

FSST NEWS

Forum of Superconductivity	No. 143
Science and Technology News	

発行
 一般社団法人
 未踏科学技術協会
 平成 26 年 10 月 20 日発行
 〒105-0003
 東京都港区西新橋 1-5-10
 新橋アマノビル 6 階
 Tel : 03-3503-4681
 Fax : 03-3597-0535
 Email : fsst@sntt.or.jp

<FSST NEWS No.143 目次>

<トピックス 1>

高温超伝導体固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ波放射とその熱制御
 産業技術総合研究所 浅井 栄大、川畑 史郎…………… 2

<トピックス 2>

日本における ITER 超伝導コイルの開発
 日本原子力研究開発機構 小泉 徳潔、布谷 嘉彦……………6

<会議報告 1>

第 84 回ワークショップ会議報告 産業技術総合研究所 伊豫 彰……………11

<会議報告 2>

ASC 会議報告

(1) BSCCO および MgB ₂ 線材	物質・材料研究機構	松本 明善……………12
(2) Material:REBCO 線材	九州大学	井上 昌睦……………13
(3) Large Scale HTS Coils	物質・材料研究機構	松本 真治……………14
(4) 磁石応用以外のコイル化技術	京都大学	中村 武恒……………15
(5) 2014 年応用超伝導会議で垣間見た超伝導検出器研究の最前線	産業技術総合研究所	神代 暁……………16
(6) デジタルとその関連技術	名古屋大学	田中 雅光……………18

<会議報告 3>

国際材料研究学会連合-アジア国際会議 2014 (IUMRS-ICA 2014) 会議報告
 九州大学 東川 甲平……………19

<研究室紹介>

(1) 名古屋大学 エコトピア科学研究所 グリーンシステム部門 早川研究室	……………21
(2) 日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター・シミュレーション技術開発室	……………22
(3) 東北大学 大学院工学研究科 電気エネルギーシステム専攻 津田・宮城研究室	……………23
(4) 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 物質系専攻 芝内研究室	……………24
(5) 九州工業大学大学院先端機能システム工学研究系(総合システム工学科)小森研究室	……………25
○第 19 回超伝導科学技術賞候補募集	……………27
○研究会の動き	……………28
○平成 25 年度事業報告・平成 25 年度決算報告書	……………30
○国内超伝導関連会議/国際会議及び国外の主要な会議	……………33

<トピックス 1>

高温超伝導体固有ジョセフソン接合からの テラヘルツ波放射とその熱制御

Amplification of THz emission from intrinsic Josephson junctions by external heat control

産業技術総合研究所 電子光技術研究部門
浅井 栄大、川畑 史郎

Electronics & Photonics Research Institute,
National Institute of Advanced Industrial Science and
Technology
H. Asai and S. Kawabata

1. はじめに

超伝導体の特徴づける無損失の超伝導電流は、超伝導試料全体にわたる巨視的な量子状態の発現によって引き起こされる。この巨視的な量子状態は超伝導体表面からわずかに染み出す。そのため、薄い絶縁膜を挟んだ二つの超伝導電極からなるジョセフソン接合では、それぞれの電極の巨視的な波動関数が絶縁膜を介して重なり合う。その結果、電極間に超伝導電流、即ちジョセフソン電流、が流れる。ジョセフソン電流 I_J は両電極の波動関数の間のゲージ不変な位相差: θ を用いて、

$$I_J = I_c \sin \theta \quad (1)$$

と記述され、またこの位相差 θ は印加電圧 V に対して、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{2eV}{\hbar} \quad (2)$$

という関係式に従って時間変化する (e は電気素量, \hbar はプランク定数)。この位相差に対する非線形なジョセフソン電流により、ジョセフソン接合は複雑な電磁場応答を示し、古くからその工学応用にむけた研究が進んでいる[1]。本稿で紹介する高温超伝導体テラヘルツ波発振器は、式(2)で示される交流ジョセフソン効果を利用している。

