

発行

一般社団法人
未踏科学技術協会
平成 25 年 1 月 25 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

Forum of Superconductivity	No. 136
Science and Technology News	

<FSST NEWS No.136 目次>

<年頭所感>

「近未来の諸課題と期待」

超伝導科学技術研究会会長／東京大学 下山 淳一 ……2

<トピックス 1>

日本初の高温超電導ケーブル実証試験

住友電気工業 増田 孝人 ……3

<トピックス 2>

鉄系超伝導体 ～発見からの 5 年を振り返って～

産業技術総合研究所 永崎 洋 ……7

<トピックス 3>

磁気アルキメデスを利用した新しい磁気分離技術の展開

大阪大学 西嶋 茂宏 ……15

<会議報告 1>

ASC2012 会議報告

(1) Material 昭和電線ケーブルシステム 木村 一成 ……19

(2) Electronics 国際超電導産業技術研究センター 日高 睦夫 ……20

(3) HighTc Coil 物質・材料研究機構 西島 元 ……21

(4) Large Scale Application 鉄道総合技術研究所 水野 克俊 ……22

<会議報告 2>

ISS2012 田中先生追悼セッション報告

国際超電導産業技術研究センター 田辺 圭一 ……23

<研究室紹介>

(1) 岡山大学大学院 自然科学研究科 計測システム研究室 ……25

(2) 岡山大学大学院 自然科学研究科 地球生命物質科学専攻 ……26

(3) 九州大学大学院工学研究院 材料工学部門 金子研究室 ……27

(4) (株)日立製作所日立研究所 材料研究センター 環境材料プロセス研究部 ……28

(5) 東京大学大学院工学系研究科 応用化学専攻 岸尾研究室 ……29

○第 1 回超伝導科学技術セミナー ～若手技術者向け講習会 ……32

○シンポジウムのご案内 ……33

○研究会の動き ……33

○国内超伝導関連会議／国際会議及び国外の主要な会議 ……34

<年頭所感> 近未来の諸課題と期待

Issues and expectations in near future

超伝導科学技術研究会会長
東京大学大学院 工学系研究科
下山 淳一

Faculty of Engineering, The University of Tokyo
J. Shimoyama



明けましておめでとうございます。皆様方には旧年中の当会へのご協力に対しまして厚く御礼申し上げます。今年も皆様方と一緒に超伝導科学技術の発展を促す活動を展開してまいりますので、引き続いてご協力、ご意見等を賜りますよう、よろしくお祈りいたします。

皆様、ご存知のとおり、一昨年の東日本大震災以降、国内やEU諸国の一部では原発の存廃と再生可能エネルギーを中心に近未来の電力供給の形態が議論されています。一方、米国におけるシェールガス採掘技術の確立は、これまで中東が世界的な主導権を握っていた化石エネルギーの生産・供給の体制を大きく変える可能性を持っています。米国ではこの新しい化石燃料シェールガスへの期待が高まっており、ロシアは東シベリアの天然ガス田の利用を東アジア向けに積極的に進めようとしています。大震災前まで熱心に議論されていた地球温暖化問題が忘れられたかのように、再生可能エネルギーによる発電設備の急速な増加と並行して、化石燃料の利用増が米露で推進され、さらに中国など新興国でも石炭を中心に化石燃料消費量の急速な増加が続いています。

ところで、昨年途中より国内では深刻なヘリウムの供給不足が起こり、ごく一部の研究機関を除いて、超伝導・低温に関わる研究や産業に多大な支障が生じており、今日もこの問題は解決していません。社会生活への影響が小さいものの、まさにヘリウムショックというべき事態です。高温超伝導材料の応用が始まったとはいえ、大半の超伝導機器は冷却にヘリウムを必要とします。ヘリウム不足が長期にわたれば、大量の液体ヘリウムの追加を必要としないNMRやMRIでさえも運転の継続が困難になるなど、超伝導機器の多くは使えなくなります。今回のヘリウム不足は主輸入先の米国における工場のトラブルと新興国での需要増によるものと聞いていますが、そもそもヘリウムは希少な資源で、かねてより需要の増加と天然ガス田の枯渇によって将来は入手が困難で高価になることが懸念されていました。遠い将来、超伝導技術がヘリウムを必要としない時代が訪れる可能性はあります。しかし、当面はヘリウム資源に頼らざるを得ず、ヘリウムの不足が超伝導機器利用の障害となる事態は避けなければなりません。幸い、ナホトカの近くまでパイプラインが建設される予定になっている東シベリア産の天然ガスは比較的高濃度のヘリウムを含んでおり、また、

中東カタルからの輸入増も期待できそうです。オイルショック以降、中東への原油依存度を下げたように、今回のショックを機に米国への依存度の低下が進み、同時に価格の高騰も抑えられれば願っています。

さて、昨年のも明るい話題としては、東電旭変電所における高温超伝導ケーブル(66 kV-3 kA, 240 m)の実系統接続があり、10月29日の接続以後、2ヶ月以上にわたって順調に電力を送り続けています。このNEDOプロジェクトの計画では通電試験を1年以上行うことになっています。今後もトラブルなく、冷却システムを含め超伝導ケーブルの確かな信頼性を示す実績が残ることを期待するとともに、国内での次なる超伝導送電応用が具体化していくことを願っています。一方、国産のビスマス系線材を用いた1 km長のケーブルがエッセンで今年中に、また2.5 km長のものでサントペテルスブルグで2015年に布設される予定があるなど、国内だけでなく世界においても着実な実績を重ねていけば、超伝導ケーブル利用、さらにはその他の超伝導機器利用の効果が社会に広く理解されるようになると思います。また、JSTによる戦略イノベーション研究(S-イノベ)、先端的低炭素化技術開発事業(ALCA)やNEDOの各種プロジェクトから、新しい超伝導機器開発の成果や社会に夢や希望を与える実例が次々と生まれてくる時期に至っており、これらからも目が離せません。

本会は昨年、第78回ワークショップ「再生可能エネルギー導入へ向けた超伝導・低温技術」を3月13日に、第38回シンポジウム「超伝導2012—超伝導が拓いた強磁場応用—」を4月17日に、第79回ワークショップ「3.11 震災を乗り越えて」を7月19日に開催しました。本年も1月16日の第80回ワークショップ「電力グローバルネットワークは実現するのか？」を皮切りに第二期(2008年以降)の活動趣旨“超伝導産業を支える”に沿った諸活動を展開する予定です。また、新しい企画として2月22、23日に超伝導科学技術セミナーを開催します。この企画は、若手の主に企業の研究者に対して広く超伝導に関する知識を持ってもらうこと、若い世代のコミュニティーを構築することによって、今後の超伝導技術を支える人材、世代を強くすることを目指すものです。

最後に読者の皆様のますますのご繁栄を祈念し、年頭の挨拶を結ぶことにいたします。

<トピックス 1>

日本初の高温超電導ケーブル実証試験

The First in-grid operation of HTc Superconducting cable in Japan

住友電気工業株式会社

増田 孝人

Sumitomo Electric Industries, Ltd.

Takato Masuda

1. はじめに

超電導ケーブルは、「電気抵抗がゼロ」、「大電流通電が可能」という超電導の特徴を電力送電に活用しようとするもので、大電流・コンパクト化の効果による送電線路の建設費用の削減や、通電損失の低減(CO₂削減)が期待されている。この超電導ケーブルの実用化に向けて、米国、欧州、韓国、中国などが開発を進めており、実線路での実証試験を進めているところである[1][2][3]。日本においても、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託を受けて、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」を、東京電力(株)、住友電気工業(株)、(株)前川製作所の三社が進めている[4]。このプロジェクトでは、超電導ケーブルシステムの建設、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために、実系統に連系した実証試験を実施することによって、総合的な信頼性を実証するとともに、革新的な高効率送電技術の開発・検証を行うことを目的としている。

超電導ケーブル及び冷却システムを東京電力の旭変電所に建設を行い、昨年10月29日から実系統に接続し、長期運転を開始した。

本稿では、プロジェクトの概要と、実系統接続前に行った検証試験の内容及び、実系統運転の状況について報告する。

2. プロジェクト概要

本プロジェクトでは、都市部の地下送電線を念頭におき、コンパクトな、66 kV級三心一括型の超電導ケーブルを開発することを目標とした。

開発するケーブルの要求仕様を表1に示す。定格の電圧、電流を安定に送電することは重要であるが、それ以外に、交流通電時に発生する交流損失を従来ケーブルの約1/2にするために、冷却効率も考慮して、1 W/m/ph以下となるように目標値を設定した。

また、系統内では定格電流をはるかにこえる事故電流が流れる可能性があるが、その事故電流の条件をシ

ミュレーションにより求め、要求仕様として設定した。

プロジェクトの開発スケジュールを図1に示す。プロジェクトは2007年よりスタートしたが、最初の2年間は、交流損失低減、事故電流対応の要素開発を行い、2009年には、住友電工の工場内に30 m級ケーブルを建設し、各種試験を行いケーブル設計の妥当性を検証した。試験の結果は良好で、設計を確定させ、2010年に旭変電所向けの超電導ケーブル、冷却システムの製造を行い、2011～2012年に旭変電所でのシステム建設及びび性能検証試験を行い、2012年10月に実系統運転をスタートした。

表 1 実証ケーブルの要求仕様

項目	仕様
定格電圧、容量	66 kV. 200 MVA (1.75 kA)
最大過電流	2.625 kA
交流損失	1 W/m/ph @2 kA
事故電流対応	①31.5 kA, 2 sec ケーブルが損傷しない。 ②10 kA, 2 sec(もらい事故) すぐの再送電へ対応できること

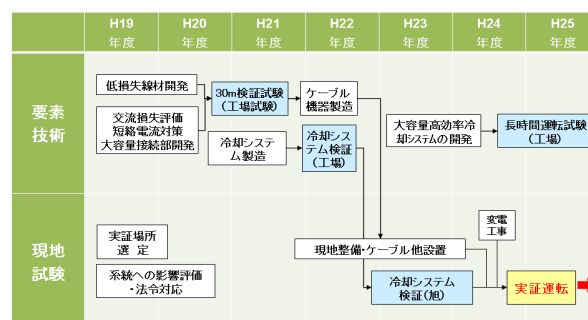


図 1 プロジェクトスケジュール

3. 超電導ケーブル

図2に開発した超電導ケーブルの構造を示す。三相交流電力を送電するために、三本のケーブルコアを断熱管の中に収納する三心一括型を採用している[5]。

ケーブルコアの中の導体は、フォーマの上に住友電工製のビスマス系線材を多層にスパイラルに巻き付けて形成している。フォーマは、銅のより線が用いられており、機械的な剛性を保たせるためと、事故電流を超電導線と平行して流すために用いられる。電気絶縁は、PPLP® (Polypropylene Laminated Paper) が採用され、液体窒素を含浸させた複合絶縁形式をとっている。絶縁層の上部に超電導線を用いてシールド層を形成し、導体電流と逆方向の電流を誘起させて、電界及び磁界を遮蔽する役割を果たしている。これらのコアが、三心に撚られて断熱管の中に収納されている。断熱管は2重

のステンレスコルゲート管と断熱材から形成されており、断熱層を高真空に維持することにより高断熱特性が得られるようになっている。この断熱管の内側とケーブルコアの外側に液体窒素が流れ、ケーブルを冷却している。尚、断熱管外周には、従来ケーブルと同様な防食層が設けられている。

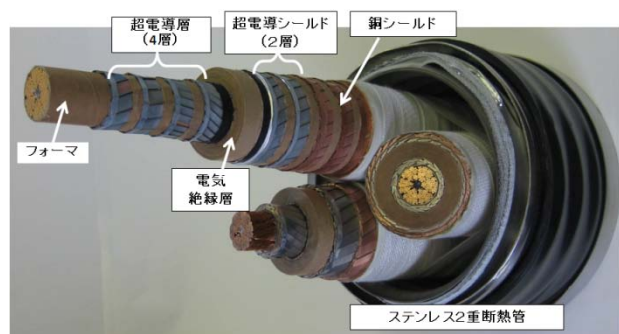


図2 三心一括型超電導ケーブルの構造

4. 実証用超電導ケーブルシステム

3で説明した超電導ケーブルを住友電工大阪製作所にて製造し、実証場所である東京電力・旭変電所にて布設した。旭変電所内の超電導ケーブルシステムのレイアウトを図3に示す

超電導ケーブルは2つのパートに別れ、ジョイント(中間接続部)にて接続されており、全長は240 mである。変電所の敷地の関係で、Uの字型の配置となっている。ケーブルの単長は輸送の制限により300~500 mであるが、より長い送電線路を構築するために必要な接続技術を検証するために、ジョイントを設けている。

ケーブルの両端には、端末(終端接続部)が設けられており、ここで常電導機器と接続されることになる。端末内では、低温と常温の熱的な境界、電気的な境界、低温で発生する熱収縮力の機械的ストレスなどが発生する場所で、端末は検証すべき重要な技術のひとつである。

この端末の片側は、遮断器、断路器等を介して、154 kV/66 kVの変圧器の66 kV側に接続されている。もう片側の端末は、66 kVの母線につながっており、まさに超電導ケーブルを介して、電力が一般家庭や工場等に送電される。尚、超電導ケーブルにトラブルが発生した場合を想定し、超電導ケーブルを介さなくても送電できるように、バイパス回路が設けられている。完成した、実際のシステムの写真を図4、図5に示す[6]。図4は、Uターン部分の写真であるが、超電導ケーブルは実際には管路の中に収納されている。図5は端末部の写真である。

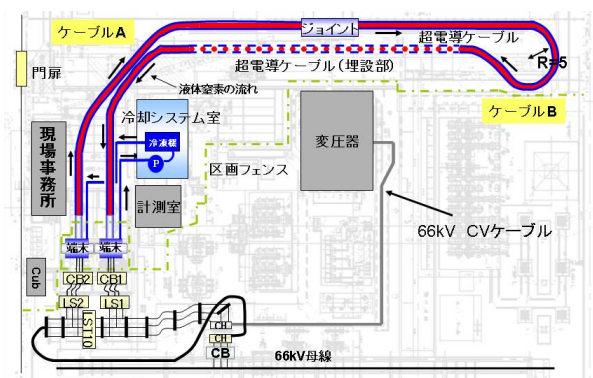


図3 旭変電所内超電導ケーブルシステムの配置



図4 旭変電所超電導ケーブル (Uターン部)



図5 旭変電所超電導ケーブル (端末部)

この超電導ケーブルの内部に液体窒素が流れ、ケーブルが冷却されているが、この液体窒素を循環させ、低温状態に維持するのが冷却システムである。本プロジェクトで開発した冷却システムのレイアウトを図6に示す[7]。

冷却システムは、6台の冷凍機、2台の循環ポンプ、リザーバタンク等からなる。ケーブルを冷却した液体窒素は、暖められて冷却システムに帰ってくるが、リザーバタ

ンクを経て、循環ポンプで押し出され、冷凍機にて冷やされて、ケーブル側に送りだされる。冷凍機は1台が故障しても、運転が継続できるように設計されており、ケーブルを冷却しながら、故障機器の交換やメンテナンスがすることが可能である。循環ポンプについても、1台が故障しても、残り1台で運転できるように冗長性を持たせている。

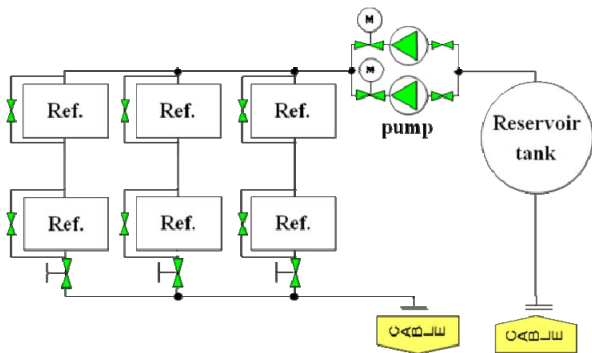


図6 冷却システム配置
(Ref.=冷凍機、Pump=液体窒素循環ポンプ)

5. 系統接続前検証試験

実系統接続前に、超電導ケーブル及び冷却システムが所定の性能を有しているか確認するため、各種試験を行った[7]。

(1) 初期冷却試験

ケーブルを冷却するため、初期冷却を行った。図7に初期冷却時の超電導ケーブルの長手方向の温度変化を示す。尚、温度は、ケーブル内の長手方向に沿って配置された光ファイバーによって、計測されている。最初は、ケーブルの片側から冷却された窒素ガスを流し、徐々にケーブルを冷却していく。ある程度冷却が進んだ後、液体窒素を直接ケーブルに注入し、さらに冷却を行い、ケーブル全長に液体窒素を満たすようにする。ここまで要する時間は約60時間であった。この後、冷却システムを稼働させ、液体窒素循環冷却に移行した。

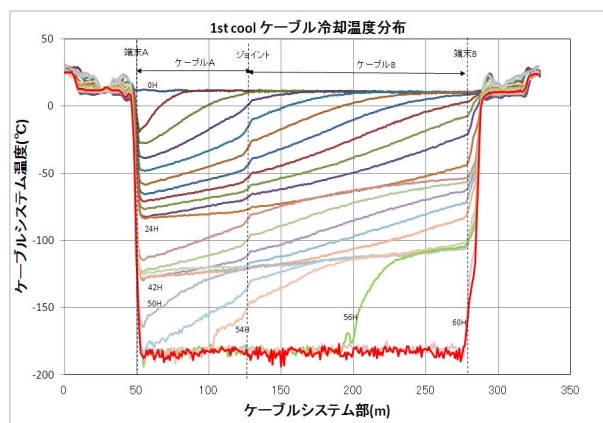


図7 ケーブル初期冷却時の温度分布

(2) ケーブル性能検証試験

(i) 臨界電流測定

臨界電流(I_c)測定は、導体部分での全長測定を実施した。今回はレイアウトの関係で、両末端が隣同士であるが、将来の実形態での測定を考え、2相に片側の末端から電流を流し、他方の末端で2相を短絡する、往復通電方式を採用した。図8に示すように、測定された導体 I_c は $6.4 \text{ kA}@77 \text{ K}$ ($1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 相当の電圧発生で定義)であり、磁場の影響等を考慮した計算値とよく一致した結果が得られた。これにより、ケーブルが布設及び初期冷却により、超電導部分に何らダメージを受けていないことが確認された。

