

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7月2**日発行

### 掲載内容(サマリー):

#### 特集:超電導技術動向報告会報告

- ○期待されるイットリウム系線材の 実用化とその応用
- ○線材開発の現状と今後
- ○第三世代線材への期待
- ○超電導電力機器への期待
- ○イットリウム系超電導電力機器技術開発の状況と今後について
- ○多素子化で広がる超電導検出器の世界
- ○鉄系超電導材料の研究動向
- ○次世代鉄道システムへの超電導応用
- ○超電導線の通則に関する国際標準化の進捗と今後の超電導関連標準化
- ○JST/S-イノベにおける超電導システムの開発
- ○超電導関連 2012 年 7-8 月の催し物案内
- ○新聞ヘッドライン(5/18-6/20)
- ○超電導速報─世界の動き(2012年5月)
- ○「ICEC24-ICMC2012」報告
- ○「日韓高温超電導ワークショップ」報告
- ○隔月連載記事-超電導磁石開発のこれまでとこれから(その3)
- ○隔月連載記事ーやさしい人工ピンのおはなし(その4)
- ○読者の広場(Q&A) 「超電導の新現象発見 磁力線、物質をすり抜け」という記事がありましたが、どういう現象が発見されたのでしょうか? また、どういう応用が期待されるでしょうか?

#### 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



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: 03-3536-7318

特集:超電導技術動向報告会報告

「期待されるイットリウム系線材の実用化とその応用 」

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 所長 塩原 融

#### はじめに

昨年3月11日の東日本大震災、巨大津波、原子力発電所事故により、我が国は、これまで経験したことのない未曾有の国難に直面しています。このトリプル災害からの復興が焦眉の急ではありますが、リーマンショック以降の世界的な金融危機に端を発した円高・経済不況が今なお継続し、経済・雇用対策、社会保障、地球環境問題が未解決の状況にあります。復興はもとより省エネ機器、再生可能エネルギー導入促進もこれまで以上に切望されています。超電導技術に関しては、経済産業省資源エネルギー庁及び独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が策定した「省エネルギー技術戦略 2011」の中で、今後の省エネルギー技術の展開として、我が国の卓越した省エネルギー技術の飛躍に向けて、「世界をリードしている日本の超電導技術をコア技術として、省エネルギーシステムに仕上げるなどの戦略的アプローチが望まれる」と記述されています。このように我が国の超電導技術は省エネルギー革新技術の切り札になるとともに、震災復興にも役立つものと大いに期待されています。

今年は、1987年2月にヒューストン大学のポール・チュー教授らにより初めて超電導転移温度が液体窒素温度を越える Y-Ba-Cu-O 系超電導体(以後 Y 系と称す)の発見から二十五周年を迎えるとともに、1962年に、当時ケンブリッジ大学の大学院生であったブライアン・ジョセフソンによって理論的に導かれ、ベル研究所のアンダーソンとローウェルによるジョセフソン効果の実験的検証から五十周年を迎える記念すべき年にあたります。

今回開催された「超電導技術動向報告会 2012」においては、この記念すべき年を機会に、「YBCO 発見 25 周年、超電導の更なる展開」を副題として、今後の超電導への更なる期待を、高温超電導線材、電力機器等エネルギー応用、薄膜電子デバイスを含めた超電導機器応用の分野において第一線で活躍されている先生方ならびに研究者から報告されました。

#### 1. 超電導現象発見以降の線材開発の進展

超電導臨界温度が液体窒素の大気圧下での沸点(77 K)を超えたことで、世界中を駆け巡った高温超電導フィーバーの起因となったイットリウム(YBCO)系高温超電導発見 25 周年を振り返ると、当初この酸化物系超電導材料がセラミックスであることから、その脆性を回避する銀シース線材の作製から試みられた。しかし、Y系超電導線材の臨界電流密度の値が低かったことから、将来の応用に対して危惧する意見が噴出した。Y系超電導材料の線材化においては、結晶粒の面内高配向化技術の重要性が認識され、その研究開発から進められた。結晶粒界弱結合の課題は、結晶粒高配向化技術により解決が可能であるとの研究成果が出て、Y系超電導線材の本格的研究開発競争が世界中で繰り広げられた。最近では、IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) 法と RABITS (Rolling Assisted Bi-axially Textured Substrate) 法が結晶粒の配向化技術として採用されている。特にIBAD 法では(株)フジクラによるIBAD 法の開発に続き、ISTEC による PLD (Pulsed Laser Deposition) 法等との組み合わせで、より高速に中間層を構成する結晶粒の面内高配向が得られる技術が開発され、長尺化が加速されてきた。最近では超電導層をホットウォール型 RTR (Reel to Reel) 加熱方式



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: 03-3536-7318

を用いた PLD 法による成膜技術により長さ方向での & の均一性が±1.35 %の実績もフジクラから報告されている。

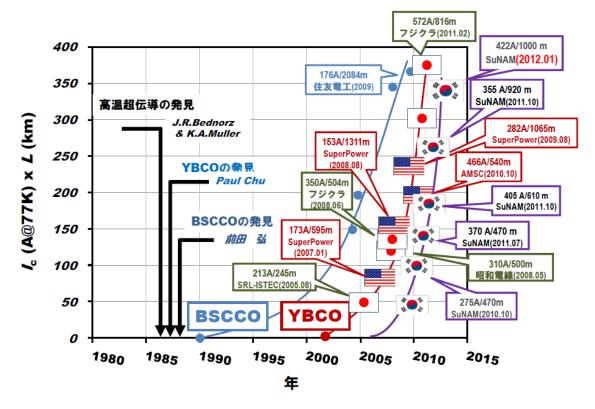


図1 高温超電導線材の研究開発の進展

図1に臨界電流( $I_c$ )と線材単長 (L) の積の値を指標として、高温超電導材料の発見後のBi系及びY系超電導線材の開発の進展を示す。高温超電導材料発見当初はBi 系銀シース超電導線材での開発が進み、その後Y系超電導線材の開発が急速に進んだ状況が伺える。特に、最近の韓国におけるIBAD基板上のRCE-DR法(Reactive Co-Evaporation by Deposition and Reaction;反応性共蒸着法)による超電導層の成膜による線材開発の成果が著しいことも伺える。尚、ほぼ同一の線材断面積約1.1 mm²(Bi系:4.4 mm幅x250μmp, Y系:10 mm幅x110 pmp での臨界電流(@77K, s.f.)で比較した。

尚、現時点では臨界電流(I<sub>c</sub>) と線材単長(L) の積の値では、我が国の(株) フジクラが世界一の実績を発表しており、線材開発では日本が世界をリードしていることが伺える。今後更なる性能向上、長尺化、歩留り向上、低コスト化、量産化が進められることを期待される。

#### 2. Y 系超電導電力機器開発

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの受託事業としての「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトでは、図2に示すように超電導電力機器による都市部への大容量安定供給を目指し、Y系超電導材料を用いた超電導電力貯蔵システム(SMES)、電力ケーブルおよび変圧器に関する技術開発と共に、それらの機器に使用されるY系超電導線材と国際標準化に向けた研究開発を実施する国家プロジェクトが平成20年度から平成24年度までの5ヶ年計画で進められている。今年、プロジェクト最終年度を迎え、表1に示す最終目標の達成を目指して研究を進めている。



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: 03-3536-7318

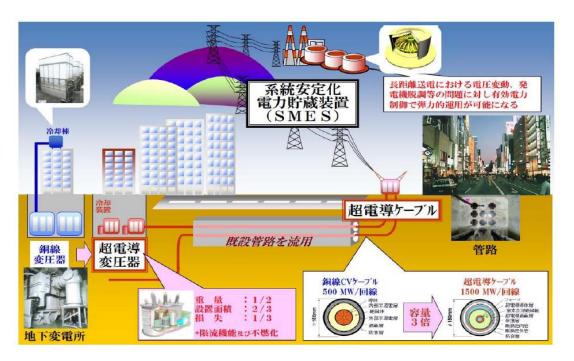


図2 超電導電力機器による都市部への大容量安定供給の概念図

表 1 「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおける研究開発目標

研究開発テーマ	研究開発目標
SMES SMES	2GJ級SMESの開発を見通す高磁界かつコンパクトコイル構成技術の開発並びにメンテナンスを容易とするコイル伝導冷却技術開発を行った上で、システムに必要となるコイル高強度化手法や設計手法等の実用性を検証する。
ケーブル	大電流ケーブルシステム(66kV-5kA、三相一括、15m、 直径150mm管路収納可能、終端接続部)及び高電圧 ケーブルシステム(275kV-3kA、単相単心、30m、直径 150mm、中間接続部、終端接続部)を作製し、送電損 失(現行ケーブルの1/2~1/3)を含めた性能検証を行う。
変圧器	66/6kV,20MVA級超電導変圧器システムが成立することを検証するため、2MVA級超電導変圧器モデルを作製・性能検証を行うとともに、数百kVA級変圧器により限流機能を検証する。
電力機器用線材開発	プロジェクト終了後の各機器の実用化技術開発時に必要な仕様を満たすY系線材の作製技術の開発を行った上で、この線材を安定に製造できる技術とともに各電力機器の導入・普及時(2020年頃)に必要な仕様を満たす線材の作製技術を開発する。

### 2.1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

2 GJ級SMESの開発を見通すため、高機能かつ高耐久性SMESコイル要素技術開発を進めている。コイル通電特性の劣化現象を解決するため、検証用の小規模コイルを用いてコイルの製



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: 03-3536-7318

造プロセス毎に特性劣化の評価と検討を行ない、線材絶縁及びコイル含浸プロセスに新たな手法を適用して最適化することでコイルの劣化原因であるコイル内部応力を大幅に低減できることを実証し、通電特性が劣化しない高機能かつ高耐久性コイルの設計手法を確立した。

#### 2.2 超電導電力ケーブルの研究開発

66kV 5kA大電流ケーブル及び275kV 3kA高電圧ケーブルの開発を見通すため、①大電流・低交流損失ケーブル化技術開発、②高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術開発、③超電導電力ケーブル対応線材開発、④66 kV大電流ケーブルシステム検証、及び⑤275 kV高電圧ケーブルシステム検証の研究開発を進めている。

大電流・低交流損失ケーブル化技術開発では4層導体設計にて最外層に2 mm幅線材を適用することで、交流損失を大幅に低減し74 Kにおいて0.8W/m-相@5kAを確認した。高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術開発では短尺ケーブルコアモデルを作製し、交流損失や中間接続部における過電流通電時の性能等を確認することでシステム設計の妥当性を検証した。さらに、超電導電力ケーブルシステム検証における課通電試験設備の製造等を最終年度の検証試験に備えて、準備を進めている。

#### 2.3 超電導変圧器の研究開発

66/6kV 20MVA級超電導配電用変圧器の開発を見通すため、①超電導変圧器巻線技術開発、 ②冷却システム技術開発、③限流機能付加技術開発、④超電導変圧器対応線材開発、⑤2 MVA 級超電導変圧器モデル検証の研究開発を進めている。

低損失化巻線モデルの試作・実証、小型・高効率な膨張タービンとターボ式圧縮機等を組み合わせた冷凍機・冷却システムの試作、及び400 kVA限流機能モデルでの過電流試験による限流機能検証等の成果を得ている。

### 2.4 超電導電力機器用線材の研究開発

超電導電力機器の長期信頼性試験等の実用化技術開発に必要な線材の安定製造技術、及び 2020年頃の普及時に要求される線材製造技術の開発を目指して、①線材特性の把握、②磁場中高臨界電流 (I<sub>c</sub>) 線材作製技術開発、③低交流損失線材作製技術開発、④高強度・高工業的臨界電流密度 (J<sub>e</sub>) 線材作製技術開発、⑤低コスト・歩留向上技術開発の研究開発を進めている。これまでの具体的研究開発成果は以下の通りである。

①線材特性の把握では、主に変圧器を対象に製作環境及び課電、過電流等の運転環境に対するヒアリングを実施し、線材剥離の課題に対し、強度と剥離起点の関係を明らかにするとともにMODベッド層の剥離強度を改善した。

②磁場中高 $I_c$ 線材開発については、パルスレーザ蒸着 (PLD) 法において人工ピン止め点材料としてBaHfO $_3$ を添加した材料で、短尺ながら85A/cm幅 (@77 K,3 T) を実現した。また、有機金属熱分解 (MOD) 法においてY(Gd)BCO超電導膜にBaZrO $_3$ を人工ピン止め点として導入した膜で中間熱処理工程の適用により短尺ながら56A/cm幅 (@77 K,3 T) を実現した。

③低交流損失線材開発では、PLD法により短尺試料において5 mm幅線材の10分割加工を実施し均一なフィラメント $I_c$ ( $16\sim19A@77$  K,s.f.)を確認し、無分割線材に比して交流損失が1/10 になることを確認した。また、MOD法において端部の膜厚変動を抑制する新たな塗布方法を開発し、幅方向での膜厚の均一化を実現した。さらに、5 mm幅線材の10分割を実施し、均一なフィラメント幅 $(0.31\sim0.38$  mm)を確認した。

④高強度・高 J<sub>e</sub> 線材開発では、最終目標達成に必要な高 J<sub>c</sub> 化 (550 A/cm幅以上@77 K,s.f.) に取り組み、PLD法及びMOD法において、それぞれ、短尺ながら700 A/cm幅及び636 A/cm幅



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: 03-3536-7318

(@77K,s.f.) を実現した。

⑤低コスト・歩留り向上技術開発では、PLD法により、71 m長線材において30 m/hの速度で460A/cm幅(@77 K,s.f.) を確認し、技術コストで2.4円/Amを実現した。また、MOD法により、50 m長線材において432A/cm幅(@77K,s.f.)を確認し、1.9円/Amを実現した。さらに、実用化技術開発用線材安定製造技術開発としては、変圧器対応中間目標である300 A/cm幅@65 K、0.02 Tの特性に関して、単長240~318 m線材で総長5.6 km線材を対象に100 %の歩留りを確認した。

#### 3. 研究開発の今後の展開

Y系超電導線材を用いた超電導電力機器開発プロジェクトは最終年度に入り、各テーマ(SMES、ケーブル、変圧器、Y系超電導線材)において、最終目標を早期に達成し、プロジェクト終了後の実用化技術開発(長期信頼性などの実証試験)、2020年頃以降の導入・普及へという超電導電力機器の実用化への基盤技術の確立を目指し、研究開発を進めている。

Y 系超電導線材の特長である、高温・高磁場中での高臨界電流特性を利用した種々の応用機器開発も大いに期待されている。

再生可能エネルギー、自然エネルギー利用、CO2排出削減の目的での超電導風力発電機の開発も、Y系超電導線材を用いることにより、小型軽量化、大容量化が可能となることから、米国、欧州で開発が進められようとしている。遠浅の海岸線が少ない我が国の特徴から、日本における風力発電への課題(大型化、利用・稼働率、洋上利用、コスト低減等)の解決には、浮体式洋上風力発電の導入が期待されており、研究開発が進められている(図 3 参照)。浮体式支持構造のコストを考慮すると、経済的にも常電導風力発電機では実現が困難な風力発電機の超大型化(>15 MW)が不可欠であり、鉄心フリー発電機による軽量化、同期発電機による効率向上、メンテナンスコスト低減のための増速ギア(変速機)レス化が重要であり、界磁子をY系超電導電磁石に置き換えることを目的とした開発の重要性が認識され、世界中で検討されつつある。鉄心フリー・高効率・ギアレス超電導風力同期発電機による超大型化・軽量化は図4に示すように、現時点で既にある程度見通せる域に達している。我が国が世界をリードしている高温超電導技術と浮体式風力発電技術の融合が、大いに期待される。

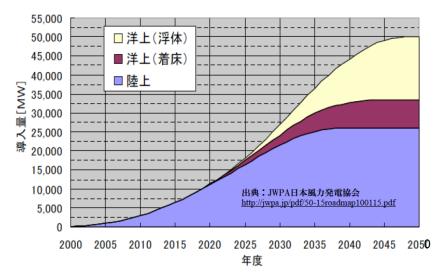


図3 日本における風力発電導入ロードマップ

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: 03-3536-7318

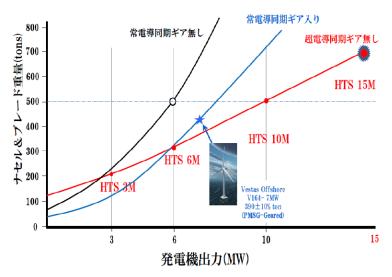


図4 風力発電機の高温超電導化の効果

高齢化社会が進むと共に、食生活の変化等により、癌患者、癌による死亡が増加している。しかし、我が国の放射線治療を受ける患者数は欧米諸国と比較して低い割合(25%程度)にある。政府の癌対策基本計画では、放射線治療法の推進とともに、治療機器の研究開発を推進することとしている。

外科治療と同程度以上の治療効果を有し、 図5に示すように癌病巣部にのみ放射線線量 の集中が可能であることから、生体内への放 射線侵襲による負担が少なく、また、図6に 示す治療部位に対して、これまで既に 5,000 人を越える治療実績のある重粒子線治療に対 し、治療に用いる加速器システムについて高 温超電導技術等を用いることによる大幅な小 型化、省エネ化をはかった低コスト医療用重 粒子線加速器を開発し、放射線療法のさらな る推進を図るとともに、放射線治療システム 産業の国際競争力強化を図ることが検討され ている。世界的にも最も進んだ重粒子線医療 施設を有している放医研センター病院のシン クロトロン型重粒子線加速器(HIMAC)は図 7 に示すように、サッカー場と同程度の大き さで、且つ、電力消費が電磁石の励磁や冷却 等のため約5億円/年に及んでいる。この電 力消費を超電導電磁石により、冷却を加味し ても約 25 %まで低減が期待できる試算がな されている。

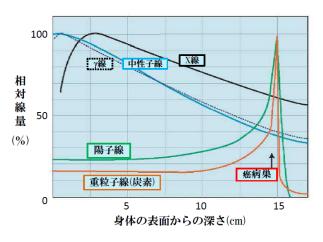


図5 各種放射線の生体内における線量分布

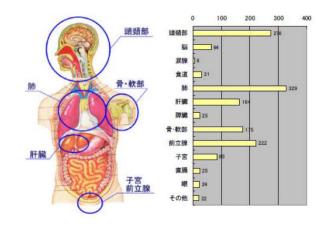


図 6 重粒子線加速器癌治療装置による治療実績部位 (HIMAC: Heavy Iron Medical Accelerator in Chiba の例)



