

掲載内容 (サマリー):

特集: 超電導デジタルデバイス

単一磁束量子 MPU 技術の展望
サーバ用超電導 SFQ メモリ開発に着手
ルータ用 2x2 パケットスイッチの技術開発状況
200 級接合回路による ADC の高速動作実証への期待
固体量子ビット研究の進展
ISEC2003

超電導関連 9-10 月の催し物案内

新聞ヘッドライン (7/16-8/19)

超電導速報 - 世界の動き (2003 年 7 月)

標準化活動 - 規范文書 PAS、TS の制定に期待 -

超電導応用研究会・東北・北海道支部 合同シンポジウム参加報告

IWCC11 会議報告

隔月連載記事 - パルス管冷凍機の誕生と変遷 (その 5)

読者の広場(Q&A) - 最近 SFQ 回路という言葉を目にしますが、SFQ 回路って何ですか?

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

発行者

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

〒105-0004 東京都港区新橋 5-34-3 栄進開発ビル 6F

Tel (03) 3431-4002 Fax(03) 3431-4044

超電導 Web21 トップページ: <http://www.istec.or.jp/Web21/index-J.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。

単一磁束量子 MPU 技術の展望

名古屋大学
大学院工学研究科
助教授 藤巻 朗

半導体、とりわけ CMOS-LSI はその動作周波数と集積度をスケーリング則という確固たる指導原理に従って伸ばし続けてきた。しかしながら、現在、その指導原理そのものに由来する大きな障害が発生している。もっとも危惧されるのは、LSI の発熱である。様々な低電力化や冷却効率の向上を図っても、発熱の問題から 20GHz 以上での CMOS-LSI の構成は極めて困難となっている。さらに配線も高速化を阻害する要因になっている。実際、バスのような長い配線の遅延時間は微細化とともに急増し、既にクロック周期に近づきつつある。

単一磁束量子 (SFQ) 回路は、配線も含めた高速性と低消費電力性、さらには集積化技術を兼ね備えた唯一の回路である。これらの特長は、SFQ 回路には数十 GHz 以上で動作する MPU の構成デバイスとして、大きな優位性があることを意味している。この点から、SFQ-MPU の研究は米国で先行して実施され、FLUX-1 (8bit - MPU) などが設計・試作されている。

日本でも、NEDO の支援を得て、アーキテクチャの専門家を含めた大学の連携で SFQ-MPU の開発に当たっている。室温周辺回路とバンド幅などでマッチングを取らなければ高性能性を発揮できないことを考慮し、今の研究では、SFQ 回路の高速性を回路の複雑さの解消に生かすようにしている。この考え方を CORE (Complexity Reduction) と呼んでいる。

動作が 50GHz を超えるような MPU では、演算されるデータ間のタイミングの調整が困難になるほか、並列伝送の場合、データ内のビット間でのタイミングのずれも無視できなくなる。これらの問題に対し、bit-serial もしくは bit-slice といったデータ処理法は有効な解決法になる。現在研究中の CORE1 では、データを bit-serial で処理することにより、非常にコンパクトに MPU を構成している。図 1 は CORE1 の写真で、回路は 16GHz で動作する。今後、2004 年には ALU を複数個搭載し高効率化を図った CORE1β を、そして 2005 年には新しいアーキテクチャに基づく CORE2 を、さらに 2006 年には、それらを 1 チップ上に複数個搭載した CORE3-MPU へと開発を進めていく。CORE3 の計算機構成法はスケラブルとなっており、集積度の更なる向上と MCM などの実装技術が開発されれば、半導体 MPU の性能を凌ぐことも可能と考えている。

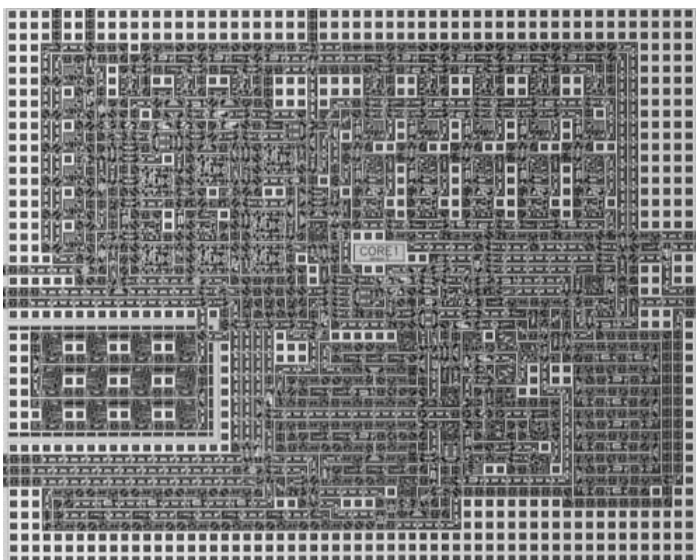


図 1 CORE1-MPU の顕微鏡写真
回路作製は NEC 標準プロセスによる。

サーバ用超電導 SFQ メモリ開発に着手

横浜国立大学
大学院工学研究院
吉川信行

我々は、現在 NEDO の「低消費電力型超電導ネットワークデバイス開発」プロジェクトにおいて SFQ サーバの開発を行っている。SFQ サーバの実現において、最も重要な要素回路技術の 1 つがメモリである。如何に高速のマイクロプロセッサを開発しても、プロセッサとメモリ間のアクセススピードが十分に速くなければ、高速のデータ処理は行えないからである。実際、半導体マイクロプロセッサでは、クロックスピードは数 GHz に達しようとしているが、メモリのアクセス時間は SRAM でも数 ns 程度であり、これを如何に隠蔽するかが、重要な課題となっている。

これまでに多くのラッチ型回路を用いた超電導メモリが開発が行われてきたが、我々が実現しようとしている SFQ サーバには適さない。これは、信号をレベル論理に変換する必要があるため、スピードや消費電力の面で効率的ではないからである。一方、SFQ 回路を用いたメモリは、これまでに幾つかの提案があるものの、駆動力が小さいという SFQ 回路の本質的な性質のために、メモリセルの 2 次元アレイに基づく回路アーキテクチャは難しいと考えられてきた。

以上の問題を解決し、高速で大容量の SFQ メモリを実現するために、われわれは SFQ シフトレジスタのアレイを用いたランダムアクセスメモリの開発に着手し、プロトタイプシステムの高速動作実証に成功した。我々が開発している SFQ メモリの概念図を図 1 に示す。メモリは、SFQ シフトレジスタのアレイと、アドレスデコーダから成る。データはワード単位のビットシリアルデータとして各シフトレジスタに格納される。この方式では、クロック周波数を SFQ 回路の限界まで高めることができ、メモリ構造も簡単なため集積度が高い。また、データ形式の面で SFQ サーバとの整合性も良い。デコーダは、1 対 2 スイッチのツリーで構成され、大規模メモリにおいても高速なアクセススピードが可能となる。

今回、試作した 4×8 ビット SFQ メモリのチップ写真を図 2 に示す。設計には、名大、SRL、通総研、横国大で共同開発した

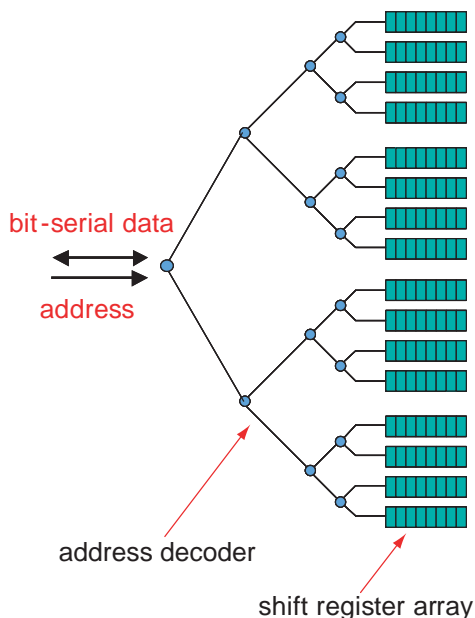


図 1 SFQ メモリの概念図
SFQ シフトレジスタとアドレスデコーダで構成される。

CONNECT セルライブラリを用いている。集積回路の製作は、NEC の Nb スタンドプロセスを用いた。高速テストのための周辺回路まで含めた回路の全接合数は 2,300 であり、寸法は 1mm × 2mm である。オンチップ高速テストにより、任意のアドレスレジスタへの 20GHz での書き込み読み出し動作を確認した。今後は、本メモリの大規模化を行い、1 年以内に 1kb システムの実現を目指す。

