

新製品 DI-BSCCO® の開発

菊地昌志*・綾井直樹・石田友信
 豊谷和晃・林和彦・小林慎一
 山崎浩平・山出哲・高畦秀雄
 藤上純・佐藤謙一

Development of New DI-BSCCO HTS Wire Products — by Masashi Kikuchi, Naoki Ayai, Tomonobu Ishida, Kazuaki Tatamidani, Kazuhiko Hayashi, Shinichi Kobayashi, Kouhei Yamazaki, Satoru Yamade, Hideo Takaaze, Jun Fijikami and Kenichi Sato — Performances of Bi2223 high-temperature superconducting wires developed by Sumitomo Electric have been dramatically innovated since the introduction of the CT-OP (controlled over-pressure) sintering process in 2004. The critical current (I_c) of a short-length Bi2223 tape with a cross section of 1 mm² has reached 218 A. This I_c value is sufficient for use in various equipment that use superconductivity technologies such as high-field magnets, motors and cables. In commercial long tape with kilo-meter over length, the highest end-to-end I_c has exceeded 180A. These wires are named “DI-BSCCO” (dramatically innovative BSCCO) wires and are now manufactured commercially. The standard bare tape with high I_c is named Type H. Sumitomo Electric also produces the Type S that is lower in price and suitable for use in equipment for low current operation. Sumitomo Electric has also developed new types of DI-BSCCO wire, Type HT and Type ST. Each of Type HT and Type ST has a stainless steel tape or a brass tape soldered to it in order to provide strength, and its critical tensile stress and critical bending diameter have been improved by 80% and 30% at room temperature, respectively, from its predecessor type, while its J_e is the same as that of Type H. Another indispensable characteristic that cannot be ignored when using superconductors in the alternating current (AC) application is lower AC loss. Sumitomo Electric has commercialized Type AC that has twisted filaments of an optimized size. As a solution to this, Sumitomo Electric is working to introduce a matrix that has much higher resistance and more optimized filament twist pitch.

1. 緒言

銅酸化物超電導体は、臨界温度 (T_c) が常圧下での液体窒素の沸点 (77.3 K) を上回る物質が多いため、極低温での運転を余儀なくされる NbTi をはじめとする金属系超電導体に比べてその冷却コストが飛躍的に安いという大きなメリットがあり、1987年世界初となる T_c が液体窒素を超える銅酸化物超電導体 (Y-Ba-Cu-O) 発見以来、現在に至るまでその実用化へ向けた研究が盛んに行われてきた。当社は2004年に加圧焼結炉 (Controlled Over Pressure (CT-OP™) sintering furnace) を導入した結果、 I_c や機械特性をはじめ様々な性能を革新的に向上させることに成功し⁽¹⁾、さらに粉末工程、加工工程、焼結工程の全てに亘る製造条件の最適化を進めたことにより、2007年には現在でも世界最高値である $I_c = 218$ A を記録した⁽²⁾。長尺線材では、単長2 km に及び性能の均一な線材を製造できる量産技術確立している。当社はこの革新的な Bi2223 線材を DI-BSCCO® wire の商標獲得のもと線材を販売している。

しかしながら、超電導応用機器の仕様によっては、 I_c が高いことのみを特徴とする線材ではその仕様を満足できないケースに多々遭遇する。その1つに機械的に強いことが

要求される。多芯構造にしたことやシース材を合金にしたこと、さらには加圧焼結によって空隙やクラックが排除されフィラメント強度が向上したことは、この要求に対する当社の成果の1つといえよう⁽¹⁾ が、当社はさらに飛躍的に機械強度が向上する線材を開発している。後述する Type HT、Type STはこの目的で開発した結果、新製品 DC-BSCCO® としてリリースしている。一方、交流通電で使用する電力ケーブル⁽³⁾、モータ⁽⁴⁾、変圧器⁽⁵⁾等に使用する場合は、超電導特有の交流損失が発生するため、極力損失の少ない線材が要求される。当社は、Type AC を品目に挙げ交流損失の低い線材の開発を行ってきた。

また、強い機械強度や低い交流損失といった観点とは若干異なるが、超電導線材は一般の銅線と比べて非常に高価であることも事実であり、より安価な線材を提供することも大変重要である。幸いなことに、前述のように I_c が革新的に向上したため、超電導機器運転時の負荷率が相当分減少することと同義になった。Type H の仕様は別段高い通電電流を必要としない応用機器に対してはオーバースペックともいえよう。当社が着目したのはまさしくこの点であり、

