

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

掲載内容 (サマリー) :

特集 : SQUID 応用・医療応用

- 鉱物資源電磁探査用 SQUID システム
- 磁気マーカーを用いた高感度免疫検査法の開発
- 超低磁場 NMR/MRI
- 低温超伝導 SUIDE を用いた実験用小動物の心磁界計測
- HTS-SQUID を用いた小型直流・回転磁化率計
- SQUID を用いた電力設備の非破壊検査の検討

特集 : 超電導 世界のプロジェクト

- 欧州における薄膜線材研究
(原題 Coated conductor research in Europe)
- 超電導関連 2013 年 8 月-9 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン (6/20-7/19)
- 超電導速報ー世界の動き (2013 年 6 月)
- 学会等報告「定常強磁場施設建設計画 (低温工学・超電導学会)」報告
- 隔月連載記事ー医療用加速器と超電導 (その 4)
- 読者の広場(Q&A)ー「超電導船の記事を見ましたが、素人からみて何が良いのか、どれくらい使われそうなのか、教えてください。」

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

〈発行者〉

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3 丁目 2 番 1 号 KSP A-9

Tel 044-850-1612 Fax044-850-1613

超電導 Web21 トップページ : <http://www.istec.or.jp/web21/web21.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>



超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：SQUID 応用・医療応用

「鉱物資源電磁探査用 SQUID システム」

公益財団法人 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
主管研究員 波頭経裕

石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）による平成22年度～平成23年度次世代SQUITEM機器開発・SQUID磁力計開発に関する委託業務として、我々は鉱物資源探査実用機としてのSQUIDシステムを開発してきた。オーストラリアでの最終試験を終え、電磁探査の実用機としてJOGMECに納品された。SQUIDをセンサとして採用した磁力計部分を（公財）国際超電導産業技術研究センターが、受信機部分を三井金属資源開発（株）が担当し、共同開発したものである。

TEM 法と言われる電磁探査は、図 1 に示すように 100-200 m 角に敷設された銅線によるコイルに直流電流を流し、その後急激に遮断することによって地下内部に誘導電流を発生させ、その時間変化を高感度磁気センサで計測し、地下の比抵抗構造を解析する手法である。これを例えば 100 m ごと移動しては計測を行い、二次元的な比抵抗構造を解析する。この手法に SQUID が適していると考えられた理由は、その高感度性と DC から 100 kHz に及ぶ広い周波数帯域にある。地下 1000 m に及ぶ探査が期待される一方、大きな印加電流やそれに伴う大きな磁場変化に追従することが要求され、いかに安定動作と高スルーレート（追従可能な磁場の時間変化の最大値）を実現できるかが開発の鍵となる。安定動作を得るためには RF ノイズを遮断することが重要であるが、同時にシステム内に発生する誘導電流が、地下の誘導電流による磁場の計測を妨げないよう、十分に速い速度で減衰することが要求される。世界が苦慮したこのシールドの問題を、独自の材料選択で解決することで安定動作と正確な計測を両立した。また、SQUID は地磁気中での冷却で、磁束トラップを低減できるよう細線化を優先した設計とし、フィールド使用に適した構造とした。

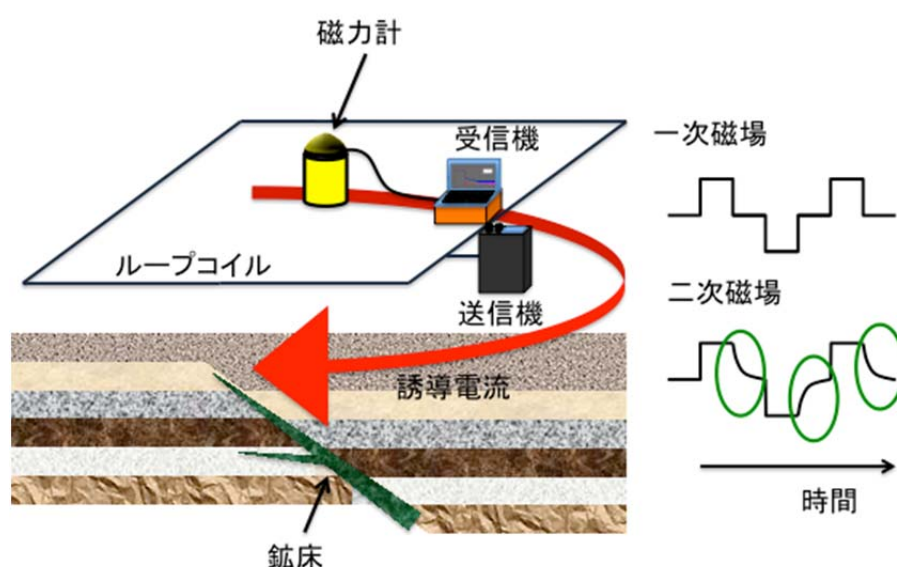


図 1 TEM 法の原理図

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

こうして完成したシステムは、JOGMEC の従来機と比較して 10 倍に相当するスルーレート 10.5 mT/s を達成し、最大印加電流も 40 倍に向上した。実用機ということで、システムは図 2 に示すようにコンパクトに設計され、17 時間の駆動を可能にするバッテリー電源を内蔵した受信機システムや、受信機と磁力計を接続する 30 m ケーブルも含めたシステムは 2 つのアタッシュケースに収められ、双方あわせて 25.6 kg に収まっている。静置で 17 時間保持できる液体窒素は、移動を含むフィールドでの実稼働において、必要とされる 8 時間以上の連続稼働が可能であることを確認した。

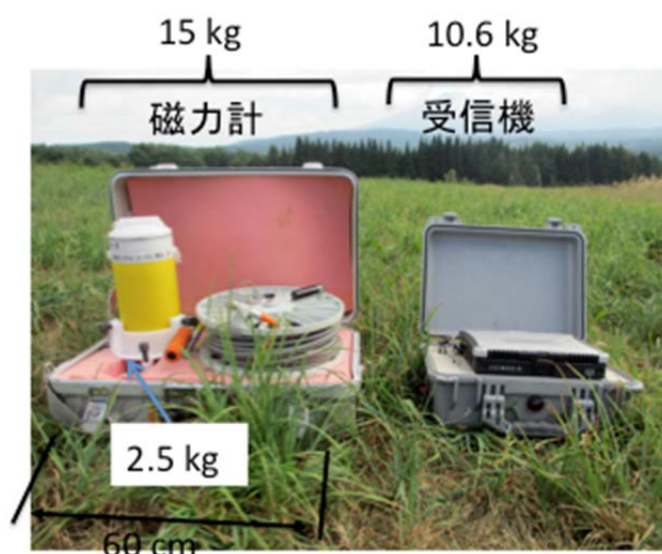


図 2 システム外観

図 3 は、秋田での地下比抵抗構造を測定解析した比較試験結果である。誘導コイルで検出するシステムや、JOGMEC が使用してきた従来機と比較して、明瞭に比抵抗構造が解析できることが明らかとなった。まず地表近くでは高抵抗層がある。このような表層を有する場所では、人工的に印加した磁場を遮断したとき、急激に磁場は減少する。このとき、誘導コイルと本機はその変化を再現できている。一方、スルーレートが十分でない従来機では再現できていない。次に、地下 500 m 付近になると誘導コイルの検出限界に達し、推定される比抵抗構造は不明瞭になっている。本機が明瞭に比抵抗の上昇をとらえているのに対し、従来機ではとらえきれていない。この原因は、人工磁場の遮断によってシステム本体に発生する誘導電流が測定を妨げているためと考えられた。従来機に発生する誘導電流は、比抵抗の比較的低い地域での探査には障害とならず、多くのフィールドで有用なシステムだが、比抵抗の高い地域では、比抵抗分布の解析に影響を与えることが予想される。本機の高いスルーレートと誘導電流の抑制、そして高感度が、地表から地下 1000 m におよぶ比抵抗構造の連続的な解析を実現している。

オーストラリアでの最終試験では、100 m ごとに移動しながら測定したデータから、二次元的な比抵抗構造が解析された。地表温度が 50 °C を超える環境下でもシステムは順調に稼働し、表層付近のグラファイトを含んだ低比抵抗層の深度が正確に計測された。また、ボーリング調査よりも深い位置に、銅や鉄の含有率が高いと推定される層があることをとらえることができた。深さ情報が得られる TEM 法の利点が顕著に現れた結果で、今後の探査現場での活躍がおおいに期待できる。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

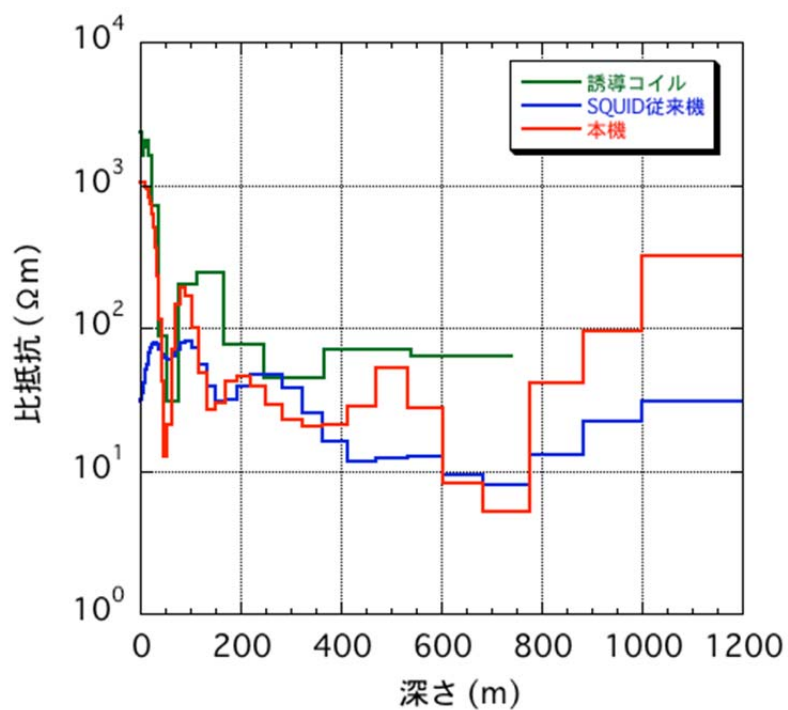


図3 地下の比抵抗構造の解析結果の比較

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

特集：SQUID 応用・医療応用

「磁気マーカーを用いた高感度免疫検査法の開発」

九州大学

超伝導システム科学研究センター

センター長 円福敬二

免疫検査は疾患由来の蛋白質や病原菌などのバイオ物質を検出する検査法であり、医療診断において多く用いられている。我々は磁気マーカーと高温超電導 SQUID 磁気センサを用いた磁氣的な免疫検査手法を開発している。今回、低雑音の SQUID センサを開発するとともに免疫検査に適した磁気マーカーを選定することにより、磁氣的免疫検査の感度を大幅に改善することに成功した。

我々の開発している免疫検査法では、測定信号の周波数は 10 Hz 程度となるため、低周波雑音の小さな SQUID センサが必要となる。図 1(a)に超電導工学研究所(SRL)と共同で開発した SQUID センサの 77 K での磁束雑音スペクトルを示す。SQUID の駆動においては DC バイアス法と AC バイアス法を用い、両者を比較している。図に示すように、100 Hz 以上の高周波帯においての磁束雑音は $S_{\Phi}^{1/2} = 8 \mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ である。SQUID を DC バイアスした場合には、低周波領域において雑音が増加しており、いわゆる $1/f$ 雑音が観測された。これに対して、SQUID を AC バイアスした場合には、低周波での雑音の増加が防止されており、 $f = 1 \text{ Hz}$ における磁束雑音は $S_{\Phi}^{1/2} = 15 \mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ となった。このように低周波雑音の小さな SQUID センサの開発に成功した。

磁気マーカーとしては多摩川精機社製の磁気マーカー (FG ビーズ) を用いた。この磁気マーカーは 40 nm 程度の磁気ナノ粒子(Fe_3O_4)をポリ GMA (グリシジルメタクリレート) と呼ばれるポリマーで被覆したものである。ポリマーの直径は約 270 nm であり、ポリマー内には複数個の磁気ナノ粒子が含有されている。

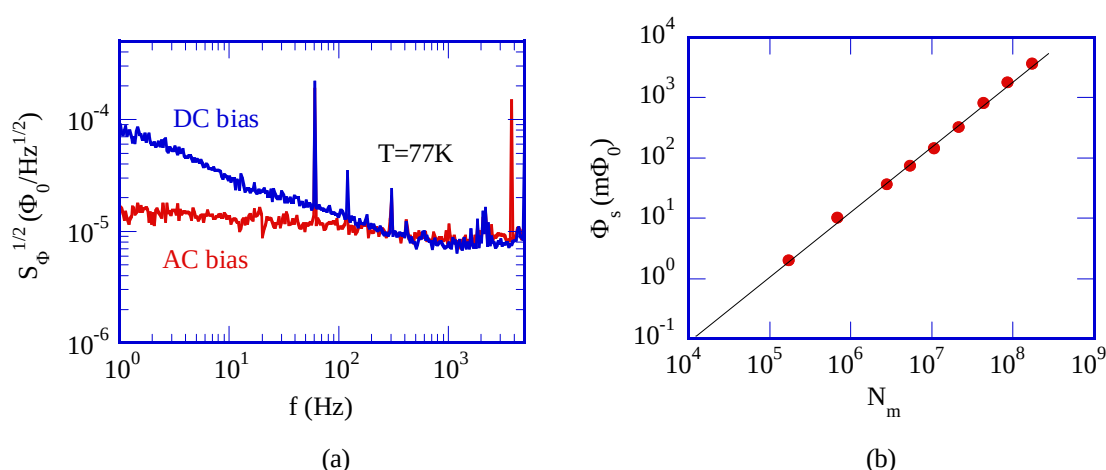


図 1. (a) 高温超電導 SQUID センサの磁束雑音スペクトル、(b) SQUID による 磁気マーカーの検出。
磁気マーカーの個数 N_m と検出信号の関係を示す。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

図 1(b)に磁気マーカーからの磁気信号を SQUID センサで検出した結果を示す。横軸は磁気マーカーの個数 N_m であり、縦軸は SQUID で検出した信号磁束である。SQUID の雑音は peak-to-peak 値でほぼ $0.05 \text{ m}\Phi_0$ であるため、図の結果より、 5×10^3 個程度の磁気マーカーが検出可能なことが分かる。磁気マーカー1 個が 1 個の抗原に結合すると仮定すると、この場合には 5×10^3 個の抗原を検出できる性能であることが分かる。

この磁気マーカーを用いてタンパク質（ビオチン）の検出実験を行った。実験は以下の手順で行った。最初に、図 2(a)に示すように固定用のポリマービーズの表面にビオチンを固定化した。ポリマービーズ 1 個当たり 2000 個のビオチンが固定化されている。その後、アビジンで標識した磁気マーカーを試料溶液中に投入した。ビオチンとアビジンの結合反応により磁気マーカーの一部はポリマービーズに固定化され、結合マーカーとなる。残りの磁気マーカーは未結合マーカーとなり、溶液中には両者が混在している。本検査手法では、未結合マーカーを分離するための洗浄工程は用いずに、未結合マーカーのブラウン磁気緩和を利用して未結合マーカーと結合マーカーを磁氣的に識別している。

図 2(b)にポリマービーズに固定化したビオチンの個数 N と信号磁束の関係を示す。同図に示すように両者には良い相関が得られており、洗浄工程なしでの免疫検査が正確に行われていることが分かる。図に示すように、検出感度としては 2×10^4 個のビオチンの検出に成功している。なお、実験に用いた溶液量は $35 \mu\text{l}$ である。従って、検出感度を濃度で表せば、 $9.5 \times 10^{-19} \text{ mol/ml}$ となり、非常に高感度な検出が可能であることが分かる。磁気的手法の特長の一つが、免疫検査において未結合マーカーを分離するための洗浄工程を省略できることである。上記の結果は、本手法により高感度な免疫検査が可能であることを示している。磁気マーカーの改良が進めば更なる高感度化が期待できる。

