

## 連携記事

# 先進超伝導材料線材化研究の進展

Progress of Advanced Superconducting Tapes and Wires

熊倉浩明

Hiroaki Kumakura

(独) 物質・材料研究機構  
超伝導材料センター  
センター長

## 1 はじめに

超伝導は抵抗ゼロで大電流が流せるため、これを各種の電力機器に応用すると効率が高まるだけでなく、機器が小型・軽量化されるので省エネルギーや低炭素化など地球環境保全の面から有利である。具体的には、送電ケーブル、発電機、各種モーター、変圧器、エネルギー貯蔵装置 (SMES)、限流器、磁気分離、電流リードなどが挙げられ、現在プロトタイプを試作等が進められている。

超伝導材料をこれらのエネルギー分野に応用するためには、いわゆる線材化が達成されなければならない。超伝導線材として重要な特性は、超伝導転移温度  $T_c$ 、上部臨界磁界  $H_{c2}$ 、臨界電流密度  $J_c$  の三つである。 $T_c$  と  $H_{c2}$  は超伝導体に固有の値であり、超伝導体が決まるとほぼ決定されてしまう。これに対して  $J_c$  は超伝導体の微細組織に極めて敏感である。したがって超伝導線材開発は、優れた  $T_c$  と  $H_{c2}$  を有する超伝導体に対して微細組織制御を施して  $J_c$  を高める、という研究が中心となる。Table 1 には応用の観点から重要な超伝導材料とその  $T_c$  と  $H_{c2}$  をまとめた。現在線材化研究が進められている超伝導材料は金属系超伝導材料と酸化物系超伝導材料、それと最近のプニクタイト超伝導材料に大別される。すでに実用化されている超伝導材料は、金属系の Nb-Ti と Nb<sub>3</sub>Sn の二つである。Nb-Ti は合金系材料で加工性に優れるために線材化が容易であり、医療診断用 MRI や磁気浮上列車をはじめとして、最も多く使われている。Nb<sub>3</sub>Sn は化合物系の超伝導材料であり、そのままでは加工できないが、いわゆるブロンズ法が発明されて線材化が達成されている<sup>1)</sup>。Nb<sub>3</sub>Sn は Nb-Ti よりも臨界磁界が高いため、高磁界超伝導マグネットの巻き線材として使われている。国際熱核融合実験炉 (ITER) のトロイダルコイルの巻き線材としても使用されることが決まっている。また、2001 年に発見された MgB<sub>2</sub> は金属系の超伝導材料であるにも関わらず  $T_c$  が 39K と金属

系超伝導材料としては非常に高いので線材化の研究が盛んに行われている<sup>2)</sup>。

$T_c$  が 77K (一気圧における液体窒素の沸点) を超える一連の高温酸化物超伝導体については、発見以来数多くの線材化研究がなされてきたが、最近になってようやく高性能な長尺線材が得られるようになり、実用化が真剣に議論されるようになってきた。実用化の観点から有望な高温酸化物超伝導体はビスマス系酸化物とイトトリウム系酸化物である。特にビスマス系線材では長尺線材の開発が進み、これを用いた送電ケーブルなどの試作も活発に進められている。

一方、2008 年に日本で発見された一連のプニクタイト超伝導体<sup>3)</sup> は単体では強磁性を示す鉄を構成元素として含んでいるために学術的な関心が高く、また応用を志向した研究も行われているが、まだ大きな超伝導電流を流すことのできる線材は得られていない。

以上の現状を踏まえて、本稿では、実用化研究が最も進ん

Table 1 Important superconductors from the viewpoint of applications

| 物質   | T <sub>c</sub> (K)                                                             | H <sub>c2</sub> (T) at 4.2K |      |
|------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------|
| 酸化物系 | YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub>                                | 92                          | >100 |
|      | Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> CaCu <sub>2</sub> O <sub>y</sub>               | 90                          |      |
|      | Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>z</sub> | 110                         |      |
|      | Tl <sub>2</sub> Ba <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>w</sub> | 125                         |      |
|      | HgSr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>v</sub>               | 135                         |      |
| 金属系  | Nb-Ti                                                                          | 9.8                         | 11.5 |
|      | Nb-Zr                                                                          | 10.5                        | 11   |
|      | V <sub>3</sub> Ga                                                              | 16                          | 25   |
|      | Nb <sub>3</sub> Sn                                                             | 18                          | 25   |
|      | Nb <sub>3</sub> Al                                                             | 18                          | 32   |
|      | Nb <sub>3</sub> (Al,Ge)                                                        | 20                          | 43   |
|      | Nb <sub>3</sub> Ga                                                             | 20                          | 34   |
|      | Nb <sub>3</sub> Ge                                                             | 23                          | 37   |
|      | V <sub>2</sub> (Hf,Zr)                                                         | 10.1                        | 23   |
|      | NbCN                                                                           | 17.8                        | 12   |
| 鉄系   | MgB <sub>2</sub>                                                               | 39                          | 25   |
|      | SmFeAsO <sub>1-x</sub> F <sub>x</sub>                                          | 55                          | >100 |