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: 03-3536-7318

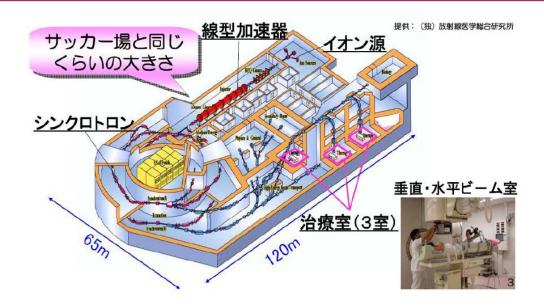


図7 放射線医学総合研究所に導入されている重粒子線癌治療装置 (HIMAC: "Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba")

世界をリードしている日本の高温超電導技術、加速器技術を融合し、重粒子線加速器用高磁場電磁石を開発するとともに加速器イオン入射部、加速部、ビーム出射部、ガントリー等の飛躍的小型化をはかり、さらにこれら要素機器を組み合わせ、加速ビーム制御技術を開発し、従来システムに対し大幅に小型化、省エネ化をはかった低コスト小型医療用重粒子線加速器を実現する計画の検討が進められている。

これまで、高温超電導線材の開発は線材性能としての臨界電流と長さ及びコストを指標として開発が進められ、また、常電導機器の置き換えによる超電導機器の機能検証も進められてきた。今後の線材研究開発は、これまでの機能検証の成果を踏まえ、競合機器・技術に対しての絶対的優位性の確立が求められる。さらに、今後は発生磁場の時間的・空間的均一性が要求され、電力機器応用とは異なる線材の磁場中性能の大幅な向上、性能均一性、歩留り向上、低コスト化も求められる。

尚、線材の低コスト化に関しては、材料費及び設備費(導入・維持費)の限界から 2,000~3,000 円/m を目指すとともに、Am (アンペア・メートル) 単価での低コスト化は性能向上が必須となる。線材の今後の開発は、昨年の ISS-2011 で、日本が最初に提案した以下の目標を満足する第 3 世代 (3G) 超電導線材の開発により、世界をリードする超電導技術に繋がるものと期待される。

- 超高臨界電流: I<sub>c</sub> 、e.g. 2,000 A/cm-w 幅 , 2 μm-厚 、(J<sub>c</sub> > 10 MA/cm<sup>2</sup>) @77 K, s.f.
- 高磁場中の超高臨界電流: I<sub>c, min</sub>-B、高 B<sub>c2</sub>線材 e.g. 500 A /cm 幅 @65 K, 5 T
- 結晶粒配向度: Δφ< 2°</li>
- 性能均一性:線材幅&長方向均一性 0.5%以下、線材間ばらつき均一性 1.0%以下
- 低コスト化:1円/Am@65K,4T

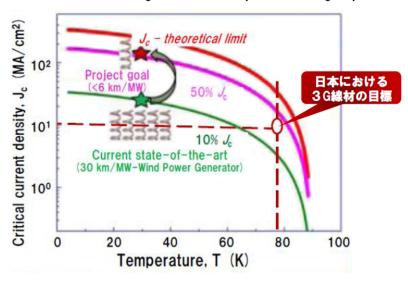
第3世代線材の開発に関しては、米国においても今年に入り、図8に示す Bi-axial Strain Engineered 3G-Superconducting Tape の開発がエネルギー省(DOE)のARPA-E プロジェクトの大型風力発電機の開発の中で進めることが発表されている。米国では理論限界(超電導対破壊電流)



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: 03-3536-7318

の50%の 臨界電流密度を目標としており、日本の第3世代(3G)線材の目標の約30%を越える目標を設定している。韓国においても、Y系線材開発の新規プロジェクトの計画が実現するとのことでもあり、今後も日米韓での超電導線材開発競争が繰り広げられるものと考えられる。

#### Bi-axial Strain Engineered 3G-Superconducting Tape



出典:Mark John, Program Director ARPA-E, DOE, "Rare-Earth and Critical Materials Research at DOE"を基に作成。 http://www.l.eere.energy.gov/manufacturing/pdfs/critical materials workshop presentations.pdf

図8 米国エネルギー省 (DOE) における今後の超電導線材開発の目標 (ARPA-E; Advanced Research Projects Agency – Energy)

以上、超電導技術は機器の高効率化、コンパクト化等のメリットにより、地球環境問題である CO<sub>2</sub> 削減、省エネルギー、医療分野等に大きく寄与できる技術であると共に、現状の日本の優位性を維持し、成長戦略分野としても期待されている。今後、更なる技術開発の進展と共に、2020 年頃までに、実用化ならびに超電導産業の事業化に繋がるべく、オールジャパン体制での取り組みが重要である。

本稿は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施している「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトの成果を一部引用している。



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:超電導技術動向報告会報告 「線材開発の現状と今後」

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

これまで Y 系超電導線材開発上一つの重要な指標である lexL 値に関して、現在は㈱フジクラが到達した 467(kAm) が世界最高値である。従来、この値は日米の激しい開発競争の中で進展してきたが、最近、この勢力図が大きく変化してきている。それが、韓国 SuNAM 社の台頭である。昨年の秋以降、急激に長尺線材の開発が進み、今年の 1 月には、上述のフジクラ成果に次ぐ世界第 2 位の lexL 値である 422(kAm) が報告されている。国の政策で強化しているとの話もあり、今後も日米に次ぐ第三極として更に台頭してくると考えられる。

一方で一定の LxL を達成した日米における線材開発の軸足は、最近では各種の応用機器を強く意 識した線材の機能向上技術開発にシフトしている。具体的には、送電ケーブル、変圧器では低い交 流損失が、SMES、NMR 等では高磁場特性、回転機系では更に機械的に高い強度が必要とされてい る。また、共通して低コスト線材が求められることは自明であり、これらの各要素に対する性能向 上を目的とした技術開発に力が注がれているのである。磁場中特性向上に関しては、最近、従来の BaZrO<sub>3</sub>等に比べて、より有効な人工ピン止め材料である BaHfO<sub>3</sub> が見出されている。この材料を添 加したターゲットを用い、PLD 法により作製した超電導線材では、他の材料で観られる厚膜時の磁 場中特性低下が見られず、2.9 μm 厚線材で、85A/cm 幅@77K,3T という非常に高い特性を得ている。 この起源として、BaHfO<sub>3</sub>は、ロッド長が短く比較的等方的な組織で、膜厚に伴う組織変化が小さ いことが確認されている。また、低交流損失技術としては、スクライビング線材の作製及び加工技 術の進展が著しい。例えば、50 m 長の 5 mm 幅 MOD 線材を 5 分割スクライブ加工することで特性 低下を抑えて、損失を 1/5 に低減することができている。短尺では 10 分割で損失 1/10 にも成功し ている。更に、最近 Y 系超電導線材の課題としてクローズアップされている剥離強度に関しても系 統的な解析が進められている。異なる材料及びプロセスで作製した線材の剥離試験により、剥離の 起点の解明を行い、大別して3か所に集約されることが分かった。この中で、比較的低い剥離強度 の起源となっている MOD ベッド層のプロセス改善を行い、この層の起点を除去することで、60 MPa 以上の高い剥離強度実現に成功している。

上記の線材開発と並行して行われている機器開発の成果と合わせて、機器における Y 系線材の利点の証明ができるところまで開発は進展している。しかしながら、競合機器においても開発が進む中、圧倒的な優位性を示して多くの機器の超電導化(所謂、超電導ワールド)の実現には飛躍的な線材能力の向上が更に必要である。この線材を第三世代線材と定義し、これまでの開発の延長線上を大きく超える画期的な高性能・低コスト線材の位置付けである。この概念は、昨年秋の ISS で初めて日本から発信したものであるが、今年に入って米国でも同様の超高性能線材の必要性と開発目標の提案がなされている。具体的な特性レベルとしては、 $I_c \ge 2000$ A@77K,s.f. や  $I_c \ge 500$ A@65K,5Tなどである。ここで、ご注意いただきたい(誤解されることが多い)のが、例えば 2000 A を運転電流として使用するための開発ではないということである。エネルギー回収や  $I_c$ の限界などを考慮した運転電流があったとして、 $I_c$ の向上により大幅に負荷率低減が図られ、これに伴って交流損失が低減できる効果を期待したりするということである。また、磁場中特性向上などは、必要な電流値を熱的にも安定で冷却負荷の小さいより高温で利用できるようになる利点がある。最近では、医



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

療用等の加速器を視野に入れて、均一磁場創製のための超均一線材作製の必要性なども謳われている。更に、実用上最も重要ともいえるコスト低減も併せて、飛躍的な向上が期待されるところである。



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:超電導技術動向報告会報告

「第三世代線材への期待」

九州大学 大学院システム情報科学研究院 教授 木須隆暢

#### 1. はじめに

希土類系 (RE-123) 実用線材の開発における重要課題は、主として 1) 粒界弱結合の問題、2) 電流阻害因子の除去、3) 磁東ピン止め点の導入が挙げられる。その困難さの大きな原因の一つは、12 桁の空間スケールにわたる事象を制御する必要があることである。すなわち、磁東ピン止めを制御するナノスケールの欠陥、サブミクロンから数 10 ミクロンにおける結晶粒界の制御、電流をブロックする欠陥の除去が求められる。一方、工業製品としての線材は数 100 メートルからキロメートルに及び、再現性、品質管理の点から長周期に亘る欠陥の把握と均一性の確立が求められる。

本講演では、第二世代(2G)線材と位置づけられる RE-123線材の開発現況について述べると共に、長尺線材のナノ組織制御によって飛躍的な実用性能の向上が期待される、近い将来に実現可能な線材を第三世代(3G)線材と位置づけ、その具体的な性能について理論と実験の両面から定量的に検討し、既存線材との性能比較、さらに、マグネットを中心とした応用へのインパクトについて考察した。

#### 2. 第二世代線材の開発の進展と第三世代線材への展開

#### 2.1 面内配向性

酸化物高温超電導体における電子対の d 波対称性により、 $CuO_2$  面内の低傾角粒界の傾角の増大と共に粒界の臨界電流密度 ( $J_c$ ) は指数関数的に減少することはよく知られている  $^{10}$ 。粒内と同程度の  $J_c$  を得るためには、結晶粒界の傾角を数度以下に抑える必要がある。すなわち、高性能 RE-123線材の開発において、金属基材上に如何に高配向組織を形成するかが重要課題であった。1991年に(株)フジクラの Iijima 等により IBAD 法による 2 軸配向中間層の形成が可能となって初めて  $J_c$  値は 0.1  $IMA/cm^2$  (@77 K, s.f.) を超え、RE-123線材の開発が加速することとなる  $^{20}$ 。 その後 IBAD 層の改善や、ISTEC によって開発された中間層上の IEAD をのよっている。面内配向性の改善と共に、線材品質の目安として用いられている IEAD 基板が可能となっている。面内配向性の改善と共に、線材品質の目安として用いられている IEAD IEAD

#### 2.2 局所欠陥

結晶粒界の他、電流をブロックする欠陥が存在すると電流が迂回することにより電流分布の空間的な不均一が生じる。高温超電導体の電界 (E) -電流密度 (J) 特性はn値モデル:  $E=E_c(J/J_c)^n$  で表されるような強い非線形性を有しており、J の僅かな分布によって E は欠陥近傍に局在する  $^{3}$  。 その結果、線材内の磁東フロー損失の著しい空間分布やホットスポットを生じる。局所欠陥の原因となる因子を一つずつ解明すると共に、プロセスへのフィードバックによって、最近の線材において面内均一性は飛躍的に向上している。この結果、数 100 メートル級の長尺線において、70 cm 区間ごとに測定した臨界電流 ( $I_c$ ) 値の標準偏差は 1.35 %に収まるなど、優れた均一性を実現してい



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  $^{4)}$ 。現在の  $^{2}$ G 線材の世界トップレベルの性能として、(株) フジクラより報告されている  $^{600}$ C A/cm-w の  $^{1}$ C (@77 K, s.f.) を有する、線材長  $^{600}$ m の線材  $^{5)}$ を挙げておきたい。

以上の技術開発により、 $J_c$ 値は増大し、確かに線材の性能は向上した。しかしながら、図1に示すように、高磁界中の特性を詳細に調べると、不可逆磁界はこれまでの開発でほとんど変化していないことが分かる。RE-123線材は低磁界中では大きなn値を有しており、したがって、局所欠陥や粒界弱結合に伴う電流不均一の影響を顕著に受ける。一方、不可逆磁界近傍ではE-J特性はなだらかとなり、n値は低下することから、電界の空間分布もブロードになる。局所電界の分布の様子を低温レーザ顕微鏡で実際に観測した結果を図2に示すf0。いずれも、異なるバイアス磁界f8におけるf1。いずれも、異なるバイアス磁界f8におけるf2。に到達した際の面内の電界分布を示している。試料両端に生じる電圧は同一であっても、その内部の電界分布は大きく異なる様子が分かる。

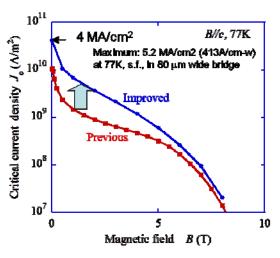


図1 面内均一性の改善による Jc-B 特性の向上

この結果から明らかなとおり、中・低磁界中では局所欠陥近傍で大きな電界が生じ、この部位がボトルネックとなることでマクロな 5 が制限される。一方、高磁界中では、低バイアス電流時にすでに磁東フロー損失発生領域のパーコレーションパスが形成されることから局所電界の集中は緩和され、局所欠陥が存在する場合も超電導層の全体的な特性によって 5 が決定されており、局所欠陥の有無はあまり影響していないことが分かる。すなわち、磁界領域によって、電流の制限因子が異なっており、中・低磁界領域では配向性、均一性を向上した高品質基板が、不可逆磁界近傍の高磁界領域では超電導層の磁界性能の向上、すなわちピン止め点の導入が本質的に重要な技術課題となると考えられる。

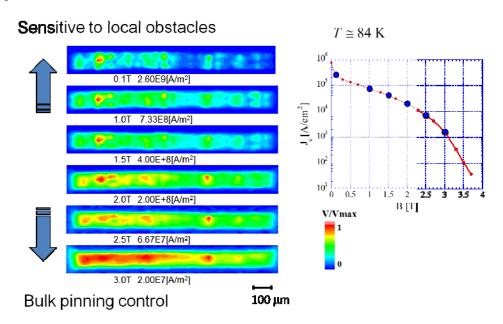


図 2 低温レーザ顕微鏡による外部磁界下の  $J_c$ 到達時における内部電界分布の比較。 挿入図は  $J_c$ -B 特性と、各イメージを観測したバイアス磁界を示す。



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

#### 2.3 磁東ピン止め点の導入による磁界中性能の向上

コヒーレンス長と同程度のナノサイズ欠陥を導入することで量子化磁束をピン止め出来ることが知られている。金属系超電導体では、使用環境下に応じてナノ組織を最適化する人工ピンニングが可能なレベルに達している。RE-123線材においても、ナノ粒子の添加や、PLD成膜時に添加物を加えることによって、ナノロッドを人為的に導入し、磁界中性能向上に有効であることが示された。近年、新しい人工ピン導入技術として注目されているのは、ISTECにより報告された、PLD成膜時にBaHfO3(BHO)を添加する方法である。短尺試料ではあるものの $T_c$ 低下の影響が少なく磁界中 $J_c$ 向上に有効であると共に、厚膜形成時にも効果的であることが示されている $T_c$ 0の有無による $T_c$ 0の有無による $T_c$ 0の有無による $T_c$ 0の増大している事がわかる。さらに、 $T_c$ 0のテープ面に対する磁界印加角度 $T_c$ 0が増大している事がわかる。さらに、 $T_c$ 0のテープ面に対する磁界印加角度 $T_c$ 0が増大している事がわかる。さらに、 $T_c$ 0のテープ面に対する磁界印加角度 $T_c$ 0が増大している事がわかる。さらに、 $T_c$ 0のテープ面に対する磁界印加角度 $T_c$ 0が増大している事がわかる。

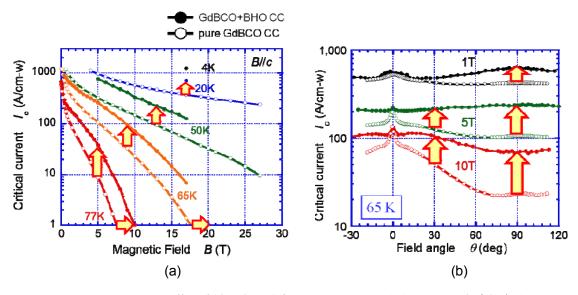


図3 BHO 人工ピン導入試料の臨界電流特性。(a) /c-B-T 特性、(b) /cの角度依存性

### 3. 第三世代線材の性能予測

前節で述べたとおり、今まさに長尺線材のナノ組織制御により飛躍的な実用性能向上の可能性が 見えてきた段階にある。本節では、現在の線材は理論限界(対破壊電流)から見てどの程度の位置 づけにあるのかについて考察し、第三世代線材として期待される具体的な性能について考察してみ る。

前節で述べた 600 A/cm-w、600 m を有する最高レベルの 2G 線材を用いて、その磁界中特性を実測し $^{8)}$ 、パーコレーションモデルを用いて通電特性を定式化 $^{9)}$ することによって、 $I_c$ の温度、磁界依存性について記述したところ、2G 線材の自己磁界中の  $J_c$  値は対破壊電流の約 10 %弱に相当する事が分かった。一方、BHO による人工ピンを導入した短尺試料の測定結果と共に、ピンの最適化によって対破壊電流の 30 %程度が実現可能と仮定し、3G 線材の特性を推定した。超電導層の膜厚を製造コストの点も考慮して 2  $\mu$ m とすると、3G 線材の 77 K 自己磁界における  $I_c$  値は、2000 A/cm-wとなる。2G 線材と 3G 線材の特性を比較したマップを図 4 に示す。ここで、線材の実用性能を示すため、基板を含む線材の有効厚さを 100  $\mu$ m として線材断面あたりの overall  $J_c$  ( $J_c$ )を示した。