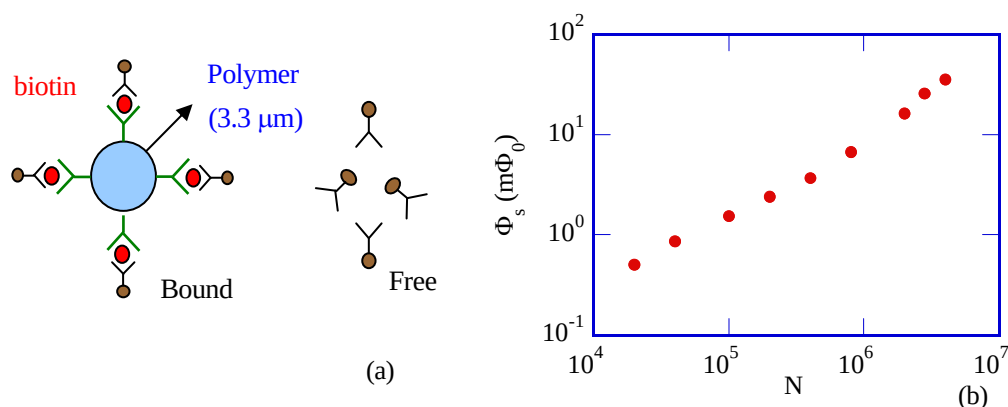


図 2. 磁気的手法による免疫検査。(a)固定用ポリマービーズを用いたタンパク質（ビオチン）の検出、(b) ビオチンの個数 N と信号磁束の関係

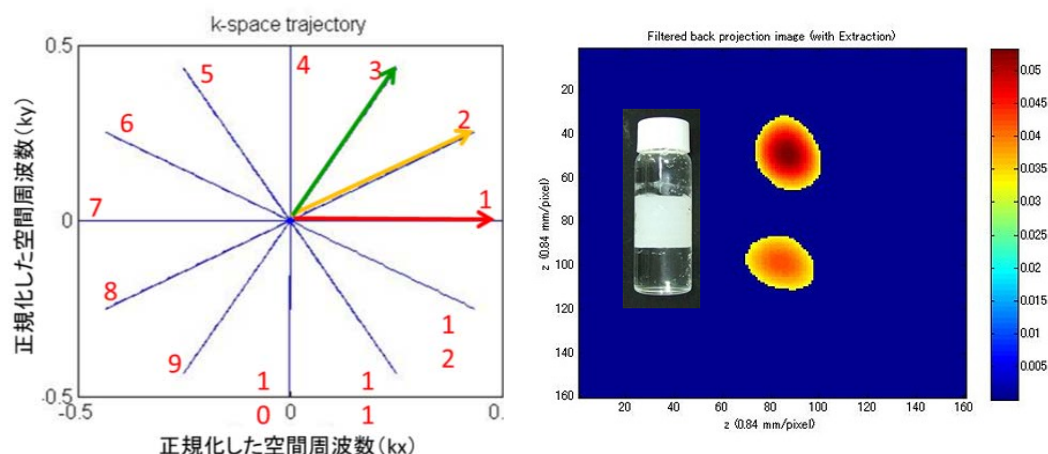
[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：SQUID 応用・医療応用

「超低磁場 NMR/MRI」

豊橋技科大学 大学院工学研究科
環境・生命工学専攻
教授 田中三郎

核磁気共鳴 (NMR) 分光法や磁気共鳴画像法 (MRI) は、プロトン ^1H が静磁場中で固有の周波数を持つ電磁エネルギーを吸収・放出する現象を応用したもので、物理学、化学、医学など様々な分野で利用されている。従来の NMR/MRI システムは数 T～数 10 T のような強い磁場を印加するために、超伝導磁石やそれを冷却するヘリウム冷凍機が用いられており、そのために装置が大型、複雑化して高コストになっている。一方近年、低周波数帯域においても高感度な SQUID 磁気センサを用いた超低磁場 NMR/MRI システムが注目されている。本システムは超伝導磁石を必要しないため、従来法に比べて低コストで簡易なシステムを構築することができる。超低磁場 NMR では静磁場が弱いので、核スピンを強めるために 10～100 mT の分極磁場磁場(Bp)を数秒間印加する必要がある。Bp 遮断後には強磁場 NMR と同様に、核スピンは歳差運動を行いながら自由誘導減衰振動 (Free Induction Decay: FID) を生じて元の静磁場方向に戻る。分極の方向によっては Bp 遮断後に 90° パルスあるいは 180° パルスと呼ばれる RF パルスを照射することもある。FID 信号の周波数は静磁場強度に比例するため、数十マイクロテスラの超低磁場 NMR/MRI の信号は kHz オーダーの低周波数となる。そのため、誘導コイルでは十分な感度が得られないので、その代わりに低周波数帯でも高感度な高温超伝導 (HTS)SQUID を用いた超低磁場 NMR/MRI 装置を開発してきた。



(a) 計測軌跡 (k-space trajectory) (b) 再構築後の 2D イメージ
図 1 二分割水サンプルの 2D イメージング

超低磁場 NMR/MRI では信号雑音比 (SNR)を増大するため、大きな分極磁場(Bp)を印加することが必要である。そこで分極磁場 B_p を高める方法を検討しており、1.1 T の永久磁石を用いて分極する技術を開発した。これを利用してバックプロジェクション法によって得られた水ボトルの 2 次元

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

MRI 撮像の結果を図 1 に示す。撮像ために回転勾配磁場を印加し、図 1(a)に示すように勾配磁場の角度が 0° ($G_y=56$ nT/cm、 $G_z=0$ nT/cm) から 30° ごとにそれぞれの角度における FID 信号を取得した。このデータをフーリエ変換して再構築したところ、図 1(b)のようにシリコンゴムで分割した 10 ml の水サンプルの大きさにほぼ対応する 2D イメージを得ることができた。今後、磁場勾配を工夫して分解能の向上を図りたい。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

特集：SQUID 応用・医療応用

「低温超伝導 SQUID を用いた実験用小動物の心磁界計測」

金沢工業大学 先端電子技術応用研究所
准教授 足立善昭

マウス、ラットなどの小動物では、その遺伝子操作が容易であることから、遺伝因子起因の疾患モデルを人工的に再現できる。疾患モデル小動物を多数作製し、それを解析することにより、ヒトの病因解析や治療法を研究することが可能となる。われわれは小動物の心臓の電気生理学的な信号を非侵襲的に得る目的で、小動物用の心磁計の研究開発を行った。これにより、疾患モデルの研究に役立つ他にも、創薬の現場などで、電極の埋め込みや体表面に電極を装着するための剃毛の必要なしに、数多くの小動物から高いスループットで効率よくスクリーニングテストを行うことができるようになる。

小動物用心磁計の磁気センサとして図1のような低温超伝導 SQUID 磁束計アレイを作製した¹⁾。10 mm×10 mm のシリコンチップに 3×3 のマトリックス状に 9 個の直接結合型 SQUID 磁束計が配置されている。センサの間隔、ピックアップコイルの直径はそれぞれ 2.75 mm、2.5 mm である。各センサの磁界分解能は白色雑音領域で $8 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ となった。

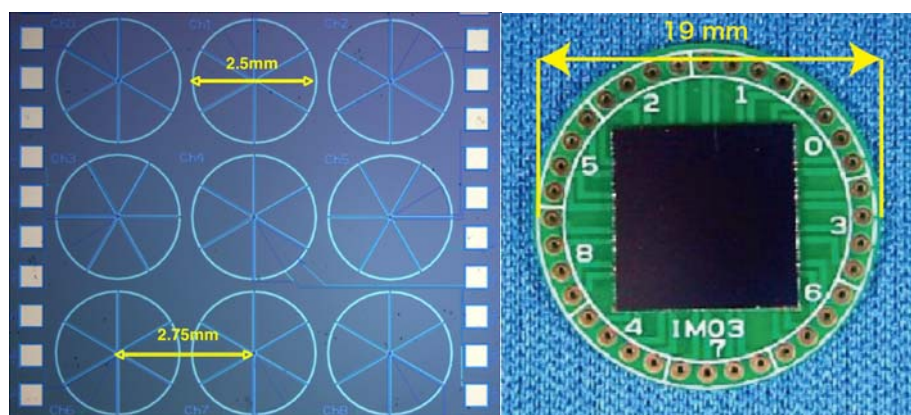


図1 作製した 9ch SQUID 磁束計センサチップ (左)とセンサチップをフリップチップでプリント基板と接続した状態(右)

この SQUID 磁束計アレイを図2(左)に示す懸架型の液体ヘリウムデュワに実装し、心磁計システムを構成した。液体ヘリウムのリザーバ部を磁気シールドボックスの外に配置し、センサ部のみを磁気シールドボックス中央付近に導入するという構造を持つ。センサ部の cool-to-warm-separation は 2mm 以下で実現した。リザーバ部の液体ヘリウム容量は約 6 リットルで、1 度のヘリウム供給でセンサの超伝導状態を 10 時間以上保つことができる。システム全景を図2(右)に示す。磁気シールドボックスはパーマロイ 2 層、電磁シールド層からなり、商用電源周波数帯域で 60 dB 程度の減衰率を実現できている。液体ヘリウムデュワ内に環境磁界雑音を検出する参照磁界センサを配置し、信号処理により磁気シールドで低減しきれない磁界雑音を低減する仕組みを装備している²⁾。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

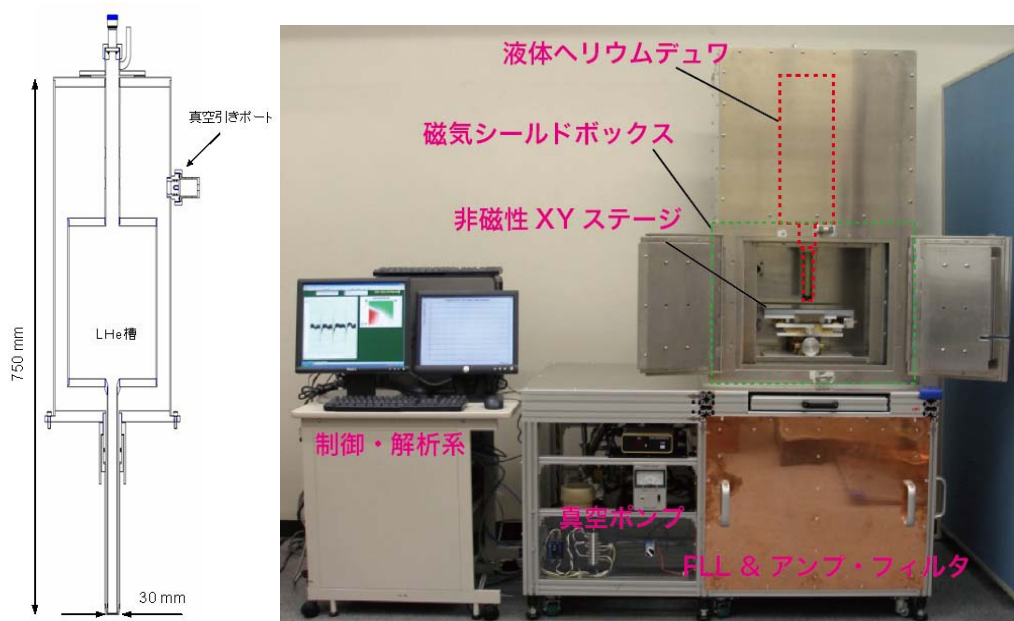


図 2 懸架型デュワの構造(左)と小動物心磁計システムの全景(右)

図 3 (左) に本システムにてモルモットの心臓磁界信号を検出しているようすを示す。この実験ではデータの妥当性検証のために心電図との同時計測を行った。測定したモルモットの心臓磁界信号波形の一例を図 3 (中) に示す。30 秒間の計測中の 135 回の拍動に伴う信号を心電信信号をトリガとして同期加算平均したものである。9 チャンネルそれぞれで P-QRS-T 波が明瞭に確認できる。R 波～S 波における等磁界線図を図 3 (右) に示す。

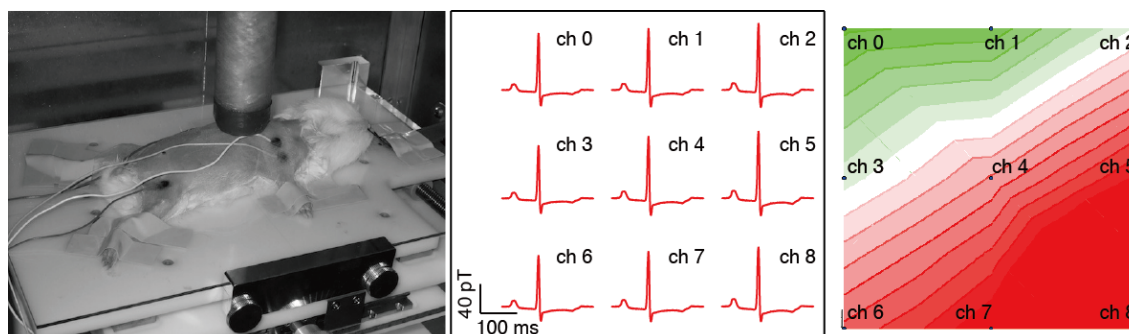


図 3 心臓磁界信号検出のようす(左)、心磁信号波形の一例(中)と心磁信号分布(右)。
心磁信号波形は上向きがわき出し方向。等磁界線図は赤がわき出し方向、緑が吸い込み方向を表す。等磁界線の間隔は 300 fT。

上述の実験動物用心臓磁界計測システムは、疾患モデルの研究や薬剤の心臓への影響を調べる QT 伸張の研究などに使われている³⁾。また、小動物の脳磁界信号を計測する装置としてデュワを改良したものが、小動物の聴覚の研究に利用されている。今後は近年発達の著しい SQUID 低磁界 MRI の技術を統合し、小動物用低磁界 MRI システムとしてさらに研究開発を進展させていく予定である⁴⁾。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

参考文献：

- 1) J. Kawai *et al.* "Fabrication and characterization of an integrated 9-channel superconducting quantum interference device magnetometer array", IEEE Trans Applied Superconductivity, 15, 821–824, 2005.
- 2) M. Miyamoto *et al.*, "Development of an MCG/MEG system for small animals and its noise reduction method", Journal of Physics: Conference Series, 97, 012258, 2008.
- 3) K. Komamura *et al.*, "Micro-magnetocardiography system with a single-chip SQUID magnetometer array for QT analysis and diagnosis of myocardial injury in small animals", IEEE Trans Biomedical Circuits and Systems, 2, 260–268, 2008.
- 4) D. Oyama *et al.*, "Development of SQUID-Based Compact Low-Field MRI System", IEEE Trans Applied Superconductivity, 23, 1601604, 2013.

