
掲載内容（サマリー）：

特集：超電導線材技術とマグネット技術

- Y 系線材の高磁場特性向上技術の展望
- 高性能ビスマス 2223 系高温超電導線材技術とコイル化技術の展望
- MgB₂ 線材の特性向上とコイル化技術の現状
- 高性能 Nb₃Sn 線材技術と理化学研究用マグネット技術の進展
- 金属系線材の量産技術と大型プロジェクトへの寄与
- 超電導関連製品ガイドー超電導線材関連製品ー

- 超電導関連 4-5 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（2/17-3/17）
- 「大型核融合装置の設計状況と先進超電導導体の核融合装置への適用」
ー低温工学材料研究会からー
- 国際シンポジウム報告「メゾスコピック超伝導とスピントロニクス(MS+S2006)」
- 隔月連載記事ー超電導心磁計が市場にでるまで（その 2）
- 読者の広場(Q&A)ー超電導線材ではなぜ交流損失が重要なのでしょうか？

[超電導 Web21 トップページ](http://www.istec.or.jp/Web21/toppage.html)

超電導 Web21

〈発行者〉

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

〒105-0004 東京都港区新橋 5-34-3 栄進開発ビル 6F

Tel (03) 3431-4002 Fax(03) 3431-4044

超電導 Web21 トップページ：<http://www.istec.or.jp/Web21/index-J.html>



この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

特集：超電導線材技術とマグネット技術「Y 系線材の高磁場特性向上技術の展望」

京都大学
大学院工学研究科 材料工学専攻
助教授 松本 要

J_c 特性に優れた $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 薄膜を用いてテープ状線材を作製する Y 系線材開発が最近急ピッチで進んでいる。しかし、Y 系線材の幅広い応用に必要な 77K における磁場中 J_c は実用化の観点からはまだ不十分である。これは粒界の影響だけでなく、Y 系薄膜中に効果的な量子化磁束のピン止め点が不足しているためである。Y 系線材を魅力的な材料として実用化するためには、77 K において磁場中 J_c を従来の数倍から 10 倍程度向上させることが必要である。

以上の目的のために、ナノテクを応用して、Y 系薄膜中にピン止め点となる人工的な結晶欠陥を高密度かつ低コストで導入する手法の開発が国内外で進んでいる。こうして導入された欠陥は人工ピンと呼ばれる。現在、人工ピンにより量子化磁束を強力にピン止めすることで 77 K の磁場中 J_c が飛躍的に向上することが明らかになりつつある。

人工ピンとして利用できる結晶欠陥には転位（1 次元人工ピン）や結晶粒界（2 次元人工ピン）、微細析出物（3 次元人工ピン）などがある。最近では、Y 系薄膜中に $BaZrO_3$ ナノ粒子をドープすることが検討されているが、興味深いことに $BaZrO_3$ は c 軸方向にナノロッド状に揃うことが明らかになり、これらも高密度な 1 次元人工ピンとして利用できる。

さらに、臨界温度や不可逆磁場の高い $REBa_2Cu_3O_y$ 薄膜（RE = Sm, Gd 等で $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ の Y サイトを置換したもの）に人工ピンを入れたテープ状線材は磁場中でさらなる高 J_c 化が期待される。図 1 にこれまでに報告されている $REBa_2Cu_3O_y$ 薄膜の磁場中 J_c 特性（77K、B//c）を示す。得られた値は 4.2 K、5 T における NbTi 線材の J_c 値を凌駕しており、この事実は高温超電導体の潜在力を示したものである。

当然のことながら、人工ピンを導入した Y 系あるいは RE 系線材の磁場中 J_c 特性は使用温度を 77K から 65K に下げると数倍向上する。さらに 20K にまで冷却すれば、 J_c 特性は一桁程度向上して異方性もほとんど見えなくなり、20～30T の磁場を加えても J_c は低下せず高 J_c を保ったままになる。このような優れた J_c 特性は他の超電導線材の特性を大きく上回ることになる。

低コストで使い易い Y 系あるいは RE 系線材が実現すれば、77K における各種電力機器や産業機器から核融合、NMR などの高磁場応用まで含む幅広い用途に使用可能な線材となることが期待される。Y 系および RE 系材料の実用線材化に向けた努力と、これら材料の優れた特長とピン止め点導入技術の向上が相まって、近い将来にこれまでになかった高特性を有する線材が出現すると予想される。

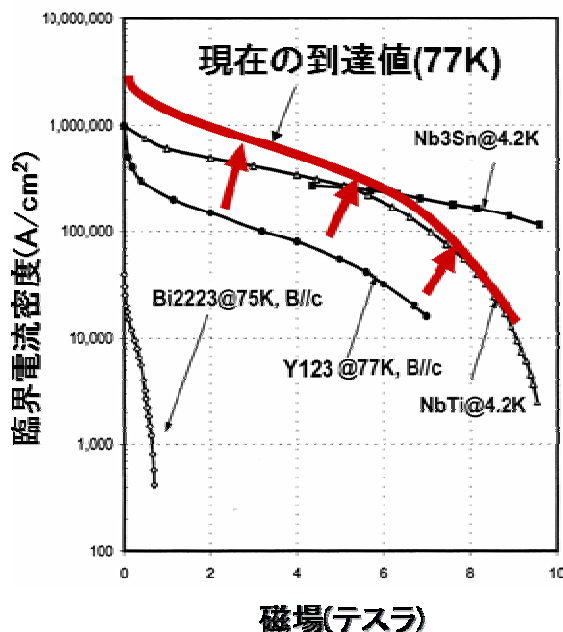


図1 従来 Y 系線材 (Y123) と各種線材の J_c 特性比較 (77K, B//c)

特集：超電導線材技術とマグネット技術

「高性能ビスマス 2223 系高温超電導線材技術とコイル化技術の展望」

住友電気工業株式会社 電力・エネルギー研究所
林 和彦

1. ビスマス 2223 線材性能の向上

現在、工業的に生産が可能な長尺高温超電導線材は、Bi2223 線材のみである。Bi2223 超電導体は、1988 年の発見当初から銀被覆 PIT 法（Powder-in-Tube）により、臨界電流密度の向上、長尺線材化が進められてきたが、最近になって線材製作プロセスのうち超電導特性を決定する最後の重要工程である熱処理工程に加圧焼成法を用いることで、ビスマス系超電導フィラメントの密度が従来の 85%から 100%へと向上すると共に、長尺線材の歩留りが従来の 20%から 90%に増加し、無欠陥で 1,500m 級の長尺線材の量産が可能となり、住友電気工業株式会社は DI-BSCCO®の名称で販売を開始している。

