

## 掲載内容（サマリー）：

### 特集：超電導マイクロ波・光デバイス

- 超電導マイクロ波・光デバイスの技術動向
  - 分割マイクロストリップライン共振器フィルタの高耐電力化技術の現状
  - 宇宙背景放射観測のための超電導検出器の開発
  - ミリ波・サブミリ波帯大型電波干渉計（ALMA）計画の現状
  - 宇宙太陽光発電（SPS）計画の概要
  - 宇宙太陽光発電計画の技術課題
- 
- 超電導関連 2010年2-3月の催し物案内
  - 新聞ヘッドライン（12/19-01/20）
  - 超電導速報—世界の動き（2009年12月）
  - 「第3回材料研究会 - 鉄系超伝導物質の最新情報 - 」報告
  - 応用超電導・低温工学アジア会議2009 (ACASC2009) のトピックス
  - 隔月連載記事—超電導モータの過去・現在・未来（その1）
  - 読者の広場(Q&A)—高温超電導に関わる 65 K 近傍での超電導エレクトロニクス、  
車載小型モータ及び電力機器用冷凍機の現状に於けるおおよその  
冷凍機価格を教えてください。

[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) 3536-7318

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。

<http://ringring-keirin.jp>



特集：超電導マイクロ波・光デバイス

「超電導マイクロ波・光デバイスの技術動向」

山形大学大学院理工学研究科

電気電子工学専攻

教授 大嶋重利

超電導フィルタ、テラヘルツ検出超電導デバイスや ALMA 計画の超電導受信機等の応用に関しては、本超電導 Web21 の記事を参考にさせていただけるので、私は、最近の超広帯域無線通信 (Ultra Wide band : UWB) への超電導フィルタの応用研究や電波資源の有効利用の考え方について述べてみたい。

超電導フィルタを携帯電話基地局に使用することは、米国で先行され、中国がそれを追隨する状況でほぼ一段落となった感がある。性能、信頼性、耐久性などは全く問題ないと思われるシステムであるが、経済状況が悪化している日本やヨーロッパでは、新たなインフラ整備は難しく、実用化に関してはほぼ絶望という感がある。それでは、今後超電導フィルタの実用化はもう望めないのだろうか。いや、まだまだ可能性はあると私は思っている。その一つの可能性が UWB 通信への応用である。UWB 通信とは、500 MHz 以上の帯域を使用する無線通信 (1.5 GHz 以上の帯域とする場合もある) で、元々、米国の軍事技術として開発され、米国の連邦通信委員会から 2002 年に民間への使用が許可されたものである。米国では特別な免許がなくても使用できる通信システムである。近距離の大容量高速通信が可能で、妨害電波に強く、閉鎖空間での高速無線通信の目玉になるといわれている。現在、世界各国でその通信方式の規格化やアンテナやフィルタなどのデバイス研究がおこなわれている。日本でも、3.4~4.8 GHz, 7.25~10.25 GHz 帯を UWB の周波数帯として総務省が指定している (図 1)<sup>1)</sup>。しかしながら、その周波数帯はすでに色々な事業で使用されており、電波の相互干渉を防ぐことが重要である。超電導バンドパスフィルタが電波の相互干渉を防ぐ最適なデバイスであることは、今までの成果で明らかである。したがって、UWB への応用に超電導バンドパスフィルタがクローズアップされ、500 MHz 以上の帯域を持つ超電導フィルタの設計等に関する報告が多くなってきた。現在、中国、韓国、日本の研究者から色々なタイプの超電導フィルタが提案され、優れたフィルタが実現されつつある。今後の発展を期待したい。

もうひとつの話題として、周波数資源の有効利用について述べてみたい。米国での超電導フィルタを実用化させたのは STI 社である。STI 社のホームページ<sup>2)</sup> を覗くと、最近主張が変わってきたのがわかる。以前は、超電導フィルタシステムの性能を力説していたが、最近では周波数資源の確保を強くアピールするようになった。欧米では周波数資源を一般に売り出すビジネスがある。700 MHz 帯における 52 MHz バンドの価格が 190 億ドルになったそうである。この価格をベースに考えると、6 MHz バンドの価格は 22 億ドルになる。このような高価な周波数資源をより有効に利用しなければ、国家の損失であると STI 社は訴えている。図 2 に、通常のフィルタと超電導フィルタを利用した時の周波数有効利用の違いを示す。(a) で示されるような通常のフィルタシステムでは、25 の有効リソースしか提供できない (1 リソース当たり 8800 万ドルになる)。一方超電導フィルタシステムを利用すれば、ガードバンドを圧縮することができ、有効リソースを 27 に増やすことが可能である。従って、この 6 MHz バンドだけでも、1 億 7600 万ドルの利益が出る。このように、超電導フィルタシステムを利用すれば、周波数資源をより有効に活用できることがわかる。にほんでも、このような流れが生まれてくるのであろうか。

3000MHz~10000MHz

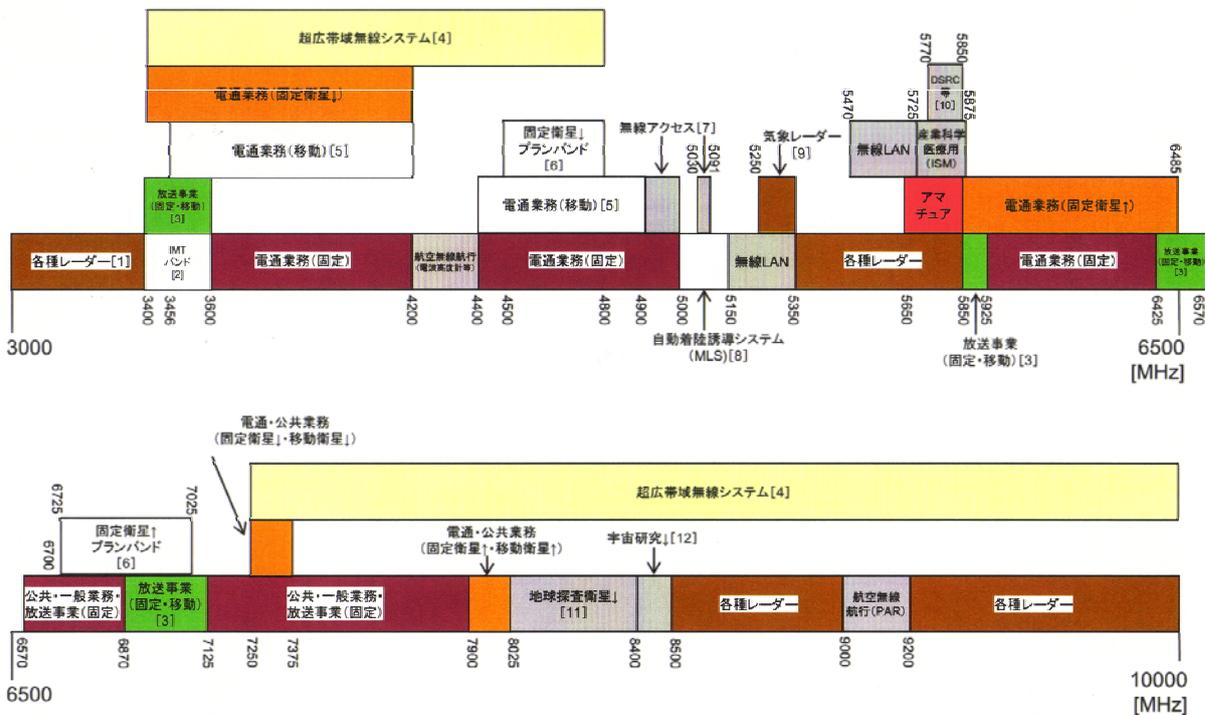


図1 日本における3000~10000 MHz帯の周波数利用状況

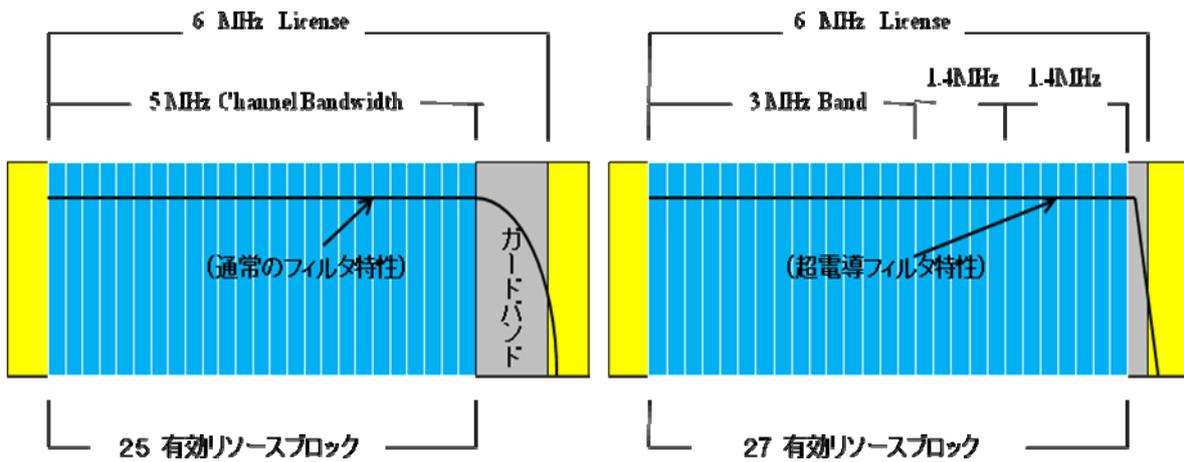


図2 超電導フィルタを使用した場合の有効リソースブロックの拡大モデル図

参考文献

- 1) 総務省ホームページ : <http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/use/index.htm>
- 2) STI Web: <http://www.suptech.com>