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：SQUID 応用・医療応用

「HTS-SQUID を用いた小型直流・回転磁化率計」

岡山大学

大学院自然科学研究科 産業創成工学専攻

教授 塚田啓二

磁化率計は物質の磁気特性を評価する上で基礎的な計測装置であり広く用いられている。多く使われている装置としては、常電導マグネットを用いて常電導のピックアップコイルで計測する構成のもので、特に強磁性体等の磁化率が大きい材料の特性評価として産業界等で使われている。また、強い印加磁場強度を必要とするほか、常磁性あるいは反磁性等非常に微弱な磁気特性を計測するものとして、低温超電導体 SQUID で計測する高感度磁化率計があり、理化学的な基礎研究などに使われている。本研究は、JST の S-イノベーションプログラムで行っており、低温超電導 (LTS-)SQUID に匹敵する感度と、より小型な計測器を目指すとともに、新しい計測応用の展開を図ってきているので紹介する。ここで SQUID は、ISTEC で開発された高温超伝導 (HTS-)SQUID を用いている。

研究開発している計測装置は基本的に 2 種類あり、直流磁場中で試料を振動させ印加磁場強度に対する磁化変化を計測する直流磁化率計 (図 1) と、試料を回転させて磁石を通過させる回転磁化率計 (図 2) である。直流磁化率計では電磁石の間に置かれた常電導ピックアップコイルの上を試料が振動往復する構成を取っている。ピックアップコイルで検出した信号を SQUID のインプットコイルに伝達して計測している。ここで、HTS-SQUID の問題点として、低周波領域での 1/f 雑音がある。このため、高感度化には高周波計測が望ましいが、機械的振動には振動数の限界があった。これを改善する方法としてピックアップコイルとサンプルの間の振動位置を最適化することにより高調波を発生させ振動周波数に対し 2 倍、3 倍の高周波信号が得られるようになり低雑音化を実現することができた。この装置を用いて基本的な磁気特性評価だけでなく、新たな応用として磁気特性が異なる混合物中の水の反磁性特性を分離し水分量を計測することなどが可能となっている。生化学分析等では多くの検体を早い時間で分析する迅速性が求められる。このため、回転体に多くの試料を並べ同時に磁気特性を計測する回転磁化率計を開発した。この方法は回転速度を容易に上げることができるので、信号処理として加算回数を上げるにより高い SN を実現できる。特にこの装置の新しい使い方としてピックアップコイルの位置も回転させることができるので、磁場印加時の初期磁化から、印加磁場を遮断した後の磁化の緩和現象を計測できるようになった。高感度化と磁化の時間計測により微弱な水の磁化の緩和現象を解析できるようになった。



図 1 SQUID 直流磁化率計 (大きさの比較のため iphone を並べている)



図 2 SQUID 回転磁化率計

以上のように HTS-SQUID を用いた磁気特性評価装置の開発により、特に微弱な水の反磁性特性から水分量や磁化緩和現象等を容易に計測できるようになった。ここでは、応用の一部を紹介したが、高感度化と装置の小型化による各種計測応用の展開が容易になったので、様々な新しい計測を今後紹介していけるものと考えている。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：SQUID 応用・医療応用

「SQUID を用いた電力設備の非破壊検査の検討」

中国電力株式会社

エネルギー総合研究所 系統・情報通信担当

研究員（工学博士）河野丈治

SQUID（Superconducting Quantum Interference Device：超電導量子干渉素子）は、極めて高い感度を持つ磁気センサで、医療分野では既に実用化されており、頭骸内の神経細胞の活動により生じる微小な磁気信号の変化を非侵襲で測定することが可能である。工業分野では材料に生じた欠陥を磁場の変化として検出する非破壊検査への応用が期待されている。液体窒素冷却による動作が可能な高温超電導 SQUID は冷却時の温度マージンが大きく、冷却設備も小型化が可能で、近年では地下資源探査等、屋外での使用が試みられる状況にある¹⁾。

中国電力エネルギー総合研究所はこれまで国際超電導産業技術研究センター（以下 ISTE C）と共同研究により SQUID を用いた非破壊検査に関する調査、研究を行い、電力設備の劣化診断への適用可能性に関する検討を行ってきた。

設備、機械の劣化進展に関する評価技術は余寿命診断を可能とし、有効的な設備の使用、あるいは予期せぬ事故の未然防止につながるため強く望まれる技術である。この状況に鑑み、SQUID を用いた電力設備の劣化診断の可能性について研究を行ってきた結果、発電所等の電力設備に対し非破壊での設備診断に使用できる可能性を得た。今回、SQUID 非破壊検査の概要と研究の実施内容についてその概要と今後の研究の方向性を紹介する。

1. SQUID 非破壊検査の特徴

SQUID 非破壊検査手法は、渦流探傷法：ECT 法（Eddy current test）を基本原理としている²⁾。SQUID を用いない一般的な ECT は、高速な診断が可能なもののセンサの感度が十分でなく、高い S/N 比を得るにはセンサを極力測定対象に密着させる必要がある。センサの感度向上には高い周波数での励磁が必要となるが、高周波時には厚い導体の深部に十分な渦電流を生成できないため、一般的な ECT による非破壊検査は導体の表面付近の欠陥探査を目的として使用されている。我々は ISTE C で開発された非破壊検査装置を使用し、電力設備に対する非破壊検査の適用可能性についてこれまで検討を行ってきた。非破壊検査装置のセンサ部は高温超電導 SQUID で、その外観を図 1 に示す。SQUID は極めて高い感度を持つため、センサ部を必ずしも試験体表面に接触させる必要が無い。また、低い周波数でも感度低下が少ないため、厚い金属導体の深部欠陥探査に適用できる可能性が示されている²⁾。これらの特性や、過去の測定結果から、厚さ 40 mm 程度の SUS やアルミに生じたき裂の欠陥探査や、図 2 のような外装、断熱材を取り付けた状態で配管に生じた欠陥を

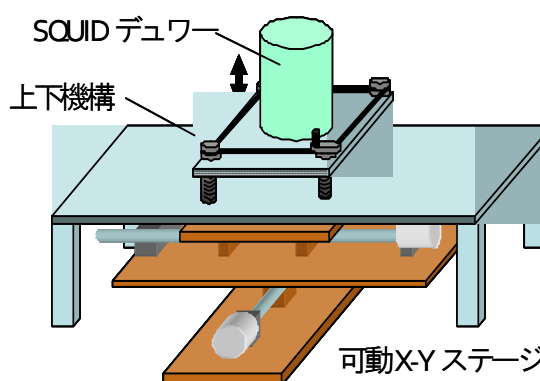


図 1 SQUID 計測装置の外観

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

診断できる見通しを得た。現在、SQUID 非破壊検査装置を使用し、電力設備の劣化診断への適用先として配管を模擬した試験体に設けた欠陥に起因する信号を観測し、欠陥探査性能の評価を行っている。

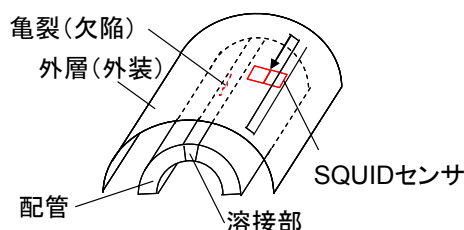


図2 設備診断の目標例（外装付きの配管）

2. 研究の概要

(1) SQUID 非破壊検査の電力設備への適用調査

現在調査対象とする模擬試験体は図2で示した外装付きの配管を想定して作製した。現状では測定装置の仕様上、運搬できるものに限られ、形状も平面状のものに限られる。試験体は厚さ2mmのアルミ平板と厚さ5mm絶縁体を組み合わせて作製し、保温材に覆われた金属配管に生じたき裂状欠陥を想定している。図3に厚さ26mmの試験体とSQUIDセンサとの位置関係を示す。図4はその際観測される観測信号の2次元イメージである。中心部に長さ20mmのスリット状欠陥を設けたアルミ板を欠陥層と呼ぶ。欠陥層を多層導体中の任意の位置に配置し、外装から模擬欠陥までの深さを変化させることが可能である。外装および絶縁層に相当するアルミ板、樹脂板を介して深部にある導体に内在する欠陥に起因する信号を観測することが可能である。

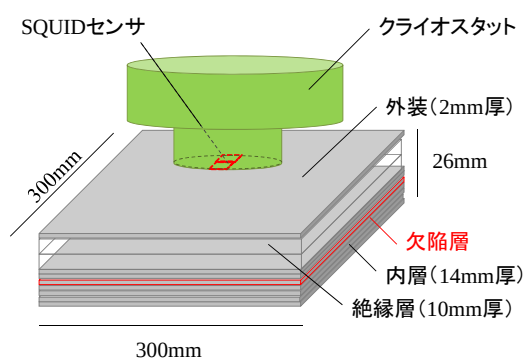


図3 試験体と測定装置の位置関係

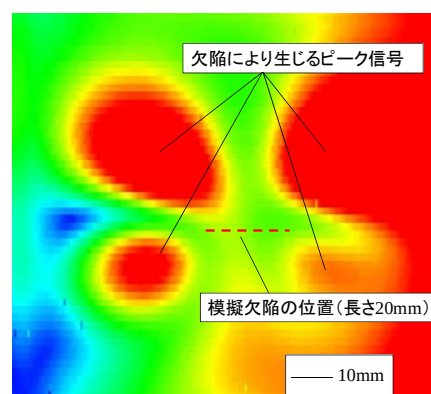


図4 観測信号の2次元イメージ

(2) 新型装置の試作

エネルギー総合研究所では現在、SQUID 非破壊検査装置の現場適用を目指して、新型非破壊検査装置の開発に関する研究を行っている。SQUID センサは測定の際の振動や、それに伴う磁場変化の影響を受けるとされる。このため、現状では SQUID センサは図1に示したように固定し、可動 X-Y ステージの上に配置した試験体を駆動させて測定を行っている。この方式ではセンサの振動等によ

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

る観測信号への影響は排除できるがその半面、測定対象は可搬物に限られ、その形状も平板型に限定される。したがって、センサ固定方式では電力設備等の大型構造物を現場で測定することはできない。

上記の課題の克服が現在の研究目的となる。計測装置を現場で使用するには、運搬できない構造物や、3 次元的な形状を持つ構造物の測定が必要になる。図 5 は現在開発計画中の SQUID 計測装置のイメージ図である。ロボットアームの先端にピックアップコイルを取り付け、SQUID センサは磁気シールド内に格納する駆動方式を検討している。この方式により、発電所や変電所内の環境磁場や、測定対象自体の磁化の影響を低減できるものと考えている。センサ部駆動式 SQUID 非破壊検査装置の開発により 3 次元形状を持つ構造物の劣化診断が見込まれ、発電所等現場で使用可能な高感度設備診断の実施に大きく進展するものと考えている。

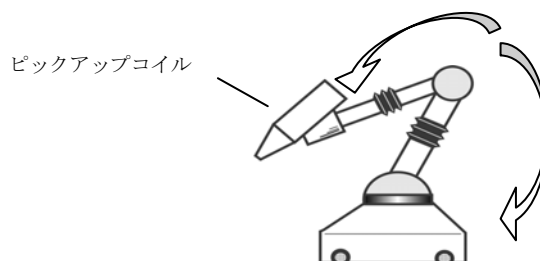


図 5 新型非破壊検査装置（開発中、イメージ）

参考文献：

- 1) 荒井英一：「高温超電導 SQUID を用いた金属資源探査装置（SQUITEM）の開発」，応用物理，Vol.82，No.7， pp.583（2013）
- 2) 河野丈治：「高温超電導 SQUID センサを用いた磁化材料内部欠陥の非破壊検査に関する研究」，東京工業大学博士論文（2012）

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：超電導 世界のプロジェクト



Save Earth by Superconductor

本年度、ISTEC Web21 では新たな試みとして、特集“超電導 世界のプロジェクト”の連載を 4 月号から開始しています。

今月号は、スペインの Obradors、Puig 両教授による欧州の最新事情です。最近始まった EUROTAPES プロジェクトの開発の内容、進め方が詳細に紹介されています。また、最近の電力応用プロジェクトも最後に簡単に述べられています。昔では思いもよらなかったルーマニア、スロバキアの研究機関も参加しています (P4, P23 など)。

読者のご参考になることを期待します。

ISTEC

山田 穰 (和訳)

* 本文は、上記両名による寄稿 “Coated conductor research in Europe” (原文 http://www.istec.or.jp/web21/pdf/13_06/Extra%20June.pdf に掲載) を ISTEC の責任で翻訳したもので、文中の意見など原著者の見解であります。

**なお、原文では RABiT, RABITs, RABITS などが多用されていますが、本訳中では一部製法を除き RABITS® にしました。なお、本文中で英字の略称による製法が多数出てきますので、最後に編注で本文に出てくる製法などの一覧を付けましたので、ご参考ください。

「禁；無断転載」

欧州における薄膜線材研究

(原題 Coated conductor research in Europe)

著者：

Xavier Obradors and Teresa Puig

Institut de Ciència de Materials de Barcelona, CSIC

Campus de la UAB, 08193 Bellaterra, Catalonia, Spain

要旨

本報告は、現在欧州で行われている幾つかの応用に向けた薄膜線材 (coated conductor (CC)) に関するプロジェクトについて述べたものである。最初に、線材作製に必要な技術開発に参加している幾つかの機関の概略を述べる。そして、これまで欧州でこの分野で最大である動き、すなわち EUROTAPES プロジェクトに関して詳細に述べる。9 か国、20 の機関を含むこのプロジェクト全体の目的は、大学と産業界のシナジー効果を引出し、幾つかの科学的問題に関して最新の結果を引き出すことである。すなわち、薄膜線材の特性を上げ、工学的に使える低コストの線材を開発し、高速多量生産可能な製造プロセスを生み出す。このプロセスには、品質制御ツールが組み込まれ、高収率化が可能となり、ゆえに量産化へつながる。本プロジェクトでは 3 つの汎用的な応用のターゲットが考えられており、それに対応して異なる構造と特性を持つ導体が考えられている。それゆえ計画を実行する戦略としては、真空法と化学的方法を組み合わせている。その 2-3 の例を新しい導体構造と形状に関連して紹介する。ナノ構造を作り出す新規な方法による量子化磁束のピン止め力の向上も述べる。最後に、現在欧州で最も活発な電力応用のプロジェクトについて簡単に紹介する。

1. 諸言と概観

高温超電導体の発見が前例のない科学的挑戦を生み出したが、最も有望な高温超電導材料、すなわち $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) をもとにした実用導体の開発は粒界問題を克服する実用的な方法を得るまで遅れたが、2 軸配向させた YBCO 膜を基盤とした第 2 世代 (2G) 線材は、ここ 10 年間世界的な関心を引き起こした。これにより電力応用の実用線材が開発された。また、多くの研究プログラムが米国、日本、韓国、欧州の世界各国で設立され、この新しいチャンスを追求めていった。欧州では国際的な流れを密接にフォローし、国内レベルや EU 連合に支援された国際的な協力プロジェクトのレベルで、多くの研究開発努力を行ってきた。中でも、化学溶液法にとりわけ熱心に取り組んだ SOLSULET、HIPERCHEM の各プロジェクト、インクジェット法を開発した EFECTS プロジェクト、ナノ工学による線材開発を行った SUITABLE、HIPERMAG、NANOFEN、NESPA プロジェクトがあげられる。

しかしながら、これまで発表された中で超電導に関する欧州最大のプロジェクトが最近発足した。EUROTAPES プロジェクト (2012-2016) である。正式名称は、“European development of Superconducting Tapes: integrating novel materials and architectures into cost effective processes for power applications and magnets” (EUROTAPES, 2012-2016)¹⁾ である。このプロジェクトには、9 つの国の 20 の機関が加わり (図 1、表 1 を参照)、その中で大学関係は 12 機関、産業界は 8 機関である。全体予算は ~ 20 M€ (2013 年 6 月 19 日 128 円/€ 換算レートで約 26 億円)。科学的な調整役は、ICMAB-CSIC の Xavier Obradors 教授である。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612



図 1 欧州の超電導研究、超電導電力应用を行っている機関および EUROTAPES プロジェクト参加者

表 1 EUROTAPES 参加機関（水色が産業界）

Participant No.	Participant	Country
1 (Coord)	Institut Ciència Materials Barcelona, ICMA - CSIC	ES
2	Bruker HTS GmbH	DE
3	Italian National agency ENEA	IT
4	Institute of Electrical Engineering, IEE Bratislava	SK
5	La Farga la Cambra, LFL	ES
6	Leibniz Institut für Festkörper und Werkstofforschung, IFW	DE
7	Nexans SA	FR
8	Oxolutia, SL	ES
9	PerCoTech AG	DE
10	Technical University of Cluj-Napoca, TU Cluj	RO
11	Vienna University of Technology	AT
12	Institute Neel, CNRS Grenoble	FR
13	University of Antwerp	BE
14	University of Cambridge	UK
15	University Autònoma de Barcelona, UAB	ES
16	University of Ghent	BE
17	Evico	DE
18	Nexans GmbH	DE
19	Leitat Technological Center	ES
20	Theva	DE

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

本プロジェクトの最終目標は、500 m 以上の長尺の薄膜線材を供給し、かつ、商用前段階レベルのコスト(～100 €/kA m)で作製し、電力応用に最も有望な線材作製の技術選択を行うことである。3つの磁場領域が目標とされており(図2)、線材は異なる動作温度で使われる。1番目は低磁場領域(<1 T)である。これはケーブル、限流器(FCL)用で77 K近辺で動作させる。2番目は高磁場領域(3-5 T)で、30-60 Kで使う必要がある。これらの線材を使った電力システムは、主に回転機、SMESになる。最後に、高磁場領域(>15 T)である。これは、～5 Kの低温までマグネットを冷却しなくてはならないであろう。達成すべき技術的な特性は、臨界電流 I_c (77 K, sf) > 400 A/cm-w (1 cm 幅当たりの I_c)、 F_p (60 K) > 100 GN/m³ and I_c (5 K, 15 T) > 1000 A/cm-w である。

