

# FSST NEWS

Forum of Superconductivity	No. 142
Science and Technology News	

発行

一般社団法人  
未踏科学技術協会  
平成 26 年 7 月 15 日発行  
〒105-0003  
東京都港区西新橋 1-5-10  
新橋アマビル 6 階  
Tel : 03-3503-4681  
Fax : 03-3597-0535  
Email : fsst@sntt.or.jp

## <FSST NEWS No.142 目次>

### <前田先生の追悼記事>

追憶	物質・材料研究機構、東海大学	太刀川 恭治	2
前田弘先生を偲んで	住友電気工業	林 和彦	2
前田弘先生を偲んで	東京大学	下山 淳一	3

### <トピックス 1>

Nd <sub>2</sub> CuO <sub>4</sub> 構造銅酸化物の母物質における超伝導	NTT 物性科学基礎研究所	山本 秀樹	4
--	---------------	-------	---

### <トピックス 2>

超伝導フライホイール蓄電システム用超伝導磁気軸受の開発について	古河電気工業	向山 晋一	10
---------------------------------	--------	-------	----

### <第 18 回超伝導科学技術賞を受賞して>

(1) 先進超伝導線材の研究開発	物質・材料研究機構	熊倉 浩明	13
(2) 超伝導量子回路を用いた量子情報システム	理研創発物性科学センター	蔡 兆申	16
(3) 圧力技術を用いた超伝導研究	日本大学	高橋 博樹	19
(4) 超伝導量子干渉素子を用いた心磁計による胎児不整脈診断学の確立	筑波大学	堀米 仁志	21
(5) 鉄道用超伝導ケーブルの開発	鉄道総合技術研究所	富田 優	23
(6) 電力実システムでの高温超伝導ケーブルシステムの開発および実証	住友電気工業	渡部 充彦	26
(7) 中国瀋陽市における 275 kV-3 kA 超伝導ケーブルのデモンストレーション	古河電気工業	八木 正史	28

### <研究室紹介>

(1) 九州工業大学 大学院情報工学研究院 電子情報工学研究系 超伝導応用工学研究室	31
(2) 東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻 巨視的量子物性グループ	34
(3) 大阪府立大学大学院 工学研究科電子・数物系専攻電子物理工学分野 量子物性研究室	35
(4) 新潟大学 大学院自然科学研究科 電気情報工学専攻 超伝導応用研究室	37
○研究会の動き	39
○第 84 回ワークショップ	40
○国内超伝導関連会議／国際会議及び国外の主要な会議	41



在りし日の前田 弘先生

## 追憶

### A Reminiscence

物材機構、東海大学  
太刀川恭治  
NIMS, Tokai Univ.  
K. Tachikawa

Y系高温超伝導体を凌ぐ、offset  $T_c$  105 KのSr. Caを含むBi系銅酸化物超伝導体の発見者として輝かしい業績を挙げられた前田弘博士の訃報に接して痛恨の極みであり、心からお悔やみ申し上げます。ご依頼によりささやかな追悼文を書かせて戴きますが、長いお付き合いに免じて本文では前田さんと呼ばせて戴きます。

私が直接のつながりを持ったのは超伝導の研究のため金材技研(現、物材機構)に移った1962年以来ですので、50年間以上に亘ります。さらにそれ以前も私は一時磁性材料の研究をしていたので、同氏と面識がありました。当時私と同じ電気磁気材料研究部に所属され、故森本一郎氏の研究室の一員でした。同研究室では、前田さんの磁性材料の他、接点材料、ばね材料、熱電材料等の研究も熱心に進めていました。電磁部では、毎月の研究会、毎年の旅行会等で繋がりが深く、当時の写真を見て懐かしい限りです。前田さんは研究の他、囲碁、テニス、山歩きなどに楽しい日を送られていました。森本さんが他部に移られ、前田さんが室長となり、私が電磁部長となり、引続き深い関係を持つことになりました。

1970年代の後半になると金材技研の筑波移転が現実化し、前田さんも研究室内をまとめるのに若干苦勞しておられました。移転後暫くして前田さんは胃の手術をうけて療養され、私も心配致しましたが、無事元気に戻られました。1980年、電磁部は極低温材料研究グループとなり、前田さんには新しく脚光を浴びていた磁気冷凍材料を研究して戴くことになりました。そのため前田さんは、それまでの金属系から酸化物系の磁性材料に研究を移されました。ついで1985年私が筑波支所長となり直接の研究から離れた時、後継者に躊躇なく前田さん

をお願い致しました。その結果、前田さんは超伝導材料の研究も担当されることになりました。このようにして私は金材技研時代長年にわたり前田さんを頼りにしておりました。

その後間もなく銅酸化物高温超伝導体が発見されて前田さんはその分野に深い関心を持たれ、はじめに述べたBi系高温超伝導体の発見に至りました。我が国で見出されたことは大変幸せで、その御連絡を受けた際に努力する人は必ず報われるものと改めて感じました。ここで特に若い方々に申し上げたいのは、研究者は多くのテーマの変遷を経るものであり、その間の変わらぬ努力により優れた成果にたどり着くことです。なお、その後前田さんは金材技研の強磁場施設建設や、科技厅のマルチコアプロジェクトにも活躍されました。停年御退官後についてもご相談を受けましたが、東北大、北見工大への道を進まれました。その間、前田さんは当研究会の超伝導科学技術賞特別賞を含む数々の栄誉を受けられ、さらに内外で活躍されたのは周知の通りです。

前田さんの御性格は、聡明であるとともに大らかで、真面目で研究熱心であり、また、地味ながら存在感のあるお人柄でした。以上述べましたように、私が職務上直接前田さんと関係があったのはBi系高温超伝導体が発見される前までのことですが、古いことはあまり知られていないかと思ひ小文を書きました。前田さんとは最近まで国際学会その他で一緒しておりましたが、Bi系高温超伝導体が結実期を迎えようとしている折から急逝されたのは超伝導分野にとり大きい痛手かと思ひます。今となりましては、昔の磁性材料の御研究をそのまま続けられた方がお幸せだったかなと無常さを感じます。心からご冥福をお祈りするとともに、ご苦勞様でしたと申し上げたいと思ひます。

## 前田弘先生を偲んで

### Memory of Dr. Hiroshi

住友電気工業株式会社  
林 和彦

Sumitomo Electric Industries, LTD.

K. Hayashi

春季低温工学・超伝導学会が始まった5月26日、前田弘先生の訃報が舞い込んできました。今年2月にお会いし、お酒を酌み交わした時には大変お元気そうでしたのでとても驚いております。ピスマス系高温超伝導体の発見者である前田先生とピスマス2223超伝導体の線材化、応用開発に取り組んでまいりました弊社とは関係浅からぬものがありますので思い出の一端を述べさ

せていただき追悼文とさせていただきます。

1988年1月に当時の金材技研でビスマス系の超電導体が発見され、前年からイットリウム系でpowder-in-tube法による線材化に取り組んでいた我々は、早速ビスマス系でpowder-in-tube法にトライ。イットリウム系ではなかなか臨界電流密度が更新しませんでした。材料と製造プロセスの相性が良く、性能は日々更新していきました。一方、ビスマス系の発見直後の1988年5月には当時の科学技術庁の超伝導材料マルチコアプロジェクトがスタート。我々もマルチコアプロジェクトの一環として、powder-in-tube法による長尺線材化に当時の新技術事業団（現在の科学技術振興機構）の委託開発制度を利用して取り組み始めました。途中いろいろと苦労したこともありましたが、加圧焼成法などの開発もあり、物質発見からの26年で線材性能、長尺線材化とも大きく進展し、工業材料の仲間入りを果たしたと思っています。性能向上の歴史を、図1に示します。

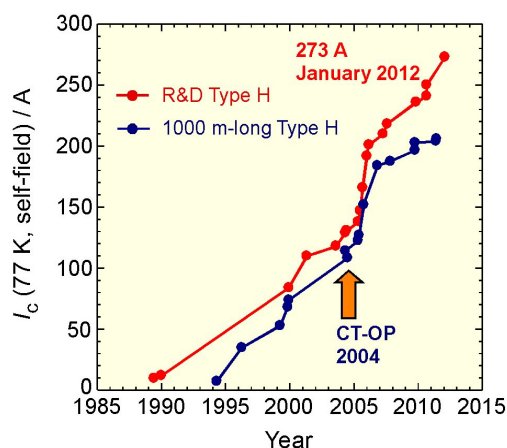


図1 Bi2223線

前田先生とは、金材技研を退職されて、東北大金研や北見工大に移られてからも折々にご指導をいただきまいました。数年前にフロリダ州立大学を訪問した際には、前田先生が滞在されていた時に実験に使われていた私どもの線材サンプルが大事に保管されておりました。

2011年のISSで、超電導発見100周年の記念ミニシンポジウムが企画され、前田先生と私がビスマス系の招待講演を行ったことがありました。この時久しぶりにお会いしたこともあり、弊社大阪製作所でのビスマス2223線材及び応用製品の開発状況のご視察をお願いしたのですが、中々都合がつかず月日だけが過ぎていきました。

その2年後、日経産業新聞2013年10月1日号に「日経産業新聞40周年記念特集 ニッポンの独創力」なる記事が掲載され[1]、日本発の高温超電導材料の発見者として前田先生がお元気そうな写真入りで紹介されまし

た。早速懸案であった弊社大阪製作所のご視察を提案申しあげ、今年2月6日に漸く実現したのでした。我々のビスマス系線材開発チームには、高温超電導体発見当時のフィーバーを知らないどころか、ビスマス系超電導体の発見時にはまだ生まれていなかったメンバーもおりますので、当日は発見当時の日々の苦労話を若手のメンバーに対して情熱的に語っていただきました。なおビスマス系超電導体発見当時の模様は、日本金属学会報「まてりあ」にもまとめられております。[2]

引退された後も、室温超電導体の発見を目指して実験が続けられていると伺っておりましたので、この度の計報は残念でなりません。今年8月に開催されるApplied Superconductivity Conferenceでは、前田先生の遺徳を偲ぶ特別セッションも急遽企画されたようです。私もぜひ参加して残されたビスマス系の研究者と共に、前田先生の功績を偲びたいと考えております。

#### 参考文献

- [1] 日経産業新聞 2013年10月1日第二部 20A
- [2] 前田:まてりあ第40巻第11号 (2001) 947-950.

### 前田弘先生を偲んで

東京大学 下山 淳一

去る5月26日、低温工学・超電導学会初日の朝、学会開催の準備中に、本研究会の北口副会長より前田弘先生ご逝去の報を受けました。突然の悲しい知らせでしたが、同時に前田先生のあまりにも大きな超伝導科学技術の発展への貢献や、私が金属材料技術研究所でご指導いただいていた頃のことを思い返し始めていました。日本いや世界の高温超伝導物質への理解や材料化技術の今日があるのは、前田先生によるBi-Sr-Ca-Cu-O系超伝導体の発見によるところが大きいことは皆様よくご存知の通りです。SrとCaという価数が同じでも占有サイトが異なり、単位構造中に3枚以上のCuO<sub>2</sub>面を持つ物質探索の端緒となり、後のホモロガスシリーズの理解を早め銅酸化物超伝導体の結晶構造、化学組成が体系化されました。

以前、応用物理学会誌の特集号「チャンスを生かせ」(第67巻、第8号、1998年8月)にご寄稿いただきましたが、そこにはクリスマス・イブに観測された100 K超での電気抵抗の急落などBi系高温超伝導体発見当時のエピソードが書かれています。私がつくばで研究を始めた1991年、初めてご一緒させていただいた酒席で、その論文投稿まで試料の質を高めるために1ヶ月闘われた

間の思い出話をうかがいました。当時、かなり怪しい実験データでもそのまま急いで論文投稿してしまう研究者が多かったなか、1ヶ月は実に長い時期であり、その研究者としての慎重な姿勢と100 K以上でゼロ抵抗を実現すべき、という信念に感動したことを覚えています。また、所内で「それは研究ではありません。」という厳しいお言葉を何度か耳にしました。個人的な興味や安易な方法に流されやすく研究の本筋を見失いがちだった当時の私にとってとても印象に残る警鐘であり、今でも強く意識している言葉です。

前田先生は、最近も新超伝導体探索の研究を自らの手で行われていたことを聞きました。さらに、SUPERCOM誌の“年頭のことば”(2013年2月発行)[1]では室温超伝導体への熱い想いが記されており、「所詮、挑戦しなければ夢は夢で終わってしまう。まず一步を」と述べられています。残念ながら前田先生が期待されたご存命の室温超伝導体発見の発表はありませんでしたが、一研究者としてまた、超伝導科学技術研究会の代表者として、この夢への挑戦を続け、また支援していく所存ですので、天国からご注目ください。

最後に、これまでのご指導、超伝導科学技術における多大な貢献にあらためて感謝し、ご冥福をお祈り申し上げます。

[1] 前田 弘、SUPERCOM Vol. 122 No. 1 (2013) p15.  
[http://semrl.t.u-tokyo.ac.jp/supercom/120/S-Com\\_120.html](http://semrl.t.u-tokyo.ac.jp/supercom/120/S-Com_120.html)

## <トピックス 1>

### Nd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> 構造銅酸化物の母物質における超伝導

#### Superconductivity in parent compounds of cuprates having the Nd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>-structure

NTT 物性科学基礎研究所

山本 秀樹

NTT Basic Research Labs., NTT Corporation

H. Yamamoto

#### 1. はじめに

1986年の銅酸化物における高温超伝導の発見[1]以来、おびただしい数の研究者による懸命な努力にもかかわらず、『何故この物質系において高い超伝導転移温度が実現するのか』という機構に関しては、未解明な部分が残されていると考える研究者が多数であろう。しかしながら、機構を議論する上で基本となる電子相図(横軸にドーピング量、縦軸に温度をとって、最も安定に形成される秩序状態を描いたもの)は、高温超伝導研究の初期の段階で確立したと考えられており、この電子相図をベースに、『高温超伝導は、母物質反強磁性絶縁体に正孔または電子のいずれかをドーピングすることにより発現する』という考え方が広く支持されてきた[2-4]。筆者も、このような考え方を教科書で学んでから高温超伝導研究に参入した世代の一人であるため、筆者らのグループが、標題のNd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>(T')構造の母物質における超伝導の発現を報告[5]した際のコミュニティの驚きと戸惑いは想像に難くない。

T'構造の母物質における超伝導を最初に実験室で確認したのは2003年であり、論文を投稿した後、秋のISS2003にて口頭報告した。その後、論文がなかなか採択されず、文献[5]が出版されるまでに2年を要した。また、T'構造(平面4配位のCuO<sub>2</sub>面を持つ構造)ではドーピングせずとも超伝導が発現するという主張が、それまでに知られていたバルク試料での実験結果とあまりにも対照的であった(バルク試料と薄膜試料で結果が異なって見える理由は後述)ために、第1論文出版後も慎重な意見が主流で、なかなか、この話題について邦文で書く機会がなかった。但し、ごく最近、固体物理誌上にこの話題に関する解説記事が掲載された[6]ことから考えると、少なくとも実験事実に関しては市民権が得られて来たように思われる。幸い、今回FSST NEWSに記事を書く機会を戴いたので、発見からこれまでの歴史を追う形で述べたいと思う。このようなスタイルでの解説をお許し戴ければ幸いである。

## 2. 第1世代の母物質超伝導体 $T'$ -(La, RE) $_2$ CuO $_4$ (RE: 希土類元素) の発見まで

著者が高温超伝導研究に一人称で携わるようになったのは、1995年にNTT基礎研究所(現在の物性科学基礎研究所)に入所してからである。大多数の高温超伝導研究者と少し異なると思われるのは、試料合成をバルク合成法ではなく、最も高度な薄膜成長手法である分子線エピタキシー(MBE)法で行った点で、当時、内藤(現東京農工大)らにより構築された、複雑な構造と組成を有する酸化物超伝導体を再現性良く作製できるMBE装置のレベルに驚きながら、実験を開始した。まもなく、実験室で、エピタキシャル歪みによる $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の $T_c$ の大幅上昇[7]、見た目には透明な基板にしか見えない $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ 超薄膜の超伝導化[8]、オゾン酸化による $\text{K}_2\text{NiF}_4(\text{T})$ 構造の $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ の超伝導化[9]などに次々と巡り合うことができ、心躍る日々を過ごした。但し、当時併行して成膜していた123系の薄膜とも合わせ、いわゆるホールドープ型の超伝導体に関しては、1/8異常の有無[10]を除き、電子相図に本質的な変更を迫るような実験結果はなかった。

転機は、 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ 薄膜の光電子分光測定から訪れた。 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ は、いわゆる最適ドープ組成の $x = 0.15$ であっても、バルク・薄膜を問わず試料を合成しただけでは超伝導が発現せず、合成後に還元アニールを施して初めて超伝導化することが知られている。この還元アニールの役割と機構に関する詳細は優れた解説[11]に譲るが、酸化物から酸素を抜くという相分解と競合する操作であること、また、拡散過程であり、熱力学的な因子だけでなく速度論的因子にも強く支配されることの2点が本質的に重要である。実際、バルク試料での実験結果に基づき作成された $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ の電子相図では、超伝導は $0.12 \leq x \leq 0.18$ の極めて狭い組成域でしか超伝導が発現しないが、 $\text{Pr}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ の単結晶を同じ組成の多結晶ペレットで挟んで分解しにくくし、より高い温度で還元した場合には、超伝導を示す組成域がいわゆるアンダードープ側で $x = 0.04$ まで広がることが報告されていた([12]、図2 (b)を参照)。我々の薄膜試料は、厚みが1000Å程度であるため、上記速度論的な観点から、還元アニールによって均一な酸素組成と酸素副格子を得るのに極めて有利である。そこで、様々な $x$ 組成の $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ 薄膜を還元し、その場観察光電子分光(PES)測定を行ってみた。その結果、図1のように $x = 0$ の母物質が、Ceドープされた試料と本質的に同じ電子状態を持ち、フェルミ端を示すことがわかった(1996年に測定)。測定は報告されているネール温度 $T_N$ より高い、室温で行ったために、(PESから直接にはわからないが)反強磁性秩序が消失していても不思議では

ないが、母物質で観測されていた反強磁性絶縁体状態が、モットーハバード的な絶縁体状態に由来するものであるなら、室温程度で金属状態が現れることは説明できない。 $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$ における超伝導の発現[13]にはこの測定からさらに10数年を要することになるが、少なくとも5年後の2001年頃には、『 $T'$ 構造の母物質の基底状態はCeドープした物質と同様に金属(超伝導)であるが、還元条件を最適化するのが難しいために絶縁体に見えているのではないか』という感触が研究チーム内にあったと記憶している。尚、還元された $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$ でフェルミ端が観測されることは、他のグループからも報告されている(測定はバルク試料に対して、バルク敏感なX線PESを用いて行われている)[14]。

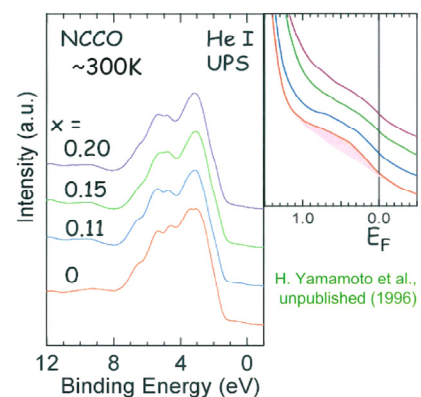


図1  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$  (NCCO) 薄膜のその場観察UPSの $x$ 依存性。 $x = 0$ でもフェルミ端が見える。

その後、 $T_c$ が30 Kと高い $T'$ -(La,Ce) $_2$ CuO $_4$ が、バルク合成と異なり、薄膜では比較的容易に成膜できた[15]—600°C程度の低温で成膜できることがポイント— こともあって、 $RE = \text{La}$ をはじめとする様々な $T'$ - $RE_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ 薄膜で $x$ 依存性が調べられた[5,16]。その結果を図2に、前述の改良還元法により得られたBrinkmannらの $\text{Pr}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ バルク試料に対する電子相図とともに示す。これらのデータを素朴に見ると、『 $x = 0.15$ で $T_c$ が最高となりその周りの極めて狭い組成域でのみ超伝導が発現する』というバルク $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ の電子相図はユニバーサルなものではないことがわかり、また、還元アニール条件を最適化すれば、 $x = 0$ でも超伝導が発現しそうにも見える。因みに、(La,Ce) $_2$ CuO $_4$ において $x = 0.05-0.06$ 付近で $T_c$ が急激に下がるのは、このあたりが通常の成膜条件では、構造が $T'$  から $T$ へと変わる境界にあたることによる。この後、成膜温度をより下げたり適切な基板を選択したりすることで、何とか $T'$ - $\text{La}_2\text{CuO}_4$ 相を安定化させ[17]、様々な還元条件を試したが、当時は、超伝導化にまでは至らなかった(注:10年以上を経て、ごく最近超伝導化されている[18])。

ここで、 $T'$ - $\text{La}_2\text{CuO}_4$ の構造安定化のために、イオン半

径の大きなLaの一部を別の小さな希土類元素で同価数置換するというアイデアが導入された。この結果、我々が第1世代の母物質超伝導体と呼んでいる、一連の超伝導物質T'-(La, RE)<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub> (RE = Y, Sm, Eu, Gd, Tb, Lu)が合成・発見されることになった[5,19,20]。