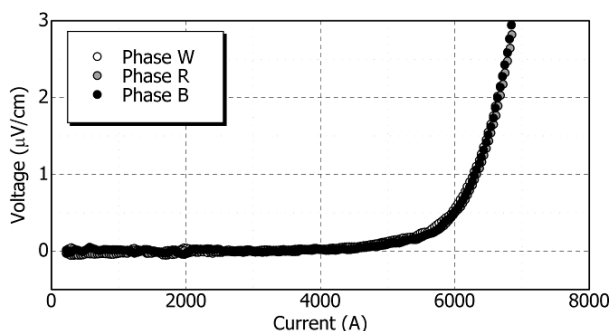


図8 臨界電流測定結果

(ii) 直流課電試験

電気設備技術基準では、系統の対地最高電圧×2の交流電圧、またはその交流電圧の2倍の直流電圧を印加して試験を行うことが規定されている。ここでは、設備の簡便さを考え直流電圧151.8 kVを印加し、異常なく運転できることを確認した。

(iii) 部分放電測定

上記試験のあと、末端の片側のみ系統に接続し、系統電圧を印加し、部分放電(PD)の測定を行った。10分間の測定で、超電導ケーブル内で測定感度(50 pC)以上のPD信号は観測されず、良好であると判断した。

(3) 冷却システム検証試験

冷却システムの検証試験としては、冷凍機、ポンプの単体性能確認試験、温度、圧力の制御試験、冷凍機、ポンプのメンテナンス試験、停電時対応試験等を実施している。そのうち、本システムの運転の一つの特徴である温度制御について以下に記述する。

本システムでは、冷凍機が複数台あるので、ケーブルの負荷に応じて冷凍機台数を決め、必要な冷凍機台数のみ運転する方式を採用している。本システムでは、ケーブル入口温度を $69 \text{ K} \pm 1 \text{ K}$ の範囲に入るように冷凍機台数が制御されている。ケーブル入口温度が 68 K を下回ると運転している冷凍機の台数を1台減じる。逆に

温度が70 Kを越えると運転台数を1台増やす。図9にON/OFF運転時のケーブル入口、出口温度の変化を示すが、長期的に安定した制御ができることを確認している。

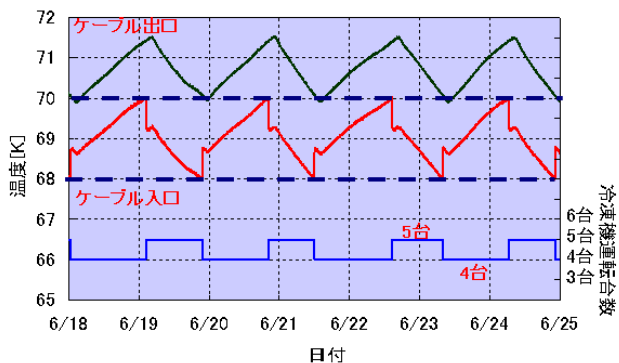


図9 冷凍機台数制御による運転

6. 実系統運転

超電導ケーブル、冷却システムが所定の性能を有していることを確認した後、2012年10月29日に実系統へ接続し、実証運転が開始された[6]。接続後の運転電圧、電流の変化を図10に示す。超電導ケーブル及び冷却システムは自動で運転され、温度、圧力などの運転情報は遠隔にてモニターすることができる。

今後、運転データを蓄積し、送電状態と、超電導ケーブル、冷却システムを組み合わせた解析、評価を行っていく予定である。

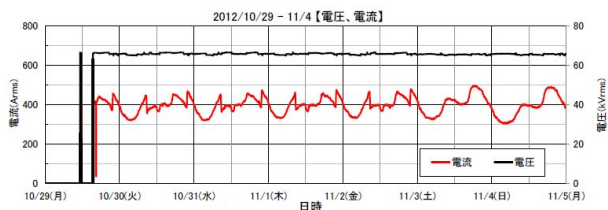


図10 実系統運転時の電圧、電流

7. おわりに

66 kV級の高温超電導ケーブルシステムの開発を行い、日本で初めてとなる実系統運転を開始した。本実証運転は、2014年2月まで行う予定で、長期運転を通じて、超電導ケーブルシステムの安定性、信頼性を検証していく予定である。

参考文献

- [1] J.F.Maguire, et. al., “Installation and testing results of Long Island transmission level HTS cable,” IEEE Transactions on Applied on Superconductivity, Vol.19, pp.1692-1697, 2009.
- [2] P. Tixador, “Development of superconducting power devices in Europe,” Physica C, vol.470, pp.971-979, 2010.
- [3] S.Lee, et. al., “Modeling of a 22.9kV 50MVA superconducting power cable based on PSCAD/EMTDC for application to the Icheon substation in Korea,” Physica C, vol.471, pp.1283-1289, 2011.
- [4] S.Honjo, et.al., “Status of superconducting cable demonstration project in Japan,” IEEE transactions on Applied Superconductivity, vol.21, pp.967-971, 2011
- [5] 増田孝人, 湯村洋康, 渡部充彦, 大屋正義, 本庄昇一, 三村智男, 池内正充, 大野隆介:「電気学会超電導応用電力機器研究会資料」, ASC-09-030.
- [6] NEDO、東京電力株式会社、住友電気工業株式会社、株式会社前川製作所:「日本初「高温超電導ケーブル」の電力系統への連系運転開始」, ニュースリリース、2012年10月29日
- [7] 稲垣芳宏、大屋正義、芦辺 祐一、渡部充彦、湯村洋康、中西辰雄、広田博史、増田孝人、大野隆介、矢口広晴、三村智男、原築志:「電気学会超電導応用電力機器研究会資料」, ASC-12-003

<トピックス 2>

「鉄系超伝導体 ～発見からの5年を振り返って～」

Iron-based superconductors: five years since their discovery

(独)産業技術総合研究所
永崎 洋

National Institute of Advanced Industrial Science
and Technology (AIST)

H. Eisaki

1. はじめに

東京工業大学の神原らによって、鉄系高温超伝導体の発見が報告されたのは2008年2月である[1]。それ以来5年間に経過し、膨大な研究成果が蓄積されている[2]。超伝導研究において一大分野が形成されたことは間違いない。

鉄系超伝導体がここまで注目され、精力的に研究されてきた理由としては、

- (1) 結晶構造が多彩であり、新たな超伝導体の発見、およびそれに伴う超伝導転移温度 (T_c) の上昇が期待されたこと
- (2) 磁性のシンボルであり、超伝導の天敵とも言える鉄を含む物質で出現する高温超伝導は、従来とは全く異なるメカニズムで起こっている可能性が高いこと
- (3) 銅酸化物超伝導体に次ぐ高い T_c は、超伝導応用にとって極めて有望であること

等が挙げられるであろう。

本稿では、上記の点を踏まえて、これまでの5年間で明らかになった、あるいはなりつつある事実を紹介したい。特に、物質のバリエーションの広がり、超伝導機構に関する理解の進展、応用展開の現状について、筆者なりに纏めてみたいと思う。

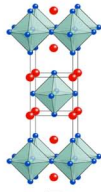
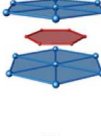
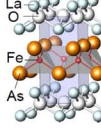
2. 鉄系高温超伝導体の概観

まずは、鉄系超伝導体の特徴をざっくり見てみよう。表1に、鉄系超伝導体の特徴を、銅酸化物高温超伝導体、および MgB_2 と比較して示す。多くの点において、鉄系超伝導体と銅酸化物超伝導体との間には共通点が存在することが見て取れる。例えば、結晶構造が基本構造ユニット(銅酸化物では CuO_2 面、鉄系では Fe_2Pn_2 面、もしくは Fe_2Ch_2 面: Pn, Ch はそれぞれプニコゲン、カルコゲン元素を表す)とブロック層との積層構造で構成されていること、バンド構造が主として $3d$ 遷移金属イオンの d 軌道で形成されていること、また、磁気的な秩

序を有する母物質が存在し、ドーピングによって超伝導が出現すること等は、両者に共通した性質である。一方、超伝導状態の波動関数の対称性(ギャップ構造)を見てみると、銅酸化物が dx^2-y^2 波動的であるのに対し、鉄系では s 波動的であることがわかっており、その点で両者は大きく異なっている。高温超伝導を産み出すメカニズムとしては、スピン揺らぎ、および、軌道揺らぎによる対形成機構が提唱されているが、現時点では決着がつかない。応用研究の観点からは、銅酸化物に匹敵する大きな上部臨界磁場 ($H_{c2}(0)$) を有すること、銅酸化物に比べてその異方性が小さいこと ($\gamma \sim 1-2$)、および不純物による影響が小さいことは、将来の応用を考える上で前向きなメッセージと言えよう。

以下では、この表に示された特徴のそれぞれについて、その元となった研究結果をより詳しく紹介する。

表1 銅酸化物、 MgB_2 、鉄系高温超伝導体の特徴の比較

	銅酸化物 高温超伝導体	MgB_2	鉄系 高温超伝導体
結晶構造	 CuO ₂ 面+ ブロック層	 Mg層+ B層	 Fe ₂ As ₂ 面+ ブロック層
物質の バリエーション	多い(>30種)	1種類	多い(~10種)
$T_{c,max}$	134 K	39 K	56 K
バンド構造	Cu $3d$ x^2-y^2 1バンド	B $2p\sigma, 2p\pi$ 2バンド	Fe $3dxy, dyz, dzx,$ dx^2-y^2, dz^2 5バンド
母物質の 基底状態	反強磁性 (モット)絶縁体	金属	反強磁性金属
超伝導波動関 数の対称性	d 波	s 波	s 波 (+- or ++)
超伝導 メカニズム	磁気的 相互作用	電子-格子 相互作用	スピン揺らぎ/ 軌道揺らぎ
不純物の影響	大	中	小
$H_{c2}(0)$ (H/c)	~100 T	40 T	~100 T
異方性 パラメータ γ	5-7 (YBCO) 50-90 (Bi-based)	3	1-2 (122) 5 (1111)

3. 物質開発の進展

3-1 新たな結晶構造

前述のように、鉄系超伝導体の基本構造ユニットは、 Fe_2Pn_2 二次元面である。この Fe_2Pn_2 面がブロック層と積層することで実際の結晶構造が形成される。銅酸化物の場合と同様、鉄系超伝導体の物質の多彩さは、ブロック層の豊富なバリエーションに起因している。新しいブロック層の発見・開発は即座に新物質の発見をもたらすことになる。

具体的な結晶構造を図1に示す。(a)-(d)は、神原らによる報告後半年以内に発見された物質であり、その化学組成はそれぞれ(a) $LnFePnO$ (Ln :希土類元素) (構成元素比から1111系と称される)、(b) $AeFe_2Pn_2$ (Ae :アルカリ土類元素) (122系)、(c) $FeTe_{1-x}Se_x$ (11系)、 $AFeAs$ (A :アルカリ元素) (111系)である。各物質群でブロック層に相当するのは、 Ln_2O_2 層(a)、 Ae 層(b)、および A_2 層(d)である。(c)の $FeCh$ では、 Ch が-2価であり、層内で電荷中性条件は満たされているためにブロック層は存在しない。各物質群が示す最高の T_c はそ

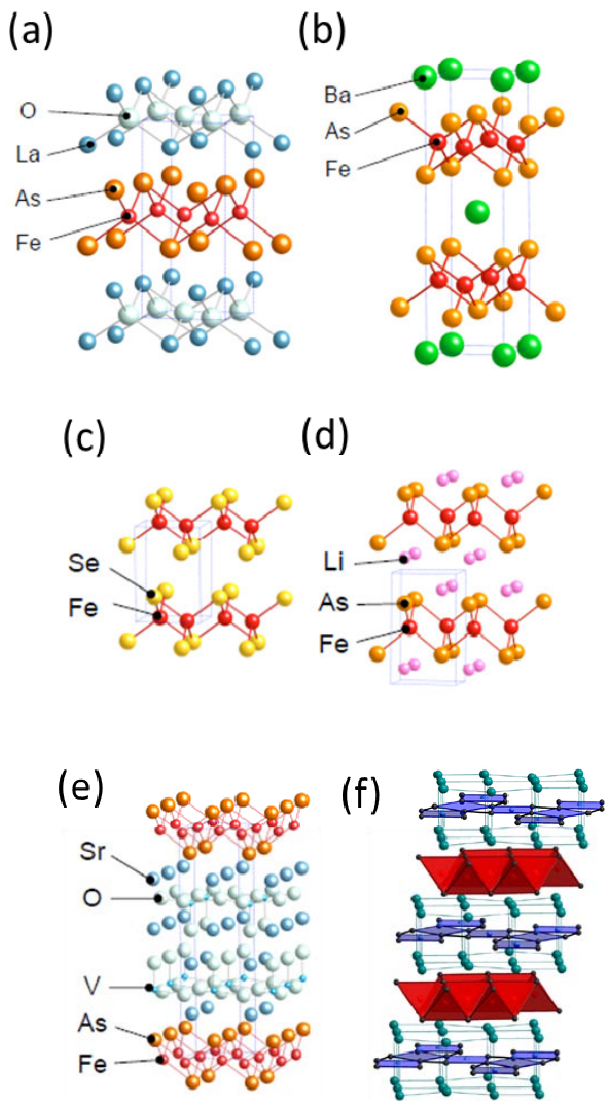


図1 鉄系高温超伝導体の結晶構造

れぞれ55 K ($SmFeAsO_{0.9}F_{0.1}$) [3]、38 K ($(Ba_{0.6}K_{0.4})Fe_2As_2$) [4]、14 K ($FeTe_{0.5}Se_{0.5}$) [5]、21 K ($NaFe_{0.97}Co_{0.03}As$) [6]である。

上記の物質群の結晶構造は、神原らの報告以前から知られていたものであるが、2009年以降には、従来にないブロック層を有する新物質の報告がなされ始めた。(e)は、 Fe_2Pn_2 層間にペロブスカイト層が挟まれた結晶構造

を有しており、その化学式は($Ae_{n+1}M_nO_{3n-1-y}$) (Fe_2Pn_2)もしくは($Ae_{n+2}M_nO_{3n-y}$)(Fe_2Pn_2)($n = 2, 3$) (M :遷移金属、アルカリ土類金属)で表される。30 Åを越える長い c 軸長、 M 元素の豊富なバリエーションが特徴であり、その T_c は1111系に次ぐ47 Kにまで達している[7]。また、2011年には、白金(Pt)とヒ素からなるブロック層(Pt_nAs_8)を有する新物質 $Ca_{10}(Pt_nAs_8)(Fe_{2-x}Pt_xAs_2)_5$ ($n = 3, 4$)の発見が報告された。その T_c は $n = 3$ で13 K、 $n = 4$ で38 Kにまで至る[8]。これら物質群の詳細については、発見者である荻野、野原両氏による解説記事FSSTニュースNo.123「ペロブスカイト酸化層を有する鉄系超伝導体の発見」および、No.131「鉄白金系高温超伝導体の発見」を参照していただきたい。

3-2 ドーピング元素のバリエーション

純粋な新物質ではないものの、正規組成で超伝導を示さない母物質に対して、様々な異種元素で置換することで超伝導化させる試みも功を奏している。表2に、122系の母物質である $BaFe_2As_2$ に対し、Feサイトを他の遷移金属 M で置換した $Ba(Fe_{1-x}M_x)_2As_2$ において超伝導が出現した例を示す[9]。鉄と同数の、あるいはより多くの d 電子数を有する遷移金属の置換によって超伝導が出現することが見て取れる。超伝導を担うFeサイトへの置換によっても20 Kを越える T_c が出現するという特徴は、高々数パーセントのCuサイト置換で超伝導が完全に消失する銅酸化物高温超伝導体とは対照的であり、後述するように、本系の超伝導対称性を判定する要因として注目されている。この傾向は122系に限ったものではなく、1111系、111系においてもFeサイトへの置換によって超伝導が誘起されることが知られている。

表2 $Ba(Fe_{1-x}M_x)_2As_2$ の T_c

Cr non-SC	Mn non-SC	Fe	Co 25K (x=0.07)	Ni 20K (x=0.10)	Cu non-SC
Mo	Tc	Ru 21K (x=0.45)	Rh 24K (x=0.12)	Pd 19K (x=0.11)	Ag
W	Re	Os	Ir 22K (x=0.25)	Pt 16K (x=0.08)	Au

3-3 鉄カルコゲナイド系の進展

2010年になって、 $T_c=30$ Kを有する新超伝導体 AFe_2-ySe_y ($A=K, Rb, Cs$)の発見が報告された[10]。当初は、122構造を有すると考えられていたが、詳細な構造解析の結果、図3に示すように、Feサイトに多くの元素欠損を有すること、更に、 A イオンが結晶内を移動することによって乱れが入りやすく、超伝導相と絶縁相に容易に相分離する傾向があることが明らかとなってきた[11]。

単結晶を用いた測定では、500 K付近で結晶構造や磁気構造に大きな変化があることが示されているが、これも、*A*イオンの秩序化、相分離に起因するものとして理解されている[12]。また、圧力下の輸送現象測定によって、本物質の T_c が10 GPa付近で一旦ゼロに落ちた後、12 GPaで47 Kにまで急上昇するとの報告もなされている[13]。

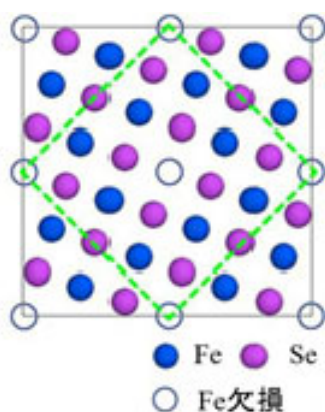


図2 AFe_{2-y}Se_yの欠損構造

更により最近になって、高压の超臨界アンモニア流体を溶媒とするアモナーマル法により、FeSeに様々なアルカリ金属およびアルカリ土類金属 (*A*=Li, Na, Ba, Sr, Ca, Yb, Eu)をインターカレートすることができるとの報告がなされた[14]。その T_c は、NaFe₂Se₂で45 K、Ba_{0.8}Fe₂Se₂で39 Kに達する。この物質群は上記のAFe_{2-y}Se_yと異なりFeサイト欠損は存在しないとのことである。詳細な構造解析が待たれる。

一方、*A*イオンを含まないFeSe (11系)は、高压下でその T_c が37 Kにまで上昇することが報告されていたことから[15]、更なる T_c の上昇が期待されていたが、昨年、分子線エピタキシー法を用いてSrTiO₃基板上に作製された1ユニットセルFeSeで、その T_c が77 Kに達したとの報告がなされた[16]。筆者によれば、高い T_c はFeSeとSrTiO₃の界面でのみ出現しているために、ゼロ抵抗は観測されず、超伝導のオンセットは、走査型トンネル分光 (STS)において超伝導ギャップが開き始める温度で定義したとのことである。その真偽は今後の追試によって明らかとなるであろうが、鉄系超伝導体における一層の T_c の上昇を期待させる結果として興味深い。

4. 電子状態、超伝導メカニズムはどこまで明らかになったのか?

