

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：

- ISIS 開催
- 高温超電導の新たな展開
圧力誘起分子解離によって生じる $T_c = 200$ K の超伝導体の結晶構造

特集：超電導デジタルデバイス

- D-Wave の量子アニーリングデバイスと超伝導デジタル回路
- 100 GHz 超伝導マイクロプロセッサ
- AQFP を用いた超低電力マイクロプロセッサに向けた研究
(SQUID などアナログデバイスは 8 月号に掲載)

- 超電導関連 2015 年 10 月 - 11 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン (8/20-9/19)
- 「世界の動き」
- 「応用物理学会」報告
- EUCAS2015 報告 (和泉副所長)
- (山田特別研究員)
- (町主管研究員)
- 隔月連載記事「鉄道と超電導 (その 5 - 浮上式鉄道用高温超電導磁石の開発②)」
- 研究室紹介 鹿児島大学大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻 川越研究室
- 読者の広場「レクサスのホバーボード！ 今後、どこにでも乗って行けるような改良は出来るのか？」

[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、公益財団法人 JKA 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 24 回国際超電導産業サミット (ISIS-24) 開催速報

公益財団法人 超電導産業技術研究センター
事務局長 渡辺 勉



ISIS 会場

平成 27 年 9 月 2 日 (水) ～4 月 4 日 (金)、ドイツ・ケルンにて第 24 回国際超電導産業サミット (ISIS-24) 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 EUCAS (European Conference on Applied Superconductivity) が直後にリヨン開催されることから、ドイツがホスト国となり開催された。今回は日本、アメリカ、ヨーロッパ (ロシアを含む)、韓国が参加し、ニュージーランドは諸事情により今回も不参加となった。国ごとの参加者数は、日本からは 7 名で、米国は 5 名、ヨーロッパの 29 名、韓国は 2 名の総計 43 名と昨年度のロシア開催の ISIS-23 の 36 名と同程度となっている。なお、ヨーロッパはドイツ、イタリアの企業からの参加であった。

今回の会議テーマは、世界的にみて注目される動向を扱う Lighthouse projects、各地域の動向を Review of activities from regions、出席企業の状況を Report from companies、また、参加者によるフリー討論を Lessons learnt と分類しそれぞれ報告が行われた。

Lighthouse projects では、米国での超電導に関する National Network of institutes、これはコンソーシアムに類する組織体であるが、その成立に関する動向、ヨーロッパから JT60SA コイル (日本に設置) の開発状況、ドイツの超電導配電ケーブル系統 (Ampacity) の設備状況、日本から医療用超電導コイルプロジェクトの進捗状況が報告された。

Review of Activities from regions では、各地域、具体的には米国、韓国、ロシア、欧州、日本のそれぞれについて最近の超電導技術開発、実用化を巡る状況が報告された。

Report from companies では、線材、機器、冷却関連等について R&D の状況、販売製品、納入された設備の状況が各メーカーから報告された。日本からは、線材 (電線) メーカーから各社の状況、ISTEC から冷却メーカー、鉄道での R&D の状況が報告された。

Lessons learnt では、今後、超電導分野市場の飛躍的拡大を図るには、過去の反省も踏まえ今後何をすべきかとの視点で参加各社の自由討論が行われた。各参加者共、超電導技術が実用化に向け相当レベルに到達しているのに対しなかなか市場が思うように広がらないので打開を図りたいとの意見表明があり、次回以降も議論を進めることとされた。

なお、明年 (2016 年 ISIS-25) は、韓国済州島で秋季開催の予定。

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

会議の合間に、ドイツ、エッセン市に設置された Ampacity 設備（1 万 V、1 km 40 MW1 回線 2014 年春運転開始 RWE 社）を会議参加者にて見学した。本設備は従来 11 万 V で供給される設備を超電導で大容量化した 1 万 V 3 相同軸ケーブル 1 回線で実現し、設備効率化を図ったものである。超電導線での事故時電流を抑制するため超電導限流器をケーブルと直列に設置している。冷却は冷却器を設置しない方式としてコスト削減を図っている。これら設備全体でも 11 万 V で受電設備・変圧器を設置し 1 万 V に変換し供給するよりもコンパクト化が図られメリットが大きいとのことである。既に 1 年以上の順調な運転が行われている。なお、EUCAS でも複数のセッションで本プロジェクト報告がされており注目度が高いことがうかがわれる。EUCAS 中にもサミットサテライト会議が行われた。



Ampacity 高温超電導設備全景（変電所内）



ケーブル用液体窒素タンク（高さ 15m）



超電導限流器（YBCO 系線材を使用）

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

-Program-

2nd September 2015

Executive meeting

3rd September 2015

9:00 - 9:30 CCAS Alan Lauder

-US government promotion of industry led Commercial Manufacturing institute-

9:30 - 10:00 Alstom Alex Bourguard

- JT60 SA TF coils status-

Coffee break

10:30 - 11:00 Changwon National University Minwon Park *

-After DAPAS, what was changed and what is working in Korea-

11:00 - 11:30 JSC Russian superconductors Victor Pantsyrny*

-Status Superconductivity in Russia-

11:30 - 12:00 Deutsche Nanoshnicht GmbH Michael Backer

-Superconductor Material Activities in Europe-

Lunch break

13:00 - 13:30 Babcock-Noell GmbH Wolfgang Walter*

-Superconductor application Status in Europe -

13:30 - 14:00 Florida state university Sastry Pamidi*

-Superconductivity Programs in the US -

14:00 - 14:30 ISTEC Tsutomu Watanabe *

-National R&D of HTS application in Japan-

Coffee break

15:00 - 15:15 Siemens AG Tabea Arndt*

SC applications by Siemens

15:15 - 15:30 Sumitomo Electric Industries Kazuhiko Hayashi

New Bisco tape

15:30 - 15:45 Babcock Noell GmbH Achim Hobl

SC magnet

15:45 - 16:00 3-Cs Ltd Eamonn Maher

Coated conductor cylinder technology

16:00 - 16:15 Fujikura Ltd Daibo Masanori

Coated conductor technology

16:15 - 16:30 AMSC Rob Rouse *

SC application by AMSC

Coffee break

16:30 - 17:30 Free Discussion

Regarding the lessons learnt in the past and requirements for future success, each member expressed one's opinion.

4th September 2015

8:30 - 9:00 CCAS Alan Lauder

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

-The US Federal budget-

9:00 – 9:15 IEA-IA-Operating Agent Tsutomu Watanabe

IEA-IA of SC was introduced. Dr Tabea made additional explanation that there are other IAs and coordinated activity can be pursued.

9:15 – 9:30 Alstom Power Systems France Alex Bourquard

Magnet, MRI with HTC and LTC

9:30 – 9:45 Showa Cable System Company Ltd Nobuhiro Mido

Power cable system

9:45 – 10:00 ISTEC Yutaka Yamada*

Activities in Railway and Cooling system companies

Coffee break

10:30 – 11:00 Nexans GmbH Frank Schmidt

Ampacity project

11:00 – 11:30 ISTEC Teruo Izumi

Current National Project on CC in Japan – Development of HTS Coiling technology for medical Application

11:30 Session concluded

Next ISIS meeting : 2016 around November in Jeju-island in Korea

Afternoon; Site tour to AmpaCity project

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒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：高温超電導の新たな展開

「圧力誘起分子解離によって生じる $T_c = 200$ K の超伝導体の結晶構造」

大阪大学
基礎工学研究科附属極限科学センター
榮永茉莉

これまでの最高の超伝導転移温度である水銀系銅酸化物の $T_c = 164$ K を大きく更新する 203 K (-70 °C) の T_c が Drozdov らにより高压下 150 万気圧 (~150 GPa) の硫化水素で発見された¹⁾。この超伝導は BCS 理論により予測される限界の $T_c = 40$ K を大きく超えるものであった。

室温を超える T_c は、最も軽い元素である単体水素の超高压下 400 GPa 以上で理論的に予測されていたが、水素封入や超高压発生などの実験的困難さから実現していない。水素を多く含む水素化合物でも高い T_c が予想されているが、実験的に明らかであるのはシラン (SiH_4) の $T_c = 17$ K のみであった²⁾。近年、新たに H_2S において 160 GPa で $T_c = 80$ K が予測されていたが³⁾、実際には倍以上の T_c が観測されたことになる。Drozdov らの報告の後、すぐさま理論計算によるこの超伝導物質の構造探索が行われ、硫化水素は加圧によって次式で示される分子解離を起こすことが予測された： $3\text{H}_2\text{S} \rightarrow 2\text{H}_3\text{S} + \text{S}$ ⁴⁾。また、高压下で body-centered cubic (bcc) 構造を持つ H_3S は 200 K の超伝導を良く説明できる。

この結晶構造を実験的に明らかにするため、筆者のグループは Drozdov らと協力して放射光 X 線回折 (XRD)・電気抵抗の同時測定を SPing-8 でおこなった⁵⁾。図 1 に室温での XRD 測定の結果を示す。図に示すとおり、硫化水素と重硫化水素のパターンはどちらも理論計算で予測された bcc 構造の H_3S と単体硫黄の高压相である β -ポロニウム構造の混相としてほぼすべてのピークを説明でき、主相は H_3S であった。試料が超伝導となる低温でも室温と同様の XRD パターンが保たれていた。したがって、 H_2S は理論計算が示したように bcc の原子配列を持つ H_3S と単体硫黄となると考えられる。

圧力誘起分子解離による硫化水素の超伝導が発見され、分子性構造を持つような他の水素化合物も圧力下では高い T_c を示す可能性が示唆された。今後、水素化合物の超伝導の研究がさらに進み、室温超伝導体の実現に向けた大きな手掛かりとなることが期待される。

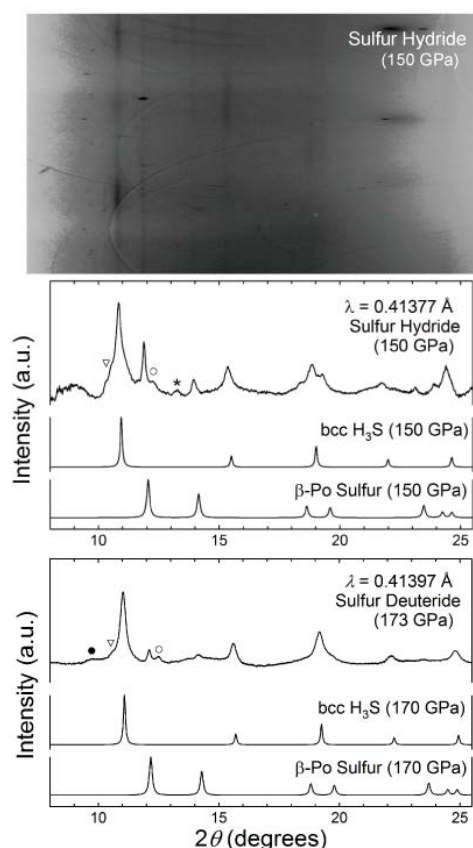


図 1. 硫化水素の XRD 測定の結果。

(上段) イメージングプレート上に露光された試料からの反射を開いたもの。

(中段) 上段を積分して得られた Sulfur hydride の XRD パターンと、bcc 構造の H_3S と β -Po 構造の単体硫黄のシミュレーションパターン。

(下段) Sulfur deuteride の XRD パターン。

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) A. P. Drozdov *et al.*, Preprint: <http://arxiv.org/abs/1412.0460> (2014), A. P. Drozdov *et al.*, Nature, 525 (2015) 73-76.
- 2) M. I. Eremets *et al.*, Nature, 319 (2008) 1506.
- 3) Y. Li *et al.*, J. Chem. Phys., 140 (2014) 174712.
- 4) D. Duan, *et al.*, Phys. Rev. B 91 (2015) 180502, I. Errea *et al.*, Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 157004 など。
- 5) M. Einaga *et al.*, Preprint: <http://arxiv.org/abs/1509.03156> (2015).

