

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717 **2012 年 4** 月 号 2012 年 4 月 2 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 系超電導線材開発の動向
- ○Bi 系超電導線材の開発動向
- ○MqB₂線材化プロセス技術の進展
- ○鉄系超電導材料の最近の研究動向
- ○RE 系高温超電導バルク材の開発動向
- ○超電導関連 2012 年 4-5 月の催し物案内
- ○新聞ヘッドライン(2/18-3/17)
- ○超雷導速報─世界の動き(2012年2月)
- ○隔月連載記事-超電導マグネット開発のこれまでとこれから(その2)
- ○読者の広場(Q&A)ー手のひらに載る小型・最軽量の3テスラ高温超電導バルク磁石を開発 ~新着磁技術により小型・軽量化と低消費電力化を実現~

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

KEIRIN

この「超電導 Web21」は、JKA の補助金を受けて作成したものです。 http://ringring-keirin.jp





公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

特集:超電導線材技術の進展

「国内外の Y 系超電導線材開発の動向」

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所線材研究開発部 部長 和泉輝郎

Y 系超電導線材は、これまでポテンシャルは認められつつも、長尺線材や量産線材の提供が必ずしも十分ではなかったことにより機器開発の動きが鈍かったが、ここ数年の間に大幅な進展がみられ、パワー応用を始め、多くの機器応用の開発が活性化してきている。

そのトリガーとなったのは I_c (臨界電流)・L (長さ)の積で代表される長尺線材開発の進展である。これまでは、日米の開発競争が世界を牽引してきたことは、これまでも紹介してきており、現在でもフジクラの I_c ・L = 467 kAm; 816 m-572 A/cm 幅が世界最高であることには変わりはない。ところが、ここにきて勢力図に異変が起きている。日本と米国の争いの中に韓国の SuNAM 社が台頭してきたのである。驚異的なのは、その開発スピードである。昨年の 7 月に I_c ・L = 174 kAm; 470 m-370 A/cm 幅を出した後に 10 月末の ISS では I_c ・L = 247 kAm; 610 m-405 A/cm 幅を報告し、1週間後の ISIS では、この記録をさらに伸ばして(I_c ・L = 327 kAm; 920 m-355 A/cm 幅)、遂には世界 2 位の記録を出すに至っている(図 1 参照)。彼らは、IBAD 基板上に共蒸着法を基本としたRCE-CDR(Reactive Co-Evaporation by Cyclic Deposition & Reaction)法により超電導層を形成するプロセスを選択しており、これまではプロセスの安定性を確保することに苦労していたようではあるが、ここにきて安定製造技術を得たようである。最近では、モータを始め機器開発への提供を盛んに行っているとの情報が入っている。

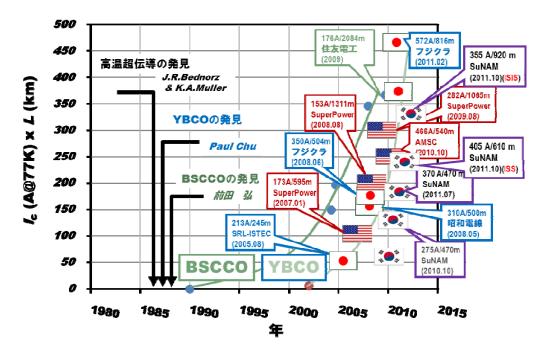


図1 高温超電導線材開発における 16・L 積向上の推移



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

一方で、各機器からは、上記の示標である長さや自己磁場中での I_c だけではなく磁場中特性、低損失化、高強度化などの各種の機能向上が求められており、この分野での開発も並行して進められている。最近の特筆すべき成果としては、ISTEC において新たな人工ピン止め材料の開発が行われたことである。これまでも、PLD 法や MOCVD 法などの気相法による超電導層形成時にBaZrO $_3$ (BZO) などを添加することで磁場中特性向上が図られてきたが、厚膜時に I_c 特性が飽和し、高 I_c 化が困難であった。これに対し、新たに見出した BaHfO $_3$ (BHO) は、厚膜時にも磁場中 I_c 特性に低下がみられず、約3 I_c m I_c mの線材で85A/cm I_c m I_c mの数据であった TFA-MOD 法においても、短尺ながら中間熱処理とこれに適応した本焼条件の適正化により BZO ナノ粒子人工ピン止め点の微細分散化に成功し、56A/cm I_c mの3T を実現している。

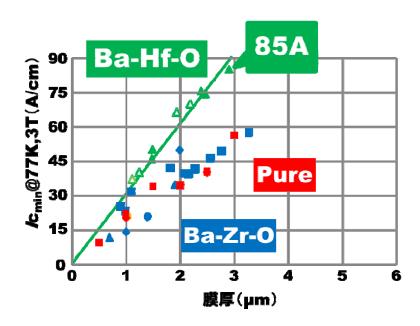


図2 PLD 法による超電導形成における BHO 人工ピン止め点導入の効果

また、機器実用化の観点からは、上記の個別機器仕様とともに共通因子として低コスト化や量産化に向けた安定製造技術開発が求められている。低コストに関しては、装置費用が大きな比率を占めていた開発初期には、プロセスの高速化によるコスト低減が有効であり、世界的にもこの方向で開発が進められてきた。象徴的な事象として、IBADの高速化が挙げられる。開発初期には、数 m/hで全プロセスの律速プロセスであったが、大面積化と共に MgO 材料の開発などにより、最近では数十 m/h を超える高速化が実現し、もはや律速工程ではなくなっている。これらの開発の進展に伴って、低コスト化の主体が高特性化のアプローチに移行している。一方、量産化の分野では、米国企業が先行しており、最近ではこれに韓国の SuNAM 社が参戦している。日本の線材メーカにおいても、販売を開始していると共に、価格目標を謳う企業が増えてきており、事業化が進んでいることがうかがえる。今後は、単なる量産化ではなく、上述の高機能線材の低コスト化、量産化が求められるところである。

上記の線材開発は継続して進展し、並行してこれらの線材を用いた機器開発もより活性化するものと推察されるが、超電導の優位性を絶対的なものにするためには、これまでの開発の延長線上の特性を大きく凌駕する線材の実現が望まれている。この要望に応える、いわゆる「第三世代線材」の実現が次代のターゲットとなると考えられる。この第三世代線材では、2,000 A (@77 K,自己磁



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

場)以上の超高 I_c 特性や、65 K,5 Tで 500 A 以上の磁場中超高特性、さらには、"岩熊効果"(超電導 Web21、2010 年 10 月号 P4 参照)を活用した超低損失などが提案されている。もちろん、実際に 2,000 A を運転電流として使用するわけではなく、この I_c の下で負荷率を低減することによる極低損失化や、磁場中応用における運転温度の高温化により冷却負荷の大幅な低減などで、本質的な高温超電導線材の優位性を極限まで引き出せることが期待されるところである。

以上、最近のY系超電導線材開発に関する状況をまとめた。当面は、現状線材の量産化技術と共に事業化へ向けた動きが加速すると考えられる。開発としては、各種機器に対応した多機能化の開発とその成果の量産技術への展開が図られていく。また、同時に超電導世界の実現を確固たるものにするための第三世代線材への開発が動き出さねばならない時期に来ていると感じるところである。



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

特集:超電導線材技術の進展 「Bi 系超電導線材の開発動向」

住友電気工業株式会社 超電導製品開発部 応用開発部長 林 和彦

Bi2223 線材は現在、最も普及している高温超電導線材であり、これまでに送電ケーブルや各種超電導磁石、モータ、電流リードなど広い用途での採用が進められてきた。特に最終熱処理工程に加圧焼成法を採用した DI-BSCCO 線材を商品化してからからは、臨界電流特性の向上と同時に長尺における均一性、量産性、歩留りを著しく改善しており、日米欧・アジアにおける顧客からの信頼を得て、毎年出荷量を増やしており、年産 1,000 km/年も可能である。最近の DI-BSCCO 線材の 77 Kにおける I_c は短尺線材で 250 A、長尺の量産線材でも 200 Aに達しているが、酸化物フィラメント部分の I_c としては I_c × I_c 104 A/cm² 程度でしかない。物質・材料研究機構(NIMS)、鹿児島大学、九州大学の共同研究成果である Bi2223 薄膜の I_c は I_c が $I_$