でいるビスマス系酸化物線材と  $\text{MgB}_2$  線材の現状についてその概略を紹介したい。

## 2 ビスマス系超伝導線材

ビスマス系酸化物超伝導体で応用上重要なのは  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$  (Bi-2212) ならびに  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_z$  (Bi-2223) の二つであり、いずれも旧金属材料技術研究所(現物質・材料研究機構)で発見された。本稿ではこの二つについて述べる。 $T_c$ は酸素量でかなり変化するが、Bi-2212相が90K程度、Bi-2223相が110K程度である。したがって液体窒素温度(77K)などの高温応用では、主にBi-2223を使った研究が進められている。Fig.1にこれらの超伝導体の結晶構造を示す。一般的に高温酸化物超伝導体で超伝導を担っているのはCu-O層であり、Bi-2212はこのCu-O層が二層あり、Bi-2223では三層存在している。この2ないし3層のCu-O層の、上下方向(c軸方向)のつながりは、二層のBi-O層で隔てられており、これらの二層のBi-O層はブロッキング層とも呼ばれている。

このようなBi-Oのブロッキング層は、結晶構造だけではなくビスマス系酸化物の物理的特性にも異方性(二次元性)をもたらす<sup>4)</sup>。例えば、Cu-O面と垂直方向(c軸方向)の電気抵抗は、面内方向の電気抵抗よりも数桁も高い。このようなブロッキング層の存在は、超伝導特性にも大きな影響を与える。実用的な観点から一つだけ指摘をすると、c軸に平行に磁界をかけた場合、このブロッキング層の存在によって磁束格子がブロッキング層のところで途切れてしまって二次元的なふるまいをするようになり、このために抵抗ゼロの超伝導

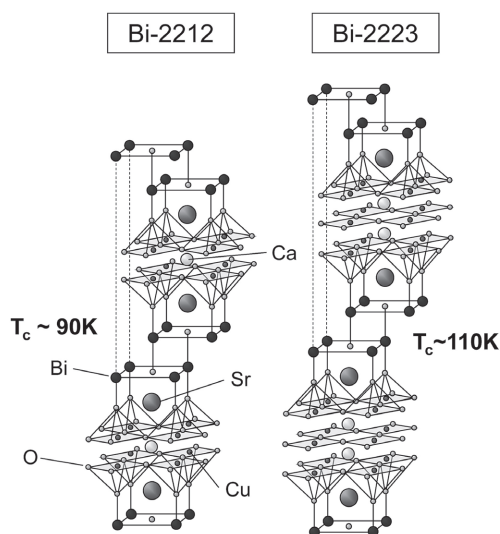


Fig.1 Crystal structure of Bi-based oxide superconductors, Bi-2212 and Bi-2223

電流を流すことのできる臨界磁界である不可逆磁界  $H_{irr}$  が影響を受ける。高温酸化物超伝導体の中でも特にビスマス系は、Cu-O 超伝導層間の距離が大きいために二次元性がかなり強く、このために高温で  $H_{irr}$  が低くなってしまうという実用上大きな問題がある。

ビスマス系酸化物も含めて、高温酸化物超伝導体の物理特性に大きな影響を与えるのがキャリア(ホール)のドーピングである。例えば、Bi-2212を高い酸素圧力の下でアニールを行うとBi-O二重層に酸素が取り込まれ、この酸素はマイナスイオンとなって電子を取り込むのでCu-O層にはホールがドーピングされることになる。超伝導特性はこのようなキャリアドーピングに大きく影響される。例えば試料をアニールするとその時の酸素分圧によって  $T_c$  は変化するが、酸素分圧が高くなると共に  $T_c$  が上昇して最高値をとり、さらに酸素分圧が上昇すると逆に  $T_c$  は低下する。このようなキャリアドープによる  $T_c$  の変化はビスマス系酸化物に限らず、銅系の高温酸化物超伝導体において共通に見られる現象である。

