

掲載内容（サマリー）：

トピックス：

- ISTECS 平成 21 年度予算案、通常理事会・評議員会にて承認
「超電導応用基盤技術研究開発」（第 II 期）事後評価結果、開示される

特集：超電導線材技術の進展

- 超電導材料技術の展望
- REBCO 線材技術の現状
- IBAD/PLD 法 Y 系超電導線の線材技術の現状
- MOD 法 YBCO テープの長尺化技術の進展
- 配向基板を用いたテープ線材技術の進展
- ITER-TF コイル用 Nb_3Sn 線材技術の現状
- Nb_3Al 線技術の展望

- 超電導関連 4-5 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（2/21-3/19）
- 超電導速報—世界の動き（2009 年 2 月）
- 電気学会「超電導応用電力機器研究会」報告
- 隔月連載記事—超電導と MRI / NMR（その 2—MRI/NMR と超電導とのかかわり）
- 読者の広場(Q&A)—超電導線の国際標準化は実現するのでしょうか？ 教えて下さい。

[超電導 Web21 トップページ](#)

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

〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13

Tel (03) 3536-7283 Fax(03) 3536-7318

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。

<http://ringring-keirin.jp>



トピックス：

- ISTE 平成 21 年度予算案、通常理事会・評議員会にて承認

(財) 国際超電導産業技術研究センター（理事長 荒木 浩）は、平成 21 年 3 月 16 日に経団連会館で第 43 回通常理事会並びに第 33 回評議員会を開催し、「平成 21 年度事業計画及び収支予算」等を原案通り可決した。また、同時に「役員（理事）の選任」が行われ、4 月 1 日付けで超電導工学研究所長の 塩原 融 が理事（非常勤）に選任された。

なお、議事終了後、塩原所長より「高温超電導技術と環境・エネルギー～現状と期待される活用～」という演題で講演が行われた。



第 43 回通常理事会並びに第 33 回評議員会 会場風景

- 「超電導応用基盤技術研究開発」（第 II 期）事後評価結果、開示される

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）は、平成 21 年 2 月 18 日に第 20 回研究評価委員会を開催し、プロジェクトの事後評価結果を審議・決定した。対象プロジェクトの一つである、2003 年度から 2007 年度まで実施された「超電導応用基盤技術研究開発（第 II 期）」

（事業総額 170 億円、プロジェクトリーダー（財）国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長代行（現所長）塩原 融）の事後評価報告書が審議され、次の評価結果となった。（詳細は以下のアドレスを参照してください）

<http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/hyouka/20h/20/index.html>

評価：挑戦的とも言えるかなり高い目標であったにもかかわらず、適切な戦略による研究マネジメントに基づき、設定した目標をすべてクリアし、世界最高水準の優れた成果を挙げたことは、極めて高く評価できる。一方、既存機器の成熟度は高く、置き換えるには更に高い目標設定、更なるコスト削減のための技術の開発が望まれる。

提言：線材開発はまだ世界的な競争段階にあり、これを民間企業単独で行うことや、既存機器置き換えを目指すには、開発リスクは依然として大きく、着実に実用化研究開発を進展させるためには、

引き続き国の支援の下での研究開発推進が望まれる。

評点：下表の通り。

	事業の位置づけ・ 必要性	研究開発 マネジメント	研究開発成果	実用化、事業化の見 通し
中間（平成 17 年 8 月）	3.0	2.6	2.9	2.0
事後（平成 20 年 11 月）	3.0	2.6	2.9	2.0

－ NEDO ホームページより抜粋－

（ISTEC 常務理事 田島克己）

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導線材技術の進展「超電導材料技術の展望」

近年、特に日米において、Y 系超電導線材の熾烈な開発競争が繰り広げられ、トップデータとしては 77 K において 200-400 A/cm 幅の自己磁界中の J_c 値をもつ 500 m 長から 1 km 長の線材が得られるようになってきている。国内では、NEDO の先行プロジェクトにおける Y 系線材開発の成果を受けて、SMES、ケーブル、変圧器などの超電導電力機器のプロトタイプ実証を目的とする「リトリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトが 2008 年 6 月にスタートしている。このプロジェクトの中では、現状レベルの Y 系線材を用い機器プロトタイプの開発・実証が行われることになっている。一方、2020 年頃に予想される機器の実用化・導入段階においては、磁界中での高い臨界電流密度 (J_c)、長さ方向や幅方向の高い均一性、一層の低コスト化など、より高い性能が Y 系線材に求められる。プロジェクトの中ではこのような高性能線材の開発も並行して行われている。

さて、Y 系、Bi 系に代表される銅酸化物材料は液体窒素温度より十分高い 90 K 以上の T_c が最大の特徴であるが、その層状構造のため、一般的に物理的性質の異方性が大きく、例えば電気抵抗ゼロが保てる最大の磁界である不可逆磁界 (B_{irr}) は上部臨界磁界 (B_{c2}) に比べかなり低くなってしまふ。また、 T_c が高いと超電導コヒーレンス長は必然的に短くなり、大きな異方性と相まって、磁束ピンニングが働きにくくなる。しかしながら、Y 系材料は銅酸化物材料中で最も異方性が小さく (異方性パラメータ $\Gamma = 5-7$)、多くのらせん転位や格子欠陥を含む薄膜やテープ線材の自己磁界中 J_c は、低温で 30-80 MA/cm²、77 K で 3-8 MA/cm² と、理論的な限界である対破壊電流密度の 20-30 % に達している。これは実用 Nb-Ti 線材での比にほぼ匹敵する。また、近年では、成膜時に BaZrO₃ 等の微量不純物を混入することにより、いわゆるナノロッドやナノ粒子などのピン止め中心が分散した線材が開発され、1-5 T 程度の磁界中における J_c がかなり向上した (例えば、77 K、 $B(\parallel c) = 1$ T で 0.7-1 MA/cm²)。今後は、SMES やモータ、高磁界マグネット等の応用で必要となる、より低温高磁界での磁束ピンニング機構の解明と J_c 向上が、複雑な構造や組成に由来する不均一性の理解とその抑制と共に、大きな材料上の課題と考えられる。

一方、銅酸化物系材料以外に目を向けると、2008 年 2 月に東工大グループが新しく発見した鉄系超電導材料が最近大きな注目を集めている。約 1 年経過した現段階では、東工大グループが発見した LaFeAs(O,F) ($T_c = 26$ K) の希土類元素を、Sm や Nd に置換した材料で観測された約 55 K がこの材料系で最高の T_c である。この材料は、超電導を担う Fe-As の四面体のネットワークから構成される層と、RE-(O,F) の四面体からなる層が交互に積層された層状構造をもっており、その異方性は Y 系銅酸化物と同程度の大きさであることがわかってきている。また、Fe-As の層と (Ba, K) の層が交互に積層された材料、(Ba,K)Fe₂As₂ は、 T_c が 38 K と低い、MgB₂ と同程度か小さな異方性 ($\Gamma = 1.5-2$) をもつ。また、これらの材料の上部臨界磁界は Y 系材料並みかそれ以上に高いことがわかっている。ただ現状では、 T_c が液体窒素温度を超えていないことに加え、単一相のきれいな多結晶材料を得ることが難しく高い J_c が得られない、有毒物質の As をかなりの割合で含んでいるなど、線材応用への課題は多い。しかしながら、この材料系は、銅酸化物系材料以上の元素の組み合わせが可能のようであり、より高い T_c の材料が生まれる可能性の点でも当面目の離せない材料系と言える。

(超電導工学研究所副所長 田辺圭一)

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導線材技術の進展「REBCO 線材技術の現状」

高温超電導材料が発見されて以来、液体窒素温度における応用も含めて超電導応用への期待が高まっている。中でも、電力応用はその中心であり、送配電（ケーブル、変圧器、限流器）発電機、エネルギー貯蔵など様々な機器への展開が期待され、何れも材料として線材が必要になる。高温超電導線材としては、開発が先行している Bi 系超電導線材に比較して Y 系超電導線材は、その材料特性や構造から以下のメリットが謳われ、期待されてきた。

- 1) 低コスト
- 2) 磁界中高特性
- 3) 高機械強度
- 4) 低交流損失

しかしながら、結晶粒配向性などの要求を満たす長尺高特性線材作製の難易度が高いことからその開発は Bi 系超電導線材に対し遅れをとっていた。この技術分野において大きな進展が見られたのは、平成 10 年度より NEDO プロジェクトとして ISTEC を中心に電力、線材、重電メーカー及び多くの大学が参画した「超電導応用基盤技術研究開発」事業においてである。各機関の英知を集結し、それまで 1 m 程度であった Y 系超電導線材が長さ、特性の面で飛躍的な進歩を遂げた。

Y 系超電導線材で高い特性を得るためには結晶粒を二軸配向させる必要があるが、(株)フジクラ及び ISTEC では、フジクラが開発した IBAD（イオンビームアシスト蒸着）法により中間層を配向させる手法を用い、更に配向を促進させる CeO_2 層を開発した。加えて、この基板上に PLD（パルスレーザー蒸着）法により超電導層を形成する組み合わせで線材の開発を行い、これまで常に米国との競争下で世界をリードし続けてきている。平成 19 年度末の「超電導応用基盤技術研究開発」終了時には、超電導層に $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 相を適用した線材で、504 m 長で 350 A/cm 幅の線材作製に成功し、開発指標としている I_c （臨界電流）・ L （長さ）の積で当時の世界最高値（176 kAm）を得ている。一方、昭和電線ケーブルシステム（株）及び ISTEC では、超電導層の形成手法として低コスト化を狙える TFA-MOD（三弗化酢酸塩を用いた有機酸塩堆積）法によるアプローチでの線材開発を進めている。同法は、原理的に低コストが期待できるプロセスであるとともに、フッ素を含んでいることにより低温焼成が可能になり、配向組織も得やすいことから高特性が可能になっている手法である。但し、開発開始時期が遅かったこともあり上記の PLD 線材に比べて遅れをとっていた。しかしながら、このプロジェクト内で、反応機構の解明や高 J_c 膜作製技術の開発、シミュレーションを用いたガス流の精密制御焼成炉の開発などにより急激に開発が進んだ。最近では、上記の PLD 線材と同様の基板上で、500 m 長で 310 A/cm 幅の特性を有する線材の作製に成功しており、 $I_c \cdot L$ 値で PLD 線材とほぼ同等のレベルに到達している。さらに、応用には必須の要件となる更なる低コストを目指した線材開発も行われ、技術コストとして 3 円/Am が実現可能なプロセス開発も行われた。ここでは、MgO 材料による高速 IBAD を用いた線材などでの開発が行われ、上記コストが原理的に可能であることを証明した。

