超電導 Web21
Superconductivity

超電導 Web21

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 12 月号　　2012 年 12 月 10 日発行

掲載内容（サマリー）：

トピックス：
○第 21 回国際超電導産業サミット（ISIS-20）報告
○チュニスにおける EnerSol-WSEF の報告
○「TcSUH（the Texas Center for Superconductivity at the University of Houston）及び YBCO 発見の 25 周年記念講演会に出席して」

特集：超電導電力機器技術の展開
○超電導電力機器の開発動向
○高電圧超電導電力ケーブル技術開発の進展
○日本初『高温超電導ケーブル』の電力系統への連系運転開始
○超電導変圧器技術開発の進展

○超電導関連 2012 年 12 月-2013 年 1 月の催し物案内
○新聞ヘッドライン（10/20-11/16）
○超電導速報－世界の動き（2012 年 10 月）
○標準化情報　12 月のトピックス
　　超電導国際規格に関する第 10 回パネル討論会概要」報告
○特許情報－線材ジョイント
○「電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会参加」報告
○「Applied Superconductivity Conference (ASC) 2012」報告
○最新超電導プロジェクト情報（ASC2012、ISIS-2012 にて収集）
○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 6）
○読者の広場(Q&A)－「まず超電導地磁気センサの詳細を教えてください。地震発生が瞬時にわかるようになったそうですが、数秒間早くなったということでどういうメリットがあるのでしょうか?」

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

KEIRIN

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

© ISTEC 2012 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2012 年 12 月 10 日発行

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

トピックス：第 21 回国際超電導産業サミット（ISIS-20）報告

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
国際部長　岡崎 徹

ISIS-21 会場の様子

平成 23 年 10 月 4（木）～10 月 6（土）、アメリカ西海岸のシアトル近く、オレゴン州ポートランドにて第 21 回国際超電導産業サミット（ISIS-21）が開催された。ポートランドは全米一の環境に優しい都市として知られている。前回の ISIS-20 参加国は従来の日本、アメリカ、ヨーロッパ、ニュージーランド、韓国であったが、今回はロシアが正式メンバーとして参加しており、超電導業界の広がりを感じた。国ごとの参加者数は、ホストであるアメリカが 16 名で最も多く、次に日本の 11 名、ヨーロッパの 4 名、ニュージーランドと韓国がそれぞれ 3 名、ロシアからは 1 名であった。

今回は以上のような各国での超電導業界の広がりを受けて、特に会合のテーマを定めずに各国ごとの現状を報告し、そのなかで ISIS として何か促進できる役割が果たせるかどうかを議論する場となった。

会議では冒頭にアメリカの Alan Lauder より ISIS の歴史が紹介された後、二人の偉大なる先駆者、田中昭二先生と Dr. Jens Mueller の訃報について紹介され黙祷が行われた。次に世界的な景気後退の局面下で各国における高温超電導の開発 PJ を相互に開示し、議論して将来に繋げていこう、という今回の会議趣旨が提示された。

ニュージーランドからは HTS110 社の Co-CEO、Mt. Tye Husheer と政府 100 %出資の IRL という研究機関の Group Manager, Dr. Robert Buckley から報告があった。ニュージーランドは小国ながら着実にビジネス化を進めており、ニッチな市場ながらも十分利益の出る事業として継続していく事への自信を見せた。主な期待分野は NMR 用マグネットおよびシステムである。

ヨーロッパの Dr. Joachim Bock からは NEXANS のケーブルおよび限流器（FCL）における着実な進捗が報告されている。特に FCL については商業ベースで導入した例があると報告がされた。FCL は大容量化すると Y 系線材を利用する。ケーブルでは Ampacity という計画が紹介され、相当な線材量が必要となるが、この計画に対する線材供給者は多数存在するため材料の問題は無いとしている。

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

Siemens の Dr. Tabea Arndt からはその他の各種計画が報告された。目新しいのはヨーロッパにて EUROTAPES という線材開発計画が始まった点である。4 年半で 20 億ユーロの資金を投入し、各種用途に適した線材を開発する。センサも有望な用途であるとの事である。

ロシアの Dr. Victor Pantsyrny からは各種ロシアの PJ が紹介されている。ケーブル、FCL、変圧器、SMES、モータ、発電機と従来の応用用途をまんべんなく開発している。中でもサンクトペテルブルクに導入を計画している 2.5 km クラスの AC および DC ケーブルの導入が目を引いた。

日本からは従来の計画紹介の後、電線四社から現状が報告され、また最近のエレクトロニクス関連への応用も紹介されている。

韓国もロシアと同じく各種用途をまんべんなくこなしている。Prof. Minwon Park からは風力発電機の超電導化についてその必要性から詳しく報告され、この分野への並々ならぬ意欲が感じられた。

米国であるが、2012 年にはついに新規の超電導に関する DOE ファンドが無くなり、継続している PJ も多くが 2013 年には終了する現状が報告され、他国と比べてかなりトーンダウンしているイメージはぬぐえない。しかしその中でもニューヨークワシントン間を接続する Maglev 計画や、超電導航空機など夢のある計画は持ち上がっている。

総合討論では ISIS として横断的な PJ を立ち上げるのはどうか、などの議論もだされたが、すぐには難しく当面現在の ISIS の形態を維持するのが良いであろう、との結論に達している。　アメリカでは政府の方針もあって研究予算は削減されているが、世界に目を向けると逆に新 PJ も立ち上げられるなど温度差が感じられた。

来年度は順番として日本での開催になり、ISTEC が主催する予定である。国際超電導シンポジウム（ISS2013）が 2013 年 11 月 18 日（月）～20 日（水）にて行われるため、これに引き続いて開催される方向である。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

トピックス：チュニスにおける EnerSol-WSEF の報告

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
常務理事・事務局長　近藤亮平

EnerSol WSEF の会場

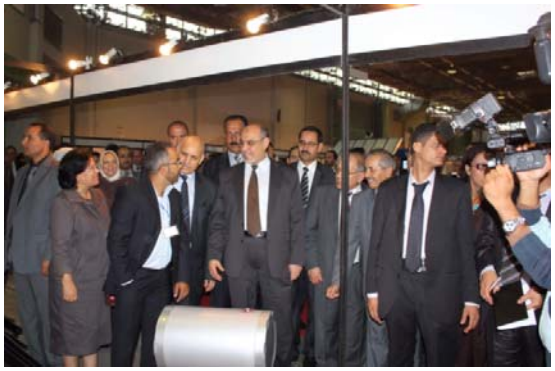
1. EnerSol-WSEF とは

2002 年にチュニスで開催された国連工業開発機構の太陽光発電セミナーにおける推奨などに由来し、今回、初めて EnerSol-WSEF 2012（World Sustainable Energy Forum）が開催された。その目的は、産学官および社会一般からの幅広い参加者が再生可能エネルギーを中心とした政策や科学技術やプロジェクトの最新情報を交換し、特にこれからダイナミックな発展が期待されるアフリカと中東各国に貢献することにある。

2. イベント全体の状況

EnerSol-WSFF 2012 は 11 月 14～16 日の三日間に亘り、チュニス市東部の Kram 地区にある Park 国際展示場で開催された。全体としては各種事業主体による百件余りの展示と、政策・科学技術・ビジネスのフォーラムで構成される。展示場には主催者が 1 万人以上の来訪者を見込み、フォーラムには約十ヶ国から百名程度が参加した。EnerSol の会長である Salah El HNNACHI 氏はチュニジアの政界で顔が広く、駐日大使として十年間も赴任された親日家であり、今回はその人脈でも参加者が募られた様子であった。

開会初日には、首相である Hammadi JEBALI 氏が来賓として顔を出され多くのマスコミが集結した。チュニジアは『アラブの春』の発端となった『ジャスミン革命』の地であるが、現在は憲法制定議会のもとで首相と大統領が存在、JEBALI 氏が The Head of Government として政府全体を統括しているとの由であった。同首相は、物理学者であり再生可能エネルギーにも造詣が深いとのことで、熱心に展示場を視察して回られた。



多くの来場者、マスコミ、SP に囲まれながら首相（中央）が会場を視察

3. Forum の内容（Policy&Business,Science&Technology）

フォーラム開会の挨拶として、同国の産業大臣が JEBALI 首相に代わり仏語にて熱弁を振るわれた。以下フォーラムの概要を報告する。

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

産業大臣（右から 4 人目）と主催者（同 3 人目）による開会挨拶

- 主要なテーマとして、サハラ砂漠でのメガ・ソーラー構想に関する報告が幾つかなされた。EU からは、サハラ PV（Photovoltaic Power Generation,太陽光発電）で 2 GW 級の発電を行い欧州に送電してベースの電源としたいこと、MENA（中東北アフリカ地域）で PV・風力エネルギー政策を統一して EU への送電を期待すること、などの報告があった。日本からは、サハラ・ソーラー・ブリーダー計画について、PV の潜在力が極めて大きいこと、砂漠のケイ素を活用してパネルを作成しつつ PV による電力は砂漠の緑化にも活かすべきこと、地中海を横断直流超電導送電の実現性と冷却を含めたシステム全体で評価することの重要性、など意義深い報告がなされた。

- 再生可能エネルギーに関しては、電力系統強化が重要であること、「PV と地熱 HP（Heat pump）システム」或いは「PV と太陽熱発電」の組み合わせによる高効率化、PV とディーゼル発電の組み合わせによる蓄電池不要の供給システム、など興味深い報告があった。また、チュニジアから「雇用者数の多寡（人／kw）という観点では『風力＞PV＞ガス・石炭』である」という地元経済情勢を反映した研究報告がなされた。
なお、筆者からは東日本大震災以降における日本の再生可能エネルギー政策の状況を報告した。

4. その他

『革命通り』西端の中央分離帯（車の向こう側に鉄条網と装甲車）

フォーラムの合間に市中心の『革命通り（ブルギバ通り）』を訪ねてみた。事務局の女性から「今日はデモが予定されているからくれぐれも気をつけて」との忠告を受けたが、男性事務局員からは「チュニスは絶対に安全、日本の皆さんにも安心して来るよう伝えて欲しい」と頼まれた。実際の『革命通り』は、ごく普通に大勢の人々が行き交っており、デモ隊からは歌声が聞こえた。しかし通りの中央には装甲車が駐留していて、革命の名残を感じさせられた。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

トピックス：「TcSUH（the Texas Center for Superconductivity at the University of Houston）及び YBCO 発見の 25 周年記念講演会に出席して」

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 所長　塩原 融

TcSUH 25th Anniversary Symposium
Hilton University of Houston, Shamrock Ballroom
4800 Calhoun Road, Houston, TX 77004

2012 年 11 月 19 日に、TcSUH（the Texas Center for Superconductivity at the University of Houston）主催の"TcSUH 25th Anniversary Symposium（TCSUH 及び YBCO 発見の 25 周年記念講演会）が開催され、この 25 年間を振り返ると共に、今後の研究への期待がパネル討論会形式で進められた。このパネル討論会に先立ち午前中には基調講演の Session が公開で行われ、6 人のノーベル賞受賞者が講演した。各基調講演は 20 分で、6 人のうち 2 人（酸化物超電導の発見者の Dr. K. Alex Mueller と BCS 超電導理論の Prof. Leon Cooper）は Video による講演であった。米国における記念講演会であることと、非常に注目度が高い YBCO 発見の 25 周年であることから、日本では考えられないノーベル賞受賞者の講演が続いた。筆者としてもこれだけの特別講演が聴けたことは感激であった。

基調講演は Annette Bussmann-Holder 教授（University of Basel）により Alex. Mueller 博士が 1963 年にスイスの IBM チューリッヒ研究所就任以降、固体物理学の研究から高温超電導の発見、その後の研究内容及び近況を Mueller 博士からの Video Letter を交え紹介された。

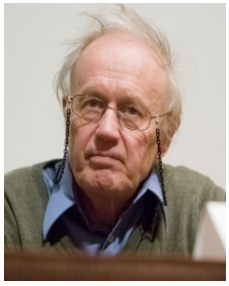
また超電導の関係ではBCS理論でノーベル賞を受賞されたLeon Cooper 教授がVideo LetterによりBCS理論構築までの苦労談（？）を交えて講演され、最初はエネルギー・ギャップを説明しようという方針のもとで、ファインマン・ダイアグラムや繰りこみ手法を駆使しようとしたが、起点でのエネルギー・スケールに比べ、超電導状態になることによるエネルギー利得が桁違いに小さいために説明が出来ない壁に突きあたったこと、そして、フォノン交換が電子間引力を生むことは既に示唆されていたが、教授はこれがフェルミ面上の電子に働いたときに問題となることに気付いたこと、しかし、クーパーペアは重なりあっているので単純なボース・アインシュタイン凝縮はしないのでは、というのが博士の直感だったとのこと等、25周年の祝辞と併せて述べられた。

午前の基調講演で約 20 分間の Video による講演・祝辞を行っている
Allex Mueller 教授（左）と Leon Cooper 教授（右）

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

続いて、超電導と非常に関係の深い、ヘリウム3超流動（Superfluidity）に関しての2件の講演が行われた。超電導は、極低温で電子が流れる際に突如電気抵抗がなくなる状態であり、超流動では同様に冷却により液体の粘性が突如消失し、流体力学的に抵抗なく流れるという現象である。ヘリウム4 は超流動現象を示したが、ヘリウム3 は超流動にはならないだろうと長い間考えられてきたが、1972 年にD. M. Lee 教授らにより、ヘリウム3 の超流動が0.0026 K（2.6 mK）、34 気圧下で発見された。このヘリウム3の超流動発見に関してLee 教授による講演が行われた。常圧での転移温度はおよそ1 mKであり、ヘリウム4と比べると非常に低い。ヘリウム3 は核子が3 個（奇数個）のフェルミ粒子から成るためフェルミ粒子である。フェルミ粒子系はそのままでは凝縮状態とならないために、ヘリウム4 に比べると超流動転移温度が非常に低い。2個のヘリウム3 が対を形成すればボーズ粒子となり、ボーズ･アインシュタイン凝縮を起すことが可能であり、ヘリウム3の超流動はヘリウム原子の対が凝縮した状態と考えられる。BCS 理論においてはフェルミ粒子のペアのスピンはゼロとされているが、ヘリウム3の超流動では、内部自由度を有している。BCS 理論では電子ー格子相互作用により引力が働き電子が対を形成したが、ヘリウム3に対してはスピン揺らぎを媒介にして引力が働くと考えた。このスピン揺らぎによる対相互作用に関して、A. J. Leggett 教授による講演が行われ、複雑な相図も紹介された。

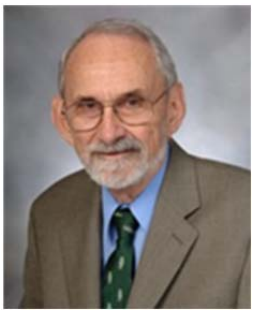


ヘリウム 3 超流動に関して基調講演を行った
Anthony James Leggett 教授（左）と David Morris Lee 教授（右）
出典: フリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia）』:
Nobel Laureate Sir Anthony James Leggett in 2007.jpg、Nobel Laureate David Morris Lee in 2007.jpg

続いて、Robert F. Curl, Jr. 教授によりフラーレン C60 に関しての講演が行われた。教授は原子のクラスタを作成するのに適切なグラファイトのターゲットに対してレーザ照射による蒸気化実験を行い炭素が大きいチェーンあるいはクラスタが形成されたことを確認した。実験結果として、質量のピークが 720（60 個の炭素原子に対応）にあることに注目し、そして次のピークが 840（70 個のカーボンに対応）で、そして、多様な条件下で形成されるという非常に高い安定性を示していることを発見した。この実験結果は、60 個の炭素原子の炭素分子が形成されたことを示しているが、構造的な情報は少なかった。実験を繰り返したのち、考えられるのは球状分子であると結論付けした。しかし 60 個の炭素原子が球を構成するためにどの様に配置されているかは正確には知られていなかったが、共同でノーベル賞を受賞した Harry W. Kroto 教授はモントリオールの万博の展示での幾何学的な 5 角形と 6 角形を含む閉じた半球状のドーム構造から、この構造が C60 において炭素原子が配置される方法であると考えた。C60 自身は Buckminster Fullerene あるいは省略され Bucky balls と知られている。また楕円状 C70 のようなその他の籠状の構造も発見され、これら籠状の分子の族全体はフラーレン 'fullerenes' と呼ばれていること等も講演された。

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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



フラーレン C60 関して基調講演を行った Robert Floyd Curl, Jr. 教授
出典：Rice University · James A. Baker III Institute for Public Policy

基調講演 Session の最後は、Burton Richter 教授と共にジェイプサイ中間子の発見により 1976 年にノーベル物理学賞を受賞した Samuel C. C. Ting 教授により講演が行われた。実験は高強度の陽子線を利用し、ターゲットを衝撃照射し、粒子のシャワー（showers of particles）を複雑で精緻な検知器で検出させることに成功し、これが新しい素粒子の発見に繋がっている。尚、Richter 教授のグループは新粒子を Ψ 粒子と呼び、Ting 教授のグループは J 粒子と呼んだ。 Ψ の由来は、発見されたときの粒子の軌跡がギリシャ文字の Ψ の形をしていることからである。 J 粒子については、一説には Ting の漢字表記「丁」に似たアルファベット J が選ばれたからと言われている。 現在は二つの呼び名を合わせて、J/Ψ(ジェイプサイ）中間子と呼ばれている。講演では、実験が理論と同じくらい重要であることを強調した。

以下に基調講演における司会者、講演者とその講演題目プログラムを添付する。

MORNING SESSION

Creativity & Innovation in Frontiers of Materials, Science, and Technology

This special session provides a unique opportunity to hear renowned scientists share their personal insights on major discoveries in materials, science and technology.

