

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

掲載内容（サマリー）：

トピックス：

○連載記事の紹介

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デジタルデバイス

- 超電導マイクロ波・テラヘルツ波デバイスの最近の技術動向
- MKIDs イメージングの最新動向
- ハイパワー超伝導フィルタの最新動向
- 超電導検出器の最新情報と IEC 標準化活動
- 超伝導デュアルバンド帯域通過フィルタの最新動向

- 超電導関連 2014 年 2 月-3 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（12/19-1/20）
- 世界の動き
- 再生可能エネルギーと超電導
- 標準化情報 -IEC/TC90 国際幹事交代ー設立から現在までを振り返って
- 学会・シンポジウム報告-「超伝導エレクトロニクス（SCE）1 月研究会開催」報告
- 隔月連載記事「超電導センサ」（その 1）
- 連載記事「やさしい電力系統のはなし」（第 1 回）
- 読者の広場「超電導磁気浮上式鉄道はどうして日本でだけ発達したのでしょうか？
経緯も含めて知りたいです。」

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

〈発行者〉

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3 丁目 2 番 1 号 KSP A-9

Tel 044-850-1612 Fax044-850-1613

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



この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

トピックス：連載記事の紹介

年も明けはや一ヶ月、年度末に向け皆様お忙しい日々を過ごしておられるかと思います。超電導 Web2.1 では年度末を前に既に新しい連載を開始しておりますので、簡単に紹介いたします。

1 月号から奇数月には「冷却技術について」の連載が始まっています。超電導技術の表舞台にはなかなか出てこないのですが実は心臓部分でもある冷却技術、これを大陽日酸の吉田氏に解説頂きます。冷却技術の原理や歴史、各種冷凍機の特徴や最新動向など、超電導機器実現に必須の技術について解説頂きます。

2 月号から偶数月には近年飛躍的な進展が見られた「超電導センサについて」の解説記事が始まります。超電導センサは種類も多く、災害対策から資源探査、医療分野など幅広い分野にまたがりますので、それぞれのご専門の方に解説をお願いしています。

今年度はこれに加えて当所の渡辺に「電力系統の解説」が始まります。長らく一般の人には意識されてこなかった電力系統ですが、3.11 以降かなり意識されるようになったと思います。しかし巨大で全体像が見えにくいのが実態だと思います。これを出来るだけ平易に解説してもらいます。その全体像を次に紹介いたします。

「やさしい電力系統のはなし」の連載開始について -----

今月から、「やさしい電力系統のはなし」の連載を開始します。基本的には毎月掲載で約 1 年をかけて、読者の皆さまに少しでも電力系統を理解していただくこと、それにより超電導技術の役割への理解が進むことを目標と致します。

高校生程度の学力を有する方を対象に解説しますので、技術的な厳密性はやや犠牲にする場合がありますが、別途質問等も受けながら理解を深めていただければと思います。

各回の解説スケジュールは以下を想定しておりますが、適宜、ご意見等いただきながら柔軟に対応する予定です。

第 1 回、2 回

○電気のイメージを持つ

- ・電気の特性 : 電圧、電流、電力、電力量
- ・電気の送り方 : 交流 (→周波数、有効電力、無効電力) → 3 相交流) と直流
- ・プールの性質
- ・ロスの話 : エネルギーロス、送電ロスー直流、交流、電圧との関連

第 3 回

○電力系統設備の概要 : 発電設備、送電設備、配電設備、需要家設備

○電力系統の個々の設備のはなし : 発電設備

- ・交流発電機、直流発電機、周波数可変型発電機
- ・エネルギー源別の発電機の特徴、経済運用の基礎
- ・分散電源と大容量電源の特徴

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

第 4 回

○電力系統の個々の設備のはなし：送電設備

- ・変圧器、送電線（架空送電線、地中送電線）、変電所、直流変換設備
- ・電圧、容量、機器設計（保安の考え方）、送電ロスとの関連

第 5 回

○電力系統の個々の設備のはなし：配電設備

- ・配電線（架空配電線、地中配電線）、変圧器、スマートグリッド
- ・電圧、容量、機器設計（保安の考え方）
- ・需要家設備（HEMS、BEMS にも触れる）

第 6 回

○需要家が使う電気品質と電力系統の関係

- ・電圧維持：変圧器タップ、調相設備、FACTS（SVC、SVG）、安定化装置
- ・周波数維持：発電機制御、蓄電設備、FACTS、系統安定化装置、需要家制御
- ・信頼度維持：N-1 基準での系統設備設計、供給力不足日数に対応した電源設計、重大事故対応を考えた系統設備設計、需要家供給停止設計「系統崩壊」と回避策

第 7 回

○電力設備をこわさない or こわれにくくするために → 需要家から見れば信頼度問題

- ・高電圧：機器設計への反映、過電圧保護システム、避雷器
- ・過電流：機器設計への反映、過電流保護システム、電源や負荷の遮断システム
- ・事故電流：機器設計への反映、事故電流遮断システム、系統運用変更システム
- ・不平衡、脱調保護、異常現象対応（太陽風）→ 前記システムに付加（超電導：事故電流や過電流の限流効果等）

第 8 回

○電力系統を理解するための演習 → 電力系統を模擬的に計画してみる

- ・負荷が小さい系統 → 電源台数、送電線数（ループ、放射状を含む）
- ・負荷が大きい系統 → 電源台数、連系の可否、架空線、地中線
- ・経済性（設備産業での総括原価方式の合理性にもさりげなく触れる）（超電導：導入の効果は？）

第 9 回

○電力系統と自由化

- ・需要家が発電を選ぶとは？
- ・同時同量とは？
- ・アンシラリーサービスとは？ 所要コストを決めるには。
- ・発送分離と発送一体は何が違う

○海外との電力連系

（編集局）

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デジタルデバイス

「超電導マイクロ波・テラヘルツ波デバイスの最近の技術動向」

山形大学
大学院理工学研究科
教授 大嶋重利

超電導 Web2.1 では毎年 2 月に「超電導マイクロ波・テラヘルツ波デバイスの最新の技術動向」に関する特集号を出している。今回も、産総研の大久保氏に「超電導検出器の最新状況と IEC 標準化活動」、山形大学の齊藤氏に「ハイパワー超伝導フィルタの最新動向」、名古屋工業大学の有吉氏に「MKIDs イメージングの最新動向」、山梨大学の關谷氏に「超伝導デュアルバンド帯域通過フィルタの最新動向」の原稿を依頼し、特集号を組んだ。私は、本特集号の総論を依頼されているので、最近のマイクロ波・テラヘルツ波・X 線の超伝導デバイスの現状について述べ、最後に、現在我々が開発をしている NMR 用超伝導プローブについて、紹介したい。

超伝導高周波デバイスは主に次の 3 つに分類される。

- ① 低表面抵抗を利用したデバイス
- ② 超伝導準粒子の生成を利用したデバイス
- ③ 超伝導遷移時の抵抗変化を利用したデバイス

①の現象を利用したデバイスの代表的なものは、超伝導フィルタであろう。米国の STI 社では¹⁾、ご存じのように、SuperLink という商品名で携帯電話の基地局用超伝導フィルタシステムを市販している。それは高速通信が可能な LTE (Long Term Evolution) 対応 (3.9 G) であると宣伝している。また、中国では超伝導フィルタシステムの実用化が更に進み、現在では 300 を超えるシステムが稼働していると清華大学の Cao 教授が EASSE2013 で発表している²⁾。最近の動向についてメールで尋ねたところ「4G 対応用超伝導フィルタシステムの開発ファンドが政府から下りたので、近々その超伝導フィルタシステム開発をスタートする」という返事が戻ってきた。更に、最近、受信用超伝導フィルタの開発とは別に、ハイパワーフィルタ^{3), 4)}や 2 帯域通過フィルタ^{5), 6)}の開発が日本や中国で積極的に行われている。まだどの分野に応用するかということは未定ではあるが、優れた特性を持つフィルタができつつあるので、今後の進展を期待したい。②の現象を利用したデバイスでは MKIDs の研究が精力的に行われている^{7), 8)}。テラヘルツ波のセンシングデバイスの本命と目され、いろいろな国、機関で研究開発されている。4.2 K 冷凍機で動作するイメージングシステムが完成すれば、民生用として実用化できるかもしれない。③のデバイスの代表的なものは TES である。既に SEM 用検出器として実用化されている^{9), 10)}。以上の 3 点に関しては、それぞれの以下の項目記事を参考になさってください。

NMR の感度を上げる手段は

- a) 磁場強度を上げる (測定周波数を上げる)
- b) 検出ローブ感度を上げる (検出コイルの Q 値を大きくする)

の 2 つが有力である。既に 900 MHz を超える NMR システムが開発され、現在 1.03 GHz の NMR の開発が進められている。しかしこの方法では、印加する静磁場をどんどん高くする必要があり、1.03 GHz では、24.2 T の高磁場が必要である。そろそろ限界に近づいているのではないかな。もう

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

一つの手法としては、検出プローブの感度を向上させることである。NMR の S/N は、通常の LCR 共振器を用いたシステムでは、次式で与えられる¹¹⁾。ここで、

$$S/N = KM_0 \left[\frac{\mu_0 2\pi f V_s}{8k_B \delta f} \right]^{0.5} \left[\frac{\eta Q_L}{T_{eff} + T_r} \right]^{0.5}$$

$K, M_0, \mu_0, f_0, V_s, k_B, \delta f, \eta, Q_L, T_{eff}, T_r$ はそれぞれ、 B_1 磁場の均一性度由来する係数、スピンの密度、真空の透磁率、共振周波数、試料体積、ボルツマン定数、NMR 信号の半値幅、検出コイルのフィリングファクター、検出コイルの負荷 Q_L 、検出コイルと試料に由来する等価雑音温度、受信機の熱雑音温度である。このうち、感度に大きく影響するのは、検出コイルの Q_L である。図 1 にコイルの Q_L と NMR の S/N の関係を示す。ここでは、共振周波数を 700 MHz、試料の損失は十分小さいとしている。

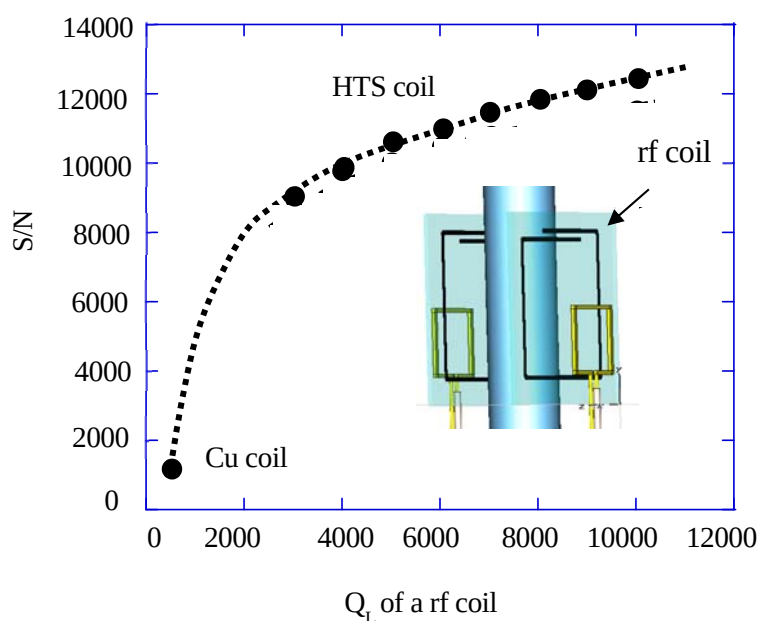


図 1 NMR 検出プローブの Q_L と S/N の関係

これより、超伝導プローブを用いると、MR の S/N は飛躍的によくなることがわかる。既に、フロリダ大学のグループでは、1.5 mm 試料管用の 600 MHz NMR HTS プローブを開発している^{12), 13)}。現在我々は、JSTS-イノベプロジェクトで 5 mm 管用の 700 MHz NMR HTS プローブを開発し、NMR の高感度化を目指している。

参考文献:

1. STI 社のホームページ <http://www.suptech.com>
2. 7th East Asia Symposium on Superconductive Electronics; Taipei Taiwan (2013).

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

3. Improving Power-Handling Capability of 4-Pole HTS Filters by Expanding Line Width of Resonator 2 with Narrow Slits. Y. Tanaka et al. IEEE TRANS. APPLIED SUPERCON. 23 (2013)
4. Power handling capability of transmit filters using stripline structure. N. Sekiya, et al. PHYSICA C. 471 (2011) 1217-1220
5. A Narrow Band Dual Mode HTS Patch Filter With High Power Capability. Wang, Yuehui et al.; IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS 19 (2009) 449-451
6. Dual-Band Superconducting Bandpass Filter Using Stub-Loaded Resonators With Controllable Coupling and Feeding Structures Heng, Yong et al. IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS 23 (2013) 400-402.
7. Fabrication of MKIDs for the MicroSpec Spectrometer. A. Patel. et. al. IEEE. TRANS. APPLIED SUPERCON 23 (2013)
8. NbN-Based Microwave Kinetic Inductance Detector with a Rewound Spiral Resonator for Broadband Terahertz Detection S. et al. APPLIED PHYSICS EXPRESS 6 (2013) 064103
9. Development of Hard X-ray and Gamma-Ray Spectrometer Using Superconducting Transition Edge Sensor. S. Hatakeyama, et al. IEEE TRANS. APPLIED SUPERCON. 23 (2013) 2100804
10. Eight-Channel TES Microcalorimeter System for Detector and Source Development M. Croce, et al. IEEE TRANS. APPLIED SUPERCON. 23 (2013) 1602605
11. MgB₂ および Bi₂Sr₂CaCu₂O_x を用いた超伝導 NMR プローブコイルに関する研究.
山本浩之 博士論文 (H21 年度群馬大学)
12. Development of a C-13-optimized 1.5-mm high temperature superconducting NMR probe. V. Ramaswamy, et al. J. MAGNETIC RESONANCE 235 (2013) 58-65.
13. Design, construction, and validation of a 1-mm triple-resonance high-temperature-superconducting probe for NMR. W. Brey et al. J. Magnetic Resonance. 179 (2006) 290-293.

