



ビスマス系高温超電導線材と応用製品の実用化

Commercialization of Bi-2223 Superconducting Wires and Their Applications

林 和彦

Kazuhiko Hayashi

1986年末に高温超電導体が発見されて以来、当社ではパワー応用を目指した高温超電導線材の高性能・長尺化に取り組み、特に、ビスマス系2223線材（Bi2223線材）開発では、開発初期より長尺化、高性能化で世界をリードしてきた。また、線材開発と並行して各種応用製品の開発にも取り組み、マグネット、電力ケーブルなどで実用レベルの応用機器が開発されるに至っている。電流リード応用においてはMRI用を始め、商業化された応用機器に組み込まれる例も増えてきた。本稿では、最近のBi2223線材の開発・製品化状況及び線材の周辺技術として今後の用途拡大に重要な接続技術、大電流導体化技術、並びにBi2223線材を用いた各種応用機器の開発・製品化状況を紹介します。

Sumitomo Electric Industries, Ltd. has been engaged in the development of high-performance and long-length Bi2223 high-temperature superconducting wires. These wires and their applied products, such as current leads for magnetic resonance imaging, have been commercialized and well received by the market. This paper describes the recent development and commercialization of Bi2223 wires and typical products incorporating the wires, as well as wire joint technology and high-current conductor technology, which are indispensable for expanding the application of the wires.

キーワード：ビスマス系高温超電導線材、電流リード、超電導マグネット、超電導ケーブル

1. 緒言

高温超電導体が1986年に発見されて、既に30年以上が経過した。当社では、エネルギー伝送分野において大きなブレークスルーが起きる可能性が無視できないと考え、高温超電導体の発見直後からこの物質の線材化、応用製品開発に取り組んできた。

最初の発見から30年以上を経て様々な高温超電導体が見つかったが、実用材料として工業化、製品化が進んでいるのは、希土類系（REBCO：Rare earth-Ba-Cu-O）とビスマス系（Bi-Sr-Ca-Cu-O）に限定される。特に線材化及び線材を用いた応用製品開発はほぼこの2種類に絞られてきた状況である。ビスマス系高温超電導線材ではその組成比でBi2212線材（臨界温度が約90K）とBi2223線材（臨界温度が約110K）に大別されるが、Bi2212線材は4.2Kの高磁場応用に応用分野が限定されるため、4.2K（液体ヘリウム温度）～77.3K（液体窒素温度）の幅広い温度領域で応用可能なBi2223線材とその応用機器開発が進んできた。

当社では、Bi2223線材についてDI-BSCCO線材の商品名で販売を開始し、並行して応用製品の開発とそれらの製品化に取り組んできた。DI-BSCCO線材の製品化を進める中で、応用側からのニーズに応じて、高強度線材などの製品ラインナップの拡充、接続技術や大電流導体化などの線材周辺技術開発を進めてきた。また応用製品開発では、当社が最終製品まで製作した例や、ユーザーに協力してコイルなどの中間製品や線材供給まで行った例などがある。

本稿では、DI-BSCCO線材の製品化開発の現状と、DI-BSCCO線材を用いた応用製品の開発例を紹介する。

2. ビスマス系高温超電導線材

2-1 DI-BSCCO線材製品

当社のDI-BSCCO線材は、Agシーシを用いたPowder-in-Tube法で製造されており、Agマトリックス中に多数のBi2223フィラメントが細線化された多芯構造となっている。線材の横断面を写真1に示す。加圧焼結法の適用により、密度がほぼ100%の超電導フィラメントが実現できるようになり、フィラメントの高密度化により、強度の向上、欠陥の発生抑制等が可能となった^{(1)~(3)}。