断面積がType Hの約半分の線材を製造することで原料にかかるコストを半減した。これが功を奏し、狙い通り低運転電流機器向けに低価格な線材を提供できることとなり、現在ではType Sとして品目に挙げている。“S”とは“Slim”の略称であり、断面積がType Hの約2分の1であることを意味する。

表1に各々の特徴を性能別に比較した。

表1 各種DI-BSCCO®の特徴

線材タイプ	Ic	許容引張り応力	許容曲げ径	交流損失	価格
Type H	◎	○	△	△	○
Type S	○	△	○	○	◎
Type HT	◎	◎	◎	△	○
Type ST	○	○	◎	○	◎
Type AC	△	△	○	◎	○

2. BSCCO®の製造方法

図1に製造工程図を示す。最終工程である熱処理に至るまでは、原料粉末が充填された銀パイプを伸線し、多芯化してから再度伸線を行い、圧延と焼成を繰り返す簡素な工程により製造できる。一般に、Powder In Tube法（PIT法）と呼ばれているこれらの工程は、製造条件を制御しやすいため長尺かつ性能の均一な線材を製造するのに適している。最終工程である2回目の焼結は、約300気圧の外力を線材に印加しつつ温度、酸素分圧を精密に制御した状態で熱処理する加圧焼結法を採用し、劇的な性能向上があったことは先述の通りである。一方、RE123系超電導薄膜線材（REは希土類）はレーザー蒸着（PLD）法⁽⁶⁾、⁽⁷⁾や有機金属蒸着（MOD）法⁽⁸⁾、⁽⁹⁾等の方法を採用しているが、成膜条件の安定性等の問題があるため長尺に亘って均一な性能を得ることが容易にはいかない。Bi2223線材がPIT法に適しているのは、Bi系超電導体の構造そのものに起因する。結晶構造は、超電導電流を担うCu-O面と上下にある絶縁

層（ブロック層）がc軸方向に積層する形態をとる。ブロック層にはBi-O層が互いに隣接した2重層があり、その結合エネルギーが比較的小さいので劈開性に富む。言い換えれば延性に乏しいはずのセラミックスは、材料由来の劈開性のおかげで伸線時には銀ないし銀合金の伸びに追従し、圧延時には自ずとc軸方向に配向しやすい。これによりPIT法を適用できたわけである。

さて、新製品DI-BSCCO®線材の製法について簡単に述べる。

2-1 Type H、Type S製造工程 ともに図1に示した製造工程により製造できる。

2-2 Type HT、Type ST製造工程 Type H、Type Sに対して、補強テープを接合させる工程を付加する。補強テープを選択する場合は、接続抵抗、必要曲げ径、必要引張り強さ等ニーズによって様々であるが、主たる材料としてステンステープ、銅合金テープを使用している。超電導線材と金属補強テープを半田溶解層の中で集合させダイスを通すことにより、両者は半田によって一体化される。例として厚さ20μmのステンステープをType Hに接合させたType HTの断面を写真1に示す。

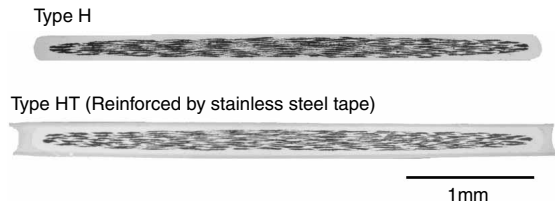


写真1 Type HTの断面像、ステンレス線材は半田により接合される

2-3 Type AC製造工程 Type ACは図1に示した工程における、多芯伸線後の丸線に捻りを加えるツイストと呼ばれる加工を施している。捻りが入った丸線は、圧延以降は同じプロセスを経る。これにより最終線材における結合損失を抑制する効果がある。

3. 各線材の諸特性

3-1 機械特性 当社が提供している各種線材の仕様を表2に表す。以下に個別の線材特性について記載した。

(1) 引張り強度

Bi2223超電導線材は、複数の超電導フィラメントのまわりが銀または銀合金で覆われた構造のテープ線材である。つまり、延性のある金属と延性に乏しいセラミックの複合材料といえる。したがって、Bi2223超電導線材に曲げや引張りといった外力が印加された場合、超電導電流を担うフィラメントが塑性変形を経て破断する、言い換えればある外力以上で粒接合が弱化しIcが低下する品質劣化が起こるのである。当社は、高い機械的強度を持たせるため、DI-

