

超電導 Web21

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

掲載内容（サマリー）：

トピックス

- 第 27 回国際超電導シンポジウム（ISS2014）開催速報
- 第 23 回国際超電導産業サミット（ISIS-23）開催速報

特集：低温デジタルデバイス

- 超伝導デジタル回路への磁性薄膜導入とその効果
- 論理演算回路の消費電力限界を打破する超伝導可逆回路
- 超伝導検出器と SFQ 回路のハイブリッドデバイス

- 超電導関連 2014 年 12 月-2015 年 1 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（10/20-11/19）
- 世界の動き
- 「2014 年度春季低温工学・超電導学会」報告
- 隔月連載記事超電導センサ（その 6）
- 連載記事「やさしい電力系統のはなし」（第 11 回）
- 研究室紹介 九州工業大学大学院 超伝導応用工学研究室
- 読者の広場「鉄系超電導にアンモニアを挟むことで新しい現象が出た、と新聞で見ましたが、鉄系の臨界温度がどんどん上がっていくのでしょうか？見通しは如何でしょうか？」

[超電導 Web21 トップページ](#)



超電導 Web21

〈発行者〉

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局
213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3 丁目 2 番 1 号 KSP A-9
Tel 044-850-1612 Fax 044-850-1613
超電導 Web21 トップページ：<http://www.istec.or.jp/web21/web21.html>

この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>

超電導 Web21

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

トピックス：第 27 回国際超電導シンポジウム (ISS2014) 開催速報

公益財団法人・超電導産業技術研究センター
普及啓発・国際部長 岡崎 徹

(公財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) は、平成 26 年 11 月 25 日 (火) ～27 日 (木) の 3 日間、タワーホール船堀 (東京都江戸川区) にて国際超電導シンポジウム (ISS2014) を開催した。ISS は国内外の超電導に関する研究や技術開発の成果発表と国際交流を通して、超電導産業技術の開発と実用化の促進、一般社会への普及・啓蒙を図ることを目的に毎年開催しており、今年で 27 回目を迎えた。今回は、海外参加 122 名を含め総参加者 434 名となった。参加国 17 カ国となり、最も多い韓国で 66 名、ついで中国の 24 名、欧州全体で 14 名、米国の 9 名、ロシア 5 名と続いた。発表は招待講演者 50 名 (昨年度 57 名) を含め口頭講演 120 件、ポスター講演 237 件の合計 392 件で前年度から 35 件減少している。ここ数年、発表数の減少が見られるがリーマンショック以降の急激な研究開発投資への削減と比べて減少はおだやかで、削減された研究費の中での研究者の熱意が感じ取られる。昨今の景気回復基調の元、来年以降の発表数回復に期待される。

講演の論文は査読を経た後、Physics Procedia 若しくは Special issue of Physica C (共に Elsevier) に掲載される予定である。また、10 企業・団体による超電導関連材料と製品、技術の展示会も同時開催された。

本年は去る 9 月、組織委員長である北澤宏一先生が急逝されたため、木須隆暢プログラム委員長・九州大学教授が組織委員長代行として登壇し、開会式の際に黙祷を行い、北澤先生とゆかりの深い田島大阪大学教授が簡単なメモリアル講演を行った。その後の特別基調講演は 2 件行われ、最初に MIT の岩佐教授が High-Field Applications of HTS Tapes の題名で講演を行い、次にプログラム委員長でもある University of Jena の Paul Seidel 教授が Present status of research projects on iron-based superconductors in Germany を講演した。

2 日目、3 日目は、物理・化学／磁束物理、線材・テープ／特性評価、薄膜・デバイス、システム応用及び大型システム応用の 4 分野に別れての口頭発表と、2 回のポスターセッションが開催され、関係する報告と討議がなされた。従来のバルク・特性評価は内容によって上記 4 分野に振り分けられている。

今年は新たに IEA とのジョイントセッションが試行された。若手研究者の育成を目的としており、35 歳以下の研究者が自身の研究テーマと将来のエネルギーシステムに関する期待、自身の関わり方などを報告する。優秀者には IEA より賞金も出された。最優秀賞には大阪大学の Saori Shibatani 氏、優秀賞には九州大学の Kohei Higashikawa 氏が選定された。

なお、今年度も昨年度に引き続き韓国の選抜中学生 15 名 3 グループによる特別ポスター発表が指導教官の下で行われた。大人顔負けの英語力で、是非とも発表を聞いてほしい、という熱意が感じられてほほえましかった。

3 日目午後のクロージングでは各分科会で行われた内容を総括して報告され、最後に ISS2014 運営委員長の清川寛 ISTEC 専務理事から閉会スピーチがあり、来年 11 月 16 日 (月) ～11 月 18 日 (水) の 3 日間、東京・江戸川区 タワーホール船堀で開催予定の ISS2015 の紹介をもって閉幕した。

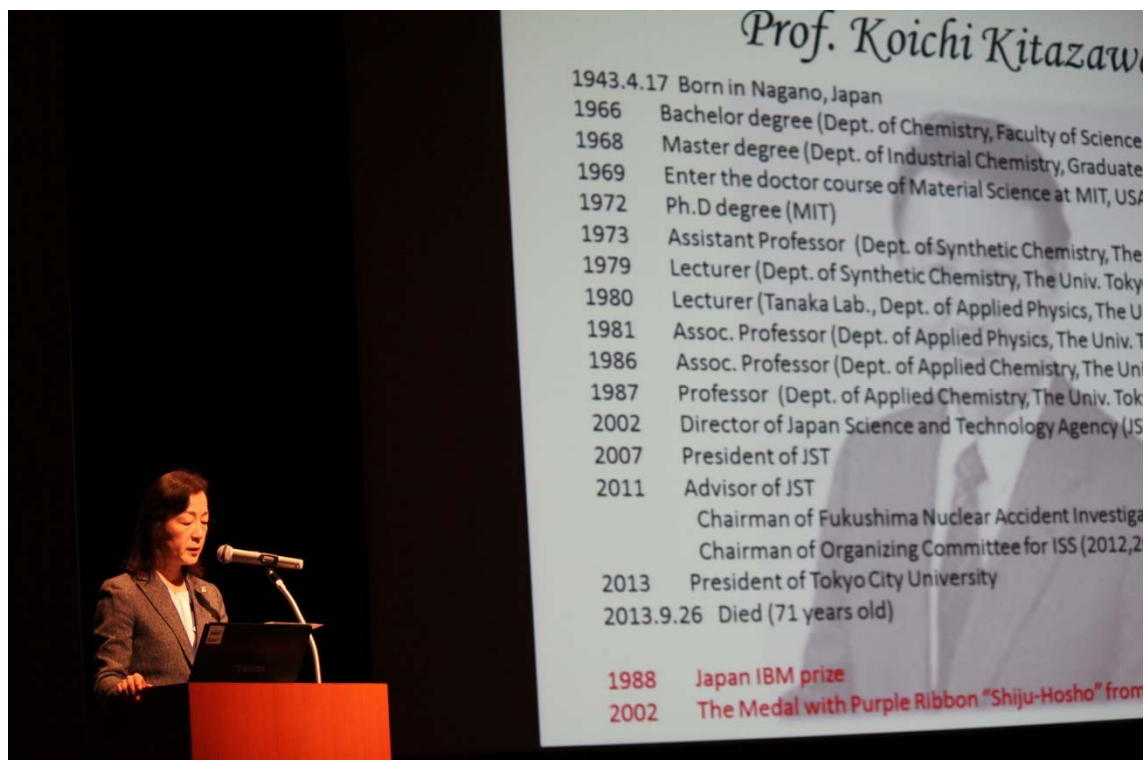
なお、ISS2014 の詳細な報告は 1 月号 Web21 にて別途紹介される。

超電導 Web2.1

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



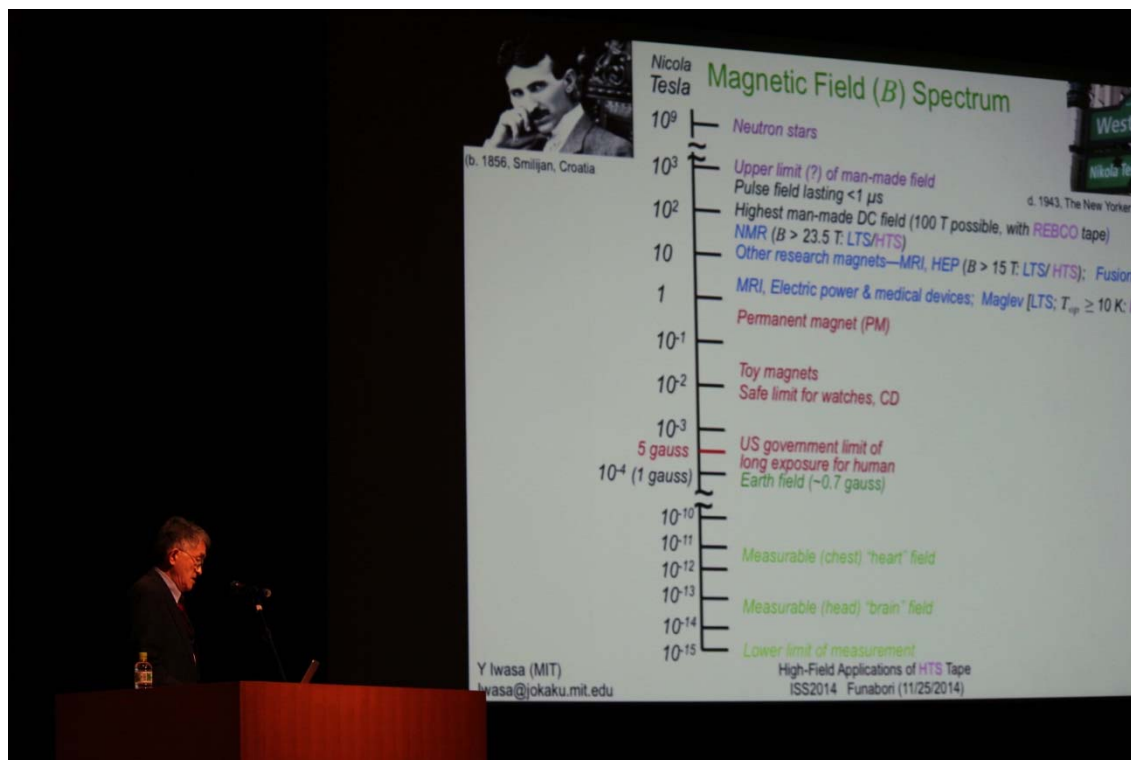
開会挨拶 組織委員長



北澤宏一先生のメモリアル講演から

超電導 Web2.1

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



岩佐教授による講演



オールラセッションでの質問時間

超電導 Web2.1

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



ポスターセッション



韓国中学生

超電導 Web2.1

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



企業展示会風景



IEA-ISS ジョイントセッションの受賞者

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

トピックス：第 23 回国際超電導産業サミット（ISIS-23）開催速報

公益財団法人・超電導産業技術研究センター
普及啓発・国際部長 岡崎 徹



ISIS-23 会場の様子

平成 26 年 11 月 12（水）～11 月 14（金）、ロシア・モスクワにて第 23 回国際超電導産業サミット（ISIS-23）が開催された。サミットは参加各国の持ち回りで開催されており、今年度は昨年新たにメンバーに加わったロシアがホスト国であった。

今回は世界情勢によりロシアへの経済制裁が行われており、開催も危ぶまれたが参加国は日本、アメリカ、ヨーロッパ、韓国の参加を得た。ニュージーランドは諸事情により不参加となった。

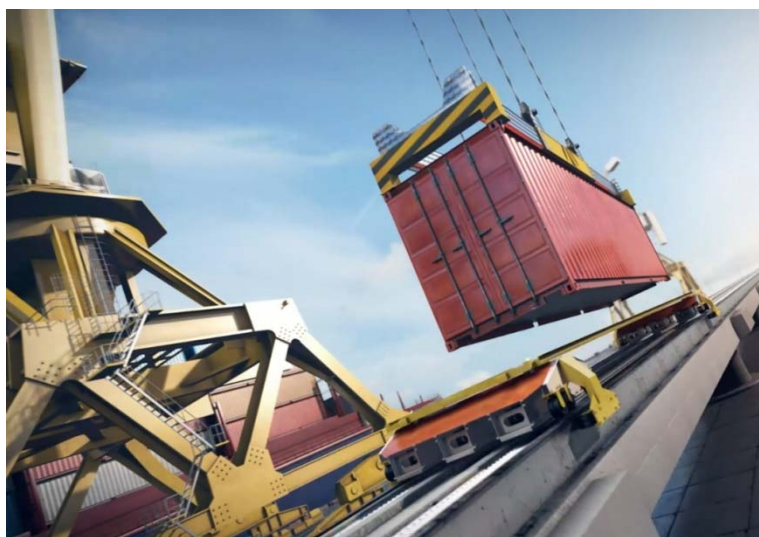
国ごとの参加者数は、日本からは 3 名で、次に米国は 1 名、ヨーロッパの 2 名、韓国は 3 名であり、ホスト国のロシアは 26 名が登録しており、総計 35 名と昨年度日本で開催された ISIS-22 の 36 名と同程度となっている。ただしロシアについては全員が揃って会議に参加することは無く、実際の参加数は不明である。

今回の会議テーマは International Status and Projections for Superconductivity で、現在の各国 R&D の現状から始まり線材、ケーブルの現状報告、そして回転機および MAGLEV 関連へと繋がった。日本からは R&D 全体状況の次に線材の開発状況を報告し、MAGLEV の現況および鉄道電力システムへの応用などが紹介された。

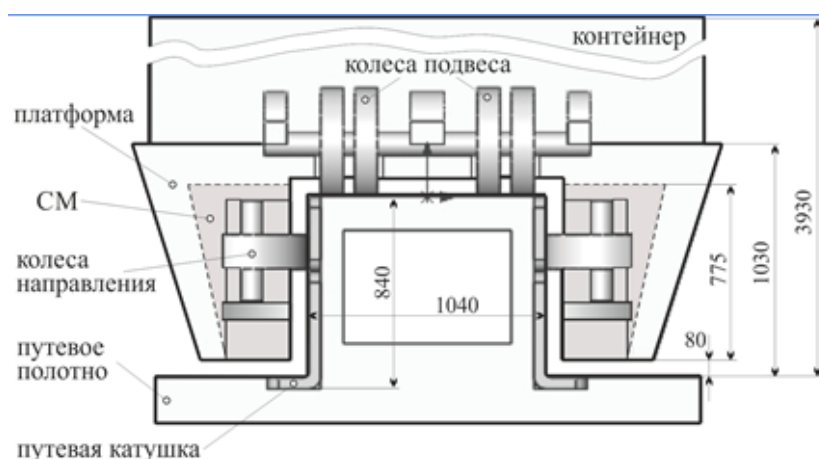
興味深かったのはロシアで、各種応用への展開が期待されることが述べられた。逆に欧州からはそこまで手広く考えず、もっと着実に考えれば、との意見も出されている。そのロシアの各種応用の中で興味深いのは MAGLEV 計画で、全く机上レベルではあるものの検討が進んでいるのは事実の様である。北部の港湾からモスクワまでの高速貨物鉄道に応用し、旅客はまだ考えていない。手の込んだ CG による動画も披露され、具体的な検討が進むのも近い可能性がある。また超電導航空機なども考えている。従来 4 kW/kg 程度であったモータが 50 kW/kg まで改善できると述べられ、その要素技術であるレーストラックコイルの開発などが報告された。