写真1 DI-BSCCO線材（Type H）の横断面

これらの基本的な線材製造プロセスを踏まえ、製品として様々なバリエーションを加えてきた。これまでに製品化した線材のラインナップを表1に示す。

表1 DI-BSCCO線材仕様

| | Type H | Type G | Type HT-SS | Type HT-CA | Type HT-NX |
|--|------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | 高電流密度型 | 低熱伝導度型 | | 高強度型 | |
| 応用例 | | 電流リード | マグネット | 電力ケーブル | 高磁場マグネット |
| 平均幅 | 4.3+/- 0.2mm | 4.3+/- 0.2mm | 4.5+/- 0.1mm | 4.5+/- 0.1mm | 4.5+/- 0.2mm |
| 平均厚さ | 0.23+/- 0.01mm | 0.23+/- 0.01mm | 0.29+/- 0.02mm | 0.34+/- 0.02mm | 0.31+/- 0.03mm |
| マトリックス | Ag合金 | Ag-Au 5.4wt% | Ag合金 | Ag合金 | Ag合金 |
| 補強材 (厚さ) | - | - | ステンレス (0.02mm ¹) | Cu合金 (0.05mm ¹) | Ni合金 (0.03mm ¹) |
| 臨界電流I _c ^{*1} (77.3K, 自己磁場) | 170A, 180A, 190A, 200A | | | | |
| 対引張力* 室温, 95% I _c 維持 | 80N * | 80N * | 230N * | 280N * | 410N * |
| 対引張応力* 77.3K, 95% I _c 維持 | 130MPa * | 130MPa * | 270MPa * | 250MPa * | 400MPa * |
| 対引張歪* 77.3K, 95% I _c 維持 | 0.2% * | 0.2% * | 0.4% * | 0.3% * | 0.5% * |
| 対両方向曲げ径* 77.3K, 95% I _c 維持 | 80mm * | 80mm * | 60mm * | 60mm * | 40mm * |

* 典型的な値

2-2 Ag-Au シース線材

Agは金属の中でも最も熱伝導性に優れた材料である。高温まで超電導状態を維持できる高温超電導体はマグネットなどの通電に用いる電流リードとして期待されているが、理想的な電流リードを実現するためには、高温まで電気抵抗ゼロという特性に加えて、熱伝導による熱侵入を抑制する必要がある。

そこでAgの熱伝導を抑制するために、超電導特性を劣化させることなく低熱伝導化が可能なAg-Au合金シースを選択した。Auの濃度を高めれば熱伝導度は低下するが、コストとのバランスを考慮して、Ag-5.4wt% Au合金を選択した。その他の構成は標準的な高電流密度型Agシース線材Type Hと同等である。これらの線材の熱伝導度の温度依存性を図1に示す⁽⁴⁾。10~20Kの温度領域では2桁近く熱伝導率が低下していることがわかる。

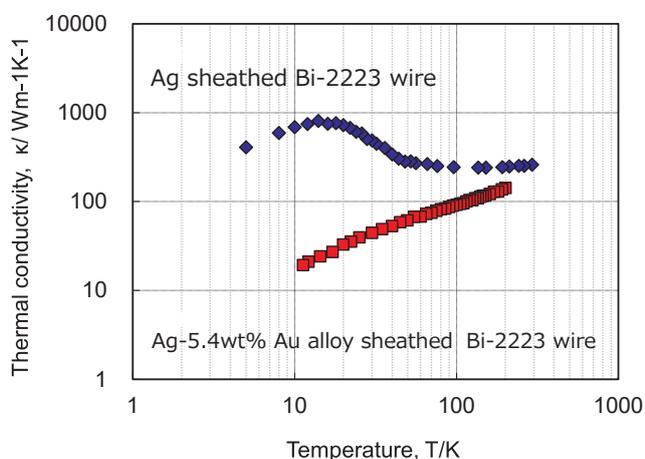


図1 線材の熱伝導度

2-3 高強度線材

標準的な高電流密度型線材のType Hは、臨界電流I_c^{*1}が劣化しない引張応力が77.3Kで130MPaであり、大口径マグネットや高磁場マグネットのように電磁力が大きい場合には、機械的に特性が劣化してしまう。このため線材の高強度化が要求され、当社はType H線材の両面に補強材を半田で集合する技術を開発した。

Bi系超電導体はセラミックスの一種であり、引張応力に弱いことから、線材としての対引張応力特性の改善には、超電導体に圧縮残留応力を印加することが有効である。このため、適切な補強材の材質、厚みの選択に加えて、集合時に補強材に引張力を印加することにより、圧縮残留応力を制御できるようになり、対引張応力特性が改善された。