最近の特性改善のトピックスでは、Bi2223 のキャリアドープ状態の調整により、77 K における I_c は低下するが、低温磁場中での I_c 特性は向上する(図 1)ことが分かり、低温高磁場仕様線材の商品化を計画している。Bi 系超電導体は電気的磁気的異方性が大きいため、本質的に磁場下臨界電流特性の改善は難しいと言われるが、製造条件の最適化を進めることにより改善は可能である。特に Bi2223 線材における金属組成や酸素組成の調整は、Bi2223 多結晶体の結晶粒間電流特性を改善し、超電導電流特性のさらなる向上を期待させる。

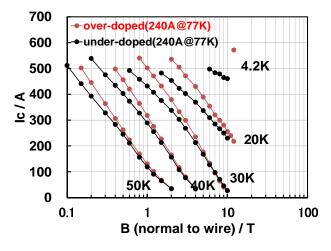


図 1. 酸素組成調整した DI-BSCCO 線材の低温磁場特性



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

一方、高磁場マグネットや大型ボアを要するマグネット応用では、線材の機械強度が重要である。 DI-BSCCO 線材では、高強度化を目的に、ステンレスなどの金属テープを半田集合する手法を用いた TypeHT を商品化している。 77 K の引張強度のカタログ値は 270 MPa である。今回、補強材であるステンレステープのサプライ張力と厚みを増大させることにより、77 K での引張強度 500 MPa、引張歪み 0.5 %を達成できる技術に目処を立てた(図 2)。高強度仕様線材についても、近々商品化を計画している。

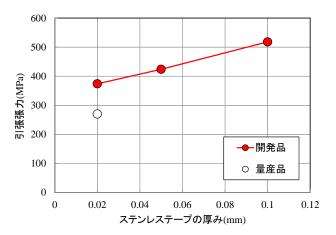


図 2. TypeHT 線材の 77 K 引張張力特性

1988 年に Bi 系高温超電導体が発見されて 24 年になるが、線材として、工業製品と言えるレベルまで技術開発を進めることができた。超電導現象を利用した機器開発を進める多くの研究者に評価頂ければ幸いである。



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

特集:超電導線材技術の進展

「MgB2線材化プロセス技術の進展」

独立行政法人 物質・材料研究機構 強磁場共用ステーション ステーション長 熊倉浩明

MgB2の発見からすでに10年以上が経過してMgB2線材の研究開発も進展を見せている。線材化法としては原料粉末を金属管に充填して線材加工後に熱処理を行うPIT法が主流である。PIT法においては原料粉末の品質が重要であるが、特にB粉末の質が線材の臨界電流特性に大きな影響を及ぼすことがよく知られている。高純度のアモルファスB微粉末が高い臨界電流特性を得るのに有効であるが、高価であるという難点がある。Mg粉末の代わりに金属管の中心にMg棒を配置し、Mg棒と金属管との隙間にB粉末を充填して線材に加工後、熱処理をするMg拡散法も試みられている。Mgは六方晶で加工が難しいことが知られているが、Mg芯がB粉末で囲まれていると、Mgは破砕されることなく均一にフィラメント状に加工される。この線材を熱処理すると、MgがB層に拡散してBと反応し、MgB2が生成される。このようにして得られたMgB2層はPIT法よりも充填率が高いためにPIT法に比べてはるかに高い J_c が得られる。ただし、Mg拡散法では熱処理後にMgコアに大きなボイド(カーケンドールボイド)が形成される、という難点もある。

PIT法やMg拡散法においては、様々な不純物添加が試みられている。最もよく知られた不純物はナノレベルのSiC粉末であり、SiC添加によってMgB2のBサイトのC置換が起こって H_{c2} が向上するので、これによって高磁界での J_c 特性も上昇する。同様な効果はカーボンナノチューブやフラーレンなどの炭素の添加、あるいは炭化水素や炭水化物の添加によっても得られている。ただし、ある種の炭化水素や炭水化物の添加では、BサイトのC置換量が少ないにも関わらず、かなり大きな J_c の向上が得られることも知られている。しかしながら、このような不純物を添加した線材においても、 J_c は実用レベルよりもまだかなり低い。MgとBの混合粉末を出発原料とするin situ PIT法線材の J_c が低い原因の一つは、MgB2コアの充填率が50%程度とかなり低く、MgB2結晶粒のつながり(電流を流すための有効断面積、connectivity)が十分ではないためである。実際PLD法などによる薄膜では、高い充填率が得られて相当に高い J_c が実現されている。

Connectivityは MgB_2 の充填率に大きく依存するが、線材における MgB_2 の充填率を向上させる方法としては前述したMg拡散法の他にも、線材の熱処理前に行う冷間プレスやホットプレスが有効である。特に冷間プレスは長尺線材に適用可能と考えられていて研究が進められている。さらに原料粉末をボールミルすることによるメカニカルアロイング法も充填率の向上に有効と考えられる。また MgB_2 の粉末を金属管に充填するex situ PIT法では、in situ PIT法よりも高い充填率が得られるという利点がある。

 MgB_2 線材の長尺化についても最近では研究開発が進み、1 km 以上の線材が作製されるようになってきているが、やはり J_c が実用レベルに達していない。また現在の MgB_2 線材においては超電導体の体積率が低く、一番重要な線材全断面積あたりの $J_c(J_e)$ が相当に低いという難点がある。今後は金属管の肉厚を減らすなどして MgB_2 の比率を高めることが必要となろう。さらに線材における超電導フィラメント数の増大も重要な課題となっている。



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

特集:超電導線材技術の進展

「鉄系超電導材料の最近の研究動向」

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

副所長 田辺圭一

銅酸化物に次ぐ第2の高温超電導体群である鉄系超電導材料が東工大の細野教授のグループにより発見されてから約4年が経過した。昨年の特集(2011年4月号)では、本材料系の応用を目指した薄膜や線材作製に関する発見後3年間の研究の進展について報告した。ここでは、その後の約1年間での研究開発の進展や最近のトピックスについて紹介する。

図 1 にはこれまで発見された代表的な鉄系超電導材料の構造と臨界温度 T_c を示す。いずれも超電 導を担うのは、鉄とニクトゲン(As や P)あるいはカルコゲン(S, Se, Te)からなる四面体のネットワークであるが、他の原子面との積層の仕方により、1111 系、122 系、111 系、11 系などと分類 することができる。 T_c が最も高いのは最初に発見された 1111 系の材料である。一方、122 系及び 構造の最も単純な 11 系の材料は、最高の T_c はそれぞれ 1111 名 1111 K と低いものの、応用にとって 重要な異方性が 1111 MgB2 並に小さいという特徴がある。これ以外にもペロブスカイト構造や蛍石構造 からなる厚いブロック層を挟む材料(11111 系や 11111 系や 11111 3 名 11111 3 111111 3 11111 3 111111 3

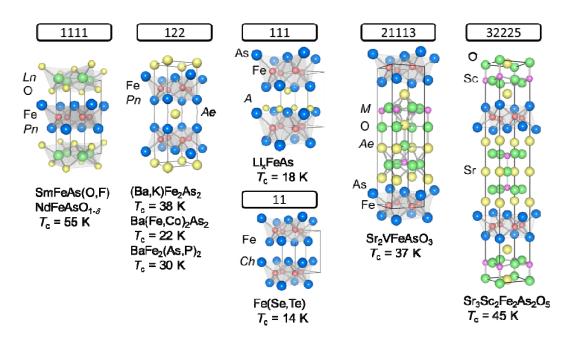


図1 代表的な鉄系超電導材料の分類、構造と 7。

これまで 1111 系材料の SmFeAsO や NdFeAsO は、酸素サイトを 15-20 % フッ素 F で置換することより電子が FeAs 面に導入され、最高で約 55 K の T_c を示すことがわかっていたが、置換できる量に限界があり、いわゆるオーバードープ状態にすることができなかった。東工大グループは、高圧合成法を用い、酸素サイトを水素 H で最大 40 %まで置換した材料を合成し、オーバードープ