ビスマス系酸化物超伝導体の線材化法としては、Bi-2212、Bi-2223ともに、Fig.2に示したように原料粉末を金属管に充填して加工・熱処理を行う方法が最も一般的であり、通常パウダー・イン・チューブ(PIT)法と呼ばれる。この場合、ビスマス系酸化物の構成元素の氧化物や炭酸塩などの出発原料粉末を混合・仮焼して前駆体(プリカーサ)を作製し、このプリカーサを金属管に充填する、という手法がとられる。金属管としては構成元素と反応しにくい銀管が用いられている。酸化物超伝導体の場合は、熱処理中に酸素の出入りが起こるが、酸素は銀を透過することができるので、銀管はこの点でも好都合である。最近では、ある程度加工をした線材を束ねて再度銀管に挿入し、これをさらに加工することによって得ることのできる、より実用に適した多芯線材が主流である。Fig.3に一例としてBi-2212丸線材の断面構造を示した<sup>5)</sup>。

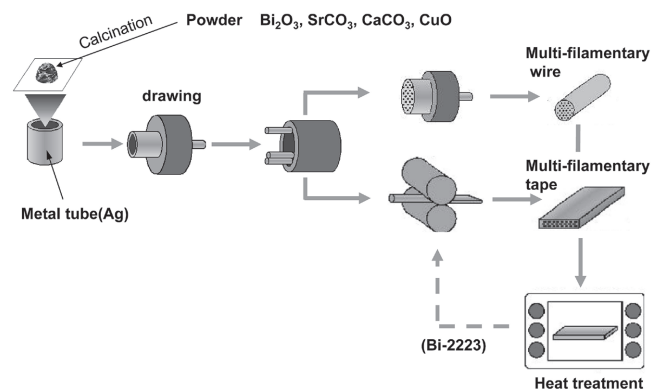


Fig.2 Fabrication method of Bi-based oxide superconducting tape and wire

一般的に高温酸化物超伝導体においては、結晶の方位がランダムな多結晶体では結晶粒同士の結合が弱いという、いわゆる弱結合の問題があり、これを避けるためには、結晶粒の方位を揃えてやること（配向化）が必要である。この配向化によって結晶粒間の結合性が大幅に改善され、大きな超伝導電流を流せるようになる。ビスマス系酸化物超伝導体は異方性（二次元性）が強く、板状に結晶成長するために、結晶粒の配向化が比較的容易である。しかしながら配向化の手法は Bi-2212 と Bi-2223 では異なっており、Bi-2212 線材においては、熱処理時に温度を Bi-2212 の融点の少し上まで上げ、その後ゆっくりと冷却をする、いわゆる部分熔融－徐冷熱処理が適用される<sup>6)</sup>。Fig.4 に Bi-2212 テープ線材のテープ長手方法の配向組織を示した<sup>7)</sup>。Bi-2212 結晶の c 軸がテープ面に垂直に配向しているのがわかる。

一方の Bi-2223 では部分熔融－徐冷熱処理が適用できず、圧延加工と熱処理を組み合わせることにより配向させている<sup>8)</sup>。Fig.2 に示すように通常は最初の熱処理の後、さらに圧延を行って二次熱処理を行っている。このようにして Bi-2212 テープと同様な c 軸配向組織が得られる。Bi-2223 線材では溶融法が適用できないために、Bi-2223 線材における超伝導体の充填率は Bi-2212 線材に比べてかなり低かったが、その

