

FSST NEWS

Forum of Superconductivity	No. 138
Science and Technology News	

発行
 一般社団法人
 未踏科学技術協会
 平成 25 年 7 月 15 日発行
 〒105-0003
 東京都港区西新橋 1-5-10
 新橋アマノビル 6 階
 Tel : 03-3503-4681
 Fax : 03-3597-0535
 Email : fsst@sntt.or.jp

<FSST NEWS No.138 目次>

<トピックス 1>

超高压超電導ケーブルの開発について

古河電気工業 向山 晋一2

<第 17 回超伝導科学技術賞を受賞して>

(1) 高温超電導に対する期待

住友電気工業 佐藤 謙一8

(2) 高温超伝導薄膜線材とその基板材料に関する研究

京都大学 土井 俊哉10

(3) トポロジカル超伝導の研究

名古屋大学 佐藤 昌利13

(4) トポロジカル超伝導体実証への道:ソフトポイントコンタクト分光法の開発

大阪大学 佐々木 聡17

(5) 金属資源電磁探査用高性能 SQUID 磁力計の開発

国際超電導産業技術研究センター 波頭 経裕20

(6) 400 kJ 級 RE 系 5T 高温超電導マグネット開発」

フジクラ 大保 雅載22

(7) Bi-2223 線材を用いたヒト脳研究用 3 テスラ MRI 装置の開発

京都大学 浦山 慎一25

<会議報告 1>

CEC-ICMC2013 会議報告

物質・材料研究機構 熊倉 浩明28

<研究室紹介>

(1) 岩手大学工学部電気電子・情報システム工学科 小林研究室30

(2) 横浜国立大学 大学院工学府 物理情報工学専攻 吉川研究室31

(3) 産業技術総合研究所 超伝導クリーンルーム(CRAVITY)32

○第 81 回超伝導ワークショップ案内34

○研究会の動き36

○国内超伝導関連会議／国際会議及び国外の主要な会議37

<トピックス 1>

超高压超電導ケーブルの開発について

Development of high voltage
superconducting cable

向山 晋一

古河電気工業(株) 研究開発本部

パワー&システム研究所 超電導応用開発部

Furukawa Electric CO., Ltd., R&D Group, Power &

System Laboratories, HTS Engineering Department

S. Mukoyama

1. はじめに

電力電気機器への超電導の適用の最大のメリットは、大電流を抵抗ゼロ(直流)もしくは低損失(交流)で送れることであり、そのためこれまでは既存の電力機器に対して、低電圧大電流による機器応用が超電導の歴史の中で進められてきた。古河電工が5年前に、超電導ケーブルのターゲットとして275 kV超電導ケーブルの開発を目指すと表明した時、「超電導ケーブルは現用ケーブルに比べて低電圧で運転できるところにメリットがある」、「超電導のように信頼性の十分確立されていない技術を電力の基幹系統で用いられる超高压で使用することなどありえない」との意見が大多数であった。ましてや、液体窒素中での電気絶縁について十分な実績、データもないところで、従来の超電導ケーブルの4倍となる275 kVの電気絶縁ができるのか、という不安もあり、その意味で技術面だけでなく、開発の意味を含めて関係者とは多くの議論をした。「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおける275 kV超電導ケーブルの開発[1]をスタートするにあたり、NEDO関係者、電力会社関係者と議論をして、現用ケーブルよりコンパクトでも大容量が送れ、布設コスト低減、布設スペース低減が見込まれる低電圧ケーブルの他にも、架空送電線並みの大容量送電が可能な超高压超電導ケーブルの実用化も必要であると結論した。この後押しもあり、5年間という短期間で、275 kV-1500 MVAという大容量送電線の開発に成功することができたと考えている。

2. 超高压超電導ケーブルの開発意義

図1に、日本国内の一般的な電力系統の流れを示す。電源系統から都市近郊までは275 kV~500 kVの架空送電線が使われており、基幹系変電所で275 kVや154 kVの電圧に降圧される。降圧された電力は、市街地における景観や環境調和を考慮して275 kVや154 kVの地中送電ケーブルで、都市近郊から都市内部へ導

入される。そして、中間変電所において66 kVなどの電圧に変換される。ここからさらに、地中送電ケーブルで配電用変電所まで送られ、配電用変圧器において6.6 kVまで降圧し各配電線へと送り出され、需要家まで送り届けられている。

これまで日本国内において、高温超電導ケーブルの開発は66 kV/77 kVのケーブルの開発であり、その目的は一次変電所からの送電容量を66 kV/77 kVで実現することで中間変電所の省略が可能となる点である。一方で、世界各国で都市部の電力需要の増大傾向は続いており、都市内導入線路の増強や、既設ケーブルの老朽化に対して送電容量アップを伴うリプレースが求められている。特に先進国では都市部の地下空間は、既に多様なインフラ設備で過密化しており、新たな洞道建設も困難な状況である。新興国においても、加速する経済発展に伴い電力インフラの整備は必須である。このような大容量送電に対して、架空送電線は布設コストの安価な送電線ではあるが、都市化率が高まるほどその建設は困難となってくる。そのために、架空送電線の代替も含めた超高压超電導ケーブルに対するニーズが将来高まるものと予想している。

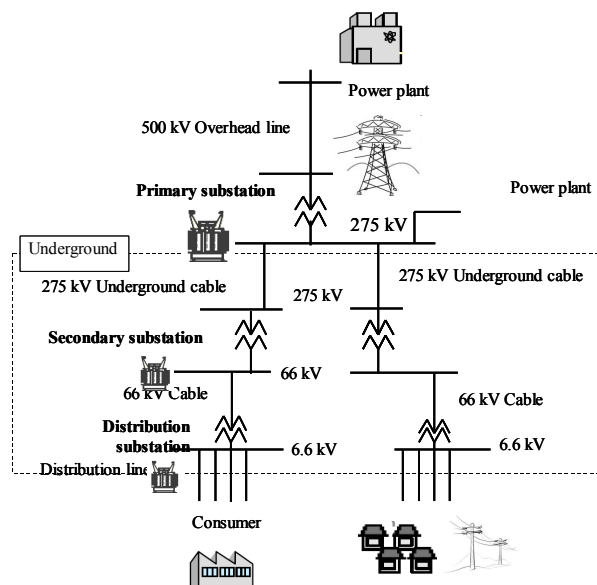


図1 電力系統の模式図

3. 超高压超電導ケーブルの開発[2]

高温超電導ケーブルの構造は、図2に示すようにフォーマと呼ばれる銅製のより線を巻芯として、テープ状の高温超電導線を多数本螺旋状に複数層巻きつけ超電導層を形成し、更にもその上に半合成紙を巻きつけて形成した電気絶縁層、超電導線を巻きつけた超電導シールド層そして銅テープや絶縁テープを巻きつけて

形成した保護層からケーブルコアが形成されている。このケーブルコアを液体窒素が流れる断熱管の中に収納して、断熱管の内管とケーブルコアの隙間に流れる液体窒素で、液体窒素温度(77 K)以下に冷却される。

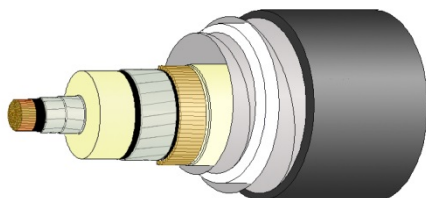


図2 275 kV 超電導ケーブルの構成図

このケーブルの電気絶縁方式は、液体窒素含浸多層紙絶縁方式(LN₂-impregnated paper insulation)と呼ばれる半合成紙を多層に巻きつけた絶縁方式である。275 kV-3 kA 超電導ケーブルの開発仕様として次の値を設定した。

- ・ 電気絶縁は、現用ケーブル同様に30年相当の寿命をもつこと、
- ・ ケーブル損失(交流損失、誘電損失の合計)としては0.8 W/m以下とすること、
- ・ 63 kA-0.6秒の短絡相当電流が流れても、ケーブルが劣化しないこと、
- ・ ケーブル外径として現用ケーブルよりコンパクトであること(150 mm)、

ケーブル損失については、0.8 W/m以下が実現できると、従来のCVケーブルに比べて送電損失を1/4以下にすることができることに加えて、絶縁厚が厚いことで顕在化する自己発熱による導体温度の上昇を、抑えることができる。交流損失低減については、導体に使用する2G-HTS 線材の I_c の向上に加えて、巻線での線材間のギャップの最小化、幾何学的な円筒導体化などの開発により達成することができている[3,4]。本来、本誌においては、超電導固有の現象について記載するべきだと思うが、これらについては多くの研究者により多数の研究論文が出されていること、低中圧超電導ケーブルにおいても重要技術であり開発が進められており、今後も多くの場面で発表されるのでここではあえて取り扱わないものとした。超高压ケーブルのこれらの詳細については、これまで発表してきた論文等[5-7]を参考文献として列記するので、参照していただければと思う。今回あえて、超電導現象ではないものの、超電導ケーブルの重要技術であり、また超高压ケーブル開発で他に研究報告もない固有な技術開発であることより、本論ではこの

部分に注目して紹介する。

4. 超高压超電導ケーブルの電気絶縁設計

絶縁層は、従来のOFケーブルと同様の構成の導体遮蔽層、絶縁層、絶縁遮蔽層からなる。設計の考え方も同様であり、導体の直上がもっとも電界が高く、絶縁厚さ t (mm)、電圧値 V (kV)、導体遮蔽層外半径 r (mm)、設計電界 E (kV/mm)とすると、(1)式となるように絶縁厚が決定される。

$$t=r \cdot \left[\exp\left(\frac{V}{E \cdot r}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

電圧値は、超電導ケーブルの試験および運転でかかるすべての電圧を考慮する必要があり、交流耐電圧、インパルス耐電圧、部分放電発生電圧が検討される。一方、設計電界は、長期信頼性やいろいろな不確定要素を考慮して決定する必要があり、そのために本絶縁構造における各種サンプル試験からデータを取得してきた[8]。



図3 モデルケーブルの電気絶縁試験装置
(上図：モデルケーブル、下図：試験用クライオスタット)

まずは、絶縁設計において、ケーブルに加わる最高電圧に対して、ケーブルが絶縁破壊されては困るので、ケーブルにかかる最高交流電圧と、雷インパルス電圧に対する耐電圧特性評価を行った。測定は、φ 20 mmの銅ロッドに絶縁厚1 mmの絶縁紙を巻きつけた絶縁モデルケーブル(図3)を作製し、液体窒素に浸漬して電気試験を行った。圧力は気泡が発生しないサブクール状態を実現するために、0.2 MPaとした。液体窒素浸漬を十分にするため、浸漬して圧力をかけたあと、30分以上保持した後に試験を開始した。交流破壊試験、インパルス破壊試験の結果を図4、図5に示した。それぞれの図は、破壊電圧を横軸にして、発生確率を縦軸としたワイブルプロットによる表記である。これは多様な原因によりばらつきを持つ破壊電圧値に対して、ワイブル分布で検討することが統計的に有効であることが知られている。これより、0.1%の発生確率を設計電界として定義して、交流耐電圧については、37 kV/mm、インパルス電圧については、極性により耐電圧値が異なることより、破壊電圧の低い負極性の値を用いて83 kV/mmを設計電界とした。

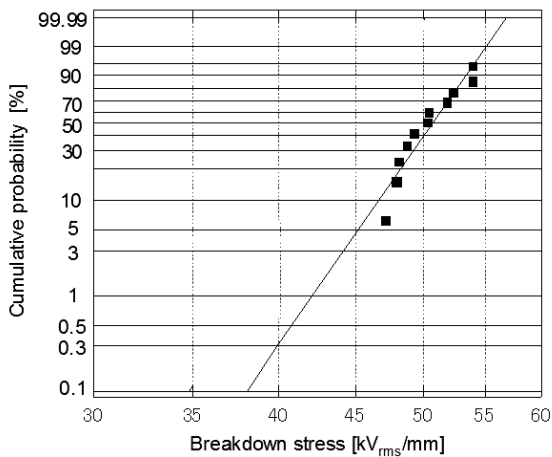


図4 交流破壊試験結果

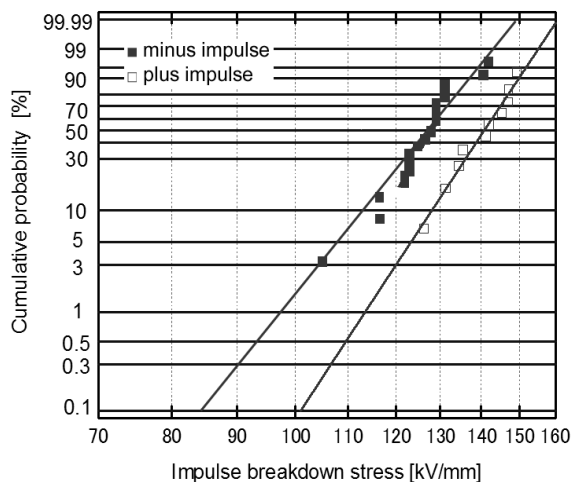


図5 インパルス破壊試験結果

一方で、電力系統におけるケーブルの信頼性と考えた場合、その絶縁に対する耐用年数は電気的ストレスの面で30年基準に考えている。電力ケーブルの絶縁破壊の原因とその機構は多数あるが、一概に絶縁体中の微小な欠陥に電界が集中し、微弱な放電(部分放電)が発生し、これにより絶縁体が劣化して、長時間後には絶縁破壊に至ることが説明されてきた。そこで、超電導ケーブルの電気絶縁設計としては、部分放電フリーであることにより絶縁体の劣化を防ぐこと、さらに部分放電発生電圧(電界)の経年的変化を考慮して、30年経過後においても部分放電を発生させないことが、安全過剰と言われるまでの高信頼性を実現するための設計思想である。部分放電測定は、図3の耐電圧試験と同じ試験設備で絶縁厚1 mmのサンプル評価を行い、その後実機クラスと端末を有する課電試験装置を開発して実施した。その結果、絶縁厚1 mm、10 mmで部分放電開始電界(PDIE)を取得した結果、絶縁厚みに依存せずに、ほぼ一定の値を示した。そこで、図6のワイブルプロットから0.1%の発生確率で22 kV/mmを設計ストレスとした。

長期信頼性のに関しては、破壊電圧の時間推移と、部分放電開始電界の時間推移を調べることにした。1 mm厚さのサンプルを用いて、クライオスタット内で液体窒素に浸漬した状態で連続的に電圧をかけて、破壊にいたる時間および部分放電が発生する時間の測定を行なった。その結果として破壊に至るV-tカーブを図7、部分放電発生に至るV-tを図8に示す。劣化曲線を $V \propto t^n$ とした場合のn値を見ると、破壊電圧については $n = 50$ 、部分放電発生については $n = -80$ という値が得られた。破壊に対しては、CVケーブルやOFケーブルに比べて劣化が起きにくいケーブルであるといえる。設計においては、22 kVを設計電界として用いることとした。

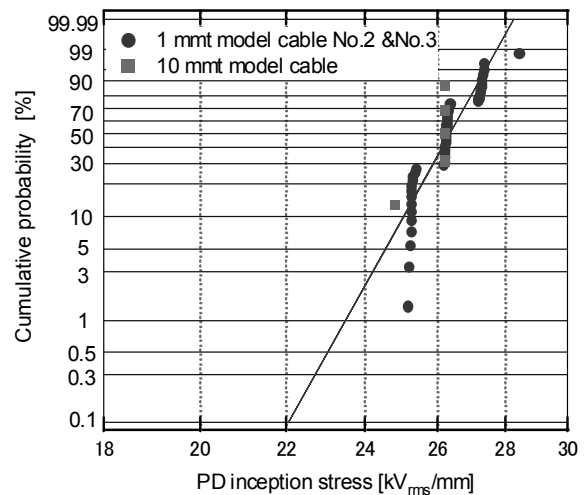


図6 部分放電開始電圧

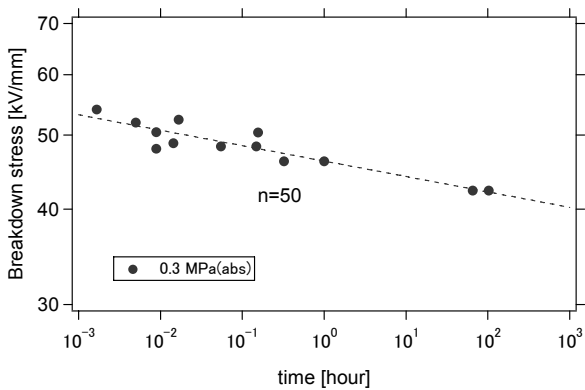


図7 交流破壊電圧の寿命特性

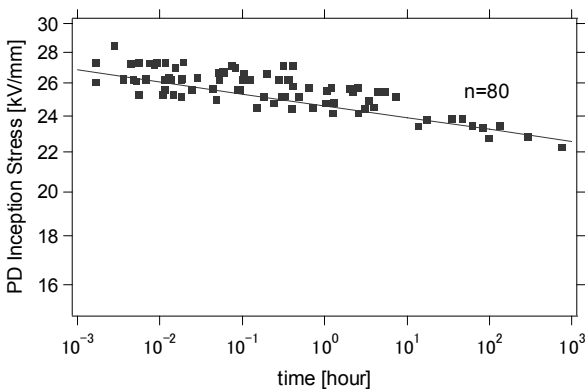


図8 部分放電開始電圧の寿命特性

5. 275 kV-3 kA 超電導ケーブルの製造

上記絶縁設計を受けて、YBCO線材を用いた275 kV-3 kA超電導ケーブルの設計を行った。その結果を表1に示す。また、製造したケーブルのタケノコ写真を図9にしめす。

表1 275 kV-3 kA超電導ケーブルの設計

構造	仕様	外径
フォーマ	中空銅より線 400 mm ²	35.4 mm
超電導導体	2層超電導, 3 mm幅60本 交流損失0.124 W/m at 3 kA	
絶縁体	半合成紙22 mm厚 誘電損失0.6 W/m	79.4 mm
超電導シールド	1層超電導, 5 mm幅43本 交流損失0.076 W/m at 3 kA	81 mm
Cuシールド	210 mm ² 銅編組	90 mm
保護層	半合成紙	
2重断熱管 外部シース	ステンレス2重管, 真空断熱層, PEシース	150 mm

6. 瀋陽古河電纜での超電導ケーブル試験

6.1 試験目的

275 kV-3 kA超電導ケーブルの長期化課通電試験[9]を、中国瀋陽市において行なった。この試験の目的として、次の4点を掲げて準備を進めた。

- (1) 実機サイズのケーブル、中間接続部、終端接続部をもちいたケーブルシステムを構築して、実用レベルの運転電圧、運転電流相当で試験評価を行う。
- (2) 電圧に関しては1ヶ月間の連続課電により30年運転相当の加速試験を行い、その健全性を評価する。
- (3) 課電と通電を同時に行うことで、ケーブルに負荷がある状況での課電試験を行う。
- (4) 中国で試験を行うことにより、日本の技術を経済発展が進む東アジアに対してPRし、日本の技術の進歩性、優位性をアピールする。一方で、科学技術の進展に対する国際化に寄与して、この分野での日本の影響力を高める。