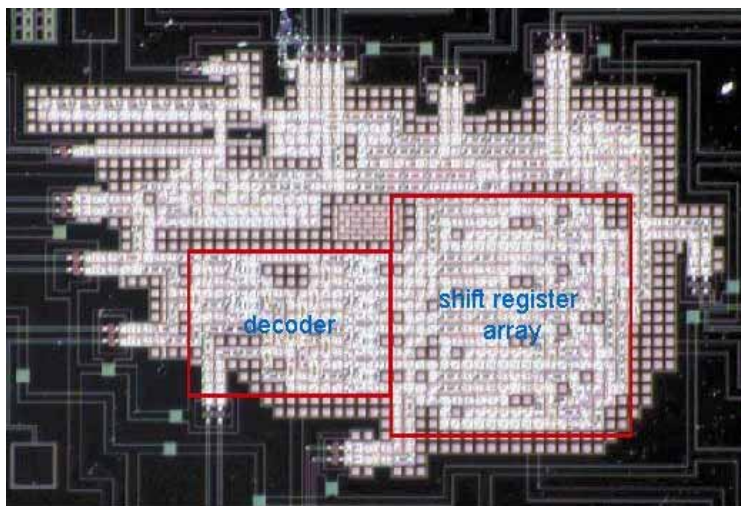


図2 4×8ビットSFQメモリのチップ写真
枠で囲まれた部分が、SFQメモリの本体。
他は、高速テストを行うための周辺回路。

[超電導 Web21 トップページ](#)

ルータ用 2x2 パケットスイッチの技術開発状況

ISTEC 超電導工学研究所デバイス研究開発部低温デバイス開発室（以下 SRL 低温デバイス開発室）は、NEDO の委託による低消費電力型超電導ネットワークデバイスの開発事業として、超電導 SFQ 技術を用いたパケットスイッチの研究開発を行っている。

社会の IT 化進展に伴い、ルータへの性能要求は増大する一方である。しかし、半導体技術を用いて必要な性能向上を続けることは、処理速度・消費電力・実装などの問題により困難になりつつある。SFQ 回路技術は高速動作・低消費電力を特徴とする新しい回路技術であり、現在の電子ルータが抱えている諸問題を解決する技術として期待されている。

グループではアーキテクチャレベルからの研究をおこなっているが、実証実験の第一歩としてパケットスイッチの基本回路である 2x2 パケットスイッチ回路の設計・試作と動作実験を試みた。2x2 スイッチは二つの入力パケットを行き先にあわせて切り替える回路である。小規模だがランダム論理回路であり、設計手法としてはトップダウン・セルベース設計が必須と考えられる。我々はケイデンス社の CAD をベースに SFQ デジタル回路向け設計環境を構築した。セルライブラリは名大、横国大、通信総研、SRL 低温デバイス開発室（NEC 基礎研）の産官学共同で開発し、CONNECT と名づけた。また、今後の回路規模増大をにらみ、回路の自動配置配線レイアウトツールも新規に開発した。これらのツールとライブラリを用いて 2x2 スイッチを設計した。図に NEC 標準プロセスで作製された回路を示す。CONNECT オンチップ回路テストブロックを用いた動作実験の結果 40GHz までの安定な正常動作を確認した。現在、パケットスイッチ回路動作速度としては世界最高水準にある。

グループでは、スイッチ回路規模拡大のため、回路間の配線を現在のジョセフソン線路（JTL）からマイクロストリップ線路などの受動線路（PTL）に置き換える技術開発を行っている。この技術により回路規模・消費電力を大きく削減でき、動作遅延も小さくすることができるため、大きなイノベーションが SFQ 回路技術にもたらされる。今後、このような新技術を組み合わせ、SFQ スイッチ規模を拡大し、実用化を目指す。

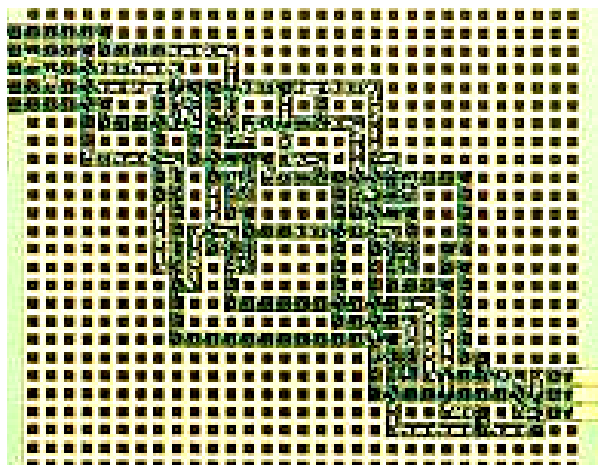


図 2x2 クロスバースイッチ

（SRL/ISTEC デバイス研究開発部低温デバイス開発室 萬 伸一）

[超電導 Web21 トップページ](#)

200 級接合回路による ADC の高速動作実証への期待

酸化物系の SFQ デバイスでは、高度な積層膜形成技術を必要とし、未だ回路作製技術が成熟していないために、Nb 系の SFQ 回路と同等の集積度を得るのは困難である。一方、酸化物デバイスは 30K 以上の高温で動作でき、出力電圧の高い接合を得るのが容易なため、高い動作周波数を実現できる。たとえば、ランプエッジ接合を用いて日立製作所で作製されたアナログ・デジタル変換器； Analog-to-digital converter (ADC)モジュレータ回路は温度 20K で 100GHz の動作周波数が得られた。SRL で作製した ADC 比較回路は 80GHz の動作周波数が温度 40K で計測された。これらの結果は酸化物デバイスの高速動作の可能性を示したものである。

2003 年度から開始されたプロジェクト「低消費電力超高速信号処理技術開発」では、酸化物系の SFQ 回路で、より機能的な回路を作製し、高速動作を実証することを狙いとしている。なかでも ADC は高速動作が性能に結びつく回路である。サンプリング周波数を高くするほど、ADC のビット精度は向上する。酸化物系で ADC モジュレータを作製すれば、100GHz のサンプリング周波数でアナログの入力信号をデジタルの SFQ 列に変換可能である。ただしモジュレータでは、出力は 1 ビットである。周波数を落として多ビット化するためのデジタルフィルター回路を設けるか、周波数のみを落として、多ビット化の処理は半導体回路に預ける構成が考えられる。比較的低い集積度で実現できる前者の構成を採用するのが現実的である。モジュレータの後段に、高周波の SFQ 列出力を並列化して、周波数を低減するデ・マルチプレクサを接続した ADC 回路を開発目標に据えて、研究を進めている。

超高速 ADC の実現は無線通信や計測の分野で求められている。とくに伝送速度 100Mbps が想定されている第 4 世代ブロードバンド携帯の基地局では、現在の半導体技術を遙かに越える大容量のデータ処理を必要とする。このための ADC には数百 MHz で 14 ビット以上という高速性能が要求される。酸化物デバイスでも、到達するには高速性能を十二分に発揮させる必要がある。

(SRL/ISTEC デバイス研究開発部 樽谷良信、田辺圭一)

[超電導 Web21 トップページ](#)

固体量子ビット研究の進展

NEC 基礎研究所
主席研究員 蔡 兆申

固体量子ビットで現在最も研究が進んでいるのは、超電導ジョセフソン量子ビットと半導体量子ドット量子ビットである。以下にこれら分野での研究の最近の進展を簡単に説明する。

ジョセフソン量子ビットには電荷と位相の自由度があり、それらを利用した幾つかのタイプの量子ビットが既に1ビットのレベルで実現されていることに関して前回報告した。(「超電導 Web21」2002年1、3、5、7、9、11月号「隔月連載記事」欄参照) 具体的には99年のNECの電荷量子ビット、02年のカンサス大学の位相量子ビット、02年のSaclayの電荷と位相の自由度が共存する量子ビット、02年のNISTの位相量子ビット等である。カンサス大学とNISTの位相量子ビットは、位相がよい量子数である単一のジョセフソン接合において、同じ位相で複数の異なったエネルギーの状態を作り、そのうちの二つの状態を量子ビットとして利用する実験であった。その後03年にDelft工科大学で違った種類の位相量子ビットが実現された(Science, 229, 1869, 2003)。これは3接合SQUID状の素子であり、インダクタンスループがあるため、位相状態にグローバルなエネルギー極小状態が存在する。量子ビットとして、このようなエネルギー極小状態を外場の調整により二つ準備し、その二つの状態で構成される固有状態を量子ビットとして使う。このタイプの量子ビットは巨視的な超電導の位相に加えて、超電導ループに誘起される巨視的なスクリーニング電流を伴っていることが特徴的である。

以上は1量子ビットの制御の実験であるが、2量子ビットの実験についての進展が最近あった。NEC/理研のチームは電荷量子ビットを二つ静電的に結合させ、二つの量子ビットを同時に量子振動させる実験に成功した(Nature, 421, 823, 2003)。その結果二つの量子振動間にビートが見られた。この結果を解析することにより、量子絡み合いが生成されていたことが立証された。その後、エネルギー領域のみの実験であるが、単一のジョセフソン接合を静電的に二つ結合させた系においての結果が報告された(Science, 300, 1548, 2003)。量子絡み合いがこのように実現した事で、量子情報処理に必要な万能ゲートの、固体素子による実現に一步近づいた。

