

# Y系およびBi系高温超伝導線材における実用機器への 適用性に関する比較検討

Feasibility Study on Yttrium- and Bismuth-system High Temperature Superconductors for  
Practical Applications

宮田 成紀, 水野 貴敏<sup>†</sup>, 黒田 潔<sup>†</sup>  
Seiki Miyata, Takatoshi Mizuno,<sup>†</sup> and Kiyoshi Kuroda<sup>†</sup>

玉川大学工学部情報通信工学科 194-8610 東京都町田市玉川学園 6-1-1

<sup>†</sup> 玉川大学工学部エンジニアリングデザイン学科 194-8610 東京都町田市玉川学園 6-1-1

Department of Information and Communication Technology, College of Engineering, Tamagawa  
University, 6-1-1 Tamagawagakuen, Machida, Tokyo 194-8610

<sup>†</sup>Department of Engineering Design, College of Engineering, Tamagawa University, 6-1-1  
Tamagawagakuen, Machida, Tokyo 194-8610

## Abstract

Yttrium- and Bismuth-system high temperature superconductors (HTSs) are compared from the viewpoint of feasibility for practical applications. We investigated a trend of national projects concerning verification tests of superconducting devices. Critical current properties of the two types of HTS wires were evaluated with the four-terminal method. As a result, it turned out that although an in-field current property of the Y-system HTS are intrinsically superior to the Bi-system HTS, Bi-system HTS wires have a competitive advantage in cost and reliability compared to Y-system HTS wires. However, further investigations are needed to conclude which type of wire is prior to the other one.

Keywords: high temperature superconductor, superconducting wire, practical application

## 1. 背景

1986年の発見以来、期待されてきた高温超伝導体の実用化がいよいよ現実のものとなってきた。実用機器への応用に必須な線材の作製プロセスがほぼ確立されたからである。高温超伝導体と呼ばれる一連の超伝導体は超伝導状態を発現する温度（臨界温度）が高く、冷媒として沸点が4.2 Kの液体ヘリウムが必要となるNbTiあるいはNb<sub>3</sub>Snなどの金属系超伝導と異なり、77 Kの沸点を持つ液体窒素を用いることができる点でコスト的に非常に有利であり、応用の幅も格段に広がると期待されている。既存の超伝導機器で使用されているNbTiあるいはNb<sub>3</sub>Snなどの金属系超伝導体は基本的に液体ヘリウムを用いてその沸点である

4.2 K（摂氏−269℃）あるいはそれ以下の温度に冷却されて利用される。しかし冷媒である液体ヘリウムは高価で、通常天然ガス資源の副産物として分離・精製されるが、世界的にも供給元は数ヶ国程度に限られており、供給量は国の政情や方針あるいは企業の経営状態などに大きく依存するため、つねに供給不安にさらされているのが実情である。一方、液体窒素であれば、原料が大気であるため原理的には液化器さえ準備できれば原料コストがかからず供給不安もない。しかも比熱、潜熱ともに大きな値をもつため超伝導機器の動作安定性を高める利点もある。超伝導応用機器として現時点で最も普及している医療用MRIの市場規模がおよそ5000億円、超伝導応用機器全体とし

表 1: 超伝導ケーブルおよびマグネットに関する国内外の主な実証プロジェクト 6-9)