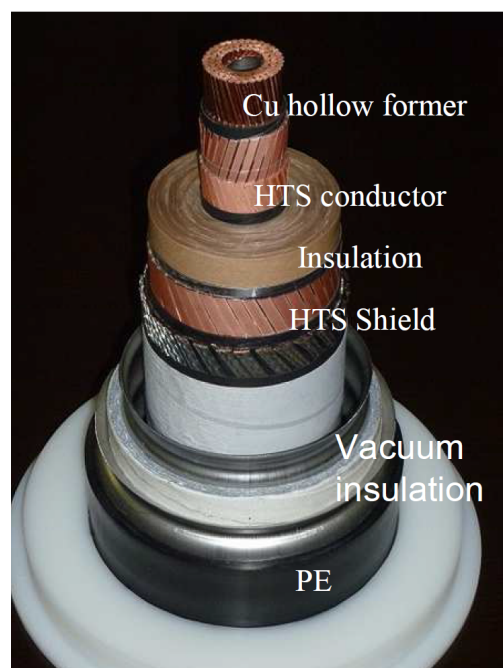


図9 30 m-275 kV-3 kA 超電導ケーブル構造

6.2 モデルケーブル線路建設

図10は、30 mの275 kVの3 kAのHTSケーブル装置全体のレイアウトを示す。モデルケーブル線路は、日本国内で製造した30 m超電導ケーブルと中間接続部、そして終端接続部から構成されている。超電導ケーブルは、実系統での布設を考慮して直径(6 m)でU字型に曲げた。その両端には、終端接続部が接続されて、高圧である導体層を、熱絶縁と電界緩和をして取り出している。導体層には通電トランスによる通電と、課電トランスによる課電を行うために、CVケーブルを用いてループを形成した。超電導ケーブルの電流を流すために、CVケーブル側は気中終端接続部を3組立て、3本のCVケーブルで3 kA級の電流を流した。また、直線部には、中間接続部を構築した。

冷却システムは、試験期間が短期間であることから、

コストを考慮してオープン型の液体窒素循環装置を用意した。そのフロー図を、図11に示す。オープン型循環装置は、超電導ケーブルを冷却する液体窒素は閉ループを構成し、加圧することで液体窒素をサブクーラ状態として、ケーブルを循環冷却する。ケーブルで温められた液体窒素は、サブクーラの中の熱交換器でサブクーラ内の排気ポンプで減圧して77 K以下にされた液体窒素で冷やされる。ケーブルの熱負荷は、サブクーラの液体窒素は排気で消費されるので、2日に1回配送・充てんされる液体窒素タンク(CE: Cold Evaporator)から補給される。

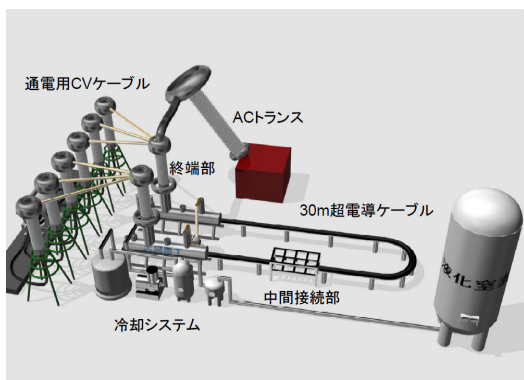


図10 30 m-275 kV-3 kA 超電導ケーブルレイアウト

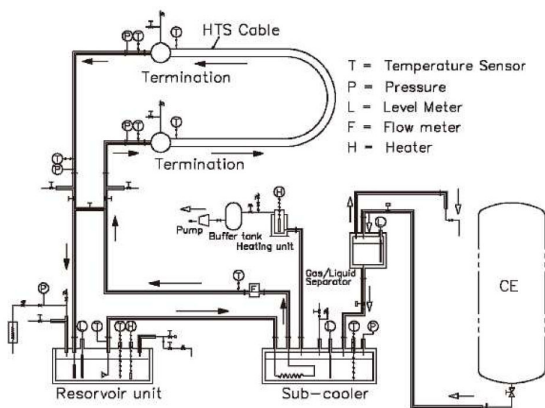


図11 275 kV-3 kA 超電導ケーブル用冷却システム

6.3 30 m 超電導ケーブル試験

6.3.1 通電試験 (I_c 測定)

液体窒素浸漬による冷却後、導体とシールドの I_c を中間接続部込みで測定した。その結果、導体は6800 A、シールドは7000 Aであり、輸送後および組立後にも性能低下は生じていない。

6.3.2 課電試験

30 m超電導ケーブルの課電試験は、日本の電力規格であるJEC 34084[10]をベースに決定した試験項目

および試験電圧で実施した。

(1) 雷インパルス試験

30 mケーブルでは雷インパルス試験が試験設備の容量の問題から実現できないために、製造ロットから切り出した5 mサンプルで実施した。試験電圧は、雷インパルス耐電圧値 (LIWV: Lightning Impulse Withstand Voltage) に裕度(1.1)をかけた1155 kVを3ショット行い、破壊が生じないことを確認した。

(2) 商用周波耐電圧試験

超電導ケーブルの電力システムを使用する場合、ケーブルにかかる異常電圧は、雷インパルス、開閉サージ電圧(インパルス)、地絡時の電圧上昇である。商用周波(交流)電圧においてもっとも高い電圧は、一線地絡時の健全相の電圧上昇である。これは、中性点接地方式により電圧上昇を抑えることもできるが、今回の試験においては可能性として最も高い電圧に耐えることを目的として、中性点非設置系を考慮して、式(2)で与えられる310 kVを試験電圧として、10分間かけて部分放電を測定し、部分放電の発生がないことを確認した。

$$V = \frac{E_0}{\sqrt{3}} \times K \quad (2)$$

E_0 : ケーブル最高電圧(300 kV)、

K : 負荷遮断時の電圧上昇倍率(1.39)



図12 275 kV-3 kA 超電導ケーブル (中国瀋陽市)

(3) 長期課通電試験

電力ケーブルにおける長期試験に相当する長期課通電試験を実施した。定常運転試験は、本システムでの安定的な運転条件となる平均液体窒素温度73 K、液体窒素流量30 l/minの冷却条件で、対地間電圧200 kVの課通電条件で30日間連続運転を行った。通電は、3000 Aの通電を日中8時間、夜間16時間をゼロとした負荷変動を与えて実施した。この試験は、ケーブルの運転電圧より、寿命係数 $n = 49$ を用いて式(3)で与えられる過電圧をくわえることで、30年相当の運転を1ヶ月に加速するものである。

$$V = \frac{E_0}{\sqrt{3}} \times \left(\frac{30y \times 365.25d}{30d} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

7. まとめ

NEDOプロジェクトのなかで、YBCO線材を用いた275 kV-3 kA超電導ケーブルの開発を行ってきて、2013年3月にすべての目標値をクリアして完了した。開発では、重要な技術的な目標のうちの、ケーブル損失を0.8 W/m未満にすることは、本書では詳しい説明は省いたが、テープ線材の幅を3 mm幅のYBCO線材を用いた導体で低交流損失を実現し、ポリプロピレンの比率の高い半合成紙を用いることで3 kA-0.8 W/mを達成した。さらに、電気絶縁については、多くの設計データを取得して、そのデータより30年運転で絶縁破壊が起きないケーブル設計を行った。これらの検証のために、30 mの275 kV-3 kA超電導ケーブルを製造して、中国瀋陽市で長期課通電試験を成功裏に実施した。

本研究においては、引き続き継続研究を実施している。この中で、超電導についての信頼性を検証する一つとして、ヒートサイクルを行うことで熱的、機械的な履歴による超電導特性の劣化について確認する予定でいる。

8. 謝辞

本研究は、NEDOの「イットリウム系超電導電力機器開発」プロジェクトの一環として実施したもので、NEDO省エネルギー部殿および、研究遂行及び超電導線材の供給で国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所殿の協力をいただきました。また、京都大学雨宮研究室殿には交流損失の解析、早稲田大学石山研究室殿には過電流試験の解析、名古屋大学早川研究室殿には絶縁部の部分放電データの支援を受けました。今回のケーブルに使用した主な超電導線材は、フジクラ殿の基板に昭和電線ケーブルシステム殿の

YBCO成膜した線材を用いている。また、本研究の電気絶縁の開発においては、有識者から構成する絶縁小委員会を立ち上げ、超電導ケーブルの絶縁設計、課電試験について水谷照吉委員長(愛知工業大学)には多くの有益なアドバイスをいただきました。上記、皆様に深く感謝します。

また、研究を実施した古河電工超電導応用開発部の研究員、試験遂行に協力いただいた瀋陽古河電纜のスタッフ、ケーブル製造の協力いただいたビスキャス電力ケーブル製造部には、謝意を表します。

参考文献

- [1] 藤原 : 超電導高効率送電技術, 電気評論, 7 (2008)
- [2] 向山他 : 275 kV 級高温超電導ケーブルの開発, 電気学会研究会資料. ASC, 超電導応用電力機器 2010 (1), 29-33, 2010-01-25, 2010.
- [3] N. Fujiwara, *et al.*: Development of YBCO power devices in Japan, Issue 20, Physica C, vol. 470, pp. 980-985, 2010.
- [4] S. Mukoyama, *et al.*: Conceptual design of 275 kV class high-Tc superconducting cable, Physica C, vol. 470, pp.1563-1566, 2010.
- [5] 向山他 : イットリウム系高温超電導電力ケーブルの開発, 古河電工時報 第 123 号(平成 21 年 2 月)
- [6] M. Yagi, *et al.*: Progress of 275 kV-3 kA YBCO HTS cable, Physica C, vol. 471 pp.1274-1278, 2011.
- [7] 竹内他 : Y 系超伝導線材の細線化による超伝導送電ケーブルの交流損失低減, 低温工学・超電導学会講演概要集 81, 107, 2009-11-18
- [8] S. Mukoyama, *et al.*: DEVELOPMENT OF 275 KV 3 KA HTS POWER CABLE, 8th International Conference on Insulated Power Cables. C.6.2. Jicable'11, C.6.2, 2011.
- [9] 八木他 : 世界最高電圧の 275 kV-3 kA 高温超電導ケーブルの開発, 古河電工時報第 131 古河電工時報第 131 号(平成 25 年 2 月)
- [10] JEC-3408-1997 特別高圧(11 kV~ 275 kV)架橋ポリエチレンケーブルおよび接続部の高電圧試験法

<第17回超伝導科学技術賞を受賞して>

(1) 高温超電導に対する期待
In expectation to High Temperature Superconductivity

住友電気工業(株)
佐藤 謙一
Sumitomo Electric Industries, Ltd.
K. Sato

1. はじめに

高温超電導は21世紀の最大の課題である地球環境の改善やエネルギー供給問題の解決、医療をはじめとした社会生活の改善、電気推進船・超電導電気自動車などの交通・輸送ネットワークの変革、工場など生産現場における高い磁場を応用した新プロセスなど、私たちの身近な社会に貢献可能な技術です。

2. 高温超電導線開発と実用製品の現状

高温超電導が1986年に発見されて四半世紀を過ぎた今、高温超電導線はLHCの大型マグネットや冷凍機冷却型マグネットの電流リードに採用され、ヒッグス粒子の発見など科学の分野で大きな貢献しています。ビスマス系超電導線を用いた超電導電力ケーブルは世界各国で実系統に連係され、モータは実規模の大きさと性能検証が進み、マグネットについては、工場で稼働する例が実現しています。

高温超電導線の開発の状況について、ビスマス系(Bi-2223)超電導線を例に紹介したい。

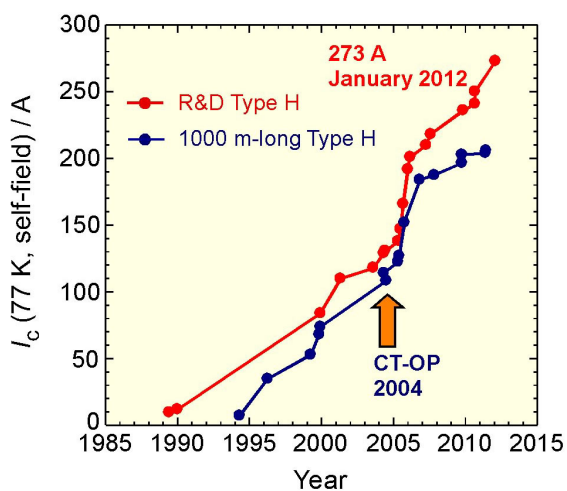


図1 ビスマス系超電導線の I_c 向上

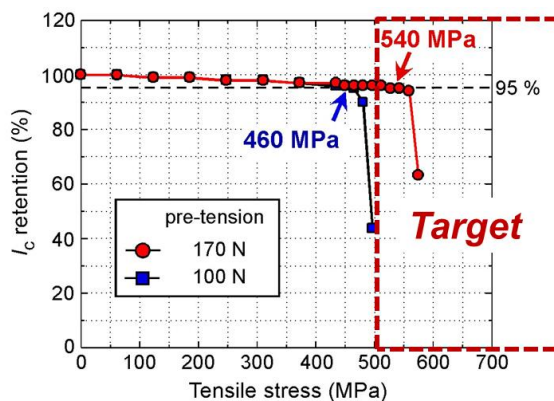
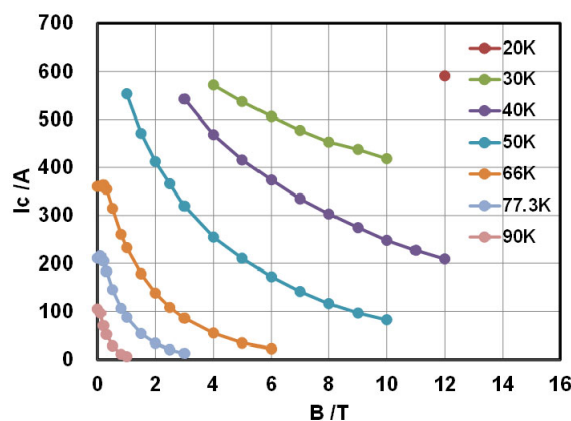


図2 ビスマス系超電導線の機械特性の向上

(a) $B // ab$ plane



(b) $B \perp ab$ plane

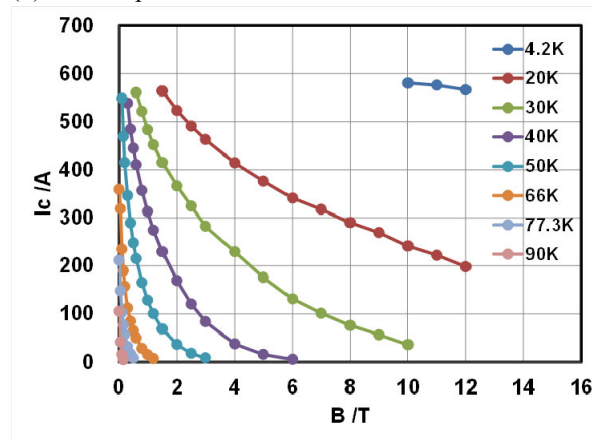


図3 ビスマス系超電導線の I_c - B - T 特性

図1はビスマス系超電導線の性能向上の歴史を示す。1988年に前田らによりビスマス系超電導材料が発見されて以来、臨界電流の向上、長尺線材の量産製造技術、機械的性能の向上、コストパフォーマンスの向上と営々として開発努力[1-5]が継続されてきた。図2はビスマス系超電導線の機械的特性向上の現状を示しており、50 μ m厚の新物質補強材を用いること、および補強材のpre-tensionを利用することで500 MPa以上の引張応力

に耐えられることがわかってきた。

図3は、 I_c - B - T 特性を示したもので、幅広い温度で応用が可能なことがわかる。

表1には超電導ケーブルの代表例を示します。この表からは直流ケーブルの例が増えていることが明確にわかります。最近のパワーエレクトロニクスとの進展、および再生可能エネルギーの拡張に伴い、直流送電による電力輸送が今後の電力網に大きな影響を与えることが予想されます。その中で超電導ケーブルが大きな役割を果たすことが求められています。

表2にはモータの代表例を示します。電気推進船用のモータ開発が多く認められます。我が国では電気自動車用モータも開発されています。バスやトラックなど、定期運行しgo/stopが頻繁な用途で高トルク特性の威力が発揮されることが目標となります。

表3にはマグネットの代表例を示す。すでに商用化されたものが出てきています。Stand aloneで冷凍機冷却されるという冷却の簡便化がこの分野を可能としています。

表1 ビスマス系超電導ケーブルの代表例

国	プロジェクト	電圧 (kV)	電流 (kA)	長さ (m)	実施場所	備考
日本	東電/電中研/住電	66	1	100	研究所	終了
	中部大(直流)	20	2	200	研究所	運転中
	横浜	66	2	240	電力系統	運転中
	住友電工	3.3	0.4	70	工場	運転中
	鉄道総研(直流)	1.5	5	30	研究所	運転中
	経産省産業者(直流)	10	5	2,000	データセンター	計画
米国	Albany	34.5	0.8	350	電力系統	終了
	Ohio	13.8	3	200	電力系統	終了
	LIPA	138	2.4	600	電力系統	運転中
欧州	Denmark	30	0.2	30	電力系統	終了
	VNIKP	20	1.4	200	電力系統	計画
	Essen	10	2.3	1,000	電力系統	計画
	St. Petersburg(直流)	20	2.5	2,500	電力系統	計画
中国	Yunnan	35	2	33.5	電力系統	終了
	Lanzhou	10.5	1.5	75	工場	運転中
	IEE/CAS(直流)	1.3	10	380	工場	運転中
韓国	KEPCO	22.9	1.25	100	研究所	運転中
	DAPAS1	22.9	1.25	100	研究所	終了
	DAPAS2	154	3.75	30	研究所	終了

表2 ビスマス系超電導モータの代表例

開発者	出力	回転数 (rpm)	トルク	冷却
東京海洋大	モータ 10 kW	850	0.137 kNm	30 K, Ne
京大	モータ 20 kW	-	-	77 K, N ₂
住友電工	モータ 30 kW	2,200	0.136 kNm	77 K, N ₂
Siemens	モータ 400 kW	1,500	2.5 kNm	27 K, Ne
IHI	モータ 400 kW	250	-	70 K, N ₂
川崎重工	モータ 1 MW	190	50 kNm	30 K, He
KERI/Doosan	モータ 1 MW	3,600	2.65 kNm @1,800rpm	30 K, Ne
武漢船舶研	モータ 1 MW	500	-	30 K, Ne
Siemens	モータ 4 MW	120	320 kNm	27 K, Ne
AMSC	モータ 5 MW	230	-	30 K, He
AMSC	モータ 36.5 MW	120	2,900 kNm	30 K, He
Siemens	発電機 4 MW	3,600	10 kNm	27 K, Ne

表3 ビスマス系超電導マグネットの代表例

機器	開発者	特徴	T _{op}	形式	備考
FCL	CESI	9.4kV	77K	Resistive	Grid
	Nexans	12kV	77K	Resistive	Grid
	InnoPower	35/220kV	77K	Saturated iron	Grid
MRI	GE	Limb size	27K	Layer wound	-
	Kyoto Univ	3T(Brain)	20K	LHe free	2008-2012
NMR	NIMS	24.2T/1.05GHz	4K	Layer wound	2007-2013
Magnet	Toshiba	1.4T	20K	Helmholtz	Single X'stal
	Zenergy	1.8m long	30K	Billet Heater	Commercial
	Sumitomo	8T	20K	200mm bore	2006
	Sumitomo	5T	20K	100mm bore	Practical use

3. 未来に向かって

このような状況下で近未来を展望すると、世界中で電力系統に連係された超電導ケーブルにより高効率送配電が可能となりまた従来の交流電力網と超電導直流電力網がお互いに電力流通に寄与していると予想されます。高トルク・小型・軽量・低損失の四拍子揃った超電導モータにより未来の交通技術を拓き、超電導高磁場マグネットが工場や医療現場で昼夜を問わず活躍している、という状況も予見します。そのような日に向けて、大勢の仲間の皆様とともに「萬事入精(ばんじにつせい)(誠心誠意立ち向かい、日夜奮闘して成功させること)」のころで進んでいきたいと思ひます。

大学や研究開発独立法人などのアカデミアがサイエンスの基礎にしっかりと土台を作り、その土台の上に産業側が材料の持っている極限の性能まで線材特性を高めコストを低減し、様々な応用製品のシステム開発により、産官学の連携で良い循環を回すように願ってやみません。

参考文献

- [1] T. Nakashima, S. Kobayashi, T. Kagiya, K. Yamazaki, M. Kikuchi, S. Yamade, K. Hayashi, K. Sato, G. Osabe, J. Fujikami: Cryogenics **52** (2012) 713.
- [2] K. Sato, S. Kobayashi, and T. Nakashima: Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 010006.
- [3] 小林慎一、中島隆芳、山崎浩平、佐藤謙一: 低温工学、**47** (2012) 422.
- [4] 小林慎一、中島隆芳、山崎浩平、佐藤謙一: 電気学会論文誌 A、**132** (2012) 387.
- [5] K. Yamazaki, T. Kagiya, M. Kikuchi, S. Yamade, T. Nakashima, S. Kobayashi, G. Osabe, J. Fujikami, K. Hayashi and K. Sato: Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 054015.