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

状態の試料を作ることに成功した。しかしながら、最高の T_c は約 20 %置換で得られる 55 K と変わりがなかった。一方、後で少し詳しく述べるように、薄膜ではバルクの値を少し超える T_c が最近記録されている。122 系材料では、米国メリーランド大学のグループが $CaFe_2As_2$ の Ca サイトを希土類元素 (Ln = La, Ce, Pr, Nd) で 10-30 %程度置換することで、電気抵抗で見て最高 47 K の T_c オンセットが得られることを報告している。異方性の小さな 122 系での T_c 向上は応用上好ましいが、磁化率で見た体積分率が小さく、構造の異なる別の相による超電導の可能性が高い。岡山大学のグループは以前、 $CaFe_2As_2$ に白金 Pt を置換することで 38 K 程度の T_c が得られることを報告していたが、Pt と As からなる面が Estar 2 つの Estar 3 C Estar 3 C Estar 4 C Estar 4

薄膜作製については、昨年すでに報告したように、Co を Fe サイトに部分置換した 122 系 BaFe₂As₂ (T_c = 20-25 K) に対し、まず高品質のエピタキシャル薄膜が東工大グループやドイツの IFW Dresden、米国の Wisconsin 大学により PLD 法で合成された。東工大グループは ISTEC と共 同で、バイクリスタル基板上に作製した高」。エピタキシャル薄膜を用い、結晶粒界の性質を明らか にすると共に、粒界ジョセフソン接合の作製に鉄系では初めて成功している。1111系材料の薄膜合 成については MBE 法を用いた日本のグループの独壇場となっている。名大グループが、NdFeAsO エピタキシャル薄膜に Nd-O-F 薄膜を連続堆積し、F を拡散させることで 50 K を超える Tcを実現 したことは昨年報告したが、 CaF_2 単結晶基板を用いることでさらに T_c の高い薄膜が得られること を最初に報告した。農工大グループは MBE 法による SmFeAs(O,F) 薄膜の作製条件を最適化する ことにより、 CaF_2 基板上に 57.8 K (オンセット)、56.4 K (ゼロ抵抗) の T_c をもつ薄膜の作製に成 功した。また、この膜は 5 K、self-field で 1.8 MA/cm²、20 K、5 T でも 0.13 MA/cm²の高い J_cをも つことが報告されている。CaF2 基板を用いた場合、基板からも F が膜中に拡散し、ドーピングの 最適化に寄与しているようである。11系の Fe(Se,Te) に対しても多くの機関が高品質のエピタキシ ャル薄膜の合成に成功している。電中研と東大のグループは、種々の単結晶基板上に PLD 法で $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ 薄膜を作製し、 CaF_2 基板上ではバルクの値を超える 16.6 K のオンセット T_c と共に、 低温では14 Tの高磁場中でも4.2 x 10^4 A/cm²の高い J_c が得られることを報告している。FeSe_{0.5}Te_{0.5} エピタキシャル薄膜は、self-field の J_c は 1 MA/cm^2 に達しないものの、磁場中でやはり高い J_c を示 すことが、IFW Dresden やイタリアの CNR-SPIN グループにより最近報告されている。ちなみに、 前者の薄膜の Tcは 17 K以上で、後者は以前エピタキシャル歪みで 21 Kの薄膜が得られたことを報 告していたが、再現性は低いようである。米国のブルックへブン国立研グループは、ロスアラモス 研の IBAD-MgO 配向膜付きハステロイ基板上に薄膜を作製し、4.2 K で 25 T の高磁場中でも 10⁴ A/cm^2 の高い J_c を保つことを報告し、低温での高磁場応用の可能性を指摘している。

パウダー・イン・チューブ(PIT)法による線材では、NIMS グループが 122 系の Ag シース線材で、self-field I_c で 60 A、 J_c が 10^4 A/cm² 台の値を報告していた。ここでは、Wisconsin 大学のグループが微粉末の機械化学反応を利用した材料合成法を用い、 $4.2~\mathrm{K}$ 、self-field で $1.2~\mathrm{x}$ 10^5 A/cm² の高い J_c をもつ 122 系 Ag シース線材の作製に成功したことを昨年秋の日米ワークショップで報告していたことだけ紹介しておく。



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

特集:超電導線材技術の進展

「RE 系高温超電導バルク材の開発動向」

新日本製鐵株式會社 先端技術研究所 主幹研究員 森田 充

単結晶状の 123(REBa₂Cu₃O_{X、}RE: Y または希土類元素)相中に 211(RE₂BaCuO₅) 相が微細分散した高温超電導バルク材料(バルク材)は、高磁場中においても高い臨界電流密度(J_c)を有する。その優れた J_c -B 特性のため、バルク材は磁場中でも大電流通電可能なコンパクトな電流リード用材料として理想的な材料であり、使用実績の蓄積も着実に進んでいる。さらに、バルク形状のままで材料中に超電導電流を循環させる工程(着磁)によって、永久磁石のようなコンパクトな空間に永久磁石の磁場強度をはるかに超える強磁場を発生させることが可能なマグネット(バルクマグネット)になる。新日鉄では、酸化物超電導材料発見当初からバルク材の開発を進めるともに、現在、各種応用開発を加速するために高性能なバルク材(商標 $QMG^{®}$)を研究所から有償サンプルとして社外の研究機関に提供している。ここでは、新日鉄でのバルク材料の開発状況、特にバルクマグネット応用関連について述べる。

バルクマグネットの発生磁場強度は、 J_c と単結晶試料サイズの積に比例する。図 1 に製造可能となった単結晶試料サイズとこれによって発生可能となった総磁束量(77K 換算)の変遷を各要素技術の開発と合わせて模式的に示す。図 1 からも分かるように、性能・大型材料製造技術は現在も着実に進展している。高い捕捉磁場特性と生産性から、Gd 系バルク材がバルクマグネット用途に適していると考えられる。特に大型材においては、大気中結晶成長では RE/Ba 置換による超電導特性の低下が懸念されるが、大気中での大型 Gd 系バルク材安定製造技術は格段に向上している。Gd 系よりも RE/Ba 置換が起こり易い Eu 系バルク材についても、結晶成長条件の更なる精緻な制御を実現することで大気中結晶成長が可能になり、高い捕捉磁場特性に加えて低い磁化率が要求されるバルク NMR 用途に期待されている。

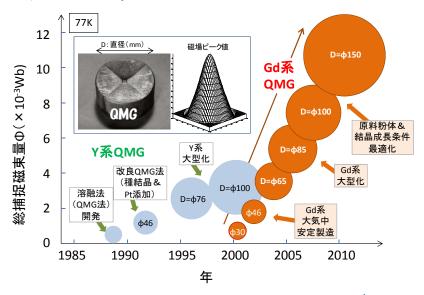


図1 RE 系高温超電導バルク材の高特性化の変遷 1)



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

Jc は冷却温度が低下するにつれ増大するため、冷却温度の低温化で発生磁場強度の向上が可能となる。発生磁場強度の向上と共に、バルク材に作用する電磁力も増大するため、バルク材が破壊することがある。しかし、大型バルク材の安定製造技術が向上したことで、従来よりも均質性の高いバルク材が得られるようになり、例えば、SUS 製リングによる簡易的な補強でも、比較的大型の直径 46 mm の Gd 系バルク材を 20~50 K に冷却することで 10 T 級の強磁場捕捉が可能であることが、岩手大学の協力によって実証されている。

最近の直径 80 mm を超える大型材料の安定製造技術に関しては、希土類組成勾配法がキーテクノロジーとなる。希土類組成勾配法では、RE 元素による包晶温度(123 相の結晶化温度)の差を利用し、同心円状に RE 元素の組成に勾配を設けた前駆体を作製し結晶成長させる。これにより材料周辺部からの多結晶化を抑制し、かつ結晶成長端面の安定化を図ることで高品質の大型材料の製造が可能となった。現在は、Gd と Dy を組み合わせた希土類組成勾配法により直径 150 mm 級超大型バルク材の製造が可能であり、単一ピークの捕捉磁場分布を有する高品質の大型材が得られている。

一方、得られたバルク材をバルクマグネットにするには、着磁が必要である。着磁方法には大別して静磁場着磁法とパルス着磁法があるが、いずれの場合も超電導状態で磁束が移動するため熱が発生する。この熱は着磁後の磁場分布に影響を及ぼす場合があるため、抜熱特性に優れ着磁し易いバルク材料の開発も進めている。

超電導の応用開発は、着磁方法、冷却方法、補強方法等の周辺技術の開発が極めて重要である。 現状、10 T級の磁場を発生させるためには、50 K以下の冷却が必要であり、液体ネオン(沸点: 27 K) は、熱磁気的な安定性の観点からもバルクマグネット応用に適した冷媒であると考えられる。 今後、バルク材の本格的な応用には、材料技術と周辺技術の有機的な連携が不可欠であり、これら 総合力の向上が強く望まれる。

参考文献:

1. 新日鉄技報 p195, No.391 2011.



