

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 :

- ISTEC/SRL の移転完了

特集 : 超電導デジタルデバイス

- 超電導スーパーコンピュータ・超電導データセンタへの期待
- CREST (単一磁束量子回路による再構成可能な低電力高性能プロセッサ) の到達点と課題
- 断熱型 QFP 回路と可逆演算の可能性
- 微小な AI 系積層型ジョセフソン接合の開発と量子ビットへの応用
- 集積型量子雑音電圧源 - 美しい雑音を作る -

- 超電導関連 2013 年 10 月-11 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン (8/20-9/19)
- 超電導速報—世界の動き (2013 年 7 月)
- 「EUCAS2013 Coated Conductor 関係発表」報告
- 「EUCAS2013 接合及び SQUID 関係発表」報告
- 「EUCAS2013 電力機器関連開発発表」報告
- 隔月連載記事—医療用加速器と超電導 (その 5) (11/01 掲載予定)
- 読者の広場(Q&A)—「対称性の破れた超電導体、とは何でしょうか? どういう効果が期待されるのでしょうか? 室温超電導に繋がるのでしょうか?」

[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 Fax044-850-1613

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：ISTEC/SRL の移転完了

(公財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC) / 超電導工学研究所(SRL) については、本誌 7月号で7月1日付での本拠地(事務局)の移転等のお知らせをしましたが、その後、研究部においても移転作業を順次進め、10月初旬に移転は全て完了し、従前の東雲の施設は閉鎖いたします。

移転先は以下のとおりです。東京の西方面へ、また分散しての移転となりますが、今後とも我が国の超電導技術の実用化に全力をあげて取り組んでまいりますので、引き続きご支援の程、お願い申し上げます。

【移転先】

●事務局 及び 線材・パワー応用研究部；かながわサイエンスパーク(KSP)

〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸3丁目2番1号 KSP R&D ビジネスパークビルA棟9階 901・906
電話(代) 044-850-1611 FAX 044-850-1613

○但し MOD 関係；昭和電線ケーブルシステム(株) 相模原事業所内 電話(代) 070-5347-7407



KSP 外観・内部 (移転前)

●物性・デバイス研究部；日吉研究所 〒223-0061 神奈川県横浜市港北区箕輪2丁目11番19号
電話 045-560-1350 FAX 045-560-1351

○但し FIRST 関係；東京工業大学 すずかけ台キャンパス内 電話 090-4596-1050



日吉研究所外観

[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

「超電導スーパーコンピュータ・超電導データセンタへの期待」

名古屋大学大学院
工学研究科
教授 藤巻 朗

超電導デバイスを利用してスーパーコンピュータやデータセンタを構築しようという機運が、現在急速に高まっている。そのきっかけは、数年間のフィジビリティスタディを経て募集された米国の **Cryogenic Computing Complexity (C3)** プログラムである。ここでは、**CMOS** 半導体技術では到達し得ない計算機性能が目標に掲げられている。本稿では、**C3** プログラム募集の背景でもあるマイクロプロセッサとメモリの開発の現状について、今後の方向性ととも簡単に報告する。

昨年本記事で紹介したように、超電導デジタル回路は低消費電力化、高エネルギー効率化という観点から回路構成法が見直された。その結果現在では、半導体集積回路に対し、冷凍機冷却のペナルティを考慮しても 1-2 桁高効率の超電導集積回路が実証されている。従来の **Rapid Single Flux Quantum (RSFQ)** 回路では、能動素子であるジョセフソン接合を電流源で駆動するために、ジョセフソン接合のインピーダンスより大きな抵抗を電流制限抵抗として電源とジョセフソン接合の間に挟む必要があった。しかしその結果、この電流制限抵抗で消費される電力、すなわち静的消費電力が、ジョセフソン接合自身が消費する動的消費電力よりも遥かに大きく、高効率化の阻害要因となっていた。現在提案されている各種回路方式はいずれも、静的電力消費を大幅に低減、もしくは完全に削除することに成功している。

低消費電力化を比較的簡単に行える回路方式が、名大で提案している低電圧 **RSFQ** 回路である。これは、通常の **RSFQ** 回路と比較して、電源電圧と電流制限抵抗の双方を 1/5-1/10 に低減化する方法である。表 1 は、これまで開発された超電導マイクロプロセッサ、ならびに現在開発が進められている超電導マイクロプロセッサの性能をまとめたものである。また、現在の **CMOS** 半導体によるマイクロプロセッサの性能も合わせて記載した。最も重要な指標である電力効率は、既に実証済みの低電圧 **RSFQ CORE** プロセッサにおいて **1700 giga operations/W (GOPS/W)** に達しており、**CMOS** と比較して **40000** 倍の優位性を持っている。これは、冷凍機の電力消費を考慮しても、約 1 桁の優位性を持つことを意味している。今後、集積度を上げ、またアーキテクチャの最適化を図ることで、半導体に対し 2 桁以上の優位性を発揮することが可能と考えている。米国では、これまで超電導マイクロプロセッサを実証した実績はないが、表 1 に記された **C3** プログラムの目標性能を目指して、急速に開発が進められると考えられる。

表 1 超電導マイクロプロセッサの性能指標

	CORE1a-ver5	LV-RSFQ CORE	LV-RSFQ RISC	C3	CMOS
実証年(計画を含む)	2003	2013	2017	2020	2013
システムクロック周波数	1 GHz	2 GHz	3 GHz	10 GHz	2 GHz
ワード長	8 bit	8 bit	32 bit	64 bit	64 bit
データ形式	ビットシリアル	ビットシリアル	ビットスライス	パラレル	パラレル
電力効率	100 GOPS/W	1700 GOPS/W	4000 GOPS/W	-	0.04 GOPS/W

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

スーパーコンピュータやデータセンタを構成するには高速大容量メモリは不可欠である。高速性、すなわちアクセス時間を短くする本質的な方法は、単位メモリセルの物理的な大きさを小さくすることである。しかしながら、従来は磁束量子を蓄えることをメモリの基本的な考え方としていたため、どうしても超電導ループが必要となり、その結果メモリセルが大きくなっていた。また、磁束量子の出入りに伴うエネルギー消費が比較的大きいのも、従来のメモリの問題点であった。これに対し、超電導磁気メモリ(超電導 MRAM) の概念が提案され、米国を中心に研究が活発化している。超電導 MRAM は、通常の MRAM と同様にトンネル接合中に磁性薄膜を導入し、その磁化の向きによって 2 値の情報を蓄えるものである。磁性接合 1 個でメモリを構成できることから、セルサイズは小さくなり、高速化が期待できる。また、磁束量子を用いないことから、低消費電力化も図れる可能性がある。C3 プログラムでは、こういった新しいメモリも開発対象に含め、最終的には高速大容量メモリを目指している。しかしながら、超電導 MRAM は読出し/書込みといった本来のメモリとしての動作実証が現時点ではなされておらず、実際の有用性の判断は、今後の開発成果に委ねられている。

以上のように、超電導デジタル回路は大規模計算システム目指して、大きな変革期を迎えようとしている。米国では 1970 年代のラッチング論理回路、1990 年代の RSFQ 回路、そして今回の高エネルギー効率単一磁束量子回路と 3 度目の挑戦となる。プロセス技術、設計技術など日本が技術的に優位な点も多いが、3 度目の正直となるよう、適度な緊張感を持ちつつ日本も協力することが重要と考えている。

[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

特集：超電導デジタルデバイス

「CREST (単一磁束量子回路による再構成可能な低電力高性能プロセッサ)の到達点と課題」

京都大学大学院
情報学研究科
教授 高木直史

超伝導単一磁束量子 (SFQ) 回路は、半導体回路では実現が困難な超高速、超低消費電力の処理を実現できる回路技術として期待されている。我々は、JST-CREST のプロジェクトとして、平成 18 年 10 月より平成 25 年 3 月まで、「単一磁束量子回路による再構成可能な低電力高性能プロセッサ」の研究を行った。(超電導 Web21 2009 年 10 月号「SFQ 回路による低電力高性能プロセッサの研究開発の現状」参照。) 数千個規模の多数の浮動小数点演算ユニット (FPU) とそれらを接続するネットワーク (ORN) からなる再構成可能な大規模データパス (RDP) を SFQ 回路で実現し、これを通常のプロセッサに演算アクセラレータとして付加する。大規模計算に現れる繰り返しループ内の一連の計算に合わせて ORN を再構成して、多数の FPU を並列動作させ、高い計算性能を実現する。プロジェクトでは、SFQ 回路による RDP の基盤技術の確立を目指し、京都大学、九州大学、横浜国立大学、名古屋大学、超電導工学研究所の研究グループが協力し、SFQ 回路プロセスから、SFQ 演算回路、再構成機構、RDP アーキテクチャ技術にわたる研究を行った。