超電導 Web2.1

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



MAGLEV の CG 一部。船舶からコンテナを受け取り、下のパレット状の車両が高速で輸送する。



パレットの構造図



超電導航空機の構想図

超電導 Web2.1

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

会議終了後には近郊の Scientific Center of Federal Grid Company United Energy System を訪問し、超電導ケーブル試験の現場を見学した。屋外の直流超電導ケーブルはリールに巻かれた状態であったが、ジョイントもされており、そのコンパクトさが目を引いた。また交流ケーブルも室内に置かれていた。色々たくさんの PJ があり、その PJ に比べて少ない予算でやりくりしている様子も見取れた。



屋外暴露中の直流超電導ケーブルとジョイント（中央部に少し見えている）



室内に置かれた端末（交流ケーブル）

超電導 Web21

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

蛇足ながら、筆者はソ連邦最後の夏に学会参加のためレニングラード（今のセントペテルスブルグ）を主に訪問した事がある。当時と比べて圧倒的に増えた自動車、どこかで見たようなブランド店が軒を並べるなど大きく変わっている。異文化に触れるという感覚はかなり希薄になり、その点は何が残念であった。ただ重厚な建造物、地下深い地下鉄、などなどはそのままで少しほっとした。また現地で英語が通じないのは相変わらずで、せめてアルファベットくらいは覚えていかないとかなり苦勞することを体感した。

--- Program ---

Session 1 National R&D Review

(Speech 35 min Q&A 5 min)

09.10 – 09.50 Japan: International Superconductivity Technology Center (ISTEC)

09.50 – 10.30 USA: Coalition for the Commercial Application of Superconductors (CCAS)

11:00 – 11:40 Europe: Consortium of European Countries Determined to use Superconductivity (CONNECTUS)

11:40 – 12:20 Korea: Korea Industries Confederation for Commercialization of Superconductivity (KICS)

12:20 - 13:00 Russia: Russian Superconductor Organization (RSC)

Session 2 Progress in Commercialization of HTSC Wires, Conductors and Cables

14:40 - 15:00 Progress in Production of HTS-2 tapes (SuperOx)

15:00 – 15:30 HTS wires and Cable Projects in Japan

15:30 – 16:00 HTS wires and Cable Projects in Korea

16:00 – 16:30 HTS Cable Projects in Russia (RF Grid Co.)

17:00 – 17:30 HTS wires and Cable Projects in USA

17:30 – 18:00 HTS wires and Cable Projects in EU

Friday, November 14

Round table HTSC in rotating machinery. Way to commercial HTS Motors, Generators, Flywheels

09:00-10:00

Russia (MAI), - main presentation - + discussions,

Round table HTSC in MAGLEV trains

10:00 – 10:40 Maglev Projects in Japan, US, Russia

10:40-11:00 Panel and General Discussion

11:00 – 11:15 Closing remarks Dr. Alan Lauder Chairman of ISIS

Technical Tour: 11:30 – 15:30 (Visit to the organization involved in the HTSC technologies – Preliminary to Scientific Center of Federal Grid Company United Energy System)

(詳細は次号で)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

特集：低温デジタルデバイス

「超伝導デジタル回路への磁性薄膜導入とその効果」

名古屋大学 大学院工学研究科
准教授 赤池宏之

単一磁束量子(SFQ)回路をはじめとする超伝導デジタル回路の特徴の一つは低消費電力性である。近年、この特徴が重要視され、さらに低消費電力化を目指す研究開発が盛んである。これは、超伝導デジタル回路の目指すべき方向性の一つがエネルギー効率の高い演算処理の実現であり、スーパーコンピュータやデータセンターにおける電力消費量の将来的な課題に対して、超伝導デジタル回路が一つの解を与える可能性があるからである。実際、米国では Cryogenic Computing Complexity (C3) プログラム¹⁾の下、日本でも JST-ALCA プロジェクト²⁾や科研費支援の下、精力的に超低消費電力回路やシステム化の開発が進められている。そのような中、近年、磁性体材料を回路内に組み込み、回路の高性能化及び高機能化を実現しようとする試みがなされるようになった。本稿では、磁性薄膜導入の効果について、我々の取り組みも含めて、簡単に紹介する。

磁性材料の特徴の一つは磁化を持つことである。そこで、磁気抵抗メモリ(MRAM)のごとく磁化反転を利用すれば、従来の磁束量子を保持する超伝導ループの使用から開放され、超伝導デバイス初の大容量メモリの実現につながる。上記 C3 プログラムでは、大容量クライオメモリの開発が重要課題として位置付けられ、磁性ジョセフソン接合や超伝導 MRAM の研究開発が活発化している。我々も、磁性体に PdNi 合金を用いて磁性ジョセフソン接合の検討を開始しており、素子特性のばらつき(標準偏差 1σ)が 0.7 %と、集積化に耐えうる特性を実現している。磁性体導入の他の利点は、磁化から発生する磁束を回路にバイアスすることができることである。つまり、微小磁性パターンを回路内に組み込み、局所的に磁束を印加することが可能となるのである。

後者の磁束バイアス効果は、ジョセフソン接合を含む超伝導ループ、すなわち SQUID の並列回路となる超伝導回路において、高性能化に向けての一つの手段となる。今、回路内の一つの超伝導ループに着目する。このループに沿って一周したときの超伝導巨視的波動関数の位相変化分は、量子化条件から 2π の整数倍となる。外部からこのループに磁束が印加されると、その大きさに応じた等価位相差としてループの位相変化に加算され、ループの位相変化分をシフトさせることになる。このような機能を実現する素子は超伝導位相シフタと呼ばれ、いくつかの素子が提案されている(表 1)。

表 1. 各種超伝導位相シフタの比較

位相シフト素子	シフト量	特徴	課題・短所	文献等
磁束トラップループ	π	作製容易	素子サイズ大、磁束トラップ操作必要	3)
YBCO コーナースQUID	π	超伝導ギャップ d 波対称性	HTS プロセス、レイアウト	4)
強磁性 π 接合	π	プロセス適合性、素子サイズ小	素子特性制御	5)
磁性パターン	任意	作製容易、素子サイズ極小	磁化制御、磁束漏れ	名大

超電導 Web2.1

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

位相シフト導入の意義は、回路の低消費電力化⁴⁾、及び動作の安定化⁶⁾が可能なことである。位相シフトを上記超伝導ループに挿入すると、自然に周回電流が発生する。これは、超伝導ループに外部磁束を印加すると、それを打ち消すように周回電流が流れることと等価である。従来の回路では、SFQ を保持するループに非対称にバイアス電流を供給することや相互インダクタンスを介した磁束の印加により、上記の効果をj得ていた。従って、回路内のループにうまく位相シフトを配置すると、バイアス線の数及びバイアス電流量を削減でき、低消費電力化が可能となる。また、回路の動作余裕やビットエラーレートが改善され、動作の安定化に繋がる。

我々が取り組む磁性体を用いた位相シフトは、表 1 に示したように、素子の作製・微細化が容易かつ任意の位相シフト量が可能な点が特長であるが、導入に向けては磁化の制御が不可欠である。これまでに単独ジョセフソン接合及び SQUID 上に磁性パターンを配置し、その効果を検討してきた。その一例を図 1 に示す。試料の冷却時に外部磁場を印加した時(有磁場冷却時)、磁性パターンによる磁束バイアス効果が確認できる。この磁束バイアス量は、有磁場冷却時の印加磁場の強さにより制御できることを見出している。現在、この位相シフトを回路に導入し(図 2)、その効果の検証を進めているところである。

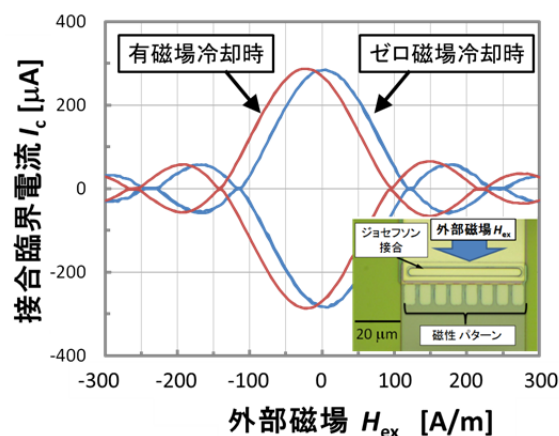


図 1. 磁性パターン付ジョセフソン接合臨界電流の外部磁場依存性。有磁場冷却により、特性がシフトしていることがわかる。



図 2. 磁性パターン付回路

以上のように、磁性材料を接合レベルから回路レベルまで導入することにより、超伝導デジタル回路はその性能向上とともに、実用化へ向けて大きく進展するものと予想される。このような研究の遂行には、超伝導デジタル分野の研究者のみではなく磁性分野の研究者を交えた領域融合型研究グループによるものが望ましい。このような形をとるプロジェクトは C3 プログラムに代表されるように海外が先行している。国内においても、本格的な研究プロジェクトの開始が待たれる。

参考文献：

- 1) IRPA C3 program, <http://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/c3>
- 2) JST-ALCA program, <http://www.jst.go.jp/alca/kadai.html#K02>
- 3) J.B. Majer et al., Appl. Phys. Lett. 80, 3638 (2002).
- 4) Ortlepp et al., IEEE Tans. Appl. Supercond., 17, 659 (2007).
- 5) M. I. Khabipov, et al., Supercond. Sci. Technol. 23 (2010) 045032.
- 6) O. Wetzstein et al., IEEE Tans. Appl. Supercond., 21, 814 (2011).

超電導 Web2.1

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

特集：低温デジタルデバイス

「論理演算回路の消費電力限界を打破する超伝導可逆回路」

独立行政法人 情報通信研究機構
未来 ICT 研究所 ナノ ICT 研究室
特別研究員 竹内尚輝

ExaFLOPS を超える次世代ハイエンドコンピュータを実現するためには、CMOS 回路に比べて革新的に消費電力の低い論理回路が必要となる。このような究極的に高いエネルギー効率を実現するため、計算機とエネルギーの物理的関係に関する議論が古くより行われてきた。中でも最もよく知られた議論は、「演算に伴う最小の消費エネルギーはエントロピー（情報量）の減少量によって決まる」と予言した Landauer の原理¹⁾である。近年、Bérut らによってようやくこの原理の妥当性が実験的に確認された²⁾。これらの状況から、エントロピー変化を伴わずに無限小の消費エネルギーで演算が可能な可逆計算³⁾の実現に期待が寄せられている。しかしながら、可逆計算をデバイスレベルで実現した研究例はこれまでに報告されていない。

そこで我々は、低電力超伝導回路である Adiabatic quantum-flux-parametron (AQFP)^{4),5)}を用いて可逆計算を実現する研究に取り組んでいる。AQFP 回路では、ポテンシャルエネルギーを断熱的に変化させることによってスイッチングに伴う消費エネルギーを極限的に小さくすることが可能である。これまでに、実験による 10 zJ ビットエネルギー動作の実証⁶⁾、数値解析によるサブ $k_B T$ ビットエネルギー動作の実証⁷⁾に成功した。さらに、エネルギー遅延積が量子力学的極限 ($\hbar/2$) に迫る程小さくできることも示された⁸⁾。これらの研究結果から、可逆計算を構成する低電力なビルディングブロックとして AQFP 回路が適していると考えられる。

可逆計算を実現するためには、物理的に可逆なデバイスが必要であると言われている⁹⁾。そこで我々は、図 1a に示す Reversible quantum-flux-parametron (RQFP) ゲート¹⁰⁾を可逆論理ゲートとして提案した。RQFP は 3 つの Splitter (SPL) ゲートと 3 つの Majority (MAJ) ゲートより構成される。AQFP 回路では SPL と MAJ が同じ回路図で表されるため、RQFP ゲートは左右対称、つまり物理的に可逆である。図 1b に RQFP ゲートの消費エネルギーの計算結果を示す。全ての入力パターンにおいて、消費エネルギーが AC バイアス電流の立ち上がり／下がり時間に対して線形的に減少し、下限値が存在しないことが分かる。これは、物理的可逆性から、RQFP ゲートを構成する全ての AQFP 回路のポテンシャルエネルギーが断熱的に変化するためである。以上より、RQFP ゲートを用いることによって、無限小の消費エネルギーで演算が可能な可逆計算の実現に初めて成功した。さらに、産業技術総合研究所が提供する Nb 集積回路プロセスを用いて RQFP ゲートの動作実証にも成功した。

CMOS 等の非断熱回路では、熱力学的な観点から論理演算の際に $k_B T$ よりはるかに大きな消費エネルギーが必要となる。これに対して本研究で提案した RQFP ゲートを用いた可逆計算では、 $k_B T$ よりも小さな消費エネルギーで論理演算が可能となり、エネルギー効率の観点から 6 桁以上の優位性が見込める。今後は、RQFP ゲートを用いた超低電力可逆計算システムの実現に向けた検討を進める。

超電導 Web2.1

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

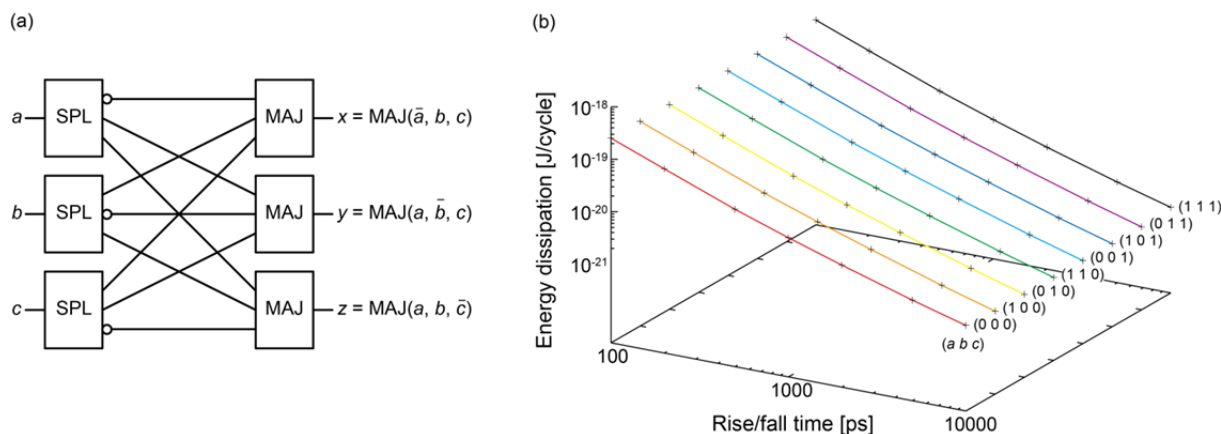


図 1 RQFP ゲート。(a) ブロック図。ここで、 $\text{MAJ}(a, b, c) = ab + bc + ca$ である。(b) 消費エネルギーの計算結果。横軸は AC バイアス電流の立ち上がり／下がり時間を表す。計算には、入出力バッファゲートの消費エネルギーも含まれている。

参考文献：

- 1) R. Landauer, "Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process," IBM J. Res. Dev., vol. 5, no. 3, pp. 183–191, Jul. 1961.
- 2) A. Bérut, A. Arakelyan, A. Petrosyan, S. Ciliberto, R. Dillenschneider, and E. Lutz, "Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics," Nature, vol. 483, no. 7388, pp. 187–9, Mar. 2012.
- 3) E. Fredkin and T. Toffoli, "Conservative logic," Int. J. Theor. Phys., vol. 21, no. 3–4, pp. 219–253, Apr. 1982.
- 4) N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "An adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device," Supercond. Sci. Technol., vol. 26, no. 3, p. 035010, Mar. 2013.
- 5) N. Takeuchi, K. Ehara, K. Inoue, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Margin and Energy Dissipation of Adiabatic Quantum-Flux-Parametron Logic at Finite Temperature," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no. 3, p. 1700304, Jun. 2013.
- 6) N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Measurement of 10 zJ energy dissipation of adiabatic quantum-flux-parametron logic using a superconducting resonator," Appl. Phys. Lett., vol. 102, no. 5, p. 052602, 2013.
- 7) N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Simulation of sub- $k_B T$ bit-energy operation of adiabatic quantum-flux-parametron logic with low bit-error-rate," Appl. Phys. Lett., vol. 103, no. 6, p. 062602, 2013.
- 8) N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Energy efficiency of adiabatic superconductor logic," Supercond. Sci. Technol., in press.
- 9) K. K. Likharev, "Classical and quantum limitations on energy consumption in computation," Int. J. Theor. Phys., vol. 21, no. 3–4, pp. 311–326, Apr. 1982.
- 10) N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Reversible logic gate using adiabatic superconducting devices," Sci. Rep., vol. 4, p. 6354, Sep. 2014.

