

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

2013 年 4 月号

2013 年 4 月 1 日発行

掲載内容 (サマリー) :

特集 : 超電導線材技術の進展

- 国内外の Y 系超電導線材の開発動向
- Bi2223 線材の開発動向
- MgB₂ 線材のプロセス技術の進展
- 世界をリードする ITER トロイダル磁場コイル用超伝導導体の調達進展

○超電導関連 2013 年 4 月-5 月の催し物案内

○新聞ヘッドライン (2/20-3/19)

○超電導速報ー世界の動き (2013 年 2 月)

○「電力分野に向けた経済性に優れる超電導導体の製造および関連超電導機器の米国における現在の活動」報告

○「超電導技術の高効率鉄道システムへの適用可能性」報告

○「産総研の超電導クリーンルーム CRAVITY 公開記念シンポジウム」報告

○隔月連載記事ー医療用加速器と超電導 (その 2)

○読者の広場(Q&A)ー「最近の電気学会誌に磁気と医療の特集がありましたが、超電導は応用できないのでしょうか？」

[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

〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13

Tel (03) 3536-7283 Fax(03) 3536-5717

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 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

特集：超電導線材技術の進展

「国内外の Y 系超電導線材の開発動向」

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 線材開発研究部

部長 和泉輝郎

RE 系超電導線材の開発として長年指標として用いられていた $I_c \times L$ 積に関しては、2011 年 1 月にフジクラから報告された成果 ($467 \text{ kAm} = 572 \text{ A} \cdot 816 \text{ m}$) を最高値として、その後は更新はない。トピックスとしては、韓国の SuNAM 社の著しい進展である。2010 年から約 2 年の間に $I_c \times L$ 積で約 7 倍の進展がみられ、現在では世界第 2 位の値 ($422 \text{ kAm} = 422 \text{ A} \cdot 1000 \text{ m}$) を有している。

一方で、開発のターゲットは数年前から機器を意識した付加価値である特殊仕様実現の研究開発にシフトしている。具体的な仕様としては、SMES や回転機等に求められる磁場中での I_c 特性向上技術開発や交流応用で求められる低交流損失線材開発、また剥離や引張りなどの機械強度の高い線材の開発などの項目である。

磁場中 I_c 特性向上に関しては、人工ピン止め点の制御技術を中心に開発が行われている。SuperPower 社では、MOCVD 線材に関して 15 %以上の高い Zr ドープ濃度に対するプロセス適正化を行い、Modified Process なる方法で特性向上を実現し、代表値として $1353 \text{ A/cm 幅@50 K, 3 T}$ という非常に高い成果を得ている。一方、ISTEC においても PLD 法において厚膜に有効なピン材料として BaHfO_3 を見出し、評価条件が異なり比較は難しいものの SuperPower 社と同等のレベルである $107 \text{ A/cm 幅@77 K, 3 T}$ の線材を実現している。また、この材料においては長尺線材作製にも取り組んでおり、200 m 長で $54 \text{ A/cm 幅@77 K, 3 T}$ を確認し、液体窒素温度での磁場応用への可能性を広げる成果となっている。MOD 法による線材に関してはスペインのバルセロナのグループ (IMSB) が BaZrO_3 ドープ膜に関して基礎的な検討を行い、高いピン力の報告と行っているとともに MOD 膜におけるピン力の起源に関して BZO 粒周囲の歪の影響との提案をしている。長尺線材に関しては ISTEC と昭和電線のグループが、最近 80 m 長線材において $50 \text{ A/cm 幅@77 K, 3 T}$ の成果を実現しており同種の線材では初めての長尺で人工ピン線材の作製ということになる。

交流損失低減に対しては、線材における超電導層を細く加工するスクライビング技術が有効であることが分かっている。これに対し、SuperPower 社で複数の加工技術の検討を行っており、その中で、機械的にスクライブ加工したのちに選択的に Cu 電気めっきすることでフィラメント上だけに安定化 Cu を配した構造を実現し、短尺ではあるものの 12 mm 幅線材を 12 分割し、損失低減を確認している。但し、残念ながら長尺の報告はなされていない。これに対し、ISTEC では、5 mm 幅線材の 10 分割加工を 100 m 線材に施し、交流損失を 1/10 に低減することに成功している。

加えて、最近のトピックスとして、剥離に関する材料学的な進展が見られた。これまで、樹脂含浸時などに問題になっていたこの現象は、その原因を含め本質的な解明がなされないままであった。ISTEC のグループは、様々なプロセス及び作製条件で成膜した線材に関して、剥離強度の評価と共に破面観察などの解析を行い、剥離の原因の分類を行い、対策を施す事に成功した。例えば、10～40 MPa の剥離強度の起点が金属基板とベッド層との界面にあることを見出し、この頻度が関係して超電導層成膜時間を短くすることで解決することを明らかにした。この結果、剥離強度は劇的に改善し、線材全体に亘って 60 MPa 以上の強い剥離強度を有した線材を実現している。

今後は、高温超電導線材機器の絶対的優位性実現のために更なる高性能化、低コスト化の開発が進められていくものと考えられる。

[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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

特集：超電導線材技術の進展

「Bi2223 線材の開発動向」

住友電気工業株式会社

超電導製品開発部長

林 和彦

Bi2223 線材は、量産技術の開発、低コスト化が進み、実用規模の各種実証プロジェクト用に適用されるケースが増えてきた。

国内の送配電ケーブルプロジェクトでは本誌にも掲載された NEDO 委託の高温超電導ケーブル実証プロジェクトと住友電工大阪製作所内の超電導線製造工場の配電系統へ接続した高温超電導ケーブルの 2 つのプロジェクトの実証試験が進められている。

国外では、ドイツの交流超電導ケーブル実証プロジェクトである「AmpaCity」プロジェクトに約 80 km の線材と、ロシアの直流超電導ケーブルプロジェクトに約 100 km の線材の供給が始まっている。ドイツの電力会社である RWE Deutschland と欧州のケーブル製造会社である Nexans 社、及び Karlsruhe Institute of Technology が、ドイツの連邦経済技術省から一部の資金を受けて実施する「AmpaCity」プロジェクトでは、ドイツ・エッセン市の中心部において、2 つの変電所間を長さ 1 km の交流超電導ケーブル（電圧：10 kV、ケーブル容量：40 MVA）で結ぶ計画となっており、2013 年には、超電導ケーブルの布設、受け入れ試験が行われ、その後少なくとも 2 年間、電力網の一部として実証運転される予定である。ロシアの電力会社である FGC UES (Federal Grid Company of Unified Energy System) と、その研究開発部隊である R&D Center @ FGC UES が実施する直流超電導ケーブルプロジェクトは、ロシア・サンクトペテルブルグ市において、2 つの変電所間を長さ 2.5 km の直流超電導ケーブル（電圧：20 kV、ケーブル容量：50 MVA）で結ぶ世界初の試みとなっており、2015 年に超電導ケーブルが布設され、その後、電力網の一部として実証運転される予定である。

一方、超電導磁石やモータ開発にも線材を供給しており、例えば JST プロジェクトで京都大学が中心となって開発を進めたコンパクト 3T-MRI 装置の開発（室温ボア径 514 mm）では、1.5 T にて磁場均一度 5 ppm を達成し、既存製品と同等の MR 画像を取得できている。また、川崎重工業で開発が進められている NEDO 省エネ革新 PJ で実施中の 3 MW 船舶用モータや、日本電磁測器の B-H カーブトレサーなどの実用機器への納入も始まっている。