超電導 Web2.1 トップページ

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デジタルデバイス

「MKIDs イメージングの最新動向」

名古屋工業大学 有吉 誠一郎、中島健介

山形大学 齊藤 敦

埼玉大学 田井野 徹

理化学研究所 大谷知行

マイクロ波力学インダクタンス検出器 (Microwave Kinetic Inductance Detector、以下 MKID と称す。) とは約 10 年前に米カリフォルニア工科大学で考案された歴史的に浅い新種の光検出器であり [1\)](#)、超伝導ギャップエネルギーよりも大きなエネルギーの光子入射によりクーパー対が解離されるという現象を利用したものである (図 1)。具体的には、クーパー対解離によって生じる準粒子数密度の変化により、受光部 (同図はテラヘルツ光アンテナの例) の下流に位置するマイクロ波回路の共振周波数 (すなわち、超伝導体特有の力学インダクタンス成分) が変化することを利用して、信号線を透過するマイクロ波の振幅または位相の変化を測定するものである [2\)](#)。

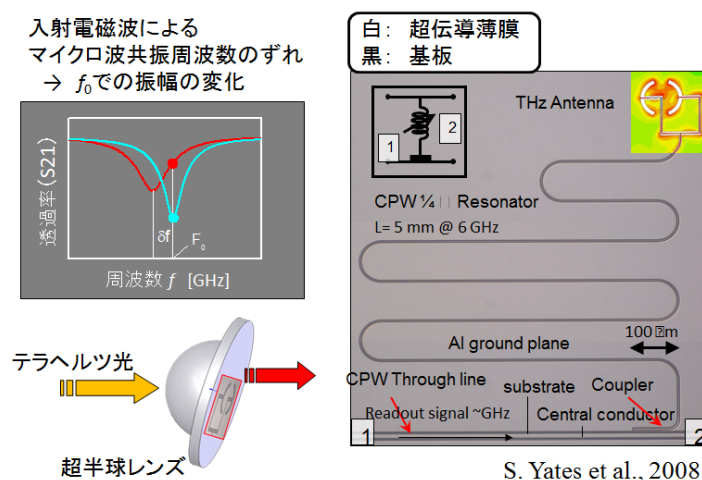


図 1 MKID の動作原理

近年諸外国では 0.1 K 動作の MKIDs 開発が精力的に進められており [3\)](#)、現在すでに 100 画素クラスの 2 次元アレイを用いてミリ波帯での天文試験観測も始められている [4\)](#)。また、国内でも最近、高エネルギー加速器研究機構や国立天文台などの研究グループによって宇宙マイクロ波背景放射偏光観測への応用を目指した MKID アレイの開発が進められている [5\)](#)。しかし、これまでに報告された MKIDs は究極感度が要求される「天文観測応用」に特化した研究開発が主流であり、極めて低い超伝導転移温度をもつ主にアルミニウム (1.2 K) で作製した MKIDs を希釈冷凍機や断熱消磁冷凍機といった 0.1 K クラスの極低温冷凍機で冷却・運用することを前提としている。さらに、地上天文観測の場合、大気背景雑音を抑えるために検出器の狭帯域化が必須であることから、広帯域の汎用計測器として誰もがその性能を簡便に利用できる状況にはない。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

このような状況の中、筆者らの研究グループではテラヘルツ帯でのイメージング分光計測の実現を目的として、(独) 科学技術振興機構の支援のもと、産業界への普及を念頭に置いた ^4He 冷凍機動作（最低到達温度 $\sim 3\text{ K}$ ）かつ広帯域特性を併せもつ MKID アレイの設計から作製・性能評価に至る一連の研究開発を進めている⁶⁾⁻⁸⁾。図 2 に一辺 10 mm 角の R 面サファイア基板上に作製した窒化ニオブ製 MKID の 2 次元アレイを示す。当面の開発目標は、検出器 1 画素の性能として周波数帯域 1 $\sim$ 5 THz 以上、応答時間 100 μsec 以下、雑音等価電力は $10^{-14}\text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度である。また、2 次元マッピング計測への応用を考慮し、検出器のピクセル数は測定サンプルの中心とその外周を含めた 5 $\times$ 5 画素以上に設定している。さらに、将来の一般ユーザーが低温を意識することなく簡便に扱えるシステム構築のために、従来の冷媒（液体ヘリウム）を用いた煩雑な冷却系ではなく、全自動冷却の ^4He 冷凍機上での安定動作を目指している。これにより、計測時間の飛躍的な短縮や分厚いサンプルへの対応、スペクトル情報とイメージ情報の融合といった産業界からの多種多様な計測対象や目的に応えることが可能になると期待される。

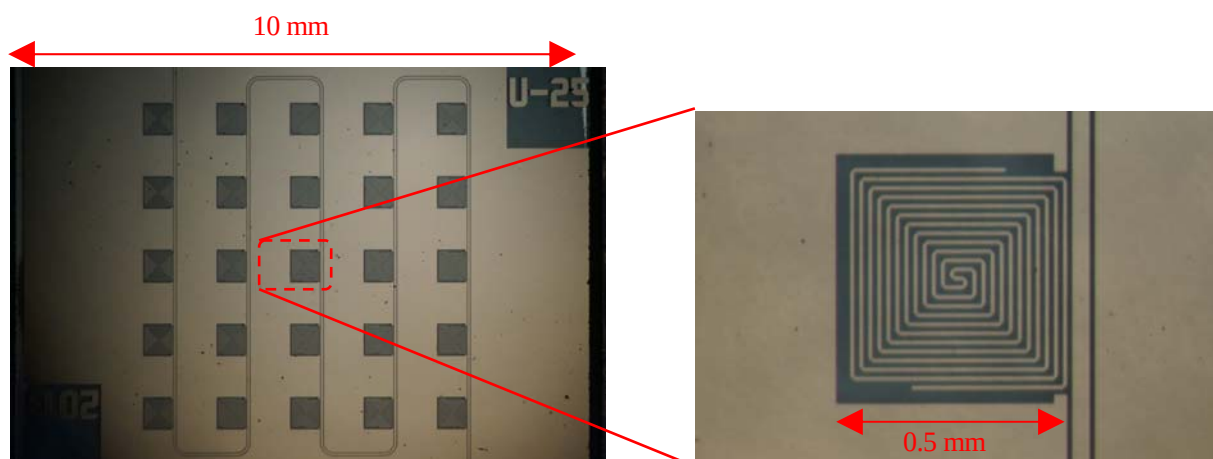


図 2 サファイア基板上に作製した NbN 製 MKID アレイ（左）と 1 画素の拡大写真（右）

引用文献：

1. P. K. Day *et al.*, "A broadband superconducting detector suitable for use in large arrays", *Nature*, 425 817-821 (2003).
2. J. Baselmans *et al.*, "Noise and Sensitivity of Aluminum Kinetic Inductance Detectors for Sub-mm Astronomy", *J. Low Temp. Phys.* 151 524-529 (2008).
3. A. Baryshev *et al.*, "Progress in Antenna Coupled Kinetic Inductance Detectors", *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, 1 112-123 (2011).
4. A. Monfardini *et al.*, "A Dual-band Millimeter-wave Kinetic Inductance Camera for the IRAM 30 m Telescope", *Astrophys. J. Suppl. Series* 194:24 (2011).
5. K. Hattori *et al.*, "Novel frequency-domain multiplexing MKID readout for the LiteBIRD satellite", *J. Low Temp. Phys.* 167, 671-677 (2012).
6. 有吉 誠一郎 他, "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", 超電導 Web21, 2 月号, 3-4 (2013).
7. K. Hayashi *et al.*, "Microwave characteristics of microwave kinetic inductance detectors using

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

- rewound spiral resonators array”, Physics Procedia, 45, 213-216 (2013).
8. S. Ariyoshi *et al.*, “NbN-based Microwave Kinetic Inductance Detector with a Rewind Spiral Resonator for Broadband Terahertz Detection”, Appl. Phys. Express, 6, 064103_1-3 (2013).

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デジタルデバイス

「ハイパワー超伝導フィルタの最新動向」

山形大学大学院
理工学研究科
准教授 齊藤 敦

超伝導フィルタは通過帯域における低損失性と遮断領域での急峻なスカート特性を両立できる。この理由はマイクロ波領域における超伝導体の損失が通常の金属に比べて数桁低いためである。^{1), 2)}このような利点に注目し多くの超伝導フィルタの研究が成され、移動体通信基地局用受信用フィルタは米国・中国で既に実用化に至った。^{3), 4)}また、超伝導を応用した気象レーダー用のハイブリッドフィルタも実用化されている。⁵⁾移動体通信基地局用送信用フィルタは受信用フィルタ以上の有効性が期待されているが、実用レベルで必要とされる平均 10 W の許容電力を達成した例は、米国 SII 社⁶⁾、東芝⁷⁾、山形大学⁸⁾、山梨大学⁹⁾等の数例であり、瞬間的に必要とされる 100 W を達成した報告はない。ここでは、ハイパワー超伝導フィルタの最新動向として、薄膜分割型共振器の研究と超伝導単結晶バルクを用いたハイパワーフィルタの研究について紹介する。

① 3次元マトリクス共振器フィルタ

一般的な薄膜マイクロストリップ線路を用いた共振器では、表面（幅方向の端と上下面）に高周波電流が集中し、超伝導性の破壊や歪が生じる。そこで、共振器パターンを幅方向に分割するスリットを導入することや¹⁰⁾、共振器を膜厚方向に分割する積層膜共振器の研究がなされ¹¹⁾、耐電力特性の向上を報告している。さらにこれらの研究は、幅方向と膜厚方向を同時に分割した3次元マトリクス共振器フィルタへ進展している。図1は3次元マトリクス共振器の概略図であり、膜厚方向と幅方向への電流分散が可能になる。これまでの NbN/AlN/NbN 三層膜を用いた3段フィルタの実験結果より、通常の共振器（非分割）フィルタに比べて 3.1 dB の耐電力向上が確認されている。

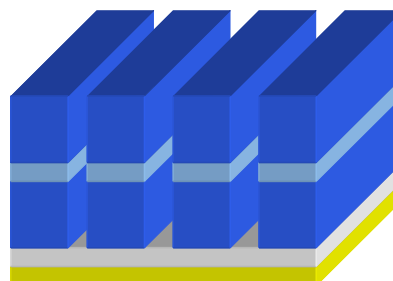


図 1.3 次元マトリクス共振器の概略図

② 超伝導単結晶バルク共振器フィルタ

本研究ではディスク型 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 単結晶バルクをセラミクス基板に導入した独立型共振器構造（図2）を採用し、チューニング・トリミング用誘電体ロッドによる周波数特性改善機構を搭載した3段フィルタの設計・試作・評価を行っている。周波数特性の設計目標は、中心周波数 5 ± 0.1 GHz、帯域幅 100 ± 5 MHz、挿入損失 0.2 dB 以下である。また、シミュレーションには3次元電磁界シミュレーター

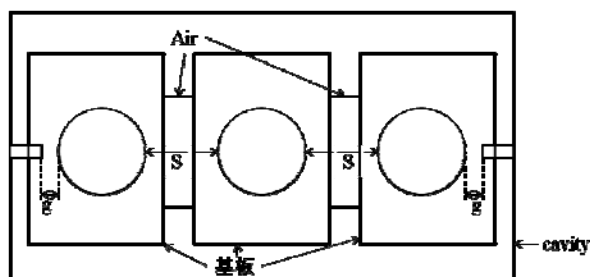


図 2.3 段ディスク型バルク共振器フィルタのモデル

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

MW-Studio を用いている。図 3 に作製したフィルタパッケージの外観写真を示す。図 4 に 3 段バルクフィルタの典型的な周波数特性を示す。作製したフィルタは帯域内近傍に不要な共振が無く、良好な特性を得ている。また、図 5 に同フィルタの耐電力特性を示す。最高で 41.7 W の耐電力特性を得ることができた。このような耐電力特性が得られたことは、材料の特性のみならず超伝導体の厚さを主因とする共振器の構造による最大電流密度の低減によるものと考えている。今後、さらなる多段化とその電流密度解析により、100 W を超える超伝導フィルタの実現を目指している。

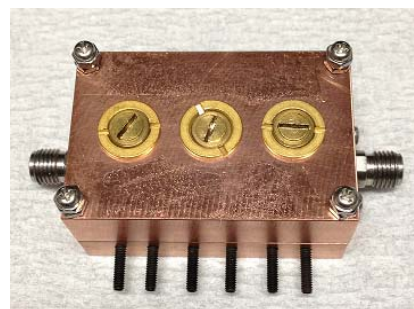


図 3 フィルタパッケージの外観写真

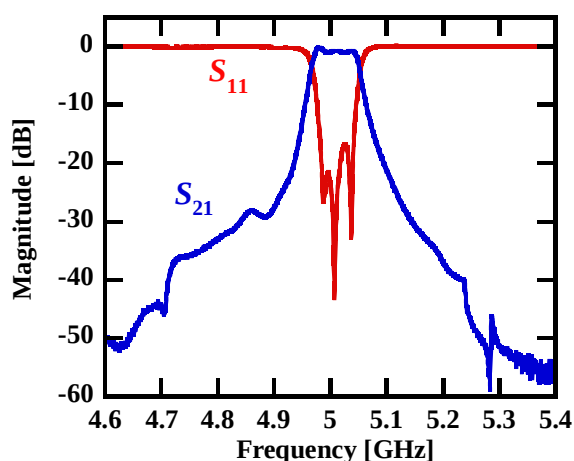


図 4. 3 段バルク共振器フィルタの周波数特性

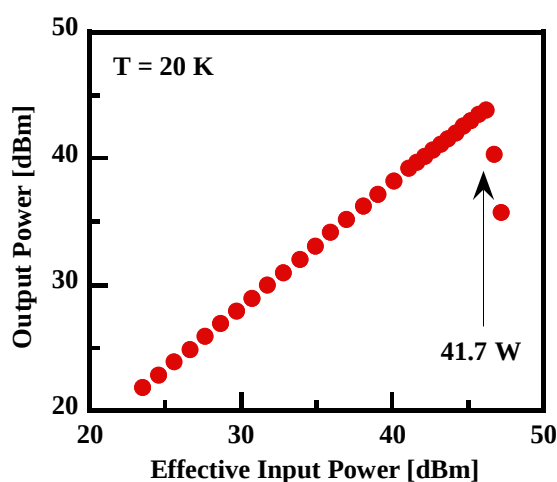


図 5. 3 段バルク共振器フィルタの耐電力特性

参考文献：

- 1) M. J. Lancaster, Passive Microwave Device Applications of High-Temperature Superconductors, Cambridge University Press, Chapter 1.
- 2) A. Saito, *et al.*, Physica C, 426-431, 2, 1606 (2005).
- 3) http://www.suptech.com/superlink_850.php
- 4) Z. S. YIN *et al.*, Int. J. Mod. Phys. B 19, 419 (2005).
- 5) http://www.toshiba.co.jp/rdc/rd/award/1304_01.htm
- 6) S. K. Remillard, *et al.*, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 14, 5, 234 (2004).
- 7) 加屋野博幸, 等, 電子情報通信学会論文誌. C, エレクトロニクス J90-C3, 188 (2007).
- 8) A. Saito, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., 19, 1, 889 (2009).
- 9) N. Sekiya, *et al.*, Physics Procedia, 27, 328 (2012).
- 10) S. Takeuchi, *et al.*, Physica C468, 1954 (2008).
- 11) Y. Endo, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., 21, 3, 559 (2011).

