

掲載内容（サマリー）：

トピックス

- 「1st Asia-Arab Sustainable Energy Forum」 報告

特集：超電導デジタルデバイス

- 超電導デジタルデバイスの技術動向（動画含）
- 微小積層型ジョセフソン接合作製における一課題
- 集積型極低温電流比較器作製プロセス
- 極限低消費電力断熱型 QFP 回路
- マルチピクセル SNSPD アレイ用 SFQ 読み出し回路の開発（動画含）
- 超伝導量子回路が拓く可能性

- 超電導関連 2011 年 10-11 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（8/19-9/15）
- 「応用物理学学会」報告
- 隔月連載記事ーやさしい超電導リニアモーターカーのお話（その 5）
- 読者の広場(Q&A)ー最近、極低温冷却システムについての記事があり、運転コストを 1/10 に減らせるとのことですが、どういう技術で可能になったのでしょうか？

[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

〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13

Tel (03) 3536-7283 Fax(03) 3536-5717

超電導 Web21 トップページ：<http://www.istec.or.jp/web21/web21.html>



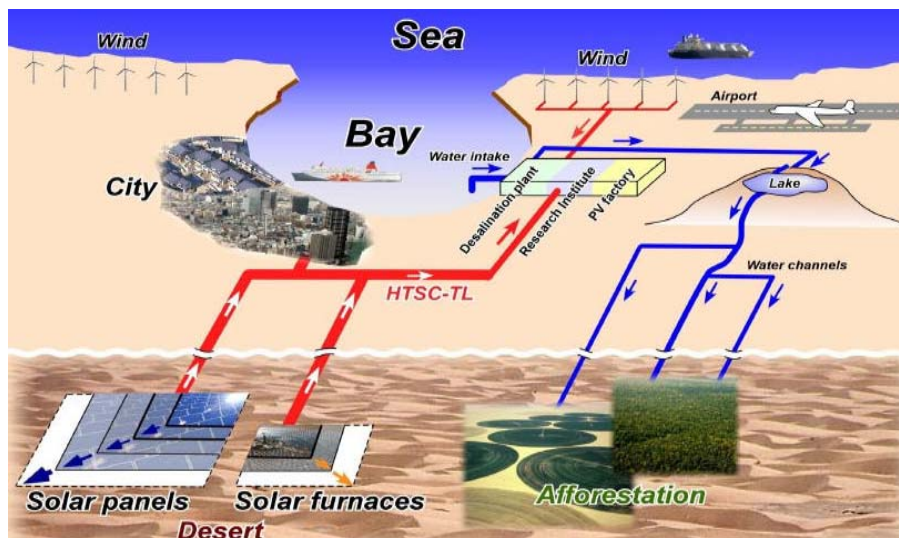
この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



トピックス：「1st Asia-Arab Sustainable Energy Forum」報告

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
所長 塩原 融



Ref. 「サハラソーラーブリーダー計画」 ホームページ

2011 年 8 月 23～26 日に名古屋市で開催された 1st Asia-Arab Sustainable Energy Forum（第 1 回 AASEF 会議）に出席した。この Forum は当初計画では 2011 年 3 月下旬に青森県弘前市での開催が予定されていたが、3 月 11 日の東日本大震災の影響で開催が延期され、直流超電導送電研究開発を実施している中部大学の地元の開催となった。

東京大学と中部大学が中心となって太陽光エネルギーを利用して砂漠の砂（主成分が珪酸 SiO_2 ）から Si 太陽光パネルを作製し、莫大な太陽エネルギー（サハラ砂漠が受けている太陽エネルギーは全世界の総消費エネルギーの約 10 倍に相当するとのこと）を効率的に利用する太陽光発電技術と、遠距離の送電を低損失で実現できる高温超電導（HTS）直流送電技術を組み合わせたサハラソーラーブリーダー（SSB）計画と呼ばれているプロジェクトが提案され、進められている。このプロジェクトは化石燃料を使用するエネルギーから新しいエネルギー供給モデルとして、産油国でアラブ諸国からも注目を集めている。サハラ砂漠近傍の多くの国々からの研究者が集まり、名古屋駅前の「ウイंकあいち」で本会議が開催され、上記 SSB 技術の実現に向けた熱い議論が交わされた。主催者の集計によると、海外 9 カ国（アルジェリア、オランダ、チュニジア、ロシア、タルクメニスタン、インド、英国、台湾、韓国）から約 30 名の参加があり、日本からの約 50 名の参加者合わせて参加者総数は約 80 名であった。

この第 1 回 AASEF 会議は、JST-JICA プログラム（地球規模課題対応国際科学技術協力 Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development: SATREPS）において、国際社会が共同で取り組むことが求められている地球規模の課題（環境・エネルギー問題・自然災害・感染症・食糧問題等）解決のために、我が国と開発途上国の研究者が共同で行う事業の一環である SSB 会議と、直流超電導送電会議が併合された会議である。

プログラムは初日（23 日）の午前中と午後前半に“Session-1: Opening & General Remarks”として、中部大学総長、SSB Foundation、RITE/JST から主催者挨拶が行われ、文科省（MEXT）、日本科学技術振興機構（JST）、チュニジア大使、愛知県から来賓挨拶が行われた。その後、以下の 8 つの Session

が開催された。

- “Session-2: Innovative Si technology-1; More than Siemens”、
- “Session-3: Innovative Si technology-2; Beyond Siemens”、
- “Session-4: Workshop on Superconducting DC transmission and distribution-1”、
- “Session-5: Energy from the desert: PV system and application”、
- “Session-6: Workshop on Sahara Solar Breeder plan (semi-closed, parallel session)”、
- “Session-7: Workshop on Superconducting DC transmission and distribution-2 (open)”、
- “Session-8: International cooperation and future plan”、
- “Session-9: Closing remarks”

この会議ではセッション名から類推できるように、太陽光発電技術研究開発と超電導直流送電研究開発に大別される。会議での報告の概要は以下の通りである。

太陽光発電技術研究開発

- 1) 太陽電池は化石燃料枯渇後も永続的に利用できる未来の無尽蔵のエネルギー源として期待を集めているが、太陽電池の主流となっている Si 太陽電池は、高純度 Si の製造コストが高く、これを大幅に下げる新技術の開発が急務となっている。
- 2) サハラ砂漠の砂の主成分が Si の酸化物 (SiO_2) であることに着目し、砂漠の砂の還元による低コスト Si 太陽電池製造プロセスの研究開発を行っている。
- 3) 砂漠の砂を用いて砂漠の近傍で、製造した Si 太陽電池をサハラ砂漠に設置することによって得た電力を太陽電池の製造工場の拡大に充てる。このプロセスの繰り返しにより、低コストで大量の Si 太陽電池を砂漠に設置することができる。

<会議では莫大な量の量産効果を期待して最終的に 7~8 円/kWh の発電コストを見込んでいるとの計画も報告されている。>

超電導直流送電技術

- 1) 液体窒素で動作可能な HTS 線材の性能及びコストは、日本が中心になり研究開発が進み最近 7 年間で 1/20 になっている。一方、新興国の経済発展に伴い、銅コストは大幅に上昇している。
- 2) 直流でメリットが出る HTS 線材を利用する直流送電ケーブル及び周辺機器（パルス電流リード等）やシステム（冷却システム等）の研究開発が進み、中部大学を中心に直流超電導ケーブルシステムの研究開発が進められている。
- 3) アラブ諸国では「石油後」を見越して、砂漠での太陽光等の電力エネルギー生産の検討が本格化しつつある。このエネルギーの輸出のために HVDC（超高压直流送電）や、さらに効率が高く資源制約性が少ない超電導直流送電に関する研究開発が開始されようとしている。

<このようにサハラ砂漠の砂還元プロセスによる低価格 Si 太陽電池製造技術と遠距離送電を低損失で実現可能な超電導直流送電技術を組み合わせると（上図参照）、強力な砂漠の太陽エネルギーを電力に変換し遠方にある消費地（EU 諸国）に供給できるようになるとの姿が紹介された。>

HTS 直流送電技術の適用には、直交変換器ロス、冷却ロス、HTS 線材コストを勘案した Breakeven Length の解析によると 700~800 km 以上の超長距離 HTS 直流送電で現状の交流グリッドの置き換えに対してメリットが出てくることから、新規増設グリッドあるいは現存の直流送電グリッドの置き換え以外での国内導入市場は少ないものの、今回の会議で議論されたサハラソーラーブリーダー（SSB）計画のような壮大な（超長距離送電を含んだ）将来市場に、現在世界で最も進んでいる我が国の超電導技術が進出していくためにも今後の動向には注視していく必要があると実感した。

特集：超電導デジタルデバイス「超電導デジタルデバイスの技術動向」

名古屋大学大学院
工学研究科
教授 藤巻 朗

超電導のデジタル応用を目指したジョセフソン接合による論理回路、あるいはその集積回路化は、すでに 40 年の歴史を持つ。20 年ごとに節目が訪れ、今はまさに第 2 世代から第 3 世代への移行期にある。第 1 世代はラッチング論理回路、第 2 世代は単一磁束量子論理回路（RSFQ 回路）、そして第 3 世代は低電力 SFQ 回路である。