これまでに製品化した線材の対引張応力特性を図2に示す。補強材にステンレスを用いたType HT-SS、補強材にCu合金を用いたType HT-CAでは77.3Kで約250MPaま

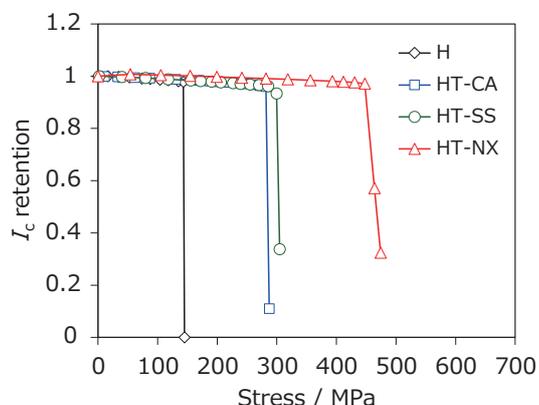


図2 線材I_cの引張応力依存性 (77.3K)

でI_cは低下しない。Type HT-SSは主にマグネット应用到、Type HT-CAは低電気抵抗を生かして主として電力ケーブル用に広く用いられている。20Tを超えるような高磁場マグネット応用では、250MPaの対引張応力でも不十分なため、特殊なNi合金を用いたType HT-NXを開発した。これによって400MPaまでの引張応力に耐えられるようになった。また、引張応力特性の改善に伴い、対引張歪特性も改善されることが分かっている（表1参照）⁽⁵⁾。

Type HT-NX線材により、後述するように25Tレベルのマグネットが実現したが、特殊なNi合金を用いているため高コストとなり、また30T～40T級のマグネット開発が世界各国で始まったことから、Type HT-NXを凌ぐ高強度線材が求められるようになった。

これらの要求を満たすため、低コストの400MPa級線材として0.08mm²のステンレスを補強材に用いた線材を開発した。また、500MPa級線材としては0.1mm²のNi合金を用いたタイプの線材を開発した（図3）。

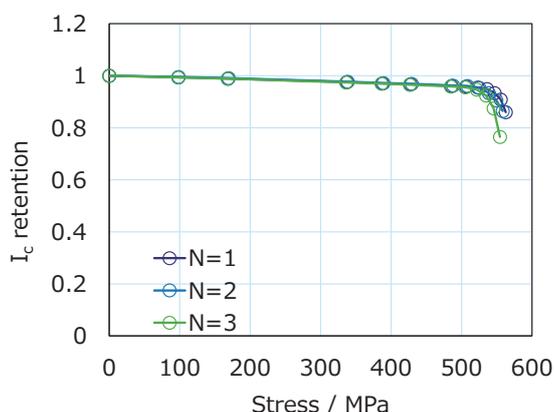


図3 500MPa級高強度線材の対引張応力特性 (77.3K)

3. 接続技術

線材の製造コスト、応用機器の製造コストを考えた時、単長の短い線材を使いこなすことは重要である。また、長単長の線材が製造可能であっても、マグネットでもケーブルでも必ず接続箇所は存在する。このため応用製品の開発、用途拡大には接続技術は大変重要である。

3-1 低抵抗接続

Type H線材は、マトリックスが低濃度のAg合金であり、半田付けによってもCuなどの半田付けの場合よりも低抵抗の接続が可能である。これは、接続抵抗が線材の電気抵抗と、半田やマトリックスなどそれぞれの電気抵抗に依存するためである。