SFQ 回路プロセスについては、完全平坦化技術を開発し、受動配線 (PTL) 配線層 2 層をもつニオブ 9 層 1 μm プロセスを確立した。さらに、論理セルライブラリを構築するとともに、一連の回路設計支援ツールを開発した。また、低消費電力回路技術を開発した。SFQ 演算回路については、浮動小数点加算器 (FPA)、乗算器 (FPM)、除算器、開平方の構成法を開発し、半精度 FPA および FPM の 60 GHz 以上での動作実証に成功した。再構成機構については、ORN の構成法としてクロスバ多段網の採用を決め、プロトタイプ ORN の 48 GHz までの動作実証に成功した。さらに、プロトタイプ RDP の開発を行い、2x2 RDP の 45 GHz での動作実証に成功した。最終目標とした 4x4 RDP (写真) の完全動作実証には至らなかったが、3 段階までの再構成機能の確認に成功した。RDP アーキテクチャ技術では、アプリケーション解析と SFQ 回路による実現に関する検討の両面から研究を進め、種々の科学技術計算の解析に基づき、RDP の詳細アーキテクチャを決定した。また、RDP コンパイラを作成するとともに、RDP の評価ツールを作成した。さらに、熱伝導方程式等の種々の数値計算に対して RDP 向きのアルゴリズムを開発した。これらにより、大規模 SFQ 回路が設計可能かつ製作可能であること、および、SFQ-RDP が実現可能で、一部の科学技術計算に有効であることを示した。さらに、将来の 0.5 μm プロセスによる SFQ 回路の性能見積りから、実効性能が 10 テラフロップスで、消費電力が 3.2 W の SFQ-RDP が実現可能であることを示した。

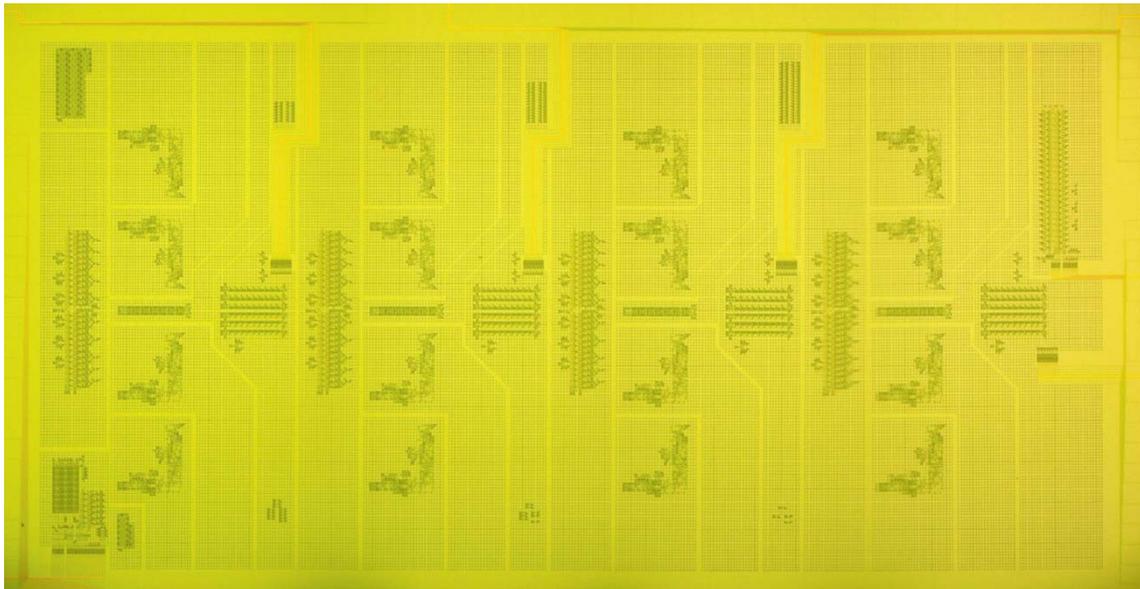
研究目標は概ね達成された。特に、世界最高水準のプロセス技術、デバイス技術、論理設計技術を開発し、世界最大規模の回路を試作し動作実証を行ったことは誇れる成果である。しかし、試作した 4x4 RDP は 16 個の ALU からなるものであり、数千個の FPU からなる実用的な RDP の実現には、まだまだ道のは遠い。RDP は SFQ 回路による実現に適しており、また、SFQ-RDP を演算アクセラレータとして通常のプロセッサに付加する方式は、超伝導メモリ等を必要とせず、比較的实现が容易であると考えられる。しかし、主記憶のバンド幅、RDP とのデータ転送のバンド幅がシステム性能を律速する危惧があり、アクセラレータ側に超高速メモリを備えることや、RDP 内に中間結果を保持するバッファを設けることを検討する必要がある。また、RDP が有効な科学技術計算のアプリケーションは限られている。今後も SFQ 回路実現に適し、かつ、科学技術計算の多く

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

のアプリケーションに有効なアーキテクチャを探究するとともに、超伝導メモリ等を開発することが求められる。

本プロジェクトで平坦化技術および PTL 多層配線技術を開発したため、既に半導体集積回路製作のために開発された微細加工技術を流用することにより、 $0.2\ \mu\text{m}$ 程度の SFQ 回路プロセスは技術的には大きな支障なく確立できるものと考えられる。今後の研究の推進のため、装置の更新が強く望まれる。



写真： $1\ \mu\text{m}$ SFQ プロセスにより試作した 4x4 RDP プロトタイプ LSI
4つの ALU からなる列が 4列あり、隣接する列の ALU 同士がネットワーク (ORN) を介して接続されている。ダイサイズは $11.0\ \text{mm} \times 5.5\ \text{mm}$ 、ジョセフソン接合数は 28,528 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

特集：超電導デジタルデバイス

「断熱型QFP回路と可逆演算の可能性」

横浜国立大学大学院
工学研究院
教授 吉川信行

現在、ハイエンド情報機器の性能は消費電力により制限されており、将来の性能向上のためには演算回路自体の抜本的な低消費電力化が必須の課題である。超伝導集積回路技術は、半導体回路を遥かに上回るエネルギー効率を実現する技術として期待されており、日米を中心に低消費電力型の情報機器を実現しようとするプロジェクトが進められている^{1), 2)}。近年、超伝導デジタル集積回路の低消費電力化を可能とする数々の新回路方式が提案され、活発に研究開発が進められている³⁾。

演算回路の根本的な低消費電力化のためには、1 ビットの演算あたりの消費エネルギーを低減する必要がある。しかしながら、CMOS 回路や単一磁束量子(SFQ)回路などの従来の論理回路では、演算に要するビットエネルギーは非断熱的に消費されていた。加えて回路の誤り率を低下させるために、このビットエネルギーは、熱雑音エネルギー $k_B T$ に対して十分に大きい（通常 1000 倍以上）必要があった。これに対して、我々は磁束量子パラメトロン(quantum flux parametron: QFP)と呼ばれる超伝導回路を断熱的にゆっくりと動作させることで、回路のビットエネルギーを極めて小さくできることを示した。これまでに、断熱型 QFP (AQFP)回路が動作するパラメータ条件を明らかにし⁵⁾、AQFP 回路の回路パラメータと動作マージンの関係⁶⁾、消費エネルギーの実験的評価⁷⁾、ならびに AQFP 論理回路の実証⁸⁾を行なった。以上の研究を通して、比較的損失の大きな critical dumping 接合を用いた回路において、ビットエネルギーが 170 $k_B T$ 程度の AQFP 回路が 5 GHz のクロック周波数で動作可能であることを示した。

一方、Landauer らは、演算に伴う情報のエントロピーの低下が無ければ、演算に必要なエネルギーの下限値は存在せず、情報の消去に伴い最低 $k_B T \ln 2$ のエネルギーが消費されると予言した⁹⁾。演算における消費エネルギーの下限値の有無は、古くから議論されてきたが、未解決の問題である。我々は、この問題を AQFP 回路を用いて明らかにしようとしている。今回、シャント抵抗を取り除いた損失の少ない接合を用いた AQFP ゲートにおいて、ビットエネルギーを計算により評価し、実験により回路動作を実証した¹⁰⁾。

図 1 に AQFP 回路の回路図を示す。断熱動作のために比較的小さなループインダクタンスが用いられており、回路はゆっくりとした立ち上がり時間/立ち下がり時間のクロック電流 I_x で駆動される。図 2 には、アンシャント接合($I_c = 50 \mu A$, $\beta_c \sim 2600$)を用いた AQFP 回路のビットエネルギーのクロック立ち上がり/立ち下がり時間に対する依存性を示す。図より、クロック電流 I_x の立ち上がり/立ち下がり時間の増加に反比例してビットエネルギーが減少していることが分かる。このビットエネルギーは、critical dumping 接合を用いた AQFP 回路に対して約 50 分の 1 の大きさであった。また、立ち上がり/立ち下がり時間が 1000 ps より大きい場合、4.2 K における Landauer リミットを下回るビットエネルギーでの動作が可能である。一方、立ち上がり/立ち下がり時間が 200 ps 以下の領域では、回路にプラズマ振動が誘起され、消費エネルギーは急激に増大する傾向にある(図 2 の挿入図参照)。今回検討した AQFP ゲートは物理的にも論理的にも可逆な演算を行なうことが可能である。したがって、理論上、Landauer リミットを下回る論理動作が可能であり、シミュレーションにおいても同様な結果が得られた。我々は、更に回路動作の熱雑音に対する影響を調べ、回路が $T=4.2$ K において十分に小さな誤り率で動作することを示した¹⁰⁾。