式(1)、(2)からわかるように、電圧下における交流ジョセフソン効果は、周波数 $\nu_j = 2eV/\hbar$ の交流電流を生み、接合外部への電磁波の放射を起こす。しかし、単一のジョセフソン接合からの放射強度は \sim pW程度と微弱であり[2]、電磁波発振器として利用するためには集積化したアレイ構造を作製する必要がある[3]。また接合内部の電磁波の最大周波数は超伝導ギャップ Δ の大きさによって制限される ($\hbar\nu_j < \Delta$)。そのため、AlやNb等の従来型の超伝導体を用いた場合、テラヘルツ (THz)

帯以上の高周波領域の電磁波を放射する事が難しい。このような問題点から、ジョセフソン接合を用いた実用的な電磁波発振器の実現は困難であると考えられていた。

ところが近年、Ozyuzer等は高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-x}$ (Bi2212) 単結晶に内在するジョセフソン接合を利用する事で、上記の従来型発振器の問題点を克服した。彼らは単一の単結晶試料から μW 程度の THz 波の放射を実現したのである[4]。高温超伝導体の単結晶は、超伝導性を示す CuO_2 面と絶縁性を示すブロック層が相互に積層した構造を持ち、天然のジョセフソン接合列を形成している。これらの層状構造は実際にジョセフソン接合として振る舞う事が確認されており[5]、固有ジョセフソン接合(固有接合)と呼ばれている。固有接合は、原子スケールで高密度に集積化されており、また大きな超伝導ギャップを持つ。そのため、高強度な THz波放射がわずかに数 μm 程度の厚さの単結晶構造を利用する事で可能となる。Ozyuzer等はこのBi2212の単結晶のメサ(台地)構造を作製し、この薄いメサ構造(厚さ約1 μm)に電圧をかける事で高強度のTHz波放射を達成している(図1左)。

現在、THz帯の電磁波は高速無線通信、セキュリティ、医療診断等の様々な応用に向けた研究が進んでいる[6]。しかし、このTHz波は電波と光波の中間に位置し、未だに有効な波源の開発が遅れている。そのため、小型且つ高強度なTHz波源の有力な候補の一つとして、上述の固有接合が注目を集めている。現在、国内外の複数の研究グループによって実用化に向けた研究が進んでおり[7-15]、0.3~1.6 THzの周波数帯においておよそ10 μW 程度のテラヘルツ発振が報告されている。しかし、実用化には約1 mW程度の放射強度が必要であると言われており、更なる高強度化が不可欠である。

以上のような背景から、我々は固有接合からのTHz波放射の数値シミュレーションを行い、放射強度を増強するための様々な理論提案を行ってきたF[16-18]。我々は二桁程度の劇的な出力の増強には新しいアプローチが必要だと考え、特に固有接合内部の「温度分布」に着目した。本稿では、固有ジョセフソン接合の理論模型や、発想に至った経緯などを交えながら、我々の提案した外部熱制御を利用した新しいTHz発振器について紹介したい。

2. 固有ジョセフソン接合の模型とTHz発振機構

前節で述べたように高温超伝導体の単結晶構造は固有接合と呼ばれるジョセフソン接合列と見なす事ができる(図1右)。位相差は各接合において定義され、 m 番目の接合の位相差 θ_m は隣り合う接合の位相差と接合内部の電磁場を介して結合している[19-22]。この位相差

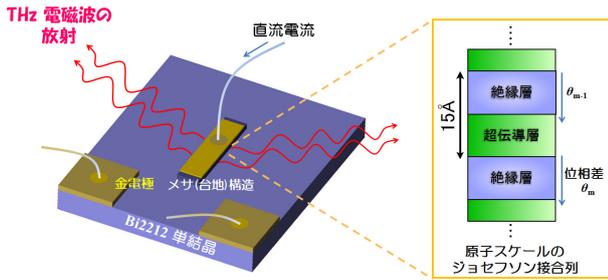


図1 固有ジョセフソン接合メサを用いたTHz発振器の概念図(左)、固有ジョセフソン接合の概念図(右)。

間の結合により、ゼロ電圧の状態では各接合の位相差は全て等しくなる($\theta = \theta_m$)。このような状況では均一な位相差 θ に対するダイナミクスは以下に示すような式に帰着する[16,23,24]。