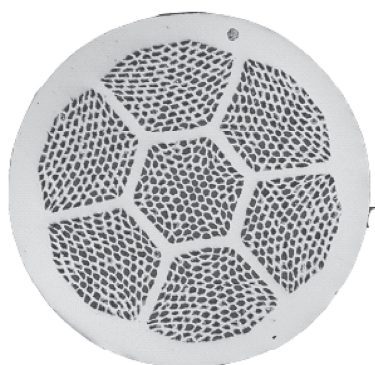


Fig.3 Transverse cross section of Bi-2212 round wire

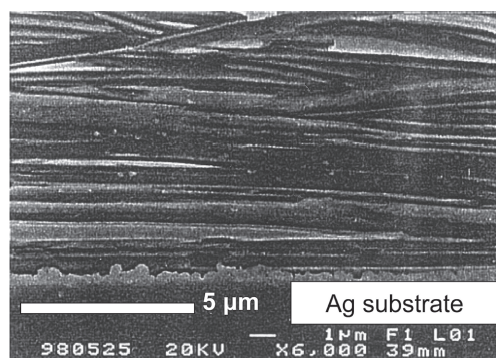


Fig.4 Grain oriented microstructure of Bi-2212 tape

後加圧熱処理法が開発されてほぼ 100%の充填率が得られるようになり、かなり優れた  $J_c$  特性を有する線材が得られるようになった<sup>9)</sup>。加圧熱処理法は Bi-2223 結晶の c 軸配向度を向上させる点においても有効であり、これも高  $J_c$  化に寄与していると考えられる。このようにして作製した Bi-2223 多芯テープ線材の例を Fig.5 に示した。

上述の製法で作製したビスマス系線材は、 $\sim 20\text{K}$  以下の低温ではその高い上部臨界磁界  $H_{c2}$ （あるいは不可逆磁界  $H_{irr}$ ）を反映して、30T 以上の極めて高い磁界まで  $J_c$  の低下がほとんどなく、金属系の線材を大幅に凌ぐ優れた特性を示す。したがってビスマス系線材の応用の一つは、低温で使用する高磁界マグネットである。実際、Bi-2212 コイルを既存の液体ヘリウム冷却型超伝導マグネットシステムの内層マグネットとして使用することにより、23.4T という超伝導マグネットとしては世界最高の磁界発生に成功している<sup>10)</sup>。

このようにビスマス系線材は低温では優れた高磁界特性を示すことから、これを使った高磁界 NMR（核磁気共鳴）装置への適用が期待される。NMR の分解能は磁界が高くなると共に向上するので、高磁界 NMR はタンパク質などの複雑な物質の構造解析に威力を発揮すると期待される。しかしながら NMR で要求される磁場の時間的安定性と空間的均一性を得ることが困難で、これまで実用化されていなかったが、最近の Bi-2223 線材の進展を受けて Bi-2223 線材を一部に用いた NMR システムの開発が進められている<sup>11)</sup>。

また最近では冷凍機の進歩が目覚しく、 $\sim 20\text{K}$  程度の温度は簡単に達成できるようになってきている。 $\sim 20\text{K}$  でマグネットを運転するメリットは、液体ヘリウム冷却に比べて冷却コストを抑制できるだけでなく、線材の比熱が桁違いに大きくなるので、マグネットの安定性が大きく向上することである。このようにして、液体ヘリウム不要の冷凍機冷却マグネットがビスマス系線材のもう一つの有望な応用である。

一方さらに温度が上がると、ビスマス系線材では磁界中の  $J_c$  が急激に低下するという難点がある。これはビスマス系酸化物が示す大きな異方性と関係しており、本質的な特性であると考えられる。しかしながら磁界が十分に低い場合は、液体窒素温度 (77K) でも相当大きな超伝導電流が流れるために、磁界の影響の少ない送電ケーブルなどへの応用が有望と



Fig.5 Transverse cross section of high pressure synthesized Bi-2223 tape<sup>9)</sup>

考えられ、すでにプロトタイプが試作されて送電試験が行われている。このような超伝導送電においては、通常の交流送電では送電におけるエネルギーロスが従来の送電の1/4、直流の送電ではエネルギーロスが1/10に低減させることができると試算されている<sup>12)</sup>。また、送電電力も従来の同一直径の銅ケーブルに比べて5倍から10倍の送電が可能になる。Fig.6には住友電工がBi-2223線材を用いて試作した三相交流用の送電ケーブルを示した。このケーブルは、米国、エネルギー省のオルバニー市における超伝導送電プロジェクトに使用され、実際の電力系統に組み入れて長時間の運転に成功している<sup>13)</sup>。

一方、船舶や列車、自動車といった交通機関に超伝導を適用すると、低損失によるエネルギー効率が高まるだけでなく、小型・軽量化によるエネルギー使用量の削減も期待できる。超伝導を用いた交通機関としては磁気浮上列車が有名であり、現在は従来の実用超伝導線材であるNb-Ti合金線材が用いられているが、このNb-Ti線材を用いたマグネットシステムをBi-2223線材によるマグネットで置き換えた実験も実施されている。Bi-2223線材を用いる利点は、運転温度を高く設定できること、またこれに伴って冷却システムが簡単になって軽量化、低コスト化が可能になること、などである。

### 3 MgB<sub>2</sub> 線材

MgB<sub>2</sub>超伝導体はFig.7に結晶構造を示すようにボロンとMgの層状構造を形成し、ハニカム構造をなすボロンが高い $T_c$ の発現に重要な役割を果たしていることがわかっている。MgB<sub>2</sub>は従来の金属系超伝導体と同様に機械的特性が良好で



Fig.6 Superconducting power cable fabricated using Bi-2223 tapes (Courtesy of Sumitomo Electric Industries, Ltd.)