また加圧焼成法の開発当初の臨界電流（77K,0T）は、標準 4.3mm 幅で 130A 程度であったが、その後、粉末工程、加工工程、熱処理工程の製造工程の全てにわたって均一化、無欠陥化などの改善を進めた結果、臨界電流（77K,0T）は 201A に到達した。現在では長尺線材で 150A クラスの長尺線材が工業的に生産可能になっており、200A 級の長尺線材製造体制も整いつつある。これまでの Bi2223 線材の臨界電流向上、長尺化の進展を図 1 に示す

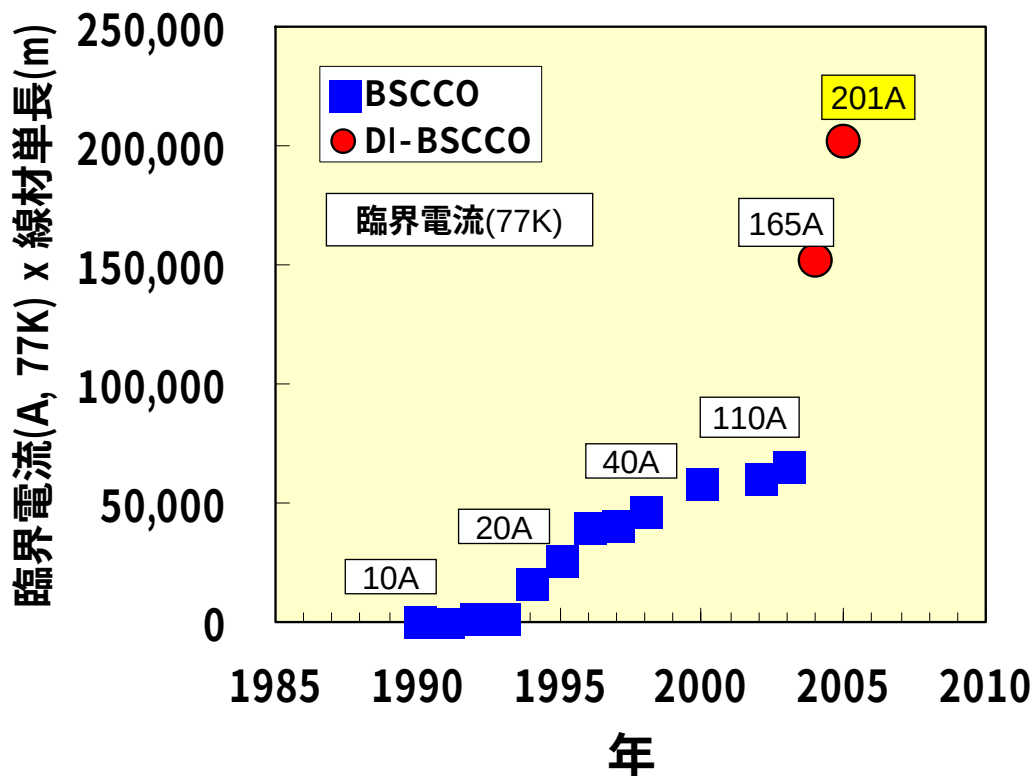


図 1 ビスマス 2223 高温超電導線の性能向上

2. コイル化技術の展望

住友電工では、(株)東芝、信越半導体(株)と共に 8 インチサイズのシリコン単結晶引き上げ用マグネットを、Bi2223 線材を用いた 20K 伝導冷却技術で実現しているが、この時の線材の臨界電流は 40～50A であり、マグネットの大きさも NbTi マグネットの約 2 倍あった。今回達成した臨界電流 201A は、ビスマス 2223 系高温超電導線の大きな応用製品分野であるマグネット用途の、主たる運転条件である 20K、数 T の磁場中で、 $J_c=40,000\text{A}/\text{cm}^2$ をクリアしており、4.2K 運転の NbTi マグネットよりも高いコイル運転電流密度を実現できる。例えば、20K 運転で、常温ボア 200mm ϕ の空間に 10T を発生させるコイルの設計も可能になっている。今後は、磁気共鳴診断装置 (MRI) や、たんぱく質の解析などに用いられる核磁気共鳴分析装置 (NMR)、リニアモーターカーなど様々な分野において、マグネット用途での超電導線市場の拡大が期待できる。

また、臨界電流値の大幅向上と、加圧焼成法の採用による高い生産歩留りの効果と合わせて、メリット係数 (線材 1m における、電流あたりの線材価格 (価格/電流・m) が大幅に低減されることになる。これによって、応用製品に必要な超電導線のトータルコストを削減できるため、超電導マグネットは勿論、超電導ケーブル、液体窒素運転モータ等の製品価格競争力が向上。マグネット用途以外での応用製品の拡大も期待される。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導線材技術とマグネット技術「MgB₂ 線材の特性向上とコイル化技術の現状」

物質・材料研究機構
超伝導材料研究センター
センター長 熊倉浩明

二硼(ほう)化マグネシウム (MgB₂) は、超電導転移温度が金属系材料として世界最高の39Kと優れ、また、マグネシウム(Mg)とボロン(B)からなる比較的簡単な化合物であり、合成が容易で資源的にも豊富であるという特徴があるため、実用化に向けた線材化研究が世界中で活発に行われている。MgB₂の線材化法に関しては、これまでにいくつかの方法が提案されてきたが、最近では粉末を金属管に詰め込んで加工をする、いわゆるPowder-In-Tube(PIT)法が主流である。PIT法によるMgB₂線材作製法には、MgとBの混合粉末を金属管に詰めて加工し、熱処理によってMgB₂を生成させるin situ法と、直接MgB₂の化合物粉末を金属管に詰めて加工をするex situ法とがある。

PIT 法においては、充填した混合粉末の密度を高めることが高 J_c 化に有効であり、この点で硬度の高い金属管を使うことが有利である。現在のところ、主として Fe や Ni 管を用いて線材が作製されている。加工性や熱伝導性が良好な Cu 管も使用されるが、Cu は MgB₂ 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。ただし、Cu 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。

