

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

2013年2月号

2013年2月1日発行

## 掲載内容 (サマリー) :

### 特集 : 超電導マイクロ波・テラヘルツ波デジタルデバイス

- 超伝導マイクロ波デバイスの技術動向
- テラヘルツイメージング分光のための力学インダクタンス検出器の開発
- アタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計 (ALMA) 計画用 Band 10 受信機のファーストライト
  
- 超電導関連 2013年2月-3月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン (1/03-1/23)
- 超電導速報ー世界の動き (2012年12月)
- 「ISS2012」報告
- 隔月連載記事ー医療用加速器と超電導 (その1)
- 読者の広場(Q&A)ー「読者からの問合せがあり、最近の He 資源事情を新聞記事やインターネットから集め、まとめてみました。」

[超電導 Web21 トップページ](#)

### 超電導 Web21

〈発行者〉

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

〒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>



# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

## 特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デジタルデバイス 「超伝導マイクロ波デバイスの技術動向」

山形大学大学院  
理工学研究科  
教授 大嶋重利

ここ 1~2 年で開催された超伝導のマイクロ波関連の発表が多い国際会議 (ASC, EUCAS, ISEC, HTSHFF など) では、主に①0.5~25 GHz 帯の超伝導フィルタの設計と評価 ②超伝導薄膜のマイクロ波物性の理論と実験が多く発表されている。①に関しては、日本、中国、台湾、カナダから面白い発表が多く出されている。②に関しては米国、イタリア、英国などから発表されている。ここでは、マイクロ波デバイスの技術動向として、①の最近の動向についての的を絞り、中国での超伝導フィルタ開発の展開と、オーストラリアでシミュレーションされた「携帯電話の基地局に超伝導フィルタを導入された時の効果」について紹介したい。

### 1. 中国での超伝導フィルタ研究の新展開

中国での移動体通信基地局用受信超伝導フィルタシステムの開発は一段落した感がある。しかし、清華大学の Bisong Cao 教授のグループでは、2012~2015 の 4 年間で新たな超伝導フィルタシステムの開発プロジェクト (総予算 280 万円) を推進することになった。これは、現在稼働している基地局用超伝導フィルタシステムの性能アップ (フィルタ及び冷却システム) を図り、新たな応用の道を切り開こうとするものである。新しい情報が入手できたらまた紹介したい。

また、最近 Chinese Academy of Science の HE YuSheng グループと Nankai University の XU Zhang グループから優れた超伝導分波器の報告がなされている。中国では、実用化を念頭にした研究が多いので、実用化を目指した研究であろうと推察している。しかし、どの分野での実用化なのかは、残念ながら情報を得ていない。図 1 に、XU Zhang グループの 3 分波器のレイアウトと実験結果を示す。コンパクトな超伝導分波器を設計し、優れた特性を出している

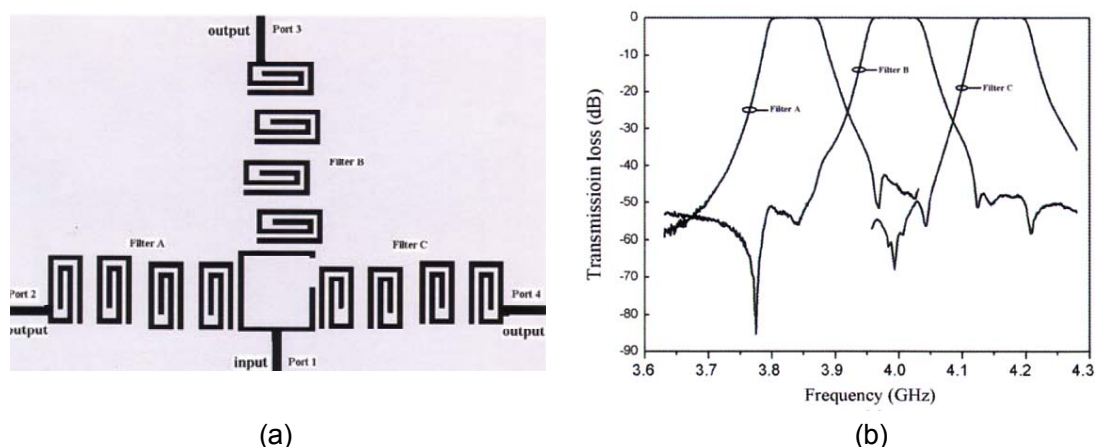


図 1 Triplexer のレイアウト(a)とその特性(b)、(XU Zhang 氏提供)

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

## 2. オーストラリアでの基地局用超伝導フィルタシステムの検討

携帯電話の基地局に超伝導フィルタシステムを導入している米国や中国では導入のメリットとして①基地局のカバーエリアの増大、②通話品質の向上、③携帯電話のバッテリーの長寿命化などを報告している。オーストラリアでも、もし携帯電話の基地局に超伝導フィルタシステムを導入した場合、どのようなメリットが想定できるかのシミュレーションがなされた。James Cook University の Janina Mazierska 教授がヘッドとなりレポートをまとめている。(下記参照)

Investigation into adjacent channel interference in 800 MHz spectrum allocation due to LMS

Possible effects on LTE and 3G.

Janina Mazierska (James Cook University, Australia)

オーストラリアで普及している 800 MHz 帯の無線通信システム (Mobile Units) に近接周波数帯域の無線機 (LMS) があると想定した時の相互干渉を色々な条件下でシミュレーションした。図 2 で示すように、UPLINK の場合は、LMS から携帯電話の基地局に干渉電波が飛び、DOWNLINK では LMS の基地局から携帯電話に干渉電波が飛ぶことを想定している。超伝導フィルタシステムを携帯電話の基地局に設置した時、どのような干渉が発生するか、ガードバンドを狭くできるかなどをシミュレーションした。基地局に超伝導フィルタシステムを導入すると、干渉を小さくすることができ、またガードバンドを狭くすることができることを示した。(詳しい資料が必要な方はメールで連絡して下さい。資料を送ります。ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp)

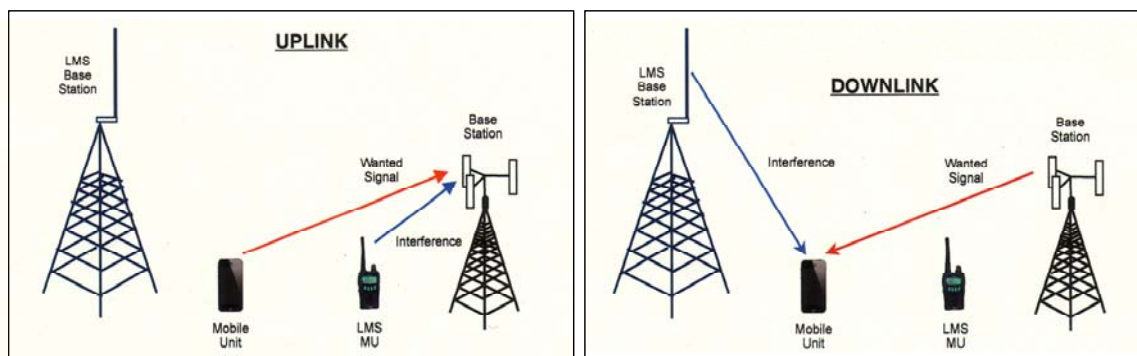


図 2 Mobile Unit と LMS MU の相互干渉モデル図

[超電導 Web21 トップページ](#)

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

## 特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デジタルデバイス

### 「テラヘルツイメージング分光のための力学インダクタンス検出器の開発」

名古屋工業大学 工学研究科機能工学専攻  
有吉誠一郎

山形大学大学院 理工学研究科  
中島健介、齊藤 敦

埼玉大学大学院 理工学研究科  
田井野 徹

理化学研究所 基幹研究所  
大谷知行

テラヘルツ領域における2次元分光技術はソフトマテリアルなどの物性研究や応用開拓のために有効な可能性を秘めている。我々は、2次元フーリエ分光システムへの適用を念頭に置き、従来の半導体ボロメータに比べて1桁以上の優れた検出感度と高速応答を併せもつ4 K冷凍機動作の力学インダクタンス検出器 (Microwave Kinetic Inductance Detector<sup>1)</sup>、以下 MKID と称す。) アレイの開発を進めている。検出器1画素の当面の目標性能は、周波数帯域 1~5 THz 以上、応答時間 100  $\mu\text{sec}$  以下、雑音等価電力  $10^{-14}$  W/Hz 以下であり、この実現のために、広帯域・省スペース化を図った新型 MKID の設計および窒化ニオブ (NbN) を用いた作製と性能評価を進めている。