4-1 電子相図の概観

鉄系超伝導体では、銅酸化物超伝導体と同様、多くの場合、超伝導は異種元素の置換によって実現する。銅酸化物同様、ドーピングによる電子状態の変化を理解することが超伝導機構の解明に資するであろうとの期待の元、これまでに数多くの実験、理論的研究がなされてきた。図3に、代表例として、Ba(Fe_{1-x}Co_x)As₂の電子相図を示す[17]。5個の*d*電子数を有するFe²⁺が6個の*d*電子数を有するCo²⁺で置換されることにより、系には電子がドーピングされる。Feの価数が+2であるBaFe₂As₂は、 $T_N = 135$ Kで反強磁性磁気秩序を示す。Coの置換と共に磁気秩序は抑制され、 $x = 0.04$ で超伝導が発現する。 T_c はドーピング量によって敏感に変化し、過剰のドーピングは T_c を却って下げてしまう。同様の電子相図は、+2価のBaイオンを+1価のKイオン (ホールドーピングに相当)、あるいはAsイオンをPイオン (この場合は等価数イオンの置換で、化学的圧力効果に相当する)においても得られている。後者については、笠原氏による詳細な解説記事 (FSSTニュースNo.127)を参照されたい。

母物質における反強磁性長距離秩序の存在、およびドーピングによるその抑制と超伝導の出現は、銅酸化物と同様である。しかしながら、鉄系超伝導体は、(1)母物質が金属的伝導を示している点、および、(2)超伝導出現にとって、必ずしもキャリア (ホールもしくは電子)のドーピングを必要としない点、において銅酸化物とは異なっている。

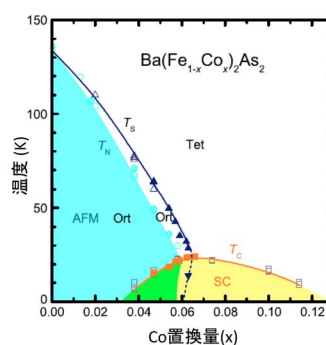


図3 Ba(Fe_{1-x}Co_x)As₂の電子相図

4-2 バンド構造の特徴

ドーピングが十分にされた金属状態では、Feの5つの3*d*軌道すべてがフェルミ面付近の電子状態に寄与していると考えられている。図4に、バンド計算から求められた1111系のフェルミ面の形状を示す[18]。 Γ 点 (0,0)、およびM点 ($\pi,0$)にそれぞれ複数のホール面、および電子面が存在するのがその特徴である。このバンド構

造は、実際に角度分解型光電子分光 (ARPES) によって観測されており、バンド計算と定性的に一致する結果が得られている[19]。また、バンド構造の概形は、結晶構造や、ニクトゲンとカルコゲンの違いによらずほぼ同様であることがわかっている。

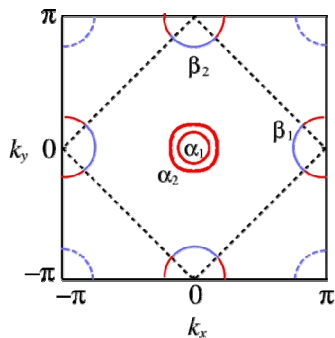


図4 LaFeAsO_{0.9}F_{0.1}のフェルミ面の形状

4-3 母物質の磁気・構造秩序

母物質の示す磁気秩序には、(1)その磁気秩序に先立って、正方晶から斜方晶への構造相転移が引き起こされる(図3の T_s が構造相転移温度に相当する)、また、(2)そのスピンの向きがFe₂As₂面内で異方性を有する、という特徴がある。BaFe₂As₂における例を図5に示す。斜方晶相では a 軸のほうが b 軸よりも0.36%長くなる[20]。また、スピン配列のパターンは、 a 軸には反強磁性的、 b 軸には強磁性的であり、その大きさは約0.9 μ_B と見積もられている[21]。後述するように、この磁気秩序構造を表すベクトル $Q = (\pi, 0)$ は、前述の図4に示された、電子面とホール面間を結ぶネスティングベクトルとほぼ一致しており、スピン揺らぎによる超伝導メカニズムの根拠となっている。

なお、11構造の母物質であるFeTeにおいても、磁気・構造秩序が存在しているが、スピンの配列は他とは異なり、ダブルストライプ型と呼ばれる構造をとることがわかっている[22]。磁気モーメントの大きさも約2.25 μ_B と大きいことから、11系の磁気秩序の起源は鉄ヒ素系とは異なる野ではないかとの指摘もなされている。また、KFe_{2-y}Se_yについても、3.3 μ_B にも及ぶ大きな磁気モーメントの存在が報告されている[23]。

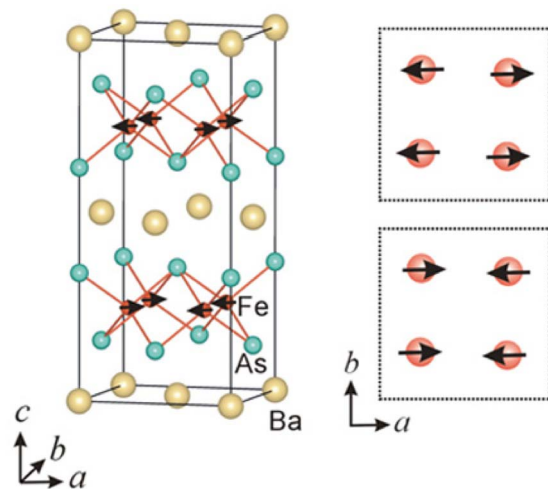


図5 BaFe₂As₂の磁気構造

4-4 超伝導ギャップの対称性

超伝導機構を議論する上で、その波動関数(超伝導ギャップ)の対称性の決定は避けて通れない。初期の議論の方向性を決定づけたのは、PrFeAsO_{1-y}を対象としたマイクロ波吸収[24]、および、Ba_{1-x}K_xFe₂As₂ ($x = 0.4$)に対するARPES[19]実験である。両実験結果はともに、フェルミ面の全域で超伝導ギャップが開いている(ノードのない)、いわゆる s 波的な状態が出現していることを明瞭に示すものであった。しかしながら、引き続いて行われたBaFe₂(As_{1-x}P_x)₂を対象とした一連のマイクロ波吸収実験では、全てのドーピング領域においてノードの存在を示す結果が得られ[25]、更に、Ba_{1-x}K_xFe₂As₂においても、 $x = 1$ の組成であるKFe₂As₂を対象としたARPESによってノード構造が観測される(図6: FSST ニュース No.135 岡崎氏「低温超高分解能レーザーARPES装置の開発と鉄系超伝導体KFe₂As₂における超伝導ギャップの観測」も参照のこと)に至って、鉄系超伝導体の超伝導ギャップ構造は必ずしも普遍的ではないことが明らかとなった。現在の一般的な認識は、「ノードのない状態、すなわち s 波状態を基本としつつ、状況に応じて(偶発的に)フェルミ面の一部にノードが入り込む」というものである。

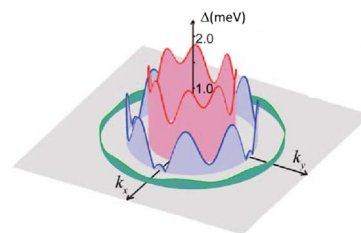


図6 KFe₂As₂のホール面の超伝導ギャップの大きさ
LaFeAsO_{0.9}F_{0.1}のフェルミ面の形状

4-5 超伝導機構は?

鉄系超伝導体の発見当初から、超伝導機構の起源としては、スピン揺らぎが最有力候補として考えられてきた。そもそもスピン揺らぎのエネルギースケールは1000 K以上と、電子-格子相互作用に比べて遙かに大きいことから、高温超伝導の候補として挙げられるのが常であるが、鉄系超伝導体の場合は特に、前述した多バンドの形状がスピン揺らぎに有利に働くとの指摘がなされたのである。図7 (a)に再度示すように、鉄系超伝導体のフェルミ面を形成している Γ 点周りのホール面とM点回りの電子面は、丁度、波数 $Q = (\pi, 0)$ の並進操作によって互いに重なる。このバンド間の重なり(ネスティング)は、同じ波数をもつ反強磁性スピン揺らぎを発達させ、そのスピン揺らぎを実効的な引力としてクーパー対が形成されるというものである。ただし、スピン揺らぎは本質的には斥力相互作用であるため、実現する超伝導状態は、フルギャップで、かつネスティングベクトルの行き先で秩序パラメータの符号が互いに反転する $s+$ -波状態となる[26]。現時点では、このスピン揺らぎによる超伝導出現機構が最も一般的に受け入れられていると良いであろう。

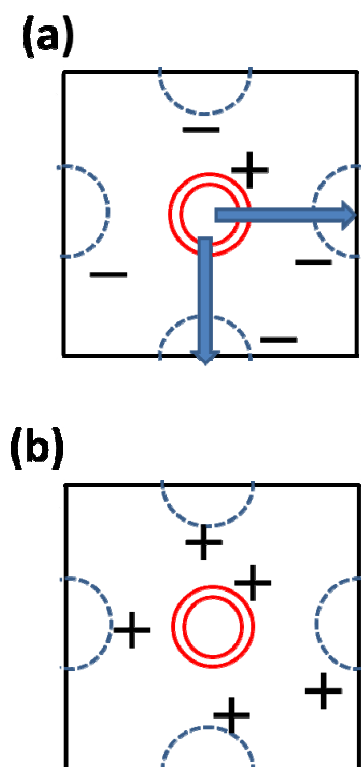


図7 鉄系超伝導体で提唱されている $s+$ -波状態 (a)と $s++$ -波状態 (b)のギャップ構造。(a)中の矢印はネスティングベクトル

上記のシナリオを検証するためには、バンド間でその秩序パラメータの符号反転が起こっているかどうかを調

べる必要がある。花栗らは、超伝導状態における磁性不純物周りの準粒子干渉パターンが、符号反転する場合としない場合で逆の傾向を示すことを切り口として、FeSeを対象とした磁場中 STS 実験を行うことにより[27]、符号反転と整合する実験結果を得た。また、Chenらは、1111系多結晶とNbで形成されるジョセフソンリング中の磁束密度を観測し、半整数磁束量子が観測されたことから、秩序パラメータに符号反転があると結論づけている[28]。

上記の結果はいずれも $s+$ -対称性を支持するものであるが、符号反転を伴う $s+$ -波状態は、不純物によるバンド間散乱によってその T_c は大きく減少する筈である。この結果は、鉄系超伝導体で観測されている小さな不純物効果とは一見矛盾するように見える。実際、佐藤らは、鉄系超伝導体における T_c の不純物効果を定量的に評価し、その大きさはMgB₂並みに小さいと結論づけ、その結果を元に、符号反転の存在しない、通常の $s++$ -波状態が実現している可能性を提唱した[29]。

このような背景のもと、紺谷ら、および、大野らはそれぞれ独立に、電子-格子相互作用をベースとした超伝導理論を提案した。ここで考えられているのは、通常の電子-格子相互作用ではなく、鉄イオンの振動が系の対称性を下げするために引き起こされる d 電子の軌道間散乱(例えば d_{xy} 軌道から d_{yz} 軌道への散乱)によって「軌道揺らぎ」が発達し、これを媒介として符号反転の存在しない、 $s++$ -波状態の超伝導が実現するというものである[30]。

現時点では、スピン揺らぎと軌道揺らぎのどちらがより支配的かについては結論がついていない。組成によって、あるいは物質によって両者の寄与が異なっているという可能性もある。この問題は超伝導機構の理解に留まらず、鉄系超伝導体の電子相図の全容を解明するためにも重要であり、早急な究明が望まれる。

尚、KFe_{2-x}Se₂のARPESの結果によれば、この系では電子面のみが存在し、ホール面は存在しないとの報告もなされている[31]。試料の質の問題もあり、現時点で実験結果を額面通り信用して良いかどうかは疑問が残るが、その結果が本当であれば、本物質では、前述した電子-ホール面間のネスティングは存在しないことになる。研究の流れが大きく展開する可能性もあり得る。今後の研究の推移を注視すべきであろう。

4-5 最近の話題:母物質近傍の異常な物性と「ネマティック状態」

前述のように、鉄系超伝導体の母物質近傍では、構造相転移と磁気相転移が観測されるが、このとき、系の電子状態に顕著な異方性が出現することが近年明らか

になっている。例を挙げると、(1)電気抵抗では、 b 軸方向の電気抵抗率が a 軸に比べて高くなる[32]、(2)STSにより、一次元的な準粒子干渉パターンの分散が観測される[33]、(3)ARPESで、フェルミ面が2回回転対称性を示すこと[34]等である。この起源について、異方的なスピンの揺らぎ[35]、またはFeの $3d_{xz}$ 、 $3d_{yz}$ 軌道が関与した軌道秩序[36]が原因であるという提案がなされている。(詳細は、中島氏による解説記事(FSSTニュースNo.129)を参照されたい。)

吉澤らは、 $BaFe_2As_2$ の弾性的性質を調べ、結晶構造を正方形から斜方晶に変形させる弾性定数 C_{66} が、転移温度に向かって、80%におよぶ極めて巨大なソフト化を示すことを明らかにした[37]。この原因として、低温で軌道秩序が出現している可能性を指摘しており、これが前述の軌道揺らぎによる $s++$ 超伝導出現の大きなよりどころとなっている。

更に、笠原らは、結晶構造転移温度以上においても、その電子状態が自発的に破れ、2回回転対称性を示す兆候を発見したと報告した[38]。この対称性を破った状態は、液晶ディスプレイなどで用いられるネマティック液晶との類似性から、ネマティック電子状態と呼ばれる。同様の2回対称性を有する電子構造は、銅酸化物高温超伝導体の「擬ギャップ相」においても見いだされることから、高温超伝導発現機構とネマティック電子状態の関係が注目されている。

5. 実用化への道

これまで、1111系、122系、111系、11系については、単結晶、薄膜試料共に良質な試料が作製され、系統的なポテンシャル評価が遂行されている。また、線材、デバイスについても試作・評価が開始されつつある。

5-1 磁場中の超伝導特性

前述の表1で示したように、超伝導材料としての鉄系超伝導体は、50 Tを優に超える大きな上部臨界磁場($H_{c2}(0)$)と小さな異方性(122系の場合で1~2)がその特徴である。更に、不純物の超伝導特性に与える影響も小さいことから、原理的には、高磁場で動作可能なマグネット線材応用が期待される。図8に、鉄系超伝導体を含む種々の超伝導体の温度-磁場相図を示す[39]。ここで、実線は上部臨界磁場(H_{c2}/I_c)、破線は不可逆線である。この図から、鉄系超伝導体は、マグネット応用として興味深い5 T < H < 50 Tの範囲において、20 Kにおける動作が可能であることが見て取れる。

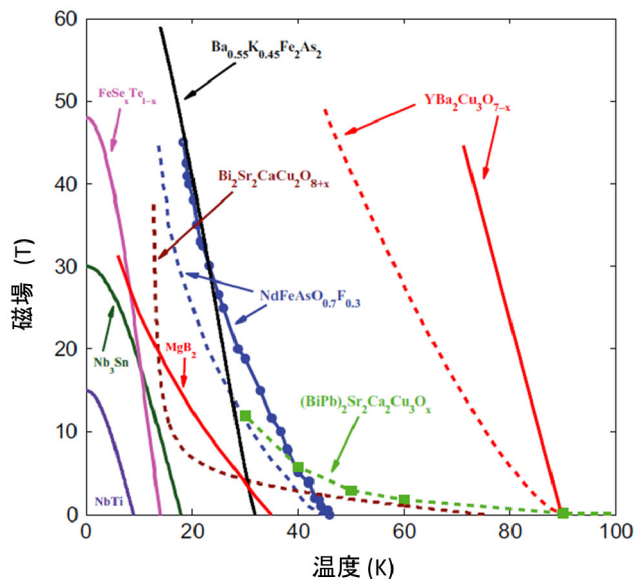


図8 様々な超伝導体の温度-磁場相図。実線、点線はそれぞれ上部臨界磁場および不可逆線を示す。

5-2 粒界特性

線材応用を考えた場合、結晶粒内での特性だけではなく、粒界特性も問題となってくる。片瀬らは、パルスレーザー法を用いて、MgOと(La,Sr)(Al,Ta)O₃のバイクリスタル基板上に $Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$ 薄膜を作製し、傾角粒界における臨界電流密度を評価した。その結果は、臨界電流密度が傾角9°に至るまで、1 MA/cm²以上の高い値を維持することを示すものであった。この値は、YBCOの臨界角である3-7°よりも大きく、鉄系超伝導体の実用化に期待を持たせる結果と言えよう [40]。

