



高温超電導の開発の現状と今後の展望

佐藤 謙一

Present Status of High Temperature Superconductors (HTS) and Perspective — by Ken-ichi Sato — In 1986, high temperature superconductors (HTS) were discovered, and in 1987 a yttrium-based HTS material (YBaCuO) was discovered followed by a bismuth-based (BiSrCaCuO) HTS material in 1988. Among them, the BiSrCaCuO HTS material was discovered in Japan, and we can improve a critical current property by adopting plastic deformation process with a feature of mass production. Although this material has shortcomings of brittleness due to a nature of oxide, a multi-filamentary structure could overcome this shortcomings. Furthermore, usually it is hard to obtain 100% density of oxide by conventional sintering technique resulting in 85% density of oxide. By developing a controlled over pressure technique, so called “CT-OP™”, it became feasible to obtain 100% density of oxide leading to higher critical current due to improvement of crystal connectivity and better mechanical properties due to eliminating porosities in the oxide. This newly developed technique could make it possible to supply excellent BiSrCaCuO wires (DI-BSCCO®) commercially with high performance and long length features. This paper will describe our history of wire development and together with application prototypes and future directions.

1. 緒言

1911年は、現在の住友電気工業(株)が住友電線製造所として会社が創立(創業は1897年の住友伸銅場)された年であり、偶然にも同じ年にオランダのカマリン・オネスにより、水銀の電気抵抗が液体ヘリウム温度(4.2 K)の極低温になると測定できなくなるほど小さくなることで超電導現象が発見された。その後の研究で様々な金属、合金、化合物が超電導を示すことが明らかにされた。高温超電導は1986年にIBM チューリッヒのベドノルツとミュラー⁽¹⁾により発見され、田中等⁽²⁾によりLaBaCuO系の材料で超電導現象の特徴である「電気抵抗がゼロで反磁性である」ということが実証され、従来のBCS理論では予測できなかった高い温度の超電導現象が確認された。高温超電導は、20世紀の三大発明・発見、即ち「原子力」、「光を含むエレクトロニクス」、「超電導」の一翼を担う非常に根本的且つ革新的な技術である。

1986年のLaBaCuO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⁽³⁾、続いて110K級のBiSrCaCuO系^{(4),(5)}、125K級のTiBaCaCuO系⁽⁶⁾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。

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、応用製品開発に必要な線材開発の競争が日米欧各国で繰り広げられてきた。

1988年のビスマス系高温超電導材料発見と同時に、世界中で線材化や薄膜化の研究開発が取り組まれてきたが、開発当初は臨界電流密度も低く、また酸化物である高温超電導材料は、基本的に脆性であるため、この材料を長尺でしかも応用に十分な臨界電流密度を持った線材にできるかどうか不明であった。特に、微細組織と超電導特性の関連が不明確で、開発指針が明らかでないこと、また、如何にして脆性な材料を可とう性を持つ線材にするかについては量産性に富む線材構造の指針がなかった。

ビスマス系高温超電導線の臨界電流密度を向上させるため、基礎的な電磁気特性、および微細組織と超電導特性の関係を明らかにして線材の開発指針を得る研究結果、実用時に重要な耐歪み特性や引張特性の向上と幅広い温度と磁場のもとでの臨界電流特性の研究結果、代表的な応用製品である、冷凍機冷却型マグネットおよび電力ケーブルの研

表1 高温超電導線と応用製品の開発の経緯

	1988-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	2005-2006	2007
Material	・ Discovery of BSCCO					
Wire	・ High-Jc & Long Length Wire Process ・ Multi Filamentary Wire		・ Ag-Alloy Sheath ・ 1,000m Process	・ Controlled Over Pressure (CT-OP™)	・ 200A Critical Current ・ Tough Type	・ 218A Critical Current ・ Slim Type ・ AC Type
Current Leads & Busbar		・ 500A Leads ・ 2,000A Leads ・ 1,000A/5m Busbar ・ 10,000A Busbar	・ 600A Leads for MAGLEV ・ 2,000A Leads for SMES and SR ・ 10,000A Leads for Fusion ・ 20,000A Busbar			
Cable		・ 2,000A Cable Conductor ・ 3-in-One 66kV/7m Cable	・ 50m/2,000A Cable Conductor ・ 3-in-One 66kV/30m Cable	・ 66kV/100m/114MVA Cable	・ 22.9kV/100m/1250A Cable for KEPRI ・ 34.5kV/350m/800A Albany Cable on Grid	・ 66kV/200MVA Project Started
Magnet		・ 2T/40mm	・ 4T/50mm/RT bore ・ 7T/50mm/RT bore	・ Magnet for Si Crystal		・ 8.1T/200mm/RT bore
Transformer			・ 800kVA	・ 1MVA	・ 3.5MVA	
Motor					・ 12.5kW Ship Motor	・ 365kW Ship Motor

究など、この新しい材料を世の中に役立つ製品レベルまで高める研究結果について述べる。

ビスマス系超電導線と応用製品の開発の経緯を表1に示す。超電導線と応用製品の開発を並行して進め、高温超電導線を用いた製品のメリット、デメリットを把握し、実使用を目指した開発を行ってきた。

2. ビスマス系超電導線の開発

2-1 銀被覆圧延法 エネルギー応用分野、電力ケーブルやモータ、マグネットへの応用を考えると、この新しい材料を線材化する必要があり、種々のプロセスでの線材化が進められた。この中では、固相法、液相法、気相法の三つがあり、表2に分類して示す。固相法である銀被覆圧延法によるビスマス系超電導線の臨界電流密度の向上について、特に微細組織との関連について研究し、非超電導相の存在および粒界微細組織と臨界電流密度の相関、および電磁気的異方性の研究を通じて、臨界電流密度の向上についての指針を得ることを目的に研究を系統的に実施した。

本稿で報告する固相法である銀被覆圧延法は、①伸線、圧延など通常の金属線の加工技術を使用するため、長尺化、細線化が可能で、大量生産向きである、②被覆材の金属を安定化材（超電導が部分的に破れた場合の電流のバイパス）として利用できる、という長所がある。反面、固相法による高温超電導線材の液体窒素温度における臨界電流密度

表2 高温超電導線の製作プロセス

大分類	中分類	小分類	
固相法	金属複合加工法	押出	
		伸線	銀被覆圧延法
		圧延	
	有機物混合法	ドクターブレイド	
		押出	
		紡糸	
	拡散法		
液相法	溶融法	凝固	
		方向性凝固	
		急冷	
		溶射	
	溶液法	ゾルゲル	
		MOD (Metal Organic Deposition)	
気相法	PVD (Physical Vapor Deposition)	スパッタ	
		蒸着	
		MBE (Molecular Beam Epitaxy)	
		レーザアブレーション (PLD)	
	CVD (Chemical Vapor Deposition)		

(Jc) は、開発当初は 1,000A/cm² のオーダーであり、薄膜に比べて3桁も低いものであった。さらに、Jcの磁場依存性にいたっては、わずか数百ガウスの磁場で自己磁場の臨

界電流密度の百分の一以下にまで減少してしまい、使用に耐える特性が得られなかった。

例えば、ビスマス系よりも1年前に発見され、線材化や薄膜化が研究されていたYBaCuO系の銀被覆圧延法による線材では、丸線に比べ圧延によるテープ状線材の液体窒素温度での臨界電流密度が230A/cm²から3,330A/cm²へと向上することが判明していた⁽⁷⁾。この理由として、YBaCuOの密度向上(5.3-5.4g/cm³→5.7-5.9g/cm³)と超電導体の形状均一性が臨界電流密度向上の理由と考えられているが、超電導相均一化の定量的把握や配向性の寄与、粒界に関する指針は明確でなかった。また、SrTiO₃単結晶基板上へのスパッタリングによる配向した単結晶状のYBaCuO薄膜の評価結果から、a-b面方向の液体窒素温度での臨界電流密度は、1.8×10⁶A/cm²であり、c軸方向の臨界電流密度は、10⁴A/cm²と、a-b面方向の液体窒素温度での臨界電流密度が二桁高い臨界電流密度である⁽⁸⁾ことがわかっていたが、線材のように多結晶状の材料の臨界電流密度に関する指針は明確でなかった。