図1は広帯域のテラヘルツ光アンテナ、かつ高Qマイクロ波共振器として機能するように設計した MKID (スパイラル MKID) の構造である<sup>2)</sup>。本設計は、広帯域テラヘルツ光アンテナのターン数を線路全長がマイクロ波の1/2波長程度になるまで増大させると、マイクロ波に固有共振周波数をもつ共振器として動作すること、かつテラヘルツ光アンテナの性能を阻害しないことに基づいている。

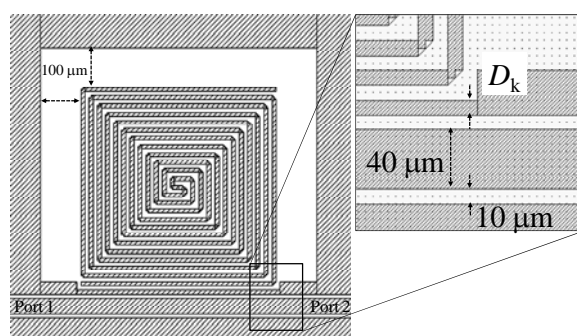


図1 典型的なスパイラル MKID の構造

次に、DC マグネトロンスパッタ装置を用い、Nb スパッタ時の窒素ガス濃度を変えることによって超伝導転移温度 ( $T_c$ ) を制御し、かつ様々な単結晶基板上で NbN 薄膜の成膜条件を検討した。その結果、R 面サファイア基板上で比較的高い  $T_c \sim 13$  K (膜厚 150 nm) をもつ良好な薄膜が得られた。

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

3)。さらに、スパイラル MKID を 25 画素分配置したフォトマスクを作製し、フォトリソグラフィおよび反応性イオンエッチング装置を用いて MKID を試作した。図 2 に一辺 10 mm 角の R 面サファイア基板上に作製した NbN 製スパイラル MKID アレイを示す。

その後、試作した MKID チップを 4 K 冷凍機内に設置し、テラヘルツ光導入窓を閉めた状態（平衡温度 3.0 K）でのマイクロ波共振特性を測定した結果、共振 Q 値が約 2 万（ディップ 14 dB）という良好な電気特性を確認した。一方で光導入窓を開けた状態（3.5 K）では、温度の異なる 2 種（300 K, 77 K）の電波黒体を用いたテラヘルツ光照射実験により、マイクロ波共振特性の明瞭な応答を確認した（図 3）<sup>4)</sup>。今後、フーリエ変換分光器を用いたテラヘルツスペクトルの取得、アレイ配置の電磁界解析や周辺の光学系も含めた検出感度の最適化を進めていく予定である。

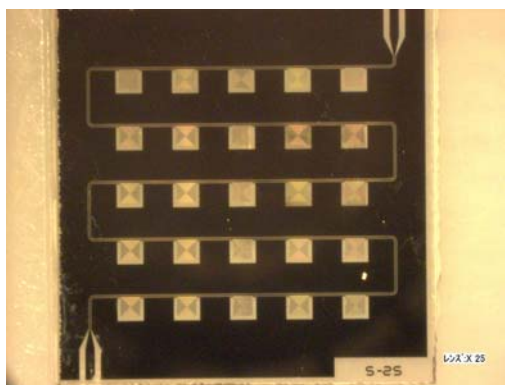


図 2 10 mm 角のサファイア基板上に試作した NbN 製スパイラル MKID の 5×5 画素アレイ

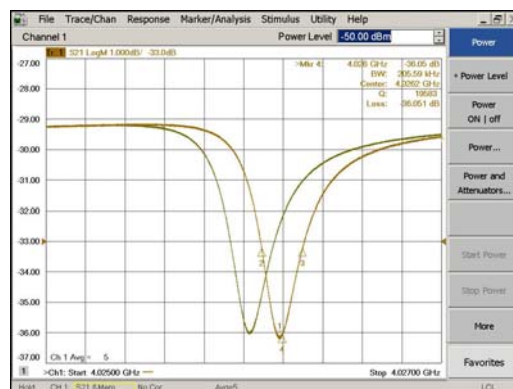


図 3 スパイラル MKID のテラヘルツ光応答@3.5 K（共振周波数 4.026 GHz の MKID を用いて、約 0.2 MHz の周波数シフトを観測）

## 謝辞

本研究は、独立行政法人科学技術振興機構（先端計測分析技術・機器開発プログラム）の支援により推進されています。

## 引用文献：

1. P. K. Day, H. G. LeDuc, B. A. Mazin, A. Vayonakis, J. Zmuidzinas, "A broadband superconducting detector suitable for use in large arrays", *Nature*, 425 817-821 (2003).
2. A. Saito *et al.*, in preparation (2013).
3. 田之上 寛之 他, “異なる基板上の窒化ニオブを用いた力学インダクタンス検出器の作製”、2012 年秋季 第 73 回応用物理学学会学術講演会, 14p-A2-6.
4. S. Ariyoshi *et al.*, in preparation (2013).

[超電導 Web21 トップページ](#)



# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デジタルデバイス

「アタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計 (ALMA) 計画用 Band 10 受信機のファーストライト」

自然科学研究機構 国立天文台

先端技術センター

鵜澤佳徳



図1 建設終盤のALMA望遠鏡。国立天文台提供。

ALMA (Atacama Large Millimeter/ submillimeter Array) は、国立天文台 (NAOJ) を代表とする東アジア、米国国立電波天文台 (NRAO) を代表とする北米連合、ヨーロッパ南天天文台 (ESO) を代表とするヨーロッパの国際共同プロジェクトで、南米のチリ共和国北部にある標高 5000 m のアタカマ砂漠に建設されている地上最大の電波望遠鏡である。この場所は、水蒸気による電波吸収の影響を受けにくい上、広く平坦なため、合計 66 台のパラボラアンテナ (直径 12-m アンテナ 54 台 + 直径 7-m アンテナ 12 台) を配置するには地球上で最も適している。開口合成の手法を用いて、天体からのミリ波、サブミリ波 (現計画では 31.5 GHz から 950 GHz) の信号を既存電波望遠鏡の 1 ケタ以上高い感度、分解能で観測することが可能となる。現在、アンテナ台数は 54 台となり、2002 年から始まった建設も終盤を迎えている<sup>1)</sup>。図 1 は標高 5000 m の山頂施設 (AOS: Antenna Operation Site) の写真である。もはや 1 ショットにすべてのアンテナを収めるのが困難な状況となっている。この他にも標高 2900 m の山麓施設 (OSF: Operations Support Facility) でアンテナの組み立て・調整試験やメンテナンスが実施されており、2013 年 3 月 13 日に開催予定の ALMA 完成記念式典に向けて準備を進めている。

ALMA の建設における日本の分担はアタカマコンパクトアレイ (ACA) 用アンテナ (12-m アンテナ 4 台 + 7-m アンテナ 12 台) と相関器、そして全アンテナ搭載用の Band 4 (125-163 GHz)、Band 8 (385-500 GHz)、Band 10 (787-950 GHz) 超伝導受信機の開発・製造などがある。日本は

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

ALMA 計画に 2 年遅れで参加したハンデを取り戻すべく、これまでしゃかりきに頑張ってきた結果、残すは超伝導受信機の製造のみとなった。このうち最も開発が困難とされた Band 10 受信機については、全出荷台数 73 台（アンテナ台数+スペア 7 台）のうち、これまで 30 台近くの受信機を「量産」した。図 2 の左に、Band 10 受信機の写真を示す。受信機は 4-K、15-K、110-K 冷却プレート（金メッキの銅製）と、室温の真空シールプレート（ステンレス製）を有している。4-K プレートには、楕円鏡や偏波分離グリッドなどの光学系や SIS ミキサー、IF アンプなどが配置されている<sup>2)</sup>。図 2 の右に、これまで製造・試験が終了した 28 台の受信機（SIS ミキサー 56 個分）の雑音温度性能を示す。ALMA の要求仕様値に対し、測定値の平均は十分低い値であり、すべての受信機が仕様を満たしている。800 GHz 付近の雑音増加は NRAO 担当の局部発振波（LO）源からの過剰雑音によるものである。これまで帯域内で 123 K の最小受信機雑音温度が得られており、これは量子雑音  $h\nu/k_B$  の約 3 倍に相当する。このことは、SIS 接合自身が量子雑音限界近くで動作していることを示唆しており、超伝導技術の優位性をテラヘルツ帯で実証した結果となっている。