(2) 高温超伝導薄膜線材とその基板材料に関する研究

Researches on Superconducting Coated Conductors and Their Substrates

京都大学大学院エネルギー科学研究科
土井 俊哉
Graduate School of Energy Science,
Kyoto University
T. Doi

1. はじめに

高温超伝導物質の発見[1, 2]以来27年が経過した。この間の多くの関係者の方々の努力が実り、最近では液体窒素冷却で使用可能な超伝導線材が市販されるに至っている。高温超伝導線材の研究開発では我が国が常に世界をリードして来ており、現在市販されているBi系線材[3]、Y系線材 (IBAD法[4]および集合組織金属基板法[5, 6])のいずれも日本発の技術であることは非常に誇らしい。本稿では、筆者もその開発に携わってきた集合組織金属基板法による高温超伝導線材について概観したい。

高温超伝導物質は、その結晶構造内部に特筆すべき不均質性を内包していて、*c*軸方向に金属的部分(超伝導性を発現する部分)と絶縁的部分が層状に積層された構造となっている。この結晶の不均質性(2次元性と呼ばれることが多い)が原因で[7-9]、77 K近傍の温度領域では量子化磁束線格子の状態が金属系超伝導物質のものと大きく異なり、ピンニングセンターが有効に機能し難いことが知られている。特に2次元性の高いBi系超伝導物質($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$)においては顕著であり、液体窒素冷却で使用する高温超伝導線材を開発するためには相対的に2次元性が小さいY系($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)、Tl系($\text{TlBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+3}$)、Hg系($\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+3}$)などの超伝導物質を用いて線材を作製する必要がある[10]。

しかし、これらの2次元性の低い高温超伝導物質の結晶粒界部分の超伝導的結合性には問題があり、例えばY系超伝導物質では結晶同士のなす角度が 10° 以上となると J_c が著しく低下する[11, 12]。つまり、高温超伝導線材を実用化するためには、結晶の*a*、*b*、*c*軸を全て揃えた状態(2軸配向)にする必要がある。この性質は実用化に際して非常に大きな問題となることは容易に想像できる。高温超伝導線材以前には1 kmもの長さに渡って結晶の向きを2軸とも揃えた工業製品などは存在しなかった。

この難問を解決するために半導体産業分野の技法が超伝導線材の分野に持ち込まれ、単結晶的に表面

の結晶が2軸配向したテープ上に高温超伝導物質をエピタキシャル成長させることが試みられた。ここでキーとなる技術は2軸配向したテープをどのようにして得るかである。線材は長尺でかつ柔軟性を持つことが要求されるので、基板には金属を用いる必要がある。2軸配向した金属テープの作製には様々な手法が試みられたが[4-6, 13-15]、現在ではハステロイテープ上に斜め方向からイオンビームを照射しながら2軸配向した酸化物中間層を形成する方法[4] (IBAD法)と金属の圧延再結晶集合組織を利用する方法[5] (集合組織金属基板法、特にNiテープを使った場合はRABiTS法[6]と呼ばせている)のみが実用化に至っている。

2. 集合組織金属基板法による高温超伝導線材

金属加工の分野では、圧延や再結晶によって金属結晶が特定の方向に揃う事は非常に良く知られた現象であり、工業的にも広く用いられている技術である。特にFCC金属では{100}面が圧延面に平行でかつ<001>方向が圧延方向に平行に揃った立方体集合組織というシンプルな集合組織が得られ、高温超伝導線材の基材テープとして好適である。高温超伝導膜は酸素ガスが存在する雰囲気中800°C程度の高温で作製される。その為、基材テープには耐熱性と耐酸化性が求められる。また高温超伝導膜をその上にエピタキシャル成長させるために格子定数も*a*軸長0.38 nmに近い必要がある。これらの条件を満足する金属は意外に少なく、まず初めにAgを使って開発が進められた[5, 16-18]。Agは高温超伝導物質と800°Cでも反応しないため、2軸配向Agテープ上に直接高温超伝導物質をエピタキシャル成長させることが可能であるが、Agは一般的には合金型の集合組織を示し、立方体集合組織を得るためには100°C前後の温度での圧延を必要とし、その製造条件範囲は非常に狭い[17]。また、Agの格子定数は0.41 nmであり、高温超伝導物質との格子マッチングがそれほど良くないため、高温超伝導物質のエピタキシャル成長可能な成膜条件範囲が狭い。日立製作所、鹿児島大学、中部電力、田中貴金属などを中心に研究が進められたが、Agが高価であるために線材コストが高くなることなどもあって実用化には至らなかった。

一方、Al、Ni、Cuなどは純金属型の集合組織を示すFCC金属であり、幅広い作製条件範囲で容易に安定して立方体集合組織が得られる[19]。しかしながらAlの融点は高温超伝導物質の作製温度より低いいため選択の対象外である。

Niは表面に形成される酸化ニッケル層が高温酸化雰囲気中でも厚く成長しないため、その上に中間層と高温超伝導物質層を形成しやすい。米国オークリッジ国立

研究所が最初に立方体集合組織Niテープ上に Y_2O_3 、YSZ、 CeO_2 を中間層としてエピタキシャル成長させた後、Y系系超伝導層を2軸配向状態で形成することに成功し[6]、77 K、無磁場中で 1×10^6 A/cm²を越える実用レベルの J_c が得られることを示した。現在は基材テープにはNi-5at%W合金テープが用いられ、広く市販されるに至っている。

Cuを基材テープに用いた研究は、鹿児島大学、中部電力、田中貴金属、京都大学のグループが精力的に研究を行い[20-26]、短尺ながら77 K、無磁場中において 3.2×10^6 A/cm²と高い J_c が得られることを報告している。Ni合金テープは価格が高く、また強磁性を示すため交流を用いた機器での使用が難しい。CuはFe、Alに次いで低価格の汎用金属であり、強磁性を示さず、電気抵抗も非常に低いため、高温超伝導線の基材としては好ましい。しかしながら、Cuは高温超伝導膜の作製条件下では表面(界面)に厚い酸化銅の層を形成し、その進行が止まらない問題があった。これを解決するためにCuテープ表面にメッキによりNi層を薄くエピタキシャル成長させる技術が開発され、酸化銅の生成が回避されるようになった。また、Cuテープとステンレステープを貼り合わせることによって、テープの結晶配向度の低下を招く合金化によらないで、テープの機械強度の向上にも成功している。

図1に、CuとSUS316の貼合せ(Cu/SUS)テープの上に形成したNiめっき層の{111}極点図を示す[24]。Niめっき層中のNi結晶は、 $[100]_{Ni}/[100]_{Cu}$ かつ $[010]_{Ni}/[010]_{Cu}$ の方位関係を保つようにCu層上にエピタキシャル成長していることが分かる。ピーク半値全幅(FWHM)を求めたところ 4.5° であり、良好な2軸配向が得られていることが分かる。この半値全幅は、Ni系テープの半値全幅 $5 \sim 7^\circ$ よりも小さい。また、高温に保持さ

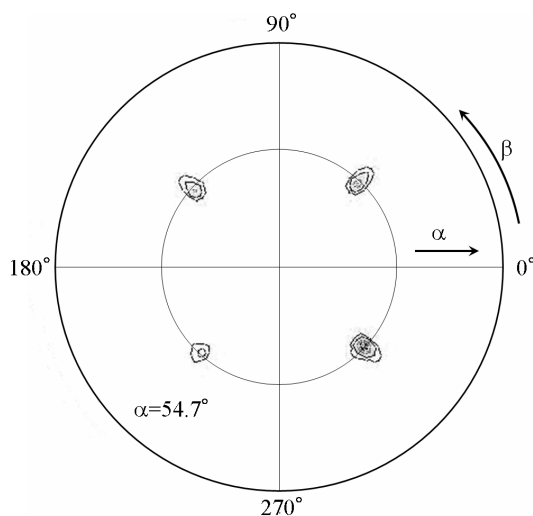


図1 立方体集合組織Cuテープ上にめっきしたNi層の{111}極点図

れた時にテープ表面に出現する粒界グループもCuはNi系テープよりも浅いことが確認されている。

これまでのY系高温超伝導線材においては、2軸配向金属テープ上に形成する中間層はいずれの場合も絶縁性であった。最近、我々はNiめっきCu/SUSテープ上に導電性のNbドーブ $SrTiO_3$ (Nb-STO)を中間層として使用したY系線材の短尺試料作製に成功した。図2にNiめっきCu/SUSテープ上に絶縁性の $CeO_2/YSZ/CeO_2$ 積層膜及び導電性のNb-STO単層膜を中間層に用いて作製した $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導薄膜の77 K、自己磁場中における $I-V$ 測定結果を示す。導電性のNb-STOを中間層として使用した試料では、絶縁性物質を中間層として作製した試料に比べて、 I_c 以上の電流を流した時の $I-V$ 曲線の勾配が1/20程度と大幅に小さくなっていることが分かる。この結果は、導電性物質を中間層に用いたことで、 I_c 以上の電流を試料に流した場合には I_c を越える常伝導電流の大部分がCu/SUSテープに流れたこと、つまりCu/SUSテープが安定化層として働いたことを示している。現在のY系超伝導線材の製造コストの中で $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導層の上に形成しなければならないAg+Cu安定化層はかなり大きな割合を占めているため、このような低抵抗のCuテープと導電性中間層の組み合わせはコスト低減に非常に有効であると思われる。

以上のことから、SUS316などの高強度金属テープを強度メンバーとして貼合せた立方体集合組織Cuテープ上にNiおよびNbドーブ $SrTiO_3$ を中間層として形成した後、高温超伝導物質をエピタキシャル成長させて作製する高温超伝導線材は実用線材として非常に有望であると考えられる。

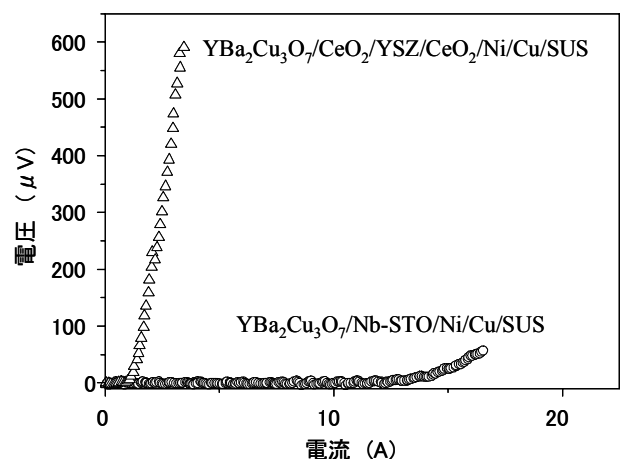


図2 NiめっきCu/SUSテープ上に絶縁性の $CeO_2/YSZ/CeO_2$ 及び導電性のNbドーブ $SrTiO_3$ を中間層として作製した $YBa_2Cu_3O_7$ 超伝導膜の77 Kにおける $I-V$ 測定結果

3. まとめ

本稿では液体窒素冷却で使用可能な高温超伝導線材の製造手法の代表例の一つである集合組織金属基板法を概観した。Agテープに始まり、Ni合金テープを使用することで実用化に至り、現在ではCuにおいても研究開発が進められている。CuはFe、Alに次いで安い汎用金属であり、また電気抵抗が非常に低い。中間層を導電性物質とすることで、基材として使用するCuテープに安定化層を兼ねさせることも可能であることから、理想的な基材テープであろう。Feでは高温超伝導体の基材として好ましい方位の集合組織が得られていないこと、及びAlの融点は660°Cと低いことを考えると集合組織金属基板法で使用するテープとしてはCuがベストの選択であると考えられる。

高温超伝導線材が市販されるに至り、最近では機器の開発が進んでいる。しかしながら、超伝導が社会に貢献できるようになるためには「価格」という大きな壁を乗り越えなければならない。材料、線材、機器、システムの全ての分野で更なる性能向上と価格低減が必要であることは論を待たない。超伝導の実用化に向けて、筆者も微力ながら自分の専門とする分野で貢献してゆきたい。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、これまで一緒に研究を行ってきた日立製作所、鹿児島大学、中部電力、田中貴金属工業、ファインセラミックスセンター、九州大学、物質・材料研究機構、京都大学の方々に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] J. G. Bednorz and K. A. Muller: *Z.Phys.* **B64** (1986) 189.
- [2] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu: *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 908.
- [3] 佐藤 謙一: *応用物理* 第 **66** 卷(1997) 356-356.
- [4] Y. Iijima, N. Tanabe, O. Kohno and Y. Ikeno: *Appl. Phys. Lett.* **60** (1992) 769-771.
- [5] T. J. Doi, T. Yuasa, T. Ozawa and K. Higashiyama: *Advances in Superconductivity VII*, Eds. K. Yamafuji & T. Morishita, Springer-Verlag, Tokyo, (1995) 817-820.
- [6] A. Goyal, D. P. Norton, J. D. Budai, M. Paranthaman, E. D. Specht, D. M. Kroeger, D. K. Christen, Q. He, B. Saffian, F. A. List, D. F. Lee, P. M. Martin, C. E. Klabunde, E. Hartfield and V. K. Sikka: *Appl. Phys. Lett.* **69** (1996) 1795-1797.
- [7] J. R. Clem: *Phys. Rev. B* **43** (1991) 7837.
- [8] P. H. Kes, J.Aarts, V.M.Vinokur and C. J. van der Beek: *Phys. Rev. Lett.* **64** (1990) 1063.
- [9] D. H. Kim, K. E. Gray, R. T. Kampwirth, J. C. Smith, D. S. Richeson, T. J. Marks, J. H. Kang, J. Talvacchio and M. Eddy: *Physica C* **177** (1991) 431-437.
- [10] 下山 淳一, 岸尾 光二: *応用物理* 第 **73** 卷 (2004) 14-21
- [11] D. Dimos, P. Chaudhari, J. Mannhart and F. K. LeGoues: *Phys. Rev. Lett.* **61** (1988) 219-222.
- [12] D. Dimos, P. Chaudhari and J. Mannhart: *Phys. Rev. B* **41** (1990) 4038-4049
- [13] K. Hasegawa, K. Fujino, H. Mukai, M. Konishi, K. Hayashi, K. Sato, S. Honjo, Y. Sato, H. Ishii and Y. Iwata: *Appl. Supercond.* **4** (1996) 487-493.
- [14] M. Fukutomi, S. Aoki, K. Komori, R. Chatterjee and H. Maeda: *Physica C* **219** (1994) 333-339.
- [15] K. Matsumoto, S. B. Kim, J. G. Wen, I. Hirabayashi, T. Watanabe, N. Uno and M. Ikeda: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** (1999) 1539-1542.
- [16] T. J. Doi, N. Sugiyama, T. Yuasa, T. Ozawa, K. Higashiyama, S. Kikuchi and K. Osamura: *Advances in Superconductivity VIII*, Eds. H. Hayakawa & Y. Enomoto, (Springer-Verlag, Tokyo, 1996) p.903.
- [17] 土井俊哉, 東山和寿: *応用物理* **65** (1996) 372.
- [18] Toshiya Doi, Toshiaki Kozono, Yoshinori Hakuraku, Naoji Kashima and Sigeo Nagaya, "Transport Properties of Y Ba₂Cu₃O₇ and NdBa₂Cu₃O₇ Films Prepared on Textured Ag Tapes", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** (2005) 2667.
- [19] 長嶋晋一編: 「集合組織」, 丸善出版, 1984 年.
- [20] M. Tokudome, T. Doi, R. Tomiyasu, S. Sato, Y. Hakuraku, S. Kubota, K. Shima, N. Kashima and S. Nagaya: *J. Appl. Phys.* **104** (2008) 103913.
- [21] M. Tokudome, T. Doi, R. Tomiyasu, M. Daio, Y. Hakuraku, K. Shima, S. Kubota, N. Kashima and S. Nagaya: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009)
- [22] 富安, 土井, 徳留, 大王, 白樂, 窪田, 嶋, 鹿島, 長屋: *低温工学* **44** (2009) 269-277.
- [23] N. Kashima, K. Shima, T. Doi, S. Kubota, T. Watanabe, M. Inoue, T. Kiss and S. Nagaya: *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009) 3299-3302.
- [24] 大王, 土井, 白樂, 窪田, 嶋, 鹿島, 長屋: *低温工学* **44** (2009) 488-495.
- [25] 魏, 土井, 勝目, 宮永, 稲田, 白樂, 嶋, 窪田, 鹿島, 長屋: *低温工学* **47** (2012) 276-281.
- [26] 宮永, 土井, 稲田, 大原, 平田, 白樂, 窪田, 嶋, 鹿島, 長屋: *低温工学* **47** (2012) 667-673.