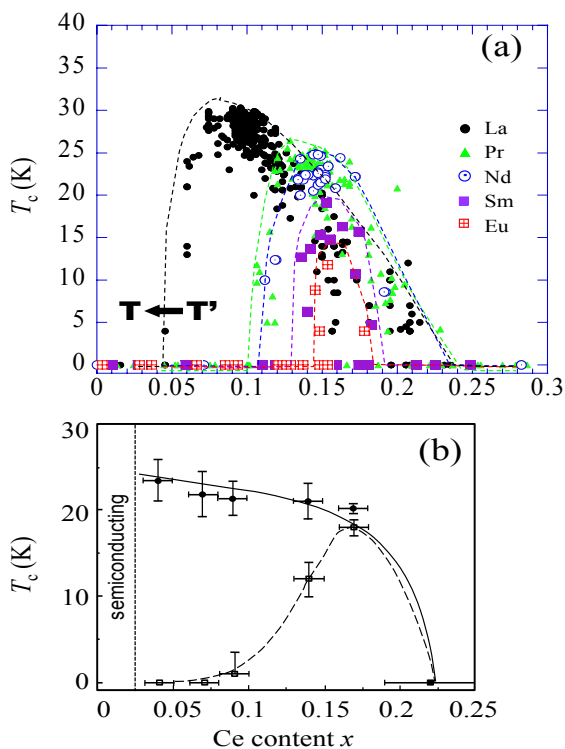


図2 (a)  $RE_{2-x}Ce_xCuO_4$  (RE = La, Pr, Nd, Sm, Eu) 薄膜の $T_c$ のCe置換量 $x$ 依存性[5]。(b) Brinkmannらの改良還元法によって得られた $Pr_{2-x}Ce_xCuO_4$ 単結晶における $T_c$ のCe置換量 $x$ 依存性[12]。

このうち、RE = Sm, Euの物質に関しては、現在ではバルクの多結晶試料が合成され、バルク試料においても超伝導が確認されている(表1参照)[21,22]。また、もともとMBE成膜された結晶性の良い試料であったが、更なる結晶性の改良と厚膜化(~2700Å)が達成され、低速ミュオン分光法といった極めて高度な物性測定を通じて、マイスナー効果が確認されるまでに至っている(KEKの門野・小嶋グループとの共同研究による)[23]。

### 3. 第2世代の母物質超伝導体T'-RE<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>

第1世代の母物質超伝導体は、最初の報告当時、主に欧米の一部研究者からの強い関心を得た。酸素欠損の有無と並んで、この頃最も良く受けた質問は、『T'-(La, RE)<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>が、(as-grownの試料に常に含まれる)頂点酸素の除去による酸素副格子の完全性の向上によってもたらされているとするなら、何故、良く知られている母物質のPr<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>やNd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>は同様のプロセス

によって超伝導を示さないか』というものであった。これら物質を実際に超伝導化できている現在では、『Pr<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>やNd<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>の超伝導化には、より精緻にデザインされた還元プロセスを要するから』という答えが説得力を持つが、当時は、なかなか答えられない重い課題に思われた。

筆者自身は、2005年途中から2007年末まで、研究の現場を離れて仕事をしていたが、現場復帰も見えて来た2007年6月に、共同研究先の東京農工大から大きなニュースが飛び込んできた。それは、有機金属塗布熱分解(MOD)法という、固相エピタキシーをベースとする成膜方法で母物質のSm<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>を成長した場合、成膜時の酸素分圧を低くし更に還元処理を施すと超伝導が発現するというものであった(図3)[13]。この手法は、REの異なる他のT'構造母物質にも適用され、RE = Pr, Nd, Sm, Eu, Gdの母物質で超伝導性が確認されるに至った[13,24,25]。RE = Gdに至っては、Ce置換したGd<sub>2-x</sub>Ce<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>ですら超伝導性が報告されていなかった物質である点、特筆されるべきであろう。

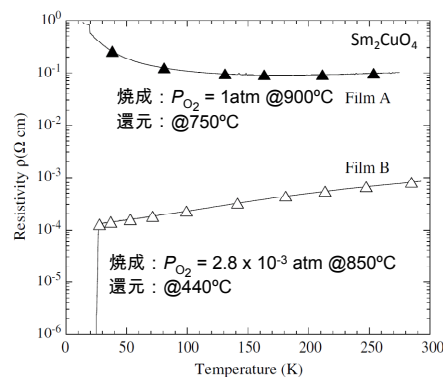


図3 MOD法により異なる条件で作製されたSm<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>薄膜の抵抗率の温度依存性[13]。低酸素分圧下で焼成(この過程で固相エピタキシーが起こる)された薄膜(Film B)は、還元後、超伝導性を示す。

筆者は、2008年の現場復帰と同時に、MBE成長したRE<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>薄膜の超伝導化にとりかかった。MOD法とは異なる合成法で超伝導試料を作製して、発見をより強固に追試したいという思いと、いずれ物性を詳しく調べる際には、高品質試料が必要になるという思いの2つがあった。実は、この取り組みを開始した直後には、MOD薄膜で超伝導が発現しているのであるから、より洗練された成膜手法であるMBE法で作製した薄膜の還元アニールによる超伝導化は比較的容易な応用問題であろうとの思い込みがあったのだが、実際には非常に苦労した。MBE薄膜を超伝導化するためには、MOD薄膜の成膜プロセスからヒントを得た、2ステップの還元アニー

ル(図4)が必要であったが、非常にパラメータが多い上に許容windowが狭く、ルーチンに超伝導試料が作れるようになるまでには、1年以上にわたる非常に多くの系統的なアニール実験を要した[26]。その後、実習生が、数百回に上るアニール実験に挑んでくれたこともあり、第1世代の発見時には大学院生として研究グループに滞在していたKrockenberger氏を2010年に同僚として迎えるころには、高品質Pr<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>試料の作製に一定の目処が立つ状況になっていた。

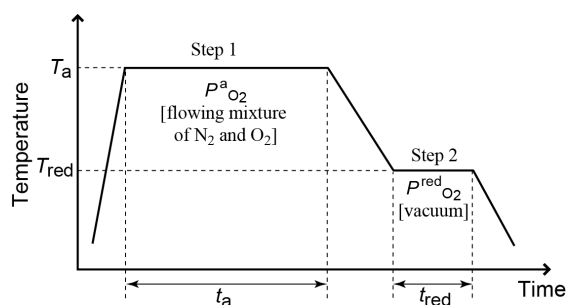


図4 MBE法で作成したRE<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>薄膜の超伝導化に必要な2段階アニールプロセス[26]。各段階での温度、酸素分圧、時間と多くのパラメータを最適化する必要がある。

サンプルの高品質化への努力は、2010年以降も継続する必要があったが、Krockenberger氏の加入により、同時に物性測定も加速度的に進展することになった。まずはゼロ抵抗に加え、超伝導性の基本であるマイスナー効果がきちんと確認された(図5)[27]。一般に超伝導に由来する反磁性信号を確認することはバルク試料ではあまり難しくないが、厚さわずか1000Åの薄膜試料で、CuO<sub>2</sub>面に平行方向に磁場を印加して、マイスナー信号が観測されるのは、試料が極めて高品質な場合のみである。

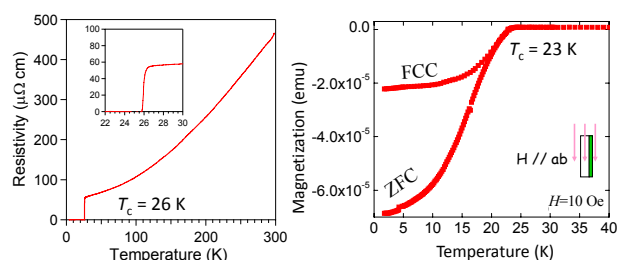


図5 MBE法で作成したPr<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>薄膜の抵抗率と磁化の温度依存性。

その後、磁気抵抗[27,28]やホール係数の測定[18,29]へと歩を進めることができ、『電子ドーピング型』超伝導体の母物質と考えられているPr<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>が、正のホール係数を持つことが明らかになった。これは、バンド計算や、角度分解光電子分光(ARPES)で実験的に決めら

れた『電子型』超伝導体のバンド構造からの予想と一致するものである。すでに母物質がホールのフェルミ面を持つ金属であるので、Ce置換の意味するところは、バンドのフィリングコントロールである。筆者の私見も交えて述べるなら、『電子ドーピング』といった言い方は、このフィリングコントロールの方向を示す用語としては有用であるが、半導体のようにエネルギーギャップを持つ電子構造にキャリアを注入するというイメージを持たれるような使い方は誤用と言わざるを得ない。

表1に薄膜、バルクを問わず母物質での超伝導性発現に関する報告をまとめる。前述のように、第1世代のほうは、バルク試料でも超伝導が確認されているが、第2世代の方はまだである。第2世代の場合、厚さ1000Å程度の薄膜であっても還元アニール条件の最適化は容易でないので、バルク試料の超伝導化に困難が付きまとうのは想像に難くないが、今後、挑むべき課題の一つであろう。

表1 母物質超伝導体に関する報告のまとめ。

Material	Form	Method	Institute	RE element	T <sub>c</sub>	Ref.
(La, RE) <sub>2</sub> CuO <sub>4</sub>	Thin film	MBE	NTT	RE = Y, Sm, Eu, Gd, Eu, Tb, Lu	~ 20 K	[5,18,19]
		PLD	Maryland	RE = Y	11 K	[36]
		Sputtering	Hefei NL	RE = Y	14 K	[37]
	Bulk	Molten salt	TUAT	RE = Sm	~22 K	[21]
		Solid State Reaction (T → S → T')	Tohoku	RE = Eu	~18 K	[22]
RE <sub>2</sub> CuO <sub>4</sub>	Thin film	MBE	NTT	RE = La	28 K	[18]
		MBE + ex-situ anneal	NTT&TUAT	RE = Pr, Nd, Sm	27 K	[26-29]
		MOD	TUAT&NTT	RE = Pr, Nd, Sm, Eu, Gd	~ 30 K	[13,24,25]

#### 4. 課題

母物質超伝導体は、新超伝導体であるので、その確立の有無の判断は『田中の4原則』によるのが良いであろう。すでに述べたように、ゼロ抵抗とマイスナー効果は確認しており、また、構造に関してもX線回折、TEM等で詳細に決定されているので、残るは組成である。組成のうち、カチオンの組成は、成膜時の電子衝撃発光分光法、成膜した薄膜の化学分析などの複数の手法で決定できているので、あとは酸素組成ということになる。

残念ながら、現在のテクノロジーでは、薄膜中の酸素組成を実験的に決定することは出来ないで、厳密には、例えば、Pr<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>は、Pr<sub>2</sub>CuO<sub>4±δ</sub>と書かれるべきである。このため、母物質超伝導体には、常に、酸素欠損による偶発的なキャリアドーピングの可能性が言われてきた。一方、母物質のバルク試料に対しても酸素量が正確に決定できているわけではない。従って、絶縁体だと言われてきた、RE<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>試料に対してもRE<sub>2</sub>CuO<sub>4±δ</sub>と書くのが最も正確ということになり、絶縁性がδのどの値に

由来するものかは同じく決定できていない。さらに言えば、T'構造物質では、その物性が、微量の頂点酸素の有無によって支配されているので、酸素の全体的な組成を決めるだけでは十分ではなく、本当は、CuO<sub>2</sub>面の酸素O(1)、RE<sub>2</sub>O<sub>2</sub>面の酸素O(2)、頂点酸素O(3)に対して、(CuO<sub>2±δ(1)</sub>)(RE<sub>2</sub>O<sub>2±δ(2)</sub>)O<sub>δ(3)</sub>のδ(1)、δ(2)、δ(3)を決定する必要がある。ここで、O(2)の酸素は格子に強く結合しており、還元アニールの前後で、占有率に変化がないことが、バルク試料に対する中性子回折で確かめられている[30]ので、δ(1)、δ(3)に対する情報と考察が、この物質系の物質科学と物性とを理解する上で本質的である。

現時点では薄膜試料のサイト毎の酸素量を直接的に決定するすべはないが、我々は母物質で発現している超伝導が酸素欠損によるものではないことを示唆する実験事実を積み重ねて来た。紙面の都合で詳細は省略させていただくが、還元前後での格子定数の変化の有無[27,29]、系統的に還元条件を変えた際の抵抗率の変化[5,20]、光電子分光で観測されたリジッドバンドシフト[31]、正のホール係数[18,29]などである。最後のホール係数に関して、『金属』のホール係数はフェルミ面の形状と非等方的なキャリア散乱時間の複雑な関数として決定されるため、その符号からキャリアの種類を議論するのはもとより固体物理学の教えるところと反するが、T'銅酸化物では、このホール係数も残留頂点酸素の影響を強く受け、頂点位置の非正規酸素を除去した試料では、Ce置換(電子ドーブ)した場合でも正の符号を持つことが明らかになって来ている(初期の報告[32]と異なる)。従って、ホール係数が正だからといって電子ドーブされていないという証拠にはならないが、少なくとも、『負のホール係数は、電子ドーブされている証拠で、もしホール係数が負なら酸素欠損による電子ドーピング』といった単純な議論は決して成立しないことは確実に言える。さらに、RE<sub>2-x</sub>Ce<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>では、xによらず超伝導の発現に還元アニールが必須であるが、この還元アニールの役割を、x > 0の場合にはO(3)サイトの過剰酸素の除去、x = 0の場合には、酸素欠損の導入によるキャリアドーピングと考えるのは、いかにも恣意的に思われる。いずれにせよ、サイト毎の酸素量を直接決定するのは極めて困難であるため、Ce置換量を系統的に変えてフェルミ面の形状とサイズを調べるというアプローチが有望である。ARPESや量子振動(SdH効果など)の実験が待たれる所以である。

続いて残されている課題は、T'構造へのホールドーピングである。これまで得られている実験結果では、Pr<sub>2-x</sub>Ce<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>やNd<sub>2-x</sub>Ce<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub>にて、xの減少と共にx = 0まで単調にT<sub>c</sub>が上昇しているため、その先、ホールドー

ブした際の物性には大変興味を持たれる。この話題に関しては、東北大グループがT'-(La, Eu)<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>にSrドーブした場合の超伝導を報告し[22]先行しているが、現時点では試料の超伝導体積分率が小さいことなどから、観測された低いT<sub>c</sub>が試料品質の改善によってさらに上がる余地が残されているように思われる。

最後に、T'構造と同じ、平面四配位のCuO<sub>2</sub>面を持つ、無限相構造の母物質における超伝導発現の有無の確認も今後の課題である。無限相銅酸化物は、そのバルク試料の合成に高压合成を要するなど、相そのものの安定化が簡単ではない。薄膜ではエピタキシーと低温成膜の効果により、単結晶薄膜は得られるが、構造を保ったままアニールできる温度領域が限られており、T'構造と同様のアニール実験には困難がつきまとう。幸い、最近の研究で、電子ドーブされた無限相構造Sr<sub>0.9</sub>La<sub>0.1</sub>CuO<sub>2</sub>薄膜では、酸素副格子の完全性の制御に成膜時の活性酸素種の制御が重要であることがわかってきた[33]ため、このような知見を活用して、ドーブされていない試料での物性研究を進めることができると考えている。

## 5. まとめ

高温銅酸化物超伝導体の母物質は強い電子相関ゆえに例外なく絶縁体であり、超伝導の発現にはドーピングが必須であると信じられて来た。しかしながら、我々の系統的な実験や他グループによる追試により、平面四配位のCuO<sub>2</sub>面を持つT'構造の銅酸化物においては、超伝導が発現する舞台であるCuO<sub>2</sub>面のdefect(頂点位置の過剰酸素)除去により、ドーピングに関係なく超伝導が発現することが明らかになって来た。また、最近では、CuO<sub>2</sub>面のCuへの酸素の配位の違いによって、基底状態がモット絶縁体から金属まで変わり得ることが、計算によっても示されるようになってきた[34,35]。これらの新しい結果の解釈に関しては、未だ論争が続いている状況であるが、将来のさらなる研究によってドーピング無しで超伝導が発現することが確立したなら、我々の研究結果は、高温超伝導物理・機構を理解する営みに一つのターニングポイントを与えたことになるであろう。

## 謝辞

本稿は、内藤方夫氏(現 東京農工大)、Yoshiharu Krockenberger氏(NTT)、東田昭雄氏(現 東京理科大)をはじめとする多くの方々との長年の協働の結果得られた研究成果に基づくものです。関係各位に深く御礼申し上げます。



参考文献

- [1] J. G. Bednorz and K. A. Müller: *Z. Phys. B* **64** (1986) 189-193.
- [2] G. M. Luke, L. P. Le, B. J. Sternlieb, Y. J. Uemura, J. H. Brewer, R. Kadono, R. F. Kiefl, S. R. Kreitzman, T. M. Riseman, C. E. Stronach, M. R. Davis, S. Uchida, H. Takagi, Y. Tokura, Y. Hidaka, T. Murakami, J. Gopalakrishnan, A. W. Sleight, M. A. Subramanian, E. A. Early, J. T. Markert, M. B. Maple, and C. L. Seaman: *Phys. Rev. B* **42** (1990) 7981-7988.
- [3] M. B. Maple: *MRS Bulletin* **15(6)** (1990) 60-67.
- [4] 内田慎一: 固体物理, 第25卷10号 (1990) 74-84.
- [5] A. Tsukada, Y. Krockenberger, M. Noda, H. Yamamoto, D. Manske, L. Alff, and M. Naito: *Solid State Commun.* **133** (2005) 427-431.
- [6] 足立匡、小池洋二: 固体物理, 第49卷5号 (2014) 7-18.
- [7] H. Sato and M. Naito: *Physica C* **274** (1997) 221-226.
- [8] H. Sato, H. Yamamoto, and M. Naito: *Physica C* **274** (1997) 227-231.
- [9] H. Sato, M. Naito, and H. Yamamoto: *Physica C* **280** (1997) 178-186.
- [10] H. Sato, A. Tsukada, M. Naito, and A. Matsuda: *Phys. Rev. B* **62** (1997) R799-R802.
- [11] 内藤方夫: 応用物理学会超伝導分科会スクールテキスト「高温超伝導データブック」, 第3章 (2009) pp.49-112.
- [12] M. Brinkmann, T. Rex, H. Bach, and K. Westerholt: *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 4927-4930.
- [13] O. Matsumoto, A. Utsuki, A. Tsukada, H. Yamamoto, T. Manabe, and M. Naito: *Physica C* **468** (2008) 1148-1151.
- [13] O. Matsumoto, A. Utsuki, A. Tsukada, H. Yamamoto, T. Manabe, and M. Naito: *Physica C* **468** (2008) 1148-1151.
- [14] R. P. Vasquez, A. Gupta, and A. Kussmaul: *Solid State Commun.* **78** (1991) 303-306.
- [15] M. Naito and M. Hepp: *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** (2000) L485-L487.
- [16] Y. Krockenberger, J. Kurian, A. Winkler, A. Tsukada, M. Naito, and L. Alff: *Phys. Rev. B* **77** (2008) 060505(R)-1-4.
- [17] A. Tsukada, T. Greibe, and M. Naito: *Phys. Rev. B* **66** (2002) 184515-1-5.
- [18] Y. Krockenberger, H. Irie, J. Yan, L. Waterston, B. Eleazer, K. Sakuma, and H. Yamamoto: *Appl. Phys. Express* **7** (2014) 063101-1-4.
- [19] M. Noda, A. Tsukada, H. Yamamoto, and M. Naito: *Physica C* **426-431** (2005) 220-224.
- [20] A. Tsukada, M. Noda, H. Yamamoto, and M. Naito: *Physica C* **426-431** (2005) 459-463.
- [21] S. Asai, S. Ueda, and M. Naito: *Physica C* **471** (2011) 682-685.
- [22] T. Takamatsu, M. Kato, T. Noji, and Y. Koike: *Appl. Phys. Express* **5** (2012) 073101-1-3.
- [23] K. M. Kojima, Y. Krockenberger, I. Yamauchi, M. Miyazaki, M. Hiraishi, A. Koda, R. Kadono, R. Kumai, H. Yamamoto, A. Ikeda, and M. Naito: *Phys. Rev. B* **89** (2014) 180508(R)-1-5.
- [24] O. Matsumoto, A. Utsuki, A. Tsukada, H. Yamamoto, T. Manabe, and M. Naito: *Phys. Rev. B* **79** (2009) 100508(R)-1-4.
- [25] A. Ikeda, O. Matsumoto, H. Yamamoto, T. Manabe, and M. Naito: *Physica C* **471** (2011) 686-689.
- [26] H. Yamamoto, O. Matsumoto, Y. Krockenberger, K. Yamagami, and M. Naito: *Solid State Commun.* **151** (2011) 771-774.
- [27] Y. Krockenberger, H. Yamamoto, A. Tsukada, M. Mitsuhashi, and M. Naito: *Phys. Rev. B* **85** (2011) 184502-1-8.
- [28] Y. Krockenberger, H. Yamamoto, M. Mitsuhashi, and M. Naito: *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** (2012) 010106-1-4.
- [29] Y. Krockenberger, H. Irie, O. Matsumoto, K. Yamagami, M. Mitsuhashi, A. Tsukada, M. Naito, and H. Yamamoto: *Sci. Reports* **3** (2013) 2235-1-6.
- [30] P. G. Radaelli, J. D. Jorgensen, A. J. Schultz, J. L. Peng, and R. L. Greene: *Phys. Rev. B* **49** (1994) 15332-15326.
- [31] H. Yamamoto, A. Tsukada, O. Matsumoto, M. Naito: *Physica C* **470** (2010) S88-S89.
- [32] S. Uchida, H. Takagi, and Y. Tokura: *Physica C* **162-164** (1989) 1677-1680.
- [33] H. Yamamoto, Y. Krockenberger, M. Naito: *Proc. SPIE* **8987** (2014) 89870V-1-11.
- [34] C. Weber, K. Haule, and G. Kotliar: *Nat. Phys.* **6** (2010) 574-578.
- [35] H. Das and T. Saha-Dasgupta: *Phys. Rev. B* **79** (2009) 134522-1-5.
- [36] W. Yu, B. Liang, P. Li, S. Fujino, T. Murakami, I. Takeuchi, and R. L. Greene: *Phys. Rev. B* **75** (2007) 020503(R)-1-4.