超電導 Web2.1

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

特集：低温デジタルデバイス

「超伝導検出器と SFQ 回路のハイブリッドデバイス」

大阪府立大学
大学院工学研究科
教授 石田武和

電流バイアス状態の超伝導細線に対する外部刺激を、運動インダクタンスの時間微分を過渡電圧パルス信号として計測する方式は、大阪府大（石田）と名古屋大（藤巻）により基本原理が考案され、図 1 に原理図を示すが、電流バイアス運動インダクタンス検出器（CB-KID）と名付けた。いろいろな外部刺激検出に適用可能である。高品質の Nb 薄膜を微細加工して、Nb 細線のつづら折りパターンを作成し、中央部分に超高真空分子線エピタキシー装置（MBE）で ^{10}B （200 nm）で積層する。これに、電流を流した状態で超伝導状態になっている Nb 細線があり、積層されたボロン膜で中性子とホウ素原子核が核反応を起こすと、2.3 MeV の大きな核反応熱が ^4He 原子核と ^7Li 原子核により反対方向に運び出され Nb 細線の超伝導クーパ対の一部が破壊され、運動インダクタンスが変化し、過渡電圧として中性子検出が検出できることを大阪府立大学チームが検証した。

従来の中性子検出器は大型で高電圧電源を必要としていたが、大阪府大が中性子検出に成功した新型中性子検出器は、小型軽量で、わずか数ボルトの電圧で動作する特徴がある。稀少核種である ^3He を使う必要もない。運動インダクタンスの変化を検出することから 4 K でも動作する。そのことを活かして、多チャンネル化した場合の読み出し回路に同じく 4 K で動作する単一磁束量子（SFQ）回路が使えるのである。図 2 に示すように、我々は、22 mm x 22 mm のサイズで 80 ピン標準パッケージを規格化した。X 方向のセンサーと Y 方向のセンサーを積層するので、ワンチップで、超伝導検出器（CB-KID）、中性子反応層（ ^{10}B ）、単一磁束量子（SFQ）読み出し回路をすべ

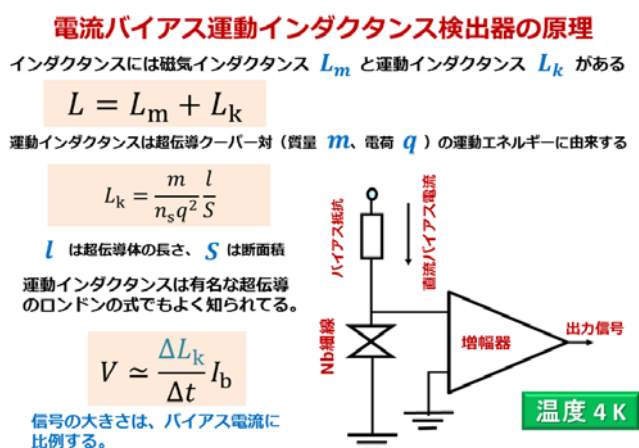


図 1 電流バイアスインダクタンス検出器の原理を示す。

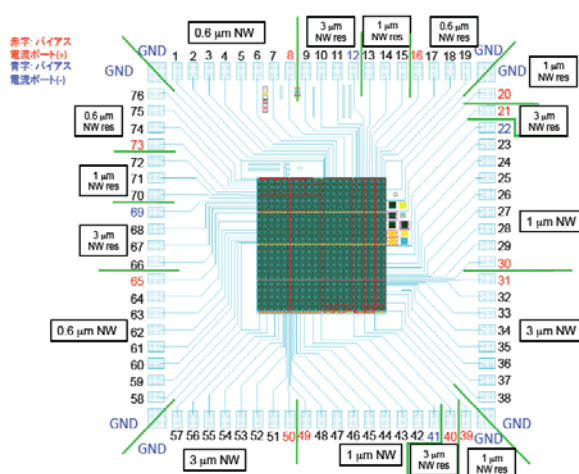


図 2 22mmx22mm Si 基板 Nb 細線による検出器部は中央、周辺に SFQ 回路配置電極パッドは 80 個。

超電導 Web2.1

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

て作り込むことができる。すなわち、半導体の CMOS のようなチップが超伝導で可能になるのである。Nb 細線の線幅も $0.6\ \mu\text{m}$ と微細化し、サブミクロンの空間分解能を持ち、百万画素のイメージングに近い将来実現することにつながる画期的な技術となっている。特に、SFQ 回路の読み出し回路としての性能を引き出すところが注目されている。

既に、大強度陽子加速器施設 J-PARC において、パルス中性子による中性子を検出できる実証実験は終えている。その時用いた実験装置の素子マウントの様子を図 3 に示す。この新しいイメージング装置が実用化されると、既存技術を革新し、原子炉などの中性子強度測定、非破壊検査、新材料の開発、スピントロニクスなどの局所磁場分布など、超高速、高感度、超高空間分解能の中性子検出器として利用され、物質科学・磁気科学の進展に寄与すると期待される。

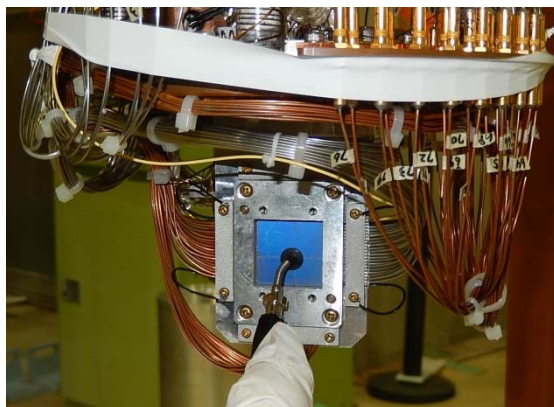


図 3 : 中央に CB-KID を設置の 4 K 冷凍機クライオスタットとセミリジッドケーブル 76 本。

この研究は、大阪府大 石田武和、宮嶋茂之、宍戸寛明、鳴神吉人、吉岡直人、中山弘貴、山口裕之、名古屋大学 藤巻 朗、産総研 日高 睦夫、J-PARC 及川 健一、原田 正英、奥 隆之、新井 正敏の各氏との共同研究である。基盤研究 (S) 「百万画素サブミクロン分解能中性子ラジオグラフィのための固体超伝導検出器システム」(代表 石田 武和) と課題番号 : 23226019、J-PARC 物質・生命科学実験施設 プロジェクト課題 2013P0800 「中性子光学デバイスおよび検出システムの開発と応用」(代表 奥 隆之) の支援を得ている。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

超電導関連 ‘14/12 月 – ‘15/1 月の催し物案内

11/30-12/3

International Workshop on Coated Conductor and Applications (CCA2014)

Jeju, Korea

<http://www.cca2014.org/>

12/6

第 17 回スターリングサイクルシンポジウム

神奈川大学横浜キャンパス

<http://www.jsme.or.jp/event/detail.php?id=2941>

12/11

第 3 回超電導応用研究会シンポジウム

岩谷産業中央研究所

http://www.csj.or.jp/application/2014/3rd_1211.pdf

12/12

低温工学・超電導学会関西支部特別講演会

大阪市立大学文化交流センター

http://www.csj.or.jp/kansai/2014/13th_1212.pdf

12/13 (12/6 より日程変更)

熱音響工学講習会

東京農工大 小金井キャンパス

http://www.csj.or.jp/application/2014/conference_1206.pdf

12/15

S-イノベ 戦略的イノベーション創出推進プログラムシンポジウム

JST 東京本部別館

http://www.csj.or.jp/event/co-sponsor/2014/jst_1215.pdf

12/17

第 5 回冷凍部会 (公開) 例会／環境・安全委員会ワーキング

川崎重工業 新東京本社

http://www.csj.or.jp/reitob/2014/5th_1217.pdf

1/21

超電導機器研究会

産業技術総合研究所 臨海副都心センター別館

<https://workshop.iee.or.jp/sbtk/cgi-bin/sbtk-showprogram.cgi?workshopid=SBW00003396>

1/22

超伝導エレクトロニクス研究会

超電導 Web2.1

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

東京・機会振興会館

http://www.ieice.org/ken/program/index.php?tgs_regid=03d7430278c0f096d37a2650c9364035fb9a87d019366a08ffa1c57e9db74852&tgid=IEICE-SCE

(編集局)

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

新聞ヘッドライン (10/20-11/19)

- 日経産業新聞 仏の国際熱核融合実験炉用、超電導ケーブル受注、古河電工、30ton 分 10/27
- 産経新聞 速報ニュース 最新鋭エコトレイン事情 「超電導」「蓄電池」で効率進化、CO2「60%減」の凄さ 11/02"
- 日刊産業新聞 鉄道総研・松井鋼材など 高速回転軸用 真空シール開発 超電導フライホイール向け 大容量蓄電可能に 11/04
- 日刊工業新聞 News ウェーブ 21 金属間化合物にボース・アインシュタイン凝縮に近い超電導状態が実現 京大などが解明 11/04
- 日経産業新聞 東大 周波数変換で新技術 電磁波 超電導材料に照射 11/05
- 日経産業新聞 原子 1 個分の薄膜から材料 LED や超電導体に活用 11/07
- 東京読売新聞 超電導の不思議 体験＝福島 11/09
- 鉄鋼新聞 東京電化 無酸素銅線にクロムめっき 核融合実験炉向けで受注 11/18
- 朝鮮日報 LS 電線 超電導ケーブルの試験開始 11/20

(編集局)

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

世界の動き (2014 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 穰



★News sources and related areas in this issue

▶電力応用

韓国スマートグリッド試験

AMSC (2014年10月29日)

韓国電力公社 (KEPCO)、LS電線社、そしてAMSC社は、済州島にあるKEPCO社のスマートグリッド実証実験施設で、高電圧直流 (HVDC) HTS送電ケーブルの通電に成功した。HVDC HTSケーブルは電力密度が高いため、限られた敷設スペース内で地下に大容量電力網を築くの理想的である。

この全長500 mに及ぶ80 kV直流HTSケーブルは、AMSC社のAmperium® HTS線材で構成されている。AMSC社の社長兼最高経営責任者であるDaniel P. McGahn氏は、「済州島でのHVDCケーブルの通電により、KEPCO社とLS電線社は共に新たな一步を踏み出した。これを機に、韓国電力網のアップグレードに加え、KEPCO社がビジョンとするグリーンおよびスマート・テクノロジー開発を通じて、世界トップクラスの競争力強化への取り組みが推進される。」と述べた。また、LS電線社の社長兼最高経営責任者であるJa-Eun Koo氏は、「HVDC超電導ケーブルシステムは、交流 (AC) システムより優れた送電容量を確保できる。この技術への関心は、新たな電力網の導入が必要とされるアジア、米国、そして欧州地域で高まってきている。」と意見を述べた。彼は、スマートグリッドをはじめ、エネル

超電導 Web2.1

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

ギー貯蔵システム (ESS)、マイクログリッド等を世界で最も早く実現させた国は韓国であると考えられる。さらに、KEPCO社の社長兼最高経営責任者であるHwan-Eik Cho氏は、「初めて直流HTSケーブルの通電に至り、KEPCO社が世界最先端を行く技術開発にいかに関与していくかが証明される。」と述べている。

AMSC社のAmperium HTS線材を利用し、KEPCO社は長さ1 kmに及ぶ154 kV交流ケーブルシステムのテストも行っている。KEPCO社、LS電線社、そしてAMSC社がソウル近くの仁川変電所で22.9 kV 交流ケーブルシステムの通電検証を行い、2年間の稼働に成功したのは2011年のことであった。KEPCO社は、将来的に8mという送電線用地のスペース内で10ギガワット (GW) の電力を送電できるケーブルの設計に期待を寄せている。

Source: "Korea Energizes High Voltage Direct Current (HVDC) Superconductor Cable"

(29 Oct, 2014) Press Release

URL: <http://ir.amscom/releases.cfm>

Contact: Kerry Farrell, kerry.farrell@amscom

独エッセン市のケーブル試験

RWE社 (2014年10月27日)

全長1 kmに及ぶ世界最長超電導ケーブルは、全ての期待を超えるパフォーマンスを発揮した。今年4月30日の敷設以来、ケーブルは現時点で4300時間稼働し続け、エッセン市の約1万世帯に相当する約2000万キロワットの送電が行われた。AmpaCityプロジェクトの上半期について、RWE社およびプロジェクトパートナーから中間報告が発表されたが、ポジティブな内容であった。RWEドイツ本社テクニカルディレクターJoachim Schneider博士は、「ケーブルは、これまでのところ順調に機能している。技術面では、有用な知識の獲得を重ね、超電導システム全体の向上に役立ってきた。」と報告した。さらに、ケーブル冷却回路への適応と共に、監視システムに変更を加え、エッセン市のグリッド保護システムへのスムーズな統合を推進している。

ドイツ連邦経済エネルギー省政務官であるUwe Beckmeyer氏は、エッセン市訪問時に、「将来のエネルギー分野の変遷において、大胆な技術革新が求められている。我々は、明日のエネルギー需要を満たすため、効率的かつ安全なシステムを設計する必要がある。それゆえ、エネルギー研究プログラムの元、我々がこの優れたプロジェクトを採択し、協賛することにためらいはなかった。」と述べた。ドイツ連邦経済エネルギー省による資金提供を受けて、このフラッグシッププロジェクトが促進されるに至った。それ以後、AmpaCityプロジェクトは世界的に注目を集め、中国、フランス、ガーナ、日本、そして米国からの代表団が既にエッセンを訪れ、現地での技術調査が行われている。従来の11万ボルトの送電線を1万ボルトの超電導ケーブルに置き換えることで、変電所の数が減らされ、都心部の土地を他の用途に有効利用できるようになる。