5-3 線材作製

これまで、1111、122、11系試料を対象として、パウダーインチューブ(PIT)法を用いた線材の試作が行われている。表3に、現時点においてそれぞれの物質群で得られている線材のトップデータを示す[41]。

表3 鉄系超伝導体の線材の特性値

化学組成	シース	T_c (K)	J_c (Acm ⁻² , 4.2K)	備考
SmFeAsO _{1-x} F _x	Ag	54	4000(@0T)	Ex situ
Ba _{0.6} K _{0.4} Fe ₂ As ₂	Ag/ Cu	36	10 ⁵ (@0T) 10 ⁴ (@10T)	Ex situ HIP
FeSe	Fe	10.5	1000(@0T) 30(@10T)	In situ 七芯線

いずれの物質系においても、PIT法による線材作製が可能であることがわかっている。シース材としてはAgが広く用いられているが、FeSeでは、Feシース材にSeを

詰めた、いわゆるIn situ法も有効であることが示されている。最高の特性値は122系で得られており、 J_c は現段階で10 Tの磁場中で 10^4 A/cm² にまで至る。122系の J_c 阻害要因は、粒界に析出する不純物(アモルファス酸化物)であると考えられている。フィラメント材料の純良化、および高密度化が直近の課題として挙げられる。

6 まとめと今後の展望

2008年の発見以来、鉄系高温超伝導体の研究は極めて速いペースで進行している。 T_c の最高値は、初期に記録された56 Kから未だ上昇していないとはいえ、物質のバリエーションは着実に広がりを見せている。銅酸化物高温超伝導体では、 T_c の最高記録が達成されたのが、1986年のランタン系発見から7年後の1993年であったことを考えると、鉄系超伝導体においても、今後更に高い T_c を有する物質が見つかることは十分あり得るだろう。また、鉄カルコゲナイドに関しては、その T_c が窒素温度を超えそうな兆候も見いだされている。今後の展開を注視したい。

鉄ヒ素系超伝導体の発見は、高温超伝導に至るルートが銅酸化物に限らないことを実証したものとと言える。鉄系超伝導体の発見を機に、更に新しい芽を探そうという機運が高まっている。SrPtAs ($T_c = 2.4$ K)[42]やLaCo₂B₂ ($T_c = 4$ K) [43]等、その流れに沿って様々な新超伝導体が見つかっている。中でも、水口らによって発見されたBi₄O₄S₃ ($T_c = 4.5$ K)やLa(O,F)BiS₂ ($T_c = 10.6$ K) [44]に代表される一連の超伝導物質は、BiS層状構造に起因する物質バリエーションの豊富さという点で注目される。どのような物質群が発見され、どこまで T_c が上がるか、今後の発展が期待される。

電子状態の特徴という点では、鉄系超伝導体は、反強磁性秩序に隣接し、ドーピングによって超伝導が出現する等、銅酸化物と多くの類似点を有する。しかしながら、出現する超伝導対称性は、銅酸化物が d 波形的であったのに対し、鉄系超伝導体は s 波形的である。様々な実験的・理論的研究の積み重ねにより、その超伝導の背後にあるのは、「多バンド系」における「強いスピン、もしくは軌道揺らぎ」であることが明らかとなってきた。これらの要素の絡み合いにより、ネマティック電子相をはじめとする新奇な電子相・電子秩序が出現している可能性も指摘されている。銅酸化物超伝導体が、「ドーピングされたモット絶縁体の物理」という研究分野を産み出したと同様、鉄系超伝導体の発見を契機として、新たな研究分野が誕生する可能性は高い。

応用面においては、少なくともこれまで得られている結果は前向きなものが多い。本稿では述べなかったが、デバイス開発においては、ジョセフソン接合やそれを用

いたSQUID素子の作製は既に行われている[45]。銅酸化物に比べ、その進展は極めて順調だと言えよう。

本稿で紹介した内容は、鉄系超伝導研究のごく一部である。これまでに、より詳細なレビューが数多く出版されている。興味のある読者は、これら専門的なレビューもご参照頂きたい[46]。

参考文献

- [1] Y. Kamihara *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **130**, (2008) 3296.
- [2] 超伝導体文献データベース登録数は2013年1月時点で2600本を超えている。
http://riodb.ibase.aist.go.jp/sprcnd_etl/DB013_jpn_top_n.html
- [3] Z. A. Ren *et al.*, Chin. Phys. Lett. **25**, (2008) 2215.
- [4] M. Rotter *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, (2008) 107006.
- [5] F. C. Hsu *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **105**, (2008) 14262.
- [6] D. R. Parker *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, (2010) 057007.
- [7] H. Ogino *et al.*, Appl. Phys. Lett. **97** (2010) 072506; H. Ogino *et al.*, Appl. Phys. Express **3** (2010) 063103.
- [8] S. Kakiya *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 093704.
- [9] L. J. Li, *et al.*, New J. Phys. **11**, (2009), 025008; N. Ni *et al.*, Phys. Rev. **B 80**, (2009), 024511; S. A. Sharma *et al.*, Phys. Rev. **B 81**, (2010), 174512; X. F. Zhu *et al.*, Phys. Rev. **B 81**, (2010), 104525.
- [10] J. Guo *et al.*, Phys. Rev. **B 82** (2010), 180520 (R); A. F. Wang *et al.*, Phys. Rev. **B 83** (2011) 060512 (R); A. Krzton-Maziopa *et al.*, J. Phys. Condes. Matter **23** (2011) 052203.
- [11] Z. Wang *et al.*, Phys. Rev. **B 83** (2011) 140505 R.
- [12] R. H. Liu *et al.*, Europhys. Lett. **94** (2011) 27008.
- [13] L. Sun *et al.*, Nature **483** (2012) 67.
- [14] T. P. Ying *et al.*, Scientific Reports **2**, 426 (2012)
- [15] S. Margadonna *et al.*, Phys. Rev. **B 80** (2009) 064506.
- [16] Q. Y. Wang *et al.*, Chinese Phys. Lett. **29** (2012), 037402
- [17] S. Nandi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, (2010) 057006.
- [18] K. Kuroki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, (2008) 087004.

- [19] H. Ding *et al.*, Europhys. Lett. **83**, (2008) 47001.
- [20] M. Rotter *et al.*, Phys. Rev. B **78** (2008), 020503(R) (2008).
- [21] Q. Huang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, (2008) 257003.
- [22] W. Bao *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 247001 (2009).
- [23] W. Bao *et al.*, Chinese Phys. Lett. **28** (2011) 086104.
- [24] K. Hashimoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 017002.
- [25] K. Hashimoto *et al.*, Phys. Rev. **B 81**(2010) 220501.
- [26] I. I. Mazin *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, (2008), 057003
- [27] T. Hanaguri *et al.*, Science **328** (2010) 474.
- [28] C.-T. Chen *et al.*, Nature Physics **6** (2010) 260
- [29] M. Sato *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **79** (2009) 014710.
- [30] H. Kontani and S. Onari, Phys. Rev. Lett. **104**, 157001 (2010), Y. Ohno *et al.*, Solid State Comm., **152**, (2012) 701.
- [31] Y. Zhang *et al.*, Nature Materials **10**, (2011), 273.
- [32] M. A. Tanatar *et al.*, Phys. Rev. **B 81**, (2010), 184508 (2010); J.-H. Chu *et al.*, Science **329**, (2010), 824.
- [33] T.-M. Chuang *et al.*, Science **327**, (2010)181.
- [34] T. Shimojima *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, (2010) 057002.
- [35] C. Fang *et al.*, Phys. Rev. **B 77**,(2008) 224509; C. Xu, M. Muller, and S. Sachdev, Phys. Rev. B **78**, (2008) 020501(R); I. I. Mazin and M. D. Johannes, Nat. Phys. **5**, (2009)141; R. M. Fernandes, Phys. Rev. Lett. **105**, (2010) 157003.
- [36] C. C. Lee, W. G. Yin, and W. Ku, Phys. Rev. Lett. **103**, (2009) 267001; F. Kruger *et al.*, Phys. Rev. **B 79**, (2009) 054504; Z. P. Yin and W. E. Pickett, Phys. Rev. **B 81**, 174534 (2010); M. Daghofer *et al.*, Phys. Rev. **B 81**, 180514(R) (2010); W. Lv, F. Kruger, and P. Phillips, Phys. Rev. **B 82**, 045125 (2010).
- [37] M. Yoshizawa *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012), 24604.
- [38] S. Kasahara *et al.*, Nature **486** (2012) 382.
- [39] A. Gurevich, Nature Materials. **10** (2011) 535.
- [40] T. Katase *et al.*, Nature Commun. **2** (2011) 409.
- [41] M. Fujioka *et al.*, Appl. Phys. Express **4** (2011) 063102; J. D. Weiss *et al.*, Nature Materials **11** (2012) 682; T. Ozaki *et al.*, J. Appl. Phys. **111** (2012) 112620.
- [42] Y. Nishikubo *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 055002.
- [43] H. Mizoguchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, (2011), 237001
- [44] Y. Mizuguchi *et al.*, Phys. Rev. **B 86**, (2012) 220510(R); Y. Mizuguchi *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., **81** (2012) 114725.
- [45] T. Katase *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 082001.
- [46] 日本語のレビューとしては、日本物理学会誌 64 (2009) 11 月号に、鉄系超伝導体のレビューが掲載されている。より最近のレビューとしては、前田京剛、今井良宗、高橋英幸、固体物理 **46**, (2011) 453. 英語の詳細なレビューとしては、K. Ishida, Y. Nakai, and H. Hosono, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, (2009), 062001; D. C. Johnston, Advances in Physics **59**, (2010); G. R. Stewart, Rev. Mod. Phys. **83** (2011), 1589 が挙げられる。

<トピックス 3>

磁気アルキメデスを利用した 新しい磁気分離技術の展開

Development of new magnetic separation technology with magneto-Archimedes method

大阪大学工学研究科環境エネルギー工学専攻
西嶋 茂宏

Division of Sustainable Energy and Environmental
Engineering, Osaka University
S. Nishijima

1. はじめに

混合物質や懸濁物質からそれらの磁化率の差を利用して特定の物質を分離する方法が磁気分離である。磁気力は、対象物質の体積と磁化と外部磁場の勾配の積に依存するので、磁化を大きくしたり、磁場勾配を大きくしたりする事で分離効率を増加させることがなされてきた。具体的には、常磁性材料や反磁性材料を対象にして、外部磁場を大きくして磁化を大きくし、磁気フィルターを導入して高勾配磁場を構成することである。このようにして、常磁性材料、場合によっては反磁性材料をも分離することができるようになったのである。この手法は高勾配磁気分離(HGMS)と呼ばれる。しかしながら、この手法では工業的な応用に答えるような高速度の処理が困難であったため、分離対象物に選択的に強磁性微粒子を付着させる、“磁気シーディング法”が開発された。この手法が開発されたことにより、HGMSの応用の範囲が格段に広がったと言える。例えば、廃水の浄化がそうである。

一方、反磁性材料を常磁性媒体の中に懸濁させ、磁場空間に配置することで、反磁性物質が浮上するという、磁気アルキメデス効果が発見された[1]。この手法は、後述するが、反磁性物質に効果を発揮する。

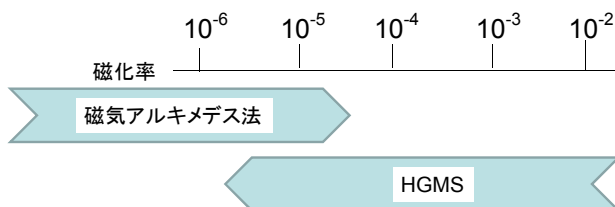


図1 対象物質の磁化率と磁気アルキメデス法とHGMSの応用範囲

また、近年、条件を整えれば、常磁性物質にも応用が可能であることが明らかになり、その応用の範囲は拡大した。図1にそれぞれの手法の応用が可能なおおよその範囲を対象物質の磁化率によって示した [2]。この図から、ほとんどの物質は、HGMSと磁気アルキメデス法の併用で分離が可能となることが見て取れる。すなわち混合物質の分画が、磁気を利用した物理的方法で可能になることが明らかになったのである。

混合物の分画としての具体的応用を考えると、むしろ、HGMSで対処できない物質の方が多い。このため、前述の磁気シーディング法が開発されてきたのである。一方で、反磁性物質を中心とした磁気アルキメデス法が発見され、この現象を分画に利用する事が考えられたが、必ずしも実用化したとは言えなかった。それは、対象とする材料の磁気的性質と密度の関係で、分離効率が悪かったり、単純な磁気アルキメデス法で対応できない対象物もあったりしたからである。最近、これらの問題の解決を可能にする手法が見出され、急速にその実用化が検討されるようになってきた。

ここでは、主に磁気アルキメデス法について述べる。また、その具体的応用として、廃蛍光体の分画についての検討結果を述べ、磁気アルキメデス法の可能性について報告する。

2. 磁気アルキメデス法

反磁性材料を常磁性媒質内に分散させ、磁場(および磁場勾配)内に静置すると、常磁性沈降する材料でも通常は浮遊するようになる。この現象は磁気アルキメデス現象と呼ばれている。ここで印加される磁場方向は鉛直上向きである。直感的にこの現象を理解しようとすると、次のようになる。磁場によって媒質が重くなり、物質に働く浮力が増加する、一種の重液分離である。反磁性物質では磁気力は浮力を増加する方向に働くので、容易に比重差を打ち消すのである。バランスする状態を定量的に示すと以下のようなになる。

$$-\frac{(\chi_f - \chi_p)}{\mu_0} B \frac{\partial B}{\partial z} + (\rho_f - \rho_p)g = 0 \quad (1)$$

ここで、 χ_f , χ_p はそれぞれ媒質と材料の磁化率であり、 ρ_f , ρ_p は密度である。磁気力の正負について議論する。座標軸は、ここでは鉛直上向きを正に取っており、原点に磁石が配置されていることを想定している。いま、 $z > 0$ の場合を考える。磁場が、鉛直上向きの場合、磁場は正、また距離とともに減少するので磁気勾配は負である。このため磁場(磁束密度)と磁気勾配の積(以降、磁場積と呼ぶ)は負となる。逆に磁場が下向きの場合、磁場は負である。磁場の絶対値は距離とともに小さくなるが

磁場が負であるため磁気勾配は正となる。したがって、この場合も磁場積は負となる。すなわち、 $z > 0$ の場合、磁場積は通常、負と考えて良い。したがって、(1)式から分かるように、媒質の磁化率が懸濁材料の磁化率より大きい場合、磁場が関係する項は浮上力として働くことになる。これが一般的な磁気アルキメデス効果である。

一方、 $z < 0$ の場合である。磁場が上向きの場合、磁気勾配は正となり、磁場積は正。磁場が下向きの場合は、磁気勾配は負となり、磁場積は正となる。このため媒質の磁化率が懸濁材料の磁化率より大きい場合、磁場が関係する項は沈降力として働くことになる。直感的には、懸濁媒が上方にけん引されるので、その密度が減少する事と等価である。(1)式を考察から、沈降力を発生させることも磁気アルキメデス効果の一つであると言える。

以上の事から、磁石の上に体系を配置すると、懸濁媒の磁化率が懸濁物質の磁化率より大きいと、磁気力は浮上力となり、下に配置すると沈降力となり得ると言える。

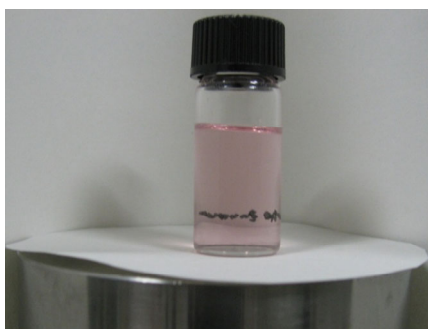


図2 タングステン（常磁性）の磁気アルキメデス現象。
タングステンが浮上している。

磁石を体系の下に配置した場合、常磁性媒質と反磁性材料では、 χ_t は正、 χ_p が負となるので、(1)式の磁気力の項は正となり浮上力を示す。一方、第2項は通常のアキメデス力を示している。この式から比重の比較的小さい反磁性材料を対象に(浮上)磁気アルキメデス効果が発見されたことは理解できることである。

さらに、この式から、懸濁させる材料が常磁性体であっても、媒体の磁化率より小さい材料であれば磁気力が浮上力となり、比重差を打ち消せば、浮遊させる得ることが理解できる。図2にタングステンを浮上させた例を示す。タングステンは比重が 19.3 g/cm^3 、磁化率は 5.6×10^{-5} である。水に比べてかなり比重が大きい材料でも浮上させ得る事が実証された。この図では磁場発生は高温超電導 (HTS) バルク磁石を利用しており、発生磁場はクライオスタット表面で、3 Tである。タングステンの他、強磁性材料以外ほとんどの材料を浮遊させ得ることも明らかになった。

なお、通常、磁場(あるいは磁気勾配)は、磁石との距離とともに減少するので、距離とともに磁気力が減少することになる。このため浮遊する物質はある安定位置に留まることになる。ソレノイド磁石の中では状況は異なるが、(1)式に従った場所で安定浮揚する。

一方、密度が媒質より小さく浮上する材料に関して、即ち(1)式の第二項が正の材料であっても、前述のように第一項の磁場積の符号を逆にすれば、沈降させる得る事ができる。すなわち $z < 0$ とするのである。図3にポリプロピレン($\chi_p = -8.67 \times 10^{-6}$ 、 $\rho_p = 0.9 \text{ g/cm}^3$)を沈降させた例を示す。この例では、上方にネオジウム磁石を配置している。通常は液面に浮上するが、磁場下では安定位置に沈降している。