最近 in situ 法では、Mg+B の混合粉末に微細な不純物を添加して J_c 特性を向上させる試みが種々なされるようになった。最も注目されるのはナノメートルサイズの SiC 粒子添加であるが、¹⁾ その他にも B₄C や種々の炭化水素化合物、ナノカーボンなどの添加が試みられ、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。このような炭素含有化合物の添加により J_c が向上するのは、磁束線ピン止め点が導入されるとともに、B サイトの C 置換が起こってコヒーレンス長が短くなり、上部臨界磁界 B_{c2} が向上するためと考えられる。

一方、ex situ 法では、これまであまり高い J_c は得られていなかったが、最近、in situ 法で作製したテープから MgB₂ のコアを取り出し、これを粉砕して鉄管に充填・加工して得たテープでかなり高い J_c が得られている。²⁾ 特に加工後 600°C、1 時間のアニールを行ったテープでは、高磁界領域において、元になった in situ 法テープを上回る高い J_c が得られており、注目される。これは、コアを粉砕して得られた MgB₂ 粉末の粒表面がきれいで酸化しておらず、粒同士の結合が良好なこと、また加工によって MgB₂ コアに歪が導入されて B_{c2} が向上すること、などによると考えられる。

MgB₂ 線材の B_{c2} は作製条件にかなり大きく影響されるが、SiC 添加した in situ 法テープで 20K における B_{c2} が 11T 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 における B_{c2} に匹敵する値である。このことは、現在 4.2K で実用されている Nb-Ti 線材を MgB₂ 線材で置き換え、20K で運転できる可能性があることを示している。そこで MgB₂ 線材の応用の一つとして、液体ヘリウム不要の超電導機器が考えられている。最近では冷凍機の進歩が目覚しく、～20K 程度の温度は簡単に得られるようになってきている。あるいはまた、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。～20K 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こと、また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。

このような MgB₂ 線材の進展を受けて、最近では 1km を越える長尺線材も作製されるようになった。また小型コイルの試作も行われるようになってきている。一例として、外径 50mm、高さ 60mm の小型ソレノイドコイルにおいて、20K の温度、1T のバイアス磁界において 1.3T の磁界発生に成功しており、MgB₂ 線材は冷凍機冷却や液体水素冷却による超電導マグネットに有望と考えられる。³⁾

さらにごく最近では、 MgB_2 コイルの永久電流モードの運転にも成功しており、⁴⁾ 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。これより MRI マグネットなどへの応用も視野に入ってくると期待される。

以上のように MgB_2 線材開発にも着実な進展が見られるが、現状の MgB_2 線材は in situ 法、ex situ 法ともに臨界電流特性が実用レベルには達しておらず、特性の向上が必要不可欠である。今後の更なる研究により、臨界電流特性の向上を期待したい。

参考文献

- 1) S. X. Dou, S. Soltanian, J. Horvat, X. L. Wang, S. H. Zhou, M. Ionescu, H. K. Liu, P. Munroe, and M. Tomsic, Appl. Phys. Lett. 81(2002) 3419.
- 2) T. Nakane, H. Kitaguchi and H. Kumakura, Appl. Phys. Lett. 88(2006) 022513.
- 3) K. Tanaka, H. Kitaguchi, H. Kumakura, M. Hirakawa, H. Yamada and M. Okada, IEEE Trans. Appl. Supercond. 15(2005)3180.
- 4) M. Takahashi, K. Tanaka, M. Okada, H. Kitaguchi and H. Kumakura, Supercond. Sc. Technol. 18(2005) S373.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導線材技術とマグネット技術

「高性能 Nb₃Sn 線材技術と理化学研究用マグネット技術の進展」

ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社
村上幸伸、大谷靖彦

理化学研究用マグネットの中で、安定した市場を形成しているものの一つに NMR マグネットがある。NMR 分析では磁場の増加とともに分解能・S/N 比が向上することから、より高い磁場を発生できるマグネットの開発が望まれている。マグネットの高磁場化のためには、Nb₃Sn 線材の高性能化が必要不可欠であり、具体的には高 Jc 化と高強度化が必要となる。

Nb₃Sn 線材の製造方法には主にブロンズ法と内部拡散法の 2 通りがあり、低 Sn 濃度ブロンズ法 Nb₃Sn 線材は早くから安定した量産技術が確立され、多くの NMR マグネットに適用されてきた。

Nb₃Sn 線材の高 Jc 化には、結晶粒の微細化による layer Jc の向上と線材断面積に占める Nb₃Sn 反応層の比率の向上が有効である。ブロンズ法でこれらを達成する方法として、ブロンズ中 Sn 濃度の高濃度化が図られてきた。しかしながら、Sn 濃度の増加とともにブロンズの加工性は低下し、ブロンズ中への Sn の固溶限が 15.8wt% であることから、従来は 15wt% 程度が実質的な加工限界であると考えられてきた。現在では、ブロンズ中の微細析出を分散させ、線材の製造工程を改良することにより、ブロンズ中 Sn 濃度を 16wt% まで高めた Nb₃Sn 線材製造が可能となった。図 1 に Sn 濃度の異なるブロンズを用いた Nb₃Sn 線材の代表的な Jc を示す。Sn 濃度増加とともに Jc が向上していることがわかる。

一方、マグネットの高磁場化は同時にマグネットの大型化をもたらし、線材に作用するフープ応力はどんどん大きくなるため、高磁場マグネットの外層に用いられる Nb₃Sn 線材には高い機械的強度が要求される。当社は Ta を補強材として採用し、300MPa 以上という高い 0.2% 耐力を実現した。¹⁾

Ta 補強による高強度 Nb₃Sn 線材と 16wt%Sn ブロンズ Nb₃Sn 線材は、物質・材料研究機構と神戸製鋼所の NMR マグネット共同開発に適用され、当時として世界最高の 930MHz-NMR マグネットを実現した。²⁾ 図 2 は現在同機構で稼働中の 930MHz マグネットの外観写真である。本開発は Nb₃Sn 線材の性能向上がマグネット性能向上に直結した一例

