

〔基調講演〕

「超電導・低温の最新技術 ―産業機械への適用可能性―」

低温工学・超電導学会 会長／住友電気工業株式会社 フェロー

佐藤謙一

1. はじめに

1986 年の LaBaCuO 系（ランタン系）酸化物高温超電導体の発見以降、臨界温度（ T_c ）が、90K 級の YBaCuO 系（イットリウム系）、続いて 110K 級の BiSrCaCuO 系（ビスマス系）、125K 級の TlBaCaCuO 系（タリウム系）酸化物高温超電導体が報告されるにいたって、冷却媒体として液体窒素（1 気圧下での沸点：77.3K）が使用可能となった。液体窒素は資源として豊富で取り扱いが容易で安価な上、低温容器が簡略化でき、冷却性能が大きいなどの特徴があり、液体窒素温度で使用可能な超電導が現実のものとなると、エネルギー分野、エレクトロニクス分野へ多大の影響を与えることが予想された。表 1 に主な超電導材料を示す。

ビスマス系高温超電導材料、なかでも $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$ で表されるビスマス系 2223 相と呼ばれる高温超電導材料は、①電気抵抗がゼロになる超電導状態に移行する温度が、液化天然ガス（LNG）の蒸発する温度である 110K、すなわち -163℃と高く、従って液体窒素が冷媒として使用可能であり、従来の金属系超電導線の冷却に必要な高価な液体ヘリウムが不要であり、冷却コストが大幅に低下可能であること、②高価な希土類元素や毒性元素を含まないことにより、発見当初から世界中で着目され、ビスマス系超電導線として超電導ケーブル、超電導マグネット、超電導モータなどへの応用が進められてきた^{1,2,3)}。最近ではイットリウム系高温超電導材料である $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ で表される RE123 系の超電導線を用いる応用も見られる。

表 1 超電導材料

材料	転移温度 T_c (K)	臨界磁場 B_{c2} (T)	用途
Nb-Ti 合金	9.6	11.5	NMR、MRI、加速器、リニア、発電機など
Nb ₃ Sn	18	27	NMR、核融合用など高磁場用(>10T)
MgB ₂	39	30	液体水素温度での MRI など
ビスマス系 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-x}$	110	~100	NMR、MRI、加速器、ケーブル、モータ、変圧器、限流器、各種高磁場マグネット
イットリウム系 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	90	~100	エレクトロニクス（SFQ）素子、高周波フィルター、SQUID、変圧器、限流器、ケーブル

2. 高温超電導線の性能

図1に高温超電導線の開発の歴史と現状を示す。ビスマス系超電導線、RE123系超電導線はいずれも酸化物である。酸化物であるので、その性質は、基本的に脆性であるが、ビスマス系超電導線の場合、多芯線と呼ばれる数十本～百本の超電導材料をフィラメント状に金属マトリックス中に分散配置させることにより、フレキシブルにすることが出来る。図2に製造方法、線材断面構造を示す。約 1mm^2 の断面積で $200\text{A}@77\text{K}$ の超電導電流を流すことが出来る。