連邦経済エネルギー省は、RWE社、およびそのパートナーであるネクサン社、そしてカールスルーエ工科大学 (KIT) と共に投資に参加し、総事業費1350万ユーロのうち590万ユーロの献金を行った。なお、ネクサン社は、KITの協力を得て実証試験用の超電導限流器を設計した。

超電導 Web2.1

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

Source: "World's longest superconductor cable yields first new technological knowledge" (27 Oct, 2014) Press Release

URL: <http://www.rwe.com/web/cms/en/113648/rwe/press-news/press-release/?pmid=4012082>

Contact: Sebastian Ackermann, sebastian.ackermann@rwe.com

▶加速器

超電導電子リニアック試験成功

TRIUMF (2014年10月7日)

カナダの国立素粒子原子核物理研究所 (TRIUMF) は、新たに超電導電子線形加速器 (電子リニアック) を構築し、最初の目標である23 MeVまで粒子ビームを加速することに成功した。これは、最近一連の成功を収めている先端レアアイソトープ研究所 (ARIEL) のプロジェクトの一環であり、ARIELは最先端技術および高度なサイエンス機能を備え、世界で最も洗練されたレアアイソトープ施設の一つとして認識されている。ARIELの電子リニアックは、効果的にビームを送るため極端に過酷な環境で確実に動作することが求められる超電導高周波 (SRF) 加速空洞など、多くの洗練されたシステムで構成されている。

TRIUMF、カナダ産業界、そしてビクトリア大学 (電子リニアックの構築、敷設、そして試運転に貢献) 率いるカナダの大学13校による見事な共同研究の成果として、このプロジェクトは成功裡に終わった。カナダ政府はカナダ技術革新基金 (CFI) を介して、ブリティッシュ・コロンビア州政府は、ブリティッシュ・コロンビア知識開発基金 (BCKDF) を通じてこのプロジェクトに資金提供している。さらに、現物出資を通じてカナダ国立研究評議会も資金提供を行っている。技術革新・市民サービス省大臣であるAndrew Wilkinson氏は、「今回の成功は、これまで研究に携わってきた科学者および研究チーム、そしてブリティッシュ・コロンビア州にとって非常に素晴らしい業績である。」と述べ、ブリティッシュ・コロンビア州が将来的に超電導体やレアアイソトープ研究分野で世界的リーダーになるものと確信している。

ARIELプロジェクトが次に目指すのは、カナダの大学19校、そして州政府5ヶ所へと共同研究の輪を拡大していくことにある。様々な業界と新たなパートナーシップを築き、次世代の科学者やエンジニア育成の場を一層強化する動きである。今後5年間に及ぶARIELの計画には、カナダにとって大きな社会的、経済的利益を生み出す高度なサイエンス機能と技術開発力の推進が含まれ、TRIUMFは最先端のレアアイソトープ研究分野の国際拠点化を目指す。実際、インドのコルカタ市にある可変エネルギー・サイクロトロンセンター (VECC) とTRIUMFは、各施設用の加速器とアイソトープ製造技術の開発に向けて共同パートナーシップを締結した。

Source: "Canada's Superconducting Electron Linear Accelerator Produces First Beam"

(7 Oct, 2014) TRIUMF News Release

URL: http://www.triumf.ca/sites/default/files/NR_2014-10-07-ARIEL_BEAM-vFINAL_0.pdf

Contact: Melissa Baluk mbaluk@triumf.ca

超電導 Web2.1

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

▶バルク

18 テスラ強磁場バルクの応用

University of Cambridge (2014年10月22日)

10月初めにケンブリッジ大学工学部長に任命されたDavid Cardwell教授率いる同大学のバルク超電導研究グループは、磁気浮上式鉄道技術で利用されてきた強磁場が、深刻な疾患に対する治療や癌治療の改善に向けて役立つかもしれない。」と述べた。

同教授は、「我々は、バルク超電導体で強磁場を発生させることに取り組んでいる。」と述べた。今年はじめ、同研究グループは18テスラという強磁場を封じ込めることに成功している。液体窒素の沸点を超える温度で冷却した円盤状のガドリニウムバリウム酸化銅超電導体を用いることで、世界記録を更新した。

この技術を利用した応用の中では、磁気浮上式鉄道が最も注目を集めている。例えば、上海の磁気浮上式リニアモーターカーや日本の超電導リニアである。しかし、磁気浮上式鉄道の建設には膨大な費用がかかり、上海のリニアモーターカーで12億ドル、また日本の超電導リニアでは線路1 kmあたり約1億ドルという見積りが上げられている。同教授は、このような高額な建設費がリニアモーターカーの普及を妨げるという所見を持ち、「リニアモーターカーの鉄道網を構築するには、非常に多額の費用と長い時間がかかる。我々は、将来的に超電導がより広い用途で使用され、特にヘルスケア分野において応用されることに注目している。」と述べた。想定されるアプリケーションとして、総合病院だけで利用されるのではなく、むしろ地方の診療所にインストールされるコンパクトなMRIスキャナーが含まれる。

また同教授は、「これらの強磁場を癌治療に使用できる可能性もある。もし体内に磁性を持つ何かを挿入できれば、我々は、現時点で行われているような全身治療ではなく、癌に侵されている体の一部のみを直接治療することができる。そうすれば潜在的に患者への副作用が減らされる。今後数年間においてこの種の技術が実際に使用されるようになるかもしれない。」と付け加えた。

Source: "Cambridge University's bulk superconductivity group says levitating train tech could be used in cancer treatment"

(22 Oct, 2014) Cambridge News

URL:<http://www.cambridge-news.co.uk/Cambridge-University-s-bulk-superconductivity/story-2334189-7-detail/story.html>

Contact: reception@eng.cam.ac.uk

▶経営・決算

ドイツに高温超電導の新研究所

BASF (2014年10月29日)

超電導 Web2.1

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

カールスルーエ工科大学 (KIT) とDeutsche Nanoschicht社 (BASFの子会社) は、限流器や変圧器 (公共グリッド、都市部の送電網用ケーブル、そして発電機および電気モーター用コイルに使用されるもの) などのエネルギー応用で利用される特殊な高温超電導体の開発を目指し、協力協定を締結した。この共同事業体では、両者合意の下、KITの技術物理研究所を拠点とする新しい研究室が、2015年初旬にかけて開設される予定である。ここでは、超電導薄膜を用いて、各々の用途に適した線材の加工と最適化に取り組んで行く。例えば、超電導特性について、AC、高電流密度、さらに強磁場といった環境に適用できる優れた特性を備える必要がある。

BASF New Business社常務取締役であるStefan Blank博士は、「KITは、超電導体の合成とその利用法に関して幅広い知識を持っている。したがって、当社の成長分野であるE-Power Managementを強化する上で、KITとの連携によって理想的な開発体制が構築されることになる。」と述べた。さらに、Deutsche Nanoschicht社常務取締役であるMichael Bäcker博士は、「当社独自のコーティング技術を活用し、エネルギー分野全体に亘って幅広く適用できるコストパフォーマンスに優れた超電導体を製造することが可能になる。」と付け加えた。この新しい研究室では、KIT技術物理研究所の教授Bernhard Holzapfel博士が監督者となる。

Source: "Tailored superconductors for energy technology"

(29 Oct, 2014) Joint News Release

URL: <http://www.basf.com/group/pressrelease/P-14-379>

Contact: Vanessa Holzhauser BASF, Vanessa.holzhaeuser@basf.com

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

「2014 年度春季低温工学・超電導学会」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 穰

第 90 回目となる低温工学・超電導学会が 11 月 5 日から 7 日まで、福島駅前の「コラッセふくしま」で開催された。5 階建てのきれいな新しいホールで、福島物産展など常設販売の店もあり、市民、県民の活動に生かされているようである。

今回、参加人数は 373 名、発表件数 216 件、展示ブースは 23 機関であった。特に、企業展示は件数も多く活発に PR がなされている印象があった。

発表の全体のプログラムは、下記表の通りである。

開催日	A会場	B会場	C会場	D会場
11/5 (水)	受付 9:15~			
	9:45 - 10:45 加速器(1)	9:45 - 11:00 交流送電ケーブル	9:45 - 10:45 MeB_2バルク作製・素磁	9:45 - 10:45 Bi系・鉄系線材
	11:00 - 12:00 回転機	11:15 - 12:00 直流送電ケーブル	11:00 - 12:00 Y系ピンニング	11:00 - 12:00 磁性蓄冷材・GM冷凍機
	昼食			
	ポスター、展示手短紹介 13:15 - 14:15 (A 会場)			
	ポスターセッション I 14:15 - 15:30 (Poster会場) センサー・SQUID計測(1) HTS通電特性, HTSマグネット (1) Y系・MeB_2バルク 核融合 (1) , 送電ケーブル			
	15:45 - 17:00 Nコイル	15:45 - 17:00 磁気軸受	15:45 - 17:00 Y系線材	15:45 - 17:00 LTSデバイス
	17:15 - 18:30 NMR (1)	17:15 - 18:45 核融合 (2)	17:15 - 18:45 Y系バルク作製・素磁	17:15 - 18:30 小型冷凍機
11/6 (木)	9:00 - 9:45 マグネット解析 (1)	9:00 - 9:45 電力応用	9:00 - 9:45 MeB_2	9:00 - 9:45 センサー・SQUID計測 (2)
	10:00 - 11:15 定常強磁場施設計画	10:00 - 11:15 核融合 (3)	10:00 - 11:15 Y系の合成法と特性	10:00 - 11:15 冷却システム・教育
	ポスター手短紹介 11:30 - 12:05 (A 会場)			
	昼食			
	ポスターセッション II 13:15 - 14:30 (Poster会場) 磁気冷凍機 , 冷却システム , Y系諸特性 , マグネット解析 (2) 超電導電流 , 超電導応用 / 電流リード , 電気機器			
	受賞記念講演 14:35 - 15:35 (A 会場)			
	特別セッション 15:35 - 16:35 (A 会場) 材料、応用、冷凍技術に関する最新レビュー 材料研究会 吉田 隆、超電導応用研究会 福井 聡、冷凍部会 瀬野修一郎			
	特別講演 16:45 - 17:45 (A 会場)			

超電導 Web2.1

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

開催日	A会場	B会場	C会場	D会場
11/7 (金)	9:15 - 10:30 安定性・保護	9:00 - 10:30 磁気分離	9:00 - 10:30 加速器②	9:00 - 10:30 流動特性/熱伝達
	10:45 - 12:00 HTSマグネット②	10:45 - 12:15 産業応用 / 磁場応用	10:45 - 11:30 Y系通電特性	10:45 - 12:15 AI5線材
			11:45 - 12:15 構造材料	
		昼食		
		13:30 - 14:30 NMR②		
		14:45 - 15:45 高磁場MRI		

以下、聴講できた範囲で、主な特徴を記す。

加速器関係：東芝、三菱、フジクラほか

経産省の国プロで開発が進められている。三菱電機の横山氏は、現在三菱のシンクロトロンが直径 20 m と大きい、RE 系線材を使えば磁場を倍増でき、装置を大幅に小型化できると発表した。今年度、ボア形状 400 mmx200 mm のレーストラックコイルの試作を実施中である。コイルの定格電流は 260 A で、中心磁場は 3 T である。

東芝、京大ほかのグループは、3 件、医療用加速器、ガントリーの RE 線材のコイル化を発表した。特に気になったのはコイル巻線精度であるが、巻線後のコイル高さのバラツキを 0.1 mm の標準偏差まで抑えて、磁場均一度で 10^{-4} 以下を達成していた。より高精度なスペックにはさらに高精度の巻線、また、線材寸法、含侵精度などが必要とされ、再度、このような医療用装置では磁場均一度のために厳しい寸法精度が必要とされると認識した。

ケーブル関係：中部大、I-SPOT 組合ほか

「高温超電導直流送電システムの実証研究」（平成 24 年度経済産業省からの委託）のプロジェクトでは、上記グループが北海道の石狩新港地域で、高温超電導直流送電システムを建設し、データセンタなどとの実運用システムの構築、将来の長距離送電システムのための課題抽出を目的として直流ケーブルシステムを開発している。今回、その経過報告がなされた。回線 1 はさくらインターネットの石狩データセンタと同社保有の太陽電池を約 500 m の超電導ケーブル（住友電工製 BSCCO ケーブル）で接続する。回線 2 は当初計画を変更して、総長を 1 km と短くし、地上布設し、2 カ所の中間接続部を設け、過酷試験など様々な検証を行う。2 年目の 2014 年 6 月より、布設工事が開始されており、10 月に回線 1 のケーブル布設が完了した。回線 2 は、10 月中には管路工事が開始される予定である。

線材関係

小生の聴講できた範囲に限って報告する。京大グループ他による鉄系、銅系基板の開発が報告された。彼らによると、ハステロイ基板が高価なためこうした基板が必要とのこと。1 kg の値段はハステロイが 1 万円に対し、銅は 700 円、鉄は 50 円であるとのこと。まだ、現状では鉄基板は配向に成功したところであり、銅基板は配向度が 4-5 度を達成し、臨界電流が 10A とまだ向上させなくてはならないが、低コスト化には大いに必要であると思われた。

また、ISTEC のレーザによる細線化では、町らが「10 分割した線は I_c の劣化があまり無く、現在コイル応用で問題になっている遮蔽電流を減らす効果があり、磁化緩和も大幅に小さくなった」

超電導 Web21

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

と報告し興味を引いた。

最後に特別講演で環境省の福島環境再生事務所の青木氏から福島を除染処理の現状の報告があった。現地の担当の苦労が偲ばれる一方、総費用が 3 兆数千億円かかると言われ、その巨額さに聴衆の一同は驚かされた。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

【隔月連載記事】

超電導センサ (その 6) - 超電導遷移端型センサの原理と応用

首都大学東京 大学院
理工学研究科 物理学専攻
准教授 江副 祐一郎

本特集の第 6 回では、超電導遷移端での急激な抵抗変化を温度計として利用するセンサ、いわゆる TES (Transition Edge Sensor) の原理と応用について紹介する。

1. 原理と利点

TES は光や粒子を熱量測定によって捉える検出器の一種である^{1,2)}。原理を図 1 に示す。一つ一つの光子や粒子のエネルギー量子 E を検出するものをカロリメータ、一つ一つを区別せず吸収したパワー P を計測するものをボロメータと呼ぶ。温度計として超電導遷移端の抵抗変化を用いるものが TES であり、温度増加はカロリメータの場合には E/C 、ボロメータの場合には P/G となる。吸収された熱は熱浴へと一定の時定数で逃げて行く。カロリメータの場合の温度変化を図 1 に示した。