表面が補強材になっているType HT系の線材では、補強材の電気抵抗や接続面積が接続抵抗に大きな影響を及ぼす。

す。図4に線材表面（補強材表面）同士を半田で接続した場合の接続抵抗のラップ長依存性を示す⁽⁵⁾。ラップ長が長いほど低接続抵抗となるが、曲げ特性が悪化するので、用途によって最適なラップ長を選択する必要がある。ケーブル用のType HT-CA線材では、20mmを標準としている。Type HT-NX線材は、高磁場マグネット用に有効であるが、通常の半田接続では高接続抵抗となってしまう。補強材を剥いでAgシース同士の接続とすれば低接続抵抗となるが、残留圧縮応力が解放されるため、強度が維持できない。そこで、強度の低下を最小限に抑えたまま低接続抵抗を得るために、補強材の一部を剥いで、隙間部にCuテープを配置することで、低接続抵抗と高強度を両立させることが可能となった。このような接続部の模式図を図5に示す。例えば、ラップ長を40mmとし、20mm部分の補強材を剥いで18mmのCuテープを挿入することで、77.3Kでの接続抵抗54nΩが得られた。また、対引張応力特性は接続なしで423MPaの線材を用いて同じ接続構造としたところ、416MPaが得られ、98%の強度維持率であった⁽⁵⁾。

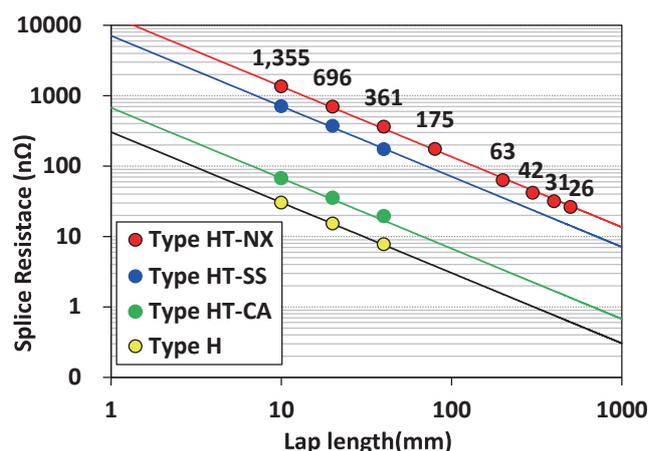


図4 半田接続抵抗の接続長依存性 (77.3K)

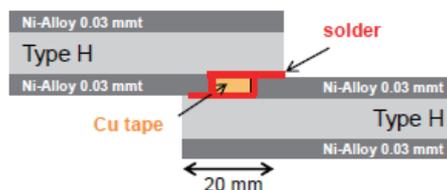


図5 Type HT-NX線材の高強度低抵抗接続構造

3-2 超電導接続

MRIやNMRなど、単位時間あたりppm～ppbオーダーの高安定な磁場が要求されるマグネットでは、特殊な直流電源を用いない限り、電流出力の変動により必要な磁場安

定度を実現することは困難である。これまでの低温超電導線材を用いた高安定度マグネットでは、永久電流運転により電源と切り離して運転されている。永久電流運転を実現するためには、接続部が超電導であって、永久電流の減衰時定数がマグネットのインダクタンスと抵抗の比で決まるため、設計毎に必要な接続抵抗を実現する必要がある。

DI-BSCCO線材の超電導接続技術については、あらかじめ2本の線材を1°以下の低角度に研磨した後、Bi2223厚膜を挟んで熱処理することにより、実用レベルの超電導接続が実現できている。低角度に研磨することで、多芯のフィラメントが全て接合に寄与することになる。図6に接続部の模式図を、図7に超電導接続部の臨界電流特性を示す⁽⁶⁾。Joint Aでは露出するフィラメントが少ないため、Icは低い。低角度研磨した超電導接続部の接続抵抗も測定されており、NMR応用を考慮した4.2K, 1Tの条件で $<10^{-13}\Omega$ が得られている⁽⁷⁾。