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

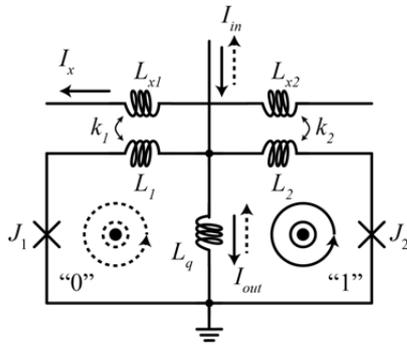


図1 AQFP ゲート

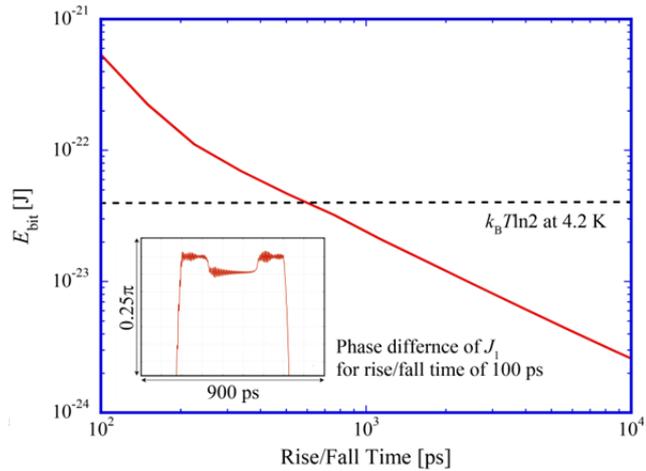


図2 AQFP ゲートのビットエネルギーのクロック立ち上がり/立ち下がり時間依存性。アンシャント接合($I_c = 50 \mu\text{A}$, $\beta_c \sim 2600$)を仮定。

図6には、アンシャント接合を用いた6段AQFP論理ゲートの低速測定結果を示す。回路はAISTのNb標準プロセス(STP2)を用いて作製された。図より回路は十分に広い動作マージンで動作していることがわかる。

以上の研究成果は、AQFP回路が熱雑音以下のビットエネルギーで動作することを示している。演算における情報エントロピーの変化とビットエネルギーとの関係を解明することが今後の課題であるが、我々は既にAQFPを用いて情報エントロピーの変化を伴わない可逆的万能ゲートの検討を進めている。以上の研究は、「演算におけるエネルギーの下限値を明らかにする」という意味で物理学上、重要である。一方で、可逆演算では演算自体の無駄が多いため、工学的には演算のエネルギー効率を高めるためにどこまで可逆演算を取り入れるべきかを検討する必要がある。

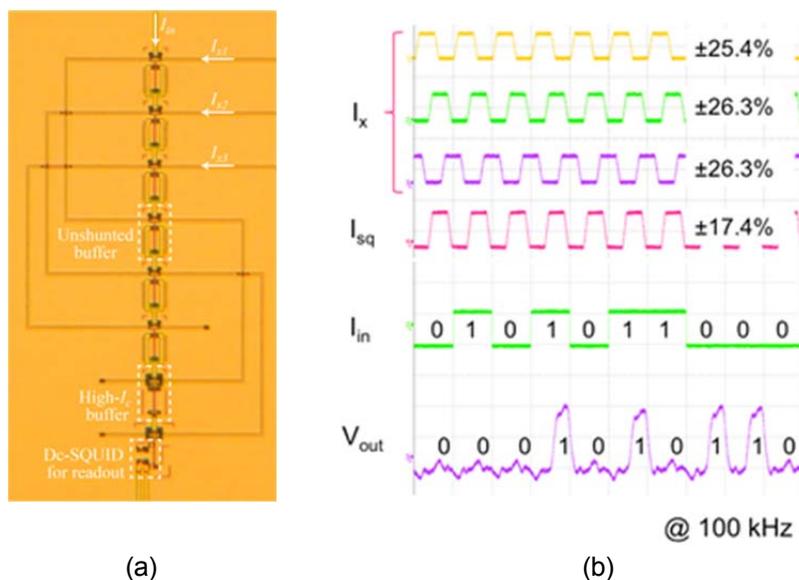


図3 アンシャント接合を用いた6段AQFPゲートの動作検証。(a) 顕微鏡写真。(b) 低速測定結果(測定周波数100 kHz)。

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. 先端的低炭素化技術開発事業「低エネルギー情報ネットワーク用光・磁気・超伝導融合システム」
<http://www.jst.go.jp/alca/kadai.html>
2. CRYOGENIC COMPUTING COMPLEXITY (C3) PROGRAM,
<http://www.iarpa.gov/Programs/ss0/C3/c3.html>
3. O. A. Mukhanov, "Energy-efficient single flux quantum technology," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no. 3, pp. 760–769, Jun. 2011.
4. M. Hosoya, W. Hioe, J. Casas, R. Kamikawai, Y. Harada, Y. Wada, H. Nakane, R. Suda, and E. Goto, "Quantum flux parametron: A single quantum flux device for Josephson supercomputer," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 1, no. 2, pp. 77–89, Jun. 1991.
5. N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi and N. Yoshikawa, "Adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device," Supercond. Sci. Tech., 26, 035010 (2013).
6. 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., 23, 1700304 (2013).
7. 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., 102, 052602 (2013).
8. K. Inoue, N. Takeuchi, K. Ehara, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa, "Simulation and Experimental Demonstration of Logic Circuits Using an Ultra-low-power Adiabatic Quantum-flux-parametron," IEEE Trans. Appl. Supercond., 23 1301105 (2013).
9. R. Landauer, "Irreversibility and heat generation in computing process," IBM J. Res. Dev. 5 183–91 (1961).
10. N. Takeuchi, Y. Yamanashi and N. Yoshikawa, "Simulation of sub- $k_B T$ bit-energy operation of adiabatic quantum-fluxparametron logic with low bit-error-rate," Appl. Phys. Lett., 103, 062602 (2013).

[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

「微小な AI 系積層型ジョセフソン接合の開発と量子ビットへの応用」

独立行政法人 産業技術総合研究所

ナノエレクトロニクス研究部門 超伝導計測デバイスグループ

佐藤哲朗

ジョセフソン接合を含む超電導回路は、量子コンピュータを構成する量子ビットの有力な候補のひとつとして活発に研究されている¹⁾。超電導量子ビットに用いるジョセフソン接合には、多くの場合サブミクロンレベルの微細な寸法が要求される。現在、微小接合としては、基板上に形成したシャドウマスクを用いた斜め蒸着法で作製された Dolan Bridge 型接合²⁾が依然として主流である。しかし、この接合は接合作製後に余分な構造が残ることや配線のクロスオーバー構造が作製できないなど本格的な集積回路の作製には適していない。集積度の高い超電導回路を作製するためには、Nb 系集積回路などで実績のある積層型構造の微小接合を採用することが望ましく、そのためのプロセス技術の確立が求められている。我々は量子ビットとして優れた特性を示す AI を超電導体を用いた微小積層型ジョセフソン接合作製プロセスの確立を目指している。

これまで微小な AI 系積層型ジョセフソン接合の作製のために、電子線描画装置を用いた微小パターン形成や塩素系反応性イオンエッチング装置を用いた精密な AI エッチングプロセスを開発してきた。また、微小な接合へのコンタクトを形成するプロセスとして、エッチングでビアコンタクトを形成する従来のプロセスに代わって、CMP による平坦化手法を用いて絶縁体層に覆われた接合上部電極を露出させることによるコンタクト形成プロセスを開発してきた。このプロセスを用いて約 1 μm 径までの接合特性の評価に成功した³⁾が、コンタクト形成プロセスや洗浄等の周辺プロセスに最適化の余地が残っていることが明らかになった。

これらの課題のうちコンタクト形成プロセスに関しては、CMP 工程は絶縁体層表面の平坦化にのみ用い、その後の接合上部電極露出はフッ素系反応性イオンエッチングで実施する方法へ変更した。また、接合形成後の洗浄工程では、使用するレジスト剥離剤を変更することで接合周囲の AI の損失を抑制した。