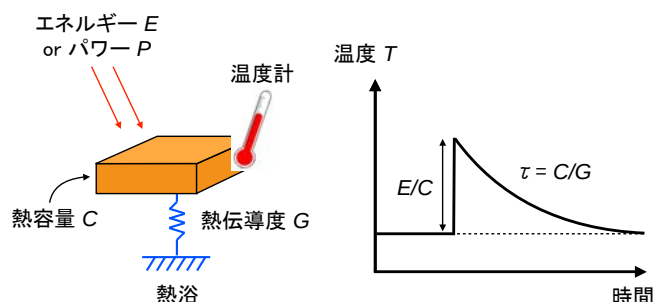


図 1. センサの原理とカロリメータの温度変化。

TES の温度抵抗特性の例を図 2 に示す。温度計感度 $\alpha = d \log R / d \log T$ は 10~1000 程度と大きい。転移温度は近接効果を使って、超電導金属と常伝導金属の二層薄膜 (Ti/Au, Mo/Au など) の膜厚比を変えることで制御する。 α の制御はより困難であるが、近年、米 NIST による研究で TES 上に常伝導金属のバー構造を付けて、電流の流れ方を制限することで制御できることが分かってきた³⁾。

超電導遷移端上に状態を維持するため、TES は擬似的な定電圧バイアスをかけて動作させる (図 2)。光や粒子との相互作用によって、素子の温度が上昇すると、TES を流れる電流が減少しジュール発熱が減ることで元の温度に戻るため、安定的に使用できる。これを電熱フィードバックと呼ぶ。温度変化の減衰の時定数は、カロリメータでもボロメータでも、実効的に $\tau_{\text{eff}} \sim C/G * n/\alpha$ となる。ただし n は熱伝導度の温度依存性 ($G \propto$

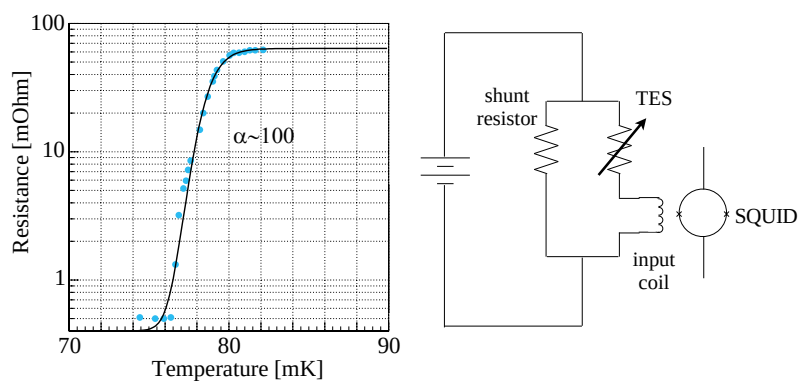


図 2. TES の温度抵抗特性と電熱フィードバック。

超電導 Web2.1

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

T^n) による項であり 3~5 程度である。つまり電熱フィードバックによって信号は速くなる。たとえば $C = 1 \text{ pJ/K}$ 、 $G = 1 \text{ nW/K}$ 、 $\alpha = 50$ では $\sim 80 \mu\text{s}$ であり、高速計数が可能である。

τ_{eff} の逆数で決まる周波数帯域 $\omega < 1/\tau_{\text{eff}}$ において、TES のノイズ等価雑音 (NEP) は原理的に、熱リンクを通したランダムな熱入出力、いわゆるフォノン雑音が支配的となる。これは $(4 k_B T_B G \gamma)^{1/2} [\text{W/Hz}^{1/2}]$ (ただし $\gamma \sim 1$, $\omega < 1/\tau_{\text{eff}}$) と書ける。つまり低温かつ小さな G とすることで超低雑音となる。たとえば $T_B = 300 \text{ mK}$ 、 $G = 10 \text{ pW/K}$ では NEP は $\sim 1 \times 10^{-17} [\text{W/Hz}^{1/2}]$ である。特筆すべきは G を小さくしても、 α が大きいため、 τ_{eff} は小さく、高速な応答が可能であることである。これは TES ボロメータの大きな利点となっている。

カロリメータとして用いる場合、原理的なエネルギー分解能は $2.35 \xi (4k_B T_B^2 C)^{1/2} [\text{J}]$ (ただし $\xi \propto 1/\alpha^{1/2}$) と書ける。たとえば $T_B = 100 \text{ mK}$ 、 $C = 1 \text{ pJ/K}$ 、 $\alpha = 50$ では $\sim 2 [\text{eV}]$ となる。5.9 keV X 線に対するエネルギー分解能と比較すると、これは半導体検出器より約 70 倍優れている。また TES よりも早くから開発されてきた半導体温度計型カロリメータと比べても約 2 倍優れている。ただし、超電導遷移端を超えるとエネルギー分解能は上の式よりも悪くなるため、最大エネルギーには $E_{\text{sat}} \sim CT/\alpha$ という条件が課される。上のパラメータでは $E_{\text{sat}} \sim 13 [\text{keV}]$ である。

読み出し回路からの利点として、TES は低インピーダンスであり、初段の増幅器として SQUID を利用できることが上げられる。TES の信号帯域幅は典型的に数 ~ 数十 kHz であり、SQUID の帯域幅 $\sim \text{GHz}$ と比べて十分小さい。そのため時分割、周波数分割など様々な手法で信号を多重化して読み出すことが可能である。よって、1000 pixel を超えるような巨大なアレイも、読み出し配線を過度に増やさず、現実的な冷凍機リソースで実現することができる。

TES に対して、半導体温度計型カロリメータやボロメータでは高インピーダンスのため、JFET を使った 1 pixel 毎の読み出しが必要である。2015 年度打ち上げの日本の X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載される半導体温度計型カロリメータは 6x6 pixel であり、5.9 keV でのエネルギー分解能は 5 eV 程度である⁴⁾。これは従来の半導体検出器と比べて画期的であるが、TES はさらにその先の性能、たとえば $\sim 1000 \text{ pixel}$ 、 $\sim 2 \text{ eV}$ を実現しうるデバイスであることが分かる。

2. 応用

TES の代表的な応用例を表 1 にまとめた。近赤外線から可視光、X 線、 γ 線までの単一光子検出器、mm・sub mm 波に対するエネルギー流量検出器、さらには暗黒物質探査まで、非常に幅広く活用されている、もしくは活用されようとしていることが分かるであろう。

表 1. TES の代表的な応用例

方式	応用例
カロリメータ	天文 (X 線), 量子暗号 (可視光, 赤外線), 微量分析 (X 線), 核物質分析 (γ 線)
ボロメータ	天文 (sub-mm, mm 波), 宇宙マイクロ波背景放射 (mm 波), 暗黒物質 (粒子)

これらの応用例において、TES センサの性能は理論値に近づきつつある。例として図 3 に米 NASA GSFC がまとめた X 線用 TES カロリメータの単一 pixel での 5.9 keV X 線に対するエネルギー分解能の変遷を示す。現在の世界記録は NASA GSFC が達成した 1.6 eV であり、ほぼ理論通りの性能が出ている。一方、我々首都大、JAXA 宇宙研を中心とするグループの記録は 2.8 eV であり⁶⁾、世界記録に迫っているが、まだ改善の余地がある。アレイとしては、将来 X 線天文衛星用のもので $\sim 1000 \text{ pixel}$ が開発されている。読み出しとしては、米 NIST の時分割信号多重化 SQUID を用いた 16 pixel 同時読み出しで 2.9 eV が達成されている。

超電導 Web2.1

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

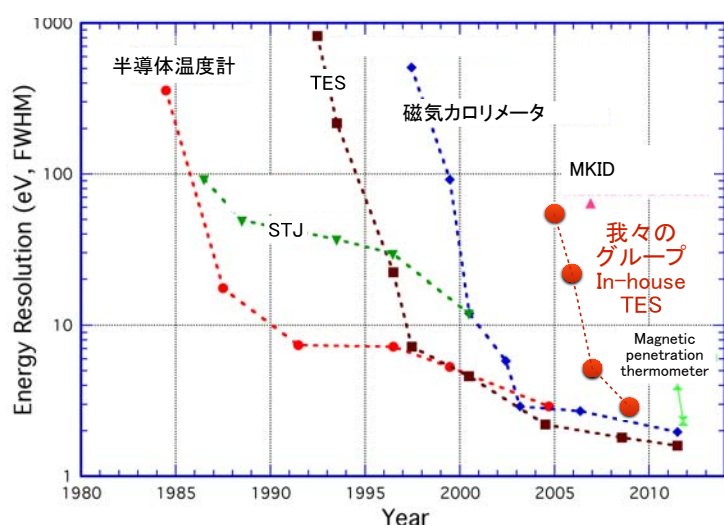


図 3. X 線用 TES カロリメータ等のエネルギー分解能の変遷⁵⁾。
我々のグループの自作素子の変遷を重ねた。

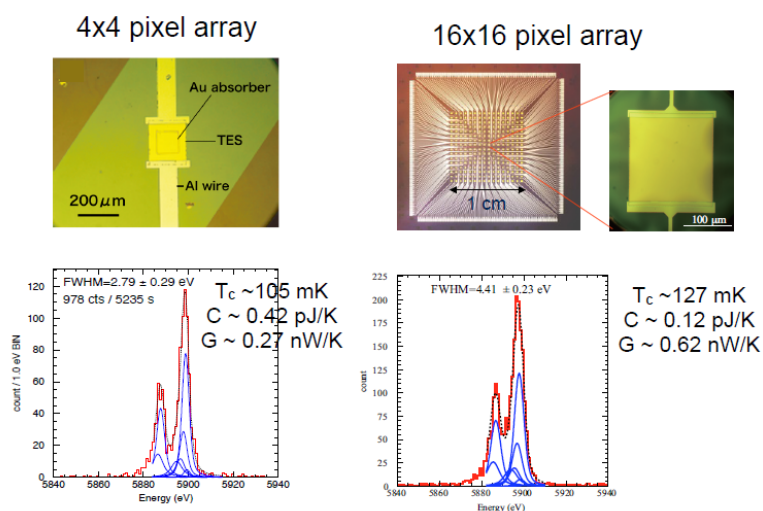


図 4. 自作した X 線用 TES カロリメータの例。

ダークバリオンの検出には 0.3-1.5 keV のエネルギー範囲で、優れたエネルギー分解能 (< 5 eV) と大面積 (1 cm 角) を兼ね備えた検出器が必要であり、これらの要求を満たすことができるのが TES カロリメータである。

我々のグループでは首都大・宇宙研・産総研の装置を用いて、2004 年から本格的にインハウスで素子製作を行ってきた。さらにセイコーや三菱重工、フォトプレジジョンなどにご協力頂いて、配線や吸収体技術等を共同で開発している。図 4 に例を示す。前述の通り、単一 pixel でのベストエネルギー分解能は 5.9 keV X 線に対して 2.8 eV (TES 200 μ m 角, 吸収体 Au 120 μ m 角, 1.6 μ m 厚) であり⁵⁾、アレイでは 16x16 pixel 中の 1 pixel に対して 4.4 eV (TES 180 μ m 角, 吸収体なし) を達成している¹³⁾。

TES ボロメータでも sub-mm 波天文用で理論限界に迫る NEP が実現できており⁷⁾、アレイとしても 数百~10000 pixel が製作されてきている⁷⁻⁸⁾。X 線用と比べ、時定数が比較的遅く ($\sim$ ms)、信号多重化がより容易であることが、X 線用よりも巨大なアレイが先に実現された主な理由と思われる。また極低雑音が必要な宇宙マイクロ波背景放射の観測でも巨大アレイが求められていることから、TES ボロメータが近年、多く採用されてきている⁹⁾。

天文だけでなく地上向けにおいても TES の応用例は枚挙にいとまがない。たとえば微量分析用に電子顕微鏡の EDS¹⁰⁾や、近赤外線領域での量子暗号通信¹¹⁾などである。

特筆すべきは、こうした分野で日本のさまざまなグループが世界と肩を並べて、TES 開発を行っていることである。そのような中、恐縮ではあるが、以下では紙面の都合から我々、首都大・JAXA 宇宙研が中心となって開発している X 線天文用の TES カロリメータを紹介させて頂きたい。

我々の目標の一つが、宇宙の大規模構造に沿って存在すると考えられる未発見の通常物質 (ダークバリオン) の解明を目指した日本の将来衛星計画 DIOS である¹²⁾。

超電導 Web2.1

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

これらの経験と実績に基づき、我々は現在 DIOS に向けたアレイ製作のため必要な要素技術、配線¹⁴⁾と吸収体¹⁵⁾の開発を進めている。図 5 に試作品を示す。

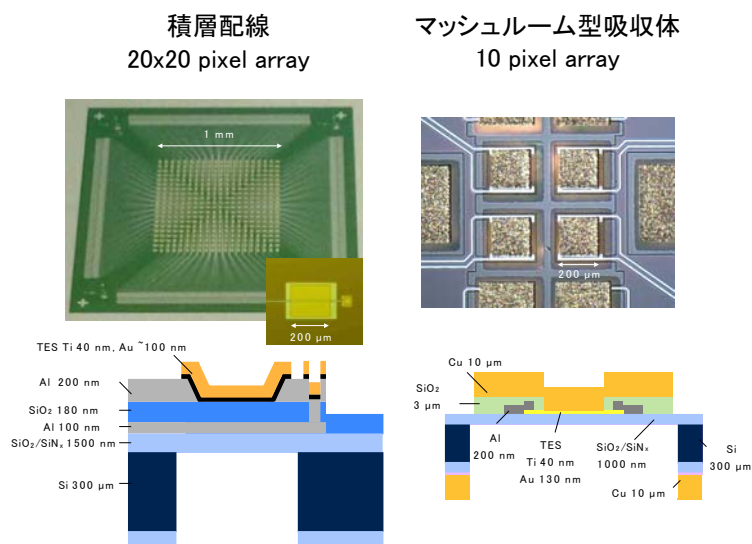


図 5. 積層配線およびマッシュルーム吸収体の試作品と断面図。断面図の数字は厚みを表す。

鍵となる技術の一つが配線である。エネルギー分解能と面積を両立するため、DIOS では 20x20 pixel アレイを採用することを考えており、TES サイズは 250 μm 、TES pixel 間の間隔は 500 μm である。ここに多数の配線を並べると相互インダクタンスによる cross talk によってエネルギー分解能が劣化する。そこで Hot と Return の配線が正確に上下に重なった積層配線が必要となる。我々は産総研 CRAVITY を利用させて頂いて、共同で試作を進めており、転移特性の良好な配線の形成に成功してきている。現在は TES を配線上に形成して、転移特性やエネルギー分解能を調べる段階に来ており、完成まであと少しである。

もう一つの鍵技術が吸収体である。DIOS で要求されるこれまでにないエネルギー分解能と面積を両立するためには、できるだけ熱容量を抑えつつ、吸収体の受光面積を増やす必要がある。そこで TES (250 μm 角) よりも 2 倍大きなマッシュルーム吸収体を目指して、電析 Cu や電析 Bi を使った吸収体の製作をフォトプレジジョンなどと協力して進めており、目処を付けつつある。

これらの要素技術を組み合わせて製作した TES カロリメータアレイを、JAXA 宇宙研で開発中の周波数分割方式の読み出し回路と合わせることで、世界最高感度の X 線天文用 TES カロリメータを完成し、2020 年代前半に打ち上げを目指す予定である。