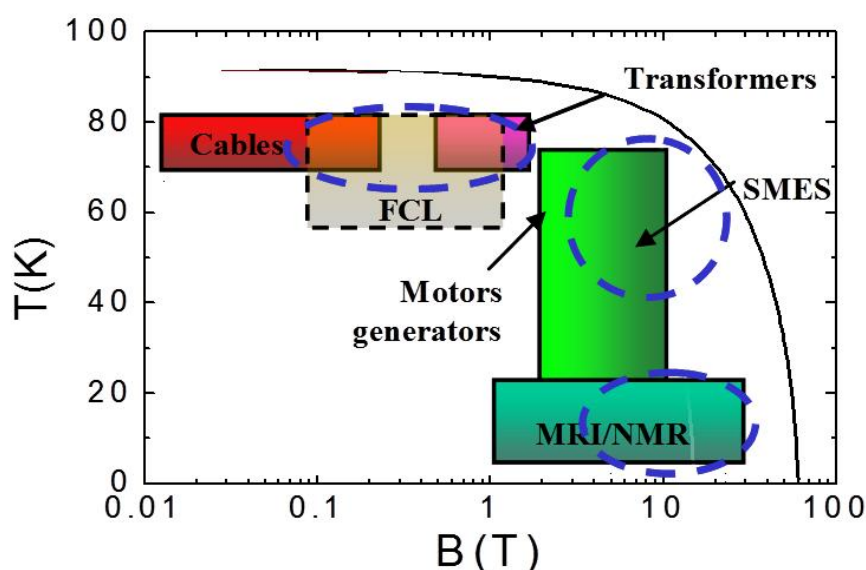


図2 YBCO 薄膜線材が適用される応用での動作磁場と温度。EUROTAPES プロジェクトで目標とされるものに印をつけた。

さらに、このプロジェクトの戦略においては、各々の応用に関して必要な長さを考慮することにした。すなわち、高温超電導線の全システムに占める割合により全体コストは大きく異なってくる。例えば、マグネット中の線材コストは5-15%程度である。配電システム応用(ケーブル、限流器、変圧器)では、システムの20-25%であり、回転機では30%にもなる。この大きなコスト要因の幅は、異なる線材構造の開発を要求することを意味している。構造により製造コストも異なってくる。よって、対応する動作環境下で特定の特性を調べ、それにより特徴づけられる異なる構造の薄膜線材を研究し、最終製造コストをある幅で達成することが望ましい。

このEUROTAPES プロジェクト(30-42ヶ月)の後半では、重点は高効率と高特性を持った量産性におかれる。そして、産業界のメンバーが指導力を発揮し、選ばれた薄膜線材プロセスの大型化を進める。しかしながら、ここで以下の点も述べておきたい。EUROTAPES プロジェクトは、欧州の主な研究開発のメンバーを含んでいるが、他にも薄膜線材を活発に開発しているグループがいる。彼らは、このプロジェクトと一定の協力を行っていく。例えば、カールスルーエ工学研究所(KIT研)は、導体とケーブルの製造及びその先進評価に関する大きなプログラムを持っており、Deutsche Nanoschicht 社(D-Nano 社、以前の Zenenergy 社、ドイツ)は RABiTS®基板を用いた化学溶液蒸着(CSD)法を使った薄膜線材の工業化に非常に積極的に動いている。さらに、デンマークの Riso 国立研は同様に化学溶液法に基づいたバッファ層、超電導層の研究を行っている。最後に、最近ロ

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

シアでも薄膜線材および電力応用に関する広範囲な研究プログラムが始まったことを強調しておきたい。

2. 薄膜線材の構造

材料科学者の“名人芸、或いは技術の粋”というべき薄膜線材の開発は、まとめると図 3 に示すような技術スキームで行われる。いかに多くの関連因子が独特な方法で連携され高性能の線材開発をしなくてはならないかがわかる。また、それは低コストでなくてはならない。EUROTAPES プロジェクトでは、最初の段階で、金属基板の作製と化学蒸着の分野で既存の技術の最適組み合わせの方法に関して探索する。金属学、エピタキシャル成長、溶液化学、表面科学、その場蒸着の制御ツールを含む薄膜ナノ工学、製造工学が薄膜線材の産業規模での生産のために使われ、最良の線材構造とプロセスが選ばれる (図 4)。また、図 5 に示すように、3 つの主要な線材構造が本プロジェクトでは研究される。

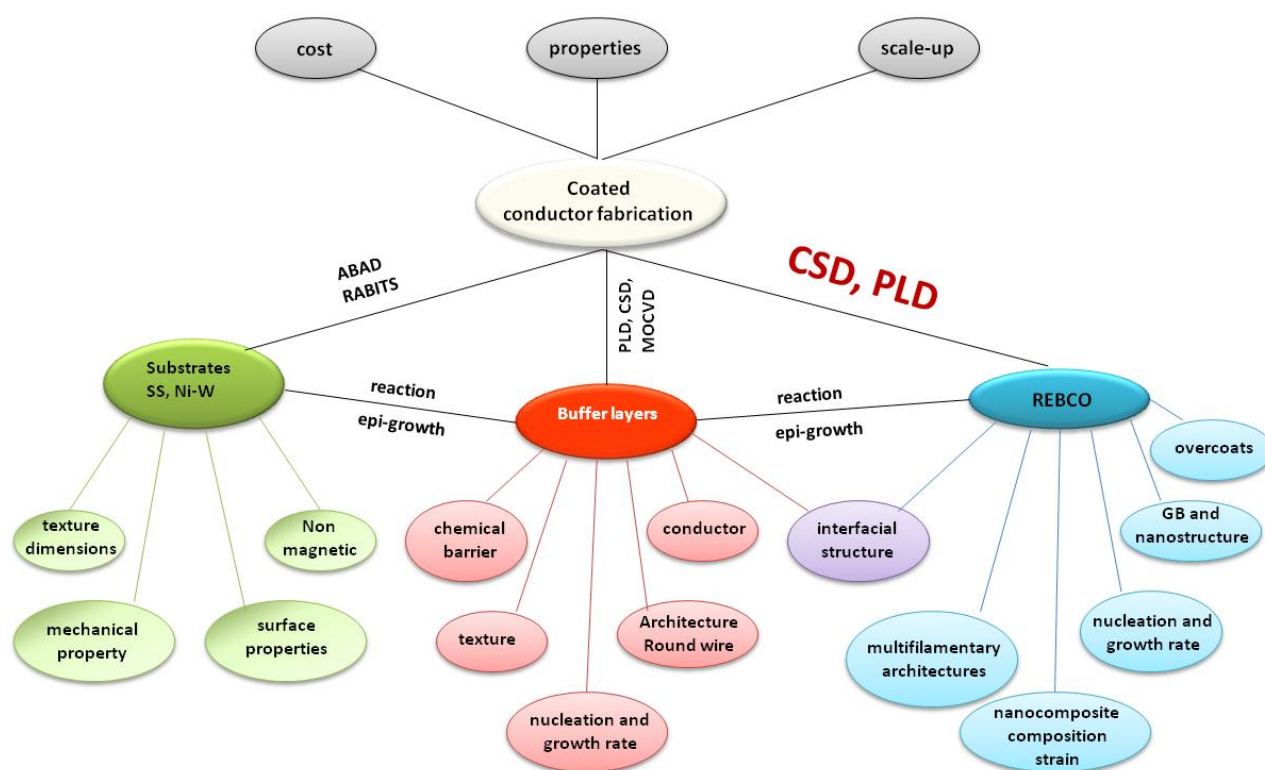


図 3 薄膜線材開発での科学的、技術的課題のマップ図。
EUROTAPES プロジェクトでは、これら全てを統合させたアプローチで産業応用を達成しようと考えている。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

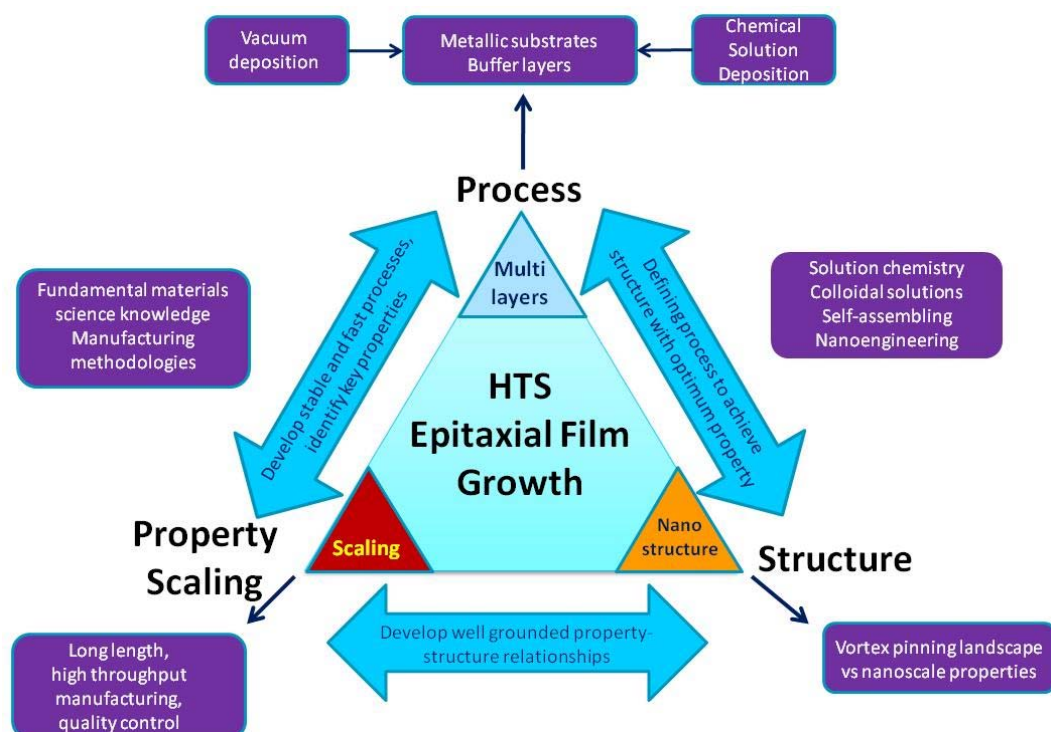


図 4 薄膜線材の科学的コア技術は、エピタキシャル成長とナノ構造の開発である。主な挑戦課題は、統合された方法で金属基板上に多層材料とナノ複合体を作る技術を確認することである。EUROTAPES プロジェクトの戦略は、真空を用いた方法と化学的方法を最善の方法で組み合わせ、高収率で高生産量の長尺薄膜線材を製造することである。

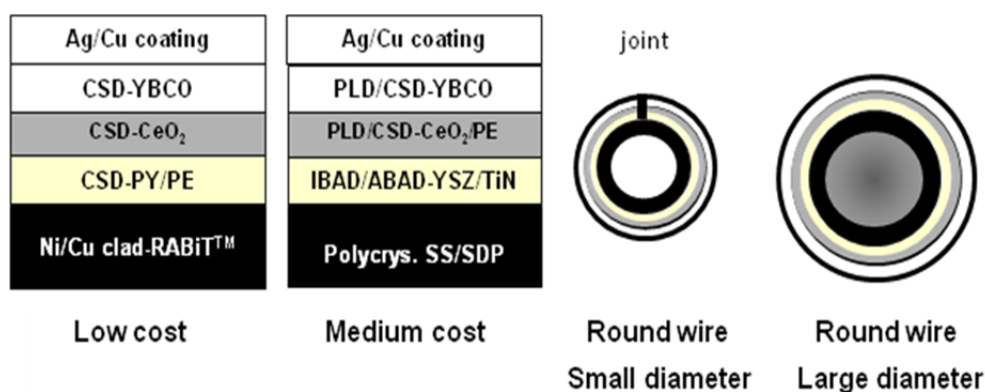


図 5 EUROTAPES プロジェクトの開発で考えている 3 つの導体構造。

RABiT[®]法による研究では、主に新しい非磁性材基板 (Ni と Cu 系) を用いて交流損失を減らし、新規なバッファ層の組み合わせで検討を行う。これにより最終目標である高性能で低コストな CSD

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

法による線材開発を目指す。他方、多結晶金属基板（ステンレス鋼 (SS)）も研究し、ABAD（交互イオンビーム照射蒸着）法による配向テンプレートを作る方法を探る。ここで主に研究するのは BrukerHTS 社により広く使用されており、強度の高いテンプレートの YSZ である。しかし、TiN テンプレートの可能性も探る。両方の場合とも、製造コスト低減を削減するための特別の努力を払う。その際、溶液塗布平滑（SDP）法や CSD 法によるバッファ層も使う。

最後に、新しい導体構造もこのコンソシアムの中で検討する。すなわち、2G テープ線材による丸線である。この形状は、電力ケーブルの製造に関して実地的な興味をひくものである。この丸線で線材配置空間の使い方は、Nexans 社²⁾により実証されている製造法の簡素化と同じように最適化されなくてはならない。

まとめると、本プロジェクトで開発されるのは図 6 に示す異なる組み合わせの薄膜線材である。これらは産業化推進の基盤となり、EUROTAPES プロジェクト内やその他の開発機関 (D-Nano 社) により検討がなされている。

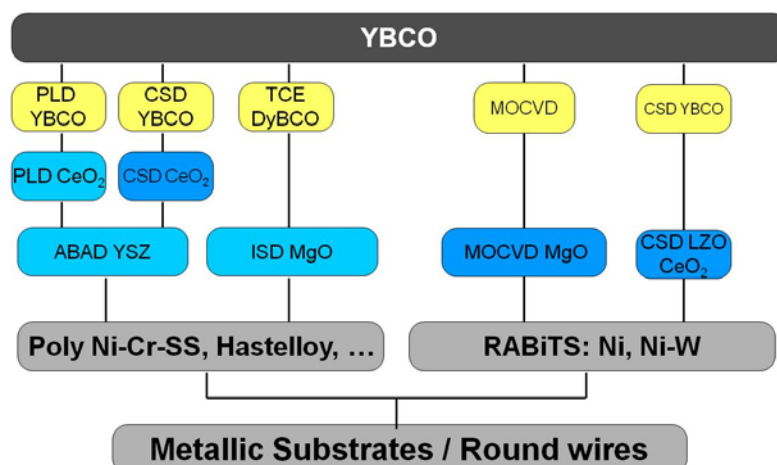


図 6 現在欧州で開発されている主な薄膜線材構造構成の模式図。
EUROTAPES プロジェクトで研究しているもの、このコンソシアム以外の民間機関で行っているものも含む。

EUROTAPES プロジェクトで生まれるシナジー効果は、非常に大きい (図 7 参照)。というのも、あるメンバー (Bruker 社, IFW 研, Evico 社, Lafarga 社, ENEA 社) は金属基板製造に熟練しており、CSD 法による酸化物バッファ層 (Ghent 大, CNRS Grenoble, ICMAB) や MOCVD (Percotech 社)、PLD 法 (Bruker, IFW 研, Enea) のメンバーと協力・連携していく。他方、超電導層の成長は、2 つの主流の方法で行う。それは、PLD 法 (Bruker 社, IFW 研, Enea 社, Cambridge 大) と CSD 法 (ICMAB, Oxolutia 社, TU Cluj 大)³⁾である。

2 番目のケースでは、新規で、かつ、もっと環境に配慮した、低フッ素濃度の材料がインクジェット法に適用されて、膜厚を増やすべく研究される⁴⁾。両方の場合とも、特別な努力がなされ、以下に述べるように、新規なナノ構造の製法により磁束ピン止め力を向上させる。丸線については、主な研究機関は Nexans 社であるが、CNRS- Grenoble, Percotech 社と Oxolutia 社も彼らを材料開発の面で援助する。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