(3) トポロジカル超伝導の研究 Research on Topological Superconductors

名古屋大学大学院工学研究科
佐藤 昌利

Department of Applied Physics, Nagoya University
M. Sato

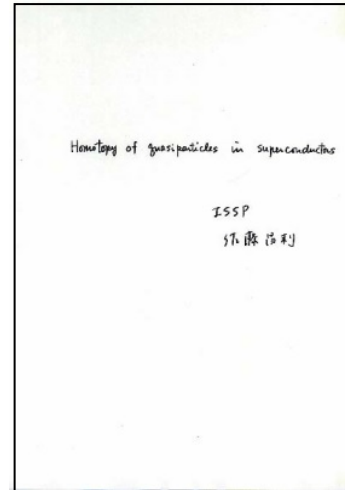
1. はじめに

古くから、量子ホール効果が、基底状態の波動関数のトポロジカルな性質に由来することはよく知られている[1]。量子ホール効果は、磁場下にある2次元電子が示す現象であるが、同様のトポロジーに由来する現象を他の系で探索する試みは、1980年の量子ホール効果発見当初から存在していた[2]。

私が、超伝導体のトポロジカルな性質を研究し始めたのは、今から10年ほど前の2002年頃で、当時はReadとGreenの研究やIvanovの研究を契機として、スピン三重項超伝導体と量子ホール状態のアナロジーが追求され始めたころであった[3,4]。当時、東京大学物性研究所で行われた研究会で、青木秀夫氏(東京大学)がIvanovの研究を紹介しており、それに興味を持って修士課程の学生であった柴田正和氏と一緒に勉強し始めたことがきっかけであった。また、磁場下の熱伝導率測定より超伝導体のギャップ関数の詳細が実験的に決定可能となり始めており[5]、これまでと異なる手法で研究する必要があるのではないかと感じたことも研究を始めるきっかけとなった。

図1に挙げたのは、2004年初めて物性研で行ったセミナーで使ったスライドで、この時、初めてトポロジーを使って超伝導体を分類する試みを報告した。これを見ると、銅酸化物高温超電導体、 $^3\text{He-A}$ 相や $^3\text{He-B}$ 相など現在トポロジカル超伝導体として知られるようになった多くの物質が正しく分類されている。しかし同時に、現在では間違っていると判明している部分も存在している。特に、2次元時間反転対称な超伝導体のトポロジカル数が正しく与えられていない。時間反転対称性を課すと新しいトポロジーが可能となることは、このセミナーの後、2005年にストリング理論の研究者であるP. Horavaがストリング理論とK理論の関係をつかい初めて指摘し[6]、同年少し遅れて、量子スピンホール効果と関連して、KaneとMeleによって時間反転対称な系のトポロジーを特徴づける Z_2 トポロジカル数が導入された[7]。また、トポロジーの分類に、従来の超伝導体研究を踏襲して、スピン一重項超伝導体とスピン三重項超伝導体を用いている事も、その当時しっくりしなかった点であった。スピン・軌道相互作用や不純物を考慮すると、そのような分類

は数学的厳密性を失ってしまうが、それでもトポロジカルな性質は保たれるからである。この問題は、2008年にAltland-Zirnbauerによるランダム行列の理論をトポロジーの分類に導入することによって、古崎昭氏(理研)らによって解決された[8]。実は、2006年頃、Altland-Zirnbauerの分類をトポロジーの分類に使うことをY. Avishai氏(Ben Gurion大・イスラエル)や福井隆裕氏(茨城大)に示唆されたのだが、残念なことに当時、詳しく検討するに至らなかった。



Spin-Singlet SC

時間反転対称性(T)	強相関時間空間	スピントビ	強相関の半導体
有	$\mathcal{R} = S^2$	\mathbb{Z}_2	line node
無	$\mathcal{R} = S^2/U(1)$	\mathbb{Z}	point node

Spin-Triplet SC

時間反転対称性(T)	強相関時間空間	スピントビ	強相関の半導体
有	$\mathcal{R} = S^2$	\mathbb{Z}_2	無
有	$\mathcal{R} = S^2/U(1)$	\mathbb{Z}_2	point node
無	$\mathcal{R} = S^2/U(1)$	\mathbb{Z}	point node

図1 物性研におけるセミナーでのスライド

2008年頃より、量子ホール効果との類似性を使い、超伝導体を研究する手法の有効性は広く認められるようになり、量子ホール状態と類似の性質をもつ超伝導体はトポロジカル超伝導体と呼ばれるようになった。以下では、トポロジカル超伝導体に関する話題について私自身の研究を中心に述べることにする。

2. マヨラナ粒子

トポロジカル超伝導体特有の励起状態がマヨラナ粒

子である[9]。マヨラナ粒子とは、自分自身が反粒子であるディラック粒子のことであり、そのハミルトニアンはディラック粒子と同じ運動量の一次の項から始まる。一方、その波動関数(場)は、本質的に実数となり、そのため粒子の波動関数の複素共役で記述される反粒子との区別がつかない。ボーズ粒子では、実数場で記述され自分自身が反粒子となる粒子は、光子、フォトンなど古くからいくつも知られているが、フェルミ粒子では自分自身が反粒子となる粒子は長い間見つかっていなかった。マヨラナ粒子は、もともとニュートリノを記述する粒子として導入されたものであるが、ニュートリノがほとんど相互作用しない粒子であることもあって、ニュートリノが自分自身反粒子であるマヨラナ粒子であるか、未だ分かっていない。ところが、最近、マヨラナ粒子が超伝導体で実現可能であることが明らかになり、注目を集めている[9]。

トポロジカル超伝導体中にマヨラナ粒子が現れるのは以下の理由による[3,9]。まず、量子ホール状態と同様に、トポロジカル超伝導体には、端や表面に線形分散を持つ励起が現れる。したがって、その励起のハミルトニアンは自然とディラック・ハミルトニアンとなる。一方、自分自身が反粒子となるのは超伝導クーパー対の存在による。超伝導体の基底状態には多数のクーパー対があるため、電子の反粒子であるホールは容易にクーパー対内の電子と対消滅して電子へと移り替わる。そのため、超伝導体内では、電子とホールの区別がつかなくなり、自分自身が反粒子となるのである。これら2つの性質が合わさって、マヨラナ粒子がトポロジカル超伝導体に現れる事になる。

マヨラナ粒子の示す興味深い性質の一つは、非可換統計性である[10]。非可換統計とは、粒子の交換操作が行列であらわされる統計性であり、通常のボーズ統計やフェルミ統計と異なり、粒子の交換によって元の状態と直交する新しい状態を作りだすことが可能である。実際には、マヨラナ粒子自体は通常の電子と同じフェルミ統計に従うが、量子渦などにマヨラナ粒子の束縛状態が作られると、それらが非可換統計に従うことになる。以下に述べるようにこの不思議な性質は、自分自身が反粒子であるという性質からの帰結である。

トポロジカル超伝導体では、量子渦のコアやナノワイヤの端にマヨラナ粒子の束縛状態が現れる。これら束縛されたマヨラナ粒子も、自分自身が反粒子であるので、その演算子は複素共役で与えられる反粒子の演算子と同じとなり、 $\gamma_0^\dagger = \gamma_0$ の関係式を満たす。この一見単純な関係式が、マヨラナ粒子に関する不思議な性質を導く。通常、束縛状態の演算子は、その状態を生成する生成演算子となるが、上の関係式は、そのようなことが

許されないことを意味するからである。つまり、仮に γ_0^\dagger を生成演算子とすると、上の関係式から生成演算子と消滅演算子 γ_0 が同じことになり矛盾が生じるからである。事実、マヨラナ粒子の束縛状態単体では、生成演算子を定義できず、束縛状態2つを使って初めて生成演算子が定義できることが知られている。したがって、マヨラナ粒子の束縛状態が量子渦や端に一つしかない場合には、離れた場所にある別の量子渦や端に束縛されたマヨラナ粒子も使ってはじめて生成演算子が定義されることになる。ここで注意したいのは、離れた場所にある2つのマヨラナ束縛状態で生成演算子が定義されるということは、マヨラナ粒子の場所を特定することができないということである。これによって、渦の間に非局所的な量子相関が生じ、その結果、渦あるいは端の統計性が通常と異なる非可換統計となる。

非可換統計が実現できれば、粒子の交換によって新しい状態が作られるため、新しい量子コンピュータへ応用可能だと考えられている[10]。ところが、私がトポロジカル超伝導体の研究を始めた2002年頃は、一部の研究者を除いて、あまり現実味をもってトポロジカル超伝導内のマヨラナ粒子は研究されていなかった。状況が変わったのは、ごく最近のことで、この5年間の理論・実験の大きな進展によって、多くの研究者がマヨラナ粒子を現実味のあるものとして研究を進めることになったのである。

私が、トポロジカル超伝導体の研究を始めた2002年頃に話を戻すと、当時の問題の一つは、スピン三重項超伝導体しかトポロジカル超伝導体知られていないことであった[3]。スピン三重項超伝導体は、非常に稀な超伝導状態で、現在までに Sr_2RuO_4 などごく一部の物質しかそのような超伝導体を示さない。また、非可換統計を実現するには、さらに半整数量子渦と呼ばれる未だ実証されていない特別な渦を用意しなくてはならず[4]、そのこともあって非可換統計は現実味が薄いと考えられていた。

そこでまず、通常のs波超伝導体で非可換統計の励起を作る可能性を検討することから研究を始めた。この時、学生時代に行ったことのあるソリトンの研究が役立った。通常の電子の代わりに線形分散をもつディラック電子を考えれば、ソリトンの研究でなじんでいた指数定理を使うことができ、量子渦の中に束縛された状態ができることが数学的に厳密に示せたからである。その結果、s波超伝導状態であっても、ディラック電子が奇数個存在する系では量子渦が非可換統計に従うことが分かった。一方、ディラック電子が奇数個存在しないといけなことから、物質系でこの系を実現することは簡単でないことも同時に分かった。ニールセン・二宮の定理より、ディ

ラック電子はバルクには必ず偶数個現れることが知られていたからである[11]。そこで、結果は宇宙論へ応用することに素粒子論の論文として発表した[12]。

ところが、2006年になってトポロジカル絶縁体と呼ばれる物質の表面には、奇数個のディラック電子が存在することが明らかになった[13]。ニールセン・二宮の定理はバルクのディラック電子の数に対しては制限を与えるが、表面のディラック電子の数に対しては制限を与えないので、その制約を逃れることが可能であったのである。実際、2008年になって上記の論文[12]で議論したのと同じハミルトニアンが、トポロジカル絶縁体と s 波超伝導体の接合面で実現されることがFu-Kaneにより指摘され、非可換統計の現実味が急速に増すことになった[14]。残念なことに、上記論文は素粒子論の論文として発表していたためか、Fu-Kaneの論文に引用されておらず、現在でもほとんど注目を集めていないが、一部の研究者はその価値を認めてくれているようである[15]。

トポロジカル超伝導体に関する研究は、2008年以降、急速に進むことになった。いくつもの新しい仕事が、2008年からの数年間になされることになったが、私の関係した研究では、ディラック電子を使わなくても、通常の電子の s 波超伝導体で非可換統計を実現する可能性が見出されたことが大きな進展であった[16]。これは、藤本聡氏(京都大学)の研究を契機として始まった[17]。氏は、空間反転対称性の破れた系に現れるラシュバスピ軌道相互作用とディラック電子のハミルトニアンの類似性に着目して、通常の s 波超伝導状態であっても、ラシュバスピ軌道相互作用とゼーマン磁場を取り入れることで、マヨラナ粒子が実現されるという可能性を初めて議論した。この提案は、Fu-Kaneの提案のようにトポロジカル絶縁体という特別な物質を必要とせず、またラシュバスピ軌道相互作用、ゼーマン磁場ともに制御可能であるため、より多くの系でマヨラナ粒子を実現する可能性を秘めた非常に魅力的な提案であった。

2008年春にこの提案がなされるとすぐに、私は、このアイデアに魅力を感じ、詳細を検討することにした。ひとつ気がかりだったのは、元の提案は基底変換を使った直観的な議論を使っていて、エッジ状態の存在やトポロジカル相転移といったトポロジカル超伝導体となる条件の議論が十分でなかったことである。また、私自身、2006年に書いた論文で空間反転対称性の破れた系がトポロジカル相転移を起こす条件を検討したことがあり[18]、藤本氏の提案した条件がその結果と一致していないことも気がかりであった。そこで、まずは、エッジ状態の存在から確認することにした。

エッジ状態の計算からすぐに明らかになったことは、氏の提案した条件下ではマヨラナ粒子は存在しないこと

であった。しかし、同時に、最初の提案よりも強いゼーマン磁場の下では、トポロジカル相転移が起きて、マヨラナ粒子を得ることができるとも明らかになった。更に、同じ条件下で系のトポロジカル数を計算するとこれがゼロでないことも明らかになった。

この段階で結果をどのように公表するか、少し迷ったが、元々のアイデアに負う所が大きいと判断して、藤本氏に結果を伝えることにした。公平なことに藤本氏はすぐに私の結果を認めてくれ、その結果、共同研究が始まることになった。藤本氏との共同研究の結果明らかになったことは以下の通りである[16, 17, 19, 20]。

- a) 系のゼロ磁場でのフェルミエネルギーを E_F とし、 s 波超伝導ギャップを Δ とした時、ラシュバスピ軌道相互作用のスピンの向きと直交する向きにゼーマン磁場 H をかけると、磁場が $H > \sqrt{\Delta^2 + E_F^2}$ を満たすとき、マヨラナ粒子が系のエッジあるいは量子渦のコアに現れる。
- b) 磁場がギャップ関数よりも大きくなくては、マヨラナ粒子が実現されないので、マヨラナ粒子を得るには、ローレンツ力に由来するクーパー対破壊効果を避ける工夫が必要である。
- b)の結果は、重い電子系など上部臨界磁場が大きい超伝導体以外のバルクの超伝導体ではマヨラナ粒子を作ることが難しいことを意味している。そこで、現在、我々のマヨラナ粒子生成機構は、ローレンツ力の働かない中性冷却原子の s 波超流体や、ナノワイヤー系で研究が進んでいる[21]。

ここでいくつか関係する研究を挙げておく。私と藤本氏以外に同様の系の研究がDas Sarma氏(Maryland大・アメリカ)のグループによって行われている。メリーランド大のグループは、まず、藤本氏の研究に遅れて、ラシュバスピ軌道相互作用をもつ s 波超流動冷却原子系でマヨラナ粒子を実現する可能性を提案している[22]。この提案は本質的に藤本氏が最初の行った議論を(藤本氏の論文の引用なしに)そのまま用いており、エッジ状態の計算やマヨラナ粒子の存在条件の検討をしていない。そのため、 p 波フェシュバツハ相互作用の下では d 波超流体が実現されると主張するなど誤った結論が導かれている。また、同グループは、我々の論文発表後、半導体・超伝導接合で我々の見出したトポロジカル相転移をつかい、マヨラナ粒子を実現するアイデアを提案している[23, 24, 25]。半導体・超伝導接合を使うというアイデアは実用上非常に重要な進展であり注目に値するが、マヨラナ粒子を得るための条件などはすべて我々が得たものと全く同じであり、その結果はラシュバスピ軌道相互作用とゼーマン磁場を使うという元のアイデアの汎用性の高さに由来するところも多い。また、しばしば、

ゼーマン磁場でトポロジカル相転移を起こすという我々の基本的なアイデアや相転移の条件式までが、誤ってメーランド大のグループの成果として取り上げられているのは、全く残念である。

マヨラナ粒子に関しては、近年、実験的検証の方面も急速に進展している。マヨラナ粒子の実験的検証は、日本から始まった。まず、広島大の永井・東谷グループの理論、東工大の奥田・野村グループの実験の共同研究により、世界で初めて³He-B相のマヨラナ粒子の存在を支持する結果が得られている[26]。また、超伝導体に対するマヨラナ粒子の実験的検証でも日本のグループが世界に先んじている。まず、Sr₂RuO₄がトポロジカル超伝導体由来のエッジ状態を持つことが産総研の柏谷聡氏らによって実証されている[27]。Sr₂RuO₄に関してはスピン自由度からマヨラナ粒子が2つあると考えられており、自由度の数ではディラック粒子と区別つかないため、マヨラナ粒子を初めて実証したかについては意見が分かれるところであるが、トポロジカル超伝導に起因するディラック型のエネルギー分散をもつ表面状態を初めて検証したという点で非常に重要な成果である。続いて、大阪大学産総研の安藤陽一氏のグループにより、Cu_xBi₂Se₃の表面状態の検出が行われている[28]。理論的予想によると、この物質の表面にはマヨラナ粒子は一つしかないことが知られており、もし本当に表面状態が存在するとすれば、それはマヨラナ粒子であると考えられている[29,30]。実際、阪大のグループが得たトンネル伝導度は、マヨラナ粒子の存在を仮定して我々のグループで計算したトンネル伝導度とよく一致しており[31]、超伝導体でマヨラナ粒子を世界で初めて検出した可能性が高い。藤本氏と共同で提案したラッシュバースピン軌道相互作用のある系でのマヨラナ粒子に関しては、現在、ナノワイヤーを使った実験が行われている[32]。この実験では、我々が与えた条件(先に述べたa)の条件)と矛盾のない強さのゼーマン磁場下で、マヨラナ粒子の存在を示唆する実験結果が得られている。

3. 最後に

現状をまとめると、上で述べたように様々な系でマヨラナ粒子の存在を示唆する実験結果が得られ始めている。その一方、非可換統計性のようなマヨラナ粒子特有の現象を示唆する実験結果はまだなく、マヨラナ粒子の存在を確立するには理論・実験ともまだ多くの検討すべき課題が残されている。今後、この魅力的な分野に多くの人が参入し、さらなる発展によって、近い将来、新しい超伝導科学技術への道が開かれることを期待する。

参考文献

- [1] D. J. Thouless, M. Kohmoto, M. P. Nightingale, M. den Nijs, Phys. Rev. Lett. **49** (1982) 405.
M. Kohmoto, Ann. Phys. (NY) **160** (1985) 343.
- [2] J. E. Avron, R. Seiler, B. Simon, Phys. Rev. Lett. **51** (1983) 51.
- [3] N. Read and D. Green, Phys. Rev. B **61** (2000) 10267.
- [4] D. A. Ivanov, Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 268.
- [5] 井澤公一、松田祐司、固体物理 **37** (2002) 235.
- [6] P. Horava, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 016405.
- [7] C. L. Kane and E. J. Mele, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 146802.
- [8] A. P. Schnyder, S. Ryu, A. Furusaki, and A. W. W. Ludwig, Phys. Rev. B **78** (2008) 195125.
- [9] F. Wilczek, Nat. Phys. **5** (2009) 614.
- [10] C. Nayak, S. H. Simon, A. Stern, M. Freedman, S. Das Sarma, Rev. Mod. Phys. **80** (2008) 1083.
- [11] H.B. Nielsen and M. Ninomiya, Nucl. Phys. B **185** (1981) 20.
- [12] M. Sato, Phys. Lett. B **575** (2003) 126.
- [13] M. Z. Hasan and C. L. Kane, Rev. Mod. Phys. **82** (2010) 3045.
- [14] L. Fu and C. L. Kane, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 096407.
- [15] J. E. Moore, Physics **5** (2012) 84.
- [16] M. Sato, Y. Takahashi, and S. Fujimoto, Phys. Rev. Lett. **103** (2009) 020401.
- [17] S. Fujimoto, Phys. Rev. B **77** (2008) 220501(R).
- [18] M. Sato, Phys. Rev. B **73** (2006) 214502.
- [19] M. Sato and S. Fujimoto, Phys. Rev. B **79** (2009) 094504.
- [20] M. Sato, Y. Takahashi, and S. Fujimoto, Phys. Rev. B **82** (2010) 134521.
- [21] 佐藤昌利、固体物理 **46** (2011) 399.
- [22] C. Zhang, S. Tewari, R. M. Lutchyn, and S. D. Sarma, Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 160401.
- [23] J. D. Sau, R. M. Lutchyn, S. Tewari, and S. D. Sarma, Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 040502.
- [24] R. M. Lutchyn, J. D. Sau, S. Das Sarma, Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 07701.
- [25] Y. Oreg, G. Rafael, F. von Oppen, Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 077002.
- [26] Y. Aoki, Y. Wada, M. Saitoh, R. Nomura, Y. Okuda, Y. Nagato, M. Yamamoto, S. Higashitani, and K. Nagai: Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 075301.
- [27] S. Kashiwaya, H. Kashiwata, H. Kambara,

- T. Furuta, H. Yaguchi, Y. Tanaka, and Y. Maeno, Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 077003.
- [28] S. Sasaki, M. Kriener, K. Segawa, K. Yada, Y. Tanaka, M. Sato, Y. Ando, Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 217001.
- [29] L. Fu and E. Berg, Phys. Rev. Lett. **108** (2010) 097001.
- [30] M. Sato, Phys. Rev. B **81** (2010) 220504(R).
- [31] A. Yamakage, K. Yada, M. Sato, Y. Tanaka, Phys. Rev. B **85** (2012) 180509(R).
- [32] V. Mourik, K. Zuo, S. M. Frolov, S. R. Plissard, E. P. A. M. Bakkers, L. P. Kouwenhoven, Science **336** (2012) 1003.