図 1 は、これまで試作されてきたマイクロプロセッサなど比較的大規模な集積回路のビットエネルギーとクロック周期の関係を示したものである。ここでビットエネルギーは、1 クロック周期において消費されるエネルギーを素子数で割った値である。半導体 CMOS デバイスとラッチング回路は、クロック周期、ビットエネルギーともに既に同じ程度となっている。したがって冷却のコストを考えると、ラッチング回路に優位性は見出せない。

この状況を大幅に変えたのが RSFQ 回路である。同じ作製プロセスにおいて、クロック周期、ビットエネルギーともに 1 桁以上低減化されている。さらに、ISTEC が開発したアドバンスドプロセス（ADP）を利用することで、動作周波数が 100 GHz を超える回路も実証された。ビットエネルギーもさらに 1 桁減少している。図 2 は、ADP を用いたもっとも複雑な回路である科学計算専用のコプロセッサプロトタイプである。ジョセフソン接合の総数は 11458 個、45 GHz で動作し、消費電力は 3.4 mW であった。現在の RSFQ 回路は半導体 CMOS に比べて動作周波数、ビットエネルギーで合計 4 桁優れており、冷凍機のコストを考慮しても優位性は維持されている。ADP による SFQ 回路の優位性を示す端的な例として、トグルフリップフロップ（TFF）を太陽電池でデモンストレーションした例を動画として示す。そこでは、

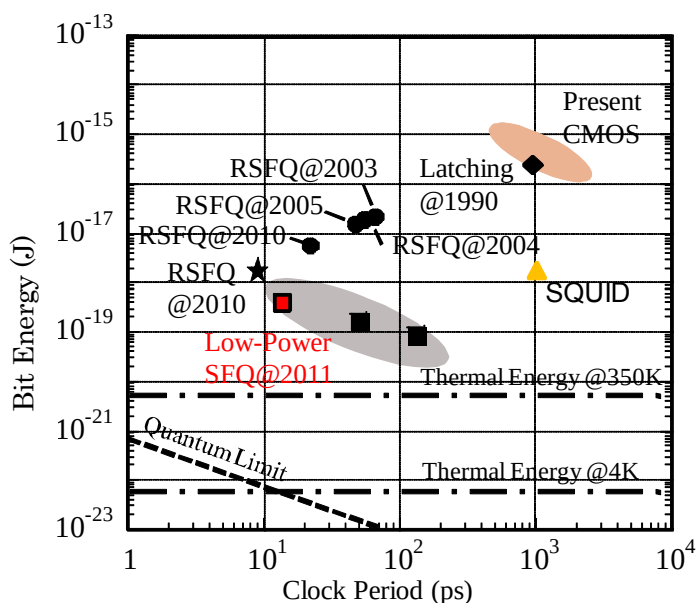


図 1 各種集積回路におけるビットエネルギーとクロック周期の関係

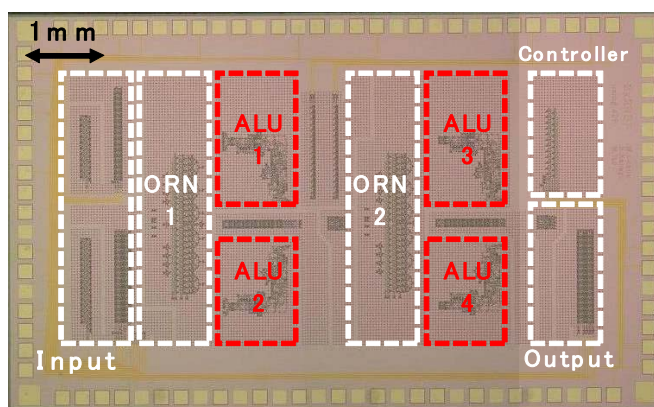
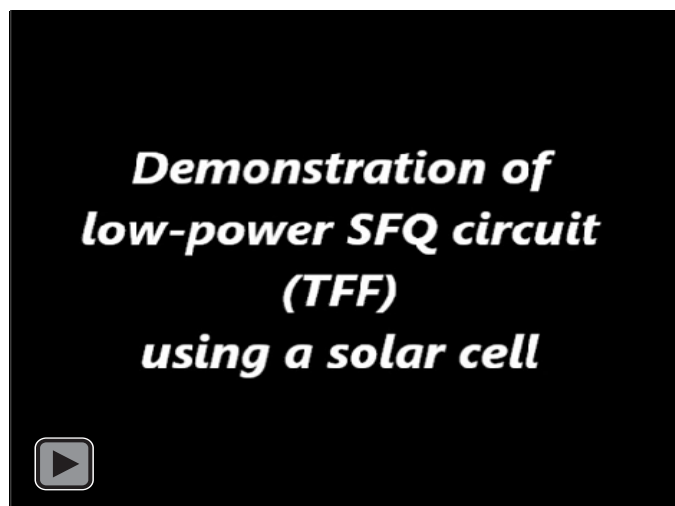


図 2 ADP によって作製した科学計算用コプロセッサプロトタイプ顕微鏡写真

288 GHz まで 15 μ W 以下の電力で動作している。応用としては、将来の IT 機器以外に、超伝導検出器システムへの展開が積極的に進められている。多素子化した検出器の出力をピックアップし、必要な信号処理を施したのち、多重化して室温エレクトロニクスへと信号を送るシステムである。日本では、単一光子検出器、中性子検出器、質量分析装置へ展開が図られている。



太陽電池を使用したトグルフリップフロップ（TFF）のデモンストレーション（動画）

限界が見えたとは言え、半導体の性能向上は依然として続いている。この状況を考えると、超電導デジタル回路の将来にわたる優位性確保のためには、さらに 1 桁以上の性能向上が求められる。そこで、RSFQ 回路のエネルギー消費の 9 割以上を占めている電流制限抵抗でのエネルギー消費を削減する提案がなされた。電流制限抵抗は、電圧源とジョセフソン接合の間に挿入されており、ジョセフソン接合に流れる電流を決定する。電流源駆動となるように、比較的大きな抵抗値が用いられ、その結果そこでのエネルギー消費が増加している。具体的なエネルギー消費低減方法として、交流で駆動し電流値をトランスの巻線比で調整する方法、電流制限抵抗をインダクタとジョセフソン接合で置き換える方法が米国で研究されている。日本では、横浜国立大学、名古屋大学で電流制限抵抗の値を 1/10 程度にまで低減化し、代わりにインダクタンスを抵抗と直列に配置する LR バイアス法が以前から続けられている。

最近では、ジョセフソン接合でのエネルギー消費そのものを低減化しようという試みもなされてきた。基本的にはジョセフソン接合のスイッチングを遅くすることで、電圧の発生を抑制するという思想である。Stony Brook 大学の nSQUID、横浜国立大学の断熱型 QFP、そして名古屋大学の低電圧 RSFQ がこれに該当する。ビットエネルギーとクロック周期の関係は、実験値を図 1 に Low Power SFQ としてプロットした。動作速度は遅くなるものの、ビットエネルギーが大幅に低減化し、半導体に比べ、ビットエネルギーとクロック周期の積において 5 桁の優位性があることが分かる。既にジョセフソン接合自身のエネルギー消費は通常の SQUID よりも小さくなっている。nSQUID や断熱型 QFP は熱力学的限界、量子力学的限界にまでビットエネルギーを下げることも可能と考えられ、今後の展開が期待される。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス「微小積層型ジョセフソン接合作製における一課題」

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

ジョセフソン接合 (JJ) は超電導体の巨視的量子効果を外部に引き出すためになくてはならない素子である。超電導工学研究所では超電導単一磁束量子 (SFQ) 回路作製のために最小 $1\ \mu\text{m}$ 角の JJ を作製している。一方、量子コンピュータに用いる量子ビットにはさらに小さい $0.1\ \mu\text{m}$ 角から $0.05\ \mu\text{m}$ 角の JJ が必要だと言われている。また、SFQ 回路の消費電力を低減するためにもより小さな JJ が望まれている。このため、我々は微小 JJ の作製プロセス確立に向けた研究を行っている。微小な JJ を作るにはより優れたリソグラフィ技術とエッチング技術は当然必要であるが、これらの技術については他に多くの解説があるので本稿では触れない。本稿では実際に微小 JJ を作製する際に解決する必要がある JJ と上部配線のコンタクト方法について述べる。

図 1 に超電導回路に一般的に用いられるトンネル型 JJ の断面構造を示す。JJ は Nb や Al 等の超電導体からなる下部電極上に極薄のトンネルバリアを介して、超電導上部電極が積層された構造をしている。この上部電極がトンネルバリアと接する面積が JJ の面積となる。従って、微小 JJ とは微小な上部電極を持つ JJ のことである。上部電極は層間絶縁膜に開けられたコンタクトホールを介して超電導上部配線と接続され、電気的に外部と接続される。