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

超電導関連 '12/4 月-5 月の催し物案内

4/9-13

2012 MRS Spring Meeting and Exhibit

場所: San Francisco, California

問合せ: http://www.mrs.org/spring2012/

4/10-13

International Workshop on Numerical Modeling of HTS

場所: Barcelona, Spain

問合せ: http://www.icmab.es/htsmodelling2012/

4/17

社団法人未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会 第 38 回シンポジウム/第 16 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

問合せ:http://www.sntt.or.jp/~fsst/20120417.html

4/20

電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会

場所:機械振興会館

問合せ:

http://www.ieice.org/ken/program/index.php?tgid=IEICE-SCE&tgs_regid=6869aa380ff4a0afd3d0d8d1a8068f5b8c85266adc22593fcbbe4974b30aa7cd&lang=jpn

4/29-5/4

International Conference on Superconductivity and Magnetism – ICSM 2012

場所: Istanbul, Turkey

問合せ: http://www.icsm2012.org/

5/14-18

ICEC 24 - ICMC 2012

(International Cryogenic Engineering Conference 24-International Cryogenic Materials Conference 2012)

場所:福岡国際会議場

問合せ:http://www.icec24-icmc2012.org/index.html

(編集局)



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

新聞ヘッドライン(2/18-3/17)

- ○風力連系に応募 165 件 東北電、募集枠の 10 倍強 電気新聞 2/20
- ○世界の風力発電 10 年で出力 10 倍 昨年末 2.3 億キロワット 中国・欧州で急伸、5 年以内に 原発超えか 朝日新聞 2/21
- ○超電導材料の磁力線観察 東北大と理研 永久磁石に応用 日経産業新聞 2/21
- 〇山形県自動車販売店リサイクルセンター 廃車からレアメタル 実用化にメド、微生物使い回収 日経産業新聞 2/21
- ○IHIMU 日本製鋼所 洋上風力概念設計 海事協会が初承認 電気新聞 2/21
- ○経産省 風力連系線に財政支援 北海道、東北で開発促進 電気新聞 2/21
- ○風力発電、音小さく まず小型機 風車の構造工夫 グローバルエナジー 日経産業新聞 2/23
- 〇モーター用の高性能磁石 ミツバ、レアアース使用減 **15**年度、ジスプロシウムは全廃 日経産業新聞 **2/23**
- ○リスク管理 プロフェッショナル&専門部署 昭電 風力発電設備、雷から守る 日刊工業新聞 2/23
- ○中国風力メーカー今後は停滞か? 現地市場、飽和状態に 品質の信頼性不十分 電気新聞 2/23
- ○浮体式洋上風力設計で承認取得 IHIMU・日本製鋼所 日経産業新聞 2/24
- ○太陽光・風力 共存いかに NAS 電池で変動吸収 経済的運用依然カギに 電気新聞 2/24
- ○レアアース下落続く ネオジム7割安 中国の在庫増で 日本経済新聞 2/24
- ○発電候補地 データベース化 風力・地熱で環境省 希少動物など調査 計画空振りを防止 朝 日新聞 夕刊 2/25
- ○メキシコで風力発電参画 三菱商事 40 万キロワット、事業費 800 億円 日経産業新聞 2/27
- ○中南米の風力発電事業 三菱商事が参画 日刊工業新聞 2/27
- ○無風時でも出力安定 海底に空気タンク設置 蓄電機能付き洋上風力 MIT 教授が提唱 電気新聞 2/27
- ○北海道電力 風力発電連系で抽選 9月めどに事業者決定 電気新聞 2/27
- ○「レゴ」の親会社 風力事業に投資 電気新聞 2/27
- ○メキシコ風力に出資 三菱商事 中南米で最大規模 電気新聞 2/27
- ○再生可能エネ専用 HP 開設 日照・風力を随時更新 福岡県 日刊工業新聞 2/28
- ○国内の風力導入減速 風力発電協まとめ 10年度の3割未満に 電気新聞 2/28
- ○再生可能エネルギー/風力 低コスト導入 潜在力 19 億 kW 日刊工業新聞 第 2 部 2/29
- ○レアアース工場反対 笑うのは中国? Fuji Sankei Business i. 3/01
- ○中国電力 12年度風力連系で説明会 33 社から 47人が参加 電気新聞 3/02
- ○NIMS モット転移の本質明らかに 高温超伝導のメカニズム 解明に向けて大きく前進 科学 新聞 3/02
- 〇ユーラス、国内能力 7 割増 風力発電再び追い風 全量買い取り 7 月に開始 他社も開発強化 日本経済新聞 3/03
- ○レアメタル 3 種強酸使わず溶出 徳島大が新技術 低コスト回収に道 日刊工業新聞 3/05
- ○レアアース戦略 中国に内憂外患 日本経済新聞 3/05
- 〇高層ビル並み規制緩和を 風力発電ユーラス清水社長に聞く 豊田通商が筆頭株主に 海外展開で連携 日経産業新聞 3/06
- ○福島沖で風力発電実験 丸紅など 15年度までに3基 日経産業新聞 3/07
- 〇ユーラスエナジーホールディングス 清水 正己社長に聞く 風力発電、1-2 年は足固め 日刊 工業新聞 3/07
- ○福島沖で浮体式風力 1.6 万キロワット 丸紅、東大など実証 電気新聞 3/07