プロジェクト名	国・地域	主な参画機関	内容など
southwire (DOE)	米国	southwire	ケーブル, Bi 系, 30 m, 2000-
TEPCO	日本	東京電力, 住友電工	ケーブル, Bi 系, 100 m, 2001-02
Super-ACE (NEDO)	日本	Super-GM, 古河電工, 電中研	ケーブル, Bi 系, 500 m, 2004-05
Albany (DOE, NYSERDA)	米国	スーパーパワー社, 住友電工他	ケーブル, Bi/Y 系, 350 m/30 m, 2006-08
Ohio (DOE)	米国	Ultera(Southwire/nkt cables), AEP, ORNL, Praxair, AMSC	ケーブル, Bi 系, 200 m, 2006-2012
LIPA (DOE)	米国	AMSC, Nexans, Air Liquide	ケーブル, Bi 系, 660 m, 2008-
Y 系超伝導機器 (NEDO)	日本	ISTEC, フジクラ, 住友電工, 古河電工他	ケーブル, Y 系, 15 m&30 m, 2008-12
HYDRA	米国	AMSC, Southwire, ConEdison	ケーブル, Y 系, 200 m, 2010-
AmpaCity (BMW)	ドイツ	RWE, Nexans, KIT, 住友電工	ケーブル, Bi 系, 1 km, 2011-16
LIPA2	米国	AMSC, Nexans, Air Liquide	ケーブル, Y 系, 600 m, 2011-
石狩 (METI)	日本	中部大, 住友電工, 千代田化工, さくらインターネット	ケーブル, Bi 系, 500 m&1 km, 2012-14
Jeju	韓国	KEPCO, LS Cable, KERI 他	ケーブル, Y 系, 500 m&1 km, 2014-
超 1GHz-NMR (JST)	日本	NIMS, 理化学研究所, 神戸製鋼, JEOL	NMR 用マグネット, Bi 系, 24 T, 2006-14
S-イノベ (JST)	日本	NIMS, JEOL	NMR 用マグネット, Y 系, 24 T, 2009-18
強磁場コラボラトリ	日本	東北大, 東芝	高磁場マグネット, Bi 系, 25 T, 2013-16
NHMFL (DOE)	米国	フロリダ州立大	高磁場マグネット, Y 系, 32 T

ては 1 兆円規模とされている<sup>1-3)</sup>が, 高温超伝導体を利用することで, 液体ヘリウムを用いたシステムではコスト的に不可能であった送電ケーブルや, 臨界温度だけでなく高い臨界磁場をもつという特性から高磁場マグネットへの適用など, 用途も大幅に広がることになる. しかしながら高温超伝導体の実用化には大きな課題があった. これらは金属酸化物, つまりセラミックスの一種であり, 金属のように圧延などの機械的な加工法で容易に可撓性をもつ線材形状に加工することができない. しなやかで可撓性をもつ線材形状に加工できなければ, 応用機器を作製することができない. そこで PIT 法およびコート法の 2 つ手法が開発された. 両手法ともいわば金属に超伝導体が寄生する構造をとることで線材形状を達成している点が特徴である. PIT 法は powder-in-tube 法の略で, 金属パイプに粉末状の高温超伝導体を充填し, 圧延等の機械加工と熱処理を施す方法である. 一方, コート法は幅 1 cm・厚さ 100 ミクロンほどのテープ形状をした金属の表面に 1 ミクロン程度の超伝導体の薄膜を形成させる方法で, 薄膜法とも呼ばれる. それぞれ, PIT 法は  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (以下 Bi 系) に, コート法は  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (RE

= Y を含む希土類元素, 以下 Y 系) に適用される. 比較的簡便であり, 線材開発としては先行した Bi 系線材は, 磁場中での特性に優れるため本命と目される Y 系線材にやがて置き換えられると言われてきたが<sup>5)</sup>, 少なくとも現時点ではそのような状況にはなっていない. 基礎的研究は広く続けられていくべきであるが, 実用機器の開発を念頭においた応用研究においては最終的に使える(あるいは使われる)技術でなければならないため, その動勢を見極めることも重要となってくる. また, そのような調査を行うことで解決されるべき課題というものも見えてくるはずである. そこで, 国内外のプロジェクトや企業の動向の調査や市販されている線材特性の評価などを行い, 上記視点における両物質の比較, 検討を行った.