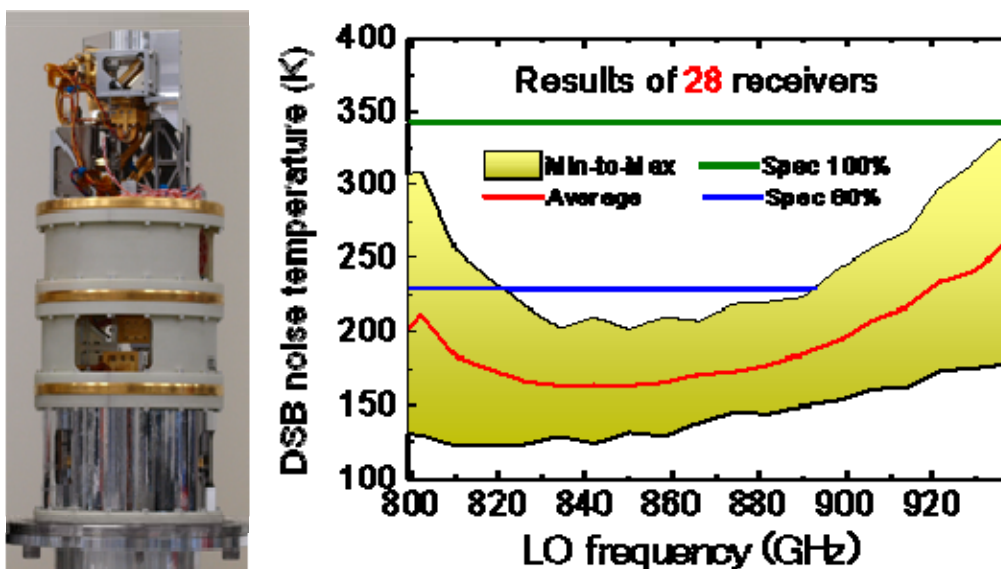


図 2 Band 10 受信機写真（左）と、これまで「量産」した 28 台の受信機雑音温度性能のまとめ（右）。1 つの受信機には直交 2 偏波受信用に 2 つの SIS ミキサーが搭載されているため、56 個の SIS ミキサーの結果である。

1 年前に本誌で報告した Band 10 受信機 1 号機は<sup>3)</sup>、予定通り NRAO のインテグレーションセンターにおいて ESO 供給の ALMA クライオスタットに装着された。同センターで性能確認試験が実施された後、チリの OSF に送られた。そして昨年（2012 年）11 月、アンテナに搭載された Band 10 受信機が天体からの電波を受信し、待望の初スペクトルの取得に成功した。電波源は、いて座 B2(Sgr B2)である。水蒸気量の多い OSF での試験観測であるにもかかわらず、図 3 に示すように明瞭なスペクトルが得られた。これは、我々の開発した Band 10 受信機の性能が非常に優れていることを示していると同時に、観測現場の環境下でも安定に動作していることを示唆している。この図には、多くの署名が入っている。これらは、このファーストライトに参加して下さった合同アルマ観測所（JAO: Joint ALMA Observatory）の方々のものであり、彼らの喜びが伝わってくる。天文学という小さな分野ではあるが、我々の超伝導技術が世の中に役立っていることを実感し、これまでの苦

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

労が吹き飛んだ。次のマイルストーンは、Band 10 受信機を複数台用いた人類初のテラヘルツ帯干渉試験である。我々は、全アンテナへの搭載に向け、今後も受信機の量産を進めるだけでなく、新たな超伝導技術の研究開発を行うことによって微力ながら宇宙科学の発展などに貢献していきたいと考えている。

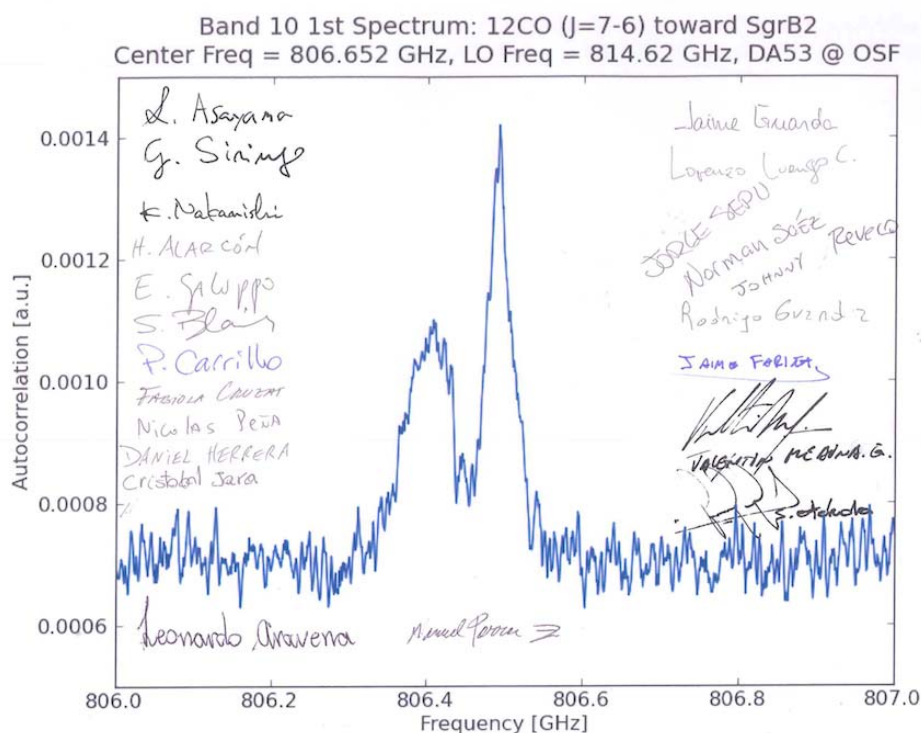


図3 ALMA アンテナに搭載された Band 10 受信機で取得した初スペクトル。

本成果は、国内外の ALMA 関係者、情報通信研究機構、大阪府立大学、紫金山天文台などの方々のご協力、ご支援を得た結果である。この場を借りて感謝を申し上げたい。

参照：

1. <http://www.almaobservatory.org/>
2. Y. Fujii, *et al.*, "The first six ALMA Band 10 receivers", accepted for publication in IEEE Trans. THz Sci. and Technol.
3. 鶴澤佳徳、「アタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計 (ALMA) 計画用 Band 10 受信機の量産化」、超電導 Web21、2012 年 2 月号

超電導 Web21 トップページ



# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

---

## 超電導関連 '13/2月-3月の催し物案内

### 1/31-2/1

第7回極低温技術スクール

場所：物質・材料研究機構（NIMS）桜地区、筑波大学

問い合わせ：[http://www.csj.or.jp/seminar/2013/7th\\_school\\_0131.pdf](http://www.csj.or.jp/seminar/2013/7th_school_0131.pdf)

### 2/1

第4回関西支部講演会

場所：大阪市立大学文化交流センター

問い合わせ：[http://www.csj.or.jp/kansai/2012/4th\\_0201.pdf](http://www.csj.or.jp/kansai/2012/4th_0201.pdf)

### 2/22-23

第一回超伝導科学技術セミナー ～若手技術者向け講習会～

場所：古河電工健康保険組合 鬼怒川荘

問い合わせ：<http://www.sntt.or.jp/~fsst/20130222.html>

### 2/25-27

ARPA-E Energy Innovation Summit

場所：National Harbor, MD

問い合わせ：[www.arpae-summit.com](http://www.arpae-summit.com)

### 3/8

第4回超電導応用研究会シンポジウム 超電導技術の高効率鉄道システムへの適用可能性

場所：鉄道総合技術研究所 国立研究所

問い合わせ：[http://csj.or.jp/application/2012/4th\\_0308.pdf](http://csj.or.jp/application/2012/4th_0308.pdf)

### 3/20-3/22

電気学会全国大会

場所：名古屋大学 東山キャンパス

問い合わせ：<http://www2.iee.or.jp/ver2/honbu/03-conference/index.html>

### 3/26-29

物理学会年次大会

場所：広島大学東広島キャンパス

問い合わせ：<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/>

### 3/27-29

金属学会春期講演大会

場所：東京理科大学神楽坂キャンパス

問い合わせ：[http://jim.or.jp/MEETINGS/2013\\_spr/2013\\_spring.html](http://jim.or.jp/MEETINGS/2013_spr/2013_spring.html)