図 1 でコンタクトホールが上部電極からはみ出すとリーク電流発生の原因となるため、コンタクトホールは上部電極領域に収まる必要がある。露光時の目合わせずれ (アライメントマージン) を考慮に入ると、コンタクトホール直径は JJ より $0.5\ \mu\text{m}$ ほど小さくしなければならない。このため、リソグラフィとエッチングの限界まで JJ サイズを小さくする微小 JJ では、従来のようにコンタクトホールを用いて JJ と上部配線をつなぐことができなくなる。

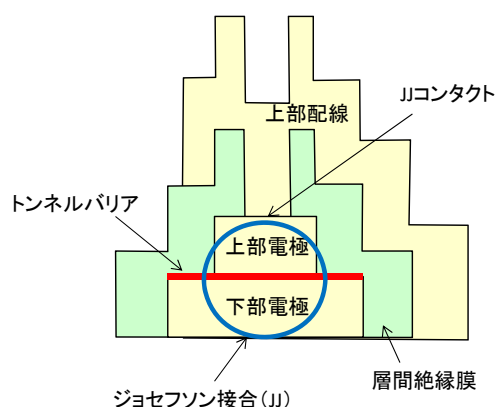


図 1 コンタクトホールを用いた JJ の断面模式図

超電導工学研究所では Chemical Mechanical Polishing (CMP) 法を用いて JJ と上部配線を接続する方法を開発している¹⁾。この方法で作製した JJ の断面模式図を図 2 に示す。この方法では JJ 上に層間絶縁膜を成膜した後、上部電極表面が露出するまで CMP を用いて表面を研磨する。CMP では平坦な部分より突出した部分の研磨レートが高いため、CMP を行うことにより表面の平坦性は

向上する。露出した上部電極上に上部配線を成膜することにより JJ と上部配線のコンタクトを取ることができる。この方法で難しいのが CMP 終点検出の方法である。微小な上部電極が露出したことを直接観測することは困難であるため、我々は研摩後の層間絶縁膜の膜厚を分光干渉法で光学的に測定することにより上部電極露出を推定する方法を採用している。本方法を用いて JJ と上部配線とのコンタクトを取ることに成功しており、今後微細 JJ を作製していく予定である。

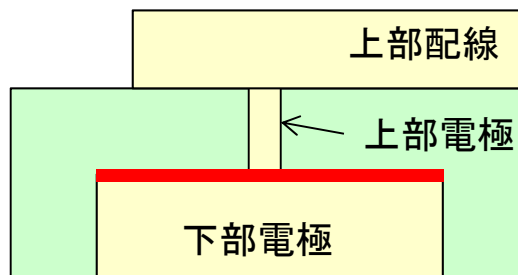


図 2 CMP 平坦化を用いた微小 JJ 断面模式図

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会の最先端支援プログラムにより助成を受けたものである。また別の一部は科研費（基盤 S 22226009）の助成を受けたものである。本研究で用いたデバイス試作には(独)産業技術総合研究所が一部寄与している。

参考文献：

1) 佐藤、永沢、日野出、日高、前澤、「微小積層型ジョセフソン接合の作製と評価」、第 72 回 応用物理学学会学術講演会、31p-ZM6（2011）

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス「集積型極低温電流比較器作製プロセス」

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所低温デバイス開発室
佐藤哲朗

我々は長年にわたって Nb/AlO_x/Nb 系ジョセフソン接合を含む集積回路の作製プロセスを研究・開発してきた。試作した集積回路はジョセフソンメモリや SFQ (Single Flux Quantum) 集積回路など様々である。最近回路内にグランドプレーンや配線層が多数必要とされるため、9-10 層の多層構造を持つ SFQ 集積回路を CMP (Chemical Mechanical Polishing) 平坦化工程を含むプロセスで作製する製造技術を開発し、回路試作を重ねている。ここではこの集積回路用に開発した多層構造作製プロセスを、やや構造・機能を異にするデバイス作製に応用した例を紹介する。

極低温電流比較器 (Cryogenic Current Comparator: CCC) は二つの電流の比を最も正確に決定できるデバイスである。CCC はある巻線数を持つ 2 本以上のコイル、それらのコイルを取り巻く超伝導シールド、そのシールドを流れる電流が発生する磁場を検出するためのピックアップコイルを持つ SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) 磁束計から構成される。

2 本のコイルは巻線数が等しく、それらにはほぼ同じ大きさで逆向きの電流が流れていると仮定する。コイルを取り巻く超伝導シールドにはそれらの電流から生じる磁界を打ち消すため、マイスナー効果によるシールド電流が生じる。超電導体シールドが十分厚く完全な磁気シールドとみなせるならば、シールド電流の大きさは二つの電流の差に一致する。二つの電流の電流差がゼロの場合にはシールド電流がゼロになる。この関係はコイルやシールドの幾何学的な寸法や位置関係などに影響されない。すなわち、シールド電流が発生する磁場を SQUID で測定しながら、この磁場（すなわち電流差）をゼロにするように電流値を調整すれば、極めて高い精度で等しい値を持つ二つの電流を作ることができる。なお、コイルの巻線比を変えることで、1:1 以外の電流比にも対応することができる。

CCC の代表的な用途は抵抗標準であり、温度計の校正に用いられている。また微弱な電流を正確に通信したい場合にも用いられている。

これまでの CCC では、鉛箔を用いて作製したトーラス状の管を超伝導シールドとして用いていた。このため従来の CCC は数 cm 以上の寸法を持つバルクデバイスであり、その製作には特殊な職人技が必要であり、またその使用に際しては冷媒である液体ヘリウムに浸す方法しかなかった。

我々は、(独)産業技術総合研究所および東京都市

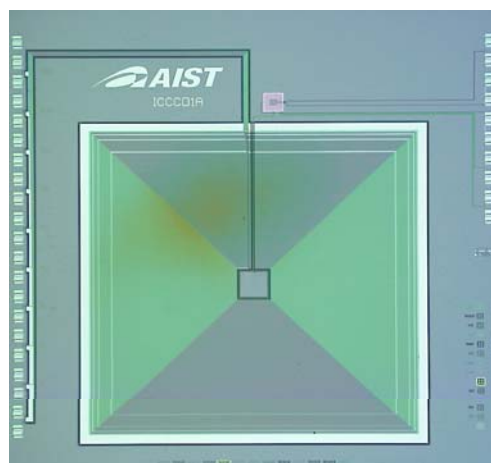


図1 集積型 CCC の顕微鏡像。1 チップの寸法は 5 mm×5 mm である。

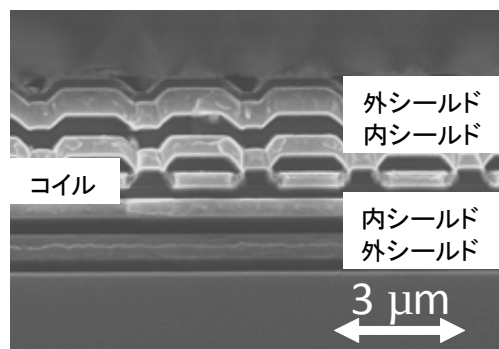


図2 集積型 CCC の断面 SEM 像

大学と共同で、薄膜技術を用いることにより CCC のすべての構成要素がひとつの基板上に集積された集積型 CCC を開発している¹⁾。この集積型 CCC はその作製においては高度に確立された集積回路作製技術が使えるため、高い再現性が期待される。また、その使用に際しては簡便な小型冷凍機の使用が、加えて Si ウェハ上に集積されているため高い機械的耐久性が期待される。我々はこの開発の中で、長年にわたって手がけてきた Nb 系多層 SFQ 集積回路の作製プロセスを応用した集積型 CCC 作製プロセス開発を担当している。これまでの研究では、まず SFQ 回路作製のためのプロセス条件から大きな変更はせずに、5 層の Nb 層で構成された集積型 CCC を試作し、CCC の基本動作を確認している。図 1 に試作した集積型 CCC の顕微鏡像を示す。また図 2 は、集積型 CCC のコイルおよびそれらをシールドする 2 重の超伝導シールド層の構造を示す断面 SEM 像である。

今後は、全長数 m にもおよぶ長い CCC コイルや十分なシールド特性を有する数 μm 厚の超伝導シールド層など、CCC 特有の構造を作製するためのプロセス開発を進める。

参考文献：

1) M. Maezawa *et al.*, “Design and Fabrication of Integrated Cryogenic Current Comparators”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 21, Issue 3, Part 1, p 728-733, (2011).