Y 系超電導線材の開発は上記の通り、近年急速に進展し、機器開発を開始できるレベルまでに到達した。そこで、平成 18 年度からは「超電導応用基盤技術研究開発」の中で、Y 系超電導線材を用いた機器へ向けてケーブル、変圧器、モータ、限流器などの要素技術開発が始められ、低交流損失や限流効果など、Y 系超電導線材の特徴を確認できる成果が挙がっている。これらの成果を受けて、平成 20 年度からは新たなプロジェクトとして Y 系超電導線材による機器開発を中心とした「イットリウム系電力機器技術開発」が開始されている。ここでは、これまでの成果に基づいて、線材メーカーが機器開発に必要な線材を提供し、SMES、ケーブル、変圧器の電力応用機器の開発を進めているところである。

一方、線材の技術レベルの観点からは、上述の通り、確かに機器開発を開始できるレベルには到達したものの、実用化を考えたときには、磁界中特性を含めた特性向上、量産化、高速化、低コス

ト、加工技術などを含めた歩留向上など、まだまだ開発が必要な要素が多く、その求められる仕様も現有レベルを大きく超えるものである。図には、前プロジェクトが終了した時点での線材開発レベルと、2020 年ごろに想定されている超電導機器が普及導入される際に求められる線材仕様をまとめた。何れの項目も、全プロジェクト終了時の最高値を大きく上回るレベルの線材仕様が必要であり、さらにはこれらのレベルを安定的に量産化する技術にしなければ大量の線材を必要とする普及導入時には対応できないことになり、大きな技術的進展が必須であることがわかる。したがって、前述の機器開発とともに継続的な線材開発が超電導機器実用化には不可欠であり「リットリウム系電力機器技術開発」プロジェクト内でも一つの柱として線材作製技術開発を進めている。ここでは、従来の材料開発側からの視点に基づいた技術開発ではなく、ニーズサイドである機器側から必要とされる仕様を実現すべく目標が設定され、ISTEC が中心になって開発が進められている。今後は、ここでの開発の推進と共にさらに開発された成果を、量産可能な技術まで展開し、将来の超電導機器の普及導入時期に対応可能な技術開発が期待される場所である。

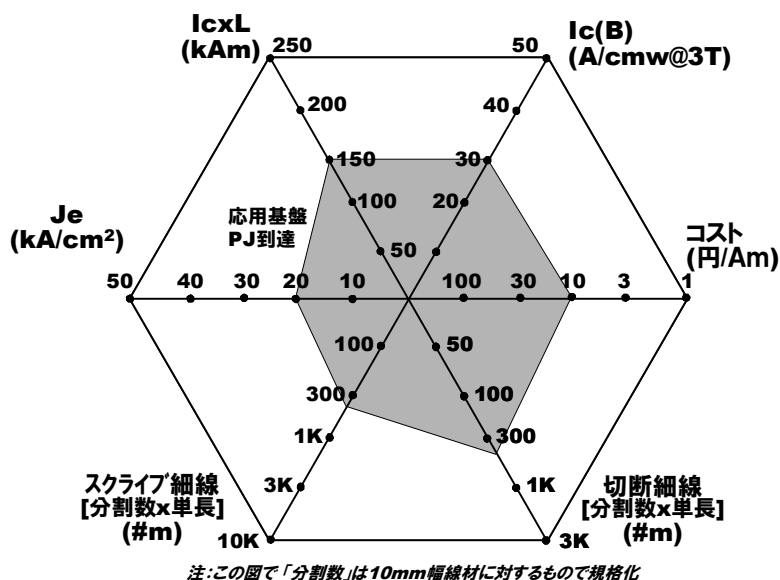


図 普及・導入時に求められる線材の主な仕様と超電導応用基盤技術研究開発で達成された線材レベル（網掛け）

(SRL/ISTEC 線材研究開発部長 和泉輝郎)

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導線材技術の進展「IBAD/PLD 法 Y 系超電導線の線材技術の現状」

株式会社 フジクラ

材料技術研究所

上席研究員 齊藤 隆

IBAD/PLD 法超電導線は IBAD 法によって高度に結晶配向させた中間層の上にエキシマレーザーを用いたレーザー蒸着法によって超電導層を形成し作製する。2007 年度に終了した超電導応用基盤プロジェクトにおいてはいち早く最終目標であった臨界電流 300 A、長さ 500 m の線材を実現することができ、あわせて製造速度目標、コスト目標も達成することができた。しかし実用に供するためには性能面、コスト面の改良が求められている。性能面においてはこれまで短尺で 600 A クラスの臨界電流を得ていたが、さらなる高性能化に取り組んでいる。

その一例として 1,000 A/cm の臨界電流の線材の作製に成功している。従来、臨界電流の向上のためには臨界電流密度の改善とともに厚膜化による向上を図ってきた。この 1,000 A/cm 線材においては主として厚膜化による臨界電流の向上を行った。これまで超電導層を厚くしていくと 3 μm 程度を越えると次第に超電導層の結晶性が低下した膜が形成することや、中間層近傍の部分の結晶が分解を始めるなどのために膜厚に対する臨界電流の上昇の鈍化や低下を生じていた。このことを解決するため成膜時の加熱方法をこれまでの基板裏面から加熱する方法から成膜空間全体を加熱するホットウォール型の加熱方式を採用した。作製した超電導線は 5 μm を超える超電導層の膜厚にもかかわらず臨界電流は膜厚とともに増大し 1,000 A/cm を超える線材を得ている。臨界電流の向上はアンペア m あたりのコストの低減に寄与することにもなる。また、70 K レベルでの高磁界超電導機器の実現、コンパクト化にもつながってくる。

また、長尺化、低コスト化の観点からは製造速度の向上が必要となっている。特に、IBAD 中間層は性能面では良好なものの製造速度が難点であった。IBAD 法の開発当初は小型 IBAD 装置を用いて 1 時間に 0.1 m 程度しか中間層を作製することができなかった。その後、超電導応用基盤プロジェクトにおいて高速成膜技術を開発し 5 m/h を超える高速化に取り組んできた。さらなる高速化を実現するために従来中間層材料として使ってきた Gd-Zr-O から MgO への転換を図っている。

Gd-Zr-O 中間層では 1 μm 程度必要であった IBAD 中間層厚さを下地に Al-O や Y-O の薄い層が必要となるものの MgO 中間層では数 10 nm ですむため高速化が可能である。均質で高配向した MgO 中間層と Ce-O 中間層の組合せで従来の中間層を用いた場合と同等の超電導特性が得られることを確認している。この IBAD 中間層は 500 m/h で作製することが可能となったことから長尺化とともに低コスト化にも大きく寄与すると考えられる。

今後はさらなる高性能化、低コスト化をめざした Y 系超電導線の開発を続け、Y 系超電導機器の普及の一助としたい。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導線材技術の進展「MOD 法 YBCO テープの長尺化技術の進展」

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
プロジェクト長 青木裕治

MOD (Metal-Organic Deposition) 法は、有機金属塩を溶かした原料溶液を基板の表面に塗布、乾燥した前駆体膜（仮焼膜）を作製し、更に熱処理（本焼）をすることで結晶化した薄膜を作製する手法である。REBa₂Cu₃O_y 超電導線材の作製では、原料溶液に三弗化酢酸塩（Tri-Fluoro-Acetate）を用いることから TFA-MOD 法と言われ、本焼において水蒸気と酸素を含む雰囲気ガス中で前駆体膜から超電導薄膜への結晶化反応を行う。この反応過程で発生する HF ガスは超電導膜の成長を抑制するものであり、超電導薄膜の成長界面の HF 濃度を低くする事、即ち反応ガスを速やかに炉外に排出することが本プロセスのポイントであり、各研究機関が創意工夫をしているところである。

長尺線材の検討は、米国の AMSC (American Superconductor)、日本の超電導工学研究所 (SRL)、昭和電線ケーブルシステム (SWCC-CS)、3 つの機関がリードしており、AMSC と SRL が本焼を Reel-to-reel 式の連続熱処理プロセスを常圧で行うのに対し、昭和電線は減圧雰囲気でのバッチ式熱処理プロセスを採用している。Reel-to-reel 式の熱処理プロセスは原理的に作製線材長が無制限となるが、線材の移動速度が電気炉の炉長と成長速度によって決まるために高速製造を不得意とする。一方、バッチ式熱処理はドラムに仮焼膜を巻き付けて一括熱処理をするため製造可能線材長が装置の大きさによる制限を受ける。しかし、密閉されたチャンバーの中で熱処理するため雰囲気制御が容易であり、一度焼成条件が決定すると高い再現性を示すことが確認されている。Reel-to-reel 式熱処理の最長記録は、2008 年秋に AMSC が公表した 200 m×250 A/cm 幅となっている。昭和電線はバッチ式熱処理で 2007 年 2 月に 200 m×250 A/cm 幅の線材を作製し、その後 500 m 線材用の大型電気炉を開発した。炉体の大型化に伴うガス導入機構と、HF ガス排出機構の最適化に苦労したが、2008 年 11 月に 500 m×310 A/cm 幅の線材作製に成功した。SuperPower の MOCVD 法、フジクラの IBAD-PLD 法に続き、MOD 法でも 500 m×300 A/cm 級線材が作製できることが実証された。図 1 に 500 m 線材の外観を、図 2 には 1 m 間隔で測定した線材 I_c の長手方向分布を示す。

