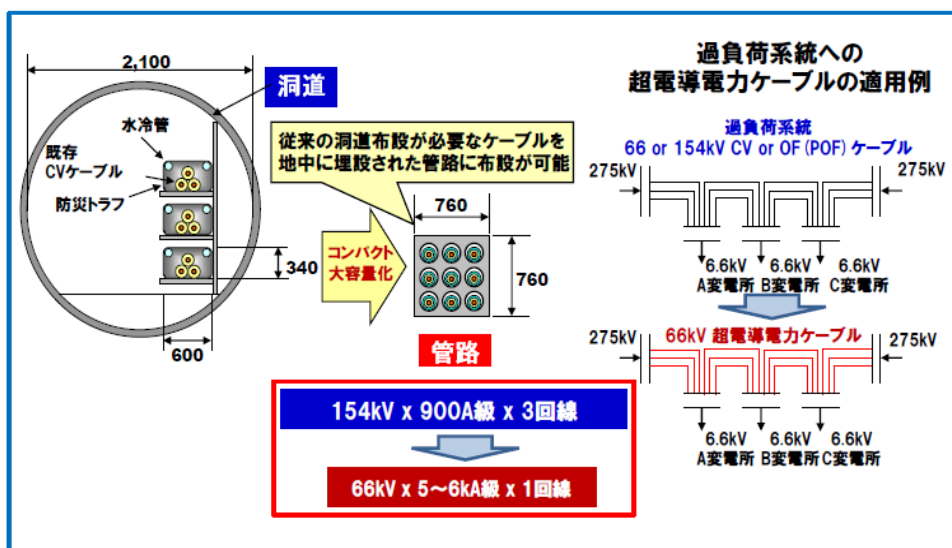


図4. 超電導ケーブルのメリット・特徴

超電導送電ケーブルにおける交流損失は、発生磁場は小さいものの、ほぼ電流の2乗に比例することから、超電導線材の臨界電流の大幅な向上による積層数の低減、運転電流(I_{op})／臨界電流(I_c)比

(負荷率)の低減、線材の超電導層厚さの薄肉化が要求されると共に、ケーブルの断面を真円形状でスパイラル導体化することが重要であると考えられており、Y 超電導線材への期待が大きい。特にケーブル断面形状が真円状になると、交流通電時の磁束変動は超電導線材の厚さが変動幅(移動距離)になる。Y 超電導線材は、超電導層及びAg 安定化層を含めた厚さが数十 μm であり、Bi 系超電導線材 (BZO 等を 2223 超電導フィラメント/Ag マトリックス間に挿入したバリア線材を除いた市販 Bi 系超電導線材)の厚さ、約 250 μm に比して 1/10~1/5 となり、交流損失の大幅な低減が期待されている。

これまでに我が国の大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発では、構造設計を「超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層」とし、ケーブル損失を 4 層導体で 1.5 W/m-相@5 kA、シールド導体で 0.4 W/m-相@5 kA までの交流損失低減を短絡試験、接続試験で検証し、性能低下や異常無きことを確認している。また、高電圧・低誘電損失ケーブル化技術の開発では、ケーブル損失(交流損失及び誘電損失)を 0.70 W/m まで低減することに成功している。超電導ケーブル中間接続部における素線間接続は数 n Ω の低抵抗を実現し、課電試験でも導体、接続部で異常が無いことを確認している。

2.2 超電導変圧器

これまでの変圧器の超電導化開発の歴史を表 2 に示す。1986 年の高温超電導材料の発見後、2000 年代前半にかけて日本、欧州、米国、韓国、中国で Bi 系超電導線材を用いた超電導変圧器の開発が進められてきた。特に我が国の変圧器の開発は九州大が主体となり、鉄道・車両用を含めて進められてきたことが伺える。その後 2006 年以降から Y 系超電導変圧器の研究開発にシフトしつつあることも伺える。

表2. 超電導変圧器開発の歴史

年代	超電導変圧器	
1900	1911	Hg 超電導発見
	1986	高温超電導 発見 (YBCO :1987, BSCCO:1988)
}	~	・九州大学, Bi-2223超電導単相変圧器:630kVA,6.6/3.3kV,@77K
	1993	・ABB (EU)、Bi-2223超電導3相変圧器:630kVA,115/13.1kV,@77K
}	1997	・SPI (USA,Waukesha他)、Bi-2212超電導単相変圧器:1MVA,
	1998	13.8/6.9kV,@25K
2000		・福岡県コンソシアム (九州大,富士電機)、Bi-2223超電導単相変圧器:
	2001	1MVA,22/6.9kV,@66K
}		・Siemens (EU)、Bi-2223超電導単相変圧器 (鉄道・車両用):
	2003	100kVA,5.5/1.1kV,@77K
}		・SPI (USA,Waukesha他)、Bi-2223超電導3相変圧器:5/10MVA,
	2004	24.9/4.2kV,@25K
}		・Super-Ace (九州大,富士電機)、Bi-2223超電導単相変圧器:
		2MVA,66/6.9kV,@66K
}		・DAPAS Project (韓国)、Bi-2223超電導単相変圧器:
		1MVA,22.9/6.6kV,@65K
}		・鉄道総研 (JR総研,九州大,富士電機)、Bi-2223超電導単相変圧器:
		4MVA,25/1.2kV,@66K
}		・TBEA (中国)、Bi-2223超電導3相変圧器:630kVA, 10.5/0.4kV,@77K
	2005	・Siemens (EU)、Bi-2223超電導単相変圧器 (鉄道・車両用):
}		1MVA,25/1.4kV,@66K
	2006	・Y系超電導電力機器技術開発 (NEDO:九州電力,太陽日設,ISTEC,九州大)
}		YBCO超電導3相変圧器:2MVA,66/6.9kV,@66K
	2008	・SPI (USA,Waukesha他)、YBCO超電導3相変圧器:
		25MVA,115/13.1kV,@70K

Y系超電導変圧器開発のメリットは、従来の油入変圧器に比した効率向上と共に、コンパクト、軽量、設置面積縮小、不燃化である。変圧器の巻き線に超電導線材を用いることにより電流密度が高くなることから、変圧器本体の小型化が可能となることは、Bi系超電導変圧器開発の成果で明らかになっている。しかしながら、交流損失が大きいと、その損失相当の熱を抜熱・冷却することが必要になり、冷却装置が大きくなるという欠点が報告された。更には絶縁対策面でも、大電流密度化を期待した低温(～25 K)での変圧器において大きな課題を残し、米国では一時開発が中断された。Y系超電導変圧器のメリットと特徴を図5に示す。Y系超電導線材は高温・磁場中での臨界電流が高いことから、冷媒として液体窒素を使用し、絶縁性能を確保することが可能である。交流損失低減に関しては前述のケーブルの場合とは異なり、コイル形状における磁束の変動に起因したロス、テープ線材面に垂直な磁束線の変動が主たるロスである。このことから、変動幅(移動距離)を短くする目的で、電氣的にカップリングのないフィラメント化が有効である。Y系超電導線材の構造の特色として、金属基板と超電導層間の中間層が絶縁材料であることから、超電導線材幅低減を実現するための溝加工による細線化(フィラメント)加工により、交流損失の低減が見通せている。既に5分割の溝加工を施した線材を用い、転位巻き線と共に特殊な巻き線方式により、コイルでのヒステリシス(磁化)損失が、無分割線材を用いたコイルの1/5になることが我が国で初めて成功している。このようにY系超電導線材により、冷却装置を含めたコンパクト・軽量・高効率超電導変圧器システムの開発への期待が大きくなり、米国でもこの成果を受けてのことと推察できるが、Y系超電導変圧器の開発が再開された。

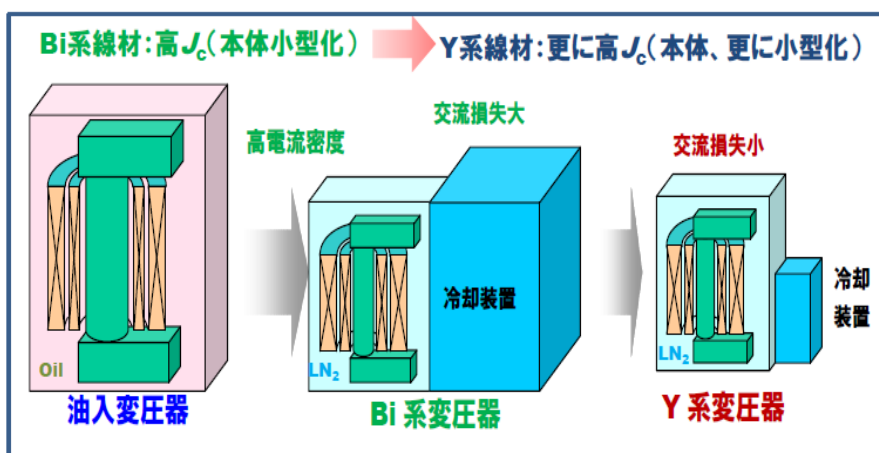


図5. Y系超電導線材を用いた変圧器のメリット

我が国におけるこれまでのY系超電導線材を用いた超電導変圧器の開発では、400 kVA 短絡モデル変圧器を試作、短絡試験を実施し、定格の6倍の短絡電流での健全性確認及び2 kA級の通電特性と、巻線劣化や異常がないことを検証している。また、2 MVA級超電導変圧器モデル検証では、66 kV/6.9 kV-2 MVA級モデルの設計及び冷却システム系の検討を実施し、66 kV/6.9 kV-20 MVA級配電用変圧器実機の設計を行った。更には、小型巻線モデルで、図6に示すように、1200 Aの短絡電流を43 Aに限流することに成功しており、この限流効果は1/30相当になる。短絡事故時の大電流による超電導材料の超電導/常電導相転移現象を利用し、変圧器機能を発揮できるコイル(変圧器に必要な励磁突入電流では限流しないことが必要条件)に対する限流機能付加に成功している。

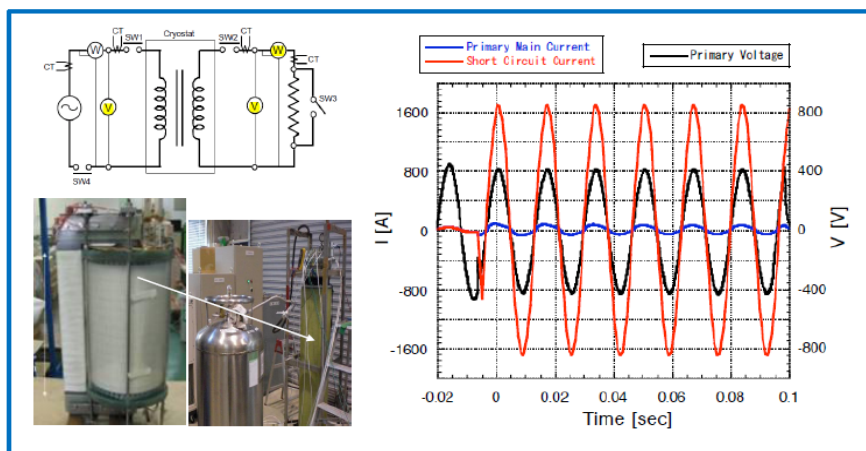


図6. 変圧器への限流機能付加技術の検証

2.3 超電導電力貯蔵 (SMES)

超電導電力機器の開発は、上記の交流送電ケーブル、変圧器以外は SMES (電力貯蔵)、限流器等が世界中での開発対象となっている。限流器の開発に関しては、我が国の国プロでは前述のように変圧器の開発と共に進められている。SMES に関しては、系統制御技術としての要求と共に、小規模で済む産業応用への波及分野として、電気エネルギーに高い品質と信頼性を要求するハイテク産業における瞬低 (瞬時電圧低下) 対策技術としても、広汎な普及が期待されている。我が国では高磁界且つコンパクトコイル構成技術の開発、並びにメンテナンスを容易とするコイルの伝導冷却技術開発を行った上で、SMES コイルシステムに必要となるコイルの高信頼性・高耐久性要素技術の開発を行うことで、2 GJ 級 SMES の開発を目指している。

我が国における SMES の開発は、これまでに NbTi 線材を用いて 20 MJ-SMES が開発されたのが最大で、Y 系超電導線材を用いた SMES の開発は始まったところといえる。米国においても昨年よりエネルギー省(DOE)の ARPA-E プロジェクトの中で、Y 系超電導線材を用いた 3.4 MJ@4.2 K&30 T の SMES の開発が 3 年計画で開始したとの発表があった。韓国でも Y 系超電導線材を使用した超電導 SMES (2.5 MJ) の開発が進行しているものの、我が国が目指す 2 GJ 級は群を抜いたスケールと言え。これまで既に、数個の要素コイルを作製し、2 GJ 級 SMES 運転時の大電流通電と、フープ応力 (BJR: 磁場 B、電流密度 J、半径 R より計算) への耐性評価を行った結果、多層巻コイルで 600 MPa を超えるフープ応力、4 束導体コイルで 2.6 kA 通電をそれぞれ実証している。

2.4 産業用等超電導機器応用

Y 系超電導線材は高磁場中での臨界電流特性が非常に高いことから、種々な応用への展開も大いに期待されている。欧米ではモータ (電動機) の開発が高温酸化物超電導線材を用いて活発に進められている。我が国でも、先ず Bi 系超電導線材を用いた船用モータの開発が進められている。更には、永久磁石(PM)を使用した同期電動機の回転子の永久磁石を、Y 系超電導線材を使用した界磁子コイル (電磁石) に置き換え、永久磁石の材料である Nd, Dy 等、希土類系希少金属の使用量を大幅に削減する目的でのモータ用界磁子コイルの開発も進められている。同期電動機等回転機の出力は回転数に比例するが、産業用電動機 (>1000rpm)、船用モータ(100~300 rpm)の開発は、省エネルギー効果を発揮できることから、今後一層の開発が期待されている。また、再生可能エネルギー、自然エネルギー利用、CO₂ 排出削減の目的での風力発電機 (数十 rpm) の開発も、Y 系超電導線材を用いることにより、小型軽量化、大容量化が可能となるので、米国、欧州で開発が進められようとしている。特に、風力発電機の大型化(>3 GW)、洋上風力発電の導入促進には風車のナセル部の軽量

化が不可欠であり、効率向上、増速ギア（変速機）レス化、軽量化の目的で、少なくとも界磁子を Y 系超電導磁石に置き換えることを目的とした開発が進められている。

Y 系超電導線材の特長である、高磁場中での高臨界電流特性を利用した機器開発にも期待が寄せられつつある。約 50 年前に核磁気共鳴現象が見出され、複雑な有機化合物の分子構造解析を可能にしたのが NMR(Nuclear Magnetic Resonance)分光法である。最近では、天然・人工の高分子やタンパク質、DNA の構造解析などが研究の興味の中心となっている。高性能の NMR には強力な磁場を発生する超電導磁石が備えられており、近年国内では、高分子量で複雑なタンパク質を解析するために優れた NMR 装置が開発されている。NMR 装置の高性能化には、分解能、感度向上のための高磁場化、信号分離を良好にするための高空間均一度、信号積算を可能にするための高時間安定度、即ち励消磁により高温超電導線材中に生じる遮蔽電流による磁場のドリフト低減が求められている。図7にこれまでの NMR マグネットの高磁場化開発の進展を示す。1 GHz の高分解能 NMR には >23.5 T の磁場が必要であり、現在、世界中で NMR の高分解能化(高磁場化)を目指した開発が進められている。

Y 系超電導線材を用いると、これまで不可能であった 1 GHz(23.5 T)を超える磁場を持つ NMR 装置が可能となり、磁石のコンパクト化も可能となる。NMR 装置は、前述のように、高磁場 (= 高周波) ほど感度や分解能が良くなるので、より高い磁場が求められている。しかし、これまでの高磁場の NMR 磁石は感度や分解能が良い反面、磁石のサイズが大きくなる欠点があった。機械的な強度が強い Y 系高温超電導線材を用いれば、従来に比べてはるかにコンパクトな高磁場 NMR 磁石が製作できることに注目して、次世代 NMR 磁石開発が我が国でも進められている。

図8に高磁場中の工業的臨界電流密度 (J_e : 臨界電流 I_c を線材総断面積で除した値) の、各種線材での比較を示す。Y 系超電導線材の高磁場特性が顕著であることが伺える。 J_e 値は 20 K においても、これまでの金属系低温超電導線材で最高性能を有している Nb₃Sn の 4.2 K(液体ヘリウム温度)の特性を凌駕すると共に、30 T の磁場中で実用化レベルの J_e 値を示している。今後、1 GHz システム(23.5 T)に向けて Y 系高温超電導線材を用いたシステム開発が日米欧で競われ、NMR の高分解能化をめぐる、当分、超強磁場超電導磁石の熾烈な開発競争が繰り広げられそうな情勢である。