Chairs will provide 2-minute introductions of each speaker, and speakers will have 15 to 18 minutes for each talk, with presentations pre-loaded before the session begins. Each speaker block is thus shown as 20 minutes. Brief speaker bios will be printed in the official program.

Session Chairs

Prof. David Pines, *Founding Director, Institute for Complex Adaptive Matter (ICAM); Distinguished Professor of Physics at UC Davis, and Research Professor of Physics/Professor Emeritus of Physics and Electrical and Computer Engineering in the Center for Advanced Study, University of Illinois at Urbana-Champaign*

Prof. Dr. Øystein Fischer, *Professor, Départment de Physique de la Matière Condensée (DPMC); Founder and Director, Swiss National Center of Competence in Research (NCCR); Initiator, Geneva Creativity Center, University of Geneva, Switzerland*

Thoughts on the Discovery of the First High Temperature Cuprate Superconductor *9:15 – 9:35*

Dr. K. Alex Mueller *(greetings/video lecture), IBM Zürich Research Laboratory, Ruschlikon, and Department of Physics, University of Zürich; 1987 Nobel Prize in Physics for superconductivity in ceramic materials. Introduction by* **Prof. Dr. Annette Bussmann-Holder**, *Department of Physics, University of Basel, and Max Planck Institute for Solid State Research, Stuttgart, Germany*

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

Origin of the Theory of Superfluid He3 and Superconductivity *9:35 – 9:55*
Prof. Sir Anthony J. Leggett, *John D. and Catherine T. MacArthur Professor, and Center for Advanced Study Professor of Physics at the University of Illinois at Urbana-Champaign; 2003 Nobel Prize in Physics for the theory of superconductors and superfluids*

The Discovery of Superfluidity in He3 and its Implications for Science and Technology *9:55 – 10:15*
Prof. David M. Lee, *Distinguished Professor of Physics, Physics & Astronomy Department, at Texas A&M University; 1996 Nobel Prize in Physics for the discovery of superfluidity in helium-3*

The Development of the BCS Theory, The Most Comprehensive Microscopic Theory of Superconductivity, and its Impact on Physics *10:15 – 10:35*
Prof. Leon N. Cooper, *(video lecture), Thomas J. Watson, Sr. Professor of Science and Director of the Institute for Brain and Neural Systems at Brown University; 1972 Nobel Prize in Physics for the BCS theory of superconductivity*

Discovery of C_{60} and the Beginning of the Nanoscience and Technology Era *10:35 – 10:55*
Prof. Robert F. Curl, Jr., *University Professor Emeritus, Pitzer-Schlumberger Professor of Natural Sciences Emeritus, and Professor of Chemistry Emeritus, Rice University; 1996 Nobel Prize in Chemistry for the discovery of fullerenes*

The Discovery of the J-Particle and the Search for Dark Matter *10:55 – 11:15*
Prof. Samuel C. C. Ting, *Thomas D. Cabot Professor of Physics, Massachusetts Institute of Technology; 1976 Nobel Prize in Physics for discovering the subatomic J/ψ particle*

午前中の基調講演に引き続き、25th Anniversary Luncheon では以下の祝辞・スピーチが行われた。

Texas 選出の Congressman（下院議員 US House of representative）の Ms. Sheila Jackson Lee が直々に出席され、科学技術の重要性と高温超電導への期待並びに TcSUH の活躍とこれまでの成果を称賛し、表彰した。また、上院議員（US Senate）の 2 名、Kay Bailey Hutchinson 議員と John Cornyn 議員は代読で講演が行われた。そのあとで Texas 州知事（代理）、Houston 市長（代理）の挨拶の後、Prof. Neal F. Lane (Rice Unv.) が米国の Science Community を代表して挨拶され、最後に筆者から International Community を代表して 25 年を振り返るとともに、今後の期待に関しての講演と 25 周年の祝辞を述べた。講演は非常に好評であった印象を持った。

Ms. Sheila Jackson Lee 米国下院議員による祝辞後の表彰
左から Prof. R.N. Bose (Vice Chanceller, University of Houston)、 Prof. C.W.Chu、
Prof. Allan J.Jacobson (Director, TcSUH)と米国下院議員の The Honorble Ms. Sheila Jackson Lee

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

筆者（塩原）による YBCO 発見 25 周年を振り返っての講演と祝辞

Friends of TcSUH 25th Anniversary Luncheon

November 19, 2012 — 11:30 a.m. – 1:30 p.m.

Hilton University of Houston Hotel – Waldorf Ballroom

11:30	**Welcome**	**Allan J. Jacobson**, Director, TcSUH
		Rathindra N. Bose, Vice Chancellor/Vice President for Research and Technology Transfer, University of Houston
11:33	**Introductions**	**Alan Lauder**, Executive Director, Coalition for the Commercial Application of Superconductors; President, Allan Lauder, Inc. (Master of Ceremonies)
		Corbin J. Robertson, Jr., CEO, Quintana Minerals; Chair, TcSUH Advisory Board
		Paul C. W. Chu, Founding Director and Chief Scientist, TcSUH
11:40 – 12:00		**GREETINGS**
	United States House of Representatives	**The Honorable Sheila Jackson Lee** Congressional District 18
	United States Senate	**Jason Fuller**, Regional Director, Office of the Honorable Kay Bailey Hutchison, United States Senate
		Jay Guerrero, Regional Director, Office of the Honorable John Cornyn, United States Senate
	Office of the Governor, State of Texas	**Brett Perlman**, CEO, Vector Advisors; Former Public Utility Commissioner, State of Texas
	Office of the Mayor, City of Houston	**Alfred Moran**, Director of Administration and Regulatory Affairs, City of Houston
	Scientific Community	**Neal F. Lane**, Malcolm Gillis University Professor, Professor of Physics and Astronomy, and Senior Fellow, James A. Baker III Institute for Public Policy, Rice University
	International Community	**Yuh Shiohara**, Director General, Superconductivity Research Laboratory (SRL), International Superconductivity Technology Center (ISTEC), Senior Managing Director, Industrial Superconductivity Research Association (iSTERA), Tokyo, Japan

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

午後に入って、以下の 4 つのパネル討論会が行なわれた。

1:30 – 6:20 **TcSUH 25th ANNIVERSARY SYMPOSIUM** – *Continued in Shamrock Ballroom*

AFTERNOON SESSION:

Frontiers of Materials, Science, and Technology: Creativity, Innovation, and Education

Note: *There will be no formal break during the sessions. Beverages will be provided in the foyer throughout the session.*

Session Chairs

Dr. Maw-Kuen Wu, *President, National Dong Hwa University, Taiwan*

Dr. Larry R. Faulkner, *President Emeritus, The University of Texas at Austin; President Emeritus, Houston Endowment; TcSUH Advisory Board member*

Note: The afternoon session will consist of panels. Renowned scientists will share their personal insights on HTS science, materials, applications, and science and technology policy. One hour and five minutes has been allotted to each panel for discussion of the topics listed below. Each speaker has 6-8 minutes to share his/her personal perspective on what is exciting, with time at the end for a few questions from the audience. If necessary, one or two viewgraphs may be used, and we ask that they be turned in at the registration table for loading prior to the session. The Chair will briefly introduce panel members at the beginning of each session. A brief bio for each speaker will be included in the printed program. There will be 5 minutes between sessions for panel changes.

1:30-2:35 **PANEL 1: High Temperature Superconductivity: PRESENT SCIENCE & MATERIALS RESEARCH**

- **Dr. Ivan Bozovic**, *Senior Scientist and Leader, Molecular Beam Epitaxy Group, Brookhaven National Laboratory*
- **Prof. Richard L. Greene** (Chair), *Alford L. Ward Professor of Physics, and Director Emeritus, Center for Superconductivity Research, University of Maryland*
- **Dr. T. K. Lee**, *Distinguished Research Fellow and Director, Institute of Physics, Academia Sinica, Taiwan*
- **Dr. Igor Mazin**, *Materials Science and Technology Division, Naval Research Laboratory*
- **Dr. James L. Smith**, *Materials Technology: Metallurgy, and Laboratory Fellow, Los Alamos National Laboratory*

2:40-3:45 **PANEL 2: High Temperature Superconductivity: APPLIED RESEARCH, DEVELOPMENT & APPLICATIONS**

- **Dr. Amit Goyal**, *UT-Battelle Corporate Fellow, Battelle Distinguished Inventor and an ORNL Distinguished Scientist, Materials Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory*
- **Prof. David C. Larbalestier** (Chair), *Francis Eppes Professor of Superconducting Materials, Department of Mechanical Engineering, and Director of the Applied Superconductivity Center, Florida State University; Chief Materials Scientist, National High Magnetic Field Laboratory*
- **Dr. Marty Nisenoff**, *M. Nisenoff Associates; IEEE Council on Superconductivity*
- **Dr. Horst Rogalla**, *National Institute of Standards and Technology (NIST)*
- **Dr. Bruce P. Strauss**, *Program Manager, High Energy Physics, Office of Science, U.S. Department of Energy*

3:50-4:55 **PANEL 3: High Temperature Superconductivity: THE FUTURE**

- **Prof. Øystein Fischer**, *Professor, Départment de Physique de la Matière Condensée (DPMC); Founder and Director, Swiss National Center of Competence in Research (NCCR); Initiator, Geneva Creativity Center, University of Geneva, Switzerland*
- **Prof. Laura H. Greene** (Chair), *Swanlund Professor of Physics and Center for Advanced Study Professor of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign; Associate co-Director, Center for Emergent Superconductivity, an Energy Frontier Research Center; TcSUH Advisory Board Member*
- **Dr. Peter D. Johnson**, *Chairman, Condensed Matter Physics and Materials Science Department, Brookhaven National Laboratory*
- **Prof. Shin-ichi Uchida**, *Professor, Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo*
- **Dr. Harold Weinstock**, *Program Manager, Air Force Office of Scientific Research (AFOSR)*

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

5:00-6:05 **PANEL 4: PERSPECTIVES ON SCIENCE & TECHNOLOGY POLICY**

- **Prof. Dr. Kristian J. Fossheim**, *President, Royal Norwegian Society of Sciences and Letters; Professor Emeritus, Institute for Physics, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim*
- **Dr. Mary L. Good**, *Special Advisor to the Chancellor for Economic Development, Founding Dean and Dean Emeritus, Donaghey College of Engineering and Information Technology, University of Arkansas at Little Rock; former Under Secretary for Technology, Technology Administration, Department of Commerce; former President, American Chemical Society*
- **Dr. Koichi Kitazawa**, *Counselor to the President, Japan Science and Technology Agency (JST), Tokyo; former President, JST; Head, The Independent Investigation Commission on the Fukushima Daiichi Nuclear Accident*
- **Prof. Neal F. Lane** (Chair), *Malcolm Gillis University Professor, Professor of Physics and Astronomy, and Senior Fellow, James A. Baker III Institute for Public Policy, Rice University; Former Director of the National Science Foundation, Assistant to the President for Science and Director of the White House Office of Science and Technology Policy; TcSUH Advisory Board Member*
- **Prof. H. D. Yang**, *President, National Sun Yat-Sen University, Taiwan; representative on behalf of the Taiwan Comprehensive University System (TCUS); former Vice Chair, National Research Council, Taiwan, ROC*

6:05-6:20 **Concluding Remarks – Prof. Paul C. W. Chu**

午後のパネル討論会で基調講演をされる
北澤先生（左）と D. Larbalestier 教授（右）

Banquet での C.W.Chu 教授（右）、
北澤先生（中）と筆者（左）

尚、日本からの招待出席者は北澤宏一先生（JST）と内田慎一先生（東大）と筆者の 3 名であった。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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：超電導電力機器技術の展開

「超電導電力機器の開発動向」

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 電力機器研究開発部
部長　大熊 武

我が国における超電導電力機器の研究開発は、主に経済産業省と新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の事業として進められており、現在「Y 系超電導電力機器技術開発」プロジェクト（2008 年度～2012 年度）と Bi 系超電導線材を使った「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」（2007 年度～2013 年度）が実施されている。国内におけるこれらプロジェクトにおいて 2012 年度は重要な年といえる。

「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」では、Bi 系超電導線材を用い、ケーブル単体のみではなく冷却技術などを統合した 66 kV、200 MVA 級ケーブルシステムを構築し、運転、保守を含めた超電導ケーブルのトータルシステムとしての総合的な信頼性を実証するために、実際の 66 kV 電力系統に連系した実証試験を実施する。2012 年 10 月 29 日に日本国内初めての実際の電力系統と超電導ケーブルを接続し、実証試験を開始した。

「Y 系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおいては、Y 系超電導線材を作製するプロセス技術の開発を基礎として、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、この Y 系超電導線材を用いた超電導電力貯蔵システム（SMES）、送電ケーブル、変圧器の実用化に向けた技術開発が進められている。2012 年度はプロジェクト最終年度となり、SMES については高信頼性・高耐久性コイル化技術の確立およびケーブル・変圧器についてはシステム検証試験を行うことによって、システムの成立性を実証することとなる。

一方、海外における超電導電力機器の研究開発について、SMES の開発では、米国において 2011 年より DOE ARPA-E プロジェクトの中で、Y 系超電導線材を用いた 3.4 MJ 級 SMES の開発が進められており、中国においても Y 系超電導線材を用いた SMES の開発が 2012 年より 4 年計画で開始された。

超電導ケーブルの開発では、米国の LIPA プロジェクトにて実施している 138kV/2.4kA-600m 級単心型 Bi 系超電導ケーブル実証試験の 3 相のうち 1 相のみを Y 系超電導ケーブルに変更を計画しており、一方 HYDRA プロジェクトでは 13.8kV/4kA-170m 級三相同軸型 Y 系超電導ケーブルを開発し 2014 年に実系統での試験を計画している。また、韓国の DAPAS プロジェクトでは 22.9kV/1.26kA-410m 級三心一括型 Y 系超電導ケーブルの実系統実証試験を実施しており、今後 80kV/3.12kA-500m 級直流ケーブルおよび 154kV-1km 級交流ケーブルを開発して実系統への導入を計画している。Bi 系超電導線材を用いたケーブルでは、中国の河南省工場内にて 1.3kV/10kA-360m 級直流ケーブルの実証試験を行っており、ドイツの AmpaCity プロジェクトでは 10kV/2.3kA-1km 級三相同軸型ケーブル（中間接続部込み）の開発を行い 2013 年に Y 系限流器と組み合わせた実系統への導入を計画しており、ロシアではモスクワ市内変電所にて 20kV-2.5km 級直流ケーブルの実証試験を計画している。

超電導変圧器の開発では、米国の DOE Smart Grid Demo プロジェクトにおいて 69kV/12.47kV 級限流機能付 3 相 Y 系変圧器を開発し実系統への導入を計画している。