今後高磁場マグネットや大口径ボアを要するマグネット機器へ対応するには、線材の機械強度の改善が重要になってくる。Bi2223 線の場合、用途に応じて、ステンレステープや銅合金などの補強材を線材の両サイドに半田付けする手法により強度を増す方法を取ってきたが、77 K 引張強度は 270 MPa であり、強度アップが課題であった。昨年の特集においては、ステンレステープの厚みを通常の 20 μm から最大 100 μm に増すことで、77 K での引張強度を 270 MPa から 500 MPa まで向上できる開発結果を紹介したが、補強材が厚すぎ、Je が大きく低下する欠点があった。現在、補強材の材質と貼り付けの際の張力（Pre-tension）を見直すことで、補強材厚みが約 30 μm でも 77 K の引張強度を 500 MPa に向上できる技術に目処が立ちつつあり、近く商品化を計画している。

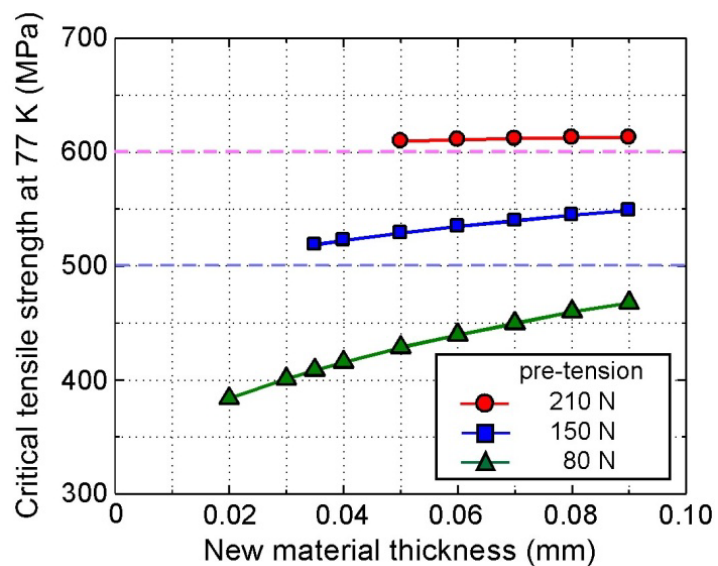


図 1. 新たな補強材接合時の張力条件と引張強度の関係（計算値）

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導線材技術の進展

「MgB₂ 線材のプロセス技術の進展」

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

二硼（ほう）化マグネシウム（MgB₂）は、高温酸化物超電導体に比べて T_c はかなり低い、1) 結晶粒の向きを揃えること（配向化）が不必要と考えられること、2) 資源的にも豊富で原料が比較的安価であること、3) 機械的にタフであること、4) 軽量であること。などの利点があるため、線材化の研究が世界的に活発に行われており、またMRIなどの超伝導機器の開発も進められている。

MgB₂線材の作製法としては、原料粉末を金属管に詰め込んで線材に加工後、熱処理をする、いわゆるパウダー・イン・チューブ（PIT）法が最も一般的である。特に、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を生成するin situ PIT法が一般的である。ただし、in situ PIT法で作製した線材では、MgB₂コアの充填密度があまり高くないためにMgB₂結晶粒のつながり（電流を流すための有効断面積、connectivity）が十分ではなく、実用レベルの J_c 値はまだ得られていないのが現状である。実際、in situ PIT法線材におけるMgB₂コアの充填率は50 %前後と言われている¹⁾。ConnectivityはMgB₂の充填率に大きく依存し、MgB₂の充填率の向上が重要な課題となっており、メカニカルアロイング²⁾、冷間プレス加工³⁾、ホットプレス加工⁴⁾など、PIT法の改良が試みられており、 J_c の改善が得られつつある。

PIT法がMg+Bの混合粉末を用いるのに対して、拡散法はB粉末層に外部からMgを拡散反応させることで高いMgB₂の充填率を得ようとするものである⁵⁾。このMg拡散法による線材作製法を図1に示す。金属管の中心に純Mg棒を配置し、Mg棒と金属管との隙間にアモルファスボロン粉末を、なるべく密になるように充填する。これを溝ロールやダイス線引きでワイヤー加工し、最後に熱処理をする。Mgは六方晶の結晶構造を有し加工性が悪いことで知られているが、このような状況では焼鈍等が必要とせずに断線なく加工できる。最後に熱処理をするとMgがボロン層に拡散して行き、MgB₂が形成される。また、加工した素線材を複数本束ねてさらに金属管に挿入し、加工と熱処理をすることで複数の超伝導コアを有する多芯線材を作製することもできる。図2に拡散法により作製した19芯のMgB₂線材の断面を示した。この拡散法ではMg原子のB層における拡散距離が必ずしも長くはないので未反応のBが残留したり、Bリッチ化合物（MgB₄）ができやすいが、多芯線材にしてフィラメントのサイズを小さくしたり、B層にMg粉末を分散させ

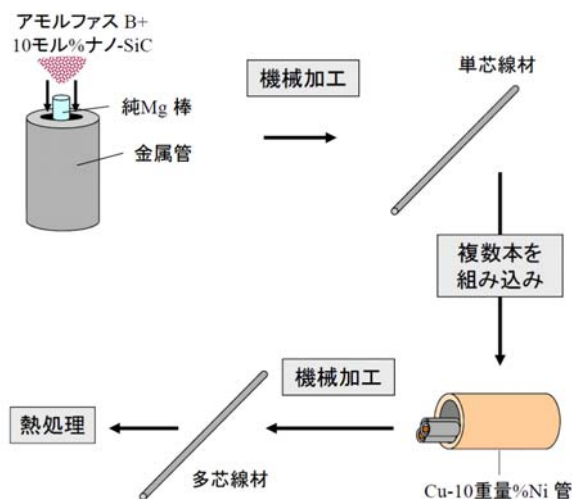
図1 Mg 拡散法による MgB₂ 多芯線材の作製法。

図2に拡散法により作製した19芯のMgB₂線材の断面を示した。この拡散法ではMg原子のB層における拡散距離が必ずしも長くはないので未反応のBが残留したり、Bリッチ化合物（MgB₄）ができやすいが、多芯線材にしてフィラメントのサイズを小さくしたり、B層にMg粉末を分散させ

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

たりすることでこれらの不純物の量を大幅に減らすことができる。このようにして得られた反応層における MgB_2 充填率は、PIT 法で得られる MgB_2 の充填率よりもはるかに高く、4.2 K の温度 10 T の磁界において 10 万 A/cm^2 のレベル、20 K、5 T では 5 万 A/cm^2 のレベルと、PIT 法線材よりもはるかに高い J_c 値が得られている。

ただし、この拡散法では、図 2 に示すように熱処理後に Mg コアに大きなボイドが形成されることもあり、 J_c は高いが、線材全断面積あたりの $J_c(J_e)$ は PIT 法線材に比べて必ずしも高くはなかった。最近、オハイオ州立大と Hyper Tech Research Inc. のグループは、金属シースの厚みを減少させた 0.6 mm 径の単芯ワイヤーで 1.7 万 A/cm^2 の J_e (4.2 K, 10 T) という、PIT 法線材の J_e をはるかに上回る値を発表している⁶⁾。

MgB_2 線材開発の進展により、最近では PIT 法によって 1 km をはるかに越える長尺線材も作製されるようになってきている。 MgB_2 線材の応用としては種々の超電導機器が提案されているが、最も有望視されているのが冷凍機冷却による MRI 用マグネットである。これには MgB_2 コイルでは高温酸化物超電導コイルと異なり永久電流モードの運転が可能と考えられることが大きく働いている。今後の更なる線材の特性向上と機器応用の進展に期待がもたれる。