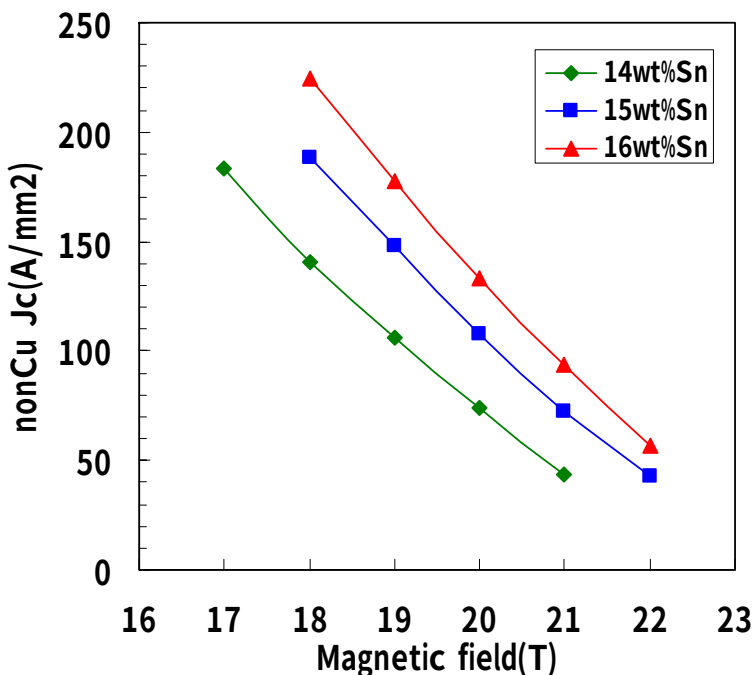


図 1 Sn 濃度の増加による nonCu Jc の向上

である。NMR マグネットにおいてはこの様に線材性能が最終マグネット性能を決定する側面が強く、今後とも線材性能とマグネット性能が相互連携して向上していくものと予想される。



図2 930MHz-NMR マグネットの外観写真

参考文献

- 1) 宮崎隆好ほか,低温工学, Vol.35(2000),P.126
- 2) 吉川正敏ほか,低温工学, Vol.39(2004),P.625

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導線材技術とマグネット技術

「金属系線材の量産技術と大型プロジェクトへの寄与」

古河電気工業株式会社
金属カンパニー 日光伸銅工場 超電導製品部
木村昭夫

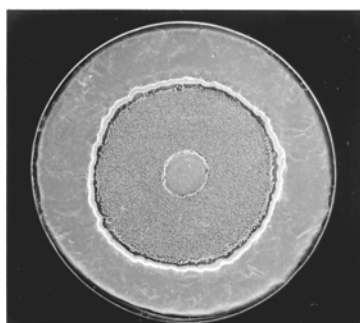
ITER 計画では、数百トンに及ぶ超電導線（Nb₃Sn 線と NbTi 線）が必要とされる。これらを如何にして決められた期間内に製作するかが、線材メーカーにとっての重要な課題である。

欧州で建設が進められている大型粒子加速器（LHC）には 1,200 トンもの NbTi 超電導成形撚線が使用されている。当社は加速リングの 1/8 部分の Outer ケーブル（92 トン）を受注し、全ての仕様に対して極めて安定した特性を保持しつつ、その製造をトップランナーとして終了した。その結果、その功績について CERN より HADRON 賞を頂くことができた。（図 1）

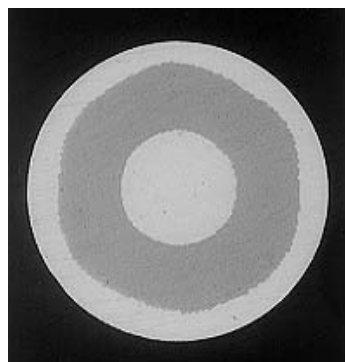


図 1 ゴールデンハドロン賞 2003

当社は大量製造に適した Nb₃Sn 線材の製法として、ビレットの熱間押出ができ、大型化が可能なブロンズ法を採用している。一方、NbTi 線材の製法は複合多芯ビレットを押出・伸線し、途中で時効熱処理を施して磁束ピンニング力を向上させるが、製造工程は殆どの部分が Nb₃Sn 線材と共通であり、各々の線材製造で確立された固有技術・管理技術が他方に容易に展開可能である。ITER 用 Nb₃Sn 線材と LHC 用 NbTi 線材の線材断面写真を図 2 に示す。



a) Nb₃Sn 素線
(ITER-CS モデルコイル用)



b) NbTi 素線
(LHC-Outer ケーブル用)

図 2 断面写真

大量生産に当たって重要と考えられる項目を 2 点あげるとすれば、均質な原材料の調達と断線防止技術である。

原材料の中で、均質性の観点から最も難度が高いものが Nb₃Sn 線に用いられるブロンズ (Cu-Sn 合金) である。次に難度が高いものが NbTi 合金である。LHC ではメーカー認定審査が行われ、結局 1 社の独占供給となった。

Nb₃Sn 線材、NbTi 線材ともに直径数 μm のフィラメントが数千本埋め込まれている。このため異物に対する断線感受性が極めて高く、20 μm 程度の異物でも断線が生じる。断線は製造終盤の伸線中に発生し、多発すると極端な歩留低下と工数の増大、および製造計画の大混乱を招く。従って、線材の大量製造に当たっては断線防止が最重要ポイントである。

当社では、ITER-CS モデルコイル用 Nb₃Sn 線材製造中盤にこれらの対策技術を確立し、平均断線回数 0.09 回/km という好結果を得た。またその後の LHC 用 NbTi 線材でも同じ平均断線回数のレベルに抑えることができた。

LHC や ITER などの大型プロジェクトは短期間とは言え、数年間にわたり大量の超電導線材を作り続ける必要がある。プロジェクトから見れば、線材メーカーは、最初に生産をスタートするトップバッターであり、その出来不出来でその後に続くスケジュールを大きく左右する。当社は、LHC で経験した高均質な超電導線材の大量生産技術を元に、ITER への貢献、責任を果たしていきたい。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連製品ガイドー超電導線材関連製品ー（社名五十音順表示）