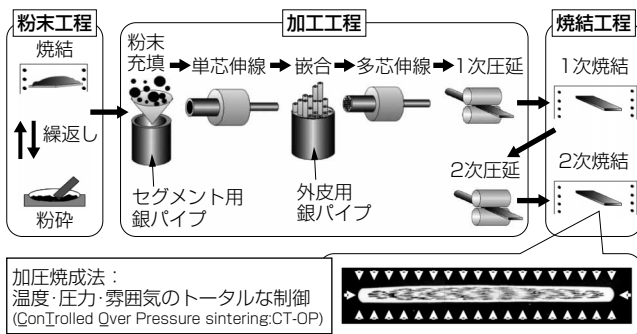


図1 DI-BSCCO®の製造プロセス (PIT法)

表2 新製品DI-BSCCO®の機械特性

DI-BSCCO®	Type H	Type HT	Type S	Type ST	
I_c (A)	~ 180	~ 180	~ 80	~ 80	
幅 (mm)	4.2 ± 0.2	4.4 ± 0.2	2.6 ± 0.2	2.8 ± 0.2	
厚み (mm)	0.22 ± 0.02	0.28 ± 0.03	0.18 ± 0.02	0.24 ± 0.03	
引張強度 (Mpa)	77K	150	270	140	370
引張り歪み (%)	77K	0.2	0.4	0.3	0.4
許容曲げ径 (mm)	70	50	60	30	

BSCCO® Type H、Type Sの外周にステンステープ、黄銅テープ等の金属箔を接合させた複合線材を新たに開発した。DI-BSCCO®は高磁場中10 T以上においても、特に低温において優れた I_c 特性を有することから⁽¹⁰⁾、NMR（核磁気共鳴装置）等の強磁場を必要とする装置に適用できる可能性が高い。しかしながら、そのような高い磁場と通電電流によってローレンツ力が作用するため、線材自身には相当な引張り応力（フープストレス）が印加されることになる。現在（独）物質・材料研究機構で開発されている1 GHz級NMRでは、180 MPaのフープストレスが線材に印加される設計になっており、このような大きな応力が印加された状態でも外力ゼロにおける初期 I_c を維持するため、線材には高い強度が求められるのである。超電導線材の強度を示す指標として、外力のない状態での I_c を95%以上維持する臨界強度が一般に使用されており、当社は室温あるいは液体窒素中において線材にある張力を与えた後開放して四端子法で I_c を測定するというサイクルを I_c が低下するまで繰り返す試験を実施した。Bi2223線材を開発した当初は、外皮とマトリックスに純銀を使用していたことと、超電導フィラメント中に隙間が多かったことから、液体窒素中における許容最大応力は100 MPaにも満たなかったが、外皮の合金化および加圧焼結によるフィラメントの緻密化によるヤング率の向上によって、150 MPa以上の引張り強度を持たせることができた⁽¹⁾。さらに、金属補強テープを半田を用いて超電導線材に接合させることによって許容最大応力は著しく改善した。図2に示したのは、各種線材 I_c の室温における引張り応力依存性である。横軸は引張り荷重を線材断面積で除した応力、縦軸は各応力印加後応力を開放してから測定した I_c を応力を印加する前の I_c （ $\equiv I_{c0}$ ）で除した値 I_c/I_{c0} で示した。図中のType HT、Type STは、Type H、Type Sに厚み20 μ mのステンステープを半田接合したものである。許容最大応力はステンステープ補強をすることにより従来線材の2倍以上に向上したことも実証できた。図3には液体窒素中（77.3K）における引張り応力依存性を示したが、同様の特性向上が認められた。当社の他にBi2223線材を開発してきた企業として、American Superconductor Corporation社が知られている。同社製のHTS High Strength Plus WireはステンステープをBi2223線材上下に半田接合した当社と同様の構造をとるが、室温