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

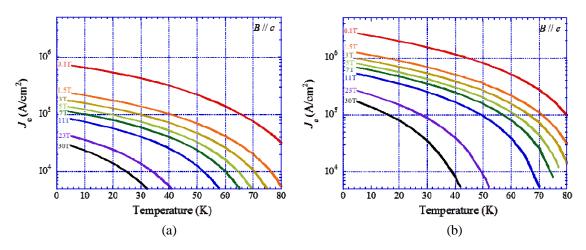


図 4 Je-T-B 特性: (a) 2G, (b) 3G 線材の特性比較

 $J_e$ -B-T 特性を他の線材のそれと比較すると、図 5 に示すとおり、3G 線材では、65 K で NbTi 線材(② 4.2 K)と、50 K において現状の Nb<sub>3</sub>Sn 線材(② 4.2 K)と同程度の磁界中性能を実現できると予測できる。同図には現状の長尺 2G 線材の特性も合わせて示している。人工ピンを導入していない現状の線材においては、NbTi と同程度の性能を実現するには 4 K までの冷却が必要であるが、高磁界性能に着目すると、20 T を超える高磁界領域においては 20 K においても Nb<sub>3</sub>Sn 線材を凌駕するレベルにあることが分かる。

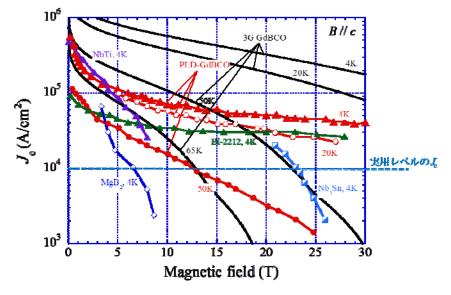


図 5 各種線材の Je-B 特性の比較

### 4. マグネット応用におけるインパクト

上述した線材の性能を基に、コイル巻線に適用した際の性能について検討を行った。必要となる線材長を目的関数として、中心磁界  $B_0$ と動作温度 T に対し 1)線材の J (E, T, B,  $\theta$ ,  $\varepsilon$ )特性 (ここで $\varepsilon$  は線材の長手方向の一軸歪を示す)と共に、2)コイルの電磁力を考慮した構造解析と 3)磁束



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

フロー損失を考慮した熱解析とを練成解析  $^{10}$  を行って、最適のコイル形状を求めた。ここでコイルの内径を  $^{30}$  mm 以上とし、運転電流はコイル内の最小  $^{10}$  以下、さらに、安定化層と絶縁層を考慮して、コート線材の体積比を  $^{50}$  %とした。

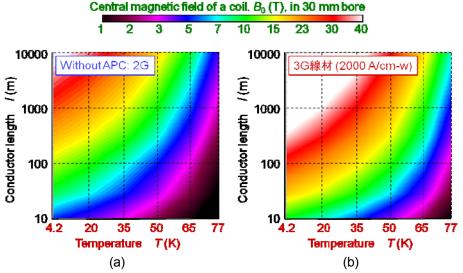


図 6 コイル巻線時の発生可能磁界の比較: (a) 2G, (b) 3G 線材

どのような温度でどれくらいの磁界の発生が可能か比較した結果を図 6 に示す  $^{11}$ )。 3G 線材によって飛躍的に高い温度でかつ必要な線材長の短縮によりコンパクトなコイルで高磁界発生が可能となることが分かる。一例として、運転温度 65 K において中心磁界  $B_0=5.5$  T を例に、2G 線材と 3G 線材を用いてコイルを構成した際の比較を図 7 に示す。2G 線材では、線材長 1800 m を必要とするのに対し、3G 線材では僅か 100 m で実現可能であり、したがって、体積も約 16 分の 1 と大幅にコンパクト化出来ることが分かる。

For  $B_0 = 5.5 \text{ T at } 65 \text{ K}$ 50 mm 3G-With APC (BaHfO<sub>3</sub>) 2G-Without APC  $I_{\rm c(77K, s.f.)} = 2000 \text{ A/cm-w}$  $I_{c(77K, s.f.)} = 620 \text{ A/cm-w}$ 100 m  $l_{\text{total}} = 1800 \text{ m}$ 体積: 272 cm<sup>3</sup> 体積:4433 cm<sup>3</sup> フープ応力: 49 MPa フープ応力:23 MPa 通電電流: 584 A 通電電流:159 A 起磁力: 336 kAT 起磁力: 810 kAT (a) (b)

図 7 中心磁界 B<sub>0</sub>=5.5 T, 運転温度 T=65 K とした場合のコイルサイズの比較: (a) 2G, (b) 3G 線材。 サブクール液体窒素中での高磁場マグネット適用に高いポテンシャルを有していることが分かる。



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

#### 5. まとめ

現状の 2G 線材においては、高配向基板と高均一プロセスの成果によって、4.2~K において NbTi 線材(@4.2~K)と同程度の  $J_e$  特性を有し、20~K において  $Nb_3Sn$  線材(@4.2~K)を凌駕する特性を実現している。自己磁界中の  $J_c$  は対破壊電流の約 10~%程度と見積もられる。

今後、3G線材の目指すべき開発目標としては、以下のようなものが挙げられる。

### (1) 65 K において NbTi 線材 (@ 4.2 K) と同程度の Je 特性を実現

現在大半の超電導応用で用いられている NbTi 線材の置き換えが、サブクール液体窒素環境下で可能であることを意味しており、大幅なコスト低減と冷却負荷の軽減など、超電導技術の産業応用において極めて大きなインパクトが期待できる。

(2) 50 K において Nb<sub>3</sub>Sn 線材 (@ 4.2 K) と同程度の J<sub>6</sub>特性を実現

超高磁界 NMR や加速器の高温動作、必要線材量の短縮によるコンパクト設計と飛躍的な低コスト 化が可能なる。

これらの目標には、ピン導入の最適化によって対破壊電流の約 **30** %を達成することで到達可能であり、有効な人工ピンを長尺に亘って均一に導入する技術の確立が鍵を握る。これまでの線材開発の要素技術の蓄積により、飛躍の準備は整っていると言える。

**謝辞**:本研究の一部は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、ISTEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施したものである。

#### 参考文献:

- 1. D. Dimos, et al., Phys. Rev. Let. 61 (1988) 219-222.
- 2. Y. lijima et al., APL 60 (1992) 769-771.
- 3. M. Friesen and A. Gurevich, Physical Review B 63, 064521 (2001).
- 4. M. Igarashi et al., Physica C 470 (2010) 1230-1233.
- 5. K. Kakimoto et al., Physica C 471 (2011) 929-931.
- 6. T. Kiss et al., IEEE Trans. Appl. Supercond 17 (2007) 3211-3214.
- 7. H. Tobita et al., SuST 25 (2012) 06002 (4pp).
- 8. M. Inoue et al., IEEE Trans. Appl. Supercond 21 (2011) 3206-3209.
- 9. T. Kiss et al., SuST 12 (1999) 1079-1082.
- 10. K. Higashikawa et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity 19 (2009) 1621-1625.
- 11. 東川甲平ほか、平成 24 年電気学会全国大会講演論文集 [5], 5-121, p. 189 (2012 年).



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:超電導技術動向報告会報告

「超電導電力機器への期待」

明星大学

理工学部 電気電子システム工学科

教授 仁田旦三

#### 1. はじめに

超電導電力機器は、高温超電導体の開発に伴い開発が進められてきている。電力系統に超電導機器を導入したときの効果について概観する。まず、電力系統の設計・運用に関する基本的考え方を述べ、有益な導入法について述べる。次に、最近話題のスマートグリッドにおける超電導機器の有用性について述べる。

### 2. 電気エネルギーシステム (電力系統)

電力系統は、発電-送電-変電-配電からなる。それらは、発電機、変圧器、送配電線、スイッチ(しゃ断器, 断路器)、貯蔵装置、と保護システムからなる。電力系統の設計と運用において、重要な課題は高品質で経済的で安定な電力を供給することである。その中で、事故電流遮断と系統安定度は非常に重要な課題であり、トレードオフの関係にある。

#### 3. 超電導電力機器

現用の電力機器に対して対応する超電導機器がある。それは、超電導発電機、超電導変圧器、超電導送電ケーブル、超電導磁気エネルギー貯蔵装置があり、事故電流に対しては事故電流を抑制する超電導限流器がある。

超電導機器の共通の特徴は、小型・軽量、高効率、大容量化などであり、また、以下に述べるように機器特有の特徴がある。

超電導発電機:系統安定度を向上させる。部分負荷効率が高い。

招電導送電ケーブル:架空送電線並みの線路定数。

超電導磁気エネルギー貯蔵: 高応答性。

超電導限流器:センサーなしの高応答性。トレードオフの課題である系統安定度と故障電流

抑制の課題を一挙解決。

例:出力変動する風力発電を含む系統において、現用機では不安定となるが、現用機を超電導発 電機に入れ替えることで安定な系統となる。

超電導磁気エネルギー貯蔵を用いることで、系統の固有値をオンラインで測定出来る。(系統の安定性評価)。

超電導ケーブルを母線に利用する。高効率性と大電流性、EMC 問題解決が図れる。

#### 4. スマートグリッドと超電導機器

スマートグリッドにおいて、電力系統に需要家を含めたシステムを考えることになる。また、多様なエネルギー源による発電方式を含むことになる。ここにおいて、超電導電力機器を導入することは非常に有益である。例えば、超電導発電機の系統安定度向上効果や部分負荷運転の高効率性、超電導限流器の事故電流抑制効果、超電導エネルギー貯蔵装置による変動補償やオンライン安定度評価などが考えられる。また、スマートグリッドでは、多量のエネルギー貯蔵装置が必要となる。



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

電力系統のセンスから見ると現用のバッテリは非常に効率が悪い。超電導エネルギー貯蔵装置の高効率性を生かすべきであろう。

### 5. むすび

超電導電力機器は、現状の電力系統の向上のみならず、将来の電力システムであるスマートグリッドにおいても有用な機器であり、その開発に期待する。



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:超電導技術動向報告会報告

「イットリウム系超電導電力機器技術開発の状況と今後について」

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 電力機器研究開発部 部長 大熊 武

超電導電力機器による都市部への大容量安定供給を目指し、Y系超電導材料を用いた超電導電力 貯蔵システム (SMES)、電力ケーブルおよび変圧器に関する技術開発を行う国家プロジェクトが平成 20 年度から平成 24 年度までの 5 ヶ年計画で進められている。これまで、前半 3 年間では各機器の要素技術開発を行うとともに機器の性能向上に必要となる線材の開発を行い、今年最終年度を迎えようとしている。

本報告会では、この「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおける各機器の技術開発状況について概説した。

#### 1. SMES

電力系統安定化用 2 GJ 級 SMES をターゲットに中部電力が主体となり、20 MJ 級 SMES の要素コイルでの成立性の検証実施を進めている。前半 3 ヶ年では Y 系 SMES コイルシステムの特徴である線材強度を活かした高強度高フープ応力コイル構成技術と伝導冷却システムの構成技術の確立を図り、後半 2 ヶ年では伝導冷却 SMES コイルとしての特性評価を行い、将来の 2 GJ 級大容量 SMES 開発に向け、Y 系超電導線材を用いたコイルの限界性能(耐久性・信頼性など)を把握することを目標としている。

これまでに 11 T の外部高磁界中での試験により、多層巻コイル(250 mm  $\phi$ )で 600 MPa を超えるフープ応力耐性を確認するとともに、4 束集合導体を用いた実規模コイル(約 600 mm  $\phi$ )により 2.6 kA の大電流通電試験を実証している。さらに超電導線材に作用する電磁力を抑制するコイル化構成技術、曲げに強いフレキシブルな絶縁被覆の形成技術を確立することにより、従来の 2 倍以上の電磁力に耐えるコイル開発に成功している。

#### 2. 超電導電力ケーブル

コンパクトで大容量の送電を可能とする 66kV/5kA 大電流ケーブルおよび 275kV/3kA 高電圧ケーブルの技術開発を行っている。前半 3 ヶ年では、大電流・低交流損失ケーブル化技術、高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術に関する要素技術の確立を図り、後半 2 年では各ケーブルシステムの課通電試験によりシステム検証を行う。

超電導ケーブル開発において重要な交流損失低減に対し、ケーブル化した際の線材集合断面形状を円形に近付けて垂直磁場の発生を抑制するため、大電流ケーブルでは、4 mm 幅・2 mm 幅の細線化技術を採用し、交流損失 1.5 W/m-相の損失を実証した。さらにモデルケーブルの短絡試験を実施して、31.5 kA×2 秒の過電流に対しても性能低下や温度上昇も問題ないことを検証した。

高電圧ケーブルにおける電気絶縁材の開発では、AC 絶縁耐圧、インパルス耐電圧試験、部分放電開始ストレス試験、長期寿命試験等を実施し、耐高電圧・低誘電損失な絶縁材料としてポリプロピレン・ラミネート紙 (PPL 紙) を選定し、ケーブル設計を実施した。この結果、誘電損失 0.6 W/m、トータルのケーブル損失 0.8 W/m 以下を達成して、必要電気特性をクリアするケーブルを得ることができた。さらにモデルケーブルおよび中間接続部の短絡試験を実施して、63 kA×0.6 秒の過電流



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

に対しても性能低下や温度上昇等に問題のないことを検証した。

今年度は、これまでの成果に基づき、66kV/5kA 三心一括大電流ケーブル (15 m) および 275kV/3kA 単相高電圧ケーブル (30 m) のシステムモデルを構築し、各種特性試験、長期課通電試験によりシステムとしての成立性を検証する。

#### 3. 超電導変圧器

コンパクト、高効率かつ不燃を特徴とする 66kV/6.9kV-20MVA 級超電導変圧器の実現に向けて 九州電力が主体となり、要素技術開発およびシステム技術の開発を行っている。前半 3 ヶ年では、 低損失化や大電流化、耐短絡強度などの巻線技術、冷却システム技術および限流機能付加技術の確立を行い、後半 2 ヶ年では数百 kVA 級限流機能付加変圧器モデルによる検証および 66kV/6.9kV-2MVA 級変圧器モデルによるシステム検証を行う。

これまでに超電導変圧器開発に重要な巻線技術では、無分割線材に対して5分割に溝加工した細線化線材の交流損失が1/5になること、定格電流の6倍の短絡電流による巻線の耐短絡強度検証や多層並列導体(12重2並列)の転位均流モデルでの各素線間の均流化を確認した。また、限流機能を付加した400 kVA 変圧器モデルの過電流試験により、過大電流を定格電流の3倍以下に抑制する限流機能を検証した。さらに冷却システム技術開発においては、ネオン冷媒を採用した効率向上、高信頼性および長寿命化を目指して無駆動膨張タービンおよび摺動部レスの小型ターボ圧縮機を開発し、効率65%以上を実証し、これらと熱交換器を組み合わせた冷却システムを設計・試作した。

今年度は、2 MVA 級超電導変圧器モデルの性能試験によって、66kV/6.9kV-20MVA 級超電導変圧器システムが成立することを検証する。

本稿で紹介した研究成果は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託によるものです。



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

特集:超電導技術動向報告会報告 「多素子化で広がる超電導検出器の世界」

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

超電導検出器とは、超電導体に特有な特性を利用して既存技術より高分解能、高感度に $\gamma$ 線、X線、光子、粒子などの検出を行うセンサである。近年超電導検出器研究は大きな盛り上がりを見せており、超電導応用研究に関する世界最大の会議である ASC (Applied Superconductivity Conference)のエレクトロニクス分野は、今年はエレクトロニクスと検出器の二本立てとなっている。

超電導検出器にはいくつもの種類がある。代表的なものとして、X線などの信号入力による温度変化を超電導体の超電導/常電導転移を利用して検出する TES (Transition Edge Sensor)、信号入力による超電導電子対破壊を超電導体/絶縁体/超電導体接合のサブギャップ電流増加として検出する STJ (Superconducting Tunnel Junction)、ミアンダ状に配置された極細超電導薄膜の超電導性が光子などの信号入力によって破れることを利用した SSPD (Superconducting Single Photon Detector)などがある。例えば STJ では、超電導電子対のエネルギーギャップは半導体のエネルギーギャップより 3 桁小さいため、高感度であるだけでなく、信号入力により破壊される電子対数が多いことからエネルギー分解能も高くなる。

超電導検出器は他の材料では実現できない高分解能、高感度の検出器としてそれぞれの特性に応じて様々な分野での応用が期待されている。例を示すと、宇宙の謎を探索する X 線天文、原子核種が簡単に同定できる放射線分析、空港セキュリティ確保などに有効なテラヘルツイメージング、質量/電荷比ではなく質量を直接知ることができる質量分析、今まで分離できなかった原子が同定できる材料分析、絶対安全な量子情報通信などである。

しかし、超電導検出器には検出に長時間が必要であるという欠点がある。これは、信号入力に対して敏感な検出器は体積が小さい必要があり、必然的に有感面積が小さくなるためである。分解能や感度を保ったまま有感面積を増加し検出時間を短縮するためには、多数の素子をアレイ状に並べる必要がある。このため、超電導検出器研究の中心は単体の検出器から多素子化へ移ってきている。一方、単純な多素子化は入出力線数の増大ひいては入出力線を介しての熱流入増加を招くため、冷却能力の限られた極低温環境では受け入れ難い。

これを解決する手段として、多重化による出力線数の削減が試みられている。現在までに時分割多重化、周波数多重化、コード分割多重化、共振を用いた多重化などが開発されている。この中で共振を用いた多重化が最近注目を集めている。MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector) は信号入力による超電導体のカイネティックインダクタンスの変動を LC 共振周波数のずれにより検出するもので、1 本の線で約 1,000 個の検出器読み出しが可能である。また、ISTEC が昨年度から産総研と研究を開始した TES 出力により SQUID インダクタンスを変化させ LC 共振周波数のずれを検出する方法は、高分解能の TES と多素子の多重化が期待できる共振周波数法を組みあわせたものである。

超電導検出器は直ぐには大きな産業に結び付くものではないが、日本の科学技術を世界トップレベルに維持するにはその研究・開発は欠かせない。一方、我が国の超電導検出器開発プロジェクトは小粒なものばかりであり、研究者の力が結集されているとは言い難い。また、今後この分野の研究をしっかりと進めていくにはデバイス供給が安定してなされる仕組みが必要であり、これによっ