超電導 Web2.1 トップページ

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デジタルデバイス

「超電導検出器の最新状況と IEC 標準化活動 - 超伝導センサと検出器の標準化提案(通則)

国際投票開始！」

独立行政法人 産業技術総合研究所
上席イノベーションコーディネータ
大久保 雅隆

超伝導検出器(「検出器」と「センサ」は同義語であるが、その使い方は異なるため、IEC 標準では 2 つの用語を併記する案を考えている)は、他の技術では不可能な計測を可能にできた。SQUID は、磁気センサとして古くから他の技術の追従を許さない微小磁場検出感度を達成し、心磁計、脳磁計、異物検査、鉱物探査などに用いられてきた。最近地震予知でも注目されている。近年、SQUID の感度を超える光ポンピング原子磁気センサやスピントロニクスを用いた超伝導に寄らないものが現れてきているが、実用化されている計測システムとしては、SQUID が有利である。Superconductor-Insulator-Superconductor (SIS)ミキサーは、ヘテロダイン検波素子として古くから電波天文学等で使われている。IEC 関係者の意見では、名称として Superconducting Tunnel Junction (STJ)ミキサーの方が相応しいといった意見も出ている。以上はコヒーレント検出に分類できる超伝導検出器である¹⁾。

これら以外に、30 年程前から、当初は太陽ニュートリノの検出、暗黒物質の検出といったサイエンスのために、いわゆる直接検出と言われるタイプの超伝導検出器が登場してきた¹⁾。このタイプの検出器開発は、Int. Workshop on Low Temp. Detectors (LTD)という国際会議の歴史と一致する。直接検出器の種類や性能は、ref. 1 や 2 にまとめられている。直接検出では、光子 1 個といった量子の吸収によるクーパー対破壊を測定し、光子エネルギーのエネルギー分散分光を行うことができる。このタイプには、STJ や Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID)がある。量子エネルギーにより超伝導が壊れることを検出原理とする以外に、光子 1 個の吸収による吸収体の温度上昇や帯磁率の変化を超伝導センサで測定するタイプがあり、これらも直接検出に分類できる。このタイプには、Transition Edge Sensor (TES)や Metallic Magnetic Calorimeter (MMC)がある。これらの検出器は、電波望遠鏡や、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)検出といった天文学以外に、放射光利用材料分析、質量分析、SEM, TEM による元素分析と言った、研究開発などで使用される分析機器分野で実用化が進んでいる。直接検出では、有感面積を大きくするためとイメージングのために多素子のアレイ化が進んでいる。STJ では、高計数率を活かすために 1 素子に 1 つの読み出し回路を準備する並列読み出しが行われている。STJ100 ピクセルにて 500 k cps の高光子計数率に対応しており、放射光用に適している³⁾。TES では、時間分割マルチプレクス(周波数分割やコード分割マルチプレクスもある)により、10,000 ピクセル規模の THz イメージャーが完成している⁴⁾。MKID では、現在 2024 ピクセルの報告があるが、この読み出しに必要な配線は、マイクロ波の入力と出力ペアが 2 系統の計 4 本のみである。さらなる大規模アレイ化が期待されている⁵⁾。

さらに、近年、数 nm から数 10 nm 厚の超伝導薄膜を 1 μm 以下の幅のストリップにした非常に単純な構造の Superconducting Strip Detector (SSD)が出てきた。このタイプは、当初、通信波長帯の単一光子検出に使われた。量子情報通信において、高い量子効率と高計数率が期待されている。名称として、半導体検出器で使われていた Single Photon Detector の前に一語置き、Superconducting Single Photon Detector (SSPD)が用いられてきた。しかし、超伝導検出器は何れも単一光子検出が可能であるため、特定の超伝導検出器に SSPD という名称と使うのは適切でないとの意見が、IEC

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

関係者やコミュニティーからあり、現在の一案は前述の SSD である。光子検出の場合には、推奨される名称は、Superconducting Strip Photon Detector (SSPD) となり、略称は当初の SSPD と同じになる。SSD は、通信波長帯の単一光子以外にも、電子、イオン、分子などの検出が実現されており、分析機器への応用も期待されている⁶⁾。超伝導検出器は、多くの種類があり、また今後とも新しいタイプの出現が予想される。そのときの統一命名法の案は、構造（あるいは機能）+検出対象+検出器（あるいは、センサー、ミキサ）である。

2010 年のシアトル IEC 会議にて、超伝導センサと検出器の標準化について検討する臨時グループ(ad hoc group 4) の設置を日本から提案して承認された。各国から 11 名の専門家が参加して、3 年間活動してきた。その成果として、2013 年末に通則 (Generic specification: 検出器分類、名称、回路シンボルなど) に関する標準化案 New Working Item Proposal (NWIP) を仕上げた。その NWIP は (コヒーレントと直接検出の両方を対象にする)、2014 年 1 月 10 日から国際投票に掛けられている。投票期限は、3 ヶ月後の 4 月 11 日であり、IEC TC90 の P メンバー各国の賛同が得られることが期待される。この NWIP の国際承認後には、IEEE と合同で新 WG を立ち上げる予定である。通則案に記述した用語や電気回路シンボル⁷⁾の標準化は、他の WG との協力により推進し、その後、各タイプの検出器に関する詳しい仕様等の標準、性能試験法の標準化を行っていく予定である。



1. M. Ohkubo, "Introduction to IEC standardization for superconducting sensors and detectors," Prog. Supercond. 14, 106 (2012);
http://ocean.kisti.re.kr/is/mv/showPDF_ocean.jsp?method=download&pYear=2012&koi=KISTI1.1003%2FJNL.JAKO201209857785508&sp=106&CN1=JAKO201209857785508&poid=kss1&kojic=CJDHBL&sVnc=v14n2&sFree
2. B. Sadoulet, "Recent progress with low temperature particle detectors," AIP Conf. Proc. 1185, 785 (2009); <http://dx.doi.org/10.1063/1.3292455>
3. 志岐成友, 浮辺雅宏, 松林信行, 小池正記, 北島義典, 大久保雅隆, "超伝導検出器で可能になる微量軽元素の蛍光収量 X 線吸収分光," PF NEWS 31(3), 13 (2013);
http://pfwww.kek.jp/publications/pfnews/31_3/saikin2.pdf
4. W. Holland, et al., "SCUBA-2: a 10,000-pixel submillimeter camera for the James Clerk Maxwell Telescope," Proc. SPIE 6275, 62751E (2006); <http://dx.doi.org/10.1117/12.671186>
5. B. Mazin, et al., "ARCONS: A 2024 Pixel Optical through Near-IR Cryogenic Imaging Spectrophotometer," Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2013;
<http://www.sciencedaily.com/releases/2013/11/131104162710.htm>
6. N. Zen, et al., "Ion-induced dynamical change of supercurrent flow in superconducting strip ion detectors with parallel configuration," Appl. Phys. Lett. 104, 012601 (2014), and references therein; <http://dx.doi.org/10.1063/1.4861225>

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

7. “Increasing clarity for Japanese users, IEC databases for graphical symbols now available also in Japanese,” IEC 60617; http://www.iec.ch/etech/2013/etech_0113/store-2.htm?mlref=etech

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導マイクロ波・テラヘルツ波デジタルデバイス

「超伝導デュアルバンド帯域通過フィルタの最新動向」

山梨大学大学院
医学工学総合研究部
關谷尚人

近年、スマートフォンやタブレットの急速な発展により、映像などのデータ通信が爆発的に増大していることから、次世代移動体通信として光ファイバ通信並みの高速・大容量通信の実現が期待され、それと同時に周波数資源の有効利用が急務となっている。

高速・大容量通信を実現する一つの方法としてキャリア・アグリゲーション技術が提案されており、その要素技術として二つの周波数帯域を同時に通過させるデュアルバンド帯域通過フィルタ (DBPF) が注目されている。特に高温超伝導体 (HTS) を用いた DBPF は低損失で急峻な遮断特性を実現できることから高速・大容量通信と周波数資源の有効利用を同時に実現できる唯一の技術として将来の移動体通信を担う候補として期待される。

DBPF の構成方法は次の二つの場合で異なる。①同じ周波数帯の連続するキャリアで通信する場合、②異なる周波数帯のキャリアで通信する場合の二つがある¹⁾。①の場合、広い帯域を有する帯域通過フィルタ (BPF) の帯域内にノッチを設けて DBPF を実現する設計方法が提案されている²⁾。②の場合 DBPF を実現する方法としてデュアルバンド共振器を用いる方法が提案されている。デュアルバンド共振器の構成には基本共振と高次共振を用いる方法や偶・奇モードを用いる方法などが報告されている^{3), 4)}。日本では、②の DBPF に関して NTT ドコモの研究グループが 2008 年ころから現在まで HTS-DBPF の先駆的な研究を行っている⁴⁾。②の DBPF は図 1 に示すように一つのデュアルバンド共振器で二つの帯域 (Band A, Band B) の BPF を実現する。しかし、従来の単一帯域通過フィルタと同様の方法では二つの帯域の共振周波数や共振器間の結合係数 (K_{ij} , M_{ij}) などの設計パラメータを個別に調整することが難しい。そのため、急峻な遮断特性を得るために多段化設計が求められる HTS-DBPF の設計は段数の増加とともに調整する各設計パラメータの数が増加するため困難を極める。

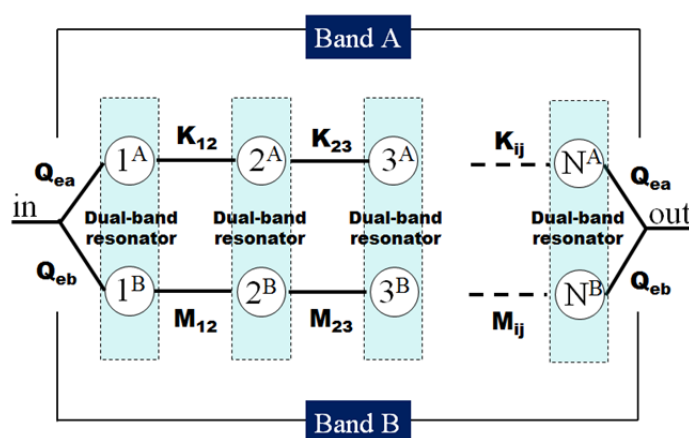


図 1 デュアルバンド共振器を用いた DBPF の結合構造

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

この問題に対し、山梨大学では独自の共振器構造と結合係数調整方法を開発し⁵⁾、3.5/5.0 GHz 帯 5 段 HTS-DBPF を開発した⁶⁾。図 2 は作製した 5 段 HTS-DBPF の写真である。図 3 に測定結果を示す。図 3 から 3.5 GHz 帯と 5.0 GHz 帯に良好な周波数特性を示す BPF が二つ実現できることが確認された。

今後は DBPF では報告例がない 8 段以上の多段化設計と 3 帯域を有するトリバンド帯域通過フィルタについて取り組む予定である。

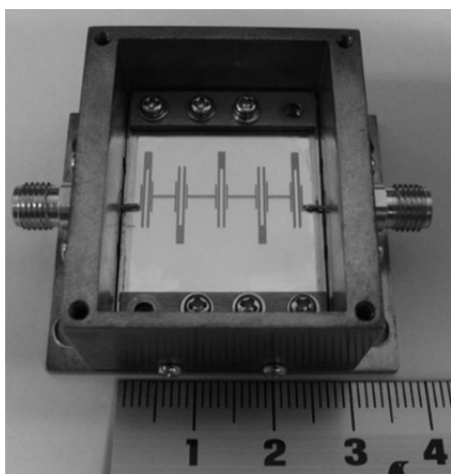


図 2 作製した DBPF

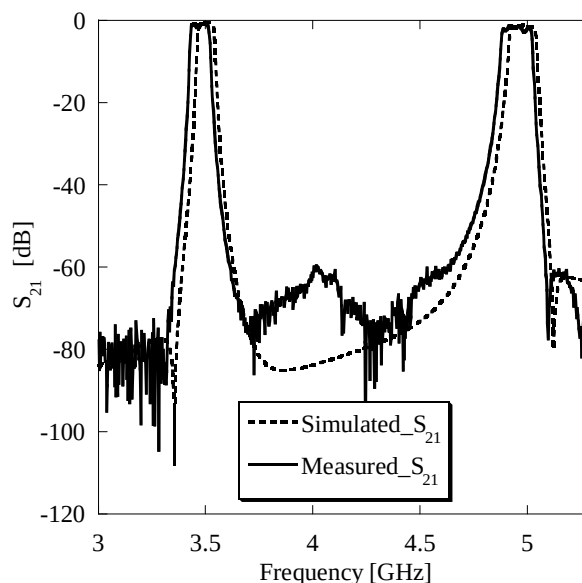


図 3 シミュレーション及び測定した 5 段 DBPF の周波数特性

参考文献：

- 1) 檜橋 “キャリア・アグリゲーションと複数帯域同時通過フィルタ,” 超伝導 Web21, 2012 年 2 月号.
- 2) A. M. Abu hudrouss *et al.*, “Triple-band HTS filter using dual spiral resonators with capacitive-loading,” IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol. 18, No. 3, pp. 1728-1732, 2008.
- 3) Li-Min Wang *et al.*, “Quarter-Wavelength Stepped-Impedance YBCO Resonators for Miniaturized Dual-Band High-Tc Superconducting Filters,” IEEE Transaction on Applied Superconductivity, vol. 19, No. 3, pp. 895-898, 2009.
- 4) 佐藤他 “4 段 CPW デュアルバンドフィルタ,” 信学技報 MW08-36, June 2008.
- 5) 關谷他 “スタブ装荷ヘアピン共振器を用いた超伝導デュアルバンド帯域通過フィルタの検討,” 電子情報通信学会総合大会, C-2-98, 2013.
- 6) T. Sugiyama *et al.*, “Five-pole HTS dual-band bandpass filters using stub-loaded hair-pin resonators,” 26th International Symposium on Superconductivity (ISS 2013), FDP-29, 2013.