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：超電導デジタルデバイス

「D-Wave の量子アニーリングデバイスと超伝導デジタル回路」

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
ナノエレクトロニクス研究部門 超伝導計信号処理グループ
上級主任研究員 日高睦夫

カナダの D-Wave Systems が発売した量子コンピュータが注目を集めている。量子コンピュータといっても素因数分解の解法などを行うゲート方式の量子コンピュータとは異なり、最適化問題を解く量子アニーリングマシンである。ゲート方式の量子コンピュータが実現にまだ 10 年以上の歳月が必要と言われているのに対して、量子アニーリングマシンは 2010 年に最初の製品が発売され、その後 Lockheed-Martin、Google、NASA が購入したことから話題となり、多くの解説記事が書かれている¹⁾。

量子アニーリングマシンが解く最適化問題とは、多数の候補の中から最適な解を選ぶ問題である。最適化問題の例として巡回セールスマン問題が知られている。これはセールスマンが多数の都市を訪問するときに、全ての都市を一度だけ訪問するという条件の下で最短経路を見つけるという問題である。この手の問題は都市数が少ない時は簡単に解けるが、都市数が増えるに従い計算量が指数関数的に増加することが特徴で、古典コンピュータが苦手な問題である。京コンピュータを用いたとしても 25 都市を越えるくらいから現実的な時間で解くことができなくなる。この最適化問題を効率よく解く手法がビッグデータ時代には様々な分野で求められており、量子アニーリングマシンはその有力な候補となっている。

D-Wave の量子アニーリングマシンの外観を図 1 に示す。外観は大きい。心臓部は図 2 に示される 1 個のチップであり、このチップが希釈冷凍機によって 15 mK に冷却されている²⁾。最新チップでは、1152 量子ビットが集積されており、使用されているジョセフソン接合(JJ)の数は 128,000 個である³⁾。この JJ 集積数は、動作が実証されている超伝導回路では最も大きい。1 個の量子ビットは 6 個の JJ を使用している。また、1 個の量子ビットは、隣接する量子ビットと可変結合するための超伝導リング結合器を 6 個有しており、それぞれの超伝導リング結合器は JJ を 2 個使用している。これらの JJ はいずれも可変インダクタンスとして働いており、デジタル回路と異なり電圧状態にスイッチすることは無い。可変インダクタンスとして働く JJ の数は高々 1 万数千個であり、残りの約 11 万個の JJ はデジタル回路と同じモードで動作している。

その一つの例が各量子ビットに 5 個、超伝導リング結合器に 1 個ずつ配置されている DAC (Digital Analog Converter) である。この回路は JJ の電圧状態へのスイッチにより超伝導ループに単一磁束量子(SFQ)を 1 個ずつ挿入していき、SFQ 個数に応じた値の制御電流を量子ビットや超伝導ループ結合器に与える回路である。また、量子ビットの読出しには、本特集で横浜国大の竹内先生が紹介している QFP (Quantum Flux parametron)回路が使用され、量子ビットの状態に応じて超伝導ループに流れる電流が時計回りもしくは反時計回りとなる。この電流の向きを DC-SQUID を用いて電圧に変換することで読出しを行う。他にも制御や読出しのターゲットとなる量子ビットを選択するために超伝導デジタル回路が使用されている。これらのデジタル回路に求められている性能は、極小の発熱とノイズである。これは、量子ビットが動作する 15 mK に冷却する冷凍機の熱バジェットが極めて小さいことと、量子ビットがノイズに対して極めて敏感なことに由来する。

D-Wave の量子アニーリングデバイスは、超伝導材料として Nb、抵抗材料として TiPt、JJ として Nb/AlOx/Nb 接合を用いている。また、平坦化を施した 6 層 Nb 配線構造である。製造は半導体

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

ファンドリである Cypress 社の 8 インチ CMOS ラインを使用しており、露光に KrF ステッパーを用いて、最小 JJ 直径 $0.6\ \mu\text{m}$ 、最小線幅 $0.25\ \mu\text{m}$ を実現している。この製造プロセスは最先端の超伝導デジタルデバイスとほぼ同等である³⁾。

D-Wave の量子アニーリングデバイスには、これまで開発されてきた超伝導デジタル回路技術が数多く活かされている。量子アニーリングデバイスの性能を上げるには、量子ビットの性能を向上するとともに大規模化が不可欠である。規模を拡大していくために、デジタル回路技術を量子アニーリングに適した方向に進化させていくことが期待されている。



図 1 D-Wave Systems の量子アニーリングマシンの外観 <http://www.dwavesys.com/d-wave-two-system>

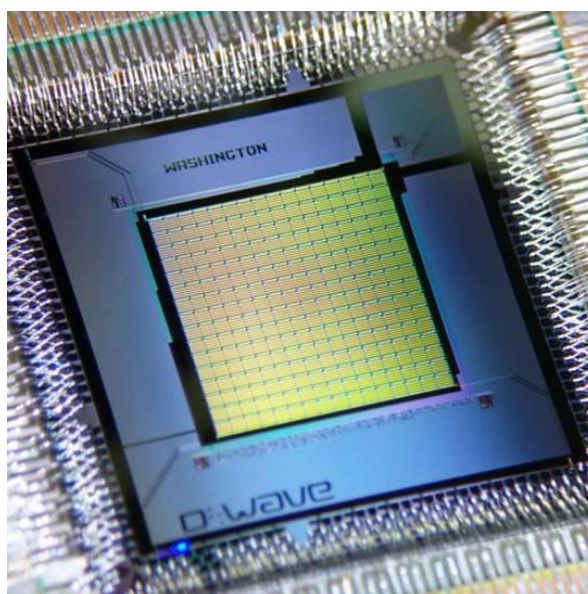


図 2 最新量子アニーリングデバイス「Washington」
<http://www.dwavesys.com/d-wave-two-system>

参考文献：

- 1) <http://www.dwavesys.com/d-wave-two-system>
- 2) 例えば、日経コンピュータ ITpro
<http://itpro.nikkeibp.co.jp/atcl/column/14/346926/080700316/?ST=system>
- 3)
<http://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-systems-breaks-1000-qubit-quantum-computing-barrier>
- 4) S. Tolpygo, V. Bolkhovskiy, T. Weir, and W. Oliver, "Fabrication process and properties of fully-planarized deep-submicron Nb/Al-AIOx/Nb Josephson junctions for VLSI circuits", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 3, June 2015.

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

特集：超電導デジタルデバイス

「100 GHz 超伝導マイクロプロセッサ」

名古屋大学大学院
工学研究科量子工学専攻
特任講師 田中雅光

世界一高速な大規模集積回路(LSI)を作りたい - 超伝導エレクトロニクスを応用してこの目標に取り組んでいます。LSI は総合力での勝負。デバイス的高速性だけでなく、配線遅延や消費電力制約の解決、デバイスの性能を引き出す計算機設計支援(CAD)技術などさまざまな要素が性能に影響を与えます。

超伝導ループ内で量子化された磁束量子ひとつひとつを用いて情報処理を行う回路のアイデアは日本で誕生し、モスクワ州立大学の Likharev らによって rapid single-flux-quantum (RSFQ) 回路として体系化されました¹⁾。ジョセフソン素子的高速性や無損失の超伝導線路を用いた電磁波信号伝送により、原理的にサブテラヘルツ動作が可能ですが、フリップフロップ²⁾やシフトレジスタ³⁾のような簡単な回路を除き、100 GHz 以上で動作する LSI はまだ実証されていません。

本研究では、JST ALCA の支援を受け、ジョセフソン臨界電流密度が 20 kA/cm^2 の次世代超伝導 LSI 作製プロセスを産総研の協力を得て開発し⁴⁾、100 GHz で動作するマイクロプロセッサの実証を目指しました。円形接合を導入し、素子ばらつきは LSI を実現するのに十分な 2% に抑えました。回路パラメータや構成を見直して、サブピコ秒レベルの高精度な設計技術を確立するとともに、必要な動作速度に応じて電源電圧を変え、高速性と低消費電力性を両立しています。

図 1 にマイクロプロセッサの演算部を構成する、加算器のテスト回路と動作周波数の評価結果を示します⁵⁾。約 140 GHz までの動作を確認できました。現在、この加算器を組み込んだ、簡単なマイクロプロセッサの詳細な評価を進めていますが、およそ 100 GHz での正常動作を確認しています。消費電力は 1 mW。はじめて実証に成功した RSFQ マイクロプロセッサ⁶⁾と比べ、速度は 6 倍、消費電力は 2/3 となり、半導体マイクロプロセッサに対抗し得るポテンシャルを達成しています。

次世代 LSI 技術を目指し、超伝導デジタル回路技術実用化の道を拓きます。

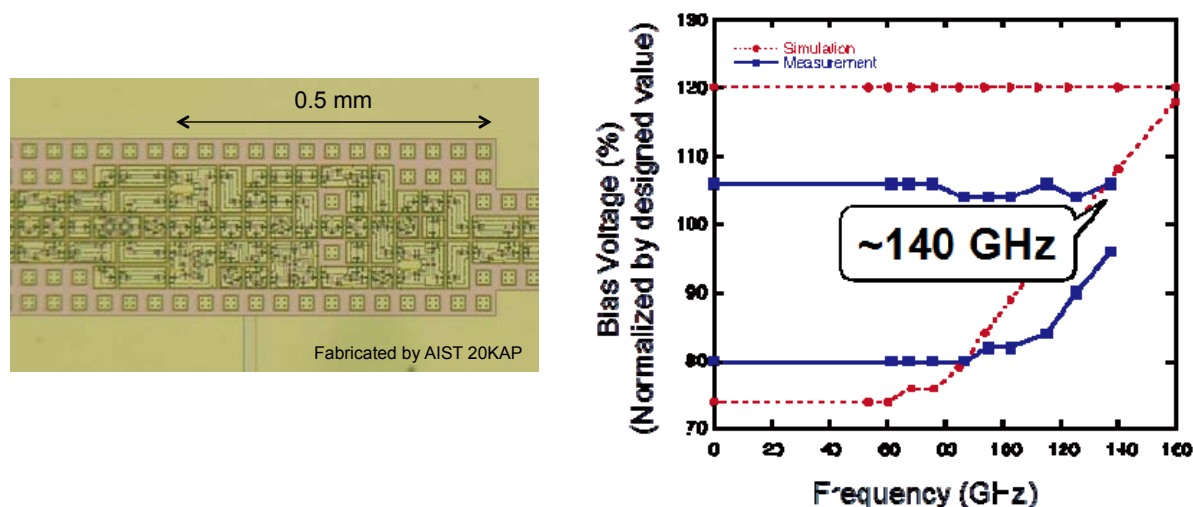


図 1 RSFQ ビットシリアル加算器の顕微鏡写真と動作周波数評価結果⁵⁾

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

引用文献:

- 1) K. K. Likharev and V. K. Semenov, IEEE Trans. Appl. Supercond. 1 (1991) 3.
- 2) W. Chen *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 9 (1999) 3212.
- 3) H. Akaike *et al.*, Supercond. Sci. Technol., 19 (2006) S320.
- 4) S. Nagasawa *et al.*, 15th Int. Supercond. Electron. Conf. (ISEC 2015), Nagoya, 2015.
- 5) 田中雅光ほか、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、東海大学、2015 年。
- 6) M. Tanaka *et al.*, Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC 2004), San Francisco, 2004.

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：超電導デジタルデバイス

「AQFP を用いた超低電力マイクロプロセッサに向けた研究」

横浜国立大学
先端科学高等研究院
竹内尚輝

エクサスケールの次世代スーパーコンピュータ実現のためには、CMOS に比べて桁違いにエネルギー効率の高い論理回路が必要になると考えられる。そこで我々は、低電力超伝導回路である **Adiabatic quantum-flux-parametron (AQFP)** ¹⁾ の研究を行っている。AQFP では、回路のポテンシャル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低減することが可能である。本稿では、AQFP を用いた超低電力マイクロプロセッサ実現に向けた最新の研究成果を報告する。

デジタル回路を効率的に設計するため、ミニマル設計 ²⁾ と呼ぶ手法を用いて AQFP セルライブラリを構築した。AQFP では、バッファ、NOT、定数、ブランチの 4 種類のビルディングブロックを組み合わせて任意の組み合わせ論理回路を作成することができる。本研究で提案したミニマル設計では、4 種類のビルディングブロックのみを予め最適化し、これらのブロックを並び替えることで論理セルを設計し、セルライブラリを構築する。セルごとに最適化を行う従来の設計手法に比べて、セルライブラリの構築、各プロセスに応じたカスタマイズを効率的に行うことが可能となった。図 1(a) に設計したビルディングブロック、図 1(b) に本手法を用いて設計したセルテスト回路を示す。回路作成には、産業技術総合研究所の Nb スタンダードプロセス(STP2)を用いた。低速での測定により、 $\pm 30\%$ 以上の広いバイアスマージンを確認することができた。次に、作成したセルの歩留まり評価を行うため、約 10,000 個のバッファゲートから構成される回路を作成した ³⁾。本回路は、1,000 ゲートの歩留まりと 10,000 ゲートの歩留まりの両方を評価することが可能である。STP2 を用いて回路を作成し、低速で評価を行った。結果としては、1,000 ゲートの歩留まりは 56 %、10,000 ゲートの歩留まりは 13 % であった。プロセッサを実現するためには十分な歩留まりとは言えないが、モートの最適化、レイアウトの改善により歩留まりの向上が見込める。

さらに我々は、AQFP 回路に用いる低電力ラッチとして **Magnetically-coupled quantum-flux-latch (MC-QFL)** ⁴⁾ を提案した。STP2 を用いて MC-QFL を作成し、低速測定において広いバイアスマージンを確認した。また、**Passive-transmission-line (PTL)** を用いた長距離配線を用いるために必要となる AQFP-SFQ インターフェイス回路を提案し、低速にて動作実証を行った ⁵⁾。以上より、論理セル、ラッチ、配線、という物理レベルでのコンポーネントが揃った。今後は、AQFP セルライブラリに対応した EDA、HDL モデルを用いたデジタル設計環境を構築し、8-bit AQFP マイクロプロセッサの冷凍機内での動作実証を目指す ⁶⁾。