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

て初めて各研究機関はそれぞれの得意分野にリソースを集中することができる。安定したデバイス 供給拠点の確立と日本の超電導検出器研究者を結集したプロジェクトの設立により、多素子化され た超電導検出器を本格的に立ち上げるべき時に来ている。



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:超電導技術動向報告会報告 「鉄系超電導材料の研究動向」

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・細野教授のグループにより発見されて約4年が経過した。当初の数ヶ月で約55 Kまで上昇した Tcはその後更新されていないが、この発見を契機として国内では、JSTの「TRiP」(H20-H22年度)、JSPSの「新超電導及び関連機能物質の探索と産業用超電導線材の応用」(H21-H25年度)、JSTの「日本-EU 共同研究」(H23-H25年度)などのプロジェクトが開始され、新材料探索に加え鉄系材料の応用可能性の評価も精力的に行われてきている。本報告会では、鉄系超電導材料の薄膜技術の進展、応用上重要な結晶粒界特性、線材作製の試みなど最近の研究動向を紹介すると共に、鉄系材料および新物質探索に関する最近のトピックスを最後に紹介した。

鉄系超電導材料は、超電導を担う Fe-Pn (Pn は P, As などのニクトゲン元素) あるいは Fe-Ch (Ch は S, Se, Te などのカルコゲン元素) の層と他の原子層が積層された層状構造をもち、層の積層の 仕方により、1111 系、122 系、11 系などに分類される。最高の約55 Kの  $T_c$ をもつ NdFeAs(O,F) に代表される 1111 系、最高で38 Kの  $T_c$ を示す(Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> に代表される 122 系材料は Y 系銅酸 化物に匹敵する高い上部臨界磁場を有する。また、122 系材料と Fe(Se,Te)に代表され最もシンプルな結晶構造をもつ11 系材料は上部臨界磁場等の超電導パラメータの異方性が銅酸化物より小さく、線材等の応用には有利な特徴をもつ。

鉄系超電導材料の薄膜作製については、122 系および 11 系の報告がこれまで最も多い。122 系については、Fe サイトを Co で部分置換した Sr(Fe,Co)<sub>2</sub>As<sub>2</sub>や Ba(Fe,Co)<sub>2</sub>As<sub>2</sub>( $T_c$ は約 22 K)で最初に高品質薄膜が東工大グループにより PLD 法を用い作製された。その後、米国 Wisconsin 大グループやドイツの IFW Dresden グループは、SrTiO<sub>3</sub>や金属 Fe のバッファ層を用い、同じく PLD 法で高品質薄膜を作製している。特に前者では、薄膜中に導入された BaFeO<sub>2</sub>のナノロッドが強いピン止め中心として働き、高い磁場中  $J_c$ を示すことが報告されている。また、より  $T_c$ の高い (Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>( $T_c$ =38 K)や BaFe<sub>2</sub>(As,P)<sub>2</sub>( $T_c$ =30 K)の高品質薄膜が農工大や名大グループにより MBE 法を用い実現されており、最近では ISTEC でも PLD 法により高い  $J_c$ を示す BaFe<sub>2</sub>(As,P)<sub>2</sub> 薄膜の作製に成功している。11 系の Fe(Se,Te) 薄膜は主に PLD 法により国内外の機関で高品質薄膜が作製されているが、バルクに比べ高い 16-21 K の  $T_c$ が報告され、また磁場中の  $J_c$ の低下が小さいなど興味深い性質をもっている。 $T_c$ の高い 1111 系材料は、薄膜で結晶構造を実現するのに厳密な酸素量制御が必要で、名大、農工大のグループが最近 MBE 法でバルクより若干  $T_c$ の高い高品質薄膜を実現している(詳細については、超電導 Web21、2012 年 4 月号参照)。

昨年、東工大グループはISTEC との共同研究で、バイクリスタル基板上に作製した  $Ba(Fe,Co)_2As_2$  エピタキシャル薄膜を用い、鉄系超電導材料では高傾角粒界は銅酸化物と同様に弱結合となるが、傾角増大に伴う  $J_c$  の低下が緩いなど、銅酸化物に比べ有利な粒界特性をもつことを明らかにした(超電導 Web21、2011 年 9 月号参照)。最近では、名大グループが MBE 法により傾角 24 度のバイクリスタル基板上に作製した  $BaFe_2(As,P)_2$  薄膜が低温で 1  $MA/cm^2$ 以上の高い $J_c$ をもつことを報告しており、材料品質の向上により粒間  $J_c$ がさらに上昇する可能性がある。2 軸配向 IBAD-MgO バッファ付き金属基板上の鉄系超電導薄膜についてもいくつかの報告が出され、特に東工大と ISTEC



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

は、面内配向度が 7 度程度でも単結晶基板上薄膜と同等の  $J_c$  が得られ、面内配向に関する制約が銅酸化物に比べ緩いことをやはり昨年明らかにしている。PIT(Powder-In-Tube)法による線材作製についても最近大きな進展があった。フロリダ州立大学グループは、原料粉末を微細化し低温で反応させることで不純物の少ない(Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 焼結体を合成し、これを用いた銀シース線材で、従来の報告より 1 桁高い 120 kA/cm<sup>2</sup> の  $J_c$  (4 K、self-field)を実現しており、合成方法の改良により  $J_c$  がさらに向上する可能性を示した。線材応用の場合、やはり As のような有毒元素を含まない材料が望ましい。 $K_x$ Fe<sub>2-y</sub>Se<sub>2</sub> のように As を含まず 30 K以上の  $T_c$ を示す材料も見つかっているが、さらに高い  $T_c$ をもつ材料の探索も精力的に続けられている。



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:超電導技術動向報告会報告

「次世代鉄道システムへの超電導応用」

公益財団法人鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 超電導応用研究室 室長 富田 優

超電導技術動向報告会では、鉄道のき電系に使うための超電導ケーブルの開発について、紹介しました。取り組み内容は、①鉄道用超電導ケーブルの導入効果、②超電導線材の基礎特性評価、③超電導ケーブル用冷却システム、④超電導ケーブルの試作の4つに分けられます。

#### ①鉄道用超雷導ケーブルの導入効果

日本の鉄道の約60%では直流1,500Vのき電方式が採用されており、変電所間に直流超電導ケーブルを導入することで、冷却ロスを大きく上回る送電ロス・回生失効の低減や変電所入力電圧の低減など、運用上有利な効果が得られることをシミュレーション結果より示した。

#### ②超電導線材の基礎特性評価

直流用の超電導ケーブルの設計に向けて、過電流特性、 $I_c$ -B-T 特性、長尺線の  $I_c$ 分布の評価を行なった。

過電流特性評価として幅 100 ms のパルス電流を繰り返し印加し、100 回の印加でも 1cの低下がみられないことを実験で明らかにし、繰り返し印加の影響がないことがわかった。また過電流特性のスイープ速度依存性の評価を行い、液体窒素浸漬冷却下では通常、初気泡が発生し、核沸騰に移行し、最終的に膜沸騰に移行してすぐに破断に至るが、スイープ速度が速くなるに従い、初気泡が発生する電流値が大きくなる。その結果、破断電流値が小さくなり、Bi 系超電導線材においては 360 A/s 以上の速度では初気砲が発生する前に破断することを明らかにした。

Bi 系超電導線材、Y 系超電導線材の低磁場領域、特に  $0.1\ T$  以下の依存性について、 $I_c$  -B-T 特性の測定結果を示した(NIMS との研究)。

長尺線の ½分布評価では四端子法では均一に見られる線材でも局所的には比較的大きなばらつきが存在することを磁気顕微法により明らかにするとともに、磁気顕微法の高速化を行い、36 m/h という速度での測定でも線材中のミリメートル以下の欠陥位置を可視化した。欠陥部はホットスポットになるので、この技術は長尺ケーブル作製の上で不可欠な技術であると言える(九大との研究)。

#### ③ 紹電導ケーブル用冷却システム

冷却方式の検討を行い、冷凍機で冗長系を組むより、冷凍機と真空ポンプの組み合わせによるシステムの方が、信頼性が遥かに高いことを示した。

#### ④超電導ケーブルの試作

超電導ケーブルの長さ  $5 \,\mathrm{m}$  の試作例を示し、通電試験の結果で、導体層:  $10.1 \,\mathrm{kA}$  (@77 K), シールド層:  $10.9 \,\mathrm{kA}$  (@77 K)の通電電流が得られたことを紹介した。

鉄道総合技術研究所では、超電導の鉄道システムへの展開技術を検討しています。中でも、鉄道 用の超電導ケーブルは、一部に JST の研究成果展開事業 戦略的イノベーション創出推進 (S-イノ



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

べ)の支援もあり、活発に研究開発が進められています。今後はこれまでの基礎実験の結果を整理 し、鉄道用に適したフィールド対応の超電導ケーブルの設計および製作に取りかかっていきたいと 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

特集:超電導技術動向報告会報告

「超電導線の通則に関する国際標準化の進捗と今後の超電導関連標準化」

公益財団法人 応用科学研究所 特別研究員 長村光造

超電導現象が発見されて 101 年が経過し、その間学術的な進歩に支えられて、具体的な超電導技術の応用は 1960 年代から始まったが、1986 年に高温超電導物質が発見されてから、さらに超電導応用の機運が高まってきた。一般に工業製品の開発・普及には製造、流通から消費段階で共通する製品に対する標準(規格)が決められることが必要不可欠となる。とくに超電導線のような新しい工業素材では特性やその利用方法について周知徹底するために超電導線に関する通則は重要な役割を果たすと考えられる。

これまでに Nb-Ti, Nb<sub>3</sub>Sn, MgB<sub>2</sub>, BSCCO, REBCO 等の超電導物質を用いた超電導線については工業製品としての構造や製造方法についてその工業技術が確立してきている。そこでこれら工業製品として取扱い得る超電導線について、それらを利用するために必要な線材構造、超電導および工業材料として具備すべき特性について必要な知見を体系的に表示することが必要という認識が IEC-TC90 超電導標準化国内委員会で持たれるようになった。

そこで 2008 年 6 月に開催された IEC-TC90 のベルリン会議において、日本から超電導線材の通則に関する提案趣旨説明がなされた。それを受けて標準化の妥当性を検討するため Ad-hoc3 グループが設置され、そこでの審議の結果として標準化推進の勧告が 2010 年 10 月開催された IEC-TC90シアトル会議で報告された。勧告は承認され、同時に提案された NWIP を審議するため新たにWG13が設置された。2011 年 6 月に開催された Berkeley 会議において NWIP を 2 分割する方針が決められ、それに基づき委員の間で議論を積み重ね、2011 年 12 月に開催された沖縄会議において 2 部構成の CD 原案の骨子が合意された。このような審議過程を経て、各国に現在回付中の超電導線材通則の概要を次に紹介する。審議が順調に推移すれば 2014 年 4 月に国際標準として成立する見込みである。

実用超電導線の分類とその構造的特徴に関する第 1 部は文書番号 IEC 61788-20 として登録された。超電導線としては素線のみを取扱い、他の工業材料が持ちえない超電導線の特徴的な特性と線材構造の構成を概説している。その上で上述した 5 系統の実用超電導線を利用するために知っておくべき構造的共通性を総括している。この国際標準では製造者に次のことを義務付けている。すなわち(1) "Superconductor"、超電導物質名および商標名のいずれかあるいはすべて、(2) 製造者名、(3) 原産国名、(4)ロット番号あるいはシリアル番号のような製造者によって付された traceabilityを保証する記述等の出荷情報を製品上に明示することである。第 2 部 (IEC 61788-21) は実用超電導線の特性試験方法に関する文書である。実用超電導線を利用するときに留意すべき特性として臨界温度、交流損失、臨界磁界と不可逆磁界、機械・電磁気特性、臨界電流と n 値、不均一性、安定性について概説している。準拠試験規格 (Reference Test Methods) として超電導に係わる特性および工業材料として満たすべき特性について 11 の国際標準が発行されているので、特性試験を実施する場合にはこれらの国際標準を使用することを規定している。

今後超電導技術が産業として発展、定着する過程で多くの超電導製品が開発され、それらの製品の国際標準が制定され、それに必要な試験方法の標準も現在の 11 件をはるかに越える多くの試験方法が必要になるものと考えられる。このように将来複雑多岐にわたる国際標準を体系的に整理するための "要"として本超電導線材の通則が位置付けられる。超電導技術全体がまだ産業として定



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

着していないが、国としては IEC/TC90 国内技術委員会を中心にして、国際標準化の促進と超電導産業技術の調査を継続的におこなってきている。コンセンサス標準戦略という観点から、我が国が超電導技術の国際標準化を主導していくことは、つねに先端的な超電導科学技術の成果を発信することと相まって重要なことと思われる。



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:超電導技術動向報告会報告

「JST/S-イノベにおける超雷導システムの開発」

科学技術振興機構/住友電気工業株式会社 プログラムオフィサー 佐藤謙一

#### 1.制度の概要と特徴

科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(略称: S-イノベ)」は2009 年度から始まったプログラムで、その中のテーマとしては、JST の戦略的創造研究推進事業等の優れた成果をベースとして研究開発テーマが選定された。このプログラムの特徴は、①研究開発期間を最長 10 年とし、基礎研究の成果からアプリケーションの開発までを一つのプログラムでサポート(長期間のシームレスなファンディングの実現)、②推進体制としては、a. 1 つの研究開発テーマについて産学連携による複数チームが研究開発を推進、b. 産と学で1 つのチームを構成、c. 各チームの取りまとめ役として PM(プロジェクトマネージャー)を配置、③課題採択及び研究開発推進の責任者として PO(プログラムオフィサー)を配置し、JST とともに研究開発を推進する、ものである。

#### 2.研究開発テーマ「超伝導システム」のこれまでの成果と課題

「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」が研究開発テーマとして選定され、応募された中から厳しい選考を経て五つのチームが研究開発をスタートしている。開始後、2.5 年が経過し、研究開発が順調に進んでいる。技術的成果としては、表 1 に示すような世界をリードする成果が得られている。特許や外部発表の成果を表 2 に示す。200 件を超える外部発表の実績があり、この研究開発テーマが高温超電導に関する研究開発成果の国内・海外への情報発信の基地となっていることが判っていただけると思う。

表 1 技術的成果

イ / m2 #r	<b>计集式</b> 用	
チーム略称	技術成果	
高温超伝導 SQUID	・SQUIDの高性能素子作製技術と低温超伝導SQUID並みの雑音特性達成・SQUIDセンサのモジュール化と参加機関への配布の仕組みによる応用研究加速	
大出力超伝導 回転機器	・目標効率99%の条件下での20MW級回転機の概念設計と構成要素部品への要求仕様の明確化 ・超伝導界磁コイルの交流損失について目標達成可能性を確認 ・回転子一体型冷却システム予備実験により熱負荷下での冷却安定性確認	
高効率・小型 加速器システム	・加速器とマグネットの概念設計完了と要素技術(3次元巻線技術など)への要求仕様明確化 ・要素技術について、遮蔽電流効果の詳細検討などにより解決の見込みを得る と共に、3次元巻線コイルにおいては良好な超伝導特性を確認	
次世代NMR	・超伝導線材の基礎特性評価と含浸方法の検討を踏まえて高温超電導コイルを試作し、ハイブリットマグネットにおいて24Tの世界最高磁場を4.2Kで確認・最終目標の高温超伝導マグネットについての仕様明確化・検出プローブについて、金属プローブの低温化による感度向上を実証	
次世代鉄道 システム	・鉄道への超伝導直流送電システム導入による効果を、実際の路線やダイヤの モデルでシミュレーションし、エネルギー削減効果を確認 ・鉄道応用に特化した送電システム(ケーブル込み)と冷却システムの組み合わ せ候補検討	



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

表 2 特許・外部発表の成果

項目	件数	
特許(件)		12(海外:2)
学会発表(件)	国内	129
	海外	59
論文発表(件)	和文	3
	英文	21
新聞、TV等		15

今後は研究開発が更に要素技術の確立へと課題が本格化して行くステージに入り、関係の皆様の 今まで以上の御支援・御指導をお願いしたい。



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 '12/7 月-8 月の催し物案内

#### 7/5

応用物理学会

超伝導分科会「多面的に広がる超伝導技術の活用」~宇宙から地中まで~

場所: (公財) 国際超電導産業技術研究センター 問合せ: http://annex.jsap.or.jp/support/division/super/

#### 7/9-12

IOP Institute of Physics

Superconductivity Summer School 2012

場所: Wolfson College, Oxford, UK

問合せ:

https://www.eventsforce.net/iop/frontend/reg/tOtherPage.csp?pageID=85597&ef\_sel\_menu=2318&eventID=222&eventID=222