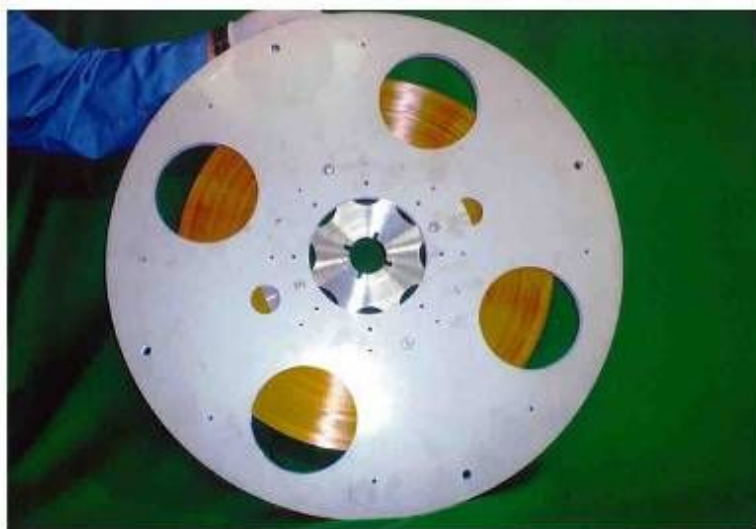


図 1 バッチ式熱処理で作製した 500 m 線材

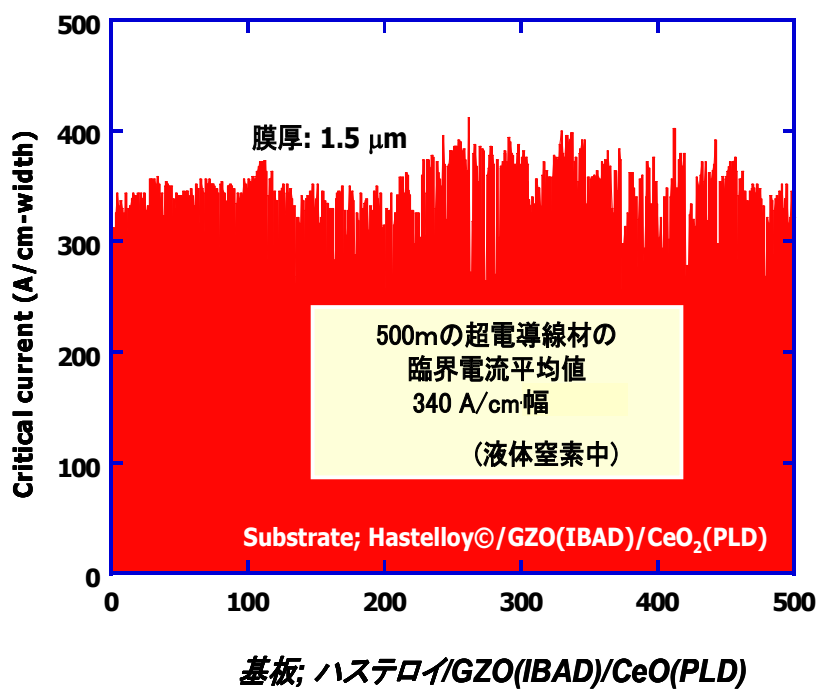


図 2 500 m 線材の長手方向の I_c 分布

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導線材技術の進展「配向基板を用いたテープ線材技術の進展」

住友電気工業株式会社
電力・エネルギー研究所 薄膜超電導線グループ
永石竜起

配向金属基板テープ線材は、配向金属あるいは表面に配向金属を備えたテープ状金属基板に拡散防止層や配向層を中間層として設け、その上に超電導層を形成した構造を有する。配向金属として Ni-5at%W（以下、NiW と表記）が汎用化されているが、その磁性によりケーブル等の交流応用における損失が課題となっている。本課題を回避するため、磁性材料の割合を少なくしたクラッド基板の開発が進んでいる。

住友電工では、配向金属層を表面近傍に有するクラッド基板を用いた超電導テープ線材を開発した^{1,2)}。NiW 基板とクラッド基板の磁化損を比較すると、前者が $1,300 \text{ J/m}^3$ であるのに対し、後者が 52 J/m^3 と $1/25$ に減少した。また、NiW 基板で別の課題となっている機械強度について評価を行い、 I_c 劣化開始引っ張り強度が NiW 基板の 200 MPa に対し、クラッド基板では 500 MPa に向上することが示され、高い実用性が証明された。

一方、クラッド基板を超電導線材用基板として適用するために、表面平滑性および面内配向性の向上検討を行った。その結果、 R_a を 30 nm とし、面内配向度を NiW 基板の 6.2° に対して、 4.1° とすることができた。中間層は、RF スパッタ法により CeO_2 シード層（ $\sim 0.1 \mu\text{m}$ ）、YSZ 拡散防止層（ $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$ ）、 CeO_2 キャップ配向層（ $0.05 \sim 0.08 \mu\text{m}$ ）の 3 層を形成し、PLD 法により GdBCO 超電導薄膜を形成した。作製した超電導線材の I_c を評価した結果、超電導膜厚 $2 \mu\text{m}$ で最大で 380 A/cm となり、NiW 基板上と同等の特性を得た。

さらに、クラッド基板により交流損失が低減することを確認するために、導体を試作し交流損失の評価を行った。まず、テープ線材を、作製した 1 cm 幅から 4 mm 幅にスリット加工した後、周囲に約 $20 \mu\text{m}$ 厚の銅を安定化層として電解メッキにて形成した。NiW 基板およびクラッド基板で各々 4 層 56 線材の導体を作製し比較した結果、通電電流 1 kA における交流損失が NiW 基板では 2 W/m 以上あったのに対し、クラッド基板では $1/10$ 以下の 0.17 W/m であった。これにより、クラッド基板の低磁性による交流損失低減が可能であることを示すことができた。

配向クラッド基板を用いたテープ線材は、クラッド基板の材料の低コスト性や、他手法と比べて少ない中間層の層数等のメリットを有しており、種々の応用に適用可能な線材として期待できる。

参考文献

- 1) Y. Shingai *et al.*, 2MX09, 2008 Applied Superconductivity Conference, Chicago, Illinois USA, August 17 - 22, 2008.
- 2) T. Nagaishi *et al.*, WT-7-INV, 21st International symposium on Superconductivity, Tsukuba, Japan, October 27-29, 2008 (to be published in the ISS 2008 proceedings as a special volume of Physica C).

特集：超電導線材技術の進展「ITER-TF コイル用 Nb₃Sn 線材技術の現状」

日立電線株式会社 電伸部
主管技師 鈴木洋一

ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社
企画管理部長 宮武孝之

日立電線とジャパンスーパーコンダクタテクノロジー（JASTEC）は、ITER 機構の国内機関である（独）日本原子力研究開発機構（JAEA）より、2008 年 3 月に TF コイル用 Nb₃Sn 素線を各 1 個分ずつ受注した。両社ともブロンズ法で素線を製作する。今回の受注量は、TF コイル用全素線 420 t（日本担当はその 25 %）のうちの約 50 t にあたり、2010 年 2 月末まで約 2 年にわたって製作する。

TF コイル用 Nb₃Sn 素線の断面写真を図 1 に、その主な仕様を表 1 に示す。この仕様は、JAEA が両社を含めた供給候補先と複数回にわたって行った線材の量産試作によって、実現性が検証されている。ここで、臨界電流 I_c は、固溶限界と同等の高 Sn 濃度ブロンズを使用し、素線に加工する技術を確認することにより、仕様の 120 % 以上の値を達成した。また、ヒステリシス損失 Ph は臨界電流密度 J_c と比例する傾向にあり、 J_c と Ph が二律背反の関係の中、フィラメント材質／配置等を工夫して、仕様を満足させることができた。

TF 導体は、素線 900 本と銅線 522 本が撚られた、ケーブル・イン・コンジット（CIC）導体である。JAEA にて量産試作線材を用いて CIC 導体が試作され、TF コイルの動作条件（有効磁界 11.3 T、温度 5.7 K、軸方向歪み-0.77 %）における導体性能が確認されている。今回の素線の受注において、両社には量産試作と同等の性能を有する線材を確実に生産することが求められている。このため、 I_c 仕様は、表 1 の値から、初期の製作実績に応じて改訂される。これまでのところ、両社とも数トンの素線を生産し、その I_c の平均値は仕様を 20 % 以上上回るレベルを確保し、品質面でも順調に推移している。3 月には JASTEC から最初の素線が撚線を担当する日立電線日高工場に納入された。今後、両社から続々と納入される予定である。

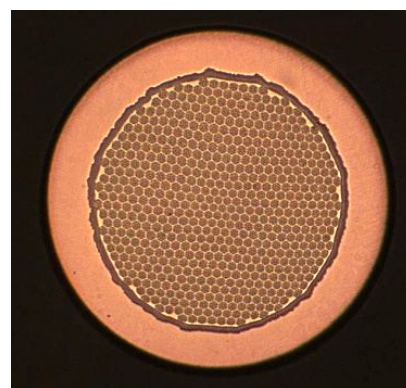


図 1 TF コイル用 Nb₃Sn 線材（日立電線製）の断面写真

表 1 TF コイル用素線（ブロンズ法）の主な仕様

	仕様	備考
外径	0.82 mm	
銅比	1.0	
クロム被覆厚さ	2.0 μ m	
臨界電流	>190 A	@12 T, 4.2 K, ε -0.25 %
ヒステリシス損失 (素線あたり)	<500 mJ/cm ³	@ ± 3 Tcycle, 4.2 K

これまで Nb₃Sn 線材の定常用途は NMR マグネットに限られており、世界規模でも年間 20 t 程度の生産量であった。このように Nb₃Sn 線材が複数年にわたって 1 社で年 10～20 t を越える規模で大量生産されるのは初めての経験であり、原料、プロセスの性能への影響等、生産技術や品質管理面で数多くの知見が得られると期待される。本プロジェクトの Nb₃Sn 線材の工業技術確立における意義は大きい。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導線材技術の進展「Nb₃Al 線技術の展望」

日立電線株式会社 技術本部
金属材料研究部 先端材料グループ
田中和英

急熱急冷・変態 (Rapid-Heating/Quenching and Transformation) 法 Nb₃Al 線材は、中磁界から高磁界における J_c 特性及び耐歪特性に優れていることから、加速器や NMR マグネット用材料として期待されている。当社ではこれまで、ジェリーロール法で作製した線材の高 J_c 化・長尺化・安定化など実用化に向けた線材開発を進めてきた。

RHQT 法は、急熱急冷処理により Nb₃Al 化合物相の前駆体となる Nb-Al 過飽和固溶体を生成した後、変態熱処理を加えて Nb₃Al 超電導線材を得る手法である。現在では、4.2 K、20 T 中で 200 A/mm² を超える J_c が、安定して得られるレベルに到達している。図 1 に示すように、20 T の印加磁界下では、ブロンズ法で作製した Nb₃Sn 線材に比べて約 1.5 倍高い J_c が得られている。図 2 に RHQT 法で作製した線材の耐歪特性を示す。0.3 % の歪を加えても J_c の低下率は 5 % 以下であり、Nb₃Sn 線材に比べて圧倒的に優れることがわかってきた。これにより、電磁力に対するマグネット設計も比較的容易に行うことができる。