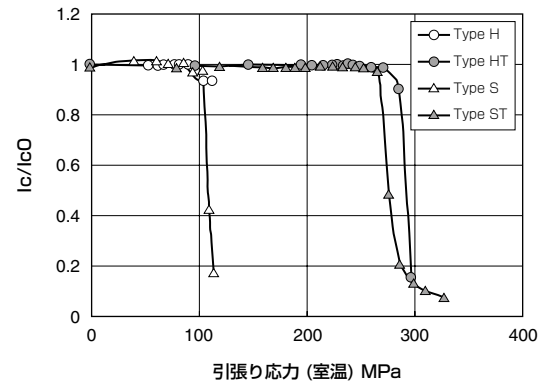


図2 各種DI-BSCCO®の室温における I_c の引張り引張り応力依存性
ステンステープを半田接合させたことにより引張り強度は裸線の2倍以上に向上した

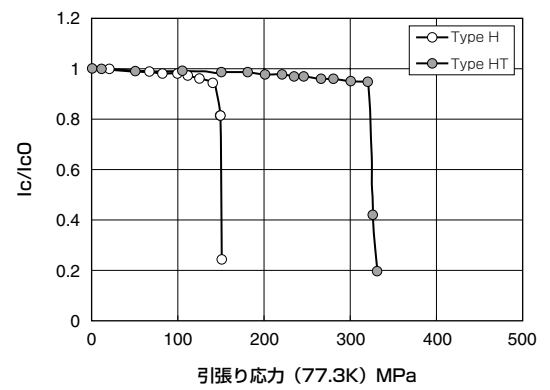


図3 各種DI-BSCCO®の液体窒素中における I_c の引張り応力依存性
室温同様、補強導体の引張り強度は2倍以上に向上した

における許容最大応力は200 MPaをそのカタログ値としており、当社製Type Hの性能が優れている。同社はRABiTS法で作製されたNi配向基板を用いてYBCO薄膜も製造しているが、室温における許容引張り応力のカタログ値は250 MPaと当社がやはり優っており、Type HTの機械的特性の信頼性の高さを示したといえる。

(2) 曲げ特性

線材を曲げるときには、中立線の内外に引張り応力、圧縮応力が印加される。したがって、曲げ径を小さくすればそれに対応して上記引張りおよび圧縮応力は高くなりフィラメントの破断にいたるため、 I_c は低下する。しかしながら、コンパクトな超電導機器には小径の超電導コイルが必要不可欠であり、そのようなニーズに応えるには小さな径に曲げても I_c が劣化しないことが最低条件となる。当社が開発した3層積層導体は、先述したように引張り強度が劇的に改善したのみならず、曲げ特性も大きく改善した。曲げ特性の評価は、線材をある直径に曲げ、直状に戻した後再度同じ直径で逆側に曲げてから I_c を測定するサイクル（両曲げ）を、 I_c が低下するまで繰り返す方法とした。

なお許容曲げ径は、曲げる前の初期 I_c に対して95%にまで低下したときの径と定義した。図4に各種線材 I_c の曲げ直径依存性を示す。許容曲げ径はType Hが58mmであるのに対して、同線材に厚み20 μ mのステンステープ2枚を線材上下接合させた3層積層導体であるType HTは30mmへとほぼ半分に改善されたことがわかった。また、片側のみに曲げた場合の許容曲げも29mmと両曲げの場合とほぼ変わらず、非常にフレキシブルであることも明らかになった。同様の傾向はType Sにも見られており、Type Sの38mmに対してType STは25mmへ改善されている。この特性改善により、ソレノイドコイルや非常にコンパクトなレーストラックコイルにも十分適用できると考えられる。

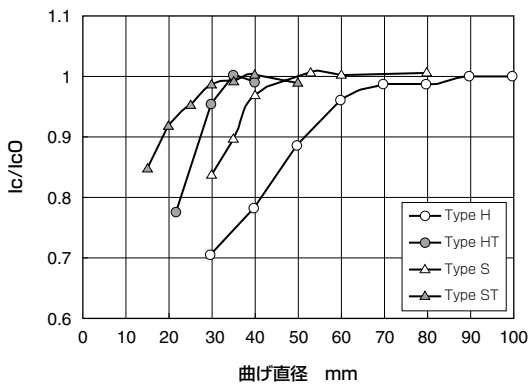


図4 各種DI-BSCCO® I_c の曲げ直径依存性
直径30mmに曲げても I_c が劣化しない線材がステンステープ補強により可能になった

(3) フープストレス試験⁽¹¹⁾

(1) にも述べたように、DI-BSCCO®は強磁場中の I_c 特性が優れている。しかしながら、強磁場マグネットの巻き線には電磁力によって大きな引張り応力、いわゆるフープストレスが加わるため、通常のDI-BSCCO®では I_c よりもむしろ許容引張り応力が設計上の制限となっている。DI-BSCCO® Type HTとしてリリースしている3層導体では、200A級の I_c を維持しつつ許容引張り応力が2倍以上に改善されており、本件のような強磁場マグネット用線材として有望であると考えている。