#### 7/13

超電導エネルギー貯蔵研究会

第24回超電導電力貯蔵研究発表会

場所:東海大学校友会館

問合せ: http://www.rasmes.com/

#### 7/19

第79回超伝導科学技術研究会ワークショップ

「3.11 震災を乗り越えて」

場所:全日通霞が関ビルディング

問合せ:http://www.sntt.or.jp/~fsst/20120719.html

#### 7/19

電子情報通信学会

超伝導エレクトロニクス研究会「信号処理基盤技術及びその応用、一般」

場所:機械振興会館

問合せ: http://www.ieice.org/es/sce/jpn/

### 8/2-3

低温工学·超電導学会

2012 年度東北·北海道支部研究会/第2回材料研究会

場所:まちなかキャンパス長岡

問合せ: http://csj.or.jp/

#### 8/26-30

18th International Conference on Biomagnetism

場所: Paris, France



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

問合せ: http://www.biomag2012.org/

#### 8/31-9/1

低温工学 · 超電導学会

東北・北海道支部/第17回超伝導・低温若手セミナー

場所:新潟大学・新潟駅前キャンパスときめいと

問合せ:http://csj.or.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

### 新聞ヘッドライン (5/18-6/20)

- ○銅酸化物磁性体を発見 乱れに強い量子液体状態示す 中辻・東大准教授らの研究グループ 科学新聞 5/18
- ○洋上風力発電に 200 億円 6 行強調融資 普及拡大へ英社買収 読売新聞 5/20
- ○世界最高圧中国で試験 古河電工超電導ケーブル 27 万 5 千 V 2020 年までの発売目指す 電気新聞 5/21
- ○超電導体でイオン検出 産総研など 質量分析装置に応用期待 日刊工業新聞 5/21
- ○超電導ケーブル試験 古河電工、中国で開始 日刊工業新聞 5/21
- ○世界最高電圧の超電導線を試験 古河電工、中国で 日経産業新聞 5/21
- ○茨城沖に風力発電8基増設 日経産業新聞 5/23
- ○次世代送電網 日米共同で実験 清水建設など9社 日経産業新聞 5/23
- ○スマートグリッド実証から実用へ [1]架空の街で検証 発電予測の精度を向上 日刊工業新聞 5/23
- ○供給国の主導権強まるレアメタル市場 極端に高い中国依存 調達体制の多様化必要 日刊工業 新聞 5/24
- 〇スマートグリッド実証から実用へ [2]「スマートハウス」で節電 EV と連携、発電・蓄電にも 日刊工業新聞 5/24
- ○スマートグリッド実証から実用へ [3]「スマートビル」主力は太陽光 日刊工業新聞 5/25
- ○イリジウム・テルル化合物 分子融解の超電導発見 岡山大 日刊工業新聞 5/25
- ○乱れに強い量子液体状態 銅酸化物磁性体を発見 東大など 日刊工業新聞 5/25
- ○電子の軌道 液体に近く 超電導発生の新現象発見 岡山大 日経産業新聞 5/28
- 〇スマートグリッド実証から実用へ [4]次世代環境地域で電力自給 普及に規制やコストの壁 日刊工業新聞 5/28
- ○風力拡大へ地域連系活用 北陸電力四国電力 関西・中部向けに送電 電気新聞 5/28
- 〇スマートグリッド実証から実用へ [5]"売電制度"普及の起爆剤に 地域に利益、事業モデル模索 日刊工業新聞 5/29
- ○大強度電子ビーム加速 高エネ研など成功 超電導装置使い 日経産業新聞 5/30
- ○風力発電装置を導入 森精機、伊賀事業所に 独社製、国内販売も検討 日経産業新聞 5/30
- ○韓国ユニスンを傘下に 東芝 風力発電事業を強化 日刊工業新聞 5/30
- ○レアアース下落続く 国内の在庫調整進まず 日刊工業新聞 5/31
- 〇次世代の風力発電と風モデル 台風・複雑地形を考慮 羽根車の性能評価 産総研のグリーンイノベーション 日刊工業新聞 5/31
- ○次世代送電の基盤に 超電導研究、日本がリード 鉄道総研が新ケーブル 日本経済新聞 5/31
- ○電気、ロスなく電車へ 鉄道総研が超電導ケーブル 日本経済新聞 5/31
- ○脱レアアース加速 中国から輸入昨年3割減 磁石など代替、使用量縮小 取引価格も伸び悩む 日本経済新聞 6/01
- 〇レアメタル確保へ融資 三菱 UFJ、チリ銅公社に 250 億円 JFE などへ長期供給 日本経済新聞 6/01
- 〇品質確保、認定基準など策定 経産省 再生可能エネ買い取り制度 Fuji Sankei Business i. 6/04
- ○世界で導入計画(上) スマートグリッド 再生エネ活用に意欲的 日刊工業新聞 6/04
- ○進む「スマート化」 再生可能エネルギーは今 毎日新聞 6/05
- ○世界で導入計画(下) スマートグリッド 需要家に利点、動機付けを 日刊工業新聞 6/05
- ○再生可能エネ全量買取制度 政令、8日にも閣議決定 電気新聞 6/07
- ○第3の超伝導物質を発見 発想豊か 新材料を次々 細野秀雄氏 読売新聞 6/07



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

- ○分子状イリジウム鎖の化学結合切断で超伝導 岡山大の研究グループ発見 科学新聞 6/08
- ○「3」の数字が特別な意味 多成分超伝導で起きる新規物性現象の解明 科学新聞 6/08
- ○スマートグリッド対応急ぐ 電力リストラの波紋 送変電機器 日刊工業新聞 6/12
- ○風力発電機で英社と提携 ゼファー、海外展開加速 日経産業新聞 6/13
- ○再生可能エネルギーの評価 時評 ウェーブ 電気新聞 6/14
- ○大強度 電子ビームの超伝導加速-KEK、東大などの研究グループ-最先端技術を用いて実現 科 学新聞 6/15
- ○超電導、鉄道で実用間近 開発、常に産業応用意識 先端技術 日経産業新聞 6/18

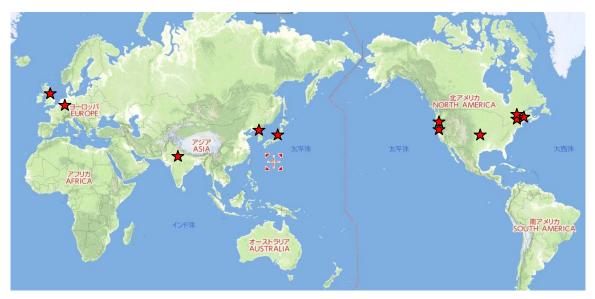


公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

### 超電導速報―世界の動き(2012年5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、関連地

### 線材

### Superconductor Technologies Inc. (2012年5月17日)

Superconductor Technologies社 (STI) は、Nexans がSTIの高性能2G HTS線材サンプルのテストを完了したことを発表した。テスト完了後、Nexansは、STIの線材が交流高温超電導電力ケーブルに適用するための臨界電流目標値(絶対温度77 Kで1センチ幅あたり500 A)を満たしていることを確認した。STIの社長兼最高経営責任者であるJeff Quiram氏は、「Nexansが独自に実施した線材の性能テストによって、我が社の2G HTS線材が業界で主導権を発揮していることが実証され、重要な節目を迎えたと言える。これら初期テストに成功したということは、将来の送電ケーブルプロジェクトの厳しいニーズを満たすため、我が社の線材技術開発が順調に進んでいるという表れであると確信している。」と述べた。

(出典)

"Superconductor Technologies Inc. Completes Initial 2G HTS Wire Testing With Nexans" Superconductor Technologies Inc. press release (May 17, 2012)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1696931&highlight

Contact: Corporate Headquarters of STI Email: info@suptech.com



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

## マグネット

### Oxford Instruments (2012年6月1日)

Oxford Instruments 社は、英国の国立シンクロトロン施設である Diamond Light Source 社にある先端的な "2 色作用" 実験のための I10 ビームライン(BLADE)内に、14 T 超電導マグネットシステムを設置した。この新システムは、超高真空実験に使用される予定であるが、"隠れた磁気状態"を探索するため、既に研究者によって使用されている。この新マグネットシステムは、同社の革新的な低ヒステリシス損失の Nb3Sn 超電導素線(Oxford Superconducting Technology 社 [OST] 開発)を使用して構築され、磁場の高速ランピングを可能にする。その結果、磁石は一時間以内で-14 T から+14 T まで掃引することができる。磁石自体は、蒸発したヘリウムガスを回収し再液化するツインパルス管冷凍機を利用して作られたクライオスタット内部に収められており、液体ヘリウムを全て再凝縮することができる。磁石には、熱入力を最小限に抑える高温超電導磁石の電流リードが装備されているので、磁石の掃引時でも液体ヘリウムを再凝縮することができる。BLADE のビームライン主幹研究員である Peter Bencok 博士は、「我々は、この新しい高磁場超電導磁石を受け取ることができて非常にうれしく思っている。最初の試験結果は非常に有望であり、ビームラインだけでなく Diamond 装置全体にとって重要な節目となるであろう。」と述べた。(出典)

"Team at Diamond Light Source runs first experiments" Oxford Instruments press release (June 1, 2012)

http://www.oxford-instruments.com/news/Pages/news.aspx

Contact: Email: lynn.shepherd@oxinst.com

#### 電力応用

### AMSC (2012年5月23日)

AMSC 社は、Inox Wind 社(インド)が自社の 2-MW 二重供給誘導型(Doubly-Fed 型)風力タービンに使用するために、電気制御システム(ECS)(設計、認可ともに AMSC 社による)を 50 台追加注文したことを発表した。このシステムは 2012 年に Inox に出荷される予定であり、これまでの 2 年間で、Inox からの大量取引は 4 回目となる。Inox Wind 社の取締役である Devansh Jain 氏は、「Inox では、インドという立地条件や運営費並びに維持管理費の低コスト化を考慮した上で、インド市場に適した最高の性能と魅力を備えた風力タービンをいくつか生産している。我が社は、これまで2-MW タービンを地元で大量に生産し始めた先駆メーカーに囲まれ奮闘してきたが、今や、我々はいち早くマーケットリーダーとなり、その地位を確立するに至った。そしてこの地位は、最高水準の製造と同時にプロジェクト開発を含む我が社の垂直的アプローチによって強化され、築き上げられたものである。AMSC 社の協力の下、これからも我が社が成長を続けることを楽しみにしている。」と述べた。

(出典)

"AMSC Receives 100 MW Wind Turbine Electrical Control System Order From Inox Wind" AMSC press release (May 23, 2012)

http://ir.amsc.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=676073

Contact: Jason Fredette Email: jason.fredette@amsc.com



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

### 加速器

### RI Research Instruments GmbH (2012年5月9日)

Bruker Energy & Supercon Technologies 社 (BEST) の子会社である RI Research Instruments 社 (RI) は、英国にある Diamond Light Source 社 (DLS) と交わした 500 MHz の超電導加速器モジュールの契約に加えて、韓国に拠点のある Pohang 加速器研究所 (PAL) と同様の 500 MHz の超電導加速器モジュールを供給する契約を結んだ。両契約総額は約 520 万ドルである。今回の契約で PAL が発注したのは、3 つ目となるモジュールで、以前 2010 年 3 月に契約した 2 つの超電導加速器モジュールについては、現在、PAL に配送されるよう準備がなされている。これら 3 つの加速器モジュールは、全て、Pohang Light Source (PLS) と呼ばれる PAL の第 3 世代シンクロトロン光源をアップグレードするのに使用される。アップグレードは 2012 年または 2013 年中に完了する予定で、このアップグレードによって、従来よりも 100 倍明るいシンクロトロン放射光を生成できるようになる。

最近の2つの発注を含め、RIはこれまで放射光源と蓄積リングに使用される加速器モジュールの契約を台湾、カナダ、米国、英国、中国、そして韓国と交わしており、過去15年間で16ものモジュールを製造してきた。このようにRI社は、超電導無線周波数(SRF)技術を用いた他の加速器プロジェクトと同様に、シンクロトロン光源技術における応用にも将来的に有望な地位をきづいている。

(出典)

"RI Awarded Contracts for Superconducting Accelerating Modules from South Korea and Great Britain"

RI Research Instruments GmbH (RI) press release (May 9, 2012)

http://www.research-instruments.de/frontend/press/id/37

Contact: Ha nspeter Vogel Email: Hanspeter.Vogel@research-instruments.de

### 基礎

### Brookhaven National Laboratory (2012年5月3日)

Brookhaven 国立研究所の研究者は、Cornell 大学や St. Andrews 大学等の研究者と提携し、抵抗なしで電流を運ぶ鉄系超電導体の能力には磁気が鍵を握っているという理論を裏付ける直接的な証拠を提供した。研究チームは、鉄系超電導体にクーパー対を形成するのに電子がどれくらい強く結合するのかを測定することによって、この証拠を得ることに成功した。電子が通る電子バンドやその方向性を考慮しながら測定が行われ、得られた実験結果は、特性改善された新物質の特定や設計にはこの理論を用いることができるという目標への励みとなり、所謂、既存の超電導体よりも高温度で作用できる超電導体生成への進展に期待が寄せられる。この研究チームの研究成果は Science に掲載されている。

(出典)

"Atomic-scale visualization of electron pairing in iron superconductors"

Brookhaven National Laboratory press release (May 3, 2012)

http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/PR display.asp?prID=1410&template=Today

Contact: Karen McNulty Walsh Email: kmcnulty @bnl.gov



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

### Lawrence Berkeley National Laboratory (2012年5月14日)

Lawrence Berkeley国立研究所の研究者は、他の研究機関と提携し、電子と磁気の革新的なアプリケーションに適用できるかもしれないユニークな新物質(強力な3次元トポロジカル絶縁体 [TIs])の実証に成功した。TI表面上の電子は、一緒にロックされた状態で一定の方向に回転しながら揃って変化する。表面上のこれら電子は、欠陥や他の摂動のせいで散乱させられることはないと予測され、そのため抵抗に直面することはほとんどない。言い換えれば、この表面状態は"トポロジーの原理で保護された状態"なので、電子が量子力学の法則を破ることなく散乱することはできないのである。研究チームは、角度分解光電子分光法(ARPES)を利用して、ビスマス・セレン(Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)に結合した電子・フォノンを解析した。Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>の表面上の電子は室温で自由に流れ、スピントロニクスのデバイスや究極的には量子コンピュータなど、実用的なアプリケーションの有力候補となる。もう1つ別に生成しうるものとして興味深いのが、トポロジカル絶縁体の表面上に超電導物質を成層させることである(実際この偉業は、最近になって、Berkley研究所にあるAdvanced Light Source [ALS] のビームラインで研究する中国人科学者によって達成された)。このような努力は、理論上は成り立つがまだ観測されていない粒子(マヨラナフェルミオンとして知られ、その粒子独自の反粒子でもある)の生成につながる可能性を持っている。

(出出)

"Beyond the high-speed hard drive: Topological insulators open a path to room-temperature spintronics"

Lawrence Berkeley National Laboratory press release (May 14, 2012)

http://newscenter.lbl.gov/feature-stories/2012/05/14/topological-insulators/

Contact: Paul Preuss Email: paul\_preuss@lnl.gov

#### Stanford Synchrotron Radiation Lightsource (2012年5月17日)

従来の超電導体のクーパー対はs波ペアリング対称性を示す一方、高温超電導体系ではクーパー対はd波ペアリングを示す。一方、鉄系超電導体のペアリング対称性は単一タイプで示されるわけではなく、なかにはs波ペアリング対称性の典型である超電導ギャップの特性を示す物質もあれば、d波ペアリング対称性の典型である超電動ギャップがゼロになるノードを持つ物質もある。Fudan大学の研究者は、Stanford シンクロトロン放射光研究所(SLAC)でBeam Line 5-4 と呼ばれる機器を使用し、鉄系超電導体 BaFe2(As0.7P0.3)2の超電導ギャップ構造を測定した。その結果、研究者はd波ペアリングから生じたものではないサインを発見した。この研究成果により、従来の超電導体と同様に、鉄系超電導体もs波ペアリングを示すことがあるという確かな実験的証拠が見出だされ、ノードのあるギャップ、ノードのないギャップ両者とも同じメカニズムから生じるということを示唆するものである。

(出典)

"Iron-based Superconductors Exhibit S-wave Symmetry"

Stanford Synchrotron Radiation Lightsource press release (May 17, 2012)

https://news.slac.stanford.edu/features/iron-based-superconductors-exhibit-s-wave-symmetry

Contact: SLAC Office of Communications E-mail: communications@slac.stanford.edu

### Cornell University (2012年5月30日)

Cornell 大学の研究者は、東京大学との共同研究において高温超電導体で観察される"擬ギャップ"状態の洞察を得た。走査型トンネル顕微鏡法を使用してこの国際的研究チームが行ったのは、高温超電導体がその化学成分を変えると、どのようにして原子レベルで超電導状態が進化するのかという観察であった。"ドーパント"原子が追加されると、超電導のナノスケール領域(時には、幅わずか



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

原子数個分の大きさ)が単離して現れ始めることが観察された。これらの"斑点"は接触しながら領域全体を埋め、その物質全体が超電導になるまで成長する。このメカニズムはこれまで理論化されていたものの、今回、この現象が実際に起こるということが同研究チームによって初めて証明されたことになる。この業績は、電気工学に革命を起こすのに十分とも言える高温度で超電導に成り得る新素材の開発に向け、新たな一歩を刻んだことになる。同研究チームの研究成果は、Nature Physics のオンライン版に掲載されている。

(出典)

"High-temperature superconductivity starts with nanoscale electronic oases" Cornell University press release (May 30, 2012)

http://www.news.cornell.edu/stories/May12/CuprateEvolution.html

Contact: John Carberry Email: jjc338@cornell.edu

### Lawrence Berkeley National Laboratory (2012年5月31日)

Lawrence Berkeley国立研究所の研究者は、California大学Berkeley校との共同研究において、超高速レーザーARPES(分解光電子分光法)を使用し、高温超電導体の電子状態に関する理解を一層深めた。赤外レーザーパルスをBi2212サンプルに照射することにより、研究者はクーパー対のいくつかを一時的にその構成要素に分解することができた。この状態を"準粒子"と呼ぶ。この状態が崩壊すると、準粒子は再びクーパー対に結合した。そこで研究チームは、ARPESを使用し、エネルギーと運動量の変化を測定することによって、クーパー対の形成の様子を見せる究極のスローモーションビデオを作り、それを見ることに成功した。ARPESを使用し、準粒子の初期励起エネルギーと運動量空間での振る舞い、そしてこれらが準粒子の崩壊する速さとどのような関係があるのかを発見することができたのである。同研究チームの一員であるChristopher Smallwood氏は、「今、これらの再結合過程の要素がはっきりと測定できるようになり、各要素が何に貢献するのかを確認できるようになり、興奮している。これは、クーパー対形成に関するアイデアを評価する上で、新しい手段となるはずである。我々は、今回の測定法や他のアイデアにより、高温超電導遷移において、各過程が重要な役割を果たすかどうかを確認することができる。」と述べた。同研究チームの研究成果は、Scienceに報告されている。

(出典)

"A New Tool to Attack the Mysteries of High-temperature Superconductivity" Lawrence Berkeley National Laboratory press release (May 31, 2012) http://newscenter.lbl.gov/news-releases/2012/05/31/ultrafast-arpes/