## 2. 国内外のプロジェクト比較

超伝導体に関係した研究開発は, 戦略的な重要性から国家プロジェクトが推進力としてその主な役割を担ってきた. したがって, その動向を追跡することで全体の推移がおおよそ把握できる. 表 1 に高温超伝導体の主要な応用機器である超伝導ケーブルおよび(高磁場)マグネットに関する

国内外の主な実証的プロジェクトを示す。上述のように、線材開発では比較的容易な手法であったPIT法によるBi系が先行したため、2000年ごろからいち早くBi系を用いたケーブルの実証実験が行なわれていることがわかる。その後もBi系が主に使われ、2006年から2008年にかけて実施されたAlbanyプロジェクトで、Bi系ケーブルシステムの一部をY系で置き換えるという状況があったものの、Y系を中心に据えたプロジェクトとしては2008年以降のY系超電導機器プロジェクトが初めてとなる。いずれにしても2000年代後半に入ってからであり、Bi系とは7-8年程度の開きがあると言える。またマグネット開発に関しては、研究室レベルの小型・低磁場マグネットの試作は行われていたが、本格的な高磁場マグネットのプロジェクトはケーブルに比べ出足は遅く、2006年ごろから始まっていることが表1からわかる。磁場中で電流特性の劣化が大きいとされるBi系でも25 Tまでのマグネットの試作に成功しており、一方、Y系を用いたコイルではクエンチや焼損などの報告が見られる<sup>10-12)</sup>。

このように全体的にはおおよそ順当な（つまり予想通りの）流れだと言える。つまり、線材化技術がいち早く確立したBi系線材が先行し、その後、Y系線材が追随するかたちとなっている。そのような流れのかなで、プロセスとしての成熟度が高いBi系線材に比べてY系線材は技術的な蓄積がまだ浅く、クエンチや焼損などの課題が克服できていない段階であるという見方ができる。

### 3. 臨界電流特性の評価実験

#### 3.1 実験の目的

次に、実際に市販されている線材を購入し、その臨界電流 ( $I_c$ ) 特性の分布を評価することで二つの高温超伝導線材の“成熟度”を評価することを試みた。結果的にはY系線材については焼損してしまい  $I_c$  特性を評価することはできなかったが、そこから得られる知見について考察を行った。

実用機器へ適用するには線材化が必須となるが、Y系およびBi系高温超伝導線材に関しても線材化技術が確立したとして、パイロットプラントを

表 2: 用いた市販線材の仕様

	超伝導相	線幅	線厚	全長
Bi系線材	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$	4 mm	0.23 mm	10 m
Y系線材	$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$	4 mm	0.14 mm	11 m

用いた準量産体制に入り、機器開発に供せられている。しかし、線材化技術が確立したと言っても、何とか最低限の条件をクリアできた状態であり、当然ながら改善点がまったくないという意味では決してない。改善点として挙げられるのが、臨界電流特性の空間的不均一性である。基本的に線材は電流を運ぶために用いられるため、線材の臨界電流 ( $I_c$ ) 値とは、例えば100mの線材があった場合、一方の端から他方の端まで、つまり両端間でどれだけ電流を流すことができるかを示す値として扱われる。しかし100mの全長にわたって均一に同じ  $I_c$  値をもつわけではない。線材の各地点の  $I_c$  値にはばらつきがあり、もっとも単純に考えた場合には、そのうちの最低の  $I_c$  値をもつ部分が全体の  $I_c$  を決定することとなる（この点についてはじつはそれほど単純ではないが）。つまり、プロセスが確立されたと言っても、最低  $I_c$  がある程度の大きさ以上（今の場合数百アンペア以上）の値をもつ線材をある一定の確率で（つまりある一定の歩留りで）つくることが可能となったという意味であり、全体の  $I_c$  値には大きなばらつきがあり、決して安定して製造できることを意味しない<sup>13,14)</sup>。  $I_c$  値のばらつきは、歩留りだけでなくクエンチなどの問題の原因にもつながると考えられているため、引き続き均一化・プロセスの安定化の努力が為されている状況にある。したがって、  $I_c$  値の分布を評価することで、線材プロセスとしての技術的な成熟度をある程度判断することができる。