最後に TES は応用性の広さから米では NIST と NASA GSFC が協力して開発を進めるなど、地上・天文を超えた共同研究が進んでおり、世界的な競争が激しさを増している。日本でもこうした分野を超えた共同研究の動きは既に始まっているが、この流れをさらに加速させ、目的とする応用をいち早く実現してゆくことが鍵になるかと思われる。

なお TES の先を目指した開発も始まっていることも追記しておきたい。mm, sub-mm 波天文では Microwave Kinetic Inductance Detector (通称 MKID, 2014 年 2 月号の有吉さん他による解説を参照¹⁶⁾) を使った ~ 1 Mpix を目指した新たな開発が進められている。また X 線天文でも TES や磁気カロリメータを MKID と同様に microwave resonator と結合させ、さらに GHz 周波数分割 SQUID と組み合わせて、より巨大なアレイを実現する動きが出てきており、こうした二歩先にも目を向けて開発を推進してゆくことが大事になるかと考えている。

超電導 Web21

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

参考文献：

- 1) K.D. Irwin and G.C. Hilton, "Transition-Edge Sensors", chapter in Cryogenic Particle Detection, C. Enss (Ed.), Topics in Applied Physics, vol. 99, p.63 (2005).
- 2) 江副 祐一郎, 篠崎 慶亮, 竹井洋, "進化する X 線マイクロカロリメータ - X 線分光で解き明かす宇宙の大規模構造 -", 日本物理学会誌, 実験技術, 8 号, p.611 (2009).
- 3) J.N. Ullom, *et al.*, "Characterization and reduction of unexplained noise in superconducting transition edge sensors", Appl. Phys. Lett., vol. 84, p. 4206 (2004).
- 4) 石崎 欣尚, "宇宙用 X 線マイクロカロリメータ検出器", 応用物理学会放射線分科会誌「放射線」, vol. 37, p.217 (2011).
- 5) S. Bandler, "Large-Format High Resolution X-ray Microcalorimeter Arrays", Astrophysics Roadmap Town Hall Meeting (2013).
<https://scienceworks.hq.nasa.gov/web/astrophysics-roadmap/home>
- 6) H. Akamatsu, *et al.*, "Impedance measurement and excess noise behavior of a Ti/Au bilayer TES calorimeter", AIP Conf. Proc., vol. 1185, p.195 (2009).
- 7) W.S. Holland, *et al.*, "SCUBA-2: the 10000 pixel bolometer camera on the James Clerk Maxwell Telescope", MNRAS, vol. 430, p.2513 (2013).
- 8) T. Oshima, *et al.*, "Development of TES Bolometer Camera for ASTE Telescope: I. Bolometer Design", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, 2101004 (2013).
- 9) D. Benford, H. Moseley, and J. Zmuidzinas, "Direct Detectors for the Einstein Inflation Probe", J. of Phys., Conf. Series, vol. 155, 012001 (2009).
- 10) T. Hara, *et al.*, "Microcalorimeter-type energy dispersive X-ray spectrometer for a transmission electron microscope", J. Electron Microscopy, vol. 59, p.17 (2010).
- 11) D. Fukuda, *et al.*, "High speed photon number resolving detector with titanium transition edge sensor", J. Low. Temp. Phys., vol. 151, p.100 (2008).
- 12) T. Ohashi, *et al.*, "DIOS: the dark baryon exploring mission", SPIE, vol. 9144, 91442Q, (2014).
- 13) Y. Ezoe, *et al.*, "Large arrays of TES X-ray Microcalorimeters for Dark Baryon Search", AIP Conf. Proc., vol. 1185, p. 60 (2009).
- 14) Y. Ezoe, *et al.*, "Tapered Edge Readout Wiring for Transition Edge Sensor Calorimeter Arrays Using Ion Milling", IEEE Trans. Appl. Supercond., in press.
- 15) 永吉賢一郎, "検出効率の飛躍的向上を目指したマッシュルーム型吸収体 TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発", 修士論文, 東京大学 大学院 理学系研究科 物理学専攻 (2013).
- 16) 有吉誠一郎ほか, "特集:超電導マイクロ波・テラヘルツ波デジタルデバイス 「MKIDs イメージングの最新動向」", 超電導 Web21, 2014 年 2 月号.

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 11 回)

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 渡辺 勉

さて、今回は電力系統に発生するさまざまな現象（異常現象）とそれらから電力系統を守る考え方や仕組みの概要を紹介します。

なお、全体的な説明をするため、過去の解説とやや重複しているところがあります。

○電力系統を守るとは

「守る」イメージはいろいろあると思いますが、ここでは、電力系統に発生する様々な現象に対し、①電力系統の電力供給機能を維持する、②設備を損壊させない、③設備損壊の影響をある程度以下に留める、としています。

・電力系統が遭遇するさまざまな現象 (図 11 回-1)

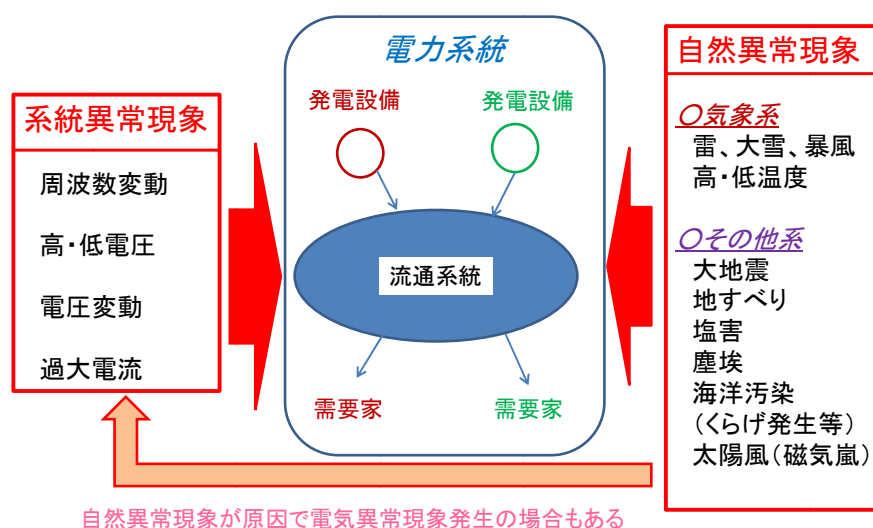


図 11 回-1 電力系統が遭遇する異常現象

電力設備は常に自然現象に晒されています。気象で言えば、落雷、高温、低温、大雪、大雨、強風（これらは複合することもあります）、その他の自然現象では、大地震、津波、地すべり、塩害、塵埃汚染（大気汚染を含む）、海洋汚染（くらげの大量発生等）、太陽風等が異常を及ぼす現象です。以下ではこれらを自然異常現象と呼びます。

一方、電力系統運転中に電力系統内では様々な電気現象が発生します。周波数変動、高電圧、低電圧、過大電流などがあり、電圧・電流現象には、商用周波数（50 Hz、60 Hz）、それより高い周波数、低周波数（周波数領域と言います）での現象が発生します。（電圧変動は第 10 回参照）

以下ではこれらを系統異常現象と呼びます。

(1) 電力系統の守り方：設備が壊れる場合の対応 (図 11 回-2)

超電導 Web2.1

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

電力系統では、自然異常現象に対し、ある程度設備が壊れる（機能が停止する）を前提に電力系統全体の機能を維持するとの考え方です。自然＝神様と考えると、そもそも人間の力で（必ず）自然がもたらす現象に全て打ち勝つのは困難、がベースにあります。この考え方から電源設備では一定の電源予備力確保（第 6 回解説）、流通設備では N-1 基準適用（第 8 回解説）が図られます。なお、流通設備でも、配電系統等では通常 N-1 基準は適用しませんが、電源車（臨時に電気供給を行う移動発電設備）配置等、N-1 基準に準じて対応されます。

この考え方を適用しても、設備

が多数・同時に壊れると「停電（＝機能低下）」しますから、設備を有る程度「頑丈」にすることも必要です。普通、設備を頑丈にするほどコストは増えますから、異常現象の発生確率と壊れる確率を総合的に評価し頑丈さが決められます。一方、異常現象が多く設備で同時に起こらないよう設備の分散化等の設備配置（分散配置等）の工夫もされます。

異常現象に対し全体機能を維持できる「度合い」を信頼性と言いますが、電力系統の信頼性は、電力系統の作り方（分散配置等）、運用の仕方（N-1 基準等）と設備個々の信頼性（頑丈さ）が合わさる訳です。家庭で言えば、地震の起きにくい（とされる場所）に家を建てるのが「電力系統の作り方」、家の構造を頑丈にするのが「個々の設備の信頼性」、寝床に背の高い家具を置かない、が「運用の仕方」で、総合してその「家」の地震に対する安心さ（信頼性）が決まるイメージです。信頼性の高低で電力系統に必要な費用が変わり電気料金に影響します。ちなみに電気料金を下げるには「信頼性低下」が手っ取り早い？のですが、「信頼性の安易な低下」へ誘惑されない注意が電力技術者に必要と思います。電力系統の信頼性は判りにくい面がありますが、電気料金や停電のし易さ等生活に直結しますので、時には関心を持っていただければと思います。

(2) 電力系統の守り方：設備が壊れない場合の対応

電力系統では、設備が壊れなくても供給機能停止（＝停電）が発生します。発端は、主に周波数、電圧、電流に関する系統異常現象です。

・系統異常現象への対応： 周波数（図 11 回-3, 4）

周波数が同じ交流電力系統で、周波数がある程度上昇又は低下すると（通常 3 %程度以上）、系統全体が停止する場合があります。周波数は、発電と需要がインバランスになると変動しますが、まず、発電設備の出力（kW）制御でバランス維持を図ります。（第 5 回参照）周波数が異なる地域が周波数変換設備などで連系される場合も、連系設備を緊急制御し異なる地域間の発電設備が協力します。

周波数低下の場合（需要＞発電）、発電電力が増加されますが、それでも不足する場合や増加速度が十分でない場合、需要遮断制御（強制停電）をします。

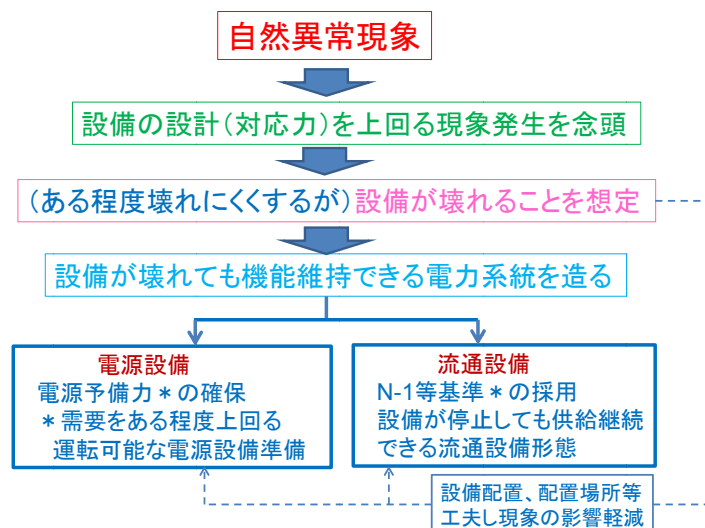


図 11 回-2 電力系統の守り方：

(1) 電力設備が壊れる前提の設備作り

超電導 Web2.1

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

どの程度の需要遮断を準備するか「定説」はありませんが、ある国の電力システムアドバイスをした際、先方要望は全需要の 80 % 遮断でした。「80 % も停電させて電力システムを守っていると言える？」と疑問かも知れませんが、20 % でも需要供給が続けられると、電力システムをゼロから回復させるのに比べ復旧スピードなどに大差が出ます。これは、例えば、火力発電設備は止める時間が長くなる程設備が冷えてしまい再発電までに(暖める等)長時間を要するなど復旧が遅れる要因が増すため、低出力でも運転を続けることが重要となります。一方、流通設備では、変圧器の場合、一旦、停まると再使用の際、過渡的に大きな電流が流れる現象(励磁突入電流：インラッシュ電流)が生じるため種々の対策をしてから再使用する必要があり、少しの需要でも変圧器の運転継続が望ましいです。更に、電力システムでゼロから供給を開始する際、広範囲システムから開始するのは電圧維持等が難しく、小範囲システムから徐々に拡大する必要があり、このための時間が必要になります。このため、20 % でも電力供給が維持されている方がゼロから開始するより遥かに供給回復が容易となります。

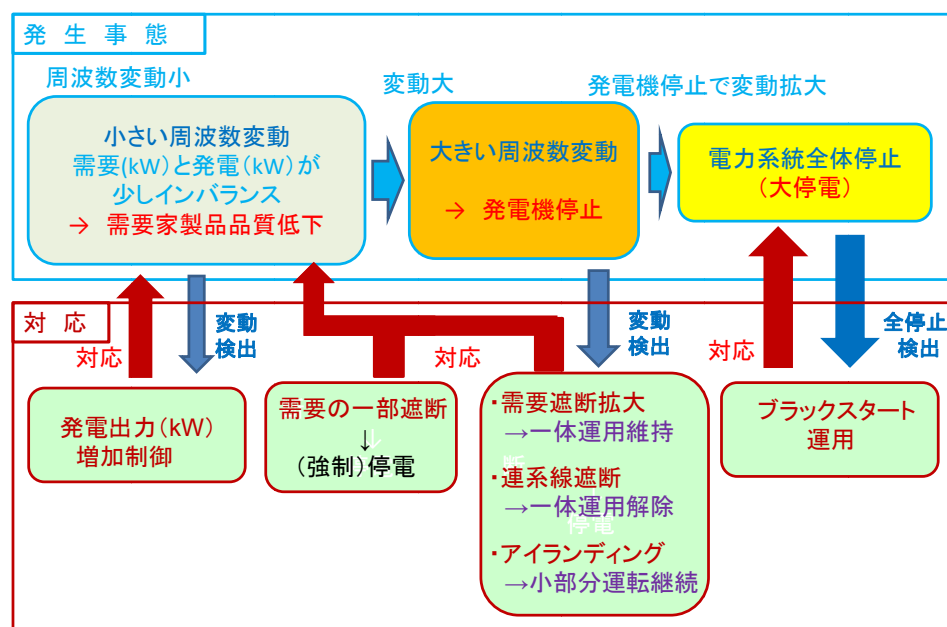


図 11 回-3 周波数変動への対応イメージ (周波数低下対応)

ちなみに、ゼロスタートから電力システムの供給を拡大してゆくプロセスは、ブラックスタートと呼ばれ、たいいてい高度なノウハウが必要になります。(図 11 回-4)

以上の様に、需要の 80 % を停電しても系統運用者は「電力システムを守れた！」と感じるのですが、社会的な反応(マスコミ等?)は「大停電を起こした！」方に目が向き厳しいものになると思います。

なお、同一周波数の電力システムであっても、全体へ異常が波及し全停止となるリスクを減らすため電力システムを部分的(部分と言っても複数国からなる系統ではそのうちの 1 国全部を停止させる場合もある(第 5 回参照))に停止する対応もされます。これも「電力システムを守る」重要な手段です。