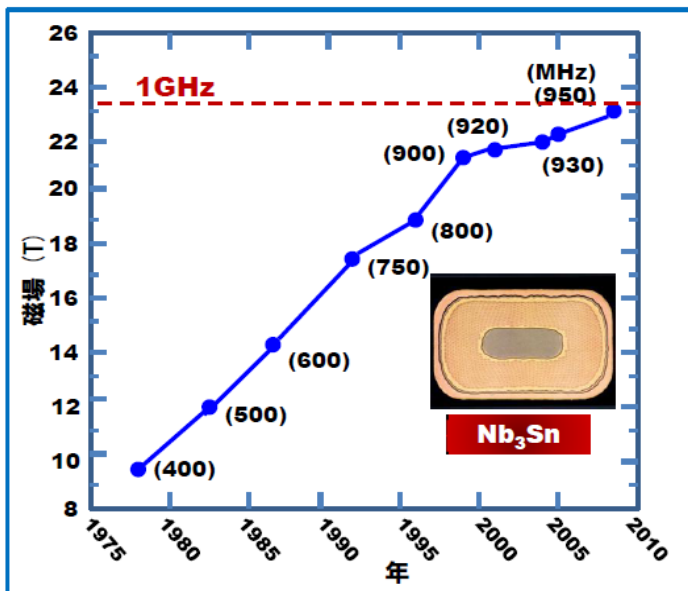


図7. NMRマグネットの高磁場化開発の進展

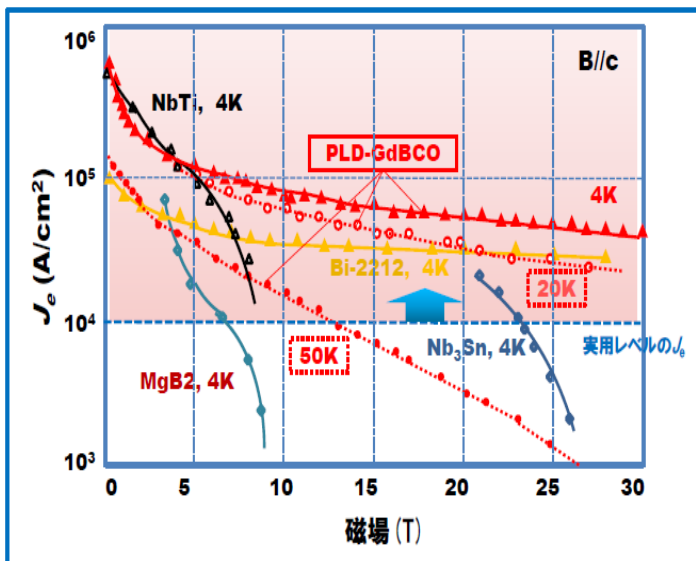


図8. 各種超電導線材の高磁場特性

今後の展開

現在、Y系超電導線材を用いた超電導電力機器開発プロジェクトは前期3カ年を終え、折り返し地点にあり、プロジェクト後半の2年間は、各テーマ（SMES、ケーブル、変圧器、Y系超電導線材）において、最終目標を早期に達成し、プロジェクト終了後の実用化技術開発（長期信頼性などの実証試験）、2020年頃以降の導入・普及へという実用化への先鞭を付ける。また、プロジェクト全体としては、研究開発実施体制の見直しや、他の国家プロジェクトや研究機関などにおいて得られた成果の共有、実施内容の統廃合などを行い、各方面と様々な連携を取って進めていく。

以上、超電導技術は機器の高効率化、コンパクト化等のメリットにより、地球環境問題であるCO₂削減、省エネルギーに大きく寄与できる技術であると共に、現状の日本の優位性を維持し、成長戦略分野としても期待されている。今後、更なる技術開発の進展と共に、2020年頃までに、実用化ならびに超電導産業の事業化に繋がるべく、オールジャパン体制での取り組みが重要である。

本稿は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託を受けて実施している「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトの成果を一部引用している。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会報告

「超電導線材の歴史と今後」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所線材研究開発部
部長 和泉輝郎

超電導の応用を考えた時、特にパワー応用を始めとする大型応用では線材の開発が不可欠である。歴史的にみても、1911年以降の金属系超電導材料の発見の中で比較的早い時期から線材開発が行われ、1950年代にはNbTi線材が商用化されていた。本稿では、超電導動向報告会において紹介した、金属系超電導線材から、最近開発が盛んに行われている酸化物超電導線材に関する歴史と開発動向についてまとめる。

金属系超電導線材の中で最も広く使われている線材はNbTi線材である。同材料は、 T_c は9Kと高くはないものの加工性に優れることから、現在実用化されている超電導機器のほとんどはこの線材を用いている。開発の歴史をみると、交流損失によるクエンチに対する対策の歴史であり、安定化材や多芯化、フィラメント細径化、ツイスト化などの開発が行われ現在の形態に至っている。既に、MRIで広く実用化され、一般社会の中で唯一利用されている超電導材料となっている。また、リニアモーターカーでも用いられており最も身近な超電導材料といえる。同じ金属系で、特性の観点から、厳しい高磁場利用を目的とした領域に利用されているのがNb₃Sn線材である。同材料は、NbTiに比べて T_c が高く(18K)、臨界磁場も高い特徴(28T, NbTiは10.5T)を持ち、高分解能(高磁場)NMRやITERなどに利用されている。線材化技術における開発としては、外部拡散法やブロンズ法などによるプロセス開発が主体で、NbTi同様、極細多芯化などの技術開発と共に、磁場中特性の更なる向上を目指した第三元素添加技術などが行われてきた。これらのNb系超電導線材に対して、最近、秋光教授らのグループによって発見されたMgB₂は、金属系でありながら39Kという高い T_c を有していることが最大の特徴である。線材化手法としてはPIT法を中心に開発が進められ、メカニカルアロイング法や拡散法による高密度化技術開発が盛んに行われ、特性向上が図られている。最近では、イタリアの会社が長尺線材製造を始めるとともに、20K応用を目指した機器開発が始められている。

上記の金属系超電導材料の実用上の課題は、極低温までの冷却負荷が大きいことと、比熱が小さいことによる熱的不安定である。これらの課題を一気に解決してくれる可能性を持っているのが、高温超電導線材である。前田博士によって発見されたBi系超電導材料、及び米国Chu博士によって発見されたY系超電導材料を用いた線材開発が、世界的に見ても主流である。更に T_c の高いTI系やHg系などの超電導材料はあるものの、毒性がない材料などの観点からBi系、Y系が選択されている。これらの材料の中では、Bi系超電導線材の開発が先行している。これは銀パイプを用いたPIT法による、従来の知見が適用しやすい手法での線材化が可能であったことが大きな要因である。Bi系超電導線材における開発の過程で特筆すべきは、加圧焼成法の開発によるブレイクスルーである。これは、PIT法における最終熱処理の過程で、加圧しながら焼成することで高密度超電導材料を実現したのである。高密度化に伴って超電導相への反応も促進され、ほぼ100%の超電導相率が得られ、同時に均一化、高機械強度化などの多くのメリットが創出されている。既に、短尺では250Aを、量産レベルの長尺線材では180Aの高い I_c を得るレベルに到達している。本材料を用いた応

用開発においても早くから行われており、送電ケーブルに関しては幾つかのプロジェクトを経て、現在「超電導送電システム実証プロジェクト」において東京電力旭変電所内の実系統運転試験を行うことになっている。また、複数種の船用モータ開発にも同線材を提供している。最近では新規分野として、磁気ビレットヒータ用マグネットを製作し、実用化に結びつけている。

一方で、Bi系超電導線材に対して複数の観点（コスト、磁場中特性、機械強度、交流損失等）で優位性が期待できるY系超電導線材の開発が急激に進展している。同線材は発見当初より材料特性に優れていることがわかっていたが、Bi系超電導材料に比べて加工性が劣っていることから、同様の銀シース法では特性の高い線材が得られなかった。結果的に小規模ながら実験室レベルでの薄膜材料で得られている技術を長尺化することで線材とする手法の開発が続けられていた。1998年以降に始まった国家プロジェクトにおいて、本格的にこの線材の開発が展開され、著しい進歩を遂げた。同線材で高い特性を実現するための必要条件は、結晶粒を配向組織化することであり、金属基板上でこの配向組織を得るために様々な手法が提案されたが、現在残っているのは、IBAD中間層を用いる手法か、配向金属基板を用いる手法である。超電導層の形成に関しても複数の手法で開発が進められてきたが、現在では、PLD法、MOD法、MOCVD法などにより長尺線材作製が行われている。十余年の本格的な開発を経て、開発当初は1m-数十Aの線材が、最近では816m-572A（株フジクラ）を得るに至っている。この間、世界的にみると、日米の開発競争が世界を牽引してきており、常にこの二か国がトップを争い続けてきている。Y系超電導線材の最近のトレンドは、適用する機器に即した線材開発である。これまでは、自己磁場中での I_c と長さの積を開発の指標として来ていたが、「リトリウム系超電導電力機器技術開発」に代表されるように、機器開発が本格的に始まると、応用サイドからの要求が多様化、専門化することがわかってきた。これらの要求に応えるべく要素技術の開発が進められている。例えば、磁場中応用に適応した開発として、磁場中での I_c 特性の向上が挙げられる。ここでは、厚膜化により自己磁場中特性と共に磁場中特性も向上させるアプローチや、人工ピン止め点として微細なBaZrO₃ロッドを分散させる手法で、それぞれ40A-90m、30A-60mの磁場中特性（@77K, 3T）を実現している。最近では、人工ピン止め点の開発で新たな材料の開発に成功し、短尺ながら70A@77K,3Tを実現している。また、交流応用に対応した要素技術としては、線材の交流損失を低減させる技術が求められている。この要求に対しては、線材をスクライビング処理することで低損失化する技術開発が進められてきた。具体的には、線材の均質化と細線加工技術の開発により、5mm幅線材を5分割することで、交流損失が分割のない線材に比べて1/5になることを、50m長の線材で確認するに至っている。世界的に見ても、短尺線材で損失低減の報告はあるものの、長尺線材で実証した例はほかにはない。最近では、結晶粒の配向性が著しく高い線材において、交流損失低減に関わる新現象が見出された。まだ、短尺で発現条件（温度、磁場等）も限られているものの、スクライビング等の加工を施すことなしに、自発的に損失が低減する現象である。原理も含めてまだ未解明な部分はあるものの、多くの応用に対して大きな損失低減を、無加工で実現する夢の線材を提供できる可能性を有した現象であり、大きく期待するところである。

本稿では、金属系から酸化物系まで実用もしくは実用寸前の線材に関する歴史と現状を記した。それぞれの線材の特徴と歴史を図1にまとめる。実用化の先行している金属系超電導線材に対して、MgB₂、Bi系、Y系超電導の各線材がそれぞれに可能性を有しており、今後の開発が期待されるところである。

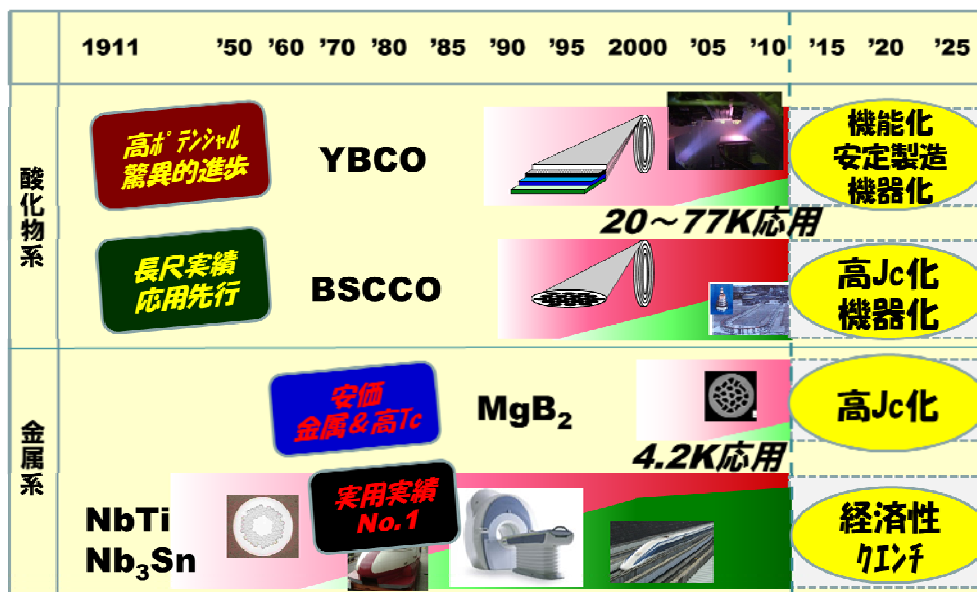


図1 超電導線材開発の歴史と動向のまとめ

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会報告

「超電導線材の交流損失低減技術の過去・現在・未来」

九州大学
超伝導システム科学研究センター
准教授 岩熊成卓

今回の動向報告会では、超電導線材・導体の低交流損失化技術の進展動向を、これまでの超電導応用研究の展開と絡めて報告した。

超電導線材・導体の交流損失は、基本的に、線材における履歴損失と結合損失、および、導体化に伴う付加的交流損失（素線間に誘起される結合電流が発生するジュール損失）から成る（PDF資料 p.3）。電流・磁界の同時掃引時には、動的抵抗損失も発生するが、通常、この増分に相当する履歴損失が減少するため、交流損失を見積る際には考慮しなくてよい。

線材、フィラメントが円断面を持つ多芯線である場合の、履歴損失（1周期、単位体積当たり）は次式で、

$$W_h = \frac{16}{3\pi} J_c(B_m) d_f B_m \quad (for B_m \gg B_p)$$

$$B_p = \frac{2}{3\pi} \mu_0 J_c d_f$$

結合損失（1周期、単位体積当たり）は次式で表される。

$$W_c = \frac{2\pi\omega\tau_c}{1+\omega^2\tau_c^2} \frac{B_m^2}{\mu_0}$$

$$\tau_c = \frac{1}{2} \sigma_{\perp} \mu_0 \left(\frac{l_p}{2\pi} \right)^2$$

ここで、 B_m は磁界振幅、 d_f はフィラメント径、 B_p は中心到達磁界、 τ_c は結合時定数、 σ_{\perp} は母材の横方向導電率、 l_p はツイストピッチ、 ω は角周波数である。

上記表式は、長年にわたる研究、標準化作業等により、その定量性が検証されている。履歴損失の表式は、臨界状態モデル（量子化磁束線に働くローレンツ力と、ピン力が釣り合う点で臨界電流密度 J_c が決まる、また超電導体での電流密度は J_c or 0 に限定される、という超電導体内電磁現象を記述するモデル）に因っており、NbTi、Nb₃Sn 等金属系低温超電導線材、さらに Bi 系酸化物高温超電導線材を含め、これから外れる現象は、ピンニングポテンシャル内で磁束線が可逆運動をする、いわゆる磁束線のリバーシブル挙動以外には観測されていない（磁束線のリバーシブル挙動は、サブミクロン径の極細多芯線の低磁界領域においてのみ観測される）。上式より、低交流損失化、すなわち、低履歴損失化のためには細フィラメント化、低結合損失化のためには母材の高抵抗化、短ツイストピッチ化が必要、との指針が導かれる（PDF資料 p.5）。これまでこの指針に従って低温超電導線材の低交流損失化が進められ、その究極的典型例が交流用極細多芯線であった（文末の PDF資料 p.6）。

しかしながら、線材レベルにおける低交流損失化の努力は、大電流容量化のための導体化（撚線）

の段階で (PDF 資料 p.7-9)、ほぼ水泡に帰すというのが通例であった。線材における履歴損失と結合損失の合計より、導体構成に伴う付加的交流損失、すなわち素線間の結合損失のほうがはるかに大きいのである。これを抑制するには素線間を絶縁するか、素線間の接触抵抗を大きくせざるをえないが、低交流損失化の代償として、安定性は極めて悪くなった。低温超電導線材を素線とする撚線およびモノリス構造の超電導導体が、交流損失を無視しうる、あるいはあまり考慮しなくてもよく、高安定性仕様に振りうる直流用もしくはパルス用にしか適用されていないのはこれが理由である。

さらに、低温超電導線材を電力機器に適用する場合には、動作温度に起因する避け難い難点があった。直流、パルス用の超電導マグネットは専用の電源により駆動されるが、電力機器の場合、超電導巻線は系統に連系されるため、過大電流、過大電圧等の擾乱が系統から巻線に容赦なく侵入する。例として、雷サージが変圧器巻線に侵入する際、巻線では電位振動が発生する。常電導巻線では、通常、巻線内の電位傾度を軽減するために、インターリーブ巻線等制振巻線が採用されている。しかし、これら制振巻線の原理は、電荷を速やかに移動させることによって電位の傾度を軽減するというものであり、電位振動が減少する代償として、電流振動は逆に激しくなる。この電流振動に伴って誘起される交流損失は、究極の低交流損失性を持つ交流用極細多芯線を使用しても、商用周波数の通常運転時より 2 桁以上も大きく、JEC で規定されている試験波形を入力するだけで超電導巻線の温度は臨界温度 T_c を越え、クエンチに至ってしまう (PDF 資料 p.11-15)。また、たとえ電流振動が発生せずとも、各種サージの侵入は超電導巻線に単極性のインパルス電圧が印加されることと等価であり、波尾長が長い開閉サージの侵入だけで、電流は単調増加をして臨界電流 I_c を軽々と越える (PDF 資料 p.16-17)。この根本の原因は、低温超電導線材の動作温度が 4-6 K であるために、比熱が室温下に比べて 1/1000 と極めて小さいことにある。低温超電導線材を用いた電力機器は極めて実現困難であった。

サブミクロン径のフィラメント、Cu-30Ni 高抵抗母材、1-2 mm の短いツイストピッチを持ち、究極の低交流損失性を実現した交流用極細多芯線をもってしても、金属系低温超電導線材は、こと電気機器応用では銅線の代替を担うことはできなかった。低交流損失性は線材レベルのみならず導体レベルでも満足されなければならず、さらに超電導導体は高安定性をも要求され、この両立は、低温超電導線材では比熱の小ささゆえに困難であった。銅線に代わりうる超電導線材を実現するには、高温酸化物超電導線材に望みを託すしかなかったのである。

筆者らは、低温超電導線材は直流、パルス用として割り切り、超電導技術の産業界での幅広い普及を目指して、研究対象を高温超電導線材・導体の開発に切り替えた。まだ Super-GM の活動が活発な 1992 年ごろである。