[37] L. Zhao, R. H. Liu, G. Wu, G. Y. Wang, T. Wu, X. G. Luo, and X. H. Chen: Supercond. Sci. Technol. **21** (2008) 065005-1-8.

## <トピックス 2>

### 超電導フライホイール蓄電システム用超電導 磁気軸受の開発について

Developments of HTS magnetic bearing for  
next generation flywheel energy storage system

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

S. Mukoyama

Furukawa Electric Co., Ltd., R&D Group, Power &  
System Laboratories

公益財団法人鉄道総合技術研究所(鉄道総研)と古河電気工業(株)は、平成26年3月10日に、「次世代フライホイール向け高温超電導マグネットの開発に成功ーメガソーラー等との連携により、効率的な電力エネルギーの貯蔵が可能にー」と題して、プレスリリースを行いました。本報は、その内容を報告するものです。

#### 1. はじめに

電力改革として、原子力への依存度を可能な限り低減させベースロードに抑えることを図っていく中で、太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギーの導入は、化石エネルギー依存率の低減とエネルギー自給率の向上や、地球温暖化の抑制など一層重要となってきた[1]。一方で、不安定な自然エネルギーに頼る太陽光発電や風力発電の大量導入は、系統の不安定性を引き起こしたり、余剰電力が発生したりする問題が課題となってきた。その解決の一つとして、系統安定化用の大容量蓄電システムを系統に導入することが検討されている。

フライホイール蓄電装置は余剰電力で電動機を駆動し、フライホイール(はずみ車)を回転させることで運動エネルギーの形で電力を貯蔵し、電力放出の時に電動機を発電機として運動エネルギーを電力に変換して供給するのである。フライホイール蓄電装置の利点としては、瞬時の電力の出し入れができること、繰り返し充放電でも劣化することが無いこと、そしてフライホイール自身が永続的に使用できる(長寿命)というところにある。本研究では、このフライホイールの回転体軸受部分に超電導技術を適用することで、完全非接触支持を目指し、機械部品の保守(メンテナンスコスト)に関する経済的な問題、軸受部分の摩擦損失などによる運転効率の低下を解決することを目的としている。

## 2. 次世代フライホイール蓄電システムの概要

図1に、今回開発しているフライホイール蓄電システムの構成を示す。本開発は、公益財団法人鉄道総合技術研究所、山梨県企業局、クボテック株式会社、株式会社ミラプロと共同で、新エネルギー・産業技術総合開発機構の「安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発」プロジェクトの中で実施している。各社のそれぞれの開発分担を表1に示す。

フライホイール蓄電システムは、電力をはずみ車(回転体)の回転エネルギーに変換して蓄えるため、フライホイールロータは「より重く」「より高速で回転」するほど、大きなエネルギーを蓄えることが可能となる。さらに、電力の入出力を高速かつ繰返して行うことができる装置で、太陽電池等の短時間の出力変動を補償するに適している。しかし、これまでのフライホイール蓄電システムでは、高速回転する軸を受ける軸受を機械的軸受を用いていたために軸受損失が大きく、かつ軸受の摩擦による摩擦により、周期的なメンテナンスが必要であった。そのために、永久磁石を用いた磁気軸受を用いて回転体を非接触で浮かす非接触軸受が検討されていたが、電磁石と永久磁石を用いた従来の磁気軸受や、開発が行われてきた超電導磁石と永久磁石を用いた磁気軸受では、浮上力が小さく、大型のフライホイールへの適用はできなかった。

本開発の次世代フライホイールには、鉄道総研の長嶋部長のグループが考案した超電導バルク体と超電導マグネットを組み合わせた超電導磁気軸受を適用し、高い磁場とバルク体の反発力を利用して、数トンの重量を支えることができることが大きな特徴である。

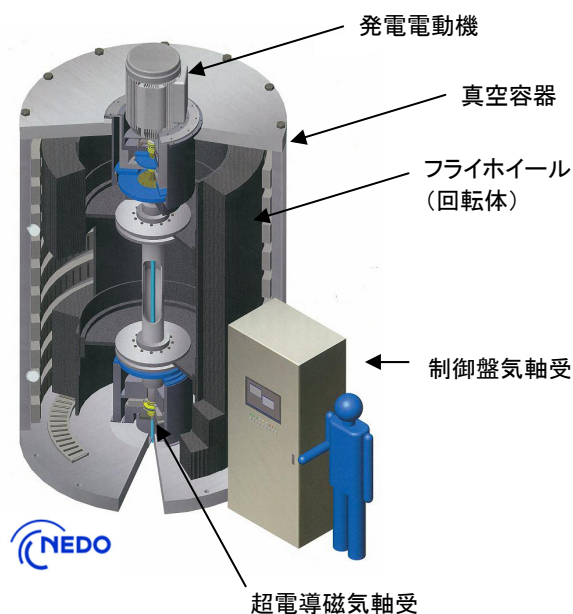


図1 超電導フライホイール蓄電システム

表1 超電導フライホイール蓄電システムの開発分担

開発内容	担当社
総括／発電電動機	(公財)鉄道総合技術研究所
フライホイール	クボテック(株)
真空容器	(株)ミラプロ
超電導磁気軸受	古河電気工業(株)
系統連系制御システム	山梨県企業局

## 3. 超電導磁気軸受の開発

鉄道総研では、平成24年度まで国土交通省の国庫補助金を受けてビスマス系高温超電導コイルと超電導バルク体の組み合わせによる超電導磁気軸受の開発を行い、6 tonを超える荷重の実証に成功している[2]。今回、コイルに第二世代高温超電導線(REBCO wire)を適用することを考案し、古河電工がコイル開発を分担して、新しい磁気軸受の開発をスタートした。これは、ビスマス系高温超電導マグネットでは高磁場を発生させるために30 K以下まで冷やさなければならないことに対して、REBCO高温超電導マグネットでは比較的高い温度の50 Kで運転することで所要の磁場を得ることができ、それによりクライオスタットの設計が簡易になり、さらに冷凍機動力としての冷却コストを低減することが可能となる。超電導線材としては、スーパーパワー社が製造したイトリウムを用いたREBCO線材を用いた。スーパーパワー社では、高磁場での性能向上を図り、ピンニングセンターを導入したものを製造しており、ピンニングセンターを導入したREBCO線材を用いた。超電導マグネットは内径120 mm、外径260 mmのダブル・パンケーキコイルで、中部電力(株)が開発した「よろい」コイル技術を用いて製作した。「よろい」コイル技術とは、コイル内の超電導線材に作用する電磁力を超電導線材に接するコイル側板で支える方法で[3]、大きな荷重に耐える必要のある本コイルに適したコイル構成と考えて採用した。本ダブル・パンケーキコイルの仕様を表2に、写真を図3に示す。

通電試験は、製作したコイルを真空容器に入れて、GM冷凍機で伝導冷却して行った。通電実験は、30 Kの温度に保持した状態で、運転電流である110 Aでの通電を行い、設計通りの0.8 Tの磁場が発生することを確認した(図4)。さらに、図5の概念図のように新日鉄住金製の超電導バルク体と組み合わせて、浮上力実験を行った。超電導コイルと超電導バルク体の反磁性効果による反発力を、ロードセルで測定して、2 tonを超える所期の浮上力を確認することができた(図6)。

表2 HTSダブル・パンケーキコイル仕様

項目	仕様
線材	Superpower 社製
テープ幅	6 mm
テープ厚	0.1 mm
テープ $I_c$ (77K s.f.)	~100 A
コイル内径	120 mm
コイル外径	260 mm
コイル高さ	17.6 mm

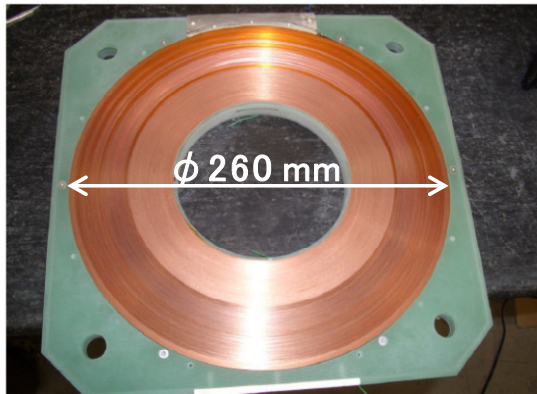


図3 製作したHTSコイル

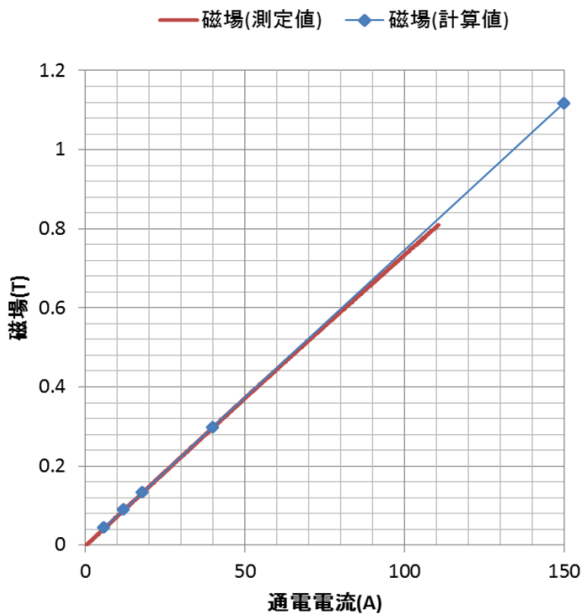


図4 超電導磁気軸受用REBCOコイルの励磁特性

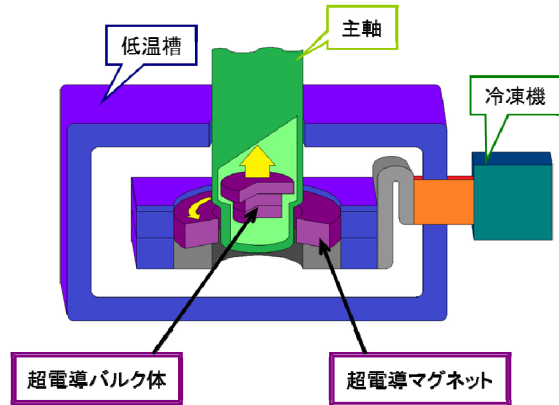


図5 HTSコイルとHTSバルクによる浮上実験結果

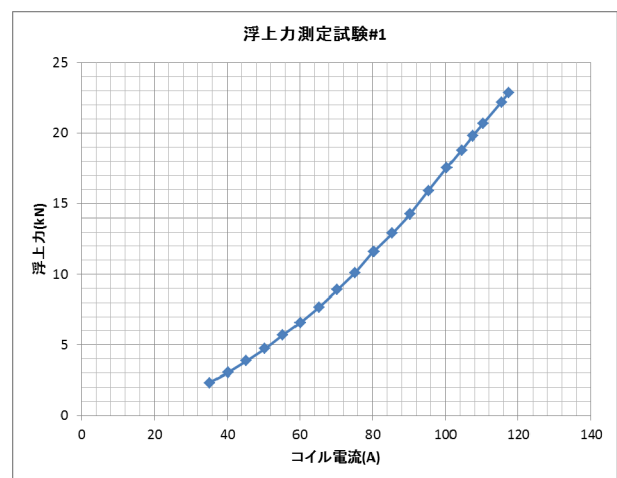


図6 HTSコイルとHTSバルクによる浮上実験結果

#### 4. 今後の計画

本開発では、REBCO高温超電導コイルでの磁気軸受の可能性の検証として、一つのダブル・パンケーキコイルの試作、通電試験、浮上力試験を実施して、設計通りの結果を得ることができた。現在、実サイズのフライホイールを浮上させるために、ダブル・パンケーキコイルを複数個積層した回転試験を予定している。さらに、このユニット化を行い超電導磁気軸受を、100kWh級超電導フライホイールの中に組み込み、再生可能エネルギーの出力変動の抑制効果の検証として、平成27年に山梨県米倉山のメガソーラーとの連系試験を開始する予定である。

#### 5. おわりに

フライホイール蓄電システムは、他の蓄電システムと比べて、長寿命化、高効率なメリットは明白である一方で、低コスト化と安全性について追及していくことが重要である。本開発では、これらも並行して検討しているものである。今回開発した超電導磁気軸受超電導コイルは、その後複数回の昇温・冷却と繰り返しの通電・荷重

実験を行っているが、現時点では性能劣化もなく実用の目途が立っている。

このフライホイール蓄電システムは、劣化のない「電池」として使えるもので、用途は幅広く、例えば鉄道システムの電力有効利用(回生失効対策)などにも役立つと考えている。

## 6. 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の「安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発」プロジェクトのうち「次世代フライホイール蓄電システムの開発」の一環として実施したものです。また、超電導磁気軸受のコイル開発および製造で協力いただいた中部電力(株)長屋氏および羽衣電機(株)に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] エネルギー基本計画(2014/4) 経済産業省
- [2] <http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/rd7920/rd79200107.html>
- [3] 渡辺智則ら、低温工学 **48** (2013) 213.

# <第18回超伝導科学技術賞を授賞して>

## (1)先進超伝導線材の研究開発

### Development of Advanced Superconducting Wires and tapes

物質・材料研究機構

熊倉浩明

National Institute for Materials Science

H. Kumakura

#### 1. はじめに

このたびは栄えある超伝導科学技術賞をいただき、誠にありがとうございます。私はこれまでに様々な超伝導材料について線材化の研究を行ってきました。超伝導材料の線材化研究は多彩であって材料科学の観点から非常に興味ある対象であると思います。また超伝導材料にはそれぞれに長所、短所があって短所を抑えて出来るだけ長所を伸ばすような手法の開発が必要となります。ここでは、筆者らが物質・材料研究機構(旧金材技研)において研究を行ってきた代表的な超伝導材料の線材化研究について簡単に紹介してみたいと思います。

#### 2. Nb<sub>3</sub>AlならびにNb<sub>3</sub>(Al,Ge)線材

Nb<sub>3</sub>AlはNb<sub>3</sub>SnよりもはるかにH<sub>c2</sub>が高いので強磁界マグネット用線材として有望であり、以前より注目されてきた。しかしながらNb<sub>3</sub>AlではT<sub>c</sub>の高い化学量論組成は高温でのみ安定であり、~1000°C以下では特性の劣ったNbリッチな化合物しか得られない。このため、優れたT<sub>c</sub>やH<sub>c2</sub>を有するNb<sub>3</sub>Alは高温で熱処理を行う必要があるが、通常の高熱処理では結晶粒の粗大化が起り、肝心の臨界電流密度J<sub>c</sub>が低下してしまうという難点があった。そこで、エネルギー密度の高いレーザービームや電子ビーム照射を利用して急速加熱を行ってNb<sub>3</sub>Alを生成させ、その後急速冷却を行って結晶粒の粗大化を抑制することにより、高いJ<sub>c</sub>特性を有する線材作製を目指した[1,2]。照射を実施する素線材(テープ)はパウダー・イン・チューブ(PIT)法で作製した。このテープを移動させながらその表面に細く絞ったレーザービームや電子ビームを照射した。このようにして作製されたNb<sub>3</sub>AlテープのT<sub>c</sub>は17 Kを越えており、化学量論組成に近い組成が得られることが分かった。またテープの組織観察から、ビーム照射によって急速に加熱されてNb<sub>3</sub>Alが生成し、その後、テープの未照射部分に熱が逃げて急速に冷却されるので、Nb<sub>3</sub>Alの結晶粒の粗大化がかなり抑制されることが分かった。図1にこのようにし

て得られたテープの4.2 Kにおける $J_c$ - $H$ 特性を示す[3]。Nb<sub>3</sub>Alテープでは、 $J_c$ は4.2 K、20 Tで2万A/cm<sup>2</sup>と通常熱処理したテープの $J_c$ を大幅に上回る値が得られた。また、Nb、AlならびにGeの混合粉末から出発して作製されたテープにビーム照射を行って得た超伝導テープでは、4.2 K、25 Tで約3万A/cm<sup>2</sup>とさらに高い $J_c$ 値が得られた。

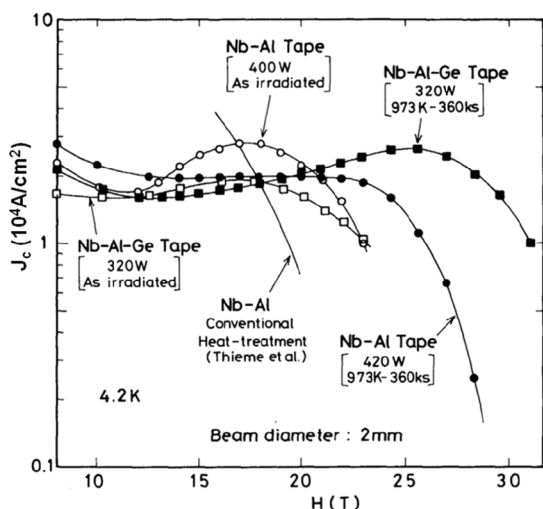


図1 電子ビーム照射を利用して作製したNb<sub>3</sub>AlならびにNb<sub>3</sub>(Al,Ge)テープの $J_c$ - $H$ 特性[3]

### 3. ビスマス系高温超伝導線材

ビスマス系高温酸化物超伝導体にはBi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>x</sub> (Bi-2212)とBi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (Bi-2223)とがあり、線材化法としては、どちらも PIT法が一般的である。筆者らは、主としてより製法が簡単なBi-2212について線材化研究を進めた。あらかじめ原料粉末の混合・熱処理によりBi-2212プリカーサ粉末を作製し、これを銀管に充填して機械加工によってテープを作製した。高温酸化物超伝導材料においては高い輸送超伝導電流を得るためには、結晶粒の配向化が重要である。ビスマス系酸化物超伝導体は異方性(二次元性)が強く、板状に結晶成長するために結晶粒の配向化( $c$ 軸配向化)が比較的容易である。Bi-2212については、熱処理時において温度をBi-2212の融点の少し上まで上昇させて部分熔融状態とし、その後2°C/hくらいの速度でゆっくりと冷却をすると、高レベルの $c$ 軸配向が得られることがわかった[4,5]。この部分熔融—徐冷熱処理法によって、ランダムな方位の場合と比べて格段に高い $J_c$ を得ることが可能となった[6]。

図2にこのようにして得られたBi-2212テープの4.2 Kにおける $J_c$ - $H$ 特性を実用線材の特性と比較して示す。4.2 Kにおいては、25 Tの強磁界まで10<sup>5</sup> A/cm<sup>2</sup>を越す実用レベルの $J_c$ が得られ、強磁界超伝導マグネット用の線材として非常に有望なことが判明した。その他、熱処

理中の酸素分圧や超伝導層厚が $c$ 軸配向度や $J_c$ 特性に大きく影響することも判った[7]。次に、企業の協力をいただいて、この手法を適用して長尺テープを作製し、wind & react法によって小型コイルの試作を行い、この小型Bi-2212コイルを超伝導マグネットシステムの内層マグネットとして用いる研究を進めた。その結果、最高の発生磁界が23.4 Tと、当時としては超伝導マグネットによる磁界発生の世界記録を達成した[8]。

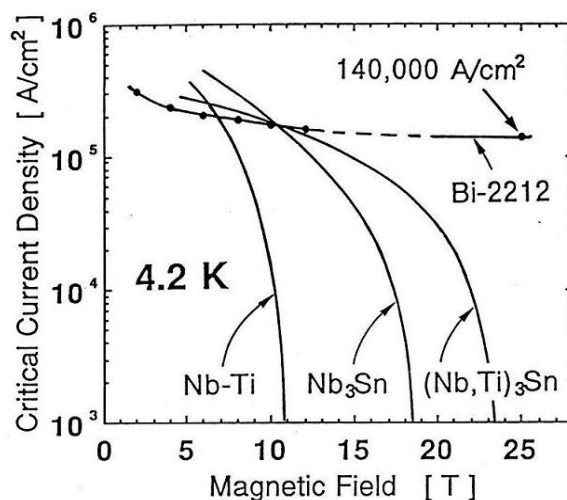


図2 部分熔融—徐冷法によるBi-2212テープの4.2Kにおける $J_c$ - $H$ 特性。比較のためにNb-Ti, Nb<sub>3</sub>Snならびに(Nb,Ti)<sub>3</sub>Sn実用線材の特性も示す。