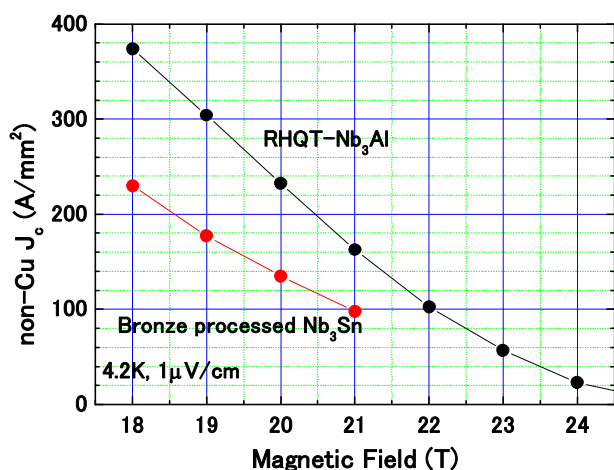


図 1 RHQT 法で作製した Nb₃Al 線材の J_c の磁界依存性

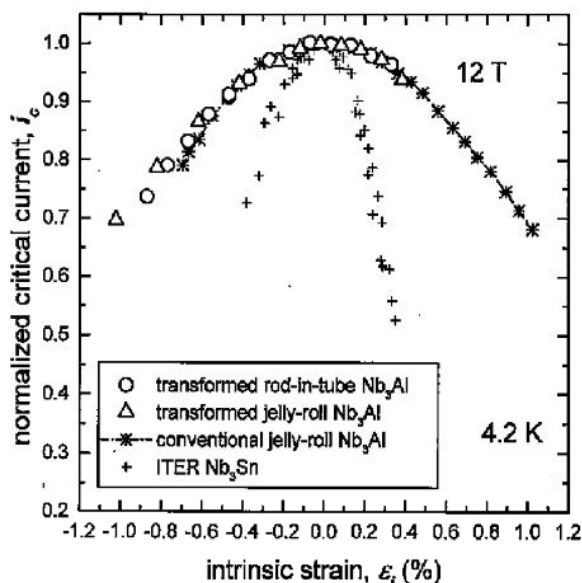


図 2 RHQT 法で作製した Nb₃Al 線材の規格化 j_c の歪依存性¹⁾

さらに、RHQT 法で作製した線材を平角形状に加工しながら銅安定化を付与するクラッド法 (図 3)、あるいは、再度銅パイプに組込んで伸線するリスタック法 (図 4) により、 J_c を約 1.3 倍に向上することに成功している。特に、リスタック法により作製した線材においては、図 5 のように 4.2 K、14 T 中で 1000 A/mm² を超える J_c が得られており、次期加速器用の線材として注目されつつある。現在、当社において、押出による量産化の試作を進めており、km 級線材が実現できれば、加速器用線材の候補として一気に浮上する可能性がある。

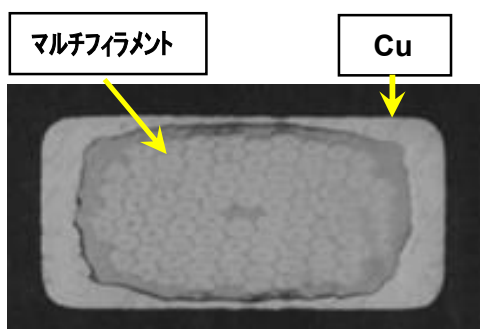


図 3 銅クラッド線材の横断面

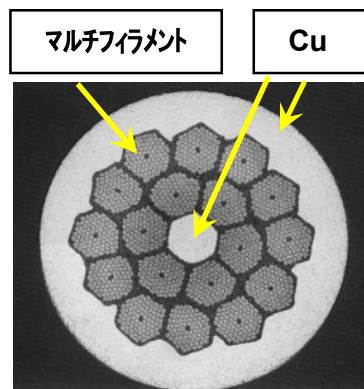


図 4 リスタック線材の横断面

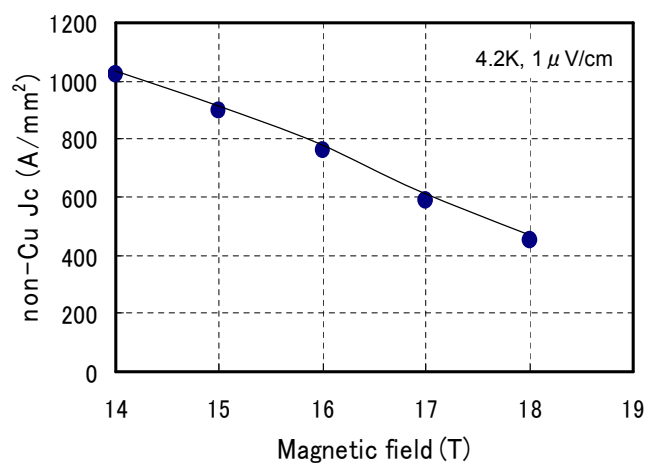


図 5 リスタック線材の J_c の磁界依存性

参照

1) T. Takeuchi *et al.*, Appl. Phys. Lett., vol. 71, pp. 122-124, July 1997.

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連 4-5 月の催し物案内

4/8

材料イノベーションシリーズ第 9 回「21 世紀は超伝導材料を使いこなす時代」
～超伝導技術が地球をまもる～

場所：(社) 日本化学会 化学館 6 階 601 会議室、東京都千代田区

主催：(社) 未踏科学技術協会

問合せ：(社) 未踏科学技術協会 特別講演会担当：末次、伊藤

Tel: 03-3503-4681、Fax: 03-3597-0535、E-mail: mitoh-sws@sntt.or.jp、<http://www.sntt.or.jp/>

4/8-10

2009 INTERNATIONAL EVCERAMIC EXHIBITION

場所：東京ビッグサイト

主催：日本セラミックス協会、フジサンケイビジネスアイ、他

問合せ：<http://www.cnt-inc.co.jp/ceramics/>

4/15

(社) 未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会第 35 回シンポジウム/第 13 回超伝導科学技術賞授
賞式、超伝導 2009—使われる超伝導の時代へ—

場所：日本科学未来館 みらい CAN ホール、

東京都江東区青梅 <http://www.miraikan.jst.go.jp/guide/route>

問合せ：(社) 未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会 担当：大貫

Tel: 03-3503-4681、Fax: 03-3597-0535、E-mail: fsst@sntt.or.jp

5/4-8

IEEE International Magnetism Conference 2009 (INTERMAG2009)

場所：Sacramento, California (USA)

問合せ：<http://www.intermagconference.com/intermag2009/>

5/13-15

CIGRE Workshop on Test Techniques and Procedures for HTS Power Applications

場所：Nagoya University, Nagoya, Japan

共催：CIGRE SCD1 WG15, Chairman Prof. Dr. Hitoshi Okubo, CIGRE JNC, METI, NEDO, TEPCO,
Chubu Electric Power Co., IEEE Nagoya Section, EcoTopia Science Inst., Nagoya University

問合せ：Secretary Prof. Dr. Mathias Noe, Forschungszentrum Karlsruhe,

Tel: +49 7247 82 3500, Fax: +49 7247 82 2849, E-mail: mathias.noe@itp.fzk.de

5/25

超電導技術動向報告会 09

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/>

ISTEC
国際超電導産業技術研究センター

超電導

技術動向報告会09

●開催日 2009年5月25日(月) 9:30~17:00
●場所 都市センターホテル3F コスモスホールⅠ
東京都千代田区千代田2丁目4番1号
TEL 03-3265-8211
●主催 財団法人国際超電導産業技術研究センター
●参加費 無料
●申し込み ホームページからお申し込みください。
<http://www.istec.or.jp/event/>

超電導
技術動向報告会09

●開催日 2009年5月25日(月)
●場所 都市センターホテル 3F コスモスホールⅠ
●時間 9:30~17:00(開場9:00、閉場17:10)

共催：(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 特設事務局 連絡 佐藤

9:30 開会挨拶
(財)国際超電導産業技術研究センター 事務理事 清川 寛
来賓祝辞
経済産業省 産業技術政策課 研究開発課 課長 土井 貞由
(36) 新エネルギー 産業技術総合開発機構 新エネルギー技術開発部 部長 福田 秀樹

9:40 基調講演「Y系超電導電力機器基盤技術開発」
(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 所長 堀原 敏
講演「電力機器応用に適応するY系線材作製プロセスの開発」
(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機器研究開発部 部長 杉山 博郎
講演「高Jc-B特性を目標としたピン止め点導入Y系線材」
九州工業大学 教授 松本 実
講演「Y系線材による電力機器技術開発の状況」
超電導工学研究所 電力機器研究開発部 部長 藤澤 昇
講演「住友電工におけるB系線材開発と応用」
住友電工工業(株) 材料技術開発本部 技術長 林 裕彦

12:10~13:30 昼食休憩

13:30 講演「ニオブ系超電導デバイス開発の新展開」
(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 デバイス研究開発部 低温デバイス開発室 室長 日高 勉夫
講演「次世代気象レーダー用超電導フィルタシステムの開発」
(株)東芝 研究開発センター 電磁特性工学センター 主任研究員 加賀野 博幸
講演「低交流損失Y系線材に向けた加工・評価技術の開発」
(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 調査部 材料開発グループ 部長(デバイス研究開発部 部長) 田道 圭一
講演「フライホイール用高温超電導バルク体磁気軸受の開発」
(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 低温システム研究開発部 部長 長嶋 賢

15:30~16:00 休憩

16:00 講演「超電導国際標準化のこれまでと今後」
(財)国際超電導産業技術研究センター 標準部 部長 田中 靖三
基調講演「電力機器応用と酸化物超電導」
理研大学 教授 仁田 昌三

17:00 閉会挨拶
(財)国際超電導産業技術研究センター 事務理事 田島 克己

17:10 閉場

●問い合わせ先
ISTEC
(財)国際超電導産業技術研究センター 普及啓発部
〒135-0062 東京都江東区東雲1丁目10番13号
TEL: 03-3536-7283 FAX: 03-3536-7318
E-mail: info@istec.or.jp

(編集局)

超電導 Web21 トップページ

新聞ヘッドライン (2/21-3/19)