高温超電導線材を 64 K-77 K における液体窒素中で使用する場合には、比熱は 4.2 K に比較して 1000 倍も大きく、たとえ系統連系により各種サージが超電導巻線に侵入しても盤石の安定性を確保できる。実際に Bi2223 線材を用いた超電導変圧器の試作器では、JEC の規定通りに 22 kV の定格電圧に対して 100 kV、66 kV の定格電圧に対して 350 kV の雷インパルス電圧を印加し、健全性を検証している。

酸化物超電導線材も大電流容量のための導体化は避けて通れないが、テープ形状の酸化物超電導線材の導体化にあたり、筆者らは常電導機器において銅巻線で通常用いられている転位並列導体を採用した (PDF 資料 p.18-28)。ただし、転位箇所は必要最低限とした。理論、実験の両面から転位並列導体の交流損失特性を解明するとともに (PDF 資料 p.23-25)、試作した各種酸化物超電導変圧器巻線および伝導冷却方式パルスコイルにも採用して、転位並列導体を用いた超電導巻線では導体化に伴う付加的交流損失は基本的に発生しないこと、すなわち、転位並列導体を用いた超電導巻線の交流損失密度は素線の交流損失密度と同じであることを検証した (PDF 資料 p.26-27)。また、転位並列導体構造が Y 系線材にも適用可能であることを、24 本並列導体を構成したテストコイルの

試作を持って検証した (PDF 資料 p.30-31)。

導体レベルの高安定性を比熱の大きさで、また導体化に伴う付加的交流損失の抑制を転位並列導体構造の導入で実現すると、残された課題は、素線である酸化物超電導線材の交流損失の低減だけであった。しかし、多芯線構造を持つ Bi 系線材の低交流損失化はフィラメント同士の超電導接合のために未だ実現せず、Y 系テープ線材の低交流損失化を図らざるを得ない状況であった。筆者らは、まず、スクライビングによるテープ線材のマルチフィラメント化と特殊巻線工程の組合せによる低交流損失化手法を提唱し、世界に先駆けて巻線形状でのフィラメント幅に比例した交流損失低減に成功した (PDF 資料 p.32-38)。この段階での低交流損失化はまだ従来理論、臨界状態モデルに則ったものであった。

近年、筆者らは、Y 系線材の磁化および交流損失が大幅に低減する新現象を発見した (PDF 資料 p.39-50)。交流損失は、フィラメント加工しない 10 mm 幅線材で、従来理論による予測値より 2 桁も減少した。この現象は Maxwell 方程式と従来理論では説明できず、筆者らは、REBCO 超電導体の構造および超電導特性の異方性に起因する磁氣的相転移現象であると推測している。REBCO 超電導層には、CuO₂ 超電導層がテープ面と平行に多数積層している (PDF 資料 p.49)。量子化磁束線が CuO₂ 超電導層に垂直に侵入する場合、量子化磁束線はその中心で超電導電子密度がゼロである常電導コアであるから、系のエネルギーは凝縮エネルギーの分だけ上昇する。これに対し、量子化磁束線が CuO₂ 超電導層に平行に侵入する場合、何らかの影響はあるにしても、超電導を破壊しないのでエネルギーは上昇しない。すなわち、量子磁束線は CuO₂ 超電導層に平行に侵入しやすいのである。この現象が発現する場合の交流損失は今後定量的に明確にすべき課題である。

スクライビングと特殊巻線工程の組合せ、もしくは新現象のいずれを活用しても Y 系超電導テープ線材の交流損失を低減することが可能となった。転位並列導体の活用で導体化に伴う付加的交流損失の増大がないことは検証済みであり、比熱の増大により機器に適用可能なレベルの安定性も確保した。いよいよ直流、交流を問わず、Y 系超電導線材を用いて超電導電気機器を大々的に開発し、実用に供すべきステージに至ったのである。



(PDF 資料、ページの展開には枠内をクリック)

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会報告

「Y系酸化物超電導の可能性」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
特別研究員 山田 穰

本講演では、最近活発化している超電導モータ、発電機を中心に「超電導機器応用」の開発状況を紹介します。

1. 背景

最初に、超電導を取り巻くニーズの現状が紹介された。世界の人口増加の勢いは現在も激しく、50年前の20億人強から、現在、2010年10月現在の国連推計で69億人にもなっている。その消費量と生活レベルの世界的向上を考えると、地球上の資源、エネルギーを効率よく使うことが求められる。同時にCO₂排出を抑え環境に配慮した省エネ、省資源化への施策も世界中で活発である。このため、再生可能エネルギーの1つとして風力発電が世界的に大きく需要を伸ばしている。図1は、米国、中国、インド、および世界の導入実績であるが、ここ10年で10倍にもなっている。

2. 超電導

周知のように、超電導は抵抗ゼロで発熱がないため、電機機器の効率化、省エネ化に有利である。最近では、回転機応用にも盛んに検討されている。回転機では、図2に示すような界磁コイル部分を(中心の磁場を出すコイル)を超電導化し、従来の銅線によるコイルの熱をなくして効率化する。例えば、船用などに関して、AMSC社、Siemens社、Doosan社(韓国)、川崎重工などがBi系線材による船用超電導モータを開発している。図3のような大型船舶の電気推進船化に使われる可能性が高い。

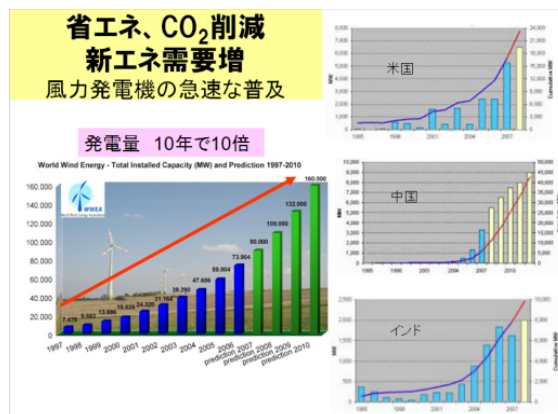


図1 世界の風力発電導入の推移

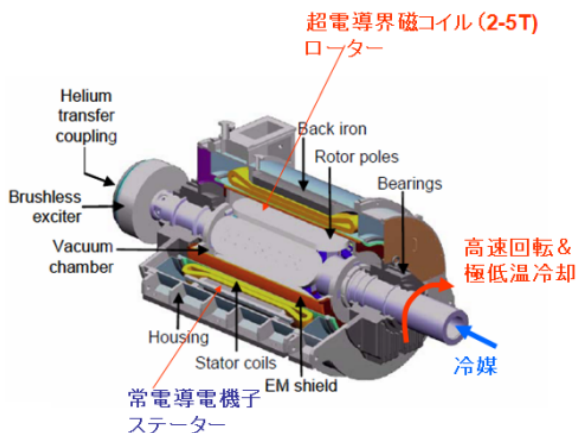


図2 超電導発電機、モータ例 (AMSC社の図に加筆)



図3 電機推進船の例：7万トン級豪華大型客船“イレーション”42.8MWモータ装備。最新の電気推進システムを採用、モーター部分を船外に設置するという、極めて斬新な運航方式を取り、より船内を広く使えるエンジン配置になった。振動や騒音も大きく削減できた
http://www.cruise-mag.com/db/profile.cgi?_v=1204176961&pl=view

3. Y系化の動き

上記応用例をはじめ、これまでの機器応用では、Bi系線材を用いた検討がなされてきたが、ご承知のようにY系線材の長さ、臨界電流特性が向上してきている。このため、最近ではY系線材を使ってより高性能な回転機を作ろうという試みが盛んである。英国のConverteam社、米国のAMSC社はいずれも従来にない大型の8-10 MWの大型の風力用超電導発電機の設計検討を行っている。背景には、欧州、米国での大型機を用いた洋上風力による大規模なウィンドパークの開発立案がある



図4 米国における洋上風力発電の例：大型化が進展中。MW級機を数百台設置予定。(Renewable Energy Focus, HP <http://www.renewableenergyfocus.com/>)

(図4)。この様に、大型機のニーズは非常に高まっているが、現在主流の商用機は容量が1.5-2 MW程度であり、これをそのまま従来の常電導発電機方式で容量アップさせると、大幅に重量、サイズともに増加し、大型機に必要な100 m以上の高所に設置することは難しい。図5のように大型化に伴い、現状のCu巻線から永久磁石式に、そして最終的には超電導化した発電機が重量、サイズの面で望まれている。彼らによれば、Y系線材を使えば、従来のCu巻線による誘導発電機に比べ、重量、サイズともに大幅に減少する。例えば、10 MW機で従来の常電導方式では800 tonにもなるが、超電導を使えば、約500 tonになり、タワー高さ120 m、ブレード直径190 mの10 MW機が可能になるという

(AMSC社HP http://www.amsc.com/pdf/SEATITAN_DS_1010_FNL.pdf)。

4. Y系検討の現状

前記風力の例のように、Y系機器に関しては、まだ、設計のみの検討が多かったが、最近ようやく要素検討や機器作製が始まってきた。Siemens社は2000年頃から400 kW級モータなどをBi系線材で検討してきたが、最近ではY系によるコイル化の検討も開始している。また、韓国のDoosan社は多量のY系線材を使った船用モータを開発中である。日本では、産業用超電導線材・機器技術研究組合(iSTERA)がY系回転機の検討を最近開始した。図6のように線材レベルから回転機の実機に適用できるように、導体化、単純コイルから異型コイル化の検討を行っている。主な結果としては、1)機器用長尺導体化(Cuの安定化材、絶縁材を付け長手分布の均一性も考慮したもの。600 mをコイル用に作製)、2)機器作製用機械特性、 I_c -B-T(実際に使う温度、磁場での依存性)などの特性把握、3)Y系特有の異方性を考慮したコイル作製法の検討、4)コイルの安定性の検討、5)回転機特有のレーストラック状異型コイルの検討を行っている。特に、回転機用コイルの励磁試験では、線材の特性を100%引き出せるコイル作製法も目途が立ち、良好なコイル励磁特性を得ている。

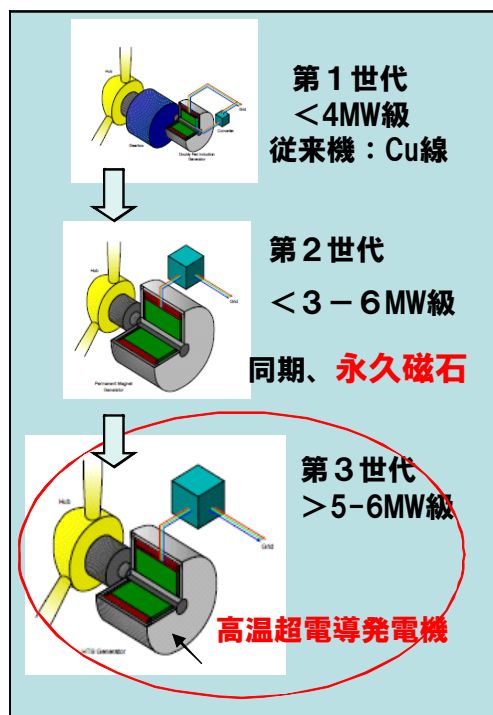


図5 風力における大型化に伴う発電機方式の流れ(図はConverteam社による)

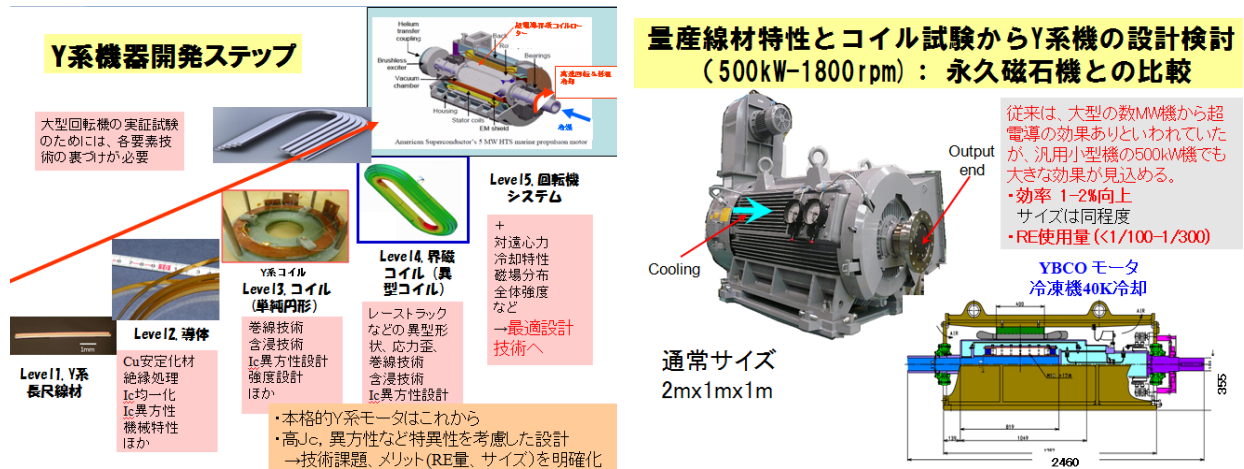


図 6 Y 系機器開発のステップ (iSTERA による)

図 7 Y 系超電導モータの設計例 (iSTERA による)

5. モータにおけるレアアース問題

各種用途に使われるモータは国内消費電力の大半を占めており、高効率化が望まれていることは周知の通りである。このため、永久磁石 (PM) を使った同期モータが小型から大型まで多数採用されつつある。ちなみに、最近開業した東北新幹線のモータにも使われている。しかしながら、近年の国際的な資源戦略化の動きから、各国ともできるだけレアアース使用量を少なくしたいとの要望が高い。風力の分野でも例外でなく、近年は高効率化の点で大型機に PM 式発電機を使おうとしているが、超電導を使えば、レアアースの使用を大幅に削減した大型機が可能である。このため、iSTERA では、前記 Y 系線材、コイル特性の良好な結果を受けて、Y 系回転機の設計検討を行った。図 7 は、汎用産業用 500 kW モータの場合の設計例である。従来の Cu 巻線による常電導モータに比べ巻線の電流密度を従来の 3 A/mm^2 から 50 倍以上の電流密度 150 A/mm^2 に増やせる。このため、従来の常電導機と比べてサイズは同程度であるが効率が 1-2 % 向上し、さらにはレアアース使用量が従来の PM モータと比べた場合に数百分の 1 に減らせることが分かった。

6. まとめ

Y 系応用の現状と可能性を主に産業用機器、回転機の分野で報告した。Y 系線材は磁場中で高臨界電流が見込まれるため、最近の長尺化の進展に伴い各国で機器応用が盛んに検討されている。特に、船用、風力用は日米欧韓で盛んに検討されている。また、iSTERA の最近の結果から、Y 系機器は、従来の高効率化、軽量コンパクト化に加えて、レアアース使用量削減に非常に有効であることが分かった。

なお、上記結果の一部は、NEDO プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」、「希少金属代替材料開発プロジェクト②-2 超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

特集：超電導技術動向報告会報告

「電力機器等エネルギー応用」

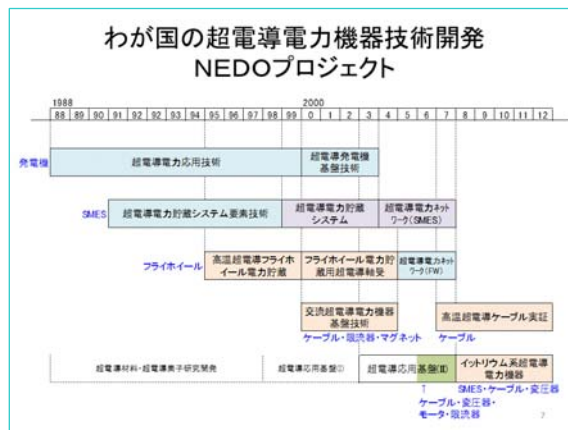
東京大学大学院
新領域創成科学研究科
教授 大崎博之

超電導電力機器の技術開発のための大型プロジェクトが開始されたのは、高温超電導材料が発見されて間もない1988年からである。超電導電力応用技術開発プロジェクトは、通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画の一環として、1988年度から1999年度まで、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からSuper-GMが受託して実施された。

そして、世界で初めて7万kW超電導発電機モデル機の運転に成功し、さらに20万kW級発電機の実現可能性を確認した。また、低損失NbTi導体や酸化物超電導線材の開発、冷凍システムの研究開発などでも多くの成果を得た。Super-GMプロジェクトの開始以降、SMES、フライホイール電力貯蔵、電力ケーブル、限流器、変圧器、モータなどの研究開発が実施され、2011年度には、電力ケーブル、SMES、変圧器、船用モータなどのNEDOプロジェクトが進行中である。また、しばらくはNbTi線材などの金属系超電導線材を使用する機器の研究開発が中心であったが、高温超電導技術の進歩とともに、Bi2223線材やY系線材などの高温超電導線材を使用する機器開発に移ってきた。特に、高温超電導電力ケーブルは日米韓中などを中心に実証試験が盛んに進められ、実績を積み重ね、IECやCIGREで試験法の標準化作業も着手されている。さらに最近では直流超電導ケーブルの応用も注目されている。一方、NbTi線材を用いた超電導コイルによるSMESは、瞬低対策用として実用機も出現している。

2011年3月11日の東日本大震災と原発事故により、将来の電力システムの姿を描きにくい状況に現在まだあるが、集中型電源と分散型電源の適切な組み合わせ、高効率送電の実現、再生可能エネルギーの導入拡大、フレキシビリティの高いネットワークの実現と運用などの重要性は今後も変わらない。電力ケーブルやエネルギー貯蔵、限流器などはそのための重要機器と考えられる。そして、超電導機器が電力ネットワークに導入されるためには、実証試験を通じて実績を積み重ね、実用超電導機器としてのリスク評価なども必要である。