そこで、Type HTを直径 Φ 280mmに1ターンコイルに巻いた状態で(独)物質・材料研究機構(NIMS)が保有する大型マグネットの内層に挿入し、液体ヘリウム中14 Tの強磁場がコイルに印加された状態でコイルに通電して実際にフープストレスを経験させる試験を、NIMSでマグネット開発を担当している木吉氏らと共同で実施した。試験中はテープ表面に貼り付けた歪みゲージによりテープ長手方向の歪みを計測した。これにより複合線材が弾性限度内にあるか、限度を越えた塑性領域にあるか、歪みが残留する

かを判断できる。 I_c が劣化していないかを判断するため、フープストレス印加前後の線材を対象に、液体窒素中にて4端子法で電流-電圧特性を測定した。

図5に、 I_c 維持率(I_c/I_{c0})および歪みの応力依存性を示した。図中の応力はフープストレスを指し、磁束密度B、電流密度J、コイル半径Rの積算BJRで求められる。結果、330MPaまでのフープストレスに相当する電流を通電しても I_c の劣化は認められなかった。この結果により、Type HT線材がNMR内挿マグネット用コイルに十分適用できる性能を有することを実証できた。また、図中に示す通り残留歪みが認められているが、これは補強ステンステープの状態が塑性領域であることを表す。つまり、ステンステープに替わるより高強度な補強テープを使用することで、まだ残留歪み、許容最大フープストレスには多に改善の余地があると考えられる。

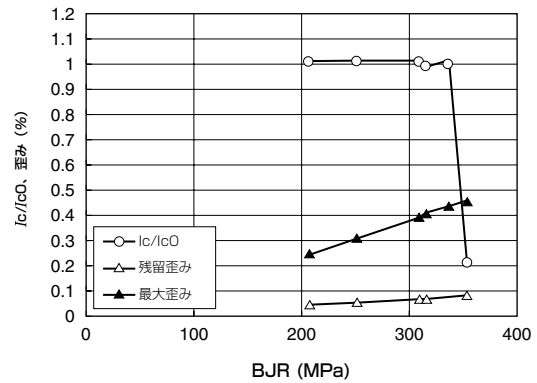


図5 フープストレスを印加した線材 I_c の応力依存性
NMR内挿用コイルに必要な耐力を十分に凌駕する性能がステンステープ補強導体で得られた

3-2 交流損失 超電導は電気抵抗がゼロになり直流では原理的に電力損失は生じないが、交流の場合超電導体内でヒステリシス損失が生じる。ヒステリシス損失低減のためには超電導フィラメントを細径化して磁気ヒステリシスのループを小さくすれば良い。実用超電導線では超電導体を細かいフィラメントにして金属に埋め込んだ多芯構造にする。Bi2223線材は曲げられるように多芯化したしたが、交流で使用するときにもこの多芯構造が役に立つ。ただし、フィラメントの細分化のみをすれば良いのではない。交流で使用する場合、最外層付近のフィラメント間には変動磁場を遮蔽するように誘導電流がマトリックスを介して流れる(結合電流と呼ばれている)。結合電流が速やかに減衰しない場合、複数のフィラメント同士は電氣的に結合した振る舞いをするため、いくらフィラメントを細径化してもあたかも太いフィラメントになることと等価であることから、ヒステリシス損失の増大に繋がる。したがって結合電流の減衰時定数(結合時定数と呼ばれる)を小さくする必

要がある。また、結合電流はマトリックス中でジュール損を発生させるため、これも低減する必要がある（これを結合損失という）。結合損失は、使用する周波数によっては実用上問題になるほどの大きな値になり得る。これらの低減を可能にする手段の1つが、フィラメントのツイスト加工である。結合損失はツイストピッチの2乗に比例することが良く知られており、半減することで原理的には4分の1にまで損失を低減できる効果があるからである⁽¹²⁾。