特集：超電導マイクロ波・光デバイス

「分割マイクロストリップライン共振器フィルタの高耐電力化技術の現状」

山形大学大学院  
理工学研究科  
准教授 齊藤 敦

近年の急速な情報通信端末（携帯電話等）の普及に伴い、次世代の高速・大容量通信技術とその規格が検討されている。この次世代（第4世代）通信技術は現行の IMT-2000 (IMT: International Mobile Telecommunication) の後継という意味で IMT-Advanced と呼ばれており、通信方式には比較的広い周波数帯域を必要とするため周波数資源の有効利用が重要である。そのハード的解決方法としては超電導フロントエンドシステムの導入が有効であり、受信用フィルタは米国、及び中国で既に実用化に至っている。一方、送信用超電導フィルタの研究・開発も行われており、最近中国では円形共振器を用いた送信用超電導フィルタが試験的に導入され実用段階に入っている。しかしながら理想的な送信用超電導フィルタを実現するための研究課題は、①高耐電力化、②ひずみの低減、③スカート特性の向上、④小型化であり、①の高耐電力化がかろうじてクリアできているというのが現状である。

そこで、我々の研究室では共振器の多段化により急峻なスカート特性を比較的小型で実現できるマイクロストリップライン (MSL) 共振器の形状と耐電力特性の関係について研究を行っている。一般的な MSL では共振器端部に高周波電流が集中し (図 1(a))、その電流が臨界電流を超えると共振器は常伝導転移を起こしフィルタ特性を維持できなくなってしまう。そこで、共振器を幅方向に分割し高周波電流を内部へ分散させることにより、端部での最大電流の低減とそれに伴う耐電力特性の向上を意図した分割 MSL 共振器を提案している (図 1(b))。これまでの電磁界シミュレーションと実験により、分割 MSL 共振器を用いたフィルタは通常の MSL フィルタに比べて約 5 dB の耐電力向上が確認できている。

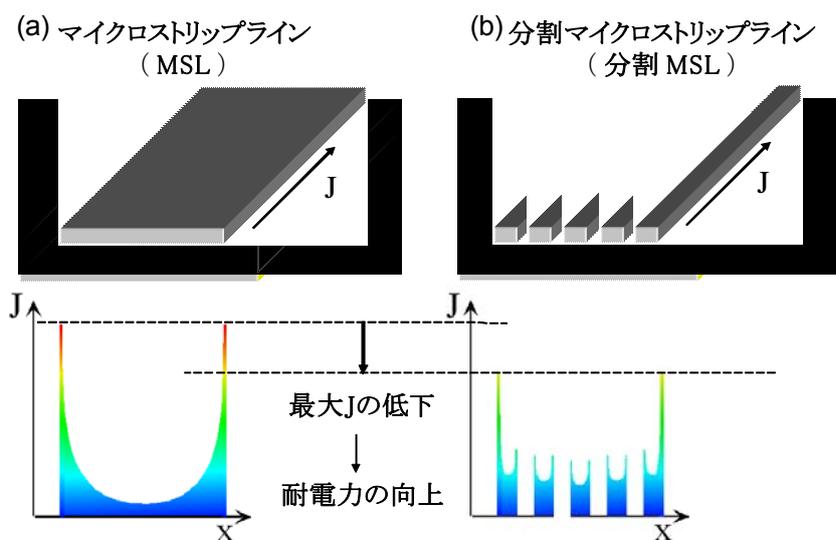


図 1. マイクロストリップラインと分割マイクロストリップラインの概略図と幅方向の電流分布モデル

図2(a)は富士通研究所との共同研究により作製した分割MSL共振器7段フィルタの概観図である。写真は内部構造を示すために側壁及び上蓋を外している状態である。フィルタの作製はMgO単結晶基板に成膜した両面YBCO薄膜(膜厚700nm)を用いた。基板面積は25mm×50mmであり、円形共振器であれば2段相当の基板面積であるが、分割MSL共振器を用いることにより7段を配置できている。また、各共振器は40μmのスリットを用いて幅方向に均等に13分割した(図2(b))。図3は分割MSL共振器7段フィルタの周波数特性(a)と耐電力特性(b)を示している。測定温度は70Kである。周波数特性はシミュレーションとの良好な一致を示し、急峻なスカート特性を得ている。また、耐電力特性は2.7Wを得ている。

実用化のためには更なる高耐電力化が必要であることから、現在、これまでの均等分割のみならず不均等な分割も考慮した共振器形状の最適化を行っている。また、超電導薄膜へのダメージの少ないパターン形成方法の検討や人工ピンニングセンターを導入した薄膜・厚膜をフィルタ材料として用いることにより更なる高耐電力化が見込まれる。以上のような取り組みの成果がIMT-Advancedに採用されることを目標に今後も精力的に研究を行っていく予定である。

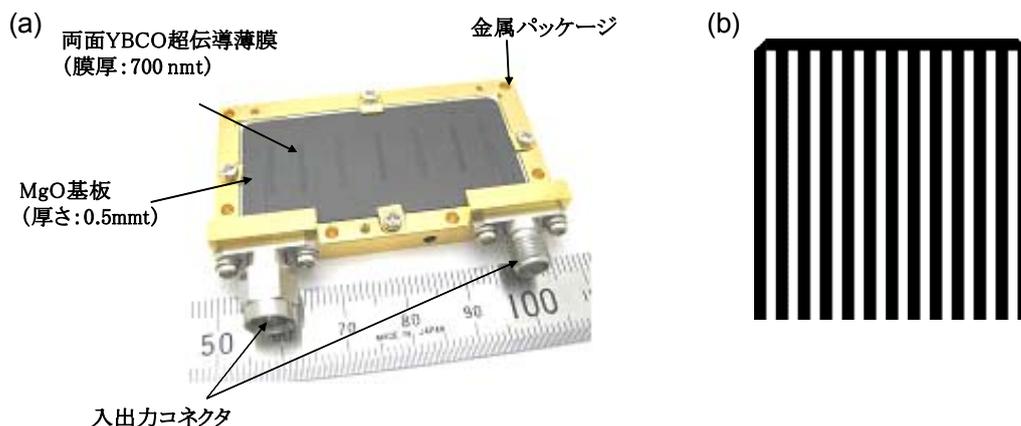


図2. 分割マイクロストリップライン共振器7段フィルタの概観図(a)と分割MSL共振器の概略図(b)

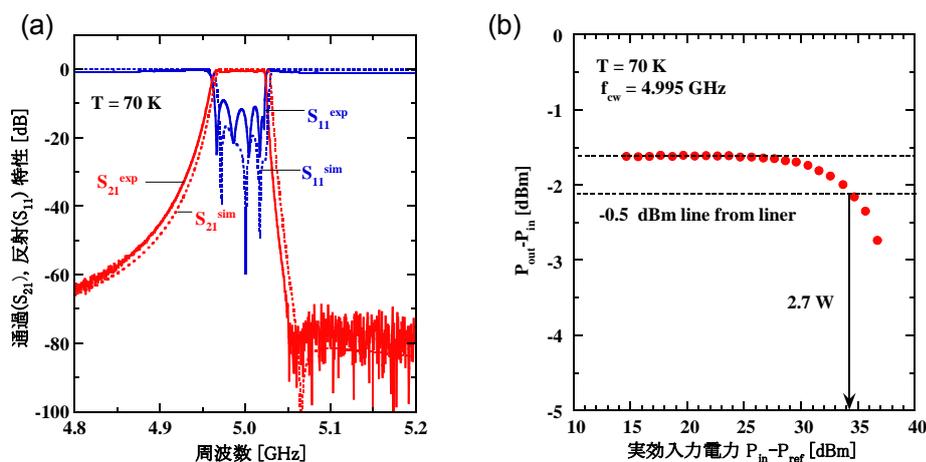


図3. 分割マイクロストリップライン共振器7段フィルタの周波数特性(a)と耐電力特性(b)

特集：超電導マイクロ波・光デバイス

「宇宙背景放射観測のための超電導検出器の開発」

独立行政法人理化学研究所  
基幹研究所テラヘルツ光研究プログラム  
大谷知行

宇宙はビッグバンにより始まったと言われるが、ビッグバン以前に宇宙のサイズが指数関数的に膨張する現象（インフレーション）が起こったと考えられている。しかし、インフレーションは素粒子物理学の「標準理論」では予言できず、さらなる究極的な基礎物理理論に向けた実験的・理論的研究が必要である。宇宙マイクロ波背景放射（CMB）は宇宙の晴れ上がり（誕生後 38 万年）での姿であり、そこにインフレーション時の原始重力波の痕跡が偏光パターン（「B モード」）として刻印されている。従って、CMB 偏光成分の超精密測定によりインフレーション期の観測的研究が可能であり、理論的な予言の比較により地上実験では到達不可能な超高エネルギーの物理を探ることが可能となる。