(4) トポロジカル超伝導体実証への道： ソフトポイントコンタクト分光法の開発 Experimental effort to realize topological superconductor: Development of soft point contact spectroscopy technique

大阪大学産業科学研究所
佐々木 聡、クリーナー マルクス、
瀬川 耕司、安藤 陽一
Institute of Scientific and Industrial Research,
Osaka University
S. Sasaki, M. Kriener,
K. Segawa, and Y. Ando

1. はじめに

第17回超伝導科学技術賞の受賞理由である「トポロジカル超伝導体の理論と実証」の中で我々はトポロジカル超伝導体の実証の部分を担当している。結論から述べると、トポロジカル超伝導体候補物質である可能性が高い超伝導体に対し、我々は新しく開発したソフトポイントコンタクト法を用いたコンダクタンス分光実験を行い、トポロジカル超伝導体候補物質であるための必要条件にあたるアンドレーエフ束縛状態がその表面に存在することを実証した。この表面アンドレーエフ束縛状態はゼロエネルギー状態のマヨラナフェルミオンからなり、コンダクタンス分光実験でゼロバイアスに現れる微分コンダクタンスのピーク(ZBCP: Zero Bias Conductance Peak)として観測される。今回我々が注目した物質は、エッジ状態に“奇数個(対消滅しない)”のマヨラナフェルミオンが存在する時間反転対称なトポロジカル超伝導体の候補物質で、具体的には電子ドーピングされたトポロジカル絶縁体である $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ とホールドーピングされたトポロジカル結

晶絶縁体である $\text{Sn}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ である[1,2]。

2. トポロジカル超伝導体

さて、本稿の題名にあるトポロジカル超伝導体はどのような超伝導体だろうか。それは実空間で幾何学的に不思議な形をしている超伝導体ではなく、その準粒子の波動関数がヒルベルト空間で非自明なトポロジーを持つ非従来型超伝導体である。そのトポロジーは、準粒子波動関数がヒルベルト空間全体に何回巻きついているかを表す整数に量子化された巻きつき数(トポロジカル不変量)で定義され [3]、巻きつき数が異なる状態、例えば真空とは連続的につながらない。その結果、トポロジカル超伝導体では、準粒子励起によるエネルギーギャップがあいているバルクに対して、表面ではギャップが一度閉じたギャップレス金属状態が形成される。このギャップレス状態は表面アンドレーエフ束縛状態であり、電子励起とホール励起が独立ではないため生成消滅の区別がないマヨラナフェルミオンだとみなされる。特に時間反転対称なトポロジカル超伝導体の場合、非局在するゼロモードのヘリカルマヨラナフェルミオンが奇数個存在する。このマヨラナフェルミオンは、実空間における位置の入れ替え方によって元の状態とは全く異なる状態を形成するため(非可換統計性)、究極的にはこれらの状態をbitとするトポロジカル量子コンピュータへの応用が期待される[4]。

では、実際どのような物質がトポロジカル超伝導体の候補になるのだろうか。2008年にL. FuとC. L. Kaneは、強いスピン軌道相互作用のもとでは近接効果によって時間反転対称なスピンレス $p_x + ip_y$ 波の二次元トポロジカル超伝導が実現する可能性を示した[5]。また、2010年にはL. FuとE. Bergが、バルク超伝導に強いスピン軌道相互作用が働くと、 p 波の三次元トポロジカル超伝導が実現する可能性を示した[6]。つまり、最近話題のトポロジカル絶縁体は試料表面にその強いスピン起動相互作用を反映した特殊なギャップレス金属状態を持つので、仮に s 波超伝導体からの近接効果とその表面金属状態に起こるか、キャリアドーピングによってトポロジカル絶縁体自体が超伝導を発現すれば、それはトポロジカル超伝導体候補物質である可能性が高いということである。

3. ソフトポイントコンタクト分光法

アンドレーエフ束縛状態は超伝導体表面におけるトンネル現象といった低エネルギー現象に敏感であるため、トンネル分光はアンドレーエフ束縛状態を観測するのに非常に有効な手段である。残念ながら我々は高価な超低温 Scanning Tunnel Spectroscopy 冷凍機や鋭い

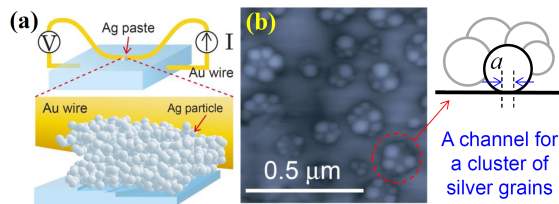


図1 (a) ソフトポイントコンタクト分光法 (上) とポイント接合 (下) の概念図、(b) 銀ナノ粒子のAFM像

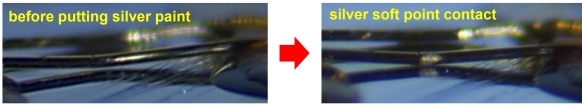


図2 銀ペイントで形成されたソフトポイント接合

先端を持つ探針を試料にポイントで接触させるポイントコンタクト冷凍機を持ちあわせていないため、銀ナノ粒子から成る少量の銀ペイント (Dupont製4922N) でポイント接合を形成し、コンダクタンス分光を行う方法を開発した[7]。図1aはその測定方法の概念図である。疑似4端子測定でポイント接合での微分コンダクタンスと電圧降下を測定する。図1bは実際の分光実験後にポイント接合面の銀ペイントを観察したAtomic Force Microscope (AFM) 像である。銀ペイントがたくさんの銀ナノ粒子のクラスターから成り、ポイント接合界面では各クラスターが試料面に対して並列な伝導チャンネルを作っていると考えられる。ポイントコンタクト分光では、正しく分光するために電子がこれらのチャンネルを“弾道的”に伝導出来ることが必要になる。銀の場合、1 K以下の低温で一つのチャンネルの有効接触径が約100 nm以下になるとSharvin抵抗で表される電子の「弾道的」伝導が支配的になる[8,9]。図1bから銀ナノ粒子の直径は高々50 nmなので、有効接触径はさらに小さく我々のソフトポイントコンタクト分光法は信頼出来るものであると結論出来る。図2は導線である直径30 μmの金線と試料表面の間に少量の銀ペイントが挿入されている様子を写したものである。コンダクタンス分光に必要な電圧がポイント接合界面に印加できるように接合面の面積は数百μm²程度に抑えられていることがわかる。

また、常伝導体/“従来型”超伝導体の接合では、接合面でのトンネル障壁が低い場合、アンドレーエフ反射によって超伝導ギャップエネルギーよりも低エネルギー側でコンダクタンスが2倍になることが知られているが、トンネル障壁が高くなるにつれて超伝導ギャップ内のゼロ状態密度を反映してゼロエネルギーを中心に微分コンダクタンスが減少する。図3はBCS超伝導体のSn表面で行った我々のソフトポイントコンタクト分光の結果である (シリーズ抵抗の寄与が考慮されている)。従来型超伝導の振る舞いを記述するBlonder Tinkham Klapwijk (BTK) モデル[10]で実験結果が良く説明でき、このソフト

ポイントコンタクト法が分光実験で有効であることがわかる。

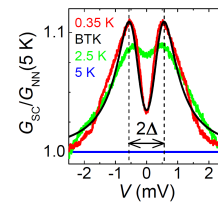


図3 Snのソフトポイントコンタクト分光スペクトル

4. 電子ドーパされたトポロジカル絶縁体: $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$

トポロジカル超伝導体に関する理論研究が進む中、2010年にプリンストン大学のグループがトポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 にCuをドーパすることで Bi_2Se_3 のギャップレス表面状態を維持しつつ約3 K以下で超伝導が発現することを発見した[11,12]。しかし、当初その試料作製が困難であったため、実験研究はなかなか進展しなかった。我々は「 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ はトポロジカル超伝導体研究の鍵になる物質である」と考え、電気化学的手法を取り入れた新しい試料作製法を開発し、良質な試料を得ることに成功した[13]。そのおかげでいち早く試料の比熱測定を行うことができ、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ が三次元バルク超伝導体であることを突き止めた[14]。また、開発したソフトポイントコンタクト法によって $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ のコンダクタンス分光を行ったところ、BTKモデルでは説明出来ない、アンドレーエフ束縛状態の存在を示唆するZBCPを観測した (図4) [1]。

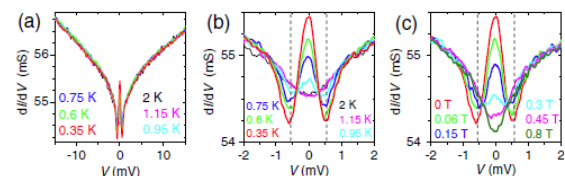


図4 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ のソフトポイントコンタクト分光結果

この実験はかなりの困難を極めた。 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ は試料作製課程でどうしても表面が荒くなる (図5)。また信頼性の高いソフトポイント接合を形成するため、原子レベルで平坦でかつ広い面得るため試料を何度も劈開する必要がある。更に、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 中のCuは本質的に不均一であるため[13]、超伝導体積分率が40-60%程度と低く、ポイント接合を形成した場所が超伝導にならない部分だったということがかなりの頻度で起こった。結局、形成したポイント接合が冷却中の熱収縮で壊れた場合を含めると57ポイント接合を形成し、25個がZBCPを示し、22個が最低温度 (0.35 K) まで超伝導を示さなかった。ZBCPを観測された場合、ポイント接合実験では本質的、非本質的両方の理由が考えられ、本質的だとしても幾

つかの解釈があり得るため、本当にアンドレーエフ束縛状態によるものであることを確認するため再現性を含めて多くの実験を必要とした[1]。

幸運だったのは、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ は単純な電子構造を持つため、もしこの物質で異方的超伝導の証拠である表面アンドレーエフ束縛状態が実現していれば、それは必ずトポロジカル超伝導の証拠であると理論的に結論できたことである。以上のように、実験と理論の協力によって、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ が现阶段でトポロジカル超伝導体の有力な候補物質であることを世界で初めて実証することに成功した[1]。

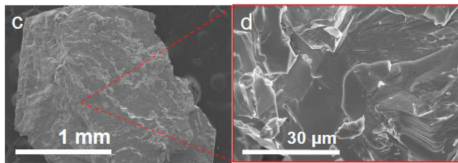


図5 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ の荒い面の電子線描画 (SEM) 像

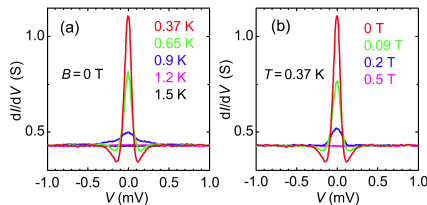


図6 $\text{Sn}_x\text{In}_{1-x}\text{Te}$ のソフトポイントコンタクト分光結果

5. ホールドープトポロジカル結晶絶縁体、 $\text{Sn}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$

$\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ がトポロジカル超伝導体である更なる証拠を集めるため異なる実験手段による検証が進められている。中でも超伝導ギャップの対称性を決めることは重要だが、試料の本来的不均一性により、研究の進展に時間がかかっている。

そこで我々が新たに注目したのがトポロジカル結晶絶縁体 SnTe [15]に In をドーピングすることで超伝導を示すことが以前から知られていた $\text{Sn}_x\text{In}_{1-x}\text{Te}$ である[16]。我々はこの $\text{Sn}_x\text{In}_{1-x}\text{Te}$ 超伝導体の気相成長高品質単結晶を製作し、そのファセット面でのソフトポイントコンタクト分光でZBCPの観測に成功した(図6)[2]。 $\text{Sn}_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ の基本的な常伝導状態電子構造は既に知られており、本質的に $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ と同じ超伝導ギャップ対称性を持つことがわかった。もしこの物質で異方的超伝導状態が実現すればそれは必ずトポロジカル超伝導状態であると理論的に結論できるため、我々の実験結果はこの物質が時間反転対称トポロジカル超伝導体の有力な候補物質である可能性が高いことを意味する。また SnTe と同じ結晶構造(立方晶)を持ち、スピン起動相互作用の大きさの違いからギャップレス表面状態を持たないノンドギャップ絶縁体 PbTe に TI をドーピングすると超伝導を発現すること

が知られている。この $\text{Pb}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Te}$ にソフトポイントコンタクト分光を行ったところ、この超伝導が従来型であることを示すアンドレーエフ反射のスペクトルが得られた(図7)。以上から T_c が $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ よりも低いことを除けば $\text{Sn}_x\text{In}_{1-x}\text{Te}$ はより将来性のある有力なトポロジカル超伝導候補物質である。

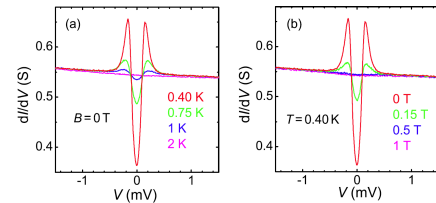


図7 $\text{Pb}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Te}$ のソフトポイントコンタクト分光結果

6. まとめ

最近超伝導研究の話題の一つとしても注目されているトポロジカル超伝導体の特徴や将来の応用の可能性について紹介し、強いスピン起動相互作用を持つトポロジカル絶縁体やトポロジカル結晶絶縁体との関連性にふれた。また、我々が開発したソフトポイントコンタクト分光法による $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ と $\text{Sn}_x\text{In}_{1-x}\text{Te}$ の分光実験において、トポロジカル超伝導体であることを実証するための必要条件であるZBCPの観測に成功したことを報告し、この先解決すべき問題点についても議論した。

参考文献

- [1] S. Sasaki, M. Kriener, K. Segawa, K. Yada, Y. Tanaka, M. Sato, and Y. Ando: Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 217001-1-5.
- [2] S. Sasaki, Z. Ren, A. A. Taskin, K. Segawa, and Y. Ando: Phys. Rev. Lett. **109** (2012) 217004-1-5.
- [3] 佐藤:物性研究, 第94巻3号 (2010) 311-349.
- [4] F. Wilczek: Nature Phys. **5** (2009) 614-618.
- [5] L. Fu and C. L. Kane: Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 096407-1-4.
- [6] L. Fu and E. Berg: Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 097001-1-4.
- [7] D. Daghero and R. S. Gonnelli: Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 043001-1-37.
- [8] G. Sheet, S. Mukhopadhyay, and P. Raychaudhuri: Phys. Rev. B **69** (2004) 134507-1-6.
- [9] H. Hövel: Appl. Phys. A **72** (2001) 295-302.
- [10] G. E. Blonder, M. Tinkham, and T. M. Klapwijk: Phys. Rev. B **25** (1982) 4515-4532.
- [11] Y. S. Hor, A. J. Williams, J. G. Checkelsky, P. Roushan, J. Seo, Q. Xu, H.W. Zandbergen, A. Yazdani, N. P. Ong, and R. J. Cava: Phys. Rev.

Lett. **104** (2010) 057001-1-4.

- [12] L. A. Wray, S.-Y. Xu, Y. Xia, Y. S. Hor, D. Qian, A. V. Fedorov, H. Lin, A. Bansil, R. J. Cava, and M. Z. Hasan: Nature Phys. **6** (2010) 855-859.
- [13] M. Kriener, K. Segawa, Z. Ren, S. Sasaki, S. Wada, S. Kuwabata, and Y. Ando: Phys. Rev. B **84** (2011) 054513-1-5.
- [14] M. Kriener, K. Segawa, Z. Ren, S. Sasaki, and Y. Ando: Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 127004-1-4.
- [15] Y. Tanaka, Z. Ren, T. Sato, K. Nakayama, S. Souma, T. Takahashi, K. Segawa, and Y. Ando: Nature Phys. **8** (2012) 800-803.
- [16] A. S. Erickson, J.-H. Chu, M. F. Toney, T.H. Geballe, and I. R. Fisher: Phys. Rev. B **79** (2009) 024520-1-7.
- [17] Y. Matsushita, H. Bluhm, T. H. Geballe, and I. R. Fisher: Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 157002-1-4.

(5) 金属資源電磁探査用

高性能 SQUID 磁力計の開発

Development of HTS-SQUID magnetometer system for electromagnetic geophysical exploration of metal resources

(公財) 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所

波頭 経裕、塚本 晃、安達 成司、
押久保 靖夫、田辺 圭一

Superconductivity Research Laboratory, ISTE
T. Hato, A. Tsukamoto, S. Adachi,
Y. Oshikubo and K. Tanabe

1. はじめに

昨年、本誌で開発状況を報告させていただいた[1]、金属資源探査用SQUID磁力計のシステム(受信機も含めたシステムはSQUITEM3号機と呼ばれる)が、最終試験を終え、完成した。

最終試験を行ったオーストラリアの砂漠地帯は、地表温度が60℃近くに達し、機材は未舗装道路を時速100 km/hで運搬する。図1は野外試験の様子である。資源探査用のSQUID磁力計は、資源探査の調査員がこの環境の中でも無理なく使えることを要求される。SQUIDそのものの性能向上に加え、実装技術の確立が非常に重要であることがご理解いただけると思う。屋内試験では問題なく動作した装置が、一転して屋外、野外では性能を発揮できず、その度に技術課題を一つずつ解決

し、最終的に高感度なSQUIDの性能を野外環境で発揮させることに成功した。



図1 オーストラリアでの資源探査野外試験の様子

金属資源探査と言えば、とかくレアメタルを思い浮かべがちであるが、実はずっと身近な銅の探査も重要である。石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)のレポートによれば、現状価格での可採年数(埋蔵量を年間産出量で割ったもの)は40年足らずである[2]。だからこそ、高効率、高精度で経済的な金属資源探査技術が必要とされている。

TEM (Transient Electromagnetic) 法またはTDEM (Time-Domain EM) 法 [3]と呼ばれる今回開発したシステムは、探査法の中でも地上での電磁探査という分類に属し、どの程度の深さにどの程度のボリュームで鉱脈が存在するかを判断するのに有用である。この手法において、SQUIDは、単に高感度であるというだけではなく、DCから100 kHzを超える周波数帯域において連続的に高感度性を有するという、他の磁気センサーに対する大きな優位性をもつ。その優位性を、RFノイズに弱く、かつ冷却を必要とするという課題を制して、早い磁場変化にも追従できる(高スループート)システムに仕上げる事ができるかが開発の鍵であった。

2. 野外使用に向けた要素技術開発

SQUIDの設計上配慮を要する重要な点は、地磁気中で冷却するという点である。このとき、磁束トラップが起きると、それがノイズ源となる。従来から超伝導体への磁束トラップについては多くの研究がされており、Clemらによって超伝導配線が垂直磁場によって磁束トラップを起こす線幅の閾値はおおよそ $(\pi\Phi_0/4B_T)^{1/2}$ と与えられ、実験的にも検証されている[4-5]。したがって50 μT の地磁気中冷却でトラップしないよう線幅を5 μm 以下にし、かつ感度が上がるように入力コイルを含むSQUIDを設計した。ホワイトノイズは30 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ と、屋内用に作製した入力コイル積層型の高感度SQUIDに比べ3倍程度ノイ

ズレベルは高いものの、野外使用に適した設計とすることを優先した[6]。ノイズ測定の結果では磁束トラップによるノイズ増加が見られず、トラップが起きていないことを確認した。

また、RFシールドの選択は野外使用と高速な磁場変化を念頭においている。地磁気中で使用し、エディー(渦)電流の影響が探査計測に影響を与えないことが重要である。その観点からすれば、アルミや銀などの非磁性材料である必要はない。素子に対して入力磁気信号を妨げず、磁場の変化を生まなければ、弱い磁性を持っていることも許容されると考えた。100 kHz以上の電磁波を効率よく遮断する周波数遮断特性をもち、エディー電流が 10^{-7} s台の減衰定数で短時間に減衰するNi/Cuシールドを採用することによって、SQUIDの野外使用時の動作安定性が格段に改善した。この実装技術により、従来装置ではエディー電流の影響を受けた10000 Ω m程度の高比抵抗の地表でも、探査計測への影響が抑制されていることを確認した。

図2に完成した磁力計の写真を示す。また、表1にその仕様を示す。最大印可磁場は従来機の40倍、スルーレートは10倍、ノイズレベルは半分以下に改善されている。本装置では、SQUIDは液体窒素で冷却されている。液体窒素は液体ヘリウムと異なり、世界中の至る所で入手しやすい。病院での治療をはじめ、畜産農家ででの精子の凍結保存などにも用いられるためである。そして、過酷な野外作業では、液体窒素の補充を気にすることなく作業できることが重要である。本装置は1リットルの容量で、屋内試験では17時間の液体窒素保持時間を示した。移動を含めた実際の探査試験でも8時間以上の保持が可能で、一日の作業中に液体窒素の補充が不要であることが確認され、高い実用性が証明された。



図2 金属資源探査用SQUID磁力計

表1 SQUITEM3号機の仕様

(1)最大印加磁場 (100mループコイル電流)	429 nT 40 A
(2)スルーレート	10.5 mT/s
(3)ホワイトノイズ	30 fT/VHz
(4)クライオスタートサイズ	300mmH 2.5kg