〔Nb-Ti 合金複合超電導線〕

○ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社（JASTEC）、線材事業部

NMR 分析器用線材、各種マグネット用線材

TEL:093-391-2836、FAX:093-391-2847

担当：村上幸伸

○日立電線株式会社 高機能材料事業本部 電伸部電伸課

核融合・加速器用導体、パルス磁界用導体

TEL:029-826-7416、FAX:029-826-1846

担当：鈴木洋一

○古河電気工業株式会社 金属カンパニー第二営業部超電導製品課

高エネルギー加速器用導体、変動磁界用導体、各種銅安定化 Nb-Ti 導体

TEL:03-3286-3161、FAX:03-3286-3663

担当：高木、清水

○三菱電機株式会社 電力システム製作所 磁気応用先端システム部 超電導技術グループ
PVF 被覆超電導線材

TEL:03-3218-2607

担当：（原子力部原子力営業第二課）宮田直大

〔Nb₃Sn 化合物複合超電導線〕

○ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社（JASTEC）、線材事業部

NMR 分析器用線材、高磁界マグネット用線材、高強度線材、核融合炉用素線

TEL:093-391-2836、FAX:093-391-2847

担当：村上幸伸

○日立電線株式会社 高機能材料事業本部 電伸部電伸課

高磁界マグネット用導体、核融合用導体

TEL:029-826-7416、FAX:029-826-1846

担当：鈴木洋一

○古河電気工業株式会社 金属カンパニー第二営業部超電導製品課

NMR 分析器用線材、高磁界マグネット用導体、核融合炉用 CICC 素線

TEL:03-3286-3161、FAX:03-3286-3663

担当：高木、清水

○三菱電機株式会社 電力システム製作所 磁気応用先端システム部 超電導技術グループ
核融合炉用低ヒステリシス損失素線、直流用高臨界電流密度素線

TEL:03-3218-2607

担当：（原子力部原子力営業第二課）宮田直大

〔Nb₃Al 化合物複合超電導線〕

○日立電線株式会社 高機能材料事業本部 電伸部電伸課

高磁界マグネット用導体、核融合用導体

TEL:029-826-7416、FAX:029-826-1846

担当：鈴木洋一

〔ビスマス系銀シース酸化物超電導線〕

○昭和電線ケーブルシステム株式会社 技術開発センター 超電導プロジェクト

銀シース Bi-2212 線材、電流リード

TEL:042-773-7163、FAX:042-773-7291

担当 青木裕治

○住友電気工業株式会社 超電導開発室

銀シース Bi-2223 テープ

TEL:06-6466-5537、FAX:06-6466-5705

担当：山田雄一

○日立電線株式会社 高機能材料事業本部 電伸部電伸課

TEL:029-826-7416、FAX:029-826-1846

担当：鈴木洋一

（編集局 田中靖三）

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連 4-5 月の催し物案内

4/14

Bi 系高温超伝導材料の強磁場による組織制御
場所：東北大学金属材料研究所 本田記念館視
聴覚室（3 階）、仙台市
主催：低温工学協会 東北・北海道支部
問合せ：渡辺和雄 東北大学金属材料研究所
TEL:022-215-2147、FAX:022-215-2149、
E-mail:cshibata@imr.tohoku.ac.jp

4/17-21

2006 MRS Spring Meeting: Symposium HH
Recent Advances in Superconductivity
場所：San Francisco, California, USA
主催：Materials Research Society
問合せ：E-mail:enews2@lucy.mrs.org

4/20

低温工学基礎講座：冷凍・空調温度域の冷凍の
基礎
場所：産業技術総合研究所臨海副都心センター
第 1 会議室(4 階 412 室)、東京都江東区
主催：低温工学協会 冷凍部会
問合せ：佐藤明男 物質・材料研究機構 強磁
場研究センター
TEL:029-863-5453、FAX:029-863-5470、
E-mail:inquire@akashi.nims.go.jp

4/20

超電導エレクトロニクス・マイクロ波・太陽発
電衛星研究会合同研究会
場所：(財) 国際超電導産業技術研究センター／
超電導工学研究所、東京都江東区東雲
主催：電子情報通信学会
問合せ：超電導工学研究所 材料物性 鈴木克己

4/21

超伝導技術講演会・展示会「実用化を迎えた超
伝導エレクトロニクス」

場所：東京コンファレンスセンター飯田橋
主催：日本学術振興会産学協力研究委員会 超
伝導エレクトロニクス第 146 委員会
問合せ：日本学術振興会産学協力研究委員会
超伝導エレクトロニクス第 146 委員会総務幹事
松田瑞史

TEL:0143-46-5550、FAX:0143-46-5501、
E-mail:matsuda@mmm.muroran-it.ac.jp
幹事 吉田 晃 (SRL)

E-mail:a-yoshida@istec.or.jp

4/22-25

APS April Meeting 2006 held in conjunction with
Sherwood Fusion Theory Conference
場所：Dallas, Texas, USA
主催：American Physical Society

4/24-28

SuperConductingCity 2006, Hannover Fair
場所：Hannover, Germany

5/28-6/3

The 9th International Conference on
Synchrotron Radiation Instrumentation
(SRI2006)
EXCO Center, 大邱、韓国
Pohang Accelerator Laboratory (PAL)
Spring-8/JASRI 鈴木
E-Mail:msyszk@sping8.or.jp
<http://SRI2006.postech.ac.kr/>

5/29

超電導応用技術の新展開
競走の時代一転機を迎えた超電導開発
場所：都市センターホテル 3F コスモスホール I
主催：財団法人 国際超電導産業技術研究センター
問合せ：<http://www.istec.or.jp/event/>

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (2/17-3/17)