これらの改良の結果、良好な特性を示すサブミクロン接合の作製に成功した。図 1 に完成した AI/AIO_x/AI 系積層型ジョセフソン接合の断面 TEM 像を示す。接合寸法は設計寸法通りの約 100 nm であること、接合の側壁は十分な急峻性を持っていること、トンネルバリアから 40 nm 程度エッチングを進めた高さで接合のエッチングが停止されていることなどが確認できる。また、図 2 は AI 系積層型ジョセフソン接合の 300 mK における I-V 特性である。設計寸法は試作した接合の中で最小の 80 nm である。100 nm より小さな寸法であるにもかかわらず、明瞭な超伝導ギャップを確認することができる。

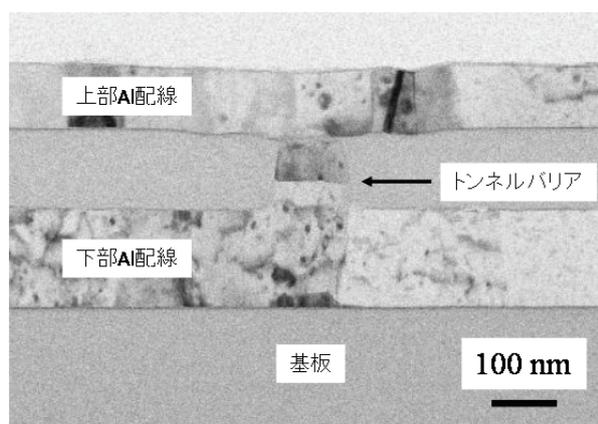


図 1 微小 AI 系積層型ジョセフソン接合の断面 TEM 像

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

今後はこれらの微小 AI 積層接合を用いた超電導量子ビットの試作・評価へと展開していく計画である。

謝辞

本研究は、総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラムにより、日本学術振興会を通して助成されたものです。

参考文献：

- 1) J. Clarke and F. K. Wilhelm, Nature, vol. 453, pp. 1031-1042, June 2008.
- 2) G. J. Dolan, Appl. Phys. Lett., 31 (1977) 337.
- 3) 佐藤哲朗, 超電導 Web21, no.10 (2012), 4.

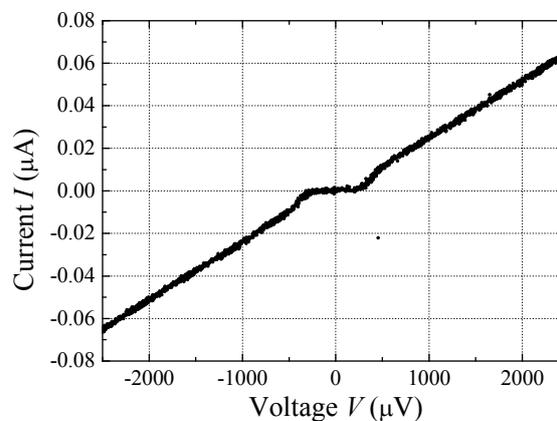


図2 300 mKにおけるAI系積層型接合のI-V特性。設計寸法は80 nmである。

[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

特集：超電導デジタルデバイス

「集積型量子雑音電圧源 - 美しい雑音を作る -」

独立行政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
主任研究員 前澤正明

雑音は日常生活でも科学・産業活動でも嫌われものですが、ここでは「美しい雑音」を作る研究を紹介します。

「美しい雑音」といっても美しさは主観です。筆者の趣味で恐縮ですが、色白（白色／white）で品行方正（計算可能／calculable）な美人を理想としましょう。さらに慎ましき（儉約／low-cost）をそなえていけば言うことはありません。

図1は開発中の集積型量子雑音電圧源です。主要部品は、疑似乱数発生器、パルス数増倍器、電圧増倍器の三つです。すべて超伝導単一磁束量子（SFQ）回路で作られ一つのICチップに集積されます。疑似乱数発生器は、M系列アルゴリズムに基づきSFQパルスの二値疑似乱数列を作ります。M系列乱数列は、繰り返し周期を十分に長くとれば、実用的には白色雑音になることが知られています。SFQパルスは微弱なので、各種応用のためにはM系列雑音を後段のパルス数増倍器と電圧増倍器により増倍します。一般的な増幅ではなく増倍と書いたのは、いずれの過程においても電圧波形が量子化SFQパルスの重ね合わせで合成されることを強調するためです。これによって出力雑音波形を高い精度で計算できることが保証されます。より詳しくは文献1)、2)をご覧ください。

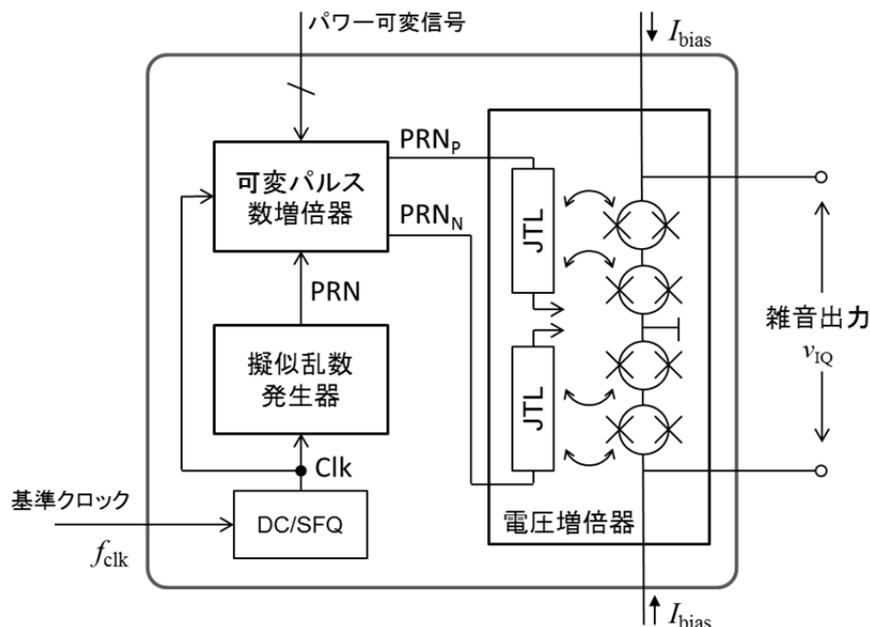


図1 集積型量子雑音電圧源のブロック図

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

超伝導を用いた量子雑音電圧源はもともと米国 NIST が発明しました。これは出力回路（図 1 の電圧増倍器にあたる部分）にのみに超伝導を利用したものです。室温エレクトロニクス機器に起因する問題のため、使い勝手の悪さやコストの点で改善が望まれています（ちょっとわがままな浪費家お嬢様でしょうか）。これらの欠点の改良を目指して提案したのが集積型雑音電圧源です。これまでに設計回路の解析を行い、現在は要素回路の設計試作を進めています。

最後に、たとえ美しい（あくまで主観ですが）とはいえ雑音をどう使うのかという当然の疑問に答えなければなりません。当面の目標は、温度の標準や精密計測のための熱雑音温度計の高度化です。また、高周波機器評価のための高周波雑音標準や、さらに将来はスペクトル拡散通信や暗号通信などへの応用も視野に研究に取り組んでいます。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 25289126 の助成を受けたものです。

参考文献：

- 1) 前澤正明, 山田隆宏, 浦野千春, 信学技報, vol. 112, no. 408, p. 13, 2013.
- 2) 前澤正明, 山田隆宏, 浦野千春, 信学技報, vol. 113, no. 149, p. 33, 2013.

[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

超電導関連 ‘13/10月-11月の催し物案内

10/2-3

超伝導エレクトロニクス (SCE) 研究専門委員会
東北大学・電気通信研究所 ナノ・スピンの総合研究棟 4階カンファレンスルーム
<http://www.ieice.org/es/sce/jpn/>

10/4

2013年第4回冷凍部会 (公開) 例会ー 国際会議報告会ー
KKR 沼津はまゆう
http://www.csj.or.jp/reitob/2013/4th_1004.pdf

10/8

電力・エネルギーフォーラム 超電導電力機器とシステムの高性能・多機能化
産業技術総合研究所臨海副都心センター別館
<http://www2.iee.or.jp/ver2/pes/sys/02-conference/07-13.html>

10/14-17

10th International Workshop on Low Temperature Electronics, WOLTE-10
Paris, France
<http://wolte10.lpn.cnrs.fr/>

10/23-25

7th Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics
Cappadocia, Turkey
<http://www.acasc-tr.org/>

10/28-30

11th EPRI Superconductivity Conference
Houston, USA
<https://custom.cvent.com/0C2B71276B454075AA018365A85CB80E/files/event/53317cc382324286b16d355a85c88cb9/627286ff29604fa4a06f5fbe5b45846d.pdf>

10/29

HTS 冷却システム検討会第1回交流会
産業技術総合研究所 臨海副都心センター 本館 4階第1会議室
<http://unit.aist.go.jp/waterfront/access/index.html>