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

超電導関連 ‘14/2 月－3 月の催し物案内

2/03

2013 年度第 3 回関西支部講演会

大阪市立大学文化交流センター

http://www.csj.or.jp/kansai/2013/3rd_0203.pdf

3/11-12

Industrieverband Supraleitung – iv supra

Beethovenhalle, Bonn

<http://www.ivsupra.de/>

3/17-20

応用物理学会春季学術講演会

青山学院大学相模原キャンパス

<http://www.jsap.or.jp/index.html>

3/27-30

物理学会

東海大学湘南キャンパス

<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/future.html>

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

新聞ヘッドライン (12/20-1/19)

- 新年号第 1 部 エレクトロニクス 超電導 1/01 化学工業日報
- 特集 今ニッポン流 英知結集 革新生む 1/01 日本経済新聞 朝刊
- 核融合発電実現へ 新実験炉の建設本格化 原子力機構 中核部品も開発 1/06 日経産業新
- 岡山大、半導体・超電導材料に挑む 異なる分野の専門家連携 1/09 日経産業新聞
- 日立造船、風力発電で水素製造、経産省の事業に採択。 1/16 日経産業新聞
- 〈解〉超電導磁石 1/20 大阪読売新聞

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

世界の動き (2013 年 11 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



★ 今月のニュース発信地

▶エレクトロニクス

スーパーSQUID

Weizmann Institute of Science (2013 年 11 月 25 日)

ワイツマン科学研究所の科学者たちは、磁場測定での感度並びに解像度において世界記録を破る世界最小 SQUID (超電導量子干渉素子) を製作した。このナノサイズ SQUID はプローブ上に設置でき、試料上の異なる点でスキャンして磁場を測定できる。得られたデータは組み合わせられて、全体画像が形成される。同研究所の科学者たちが使用したのは中空の石英管で、それを非常に鋭くなるまで引き伸ばし、とがった管の先端にわずか 46 ナノメートル直径の SQUID を作り上げた。そしてその先端の回りに、走査型顕微鏡を取り付けたのである。この SQUID を使用して、彼らは測定試料から数ナノメートルという至近距離で、磁気画像を撮影することに成功した。博士課程の学生である Lior Embon 氏は、「均一な磁場を測定するより高解像度の SQUID はあるものの、高感度に加え、試料とプローブが至近距離であること、さらにその大きさが極小であるという組み合わせにより、全体的精度に関して世界記録を破るデバイスを作製できた。」と述べた。この研究チームの結果は、*Nature Nanotechnology* で報告されている。

Source: “Super SQUID”

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

Weizmann Institute of Science press release (November 25, 2013)

URL: http://wis-wander.weizmann.ac.il/super-squid#.Urk2b_RSYSE

Contact: news@weizmann.ac.il

▶基礎



高温超電導発現機構 ストライプ型電荷ゆらぎと砂時計型磁気励起スペ

クトル

Institut Laue-Langevin (2013 年 11 月 19 日)

フランス、グルノーブルにある Laue-Langevin 研究所 (ILL) の研究者たちは、非ストライプ型電荷ゆらぎを示すコバルト酸化物中に、「砂時計型 (hourglass)」磁気励起スペクトルが存在することを *Nature Communications* で発表した。彼らの研究成果によると、高温超電導を引き起こす有力候補であるストライプ型電荷ゆらぎが、説得力に欠けた根拠であることを示唆している。

物質のドーピング方法で超電導体に「電荷貯留層」を作る際、電荷ストライプ構造が作成され、ストライプに整列する傾向を持つホールを形成する。静的なストライプ秩序はこれまで直接観察されてきたが、高温超電導を引き起こす役割を果たすと考えられているゆらぎによってストライプが変動すると、この観察が困難になる。これら電荷ストライプ構造とは、高温超電導体の特徴である「砂時計型」スペクトルとして知られる非常に特異な磁気励起スペクトルを伴うものが典型的である。

この関係を調査するため、サクレーにある ILL と LLB で研究に携わる研究者たち（ドイツ、ドレスデンにある Max-Planck 研究所出身）は、非ストライプ構造をした単層ペロブスカイト・コバルト酸化物内において、その磁気、磁気励起、電荷秩序、および電子フォノン結合の研究を行ってきた。この化合物はストライプ構造ではないので、砂時計型スペクトルが存在しないという結果が期待されていた。しかし、砂時計型スペクトルの基本的な特性全てが揃った通常の磁気励起スペクトルが確かに観測され、今回評価したコバルト酸化物におけるストライプと砂時計型スペクトルとの関係性を除外する結果となった。同研究チームは、超電導のストライプ構造理論に関する注意を研究者たちに促すだけでなく、砂時計型磁気励起が起こる別の要因を支持する証拠も得ている。それはフラストレーション（結晶格子内の原子が、隣接する原子からの対立する要求により、互いに整列することを阻止する状態）として知られる磁気効果などである。

Source: "Neutrons cast serious doubt on major 'suspect' in search for origins of high-temperature superconductivity"

Institut Laue-Langevin press release (November 19, 2013)

URL:

<http://www.ill.eu/news-events/press-room/press-releases/neutrons-cast-serious-doubt-on-major-suspect-in-search-for-origin-of-high-temperature-superconductivity-november-2013/>

Contact: Dr Andrea Piovano, piovano@ill.fr

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612



新しい金属水素化物

Deutsches Elektronen-Synchrotron (2013 年 11 月 20 日)

ドイツ電子シンクロトロン (DESY) で高圧 X 線研究を行っている国際研究チームは、水素と金属イリジウムを圧力 55 GPa で合成し、未だ観測されたことのないイリジウム水化物を検出することに成功した。この新物質は、他に存在するほとんどの金属水素化物の 3 倍以上の水素を吸蔵することができるため、車やその他用途で必要とされる大容量の水素燃料電池の開発に貢献する可能性が高いと考えられている。この新物質は、他に知られる水素化物では発生しない予期せぬ構造をしており、かつてない特性の発見につながる可能性がある。また、金属水素化物は超電導体として作用し得る。このような性質は、パラジウムや白金などの貴金属の水素化物で観測または予測されてきたが、その他の化学的関連がある他の貴金属（たとえばイリジウム）の水素化物で見られることもある。この新物質は、ダイヤモンド・アンビル・セルとして知られる高圧発生装置内部にイリジウムの断片を置き、その圧力セルに水素を充填して生成された。その後、約 125 GPa という高圧で測定試料を圧縮すると同時に、強烈な X 線をその試料に照射し、圧力の変化に伴う構造変化が明らかにされた。この方法を利用すれば、三水素化イリジウム相は、観察されたほとんどの金属水素化物より 3 倍以上の水素を吸蔵することができるのである。今後更なる研究によって、この物質の機械的および電子的特性の探究が期待される。この研究チームの成果は、Physical Review Letters に掲載されている。

Source: "Novel material stores unusually large amounts of hydrogen"

Deutsches Elektronen-Synchrotron press release (November 20, 2013)

URL: http://www.desy.de/information_services/press/pressreleases/@@news-view?id=6701

Contact: desyinfo@desy.de

▶経営・決算



財務報告と線材見通し

Superconductor Technologies Inc. (2013 年 11 月 12 日)

Superconductor Technologies 社 (STI) は、2013 年 9 月 28 日締め第 3 四半期の決算を報告した。第 3 四半期の純収益は 22.9 万ドルで、純損失は 350 万ドルであった。また、2013 年 9 月 28 日時点の現金及び現金同等物残高は、1,030 万ドルであった。同社の社長兼最高経営責任者である Jeff Quiram 氏は、以下のように述べた：「第 3 四半期において、最初の注文を完了させ、その他既存注文の出荷を続け、さらに受注経路を強化させることで、当社 Conductus®線材の商業化を大きく進展させた。現在出荷予定の Conductus 線材は、各超電導応用製品への品質保証試験用のものである。そのターゲットは、限流器、高磁場マグネット、産業用モーターや発電機、送電ケーブルなどである。当社線材へ市場の関心が一層高まる中、顧客からは品質試験用の製品に対する需要が相次いでいる。現存の契約だけで、向こう 3 ヶ月間に亘って我々が生産できる線材量全てを消費すると予想している。今後数ヶ月における当社目標は、2014 年に目指す生産分の受注を確保することである。」

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

同社はまた、全長 1 km が製造できる次期 RCE 装置のさまざまな部品の取り寄せを始めており、2014 年第 1 四半期には、装置の組み立てに必要な部品の納品全てを完了できるものと見込んでいます。さらに、来年度第 2 四半期を終了する頃には、線材の大量生産能力が確保でき、2014 年下半期には健全なキャッシュフロー経営により財務体質の更なる強化を目指している。

Source: "Superconductor Technologies Reports Third Quarter 2013 Results"

Superconductor Technologies Inc. press release (November 12, 2013)

URL:

<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1875150&highlight>

Contact: Investor Relations, Cathy Mattison or Becky Herrick of LHA for Superconductor Technologies Inc., invest@suptech.com, ; HTS Wire, Mike Beaumont of STI, mbeaumont@suptech.com

“世界の動き” その他（各社新聞発表以外のソースから）

・住友重機、陽子線がん治療装置の米国内販売許可を取得

Superconductor Week 誌¹⁾および 2013/11/29 付け住友重機械工業株式会社のサイトにおける発表²⁾によれば、同社は 2013 年 11 月 19 日に米国食品医薬品局 (FDA) より陽子線がん治療装置* (PBRT: Proton Beam Radiation Therapy) の米国内販売許可 (510(k)**) を取得した。

この装置は高エネルギーに加速された陽子のがん患部に照射してがん細胞を殺傷する放射線治療装置で、エックス線よりがん細胞への線量集中性が高く、正常細胞への影響が小さい。今回の 510(k) 取得で米国への一段の販路拡大となる。Superconductor 誌によれば、今回の装置は、超電導を使った装置である。本装置は患者に 360 度あらゆる角度から陽子線照射を可能にする小型化した回転ガントリーを有し、敷地面積が従来比で約 30 %削減される。

これまで、FDA はこうしたサイクロトロン方式の陽子線がん治療装置を Ion Beam Application 社に対して 2001 年に初めて承認し、2010 年には Varian Medical Systems 社の超電導機を最初に承認した。陽子線がん治療装置は、現在日本国内で 9 施設、米国で 12 施設が稼動中である。また、東芝は 2013 年の 8 月 2 日の発表³⁾で、超電導を使った重粒子線（陽子でなく炭素イオンを使う）癌治療装置を放医研から受注している（2015 年 3 月納入）。

超電導を使った医療装置は、従来、MRI や SQUID による脳磁計などがあるが、こうした粒子線治療装置にも一段と超電導の応用が進みそうである。

* 粒子線治療：陽子や炭素イオンなど高エネルギーに加速させ、がん細胞のみに照射し、周囲の正常組織に対する影響を抑えることができ、副作用の少ない治療法。外科手術と異なり、体に優しく、通院治療が可能ながん治療法として、注目されている。

** 510(k)：米国の Federal Food, Drug, and Cosmetic Act の条項 510(k)で定められた医療機器の販売前許可。

Source:

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

1. <http://www.shi.co.jp/info/2013/6kgpsq0000001mid.html>
2. Superconductor Week Dec. 17, 2013, vol. 27 no.22 p1
3. http://www.toshiba.co.jp/about/press/2013_08/pr_j0201.htm

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

再生可能エネルギーと超電導

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

平成 25 年度経済産業省関連補正予算案 超電導および再生可能エネ関連

2013 年 12 月 12 日、経産省の平成 25 年度補正予算案が閣議決定された(下記 HP¹⁾)。その中から、超電導、再生可能エネルギー関連の内容を紹介する。

全体は、

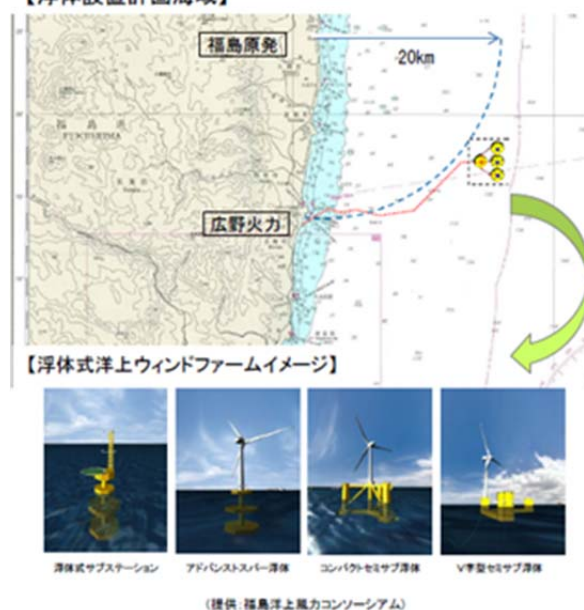
1. 競争力強化(中小企業、エネルギー、イノベーションなど)で 5,511 億円と
2. 復興の加速で 1,237 億円である。総計 6748 億円。

1. の内訳は、a)中小企業対策で 3,403 億円、b)エネルギー関連で 930 億円、c)イノベーション推進などで 661 億円などであるが、

この中で、超電導関連は、“産業技術開発加速化事業” 106.9 億円のうち “高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業” に 15 億円である。これは、北海道・石狩湾新港地域の太陽光発電所とデータセンターの間約 500 メートルに、高温超電導ケーブルや冷却システムの実証システムを構築し、直流送電を行い、課通電試験を行うものである。この高温超電導の直流送電システムが実用になれば、エネルギー消費の大幅な削減が可能となる。

また、再生可能エネルギー関連では、特に大きなものは 2. の “復興の加速” の中の “福島県における再生エネ・IT 等の実証研究・拠点整備事業” で、378 億円が計上されている。中でも、“浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業” として 280 億円が投入され、国の福島沖大型風力の開発にける意気込みがわかる。本誌でも既報の通り、本福島沖プロジェクトは総容量 14 MW (7 MW 機 2 機、2 MW 機 1 機) の大型の浮体式風力設備を構築し、実証検討を行う世界でも画期的なものである。特に、7 MW 機は単体で世界最大であり、図 1 のように洋上に浮かぶものとしては例がない。最近の研究によれば、超電導を使えば、小型軽量の発電機が可能となり、さらに風力発電設備を大型化できるとも言われている。今回の福島沖プロジェクトの推移は、超電導関係者にとっても大いに参考かつ期待されるものとなる。

【浮体設置計画海域】



(提供: 福島洋上風力コンソーシアム)

図 1 福島沖洋上風力のイメージ図 (経産省 HP¹⁾ から)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

超電導は、大型風力以外にも、エネルギー貯蔵などエネルギー分野での応用検討も盛んであるが、今回の予算案を技術分野で見ると、エネルギー関連で 930 億円も投入されている。1) 家庭用燃料電池 (エネファーム) や 2) 定置用リチウムイオン蓄電池の導入支援 (350 億円) などがある。3) 創業・ベンチャー支援 (61 億円) と合わせて、昨今の日本の情勢をかんがみた非常に時宜にかなった内容となっている。エネルギー分野に強くコミットできる超電導が将来こうした部分にも寄与でき、日本の将来に貢献できるようにしたい。

また、当 ISTEC では、最近 SQUID による資源、金属探査研究を JOGMEC ((独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構) と進めているが、今回の補正予算案でもこうした資源分野が重要視されている。