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

超電導限流器の開発では、欧州の ECCOFLOW プロジェクトにおいて、Nexans が 12kV/1kA 級抵抗型 Bi 系限流器を開発し実系統実証試験を実施しており、今後 Y 系線材に置き換えた 16.5kV/1kA 級および 24kV/1kA 級抵抗型限流器の実系統導入を計画しており、AmpaCity プロジェクトでは 10kV/2.3kA 級抵抗型 Y 系限流器の開発を行い 2013 年に超電導ケーブルと組み合わせた実系統への導入を計画している。イタリアでは 9kV/220A 級抵抗型 Bi 系限流器を開発し実系統実証試験を実施しており、ドイツでは 6.4kV/13MVA 級磁気遮蔽型 Y 系単相限流器の開発を行い、今後 3 相限流器を開発し実系統導入を計画している。また、韓国の DAPAS プロジェクトでは 22.9kV/630A 級限流器の実系統実証試験を実施しており、今後 154kV/2kA 級限流器を開発して実系統への導入を計画している。中国では Innpower 社が 35kV/1.5kA 級および 220kV/800A 級可飽和リアクトル型 Bi 系限流器を開発し実系統試験を実施している。

以上、最近の超電導電力機器の動向について、国内外における主な概要を紹介したが、以下に「Y 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開発状況について、紹介していただく。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2012 年 12 月 10 日発行
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：超電導電力機器技術の展開

「高電圧超電導電力ケーブル技術開発の進展」

古河電気工業株式会社
高温超電導事業化チーム 超電導応用開発部 伝送技術グループ
八木正史

275 kV-3 kA の架空送電線に匹敵する大容量をもつ YBCO 超電導ケーブルを M-PACC プロジェクトの中で 2008 年より開発してきた。その開発目標は、送電損失 0.8 W/m、ケーブル外径 150 mm としており、既存のケーブルよりも高性能コンパクトである。我々の試算によると、代表的な 275 kV 地中ケーブル（架橋ポリエチレン絶縁ケーブル）で 3 回線必要なところが、今回の超電導ケーブルだと 1 回線ですみ、さらに、冷凍機の動力ロスを加味しても、送電損失は、1/4～1/5 になる。

ケーブル導体側の YBCO 超電導線は、レーザで両端をカットして 3 mm 幅にした後、安定化のために銅メッキで被覆している。この超電導線を 60 本使用して、各層 30 本、2 層構造とした。一方、ケーブルシールド側の超電導線材は、5 mm 幅の YBCO 超電導線を銅メッキで被覆したものを 43 本使用して、1 層構造とした。全ての超電導線は TFA-MOD 法で YBCO 層を形成しており、単長で 50 m 以上、長さ方向の臨界電流（I_c）分布や全長の I_c を測定して、その健全性を確認している。その結果、導体、シールドともに 77.3 K で 6000 A 前後の I_c が期待され、交流 3000 A（ピークで 4242 A）に対しても十分な容量である。これらの超電導線を用いて、50 m 弱のケーブルを図 1 のように作製し、そのうちの 30 m を長期試験用に残りの 20 m 弱を評価用に使用した。

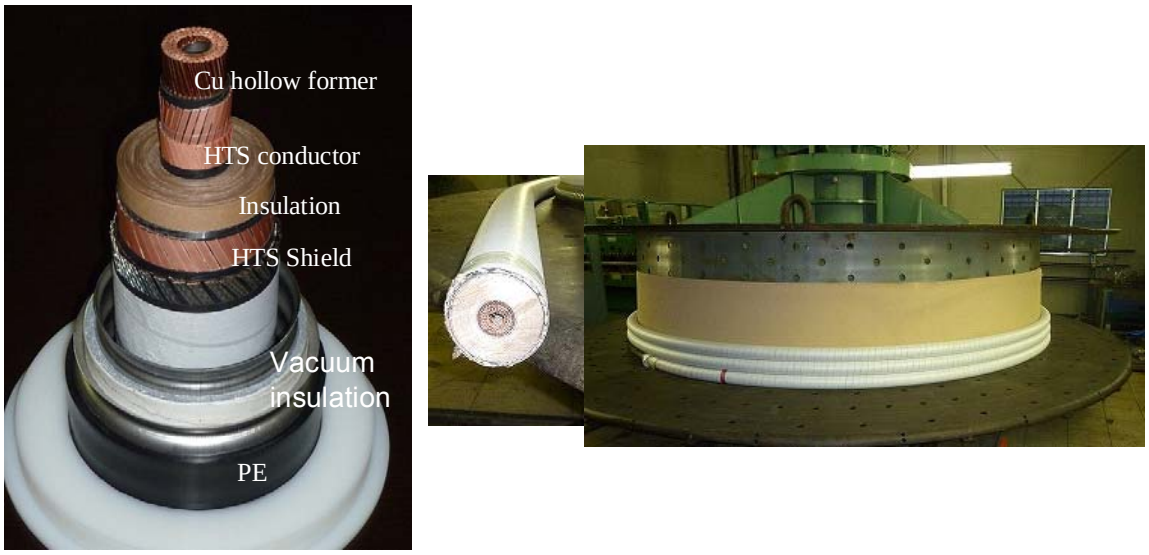


図 1　275 kV-3 kA 超電導の構造と作製

評価用の超電導ケーブルについては、短尺サンプルにして、I_c、絶縁特性、過電流特性をそれぞれ評価し、設計通りの性能を確認している。導体・シールドの I_c は設計どおりの 6000 A 前後であり、絶縁特性試験では、275 kV として具備すべき耐電圧特性を確認し、さらに、275 kV システムで最悪のケースである 63 kA-0.6 sec の過電流試験を実施し、I_c の健全性を確認した。

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

30 m の超電導ケーブルについては、接続部を予め作製しておき、試験場所に輸送し、布設した（図 2）。試験場所は、中国遼寧省の瀋陽市の瀋陽古河電纜とした。超電導技術は、エネルギー需要が急速に立ち上がる東アジアにおいても注目されている技術であり、そのなかで中国での実施は、日本の技術の国際的な発信として、さらには、超電導技術の国際化の進展に役立つものと考えて計画した。

30 m 輸送後の I_c を確認したところ、77.3 K の大気圧で導体 6800 A、シールド 7000 A であり、輸送後も性能低下は生じていない。今後、1 ヶ月の長期課通電試験の実施を進める。

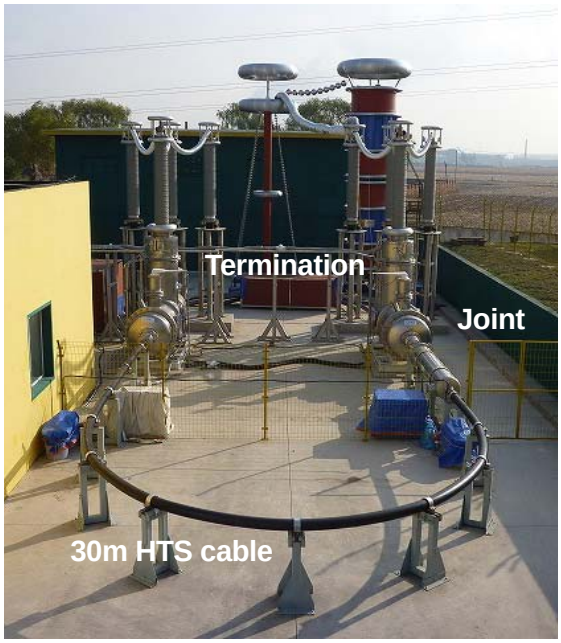


図 2　275 kV-3 kA 超電導の布設

なお、本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発研究機構（NEDO）の委託により実施したものである。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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：超電導電力機器技術の展開

「日本初『高温超電導ケーブル』の電力系統への連系運転開始」

住友電気工業株式会社
超電導・エネルギー技術開発部
増田孝人

66 kV 級超電導ケーブル（於旭変電所）

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託を受けて進めている「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」において、東京電力（株）、住友電気工業（株）、（株）前川製作所は、高温超電導ケーブルを電力系統に連系する、日本で初めての超電導送電の実証試験を東京電力㈱旭変電所（横浜市）にて、開始致しました。

本プロジェクトでは、超電導ケーブルシステムの建設、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために、実系統に連系した実証試験を実施することによって、総合的な信頼性を実証するとともに、革新的な高効率送電技術の開発・検証を行うことを目的としています。

本プロジェクトで開発した超電導ケーブルは、定格電圧 66 kV、送電容量 200 MVA 級で、コンパクトな三心一括型構造をしています。旭変電所に建設されたケーブルシステムは、長さ 240 m の超電導ケーブル、気中終端接続部、中間接続部及び冷却システムからなります。

本プロジェクトでは、住友電気工業（株）の開発による低交流損失型のビスマス線材を用いて、短尺ケーブルによる交流損失の検証および電力系統事故時における健全性の検証や、大電流接続部である終端接続部、中間接続部の技術開発を行ってきました。また、実証場所における超電導ケーブルシステムおよび運転・監視システムの設計と構築、超電導ケーブルシステムと既存系統との接続・切離しを行う保護・遮断システムの構築を東京電力（株）が行い、（株）前川製作所が冷却システムの設計と構築、さらに送電を維持した状態でのメンテナンス手法を検討して参りました。

これらの成果をもとに、冷却システムを含めた超電導ケーブルシステムを平成 22～23 年度にかけて建設し、システム完成後、冷却試験を繰り返し行い、ケーブル性能、冷却システム性能の確認を行ったあと、去る 10 月 29 日に、実系統に接続致しました。当日は、関係者が集まるなか、シス

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

テム完成の式典（写真）が行われた後、系統接続が行われ、変電所内の変圧器と、66 kV 母線との間に、超電導ケーブルが接続され、実系統運転が開始されました。

式典風景

今後、1 年以上にわたり実系統運転を実施し、超電導ケーブルの実系統での運用性や信頼性、安定性を検証していきます。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2012 年 12 月 10 日発行
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：超電導電力機器技術の展開
「超電導変圧器技術開発の進展」

九州電力株式会社 総合研究所
電力貯蔵技術グループ長　超電導変圧器サブリーダー
林 秀美

イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト（以下、Y 系プロジェクト）の一環として進めている超電導変圧器技術開発では、九州電力が主体となり、九州大学、岩手大学、国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム、富士電機、大陽日酸及び JFCC と共同で要素技術及びシステム技術の開発を平成 20～24 年度で行っている。本開発では、①超電導変圧器対応線材開発、②巻線技術開発、③冷却システム技術開発、④限流機能付加技術開発、⑤2 MVA 級超電導変圧器モデル検証を進め、それぞれの技術開発項目は表 1 に示す最終目標に向け着実に成果を挙げてきた。

平成 25 年 2 月で終了する Y 系プロジェクトについては、前回（2011 年 11 月号）は①と④を紹介したが、いよいよものづくりと検証試験が佳境を迎えた今回は③と⑤の現況について紹介する。

表 1　超電導変圧器技術開発の最終目標

技術開発項目	最終目標
① 超電導変圧器対応線材開発	・安定製造、加工技術の向上（歩留向上）
② 巻線技術開発	・2 kA 級巻線技術の確立 ・巻線の低交流損失≦1/3(対細線化なし線材)
③ 冷却システム技術開発	・冷凍能力：2 kW@65 K ・冷凍効率（COP）：0.06@80 K
④ 限流機能付加技術開発	・数百 kVA 級限流機能付加変圧器による機能検証 (過大電流を定格電流の 3 倍以下に抑制)
⑤ 2 MVA 級超電導変圧器モデル検証	・課通電試験による 66/6.9kV-2MVA 変圧器モデルの検証

③ 冷却システム技術開発

超電導変圧器の冷却に適した冷凍機の使用温度領域は 40～80 K、冷凍能力は 80 K 運転では 2～10 kW 程度と考えられるため（図 1）、Y 系プロジェクトでは表 1 の目標値を設定し、ネオンガスを作動ガスとした冷却システム（図 2）の技術開発を進めてきた。

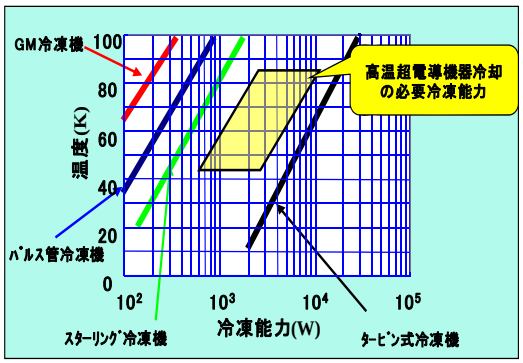


図 1　各冷凍機の冷凍能力

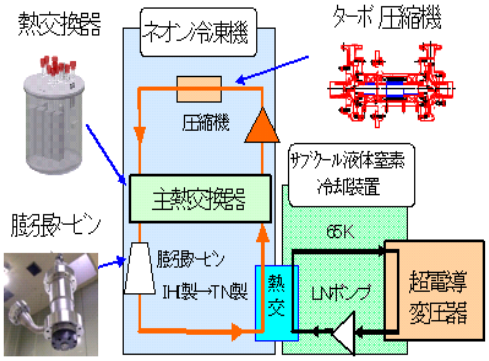


図 2　冷却システムの装置構成

© ISTEC 2012 All rights reserved.

これまでに冷凍機の主要機器であるターボ圧縮機の新規開発、膨張タービンの改良、冷凍機のプロセス検討を重ねた結果、圧縮機及び膨張タービンの効率はいずれも 2 年前の中間評価時点で目標の 65 %を超える（図 3）とともに、直近の最終試験では 65 K で 2.17 kW の冷凍能力及び 80 K で COP=0.06 を達成している（表 2）。また本冷凍機は、磁気軸受の採用により圧縮機及び膨張タービンには摺動部がないため、メンテナンスフリーが実現できることが特長のひとつと言える。

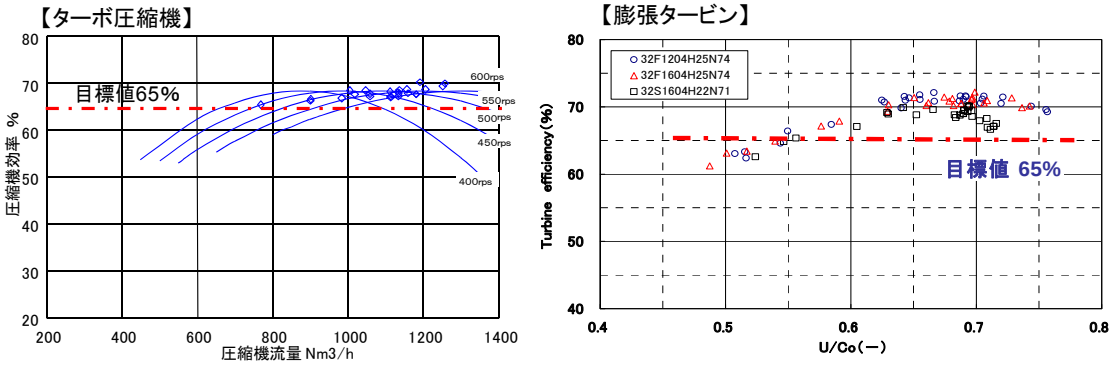


図 3　圧縮機及び膨張タービンの効率測定結果

表 2　試作冷凍機の性能試験結果

温度（K）	80	65
冷凍能力（kW）	2.93	2.17
入力電源（kW）	51.1	51.4
冷却効率（COP）	0.06	0.04
圧縮機効率（%）	70～72	
タービン効率（%）	72～74	

図 4　2MVA 変圧器用冷却システム

冷凍機は、10 月までに単体性能試験やサブクールシステム及びクライオスタットを含めた 2 MVA 変圧器用冷却システム（図 4）としての事前運転を完了しており、今後、2 MVA 変圧器と組み合わせて最終的な総合試験を実施する予定である。

⑤ 2 MVA 級超電導変圧器モデル検証

将来的な実用機 20 MVA 級超電導変圧器の実現に向け、Y 系プロジェクトでは 2 MVA 級超電導変圧器を試作し、その性能を検証することを最大の目標としている。その理由は、超電導変圧器の特性や製作技術が見通せ、冷却システムと組み合わせて検証するためには、実機と同一電圧で実機相当の巻線構成となる最低容量が 2 MVA だからである。