また、今後は今まで以上に自然エネルギー利用の拡大が求められる。そのための超電導技術の貢献可能性の一つとして、定格出力10-20MWの大型超電導風力発電機がある。Super-GMプロジェクト以降、本格的な大型回転機プロジェクトは無かったが、一般に回転機は幅広い用途に利用されていて、現在開発が進められている船用モータや検討中の大型風力発電機など、超電導回転機はいろいろな発展の可能性が期待できる。



発電機：風力発電機

大容量超電導風力発電機

- 10MW級の発電機
- 風車直径150~160m
- 回転数~10rpm
- 洋上風力発電

大出力ダイレクトドライブ同期機

- 低速
- 高トルク
- 大型

• 増速機無(ダイレクトドライブ)
 > 信頼性、保守、騒音

• 軽量

• 高効率
 > 部分負荷時にも高効率

• 風車数低減

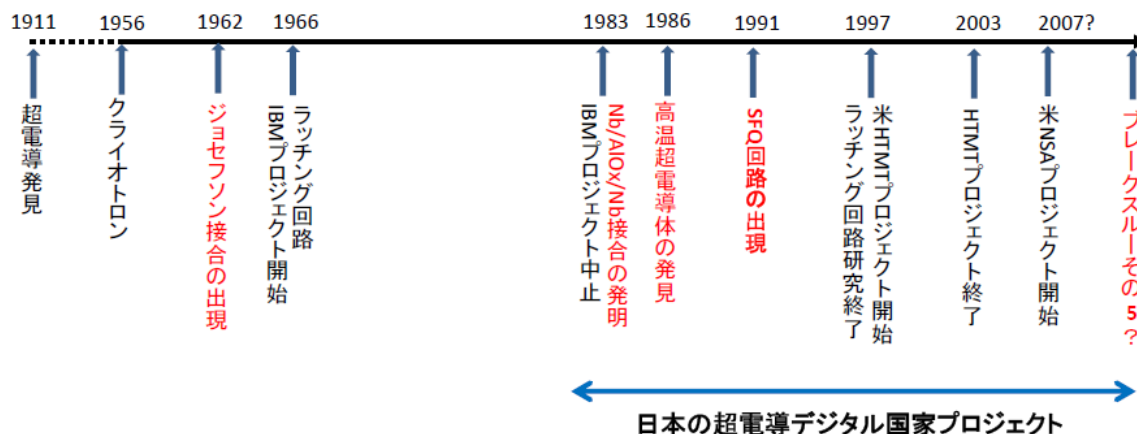
特集：超電導技術動向報告会報告

「超電導デジタル回路の歴史と将来」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所低温デバイス開発室
室長 日高睦夫

1945年に超電導体を用いた最初のスイッチ「クライオトロン」が発明されて以来、超電導デジタル回路は半世紀以上にわたり発展を続けてきた。この間様々な壁が現れ技術が停滞した時期もあったが、四つのブレークスルーによってその壁を突き破ってきた。

超電導デジタル回路研究の歴史



最初の壁はデジタル回路の基本となる“0”、“1”のスイッチであった。最初提案されたクライオトロンは、超電導/常電導転移を利用したものであり、常電導への転移によって発生した熱を取り去るために時間がかかりすぎるという問題点があった。この問題を解決した第一のブレークスルーは、ジョセフソン効果の発見とそれを利用したジョセフソン素子 (JJ) の発明である。JJにより、超電導回路は高速のスイッチを得ることができた。

JJを用いて IBM が 1966 年より大規模な超電導コンピュータプロジェクトを開始した。その中で JJ は鉛を超電導材料として開発が進められ、下部電極に Pb-In-Au、トンネルバリアに PbO と In₂O₃ の混合物、上部電極に Pb-Bi を用いるという工夫により、一定の特性を示す JJ を開発することができた。しかし、鉛は毒性があるだけでなく、腐食しやすい上、機械的にも弱く、室温から液体ヘリウム温度への熱サイクルや、経時変化による特性劣化が著しいという欠点があった。また、JJ 臨界電流値のばらつきを小さくすることも難しかった。鉛 JJ 特性改善の困難さは、IBM が 1983 年にプロジェクトを中止した大きな理由の一つとして挙げられた。

IBM がプロジェクトを中止した年に第二のブレークスルーが現れた。それが Nb/AIOx/Nb 接合の発明である。Nb は化学的、機械的に安定で毒性もないので、早くから超電導回路材料として注目されていたが、良好な特性を有する JJ が得られないという問題点を有していた。Nb/AIOx/Nb 接合は、下部電極 Nb の上に薄い Al を製膜しその表面を酸化することで安定なトンネルバリアである AIOx を形成することができる。これにより、理想的な特性を持ち、均一で安定した JJ が得られるようになった。

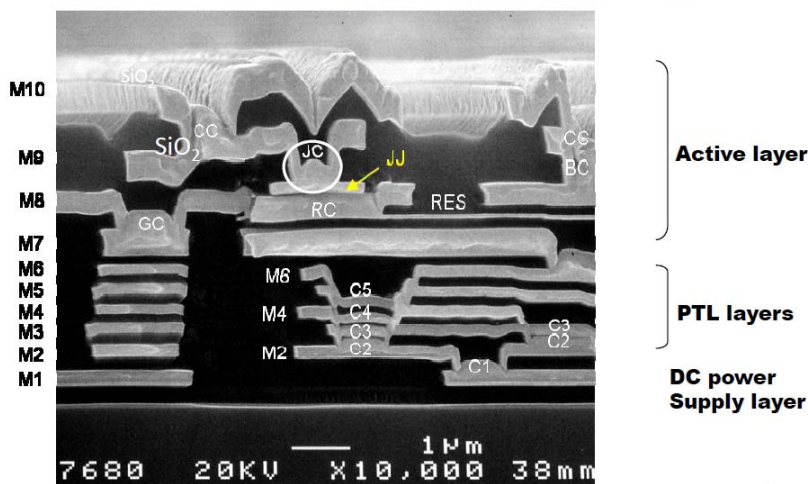
当初の超電導デジタル回路は、JJのスイッチにより電流を負荷抵抗に分流するラッチング回路と呼ばれる方式であった。ラッチング回路により8ビットプロセッサや4kビットメモリなど数々の回路が作製された。しかし、リセットを行うためにラッチング回路には交流バイアスが必須であり、大きな交流電流を高速で供給することは極めて困難であった。このため、ラッチング回路のクロックは数GHzが上限であり、当時クロック速度が向上していたCMOS回路に対して、将来にわたって優位性を保つことは難しいことがしだいに明らかになってきた。これにより、1980年代の後半に研究は停滞した。

この停滞を打ち破ったのが第三のブレークスルーである高温超電導体の発見である。高温超電導フイバーに乗ってデジタル回路研究も活性化し、プロセス技術などの進展が図られた時期に、第四のブレークスルーである単一磁束量子(SFQ)回路への移行が起こった。SFQ回路は直流でバイアスでき、100GHzを越える高速性と、ゲートあたり0.1μWの低消費電力性を合わせ持つ他の材料では実現できない優れたデバイスである。これにより超電導デジタル回路の研究は一挙に進展し、現在に至っている。

以上紹介したように、超電導デジタル回路は四つのブレークスルーによって発展を続け、Nb/AlOx/Nb接合をスイッチとするSFQ回路に到達した。しかし、世の中の電子デバイスに対する要求は年々高まってきており、超電導デジタル回路にもさらなる高みへの移行、つまり第五のブレークスルーが求められている。現時点で、第五のブレークスルーが何であるか言うことは難しいが、候補はいくつか考えられる。

まず、SFQ回路のさらなる低消費電力化である。実はSFQ回路は他のデバイスと比べて消費電力が十分小さいために、その消費電力の削減はこれまで十分に突き詰められてこなかった。最近、回路方式改善による低消費電力化が検討されており、現在比2桁以上の低消費電力化が可能であることを示す実験結果が出始めている。また、超電導デジタル回路の応用分野は、これまでスパコンやルータなどであったが、究極の感度を持つ超電導検出器アレイの出力多重化に適用することが検討され始めた。これにより超電導検出器の市場が一気に広がるのではないかと期待されている。これらの低消費電力化や新しい応用は、有力な第五のブレークスルー候補になりうるのではないかと考えられる。

ニオブプロセス高度化:平坦化による多層化(ADP)
ADPプロセスを用いたニオブ10層ニオブデバイスの断面



特集：超電導技術動向報告会報告

「電子顕微鏡搭載 (LTS) 超電導 X 線検出装置とそれを用いた材料分析」

エスアイアイ・ナノテクノロジー株式会社
田中啓一

1. 電子顕微鏡に要求される高エネルギー分解能 X 線検出器

走査電子顕微鏡 (SEM : Scanning Electron Microscope) は、サンプル表面の観察に広く用いられる。一般に SEM には X 線分析装置が取り付けられ、電子線照射時に発生する特性 X 線を測定することで組成分析が可能である。組成分析に使われる X 線分析装置には、EDS (Energy Dispersive Spectrometer) と WDS (Wavelength Dispersive Spectrometer) がある。EDS は短時間で広い (20 keV) 範囲の X 線を取得することが可能であるメリットがある一方、元素識別能力の指標であるエネルギー分解能が 130 eV 程度であり識別能力が不足する場合がある。WDS は元素識別能力が高いが、広範囲の X 線を短時間で測定することができない、また感度を上げるために EDS と比べ大きなプローブ電流を必要とする。大きなプローブ電流のデメリットは、観察・分析の空間分解能の劣化と試料へのダメージである。以上を踏まえユーザーからは、X 線検出器に対して観察・分析の空間分解能を劣化させずに元素識別の能力向上が求められている。本稿ではこのユーザーの要請に応えるべく開発した超電導 X 線検出装置について報告する。

2. SEM 搭載用 TES 型 X 線検出器

我々が開発した超電導 X 線検出装置は TES 型 X 線検出装置である。TES とは Transition Edge Sensor (TES) の略であり、超電導の転移端を温度計として利用するためこのように呼ばれる。超電導 X 線検出装置は EDS 型である。そのため既存の EDS と同等の電流レベルで分析が可能となる。図 1(左)は開発した SEM 搭載用 TES 型 X 線検出装置の外観写真である。TES 型 X 線検出装置は TES 型 X 線検出器とガスハンドリングシステムと液体ヘリウムタンクからなる。TES 型 X 線検出器のみ SEM に搭載されており、振動源となるガスハンドリングは別置きとなっている (図 1(右))。また TES 型 X 線検出器の重量を軽くするため、液体ヘリウムは常に液体ヘリウムタンクからトランスファーチューブを介して TES 型 X 線検出器へ供給される。ガスハンドリングシステムは液体ヘリウムを輸送するためのポンプ、並びに TES 型 X 線検出器を 100 mK まで冷却するための混合ガスタンク、及び混合ガス循環用ポンプが収納されている。



図 1 (左) : SEM に取り付けられた TES 型 X 線検出器の外観写真、(右) : 超電導 X 線検出装置の外観写真

3. システム性能

近年の LSI デバイスには銅配線が使用されている。図 2(左) は LSI デバイスの断面 SEM 像である。銅配線と酸化膜間にはバリア層であるタンタルが設けられている。タンタル層の厚みは 12 nm である。超電導 X 線検出装置の分析空間分解能を評価するために、この LSI 断面試料を FIB で作製したタンタル層の信号検出を行った。LSI にはタングステンのビア配線が設けられている。3 kV の低加速で分析した場合、重元素であるタングステンとタンタルからは M 線のみ得られる。酸化膜を構成するシリコンの K 線 (Si-K α : 1740 eV) と Ta-M α (1710 eV)、W-M α (1775 eV)は非常にエネルギーが近接しており、通常の EDS では分離が困難である。超電導 X 線検出装置を用い、加速電圧 3 kV で図 2(左)中の点線部 (Area1) をマッピングしたときの画像を図 2(右)に示す。ピクセル数は 64×64 であった。銅配線下部のタンタル層 (12 nm)、及びタングステンビア配線がシリコンと明瞭に区別されている。

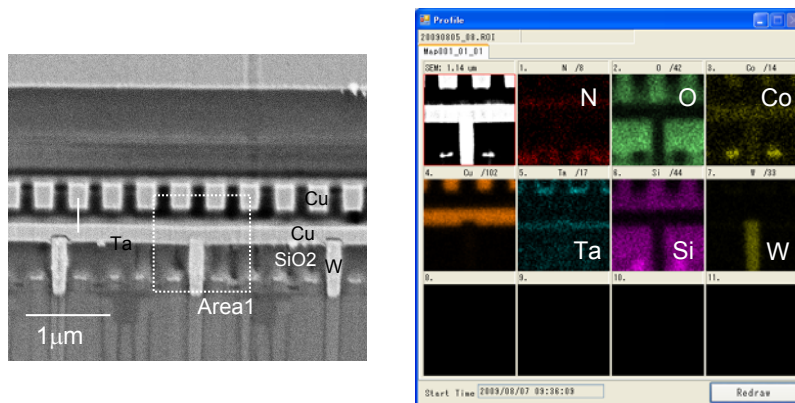


図 2 (左) : LSI デバイスの SEM 写真、(右) : 図 2 (左) の赤枠に対応するマッピング像

4. まとめ

電子顕微鏡搭載用超電導 X 線検出装置について紹介した。EDS 型であるため通常の SEM 観察条件下で分析が可能となるだけでなく、10 nm クラスの分析空間分解能が得られることを確認できた。今後は無冷媒化、及び多素子化による高計数率マッピング化開発を進めていく予定である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会報告

「高温超電導デバイス技術と SQUID 応用の進展」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
副所長 田辺圭一

2011 年は、超電導現象発見 100 周年であるとともに酸化物系高温超電導材料発見から 25 年の節目の年である。また、超電導の大きな特徴の一つであり、超電導のエレクトロニクス応用の基盤となるジョセフソン効果は 1962 年に発見されており、来年がその 50 周年という記念の年になる。ジョセフソン効果が現れる舞台であるジョセフソン接合は、2 つの超電導体の間にバリア層と呼ばれる厚さ 1-2 nm の絶縁体や、より厚い金属の層をはさんだ構造をもつ。特に絶縁体バリア層をもつ接合は、その電流-電圧 (I - V) 特性において、超電導エネルギーギャップに相当する電圧での急峻な準粒子電流の立ち上がりやヒステリシスを示し、SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) ジョセフソン接合と呼ばれる。

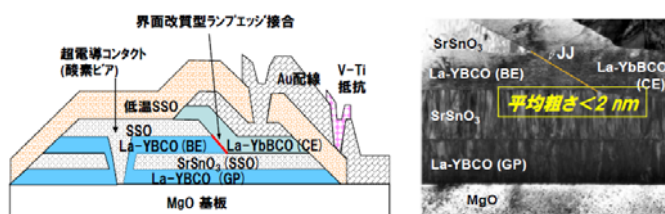
低温超電導体のニオブ (Nb) に対しては、80 年代の前半に Nb/AlO_x/Nb 接合が開発され、理想的な I - V 特性を示す SIS 接合の作製技術が確立している。酸化物系高温超電導材料に対しては、その発見以来、多くの研究者が SIS 接合の作製に挑戦してきたが、超電導コヒーレンス長が非常に短い、構造が乱れることによりキャリアが不足し絶縁体になりやすい、超電導ギャップの対称性が d 波であるなどの特異な性質のため、理想的な SIS 接合を作ることは現在でもできていない。一方、SQUID や単一磁束量子 (SFQ) 回路等に用いられるヒステリシスをもたない弱結合型あるいはオーバードンプ型のジョセフソン接合は作ることが可能である。例えば、結晶粒界における臨界電流密度の傾角に対する指数関数的な低下を利用した粒界ジョセフソン接合は、作製が容易で広く用いられているが、特性のばらつきが大きく、磁束トラップを起しやすいためなどの問題がある。これに対し、90 年代後半に開発された界面改質バリアをもつランプエッジ接合は、特性の均一性に優れ、磁束トラップが起りにくいという特長をもつ。特に国内では、当時の新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) のプロジェクトの中でその作製技術、高温 SFQ 回路を目指した集積化技術が大きく進展した。超電導層 3 層と絶縁層数層を積層した集積回路作製技術が、最終的に ISTEK において確立し、現在まで継承されている。

SQUID は超電導を利用した超高感度の磁気センサーであり、高温超電導材料を用いることにより、液体窒素冷却による小型、低コストの種々の検査装置の実現が期待される。これまで、心磁計測装置、免疫検査装置、金属異物検査装置、金属資源探査装置等の開発が行われてきており、後 2 者は実用化されているものの、広く普及するまでには至っていない。その原因の一つとしては、これらの装置で用いられてきた高温超電導 SQUID は高温超電導薄膜 1 層で構成され粒界接合を用いているため、磁場感度等の性能が低温超電導 SQUID に比べかなり劣っていることがあげられる。

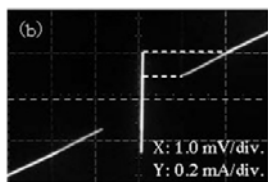
ISTEK では、4、5 年前より、高温超電導集積回路作製技術を利用し、薄膜積層型の SQUID の開発を行ってきた。例えば、マルチターン入力コイル (磁束トランス) を SQUID ループの上に集積化した磁力計 (マグネトメータ) を作製し、市販の Nb 系 SQUID に匹敵する 10 fT (フェムトテスラ = 10⁻¹⁵ T) /Hz^{1/2} という低い磁場雑音性能を実証した。また、ランプエッジ接合を用いているため磁場耐性が高く、交差配線を用いた複雑なセンサーも作製することが可能である。これまで、5 チャンネルの SQUID 磁場偏差センサー (グラジオメータ) を利用した長尺線材の欠陥検査装置を開発し、NEDO の「Y 系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の中で、変圧器用にマルチフィラメ