前述したが安定浮遊位置は、懸濁物質の磁化率と密度に依存する。このためこの現象を利用すれば、混合物を効果的分画することができるようになる。

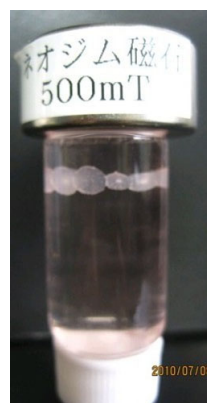


図3 ポリプロピレン（反磁性物質）がアルキメデス現象により沈降している状況

これまでは磁場方向を鉛直上向き、あるいは下向きにした場合であった。基本的に、これらの現象では、媒質の巨視的な運動は起こらず、圧力勾配が発生し、懸濁材料のみが動くことが特徴である。この現象をさらに展開することを考える。すなわち、水平方向に磁場が印加された場合である。(1)式は以下の(2)のようになり、重力成分(垂直成分)は考慮する必要がなくなる。ただし、ここではx方向の磁場が存在する体系を考えている。懸濁媒と懸濁材料の磁化率が同じ場合には磁気力は働かない。(2)式はその状態を意味している。この場合も、原点に磁石が配置されている状況を考える。この場合は磁化率が媒質より小さな材料は原点から離れる方向に磁気アルキメデス力が働き、その方向に懸濁材料は移動する。この現象をここでは、横方向磁気アルキメデス効果と呼ぶことにする。また逆に、材料の方が媒質より磁化率が高い場合は、材料は原点方向(磁石方向)に吸引されることになる。

$$\frac{\chi_p - \chi_f}{\mu_0} B \frac{\partial B}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

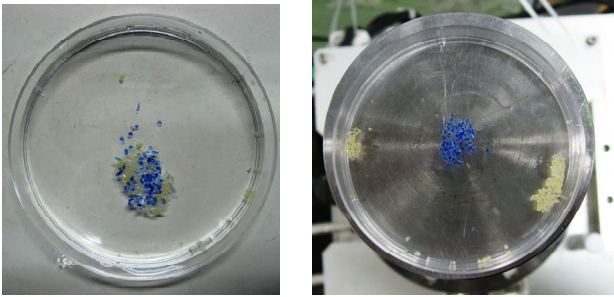


図4 黄色と青色のガラスの混合物より黄色のガラスのみが半径方向に移動する。

横方向磁気アルキメデス現象を、実際に、材料の分画に使う場合の一例を図4に示す。この写真では青と黄色のガラスの混合物が、磁場下で分画されている状況を示している。利用した磁石はHTSバルク磁石(中心クライオスタット表面で3 T)である。それぞれの磁化率は、黄色ガラスで -9.27×10^{-6} 、青色ガラスで -2.20×10^{-6} である。両者とも反磁性材料であるが、黄色ガラスの方が磁化率は小さい。ここで、媒質の磁化率を両者の中間になるように設定する。(2)式から分かるように、それぞれに働く横方向磁気アルキメデス力は、逆方向になる。つまり黄色ガラスは磁場勾配と逆方向に移動し、青色ガラスは磁場勾配の方向に移動する。この実験では、HTSバルク磁石を利用しているため青色ガラスがバルク磁石の中心に、黄色ガラスが半径方向に動き、分画がなされている。

この手法を利用すると、混合粉体を磁化率によって分画する事が可能となる。

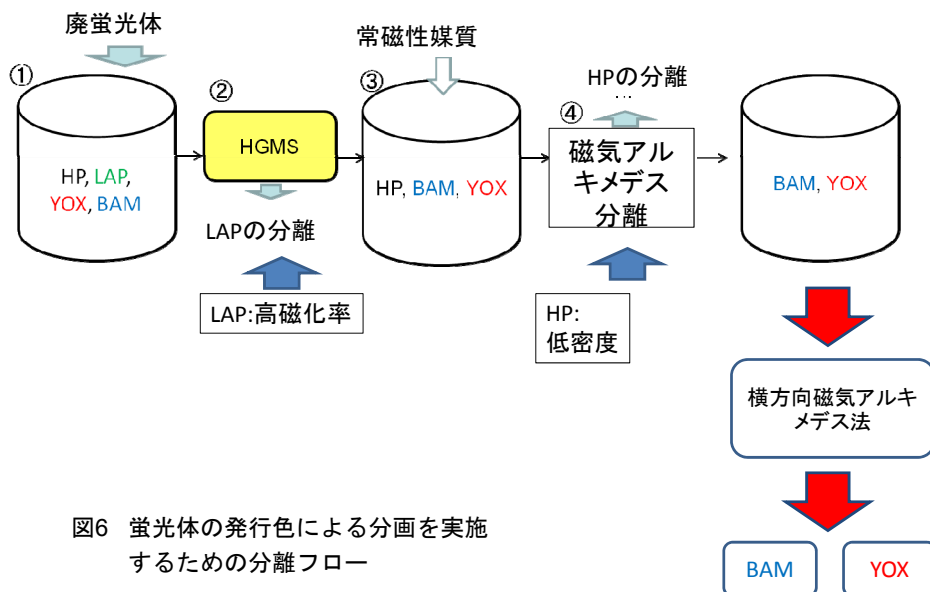


図6 蛍光体の発光色による分画を実施するための分離フロー

3. 具体的応用(廃蛍光体の分画)

3.1 背景

蛍光体廃棄物中には希土類を含む蛍光体が複数混在している。近年の蛍光体の価格の急騰、及び国内需要の増加から、低コストかつ低環境負荷な手法で蛍光体を分離・再利用することが求められている。そこで、廃棄蛍光体を発光色ごとに分画することを試みた。磁化率や密度等の物理的特性に着目し、磁気アルキメデス分離法を中心とした磁気分離法による分画を行った。

3.2 蛍光体分画法の検討

蛍光体の種類と物性を図5に示す。赤色のYOX、緑のLAP、青のBAM、及び白のHPである。図には各材料の磁化率を対数グラフ上に示している。また、それぞれの密度を括弧内に示している。

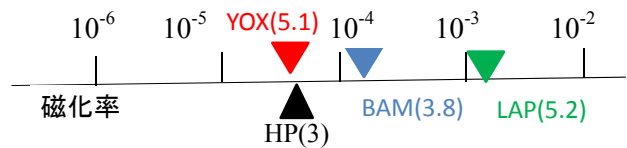


図5 各蛍光体の磁気率と密度

図5を参考に混合蛍光体から発光色による分画を実施するための分離のフローを図1を参考に検討した。その結果を図6に示す。比較的磁化率の大きいLAPはHGMSで分離し、磁化率の小さい他の3色は磁化率と密度の違いを利用して磁気アルキメデス分離法[3,4]により分画する。まずHPを浮上させて分離する。

これは、磁化率が小さく、密度が最も小さため、磁ルキメデス浮上分離に適するためである。YOXとBAMは

磁化率が異なるので、磁化率の小さいYOXを磁気アルキメデス法で浮上分離可能と思われたが以下の理由で困難であった(序論で触れた困難な理由)。磁化率が小さいYOXの方が浮上に関わる磁気力はBAMより大きい、密度が大きく沈降力大きい。このため両者が相殺し、YOXとBAMの分離は困難であった。そこで、密度を考慮しなくても良い、水平方向の磁気アルキメデス法を利用することにした。

3.3 分画の結果

ここでは、磁気アルキメデス法を利用した分画法の結果のみを示す。蛍光体廃棄物の組成は一般的にHP、LAP、YOX、BAMは6:2:1:1の割合である。再利用したい蛍光体は、LAP、YOX、BAMである。

ここではまず、図6中④の磁気アルキメデス分画の結果について示す。HP、YOX、BAMを6:1:1の割合で混合した模擬サンプルを用い、HPの磁気アルキメデス浮上分離を試みた。ここでは、常磁性媒質として硝酸エルビウム水溶液(磁化率: 2.0×10^{-4})を利用した。磁場発生源としてHTSバルク磁石(クライオスタット表面での最大磁束密度が3 T)を利用してHPとYOX、BAMの分離を行った。磁気アルキメデス法でHPを分離している実験の様子を図7に示した。

HPのみが浮上し、YOX、BAMの両者は沈降したままであることが理解できる。この分離状況を確認するために磁気アルキメデス分離後の残留粒子と浮上粒子

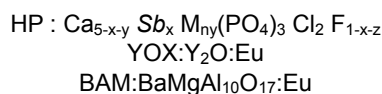
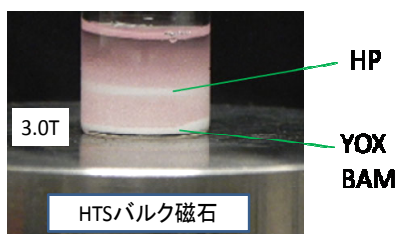


図7 HTSバルク磁石によるHPの分離

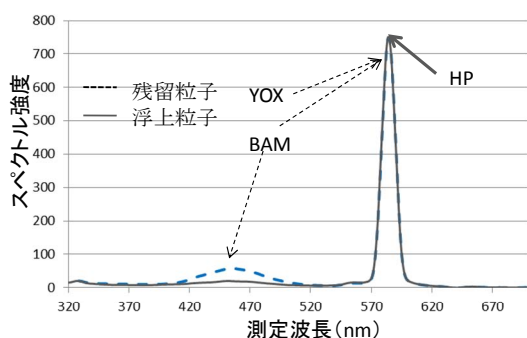


図8 アルキメデス法により分離された蛍光体の蛍光スペクトル

それぞれの蛍光スペクトルを図8に示す。浮上した粒子の蛍光スペクトルは580 nm付近のみにピークを示すが、残留粒子ではこのピーク以外にも450 nm付近の蛍光ピークが見られる。これはBAMの特徴である。この結果は、浮上粒子内にHPが存在し、BAMは存在しないことを示唆する。また、残留粒子中にBAMが濃縮されたと言える。一方YOXについては、580 nmにのみ蛍光を示すため図8のみから判断することは難しいが、この条件での磁気アルキメデス分離では浮上しないと考えられた。

最後にBAMとYOXの分離である。ここでは横方向の磁気アルキメデス法を利用した。図9に分離後の蛍光写真を示すが、中心に青色、周辺に赤色の蛍光体が効率的に分離されていることが理解できる。

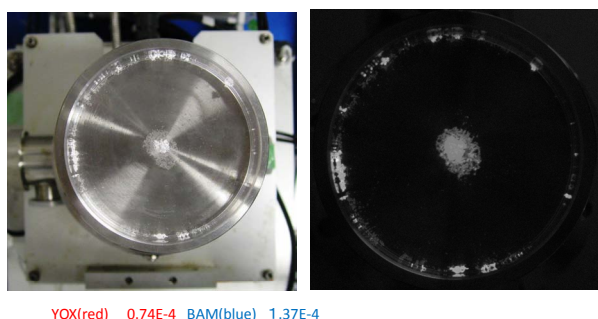


図9 YOXとBAMの横方向磁気アルキメデス法による分画

4. 結論

磁気アルキメデス法は、従来は密度の低い反磁性材料を常磁性媒質の中で、磁気力により浮上する現象であった。しかしながら、この現象は、密度の大きな常磁性材料にも応用が可能であることが明らかになった。さらに、密度が小さく浮上する材料に関しては、磁場方向を変え、沈降させ得ることも明らかになった。さらに、横方向に磁場を印加すると、横方向の牽引や反発が可能となり、懸濁媒の磁化率を適切に選択すると、従来の磁気アルキメデス法では困難であった材料の分画が可能となることが明らかになった。

高度な磁気アルキメデス法の利用により、今後、新たな応用が始まるものと期待される。

参考文献

- [1] Y. Ikezoe *et al.*: *Ener. Conv. Manag.* **43** (2002) 417-425
- [2] S.Nishijima: *Supercond. Cryog.* **14** (2012) 1-4
- [3] S.Nishijima: *Proc. ICEC-ICMC2012 Fukuoka Japan*, To be published.
- [4] K.Wada *et al.*: *Proc.ISS2012 Tokyo Japan*, To be published.

<会議報告 1>

ASC2012 会議報告

Conference report on ASC2012

(1) Material

昭和電線ケーブルシステム株式会社

木村 一成

SWCC Showa Cable Systems Co., Ltd.

K. Kimura

1966年より開催されてきたASCは、今回で25回目を数えるようになった。今年は10月7から12日までの6日間、米国のPortlandにあるOregon Convention Centerで開催された。本会議においては、超電導技術に関連する、超電導ケーブル等の応用機器開発や高温超電導線材の開発・特性の向上など、様々な内容の研究成果が報告されていた。今回もRE系線材では製造方法の違いに依らず、各々長尺化、低コスト化に加え、磁場中応用に向けた報告が精力的に行われていた。総発表件数は1,603件であり、Large Scaleに関する発表(552件)が前回よりも大きく増加していたことは特筆すべきことである。

また、今年はYBCO超電導体発見25周年、ジョセフソン効果発見25周年ということもあり、基調講演の中にElectronics分野に関連する発表があったのにも印象に残った。本報告ではCoated Conductorセッションを中心に、印象に残った発表について以下に記す。

IWF(Dresden)のHolzapfelらの発表では、欧州の新規プロジェクトである“Eurotapes”の紹介があった。ABADもしくはRABiTS基板を使用して500 m以上の長尺線材を開発することを目的としているが、その目標自体が日本や米国の現状線材特性よりも低い。ただ、近年開発が遅れていた欧州がプロジェクトを立ち上げたことで、開発スピードが上がるのが予想される。今後の動向に注目したい。

その“Eurotapes”のメンバーに名を連ねるTHEVA社のM. Bauerらは、 $I_c=1000$ A/cm-w級の超電導テープ線材の開発について最近の成果を報告した。彼らは最近、BaZrO₃(BZO)ナノ微粒子を超電導層内に均一に分散させることに成功し、3 T磁場印加時の特性がBZO非導入の線材と比較して格段に向上したことを報告した。また、BZOの導入により磁場印加角度依存性の異方性が小さくなったことを強調した。また、超電導層厚を1~7 μmまで変えて、多くの線材を作製し、 I_c との相関関係について報告した。

ISTECの吉積らは、PLD法を用いたBaMO₃ ($M =$

Metal)を導入したGdBCO超電導線材の磁場中特性について評価し報告した。幾つかの金属元素を使用してサンプルを作製したが、中でもHfを使用したBaHfO₃(BHO)ナノロッドの線材が最も高い特性を示し、3 T磁場印加時の I_c の最小値が85 A/cm-wであることを報告した。また、BHO導入超電導線材の長尺化にも挑戦し、10 m長の線材を作製することに成功した。

一方、昭和電線の木村らは、BaZrO₃を導入したMOD法によるYGdBCO線材の高特性化について報告した。本焼成時の条件を最適化することにより、超電導層厚1.9 μmで $I_c=56$ A/cm-w(@3 T, 77 K)という高い特性が得られていることを強調した。また、3 Tでの磁場角度依存性評価結果からランダムポイントピンのスケール特性についての検討結果が報告された。

九州工大の松本らは、BaSnO₃(BSO)ナノロッドをピン止め点として導入したYBCO超電導線材の、作製条件の最適化、BSO導入量の最適化などについて報告した。また、Y₂O₃をピン止め点として導入した線材の評価も行い報告した。

Houston大学のG. Majkicらは、BZOをピン止め点として大量に導入したIBAD-MOCVD超電導線材の磁場特性評価結果について報告した。添加したZrの量は超電導体の金属量に対して5~20%であった。20%は導入量としてはかなり高めであるため、77 Kでは5%添加の方が高特性を示した。しかしながら、20 Kでは、5 Tの磁場を印加した時では5%添加と20%添加ではあまり差が見られないという結果を報告した。

九州大の東川らは、ホールセンサーを使用してreel-to-reel方式で連続的に長尺線材の臨界電流密度を2次元的に測定する方法を開発し、評価結果とともに紹介した。テープ線材の特性を2次元的に可視化できるため、欠陥箇所の特長が容易になったことを強調した。評価した線材は作製手法別、スクライビング加工の有無などあり、どのような線材にも対応可能であることを示した。

超電導応用として電力機器に関する発表も多く見られた。電力応用機器では電力ケーブル、限流器、SMES、変圧・発電機などに区別され、それぞれ多くの発表がなされた。電力ケーブルでは、住友電工から東京電力・旭変電所における66 kV-1.75 kA超電導ケーブルの I_c 測定等の評価内容の報告があった。さらに古河電工からはY系超電導電力機器技術開発プロジェクト(M-PACC)における275 kV-3 kAケーブルシステムの作成・進捗状況についての発表がなされ、日本のメーカーやプロジェクトからの報告も印象に残った。

一方、海外からの報告では、中国において1.3 kV-10 kAで360 mのBi系直流超電導ケーブル開発で12.5 kA

を超える I_c が得られたと報告があった。ドイツからは、変電所間をBi系交流超電導ケーブルでつなぐAmpacity Projectの進捗報告がなされ、2013年には敷設完了する予定であることが報告された。また、ロシアでは2500 mの直流超電導ケーブルの敷設計画が発表された。

CERNのA. Ballarinoらは、YBCO、Bi-2223、 MgB_2 等の高温超電導テープ線材を使用して、twisted-pairの構造を持つ長尺のケーブルを作製し、その特性を調査した結果を報告した。また、CERNに新しい試験センターを設立したことにも触れており、20 m長の高温超伝導ケーブルを様々な温度で評価・計測できるようになったことを強調していた。