2 MVA 級超電導変圧器モデルは、図 5 に示す 2 MVA 級超電導変圧器巻線、図 6 に示すクライオスタット、及び前述の 2 MVA 変圧器用冷却システムで構成される。現在は、2 MVA 級超電導変圧器巻線をクライオスタットに組み込んだ状態（図 7）で様々な特性試験を実施中である。

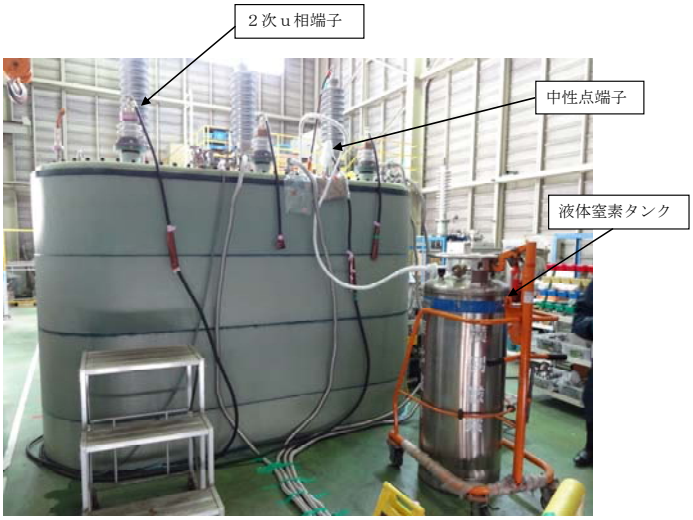
特に図 8 に示す I-V 特性については、加工の難易度が高い 3 分割線材を巻いて製作した二次側巻線において、規定の 260 A（定格二次電流 167 A の波高値×1.1）を超えても健全性を示す良好な結果が得られている。

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

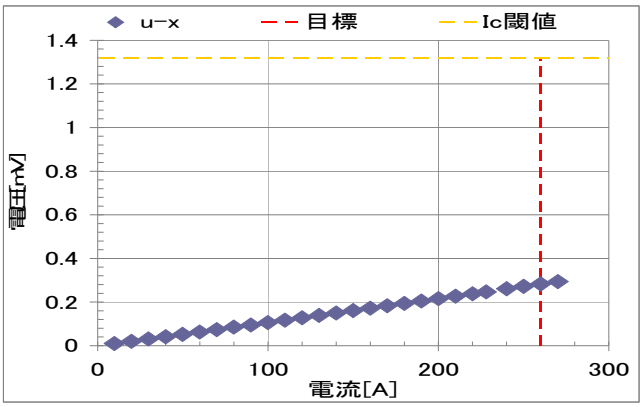
図 5　2 MVA 級超電導変圧器巻線

図 6　クライオスタット単体の試験状況



変圧器全景写真（２次ｕ相･中性点結線）

図 7　2 MVA 変圧器モデルの試験状況



U相二次巻線

図 8　I-V 特性結果（二次側）

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

今後の予定

来年 2 月の総合試験では、2 MVA 級超電導変圧器モデルを冷却システムと組み合せ、Y 系プロジェクトとしての着実な成果達成を目指すとともに、適用性や経済性等の検討を行いながら将来的な実用機 20 MVA 級超電導変圧器の設計をとりまとめる予定である。

また、Y 系プロジェクトで培った技術は各種の超電導変圧器にも適用できるため、図 9 の電力用変圧器だけでなく、図 10 に示す産業用や輸送用などの様々な分野の適用先が考えられる。それらの超電導変圧器の技術開発に Y 系プロジェクトの開発成果が大きく貢献することを期待する。

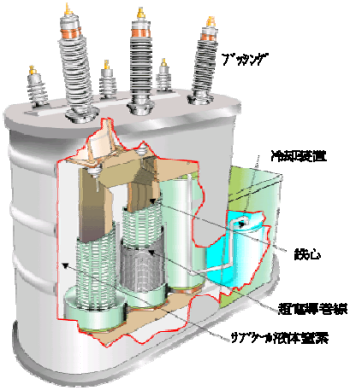


図 9　20 MVA 級超電導変圧器の概念図

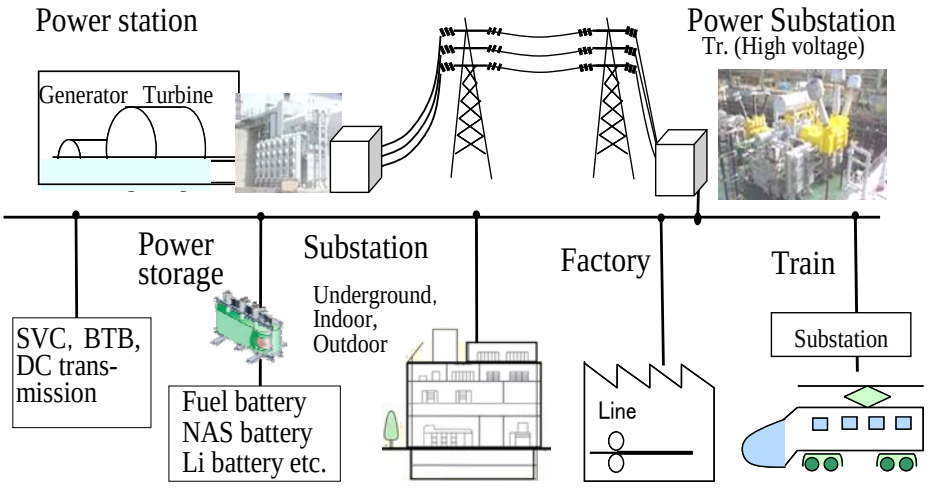


図 10　超電導変圧器の適用例

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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 '12/12 月－'13/1 月の催し物案内

12/6
金属・セラミックス研究会
場所：東京大学武田ホール
問い合わせ：
https://workshop.iee.or.jp/sbtk/cgi-bin/sbtk-showprogram.cgi?workshopid=SBW00001F44

12/6
応用物理学会　超伝導分科会　第 46 回研究会
「超伝導パワー応用の新展開 -機器・システムの原理と新たな可能性-」
場所：東京大学　武田ホール
問い合わせ：http://annex.jsap.or.jp/support/division/super/

12/7
低温工学・超電導学会 関西支部 特別講演会
場所：大阪市立大学文化交流センター
問い合わせ：http://www.jcryo-kansai.com/2012-10-No11wakate-kouenkai.pdf

12/13-15
エコプロダクツ 2012
場所：東京ビッグサイト
問い合わせ：http://eco-pro.com/eco2012/

1/16
「電力グローバルネットワークは実現するのか？」
場所：全日通霞が関ビルディング　大会議室 B
問い合わせ：http://www.sntt.or.jp/~fsst/20130116.html

1/24
超伝導センシング基盤技術及びその応用、一般
場所：岡山大学・創立五十周年記念館大会議室
問い合わせ：http://www.ieice.org/es/sce/jpn/index.html

1/30
電力・エネルギーフォーラム「イットリウム系超電導コイル技術開発」
場所：（独）理化学研究所　横浜研究所　研究交流棟ホール
問い合わせ：http://www2.iee.or.jp/ver2/pes/sys/02-conference/07-12.html#j_2704

（編集局）

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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　(10/20-11/27)

○　独・ロで超電導送電、住友電工が実験参加 15 年以降商用化　10/20 日本経済新聞
○　日立電線、ニオブ 3－錫で　超電導線材　臨界電流密度 1.5 倍に　10/23 日刊産業新聞
○　フジクラ、イットリウム系材料で超電導マグネットコイル開発　10/29 化学工業日報
○　超電導ケーブルで送電　住友電工など実証実験、電力損失半減　10/30 日本経済新聞
○　フライホイール　超電導部材で大型蓄電　鉄道総研など　11/09 電気新聞
○　前川製作所　エネ効率倍増の超電導向け冷却システム開発にめど　11/13 日刊工業新聞
○　超電導の伝道師－芝浦工業大学学長村上雅人氏（交遊抄）　11/16 日本経済新聞
○　ヘリウム、世界で不足　大陽日酸、米で合弁生産へ　11/27 日本経済新聞

（編集局）

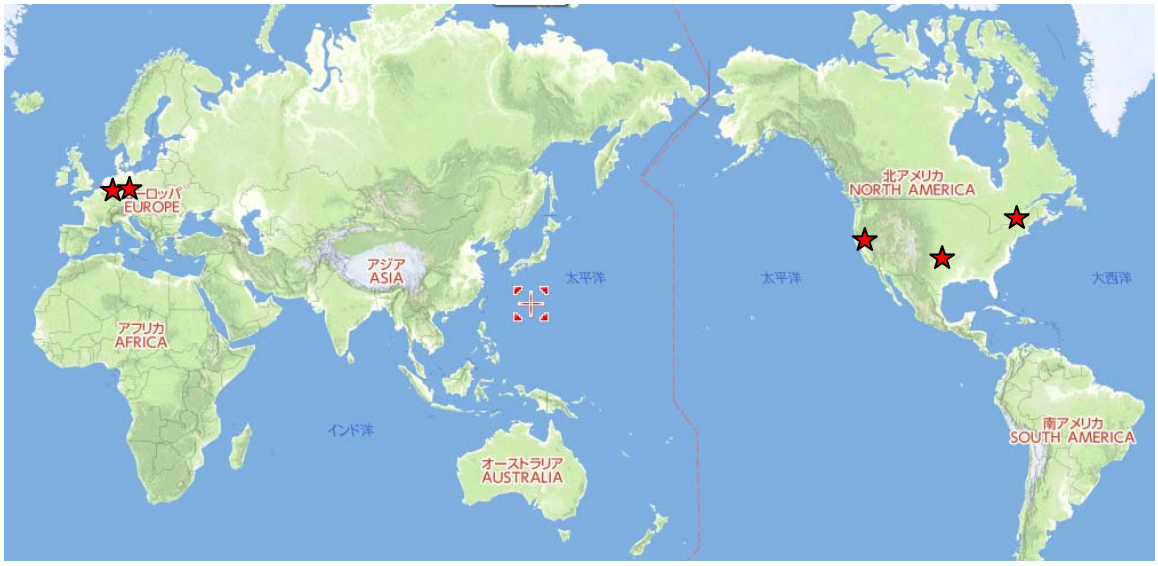
超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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 10 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

Amperium® 線の特性が倍に

AMSC（2012 年 10 月 8 日）

AMSC 社は、電力ケーブルのアプリケーションに使用される Amperium®超電導線材が新しく開発されたことを発表した。この開発により、超電導ケーブルをより低コスト化し、これらシステムの潜在的な世界市場が拡大するなど、飛躍的な発展が期待される。この新しい線材は、真鍮でラミネート加工された 4.4-mm の Amperium®線材で構成され、200 A もの高い電流輸送特性を有することが実証されている。これは、大容量タイプの次世代 HTS 線材業界をリードする高性能と見なされる。大幅な性能改善に加えて、キロアンペア･メーター価格設定を用いたこの新しい線材は、既存の Amperium®製品ラインと比べて大幅に低価である。同社の社長兼最高経営責任者である Daniel P. McGahn 氏は、「この開発によって、AMSC 社、顧客、そして業界にとってきわめて重要な進歩がもたらされる。線材の性能向上を図りつつ大幅にそのボリューム価格を下げ、さらには業界をリードする生産能力を維持することで、弊社の HTS 線材が期待に沿った将来有望な線材として実現す

© ISTEC 2012 All rights reserved.

るはずである。」と述べた。
（出典）
Source: “AMSC Doubles Superconductor Wire Performance and Reduces Pricing”
AMSC press release (October 8, 2012)
http://www.amsc.com
http://files.shareholder.com/downloads/AMSC/2165855216x0x603911/165a3cb0-c161-43b4-8095-cae5061fa22e/AMSC_News_2012_10_8_Commercial.pdf
Contact: Jason Fredette, jason.fredette@amsc.com

線材作製プラント完成

Superconductor Technologies Inc.（2012 年 10 月 11 日）

Superconductor Technologies 社は、次世代 RCE-CDR（Reactive Coevaporation Cyclic Deposition and Reaction）システムの受入れ過程を完了した。仕入れ先でのテストが終了し、インストールのため、機材は既に Texas 州 Austin 市にある同社が所有する施設 Advanced Manufacturing Center of Excellence に納入されている。同社のマーケティング及び製品ライン管理担当副社長である Ada Shelton 氏は、「この RCE-CDR システムは試験的ではあるが、100 メートルに及ぶ長尺 HTS 線材を作り出すことができ、当社独自の生産工程を採用することで高いイールド、均一性そして再現性が顧客によって実証されていくはずである。また、これに並行して、我々は重要機材の設計パラメータをいくつか検証し、2013 年には、キロメートル級の長尺線材の製造システムに統合する予定である。」と述べた。2012 年にインストール予定である 3 つのシステムのうち、2 つ目の機材の搬入が始まり、現在 3 つ目のコンポーネントである溶液堆積平坦化（SDP）装置が、システム統合テストを終了しようとしている。同社は、2012 年末までに 2G HTS 生産機材一式のインストールが完了し、運用を開始する予定である
（出典）
Source: “Superconductor Technologies Inc. Completes Acceptance of Reactive Coevaporation Cyclic Deposition and Reaction (RCE-CDR) Equipment for Its Conductus® 2G HTS Wire Production”
Superconductor Technologies Inc. press release (October 11, 2012)
http://phx.corporate-ir.net/staging/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1744057&highlight
Contact: Investor Relations, Cathy Mattison or Becky Herrick of LHA for Superconductor Technologies Inc., invest@suptech.com, ; HTS Wire, Mike Beaumont of STI, mbeaumont@suptech.com

新しい鉄系超電導体 $Li_xFe_2Se_2(NH_3)_y$

Springer 社誌掲載（2012 年 10 月 29 日）

ドイツにある Augsburg 大学の研究者たちは、$Li_xFe_2Se_2(NH_3)_y$ として知られる新しい鉄セレン系超電導体の合成に成功した。この超電導体は圧力下で 44 K の転移温度を示し、従来の銅系高温超電導体と比べて高く、将来有望な超電導体と言える。この物質を製造するにあたっては、鉄とセレンの層の間にリチウム原子を挿入するという化学合成法が用いられた。これまでの試みとは異なり、この方法では驚くべき純度で新物質をうまく合成することができる。さらに、超電導体積分率はこの物質の約 80 %を占め、これは挿入により生成された鉄カルコゲナイド系物質の中で、今までに報告された最高の体積分率である。その上、リチウムの代わりにナトリウムを使用することにより、

© ISTEC 2012 All rights reserved.