そこで、将来の人工衛星による CMB 超精密偏光観測を目指し、平成 21 年度よりプロジェクト（科学研究費・新学術領域「背景放射で拓く宇宙創成の物理」）を開始した（<http://cbr.kek.jp/>）。我々は、CMB 偏光観測用ミリ波検出器アレイ、及び、宇宙赤外線背景放射（CIRB）観測用サブミリ波（テラヘルツ波）検出器アレイの実現を目指して、高エネ研、国立天文台、岡山大と共同で研究開発を進めている。目標は、CMB、CIRB 観測用の 1000 画素クラスのイメージング検出器（感度 $\sim 10^{-18}$  W/√Hz）の開発である。これらの検出デバイスでは、放射による超電導体内の Cooper 対解離の活用を想定し、超電導トンネル接合素子（STJ）を軸としつつ、超電導力学インダクタンス検出器（MKID）も含めて開発を進める予定である。

STJ 検出器では、薄膜によるインピーダンス整合により超電導薄膜で光子を吸収し、発生した励起準粒子電流を検出する手法（薄膜マッチング型 STJ 検出器）の開発を進めている。すでに Nb 膜を用いた原理実証実験に成功し、Cooper 対解離による広帯域特性を確認している<sup>1)</sup>。一方、MKID は、放射入射による Cooper 対の減少に起因する力学インダクタンスの減少を交流特性の変化で読み出すものであり、作製や大規模アレイの信号読み出しが容易という特長を持ち、将来の超電導検出デバイスとして期待がかかる<sup>2)</sup>。

参考文献

- 1) S. Ariyoshi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 95, 193504, 2009.
- 2) P. Day *et al.*, *Nature*, 425, 817, 2003.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導マイクロ波・光デバイス

「ミリ波・サブミリ波帯大型電波干渉計（ALMA）計画の現状」

国立天文台  
先端技術センター  
野口 卓

ALMA (Atacama Large Millimeter /Submillimeter Array; アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計) は、南米チリ北部の標高 5,000 m のアタカマ台地に建設が進められているミリ波、サブミリ波帯の大型電波干渉計（開口合成型電波望遠鏡）である。ALMA では、アンテナの間隔を最大 18 km まで広げることができ、直径 18 km の単一望遠鏡に相当する解像力（最高角度分解能 100 分の 1 秒角）を得ることができる。これは、ハッブル宇宙望遠鏡の解像力を 10 倍も上回る性能に相当する。一方、80 台全てのアンテナを合わせた有効集光面積は 7,200 m<sup>2</sup> におよび、既存の口径 10 m 級のサブミリ波望遠鏡の約 100 倍の集光力をもつことになる。現在、ALMA 望遠鏡の建設が順調に進行しており（図 1）、2011 年末の完成のあかつきには、周波数 30-950 GHz（波長 10-0.3 mm）のミリ波・サブミリ波領域で世界最高の感度と分解能を備えた望遠鏡となる予定である。



図 1 標高 5,000 m のアタカマ高地に設置された 3 台の 12 mφアンテナ。右端が日本製のアンテナ。

ALMA では、30-950 GHz の観測周波数帯を 10 の周波数帯に分割し、それぞれの周波数帯の受信機を日米欧の 5 研究所が分担して製造する。このうち、国立天文台は 125-163 GHz（バンド 4）、385-500 GHz（バンド 8）、787-950 GHz（バンド 10）の 3 つの周波数帯の受信機、全 240 台の製造を担当する。ALMA の 80 GHz（バンド 3）以上の周波数帯の受信機には、Nb/AlOx/Nb 型超電導トンネル接合をベースとした SIS ミキサが使用される。バンド 4、8 の受信機に関しては、これまでに蓄積した SIS 接合素子や低雑音受信機の製造に関する技術をもとにして、比較的順調に開発フェーズを完了し、昨年 9 月にはバンド 4 受信機一号機を出荷するなど製造フェーズに移行しつつある。

これに対し、バンド 10 受信機の製作には幾つかの新しい技術の導入が必要なため、現在はそれらの技術開発中心のフェーズになっている。まず、ALMA バンド 10 の周波数帯は Nb のギャップ周波数（~690 GHz）を超えるため、低雑音受信機の実現のためには Nb に代わる損失の小さな超電導材料の導入が必須である。NbTiN は~14 K の転移温度を有し、表面抵抗による伝搬損失も小さいことから、この周波数帯の信号伝送線路の材料として有望視されている。図 2、3 は、それぞれ、情

報通信研究機構未来 ICT センターの協力で作成した NbTiN 薄膜を用いて製作したバンド 10 SIS ミキサの構造と得られた受信機雑音温度である<sup>1)</sup>。この結果は、同周波数帯における世界最高の受信機性能を示し、これまで実現が困難であると考えられていた ALMA の仕様を満足するバンド 10 受信機が実現可能であることを示している。

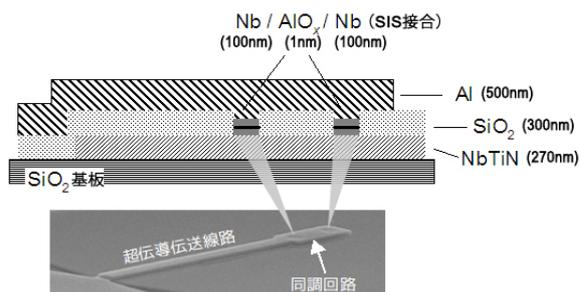


図2 バンド 10 SIS デバイスの断面構造 (上)と SEM 写真(下)。

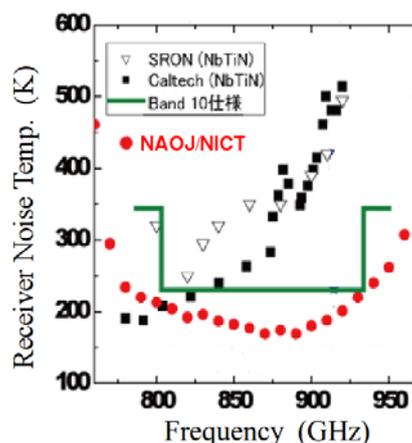


図3 NbTiN 薄膜を用いたバンド 10 周波数帯の SIS ミキサの性能。

ところで、図 3 で示した受信機のみキサには  $j_c \sim 8 \text{ kA/cm}^2$  程度の比較的低い電流密度の Nb/AlOx/Nb SIS 接合が用いられている。そのため、低雑音で動作する周波数帯域が狭く、要求されている周波数帯域 (緑線) との間のマージンが殆ど確保できていない。動作周波数マージンの拡大は、みキサ回路の寸法のばらつきを吸収でき、デバイスの歩留まりが向上するため、量産効率を向上させる上で非常に重要であると考えている。動作周波数マージンの拡大には、 $j_c = 15 \text{ kA/cm}^2$  以上の高電流密度と  $1 \mu\text{m}^2$  以下の面積をもつ高品質 SIS 接合の開発が不可欠であると考えている。AIN は AlOx に代わる高電流密度、高品質の SIS 接合のトンネルバリアとして注目されており、現在、高品質 NbTiN の国立天文台での内製化を目指したと開発研究とともに、高品質の高電流密度 Nb/AlN/Nb SIS 接合の開発に重点的に取り組んでいる。

SIS ミキサの開発に際し、常に有益な議論と助言をして頂いた国立天文台 ALMA 受信機開発グループ各位に感謝致します。

参照

- 1) Y. Uzawa *et al.*, "A sensitive ALMA Band 10 SIS receiver engineering model", Superconduct. Sci. Technol., 22, 114002, 2009.

特集：超電導マイクロ波・光デバイス  
「宇宙太陽光発電（SPS）計画の概要」

京大大学生存圏研究所  
橋本弘藏

宇宙太陽光発電（SPS）は、平成21年6月に政府の宇宙基本計画の一つに「H 宇宙太陽光発電研究開発プログラム」として取り上げられた。典型的な SPS は、静止軌道に衛星を上げ、太陽電池で発電し、2.45 GHz あるいは 5.8 GHz 帯のマイクロ波で 100 万 kW（1GW）程度の電力を地上に伝送しようとするものである。天候に左右されずに 24 時間、炭酸ガスを出さずに発電できるクリーンな自給電力源として注目されている。図1に示した JAXA(宇宙航空研究開発機構)の 5.8 GHz モデル（2004）では、送電アンテナ径 1.8 km、1 次ミラー 2.5 km×3.5 km、発電部の径 1.8 km で、総重量 1 万トンである。受電アンテナ径は 2.74 km で、地上系への出力 1 GW となっている。アンテナが巨大となることにより、赤道上空 36,000 km の静止軌道からの送電電力の約 9 割を受電できる。このような巨大なシステムを軌道に輸送するためには、現在のスペースシャトルの数 10 分の 1 のコストで上げられる再利用型のシステムが期待されている。マイクロ波の面からは、高効率で軽量化を図り、巨大なシステムを構築してゆく必要がある。既存の通信業務との両立も重要であり ITU（国際電気通信連合）での活動も行っている。