また、4.2Kの高磁場応用では、接続部がBi2212相に変化しても高いIcが得られ、Bi2223相からは半熔融により、

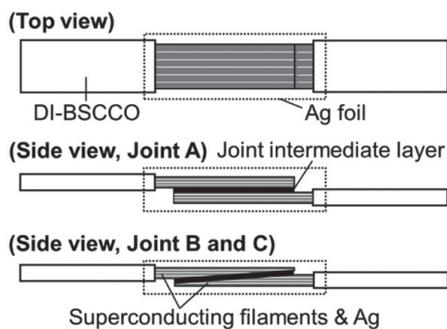


図6 超電導接続部構造⁽⁶⁾

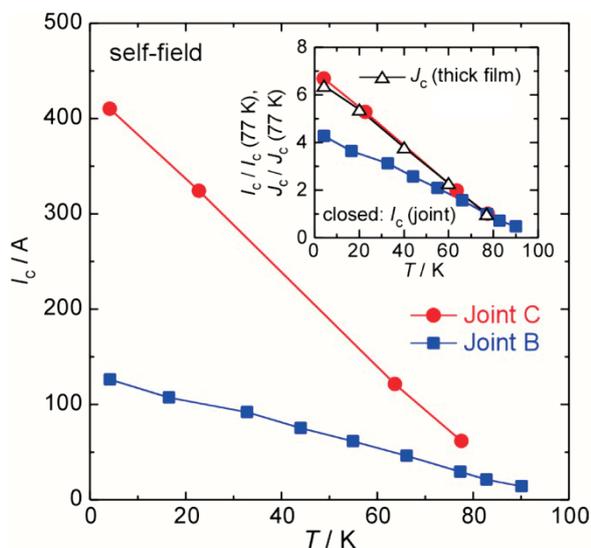


図7 超電導接続部のIc特性⁽⁶⁾

Bi2212相が出現してくるので、このような相変態を利用した接合法も開発されている⁽⁸⁾。

4. 大電流導体

DI-BSCCO線材は、1枚当たりのIcが、77.3K、自己磁場中で最高200Aであり、核融合や加速器応用のように大電流、低インダクタンスのマグネットを実現するためには、複数の線材を集合して大電流導体とする必要がある。これまでに、線材を複数スタックする方法が試みられてきたが、マグネットの励磁時など電流を変化させる場合に、電流分布の不均一が生じやすい。このため、テープ線材であるDI-BSCCO線材の位置を入れ替えて転位導体化する技術がType HT-NX線材を用いて開発され、Solid Material Solutions社によりMagnum-NXの商品名で販売が開始された⁽⁹⁾。導体の構成・外観を図8に示す⁽¹⁰⁾。

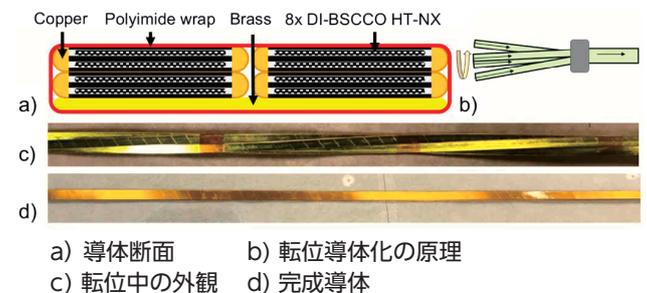


図8 大電流転位導体⁽¹⁰⁾

5. 応用製品開発

DI-BSCCO線材の開発と並行して、各種応用製品の開発が進められ、実用レベルの応用製品が生まれてきた。応用分野は、マグネット応用、電力ケーブルや電流リードなどのエネルギー伝送応用に大別できる。

5-1 マグネット応用

DI-BSCCO線材を用いたマグネット応用では、数T~10数Tレベルの中磁場応用では、NbTiなどの低温超電導マグネットでは運転ができない20K前後での運転が可能である。また、4.2K領域では、低温超電導マグネットでは発生不可能な20Tを超えるような高磁場の発生が可能である。

(1) 伝導冷却マグネット

20K領域でのマグネットの運転は、昨今のHeの供給問題の解決策の一つとなる。20Kという温度は液体Heの4.2Kに比べるとわずかに15Kほどの高い温度であるが、比熱が約100倍大きいいため熱的な擾乱があっても温度上昇が小さく、臨界温度が高いため超電導状態から常電導状態に移る温度マージンも大きくなる。また、変動磁場下では、

超電導体には交流損失が発生して発熱するが、温度上昇も小さい。従って20K運転のマグネットは安定に運転することが可能となる。

また、20K冷却では、真空ポンプの一種であるクライオポンプに用いられる冷凍機による伝導冷却が可能になる。電源スイッチをオンすることで容易に運転に必要な温度が得られる。