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

---

## 3/27-30

応用物理学会春期学術講演会

場所：神奈川工科大学

問い合わせ：<http://www.jsap.or.jp/index.html>

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

---

## 新聞ヘッドライン (1/03-1/23)

- 超電導線で超電導、原発3基分カバー 関電・住友電工 月内に送電実験 産経新聞 大阪朝刊 1/03
- 新春インタビュー 日本電線工業会 橋秀明会長 基幹産業として存続模索 技術力で新市場創出を 日刊産業新聞 1/04
- 超電導リニア、夢の500キロ台へ 走行制御は芸術的な領域に 産経新聞 速報ニュース 1/05
- 「夢の超電導線」実用へ本格化 電力問題解決の切り札となる可能性も 産経新聞 速報ニュース 1/06
- 省エネ設備補助 1000億円超 補正予算案など提示 経産省 電気新聞 1/08
- リニア中央新幹線：リニア駅へ、バス専用道 JR 甲府駅と結び県が基本構想素案 毎日新聞 1/11
- 最も軽い液体：東大が作製 毎日新聞 1/15
- 超電導ケーブルで送電、省エネへ実用化探る、国内で相次ぎ実験開始 日経産業新聞 1/21
- 兵庫県立大など、鉄系高温超電導体で電子・格子振動の変化を観測 日刊工業新聞 1/22
- 超電導ケーブル、工場で、住友電工が実験、信頼性を検証 日本経済新聞 1/23

[超電導 Web21 トップページ](#)

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

## 超電導速報—世界の動き (2012年12月)

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター  
超電導工学研究所

特別研究員 山田 穰



★記事のニュース発信地、関連地

### ▶電力応用

#### EU 洋上風力用冷却系の開発

#### **Helmholtz Association of German Research Centres and the Karlsruhe Institute of Technology (2013年1月4日)**

Karlsruhe 工科大学物理技術研究所 (ITEP) の低温工学部に所属する研究者たちは、EU が支援する SUPRAPOWER (SUPERconducting, RELiable, lightWeight, And more POWERful offshore wind turbine: 超電導、高信頼性、軽量、そしてより強力な洋上風力タービン) プロジェクトに冷却システムを提供することを発表した。プロジェクト期間が4年に亘るこのプロジェクトは、超電導ダイレクトドライブ発電機を使用する風力発電所を開発することを目的とし、Tecnalia リサーチ&イノベーション財団 (スペイン) の取りまとめの下、産業界と科学界から9つの共同開発者を設けて取り組まれている。ITEP の研究グループが請け負うのは、小さな Gifford-McMahon クーラー (共同開発者である Oerlikon Leybold Vacuum 提供) を使用して、必要な超電導コイルを 20 K まで冷却することが可能な回転式の低損失クライオスタットを開発することである。低温工学部長である Holger Neumann 博士は、「このような冷却装置の冷却性能は限られているため、装置と超電導コイルとの間の熱がうまく伝導しているかを確認する必要がある、さらには、使用する熱パイプへの回

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

転による影響も考慮する必要がある。その一方で、クライオスタットには、非常に効果的な断熱材が求められる。」と述べた。風力タービンに超電導発電機を使用することにより、発電機のサイズと重量を同時に軽減しながら、10 MW の性能向上が期待できる。これは、洋上発電所にとって非常に重要な要素である。

(出典)

Source: "Superconductors for efficient wind power plants"

Helmholtz Association of German Research Centres press release (January 4, 2013)

URL: [http://www.kit.edu/visit/pi\\_2013\\_12442.php](http://www.kit.edu/visit/pi_2013_12442.php)

Contact: Monika Landgraf, [presse@kit.edu](mailto:presse@kit.edu)

## UNIVERSITY of HOUSTON 風力用 R&D に DOE 資金

University of Houston (2012年12月19日)

Houston 大学の研究者たちは、米国エネルギー省のエネルギー先端研究計画局から、前倒し助成金と 90 万ドルの追加金を受け取った。これらの追加資金は、超電導線材をタービンに使用するという風力エネルギープロジェクトのためのものである。3年に亘るこのプロジェクト(助成金総額 400 万ドル)は、風力発電において使用される超電導線材の性能を 400 %改善することを目的とする。プロジェクトは当初、2013年6月締めの助成期間 18 ヶ月間において、210 万ドルの助成金を受け取った。その後、同研究グループが追加金 100 万ドルを受け取れるかどうかを判断する評価が計画されていた。しかし、2012年9月の時点で、性能改善が 65 %に達しており、この業績に基づいて、助成金管理者は、最後の助成金 100 万ドルを前倒しで支払い、90 万ドルを追加で授与する運びとなった。これらの追加資金により、研究活動のスピードアップ並びに研究チームの拡張、強化が行われる予定である。このプロジェクトの共同研究者として、SuperPower 社、国立再生可能エネルギー研究所、Tai-Yang Research 社、そして TECO-Westinghouse Motor 工業が含まれる。

(出典)

Source: "UH superconductivity researcher receives additional DOE funding for wind project"

University of Houston press release (December 19, 2012)

URL: [http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2012-12/uoh-usr121912.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2012-12/uoh-usr121912.php)

<http://www.uh.edu/news-events/stories/2012/december/1207SelvaWind.php>

Contact: Laura Tolley, [ljtolley@uh.edu](mailto:ljtolley@uh.edu)

### ▶ 基礎

#### 第3の磁性の発見

Massachusetts Institute of Technology (2012年12月19日)

マサチューセッツ工科大学 (MIT) の研究者たちは、これまでに知られていた磁気の 2 つの状態 (強磁性と反強磁性) につづく第 3 の状態が存在するという、全く新しい種類の磁氣的挙動について実験的に検証した。量子スピン液体 (QSL) と呼ばれるこの新しい状態は、固体の結晶と"液体"の磁気状態で構成されている。他の 2 つの磁性の状態とは異なり、QSL 中の個々の粒子の磁気方向は絶えず変動し、あたかも液体中の分子の一定の動きのように振る舞う。磁気方向、または磁気モーメントが静止状態で秩序化されることはないが、強い相互作用が生じる。しかし、磁気方向が量子効果により所定の位置に留まるということはない。



# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

QSL の概念は、高温超電導との関連が推測された 1987 年に初めて提案された。MIT のデータには、QSL が実際の物理的システムであるということを示した今までにない最強の実験的証拠がいくつか提示されている。実際に実験で使用された物質は、ハーバートスミス石という鉱物の結晶で、結晶成長には 10 ヶ月を要した。同研究グループは高度な物理学技術（中性子散乱法など）を用いてこの結晶の特性を調べる中で、結晶が分数量子数を持つ励起を示すことが発見されたのである。ほとんどの物質は、全体数が確認できるような変化を伴いながら離散量子状態を示すが、QSL はスピノンと呼ばれる励起の連続体を形成しながら分数量子化を示した。この観察は、“リマーカブル ファースト（驚くべき発見第一号）”と呼ばれている。この研究グループの研究結果は **Nature** で報告されている。

(出典)

Source: “MIT researchers discover a new kind of magnetism”

Massachusetts Institute of Technology press release (December 20, 2012)

URL: [http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2012-12/miot-mrd122012.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2012-12/miot-mrd122012.php)

<http://web.mit.edu/newsoffice/2012/mit-researchers-discover-a-new-kind-of-magnetism-1219.html>

Contact: Caroline McCall, cmccall5@mit.edu

## 新超電導体 $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$ と Ag 不純物の役割

Springer (2012年12月20日)

ビスマスと硫黄を主成分とした新種の超電導物質系( $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$ )に銀原子を用い、化学的置換の研究を行っている中国科学院固体物理研究所の合肥研究チームの中国人科学者たちは、 $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$  で作ったサンドイッチ型層状構造の超電導が真性であり、不純物で作成されていないことを発見した。今までに製造された  $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$  の超電導サンプルは全て、 $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$  と不純物の混合物で、不純物を含まない純粋なサンプルは超電導ではない。今回の発見により、観測された超電導は、不純物に起因するかどうかとの疑問が提起される。同研究チームは、X線回折、磁化率、電気輸送、そして熱輸送を用いて系統的測定を行い、この物質の特性を調査したところ、X線回折パターンを比較することで、銀の不純物がビスマス・オキシ硫化物の格子中のビスマス部位を部分的に置換することを発見した。また、様々なレベルで銀をドーピングして物質の組成を制御し、銀の含有量が増加すると超電導が抑制され、特定のドーピング閾値を越えると最終的に消滅してしまうことを発見した。ドーピングによる電子構造の改変は、超電導を抑制すると推測された。研究者たちは、これらの観測を基に、今回観測された超電導は、銀の不純物ではなくビスマス・オキシ硫化物の格子に由来すると結論づけた。この研究チームの研究結果は、**European Physical Journal B** に掲載されている。