研究者たちは超電導転移温度を 45.5 K にさらに引き上げることに成功した。同研究グループの研究成果は、*European Physical Journal* ***B*** に掲載されている。
（出典）
Source: “Cocktail achieves superconducting boost”
Springer press release (October 29, 2010)
http://www.eurekalert.org/pub_releases/2012-10/s-cas102912.php
http://www.epj.org/index.php?option=com_content&view=article&id=601%3Aepjb-highlight-cocktail&catid=110%3Aepj-b&Itemid=429&lang=en
Contact:Ann Koebler, ann.koebler@springer.com

▶加速器

BERKELEY LAB
LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY

安価な卓上加速器

Lawrence Berkeley National Laboratory（2012 年 10 月 22 日）

Lawrence Berkeley 国立研究所の研究者たちは、レーザープラズマ加速の研究の一環として、電子ビームの品質を測定するベンチマークで新記録を達成した。別名"テーブルトップ加速器"と呼ばれるレーザープラズマ加速器（LPAs）は、従来の加速器よりもはるかに安価であり、設置場所や環境への影響を軽減した新しいタイプの加速器である。LPAs は、基礎物理学研究で使用される小型で高エネルギーなコライダー（衝突型加速器）はもちろん、将来的には、小さな光源の測定にも有効となることが期待されている。また、このような装置は、新しい低温超電導体の研究など、さまざまな用途で使用される可能性もある。
本研究において、研究者たちはビームの品質を測定するのに X 線分光法を使用し、これまでに報告されたどの解像度よりも小さい半径 0.1 マイクロメートルで電子ビームを測定することに成功したと報告されている。同研究グループの研究成果は、*Physical Review Letters* に掲載されている。
（出典）
Source: “State-of-the-art beams from table-top accelerators”
Lawrence Berkeley National Laboratory press release (October 22, 2012)
http://www.eurekalert.org/pub_releases/2012-10/dbnl-sbf102212.php
http://newscenter.lbl.gov/feature-stories/2012/10/22/lpa-beams-part-1/
Contact: Paul Preuss, paul_preuss@lbl.gov

research instruments

加速器 RF キャビテイを受注

RI Research Instruments GmbH (2012 年 10 月 9 日)

Bruker Energy & Supercon Technologies 社の子会社である RI Research Instruments 社は、反陽子･イオン照射施設（FAIR）の研究プロジェクトから、5 つの無線周波空洞に関する契約を交わした。この契約は、総額約 580 万ドルに上り、契約内容には、可変周波数（1.1 MHz～1.5 MHz）の無線

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

周波空洞の設計および建設が含まれている。これら空洞は、4 年間に亘って搬入され、施設の集電環にインストールされる。
FAIR プロジェクトは、ドイツの重イオン研究 GSI Helmholtz センターで開発が進められており、そこでは、これまでに先例のない高い強度と品質を備えた反陽子並びにイオンビームが提供できるようになる。
（出典）
Source: “RI Research Instruments GmbH Awarded $5.8 Million Contract for Accelerating Cavities for FAIR Project in Germany”
RI Research Instruments GmbH. press release (October 9, 2012)
http://www.research-instruments.de/frontend/press/id/40
Contact: Hanspeter Vogel of RI, Hanspeter.Vogel@research-instruments.de

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

標準化情報　12 月のトピックス

「超電導国際規格に関する第 10 回パネル討論会概要」報告

日本大学大学院
総合科学研究科 環境科学専攻
教授　新冨孝和

IEC/TC90 主催により超電導国際規格に関する第 10 回パネル討論会が、2012 年応用超電導会議（ASC2012）が開催された米国 Portland 市の Oregon Convention Center において 10 月 10 日夕方 6 時より開催された。米国、スイス、イタリア、ドイツ、中国、韓国、英国、オランダ、日本から 40 名の参加があった。我が国からは、佐藤謙一 IEC/TC90 国際幹事、藤上純 国際幹事補、松下照男 国内技術委員会委員長他 17 名が参加した。今回の討論会では、今後の製品規格を想定し、商用導体や各国での超電導応用に関する活動状況報告が主題であった。

佐藤国際幹事の開会宣言に続いて、松下国内技術委員会委員長・九州工業大学名誉教授の司会で議事が進行された。

まず、藤上幹事補から 8 月 20～22 日に西安で開催された IEC/TC90 国際会議の経過報告があった（Web21 10 月号参照）。

続いて、応用科学研究所 長村光造特別研究員より、現在規格化が進められている商用超電導線の通則（ガイドライン）の説明がされた。商用導体の定義、LTS、HTS の形状などが紹介され、“General Characteristics and Guidance”に関する Committee Draft の概要が説明された。

古河電工 向山晋一氏から超電導電力ケーブル試験法に関する TC90 の活動、CIGRE WG B1.31 とのリエゾン関係、活動状況などが説明された。CIGRE WG B1.31 により試験法に関するガイドラインが 2013 年中にまとめられる予定であり、それを基に、TC90/TC20 でケーブル試験法のガイドラインの規格化が進められる。

A. Ballarino 氏が CERN における HTS 電流リードの運転状況と超電導ケーブル開発について報告した。LHC 用に 13 kA、6 kA、0.6 kA の Bi2223 電流リードが 1074 個設置され、2010 年から運転されてきており、順調に使用されている。CERN の実績は、電流リードの規格化に大いに貢献している。また、給電用の直流 HTS ケーブル（総電流値 150 kA）の開発状況が説明された。

“Inter. Benchmarking of the strain measurement facilities available in USA, Europe, and Asia”と題して、コロラド大学 N. Cheggour 氏が報告した。I_c、n 値、e_{irr} のベンチマーク試験用に Nb_3Sn 導体が Twente 大学と ITER に数 km 保管され、Round Robin Test 用に準備されている。

Karlsruhe 工科大学 M. Noe 氏より電力用高温超電導機器の試験方法に関する CIGRE WG D1.38 の活動状況が報告された。2014 年までにレポートが出される予定であり、今後の超電導電力機器の規格化活動に活用される。なお、名古屋大学 早川直樹教授はこのワーキンググループの幹事を務めている。

SuperPower 社の D. Hazelton 氏よりアメリカにおける HTS マグネット開発状況の紹介があった。HTS 超電導マグネット開発では、企業においては SuperPower、AMSC が、研究所では FNAL、LBL、BNL、NHFML などが活動している。

Innopower SC Cable 社の Y. Xin 氏から中国の超伝導限流器（SFCL）の開発状況の紹介があった。2005 年から開発が進められ、2007 年に 35 kV/90 MVA の SFCL が変電所で実系統試験され、2012 年には 35 kV/90 MVA の SFCL が変電所に設置された。開発は鉄コアタイプとブリッジタイプに焦点を当てている。さらに、500 kV/1.6-3.2 kA 三相 iron-core 型のものの開発が予定されている。中

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

国では SFCL の積極的な実系統試験が行われており、期待がかけられているのが感じられた。
松下委員長の総括があり、予定通り 8 時 30 分に会議が終了した。

超電導国際規格に関する第 10 回パネル討論会風景

ASC2012 でこれまでに活動がなかったような国からの研究発表が見られたように、今後地球環境を考えた超電導電力応用が世界各国で進められるのではないかという印象を持ったが、それと共に超電導電力機器規格化の活動が重要になると思われる。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

特許情報

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、企画部 部長代理　定方伸行

本年 6 月に登録になった AMSC 社の超電導（HTS）線材の接合特許について紹介する。線材の機器応用に際しては「線材の接合」は非常に重要である。本特許は、HTS 線材を斜めに突合せ、半田付けし、その上下をテープで挟む構造にある点に特徴を有す。

なお、本特許の要約、解説部分は筆者ら独自のもので、また何ら保証するものではないのでご了承願いたい。

【発明の名称】高温超伝導体積層ワイヤ用の 2 面接合部
【発行国】日本国特許庁(JP)　　【特許番号】特許第 5016139 号
【登録日】平成 24 年 6 月 15 日　　【発行日】平成 24 年 9 月 5 日
【出願日】平成 21 年 7 月 22 日
【特許権者】American Superconductor Corporation

【特許請求の範囲】主要請求項のみ記載
【請求項 1】HTS 積層ワイヤ用の 2 面ジョイントにおいて、
第 1 積層 HTS ワイヤであって、該第 1 積層ワイヤの幅に亘るテーパを持つテーパ端部を有し、第 1 ラミネート層と、該第 1 ラミネート層上の基板層と、該基板層上の緩衝層と、該緩衝層上の超伝導体層と、該超伝導体層上の空隙層と、該空隙層上の第 2 ラミネート層とを備える、第 1 積層 HTS ワイヤと、
第 2 積層 HTS ワイヤであって、該第 2 積層ワイヤの幅に亘るテーパを持つテーパ端部を有し、第 1 ラミネート層と、該第 1 ラミネート層上の基板層と、該基板層上の緩衝層と、該緩衝層上の超伝導体層と、該超伝導体層上の空隙層と、該空隙層上の第 2 ラミネート層とを備え、第 1 積層 HTS ワイヤのテーパ端部は第 2 積層 HTS ワイヤのテーパ端部に隣接し且つ結合している、第 2 積層 HTS ワイヤと、
第 1 積層 HTS ワイヤの第 2 ラミネート層と第 2 積層 HTS ワイヤの第 2 ラミネート層とに電気的に接続されている第 1HTS ストラップと、
第 1 積層 HTS ワイヤの第 1 ラミネート層と第 2 積層 HTS ワイヤの第 1 ラミネート層とに近接したバッキング・ストラップとを備える 2 面ジョイント。

【請求項 25】前記積層ワイヤの長手方向軸に対する各々の第 1 テーパ端部の角度は、3 度～50 度の範囲である請求項 1 記載の 2 面ジョイント。

【請求項 37】　（略）前記ジョイントの材料および寸法は、第 1 積層 HTS ワイヤおよび第 2 積層 HTS ワイヤの HTS 膜に中立軸を提供するように選択される 2 面ジョイント。

【請求項 39】これらによるケーブル
ほか、請求項 45 項

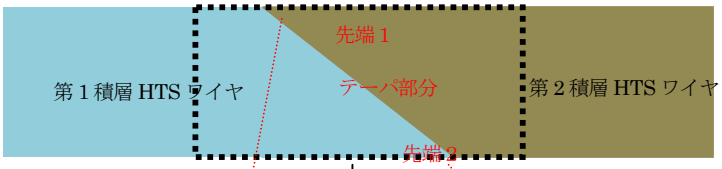
© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

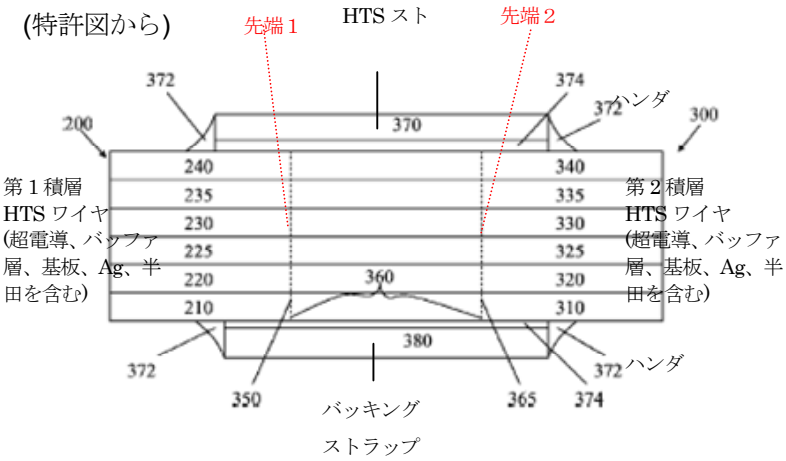
コメント

AMSC 社が 2012 年 6 月に成立させた Y 系線材の接合に関する日本国特許である。現在主流の製法による超電導層を備えた線材を用いた接合を特許化した。ポイントは、下図に示すように、2 つの線材を斜めに切断し、その両者を突き合わせ半田接続し、さらに、上下の面を同様な超電導線材あるいは補強材で挟み込んで構成する点である。これにより、薄膜状超電導テープ線材の接合部の超電導部分を多くし、接続抵抗を減らすことができる。また、強度も高く保つことができる。なお、下図で底部のバッキングストラップは、超電導線材（HTS）ストラップでもよい。ケーブルでの使用例と実際の使用効果も記載されている。

接続部平面図（解説者作図）



接続部断面図
(特許図から)



構成としては、線材は基板が配向 Ni（RABiTS®）あるいはハステロイなどであり、超電導層は有機金属堆積（MOD）法、有機金属化学堆積法（MOCVD）法、パルスレーザ堆積（PLD）法、熱または電子ビーム堆積（EB）法を用いている。現在、量産化されている製法が網羅されている。図中の接合部のテーパの角度は 3～50 度の範囲が請求されている。また、曲げ歪に強いように接合部の超電導層が中立軸に位置するような構成も請求されている（上記請求項 37）。バッキングストラップも、電気抵抗あるいは強度の点から、アルミニウム、亜鉛、銅、銀、ニッケル、鉄、クロム、鉛、またはモリブデンを含有する金属または合金と請求されている。また、接続は、半田が溶融温度 240°C 未満の金属または合金(請求項９)、あるいは、その常温抵抗が 50 μΩcm 未満の金属または合金を含むもの（請求項 10）、Pb, Sn, Ag, Cu, In のいずれかを含有する金属または合金（請求項 11）など幅広く記載されている。

実施例には、この接続部の構成や材料、半田を変えた試験、機械特性試験、接合部ケーブル敷設試験での効果が記載されている。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

「電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会参加」報告

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所低温デバイス開発室
室長　日高睦夫

電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会が 10 月 25 日に港区の機械振興会館で行われた。超伝導エレクトロニクスの幅広い分野から 8 件の興味深い講演が行われた。

防衛大の堅田等は、アンテナ結合テラヘルツ波発信素子を目指して、Bi-2212 の矩形メサをキャビティとする固有ジョセフソン接合素子を作製し、30 K で 499 GHz および 650 GHz の TE111 および TE121 モードで説明できるテラヘルツ波の発信を確認した。

産総研の山田等は、集積型極低温電流比較器（ICCC）の設計を再検討した結果について報告した。巻線電流に対する SQUID 応答性能の向上とパッケージングの改良によって、従来型バルク CCC の 600 pH/turn に迫るインダクタンス 300-400 pH/turn が得られた、また巻数精度も 7 桁前後にまで向上した。

名大の伊藤等は、SFQ 回路の微細化を進めるために、配線インダクタンス増加が期待できる磁性ナノ粒子薄膜の検討を行った。磁性ナノ粒子薄膜は、平均粒径 5 nm の Fe_3O_4 磁性ナノ粒子溶液の溶媒を蒸発させることにより形成する。磁性ナノ粒子膜と積層した SQUID に最大で 19.7 %のインダクタンス増加が認められた。

JAXA の酒井等は、小型 X 線科学衛星 DIOS 搭載に向けた低発熱型多入力 SQUID の開発状況を報告した。DIOS では周波数分割方式を用いて数百チャンネルの素子を読み出すための SQUID を用いるが、SQUID 単体あたりの最大発熱量は 20 nW 以下に抑制する必要がある。今回、発熱量 20 nW の実用可能な SQUID 開発に成功したことが報告された。また、コバルト 60 を線源として軌道上で想定される被曝量の 10 倍に当たる放射化試験を行い、劣化が見られないことを確認した。

産総研の平山等は、TES 等の低インピーダンス極低温検出器出力の多重化を行うためのマイクロ波 SQUID マルチプレクサ開発状況について報告した。インダクタンスを精度よく制御できるマイクロストリップ型コイルを用いた SQUID を採用した。5 mm 角上に 5 GHz 付近のマイクロ波共振器と集積した 16 チャンネル SQUID チップを用いて試験を行い、3 チャンネル同時読み出しに成功した。

東大の土屋等は、ニオブ薄膜を正方格子状に加工した超電導ネットワークへの異方的磁場侵入を、磁気光学イメージング法を用いて可視化することにより観察した結果を報告した。遮断電流の空間変化を最小化することにより GL エネルギーを下げるために対角方向への磁束侵入が起こることを明らかにし、新たに磁束侵入を制御する方法を開発・観測することに成功した。

名大の溝口等は、超電導デバイスにおいて磁束トラップを防止するモート形状による磁束排除効果を、GL 方程式を用いた数値解析により検討した。その結果、モートの角にあたる部分に位置する磁束のモートへの排除効果が弱いことがわかった。

電通大の高橋等は、次世代交流電圧標準を目指した周波数変調型 SFQDA コンバータにおける可変型 SFQ パルス数増倍回路の改良を行った。これにより、従来 2^{m-1} から 2^m 倍までの増倍率しか実現されていなかった m-bit 回路において、1 から 2^m 倍までの増倍率を可能とすることができた。試作された 6-bit 回路において 1~64 倍の増倍率変化を正しく測定することができた。

防衛大の発表と名大の数値計算を除く 6 件の発表は、すべて超電導工学研究所のニオブ集積回路プロセスラインにより作製されたニオブ超電導デバイスを用いて行われた。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

「Applied Superconductivity Conference (ASC) 2012」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
副所長　田辺圭一

米国内で隔年に開催される本会議は超電導応用に関する最大の国際会議であり、25 回目となる今回はオレゴン州のポートランドで 10 月 7 日～12 日に開催された。会議の参加者総数は、52 カ国から 1,650 名と前回より増加しているが、DOE 内の問題による出張制限があり、米国国研から 30 名程度が不参加になったのは残念であった。発表総数は 1,603 件で、内訳は Electronics 453 件、Large Scale 552 件、Materials 410 件、Joint session 170 件、Special 10 件、Plenary 7 件であった。Large Scale が大きく増加しており、今回初めて Materials との Joint Session が作られた。

今年は YBCO 発見 25 周年、ジョセフソン効果発見（予言）25 周年の記念の年であり、火曜日の基調講演とそれに続く Electronics のセッションでジョセフソン効果 50 周年の記念講演（効果発見、SQUID、電圧標準、RSFQ デバイス関連）が行われた。 その他の基調講演としては、月曜に、衛星搭載した超電導ジャイロスコープを用いた一般相対性理論の検証実験が Stanford 大の Muhlfelder により紹介された。また、Cambridge 大の Glowacki は今後の He ガスの供給や価格の見通しについて講演した。He ガスは天然ガスの副産物として年間 30,000 トン生産されているが、MRI などの超電導機器以外にも溶接や熱伝達など幅広い分野に用いられており、今後の超電導機器の普及や核融合技術、エレクトロニクス技術の発展により、さらに需要が大きく伸びることが予想される。一方、米国でのシェールガスの生産開始により天然ガスの採掘が一部停止するなど、He ガスの供給に関しては不安要素がある。現状のような供給不足と今後見込まれる大きな価格上昇が続けば、液体水素を用いた超電導機器の冷却とエネルギー供給という解が現実味を帯びてくるのではないかと述べた。木曜日には、CEA Saclay の Aleksan が素粒子物理の最近の進展と、これに大きく貢献した加速器用超電導技術の現状と将来展望について講演した。加速器ではマグネット、空洞共振器、室温からの大電流導入部に超電導技術が用いられている。超電導マグネットとしては現状で LTS が用いられているが、HTS を併用した 20-30 T 発生を目指した開発が始まっている。

発見から 4 年が経過した鉄系超電導材料では、水曜日に薄膜と線材に関する 2 つの口頭講演セッション、金曜日に磁束ピンニングに関する口頭講演セッションがあり、米国（NHMFL）、ドイツ（IFW-Dresden）、イタリア（CNR-SPIN）、日本（東工大、ISTEC、NIMS ほか）、中国（科学院）などから約 30 件の発表があった。

薄膜に関しては、自然ピンによる磁場中 J_c 特性、SmFeAs(O,F)の高磁場（45 T まで）特性などが主な新しい発表であり、また ISTEC からは P ドープ Ba122 薄膜の高 J_c 特性を報告した。PIT 線材では、中国科学院グループが、米国の国立高磁場研究所（NHMFL）が 7 月に Nature Materials 誌に発表したデータを超える磁場中 J_c（1.7×10^4 A/cm^2 @ 4 K, 10 T）を報告するなど、粒界特性はか

© ISTEC 2012 All rights reserved.