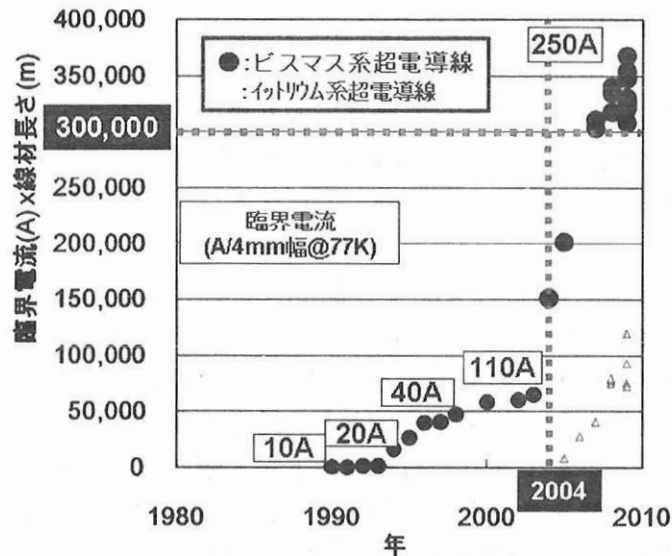


図1 高温超電導線の開発の歴史と現状（縦軸は、超電導線の性能評価指数であり、臨界電流(A) x 線材長さ(m)で表される）

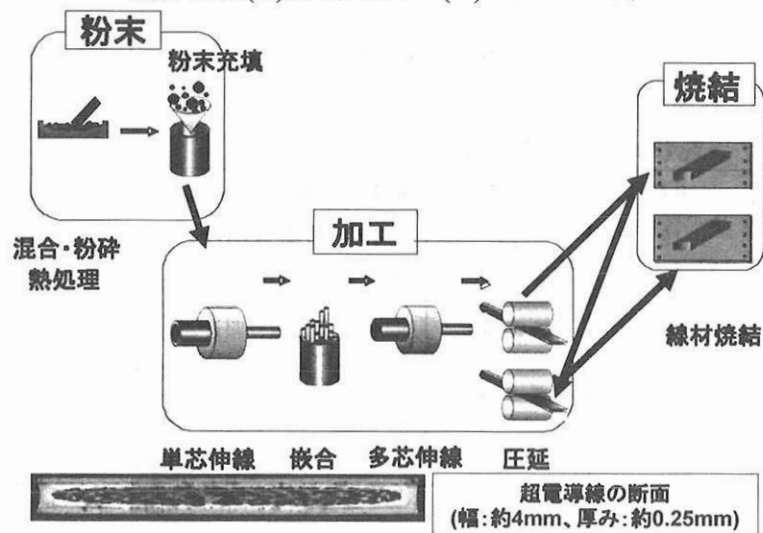


図2 ビスマス系超電導線の製造方法と線材断面構造

この製造方法は、Poweder-in-tube 法と呼ばれ、伸線加工、圧延加工、熱処理を組み合わせた手法でもあるので、Thermo-mechanical process とも呼ばれる。また、高温超電導材料を粉末として原材料とし、金属被覆して加工してゆき、圧延加工をするので、金属被覆圧延法とも呼ばれる。セラミックスであるが、このプロセスを用い、図2のような、フィラメント状の高温超電導材料に分割することで、線材の曲げ加工が出来るなど、フレキシビリティが確保出来る。

また、高温超電導材料は超電導電流が流れる部分が結晶構造の二次元面であるため、線材の長手方向に超電導電流が流れる結晶面を配向させる必要がある。ビスマス系高温超電導材料は、その結晶の構造の中に、Bi-O（ビスマスと酸素）という層状構造が二重に存在し、この層状構造がファンデルワース力という、結合力が弱い構造となっている。このことが、圧延加工時にすべり面としての機能を発揮し、結晶の配向化が可能となる。これは、ビスマス系高温超電導材料にのみ強く認められていることであり、塑性加工で配向が可能で重要な側面を持っている。ビスマス系が日本で発見された材料であること、塑性加工で配向化が可能であること、超電導状態になる温度が110K と高いこと、有害な元素や高価な希土類元素を含まないことは、我が国で線材化の基本的な重要技術が数多く開発されたことと並び、非常な幸運であった。

図2の製造方法の中で、超電導線の性能を決める重要な最終工程に、新しく開発した加圧焼成法（300気圧）を適用した。新しい加圧焼成法を開発した目的は、従来の塑性加工法を組み合わせた金属被覆圧延法では、重要な次の2点で、工業材料としての品質の信頼性や量産性を確立するには至らなかったからである。第一の点としては、酸化物セラミックスのために硬くて通常の焼結方法では密度がせいぜい85%にまでしか上げられず、結晶のつながりをよくすることができなかったことによる。そのために、機械的強度も低く、又超電導電流も大きくすることができないという欠点があったことによる。第二の点は、酸化物特有の酸素の出入りがあるために、ガスによる膨れなど局所的な性能劣化が避けられず、マグネットやケーブル応用に必要とされる数100m以上の長さになると欠陥が生じ易く、歩留を上げることができないという欠点があったからである。新しく開発した加圧焼成法は、この2点を解決できる新しい焼結方法である。