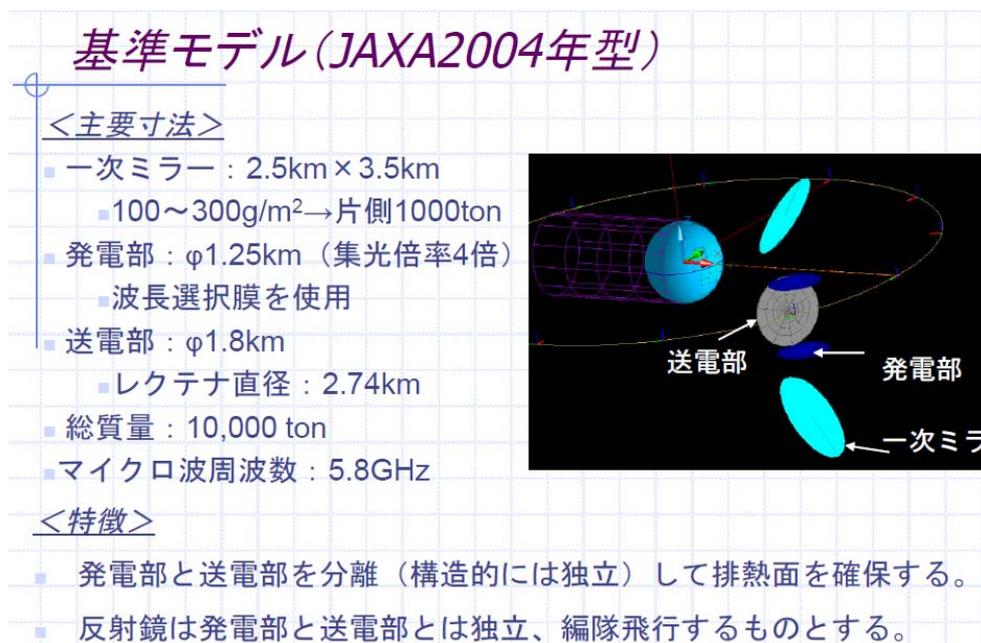


図1 JAXA 基準モデル (©JAXA)

送電系についてある程度具体的に述べると、ビームを中心に集めサイドローブを減らすために、中心部と端の電力密度に 10 dB のテーパを与えている。JAXA モデルでアンテナ間隔を 0.75 波長とした場合、素子数約 5 億、中心部で 1 素子あたり 6 W の出力となる。半導体で実現できる出力であるが、まだ効率が良くない点が問題である。送電系が高効率でないと、発熱量が大きくなり、排熱

が困難になるなど、衛星として成り立たなくなる。電子管で構成した場合、発振の効率が良いが、電力を分配する必要があり、その際の効率低下も問題となる。受電点に正確にビームを向けるためには、受電点からパイロット信号を送り、その到来方向にビームを向けるレトロディレクティブシステムを構成する。ビーム方向を柔軟に制御するために、フェーズドアレイアンテナとなっている。各素子の移相器も、多素子であるためにその損失、位相制御、較正等の課題がある。移相器を制御するための電力も無視できない。源信号を単一の発信器から有線で賄えないほど巨大なので、システム全体としての位相同期を取る方法も課題となっている。これらを軽量で薄く実現することが要請される。

詳細は、筆者らが中心となって編集した URSI (国際電波科学連合) の SPS 白書を参照されたい。URL は、以下の通りである。 <http://ursi-test.intec.ugent.be/?q=node/64>

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導マイクロ波・光デバイス

「宇宙太陽光発電計画の技術課題」

神戸大学大学院  
工学研究科情報知能学専攻  
教授 賀谷信幸

宇宙で発電した電力をマイクロ波に変換して、地上の受信基地（レクテナ）に送電し、商用電力網に供給する計画を「宇宙太陽発電衛星（Solar Power Satellite : SPS）」と呼んでいます。図1が最新のSPS構成図です。宇宙で発電すれば、地上での光発電と異なり、昼夜の差もなければ雨雪もありません。いつも一定の電力を地上に供給できます。いろいろな講演会で、皆さんにお話しすると、「夢があって良いですね」と言って関心？を示してください。「夢がある」とはたいへん聞こえが良いのですが、「宇宙太陽発電衛星って遠い未来のSFね！」って思われているのかなと、いつも感じます。ところが技術的には実現が目前なのです。ひょっとすると、数年後にはSPS試験衛星が飛んで宇宙からのマイクロ波無線送電実験が行われるかも知れません。

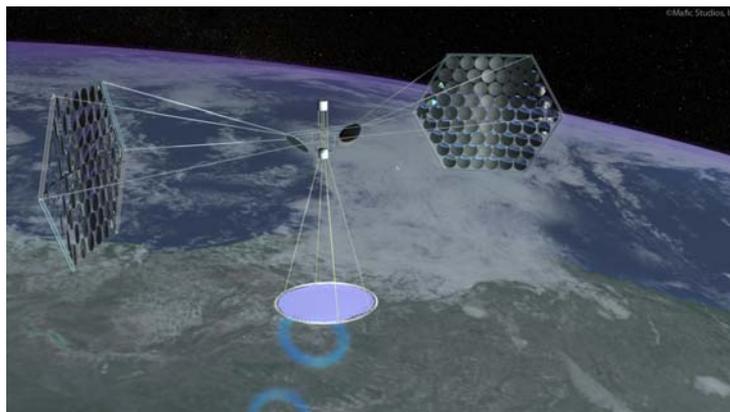


図1：反射鏡で太陽光を集め、マイクロ波で地上に送電する宇宙太陽発電衛星

宇宙太陽発電衛星には多くの技術課題があります。1) マイクロ波無線送電の実現性、2) おびただしいロケットの打ち上げ、3) 数 km にも及ぶ巨大宇宙建造物の組み立て方法、4) 長期間劣化のない高効率な太陽電池などなど。こんな風に課題をあげたら実現不可能な気がしませんか。どの課題も現在では新しいブレークスルー（例えば、50%の高効率な太陽電池など）で、実現に向けて着実に歩んでいます。

我々の研究課題は、「無線送電技術と宇宙代構造物構築」です。この頃、アメリカの友人に会うと、「テレビ・スターになったね」と冷やかされます。と言うのは、我々のハワイでのマイクロ波無線送電の実験が、アメリカのサイエンス・テレビ局ディスカバリーチャンネルで取り上げられ、一昨年2008年9月12日に全米で放送されたからです。日本でも、日本語版が12月13日に放映されました。

ハワイには、マウイ島にハレアカラ山、ハワイ島にマウナロア山という3000mから4000mの火山があります（図2）。ハレ

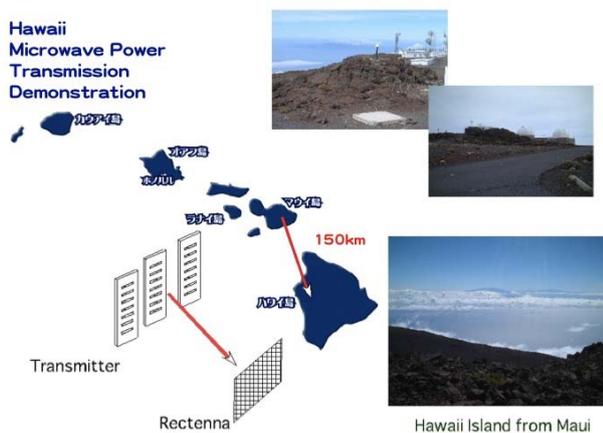


図2：ハワイ島での無線送電実験

アカラ山の山頂から 150 km も離れたマウナロア山が直視できます。上を向いて 150 km 離れると、そこはもう宇宙です。2006 年 1 月に鹿児島の内之浦で観測ロケット S-310-36 号機を用いて、宇宙—地上間の無線送電のためのビーム制御実験を行い、貴重なデータを得る事ができました。

(図 3、[http://www.isas.ac.jp/ISASnews/No.299/front\\_line.html](http://www.isas.ac.jp/ISASnews/No.299/front_line.html))

この成果から、次はハワイでもっと巨大なアンテナの実験にステップアップしたのです。地上なら、100 m や 200 m のアンテナは、小型のアンテナを並べるだけで簡単に作れます。ディスカバリーチャンネルで放映した実験は、第 1 回目の送電実験です (図 4)。これからは、どんどん小型アンテナを増やし、アンテナを大きくして、宇宙太陽発電衛星と同じ条件で、宇宙太陽発電衛星の送電アンテナの実証が目標です。この開発がうまくいったら、次は、いよいよ宇宙での試験衛星です。宇宙から初めての送電です。



図 3: 2006 年 1 月に打ち上げられた観測ロケットの実験



図 4: マウイ島の送電アンテナシステム、太陽電池で発電された電力をマイクロ波に変換して 8 台の小型アンテナから、遙か離れたマウナロア山に向けて送電

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連 2010年2月-3月の催し物案内



**2/1**

低温工学協会関西支部／第6回冷凍部会例会「水素エネルギー社会の実現に向けた産学官の取り組み」

場所：大阪市立大学文化交流センター 大セミナー室、大阪市北区梅田

主催：低温工学協会関西支部／冷凍部会

問合せ：神戸大学海事科学研究科 武田 実 Tel/Fax: 078-431-6329、

E-mail: [takeda@maritime.kobe-u.ac.jp](mailto:takeda@maritime.kobe-u.ac.jp)

岩谷瓦斯株式会社低温機器部 西谷富雄 Tel: 077-582-3773、E-mail: [tnishi@iig.iwatani.co.jp](mailto:tnishi@iig.iwatani.co.jp)

**2/5**

低温工学協会／第4回材料研究会「レーザー核融合と低温技術－大阪大学レーザー工学研究センターの最近の話題－」

場所：大阪大学レーザー工学研究センター慣性核融合実験棟（E棟）3階大セミナー室、大阪市吹田キャンパス

主催：低温工学協会／材料研究会

問合せ：大阪大学工学研究科環境エネルギー工学専攻 西嶋茂宏（鈴木一代）

Tel: 06-6879-7896、E-mail: [k-suzuki@see.eng.osaka-u.ac.jp](mailto:k-suzuki@see.eng.osaka-u.ac.jp)