次回のASCは2014年に、North CarolinaのCharlotteにて開催される。

(2) Electronics

(公財)国際超電導産業技術研究センター

日高 睦夫

International Superconductivity Technology Center

M. Hidaka

ASC2012エレクトロニクス分野の一つの特徴として、Superconducting Electronics と Superconducting Detectorsの二つに分かれてAbstract募集が行われたことがあげられる。これは最近の超伝導検出器研究の広がりを反映したものと考えられる。また、デジタルやマイクロ波などの技術を検出器の多重読み出しに応用した研究成果が出始めてきていることも興味深かった。

本報告では、デジタル、マイクロ波、SQUID、検出器について、概要を報告する。ただし、検出器は170件を越える発表が行われたため、本報告では超伝導転移端センサ(TES)に絞って報告を行う。なお、マイクロ波については山形大大嶋教授、SQUIDについてはISTEC塚本氏、波頭氏、TESについては産総研福田氏から情報をいただいた。

今回のデジタルは、アメリカの元気が良かったことが特徴であった。これは、単一磁束量子(SFQ)回路を使ったスパコンの大型プロジェクト開始に向けての検討が進んでいるためである。半導体スパコン最大の問題は消費電力であり、半導体ではエクサスケールスパコン(10^{18} FLOPS:京速コンピュータの100倍)は発熱が大きすぎて実現は難しいと考えられている。ニオブを用いたSFQスパコンの消費電力は、冷凍機や周辺機器を含めても優位性が際立っている。より消費電力の小さなSFQゲートと、IBMプロセスラインを用いたスケーラビリティには目処が付いており、現在はメモリの実現性を探る研究

が、HYPRES、Northrop Grumman、NIST、UC Berkley等で行われている。

ヨーロッパからは、ニオブのプロセスラインを持つドイツのIPHTから小規模SFQ回路を用いた実験結果の報告があった。また、フランスCEAから宇宙通信用ADコンバータを窒化ニオブを用いて作製したとの報告があった。

SFQ回路を用いた超伝導検出器出力多重化が行われている。情報通信研究機構(NICT)は、SSPDのSFQ読み出しにおいて、バイアスT回路をオンチップ化することによりジッターを67 psから37 psに低減し、SFQ入力部分の最適化設計により電流感度を8 μA から2 μA に向上することに成功した。この技術を用いて、4個のSSPD出力をSFQ回路で多重化する実験に成功した。同様の実験についてIPHTグループからも報告があったが、NICTグループの方がより完成度が高いとの印象を受けた。横国大は、産総研と協力して質量分析用SSPD出力をSFQの時間/デジタルコンバータ(TDC)を用いて検出することに成功した。

マイクロ波の基礎や薄膜に関する発表は、アメリカ、ドイツ、カナダ、イタリアなどの欧米から、フィルタや共振器などのデバイスに関する発表は、日本、中国、台湾などから主に行われた。中でも、フィルタに関する多数の興味深い発表が中国からあった。中国では、携帯電話基地局用受信システム応用以外に、宇宙用、気象レーダ用、近距離無線通信用への応用の芽が見えてきている。

また、超伝導フィルタの新たな応用の可能性を示唆するものとして、中国から3バンドの4 GHz帯マルチプレクサに使用する小型、低損失、高い周波数分離特性を持つ高温超伝導フィルタが紹介された。イタリアから、コプレーナ共振器の中心に重イオンを照射することにより、超伝導特性を弱めた箇所を作製した試料における共振特性が紹介された。重イオンを照射すると2つのモードの共振器が形成でき、かつ2つのモードは磁場やパワーで制御できることが示された。

SQUIDでは、Bi-SQUID、SQIFに関して、口頭発表とポスター発表に2セッションが割り当てられ注目を集めていた。Bi-SQUIDでは第3のジョセフソン接合(JJ)が、通常の二つのJJと並列に挿入され、正弦波ではなく三角波の $V-\Phi$ 特性が得られる。このため、通常のSQUIDよりも線形性が改善される。SQIF構造での高周波アンプなどへの応用が期待されている。また、SQIFに関しても、従来の直列あるいは並列構造から両者の特徴を組み合わせた2次元構造への展開が見られた。

低磁場NMR/MRIに関する発表が17件とSQUID応用の中で最も多く、脳磁計測や磁気緩和計測とMRIの

同時計測や低磁場 f-MRI を目指した開発が LANL (ロスアラモス国立研究所) など で 精力的に 進められている。脳磁計メーカーの Elekta 社を含むフィンランドグループは、ヘルメット型 SQUID アレイの MRI-MEG システムを開発し、LANL と同レベルで頭部 3 次元画像の取得を報告した。また、前回の ASC2010 では緩和信号の測定のみであった後発グループからも、小規模であるが 2 次元画像の取得が報告された。

その他の応用として、磁気マーカを用いた乳ガンや直腸ガンの検査装置 (ヒューストン大)、免疫検査 (台湾大)、モルタルの水分量分析など常伝導検出コイルと高温超伝導 SQUID を組み合わせた構成が多数見られた。また、ISTEC は 10 mT/s の高いスルーレートを持つ金属資源探査システムを発表し、フィールドでの実用性の高い装置として注目を集めた。その他に、SQUID を使用したダークマター (アクシオン) 検出 (ワシントン大) や中性子の電気分極測定への応用 (LANL) など宇宙、素粒子応用に関する発表も行われた。

TES では、X 線領域の光子測定を中心として、多素子化に向けた開発とその応用、読出し技術、および超伝導弱結合の素子性能への影響など幅広いテーマで発表が行われた。大規模アレイ開発では、100 素子規模からなる X 線分光装置が NIST や NASA/Goddard を中心に開発され、全素子の合算でも 6 keV に対して分解能 2~3 eV を達成した。本技術を用いて、軟 X 線励起蛍光 X 線分析、高時間分解能 EXAFS 測定、Pu の同位体比測定など、様々な分野への応用が試みられた。特に、窒素化合物からの化学シフトの直接測定や炭素の吸収端付近での精密な吸収構造の測定などは、従来の半導体検出器では不可能な知見が得られることを実証した。

読出し技術としては、時間分割多重化 (TDM) から、素子数の大規模化に有利な符号分割多重化 (CDM) へと主流が移り、1000 程度の素子数の実現も射程内に入ったとの感があった。

TES 素子と電極との弱結合に関連し、外部磁場と臨界電流及び電流感度についての詳細な報告があった。電極からの自己遮蔽電流が TES に与える影響を可能な限り排除するなど、構造面から TES 素子の物理パラメータをある程度制御することで、素子性能を向上させることが可能であることが示された。

(3) High T_c Coil

物質・材料研究機構

西島 元

National Institute for Materials Science

G. Nishijima

ASC 2012 はアメリカ合衆国オレゴン州ポートランド市で開催された。例年であれば雨期で寒いとのことであったが、初日から 5 日目までは晴天に恵まれた。

従来 ASC で Electronics、Large Scale、Material の 3 部門に分けてプログラムが編成されていたが、今回は Large Scale と Material の Joint Session が編成され、NMR、MRI、核融合等が割り当てられた。

HTS コイルおよびマグネットに関わる発表は Large Scale と Joint Session 合わせて 60 件であった。この数字は会議プログラムから数えた値であり、交流応用や電力機器を含めていない。ASC2010 では 51 件であったので、今回は約 2 割増加したことになる。

HTS 応用の全体的な印象としては、RE 系コート線材の磁場応用技術が着実に進歩していることが挙げられる。ASC2010 では「コイルを試作したが劣化した」といった発表も目についたが、RE 系コート線材コイルのエポキシ含浸による剥離問題 [1] は各機関で回避方法を見出し、現実的なサイズのコイルが開発されてきている。

フジクラの大保は、同社製 GdBCO 超伝導線を用いた冷凍機冷却超伝導マグネット開発に成功した。コイルは 25 K で冷凍機冷却され、運転電流 333 A で 5 T を 200 mm 室温ボアに発生する。同社の GdBCO 超伝導線は通常、超伝導層の上に 100 μm 厚の銅がラミネートされているが、本開発で用いられた導体ではこれが 300 μm であり、安定性が高められている。しかし、マグネットとしてのクエンチ試験や安定性試験はまだなされていないようである。また、コイル電流密度が著しく低い (線材当たり 83 A/mm^2) のが残念である。HTS ならではの高電流密度設計を実現するべく、今後の研究開発が期待される。

ASC2010 において、MIT の Hahn and Iwasa が “no insulation HTS coil” を報告した [2]。それ以来、韓国のグループによる HTS コイルは殆ど全てがターン間絶縁の無い “no insulation coil” である。KBSI の Kim はこの非絶縁コイル技術を用いてインサートコイル開発を行っている。将来の 30 T 級超伝導マグネット開発のために、15 T 磁場中で運転する HTS インサート (5 T) である。韓国 SuNAM 製 GdBCO 線材を用いて製作されたダブルパンケーキ 18 個が積層されており、4.2 K、260 A で 5.58 T の励磁に成功した。また、5 T バックアップ磁場中では

3.73 T(合計8.73 T)の励磁に成功しており、試験は現在継続中とのことであった。

中国科学院電工研の王は、25 T超伝導マグネット開発について報告した。マグネットはLTS(NbTi、Nb₃Sn)アウトサートとHTSインサート(Bi-2223、YBCO)からなり、HTSインサートの製作および実験が終了した。YBCOインサートはSuperPower SCS4050を用いたダブルパンケーキが22個積層されており、高さ253 mmである。内径40 mm、外径68.9 mmであり、20 T中で5 T発生する設計である。一方、28個のダブルパンケーキからなるBi-2223インサートは内径120 mm、外径212 mm、高さ268.8 mmであり、5 Tを分担する設計である。4.2 Kにおける励磁試験は両インサートを組み合わせて2電源で行われ、YBCOインサート単独で5 T(134 A)発生に成功した。また、Bi-2223との同時励磁では、約7.3 T(Bi-2223 4.69 T、YBCO 2.61 T)発生に成功した。何度かクエンチしたものの、特にダメージは無いようである。YBCOコイルはエポキシ真空含浸されているようであるが、剥離問題回避技術については言及されなかった(本人に直接質問したのだが、明確な回答を得られなかった)。

NHMFLのWeijersは32 T超伝導マグネット開発[3]について報告した。このマグネットは4.2 K運転であり、34 mmボアに10 mm球内500 ppmの均一度で32 Tを発生する。インダクタンス619 H、蓄積エネルギー9.15 MJであり、磁場分担はLTSアウトサート15 T、REBCOインサート17 Tの設計である。REBCO線材長は10 kmに及ぶ。機械特性(4 Kおよび77 Kにおける引張り試験)、接続試験、RRR測定、 I_c 測定(4 K、磁場印加角度依存性)、組織観察に至る広範なR&Dを行った結果、 I_c (4.2 K、17 T、18°)、 n 値、導体幅、導体厚さ等14パラメータについて要求値と許容範囲を設定し、線材を調達する。まずは総長1.54 km(線材長110 m以上を14本)を用いてプロトタイプを製作するようである。4 Kにおける I_c 均一度の評価が課題である。

神戸製鋼の寺尾は、Bi-2223線材を用いた3 T MRIマグネット開発について報告した。システムは直径514 mmの室温空間を有し、磁場均一度は5 ppmである。マグネットは10 K-GM冷凍機によって冷却され、20 Kで運転される。また、永久電流モードではなく、高安定電源による通電モードで運転される。3.0 T(184.8 A)発生時の最大フープ応力は137 MPaである。運転試験においては1.5 Tにおける磁場均一度が5 ppmであることが確認され、得られたMR画像は商用MRI(LTS使用)で得られたものと遜色なかった。

本稿では5件の発表に注目して報告した。他にも多くの興味深い発表があったが、紙面の都合で割愛させて

頂いた。

なお、今回のASCは再来年(2014年)ノースカロライナ州シャーロット市で開催される。

参考文献

- [1] T. Takematsu *et al.*, Physica C, **430** (2010) 674.
- [2] S. Hahn *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 1592.
- [3] W. D. Markiewicz *et al.*, IEEE Trans Appl. Supercond. **22** (2012) 4300704.

(4) Large Scale Application

鉄道総合技術研究所

水野 克俊

Railway Technical Research Institute

K. Mizuno

Large scale applicationに関しては多数のセッションで発表が行われ、各分野での進捗を実感することができた。

核融合関連ではITERに関する発表が大多数であり、各種コイルの製作に向けた導体の評価や接合技術の検証、及び導体製作の話題が中心であった。すでに6機分のトロダイル磁場(TF)コイル用導体の製造が終わっているとのことであった。加速器ではCERNの性能向上に向けたものや、US-LARPの磁石開発に関するもの、日本からはJ-PARCの震災からの復旧に関する話題の紹介もあった。電力応用に関しては超電導発電機/モータの設計検討や超電導ケーブルプロジェクト、その他にもマグレブ応用、FCLに関する報告など多岐にわたった。その中から興味深かった発表を幾つか紹介する。

GEのW. E. Stautnerらからは“Large scale superconducting wind turbine cooling”と題して超電導風力発電機の冷却に関する報告があった。興味深い点は、MRIで培った技術を応用しており、金属系超電導導体を用いるとのことであった。多くの超電導風力発電機の研究においては高温超電導体の利用を前提にしており、4 Kレベルの冷却は極めて難しいとされていた。彼らは10 MWを越える発電機においても冷却コストを最小化できる見通しを立てている。超電導風力発電機本体の構造についても詳細に設計が行われており、今後の展開が注目される。

Russian Scientific R&D Cable InstituteのV. Vysotskyらからは“Hybrid energy transfer line with liquid

hydrogen and superconducting MgB_2 cable-first experimental proof of concept”と題してロシアにおける超電導ケーブルプロジェクトの紹介があった。液体水素のパイプラインと MgB_2 の超電導ケーブルによる直流送電を組み合わせたシステムを想定している。仕様としては通電電流 3 kA、クライオスタット内径／外径が40 mm/80 mmとなる。Columbus Superconductor社の MgB_2 線材を用いた10 m長のプロトタイプ製作及び試験はすでに行われている。また、解析から20 Kにおいては MgB_2 線材を用いることの正当性が示された。

神戸製鋼のY. Teraoらから“Newly Designed 3 T MRI Magnet Wound With Bi-2223 Tape Conductors”と題して全ビスマス線材によるMRI製作の報告があった。彼らは将来予測されるヘリウム資源の枯渇を懸念しており、伝導冷却のビスマスコイルから構成される脳検査用のMRIを試作した。40 kmを越える線材を用いており、室温ボア直径約 500 mm、中心磁場 3 T、蓄積エネルギー 2.3 MJと高温超電導コイルとしては極めて大型のものであることがうかがえる。中間目標である1.5 Tの励磁試験結果の報告があり、安定して励磁できたことに加え、当初は磁場均一性が900 ppm程度であったものの、鉄シムを用いることにより目標とする5 ppmを実現し、MRI画像の取得に成功した。しかしながら、運転温度を10 Kから20 Kに変えて評価を行ったところ磁場均一性が大きく悪化しており、これは遮蔽電流によるものではないかと推測されている。

University of HoustonのP. J. Massonらからは“Development of a 3D sizing model for all superconducting machines for turbo-electric aircraft propulsion”と題して超電導発電機を搭載した飛行機の推進について発表があった。非常にユニークな構成を検討しており、液体水素を燃料にガスタービンで発電し、その電力で多数のプロペラを駆動するというものである。発電機とプロペラ用モータは超電導を用いており、冷却は燃料である液体水素でまかなうとのことであった。この構成の利点はプロペラを多数配置することにより、騒音の低減や燃費の向上が狙える点にある。通常のジェットエンジンを多数配置すると機械部品のメンテナンスが増える問題があるのに対し、発電を行いその電力をモータに分配するのであればメンテナンスを最小限にとどめることができる。このような超電導発電機/モータの設計のために三次元解析モデルを開発しており、近日中にコードを公開するとのことであった。超電導発電機やモータの研究開発がこれにより加速されることが期待される。

コイル化技術に関する発表だけでなく、電力応用機器においても実際に高温超電導線を用いたプロトタイプ

製作が報告されるようになってきており、実用化に向けたフェーズに移行しつつあるように感じられた。昨今、ヘリウムの供給不足が話題になっていることも考慮すると、今後高温超電導体の機器応用はより盛んになることが予測される。もっとも、高温超電導機器の実用化に関してはコストや遮蔽電流、線材保護など課題も残っているので、すべてが高温超電導体に置き換わることはなく、アプリケーションに応じて最適な超電導材料を用いることが求められていくだろう。



図1 ポートランド市内の様子

<会議報告 2>

ISS2012 田中先生追悼セッション報告

Report on Prof. Tanaka memorial session at ISS
2012

(公財)国際超電導産業技術研究センター
田辺 圭一
International Superconductivity Technology Center
K. Tanabe

高温超伝導の研究分野を切り開き、(公財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)において、副理事長、超電導工学研究所(SRL)所長として20年にわたり高温超電導材料開発とその応用技術開発を牽引してこられた田中昭二先生(東京大学名誉教授、超電導工学研究所名誉所長・顧問)がISS2011の直後の11月11日に逝去された。先生は、ISS2011までの24年間ISSの組織委員長を務められ、ISS2011ではお元気に開会及びバンケットでの挨拶をされたばかりだったので、我々にとっても突然の悲報であった。あれから1年が過ぎたISS2012では、北澤宏一先生((独)科学技術振興機構前理事長、現顧問)が新たに組織委員長に就任され、12月3日～5日に昨年と同じ船堀タワーホールで開催されたシンポジウムの初日に、例年の基調講演に代わり、

田中先生の追悼セッションが行われることになった。追悼セッションでは、高温超伝導研究を通して田中先生と親交の深かった、あるいは長年にわたり先生の薫陶を受けた国内外の研究者の方々が、先生の思い出を語ると共に、高温超伝導研究のこれまでの進展や将来像について講演した。