高温超電導マグネットは、一度常電導の芽が発生すると、酸化物セラミックスであるが故に常電導の伝搬が起こりにくく、局部的な発熱で焼損に至る恐れがある。但しDI-BSCCO線材は、Agシーすを用いているため他の高温超電導線材よりも常電導伝搬が比較的早く、低温超電導マグネットと類似の方法で、常電導の検出、保護が可能である⁽¹¹⁾。

伝導冷却マグネットの例を写真2に示す、この室温ポア70mmの6Tマグネットは、高性能希土類永久磁石の磁化曲線の測定装置に組み込まれて製品化されている。6Tまで30秒という高速で励磁が可能である。

写真2はソレノイドマグネットであるが、ヘリウムホルツ型スプリットマグネットとしては、写真3に示すハードディスクの検査用マグネットの開発事例もある。

その他の20K冷却マグネットの例としては、脳用MRI 3Tマグネット⁽¹²⁾、⁽¹³⁾、四肢用1.5T（27K液体ネオンの閉ル



写真2 20K冷凍機冷却マグネット



写真3 ハードディスク検査用マグネット
(ネオアーク提供)

プ循環による伝導冷却)⁽¹⁴⁾、新生児用1.5T⁽¹⁵⁾など、汎用タイプではなく特殊な用途に特化したMRIの開発が進んでいる。

加速器応用としては、医療用陽電子サイクロロン用に、サイクロロンのメインコイルに前述のMagnum-NXを、陽子線の軌道補正用のフラッターコイル用としてDI-BSCCO線材を用いた開発がVarian社で行われている⁽¹⁰⁾。更に加速器を構成する各種要素マグネット用の検討も大阪大学で進んでいる⁽¹⁶⁾。

(2) 高磁場マグネット

Type HT-NXを用いた高磁場マグネットの例としては、東北大学金属材料研究所で共同利用マグネットとして使われている25Tマグネットがある、外側に低温超電導コイル、内側にType HT-NXを用いた高温超電導コイルで構成され、4Kの冷凍機冷却型である。年間200日以上、3年以上の運転実績があり、固体NMR用の他、多くの実験に用いられている⁽¹⁷⁾。

高磁場NMR用としては、陽電子の共鳴周波数1.3GHz（30.5T）で、永久電流モードで運転できるマグネットの開発が進んでおり、マグネットの一部にType HT-NXを用いて、4.2Kで30Tの発生に成功している⁽¹⁸⁾。この例はまだ永久電流運転になっていないが、今後は前述した超電導接続技術も活用して、永久電流運転できるNMRを目指してゆくことになっている⁽¹⁹⁾。

5-2 電流リード

従来の銅製電流リードの熱侵入量が理論上1W/kAが限界であるのに対して、Type-G線材を用いた電流リード応用では0.2W/kAレベルへの熱侵入量低減が可能である。これまでに商用MRIマグネットを始め、液体ヘリウム冷却マグネットに広く用いられており、液体ヘリウム蒸発量低減に大きく貢献している。国際熱核融合実験炉ITERプロジェクトでは、Type G線材を使った最大電流量68kAの電流リードが中国科学院プラズマ研究所によって開発され、ITER実機用が製作されている⁽²⁰⁾。

また、20Kまたは4.2Kの冷凍機冷却型マグネットの実現には、冷却能力の制約上、高温超電導電流リードの採用が不可欠であり、前述の各種マグネットに使用されている。

5-3 超電導ケーブル

送配電ケーブルの伝送損失低減、コンパクト化による既存管路への増容量リプレース・設置スペース低減等を目的とした超電導ケーブルの開発が世界中で進んでいる。超電導ケーブルのアイデアは高温超電導体の発見前からあったが、液体ヘリウムでは長距離の冷却が困難なため、液体窒素を冷媒に用いる高温超電導ケーブルの出現によって、始めて実用化の可能性が出てきた。