### 4. MgB<sub>2</sub>線材

MgB<sub>2</sub>は、高温酸化物超伝導体に比べて $T_c$ はかなり低い、1) 結晶粒の向きを揃えること(配向化)が不必要と考えられること、2) 資源的にも豊富で原料が比較的安価であること、3) 機械的にタフであること、4) 軽量であること。などの利点があるため、線材化の研究が世界的に活発に行われており、またMRIなどの超伝導機器の開発も進められている。MgB<sub>2</sub>線材の作製法としては、PIT法が最も一般的であるが、MgB<sub>2</sub>コアの充填密度があまり高くないために実用レベルの $J_c$ 値はまだ得られていないのが現状である。これに対してMg棒の周囲に同心円状にB粉末層を配置し、中心に配置したMgをB層へ拡散によって供給してMgB<sub>2</sub>を生成させる内部Mg拡散(internal Mg diffusion (IMD))法では、はるかに高い充填率を持ったMgB<sub>2</sub>層が得られるので、高 $J_c$ 化に有利である[9]。図3にはIMD法による熱処理前の7芯線材の断面写真を示す。

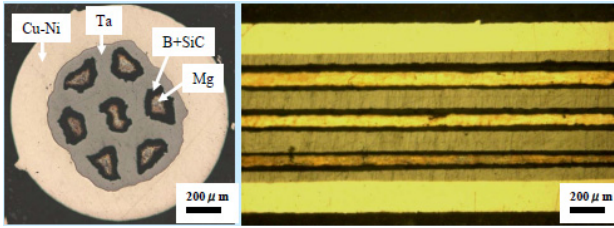


図3 内部Mg拡散 (IMD) 法により作製した7芯のMgB<sub>2</sub>線材断面(熱処理前)[9]。

図4には、カーボンコートB粉末を用いてIMD法で作製したMgB<sub>2</sub>線材の $J_c$ - $H$ 特性の温度依存性を示す。4.2 K、10 Tで $10^5$  A/cm<sup>2</sup>を越える $J_c$ が得られ、20 K、5 Tで $7.6 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>、20 K、4 Tでは $10^5$  A/cm<sup>2</sup>をはるかに越える $J_c$ 値が得られている[10]。これらの値はPIT法線材よりも大幅に高い値である。ただし、この拡散法では、線材中心部に大きなポイドが形成されることもあり、これまでは $J_c$ は高いが、線材全断面積あたりの $J_c(J_0)$ はPIT法線材に比べて必ずしも十分に高いとは言えなかった。これについても最近では、金属シースの厚みを減少させること、などにより $J_c$ も向上しつつあり、現在では4.2 K、10 Tで $10^4$  A/cm<sup>2</sup>以上と、PIT法線材の $J_c$ をはるかに上回る $J_c$ 値がIMD法により得られるようになってきている。MgB<sub>2</sub>線材は簡便な手法で実用レベルの $J_c$ や $J_0$ が得られるので、冷凍機冷却マグネットなどへの応用が有望視されている。

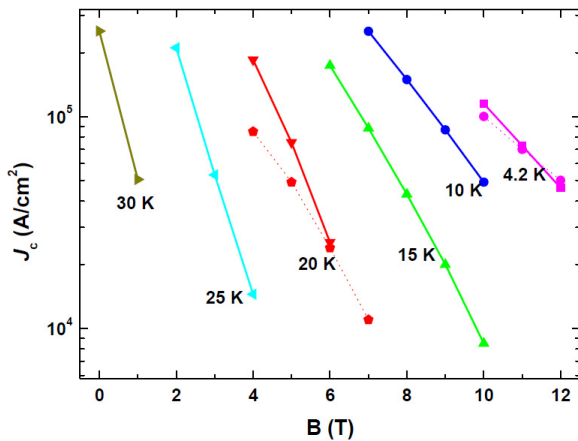


図4 カーボンコートB粉末を用いてIMD法で作製したMgB<sub>2</sub>線材の $J_c$ - $H$ 特性の温度依存性[10]。点線はSiC添加したIMD線材。

## 5. 鉄系超伝導線材

鉄系超伝導体にはいくつか種類があるが、ここでは線材化に最も有望視されている(Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>(Ba-122)について述べる。ここでもPIT法によって線材を作製した。ただし、あらかじめ超伝導体を作製し、この粉末を金属管に充填する*ex situ* PIT法を適用した。原材料をボール

ミル混合し、900°Cで熱処理を行って超伝導前駆体を作製した。これを粉砕して銀管に充填し、最初にワイヤに加工後熱処理を行い、さらにテープ加工ならびに熱処理を施した。一部のテープについては、さらに油圧プレス機によって一軸圧縮を行い、熱処理を行った。テープ圧延によってテープ厚さが薄くなるとともに $J_c$ は向上するが、テープ圧延の後に一軸プレスを施すと更に $J_c$ が向上する[11]。

図5にテープ圧延、ならびに圧延後に一軸プレスを行ったテープの4.2 Kにおける $J_c$ - $H$ 特性を示す。一軸プレスしたテープでは4.2 K、6 Tで $10^5$  A/cm<sup>2</sup>以上、10 Tで $8.6 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>の $J_c$ 値が得られている[12]。組織観察の結果、テープ圧延ならびに一軸プレスによって超伝導体の充填率が向上し、特に一軸プレスによって充填率が大幅に向上することがわかった。超伝導体の $c$ 軸配向度も一軸プレスによって向上するが、上述の最高の $J_c$ が得られたテープでも(00 $l$ )以外のピークもかなり観測され、 $c$ 軸配向度はBi-2212テープほどには完全ではない。Ba-122テープはBi-2212テープと同様に $J_c$ の磁界依存性が非常に小さく強磁界でも高い $J_c$ を示し、また $J_c$ の異方性も小さいことから[13]、強磁界マグネット用線材として有望と考えられる。

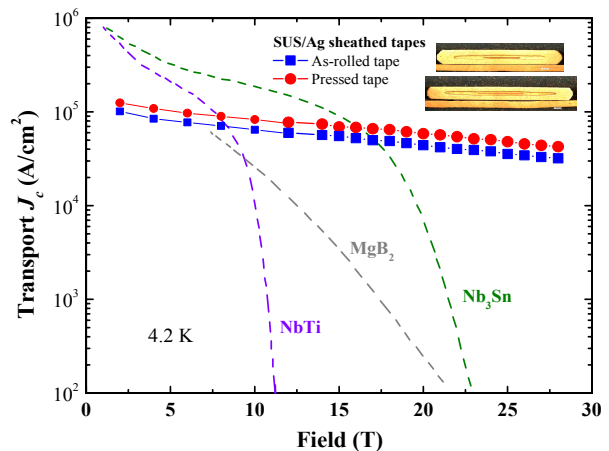


図5 ロール圧延ならびに一軸プレスにより作製したBa-122テープの4.2 Kにおける $J_c$ - $H$ 特性。比較のために、代表的なNb-Ti、Nb<sub>3</sub>SnならびにMgB<sub>2</sub>線材の特性も示す。

## 6. まとめ

以上、私が主に手がけてきた超伝導線材について概略を述べたが、いずれもまだ実用化には至っていない。Nb<sub>3</sub>AlとBi-2212については私自身は研究から遠ざかってしまったが、最近になって他グループや他研究機関で優れた成果が得られつつあり、今後更なる特性改善とともに長尺化や線材コスト低減が実現し、実用化につながることを期待したい。MgB<sub>2</sub>ならびにBa-122について

は、私自身現在も研究を続けており、今後も特性の向上をはじめとして実用化のための様々な課題の解決に向けて努力したいと考えている。

最後に、これまでの研究を遂行するにあたりましては多方面にわたる非常に多くの方々の御協力をいただきました。ここに深厚なる謝意を表します。

#### 参考文献

- [1] H. Kumakura, K. Togano, K. Tachikawa, Y. Yamada, S. Murase, E. Nakamura and M. Sasaki: Appl. Phys. Lett. **48** (1986) 601-603.
- [2] H. Kumakura, K. Togano, K. Tachikawa, S. Tsukamoto and H. Irie: Appl. Phys. Lett. **49** (1986) 46-48.
- [3] 熊倉浩明、戸叶一正、塚本進、入江宏定、太刀川恭治: 日本金属学会論文誌, 第 **51** 卷 (1987) 465-471.
- [4] J. Kase, N. Irisawa, T. Morimoto, K. Togano, H. Kumakura, D. R. Dietderich and H. Maeda: Appl. Phys. Lett. **56** (1990) 970-972.
- [5] H. Kumakura: Bismuth-Based High-Temperature Superconductors ed. H. Maeda and K. Togano (New York: Dekker) p451.
- [6] H. Kumakura, K. Togano, H. Maeda, J. Kase and T. Morimoto: Appl. Phys. Lett. **58** (1991) 2830-2832.
- [7] H. Kumakura, H. Kitaguchi, K. Togano and N. Sugiyama: J. Appl. Phys. **80** (1996) 5162-5168.
- [8] H. Kumakura: Supercond. Sci. & Technol. **13** (2000) 34-42.
- [9] K. Togano, J-M. Hur, A. Matsumoto and H. Kumakura: Supercond. Sci. & Technol. **22** (2009) 015003 (5pp).
- [10] S. Ye, M. Song, A. Matsumoto, K. Togano, M. Takeguchi, T. Ohmura and H. Kumakura: Supercond. Sci. & Technol. **26** (2013) 125003 (10pp).
- [11] K. Togano, Z. Gao, A. Matsumoto and H. Kumakura: Supercond. Sci. Technol. **26** (2013) 115007 (7pp).
- [12] Z. Gao, K. Togano, A. Matsumoto and H. Kumakura: Scientific Reports **4** (2014) 4065 (5pp).
- [13] A. Matsumoto, Z. Gao, K. Togano and H. Kumakura: Supercond. Sci. Technol. **27** (2014) 025011 (6pp).

## (2) 超伝導量子回路を用いた量子情報システム

### Quantum Information with Superconducting Circuits

理研創発物性科学センター

蔡 兆申

Center of Emergent Matter Science, Riken

Jaw-Shen Tsai

#### 1. はじめに

現在世界中で、次世代の情報処理システムとして期待される量子情報処理の研究が進んでいる。その中でも、超伝導回路を利用した量子コンピューターの開発は、最も強力に進められている分野の一つであり、これまでに目覚ましい進展を遂げている。

この技術の根幹である超伝導巨視的量子状態のコヒーレントな制御を可能とする量子ビットの基礎的物理は、14年ほど前に我々の研究室で生まれた画期的な科学技術である[1]。巨視的な広がりを持つ複雑な物体が、「量子波の重ね合わせ」のようなコヒーレント性を持てるかという問題は、量子力学の適用範囲や古典力学と量子力学の境目の同定なども含めた意味を持ち、長年にわたり物理分野で重要でかつ挑戦的な研究課題であった。この問題に、我々は明確な肯定的回答を見出すことに成功した。

工学的には、固体素子である超伝導回路により構成される量子ビットは、膨大なビット数の集積化を必要とする量子コンピューターの実現には期待が持てる技術である。柔軟な設計性、ゲート等を使った簡便な制御性など、固体素子特有な自由度がこの方面の研究開発に有望な道を開くと期待される。

量子化された複数のエネルギー準位を持つ超伝導量子ビット回路は、人工原子と考えてよい。各エネルギー準位に対応する固有状態を、量子コヒーレント性を保ち、振幅の重ね合わせ制御や位相制御を任意に行い、回路の量子状態を操ることが可能な巨大な固体素子「原子」である。

本研究室では、巨視的量子状態を使ったエンタングルメント(絡み合い)[2]、量子論理動作[3]、単事象読みだし[4]、量子万能ゲート[5]、量子ビットのエコーパルスによる長寿命化[6]やマイクロ波パルスによる高精度制御法[7]など、量子情報処理には欠かせない数々の重要な基本技術を、次々世界に先駆け実現してきた。

また超伝導人工原子とマイクロ波光子との相互作用を研究する人工原子量子光学分野が新たに生まれた。強結合条件が簡便に作り出せるこのような人工原子量子光学は自然原子に比べ設計性、集積性、光との強い



結合などの多くの利点を持ち、多くの新たな可能性を秘めている。我々の研究室でも、単一の人工原子を使ったレーザー発振[8]、共鳴蛍光[9]、電磁誘導透明化[10]、単原子量子増幅器[11]などを新規に実現してきている。

本文では、この技術を生み出した背景や重要な研究の進展を紹介し、特に量子コンピューターを目標とした研究における革新的成果や将来の展望などを含め述べる。

## 2. ジョセフソン量子ビットの実現

前記の静的な重ね合わせによる固有状態では、量子情報処理はできない。これを行うためには、量子状態をダイナミカルに変化させ、2つの量子状態の重ね合わせ、その位相と振幅の任意な制御が可能で、量子ビットと呼ばれるものを実現しなくてはならない。1999年、中村泰信、パシュキン・ユーリと筆者らは、超伝導クーパー対箱を使った実験で、系の電荷数状態を量子振動させることにより自由に制御することに成功し、固体素子量子ビットの研究に先鞭をつけた。この初期の実験では、回路の外部電場を非断熱的にすばやく変化させ量子振動を誘起させた。図1にこの実験で使った回路の写真を示す。超伝導体にはジョセフソン接合のトンネル障壁が容易に作れるアルミ薄膜を用いた。

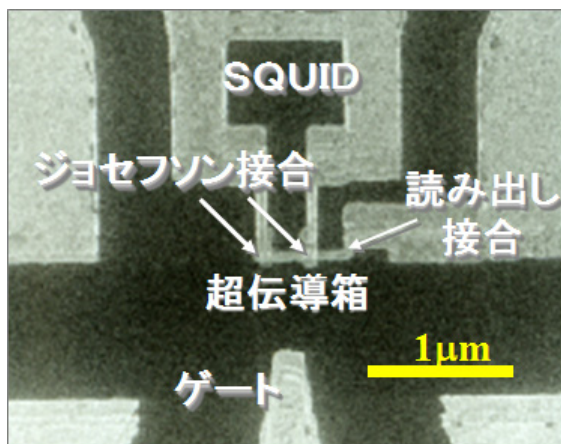


図1 超伝導電荷量子ビット写真

超伝導クーパー対箱のゲート電場を非断熱的に変化すると、箱(島)の電荷数状態が $|n\rangle$ と $|n+1\rangle$ で振動を起こす。この2状態は、量子ビットの $|0\rangle$ 状態と $|1\rangle$ 状態に相当する。これが実験で観測された周期  $\frac{h}{\Delta E}$  の量子振動である( $h$ はプランク常数、 $\Delta E$ は $|0\rangle$ 状態と $|1\rangle$ 状態のエネルギー差)。この手法により、バイアス電場の制御により、任意の位相を持った量子ビット状態を実現することが出来、1量子ビットの制御を実現した。

その後我々は非断熱的なバイアス操作ではなく、原子系でラビ振動と呼ばれる量子ビットの制御方法を、超

伝導量子ビットにおいても実現した[12]。これは外部より量子ビットエネルギー $\Delta E$ に相当する波長のマイクロ波を照射すると、量子ビットの状態は $|0\rangle$ と $|1\rangle$ 間を遷移し、その遷移確率は時間的に振動する現象である。この場合、その周波数は  $\omega_{Rabi} = J(V_{AC}) \frac{\Delta E}{\hbar}$  である(これは特異点での動作を除く一般関係式で、 $J(V_{AC})$  はマイクロ波の強度に依存するベッセル関数)。

ラビ振動を利用した量子ビットの制御は、その後多くの異なったタイプの超伝導量子ビットの実験で利用されて来た。カントロニウム型電荷量子ビット(図1の電荷量子ビットと構造は同じだが電荷エネルギーが比較的小さい量子ビット)[13]、磁束量子ビット[14, 15]、位相量子ビット、などの実験成果がその後次々と報告されたが、みなこのマイクロ波を使ったものである。この方法は、状態制御の正確さや、次に述べる環境ノイズによるデコヒーレンス効果の抑止などの点で、非断熱制御方式より有利な点がある。

トランズモンと呼ばれる電荷型量子ビットでは、通常の  $E_C \gg E_J$  ではなく、 $E_C \ll E_J$  というように電荷エネルギーの極端に小さくし、エネルギーバンドの傾きを大変平らにすることに成功している[16]。このような工夫により、動作点変動による様々な影響を低減し、量子コヒーレンスを比較的長く保てる電荷量子ビットも実現している。

図2に、典型的な磁束量子ビットの写真を示す。これは超伝導ループ中の磁束量子状態の自由度(磁束量子の数)を利用した量子ビットであり、超伝導体膜は同じくアルミを用いている。この磁束量子ビットには4つのジョセフソン接合が使われている。三個以上の接合を持つ磁束量子ビットでは、より大きな量子ビットエネルギー( $|0\rangle$ 状態と $|1\rangle$ 状態のエネルギー差)が得られる[17]。最初に実現した磁束量子ビットを含め、磁束量子ビットの実験ではほぼ全てこのタイプのものが使われている。

電荷量子ビットと、磁束量子ビット以外にも、位相量

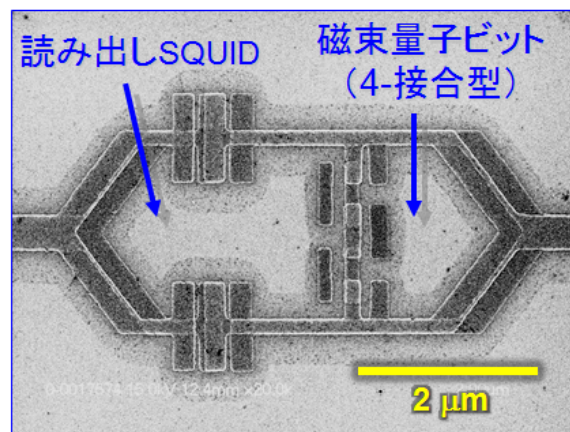


図2 超伝導磁束量子ビット写真

子ビットと呼ばれるデバイスがある。電荷の自由度や磁束の自由度を用いない、単一のジョセフソン接合に現れる量子化された量子状態そのものを量子ビットとして利用したものである[18], [19]。この量子ビットの最大の特徴はその構造の単純さと、サブミクロン加工技術に頼らない比較的大きなジョセフソン接合で実現できる点である。

以上枚挙したような様々なタイプの超伝導量子ビットが実現している。このような多様性は、固体素子であることに起因し、これは複雑なコンピューター回路を作るに当たり大変有利な要素となるであろう。ジョセフソン接合の巨視的量子状態が比較的単純な物理で正確に記述でき、回路パラメータの調整によりエネルギーバンドを思い通りに作り出すことができることも、超伝導量子ビットの設計の自由度に大きく寄与している。

### 3. まとめ

固体素子であることを反映して、超伝導量子ビット回路では様々なビット間結合様式による多ビット化がすでに実現していて、簡単な量子アルゴリズムも実行可能になっている。結合方式は大きく分けると、非線形結合器を使うものと線形共振器を使うものがある。現在、構造が比較的単純である後者の方式により(非断熱のDCパルスと組み合わせ)、既に数多くの成果が上げられている。また超伝導量子ビットでは、高度なゲート忠実度という量子コンピューター実現への一つの高いハードルも、デコヒーレンス時間の目覚ましい向上などによってクリアしつつある。これからの量子情報処理の研究の進展が楽しみである。

- [1] Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, J. S. Tsai, *Nature* **398** (1999) 786.
- [2] Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, D. V. Averin and J. S. Tsai, *Nature* **421** (2003) 823.
- [3] T. Yamamoto, Yu. A. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Nature* **425** (2003) 941.
- [4] O. Astafiev, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Physical Review B* **69** (2004) 180507.
- [5] A. O. Niskanen, K. Harrabi, F. Yoshihara, Y. Nakamura S. Lloyd and J. S. Tsai, *Science* **316** (2007) 723.
- [6] Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, J. S. Tsai, *Physical Review Letters*, **88** (2002) 047901.
- [7] Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, J. S. Tsai, *Physical Review Letters*, **87** (2001) 246601.
- [8] O. Astafiev, K. Inomata, A. O. Niskanen, T. Yamamoto, Yu. A. Pashkin, Y. Nakamura & J. S. Tsai, *Nature* **449** (2007) 588.
- [9] O. Astafiev, A. M. Zagoskin, A. A. Abdumalikov Jr., Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, K. Inomata, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Science* **327** (2010) 840.
- [10] A. A. Abdumalikov, Jr., O. Astafiev, A. M. Zagoskin, Yu. A. Pashkin, Y. Nakamura & J. S. Tsai, *Physical Review Letters*, **104** (2010) 193601.
- [11] O. V. Astafiev, A. A. Abdumalikov, Jr., A. M. Zagoskin, Yu. A. Pashkin, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, *Physical Review Letters*, **104** (2010) 183603.
- [12] 最初の超伝導量子ビットでの実験は: Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, J.S. Tsai, *Physical Review Letters*, **87** (2002) 246601.
- [13] D. Vion, A Assime, A. Cottet, P. Joyez, H. Pothier, C. Urbina, D. Esteve, and M.H. Devoret, *Science* **296** (2002) 886.
- [14] I. Chiorescu, Y.Nakamura, C. J.P.M. Harmans, & J. E. Mooij, *Science* **299** (2003) 1869.
- [15] P. Bertet, I. Chiorescu, G. Burkard, K. Semba, C. J. P. M. Harmans, D. P. DiVincenzo, and J. E. Mooij, *Physical. Review Letters*, **95** (2005) 257002.
- [16] J. A. Schreier, A. A. Houck, J. Koch, D. I. Schuster, B. R. Johnson, J. M. Chow, J. M. Gambetta, J. Majer, L. Frunzio, M. H. Devoret, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf, *Physical Review B* **77** (2008) 180502 (R).
- [17] J. E. Mooij, T. P. Orlando, L. Levitov, L. Tian, C. H. van der Wal, and S. Lloyd, *Science* **285** (1999) 1036.
- [18] Y. Yu, S. Han, X. Chu, S. Chu, and Z. Wang, *Science* **296** (2002) 889.
- [19] J. M. Martinis, S. Nam, J. Aumentado, and C. Urbina, *Physical Review Letters*, **89** (2002) 117901.