#### 3.2 実験方法

Bi系およびY系の二種類の市販線材を購入し、四端子法により  $I_c$  値の測定を行った。使用した線材の仕様を表2に示す。測定はファンクションジェ

ネレータ (NF 回路設計 WF1973) で発生させたランプ波形信号により直流安定化電源 (KIKUSUI PAG8-400) の出力電流をコントロールし, ナノボルトメータ (KEITHLEY 2182) を用いて試料に取り付けた端子間電圧を読み取り, NI 社製 NI-GPIB-USB-HS+を用いて USB ポート経由で GPIB 制御により PC に取り込むシステムをセットアップした (図 1)。

### 3.3 実験結果及び考察

まず Bi 系線材の評価結果を示す。図 2 は, 1 m 長の Bi 系線材の臨界電流特性を評価した結果である。1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  基準により評価された  $I_c$  値は 201 A であった。当該線材の製品仕様としては “end-to-end の  $I_c$  として 200 A 以上” であり, 付属の検査成績書に記述された 10 m 全長に対する実測値 (201 A) と一致する結果となった。

さらに, 10 cm 間隔で測定した長手方向の  $I_c$  分布を Fig. 3 に示す。0 cm 地点から 50 cm 地点までの 10 cm ごとの  $I_c$  値と, 0-50 cm 区間の  $I_c$  値を測定した。グラフには 1 m 区間の  $I_c$  値も合わせて示している。10 cm 区間, 50 cm 区間, 100 cm 区間の測定はすべて同一試料で行った。10 cm 区間  $I_c$  の最小値から最大値の差は 4 A 未満で, 10 cm 区間の測定結果 5 点の標準偏差は 0.78% (1.6 A) であった。非常に均一である。また 10 cm ごとの  $I_c$  値と 50 cm の両端の  $I_c$  値とは非常によく整合している。各通電電流値に対する発生電圧の値は, 50 cm 区間が, 5 つの 10 cm 区間の合計にほぼ一致している。各測定は, 通電電流を繰り返して与えながら行ったものであるから, これらの結果は各測定の再現性もある程度保証していることになる。さらに, 今回購入した 10 m の全長についてのメーカーによる実測値が 201 A であることから, 10 m にわたっての均一性も良好であると考えられる。

一方, Y 系線材を用いた同様の実験においては 130 A 程度の電流を流したところで線材が焼損してしまった (図 4)。一般論としては, 焼損はある場所で発生した量子化磁束線のフローに伴うエネルギーの散逸量が, 熱伝導で周辺に拡散する速

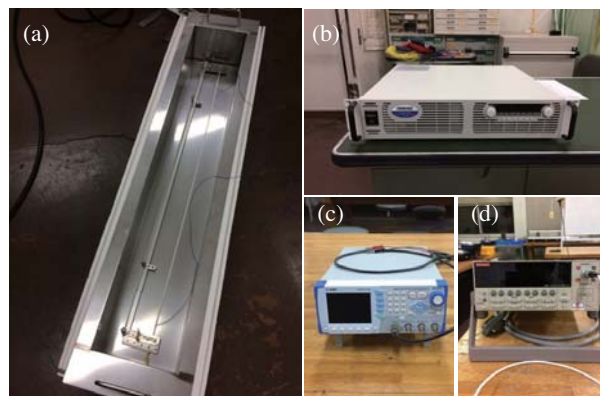


図 1: 臨界電流 ( $I_c$ ) の測定実験。(a) 試料および液体窒素槽, (b) 直流電源, (c) ファンクションジェネレータ, (d) ナノボルトメータ。