**2/19**

電気四学会関西支部 専門講習会「スマートグリッドなど次世代電力システムとその技術」

場所：中央電気倶楽部 513号会議室、大阪市北区堂島浜

主催：電気学会・電子情報通信学会・照明学会・映像情報メディア学会、各関西支部

問合せ：電気四学会関西支部事務局

Tel: 06-6341-2529、2530 Fax: 06-6341-2534 E-mail: [denki4g@ares.eonet.ne.jp](mailto:denki4g@ares.eonet.ne.jp)

**3/2**

第4回超電導応用研究会／第7回冷凍部会例会／第74回超伝導科学技術研究会「高温超電導機器の冷却技術」

場所：前川製作所守谷工場、茨城県守谷市

共催：低温工学協会／超伝導科学技術（未踏科学技術協会）

問合せ：長嶋 賢（鉄道総合技術研究所）

Tel: 042-573-7301、Fax: 042-573-7300、E-mail: [ken@rtri.or.jp](mailto:ken@rtri.or.jp)

**3/15-19**

American Physical Society, APS 2010 March Meeting

場所：Portland Oregon, USA

<http://www.aps.org/meetings/march/index.cfm>

**3/17**

2010年第57回応用物理学関係連合講演会シンポジウム 超伝導分科会企画「超伝導で“進む”未来技術の最新動向～超伝導の物流・交通への展開～」

場所：東海大学、平塚市

主催：応用物理学会 超伝導分科会

問合せ：応用物理学会 超伝導分科会幹事長（東京大学 大学院工学系研究科 応用化学専攻）下山淳一、Tel: 035841-7705、Fax: 03-5802-2908、E-mail: [shimo@sogo.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:shimo@sogo.t.u-tokyo.ac.jp)

（編集局）

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (12/19-01/20)



- 酸化物熱電発電モジュール 長期安定出力に成功 昭和電線 12/21 電気新聞
- HV モーター 永久磁石使わず同等出力 東京理科大 製造コスト削減に道 12/22 日経産業新聞
- エネルギーのものさし エクセルギー 熱を仕事に交換する仕組み 排熱中にも有効な「温度落差」が 12/22 電気新聞
- 「25%削減なんて無理」温暖化対策 鉄鋼や電力 予防線 12/24 朝日新聞
- 国にリニア試算提出 JR 東海 ルート優劣つけず 12/24 朝日新聞 (夕)
- IT 活用、天候や需要の変動を吸収 欧米で注目「賢い送電網」 12/24 朝日新聞 (夕)
- リニア中央新幹線 15年までに着工 JR 東海、国交相に調査報告書 12/25 日刊工業新聞、Fuji Sankei Business i、日経産業新聞
- 技術ウォッチ「心の病」脳機能を調べ診断 横河電機など検査装置 12/26 日経産業新聞
- 原子力機構 中性粒子ビーム入射装置 50万Vへの加速実現 12/28 電気新聞
- 東電など電力各社 次世代送電網に1兆円 各家庭に専用メーター「太陽光」急増に備え 12/31 日経産業新聞
- エネルギーのものさし エクセルギー 理論値とエントロピー 現実の最大仕事と理論値の違い 理解 1/5 電気新聞
- 環境新大陸 制御する 次世代送電は宝の山 1/6 読売新聞
- 次世代送電網の整備 インドでの受注 後押し 政府 来年、官民で実証試験 1/7 日本経済新聞
- リニア 一部先行開業 神奈川-山梨が有力 1/9 朝日新聞、読売新聞、日本経済新聞、毎日新聞
- スマートグリッド 経産省が都市で実験 新エネ需給を中央制御 国際標準のあり方検討 1/11 日刊工業新聞
- 世界最高性能の電波望遠鏡 試運用を開始 チリで観測成功、12年本格始動 1/11 日本経済新聞
- エネルギーのものさし エクセルギー 理論値とエントロピー 熱交換時の変化量合計は必ず増大 1/12 電気新聞
- ITER の超電導コイル用 導体の製造開始 原子力機構と新日鉄エンジ 仏に順次供給 1/13 日刊工業新聞、電気新聞
- 放射線治療装置 三菱重工が海外拡販 欧州の認定取得で弾み 1/13 日刊工業新聞
- 子宮筋腫治療器 患者負担が軽減 GE ヘルスケア・ジャパンが販売 1/14 日刊工業新聞
- 次世代送配電網 海外展開を後押し 経産省が共同企業体 民主導の会議体始動 1/14 電気新聞
- 化学物質規制、問われる対応力 REACH と RoHS 指令との比較 1/15 日刊工業新聞
- 経産省 東アジアとの関係強化 次世代送配電網で 1/15 電気新聞
- 原始宇宙の火の玉再現 世界最大の粒子加速器で実験へ 生まれて 1000 万分の 1 秒後の宇宙 1/19 朝日新聞
- 原子力機構 原子力の果たす役割増大 第 2 期中期計画軸に推進 ITER 着実に進展 地層処分事業を支援 1/19 電気新聞
- エネルギーのものさし エクセルギー 理論値とエントロピー 変化量=利用できないエンタルピー 1/19 電気新聞

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 超電導速報—世界の動き (2009年12月)

財団法人国際超電導産業技術研究センター  
国際部

部長 津田井昭彦

### 表彰

#### Converteam (2009年12月7日)

Converteam HYDROGENIE プロジェクトは、In stitution of Engineering and Technology (IET) 電力・エネルギー部門での 2009 年イノベーション賞を受賞した。この HYDROGENIE プロジェクトでは、商用水力発電所用超電導発電機のローター巻線への超電導線の適用を検討している。Converteam 社をリーダーとする企業コンソーシアムがこのプロジェクトに参加している。このプロジェクトは EU 第 6 次フレームワークから一部資金を受けて実施されている。このプロジェクトは現在最終の組み立てフェーズに入っており、間もなくドイツの水力発電所に発電機が据え付けられ、各般の試験が実施される予定である。IET のイノベーション賞は、15 のカテゴリーからなり、世界中から約 300 件の応募がある。この賞は革新技术が認められ、世の中に示されるユニークな機会を提供している。

出典:

“Converteam Celebrated Innovation Award”

Converteam press release (December 7, 2009)

[http://www.converteam.com/converteam/1/doc/News/PR0912.01\\_Converteam\\_Celebrates\\_Innovation\\_Awards.pdf](http://www.converteam.com/converteam/1/doc/News/PR0912.01_Converteam_Celebrates_Innovation_Awards.pdf)

### 電力

#### Tres Amigas, LLC (2009年12月9日)

Tres Amigas, LLC は米国連邦電力規制委員会 (FERC) に文書を提出し、北アメリカに初めて建設される再生可能エネルギー送電拠点である Tres Amigas SuperStation に関わる作業を進めるに当たって必要な承認を求めた。計画されている SuperStation はニューメキシコ州に建設される予定であり、数千メガワットの電力を既存の 3 つの米国電力グリッド間でやり取りすることを目指している。Tres Amigas, LLC の CEO、Phil Harris は次のように述べた。「2009 年 10 月始めに Tres Amigas SuperStation について発表して以来、このプロジェクトに対して多くの支援と関心が寄せられている。米国の再生可能エネルギーを遠隔地にある発電所から、それを最も必要とする需要地に送ることの必要性は自明のことである。Tres Amigas SuperStation は、風力、太陽、地熱電力を上記 3 グリッドの間でやり取りすることを可能とすることにより、米国内の送電ボトルネックを打破することを目指している。このプロジェクトが米国にもたらす利益や恩恵を考えれば、FERC が本件に対して承認を与えることは間違いないものと確信している。」このプロジェクトは、ニューメキシコ州及び主要産業株主からの強い支持を得ている。FERC の承認が得られれば、Tres Amigas 社は SuperStation の接続についていくつかの電力会社と交渉を開始する予定である。このプロジェクト

は、2014 年未までに運転を始めることを目指している。

出典:

“TRES AMIGAS FILES WITH FERC FOR AMERICA'S FIRST RENEWABLE ENERGY TRANSMISSION HUB”

Tres Amigas, LLC press release (December 9, 2009)

<http://www.tresamigasllc.com/docs/PR-FERC-Filing-12-09.pdf>

### Brookhaven National Laboratory (2009 年 12 月 10 日)

Brookhaven National Laboratory の研究グループは、結晶成長中のフッ化水素ガスの滞留を制御する新しい手法を開発した。このプロセスは超電導体製造や他の応用に必要とされるプロセスである。このプロセスは既に特許が認められ、製造効率や材料特性の向上につながるものと期待されている。結晶前駆体にフッ化物を加えることにより、基板から成長させるべき結晶に結晶秩序を伝える効果が得られる。しかしながら、フッ化水素の滞留は、前駆体が目的の材料に転換する反応を阻害し、場合によっては反応が止まるという問題を有している。新しい手法は、圧力変動をもたらす排気という方法ではなく、フッ化水素を吸着することにより取り除く。アルカリ土類酸化物、カルシウム、ナトリウム等を含む化合物、又は活性炭素のようなフッ化水素を吸着する能力を持つ固体を反応チャンバーに置き、高品質結晶の製造を可能にするのがこの手法である。前駆体の形状に合わせてその表面から等距離な場所にこれら材料を配することにより、フッ化水素が広い面積にわたって均一に除去され、均一な最終製品が出来上がる。研究グループは、フッ化水素吸着材料を使って、より高速に YBCO 結晶を成長させることに成功し、これによりこの新しい技術の有効性を実証した。この手法により、結晶成長する環境の均一性を保つことができ、薄膜全長にわたって均一な超電導特性を得ることが可能となった。この新しい手法はライセンスが可能であり、実用開発に使用することができる。