### (3) 圧力技術を用いた超伝導研究 Studies on superconductivity using high-pressure technique

日本大学文理学部  
高橋 博樹  
College of Humanities and Sciences,  
Nihon University  
H. Takahashi

#### 1. はじめに

1986年の銅酸化物による高温超伝導の発見以来、超伝導に関する数多くの種類の実験と理論的研究が推し進められてきた。とりわけ、低温高压技術[1]を用いた実験研究では、最近の技術開発の発展に伴い、静水圧性の高い良質の測定データが高い圧力まで得られるようになり、超伝導に関する多くの成果が報告されている[2-3]。物質への圧力効果は原子間距離を減少させることであり、元素の置換効果と同様の効果を与える場合が多いが、置換効果で引き起こされる不純物効果や格子欠損などの副次的効果を、圧力効果では排除できる利点がある。一般に、圧力によって物質の格子定数は減少するが、銅酸化物のように層状で複雑な結晶構造を持つ物質では異方的に格子が減少する 경우가多く、キャリア濃度が影響を受けたり、磁性が変化したり物質の電子状態が大きく変化する場合が多い。いずれにしても、高压実験を、物質の新しい状態を実現する手段と考えれば、新物質の合成と同様に重要な実験であり、圧力下で様々な物理量を精密に測定することで、超伝導発現のメカニズム解明、および新物質の開発指針に結びつく可能性を持っている。本稿ではこれらの超伝導研究に用いられている高压装置[4]について簡単に紹介し、主に鉄系超伝導体の最近の成果について報告を行う。

#### 2. 低温高压装置

圧力を物理量として扱うためには静水圧性のよい圧力を発生する必要があるが、ガス媒体による圧力が理想的であるが、技術的に難しいため、液体媒体を用いるピストンシリンダー装置が最も普及している。室温で3.7 GPaまで固化しないDaphne7474[1]を液体媒体とし、試料空間を大きくとることができるが、最高発生圧力が4 GPa(常用3 GPa)である。液体媒体を用いてより高压を発生するためにキュービックアンビル装置が低温で使用されている。筆者が東京大学物性研究所に所属していたときに毛利元教授と開発した装置で、約10 GPaまで液体媒体を使用できる[4]。この装置を使用して、さまざまな銅酸化物の $T_c$ の圧力効果の測定を行った。現在最も高

い超伝導転移温度 $T_c = 134$  Kをもつ $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+d}$ の $T_c$ が10 GPaで150 K以上まで上昇すること[5]、スピンドラダー系銅酸化物 $(\text{Sr}_{14-x}\text{Ca}_x)\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$ が高压下3 GPaで超伝導を示すことなどを示すことができた[6]。

さらに高い圧力を発生できる装置として、ダイヤモンドアンビルセル(DAC)がある。図1に示すように、金属ガスケットを、アンビルの平行度を保ちながら、上下からスムーズに荷重を加えることで圧力を発生する装置である。圧力発生空間が非常に小さいため、試料の扱いには細心の注意を要するが、機構が簡単であり、100 GPaを超える最も高い静的圧力が発生可能である。電気抵抗や帯磁率測定を始め、光学実験やX線回折実験など様々な物性測定が可能である。我々のグループでは電気抵抗測定に固体媒体NaClを使用し、電極には白金箔、金属ガスケットとの絶縁にBNを用いている。

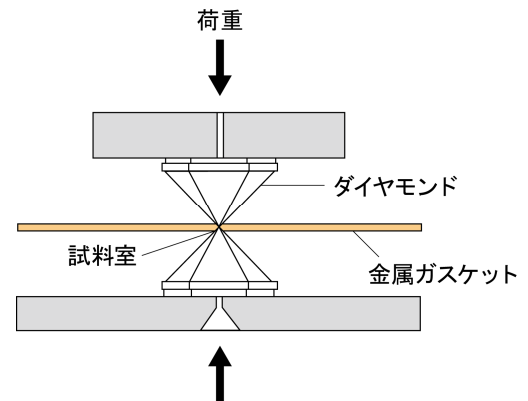


図1 ダイヤモンドアンビルセル

#### 3. 鉄系超伝導体の圧力効果

2006年、東京工業大学の細野グループにより $T_c = 5 \sim 7$  Kの鉄をベースとした超伝導体 $\text{LaFePO}$ が発見された。 $T_c$ はそれほど高くないが、銅酸化物と同様に層状の結晶構造をとることからこの物質に注目し、高压下で $T_c$ が2倍程度上昇することを示した[7]。この流れを受けて、2008年に $T_c = 26$  Kの鉄系超伝導体 $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ が発見[8]された際には、ただちに圧力実験を行い、 $T_c$ が43 Kまで上昇することを見いだした[9]。この結果により、銅酸化物を除いて、最高の $T_c$ が得られたこととなり、一気に物質の開発競争が開始された。その後、異なる結晶構造を持つ鉄系超伝導体はいくつか発見され、主なものは結晶構造と組成比から1111型、122型、11型、111型などと分類されており、いずれもアニオンが4面体的に配位した鉄の正方格子が基本になって超伝導が発現している。

$T_c$ の最も高い1111型 $\text{LnFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$  ( $\text{Ln} = \text{La}, \text{Ce}, \text{Sm}, \text{Nd}, \text{Gd}$ など)は、FeAs面を持つ層状構造をとり、母物質の $\text{LaFeAsO}$ は半金属で反強磁性体であるが、F置換に

よるFeAs面への電子ドーピングにより、磁気転移、構造相転移が抑えられて、超伝導を示す。銅酸化物と同様に層状構造であるが、反強磁性半金属にキャリアをドーピングした超伝導体で、銅酸化物とは本質的な相違点が多く、超伝導のメカニズムは異なる。

最近、東工大の細野秀雄教授のグループは、 $\text{LnFeAsO}$ に対しFドーピングの上限が15%程度であったのに対し、Hを約50%までドーピングすることに成功し、図2に示すように、ドーピング量 $x$ に対し、2つの $T_c$ ドームがあることを示した[10]。このことから、低ドーピング側と高ドーピング側で超伝導発現機構が異なる事が指摘されている。 $x = 0$ には反強磁性相が存在し、超伝導発現との相関が考えられている一方、 $x = 0.5$ のオーバードーピング側にも、図2に示すように、中性子、ミュオン、NMR等の磁気測定から磁性相の存在が報告されており高ドーピング側の $T_c$ のピークは、 $x = 0$ とは別の磁気相互作用が関係している可能性が指摘されている[11]。このHドーピングされた $\text{LaFeAsO}$ の $T_c$ を、高圧下で調べたところ、とりわけダブルピークの谷間の組成( $x = 0.2$ )の $T_c$ が高圧下で大きく上昇することが見いだされた。このような $T_c$ の大きな圧力効果に対するメカニズムとして、低ドーピング側の超伝導発現機構(反強磁性スピン揺らぎ)と、高ドーピング側の発現機構(反強磁性または軌道揺らぎ)の相乗効果による可能性が考えられる[12-13]。また最近の理論計算により、最隣接Fe原子間と次隣接Fe原子間のFe原子間のホッピングの大小により反強磁性スピン揺らぎを生じさせる機構が異なることが示され、 $T_c(x)$ の谷の組成で大きさが逆転することから、低ドーピング側と高ドーピング側で超伝導発現機構が異なることが指摘されている[14]。谷に相当する組成では、この大小関係が拮抗していることから圧力下でホッピングの大きさが大きく変化し $T_c$ の大きな上昇に関係があるのかもしれない。

伝導体への水素ドーピングが成功したことによりキャリアドーピングの領域が大きく広がり、さらに圧力効果も加えると、超伝導体の様々な性質が見られるようになった。 $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{H}_x$ ではドーピング量 $x$ に対し $T_c$ がダブルドームを示し、谷に当たる組成( $x = 0.2$ )の物質が高圧下では最も高い $T_c$ を示すことが明らかになった。

#### 参考文献

- [1] 毛利信男他, 「高圧技術ハンドブック」、丸善 (2007)
- [2] H. Takahashi and N. Môri: “Studies of High Temperature Superconductors Vol. 16”, Nova Science Publishers Inc., New York (1996) 1-64.
- [3] 高橋博樹:「マテリアルサイエンスにおける超高压技術と高温超伝導研究」、富山房インターナショナル、東京 (2006).
- [4] N.Môri *et al.*, High Pressure Research **24** (2004) 225-232.
- [5] H.Takahashi *et al.*, Physica C **218** (1993) 1-4.
- [6] M. Uehara *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **65** (1996) 2764-2767.
- [7] K.Igawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 023701.
- [8] Y. Kamihara *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **130** (2008) 3296-3297.
- [9] H. Takahashi *et al.*, Nature **453** (2008) 376-378
- [10] S. Iimura *et al.*, Nat. Commun. **3** (2012) 943.
- [11] H. Hiraishi *et al.*, Nat. Phys. **10** (1014) 300-303.
- [12] K. Kuroki *et al.*, Phys. Rev. B **79** (2009) 224511 .
- [13] S.Onari *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112** (2014) 187001.
- [14] K.Suzuki *et al.*, arXiv:1311.2413 (2013).

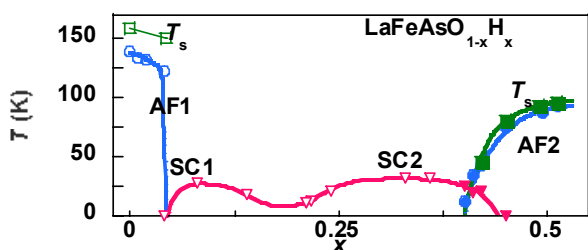


図2  $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{H}_x$ の相図。SC1, SC2は2つの超伝導ドームを示す。AF1, AF2はそれぞれ反強磁性相

#### 4. まとめ

本稿では、最近よく用いられる低温高圧実験の簡単な紹介と、最近我々のグループで行っている鉄系超伝導体の圧力効果に関する報告を行った。特に、鉄系超

#### (4)超伝導量子干渉素子を用いた心磁計による胎児不整脈診断学の確立

#### Diagnosis of fetal arrhythmias using SQUID magnetometer

筑波大学医学医療系・小児内科学  
堀米 仁志, 加藤 愛章  
日立製作所中央研究所  
神鳥 明彦, 緒方 邦臣  
大阪電気通信大学・医療福祉工学科  
細野 剛良

Department of Child Health, Faculty of Medicine,  
University of Tsukuba  
H. Horigome, Y. Kato  
Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.  
A. Kandori, K. Ogata  
Department of Biomedical Engineering,  
Osaka Electro-Communication University  
T. Hosono

#### 1. はじめに

成人期や小児期にみられる不整脈はよく知られているが、胎児期にも同様の不整脈がみられ、重症なものは胎児死亡の原因となることは一般にはあまり知られていない。最近の分子生物学の進歩により、不整脈の一部は心筋細胞のイオンチャネル(Na, K, Caチャネルなど)をコードする遺伝子の異常が原因となっていることが解明され、遺伝性不整脈という名称が用いられるようになった。このことは不整脈が親から子へ、子から孫へと遺伝することを意味し、胎児期、乳児期における不整脈の早期診断の重要性を示している。実際、近年の我が国の乳児死因第3~4位を占める乳児突然死症候群(sudden infant death syndrome, SIDS)や原因不明の子宮内胎児死亡の一部は、遺伝性不整脈の代表である先天性QT延長症候群が原因となっていることが判明し[1]、これらの早期診断・治療により乳児死亡率を減らせる可能性が指摘されている。

しかし、胎児には電極を貼ることができないため心電図を記録することができず、詳細な不整脈の出生前診断は困難であった。母体腹壁上に電極を貼って胎児の心電信号を記録する「胎児心電図法」も十分なS/N比が得られず、臨床に普及しているとは言えない。そこで筆者らは超伝導量子干渉素子(SQUID)を応用した高感度心磁計を用いて、胎児の心臓から発生する微弱な信号を母体腹壁上から非侵襲的に検出する「胎児心磁図法」(fetal magnetocardiography, fMCG)に着目し、その確立を目指した[2]。胎児心房・心室の脱分極・再分極

過程の基準値を確立するために正常胎児1,000例以上について妊娠週数別に検討し[3,4]、さらに胎児不整脈症例を対象として詳細なタイプ診断を行った。胎児心不全または胎児死亡のリスクがある頻脈性不整脈に対しては、その診断に基づいて経胎盤治療(母体への抗不整脈薬の投与)を行い、出生前不整脈治療に成功した[5]。また、遺伝性不整脈の代表である先天性QT延長症候群の胎児症例を集め、fMCG所見からハイリスク胎児を抽出し、管理にすることができた[6]。fMCGによる胎児不整脈の正確な診断と、それに基づいた出生前治療(母体への抗不整脈投与)は、子宮内胎児死亡の減少に貢献し、ひいては周産期医学の進歩に繋がる重要な超伝導技術の応用であると考えられる。

#### 2. 胎児心磁図の特徴

胎児期の心臓病は心エコー法を用いて診断されることが多い。胎児不整脈もMモード心エコー法やドプラ心エコー法を用いて心房・心室壁運動や血流動態を解析して診断されているのが現状である。fMCGはこれらの方法に比べて以下の利点がある。1) 心エコー法が機械的な現象を見ているのに対して、fMCGは心電図と同様に電気生理学的現象を評価できる。2) 非接触(電極なし)で母体腹壁上から計測できる。3) 発生する磁場を計測するだけで、胎児にも母体にも侵襲がない。4) 時間分解能が高い。5) 周辺組織の電氣的絶縁効果を受けにくいいため、妊娠週数が進んで胎脂が増えてもS/N比が良好である。(我々の経験では胎児心磁図は妊娠20週前後から記録可能である。)6) PQRST波形自体を記録でき、心電図に準じた解析ができる。特にT波を記録できるため、QT時間の計測が可能である。7) リアルタイムで波形表示できる。

#### 3. 胎児心磁図の時間指標の基準値

fMCGを用いて胎児の不整脈や心臓電気生理学的特徴を評価するためには、PR、QRS、QT時間などの時間指標の妊娠週数別基準値を確立することが必要である。そこで、はじめに正常胎児1,000例以上について妊娠週数別に検討し、胎児心臓の脱分極・再分極過程の正常値を確立した。我々のグループとヨーロッパの複数施設との共同研究の結果を表1に示す[4]。

表1 正常胎児の妊娠週数別PR, QRS, QT時間

	妊娠 20 週	30 週	40 週
PR 時間	99±6	105±7	110±9 (msec)
QRS 時間	37±3	45±3	54±4 (msec)
QT 時間	224±14	237±17	250±19 (msec)
QTc(平均)	366	386	406 (msec)

### 3. 頻脈性不整脈の胎児心磁図診断と治療

胎児の頻脈性不整脈のなかには放置すると胎児心不全や胎児死亡に至るものがあるが、正確な診断に基づいて抗不整脈薬を経母体投与すると頻拍を停止させて救命することができる。頻拍には、1:1房室伝導を示す上室頻拍(supraventricular tachycardia, SVT)、心房粗動(atrial flutter, AFL)、心室頻拍(ventricular tachycardia, VT)などがあり、1:1SVTはさらに房室リエントリー頻拍(atrio-ventricular reentrant tachycardia, AVRT)に代表されるshort RP''SVT、心房頻拍(atrial tachycardia, AT)に代表されるlong RP'に分けられる。fMCGではp波形を記録できるため(図1)、この2者も容易に鑑別することができる[5,7](図2)。前者は基礎にWPW症候群があることが多いが、fMCGではその特徴であるデルタ波自体を記録できる。心房粗動に特徴的なF波も記録することができる。また、頻拍発作の開始時や停止時の波形が記録されると、頻拍の機序を解析することができ、有用である[7]。以上のように頻拍症のタイプを明確に鑑別することができ、頻拍症のタイプに応じた経胎盤治療を行うことができる。従来、ほとんどの胎児上室性頻拍症に対してジゴキシンが第一選択薬として経母体投与されていたが、詳細な鑑別診断に基づいてソタロール、フレカイニドなど様々な薬剤が初めから使用できるようになった。

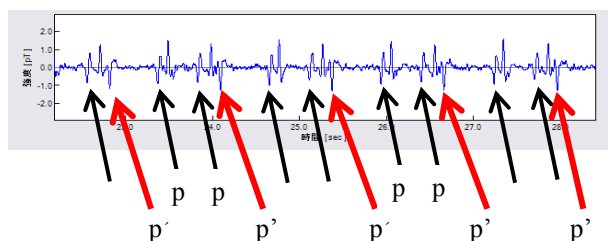


図1 胎児心磁図：リエントリー性上室期外収縮。  
R波の後に一定の間隔で洞調律のp波（黒矢印）とは異なる形のp'波（赤矢印）が認められ、リエントリーが疑われる。

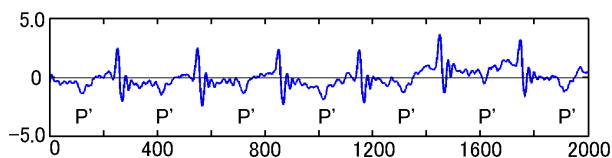


図2 胎児心磁図：long RP'タイプの上室頻拍。  
PR = 128 msec, RP' = 160 msecでRP'/PR>1のlong RP' SVTであることが分かる。ソタロールの母体投与で停止した。

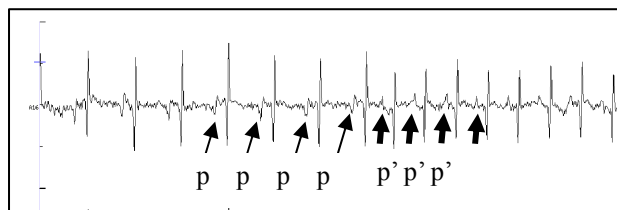


図3 胎児心磁図：long RP' タイプの上室頻拍。  
頻拍発作が始まる場所（p波→p'波）が明瞭にとらえられている。PR = 95 msec, RP' = 180 msecでRP'/PR>1のlong RP' SVTである。

心室頻拍の中では先天性QT延長症候群(long QT syndrome, LQTS)に伴うtorsade de pointesの診断が重要である。fMCGは非頻拍時のQT時間延長自体の診断も可能とした。次項でfMCGによるLQTSの出生前診断について述べる。

### 4. 先天性QT延長症候群の胎児心磁図診断と治療

非侵襲的に胎児のT波を記録でき、QT時間を測定できることはfMCGに大きな利点であることに着目し、我々のグループでは世界に先駆けてfMCGを用いた先天性QT延長症候群(LQTS)の出生前診断に成功した[8]。出生後の遺伝子検査によりKイオンチャンネルをコードする遺伝子の変異が検出され、fMCG診断を裏付けた。LQTSでは特徴的な波形の心室頻拍(torsade de pointes, TdP)を合併することがあり、失神や突然死の原因となる。別の症例ではこの波形自体をとらえることができ(図4)、抗不整脈薬の母体投与によって治療することができた。TdPの発生予測はLQTSの管理上重要であるが、そのリスク因子として著明なQT延長、T-wave alternans(TWA)などがある[9]。このTWAがfMCGで記録できた症例を図5に示した。これらの胎児心筋の再分極異常を評価できることはfMCGの大きな利点である。

我々は胎児期や新生児期など早期に発症するLQTSの症例を集め、その特徴を分析した。その結果、胎児徐脈(洞性徐脈)、(2:1)房室ブロック、間欠的VTが特徴であることがわかった。このうち2つの特徴があればLQTSを疑う必要があり、さらに家族歴があればその診断は濃厚となるが、実際には家族歴の頻度は低い。LQTSが疑われる場合にはfMCGは極めて有用な手段となる。SIDSや原因不明の子宮内胎児死亡の一部がLQTSであることが解明されてきた今日状況において、fMCGはこれらの死亡率の低減にも貢献する可能性がある。

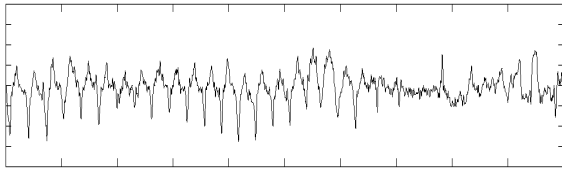


図4 胎児心磁図: LQTSの胎児にみられたTdp

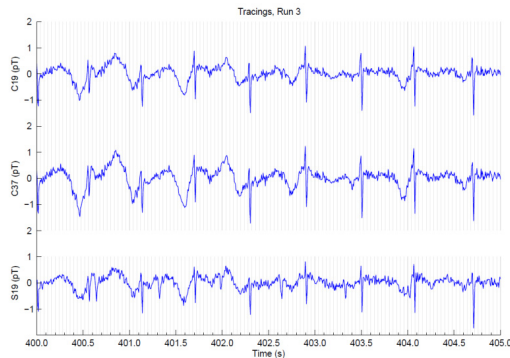


図5 胎児心磁図で記録されたT wave alternans

## 5. まとめ

遺伝性不整脈の原因が、心筋細胞のイオンチャンネルをコードする遺伝子変異にあることが発見されてから、不整脈の病態解析、診断学は著しく進歩した。成人に見られる重症不整脈は胎児期や乳児期早期に発症することもあり、その診断と治療はSIDSや子宮内胎児死亡の予防のためにも重要である。そのためには分子生物学の知見とともに、胎児心臓の電気生理学的な解析手法が不可欠である。我々が蓄積してきた胎児心磁図のデータは両者を結びつけるうえで極めて重要であり、周産期医学のさらなる発展に寄与すると確信している。

## 参考文献

- [1] M. Arnestad, L.Crotti, T.O. Rognum, R. Insolia, M. Pedrazzini, C. Ferrandi, A. Vege, D.W. Wang, T.E. Rhodes, A.L. George Jr, P.J. Schwartz: *Circulation*. **115** (2007) 361-367.
- [2] 堀米仁志, R.T. Wakai: *日本小児循環器学会雑誌* **19** (2003) 468-475.
- [3] H. Horigome, M. I. Takahashi, M. Asaka, S. Shigemitsu, A. Kandori, K. Tsukada: *Acta Paediatr.* **89** (2000) 64-67.
- [4] J. Stinstra, E. Golbach, P. van Leeuwen, S. Lange, T. Menendez, W. Moshage, E. Schleussner, C. Kaehler, H. Horigome, S. Shigemitsu, M.J. Peters: *BJOG*. **109** (2002) 1235-1243.
- [5] K. Abe, H. Hamada, Y.J. Chen, A. Abe, H. Watanabe, Y. Fujiki, H. Yoshikawa, T. Murakami, H. Horigome: *Fetal Diagn Ther.* **20** (2005) 459-462.
- [6] B.F. Cuneo, J.F. Strasburger, S. Yu, H. Horigome, T. Hosono, A. Kandori, R.T. Wakai: *Circulation*. **128** (2013) 2183-2191.
- [7] R.T. Wakai, J.F. Strasburger, Z. Li, B.J. Deal, N.L. Gotteiner: *Circulation*. **107** (2003) 307-312.
- [8] H. Hamada, H. Horigome, M. Asaka, S. Shigemitsu, T. Mitsui, T. Kubo, A. Kandori, K. Tsukada: *Prenat Diagn.* **19** (1999) 677-680.
- [9] H. Zhao, J.F. Strasburger JF, B.F. Cuneo, R.T. Wakai: *Am J Cardiol.* **98** (2006) 491-496.