RE123系超電導線はビスマス系超電導線の様な製造方法では臨界電流を改善する結晶の配向化が出来ず、半導体で使われている薄膜製造方法を用いて、テープ状の基板の上に多層の薄膜積層構造を作る。従って、長尺で欠陥の少ない製法が必須であり開発が続けられている。

3. 高温超電導線の応用

超電導線の応用は、次の五つの大きな分野において開発が進んでいる。

- (1) 地球とエネルギー・環境技術（電力ケーブル、発電機、変圧器、限流器など）
- (2) 都市インフラと交通技術（船舶用モータ、超電導自動車、リニアなど）
- (3) 暮らしとIT・ユビキタス技術（データセンタ直流配電など）

(4) 工場とモノ作り技術 (Si 単結晶引上装置、ビレットヒータ、B-H 特性評価装置など)

(5) 医療とバイオ技術 (MRI、NMR など)

これらの応用分野は私たちの社会インフラ、健康、日常生活に深く関わりあうものである。高温超電導線が省エネルギー・小型化・軽量化・高性能化・省資源化の特徴をもたらすので、今後の低炭素社会を実現してゆく際の切り札的存在になってゆくであろうことが想像される。この中では、ビスマス系超電導線の電流リードとマグネットが商用製品化されている。図3には、超電導の応用分野を示す。

4. マグネット応用

ビスマス系超電導線を使用したマグネットは、従来の Nb-Ti や Nb₃Sn 超電導線では運転不可能な温度(例えば 20K 以上)で運転可能な高磁場マグネット、また同じ運転温度領域なら従来の超電導線では発生できなかった超高磁場(例えば 24 テスラ以上)を発生できるマグネットに人別される。

20K 以上の温度でのコイルの冷却は、従来から真空ポンプとして使用されてきて大量に生産され信頼性も確認されている 20K 冷凍機によるコイルの伝導冷却や液体ネオン(27K)による浸漬冷却、そして 20K-30K のガスヘリウムによる冷却などが用いられる。20K の温度領域では比熱が液体ヘリウム温度(4.2K)に比較して 100 倍大きくなることでコイル内部の熱擾乱やコイル外部からの熱擾乱に対して格段の安定性向上が可能となり、また冷凍機の効率が良くなる。