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス「極限低消費電力断熱型 QFP 回路」

横浜国立大学大学院
工学研究院
教授 吉川信行

現在のスーパーコンピュータの100倍以上の性能を持つエクサスケールコンピュータを実現するためには、エネルギー効率の高い論理デバイスが必要不可欠である。論理デバイスのエネルギー効率を考える際、最も重要な評価指標はビット当たりのスイッチングエネルギーである。

単一磁束量子 (single flux quantum; SFQ) 回路はコンピュータシステムの消費エネルギーを飛躍的に低減する技術として知られている。ジョセフソン接合の臨界電流を I_c 、単一磁束量子を Φ_0 とすれば、SFQ論理ゲートの動的スイッチングエネルギーは $I_c\Phi_0$ で与えられ、極めて小さい。しかしながら現在のところ、この10倍以上の静的エネルギーがバイアス電流供給用のオンチップ抵抗で消費されている。システムの冷却に必要な電力を考えた場合、これは大きなエネルギー効率の低下につながる。近年、LRバイアスSFQ回路¹⁾、reciprocal quantum logic (RQL)²⁾、eSFQ³⁾など、静的消費エネルギーを低減しようとする研究が世界中で行われている。しかしながら、これらの研究の目標は静的消費エネルギーの削減であり、スイッチングにおける本質的なエネルギーである動的消費エネルギー $I_c\Phi_0$ を低減することはできない。一方、超伝導論理ゲートの動的消費エネルギーの低減を目指した研究として、負のインダクタンス結合を利用してn-SQUIDを用いた可逆的超伝導回路が提案されている⁴⁾。

これに対して我々は、論理ゲートをゆっくりと断熱的に動作させることで、超伝導論理回路の動的消費エネルギーを低減できることを提案した。今回、磁束量子パラメトロン (Quantum Flux P@rametron; QFP) を断熱動作させることで動的消費エネルギーを極限的に低減できることを示し、QFPの断熱動作のためのパラメータ条件を明らかにした⁵⁾。また、断熱型QFPゲートを試作し、その正常動作を実験により確認した。図1にはISTEC標準プロセス (STP2) を用いて作製した断熱型NOTゲートを3段接続した回路のチップ写真を示す。本回路の正常動作は低速において確認された。回路シミュレーションにより、標準プロセスを用いた場合、断熱型QFPゲートの消費エネルギーは4 GHzの動作スピードにおいて $140 \text{ k}_B T = 0.006 \text{ aJ}$ 程度であることが示された。この値は最新のCMOS論理回路に対して5ケタ以上小さい。本研究により断熱モード超伝導論理回路は、コンピュータシステムの消費エネルギーを極限的に低減する技術として有効であることが示された。

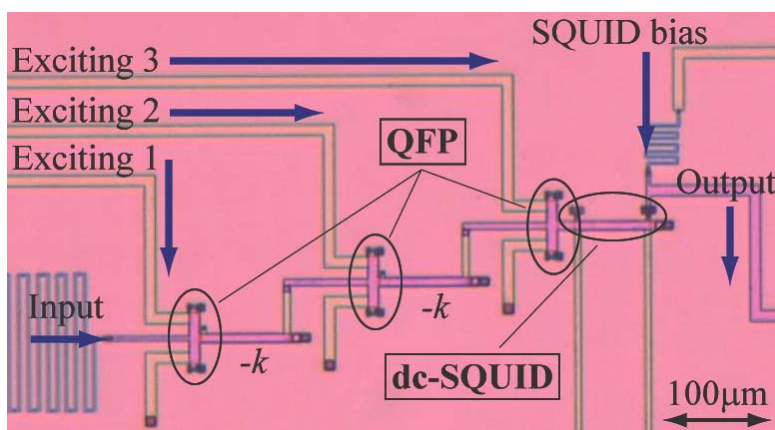


図1 断熱型QFP NOTゲートを3段接続した回路の顕微鏡写真。最終段には出力信号検出用のdc-SQUIDが接続されている。

参考文献：

- 1) N. Yoshikawa, Y. Kato, Supercond. Sci. Technol., 12, 918 (1999).
- 2) Q. Herr, A. Herr, O. Oberg, A. Ioannidis, J. Appl. Phys. 109, 103903 (2011).
- 3) O. A. Mukhanov, IEEE Trans. Appl. Supercond., 21 760 (2011).
- 4) V. K. Semenov, G. V. Danilov and D. V. Averin, IEEE Trans. Appl. Supercond., 17, 455 (2007).
- 5) N. Yoshikawa, D. Ozawa, Y. Yamanashi, Superconductivity Centennial conference 2011, September 2011, The Hague, Netherlands.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス

「マルチピクセル SNSPD アレイ用 SFQ 読み出し回路の開発」

独立行政法人情報通信研究機構

未来 ICT 研究所

寺井弘高

超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SNSPD) は、高カウントレート、高検出効率、低ダークカウントレート、低ジッタ、広波長帯域という特長を有し、量子鍵配布 (QKD) システムをはじめとする量子情報通信分野での応用が進んでいる¹⁾。SNSPD の応答速度は、本質的には入射光子により発生したホットスポットの準粒子緩和時間で決まるが、現状の受光面積 ($10\sim15\ \mu\text{m}^2$) では、ナノワイヤのカイネティックインダクタンス L_K と負荷抵抗 R による L_K/R 時定数で決まっている。受光面積の縮小により L_K を低減することで、さらなる高速応答が実現可能であるが、100 % 近いファイバとの結合効率を得るためには、受光面積を現状よりも縮小することは極めて難しい。そこで、受光面積をマルチピクセルに分割しアレイ化するという手法が注目を集めている。アレイ全体での受光面積は保たれるので、ファイバとの結合効率はこれまでと変わらず、それぞれのピクセルの L_K を低減することが可能で、現状 100 MHz のカウントレートを GHz 領域にまで向上させることが可能となる。また、マルチピクセル化することで、複数の同時入射した光子を検出することができ、単一ピクセルでは不可能だった光子数識別が可能となる。SNSPD のマルチピクセル化により、光波長帯域、高フレームレートのシングルフォトンイメージングが可能となれば、その応用範囲は量子情報通信分野にとどまらず、半導体、バイオ、質量分析など各種産業分野、最先端の研究分野に広がり、新たな産業創出に大きく貢献するものと考えられる。

マルチピクセル SNSPD アレイを実現する上で、最大のボトルネックは信号読み出しである。マルチピクセル化により読み出しに必要な RF ケーブルの本数が増えるため、冷凍機への熱負荷が増大し、現在 SNSPD で利用している 100 V 電源で動作可能な 0.1 W 小型 GM 冷凍機への実装は困難となることが予想される。冷凍機内部で何らかの信号処理を行い、

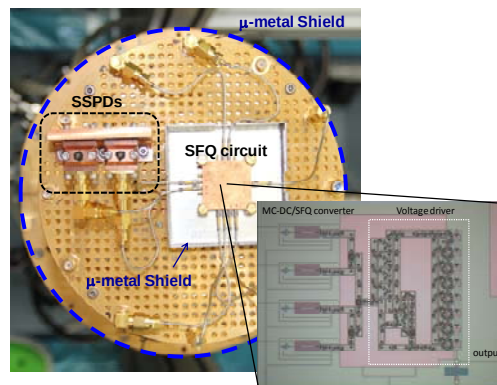


図 1 SNSPD-SFQ 読み出し回路接続実験における冷凍機内部の様子

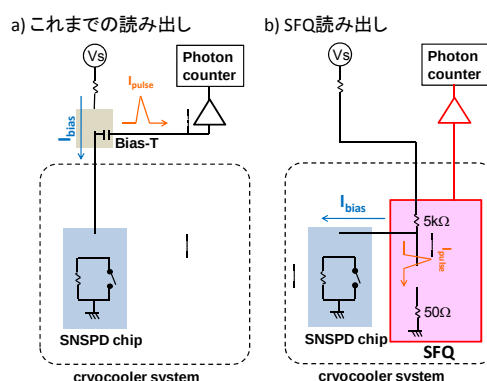


図 2 光子検出効率測定のためのセットアップ； a) 従来読み出し、b) SFQ 読み出し

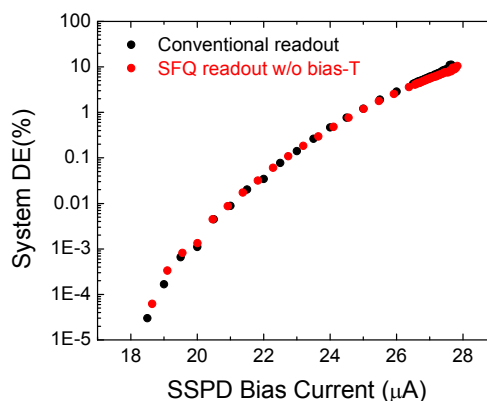
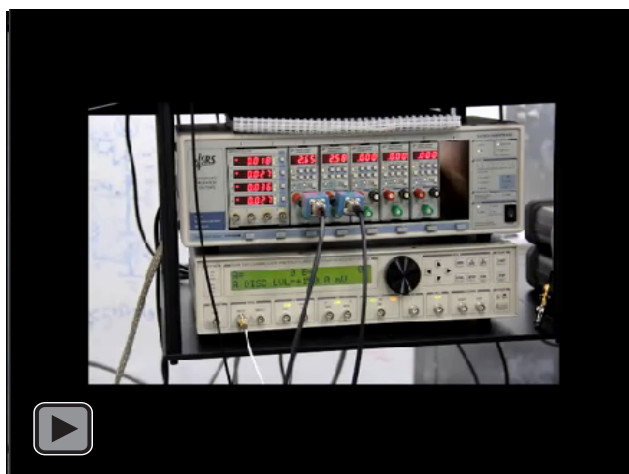