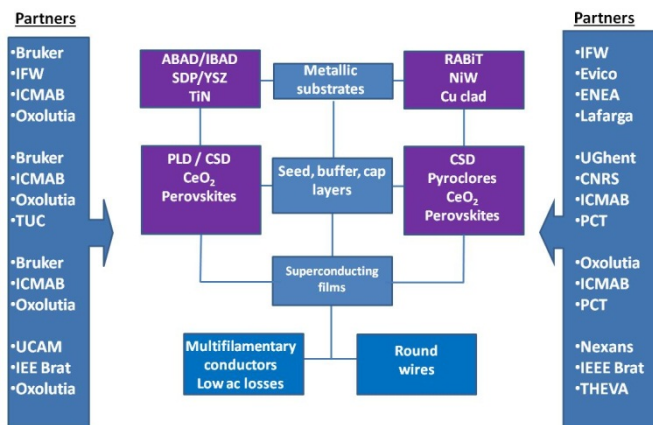


図 7(a)

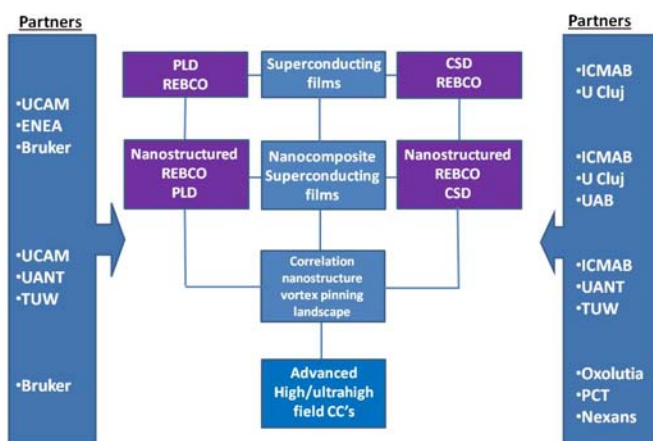


図 7(b)

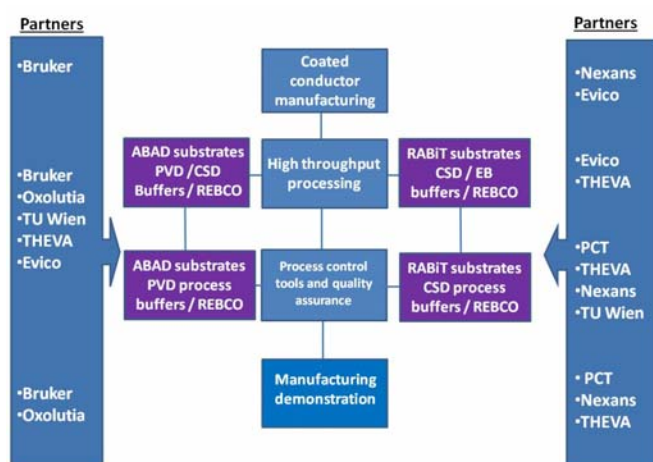


図 7(c)

図 7 EUROTAPES プロジェクトで研究されている科学的、技術的開発方法の模式図。各技術トピックスを検討する参加機関も記載した。(a)導体の基礎レイアウト(金属基板、バッファ層、超電導膜、低交流損失構造)、(b)ナノ構造膜と高ピン力を持つ導体を作製する一般的方法、(c)薄膜線材の大規模製造化と品質保証ツールに含まれる課題

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

交流損失挙動に関しては Bratislava のグループが研究し、交流損失を低減した多芯線ストライプは、Cambridge 大 と Oxolutia 社が インクジェット蒸着法により開発する^{4), 5)}。最後に、Vienna 大 と Antwerp 大のグループは先進物理的評価および構造的評価を各々行って支援する。Theva 社は YBCO 層の低温成長のためのバッファ層の特性試験に協力し、Leitat 社は参加機関のために LCA (ライフサイクルアセスメント) で貢献する。

3. 金属基板とバッファ層

上に述べたように、2 つのタイプの金属基板が EUROTAPES プロジェクトでは考えられている。1 つは、改良型イオンビーム蒸着法 (ABAD、交互イオンビーム照射蒸着法) による YSZ 2 軸配向テンプレートを持つステンレス鋼 (SS) が Bruker 社により 200 m を超える長さまで現在作製されている。このテンプレート付き金属基板は、Bruker 社による (CeO_2 と YBCO 層) の高速 PLD (HR-PLD) と ICMAB と Oxolutia 社による ($\text{Ce}_{1-x}\text{Zr}_x\text{O}_{2-y}$, CZO) キャップ層と超電導 YBCO 層の CSD 蒸着に使われる。代表的な YSZ 層の厚みは、1.0-1.5 μm で、 CeO_2 と CZO の厚みはそれぞれ 50, 20 nm である。

この金属基板の特筆すべき特徴は、その高強度と高温アニールに対する耐性である (たとえば、CZO の成長は 900°C の酸素雰囲気で行うことができる)。両方のケースとも、キャップ層の最終配向度はかなり良く、表面平滑度もそれぞれ、> 70 % (原文: 説明がないが、結晶の配向度マップ図での高配向部分の面積率か) と rms 粗さ ~ 1.2 nm である。すなわち、この基板は完全に長尺の蒸着、YBCO 層の成長に適している。EUROTAPES プロジェクトの主な目的は、表面平滑法 (SDP 法) により ABAD の製造コストを低減することであり、また、基板の幅を 40 mm まで広げることである。SDP 法の技術は、MgO の場合に IBAD 配向蒸着が可能であることが分かっていたが、YSZ ではまだ検討を要する。

さらなる IBAD の代替材料 TIN 層の潜在能力は、EUROTAPES プロジェクトの中で、SDP 法を使った表面平滑ステンレス鋼基板を用いて検証される。TIN が 2 軸配向性テンプレートとして適していることは IFW 研により既に証明されていたが、さらに高配向を得るために薄い膜厚で済むなど、蒸着コストを下げるのに魅力的な代替材料になりうるようである。その他の酸化物バッファ層 (ペロブスカイト, MgO) の幾つかが TU Cluj 大により研究され、新規な構造に適した多層構造が見つけられる。

EUROTAPES プロジェクトでは、金属基板の 2 番目の選択肢として RABiTS[®]法を使う。Ni5%W は、すでに Evico 社から手に入れることができ、この分野での最も標準的な研究のベースとなっている。本プロジェクトの目的は、しかしながら、交流損失を減らした非磁性の基板を利用できるようにすることである。よって、ここでは、最初の目的として、高配向の Ni9%W 基板を得ることとした (訳注: W 量を 9 % まで増やすと基板の磁性はなくなる)。これは IFW 研と Evico 社が実施する。IFW 研は、また、バッファ層の各生成過程の制御のため、RABiTS[®]基板上の S (硫黄) 表面テンプレートの適正化も追及する。

CSD 法を用いた NiW RABiTS[®]基板による改良されたバッファ層の探索は、3 つの主な開発機関、Ghent 大、CNRS-Grenoble と Enea 社が行う。MOCVD は Percotech 社が行う。その目的は、インクジェット印刷法をこれら金属基板のバッファ層形成のための工業的方法として使い、最も単純な構造と最も信頼性のある成長プロセスを選んでトータルコストを削減することにある。そして、パイロクロア、フローライト、食塩型構造などのいくつかの酸化物相が徹底的に試験される。この

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

研究の最終ゴールは単純な構造を選んで RABiTS[®]テンプレートの長尺製造を実行することである。非磁性 RABiTS[®]基板を探す中で、本コンソシアムでは、クラッド化して強化した Cu 基板を使ことができるか、その妥当性を検討する。この候補探しは Enea 社 と Lafarga 社が行い、妥当なバッファ層の探索に関して、Enea 社 と ICMAB はそのノウハウを PVD 法と CSD 法に関して提供する。この金属基板の利点は、非磁性以外に高品質配向でかつ幅広基板に低コストでできることである。しかしながら、強度の高い保護バッファ層の開発が必要である。

ABAD、RABiTS[®]系の金属基板の両方とも原則的には、丸線の開発に適している。よって、EUROTAPES プロジェクトでは Nexans 社の主導のもとこの丸線開発を進める²⁾。この斬新なアイデアの基本は、壊れやすい YBCO セラミックスを線材の中立軸上に正確に置き、そこでの曲げの引っ張り力を最少とするところにある。このプロジェクトでは、この新規な製法に関する開発のすべての課題を詳細に考えて、よりコンパクトなケーブルを作製する。検討は、線材の加工道具立て、バッファ層、超電導層の蒸着から、電氣的、熱的保護、機械特性、交流損失まで多岐にわたる。利用できる全てのタイプの薄膜線材はこの目的のために試験される。

4. 超電導層

超電導層の成長と最適化は確かに薄膜線材のコア技術である。何年も、世界中の多くのグループがこの超電導層が大電流を流せるよう努力をしてきた。そして、最も有望な結晶成長技術がいくつか浮かび上がってきた。

欧州あるいは EUROTAPES プロジェクトでは、2つのキー技術が予見される。PLD 法と CSD 法である。主に研究対象となるのは、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ と混晶の $(\text{Gd}, \text{Y})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ である。ドイツの Theva 社の卓越した努力も述べておく。反応性共蒸着法を用いた ISD 法により $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ の成膜で 7.5 μm までの厚膜化を行っている。

産業化レベルでは、PLD は BRUKER 社 で、CSD は D-Nano 社 と Oxolutia 社で検討が行われる。これらの製法を検討する学術的研究所は、PLD 法蒸着の結晶成長が Cambridge 大、IFW 研 と Enea 社であり、ICMAB、TU Cluj 大、U Ghent 大、IFW 研と Enea 社は CSD 法での結晶成長を検討する。Ghent 大は、フッ素フリー法の溶液法 YBCO 成長を担当するが他はいわゆる通常のトリフルオロ酸 (TFA) による製法を扱う³⁾。ICMAB と TU Cluj 大は、CSD 法 YBCO 成長の主たる検討機関であり、彼らの主な目的は低濃度フッ素溶液を開発し、高超電導特性で高結晶成長速度を持ち、厚い膜でもクラックが生じないようにすることである。

CSD 法 による YBCO の成長に関して得られた知識はまだ限られているので、欧州の中で EUROTAPES プロジェクトがこの件に関してリードしていく。異なるプロセスでの結晶生成と成長の制御、溶液前駆体の化学式と物理的性質の相関性、最少塗布回数での厚膜化 (~2 μm) の可能性、強固に焼結させることができ、かつ、分解反応ができる単一層厚みの増加が可能な仮焼工程の理解、成長速度の評価とその高速化方法、酸素富化の最適化と理解、これらが主な課題である。加えて、これら全ての努力は EUROTAPES 内で、Bruker 社から提供される CeO_2 キャップ層と ABAD 基板に対して、ICMAB と TU Cluj 大で適用され、Oxolutia 社に移管される必要がある。これで連続製法により 10-100 m 長のものができる。加えて、インクジェット印刷法による大規模工程化も行われる。

産業化レベルでは、すでにインクジェット印刷法が有望で信頼性があり、低コストな方法である

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

ことを D-Nano 社が示した。これにより彼らは NiW の RABiTS[®] 基板で全工程化学溶液法を使って 10 m の線材を作製した。すでに有望な特性（短尺で $I_c = 160 \text{ A/cm-w}$ 、長尺で $I_c = 105 \text{ A/cm-w}$ ）も実証した。長尺製造、特性向上、収率向上、幅広テープ製造、高速結晶成長、高 I_c （厚膜化による）が D-Nano 社と Oxolutia 社による主な課題であり、各々 RABiTS[®]、ABAD 基板を用いて開発する。

他方、PLD 法成長の基礎は IFW 研 ドレスデンが研究し、主に高い（レーザ）周波数での成長に対象を置く。主な産業化メンバーである Bruker 社は複数プルームによる高速 PLD 法を大面積で開発したが、現在、77 K で 250 A/cm-w の特性の再現性を検証している。EUROTAPES プロジェクトでは、これらの値を超えた特性を持つ長尺を低コストで作製する。

最後に、ロシアの SuperOX 社 が数年前から活動していることを述べておく。彼らは、超電導層の MOCVD 成長を追求し、1 m の RABiTS[®] テープ上で $\sim 100 \text{ A/cm-w}$ をそして 10 m の IBAD 基板上で $\sim 300 \text{ A/cm-w}$ を超える特性を得ている。

5. ピン止め力向上の戦略

EUROTAPES プロジェクトの主なミッションの 1 つは、最良で新規なピン止め点を見つけることである。これは前に述べた 3 つの興味ある磁場範囲（すなわち、低磁場、高磁場、超高磁場）に対応するものでなくてはならない。PLD、CSD の両方の技術とも見通しがある。主に考えられる方法として最初のものは、ナノ複合体である。この複合体では、非超電導相のナノ粒子が超電導マトリックスの中に分散している。PLD の場合には、エピタキシャル介在物（ナノ粒子、ナノロッド）が直接的にピン止めの主体であると考えられている。Bruker 社と Cambridge 大と Enea 社は密接に協力しあい、これを産業レベルにスケールアップする^{6), 7)}。他方、探究の結果、CSD 法ではランダムに並んだナノ粒子が付加的に生じさせる欠陥や歪と 3 次元のランダムネットワーク作用により、磁束をピン止めすると考えられている^{8), 9)}。

戦略としては、このナノ複合体を限界まで向上させ、異なる磁場範囲でのピン力を評価し、さらなる電流限界に近づけるようにピン止めモデルを立てる。

Eurotapes プロジェクトでの PLD 法での主な努力は、従来の研究で行われていた単一相あるいは混合相でナノロッドのサイズやナノ粒子とナノロッドの相互作用を制御することである¹⁰⁾。しかしながら、これら介在物が有効なピン止め点である温度-磁場領域に関しては、超高磁場と低温での応用に使える他の点状欠陥を探したり、予見することが必要である。

CSD 法では、ナノ粒子のサイズの制御、凝集や粗大化の防止が主な開発テーマであることが認識されている。本プロジェクトの中で大きな努力がこの点に払われる。これにより成長過程の改善や全熱処理工程でのナノ粒子の小径維持 ($< 10 \text{ nm}$) が行われる。大事なことは、このプロジェクトには YBCO 前駆体溶液の中でナノ粒子の予備作成も含まれることである。これによりいわゆるナノ複合体の ex-situ 成長での最終微細構造のデザインと制御ができる。

この努力は、これまで多くのグループや研究者が探究してきたが成功したことはなかった。理由は、高イオン性、アルコール性 YBCO 前駆体溶液がナノ粒子の析出を生じさせるからである。最近、ICMAB, UAB 大, U Ghent 大, TU Cluj 大 の EUROTAPES メンバーは、YBCO 溶液中に合成されたナノ粒子相のいくつかを安定させることに成功した。ナノ複合体の成長におけるこの新規な方法の潜在能力の系統だった解析が本プロジェクトの中で行われる。全ての努力は、厚膜長尺の RABiTS[®] と IBAD 線材で実証されなくてはならない。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

これらの挑戦課題を実行するために、Antwerp 大と ICMAB の電子顕微鏡観察グループや TU Vienna 技術大学、ICMAB、IFW 研の最新物理評価グループが特別にコンソシアムを組んだ。これにより構造欠陥とピン止めの相互関係をはっきりさせる。

最後に、これらの内で最良の組み合わせをリール法により作製できることを実証し、厚膜の線材の全長にわたる特性を示すことが必要になる。

6. I_c 向上に加えて：交流損失、機械強度

多芯線材、Roebel 導体、交流損失、シャント抵抗、最終導体構造、機械強度のようないわゆる“ I_c 向上に加えて”と称される特性は、導体の市場投入に関連した重要な課題項目である。特に、異なる構造での交流損失評価と低交流ロス化のための細線ストライプ化のスケールアッププロセスは EUROTAPES プロジェクトの目標である。その努力は、インクジェットプリント法を使ったストライプの作製とその強度評価に関して行われている。これは、欧州プロジェクト EFFECTS で行われていた薄膜線材で YBCO 層をインクジェットで作製する方法の後継であり、EUROTAPES プロジェクトでは Cambridge 大と Oxolulia 社が開発を継続する。