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

- ○欧州スマート事情 専門家に聞く上 欧州初の次世代網研究施設 洋上風力導入の足がかり 電気新聞 3/07
- ○福島沖の浮体式洋上風力発電所計画 丸紅、東大・・・・月内にも実証実験 Fuji Sankei Business i. 3/07
- ○福島沖で洋上風力実験 丸紅・東大など 経産省から受託 日本経済新聞 3/07
- ○レアメタル効率回収 ネットオフ社長 黒田 武志氏に聞く 宅配で小型家電引き取り 日刊工 業新聞 3/08
- ○物材機構 モット転移の本質説明 高温超電導機構解明に道 日刊工業新聞 3/09
- ○「クリーンエネの顔」狙う フォーカス 丸紅 ジャマイカで電力事業主導 Fuji Sankei Business i. 3/09
- ○古河電工 ケーブル開発強化へ 洋上風力推進で新組織 電気新聞 3/09
- ○加レアアース大手買収 米モリコープ、1000 億円で 日本経済新聞 3/10
- ○風力発電をモンゴルで ソフトバンク 日本経済新聞 3/11
- ○アジア送電網構築へ 孫氏設立のエネ財団 独財団と基本合意 日経産業新聞 3/12
- ○再生エネ 東北で芽吹く 国が調査支援、検討相次ぐ 日経産業新聞 3/12
- ○GE との風力発電特許訴訟 139 億円の賠償義務 日経産業新聞 3/12
- ○スマートグリッド市場 20年、7兆9000億円台 富士経済11年比試算 日刊工業新聞 3/12
- ○風力発電事業 モンゴルで展開 ソフトバンク 電気新聞 3/13
- 〇日本エネ転換、国が目標を デンマーク「風力発電の島」市議に聞く 送電網、共有インフラに 日経産業新聞 3/13
- ○ソフトバンクの風力発電 モンゴルで事業化調査 現地投資会社と会社設立 日経産業新聞 3/13
- ○海上で風力+潮力発電 三井海洋開発、コスト半減 14年実用化 日刊工業新聞 3/13
- 〇中国のレアアース輸出制限 日米欧が WTO 提訴へ 毎日新聞 夕刊 3/13
- ○レアアース中国提訴へ 輸出制限 日米欧、WTO に 日本経済新聞 夕刊 3/13
- ○レアアース規制でWTO に提訴検討 日米欧、中国相手取り 朝日新聞 夕刊 3/13
- ○レアアース中国を提訴へ WTO に 日米欧、輸出規制で 読売新聞 夕刊 3/13
- 〇日米欧、中国を WTO 提訴 「レアアース輸出に不当な規制」 Fuji Sankei Business i. 3/14
- ○低迷レアアース 価格下げ止まり Fuji Sankei Business i. 3/14
- ○レアアース争奪火ぶた 日米欧、中国をWTOに提訴へ 朝日新聞 3/14
- ○レアアース 日米欧提訴 中国の輸出制限巡り 日経産業新聞 3/14
- ○WTO 提訴へ レアアース安定確保狙い 日米欧連携 中国けん制 毎日新聞 3/14
- 〇対中国 米欧と歩調 レアアース輸出制限 WTO 提訴 紛争処理長期化も 日本経済新聞 3/14
- ○レアアース日米欧結束 中国をWTO に提訴 読売新聞 3/14
- ○風力発電「風を読む」 乱流を予測 細かな制御 故障減る 朝日新聞 夕刊 3/14
- ○脱原発へ 福島県沖に風力発電所計画 「漁再開 妨げに」 県漁連から反発の声 毎日新聞 夕刊 3/14
- ○小型風車の発電量5倍 福島大、羽根をバチ状に 日経産業新聞 3/15
- ○社説 中国 WTO 提訴へ レアアースの確保急げ 毎日新聞 3/15
- ○中国レアアース WTO 提訴 「価格影響、小さい」 国内商社 冷静な見方 日本経済新聞 3/15
- ○「WTOルールに合致」 レアアース 中国、提訴に抗戦表明 毎日新聞 3/16
- ○レアアース問題「ルールに合致」中国商務省 朝日新聞 3/16
- ○WTO 事務局長 中国提訴に理解 朝日新聞 3/16 (編集局)



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

超電導速報―世界の動き(2012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 穣



★ 記事のニュース発信地

線材

American Superconductor Corporation 社(2012年2月6日、15日)

AMSC 社は、以前報告した中国での法的措置に関して最新情報 2 件を発表した。当社は、契約違 反及び知的財産の窃盗罪で Sinovel Wind Group 社とその関連企業を相手に中国の法廷で3つの民事訴訟を起こしているが、それに加えて仲裁裁判を申請した。尚、当社は、契約済み製品出荷費用と損害賠償を合わせて合計 12 億ドル以上を取り戻すことを要求している。

この民事訴訟の中で請求額が最小なのは、Sinovel and Dailian Guotong Electric 社(Sinovel 社の電力変換器製品のサプライヤー)に対する著作権侵害のクレームであり、当社は排除措置命令と損害賠償額合わせて約 20 万ドルをこの訴訟で要求している。この訴訟に関しては海南省第一中級人民裁判所で提訴されていたが、Sinovel 社は北京仲裁委員会がこの訴訟を管轄すべきであるという理由から、管轄区域反対の動きを申し立て訴訟の却下を要求した。2012 年 2 月 3 日、法廷は Sinovel 社の動きを受け入れ訴訟を却下し、当社にこれを報告した。当社の社長兼最高経営責任者であるDaniel P. McGahn 氏は、「中国の法廷の動きは見え始めており、訴訟手続は予想どおりに進行中である。海南裁判所での訴訟却下については全くの予想外というわけではなく、その判決に対して上訴しているところである。我々は、現在提訴中である全ての訴訟に対して自信を持って対処し、これらの法廷処置から肯定的な結果が得られることを期待している。」と述べた。

2 つ目の情報は、当社が Sinovel 社に対して海南省第一中級人民裁判所で提訴しているソフトウ



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

ェア著作権侵害の民事訴訟についてである。この訴訟の申し立ては、Sinovel 社の 1.5 MW 風力タービン並びに PM3000 電力変換器に使用される当社のソフトウェアバイナリーコードに関するものである。これにより開発された AMSC 社の風力タービン制御ソフトウェアのソースコードの一部を、Sinovel 社が不正使用したというものである。AMSC 社は、排除措置命令と損害賠償額合わせて 600 万ドルを要求している。Sinovel 社は、この訴訟を北京第一中級人民裁判所から北京仲裁委員会に移送する動きを申し立てた。当社によると、2012 年 2 月 14 日、法廷がこの申し立てを却下したと報告した。

(出典)

"AMSC Provides Litigation Update" AMSC press release (February 6, 2012)

 $http://files.shareholder.com/downloads/AMSC/1730279451x0x540248/ed795563-7f0c-4acd-87e1-dd3691e854a1/AMSC_News_2012_2_6_General.pdf$

および

"AMSC Provides Litigation Update" AMSC press release (February 15, 2012)

http://files.shareholder.com/downloads/AMSC/1730279451x0x542595/cf9b0569-cc11-4bc4-9984-edc1f5522b71/AMSC_News_2012_2_15_Commercial.pdf

線材

American Superconductor Corporation 社 (2012年2月9日)

American Superconductor Corporation 社は、2011 年 12 月 31 日締め 2011 年度第 3 四半期の決算報告を発表した。第 3 四半期の収益は、前年同期の 3,160 万ドルに対して、1,810 万ドルとなった。この収益減少は、主にグリッド事業における出荷量の低下が原因である。また、この四半期には新たに 2,630 万ドルの損失があった。この損失の中には、Sinovel Wind Group 社に対する訴訟関連費用に加え、2011 年 11 月に発表した人員削減によるリストラ費用および減損費用の約 650 万ドルが含まれる。因みに、前年同期の純損失は 1,820 万ドルであった。同社の第 3 四半期の非 GAAP*ベース純損失は、前年同期の 1,340 万ドルに対して、1,750 万ドルであった。同社の社長兼最高経営責任者である Daniel P. McGahn 氏は、「弊社が、第 3 四半期における財務目標をそれぞれ突破したと報告できることを嬉しく思っている。風力とグリッドの両事業部門から着実な収益貢献があり、さらにはオーストラリア、インド、韓国、アメリカからの貢献によって総四半期収入の 10 %以上が後押しされるなど、我々は再び収入源の多角化を図ることが出来た。第 3 四半期にかけて効率化によるコスト構造の改善を一層進めることによって、現金経営費を減らし、持続可能な収益性を確保するために弊社の財務基盤を強化した。」と述べた。2011 年 12 月 31 日時点で、同社の現金、現金同等物、有価証券および拘束預金の総額は 7,550 万ドルで、受注残高総額(Sinovel 社関連の契約を除く)は 300 万ドルであった。

*GAAP (generally accepted accounting principles 一般会計原則) (出典)

"AMSC Reports Third Quarter Financial Results"

AMSC press release (February 9, 2012)

http://ir.amsc.com/financials.cfm

Furukawa Electric (2012年2月6日)

古河電気工業は、SuperPower 社を Royal Philips Electronics 社から買収した。2012年2月3日に買収手続きは全て完了した。SuperPower 社は、現在第2世代高温超電導線材を商業生産できる2



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

社のうち 1 社であるが、古河は今回の買収により、同社をグループ傘下に収めることになる。 これにより、古河は、高温超電導線材から応用機器までを量産供給できる企業グループとなり、世界規模で成長しているスマートグリッド市場、代替エネルギーなど様々な産業分野において、SuperPower 社と共に事業拡大に向けて積極的な取り組みを目指す。

以下、新しい SuperPower Inc.の概要である。(1)本社所在地; Schenectady, New York, U.S.A.、(2) 社長; Yusei Shirasaka (白坂 有生)、(3)持ち株比率; 100 %、(4)従業員数; 58、(5)事業内容; 2G 線材の開発、製造、販売。

(出典)

"Furukawa Electric Completes Acquisition of 'SuperPower Inc.' From the Philips Group" Furukawa Electric press release (February 6, 2012)

http://www.superpower-inc.com/system/files/2012 0206+Acquisition of SPI+FINAL.pdf

http://www.superpower-inc.com/content/furukawa-electric-completes-acquisition-superpower-inc-phi lips-group