半導体量子ビットの実験においてNTTは二つの量子ドットを結合させた量子ビットの制御の実験に成功した(cond-mat/0308362)。これは二つのドットのどちらかに余剰の電子がある状態を量子ビットとして使う方式のものである。デコヒーレンス時間は典型的な超電導電荷量子ビットと同程度の数ナノ秒であった。ミシガン大学は一つの量子ドット内で二つのエキシトン誘起させる系で、量子論理ゲートに利用できる状態間転移の実験に成功している(Science, 301, 809, 2003)。

[超電導 Web21 トップページ](#)

ISEC2003

超電導エレクトロニクス国際会議 (International Superconductive Electronics Conference、ISEC2003) が、2003年7月7-11日の5日間シドニーで開催された。ISEC は2年に一度の頻度で開催されており、今回で9回目を数える。参加者は約250名ほどであった。会場となったのは、有名なオペラハウス横からフェリーで30分間ゆられ、太平洋へと続くタスマン海に望むリゾート地マンリービーチにあるホテルであった。ただし7月は一年で最も寒い季節とあってオフシーズンである。とはいうものの東京の四月くらいの気温で快適そのものであった。天候にも恵まれ、夜は浜辺を散歩して南十字星を仰ぎ見ることができた。会議では基礎から応用まで広範な発表があったが、どちらかという、材料やプロセスよりは、回路やシステムといった実用化を意識した発表が多かった。会議の二日目には、超電導デバイスには必須のクライオパッケージングに関する特別セッションが組まれた。会議の内容について、用いられる材料をもとに低温系および高温系に分けて報告する。

低温超電導体では、大規模及び小規模のSFQデジタル回路応用を中心に、RFアナログ応用、SQUID応用等に加えて量子コンピュータに関する発表も幾つかあった。デジタル応用では、日本からの発表が過半数を占め、超電導ルータを実現するためのスイッチ回路 (SRL) やスピードアップバッファ回路 (名大)、FFTプロセッサ (東北大)、サーバーのためのマイクロプロセッサCORE1 (横国大、名大) など数千接合程度の回路が動作したという発表がなされた。また、回路の大規模化に伴う大きなバイアス電流の電流分布 (横国大) や電流リサイクル (東大) に関する発表もあった。これらの多くの回路は、セルライブラリーを用いて設計され、Nb標準プロセス (SRL) で試作されている。一方、米国からは、Flux-1マイクロプロセッサの試作結果が紹介され (Northrop Grumman)、ペタフロップス以降のハイエンドコンピュータの開発に向けた研究開発のロードマップや、超電導デジタルシステムの開発状況 (Hypres) が紹介されたが、レビュー的な内容や今後の計画である新しい技術の発表は余りなかったように感じられた。ただ、Flux-1に続き、32ビットのFlux-2、スーパープロと呼ばれるマルチプロセッサといったハイエンドコンピュータの開発を米国は今後も継続していくということと、ADコンバータ、Digital Correlator、TDCといった小規模の回路は実用化に向けた開発がかなり進んでいるという印象を持った。集積回路のプロセスに関しては、数10万接合のSFQ回路を実現するための新しい平坦化技術を用いたアドバンスプロセス (SRL) と、グランド面のモートの埋め込みにより信頼性が向上した8kA/cm²のプロセス (Northrop Grumman) の発表のみであった。ADコンバータに関しては、ソフトウェア無線用に高帯域で多ビットのADコンバータの実現を目的としてバンドパス (MIT、Northrop Grumman) や2次のローパスシグマデルタモジュレータ (SRL) の発表があった。今後、プロセスの高度化によるクロック周波数の向上と併にモジュレータの次数を上げることが重要であるとのことであった。また、小容量のオンチップシフトレジスターに取り込んだデータの相関を取ることでFFTパワースペクトラムが得られるモジュレータの測定評価方法 (MIT) は、高速で動作するモジュレータの評価方法として非常に有効なものと思われる。量子コンピュータでは2ビットのQubitsの動作実証 (NEC) を含め幾つかの研究機関でQubitの動作が報告され、入出力回路にSFQ回路を使用することも提案された。

高温超電導体では、アナログ応用に関する発表がその大多数を占めていた。特にSQUID関連の発表が多かった。金属非破壊検査、食料品中の異物検査、SQUID顕微鏡、心磁計など多様な応用例が示さ

れた。SQUIDによって磁性マーカーを追跡する生化学への応用や、地中の鉱脈探査や地磁気測定といった地質学研究への応用展開も紹介された。本会議のChairを勤めたFoley女史（CSIRO）によって行われた地質学研究への応用に関する講演はそのスケールの大きさに参加者に感銘を与えた。ハステロイ基板を用いたフレキシブル超電導テープを加工して作製したグラジオメータも興味深かった。高温超電導体の特徴を活かした発表としては、接合デバイス（Twente大）やBi系固有ジョセフソン接合（東北大）があった。後者では500ミクロン四方に2500スタックの接合を作製して見せた。一方、デジタル応用に関する発表は少なく、日本から数件ある程度であった。Gputa（Hypres）は将来的なデジタルシステム構成について講演した。小規模システムでは冷凍機をコンパクトにできる4.2K / 60K / 室温で動作させる低温デバイス / 高温超電導インターフェース / 半導体の複合システムが現実的であると述べた。超電導デジタル機器実現のためには、低温系 / 高温系双方のバランスのとれた研究の進展が正攻法であるように感じられた。

（SRL/ISTEC デバイス研究開発部 永沢秀一、安達成司）

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連 9 - 10月の催し物案内

9/14-18

EUCAS2003-6th European Conference on Applied Superconductivity
場所: Sorrento Napoli, Italy
e-mail: eucas2003@unina.it
<http://www.eucas2003.it>

9/21-23

12th International Superconductivity Industry Summit, ISIS-12
場所: Forschungszentrum Karlsruhe, Germany
e-mail: michael.sander@itp.fzk.de

9/22-26

Cryogenics Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (CEC-ICMC)2003
場所: Anchorage, Alaska
Contact Central Conference, 303 499-2299
<http://www.cec-icmc.org/>

10/6-18

SCENET the European Network for Superconductivity 4th SCENET school on superconducting materials and applications
場所: INSTITUT D'ETUDES SCIENTIFIQUES DE CARGESE (France)
主催: the European Commission (GROWTH Programme) within SCENET project
<http://cargese.univ-corse.fr>

10/9

低温超電導材料及び高温超電導材料の機械的性質と臨界電流の歪効果
場所: KKB 函館 (函館市)
主催: 低温工学協会/材料研究会/東北・北海道支部
e-mail: ogawa@hakodate-ct.ac.jp

10/10

超電導を用いた電力技術とその競合技術
場所: 大阪市立大学 文化交流センター (大阪市)
主催: 低温工学協会/関西支部
e-mail: ohmatsu-kazuya@sei.co.jp, shirai@energy.kyoto-u.ac.jp

10/20-24

MT-18/18th International Conference on Magnet Technology
場所: ホテル メトロポリタン盛岡 (盛岡市)
主催: 物質材料研究機構、岩手県
<http://akahoshi.nims.go.jp/MT-18/>

10/25

磁気分離研究開発に関するワークショップ
場所: 盛岡地域交流センター会議室 (盛岡市)
主催: 磁気分離研究会
e-mail: okada@iwate-techno.com
<http://www.joho-iwate.or.jp/>

10/27-29

第16回国際超電導シンポジウム (ISS2003)
場所: つくば国際会議場 (つくば市)
主催: (財) 国際超電導産業技術研究センター
<http://www.istec.or.jp/ISS/ISS.html>

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (7/16-8/19)