## (5) 鉄道用超伝導ケーブルの開発 Development of superconducting cables for railway systems

(公財) 鉄道総合技術研究所

富田優

Railway Technical Research Institute

M. Tomita

### 1. はじめに

鉄道は将来にわたって人・ものの輸送の根幹となるものであり、高度な文明社会を支える公共性の高い技術であり、信頼性(安全性、安定性)、利便性(速達性、快適性)、経済性、環境調和性を有する鉄道は、エネルギー消費の徹底的な合理化・効率化が必要とされる今世紀に、ますます重要性を増していくと考えられます。

我々のグループでは、超伝導技術の鉄道分野への応用を目指し(図1)、鉄道用超伝導ケーブルの開発を進めており、特に2009年からは独立行政法人 科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業創出」の5テーマのうちの1つに採択され、「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」という目標で研究開発に取り組んでいます。本課題では、応用機器の経済性、安定性、安全性の面からも求められる超伝導材料の高度化から、鉄道用超伝導ケーブルに向けた基礎特性評価、シミュレーションによる最適導入法の検討および信頼性の高いシステム設計といった材料から応用まで一貫した研究開発に取り組んでいます。

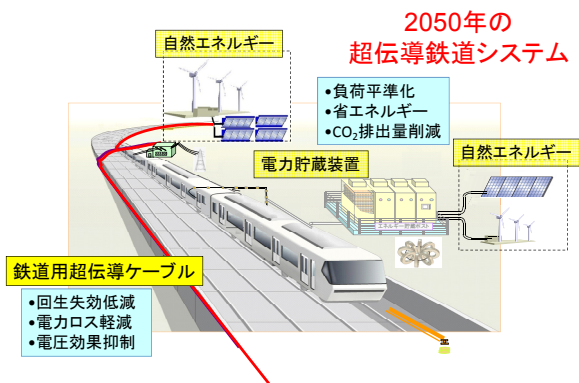


図1 次世代鉄道システム

## 2. 鉄道用超伝導ケーブルシステムの設計

鉄道用超伝導ケーブルシステムはコンパクト、かつ信頼性が高い必要があるため、これまでに各種基礎特性評価などを行ってきました[1]。以下にいくつか例を示します。

### 高温超伝導線材の低磁場領域における $I_c$ - $B$ - $T$ 評価

鉄道における直流送電に必要な通電容量は、現在のところ最大で10 kA級であり、集合導体を構成する高温超伝導線材の経験磁場は0.1 T程度に過ぎず、低磁場領域における臨界電流特性を明らかにしました。

### 高温超伝導線材の均一性評価

超伝導ケーブルは集合導体ですが、超伝導線材1本ずつが局所的にも均一であることが望まれます。そこで局所特性評価手法として磁気顕微法による非接触 $J_c$ 評価手法がBi-2223多芯線材にも適用可能であることを明らかにし、長尺線材の評価手法を確立しました。

### 多層構造化に伴う張力の緩和手法の確立

鉄道沿線に敷設される鉄道用超伝導ケーブルは電流末端の移動による張力緩和手法を採用できないケースが多いため、電流末端を固定できる手法を確立しました。

### 変動電流による交流損失の評価

鉄道における直流送電では、き電区間への列車の進入、離脱に伴う電流急変や、列車の力行、惰行の切り替わりに伴う電流急変、電力変換装置により発生する高調波電流などの電流急変に伴い交流損失が発生するため、その影響を評価しました。

### 対向流循環型冷却方式の確立

鉄道沿線に敷設される鉄道用超伝導ケーブルはコンパクトである必要があるため、対向流循環冷却

(Go&Return)方式を採用し、Go FlowとReturn Flowの熱交換を抑制する手法を確立しました。

### 一体型冷却システムの開発

鉄道における冷却システムは高信頼度であることが絶対条件であり、冷凍機による冷却と真空ポンプによるバックアップを両立させた一体型冷却システムを開発しました。

## 3. 鉄道用超伝導ケーブルシステムを用いた電車走行試験

各種検討結果を踏まえ、DC1.5 kV、5 kAの30 m級鉄道用超伝導ケーブル(図2)のプロトタイプを鉄道総研構内試験線に敷設しました(図3)。

通電、冷却、課電試験などの各種試験から、鉄道用超伝導ケーブルシステムとしての健全性を確認した後、このケーブルを通じて給電する形で電車の走行試験に世界で初めて成功しました(図4)。(プレスリリース:2013年7月24日)

## 4. まとめ

我々のグループではこれまで、鉄道送電に適用するために高温超伝導ケーブルの特性、安全対策や熱収縮対策を含む超伝導ケーブル設計と冷却システムの信頼性向上、鉄道電力システムにおける超伝導直流ケーブル運用シミュレーションによる導入効果検証と広範な要素技術開発に取り組んできた。それらを組み合わせ5 kA、30 m級鉄道用超伝導ケーブルを鉄道総研構内試験線に敷設し、このケーブルを通じて給電する形で電車の走行試験を行うことに世界で初めて成功しました。

今後は、検証試験を通して、運用上の課題、問題点を抽出し、鉄道事業用として、費用対効果も含め十分に適用可能な超伝導ケーブルの実現を目指していきます。

### 謝辞

本研究は、(独)科学技術振興機構(JST)の「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)」の支援を受けて実施した。

### 参考文献

[1] M. Tomita, H. Kitaguchi, H. Ohsaki, J. Shimoyama, T. Kiss, S. Hata, N. Amemiya, T. Tamegai, T. Masida, and N. Tamada: TEION KOGAKU 48 (2013) 39-46.



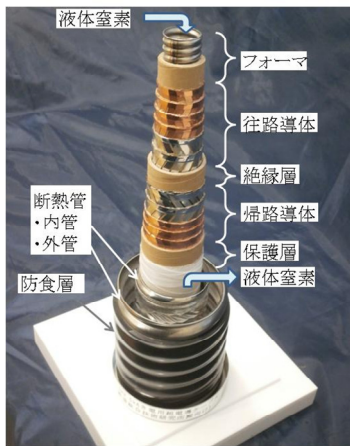


図2 30 m級鉄道用超伝導ケーブルのカットモデル



図3 敷設した30 m級鉄道用超伝導ケーブル

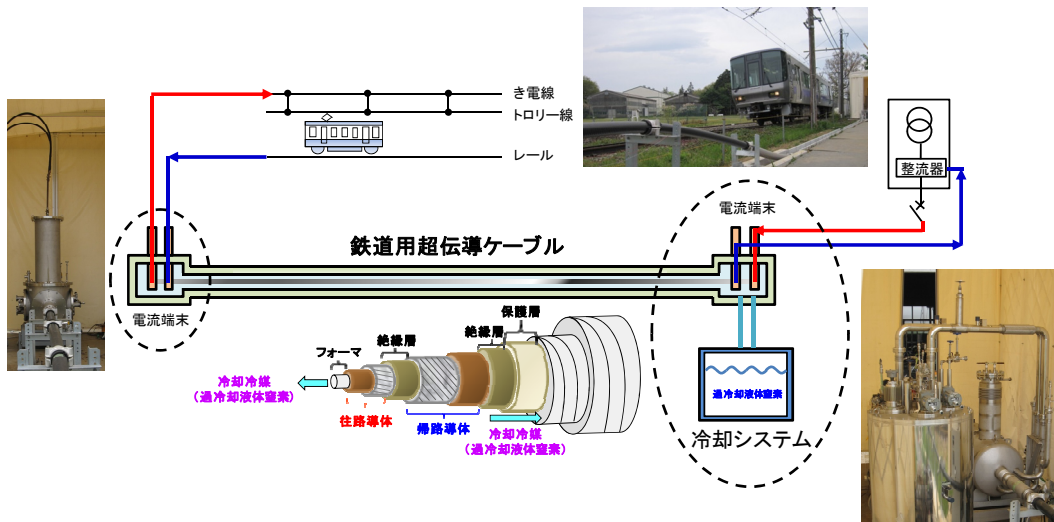


図4 鉄道用超伝導ケーブルによる電車走行試験システム

## (6) 電力実システムでの高温超電導ケーブルシステムの開発および実証

### Development and demonstration of High $T_c$ superconducting cable system in real power grid

東京電力  
鬼頭 豊、市川 裕士  
住友電工  
大屋 正義、渡部 充彦  
前川製作所  
大野 隆介、仲村 直子  
Tokyo Electric Power Company, Inc.  
Yutaka Kito, Hiroshi Ichikawa  
Sumitomo Electric Industries, Ltd.  
Masayoshi Ohya, Michihiko Watanabe  
Mayekawa Mfg.  
Ryusuke Ono, Naoko Nakamura

#### 1. はじめに

高温超電導線材を導体に用いることにより、超電導ケーブルは従来の銅導体ケーブルと比べコンパクトかつ大容量送電が可能であることから、その実用化が期待されている。本稿では超電導ケーブルシステムの概要およびこれらを日本で初めて長期実システム運用した際のシステム安定性及び長期信頼性などについての検証を行った結果について報告する。

#### 2. 高温超電導ケーブル実証プロジェクト

##### 2-1. プロジェクト概要

本プロジェクトは新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託を受けて、平成19年度から25年度までの期間、東京電力、住友電工、前川製作所の3社で実施した[1]。プロジェクトの目的は66 kV、2 kA級高温超電導ケーブルシステムの開発、液体窒素循環冷却システムの開発、線路設計や布設・建設方法の検討、および66 kV実システムにて運用した際の保守、遠隔監視方法確認、超電導ケーブルシステムのトータル安全性・信頼性評価を実施することである。

##### 2-2. ケーブル構造

超電導ケーブルは図1に示す様に超電導ケーブルコア3心が断熱管内に収納されている構造である[2]。コアは銅撚り線フォーマ、超電導導体層、電気絶縁層、超電導シールド層および銅シールド層で構成される。ケーブル両端末部にて超電導シールド層各相を短絡させ導体電流によるコア外部への磁気遮蔽を行う。また電気絶縁についてはPPLP<sup>®</sup>半合成紙を採用した。

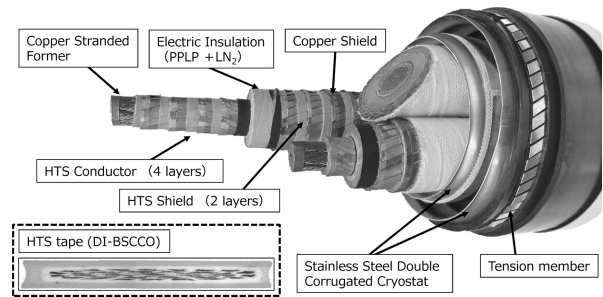


図1 三心一括型超電導ケーブルの構造

##### 2-3. 冷却システムの構成

冷却システムの概要を図2に示す[1]。システムは冷凍機、循環ポンプ、リザーバタンク等で構成され、冷凍機によりサブクール状態に冷却された液体窒素をケーブルシステムに循環させる、循環冷却方式を採用した。冷凍機は、1 kW級スターリング式冷凍機6台を2×3並列で配置し、ポンプ2台も並列に配置した。それぞれの機器は冗長性を持たせており、メンテナンスや故障時でも冷却運転を継続することができる。

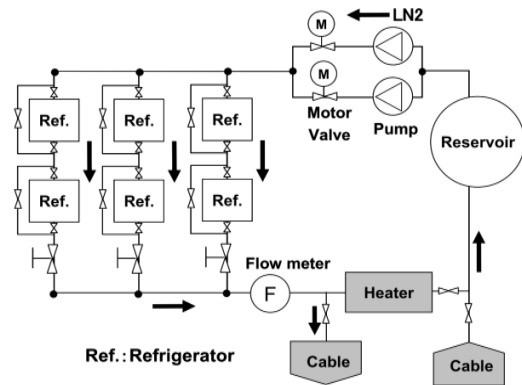


図2 冷却システム構成

##### 2-4. 実証ケーブルシステム

実証試験でのシステムレイアウトを図3に示す。

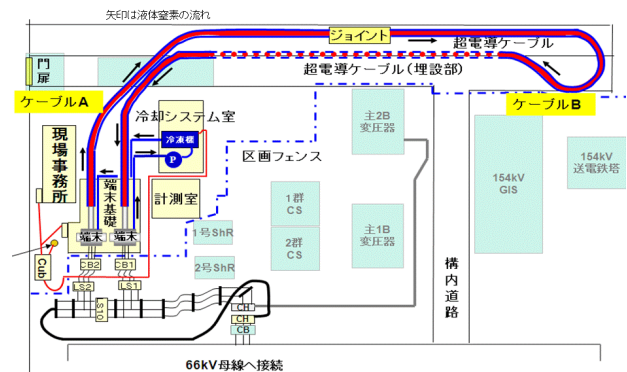


図3 超電導ケーブルシステムの配置 (旭変電所)

本システムは横浜市の東京電力・旭変電所内に建設した[3]。ケーブル長は約240 mであり、将来的な長距離

送電に不可欠である中間接続部や、ケーブル両端に気中終端接続部を設けている。66 kV系統には遮断器、断路器を配して接続され、超電導ケーブルシステムの近傍に液体窒素循環冷却システムを配置した。



図4 超電導ケーブル端末部付近

## 2-5. 系統接続前試験

建設された超電導ケーブルシステムの健全性を確認するため、系統接続前に循環冷却試験を実施し、ケーブルシステム側では臨界電流 ( $I_c$ ) 特性や課電特性などを、冷却システム側では冷凍能力特性やメンテナンス性などの評価を実施した。図5に各相導体の  $I_c$  測定試験結果を示す[3]。冷媒温度77 Kでの導体  $I_c$  はそれぞれ6.4 kAであり、各コア間の磁場の影響を考慮した  $I_c$  計算値とよく一致することを確認した。

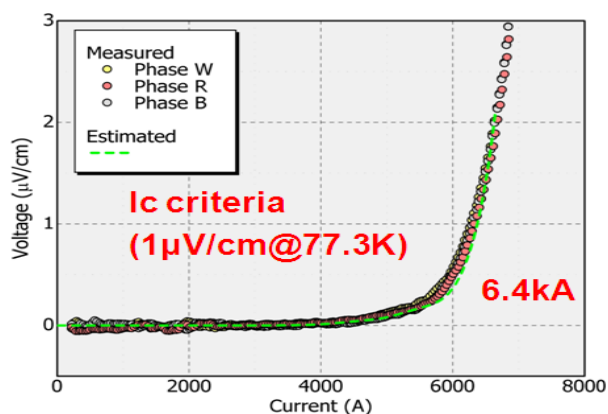


図5 臨界電流測定結果

## 2-6. 実系統運転

それぞれの項目で所定の性能を確認し、計測系や監視系のチェックを実施したのち、2012年10月29日より高温超電導ケーブルシステムの電力実系統運転を開始した。実系統運転時の冷媒温度、圧力および循環流量、通電電流の推移を図6に示す[4]。途中定期検査のための2回の送電停止期間を除き、2013年12月25日まで約400日間の実系統送電試験を終えた。期間の最大電流は1127 Arms (2013年8月)、周辺変電所間との系統切

替は50回以上を経験した。冷媒温度は運転条件を変え約69~80 Kの間で調整した。リザーバタンク圧力は0.2 MPaG、循環流量は40 L/minで試験を通じてほぼ安定に維持された。

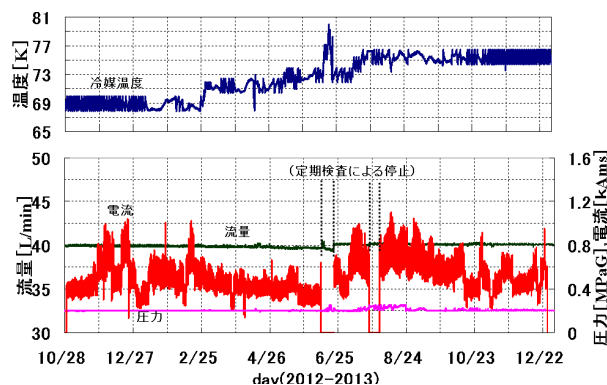


図6 超電導ケーブルの運転状況

運転中に機器真空槽真空度低下による熱負荷増加や、冷凍機の能力低下現象が発生したため、メンテナンスを実施し性能の維持に努めた[4][5]。これらを通じ、長期間にわたる運用を確認できたとともに、長期真空断熱維持方法の確立や高効率・大容量かつ高寿命冷凍機の開発が実用化への課題であることがわかった。

長期試験後ケーブル  $I_c$ 、静電容量や誘電正接などを確認し、初期値から変化がなく安定していることを確認し、ケーブルの長期運転での健全性を確認した。

## 3. おわりに

国内初の高温超電導ケーブルシステムの実系統運転を1年以上にわたり実施し、安定して運用できることを確認した。本ケーブルシステムが実用化の際の一つの選択肢になることを示した一方、真空の維持や冷凍機の信頼性や性能向上など実用化に向けた課題も明らかとなった。今後これらの課題に取り組み、早期の実用化を目指していく。

## 4. 参考文献

- [1] 三村ほか:平成 25 年電気学会全国大会、5-142.
- [2] 大屋ほか:SEIテクニカルレビュー・第 176 号、P102 (2010).
- [3] 増田ほか:平成 25 年電気学会全国大会、5-144.
- [4] 渡部ほか:平成 25 年電気学会全国大会、7-122.
- [5] 下田ほか:平成 25 年電気学会全国大会、7-123.