あり、また他の金属系超伝導体と比べて $T_c$ が高いにも関わらず、高温酸化物超伝導体で問題となる結晶粒間の弱結合が存在しないと考えられ、この点で実用上有利である。また、原料の価格が低いことや比較的簡便な線材作製法が適用できるため、低コスト化が可能なこと、などもMgB<sub>2</sub>の利点である。MgB<sub>2</sub>の線材化法に関しては、最近では上のビスマス系線材のところで述べたPIT法が主流である。

金属管としてはステンレス、純鉄、炭素鋼、ニッケルなどが用いられる。加工性が良好でかつ熱伝導率の高い銅または銅合金管も用いられるが、CuはMgB<sub>2</sub>と反応するので熱処理温度を高くできないという難点がある。そこでCu管やCu-Ni管の内側をNb等の金属で内張をしてMgとCuの反応を防ぐ手法も試みられている。また、原料粉末の純度や粉末の粒径も重要であり、一般的には高純度の粉末が用いられるが、高純度粉末は高価であり、低純度の粉末を使って高い特性を得る研究も進められている。PIT法では、熱処理によってMgとBが反応してMgB<sub>2</sub>が生成する際に、密度の増大に伴う体積の収縮が起こるので、通常のPIT法による線材のMgB<sub>2</sub>コアの充填率は50%前後と、かなり低いのが普通である。

MgB<sub>2</sub>線材においては、混合粉末に様々な不純物を添加して超伝導特性を向上させる試みが色々となされている。Fig.8には、無添加ならびにSiC添加したMgB<sub>2</sub>テープの $H_{c2}$ の温度依存性を、Nb-TiならびにNb<sub>3</sub>Sn実用線材の値と共に示す<sup>14)</sup>。SiC添加した線材においては、4.2Kに外挿した $H_{c2}$ は～30Tに達し、この値は実用線材であるNb<sub>3</sub>Sn線材の $H_{c2}$ と同等あるいはそれ以上の値である。SiC添加によって $H_{c2}$ が上昇するのは、SiCのCの一部がB原子と置換し、これによって電子の平均自由工程が短くなってコヒーレンス長が短くなるためと考えられる。

またFig.8より20Kに外挿した $H_{c2}$  (20K)は～11Tであり、これは、現在最も広く使用されているNb-Ti実用線材の4.2K

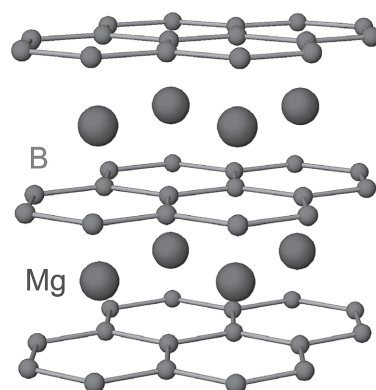


Fig.7 Crystal structure of MgB<sub>2</sub> superconductor

における  $H_{c2}$  に匹敵する値である<sup>15)</sup>。このことは、現在 4.2K で実用されている Nb-Ti 線材を  $MgB_2$  線材で置き換え、20K 近傍で運転できる可能性があることを示している。このように  $MgB_2$  線材では 20K の温度においてもかなり高い  $H_{c2}$  がえられることから、 $MgB_2$  線材の応用の一つとして、液体ヘリウム不要の、冷凍機で冷却する超伝導機器が考えられる。あるいは、沸点が 20K の液体水素を冷媒に使うという方法も提案されている<sup>16)</sup>。～20K でマグネットを運転するメリットは、ビスマス系線材のところですでに述べた。

SiC の添加は、臨界電流特性の改善にも有効である。Fig.9 に SiC 添加ならびにエチルトルエン添加した PIT 法線材の 4.2K における  $J_c$ - $H$  特性を示す<sup>17)</sup>。SiC 添加によって、特に高磁界側でかなり大幅な  $J_c$  の向上が得られている。SiC の添加により特に高磁界側の  $J_c$  が向上するのは、上述したよ