11/18-20

International Symposium on Superconductivity, ISS2013
Tokyo, Japan
<http://www.istec.or.jp/ISS/>

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

11/21-22

International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2013
Tokyo, Japan
<http://www.supera.titech.ac.jp/ns22013/index.html>

11/30

第16回スターリングサイクルシンポジウム
東京・日本科学未来館
<http://www.jsme.or.jp/event/detail.php?id=2301>

(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

新聞ヘッドライン (8/20-9/19)

- この技術に注目 超電導 究極の送電 実用化目前 8/26 日経産業新聞
- 高磁場コイル 体積5分の1 理研 MRIなど小さく 8/26 日経産業新聞
- 次世代巨大加速器 成るか日本誘致 秋以降の政治判断に焦点 8/26 日刊工業新聞
- 分子研など 超電導トランジスタ開発 有機材で実用的に 8/27 日経産業新聞
- 絶縁部分が極薄の次世代高温超伝導ワイヤを開発 9/13 科学新聞
- 名古屋駅再開発、名鉄と近鉄一体 リニア開業までに完成 【名古屋】 9/14 朝日新聞
- リニア、ルート決定、乗り換え重視、JR 東海社長、早期着工に意欲 9/18 日本経済新聞
- リニア未来図 1時間に5本、運賃11,500円 山梨、フード外す富士山区間 【名古屋】 9/19 朝日新聞

(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

超電導速報—世界の動き (2013年8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



★ 記事のニュース発信地、関連地

▶ 線材



かつてない高特性線材

Oak Ridge National Laboratory (2013年8月15日)

米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) の研究者たちは、超電導線材中のナノスケール欠陥を巧みに制御することで、従来にない性能を有し、かつ、カスタマイズ可能な性能を有する材料を生み出したと報告した。同研究チームは、非超電導物質を少量導入することで、物質全体の挙動に影響を及ぼし、異なる動作条件に適応した超電導線材を作製できると説明している。これらナノスケールのコラム構造にある欠陥を巧みに操ることで、線材の超電導特性を調節する力を制御できる。この研究テーマについて、ORNL チームリーダーである Amit Goyal 氏は、「超電導体内にあるナノスケールのコラム欠陥を導き、性能向上させるだけでなく、我々は欠陥の間隔と密度を修正することで、さまざまなアプリケーションに求められる性能に向けて最適化することができる。」と説明した。同研究チームでは、厚さ 50 ミクロンの銅安定化層を含む線材で、絶対温度 65 K および磁束密度 3 T

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

という記録性能（モーターや発電機など、回転機応用では一般的とされる動作パラメーター）に加え、磁場が印加される全ての角度領域において 43.5 kA/cm^2 ^{*注} という最低エンジニアリング臨界電流密度 (J_e) を得ることができた。この性能レベルは、ほとんどのアプリケーションで必要とされるレベルの2倍以上のものである。これら線材では、成長中に望ましいナノスケールの微細構造の自動生成を可能にする ORNL 開発の自己組織化技術を使用して、欠陥が生成される。同研究チームの研究成果は、Nature Publishing Group の Scientific Reports に掲載されている。

Source: "ORNL superconducting wire yields unprecedented performance"

Oak Ridge National Laboratory press release (August 15, 2013)

URL:

<http://www.ornl.gov/ornl/news/news-releases/2013/ornl-superconducting-wire-yields-unprecedented-performance>

http://www.eurekaalert.org/pub_releases/2013-08/dnrl-osw081513.php

Contact: Morgan McCorkle, mccorkleml@ornl.gov

***注** ちなみに、ISTEC では REBCO 超電導層と Ba-M-O₃ の人工ピン入り線材で世界最高の臨界電流 $I_c=616 \text{ A/cm}$ 幅を得ている (2013EUCAS, 2013ISS. J_e は 51.3 kA/cm^2)。

▶基礎



高温超電導体に隠れた磁場波を発見

Brookhaven National Laboratory (2013年8月4日)

米エネルギー省ブルックヘブン国立研究所並びに共同研究機関の研究者たちは、高温超電導体の磁氣的性質に関して、超電導の起源を説明する主力理論に対して挑戦的とも言える予期外な結果をいくつか発見した。2013年8月4日付けジャーナル誌 Nature Materials のオンラインに掲載された研究の中で、同研究チームは、予想外の磁気励起（研究者の多くが高温超電導を制御するのに重要な役割を果たすと信じている量子波）が、非超電導と超電導物質の両方に存在すると報告した。

研究論文の筆頭著者である Mark Dean 氏は、「これは、実験上、どの磁気励起が高温超電導にとって重要であるかを確かめる重要な手がかりになる。」と述べている。研究では X 線散乱法が使用され、これまで本質的に非磁性であると考えられていた励起状態の可視化がなされた。観察には、ランタン、ストロンチウム、銅、酸素 (LSCO) の薄膜が使用された。これら特殊な高温超電導物質は、大きく異なる様々な電子挙動を示すことができるよう調整できる。研究論文の共著者である John Hill 氏は、「これは、強相関絶縁体から非超電導金属に至る全体相図を調べることができる唯一のシステムであり、我々は、超電導の理想的なドーピングレベル前及びその後の磁気励起を共に測定することができた。」と付け加えた。

物質の成長には、特注の分子線原子層エピタキシー装置 (ALL-MBE) が使用された。ALL-MBE は、リアルタイムで LSCO 膜の合成が監視できるよう独自に装備された装置で、ドーピングレベルの調整をはじめ、各原子層の組成を制御することを可能にし、平らで鏡のような表面を持つ非常に

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

均一のとれた薄膜を生成する。オングストロームスケールの量子リップルを検出するにあたっては、フランスの欧州放射光施設 (ESRF) で行われている高度な X 線発光分光を利用した。また、共鳴非弾性 X 線散乱 (RIXS) として知られる技術も使った。中性子散乱を使用したこれまでの研究では、過剰ドーピングにより、磁気励起が LSCO サンプル内で消滅したように思われたため、量子波が超電導に不可欠な役割を果たしているという理論を支持する結果となっていた。しかし、RIXS 技術は、特定の波長を持つ磁気励起に対してはるかに敏感で、また他の方法では感知できない信号を検出する能力がある。磁気励起の発生はドーピングレベルに依存しないという今回の発見は、これらの薄膜内にある高温超電導と量子波の関係が、これまで考えられていたものよりも更に複雑なものであるということの意味している。

Source: "Scientists Discover Hidden Magnetic Waves in High-temperature Superconductors" Brookhaven National Laboratory press release (August 4, 2013)

URL: <http://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=11564>

Contact: Justin Eure, jeure@bnl.gov or Peter Genzer, genzer@bnl.gov



電子回路による瞬間移動 (teleport)

ETH Zurich (2013年8月14日)

チューリッヒ連邦工科大学の研究者たちは、従来の回路に使用される古典的な物理学の法則ではなく、量子物理学の法則に伴って情報の格納や処理をする従来型コンピューターチップに似たデバイスを使用し、この度、固体システムの一点から別の点に、情報を瞬間移動 (テレポート) させることに成功した。同研究チームは、情報を運ぶ物理的対象を輸送する (transport) ことなく、このシステムを使用することで、約 6 ミリメートル (チップの一角から反対側の隅まで) の距離を超えて情報を瞬間移動させることができたのである。光ファイバー接続におけるモバイル通信や光パルスのマイクロ波パルス転送とは異なり、量子テレポーテーションは、送信側と受信側間の量子エンタングルメント (量子もつれ) などの量子力学的特性を利用することで、情報担体ではなく、情報のみを転送する。物理的に全く異なる送信側と受信側の間のこの量子もつれ状態により、送信側で入力された情報は、受信側で共有され、読み取ることが可能になるのである。言い換えれば、A 地点で入力された情報は、実際に一点から他点へ移動することなく、B 地点で読み取られた時消失するのである。情報をテレポートするのに使用されたシステムは、超電導電子回路 (将来の量子コンピューターの構成において大切な要素になるという点で重要視されている回路) で構成されている。また、このシステムの速度は非常に速く (従来のテレポーテーションシステムよりもはるかに高速)、毎秒約 10,000 個の量子ビットをテレポートすることを可能にする。同研究チームは、光学系を用いて達成したこれらのシステムに匹敵する遠距離量子通信を実現するという目標を掲げ、次のステップとして、デバイスの送信側と受信側間の距離を拡大する計画を立てている。今回の研究成果は、Nature に掲載されている。

Source: "Teleported by electronic circuit" ETH Zurich press release (August 14, 2013)

URL: http://www.ethz.ch/media/detail?pr_id=1179

http://www.eurekaalert.org/pub_releases/2013-08/ez-tbe081413.php

Contact: Andreas Wallraff, andreas.wallraff@phys.ethz.ch, ETH Zurich

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

▶ 経営・決算



財務報告と見通し

AMSC (2013年8月7日)