Contact: Paul Preuss Email: paul preuss@lbl.gov

#### 経営情報

### Superconductor Technologies Inc. (2012年5月8日)

Superconductor Technologies社(STI)は、2012年3月31日締め第1四半期の決算報告を発表した。同社の第1四半期の純収益は、前年同期の160万ドルに比べ、今期は39万9千ドルとなった。純損失は、前年同期の370万ドルに比べ、今期は300万ドルであった。同社は今四半期にかけて、2G HTS線材開発が引き続き良好に進捗し、線材プログラムの節目に無事到達することができた(特に、プログラム目標値である77 Kで1センチ幅当たり500 Aの電流密度を達成)。さらには、同社のAdvanced Manufacturing Center of Excellence施設で建設されていたクリーンルームも完成を迎えた。線材の特殊生産装置の第1号が既に設置され、第2四半期中には新たに2体の装置が追加で設置される予定であ



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。これら装置はConductus®線材を大量生産するのに使用され、2012年末に完成予定の超電導大容量送電ケーブル実証プロジェクトに必要とされる線材を顧客に大量供給することができる。2012年3月31日時点で、同社の現金及び現金同等物が950万ドル、受注残高は15万2千ドルであった。(出典)

"Superconductor Technologies Reports First Quarter 2012 Results"

Superconductor Technologies Inc. press release (May 8, 2012)

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1692805&highlight

Contact: Corporate Headquarters of STI Email: info@suptech.com



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

## 「ICEC24-ICMC2012」報告

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター 特別研究員 山田 穣 材料物性バルク研究部 部長補佐 町 敬人 線材研究開発部 主任研究員 種子田賢宏 線材研究開発部 部長補佐 坂井直道







同 遠景 (矢印)。博多港に隣接している

ICEC24-ICMC2012 が福岡国際会議場で 5/14 (月) ~5/18 (金) に開催された。本会議は、2 年 に一回開催され、超電導機器、応用、超電導材料、線材、低温構造材料など広い分野で超電導を中心に研究報告が行われた。

今回、参加者は23 国から578名(国内270名)、発表は453件(内ポスター337件)、業者展示は47件と盛況であった。また、最近活況の中国からは55名の参加であり、参加国としては日本に次ぐ第2位であった。次回は2014年にオランダのTwente大学で開催される。

以下、聴講できた箇所につき各分野ごとに主な内容を紹介する。出席できなくて、カバーしきれていない分はご容赦いただきたい。(編集部)

### 「全体及び機器応用」 特別研究員 山田 穣

- 5/15 Plenary : "New Maglev Transportation System in Japan" Prof. Eisuke MASADA, The University of Tokyo :

旧国鉄、JR 東海による超電導マグレブ開発の歴史、さらに 2027 年営業開始(東京-名古屋 286 km)のマグレブ中央新幹線の紹介があった。現在路線を一部工事中であるが、2014 年に再び試験走行開始の予定である。2045 年には、大阪までの営業運転予定(438 km)。12 両編成で時速 550 km。

- 5/15 Plenary: "Topics of Superconductors in Japan since 3.11 Fukushima" Prof. Koichi KITAZAWA, Japan Science and Technology Agency



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

北沢先生は、まず、昨年の 3.11 の津波、事故の報告をされ、そこから現代社会のエネルギーについて論を進められ、再生可能エネルギー導入の必要性を訴えられた。かねてからの持論である超電導直流送電、風力発電などで世界を結ぶ壮大なエネルギー需給システムの開発をすべきと講演された。日本は再生エネルギー導入量が非常に少ないのが現状である。今年 FIT 制度も実施され多数の導入が期待される(筆者)。

- 5/15 Plenary: "Conductors for Very High Field Magnets" Prof. David C. LARBALESTIER, NHFML, Florida State University

最近の高温超電導マグネット、NMR など高磁場応用のレビュー。特に、日米で開発が盛んである。 米国フロリダ高磁場センターでは、常電導のバックアップ磁場中に高温超電導コイルを入れて、合 計で35.4 Tの世界最高磁場を達成した。その他、BNL(米国)、NIMS(日本)での高磁場コイルの 例も紹介された。今後、HTS の応用先として非常に有望である。また、「4 K ではピン入り無しで 特性が変わらない」を強調していた。応用先と線材 R&D の関係は重要である。

- 5/16 表彰: 英国 Oxford Instruments 社(Oxford 大最初の spin out の会社の 1 つ) 創業者の Sir Martin WOOD 氏 (1927 年生まれ) にメンデルスゾーン賞が授与され、"Mendelssohn Award Lecture: From Early Superconducting Magnets to M.R.I." と題して、50 年にわたる超電導マグネットの開発、MRI の 1 号機、そして Oxford 社創設当時の様子が紹介された。特に、奥様と大学横の粗末な小屋で実験室兼会社を始められた様子は感銘を受けた。当日は、世界で初めて作製した NbZr の超電導マグネット (当時安定化材の Cu は無し)を持参されて、講演後、それを見る人で黒山の人だかりであった。Wood 卿は奥様とともにこれで多方面に多くの寄付をされている。日本でも、凝縮系科学において優れた業績を挙げた日本人研究者へのサー・マーティン・ウッド賞を創設されている。

#### - 韓国 SuNAM 社の特性

15D-OR1-03 G. Kim 氏、Ewha Woman's Univ. "Quality assurance through structural and optical investigation on superconducting 2G wires with 330,000 Am performance"

SuNAM 社製 GdBCO 線材: 短尺では  $I_c$  = 1530 A/cm,  $I_c$  = 4.4 MA/cm2 @77 K, s.f. (3.5  $\mu$ m  $I_c$ )、1 km の長尺では 330 A/cm がルーチン作製。高  $I_c$  -L の記録としては 422 A x 1000 m = 421,700 Am。  $I_c$  分布 (422~796 A/cm) では局所的に  $I_c$  が低下し、そこで 422 A/cm となっている以外は全体的に 700 A/cm 級の特性を示している。膜厚は、1.8  $\mu$ m で  $I_c$  は非常に高い。フジクラの世界記録(46.6 万 Am)に肉薄。

#### - 導体と線材

15D-OR1-01 W.Goldacker KIT "Status of high current 2G Roebel cables"

かねてから開発している大電流導体の Roebel 導体の開発状況についての講演。複数の CC 線材を一部カットして、交差させながら並列に並べ大電流を流すようにする。現在、2.6 kA を 6 m ケーブルで流すことに成功している。これをストランド状にして編みこんだラザフォード導体化、コイル形状での試験を考えているとのこと。AC ロスの検討も行っている。40-50 本の線材を使って、10 KA 以上の 1cを得ることを目標としている。

17P-P08-13 Nakamura ら, Fujikura "Delamination strength of IBAD/PLD coated conductor" フジクラの中村氏は、IBAD-PLDGdBCO 線材の剥離特性を各層ごとに丁寧に調べて、発表していた。 最も弱いのは GdBCO 成膜後の GdBCO/CeO<sub>2</sub> 界面あるいは GdBCO 内部での剥離で、その強度は 40-80 MPa であった。応用の際には、この範囲で使う必要がある。今後の指針として重要である。



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

- 機器応用

中国の全超雷導変電所

16A-OR2-02 S.Dai 6 "Development of World's First HTS Power Substation"

中国での超電導電力応用総合システムの紹介。西安市のさらに西 600 km の Baiyin 市に超電導変電所を作った。 $75\,m$  のケーブル、 $10\,kV$  のトランス、 $10\,kVA$  の限流器、 $1\,MJ$  の SMES が全部そろっている。2011 年  $2\,$  月から全部を連携して運転中である(個々には 2004,5 年に完成、試験していた。ケーブルは 15,000 時間連続運転中)。これにより、系統の電圧安定性などに効果があった(従来  $5\,\%$  から  $0.7\,\%$ に改善)とのことである。

中国の直流ケーブル

16A-OR2-05 L. Lin 5 "Development of a 360m/10kA HTS DC Power Cable"

中国では電力の節約が重要課題である。中国では世界の AI の多くを生産しており、その AI 精錬工場の電力使用量は、中国電力の 7%にも相当するとのこと。このため、超電導 DC ケーブル用いて電力消費量を低減する。今回、10kA の世界最大容量のものを開発した。長さは362m。2012年に試験予定。

MRI、リニア応用高温超電導コイル

17P-P05-02 Y. Terao ら"Development of a 3T MRI magnet wound with Bi-2223 tape conductors" 初めての高温超電導 MRI である。今回、高精度の電源と接続(はんだ付け)により、必要な精度 0.5 PPM を達成していた。実際の MRI 画像撮影も行ったとのことである。

16P-P04-02 M. Ogata ら" Development of 5 T-class YBCO Coil using around 50 K" 冷凍機冷却により YBCO で 5 T の磁場発生に成功。リニア応用を目指す。

展示

線材、機器、冷凍機各会社からの展示が 47 件もあり活発であったが、特に、鈴木商館ブースでは、HTS(Bi 線材)による小型 NMR(200 MHz)を発売していた(製造はニュージーランドベンチャー)。 非常 にスマート な形 で印象 が良い。 また、SuperPower 社から新しくなった SuperPower-Furukawa 社としての活動も印象的であった。

## 「2G 線材(1)」材料物性バルク研究部 部長補佐 町 敬人

- セッション 2G Conductors I (5/15)

KIT(ドイツ)の Goldacker は、Roebel ケーブルの進捗について報告した。Roebel ケーブルは 切断された coated conductors の集合体であるので、磁場中  $I_c$  (B, $\theta$ ) について素線よりも有利である と強調し、15 ターンのパンケーキコイルで自己磁場での  $I_c$ 低下率が75%であるのに対して、Roebel で同様のコイルを作製すると  $I_c$ 低下率が48%に抑えられるというシミュレーション結果を示した。 しかし実験はこれからという段階であった。 目標として50 Kで12 Tのマグネット用 bar を目指しているとのことであった。

しかしながら、同じ Goldacker グループの Kario の発表では、曲げ特性について困難があることが指摘された。彼女の報告内容は、Roebel ケーブルをスタックして Rutherford ケーブルを目指すというものであったが、そのためにはエッジワイズによる Ic 低下が少ない必要がある。Roebel を構成する単一のフィラメントは、超電導層が内側の場合 (圧縮) では素線と同様に Ic 低下は少ないが、



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

超電導層が外側では、23°以上の曲げ角度で  $I_c$ が低下して戻らなかった。次に厚さ 0.6 mm の Roebel ケーブルのエッジワイズ試験では、Roebel ケーブルがバラけてしまう現象が起き、 $I_c$ は不可逆的に劣化したと報告した。

その他のケーブルや線材作製関連として、住友電工の大松らはクラッド線材を用いたケーブルでは交流損失が低減した進捗について報告し、ISTEC の種子田らはバッファ層の自己配向メカニズムを探るために微細組織等を基にした議論を展開した。

線材評価について、G. Kim (梨花女子大、韓国) および T. Kato (JFCC) の講演があった。ISTEC-SRL で見出された TFA-MOD の 2 段階焼成による高密度化や全方向での  $I_c$  ( $B,\theta$ ) 特性向上試料について JFCC の加藤らが微細組織を観察した結果、ピン止めセンターとして導入された  $BaZrO_3$ が 1 段焼成ではクラスター化するが 2 段階焼成では均一に分布していることが明確に示された。九大木須研と共同研究している G. Kim らは、LTLSM の高電圧領域と彼らのマイクロラマンイメージングが良く一致を示し、特に in-phase mode (ab 方向) が C. mather constants からない情報を得られると報告した。

#### - セッション 2G Conductors II (5/15)

5/15 の午後のポスターセッションとして 16 件の発表がなされた。内容は、ピン止めセンター導入の特性、線材開発、交流損失低減に大きく分けられる。

ピン止めセンターとしては、 $BaZrO_3$  (ISTEC, 九大)、 $BaSnO_3$  (名大) そして  $BaHfO_3$  (九大、九工大) が取り上げられ、なかでも ISTEC の飛田氏 (現フジクラ) が見出した  $BaHfO_3$  は磁場中臨界電流特性向上が著しいため磁化法、磁気モーメントベクトル法、フラックスクリープなど様々な手法で高磁場まで測定がなされていた。例えば、九工大の永光らは、フラックスクリープ測定より $BaHfO_3$ 添加の $B_{c2}(0)$  が 40.3 T から 55.6 T まで増加したことにより高磁場特性が向上したと考えていた。また TFA-MOD 法による  $BaZrO_3$  ピン止め導入では、 $BaZrO_3$  の形成される温度は Y123 よりも低く、700 C程度であると九大の寺西らが報告した。名大の鶴田らは、ターゲット交換法を用いることにより Sm123 への  $BaSnO_3$  添加量制御を容易に行え、Ba 欠損 (0.04) よりも欠損のない方が全ての磁場で高い  $J_6$  を得られたと報告した。

東大の石渡らはフッ素フリーMOD 法による Y123 薄膜作製においては、酸素分圧が高いほど最適な焼成温度が高くなり、1~3 分間という短い焼成時間でも 2~3 MA/cm² (77K, sf) の特性が得られると報告した。ISTEC-SRL の高木らは、マルチターン reel-to-reel 焼成方式により仮焼成、本焼成を行い、 $200 \, \mathrm{m}$  長で最小  $I_{\mathrm{c}}$ が 370 A を越える均一な線材作製が可能となり、またその結晶成長のメカニズムについて報告した。九工大の和田らは、クラッド上の中間層を  $\mathrm{CeO}_2$  から  $\mathrm{Y}_2\mathrm{O}_3$  に替えることにより、すべての磁場領域で  $\mathrm{J}_{\mathrm{c}}(\mathrm{B})$ が  $\mathrm{CeO}_2$  よりも高くなり、これは磁束クリープの変化により説明ができると報告した。

ISTEC-SRL の片山らは、TFA-MOD 線材のレーザースクライビングにより、 $5 \, \text{mm}$  幅  $5 \, \text{分割}$ で損失を 1/5 に低減でき、さらには溝幅低減や  $20 \, \text{分割からの}$   $10 \, \text{分割への切出し等により短尺では} 5 \, \text{mm}$  幅  $10 \, \text{分割が可能となって来たと報告した。 古河電工の畠山らは、交流損失を低減できるように磁場方向を考慮に入れたケーブルアセンブリについて実験と数値計算での報告を行った。九大の片平らは、走査ホール素子顕微鏡を用いて、ケーブルに用いられる住友電工のクラッド線材の切断条件の検討を行い、レーザー切断が最適であると報告した。昭和電線の木村らは、ピン入りの YGdBaCuOの TFA-MOD 線材作製を行い、<math>3 \, \text{T}$  中で最小  $I_c$  が  $56 \, \text{A/cm-w}$  を作製できるようになったと報告した。住友電工の小西らは、クラッド基板上 Gd123 線材の開発について紹介し、 $4.5 \, \text{km}$  を越える線材作製を行ったことを報告した。



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

### 「2G 線材(2)」線材研究開発部 主任研究員 種子田賢宏

- セッション 2G Conductors III (5/16)

16D-OR3-01 Filamentarization of coated conductors by modified laser scribing method (町ら、ISTEC)

レーザースクライビング法による薄膜線材の複数フィラメント化加工技術開発の進捗状況報告。四つの洗浄工程を導入し、歩留りが 50→70 %に向上。3 フィラメントの場合、単長 300 m まで加工でき、変圧器用として 6,500 m 以上の線材を加工・供給した。新型の UV レーザーを導入し、シリンドリカルレンズでビーム形状を楕円形にすることでレーザー照射加工の線速が 54→180 m/H に向上。銀エッチング槽を大型化し、銀エッチング時の線速が 26→144 m/h に向上。分割数増加の試みとして、50 cm 長ではあるが 10 フィラメントへの加工に成功。

# 16D-OR3-02 Multi-Scale, Multi-Physics Characterization to Realize High Performance Gd<sub>1</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-5</sub> Coated Conductors(木須ら、九大)

薄膜線材の作製が nm オーダーのピン止め点導入から km オーダーの単長の線材の製造まで12 桁の長さスケールで制御しなければならない難易度の高い技術であることを指摘。各長さスケールで起こる現象について評価手法を開発しており、評価手法と得られる結果について紹介。例として、レーザー顕微鏡による局所磁束フロー損失の可視化、磁気顕微鏡による局所電流分布の可視化(小片試料観察からリール・トゥ・リール装置による全長検査へ)、理論モデルに基づいた磁場中輸送現象の解析、角度分解磁気モーメント測定による Jcの磁場印加角度依存性の推定を挙げていた。

# 16D-OR3-03 Combination of BaSnO $_3$ nanorods and $Y_2O_3$ nanoparticles: a novel vortex pinning architecture for enhancing the critical current of $YBa_2Cu_3O_x$ films (P. Mele $_5$ 、広大)

人工ピン材料として BaSnO<sub>3</sub>(BSO)ナノロッドと  $Y_2O_3$ ナノ粒子とを添加した YBCO 複合膜の不可逆磁場と  $J_c$  を調査。 $Y_2O_3$  の添加は B//c の配置において不可逆磁場に影響しない。30 nm 厚の BSO 添加層と 30 nm 厚の  $Y_2O_3$  添加層とを組み合わせると c 軸相関ピンとランダムピンが複合して導入される。一方、30 nm または 10 nm 厚の BSO 添加層と 10 nm 厚の  $Y_2O_3$  添加層とを組み合わせると c 軸相関ピンの効果が見られず、ロッド長の短い BSO がナノ粒子の振る舞いを示す。

# 16D-OR3-04 A novel vortex pinning architecture combined length-controlled nanorods and additional artificial defects for enhancing critical current of YBCO(松本ら、九工大)

長さを制御した  $BaSnO_3$  (BSO) ナノロッドと  $Y_2O_3$ ナノ粒子とを添加した YBCO 複合膜の不可逆磁場と  $J_c$ を調査。ナノロッドの長さとしては 30 nm または 60 nm 長が磁場中ピンニング特性の改善に効果あり。 $Y_2O_3$  の添加は B//c の配置において不可逆磁場に影響しないが、 $J_c$  の角度依存性は向上。

# 16D-OR3-06 Quick optimization of composition within YBCO thin films for improvement of superconducting properties in magnetic fields(一野ら、名大)

コンビナトリアル Nd:YAG-PLD 法による迅速な組成の最適化。BSO 添加量決定にこの手法を適用し、最適添加量として 3.2 vol%を得た。この値は他の報告例と比較し妥当であった。新しい人工ピン材料として  $Ba_3Cu_3In_4O_{12}$  と  $BaTbO_3$  を YBCO に添加してみたが、残念ながら改善効果は見られず。



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

- セッション 2G Conductors IV (5/17)