うに添加によってボロンサイトのカーボン置換が起こり、これによって上部臨界磁界  $H_{c2}$  が向上するためと考えられる。同様な効果は  $B_4C$  や芳香族炭化水素などの種々の炭化物、カーボンナノチューブやフラーレンなどの炭素の添加によっても得られている。ただし SiC 添加では、透過電顕等により  $Mg_2Si$  などの微細な析出物が観察されることから、これらの析出物が磁束線の有効なピン止め点となっている可能性もある。エチルトルエン添加では、ボロンサイトのカーボン置換量は SiC 添加の場合と比べてはるかに少ないが、これは  $J_c$ - $H$  曲線の傾きが SiC 添加の場合と比べて大きく、 $H_{c2}$  が SiC 添加ほどには向上していない点にも表れている。同様の効果は他の炭化水素でも認められるが、この詳しいメカニズムはまだわかっていない。この様に SiC 添加とエチルトルエン添加では  $J_c$  向上のメカニズムが異なると考えられ、これらを両方添加すると両者のメカニズムが働いて更に  $J_c$  が向上することが期待される。Fig.9 に示したように実際に同時添加を行うと、これらの添加の相乗効果が観測された。

Fig.10 には、代表的な PIT 法  $MgB_2$  線材の、4.2K ならびに 20K における  $J_c$ - $H$  特性を、 $Nb_3Sn$  実用線材、ならびに Pulsed Laser Deposition (PLD) 法による  $MgB_2$  薄膜の特性<sup>18)</sup>と比較して示す。20K においては、2T の磁界中で実用レベルの目安とされる  $100kA/cm^2$  を越える値が得られており、比較的低い磁界での応用は現状の  $J_c$  レベルでも可能であると考えられるが、Fig.10 に示すように  $J_c$  は磁界と共に急激に低下してしまう。ここで示した  $J_c$  値は、これまでに報告された  $MgB_2$  線材の  $J_c$  値の中でも最も高い値の一つであるが、高磁界領域では  $J_c$  はまだ実用レベルに届かず、今後の更なる特性改善が必要不可欠である。

一方 4.2K においては 10T の  $J_c$  は  $30kA/cm^2$  程度で、実用  $Nb_3Sn$  線材の特性にははるかに及ばないのが現状である。PLD 法による  $MgB_2$  薄膜においては、4.2K、10T で  $10^5 A/cm^2$

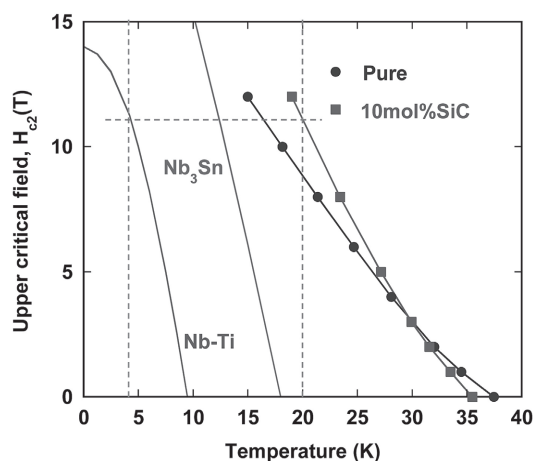


Fig.8 Comparison of  $H_{c2}$  between  $MgB_2$  and commercial superconductors, Nb-Ti and  $Nb_3Sn$

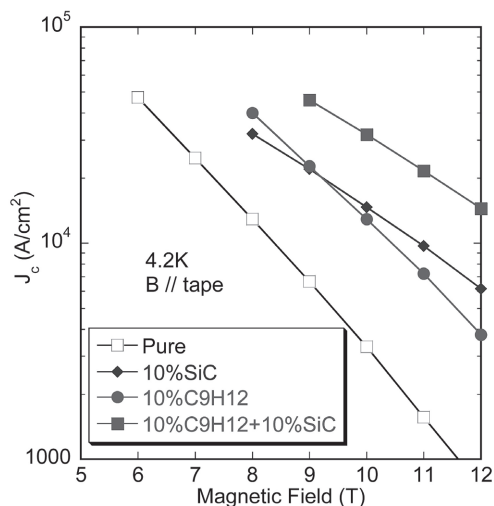


Fig.9 Effect of SiC and  $C_9H_{12}$  additions on  $J_c$  values of PIT  $MgB_2$  tape