材料とプロセスの両面から研究を実施し、特に微細組織と臨界電流特性の関連を明らかにして、臨界電流特性の向上に資することが重要であった。銀被覆圧延法の基本作成プロセスは、Bi、Pb、Sr、Ca、Cuの酸化物、炭酸化物原料粉末を、秤量、混合し、焼結後粉砕し、得られた粉末を銀パイプに充填し、線引きし、テープ状に加工する。その後、焼結して、超電導線材とする。銀は、高温でも酸化せず、また超電導材料とも反応しないため、そのまま安定化材として利用することができる。ビスマス系高温超電導線の製作プロセスとして特徴的なことは、塑性加工(圧延)と焼結を繰り返す⁽⁹⁾ことにより、高い配向性を持たせ、液体窒素温度での臨界電流密度が5,000A/cm²から54,000A/cm²と従来の線材の臨界電流密度に比べ、5倍から50倍の高臨界電流特性を得ることが可能^{(10)~(12)}になり、これにより高臨界電流密度の超電導線が得られる目処がたったことである。

2-2 加圧焼成法の開発 ビスマス系高温超電導線の製造プロセスを図1に示す。高温超電導材料の持っている欠点である、超電導電流が二次元面にしか流れない欠点を克服するためには、結晶の配向化が必須である。この克服のため、テープ状に圧延加工後、熱処理と圧延加工を繰り返す、2段階焼結法を開発した。さらに、この2回目の熱処理時に圧力・温度・雰囲気との三つの制御を同時に行う、新プロセスで

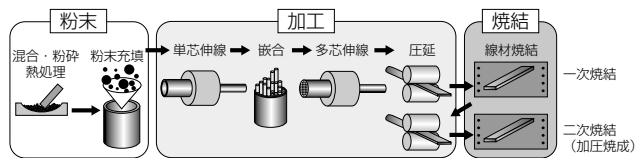


図1 ビスマス系高温超電導線のプロセスと加圧焼成法

ある「加圧焼成法」を開発することにより^{(13)~(15)}、従来に比べ以下の点で大幅に改善できた。①結晶のつながりを改善し、臨界電流(77.3K)を150~218Aと1.5-2倍に倍増し、②空孔のために弱かった機械的特性を1.5-2倍以上と軟銅線並みの強度に改善し、③極めて悪かった歩留りを工業製品として確認できるまでに向上し、④それにより、単長が1,800m以上と大幅に改善することができた。図2には、性能向上の推移を示す。

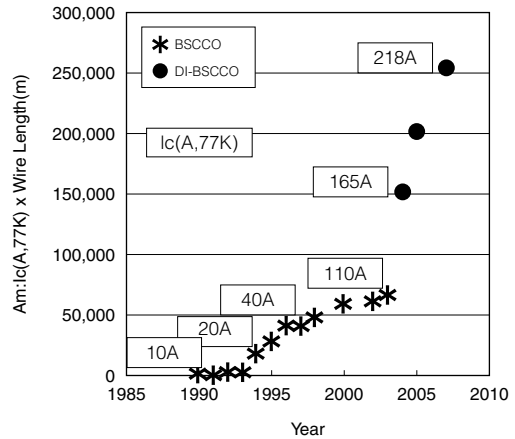
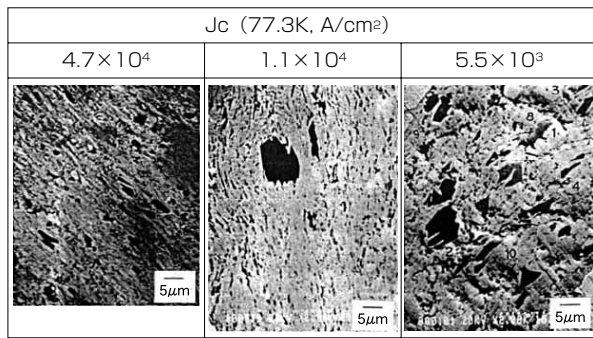


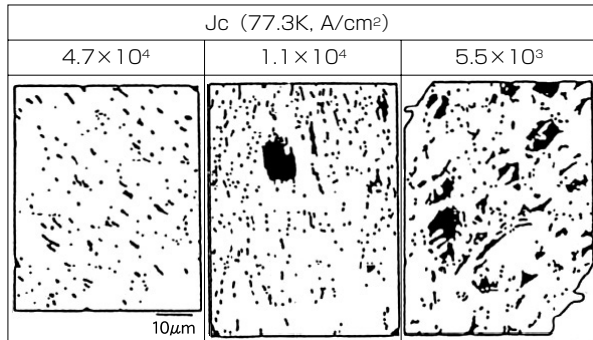
図2 ビスマス系高温超電導線の性能向上推移

新しく開発した加圧焼成法は、この種の装置では今までなかった、精度の高い酸素雰囲気下で熱処理を行う必要があるために、装置開発に時間を要したが、発想からまる5年を経て大型加圧焼成炉が完成し、2004年3月より順調に稼働している。加圧条件、温度条件とともに酸素濃度高度制御が必要であり、この手法を、CT-OPTM (ConTrolled Over Pressure) 法と名付けた。また従来の製造法に比べて、超電導部分の密度が100%にできることで性能の大幅な向上が可能なることから、加圧焼成によるビスマス系超電導線は革新的ビスマス系高温超電導線であり、DI-BSCCO[®] (Dynamically Innovative BSCCO) と呼んでいる。

2-3 微細組織の改善 開発当初は、超電導相の均一化が非常に困難であった。この理由は、この材料系が、超電導相としては三つの相(2223相、2212相、2201相)が出現し、非超電導相としては10種類以上の化合物が出現するためである。図3は、Jcの異なる三つの線材の断面SEM写真、およびその写真から非超電導相をスケッチした結果を示したものである⁽¹⁶⁾。非超電導相の断面積での割合を、表3にまとめる。Jc(77.3K)=5,500A/cm²から47,000A/cm²となるに従い、非超電導相の面積割合が30%から8%と減少しており、定量的にも非超電導相減少に伴って臨界電流密度が向上するという関連が明らかとな



(a) 走査型電子顕微鏡観察結果



(b) 非超導相の分布

図3 ビスマス系高温超導線の組織

表3 Jcと非超導相の割合

Jc (77.3K)	非超導相の断面積割合
5,500A/cm ²	30%
11,000A/cm ²	20%
47,000A/cm ²	8%

り、臨界電流密度向上の重要な指針が得られた。Bi2223相を増加させる研究は、多くの研究者^{(17)~(24)}によって実施されており、現在でも臨界電流向上の大きなテーマである。

2-4 電流輸送特性と粒界モデル 臨界電流密度 (Jc, 77.3K) が、1,000A/cm²から54,000A/cm²の幅広い特性を持つ線材の電磁気的特性を系統的に調査することにより、粒界でのウィークリンクの改善により、臨界電流密度が向上すること、また、線材長手方向に配向した板状結晶間を流れるc軸方向の電流が磁場特性には支配的に作用し、結晶間の結合や微細構造が磁場下での臨界電流特性に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。図4にはその一例を示す。

写真1には、Jcの異なる2種類の線材の透過電子顕微鏡 (TEM) 観察結果を比較して示す⁽²⁵⁾。線材 (a) は Jc (77.3K) = 5,000A/cm² の試料であり、線材 (b) は、Jc (77.3K) = 45,000A/cm² の試料であり、9倍のJcの差がある。

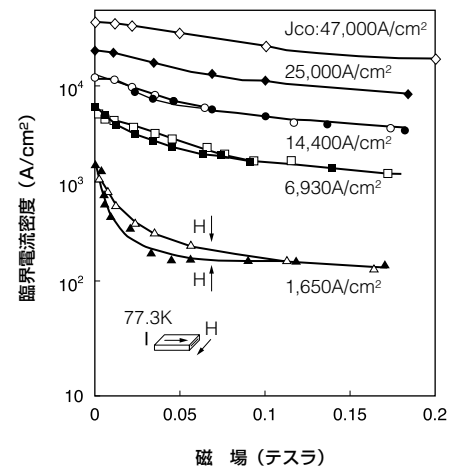
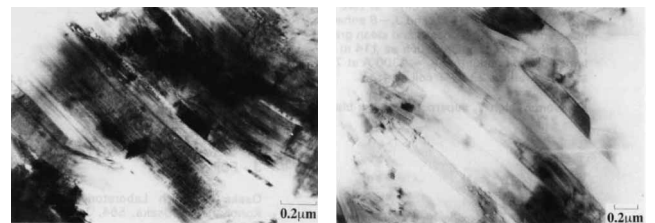


図4 ビスマス系高温超導線の磁場特性



(a) Jc=5,000A/cm²

(b) Jc=45,000A/cm²

写真1 線材断面のTEM観察結果

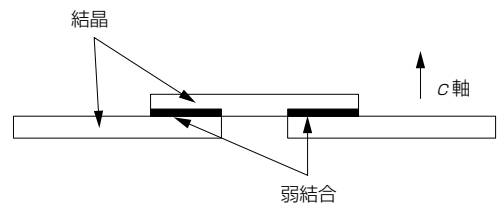


図5 結晶粒界モデル

線材 (a) には、配向した結晶粒界に非超導相が存在し、一方、線材 (b) の組織には、それが存在せず、結晶同志がc面で直接結合している。粒界の非超導相の存在がウィークリンクとして働いていることが予想され、図5に示すような粒界モデルが考えられる⁽²⁶⁾。