Superconductor Technologies Inc. (2012年2月17日)

Superconductor Technologies社(STI)は、同社普通株式1株当たり1.05ドル、総額約460万ドルの直接公募に関して、機関投資家と契約を交わしたと発表した。さらに同社は、発行後6ヶ月から5年を経過する日までに限り権利行使できる行使価格1株当たり1.35ドルで新株引受権(3,259,646株まで購入可能)を、機関投資家に発行するつもりである。今回の公募は、2012年2月22日頃に締め切る予定である。

なお、同社は2月21日に約250万ドルの2度目の直接公募も実施した。 (出典)

"Superconductor Technologies Inc. to Raise \$4.6 Million in Registered Direct Offering" Superconductor Technologies Inc. press release (February 17, 2012) および

"Superconductor Technologies Inc. to Raise Additional \$2.5 Million in Registered Direct Offering" Superconductor Technologies Inc. press release (February 21, 2012) http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1662443&highlight

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1663060&highlight

情報通信

Superconductor Technologies 社(2012年2月6日)

Superconductor Technologies社は、モバイル通信製品の業界においてReconfigurable Resonance™ (RcR) 技術を使う製品開発契約を業界トップクラスの企業と締結した。この新技術は、受動アナログ機能回路の設計から能動アナログ機能の回路まで種々の機能を効率よく実現出来、今日のアナログ回路設計が直面している多くの課題に広く適応できる全く新しい可能性を持った回路設計手法と言える。新たに結成された当社の子会社であるResonant社が、この製品開発に向けた契約に参加し、研究開発の任務をまかされる。Resonant社には、積極的な開発を開始するにあたり資金調達が必要であり、当社は現在、資金調達上の選択肢を探索中である。当社の社長兼最高経営責任者であるJeff Quiram氏は、「弊社事業の主たる焦点は2G HTS 線材であるが、長年にわたり他の部分での知的財産の資産運



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

用をうまく生かす機会を望んできた。この契約は長年我々が取り組んできた努力の成果である。弊社のRcR技術は前途多望であり、この度の契約は、弊社の事業戦略において重要な試金石になる。」とコメントした。

(出典)

"Superconductor Technologies Inc. Signs a Product Development Agreement With a Global Leader in Mobile Communications Products"

Superconductor Technologies Inc. press release (February 6, 2012)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1656668&highlight

医療機器

(出典)

TechPrecision Corporation (2012年2月22日)

TechPrecision 社は、子会社である Rancor 社に、総額 110 万ドルを超える高度な陽子線がん治療システムに必要なさまざまなコンポーネントの受注があったことを発表した。超電導を用いた本システムにおける受注内容には、大規模な機械加工、製造、そしてテストが含まれる。これらの受注は、2013 年度の第 1 または第 2 四半期に出荷される見通しである。この新技術により、システムの小型化、コスト削減、そして操作の複雑さの問題を解決し、従来の陽子治療システムの全利点をそのまま保持した小型で費用対効果の高い製品が提供できることから、将来には陽子線治療の適応範囲が拡大されていくことが期待される。

"TechPrecision Corporation Receives \$1.1 Million Order for Proton Beam Therapy Equipment" TechPrecision Corporation press release (February 22, 2012)

http://www.techprecision.com/News/TechPrecision%20Corporation%20Receives%20\$1.1%20Million%20Order%20for%20Proton%20Beam%20Therapy%20Equipment

量子コンピュータ

IBM Research (2012年2月28日)

IBM リサーチは、量子計算デバイス性能に大きな進歩を成し遂げ、この進歩によって本格的に量子コンピュータの実用化が加速されるかもしれないと発表した。同社の研究者達はさまざまな技術を駆使して、量子力学的性質の整合性を維持しながら、計算素過程におけるエラーを削減する上で、3 つの新記録を達成した。同社は、シリコン技術用に開発されている確立された微細加工技術を用いた超電導量子ビットを採用した。このことによって、数千または数百万の量子ビット製造までスケールアップできる可能性がある。 Aachen 大学量子情報研究所並びに西ドイツ Forschungszentrum Juelich 研究所の David DiVincenzo 教授は、「IBM チームが率いる超電導量子ビット研究については、信頼性と拡張性の高い量子コンピュータの実現に向け集中した研究開発が推進されている。現在、同研究チームから報告されているデバイス性能からは、有効なエラー訂正を証明する要素が見られ、信頼性の高い論理量子ビットを実現させる可能性がある。 同研究チームの研究開発が転換点に達したと言える。」と述べた。研究者たちは、マサチューセッツ州ボストン市で開催されたアメリカ物理学会の年次総会(2012年2月27日から3月2日まで)において、その研究成果を発表した。

(出典)



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

"IBM Research Advances Device Performance for Quantum Computing" IBM Research press release (February 28, 2012) および

"IBM Research Advances Device Performance for Quantum Computing" IBM Research press release (February 28, 2012) http://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/36901.wss



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

【隔月連載記事】

超電導マグネット開発のこれまでとこれから (その2)

独立行政法人 理化学研究所 生命分子システム基盤研究領域 NMR 装置技術研究チーム チームリーダー 前田秀明

超電導マグネットを使用する機器には、MRI、NMR、単結晶引き上げ装置など超電導マグネットをスタンドアローンで利用する場合と、核融合炉、加速器など巨大なシステムの一環として利用する場合とに分けることができます。前者は安価で使い易くコンパクトであることが要求されますが、後者では高い信頼性が重視されます。今回は、前者のタイプの超電導マグネットの開発の歴史と、これからの方向について述べることにします。

1. MRI

MRI は核磁気共鳴 (NMR) を利用して人体の断層を得る装置で、最も広く利用されている超電導機器です。 1973 年、Lauterbur (ニューヨーク州立大学) が発明しました 1 。図 1 に世界初の MRI 像を示します。彼は 2003 年にノーベル医学生理学賞を受賞しています。

MRI は、身体の中の水や脂肪による水素原子核(¹H)の密度分布を求めます。均一な磁場にわずかな傾斜磁場を重ねることで、NMR 周波数に位置情報を組みこみます。傾斜磁場の条件を変えながら多数の NMR 信号をとり、多次元フーリエ変換して断層像を求めます。頭部や血管の描出に優れ、脳の活動部位の描出も可能です。常電導と超電導を合わせて 6,000 台が国内で稼働しています。

MRI の画像の SN 比は磁場強度に比例するので、高磁場ほど品質が良くなります。80 年代に超電導 MRI が利用され始めました。当初は 0.5 T 機が主流でしたが、90年代には 1.5 T 機、2000年以降は 3 T 機が急増しています。3T-MRI を図 2 に示します²⁾。3 T 機は国内に 300台設置されています。また、7 T 機が世界で数十台設置され、イメージングの開発に利用されています。パリ郊外の高磁場 MRI 研究センター(NeuroSpin)では、11.74 T の全身用 MRI の開発を進めており、これが MRI 開発の最前線です。

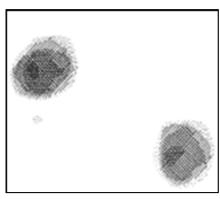


図 **1** Lauterbur (ニューヨーク州立 大学) による最初の NMR イメージ ング ¹⁾。水の入った二つの円筒です。 (Nature 誌による。)



図 2 3T-MRI(東芝)²⁾

初期(1982年)の 1.5 T MRI マグネットと、1998年のそれを比較して表 1 に示しました ³⁾。MRI マグネットでは、「イメージングの要求に答える」ために、磁場の空間的な均一度と時間的な安定度が必要です。主コイルと磁気シールドコイルが作る磁場分布を級数展開した場合の低次項が最小になるコイル配置を求め、残存する磁場不均一成分を補正コイルで打ち消します。当初の装置の磁場均一性は 40 ppm でしたが、1998年には 5 ppm まで向上しています。磁場の時間的な安定性を得