図 3 光子検出効率のバイアス電流依存性

信号読み出しに必要なケーブル数を削減する必要があるが、我々は極低温環境で動作する読み出し回路として SFQ 回路に着目し研究を行っている²⁾。SFQ 回路は、クロック周波数~100 GHz という高速、10,000 ジョセフソン接合当たり数 mW の低消費電力で動作するため、極低温環境下での SNSPD の信号処理に適していると考えられる。

我々はこれまでに SNSPD からの約 1 mV の微弱な信号を受けて SFQ パルスを発生するインターフェース回路を開発し、その動作実証を行った³⁾。この実証実験では、SNSPD と SFQ 回路を個別に冷却し、長さ約 3 m の RF ケーブルで接続していたが、今回我々は SNSPD と SFQ 回路を同じ冷凍機システムで冷却し実験を行った⁴⁾。図 1 に SNSPD と SFQ 回路を実装した冷凍機内部、SFQ 読み出し回路の写真を示す。SNSPD と SFQ 回路を約 10 cm の RF ケーブルでバイアスティーを使用せずに接続した。図 2 に実験のセットアップを、図 3 に得られた検出効率特性を示す。SFQ 読み出し回路をバイアスティーなしで SNSPD と直接接続しても、バイアスティーと室温アンプを使用したこれまでの信号読み出しとほぼ同じ検出効率曲線が得られた。また、タイミングジッタの測定を行い、SFQ 読み出し回路込みで約 50 ps という十分小さいタイミングジッタであることが確認された。SFQ 読み出し回路に 2 個の SNSPD を接続し動作検証を行った結果、2 個の SNSPD がそれぞれ検出した光子信号を SFQ 回路によって多重化し出力することに成功した（動画参照）。



2 チャンネル SNSPD+SFQ 読み出し回路接続実験の様子（動画）

今回の結果は、バイアスティーを使わずに SFQ 読み出し回路と SNSPD を接続可能であることを実証したもので、今後の多ピクセル化に向けての大きな一歩といえる。今後、SNSPD と SFQ 読み出し回路を同一基板上に集積化することを視野に入れ、研究を進めていく。

参考文献:

- 1) G. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Se menov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, and R. Sobolewski, Appl. Phys. Lett. Vol. 79, pp. 705-707, 2001.
- 2) Terai, S. Miki, and Z. Wang, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 19, 350, 2009.
- 3) Terai, S. Miki, T. Yamashita, K. Makise, and Z. Wang, Appl. Phys. Lett., Vol. 97, 112510, 2010.
- 4) S. Miki, H. Terai, T. Yamashita, K. Makise, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, Appl. Phys. Lett., Vol. 99, 111108, 2011.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導デジタルデバイス「超伝導量子回路が拓く可能性」

日本電気株式会社

中央研究所グリーンイノベーション研究所

主席研究員 蔡 兆申

微小な超電導ジョセフソン接合回路に現れる巨視的量子コヒーレンスの研究は、さまざま革命的な可能性を示している。本文では、量子ビットを使った量子コンピューターへ向けた研究と関連する一連の研究の中で、最近進展の進んでいる、超伝導人工原子を使った量子光学の成果を紹介する。

レーザーや時間標準を生み出した量子光学は、現代社会で大きな役割を担っている。100 年来、量子光学は自然原子を使ったものに限られてきた。一方量子化したエネルギー準位を持つ量子ビットは、人工原子とみなせる。人工原子は、自然原子にない設計自由度、制御性、集積性に優れていて、且つ人工原子と光子の結合は、自然原子のそれよりも格段に強く、量子性の強い「強結合」条件を簡便に実現できる。強い結合の実現は、単一の人工原子をつかった以下に紹介する多くの成果を生み出した。このような成果は、将来的には量子光学を新たな方向に発展させ、新規な量子光学デバイス創生の可能性を示している。

数年前、我々はマイクロ波共振器中に 1 個の電荷量子ビット（人工原子）を結合させ、単一原子でのレーザー発振に成功した（Nature, 449, 588, 2007）。この研究方向を発展させ、我々は人工原子を 1 次元伝送線の中に配置し実験を行った[Science, 327, 840, 2010]。実験には人工原子として磁束量子ビットを使った。開放系にある自然原子は共鳴散乱によって検出できる。これは共鳴蛍光と呼ばれる量子光学の基本原理解である。我々は単一の巨大な人工原子により、同じような入射電磁場の散乱が起こることを観測した。人工原子のこのような振る舞いは、量子光学を使った一次元開放系中の点散乱源の予測と定量的に一致していた。このような現象は、巨視的量子散乱と呼ぶことができる。共鳴条件では入射電磁波がほぼ完全に反射されること（透過電磁波の消滅）が観測された。これは原子と場の相互作用が大変強いことを示し、このような制御性を備えた人工原子の量子光学やフォトニクスへの応用が期待される。

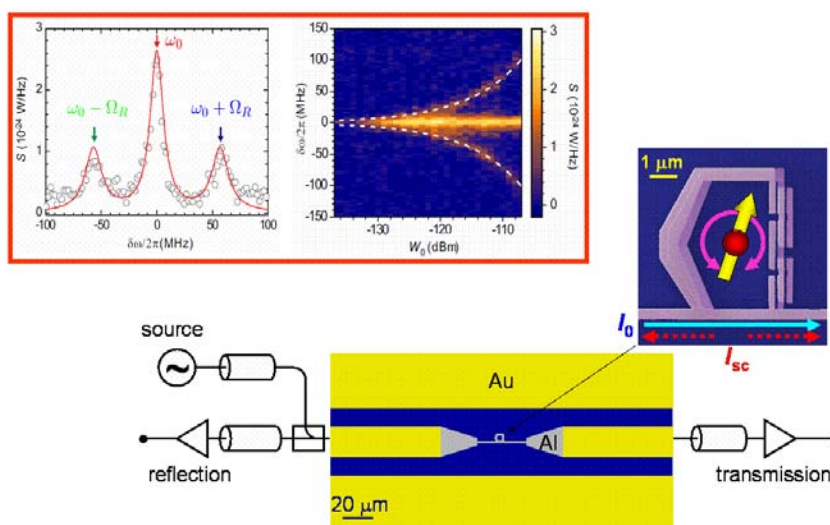


図 1 伝送線（1 次元開放系）中に配置された人工原子（磁束量子ビット）。挿入図（赤枠）：巨視的量子散乱の一例として非弾性散乱（蛍光共鳴）の実験結果をしめす。Mollow トリプレットが明確に観測されている。

人工原子の 2 準位を使い、弱いマイクロ波を照射した場合、入射光の約 94 %が反射される弾性散乱が観測された。更に強いマイクロ波を照射したときには、非弾性散乱（蛍光共鳴）が観測され、Mollow トリプレットが明確に観測された。

人工原子の 3 準位を使った実験も行った。 $|0\rangle \Leftrightarrow |2\rangle$ 転移が抑制される縮退点にバイアスした場合、電磁誘導透明化（electromagnetically induced transparency、EIT）が観測され、Autler-Townes ダブレットが明確に観測された[Physical Review Letters, 104, 193601, 2010]。縮退点から離れたバイアス点では $|0\rangle \Leftrightarrow |2\rangle$ 転移が抑制されず、光学的ポンピングによる反転分布が実現し、マイクロ波光の誘導放出と増幅が観測された[Physical Review Letters, 104, 183603, 2010]。同様な系で、時間領域の実験も行うことに成功した。量子状態の制御や評価が、透過光の観測のみで実現できることを示した[Physical Review Letters , 107, 043604,2011]。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連 10 月-11 月の催し物案内

10/10-14

13th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems

場所：Grenoble, France

問合せ：<http://icalepcs2011.esrf.eu/>

10/11-13

Tenth EPRI Superconductivity Conference

場所：Tallahassee, FL, USA

問合せ：

<http://www.cvent.com/events/tenth-epri-superconductivity-conference/event-summary-0ac856fa88e84a97ac2058094d0a4629.aspx>

10/12

超伝導エレクトロニクス研究会 10 月研究会（超伝導エレクトロニクス基盤技術及び一般）

場所：機械振興会館

問合せ：<http://www.ieice.org/es/sce/jpn/>

10/24-26

第 24 回国際超電導シンポジウム (ISS2011)

場所：タワーホール船堀（東京都江戸川区）

問合せ：<http://www.istec.or.jp/ISS/index.html>

10/27-29

The 6th East Asia Symposium on Superconductor Electronics (EASSE 2011)

場所：米沢

問合せ：

<http://easse2011.yz.yamagata-u.ac.jp/index.html>

10/31-11/1

The 20th International Superconductivity Industry Summit (ISIS-20)