AMSC社は、2013年6月30日締め第1四半期の決算報告を行った。第1四半期収益は、前年同期の2,870万ドルと比べ、2,310万ドルとなり、純損失は、前年同期の1,030万ドルと比べ、1,050万ドルとなった。また、同社の第1四半期の非GAAPベースによる純損失は、前年同期の1,100万ドルに対して、810万ドルとなった。2013年6月30日時点で、同社の現金、現金同等物、および拘束預金を合わせ、総額3,950万ドルを保有していた。同社は、第2四半期収益が2,300万ドルを超え、純損失は1,700万ドル未満に抑えられる見込みである。さらに、非GAAPベースの純損失は、1,200万ドル未満であると予想している。同社の社長兼最高経営責任者であるDaniel P. McGahn氏は、「当社の第1四半期は、計画通りの業績を続け、その結果、収益を13%伸ばし、純損失を2012年度第4四半期以降の前期比ベースで47%低減した。2013年度は、手元資金を効果的に管理することに重点を置いたまま、収益成長を促進していくつもりである。2013年度通年収益は、2012年度と比べて少なくとも25%は成長させることを期待しており、我々の指針を再確認しているところである。また当社は、確立したいいくつかの市場で既に強固な基盤を築いている上、今後も引き続き大きなチャンスを秘めている新興市場に参入する機会も狙っている。」と述べた。

Source: "AMSC Reports First Quarter 2013 Financial Results and Provides Business Outlook"
AMSC press release (August 7, 2013)

URL:

http://files.shareholder.com/downloads/AMSC/2362775124x0x682753/af53ee69-201a-46cc-bd96-d1e856064521/AMSC_News_2013_8_7_Commercial.pdf

Contact: Kerry Farrell, kerry.farrell@amsc.com

「世界の動き」 その他 (各社新聞発表以外のソースから) *****

・ TresAmigas LCC (米国) の現状

この組合(LCC)は、米国で東部、西部、南部の電力分配および再生可能エネルギー(風力、太陽光)による電力変動の調整を行うもので通称 Superstaion と呼んでいる。高圧直流ケーブルを使う予定である¹⁾が、このたび、本組合による\$1.65b=1650億円のIRB*債権の設定に関して、設置場所であるNM州Clovis市の委員会が全会一致で承認したと報じられた²⁾。10年程度の3期に分かれる工事であるが、最終的に2021年あたりに5GWの電力融通を予定している³⁾。これにより、東西南部米国の電力および再生可能エネルギーによる電力変動を調整して、電力の配分を効率良く行うことができる。当初の予定では、超電導を利用した高圧直流ケーブルを使う(3,000kmのAMSC社線材を使い、ケーブル化は韓国LSケーブル)予定であったが、昨年のCIGRE報告⁴⁾によれば、当面は常電導で行い超電導は計画の後半で検討するようである。

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

電力売買が活発な米国では、こうした電力の配分、制御に関する需要は高い。

* industrial revenue bond IRB 産業振興債

Source:

1) <http://www.tresamigasllc.com>

2) Superconductor Week、June30、2013 年号

3) http://giberson.ba.ttu.edu/public/Harris-TresAmigas_Presentation_2009_11_04.pdf#search='tresamigas'

4) CIGRE21012ParisSession B4-309, N. M. Kirby ら発表 Tres Amigas: A flexible gateway for renewable energy exchange between the three asynchronous AC networks in the USA

・OXI (Oxford Instruments, plc) オックスフォード社売上げ伸長

オックスフォード社は6月11日に2013年3月度(2012年度分)の決算見通しを発表した。それによると売上げ収入は2011年513億円から、2012年は533億円で、税引き前利益は、2011年の63.8億円から2012年73.1億円(14.8%の伸び)に伸長した¹⁾。主にMRI, ITERによるものである。また、超電導線は中国での売上の伸びが大きい。今後も新興国をターゲットに成長を主軸にしている。詳細は社のHP¹⁾やSuperconductor Week²⁾に掲載されている。

超電導に関する製品を主力としているこの会社で、これだけの成長があることは、我々日本で超電導に関わるものとして頼もしく思われる。この分野でも東南アジア新興国をターゲットに据えていることは、今後の展開に参考になる。

Source:

1) <http://www.oxford-instruments.com/news/2013/june/announcement-of-preliminary-results-for-the-year-t>

2) Superconductor Week、June30、2012 号

・中国直流ケーブル その後

5月号“世界のプロジェクト(中国編)”でも紹介したが、Henan Zhongfu 工業社のアルミ精錬工場内に敷設した10 kA-360 m 超電導直流ケーブル Pj が順調に進んでいる。全体で7億円、4年計画であったが、このたび、無事デモ、評価が完了し、中国科学技術院による受取が完了している。使用した線材の1/5はInnost社製、残り4/5は住友電工の線である¹⁾。この直流ケーブルは、12,500 Aを超える臨界電流 I_c を持ち、直径は45 mmでケーブルの全体径も150 mmである。昨年秋の受け入れ試験後、ずっとアルミ工場に電気を供給し続けている。Henan Zhongfu 工業によれば、2年で1本の1 km ケーブルを作ることができるとのこと¹⁾。この会社は本ケーブル計画に多額の投資をしており、中国では超電導電力機器への高い需要があることを示している。

Source:

1) Superconductor Week、June30、2012 号

・Bruker 社 ワインテイステイニングにも超電導：分析用 NMR

ブルカー社は安価なワイン用 NMR を発売した¹⁾ この装置は、110 ものワイン成分を分析してデー

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

タを作ったもので、ワインの産出地方、ぶどう種、製造年などを調べることができる。従来より低コストな装置になった。5000以上のワインを15か月間調べて、本NMR装置“WineScreener”の分析データを集めた²⁾。同社によれば、化粧品、薬の分析にも使えるであろうとのこと。本装置は、2013年 Intervitis/Interfructa 見本市³⁾で賞を受賞している。世界的なワインの需要の高まりから、ワインの認証に大いに役立つと思われる。

高度なソムリエ技術も不要になるかもしれないが、それはそれで寂しいものかもしれない。新しい超電導の応用分野として期待したい。

Source:

1) <http://ir.bruker.com/phoenix.zhtml?c=121496&p=irol-newsArticle&ID=1810498&highlight=2>

2) www.bruker.com/en/products/mr/nmr/food-screener

3) <http://www.messe-stuttgart.de/intervitis-interfructa/>

・液体 He 蒸発がゼロの NMR : 戦略物資 He の有効活用 (株) JEOL RESONANCE 社

本誌6月号にも掲載したが、海外で無冷媒 NMR, MRI の開発が活発である。これは、昨年からの世界的な He の枯渇、高騰によるが、国内でも液体 He の消費を減らす製品開発に努力が注がれている。今回、国内の(株) JEOL RESONANCE 社は、液体 He の補給がいない NMR を世界で初めて開発した。製品は 400MHz(9.39T)-NMR で、冷凍機による振動とそれによる液体 He の蒸発を抑え込みゼロボイルオフの装置を完成させた。昨年の He 枯渇は、He を供給している米国エクソン社、BLM (米国土地管理局) のプラントトラブルに端を発しているが、米国のシェールガスが増産になると天然ガスの採掘需要が減り、結果その副産物である He も量が減ることになる。また、新興国の人口増は今後も続き、他資源同様 He の争奪戦も起こることが予想される。こうした理由のため、今回のような He 資源使用量を抑えた製品開発の需要は大いに高まると予想される。

SuperCom, 超電導コミュニケーションズ vol.22 No.4 (2013).P1, 5.

<http://www.j-resonance.com/products/story/story01/> (株)JEOL RESONANCE 製品情報

・創薬用新磁気分離システムの開発 : (有) ネット他

癌、リウマチなどの治療薬として抗体医薬品があるが、その製造には抗体の精製分離が必要である。今回、(有) ネットはその分離を超電導マグネットを用いたシステムで行うための高勾配磁気分離 (HGMS) 用超電導マグネットを開発し、実際にナノビーズを用いた分離試験を行い良好な結果を得た。超電導による 3 T の (中心) 高磁場かつ高磁場勾配の発生が可能であり、そのため、従来の分離用ビーズではマイクロサイズの大きさが限界であったものをナノサイズにでき、大幅に処理速度が向上することである。今後の事業化が大いに期待できる。

Source: SuperCom, 超電導コミュニケーションズ vol.22 No.4 (2013).P1, 3.