なり改善されたようである。また高磁場でも J_c 低下は小さいという鉄系特有の性質が PIT 線材にも現れている。東工大の細野教授は、水曜日の基調講演で、鉄系超電導材料研究の進展について紹介したが、薄膜や線材の最近の結果は応用への明るい見通しを示すものと述べた。Stanford 大の Beasley 教授が最終日の金曜日に高温超電導材料の探索に関して基調講演を行った。室温超電導体が存在するとすれば、位相揺らぎのことを考慮すれば、小さな異方性や大きなペア密度など応用に適した性質を持つものに必然的になる。ただ、大きな電子密度と大きな相互作用は矛盾する場合が多く、現実の系でこれを見つけるのは難しい。これはいわば"聖杯（Holy Grail）"を求める研究であり、チャレンジする研究者も、お金を出す者も大変だが、継続すべき研究であると強調した。

「Coated Conductor　口頭発表」報告

超電導工学研究所 線材開発研究部
部長補佐　吉積正晃

今回の ASC における Y 系線材の口頭発表は 5 セッションあり、立ち見も出るほどの盛況であったが、内容的には驚くような進展は見られなかった。

世界の大きな動きとしては、Holzapfel 氏（IFW Dresden）から、Eurotapes という欧州の新しいプロジェクトの紹介があった。2012-2016 の 5 年間行われる約 20M ユーロのプロジェクトで、ABAD もしくは RABiTS 基板を用いて 500 m 以上の長尺線材開発を目指すとのことであった。目標を達成してもなお世界のトップランナーとは差があるが、近年開発が全くと言って良い程に進んでいない欧州の長尺線材開発が再び動き始めるようなので、注目したい。これに関連して、Celleja 氏（OXOLUTIA）から、ICMAB のスピンオフカンパニーとして設立された同社が MOD 法を用いて長尺線材開発を担う旨の発表があった。ICMAB を中心とした欧州のプロジェクトでこれまでに開発されてきたインクジェット方式の MOD により長尺線材を開発するもので、現状と今後の計画が紹介された。Bruker 社と組む事で、ステンレス上に ABAD で中間層成膜を行った基板を用いて MOD により成膜する構造を採用しており、長尺線材については装置導入・立ち上げ中であり、これまでに得られた特性は短尺 J_c が 2.3 MA とのことであった。Midterm Goal に 10 m 長線材の作製が挙げられていたが、期日の記載は見当たらなかった。他にも多数のプロセス・テーマで多くのグループが発表しており、欧州の Y 系線材開発の盛り上がりを感じるが、世界のトップレベルの特性とは言い難い。

一方、米国のプロジェクトとしては、ARPA-E が 2 グループによる開発で進んでおり、その一つ、SuperPower グループの開発状況について Selvamanickam 氏（Houston 大学）から報告があった。風力発電などを意識して磁場中特性の向上を目指して開発が進められており、MOCVD の成膜条件を見直す事で BZO の最適添加量を従来の 7.5 %から 15 %まで増やすことが出来、磁場中 I_c 特性が改善されていた。B//c のデータで、低温（30 K、3 T）でも 12 mm 幅で 1100 A を示しており、従来の最適値 7.5 %に比べても 4 割程度の特性向上が見られた。もう一つの AMSC グループからは均一性の向上といった成果が紹介されたが、特性の向上はあまり見られなかった。

ピンニングという観点からは、他にも多数の発表が行われたが、BZO、BHO などの BMO を用いたものが多く、高い特性を示していた。Yoshizumi（ISTEC）による BHO 導入長尺線材の作製報告では、10 m 長の線材で長手方向の磁場中特性分布が±10 %以内に収まる均一な線材の作製に成功しており、人工ピン導入線材の実用化が視野に入ってきた。

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

「SQUID 発表」報告

超電導工学研究所　デバイス研究開発部
主管研究員　塚本 晃、波頭経裕

SQUID 関連では、素子開発、駆動回路から応用まで幅広い分野にわたり約 80 件の発表があった。今回 Bi-SQUID、SQIF に関して、口頭発表とポスター発表に 2 セッションが割り当てられ注目を集めていた。通常の DC-SQUID は超電導リングに 2 つのジョセフソンジャンクション（JJ）が含まれるが、Bi-SQUID では第 3 の JJ が 2 つの JJ と並列に挿入される。Bi-SQUID では、正弦波ではなく三角波の V-Φ特性が得られるため通常の SQUID よりも線形性が改善される。SQIF 構造での高周波アンプなどへの応用が期待されている。また、SQIF に関しても、従来の直列あるいは並列構造から両者の特徴を組み合わせた 2 次元構造への展開が見られた。

応用に関しては低磁場 NMR/MRI に関する発表が 17 件と最も多く、先行する LANL（ロスアラモス国立研究所）が 5 件（口頭発表 3 件）の発表が行われた。脳磁計測や磁気緩和計測と MRI の同時計測や低磁場 fMRI を目指して精力的に開発を進めているが、SN を改善するため分極磁場を強くする、SQUID の数を増やすといった装置の改良に取り組んでおりあまり新しいデータは発表されなかった。脳磁計メーカーの Elekta 社を含むフィンランドのグループ（口頭 1 件、ポスター1 件）は、ヘルメット型 SQUID アレイの MRI-MEG システムを開発し、LANL と同レベルで頭部 3 次元画像の取得を報告した。また、前回の ASC2010 では緩和信号の測定のみであった後発のグループからも、数 cm 程度と小規模であるが 2 次元画像の取得が報告され始めた。

その他の応用として、磁気マーカを用いた乳ガンや直腸ガンの検査装置（ヒューストン大）、免疫検査（台湾大）、モルタルの水分量分析など常伝導検出コイルと HTS-SQUID を組み合わせた構成が多く見られた。また、フィールドでの SQUID 応用として、ISTEC は 10 mT/s の高いスルーレートを持つ金属資源探査システムを発表し、実用性の高い装置として注目を集めた。その他に、SQUID を使用したダークマター（アクシオン）検出（ワシントン大）や中性子の電気分極測定への応用（LANL）など宇宙、素粒子応用に関しても紹介された。

「エレクトロニクス_デジタル発表」報告

超電導工学研究所 低温デバイス開発室
室長　日高睦夫

エレクトロニクス分野からデジタル関連についての報告を行う。今回の ASC デジタルは、アメリカの元気が良かったことが特徴であった。これは、単一磁束量子（SFQ）回路を使った超電導ハイパフォーマンスコンピュータ（HPC）の大型プロジェクト開始に向けての検討が進んでいるからである。このプロジェクトを主導しているコンサルティング会社 Booz Allen Hamilton の Holmes 氏から、超電導 HPC 構想の紹介があった。半導体 HPC の一番大きな問題は消費電力であり、半導体ではエクサスケール（10^{18} FLOPS：京速コンピュータの 100 倍）HPC は発熱が大きすぎて実現は難しいと考えられている。ニオブを用いた超電導 HPC の消費電力は、冷凍機や周辺機器を含めても 2 MW 程度と予想されており、その優位性は際立っている。より消費電力の小さな SFQ ゲートと、IBM プロセスラインを用いたスケーラビリティには目処が付いており、現在はメモリの実現性を探る研究が、HYPRES、Northrop Grumman、NIST、UC Berkley 等で行われている。

Northrop Grumman の Q. Herr から、RQL と名付けられた低消費電力 SFQ 回路を用いて作製し

© ISTEC 2012 All rights reserved.

た 1650 ジョセフソン接合（JJ）からなる加算器の消費電力が、6.5 GHz 動作時に 500 nW であったことが報告された。日本からも名大の田中が、LE-RSFQ と名付けられた低消費電力回路が従来の 1/10 に消費電力を低減しても安定して動作することを示した。また、横国大の竹内は、究極の低消費電力が期待できる A-QFP と呼ばれる回路の消費電力が、5 GHz 動作時に SFQ 回路の限界よりさらに 1 桁小さいことを実験的に明らかにした。

メモリでは、Northrop Grumman の A. Herr の超電導/磁性体/超電導接合を用いた Josephson Magnetic RAM (JM-RAM)研究発表が興味深かった。JM-RAM の読み出し/書き込みエネルギーは 2 fJ であり、1 μm-JJ を用いて 5 mm チップに 18 Mbit の集積が期待できる。周辺回路の検討やデバイスの作製はこれからである。

HYPRES の Kirichenko は、解像度 0.25 μm の KrF ステッパーと SRL の Caldera 平坦化法と類似した平坦化方法を用いたニオブ 6 層プロセスについて述べた。彼らのプロセスの特徴は、ウエハを二つの領域に分け、それぞれに 4.5 と 20 kA/cm^2 の異なる臨界電流密度の JJ を作製している点にある。カナダで超電導量子コンピュータを開発している D-WAVE の Ladizinsky は、半導体 8 インチプロセスラインを使ったニオブデバイス作製について述べた。D-WAVE は 2005 年の研究開始以来総額 120 M$の資金を得ており、人員は 21 人の Ph.D.保有者を含む 70 人である。解像度 65 nm のステッパーによる最小 0.6 μm の JJ を使用している。ニオブ層数は 6 である。筆者は ISTEC ニオブプロセスの信頼性について報告した。ニオブ 9 層、最小 1μm の JJ を用いた 1 チップ上約 7 万 JJ のシフトレジスタ回路が完全に動作している。シフトレジスタイールドはプロセス欠陥と強い相関があり、この意味では半導体最先端プロセスを使うことの意味は大きいと考えられる。一方、磁束トラップに起因する超電導回路特有の歩留まり低下要因があり、この解明には超電導の見地からのアプローチが必要であることを述べた。

ヨーロッパからは、ニオブのプロセスラインを持つドイツの IPHT から小規模 SFQ 回路を用いた実験結果の報告があった。また、フランス CEA の Villager から宇宙通信用の AD コンバータを窒化ニオブ JJ を用いて作製した報告があった。

SFQ 回路を用いた超電導検出器の出力多重化が行われていた。NICT の寺井は、SSPD の SFQ 読み出しにおいて、バイアス T 回路をオンチップ化することによりジッターを 67 ps から 37 ps に低減し、SFQ 入力部分の最適化設計により電流感度を 8 μA から 2 μA に向上することに成功した。この技術を用いて NICT の山下は、4 個の SSPD 出力を同一冷凍機で冷却した SFQ 回路で多重化する実験に成功したことを報告した。同様の実験について IPHT グループからも報告されたが、NICT グループの方がより完成度が高いとの印象を受けた。横国大の吉川は、産総研の質量分析用 SSPD 出力を SFQ の時間/デジタルコンバータ（TDC）を用いて検出することに成功したことを報告した。

「電力機器開発発表」報告

超電導工学研究所 電力機器研究開発部
研究員　丸山 修

電力機器に関する発表は、口頭発表 47 件、ポスター発表 202 件の合計 249 件の発表が行われた。各電力機器の発表件数は、ケーブル 54 件（口頭 18 件）、限流器 100 件（口頭 14 件）、SMES・フライホイール 43 件（口頭 5 件）、変圧器・発電機・モーター52 件（口頭 10 件）。主な発表内容を以下に記載する。

電力ケーブルに関して、日本からは住友電工より東京電力・旭変電所における 66 kV-1.75 kA 超電導ケーブルの I_c 測定等の各種試験結果の報告、古河電工より Y 系超電導電力機器技術開発プロジ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

ェクト（M-PACC）における瀋陽古河電纜での 275 kV-3 kA ケーブルシステムの製造状況について報告された。韓国からは 2013 年に布設予定の 80 kV-3 kA、長さ 500 m の直流超電導ケーブル設計について報告された。中国からは 1.3 kV-10 kA 長さ 360 m の Bi 系直流超電導ケーブル開発において 12.5 kA を超える I_c を確認し、併せて直流用限流器（200 kV-1.5 kA、Bi 系）を開発すると報告された。ロシアからはサンクトペテルズブルグにおける長さ 2500 m の直流超電導ケーブル（20 kV-2.5 kA、Bi 系）の布設計画が報告された。ドイツからはエッセン市にて 2 変電所間を 10 kV-40 MVA の Bi 系交流超電導ケーブルでつなぐ Ampacity Project の進捗・計画にて報告があり、2012 年末までにケーブルを製造、2013 年末に布設予定と報告された。

限流器に関しては、EU から ECOFLOW Project にて 2013 年に実系統導入を計画している 16.5 kV-1 kA 級、24 kV-1 KA 級抵抗型限流器（Y 系）の設計について紹介されたほか、イタリアからはミラノの変電所内にて 9 kV-220 A の限流器の運用状況および 2012-14 年にて電流容量を 1 kA 級にアップグレードする計画の報告、ドイツからはアウクスブルグの 12 kV 系統に 3 相型の限流器を布設するための小型モデル機の設計・試験結果について報告された。中国 Innopower からは天津市に布設された 220 kV/300 MVA 限流器の機器仕様および試験状況について、韓国 KEPCO からは 22.9 kV 630 A 級限流器の実系統運転試験の状況について、名古屋大学からは限流機能付きケーブルにおける YBCO 線材の臨界電流特性が限流機能に与える影響等について報告された。

SMES に関しては、中部電力から M-PACC における SMES 応用のための高強度パンケーキコイル構造設計とその検証実験について報告されたほか、米国から ARPA-E project における電力用 SMES の開発および航空応用に関する紹介等がされた。

変圧器に関しては、九州大学より M-PACC における 66/6.9 kV 限流機能付き変圧器の開発状況のほか、ニュージーランド IRL より YBCO Roebel cable を用いた 1 MVA 級の変圧器の製造状況、および AC loss や冷却器ロス等の各種性能評価について報告された。

風力発電機に関しては、米国 GE から 6 ヶ月間のプロジェクトにて 10 MW 級の風力発電機の設計、および商用化の可能性に対する評価を実施すると報告された。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

「最新超電導プロジェクト情報（ASC2012、ISIS-2012 にて収集）」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 企画部
研究統括　戸井朗人