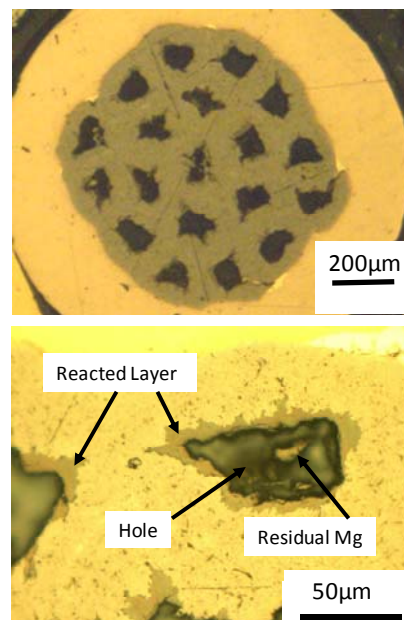


図 2 Mg 拡散法により作製した 19 芯 MgB_2 線材の断面写真。

参考文献：

1. R. Flukiger, *et al.*, Physica C 385(2003)286.
2. W. Häßler, *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 21(2008) 062001.
3. M.S.A. Hossain, *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 075013.
4. H. Yamada, *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 23 (2010) 045030.
5. H. Kumakura, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 21(2011)2643.
6. G.Z. Li, *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 25(2012)115023.

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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

特集：超電導線材技術の進展

「世界をリードする ITER トロイダル磁場コイル用超伝導導体の調達進展」

独立行政法人 日本原子力研究開発機構
超伝導導体開発グループ

高橋良和

日本、欧州、米国、ロシア、韓国、中国、インドが協力して開発を進めている国際熱核融合実験炉 ITER では、高温のプラズマを閉じ込め、制御するために 10 T 以上の高い磁場が必要となります。これには巨大な超伝導コイルを使用します(図 1)。プラズマ閉じ込めの磁場を発生させるトロイダル磁場 (TF) コイルは、重さ約 300 トンの世界最大の超伝導コイルです(図 2)。日本は TF コイル 9 個、全体の 1/4 の TF 導体 (Nb_3Sn 導体) 33 本の調達及び全ての CS コイル用導体を担当しています。また、TF 導体はインド以外の 6 極で製作を分担しています。日本は 2009 年 3 月から世界に先駆けて、TF 導体の製造を始めました。

TF 導体は、図 2 のように、直径 0.82 mm のクロムメッキ付き超伝導 Nb_3Sn 素線 900 本と銅素線 522 本を撚り合わせた超伝導撚線を、突合せ溶接により 760 m の長さに長尺化された円形ステンレス 316LN 製ジャケットの中に、引き込みます。その後、圧縮成型装置の 4 個のローラにより、所定の外径 (43.7 mm) に、1 回で圧縮成型を行います。 Nb_3Sn 素線はこれまでにない大量の約 110 トンを製作する予定ですが、その内の約 90 %が完成しました。導体は高い品質を保つため、ISO 規格に適合した品質保証計画の下で製作しています。素線は超伝導特性にばらつきが生じることが予想されたことから、統計的プロセス管理 (Statistical Process Control: SPC) を行いながら、製作しています。SPC は、製作した素線のキーとなる管理項目 (臨界電流値(I_c)、ヒステリシス損失、残留抵抗比、銅比、素線外径など) を統計的に管理し、性能や製作プロセスの異常を早期に発見することや、仕様値に対する逸脱の可能性を評価することにより、性能のバラツキを低減する管理方

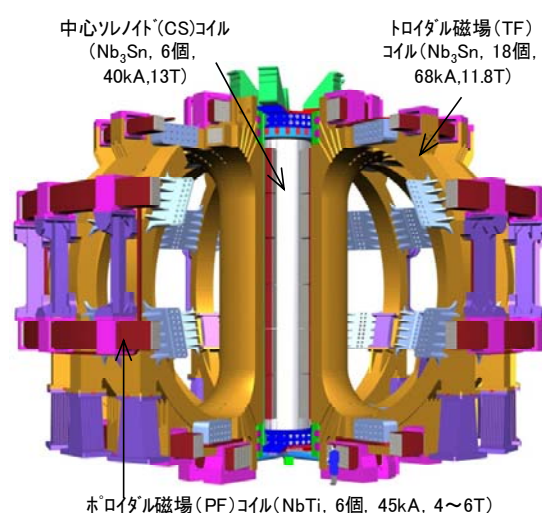


図 1 ITER 超伝導コイル・システム
18 個の TF コイル、6 個の CS コイル及び 6 個の PF コイルから構成されています。

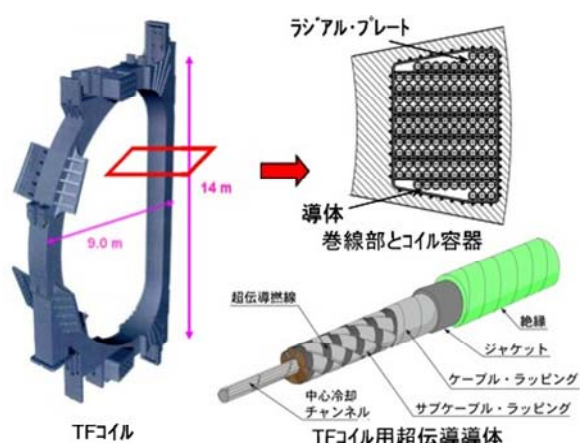


図 2 TF コイルの構造と超伝導導体

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

法です。これまでに完成した素線の I_c 値の分布はガウス分布に近くなり、その数量のヒストグラムを図 3 に示します。また、標準偏差は平均値 233 A に対して、約 3 % の 6.7 A であり、SPC を含めた品質保証計画が効を奏したと言えます。図 4 は完成した実機用超伝導導体の写真で、毎月 1 本のペースで製造を行い、これまでに完成した超伝導導体は、日本分担分の約 85 % に相当する 28 本となりました。韓国と欧州は相当の数の導体を完成させています。その他の極はある程度の量の超伝導素線を製作していますが、導体製作をやっと開始した状況です。日本は、TF 導体製作において、世界をリードしていると言えます。

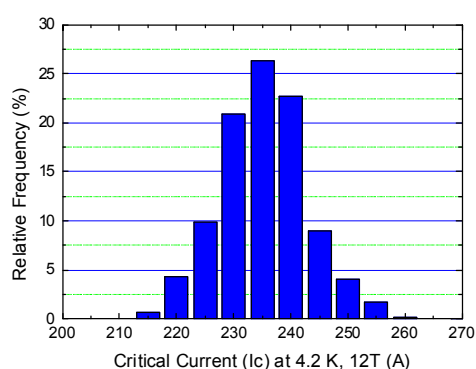


図 3 量産された超伝導素線の臨界電流値 (I_c) のヒストグラム
磁場 12 T、温度 4.2 K における I_c

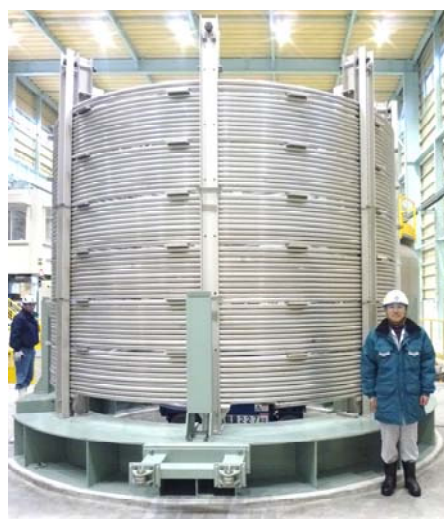


図 4 完成した長さ 760 m の超伝導導体
直径 4 m に巻かれています。

[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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