- 「ムーアの法則」7 年“延命” IBM、線幅 29.9 ナノメートルの超微細パターン生成 2/21 日刊工業新聞
- 放射線治療 がん患部に最適照射 ハイ・アート 米社製装置を拡販 2/22 日経産業新聞
- 核融合炉向け超電導線材 高臨界電流密度・低損失を実現 民生分野での活用も視野 三菱電機 2/22 電気新聞
- 覚醒手術 脳腫瘍 会話しながら摘出 2/27 読売新聞(夕)
- 原子力機構 研究施設 外部に開放 全国 16 ヶ所 民間の開発促す 2/28 日経産業新聞
- ITER 計画 日本発注枠 韓国企業に 100 億円分 政府、優遇への不満に対応 2/28 日経産業新聞
- 温暖化が難点 石炭火力撤回 東芝・オリックス山口で計画 環境省 強硬に反対 京都議定書 圧力強く 2/28 毎日新聞、読売新聞
- プルサーマル実現へ一歩 世界 10 か国で実施 佐賀県玄海町 計画に合意 安全性 理解高まる 九電「今後も説明継続」2/28 読売新聞
- めざせ最速 新幹線 366 キロ JR 東が走行試験 3/1 日本経済新聞(夕)
- たんぱく質構造分析 限界分子量 2 倍に 首都大 核磁気共鳴の新技术 3/2 日刊工業新聞
- 血中のウイルス 検出感度 14 倍に 阪大など新技术 酸化鉄・金の複合粒子活用 3/3 日経産業新聞
- 高温超電導 1 夢実現 発見から 20 年 日本初フィーバーに沸く 一転、失望感から 実用これから 3/6 日経産業新聞
- レーザーで胎児治療 原子力機構などが内視鏡開発 3/6 日刊工業新聞、日経産業新聞
- 画像診断装置で攻勢 高性能機を拡販 売上高 800 億円へ 3/6 日経産業新聞
- 高温超電導線材 臨界電流、200 アンペア超 住友電工、量産レベルで初 3/7 日経産業新聞
- 世界最高 201 アンペアの超電導線 住友電工が開発 今夏までに商品化 3/8 フジサンケイビジネスアイ
- 超伝導 商用利用へ 送電ケーブル年内にも発売 住友電工、米で実用試験 電流量は 200 倍 3/11 朝日新聞
- 高温超電導 2 夢実現 発見から 20 年 開発競争、日米で火花 摩擦に研究者翻弄 科学外交で沈静化 3/13 日経産業新聞
- 非磁性体・磁性体素材の高精度濾過が可能 精度 0.5 マイクロメートル超精密濾過装置を販売 3/15 日刊工業新聞
- ガスエンジン+太陽電池+風力発電 マイクログリッド構築へ 東ガス 都市型、8 月から実証 3/15 日刊工業新聞
- 熱処理装置 国内初の磁気利用 多田電機 ワーク全体を均一加熱 3/15 日刊工業新聞
- 線性発動機牽引列車(リニアモーターカー) 利便性一気にアップ 3/16 フジサンケイビジネスアイ
- 電子線ホログラフィー 試料を電場や磁場の像で観察 3/16 日刊工業新聞
- 阪大など大賞 日経 BP 技術賞 3/17 日本経済新聞、日経産業新聞
- シニアが先導 死の谷を越えろ ベンチャーラボ 事業うまくいかない時、道しるべに 3/17 日経産業新聞

[超電導 Web21 トップページ](#)

「大型核融合装置の設計状況と先進超電導導体の核融合装置への適用」 ー低温工学材料研究会からー

(社)低温工学協会は、平成 18 年 2 月 17 日(金)核融合科学研究所研究棟 4 階大会議室において、平成 17 年度第 4 回材料研究会を開催した

研究会は、「大型核融合装置の設計状況と先進超電導導体の核融合装置への適用」をテーマとし、以下のプログラムで実施された。また、研究会終了後、核融合科学研究所の LHD(大型ヘリカル装置)見学会と JR 多治見駅近くで自由参加の懇親会も実施された。

- 13:40-13:50 開会挨拶(材料研究会：委員長)
- 13:50-14:35 国際核融合炉(ITER)の現状(日本原子力開発研究機構：奥野 清)
- 14:35-15:20 トカマク国内重点化装置(NCT)の現状(日本原子力開発研究機構：玉井広史)
- 15:20-15:30 コーヒーブレイク
- 15:30-16:05 先進超電導線材の開発の現状と核融合装置への適用(九州大学：木須隆暢)
- 16:05-16:20 核融合炉材料の照射効果(大阪大学：西嶋茂宏)
- 16:20-16:40 自由討論
- 16:40-18:00 LHD 見学

研究会では、ITER(国際熱核融合実験炉)計画に関する本体設置がカダラシュへ決定後の「ITER 国際核融合エネルギー機構」体制づくり、ITER 建設の中核となる超電導コイルに関する技術開発、調達準備、日欧共同出資(920 億円)による「BA(広いアプローチ)計画」候補施設、BA 計画候補設備であるトカマク国内重点化装置(JT-60 の超電導化装置)、次期核融合装置を目指す Nb₃Al や Y 系酸化物など先進超電導材料開発の現状及び核融合装置に係わる材料の照射損傷効果の再確認が議論された。特に、次の各項が研究会のポイントであった。

- (1) ITER 国際核融合エネルギー機構は、池田要氏を ITER 機構長とする日本、中国、EU、韓国、ロシア連邦、米国及びインドの 7 極体制になる。
- (2) ITER 計画の総事業費は、運転期間 20 年として、約 1 兆 3 千億円(本体：約 5,000 億円、運転費約 6,000 億円、除染約 250 億円)になる。
- (3) 日本として、線材 4 社、電線 3 社、鉄鋼 2 社、重電 2 社、重工 3-4 社が調達準備中。
- (4) JT-60 の超電導化装置は、ITER の先行的相似仕様装置として、2013 年に 1st プラズマを出す。
- (5) 次期核融合装置、原型炉などへ導体候補は、Nb₃Al 導体が酸化物導体に先行している。
- (6) 銀は、半減期が極めて長いという点から核融合装置へ適用が疑問視される。

LHD 見学は、第 9 サイクルプラズマ実験終了直後の現場で行われた。

この実験は、平成 17 年 9 月 27 日から平成 18 年 2 月 16 日まで実施され、イオン温度とプラズマ温度が共に 1 億度越えを狙い、最長 54 分間プラズマを維持する記録を達成したとのことであった。



(ISTEC 標準部 田中靖三)

[超電導 Web21 トップページ](#)

国際シンポジウム報告「メゾスコピック超伝導とスピントロニクス(MS+S2006)」

NTT 物性基礎研究所
中ノ勇人

去る 2006 年 2 月 27 日から 3 月 2 日までの 4 日間、神奈川県厚木市にある NTT 物性科学基礎研究所（日本電信電話株式会社）において、「メゾスコピック超伝導とスピントロニクス」に関する国際シンポジウム(Mesoscopic Superconductivity & Spintronics)が開かれた。2000 年の MS2000 から今回で 4 度目となり、この分野の研究者には定着してきた感がある。当初、「メゾスコピック超伝導」をメインに始まったこの会議もスピントロニクスというメゾスコピック物理のもうひとつのトピックを加えて拡大してきた。近年、これらの分野は、量子情報技術のための固体素子量子ビット実現の基礎であることもあり活気づいているが、国内でこれだけ代表的研究者が海外からも一堂に集まる機会は稀であろう。会議前日のウェルカム・パーティーでは、名を知らなければもぐり、といわれそうな研究者らが和気藹々とかたまってグラスを傾ける光景を見て思わず、自分が今どこにいるのか、と言った錯覚を感じた。参加者約 200 名のうち、4 分の 1 が海外からの参加である。