電力系統 超電導技術開発を支援 エネ庁来年度 自由化後の安定化 7/16 電気新聞
脳機能計測装置 感度 100 倍、移動も可能 通総研が開発 うつ病解明などに威力 7/23 日経産業新聞
住友電工 次世代高温超電導線材 世界一の製造速度 7/24 電気新聞
電流密度、最高に ビスマス系超電導線材で 昭和電線電纜と中部電力が開発 7/25 日経産業新聞
27.5K の高温で磁場 1 テスラ スパークプラズマ焼結法利用 芝浦工大とソウル大 ニホウ化マグネシウム作製 超電導モーターや船舶推進用など 実用化へ前進 7/28 日刊工業新聞
私の視点 技術経済研究所代表取締役 尾崎典彦 基礎科学 先端技術生む国家投資を 7/28 朝日新聞
MgB₂ で 1 テスラの磁場捕捉 芝浦工大とソウル大 超電導モーターなど応用へ 7/29 日本工業新聞
文科省 ITER 建設へ 80 億円 来年度概算要求 誘致成功にらみ 7/31 電気新聞
大出力の無停電電源 住商 米 VB に出資・販売 8/1 日経産業新聞
「日経先端技術」から 強磁場で優れた超電導材料 8/4 日経産業新聞
早く簡単に 超高真空蒸着装置 産総研と共同開発 アールデック 8/7 日刊工業新聞
高温超電導体 実用化競う 線材加工に成功、応用段階に 新幹線 変圧器軽量化で振動低減 送電線 古河電工が 500 メートル級開発へ 8/8 日本経済新聞
超電導体使い発電機 東大 モーター回し機能確認 8/8 日経産業新聞
世界の鼓動 エネルギー 実証に挑む超伝導送電 8/9 朝日新聞
Sunday Nikkei 強力な磁場 物体ふわり 酸素中で水浮上 物質分離に応用 8/10 日本経済新聞
固体高分子を高精度解析 NMR 装置 900 メガヘルツ超級開発へ 先端材料研究の追い風に 岡崎国立機構と日本電子 8/12 日刊工業新聞
磁石の性質を持つ 超伝導 都立大などが発見 8/12 日本工業新聞
超電導体 金属系にも磁性 都立大 高エネ研の実験で発見 8/13 日刊工業新聞
独創研究集団 理研の最前線 驚異の計算能力 量子コンピューター実現に向けた新しい電子集積回路を提唱 超伝導量子ビット使用 効率的で拡張も可能に 8/14 日刊工業新聞
「高温超電導磁石」技術開発着手へ 8/15 読売新聞
高効率の排気システムの開発 核融合研 プラズマ放電時間飛躍的向上目指す 8/18 日本工業新聞
レーザー手術 温度測り患部切除確認 東海大、MRI で正確に 8/19 日経産業新聞



[超電導 Web21 トップページ](#)

【ビジネストレンド】超電導速報 世界の動き (2003年7月)

電力

American Superconductor Corporation (2003年7月1日)

American Superconductor Corporation(AMSC)は、3つの投資家グループと5000万ドルの資金提供に関する合意に達した。資金提供は、いくつかの上限3000万ドルまでの5カ年融資を組み合わせたものになると思われるが、これらは法人金融会社と機関投資家によって提供されることになる。これら機関投資家は、付帯覚書で普通株に転換可能な1000万ドルを提供することにも同意している。AMSCはまた1000万ドルまでを提供する予定の銀行との契約に署名した。これらの融資は、運転資本、経費、及びAMSCの第2世代HTSワイヤ・パイロット製造設備の規模拡大に使用される。

出典:

"American Superconductor Announces \$50 Million Financing Plan"

American Superconductor Corporation press release (July 1, 2003)

<http://www.amsuper.com/html/newsEvents/news.html>

American Superconductor Corporation (2003年7月9日)

American Superconductor Corporation(AMSC)及び住友電気工業株式会社(SEI)は、その第1世代HTSワイヤ、電磁コイル、電磁石、及び電流リード装置に関する北米及びヨーロッパ特許を相互に使用許諾することに同意した。両社合計で、世界中で相当数のHTS特許を所有している。両社は、また、お互いの力を補完して、超電導ケーブル市場を開拓していくことも併せて合意した。SEIは、AMSCのHTSワイヤ利用の電力ケーブルを販売する。特許許諾契約によって、一方の会社は、他方の会社の特許を利用する製品を販売するたびにその会社に特許権使用料を支払う。契約の詳細は公表されていない。

AMSC社長Greg Yurekは、「SEIとの我々の取り決め及び同意書は、HTS技術の市場導入を一層促進するだろう。まず、それらが産業界におけるフロントランナーに、新規事業に道筋をつけることになる。また、この合意により顧客向けにはAMSCがSEIからの更なる使用許可なしにコイル、磁石、電流リードを製造することができるということを保証できる。第3に、この合意の下、両社は、北米で超電導電力ケーブルの好機を活かすよう協力することができる。北米は、急速な成長とHTS製品及び技術の早期採用が予想される市場である」と語った。

出典:

"American Superconductor Announces Licensing and Market Development Accords with Sumitomo Electric"

American Superconductor Corporation press release (July 9, 2003)

<http://www.amsuper.com/html/newsEvents/news.html>

American Superconductor Corporation(2003年7月14日)

American Superconductor Corporation (AMSC)は、2つの電力プロジェクトに使用するための30kmのHTSワイヤを中国に出荷する。世界第2位の発電能力を有する中国は、世界で最も重要なHTS製品市場の一つであると見なされている。AMSCは、ワイヤ・サンプルを販売し、中国の幾つかの会社や政府機関と事業を行っているが、この最初の注文を中国におけるこの製品の巨大な成長の可能性への第1歩と見なしている。2つのプロジェクトは、蘭州での電力ケーブルプロジェクト(AMSCの12km長HTSワイヤを使用)及び長沙市での限流器プロジェクト(18km長ワイヤを使用)で構成される。AMSCは、本年度中にすべてのワイヤを納入する予定である。

出典:

"American Superconductor to Ship 18 Miles of High Temperature Superconductor Wire to China for

Electric Power Projects”

American Superconductor Corporation press release (July 14, 2003)

<http://www.amsuper.com/html/newsEvents/news.html>

Intermagnetics General Corporation (2003年7月14日)

Intermagnetics General Corporation(IMGC)は、米国エネルギー省(DOE)が系統内での商用環境における高温超電導体の技術的及び商業的実現性の実証プロジェクトコスト 2600 万ドルに対し、1300 万ドルを提供すると公表した。DOE の Superconductivity Partnership Initiative(SPI)計画の一部である当プロジェクトは、IMGC の子会社である SuperPower Inc.が取りまとめを行う。ニューヨーク州エネルギー研究開発局 (NYSERDA) も、プロジェクトへの 800 万ドルの支援を約束している。IMGC 及び住友電気工業株式会社は、残りの 700 万ドルのプロジェクトコストを折半で分担する。350 メートルの超電導ケーブルが、Niagara Mohawk 社が運用しているニューヨーク州オールバニー市の配電網に設置される。Southern California Edison 社も、アドバイザーとしてプロジェクトに参加する。

出典：

“INTERMAGNETICS ANNOUNCES U.S. DEPARTMENT OF ENERGY FUNDING OF \$13 MILLION TOWARD HTS CABLE PROJECT IN ALBANY, NEW YORK”

Intermagnetics General Corporation press release (July 14, 2003)

http://www.igc.com/news_events/news_events.asp

European Advanced Superconductors GmbH & Co.KG(2003年7月16日)

7月1日までに、ハーナウ市の Vacuumschmelze GmbH & Co. KG の超電導事業を取得し、European Advanced Superconductors GmbH & Co.KG(EAS)がカールスルーエ市の Bruker BioSpin GmbH の子会社として設立された。EAS は、ヨーロッパで最大の超電導体メーカーかつ世界でも先進的なメーカーであり、ほぼ 190 人の従業員を有する。同社は、ハーナウ市の工場で低/高温超電導体全般の開発及び製造を行っている。その製品のほとんどは、現在、MRI 医療用磁石の製造に使用されているが、分析用磁気共鳴 (すなわち、NMR 及び EPR) への需要が将来増大すると予想される。同社はまた、Large-Hadron-Collider 及び International Thermonuclear Experimental Reactor プログラムといった物理学分野の国際プロジェクトにも関わっている。

出典：

“EAS acquired the superconductor activities”

Vacuumschmelze press release (July 16, 2003)

[http://www.vacuumschmelze.de/home_vac_en.nsf/\\$frameset/start](http://www.vacuumschmelze.de/home_vac_en.nsf/$frameset/start)

Nexans 社 (2003年7月17日)

Nexans 社は、50 万 J の SMES システムの供給に関して Délégation Générale pour l'Armement(DGA)と契約を締結した。システムの超電導コイルは、同社の Jeumont(フランス)工場で生産された超電導テープを使用して製造される。極低温冷凍機を利用して、- 250 の動作温度を得る。コイルと極低温冷凍機は Centre de Recherche sur les Très Basses Températures(CRTBT)及び French National Scientific Research Center(CNRS)と協力して設計を行う予定。システムは、2006 年に稼働見込み。

出典：

“Superconductivity: Nexans signs a contract with the DGA”

Nexans press release(July 17, 2003)

http://www.nexans.com/dyn/site.php3?page_id=18

Intermagnetics General Corporation (2003年7月17日)