超電導関連 ‘13/4 月-5 月の催し物案内

4/1-5

2013 MRS Spring Meeting & Exhibit

場所：San Francisco, California

問い合わせ：<http://www.mrs.org/spring2013/>

4/6-9

5th International Conference on Cryogenics and Refrigeration

場所：Hangzhou, China

問い合わせ：<http://www.doe.zju.edu.cn/ICCR2013/>

4/16

第 39 回シンポジウム/第 17 回超伝導科学技術賞授賞式

場所：タワーホール船堀 小ホール

問い合わせ：<http://www.sntt.or.jp/~fsst/20130416.html>

4/16-18

第 47 回空気調和・冷凍連合講演会

場所：東京海洋大学 海洋工学部 85 周年記念会館

問い合わせ：<http://www.jsme.or.jp/event/detail.php?id=2026>

4/19

電子情報通信学会 研究会発表会 マイクロ波超伝導，マイクロ波一般

場所：機械振興会館

問い合わせ：<http://www.ieice.org/es/sce/jpn/>

5/13-15

第 87 回 低温工学・超電導学会

場所：タワーホール船橋

問い合わせ：<http://www.csj.or.jp/conference/2013s/index.html>

5/20

超電導動向報告会 2013

場所：タワーホール船橋

問い合わせ：<http://www.istec.or.jp/conference/gijyustudoukou.html>

5/20-23

MAMA-Trend

場所：Sorrento Italy

問い合わせ：<http://mama-trend.spin.cnr.it/>

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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

新聞ヘッドライン (2/21-3/19)

- 米の高速鉄道整備 JR 東海 受注に追い風 日米首脳会談で提起「大きな前進」 日本経済新聞 朝刊 2/24
- 鉄道事業者 海外を本格開拓 東京メトロ ベトナムで運行支援発表 日本経済新聞 朝刊 2/26
- リニア中央新幹線:中間駅誘致 知事、相原高の移転先明示 職能開発大学校跡地へ 神奈川 毎日新聞 3/01
- ITER 超電導導体の性能改善 コイル設計に新手法/ITER 機構と日米機関 電気新聞 3/04
- リニア中央新幹線:開通を見越し用地を取得へ 喬木村が 3000 万円予算案 誘客施設建設、宅地造成へ 長野 毎日新聞 3/05
- リニア「ワシントン—NY」想定 JR 東海会長 東京読売新聞 3/06
- 総務省、13 日に次世代電力網シンポジウム 日刊工業新聞 3/11
- リニア大阪同時開業 官房長官に知事要望 大阪読売新聞 3/13
- 日本、リニア技術売り込み攻勢 米の高速鉄道整備計画 Fuji Sankei Business i 3/15
- 電車送電超電導で、鉄道総研が来月実験、電力消費 5%減見込む 日本経済新聞夕刊 3/18 (編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き (2013 年 2 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

▶電力応用



インド風力 Inox Wind 社から 3,000 万ドルの受注

AMSC (2013 年 2 月 11 日)

AMSC 社は、Inox Wind 社 (インド) から 3,000 万ドル以上の風力タービン用電気制御システム (ECS) の製造を受注した。AMSC 社は、今四半期中に出荷を開始し、2014 年には全て完了する予定である。今回の受注については、2009 年 5 月に AMSC 社からライセンス供与を受け、Inox 社が 2 MW 型風力タービンの量産を始めて以降、AMSC 社にとっては 5 度目の受注となり、過去最大の規模となる。ECS は、統合的に高性能を発揮する一連のパワーエレクトロニクスシステムで構成されており、風力タービン用の電力変換装置キャビネット、内部電源、および各種の制御装置が含まれている。電流並びに電圧を制御しながら安定させ、システム性能を監視し、風力タービンの回転翼のかた揺れ (ヨーイング)、さらにはピッチ角も制御することで効率向上が図られ、信頼性の高い高性能操作を追求したシステム構築が可能となる。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

(出典)

Source: "AMSC Receives \$30 Million Follow-On Order From Inox Wind"

AMSC press release (February 11, 2013)

URL:

http://files.shareholder.com/downloads/AMSC/2362775124x0x634754/e7d6063e-46e5-43e9-a7cc-22318be33dd2/AMSC_News_2013_2_11_Commercial.pdf

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

▶ 線材 ▶ 基礎



2G 線材用 IBAD, SDP, RCE-CDR 装置、稼働始まる Superconductor Technologies Inc. (2013 年 2 月 21 日)

Superconductor Technologies 社(STI) は、テキサス州オースティン市にある施設 Advanced Manufacturing Center of Excellence で生産される Conductus®2G HTS 線材に必要な生産機材一式のインストールを完了した。現在、2G HTS 線材のパイロット生産設備は全て作動可能であり、様々なプロセスを実施する段階に入っている。HTS 線材を製造するのに必要なシステム 3 体は計画通りに機能的な要求仕様を満たしている。現在、IBAD システムは、フル生産で稼働しており、2013 年 1 月時点で記録的な結果を達成している。SDP システムは、長さ 50 メートル、幅 10 センチの線材のパイロット生産の初期運行を遂行させるために使用されており、RCE-CDR のシステムは既にインストールされ、最初のプロセス運行を 2013 年 2 月に終了している。オースティン市の施設で製造された最初の Conductus 線材は最近出荷され、超電導モーターのアプリケーションに使用され、現在、実証試験が行われている。1 月には、低温かつ高磁場超電導マグネットの性能について、4 K で幅 1 センチ当たり 2500 A 以上に到達させることに成功し、マグネットの要求仕様を満たすことができた。さらに、強度 14 T を越える磁場中テストにおいても成功を収めている。

(出典)

Source: "STI Conductus 2G HTS Wire Pilot Production Equipment Now Operational"

Superconductor Technologies Inc. press release (February 21, 2013)

URL:

<http://phx.corporate-ir.net/staging/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1787327&highlight>

Contact: Investor Relations, Cathy Mattison or Becky Herrick of LHA for Superconductor Technologies Inc., invest@suptech.com,

HTS Wire, Mike Beaumont of STI, mbeaumont@suptech.com



人工多層膜、臨界電流を向上

University of Wisconsin-Madison (2013 年 3 月 3 日)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

Wisconsin 大学 Madison 校、Florida 州立大学、そして Michigan 大学の研究者は、超電導研究と現実の応用に役立ち、飛躍的發展につながる可能性を秘めるユニークな多層膜構造の物質を人工的に設計した。研究者は、驚異的な超電導特性を得るため金属酸化物層間を途切れることなく行き交う物質を生成することに成功した。これにより、従来物質よりもはるかに多くの電流を流すことができる。具体的には、同研究チームはニクタイト超電導体の超格子特性に関して、設計及び測定を行った。超格子とは、2 つ以上の物質の層に存在する原子が、複雑かつ規則的に反復する幾何学的配列のことである。彼らが作った新しい物質は、ニクタイト超電導体と酸化物チタン酸ストロンチウム層の間を行き交う 24 層で構成されている。同研究チームは、それぞれの層に存在する原子を正確な間隔を取って位置づけし、規則的に反復する結晶構造に配列しながら、2 つの物質が会うそれぞれの領域で、シャープな原子的構造を持つ界面を設計することに成功したのである。結果として得られた物質には、通電能力の改善が示された。超格子の成長に合わせて、意図的に少量の酸素を加え、数ナノメートルごとに垂直と平面に結晶欠陥を作った。磁場で生成された量子化磁束は、さまざまな方向に発生する可能性があるため、これらの欠陥は、垂直及び平面方向でピンニングセンターとして働くのである。Wisconsin 大学 Madison 校の Chang-Beom Eom 教授は、これまでに達成された成功をさらに広げ、「将来、高磁場や電子機器への潜在的アプリケーションへ発展させるため、そしてシステム内の並外れた特性を実現させるため、また、超電導を根本的に理解する上で超格子性物質の設計が必要である。この物質は、こうした可能性を提供してくれる。」と述べた。この研究チームの研究結果は、Nature Materials のオンライン版に掲載されている。