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

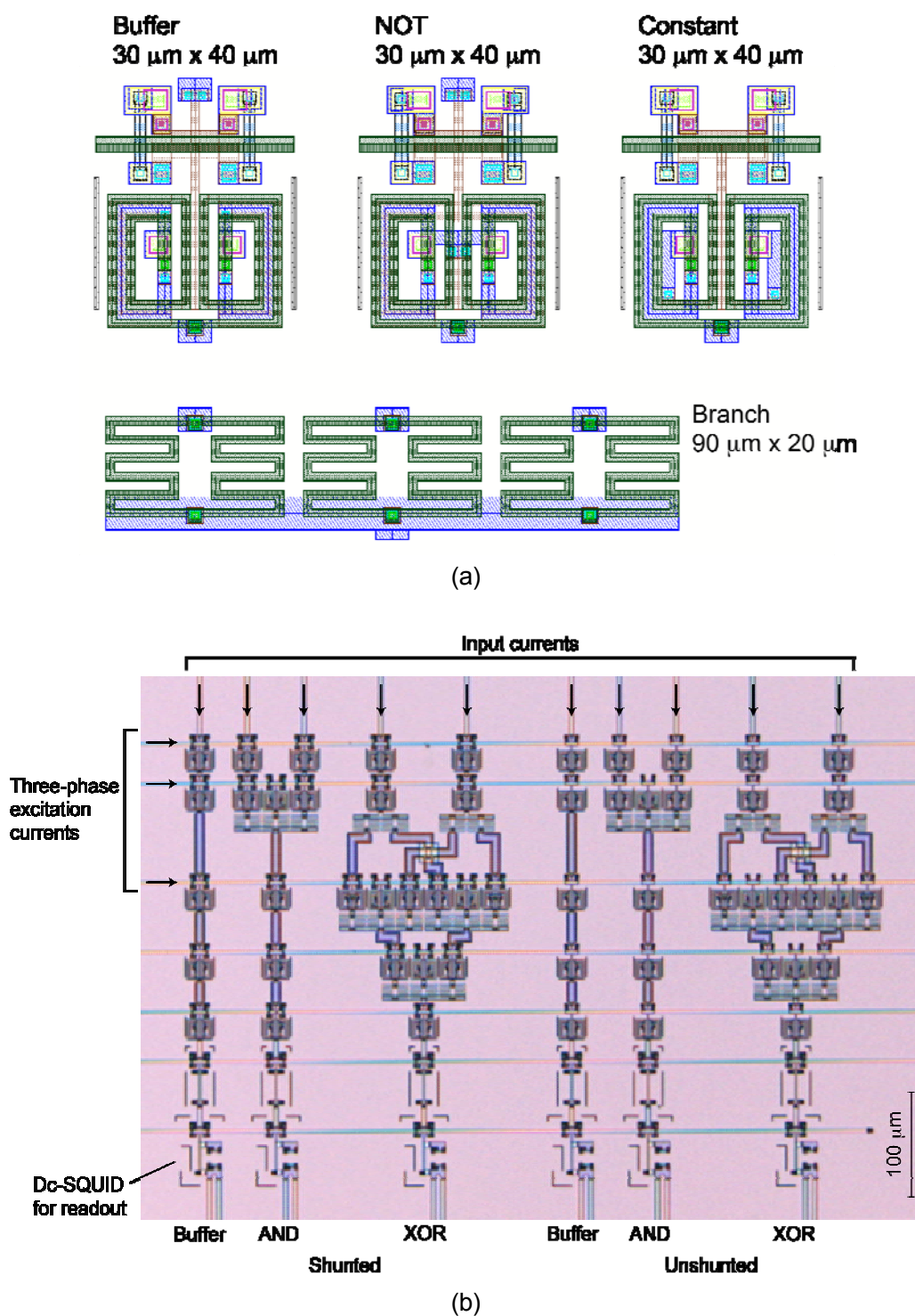


図 1 AQFP 論理セル (a) ビルディングブロック (b) セルテスト回路. 高速動作のシャントセルと低電力動作のアンシャントセルの両方を設計した。

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

参考文献:

- 1) 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.
- 2) N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Adiabatic quantum-flux-parametron cell library adopting minimalist design," J. Appl. Phys., vol. 117, no. 17, p. 173912, May 2015.
- 3) T. Narama, N. Takeuchi, T. Ortlepp, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Demonstration of 10k gate-scale adiabatic- quantum-flux-parametron circuits," The 15th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2015), Nagoya University, Aichi, Jul. 2015.
- 4) N. Tsuji, N. Takeuchi, T. Narama, T. Ortlepp, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Magnetically coupled quantum-flux-latch with wide operation margins," to be published in Supercond. Sci. Tech.
- 5) 知名史博、奈良間達也、辻直樹、竹内尚輝、Thomas Ortlepp、山梨裕希、吉川信行、"超伝導マイクロストリップラインを用いた断熱型磁束量子パラメトロン間の信号伝達回路の評価、" 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、愛知県、2015 年 9 月。
- 6) C. Ayala, N. Takeuchi, Q. Xu, T. Narama, Y. Yamanashi, T. Ortlepp, and N. Yoshikawa, "A Timing and Energy Extraction Approach for Logic Simulation of VLSI Adiabatic Quantum-Flux-Parametron Circuits," The 12th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2015), Lyon, France, Sept. 2015.

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

超電導関連 ‘15/9 月－10 月の催し物案内

10/8-9

九州・西日本支部研究会／第 3 回材料研究会 合同研究会

KKR 山口あさくら

http://www.csj.or.jp/kyushu/2015/joint_1008_rev1.pdf

10/14-16

International Workshop on Cooling-system for HTS applications

くにびきメッセ、松江市

http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/IWC-HTS/invited_speakers.html

10/18-23

Magnet technology 24

Seoul, Korea

<http://www.mt24.org/index.php?userAgent=PC&>

10/27-31

International Conference on Magneto-Science 2015 (ICMS 2015)

ホテルブエナビスタ、松本市

<http://www.magneto-science.jp/icms2015/>

10/30

東北・北海道支部 20 周年記念事業

東北大学

http://www.csj.or.jp/tohoku/2015/20anniversary_1030_rev1.pdf

11/13

第 3 回関西支部講演会「超電導磁気力応用機器実用化に向けた試み」

大阪大学吹田キャンパス

http://www.csj.or.jp/kansai/2015/3rd_1113.pdf

11/16-18

International Symposium on Superconductivity (ISS2015)

タワーホール船堀、東京

<http://www.istec.or.jp/ISS2015/index.html>

11/17-18

International Symposium on Present and Future of Material Sciences

大阪大学豊中キャンパス

<http://thmat8.ess.sci.osaka-u.ac.jp/Meeting2015/>

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

11/22-25

Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics (ACASC)

Hangzhou, China

<http://www.doe.zju.edu.cn/ACASC2015/>

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒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 (8/20-9/19)

- 超電導き電ケーブルによるエネルギーの有効活用 鉄道総研「技術フォーラム 2015」 日刊産業新聞 9/02
- 千代田化工建設・住友電工など、北海道石狩市で超電導直流送電プロ 化学工業日報 9/03
- 古河電工、磁力 50 倍の超電導磁石、新蓄電システムに導入、実証実験を開始。 日経産業新聞 9/04
- 超電導技術を発送電に 実用化へ取組推進 効率良い電力供給に貢献 日刊産業新聞 9/08
- 超電導で電気を貯蔵 古河電工、線材にかけた執念 日本経済新聞 電子版 9/14
- 経産省など、2016 年度から超電導送電を実証 「高温」技術を実用化へ 電気新聞 9/18
- 蓄エネルギー技術 巨大なコマ、電力やり取り 日経産業新聞 9/18

(編集局)

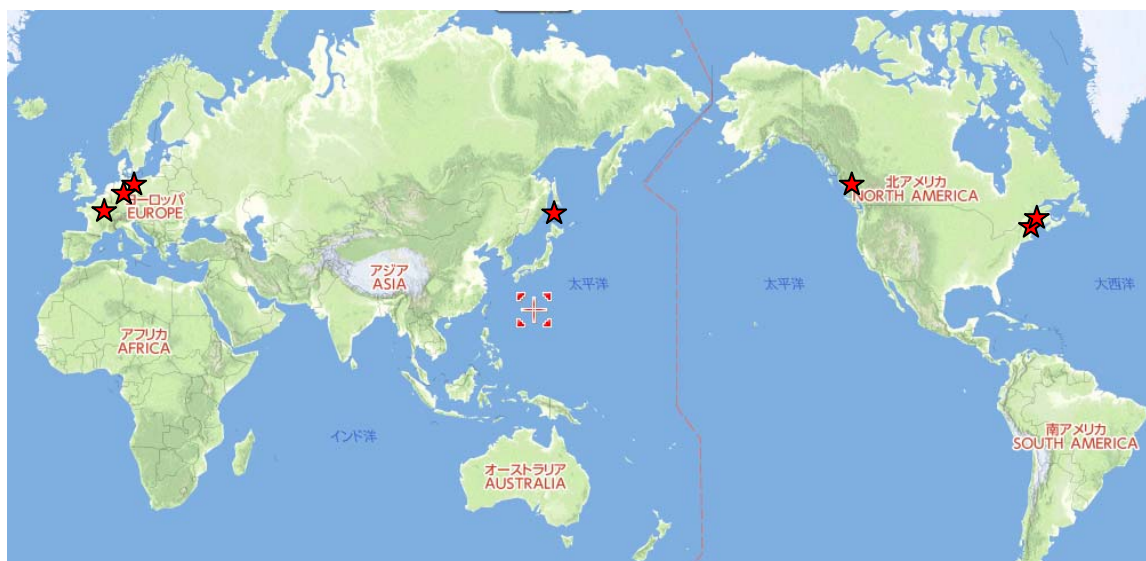
[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒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

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

▶基礎

新超電導体：-70 °Cで超電導

Max Planck Institute for Chemistry (2015年8月18日)

Mikhael Eremets氏率いるマックス・プランク化学研究所の研究者たちは、ヨハネス・グーテンベルク大学マインツ（マインツ大学）の研究者たちと共同研究し、150万バールの圧力下（地球中心部圧力の半分に相当する）では、硫化水素が-70 °Cで超電導になることを観測した。Natureで発表された研究成果では、マインツ大学研究者たちは超電導の新記録を確立するだけでなく、電流を室温で損失なく輸送する潜在的な方法も紹介した。

同研究チームは、水素が最大周波数をもつ格子中で振動することから、高压下かつ比較的高温での電気抵抗損失は、水素が原因であると信じている。研究チームが現在探しているのは、転移温度がより高い物質である。高温では、転移温度が緩やかに再び低下し始めると、電子構造に変化が起こる。高転移温度候補であることが明らかな水素は、高压下かつ室温で超電導になると予想されるものの、どんな実験にも困難をきたす3、4メガバールという圧力を必要とする。

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

本号のトピックスにはNatureでも引用された大阪大学の成果を掲載する。

Source: " Superconductivity: No resistance at record temperatures Hydrogen sulfide loses its electrical resistance under high pressure at minus 70 degrees Celsius" (18 Aug, 2015) Research News

<http://www.mpg.de/9366213/superconductivity-hydrogen-sulfide>

Contact: Mikhail Eremets, mikhael.eremets@mpic.de

▶電力応用

直流超電導送電に成功

石狩超電導・直流送電システム技術研究組合 (2015年8月6日)

石狩超電導・直流送電システム技術研究組合が、500メートルの超電導送電試験に成功した。これは、送電能力1.5 kA、100 MVAの世界最長級になる超電導直流送電である。この超電導ケーブルは、国内で初めて公道の下に埋設されているものである。また、新たな配管構造を採用して送電路の熱損失が半分に低減したという。

このプロジェクトは、北海道石狩市で高温超電導ケーブルを用いた直流送電プロジェクトを推進してきた経済産業省によって支援されている。プロジェクトは2段階で構成され、第1段階では、500メートルの高温超電導ケーブルを用いてさくらインターネットの「石狩データセンター」と接続し、太陽光発電設備による電力を送信することが目的である。そうすることで太陽光の電力を交流に変換せずにデータセンターで活用できる。第2段階では、2018年3月末までに北海道電力株式会社の変電所とデータセンターを2キロメートルの超電導ケーブルで結び、HEPCO社の商用電力を直流送電する予定である。

Source: " Researchers Succeed in Long-distance Superconducting DC Power Transmission" (6 Aug, 2015) Nikkei BP News

http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20150808/431400/?ST=msbe

http://i-spot.jp/wp/wp-content/uploads/2015/07/20150806_kaisenn1.pdf

Contact: Kenji Kaneko, Nikkei BP Clean Tech Institute

▶核融合、加速器

REBCO線材で小型核融合

Massachusetts Institute of Technology (2015年8月10日)

ほぼ無尽蔵にエネルギー資源が提供できる実用的な核融合発電の時代到来が近づいている。磁石技術の進歩により、新しい小型トカマク型核融合炉が、MIT研究チームによって考案された。核融合炉の大きさは、磁場の強さの4乗に比例するので、強磁場を閉じ込めるコイルが作れば、炉のサイズは

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

大きく減少する。高磁場コイル生成に使用される新しい市販REBCO超電導テープ線材を採用すると、核融合エネルギーを約10倍に増大させるには十分で、その上サイズがコンパクトなので、システム全体が安価になり、組み立てがより素早くできるようになる。

提案された核融合炉は、基本的な核融合研究のために、また潜在的なプロトタイプ発電所として設計されている。トカマク型（ドーナツ型）デザインを使用したこの核融合炉は、**Fusion Engineering and Design**誌中の論文（原子力科学工学部教授であり、MITプラズマ科学核融合センター長Dennis Whyte氏が共同著者を務めた）で解説されている。MIT研究チームは、この核融合炉の基本的概念とそれに関連する要素は、MITでの研究はもちろん、世界中の研究で数十年にわたって開発されてきた実証済みの原則に基づくものであると述べている。

現在フランスで建設中のITER核融合炉の費用は、約400億ドルと予想されている。ITERの直径のサイズが半分となる新デザインでは、その何分の1という少ない費用で、開発期間も短く、同じ電力を達成できると推定している。銅コイルを過熱せずに稼働させることが一度に数秒間しかできない今日の実験的核融合炉とは異なり、この新しい超電導磁石は、安定した電力出力で、核融合炉がより長期間稼働することを可能にする。

Source: "A small, modular, efficient fusion plant" (10 Aug, 2015) MIT News

<http://news.mit.edu/2015/small-modular-efficient-fusion-plant-0810>

Contact: Andrew Carleen, acarleen@mit.edu

MgB₂線で加速器用コイル

CERN (2015年8月5日)

高エネルギー宇宙線から宇宙飛行士を守る超電導磁石の開発を目的とする欧州宇宙機関超電導放射線シールド(SR2S)と呼ばれるプロジェクトが、CERN研究チームによって取り組まれている。ここでは、高エネルギー粒子を遮蔽するMgB₂超電導テープ線材で巻かれたレーストラック型コイルを使用してアクティブ磁場を生成するというアイデアの元、超電導磁気シールドの効果を検証するためにプロトタイプコイルが設計される。さらに、MgB₂超電導体はより高温(25 K)で操作できるため、極低温システムの設計を簡素化できる利点もある。

Source: "A Superconducting shield for astronauts" (5 Aug, 2015) CERN Updates

<http://home.web.cern.ch/about/updates/2015/08/superconducting-shield-astronauts>