“石油・天然ガス・鉱物資源権益確保事業”として 145 億円が計上されている。図 2 は、石油・天然ガス増産技術の一例である。我が国の資源の権益を確保し、国内企業の競争力強化の基盤となるエネルギー・資源の安定的かつ安価な供給を実現するためである。昨今の東アジアの情勢を見ると、まことに望ましい開発と言える。ISTEC の例にもあるように、超電導も高性能の高温超電導 SQUID で高度な資源探査が可能であることがわかってきたので、将来、こうした資源開発分野に寄与できることを期待したい。



図2 石油・天然ガス増産技術の研究開発強化海上油ガス田での事業のイメージ図
(経産省 HP¹⁾ から)

Source:

1. 経産省 HP <http://www.meti.go.jp/main/yosan2013/hosei1212.html>

買い取り制度(FIT)後の導入現状:すでに大型発電所 5-6 基分

超電導技術を再生可能エネルギーに適用するうえでは、現在の導入状況と同行を把握することは重

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

要である。

ここでは、資源エネルギー庁が公表した導入現状を報告する。下記表は、平成 26 年 1 月 10 日に、平成 25 年 10 月末時点の再生可能エネルギー発電設備の導入状況最新データ（資源エネルギー庁より公表）である。本誌先月号には、7 月末までの導入量を報告した。

太陽光発電設備の導入が順調に継続し、固定価格買取制度導入後の再生可能エネルギー発電設備の導入量は、累計で **585.2 万 kW** となった。大型発電所 5-6 基分にもなる。特に、非住宅用太陽光が上記 7 月末時点のほぼ**倍増**に近い伸びである。平成 25 年度 7 月末までは、169.1 万 kW であったが、これが下記表のように **312.3 万 kW** になった。

これに比較し、風力は伸びが小さいが、これは 1 基あたりの投資額が大きいこと、環境アセスなどの評価などで時間がかかるためと思われる。風力に関しては、洋上風力の買い取り価格を上げる動きも出てきており、他方、太陽光は来年度さらに買い取り価格を下げる（昨年度から 42 円/kwh から今年度 38 円/kwh）ので、今後の動向がさらに注視される。

再生可能エネルギー発電設備	固定価格買取制度導入前	固定価格買取制度導入後	
	平成 24 年 6 月末までの累積導入量	平成 24 年度 (7 月～3 月末)	平成 25 年度 (4 月～10 月末)
太陽光(住宅)	約 470 万kW	96.9 万kW	87.0 万kW
太陽光(非住宅)	約 90 万kW	70.4 万kW	312.3 万kW
風力	約 260 万kW	6.3 万kW	0.7 万kW
中小水力	約 960 万kW	0.2 万kW	0.3 万kW
バイオマス	約 230 万kW	3.0 万kW	8.2 万kW
地熱	約 50 万kW	0.1 万kW	0 万kW
合計	約 2,060 万kW	176.9 万kW	408.3 万kW
		585.2 万kW	

Source :

<http://www.meti.go.jp/press/2013/01/20140110002/20140110002-1.pdf>

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

標準化活動 2 月のトピックス

－IEC/TC90 国際幹事交代－設立から現在までを振り返って

住友電気工業株式会社
フェロー 佐藤謙一

2013 年 12 月に四半世紀にわたって務めてきた IEC/TC90 の国際幹事を藤上純氏（住友電気工業株式会社）に引き継ぎました。これまでの皆様からの御指導・御鞭撻に心から感謝いたします。

TC90 設立から現在までを振り返り、今後のご参考になればと思い、小文を綴ることとなりました。

1. 第一期：1988-1989 【誕生期】

IEC 理事会直轄の Special WG - Superconductivity が作られ、IEC として超電導分野にどう取り組むかが議論された。日本はこの SWG の幹事国を委嘱され、私は Secretary として活動することになった。1989 年 5 月に通商産業省の国際会議室で 6 カ国の参加を得て SWG 会議が開催された。日本代表の関根泰次先生からこの SWG 会議の Chair をやるようにとのご指示があり、その当時はろくに英語もしゃべれなかった私は大いに困惑しました。ラジオの英会話のテープと「会議英語－国際会議・英語討論のための表現事典」と言う本を購入して必死にトレーニングした懐かしい記憶があります。またこの当時はワープロが導入された時代でこの役目のためにワープロ（重かった!）を購入して SWG 会議に参加したことも思い出です。

この SWG で、1989 年 6 月には「超電導」に関わる専門委員会を設立すべし、との勧告を行った。この最終勧告書は 1989 年 7 月の英・ブライトンでの IEC 理事会・総会にて審議され、TC90 の設立と日本の幹事国引き受けが採択された。私も SWG の Secretary として、この理事会・総会に出席するとともに、IEC の主要メンバーに TC 設立と日本の幹事国についてのロビー活動をする機会を得た。この期間は言わば「誕生期」といえる。私は引き続きこの新設された TC90 の Secretary として務めることとなった。日本が IEC の TC レベルで幹事国をつとめるのはこれが最初の例であり、ハイテク分野で国際標準をリードすることの意義は極めて大きいものとされた。

2. 第二期：1990-1998 【揺籃期】

TC90 設立後、1990 年の東京での TC90 総会を皮切りに実質的な標準作りがスタートした。第二期の約 10 年は活動開始後から最初の IEC 規格の発行までの期間であり、言わば「揺籃期」とも言える期間であった。①人脈形成、②国際標準制定までの各国との協議に慣れる、③標準作成のフォーマットに慣れる、ことなど次のステップへ行くための貴重な期間であったとも考えている。TC90 総会は、東京（第 1 回）－パリ（第 2 回）－ボルダー（第 3 回）－北京（第 4 回）－フランクフルト（第 5 回）・・・と開催し、アジア→ヨーロッパ→アメリカ、という順番で開催することもその後の慣例となった。

3. 第三期：1999-2013 【成長期】

この期間は主に超電導特性試験方法として 20 件の IEC 規格を作成・発行した期間であり、「成長期」とも言える期間となった。素材レベルから部品レベルへと対象も拡大し、内容もそれぞれ個々の必要とされる規格から全体を包含する通則へと広がり、今後の更なる発展へと期待を抱いて良い内容ではなかったか、と感じている。現在の TC90 の組織を表 1 に示す。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

表 1 IEC/TC90 の組織

Chairman: Mr Christian Eric Bruzek, Secretary: Mr Jun Fujikami			
WG	Title	Convenor	Experts
WG1	Terms and definitions	Mr Lance D. Cooley Mr Teruo Matsushita	7
WG2	Critical current measurement of Nb-Ti composite superconductors	Mr Kozo Osamura	10
WG3	Critical current measurement method of oxide superconductors	Mr Gen Nishijima	13
WG4	Test method for residual resistivity ratio of Cu/Nb-Ti and Nb ₃ Sn composite superconductors	Mr Dongho Kim Mr Teruo Matsushita	6
WG5	Tensile test and electro-mechanical properties of composite superconductors	Mr Kozo Osamura Mr Hyung Seop Shin	13
WG6	Matrix composition ratio of composite superconductors	Mr Takakazu Shintomi	3
WG7	Critical current measurement method of Nb ₃ Sn composite superconductors	Mr Gen Nishijima Mr Jeff Parrell	9
WG8	Electronic characteristic measurements	Mr Sang Young Lee Mr Shigetoshi Ohshima	16
WG9	Measurement method for AC losses in superconducting wires	Mr Edward W. Collings Mr Masataka Iwakuma	9
WG10	Measurement for bulk high temperature superconductors - Trapped flux density in large grain oxide superconductors	Mr Masato Murakami	8
WG11	Critical temperature measurement - Critical temperature of composite superconductors	Mr Kyu Won Lee Mr Koichi Nakao	10
WG12	Current Leads	Mr Toshiyuki Mito	8
WG13	General characteristics for practical superconducting wires	Mr Kozo Osamura	10

グローバルに企業活動を進めてゆく上で、特許による自社技術の権利確保と並んで、国際標準活動は①製品開発初期における国際的な市場拡大と②製品のビジネス拡大期におけるコストダウン獲得に対する有力な手段であるとの認識であり、今後の企業活動に欠かせない技術開発戦略の一つとなっている。関係者の皆様の御努力に敬意を表するとともに、経済産業省、国際超電導産業技術研究センター、歴代の日本 TC90 委員長である関根泰次先生・長村光造先生・松下照男先生、また多くのコンビーナ・委員の皆様の今までの御厚情に対して感謝の意を表します。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

参考文献：

1. 佐藤謙一：「超電導分野における国際標準化の動向」、SEI テクニカルレビュー、第 175 号(2009)35.
2. 佐藤謙一：「超電導国際標準化活動の現状」、SEI テクニカルレビュー、第 180 号(2012)1.

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

「超伝導エレクトロニクス (SCE) 1 月研究会開催」報告

独立行政法人 産業技術総合研究所
計測標準研究部門
電磁気計測科・量子電気標準研究室
丸山道隆

平成 26 年 1 月 23 日 (木) ~24 日 (金) の二日間、電子情報通信学会・超伝導エレクトロニクス (SCE) 研究専門委員会主催の研究会が開催された。同研究会は、薄膜、デバイスからシステムに至るまで、超伝導エレクトロニクスに関連した幅広い内容を忌憚なく発表・議論する場として、年に 4 回 (1 月、4 月、7 月、10 月) 定期的に開催されている

(<http://www.ieice.org/es/sce/jpn/index.html>)。また、講演予稿は電子情報通信学会技術研究報告 (信学技報) として出版される。前回の 10 月研究会が青葉城を望む東北大学で行われたのに続き、今回は東京タワーの真向かいにある機械振興会館での開催となった (写真 1)。

今回の講演募集の主テーマは「薄膜、デバイス技術及びその応用」であるが、必ずしもこれに縛られる必要はなく、SQUID や SFQ 回路などを含む全 23 件の発表があった。また、1 日目の後半には学振第 146 委員会による 2 件の講演も行われ、二日間で延べ 50 名近くの来場者によって活発な議論が行われた。以下、主な発表内容や当日の様子などを、開催の流れに沿って紹介する。

1 日目は、計測標準に関連した 3 件の発表の他、SQUID を用いた磁気計測システムに関する 8 件の発表が行われた (写真 2)。計測標準に関しては、SINIS 単電子ポンプを用いた量子電流標準に向けた最新のデータ (産総研・理研) や量子交流電圧標準の高出力電圧化 (産総研・工研院)、Nb 接合を用いたゼロクロッシングシャピロスステップ (ZCSS) の実証及び YBCO 粒界接合への取り組み (電通大) などが報告された。高温超伝導 SQUID に関しては、分離型検出コイルの最適設計に関する詳細な検討 (東京電機大、ISTEC) や、ランプエッジ型接合の有用性を示す、HTS 薄膜を用いた外部磁気シールド不要な SQUID の開発 (豊橋技科大)、近年、医療応用分野に向けて注目される磁気ナノ粒子を利用したイメージング (MPI) への HTS-SQUID の導入 (豊橋技科大・ユーリヒ総合研究機構と九大の 2 件) などが報告された。

お昼休憩をはさんだ午後の講演の開始前には、第 4 回 SCE 奨励賞の授賞式も行われた (写真 3)。本賞は当分野の活性化を目的として、35 才以下の若手研究者や学生を対象としたもので、年 4 回の研究会の他、春と秋の電子情報通信学会・全国大会での発表を考慮し、顕著な業績を上げた個人に贈られる。今回の受賞は、岡山大学の堺 健司先生で、授賞式につづいて「HTS-SQUID を用いた試料回転式磁化率計の高感度化と磁気緩和信号の測定」という題目で招待講演が行われた。本賞の設

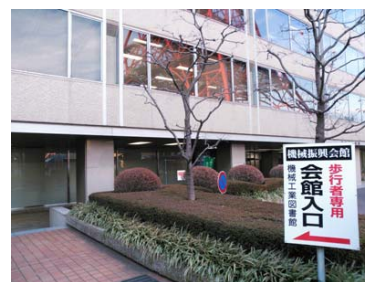


写真 1 会場の機械振興会館。
目前には東京タワーが大迫力でそびえる。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

立以来、これまでに 5 名の受賞者が出ており、ぜひ多くの若手研究者や学生の方々に受賞を目指して精力的な発表を期待したい。



写真 2 発表会場の様子。朝から多くの来場者に恵まれた。



写真 3 SCE 奨励賞授賞式（挿入写真）と招待講演の様子。挿入写真の左側は円福委員長、右側は受賞者の岡山大・堺先生。受賞おめでとうございます！

SQUID に関しては他にも、免疫検査への応用が期待される磁気マーカーの検出手法の高度化（九大）や、走査 **SQUID** 顕微鏡の感度向上のためのプローブ近傍の磁束分布の解析（阪大）、近年の液体ヘリウム供給不安定性に対応するための再凝縮システムの開発と脳磁計（**MEG**）測定の実証（**FEDELIC**・金沢工大）などの発表が行われた。

1 日目の夕方から行われた学振第 146 委員会研究会（写真 4）では、金沢工大の河合先生から、遺跡の磁気測定によりかつての古地磁気を調べる“古地磁気学”の紹介や、**SQUID** の非破壊検査能力を利用して文化財を測定して古代史のなぞに挑戦する取り組みが紹介された。また、**NTT** の柴田氏から、通信の安全性を守るための暗号方式の紹介と、量子鍵配送（**QKD**）における超伝導単一光子検出器（**SSPD**）の有用性や 336 km という長距離鍵配送の初めての成功について報告された。



写真 4 第 146 委員会研究会の様子。磁気測定の考古学への応用や長距離量子通信といった興味深い講演に思わず引き込まれるように聞き入る。

今回はとくに二日間開催ということもあり、1 日目の終了後には会場近くの浜松町駅近隣で懇親会も開かれた（写真 5）。普段会う機会の少ない大学、企業、研究所など各方面の方々とも顔を合わせ、交流を深めることができた。また、このような場での意見や感想が今後の研究会運営の参考に

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

なることもあり、研究会に付随した貴重な時間となった。

2 日目は、午前中に超伝導共振器に関する 2 件の発表と、Bi 系固有接合に関する 3 件の発表があり、午後からは SFQ 回路に関する 4 件の発表の他、メモリや整流回路に関する 2 件の発表、量子ビットの集積化に関する 1 件の発表が行われた。

共振器に関しては、低温で Q 値が飽和してしまう原因が、磁気不純物などに起因したギャップ内準粒子の存在によるものであることを示唆する検討結果（国立天文台・埼玉大・東大）や、天文観測への応用を目指した積層型の超伝導検出器（MKID）の開発（東大・国立天文台・筑波大・埼玉大）などの発表が行われた。また、Bi 系固有接合に関しては、テラヘルツ波の放射電力特性などの理論モデルを用いた説明（防衛大）や、自己発熱効果による問題を低減するための素子冷却方式の検討（宇都宮大）、接合スタック作製時に問題となるエッチングダメージに関連した TEM 観察による界面微構造の評価（長岡技科大）などが報告された。