ント加工された Y 系長尺線材の評価に利用している。また、石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) の委託による、次世代金属資源探査装置用の高感度 SQUID 磁力計の実用機開発や、科学技術振興機構 (JST) の委託による、先端バイオ・非破壊センシング装置用の高性能高温超電導 SQUID の開発などが現在進行中である。これらのプロジェクトにより、薄膜積層型の高温超電導 SQUID を用いた装置の高いコストパフォーマンスが実証されることにより、SQUID 応用機器の市場導入・普及が進むことが期待される。

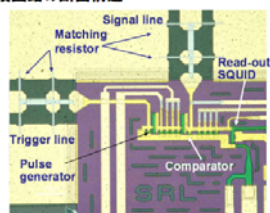
高温超電導デバイス集積化技術



ISTECで構築された高温超電導集積回路の断面構造

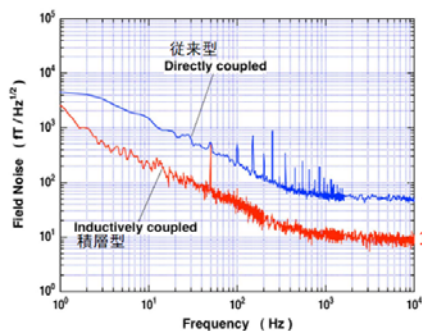


界面改質型ランペッジ接合のI-V特性(4.2 K)



超高速サンプラー回路(15接合, 40 K動作) 6

積層型マグネトメータの感度向上



積層型で再現性よく10 fT/Hz^{1/2} (市販の低温SQUIDレベル) 接合作製条件の最適化による



特集：超電導技術動向報告会報告

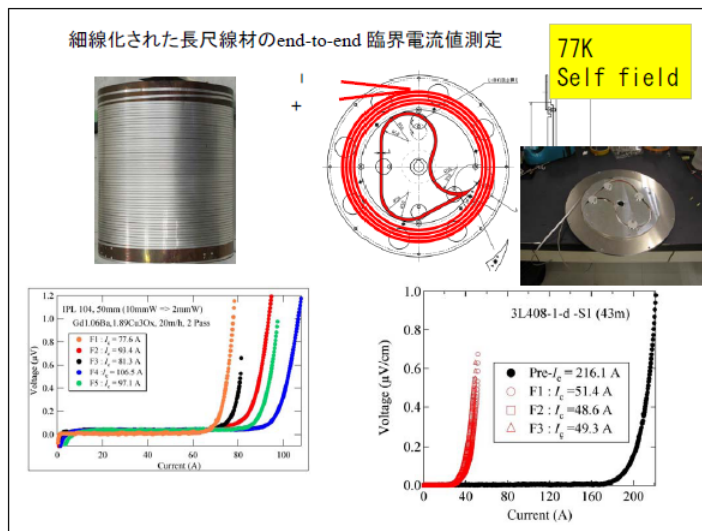
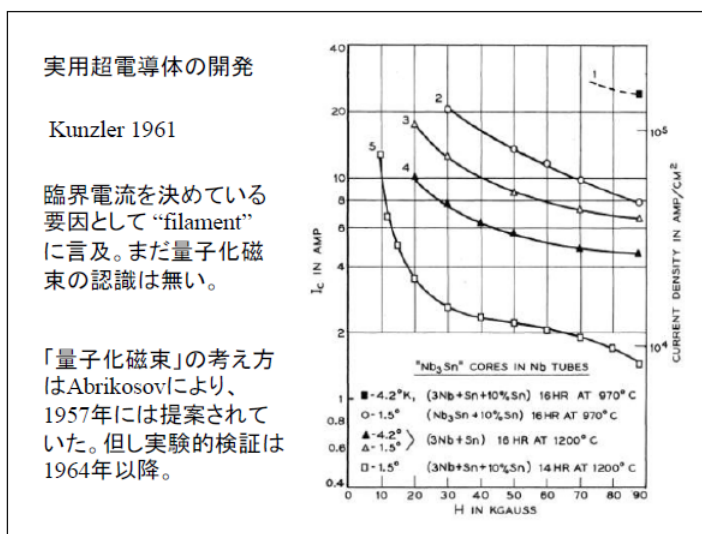
「Y系線材の臨界電流とその評価法」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所材料物性バルク研究部
特別研究員 中尾公一

超電導体が Kamerlingh Onnes によって 1911 年に発見された時、その最初の応用として考えられたのが強磁場の発生であった。超電導線のコイルを使えば発熱がなく、いくらでも大きな電流を流すことができ、いくらでも大きな磁場を発生できるのではないかと、というのは自然な期待であった。しかし実際に試してみた結果は Kamerlingh Onnes 等を落胆させるものであった。強磁場どころかわずか数十ミリテスラの磁場を発生しただけで超電導線は超電導性を失い、電気抵抗を持ってしまったのである。予想より遥かに弱い磁場によって超電導性が破壊されてしまったからである。臨界磁場の大きな超電導体が発見され、10 テスラを越えるような強磁場が超電導線を用いて発生できるようになるのはそれから約半世紀の後のことであった。

大電流を流すことのできる超電導線材はすべて第2種超電導体と呼ばれる超電導体からできている。これらは多くは非常に高い(上部)臨界磁場を有している。しかし臨界磁場が大きいことは大電流を流す能力の十分条件ではない。多くの場合磁場中の臨界電流値は量子化磁束のピンニングによって決まるからである。臨界磁場が超電導体の物質定数であり、製造プロセスにほとんどよらないのに対し、臨界電流密度はピンニングセンターの種類や密度によるので製造プロセスによって大きく変わらう。

臨界電流密度が製造プロセスに大きく依存していることは逆に言えば、臨界電流値には改善の余地が大きいということである。そのためには臨界電流値をできるだけ精度よく、かつ迅速に測定して製造プロセスにフィードバックすることが必要である。酸化高温超電導体の場合は液体窒素中で測定されることが多いが、これは液体ヘリウム中での測定が必要な、金属系超電導体の場合と比べて、大きな利点となっている。液体窒素



の方が遥かに扱いやすいからである。そのため酸化物高温超電導体の線材の場合は長尺線材をそのままの形で全長測定することが行われている。reel-to-reel で線材を送りながら1メートル程度の長さごとに臨界電流測定を繰り返す方法や、過大な自己磁場を発生しないようドラムに一層巻きにしたり、無誘導方式で巻いたリール全体を液体窒素に漬けて端から端までの臨界電流値を一挙に測定する方法がある。また外部電源から電流を与えるのではなく、磁場を印加することにより線材中に誘起電流を発生させて測定する誘導法も用いられる。ISTEC では誘導法としてホール素子法や磁気光学法を実施している。前者は測定が高速であること、後者は空間分解能が高いことが特長である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会報告

「超電導技術における国際標準化の動向」

住友電気工業株式会社
材料技術研究開発本部
技師長 佐藤謙一

IEC、ISOなどで作成されるデジュール標準や業界団体などで作成されるフォーラム標準などは、最近一括して「コンセンサス標準」と呼ばれる。これらの長所と欠点は以下の通りである。

・欠点:デファクト標準に比べて、1社で決められないこと、コンセンサスの獲得に時間がかかること、特許技術を標準におりこむ際の制約があることである。

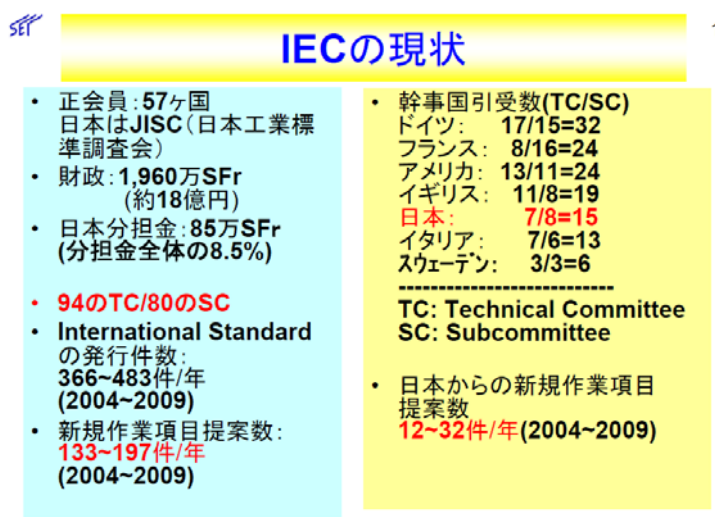
・長所:WTO (World Trade Organization、世界貿易機関)の「貿易の技術的障害に関する協定」で各国標準の基礎として用いられることを義務づけられている。従って、グローバルに企業活動を進めてゆく上で、特許による自社技術の権利確保と並んで、国際標準活動は①製品開発初期における国際的な市場拡大、と②製品のビジネス拡大期におけるコストダウン獲得に対する有力な手段、であることである。

企業としての留意点としては、どの部分を標準化するのか、どの部分を知財も含めたビジネスモデルで非標準化 (Black Box 化) するのか、技術開発戦略としてそれぞれの企業での戦略が必要である。

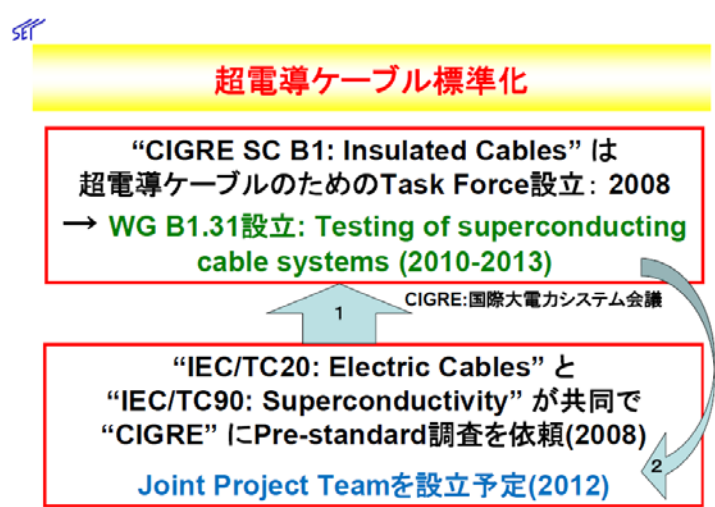
超電導と IEC の歴史を見ると、1906年:IEC (国際電気標準会議)創設、1908年: Heike Kamerlingh Onnes がヘリウムの液化に成功、1910年:日本、IECに加盟、1911年: Heike Kamerlingh Onnes が超電導現象を発見、1986年: J. G. Bednorz & K. A. Müller が高温超電導発見、1989年: TC90 (Superconductivity) 設立、とそれぞれのイベントが重なり合っていることが判る。

日本が中心となって TC90 設立の活動を行い、1989年の TC90 設立となったが、その経緯は以下の通りであり、日本が IEC の TC レベルでの初の幹事国の役目を引き受けることとなった。

・1988年、IEC 理事会管轄の「Special



Ingenious Dynamics



Ingenious Dynamics

WG – Superconductivity」にて超電導への IEC としての取り組み方を議論（幹事国：日本（代表：関根東大教授）、幹事：佐藤謙一）

・通商産業省・標準部（当時）の御指導で以下の観点から取り組んだ

- (1)当時の日米貿易摩擦もあり、日本の国内標準が貿易障壁との声を正当化させない。
- (2)IEC 規格を第 1 歩として、JIS を翻訳版で作る。
- (3)当時は、ASTM に用語と NbTi の臨界電流測定法のみが超電導関係の標準として存在し、1986 年に発見された高温超電導への期待から、幅広い国際標準が要望されていた。
- (4)研究開発のデータを同じ基準で比較することにより、研究開発も活性化することが出来る。
- (5)日本は、高温超電導で世界をリードする成果を上げており、今後の世界標準への取り組みに積極的に関与してゆくべきである。
- (6)IEC での日本の存在感を大きくする。

TC90 では今までに用語および試験方法を手始めに、15 の IEC 規格を発行しており、13 の WG が活動中で延べ参加専門家数は 150 名に及ぶ。最近では、線材や薄膜、バルクなど材料レベルから電流リードのような部品レベル、電力ケーブルのような製品レベルの規格検討も並行して進んでいる。

1989 年からの 22 年を振り返ってみると以下のようなまとめとすることができる。

- (1)国際規格は製造者が作っている。我々も作れる
- (2)新しい分野での国際標準化には 10 年程度の助走期間が必要
- (3)Pre-standard 活動をしている機関との協力が有効（VAMAS, CIGRE）
- (4)将来の標準化の方向に対する関係者の合意形成の努力が必要（国際標準化パネル）
- (5)超電導のような産業として成熟していない分野での国際標準活動には国の関与が不可欠（受益者負担の考えだけでは難しい）

今後とも、関係の皆様への御指導・御鞭撻をお願いします。



TC90の現状

2

The International Electrotechnical Commission (IEC) TECHNICAL COMMITTEE No. 90: SUPERCONDUCTIVITY

TC90設立	1989年
幹事国	日本(幹事:佐藤謙一、幹事補:藤上純) (審議団体・事務局:国際超電導産業技術研究センター)
議長	アメリカ (Dr. L. F. Goodrich, NIST)
スコープ	<ul style="list-style-type: none"> - To deal with technical aspects, problems and standards activities related to superconducting material and devices. - All classes of superconductors will be covered.
リエゾン団体 (A)	VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards)
P-member	オーストリア、中国、フランス、ドイツ、イタリア、日本、韓国、ポーランド、ルーマニア、ロシア、アメリカ (11カ国)
O-member	14カ国

日本としてはIEC/TCレベルで初の幹事国

Ingenious Dynamics

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導技術動向報告会報告

「超電導の歴史と今後」

独立行政法人 物質・材料研究機構
リサーチ・アドバイザー 戸叶一正

今年に超電導が発見されて丁度 100 年になる。これを機会にその歴史を振り返ってみることは、超電導の将来を考えるうえに有益なことと思う。物質開発と応用開発の観点から 100 年を振り返ると図 1 に示すようにおおざっぱに 4 期に分けて考えることができる。

第 1 期は発見 (1911 年) から 1961 年までのちょうど 50 年間で、超電導にとっては黎明期といえる期間である。発見者のオネス自身が鉛線を使って超電導磁石の製作を早速試みたことは有名な話であるが、これは熱力学的臨界磁界 H_c の存在によって見事に失敗に終わった。それから約半世紀の間は、超電導は磁界に極端に弱いものとして応用からは完全に見放されたと言っても過言ではない。しかし、この間後の応用につながる物質開発は着々と進められていた。特に物質探索については 1920 年代に活躍したマイスナー (彼はむしろマイスナー効果の発見で有名であるが) と 1950 年代以降に活躍したベル研のマシアスが特筆される。特にマシアスの手法は徹底した絨毯爆撃であるが、その結果非常に数多くの超電導物質が見出された。その中で実用的に大きな意義をもったのが Nb_3Sn の発見であった。

超電導の応用が現実のものとして考えられるようになったのは 1961 年以降で、これを第 2 期とする。この年、マシアスとベル研の同僚であるクントラーが、今で言う PIT(Powder-in-tube)法によって試作した Nb_3Sn 線材の臨界電流を 8.8 T の磁界中で測定し、思いもかけず大きな電流が流れることを発見した。この結果は大きな反響を呼び、同年の暮れには MIT の国際会議で Nb_3Sn 線材のみならず Nb-Zr 合金線材を含めたコイル作製と、6 T~7 T の当時としては画期的な高磁場発生成功の報が相次いだ。この会議の情報は世界中に大きな影響を与え、これを機に各国で超電導応用の重要性が認識され、応用のまさに幕開けとなった年である。その後高性能な Nb_3Sn 、Nb-Ti 実用線材が相次いで開発され、この両者の線材は今日でも超電導応用の主流となっている。一方 Nb_3Sn に代表される A15 型化合物は B1 型の NbN とともに、当時物質探索の面からも注目を浴びた物質群である。1973年に Nb_3Ge 薄膜で 23 K の記録が達成され、さらに高い臨界温度 T_c が期待された Nb_3Si 、MoN などの準安定状態での合成が盛んに

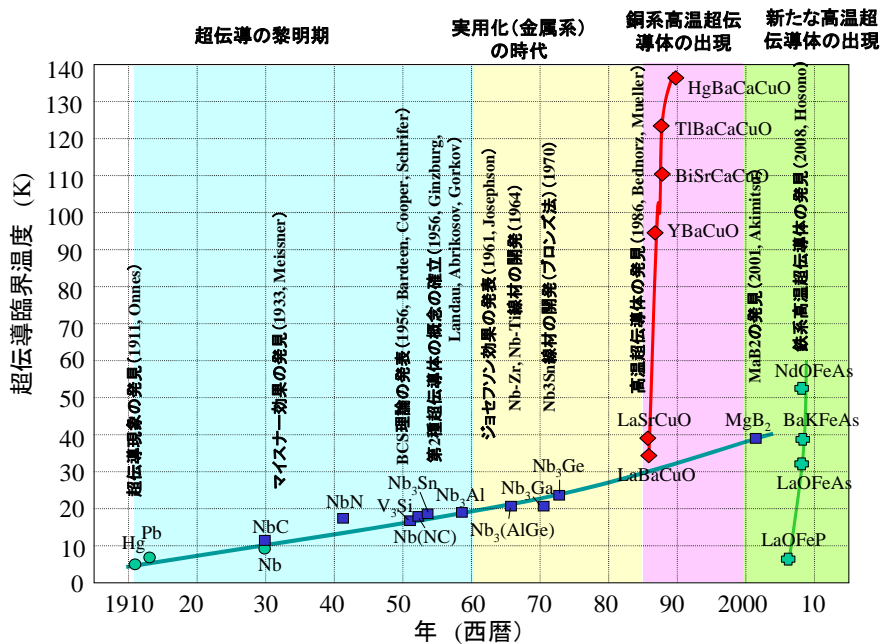


図 1 臨界温度 T_c の変遷

試みられたが、ついに 1986 年まで 13 年の間 Nb₃Ge を越える T_cの達成はならなかった。

第 3 期は 1986 年の LSCO の発見を契機に始まったいわゆる超電導フィーバーである。翌年には YBCO の発見で液体窒素温度(77 K)を越え、さらに Bi 系、TI 系と臨界温度は 100 K 以上に急上昇し、Hg 系で記録された 135 K が現在でも常圧状態での最高の T_cとなっている。この銅系高温超電導体の発見は超電導の液体窒素応用を可能とするため、実用的にも大きな意義をもつ。Bi 系は銀を被覆材とした PIT 線材が開発され、実用的な線材が量産されるようになっている。また、Y 系は高い臨界電流密度を得るためには 2 軸配向が必須なため、いわゆる coated conductor の開発が国家レベルで進行している。