EUROPE 外の他のグループ (KIT 研) はピコ秒の YAG 赤外レーザを使って 120 本までの溝分割した細線ストランドを作る。これにより交流損失の低減を実証する¹¹⁾。これらのストランドは Roebel ケーブルを作るのに使用された。これはラザフォードケーブルを使った核融合マグネットのように組み立てられ、undulator (訳注：放射光発生用磁石) 用複合体テープの最初の実証になる。また、EUROTAPES プロジェクト内の IEE Bratislava と KIT 研では、異なる基板の強磁性が検討され、異なる構造の交流損失や実際の応用 (限流器やモータ) に組み込まれた時の評価が行われる。さらに、EUROTAPES プロジェクト内で、Enea 社は多様な形状での導体の熱的安定性を研究し、解析モデルを立てて検討している。他方、電気機械的性質も重要なトピックスであり、これは限流器を開発した ECCOFLOW 欧州プロジェクトで深く研究された。

最後に、European Fusion Development Agreement (EFDA) の援助のもと、核融合用薄膜線材の成果が上がった項目も述べておく。すなわち、主に高磁場 12-16 T、低温 ~ 20-50 K での臨界電流の異方性の決定、電気機械特性、交流損失解析、熱的安定性、照射耐性の研究、接合製造などである。これらの成果は、TU Wien 大、U Lausanne 大、KIT 研、ICMAB、ENEA 社と Catalan エネルギー研究所、IREC の 6 つの機関によるものを含んでいる。

7. 電力応用プロジェクト

現在欧州には多くの重要な電力系の開発に関するプログラムがある。その多くはまだ 2G 薄膜線材を使ったものではない。3 年前にこれらのプロジェクトの要約が Tixador により報告された¹²⁾。また、より最新のレポートも、Noe によりなされた¹³⁾。実際、欧州の超電導電力応用における欧州の参加者の現在の興味を定量的に表したものとして、次のものがある；2012 年の応用超電導会議 (the Applied Superconductivity Conference 2012) での大型応用分野の発表の約 20 %は欧州の参加者であった；また、ロシアでは、大胆なプログラム (Rosatom) が 2010 年からスタートしている¹⁴⁾。ここでは、その中の異なる分野で最も目立ったもので最近の成果を述べたい。

最初に、ドイツのプロジェクトである Ampacity を述べる。これはエッセン市中に限流機能を持った 1 km 交流ケーブルを敷設するものである。全容量は 40 MVA で中圧 (10 kV) 3 相ケーブルである。このケーブルは BSCCO 1G テープでできており、限流器は抵抗方式で BSCCO セラミックス

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

のバルク体できており Nexans 社が作製する。本プロジェクトは、公益事業者の RWE が行い KIT 研も参加する。2013 年末に設置される。他の 2 つのケーブルプロジェクトはロシアで行われており、20kV-50MW で、長さは 交流ケーブルが 200 m、直流ケーブルが 2.5 km である。

限流器応用の分野では、デモンストレーションにつながる幾つかのプロジェクトがある。最も目立ったものは、EU のプロジェクトの ECCOFLOW で Nexans 社と 13 の参加者が行い、そのうちの 5 つは公益事業者である。最終目標は、24kV-1kA の抵抗型限流器を 2G 薄膜線材で作ることである。このデモ装置は、2014 年に系統に組み込まれる。最初はスペインの系統で、その後、スロバキアで試験し、最後は常用される設備になる予定である。他の抵抗型限流器開発プロジェクトは、イタリアとロシアで 2G 薄膜線材を使い、それぞれ 3.4 MVA、2.2 MVA の出力を予定している。

回転機に関しては、欧州では幾つかの構想があり、より積極的に行われている。例えば、Siemens 社は 4 MW 以上の大きな同期機を開発するプログラムを続けている。これらのモータは 1G、2G 線材を使ったものがそれぞれあり、試験は無事成功した。ドイツの Ostwald Motoren 社は、100-2000 kW の中規模モータの設計、製造に常に非常に積極的である。最後に、EU の支援により新しいプロジェクトが最近できた (SUPERconducting, Reliable, lightweight, And more POWERful offshore wind turbine, 通称 SUPRAPOWER, 高信頼軽量 超電導大出力の洋上風力タービン)。これは、MgB₂ 線材を使って冷凍機で冷却する。このプロジェクトは以下の機関を含む。風力分野で良く知られているスペインの Acciona 社、線材製造業者のイタリアの Columbus 社、研究所としてスペインの Tecnalia、その他前出の KIT 研, IEE Bratislava, U Southampton 大である。

変圧器の開発研究は、主に ABB 社と協力して KIT 研で行われている。2G 薄膜線材を使って 1 MVA 限流機能付き変圧器の実証試験が行われた。最後に、磁気エネルギー貯蔵がトピックスとしてあげられる。1 つは CNRS Grenoble 研で研究されているもの (BSCCO-2212 を使った 800 kJ SMES) で、もう 1 つが KIT 研のもの (MgB₂ 線を使ったハイブリッド液体水素 SMES 貯蔵) で国家プロジェクトをいずれもベースにしている。

これらの電力応用プロジェクト以外に、高エネルギー物理での使用に HTS システムが連続的に開発されている。主に CERN の主導でいくつか大学、研究機関、産業界からメンバーが入っている。特に LHC (大型ハドロン衝突型加速器 Large Hadron Collider) 用の電流リードの開発と LHC の将来機能向上化のための高電流送電線が開発されていることを明記しておきたい。

要するに、欧州には薄膜線材を使った電力、大規模応用に大きな関心があり、薄膜線材の工業的生産能力を高めることは非常に有益である。

8. 結論

まとめると、欧州には超電導、超電導材料、その応用に関して長い伝統があり、産業化に関しても、特に高温超電導材料を用いたものを含めて、その開発プロジェクトが広がっている。薄膜線材の発見から、多くの国内プロジェクトや欧州が支援するプロジェクトが活発に行われている。通常、欧州プロジェクトは学会、産業界から 5-8 メンバーが参加するが、伝統的にその協調性は非常に強い。2012 年には、多くの大きな研究開発プロジェクト EUROTAPES が発足した。総計 20 の機関が参加し、薄膜線材の研究開発に関するトピックスと技術の広い範囲をカバーしている。この新しいプロジェクトの主な目的は、欧州に存在する広いノウハウを最高の状態で全て使い、これらの新興材料の工業的開発を決定的に後押しすることである。特定の応用を想定して高性能と低コストを

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

達成すべく、物理的、科学的蒸着法の両方法とも、異なる線材構造を使用して融合される。このプロジェクトは、新しい科学的ブレークスルーを作り出すことだけでなく、薄膜線材のスケールアップ化の点で非常に魅力的である。欧州における薄膜線材、その超電導電力応用分野の産業界は、このプロジェクトが作り出す広いシナジー効果により大きな恩恵を受けるであろう。

謝辞

情報を提供いただいた、全ての Eurotapes プロジェクトのメンバーの方、D-Nano 社の Dr. M. Baecker 博士、KIT 研の M. Noe 教授 と Dr. W. Goldacker 博士、CNRS-Grenoble 研の P. Tixador 氏、Siemens 社の T. Arndt 氏、SuperOx 社の S. Samoilnikov 氏に感謝します。

文献：

- 1) EUROTAPES, www.eurotapes.eu ; Grant Agreement EU-FP7 NMP-LA-2012-280432.
- 2) Nexans Innovaction, Issue No. 6, February 6th, (2013).
- 3) X. Obradors, T. Puig, S. Rlcart, M. Coll, J. Gazquez, A. Palau, X. Granados, Supercond Sci Tech 25, 123001 (2012).
- 4) I. Van Driessche, J. Feys, S. Hopkins, P. Lommens, X. Granados, B. Glowacki, S. Rlcart, B. Holzapfel, M. Vilardell, A. Kirchner, M. Bäcker, Supercond Sci Tech 25, 065017 (2012).
- 5) M. Vilardell, X. Granados, S. Rlcart, R. Cobas, M. Arjona, T. Puig, X. Obradors, S.C. Hopkins, B.A. Glowacki, J. Bennewitz, M. Falter, M. Bäcker, J. of Imaging Science and Technol. 4, 040304 (2011).
- 6) K. Matsumoto, P. Mele, Supercond Sci Tech 23, 014001 (2010).
- 7) X. Obradors, T. Puig, A. Palau, A. Pomar, F. Sandiumenge, P. Mele, K. Matsumoto, in "Comprehensive Nanoscience and Technology" (eds D. Andrews, G. Scholes, & G. Wiederrecht), (Elsevier, November 2010), p. 303.
- 8) J. Gutiérrez, A. Llordés, J. Gázquez, M. Gibert, N. Romà, S. Rlcart, A. Pomar, F. Sandiumenge, N. Mestres, T. Puig, X. Obradors, Nature Materials 6, 367 (2007).
- 9) A. Llordés, A. Palau, J. Gázquez, M. Coll, R. Vlad, A. Pomar, J. Arbiol, R. Guzmán, S. Ye, V. Rouco, F. Sandiumenge, S. Rlcart, T. Puig, M. Varela, D. Chateigner, J. Vanacken, J. Gutiérrez, V. Moshchalkov, G. Deutscher, C. Magen, X. Obradors, Nature Materials 11, 329 (2012).
- 10) G. Ercolano, M. Bianchetti, S.C. Wimbush, S.A. Harrington, H. Wang, J.H. Lee, J.L. MacManus-Driscoll, Supercond. Sci. Technol. 24 095012 (2011).
- 11) S. Terzieva, M. Vojenciak, E. Pardo, F. Grilli, A. Drechsler, A. Kling, A. Kudymow, F. Gomory, W. Goldacker, Supercond. Sci. Technol. 23, 014023 (2010).
- 12) P. Tixador, Physica C 470, 971 (2010).
- 13) M. Noe (to be published).
- 14) V. Pantsyrny, "Status of the RF Project SUPERCONDUCTING INDUSTRY", ISIS Meeting, Portland USA (2012).

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

****** 編注：本文に出てくる製法一覧（略前の単語と説明）

RABiT : Rolling Assisted Bi-axially Texture, 圧延加工とその後の熱処理により結晶二軸配向を得る製法。

RABiTS: Rolling Assisted Bi-axially Textured Substrate, 上記による製法で作製した基板。Ni 系金属などが多い。

IBAD : Ion Beam Assisted Deposition, スパッタなどの蒸着時にイオンビームを同時照射して結晶二軸配向を得る製法。

ABAD: 上記 IBAD を改良して、イオンビームを交互に方向を変えて照射する方法。

CSD: Chemical Solution Deposition, 化学溶液を配向基板に塗布して、その後熱処理し、超電導相を簡便に作る方法。MOD 法(Metal Organic Depositon, 有機金属化合物を原料として、同様に基板表面に塗布、熱処理し超電導相を得る手法)なども含まれる。

SDP: Surface Deposition Planarization, 基板表面を平滑にするために化学溶液を基板に塗布後、熱処理して平坦な酸化物層を作り、IBAD, ABAD に必要な数 nm の表面平滑度を得る方法。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

超電導関連 ‘13/8 月－9 月の催し物案内

7/31-8/1

低温工学 東北・北海道支部研究会／第 2 回材料研究会のご案内
グランドサンピア八戸

http://www.csj.or.jp/tohoku/2013/2nd_0731.pdf

8/19-23

低温技術講習会「77K 小型冷凍機を作ろう」
物質・材料機構 桜地区、筑波

http://www.csj.or.jp/reitob/2013/summercamp_0819.pdf

8/22-23

2013 年度日本物理学会科学セミナー
東京大学本郷キャンパス小柴ホール

<http://www.jps.or.jp/public/seminar/scisemi2013.html>

9/2-6

International Conference on Nanoscale Magnetism (ICNM-2013)
Istanbul, Turkey

<http://www.icnm2013.org/>

9/2-3

東北・北海道支部 第 18 回超電導・低温若手セミナー
定山溪 ビューホテル

http://csj.or.jp/tohoku/2013/18th_0902.pdf

9/5-6

九州・西日本支部 若手セミナー
九州工業大学戸畑キャンパス 百周年中村記念館

http://csj.or.jp/kyushu/2013/Jr_Seminor_0905.pdf

9/10-12

日本冷凍空調学会 年次大会
東海大学 高輪キャンパス

<http://nenji.jsrae.or.jp/nenji/>

9/15-19

EUCAS
Genova, Italy

<http://www.eucas2013.org/>

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

9/20

ECCOFLOW WORKSHOP

Palma de Mallorca

<http://affccs.grenoble.cnrs.fr/eccoflowworkshop/index.html>

9/23-27

International Conference on RF superconductivity

Paris, France

<http://www.srf2013.fr/>

9/24-25

電気学会 超電導応用電力機器研究会

東京電力 技術開発研究所

<https://workshop.iee.or.jp/sbtk/cgi-bin/sbtk-showprogram.cgi?workshopid=SBW00002554>

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

新聞ヘッドライン (6/20-7/19)

- 昭和電線系と ISTEK が高温超電導線材製造技術を確立 磁場中でも特性高く 電気新聞 6/20
 - 超電導送電 北海道で実証 ロス軽減の直流 世界最長 住友電工など 4 社 産経新聞大阪朝刊 6/20
 - ナノ制御は現在の錬金術 セメントが半導体・金属に 日本経済新聞 6/23
 - エネルギーの明日 ための技術を磨く 永久稼働の蓄電めざせ 太陽光・風力普及の要進化 日経産業新聞 6/28
 - イットリウム系超電導線材—昭和電線 MRI 応用探る 日経産業新聞 7/03
 - 対称性破れた超伝導体が無数に存在 新潟大が解明 科学新聞 7/05
 - ウラン化合物超伝導前駆状態のひずみを原子レベルで測定 科学新聞 7/05
 - 国際熱核融合実験炉 20 年稼働へ整備進む 機器の品質など課題 日本経済新聞電子版 7/15
 - 科学技術振興機構顧問北沢宏一氏 (1) 高温超電導材料の写真 (こころの玉手箱) 日本経済新聞 7/16
 - リニア新駅周辺の整備方針、14 年度末までに 県検討委が初会合 甲府／山梨県 朝日新聞 7/19
- (編集局)

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

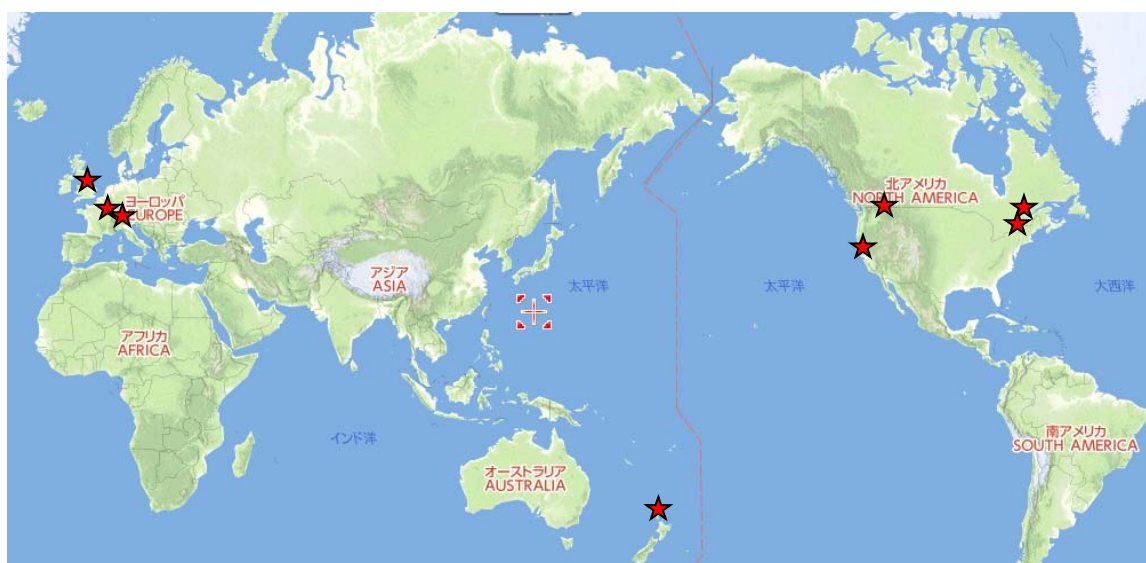
超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