## (7)中国瀋陽市における 275 kV-3 kA 超電導 ケーブルのデモンストレーション

### Demonstration of 275 kV-3 kA High $T_c$ Superconducting Cable in Shenyang, China

古河電気工業株式会社  
八木 正史  
Furukawa Electric  
M. Yagi

#### 1. はじめに

中国瀋陽でのデモンストレーションというと、反日デモと勘違いされる方も多いかと思います。中国で9月18日といえば、満州事変の発端となる鉄道爆破事件があり、その舞台となったのが現在の瀋陽市で、代表的な抗日記念日になっています。我々が瀋陽市にある瀋陽古河で超電導ケーブルを建設していたのは、尖閣の問題で中国各地に暴動の起きた2012年であり、9月はまさに建設工事の仕上げの段階でした。テレビでは一日中、中国の正当性を唱え、レストランでも図1のような看板が見られました。こういった執拗な報道や宣伝に接していると、食事の時も肩身が狭く、居心地の悪さを感じたものです。

計画の段階では、もちろん、中国を有望な市場と考えていたわけですが、国際関係の悪化まで十分考慮していたとは言えません。今後、海外で仕事する際には、相手国の十分な理解と分析が必要と感じました。

以下では、中国での超電導ケーブル試験[1-2]を振り返ってみたいと思います。

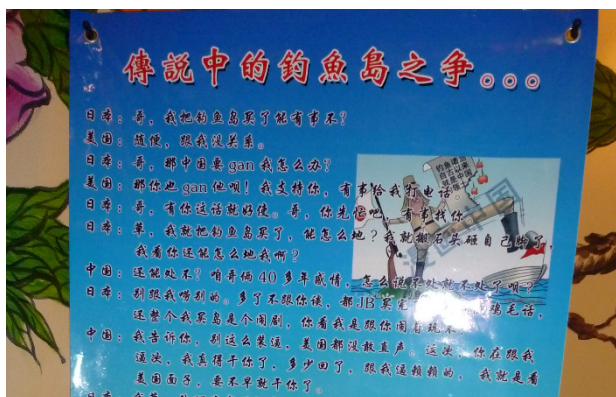


図1 尖閣での問題を訴える立て看板（中国瀋陽の  
レストランにて）

#### 2. 超電導ケーブル製造と試験場の設営

まずは、瀋陽古河に専用の試験場を設営する必要があります。敷地内の空き地を整備し、基礎工事や測定器室、冷却室の建設を始めました。また、試験のための課電装置、通電装置の選定を進めました。それと同時

に日本では、超電導ケーブルの製造を始めました。ケーブル完成後に輸送となるわけですが、今回の試験では、中国での滞在期間の制限や慣れない現場での仕事、さらには技術流出漏えい防止の観点から、ケーブルの接続や端末をあらかじめ日本で組み立てて輸送することにしました。2012年4月にはケーブルは完成し、6月中旬には計画通りに日本から輸出することができました。この時には、瀋陽古河の試験場も形になっており、試験も順調に行えそうだと感じました。

#### 3. 輸送

超電導ケーブルを海外に出したのは初めてで、受け取りは自社（瀋陽古河、古河電工の100%子会社）だったのですが、自社内のやり取りはかえって難航した面がありました。税関検査を終えて、ケーブルを開封できたのはスケジュールから1ヶ月近く遅れて、お盆直前の8月上旬でした。しかし、中国国内で調達した試験設備も計画通りに輸送されず、スケジュールを管理する立場としてはやきもきました。段々とわかってきたのは、瀋陽古河の場所が市街地から離れており、委託業者が輸送を渋るようなのです。日用品に関しても同様で、瀋陽のデパートで冷蔵庫を購入して、輸送を依頼したのですが、瀋陽古河に届いたのは2週間後でした。さらに、タクシーには乗車拒否をされたり、運よく乗れても運転途中でほかの乗客をピックアップして相乗りになったりと。ちょっと日本では考えられない状況に、広い心と忍耐力、そして臨機応変の現地適応力が必要と感じました。

#### 4. 建設工事

本格的に超電導ケーブルの組み立てを開始したのはお盆明けの8月下旬でした。超電導ケーブルを終端容器内に収納して接続するのですが、終端容器は高压ガス容器に分類され、中国の高压ガス法に準拠する必要があります。そのため、日本から持っていきことができず、中国メーカ製になりました。容器の中には、金属異物が多く含まれており、その清掃に手間取りました。超高压の電力ケーブルは金属異物を非常に嫌うのですが、その情報は中国メーカに正確に伝わっていないようでした。また、ボルトも中国製だったのですが、一回使用すると、ねじが噛んでしまうものが多くあり、何度か購入しに行ったのを覚えています。

同時に、CVケーブルの建設工事も行われました。3 kAの通電のためには、超電導ケーブルとCVケーブルで回路を作り、CVケーブルに通電用の大電流トランスを入れて行います。CVケーブルは中国で使われている220 kV仕様で、瀋陽古河の製品です。一方、我々の今回のケーブルの仕様は275 kVで、終端部は同じシリコ

ン碍子を使っているため、外からでは区別が付きません(図2)。実は、碍子の中での電界ストレスの緩和状態が違うのですが、細かいことは抜きにして、個人的には、CVケーブルの終端部作製も大変な関心事項でした。なぜなら、CVケーブルにも超電導ケーブルと同じ電圧がかかり、CVケーブルで電圧破壊が起きると、試験ができなくなってしまうからです。電圧仕様は超電導ケーブルよりもワンランク下だったため、かなり心配でした。CVケーブルの組み立ては瀋陽古河の工事部隊が行いましたが、通常出荷品ではないこともあって比較的のんびりしたムードで、遅々として進まないように感じました。スケジュールの遅れも気になって、時には品保部長にかけあって、急いでもらったこともありました。

品質的には、我々の試験期間中に問題はなく、満足したものができました。



図2 試験回路をCVケーブル側から見た。手前の6本のシリコン碍子がCVケーブルの終端部で奥が超電導ケーブルの終端部。手前の赤いボックスに交流電用のトランスが収納されている。

9月中旬では、先に述べた抗日記念日があり、瀋陽古河の日本人スタッフからも外食のときは、ホテルでするようにとのアドバイスをもらいました。9月18日は一部の日本企業も休日にしていただいていたようですが、試験開始のセレモニーを計画していたことから、休むこともなく、作業を継続しました。結局、瀋陽古河は、国際問題の喧騒からは蚊帳の外でした。一方、超電導ケーブルの試験開始セレモニーについては、残念ながら、中止になってしまいました。同じような式典は、他の日本企業でも計画されていたようですが、同じ状況だったようです。

## 5. 試験設備とメンテナンス

課電設備、交流電設備、直流通電設備、真空ポンプはすべて中国で調達しました。最近の中国の人民元のレートは変わってきていますが、当時の価格で日本の1/5ぐらいでした。初期性能については、満足のゆくもの

でした。長期性能については、今後、使用を続けながら検証していくことになります。屋外に設置している課電設備や交流電設備は-30℃の厳冬やPM2.5などの厳しい環境を経ているので、気になるところです。



図3 試験後の瀋陽古河の超電導ケーブル試験場。新しいケーブル試験にいつでも対応できる。

不具合や不明な点は、中国の製造業者が対応してくれました。課電装置の部分放電測定装置の故障の際は、webを通して現地のメンテ担当者と連絡を取り合い、故障点を特定できたのは、進んでいるなど感じました。中国の数多い業者の中から本物の技術を持っている業者を知っていることは、成功要因の一つと思いました。ネットで調べた業者に見積りを依頼していましたが、信頼できる業者について、瀋陽古河のスタッフは熟知しているようでした。なるほど、ビジネス本にある4C分析のChannelとはこういうものかと、身をもって体験したわけです。

## 6. 激しい環境の変化と今後

2013年の3月にはヒートサイクル試験を行うため、瀋陽古河を再訪問しました。ちょうど、PM2.5の注意報が出ており、会社からマスクの供与を受けました。しかし、現地では誰もマスクをしておらず、たまにマスク着用者をみると、我々と同じ日本人出張者だったりしました。今は、北京のスモッグがすごいことになっているようで、瀋陽もどうなっているのか気になっています。

2012年と2013年のそれぞれ夏から秋にかけて瀋陽を体験しましたが、瀋陽市そのものの変化には驚くばかりです。国際空港の建設、国体準備のためのインフラ工事、泊まっていたホテルの廃業、日本のデパート伊勢丹の撤退等々。1年間で、街全体が大きく変わりました。そういえば、2012年の建設工事中に悩まされた飛来虫も13年にはめっきり減ったように感じました。

今後、中国の環境の激変はどのように変わっていくのでしょうか。日本にいても、決して他人事で済まされない状況だと思えます。今後も続けて、瀋陽古河での試験場

を活用して、超電導開発を進めていきたいと考えておりますが、その成果が、環境の激変を和らげる方向に貢献できるように、今後も頑張っていきたいと思っております。

## 7. おわりに

超電導ケーブルのデモンストレーションは、新エネルギー・産業技術総合開発研究機構(NEDO)の委託により実施したものです。本研究に携わった関係者に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] M. Yagi, *et al.*, Physics Procedia, **45** (2013) 277-280.
- [2] 古河電工時報 第131号 p37-43「世界最高電圧の275 kV-3 kA 高温超電導ケーブル開発」.

## <研究室紹介>

### (1)九州工業大学 大学院情報工学研究院 電子情報工学研究系 超伝導応用工学研究室 Applied Superconductivity Engineering Labo. in Kyutech (Kyushu Inst. of Tech.)

#### (1)研究室概要

九州工業大学にはいくつか超伝導関連の研究室があります。我々の超伝導工学応用研究室は1990年に当時の松下照男教授(現在は九州工業大学名誉教授)が九州大学から赴任されて飯塚市にある情報工学部に設立され、以来ほぼ1/4世紀になろうとしています。この研究室では、材料と応用の中間の部分について研究しています。つまり、材料は企業や研究所などで専門家が作ったものを提供していただき、その材料について電磁気学に基づく独自の測定や解析を通じて知見を得て、さらに独自の超伝導応用機器の基礎について検討を続けています。ここでは材料の基礎特性の評価と独自の超伝導用機器の基礎研究について紹介します。

#### (2)研究室構成

松下照男名誉教授

小田部荘司教授

木内勝准教授

Vladimir Vyatkin 研究員、技術職員、秘書

博士前期課程学生、学部学生 合計10名強

共同研究先:九州工業大学内の他のグループ、東京大学、名古屋大学、中部大学、福岡工業大学など

#### (3)最近の主な研究内容

##### ・GdBCO超伝導コート線材の磁化緩和特性

希土類酸化物銅系超伝導体は、高い臨界温度と臨界磁場を持つことから実用に向けてさまざまな研究開発が行われています。超伝導体の応用の一つに超伝導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)があります。現在でもシャープの亀山工場には落雷などの事故の時の電圧が一瞬低下する現象「瞬低」対策として2 GJのSMESを導入しています。これには従来の金属系超伝導体が使われているので、磁場が低く、また液体ヘリウムを寒剤として使って4.2 Kを保つ必要があり、大きさも20 m×30 m×10 mという巨大なものです。これを希土類酸化物銅系超伝導体の線材に置き換えると10 m×10 m×3 mで収まると見積もられています。しかし運転温度が20 Kであることから、磁気エネルギーで貯蔵されたエネルギーは超伝導体の磁化緩和という現象により徐々に失われてしまいます。したがって、線材の磁化緩和を正確に測定し、理解する必要があります。本研究では、材料や製法の違いによる線材における、磁化緩和特性を評価してSMESの設計指針を与えるを行っています。

##### ・磁束クリープ・フローモデルによる電磁特性の評価

前節で磁化緩和現象を紹介しましたが、この現象は磁束クリープ・フローモデルにより理論的に説明されていて、理論により実験結果を精度よく再現できることが知られています。実際にこのモデルにより、超伝導体の電界の電流密度依存性( $E$ - $J$ 特性)、臨界電流密度の磁界依存性( $J_c$ - $B$ 特性)、不可逆磁界の温度依存性( $B_i$ - $T$ 特性)など磁化緩和特性以外の様々な超伝導体の電磁特性をも評価することができます。

このモデルには積分を含む膨大な計算が必要です。また必要な物性パラメータは3から5つあり、これらを決定するのに手間がかかります。そこで、遺伝的アルゴリズムや最急降下法を使って、自動的にこの複雑な計算をする方法について研究を行っています。また最近のPCでは、グラフィック処理専用のGPUというICが載せられており、これを用いてCPU単体では得られない計算処理能力を使うことができます。このGPUの物理計算への利用についても

研究を進めています。その結果、これまでの1/10の時間で、また精度のよりよい計算ができることを確かめています。

#### ・有限要素法を用いた電磁特性の計算

有限要素法は工学の分野では非常にポピュラーであり、特に計算機の処理能力が向上している近年では、さまざまなシミュレーションに当たり前のように使われています。しかし超伝導体は電界-電流密度特性における非線形性が非常に大きくて収束演算を必要とし、有限要素法で計算するには、他分野と比べて莫大な計算量が要求されました。我々のグループで有限要素法を導入した当初は小規模なモデルしか計算ができませんでしたが、最近ではかなり本格的な計算も可能となってきています。また適応範囲も、超伝導体内の磁界分布計算が主ではありませんが、電界や電流密度などの基本的な電磁気の値にとどまらず、さらに損失や力など複雑な物理量を計算することができるようになりました。

依然として有限要素法を利用するには超伝導特有の現象をよく理解してモデルを組み立てる必要がありますが、計算機能力が向上したことで、かなり分野について計算をすることが可能となっており、研究室の一つのツールとして応用の可能性を検討し続けることにしています。

#### ・縦磁界効果利用超伝導電力ケーブルの基礎研究

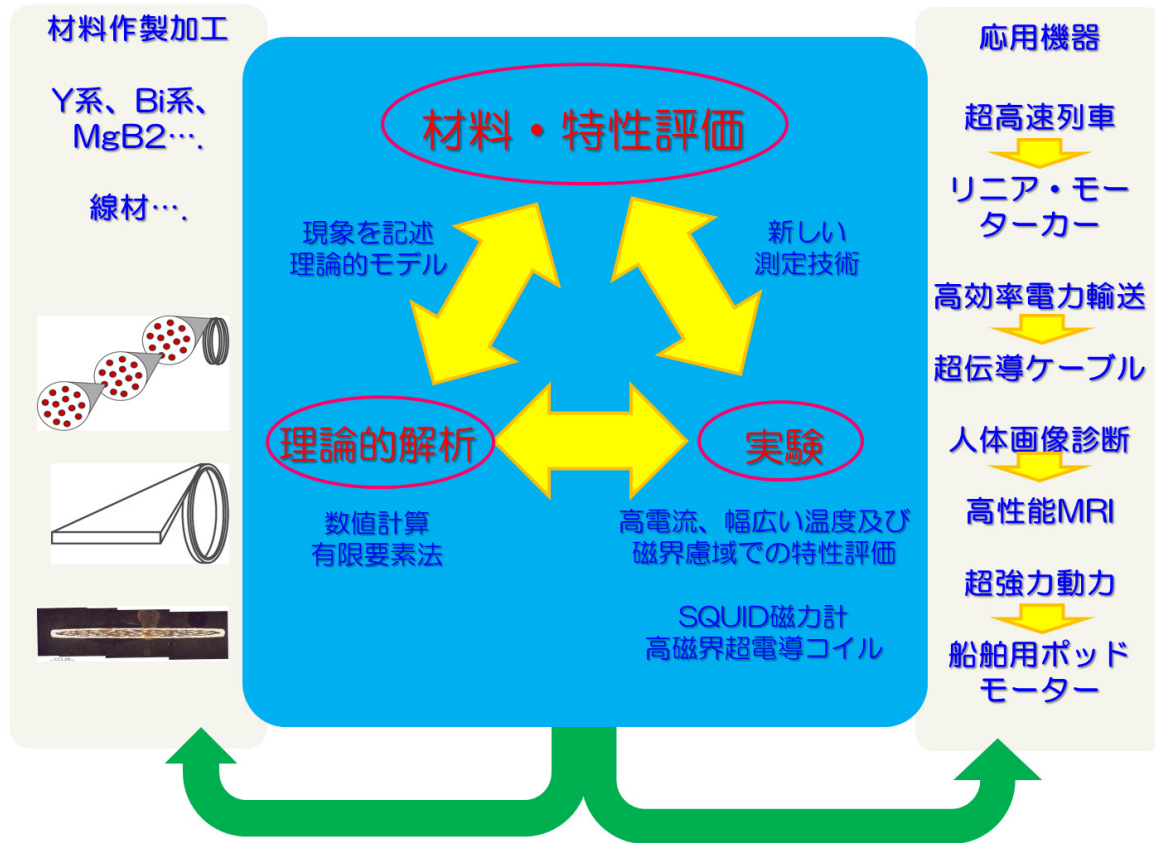
科学技術振興機構(JST)の先端的低炭素化技術開発(ALCA)の補助事業に採択されて、「高性能超伝導電力ケーブルの開発」という課題名で研究を進めています。これは超伝導電力ケーブルの構造を工夫することで、流れる電流と内部に発生する磁界の向きがほとんど平行な状態にする(縦磁界)ことにより、超伝導電力ケーブルの電流容量を格段に増やすことができる可能性を確かめるものです。

まず現在開発中である希土類酸化物銅系超伝導コート線材が縦磁界において臨界電流密度がどのように向上するのかを測定しています。しかしコート線材は磁界異方性が強く、コート線材の面に垂直な磁界がかかると臨界電流密度がすぐに減少してしまいます。したがって、コート線材を一枚で測定しても、ケーブル状にしたときの性能を測定することができないこととなります。そこでコート線材のサンプルの周りにもいくつかダミーのコート線材を配置することによって、より正確な縦磁界下での臨界電流密度測定を行っています。これは有限要素法によっても周りの磁界分布を計算して、コート線材の面に垂直な磁界成分が低減できていることを確かめています。

次に縦磁界効果を利用した超伝導電力ケーブルの設計に資するように、電流容量の計算をおこなっています。ケーブルはテープ状の線材をフォーマーの上に並べる構造をしており、その臨界電流は磁界の値や電流との角度によって複雑に変わります。また流れる電流によって多層構造である電力ケーブルの内部の磁界構造は変わります。これらを矛盾無く求める方法を開発しています。またこの計算結果が正しいかどうかを有限要素法により検証を進めています。

さらに、実際に模擬ケーブルを作製して実際に4000 Aという大電流を通電して、その性能について検証しています。実際に作製すると、テープ線材単体の性能に比べてテープ線材を複数使ってケーブルにすると性能が向上することが確かめられました。また巻き方を工夫してより縦磁界の状態に近い状態を作ることにより、ケーブル全体の性能が向上することも確かめることができました。





#### (4) 連絡先

〒820-8502 福岡県飯塚市川津680-4  
九州工業大学 大学院情報工学研究院 電子情報工学研究系  
超伝導応用工学研究室  
教授 小田部 荘司  
Tel. & FAX 0948-29-7683  
otabe@cse.kyutech.ac.jp  
<http://aquarius10.cse.kyutech.ac.jp>  
<http://aquarius20.cse.kyutech.ac.jp>  
<http://aquarius30.cse.kyutech.ac.jp>

---

## (2) 東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻 巨視的量子物性グループ Macroscopic Quantum Phenomena Group, Graduate School of Science, Tohoku University

---

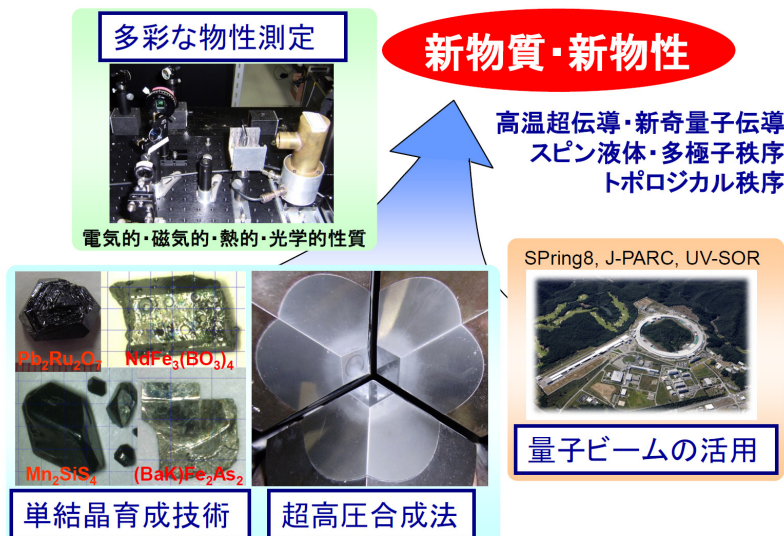
### (1) 研究室構成 (H26年6月現在)

教員: 大串 研也 教授

### (2) 研究室の概要

強相関電子系では、しばしば対称性の破れやトポロジカル数で特徴づけられる量子秩序が生じ、巨視的なスケールで量子効果が発現する。超伝導・スピン液体・量子ホール効果はその代表例である。こうした巨視的量子物性を探求することを研究室の柱に据えている。対象とする物質は、酸化物・窒化物・カルコゲナイド・ニクタイトなどの遷移金属化合物であり、フラックス法・気相成長法を含む様々な固体化学的手法により純良単結晶を育成している。また、超高压合成法を用いた新物質探索も行っている。こうして得たバルク試料の電気的・磁氣的・熱的・光学的性質をラボベースで測定することで、量子物性の開拓を進めている。さらに、近年長足の進歩を遂げている共鳴X線散乱や中性子散乱など大型施設を利用した量子ビーム研究を積極的に推進することで、微視的観点から電子状態を解明している。このような物質合成を基盤に置いた総合的研究を通して、超伝導・磁性・トポロジカル秩序などの新奇量子物性を見出すことを目指している。現在は以下の研究課題を集中的に推進している。

- ・ 鉄系超伝導体の輸送現象・光物性。
- ・ 電気八極子・磁気四極子など奇パリティ多極子の物理。
- ・  $5d$ 電子系におけるスピン軌道相互作用の量子物理。
- ・ 高压合成法による新物質・新超伝導体探索。
- ・ 共鳴X線散乱法による構造物性研究。



### (3) 特徴のある装置

本研究グループはH26年に発足した新しい研究室である。未だ十分な装置を保有していないものの、銅酸化物超伝導体の酸素組成制御に有効な高压酸素炉やキュービックアンビル型高压合成装置の導入を予定している。

### (4) これまでの研究成果

- ・ 本研究グループの研究対象は多岐に亘るものの、超伝導は最も力を注いでいるテーマの一つである。これまでの私たちの超伝導に関する研究成果から3つ紹介する。
- ・ 高压合成法を駆使することで、新物質 $\text{Hg}_x\text{ReO}_3$  ( $x = 0.44$ )を発見した。同物質が7.7 K (高压下で11.1 K)において超伝導転移を示すことを見出し、六方晶ブロンズファミリーの転移温度更新に成功した。伝導を担うRe-Oフレーム

ワークに内包されたHgのラットリング運動が顕著であり、これが高温超伝導の起源となっている可能性がある。[K. Ohgushi, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106** (2011) 017001.]