SFQ 回路に関しては、rf-SQUID ラダーを用いたレベル論理方式の提案（東北大）や、SFQ 並列乗算器に向けた最終加算回路の比較検討（東北大）、質量分析に向けた時間測定回路における外部クロック方式を用いたジッター改善（横浜国大・産総研）などが報告された。その他、位相シフタやメモリセルの実現に向けて SQUID 近傍に配置した磁性体の影響や特性制御の可能性についての試み（名大）や、非対称形状をもつ HTS ナノブリッジにおける整流特性を利用した SFQ 回路用電源供給回路の低消費電力化に向けた取り組み（名大・名城大）、超伝導量子ビットの集積化に向けた微小接合作製方法の検討と平坦化による素子作製（改良型 PARTS 法）の実証（産総研）などの発表が行われた。

以上、朝から夕方までたくさんの発表が並び、少々タフなスケジュールであったにもかかわらず、興味深い発表内容によって多くの参加者が集まり、有意義な議論や意見交換を拝聴することができた。研究会は皆さんの参加や協力によって成り立っており、発表者や共著者、聴講者、委員及び事務局の方々には、運営担当の一人として、この場を借りて深くお礼申し上げたい。

最後に、次回の 4 月研究会はマイクロ波研究会（MW）、無線電力伝送研究会（WPT）及び SCE との共催で、4 月（18 日（木）～）19 日（金）に機械振興会館で開催される予定である。他分野との交流やより新鮮な議論を得られる貴重な機会のため、ぜひ多くのご発表とご参加によって、各分野が Win-Win の関係で盛り上がるきっかけとなることを期待したい。



写真 5 会場近くで行われた懇親会の様子。鳥鍋をつつきながら交流を深める。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

超電導センサ (その 1)

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
副所長 田辺圭一

1. はじめに

超電導現象を利用したエレクトロニクスデバイスは、フィルタ等のアナログ受動デバイス、情報処理用のデジタルデバイス、センサ類の 3 つに大別することができるが、この中で最も多様なデバイスが開発されかつ実用化が進んでいるのがセンサ類である。超電導センサでは、超高感度を特長とする SQUID (超電導量子干渉素子) 磁気センサや電波天文分野でのキーデバイスである SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) 型のトンネル接合を用いたミキサ (mixer) が有名であるが、特に電磁波センサは SIS ミキサ以外にも多くのデバイスが開発され利用されている。

本特集では 6 回にわたり、主要な超電導センサの原理とその応用、また最近の技術進展について紹介する。この第 1 回では、総論として、超電導センサの種類と特徴、応用分野などをまとめる。主要なセンサについての詳細は第 2 回以降に紹介する。

2. 超電導センサの種類と特徴

2.1. 電磁波センサ

表 1 には、超電導を利用した種々の電磁波センサの主要要素、利用波長域、主な用途と特徴をまとめる。センサの構成要素に注目すると、2 つの超電導薄膜の間に 1-2 nm 程度の厚さの絶縁体バリア層を挟んだ SIS トンネル接合を利用するものと超電導薄膜を用いるものの 2 種に大別することができる。

表 1. 超電導電磁波センサの種類と特徴、用途

電磁波センサの種類	主要な要素	主な利用波長域	特徴	主な用途
SISミキサ	SISトンネル接合	ミリ波、サブミリ波 (100-800 GHz)	高感度(量子限界)	天体、宇宙観測 地球大気観測
ホットエレクトロンボロメータ (HEB)	薄膜マイクロブリッジ	サブミリ波、テラヘルツ波 (0.8 - 1.5 THz)	高感度	天体、宇宙観測
マイクロ波カイネティックインダクタンス検出器 (MKID)	薄膜共振器	マイクロ波、ミリ波 (50-300 GHz)	高感度、アレイ化容易	天体、宇宙観測
転移端センサ (TES)	吸収体、薄膜温度計	X線、ガンマ線、テラヘルツ波	高エネルギー分解能、高感度	元素分析 (EDX)、核物質検査、宇宙観測
超電導トンネル接合検出器 (STJ)	SISトンネル接合	X線	高エネルギー分解能、高速	各種分析 (XAFS、高分子質量分析等)
超電導ナノワイヤ単一光子検出器 (SNSPD)	薄膜ナノワイヤ	赤外線 (1.55 μm)	高量子効率、低暗係数率	量子情報通信

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

超電導状態では電子がクーパー対を形成し、図 1 のエネルギー状態図に模式的に示すように、超電導ギャップの下に最低エネルギー状態に落ち込んでいる。超電導ギャップの大きさは超電導材料によって異なり、センサを含む超電導電子デバイスで広く用いられている臨界温度 (T_c) が 9.2 K のニオブでは 4.2 K で約 1.5 meV の値である。このエネルギーギャップの 2 倍以上のエネルギーをもつ電磁波 (ニオブの場合、周波数で約 720 GHz 以上、波長で約 4.2 mm 以下) を超電導体に照射すると、クーパー対が壊れ、ばらばらの電子 (準粒子) がエネルギーギャップの上に励起される。これにより、超電導薄膜の電磁気的特性や SIS トンネル接合の特性が大きく変化する。例えば、超電導薄膜の細線はその形状で決まる磁気インダクタンスに加え、超電導電子の速度が急には変わらない慣性をもつことから発生する力学 (カイネティック) インダクタンスをもつ。力学インダクタンスは、超電導クーパー対密度に反比例するため、準粒子励起によりその値が変化する。したがって、超電導薄膜で作った共振器の共振周波数が変化する。この原理を用いたのが、マイクロ波カイネティックインダクタンス検出器 (Microwave Kinetic Inductance Detector: MKID) である。このセンサは、エネルギーギャップの小さなアルミ薄膜等を用いることにより、50 GHz 程度のマイクロ波領域でも使用することができる。一方、準粒子励起は、図 2 に示すように、SIS トンネル接合のギャップ電圧以下でのトンネル電流の増大をもたらす。これを利用するのが超電導トンネル接合検出器 (STJ) で、X 線照射に対し 1 光子で多数の準粒子が励起されるため、ギャップエネルギーが 1 eV レベルと大きい半導体を利用した検出器に比べ高いエネルギー分解能が得られる。

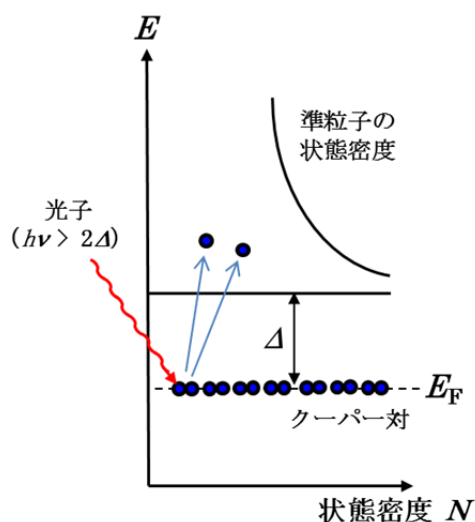


図 1. 超電導体のエネルギー状態図

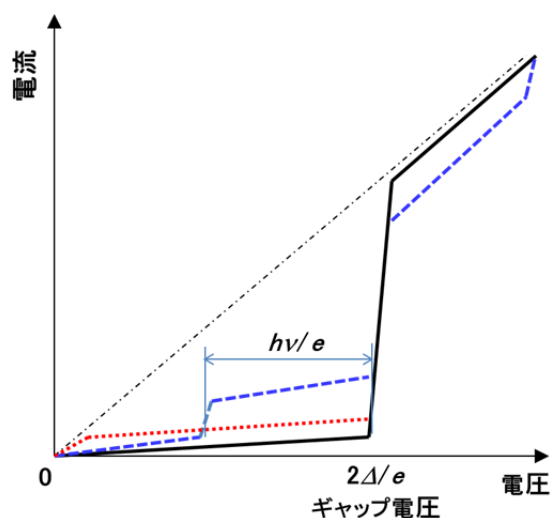


図 2. SIS トンネル接合の電流-電圧特性、赤波線は電磁波 ($h\nu > 2\Delta$) 照射による変化、青破線は光誘起トンネリング

電磁波照射により励起された準粒子はピコ秒という短時間の間に再結合しフォノン (格子振動) を放出する。放出されたフォノンの一部クーパー対を破壊しながら、最終的にはナノ秒の時間スケールで熱として基板に逃げていく。図 3 に模式的に示すように、超電導体の極薄膜 (厚さ 5 nm 程度) で作製した幅 100 nm レベルのミアンダ形状のナノワイヤにその臨界電流に近いバイアス電流を流しておくと、光子吸収により発生した熱が局所的に超電導を壊し電圧が発生する。これを利用するのが、超電導ナノワイヤ単一光子検出器 (Superconducting Nanowire Single Photon Detector: SNSPD) である。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

SNSPD) で、文字通り光子 1 個の検出に用いられる。SNSPD は、アバランシェフォトダイオードなどの半導体検出器に比べ格段に暗係数率(雑音)が小さいという特長がある。一方、電磁波を超電導体ではなく常電導金属等に吸収させ、発生した熱による微小な温度上昇を超電導薄膜の T_c での急峻な電気抵抗の変化を利用して捉えるセンサが転移端センサ(Transition-Edge Sensor: TES)である。感度を上げるために急峻な転移を示す低温合金系超電導薄膜が用いられる。動作温度は 0.1 K 程度と低いが、非常に高い感度と X 線等に対しては STJ に比べても高いエネルギー分解能が得られる。

SIS ミキサでは、上記の電磁波センサと全く異なり、トンネル接合に加えた局所発信器の信号と観測する電磁波との周波数ミキシングを行い、その差周波信号を検出するヘテロダイン検波を行っている。図 2 に示すように、SIS トンネル接合にギャップエネルギー以下の電磁波を照射すると、光子のエネルギーをもらって準粒子がトンネル(Photon-assisted tunneling) できるため特性が大きく変化するが、これが周波数混合に利用される。SIS ミキサで観測できる電磁波の周波数の上限はギャップエネルギーで制限される。一方、超電導薄膜の微小マイクロブリッジにギャップエネルギーを超える電磁波を照射すると、エネルギーの高い準粒子(ホットエレクトロン)が励起し電流-電圧特性が変化するが、これを利用してヘテロダイン検波を行うのがホットエレクトロンボロメータ(Hot Electron Bolometer: HEB)で、SIS ミキサでは検出できない THz 帯の電磁波センサとして開発が行われている。

超電導電磁波センサの用途としては、超高感度性能が必要となる天体・宇宙観測が最も多い。実際に SIS ミキサでは量子限界($h\nu/k_B$)に近い極めて低い雑音温度が実現されており、他のセンサの追従を許さない。最近では、ALMA という国際プロジェクトにより、チリの標高 5000 m の高地において、複数の周波数帯の SIS ミキサを搭載した電波望遠鏡アレイによる観測が開始されている。一方、接合を用いない KMID や TES は大規模なアレイ化ができ、広範囲を短時間で観測できる利点がある。また、TES や STJ は高エネルギー分解能の X 線センサとして、元素や結晶構造の分析装置に、さらに高分子質量分析装置にも応用されている。SNSPD は量子鍵分配による暗号化通信など量子情報通信分野に主として応用されている。いずれも極限性能を要求する分野であるため、低温超電導体による極低温動作が基本となっている。SIS トンネル接合や極薄膜の作製が困難な酸化物高温超電導体については、現状では弱結合型ジョセフソン接合における交流ジョセフソン効果を利用した THz 波検出器等の開発が一部行われているのみである。

2.2. 超電導磁気センサ

超電導磁気センサのほとんどは SQUID を利用したものである。SQUID の基本要素は図 4(a)に示すようなジョセフソン接合を含む超電導ループである。特に直流 SQUID では、ループは 2 個のジョセフソン接合(ヒステリシスをもたない弱結合型の接合)を含む並列回路になっている。磁場ゼロの状態では、並列回路に電流を流すと左右均等に超電導電流が流れるが、ループに磁場が鎖交すると左右のジョセフソン接合の位相差が変化することで電流バランスが崩れ、ループには実効的な周回電流が発生する。この周回電流の作る磁束と外部磁場の作る磁束の和は磁束量子 Φ_0 ($=h/2e = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb) の整数倍に量子化されている(磁束量子化、正確にはフラクソイドの量子化と呼

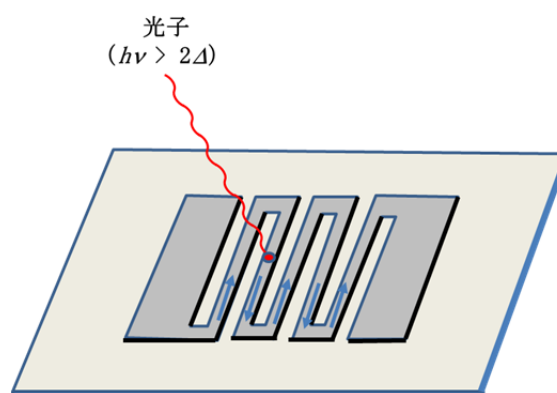


図 3. SNSPD の動作原理

光子吸収により発生したホットスポットが広がり局所的に超電導が壊れる

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

ばれる)。すなわち、外部磁束に対しフラクソイド量子化を保つように接合の位相差が変化するわけである。左右の接合に流れる超電導電流のバランスが崩れた状態では、並列回路の超電導電流の和は減少し、その電流－電圧特性は図 4(b)のように周期的に変化する。ループに鎖交する磁束が磁束量子の整数倍、半整数倍の時に超電導電流の和はそれぞれ最大、最小になる。したがって、並列回路の最大臨界電流の値に近いバイアス電流を流しておくと、図 4(c)に示すような鎖交磁束に対し Φ_0 の周期で変化する電圧変化（数 10-100 μV 程度）が得られる。磁気センサとして用いる場合には、測定対象に合わせた大きさの磁場検出コイルをこの並列ループに磁氣的にあるいは直接結合して用いる。また、図 5 に示すようなフィードバック回路（増幅器、積分器、並列ループに逆向きの磁場を印加するコイルからなる）を用い、外部磁場による変化を打ち消すようにフィードバックをかけることで、外部磁場に比例した出力電圧が取り出せると共に、より微小な磁場変化を検出できるようになる。図 4(c)での動作点を固定することになるので、この回路は Flux-Locked Loop (FLL) 回路と呼ばれる。