17P-P08-02 Observation of Local Superconducting Property in SmBCO Coated Conductor by Using Low Temperature Laser Scanning Microscopy (田上ら、九大)

EDDC(Evaporation using Drum in Dual Chamber)法で作製した SmBCO 試料を(1)室温でレーザー誘起熱起電力イメージング(LITE)法、および(2)低温走査レーザー顕微鏡(LTLSM)法で評価。主な損失が発生している箇所が LITE 法の位相像が反転する箇所に対応。この箇所をサンプリングし断面 TEM を調査すると線材長手方向について c 軸傾斜方向が異なる(時計回りと反時計回り)粒界であった。同様の調査を f 箇所について行い、f 軸傾斜角度とゼーベック電圧との間に比例関係があること(すなわち理論式通りであること)を実験的に確認。

# 17P-P08-11 Evaluation of Strength Properties and Fracture Morphology of Gd123 Coated Conductors by Pull Tests(谷江ら、京大)

SuperPower 社製 GdBCO 線材の剥離強度をロッド径( $3,6,7,8 \text{ mm}\phi$ )を変えて調査。剥離強度分布がロッド径により異なる原因としてロッド径が大きい程接合する面内における欠陥数が増え、観測される剥離強度が低強度側に収束すると考察。

### 17P-P08-13 Delamination strength of IBAD/PLD coated conductor(中村ら、フジクラ)

ハステロイから中間層を経て超電導層まで順次積層し、各層表面での剥離強度を評価。 $Al_2O_3$ 、 $Y_2O_3$ 、MgO まではハステロイ/ $Al_2O_3$  界面で剥離。 $CeO_2$  成膜後は  $MgO/CeO_2$  界面で剥離。これは  $CeO_2$  成膜時の加熱の影響で  $Al_2O_3$ 、 $Y_2O_3$  層の結合が強化されたため。GdBCO 成膜後は  $GdBCO/CeO_2$  界面と GdBCO 内部での剥離の二種類が存在。

# 17P-P08-16 Transmission electron microscopic observation of BaZrO in GdYBCO coated by MOCVD(福永ら、JFCC)

MOCVD- $(Gd_xY_{1-x})BCO$  (BZO 1%添加) 試料の断面 TEM 観察。BZO と思われるロッド状、および点状構造を観察。制限視野回折パターンより方位関係は(001)(Gd,Y)BCO//(001)BZO、(100)(Gd,Y)BCO //(100)BZO であることが判明。

### 「MgB2線材他」線材研究開発部 部長補佐 坂井直道

MgB<sub>2</sub>は、T<sub>c</sub>が 39 K と金属系超電導体としては高く、原料コストが安いこと、合成が比較的容易、配向が必要ない等の特徴を有していることから、PIT (パウダーインチューブ) 法による線材や焼結バルク体で、液体水素温度 (23.7 K) での利用が期待されている。ここで、開発の課題としては、さらなる特性向上と応用開発が挙げられる。以下に、筆者の興味を引いた発表をいくつか紹介する。

- PIT 線材: 合成法、添加物、HIP 処理などによる特性向上および多芯化や長尺化、機械的特性 に関して、12 件の発表があった。以下、代表的な発表を紹介する。

# 17D-OR5-03, G. Grasso (Columbus supercond.) "Development of long $MgB_2$ wires for high current cable and DC/AC applications"

同社は、PIT 法による  $MgB_2$ 長尺多芯線を市場投入しており、既に MRI のデモ機にも使われている。本報告では、液体水素冷却 DC/AC 線材に関する検討結果を報告した。それぞれの利用方法に応じて、安定化層の組成や構造を変化させ、過電流対策や AC ロス低減を図っているとのこと。



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

# 17D-OR5-04, H. Kumakura (NIMS) "Structure and properties of Mg diffusion processed MgB<sub>2</sub> multifilamentary wires"

Mg 拡散法を用いた高特性  $MgB_2$  多芯線に関して報告していた。SiC の添加、熱処理条件や線引き条件を最適化することで特性向上が可能とのこと。

# 17P-P10-02, M.Kodama (Hitachi Ltd) " $J_c$ -B properties and microstructures of premix PIT processed MgB<sub>2</sub> mono-filament wires"

PIT 法による  $MgB_2$ 線材の高密度化による  $J_c$ の改善に関して報告していた。通常の PIT 法では、密度が 50-60 %と低いところ、本報告では、 $Mg+B+MgB_2$ の混合原料を用いて高温長時間処理することで、80 %までその密度を高めることに成功し、それに従い  $J_c$  も改善されたとのこと。高密度化に関しては他にも HIP 法を用いた発表もあった。

- バルク関係: 合成法検討、複合化や緻密化による特性向上および磁石作製に関して 10 件の発表があった。以下に、代表例を記す。

# 17D-OR5-05, A. Yamamoto (Univ. Tokyo) "Spatial homogeneity of superconducting properties in MgB<sub>2</sub> bulk magnets"

 $MgB_2$ は、粒界が弱結合とならないため、焼結法によりバルク磁石作製が可能である。内部の $J_c$ 分布も均一であり、3Tを超える磁石作製も可能だとのこと。具体的に何に応用できるのかは今のところ不透明ではあるが、軽く、複雑形状の高特性バルクが安く、容易に作製できるようになれば、面白い利用方法が出てくることも期待される。

- 応用開発関係: 液体水素レベルセンサー、モータ、SMES、MRI 等への応用検討が発表された。 この内、モータとレベルセンザーに関して以下の発表で纏められていたので報告する。

# 16A-OR2-06, K.Kajikawa (Kyusyu Univ.) "Development of a liquid hydrogen transfer pump system with $MgB_2$ wires"

洋上風力発電などの再生可能エネルギーは、変動が大きい電力であり、電気として配送すると無駄が多くなる。そこで、得られた電力で液体水素を作製し、それを搬送することでエネルギー密度が高い搬送が可能である。また、液体水素は燃料電池の原料として用いればトータルシステムとして非常に利点が多いと考えられている。本発表では、MgB2線材(日立製作所製)を用いてかご型誘導同期モータを作製し、20Kで運転可能なポンプとしたこと、液体水素のレベルセンサーも MgB2線により作製したことである。ローター、ステーター共に超電導とすることで、ロスが低減してトルクと出力が稼げるようになったとのこと。かご型誘導同期モータはいくつかのメリットがあるが、最大の利点は温度変化に強いということである。温度が低い超電導状態では同期モータとして働き、温度が高くなり超電導から外れたときには誘導モータとなり、高いトルクを生み出す。この両状態を行き来して動作するため安定動作するとのこと。(T. Nakamura、Kyoto Univ., 16A-OR2-01 )また、これまで液体水素用のレベルセンサーにはあまり有効なものがなかったが、MgB2線をセンサーとして用いることで、より正確なレベル計測が可能となり、入力電力を削減することが可能になったということである。

- 薄膜: 発表件数は少ないが、興味深い発表があったので、報告する。 17P-P10-09, T. Doi (Kyoto Univ.) "Effect of surface roughness of Al tape on  $J_c$  of MgB<sub>2</sub> thin film"



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

MgB<sub>2</sub>薄膜を AI テープ上に成膜すると 10 MA/cm<sup>2</sup> (10 K) と PIT 法で作製した線材の 1,000 倍も高い  $J_c$  が得られる。本報告では、AI の表面状態と  $J_c$  の関係について調べたところ、まったく研磨をしていない粗い表面に成膜した場合でも非常に高い  $J_c$  が得られたことから、圧延しただけの AI テープ上に線を作製することで、コストが大幅に低減できるのではないかと主張していた。なお、表面粗さに影響されない理由は、 $MgB_2$  は細長いロッド状に c 軸成長するため、凹凸ができても a-b 方向のコネクションには影響しないためとのこと。

以上のように、MgB<sub>2</sub> は液体水素温度での利用が考えられている。利用温度的には Bi2212 と競合するが、丸線が容易に得られるという利用があることから、今後の展開が期待される。



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

## 「日韓髙温超電導ワークショップ」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

特別研究員 山田 穣

Japan-Korea Workshop on Superconducting Technologies for Electric Power System

May 19, 2012

Inamori Center, Kyushu University Fukuoka, Japan



Supported by
1) Research Institute of Superconductor Science and Systems, Kyushu University
2) Changwon National University







九大の会議場とプロシーデイングス表紙

ICEC/ICMC 会議(福岡市内国際会議場)の後、九州大学(伊都キャンパス)の稲盛ホールにて、5月19日(土)に日韓高温超電導ワークショップが開催された。両国で高温超電導線材、機器応用を検討している総勢20名ほどが集まり、ワークショップを開催した。メンバーは、韓国側が韓国電力(KEPCO)を中心とする韓国グループと日本のY系機器応用プロジェクト(MPACC)のメンバーである。

当日のアジェンダは、以下の通りで高温超電導 Y 系線材およびそれを使った超電導の電力応用や 日韓アジア電力構想を討論した。

チェアマン 九州大学-木須教授

5月19日(土)

### 10:05 - 10:35 Yutaka Yamada ISTEC-SRL:

R&D on RE123 Power Cable & Power Devices in Japanese National Project: MPACC: MPACC の現状特にケーブル、SMES 開発について.

#### 10:35 - 11:05 **()**Kyu-Won Jeong KEPCO:

KEPCO's HTS power system Development Plan & Introduction of Super Grid 韓国の新旧ケーブルプロジェクトの概要

### 11:05 - 11:25 Masataka lwakuma 九大:

Development of HTS Power Transformer with a Function of FCL in Japan 限流機能付き変圧器 について

#### 11:25 - 11:45 Masayoshi Ohya SEI:

Development of High-temperature Superconducting Cable 住電で進めているケーブル開発

#### 11:45 - 12:05 ②Keun-Tae Lee LS CNS:

Grid Application of HTS Cable System in Korea. KEPCO とのケーブルプロジェクト内容



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

## 

Neon Turbo-Brayton Refrigerator 大容量高温超電導用冷凍機

#### 

Future HTS Power Devices, esp. Wind Power and DC Reactor 風力用高温超電導発電機および DC ケーブル用リアクターの検討

#### 14:10 - 14:30 Hak-Man Kim U. Incheon :

HTS Power System Analysis for Grid Application

#### 14:30 - 14:50 Kideok Sim KICS :

Superconducting Power Cable Project of KOREA and a Suggestion on The Future Superconducting Renewable Energy Network

#### 14:50 - 15:10 Daibo Masanori Fujikura:

IBAD RE-123 CC フジクラ線材の最近の特性

#### 15:30 - 15:50 Seong-Hyun Moon SuNAM:

HTS Wire Development SeNAM 社線材の最新開発状況

### 16:10 - 16:30 Takayo Hasegawa SWCC:

Recent Status of Development of MOD Conductor and Current Lead System 昭和 MOD 線材の Jc-B 特性と電流リード開発

#### 16:30 - 16:50 Masateru Yoshizumi ISTEC-SRL:

Recent progress of R&D on REBCO coated conductor 人工ピンなど MPACC 線材特性の最近特性のトピックス

### 16:50 - 17:10 Takanobu Kiss 九大:

Characterization of HTS Wire for Power Device Application 日本の線材の特性。特に *I<sub>c</sub>* の温度磁場依存性

### 17:10 - 17:55 0:45 Panel Discussion

(Prof. Goda (九大)、Yamada、Ohya、Yoshida; Jeong, Moon, H.M.Kim) On "Possible collaboration between Japan-Korea superconductivity research community for future electric power systems & Possibility of Korea-Japan Grid Interconnection for East-Asian Super Grid" 超電導ケーブルを使った東アジア SuperGrid 構想に関する討論など

上記のように、日韓双方からプロジェクトに関して最新の結果の紹介があったが、主に韓国側の機器応用の重要なものについて詳細を記す。

#### ◆韓国電力(KEPCO)の高温超電導(HTS)応用の取り組み(上記①、②)

KEPCOでは過去 DAPAS, GENI-プロジェクトでケーブル応用を検討してきたが、今回さらに発展させて新しいプロジェクトを立てた。"HTS ケーブルの生産、設置開発" (2011.7-2016.6) である。総額 68MUS\$で、チェジュ島に 1 km の 154 kV ケーブルと 500 m の直流 80 kV ケーブルを作る。 KEPCO が工事全体、LS ケーブルが製造、設置を担当する。また、前 GENI-プロジェクトでは 22 kV の配電レベルでの各機器(ケーブル 410 m、限流器)を制作したが、これを実際に Icheon 変電所に統合設置し、実証試験を昨年 8 月から行っている。引き続き継続プロジェクトで連続運転試験を実施中である。また、KEPCO と LS ケーブルの両社は、米国の Tres Amigas Super Station にも出資して、米国での超電導 SuperGrid 計画に寄与している。非常に積極的であるのが印象的であった。

### ◆チャンワン大学 10 MW 風力応用および DC ケーブル用超電導リアクター (上記③)

10 MW の大型風力に関して発電機だけでなく、ブレード、ナセル、増速器を含めて詳細設計し、高温超電導利用の可能性を検討した。今回の検討で、重量が従来報告されている設計よりも大幅に軽くなった。すなわち、常電導機では 10 MW 機はヘッド部分(発電機、増速器などタワー上部の



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

機器全て)が 1000 トンを超え建築が難しい。しかし、超電導を使えば少なくても 700 トン以下にはなりそうであるとのこと。超電導発電機は、24 極の超電導回転界磁でその最大磁場は約9 T である。線材量は総計で 430 km で、超電導風力発電機の初期の設計検討であるデンマーク工科大の Abrahansen らが算出した使用量 1500 km から 1/3 程度に減っている。これは線材特性の向上によると思われる。

また、本発表では前記 KEPCO の DC ケーブルに対応した超電導リアクターの開発も報告があった。DC ケーブル (実際にチェジュ島 - 本土間には高圧直流送電ケーブルが敷設されている) には、そのリップル調整のために誘導成分をもつコイルが必要であり、超電導 DC ケーブルを作る際には、この誘導成分を得るコイル部も超電導化するとのこと。

## ◆大陽日酸 40-80 K 高温超電導用を目指した Ne ターボブレイトン冷凍機 (上記④)

大陽日酸から最近の大容量冷凍機開発の報告があった。MPACC-プロジェクトでこれまで行ってきた高温域で大容量の冷凍機の開発である。冷凍能力 2kW@65K で Ne を使って大容量を実現した。最近は、さらにコンパクト化を目指しており、2.35 m x 1.55 m x 高さ 2.5 m のものを検討中(ターボコンプレッサー、ターボ熱交換器、主熱交換器を含む)。今後の商品化も視野に入れて進めている。

◆Panel Discussion Japan-Korea, Future electric power systems & Possibility of Korea-Japan Grid Interconnection for East-Asian Super Grid:

最後にパネルデスカッションを行い、KEPCOが提唱する日韓、アジア SuperGrid 構想について議論した。先方は、日韓のみがエネルギー的に孤立した国、互いに助け合うことが必要との意見。政策的課題も重なるので、まずは、風力などでのローカルな地域での技術的課題解決およびメリットの確認が必要であり、同時にそれへ向けた日韓の協力が種々の機関で必要であると思われた。



Asian Super Grid 構想を討論するパネルデスカッションの様子



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3)

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

前回は、超電導マグネットをスタンドアローンで利用する装置について述べました。今回は、大きなシステムの一環として利用されている超電導マグネットとしてリニア用の超電導マグネットについて紹介します。

超電導リニアの本格的な開発は 1970 年代に始まりました。NbZr、NbTi、Nb<sub>3</sub>Sn などの超電導線材が新しく開発され、それらを用いたコイルが製作され始めた時期に当たります。このような時期に、超電導リニア高速鉄道のコンセプトを発案し、開発を決断したチャレンジ精神には驚嘆させられます。マグネットの開発と共に、1977 年に宮崎実験線、1990 年には山梨実験線が建設されて走行試験が重ねられた結果、2027 年のリニア中央新幹線の開業が決定されたことはご存じの通りです。

超電導リニアでは、車体の下部の台車の両側面に超電導マグネットが搭載されています。マグネットには数個のレーストラックコイルが収められています。超電導マグネットと地上コイルとの相互作用で、浮上力、推進力、案内力などが発生します。マグネット自体は十メートル余りでそれほど大きなものではありませんが、高速リニアシステムの最も重要な役割を担っています。

リニアのマグネットに要求される第1の技術的なポイントは、高速走行する車体に搭載するためのマグネットの小型化と軽量化です。このために、数百 A/mm²まで高電流密度化されています。超電導マグネットは地上コイルの作用により走行時に数百ヘルツで加振されます。この様な厳しい環境下でも、マグネットの安定性を保持する必要があります。この目的にかなうように、レーストラックコイルを樹脂で固め、その外周部を金具で押さえて金属チューブ(内槽と呼びます)に収めた特別な構造をしています¹)。電磁力対策として、内槽の直線部を補強します。これにより、電磁力に対して十分な強度を持ち、高速走行時の加振で大きな振動が生じない様な構成になっています。マグネットは地上から切り離された車体に置かれるので、電源が不要な永久電流で運転されています。但し、永久電流の時間的な安定度は、NMR や MRI に比べてずっと緩いレベルです。

第2の技術的なポイントは、液体ヘリウムや液体窒素の注液なく長時間に亘り稼働できる冷却構成です<sup>2)</sup>。液体ヘリウムは内槽とコイルの間のわずかなスペースに蓄えられているだけです。走行時に蒸発したヘリウムガスをマグネット上部のタンクに集め、小型 GM/JT 冷凍機で再び液体ヘリウムに戻します。コイルの周りの液体ヘリウムの量が少ないので、走行中にドライアップしない様に発熱を低く抑制せねばなりません。走行中に内層に生じる機械的ロスや電気的なロスで液体ヘリウムが蒸発しないように、内槽構造には工夫が施されています。マグネット容器は四角い弁当箱のような形なので、台車の両側に容易に取り付けることができます。

リニアの超電導マグネットには、オリジナリテイにあふれた時代を超えるアイデアがたくさん詰まっています。コイルの周りの液体ヘリウムの量をできるだけ少なく抑え、小型冷凍機を用いたクローズドの冷却系でヘリウムを循環冷却する構成は、現在の冷凍機伝導冷却マグネットのさきがけともいえる斬新なアイデアであると思います。高電流密度であるにもかかわらず、加振力の加わる厳しい環境下でクエンチのない走行を実現しているのも素晴らしい技術です。いずれにしても、斬