場所：Konjiam Resort, Gyeonggi-do, South Korea

問合せ：<http://eng.super-kics.or.kr/conference>

11/9-11

2011 年度秋季低温工学・超電導学会

場所：金沢歌劇座

問合せ：<http://www.csj.or.jp/conference/2011a/index.html>

ISS2011
TOWER HALL FUNABORI, Tokyo, Japan
October 24 (Monday) - 26 (Wednesday), 2011
Sponsored by
International Superconductivity Technology Center, ISTEC

超電導 2011
[sú:pər]

Special Plenary Lectures (tentative) P.H. Kes A.P. Malozemoff Y. Shiohara Leiden University American Superconductor Corporation ISTEC-SRL	Plenary Lectures (tentative) H. Hayashi H. Kayano J. Müller M. Tachiki F.N. Werfel Kyushu Electric Power Co., Inc. Toshiba Corporation Zenergy Power Tohoku University Adelwitz Technologiezentrum GmbH
--	--

Deadlines:
June 27 for Abstract submission
October 3 for Pre-registration

ISTEC
Phone: +81-3-3536-7283 Fax: +81-3-3536-7318
E-mail: iss@istec.or.jp (for further information)
E-mail: iss-editorial@istec.or.jp (for proceedings manuscripts)
E-mail: iss-exhibition@istec.or.jp (for exhibition)
10-13, Shinonome 1-chome, Koto-ku, Tokyo 135-0062, Japan

ISS2011 Secretariat
Abstract:
Phone: +81-3-3500-5935 Fax: +81-3-5283-5952
E-mail: iss2011@convention.co.jp
c/o Japan Convention Services, Inc. IT Center
Koshin Bldg.
2-2, Kandanshikicho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0054, Japan
Registration:
Phone: +81-3-3508-1250 Fax: +81-3-5283-5952
E-mail: iss2011reg@convention.co.jp
c/o Japan Convention Services, Inc. IT Center
Koshin Bldg.
2-2, Kandanshikicho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0054, Japan

<http://www.istec.or.jp/ISS/>

KEIRIN
OO
This symposium is partly subsidized by JKA through its promotional funds from KEIRIN RACE.
<http://ringring-keirin.jp>

11/16-11/18

Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics (ACASC 2011)

場所 : New Delhi, India

問合せ : <http://www.iuac.res.in/ACASC2011>

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (8/19-9/15)

- 脱レアアース開発加速 車向けなどハイテク素材 中国依存を軽減 日本経済新聞 8/19
- 北朝鮮、レアアースに力 豊富な埋蔵量 外貨獲得狙う 朝日新聞 8/19
- どうする日本の電力 導入機運高まる風力・太陽光 Fuji Sankei Business i. 8/19
- 豪産レアアース輸入 読売新聞 8/20
- 世界の風力発電装置市場 20 年 3.1 倍 24 兆円 日刊工業新聞 8/24
- 太陽光発電システム サハラ砂漠で構築 日刊工業新聞 8/25
- 日本と EU が共同研究 超伝導テーマ 新規 3 課題決定 科学新聞 8/26
- 中国江西省 3 県 レアアース生産 年内に停止 Fuji Sankei Business i. 9/06
- レアアース生産制限 中国、資源保護を強化 朝日新聞 9/06
- 中国 大半が生産再開 レアアース価格下げ止まり Fuji Sankei Business i. 9/06
- 超電導で世界最高 24 テスラの高磁場磁石開発 日経産業新聞 9/08
- 誘導集電方式 リニアに採用 鉄道で世界初 毎日新聞 9/14
- 風力発電 欧州の陣 日本勢、品質で拡大市場狙う 日本経済新聞 9/15

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

「応用物理学会」報告

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

第 72 回応用物理学会学術講演会が、山形大学（山形市）において 8 月 29 日から 9 月 2 日の日程で開催された。応用物理学会は総発表件数が 4,000 件に迫る大きな学会であり、この中で一般 167 件、シンポジウム 10 件の超電導関連の講演が行われた。これらとは別に、今年は超電導発見 100 周年にちなみ「100 年の歴史に学ぶ超伝導～新たな 100 年の発展に向けて～」と題する特別シンポジウムが企画され、10 件の講演が行われた。本稿では、特別シンポジウム、シンポジウム「超伝導検出器により拓く次世代先端計測分析技術」、一般セッション「接合、回路作製プロセスおよびデジタル応用」について報告を行う。

超電導 100 周年記念特別シンポジウムは、山形県の旧県会議事堂である歴史的な建物で行われた。超伝導物質、現象、電磁現象の物理的解説から、金属、酸化物超伝導線材、マグネット応用、エレクトロニクス応用まで幅広い範囲が歴史を踏まえてわかりやすく解説された。農工大の内藤による BCS の壁 ($T_c \sim 30\text{ K}$ が BCS 超伝導体の限界) は、もともと存在していなかったという話が印象的であった。また、このシンポジウムのハイライトは、酸化物超伝導体の発見に大きな功績のあった JST 北澤理事長の講演であった。いつもながら聴衆に明るい希望を抱かせるユーモアあふれる話に感心した。

検出器のシンポジウムでは、TES X 線分析器を用いた犯罪捜査、大気粉塵源同定（東理大・中井）、ミッシングバリオンを探す X 線天体観測（JAXA・満田）、宇宙背景放射観測用 MKID（国立天文台・関本）、超ウラン原子観測用 γ 線 TES（東大・Damayanthi）、SFQ 回路による検出器出力多重化（名大・藤巻）、XAFS による軽元素の X 線材料分析（産総研・志岐）、e/m が同じ物質を識別できる質量分析（産総研・大久保）、TES を用いた光子数識別（産総研・福田）、量子通信受信用 SSPD（NICT・王）という我が国の超電導検出器研究の粋を集めた発表があった。このシンポジウムを企画した産総研大久保氏の以下のまとめが印象的であった。「2007 年に同様のシンポジウムを開催した時と比べて超伝導検出器技術は着実に成熟していることが実感できた。さらに新たな試みもみられたが、それらが世に広く認知されるには至っていないと感じられる。今後あらゆる機会をとらえてこの技術を宣伝していきたい。」

超伝導デジタル回路のセッションでは、様々な応用やそのためのデバイス作製方法などが講演された。今回の一つの特徴は、より低消費電力の超伝導回路を目指した研究であった。横国大は、究極の省エネデバイスである断熱型 QFP への電源供給方法を提案した。名大は、省エネ型 SFQ 回路を使ったシフトレジスタ回路の動作マージンなどを議論した。また、以前から議論のあった SFQ コンパレータのグレーゾーンについて名大と横国大から発表があり、だいぶ現象が整理できてきたとの印象を受けた。

デジタルセッションの分科内シンポジウムとして「超伝導が拓く量子情報・通信」が行われ、量子コンピュータ用超伝導量子ビットや量子暗号通信用 SSPD の発表があった。この分野は最近進展が著しく活気が感じられた。特に NEC 山本と NTT 仙場による二つの招待講演が圧巻であった。山本は、量子ビットはコヒーレント、カップリング、ゲート操作、読出しの全てが一つのデバイスで高いレベルで実現できることが重要であることを述べ、制御位相ゲートの実現とそれを用いた量子アルゴリズムの実証を報告した。仙場は、超伝導量子ビットは原子などの他の量子ビットと比べる

と桁違いに強結合であるが、強結合ゆえにノイズとも結合してしまいコヒーレント時間が短い欠点があることを述べた。この欠点を補うために超伝導量子ビットの量子状態を結晶中のスピンなどに保存する量子メモリについて報告が行われた。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導リニアモーターカーのお話（その 5）

～クライオスタットと車載冷凍システム～

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 長嶋 賢

1. クライオスタットの高性能化

前回は超電導磁石の、特にコイル部分についての変遷を中心に紹介したが、超電導コイルを冷凍する車載冷凍システムや、極低温状態を維持するクライオスタット（低温容器）は超電導磁石の重要な構成要素なので、今回はこれらについて紹介する。

車載冷凍システムやクライオスタットに関して、1966 年の J.Powell と G.Danby の論文では「全長 100 フィート(30 m)の車両の場合、超電導部分への全熱侵入は 10 W 程度であろう。小型ヘリウム冷凍機は 4 K で 1 W の熱侵入につき 1 kW ほどの電力を消費する。従って消費電力 10 kW の冷凍機を積載すれば、必要な冷凍が可能となる。」と簡潔に述べている。この値は正確では無いものの、この論文が 40 年以上前、実際の開発に着手する以前に書かれたことを考えると驚くほどの確かな予測と言える。しかし、実際にクライオスタットの熱侵入をこのレベルまで低減し、冷凍システムの効率向上と小型軽量化を行って車両に搭載するまでには多くの困難があった。

熱の伝わり方には、「対流（流体の流れによって伝わる）」、「伝導（物質を介して直接伝わる）」、「輻射（電磁波の形でエネルギーを放出したり吸収したりして伝わる）」の三種類があり、現在の超電導磁石では、次のような手段でそれぞれの熱の侵入を防いでいる。