3. 実用的特性

3-1 可とう性 超導線を実際の応用、電力ケーブルやモータ、マグネットに用いる場合、導体化やコイルへの巻線加工が必要であり、また使用時の応力に耐える必

要性から、曲げ歪み特性や引張応力に対する特性が重要となる。

フィラメント数が36本、762本、1296本まで増加させた多芯線の曲げ歪み特性を評価した。曲げ歪みは、室温で与え、その後曲げ歪みを与えた状態で液体窒素中における臨界電流を測定し、曲げ歪みを与える前の臨界電流との変化の度合いで評価した。曲げ歪みは、(1)式で与えられる。

$$\text{曲げ歪み (\%)} = t / 2R \times 100 \dots \dots \dots (1)$$

t : ビスマス系超電導線の厚み (mm)

R : 曲げ半径 (mm)

図6に示す結果により、多芯数の増加に伴い、曲げ歪みに対する臨界電流の変化の度合いが小さくなることがわかる⁽²⁷⁾。1296芯の多芯線は、0.7%の曲げ歪みまで臨界電流の変化がないことがわかり、この手法で脆性な酸化物もフレキシブルな線材にできることが判明した。酸化物であるビスマス高温超電導材料が、銀マトリックス中にフィラメント状に分散配置されることにより、曲げ歪みを与えても酸化物にクラックが入ることが少なくなるからと考えられる。

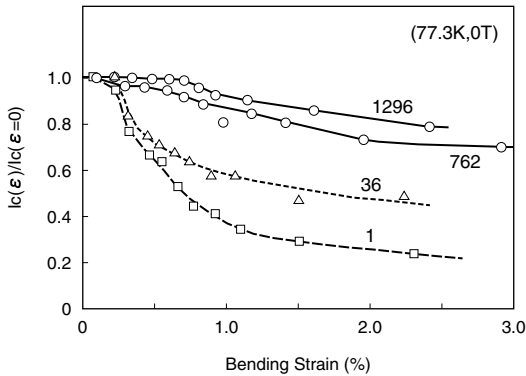


図6 多芯線の曲げ歪み特性 (図中の数字は、フィラメント数を示す) (室温で曲げ歪みを加え、曲げを与えた状態で臨界電流を評価し、順次、曲げ歪みを大きく加えて評価した)

高温 (830-850 °C) での焼結から、室温に冷却され、試験温度の液体窒素温度 (77.3K) にまで冷却される際、超電導体 (線膨張係数: $13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) と銀 (線膨張係数: $22 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) の差により、超電導体に圧縮応力がかかり、曲げ歪みを与えた時および液体窒素温度に冷却した時、超電導体に残留している圧縮応力⁽²⁸⁾と曲げによる引張応力がバランスするまでは曲げ歪みに耐え、引張応力が残留圧縮応力を超えて増大する曲げ歪みで超電導体のフィラメントにクラックが入り、順次 I_c が低下する。単芯線から多芯線

へとフィラメント数の多い順に曲げ歪み特性が改善されるのは、フィラメント数の多さに従って、曲げ歪みを与えた時に破断する超電導体の面積が小さくなるからと考えられる。曲げによる引張応力は曲げの中心軸より線材外側へ向かって増加するので、この引張応力により破断する超電導体の面積は、フィラメント数が多くなるほど少なくなるからである。従って、フィラメント数の多さに従って曲げ歪み特性が改善される。

ビスマス系超電導線の実際的应用を考えると、まずは製造時に、製造ラインで各種の曲げを与えるパスラインを通過し、また最終的には、リールに線材が巻き取られる。応用製品になると、例えば、電力ケーブルでは、導体化の際にフォーマー上にビスマス系超電導線が集合され、導体となる。導体に電気絶縁材料を巻きつけて、断熱管に収納されて、ケーブルになり、ドラムに巻かれて布設場所に運搬される。ドラムからケーブルを繰り出して、管路に布設される。このように、曲げ歪みは繰り返し与えられるので、単に一回の曲げ歪みに対する効果では実際的应用には十分ではない。

図7には、61多芯線の繰り返し曲げ歪み特性を示す^{(27),(29)}。曲げ歪みサイクルとして、曲げ-直線-逆方向曲げ-直線、を一回のサイクルとして、150サイクル (合計の曲げは、600回) まで評価した結果である。0.18%の曲げ歪みを150サイクル与えても、臨界電流は初期の90%を保持しており、シングルスタック法で作成した、61多芯線が優れた曲げ歪み特性を持つことがわかる。

曲げ歪み特性を向上させるためには、フィラメント数が多いほど向上するが、フィラメント数が多くなるほど、作成プロセスが複雑となるほか、臨界電流密度は、フィラメント数が多くなると低下する傾向があるので、曲げ歪み特

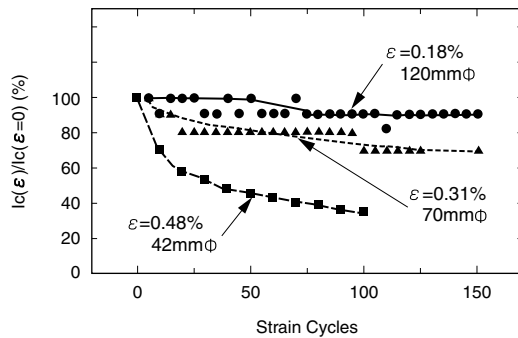
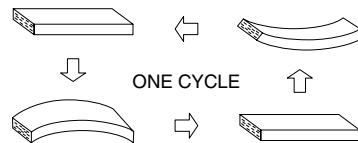


図7 61多芯線の繰り返し曲げサイクル特性 (1サイクル: 曲げ-直線-逆方向曲げ-直線)

性が確保できる、フィラメント数の最適化を行った⁽³⁰⁾。

3-2 幅広い温度と磁場のもとでの臨界電流密度特性の検討 ビスマス系高温超電導線は、液体窒素温度(77.3K)から、20K近傍の中間温度、また液体ヘリウム温度(4.2K)までの幅広い温度や磁場のもとでの応用が考えられる⁽³¹⁾、⁽³²⁾ため、各種の条件での評価を実施して、その臨界電流密度特性を評価した。液体ヘリウム、および液体水素を冷媒として用いることにより、20T(T、テスラ=10,000ガウス)以上の高磁場においても金属系超電導線に比べ高い臨界電流密度を保持していることが明らかになった^{(33)~(35)}。上記の幅広い温度領域、磁場領域での検討を通じて得られた、ビスマス系高温超電導線の超電導臨界面を**図8**に示す。

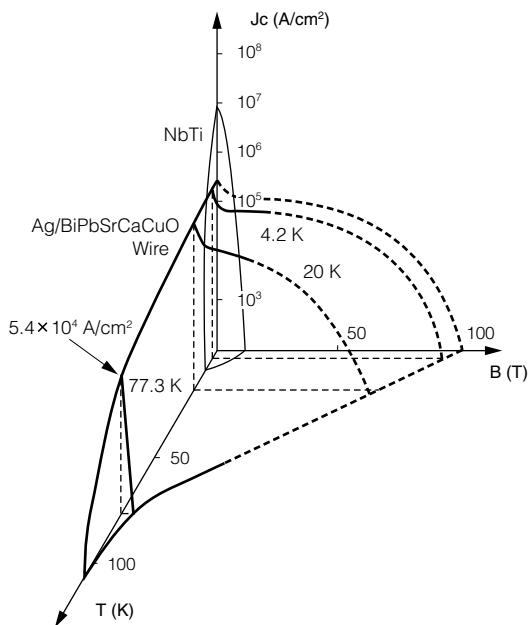
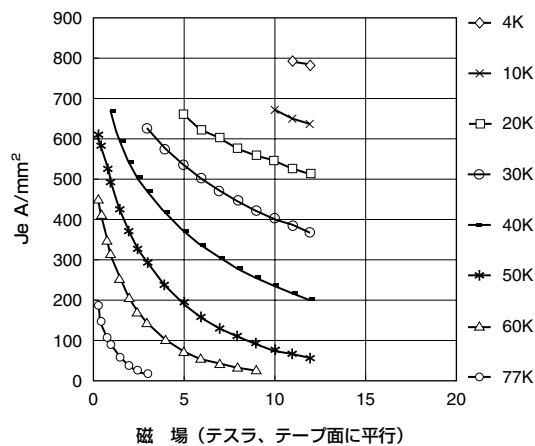