- JR 東海 1000 人採用 リニア新幹線に備え 2010 年度 過去最多 2/21 読売新聞
- 鉄系超伝導 登場 1 年 「最悪の相性」一転主役に 元素の組み合わせ幅広く 2/22 読売新聞
- 核心 ガラパゴスを出よう 巣ごもりは進化をゆがめる 2/23 日本経済新聞
- 多様化・国際標準化する BCP 国際標準の確立に期待 コスト・効果を勘案し対応 2/24 日刊工業新聞
- 成田・羽田リニア構想 事業費 3 兆円 財源など課題 国交省 2/25 電気新聞
- リニア駅 我が町に 山梨の 4 地域 熱い誘致合戦 2/26 毎日新聞 (夕)
- 活躍の場 広がる超電導 室温超電導 夢も浮上 リニアや送電線 省エネ効果期待 3/1 日本経済新聞
- 超伝導科学技術賞 黒木教授ら選定 未踏科学技術協会 3/31 日刊工業新聞
- プラズマシミュレーター 核融合研で稼働開始 3/3 電気新聞
- ルネサンス絵画 テラヘルツ波で内部分析 情通機構 下地構造や損傷確認 3/4 日刊工業新聞
- 自然エネルギーに投資 オバマ政権 経済活性化狙う 「賢い送電網」巨大な可能性 温室ガス削減 排出量取引で 3/4 朝日新聞 (夕)
- 医療機器に世界不況の波 米の投資抑制・円高響く コスト削減急ぐ 3/5 日経産業新聞
- たんぱく質の構造や働き 生きた細胞中で分析 京大など 核磁気共鳴を応用 3/5 日経産業新聞
- “負の熱膨張”酸化物合成 ランタン・銅・鉄で新材料 京大 3/5 日刊工業新聞
- 「直流給電システム」の開発 NTT-F データセンターを省エネ化 変換ロス、大幅に低減 国際標準化めぐり欧米と競争も 3/6 電気新聞
- 広がる超電導の世界 磁石の力で時速 500 キロ リニア新幹線 省エネ 低い温度が必要 3/7 読売新聞 (夕)
- 新構造の炭素物質 合成のヒント数学で予言 環境エネ材料 開発に期待 専門家の連携不可欠に 3/12 日経産業新聞
- リチウム系超電導線 15 年までに生産体制構築 古河電工 拡大需要取り込む 3/13 日刊工業新聞
- 技術ウオッチ ナノテクで土や水浄化 戸田工業、コスト 3 割減 3/13 日本経済新聞
- 国際標準 経産省、海外連携を加速 環境・エネ バイオ分野「日本発」の規格化支援 3/16 日刊工業新聞
- 高速点火核融合実現へ 超高強度レーザー開発 阪大 3/16 日刊工業新聞
- 風力発電所、送電量一定に 米電力大手にシステム 日本風力開発 来月にも実証試験 3/17 日本経済新聞
- ジャパンエコセンサー 電流センサー、精度 100 倍 磁性流体使い誤差抑える 3/17 日経産業新聞
- テクノロジートーク 第 52 回 規格化 誤った道の修正遠く 3/17 電気新聞
- 21 世紀を拓く 知の創造者たち 東京電力 省エネ・高品質で安定供給 系統会席サポート 超電導送電に全力 太陽光発電に規格 3/18 Fuji Sankei Business i
- 知っ得! 「賢い送電線」日本は消極的 3/18 朝日新聞 (夕)
- 横河電機が磁場計測装置 脊椎診断 痛みゼロ 3/19 日経産業新聞
- 電力市場の風景が変わる 再生可能エネとタッグ 進む標準化 可能性秘め 3/19 電気新聞

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き（2009 年 2 月）

電力

Zenergy Power plc (2009 年 2 月 2 日)

Zenergy Power plc は、米国 DOE から Sandia National Laboratory との低コスト Y 系線材の画期的量産技術開発に関する契約延長のための追加資金を受領した。Zenergy 社は、2003 年から低コスト Y 系線材技術の開発を進めてきており、そのための資金を 2006 年に DOE から受け取っている。それ以来、Zenergy 社と Sandia 研究所は Zenergy 社が特許を保有する全化学製造技術のコスト面での利点を明確にしてきたところである。この契約延長の結果、この開発プロジェクトの費用総額は 180 万ドルとなり、2010 年まで開発が継続する。Zenergy 社 CEO、Jens Müller は次のように述べた。「Sandia 研との協力により世界先端のすばらしい研究リソースが利用でき、また、米国 DOE の支援により、世界で最高にコストエフェクティブである可能性を持つ超電導線材の開発をスピード感を持って進めているところである。」

出典:

“Extension of DOE Funded Superconductor Development Project”

Zenergy Power press release (February 2, 2009)

http://www.zenergypower.com/images/press_releases/2009-02-02-sandia.pdf

American Superconductor Corporation (2009 年 2 月 3 日)

American Superconductor Corporation (AMSC) は 2008 年 12 月 31 日に終了する第 3 四半期の収支を発表した。当期収入は、前年同期 3,260 万ドルに対し 4,130 万ドルへと 27 %増加した。粗利益率は、前年同期の 30.9 %から 23.2 %に減少した。粗利益率の低下は、主としてある種の製品の予想を上回るコスト高、過剰在庫及び為替差損によるものである。純損失は、前年同期の 730 万ドルに対し、当期は 780 万ドルであった。2008 年 12 月 31 日時点で、同社が保有する現金、現金等価物、流通証券及び使途制限付現金あわせて 1 億 2,260 万ドルである。当期末時点での受注残は約 6 億 200 万ドルであり、前年同期末は 1 億 6,800 万ドルであった。同社創立者で CEO の Greg Yurek は次のように述べた。「我々の成長コアである中国の風力発電市場と米国電力グリッド市場は第 3 四半期を通じて好調であった。我々は、この傾向が当面続くものと考えている。風力発電は引き続き我々の成長エンジンではあるが、第 3 四半期の収入 4,600 万ドルの内の 2,700 万ドル以上は D-VAR®スマートグリッド・ソリューションによるものである。これら新規受注により、我々は現在の受注残 6 億 200 万ドルの内 2009 年度に 1 億 7,500 万ドル以上が現金化されると予想している。2009 年度及びその後の 2 年間の受注残及びコア市場における我々の強みを考えると、2009 年度及びそれ以降の強い成長に向け我が社は良好な位置づけにある。」

出典:

“AMSC Reports Third Quarter Fiscal 2008 Financial Results”

American Superconductor Corporation press release (February 2, 2009)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1251181&highlight

Zenergy Power plc (2009 年 2 月 9 日)

Zenergy Power plc は、RWE Power AG から同社の河川部に設置された既存水力発電所に、可変速超電導発電機を設置した場合に得られる発電量の増加の可能性を検討して、報告書に纏めるよう依頼された。Zenergy 社は RWE 社から河川部の既存発電所に関するデータを受け取り、超電導部

品を使った水力発電機を使うことにより発電所の改良を行った場合、水の流量、タービンの効率や、条件を加味した上でどの程度の効率、全体の発電量が増加するかについて報告書を纏める。この解析結果は、2009 年後半には纏められる予定である。RWE 社は、得られた結果を基に、河川部の発電所で既存の発電機を超電導発電機に置き換えた場合の経済面での事業性評価を行うとしている。RWE 社は全部で 10 の河川部の発電所を運転しており、年間の総発電量は併せて 800 GWh に上る。

出典:

“RWE Hydro Power Contract”

Zenergy Power press release (February 9, 2009)

http://www.zenergypower.com/images/press_releases/2009-02-09-rwe.pdf

American Superconductor Corporation (2009 年 2 月 10 日)

American Superconductor Corporation (AMSC) は、米国 DOE の National Renewable Energy Laboratory (NREL) 及び National Wind Technology Center (NWTC) と CRADA (Cooperative Research and Development Agreement) を締結した。この契約により、10 MW 級風力発電機の経済性評価が行われる。CRADA は、連邦政府及び民間企業が各々の（人的、技術的）資源を最適配分しつつ、環境保護に関する専門知識を共有し、技術の速やかな商業化を図るためのものである。12 ヶ月間の契約の一環として、AMSC Windtec™ がダイレクトドライブ超電導発電機及び関連部品を含め 10 MW 超電導風力発電機全体のコスト解析を行う。NWTC は、この風力発電機の経済的インパクトを評価する。また、この CRADA と並行し、National Institute of Science and Technology's Advanced Technology Program (ATP) から資金を得ているプロジェクトの一環として、AMSC 社及び TECO-Westinghouse Motor Company は 10 MW 級ダイレクトドライブ超電導発電機に向け高温超電導技術及び関連技術の開発を進める予定である。

産業調査会社、Emerging Energy Research 社は、最近、2007 年には風力発電機に 270 億ドルが投資されたと報告している。この投資額は 2015 年までには、年額 550 億ドルへと倍増するものと期待されている。

出典:

“AMSC and U.S. Department of Energy Agree to Collaborate on 10 Megawatt-Class Superconductor Wind Turbines”

American Superconductor Corporation press release (February 10, 2009)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=86422&p=irol-newsArticle_Print&ID=1254866&highlight

Nexans (2009 年 2 月 26 日)

Nexans 社は、英国 Lancashire の中間電圧（11 kV）変電所への試験的な設置のための超電導限流器を Applied Superconductor Limited (ASL) に出荷した。この超電導限流器は地域電力網の効率と安全性を最適なものとするために使用される予定である。また、これにより超電導限流器がもたらす効果を実際に実証することが見込まれる。この超電導限流器はメッシュ状の電力ネットワーク、再生エネルギー源のネットワークへの接続、将来のスマートグリッドにおいてより大きな役割を果たすものと期待されている。Nexans SuperConductors 社取締役 Joachim Bock は次のように述べた。

「超電導限流器の商業化のための壁は今回のプロジェクトによって打ち破られることになろう。中間電圧限流器や各種仕様の限流器も現在、製造している。発電所の補助電力網の保護など、特定用途の顧客の需要に対応してこのような限流器を適用することは、装置がモジュール化されていることもあって、容易である。我々は、材料、コンポーネント、システムとバリューチェーンを駆け上がり、この製品によって顧客に最適ソリューションを提供できるまでになった。」 Nexans SuperConductors 社はクライオスタットも含め超電導限流器を設計、製作した。電流制限機能は、

一連の想定される全ての短絡試験や高電圧試験を経て成功裏に実証されている。

出典:

“Nexans supplies innovative Superconducting Fault Current Limiter to Applied Superconductor Ltd. for pilot UK installation”

Nexans press release (February 26, 2009)

http://www.nexans.com/eservice/Corporate-en/navigatepub_142482_-20191_297_2579/Nexans_supplies_innovative_Superconducting_Fault_C.html