当社は加工工程を中心とする全工程の最適化を行うことによって、フィラメントサイズの細径化、短ツイストピッチ化に成功した。短ピッチツイスト線材を作製するためには、捻りを加えることによる金属の加工硬化、その影響による断線、フィラメント破断等様々な問題があったが、加工方法を中心とする製造工程を最適化したことにより、3mmピッチの低交流損失型スリム線材を作製することに成功した。交流損失を評価する際には、 I_c の異なる線材間でも交流損失を平等に比較できるように I_c で規格化した単位長さあたりの損失を用いる。 I_c が異なれば、銀比が同じ場合は臨界電流密度 (J_c) も異なる。 J_c が高くなるとそれに見合った結合電流が金属の部分に流れようとしても発生する抵抗が大きくなるので、相対的に結合電流は流れにくくなり結合損失が減少する、つまり I_c の異なる試料は線材構造が同じでも交流損失が異なってくるからである。当社が開発した3mmのツイストピッチスリム線材において、商用周波数50 Hzにて0.2 Tという大振幅の交流磁場をテープ面に対して垂直に印加した状態で測定した規格化磁化損失は、Type H線材に対して2分の1以下にあたる11.9 W/kA/mにまで低減した。さらに、同周波数にて振幅0.07 Tの交流磁場をテープ面に対して平行に印加して測定した規格化磁化損失は、Type H線材に対して3分の1以下にあたる0.16 W/kA/mにまで低減した。図6、図7にそれぞれ平行磁場0.07 T、垂直磁場0.1 Tにおける規格化磁化損失の周波数依存性を示した。垂直磁場にて短ピッチツイストの効果が顕著に認められているように見えるが、高周波側では低周波数側ほどその低減幅は小さい。これは、ツイストの効果が低周波側にしか見えておらず、高周波数側の低減はスリム化により幅が2分の1になった効果が主に見えていると判断するのが妥当であろう。したがって、高周波数側でも結合が切れないような対策が今後必要となる。しかしながら、交流用モータの場合は比較的20 Hz周辺の低周波数側での使用が多くなることが予想されるため、この結果は超電導交流モータへの応用に向けた非常に大きな成果であるといえる。表3にケーブル、モータの使用周波数帯における素線の交流損失結果を示した。また、Type ACにもステンレステーブ等を半田接合した補強導体も、より使いやすい高強度低損失スリム線材の開発を進めている。先に述べたように、機械特性は先に述べたのと同様飛躍的に向上し、特にコンパクトなシステムに使用する超電導線材に適用することは非常にメリットが大きいものとして期待されている。

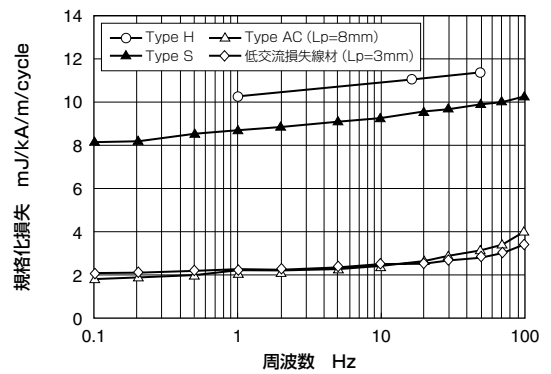


図6 平行磁場0.07 Tにおける交流損失周波数特性(L_p はツイストピッチ)

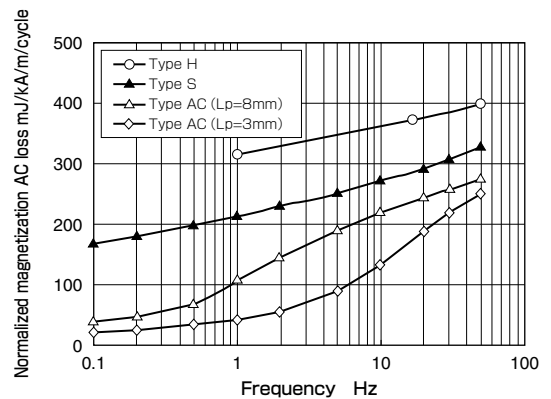


図7 垂直磁場0.1 Tにおける交流損失周波数特性

表3 各種線材の交流損失 (垂直最大磁場で交流損失が大きく低減)