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

新なアイデアと長期間にわたる開発の継続により、超電導リニアはわが国の超電導技術を牽引する大きな駆動力の一つとなってきました。

従来のリニアのマグネットは NbTi コイルからなりますが、開発品レベルでは、JR 東海と東芝が Bi2223 高温超電導線材を用いたマグネットを開発しています <sup>3)</sup>。高温超電導コイルを用いて 20 K で運転すれば、クエンチが起こらず、走行時の発熱に対する冷却マージンを大きくできる上、冷凍機伝導冷却方式により冷却構成を簡略化できるという発想です。永久電流スイッチの構成が難しいですが、YBCO の薄膜を用いて、ヒータ加熱でオン・オフさせる方式を用いています。2005 年には、この高温超電導マグネットを用いて 554 km/h で走行する快挙をあげました。さらに JR 総研では、ReBCO マグネットの可能性も検討しているようです <sup>4)</sup>。高温超電導によるリニアは多くのメリットがある反面、線材の価格が欠点です。この点が折り合う様になれば、中央リニア新幹線に利用される様になる日もそう遠くないかもしれません。

ここまで超電導リニアについて述べました。超電導マグネットが中心になるシステムとして、この他に、加速器、核融合炉などがあります。加速器はノーベル賞に結びつくような大きな発見を生み出す人類にとっても重要な装置です。CERN が建設した LHC では、27 km 長のリングに沿って、数千台の2極偏向マグネットや4極収束マグネットなどが設置されています<sup>5)</sup>。衝突粒子の飛跡の検出器にも超電導コイルが使用されています。マグネットを冷却するために大型の冷凍装置を備えています。一方、核融合炉は、高温プラズマの誘導、閉じ込め、位置制御などに中心ソレノイド、トロイダルコイル、ポロイダルコイルなどを用います。コイルには数万アンペアの大容量の強制冷却超電導導体を用います<sup>6)</sup>。核融合は大きな電磁力が発生する巨大なシステムなので、コイルの機械的な強度やクエンチの生じない安定性が重視されます。加速器用のマグネットや核融合炉用マグネットについては詳細な解説が他にありますから<sup>5),6)</sup>、今は詳しい説明をそちらの方に譲りたいと思います。

今回まで3回にわたり「超電導マグネット開発のこれまで」について述べてきました。次回からは「超電導マグネット開発のこれから」として、ReBCOマグネットの開発上の技術課題と今後の可能性について述べていきます。

#### 参考文献:

- 1. 山地睦彦、前田秀明、真田芳直、東芝レビュー 46、p390 (1991)
- 2. 中島洋、低温工学 4、p148(2002)
- 3. 五十嵐基仁他、低温工学 H. Maeda, M. Urata, T. Wada, T. Yazawa and A. Sato, IEEE Trans. on Magnetics 25, p651 (2004)
- 4. 長嶋賢、鉄道総研報告 25、p17 (2011)
- 5. T.M. Taylor, IEEE Trans. Appl. Supercond. 10, p342 (2000)
- 6. 小泉徳潔、布谷嘉彦、中島秀夫、低温工学、47、p135(2012)



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】

やさしい人工ピンのおはなし(その4)

九州工業大学 大学院物質工学専攻 教授 松本 要

#### 1. はじめに

1986 年の高温超電導体の発見後、多くの研究者や機関がこの分野に参入し、超電導研究は一大ブームの時代を迎えた。特に 1986 年の暮れから 1987 年にかけては、チューらによる  $T_c$  = 93 K の超電導体 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>(YBCO) の発見で沸き立ち、科学史上、きわめてエキサイティングで稀有な年のひとつとなった。その後も精力的な研究によって次々と新超電導物質が発見され、たちまちにして  $T_c$  も 100 K を超えていった。(現在では、特殊な条件下ではあるが、水銀系超電導体で  $T_c$  = 164 K となり、室温の半分の温度にまで到達している。)こうした興奮の中で、すぐにでも液体窒素温度(77 K)で動作する超電導ケーブルや超電導コイルが実現するのではないかと期待が高まっていた。ところがその後、高温超電導はいくつもの難問を抱えていることが明らかになっていく。つまり  $T_c$  は高いものの、さまざまな理由により 77 K における  $J_c$  を大きくすることが大変難しく、そのため実用上重要な線材の実現には大きな壁が立ちはだかっていることが分かってきたのだ。難問克服のためには、その後 20 年以上にわたる研究者の地道な努力が必要であった。長年の研究の過程で開発されたのが高度な結晶配向化技術であり、そして本連載の主役である"人工ピン"である。

### 2. 粒界問題

高温超電導発見からその後の進展は大変早い。チューらの YBCO の論文投稿は 1987 年 2 月であったが、4.5 K ではあるが  $10^6$  A/cm² を超える高い  $J_c$  を持つ YBCO エピタキシャル薄膜の論文投稿が直後の 1987 年の 5 月になされている。一般に YBCO の粉を焼き固めて作った多結晶体の  $J_c$  は極めて低いが、エピタキシャル薄膜の  $J_c$  は高くできる。こうして  $J_c$  向上には粒界を無くすことが重要であることはすぐに明らかになった。

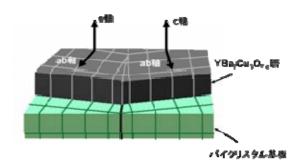


図1 バイクリスタル SrTiO3 単結晶基板上に形成された YBCO バイクリスタル

粒界と  $J_c$  との関係を明快に示したのはディモスらによる YBCO バイクリスタルの実験だった (1988 年)。これは  $SrTiO_3$  単結晶基板を切断して適当な角度ではり合わせて単一の粒界を作り出し、この基板上に YBCO 薄膜を形成することで同様に単一の粒界を持った YBCO バイクリスタルを作る方法だ。図 1 にその模式図を示した。結晶粒 1 と結晶粒 2 は単結晶なので特定の結晶方位を持っ



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

ており、それぞれの方位のなす角度を傾角という。(傾角が  $10\sim15$  度以下を小傾角粒界、それ以上を大傾角粒界とよぶ。)角度をさまざまに変化させながら、粒界を横切って流れる  $J_c$  を測ることで粒界と  $J_c$  との関係が分かる(図 2)。図から明らかなように傾角が 5 度以上になると急激に  $J_c$  が低下している。多結晶体には多くの粒界がありその角度もランダムで小傾角と大傾角粒界が入り混じっており、その結果として必然的に  $J_c$  は低くなってしまう。こうして、実用的な超電導線材の作製には長尺にわたって粒界がほとんどない線材を作り上げることが必須であることが分かった。これは大きな技術的ブレークスルーを必要とする難問だ。

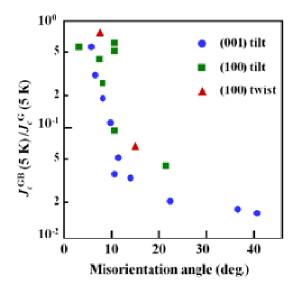


図 2 YBCO バイクリスタルを用いた  $J_c$  と粒界傾角の関係

#### 3. 磁束融解とそれに関連する問題

一方、超電導体に磁場を加えると渦糸が形成され、アブリコソフ格子(磁束格子)が形成されることは既に述べた。しかしながら、高温超電導体においても同様にアブリコソフ格子が形成されるが、その振る舞いは、従来の超電導体に比べて大きく異なることが発見直後から次々に明らかになった。1987年の夏には、 $T_c$ よりもかなり低温側でアブリコソフ格子が融解する磁束融解現象が早くも報告された。1988年には関連する不可逆磁場の存在や巨大磁束クリープといった現象も報告された。これらは高温超電導体の特異な結晶構造と、 $T_c$ 近傍では大きな熱ゆらぎの影響を受けるために現れたものであり、従来超電導体においては存在しない、あるいは無視できる現象であると考えられた。例えば YBCO は  $T_c$  = 93 K を持つがその磁束融解は 75 K 近傍で起こるとされた。ビスマス系やタリウム系といったさらに  $T_c$  の高い物質では磁束融解は 30 K 当たりで起こるというのだ。

磁束融解が起こるとどのような問題が起こるのか? それは次のような例を考えれば明らかだ。 従来超電導ではアブリコソフ格子は  $H_{c2}$ 以下の広い磁場範囲ではっきりと定義できていた。 個々の 渦糸は磁束量子を持っておりお互いに磁気的に反発することで三角格子を組む。 これをしっかりと 編まれたカーペットみたいなものと考えてみよう。床に置かれたカーペットが滑らないようにする ためには、端を画鋲で止めてしまえばいい。 ところがカーペットが液体のようなものであったらどうだろうか。 いうまでもなく画鋲は全く効かないでカーペットは床の上をするすると流れて行って しまうはずだ。 渦糸、 あるいはアブリコソフ格子そのものが運動してしまうと、既に述べたように 抵抗が発生してしまう。 これは高温超電導体が 77 K では使い物にならなくなることを示している。 これも粒界問題に劣らない第一級の難問だ。



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

### 4. パーティは終わった?

このような当時の状況を受けて、権威ある米国の科学雑誌「Science」は 1989 年 5 月にある記事を掲載する。それは「Superconductivity: Is the Party Over?」と題する研究ニュースだった。その内容は、磁束融解によってたやすく抵抗が発生してしまうことから、ビスマス系やタリウム系はもとより、YBCO においてもその産業的な展開は大変厳しいと述べたものだった。さらに、もしこのまま  $T_c$  が上昇して聖杯である "室温超電導体"が現れたとしても、熱ゆらぎでたやすく渦糸が運動してしまうだろうからゼロ抵抗は実現できないだろう、という教科書で有名なティンカムのコメントまで添えられていた。名だたる一流の研究機関の研究者たちのコメント等が多数添えられ悲観的な内容であったことから、高温超電導に参入した企業や多くの研究者たちに冷水を浴びせる結果となった。この記事にすぐに反論したのが YBCO を発見したチューだった(1989 年 7 月)。超電導の技術的な将来性を考えれば研究を続けるべきであること、また現実に薄膜やバルクで  $J_c$  が向上しつつあることを指摘した内容であった。また刺激的すぎるタイトルと研究の進展に対する気短さにも疑問を呈していた。(Science 誌は 1989 年 12 月に同じ執筆者による「Superconductivity: Party Time Again」を掲載し、バルク超電導体の進展について触れるのだが・・・)

ともあれ、Science 誌の記事は刺激的ではあるものの、問題を的確にとらえてはいた。そして同時にその解決策にも触れていた。それは有効なピン止めの導入による融解の抑制であった。1988年12月、すでにフィッシャーによって新しい熱力学的相の存在が理論的に指摘されていた。そして1989年にはYBCO 薄膜において実験的にこの相、すなわち磁束グラス相の存在が確認されたのだ。YBCO 薄膜はエピタキシャル成長しているとはいえ、多数の微細な結晶欠陥(酸素欠損、転位、その他の欠陥)が薄膜成長過程で自然に導入されていると考えられる。これらの欠陥が渦糸を草の根的にピン止めすることで、多数の渦糸がからまりあったスパゲッティ(日本ならうどんかそば)のような状態になり、渦糸の運動が凍結されてしまうというのだ。実際にYBCO 薄膜の  $J_c$  は当時、77 K で  $10^6$  A/cm² を超えるようになってきており、ピン止め導入の有効性が理解されるようになっていたのだ。

### 5. 解決の糸口

ところで、第一の難問の粒界問題はその後どうなったのだろうか。もちろん良く知られているように、最初のブレークスルーは銀シースビスマス線材で実現した。これはビスマス系超電導体が劈開しやすい性質を巧みに利用したもので、77 K での実用超電導線材の実現に成功した。もうひとつの成功例は YBCO コーテッドコンダクターだ。これは高度な結晶配向化技術の賜物であり、最初の突破口はフジクラの飯島による IBAD だ(1991 年)。こちらのサクセスストーリーはこの連載で触れるスペースはないので、Web21 の別の記事を参照した方がいいだろう(「Y 系超電導線材開発の道のり」ーその 2)。http://www.istec.or.jp/web21/series/series2011-1.pdf

一方、ピン止めに関する新たな進展はほぼ同時期に、別の方向からやってきた。1991年、シバーレは YBCO 単結晶に高エネルギーのスズイオンを照射して、結晶内部に直径  $5\,\mathrm{nm}$  の多数のコラムナー欠陥を導入し、その超電導特性を調べた。その結果、 $J_c$ の大幅な増大とともに不可逆磁場の増大も実現したのだ。単結晶に後処理によってコラムナー欠陥というピン止め点を大量に導入したという点で、この手法も一種の人工ピンに数えられるものであろう。この結果は理論家の興味を呼び起こし、磁束グラス相とは異なる新たな熱力学相、すなわちボーズグラス相の発見の契機となっていく。こうして Science の記事を前後して、高温超電導研究はより多彩さと深みを増し、応用研究に向けて大きく舵を切っていくことになるのだ。次回は、いよいよ本主題である人工ピンの成り立ちについて触れてみたい。

高温超電導に関わる参考書として以下を上げておく。



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

### 参考文献:

1. 立木 昌、藤田敏三「高温超電導の科学」、裳華房(1999年)



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**:「超電導の新現象発見 磁力線、物質をすり抜け」という記事がありましたが、どういう 現象が発見されたのでしょうか? また、どういう応用が期待されるでしょうか?

A: 超伝導の研究は、電場が関与する現象と磁場が関与する現象の発見が交錯しながら進展してきました。歴史的には、1911 年にゼロ抵抗現象や完全電気伝導を示す超伝導現象が発見(1913 年ノーベル物理学賞受賞)され、1933 年には完全反磁性現象を示すマイスナー効果\*7 が発見されました。1962 年になると超伝導デバイスの基礎であるジョセフソン効果が発見(1973 年ノーベル物理学賞受賞)されました。ジョセフソン効果は量子電圧標準を実現し、現代科学技術分野全般に大きな波及効果を及ぼしました。超伝導現象を応用した磁気共鳴画像装置(MRI)の開発は、産業、医療分野を大きく前進させ、ジョセフソン効果を応用した高感度に磁束を測定できる超伝導量子干渉計(SQUID)は、多くの重要な応用場面で役立っています。

ジョセフソン効果と量子力学的に完全に双対な現象がコヒーレント量子位相スリップ(CQPS)効果です。ジョセフソン効果は、弱く結合した2つの超伝導体の間に、超伝導体の電子対がトンネル(透過)することによって超伝導電流が発生する現象です。ジョセフソントンネルでは、電子(電子対)がエネルギーを散逸せずトンネル障壁をすりぬけます。CQPS 効果では、磁束がエネルギーを失うことなく量子的に超伝導細線を横切る現象です。ジョセフソン効果における電子対が絶縁体(空間)をトンネルすることと類似しています。また、ジョセフソン効果では、電子対の運動の障壁になるのは、絶縁体(空間)ですが、CQPS 効果の場合は、磁束の障壁は超伝導細線になります。CQPS 効果は昔から理論上予言されていましたが、適合する実験材料が見つからず、また評価方法も確立できなかったこともあって実証されていませんでした(図1)。



図1 ジョセフソントンネル接合(左)とコヒーレント量子位相スリップ(右)

CQPS 効果を明確に観測するため、酸化インジウム(InOx)薄膜を用いて幅 40 nm の細線を含んだ  $4\times8~\mu$ m の大きさの超伝導ループを電子リソグラフィで作製しました。(図 2) このような構

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

造では、完全反磁性に反して磁束がエネルギーを失うことなくトンネルすると、磁束が超伝導ループを出入りし、既に開発したジョセフソン接合を用いた磁束量子ビットに相当するデバイスが実現できることが予想されました。また過去の研究により、このような量子ビットで量子力学的なトンネルが発生すると、原子と同等の性質をもつ量子ビットは、基底状態から励起状態へとエネルギーを変化させ、ギャップ構造を生じることが分かっていました。

## 磁場は図面に垂直方向に印加

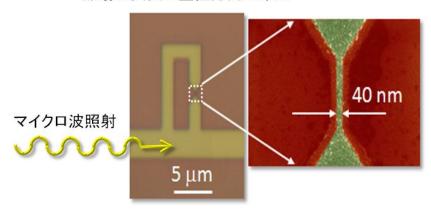


図2 超伝導細線を含んだ超伝導ループ

この量子ビットのエネルギーレベルを観測するために、外部から非常に小さな磁場を変化させながら印加し、同時に接続したマイクロ波共振器から、ギガヘルツレベルのマイクロ波を照射してエネルギー分光測定を行いました。その結果、エネルギーバンドには約5 ギガヘルツのギャップが存在することを確認しました(図3)。これは磁束が量子的にトンネルしていることを証明するもので、理論上予想されていた CQPS 効果を実証し、ジョセフソン接合を用いない新しい超電導磁束量子ビットの試作に成功したことも意味します。

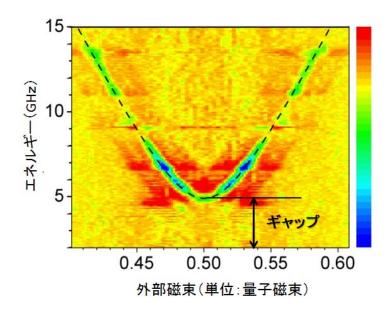


図3 エネルギー分光測定法で得られたエネルギーバンド図



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

CQPS 効果は、ジョセフソン効果と量子力学的に完全に双対であることから、ジョセフソン効果が達成できることは、全てその双対のデバイスの実現が可能だと考えられます。最も期待を寄せている応用は、現存のジョセフソン効果がもたらした量子電圧標準と双対関係にある CQPS 効果による量子電流標準の実現です。これまで単電子トランジスタを基に量子電流標準の実現が試みられてきましたが、単電子トンネルが確率的に起こることや、背景電荷のばらつきなどの問題があり、標準構築には至っていませんでした。CQPS 効果にはこうした問題が存在しないため、効果的な量子電流標準の実現が比較的簡単にできると考えられます。既に量子電圧標準と量子抵抗標準は現存しているので、量子電流標準の実現が達成できれば、「量子三角形」と呼ばれる自己完結した量子標準系が初めて実現することになります。

回答者:独立行政法人理化学研究所 量子コヒーレンス研究チーム チームリーダー 蔡 兆申 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。」