3. 野外試験

秋田で行われた一測定点における測定結果の従来機との比較を図3に示す。これは、TEM測定波形から、深さに対する比抵抗の分布に換算した結果である。誘導コイルをセンサーとして用いたもの、SQUITEM2号機(従来機)、それに今回開発したSQUITEM3号機を比較した。この地層は、表面に高抵抗層があることと、深部に再び高抵抗層があることが特徴である。地表面の高抵抗層の影響で、高いスルーレートが要求される。高周波での測定を得意とする誘導コイルの測定結果とSQUITEM3号機の測定結果はよく一致する。しかしながら、深さ500 m程度になると誘導コイルの測定結果が明瞭でなくなり始める。SQUITEM3号機の結果はこの付近に高抵抗層が存在することを明瞭に示している。一方、2号機では高抵抗層は見えていない。これは2号機のクライオスタートの制御回路のシールドにアルミが使われており、それに発生したエディー電流の影響で誤測定したと考えられる。深さが800 mを超えると、2号機の測定が不明瞭になり始めるが、3号機では依然として明瞭である。これはノイズレベルが小さいためで、より深部の測定にSQUIDの感度が反映していることを示している。

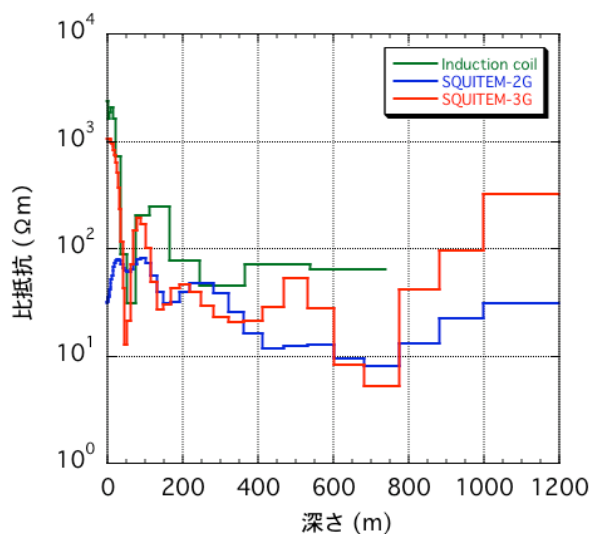


図3 従来機との探査性能比較(秋田)

オーストラリアでの最終試験では、実際に探査活動を行う時と同時に、測定ラインに沿って100 mごとに測定して2次元的な比抵抗分布図を作成した。進行中の探査プロジェクトの都合でデータを記載することができないため、概略のみを紹介する。

試験を行った地域のボーリング調査の結果と照合した結果、SQUITEM3号機による探査結果はボーリング調査の結果とよく一致していることがわかった。具体的には地表付近のグラファイトに富んだ堆積岩層の境界深度も正確に補足できていたのに加え、金属硫化物が多く含まれる低抵抗層、つまり金属鉱物が多いと推定される領域を明確にとらえていた。

また、別の測定ラインでは、ボーリング調査を行った深さのさらに下に金属鉱物が多いと推定される領域の存在を示す測定結果も得られ、重力探査や磁性探査では把握できない深さデータを得ることができるTEM測定の有用性も示された。

オーストラリアの試験フィールドは比抵抗が小さな領域であるため、高いスルーレートを必要とはしない。その結果、探査深度も磁力計の性能ではなく、印加磁場を発生させる市販の送信電源の出力限界によって制限されている。今後、同フィールドでより高性能な送信機を用いた試験や、アフリカのボツワナなどの高比抵抗層の地域での試験などにより、SQUID磁力計の限界性能が検証されることを期待している。

4. まとめ

完成した金属資源探査用のSQUID-TEM磁力計について紹介した。本システムは3月にJOGMECに納入され、今後世界での金属資源探査に活躍することが期待される。本システムは、SQUIDの高感度性と周波数帯域の広さが、他の磁力計に勝ることにより、SQUID性能を活かせる応用であることが原理的には明瞭であった。しかしその一方で、野外の過酷な環境で使用するという技術的ハードルを克服する必要があった。

高感度というだけでは、光ポンピングなどの他の磁力計がSQUIDに追いつきつつあり、必ずしもSQUIDを用いることが優位であるとは言えない場合もある。今回の開発では、SQUIDの本質的な優位性は何かを見極め、システムとして完成させるために必要な周辺技術を積極的に構築することによって実用機が誕生した。

今回の開発がより多くの超伝導システム実用機開発の突破口となることを期待している。また、これらの技術を次世代につなげることが重要だと思っている。現状では次世代の人材を育成する環境は乏しいものの、これらの実用技術をビジネス化し、次世代を育成する場を作って行きたいと思っている。

謝辞

本研究開発は、石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)委託による平成22年度-平成23年度次世代SQUITEM機器開発・SQUID磁力計開発において実施された。

参考文献

- [1] 波頭経裕、塚本晃、安達成司、押久保靖夫、田辺圭一：地下資源探査用高温超電導 SQUID 磁力計の開発 FSST NEWS No. 133.
- [2] JOGMEC NEWS Vol. 29, Jun. 2012.
- [3] 後藤忠徳, 三ヶ田均: 地学雑誌, **117** (6) (2008) 997-1010.
- [4] Clem J R 1998 *Bull. Am. Phys. Soc.* **43**, 401.
- [5] Stan G, Field S B, and Martinis J M 2004 Critical Field for Complete Vortex Expulsion from Narrow Superconducting Strips *Phys. Rev. Lett.* **92** No. 9 097003.
- [6] Tsukamoto A, Adachi S, Oshikubo Y, and Tanabe K 2013 Design and Fabrication of Directly-Coupled HTS-SQUID Magnetometer With a Multi-Turn Input Coil *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, to be published.

(6) 400 kJ級 RE 系 5T 高温超電導マグネット 開発

Development of a 400 kJ-class
5 T Rare-earth-based High Temperature
Superconducting Magnet

株式会社フジクラ
大保 雅哉、藤田 真司、原口 正志、
飯島 康裕、伊藤 雅彦、齊藤 隆
Fujikura Ltd.
M. Daibo, S. Fujita, M. Haraguchi,
Y. Iijima, M. Itoh and T. Saitoh

1. はじめに

RE系($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (REBCO), RE = rare-earth)超電導線材は20 K以上の高温領域でも高い臨界電流(I_c)—磁場(B)特性を示し、高い機械強度を有していることから様々な超電導機器への応用が期待されている。我々は過去20年以上RE系超電導線材の高特性化、長尺化、高均一化の開発を行ってきており、最近では液体窒素(77 K, self field) 中の I_c 500 A/cm以上、600 m以上の

高性能線材の開発に成功している[1],[2]。また、これらRE系超電導線材開発を進めると共にRE系超電導線材の機械特性および磁場特性の把握と性能向上にも努めている[3],[4]。

近年、RE系超電導線材の市販化と共に小型含浸コイル試作による課題抽出、低温下でのコイル特性評価も進められている[5]-[7]が、我々もRE系超電導線材開発と並行して液体窒素中および伝導冷却下でのコイル通電特性、安定性評価などを行ってきた[8]-[11]。高温超電導は低温超電導に比べ運転温度が高いため熱容量が2~3桁大きく熱安定性は極めて高い。さらに、伝導冷却コイルは運転温度も任意に設定でき、冷媒を使用しないためユーザにとっても使いやすい利点がある。しかし、万が一伝導冷却下で超電導コイルに異常が生じると超電導コイルが熱暴走して、最悪、超電導線材が焼損に至る可能性もあるため、我々はコイル内電圧分布特性にも考慮した評価を行ってきた。その結果、小型のRE系超電導コイルに関してコイル内電圧分布の実測値と計算値が概ね一致するなど、設計予測が可能な知見が得られてきている[10]。しかし、RE系超電導線の実用機器への適用を想定するとより大口径コイルでの実証例も必要である。今回、フジクラ製RE系超電導線材を用いてコイル保護の観点から断熱条件下での熱平衡方程式により超電導線材安定化厚を決定し、φ 20 cm室温ボアを有する蓄積エネルギー420 kJ級の5 T RE系超電導マグネットの開発に成功したので概要を以下に報告する。

2. RE系超電導線材の諸元と安定化銅厚

使用したRE系超電導線材を表1に示す。RE系超電導線材はIon-beam-assisted deposition (IBAD) 法およびPulsed laser deposition (PLD)法により製造され、10 mm幅線材を24本(単長300 m)を使用した。

表1 RE系高温超電導線材の諸元

項目	諸元
線材幅	10 mm
基板厚	0.1 mm
安定化銅厚	0.3 mm (laminated)
臨界電流 I_c (77 K, s. f.)	> 467 A
n 値 (77 K, s. f.)	24 - 38

一方、コイル保護の観点から超電導線材の安定化層厚は重要である。超電導コイルが大型になればインダクタンスおよび蓄積エネルギーも大きくなり、必要な安定化層も厚くなる。本開発ではコイル保護過程におけるコイル内温度上昇について、最も保守的な前提として熱平衡方程式(1)式[12],[13]で表される断熱条件下を想

定した。今回のRE系高温超電導マグネットの諸元を表2に示すが、(1)式により最高到達温度 T_m が300 K以下になる条件として安定化銅厚0.3 mmを採用した[14],[15]。

$$\int_{T_0}^{T_m} \frac{C_l(T)}{\rho_{stab}(T)} dT = \frac{S_{stab}}{S_t} \left(t_d + \frac{E}{V_m I_0} \right) J_{stab,0}^2 \quad (1)$$

ここで、 C_l は導体単位面積当たりの熱容量、 S_t 、 S_{stab} は導体、安定化層断面積、 ρ_{stab} は安定化層の電気抵抗率、 J_{stab} は安定化層の電流密度、 T_0 はクエンチ時の初期温度、 $E (=LI_0^2/2)$ は超電導コイルの蓄積エネルギー、 t_d は検出遅れ、 $V_m (=RI_0)$ は最大電圧、 I_0 は電源遮断時のコイル通電電流、 $J_{stab,0}$ は電源遮断時の安定化層電流密度、 R は保護抵抗である。

3. 超電導マグネット製作

超電導マグネット製作に当たりコイル構造の妥当性、マグネット製作作業性検証のためほぼ同一寸法のモデルコイルを試作し、伝導冷却下で通電特性を評価した。その結果、コイル I_c の計算と実測値の比較、マグネット製作における作業性の検証等で良好な結果が得られたため[15]、超電導マグネットの製作を行った。

表2 RE系5 T高温超電導マグネットの諸元

項目	諸元
コイル内径	260 mm
コイル外径	535 mm
コイル高さ	271 mm
層数	24
超電導線材総使用長	7.2 km (300 m × 24)
総ターン数	5775
運転温度	約 25 K
運転電流	333 A
中心磁場	5.0 T
インダクタンス	7.68 H
蓄積エネルギー	426 kJ

パンケーキコイル製作においてはコイル製作中のハンドリングによるRE系超電導線材の劣化も十分あり得ることから加工中は十分留意してパンケーキコイルを製作した。パンケーキコイルは2層毎に含浸し、含浸後、液体窒素中でコイル I_c 、 n 値を測定した。含浸後の全24パンケーキコイルのコイル I_c (10^{-7} V/cm定義)、 n 値 ($10^{-7} \sim 10^{-8}$ V/cm定義)を図1に示す。全てのパンケーキコイルの n 値が $10^{-7} \sim 10^{-8}$ V/cmの低電圧領域で24以上であり、コイルが健全であることを確認した。

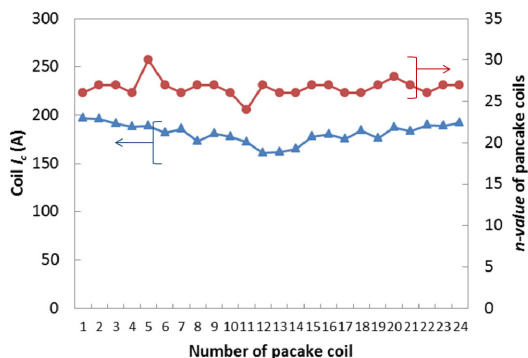


図1 全パンケーキコイルのコイル I_c 、 n 値(77 K, s.f.)

製作したパンケーキコイルを積層して積層コイルを組み立てた後、クライオスタットに取り付けた。完成した高温超電導マグネットの諸元を表2に示し、超電導マグネットの外観を図2に示す。マグネットの初期冷却では、コイル最上層、最下層、中間に設置した冷却板が89 K以下になったときコイル端子間電圧がゼロ抵抗を示し、超電導転移が確認された。また、コイル冷却板温度は冷却開始後、約260時間で23.7 Kに到達した。なお、冷凍機には2段 Gifford-McMahon (GM) 冷凍機 (1段ステージ: 70 W at 68 K, 2段ステージ: 13 W at 20 K) を用いた。

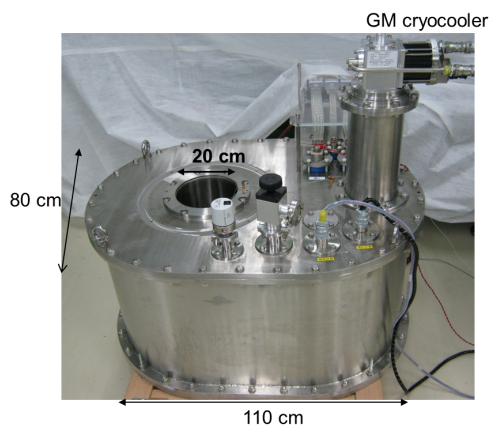


図2 開発したRE系5 T高温超電導マグネット外観

4. 超電導マグネット通電評価

初期通電試験結果例を図3に示す。コイル通電電流が333.4 Aに一定になった時点で中心磁場は4.993 Tに達し、1 min後に5.000 Tに達し、その後60 min保持でもコイル電圧に異常がないことを確認した[14],[15]。なお、コイル通電電流はシャント抵抗により測定し、中心磁場はホール素子により測定した。コイル通電電流が333.4 Aに一定になった時点の中心磁場4.993 Tと計算値を比較すると2.1%の差が確認された。この差は予想より小さいが、励磁速度や励磁途中で電流を保持しているため遮蔽電流の影響が緩和されているためと考える。

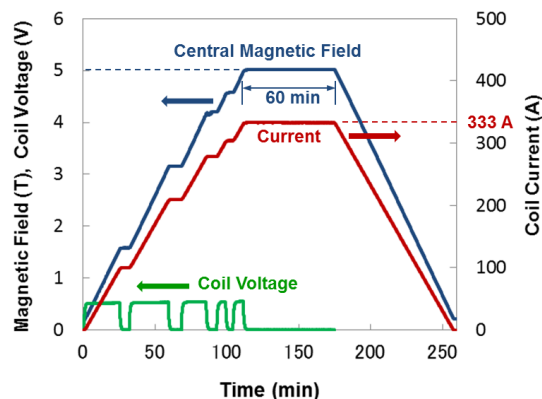


図3 高温超電導マグネット初期通電試験例

なお、25 Kにおけるコイル I_c 計算結果を図4に示す。RE系超電導線材は温度や磁場で臨界電流の磁場角度依存性が異なる場合がある[4]が、今回、RE系超電導線材の臨界電流磁場角度依存性、適用した線材の I_c - B 特性を考慮して、コイル内磁場分布からコイル I_c を計算した結果、温度25 Kではコイル軸方向上下端でコイル径方向最内層から約30 mm内側に入った部分でコイル I_c が最小値を示す結果が得られた。図4にはコイル通電電流を変えずに40 K、50 Kのコイル I_c 計算結果も同様に示している。温度が高くなるとコイル I_c が最小値を示す位置がコイル径方向最内層側に徐々に変わるが、図4のコイル I_c の温度依存性から5.0 T到達時での負荷率は約0.6、温度マージンは約25 Kと試算される。

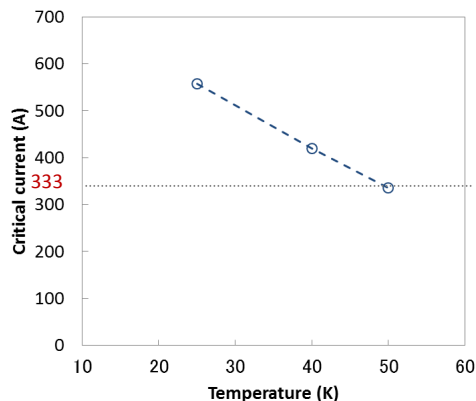


図4 コイル I_c 計算結果

RE系超電導線材はそのテープ形状によりコイル径方向の磁場による遮蔽電流により中心磁場のドリフトが懸念されている。そのため、中心磁場5.0 Tに保持した際の軸方向の中心磁場ドリフト量について、コイル通電電流の1%をオーバーシュートさせた場合とオーバーシュートさせない場合の磁場ドリフト量を比較評価している。その結果、1%オーバーシュートにより磁場ドリフト量が低く抑えられることも確認している[15],[16]。

5. まとめ

今回、RE系超電導線材を約7.2 km使用し、24層から構成される蓄積エネルギー426 kJの5 T高温超電導マグネットの開発に成功した。超電導マグネット製作に当たっては各パンケーキコイルを液体窒素中で測定し低電圧領域からの n 値を評価することによって各パンケーキコイルの健全性を確認した。また、製作したRE系超電導マグネットは遮蔽電流による中心磁場ドリフト量を評価し、1%オーバーシュートにより磁場ドリフト量が抑制されることを確認した。なお、製作したRE系超電導マグネットはフジクラにて線材 I_c - B 特性評価用外部マグネットとして利用する予定である。

今後、RE系超電導線材の応用開発が進展していくことを期待したい。

参考文献

- [1] K. Kakimoto, *et al.*, Physica C **471** (2011) 929-931.
- [2] M. Igarashi, *et al.*, Physics Procedia **36** (2012) 1412-1416.
- [3] 藤田ら, 低温工学 **48** (2013) 172-177.
- [4] M. Daibo, *et al.*, Abstract of CSJ Conference, **87** (2013) 152.
- [5] S Matsumoto, *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 025017.
- [6] H. Miyazaki, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 2453-2457.
- [7] K. Marukawa, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2012) 3900304.
- [8] M. Daibo, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 2428-2431.
- [9] M. Daibo, *et al.*, Physica C **471** (2011) 1436-1439.
- [10] M. Daibo, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2012) 3900204.
- [11] M. Daibo, *et al.*, Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012 (2013) 507-512.
- [12] Y. Kawai, *et al.*, Physica C **470** (2010) 1865-1869.
- [13] Y. Iwasa, Springer, New York (2009)
- [14] M. Daibo, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (2013) 4602004.
- [15] 大保ら, 低温工学 **48** (2013) 226-232.
- [16] M. Daibo, *et al.*, Physics Procedia **45** (2013) 229-232.