出典:

“Absorbing hydrogen fluoride gas to enhance crystal growth”

Brookhaven National Laboratory press release (December 10, 2009)

[http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/PR\\_display.asp?prID=1041](http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/PR_display.asp?prID=1041)

## マグネット

### Oxford Instruments (2009 年 12 月 1 日)

Oxford Instruments は、ISIS Neutron Source (STFC Rutherford Appleton Laboratory, Didcot) 及び ILL 中性子施設 (Institut Laue-Langevin, Grenoble) との協力関係にあるが、このほど中性子回折応用では初めてのヘリウム再液化強磁場マグネットを出荷した。蒸発したガスを捕らえ、液体ヘリウムに戻すための再液化デューワーにより、高性能マグネットのヘリウム消費量を大幅に減らすことができる。1 台の 10 T の非対称分割マグネットが ILL 中性子施設に、2 台のヘリウム再液化中性子散乱マグネットが ISIS Neutron Source に納入された。ILL 中性子施設の先端中性子チームリーダーの Eddy Lelièvre-Berna は次のように述べた。「この新たな設計により、液体ヘリウムの蒸散を大幅に抑えながら、超電導コイルを液体ヘリウムバス中で極低温状態に維持することができるようになる。ドライシステムと比較し、室温ボアがない分より大きなサンプル空間を確保できる。また、支持ビーム材料の使用量を低減できるため、不必要な中性子の吸収や支持ビームからの検知器への散乱中性子を抑制できる。これらにより、我々はさらに一歩前進を遂げた。」ISIS 試料グループリーダー Oleg Kirichek は次のように述べた。「再液化システムにより、ヘリウムコストを低減するとともに、

健康・安全問題についても改善されることになる。また、最適なマグネット性能のために重要な均一温度分布の改善が図れる。このマグネットにより、多くの研究分野での中性子散乱実験のための優れた高磁界試料環境をユーザーに提供できる。」

出典:

“Magnet systems for neutron scattering experiments”

Oxford Instruments press release (December 1, 2009)

<http://www.oxinst.com/news/Pages/news.aspx>

## NMR

### Bruker BioSpin (2009年12月2日)

Bruker BioSpin は、世界初の 1000-MHz 超高磁界 NMR AVANCE™をフランス、リヨンの Centre de Resonance Magnétique Nucléaire à Très Hauts Champs (CRMN) に据付けた。AVANCE 1000 システムは 23.5-T の UltraStabilized™超電導マグネットが組み込まれており、この施設を利用できるフランス及びヨーロッパの研究者に他では得られない研究の機会を提供することになる。装置の据え付けは円滑に行われ、マグネットは運転磁界にまで達しており、優れた磁界均一性と良好なドリフト性能を示している。幅広い科学研究分野での実験が現在行われており、新しいシステムの有効性を実証している。

出典:

“World’s First 1000 MHz NMR Spectrometer Now Offers New Research Capabilities to European Scientists, Following its Successful Installation at CRMN in Lyon, France”

Bruker BioSpin press release (December 2, 2009)

<http://www.bruker-biospin.com/pr091202.html>

### Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. (2009年12月7日)

Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. (BEST) は、 $J_c$  が  $91 \text{ A/mm}^2$  (4.2 K, 5 T) の  $\text{MgB}_2$  超電導線材 1000-m の製造を完了した。この  $\text{MgB}_2$  線材は、wire-in-channel タイプ線材で、医療用(研究用を含む) MRI マグネットへの応用を目指している。捻りピッチが 75 mm で、Monel シースを有するこの新しい  $\text{MgB}_2$  線材は、BEST と IFW Dresden との間の共同研究の枠組みの下製造された。この線材は絶縁処理を施された wire-in-channel 線材として仕上げられる。BEST 社の超電導材料販売・マーケティング部長 Reinhard Dietrich は次のように述べた。「今日の MRI 用 Nb-Ti 線材に比肩する性能と価格を達成するためには、 $J_c$  の向上及び製造プロセス最適化のための更なる研究開発が必要である。中温度で使用される  $\text{MgB}_2$  超電導材料は、液体窒素や液体ヘリウムを使わないで 10~20 Kelvin の温度域で作動する将来の冷媒フリーMRI マグネット向けにはよい材料選択である。」

出典:

“MgB2 Medium-Temperature Superconducting Wire Production at Bruker Energy & Supercon Technologies Exceeds 1000 Meter Unit Length”

Bruker Energy and Supercon Technologies, Inc. press release (December 7, 2009)

<http://www.bruker-est.com/pr091207.html>

## 核融合

Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. (2009年12月16日)

Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc. (BEST) は、子会社の Bruker EAS GmbH が国際核融合プロジェクト ITER 向け高性能 Nb-Ti 超電導線材 37 metric ton の供給契約 (総額 3,600 万ドル) を締結したと発表した。この発注は Barcelona に拠点を持つ欧州の ITER 担当機関 Fusion for Energy (F4E) からのものである。BEST 社は、2010 年後半から超電導ストランドの出荷を開始し、その後 30 ヶ月をかけて全ての出荷を終える予定。Nb-Ti 線材を使って製造される大型超電導マグネットは、ITER 炉内のプラズマ閉じ込めに使われる。

出典:

“Bruker Energy & Supercon Technologies (BEST) Receives \$36 Million Contract for High-Performance Superconductors from ITER Fusion Energy Project”

Bruker Energy and Supercon Technologies, Inc. press release (December 16, 2009)

<http://www.bruker-est.com/index.php?id=2924>

## 加速器

CERN (2009年12月18日)

CERN は、Large Hadron Collider (LHC) が最初の運転を成功裏に終了したと発表した。この期間中、世界最高記録である 2.36 TeV の衝突実験が行われた。過去 2 週間の運転期間中、6 回の実験が行われ、100 万の粒子衝突事象を記録した。この結果は LHC 計算グリッドを通じて世界中に配布された。現在、LHC はスタンバイモードにあり、より高エネルギーの衝突及び主要研究プログラムの開始準備のための短期間の運転停止を経て、2010 年 2 月に運転が再開される。CERN 所長 Rolf Heuer は次のように述べた。「これまでのところ LHC の運転は順調である。最初の運転期間は、全ての LHC システムの試験、実験のための校正データの取得、より高エネルギーでの継続運転のために対処すべき課題の明確化といった所期の目的を完全に達成した。我々は 2009 年を終え、最高の出だしを飾った。」

出典:

“LHC ends 2009 run on a high note”

CERN press release (December 18, 2009)

<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2009/PR20.09E.html>

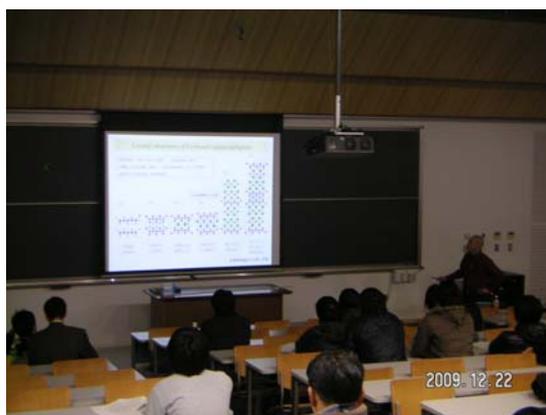
[超電導 Web21 トップページ](#)

「第3回材料研究会 - 鉄系超伝導物質の最新情報 - 」報告

鹿児島大学大学院  
理工学研究科電気電子工学専攻  
准教授 土井俊哉

2009年12月22日、九州工業大学において、低温工学材料研究会「鉄系超伝導物質の最新情報 - 鉄系高温超伝導に進化できるのか -」が九州・西日本支部との共同で開催された。

鉄系超電導物質の  $T_c$  は  $MgB_2$  より高く現状で 55 K に達していること、反強磁性の母物質にキャリアドーピングすることで超電導性を発現するようになったといった銅系高温超電導物質との類似性や、8000 種類にも及ぶ多くの候補物質の存在が室温超電導物質発見への期待をかき立てます。今回の研究会では、新物質探索、物性、合成、薄膜作製、線材作製、超電導特性などの広い観点から鉄系超電導物質の最新の研究状況が紹介された。



まず、材料研究会の松本委員長の挨拶で始まり、「新しい鉄系超伝導物質の構造と物性」と題して（独）物質・材料研究機構の高野義彦氏が講演を行った。鉄系超電導物質の共通点とバライティーについて、結晶構造と磁気秩序の観点から解説がなされた。その後、鉄系超電導物質の中で最も構造がシンプルな  $FeSe$ ,  $Fe(Se, Te)$  についての最新の研究成果が紹介され、 $FeSe$  の  $T_c$  は常温では 8 K 程度であるが高圧力下では 37 K まで大幅に向上すること、 $Se$  の  $Fe$  面からの高さ  $T_c$  の間に強い相関があること、この  $Fe$  面からの  $Se$  ( $As$ ) の高さは鉄系超電導物質全体に共通する性質であることなどが報告された。また、 $FeSe$  と  $FeTe$  の固溶体  $Fe(Se_{1-x}Te_x)$  の結晶構造変化と磁気秩序についての詳細な研究結果が紹介され、構造層転移&磁気転移と超電導の競合があることが示された。