Intermagnetics General Corporation(IGC)は、同社の第4四半期収益が、前年同期の340万ドルと比較してほぼ27%増、440万ドルまで増大したと報告した。当該四半期の純売上高は、前年同期3700万ドルであったのに対し、3770万ドルに上った。当該の年間純利益は、長期の取引訴訟が有利に決着したことによる保険費用の変更を含めて、1490万ドルであった。2002年5月26日に終わる当該の年間純利益は、計装部門の再編成及び投資の評価切下げに関連した費用による損失やIGCのLTSワイヤ及びヘリウムガス事業の売却による利益を相殺したものを含め、2060万ドルと報告されている。2003会計年度の純売上は、前年の1億4430万ドルに対し、1億4740万ドルに達した。Glenn H. Epsteinは、「我々の2003年度事業収益は、ほぼ20パーセント増大し、2002年度の1960万ドルに対し2340万ドルを記録した。我々の収益の継続的な増大は控えめではあるが、我々のコスト構造の更なる改善、全体的効率改善を図りながら支出を押さえることによって、このような良好な成績が可能となった。」と語った。MRI部門は、2002年度の1億2070万ドルから2003年度の1億2510万ドルへの収益増大を報告した(売却したLTSワイヤ事業は、2002年度の収益にほぼ210万ドル貢献した)。同社の展望に関して、Epsteinは次のように述べた。「2004年度中に、我々は、最近導入された強力な3.0テスラの超電導MRI磁石の販売の継続的拡大を予想している。我々が関係を持つMRシステムメーカーによる製品導入の決定次第ではあるが、2005年度の初めに、新規の強磁界1.0T開放型磁石の商品出荷が可能になると予想している。」

出典：

“INTERMAGNETICS REPORTS Q4 NET INCOME UP 27% TO \$4.4MILLION”

Intermagnetics General Corporation press release (July 17, 2003)

http://www.igc.com/news_events/news_events.asp

General Electrics (2003年7月23日)

General Electrics(GE)は、新しいHTS発電機の実証モデルの試験に成功した。この開発計画によって、エネルギーを数百万ドル節約できる高発電効率が実現すると期待されている。この発電機は、商業化に向けてHTS技術を進める3.5カ年計画のための米国エネルギー省からの1230万ドルの契約の下に開発される。このプログラムは、2002年10月に始まった。現在報告されている実証モデルは、ローター及び必要な極低温冷却及びHTSサブシステムに関する1.8MVAの概念証明モデルである。次に、この試験結果が、100-MVAプロトタイプ発電機的设计に活用され、全負荷で試験される。本冷却システム及び伝達カップリングは、100-MVA発電機に直接適用可能なフルサイズ・プロトタイプである。100-MVAプロトタイプは、2004年に完成し、2005年に試験する予定である。

出典：

“High-efficiency generator design validated”

General Electrics press release (July 23, 2003)

http://www.gepower.com/dhtml/corporate/en_us/aboutgeps/new_pre_rea.jsp

SuperPower, Inc.(2003年7月23日)

SuperPower社は、再現性良く1000A-m定格の10m長被覆導体を生産するという目標を達成したと公表した。米国エネルギー省ピア・レビュー会議(ワシントン、2003年7月23~25日)で公表されたもの。実証には、1980A-mの性能の18m長テープが使用された。以前に公表された結果で使用されたよりテープよりも高いスループットで、高性能10m長テープが製造されたことが重要である。SuperPower社は、また、ロスアラモス国立研究所(LANL)との共同研究と開発協定(CRADA)におけるマイルストーンの達成に成功したと発表した。この協力の成果には、最近実証された仕様の被覆導体のパイロットスケール製造設備の確立が含まれている。SuperPower社及びLANLは、更に2年間CRADAを継続し、その間に、第2世代HTS導体の商用規模のスループットを達成するために必要なプロセスを確立するこ

とに努める。

出典：

“SuperPower, Inc. Announces Coated Conductor Performance Achievements And Follow-On Cooperative Research And Development Agreement With Los Alamos National Laboratory”

SuperPower, Inc. press release (July 23, 2003)

http://www.igc.com/news_events/news_events.asp

American Superconductor Corporation (2003年7月24日)

American Superconductor Corporation (AMSC) は、Oak Ridge National Laboratory (ORNL)で行われた最近のケーブル試験で第2世代 HTS ワイヤが予定していた性能を 50%以上超えたと公表した。米国エネルギー省超電導ピア・レビュー会議で公表された。ORNL の試験で使用されたケーブルは、ORNL との協力で、Southwire Company と nkt Cables 社との間のジョイントベンチャーである Ultera 社によって製造された。試験により、世界初の第2世代超電導体としての 1.25m のケーブルが商用性能レベル(2,000 アンペア以上の交流電流)であることが確認された。液体窒素で冷却されたケーブル導体は、当初の試験目標 1,600Amps をはるかに超える 2,500Amps までの交流電流を送ることができる。直流モードでは、ケーブル導体は 4,200Amps まで試験された。他のケーブル導体特性を評価するための付加的な試験が、現在 ORNL で行われている。

出典：

“Second Generation Superconductor Power Cable Conductor Using American Superconductor Wire Achieves Commercial Electrical Performance”

American Superconductor Corporation press release (July 24, 2003)

<http://www.amsuper.com/html/newsEvents/news.html>

材料

Superconductive Components, Inc. (2003年7月1日)

2003年6月30日に、Superconductive Components, Inc.の 600,000 ドルの Convertible promissory note に関する 2 つの契約が終了し、発行されていたシリーズ A の Convertible promissory note に係る同社の全 129,770 ドルの債務が償還された。同社の現在の 4 つの株主は、新たに 600,000 ドルを投資した。優先株の所有者は、総額 129,770 ドルの新規 Convertible promissory note を引き受けた。新しい Convertible promissory note の 729,770 ドルの元本と利子は、2006年6月30日が支払い期日である。債務は、同社の資産に対する担保により保証されている。

Superconductive Components 社は、100,000 ドルの手形収入により銀行に債務を完済した。新らしくリースした設備への移行に資金供給するためにほぼ 300,000 ドルを、会社の一般経費に 200,000 ドルを使用する予定である。

出典：

“Superconductive Components, Inc. Announces Completion Of Financings”

Superconductive Components, Inc. press release (July 1, 2003)

<http://www.sciengineeredmaterials.com/ne/news/index.htm>

Superconductive Components, Inc.(2003年7月11日)

Superconductive Components, Inc.は、低コストな高磁界磁石用キロメートル長 BSCCO2212 ワイヤ製造が可能であるかどうかを調査するため米国エネルギー省と Phase II Small Business Innovation

Research (SBIR) 暫定契約を結んだ。この契約において特に、超電導体/銀複合ワイヤの熱加工処理を改善し、商用レベルに合せた工程を設計するために、BSCCO2212 粉体の粒径分布を調整する方法を吟味する。暫定契約は 105,000 ドル。Phase II SBIR 本契約は、2003 年 9 月末に決定され、600,000 ドル。
出典：

“Superconductive Components, Inc. Announces Contract From U.S. Department of Energy”
Superconductive Components, Inc. press release (July 11, 2003)
<http://www.sciengineeredmaterials.com/ne/news/index.htm>

通信

Superconductor Technologies Inc.(2003 年 7 月 31 日)

Superconductor Technologies Inc.(STI)は、Deloitte&Touche 社の名声高い Los Angeles Technology Fast 50 プログラムの 2 年次へ同社が加わることを発表した。Technology Fast 50 プログラムは、米国に本社を置く最も成長の早い 50 の技術関連会社を評価するものである。格付けは、1888 ~ 2002 年の会計年度収益の成長率に基づいている。その期間中に、STI の収益は 180% 増大した。2002 年には、2001 年に比べて収益は 80% 以上増大した。STI の社長兼最高経営責任者である Peter Thomas は、同社は 2003 年に収益倍増を予想していると述べ、次のように説明している。「この成功の多くは SuperLink Rx のおかげである。これは現在世界中の約 3 千の基地局において干渉予防及び感度の面で高い性能を示しているフィルターシステムである。即ち、途中で切れたり、毎年数百万単位のドロップ・コールやブロック・コールが予防されているということの意味している。」

出典：

“Superconductor Technologies Inc. Again Named One of LA's Fastest Growing Tech Companies in Deloitte & Touche Technology Fast 50' Program”
Superconductor Technologies Inc. press release (July 31, 2003)
<http://ir.thomsonfn.com/InvestorRelations/PubNews.aspx?product=MzqwU1ZJPVAKWQEQUALSTOEUALSTO&partner=Mzq0TIRrMU1RPT1QJFkEQUALSTO>

(ISTEC 国際部 津田井 昭彦)

[超電導 Web21 トップページ](#)

標準化活動 9月のトピックス

- 規范文書 PAS、TS の制定に期待 -

いま、先端技術の急速な進展や緊急の市場ニーズに対応するための標準化活動の手段として、国際的規范文書 PAS（公開仕様書：Publicly Available Specification）及び国際的規范文書 TS（技術仕様書：Technical Specification）の制定が進展しており、その成果に大きな期待が寄せられている。超電導国際標準化活動においても、IEC（国際電気標準会議）/TC90（超電導）のもとで PAS 及び TS を制定すべくその原案作成の準備が進められている。