Contact: Press Office, press.office@cern.ch

▶エレクトロニクス

量子ビットコンピューター

D-Wave Systems社 (2015年8月20日)

D-Wave Systems社は、1000個を超える量子ビットを搭載する量子コンピューターシステムの新モデル

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

ル、D-Wave 2X™を発表した。このプロセッサは、極めて専門的な古典的コンピューターの最大15倍の係数に匹敵する21000個の解を同時に算出する。またD-Wave 2X量子プロセッサの生得である計算時間において、古典的コンピューターよりも最大で600倍高速に解けることを示す。このシステムには、これまで生産システムで成功を収めてきた最も複雑な超電導回路とされるジョセフソン接合が128,000個集積されている。15 mK以下で稼動するこのD-Wave 2Xは、制御回路の精度を高めると同時にノイズを50 %削減し、高速化と信頼性向上の期待に応える。

同社のプロセッサ開発事業部副社長Jeremy Hilton氏は、「新モデルD-Wave 2Xシステムによって、この革新的な技術を独自のアプリケーションに活用する道が開けるなど、ユーザーにとって次のインセンティブにつながる。」と語った。D-Wave 2Xシステムの性能を披露するため、一連のバイオインフォマティクスをベンチマークとする論文や帰納論理プログラミング、また自然言語処理およびD-Wave 2Xシステム固有のコンピュータビジョン問題の結果等、arXivに投稿される予定である。研究成果の概要や論文のリンクは、同社のブログに掲載されている。

Source: "D-Wave Systems Announces the General Availability of the 1000+ Qubit D-Wave 2X Quantum Computer" (20 Aug, 2015) Press Release

<http://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-systems-announces-general-availability-1000-qubit-d-wave-2x-quantum-computer>

Contact: Beth Sanzone, dwave@launchsquad.com

世界最速の超電導集積回路

HYPRES (2015年8月5日)

HYPRES社は、最小接合サイズ0.7 μm 角、臨界電流密度が10 kA/cm^2 まで向上した集積回路を発表。同社が現在特許出願中の平坦化6層構造チップの新しい製造プロセス、RIPPLE (Rapid Integrated Planarized Process for Layer Extension)により、この集積回路が実現する。

同社はまた、臨界電流分岐オプションを備え、シャント抵抗を内蔵もしくは内蔵していないジョセフソン接合も提供している。なお、4.5 kA/cm^2 、100 A/cm^2 、30 A/cm^2 はもちろん、その他のカスタマイズ可能な特性パラメータも設定し、従来機能を備えた集積回路作製も引き続き取り組む。これらは、次世代スーパーコンピューターシステムやデジタルRFシステム、さらに高度な超電導機器などに要求される性能ニーズを満たしていく上で重要な進捗である。

同社の最高技術責任者 Oleg Mukhanov博士は、エクサスケール・コンピューティング開発など、高性能アプリケーションを開発する顧客のニーズに応える上で、同社が最もふさわしい企業であると確信を示している。

Source: "HYPRES increases speed of world's fastest commercially-available superconductor integrated circuits" (5 Aug, 2015) Newsroom

<http://www.hypres.com/newsroom/hypres-increases-speed-of-worlds-fastest-commercially-available-superconductor-integrated-circuits/>

Contact: contacts@hypres.com

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

▶バルク

レクサス宣伝用ビデオにバルク磁気浮上デモ

Lexus (2015年8月5日)

レクサスのホバーボードプロジェクトは、IFW Dresden社とevico GmbH社からなる研究チームにより18ヶ月前に始まった。走行試験では、最長200メートルにも及ぶ永久磁石レールを敷いて、ホバーパークが特設された。水面上を走行するなど、スケートボードでは今まで実現不可能な技が披露された。このプロジェクトで特徴的なのは、超電導体が液体窒素により-197 °Cに冷却される技術である。磁石と超電導体間の磁場は、ライダーがボードの上に立ったりジャンプしたりすることが十分できるほど力強いものである。プロスケートボーダーでホバーボードテストライダーを務めたRoss McGouran氏は、「スケートボードをずっとしてきたが、摩擦のない状態でホバーボードに乗るためには、全て新しいスキルを学んでいるような気がした。」と述べ、このテストは成功に終わった。本号の読者のQ&Aコーナーにて詳説する。

Source: "New film for the latest Amazing in Motion campaign shows final testing in Barcelona" (5 August, 2015) News

<http://www.lexus-int.com/news/lexus-hoverboard-ride-revealed.html>

Contact: Manager, PR Operations, erica.haddon@tgb.toyota.co.uk

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

「応用物理学会」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
デバイス研究開発部
部長代理 主管研究員 安達成司

9 月 13～16 日に(公社)応用物理学会主催の第 76 回応用物理学会秋季学術講演会が開催された。応物の春秋の講演会はこれまで大学を会場として開催されていたが、今回は名古屋国際会議場で行なわれたため、少しばかり学会の雰囲気がいつもと違ったように感じられた。ここ数年の応用物理学会には旧態依然とした活動をどんどん変えていこうとしている姿勢が感じられる。学会誌の体裁が随分変わったことに気付いた学会会員は多い筈である。変革にチャレンジする精神は大いに評価できると思う。秋の講演会会場もその一つの取組みかもしれない。ちなみに来年・再来年の会場も大学ではない会場での開催が予定されている。

報告者は、超伝導分科:『アナログ応用および関連技術』のセッションにおいて、高温超伝導 SQUID 研究を中心に情報収集を行なうために参加した。同セッションでは 32 件の口頭発表があり、18 件が低温超伝導(LTS)、14 件が高温超伝導(HTS)を扱ったものであった。LTS では STJ, MKID などの検出器関連の発表がほとんどであった。産総研、埼玉大、理研からの発表が多かった。LTS で実現できる究極性能を使った応用が主であったが、THz 帯の産業界での実用を目指した研究もあった。一方、HTS では SQUID 関連の発表が 7 割以上を占めていて、九大、岡山大、豊橋技科大などから発表があった。磁気マーカーを用いた医療応用(九大)、磁化率計開発(岡山大)、超低磁場 NMR(豊橋技科大)について進捗が報告された。これらは JST プロジェクト“S イノベ”において SQUID 実用機器開発を進めている機関であり(ISTEC も参画)、チームとしての連携が研究効率を上げているように感じられた。また、宮戸(阪大)、藤原(山梨大)は従来から継続して行なっている rf-SQUID を使用した STM 開発、HTS 薄膜を用いた送信用フィルタに関してそれぞれ発表した。地道な研究から、共振周波数の制御方法開発、フィルタの耐電力性能向上へとそれぞれ着実な前進が見られている。

超伝導分科の HTS アナログ応用といえば、薄膜技術を使った研究がそのほとんどであったが、バルク体を使用した送信用フィルタの研究(齋藤(山梨大))や HTS 超伝導線材を使用する無線電力伝送(関谷(山梨大))や検出コイル(石田(九大))の発表もあった。

HTS-および LTS-SQUID を地磁気計測に用いる検討がそれぞれ波頭(ISTEC)、河合(金沢工大)からあった。双方とも環境ノイズの影響に言及し、SQUID の設置場所として都市部から遠く、電車や高速道路から離れた適地を見つけていた。今後、どのような知見が得られて行くのかが楽しみである。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

EUCAS2015 報告 (Y 系線材部門)

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 兼 線材・パワー応用研究部長 和泉輝郎



2015 年 9 月 6 日から 10 日までの 5 日間にわたってフランスのリヨンで EUCAS2015 が開催された。この学会には、世界中から 1137 名が参加し、毎回のことながら、国別では日本からの参加者が最も多く、今回も 200 名を超えていた。講演では、10 件の基調講演をはじめとして、1060 件の講演が行われた。本稿では、本学会における Y 系超電導線材プロセスに関する情報をまとめて報告する。

基調講演では、筆者の講演を含む 2 件が Y 系超電導線材プロセスを主テーマとするものであった。筆者は、日本における Y 系超電導線材プロセス開発の歴史から現状、将来への展望についてまとめた。ここでは、IBAD 法の開発や CeO_2 層の自己配向化現象の発見などの日本の貢献を紹介した後に、磁場中特性の向上と細線化の効果に関して最近の動向を説明した。磁場中特性の向上に関しては、PLD 法において有効性を確認した BHO 人工ピンの効果を説明し、最高特性として $I_c(\text{min.})=141 \text{ A/cm}^2 @ 77 \text{ K}, 3 \text{ T}$ を紹介した。また、これを適用することで液体窒素中において運転可能な 3 T-MRI が期待できると応用への展開の可能性を示した。細線化線材に関しては、長尺加工と共にコイル形状で交流損失が低減できているのは日本だけであることと共に、この技術が MRI 等の応用で制御が必要な遮蔽電流による磁場を抑制する効果を証明した。さらに、今後の線材開発の方針に関して、近未来課題として「低コスト化」と「性能向上」を挙げ、さらに中長期的課題として「等方線材」という新しい概念の提案と「超電導接合」開発の必要性を説明した。最後に、これからの高温超電導業界における成功の鍵として材料分野と機器分野の関係者がターゲットと絞って商品化にもっとも効果的、効率的な仕様の検討を共同で行い、一日も早い実用化を実現することが、直面する“死の谷”を越えるために必要なことであるとの考え方を紹介した。

一方、ICMAB (スペイン) の Puig 教授は、Y 系超電導線材に関する世界の開発動向を総括した。まず、世界的に量産を実現もしくは目指している会社の生産能力に関する情報を整理した。主要な項目について数字を拾うと表 1 の通りになる。これによると、ドイツ勢の台頭がクローズアップされていた。尚、この表に含まれていない有力企業としては日本のフジクラと日/露の SuperOX に加え、米国の STI 社が製造能力を整えている。さらに、教授は、磁場中特性の向上、特に人工ピンに関して世界的に取り組まれている材料、プロセスに関して解説を行った。まず、ピンの形態の整理を行い、ロッド形状を形成するのが PLD 法や MOCVD 法の気相法で、球状粒子を形成するのが CSD(MOD)法と共蒸着法であり、もっとも有名なのは BZO に代表される BMO 系 ($\text{M}=\text{Zr}, \text{Sn}$ 等) を気相法で形成するシステムで、 B/I_c の特性向上に効果的である。最近のトレンドでは BaHfO_3 と共に $\text{Ba}_2\text{Y}(\text{Nb}_{0.5}\text{Ta}_{0.5})\text{O}_6$ 等が効果的であると報告されている。また、MOCVD に対する BZO の高濃度添加や MOD 法における BZO 粒子、 Y_2O_3 粒子と上述のロッド材とのハイブリッドなどが注目

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

あると紹介された。教授は特に低温高磁場応用に注目しているところではあるが、最後のメッセージとしては奇しくも、筆者の結論と同じく“Winning Story”として、分野を超えた関係者の協力が鍵であるとの主張であった。

表 1 世界の線材メーカーの供給線材の仕様リスト

会社名 (国)	生産能力	単長	プロセス
Bruker (独)	25 km/年/4 mm	600 m	PLD/ABAD
THEVA (独)	150 km/年/2 mm	1 km	Co-eva/ISD
D-nano (独)	計画 : 200 km/年 20-100	m	CSD/RABiTS
SuperPower (米日) 1000	km/年	500 m	MOCVD/IBAD
SWCC (日)	20 km/年	125 m	MOD/IBAD
SuNAM (韓)	1000 km/年	1 km	Co-eva/IABD

その他の Plenary Talk では、Y 系超電導線材だけに限った話ではなかったものの Northwest Institute (中国) の Zhang 教授の講演で一部、紹介があった。教授は、中国における材料および応用の現状に関するレビューを行った。Y 系線材プロセスに関する活動としては、国の研究開発プログラムとして 1 km-500 A 級の線材を目指して設備を整えているところで、基板・中間層から超電導層まで 1 km 対応装置を整え、超電導層を MOCVD 法で形成する手法では 1 km-280 A の長尺線材を、PLD 法による手法では 500 A-600 A の高特性線材を既に作製しているとのことであった。

一般講演においては口頭講演で多くのメーカー、研究機関から最近の開発動向に関する報告があった。紙面の制限もあるので、ここでは各機関が今学会で初めて紹介した内容について以下にまとめる。

Houston 大 (米国) の Selvamanickam 教授は、MOCVD 法による線材における人工ピン止め点制御による磁場中特性向上技術開発において、“Advanced MOCVD”と称した手法により特性向上を図っている。同法は、温度、ガス流などを精密に制御することが可能なリアクターを特徴とする手法で、これにより製造条件の厳密制御により磁場中特性も向上し、 $I_c=3346 \text{ A}/12 \text{ mmw}(2788 \text{ A}/\text{cmw})@30 \text{ K}, 2.5 \text{ T}(B//c)$ で最高の Lift Factor 値(=9)を実現したとのことであった。SuperPower の Nakasaki 氏は、詳細は説明がなかったが、“enhanced AP”という人工ピン止め点を導入し、磁場中特性の向上に成功したと報告している。

同様の磁場中特性向上に関しては、フジクラ (日本) の Igarashi 氏から ISTEK で開発された BHO 人工ピン止め点の導入に着手した旨の説明があり、まだ 10 m 長ながら、 $I_c=907 \text{ A}/\text{cmw}@4.2 \text{ K}, 16 \text{ T}$ の高い磁場中特性を得たとのことであった。

一方で、SuperOX Japan (日本/ロシア) の Lee 氏からは、IBAD/PLD 法による長尺線材の動向を紹介すると共に、歩留まり向上の新しいアプローチとして IBAD 系中間層基板において、IBAD/LMO までのところで配向不良が検知された際に、再度 IBAD 層を付与することで不完全部が修復され、均一性が向上することが紹介された。また、STI 社 (米国) の Huh 氏からは、同社で進めている製造設備の準備状況の紹介があり、1 km 対応の装置システムを整えたので今後、積極的に受注していくとのアピールがあった。