(出典)

Source: “Silver sheds light on superconductor secrets”

Springer press release (December 20, 2012)

URL: [http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2012-12/s-ssl122012.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2012-12/s-ssl122012.php)

<http://www.springer.com/about+springer/media/springer+select?SGWID=0-11001-6-1399741-0>

Contact: Ann Koebler, ann.koebler@springer.com

EBERHARD KARLS  
UNIVERSITÄT  
TÜBINGEN



自己作動する新しい超電導素子

University of Tübingen (2012年12月3日)

Tübingen大学 (ドイツ)、Tel Aviv大学 (イスラエル)、そしてKiel大学 (ドイツ) の研究者たちによつ

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

て、 $\phi$ ジョセフソン接合と名付けられた新しいタイプの超電導素子が提案され、実験的に証明された。この素子は、超電導電子回路を"自ら"実際に動かし、機能性を向上することができる。そして、 $\pi$ ジョセフソン接合（逆位相同期）と従来のジョセフソン接合（電子運動の同相同期）を組み合わせ、接合する二つの超電導体の電子間に任意位相シフト( $\phi$ )を持つジョセフソン接合を生成するのである。 $\phi$ の値 ( $0 < \phi \leq \pi$ ) は、設計要件に応じて選択することができる。このようにしてできた $\phi$ ジョセフソン接合は、2つの超電導電極間に一定の位相シフトを維持することのできるデバイスとして使用することができる。

この研究に携わる共同著者の一人であるRoman Mints教授（Tel Aviv大学）は、この概念について「 $\phi$ ジョセフソン接合は、接続した超電導電子回路に、通常のバッテリーにあるような電圧ではなく、位相シフト $\phi$ を供給するバッテリーであると考えることができる。この位相バッテリーは通常のバッテリーとは異なり、エネルギー散逸を伴わない超電導電流が流れるためバッテリーが放電することは決してない。」と説明した。また、この研究で第1線の科学者であるEdward Goldobin博士（Tübingen大学）は、「我々はさらに、この $\phi$ ジョセフソン接合には、実際に2つの状態が存在するかもしれないことを発見した。それは、位相シフトの $+\phi$ か $-\phi$ のどちらかで超電導体を"同期"させることができるかもしれないというもので、そうであれば、双安定システムとして使える可能性があり、将来的には量子ビットとしても使用できるかもしれない。」と付け加えた。位相シフト $\phi$ の値は、膜厚のようなサンプルのパラメーターによって制御される。これまでは、基底状態を自由に变化できるという考えは、科学者たちの間では考えられなかったものである。この研究グループによる現在の研究結果は、Physical Review Lettersに掲載されている。

(出典)

Source: "Superconductors Which Work by Themselves"

University of Tübingen press release (December 3, 2012)

URL: <http://www.uni-kiel.de/aktuell/pm/2012/2012-356-phase-shifter-e.shtml>

Contact: Dr. Edward Goldobin, gold@uni-tuebingen.de

## ▶経営・決算

### 液体Heの価格上昇

**Air Products (2012年12月17日)**

Air Products社は、北米における液体ヘリウムのバルク販売価格の大幅引き上げを発表した。この値上げは、現在進行中の世界的ヘリウム不足に加え、安定した供給並びに新規のヘリウム供給源を確保するために同社が負担する臨時費用を補うための余儀ない措置である。新しい価格設定は、2013年1月1日付け、または契約で認められた期日より実施される。

(出典)

Source: "Air Products Announces North America Price Increase for Liquid and Bulk Helium Gases"

Air Products press release (December 17, 2012)

URL:

<http://www.airproducts.com/company/news-center/2012/12/1217-air-products-announces-north-america-price-increase-for-liquid-and-bulk-helium-gases.aspx>

Contact: Art George, georgeaf@airproducts.com\_

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

---



## 風力訴訟その後

### AMSC (2012年12月17日)

AMSC 社は、Sinovel Wind Group 社に対する著作権侵害訴訟の追加公聴会の開催日について、中国の最高人民法院がまだ未定にするつもりであることを公表した。AMSC 社が Sinovel 社に対して提起した訴訟の中には、ソフトウェアの著作権侵害の民事訴訟もあり、そこでは、AMSC 社が排除措置命令と総額 600 万ドルに上る損害賠償を要求している。現時点では、最高人民法院は、AMSC 社と Sinovel 社が提起する管轄問題の再審理のために公聴会を開催すると判決を下しており、下級裁判所の手続きは、最高人民法院の結果が出るまで滞っている状態である。この訴訟は、2011 年後半に AMSC 社が Sinovel 社に対して提起した 4 つの訴訟の 1 つで、Sinovel 社の契約違反や知的財産の窃盗が発覚したことに關するものである。

(出典)

Source: "AMSC Provides Litigation Update"

AMSC press release (December 17, 2012)

URL:

[http://files.shareholder.com/downloads/AMSC/2165855216x0x622101/29090ccc-2480-41e8-a9a4-dd848b6d6b11/AMSC\\_News\\_2012\\_12\\_17\\_Commercial.pdf](http://files.shareholder.com/downloads/AMSC/2165855216x0x622101/29090ccc-2480-41e8-a9a4-dd848b6d6b11/AMSC_News_2012_12_17_Commercial.pdf)

Contact: Jason Fredette, [jason.fredette@amsc.com](mailto:jason.fredette@amsc.com)

[超電導 Web21 トップページ](#)

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

## 「ISS2012」報告

### 1. 物理・化学・バルク・磁束物理セッション 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 材料物性バルク研究部  
部長代理 筑本知子

今年度から本分野に従来のバルク分野も含まれることになり、合計6つの口頭講演セッションで37件の講演、そしてポスター発表は95件であった。以下、新物質、メカニズム、試料合成(含バルク)、磁束物理のカテゴリー毎に主な発表内容について招待講演を中心に報告する。

【新物質】 電通大の村中は、軽元素を含む系の新物質探索を行ない、 $\text{BaCu}_x\text{Si}_{2-x}$  ( $0.2 < x < 0.6$ ) ( $T_c=3$  K)、 $\text{Lu}_2\text{SnC}$  ( $T_c=5.2$  K)、 $\text{NiGa}_5$  ( $T_c=3.5$  K)、 $\text{PdGa}_5$  ( $T_c=2.2$  K) などの多くの超電導体を発見したことを報告した。東工大の溝口は超電導体、透明導電膜、色素などの新材料を紹介した。超電導体としては、 $\text{LaCo}_2\text{B}_2$  ( $T_c=4$  K) を発見したことを報告した。岡山大(現東大)のPyonは $\text{IrTe}_2$ について、Irの元素置換により三方晶-単斜晶への構造相転移を抑えると、超電導性が発現することを見出した。バルクの超電導は $x > 0.03$ から現れ、最高 $T_c$ は3.1 Kである。NIMS(現首都大)の水口らは $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$  ( $T_c=5$  K)とその関連物質について報告した。本系は $\text{BiS}_2$ 層にて超電導が発現していると考えられることから、同グループは所謂ブロック層を変えてキャリア密度や層間隔をかえることを試み、 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ において $T_c=10.6$  Kが得られることを見出した。

また、鉄系に関しては、Sun(中国科学技術アカデミー)が $\text{K}_{1-x}\text{Fe}_{2-y}\text{Se}_2$  ( $T_c=32$  K、高压下で $T_c=48$  K)を報告した他、清華大学のXueはSTO基板上に1ユニットセル成膜したFeSe超薄膜のSTM測定で20 meVのギャップが観測されたことから、77 K以上の $T_c$ をもつと推察されると述べた。

【メカニズム】 東大の有田は層状窒化物の超電導メカニズムについて密度汎関数理論を用いた解析を試み、理論から導かれる $T_c$ が実測値の半分に満たないことから、同系の高い $T_c$ を説明するにはMigdal-Eliashberg理論を超えた新たな理論を構築していく必要があると論じた。鉄系超電導体のメカニズムに関しては、Eremin(Ruhr-Universität Bochum)がスピン励起によるペアリング機構について、大成(名古屋大)は軌道ゆらぎの効果について論じた。