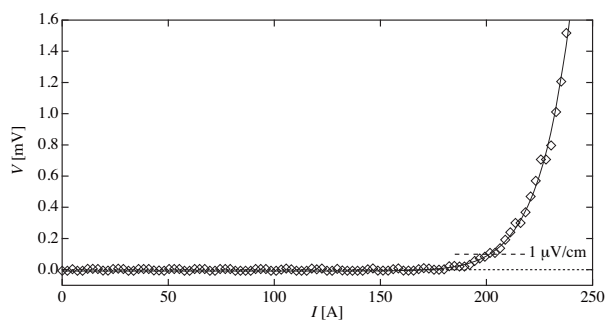


図 2: 得られた Bi 系高温超伝導線材の電流-電圧特性。電圧端子間距離 100 cm, 電界基準 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  で決定された  $I_c$  値は 201.4 A であった。

度を超えた場合に起こる。しかしその具体的な原因については特定することは難しい。剥離や応力集中, 回復不可能なホットスポットの存在, ハンドリングミスによる損傷などが考えられる。焼損すると当該箇所が失われてしまうため, 追加観察などができず, 原因の特定が困難となってしまう。このように, 今回は残念ながら実測することはできなかったが, 文献を見ると Y 系線材の  $I_c$  値の長手方向の分布については, 例えば数%から 10% の値が報告されている<sup>13,14)</sup>。やはりこれらの値に比べると, Bi 系線材の均一性はかなり高いと言える。直接的な原因かどうかはともかく, 少なくとも Y 系線材におけるクエンチや焼損と  $I_c$  の不均一性との相関が示唆される結果となった。

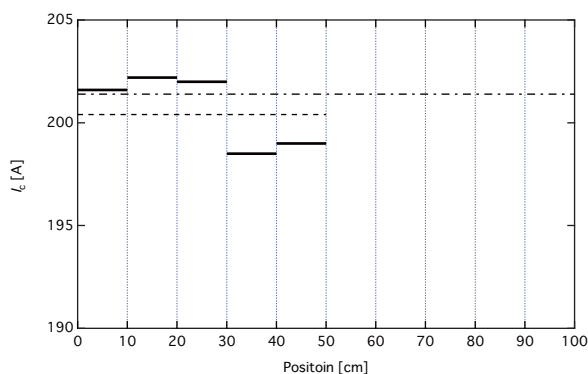


図 3: Bi 系線材の  $I_c$  分布. 同一試料について行われた 10 cm (実線), 50 cm (鎖線), 100 cm 区間 (一点鎖線) に対する測定結果.

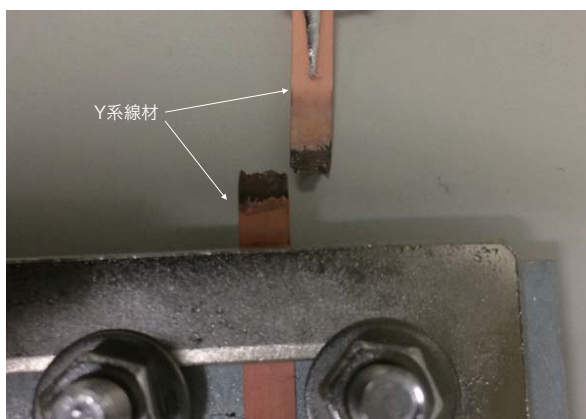


図 4: Y 系線材の焼損部

#### 4. まとめ

まず、プロジェクトの推移を概観した結果からは、Bi 系が先行し、線材プロセスの確立した Y 系がそれに続いているという予想通りの結果が確認できた。しかし気になる点として、Y 系線材に関する焼損やクエンチなどの報告が見られたことが挙げられる。この問題が本質的なものなのか、解決可能なものなのかは現時点では断定できない。Bi 系線材においても開発初期の段階においては同様であった可能性があり、少なくとも現在実用化されている金属系の超伝導体においても初期の段階では焼損やクエンチなどの現象に悩まされた。その事実を考えると、技術的なノウハウの蓄積が十分でないことが原因であると考えられることもでき、そうであれば解決可能な問題であると捉えること