図8 ビスマス系超電導線の超電導臨界面

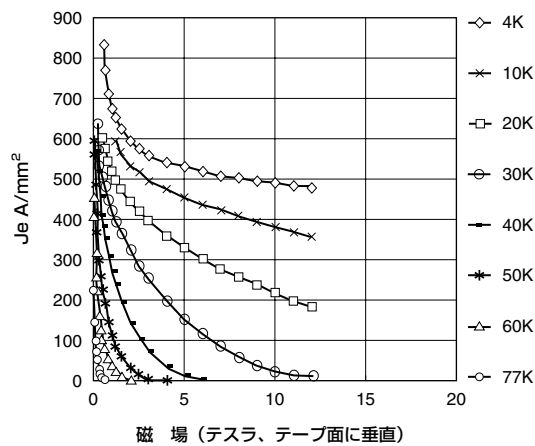
物質・材料研究機構の北口らにより測定された、現在の200A級ビスマス系高温超電導線の臨界電流の温度—磁場特性を**図9**に示す。幅広い温度範囲、磁場範囲にわたって応用が可能な特性を有しており、様々応用製品に適用可能である。

4. ビスマス系超電導線の応用

前章で明らかになったように、ビスマス系高温超電導材料を銀マトリックスに多数のフィラメント状に分散配置させることにより、曲げ歪みに強く、繰り返し曲げに耐えられる線



(a) 磁場方向：テープ面に平行



(b) 磁場方向：テープ面に垂直

図9 ビスマス系超電導線の臨界電流密度の温度—磁場特性 (物質・材料研究機構の北口らによる) (Je：臨界電流を線材全体の断面積で除した値—Engineering Current Densityとも呼ぶ)

材が可能となったこと、また、20K近傍の温度以下では、従来の金属系超電導線に比べて非常に高い臨界電流密度が得られることがわかった。このビスマス系高温超電導線を用いることにより、液体窒素を冷媒とする大電流導体応用の電力ケーブル、磁場応用の変圧器、モータ、20Kの冷凍機を冷却に用いる高磁場応用であるリニア、MRI、各種マグネットなどが応用可能で、また液体ヘリウムを冷媒として用いる超高磁場(23.5T以上)が必要な1GHz以上のNMR応用が技術的に可能になると期待されている^{(36)~(38)}。ビスマス系高温超電導線の応用分野とメリットをまとめて**表4**に示す。

変圧器、モータ、マグネット応用は、焼結後にコイル加工ができることから、コイル加工後の高温(~850℃)での熱処理が不要で、室温でコイル加工が可能となる。従って、電気絶縁材料に薄肉の有機系材料を用いることができ、コンパクトなコイル製造が可能であり、またマグネットの

表4 ビスマス系高温超電導線の応用分野とメリット

応用例	内 容	低ロス	小型	軽量	大トルク	高磁場	高精度	静粛性	保守性	安定性	総合経済性	備 考
MRI (医療用)	高磁場発生源	○				○			○	◎	○	高温超電導線で僻地でも利用可能に
NMR (分析用)	超高磁場発生源	○				◎					○	高機能機種 (>1GHz)。タンパク質の分析
ケーブル (交流、直流)	小さな直径で大電力、低ロス	◎	○							○	◎	電力会社、米国政府プロジェクト、自然エネルギーとの組合せ、鉄道
変圧器	新幹線用		○	◎								軽量化が至上課題
	電力用	◎	○								○	地下変電所向けなど
限流器	事故電流抑制	○								○	○	既設電力網に導入可能
SMES	磁場エネルギー貯蔵	○				◎						系統安定性
MAGLEV	磁場で浮上。金属超電導線代替		○	◎					◎	◎	◎	信頼性向上、総合経済性
船舶用モータ	小型化で推進抵抗の削減	◎	◎	◎	◎			◎	○	◎	◎	共同産学8者、365kW 機開発
航空機推進	軽量化、燃料電池電力の利用	○	○	◎				○			◎	米空軍
溶湯制御	高磁場で対流抑制	○				◎				○		次世代大型単結晶炉、鉄鋼の溶湯制御
ロボットアーム	可動部分の軽量化、高精度化		○	○	◎		○					関節の先の方で有効
工作機器	大トルクのためギアレス・高精度化、保守性向上			○	○		◎		◎			超高精度製品を安定に製造するため
磁気分離	医薬品、廃水浄化	○				◎				○	○	製紙工場で実績積みつつある
自動車	駆動モータの大トルク、低ロス化	◎	◎	◎	◎						◎	液体水素燃料にて効果大
風力発電機	ナセル構造の簡素化		○	◎	○			○			○	軽量・静音化

構成材料に、銅やアルミニウムなどの熱伝導に優れた材料を採用できるメリットもある。また、高磁場を発生するマグネット応用では、20K近傍での冷凍機を用い熱伝導でコイルの冷却ができれば、液体冷媒を用いることなく、冷凍機の電源をスイッチオンすれば、マグネットが運転可能であり、冷凍機の動力も4.2Kに比べ1/5以下で済み、20Kでの物質の比熱が4.2Kに比べ、約100倍高いため、熱擾乱に非常に強く、従ってクエンチの起こりにくい信頼性の高いマグネットが期待できる。さらにマグネット応用では、技術的には従来の金属系超電導線と同じ冷媒である、液体ヘリウムを用いた場合、金属系超電導線では臨界磁場が低く不可能であった、超高磁場マグネット (23.5T以上) が可能となる期待がある。

電力ケーブルでは、可とう性に優れた多芯線を用いることにより、フォーマー上にスパイラル形状に線材を集合することにより、コンパクトで大電流通電が可能な導体を構成することが可能となり、ケーブルとして、大容量でコンパクト、低損失で省エネルギーに特徴のあるケーブルがターゲットと考えられる。

4-1 冷凍機冷却型マグネット 高磁場を発生できる特徴を活かして、液体ヘリウムを必要とせず、20K冷凍機にコイルを直結させて伝導冷却するという、新しい冷却方式を世界に先駆けて生み出し、20Kでの運転が可能な高温超電導マグネットを検討した⁽³⁹⁾。

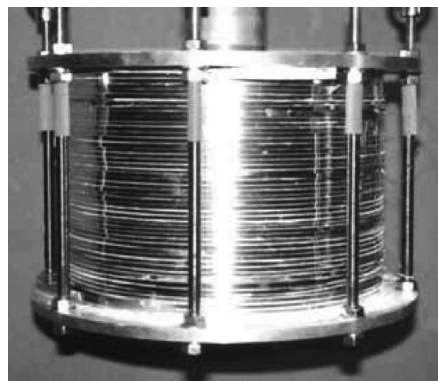


写真2 7T高温超電導マグネット用ダブルパンケーキコイル外観

コイルを伝導で冷却するための20K冷凍機として、多くの実績があるギフォード・マクマホン (GM) 型の2段冷凍機を用いて、冷凍機冷却型のマグネットを検討した。冷凍機は、第1段階が、80Kの冷却能力を持ち、輻射シールドと電流リードのサーマルアンカーを冷却し、第2段階は、20Kの冷却能力を持ち、ビスマス系高温超電導線で巻線されたコイルを冷却する。

ビスマス系高温超電導線を巻線し、写真2に示すダブルパンケーキコイルを積層することにより、20K運転で4Tおよ



(a) 外観

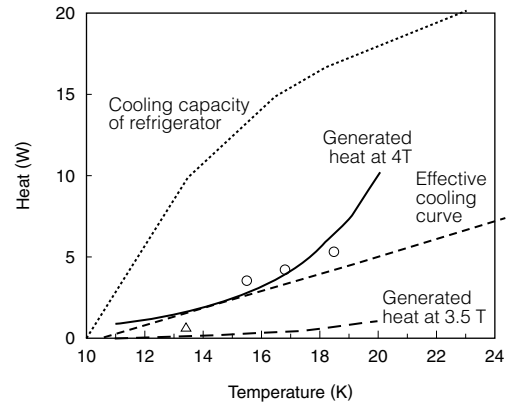
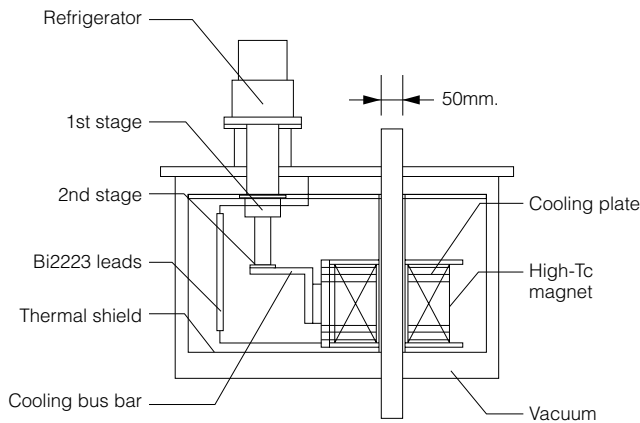