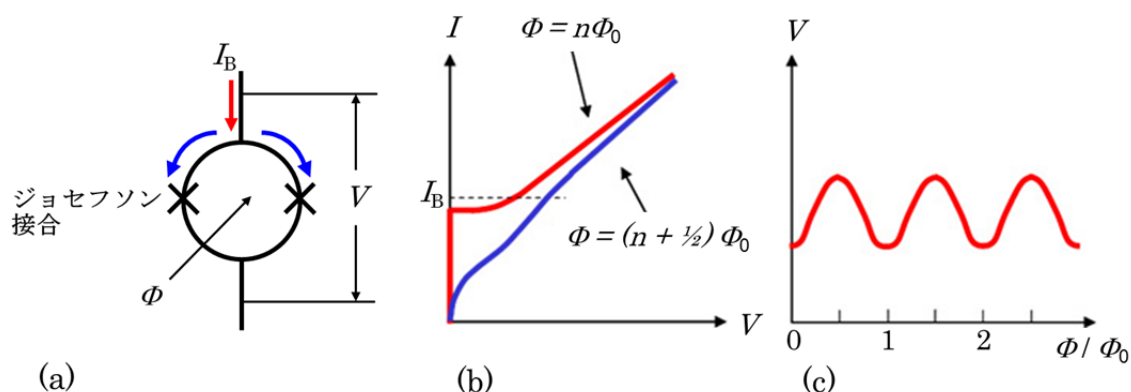


図 4. (a)直流 SQUID の基本要素、(b)電流－電圧特性、(c) 電圧－磁束特性

SQUID を利用した磁気センサの感度（磁場ノイズ）は、検出コイルサイズにも依存するが、ニオブ系低温超電導ジョセフソン接合を用いた液体ヘリウム冷却、4.2 K 動作のセンサで $1\text{-}10 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ （fT：フェムトテスラ = 10^{-15} T ）と、人の脳から発生する微弱な磁場を十分検出することが可能なため、脳磁計や超低磁場 MRI などの生体磁気計測を中心に用いられている。一方、銅酸化物高温超電導ジョセフソン接合を用いた 77 K 動作の SQUID 磁気センサは、動作温度が高いため磁場ノイズは $5\text{-}100 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ と低温超電導 SQUID センサに比べ高いが、液体窒素冷却で容易に使えるため、非破壊検査や金属資源探査などの野外使用に適している。図 6 には SQUID 磁気センサと他の磁気センサの感度（磁場ノイズ）を比較した。フラックスゲートセンサ、磁気インピーダンス (MI) センサ等のセンサに比べ桁違いに高感度である。光ポンピングセンサのように SQUID に匹敵する感度をもつ磁気センサの開発されてきているが、SQUID は高感度だけでなく広い周波数帯域にわたり感度が一定という他のセンサにない特長をもっている。

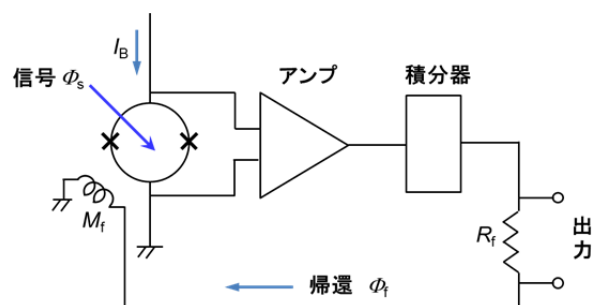


図 5. SQUID 磁気センサに用いられる FLL 回路の構成

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

SQUID の周期的な電圧変化量は $10\text{-}100\ \mu\text{V}$ 程度であるが、より大きな電圧振幅や感度の向上をねらいとし、図 7 に示すようなサイズの異なるループをもつ SQUID を並列あるいは直列に接続した超電導量子干渉フィルタ (Superconducting Quantum Interference Filter: SQIF) というセンサも開発されている。ループサイズの異なる SQUID の特性重ね合わせにより、磁場ゼロを中心に大きな単一の電圧ピークが得られる (数 mV 程度の値まで報告されている)。磁気センサとしての実用化はまだのようであるが、増幅器等への応用も報告されている。

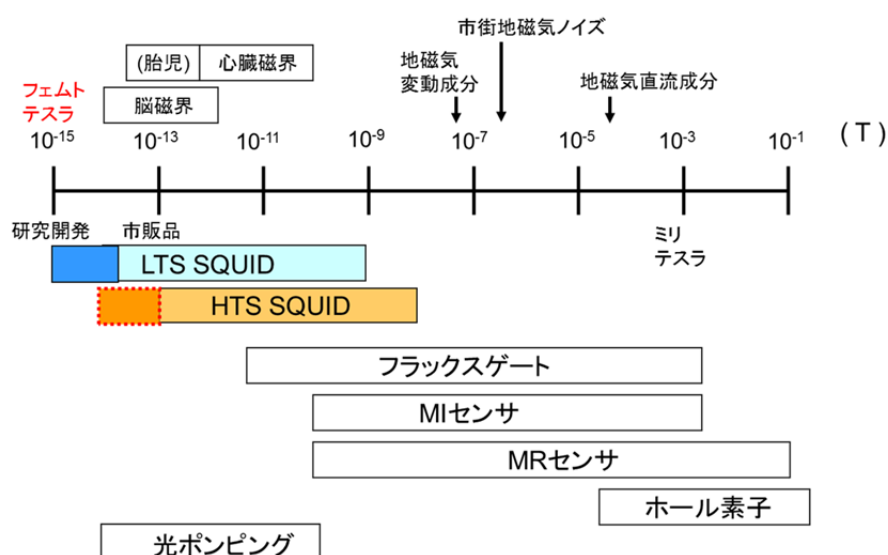


図 6. SQUID 磁気センサと他の磁気センサの感度 (磁場ノイズ) の比較

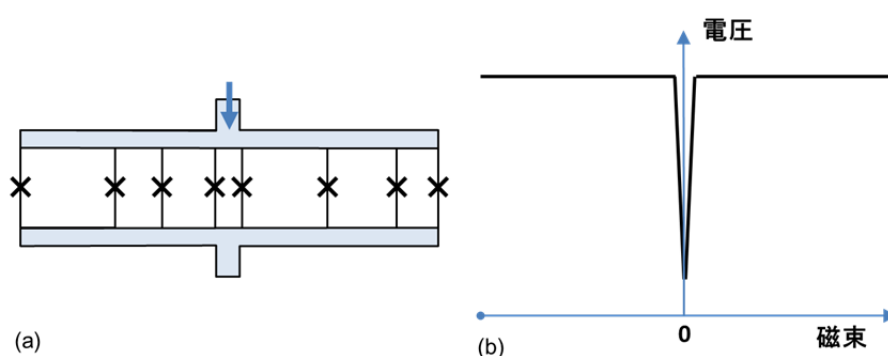


図 7. SQIF の構成 (並列 SQIF) と電圧-磁束特性

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 1 回)

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
常務理事 渡辺 勉

今回から「やさしい電力系統のはなし」を 6~7 回程度に分けて進めていきたいと思います。電力系統は理解しにくいとの定評?がありますが、できるだけ平易に解説していきたいと思います。このため、技術的な厳密性にやや欠ける場合もありますが、「まず基本を理解していただく」ことを目標にしますのでよろしくお願いします。

今回 (第 1 回) は、電力系統を理解するために必要な「電気」の基本的な特徴をおはなしの前半です。

1. 電気のイメージ

○電気：水のイメージで理解する

山に雨が降ると水が流れ川となり海へと流れていきます。
(図 1)

人は、昔は水車、最近では水力発電でこの水のエネルギーを利用してきました。

高い山に降った雨は、低い山に降った雨と比較して大きいエネルギーを持っています。流れの量が多いと少ない場合に比べ大きいエネルギーを持っています。電気を水に例えると、この高さの違いを「電圧」(単位はボルト(V))、流れる量を「電流」(単位はアンペア(A))と呼びます。

山にダムがあるとします。そこに水が溜まるとその水は下流に流れるとエネルギーを生み出します。溜まった水はエネルギーを有している訳です。電気ではこのエネルギー量を電力量 (Wh) と言います。ダムの水が川に繋がっていると出口の水は高さで流れる量に比例した圧力を持ちます。これを電力(W)と言います。この圧力の水を 1 時間流すと溜まっていたエネルギーは減ってしまった水の分だけ減少します。 $W \times 1 \text{ 時間} = Wh$ (h はアワーと発音します。)

1 時間は英語で 1 hour (アワー)、1 を省略すると Wh = 電力量となります。



図 1 水の流れのイメージ

○電力と電力量

電気では、上記の 4 要素、電圧、電流、電力、電力量が非常に重要ですが、電力系統では、言葉の似ている「電力」と「電力量」の違いへの理解が大切ですので、ここで更に説明をします。

電力系統では、発電電力と需要電力のバランス、発電電力量と需要電力量のバランスが重要となります。それぞれの「バランスの特徴」をイメージしていただくと「電力系統の安定な運用」を理解していただき易くなります。

・電力のバランス：綱引きのイメージで

電力は「圧力」と言えますが、電力のバランスは「力がかかる」スポーツである綱引きをイメージしていただければと思います。両方で綱を引き合うと、綱に強い圧力がかかりますが、引き

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

合う力がバランスしていると、周りから綱を見ると何も起こっていない様に見えます。(少しは前後しているでしょうが――)

この時、片方の引き手の数人が綱をひくのを突然やめバランスが崩れると、あっと言う間に一方的に引っ張られていくでしょう。電力系統では、電気を作る側（発電）と電気を使う側（需要）が電力と言う綱を通して綱引きしているとイメージとしていただいても良いのですが、電力系統でもバランスが崩れると、「あっと言う間に一方的に動いてく」状況となります。発電と需要の電力バランスが取れず急速にバランスが崩れる状況を、「不安定な電力系統状況」と呼ばれます。電力系統が不安定になると、あっと言う間に電気エネルギーが望むように流れなくなり、バランスの回復も、綱引きの場合は綱を元の位置に戻し双方引き合い始めるのですが、容易ではありません。具体的な不安定の発生状況とそれを防ぐ対策は次回以降解説します。

・電力量のバランス：水を溜めるイメージ

電力量はエネルギー量です。このバランスを保つとは、発電側で溜めたエネルギー量と需要側で溜めたエネルギー量を等しくすることです。山に溜めたダムの水量とそれが下流に流れて町の近くの貯水池に溜めて使用される水量が同じであれば、バランスが取れている、とのイメージです。電力（圧力）のようにあっと言う間に崩れるイメージは基本的に有りません。

電力量のバランスが崩れると、例えば、ダムの水を使い切ると川は干上がり需要側の水もなくなり、双方ゼロとなってしまいます。電力量のバランスは、時間経過を追いながら確認ができますので、電力バランスと比較すると、予測が可能です。

ここでは、「電力」では時々刻々の発電と需要のバランス維持が重要、「電力量」では将来的な時間経過を想定したバランス維持が重要であることを理解していただければと思います。それぞれのバランス維持を図るため電力系統では種々の対策を講じますが、次回以降順次説明して行きます。

2. 交流と直流

電気の送り方（川の流れ方のイメージ）には、交流と直流があります。

交流は「川の流れ」では全く説明できない流れ方です。このため、直流より交流に重点を置いて説明します。

○直流：水が流れるイメージ

直流は、時々刻々の電圧、電流を一定にし、エネルギーを流す方法です。(図 2)

たとえば、電圧が一定の 10 V、電流が 10 A の電気が流れるとします。

圧力（電力）は電圧 × 電流 = 100 VA = 100 W となります。

「電力」は電圧が大きい程、電流が大きい程大きくなります。

これを 1 時間流したときに送れる（送電する）エネルギー量は、

$100 \times 1 \text{ (時間)} = 100 \text{ Wh}$ となります。

「電力量（エネルギー量）」は電圧が大きい程、電流が大きいほど、流す時間が長い程大きくなります。

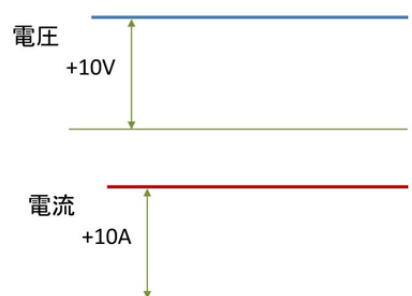


図 2 直流

「水の流れ」のイメージで理解していただければ幸いです？

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

○交流：電圧と電流があってもエネルギー量が送れない！？→無効電力問題

交流は、電気を波の形にし、送電する方法です。例えば、太陽光はエネルギーですが、波の形で地球に送られてきます。それを電気に応用していると考えましょう。交流は、直流と異なる独特の性質が有りますので以下説明します。

電圧、電流の波は、サインカーブと呼ばれる形で滑らかに上下変化します（上下 1 回を 1 周期と呼びます）。(図 3) 1 秒間に上下変動する回数を周波数 (Hz) と呼びます。日本では、西側地域は 60 Hz (ヘルツ)、東側地域は 50 Hz です。(図 4)

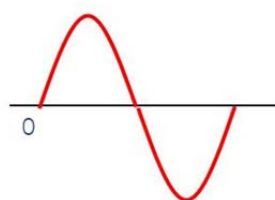


図 3 サインカーブ

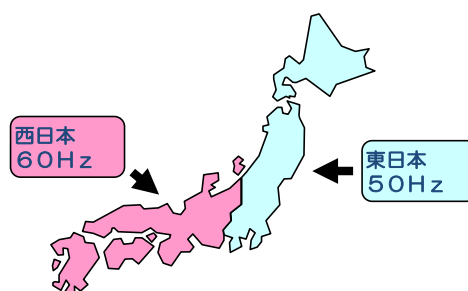


図 4 日本の電力系統周波数

サインカーブは、慣れないと判りにくい面がありますので、ここでは 1 周期の間、上下に一定な電圧・電流の波形で説明します。(図 5)

ここで、1 周期の電圧はプラスマイナス 10V、電流がプラスマイナス 10A とします。

圧力 (電圧×電流) は、最初の半分の間 (半周期と言います) は、

$$10V \times 10A = 100W$$

後半の半周期でも、

$$-10V \times (-10A) = 100W$$

結局、波形は変化しますが、1 周期の圧力は 100 W 一定で、結果的には直流と同じです。

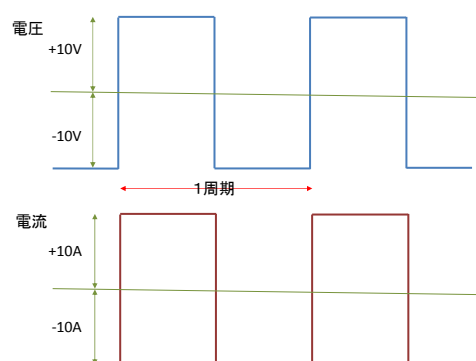


図 5 上下に変化する電圧・電流の特徴

ところが、交流では、電流と電圧の波形にずれ (位相差) が生じることがあります。ずれを生じる原因はいろいろありますが、ここでは、

交流では電圧と電流に「位相差が生じる！」と覚えて下さい。(暗記①)