(出典)

Source: "Man-made material pushes the bounds of superconductivity"

University of Wisconsin-Madison press release (March 3, 2013)

URL: <http://www.news.wisc.edu/21555>

Contact: Renee Meiller, meiller@engr.wisc.edu



ブレイクスルーをもたらすピンニング

Argonne National Laboratory (2013 年 2 月 12 日)

Argonne 国立研究所をはじめ、ロシア、スペイン、ベルギー、英国の研究機関からなる国際研究チームは、超電導のアプリケーションにおいてブレイクスルーとなりうる研究結果をこの度発表した。同研究チームは、超電導の妨げとなる小さな量子化磁束 (vortex) を効率的に安定化する方法を発見した。この発見により超電導技術の進捗上の大きな障害が取り除かれる可能性がある。彼らは、量子化磁束が 1 列しか収容できない非常に細い低温超電導線材 (50 nm) に高磁場を印加し、長いクラスター状に量子化磁束を凝集させ、その動きを止めた。磁場をさらに上げても、超電導性が破壊されることはなく、むしろ超電導性は保持された。彼らはまた、超電導膜に穴をあけ、わずかな量子化磁束が穴部間に存在できるだけにした。そのため、量子化磁束はこの加工された配列内に留まり、電流の妨げにならない。この結果、これまで量子化磁束を固定させることができなかった温度と磁場で、超電導体の抵抗率を劇的に減少させることができたのである。この結果は、"実に驚くべき"と評価され、同研究チームは現在、他のタイプの超電導体にもこの方法が適用されるかを検討している。この研究結果は、Nature Communications に掲載されている。

(出典)

Source: "Vortex pinning could lead to superconducting breakthroughs"

Argonne National Laboratory press release (February 12, 2013)

URL: <http://www.anl.gov/articles/vortex-pinning-could-lead-superconducting-breakthroughs>

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

Contact: Louise Lerner, media@anl.gov

▶ 基礎

LHC、この 3 年の成果

CERN (2013 年 2 月 14 日)

大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) は、最初の 3 年連続稼働期間を無事終了させ、念願のヒッグスボゾンであると考えられる新しい粒子の発見 (2012 年 7 月公表済み) をはじめ、物理学に多大な進捗をもたらした。稼働中の最後の数週間時点で、100 ペタバイト以上のデータ (フル HD 画質の映画約 700 年分に相当するデータ量) が、CERN の大容量記憶システムに保存されていた。今後、LHC は LS1 として知られる最初の長期停止期間を設け、その間、主要な補強並びにメンテナンス作業が行われる予定である。LHC はまた、一層の高エネルギー稼働に向けて準備を進め、さまざまな実験に不可欠なメンテナンスが行われた後、2015 年に再稼働する予定である。CERN 加速器担当理事 Steve Myers 氏は、「CERN の加速器複合体の補強作業は、LHC 本体に匹敵するほどの重要な作業である。LHC にあるマグネット間の相互接続が原則的に再構築されるため、2015 年の再稼働時には、1 ビーム当たり 7 TeV のエネルギーレベルまで増加して装置を運転できるようになる。」と述べた。3 年間に亘る初期稼働期間中、LHC は、当初予想よりもはるかに多くのデータを生成し、期待を超える成果を収めた。2012 年 12 月に行われた最後の高エネルギー陽子データ記録のうち、ATLAS と CMS 実験はそれぞれ、約 30fb^{-1} (インバースフェムトバーン) というデータを記録していた。このデータの多くは、LS1 期間中に分析される。

2013 年の最初の数週間は、ビッグバン直後に存在したと思われるような問題を解明するプログラムの一環として、LHC では鉛イオンと陽子を衝突させる実験が行われた。

(出典)

Source: "First three-year LHC running period reaches a conclusion"

CERN press release (February 14, 2013)

URL:

<http://press.web.cern.ch/press-releases/2013/02/first-three-year-lhc-running-period-reaches-conclusion>

Contact: press.office@cern.ch

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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

A.M. Wolsky, Ph.D 著

「電力分野に向けた経済性に優れる超電導導体の製造および関連超電導機器の米国における現在の活動」

**「TODAY'S ACTIVITY, IN THE U.S., TO MAKE ECONOMICAL
SUPERCONDUCTOR,
AND EQUIPMENT INCORPORATING IT, FOR THE POWER SECTOR」**

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 企画部
部長代理 定方伸行

IEA Implementing Agreement for a Cooperative Programme for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector より題記の報告書が 2012 年 11 月に発刊 (2012 年 1 月改訂) された。この報告書は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構が担当している超電導に関する IEA 活動の一環として作成した、米国における最新の動向等の最新情報を 159 ページまとめたものである。このたび、ISTEC が組合員として参画している産業用超電導線材・機器技術研究組合 (iSTERA) が原文を入手し、平成 24 年度調査活動の一環として日本語版を作成したので、その概要をここに紹介する。

米国の電力分野に関連する超電導の公的プロジェクトは、その商業的普及を促進するための民間企業を主体とする枠組みに移行しつつある。この報告書は、米国の主要企業の研究開発実証の動向、およびプロジェクト等について最新動向をまとめたものである。超電導の商業的普及を促進するため、この2年間、米国の公的資金は国立研究所から民間企業に移行し、幾つかの米国企業が超電導導体や超電導関連機器の開発と実証に取り組んでいる。DOE資金の大部分は、再生可能エネルギー分野である風力発電、風力タービン発電機用導体開発、および風力タービンの最適設計と実証に向けられている。また、超電導ベアリングを持つフライホイールやY系超電導導体SMESマグネットの電力貯蔵、ならびに限流機能付き実用規模変圧器にも資金が費やされている。導体製造メーカーを目指す企業は、低コスト化と異方性の低減という課題について、研究機関と共同で取り組むとともに、より実用的な導体開発と関連機器開発を進めている。またこれらと並行して低温容器や冷却に関わるコスト低減と信頼性確保にも取り組んでいる。

企業に関しては、超電導線材 (導体) および超電導電力機器の研究、開発、実証を進めている 8 社について、それぞれ、(1) 連絡先、出資元、資金額とスケジュール、(2) 企業情報、(3) 情報源および追加情報入手先、が記述されている。調査対象は以下の企業である。

1. ADVANCED MAGNET LAB (AML)
2. AMERICAN SUPERCONDUCTOR, INC. (dba AMSC)
3. GRID LOGIC, INC.
4. HYPER TECH RESEARCH, INC.
5. METAL OXIDE TECHNOLOGIES, INC. (METOX)
6. SOUTHWIRE COMPANY (a partner in Ultera, a joint venture with NKT)
7. SUPERCONDUCTOR TECHNOLOGIES, INC. (STI)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