PAS は、専門家同士のコンセンサスを示す規范文書であり、国際 P メンバーの過半数により承認されるものと定義されている。したがって、PAS は技術開発途上の中間的な一般公開仕様書であって、コンセンサスの水準が通常の国際規格 IS より低いものであり、正規の IS と同一の資格をもたない。PAS は PAS 原案があれば、約 1 年で承認を得てその発行が可能になる。PAS には、IEC/TC が作成するもの、外部コンソーシアムが作成するもの並びに IEC/TC が作成する市場性の高いものの 3 種類がある。PAS は少なくとも 3 年ごとに見直し、6 年後には上位段階の TS や IS に移行するか廃止かを選択しなければならない。なお、PAS に種類が多いこととその区別が不明確な点が指摘されており、より質の高い PAS を目指して現在も審議が続けられている。

また、TS は、正規のコンセンサス手順によって策定された規范文書であって、その出版には国際 P メンバーの 3 分の 2 の賛成を要するものと定義されている。したがって、TS は新業務項目提案と同様の審議経過を辿り、最終的に IS の出版に必要な支持が得られなかったもの、対象内容がまだ技術開発中であるもの並びに何らかの理由により将来 IS としての合意が得られる可能性のあるものをいう。TS は TS 原案があれば、約 1 年半で承認を得てその発行が可能である。TS は少なくとも 3 年ごとに内容を見直し、6 年後には上位の IS に変換するか廃止するかを選択しなければならない。

因みに、IS は、正規のコンセンサス手順によって策定された規范文書であって、国際 P メンバーの 3 分の 2 以上が賛成し、反対が 4 分の 1 以下であるものと定義されている。IS は通常の手順で提案から発行まで少なくとも 3 年間が必要である。また、IS は少なくとも 5 年ごとに内容並びに国際 P メンバーの定期見直しを行わなければならない。

このように PAS、TS 並びに IS はいずれも国際的規范文書であって、一般の技術報告書 TR（ISO/IEC の定義では参考文書）とは明確に区別されていることがわかる。

元来、IS は国家標準化の基礎となり、国際入札及び国際契約の原案を作成するときの基準として活用されてきた。しかし、IS 発行と維持のためには、正規の長期間のコンセンサス手順を踏む必要があり、急速に進展する技術開発や緊急な市場ニーズへの対応に不十分であった。すなわち、昨今の標準化活動は、急展開する技術に対しては PAS を、緊急な市場ニーズに対しては TS を開発することによって、IS における緩慢性を補完しようとしている。また、PAS や TS の制定は、超電導のような先端技術の研究開発プロジェクトにおける成果を滑らかに超電導関連産業へ移行させ超電導関連市場の発展に繋げる“橋渡し役”も果たしている。

（ISTEC 標準部 田中靖三）

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導応用研究会・東北・北海道支部 合同シンポジウム参加報告 - エレクトロニクス・線材応用のための高温超電導薄膜作製 -

山形大学工学部
助教授 向田昌志

平成 15 年 8 月 4 日、長岡技術科学大学において、低温工学協会超電導応用研究会・同じく低温工学協会東北・北海道支部主催の合同シンポジウムが開催された。本シンポジウムは第一部「エレクトロニクス応用のための高温超電導薄膜作製」と第二部「線材応用のための高温超電導薄膜作製」からなるシンポジウムであり、低温工学協会西日本・九州支部と学術振興会超伝導エレクトロニクス第 146 委員会「マイクロ波～光」分科会の共催のもと、約 46 名の参加者を得て行われた。

第一部では、エレクトロニクス応用について 5 件の研究成果が報告された。鳥取大学の岸田等は Bi 系高温超電導薄膜の作製について、多元ターゲットと He のペニング効果を用いたスパッタにより、これまでより特性が改善されたことを報告した。山形大学の向田等はレーザー蒸着法 Ln123 系膜のマイクロ波応用には、臨界電流密度の向上が重要であり、そのためには傾角粒界の低減、粒界へのキャリアドーピングが有効であると報告した。その候補としてバッファ層の適用、Er123 膜のマイクロ波特性の結果を示した。産業技術総合研究所の真部等は、フッ素フリー塗布熱分解法による YBCO 膜の作製には、急速加熱と熱力学的な YBCO 安定領域の上限付近での温度制御及び酸素分圧制御が重要であることを示し、現在までに 10cm x 30cm サイズの超電導膜を作製できていることを報告した。長岡科学技術大学の山崎等は、パルスイオンビーム蒸着法による YBCO 膜がワンショットで作製でき、ターゲット組成の変更を行うことにより、その後の熱処理で超電導特性に改善が見られたことを報告した。

その後の特別講演では九州大学の円福等による、磁気ナノ粒子と SQUID を用いた免疫検査についての講演があった。この磁気ナノ粒子と SQUID を用いた免疫検査は他の検査法より 100 倍感度が良く、未結合磁気マーカーの洗浄を必要としないという他に類を見ない検査法として注目されているとのことである。我々はすぐ感度の良さに目が行くが、ユーザーから見ると「マーカーの洗浄不要」という点に魅力があるとのこと。ユーザーサイドからの視点の必要性を痛感した。

第二部では、線材応用の 4 件の講演と総合討論があった。超電導工学研究所の本庄等は TFA-MOD 法を用いた Y123 系長尺線材の作製について、テープ横断方向ガス流し法と銅系フッ素フリー材料の採用で、 $J_c=3.4\text{MA/cm}^2$ の高 J_c テープを短時間作製できることを示した。京都大学の松本等は IBAD 膜に掛かるコストを大幅に削減できる SOE 法による Y123 系テープの作製について、現状と今後の課題を示した。現在 SOE 法による Y123 系テープの J_c が 1MA/cm^2 を越えてきており、今後の進展が注目される。名古屋超電導工学研究所の山田等は IBAD と PLD 法 CeO_2 を用いた YBCO 線材の高速作製かつ高 J_c 線材(最新データでは $J_c=4.4\text{MA/cm}^2$)が実現できていることについて報告した。フジクラの齊藤等は IBAD の配向中間層としてパイロクロア型酸化物($\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$)と誘導放電方式大型矩形イオンソースの採用により、100m 長の高超電導特性線材を開発できたことを報告した。

最後に電力中央研究所の秋田等による総合討論「高温超電導線材・薄膜の電力機器への実用化のためのアプローチ」があり、Y123 系の SMES への適用において、垂直ピンが重要であるとの報告、早稲田大学の石山等による熱暴走に対する検討結果が示され、Y 系は熱的に弱くないとの報告があった。参加者はピン止め力の強い Y123 系材料が現在実用化への最右翼にいるということを確認したに違いない。

[超電導 Web21 トップページ](#)

IWCC11 会議報告

IWCC11 事務局
九州工業大学
助教授 小田部荘司

2003年7月28日より7月31日に、東京の日本大学文理学部百周年記念館において The 11th International Workshop on Critical Currents in Superconductors (IWCC11, 第11回超伝導体の臨界電流に関する国際会議)が行われた。この会議は1974年にドイツゲッチンゲンで The international workshop on flux pinning in superconductors(ピン会議)として開催し始めたもので、2から3年に一度日本、米国、欧州を開催国として継続されてきている。最近では1996年に北九州で山藤、松下教授が、1999年に米国マジソンで D. Larbalestier 教授が、2001年にドイツゲッチンゲンで H. Freyhardt 教授が議長として開催している。今回は議長を芝浦工大の村上教授と日大の滝沢教授が、プログラム委員長を九工大の松下教授がそして事務局を私が担当することになった。会議の参加者は70名ほどで、1996年北九州の時には130名だったことを考えるとかなり縮小している。これは2003年には大小の国際会議が秋に集中していること、米国ではちょうど7月下旬にエネルギー省の予算獲得のためのプレゼンがあったこと、イラク戦争やSARSなどの影響があったものと考えている。したがって、海外からの発表者は招待講演者にかなり限られており、しかも著名なグループからは若手が来日して発表するというケースが多かったことが特徴のひとつとして挙げられる。会議はコンパクトだったが発表の質が高く勉強になったという感想を複数の参加者からいただくことができたのは幸いだった。

基調講演はSRL/ISTECの田中所長から coated conductor について、日立の外村氏よりローレンツ顕微鏡による磁束観察についてそれぞれあった。最初の coated conductor のセッションでは日米欧韓の代表的な研究者から最新の様子がそれぞれの手法で説明されていた。RIKENのF. Noriは電子リソグラフィーで作られた人工ピンによりエキゾチックなE-J特性が現れることを理論と実験から示した。MgB₂ではソウル大学のS.-I. Yooがバルクを使い27.5Kで1Tの磁界をトラップすることに成功したことを報告した。SRL/ISTECのM. MiryalaはNEG123が90Kの液体酸素中で十分高いJ_cが得られて浮上実験ができることを示した。この発表はBest Presentation Awardとなった。産総研の馬渡氏は超電導薄膜の表面抵抗が周期的な結晶粒界によりバルクの表面抵抗より下がる可能性があることを理論的に示した。ポスターではBest Poster Awardが人工ピンのピンニングについて発表した、山口大学の原田助教授に授与された。