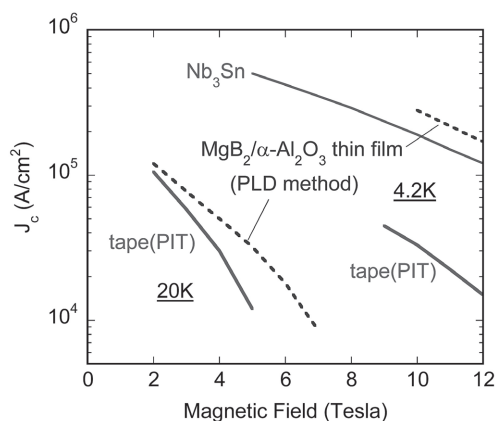


Fig.10 Comparison of  $J_c$  between  $MgB_2$  tape, thin film and  $Nb_3Sn$

cm<sup>2</sup>以上とかなり高い $J_c$ が得られているが、これはPLD法薄膜においては、はるかに高いMgB<sub>2</sub>の充填率が得られるためと考えられる。したがって、PIT法テープにおいてもMgB<sub>2</sub>コアの充填率を上げることによって高い $J_c$ が期待できる。実際、ホットプレス<sup>19)</sup>やMg拡散法<sup>20)</sup>の適用で大幅な $J_c$ の向上が報告されている。

以上、MgB<sub>2</sub>線材の開発状況を述べたが、このようなMgB<sub>2</sub>線材開発の進展を受けて、最近では1kmを越える長尺線材やコイル等の試作も行われるようになってきている。筆者らが試作した小型のソレノイドコイルにおいては、20Kの温度、1テスラのバイアス磁界において1.3Tの磁界発生が得られており<sup>21)</sup>、MgB<sub>2</sub>線材は冷凍機冷却や液体水素冷却による超伝導マグネットに有望と考えられる。さらにMgB<sub>2</sub>コイルの永久電流モードの運転にも成功しており<sup>22)</sup>、4.2Kの温度ではあるが、1.5Tの磁界を減衰なく12時間にわたって保持することに成功している。一方海外においては、米国のHyper Tech社<sup>23)</sup>とイタリアのColumbus Superconductors社<sup>24)</sup>が、活発に長尺線材ならびにコイルの開発を進めている。最近Columbus Superconductors社では、ASG Superconductors社(伊)と協力してMgB<sub>2</sub>線材を用いてオープンタイプの冷凍機冷却MRIシステムを完成させ、人体の断面イメージを得ることに成功している<sup>25)</sup>。発生磁界は0.5～0.6Tと低いことから現段階では実用的な価値は低いと考えられるが、MgB<sub>2</sub>線材が応用上有望であることを明確に示す成果で今後の進展が期待される。

## 4 今後の課題と展望

ビスマス系線材、MgB<sub>2</sub>線材ともに年々 $J_c$ 特性が向上してきているもののまだ実用レベルに達しておらず、 $J_c$ の更なる向上が必要不可欠である。ビスマス系線材では、結晶粒の配向化の改善や不純物の低減がカギとなろう。また、一般に高温酸化物線材は応力や歪みによる $J_c$ の劣化が大きく、線材の補強も必要である。また一般に酸化物線材は作製プロセスが複雑でコストが高くなりがちであり、コストの低減が非常に重要である。このためには、線材製造行程の合理化など、検討すべき項目は多いと考えられる。ただし上述したようにオルバニー市での送電試験にも成功しており、磁場発生の低い送電では、実用化もそう遠くないものと思われる。

MgB<sub>2</sub>線材においては上述したMgB<sub>2</sub>コア充填率の改善がまずは重要である。充填率の向上だけで $J_c$ が大幅に改善する可能性がある。また、粒界等に析出している可能性のあるMgOなどの不純物の低減も重要である。MgB<sub>2</sub>においては結晶粒界が有効なピンニングセンターの一つであるが、さらにナノ粒子などをピンニングセンターとして導入することも