また、積極的にある地域だけ電源と見合う需要で孤立させてそこだけ供給を続ける場合があります。(アイランディング制御：アイランドとは島の意味ですが、文字通り電力システムに「八丈島?」を作りそこだけは電気供給を維持するイメージです)(図 11 回-5)

超電導 Web2.1

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

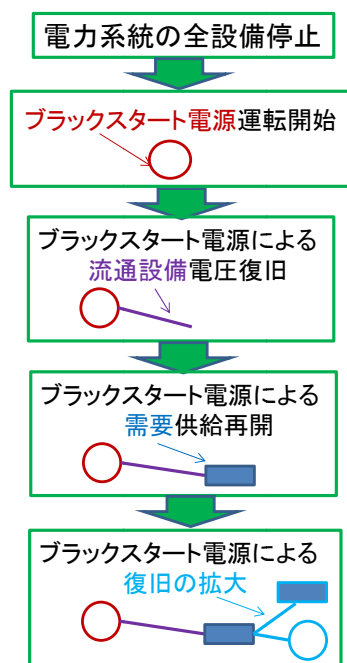


図 11 回-4 ブラックスタート

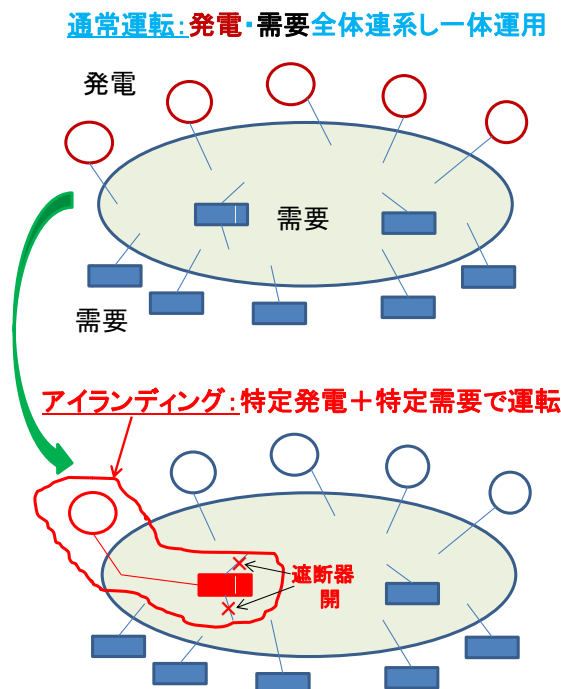


図 11 回-5 アイランディング制御

・系統異常現象への対応：電圧

電圧に関する異常現象は、通常、狭い範囲で生じ、その近辺で対応すれば異常は解消します。ところが条件が重なると大規模異常現象へ発展します。

電圧が低下すると、同じ電力（kW）を送るのに電流が増えます。このため電圧／電流の比が小さくなりますが、電気事故（通常電圧が下がり、大きな電流が流れる）に近い比率になると電気事故除去システム（距離リレー）が動作し設備を停止させます。このような設備停止が生じると電圧低下の影響が更に拡大し結局大規模な停電へ発展する場合があります。海外の大停電も往々にしてこのような過程から発生しています。

一方、電圧が上昇しそれぞれの設備が壊れる危険レベルに近くなると各設備の保護システム（過電圧リレー）が動作し設備を停止します。この時、例えば、発電設備が停止すると、需給バランスが崩れて周波数異常現象（低下）へと発展し大停電となる場合があります。

電圧に関する系統異常現象対策として、電圧低下、上昇を抑制する無効電力発生設備（リアクトル、コンデンサ、同期調相機）が設置されます。また、その動作を高速化に行う機器（FACTS 機器：Flexible AC-Transmission System 機器）が設置される場合もあります。更に、需要遮断制御（停電になりますが）や電源遮断制御で電圧を維持する場合があります。

・系統異常現象への対応：電流

電気が使われ過ぎたり設備停止で電気が偏って流れたりする等で電流が異常に大きくなる場合があります。また、設備事故や雷で普段の数倍以上の電流（事故電流）が流れる場合があります。（第 7 回参照）

設備には電流の流せる限度と時間（通常、熱容量と呼ばれます）があり、それを超えると壊れま

超電導 Web2.1

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

す。設備を壊さないため熱容量超過前に各設備の保護システム（過電流リレー）が動作し停止します。保護システムでは、大きな電流では早めに、小さい電流では遅めに動作します。（反限時特性と呼ばれる）なお、ヒューズも大電流から設備を守るシステムですが、瞬時に動作し限時特性は殆ど有りません。結局、設備は壊れなくても「壊れるのを防ぐため」設備の機能は停止します。なお、熱容量超過のストレスが比較的ゆっくり大きくなる場合、保護システムではなく系統運用者の判断で停止される場合もあります。ループ系統やメッシュ系統（第 3 回参照）では、過電流対策としてある設備を停止させるとその点の大電流はなくなりますが、他の部分を通して電流が流れ、大電流箇所が拡大する場合があります。これに伴い、過電流対応で更に設備停止が停止し（CASCADING 現象：将棋倒しのイメージです）、対応を誤ると大停電となる場合があります。（図 11 回-6）この現象でも各国で大停電が発生しています。対応するため必要に応じ需要遮断制御や電源遮断制御が行われます。

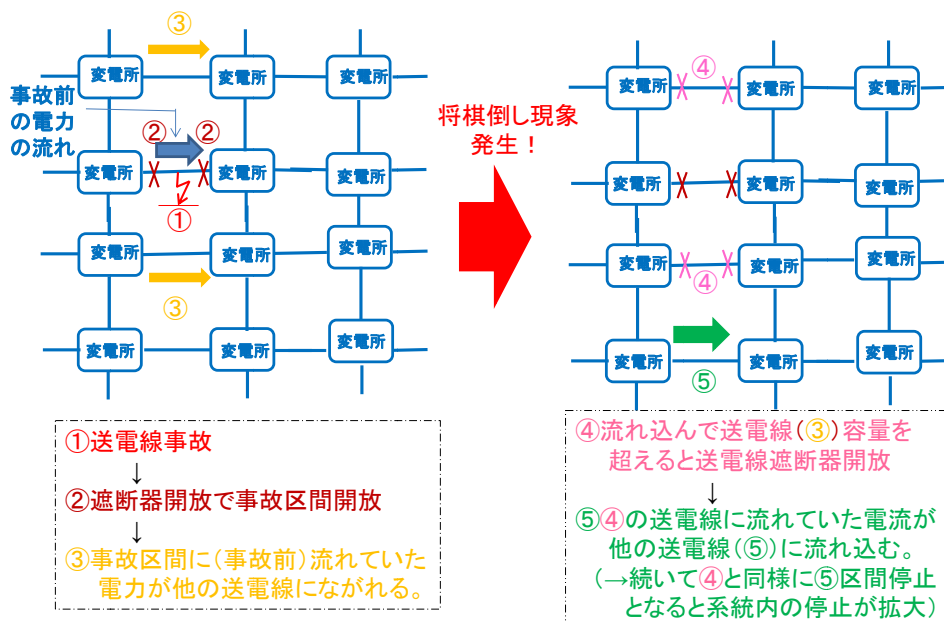


図 11 回-6 電力系統での将棋倒し（CASCADING）現象

・系統異常現象への対応：安定性

電力系統は、需要設備、発電設備、流通設備がそれぞれの役割やニーズを適切に果たすため制御されています。電力系統内での何かのきっかけで（例えば雷事故）、それらの制御がうまく折り合わなくなると（いわば喧嘩するイメージ）、電圧、電流、発電出力が変動、更にその変動が拡大し、場合によっては、電力系統の大きな部分（最悪、電力系統全体）が停止します。この現象は、電力系統が複雑なシステムであるため理論的な分析が難しく、計算機で模擬シミュレーションし発生の可能性や対応策等を検討する必要があります。電力技術に関する書籍では簡単モデルでの安定性が説明されますが、実際の電力系統は遥かに複雑ですので、経験を積みながらノウハウを学ぶ必要があります。安定性で問題がある場合の解消方法や影響削減対策は豊富！にあります。適切に適用するには、やはりノウハウが必要です。

・系統異常現象への対応：共振（図 11 回-7）

ブランコを少しずつ漕いでゆくと、それ程力を入れなくてもだんだん揺れが大きくなります。これは、ブランコにはある周波数（力を加える時間間隔のイメージ）で揺れやすい特徴があり（固有

超電導 Web2.1

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

周波数と言います)、それに合わせて力を加えるとどんどん揺れが大きくなるためです。この現象を共振といいます。

電力系統では、電氣的に「揺れやすい性質」が種々あり、例えば、1 万分の 1 秒以下で振れる周波数に対応する固有周波数で電圧が揺れる特性を持つ変電設備、発電機同士で数秒の固有周波数で出力が変動する特性が生じる場合等があります。「揺れ」が止まらず更に拡大するのが共振（現象）です。この際、拡大した段階で高電圧や大電流が発生したり、前述の安定性問題へ発展したりして、電力設備・系統運用や設備耐力を脅かす場合があります。なお、高調波（第 10 回解説）でも共振現象が発生する場合があります。この現象自体で大停電になることは少ないと思いますが、引き金になる場合があります。（共振が発生していても、いろいろな周波数（揺れ）が混じりなかなか判りにくいです）

電力系統で共振現象を事前に想定することは難しく、前兆現象や一部の設備が壊れる等を経て確認できることが多いです。このため過去の経験を蓄積しつつこの可能性を念頭における、いわば「感度の高い」技術者を育成することが大切です。

対応策としては、固有周波数を変化させる（ブランコでは、ひもの長さを変えると変えられます）、共振作用を減じる成分（制動分）を増す（ブレーキを付けるイメージ）のが効果的で、種々具体策はありますが、電力系統は複雑ですのでなかなか理論どおりの効果が発揮されない場合もあります。（これも 1 冊の本ができますし、常に課題が出てきますが専門的過ぎますので省略します）

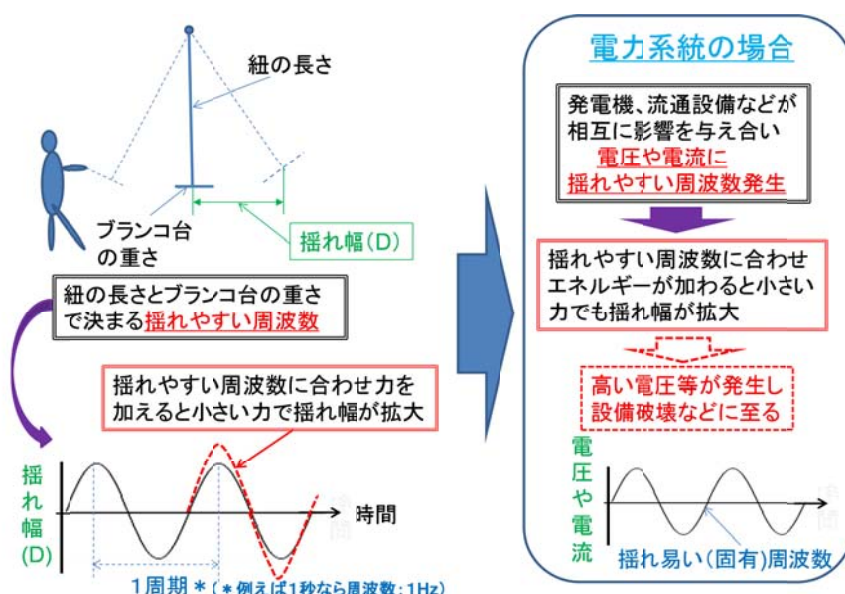


図 11 回-7 共振現象のイメージ

(余談) 津波と共振

津波はゆっくりした満ち引きと、比較的短い時間の満ち引きが組み合わされて大きな波が最初の波の襲来後にくる場合があります。（いわきで経験しました）これは、例えば、地震発生点と陸の間（多分、ゆっくり）、湾の中の陸と陸の間（多分、早い）で、ある時間間隔（固有周波数）で波の行き来を繰り返し、丁度うまく？重なり有った時に大きな波が発生する、いわば共振現象の一種と感じました。いづれにしても固有周波数はいろいろなところにあります。例えば、経済で有名な「景気に関するコンドラチェフの波」（50 年周期）も解析すれば、固有周波数の考え方を適用できるのではと期待？しています。

超電導 Web2.1

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

・「壊れ易さ」をどの程度のレベルとする？

自然異常現象に対し、ある程度までは設備を壊さない作り（設計）としますが、逆に言えば上回る現象では設備は壊れます。電力系統では「設計の想定を上回る現象はある」が前提ですから、「想定外」はないとも言えます。設計する際の異常現象の発生想定は、数十年に一度が一般的と思いますが、原子力設備は数万年（または以上）に一度です。想定を上回る現象の発生は前提ですから、上回った場合どうするかが電力系統システムとの課題となります。この際、結局、「対応にお金がかかり過ぎるのでシステムとして何もしない」との判断もありえます。ただし、その場合でも壊れても安全を維持できるか、壊れた際の早期復旧をどう図るかの検討が必要となります。

（余談） 万が一の事態でも大丈夫？！！にどう答える

前記の考え方は、基本的に欧米流と思います。設備が壊れる状況（通常、リスクと呼ぶ）は必ずあり、そのリスクをどの程度に「収めるか」かは、影響度も考えながら社会（会社なら経営陣）が判断するとの考え方です。電力系統関連技術は欧米で発展し日本に取り入れられた経緯があり、個人的には、日本的な感覚には合いませんが、「なるほど」とは感じました。

一方、日本では、「万が一」の言葉が広く使われ「万一に備える」等といわれますが、これは「数学的な 1 万回に 1 回」の事態に備えるのではなく、なんとなく「まずあり得ないことが起きても大丈夫」の意味で使われます。この場合、「まずあり得ないこと」が一体どの（確率的）レベルか曖昧で、「万が一の事態でも大丈夫か」と問われると技術的には答え様がないので、「適当？」に答えざるを得ません。西欧的な何でも数字化した評価は疑問ですが、「万が一」については、思考様式のある程度の欧米化も必要では？と思います。（第 3 回余談（連系線論議）もご参考して下さい）

・ 電力設備を雷から守る：避雷器（図 11 回-8）

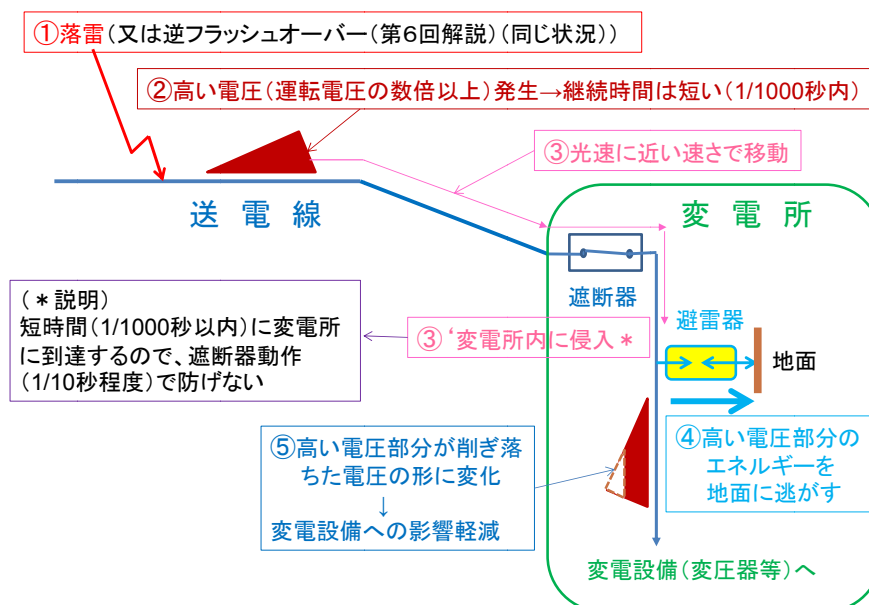


図 11 回-8 避雷器の役割

雷は昔から電力設備にとって大敵でしたが、近年はそれなりの対応が可能となってきました。大きく貢献しているのは避雷器（Arrestor）の高性能化です。避雷器は、雷によって電力系統内に高電圧が発生すると自動的にエネルギーを地面に流す仕組みとなっていますが、性能が非常に良くな