会議を運営する立場から見ると電子メールやウェブの役割が大きいことを実感させられる。1996年の北九州のときもホームページは作ったがほとんどの文書を直接参加者に郵送したために手間がかなりかかった。今回は1st circularのみ郵送にしてあとはウェブ上で行った。そのために会議の1ヶ月前になっても最終のプログラムや論文の準備方法が載らないというような遅れも起こった。しかし参加者は常にウェブを見ているし、会議の方法も知られているので大きな混乱はなかった。また、会場は日大文理学部滝沢・橋本研究室がきちんと準備してくださったので、会議を非常にスムーズに進めることができた。

会議の最終日の午後、IWCCの発展にも尽くされた入江富士男九州大学名誉教授がこの日逝去されたことが伝えられた。先生の多大な業績をしのび、ご冥福をお祈りいたします。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

パルス管冷凍機の誕生と変遷 (その5)

日本大学 量子科学研究所
教授 松原洋一

パルス管冷凍機の多段化

パルス管冷凍機でも、20K 以下の極低温を効率よく得るためには、スターリングや GM 冷凍機と同様に膨張ステージを多段化する必要がある。

1964 年頃の基本型パルス管では図 13(a)のような多段化方式が採用されていた。この構成では各段のパルス管と蓄冷器とはそれぞれ同一の温度レベルで動作している。すなわち下段パルス管の高温端は上段パルス管の低温端に熱的に結合されている。このような直列型パルス管による多段化方式の問題点は、下段パルス管内でのエンタルピーの流れを上段パルス管の冷凍仕事の一部を消費することによってのみ取り去らなければならないということである。その結果として効率の良い多段冷凍機を構成させることが困難となる。

1984 年以後の第 2 世代のパルス管でも同様な方式での多段化が試みられていたが、3 段にしても 10K 以下は得られていない。¹⁾ 基本型パルス管の場合にこのような構成が考案された理由は、その動作原理がパルス管壁を媒体とする熱輸送効果を利用しているため、管壁の温度勾配に限界があり、限られた圧縮比のもとでは 1 本のパルス管で温度比 2 以上を達成させることが困難であることによる。したがって多段化させる場合でも、低温段のパルス管の高温端は上段の低温端に接続し、温度比を低く保たせる必要があった。一方、第 2 世代以後のパルス管冷凍機では管壁での熱輸送効果を利用せず、直接仕事の流れを利用しているため、本質的な温度比の限界は無く、このような直列方式の多段化にこだわる必要性が特に無い。

そこで第 2 世代以降のパルス管用として図 13(b)に示すようにパルス管を並列にした多段化方式が新たに提案され、この方式の 3 段パルス管で 3.6K が得られ、並列方式の優位性が実証されるようになった。²⁾ 最も、ここに達するまでには、以下のような開発過程があった。

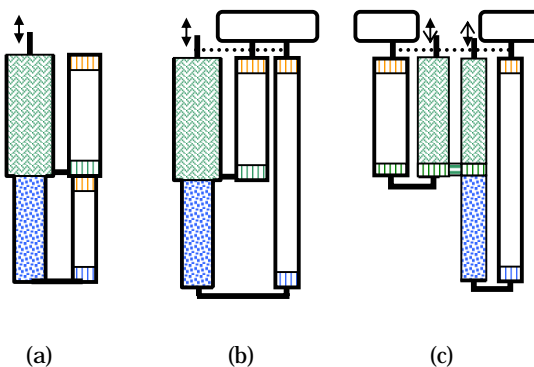


図 13 多段パルス管冷凍機の構成

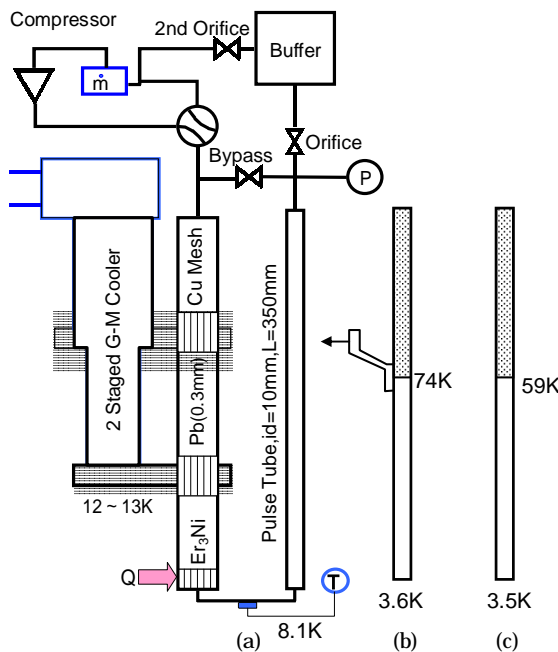


図 14 GM 予冷型パルス管冷凍機

1982年にGMサイクルで初めて4K台の極低温の得られることが実証³⁾されて以来、多段GM冷凍機で4Kを効率よく達成させるための蓄冷材開発が盛んになり、Er₃Niを始めとする多くの磁性蓄冷材が開発された。そこで磁性蓄冷材を用いたパルス管冷凍機の可能性を検討するために図14のようにGM冷凍機で予冷された蓄冷器と一本のパルス管(内径8mm)との組み合わせで最低到達温度を測定した。⁴⁾まずパルス管の高温端をGM冷凍機で約50Kに予冷した場合には4.5Kが得られたので、図14(a)のように高温端を室温まで伸ばしたところ8.1Kしか得られなかった。そこで図14(b)のようにパルス管の上半分に蓄冷材(ステンレス球)を挿入し、その境界部をGM冷凍機の1段目で約74Kに予冷してみた。その結果、3.6Kが得られたが、興味あることは、境界部での熱流がGM冷凍機側からパルス管に向かっており、予測とは逆の結果を示していた。そこで図14(c)のように予冷をはずしてみたところ、3.5Kが得られ、境界部の温度も59Kを安定に保っていた。

一般に、断熱空間(パルス管)から等温空間(蓄冷器)に向かって仕事を流せば、その境界位置の温度は上昇するはずである。したがって、この結果の意味するところは、少なくとも境界部での仕事の流れがパルス管の高温端から低温端に向かっていることを示している。この奇妙な現象を明らかにする目的で、warm expander方式の位相制御による実験と、それに対応する数値解析を試みた。実験での最低到達温度は2.7Kであったが、低温端が4K以下になるための条件はパルス管高温端でのPV線図が“8”の字を描いており、その積分の結果が圧縮仕事、つまりパルス管に仕事が入力されている状態であることを示していた。⁵⁾数値計算の結果も、この実験結果を支持していた。それによれば、管壁との熱伝達によって仕事流が熱流に変換され、パルス管途中で仕事流がゼロになり、その位置より高温側では逆向きの仕事流が必要になる。第1世代の基本型パルス管と異なる点は、仕事流がゼロになる位置でも気体の振幅はゼロではなく低温端よりも大きな振幅を必要としていることである。

以上の考察から、上述の実験でパルス管高温部に蓄冷材を挿入すると境界部の温度が下がるのは、その部分での仕事流が高温から低温に向かっていただけだと考えることができる。ただし、低温端の到達温度を低減させるために、高温部に蓄冷器を挿入する必要があるのは、パルス管の直径がある程度小さい場合に限られ、直径が20mm近くになると仕事流の逆転する位置が室温端付近になるので蓄冷材を挿入する必要性が無くなる。

その後のパルス管冷凍機の低温化に関する研究の舞台はヨーロッパに移動し、アイントホーベン工科大学(オランダ)のde WaereらがHe-3を作業ガスとする3段パルス管で1.7K、2002年にはギーセン大学(ドイツ)のThummesらが2段パルス管で1.4Kを達成するなどの進展が見られている。

しかしHe-3は高価でありGM型パル

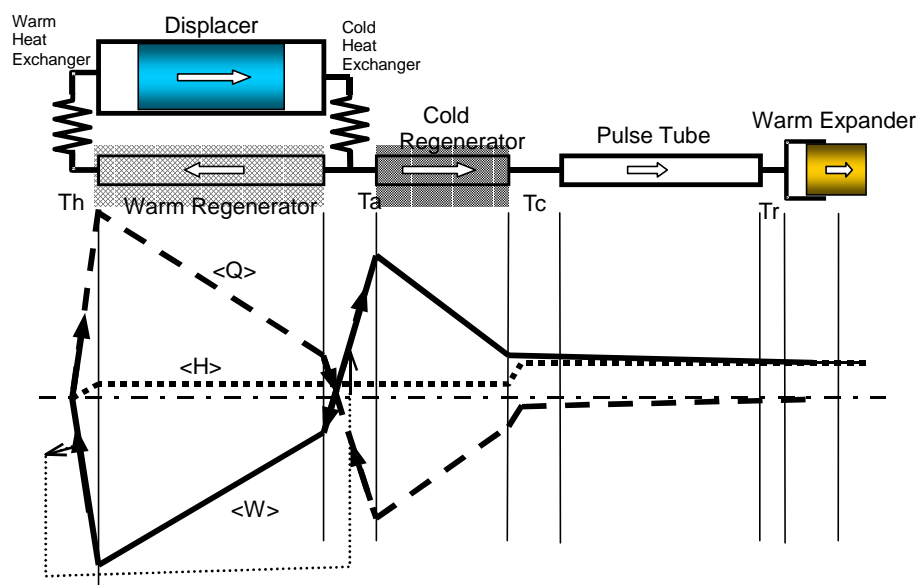


図15 VM型パルス管冷凍機

ス管冷凍機の作業ガス全てを He-4 から置換するのは実用的ではない。そこで図 13(c)の右側のサイクルに図 15 のようなサイクルを適用した複合サイクルが提案された。⁶⁾ パルス管冷凍機には GM 型とスターリング型とがすでに開発されているが、この方式は Vuillemier サイクルの一部をパルス管に置き換えた構造をしているので、VM 型パルス管冷凍機と呼ぶ。