下記のようなずれが生じた場合を考えます。(図 6)

圧力を図の①、②、③、④でそれぞれ計算します。

① : $10V \times 10A = 100W$

② : $10V \times -10A = -100W$

③ : $-10V \times -10A = 100W$

④ : $-10V \times 10A = -100W$

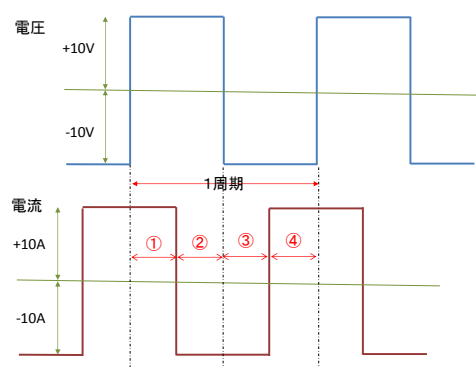


図 6 電圧と電流のずれが発生すると――

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

この例では、電力 (= 電圧 × 電流) は 1 周期中、プラスマイナスが 4 回変化します。とにかく、「電流と電圧にずれ (位相差) があると直流とは全く違う状況が生じる！」と覚えて下さい。(暗記②)

50 ヘルツの場合 1 秒間に 50 回この様な状況が発生します。1 時間の間には 50×60 (秒) $\times 60$ (秒) = 180000 回この様な変化が起こるのですが、この間に流れる (送電する) 1 時間の電力量は、

$$\begin{aligned} & \textcircled{1} \times 18 \text{ 万回} + \textcircled{2} \times 18 \text{ 万回} + \textcircled{3} \times 18 \text{ 万回} + \textcircled{4} \times 18 \text{ 万回} \\ & = (\textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3} + \textcircled{4}) \times 18 \text{ 万回} = 0 \times 18 \text{ 万回} = 0 \end{aligned}$$

となります。なんと 18 万回電気が上下 (プラスマイナス) に流れても、結局エネルギーは送れないのです。では、18 万回の間、何が流れているかと考えると、電流は流れていますので、技術者は「無効電力 (送電されないゼロエネルギー)」が流れていると「定義」しました。この部分は直感的になかなか飲み込めず、交流が主体の電力系統が理解しにくい「元凶」となっています。

実際には、ずれが生じて送電エネルギーがゼロとなるのは、位相差が一定の条件の時だけです。電気では、1 周期を 360 度 (円の 1 周の角度) とすると取扱いが便利なのですが、図 6 は、1 周期の $1/4$ 、 $360 \text{ 度} \times 1/4 = 90 \text{ 度}$ のずれがある時に送電エネルギー量はゼロになることを示しています。それ以外のずれの場合 (位相差: X 度)、波形がサインカーブの場合次式となります。

$$1 \text{ 時間の送電電力量} = \text{電圧} \times \text{電流} \times \cos * (X \text{ 度}) \times 1h (* \text{コサイン})$$

ちなみに $\cos 90 \text{ 度} = \text{ゼロ}$ ですから、90 度の時、送電電力量はゼロとなり、上記の説明と合います。なお、電圧 $\times$ 電流 $\times \cos (X \text{ 度})$ を有効電力 (W) (エネルギーの送電に貢献する電力 (圧力)) と呼びます。

例として、ずれが 60 度の場合を考えてみましょう。

$$1 \text{ 時間の送電電力量} = \text{電圧} \times \text{電流} \times 1/2 \times 1h \text{ となります。}$$

直流と同じ電圧・電流とでエネルギーは半分 ($1/2$) しか送れません。直流と同じエネルギーを送るには、電圧か電流を 2 倍にする必要があります。この様なずれが電力系統でどのように生じるか、どの様に減少できるかは、交流送電の場合、非常に重要な検討要素となります。

電圧と電流があると送電エネルギーはゼロでも「圧力」が発生し、この圧力 = 電圧 $\times$ 電流を皮相電力 (VA) と呼びます。特に、電気を流す機械を作る場合、電圧と電流に耐える必要がありますから、皮相電力に関する検討が重要です。

なお、無効電力は 電圧 $\times$ 電流 $\times \sin * (X \text{ 度})$ で表されます。(*サイン)

ところで無効電力はエネルギーゼロですから、無効電力量は存在しません。

$\sin 90 \text{ 度} = 1$ ですから、皮相電力 = 無効電力、 $\cos 90 \text{ 度} = 0 \rightarrow$ 有効電力 0、すなわち、90 度の場合、1 時間送電しても送電エネルギーはゼロ、無効電力分の電流だけが流れるとの前記説明と合致します。

無効電力のコンセプトはイメージしにくく難解です。ここでは、とにかく、以下を覚えて (何となくでも理解して) いただければと思います。

I. 交流では、電圧と電流にずれが生じると無効電力が流れる

II. 無効電力が流れる状況 (ずれが発生する状況) では、送電エネルギー量は直流の電圧 $\times$ 電流 $\times$ 時間で計算される量を流せない、

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

なお、無効電力以外にも、交流と直流では「実効値」等の違いもありますが（前述の議論でも省いてます）、電力システムを理解する上で重要性が比較的低いので本稿では省略します。（教科書等ご参照下さい）

（余談）無効電力は誰にとっても難しい

無効電力は多くの電力関係者が「難しくてちょっと」と敬遠します。ですから、すっきり理解できなくてもがっかりしないで下さい。

実際の技術検討では、正しくデータを入れれば（これが結構大変ですが）、コンピュータが（技術者の思いにおかまいなく）無効電力や有効電力の正確な分析結果を示します。

なお、英語では、無効電力を **Reactive Power** と言いますが、日本語に約せば「反応電力？」でしょうか、「無効」も判りにくい表現ですが、「Reactive」も意味不明な気がします。このためかも知れませんが、海外でも、十分理解している電力関係者は少ない気がします。

○高電圧送電系統は 3 相交流

送電線鉄塔を見ると（図 7）、大抵の場合、左側、右側にそれぞれ 3 本ずつ、計 6 本の電線があります。送電鉄塔は高い電圧（数万ボルト以上）で電気を送る設備ですが、電気の電圧を 120 度ずつずらして送っています。120 度ずらすと、0 度の電圧、120 度ずれた電圧、240 度ずれた電圧、360 度ずれた電圧——、となりますが 360 度は丁度円を 1 周したことになり、ゼロ度と重なります。結局、0 度、120 度、240 度の 3 種類のずれた電圧（これを 3 相と呼びます）で送電しますが、この送電方式を 3 相交流と呼びます。送電線は右側で 3 相、左側でも 3 相、道路で言えば 2 車線として、3 相×2 車線＝6 本の電線で送るのです（2 回線送電と呼びます）。なお、海外では、3 本での送電線（1 回線送電）も良く見られます。3 相交流は、電圧が高くなるとメリットが大きいのですが、電力システムの検討では、1 相として扱い（単相）で検討することため、今回のお話では深入りしないこととします。なお、低い電圧での送電では（例えば電柱での送電）、単相送電も行われています。また、6 相送電や 12 相送電なども研究されていますが、汎用化していません。

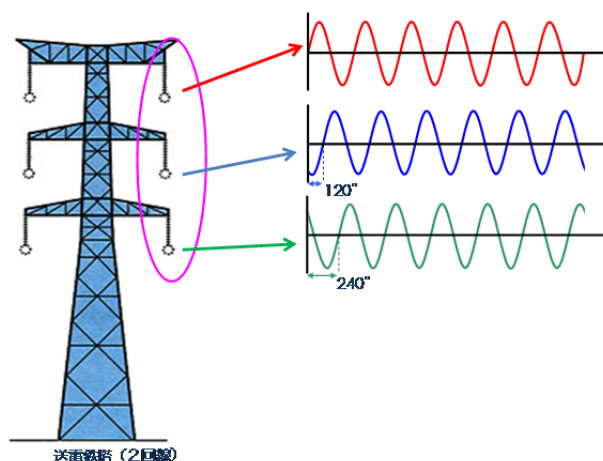


図 7 三相交流

○直流と交流：交流、直流どちらが良いのか

現在、電力システムは、主に交流で形成しています。前述した交流特有の無効電力問題も対応方法がありますので、致命的な差にはなっていません。

歴史的経緯もあり、世界の電力システムは主に交流で形成されていますが、交流、直流の電力技術は着実に進歩していますから、両方の良いところを取り入れて適材適所に活用するのが良いでしょう。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

筆者自身は、既に交流で電力系統が存在する場合はきりだけ活用しつつ、交流より良い効率が効率的に得られる場合、直流を活用するのが良いと考えます。

○直流と交流：電力系統に異なる周波数があるのは問題か

日本では、東日本が 50 Hz、西日本が 60 Hz です。需要家に不便があるのは事実と思いますが、世界を見れば、アメリカは 60 Hz、欧州が 50 Hz ですから、グローバルに見ると 2 つの周波数の存在が技術的に致命的ではないと思います。(日本として、両周波数の技術を持つのも悪くない気がします)

数学的には直流は周波数ゼロの送電方式です。前述の様に直流と交流を適宜使用するとは、周波数を変える設備(周波数変換設備)を介して交流と直流をつなげていくことになります。このつなげていく技術は着実に進歩していますし、50 Hz 系統と 60 Hz 系統も周波数変換設備を介しつなげることで、技術的に交流・直流を併用することと考え方は同じです。

直流と交流を適宜上手に利用する時代を迎えたと考え、「異なる周波数問題」はそれほど重要な課題でないと思われます。

なお、周波数が異なることよりも、50 Hz 系統と 60 Hz 系統をつなぐ「変換設備に至る部分の交流電力系統」の弱体性が重要な課題と思います。

(余談) 同じ周波数系統でも「わざわざ」違う周波数の様に扱う

米国や欧州では、同じ周波数にもかかわらず「わざと」周波数変換設備を介してつなげている場合があります。この場合、例えば 50 Hz 系統同士を、一旦直流に変換し、50 Hz へ再変換しつなげます。いわば、直流を仲立しつなげるのです。これは、電氣的なつながりを“わざと”薄めるためです(完全に縁を切る訳ではありません)。薄め方具合は、別の機会に説明する予定ですが、「なぜ薄めるか」については、政治的な面を含め複雑な経緯があることが多いです。なお、このような系統に関係する技術者にこの理由を深く問いつめるとご機嫌が悪くなる場合ことがありますので注意が必要です。

今回は、少し長くなりましたのでここまでとします。

更に次回、引き続き電力系統を理解する上で知っていただきたい基礎的な事項の解説をします。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

読者の広場

Q&A

Q: 「超電導磁気浮上式鉄道はどうして日本でだけ発達したのでしょうか? 経緯も含めて知りたいです。」

A: 日本でだけ発達したわけではありませんが、下記の経緯で今のところ、実用化を目指した開発は事実上、日本だけとなっている次第です。

磁気浮上を交通機関に利用するアイデアとしては、1914 年にイギリスのパシェレットが、電磁誘導反発浮上の原理によるリニアモーターカーのモデル実験を行っており、1936 年にはドイツの H. ケンパーが、電磁吸引制御方式の磁気浮上式鉄道の概念を発表しています。超電導磁石を用いた磁気による浮上・案内の方式は、1966 年にアメリカのブルックヘブン国立研究所の J.R. パウエルと G.R. ダンビイの両氏が連名で米国機械学会に発表しました (リニアシンクロナスマータによる推進の組み合わせは 1969 年に発表しました)。

日本では、新幹線システムを完成し、次の高速化を模索していた国鉄がこのアイデアに注目し、1970 年から超電導磁石による誘導反発方式の本格的な検討を開始しました。日本でのその後の開発の歩みに関しては <http://www.istec.or.jp/web21/series/series2011-2.pdf> の 8 ページ以降に詳しく書いてあります。ただ、「日本で超電導磁気浮上式鉄道が発達した理由」として、開発当初に日本の地理的な事情を考慮して、車両-軌道間の空隙を 10 cm 程度確保することを決めたことがあげられると思います。この方針を守るためには強力で軽量の超電導磁石が不可欠だからです。また、車両の浮上や案内に伴う制御が不要なシステムですので、安全性が高いことも挙げられます。超電導技術の採用でコスト高になると考えられることもありますが、そうではないことは上で述べたパウエル、ダンビイ両氏の論文にある次の文章でわかって頂けると思います。「車上の超電導コイルには損失なく数百 kA の電流を流し、地上コイルへの通電電流は数 kA だけに限定することによって通電にともなう損失を小さくできる。車上にだけ超電導コイルがあればよいので、コストも、必要な冷凍能力も少なく済む。」

米国では 1975 年頃にマサチューセッツ工科大学が「マグネプレーン=Magneplane」と名付けた 1/25 の模型による走行実験を行い、超電導磁気浮上式鉄道の可能性を実証しました。車両は実際に超電導コイルを搭載しており、全長 1 m、円形断面で直径 20 cm、重量 14 kg で、軌道長 116 m を走行しました (<http://www.magneplane.com/history.html>)。その後、1990 年に、日本の新幹線やヨーロッパでの高速鉄道の成功に刺激され、超電導磁気浮上式鉄道の開発が再開されました。目的は道路、飛行場の混雑緩和、エネルギー・環境問題の解決や、米国の技術力を高めることにあったようで、磁気浮上式鉄道は自動車や短距離航空機輸送の代替輸送機関として考えられましたが、1991 年には議会で磁気浮上式鉄道開発計画を含む法案が承認されたものの、予算化ができなかった模様です (<http://ntl.bts.gov/DOCS/TNM.html>)。

一方ドイツでは、1974 年にシーメンス社がエアランゲン研究所の構内に直径 280 m の円形軌道を建設し、超電導磁気浮上 (EDS)、リニアシンクロナスマータ (LSM) 推進の実験車両 EET-01 で 160 km/h までの走行確認試験を実施しました。円形軌道上で 230 km/h を目指して設計されていたため、軌道には 45° の傾斜 (カント) がついており、超電導磁石を搭載した 16 t の車両が長時間にわたり浮上できました。浮上高さは 10 cm でした。しかし、最終的にドイツでは、コストや、超電導磁石と冷凍システムの開発リスクが高いと判断し、常電導方式の磁気浮上方式の開発を進めることとなり、現在のトランスラピッドが開発されました。

(http://www.siemens.com/innovation/en/publikationen/publications_pof/pof_spring_2003/transra

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

[pid_article.htm](#))。このトランスラピッドは中国の上海で「上海磁浮列車＝Shanghai Maglev Train」
として実用化されています (<http://www.smtdc.com/en/>)。

回答者：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 部長 長嶋 賢 様

[超電導 Web21 トップページ](#)