・分子研 世界で初めて、有機物に電圧を加えて超伝導を実現

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

8月23日、自然科学研究機構 分子科学研究所（協奏分子システム研究センター）は、世界で初めて有機物に電圧を加えて超伝導を実現したと発表した。最先端のシリコンテクノロジーに用いられている「歪み制御」技術を用いて、有機物に電圧を加えることで動作する超伝導スイッチを開発した。この技術により、将来、低コスト・省エネルギーで製造可能なフレキシブルデバイスができる可能性がある。今回、 κ -Br (κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Br) という有機物質を用いて電界効果トランジスタを作り、その歪みをゲート基板によって制御することで超伝導スイッチを実現した。 κ -Br 有機物と無機ゲート基板（ニオブをドーピングしたチタン酸ストロンチウム：Nb-SrTiO₃）との熱膨張係数ミスマッチにより歪みを制御する。 κ -Br の歪みをちょうど超伝導と絶縁体との間で相転移が起きるぎりぎりの状態にし、ゲート電圧 (V_G) をかけて電場を加えると、電圧が 9 V のところで超伝導状態へと変化して、電気抵抗が突然下がる(臨界温度約 5 K) という現象が観測された。結果は、英国 Nature 姉妹誌 "Nature Communications" に 8 月 23 日に掲載される。

Source: <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20130823/>

[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

「EUCAS2013 Coated Conductor 関係発表」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 線材・パワー応用研究部
部長 和泉輝郎

Coated Conductor 関連のセッションとしては、Coated Conductor 名のセッション以外にも、Plenary Talk、Flux Pinning and Critical Current、HTS Films and Multilayers の一部で Oral 47 件 (内招待講演 8 件)、Poster も 65 件の発表があった。主な内容を以下にまとめる。

2 日目の Plenary Talk では、ICMAB(Spain)の Obradors 氏が EU 地域の Y 系線材のプロジェクトである EUROTape のこれまでの成果をまとめた。このプロジェクトでは、配向中間層基板として、ABAD(Bruker)、TiN-IBAD(IFW)、RABiTS(evico)を、超電導層としては PLD(Bruker)、CSD(ICMAB, OXOLUTIA)、All-CSD(ENEAD, DTU) が主に選択されて取り組んでいる。これまでの成果としては、DTU で短尺ながら All-CSD 法により 1 μm 厚で 1.8 MA/cm² の J_c を、OXOLUTIA では ABAD 上で 10 cm ながら 2 MA/cm² (108 A/cmw) の特性を得ている。また、トピックスとして、ICMAB が CSD の磁場中特性向上技術に関して、BZO 添加に加えた上に熱処理の改良により microstrain を導入する技術や Robel 導体を用いた Rutherford 導体の試作に関して紹介がなされた。参画機関が多いので元気は感じるが線材としては、日米の 5 年以上前のレベルであることは否めない。

Coated Conductor のセッションとしては筆者が M-PACC プロジェクトの成果と今後の予定に関して招待講演を行った。このプロジェクトでは、多くの成果が出ているが、特に APC 導入線材において PLD 及び MOD のいずれの線材においても高い $J_c (>50 \text{ A/cmw}@77\text{K}, 3\text{T})$ で長尺化に成功したことである。特に、PLD 線材では BHO の発展系の新しい組合せ線材で 141 A/cmw@77K, 3T の非常に高い特性を得ている。同様に、交流損失低減のための分割線材に関しても 100 m 長尺線材で 10 分割—損失 1/10 を実現している。これらの成果は、世界的にも傑出している。加えて、新しいトピックスとしては、剥離に関する解析と対策を紹介した。また、今後の開発への動きとして新たなプロジェクトに関しても言及した。

HTS Films and Multilayers のセッションでは、SuNAM の Moon 氏が同社での最近の開発状況について招待講演を行った。特筆すべきは、これまで $J_c \times L$ 値では世界 2 位の線材を持ちながら、均一性に不安がある線材の印象が強かったが、基板の管理、超電導層成膜時の組成の厳密管理で劇的に均一性が改善している点である。

米国の動きとしては、amsc 社の Flesher 氏が均一性の改善で $\sigma=2\%$ 紹介し、SuperPower 社の Hazelton 氏が Modified MOCVD 法による磁場中特性の改善 (従来の 3 倍) の紹介をしたが何れも、他の学会で聞いたもので、総じて技術的な大きな進展は感じられなかった。一方で、STI 社の Huh 氏から 100 m 線材で $J_c(\text{ave.})=350 \text{ A/cmw}$ の報告があった。同社は IBAD 基板に MOD 法で平滑化を施し、RCE-CDR 法で超電導層を形成する組み合わせで線材開発に取り組んでいたが、これまで上述 2 社から大きく後れを取っていたが、少し進展した感じがする。

EU の動きは上述の Obradors 氏がまとめているが、その他の発表でのトピックスとしては、Bruker 社からの報告で初めて長尺成果が少し出てきたことである。100 m 以上の複数の線材で、250 A/cmw レベルの特性を得ている。7 m では 541 A/cm も紹介した。但し、依然として本格的な長尺装置は立ち上げ中とのことであった。

[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

「EUCAS2013 接合及び SQUID 関係発表」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 物性・デバイス研究部
主管研究員 波頭経裕

接合及び SQUID に関する講演は、12 カ国の研究者からポスター42件 (51 件予定)、口頭講演 17 件、プレナリー1 件が実施された。応用では実用機を含め、日本は資源探査、非破壊検査、医療、異物検査など、様々な応用に分散している一方、ヨーロッパは TES などの高感度センサのリードアウト、台湾、韓国は医療、アメリカは顕微鏡、中国は医療、資源探査、非破壊検査、オーストラリアは資源及び人工物探査に関連した研究発表を行った。特に昨年まで画像を得る事がテーマだった低磁場 NMR/MRI では、クリアな画像を得るための課題が整理され、そのブレークスルーへのチャレンジに議論が移行している。一方、「きれいな画像を得る」という正攻法の他、用途を特化する事、他の評価システムと融合させ、活路を開拓する動きも活発である。

まず、接合および SQUID 作製技術であるが、ナノ SQUID、P-N 型超電導体を組み合わせたランプエッジ、Au 粒子による I_c 低下を利用したナノブリッジなどの報告の中、ドイツ Julich の Faley 博士のステップエッジ接合の報告が注目を集めた。ランプエッジ接合と比較してプロセス行程が簡略化できることから、世界が注目しながらなかなか成果につながらなかったステップエッジ接合だが、氏は精細にステップ形状を観察し、再現性あるプロセスを確立し、77 K での I_c が 20 μA 、 $I_c R_n$ 積が 600 mV の接合を実現している。ISTEC の塚本博士らはランプエッジ接合の上部電極を広げ薄膜磁気シールドとして SQUID インダクターを覆う構造を開発し、SQUID の磁場耐性を改善した。

また、実装技術では、オーストリアの RUAG 社が、渦電流を抑えてかつ熱ノイズを低減できる新しいデザインのスーパーインシュレーションの報告を行い、熱放射を従来比較で 60 %低減させる事に成功している。

SQUID 医療応用のセッションでは、発表 16 件中 6 件が台湾のグループである。彼らは磁気微粒子が検査や薬品誘導の後、代謝によって体外に安全に排出され、健康に害を及ぼさない事をラットを使った実験で明らかにし、臨床応用の準備を着々と進めている。また、腫瘍と正常細胞のコントラストが大きいことが低磁場 NMR/MRI の特長としてすでに知られているが、今回ラットの肝臓癌を利用して、7 T の強磁場 MRI よりも低磁場 MRI が検出精度に優れている事を示し、低磁場 MRI の応用の一つを明確に示した。

Julich が研究を進めている BSC (Bootstrap Circuit) を、SQUID のリードアウトとして MCG と資源探査 TEM への応用を紹介している。そのメリットは、回路が比較的シンプルである事、出力電圧が大きい事などがあげられる。そのため、スルーレートが高くシールドレス環境での応用に適しているとの主張である。

低磁場 NMR/MRI の最大の課題は、解像度の低さにある。その解決方法のポイントは 3 つある。1 つは Pre-polarization Field (B_p) を大きくする事である。そのために KRIS 博士らは、NbTi 超電導コイルと銅コイルを同じ電氣的パラメータで設計し比較している。しかし、超電導コイルでは磁場トラップによる磁場振動が、かえって測定ノイズを増大させると結論づけた。また、フィンランド Aalto 大の Zevenhoven 博士らは、Nb フィラメントに高温超電導リードを接続して熱流入を押さえたマグネットでの B_p の増大を試みたが、20 mT 以上では磁化してしまい、どのようなコイルが LF-MRI にふさわしいか、議論を投げかけている。一方、豊橋技科大の田中教授らのグループは、コイルでパルス磁場を与えるのではなく、永久磁石で強磁場を与えておいて、試料を物理的に動かして強い B_p を与える手法を用いている。2 つ目の方法は、画像化するシーケンスを改善す

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

る事であり、中国科技大学の Zheng 博士らのように Bp を変化させ、緩和時間のコントラストを画像化する試みなどが報告された。3 つ目のポイントは、ピックアップコイルのノイズの低減で、九州大学の円福教授の報告のように、コイルを冷却する手法の有用性が示された。