上記の通り、磁場中特性を中心に性能向上の動きが依然として活発であることと共に、製造販売に向けた設備整備が世界中で進んでいることを感じた。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

EUCAS2015 報告 (機器応用)

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所 線材・パワー応用研究部・普及啓発・国際部
特別研究員 山田 穰

EUCAS 2015 がフランス南部のリヨンで 9 月 6 - 10 日に開催された。本稿では、機器応用についての報告を主に行うが、参加者などの情報は以下の通りであった(町氏、和泉氏の報告も参照のこと)。主催者発表によれば、参加者 1137 人(内学生 235 人)、発表予稿 1060 件、展示 33 社で、国別参加者は、またしても日本が 1 位の 200 人で、ドイツ 110 人、中国 70 人であった。発表は、Plenary 12、招待 30、ポスター 775 件で、その内訳は、応用 305、材料 189、エレクトロニクス 163、線材 115 であった。

会議の冒頭、表彰があり、長年超電導の発展につくし、特に最近 Roebel 導体の開発を主導してきた KIT の Goldacker 氏に ESAS(欧州応用超電導)賞が授与され、これまでの開発に関する講演があった。

今回の会議で目立ったのは以下のものである。いずれも欧州に開発拠点があるため、それを中心とした欧州の活動に力点が置かれていたように思う。

①ITER 関係の核融合、CERN 関係の加速器共に、欧州に本部がある (ITER は後述する大型コイルなどの受け入れ試験棟などの建設が急ピッチで進んでいる)。2030 年までにエネルギー消費量は 60 % 増となり、ITER はクリーンな発電システムであり国際協調で開発する意義が大きいことを力説していた。

②MRI を含む強磁場コイル

現在 Saclay で 11.7 T の世界最高磁場の MRI の建設が進んでいる。見学ツアーもあり日本人を含む多数が参加していた。

③Y 系線材の進展:特に展示も盛んであり、長尺作製から販売を含めて応用への展開を図っている。

④AmpaCity (高温超電導ケーブル) などの高温超電導電力応用

ドイツのエッセンで昨年夏に系統連続通電を開始したため。ドイツ電力会社 RWE ほかに Siemens、Nexans、KIT など総力を挙げてやっていると言っても過言ではない。

⑤MgB₂ の機器応用



EUCAS2015 会場 (リヨン国際会議場)



会議場からの風景。ローヌ川を望む。

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

線材メーカーの Columbus 社がイタリアにあり、かつ、応用で長尺が多量に手に入るため。

以下、上記の中で主要な発表を紹介する（聴講できたものに限る）。

①ITER 関係の核融合、加速器：初日 7 日月曜の Plenary で Dr. Bernard Bigot (Director-General of ITER Organization) が“Superconductivity and Fusion: an enabling technology for the success of ITER”と題した IETER の現状を紹介した。日米欧韓国ロシア中国インドの各国分担で進めているが、構成各大型コイル（最大 360 トン）の 70 % はもうできており、順調に進んでいる様子が伺えた。関係する日本企業は、東芝、日立、古河、JASTEC、三菱重工などである。また、高温超電導リード(Bi2223)も使われている。

翌日火曜の Plenary では、中国の Prof. Zhang (President of Northwest Institute for Nonferrous Metal Research Xian) が“Status of superconducting materials and applications in China”と題して、中国の超電導全体の開発現状を紹介したが、中国も ITER のメンバーであり、それに使用する線材の金属系(NbTi, Nb₃Sn)線材の量産化は著しく進展している。日本と遜色ないレベルであった。一方、MgB₂線材や Y 系長尺線材の開発会社 3 社が立ちあがっていたのは、筆者にとっては目新しい情報であった。鉄系超電導体の線材化も CAS (中国科学院) で取り組んでいるが、まだ、 $J_c=2 \times 10^4$ A/cm²(4.2 K, 10 T)と低い。

②MRI を含む強磁場コイル開発：10 日月曜の Plenary Pr. Denis Le Bihan (Member of the Institut de France and of the Academy of Technologies, head of NeuroSpin, CEA, Saclay, France) による “Perspectives for Ultra-High Field Magnetic Resonance Imaging”および一般オーラル講演の“Iseult/INUMAC Whole Body 11.7 T MRI Magnet manufacturing status” (VEDRINE ら：CEA、Siemens Healthcare と ALSTOM) の講演で、Saclay で開発中の 11.7 T MRI を含む高磁場 MRI に関して発表があった。MRI は通常 3 T 程度であるが、高磁場化することで脳の機能的な働きが画像で認識できるようになるとのこと。同様に、日本の NIMS から西島氏が Successful upgrade of 920 MHz NMR magnet to 1020 MHz using Bi-2223 innermost coil で世界最高磁場の NMR の成功を発表した。

また、MIT の Hahn 氏(フロリダ高磁場研)は、No-Insulation HTS Winding Technique for High-Field NMR Magnets の発表で高温超電導 NMR 用コイルの基礎開発を紹介した。基礎的な非絶縁コイル（略称 NI コイル）である。これは、線間の絶縁材が無いコイルで 2 - 3 年前に MIT の岩佐氏から提唱されたものであり、今や、日韓で盛んに検討を行っている。絶縁が無いことでコイル電流密度があがり、コイルはコンパクトになるが、励磁速度が遅くなるため、使用用途に制限がでてきそうである。彼は Sunam 社と組んで昨年 NI コイルの 26 T コイルを完成させている。この後、励磁速度が遅い点を改良するため、コイル巻線間を SUS などの金属材料をはさんで作る HTS コイルも検討されている。(発表：A (RE)BCO Pancake Winding with Metallic Insulation(LECREVISSE(Saclay) と IWASA 氏(MIT)))。

③Y 系線材の進展：概略のみ（詳細は和泉氏報告参照）。現在、欧州では線材開発プロジェクト Euro Tapes Pj (2012-2016) を進めており、Theva 社、Bruker HTS 社などがある。まとめると以下の通りであるが、特性も長さも日米韓より低いのが現状である。

例：Bruker HTS 社 能力 4 mm 幅の線で 25 Km/年。単長は 600 m。Theva 社：共蒸着法の GdBCO、基板 ISD 法-MgO で、単長は 1 km。全自動運転で成膜中の品質検査を行っているが、昔と同じ ISD 法であるので、恐らく昔と同様磁場中 I_c は低いと思われる。deutsche nanoschicht 社：安価な製法の全溶液法 (RABiTS 上)。量産機一部構築中で今年から顧客用資料提供とのこと。Oxolutia 社：インクジェット方式のユニークな製法を採用している。最後の 2 社はこれから長尺を本格化。

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

④AmpaCity (高温超電導ケーブル) などの高温超電導電力応用

初日の Power transmission cables and storage のオーラルセッションで、Ampacity ほかに米欧の HTS ケーブル、限流器、SMES の発表があった。AmpaCity Project –Update on World's First Superconducting Cable and Fault Current Limiter Installation in a German City Center STEMMLE ら。1 km-10 kV の 3 層同軸ケーブル (Nexans 社製) を現在使用されている電力系統の中に設置し運転している。限流器もセットし、下流の 4 つの変電所をなくしたとのこと。2 年の長期運転で実用化への課題を探っていく。前週の会議 ISIS で現地も訪問したが、超電導機器が設置されている変電所は外部からは全く超電導が動いているとはわからず、限流器も音も立てず、全体が街と調和して運転されている印象を受けた (写真参照)。

元 EPRI の Grant 氏は、Lessons Learned From the 1998-2004 US Pirelli-Detroit Edison Cable Demonstration と題して、過去の米国の電力ケーブルプロジェクトから学ぶ教訓を述べた。米国では、当時ケーブルプロジェクトは Pirelli 社や Detroit Edison 社の民間 (investor-owned private utilities) で進められており、州、国の援助なども関係なく、民間ゆえの投資効率の観点、また規制緩和の影響から中止になった。長期的視野からの進め方ができなかったことを他山の石として欧州 (純民間電力でないとのこと) では進めてほしいと述べていた (これは聴講できなかったので、予稿から)。

また、ブラジルでも 10 m 級であるが HTS ケーブル開発が進んでいる。2010 年からブラジル電力庁のもと進んでいる (Development of the First Brazilian Project on Superconducting Power Cable MARCELO ら)。

欧州でのケーブルや限流器の開発が活発なことを受けて、2 日目火曜日の午後に、特別セッションが組まれた。2 A-LS-O1 Large Scale -Industries and utilities 司会 : Bruzek (Nexans) & Hadjsaid (Grenoble-INP / G2Elab)。目的は、世界で進む電力機器導入試験の経験から、今後の課題などを共有、議論しようというものである。パネラーは、Introduction Martini 氏 (RSE イタリア電中研)、Ampacity project (1 km, 10 kV, 40 MVA HTS cable with FCL) Merchel 氏 (RWE)、Yokohama project (240 m, 66 kV, 200 MVA HTS cable) Ohya 氏 (Sumitomo)、Motors for Aircraft Berg 氏



高温超電導設備全景 (変電所内)。矢印の箇所に、ケーブル(Bi)の出口、限流器 (下記) が収納されている。



超電導限流器 (YBCO 系線材を使用)。上図矢印に収納されている。

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

(Airbus) 、Italian Fault current limiters Gulliano 氏 (RSE) である。各自が自分たちの結果や見解を述べたあと、壇上に出て今後の課題などを聴衆と議論した (住電からは林氏) 。

特に、印象に残ったのは、Nexans 社の Shmidt 氏の発表で、Ampacity エッセン市のケーブル、限流器の導入にあたっては、丁寧に住民と液体窒素 (高さ 16 m のタンクを設置) や超電導機の意義、効果を説明し、positive な反応を持ってもらうよう努力したこととのコメントであった。技術だけでない努力が最後にはインフラとして必要になる。また、コストやケーブル、機器の能力だけでなく、冷却への R&D も大いに必要であること、信頼性を如何に高めるか (世論の印象も踏まえて)、法規制の問題も課題として挙げられた。信頼性に関して、聴衆から Ampa City の巨大な液体窒素タンクを有する冷却の課題はないのかとの質問に、「冷凍機を使う場合のようにメンテが要らない、2-3 週間に 1 回液体窒素会社が来て静かにタンクに液体窒素を補充するだけであり、安全である」との回答であった。この点は、日本で冷凍機冷却を進めているグループと今後大きな議論が望まれる。



特別セッション (YBCO 系線材を使用)。各自発表の後、壇上の椅子に座ってパネル討論を行った。

⑤MgB₂ の機器応用

今回、多数の MgB₂ 機器の発表があった。以下はその一例である。

2M-LS-O1 Sep 8 - Large Scale -Superconducting machines

Design and testing of real scale MgB₂ coils for SUPRAPOWER 10 MW wind generators

SARMIENTO ら。TECNALIA 社, Spain, Columbus 社, Italy。

Long length critical current measurement of MgB₂ wire in a coil : WOZNIAK ら, Siemens 。

The BEST PATHS project on MgB₂ superconducting cables for very high power transmission

BALLARINO ら。CERN, Nexans 社ほか

特に、最初の MgB₂ の風力は、設計で低温動作でも従来の常電導風力にまさるメリットが出せるとして、KIT などを含めて MgB₂ 大型コイルの試作、冷却法の検討が進んでいる。ReBCO に比べ性能は劣るがコストは現在大幅に安いので、彼らは今すぐ作って採算がとれるものとして進めている。

まとめ

高温超電導に関しては、Ampacity プロジェクトのケーブルが最も華々しい。ケーブルは、Bi 線であるが、限流器は Y 系線材である。韓国済州島の 500 m、1 km のケーブル試験に続き、こうしたデモが世界の各地で活発に行われると、世間の見る目 (特に信頼性に関する懐疑性) が変わってくると思われる。Ampacity のケーブル試験を実施しているドイツ RWE 電力会社では、試験設備完成、通電開始、通電状況の報告などに関して、適宜、積極的に広報を行っており、これまでに 100 件以上の報道が TV、雑誌、新聞を通じてなされたとのことである。日本においても、こうした活動で導入へ向けた各社、世論へのバリエを取り除くことが重要と思われた。同時に英語における発信も必要であろう。

超電導 Web21 トップページ

超電導 Web21

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

EUCAS2015 報告 (その他全般)

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所 線材・パワー応用研究部
主管研究員 町 敬人

ヨーロッパの超電導応用の会議である第 12 回の EUCAS2015 は参加者 1137 名、講演数 1060 件という規模で、フランスのリヨンで行われた。Exhibition は Registration 開始日から最終日までという長期間の展示が可能であるためか、33 社もの企業が出展していた。日本からの参加者は 200 名を越え、それに次ぐアメリカやドイツの 100 件余りと比べて倍近くの参加数であった。会議は 10 人の基調講演、32 のテーマに分けられたパラレルのオーラルセッション、および 3 日間に渡るポスターセッションによって構成されていた。以下、線材および線材応用に関する講演について報告する。

[基調講演等]

基調講演では、まず ITER の General director である B. Bigot が各国の超電導核融合について講演し、中国の EAST-ASIPP、韓国の KSTAR、インドの SST-1 など 2 m 未満の実験炉がすでに開発されており、これから開発されていくものとしてドイツの W7-X (計画中)、日本の JT-60SA が 2019 年に、そして ITER は 2025 年に完成する可能性があるということであった。ISTEC の和泉は日本の coated conductors の進捗について講演した。中国の有色金属研究所の Zhang は主に NbTi や Nb3Sn の超電導線材の開発現状について講演した。ICMAB の Puig は coated conductors について各研究機関の開発現状についてレビューを行い、ピン止めセンターとして nanocomposite が重要であると講演した。フランス NeuroSpin の Bihan は全身用 11.7 T の MRI を今年度中に完成させる予定であると講演した。システム構築は NeuroSpin が行うが、マグネットは CEA が開発していた。