まず午前中には、北澤先生、米国・ヒューストン大の Paul Chu 教授、中国科学院の Z. X. Zhao 教授の3名の方々の特別基調講演があった。北澤先生は、東京大学の田中先生の研究室における高温超伝導の最初の確認から高温超伝導フィーバーにつながった1986-87年当時の活気に満ちた様子や田中先生の愛すべきお人柄をまず振り返り、次に3.11の震災に伴う福島第1原発事故の独立調査委員会議長等を務められた経験から、事故の教訓と今後の日本のエネルギー事情や政策の見通しについて講演した。原発政策は不透明であるが、原発の比率を下げてベストミックスの解を作るためには、再生可能エネルギーの比率を大幅に上げる必要がある。太陽光、風力発電は発電量の変動が大きく、電力網を安定化させるためには、エネルギー需要の高い地域にできるだけ多くの電源から電力を供給する仕組みを作るのが望ましく、例えば北海道や東北地域から首都圏に電力を送るために直流超伝導送電ケーブルの重要性が高まるであろうという見通しが述べられた。Chu 教授は、1984年に米国で初めて田中先生に会った際の思い出や高温超伝導発見後26年にわたる友情について述べると共に、教授が最近特に興味を持ち精力的な研究を行っている鉄系超伝導材料に関するトピックスを紹介した。鉄系超伝導材料では、1111系に比べ T_c を上げる方法がないのかというのが大きな関心の一つである。高 T_c をもたらす機構として1970年代にエキシトンを紹介した界面超伝導が提唱されているが、希土類置換Ca122鉄系材料で最近報告されている49 Kまでの超伝導は界面効果の可能性が高いと報告した。Zhao 教授は、1987年の物理学のWoodstockと呼ばれたAPS March Meetingで田中先生と一緒に講演を行ったこと、また1997年の北京でのM²Sや2005年の上海の会議での田中先生の招待講演を印象深い出来事としてあげた。中国では、M²S 当時は研究費が少なく苦労したが、現在では超伝導応用に関する国の支援も厚く、ケーブル、限流器、変圧器、SMESを含む高温超伝導サブステーションデモのプロジェクトなどが進行していることを紹介した。

午後のセッションでは、ISTEC-SRLにおいて田中先生のご指導の下に20年以上にわたり行われてきた超伝導エレクトロニクスデバイス開発の歴史と現状について筆者がまず紹介した。先生は特に、1990年代後半に高温超伝導材料と低温超伝導Nbの両方に対し単一磁束

量子(SFQ)回路をターゲットとする国プロを立ち上げることに尽力された。Nb系SFQ大規模集積回路に関するプロセス技術、設計技術はその後世界をリードするレベルに達し、超高速AD変換回路などの計測回路やマルチチャンネル超伝導検出器用の信号処理回路の実現につながっている。また、高温超伝導薄膜の多層化技術やランプエッジ接合技術がプロジェクトのなかで確立し、最近の薄膜積層型高温超伝導SQUIDを用いた金属資源探査装置の実用化等に発展したことを紹介した。スウェーデンのChalmers大学のグループを長年率い、同じくエレクトロニクス分野で大きな業績を上げてきたClaesson教授は、ISTECをたびたび訪問され田中先生とお話しされていたことを筆者は記憶している。教授は、Chalmers大グループによる高温超伝導SQUIDの脳磁計測への応用に加え、動的カシミール効果の観測、YBCOナノアイランドを用いた単一電子トランジスタなどの研究成果を紹介した。芝浦工業大学学長の村上教授は、ISTEC-SRL在籍中の1990年のISSにおいて田中先生を浮上させることに初めて成功した”人間浮上デモ”の苦労話を紹介した。最初は浮上用の磁石を平板状に敷き詰めたが、反磁界の効果で十分な磁束密度を得ることができず、同心円状の配列を思いついて成功したことなど面白い話が聞けた。中部大学の福田教授は、住友電工在籍中に行ったBi系高温超伝導線材とその応用開発について紹介した。田中先生がプロジェクトリーダーを務めたNEDOプロジェクトにおけるマグレブ用高温超伝導マグネット開発が高性能DI-BSCCO線材の実現に繋がっており、その後Bi系線材は送電ケーブル、モーター、電気自動車、限流器、マグネットなど様々な機器のデモに用いられている。AMSC社のMalozemoff氏は、高温超伝導研究や応用開発に果たした田中先生の功績を讃えると共に、AMSC社におけるY系線材開発や交流送電ケーブル、限流器、風力発電機など多様な応用開発の現状について紹介した。SRLの現所長である塩原氏は、田中先生の指導、助言を受けて行ったY系大型単結晶や初期のY系線材開発の苦労話と共に、NEDOのY系電力機器技術開発プロジェクトで得られた最近の成果について紹介した。重要技術が市場に受け入れられるまで30-50年が必要だという田中先生がよく口にされていた言葉を引用し、Y系線材を用いた機器開発への継続的投資が必要であることを強調した。最後に、(公財)電力中央研究所の秋田氏が、1980年代にNb-Ti線材から始まった国内の超伝導交流応用研究開発の歴史と将来展望について講演した。超伝導パワー応用を正しい方向に導くには電力システムのトータル研究が必要であり、田中先生のようなポジティブ思考が必要であると強調した。

(1) 岡山大学大学院自然科学研究科 計測システム研究室 Okayama University Measurement System Laboratory

(1) 研究室の簡単な紹介

岡山大学自然科学研究科、産業創成工学専攻、電気電子機能開発講座の計測システム研究室では、センサデバイス研究開発を基幹とした計測システム開発及び応用研究を幅広く行っています。センサデバイスとしては超伝導量子干渉素子(SQUID)、テラヘルツ検出器、電界効果型トランジスタをベースにした集積化ガスセンサ、薄膜型イオンセンサ、磁気抵抗素子等の研究開発を行っています。現在、超伝導の研究においては、高温超伝導SQUIDを用いた物質の磁化特性を評価する高感度測定装置や、電気化学電極反応や太陽電池等のセル内や電極界面でのダイナミックな電気現象の磁気計測および計測装置の研究をしています。

(2) 研究室スタッフ

教授: 塚田啓二、准教授: 紀和利彦、助教: 堺健司

学生: M2: 6名、M1: 12名、B4: 16名(平成24年12月現在)

研究室は塚田・堺Grと紀和Grに分かれて研究を行っていますが、相互協力体制で計測システム研究室を構成しています。年々学生数が増加して、大所帯となっています。

(3) 研究設備

デバイス開発のためにクリーンルームの中に薄膜製造装置であるスパッタ装置や、ホト工程用の露光装置やスピナー、ベーキング装置、デジタルマイクロスコープ等、またその外には実装用としてダイシングマシン、ワイヤーボンダー等があります。センサデバイスを用いた計測システム開発研究用としては、電波シールド室、各種磁気シールドボックスなどがあり、各種特性評価用として複数台のロックインアンプや電流源、発振器、FFTアナライザ、高感度電流・電圧計などがあります。また電気化学計測用としてサイクリックボルタンメトリー等があり各種電極反応解析ができます。

(4) これまでの成果、最近のトピックス

現在SQUIDを用いた研究では、JSTのS-イノベプロジェクトで、九州大学の円福教授をPJリーダーとした高温超伝導SQUIDを用いた先端バイオ・非破壊センシング技術の開発に参画しています。その中で、(公財)国際超伝導産業技術研究センターで開発された高温超伝導SQUIDを用いた各種非破壊検査装置の研究開発を行っています。装置の種類としては大きく、物質の磁化特性を評価する高感度磁気特性計測装置と、電池評価装置があります。

高感度磁気特性計測装置として、試料を磁場中で振動させ磁化率を計測する直流磁場磁化計測装置や、回転円板上におかれた試料を磁場中に通過させ計測する回転磁化計測装置や、ヘルムホルツコイルにより交流磁場を印加した交流磁気特性評価装置等を開発しました。これらは卓上型のコンパクトで高感度・高機能な装置を目指しています。直流磁場磁化計測装置では、検出コイル形状の改良と2次高調波検出により、従来の磁化率計と比べ感度では2桁程度良い 10^{-8} emuの感度を達成しています。また、回転磁化計測装置では、磁化率だけでなく、磁場を遮断した後の磁化減衰現象も計測できるようになり、水の磁気緩和現象を正確に計測できるようになりました。

電池評価装置では、電気化学反応における電極/電解質界面および電解質中での酸化還元反応やイオン輸送、充電現象などを解析するために、電気化学反応セルと従来のサイクリックボルタンメトリーに磁気検出を組み合わせた電気磁気化学手法を新たに開発して、電気化学反応を画像化することができるようになりました。また、

太陽電池評価では、交流電圧を印加させ電池内での電流分布を画像化し、局所的な微分コンダクタンスなどpn接合における電気特性分布が解析できるようになりました。

(5)連絡先

〒700-8530

岡山県岡山市北区津島中3-1-1 岡山大学大学院自然科学研究科

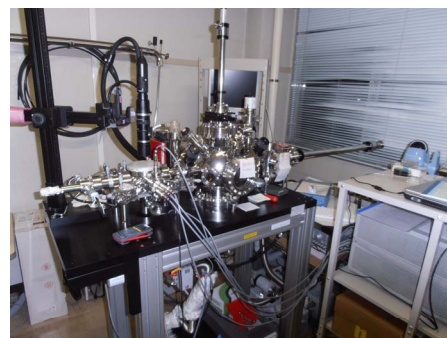
塚田 啓二 <http://www.sense.elec.okayama-u.ac.jp/>

E-mail: tsukada@cc.okayama-u.ac.jp 電話:086-251-8129

(2)岡山大学大学院自然科学研究科地球生命物質科学専攻界面化学教育研究分野 (岡山大学理学部附属界面科学研究施設粉体物性学部門)

Interface Chemistry Division, Department of Chemistry, Okayama University & Research Laboratory for Surface Science, Okayama University

岡山大学大学院自然科学研究科・地球生命物質科学専攻・界面化学教育研究分野では、主として分子系物質を基礎とする超伝導ならびにエレクトロニクスデバイスに関する教育・研究を行っています。当教育研究分野は、岡山大学理学部附属界面科学研究施設の一部門である粉体物性学部門も兼ねており、施設名からもわかるように、界面を制御することによるエレクトロニクスデバイスの高度化や界面制御による超伝導現象の発現などにも積極的に取り組んでいます。2012年12月現在、4名の教育研究スタッフ(久保園、後藤、江口、高林)と、1名の研究補助員、7名の大学院生・学部学生が上述の研究テーマを遂行しています。研究室はクラス1000のクリーンルームを有しており、デバイス作製や界面制御による超伝導に関する研究は、基本的にクリーンルームを活用して進めています。また、分子系物質や無機物質の超伝導体の合成に関する研究は、グローブボックスやスクラバーを取りつけた特殊ドラフトを使って遂行しています。研究室内に、MPMS磁気特性測定装置や各種電気抵抗測定装置、超高真空での薄膜形成・電気特性評価装置(写真)、ケルビンプローブ装置、逆光電子分光装置、STM/STS装置などがあり、超伝導特性やデバイス特性の基本的な評価を行うことが可能です。また、X線回折装置やラマン測定装置、PPMS物理特性測定装置などの学内共用の装置を使って、超伝導体やデバイスの詳細な構造・物性研究を行っています。大型放射光施設(SPring-8)が大学の近くにあるため、その積極的な活用も図っています。



超高真空電気特性評価装置

なお、現在遂行中の主な研究テーマは以下の通りです。

(1)多環縮合炭化水素系超伝導体に関する研究

2010年に我々の研究グループが初めて報告した多環縮合炭化水素分子ピセン超伝導体の研究を進めています。とくに、超伝導体積分率の増大に向けて、従来のアニーリング法に加えて、低温アンモニア合成法による試料作製研究も進めています。低温アンモニア法による合成を行うために、シリンダーキャビネットとスクラバーが取り付けられた特殊ドラフトを利用しています。最近では、ピセン以外の多環縮合炭化水素へのアルカリ金属やアルカリ土類金属のインターカレーションでも新しい超伝導体が生まれています。また、磁化測定に加えて新超伝導体の電気抵抗測定に関する研究も進んでいます。

(2)FeSeTe 系超伝導に関する研究

FeSeのSe原子をTe原子で置き換えていくと、超伝導転移温度が徐々に上昇していきませんが、ある量以上にTeの量が増えると超伝導転移が抑えられてしまいます。我々の研究室では、バルクでは超伝導を示さないFeSe_{0.1}Te_{0.9}結晶を薄くしていくと超伝導が観測され始めることを明らかにしました。その際に用いたのは、グラフィン作製に用いられるスコッチテープによる剥離法です。この方法で薄くした結晶を二酸化ケイ素基板上に張り付けて、電気抵抗測定を行うと超伝導が見いだされます。この原因の一つとして考えられるのは、基板との相互作用

用による結晶構造の変化です。我々の研究室では、上記の方法で作製した極薄剥離FeSe_{0.1}Te_{0.9}結晶を使って電界効果トランジスタを作製し、電界効果でキャリア注入を行って、物性を制御する研究も行っています。最終的には、この方法で超伝導を始めとする新奇な物性が発現することを期待しています。

(3) グラフェンの電界効果キャリア注入による新規物性の発現

グラファイトを剥離していくと、グラフェンと呼ばれる炭素原子一層のハニカムネットワーク物質を作ることができます。我々は、グラフェンを使った電界効果トランジスタを作製し、グラフェンの示す特異な物理的性質を調べています。グラフェンに高濃度のキャリアを注入するためにイオン液体を使った電界効果デバイスを作製し、その特性を体系的に調べていったところ、注入されるキャリアは期待されるほど増加しないことが実験的に明らかになりました。また、グラフェンの端を使ったデバイスの研究も行っています。最近の研究では、グラフェンを使って超伝導を発現させるためには、電界効果と化学的なドーピングを組み合わせることが重要であることがわかってきました。

(4) 連絡先、ホームページアドレス等

連絡先: 久保園芳博 kubozono@cc.okayama-u.ac.jp

研究室のホームページアドレス: <http://interfa.rlss.okayama-u.ac.jp/homejpn.html>

(5) 本研究室では助教を募集しています。詳しくは下記のホームページをご覧ください。

<http://www.science.okayama-u.ac.jp/~surface/koubo.html>

(3)九州大学大学院工学研究院 材料工学部門 金子研究室 Kaneko Laboratory, Department of Materials Science and Engineering Graduate School and Faculty of Engineering, Kyushu University

本研究室は、電子顕微鏡等を利用した微構造解析により超伝導材料の特性と組織の関係を明らかにし、プロセスへのフィードバックによる高特性化の研究を行なっています。超伝導材料をはじめ結晶性材料の物理的特性は、材料組織(構造、原子配列、組成など)に大きく依存することから、本研究室では透過型電子顕微鏡による高分解能観察法や組成・結合状態解析法、また近年国内外で注目を集める「3次元電子線トモグラフィ法」による3次元ナノ形態解析を行ない、プロセス開発に貢献しています。超伝導材料のほか、金属、セラミックス等の材料解析、材料組織の3次元解析に関する国家プロジェクトや国内企業、海外研究機関との共同研究も行っており、これら研究活動を通して材料工学分野を専攻する学生の教育に取り組んでいます。

(1) 研究室スタッフ

教授: 金子賢治 (微細構造解析、組成・結合状態解析、3次元電子線トモグラフィ、固体物性学など)

准教授: 寺西 亮 (溶液法、レーザー蒸着法による薄膜材料プロセスなど)

技術専門職員: 山田和広 (電子顕微鏡等による材料の微細構造解析など)

学生: 博士課程5名(内、社会人1名)、修士課程11名、学部4年生6名(2012年4月現在)

(2) 主な研究の紹介

◆希土類系超伝導線材の微構造に関する3次元形態・分布解析

NEDOプロジェクト「イットリウム系超伝導電力機器技術開発」の一環として、磁束の人工ピン止め点を導入した超伝導膜について、電子線トモグラフィ法により膜中のBaZrO₃等のピン止め点(図1)や結晶欠陥などを3次元可視化し、下記の情報を得ています。

- ・磁束ピン止め点や結晶欠陥の形態や分散状態

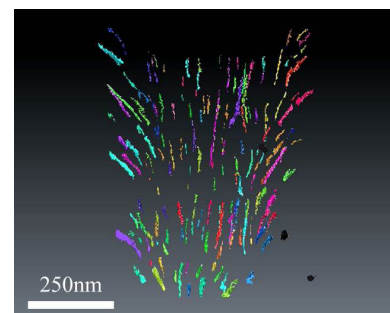


図1. 小片加工したGdBCO試料における磁束ピン止め点の3次元再構築像

- ・母相に対する柱状析出物の偏角
 - ・析出物の数密度や体積率
- など

上記解析により得られた知見をプロセス開発にフィードバックし、磁場中での電流特性の高性能化に貢献しています。

◆希土類系超伝導膜への磁束ピン止め点の導入プロセス開発

磁束ピン止め点となる微細粒子(ナノ粒子)を超伝導膜の原料溶液中に分散させる手法や、ピン止め点の構成元素(塩)を原料溶液中に溶解させる手法により、超伝導膜中に有効な磁束ピン止め点を導入するプロセス研究を行なっています。また、結晶配向性の高い薄膜が得やすいレーザー蒸着法による薄膜作製も行なっています。

◆希土類系超伝導線材の低抵抗接続プロセス開発

NEDOプロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として、線材の低抵抗接続に関するプロセス開発を行なっています。重錘式加圧熱処理炉(図2)を用い、線材安定化層(Ag)の拡散・変形による固相接合において、接合抵抗に及ぼす要因を特性評価や微細組織観察などから解析し、低抵抗接続の実現を目指しています。