8. SUPERPOWER INC.

また、プロジェクトに関しては、それぞれ、(1) 参加機関、連絡先、出資元、資金額およびスケジュール、(2) プロジェクト概要、(3) 情報源および追加情報が記述されている。調査対象は以下のプロジェクトである。

CONDUCTOR DEVELOPMENT AND MANUFACTURING

1. Center for Emergent Superconductivity: An Energy Frontier Research Center.
2. Improved Superconducting Wire for Wind Generators
3. High-Performance, Low-Cost Superconducting Wires and Coils for High-Power Wind Generators

CABLE

1. Long Island Power Authority HTS Cable: LIPA I and II
2. Tres Amigas Power Transfer Facility
3. Resilient Electrical Grids (also known as Project Hydra)
4. Superconducting DC Cable

FAULT-CURRENT LIMITER

1. Resilient Electrical Grids (also known as Project Hydra)
2. Superconducting Fault-Current-Limiting Transformer

TRANSFORMER

1. Superconducting Fault-Current-Limiting Transformer

ROTATING MACHINES

1. High-Fidelity Sizing Model for Superconducting Rotating Machines for Turbo-Electric Propulsion Design
2. NAVSEA Motor Study
3. Fully Superconducting Direct-Drive Generator for Large Wind Turbines, Phase I
4. Generator for Wind Turbine, Incorporating LTS

STORAGE

1. Superconducting Magnetic Energy Storage System with Direct Power Electronics Interface
2. Low-Cost, High-Energy-Density Flywheel Storage Grid Demonstration

詳細はISTECホームページ <http://www.istec.or.jp/> の会員様専用ページ"に掲載されている。

[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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

「超電導技術の高効率鉄道システムへの適用可能性」報告

鉄道総合技術研究所

研究開発推進室 担当部長 兼 材料技術研究部 超電導応用研究室長

富田 優

2013 年 3 月 8 日、(公財) 鉄道総合技術研究所において「超電導技術の高効率鉄道システムへの適用可能性」をテーマに第 4 回超電導応用研究会シンポジウムが行われた。本シンポジウムでは、超電導技術適用の観点から電気鉄道システムの更なる高効率化の可能性について講演が行われた。具体的には、電気二重層キャパシタや超電導モータを利用した電力システムの高効率化、超電導ケーブルの開発、エネルギー貯蔵システムの開発について紹介があり、鉄道システムの超電導技術導入への期待について講演があった。

鉄道総研の小西から「電気二重層キャパシタと超電導モータを適用した省エネ形直流電システムに関する検討」と題して紹介があった。サイクル寿命が長い、環境に優しい、急速充放電が可能といった特徴を有する電気二重層キャパシタ (EDLC) を用いた電力貯蔵装置の回路構成、制御系、効果について説明があり、400 V 系ミニモデルの試験より、回生効率の上昇、変電所電流のピークカット、電圧補償の効果が得られていた。また、京都大学が中心に開発をしている、高温超電導誘導/同期電動機 (HTS-ISM) と常伝導かご形誘導機 (N-IM) とのトルク特性、電力特性の比較があり、N-IM から HTS-ISM への置換により、電車に供給する力行電力が抑制され、回生電力が大きくなることが示された。

鉄道総研の富田からは、「鉄道用直流超電導ケーブルの開発」と題して紹介をした。超電導ケーブルを鉄道の送電線へ適用することにより、回生効率の向上、損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧の低減による変電所の集約化、レール電位の抑制による電食の改善などの効果があると期待されている。シミュレーションによる省エネ効果、実路線で使用可能な 8 kA 級の鉄道用超電導ケーブルの試作について紹介をした。特に試作した 8 kA 級鉄道用超電導ケーブルは、鉄道固有の短絡電流に対応した保護層や、熱侵入低減のためフォーマ内に冷媒経路を設けるなど、独特な特徴を有している。現在、鉄道向けの超電導ケーブルを製作し、鉄道総研構内試験線での各種実証試験を進めている。

鉄道総研の長嶋からは、「超電導磁気軸受を用いた鉄道用フライホイール蓄電装置の開発」について紹介があった。従来のフライホイールのデメリットである機械軸受のメンテナンス、低貯蔵エネルギーについて、超電導技術を適用することでメンテナンスフリー、高貯蔵エネルギーを実現させる目的であった。講演では、超電導バルク体と超電導コイルを組み合わせた超電導磁気軸受を製作し、その回転試験、荷重試験を行い、ロータの完全非接触浮上支持および共振点を越える回転でも問題ないことが示された。

JR 東日本の林屋からは、「鉄道電力供給システムからの超電導技術への期待」と題して、現在の鉄道電力供給システムの特徴と課題について紹介があり、それを踏まえて超電導技術への期待として講演があった。大電流送電故の課題 (電圧降下や回生失効) 解決のため、変電所増設が最も確実な解決手段であるが、現在は工期・コスト、立地面などの優位性からリチウム電池を使った電力貯蔵装置の導入が検討されている。ここに SMES やフライホイール等の超電導電力貯蔵を導入するには、低価格化が課題であることが示された。超電導ケーブルについては、進行中の S-I ノベプロジェクトに触れ、変電所間を結ぶことで負荷分担の平滑化が実現され、設備の利用率向上が期待されることから、今後は変電所側の制御を含めた開発も必要になるとのことであった。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

講演終了後、鉄道総研の設備見学として、超電導ケーブル、超電導フライホイール、電気二重層キャパシタの見学があった。超電導ケーブルは鉄道路線に敷設され、実際の鉄道用トラフ内に収容されており、現在、実用実証に向けた基礎的な実験を進めている状況を示した。

[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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

「産総研の超電導クリーンルーム CRAVITY 公開記念シンポジウム」報告

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 低温デバイス開発室
室長 日高睦夫

(独) 産業技術総合研究所 (産総研) の超電導アナログ・デジタルデバイス作製用クリーンルーム CRAVITY (Clean room for analog and digital superconductivity) のオープンを記念して、2013 年 3 月 6 日に公開記念シンポジウムが開催された。

CRAVITY は産総研つくば中央に設置された超電導アナログ・デジタルデバイスの安定供給を目指したクリーンルームであり、高度な低温超電導デバイスの作製が行える施設と装置を備えている。また、CRAVITY の装置は、産総研先端機器共用イノベーションプラットフォーム (IBEC) の一部として、産総研外部にも公開される。

CRAVITY は、リソグラフィー室、成膜室、ユーティリティスペースから構成されている。リソグラフィー室はクラス 100 のクリーンルームで、面積は 90 m² である。ここには、露光を行う i 線ステッパーを始め、基板のゴミ・汚れを洗浄するウエハ洗浄装置、レジストの塗布・露光を行うコータ・デベロッパ、エッチング後にレジストを除去する有機洗浄装置などが置かれている。成膜室は面積 70 m² のクラス 10000 クリーンルームであり、Nb および NbN のジョセフソン接合成膜装置、5 台の反応性イオンエッチング装置 (RIE) などが置かれている。RIE では、エッチングされる材料、ガスごとに装置を別にしておくことが、制御性と再現性を維持するために極めて重要である。CRAVITY では、5 台の RIE 装置を目的別に使い分けることで、質の高いエッチングを行うことができる。また、オートプローバーや段差計、応力評価装置などの評価装置も充実している。クリーンルーム外側のユーティリティスペースには、装置の排気ユニットやボンベステーションが置かれており、クリーンルームの清浄度維持に貢献している。



クリーンルーム見学会の様子 (リソグラフィー室)