[マグネット応用]

マグネット作製として興味を持ったのは、まず NIMS の西島らの Bi2223 インナーコイルを用いた 1020 MHz(24.0 T)の NMR 用マグネットの成功である。6 ヶ月間高安定電源を用いて稼働しており、安定度は 1 ppb/10 h で均一度は水素スペクトルで 0.7 ppb を達成したことを確認していた。次に興味を引いたのは、MagLab(USA)の Hahn らの、REBCO のみのマグネットで 26 T(35 mm ボア)の磁場を発生したことである。上下中央に向かって線幅を狭くした非絶縁(NI)の REBCO ダブルパンケーキコイルを 26 個スタックして、中心磁場で 26.4 T の世界記録を達成していた。線材は SuNAM 製であった。クエンチテストも行ったがマグネットにダメージは生じなかった。次世代のマグネットとして、6 mm 幅の HTS テープを 70 km 長用いて、ボア径 54 mm で 47 T の均一磁場を発生する All REBCO マグネットを目指すということであった。また、REBCO インサートコイルを用いた 8.7 T マグネット Shaking コイルによる遮蔽磁場の低減実験を試み、72 %の遮蔽磁場が低減できたと報告した。CEA/IRFU の Pierre らは、全身用 11.7 T の MRI マグネットの開発状況について報告した。線材は NbTi を用い、ボア径 900 mm、安定度 0.05 ppm/h、均一度 0.5 ppm/22 cm-DSV 以下というスペックで、総重量 132 ton、直径 5 m、長さ 5.2 m、動作電流は 1483 A という巨大なマグネットである。コイルは 170 個のダブルパンケーキで構成され、不整磁場低減用の遮蔽コイルが 2 つ取り付けられている。コイル部分は遮蔽コイルも含めて完成しており、サーマルシールドや真空容器などの納入を待って組み立てに入るという事であった。低磁場での磁場分布測定は終了しており、Z2 と X11 の分布は大きいもののクライオシムコイルで取り除ける範囲であった。

超電導 Web21

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

が、Y11 については除去できないので、鉄シムを追加する必要があるということであった。PSI (スイス) の Calzolaio らは、 Nb_3Sn 線材を用いたプロトン照射用の 90° ダイポール型のガントリーマグネットの概念設計について講演した。癌治療に期待されるガントリーマグネットは磁場変化が速いため($\sim 0.1 \text{ T/s}$)に Nb_3Sn 線材では交流損失が問題となる。発生する熱を冷凍機による強制冷却によって解決しようという試みである。東芝の小柳らは固定磁場強集束型(FFAG)加速器を REBCO 線材で実現するためのデザインと実験結果について報告した。コイル作製において大きな問題となるのが REBCO 線材の幅と厚みの分布であるため、これらの値を 10 mm 毎に RTR で測定できるシステムを開発し、サブミクロンまでの精度で線幅の長さ依存性を測定した。これを用いて、例えばある線材の標準偏差が $19.3 \mu\text{m}$ であることを確かめ、これらをコイル設計に活かしていくということであった。

[線材特性]

ジュネーブ大の Carmine らは、20 T 級の加速器用マグネットおよび 30 T 級のソレノイドコイルを作製するために REBCO 線材を販売している各社(AMSC, BRUKER, Fujikura, SuNAM, SuperOX, SuperPower)の線材の磁場中評価を行った結果を報告した。4.2 K、19 T での測定を中心に、磁場角度依存性、 J_c の温度と磁場へのスケーリング、磁場中曲げ試験、熱伝導率、熱領域拡散速度を評価し、各社の線材の特性のバランスの違いについてまとめていた。Durham 大の Paul らは、核融合炉を目指して上部臨界磁界 B_{c2} の歪みと温度の依存性を測定し、要素的ピン止め力 F_p が B_{c2} のベキ乗に比例し、ベキ乗の大きさは 60 K から 76 K の温度で変わらずに 1.65 であることを見出していた。

[低交流損失・遮蔽磁場]

九大の岩熊らは、スクライビング加工した線材を用いて MRI 用のテストコイルを作製し、 I_c 近傍でのオペレーションによって細線化していない線材で作製したコイルよりも遮蔽磁場の時間変動が早く緩和することを報告した。デンマーク工科大(DTU)の Wulff らは、2 段階構造を持つマルチフィラメント線材を開発したと報告した。これはハステロイ基板にエッチング法によって 1 mm 以下の溝を形成し、その基板を使ってバッファや超電導層を成膜することで、2 階建て構造のマルチフィラメントとし、溝内にも超電導層が形成されるために、溝面積分の I_c 低下を防げるという発想のものである。フィラメント間の絶縁を確保しつつ、 I_c 低下が少ないという点で興味深い研究であった。Inkjet 法による細線化について、ケンブリッジ大の MITCHELL-WILLIAMS らは(Y,Pr)BCO を、OXOVLUTIA の Albert らは研磨した SS 上の YBCO 成膜を報告していた。Twente 大の Otten らは、ストレスに弱い ROEBEL ケーブル(40 MPa で I_c 劣化が生じる)を強化するためにエポキシ含浸(含浸によって I_c が 25 %低下するものの)を行って 253 MPa まで強度を高めたので、加速器に必要な 110 MPa を越えられたと報告した。ROEBEL ケーブルを航空機の配線に用いようという試みが始まっていると Russian Scientific R&D Cable Institute の Fetisov らが報告した。

[ケーブル]

JSC R&D center の Sytnikov らは、ロシアでの 50 MW-20 kV の AC および DC ケーブルテストの現状について、DI-BSCCO 線材を用いて 200 m の AC ライン (3 相それぞれ)、および 860 m の DC ライン(2500 A)の敷設と通電テストは予定通り完成したので、2016 年までの耐久テストに入ったと報告した。中部大の筑本らは石狩プロジェクトの概要と進捗について、同じく宮田らは敷設するケーブルシステムへの熱流入とペルチェ電流リード(PCL)とのバランス計算の結果を報告した。

[線材作製]

SuperOX(Russia)の Samollenkov らは、REBCO 線材を顧客に合わせた全てのカスタマイズ (Ag

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

のみ、Cu メッキ、金属貼り合わせ、ポリイミドワニス被覆、ポリイミドラップ被覆、線材積層など）が可能であることをアピールし、いくつかの実例を上げていた（線材作製については S.Lee-SuperOX Japan が別途講演を行った）。例えば、電流リード、線材を交互にスタックした 2G バルクと呼ぶ擬似バルク、Cu メッキした線材を使った ROEBEL ケーブル、さらにはメッキ前の線材を打抜き加工して ROEBEL 形状の加工した後に Cu メッキを施して I_c 劣化を防止した線材、Biffar コイル形状にして限流器に用いる構造としたもの（2 つはロシアへ 1 つはフランスへ出荷）などである。2014 年から販売を開始した後発線材メーカーであるため、多くの研究機関に様々な形態の線材を提供して特にヨーロッパでは広く使われ始めていると感じた。さらには 2016 年度にはロシアでの線材作製が開始することになっており、12 mm 幅線材の年間供給長は 300 km に達する予定であるとのことであった。Bruker の Usoskin らも SuperOX と同様に ROEBEL パンチング後にメッキした線材構造の提案を行っていた。メッキ技術の向上により、これまで線材端部が dog boning していた形状を低減することができていた。12 mm 幅での 4.2 K、18 T 中 36 m 長の J_e は 720 A/mm^2 の世界記録であると強調していた。長手方向のバラツキは標準偏差で 2 % であった。また 4 mm 幅短尺での測定では 31 T 中で 309 A の I_c であり、高磁場応用への提供を強くアピールしていた。OXOLUTIA(Barcelona)の Vilardell らは、RTR-inkjet 装置を開発し、これを用いてステンレス(SS)基板上に Y_2O_3 を 35 m/h で成膜、YSZ(ABAD)/SS 上に CZO を 28 m/h で成膜、 $\text{CeO}_2(\text{PLD})/\text{YSZ}(\text{ABAD})/\text{SS}$ 上に YBCO を 20 m/h で成膜する等を試みていた。

[接合]

Schneider Electric（ドイツ）の Bäuml らは、FCL を構築するための REBCO 線材の常伝導接合の方法として、Ag シートで包んだクランプ方式、クランプ後に接着剤で固める方式、および RMS ハンダ接合を試みていたが、最も良かった RMS ハンダ接合でも $200 \text{ n}\Omega$ 以上の接合抵抗であった。Andong 大（韓国）の Shin らは超音波接合による銅メッキされた REBCO 線材接合を試みていた。超音波は面に広げることが難しいので、超音波ホーンおよびアンビルチップは突起を有している。接合抵抗は、超音波ホーンチップの面積比が 17 % 程度の場合に最も低く約 $200 \text{ n}\Omega$ であった。超音波アンビルチップの形状を変更して約 $120 \text{ n}\Omega$ まで低減できたが、これは通常のハンダ接合と同程度であり、まだ超音波接合ではハンダ接合に替わることはできないと思えた。

[評価技術その他]

Wollongong 大（オーストラリア）の Wells らは、磁束侵入の時間変化を数 ms の時間分解能で観測できる高速の磁気光学イメージング装置を開発し、YBCO の磁束および電流の時間変化を観察した結果を報告した。ICMAB の Cavado らは、YBCO の高温中の電気抵抗の変化から酸素の出入りをモニターすることを試み、拡散係数を見積もることはできたが、ホール係数で酸素欠損量をチェックした結果、酸素導入時の電気抵抗はアンダードープではうまく対応がつかず、拡散速度が長いためではないかと推察していた。ケンブリッジ大の Geng らは YBCO コイルを作製した場合の永久電流スイッチ(PCS)として、通常のヒータではなく交流磁場を印加することでスイッチング可能な機構を作製し、30 Hz の交流磁場でのスイッチングを確認していた。ATZ（ドイツ）の Werfel らは、YBCO バルクを用いた MagLev についてレビューを行い、Chengdu（中国成都）の 40 m、IFW ドレスデンの Supra Trans II の 80 m、リオデジャネイロの Cobra の 180 m について紹介があり、水平方向の安定性や永久磁石の Biasing などについて説明があった。

[新超電導体]

線材関連ではないが、最近話題の Hydrogen 系の超電導についてジュネーブ大の Putti がレビューをした。2015 年 8 月の Nature に掲載された A.P.Drozdv らの高圧下での H_2S の超電導転移温度

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

が 200 K を越えたことに関連して、 T_c は圧力の増加とともに水素(H_2S)を重水素(D_2S)に替えることで T_c の同位体効果が観測され、 $T_c \propto M^{-\alpha}$ で $\alpha \sim 0.3$ が得られており、BCS 超電導体であろうと考えられているようであった。その他の物性値としては、 $B_{c1}(0)=30$ mT, $B_{c2}(0)=20$ T, $\xi=2.5$ nm, $\lambda_{ab}=125$ nm などが得られていた。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒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】

鉄道と超電導（その 5）

～浮上式鉄道用高温超電導磁石の開発②～

公益財団法人鉄道総合技術研究所
 浮上式鉄道技術研究部 低温システム
 研究室長 小方正文

鉄道に超電導技術を適用する試みは複数ある。鉄道総研で研究テーマ化された内容だけでも、超電導磁気浮上式鉄道（超電導リニア）、超電導き電ケーブル、車両用高温超電導変圧器、超電導磁気軸受を用いたフライホイール、SQUID によるレールの非破壊検査等がある。今回の連載では、この中からいくつかのテーマについて、鉄道総研の直接の担当者が分担して最新の研究開発状況を紹介している。

今回は 1 月に掲載した「浮上式鉄道用高温超電導磁石の開発」の続編として、実機大高温超電導コイルの研究開発状況について概要を報告する。

高温超電導化のメリット

現在の超電導リニア用車載超電導磁石には、Nb-Ti 線材製の超電導コイルを液体ヘリウムで浸漬冷却する、いわゆる低温超電導方式の超電導磁石が採用されている。その一方、高温超電導線材も年々性能向上が進んでおり、鉄道総研ではリニア用超電導磁石の高温超電導化に向けた研究開発を進めている。図 1 に高温超電導化のメリットを示す¹⁾。高温超電導化により小型軽量で構造も簡素化された超電導磁石が実現可能となるので、将来的にはメンテナンスコストも含めたコスト低減に向け欠かせない技術であると考えている。

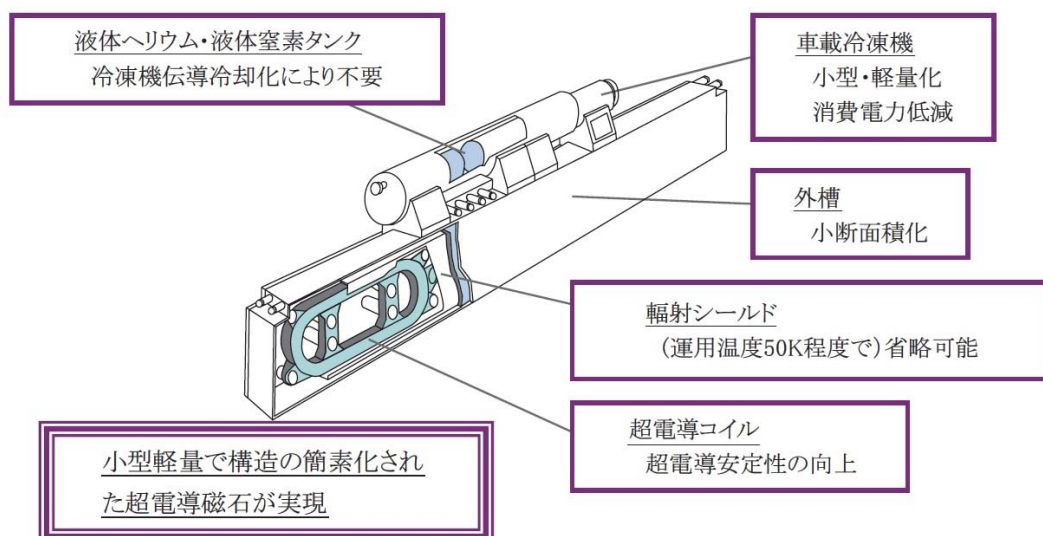


図 1 高温超電導化のメリット

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

実機大高温超電導コイル

前報記事「浮上式鉄道用高温超電導磁石の開発」²⁾のとおり、鉄道総研は高温・高磁場中の通電特性や機械的強度にも優れる RE 系高温超電導線材を選定し、超電導リニア用高温超電導コイルの開発に着手した。この開発過程において、RE 系コイルの課題のひとつであった通電特性劣化の対策として、コイル冷却時に線材平面に対して垂直な方向に発生する応力を緩和するコイル構造を考案し、これにより線材内部にある超電導層の剥離破壊を防止することで通電特性劣化の問題を解決した³⁾。