図 11 4Tマグネットの安定性
(○：4T発生時の発熱量、△：3.5T発生時の発熱量)



(b) 構造

図 10 7T高温超電導マグネット外観と構造

び7Tを発生できるマグネットを開発した⁽⁴⁰⁾。このマグネットの外観、構造を図10に示す。パンケーキ同士は、通常のはんだで接合し、コイル外側に輻射シールドを設け、輻射シールドの外側には熱輻射を抑えるスーパーインシュレーションを巻き、それを真空容器中に設置し、 10^{-5} torr以下の高真空に保持することで冷凍機冷却型の高磁場マグネットが可能であることを確認した。

ビスマス系高温超電導線と20K冷凍機の組み合わせで、運転が容易で、かつ強い磁場を発生できるマグネットの可能性が明らかとなり、ビスマス系高温超電導線を用いた冷凍機冷却型マグネットは、20Kで安定した運転が可能であることがわかった。しかしながら、発生熱と冷却能力との関係を把握することが、安定運転には必要である。ビスマス系高温超電導線の磁場と臨界電流密度の関係を踏まえて、コイルの各部分の磁場と温度から、各部分での電流—

電圧特性を考慮し、発生熱と冷却能力を比較することで安定運転が可能かどうかを判定することを検討した。

図11に4Tマグネットの発生熱と冷却能力の関係を示す⁽⁴⁰⁾。発生熱は、計算値と実測値を図中に示した。冷却能力は、冷凍機の第2段階ステージとコイルの間の熱抵抗を1.5K/Wと直線近似して検討した。4T発生時の発生熱は、冷却能力をどの温度でも上回っており、マグネットは、定常状態で、安定しないことが予測されるが、実験的にも確かめられた。3.5T発生時の冷却能力は、広い温度範囲で発生熱を上回っており、安定運転が可能である。

7Tマグネットの場合の発生熱と冷却能力の関係を同様に評価して、図12に示す⁽⁴⁰⁾。発生熱は、広い温度範囲で冷却能力を下回っており、安定運転を予測できる。これも結果で実際に確認されており、この手法により、マグネットの設計が可能であることが確かめられた。

7T高温超電導マグネット^{(40),(41)}は、科学技術振興事業団(現在、科学技術振興機構)の埼玉研究室に設置され、各

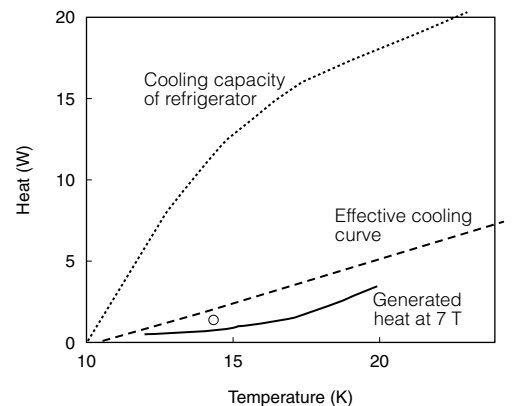


図 12 7Tマグネットの安定性 (○：7T発生時の発熱量)

種の化学反応への磁場の影響を研究する用途に、磁場を高速に変化させる方法も含めて用いられた⁽⁴²⁾。2Tおよび4T高温超電導マグネットは、カオリン粘土⁽⁴³⁾、伸線潤滑油⁽⁴⁴⁾の磁気分離など、磁気分離の研究に用いられた。

これらの検討を経て、種々の分野で実使用可能な室温ボアが200mmと大きなマグネットが試作された。このマグネットの諸元を表5に、外観を写真3に示す。室温空間に8.1Tという強磁場を発生することができ⁽⁴⁵⁾、20K冷凍機で運転するために、比熱が4.2 Kに比べて格段に大きい状態で運転でき、外部や励磁時の熱擾乱に強く、クエンチに対して大きな耐性を持つ。また、実績が大きな20K冷凍機を用い、スイッチを入れるだけで冷却が可能であり、運転が簡単な特徴がある。

表5 8.1T冷凍機冷却型マグネットの性能

Room Temperature Bore Diameter (mm)	200	
Coil	Inner Diameter (mm)	232
	Outer Diameter (mm)	414
	Height (mm)	422
	Wire Width (mm)	4.2
Conductor	Wire Thickness (mm)	0.22
	No. of Bundles (mm)	2
	No. of Double Pancake Coils	44
Total No. of Turns	15,840	
Total Weight (kg)	320	
Magnetic Field Coefficient (mT/A)	37.6	
Inductance (H)	37.7	



写真3 8.1Tマグネット外観

4-2 電力ケーブル 地中送電線として開発が進んでいる高温超電導ケーブルの現状を紹介する前に、この開発の背景としてほぼ同様の要求があり、新しい電線が開発された、架空送電線の歴史を振り返ってみる。1970年代、日本の郊外の送電線の容量増加が深刻な課題となり、

ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced) と呼ばれる従来の送電線と同一直径、重量で2倍の増容量が可能な送電線であるインバー電線またはACIR (Aluminum Conductor Invar Reinforced) と呼ばれる電線が開発された⁽⁴⁶⁾、⁽⁴⁷⁾。この電線は、中心の強度を持たせる従来の鋼撚線にかわり低線膨張率で高強度のFe-約40% Ni合金撚線を採用し、外側のアルミ合金導体としてはAl₃Zrを微細分散させた超耐熱導電用アルミ合金を用いるため、3倍高価ではあるが、既設の鉄塔を用いて電線を張り替えるだけで2倍増容量が可能で総合経済性に優れる。1980年代に日本の電力会社を皮切りに、韓国、東南アジア、中近東でも採用された。またここ数年中国で採用され、最近では、米国で注目されている。1981年からの累積布設量は、10,000kmに及ぼうとしている。この送電線は、従来の送電線と同一直径であり、そこに2倍の電流を流すため、運転温度は上昇し、“High Temperature Conductors” と呼ばれる。

地中送電線として使用される電力ケーブルの新規需要や増容量への要望は、IT機器の普及もあり建屋の面積あたりの電力消費量が増加し、また100万人都市の数の増加が予想される中、今後ともますます強まるものと予想される。電力ケーブルの布設量増加は、東京やNew Yorkのような大都市では、電力ケーブル用洞道や管路、変電所の新設に大きな投資が必要で、また物理的にも不可能な状況にある。これに対して高温超電導ケーブル、“High Temperature Superconducting Cable”、は従来の同一直径の電力ケーブルに対して、5倍から10倍の増容量が可能で、また省エネルギーが可能となる全く新しい電力ケーブルであり、従来から存在する既設のインフラストラクチャーである洞道や管路を用いてケーブルを張り替えるだけで増容量が可能となる特徴がある。

(1) ケーブル導体の可とう性

ビスマス系超電導線自体をフレキシブルにする線材構造が明らかとなり、それを用いた電力ケーブルの開発を世界に先駆けて検討した。特に、電力ケーブルとしての応用では、マグネットとしての応用と異なり、製造中や輸送、布設など曲げを何回も経験し、また使用時には定期点検などで繰り返し室温への昇温が考えられるので、導体の曲げ特性や液体窒素温度でのヒートサイクル特性を最初に検討した。また、電力ケーブルの応用としては、交流ケーブルへの応用ニーズが高いため、交流ロスの評価や、理論的検討とともに交流ロスの低減方策を検討した。

電力ケーブルとして応用を考えると長尺の導体が必要で、多芯線を用いてスパイラル導体を作成する際の、曲げ特性を調査した⁽⁴⁸⁾。どちらの場合も、0.4%の曲げ歪みまで、臨界電流が変化せず、スパイラル導体を形成できることを確認した。冷媒である液体窒素温度と室温との間でのヒートサイクル特性が導体の形でも特性に変化がないことを確認した。図13には、導体集合の模式図を示す。1.4m長の3層導体を用いて、過酷な0.75mまでの曲げ半径を与

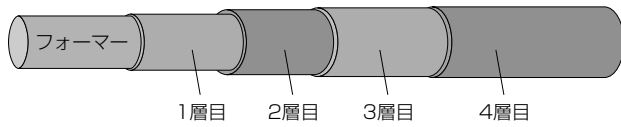


図13 多層スパイラル導体の模式図 (4層導体の例)