(7) Bi-2223 線材を用いたヒト脳研究用 3 テスラ MRI 装置の開発

Cryogen-free 3 T-MRI System for Human Brain Research using Bi-2223 High-Temperature Superconducting Tapes

京都大学
医学研究科附属・脳機能総合研究センター
浦山慎一・福山秀直
Human Brain Research Center, Kyoto University
S. Urayama and H. Fukuyama
株式会社神戸製鋼所
技術開発本部
寺尾泰昭・長谷隆司・尾崎 修
Technical Development Group, Kobe Steel, Ltd
Y. Terao, T. Hase and O. Ozaki
物質・材料研究機構
環境・エネルギー材料部門 超伝導線材ユニット
北口 仁
Environment and Energy Materials Division,
National Institute for Materials Science
H. Kitaguchi
住友電気工業株式会社
材料技術研究開発本部
佐藤謙一
R&D Unit, Sumitomo Electric Industries, Ltd.
K. Sato

1. はじめに

2008年10月、京都大学を中心とする7機関のチームは、Bi-2223テープを用い、世界初となるヒト用高温超伝導高磁場MRI装置開発を開始した。そしてこの春の研究終了までの4年半、残念ながら最終目標は達成できなかったものの、高温超伝導線材のMRI用マグネットへの可能性、またその難しさなど、様々な知見を得ることが出来た。

以下に、プロジェクトの概略を述べると共に、高温超伝導MRI装置の今後に関して述べる。

2. MRIとMRI用超伝導マグネット

まず簡単に、MRIとMRI用超伝導マグネットの特徴について、一般論を述べよう。

MRI装置は、NMR(核磁気共鳴)現象を用いた生体内断層撮像装置である。NMR現象とは、強い静磁場中におかれた物質内の原子核が、磁場強度に比例する特定の周波数の電磁波に晒されることによって共鳴現象を起こし、自ら電磁波を発生する、という現象である。

そして、NMRが検波して得られた電磁波のスペクトルで原子の状況(分子構造など)を知るのに対し、MRIでは、傾斜磁場コイルという特殊なコイルを用いて線形磁場を印加し、原子核からの電磁波の周波数及び位相を場所ごとに変化させることにより、得られた2次元/3次元スペクトルを電磁波信号強度の空間分布に対応させる。この多次元スペクトルこそが、MRI画像である。

すなわちMRI装置とは、(マグネットと、RFコイルと呼ばれる送受信アンテナ、スペクトロメータで構成される)NMR装置に、傾斜磁場コイルを加えたもの、と言える。ただしマグネットに関しては、MRI用はNMR用と比較して大きな撮像領域が必要な上に、傾斜磁場コイルのスペースが必要なため、大きな室温ボアが必要となる(小動物用でも100 mm以上、ヒト全身用であれば900~1000 mm)。一方で、撮像領域内の磁場均一度は傾斜磁場に比べて充分小さくする必要があり(撮像領域内で1 ppm以下が一般的)、また磁場安定度も、液体NMRレベル程(ppbのオーダー)ではないが、ppmのオーダーは必要となる。

3. ヒト脳研究用3テスラHTS-MRI装置

開発するMRI装置は人間の脳研究を目的としたため、人が活動時に立位もしくは座位であることを考慮し、垂直ボアを採用した。マグネットは5つのコイルを有しており、小型、中型コイルを用いた基礎実験の結果[1]から、各コイルの巻線方法はエポキシ樹脂塗り込みによるソレノイド巻きとすること、周方向/軸方向応力基準をそれぞれ137/4.7 MPa以下とすることとした。運転温度は20 Kとし、寒剤を用いずG-M型冷凍機による伝導冷却のみとした。磁場に関する目標値は、中心で3 T、均一度は磁場中心の楕円体(軸方向200 mm、径方向250 mm)の領域内で5 ppm以下、安定度は30分で±0.5 ppm以内、とした。設計の結果、円筒型マグネットの外径/内径/高さはそれぞれ1290/530/1310 mm、総重量は2.4 t、3 Tに必要な電流値は184 A、コイルのインダクタンスは137.5 H、蓄積エネルギーは2.3 MJ、テープ面に垂直方向の最大磁場強度は3.75 T、温度マージンは約9 Kであった。

HTSマグネット製作には、住友電工製DI-BSCCO Type-HTを、総延長44.6 km、計132本用いた。巻線の製作誤差は0.5 mm以下であった。クライオスタット内部の気圧を 2.7×10^{-5} Paまで低下させた後、570時間かけて6.8Kまでコイルを冷却した。電源駆動であるマグネットの直流電源には、Danfysik社製超安定化電源Model 854を用いた。巻線後のコイルと完成したHTS-MRI装置を、図1に示す

マグネットの冷却後、励磁を行ったが、マグネット損傷の危険性を考慮し、まずは中心磁場強度1.5 T下で調

整、撮像実験を行った。1.5 T(電流値92 A)への励磁速度には0.75 A/min、減磁速度には1 A/minを用いた。励磁から消磁までの典型的な温度変化は、励磁時の温度上昇が約3 K、その後の温度低下が約1 K、そして減磁時の温度上昇が約2 Kであった。磁場均一度に関しては、鉄シムによる磁場調整前は889 ppmであったが、十分な調整後、5 ppmを達成した。磁場安定度に関しては、励磁後24時間の磁場変動計測を行った結果、0.85 ppm/時の速度で磁場強度が上昇し、遮蔽電流の影響が無視できないことが示唆された。そこで遮蔽電流抑制のため、励磁時に既定値の92 Aより1 A高い93 Aまで上げてすぐに92 Aまで下げたところ、励磁直後5時間の間に16 ppm低下したものの、その後の19時間は磁場変動が±0.5 ppmの範囲内に収まり、目標を達成した[2]。



図1 巻線後のコイル(左)と完成したマグネット(右)

本プロジェクトでは、できうる限りシステム内からブラックボックスを無くすために、マグネット以外の主要パーツである、傾斜磁場コイル[3]、スペクトロメータ[4]、RFコイル、システムソフトウェアなども独自に開発した。MRIを撮像装置たらしめる傾斜磁場コイルは、マグネット内の強磁場下で最大1 kAの電流が瞬間的に流れるため、振動、騒音、発熱、渦電流など、マグネットとカップリングする様々な問題が生じ、開発技術の難易度が非常に高いことが予想された。プロジェクト開始時、このコイルは主要パーツの中で唯一、開発経験の全くないものであったが、マグネットとの強いカップリングのために傾斜磁場コイルはマグネットに合わせて設計、開発すべきものであり、またマグネットと異なり作り直しが不可能ではないため、傾斜磁場コイルの独自開発に踏み切ることにした。

これら完成したパーツをマグネットに組み込み、MRI装置を完成させ、1.5 T環境下でファントム撮像実験を行った。その結果、若干のジッパーアーティファクトが見られるものの、円筒ファントムや果物、摘出したマカクザルの脳などのスピンエコー画像を得ることが出来た(図2)。商用の1.5 T-MRI装置と得られた画像の信号ノイズ比を比較したところ、開発したHTS-MRI装置は商用機の

54%であった。

充分な1.5 Tでの調整、撮像実験(励/消磁回数が計62回)の後、2 T、2.5 Tへの励/消磁を一度ずつ行い、3 Tへの励磁実験を試行、開始から5時間後、3 Tを達成した。2度目の3 T励磁では磁場均一度を測定(845 ppm)し、そのデータを基に1度目の磁場均一度調整を行い、3度目の励磁で磁場均一度が63 ppmまで向上していることを確認した。

しかしその後の減磁時、2.5 Tを下回ったあたりでマグネットから異音が発生、電圧、電流値が共に不安定となり、コイル温度も上昇し始めた。その約10分後、超安定化電源がシャットダウンし、異音が止んだ後も、コイルの温度上昇が止まらなかったため、冷凍機をオフにしマグネットを常温に戻した。現在、異常原因を究明している。

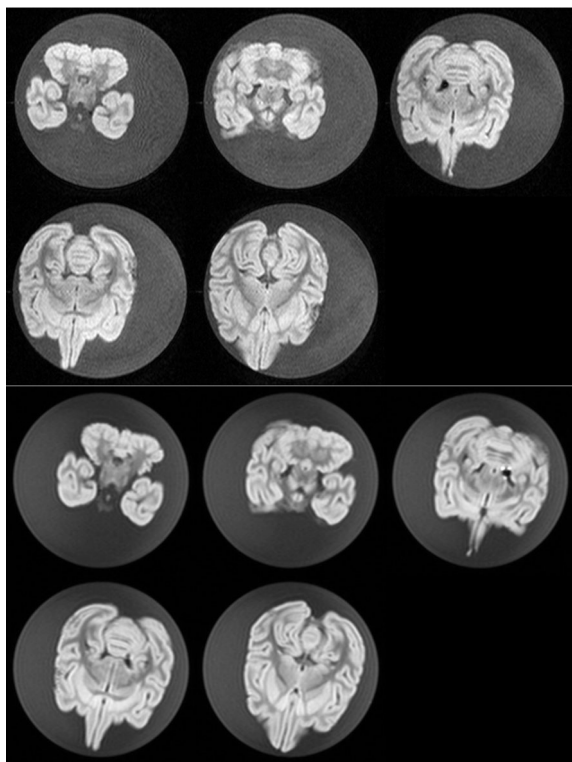


図2 開発したHTS-MRI装置で撮影したマカクザルの抽出脳(上)と、比較のため商用機で撮像した画像(下)

4. MRI用HTSマグネットの可能性と問題

開発したHTS-MRI装置は、1.5 T環境下では問題無く動作し、撮像実験も成功、有用性は確認できた。磁場均一度5 ppmは、MRI用装置としては決して十分ではないもののほぼ設計値通りであり、初期目標値としては充分であろう。安定性に関しても、マグネットの持つ大きなインダクタンスの影響か、電源駆動に由来する磁場変動は十分に小さいことが分かった上、Bi-2223テープに関しては、遮蔽電流も励磁時に電流をオーバーシュートさせることで抑制できた。また異常は発生したものの、

3 Tへの励磁に3度、成功していることは、マグネット自身に十分な可能性が示されたと考えている。昨今のヘリウム不足や今後予想されるヘリウム価格高騰、そして液体ヘリウム供給が困難な地域へのMRI導入拡大などを考えると、HTS-MRI最大の問題である「超」高コストに関しても、何らかの解が見つかる可能性も出てきたのではないだろうか。

ただ一方で、今回、開発したHTS-MRI装置に起きた異常は10分間強に渡って続き、一般的に知られている超伝導マグネットのクエンチとは全く異なり、その過程は非常に複雑であった。これは、HTS線材の特性によるもの以外に、複数のコイルで構成されているマグネットであることや、電源/保護回路/各コイルとの相互作用などにも起因しているのではないかと考えている。MRIは、マグネット/傾斜磁場コイル間の強い相互作用のためにNMRに比べて動的で、線材を部分的にクエンチさせ、マグネットを熱暴走させる要因は大きい。今後のHTS-MRI開発においては、線材におけるクエンチ検出、熱暴走からのマグネット保護など、低温超伝導マグネットには不要だった新しい技術開発が必須である。

5. おわりに

MRI用HTSマグネットには、窒素冷却MRIや、ヘリウムフリーのコンパクト「超」高磁場MRI、ヘリウム使用の低価格「超」高磁場MRI(運転温度を下げ線材削減する)など、考えようによって選択肢は広がり得る。まだまだ解決すべき問題は多いが、「様々な可能性と沢山の問題」は、研究開発者冥利に尽きる研究対象であろう。個人的には今後が楽しみな研究分野である、と考えている。

最後に、本プロジェクトに加わった著者等以外の共同研究、開発者それぞれに、チームの一員として大いに貢献していただいたこと、深く感謝する。また本研究を始めるに辺り、非常に有用な情報を提供していただき、また討論させていただいた、独マックスプランク脳科学研究所のロバート・ターナー博士、仏ニューロスピン研究所のデュニ・ルビアン博士、米マサチューセッツ総合病院のグレゴリー・ソレンセン博士に、深い感謝の意を表す。加えて、機器購入を行った幾つかの企業からは、本プロジェクトのため、様々な技術相談、技術協力をさせていただき、大いに助けになった。ここに、深謝の意を表す。

なお本研究開発プロジェクトは、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「コンパクト3テスラMRI装置の開発」の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] H. Kitaguchi, *et al.*, “Development of a Bi-2223 HTS Magnet for 3T MRI System for Human Brains”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **20** (2010), 3, pp.710-3.
- [2] Y. Terao, O. Ozaki, M. Hamada, H. Kitaguchi, S. Kobayashi, K. Sato, I. Nakajima, N. Oonishi, M. Poole, K. Takeda, S. Urayama, and, H. Fukuyama, “Newly Designed 3 T MRI Magnet Wound With Bi-2223 Tape Conductors,” *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, **23** (2013), 440904.
- [3] M. Poole, *et al.*, “Simulation of Gradient-Coil-Induced Eddy Currents and Their Effects on a Head-Only HTS MRI Magnet”, *J Phys D: Appl Phys*, **43** (2010), 095001.
- [4] K. Takeda, “Chapter 7 - Highly Customized NMR Systems Using an Open-Resource, Home-Built Spectrometer”, *Ann. Rep. NMR Spectros.*, **74** (2011), pp.355-393.

<会議報告 1>

CEC-ICMC2013 会議報告 Report on CEC-ICMC2013

物質・材料研究機構

熊倉 浩明

National Institute for Materials Science

H. Kumakura

Cryogenic Engineering Conference (CEC) と International Cryogenic Materials Conference (ICMC) の合同会議が去る6月17-21日に米国、アンカレッジの Dena'ina Civic and Convention Center で開催された。過去の本合同会議と同様に今回も数多くのセッションに分かれて活発な議論が行われたが、ICMCのポスターセッションにおいては、キャンセルされた論文数が相当数に上ったことは残念であった。以下に、MgB₂線材と鉄系線材を中心として報告者の印象に残った講演について簡単に紹介したい。

オハイオ州立大のM.D. SumptionはMg内部拡散(IMD)法MgB₂線材について発表した。ボロン粉末として Specialty Materials, Inc.(SMI)社製の3%カーボンコートした高品位のナノボロン粉末を用い、Nbで内張りをしたモネルをシース材に用いた0.55 mm径の単芯線材で、4.2 K、10 Tで 1.57×10^5 A/cm²の高い J_c を得ている。また、18芯のIMD線材では4.2 K、10 Tで 10^4 A/cm²のエンジニアリング $J_c(J_e)$ が得られており、これはPIT法線材の約2倍の値であるとしている。彼らは、これらの拡散法による高性能線材を第二世代(2nd generation)のMgB₂線材と呼んでいる。また、PIT法MgB₂線材の n 値について解析を進め、4.2 K、7 Tで30以上の n 値が得られているとしている。さらに、100 mのPIT法線材を使ってコイルを試作している。

Hyper Tech Research Inc. の David Doll は「Development of MgB₂ superconductor wire and coils for practical applications at Hyper Tech Research」と題して同社のMgB₂線材開発の進捗状況を報告した。線材としては種々の断面構成を持った線材をPIT法で作製しており、 J_c は4.2 K、10 Tで $1-2 \times 10^4$ A/cm²程度である。長さとしては6 kmの線材作製が可能としている。またIMD法線材についても言及した。応用としてはMRI、風力発電、限流器、直流送電、SMESなどがあげられ、これらについてはいずれもMgB₂線材を使った開発プロジェクトがスタートしていると述べた。

鉄系線材については、フロリダ大のEric Hellstromが(Ba,K)Fe₂As₂線材について講演した。(Ba,K)-122にお

いては結晶粒のミスアラインメントによる粒間の J_c の低下がY-123ほどには大きくは無く、無配向組織でもかなり大きなトランスポート J_c が得られる可能性があるとしている。実際に彼らはAg(内側)/Cu(外側)の二重の金属管を用いたPIT法丸線材にCIPならびに200 MPa、600°CのHIP処理を行うことにより、無配向組織で 10^4 A/cm²の高い J_c (4.2 K, 10 T)を得ている。この場合、充填するBa-122粉末の純度が重要であるが、これは高エネルギーボールミルを適用したMSR (= mechanochemical self-sustained reaction)で可能であるとしている。

イタリア、CNR/SPINのC. Ferdeghiniは、種々の単結晶基板上に形成したFeSeTe薄膜について発表した。 T_c は最高で21 Kでバルクよりもかなり高いが、これは薄膜と基板との格子定数の違いにより薄膜に圧縮応力が働いたためとしている。 J_c については基板によって大きく異なり、CaF₂基板では4.2 K自己磁界中で 10^6 A/cm²を越える高い値が得られたと述べた。

また、磁界方位による J_c の異方性はほとんどないとしている。

Bi-2212については、フロリダ大のEric Hellstromが丸線材について100 barの加圧熱処理(overpressure (OP) processing)をすることにより、4.2 K、5 Tで 8×10^4 A/cm²のエンジニアリング J_c を得たと述べた。これは通常熱処理の2倍以上の値であるとしている。通常熱処理したBi-2212丸線材ではフィラメントの30–40%はバブル(気泡)であるが、加圧熱処理をすることにより充填率がほぼ100%に向上し、高い J_c ならびに J_c が得られるとしている。4.2 K、20 Tの高磁界では $J_c=2.9 \times 10^5$ A/cm²、 $J_c=72,500$ A/cm²でBi-2212丸線材としては相当に高い値である。また10 barの加圧熱処理で小型コイルの試作も行い、31.2 Tのバックアップ磁界中で2.6 Tの磁界発生に成功している。

Advanced Conductor TechnologiesのDanko van der Laanは、Conductor on Round Core(CORC) cableについて報告した。これはSuper Power社製のコーテッドコンダクタ複数枚を丸い金属コアにらせん状に複層わたって巻きつけた導体でフレキシビリティに富み、 I_c や J_c が高く取れる利点があるとしている。また機械的特性も良好で、応力・ひずみに対する劣化が小さいとしている。

＜研究室紹介＞

(1) 岩手大学工学部電気電子・情報システム工学科 小林研究室

Kobayashi Laboratory
Department of Electrical and Electronic Engineering, and Computer Science,
Faculty of Engineering, Iwate University

(1) 研究室スタッフ(平成 25 年 6 月現在)

教員:小林宏一郎、 大学院生:5名、学部生:5名

(2) 研究室の紹介

本研究室は、平成14年に小林が岩手大学に赴任して立ち上がった研究室であり、このとき実験装置もほとんどない状態であった。当時フラックスゲート磁束計1台、FFTアナライザ1台、オシロスコープ・発振器・電源が数台あり、半田ごてを握り実験装置作りから始めた。その後、JSTの地域結集型共同研究事業の中で岩手医科大学に64チャンネルSQUID磁束計(心磁計)が導入され、生体磁気計測の研究を開始した。心磁図を主なターゲットとして、高価で重たい磁気シールドルーム(MSR)を必要としない高感度かつワイドダイナミックレンジ型SQUID磁束計の研究と心磁図のノイズ除去や信号源推定の研究を行っている。

(3) 特徴ある装置

本学は、平成24年に毎時50 Lの能力を持つヘリウム液化装置を導入し(更新)、回収ラインも増設されヘリウムの液化サイクルが整備されている。また、ガス純度などの一元管理やヘリウム液化装置の遠隔監視などが行えるようになってきている。本研究室では、独自開発したMSRレスの5チャンネルSQUID磁束計(低温型)や1チャンネルの手で持つ計測可能なSQUID磁束計(高温型)と簡易型MSRがある。

(4) これまでの成果、最近のトピックス

MSRレス心磁計として、FQC(Flux-Quanta Counting)法を用いた高感度ワイドダイナミックレンジ型SQUID磁束計の開発を行った。1つは高温型SQUIDを用いたハンドホールタイプであり、もう1つは低温型SQUIDを用いたタイプである。図1にそれぞれの測定風景、開発した制御回路のブロック図およびMSR内外で計測した心磁図を示す。このように、MSR外で心磁図が計測可能なほどの高分解能かつ高ダイナミックレンジを実現したシステムである。低温型SQUIDを用いたシステムは、1 Hzで165 dB、10 Hzで151 dBのダイナミックレンジを持っている。今後は、大きな磁気のノイズに埋もれている微小磁気信号を計測するアプリケーションの開発を目指している。

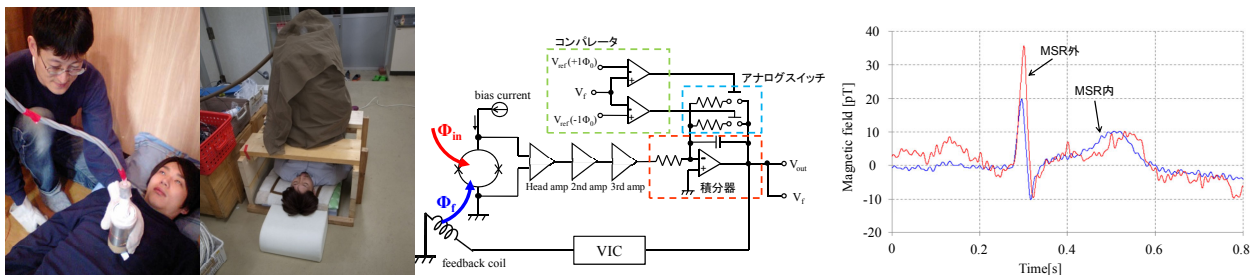


図1 心磁図の測定写真と制御回路ブロック図およびMSR内外で計測した心磁図

(5) 連絡先、ホームページアドレス等

連絡先: 小林宏一郎 kobaya@iwate-u.ac.jp

ホームページアドレス: <http://www.wel.iwate-u.ac.jp/kobayashi/>

(6)その他の情報

- ・現在、博士課程の学生(社会人や留学生を含む)を募集しています。本研究室に興味ある方は、遠慮なくご相談ください。
- ・本研究室ではSQUID(デバイス)を作製することができないため、デバイスを開発している研究室との共同研究を希望しています。特に、高温超伝導SQUIDを作製している研究室と共同研究にて、生体磁気計測装置や非破壊検査装置などのシステム作りを希望しています。