超電導に関しては、従来から、日米等を中心 に活発な研究開発が行われてきたところであるが、近年では、研究開発の進展を踏まえ、実証段階のプロジェクトが各国において多く 行われてきている。また、欧州が各国共同体制の下で新たに線材開発プロジェクトを開始するほか、ロシアにおいても超電導関係の研 究･実証プロジェクトが活発化してきているなど､新たな動きも多くみられる。ISTEC として、本年行われた ISIS, ASC 等においてこれらプロジェクトに関する情報 の収集に努めてきた。以下に、米国、欧州、韓国、中国及びロシアについてこれら情報を一覧にまとめたものを紹介する（次ページ）。

pdf 版　現行プロジェクト表（2012.10.18 時点-ASC2012 まで）

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

Web21 現行プロジェクト　2012.10.18 時点 （ASC2012まで）

国	Pj名	機関、内容					
		対象機器、線材	概要及び目標	現状	参加機関	予算、期間	その他情報源など
USA	LIPA project	ケーブル	138kV/2.4kA-600m単心ケーブル×3相（Bi線：AMSC）のうち1相分をY系線材に置き換えを計画	138kV/2.4kA-600m単心ケーブル×3相（Bi線：AMSC）実証試験	Nexans、AMSC、LIPA		ISIS2012 ASC2012
USA	DOE Smart Grid　Demo	変圧器	28MVA-３相限流機能付変圧器（69kV/12.47kV）(Y系)を開発し実系統へ導入	design under development	SuperPower、SPX、Waukesha Electric、Southern California Edison	2010-2013 ＄10.7M	ISIS2012
USA	DOE ARPA-E project	SMES	SMES（Y系）開発	first wire delivered, coil trial begun	ABB、Brookhaven National Lab、SuperPower	2011~2013　$4.2M	ISIS2012
USA		線材	・現状の５倍の特性（理論限界の50%） ・ギアフリー風力発電機用線材の開発 ・３Ｇ線材の位置付け ・RABiTS-MOD線材	本年からスタート （現在は理論限界の10%）	Brookhaven国立研究所, amsc	$1.1M 2012年1月1日～2013年9月30日	http://arpa-e.energy.gov/ProgramsProjects/REACT/SuperconductingWiresforDirectDriveWindGenera.aspx
USA		線材	・風力発電機用線材として低コスト線材を開発 ・3000A/12mm幅 @30K, 2.5T　$36/kAm ・IBAD-MOCVD線材	1100A/12mm幅 @30K, 3T	Univ. of Houston, SuperPower, TECO, Tai-Yang, NREL	$2.0M 2012年1月1日～2013年9月30日	http://arpa-e.energy.gov/ProgramsProjects/REACT/HighPerformanceLowCostSuperconductingWiresa.aspx
USA	DOE EERE	風力発電機	全超電導風力発電機開発の設計	ケーススタディ	AML. Emerson,　Argonne, Creare, Houston	＄2Ｍ, 2011-2013	ISIS2012
USA	HYDRA project	ケーブル	13.8kV/4kA-170m三相同軸ケーブル（Y系）を開発し実系統へ導入	25m cable test completed, 170m cable with FCL to be tested in 2014	AMSC、Southwire、ConEdison		ISIS2012
USA	Ultera project	ケーブル	12.3kV/3.0kA-200m三相同軸ケーブル（Bi線）の開発・実証	12.3kV/3.0kA-200m三相同軸ケーブル（Bi線）の実証中	Southwire、AMSC、AEP	2006~ 50%cost Share：Southwire＆DOE	ISIS2012
USA							
EU	ECCOFLOW project	限流器	16.5kV/1kA級、24kV/1KA級抵抗型限流器(Y系)の実系統導入を計画(2013)	12kV/800A級(2011)、12kV/1kA級(2012)抵抗型限流器(Bi2212バルクチューブ)を変電所に設置。	Nexans		ISIS2012 ASC2012
EU	AmpaCity project	ケーブル 限流器	10kV/2.3kA-1km三相同軸ケーブル(Bi系)（中間ジョイント込）および10kV/2.3kA級抵抗型限流器(Y系)の開発	100mプロトタイプケーブルを製作し、20mケーブルにて曲げ試験(φ3m)、30mケーブル＋端末にて試験（絶縁特性等）をセットアップ	Nexans、KIT、Siemens	2011~2015	ISIS2012 ASC2012
EU	**EUROTAPES project**	線材	ABAD, RABiTS基板、YBCO線材および製造プロセスの高性能化:500m, 100€/kAm、丸線化など	本年からスタート	Bruker, Nexans, Thevaなど20機関 (８企業、6大学、５国研、1技術センター。9か国)	€20億（2012年9月1日開始、54ヶ月）	ISIS2012など。 http://eurotapes.eu/
EU		SMES	Hybrid SMES	本年からスタート	KIT、Siemens	2012~2014	ISIS2013
EU		ケーブル	DCケーブル	本年からスタート	CERN、IASS、KIT、Simens	2012~2014	ISIS2012
韓国		限流器	154kV/4kA級		KEPRI、KIT	2012~2014	ISIS2012
韓国	DAPAS project	ケーブル	80kV-0.5km級DCケーブル(2014)、154kV-1km級ACケーブル(2015)をJeju島の実系統に導入	22.9kV/1.26kA-410m級三心一括ケーブル(Y系)を開発し、Ichen変電所にて試験(2011/6~2012)	KEPCO、LS CNS、KERI、Several Universities	2011/7~2016/6 ＄70M	ISIS2012
韓国	DAPAS project	限流器	154kV/2kA級限流器(2015)をJeju島の実系統に導入	22.9kV/630A級限流器を開発し、Ichen変電所にて試験(2011/6~2012)			
韓国		舶用用モータ	5MW舶用推進モータ		DOOSAN	2012~2015	ISIS2012
韓国		風力発電機	10MW風力発電機	POSCOは10kWの小さいのは製造済み	DOOSAN, KERI, POSCO	2013~2016	ISIS2012
中国	**甘粛省全超電導変電所Ｐｊ**	変電所全体(SMES, 限流器(SFCL), ケーブル,　変圧器)、Bi	・複数の超伝導電力装置を集積　・送電網の安全性、電力供給の質を改善、ロスを低減、敷地面積を減少 SMES1 MJ/0.5 MVA; 限流器三相220kV/1.5 kA;超伝導変圧器630 kVA；三相交流高温超伝導ケーブル75m長/1.5 kA	2012年４月世界初の全超電導変電所として送電網に接続し、運転を開始。個別試験は変圧器1440時間実証など確認済。	中国科学院電工研究所(IEE CAS), Innopower, Jiangsu Zhongtian Technology,　China XD Group 施設：甘粛省白銀市	予算不明。全体’11年完成、’12年1月運転開始、’15年　完了予定(各開発時期SFCL'12年、SMES'11年など)	ISS2011　及び http://jp.xinhuanet.com/2011-05/07/c_13862406.htm http://english.cas.cn/ST/HT/ht_progress/201203/t20120328_83126.shtml
中国	**河南省直流ケーブル実証Pj**	直流ケーブル、Bi	360m/10kA Al精錬工場内の直流電力ケーブル用(工場変電所内整流器ーAl電解炉を結ぶ)。通電ロス60%減(対常電導）が目標。	2012年6月試験、9月から運転。Bi線40km使用。	中国科学院電工研究所　　施設：中国河南省	予算不明。'12年6月試験開始	ASC2012 http://www.sei.co.jp/news/press/10/prs862_s.html
中国	**ケーブルPj*編者名称(以下同)**	ケーブル、線不明	1km, 110kV, ~3kA	計画中. 変電所間を結ぶ。	China EPRI	不明	ASC2012
中国	**限流器①Pj***	限流器、Bi	35kV/90MVA	2008年6月から運転中。	Innopower社	2005-2007に装置開発、現在運転中。	ASC2012
中国	**限流器②Pj***	限流器、Bi	220kV/300MVA	試運転中	Innopower社　施設：Shigezhuang Substation (天津)	2007-2012	ASC2012
中国	**その他の限流器**	上海交通大学で10 kV/400A実系統試験、InnoPower社で500 kV/1.6-3.2 kAが開発中					ASC2012
中国	**SMES①Pj***	SMES　YBCO	＞0.5MVA－＞１MJ	開発中	中国科学院電工研究所, China XD Group	2012-2015	ASC2012
中国	**SMES②Pj***	SMES　YBCO	6.9kJ	開発中	China EPRI	不明	ASC2012
中国	**モータPj***	モーター、線は不明	１MW	中国初。2012年10月プロジェクト検収終了。	中国船舶重工集団公司第七一二研究所	不明.科学技術省科技部のプロジェクト	http://j.people.com.cn/95952/7980500.html 人民網日本語版 2012年10月17日
ロシア		ケーブル	20kV/1.4kA(50MVA)-2.5km級DCケーブルの実系統導入を計画	これまで、30m長(2008)、200m長(2009)を開発		サンクトペテルブルグ市で2015-2020に実証実施	ISIS2012
ロシア	Superconducting Industry/Innovative Energy	限流器	3.5kV/650A級抵抗型限流器(Y系)の開発		ROSATOM	2011-2015	ISIS2012
ロシア		変圧器	10kV/0.4kV(10MVA)級変圧器の開発		ROSATOM	2011-2015	ISIS2012
ロシア		エネルギー貯蔵	超伝導軸受を用いたフライホイール(5-20MJ)の開発	0.5MW試験、設計変更必要。5-20MW目標	ROSATOM	2011-2015	ISIS2012
ロシア		モータ	モータ（1-5MJ）の開発	50kWは試験済み、5MW目標	ROSATOM	2011-2015	ISIS2012
ロシア		発電機	発電機(1-10MW)の開発	50kWは試験済み、10MW目標	ROSATOM	2011-2015	ISIS2012

©ISTEC2012

超電導 Web21 トップページ

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2012 年 12 月 10 日発行
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 6）

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
施設長　前田秀明
千葉大学工学研究科　柳澤吉紀

今回は熱暴走（クエンチ）が生じた場合の REBCO コイルの保護について述べることにします。

1. REBCO コイルの保護

超電導コイルの保護技術とは熱暴走（クエンチ）が起きた時にコイルを無事に帰還させる技術です。具体的には、過剰な昇温（<150~200 K）、熱応力、高電圧などによる損傷からコイルを保護する必要があります。コイルの電流密度が高く、冷却が不十分で安定性が悪い場合、クエンチ部分の温度は急激に上昇しますが、同時に常電導領域が急速に拡大して内部抵抗がどんどん増加するので、コイル電流が急激に減衰時して温度上昇は抑制されます。一方、コイルの電流密度が低く冷却が十分で安定性がよい場合には、クエンチ部分の温度上昇はゆっくりですが、常電導部分は伝播しにくいホットスポットになるので、コイル電流を外部抵抗で十分早く減衰させてコイルを保護することが必要になります[1)]。

REBCO コイルは安定性が良いので熱暴走しても常電導領域はホットスポットを作ります。そのため、熱暴走が生じた場合、外部回路で電流を減衰させるには数秒から数十秒の時間が必要になります。しかし、REBCO コイルは数百 A/mm^2 の高電流密度で利用しますから、熱暴走が発生すると極めて短い時間（数十～数百ミリ秒）で 150~200 K まで上昇するので、回路的な電流減衰ではまったく追いつかないことになります。このために、REBCO コイルでは熱暴走発生時のコイル保護技術が問題になります。以下、具体的に説明していきます。

2. 熱暴走とは?

BSCCO コイルでは、励磁中に熱暴走が生じることはほとんどありません。n 値が小さいので、熱暴走の原因になる「温度上昇と臨界電流密度低下の強いフィードバック」が起こりにくいからです。一方、REBCO コイルでは熱暴走が生じます。熱暴走が生じると、コイルは損傷を受けることがあります。図 1 に物質・材料研究機構の松本等が報告している REBCO コイル励磁中に生じた熱暴走信号と、焼損の例を示します。[(2)] 熱暴走はコイル臨界電流より低い電流で生じています。熱暴走は、あまり注目されてはいませんが、実は REBCO コイルの抱える大きな技術課題の一つです。

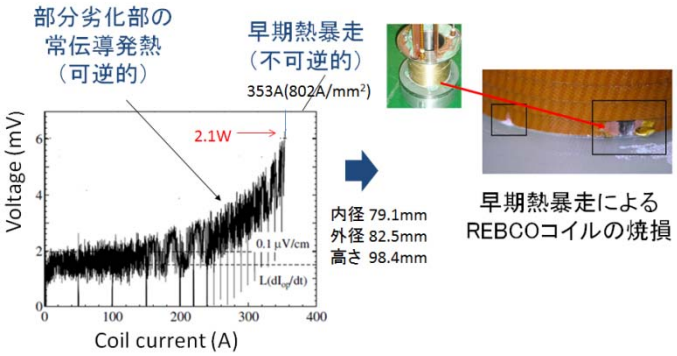


図 1　REBCO コイルの熱暴走の例（4.2 K で 10 T の磁場中）

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

高温超電導の一種である REBCO コイルは、熱的に安定で、熱暴走を起こしにくいはずなのに、なぜ熱暴走が生じ、焼損に至るのでしょうか。

3. 熱暴走の発生メカニズムと対策

3.1 熱暴走の発生メカニズム

熱暴走は、図 2 に示す 2 つのケースに分けることができます。ケース 1 は、REBCO 線材の通電特性の劣化がない場合です。この場合には、コイル臨界電流（この例では 98 A）の約 130 %を超えると熱暴走が生じます。逆に言うとそれまでは熱暴走しないので、安定であるともいえます。臨界電流を越えると常電導発熱が大きくなり熱暴走に至ります。私たちはこの種の熱暴走を「自然クエンチによる熱暴走」と呼んでいます。コイル運転電流はコイル臨界電流より小さいので、このようなケースは現実には存在しないと思われるかもしれませんが、低温超電導（LTS）外層コイルと REBCO 内層コイルを組み合わせたコイルの場合、LTS コイルがクエンチすると電磁誘導で REBCO コイルの電流が増加し、コイル臨界電流を越えることが起こります[3)]。この場合、いったん電流が増加してから熱暴走が発生するので、温度上昇や熱応力でコイル損傷が生じ易くなります。

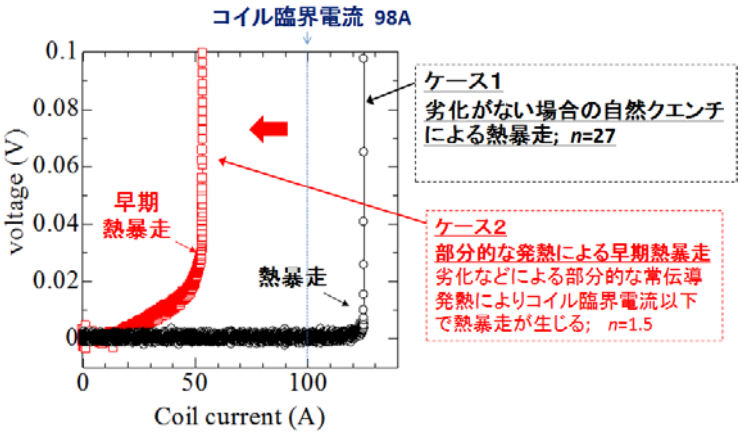


図 2　2 種類の熱暴走

ケース 2 は REBCO 線材の一部に通電特性の劣化がある場合です。線材の劣化の要因は、第 5 回目の解説で述べたエポキシ含浸による線材剥離や[4)]コイル製作過程における線材のキンクなどです。この場合、コイル臨界電流より低い電流で熱暴走が発生します。私たちはこの種の熱暴走を早期熱暴走と呼んでいます。

5 層のパンケーキの第 3 層を人為的に劣化させてポリマー含浸したコイルの、77K における励磁結果を図 3 に示します[5)]。コイル臨界電流（98 A）の 54 %の電流で早期熱暴走が発生しています。第 3 層には早くから劣化による発熱がみられますが、劣化層は n 値が低いので自発的な熱暴走が生じにくく、加熱された健全な隣接する第 2 層から熱暴走が生じます。熱暴走開始時の発熱量は 1.5W です。含浸コイルの場合、1 W が熱暴走