次に、九州工業大学の飯久保智氏が「中性子散乱でみた  $Fe(Se_{1-x}Te_x)_{0.92}$  ( $x=0.75, 1$ ) の反強磁性磁気揺らぎ」の演題で講演を行った。中性子散乱の原理について詳しい解説と、銅系酸化物超電導物質での研究結果が紹介され、その後、鉄系超電導物質の磁気揺らぎに関する最新の研究結果が示された。超電導性を示さない  $FeTe_{0.92}$  とは異なって、同じ結晶構造で超電導を発現する  $Fe(Se_{1-x}Te_x)_y$  では  $FeAs$  系超電導物質と共通の波数ベクトルを持つ磁気揺らぎが観測されることから、磁気揺らぎが超電導性の発現に密接なかわりがあることが指摘された。

続いて、九州工業大学の小田部荘司氏が「鉄系超伝導体における臨界電流密度評価」の演題で講演を行った。Campbell 法による粒内と粒間の  $J_c$  評価法に関する解説の後、様々な組成、製法による  $FeAs$  系超電導体の  $J_c$  特性が詳細に報告された。現状の線材やバルク体試料では粒内  $J_c$  は  $10^6 \sim 10^7 A/cm^2$  と高いものの未反応部分、空隙、異相などが多すぎるために輸送  $J_c$  が小さいと結論づけた。

九州大学の向田昌志氏は「鉄系超伝導体の薄膜化の試み」の演題で、九大グループの最新データの紹介と国内外の最新研究のレビューを行った。鉄系超電導薄膜の作製には組成の厳密な制御とキ

キャリア量の制御が重要であって、PLD 法でも一定品質の薄膜が作製できたものの、MBE などの超高真空装置を使用する手法が有利であることを指摘した。

最後の講演は九州工業大学の松本要氏が「エピ Fe-Te-S 系超伝導薄膜の作製と物性」のタイトルで行った。鉄系超電導物質特有の層状構造を持ちながら As を含まないために取り扱い易く、鉄系超電導物質を理解するためのモデル物質として有効であると考えられる Fe(Te<sub>0.8</sub>Te<sub>0.2</sub>)のエピタキシャル薄膜の作製方法と特性評価結果が紹介された。Fe(Te<sub>0.8</sub>Te<sub>0.2</sub>) は等方的 ( $\gamma \sim 1.09$ ) な超電導体であり、 $T_c$  が低い割には非常に高い上部臨界磁界  $B_{c20} \sim 74$  T を有し、コヒーレンス長が大変短いことが報告された。

最後に材料研究会長の松本氏が閉会の挨拶を行って散会となった。年末の開催であったにもかかわらず 24 名の参加者があり、予定時間を 1 時間余りオーバーして活発な討論が行われ、鉄系超電導物質の大きな可能性と今後の研究の広がりを予感させる盛会であった。

[超電導 Web21 トップページ](#)

## 応用超電導・低温工学アジア会議 2009 (ACASC2009) のトピックス

産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門  
低温工学会長  
我妻 洸

ACASC2009 (<http://csj.or.jp/ACASC2009/acasc.html>) が島根県松江市で 2009 年 12 月 7 日(月)～8 日(火)に開催された。この会議は、隔年に日本、韓国、中国で組織・構成されたアジアの応用超電導・低温工学の会議で、一昨年は中国西安で開催され、今年は日本での開催であった。今年のトピックは、今回からインドが新しく参加したことである。次回の ACASC2011 はインドで開催されることが組織委員会で決定した。また、今回オブザーバーで参加したトルコも次回から正式に参加することが了承され、次々回の ACASC2013 はトルコ開催を予定することに決定した。今年は、合計で 107 名の参加者を数え大変盛況であった。

プログラムの詳細は ACASC2009 の Web をご参照頂ければわかりますが、10 件の招待講演と、3 つの Oral Session での 19 件の発表と、12 テーマから成る Poster Session では 64 件の発表が行われた。全てを紹介できませんが招待講演を中心に紹介します。

初日の招待講演では 5 件の発表があり、まず、中国科学院の Xiao 教授が中国における超電導電力応用開発状況の報告として HTS を用いた、ケーブル、35kV/2kA 限流器、500kJ/150kVA の SMES、変圧器、100 kW モータ、発電機、HTS 変電所などの開発状況を盛り沢山紹介した。特にトピックスとしては、近々 1.0MJ/0.5MW の SMES をテストすること、また 2010 年に計画している 1.3 kV/10kA 直流超電導ケーブルは世界最大の電流値であり、さらに CEPRI が 3kA/110kV/1km ケーブルを北京で 2012 年に実証する計画であるとの報告がされた。

韓国 KERI の Dr. Cho は、2007 年から始まった第 3 期の DAPAS (Development of Advanced Power system by Applied Superconductivity technology) プロジェクトにおける 154kV/1GVA 級単芯 HTS ケーブルの開発とテストが、KEPCO Gochang Testing Center で行われていると報告があった。

インド プラズマ研究所の Dr. Pradhan から定常状態トカマク炉 (SST-1) の開発について報告があり、2009 年から改良計画がスタートし、2011 年末にファーストプラズマ点火の予定であるとの報告があった。

I-04 の Dr. Datta が来日不可能になったとのことで、急遽プログラムが変更になり、高エネルギー加速器研究機構の春山教授から、2008 年から EU の Zurich で既に稼動を始めたガンマ線や暗黒物質の検知に適する液体 Xenon のディテクタに関連して、KEK でも小型パルスチューブ式クライオクーラにより試作実験を行っている旨の冷凍システムの結果報告があった。

横浜国立大学の吉川教授からは、従来の CMOS 技術より消費電力が 1/1000 で、エネルギー感度 10,000 倍が期待できる SFQ 回路技術による高速浮動小数点プロセッサについての紹介があった。試作したものは 20 GHz で 1.67 GOPS、25 GHz で 2.1 GOPS を記録し、消費電力は僅かに 3.5 mW との報告であった。

翌日には、韓国 KIMM の Dr. Park から韓国におけるクライオクーラの開発状況の報告があり、クライオポンプ用の 2 段 G-M クライオクーラと、遠赤外ディテクター用のスターリング型クライオクーラの開発状況が報告された。最近のトピックスとしては、LNG プラントをターゲットにした液化機用のクライオクーラを設計しているとの報告があった。LNG プラントに関しては、Oral Session の O-14 で Hong Ik 大学の Chang 教授から、複合多段 Braiton-JT サイクル (2 段コンプレッサーの

窒素 JT サイクル、3 段コンプレッサーのエチレンサイクル、同じく 3 段コンプレッサーのプロパンサイクル) で、連続的に分離精製液化する実用プラントを計画しているとの報告があった。

東北大学の太田教授からは、スラッシュ水素を用いた高効率の水素エネルギーシステムの開発についての報告があった。 $MgB_2$  の電力ケーブルを温度 14 K で、粒径約 1.3 mm 程度で、固液比約 8 ~ 28 wt% のスラッシュ水素で冷却するシステムの開発について報告があった。

トルコの Ankara 大学の Ali 教授からは C-SiC を添加した  $MgB_2$  の研究について報告があった。トルコでは応用よりも材料などの基礎科学が盛んである印象を受けた。

中国の NINMR の Dr.Feng は ITER 用 4.2 K、12 T の  $Nb_3Sn$  導体を、内部スズ拡散法とブロンズ法で Ta バリアを採用し、条長 3 km 以上のものを開発していることを報告した。中国が  $Nb_3Sn$  実用超電導線の開発に本格的に取り組みだしたとの印象を受けた。

大同大学の町家教授からは、超電導体の局所的歪みを、中性子源を用いて計測する試みの報告があった。

以上、主に招待講演を中心に ACASC2009 をご紹介しました。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

超電導モータの過去・現在・未来（その1）

京都大学大学院  
工学研究科電気工学専攻  
准教授 中村武恒

まずは、若輩の筆者に隔月連載記事執筆の機会を与えて頂いた編集委員各位に感謝申し上げる。筆者は、学生時代から超電導材料評価の研究をさせて頂き、京都大学に奉職後に超電導回転機の研究を開始したが、いつの間にか回転機本体やそのシステム化に興味に移り、回転機開発の側から超電導技術を展望するようになった。そうすると、超電導技術は素晴らしいポテンシャルを有しているものの、既存回転機の技術的成熟度を鑑みると、“極低温に冷やさなければならない”という古くて新しい問題が立ちはだかり、筆者が開発している超電導モータを含めて実応用の観点からどのようなシステムが成立するか苦悶の時期があった。即ち、電動機容量は発電機に比較して一般に小さく、超電導化に伴う高効率化などのメリットが冷凍機損失で相殺され、さらに現状はコスト高になることから、超電導発電機プロジェクト（Super-GM）のような強い導入のモチベーションを見つけないことが大きな課題であった。