線材タイプ	幅	厚	L_p	I_c	AC loss [W/kA/m]	
	[mm]	[mm]			B ⊥ @0.2T, 50Hz, 77K	B // @0.07T, 50Hz, 77K
低交流損失開発線材	2.0	0.17	2.8	32	21	0.16
Type AC	2.4	0.18	7.6	53	17	0.17
Type H	4.0	0.23	—	180	20	0.57

4. 今後の開発の方向性

これまで述べた諸特性は、まだ改善の余地が大いにある。には、以下に述べる内容によって超電導応用製品へより幅広い範囲で適用できると考えられる。

4-1 Type HT, Type ST

①補強テープ

超電導応用製品には、線材の接続が必要になる場合が多くある。ダブルパンケーキコイルはその代表的な例である。したがって、接続部の抵抗が大きいとその部分で発生するジュール熱も比例して大きくなり発熱等の悪影響

が考えられ設計上の重要な問題である。したがって補強テープに求められる特性は、機械強度が高いことと抵抗率が低いことの両立であるが、現在主に使用している補強テープにはまだこれらの特性に改善の余地が多いにある。ステンレステープと黄銅テープを比較すると、縦弾性係数は前者が1.5倍程度強いが、抵抗率は後者が10倍程度低く、共に得手不得手がある。これは、まだ補強テープに改善の余地は多いにあることを示しており、今後さらに超電導応用製品へのより幅広い適用が期待できる。

②許容曲げ径

現在、世界で最も「曲げられる」超電導線材は、Superpower社製の薄膜線材であろう。先述の通り、11mmまで曲げても使用できる線材とのことだが、同線材の曲げ特性は、 Hastelloy基板を外側にして曲げたものであり、線材同士の接続が必要な場合にはその接続抵抗の高さにより適用しにくい。当社Type STは、現在のところ25mmまでは曲げられている。補強テープ開発や接合方法等、改善の余地は多いにあると考えており、直径10mmの曲げに対しても当社線材が適用されることが期待される。

4-2 交流損失低減 既に述べたツイストの低ピッチ化は割愛し、その他の低減策を以下に挙げた。

①マトリックスの高抵抗化

これは、結合時定数を下げるもう1つの手段であり、Bi2223超電導線材についてもその研究は多くなされてきた。先に示した交流損失が低減したスリム線材のマトリックスは銀である。したがって、銀にとって替わる高抵抗材料の導入、各フィラメントの電気的バリアの導入等の技術を確認させることにより、今後交流損失は確実に低減する見込みである。

② J_c 向上

実は、交流損失は今まで述べてきた I_c と深い関係がある。超電導体の内部で発生するヒステリシス損失は、臨界電流密度 J_c が大きくなるほど大きくなる。しかし、ケーブルにしろ、モータにしろ、実際の導体ボリュームは、定格電流に合わせて設計する。線材の I_c が高くなると、その分線材の量を減らせるので、結局、 I_c が上がっても、導体全体のヒステリシス損失は変わらない。問題になるのは結合損失の方だが、以下の2つの理由により抑制しやすくなる。まず、 J_c が高くなるとそれに見合った結合電流がマトリックスの部分に流れようとしても発生する抵抗が大きくなるので、相対的に結合電流は流れにくくなる。またツイストは捻りのピッチを短くするほど効果があるが、太い線よりは細い線の方が捻りやすい。線を細くすると電流値が下がるので使う線材の長さが増えてしまうが、 I_c が200 Aにまで向上したDI-BSCCO®は断面積を半分にしても100 A以上流れるので、細い線でも使いやすくなる。したがって、 J_c の向上も必要不可欠な手段である。加圧焼結後線材のフィラメント中には未だ

(Ca-Sr)-Cu-Oなどの非超電導相はフィラメント中に残存しており、Bi2223結晶配向性を乱す一因となっている他、超電導電流の経路を遮る最も大きな要因にもなっている。現在まで得られている知見では、Bi2223結晶配向のテープ面からのずれ角と J_c には指数関数的な負の相関が明瞭に見られているので、非超電導相の低減などによる結晶配向性向上によってさらなる高 J_c 化が望まれる。⁽¹³⁾