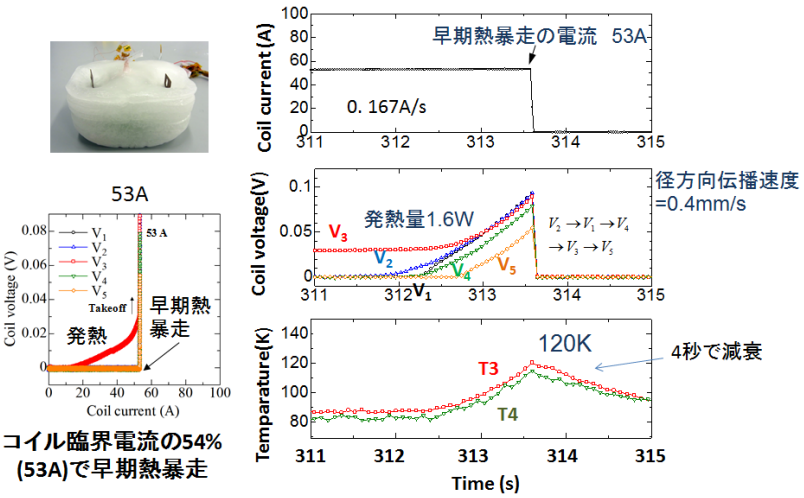


図 3　ケース 2 の熱暴走の実験例

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

の目安になるようです。

図 4 に、含浸コイルと非含浸コイルにおける熱暴走発生の電流を示します。 (a)は劣化部の n 値が 1.5、(b)は 2.4 の場合の早期熱暴走（ケース 2）、(c)は自然クエンチによる熱暴走（ケース 1）です。非含浸（赤いゾーン）の場合、液体窒素で直接冷却するので発熱が効率よく冷却され、熱暴走電流がコイル臨界電流付近にまで増加します。このように、冷媒による直接冷却は熱暴走を抑制する上で有効です。熱暴走発生時の発熱は約 5W で、含浸コイルの 3 倍の発熱まで熱暴走が生じないことが分かります。(b)の場合、含浸コイルでも熱暴走電流はコイル臨界電流近くまで増加します。即ち、早期熱暴走電流は劣化レベルに依存します。劣化の無い場合(c)、コイル臨界電流の 130%まで熱暴走は生じていません。

図 1 の松本氏のコイルの熱暴走では [2)]、劣化部の n 値が約 1.5（4.2 K）、熱暴走直前の発熱が 2.1 W、熱暴走電流は臨界電流の約 50 %など、我々の結果とよく対応しています。

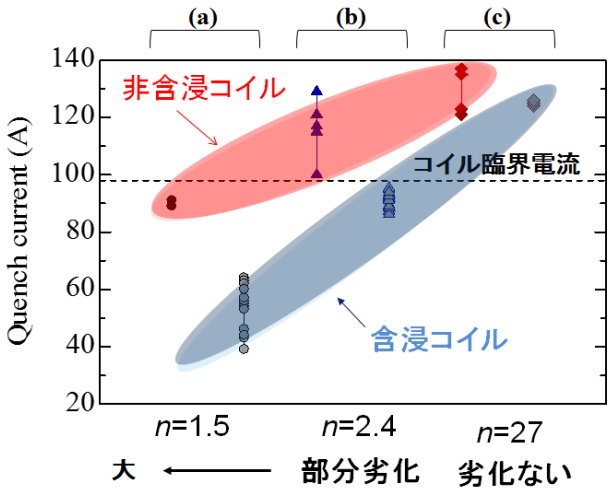


図 4　含浸の有無と熱暴走電流（77 K）

3.2 早期熱暴走の抑制法

ケース 2 の早期熱暴走を抑制するには、まず何と言っても REBCO 線材の劣化を防止することが大切です。これについては既に第 5 回に詳しく述べました。次に、冷媒による直接冷却で冷却能力を向上させることも有効です。最近我々は、10 μm のポリイミド絶縁皮膜を電着した線材で、熱暴走の発生が抑制されることを示しました [3)]。もう少し positive な方法として我々が提案しているのがサーマルグリッド法です [3)]。 高熱伝導性の金属をパンケーキ間のスペーサとして使用して径方向の熱伝導を向上させる方法です。

以上、早期熱暴走の発生を抑制するためには、（イ）線材の通電特性の劣化を防ぐ、（ロ）劣化部の発熱を効率よく冷却する、という 2 つの原則に尽きることが分かります。

4. 熱暴走による温度上昇

4.1 温度上昇の特徴

上記の 5 層パンケーキについて早期熱暴走による温度上昇を数値解析で求めた結果を図 5 に示します（n=2.4）。線材は SuperPower 社の標準品（40 ミクロンの安定化銅）を想定しています。図 5(a)は 77 K の場合ですが、74 A で早期熱暴走が発生します。これは線材電流密度で 185 A/mm^2、銅安定化材の電流密度で 463 A/mm^2 です。300 K まで温度が上昇するのに約 1 秒、安定化材の融点

© ISTEC 2012 All rights reserved.

に到達するまで 2.6 秒かかります。この電流密度は LTS コイルでも珍しくはありませんが、LTS コイルの場合には常電導伝播速度が速く電流が急速に減衰する（例えば 1 秒以下）ので、温度が過剰に上昇することはありません。一方、REBCO コイルでは常電導部がホットスポットになるので、外部回路で電流を減衰させてコイルを保護する必要があります。コイルが小さくインダクタンスが小さいうちはよいですが、大きなコイルになると電流減衰が間に合わなくなります。

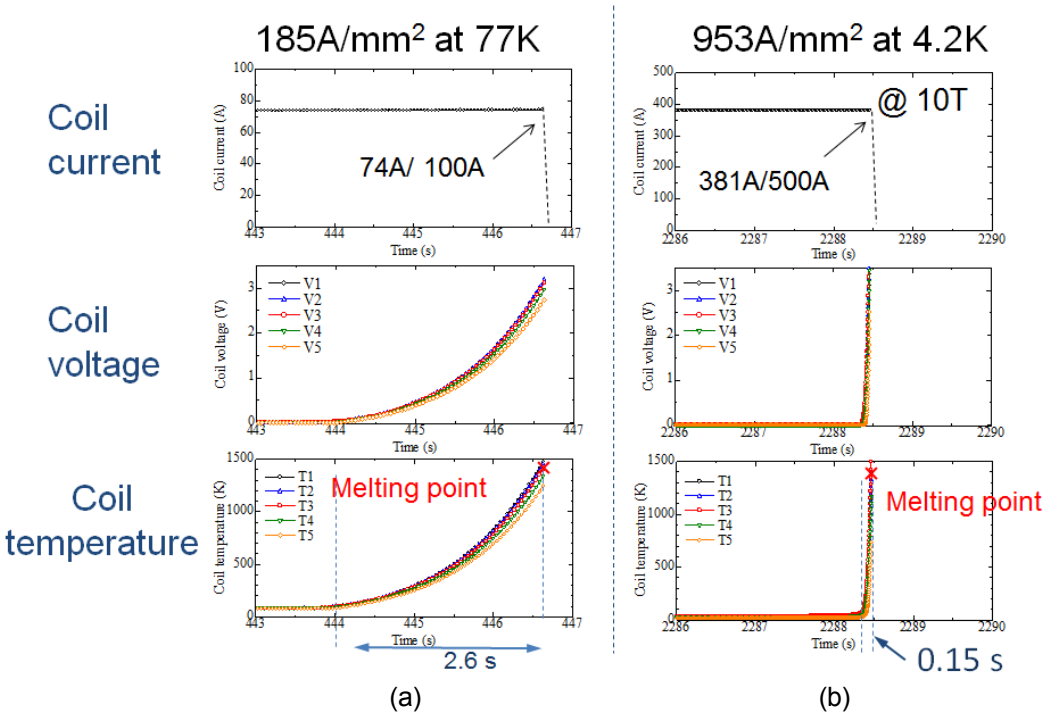


図 5　熱暴走後の温度上昇の解析値。
(a)77 K の場合は 74 A で早期熱暴走が生じる、 (b)4.2 K で 10 T のバックアップ磁場がある場合は 381 A で早期熱暴走が生じる。

図（b）は 4.2 K の場合です。10 T のバックアップ磁場を想定していますが、381 A で早期熱暴走が発生しています。線材電流密度が 953A/mm^2 と極めて高く、300K に昇温するまでに 0.1 秒、融点に到達するまでに 0.15 秒と短時間で危機的な状況に至ります。よほど小さなコイルでなければ、回路的な電流減衰に頼る保護方法ではとても間に合いません。

4.2 温度上昇の抑制

このように、運転温度が低く運転電流密度が高くなるほど、また REBCO コイルが大きいほど、標準線材を用いたのでは温度上昇が急峻すぎて対応できなくなります。当然ですが、一つの有効な方法は、標準線材より安定化銅を厚くすることです。ただし、電流密度はこれに伴い減少するので、REBCO コイルの利点を打ち消すことになります。今後、REBCO コイルが大型化するに従って、コイル保護はますますシビアになるので、新しいアイデアが強く求められています。

最近 MIT のグループが絶縁なしの巻き線を用いることで、熱暴走による温度上昇を低いレベルに抑制できることを提案していますが [6)]、これは斬新なアイデアです。また、上記のサーマルグリッド法 [3)] もこの様な方向を向いています。

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

REBCO コイルに熱暴走が発生すると、ホットスポットになるので、外部保護抵抗にコイルエネルギーをダンプする形で保護します。ところが、この手法では、大型化、高電流密度化するほど電流減衰が温度上昇に追い付けなくなりコイルの保護が困難になります。今、熱暴走によるコイル温度上昇を効果的に防ぐ新しいアイデアが強く求められています。

参考文献：

1) M. N. Wilson, Superconducting magnets, Clarendon Press Oxford, 1983.
2) S. Matsumoto, T. Kiyoshi, A. Otsuka, M. Hamada, H. Maeda, Y. Yanagisawa, H. Nakagome and H. Suematsu, Generation of 24T at 4.2K using a layer-wound GdBCO insert coil with Nb3Sn and Nb-Ti coils, Supercond. Sci. Technol. 25 025017(2012).
3) Y. Yanagisawa, T. Fukuda, K. Sato, H. Nakagome, T. Takao, H. Kamibayashi, M. Takahashi, and H. Maeda, Use of a Thermal Grid Method to Increase Thermal Runaway Current and Suppress Overheating for YBCO Pancake Coils Operated at 77 K, submitted to ASC 2012, Oregon.
4) T. Takematsu, R. Hu, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, D. Uglietti, T. Kiyoshi, M. Takahashi, and H. Maeda, Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation, Physica C, 470, 674–677 (2010).
5) Y. Yanagisawa, E. Okuyama, H. Nakagome, T. Takemastu, T. Takao, M. Hamada, S. Matsumoto, T. Kiyoshi, A. Takizawa, and H. Maeda, The mechanism of thermal runaway due to continuous local disturbances in the YBCO-coated conductor coil winding, Supercond. Sci. Technol. 25, 075014 (2012).
6) S. Hahn, D. K. Park, J. Bascunan, and Y. Iwasa, HTS pancake coils without turn-to-turn insulation, IEEE Appl. Supercond., 21, 3, 1592-1595(2011).

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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：「まず超電導地磁気センサの詳細を教えてください。地震発生が瞬時にわかるようになったそうですが、数秒間早くなったということでどういうメリットがあるのでしょうか?」

A:　私たちは液体窒素中で動作する高温超電導SQUIDを磁気センサとして応用した地磁気観測装置を開発しました。きっかけは、首都大学東京の大久保准教授らが、宮城内陸地震の発生を、地磁気の変化として観測したことに起因します。地震の発生時に、ピエゾ効果（ある種の結晶に圧力を加えると電圧が発生する現象）によって震源付近に電流が発生し、それによって地磁気が乱されるのを観測するものです。この研究は、従来はフラックスゲートという磁気センサを用いて行われてきましたが、地震の発生場所が予測できないため、一桁高感度な1 pTの磁場を観測でき、フィールドで安定動作可能な磁気センサが望まれました。本装置は、資源探査用高温超電導センサの地磁気中での安定動作技術を応用して開発したもので、高感度なだけでなく、環境温度の影響を受けずに温度管理ができ、感度が安定する利点を持っています。

図1　SQUID地磁気観測装置

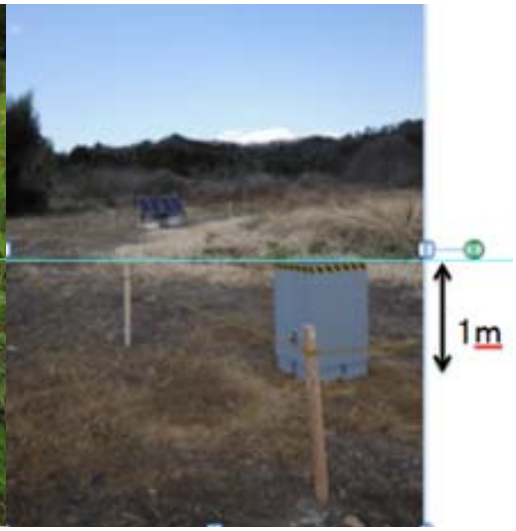


図2　設置風景

図1は液体窒素容器に3次元用に3つのSQUIDを装着した状態を示しています。25Lの液体窒素で、およそ50日間、冷却し続けることが可能です。

図2はこれをカバーで覆ったものと、このシステムに電源を供給する太陽電池パネル、データを収集および送信するシステムの設置風景を示しています。

システムの状態は、インターネットを介して制御され、データも図3に示すようにインターネット上で確認できるようになっています。この図は、一日の地磁気の変化を、3次元の成分で示しています。

© ISTEC 2012 All rights reserved.

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

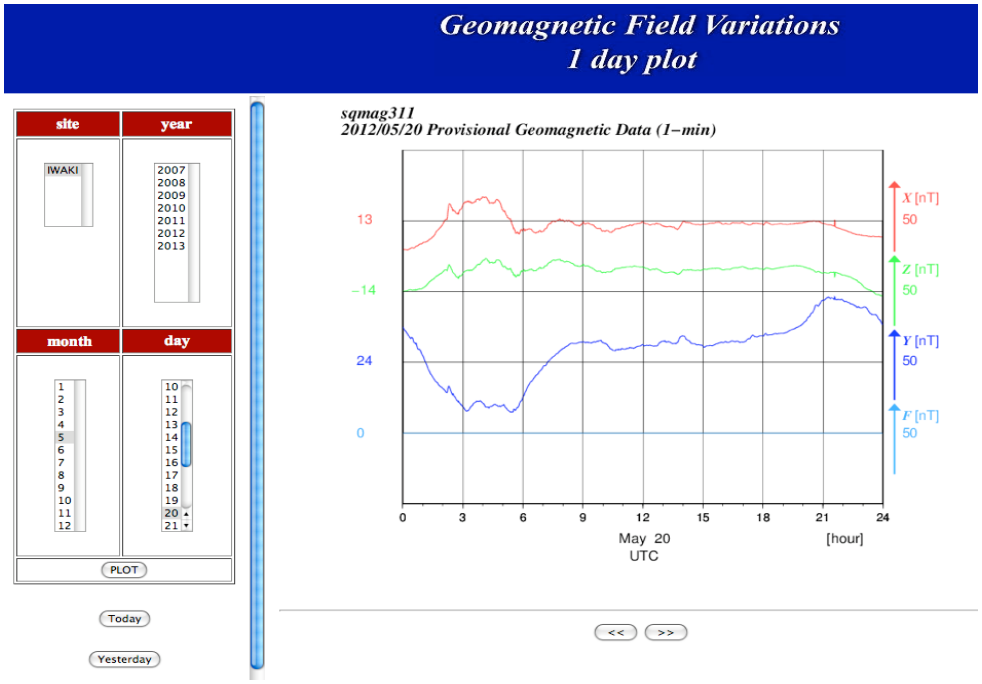


図3.　インターネットを介したリアルタイム測定

従来の地震警報システムは、大きな揺れの前の小さな揺れを感知して警報を出すため、揺れの伝わる速度で警報を出すまでの時間が制限されました。地磁気の観測によるシステムでは、地震の発生を光の速度で感知できることになり、大きな揺れが予想される震源に近い場所でも、瞬時に地震の発生を知らせることが可能です。わずか数秒であっても身構える時間を提供する事で、より多くの人命を守る手助けになると考えています。現在は観測を始めたばかりですが、日常の地磁気変化と地震による地磁気変化の区別、通報につなげるアルゴリズム、複数台による位置の特定など、実際に地震速報に応用するにはまだまだハードルがあります。

回答者：公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所
デバイス研究開発部 主管研究員　波頭経裕

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。」

© ISTEC 2012 All rights reserved.