- ・バナジウム窒化物  $V_3PN$  が、4.2 K で超伝導を示すことを発見した。これは、アンチポストペロブスカイト構造を有する化合物で初の超伝導である。転移温度は窒素欠損に強く依存し、最高 5.6 K に達する。[B. Wang and K. Ohgushi, Scientific Reports **3** (2013) 3381.]
- ・組成を厳密に制御した鉄系超伝導体  $Ba_{1-x}K_xFe_2As_2$  のホール係数を精密に測定した。ボルツマン方程式により解析することで、電子面の方がホール面より有効質量が軽い散乱を受けやすいという知見を得た。また、相図上で、正常状態に「隠れた秩序相」を発見した。[K. Ohgushi and Y. Kiuchi, Phys. Rev. B **85** (2012) 064522.]

### (5) 連絡先

〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3

東北大学 大学院理学研究科 物理学専攻

大串 研也

E-mail: ohgushi\_at\_m.tohoku.ac.jp

---

## (3) 大阪府立大学大学院 工学研究科電子・数物系専攻電子物理工学分野 量子物性研究室 Ishida Laboratory, Department of Physics and Electronics, Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

---

### (1) 研究室スタッフ(平成 26 年 6 月現在)

石田武和(教授)、野口悟(21機構・教授)、宍戸寛明(助教)、宮嶋茂之(特認助教)、渡部彰美(秘書)、学生12名

### (2) 研究室の概要

超伝導体の単結晶を育成し電子状態物性を追求すること、超伝導薄膜を微細加工で新機能を発現させることなど目指している。そのために、結晶育成装置、X線回折装置、極低温装置、強磁場装置、クリーンルーム、成膜装置、微細加工装置などを用いた研究を行っている。また、ナノファブリケーション研究所の所長、ナノ科学・材料研究センターのプログラムオフィサーとして学内の研究施設に参画している。研究室の活動を、例を挙げて、いくつか紹介する。

### (3) 主な研究テーマ

#### A. パルス強磁場を用いた物性研究

37テスラパルス強磁場を用いて数種類の $MgB_2$ 薄膜の上部臨界磁場を系統的に測定し、磁場中における $MgB_2$ の2ギャップ超伝導物性と超伝導転移温度の関係を明らかにした。図1は磁場印加によって超伝導が壊れる様子を電気抵抗から評価した測定例である。温度は $^3He$ を用いて0.4 Kまで冷却できる。現在、50テスラにパルス強磁場を増強するために改修中である。

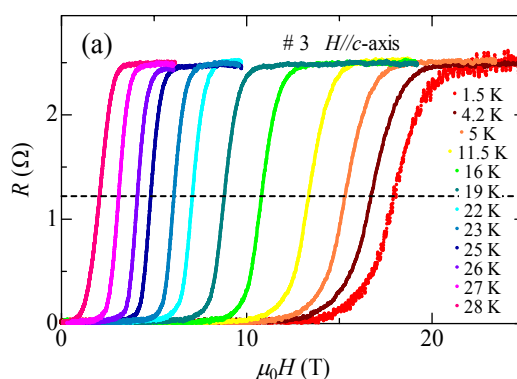


図1  $MgB_2$ 薄膜の強磁場超伝導転移

## B. 磁気トルクによる異方的超伝導体の研究

大学で独自に6テスラのスプリット型超伝導マグネットを用いた光学フィードバック方式の磁気トルク装置を製作し、自動計測システムとして物性研究に用いている。研究室で開発したKoganモデルに替わる異方的超伝導体のトルク理論(D. Kubota et al., Phys. Rev. B, 2011)を実験データの解析に適用しやすくする解析法の構築を進めている。図2の装置は、研究室で唯一、LabVIEWではなくHT-BASICベースである。トルクのダイナミックレンジが広い特徴がある。

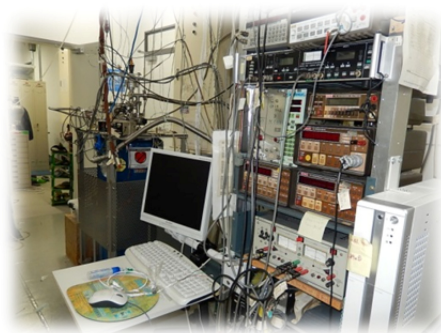


図2 磁気トルク自動計測測定装置

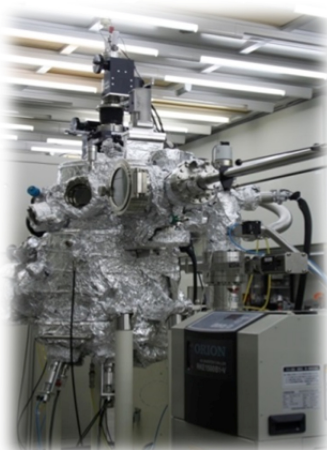


図3 超高真空MBE装置

## C. 超高真空分子線エピタキシー(MBE)法により成膜

超伝導体(MgB<sub>2</sub>など)や強相関電子系(Ce系、Sm系)薄膜や超格子による新奇物性の開発に取り組んでいる。MBE法では、超高真空下で原子ビームもしくは分子ビームを利用して基板の上に薄膜成長を行う。成長の様子は、反射高速電子線回折(RHEED)を用いた結晶表面の観察している。図3はクラス1000のクリーンルームに設置したMBE装置である。基板温度は室温から1000℃まで制御できる。基板サイズは3インチまで対応しており、ロードロック機構で予備室から搬送できる。

## D. SQUID 素子の製作と SQUID 顕微鏡への応用

Nbの多層プロセスを用いて、ワンチップ状にX方向、Y方向、Z方向の磁場を感知できるピックアップコイルとSQUID回路を装備したSQUID顕微鏡用センサーを作っている。図4のチップの写真の右上に3つのピックアップコイルが装備されている。

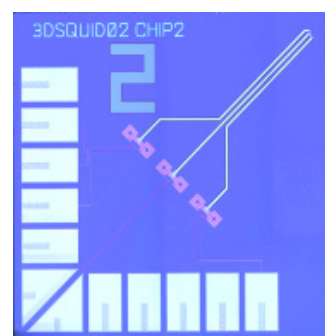


図4 3D-SQUIDチップ

磁束画像を明瞭にし、空間分解能を高める理論研究も行っている。研究室では商用のSQUID顕微鏡も使っているが、装置のサポート期間が終了したためSQUIDセンサーを独自に供給できる体制を構築して、従来のSQUID顕微鏡を継続して使える工夫をしている。主にナノ構造超伝導体の渦糸状態の研究に用いている。この研究は、産総研、秋田大学、ホーチミン科学大学との共同研究として実施している。

## E. 電流バイアス運動インダクタンス検出器による中性子検出器



図5 ワンチップ化した超伝導中性子検出器

高品質Nb細線検出器のX方向アレイとY方向アレイを直交させ、その間に超高真空MBE装置で<sup>10</sup>Bを成膜し、超伝導中性子チップを形成する。冷中性子が飛来すると、中性子とホウ素10原子核が核反応を起こし、大きな核反応熱が<sup>4</sup>He原子核と<sup>7</sup>Li原子核により180度異なる方向に運び出されNb細線の運動インダクタンスが変化するときの過渡的な電圧を中性子信号として検出できる仕組みである。この原理は、従来はなかったものであり、平成26年3月J-PARCでマシンタイムを配分され、実証実験に初めて成功した新しい検出器である。図5の写真は、大学からJ-PARCに搬入した測定装置で、検出器を真空ピンセットで実装している様子を示している。名古屋大学、産総研、原子力機構、情報通信研究機構と共同研究をしている。

## 連絡先

大阪府立大学大学院 工学研究科 電子・数物系専攻 電子物理工学分野  
教授 石田武和 (ナノファブリケーション研究所 所長)

〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1-1

電話 072-254-9260 ファクス 072-254-9498 メール [ishida@center.osakafu-u.ac.jp](mailto:ishida@center.osakafu-u.ac.jp)

ホームページ <http://www.pe.osakafu-u.ac.jp/pe1/>

ホームページ [http://www.osakafu-u.ac.jp/affiliate/21c/laboratory/01\\_nano\\_fabrication.html](http://www.osakafu-u.ac.jp/affiliate/21c/laboratory/01_nano_fabrication.html)

---

**(4)新潟大学 大学院自然科学研究科 電気情報工学専攻 超電導応用研究室**  
**Niigata University, Graduate School of Science and Technology, Department of Electrical and Information Engineering, Applied Superconductivity Laboratory**

---

(1)研究室スタッフ(2014年6月現在)

教授:福井 聡 准教授:小川 純 技術職員:佐藤 孝雄 研究員:斉藤 公世  
大学院生:15名 学部生:10名

(2)研究室の概要

本研究室では、高温超電導線材やコイルの電磁特性の解明から、高温超電導を利用した電気機器や産業機器に関する研究を展開しています。具体的には、高温超電導線材・導体・コイルの交流損失特性の解明と低減手法に関する研究、高温超電導回転機の基礎研究、磁気浮上型非接触スピン処理装置や磁気分離によるセシウムの除染、誘導加熱装置などの研究を進めています。

(3)主な研究内容

(a)交流損失に関する研究

高温超電導を電力機器へ応用するにあたって必要不可欠な交流損失特性を線材・集合導体・コイルの各レベルで評価する手法の研究を実験・理論の両面から行ってきました。

あらゆる応用の基礎となる線材の交流損失特性については、基本的な電磁環境下で精度良く電氣的・熱的に測定する標準システムの構築を行うとともに、数値解析モデルを開発して実験の妥当性の検証と交流損失低減手法の研究を行っています。また、最近では鉄心内に配置された高温超電導線材の交流損失特性の評価も行っています。集合導体に関しては、特に電力ケーブル応用の多層同軸型スパイラル導体やそのシールド導体の交流電流時の損失特性を測定する手法の研究に注力しています。本研究室では、電圧リード線を導体に電氣的に接続しない非接触電圧リードループを用いた測定手法の開発を行いました。理論解析により損失成分電圧の捕捉率などを求め、測定手法の妥当性を検証しました。また、電力ケーブル用の多層スパイラル導体の交流損失低減手法についての研究にも取り組んでいます。コイルの研究に関しては、パンケーキ積層型コイルの交流損失特性評価と損失低減手法の研究を行っています。線材の直流データのみから交流超電導コイルの交流損失特性を解析できるモデルを開発し、小型コイルの測定結果と解析結果の比較からモデルの検証を行いました。また、解析モデルに基づき、高温超電導コイルの交流損失特性とコイル構造との関係について評価を行い、交流損失を最小化するコイル断面構造の最適化設計の検討なども行ってきました。この他、JSTのプロジェクト(S-イノベ、ALCA)に参画し、高温超電導回転機用のコイルの損失特性の評価も行っています。

(b)高温超電導回転機

洋上風力発電で導入が期待されている10 MW超級の大型風力発電機の検討を行っています。ダイレクトドライブ用の大型風力発電機について、有限要素解析を用いた電気設計を行ってきました。高温超電導を用いると従来機では達成困難な小型軽量化が可能になるものの、数百kmの線材が必要になることが明らかになり、軽量化をある程度犠牲にして、線材使用量を大幅に減少させた設計が必要であることが指摘されました。本研究室では、鉄芯を効果的に利用して使用線材量を低減しつつ、従来機よりも軽量・高効率な電気設計を提案しています。現在、NEDOプロジェクト「10 MW超級風車の調査研究」において、本研究室で提案した設計に基づきフィージビリティスタディーを行っています。

(c)産業応用機器の研究

半導体関連製造工程におけるスピン処理装置の無塵化のために、高温超電導バルクによる磁気浮上型のスピン処理装置の研究開発を、JST委託開発の支援を受けて行いました。最近では、環境省のプロジェクトで大阪大学や福島大学と協力して、磁気分離を用いた除染技術の開発や超電導コイルを用いた誘導加熱装置の研究にも取り組んでいます。

#### (4) 連絡先

メールアドレス: [fukui\(at\)eng.niigata-u.ac.jp](mailto:fukui(at)eng.niigata-u.ac.jp) (福井) (at)を@に変更して下さい。

ホームページアドレス: <http://ee.eng.niigata-u.ac.jp/wiki.cgi?page=FrontPage>

(工学部電気電子工学科)



図1 伝導冷却マグネット



図2 大容量バイポーラ電源



図3 磁気浮上型非接触スピンドル処理装置

## 研究会の動き

〔平成26年(2014年)1月1日～平成26年(2014年)3月31日〕

### 幹事会

平成26年度第1回

日時：平成26年4月10日(木) 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8名

事務局1名

議事：

- (1) 第83回ワークショップについて
- (2) 第84回ワークショップについて
- (3) 第40回シンポジウムについて
- (4) 平成25年度事業報告案及び収支決算書案について
- (5) 平成26年度事業計画案及び収支予算案について
- (6) 第2回超伝導科学技術セミナーについて
- (7) 第6回総会について
- (8) FSSTNEWSについて

### 第40回シンポジウム／第18回超伝導科学技術賞授賞式

日時：平成26年4月15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2014

－未来を拓く超伝導ケーブル－

参加者数：99名

### プログラム：

【座長 松本 明善 (物質・材料研究機構)】

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「超伝導人工原子」

蔡 兆申 (理化学研究所/NEC)

11:00-11:50 基調講演「先進超伝導線材の開発」

熊倉 浩明 (物質・材料研究機構)

11:50-12:10 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 木村 昭夫 (古河電気工業)】

13:10-13:40 「高温超伝導ケーブル実証実験」

本庄 昇一 (東京電力)

13:40-14:10 「世界最高電圧の275 kV-3 kA高温超伝導ケーブルの開発」

八木 正史 (古河電気工業)

14:10-14:40 「直流超伝導き電ケーブル」 富田 優 (鉄道総合技術研究所)

<休憩・展示ポスター見学>

15:00-15:25 「石狩直流超伝導送電プロジェクトの課題と現状」

山口 作太郎 (中部大学)

15:25-15:50 「世界のケーブルプロジェクト動向」

林 和彦 (住友電気工業)

16:00-17:20 パネルディスカッション

「超伝導ケーブルの展望と課題」

総合司会 田崎 賢司

座長 仁田 且三

パネラー

青木 五男、上岡 泰晴、林 和彦、

町田 明登、山口 作太郎

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26年度第2回

日時：平成26年6月5日(木) 15:30～17:30

場所：学術総合センター11階 共用会議室

出席者：幹事6名

事務局2名

議事：

(1) 第40回シンポジウムについて

(2) 第84回ワークショップについて

(3) 第6回総会について

(4) 第2回超伝導科学技術セミナーについて

(5) 第17回日米ワークショップについて

(6) FSSTNEWSについて

## 第84回ワークショップ

# 「新しい超伝導体のホットな話題、最新の理解」

本ワークショップではこの数年の“新しい超伝導体”に関する最新の話題と理解を取り上げ、本分野における最近の研究、特に実験現場でもご活躍の気鋭の方々に講師をお願いしました。生々しい議論を通じて、今後の“新しい超伝導体”に関する研究展開や次の新超伝導体探索に対する指針やヒントが浮かび上がってくることを期待しています。

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：一般社団法人 日本物理学会、公益社団法人 応用物理学会、  
公益社団法人 低温工学・超電導学会

日時：平成26年7月22日（火）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

定員：120名

参加費・資料代：

- 超伝導科学技術研究会員：参加費無料、資料代2,000円
- 未踏科学技術協会員：参加費2,000円、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(案)：

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
13:40～14:20	1111相鉄系超伝導体の相図に関する最新の話題	慶應義塾大学		神原 陽一
14:20～15:00	122相超伝導体に関する最新の話題と理解	大阪大学		中島 正道
15:00～15:40	11相超伝導体に関する最新の話題と理解	東京大学		今井 良宗
15:40～16:00	休憩			
16:00～16:30	ユニークな構造を持つ鉄系新超伝導体	東京大学		荻野 拓
16:30～17:00	BiS <sub>2</sub> 系、BiSe <sub>2</sub> 系超伝導体の最新情報と可能性	首都大学東京		水口 佳一
17:00～17:30	次々と出現する新奇超伝導体	産業技術総合研究所		石田 茂之
17:30～17:35	閉会の挨拶	未踏科学技術協会		木村 茂行

参加お申し込みはこちらから：<http://www.sntt.or.jp/~fsst/20140722.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、金子

Phone: 03-3503-4681 Fax: 03-3597-0535 e-mail: [fsst@sntt.or.jp](mailto:fsst@sntt.or.jp)



## 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
日本物理学会／秋季 [物性関係]	H26.9.7～9.10	中部大学 春日井キャンパス (愛知県春日井市)	日本物理学会
応用物理学会／秋季	H26.9.17～9.20	北海道大学 札幌キャンパス (北海道札幌市)	応用物理学会
低温工学・超電導学会／秋季	H26.11.5～11.7	コラッセふくしま (福島県、福島市)	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
27 <sup>th</sup> International Conference on Low Temperature Physics	2014.8.6～8.13	Buenos Aires(Argentina)	<a href="http://lt27.df.uba.ar/">http://lt27.df.uba.ar/</a>
ASC2014	2014.8.10～8.15	Charlotte, NC(USA)	<a href="http://ascinc.org/">http://ascinc.org/</a>
IUMRS-ICA2014	2014.8.24～8.30	Fukuoka University,Fukuoka	<a href="http://www.iumrs-ica2014.org/">www.iumrs-ica2014.org/</a>
ISS2014	2014.11.25-11.27	Tower Hall Funabori,Tokyo	<a href="http://www.istec.or.jp/ISS2014/ISS2014.html">www.istec.or.jp/ISS2014/ISS2014.html</a>

## 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 超伝導テクノロジーセンター 線材開発グループ 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 金子 幸枝	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 一般社団法人未踏科学技術協会

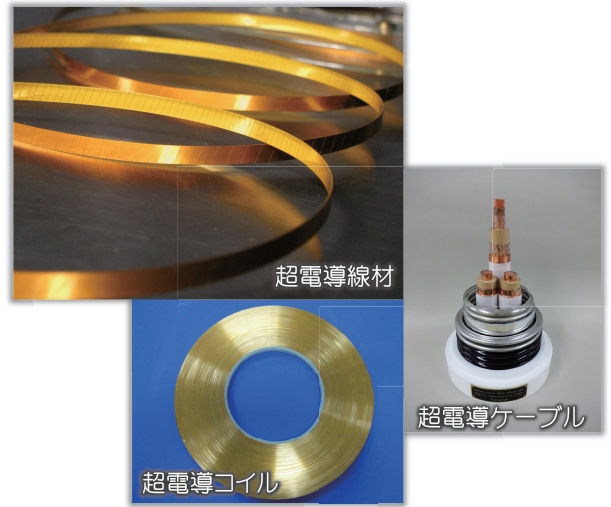
# イットリウム系超電導線材



高温超電導のベストサプライヤー

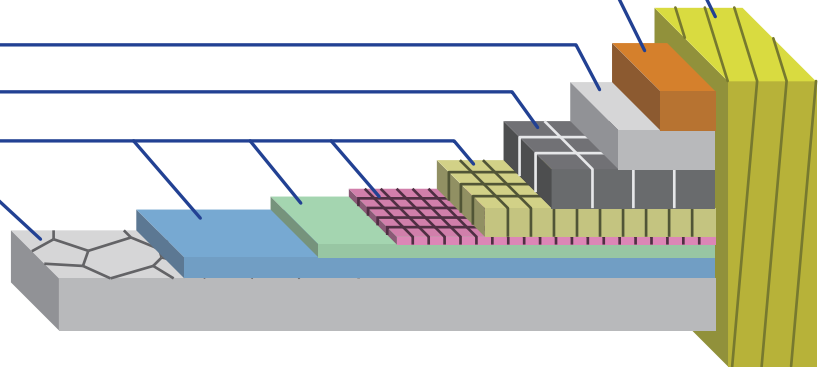
## ■ 特長

- 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 $\mu$ m (突き合せ1重巻き) ×2層
- 安定化層 [Cu] 75, 100 $\mu$ m
- 保護層 [Ag] 2 $\mu$ m ~
- 超電導層 [GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>] 2 $\mu$ m ~
- 中間層 [MgO, etc.] ~ 0.7 $\mu$ m
- 金属基板 [ハステロイ®] 75, 100 $\mu$ m



## ■ 標準仕様

- 線材幅 (5mm, 10mm)、金属基板厚さ (75 $\mu$ m, 100 $\mu$ 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 [ $\mu$ m]	安定化層 [ $\mu$ 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。

株式会社フジクラ

新規事業推進センター 超電導事業推進室

〒285-8550 千葉県佐倉市六崎1440

E-mail ask-sc@jp.fujikura.com

TEL 043-484-3048 FAX 043-484-2472

Web <http://www.fujikura.co.jp>