センサー

Delft University of Technology (2009 年 2 月 2 日)

オランダ、デルフト工科大学の研究者は、チリに建設が進められているスーパー望遠鏡を使った Atacama Large Millimeter Array (ALMA) の主要部品として使われる予定の放射センサーの機能を超電導トンネル接合により大幅に改善した。この ALMA は 5,000m の高度に 66 基のスーパー望遠鏡を設置するもので、この望遠鏡アレーは、2012 年に稼動開始すれば、天文学の分野で大きな進歩をもたらすものと期待されている。酸化アルミニウム中の窒化アルミニウムにより、非常に優れた均一性と感度を備えたナノ構造を作り出すことに成功した。この研究成果は、4 月に打ち上げられ、ハッブル望遠鏡の後継として使われる予定のハーシェル宇宙望遠鏡にも適用可能なものである。デルフト工科大学はハーシェル望遠鏡の測定装置の鍵となる多数のトンネル接合の開発も行った。

出典:

“Nanotechnology makes supertelescopes much more sensitive”

Delft University of Technology press release (February 2, 2009)

<http://www.tnw.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=08a577a7-209b-43f6-b85b-6d74fb4a629c&lang=en>

加速器

CERN (2009 年 2 月 6 日)

最近開催されたワークショップで、CERN 経営陣に対し Large Hadron Collider (LHC) の運転再開に関する一連の勧告が行われた。この勧告が受け入れられれば、LHC によって 2009 年晩くに物理データが得られるようになり、運転はその冬から 2010 年秋まで継続されることになる。このスケジュールであれば、最初の新しい物理研究の結果を得るのに十分な量のデータを集めることができる。

ワークショップで議論された話題の 1 つは、LHC の一時的シャットダウンをもたらした事故原因であった。この事故以来、小さな異常の検知という点では大きく進歩しており、LHC の運転再開までに新しい警報システムが設置され、完全な試験が行われる予定である。事故調査の結果、2 つの新たな疑わしい接続部が明らかになった。その内の 1 つは既に調べられて、改善が図られることになっている。CERN 加速器担当理事 Steve Myers は次のように述べた。「CERN の 2009 年の最優先課題が衝突実験データを得ることではあるが、注意深く進めていくことが原則である。CERN 経営陣に対してなされたこの勧告は、今年の運転という目的を達成しつつも注意深く進めるということである。」

出典:

“CERN to set goals for first LHC physics”

CERN press release (February 6, 2009)

<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2009/PR01.09E.html>

CERN (2009 年 2 月 9 日)

CERN 経営陣は、最近提案された Large Hadron Collider (LHC) 再開スケジュールを確認した。新しいスケジュールによれば、(再開後) 最初のビームは 2009 年 9 月に生成され、衝突実験は 10 月晩くに行われる。12 月に短期間の技術的な運転停止を行うことを除き、LHC は 2010 年秋まで運転され、最初の物理解析をおこなうのに十分な量のデータ蓄積を確実なものとする。引き続いて、2010 年中にその結果を発表する。この新たなスケジュールによって、2010 年の鉛イオン衝突(実験)が可能になる。CERN 所長 Rolf Heuer は次のように述べた。「我々の現在のスケジュールは疑いもなく LHC 及びデータを待ち望んでいる物理研究者にとって(望みうる)最適のものである。我々が運転を再開する前に LHC に関して全ての必要な仕事が行なわれることを確実なものにするという意味で、慎重に進めていく。これにより、物理研究が今年再開できることになる。新しいスケジュールは、LHC が 7 月初めには冷却されるだろうという以前の予想に比べて、6 週間の遅れとなる。」この遅れの原因の一部は、防護機能を強化したシステムと早期警報機能に関する対策を行ったことによるものである。

出典:

“CERN management confirms new LHC restart schedule”

CERN press release (February 9, 2009)

<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2009/PR02.09E.html>

基礎

Queen Mary, University of London (2009 年 2 月 22 日)

ロンドン大学クイーンメリー校の研究者とフリブール大学(スイス)は、高温超電導のメカニズムには磁性がからんでいることを示唆する証拠を報告した。新しい超電導体であるオキシプニクタイトが、銅酸化物高温超電導体と類似しており、両物質とも超電導は磁気的狀態から生じていることを研究者達は見出した。クイーンメリー校理学部の Alan Drew は次のように述べた。「昨年、以前知られていたものとは全く異なる構造を持つ新しいクラスの超電導体が発見された。それは、銅・酸素レイヤーのかわりに砒素・鉄レイヤーを持つものである。我々の望みは、両者を一緒に研究することにより 2 つの超電導体の背後にある物理を解き明かし、最終的により一層高温の超電導体へと繋がる可能性のある新しい超電導材料を設計することができるようになることである。」グループの研究は Nature Materials に報告された。

出典:

“Secrets behind high temperature superconductors revealed”

Queen Mary, University of London press release (February 22, 2009)

http://www.qmul.ac.uk/news/newsrelease.php?news_id=1196

(ISTEC 国際部長 津田井昭彦)

超電導 Web21 トップページ

電気学会「超電導応用電力機器研究会」報告

成蹊大学
理工学部エレクトロメカニクス学科
教授 石郷岡 猛

2009 年 2 月 19、20 の両日、成蹊大学において電気学会「超電導応用電力機器研究会」[委員長：濱島高太郎（東北大）、幹事：高尾智明（上智大）、山口 浩（産総研）、幹事補佐：斉藤 隆（フジクラ）、津田 理（東北大）] が開催された。テーマは「超電導応用ならびに材料関連技術」であり、共賛は IEEE, Council on Superconductivity, Technical Committee of Japan である。

研究会における発表論文は 18 論文で、内容、量共に充実したものとなった。

なお、発表研究機関は、大阪大、上智大、成蹊大、千葉大、東工大、東京電機大、東北大、新潟大、横浜国大、横浜市立大、理科大、核融合科学研究所、高エネ研、神戸製鋼所、産総研、日本原子力開発機構、物材研、奥村組、東京電力、日立電線、MTC（順不同）の 21 研究機関である。

発表論文の内訳は、以下の通りである。（番号は論文番号とは別）

① 超電導材料関係、

- 1) 「超電導薄膜テープ線材を用いた多層集合導体の交流損失特性と導体構造の関係」(新潟大、横浜国大、上智大)
- 2) 「Bi 系超電導線における交流損失特性の繰り返し引張り応力依存性」(上智大、横浜国大、新潟大、東京電力)
- 3) 「撚りピッチの異なる 2 種の CIC 導体における交流損失の測定結果」(東北大、日本原子力研究開発機構、核融合科学研究所)
- 4) 「超 1 GHz NMR の実現に向けて (Bi-2223 ダブルパンケーキコイルの遮蔽電流による磁界とそのヒステリシス効果)」(上智大、千葉大、神戸製鋼所、物材研、理化学研、横浜市立大)
- 5) 「次世代加速器用 Ta マトリクス RHQT 法 Nb₃Al 線材の開発」(上智大、高エネ研、物材研、日立電線)

② 超電導電力応用機器関係

- 6) 「電磁力平衡コイルを用いた超電導磁気エネルギー貯蔵の可能性と自然エネルギーシステムの電力品質改善効果」(東工大、成蹊大)
- 7) 「抵抗型限流器の特性解析」(産業技術総合研究所、東京電機大)
- 8) 「三相巻線超電導限流器の限流特性に関する基礎研究」(東北大)
- 9) 「超電導コイルとコンデンサの並列共振を利用した系統電圧安定化装置の検討」(成蹊大)
- 10) 「Power Transmission Characteristics of HTS Tri-axial Cable」(東北大)
- 11) 「超電導ケーブルを適用した直流マイクログリッドの有用性」(大阪大)
- 12) 「HVDC 専用多相環状巻き高電圧超電導発電機の提案」(成蹊大)

③ 磁気浮上関係

- 13) 「磁気浮上型超電導免震装置の高浮上力化に適した永久磁石配置の検討」(東北大、奥村組)
- 14) 「超電導磁気浮上を適用した非接触スピン処理装置のアクティブ制振の理論検討」(新潟大、MTC)
- 15) 「高温超電導体の捕捉磁界を利用した鉄ブロックの浮上実験」(成蹊大)

④ ITER 関係

- 16)「国際熱核融合炉 ITER の超電導コイル技術」(日本原子力研究開発機構)
- ⑤ 磁気分離関係
- 17)「超電導磁石を用いた非金属介在物分離装置の開発」(大阪大)
- ⑥ 低温半導体応用関係
- 18)「多数個並列接続 MOSFET を用いた超電導マグネット励磁用低温動作直流低電圧・大電流電源の試作と試験」(成蹊大)

発表論文の中で、5)「次世代加速器用 Ta マトリクス RHQT 法 Nb₃Al 線材の開発」(上智大、高エネ研、物材研、日立電線)は、Nb₃Al 線材に Ta を添加することにより低磁界不安定性を解消し、かつ磁化損失を半減できたとの内容で、将来の核融合超電導コイル用の導体としての応用が期待される。

また、6)「電磁力平衡コイルを用いた超電導磁気エネルギー貯蔵の可能性と自然エネルギーシステムの電力品質改善効果」(東工大、成蹊大)は、風力発電の間欠性を補償する目的で±80 MW、1分間程度の電力平準化を狙ったもので、電磁力平衡コイルを用いた小型のモデルによる実験結果も含めた新提案である。

さらに、8)「三相巻線超電導限流器の限流特性に関する基礎研究」(東北大)は、電力系統に於いて最多故障である一線地絡故障に対しては、三相リアクトルの原理で超電導体の常電導転移無しに限流でき、その他の短絡故障に対しては、バルク超電導体円筒のクエンチにより限流する原理の超電導限流器の提案と実験結果であり、新しい限流器として着目される。

また、9)「超電導コイルとコンデンサの並列共振を利用した系統電圧安定化装置の検討」(成蹊大)は、超電導コイルとコンデンサの LC 共振回路を系統末端に配置して、負荷端の瞬時電圧低下の防止を狙ったものであり、近年の半導体産業等への応用が期待される。

次に、12)「HVDC 専用多相環状巻き高電圧超電導発電機の提案」(成蹊大)は、HVDC 専用の発電機として、変圧器バンク無しに直接多相・高電圧を発電できる超電導発電機の提案で、環状巻きを用いた新しい概念の提案と基礎的な実験結果の紹介であり、新しい発想が着目された。