第 4 期は 2001 年の MgB₂、さらには 2008 年の鉄系超電導体に代表される新たな高温超電導体の出現である。これらの新超電導体がいずれも日本で発見されたことは日本人としては非常に喜ばしいことである。MgB₂ は、従来の金属系超電導体の範疇に属しながらマシアスもその存在を見逃していたことが歴史的にみると興味深い。金属系のため粒間結合が極めて強く、配向性なしに大きな電流を流せることは実用的にも大きなメリットで、現在冷凍機冷却などの中温度での応用を目指して PIT 法や拡散法などによりその線材化の研究が進められている。一方、鉄系超電導体は構造がバラエティに富んでいて、まだ T_cが向上する可能性を秘めている。さらに、上部臨界磁界 H_{c2} が非常に高いために高磁場超電導体として期待できるが、弱結合の解決が今後の課題となっている。

最後に今後の展望について触れておく。第 2 期で開発された Nb-Ti、Nb₃Sn 線材は現在でも応用の主流であって、病院の MRI など我々の生活に身近な部分でも使われている。しかし、液体ヘリウム冷却でも優位性が発揮できる用途に限られており、超電導応用が一般的に広く認知されるまでにはまだ到っていない。超電導が社会的な認知を得るためには液体窒素温度以上で確実に動作可能な線材の開発が重要で、Bi 系 2223 線材や Y 系の coated conductor への期待は益々高まっていくものと予想される。また、今後超電導をもっと民生応用に近づけるためには、室温超電導体を含めたより T_c の高い物質開発も強力に進めていく必要があると思う。

超電導 100 年の年に私たち日本人は東日本大震災という未曾有の経験をする事になり、電気を大切に使うことの重要性を改めて認識させられる事になった。超電導がこのような社会の要請に大きな貢献できるよう、我々関係者は協力しながら物質開発と応用開発をさらに加速して進めていく必要がある。

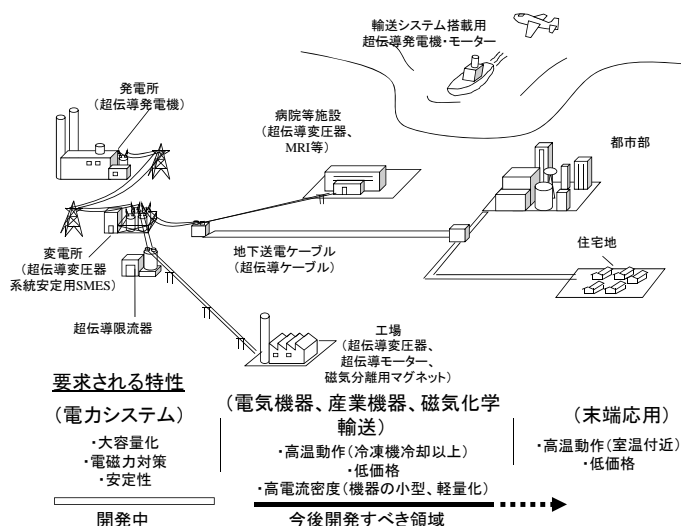


図 2 超電導応用展開の課題、最終的には末端応用を目指す

超電導関連 7-8月の催し物案内

7/13

超伝導エレクトロニクス研究会 7月研究会

(超伝導マイクロ波応用、信号処理基盤技術及びその応用、一般)

場所：機械振興会館

問合せ：<http://www.ieice.org/es/sce/jpn/>



7/25 -29

15th International Conference on RF Superconductivity

場所：Sheraton Chicago Hotel & Towers

問合せ：<http://conferences.fnal.gov/srf2011/index.html>

8/5

2nd New York State Superconductor Technology Summit

場所：Schenectady Museum & Suits Bueche Planetarium, Schenectady, New York

問合せ：

<http://events.r20.constantcontact.com/register/event?llr=jki9ubdab&oeidk=a07e3qqdtn96828298d>

8/21-26

23rd IIR International Congress of Refrigeration

場所：Prague, Czech Republic

問合せ：<http://www.icr2011.org/>

8/29-9/2

応用物理学会

場所：山形大学

問合せ：<http://www.jsap.or.jp/index.html>

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (5/18-6/17)

- 超電導体に絶縁体を転換 東大が技術 日本経済新聞 5/23
- 電界効果使い超電導材料 絶縁体に高濃度伝導キャリア蓄積 東大が新開発手法 日本経済新聞 5/23
- 超電導技術 最新動向の情報交換 ISTECC 都内で報告会開く 電気新聞 5/24
- 発見から 100 年 花開く超電導① 大節電時代、追い風に 日経産業新聞 5/24
- 中国産レアアース高騰続く ネオジム・ジスプロシウム 年初比 2 倍超す 日刊工業新聞 5/25
- 発見から 100 年 花開く超電導② 冷凍機不要のリニア 駅で冷却、9 時間持続 日経産業新聞 5/26
- 新たな超伝導材料 電界効果用いた独創的手法で開発 科学新聞 5/27
- リニア始動 国交省が建設指示 計画 38 年ようやく 毎日新聞 5/28
- リニア新幹線 建設始動 国交省、JR 東海に指示 日本経済新聞 5/28
- リニア中央新幹線「構想から実現へ」 国交省、JR 東海に建設指示 Fuji Sankei Business i. 5/28
- 中国、レアアース取引所 国有大手設立、同業は反発 日本経済新聞 5/28
- リニア建設を指示 国交省、JR 東海に 朝日新聞 5/28
- 第 52 回 藤原賞受賞者の業績 導電・絶縁 金属が激変 読売新聞 5/29
- リニア中央新幹線 ルート問題決着商用化へ サプライチェーンに貢献 日刊工業新聞 5/30
- 発見から 100 年 花開く超電導③ 線材量産技術確立急ぐ 電力設備更新にらむ 日経産業新聞 5/30
- リニア新幹線「新大阪駅に」 JR 東海社長乗り継ぎ考慮 朝日新聞 5/31
- リニア延伸前倒し意欲 JR 東海社長「新大阪駅に直結」 読売新聞 5/31
- レアメタル開発拡大 価格急騰、中国依存下げ 日本経済新聞 5/31
- リニア中間駅案提示へ JR 東海、東京-名古屋 沿線 4 県に 1 駅ずつ 日本経済新聞 6/01
- 太陽光発電や軽量素材 技術開発、国が支援 日本経済新聞 6/02
- レアアース高に緊急策 経産省 脱中国へ技術開発支援 朝日新聞 6/03
- 経産省、使用量低減など技術開発支援 レアアース高騰で 87 億円補助 Fuji Sankei Business i. 6/04
- レアアース削減に補助 経産省 中国依存の脱却促す 毎日新聞 6/04
- 自然エネルギー実力診断 洋上風力発電 立地面で大きな潜在力 日本経済新聞 6/06
- 相模原にリニア駅 JR 東海が提案方針 朝日新聞 6/07
- スマートグリッド 上 転換点 ”賢く強い” 電力網 まずスマートメーター普及 日刊工業新聞 6/07
- リニア中央新幹線中間駅案 神奈川・相模原市など JR 東海 日刊工業新聞 6/08
- リニア駅まず 3 候補 相模原・甲府盆地・中津川 朝日新聞 6/08
- リニア「中間駅」発表 JR 東海 相模原市は地下に 読売新聞 6/08
- スマートグリッド 中 広がる領域 街と暮らし変える 事業モデルに波及 日刊工業新聞 6/08
- スマートグリッド 下 組み合わせ自在 海外実証プロ着々 ノウハウ蓄積”強み”見極め 日刊工業新聞 6/09
- コバルトでも超電導材料 東工大発見 磁性元素含有 3 つ目 日経産業新聞 6/10
- 国際核融合炉 実験遅れへ 国内の試験施設被災で 日本経済新聞 6/14
- 高騰レアアース 調達不安の実相 中国の資源管理で一段高 需要家、輸入先拡大急ぐ 日本経済新聞 6/16
- 移動時間短縮で GDP 押し上げを Fuji Sankei Business i. 6/17
- コバルト化合物を母物質に 新たな超伝導体発見 東工大 科学新聞 6/17

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き (2011年4-5月)

財団法人国際超電導産業技術研究センター
国際部

部長 津田井昭彦

表彰

Superconductor Technologies Inc. (2011年5月12日)

Superconductor Technologies Inc. (STI) は、同社の革新的かつ市場を変革する可能性のある知的財産が認められ「MICO—Bright Lights Innovation Award」を受賞した。この「MICO Award」は、ニューヨークで開催された第2回 Bright Lights Conference 年次会合において、MDB Capital Group から授与された。この Bright Lights Conference では、革新的かつ市場を変革する可能性のある知的財産を有し、株式公開されている企業に着目し、これまで広く認識されていなかった企業で有力な知的財産を持つ企業を、機関投資家が見出す機会を提供している。STI 社社長兼 CEO の Jeff Quiram は次のように述べた。「我々は、大型発電装置や配電市場向けの Y 系線材の開発を行い、我が社の広範な知的財産力や専門技術の強化を図っているところである。「MICO Award」の受賞は、我が社の優秀な知的財産や HTS 材料、及びその製造技術分野に、我々のトップクラスの産業的専門技術を適用してきたという実績が認められたものであり、誇りに思っている。我々の線材技術は、高容量送電ケーブル、超電導 FCL、超電導モーターや発電機といった分野に適用される。」

出典:

“STI Received MICO Award at MDB Capitals Bright Lights Conference 2011”

Superconductor Technologies Inc. press release (May 12, 2011)

<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1562955&highlight>

電力

Converteam (2011年4月4日)

Converteam 社は、ドイツ Hanover Fair で同社の幅広い製品及びサービスに関する展示を行った。その中で、Hydrogenie プロジェクトの展示も行われた。このプロジェクトでは、Converteam 社が EU の資金提供を受け、水力発電所において実質的に無損失で稼動する HTS 水力発電機の 1 号機の開発、製造を担当している。この発電機は、ドイツで今年後半に稼動を始める予定である。この発電機を使うことにより、格段に効率向上が見込める他、設置面積及び重量が従来のものに比べて 70 %程度削減可能となる。この水力発電に係る新技術は、より費用対効果が高く、環境に優しい発電技術である。

出典:

“Converteam at the Hanover Fair – with environmentally-friendly drive solutions”

Converteam press release (April 4, 2011)

<http://www.converteam.com/majic/pageServer/100400019a0000/en/20110404-2-HanoverFair-eco-friendly-sol.html>

American Superconductor Corporation (2011年4月5日)

American Superconductor Corporation (AMSC) は2011年3月31日に終了する第4四半期と通年の収支見込を修正した。今回の収支見込の修正は、AMSC社が契約に従って出荷準備していた1.5-MW及び3-MW風力発電機向けのコア電気部品を、中国 Sinovel Wind Group Co., Ltd が受け取り拒否したことに対応するもの。その結果生じた出荷の遅れが主たる原因となり、AMSC社の第4四半期と2010年通年の収支見込が予想よりも悪化した。AMSC社は現在、第4四半期の総収入が4,200万ドルを下回り、一般会計基準による場合でも一般会計基準によらない場合いずれの計算方法でも、純損失が発生するものと予想している。その結果、2010年通年の総収入も、従来の予想4億3,000万ドル～4億4,000万ドルに対し、修正値では3億5,500万ドルに減少するものと予測している。AMSC社の現金収支も、今回の Sinovel 社の製品受け取り拒否による在庫の増加や2010年度に実施された出荷に対する支払い拒否により、マイナスの影響を受けている。以上の結果、2010年第2、第3及び第4四半期に出荷され未払い状態にある約5,600万ドルをどの時点で収入に繰り入れるかの問題についても再検討を迫られている。Sinovel社が新規出荷をいつ受け入れ、また、過去の出荷に対する支払いをいつ行うかにつき、AMSC社はSinovel社と鋭意話し合いを継続しているところである。

出典:

“AMSC Issues Update Regarding its Anticipated Fourth Quarter and Fiscal Year 2010 Financial Results”

American Superconductor Corporation press release (April 5, 2010)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1547039&highlight

Zenergy Power plc (2011年4月5日)

Zenergy Power plc は、Applied Superconductor Ltd から、英国の33-kV配電グリッド向け飽和コア型超電導限流器の詳細設計と、その効果をモデリングするための工学的検討に関する業務を受託した。一方、Applied Superconductor社は、Low Carbon Network Fund第1次計画の下、英国CE Electric社から33-kV限流器を受注している。Applied Superconductor社CEO、Herbert Pierederは次のように述べた。「超電導限流器の戦略的な設置により、再生可能エネルギー源とそうでないエネルギー源との両者を、電力グリッドで共存させることがより容易になるものと確信している。超電導限流器により、電力グリッドに大きな投資を行うことなく、予想される過電流に耐えることができるようになる。我々は現在、妥当なコストで電力供給に関わるセキュリティと電力品質の改善を実現するため、超電導限流器を大規模に展開したいと考えている。」

出典:

“Order for Design and Engineering of 33-kV FCL”

Zenergy Power plc press release (April 5, 2011)

http://www.zenergypower.com/images/press_releases/2011/2011-04-05-order-for-design%20and-engineering-of-33-kv-fcl.pdf

Superconductor Technologies Inc. (2011年4月6日)

Superconductor Technologies Inc. (STI)は、Southwire Companyが同社Y系線材サンプルの試験を完了し、これがSouthwire CompanyのHTS交流ケーブルの初期仕様を満たすことを確認したと発表した。Los Alamos国立研究所も、同じサンプルについて同様の測定を行い、同じ結果を得ている。STI社会長兼CEO、Jeff Quiramは次のように述べた。「HTS線材を製造するためにSTI社が採用しているRCE-CDR技術は、現在のHTS線材製造の高効率、低コスト技術として有望である。Southwire社の評価結果は、我が社の世界水準のY系線材技術開発が革新的交流電力応用実現に向

け順調に進んでいることを示すものである。我々は、このようなプログラムを Southwire 社とともに今後も進めていきたいと考えており、そのためのビジネス面での関係を更に深めていきたいと考えている。」

出典:

“Superconductor Technologies Inc. Meets 2G HTS Wire Customer Requirements for HTS AC Power Cable Applications”

Superconductor Technologies Inc. press release (April 6, 2011)

<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1547158&highlight>

Zenergy Power plc (2011年4月13日、4月14日、5月24日)

2011年2月11日、Zenergy Power 社の取締役会は、同グループの事業、戦略オプション及び一般的な戦略の長期的な観点からの妥当性についてのレビューを完了したと発表した。この時点では、Zenergy 社の事業は、資金力や必要な顧客を抱えるより大きな企業グループの一員として展開するのが最適であるとの結論であった。従って、取締役会はグループ事業の買い手を捜すという作業に着手した。一方、取締役会は一部株主の代表から、株主は Zenergy 社の売却は最適解ではないと確信しており、もし取締役会が今後とも売却という方策を追求していくのであれば、株主代表は社外取締役の退任決議を提案することになるとの通告を受けた。熟慮の結果、社外取締役達は現行案に対する支持が得られないという状況下で、事業戦略を株主との間の公開討論に付すことは得策ではないとの結論に達した。このため、取締役会は売却手続きを今後進めないことを決議した。同時に、これらの社外取締役は退任し、Simon Cleaver が新たな取締役会議長に、また、David Whelan と Georg Oehm が新しい社外取締役に就任した。

Zenergy 社の新たな事業戦略に関しては、取締役会の新議長 Simon Cleaver が次のように述べた。「新取締役会は、現時点で会社の売却を行うことは Zenergy 社の潜在的価値を最大化することには繋がらないと固く確信している。高温超電導技術は、電力グリッド、金属加熱及び再生可能エネルギー発電の効率を格段に向上させる能力を有しており、Zenergy 社はこの分野のグローバル・リーダーであることは間違いない。詳細な事業戦略を纏める前に Zenergy 社の状況を調上げる努力をする必要があるが、とりあえずの戦略は我が社製品の商品化を支援することを目的とした合弁企業や、戦略アライアンスを組むために現有の知的所有権や専門的な技術力をいかに活用するかをベースにして考えたい。我々は取締役会が新しくなったことを歓迎する。取締役会は、株主の信頼を回復することを目指し、新しく、明確な事業戦略の構築を行うと同時に、パートナー企業と協力して我々が市場をリードする製品群と考えるものの開発を継続すべく全力を挙げているところである。」

取締役会議長 Cleaver は、2011年5月24日に開催された Zenergy 社株主総会で本件に関して次のような説明を行った。「Zenergy 社を売却するという事及びこれを公表するという前取締役会の決定は私にとっては驚きであり、また、これに失望した。この売却案は今や放棄された。Zenergy 社が開発した技術や知的所有権はすばらしいものであり、大きな価値を持っていると常々思っていた。従って、会社売却はその価値を最大化するものではないと考えていた。取締役に新たに名を連ねた David Whelan と Georg Oehm は、Zenergy 社の有力な利益代表であり、多くの他の株主とともに、私の考えに同意してくれている。我々は今回の一連の動きを重く見ている。我々は方針転換に必要な時間は限られていることを認識している。我々は、これまでも、そして今でも Zenergy Power 社は高温超電導技術の分野で世界有数の企業であり、その高い価値を持つ知的財産が不良資産として売却されるという危機的な状況にあったと考えている。」