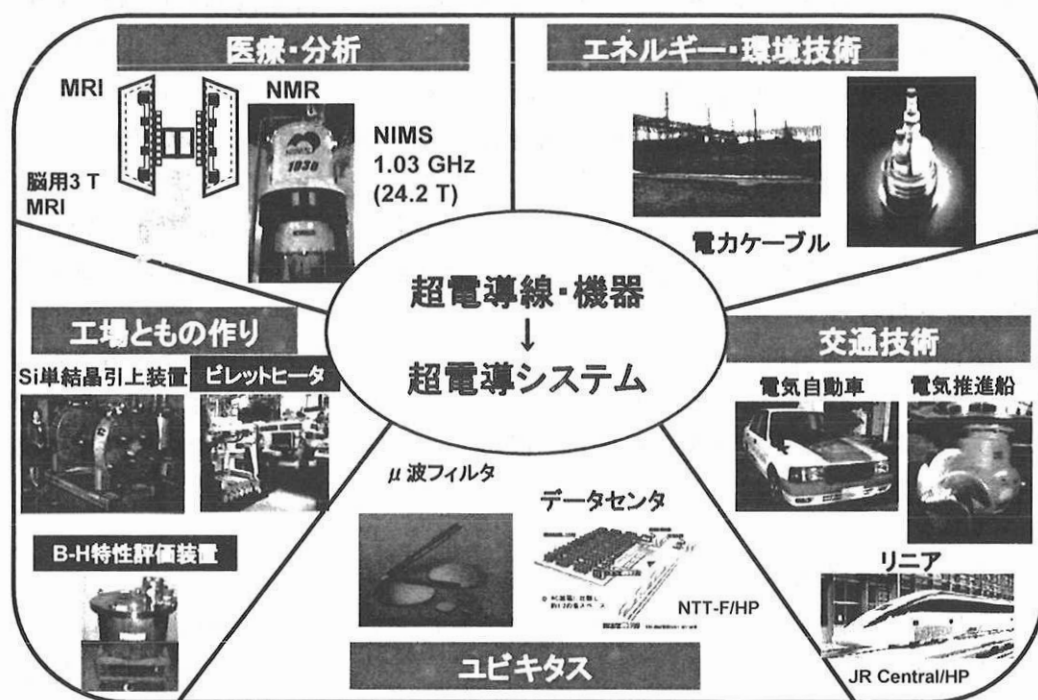


図3 超電導の応用分野

応用例の代表的なものを紹介する。図4には永久磁石のB-Hカーブを評価する目的で開発されたビスマス系超電導線をコイルに用いたマグネットを示す。冷凍機によりコイルは20Kに伝導冷却され、液体冷媒は不要となる。このマグネットは、5テスラの磁場を30秒という短時間で発生させることが出来る。

超電導磁気式ビレットヒータとして、ドイツで商品化されたものは、コイルにビスマス系超電導線を用い磁路として鉄心を介した磁場空間の中で押出に使用されるアルミニウムや銅のビレットを回転させてビレット表面の渦電流により加熱するものである。従来のビレット加熱方法に比較して大幅な省エネルギーが可能となり、また加熱が均一で短時間ですむというメリットも確認されている。このコイルも冷凍機で伝導冷却される。

最近ではMRIのマグネットとして冷凍機により20Kの温度にコイルが伝導冷却される3テスラの磁場を発生する脳用MRIマグネットシステムの開発が進められている。天然ガスの副産物として産出される液体ヘリウムは全量輸入に頼っており、MRIは大きなヘリウム使用量を示している。ヘリウムの資源問題を考えると液体ヘリウムレスのマグネットは今から開発をして備えるべきであろう。

超高磁場マグネットとして世界で開発が進められているのは、1GHzを超える周波数のNMRスペクトロメータに用いられる超電導マグネットである。この用途では、ビスマス系超電導線はNb-TiやNb₃Sn超電導線で巻線したコイルの最内層のコイルに用いられる。このコイルは、高い電磁力に耐えられるよう、高導電率高強度銅合金テープやステンレステープ補強材でサンドイッチされたビスマス系超電導線が用いられている。



図4 永久磁石のB-H特性評価マグネット

5. モータ・発電機

この用途は超電導コイルの高トルク特性を応用したもので、従来のモータや発電機に比較して省エネルギー、小型化、軽量化を目指したものである。モータとしては、船舶の電気推進、電気自動車への応用を目指したものがある。また、モータの種類としては、同期機、誘導機があり、同期機の中では axial gap 型、radial gap 型があり、ロータまたはステータに超電導コイルが用いられる。日本においては電気推進船用には 400kW～3MW のモータが、電気自動車用には 20kW～30kW のモータの開発が実施されている。

表 2 には、開発されている主な超電導モータ・発電機をまとめて示す。冷却方式は、液体窒素(77K)、液体ネオン(27K)、液体ネオン・ヘリウム混合液体(25-40K)、ガスヘリウム(主として 30K)と様々な方式がとられている。

6. 冷凍機の性能

超電導関係のプロジェクトというと、超電導基幹部品の開発にスポットライトがあたり、当然であるものの、実用化への道のりを考えると、超電導ではない技術の部分が実際の実用化には足かせになる場合がある。