CRAVITY の装置詳細と利用方法、時間単価などは、

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

<http://unit.aist.go.jp/riif/openi/cravity/ja/index.html> をご覧いただきたい。IBEC の仕組みを用いて CRAVITY 装置を外部研究者が利用できるだけでなく、産総研の持つ低温超電導デバイス作製技術・ノウハウを活用して CRAVITY で高度なデバイスを作製し、外部研究機関に供給することも可能である。

公開記念シンポジウムでは、村上 IBEC センター長の挨拶、大久保 CRAVITY 運営委員長からの CRAVITY 趣旨説明に引き続き、4 件の基調講演が行われた。NEC/理研の蔡氏は、超電導の巨視的量子コヒーレンスを用いた量子ビットと量子光学の解説を行った。(株)クオントの東海林氏は、欧州、米国、日本におけるジョセフソン電圧標準 (JVS) 技術開発の歴史と現状について述べた。JVS は現在世界で約 50 台稼働しており、今後 2 次標準として台数拡大が期待されるとのことであった。国立天文台の稲谷教授から、電波天文に用いる超電導ミキサの歴史を振り返った講演があった。稲谷先生が電総研 (当時) で Nb/AlOx/Nb 接合作製法を教わって以来 30 年間で我が国の超電導ミキサは長足の進歩を遂げ、チリに設置された巨大電波望遠鏡 ALMA には、日本で作製された多数の超電導ミキサが使用されている。横国大の吉川教授からは、超電導デジタル応用のトレンドとしてさらなる低消費電力化が進行していることや、米国で超電導スーパーコンピュータに向けたプロジェクトの募集が始まったことなどが報告された。これらの研究はいずれも高度な低温超電導デバイスを必要としており、CRAVITY 活用による我が国の超電導デバイス研究競争力強化への期待が述べられた。



公開シンポジウムの講演風景

CRAVITY 推進側から 4 件の発表が行われた。ISTEC の日高から、デジタル集積回路用に開発された高性能・高信頼 Nb デバイス作製プロセスを、CRAVITY においてデジタル回路だけでなく種々の超電導デバイス作製に適用していく構想が述べられた。産総研の低温超電導デバイスの開発例として、ナノエレクトロニクス研究部門の神代氏からラックマウント型電圧標準と検出器多画素化のための読出し SQUID 開発の進捗が紹介された。また、計測フロンティア部門の全氏からは、飛行時間型質量分析のための超電導ストリップイオン検出器の開発状況が述べられた。最後に CRAVITY 立ち上げに尽力された計測フロンティア部門の浮辺氏から CRAVITY 施設・装置の概要が説明された。

講演終了後、シンポジウム参加者に対する CRAVITY の見学会が行われた。参加者全員が数班に分かれて無尽衣を着てクリーンルーム内に入り、実際に装置を見ながら説明を受け、熱心な質疑応答が行われた。

[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 2)

京都大学
大学院工学研究科
教授 雨宮尚之

2. 粒子線がん治療と加速器

2.1 粒子線がん治療

粒子線がん治療は、1.1(1)で説明した放射線治療の一種で、陽子や炭素イオンといった荷電粒子を高エネルギーに加速した粒子線を用いるものである。粒子線の中でも、ヘリウム以上の原子番号を持つ原子をイオン化して加速したものを、狭義の重粒子線と呼ぶが、その代表例が炭素線である。また、粒子線に対して、X線やガンマ線は電磁波であるが、これを光子線と呼ぶこともある。

以下、粒子線の物理的特性と生物学的特性について説明しつつ、陽子線と炭素線の特徴についても説明していく。

(1) 粒子線のエネルギー損失、飛程、線エネルギー付与 (LET)、多重クーロン散乱

粒子線は人体組織の中を、電離、励起作用を起こすことでエネルギーを失いながら進んでいくが、単位長さを進む間に失うエネルギーの大きさは粒子線の速度の二乗に概ね反比例し、電荷の二乗に比例する。陽子線は 1 価、炭素線は 6 価であるから、速度が同じであるならば炭素線のエネルギー損失は陽子線の約 36 倍である。

飛程は粒子の初期エネルギーと単位距離を進む間のエネルギー損失で決まる。従って、速度が同じ、つまり一核子あたりの運動エネルギーが同じ粒子線の飛程は、粒子の質量 (数) に比例し粒子の電荷の二乗に反比例する。炭素イオンを陽子と比較すると質量は 12 倍で電荷は 6 倍なので、一核子あたりの運動エネルギーが同じ場合、炭素線の飛程は陽子線の約 3 分の 1 となる。従って、同じ深さにあるがんを治療する場合、炭素線は陽子線に比べて一核子あたりのエネルギーを大きくしなければならない。粒子線がん治療装置において照射粒子のエネルギーは、通常、可変とするが、一核子あたりの最大エネルギーは陽子線で 220 – 235 MeV、炭素線で 400 – 430 MeV/u 程度であり、この程度のエネルギーの粒子線の水中での飛程は約 30 cm である。

媒質中を粒子線が進むにつれて粒子が失うエネルギーが「粒子線のエネルギー損失」であるが、これに対して、粒子線の通過によって、飛跡単位長さあたりの媒質が局所的に受け取るエネルギーが線エネルギー付与 (Linear Energy Transfer, LET) (単位は keV/μm) である。LET が大きいほど粒子線の飛跡に沿った媒質 (つまり人体組織) に与える影響は大きい。LET は放射線の種類によって異なり、X線、ガンマ線、陽子線は低 LET 放射線 (数 keV/μm) であり、重粒子線は高 LET 放射線 (100 – 200 keV/μm) である。LET は後述する粒子線の生物学的特性と大きく関係している。

粒子線は、媒質を通過すると、その原子核との多重クーロン散乱により、散乱角度を持つ。多数回の小角クーロン散乱の影響による散乱角度の広がりにはガウス分布で表され、粒子の速度が同じであれば、電荷に比例し運動量に反比例する。炭素線は陽子線に比べて、電荷が 6 倍、質量が 12 倍なので、角度広がりには約半分となり、これは炭素線の利点である。

(2) ブラッグピークと線量集中性

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

光子線を人体の外部から照射すると、吸収線量は、体表付近で最大となり体表からの距離に応じて指数関数的に減衰していく。このような吸収線量の分布は、体内深部に存在するがん病巣の治療を考えた場合には好ましいものではない。

これに対して、陽子線や重粒子線のような粒子線は、人体組織の中を電離・励起作用を及ぼしエネルギーを失いながら進んでいくが、先述したように、単位長さを進む間に失うエネルギーの大きさは粒子線の速度の二乗に概ね反比例する。従って、速度の低下した飛跡の終端付近でエネルギー損失は大きくなり、吸収線量、すなわち飛跡単位長さあたりの電離作用の大きさを体表からの距離に対してプロットすると、飛跡の終端付近で大きなピークを持つ。これをブラッグピークと呼ぶ。粒子線のエネルギーを変えることにより、ブラッグピークの位置は変えることができ、これをがん病巣に合わせれば、そこに線量を集中することができる。この線量集中性が粒子線治療の大きな特長である。

(3) 粒子線の生物学的特性

粒子線の生物学的特性を表すパラメータとして、生物学的効果比 (Relative Biological Effectiveness, RBE) と酸素増感比 (Oxygen Enhancement Ratio, OER) がある。これらは、いずれも LET の関数である。