また、15)「高温超電導体の捕捉磁界を利用した鉄ブロックの浮上実験」(成蹊大)は、高価な希土類永久磁石を使用せずに安価な鉄を用いた高温超電導バルク体による磁気浮上実験結果の紹介であり、新奇性が注目された。

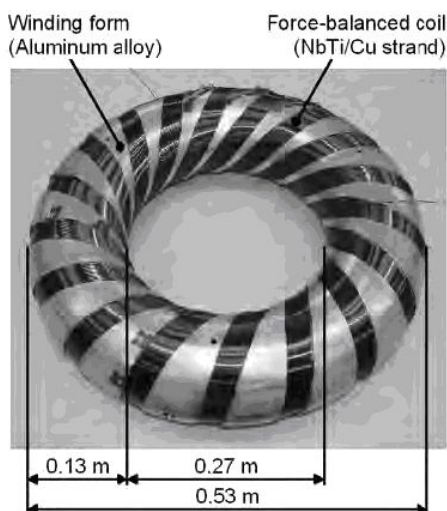


図1 6T発生の電磁力平衡コイル(東工大)

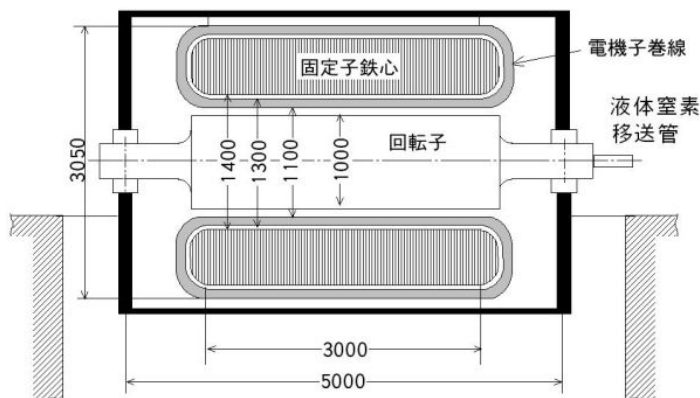


図2 1000MW, 250kV, 9相超電導発電機概念設計図(成蹊大)

【隔月連載記事】

超電導と MRI / NMR (その 2—MRI/NMR と超電導とのかかわり)

(社団法人) 低温工学協会
副会長 堀上 徹

2.1 はじめに

前号で、MRI や NMR には静磁界が必要だと書いた。磁界の強さが単に強いだけでは MRI や NMR の要求仕様を満たすことはできないが、静磁界の強さは要求される信号強度、言い換えれば得られる画像の質やスペクトルの高分解能と強い関係にあるので、より信頼できる結果を得るためには強磁界が必要となる。

今号では、主に静磁界の強さと分解能の関係、強力な静磁界を得るために必要な超電導および MRI や NMR には必要不可欠な超電導マグネットの永久電流モード実現の方法について解説する。

2.2 MRI/NMR の分解能と静磁界

前号で核磁気モーメントを持つ原子核に外部から静磁界を加えると核磁気モーメントは歳差運動をすることを述べた。この歳差運動をラーモアの歳差運動といい、このときの角周波数 ω をラーモア角周波数という。

一方、MRI の画像の質に影響を与える因子の一つとして信号強度と雑音強度の比 (SN 比) がある。前にも述べたように信号を検出するのは RF コイルである。RF コイルの半径を R 、共鳴周波数を ω とすると試料全体からの信号強度 S は

$$S \propto R^2 \omega^2 \dots\dots\dots (2-1)$$

と表わせることが分っている。

ここで、信号強度がラーモア角周波数の二乗に比例しているということが重要で、この二乗のうちの一つは核磁気の大きさがラーモア角周波数によるものであり、ラーモア角周波数は静磁界強度に比例している。前号で述べたように水素の原子核であるプロトンの場合、静磁界 1 T のラーモア周波数 (共鳴周波数) は 42.6 MHz である。もう一つの方は RF コイルに電磁誘導の法則に従って検出される電圧が、ラーモア周波数に比例するということから導かれる。詳細に式を導出することは複雑になるので、ここでは信号強度、即ち MR の分解能は静磁界の大きさに比例するということが超電導技術との接点であるということにとどめておこう。更に鮮明な画像なり、精密な化学分析 (分光法にて) を行うためには試料空間 (人体用 MRI では体内の検査したい部位) において、磁界強度が時間的に変動しないこと、及び空間的に一様性が保たれることが求められる。とりわけ静磁界の時間的安定性に関しては後述する超電導の永久電流状態が不可欠となる。

NMR 装置を用いてある物質を分光分析した場合、静磁界の強度が大きくなると共鳴周波数 f も $f=42.6 \cdot B$ (MHz) の関係に従って高くなることは前号で述べた。共鳴周波数が高くなると分解能が向上する例を図 2.1 に示した。図から分かるように共鳴周波数が高くなるほど共鳴スペクトルが鋭く分離も明確になっていることが分る。即ち化合物判別の精度が上がるわけである。

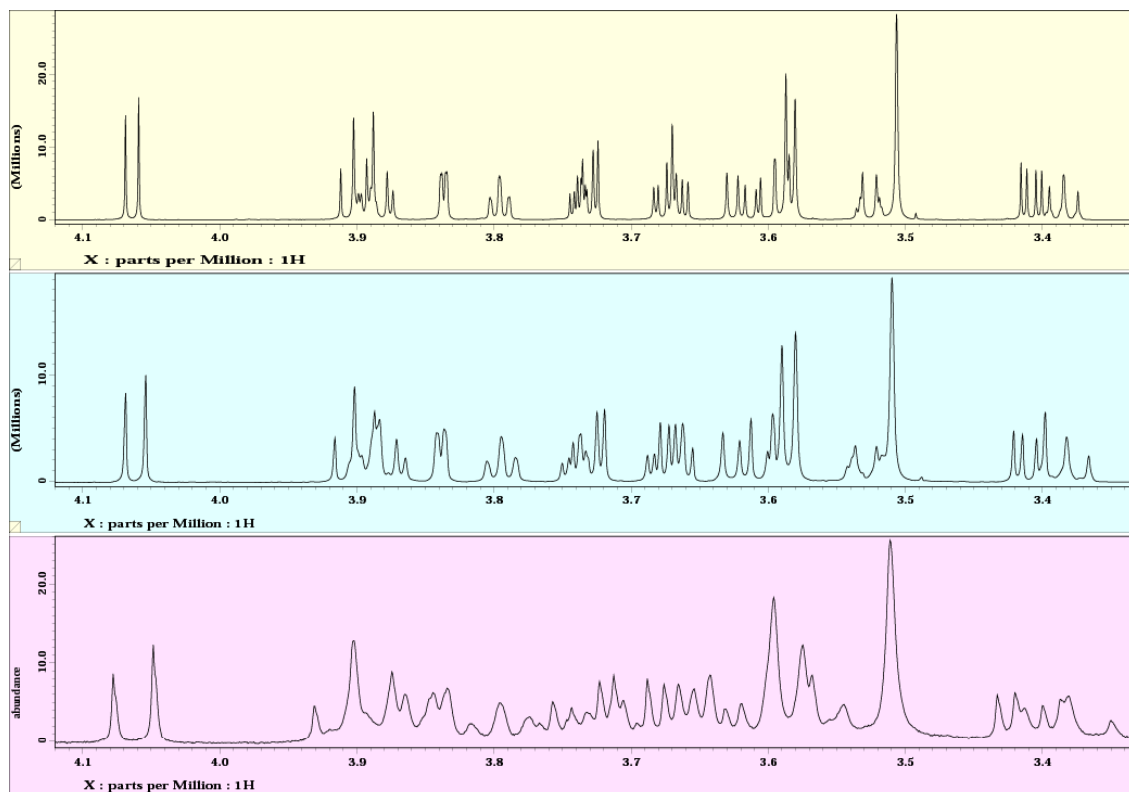


図 2.1 ある物質の NMR スペクトル（横軸：周波数、縦軸：スペクトル強度）
（データ提供：（独）物質・材料研究機構）

（プロトンの共鳴周波数が下から 300 MHz（磁界 約 7 T）、600 MHz（同 14 T）、900 MHz（同 21 T）。 共鳴周波数が高くなる、即ち静磁界が強くなるに従ってスペクトルが鋭くなり分解能が上がっていることが分る）

2.3 用途

ということで、分解能をあまり必要としない対象物の画像なり、分析を目的とする場合、例えば汎用 NMR の場合、予測した化合物が有るか無いかのみを知りたいというような要求には、分解能が少々低くともスペクトルにピークがあるか否かだけで判断できるので、強い磁界を必要としない。

磁界発生装置としては永久磁石や銅線で作製した電磁石などがある。永久磁石は、強い磁界は出せないが磁界の強さは時間的に安定しているように思えるが、実際はそうではない。永久磁石は環境温度の変化により発生する磁界が微妙に変化する。この磁界変化が MRI や NMR の分解能に影響を及ぼすのである。また、銅線で巻線したコイルの場合には、コイルに外部電源から電流を供給する必要があるが、この場合も電源の安定性が直接磁界の安定性に影響する。

医療用 MRI の場合は、人体がすっぽり入るような大型マグネットの中の検査部位において、0.5 T 以上の磁界強度と磁界の空間的・時間的安定性が必要となる。一方、汎用 NMR の場合、先のスペクトル図で示したように、共鳴周波数が 300 MHz のスペクトルを得るためですら静磁界が 7 T という強い磁界を必要とする。但し、この場合は直径 5 cm 程度の球体の試料空間に発生する磁界である。

このような強い磁界を安定に発生させるためには超電導マグネットを用いる以外に方法はないのである。

MRI 現象の医学診断への最初の試みは、1971 年のニューヨーク州立大学のダマディアン (Damadian) 博士が、悪性腫瘍組織と正常腫瘍組織とで緩和時間（前号で説明したように高周波磁界を切った後、原子核が定常状態に戻るまでの時間）が倍程度異なるとの報告から始まった。現在では MRI 装置は既にご存知のように、医療用として医療現場で人体断層像を撮影するのに広く用いられている。