実験に関しては、中島ら(AIST)は $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ 単結晶の光学測定から、Coドーピングにより面内異方性が増加することを見出した。Allan(BNL)らは鉄系超電導体のparent stateにおいて電子はnematic状態となっており、Coなどの不純物添加によりunidirectional stateが出現することを報告した。Wenら(南京大)は $\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4}\text{Fe}_2\text{As}_2$ 及び $\text{Na}(\text{Fe}_{0.975}\text{Co}_{0.025})\text{As}$ のSTM測定からボゾンモードを観測したと述べた。岡崎(東大)はレーザーARPESによりギャップの異方性を測定した結果について紹介した。芝内(京大)は $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3})_2$ の磁気トルク特性等の結果をもとに電子相図について議論し、鉄系超電導体においては、nematic instabilityが超電導を前駆していると結論づけた。

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

【試料合成】 昨年に引き続き鉄系材料に関する報告が数多くみられた。木方 (AIST) らは KAs 自己フラックス法による  $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$  ( $x=0.16\sim 1$ ) の大型 (約 5 mm 角) 単結晶育成について、Karpinski ら (スイス工科大) は  $Sm_{1-x}Th_xFeAsO$  及び  $SmFeAsO_{1-x}F_x$  ( $T_c\sim 54$  K) 単結晶の高圧合成について報告した。為ヶ井ら (東大) は  $Ca_{10}(Pt_nAs_8)(Fe_{2-x}Pt_xAs_2)_5$  ( $n=3,4$ ) ( $T_c=66,13$  K) 単結晶を育成し、 $\gamma\sim 10$  であることを確認した。東大の山本らは  $MgB_2$  のバルク合成について報告し、17.5 K で 3 T 以上の捕捉磁場が得られたことを紹介した。

【磁束物理】 磁束物理のセッションでは最初に、2012 年 5 月に亡くなった外村彰氏の追悼講演として、日立の原田より、ローレンツ顕微鏡による超電導体の磁束観察についてのレビューがあった。筑波大の辻本らは、Bi2212 を用いた THz 発振について、0.3~1 THz の広い周波数範囲において発振周波数の制御が可能となったことを述べた。

## 2. 薄膜、接合、高温デバイス応用セッション 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  
副所長 田辺圭一

薄膜、接合の口頭セッションでは、鉄系超電導薄膜に関する 4 件の講演と  $MgB_2$  接合に関する 1 件の発表があった。

鉄系超電導体の中でも 50 K 以上の高い  $T_c$  をもつ 1111 系材料と、 $T_c$  は 40 K 以下と低い異方性の小さな 122 系材料は応用上最も有望な材料である。これらの材料の高品質薄膜は MBE 法や PLD 法ですでに作製されているが、Y 系銅酸化物並みの高い上部臨界磁場を反映した磁場中の高い  $J_c$  が実現できるかが最近の関心事になってきている。Wisconsin 大 (米国) の Eom は、 $SrTiO_3$  (STO) 及び  $BaTiO_3$  バッファ層の上に酸素を若干含むターゲットからの PLD により酸素欠損ペロブスカイト  $BaFeO_x$  からなるナノロッドを含む  $Ba(Fe,Co)_2As_2$  (Co:Ba122) 薄膜を作製し、c 軸に平行な磁場印加に対し高い  $J_c$  を得ている。今回、Co:Ba122 層とドーピングなしの Ba122 からなる超格子の作製を試み、c 軸に平行方向だけでなく垂直方向にも高い磁場中  $J_c$  をもつ試料を得たことを報告した。IFW Dresden (ドイツ) の Iida (飯田) は、PLD 法により Fe バッファ上に作製した高品質 Co:Ba122 薄膜の異方性や磁場中  $J_c$  について報告すると共に、東京農工大グループが MBE 法により作製した Sm1111 エピタキシャル薄膜 ( $T_c$  zero = 54 – 55 K) の  $J_c$  特性について報告した。Sm1111 薄膜は 10 K, 16 T でも  $0.4$  MA/cm<sup>2</sup> の高い  $J_c$  を示す。20 T 以上の磁場を c 軸に垂直方向に印加した場合ほとんど磁場強度に依存しない  $J_c$  が観測されると共に、N 値の角度依存性の振る舞いから Y 系銅酸化物と同様の intrinsic pinning が生じていると報告した。名大の生田は、MBE 法による Nd1111 薄膜の作製、特に高  $T_c$  を得るために必要なフッ素ドーピングに関して同グループが開発した方法についてレビューした。また、MBE 法により作製した P 置換 Ba122 薄膜 (P:Ba122) の結晶粒界特性や、MgO 基板上に作製した薄膜に対する基板由来の歪みの効果、カチオン比を調整することにより得られた高い self-field  $J_c$  (4 K で 10 MA/cm<sup>2</sup>) について報告した。P 置換 Ba122 は、Co 置換 Ba122 に比べ高い約 30 K の  $T_c$  が薄膜でも得られる。また、ISTEC-SRL の安達は、PLD 法により MgO 基板上に作製した P:Ba122 薄膜が磁場中でも Co:Ba122 薄膜に比べ高い  $J_c$  を示すことを報告した。東



# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

京農工大の相原は、CaF<sub>2</sub>バリア層を用いた MgB<sub>2</sub>/CaF<sub>2</sub>/MgB<sub>2</sub> SIS 接合の作製について報告した。ギャップ電圧以下での過剰電流が依然小さくはないが、以前の AlO<sub>x</sub>バリアを用いた接合に比べ高い温度までジョセフソン電流が観測されている。

SQUID 応用のセッションでは、Nb 系の超高感度 SQUID を用いた超低周波 NMR において、プロトンの歳差運動周波数と生体生理振動との共振の検出とイメージングに関する試みが KRISS (韓国) の Kim により報告された。また、金沢工大の足立は、Nb 系マルチチャンネル SQUID を用いた脊髄の異常診断と臨床応用について紹介した。酸化高温 SQUID 応用に関しては、岡山大学の紀和が太陽電池パネルの閾値特性の分布や異常の評価について、同大学の堺がコンパクトな交流帯磁率計の開発について報告した。いずれも、試料に磁場を印加するため、ISTEC-SRL で開発した SQUID 本体には磁場の影響がない検出コイル分離型高温 SQUID を使用している。後者では、 $1.4 \times 10^{-9}$  emu という高い感度が得られている。ISTEC-SRL の波頭は、3 ch の高温 SQUID を用いた地磁気観測システムの開発について報告した。2012 年 3 月にいわき市に設置したシステムを用い、首都大学東京、東北大学等と共同で、地震の原因となる断層破壊による微弱な磁場変化を捉えることを目的に観測を継続しており、将来的に現在より早い地震の緊急速報システム等への応用を目指している。また、初日の基調講演において、筆者は高温 SQUID を用いた金属資源探査装置の開発について紹介したが、Chalmers 大 (スウェーデン) の Claesson は高温 SQUID の脳磁計測への応用について紹介するなど、高温 SQUID の応用開発は様々な分野に広がりつつある。

### 3. エレクトロニクス (検出器・デジタル等) セッション 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

ISS エレクトロニクス関連の口頭発表の中から、3 日目に行われた検出器、デジタル応用等についての報告を行う。

英国 Heriot-Watt 大の Hadfield は、Superconducting Nanowire Single Photon Detector (SNSPD) についての紹介を行った。SNSPD は高効率、低ダークカウント、高時間分解能の単一光子検出器であり、光導波路や読み出し回路とのオンチップ集積が可能なことでも注目を集めている。新しい応用として、多くの生物学的反応で現れる励起された酸素一重項からの発光を SNSPD で観測する試みが報告された。NICT の三木は、光ファイバーと Si 基板上に作製された SNSPD の結合方法の工夫や反射膜を設けることにより、45% 以上の検出効率を示す SNSPD が高い割合で得られることを報告した。国立天文台の鶴沢は、チリのアタカマ高原に 66 台のアンテナを並べて巨大電波望遠鏡を実現する ALMA 計画に用いる最高周波数帯の SIS ミキサを開発し、予備も含めた全 73 台のうち 13 台の出荷が完了したことを述べた。また、チリに送った SIS ミキサを用いて宇宙からの電波を捉える実験に成功したことが報告された。