新取締役会は、保有現金とその減少率は以前に伝えられている通りであること、また、文書に記載されたり以前発表されているいくつかの遅延に関する例外を除き、基本的な問題や技術的問題は存在しないことを確認した。開発が完了して製品化するためにはさらに時間が必要ではあるが、技

術開発は進展している。節約が可能な分野を明らかにするためのコスト解析が現在進行中である。Zenergy 社の商品化戦略に関し、Cleaver は次のように述べた。「商品化のためには事業戦略パートナーが必要である。我が社は常にパートナーを必要としており、この考え方は新しいものではない。開発中の製品は世界市場を目指したものである。Zenergy 社はこれら製品を世界市場で販売し、これを維持していくためのインフラ及び活動範囲に制約がある。我々は Zenergy 社との関係を発展させたいと考えている多くの素晴らしい企業から寄せられる大きな関心というものに勇気付けられている。この歩みは始まったばかりであるが、我々はどの程度の、そして、どの分野に顧客の関心があるかを見極めるため、これら企業にアプローチしているところである。」

出典:

“Change of Directorate, End of offer period”

Zenergy Power plc press release (April 13, 2011)

http://www.zenergypower.com/images/press_releases/2011/2011-04-13-directorate-change-and-end-of-offer-period.pdf

“New Directors & Strategy Update”

Zenergy Power plc press release (April 14, 2011)

http://www.zenergypower.com/images/press_releases/2011/2011-04-14-new-directors-and-strategy-update.pdf

“AGM Statement”

Zenergy Power plc press release (May 24, 2011)

http://www.zenergypower.com/images/press_releases/2011/2011-05-24-agm-statement.pdf

Nexans (2011年4月15日)

Nexans 社と 13 の欧州のパートナー企業・機関は、EC が資金を提供し、各種電力应用到に適用できる革新的かつ多目的超電導限流器を開発する ECCOFLOW プロジェクトにおいて重要なマイルストーンをクリアした。開発グループは、4 年間にわたる超電導限流器の設計開発フェーズが完了し、間もなく実機製作に入ると発表した。この超電導限流器はドイツの Nexans 工場で組み立てられ、試験のためスペイン、パルマ・デ・マジョルカのエンデサ変電所に設置される予定である。この限流器は、限流コンポーネントに Y 系線材が採用されており、欧州電力グリッドにおける色々な場所での応用が可能な初の多目的デバイスである。マジョルカでの試験が完了すれば、スロバキアの Košice における Vychodoslovenska Energetika 社の電力グリッドで長期試験が行われる予定。ECCOFLOW プロジェクトは、Nexans 社がリーダーとなり、いくつかの電力会社を含む欧州内パートナーが参加している。

出典:

“Nexans coordinates the ECCOFLOW project for superconducting fault current limiter (SFCL) with new generation tapes”

Nexans press release (April 15, 2011)

http://www.nexans.com/eservice/Corporate-en/navigatepub_142482_-30414/Nexans_coordinates_the_ECCOFLOW_project_for_super.html

American Superconductor Corporation (2011年4月21日)

American Superconductor Corporation (AMSC) は、中国科学アカデミーの電気工学研究所が中国 Baiyin において建設を進めている変電所で、同社の HTS 線材が使われていることを発表した。この電気工学研究所は科学研究機関として、ハイテク研究や新しい電気工学関連開発、新エネルギー技術開発を進めている。同機構の Xiao Liye は次のように述べた。「Baiyin の超電導変電所は、世界で

これまで実施されてきたプロジェクトの中でも最も野心的なものである。このプロジェクトは、今後全中国で超電導技術を変電所にいかに適用していくかを明らかにすることを目指している。中国の電力需要は増加の一途であり、このような超電導ソリューションは中国の家庭や産業向けの高効率で高い信頼性を持つ電力供給を維持していく上で不可欠である。Baiyin 変電所は、2011年2月に運転を開始しており、ここに設置されている超電導限流器、超電導ケーブル、SMES 及び超電導変圧器には AMSC 社の HTS 線材が使われている。American Superconductor 創立者で CEO、Greg Yurek は次のように述べた。「中国は、各種超電導電力グリッド・ソリューションを大規模に商用使用する最初の国となるべく前進しつつある。中国科学アカデミーの電気工学研究所が超電導製品を開発し、Baiyin 変電所に適用したことを我々は高く評価している。また、今後中国における同じような試みを後押ししていきたいと考えている。」

出典:

“American Superconductor Wire Serves in Superconductor Electrical Substation in China”

American Superconductor Corporation press release (April 21, 2010)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1553151&highlight

Superconductor Technologies Inc. (2011年5月4日)

Superconductor Technologies Inc. (STI) は、2011年4月2日に終了する第1四半期の収支を発表した。純総収入は、前年同期 340 万ドルに対し、当期は 160 万ドル。当期の純損失は、前年同期の 250 万ドルに対し、当期は 370 万ドルであった。STI 社社長兼 CEO、Jeff Quiram は次のように報告した。「第1四半期には、我が社の Y 系線材開発は大幅に進展した。2月早々、我々は、目指す 3 つの応用分野に対応する線材サンプルの製造、出荷を行った。即ち、HTS 風力発電機、HTS 電力ケーブル及び超電導限流器である。我が社のサンプルは、3 機関によって試験され、適用可能との結果が得られている。その 3 機関とは、北米最大の線材・ケーブルメーカーの 1 つである Southwire Company、Los Alamos National Laboratory 及び大型発電機・モーターの主要メーカーである。我が社の HTS 線材製造プロセスが顧客の仕様を満たすことが証明された現在、次の目標は STI 社の線材を HTS 機器に組み込む意思を持つ顧客との取引関係を構築することである。顧客が必要とする長尺 Y 系線材製造のための製造プロセスについても現在順調に準備が進んでいる。」2011年4月2日現在、STI 社保有の現金及び現金等価物は合計で 1,610 万ドルである。第1四半期には、STI 社は増資により、諸経費を差し引き、1,240 万ドルを受け取った。第1四半期末時点での STI 社の受注残は 72,000 ドル。なお、前年同時期の受注残は 724,000 ドルであった。

出典:

“Superconductor Technologies Reports First Quarter 2011 Results”

Superconductor Technologies Inc. press release (May 4, 2011)

<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1559144&highlight>

IOP Publishing (2011年5月15日)

IOP Publishing は Superconductor Science and Technology 誌に、Bi2212 の性能は加工プロセスにおける気泡の生成により制約を受けるとの研究者の報告を掲載した。Bi2212 は、現時点ではマグネット向けの丸型線材製造が可能な唯一の高温超電導体である。マグネット応用のためには、線材は強磁場下でも大きな電流密度を保持しなければならない。以前の研究結果によれば臨界電流は線材の長さによって大きく変化することが示されており、Florida State University の Applied Superconductivity Center と National High Magnetic Field Laboratory の研究グループは、このような変化は線材中の Bi2212 粒の結合状態に起因するものであると結論付けていた。Bi2212 線材はパウダー・イン・チューブ法により製造される。凝固寸前の熔融状態と凝固との間で生じている現象

を明らかにするため、研究グループは急冷速度を変えた急冷試料をいくつか作成した。SEM 及び放射 X 線マイクロトモグラフィーを使って調べた結果、パウダー・イン・チューブ・プロセス固有の微小な空隙が、熔融時に一箇所に集まり気泡を形成することが明らかになった。このような過程により、Bi2212 がいくつかのフィラメントに分割され（フィラメント内の粒の結合状態は良好）、フィラメント間の結合が残留している気泡により阻害される。その結果として、長尺線材内部の結合性に問題が生じ、電流の流れが妨げられていた。以上の結果から、臨界電流密度を改善するためには、熔融前の材料をより密度の高い状態にしておけばよいことになる。このような高密度化の各種手法については現在検討が進められている。

出典:

"Bubble formation with filaments of melt processed Bi2212 wires and its strongly negative effect on the critical current density" (Superconductor Science & Technology 24 075009)

<http://iopscience.iop.org/0953-2048/24/7/075009>

http://www.iop.org/news/11/may/page_50926.html

American Superconductor Corporation (2011年5月24日)

American Superconductor Corporation (AMSC)は、社長兼 COO の Daniel P. McGahn が 2011 年 6 月 1 日付けで CEO 及び取締役役に就任すると発表した。McGahn は、AMSC 社に 20 年以上に亘って奉職した近々退任予定の Gregory J. Yurek の後任となる。Yurek は、8 月の株主総会までは取締役役会議長を務め、その後 2 年間は Senior Advisor として AMSC 社に留まる。Yurek は次のように述べた。「これまでの 24 年間には、多くの課題に直面し、また、興味深く、そしてそれなりの成果も得られた。AMSC 社の素晴らしいチームとともに超電導のパイオニアであり続けたし、その間、AMSC 社は各種の電力技術に関わる会社へと発展してきた。McGahn 氏とは 15 年間仕事を一緒にしてきており、現在の課題を克服し、新たな成長へと会社を導く彼の力に信頼を置いている。」この CEO 交代に関連して、AMSC 社上級取締役 John Vander Sande は次のように述べた。「McGahn 氏は、AMSC 社にあって我々に強い影響を与えてきた。彼は、Yurek 退任の後、AMSC 社を引っ張っていける最適者である。取締役会メンバー全員が AMSC 社事業の多角化を加速し、新しい成功へと繋ぐ彼の能力に最大の信頼を置いている。我々は、過去 24 年間の AMSC 社に対する Yurek 氏の偉大な貢献に感謝しており、彼が Senior Advisor として円滑なりダーシップの移行についても尽力してくれることを嬉しく思っている。」

出典:

"AMSC Announces CEO Transition"

American Superconductor Corporation press release (May 24, 2010)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1567401&highlight

American Superconductor Corporation (2011年5月31日)

American Superconductor Corporation (AMSC) は、2011 年 3 月 31 日締めの前年度収支報告が遅れる予定であり、米国証券取引委員会への年次報告も 15 日間の猶予を求めていると発表した。AMSC 社は、2010 年度の収支結果を準備し、監査をうけるために更に時間が必要であるとしている。これには、第 2、第 3 及び第 4 四半期の中国の顧客に対する出荷に伴ういくつかの見直しが含まれている。この見直しの結果には、2011 年 4 月 5 日に発表した 3 億 5,500 万ドル以下になるとした 2010 年の年間収支見通しの際に考慮した収入のマイナス要因が加味されることになる見込み。

近い将来の収入に見合うよう支出削減を目的として、AMSC 社は新規雇用を凍結し、同時に旅費や変動経費のカット、人員の 10 %削減を行った。これに加えて、AMSC 社はフィンランドの電力技術会社 Switch 社の買収に必要な追加資金確保のための方策についても検討を進めている。

AMSC 社の収支は、2011年3月末の Sinovel Wind Group Co., Ltd.による製品受け入れ拒否や、2010年度中に出荷を終えている製品に対する債務不履行により打撃を受けた。AMSC 社は Sinovel 社と経営者レベルでの話し合いを継続しており、同社と取引が継続できるようにと期待をかけている。

出典:

“AMSC to Delay Reporting Fourth Quarter and Fiscal Year End Financial Results”

American Superconductor Corporation press release (May 31, 2010)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1569300&highlight

NMR

Bruker (2011年4月11日)

Bruker 社は、高性能、小型 NMR マグネット・シリーズ Ascend™ を拡大し、400 MHz から 850 MHz までをカバーできるよう品揃えを充実した。Ascend™ の特徴は、先端超電導マグネットであること、独自特許によるマグネット技術を採用していることであり、重量、サイズ、漏れ磁場、磁場ドリフト、冷媒消費量を大幅に削減した小型、軽量マグネットを実現している。特に、Bruker 社固有特許である超電導結合技術により、従来マグネット比でドリフト磁場を 50 %削減、最適な磁場安定性を実現した。同時に、上で述べた特徴により、Ascend™ マグネットは設置が容易であると同時に、安全かつ安価な運転が可能となっている。

出典:

“Bruker Expands its Ascend™ NMR Magnet Series for Higher Performance, Easier Siting, and More Economic Operation”

Bruker press release (April 11, 2011)

<http://www.bruker-biospin.com/pr110411-5.html>

Bruker (2011年4月11日)

Bruker 社は、合理的な価格で感度を大幅に向上した極低温プローブ CryoProbe™ Prodigy の製品化を発表した。これは従来の概念を破る画期的な製品である。広帯域 CryoProbe™ Prodigy は、従来の室温で稼動するものに比べ 2~3 倍感度向上を図るため、窒素冷却 RF コイルとプリアンプを採用している。この CryoProbe™ Prodigy は NMR の Avance III™ にも搭載可能である。

出典:

“Bruker Announces Game-Changing, Affordable CryoProbe™ Prodigy for 3-fold Sensitivity Boost and 10-fold Throughput Enhancement for Routine NMR”

Bruker press release (April 11, 2011)

<http://www.bruker-biospin.com/pr110411-1.html>

Bruker (2011年4月11日)

Bruker 社は、動的核分極（電子スピン分極を核スピン分極に伝達することにより両スピン分極の方向を揃える）を使って、固体 NMR 実験における感度を向上させることが可能な 395-GHz Solid State DNP-NMR、2 台を受注した。この新しい装置により、商品として市場に出ている高性能 DNP-NMR 装置の磁場強度の選択幅を増やすことができる。395-GHz Solid State DNP-NMR システムは、高電力マイクロ波源としての 395-GHz ジャイロトロン、Bruker 社の Ascend 600-MHz、89-mm 大口径ボア・マグネット、NMR 信号受信のための超高速 Avance™ III 電子回路から構成されてい

る。395-GHz システム 1 号機は Bruker 社の施設に設置される予定。同施設では、装置開発、応用研究及び顧客へのデモが行われる。また、商用第 1 号 395-GHz システムは、カナダの University of Guelph に出荷される予定であり、商用 2 号機についてはドイツの Max Planck Institute for Biophysical Chemistry から受注した。Bruker BioSpin 社社長 Werner Maas は次のように述べた。

「我々は、我が社の新 395 GHz DNP-NMR システムの最初の受注を喜ばしく思っている。動的核分極性能の強化による感度の大幅向上により可能となった現在進行中の新たな研究は、固体 NMR におけるパラダイム・シフトを生み出している。我々は、優秀な研究者がこの技術を使うことにより、生物学分野で、非常に興味深い新たな科学研究が行われるであろうことを確信している。」

出典:

“Bruker Announces Two Major Orders for Novel High-Field 395 GHz Solid State DNP-NMR Systems in Canada and Germany”

Bruker press release (April 11, 2011)

<http://www.bruker-biospin.com/pr110412.html>

医療

Elekta AB (2011 年 4 月 18 日)

オーストラリア、メルボルンの Swinburne University of Technology は、脳活動を研究する目的で Elekta 社の脳磁計 Neuromag TRIUX システムを購入した。2011 年半ばに運手開始予定のこのシステムは新しく建設された Advanced Technology Center に設置される予定。この脳磁計システムは、認識プロセス、視覚プロセス、神経系疾患や異常、メンタル・ヘルス関連の異常の研究に使用される予定。

出典:

“Australian Center Readies Brain Research Program for Addition of Elekta MEG System”

Elekta AB press release (April 18, 2011)

http://www.elekta.com/healthcare_international_press_release_20071249.php

基礎

Brookhaven National Laboratory (2011 年 4 月 12 日)

米国エネルギー省所管の Brookhaven National Laboratory の研究グループは、スイスの Paul Scherrer Institute 及び University of Zurich と協力して、2つの超電導層間にバリアー層を挟むことにより、バリアー層の超電導特性が格段に向上することを見出した。今回の研究は、厚いバリアー層に超電導電流が流れるという、銅酸化物で見られる巨大近接効果に関する知見に基づくものである。厚いバリアー層は比較的簡単に作りこめるため、巨大近接効果を使えばチップ上のデバイスの均一性確保が容易になる可能性がある。この均一性確保は、これまで大規模な超電導集積回路開発の大きな隘路であった。更に詳細に巨大近接効果を調べるため、研究グループは MBE を使って各層の Sr 濃度が異なるランタン銅酸化物の複雑な多層構造を作成した。各層の超電導転移温度は異なっている。各試料の外部層及び内部層の超電導状態をチェックすることができる低エネルギー・ミュオン・スピン回転法 (ミュオン SR) という新たな手法を使って作成した試料を調べた。研究グループは磁場マップを作成し、巨大近接効果を確認するとともに、 $T_c=5\text{ K}$ のバリアー層が $T_c=40\text{ K}$ の 2つの超電導層に挟まれた時、20 K においても超電導電流が流れることを見出した。研究

グループのこの結果は、バリアー層全体が巨大近接効果の影響下にあることを示すものである。今回の結果は Nature Physics オンライン号に掲載された。

出典:

“Giant Proximity Effect Enhances High-temperature Superconductivity”

Brookhaven National Laboratory press release (April 12, 2011)

http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/PR_display.asp?prID=1263

Brookhaven National Laboratory (2011年4月27日)