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

るために、マグネットは永久電流運転(0.1 ppm/時)が必要で、NbTi線の超電導接続技術が必須で す。

	1982 年	1998年
内径	1.0 m	0.9 m
全長	2.3 m	1.6 m
磁場均一度	40 ppm	5 ppm
(直径 50 cm)		
磁場安定性	0.1 ppm/h	0.1 ppm/h
漏れ磁場	12mx10m	4.5mx3m
ヘリウム蒸発量	500 cc/h	50 cc/h

表 1 1982 年と 1998 年における MRI 磁石の仕様の比較 3)

MRI を「専門家でない人が扱いやすいシステム」とするためには、磁気シールドコイルで漏れ磁 場を低減します(表 1)。これにより、病院への設置条件が画期的に向上しました。また、20 K や 4 K 小型冷凍機を利用して、液体ヘリウムの蒸発を抑えています。50 cc/h なら、1 年以上の注液間隔 で運転できます。

「患者フレンドリー」という観点からは、マグネットを短くする努力がなされました。患者によ っては、長いボアに恐怖感を覚えます。そのため、2.3 mから 1.6 mに短縮され、最近では 1.5 m 以下になっています。

「超電導マグネット技術」から見ると、MRIマグネットには、①高い電流密度、②クエンチしな いこと、③クエンチしてもコイルが損傷しないこと、などの性能が要求されます 4。フォルマール 被覆 NbTi 線の密巻きコイルにより電流密度を向上させます(①)。ポリマーで含浸してクエンチを 防ぎます(②)。また、コイル間ジョイント部に高電圧が生じアークが発生しない様に、コイルには 個別の保護抵抗を取り付けます(③)。

開発品レベルでは、MgB2線と小型冷凍機を用いて液体へリウム不要とした MRI や、Bi 系高温超 伝導(HTS)を用いた頭部イメージング用の3 TMRI などの開発が進んでいます。いずれも液体へ リウムを使用しないことが特徴で、今後の技術が進む方向を示唆しています。但し、HTS コイルで は超電導接続技術が開発されていないので、安定な永久電流モード運転ができないことが課題です。 フランスで開発中の 11.75 TMRI は巨大すぎる印象があります。ReBCO を用いればコンパクトな 11.75 TMRI も可能で、この面からの開発も課題です。

2. NMR

NMR は、有機材料、タンパク質、無機材料な どの構造情報の取得に利用されており、国内で 約 2,000 台が稼働しています。NMR スペクト ルの SN 比は磁場の 1.5 乗に比例するので、良 質なスペクトルを得るには高磁場が必須です。 図3にNMRマグネット磁場の推移を示します。 NMR マグネットでは、磁場の強さを対応する 水素核 (¹H) の NMR 周波数で表します。例え ば、2.35 T は 100 MHz に対応します。

80年代に、筆者は高磁場マグネットの開発に

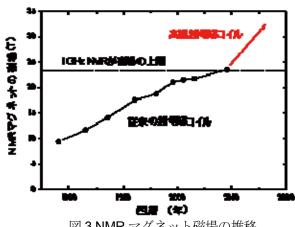


図3NMRマグネット磁場の推移



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

従事していました。すでに Nb_3Sn 複合多芯線は実用化されており、 Nb_3Sn マグネットも製作されていましたが、12 T 程度が磁場の限界でした。高磁場能力では、 Nb_3Sn 拡散テープのコイルに及ばなかったことを思い出します。但し、 Nb_3Sn 拡散テープでは磁化による磁場が大きく、磁場が時間変動するので NMR への適用は難しい線材でした。この状況を打ち破ったのは、太刀川らにより開発された Ti 添加 Nb_3Sn 線材です(1982 年) $^{5)$ 。これにより B_{c2} が 25 T 以上(@4.2 K)にまで向上しました。超流動へリウム冷却の導入も、大きなインパクトがありました。東北大学と東芝は $Nb_3Sn/NbTi$ コイルを超流動へリウムで冷却し高磁場の発生に成功しました。これらの技術と Nb_3Sn の補強線材や低銅比の Nb_3Sn 線材の開発により、20 T を超える磁場が実現可能になりました。現在、低温超電導(LTS)マグネットでは 23.5 T が実現しています。今後期待されるイノベーションの核は HTS コイルです。最近、ReBCO コイルを特性劣化なしで製作する技術が進み、LTS コイルとの組み合わせで 24 $T^{7)$ 、水冷コイルとの組み合わせで 35.4 $T^{8)}$ が可能になりました。

ここで NMR マグネットに話を戻しましょう。NMR マグネットの磁場の推移は、高磁場マグネットの開発と軌を一にしています。当初は NbTi マグネットが使用され、400 MHz (9.4 T) が上限でした。Ti 添加 Nb $_3$ Sn コイルにより、これが 700 MHz (16.5T) まで増加しました。更に超流動ヘリウム冷却により 800 MHz (18.8 T) 以上の磁場が可能になりました。図 4 に理化学研究所の 800 MHz (18.8 T) NMR を示します。NMR の最高磁場は 1 GHz (23.5 T) で、フランスにあります。わが国でも、920 MHz (21.6 T) と 930 MHz (21.9 T) の NMR を開発しています 9 。

NMR マグネットでも、「NMR スペクトルの要求」 から磁場の均一性(1ppb)や、時間的な安定性 (0.1ppb) が必要です。仕様は MRI よりはるかに厳 しいですが、これらを満たさなければ、良い品質の スペクトルを得ることができません。均一磁場を作 る主コイルと磁気シールドコイルの形状を決め、数 十組の補正コイルで不均一磁場成分を補正します。 永久電流の減衰率を 10ppb/時以下にするために は、Nb₃Sn の超伝導接続技術が必要です。これが高 磁場 NMR の最も重要な技術ですが、メーカのノウ ハウとして公開されていないものです。NMRでは、 サンプルに含まれる重水素核の NMR 信号から磁場 を求め、磁場を一定値に保つシステム(磁場ロック システム)を用いて、サンプル周辺の磁場の安定性 を更に数桁向上させます。マグネットが数 Hz から 数 100Hz で機械振動するとスペクトルにサイドバン ドが生じ、スペクトルの品質が劣化します。これを 防ぐために、マグネットを除振台にのせ地面からの



図 4 理化学研究所の 800 MHz NMR

振動をカットします。図4でマグネットが脚で支えられていますが、これが除振台です。

「専門家でない人が扱いやすいシステム」にするためには、NMRでも漏れ磁場の低減が重要です。例えば、最近の800 MHz (18.8T) NMR機では、5 ガウスラインは、横方向約1.5 m、縦方向約2.5 m と狭いので、装置の有効的な占有面積を低減できます。NMRはスペクトルの分解能が高くMRIに比べてはるかに振動を嫌うので、冷却に小型冷凍機は使用できません。低熱侵入クライオスタットによりヘリウムの蒸発を抑制するクラッシックな手法でヘリウム蒸発量を抑制しています。ヘリウム蒸発量は50 cc/時なので、数か月に一度の再注液で運転できます。800 MHz以上の超高磁場マグネットでは超流動ヘリウム冷却用に熱交換器を減圧するので、ヘリウム蒸発量は200 cc/時に増加します。



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

「超電導マグネット技術」の観点からは MRI と同様に、①高い電流密度、②クエンチしないこと、③クエンチしてもコイルが損傷しないことなどが重要です。 NbTi コイルのクエンチ時に Nb₃Sn コイルに電流が誘導され、電磁応力で線材が損傷を受けないように、クエンチ時に Nb₃Sn コイルを強制的にクエンチさせる場合もあります。

現在までの NMR 磁場の限界は 1 GHz (23.5 T) です。これより強い磁場の NMR マグネットを作るには HTS コイルが必要です ¹⁰⁾。 HTS による超 1GHzNMR の開発は世界で競争になっています。わが国でも、筆者も参加して JST のプロジェクトで Bi 系 HTS コイルを用いた開発が進められています。HTS コイルでは永久電流モード運転は不可能であり、外部電源通電運転になります。この場合、磁場の時間的な安定度を得る技術が重要です。我々のプロジェクトでは既に技術を確立しており、超 1GHzNMR の実現が目前に来ています。今後、ReBCO コイルによる超高磁場化と超コンパクト化を組み合わせることで、コンパクトな 1.2 GHz (28.2 T) クラスの NMR が実現する日もそう遠くないものと考えています。