冷凍機を低ノイズで使用方法も模索されている。KRISS の李博士らは、MCG および MEG をパルスチューブの冷凍機を使ったシステムでの実現を目指している。クライオクーラーのノイズを避けるため、SQUID と冷凍機を空間的に離す事が必要で、1.5 m 距離を離している。

世界に2千6百万人いると言われるアルツハイマー患者の早期診断を簡単に行うための装置開発も進んでいる。台湾の Yang 博士らは、HTS-SQUID 磁化率計を用い患者に負担の少ない血液検査のみで、軽度認知症とアルツハイマー型認知症の分離まで行うことに成功している。

癌の早期診断の開発も進められている。ロスアラモスの Magnelind 博士らは、超常磁性緩和時間測定法 (SPMA) の逆問題解析の弱点を低温超電導 7 チャンネルの LF-MRI で補う事で、検出精度の向上を図っている。

シールドレスで SQUID を動作させる工夫も各国で行われている。北京大学の Wang 博士らもフルテンソルグラジオメータを回転させる計測方法を、金属内のクラック検出の手法として提案している。PTB の Voigt 博士らは、絶対磁場を計測するために LTS-SQUID を回転させる手法を用いている。

センサとしてではなく、SQUID を出力装置として使用する試みもイタリアやオランダのチームで行われている。オランダの Kiviranta 博士らは、738 個の LTS-SQUID アレーを用いて TES のリードアウトの開発を行っている。

顕微鏡応用では、アメリカ NEOCERA の Talanov 博士らが、ロジックやメモリーの非破壊欠陥検出のため、GHz オーダーでの計測が可能な SQUID 顕微鏡の開発を行っている。実験では 200 MHz に留まっているが、律速しているのは RF ロックインアンプで、SQUID エレクトロニクスが原因ではないとの見解である。コロラド大の Embon 博士らは、針の先端に直径 228 nm の Pb 超電導 SQUID の作製に成功し、それを用いた顕微鏡で静的、動的磁束の観測に成功している。

[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

「EUCAS2013 電力機器関連開発発表」報告

京都大学大学院
エネルギー科学研究科
教授 白井康之

電力機器に関する発表は、口頭で Electrical Power Grid I,II の 2 セッションの 14 件、ポスターで Power Transmission Lines, Power Devices I, II, Fault Current Limiters I, II, Energy Systems の 6 セッション 74 件、関連セッションで Magnetic Levitation bearings (フライホイール関連 4 件)、Cable Design (電力ケーブル関連 6 件) の合計 98 件であった。

電力ケーブルに関しては、住友電工より東京電力・旭変電所における実系統連系運転状況が報告された。ドイツエッセンの 2 変電所間を Bi 系 AC 超電導ケーブル (10 kV,40 MW) で結ぶプロジェクト (AMPACity) は、ケーブルと限流器それぞれの個別試験が終了し、2013 年末までに試運転を行う予定であるとのことである。

DC 送電ケーブルでは、日本から 200 m 長の長期運転結果 (中部大)、鉄道用 DC ケーブル (鉄道総研、東大)、韓国から実系統向けの開発についての報告があった。ロシアからは、長距離 DC 送電の計画の他、サンクトペテルスブルクプロジェクトとして、大都市への DC 送電 (50MW:20kV,2.5kA 2500m) をめざし、2 本の 30 m テストケーブルを試作し、パワーリード・カップリング試験も終了。今後コンバータも含め 2014 年末までに製作するとの報告があった。

その他ケーブル関連としては、サブクール窒素強制対流冷却ケーブルの温度・圧力の過渡安定性解析 (早大)、絶縁関連、接続、端末などについての発表があった。ロシアから水素冷却 MgB₂ 超電導ケーブル試験結果と次期計画の説明があった。限流機能を持つ超電導ケーブルについて (SFCLC) 名古屋大から報告された。

限流器に関しては、ECCOFLOW プロジェクトが 24 kV-1 kA 級抵抗型 (Y 系線材) を完成し、試験準備に入っていると報告があった。イタリアのミラノ変電所に設置した 9 kV : 220 A の Bi 系抵抗型限流器の 1 年のフィールドテストの報告があった。また、中国 Innopower から 220 kV/300 MVA FCL の実系統運用について発表された。その他、抵抗型ばかりでなく、過飽和鉄心を用いたもの (4 件)、誘導型ほか、冷却・復帰特性に重きを置いた発表が多くあった。

SMES に関しては、出力変動の大きい自然エネルギー発電を導入した電力系統への適用を想定した SMES 研究が 5 件あった。KIT (独) の提案している LIQHYSMES は、液体水素を長周期変動吸収に、液体水素冷却 SMES を短周期変動吸収に用いる電力調整機能を持たせている

変圧器では、ニュージーランドから AC ロス低減のため 2G テープの ROEBEL ケーブルを用いた 1 MVA3 相、1100/415 V の試作器が紹介され、70 K 冷却で AC ロスの評価をし、現在試験中であると報告された。

回転機のトピックとしては、風力発電向け設計開発、Axial 型モータが多く発表されていた。MgB₂ を利用した東京海洋大学から、Bi 線材で巻いた回転子界磁コイルに磁場をリンクさせにくくする鉄系材料を配置して、損失を低減した結果が発表された。単極機について、オーストラリアの GUINA R&D から、低速度・高トルクの利用として紹介された。

[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

読者の広場

Q&A

Q : 「対称性の破れた超電導体、とは何でしょうか？ どういう効果が期待されるのでしょうか？ 室温超電導に繋がるのでしょうか？」

A : 高磁場中では超電導体の特性が劣化することが知られています。それが超電導材料の実用化に際して深刻な問題となることがあります。

さて、そもそも超電導体はなぜ高磁場中ではその特性を失うのでしょうか？ その原因は2つあります。一つは超電導体に磁束が侵入することです。これを「軌道対破壊効果」と呼びます。超電導体の実用化に向けて、ピンニングセンターを導入することでこの効果を抑制する研究が盛んに行われています。しかし、より高い磁場では、もう一つの原因である「常磁性対破壊効果」が超電導性を抑制することがあります。これは、高い転移温度を有する高温超電導体において特に深刻な影響を及ぼします。

この効果を避ける方法の一つとして、そもそも常磁性対破壊効果が小さな超電導体を用いることが考えられます。実際に、そのような超電導物質が最近の研究により発見されています。東北大学が発見したセリウム化合物 (CeRhSi_3) や大阪大学が発見した CeIrSi_3 がその実例です。これらの超電導体の特徴は、結晶構造に「空間反転対称性」がないことです。空間反転対称性とは、鏡に映った世界とこちら側の世界が同じであることを意味します。しかし、超電導体の結晶構造を鏡に映したとき、元の結晶構造とは違うものに見えることがあります。そのようなときに常磁性対破壊効果が小さくなり、高磁場中でも超電導転移温度が現象しなくなります。

しかし、このような特殊な結晶構造を持つ超電導体はそれほど多くありません。新潟大学、スイス連邦工科大学、京都大学の研究グループは共同で、常磁性対破壊効果が小さくなる別の物質群があることを提唱しました。そのような超電導体の特徴は、空間反転中心に原子がないことです。これを「局所的な空間反転対称性がない超電導体」と呼びます。そして、京都大学の研究グループが開発したセリウム化合物とイットリビウム化合物の人工超格子を用いて、局所的な空間反転対称性の破れを導入することで実際に常磁性対破壊効果を抑制し、上部臨界磁場が大きくなることを実証しました。「局所的な空間反転対称性がない超電導体」は無数に存在することから、今後幅広い物質群を用いた研究が行われるでしょう。

実は、高い転移温度を有する高温超電導体は全て「局所的な空間反転対称性が破れた超電導体」の例に含まれます。銅酸化物高温超電導体や鉄化合物の高温超電導体がその実例です。もしかすると、このような結晶構造の特徴が、高温超電導を実現している原因になっているのかもしれませんが。この点は今のところ未知数ですが、将来室温超電導体を実現するための鍵となるかもしれません。

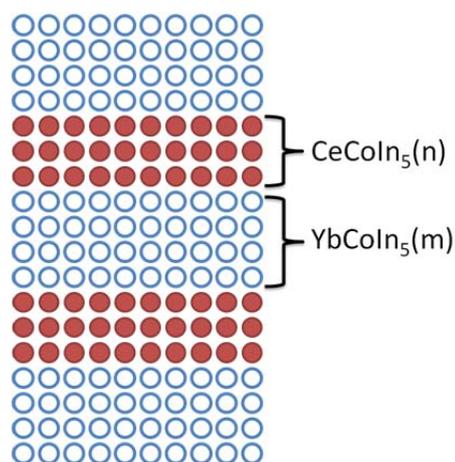


図1 人工超格子 $\text{CeCoIn}_5(n)/\text{YbCoIn}_5(m)$ の結晶構造の模式図

回答者：新潟大学 理学部物理学科 准教授 柳瀬陽一 様

[超電導 Web21 トップページ](#)