表 2 主な高温超電導モータ・発電機の例

	Project	Power	Toperation	Type	Note
Motor	Sumitomo ⁴⁾	30kW	77K	Radial	2008～, EV
	Kyoto Univ. ⁵⁾	20kW	77K	Induction	2009～, EV
	TUMAT ⁶⁾	30kW	30K	Radial	2002～
	Siemens ⁷⁾	400kW	27K	Radial	1999～2001, Ship
	IHI ⁸⁾	400kW	77K	Axial	2007, Ship
	Kawasaki ⁹⁾	450kW(1MW)	30K	Radial	2010, Ship
	Kawasaki ¹⁰⁾	20MW	-	Radial	2009～2013, Ship
	Kawasaki ¹¹⁾	3MW	30K	Radial	2010～2012, Ship
	KERI/Doosan ¹²⁾	1/4MW	27K	Radial	～2011, Ship
	Wuhan Institute	1MW	30K	Radial	2008～2012
	Siemens ¹³⁾	4MW	27K	Radial	2006～2010, Ship
	AMSC ¹⁴⁾	5MW	30K	Radial	2002～2005, Ship
	AMSC ¹⁵⁾	36.5MW	30K	Radial	2006～2009, Ship
Generator	Southampton	100kW	77K	Radial	-
	GE	1.3MW	30K	Induction	2007, Airplane
	Siemens ¹³⁾	4MW	27K	Radial	2002～2006, Ship
	AMSC	10MW	-	-	2007～, Wind

大きな効果のある超電導技術を使いこなすには周辺技術や応用ソフト技術を含めた一くくりの技術体系を開発する覚悟が必要となる。一例として、液体窒素温度における冷凍機の効率を考えてみる。図 5¹⁶⁾ に示すようにカルノー効率*に対して現状では高々 30 % 程度の効率であり、これは液体窒素温度での成績係数**である COP (Coefficient of Performance) で言うと 0.1 程度であり、液体窒素温度での損失に対し室温動力は 10 倍必要となり、経済的な合理性を獲得する上で一つの大きな課題である。そのほか実際に実用化をしてゆく上で重要なことは、メンテナンス期間の間隔長期間化や冷凍機コストの低減であり、継続して開発が必要である。

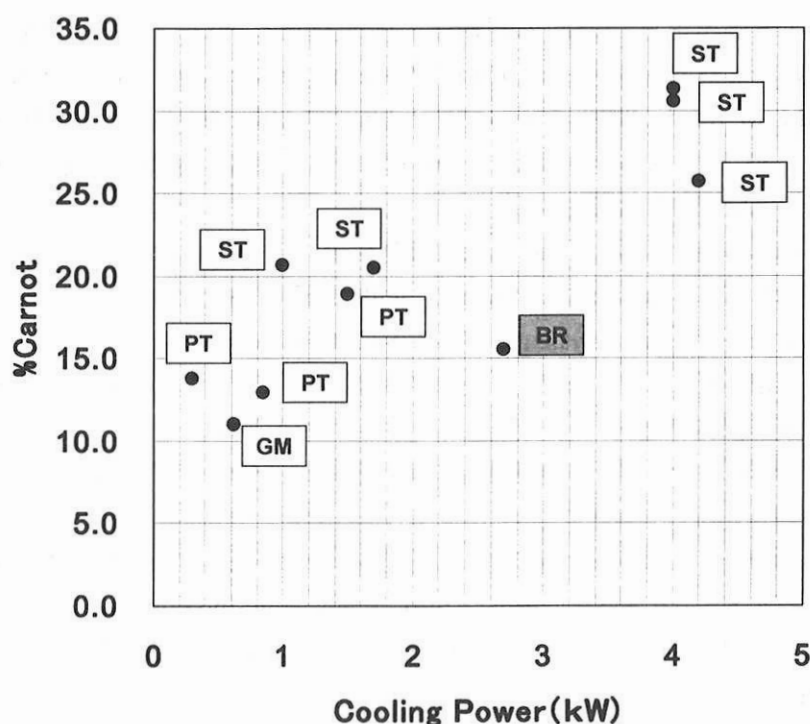


図 5 高温超電導機器用冷凍機の効率の現状 (ST : スターリング、PT : パルスチューブ、BR : ブレイトン、GM : ギフォードマクマフオン)