MgB<sub>2</sub>には有効であると考えられる。

いずれの線材にしても、様々なレベルにおける材料組織の制御が実用化のカギを握ると考えられ、材料科学に立脚した研究の積み重ねが、これからも強く望まれる。

## 参考文献

- 1) 太刀川恭治, 熊倉浩明: MgB<sub>2</sub>線材と先端金属系超伝導線材の現状と展望, 応用物理, 72 (2003), 13-20.
- 2) 熊倉浩明, 竹内孝夫: 金属系超伝導線材技術, 応用物理, 76 (2007), 44-49.
- 3) 細野秀雄: 新系統(鉄イオンを含む層状化合物)の高温超伝導物質の発見, 応用物理, 78 (2009), 31-36.
- 4) K.Kishio, J.Shimoyama, T.Kimura, Y.Kotaka, K.Kitazawa, K.Yamafuji, Q.Li and M.Suenaga: Physica C Superconductivity, 235-240 (1994), 2775-2776.
- 5) A.Matsumoto, H.Kitaguchi, H.Kumakura, J.Nishioka and T.Hasegawa: Improvement of the microstructure and critical current densities of Bi-2212 round wires with a precisely controlled heat treatment, Supercond.Sci. Technol, 17 (2004), 989-992.
- 6) H.Kumakura, Bismuth-based High-Temperature Superconductors, ed. By H.Maeda and K.Togano: Marcel Dekker, Inc., New York (1996), 451.
- 7) H.Miao, H.Kitaguchi, H.Kumakura, K.Togano, T.Hasegawa and T.Koizumi: Physica C Superconductivity, 303 (1998), 81-90.
- 8) Y.Yamada, Bismuth-based High-Temperature Superconductors, ed. By H.Maeda and K.Togano: Marcel Dekker, Inc., New York (1996), 289.
- 9) M.Kikuchi, N.Ayai, J.Fujikami, S.Kobayashi, K.Yamazaki, S.Yamade, T.Ishida, T.Kato, K.Hayashi, K.Sato, R.Hata, J.Iihara, K.Yamaguchi, H.Kumakura, H.Kitaguchi, K.Osamura and J.Shimoyama: Advances in Cryogenic Engineering Materials, 54 (2008), 407-415.
- 10) H.Kumakura: Supercond.Sci.Technol., 13 (2000), 34-42.
- 11) 濱田衛, 長谷隆司, 財津享司, 尾崎修, 寺尾泰昭, 木吉司, 崔世鎔, 高橋雅人, 山崎俊夫, 前田秀明, 細野政美, 大塚昭弘, 吉川正敏: 第79回低温工学・超電導学会講演概要集, (2008), 128.
- 12) 佐藤謙一, 低温工学: 42 (2007), 338-345.
- 13) T.Masuda, H.Yumura, M.Watanabe, H.Takigawa, Y.Ashibe, C.Suzawa, H.Ito, M.Hirose, K.Sato, S.Isojima, C.Weber, R.Lee and J.Moscovic: IEEE Trans.Appl. Superconductivity, 17 (2007), 1648-1651.
- 14) 松本明善, 熊倉浩明: 日本金属学会誌, 71 (2007),

- 928-933.
- 15) H.Kumakura, H.Kitaguchi, A.Matsumoto, and H.Yamada : Supercond.Sci.Technol., 18 (2005) , 1042-1046.
  - 16) M.Grant : Industrial Physicist, 7 (2001) 5, 22-23.
  - 17) H.Yamada, N.Uchiyama, A.Matsumoto, H.Kitaguchi and H.Kumakura : Supercond.Sci.Technol., 20 (2007) , L30-L33.
  - 18) A.Matsumoto, Y.Kobayashi, K.Takahashi, H.Kumakura, and H.Kitaguchi : Appl.Phys.Express, 1 (2008) , 021702.
  - 19) 山田秀之, 五十嵐基仁, 熊倉浩明, 北口仁, 松本明善, 太刀川恭治, 山田豊, 根本豊 : 第80回低温工学・超電導学会講演概要集, (2009) , 183.
  - 20) K.Togano, JM Hur, A.Matsumoto and H.Kumakura : Supercond.Science and Technol., 22 (2009) , 015003.
  - 21) K.Tanaka, H.Kitaguchi, H.Kumakura, H.Yamada, M.Hirakawa and M.Okada : Supercond.Sc.Technol., 18 (2005) , 678-681.
  - 22) M.Takahashi, K.Tanaka, M.Okada, H.Kitaguchi and H.Kumakura : Supercond.Sc.Technol., 18 (2005) , S373-S375.
  - 23) M.Tomsic, M.Rindfleisch, J.Yue, K.McFadden, D.Doll, J.Phillips, M.D.Sumption, M.Bhatia, S.Bohnenstiehl and E.W.Collings : Physica C Superconductivity, 456 (2007) , 203-208.
  - 24) V.Braccini, D.Nardelli, R.Penco and G.Grasso : Physica C Superconductivity, 456 (2007) , 209-217.
  - 25) Columbus Superconductors 社 Web サイト  
<http://www.columbussuperconductors.com/>

(2009 年 12 月 2 日受付)