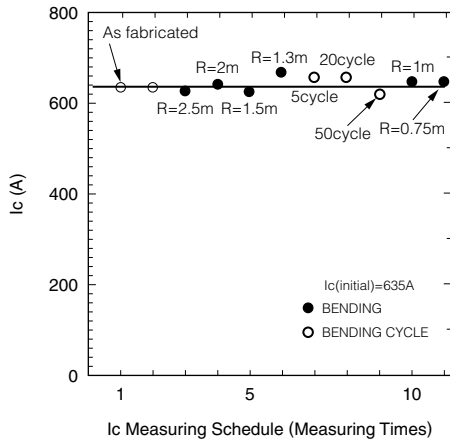


図14 スパイラル導体の繰り返し曲げ特性 (図中の数値は、導体の曲げ半径と曲げサイクル数を示す)

えて、臨界電流の評価を実施した。結果を図14に示す⁽⁴⁸⁾。臨界電流の劣化は認められず、過酷な曲げにも耐えられることがわかった。

さらに長尺の導体の性能を確認するため、5m長の多層(8層)大容量スパイラル導体を作成した。容量は3,000A(77.3K)である。直線状態および曲げ半径：1.3mで曲げた状態での、臨界電流を評価した結果⁽⁴⁸⁾、どちらの状態でもI-V特性に変化は見られず、大容量導体が可能であり、曲げた状態でも臨界電流特性に変化がないことを確認した。

(2) 交流通電特性^{(48)~(50)}

交流ケーブルとしての特性を評価するため、多層スパイラル導体を試作し、交流通電特性を評価した。フォーマー上にスパイラル状にビスマス系高温超電導線を集合し、1層、2層、4層、6層と層数を増加させて、交流ロス特性を評価した。結果を図15に示す。1層導体では、交流ロスが I^2 に比例して増加する部分があり、2層、4層、6層の多層導体では、交流ロスが I^2 に比例するという、顕著な差異が認められた。この結果から、1層の導体の交流ロスは、ヒステリシスロスが支配的であり、2層、4層、6層導体の交流ロスは、渦電流ロスか結合ロスが支配的であることがわかった。

結合ロスが支配的であれば、その結合を切る手段として、層間を絶縁紙で分断することにより、層間を渡る電流を防

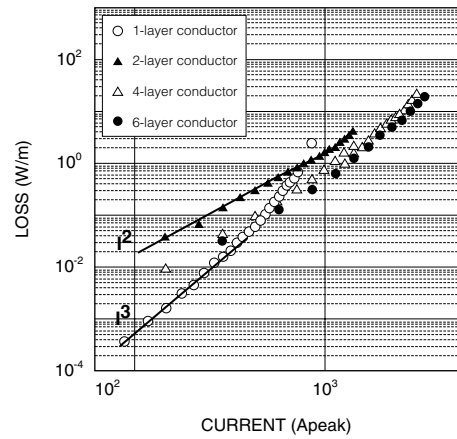


図15 多層スパイラル導体の交流ロス (○：1層導体、▲：2層導体、△：4層導体、●：6層導体)

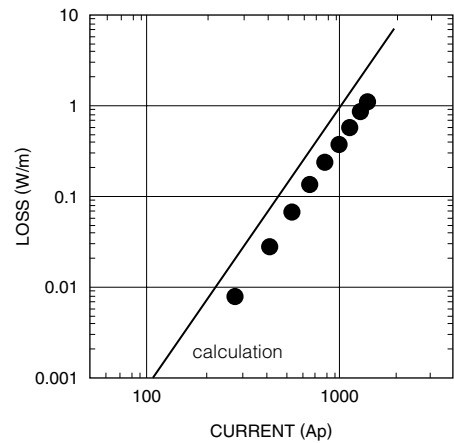


図16 層間絶縁4層導体の交流ロス (直線は計算結果を示す)

ぐことができる。そこで、層間を絶縁紙で分かつことによる、多層(4層)導体を試作し、評価した。交流ロスの評価結果を図16に示す。層間絶縁4層導体の交流ロスは、 I^2 に比例し、その大きさは、図15に示した層間絶縁をしない4層導体が、1000Apeak (Apeak：交流電流のピーク電流値)の通電電流で、約0.8W/mであるのに対し、層間絶縁4層導体の交流ロスは約0.4W/mと半減できることがわかった。

これらの結果を理論的に検討した。ノリスの臨界電流モデルによれば、楕円近似導体では、自己磁場での交流ロス(W)は、以下の式で表すことができる。

$$W = \mu_0 f I_c^2 F(z) / \pi \dots \dots \dots (2)$$

$$F(z) = z - z^2 / 2 + (1-z) \ln(1-z) \dots \dots \dots (3)$$

$$z = I_{op} / I_c \dots \dots \dots (4)$$

f：周波数、Ic：臨界電流、Iop：ピーク電流

交流電流により、臨界状態が外層から内層へと変化してゆくなら、多層導体の交流ロスは、上式に従い単純に表記できるものと考えられる。層間絶縁4層導体は、円筒形の導体であるから、上記の円形導体の変形で記述できる。

$$W = \mu_0 f I_m^2 F(z') / \pi \dots\dots\dots(5)$$

$$F(z') = z' - z'^2 / 2 + (1 - z') \ln(1 - z') \dots\dots\dots(6)$$

$$z' = I_{op} / I_c \dots\dots\dots(7)$$

$$I_m = R_o^2 I_c / (R_o^2 - R_i^2) \dots\dots\dots(8)$$

R_o : 円筒形導体の外径、 R_i : 円筒形導体の内径

超電導で全ての円形断面が満たされた導体の臨界電流： I_m より、実際の円筒形導体の通電電流： I_{op} が十分小さい時には、式(5)は式(9)となり、交流ロスは、 I^3 に比例することがわかる。

$$W \doteq \mu_0 f I_{op}^3 / 6 \pi I_m \dots\dots\dots(9)$$

実際にも、図16に示すように、 I^3 に比例する交流ロスとなった。

(3) ケーブルプロトタイプ^{(51)、(52)}

これまで、長尺の大容量多層スパイラル導体が製作可能で、交流ロスについては層間絶縁により低減できることがわかったので、ケーブルプロトタイプの検討を実施した。実際のケーブル導体は、機械的な集合を必要とし、単純な曲げ歪みだけでなく、スパイラル状の集合時の歪みを考慮する必要がある。

スパイラル集合時の歪みも考慮した、線材にかかる全歪みは、式(10)で与えられる。この式による歪み量で、0.3%以下に制御する必要性を明らかにした。また、集合時の線材張力は、単純な引張応力では、30MPa以下なら臨界電流の劣化は認められないが、曲げ歪み量で0.2%の歪みが重畳される場合は、15MPa以下に制御する必要性を明らかにした。

$$\epsilon = t / (D' + t) \dots\dots\dots(10)$$

$$D' = \sqrt{P^2 + (\pi D)^2} / \pi \dots\dots\dots(11)$$

ϵ : 線材の歪み、 t : 線材の厚み、 D : フォーマー径、
 P : スパイラル集合時のピッチ
 D' : スパイラル集合時の等価曲げ径

以上の検討を実施し、50m長の多層スパイラル導体を試作した。臨界電流は、 $10^{-12} \Omega \text{ m}$ 定義で、2,900A、 $10^{-13} \Omega \text{ m}$ 定義で、2,200Aであり、線材の特性から推定される値とよく一致し、スパイラルピッチ、導体集合パスラインの張力制御により引張応力を管理し、設計に従った導体製作が、機械的な集合でも可能なことを実証した。

実際の長尺導体の製作が可能となり、ケーブルとしての7m長さのプロトタイプの検討を実施した。写真4に7m長さのケーブルプロトタイプの概観を示す。3相が一本の断熱管に収納された3心一括型のケーブルである。ケーブル仕様は、66kV、114MVA、1kArmsである。このケーブルプロトタイプは、5回の77Kと室温の熱サイクルを経験し、110時間の通電を実施して、電気特性に変化ないことを確認した。また、1kArms通電時の交流ロスは、電氣的測定では、3.3W/m/3相であり、熱量法では、3.5W/m/3相であった。これらの値は、導体で確認された値と同一であった。