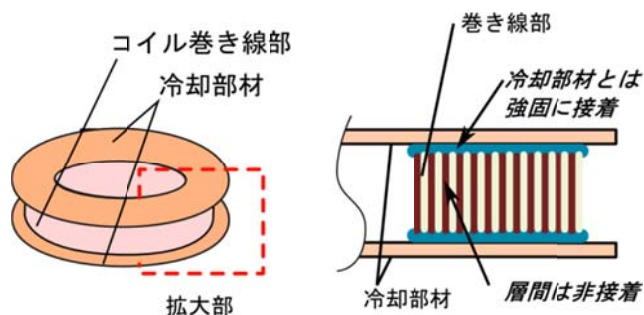


図2 通電特性劣化を防止するコイル構造イメージ

図2に通電特性劣化を防止するコイル構造イメージを示す。図はシングルパンケーキコイルを示しているが、巻線の側面とコイル冷却部材とは強固な接着によって伝導冷却のための伝熱パスを確保しつつ、巻線の層間は非接着として熱応力を緩和するという考え方である。この考え方を実現する方法のひとつが、熱可塑性樹脂を用いたコイル製作手法である(図3)。予め銅板などの冷却部材の片面に絶縁加工した熱可塑性樹脂を施工しておき、絶縁テープと共に巻き回したコイル巻き線部をこれら冷却部材で挟み込んで、約 120 °C の環境で全体加熱するだけで熱可塑性樹脂の融着が進行し、冷却するとコイルが完成する。なおこの時、粘性の高い熱可塑性樹脂は巻き線の線材層間には浸透しない。従来のエポキシ樹脂の含浸手法よりも簡易であり、製作プロセスのコスト低減にも寄与する手法である。

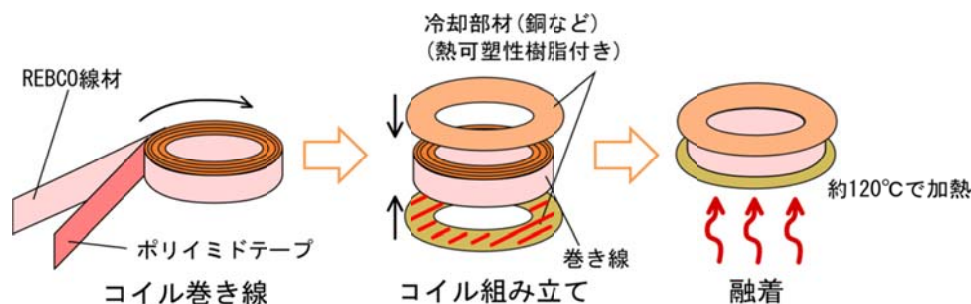


図3 熱可塑性樹脂を用いたコイル製作プロセス

上記手法を用いて実機大の高温超電導コイルを製作した。コイル外観を図4に示す。実機と同寸法となる長径方向が 1070 mm、短径方向が 500 mm のレーストラック形状で、幅 6 mm、厚さ 0.1 mm の RE 系線材を 350 ターン巻き回したシングルパンケーキコイルであり、液体窒素中での融着前後のコイル通電特性比較により、融着に伴う特性劣化が発生しないことを確認している(図5)。

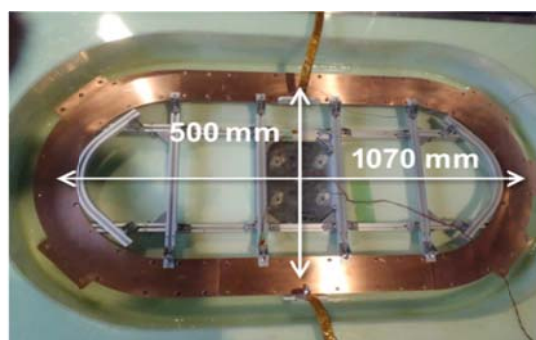


図4 実機大高温超電導コイル（シングルパンケーキコイル）

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

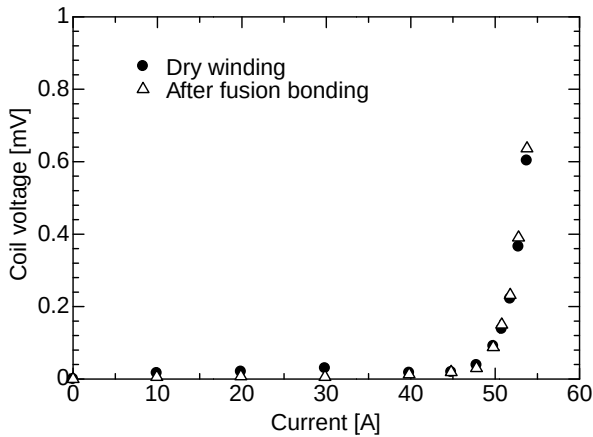


図5 熱可塑性樹脂を用いて製作した実機大高温超電導コイル (図4) の融着工程前後のI-V 特性比較(77 K)

なお、実機相当のコイル起磁力 700 kA を実現するためには、本コイルを 8 個積層して 1 コイルとし、これに 250 A 通電すると達成可能である。現在の市販 RE 系線材の通電特性から予測するとコイル運用温度を 30~40 K とすることで実現可能と見積もられる。表 1 に実機相当 RE 系超電導コイル (1 個分) の仕様を示す。実機大高温超電導コイル (シングルパンケーキコイル) を 8 個積層すると、大きさだけでなく磁場性能も含めた“実機相当”超電導コイルとなるが、実用上はコイルに発生する電磁力等に対応可能な構造を持たせる必要がある。そこで、図 6 に示すように、十分な機械的強度を有する金属製コイルケース内に、積層コイルおよび熱伝導や熱容量を受け持つ熱機能材料と共に内蔵することで、実機高温超電導コイルが完成する。

表 1 実機相当 RE 系超電導コイル (1 個分) の仕様

Operating current	250 A (External power supply)
Dimension of the race track	1070 mm × 500 mm
Number of turns	2800 (350 per pancake coil)
Total wire length	7600 m (950 m per pancake coil)
Stacking number of pancake coils	8
Inductance	12 H
Operating temperature	30 ~ 40 K (Future target: 40~50 K)

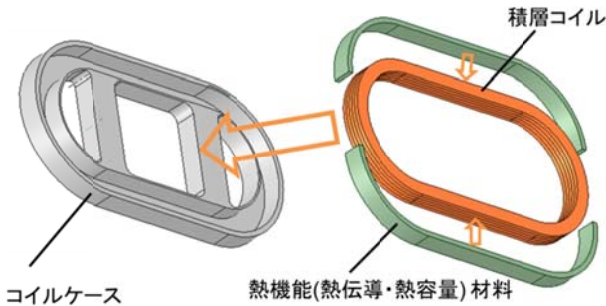


図6 実機高温超電導コイル構成

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

また、実機高温超電導コイルの冷却性能、保冷性能の検証も実施している。図 7 に示す冷却・保冷性能試験構成を用いて、冷却性能試験および保冷性能試験を実施した結果、

- (1) コイル温度 40 K 冷却時のコイル内温度分布は 1 K 以内に収まること (図 7(2))、
- (2) コイル温度 40 K で冷凍機を停止してもコイル運用上限温度に設定している 50 K 以下を約 1 時間保持できる保冷性能があること (図 7(3))、

を確認した。なお、この保冷時間はコイルケースに収める熱機能材料の設計により調整可能であるが、約 1 時間は超電導リニアが東京と大阪を結ぶ際の所要時間にほぼ等しく、万一の冷凍システムトラブルの際のコイル温度上昇に対するマージンになると考えている。

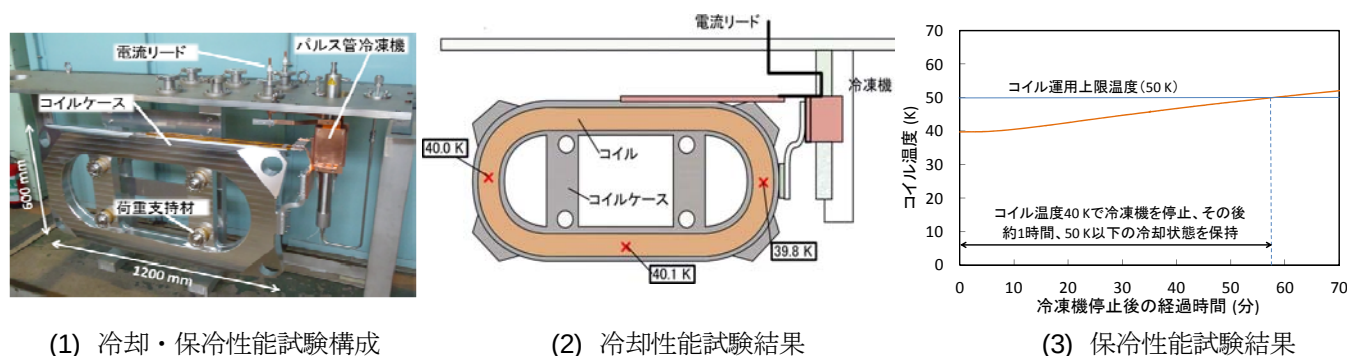


図 7 実機高温超電導コイルの冷却・保冷性能試験

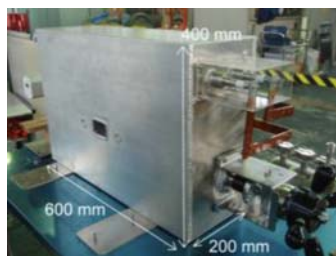
アウトガス評価

高温超電導化が進むとコイルの運用温度を上昇させることができるが、これを別の観点から見れば、液体ヘリウムという非常に強力なクライオポンプを手放すことでもある。すなわち、真空槽封じ切り運用を前提とするリニア用高温超電導磁石においては、従来は問題とならなかった真空槽内のアウトガス蓄積による真空度劣化と、それに伴う熱侵入量増大に対処することが必要となる。この問題は前報記事で説明した、実機の 1/4 サイズのレーストラックコイルを内蔵した保冷式高温超電導磁石(冷凍機無しで超電導状態を長時間維持する高温超電導磁石)においても確認されており、コイルを自然昇温させたときの真空槽内アウトガス成分のコイル温度特性試験結果を図 8 に示す。図 8 の(1)は当該磁石外観、(2)はダミーコイルの内蔵以外は当該磁石と同仕様のモデル磁石における結果、(3)は当該磁石における結果である。ここで、(3)の当該磁石にはアウトガス吸着を目的とした活性炭がコイル部に内蔵してあることを補足する。この結果から、活性炭がある場合は水素や窒素の発生が抑制されるものの、コイル温度が 50 K を超えると急激に水素が発生し始め、真空度劣化が進行することがわかった⁴⁾。

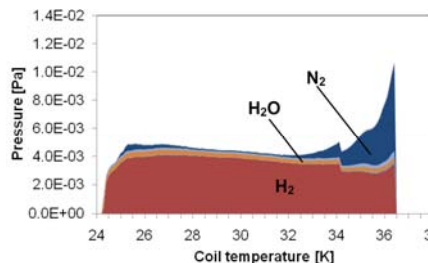
アウトガスの発生源は高温超電導磁石を構成する部材自体である。よって、各部材からのアウトガス特性を個別に評価検証することができれば、磁石設計の時点でアウトガス低減に向けた対処も可能になってくる。そこで、アウトガス評価のための試験装置を開発し(図 9)、アルミニウムや、エポキシ樹脂、GFRP、多層断熱材等からのアウトガスの定量的評価を鋭意進めているところである⁵⁾。更に、本評価試験装置は活性炭等のアウトガス吸着材の定量的な性能評価にも活用できるので、発生量低減と吸着効果改善の両面から高温超電導磁石のアウトガス対策を進めていく考えである。

超電導 Web21

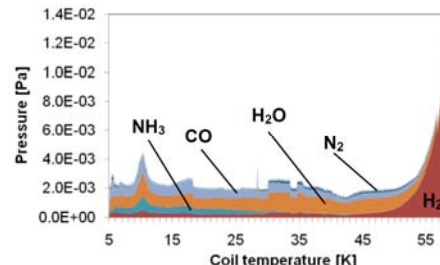
(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612



(1) 冷凍機無しで超電導状態を長時間維持する高温超電導磁石

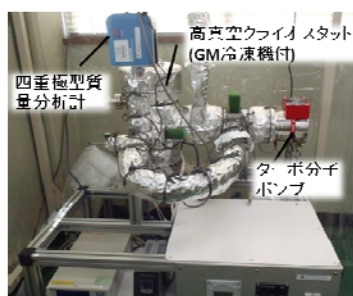


(2) アウトガス成分のコイル温度特性 (ダミーコイル内蔵モデル磁石: 活性炭なし)