米国 HYPRES 社の Gupta は、軍用通信および衛星通信用に開発している超電導 AD コンバータを用いたデジタル RF レシーバについて述べた。HYPRES では AD コンバータチップだけでなく、冷凍機も含めた実装技術も開発しており、ラックサイズの実用的なシステムを製品化している。現在までに 6 システムが納入されており、年明けに 7 台目が納入予定とのことであった。名大の藤巻は、低消費電力で知られる SFQ 回路の消費電力をさらに低下する回路について報告した。これには動作電圧を下げることにより、静的な消費電力を極力抑える方法を用いている。一方、動作電圧

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

が低下すると動作速度低下やビットエラーレートの増加というデメリットも現れる。実験の結果、動作速度やビットエラーレートに大きな影響を与えることなしに、SFQ回路の消費電力が1/10程度まで低下できることが示された。

NEC/理研のAstafievは、Josephson効果と双対な効果であるCoherent Quantum Phase Slip (CQPS)の確認実験に世界で初めて成功したことを報告した。Josephson効果は、Cooper pairが絶縁膜のバリアをトンネルする現象であるが、CQPSはvortex (phase slip)が超電導ワイアをトンネルする現象である。Josephson効果に現れる一定間隔の電圧のステップ(Shapiro step)と双対の関係にある電流ステップがCQPSでは現れることが予想されており、この電流ステップを用いれば現在では難しい量子電流標準の実現が期待されるが、この電流ステップはまだ観察されていないそうである。

## 4. 線材セッション 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 線材開発研究部  
部長 和泉輝郎

2012年12月3~5日に船堀(東京)で行われたISS2012における線材部門の内容をまとめる。Special Plenary Lecture及び田中メモリアルとして行われたPlenary Lectureでは、北澤教授やChu教授、塩原所長やMalozemoff博士など著名な方々による講演が行われた。特筆すべき内容としては未来の材料に関するものであった。塩原所長は、今後の線材開発として現在の開発の延長線上ではないブレークスルーを伴った超高性能線材として第三世代線材を定義し提案した。一方、Malozemoff博士及びChu博士からは、室温超電導についての言及がなされた。Malozemoff博士は、 $T_c$ のみが高温化してもコヒーレント長が短くなり粒界を超電導電流が透過することができずに実用的な材料としては考えられないとの見方を示したのに対し、Chu博士は、高温超電導が存在する前には誰も信じていなかったのと同様に理論による限界は実験によって覆されるものであるとの楽観的な考えを示された。何れの考え方が正しいかは今後の研究が答えを出してくれることであろう。

線材部門としては、総計で78件あり、内訳はY系超電導線材に関するものが58件(オーラル24件、ポスター34件)とその他が20件(オーラル5件、ポスター15件)であった。主なる発表内容を紹介する。Moon氏(SuNAM)からは、韓国における近況として、共蒸着法における、これまでのIc<sub>x</sub>L値向上に関する進捗として世界二位の実績とともに磁場中特性向上の成果が紹介された。人工ピン止め点としてGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を導入し磁場中特性向上を図り、30A@77K,3Tを得ている。Puig氏(ICMB)からは、最近欧州で始められた材料開発プロジェクトであるEurotapeに関する紹介がなされた。ここでは、これまで明らかにされていなかった目標値として500m長400A@77K、自己磁場で100·kAmとの線材仕様が紹介された。レベルとしては日米韓の5年前のレベルではあるが、広範囲の多くの研究者が参画して勢いを感じたところである。一方、米国からはLi氏(BNL)がDOEプロジェクトであるALPA-Eの紹介をした。このプロジェクトはこれからの風力発電用のY系超電導線材の開発が主たる目的で、BNLとamsc社及びヒューストン大学とSuperPower社の二つのグループが取り組んでいる。このプロジェクトにおいても日本と同様に第三世代線材をターゲットとして超高特性線材と低コスト化を目的として開発を始めている。

個別発表におけるトピックスとして、まだレベルは高くはないもののロシアでの線材開発が始まっている(Samoylenkov氏、SuperOX)との紹介があった。日本からは、現行のY系機器用線材開発から、機器仕様に対応した磁場中特性向上や低損失線材開発などに関して多くの発表があり、

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

最新の進展が紹介された。

今学会を通じて見えてきたところとして、線材開発レベルとしては日米韓が突出している状況は依然として変わらないが、新規プロジェクトの立ち上げに象徴される通りに欧州に勢いが出てきているところである。一方、米国では更なる高いレベルの線材を目指した国家プロジェクトが継続している。機器関連の研究者も併せて様々な議論を通じて、今後の高温超電導実用化に向けて世界的に継続した材料開発の努力が必要であることを認識したところである。

## 5. システムアプリケーション セッション 報告

### ISTEC-ISS2012 事務局

システムアプリケーションに関しては下記のような件数の発表が行われた。

マグネット/NMR	24
ケーブル	19
FCL	18
再生可能関連	8
SMES	8
バルク	7
磁気分離	6
回転機	5
電流リード	4
フライホイール	4
核融合および加速器	3
変圧器	2
磁気浮上列車	2
医療	1
航空宇宙	1
合計	112

[超電導 Web21 トップページ](#)

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

## 【隔月連載記事】

### 医療用加速器と超電導 (その1)

京都大学  
大学院工学研究科  
教授 雨宮尚之

#### はじめに

超電導 Web21 においては、新富孝和先生が「粒子加速器と超電導」という隔月連載記事を 2008 年に執筆されている。加速器用超電導電磁石の大家である新富先生の記事のあとに加速器の記事を重ねて執筆するのもおこがましいとの思いもあるが、新富先生の記事が高エネルギー物理用の加速器を中心とした話であるのに対し、医療用加速器を対象とし高温超電導の適用可能性と関連づけていくことで、切り口を変えた記事にできればと考えている。

なお、加速器の分野では、超電導線に巻いた電磁石のことを「超電導磁石」と呼ぶことも多いが、高温超電導の分野で「超電導磁石」と言うと超電導バルク磁石を想起させるので、ここでは、「超電導電磁石」あるいは「超電導マグネット」という用語を用いることにする。

初回は、超電導に限定せず、医療の分野でどのように加速器が使われているかについて概観し、二回目以降、超電導の応用が特に期待される粒子線がん治療と加速器、粒子線がん治療にも用いられ超電導電磁石の活躍の場が多い円形加速器の種類と特徴、粒子線がん治療用加速器への低温超電導の適用例、粒子線がん治療用加速器への高温超電導適用に向けた技術開発について解説していく予定である。

#### 1. 医療分野における加速器の利用

加速器には大きく分けて線形加速器と円形加速器があるが、線形加速器を中心に、医療分野は加速器の大きな応用分野であり、世界で一万台以上の加速器が医療分野で用いられているとも言われている。医療分野における加速器の利用は、陽電子放射断層撮影 (Positron Emission Tomography, PET) を除いて、主に、がんの放射線治療に関わるものである。

##### 1.1 がんの放射線治療における加速器の利用

###### (1) 放射線治療

放射線治療は、放射線を患部に照射することにより、がん細胞の DNA を損傷させ、それを細胞死に至らせ、あるいはその増殖を抑える治療法である。がん細胞は正常細胞に比べて、放射線による障害の程度が重く、修復もされにくいことを利用する。放射線治療は、外科手術に比べて、臓器の形態や機能の温存が可能で、高い QOL (Quality of Life) を保ち、低侵襲で身体の負担が小さい治療法である。また、局所療法で副作用も照射された部位に限定されることが、全身療法であり全身に副作用が生じる化学療法 (抗癌剤治療) に比した利点である。日本におけるがん治療は外科治療が圧倒的に多く放射線治療は全体の 24 %程度であるが、米国ではがん患者の 65 %近くが放射線治療を受けている。放射線治療に用いられる放射線には、X 線、陽子線、炭素線、中性子線などがある。これらの放射線を発生するために加速器が広く用いられている。陽子線や炭素線による粒子線治療とそこにおける加速器の役割は別の回に詳しく述べることにし、ここでは、X 線を用いた放射線治療と中性子を用いた放射線治療における加速器の役割について説明する。



# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

## (2) X線を用いた放射線治療と加速器

X線のがん治療への応用の歴史は非常に古いですが、当初はX線管によって発生した低エネルギーのX線を用いていたため体内深部のがん治療は不可能であった。その後、コッククロフトウォルトン型直流加速器やベータトロンといった円形加速器が用いられたが、線量やコンパクトさの点で必ずしも十分なものとは言えなかった。