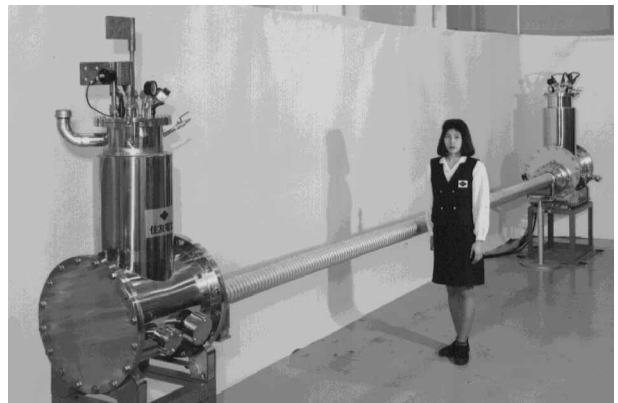
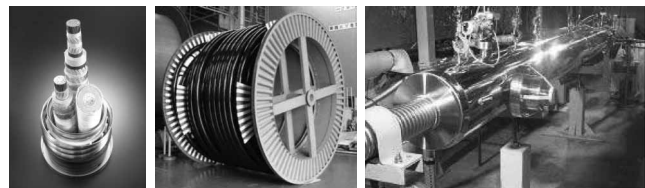


写真4 7m長さのケーブルプロトタイプ

(4) 超電導ケーブルの長期試験

上記の検討を経て、超電導ケーブルを実際に布設可能なレベルへと発展させるプロジェクトが世界中で開始された。主要なものを表6に示す。2002年には、東京電力、電力中央研究所、当社により、世界で初めての3心一括型⁽⁵³⁾、⁽⁵⁴⁾の超電導ケーブル(66kV、1kA、100m)の1年間にわたる実用性検証試験が行われ、長期の安定性が実証された。

またこの成果により、世界で初めての長尺実線路へ布設され、In-Grid運転された超電導ケーブルを写真5に示す。



(a) ケーブル (b) ドラムに巻かれたケーブル (c) 中間接続部

写真5 350m超電導ケーブルと中間接続部

表6 世界の高電圧超電導ケーブルプロジェクト

プロジェクト	メンバー	電力会社	ファンド	予算	ケーブル			端末	超電導線		期間	備考
TEPCO	SEI	TEPCO	Private	18M\$	AC66kV-1000A-100m	CD	3-in-One	Fixed	Bi2223	SEI	2001-2002	
Copenhagen	NKT		Danish DOE		AC30kV-2000A-30m	WD	Single × 3		Bi2223	NST	2001-2003	
Southwire	Southwire		DOE		AC12.5kV-1250A-30m	CD	Single × 3		Bi2223	IGC	2000-	
Detroit	Pirelli	Detroit Edison	DOE		AC24kV-2400A-120m	WD	Single × 3		Bi2223	AMSC	2001.10-	Failed
Super-ACE	Super-GM (Furukawa, CEPRI)		METI/NEDO		AC77kV-1000A-500m	CD	Single × 1		Bi2223	—	2004-2005	No Heat Cycle
Yunnan	Innopower, InnoST, Shanghai Cable	Yunnan Electric Power	China S&T, Beijing City, Yunnan Prov.	4.3M\$	AC35kV-2000A-33.5m	WD	Single × 3		Bi2223	Inno ST	2004.4-	
DAPAS	LS Cable, KERI, KIMM	KEPCO	Korean MOST		AC22.9kV-1250A-30m	CD	3-in-One		Bi2223	AMSC	2004.5-12	
Lanzhou	IEE/CAS, Changtong Power Cable Company		China S&T	1.2M\$	AC10.5kV-1500A-75m	WD	Single × 3		Bi2223	AMSC	2005-	
KEPRI	KEPRI, SEI, KERI, KBSI, etc.	KEPCO	KEPCO, Korean Gov.	2.3M\$	AC22.9kV-1250A-100m	CD	3-in-One	Fixed	Bi2223	SEI	2006-	Alive
DAPAS	LS Cable		Korean MOST		AC22.9kV-1250A-100m	CD	3-in-One		Bi2223	AMSC	2007-	
Albany	SuperPower, SEI, BOC	National Grid	DOE, NYSERDA	26M\$	AC34.5kV-800A-350m	CD	3-in-One	Fixed	Bi2223 (YBCO*)	SEI (SP*)	2006-	On Grid
Ohio	Ultera, ORNL	American Electric Power	DOE	9M\$	AC13.2kV-3000A-200m	CD	Triaxial		Bi2223	AMSC	2006-	On Grid
LIPA 1	AMSC, Nexans, AirLiquide	Long Island Power Authority	DOE	46.9M\$	AC138kV-2400A-600m	CD	Single × 3		Bi2223	AMSC	2007	under construction.
On Grid	SEI	TEPCO	METI/NEDO	22.5M\$	AC66kV-200MVA-300m	CD	3-in-One	Fixed	Bi2223	SEI	2007-2011	started
Hydra	AMSC, Southwire	Con-Edison	DHS	39.3M\$	AC13.8kV	CD	Triaxial		Bi2223	AMSC	2007-2011	started
Entergy	Southwire, NKT	Entergy	DOE	26.6M\$	AC13.8kV-60MVA-1,760m	CD	Triaxial		TBD	TBD	2007-2010	planning
LIPA 2A	AMSC, Nexans, AirLiquide	LIPA	DOE	18M\$	AC138kV-2.4kA	CD	Single × 3		YBCO	AMSC	2007-2013	planning
Amsterdam	KNT, Plaxair	Nuon	TBD	TBD	AC50kV-250MVA-6,000m	CD	Triaxial		TBD	TBD	2008-2011	planning

加圧焼成法で作成されたDI-BSCCO®を用いて、350mの超電導ケーブルが当社で製造され、NY州の州都であるAlbanyで地下管路に布設され、世界で初めての中間接続部を含めたケーブルシステムとして2006年7月20日に実系統に接続され、約9,000時間の第1フェイズが無事終了した^{(55)、(56)}。この間、70,000家庭へ電力を供給し、安定した運転実績をあげた。現在は、350mのケーブルの内、30m部分をYBaCuO線材を用いた第2フェイズへ向けた工事中であり、近々世界初のYBaCuOケーブルの実系統連系試験がスタートされる予定である。このケーブルの布設箇所の写真を写真6に示す。

4-3 超電導モータ 超電導モータは、小型化、軽量化、省エネルギーという特徴がある。同期モータや誘導モータなどの可能性、Radial方式、Axial方式の各種方式、

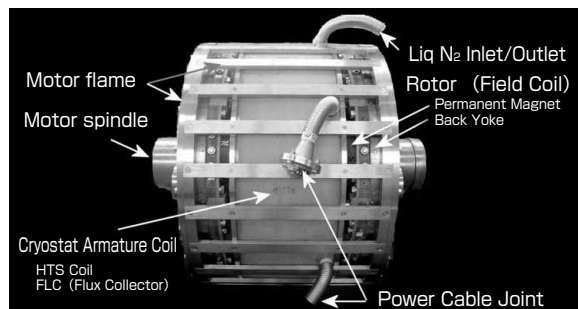


写真6 超電導ケーブル試験サイト (NY州、Albany)

界磁コイルと電機子コイルへの超電導の適用など、種々の組合せが考えられる。これらの中で、IHI、福井大学など産学8者の一員として当社が開発に参加しているグループでは、Axial方式での開発を推進している。この方式に更に加えて超電導コイルを回転させない方式でのメリットを加え、最近365kWの試作機が完成した。この外観と構造を写真7に示す。フラックスコレクタを用いて、電機子に超電導コイルを適用した世界初の例である^{(57)、(58)}。



(a) 外 観



(b) 構 造

写真7 365kW超電導モータ

5. 今後の展開

高温超電導線が液体窒素冷却や20K冷却で使用可能となり、その応用範囲は格段と広がりを見せている。今後は、技術的な可能性と経済的なviabilityを獲得するため、さらなる線材性能向上が追求され、応用の一段ステップアップしたデモと実製品化への検討が続けられてゆく必要がある。

性能向上のためには、①超電導相のよりいっそうの均一化と不純物の低減、②配向性の向上、③臨界温度自体の向上（既に、117.8Kまでのデータが確認されている^{(59)、(60)}）、④これらのための固体化学反応に立脚した超電導相の生成過程の解明が求められる。

応用については、特に省エネルギーの観点と地球規模での持続可能な社会へ向けて、①自然エネルギー（太陽電池や風力発電）と直流超電導ケーブル⁽⁶¹⁾の組合せで世界を結ぶ電力ネットワーク⁽⁶²⁾によるお天気任せの自然エネルギーを世界で利用できるPV/HTS-直流ケーブルシステムの開発や、②来るべき水素社会に向けて液体水素⁽⁶³⁾と高温超電導モータによる zero emission vehicleの開発へと大きな夢を持ってゆくことが求められる。

6. 結 言

ビスマス系高温超電導材料が1988年に我が国で発見されて以来、この材料を工業材料レベルまで高めて、実際の応用に適用できる電気特性を持つとともに、機械的特性を具備させ、量産に必要な線材構造を見出して、量産プロセスを完成させ、また、応用製品のプロトタイプを開発して、高温超電導であるが故のさまざまな特徴を世の中に指し示して、この人類に与えられた材料の実用化へ一歩でも踏み出すことができることが、長年の夢であった。