まず「対流」についてであるが、魔法瓶と同じように低温容器を二重（超電導磁石では「外槽」と「内槽」）として、その間を真空にして熱が伝わらないようにしている。

次に、「伝導」に対しては、超電導コイルを支える部品に、熱の伝わりにくい材料を選び、断面積をできるだけ小さくしている。とはいっても、超電導コイルで発生した浮上・推進力を台車経由で車両に伝えなければならないので、強度も同時に必要となる。そこで、熱伝導率は小さいが丈夫な FRP（繊維強化プラスチック）を、荷重支持材として使っている。

最後の「輻射」については、侵入する熱量が絶対温度の 4 乗の差に比例するので、高温部分と低温部分の間に中間温度の板を挿入すれば熱侵入量を小さくできる。そこで、内槽と外槽の間に、輻射シールド板と多層断熱材が入れている。輻射シールド板は液体窒素で 77 K に冷却されて内槽を完全に囲み、外部からの熱を遮断している。一方、多層断熱材は、熱の伝わりにくい材質のシートに輻射反射のためにアルミニウムを蒸着したものと、やはり熱の伝わりにくい材質の繊維を重ねて数十層にし、温度差を分割することにより、輻射による熱の侵入を小さくしている。

これらの工夫により、超電導磁石の熱侵入量は着実に低減してきた。図 1 は超電導磁石の電磁的な蓄積エネルギー当たりの熱侵入量の推移を示している。このようにして外部からの熱侵入量を極力少なくした上で、冷凍機を運転して侵入熱により蒸発したヘリウムを再び液化して使うようにすれば、高価なヘリウムを外部に出すことなくクローズドな運用が可能となる。

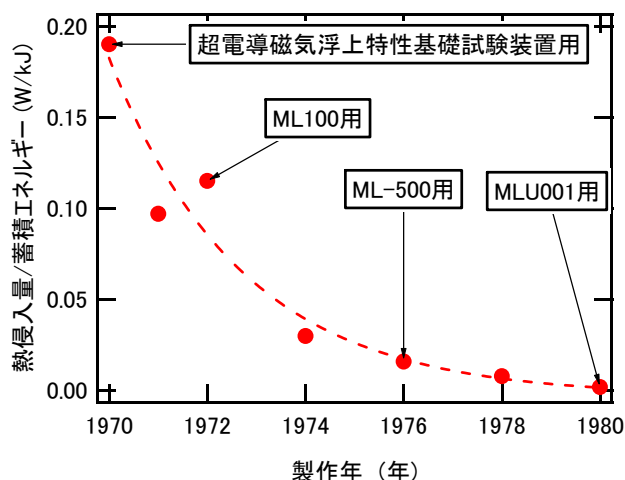


図 1 超電導磁石の熱侵入量低減の進展

2. 車載冷凍システム

冷凍機は、熱を温度の低いところから吸い上げて、高いところに捨てる働きをするが、これは、低いところにある水を高いところに汲み上げるポンプの役割に似ている。冷蔵庫のように電気で圧縮機などを運転して仕事をするわけであるが、超電導磁石では 300 K 近い温度差があるので、何十メートルもの深いところの水を、単純な一台のポンプでくみ上げられないのと同様に、冷蔵庫の様な単純なシステムではうまくいかなくなってくる。そこで、冷凍機を多段化して、段階的にガスを冷却する等の工夫が必要となってくる。

アメリカ海軍研究所の M.Nisenoff は、多くの市販冷凍機の膨大な実例を調べ、冷却温度や冷凍能力と、冷凍機の消費電力および質量の関係を整理した図 2 の様なデータを報告している。これを見ると、同じ冷凍能力であれば、冷凍機は冷却温度が上昇するにつれて質量が減少し、また質量と消費電力は比例関係にあることがわかる。このグラフの一番左に位置する液体ヘリウム温度 (4 K) の冷凍を行うためには、最も高度な技術が必要だということが数字の上からも明らかである。

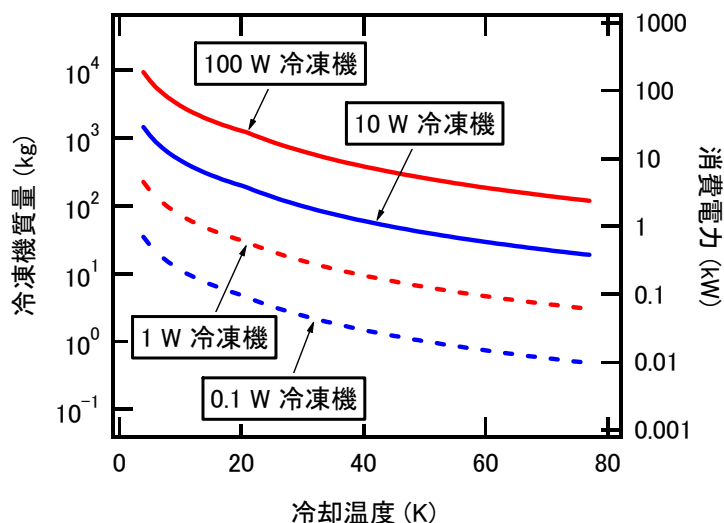


図 2 市販冷凍機の質量および消費電力調査結果

(M.Nisenoff, "CRYOGENIC REFRIGERATION: The Enabling Technology for Superconducting Electronics Applications" Proc. The 1999 International Workshop on Superconductivity, pp. 2-5, 1999)

また、超電導リアの開発開始時は当然ながらヘリウム冷凍機も地上設備でしか存在しておらず、重量、容積ともにとっても車載できるものではなかった。そこで、車両に冷凍機を搭載せず、かつヘリウムを外部に出すこともない「(ヘリウム) 封じ切りシステム」というアイデアが生まれた。これは液体ヘリウムを米国から輸入する方法を取り入れたものである。クライオスタットの蒸発ガス出口を塞ぎ、クライオスタットへの熱侵入分をクライオスタットの内圧上昇と液体ヘリウムの温度上昇で吸収し、ヘリウムを一定時間「封じ切って」保持する。ただ、実験してみると、超電導磁石が安定して使用できる温度に保持する時間が短く、実用には向かないという判断がなされた。

その後、冷凍機を 1 車両に 1 台搭載して複数の超電導磁石を冷却する方式も検討されたが、超電導磁石間を接続する低温ガス用移送管の熱侵入が多い点や、1 つの超電導磁石のトラブルが他にも波及するなどの理由から、最終的に 1 つの超電導磁石 (クライオスタット) に 1 台の冷凍機を組みあわせる現在の方式が採用された。そして、MLU001 には図 3 の様な構成の超電導磁石が搭載された。

これに先立って車載のための小型冷凍機として 3 種類の冷凍サイクルで試作が行われた。クロードサイクル冷凍機 (図 4)、スターリング/J-T (ジュール・トムソン) 冷凍機 (図 5)、GM (ギフォード・マクマホン) J-T 冷凍機 (図 6) である。それぞれの冷凍機には効率や信頼性・耐久性の点で一長一短があるが、図 3 の超電導磁石が製作された時点では、効率が高いことや車載冷凍機としてのまとまりが良いこと等が理由となり、クロードサイクル冷凍機が選択され搭載された。

ところで、残りの二つの方式の冷凍機、スターリング/J-T 冷凍機と GM/J-T 冷凍機の重要なパーツとして蓄冷器というものがあり、内部に蓄冷材が組み込まれている。この蓄冷材に要求される事柄は、極低温で大きな熱容量を有することである。殆どの物質は低温になるほど比熱が低下するために、極低温での蓄冷器の性能が低下してしまう悩みを持っていた。ところが稀土類元素を使用した蓄冷材は低温でも比熱が高く、この新しい材料を使用するようになると、これらの冷凍機の極低温領域における効率が向上した。特に GM/J-T 冷凍