DI-BSCCO線材が用いられたケーブルプロジェクトの例としては、米国Albanyプロジェクト⁽²¹⁾、横浜プロジェクト⁽²²⁾、ドイツAmpaCityプロジェクト⁽²³⁾、ロシア・サンクトペテルブルグのDCケーブルプロジェクト⁽²⁴⁾などがある。

る。更に電力伝送用途以外にも、鉄道のき電ケーブルへの
 応用検討が進んでいる⁽²⁵⁾。

これらのケーブルプロジェクトの多くではType HT-CA
 線材が用いられている。これは機械強度に加えて、電力ケー
 ブルでは短絡電流等の臨界電流を超える大きな事故電流が
 流れても、ケーブルの劣化が起こりにくいことや、ケーブ
 ル間の接続が半田接続によっても低接続抵抗で実現でき
 るためである。図9に当社が開発した66kV用ケーブルを
 示す。

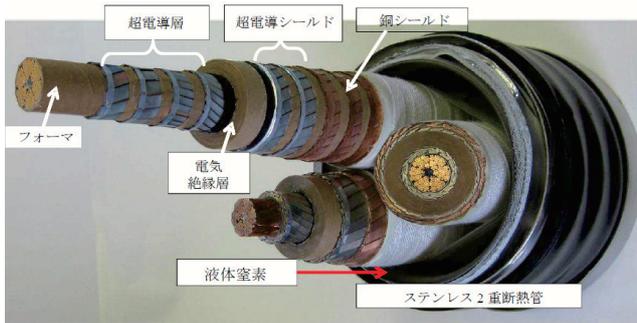


図9 三心一括超電導ケーブル

6. 結 言

DI-BSCCO 線材の製品化の進展及びDI-BSCCO 線材を
 用いた各種応用製品の開発状況について紹介した。電流リー
 ド用などで実用製品に使われ始めたが、実用化という意味
 では端緒についたところである。今後も本格的な応用分野
 の拡大、製品化の拡大を目指してゆきたい。

用語集

※1 臨界電流 I_c

電気抵抗ゼロで流せる最大電流。

- ・DI-BSCCOは住友電気工業株の登録商標です。
- ・Magnum-NXはSolid Material Solutions, LLCの米国その他の国における
 商標または登録商標です。