5. 結 言

当社は、革新的に性能が向上したDI-BSCCO®を開発し、従来の高臨界電流型線材と同じ構造かつ高い I_c を有する線材としてType Hを商品化した。さらに、超電導応用製品に対してより適応性を高めるため、低運転電流機器を対象にした低コストType S、Type H、Type Sの2倍以上の強度を有しかつ同等の I_c を有する高強度線材Type HT、Type ST、交流で使用する超電導機器を対象により、交流損失が飛躍的に低いType ACを開発した。これらの線材が示す性能は、機器サイドの多様な要求を実現できるレベルに達してきつつある。今後、超電導の広範な商用化のためにも、各種性能のさらなる向上のために全力を尽くしていく。

参 考 文 献

- (1) K. Yamazaki, S. Kobayashi, T. Kato, K. Ohkura, M. Ueyama, J. Fujikami, N. Ayai, E. Ueno, M. Kikuchi, K. Hayashi and K. Sato : SEI Technical Review, p.16, No58 (2004)
- (2) M. Kikuchi, N. Ayai, J. Fujikami, S. Kobayashi, K. Yamazaki, S. Yamade, T. Ishida, T. Kato, K. Hayashi, K. Sato, R. Hata, H. Kitaguchi, K. Osamura and J. Shimoyama, CEC-ICMC2007 Proc.
- (3) T. Masuda, T. Kato, H. Yumura, M. Watanabe, Y. Ashibe, K. Ohkura, C. Suzawa, M. Hirose, S. Isojima, K. Matsuo, S. Honjo, T. Mimura, T. Kuramoshi, Y. Takahashi, H. Suzuki and T. Okamoto, Physica C, 372-376, 1580 (2002)
- (4) T. Okazaki, K. Hayashi and K. Sato : SEI Technical Review, p.1, No61 (2005)
- (5) K. Funaki, M. Iwakuma, K. Kajikawa, M. Hara, J. Suehiro, T. Ito, Y. Takata, T. Bohno, S. Nose, M. Konno, Y. Yagi, H. Maruyama, T. Ogata, S. Yoshida, K. Ohashi, H. Kimura and K. Tsutsumi, IEEE. Trans. Appl. Supercond., 11, 1578 (2001)
- (6) M. Ueyama, S. Hahakura, K. Hasegawa, T. Taneda, K. Ohmatsu, T. Kato : SEI Technical Review, p.65, No63 (2004)
- (7) Y. Iijima, N. Kaneko, S. Hanyu, Y. Sutoh, K. Kakimoto, S. Aimura and T. Satoh, Physica C 445-448 (2007) 509
- (8) T. Manabe, M. Sohma, I. Yamaguchi, W. Kondo, K. Tsukada, S. Mizuta and T. Kumagai, Physica C 392-296 (2003) 937
- (9) 上山、長谷川、大松、加藤、「第74回2006年度春季低温工学・超電導学会講演予稿集」、p13

- (10) N. Ayai, S. Kobayashi, K. Yamazaki, S. Yamade, M. Kikuchi, E. Ueno, J. Fujikami, T. Kato, K. Hayashi, K. Sato, R. Hata, H. Kitaguchi, H. Kumakura and J. Shimoyama, IEEE. Trans. Appl. Supercond., 17, 3113 (2007)
- (11) 綾井ら、「第75回2007年度秋季低温工学・超電導学会講演予稿集」
- (12) 船木、住吉共著、「多芯線と導体」(超伝導工学の基礎)
- (13) Kitaguchi, H. Kumakura and J. Shimoyama, IEEE. Trans. Appl. Supercond., 17, 3075 (2007)
-

執筆者

菊地 昌志* : 電力・エネルギー研究所 ビスマス系超電導線グループ

綾井 直樹 : 電力・エネルギー研究所 ビスマス系超電導線グループ
グループ長

石田 友信 : 電力・エネルギー研究所 ビスマス系超電導線グループ

豊谷 和晃 : 電力・エネルギー研究所 ビスマス系超電導線グループ

林 和彦 : 電力・エネルギー研究所 所長

小林 慎一 : 超電導・エネルギー技術開発部 線材技術グループ 主席

山崎 浩平 : 超電導・エネルギー技術開発部 線材技術グループ

山出 哲 : 超電導・エネルギー技術開発部 線材技術グループ

高畦 秀雄 : 超電導・エネルギー技術開発部 線材技術グループ

藤上 純 : 超電導・エネルギー技術開発部 線材技術グループ
グループ長

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)

*主執筆者