は可能である。また、線材の  $I_c$  特性を実測した結果からは、(限定された結果からではあるものの) Bi 系線材の均一性が非常に優れていることが裏付けられ、一方、Y 系線材に関しては通電により焼損してしまうという、文献に見られる悪い結果を再現することとなってしまった。以上より、Bi 系線材は技術としては成熟しており、実用機器への適用性を十分備えていると言える。一方、Y 系線材はまだ技術的なノウハウの蓄積が十分でない可能性が示唆される。しかし、時間的に解決可能な問題である可能性は高いと考えられる。

今回分析できなかった項目も含めて、改めて全体的に検討してみると、Y 系超伝導体の Bi 系超伝導体に対する磁場中特性の優位性は、物質の構造に起因する本質的なものであるため (例えば文献<sup>5)</sup>などを参照)、解消されることはない。したがって、現時点で存在する課題がすべて解決されると仮定すると Y 系線材が残ることになるであろう。しかしより現実的には、様々な要因によって Bi 系線材が普及するシナリオも十分考えられる。例えば高い磁場中特性が必要とならない電力ケーブルの市場がいち早く拓けた場合には、現時点ですでに競争力の高い (つまり安価な) Bi 系が優位になり、量産効果からさらに優位さに拍車がかかるであろう。(実際、Bi 系線材と Y 系線材の価格は 5 倍以上の差がある。)

また、Bi 系超伝導体は液体窒素温度での特性は低い、より低温領域では特性が回復する。近年の冷凍技術の進展は著しく、10-20 K 程度の低温環境も容易に手に入るようになってきており、実際、プロジェクトの動向調査においても見られたように、高磁場マグネットでの使用にも問題のないことが確認されている<sup>10)</sup>。

電力ケーブルや高磁場マグネットなどは、これまでにないまったく新規のシステムであるが、高温超伝導線材を普及させるための最も現実的な道筋としては、既存機器の置き換えを進めることである。超伝導機器で言えば、やはり医療用 MRI である。しかしながら、その場合には重要な技術として超伝導線材同士を接続する超伝導/超伝導接続技術の開発が必要となる。超伝導のみで閉回

路をつくり、永久電流モードで稼働させるためである。BI系についてもY系についてもまだ確立されていない技術である。実現できた方の線材によるMRIの開発が一気に進むと考えられる。

総括すると、Y系の優位性は、本質的なものなのでなくなることはないが、それほど絶対というわけではない。状況によってはBi系線材のみが普及するという状況も十分あり得る。しかし現時点では不確定要素が多く、判断はできない。また付け加えると、超伝導リニアやITERなどの巨大プロジェクトの影響も無視できないであろう。

#### 参考文献

- 1) CONECTUS, <http://www.conectus.org/>.
- 2) 堀上徹他, 超電導 Web21, 2009年12月号.
- 3) NEDO, 技術戦略研究センターレポート, vol.4 (2015).
- 4) M. Parans Paranthaman and T. Izumi, MRS Bulletin **29**, 533 (2004).
- 5) D. Larbalestier *et al.*, Nature **414**, 368 (2001).
- 6) T. Masuda *et al.*, SEI Technical Review, No.59 (2005).
- 7) 山田雄一他, SEI テクニカルレビュー, 第171号 (2007).
- 8) Y. Shiohara *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 010007 (2012).
- 9) NEDO, 超電導機器の市場形成に資する技術戦略策定に向けた調査報告書 (2015).
- 10) 淡路智他, 第63回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集 (2016).
- 11) 末松浩人他, 低温工学 **48**, 31 (2013).
- 12) 横山彰一他, 低温工学 **52**, 217 (2017).
- 13) A. Ibi *et al.*, Phys. C **445–448**, 525–528 (2006).
- 14) V. Selvamanickam *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **23**, 014014 (2010).

---

2018年3月1日原稿受付, 2018年3月13日採録決定  
Received, March 1, 2018; accepted, March 13, 2018