3. シリコン単結晶引き上げ装置

LSI の基板に用いるシリコン単結晶は石英のるつぼにシリコン多結晶を溶かし、種結晶をつけて静かに回転しながら引き揚げて製造します。単結晶の直径が大きいほど溶融液量が増え、対流が強くなります。その結果、液温が不安定になると共に、るつぼからの酸素の溶け込み量が増加し問題が生じます。超伝導磁石の磁場を加えることで対流を抑制でき品質を制御できます。これを MCZ 法と呼びますが、300 mm 径単結晶の様に大きな直径になるほど効果があると言われています。スプリットコイルで溶融液に数千ガウスの横向き磁場を加え、シリコンの対流を防ぎます 11)。現在のシリコン単結晶の生産量からみて、かなりの台数が導入されているものと予想されますが、詳細は公表されていません。この場合にも、小型冷凍機を用いたヘリウム蒸発量の抑制や、漏れ磁場の低減など「専門家でない人が扱いやすいシステム」にする努力がなされています。

開発品レベルでは、Bi2223線材を用いて冷凍機で冷却する単結晶引き上げ装置用の HTS マグネットの開発が実施されています。

4. ヘリウムフリーのマグネット

90 年代末にヘリウムフリーの Nb₃Sn/NbTi 高磁場マグネットが開発されました(図 5) ¹²⁾。4 K の小型冷凍機で冷却し、ヘリウムを不要とする技術です。ヘリウム槽がないのでクライオスタットが驚くほど小さくなること、ヘリウムが蒸発しないのでクエンチに気がつかないことなど、開発者も驚くようなことがたくさんありました。ヘリウムフリーのマグネットは今では世界に広がり、ポピュラーな製品になっています。2006 年には東北大学が、高温超電導線材と組み合わせて 18.1 T の磁場の発生に成功しています。スタンドアローンの超電導機器の究極の姿として、また HTS コイルへの今後の拡張性を考慮して、あえて説明に加えさせて頂きました。



図 5 冷凍機冷却マグネット ¹²⁾

5. まとめ

MRI や NMR の様にスタンドアローンで市販化されている装置は、(イ) 代替技術がない、(ロ) 目的にマッチした特別の仕様を満たしている、(ハ) 一般ユーザが使いやすい、という 3 つの特徴を持っています。これらは、今後、超電導機器の製品化が成功するために大切なポイントを示唆しているものと考えています。



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

参考文献:

- 1. P.C.Lauterbur, Nature 242, p190 (1973).
- 2. http://www.toshiba-medical.co.jp/tmd/products/mri/index.html
- 3. 清水道夫 「MRI 用超電導マグネットの現状」 2005 年度第3回超伝導応用研究会シンポジウム.
- 4. H. Maeda, M. Urata, T. Wada, T. Yazawa and A. Sato, IEEE Trans. on Magnetics 25, p1763 (1989).
- 5. 太刀川恭治、低温工学 45、p88 (2010)
- 6. K. Watanabe *et al.*, Science Reports of the Research Institutes, Tohoku University 33, p297 (1986).
- 7. S. Matsumoto et al., Superconducting Science and Technology, 25, 025017 (2012).
- 8. Ulf P. Trociewitz et al., Appl. Phys. Lett. 99, 202506 (2011).
- 9. T. Kiyoshi et al., IEEE Trans. Appl. Superconduct. 14, p1608 (2004).
- 10. T. Kiyoshi et al., IEEE Trans. Appl. Superconductivity 18, p860 (2008).
- 11. 栗山透、佐々木高士、浦田昌身、東芝レビュー、53、p39 (1998).
- 12. 栗山透、前田秀明、金属、70, p265 (2000).



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

読者の広場

Q&A

Q:「手のひらに載る小型・最軽量の3テスラ高温超電導バルク磁石を開発 ~新着磁技術により小型・軽量化と低消費電力化を実現~」という新聞記事がありましたが、どういう特徴を有しているのでしょうか?

A: 従来、磁気力を利用してナノサイズの磁性粒子や磁性細胞等を磁気誘導する医用応用磁石には、常電導、超電導ソレノイド磁石や超電導バルク磁石が用いられていたが、比較的大掛かりな磁石システムが用いられており、実用の面で制限が多かった。今回、(株)日立製作所では、強い磁気力を誰でも、どこでも、手軽に利用できる磁石に対する潜在的ニーズに応えるべく、新着磁技術により小型、軽量化を図り、手のひらに載るサイズの3テスラ級の冷凍機一体型超電導バルク磁石を世界で初めて実現した。また、低温磁石部への熱侵入量を小さくし超電導を維持するために必要な冷凍機の定格消費電力を、ノートパソコン並みの23Wに大幅に低減した。

今回、開発した技術の特長は以下の通り。

1. 新着磁技術

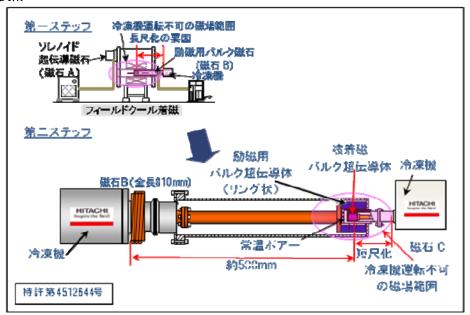


図1 新着磁法による着磁方法の説明図

図1に示すように、フィールド・クール (FC) 法により、高磁場のソレノイド型超電導磁石 (磁石A) で高温超電導バルク体を内蔵した着磁用の冷凍機一体型高温超電導バルク磁石 (磁石B) を着磁する場合、磁石Bの冷凍機は、磁石Aの約100mTの漏洩磁場空間外に配置しなければ運転できず、磁石Aの磁場中心に配置するバルク超電導体と冷凍機は、今回約500mm以上離す必要があった。このため、バルク磁石を小型化できない大きな要因であった。しかし、漏洩磁場空間が狭い磁石Bの磁場を利用して超小型の冷凍機一体型高温超電導バルク磁石 (磁石C) を着磁すれば、超電導バルク体と冷凍機をおよそ百数+mmまで近づけられることから、磁石Cの大幅な短尺化を実現した。本開発では、図2に示すように高温超電導バルク体 (Gd-Ba-Cu-O、直径20mm、厚さ20



公益財団法人 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 Fax: 03-3536-5717

mm)を内蔵した磁石 C を、従来機サイズの約 10 分の 1 (当社比)に小型化した。また、磁石本体質量も従来機の約 5 分の 1 (当社比)となる 1.8 kg の軽量化を実現し、磁石の移動操作性を大幅に向上させた。磁界 4.9 テスラの磁石 B の常温ボアーで着磁した磁石 C の最大捕捉磁束密度は、図 3 に示すように室温部の真空容器表面で 3.15 テスラであった。



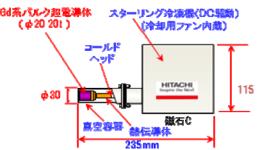


図 2 超小型超電導バルク磁石(磁石 C)の 外観写真(左)および構造(右)

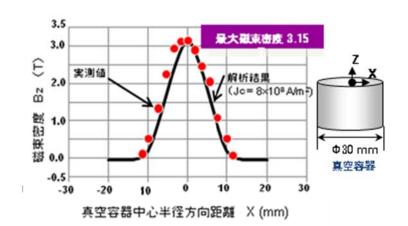


図3 磁石Bで着磁した磁石Cの真空容器表面における捕捉磁束密度Bz分布

2. 低消費電力化技術

前項の小型・短尺化および弊社の極低温断熱技術により、40 K台に冷却する低温部への熱侵入量を従来機の約10分の1(当社比)に低減した。これにより、磁石Cのスターリング冷凍機の定格運転消費電力を従来の20分の1以下(当社比)の23 Wに低減し、大幅な低消費電力化を実現した。これにより、バッテリーを内蔵した機内持込み可能サイズのキャリーバッグで、外部電源無しでの輸送が可能になった。

今後、長期信頼性を検証するとともに、応用分野への積極的な PR 活動を推進し、早期製品化を図る。

回答者:株式会社日立製作所 日立研究所 佐保典英 様

「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。」