超電導 Web2.1

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

ってきました。避雷器を適切な場所に設置することで(計算機で解析し決めます)、雷で設備が壊れる可能性が格段に低下します。なお、Arrestor は「捕まえる機器」と訳せられますから、「捕雷器」が正しいと思いますし、わざわざ雷エネルギーを請け負うので、イメージと合うのですが、「雷を呼び寄せるようなイメージ」を嫌ったのでしょうか「捕まえる」ではなく「避ける」の字が日本では使われます。ちなみに避雷針も捕雷針の方が正しい訳と思っています。

・磁気嵐：高緯度では怖い現象(図 11 回-9)

磁界が変化するとコイルには、電気が発生します。空の磁界が磁気嵐(原因は太陽の黒点活動)で変化すると地上の電線がコイルの役目を果たし電気を発生します。ちょうど、空と地上で巨大な「変圧器」ができるイメージです。(第 8 回変電設備参照) 低い周波数(数秒以上)変化で電気が発生すると、特に変圧器に異常を生じる可能性があり、過去に磁気嵐が原因の大停電がカナダで発生しました。緯度が高くなると(北半球では北)磁気嵐の影響が大きいので注意が必要です。対策については、専門的となるためここでは省略します。

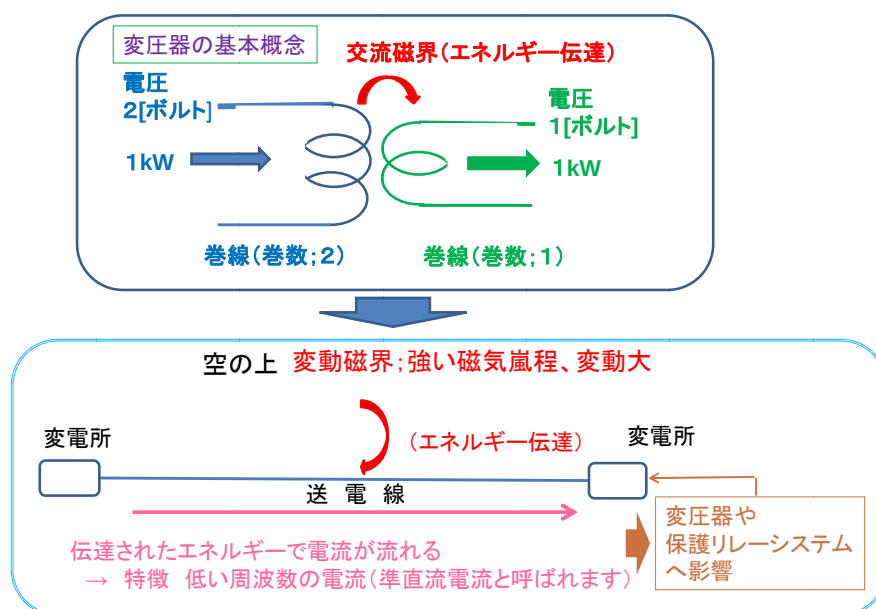


図 11 回-9 磁気嵐のイメージ

次回は、最終回、トピックとして電力自由化と電力系統、海外との電力系統連系について解説したいと思います。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

「研究室紹介」

九州工業大学 大学院情報工学研究院
電子情報工学研究系 超伝導応用工学研究室
教授 小田部 荘司

研究室概要

九州工業大学にはいくつか超伝導関連の研究室があります。我々の超伝導工学応用研究室は 1990 年に当時の松下照男教授（現在は九州工業大学名誉教授）が九州大学から赴任されて飯塚市にある情報工学部に設立され、以来ほぼ 1/4 世紀になろうとしています。この研究室では、材料と応用の中間の部分について研究しています。つまり、材料は企業や研究所などで専門家が作ったものを提供していただき、その材料について電磁気学に基づく独自の測定や解析を通じて知見を得て、さらに独自の超伝導応用機器の基礎について検討をしてきています。ここでは材料の基礎特性の評価と独自の超伝導用機器の基礎研究について紹介します。

研究室構成

松下照男名誉教授、小田部 荘司教授、木内勝准教授

Vladimir Vyatkin 研究員、技術職員、秘書

博士前期課程学生、学部学生 合計 10 名強

共同研究先：九州工業大学内の他のグループ、東京大学、名古屋大学、
中部大学、福岡工業大学など

最近の主な研究内容



超電導 Web2.1

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

1. GdBCO 超伝導コート線材の磁化緩和特性

希土類酸化物銅系超伝導体は、高い臨界温度と臨界磁場を持つことから実用に向けてさまざまな研究開発が行われています。超伝導体の応用の一つに超伝導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES) があります。現在でもシャープの亀山工場には落雷などの事故の時の電圧が一瞬低下する現象「瞬低」対策として 2 GJ の SMES を導入しています。これには従来の金属系超伝導体が使われているので、磁場が低く、また液体ヘリウムを寒剤として使って 4.2 K を保つ必要があり、大きさも 20 m × 30 m × 10 m という巨大なものです。これを希土類酸化物銅系超伝導体の線材に置き換えると 10 m × 10 m × 3 m で収まると見積もられています。しかし運転温度が 20 K であることから、磁気エネルギーで貯蔵されたエネルギーは超伝導体の磁化緩和という現象により徐々に失われてしまいます。したがって、線材の磁化緩和を正確に測定し、理解する必要があります。本研究では、材料や製法の違いによる線材における、磁化緩和特性を評価して SMES の設計指針を与えることを行っています。

2. 磁束クリープ・フローモデルによる電磁特性の評価

前節で磁化緩和現象を紹介しましたが、この現象は磁束クリープ・フローモデルにより理論的に説明されていて、理論により実験結果を精度よく再現できることが知られています。実際にこのモデルにより、超伝導体の電界の電流密度依存性 (E - J 特性)、臨界電流密度の磁界依存性 (J_c - B 特性)、不可逆磁界の温度依存性 (B_i - T 特性) など磁化緩和特性以外の様々な超伝導体の電磁特性をも評価することができます。

このモデルには積分を含む膨大な計算が必要です。また必要な物性パラメータは 3 から 5 つあり、これらを決定するのに手間がかかります。そこで、遺伝的アルゴリズムや最急降下法を使って、自動的にこの複雑な計算をする方法について研究を行っています。また最近の PC では、グラフィック処理専用の GPU という IC が載せられており、これを用いて CPU 単体では得られない計算処理能力を使うことができます。この GPU の物理計算への利用についても研究を進めています。その結果、これまでの 1/10 の時間で、また精度のよりよい計算ができることを確かめています。

3. 有限要素法を用いた電磁特性の計算

有限要素法は工学の分野では非常にポピュラーであり、特に計算機の処理能力が向上している近年では、さまざまなシミュレーションに当たり前のように使われています。しかし超伝導体は電界-電流密度特性における非線形性が非常に大きくて収束演算を必要とし、有限要素法で計算するには、他分野と比べて莫大な計算量が要求されました。我々のグループで有限要素法を導入した当初は小規模なモデルしか計算ができませんでした。最近ではかなり本格的な計算も可能となってきました。また適応範囲も、超伝導体内の磁界分布計算が主ではありますが、電界や電流密度などの基本的な電磁気の値にとどまらず、さらに損失や力など複雑な物理量を計算することができるようになりました。

依然として有限要素法を利用するには超伝導特有の現象をよく理解してモデルを組み立てる必要はありますが、計算機能力が向上したことで、かなり分野について計算をすることが可能となっており、研究室の一つのツールとして応用の可能性を検討し続けることにしています。

4. 縦磁界効果利用超伝導電力ケーブルの基礎研究

科学技術振興機構 (JST) の先端的低炭素化技術開発 (ALCA) の補助事業に採択されて、「高性能超伝導電力ケーブルの開発」という課題名で研究を進めています。これは超伝導電力ケーブルの構造を工夫することで、流れる電流と内部に発生する磁界の向きがほとんど平行な状態にする (縦磁界) ことにより、超伝導電力ケーブルの電流容量を格段に増やすことができる可能性を確かめるものです。

超電導 Web21

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

まず現在開発中である希土類酸化物銅系超伝導コート線材が縦磁界において臨界電流密度がどのように向上するのかを測定しています。しかしコート線材は磁界異方性が強く、コート線材の面に垂直な磁界がかかると臨界電流密度がすぐに減少してしまいます。したがって、コート線材を一枚で測定しても、ケーブル状にしたときの性能を測定することができないことになります。そこでコート線材のサンプルの周りにもいくつかダミーのコート線材を配置することによって、より正確な縦磁界下での臨界電流密度測定を行っています。これは有限要素法によっても周りの磁界分布を計算して、コート線材の面に垂直な磁界成分が低減できていることを確かめています。

次に縦磁界効果を利用した超伝導電力ケーブルの設計に資するように、電流量の計算をおこなっています。ケーブルはテープ状の線材をフォーマーの上に並べる構造をしており、その臨界電流は磁界の値や電流との角度によって複雑に変わります。また流れる電流によって多層構造である電力ケーブルの内部の磁界構造は変わります。これらを矛盾無く求める方法を開発しています。またこの計算結果が正しいかどうかを有限要素法により検証を進めています。

さらに、実際に模擬ケーブルを作製して実際に 4000 A という大電流を通電して、その性能について検証しています。実際に作製すると、テープ線材単体の性能に比べてテープ線材を複数使ってケーブルにすると性能が向上することが確かめられました。また巻き方を工夫してより縦磁界の状態に近い状態を作ることにより、ケーブル全体の性能が向上することも確かめることができました。

連絡先

〒820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4

九州工業大学 大学院情報工学研究院 電子情報工学研究系 超伝導応用工学研究室
Applied Superconductivity Engineering Labo. in Kyutech (Kyushu Inst. of Tech.)

教授 小田部 莊司

Tel. & FAX 0948-29-7683

otabe@cse.kyutech.ac.jp

<http://aquarius10.cse.kyutech.ac.jp>

<http://aquarius20.cse.kyutech.ac.jp>

<http://aquarius30.cse.kyutech.ac.jp>

自薦・他薦を問わずこのコーナーで紹介できる研究室を募集しています。
企業や国研の研究室でも構いません。

ご連絡先: web21@istec.or.jp

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

読者の広場

Q&A

Q：鉄系超電導にアンモニアを挟むことで新しい現象が出た、と新聞で見ましたが、鉄系の臨界温度がどんどん上がっていくのでしょうか？見通しは如何でしょうか？

A：FeSe は $T_c = 8$ K を示す最も単純な構造を持つ鉄系超電導体の一種です。鉄系の特徴である FeSe 層からできる物質であり、層間に K (他に Rb, Cs, Tl) を入れた物質 ($K_2Fe_4Se_5$) が $T_c = 30$ K を持つ超電導体となることが 2010 年に中国のグループから報告されました。一方 Na より小さな陽イオンでは層間反発により通常の高圧焼成法では合成できませんでした。これに対し同グループはアンモノサーマル法により Na、Li やアルカリ土類金属、希土類金属を層間に入れることに成功し、30-46 K の T_c (最高は組成 $Na_{0.61}Fe_2Se_{1.9}$) を報告していますが、残留アンモニアに対する考察がなく、構造評価も不完全でした。

今回の私どもの発表では、精密に制御したアンモノサーマル法を用いて、Na と NH₃ を層間にインターカレートし、その組成、構造を報告しました。具体的には T_c の異なる 3 つの超伝導物質を合成し、その化学組成と結晶構造を決定しました。

$Na_{0.65}Fe_{1.93}Se_2$ は $T_c = 37$ K の物質 (Phase I) で、FeSe の層間に Na イオンだけが挿入され NH₃ が完全に除去されたものです。また、Na イオンと一緒に NH₃ 分子が層間に挿入された物質も合成し、NH₃ 量が少ない物質 (Phase II) で $T_c = 45$ K、多い物質 (Phase III) で $T_c = 42$ K で超伝導が出現しました。今回、合成された 3 つの超伝導物質は、Fe 層間の距離が 6.83 Å (Phase I), 8.71 Å (Phase II), 11.07 Å (Phase III) であるのに対し、 T_c は 37, 45, 42 K と単調には増大せず、 T_c が層間距離とともに増大する銅酸化物超伝導体とは異なる挙動を示しました。

鉄カルコゲナイド系の最近の研究では、高圧をかけると $T_c > 40$ K まで増大することや、SrTiO₃ : Nb 基板上に FeSe を 1 分子層だけをエピタキシャル成長させた試料では、100 K 付近でゼロ抵抗が報告されるなど著しい進展を見せています。鉄ニクタイト系とは超伝導の発現機構が異なることも考えられ、予断を許さない展開になりつつあります。

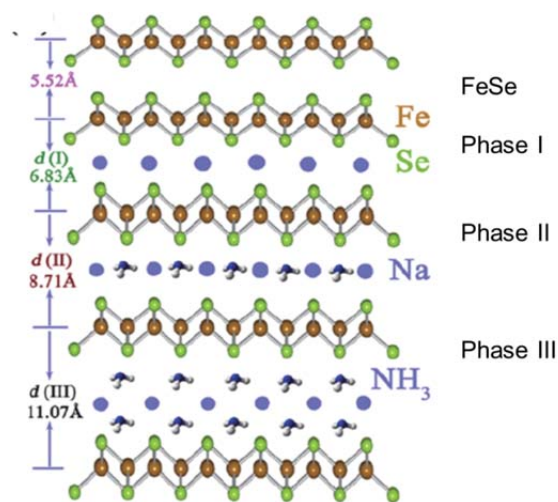
またアンモノサーマル法による試料合成は、低温のソフトプロセスであることから、非平衡相の合成に適しており、さらなる新超伝導物質の発見が期待できます。

参考：

Jiangang Guo, Hechang Lei, Fumitaka Hayashi and Hideo Hosono, "Superconductivity and phase instability of NH₃-free Na-intercalated FeSe_{1-z}S_z", Nature Communications, 5, 4756 (2014).

DOI : [1038/ncomms5756](https://doi.org/10.1038/ncomms5756)

回答者：東京工業大学フロンティア研究機構 教授 細野秀雄 様、
元素戦略研究センター 特任教授 藤津 悟 様



FeSe への Na-NH₃ インターカレーションによる層間の状態