余談になるが、1980 年代前半、企業が医療用 MRI の開発を開始した当初、それまで企業の研究所で磁気浮上鉄道用超電導線材やマグネットの開発に関わっていた筆者に、ある日突然、医療機器開発事業部門の技師長から電話があり、超電導の説明をして欲しいとの要請があった。技師長からは、銅線で巻いた電磁石を用いた MRI 装置を普及型と位置づけ、超電導線材で巻いた電磁石（超電導マグネット）を高級型と位置づけるという趣旨の説明を受けたことを今でもはっきり覚えている。それが数年を経ずして超電導マグネットを用いた MRI 装置が市場の大勢を占めるようになり現在に至っている。当初 MRI は 1 機約 6 億円といわれていたが（今では 1 億円程度と推測するが正確なところは当事者でないと分らない）、それにも関わらず超電導 MRI 装置が発売開始から短期間で市場の主流を占めるようになったのは、それだけ超電導現象が MRI に要求される性能に適合しているという証左であろう。

一方、高分解能 NMR 装置は、分子構造について詳細な情報を得ることができるため、例えば、たんぱく質や核酸などの生体高分子や、有機化合物等の構造を同定することができる。たんぱく質の構造解析に用いられる X 線結晶構造解析法では、たんぱく質を結晶化する必要があるが、NMR 法は溶液の状態で測定できるため、結晶化が困難なたんぱく質の解析が可能である。また、開発中の薬剤化合物を迅速に分析することができるため、医薬品の開発等に大いに貢献している。

2.4 超電導

良質な画像や高性能な分析結果を得ようとすれば強い磁界が必要であることを述べた。MRI では現在マグネットの中心部で磁界強度が 0.5 テスラ (T) を発生する装置が主流であるが、最近ではより高磁界化の傾向にあり、1.5 T から 3 T の市場が伸びてきている。一方汎用 NMR 装置では、共鳴周波数が 300 MHz 以上（磁界強度 7 T 以上）の装置が主である。

このように強い磁界が必要とされるために超電導が用いられるのである。逆に言うと超電導でなければ実現しない装置なのである。

よく知られていることではあるが、超電導とはある種の物質をある温度以下に冷却すると電気抵抗がゼロになるという特徴がある。このため、超電導線で巻かれたコイルに電流を流して磁界を得る場合、電気抵抗が原理的にはゼロであるために大きな電流を流すことができ、その結果強い磁界を得ることができる。

MRI や NMR には強い磁界の他に、磁界の空間的・時間的均一性が要求される。空間的に一様な磁界を得るためにはマグネットの設計と補助コイルの追加をうまくすれば実現できる。一方、磁界の時間的な均一性、言い換えれば時間の経過と共に磁界の強さが変化しないようにするためには、電気抵抗ゼロという超電導の特長を用いて磁石を永久電流状態にすることによって実現できる。超電導磁石を永久電流状態にする方法を次章で簡単に解説する。

2.5 永久電流状態の実現

永久電流状態実現のために不可欠なものが永久電流スイッチというものである。

超電導線を通常の銅線で巻いた電磁石と同じように巻き線し、外部の電流電源から電流を供給した後、何らかの方法で永久電流のモードにすればよい。そのために永久電流スイッチというものを

使うのである。

永久電流スイッチに要求される性能は、外部電流電源から超電導コイルに電流が通電されている間は **off** 抵抗が大きく、所定の電流値に達した後は抵抗がゼロであるような性質を備えたものである。この要求を満たすために考えられたのが (1) 機械式スイッチと (2) 熱式スイッチである。機械式スイッチは現在ほとんど使われていないので説明を省略する。

熱式スイッチの基本構造は、超電導線と抵抗線が無誘導に共巻きしたものである。この巻き線部周辺に加熱用ヒーターを配し、スイッチが **off** の状態をヒーター加熱で超電導線を常電導状態としておき、**on** 状態にするときには加熱を止めて超電導状態にするというのが基本である。

そのようなスイッチを超電導コイルの励磁過程との関係で図 2.2 に示した。図中、A (超電導コイル) や B (永久電流スイッチ) の外周を点線で四角で囲んである部分は極低温環境におかれている部分である。

その動作は以下のような順序で実現される。

- ① 超電導コイルに電源を接続する。
このとき、永久電流スイッチは開(**off**)の状態である

(開の状態とはヒータを通電加熱し、超電導線を非超電導状態とすることで、電気抵抗を発生させること)

- ② 設定電流値まで通電する
- ③ 永久電流スイッチを閉(**on**)の状態にする

(閉の状態とは、ヒータ加熱を止め、超電導線を超電導状態、すなわち電気抵抗ゼロの状態にすること)

- ④ 電源電流を徐々に下げていく。
このとき超電導コイルの電流は設定値のままで、電源に流れる電流との差の電流だけ永久電流スイッチ (超電導状態) の方に流れる

- ⑤ こうして電源からの電流をゼロに下げると超電導コイルと永久電流スイッチとの閉回路の中で永久電流が循環し続ける

- ⑥ この状態で電源を切り離す。

現実には超電導線同士の接続部等があるために抵抗部分があるので、通電電流は厳密には永久電流ではなく時間と共に減衰していく。減衰の度合いが、MRI や NMR の要求仕様を満たせば実用面で問題はない。

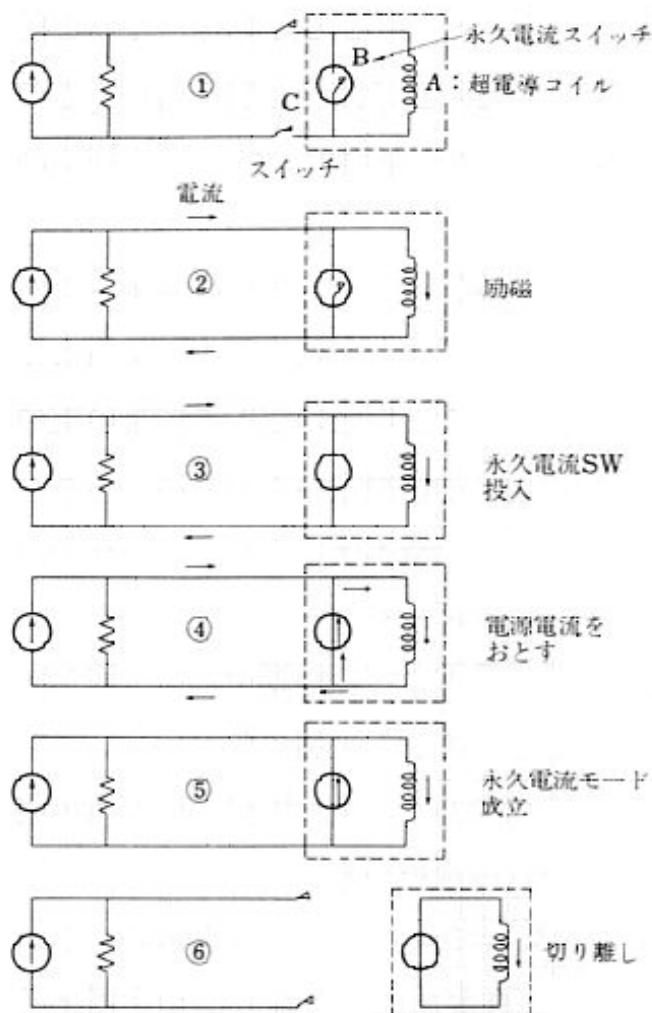


図 2.2 永久電流スイッチの動作原理
(出典:「応用超電導」荻原宏康 編著 日刊工業新聞社)

2.6 第2回目を終えるに当たって

今回は MRI や NMR に必要とされる分解能が磁界強度と大きく関係すること、従って超電導マグネットが有用であることを中心に解説した。更に MRI や NMR には磁界強度の大きさ以外に磁界の空間的均一性や時間的安定性も要求されるために、特に時間的安定性を得るために用いられている電導マグネットの永久電流モードの基本について説明した。

次回は実際に使用されている MRI や NMR の性能を中心に超電導との関わりを解説する予定である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q：「超電導線の国際標準化は実現するのでしょうか？ 教えてください。」

A：まず、超電導線の国際標準化が、2009 年 1 月によくスタートしたことをお伝えしましょう。また、超電導線の国際規格の発行は、もっとも順調に進展しても 2013 年頃になります。

この決定は、2008 年 6 月ドイツのベルリン市における第 11 回国際電気標準会議 IEC/TC90（超電導）において日本から超電導線の国際標準化の提案がなされ、基本合意がなされました。その後、（財）応用科学研究所の長村光造氏をラポーター（Rapporteur）として、日本、中国、韓国、ポーランド及び米国の専門家 9 名からなる IEC/TC90 内のアドホックグループ 3 が組織され、同グループは 2009 年 1 月に発足しました。

このアドホックグループ 3 の具体的な活動目的は、工業材料としての超電導線の国際標準化に関する技術動向並びに標準化ニーズ動向の調査結果を 2010 年に開催予定のシアトル会議にて報告することです。このシアトル会議でアドホックグループ 3 の報告が承認されますと、IEC/TC90 内に超電導線の国際規格化のためのワーキンググループ（WG）が組織され、本格的に IEC 規格原案の審議が開始されます。この審議には少なくとも 3 年が必要です。

したがって、これらの審議がもっとも順調になされたとしても、超電導線の IEC 規格の発行は 2013 年頃になります。また、この IEC 規格に整合した日本工業規格（JIS 規格）は、2015 年頃に発行されます。

超電導線の IEC 規格の適用範囲として、まず、あらゆる用途に適用可能な一般的な超電導の規格化がなされます。また、対象とする超電導線の材質にも次に示すように特別な規定がなされていません。したがって、工業材料として採用されるすべての超電導線が対象になります。

『この規格は、超電導線の一般的共通事項について規定する。

この超電導線には、さらに高次な加工を施した細分割テープ線、集合導体、より線導体、圧縮形より線導体（ラザフォードケーブル）、キーストン形より線導体、超電導ケーブル、強制冷却形導体及びケーブル・イン・コンデュイット形導体は含まれない。』

（注記 1）

代表的な超電導線には、ニオブ・チタン（Nb-Ti）合金超電導線、ニオブ 3 すず（Nb₃Sn）化合物超電導線、ニオブ 3 アルミ（Nb₃Al）化合物超電導線など金属系超電導線に加え、ビスマス（Bi）系酸化物超電導線などがあります。

（注記 2）

超電導線は、1960 年代後半から金属系超電導線がすでに実用されています。当初は、素粒子物理学や核融合研究用として超電導線の技術開発がなされました。その後これら超電導線の技術的成果を工業材料に反映し、1970 年代後半から核磁気共鳴装置である MRI や NMR スペクトロメータとして本格的な普及がなされています。

（編集局）

[超電導 Web21 トップページ](#)