現在のX線を用いた放射線治療では、電子リニアックと呼ばれる電子を加速する線形加速器を利用する。すなわち、電子銃で打ち出された電子を加速管において加速し、加速された電子をX線ターゲットに当ててX線を発生し、発生したX線を、コリメータを通して患者に照射する。電子銃は、三極管ないし二極管で、カソード（陰極）から熱電子放出された電子をカソード・アノード（陽極）間に印加した電圧で引き出す。加速管は共振空洞（空洞）で、マグネトロンやクライストロンといったマイクロ波電子管で発生したマイクロ波電力によって内部に電磁波（ほとんどの医療用リニアックの場合、定在波）をたて、この電磁波の電場によって電子を加速する。コリメータは、患部の大きさや形状に合わせてX線を照射するためのものである。

現在の放射線治療用リニアックは、電子エネルギー、X線エネルギーともに4–25 MeV程度であり、軽量・小型で回転ガントリーに搭載され、患者に対して同一平面上の多方向からのX線照射が可能となっている。さらに進んで、サイバーナイフと呼ばれる装置では、ロボットアームにリニアックを搭載し、患者に対してあらゆる方向からのX線照射を可能にしている。

電子リニアックを利用した放射線治療装置は世界で8000台近く、国内で800台近く普及しており、加速器の市場としては大きい。しかし、国際リニアコライダー（ILC）のような高エネルギー物理学研究用の大型線形加速器と異なり、医療用の小型線形加速器では、残念ながら超電導の活躍の場はあまり見当たらないようである。

## (3) ホウ素中性子捕捉療法（Boron Neutron Capture Therapy, BNCT）と加速器

ホウ素<sup>10</sup>Bに中性子nが当たると核反応により飛程約10ミクロンのα粒子（<sup>4</sup>He）と飛程約5ミクロンの<sup>7</sup>Li原子核が生成される。ホウ素中性子捕捉療法は、がん細胞に選択的に吸収されやすいホウ素化合物の薬剤（ホウ素化フェニルアラニン（BPA）など）を投与した上で、がん病巣に中性子を照射し、生成されるα線と<sup>7</sup>Li粒子線によってがん細胞の破壊をはかる放射線療法である。なお、ホウ素中性子捕捉療法で用いる熱中性子自体の細胞破壊能力は小さい。α粒子と<sup>7</sup>Liの飛程が極めて短いため、ホウ素化合物の薬剤が吸収された細胞に線量を局在化できることがホウ素中性子捕捉療法の利点である。また、α線と<sup>7</sup>Li粒子線はX線やγ線に比べて生物学的な効果が高いとされ、高い治療効果が期待できる。ホウ素中性子捕捉療法に用いる中性子は、ホウ素との反応断面積の大きい熱中性子（0.5 eV以下）などの低エネルギーの中性子である。

中性子源としては、これまで、研究用原子炉が用いられてきた。原子炉は時間的に安定で比較的大きな中性子束を得られることがメリットである。その一方で、本格的普及を考えた場合、街中の病院などへの設置が困難であることがデメリットである。原子炉に代わる中性子源として加速器を利用した中性子源が考えられる。すなわち、加速器で陽子を加速し、これをターゲットに照射することによって中性子を発生させるものである。例えば、京都大学原子炉実験所では住友重機械工業と共同で、円形加速器の一種であるサイクロトロン（原理については別の回に詳述）で30 MeVに加速した陽子をベリリウム標的に衝突させることにより発生した中性子のエネルギーをBNCTに適したものに調整して照射するシステムの開発を進めている。加速器としては他方式のものも考えられており、いばらき中性子医療研究センターでは、直線型陽子線加速器を設置し、これを用いた中性子ビーム発生を目指している。また、FFAG加速器（原理については別の回に詳述）を用いた陽子貯蔵リング内に設置した内部標的に中性子を発生する方法も提案されている。



# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

---

## (4) 粒子線を用いた放射線治療と加速器

超電導電磁石の応用先としてもっとも魅力的な加速器が粒子線がん治療用の加速器である。これについては、回を改めて詳述する。

### 1.2 陽電子放射断層撮影 (Positron Emission Tomography, PET) における加速器の利用

陽電子放射断層撮影では、陽電子 (Positron) を放出する放射性同位元素 (陽電子放出核種) を含む薬剤を投与し、陽電子放出核種が崩壊し陽電子を放出し、その陽電子が近傍の原子の電子と対消滅するときには発生する光子 ( $\gamma$ 線) を人体の周囲に多数配置された $\gamma$ 線検出器で検出する。この対消滅のときには2個の光子 ( $\gamma$ 線) が反対方向に放出されるので、この光子の対を検出した検出器を結ぶ直線上に陽電子放出核種が存在したことになる。このような情報を集めて処理することにより体内における薬剤の分布を知ることができる。例えば、薬剤として、がんに集まるような性質を持った薬剤を用いれば、がんの位置や大きさやひろがり、さらに、悪性度、進行度等も知ることができる。がんのほか、脳疾患、心疾患の診断にも適用できる。

陽電子放出核種を含む薬剤は、投与直前に加速器により陽子や重陽子を照射することにより製造する。比較的半減期の長いものについては、メーカーで製造したものを供給することも可能である。加速器としては、従来、サイクロトロンが用いられてきたが、近年、軽量でコンパクトな線形加速器も用いられるようになった。

[超電導 Web21 トップページ](#)

# 超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

## 読者の広場

### Q&A

**Q:**「読者からの問合せがあり、最近の He 資源事情を新聞記事やインターネットから集め、纏めてみました。」

**A:** インターネットによれば、ヘリウムは MRI の冷媒、光ファイバーや半導体の製造プロセスガスに使用されており、現代社会において無くてはならない資源です。ところが、ヘリウムは極めて限られた資源であり、空気中の存在比は僅か 0.0005 % のみの希少元素です。このため、窒素や酸素と違って、大気から分離精製することはできません。現在、我々が使用しているヘリウムは天然ガスの副産物として産出した粗ヘリウムガスを分離精製した製品です。ヘリウムを多く含む天然ガスの産出地域は世界的に偏っており、北米、ロシア、中近東がヘリウムの主な生産地です。とりわけ、北米が世界の約 8 割を供給しているのが現状です。

このように希少元素であるため、米国ではヘリウムの大規模な国家備蓄が行われています。市場を睨み、毎年この貯蔵施設からも払い出しが行われています。

2011 年度の世界総供給量は 1 億 8000 万 m<sup>3</sup> であり、その約 8 割に当たる 1 億 4000 万 m<sup>3</sup> が米国の供給量でありました。その内訳は、天然ガスからの抽出によるヘリウムガス生産量 8000 万 m<sup>3</sup>、貯蔵施設からの払い出し量が 6000 万 m<sup>3</sup> でした。日本国内での 2011 年度の供給量 1400 万 m<sup>3</sup> のほぼ全量を米国から輸入しました。我が国では、資源調達の一国集中を緩和するため、中近東やロシアからの供給も視野に入れていきます。

このところ、ヘリウムガスの供給が逼迫しており、遊園地等では風船の販売も中止している状況が見受けられます。この原因は幾つかありますが、近年、新興国とりわけ中国での急激なヘリウム需要が増加して、世界的需給バランスが崩れたのが一因です。さらに、2012 年夏には北米の大規模生産プラント工場が長期間メンテナンスに入り、生産量が落ち込みました。このメンテナンスは 2012 年秋に終了したものの依然フル生産には戻らず供給不足が生じています。これに追い打ちを掛けるように、最近別の北米生産プラントで設備不具合が生じ、生産減少に輪を掛けています。

また、日本国内の需給逼迫の一時的要因としては、米国のヘリウム積み出し港の倉庫組合のストライキによる出航延期があげられます。

年々ヘリウムの需要が増加する状況において、一方では将来の生産に不安があります。これは、近年天然ガスに替わり、シェールガスの採掘が開始されたことと関係します。ヘリウムガスは天然ガスの副産物ですので、天然ガスの採掘が減少すれば、それだけヘリウムの生産量も落ちることになります。これを危惧して、米国備蓄基地からの払い出し量も制限が掛かるように思われます。そこで、米国でもヘリウムのリサイクルを意識するようになってきたようです。



© Fujikogei Co., Ltd 2012

回答者：編集局

[超電導 Web21 トップページ](#)

「Web21 についてのご意見・ご感想、「読者の広場」その他で取り上げて欲しい事項、その他のお問い合わせは、超電導 Web21 編集局メール [web21@istec.or.jp](mailto:web21@istec.or.jp) までお願いします。」