いま、 T_a を室温、 T_h を高温に保ち、ディスプレイサを左右に振動させると作業ガスの平均温度が変化するので、圧力振動が発生する。そこで、やはり室温 T_r に置かれた warm expander で仕事吸収できるように位相を調整すれば、図下の実線で示すような仕事流が発生する。その結果 T_c の温度が低下し、第 3 世代のパルス管冷凍機が実現する。ここで機械的な圧縮機が無いのにもかかわらず低温が得られる理由は、まず warm regenerator 内に T_h 側から T_a 側に向かう熱流（破線）が発生する。エネルギー保存則によって warm regenerator 内には熱流と逆向きの仕事流が存在しなければならない。この仕事流は T_a 側から T_h 側に向かって増幅されているので、ディスプレイサを通過して T_a 側に戻り、その余剰仕事は T_c 、 T_r 側に流出するためである。

この VM 型パルス管を更に発展させると図 16 のようになる。(a)は図 15 の T_h 側を室温に、 T_a 側を低温（例えば 40K）にし、パルス管の低温端で 4K 以下の冷凍温度を得ようとするものである。なお、ディスプレイサは室温部にのみ置き、室温と 40K との間はパルス管と同様な仕事のみを通過させる空間（パルス管とは仕事流の向きが逆なので、単に work transfer tube と呼んでいる）で結ぶ。この方式は、低速運転が可能なので、10K 以下の低温発生に適しており、更に必要とされる作業ガスが少ないという特徴を持っているので、高価な He-3 を利用するのにも適している。(b)は更に高温の熱流を利用する方式で、この場合には 40K での必要冷凍量が少なくて済むという特徴が加わる。いずれも今後の研究課題として残されている。

一方、運転周波数が高速のスターリング型パルス管冷凍機は低速型に比較して低温を得るのが困難であるとされているが、それでも多段化による低温の取得を試みる実験は行われてきた。2002 年には、Lockeed Martin 社から運転周波数 31Hz で入力 240watt の 3 段 St 型パルスを発表し、5.35K（70mW@8K）の達成が報告された。⁷⁾ この冷凍機は入力を 60watt に下げても 8K が得られたことにより、高速小型冷凍機に新たな道を開いたといえるであろう。

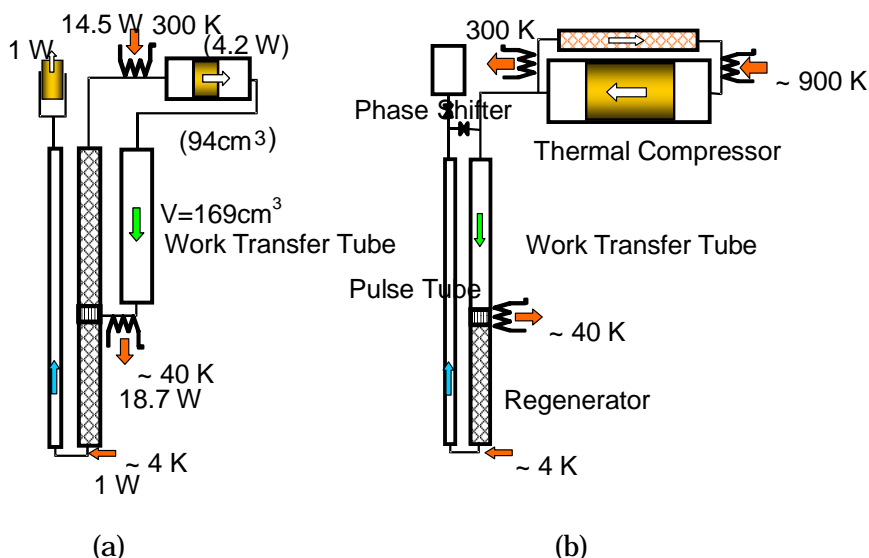


図 16 VM 型 4K パルス管冷凍機の構成例

参考文献

1. P. E. Bradley and R. Radebaugh, Adv. Cryo. Eng., Vol. 41, Prenum Press, (1996), p1511-1518.
2. Y. Matsubara and J. L. Gao, Cryogenics, Vol. 34, No.4, Butterworth, (1994), p259-262.
3. Y. Matsubara and K. Yasukouchi, NASA Conference Publication 2287, (1982), p157-168.
4. J. L. Gao and Y. Matsubara, Cryogenics, Vol. 34, No.1, Butterworth, (1994), p25-30.
5. S. L. Shou, G. Thummes and Y. Matsubara, Adv. Cryo. Eng., Vol. 45, Prenum Press, (2000), p81-88.
6. Y. Matsubara and S.L. Zhou, "Proceedings of the 18th ICEC, (2000), p535-538.
7. J. Olson, et al., Low-power Cryocooler Workshop, University of Twente, March 31 (2003).

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q：最近 SFQ 回路という言葉を目にしますが、SFQ 回路って何ですか？

A：超電導体でできたリングの中では磁束は量子化されます。これは超電導リングの中では磁束は勝手な値を取ることができず、ある最小単位の整数倍の値しか取ることができないことを意味します。この磁束の最小単位のことを単一磁束量子、英語で Single Flux Quantum 略して SFQ と呼びます。SFQ が超電導リングの中にあるとそれに対応した循環電流がリングに流れます。この SFQ を情報媒体として用いた回路を SFQ 回路と呼びます。SFQ は超電導体の中にだけ存在するものですので、SFQ 回路は超電導体で構成されることになります。

半導体回路では、電子の集団が情報媒体となり、これが移動することにより電圧が変化しゲートがスイッチします。これに対して SFQ 回路では、SFQ1 個が移動することにより演算を行っていきます。SFQ の移動にはジョセフソン接合のスイッチを用います。ジョセフソン接合は二つの超電導体が弱く結合したもので、ある値（臨界電流）以上の電流が流れると、超電導状態が壊れ電圧が発生します。超電導リングを連結し、連結部にジョセフソン接合を設けておくと、ジョセフソン接合のスイッチにより超電導リングが一瞬切れ、SFQ が隣のリングに移動します。リングの連結の仕方やリングの大きさによって、SFQ の移動、保持、分岐、合流が可能になります。これだけのことができれば、全ての論理演算を行うことができます。ジョセフソン接合がスイッチしたときに一瞬だけ電圧が発生するわけですから、SFQ の移動は電圧パルスの伝播としてとらえることもできます。

SFQ 回路の特徴は高速性と低消費電力性を合わせ持つということです。これは高速の半導体回路が大きな消費電力を持つことと比べると際立った特徴です。その秘密は論理振幅の大きさにあります。SFQ 回路では論理“0”と論理“1”の電圧差が 1mV 以下であり、半導体と比べると 3 桁以上小さい値です。おまけに SFQ 回路はパルスで情報を伝達しますから、電力を消費する時間が極めて短くて済みます。これも電圧レベルの違いで情報を伝える半導体回路との大きな差になります。半導体より 3 桁も小さな電圧で安定した演算ができるのは、SFQ が量子という非常に安定した存在であることと、極低温の極めて熱ノイズの小さな環境で動作することにあります。

この高速性と低消費電力性のため、SFQ 回路を使うと数十 GHz 以上の超高速で動作する大規模集積回路（LSI）を作ることができます。半導体でも単体のゲートでは SFQ 回路に匹敵する高速性を持つものもあるのですが、消費電力が大きすぎて発熱の問題から大規模に集積することは不可能です。このため、SFQ 回路は数十 GHz の超高速 LSI が実現できる現状では唯一の素子だということができます。このような超高速 LSI は短時間に多くの情報を処理する必要があるルータやサーバなどのネットワーク機器で今後必要不可欠なものになっていくと考えられています。

（SRL/ISTEC 低温デバイス開発室長 日高睦夫）

[超電導 Web21 トップページ](#)