RBE は、「ある生物学的効果を生じさせるのに必要な基本放射線 (X 線) の線量/同じ生物学的効果を生じさせるのに必要な当該放射線の線量」で定義され、放射線の種類による生物学的効果の違いの指標である。粒子線のうちでも、低 LET 放射線である陽子線の RBE は約 1 であり、これは陽子線の生物学的効果が X 線と同等であることを意味する。これに対して、高 LET 放射線である炭素線の RBE は大きい (例えば 3 程度)。このような陽子線と炭素線の生物学的効果の違いは、LET の違いによる DNA 損傷の違いによるものである。

OER は、細胞の酸素濃度による放射線感受性の違いを表す指標で、「同じ生物学的効果を得るのに、高酸素下で必要な線量に対する低酸素下で必要な線量の比」で定義される。OER が 1 であるとは細胞の酸素濃度によって放射線感受性が異ならないことを意味し、OER が 1 より大きいと低酸素濃度の細胞に対して放射線感受性が低いことを意味する。OER は低 LET 放射線においては 1 より大きな値をとっており、LET が高くなると 1 に近づいていく。一般に、がん細胞は酸素濃度が低いため、OER が小さい方が高い照射効果が期待できる。LET が高く OER が低いことは、炭素線の X 線、ガンマ線、陽子線などに比した利点のひとつである。

(4) 粒子線がん治療のまとめ

粒子線がん治療では、ブラッグピークをいかして体内深部のがん病巣に線量を集中できることが利点である。炭素線では飛程を確保するために陽子線に比べて一核子あたりのエネルギーを高くしなければならない。高 LET 放射線である炭素線は、低 LET 放射線である X 線、ガンマ線、陽子線に比べて、生物学的効果が高く、低炭素濃度のがん細胞に対しても感受性が高いことから、優れた治療効果が期待できる。

2.2 粒子線がん治療装置と加速器

粒子線がん治療装置は、陽子や炭素イオンのような荷電粒子を生成し、これを加速し、がん病巣に照射する装置である。粒子線がん治療装置は、

1. 陽子や炭素イオンを生成するイオン源
2. 生成した陽子や炭素イオンをある程度まで加速して円形加速器に入射する入射用線形加速器

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

3. 陽子や炭素イオンを治療に必要なエネルギーまで加速する円形加速器
 4. 加速された高エネルギーの陽子や炭素イオンを治療室まで輸送する高エネルギービーム輸送系
 5. 陽子や炭素イオンを患者に照射する照射系（回転ガントリーを含む）
- から構成される。これらの装置の機能の多くは荷電粒子に作用する電磁力により実現される。電場の強さ E 、磁束密度（磁場） B の空間を速度 v で電荷 q の荷電粒子が運動しているとき、この荷電粒子に作用する電磁力（ローレンツ力） F は次式で与えられる。

$$F=q(E+v\times B) \quad (1)$$

イオン源で生成された粒子は電荷 q をもっており入射用線形加速器にて電場 E による力 qE によって加速され、円形加速器に入射される。

円形加速器は粒子を治療に必要なエネルギーまで加速する機能を担うが、ここでも電場 E による力 qE によって粒子を加速する。円形加速器では、電場 E を発生する高周波加速空洞を効率的に利用するため、粒子を円形に周回させ、ひとつないし少数の高周波加速空洞を何度も通過させて、通過のたびに粒子を少しずつ加速していく。粒子を円形に周回させるためには向心力を作用させる必要があるが、このために磁場 B による力を利用する。式(1)によれば、粒子の速度 v と垂直な方向に磁場 B を印加すれば、大きさは速さ v に比例し、方向は v と B に垂直な力 F を作用させることができる。これにより、速さ v が一定の重粒子を B に垂直な平面内で半径 r の円軌道に沿って周回させることができる。

$$r=\frac{mv}{qB} \quad (2)$$

円形加速器で必要なエネルギーまで加速された粒子は高エネルギービーム輸送系で治療室まで導かれ照射系で患者に照射される。ここでも、特に電磁力を作用させなければ、粒子の向きを変えるために偏向機能を持った 2 極電磁石を用いる。

上述のように、粒子線がん治療装置においては、高エネルギーの荷電粒子ビームを誘導・制御するために、磁場中を荷電粒子が運動するときに作用する力を利用する。磁場を発生するために大がかりな電磁石を用いることが、装置の小型化を困難にし、粒子線がん治療、特に重粒子線がん治療の普及の障害となっている。

[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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

読者の広場

Q&A

Q:「最近の電気学会誌に磁気と医療の特集がありましたが、超電導は応用できないでしょうか？」

A: ご存知のように、MRI は既に実用化しておりますし、がん治療用の重イオン加速器の超電導化の検討も始まっております。一般的に医療応用は息の長い開発になります。このため、医療に携わる先生方との協働が必須と思われます。

さて、上記以外の医療応用としては、磁気力を利用する応用が考えられています。広島大学の越智先生のグループの研究は、臨床に近い開発と思われます。これは、関節軟骨の再生を促すもので、骨髄由来の細胞で、軟骨細胞への分化能をもつ間葉系幹細胞に、MRI 造影剤として使用されている鉄系薬剤を取り込ませ磁気シーディングします。これを軟骨欠損部に注入し、外部から磁場を印加するものです。磁場の役割は、磁気シーディングした幹細胞（磁性細胞）が拡散しないように保持する役割を果たします。また、関節ですから欠損部方向への磁性細胞の磁気力による誘導も効果的に行われています。この磁気誘導・蓄積の実験は電磁石で行われていましたが、臨床応用には遠方まで磁場が到達する HTS バルク磁石を想定しています。ミニブタを用いた動物実験では、最大中心磁場で 6 T の HTS バルク磁石を利用しています。超電導磁石を利用するメリットは、遠方（間接内部）まで磁界を発生させ、磁性幹細胞を蓄積できるようになることです。磁石システムとしても、MRI 等に比較して高価なものではなく、サイズも小さいものです。さらに、対象となる症例が変形性関節症ですので、日本のような高齢化社会において QOL を向上させ得る治療に必須の機器となると期待されます。

同様な研究が、大阪大学大学院の健康発達医学—大阪大学・金沢大学・浜松医科大学・千葉大学・福井大学連合小児発達学研究科の中神先生のグループでもなされています。こちらは遺伝子治療のための研究で、治療用の遺伝子を標的細胞に効率よく導入するために、ベクターとしてマグネタイトを使用します。磁気力で遺伝子の導入効率を向上させる研究です。ベクターとは、遺伝子を効率的に運搬するための乗り物のようなものを意味し、いろいろな種類があります。ここでは、強磁性粒子を遺伝子に付着させて、磁気力で遺伝子を運搬するため、ベクターと呼んでいます。このベクターの働きにより磁気力を発生させ、薬剤を標的とする細胞への導入効率を高める研究です。

いずれの応用も、磁気シーディングした細胞や遺伝子を、拡散力に対抗して、ある場所に集積・保持するために磁気力が使われます。これらの応用では、体内を対象としますので、遠方まで磁場が到達する超電導磁石が必須となっています。

また、従来から、磁気シーディングを実施した薬剤や磁性細胞を体内の特定の場所に誘導する研究もなされています。これは東京女子医大の先端生命医科学研究所の村垣先生らのグループの研究です。この場合も、上記と同様の理由で、超電導バルク磁石を使用することを想定しています。

回答者：大阪大学大学院環境エネルギー工学研究科 教授 西嶋茂宏 様

[超電導 Web21 トップページ](#)

「Web21 についてのご意見・ご感想、「読者の広場」その他で取り上げて欲しい事項、その他のお問い合わせは、超電導 Web21 編集局メール web21@istec.or.jp までお願いします。」