本論分で触れた、さまざまな基礎的な検討を経て、ビスマス系高温超電導線が工業生産レベルの段階に達し、性能も大きく向上した。この線材を用いて応用される高温超電導マグネット、高温超電導ケーブルが、実用化一歩手前まで来ていることを報告できることは、最大の喜びである。

ビスマス系高温超電導線は、電流リードや種々の高温超電導マグネット、例えば、磁気分離、化学反応、変圧器、シリコン単結晶引き上げ装置、磁気浮上列車、船舶用モータなどのプロトタイプに適用され、実用化への秒読みが始まっている段階である。高温超電導ケーブルは、東京電力と住友電工の100m実用性検証試験が成功裏に終わり、韓国での100m試験線や米国での350m・実線路デモンストレーションに進んでいる。

1997年に採択された京都議定書が、2005年になり発効し、我が国も待ったなしのCO₂ガス排出削減に取り組まなくてはならない。小型化、軽量化、省エネルギー化、効率化に大きく貢献できる、高温超電導技術の今後のいっそうの発展を祈念して結言としたい。

参 考 文 献

- (1) J. G. Bednorz and K. A. Müller : Z.Phys., B64 (1986) 189.
- (2) S. Uchida, H. Takagi, K. Kitazawa and S. Tanaka : Jpn.J.Appl.Phys. 26 (1987) L1.
- (3) M. K. Wu et al. : Phys.Rev.Lett. 58 (1987) 908.
- (4) H. Maeda, Y.Tanaka, M.Fukutomi and T.Asano : Jpn.J.Appl.Phys. 27 (1988) L209.
- (5) M. Takano et al. : Jpn.J.Appl.Phys. 27 (1988) L1041.
- (6) Z. Z. Sheng and A. M. Hermann : Nature 332 (1988) 138.

- (7) M. Okada et al. : Jpn.J.Appl.Phys. 27 (1988) L185.
- (8) Y. Enomoto, T. Murakami, M. Suzuki and K. Moriwaki : Jpn.J.Appl.Phys. 26 (1987) L1248.
- (9) 特許 : 第2636049号、第3149429号、第3149441号
- (10) T. Hikata et al. : Jpn. J. Appl. Phys 28 (1989) L1204.
- (11) M. Ueyama, T. Hikata, T. Kato and K. Sato : Jpn. J. Appl. Phys. 30 (1991) L1384.
- (12) 佐藤謙一 : 銀被覆圧延法による高温超電導線材、高温超電導の応用、新技術事業団監修、丸善 (1990) 174.
- (13) T. Kato et al. : Physica C 412-414 (2004) 1066
- (14) S. Kobayashi et al. : Physica C 426-431 (2005) 1132
- (15) N. Ayai et al. : IEEE Trans. Applied Superconductivity 17 (2007) 3075
- (16) K. Sato et al. : IEEE Trans MAG 27 (1991) 1231.
- (17) K. Osamura, S. Nonaka and M. Matsui : Physica C 257 (1996) 79.
- (18) M. Daumling, G. Triscone and R. Flukiger : Physica C 214 (1993) 403.
- (19) A. Jeremie : Physica C 255 (1995) 53.
- (20) H. K. Liu, Y. C. Guo and S. X. Dou : Supercond. Sci. Technol. 5 (1992) 591.
- (21) Y. E. High et al. : Physica C 220 (1994) 81.
- (22) G. Grasso, A. Jeremie and R. Flukiger : Supercond. Sci. Technol. 8 (1995) 827.
- (23) J. A. Parrel, Y. Feng, S. E. Dorris and D. C. Larbarlestier : J.Mater.Res. 11 (1996) 555.
- (24) 長村光造 : 超伝導材料 (米田出版、2000) 197.
- (25) K. Sato et al : Cryogenics 33 (1993) 243.
- (26) 佐藤謙一 : Bi系粒子配向線材、高温超伝導の科学、立木昇、藤田敏三 編、裳華房 (1999) 428.
- (27) H. Mukai et al. : Adv. Superconductivity」 (ISS' 90) , Sendai (Springer, Tokyo, 1991) 607.
- (28) 長村光造、松本要 : 応用物理 73 (2004) 3.
- (29) K. Sato : Processing and Properties of High Tc Superconductors ed. By S. Jin, 1993, World Scientific Pub., Singapore. p.121.
- (30) 特許 : 第3350935号
- (31) J. Tenbrink and H. Krauth : Bismuth-based high-temperature superconductors ed. By H. Maeda and K. Togano, 1996, Marcel Dekker, Inc., New York, p.369.
- (32) Y. Iwasa and Y. M. Butt : Cryogenics 30 (1990) 37.
- (33) K. Sato, T. Hikata and Y. Iwasa : Appl. Phys. Lett. 57 (1990) 1928.
- (34) Y. Iwasa : Cryogenics 31 (1991) 174.
- (35) K. Sato et al. : Appl. Phys. Lett 61 (1992) 714.
- (36) 原築志、石井英雄 : 応用物理 65 (1996) 401.
- (37) K. Sato, K.Hayashi, K.Ohkura and K.Ohmatsu : Proc. of 15th Int. Conf. on Magnet Technology (Science Press, Beijing, 1998) 24.
- (38) K. Sato et al. : Proc. the Nineteenth International Cryogenic Engineering Conf. (ICEC19) (2003) 225.
- (39) K. Ohkura et al. : Adv. Superconductivity VI (ISS' 93) , (Springer, Tokyo, 1994) 735.
- (40) T. Kato et al. : Proc. of 15th Int. Conf. on Magnet Technology (Science Press, Beijing, 1998) 793.
- (41) K. Sato et al. : Supercond. Sci. Technol. 13 (2000) 18.
- (42) 佐藤謙一ほか : Proc. of The First Symposium on New Magnetic Science (科学技術振興事業団 埼玉研究室、1998) 175.
- (43) J. Iannicelli et al. : IEEE Trans. Appl. Superconductivity 7 (1997) 1061.
- (44) 藤野剛三、加藤武志、大松一也、佐藤謙一 : Proc. of The Second Symposium on New Magnetic Science (科学技術振興事業団 埼玉研究室、1998) 358.
- (45) 大倉健吾、岡崎徹、佐藤謙一 : SEI テクニカルレビュー、第171号 (2007) 50.
- (46) S. Sakabe, N. Mori, K. Sato, Y. Miyake and T. Tanaka : IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems PAS-100 (1981) 1505.
- (47) 阪部貞夫、桜田晴住、宗像和夫、森範宏、佐藤謙一 : 住友電気、第117号 (1980) 38
- (48) K. Sato et al. : Bismuth-based high-temperature superconductors ed. By H. Maeda and K. Togano, 1996, Marcel Dekker, Inc., New York, P.477.
- (49) J. Fujikami et al. : Adv. Superconductivity VIII (ISS' 95) , (Springer, Tokyo, 1996) 1319.
- (50) K. Sato et al. : IEEE Trans. Appl. Superconductivity 7 (1997) 345.
- (51) T. Shibata et al. : Pro. 16th CEC/ICMC, (Elsevier Science, Oxford, 1997) 967.
- (52) J. Fujikami et al. : Pro. 16th CEC/ICMC, (Elsevier Science, Oxford, 1997) 975.
- (53) S. Honjo et al. : IEEE Trans. Applied Superconductivity 13 (2003) 1952.
- (54) 増田孝人、加藤武志、廣瀬正幸、佐藤謙一 : 電気学会論文誌、B126 (2006) 827.
- (55) H. Yumura et al. : SEI TECHNICAL REVIEW, No.64 (2007) 27.
- (56) T. Masuda et al. : IEEE Trans. Applied Superconductivity 17 (2007) 1648.
- (57) 藤野剛三ら : SEI テクニカルレビュー、第171号 (2007) 46.
- (58) 「世界最大出力・液体窒素冷却ピスマス系超電導モータの開発に成功」、2007年9月3日、http://www.sei.co.jp/news/press/07/prs545_s.htm
- (59) J. Shimoyama et al. : Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005) L1525.
- (60) 下山淳一 : FSST NEWS, No.114 (2007) 1.
- (61) M. Hirose, T. Masuda, K. Sato and R. Hata : SEI TECHNICAL REVIEW, No.61 (2006) 29.
- (62) 北澤宏一 : 低温ジャーナル 1 (2007) 2.
- (63) G. Arnold and J. Wolf : 低温工学 40 (2005) 221.

執筆者

佐藤 謙一 : 材料技術研究開発本部 支配人 フェロー 博士 (工学)