(2)横浜国立大学大学院 工学府 物理情報工学専攻 吉川研究室

**Yoshikawa Laboratory,
Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate School of Engineering,
Yokohama National University**

横浜国立大学吉川研究室では、新しい物理現象を利用した高性能な集積回路や情報処理システムの実現を目標に研究を行っています。特に超伝導集積回路をはじめ、CMOS回路や量子回路などを研究の対象としています。例えば、磁束量子1つの有無を1ビットの情報に対応させれば、高速で超低消費電力な集積回路を実現できます。また、断熱的に回路を動かし、エネルギーを電源に回収することで、無限小のエネルギーで動作する回路を実現できます。横浜国立大学吉川研究室では、これらの新規デバイスを用いた回路をデバイスレベルからアーキテクチャーレベルまで眺めながら研究を行っています。

研究室は、現在、教職員2名(吉川信行、金田久善)、研究員1名(鈴木秀雄)、秘書2名、学生21名の総勢26名で活動しています。また、独立して運営している横浜国立大学山梨研究室(代表:山梨准教授)とも協力して研究を行っています。図1に研究メンバーを、図2に研究室の実験風景を示します。研究室には、集積回路の高速測定を行なうための測定機器一式がそろっています。

これまでの主な研究成果や研究トピックスを以下に示します。

(1) 大規模単一磁束量子(SFQ)回路設計のためのセルライブラリ開発

名古屋大学と協力して、大規模SFQ回路を設計するためのセルライブラリやCADツールを開発しました。

(2) SFQ回路を用いた演算回路の高速動作実証

SFQ回路を用いたマイクロプロセッサや浮動小数点演算器、FFTプロセッサなどを設計し、その高速動作実証を行いました。これらの回路は、50 GHzを超えるクロック周波数で動作しました。

(3) Josephson/CMOS ハイブリッドシステムの開発

Josephson回路技術とCMOS回路技術を組み合わせた64 kb RAMの開発を行いました。

(4) SFQ回路を用いた飛行時間計測型質量分析(TOF-MS)システムの開発

超伝導粒子検出器とSFQ遅延測定回路を組み合わせることで、生体高分子の質量分析が可能なTOF-MSシステムを開発しました。

(5) 断熱型量子磁束パラメトロン(AQFP)の研究

超伝導回路を断熱的に動作させることで、CMOS回路に比べて百万倍消費エネルギーが小さな超伝導論理回路を実現で



図1 研究室メンバー



図2 実験風景

きることを示し、その低エネルギー性を実証しました。

連絡先: 吉川信行 横浜国立大学大学院工学研究院

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5 TEL: 045-339-4259, FAX: 045-338-1157,

E-mail: nyoshi@ynu.ac.jp URL: <http://www.yoshilab.dnj.ynu.ac.jp/>

(3)(独)産業技術総合研究所 超伝導クリーンルーム(CRAVITY) Clean Room for Analog-digital superconductiVITY (CRAVITY) in AIST

産総研のCRAVITYは、低温超伝導デバイス作製のための公開されたクリーンルームです。

(1) スタッフ(H25年7月現在)

CRAVITY運営委員会

運営委員長: 大久保 雅隆

運営委員: 金丸 正剛、神代 暁、浮辺 雅宏、日高 睦夫

CRAVITY登録者: 23名

(2) CRAVITYの簡単な紹介

CRAVITYは、産総研の計測フロンティア研究部門、ナノエレクトロニクス研究部門と(公財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)の持つ低温超伝導デバイス開発環境を統合し、プロセス技術の共有化による競争力を強化することを目的に、2012年の11月に産総研つくばセンター内に設立されました。また、CRAVITYの活動を強化するために、ISTECの低温超伝導デバイスプロセスグループが2013年の4月から産総研所属となりました。

CRAVITYは、産総研の先端機器共用イノベーションプラットフォーム(IBEC)の一環として、内外の研究者に公開されています。登録申請を行い利用が許可されれば、利用料を支払うことで誰でもCRAVITYの設備を使ったデバイス作製が可能となります。また、超伝導デバイス作製に習熟したスタッフが揃っていますので、ご相談いただければ、新しいデバイスの提案やより高度なデバイスの作製を行うこともできます。

(3) CRAVITYの装置

CRAVITYには、露光装置、スパッタ装置、反応性イオンエッチング装置、洗浄装置、検査装置等がそれぞれ複数台設置されており、材料や目的に応じて使い分けることができます。

<http://unit.aist.go.jp/riif/openi/cravity/ja/index.html>にある「施設&機器」の項目をご覧ください。それぞれの装置の写真、詳細な仕様、使用の条件、時間当たりの使用料が表示されています。

(4) 連絡先

〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-1 産総研中央第二

産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門 日高 睦夫

E-mail: m-hidaka@aist.go.jp Tel: 029-861-5055



図1 CRAVITYのロゴマーク。今後このロゴマークが様々な場面で見かけられることを期待している。

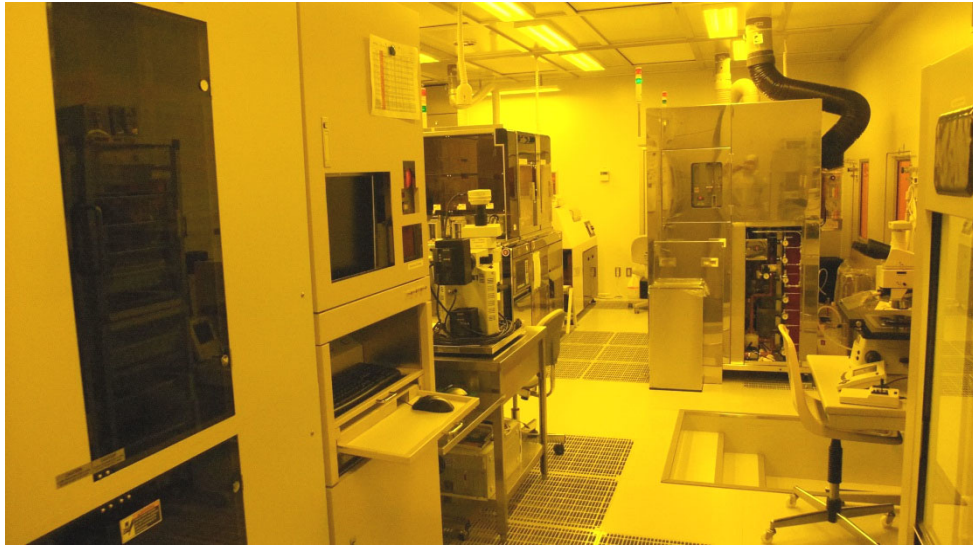


図2 CRAVITYリソグラフィー室（クラス100）の内部。手前がi線ステッパー、右奥が有機洗浄装置、左奥がコータ・デベロッパー（フォトレジスト塗布・現像装置）。

一般社団法人未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会
第81回ワークショップ

「極低温冷凍機の進展とその応用の広がり」

冷凍機開発の進展に伴い超伝導をはじめ極低温の利用が身近なものになりつつあります。冷凍機を利用した超伝導製品の開発や極低温を利用した研究を、これから進めようとしている人々を対象とし、個々の冷凍機の原理から冷凍機の実応用まで広く学び、また最新の冷凍システムの開発状況を把握できるワークショップを開催します。皆様のご参加をお待ちしております。

主催：一般社団法人 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会

協賛 公益社団法人 低温工学・超電導学会、一般社団法人 電気学会

日時 平成25年7月26日（金）13:30～17:35

場所：全日通霞が関ビルディング 8階 大会議室B

〒100-0013 千代田区霞が関3-3-3 TEL 03-3581-2261 <http://www.neu.or.jp/html/map/>

定員 120名

参加費 ★超伝導科学技術研究会員：参加費無料、資料代2,000円

★協賛学会：参加費4,000円、資料代2,000円

★一般：5,000円、資料代2,000円

★学生：参加費無料、資料代2,000円

プログラム

<司会：和久田 毅（日立製作所）>

13:30-13:40 開会の挨拶 超伝導科学技術研究会会長 下山 淳一

13:40-14:30 冷凍機基礎講座：「冷凍の原理と実際の冷凍機」
東京工業大学 岡村 哲至

14:30-15:10 先端宇宙観測用冷凍技術：「サブケルビン領域応用」
物質・材料研究機構 沼澤 健則

<休憩 10分>

15:20-16:00 超伝導ケーブル用冷却システム：
「系統連系試験の状況と大容量・高効率冷凍機開発」
前川製作所 技術研究所 町田 明登

16:00-16:40 モバイル応用向け小型冷凍機：「小型スターリング冷凍機とその応用」
日立製作所 日立研究所 松田 和也

16:40-17:20 高効率水素液化器の実現及び世界のヘリウム需給バランスについて
岩谷産業 産業ガス・機械事業本部 西村 宏

17:20-17:30 総括

17:30-17:35 閉会の挨拶 未踏科学技術協会 木村 茂行

■参加申込はこちらから：<http://www.sntt.or.jp/~fsst/20130726.html>

■問い合わせ先：一般社団法人 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会 担当 大貫

Phone: 03-3503-4681 Fax: 03-3597-0535 e-mail: fsst@sntt.or.jp

< 講演の概要 >

【講演1】：冷凍機基礎講座「冷凍の原理と実際の冷凍機」

講師：東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授 岡村 哲至

概要：低温を発生させる原理、その手法、理論効率などについて解説します。
そして、実際に使われているさまざまなタイプの冷凍機の性能や使い方などの特徴を、俯瞰します。

【講演2】：先端宇宙観測用冷凍技術「サブケルビン領域応用」

：(独)物質・材料研究機構 環境・エネルギー研究部門 主席研究員 沼澤 健則
：新しい宇宙像を拓く天体観測技術として超伝導カロリメーターが注目されています。その作動には超低温を宇宙環境下で発生させることが不可欠となります。極限環境下で作動する冷凍技術を解説するとともに、地上応用についても触れたいと思います。

【講演3】：超伝導ケーブル用冷却システム 「系統連系試験の状況と大容量・高効率冷凍機開発」

：(株)前川製作所 技術研究所 所長 町田 明登
：NEDO「高温超電導実証プロジェクト」による国内初の系統連系試験が昨年10月29日から開始され、1年間の実証試験を行っています。
その実証試験の状況と大容量・高効率冷凍機の開発状況を紹介します。

【講演4】：モバイル応用向け小型冷凍機「小型スターリング冷凍機とその応用」

：(株)日立製作所 日立研究所 松田 和也
：先端計測や医療分野等で、コンパクトな超電導機器のニーズが増加しています。弊社で開発した、手のひらサイズの超電導磁石などを題材に、小型冷凍機に関する情報と、その応用機器の可能性についてご紹介します。

【講演5】：高効率水素液化器の実現及び世界のヘリウム需給バランスについて

：岩谷産業(株) 産業ガス・機械事業本部 中島 康広
：国内初となるガスベアリング式タービンを搭載した水素液化器の特徴、及び需給逼迫により注目を集めております世界のヘリウム需給バランスについて説明いたします。

研究会の動き

【平成25年(2013年)4月1日～平成25年(2013年)6月30日】

第39回シンポジウム／第17回超伝導科学技術賞授賞式

日時:平成25年4月16日(火)10:00～17:25
場所:タワーホール船堀 小ホール
テーマ:超伝導2013ー超伝導応用最前線ー
参加者数:80名

プログラム

【座長 木村 昭夫(古河電気工業)】

- 10:00-10:10 開会の挨拶
下山 淳一
(超伝導科学技術研究会会長)
- 10:10-11:00 基調講演「高温超伝導実用化への工夫と国際標準化への取り組み」
佐藤 謙一(住友電気工業)
- 11:00-11:50 基調講演「エネルギーのこれからと超伝導への期待」
北澤 宏一(科学技術振興機構)

11:50-12:20 超伝導科学技術賞授賞式

昼食休憩・展示ポスター見学

【座長 日高 睦夫(産業技術総合研究所)】

- 13:30-14:10 「金属資源電磁探査用高性能SQUID磁力計実用機の開発」
波頭 経裕
(国際超伝導産業技術研究センター)
- 14:10-14:50 「Bi-2223線材を用いたヒト脳研究用3テスラMRI装置の開発」
浦山 慎一(京都大学)
- 14:50-15:30 「400kJ級RE123系5テスラ高温超伝導マグネットの開発」
大保 雅載(フジクラ)
- 15:30-16:00 <展示休憩>
- 【座長 飯島 康裕(フジクラ)】
- 16:00-16:40 「高温超伝導ケーブル系統実証運転の状況について」
本庄 昇一(東京電力)

- 16:40-17:20 「太陽光パネルから超伝導ケーブル」
富田 優(鉄道総合技術研究所)
- 17:20-17:25 閉会挨拶
木村 茂行(未踏科学技術協会理事長)

幹事会

平成25年度第1回

日時:平成25年4月23日(火)13:30～15:30
場所:学術総合センター11階 共用会議室
出席者:幹事8名
事務局1名

議事

- (1) 第39回シンポジウムについて
- (2) 第1回超伝導科学技術セミナーについて
- (3) 第81回ワークショップについて
- (4) 16th US-Japan Workshopについて
- (5) 平成24年度事業報告案及び収支決算書案について
- (6) 平成25年度事業計画案及び収支予算書案について
- (7) FSST NEWSについて

幹事会

平成25年度第2回

日時:平成25年6月18日(火)15:00～17:30
場所:学術総合センター11階 共用会議室
出席者:幹事5名、オブザーバー1名
事務局1名

議事

- (1) 新規プロジェクトについて
- (2) 第81回ワークショップについて
- (3) 第82回ワークショップについて
- (4) 総会について
- (5) 16th US-Japan Workshopについて
- (6) FSST NEWSについて

国内超伝導関連会議

Conferences related to Superconductivity (Domestic)

会 議 名	日 付	開催場所	主催及び問合せ先
応用物理学会／秋季	H25.9.16～9.20	同志社大学 (京都府京田辺市)	応用物理学会
日本物理学会／秋季	H25.9.25～9.28	徳島大学 (徳島県徳島市)	日本物理学会
日本金属学会／秋期	H25.9.17～9.19	金沢大学 (石川県金沢市)	日本金属学会
低温工学・超電導学会／秋季	H25.12.4～12.6	ウインクあいち (愛知県名古屋市)	低温工学・超電導学会

国際会議及び国外の主要な会議

Conferences related to Superconductivity (International/Abroad)

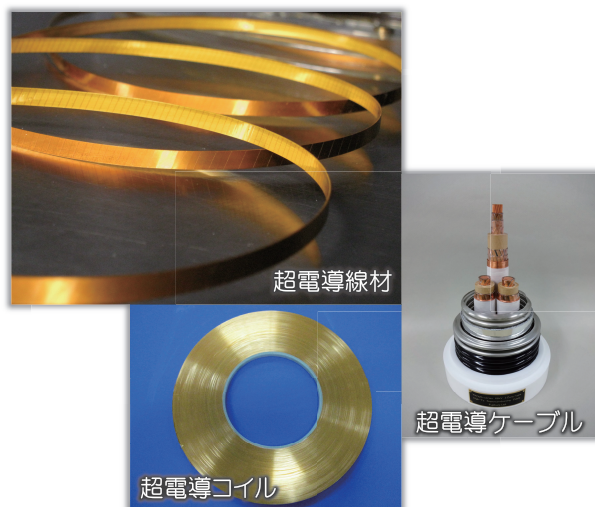
会 議 名	日 付	開催場所	主催及び問合せ先
MT-23	2013.7.14～7.19	Boston (USA)	http://www.mt23.org/
Eucas 2013	2013.9.15～9.19	Genova (Italy)	http://www.eucas2013.org/
7 th ACASC	2013.10.23～10.25	Cappaddocia (Turkey)	http://www.acasc-tr.org/
ISS2013	2013.11.18～11.20	Tower hall Funabori, Tokyo	http://www.istec.or.jp/ISS/index.html

超伝導科学技術研究会 編集委員会 委員

松本 明善	独立行政法人物質・材料研究機構 超伝導線材ユニット 主幹研究員	小泉 勉	昭和電線ケーブルシステム株式会社 技術開発センター 超電導技術開発グループ グループ長
荒井 有気	公益財団法人鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室 副主任研究員	日高 睦夫	独立行政法人産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 上級主任研究員
伊豫 彰	独立行政法人産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 超伝導エレクトロニクスグループ 上級主任研究員	木村 茂行 大貫留美子	一般社団法人未踏科学技術協会 理事長 一般社団法人未踏科学技術協会 事務局長

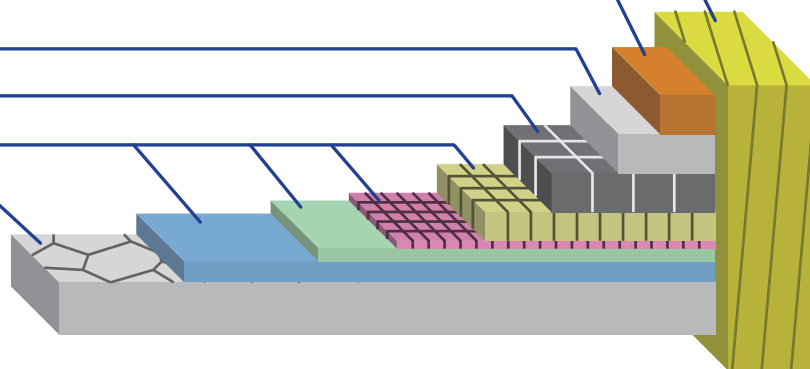
■ 特長

- 長い単長と高磁場中における高い臨界電流、長手方向に優れた均一性を実現
- 浸漬冷却・伝導冷却用コイル等、高磁場下の応用に適した高性能なコイルアプリケーションが可能
- 電力ケーブルの大容量・大電力化、コンパクト化、低送電損失化、高性能・高効率な超電導ケーブルが実現可能



■ 線材構造

- 絶縁テープ [ポリイミド] 12.5 μ m (突き合せ1重巻き) ×2層
- 安定化層 [Cu] 75, 100 μ m
- 保護層 [Ag] 2 μ m ~
- 超電導層 [GdBa₂Cu₃O_x] 2 μ m ~
- 中間層 [MgO, etc.] ~ 0.7 μ m
- 金属基板 [ハステロイ®] 75, 100 μ m



■ 標準仕様

- 線材幅 (5mm, 10mm)、金属基板厚さ (75 μ m, 100 μ m) に応じた製品ラインアップ
- 標準臨界電流 $I_c > 500\text{A/cm-wide}@77\text{K, S.F.}$
- 単長300m以上の長尺線材、ご要求仕様に応じた高性能の超電導線材が提供可能

型番	線材幅 [mm]	金属基板 [μ m]	安定化層 [μ m]	臨界電流 [A] @77K, S.F.
FYSC-SC05	5	75	75	> 250
		100	100	> 250
FYSC-SC10	10	75	75	> 500
		100	100	> 500
FYSC-S05	5	75	—	> 250
		100	—	> 250
FYSC-S10	10	75	—	> 500
		100	—	> 500

※ 仕様のご確認、ご要求等ございましたら、お問い合わせ頂けますようお願い致します。