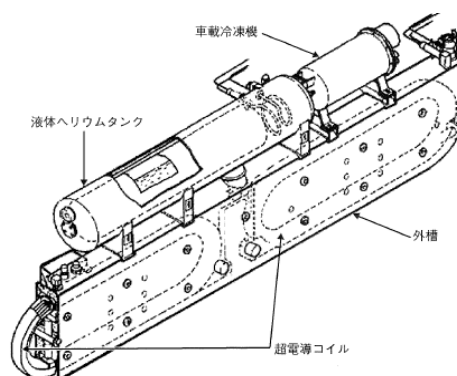


図 3 冷凍機を搭載した MLU001 用超電導磁石

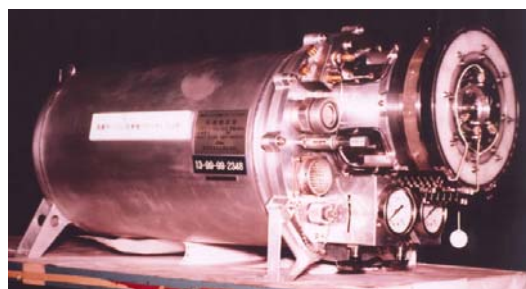


図 4 クロードサイクル冷凍機

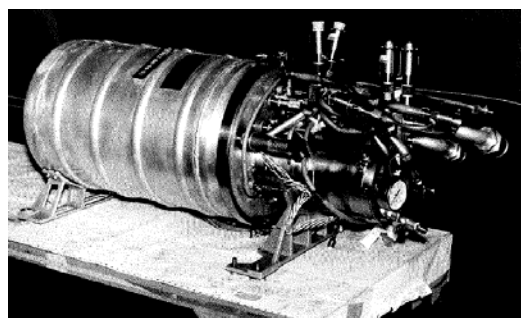


図 5 スターリング/J-T 冷凍機

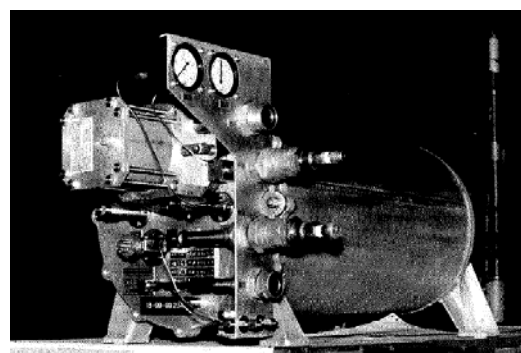


図 6 GM/J-T 冷凍機

機はその高い信頼性や台車へ搭載する際のレイアウトのしやすさ等が理由となり、現在主流の冷凍機となっている。

今後、超電導磁石に高温超電導体を用いると、冷却温度が上がるので、クライオスタットの構造はより簡単に、さらに小さくできる可能性もある。また、車載冷凍機も図 2 が示すように、温度上昇に応じて消費電力及び質量が小さくなる。当然小型化や低コスト化も可能となる。このようなことを受け、車載冷凍システムの考え方自体も大きく変わってくるであろう。

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q:「最近、極低温冷却システムについての記事があり、運転コストを 1/10 に減らせるとのことですが、どういう技術で可能になったのでしょうか?」

A: 当社はMEG（脳磁計）用ヘリウム循環装置（HCS）を開発し、そのHCSを東京大学の440チャンネルMEGに搭載して、3年以上に渡って、HCSを運転中にMEG計測が可能であること、液体ヘリウム使用量、人件費、電気代を含むランニングコストを1/10以下に出来ることなどを実証してきた。このHCSは、デュワ内で蒸発したヘリウムガスを低温で回収し直ぐに液化してデュワに戻す経路と、冷却能力の大きなGM冷凍機の第1ステージで冷却したヘリウムガスをデュワのネックチューブに流してデュワを冷却する経路の、2つの流路を長いトランスファーチューブ（TT）で結合することにより、冷却能力を高めると同時に、振動ノイズをMEGに伝えないという特徴を持っている。

しかしながら、開発したTTの挿入管が3/2インチであったため、一般のMEG装置に利用するには、利用対象MEGの改造を必要としていた。そこで今回、挿入管の外径を標準の1/2インチにし、利用機器のTT挿入口に挿入するだけで何の改造も必要としない、MEGおよび一般の超伝導利用測定機器に利用可能なHCSを開発し、その第1号機を名大医学部に設置した。

図1は、東京大学柏キャンパスにある、440 CH ベクトル型 MEG 装置に装着されて運転中の HCS の外観を示す。MEG は 3 層パーマロイの磁気シールドルーム（MSR）の中に設置されており、HCS は 1 層パーマロイ MSR の中に設置されている。太さ 76 mm、長さ約 2 m の 7 重管 TT が、2 つの MSR の壁を貫通して両者を結合している。本 HCS では、GM 冷凍機が高圧ヘリウムガスを 1 秒毎に断熱膨張させて冷却を行うために、HCS を MEG に搭載した当初は、振動、電磁気、音響に起因する大きな計測ノイズが発生した。しかし様々な改良により、音響および電気ノイズは、MEG 計測に問題ないレベルに抑えることができた。すなわち、音響ノイズは、MEG 用 MSR の中心で 35 dB であり、HCS 設置前と変わらず、問題となる電気ノイズも無くせた。振動ノイズは、MEG 天板上で 0.2 Gal 以下に落とすことができ、振動に起因する MEG の計測ノイズもほぼ無くすことができた。最終的に HCS を取り付ける前とほぼ同じノイズレベルにすることが出来た。

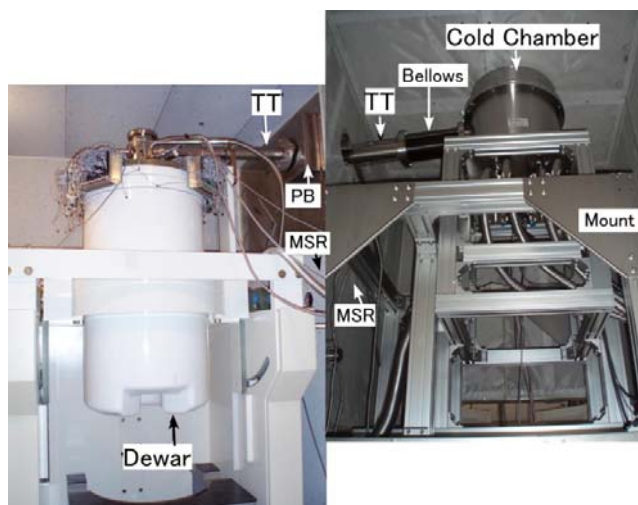


図1 440CHMEG (左) に搭載されたヘリウム循環装置 HCS (右)

図 2 は、名大用に設置された HCS の様子を示す。横河電機(株)製 160CHMEG (PQ1160C) 用デュワに、開発された 0.5 インチ径の多重管 TT 挿入管が装着されている。挿入管を標準 TT 挿入管径にしたので、既存のデュワに変更を加えることなく装着可能となった。東大に設置した HCS のように、MEG と HCS を直線的に結ぶことが好ましいが、名大の MEG は HCS の付加を想定しないで設置されたため、TT 用の穴が空けてなかった。TT 用の穴を空けるためにはシールドルームの大幅な加工を必要としたため、デュワ右上に設置されていた換気孔を利用して TT を設置した。その為、まず TT を斜め右上方に伸ばし、次に換気孔と部屋の壁を貫通させて、室外に設置する冷凍チャンバに結合した。



図 2 名大医学部用 HCS。TT は既設シールドの換気孔を通して室外に設置した冷凍チャンバに結合されるため約 3 m になった。

TT は、液化した液体ヘリウムを重力で落下させてデュワに流すために、全体を約 5 度の傾斜を持たせてある。また、TT は磁気シールドルームの壁にボルトで固定し、同時にデュワのガントリにも固定して、振動の軽減を図った。TT の外径は 60.5 mm で全長約 3 m である。実証試験の結果、デュワから蒸発する約 $10 \text{ } \mu\text{m/D}$ のヘリウムガスを全て液化した上に、 $2.0 \text{ } \mu\text{m/D}$ 以上の液体ヘリウムをヘリウムガスから作ることが出来ることを確認した。図 3 に示したように、HCS の設置前後のノイズレベルはほとんど変化が無く、MEG の計測に支障をきたさないことも確認された。本 HCS は MEG 用に開発されたため、非常に小さな振動ノイズしかないので、他の超伝導機器にも利用可能であると期待している。

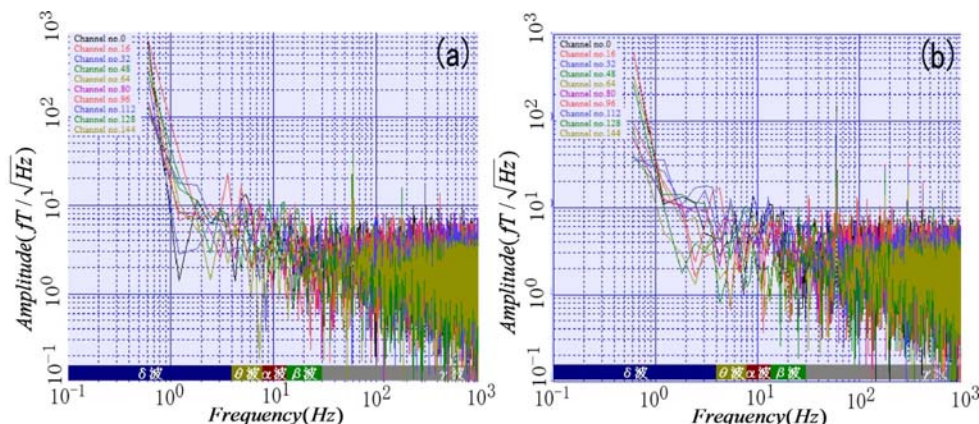


図 3 HCS 設置前(a)と設置後(b)のノイズレベル。ほとんど変化がない。

回答者：株式会社新領域技術研究所 (FTI) 会長 武田常広 様