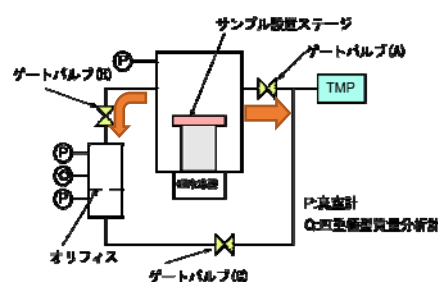


(3) アウトガス成分のコイル温度特性 (当該磁石: 活性炭あり)

図 8 高温超電導磁石内部のアウトガス成分分析



(1) 装置外観



(2) 装置構造

図 9 アウトガス評価試験装置

おわりに

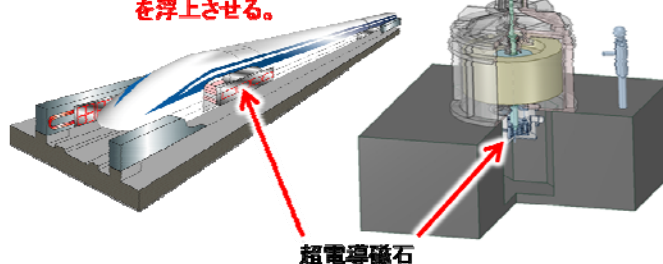
現在、実機高温超電導コイル完成に向けた作業を進めており、完成後は、超電導リニア走行時に超電導コイルが受ける振動を再現する機械加振試験の実施を予定している。引き続き、機械加振試験をはじめとする動的性能検証試験による信頼性・耐久性確認とともに、アウトガス対策も含めた浮上式鉄道用高温超電導磁石設計のための各種データの取得を進めていく計画である。

最後に、これまで述べてきたように RE 系高温超電導磁石の開発は超電導リニアへの適用を目的としているが、その中で培われた技術は、鉄道総研が別途進めているフライホイール蓄電装置用高温超電導磁気軸受の研究開発にも適用可能である (図 10)。技術開発の相乗効果により一層の性能向上も期待できると考えている。

なお本研究は、国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

超電導磁気浮上

超電導磁石の強力な磁気力で、トン単位の重量物(車体や円盤)を浮上させる。



リニアモーターカー (高速交通機関)

フライホイール (蓄電システム)

図 10 RE 系高温超電導磁石技術の適用

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) 小方正文他：希土類系高温超電導線材の浮上式鉄道用磁石への適用性評価，鉄道総研報告，Vol.24, No.1, pp.5-10, 2010, <http://bunken.rtri.or.jp/PDF/cdroms1/0001/2011/0001003424.pdf>
- 2) http://www.istec.or.jp/web21/pdf/15_01/all.pdf
- 3) 水野克俊他：浮上式鉄道用RE系高温超電導磁石の開発－実機級の起磁力実証に向けたレーストラックコイル製作－，第91回2015年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, P.133, 2015
- 4) 水野克俊他：高温超電導磁石内部のアウトガス成分分析，第84回2011年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, P.8, 2011
- 5) 水野克俊他：浮上式鉄道用RE系高温超電導磁石の開発－磁石構成部材のアウトガス評価－，第90回2014年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, P.172, 2014

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒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

「鹿児島大学大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻 川越研究室」

研究室構成メンバー（平成 27 年 9 月現在）

川越明史准教授（筆者）、学生：修士 2 年生 4 名、修士 1 年生 2 名、学部 4 年生 4 名

研究室ホームページ：<http://www.eee.kagoshima-u.ac.jp/~kawagoe>

川越研究室は平成25 年4 月より発足しました。平成25 年3 月まで、住吉文夫先生（現鹿児島大学理事）と川越の2 名で運営していた旧住吉研究室を、川越が引き継ぎました。研究テーマは、「超伝導線材・導体・コイルの電磁・熱特性評価」と「高性能超伝導コイルの設計技術開発」の二つです。

「超伝導線材・導体・コイルの電磁・熱特性評価」に関するテーマでは、ポインティングベクトル法と呼ぶオリジナルの交流損失測定法を応用して、様々な超伝導導体の電磁特性の評価に取り組んでいます。電磁エネルギーの流れであるポインティングベクトルをサンプル周辺で測定することにより、交流損失などの電磁特性を評価することができます。図 1 は、測定装置の外観です。REBCO 線材に垂直に磁界を印加した場合のポインティングベクトルの分布図を図 2 に示しています。印加磁界が小さいときは左右が非対称になっていることがわかります。線材断面の右側の臨界電流密度が低いことを示しています。またこの測定法を応用して、三相同一軸超伝導電力ケーブルの交流損失測定法の標準化プロジェクトや、MRI や医療用加速器に用いる高温超伝導コイル開発プロジェクトに参画しています。

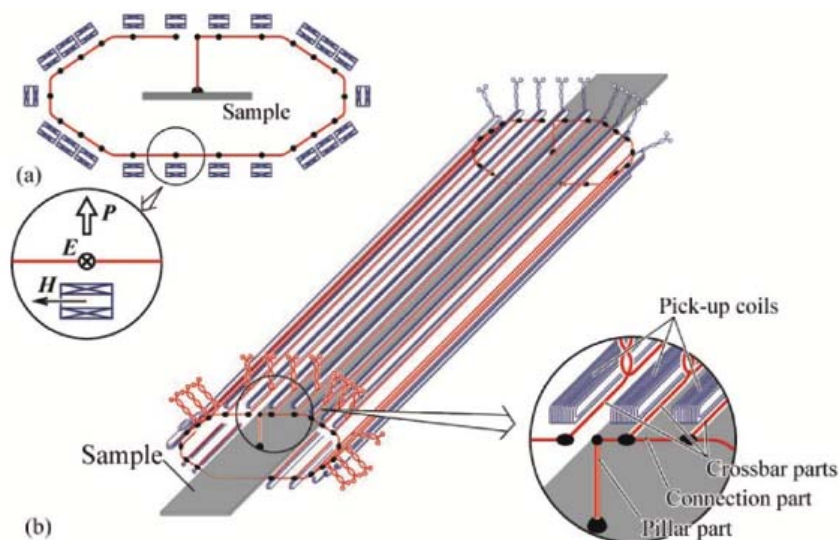


図 1 ポインティングベクトル法を用いた交流損失測定装置の外観

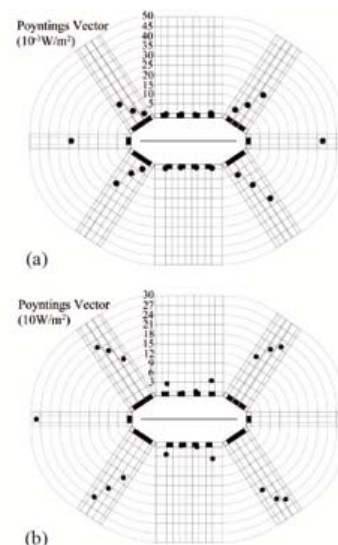


図 2 測定例 (a)3 mT 印加時、
(b)40 mT 印加時

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

さらに、上記の測定法を発展させた「高温超伝導コイルの異常検出法」を提案し、その有効性の実証と運転監視・診断装置の開発を行っています。空芯の高温超伝導コイルや、鉄心を持つ高温超伝導変圧器に対し、巻線に発生した局所的な異常としての温度上昇を、室温空間から非接触で検出することに成功しました。図 3 は、我々の提案している運転監視・診断装置の一例で、高温超伝導変圧器への適用例とその測定例を示しています。ピックアップコイル対を用いることによって、巻線で生じた微小な異常を高感度に測定することができます。現在は、測定結果から巻線の温度上昇や臨界電流の低下といった異常を正確に診断できるようにすることを目指し、詳細な測定と解析を進めています。

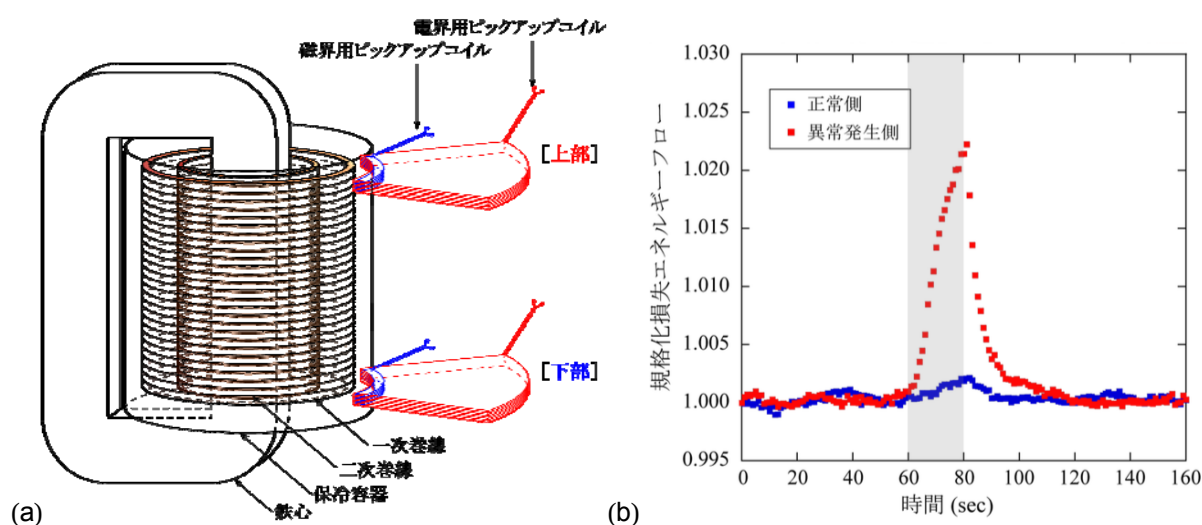


図 3 高温超電導トランスの運転監視装置装置 (a) 装置の外観, (b)測定例

「高性能超伝導コイルの設計技術開発」に関する最近の研究では、高温超伝導浮上コイルを用いることによって、効率と安全性を飛躍的に向上させた新しい液体水素貯蔵タンクの開発を目指しています（核融合科学研究所との共同研究）。浮上コイルによって熱侵入を下げるだけでなく、地震時の免震運転によって安全性も向上させようとしています。このためには、免震運転によって発生する交流損失を効率的に取り除く必要があるため、自励振動式ヒートパイプを用いることによって、従来よりも格段に優れた熱伝導特性をもつ伝導冷却型高温超伝導コイルを開発しようとしています。図 4 は、作製を計画しているテストコイルの構成です。

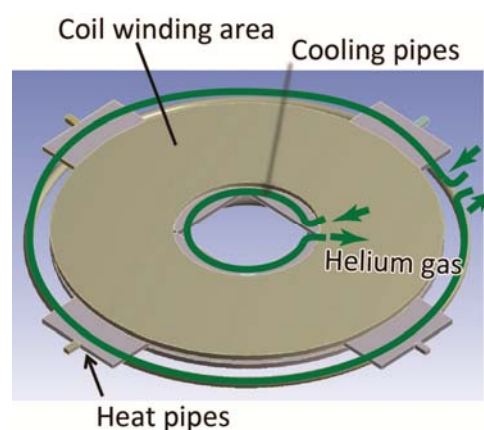


図 4 ヒートパイプを用いた高温超伝導コイルの構成例、4 枚のヒートパイプとシングルパンケーキコイル 2 個で構成している。

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

読者の広場

Q&A

Q. 「レクサスのホバーボード！ 今後、どこにでも乗って行けるような改良は出来るのか？」

A: トヨタ自動車の高級ブランド「Lexus（レクサス）」は、「Amazing in Motion」のキャンペーンの一環として非常にユニークな映像を発信している。ホバーボード（地面から浮遊して走行する、車輪のないスケートボード：¹⁾）はその第 4 弾として発信されたもので、“不可能と思われることに挑戦し、夢を追いかけている”ことを示すために開発されたものとされている。

映像では、映画「バック・トゥ・ザ・フューチャー 2」に出てくるようなホバーボードが、地上から約 10 cm ほど浮いて走っている。また、映画の中では水上では進むことが出来なかったが、レクサスのホバーボードは水上でも浮遊走行している映像が出てくるなど、非常に心躍る映像が繰り広げられている。

既にインターネット上では、その原理が明らかにされているが、このホバーボードは、バルク超電導体と磁石の反発力を利用したものである。映像の中で、ホバーボードの横から、白煙が吹き上がっているのに気づかれたかと思う。これは、ホバーボードの中に仕込まれたバルク超電導体を冷却するための液体窒素が空気中の水分を冷却してできたものである。おそらく、地上側に永久磁石のレールを敷き、レール上をバルク超電導体を仕込ませたホバーボードを走らせているとみられる。知人からの情報によると、ドイツの研究機関 IFW をスピンアウトした研究者が起こした会社²⁾が全面的に協力していたと聞いている。よって、現時点で同じ原理を利用してホバーボードを走らせるためには、磁石のレールが必要ということになり、今すぐにどこでもホバーボードが使えるかというところもいかなない。

しかしながら、“今後、どこにでも乗って行けるような改良は出来るのか？”という問いに対しては、可能性はあると。例えば、磁気浮上鉄道のように、電磁誘導作用により発生する反発力を利用して浮上させることは可能であろう。ホバーボード側の超電導体に強力磁場を発生・着磁させ、地上側のコイルや低電気抵抗非磁性金属板等上を高速移動させることで、電磁誘導による反発力を発生させて浮上させることは原理的には可能であろう。また、室温超電導体が出来れば、それを床材として利用し、永久磁石を仕込んだホバーボードで電磁誘導を利用したホバーボードも可能となるであろう。

今すぐにとという難しい面もあるが、まだまだ、超電導には夢が残されている。そのためには、今後もより一層の研究開発が必要と思われる。

1) レクサス、超電導技術のホバーボードを動画公開

<http://www.lexus-int.com/jp/amazinginmotion/slide/>

2) ドイツの協力会社

<http://www.evico.de/en/home/>

回答者：芝浦工業大学 教育イノベーション推進センター 教授 坂井直道 様

超電導 Web21 トップページ