超電導速報－世界の動き（2013 年 6 月）

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所

特別研究員 山田 穰



★ 記事のニュース発信地、関連地

▶産業応用



無冷媒型超電導 NMR を共同開発

Stelar S.r.l and HTS-110 Ltd. (2013 年 5 月 27 日)

イタリア Stelar 社とニュージーランド HTS-110 社は、新たな核磁気共鳴(NMR)製品の開発に向けて、国際共同研究を実施することを発表した。商用且つ研究用途を目的とした新しい統合ソリューション開発に向け、両社の無冷媒型超電導磁石に関するノウハウと専門知識、そして NMR 緩和時間測定法や高速磁場サイクリング NMR 開発で培われた専門技術を結合させる。HTS-110 社の変動磁場無冷媒型超電導磁石と Stelar 社の NMR 高速磁場サイクリング技術を組み合わせることで、両社は、スピン緩和の磁場依存性を、最新の臨床 MRI スキャナーの磁場強度 (3T) にまで拡張したいと考えている。Stelar 社最高経営責任者である Gianni Ferrante 氏は、「Stelar 社と HTS-110 社の結合システムにより、造影剤の全体プロファイリングが可能となり、今後、造影剤分析やより高磁場な環境でスピン緩和時間を必要とするアプリケーションに適切な機器を作製することができる。」と述べ

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

た。また HTS-110 社最高経営責任者である Donald Pooke 氏は、「変動磁場型はコンパクトな上に、その HTS 磁石の性能は、Stelar 社が持つユニークな磁気共鳴ノウハウにとって、かなり魅力的なパートナーとなる。両社の技術結合により、新たな測定への可能性が開かれ、共同研究することでその可能性がさらに展開されていくのである。」と付け加えた。

この共同研究については、イタリアのトリノで最近開催された欧州分子イメージング学会(EMIM) 2013 において、イタリアとニュージーランド間の企業貿易促進に取り組むニュージーランド総領事兼貿易事務官（イタリア、ミラノ） Clare Louise Wilson 氏から発表された。Wilson 氏は、「地球の反対側にある、小規模で高い専門性を持つ 2 つの企業が、将来世界中で販売される可能性を秘めた統合的且つユニークな製品の提供に向けて共同開発に取り組むのは、とても喜ばしいことである。」と述べた。

Source: “Stelar and HTS-110 Formalize International Partnership in Magnetic Resonance Technology Development”

HTS-110 Ltd. press release (May 27, 2013)

URL:

http://www.scott.co.nz/news/pdf/2013_Stelar_and-HTS-110_collaborative_on_NMR_relaxometry_development.pdf

Contact: Stelar s.r.l.: Gianni Ferrante, CEO, ferrante@stelar.it HTS-110 Ltd : Tye Husheer, CEO, t.husheer@hts-110.com

He 不足を解消する冷凍機冷却 3T MRI を開発

MR Solutions (2013 年 6 月 20 日)

MR Solutions 社は、液体ヘリウム冷却を必要としない超電導マグネットを利用した一連の高性能 3-T MRI スキャナーを開発した。最近、極端な世界的ヘリウム供給不足のため、一部の科学者が必要不可欠な用途を除いては、ヘリウムの使用禁止を求めるほどの事態になっているが、それを見ると今回の開発成果は特に有意義なものと言える。ヘリウム冷却は、MRI、医療 MEG スキャナー、そして脳スキャン装置など、医療スキャナー分野で広範に使用されており、現況のヘリウム不足は、多くの研究プロジェクトに困難をきたしてきた。一部の医療センターでは、これまでスキャナー予約を停止しなければならなかったり、ヘリウム回収技術に多額な投資を図らねばならなかった。同社の MRI スキャナーには、新しい超電導線材とマグネットを 4 K に冷却する標準極低温冷凍機を組み込んだ画期的なマグネット設計が利用されている。

Source : “Helium shortage no longer an issue for researchers as new kind of MRI is launched”

MR Solutions press release (June, 2013)

URL: <http://www.mrsolutions.co.uk/newsandevents/>

Contact: MR Solutions Ltd, sales@mrsolutions.co.uk

Source: “MR Solutions new pre clinical MRI scanners overcome helium shortage”

Business Wire News (June 20, 2013)

URL:

<http://www.businesswire.com/news/home/20130620005969/en/Solutions-pre-clinical-MRI-scanners-overcome-helium>

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

Contact: Simon Vane Percy, simon@vanepercy.com

▶エレクトロニクス



次世代超電導回路試作用に新しい素子製造工程が可能に

HYPRES, Inc. (2013 年 7 月 5 日)

HYPRES 社は、平坦化 6 層構造のチップの新しい製造プロセスが可能になったことを発表した。これにより、超電導 IC の集積度を増加させ、ジョセフソン接合の臨界電流密度を上げることが可能となった。これらの機能は、ハイエンド・コンピューティングや高度な無線通信、または計測機器など、高性能でエネルギー効率に優れたソリューション開発に携わる顧客のプロセスを最適化するものである。同社最高技術責任者である Oleg Mukhanov 博士は、「次世代超電導回路を開発するには、既存の金属層 4 層並びに臨界電流密度を優に超える市販の製造プロセスが必要である。我々は、商用ファウンドリサービスの一環として利用できるよう、平坦化層を 6 層に作り上げ（今後、更に増やすつもりである）、臨界電流密度を様々なレベルに向上させた。今年の初めには最初の顧客への配送を済ませた。今また新たな注文処理をしているところである。」と述べた。この新たな製造プロセスには、Rapid Integrated Planarized Process for Layer Extension (RIPPLE) の暫定的特許出願に含まれる新規プロセス及び技法が多く取り込まれている。この新規製造プロセスは、徹底した評価試験を経て、現在、実際に使われる回路の生産に問題なく使用されている。2013 年初頭、スタンフォード大学が最初の法人顧客となり、この新しい製造プロセスを使用している。同社は現在、スタンフォード大学から 2 度目の注文を受け、大学の新たな設計パラメーターや固有ニーズに応じた調整を行っているところである。

Source: "HYPRES Announces Commercial Availability of New Chip Fabrication Process for Next-generation Superconducting Electronics Circuits"

HYPRES, Inc. press release (July 5, 2013)

URL:

<http://www.hypres.com/newsroom/hypres-announces-commercial-availability-of-new-chip-fabrication-process-for-next-generation-superconducting-electronics-circuits/>

Contact: General Inquiries, contacts@hypres.com, Products & Services, sales@hypres.com

▶加速器

次世代粒子加速器 International Linear Collider (ILC) の設計完成

CERN (2013 年 6 月 12 日)

CERN の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) の性能を補い、それを超える次世代粒子加速器と言われる国際リニアコライダー (ILC) の青写真が公開され、素粒子物理学プロジェクトの国際監視委員

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

会である将来加速器国際委員会 (ICFA) に提出された。その技術設計報告書には、ILC に関して、最新の先端技術を施し、最も徹底した精査設計であると記されている。ILC 物理研究責任者である山田作衛氏は、「LHC でのヒッグス粒子の発見により、ILC はさらに説得力のある計画となった。ILC は、粒子の性質を詳細に調べることができ、既に大きな成功を収めた LHC にとって偉大な相補的機器となるだろう。」と述べた。報告書のハイライトには、世界的大規模な加速器の超電導高周波をテストする試験施設が構築され、試運転が成功したこと、加速空洞の製造工程の改善に大きな進捗があったこと、そして ILC の粒子ビームを駆動するのに必要とされる 16,000 台の超電導空洞共振器を大量生産する計画があることなどが含まれている。

Source: "Next-generation particle accelerator is ready for construction – International Linear Collider publishes its Technical Design Report"

CERN press release (June 12, 2013)

URL:

<http://press.web.cern.ch/press-releases/2013/06/next-generation-particle-accelerator-ready-construction-international-linear>

Contact: press office, press.office@cern.ch

▶基礎



LAO/STO 界面で超電導と磁性が共存

SLAC National Accelerator Laboratory, Stanford University (2013 年 6 月 7 日)

SLAC と Stanford 大学の科学者たちは、Stanford シンクロトロン放射光研究所 (SSRL) で精巧に調整した X 線を使用し、二つの絶縁ペロブスカイト[ランタン酸化アルミニウム(LAO)と酸化チタンストロンチウム(STO)]が一緒に挟まれたときに生じる謎めいた磁性の発生源を特定した。この研究で得られた"ヘテロ構造"は、LAO と STO 物質が出会う界面で電気を通すことができ、ほぼ絶対零度というところまで冷却されたとき、超電導体となる。さらには、LAO と STO を不純物でドーピングしても、単独では磁性を示さないにもかかわらず、両物質が出会う接合部では磁性が見られる。研究者たちは STO 基板上に作製した極めて薄膜の LAO 層でできたヘテロ構造のサンプルを使用し、調整した X 線でその STO 中のチタンのみ、または酸素のみをそれぞれ調べた。その結果、磁性がチタン原子の基底状態に由来することを発見した。興味深いことに、この STO 中のチタンの磁気基底状態の構造は、超電導体への移行に必要な構造と同じであった。これは LAO と STO の界面が、"磁性と超電導の共存"という異例な性質を示す可能性があることを示唆している。今回研究者らは、ヘテロ構造が超電導への移行を引き起こすほどの低温で磁性チタンを調べることはできなかったものの、今回の結果は、以前 Nature Physics (2011) に掲載された超電導と磁性の両方が LAO と STO 界面で検出されたという研究結果を後押しする。同研究グループの研究結果は、Nature Materials に掲載されている。

Source: "Man-made Material Shows Surprisingly Magnetic Personality"

SLAC press release (June 7, 2013)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

URL: <http://www6.slac.stanford.edu/news/2013-06-10-oxide-interface.aspx>

Contact: only in website, <http://www6.slac.stanford.edu/about/contact-slac.aspx>



液体 CS₂ から超電導性を得る

Washington State University (2013 年 7 月 1 日)

ワシントン州立大学とワシントンカーネギー協会の研究者たちは、非金属溶剤を超電導体に変えることに成功した。同研究グループは、二硫化炭素に高圧を与え冷却すると、その分子はダイヤモンドとよく似た三次元構造になり、磁性、高エネルギー密度、そして超硬質などの特性を示す金属のような動きを始めることを発見した。通常、非金属分子は離れすぎていて電気を伝導することはない。しかし、研究者たちが二硫化炭素を 50,000 気圧まで圧縮し、その化合物を 6.5 K まで冷却すると、圧力と温度の組み合わせ効果は、二硫化炭素分子を寄せ集めただけでなく、その分子を格子状に再配列させ、そこで固有振動する分子は電子をうまく動かし、この物質を超電導体にした。今回の発見は、従来例のない材料でどのように超電導性が生じるかという知見を与えた。構成元素の原子量がより小さい原子であると、より高い周波数で振動でき、超電導体になる可能性は高くなる。このグループの研究成果は、*Proceedings of the National Academy of Sciences* に掲載されている。

Source: "WSU researchers create superconductor from solvent"

Washington State University press release (July 1, 2013)

URL: <http://news.wsu.edu/articles/36704/1/Researchers-create-superconductor-from-solvent>

Contact: Choong-Shik Yoo, csyoo@wsu.edu

▶経営・決算



中国 Sinovel 社との訴訟 その後

AMSC (2013 年 6 月 27))

AMSC 社は、Sinovel 社とその従業員 2 名が、AMSC 社の企業秘密を盗んだとして（具体的には、AMSC 社独自のソフトウェア・コードとマサチューセッツ州に設置されている Sinovel 社の 1.5-MW タービン 4 機に対するこのソフトの知的財産の使用）、米国司法省による起訴事実を踏まえ、オバマ政権と議会に、米国と中国の貿易関係を再審査するよう要求した。この起訴は、Sinovel 社製の風力タービンが、AMSC 社の盗まれた知的財産を事実含んでいるということを検証する連邦捜査局の調査に従ったものである。AMSC 社の社長兼最高経営責任者の Daniel P. McGahn 氏は、「Sinovel 社が、米国で盗んだ知的財産を中国から米国に戻って輸出しているという事実（当社のグローバル本社から 40 マイル未満の場所に輸出）は、知的財産に対する露骨な無礼さだけでなく、国際商取引法を無視していることを示す。これらの犯罪行為は、従業員とその家族はもちろん、株主に至る

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

まで、当社全体に重大な金銭的危害を及ぼしている。Sinovel 社の悪質な違法行為があつてから過去 2 年間で、世界中のスタッフ 500 人以上が職を失っている。」と述べた。2011 年 9 月、AMSC 社は、Sinovel 社に対して中国で 4 件の訴訟を提起し、中国の警察には、Sinovel 社とその一部の従業員に対する刑事訴訟を起こすよう要請したものの、まだ捜査を実施しているようには見えず、中国の民事裁判所が、この事件に関する実質的な審問を始めるに至っていない。McGahn 氏は、「グローバル経済の競争で成功を収めるため、新製品や新技術の DNA である知的財産権の執行と保護は、米国企業にとって必要不可欠なことである。中国をはじめ、他国企業が、産業スパイやサイバースパイといった行為を通じて、企業秘密をあからさまに盗むなどということは許されない話である。中国国家主席である習近平は、中国は、外国企業の正当な権利を保護すると最近述べたばかりであるが、今のところ、AMSC 社のように、企業が経験しているのは、それに反するものばかりである。法の支配に頼ることができないとなれば、中国で事業展開する米国企業にリスクを与えることになる。米国政権は、これまで当社の問題を非常によくサポートしてきてくれた。それゆえ、政権がここで議会と協力し、企業秘密の窃盗が米国の雇用と技術革新にどのような影響を及ぼしているのかを検討し、経済発展にさらなる影響を及ぼす前に問題を解決してくれることを要求する。」と付け加えた。AMSC 社は、この問題に関して、米国並びに EU 政府の様々な関係支局から支援を受けている。

Source: "China's Sinovel Indicted in the United States for Stealing AMSC Trade Secrets"

AMSC press release (June 27, 2013)

URL:

http://files.shareholder.com/downloads/AMSC/2165855216x0x673451/326a7bc2-fd1f-48b2-bd40-697bca108d65/AMSC_News_2013_6_27_Commercial.pdf

Contact: Kerry Farrell, kerry.farrell@amsc.com

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

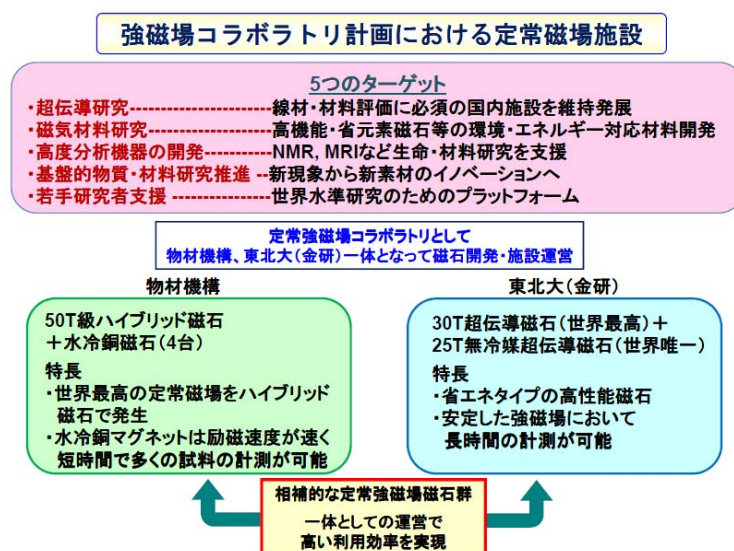
「定常強磁場施設建設設計画（低温工学・超電導学会）」報告

独立行政法人 物質・材料研究機構
超伝導線材ユニット
特命研究員 熊倉浩明

去る 5 月 13-15 日に船堀・東京で開催された低温工学・超電導学会において、わが国における次期定常強磁場施設の建設設計画について特別セッションを組んでいただき 10 件の講演を行わせていただいた。この建設設計画は、日本学術会議の大型設備整備計画に関するマスタープランに基づくものであり、本稿では、それらの講演の概要を報告させていただく。