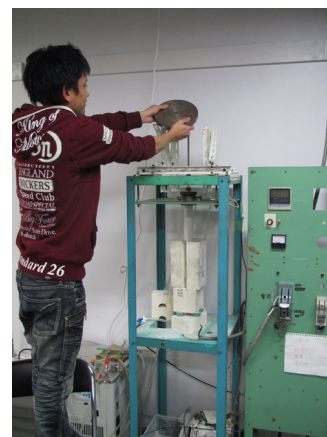


図2. 重錘式加圧熱処理炉

◆高品質な鉄系超伝導膜作製プロセス開発

2008年に発見されたFeSe系超伝導体は、単結晶バルクを用いた物性研究にてカルコゲン元素をTeやSに置換することによりキャリアドープされ超伝導転移温度が変化すること等の性質が明らかになってきましたが、線材やデバイス応用には薄膜での臨界電流密度の向上が課題のひとつです。本研究室では、電流密度が低い主な原因である膜の組成ずれやそれに伴う結晶性低下の問題に対し、薄膜成長時の膜組成や結晶配向性の基板依存性や雰囲気ガスの影響を明らかにし、品質の高い薄膜を得るための手法を研究しています。

◆超高压電子顕微鏡によるその場引張及びその場加熱による転位と析出物の相関解明

超高压電子顕微鏡(次項参照)を利用し、観察中その場引張試験によるAl合金中の転位と析出物の相互作用の解明などを行なっています。また、超高压電子顕微鏡内にてその場加熱する手法により、ステンレス鋼の粒界腐食などのメカニズム解明に取り組んでいます。図3は、Al合金における析出物および転位の3次元解析を行なった一例を示しています。析出物や転位のTEMや走査TEM(STEM)による観察、制限視野電子回折法による方位解析、STEMトモグラフィ法による析出物と転位の3次元可視化を行なっています。

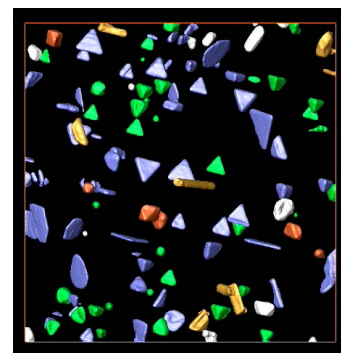


図3 3次元再構築像にて明らかとなった析出物と転位の関係

◆九州大学超高压電子顕微鏡室

本研究室が所在する伊都キャンパスには、世界最先端の電子顕微鏡を備える超高压電子顕微鏡室があり、本研究室もその運営に携わっています。その一例に、新超高压電子顕微鏡(図4、JEM-1300NEF、最高加速電圧1300 kV、点分解能0.12 nm)があります。数 μm の厚い試料の観察が可能であるほか、本装置にはオメガ型電子分光装置、テレプレゼンス遠隔操作装置、レーザービーム照射装置、元素分析装置や3Dトモグラフィシステムなどが付随しており、多元解析が可能な電子顕微鏡として稼動しています。



図4. 多元解析が可能な超高压電子顕微鏡

(3) 連絡先

金子賢治

E-mail: kaneko@zaiko.kyushu-u.ac.jp、電話: 092-802-2959

〒819-0395 福岡市西区元岡744 九州大学 伊都キャンパス ウエスト4号館650号室

金子研究室HP: <http://zaiko13.zaiko.kyushu-u.ac.jp/>

超高压電子顕微鏡室HP: <http://www.hvem.kyushu-u.ac.jp/>

(4) 株式会社日立製作所 日立研究所

材料研究センター

環境材料プロセス研究部

Department of Green Materials and Process Research, Material Research Center
Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

(1) 研究チーム紹介

当研究部は茨城県日立市を拠点としており、その中で私(一木)の所属する研究チームでは、将来の高度医療・社会インフラを支えるべく、次世代超電導材料の研究開発に取り組んでいます。2001年にMgB₂が発見されて以降は、MRIを最初のターゲットとして、その線材化技術および磁石要素技術(超電導接続、永久電流スイッチなど)の開発に注力しています。

(2) 特徴ある装置

MgB₂線材を試作し、評価するための一連の装置を保有しています。具体的には、原料粉末調整のためのグローブボックスなどの装置、線材加工のための伸線機、熱処理のための電気炉、また試作した線材の微細組織を観察するための各種顕微鏡、通電特性を評価するためのI_c測定装置、磁化測定装置などです。線材加工設備について、これまでは作製可能な限界長さが300 mでしたが、現在設備を拡張中であり、2012年度中にはkm級の線材が作製可能となる予定です。

(3) これまでの成果、最近のトピックス

MgB₂線材開発の難しさは、高い電流密度と長尺均質性を両立させることにあります。ここ数年間はこの課題を克服するための技術開発に注力してきました。まず多芯化方法に関し、単芯線を金属管に組み込んで伸線する従来の方法から、単芯線を細線化し、それを複数本撚り合わせる方法に変更しました。また単芯線の細線化加工のために、加工性を考慮した原料粉末および金属管を独自に開発しました。その結果、図1に示す長さ300 mの7芯線材の開発に成功し、そのJe-B特性(J_c: I_cをφ 1.5 mm丸線の断面積で割った値)は図2に示す通り、市販粉末を原料とした場合の約2倍に向上しました(ICEC24-ICMC2012、ASC2012に出展)*。

*共同研究機関: 東京大学、独立行政法人物質・材料研究機構

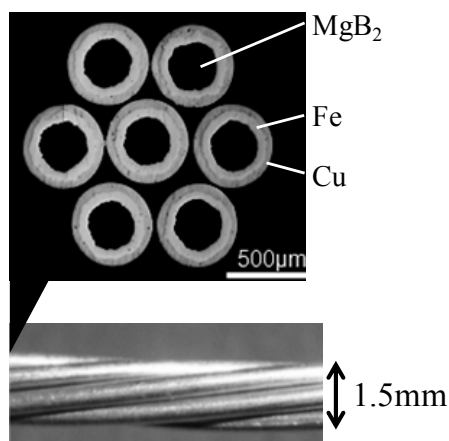


図1 MgB₂線材の外観および断面写真

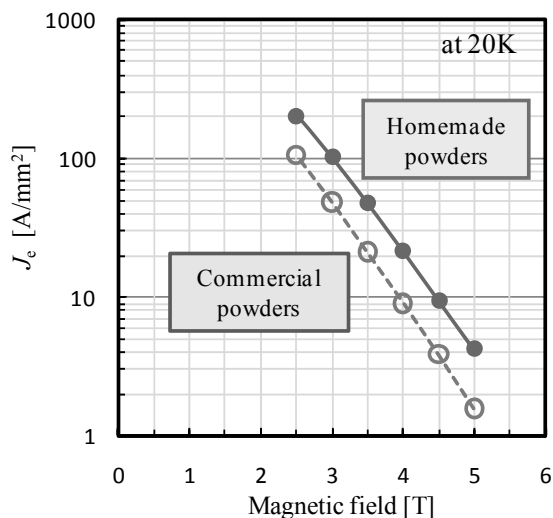


図2 MgB₂線材のJe-B特性

(4) 連絡先、ホームページアドレス

〒319-1292 茨城県日立市大みか町7-1-1

(株)日立製作所 日立研究所 材料研究センター 環境材料プロセス研究部

担当: 一木 洋太

TEL: 0294-52-5111 E-mail: yota.ichiki.rj@hitachi.com

URL: <http://www.hitachi.co.jp/rd/hrl/index.html>

(5) 東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻 岸尾研究室 Kishio Laboratory, Department of Applied Chemistry, School of Engineering, The University of Tokyo

(1) 研究室スタッフ

岸尾光二教授、下山淳一准教授、荻野拓助教、山本明保助教

(2) 研究室の簡単な紹介

私たちの研究室ではこの20年以上にわたって高温超伝導体を中心に、機能性材料の研究・開発を行っています。研究課題が、機能性新物質探索、基礎物性制御、材料化技術開拓、材料特性改善と基礎から実用材料まで広くわたっていること、これら全てに“化学”の知識や技術を生かしていること、さらに多様な物質群、薄膜、バルク、線材など様々な形態の材料に取り組んでいることが特徴です。常に「オリジナル」で「インパクト」が大きな研究成果を目指しています。

また、隔月刊の「超伝導コミュニケーションズ (SUPERCOM)」によって、超伝導関連情報を1000名以上の方々へ発送し、ホームページ (<http://semrl.t.u-tokyo.ac.jp/supercom/index.html>) でも閲覧いただけるようにしています。

(3) 研究設備

試料合成:

電気炉約40台(独自設計多数。含、赤外線集光式単結晶育成炉、高圧ガス炉(HIP))、グローブボックス3台、スピナー、ボールミル、線材加工装置、ガラス封じ切り装置(写真1)など

評価装置:

X線回折装置2式、走査型電子顕微鏡、カラーレーザー顕微鏡、TG-DTA、高温微量熱天秤、低温物性評価装置 (PPMS)、SQUID磁束計 (MPMS)、局所磁場評価装置 (磁気光学法、磁場測定法) など

(4) これまでの成果

銅酸化物超伝導体では、化学組成を精密に制御した単結晶を用いた基礎物性解明から異方性やピンニング力の制御指針を明らかにし、123系溶融凝固バルクやBi系線材になど材料の高機能化まで発展させました。最近では高温還元ポストアニールによる不定比金属組成の精密制御を通じた材料特性改善を積極的に行っています。MgB₂については多結晶体の微細組織の制御手法や臨界電流特性の抑制因子に関する研究をもとに、MgB₂材料の特性改善指針を明らかにし、さらに最近では高捕捉磁場大型バルクの開発にも力を入れています。この3年間は鉄系超伝導体および類縁化合物に関してペロブスカイト型酸化物層を含む物質探索を進めており、これまでに100種以上の新物質を発見し、うち19種が超伝導を示しました (T_c は最高47 K)。

これら成果の詳細やこのほかの研究成果につきましては研究室ホームページにリストアップしてある発表論文や解説記事などをご覧ください。

(5) 連絡先、ホームページアドレス等

ホームページ: <http://semrl.t.u-tokyo.ac.jp/>



写真1 この20年間、毎日活躍している多機能ガラス封じ切り装置。水銀系銅酸化物超伝導体、MgB₂、鉄系超伝導体などの合成における石英管真空封入だけでなく、任意の雰囲気ガスとともに石英管に試料を封入することができ、アニール、急冷後には均一な酸素組成を持つ酸化物試料が得られます。

第1回超伝導科学技術セミナー ～若手技術者向け講習会～

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
*平成24年度科学技術調査研究助成(新技術振興渡辺記念会)により開催

開催日:平成25年2月22日(金) 14:00～2月23日(土) 15:00

場 所:古河電工健康保険組合 鬼怒川荘

http://www.furukawadenko-kenpo.com/jigyo/hoyo_kinu.html

〒321-2522 栃木県日光市鬼怒川温泉大原1060-71

TEL 0288-77-0117

定 員:30名

受講料:20,000円(資料代含む)

問合せ:Tel 03-3503-4681 FAX 03-3597-0565 E-mail fsst@sntt.or.jp

概要:皆様良くご存知の通り、この数年、高温超伝導材料の開発が急速に進み、様々な応用分野に展開されつつあります。同時に次世代の超伝導科学技術を担う若手の研究開発者も増えてきました。本企画は研究開発の一層の促進に寄与することを目指して、若手研究者に超伝導に関わる広く横断的な知識を獲得する機会を用意するものです。また、他社、他研究機関の参加者との交流によって、日本の超伝導研究開発に携わる若手ネットワーク構築のきっかけとなることも狙っています。多くの皆様の積極的なご参加をお待ちしています。

<スケジュール(予定)>

22日(金)	14:00-14:10	開講のことば、スケジュールの説明、連絡事項等	下山 淳一(東大)
	14:10-15:10	超伝導の基礎(物理的性質)	伊豫 彰(産総研)
	15:10-16:10	超伝導の電気応用基礎	仁田 旦三(明星大)
	16:10-16:20	休憩	
	16:20-17:20	超伝導体の電磁特性、臨界電流特性	木須 隆暢(九大)
	17:20-18:20	超伝導機器の設計技術	田崎 賢司(東芝) /和久田 毅(日立)
	18:20-19:30	休憩	
	19:30-	夕食	
23日(土)	8:30-9:10	超伝導材料の科学(総論)	下山 淳一(東大)
	9:10-9:50	金属系超伝導線材	田中 靖三(低温工学・超電導学会)
	10:00-11:00	高温超伝導線材	飯島 康裕(フジクラ) /北口 仁(NIMS)
	11:00-12:00	超伝導デバイス	日高 睦夫(ISTEC)
	12:00-13:00	昼食、休憩	
	13:00-14:00	超伝導の医療応用	石山 敦士(東大)
	14:00-14:40	フリーディスカッション 「10年後、20年後、30年後の超伝導」	
	14:40-14:50	アンケート記入、休憩	
	14:50-15:00	閉講式	

第39回シンポジウム／第17回超伝導科学技術賞授賞式 超伝導2013(仮)「超伝導応用最前線」

日時：平成25年4月16日(火) 10:00～17:10

場所：タワーホール船堀 小ホール

研究会の動き

〔平成24年(2012年)10月1日～平成24年(2012年)12月31日〕

幹事会

平成24年度第4回

日時:平成24年10月2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7名 プロジェクト実行委員1名
事務局1名

議事:

- (1) 第80回ワークショップについて
- (2) 第17回超伝導科学技術賞について
- (3) FSST NEWSについて
- (4) 第1回超伝導科学技術セミナーについて
- (5) 超伝導本出版について

賞審査委員会

平成24年度第1回

日時:平成24年12月18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:委員10名
事務局1名

議事:

- (1) 第17回超伝導科学技術賞の選考

幹事会

平成24年度第5回

日時:平成24年12月18日(火)15:45～17:45

場所:学術総合センター11階 共用会議室

出席者:幹事9名
事務局1名

議事:

- (1) 第80回ワークショップについて
- (2) 第39回シンポジウムについて
- (3) 第17回超伝導科学技術賞について
- (3) FSST NEWSについて
- (4) 第1回超伝導科学技術セミナーについて
- (5) 超伝導本出版について

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 主任研究員	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 超伝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 研究員	日高 睦夫	公益財団法人国際超伝導産業技術研究 センター 超伝導工学研究所 デバイス研究開発部 低温デバイス開発室 室長
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 主任研究員	木村 茂行	一般社団法人未踏科学技術協会 理事長
		大貫留美子	一般社団法人未踏科学技術協会 事務局長

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／春季	H25.3.26～3.29	広島大学 東広島キャンパス (東広島市鏡山)	日本物理学会
応用物理学会／春季	H25.3.27～3.30	神奈川工科大学 (神奈川県厚木市)	応用物理学会
日本金属学会／春期	H25.3.27～3.29	東京理科大学 神楽坂キャンパス (東京都新宿区神楽坂)	日本金属学会
2013 年度春季 低温工学・超電導学会	H25.5.13～5.15	タワーホール船堀 (東京都江戸川区)	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
APS March 2013	2013.3.18～3.22	Baltimore, Maryland (USA)	http://www.aps.org/meetings/march/index.cfm
2013MRS Spring Meeting	2013.4.1～4.5	San Francisco (USA)	http://www.mrs.org/spring2013/
CEC-ICMC2013	2013.6.17～6.21	Anchorage, Alaska (USA)	http://www.cec-icmc.org/
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/

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>

- 長尺における高い臨界電流値、長手方向に優れた均一性を実現
- 高磁場における高い臨界電流密度、高い機械強度を実現
- 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



<標準仕様^{*1}>

- 線材幅 (5mm, 10mm)、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 $I_c > 500\text{A/cm-w}@77\text{K}, 0\text{T}$ 、単長 $>300\text{m}$ 級にも対応可能

型名	線材幅 ^{*2} (mm)	線材厚さ			臨界電流値 (A) (@77K, 0T)
		基板厚さ (μ m)	安定化層厚さ (μ m)	総厚さ (mm) ^{*2}	
FYSC-SC05	~ 5.15	75	75	~ 0.25	> 250
		100	100	~ 0.3	> 250
FYSC-SC10	~ 10.15	75	75	~ 0.25	> 500
		100	100	~ 0.3	> 500
FYSC-S05	~ 5.15	75	—	~ 0.15	> 250
		100	—	~ 0.2	> 250
FYSC-S10	~ 10.15	75	—	~ 0.15	> 500
		100	—	~ 0.2	> 500

*1 上記仕様は2012年4月時点のものです。仕様のご確認、ご要求等、何なりとお問い合わせ頂けますようお願い致します。

*2 線材幅、厚さは絶縁テープを含む平均値となります。

<線材構造>

絶縁テープ [ポリイミド] 12.5 μ m \times 2層; 25 μ m 重ね巻き

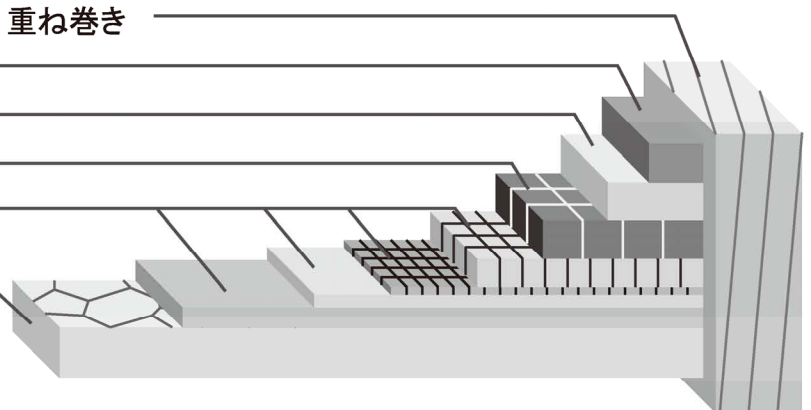
安定化層 [Cu] 75, 100 μ m

保護層 [Ag] 2 ~ 5 μ m

超電導層 [GdBa₂Cu₃O_x] ~ 2 μ m

中間層 [MgO, etc.] ~ 0.7 μ m

金属基板 [Hastelloy®] 75, 100 μ m



お問い合わせ

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

E-mail ask-sc@fujikura.co.jp / Web <http://www.fujikura.co.jp>

Fujikura Superconductor