参 考 文 献

- (1) T. Kato, S. Kobayashi, K. Yamazaki, K. Ohkura, M. Ueyama, N. Ayai, J. Fujikami, E. Ueno, M. Kikuchi, K. Hayashi, and K. Sato, Physica C 412 (2004) 1066
- (2) S. Kobayashi, K. Yamazaki, T. Kato, K. Ohkura, E. Ueno, K. Fujino, J. Fujikami, N. Ayai, M. Kikuchi, K. Hayashi, K. Sato, and R. Hata, Physica C 426 (2005) 1132
- (3) N. Ayai, M. Kikuchi, K. Yamazaki, S. Kobayashi, S. Yamade, E. Ueno, J. Fujikami, T. Kato, K. Hayashi, K. Sato, R. Hata, J. Iihara, K. Yamaguchi, and J. Shimoyama, IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 3075
- (4) T. Naito, H. Fujishiro, and Y. Yamada, Cryogenics 49 (2009) 429
- (5) 長部、山崎、中島、門谷、小林、加藤、SEIテクニカルレビュー第190号 (2017年1月) P.9
- (6) Y. Takeda, T. Motoki, H. Kitaguchi, T. Nakashima, S. Kobayashi, T. Kato, and J. Shimoyama, Appl. Phys. Express 12 (2019) 023003
- (7) H. Kitaguchi, K. Kobayashi, A. Uchida, M. Amaya, Y. Takeda, and J. Shimoyama, 10th ACAS/2nd Asian ICMC/CSSJ Joint Conference, Okinawa, 9A4-1 (2020)
- (8) X. Jin, Y. Suetomi, R. Piao, Y. Matsutake, T. Yagai, H. Mochida, Y. Yanagisawa, and H. Maeda, Supercond. Sci. Technol. 32 (2019) 035011
- (9) A. Otto, L. Saraco, J. Colque, and G. Pothier, 2018 Appl. Supercond. Conf., Seattle, 4L0r2C-04
- (10) A. Godeke, L. Alberty, E. Akcoltekin, R. Babouche, C. Detourbe, R. Nast, C. Radermacher, H. Rocken, A. Roth, M. Schillo, P vom Stein, M. Walpole, J. Wittschen, K. Hayashi, E. Shizuya, H. J. G. Krooshoop, R. Lubkemann, A. Nijhuis, C. H. Vermeer, W. A. J. Wessel, J. Krause, J. Wiezorek, A. Otto, and L. Saraco, Supercond. Sci. and Technol., 33 (2020) 064001
- (11) E. Sasaki, D. Nakayama, T. Ariyama, T. Takao, O. Tsukamoto, Y. Fujimoto, T. Yamaguchi, E. Ueno, T. Kato, R. Matsuo, Y. Yamamoto, and N. Matsuda, IEEE Trans. Appl. Supercond. 26 (2016) 4701404
- (12) Y. Terao, O. Ozaki, C. Ichihara, S. Kawashima, T. Hase, H. Kitaguchi, S. Kobayashi, K. Sato, I. Nakajima, N. Oonishi, M. Poole, K. Takeda, S. Urayama, and H. Fukuyama, IEEE Trans. Appl. Supercond. 23 (2013) 4400904
- (13) H. Kitaguchi, O. Ozaki, T. Miyazaki, N. Ayai, K. Sato, S. Urayama, and H. Fukuyama, IEEE Trans. Appl. Supercond. 20 (2010) 710
- (14) Xu M, Laskaris E T, Budesheim E, Conte G, Huang X, Stautner E W, and Amm K, IEEE Trans. Appl. Supercond. 20 (2010) 769-72
<https://neoscan-solutions.com/>
- (15) Proceedings of the 21st International Conference on Cyclotrons and their Applications (CYC2016) THB03
- (16) S. Awaji¹, K. Watanabe¹, H. Oguro, H. Miyazaki, S. Hanai, T. Tosaka, and S. Ioka, Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 065001
- (17) Y. Suetomi, T. Yoshida, S. Takahashi, T. Takao, G. Nishijima, H. Kitaguchi, Y. Miyoshi, M. Hamada, K. Saito, R. Piao, Y. Yanagisawa and H. Maeda, MT26 (Sep.27,2019) Fri-Mo-Or27-02
- (18) H. Maeda, J. Shimoyama, Y. Yanagisawa, Y. Ishii, and M. Tomita, IEEE Trans. Appl. Supercond 29 (2019) 4602409
- (19) K. Ding, Y. Bi, H. Feng, X. Huang, C. Liu, X. Lin, Q. Ni, G. Shen, Y. Song, J. Tang, H. Wu, J. Yu and T. Zhou, Physics Procedia 36 (2012) 931
- (20) 湯村、芦辺、大屋、渡部、滝川、増田、廣瀬、八束、伊藤、畑、SEIテクニカルレビュー第174号 (2009年1月) P.95
- (21) 大屋、湯村、渡部、芦辺、滝川、伊藤、南野、西村、増田、本庄、三村、鬼頭、野口、SEIテクニカルレビュー第182号 (2013年1月) P.102
- (22) M. Stemmler, F. Merschel, M. Noe, and A. Hobl, IEEE/CSC SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM (global edition) October 2014 Invited Presentation 4L0r3B-01 given at ASC 2014, Charlotte, August 10-15 (2014)
- (23) V. E. Sytnikov, S. E. Bemert, Y. V. Ivanov, S. I. Kopylov, I. V. Krivetskiy, D. S. Rimorov, M. S. Romashov, Y. G. Shakaryan, R. N. Berdnikov, Y. A. Dementyev, Y. A. Goryushin, and D. G. Timofeev, IEEE Trans. Appl. Supercond. 23 (2013) 5401904

(25) M. Tomita, Y. Fukumoto, A. Ishihara, T. Akasaka, and K. Suzuki,
10th ACAS/2nd Asian ICMC/CSSJ Joint Conference, Okinawa,
8C3-3 (2020)

執筆者

林 和彦 :フェロー
超電導製品開発部