米国エネルギー省所管の Brookhaven National Laboratory (BNL) の研究グループは、絶縁体が高温超電導体へと変化する条件を調べることを目的として、正確に1原子ごとに積層する技術を使って電界効果トランジスターと同様の構造を持つ超薄膜デバイスを作成した。外部電場を変えて材料中の伝導電子密度を増減させることにより、絶縁体-超電導転移を調べることができる。また、これにより電子密度の変化が電流の増減にどのような影響を与えるかを見ることもできる。しかしながら、銅酸化物をこの手法により調べるためには、非常に薄くて完全に均一な膜と100億 V/cm 以上にも上る電界が必要である。研究グループは、MBEにより1原子層毎に積層して、1層の膜厚が正確に制御された完全に均一な超電導薄膜を作成した。同様の手法を使い、研究に必要な、電荷制御が可能な薄膜の超電導電界効果デバイスを作成した。研究グループは、このデバイスを使って、伝導電子密度の増加に伴い銅酸化物は絶縁状態から超電導状態へと移ること、その遷移はシート抵抗が6.45 kΩ に達した時に起こることを見出した。このシート抵抗の値はプランク定数を電子密度の2乗を2倍した値で割ったものと正確に一致している。この結果は、クーパー対を形成している超電導状態の電子の他、局在化して絶縁状態の電子ペアが存在していることを示しているようであるが、このような状態が生じることはこれまで知られていない。超電導電界効果デバイスの作成という技術ブレークスルーについては、Nature に掲載されている。

出典:

“Exploring the superconducting transition in ultra thin films”

Brookhaven National Laboratory press release (April 27, 2011)

http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/PR_display.asp?prID=1268

Rice University (2011年5月3日)

Rice University の研究グループは、2つの異なるタイプの高温超電導体がなぜ類似の振る舞いを見せるかについての理論研究結果を発表した。特に、今回の結果は、異なるタイプのニクタイトにおける電子の磁氣的性質がいかに超電導と関連しているかを説明している。ニクタイトの親物質群の1つは2008年に発見された金属的性質を持ったものである。また、もう1つは2010年に発見された絶縁体である。各々の材料は、特別な方法で合成すると、ほぼ同じ温度で超電導体になる。理論研究者達は、このように異なる化合物が類似の振る舞いをしている要因は何かを突き止めようと検討を行ってきている。Rice University の研究グループは、各々の材料における鉄原子配列の仕方の僅かな違いがこれを説明できるものと考えている。ニクタイトは、鉄層が他の原子層により分かたれている層状化合物である。中国の研究者達は、最近選択的に鉄原子を取り除いて、空サイトを規則的に配列させる方法を発見した。一方、今回の研究のリーダーである Qimiao Si は超電導転移温度まで冷却したときに電子の集団的振る舞いがこの2つの異なる物質の類似性を説明できないものかと考えた。共同研究者の Rong Yu は次のように解説した。「規則的に配列した空サイトは1つの電子が近隣の電子との間に一定の距離をおく傾向を強める働きを持つことを見出した。いわゆるモット局在化であり、これにより絶縁状態が生じる。これは、モット局在が生じる全く新しい態様である。」他の共同研究者 Jian-Xin Zhu (Los Alamos National Laboratory) は更に次のように述べた。

「2つの物質を比べることにより、ほぼ局在状態にある電子スピンとそれらの間の相互作用は超電導状態発生にとって極めて重要な役割を果たすという知見を得ている。また、今回の知見を使えば、2010年に発見された新しい化合物群において、どういう点が超電導転移温度の向上にとってプラスに働くかを実験研究者に対して説明することができる可能性を持っている。」Siは以下のように述べて締めくくった。「2010年の新しい超電導体は、恐らく、2008年の鉄ニクタイト高温超電導体の発見以来見出された最も重要な鉄基材料である。我々の理論研究の結果は、新しい鉄基超電導体と古い超電導体との間の自然な関係を説明しており、これら材料における超電導性の共通した起源を示している。」この研究グループの結果は *Physical Review Letters* オンライン号に掲載された。

出典:

“Study helps explain behavior of latest high-temp superconductors”

Rice University press release (May 3, 2011)

<http://www.media.rice.edu/media/NewsBot.asp?MODE=VIEW&ID=15727>

Boston College (2011年5月21日)

Boston Collegeの研究グループは、Chinese Academy of Sciences, National Institute of Standards and Technology, Oak Ridge National Laboratory 及び University of Tennessee と協力して、中性子回折及び STM を使って反強磁性と超電導性との関係を調べた。その結果、以前は超電導と競合すると考えられていた反強磁性が、超電導性と共存しうることが明らかになった。電子ドーピングした銅酸化物を使い、高温超電導体が超電導状態にある時にも反強磁性状態が残存していることを見出した。特に、中性子回折及び STM 実験の結果、材料が反強磁性状態にある時も、超電導状態にある時もスピン励起が存在することが分かった。中性子回折は直接スピン励起を調べることができ、STMは電子の振る舞いを明らかにすることができる。これまで、電子スペクトル内にスピン励起信号が認められ、電子結合が生じていることが示されている。この結果は、スピン励起の超電導発現に対する重要性を示すものであり、色々な状態の間の関連に関しより深い理解へと導くものである。グループの研究結果は *Nature Physics* に掲載された。

出典:

“Once thought a rival phase, antiferromagnetism coexists with superconductivity”

Boston College press release (May 23, 2011)

<http://www.bc.edu/offices/pubaf/news/2011/madhaven05252011.html>

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

イットリウム系超電導線材の開発の道のり (その4)

～ 長尺化の壁と大規模プロジェクト 1998年-2008年 ～

株式会社フジクラ
超電導プロジェクト室
グループ長 飯島康裕

現在製造に供されているイットリウム系超電導線材の製法の多くは 90 年代中葉迄に提案されていたが、これを数 cm のショートサンプルではなく、長さを持った形で検証する作業は大変難航した。当時より PLD、CVD 等の気相合成法による開発が先行していたが、テープ基板を送りながら、僅かな組成のずれや温度変動を防ぎつつ、超電導膜を積層していくのが難しく、数年の歳月を経てようやく 2-3 m 長程度のサンプルが、日本企業と米国の国研にて個別に報告されるに至っていた。中でも大きな壁となったのは、十分な長さで機能する「配向中間層付き基板テープ」を得ること、及び、超電導層成膜時の基板温度制御であった。当時は高温酸素雰囲気で作動する真空機器の設計技術が大変未熟で、設備の安定動作自体に困難があったほか、超電導層の成長に伴って放射率が変動していくため、膜成長面においてテープを移動させつつ、数度以内の最適温度に保ち続けるのは、思いのほか至難であった。このように精緻な条件出しを連続長尺設備に適用していく作業は、その都度設備の修正をしながら手探りでスケールアップする形になるため、継続的な設備投資と膨大な時間をかけた検証作業がどうしても必要であった。既に高温超電導発見から 10 年近くを経ており、こうした息の長い開発を民間主導で実施するのはとうてい不可能となっていた。

この状況を打開するため、ほぼ同時期に日米で大規模な国家プロジェクトが生まれ、各機関でバラバラに進められていた開発を束ね、効率的に国費を投じ開発を加速することになった。米国ではエネルギー省傘下の有力な国立研究所が集結し、日本では経産省・NEDO の下で ISTE C を中心に線材・重電メーカーが集結した。弊社も 1999 年から ISTE C からの再委託開発機関として NEDO の「超電導応用基盤技術開発」プロジェクトに参加し、それまでとは桁違いの国費補助を受けて本線材の長尺化開発に取り組むことになった。本プロジェクトは、早期に成果を出し得るプロセスを選定して集中投資を行うと同時に、長期的に低コストを目指せるとされる製法も、複数平行して進めるという 2 段階の構成となっており、弊社提案の IBAD 法中間層/PLD 法超電導層、住友電工提案の ISD 法中間層/PLD 法超電導層の 2 種が、先ず 50 m 以上の長さを達成する「先行開発線材」として選定された。

1999 年の時点で長さの律速になっていたのは配向中間層基板であった。当時の気相法による超電導層の連続製造技術そのものは、数 10 m 長であれば決して不可能ではない、と期待される状況になっていたが、このような長さの中間層付き基板が存在していなかったのである。配向中間層基板は、Y 系線材開発の根幹をなす技術であり、多数の製法が提案されていたが、米国が主導する RABiTS 法や MgO-IBAD 中間層のように低コストとされる基板は、未だ超電導層を安定成膜し得る信頼性が得られず、何れもショートサンプルに留まり進捗は遅疑としていた。一方、日本のプロジェクトにおいては、高コストではあっても十分な信頼性のある YSZ 系材料を用いた IBAD、及び ISD 法による配向中間層基板の長尺化に挑戦した。これについては批判もあると思うが、当時は超電導層の成膜技術自体を進歩させる必要があり、少なくとも信頼性ある基板を使って修行を積み上げる時期が必要だという判断は正しかったものと思う。

こうして同プロジェクトにおいて弊社が担当し設計製作したのが、66 cm 長の誘導放電式矩形イ

オンソースを用いた連続 IBAD 中間層製造装置である。当時用いられていた YSZ による IBAD 中間層は、成膜初期は無配向の微結晶膜であり、成長に伴って徐々に配向結晶が選択的に加算されていく特徴があり、高特性が得られる数度以内の面内分散角に留めるまでには 1 μm 前後の厚さを必要とした。これをイオン衝撃下で、成長速度の遅い IBAD にて作製するためには数時間を要した。このため 1 m/h 程度の線速を得るには数 100 cm^2 以上の面積にわたってテープを這わせて同時に蒸着する必要があり、かつ 100 時間程度の連続運転が必要であった。IBAD 法発見当時に市販されていたイオンソースは、タングステンフィラメントによる熱電子を用いた小型丸型の DC 放電式が主流であって、酸素雰囲気中の動作時間はせいぜい数時間が限度であり、このような設備の設計はとても不可能であった。ところが、これについては時が味方をした。当時進みつつあった大型液晶ディスプレイプロセスにおいて、液晶の配向のためにガラス表面に微細な凹凸をつける“rubbing”工程に、矩形のイオンビームを使う構想があり、そのための試作一号イオンソースが丁度完成したタイミングだったのである。ほぼ要求通りのスペックのイオンソースが市販で得られたため、比較的順調に設備の設計製作とサンプル試作が進み、材料についても YSZ に換わってより配向性に優れる $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ が見付き、これを用いることによって 100 m 長程度の配向中間層付き基板が安定して得られるようになった。これを用いて、2002 年から 2004 年にかけて、50-100 m 長で 100 A クラスの線材を、世界に先駆けて作製することが出来、 l_c と長さの積が 10^4Am を超えるに至った。この結果は当時の米国側のプロジェクト目標値そのものであり、先行して日本が達成してしまったことで再度米国を刺激することになる。

「超電導応用基盤技術開発」プロジェクトは 2003 年度から第 II 期の 5 年計画に入り、300 A 以上の l_c で、500 m 以上の長さの線材 (l_c と長さの積が $1.5 \times 10^5 \text{Am}$) を達成することが目標として掲げられた。これは現在では極く当たり前に製造出来る線材スペックであるが、当時は一桁以上のスケールアップであり、本当に達成できるのかどうか、大変挑戦的な値に思えたものである。IBAD 工程については 500 m 長中間層の安定製造のため、世界最大の矩形イオンソース (110 cm x 15 cm) が特注で設計され、これを用いた大型設備は、約 2 年間の調整作業を経て 500 m 長中間層の安定製造に至った。しかし、この時期の開発の焦点は寧ろ超電導層のスケールアップであった。当時最も安定した条件出しが出来る製法は PLD 法であったが、この方法は、ターゲット上にレーザー光を集光した位置でスポット的に高速蒸発するため、過度にパワーを上げると過飽和度が限界を超えて、成膜条件が狭くなって線速が制限される問題があった。この問題を解決するべく、パルスレーザーのビームをミラー等で高速スキャンする方法が、この時期にいくつかの真空機器メーカーにて開発された。このビームのスキャン技術そのものは半導体微細加工技術の一環として開発されていたものであったが、これを PLD 技術に取り入れることにより、比較的大きな面積で一定の過飽和度を保って蒸着することが可能となり、PLD の生産性は飛躍的に向上することになった。この技術を用いて $l_c > 200 \text{A}$ で 200 m を超える線材が、2005 年に ISTE C から、 $l_c > 300 \text{A}$ で 500 m を超える線材が、2008 年にフジクラから報告されるに至った。

一方、2000 年代前半は米国側が注力している「低コスト」タイプの製法が飛躍的に進展した時期でもあった。米国では日本の動きに対抗して 2000 年頃から国費投入を前倒し加速することとなり、IBAD 法については、ロスアラモス国立研から IGC スーパーパワー社に技術移管され、同社が進める CVD 法による超電導層成膜技術に大きな助成が入れられることになった。また RABiTS 法上の塗布法 (TFA 法) 超電導層を進めていた AMSC 社についても大きな資金が投入されていった。しばらくは日本の GZO-IBAD/PLD 法の後塵を拝する状況が続くが、2005 年頃から IBAD-MgO 方式を構成する積層構造がほぼ確立し、また RABiTS 方式の基板についても、添加元素の工夫等で機械的信頼性が向上するに至り、100 m を超える長さの基板が安定して作れるようになっていく。こうなるとプロセス線速が早いメリットは大きい。MgO 方式の IBAD 法については 2007 年頃に 1 km 長の基板が作製され、2008 年には 1 km 級の線材が CVD 法超電導層の積層で報告されるに至った。

以上、今世紀初頭の約 10 年間にわたる日米の精力的な国家プロジェクト投資により、僅か数 m に留まっていた Y 系超電導線材が、一気に長さの壁を突破して、数 100 m 長の高特性線材の作製に至った過程について述べた。多数の製法が提案された中で、どの製法の組み合わせが正解なのかを見通すのは至難であり、途中で消えていったプロセスも少なくなかったが、多数の方式の開発が同時進行したことによって Y 系線材プロセス全体への理解が進み、結果的に開発が加速された面はあったと思う。次回は、事業化へ向けてのコストダウン開発と、更なる高性能化、均一高品質化へ向かう現在の Y 系線材開発の状況について記述したい。

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q: 「最近、強力超電導磁石で「卓上 MRI」実現へ道開くという記事がありました。どのような特長を有していてどのような応用が期待されるのでしょうか？」

A: 現在、市販されている MRI や NMR といった分析器に利用される超電導マグネットは、NbTi 等の金属系超電導線材で作られているため、液体ヘリウム温度 (4.2 K) までの冷却が必要となり、冷凍機を含め非常に大がかりな装置となります。もし持ち運び可能な簡易型のマグネットが実現できれば、移動困難な汎用の超電導マグネットをステーション化し、そこで簡易型マグネットに着磁させることで必要な場所に必要な磁場を自由に移動させることが可能となります。

RE123 系の高温度超電導バルク体は、それ自体が超電導の結晶であるため、①高磁場中でも高電流密度、②制御フリーで安定した磁気浮上 (高ピンニング特性)、③コンパクトで強い磁場発生等の特徴があり、29 K にて 17 T という非常に強い磁場を発生した報告もあります。また、実用上使用困難な温度と言われている液体窒素温度 (77 K) においても高い電流密度を有しています。つまり、バルク体の持つ特徴を液体窒素冷却でも十分に活かすことが可能で、バルク体は簡易型のマグネットに適していると言えます。

鉄道総合技術研究所で開発された超電導マグネットの構造は、リング形状に加工し、樹脂含浸加工を施した外径 87 mm、内径 47 mm のガドリニウム系超電導バルク体が層状に重ねられ、内外周を FRP 容器で覆い、外周 FRP と大気とはステンレスの真空壁で断熱されています。最終的には直径 120 mm、長さ 320 mm の円筒形の容器となり、この容器に液体窒素を入れて冷やし続けることが可能で、大きな冷却システムは不要となります (図 1)。超電導マグネットのユーザーはできる限り、サンプル空間の大容積化を望んでいますが、内径が大きくなるに従い加工面積も増えてしまうため、表面の加工損傷箇所も大きくなります。

そのため、樹脂含浸により補強を行い、長期の磁場安定化を図っています。このように製作したリング形状バルク体は積層数を増やすほど中心磁場が向上し、10 個積層時において 2.59 T 以上の発生磁場を確認しました (図 2)。この値は、MRI の現在の主流である 1.5 T クラスに比べ、十分であると言えます。高温超電導材料は低温になるほど高性能になる特性があるので、小型の冷凍機で更に冷却することにより、磁場の向上が望めます。

このような持ち運びができるマグネットの開発により、研究者や小規模な医療機関が手軽に活用できる卓上サイズの高性能な MRI や NMR が実現します。また、材料分析器以外でも高温超電導バルク体の着磁が行えるため、小さな実験室でも気軽に性能評価が行えるようになり、更なる超電導材料の高性能化や新材料の開発が期待されます。



図 1 簡易型超電導マグネット

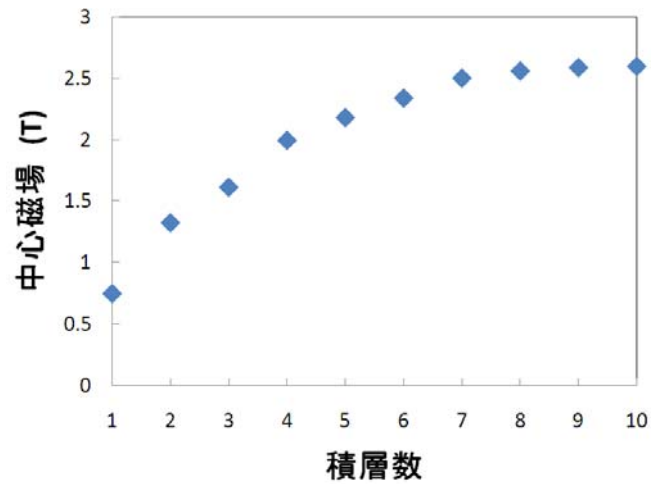


図2 積層数による磁場の変化

回答者：公益財団法人鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 超電導応用研究室長 富田 優 様

[超電導 Web21 トップページ](#)