しかしながら、近年になって、我が国でも国家プロジェクトを中心とする大学・企業他の産学連携グループや、あるいは企業単独で高温超電導回転機開発が活発に進められており、少しずつその実現可能性が見えてきているように感じる。即ち、高温超電導材料作製技術進展に伴い、低温超電導線材に比較して、高温駆動化に伴う運転コスト低減や、あるいは比熱上昇によってクエンチしにくくシステム運転の複雑さが解消されることから、そのパフォーマンスが上記極低温冷却の障害を克服しつつあるという印象を強く持つようになってきている。現在では、例えばビスマス系やイトリウム系線材については市販される状況であり、まずは比較的低速の大形船舶搭載用の高温超電導モータを中心に研究開発が活発に進められており、例えば米国では 36.5 MW 級機の試験が実施され<sup>1)</sup>、国内においても数百 kW 級の研究開発が行われている<sup>2)</sup>。また、最近では車載応用など、超電導モータにとってハードルがどんどん高くなる小形化についても挑戦的な研究開発が進められるようになっており<sup>3)</sup>、次世代の新しいタイプの回転機の一方向性につながっていくことが多いと期待される。

我が国の電力消費の 50% 以上は、回転機駆動によって消費されているが、その内の 8 割程度は中小容量機である。従って、超電導回転機によって真の技術革新を達成するには、如何にシステム全体としてのメリットを残したまま小形化・汎用性を追求出来るかが鍵であり、今その時期に来ているのでは無いかと予感される。さらには、モータを実駆動する場合には、超電導線材に優しいきれいな正弦波を与えていたのではダメで、高いキャリア周波数を有する PWM 波に対して安定・低損失である必要があり、さらには汎用性を追求するならば、目的指向的な可変速に対しても既存機に対する優位性を示す必要がある。つまり、超電導モータだけ素晴らしいものが出来ても役に立たず、駆動系やその他システムに組み込んだ形で性能を最大化する検討が極めて重要であり、システム側から超電導回転機を見直す作業も必要になってくると考えられる。

既存の永久磁石モータについては、高出力密度化を指向する場合、現在最も大きな課題の一つはその“冷却”法である。即ち、既存の IPM (Interior Permanent Magnet) モータでは、究極性能を追求するあまり非常に大きな発熱密度を許容した設計を余儀なくされ、“冷却”のために複雑な排熱機構が検討されている<sup>4)</sup>。一方、同一出力で比較した場合、超電導回転機本体の発熱密度は疑い無

く圧倒的に既存機に対して小さい（鉄損の割合が相対的に大きくなる極めて高速な回転時は除く）。このことは、実は既存機と超電導機で“冷却”の考え方が異なる。即ち、既存の常伝導機では、モータが発生する発熱を除くのにエネルギーを必要とし、つまり損失の補償に損失が必要である。一方、超電導機ではそれ自体損失は極めて小さく、そうした環境を提供する縁の下の力持ちとして最低限の“冷却”エネルギーを使用しており、“合目的”的である。従って、発熱・省エネの観点からは、超電導機は極めて合理的モータと言える。本連載記事では、上記背景をベースに、超電導モータの過去・現在・未来と題して、これまでの開発経緯と将来展望についてまとめさせて頂く。一年間、何卒お付き合い頂きたい。

回転機出力  $P$  は、大雑把には次の式で表わされる。

$$P \propto D^2 L \cdot AC \cdot B \cdot N$$

ここで、 $D$  は回転子直径、 $L$  は回転子有効長、 $AC$  はアンペアコンダクタ（電気装荷）、 $B$  は磁気装荷、および  $N$  は回転数である。上式より、同一の出力に対して回転子体格が同一ならば、 $AC$ 、 $B$ 、 $N$  のいずれかを大きくして出力向上を図ることになる。既存の常伝導モータについては、 $AC$  は Joule 発熱他によって制約され、 $B$  は鉄心の磁気飽和によって制約される。また、 $AC$  と  $B$  の分配を装荷分配と呼び、モータ設計の要であるが、この分配については経験則が支配しており、各社各様の方針によって決定されているようである。一方、超電導機については、形式的に抵抗ゼロの大電流を通電することができ、 $AC$  若しくは  $B$ 、あるいは両者を大幅に改善することが可能である。特に、 $B$  を極端に大きくして鉄心を省略することにより、漏れ磁束は大きくなるものの、小形軽量化やあるいは同期リアクタンスの低減を達成できる巻線形同期モータの研究開発が主流と思われる。表 1 には、これまで超電導化が検討されていた、あるいは現在も検討されているモータの一覧を赤字で示す。次号以降では、各モータについてやや詳細に検討していきたい。

表 1 超電導化が検討されている、あるいはされていた電動機のタイプ（赤字）

直流モータ-----	単極形 -----	ディスク形
		ドラム形
-----	整流子形 -----	他励式
		分巻
		直巻
		複巻
交流モータ-----	交流整流子機	
-----	同期形モータ -----	巻線形
		リラクタンス形
		誘導子形
		ステッピングモータ
-----	誘導モータ -----	かご形
		巻線形

#### 参考文献

- 1) AMSC ホームページ <http://www.amsc.com/>
- 2) 高木健次, 超電導 Web21, 2007 年 11 月号 (2007)
- 3) 2009 年 11 月 30 日付日本経済新聞「超電導モーター 電気自動車向け開発加速」(p. 12)
- 4) R. H. Staunton et al., "Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System", U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, Under contract DE-AC05-00OR22725 (2006)

読者の広場

Q&A

**Q** : 「高温超電導に関わる 65 K 近傍での超電導エレクトロニクス、車載小型モータ及び電力機器用冷凍機の現状に於けるおおよその冷凍機価格を教えてください。」

**A** : 高温超電導機器（以下 HTS 機器）冷却に使用される専用の冷凍機は、未だありませんので、その価格を正確にお答えするのは難しいことです。HTS 機器が実用化された場合の冷凍機は、実用化に耐える性能と、コスト、安全性、信頼性そして長いメンテナンス間隔を持っていなければなりません。ところが、現在の冷凍機は HTS 機器の実用化に対応した開発が十分ではありません。超電導送電や変圧器、限流器、SMES それにモータや発電機、SQUID、SFQ 計算機などそれぞれに対応した冷凍機が開発されなければなりません。現在はクライオポンプや MRI、低温研究用の冷凍機がそのまま HTS 機器の冷却に使用されています。冷凍機の冷却原理によって、その形状はほぼ決まってくると思いますが、実用化された HTS 機器の冷凍機は、形状、性能などその機器にジャストフィッティングしたものでなくてはなりません。

しかしながら HTS 機器の開発段階での現在の冷凍機価格と、将来実用化された時の冷凍機の価格は、正確ではなくともある程度の精度で知っておかなければなりません。そこで、今回の質問を機会に、各種 HTS 機器用冷凍機の価格を推定してみました。

冷凍機の価格を決める要素は、冷却温度と冷凍能力ですので、冷却温度を 65 K に限定して、HTS 機器に対応した冷凍機の価格を表 1 に示しました。

表 1 HTS 機器実用化時の必要冷凍能力と冷凍機候補及び推定価格  
(冷却温度は 65 K とし、実用化時推定価格は、100~1,000 台単位の量産を仮定)

超電導機器	必要冷凍能力	冷凍機候補	現状冷凍機と冷凍能力	現状冷凍機の価格 (1 台)	実用化時推定価格 (必要冷凍能力具備)
送電	10~80 kW	ターボプレート	スターリング 800 W G-M 150 W	¥2,500 万 ¥400 万	¥10,000 万~ ¥80,000 万
変圧器	2~10 kW	ターボプレート	スターリング 800 W G-M 150 W	¥2,500 万 ¥400 万	¥2,500 万~¥10,000 万
限流器	2~10 kW	ターボプレート	スターリング 800 W G-M 150 W	¥2,500 万 ¥400 万	¥2,500 万~¥10,000 万
SMES	2~10 kW	ターボプレート	スターリング 800 W G-M 150 W	¥2,500 万 ¥400 万	¥2,500 万~¥10,000 万
モータ	2~20 kW	ターボプレート	スターリング 800 W G-M 150 W	¥2,500 万 ¥400 万	¥2,500 万~¥20,000 万

発電機	20~50 kW	ターボブレイトン	スターリング 800 W G-M 150 W	¥2,500 万 ¥400 万	¥20,000 万~ ¥50,000 万
通信用 ミキサ	0.1~1 W	スターリング	スターリング 0.1 ~1 W	¥60 万~¥180 万	¥40 万~¥100 万
SQUID	10~300 W	パルスチューブ	パルスチューブ 300 W	¥200 万~¥500 万	¥100 万~¥200 万

HTS 機器が実用規模になった時には、電力機器及び回転機では比較的大きな冷凍機能力が必要になります。表を見ると、これらの機器には現在の冷凍機では能力が不足していることが解ります。そのため、現状ではスターリングや G-M 冷凍機を複数台（4~6 台）使用して冷却しています。そして、HTS 機器にはほとんど場合、ターボブレイトン冷凍機が候補となりますが、この冷凍機はまだ開発が済んでいません。クライオエレクトロニクス用には、小型のスターリング冷凍機とパルスチューブ冷凍機が使用できます。表には、現在の市場にある冷凍機の 65 K における冷凍能力と価格を示しました。同時に、高温超電導機器実用化時に使用されているであろう冷凍機の推定価格を示しました。電力機器用としては、ほとんどがターボブレイトン冷凍機になると思われますが、それぞれの冷凍能力によって価格が広い範囲に亘っています。

ここで示した HTS 機器実用化時価格は、あくまでも推定価格であり、開発が済んでさらに実用化が進み、広く使用されるようになった場合の価格ですので、これからの状況によっては、これより高くなったり低くなったりすると思います。大雑把な目安とお考えください。

回答者：大陽日酸株式会社 顧問 上岡泰晴様

[超電導 Web21 トップページ](#)