招待講演を主とする 46 件の口答発表と、約 80 件のポスター発表が行われた。大物はレビュー的な講演が多いが、ライバル研究者も同席しているのでつい慎重になる様も見られ、この分野の有体な進捗状況が肌身で理解できる。超電導微小回路は「そこに存在する観察すべきもの」から「人間がその量子状態を操作するもの」に進化した。その操作の「巧み」が新しい物理を拓く時代になった。相対論的量子自由度として神秘の存在であり続けたスピンは、「干渉する独楽」として研究者達の掌におさまろうとしている。神社の境内での子供達の独楽合戦の風景が浮かぶ。量子情報技術の研究にはいろいろ賛否両論見られるが、これがきっかけで物性物理における離散少数自由度系の制御と計測の理解と技術が近年急速に進んだことだけは間違いない。こういう会議に参加したときの、心の奥の静かなワクワク感は研究者の特権である。こういうものを次世代の若者に伝えられず「理科離れ」を愁うだけの無力な自分も認識する。会議の、そして会議の合間の雑談や、ポスター・セッションの人のいきれ、バンケットで飲んだくれた大物の、皮肉だが一聴の価値ある愚痴、などなどの臨場感は文字では伝達不可能だが、講演者やポスターのタイトルは、WEB ページ

<http://www.brl.ntt.co.jp/event/ms+s2006> にてまだ見ることができる。最後になったが、会議の主催は NTT 物性科学基礎研究所と科学技術振興機構である。



[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導心磁計が市場にでるまで（その 2）

岡山大学大学院自然科学科
教授 塚田啓二

3. 超伝導センサ研究所

3.1 超伝導センサ研究所の役割

前回は、臨床診断方法として新しい心磁図の歴史を、心電図の歴史と対比させて述べた。では、超電導を用いた心磁計がどのように国内で開発されてきたかを振り返ってみたい。私は、もともと日立製作所中央研究所で医療機器の研究には携わり血液中の生化学成分を計測する化学センサの研究を行っていて、特に各種センサの集積化と計測回路との集積化を行っていた。そうした私に転機が訪れたのは、1991 年の春であった。超伝導センサ研究所への出向である。この超伝導センサ研究所はその 1 年前の 1990 年に基盤技術研究促進センターと民間 10 社（日立、横河、住友電工、島津、東芝、セイコー電子、ダイキン、日本真空、清水建設、竹中工務店）の共同出資で設立された研究所である。今振り返ると、この研究所が果たした役割は数多くあり、世界的な研究成果のみならず人材も多く育成されたのではないだろうか。現在日本国内で超電導のアナログ応用研究をやっている第一線の研究者の多くが、この研究所で研究されたか、あるいは外部からサポートしていただいたかとの関係がある。そのため、国内の生体磁気計測装置の開発の歴史を語る上で、超伝導センサ研究所は大きな起点である。

この研究所は、臨床診断装置として生体磁場計測による脳や心臓の疾患や機能を画像化する装置を開発する目的で設立された。総合的な研究を行うため、センサデバイスである SQUID（超電導量子干渉素子）の研究開発を行う SQUID 部、SQUID 計測のマルチチャンネルシステム化及び計測データから生体の機能を画像化するソフトウェアの研究開発をするシステム研究部、および高温超電導体を用いた高温 SQUID 部の 3 つが設置されていた。この研究所から多くの成果がでて、最初に磁場分解能として $2\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度の平面型 1 次微分グラジオメーターが得られた。また、低雑音の SQUID 駆動回路 FLL を開発し、高感度なマルチチャンネル計測を加速させた。また、特に微弱な磁場計測である脳磁計測用として、環境雑音を極限まで減衰させる磁気シールドが開発された。これは 32 面体の球状の磁気シールドで 4 層のパーマロイと 1 層のアルミニウムからなっている。これにより世界トップの特性である環境磁気雑音を 40 万分の 1 まで減衰させることができた。このことは、海外の磁気計測の研究者を刺激し、ドイツの物理気象局（PTB）では、8 層の構造を持ち 75 万分の 1 の遮蔽率をもつ世界最高の磁気シールドが完成された。超伝導センサ研究所では、脳磁計の高い空間分解能をもとめ、最終的に 256 チャンネルと多チャンネルシステムを完成させた。これも世界の生体磁気計測装置の研究者を刺激し、1997 年にはフィンランドの Neuromag 社ではベクトル成分を計測する 306 チャンネルの脳磁計が製品化した。また、イタリアの国プロジェクトにより現在ではベクトル成分を計測する 500 チャンネルの脳磁計が完成している。このように現在、チャンネル数が 200 チャンネル以上の脳磁計システムは普通になっている。その当時としては、競争力になるほどチャンネル数が強く意識されていなかったが、超伝導センサ研究所の目標仕様が強く影響したことは確かである。

3.2 SQUID の開発

私は SQUID 部に所属しデバイスの研究をおこなった。出向した初めの頃は、研究所の建屋はなく、デバイスの研究は当時東陽町にあった竹中工務店の建築技術研究所のショールームとして使われていたクリーンルームの

中で行われていた。その後、千葉ニュータウンの東京電機大学の敷地内に超伝導センサ研究所（図 1）が建設され、本格的なクリーンルームと薄膜製造装置（図 2）が設置され SQUID の研究開発が加速された。トータルシステムを開発していく上で、当然センサができないとシステム化ができないことになる。このため、SQUID 部からの安定したデバイスの供給が研究計画を推進する上で大きなカギとなった。SQUID 部には横河電機、

日本真空、セイコー電子、島津製作所からの研究者と私がいて、良質な Nb/AlO_x/Nb のジョセフソン接合の開発と高感度な SQUID デバイスの開発を行っていた。全員が夜遅くまで SQUID 製造プロセスの条件出しから製作を行っていて、活気ある研究環境であった。SQUID 部が安定な SQUID をシステム部に提供できるようになってからは、各自が設計したデバイスをほとんど一人で全ての工程をやっしまい、なんと約 2 週間程度で製造して評価しているまでになっていた。こうした全てのデバイスプロセスをやっていける研究環境は、他ではなかなか得ることができないものであった。このように良い研究設備と良き研究者仲間に恵まれて過ごすことができたのは非常に良かった。生体磁気計測装置用の基本デバイスとしての SQUID は、SQUID リングが一次微分になった形状のもので、4 インチウエハに 300 個程度を一度に製造することができた（図 3）。