*カルノー効率：理論的な熱効率を意味し、高温 (Thigh) と低温 (Tcool) の間での熱効率は、 $T_{cool} / (Thigh - T_{cool})$ で示され、室温と 77K では 0.345 である。%Carnot は、実際の効率とカルノー効率の比で表す。

**成績係数：COP (Coefficient of Performance) と言われ、 P_{output} / P_{input} で表し、投入エネルギーのうち使用されるエネルギーの比である。エネルギーの消費効率の目安として使われる。

参考文献

- 1) Ken-ichi Sato, Shin-ichi Kobayashi, and Takayoshi Nakashima: "Present Status and Future Perspective of Bismuth-Based High-Temperature Superconducting Wires Realizing Application Systems", *J. J. A. P.* **51** (2012) 010006.
- 2) 小林慎一、中島隆芳、山崎浩平、佐藤謙一:「実用化に動き出したビスマス系超電導線」、電気学会論文誌 A、**132**(2012)387.
- 3) 小林慎一、中島隆芳、山崎浩平、佐藤謙一:「高温超電導材料Ⅲ —ビスマス系酸化物高温超電導線—」、低温工学、**47**(2012)422.
- 4) 馬場猛、尾山仁、有吉剛、澤井孝典:「超電導モータの設計」、SEI テクニカルレビュー、第 176 号(2010)45.
- 5) 中村武恒:「高温超電導誘導同期回転機の開発状況」、低温工学、**47**(2012)384.
- 6) M Miki, S Tokura, H Hayakawa, H Inami, M Kitano, H Matsuzaki, Y Kimura, I Ohtani, E Morita, H Ogata, M Izumi, H Sugimoto and T Ida: "Development of a synchronous motor with Gd-Ba-Cu-O bulk superconductors as pole-field magnets for propulsion system", *Supercond. Sci. Technol.* **19** (2006) S494
- 7) W. Nick, G. Nerowski, H.-W. Neumueller, M. Frank, P. van Hasselt, J. Frauenhofer, and F. Steinmeyer: "380 kW synchronous machine with HTS rotor windings—development at Siemens and first test results", *Physica C* **372–376** (2002) 1506.
- 8) 深谷敦子、津田哲平、大田友哉:「超電導電機子型モータの進展—液体窒素冷却アキシアルギャップ同期モーター—」、低温工学、**47**(2012)370.
- 9) 梅本勝弥、柳本俊之:「船舶推進用高温超電導モータの研究開発の状況」、低温工学、**47**(2012)377.
- 10) S-イノベ (戦略的イノベーション創出推進プログラム):「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」、<http://www.jst.go.jp/s-innova/>
- 11) 平成 22 年度省エネルギー革新技术開発事業採択テーマ一覧、<http://www.nedo.go.jp/content/100075196.pdf>
- 12) Y.K. Kwon, H.M. Kim, S.K. Baik, E.Y. Lee, J.D. Lee, Y.C. Kim, S.H. Lee, J.P. Hong, Y.S. Jo, and K.S. Ryu: "Performance test of a 1 MW class HTS synchronous motor for industrial application", *Physica C* **468** (2008) 2081.
- 13) W. Nick, J. Grundmann, and J. Frauenhofer: "Test results from Siemens low-speed, high-torque HTS machine and description of further steps towards commercialisation of HTS machines", *Physica C* (2012) in press, Available online 8 May 2012
- 14) G. Snitchler, B. Gamble, and S. Kalsi: "The performance of a 5 MW high temperature superconductor ship propulsion motor", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** (2005) 2206.
- 15) B. Gamble, G. Snitchler, and T. MacDonald: "Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** (2011) 1083.
- 16) 佐藤謙一:「高温超電導技術、過去・現在・未来」、SEI テクニカルレビュー、第 177 号(2010)1.