強磁場の利用は磁性、超伝導、半導体などの物性科学や、それに基づいた材料科学はもとより、化学、生物、医学など、科学技術の広い範囲にわたっており、強磁場発生装置は科学技術を支える基盤的な装置の一つとなっている。強磁場施設の世界の状況をみると、米国の国立強磁場研究所 (NHMFL) は定常・パルス統合した国立施設であり、欧州では仏が同様の国立施設を形成し、独・蘭の強磁場施設の更新と併せて EU 全体で運用するという統合が行われた。また中国においても欧米に匹敵する規模の強磁場施設が、武漢（パルス）および合肥（定常）の 2 拠点で建設・運用されるなど、世界的に強磁場研究拠点の増強が進んでいる。

翻って日本の現状を見ると、特に定常強磁場施設においては老朽化が進み、世界水準からは大きく後れを取っている。また強磁場を発生する磁石はいずれも大型の設備であり、これらの建設・運用は個々に行うよりも、国が一体として建設・運営した方が効率的であり、強磁場のユーザにとっても利用しやすくなる。



そこで、国内において強磁場施設を有する物質・材料研究機構、東北大学金属材料研究所、東京大学物性研究所ならびに大阪大学極限量子科学研究センターの四機関は、日本学術会議の提言に基づき、また強磁場フォーラムを中心とする強磁場科学の研究者コミュニティでの議論も参考にし、オールジャパン体制で運営する「強磁場コラボラトリー」の計画を進めている。定常磁場に関

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

しては、上図に示すように物材機構において 50 T 級のハイブリッドマグネットならびに単独水冷銅マグネットを整備する。このために 24 MW の大容量電源を設置する。一方東北大では 30 T ならびに 25 T のオール超伝導マグネットを開発・設置する。これらのマグネットの内層コイルには高温酸化物コイルを採用するが、25 T 級マグネットは無冷媒マグネットとする計画である。ただし、これらの設備の開発は物材機構と東北大共同で行うこととし、また運営は一体として行うことによって効率的な運用を目指す。関係各位のご協力をお願いする次第である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

医療用加速器と超電導（その 4）

京都大学
大学院工学研究科
教授 雨宮尚之

前回は、ローレンツ力による荷電粒子の円運動、サイクロトロン、位相安定性原理（縦方向の集束）、シンクロトロンについて解説した。今回は、横方向の集束、強集束によるシンクロトロンの改良、直流磁場でシンクロトロンと同様な強集束を達成できる FFAG 加速器について紹介する。そして、最後に、サイクロトロン、シンクロトロン、FFAG 加速器の比較を表にまとめておく。

3. 円形加速器（続き）

3.6 横方向の集束 —ベータトロン振動、弱集束と強集束—

円形加速器の中には、単一ではなく多数の荷電粒子が周回しているが、これらの荷電粒子の全てが理想的な設計軌道に沿って運動しているわけではない。荷電粒子の速度ベクトルはばらつきを持っており、理想的な軌道の向きからずれた速度ベクトルを持った荷電粒子は、そのままではビームダクトにぶつかってしまう。また、最初は理想的な軌道に沿って飛び始めた荷電粒子であっても、様々な原因による磁場の誤差のために、その軌道は理想的な設計軌道からずれてくることが考えられる。このように、荷電粒子の速度ベクトルにばらつきがあり、また、磁場に誤差がある場合でも、荷電粒子を概ね設計軌道に沿わせて安定に周回させ加速するために、ビームに対して集束力（中心からずれた粒子を中心に引き戻す力）を作用させる必要がある。3.4 では縦方向の集束について説明したが、ここでは横方向の集束について説明する。

(1) ベータトロン振動

横方向の集束力が働いた状態では、荷電粒子は中心軌道の周りを微小振動しながら周回する。この振動をベータトロン振動と呼び、その波長をベータトロン波長と呼ぶ。また、軌道周長とベータトロン波長の比をチューン（ベータトロン振動数）という。

(2) 弱集束

サイクロトロンなどにおける水平面に垂直な方向の一樣な偏向磁場によっても、水平方向には弱い集束力を作用させることができる。例えば、一定磁場中のある一点において、初速度の大きさが同じで向きが水平面内でわずかに異なる二つの荷電粒子を考えると、これらの荷電粒子の描く軌道は一致しないが、共に半径が同じ円軌道となり、一周すればまた同じ点に戻ってくるはずである。すなわち、粒子に対しては水平方向の集束力が働いていることになり、水平方向のベータトロン波長は軌道周長に等しい。

しかし、一樣な偏向磁場では垂直方向の集束力を作用させられないことはローレンツ力の方向を考えれば明らかである。ローレンツ力を垂直方向に作用させるためには水平方向（径方向）の磁場が必要である。図 3-4 に示すように磁極の間隔を外側に行くにつれて大きくすると、偏向磁場の一樣性は失われるが、そのかわり径方向の磁場成分を発生できる。図の座標系で θ の正の向きの速度成分を持った正の荷電粒子が中央面（ $z = 0$ ）より上（下）に存在したとすると、 r 方向の磁場成分

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

B_r が正（負）であればローレンツ力によりこの荷電粒子の軌道は中央面に引き戻される。つまり、垂直方向の集束力を作用させることができる。しかし、このとき、偏向磁場成分が一樣でないために水平方向のベータトロン波長は周長より大きくなってしまう。一般に、水平方向、垂直方向の両方の集束力を得ようとする、水平方向、垂直方向のベータトロン波長はともに周長よりも大きくなってしまふ。ベータトロン波長が大きいとベータトロン振動の振幅も大きくなり、ビームの広がりが大きくなってしまふ。これはサイクロトロンのような弱集束加速器の欠点の一つである。

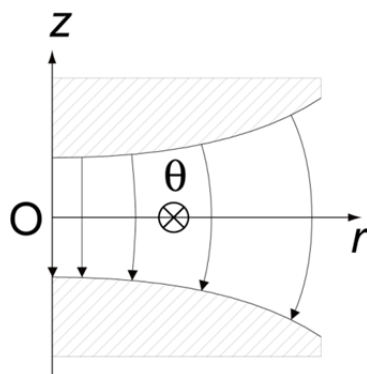


図 3-4 弱集束

(3) 強集束

図 3-5 に示すような 4 極磁場中を紙面に垂直に奥から手前に向かって正の荷電粒子が飛行しているとき、 x 軸上の正（負）の部分では x の負（正）の向きにローレンツ力が働く。すなわち、図 3-5 のような 4 極磁場により、水平方向の集束力を作用させることができる。一方、 y 軸上について同様な考察を行うことにより、この 4 極磁場は垂直方向には発散力を作用させることがわかる。つまり、光に例えれば、この 4 極磁場は水平方向には凸レンズの役割を果たし、垂直方向には凹レンズの役割を果たす。

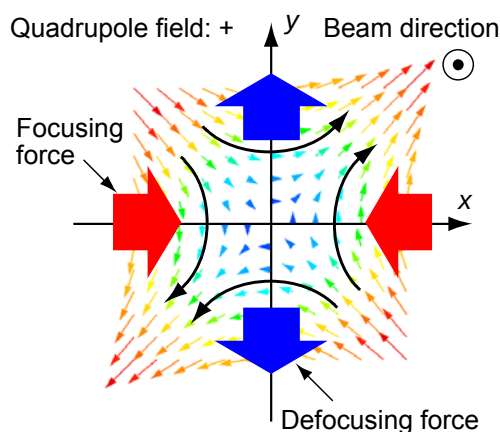


図 3-5 4 極磁場による集束

水平方向に対して集束極性を持つ 4 極磁石と、向きを 90 度ずらして垂直方向に対して集束極性を持つ 4 極磁石を並べた構造を FODO 構造という（図 3-6）。FODO 構造を上から見た様子を図 3-6 の上図に、横から見た様子を図 3-6 の下図に示してあるが、FODO 構造によって、集束、発散を繰り返させながらビームを強く集束し輸送できることがわかる。このように強い集束力、発散力を持った 4 極磁石を並べて、ビームを強く集束することを強集束という。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

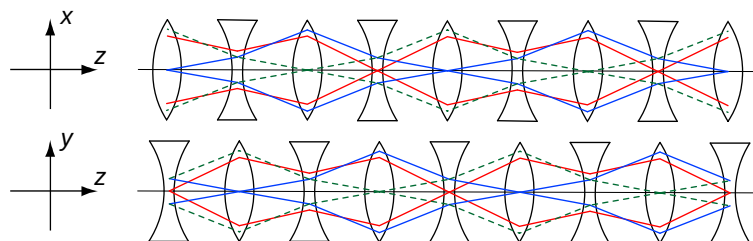


図 3-6 4 極磁石を並べた FODO 構造

3.7 強集束のシンクロトロン

図 3-7 のように 4 極磁石をシンクロトロンの軌道上に並べることにより強集束原理を適用できる。このような強集束のシンクロトロンではベータatron 波長は軌道周長とは無関係に短くできる。その結果、ベータatron 振幅も小さくでき、荷電粒子ビームの径を大幅に小さくすることが可能になった。ビーム径の低減は電磁石の磁場発生空間の低減につながり、電磁石の格段のコンパクト化を可能にした。

また、ビームの集束性がよいことは、高速の荷電粒子の衝突（ビームロス）による電磁石構成部材の放射化の抑制という点で、サイクロトロンのような弱集束加速器と比較した場合の強集束加速器の利点である。

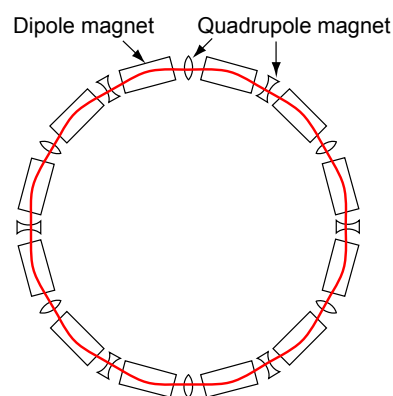


図 3-7 強集束のシンクロトロン

3.8 FFAG 加速器

FFAG (Fixed field alternating gradient : 固定磁場強集束、図 3-8) 加速器は、固定磁場、すなわち直流磁場で、強集束のシンクロトロンのような、径の小さいよく集束された粒子ビームを得ることができる加速器である。

FFAG 加速器においては、リング中心からの距離を r として r^k に比例する非線形磁場を電磁石で発生し、ビームの偏向、集束を行う。すなわち、 r^k に比例する磁場を r に関して Taylor 展開すれば 2 極成分と 4 極成分を含んだ級数に展開されるが、その 2 極成分と 4 極成分それぞれに偏向と集束（発散）の機能を担わせる。

FFAG 加速器のうちラディアルセクタ FFAG 加速器とよばれるタイプの加速器では、水平方向の集束機能／垂直方向の発散機能とリング内側への偏向機能を持った集束電磁石と、集束電磁石と磁場の向きが反対で、垂直方向の集束機能／水平方向の発散機能とリング外側への偏向機能を持った発散電磁石を周期的に並べることで強集束作用を得る。

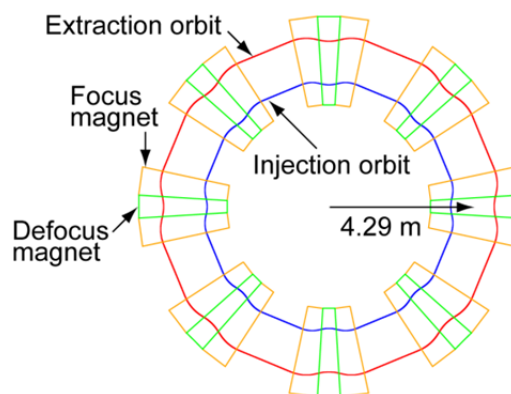


図 3-8 FFAG 加速器

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

FFAG 加速器においては、内側に入射された荷電粒子はらせん軌道を描いて周回加速されていくが、外側にいくに従い非線形に磁場が大きくなっているためにサイクロトロンに比べると軌道半径の拡大は抑えられる。

3.9 各種の円形加速器の比較

前回から今回にかけて、サイクロトロン、(強集束の) シンクロトロン、FFAG 加速器といった円形加速器の概念について説明してきた。最後に、重粒子線がん治療装置への適用という視点からのこれらの加速器の比較を表 3-1 にまとめておく。

表 3-1 各種円形加速器の比較

	サイクロトロン	シンクロトロン	FFAG加速器
出射方式	連続取り出し	遅い取り出し	速い取り出し (遅い取り出しも可)
エネルギー調整	減速板で調整	RFパターンと励磁磁場で調整	キッカー蹴り角とタイミングで調整
連続照射	連続照射可能	蓄積粒子数と照射強度で制限	繰り返しを上げれば連続照射可能
照射強度調整	イオン源へのフィードバック等	出射機器へのフィードバック等	イオン源へのフィードバック等
照射強度安定性	一定磁場のため擾乱は少ない	チューン変化に対して不安定	一定磁場のため擾乱は少ない
照射位置安定性	一定磁場のため擾乱は少ない	ヒステリシスや渦電流の影響有	エネルギーによって出射角の調整が必要
ビームロス	出射時および減速時にロス	入出射時にロス	必然的なロスポイント無し
照射スポットサイズ	減速板で広がる	ビーム工学設計で調整可能	ビーム光学設計で調整可能
高速ビーム遮断・再開	チョッパーにより制御	高速四極電磁石により制御可	キッカーにより制御可

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

読者の広場

Q&A

Q：「超電導船の記事を見ましたが、素人からみて何が良いのか、どれくらい使われそうなのか、教えてください。」

A：最近、開発が報告されている超電導船は、超電導電気推進船と呼ばれるもので、超電導材料を用いて製作した電動モータ、いわゆる超電導モータでプロペラを回転させることで推進力を得ます。超電導モータは通常の電動モータでは達成できない高効率で小型のモータが実現でき、様々な利点を得ることができます。

図 1 に超電導モータの例を示します。超電導コイル（ロータコイル）は線材を数百回も巻いてつくりますが、超電導線材が薄いテープ状であるため非常にコンパクトになります。この図の例では回転子を真空断熱容器として、その中にこのコンパクトな超電導コイルを設置し、超電導状態を保つため容器内を低温にしています。そして、超電導コイルには大電流を流せるため非常に強い磁場を発生できます。この小型で強力な磁場を用いると、例えば 1 分間に 160 回転で 3 メガワットの出力となるような低回転・高トルクなモータにおいて、従来のモータ比で約半分の大きさに小型化することができるとともに、98 % 以上の高効率が達成可能となります。

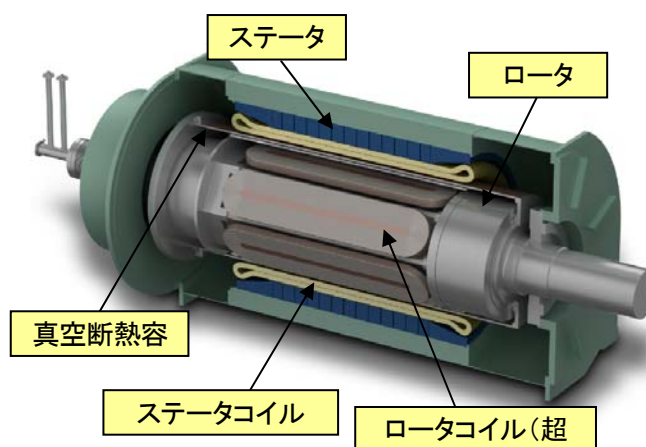


図 1 超電導モータの例

一般のディーゼル船の推進機を、超電導モータを組み込んだ推進機に置き換えた場合、モータの高効率化に伴う消費電力の低減に加え、モータの小型化により船尾を絞った低抵抗船型の採用や超電導モータ内蔵の船外推進機の小型化が可能となります。これらより推進効率を向上し、大きな燃費削減効果を得ることができます。また、モータの小型化による船内搭載機器の配置自由度の増加から、輸送貨物を増やすこともできます。

今後、超電導モータ本体だけでなく冷却系等を含めたシステム全体の信頼性の向上やコストダウンなどを速やかに実現し、上記の利点を持つ超電導電気推進船を普及していきます。

回答者：川崎重工業株式会社 技術研究所 機械システム研究部 横山 稔 様

[超電導 Web21 トップページ](#)