3.3 生体磁気計測装置の開発

デバイスを開発すると、それを使った装置ではどのように動くのか、あるいはどのようなデータがでるのか知りたいのは私だけでなく、多くの読者もそうであろう。特に、生体磁気計測装置は最終的には臨床応用であるので、臨床でどのように評価されるのかが興味あるところである。このため、超伝導センサ研究所のプロジェクトの後半では、私は SQUID 応用研究室に移った。臨床応用



図 1 超伝導センサ研究所の概観
（現在：東京電機大学，先端工学研究所）



図 2 SQUID 製造用クリーンルーム
（イエロールームは左の部屋）

を推進するところとして、新設された研究室である。超伝導センサ研究所には高性能の磁気シールド内に設置した大規模な 256 チャンネルがあり、脳機能の基礎研究に使われていた。しかし、臨床応用は困難なため、直接病院にて共同研究できるように移設が容易な小型の磁気計測装置を開発することを行い、計測点 16 点のパソコン計測できるものを実現した。特に心臓疾患に関しては、心臓の状態が様々な検査より診断されているので、それらを対照検査として心磁計の実力が判断できると考え、心磁計測に注力した。当時として、心磁計測は信号が大きいから簡単でしょと皮肉をいわれることが多かったのは事実である。これについては、多くの方が誤解していると考えられた。というのもパルスの波形まではとることが容易であるが、臨床診断までとなるともっと高い磁場分解能が必要であり、脳磁計測に近い精度が必要とされる。しかし、広く普及するには、高度な技術はブラックボックスに入り、計測そのものは表面的に簡単にならなければいけないのは当然だが。臨床応用は、千葉ニュータウンから比較的近かった筑波大学との共同研究として開始された。国内では徳島大学が BTi 社（現在の 4-D NEURO IMAGING 社）の 1 チャンネルその後 7 チャンネルの SQUID 装置を用いて臨床評価していたが、国産機を用いた臨床評価はこれが初めてであった。次回はこの臨床応用について話をする。

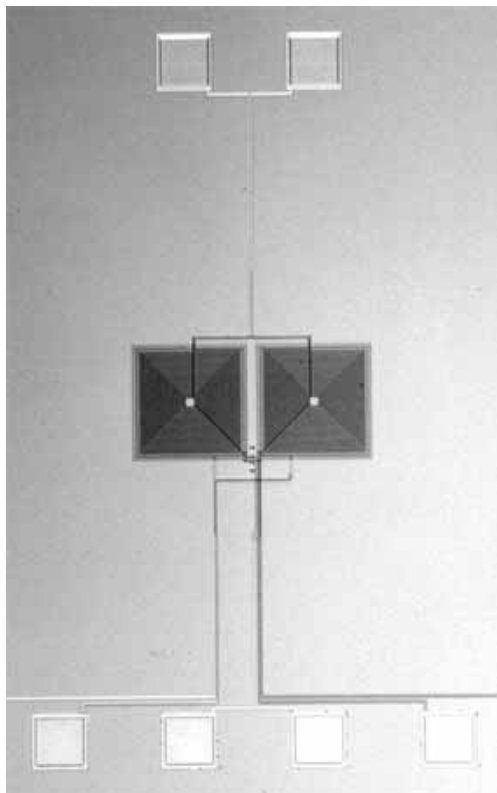


図 3 超伝導センサ研究所で開発された低温系 SQUID の一例

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q：超電導線材ではなぜ交流損失が重要なのでしょうか？

A：送電ケーブルや変圧器といった電気機器の多くは交流で用いられるので、その中で超電導線材は交流の磁界にさらされ、また、交流の電流を輸送しなければなりません。このとき非常に小さくはありますが交流損失という損失を発生してしまいます。冷凍機の効率を考えると、低温でのわずかな損失もそれを除去するのに要する室温領域での電力に換算すると馬鹿になりません。従って、交流損失の低減が超電導を交流電気機器に応用するための鍵となります。

一般的に実用される第二種超電導体が外部からの磁界に晒されたり、電流を輸送しその結果自己磁界が発生したりしている状態では、超電導体内部に磁束が、磁束線という離散的な線となって侵入しています。磁束が侵入し、かつ、磁束密度が一樣でないが故に、輸送電流や遮蔽電流といったマクロな電流を超電導体に流すことができるのです。さて、外部磁界や輸送電流が変化しない限りは、磁束線は静止しています。このとき、磁束線と電流の間にローレンツ力という力が働いているにもかかわらず磁束線が静止しているのは、磁束線が格子欠陥や不純物にひっかかっているからです。この現象をピン止め、ローレンツ力に対する抗力をピン止め力と呼びます。ところが、外部磁界や輸送電流が変化すると超電導体内部の磁束分布も変化することになり、磁束線はローレンツ力によりピン止め力に逆らって動かされることになります。これに要する仕事が交流損失の中でもっとも基本的なヒステリシス損失と呼ばれるものです。磁束線 1 本を動かすのに要する仕事は抗力（すなわちピン止め力）と磁束線の移動距離に等しいので、大雑把に言えば、ヒステリシス損失は単位体積あたりのピン止め力、超電導体を貫通する磁束線の長さ、磁束線の移動距離、そして動かすべき磁束線の本数の積で与えられます。これに基づいた簡単な考察から、薄いテープ状の超電導線材に交流磁界がかかる場合、磁界がテープ面に平行な方が交流損失は小さくなることがわかります。また、テープ面に垂直にかかる交流磁界が避け得ない場合には、超電導層を細いストリップに分割することにより交流損失を小さくできることもわかります。

超電導体と常電導体を複合した超電導線材の場合は、交流損失の発生機構はもっと複雑になり、結合損失という別の損失成分が重要になってきますが、ここでは紙面の制約から、説明を省かせて頂きます。

回答者：横浜国立大学 大学院工学研究院
知的構造の創生部門
教授 雨宮 尚之

[超電導 Web21 トップページ](#)