$$\left[-\frac{\epsilon_c}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{4\pi\sigma_c}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] \theta(x, t) = \frac{1}{\lambda_c^2} \sin \theta(x, t)$$

$$\lambda_c^2 = \frac{c\phi_0}{8\pi^2 D j_c} \quad (3)$$

$$B_y = \frac{\hbar c}{2eD} \frac{\partial \theta}{\partial x}, \quad E_z = \frac{V}{DN} = \frac{\hbar}{2eD} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

ここで、 c は光速、 ϕ_0 は磁束量子、 ϵ_c 、 σ_c は固有接合内部の誘電率と準粒子の伝導度、 D 、 N 、 V は固有接合の接合間距離と枚数、そして接合全体にかかる電圧である。 B_y 、 E_z はそれぞれ磁束密度及び電場であり、固有接合は z 方向に積み重なっている(簡単のためここでは x - z 平面のみ扱っている)。この式は単一接合に対するSine-Gordon方程式と同型である。ここで、さらに θ に関する微小振動を考えると($\sin \theta \approx \theta$)、式(3)から θ が接合内部を伝搬する平面波解を持つ事がわかる。式(4)からわかるように、この位相差の横波は電磁波と一体となって伝搬する。そのため、この伝搬モードはジョセフソン横プラズマモードと呼ばれている。このプラズマモードに起因する電磁波の吸収が、実際の高温超伝導体試料において確認されており[25]、上記の固有接合の理論模型が高温超伝導体層状構造の適切な近似となる事が示されている。

メサ型の固有接合THz発振器では、加工したメサ部分(図1左参照)に電圧を印加する。そしてTHz帯の交流ジョセフソン電流をメサ内部に発生させ、ジョセフソン横プラズマを励起する。このプラズマ振動はメサ外部の電磁場とも結合しているため、そのエネルギーの一部が遠方に伝搬するTHz電磁波として放出される。このTHz横プラズマの励起において重要となるのが、1) THz波帯に対応した電圧の印加、そして、2) 電磁波の空洞共振条件、である。まず式(4)の関係式から、各固有接合に $V/N = 0.2 \sim 2$ mVの電圧をかける事で、THz帯

(0.1~1 THz)の交流電流がメサ内部に発生する事がわかる。実験的に良く用いられる厚さ $1 \sim 2$ μm の小型のメサ構造では $N = 670 \sim 1340$ 枚程度の固有接合が含まれており、THzプラズマの励起はおよそ $1 \sim 3$ V程度の電圧を印加する事で達成できる。次にプラズマ振動を増幅させるために、メサ内部で電磁波を共振させる必要がある。この空洞共振条件は、

$$\nu_J = c \sqrt{(m/2w)^2 + (n/2l)^2} / \sqrt{\epsilon_c} \quad (5)$$

で与えられる。ここで n 、 m は共振モードの次数、 w 、 l はメサの横幅と長さである。実際にこれまで報告されている強いTHz発振は主にこの空洞共振条件が満たされる際に発生している。

3. 温度の不均一性とTHz波放射強度

メサ型の固有接合THz発振器では電圧印加時にメサ内部で大きなジュール熱が発生する。固有接合の熱伝導度は金属と比べると二桁程度低いため[26]、発生したジュール発熱がメサ内部に籠ってしまう。その結果、メサ内部の温度は熱浴(基板)の温度と比べて大きく上昇し、またメサ内部には不均一な温度分布が生まれる。このようなメサ温度の上昇、及び不均一な温度分布はWang等のレーザー顕微鏡を用いた手法によって観測されている[27]。さらに近年では、南らやBenseman等が、蛍光強度が温度に強く依存する蛍光物質を塗布する事で、より直接的な温度分布観測を行っている(図2)[28,29]。これらの実験において特筆すべき点は、主に高温状態にある固有接合メサから強いTHz波放射が報告されている事である。高温において超伝導性が弱まる事を考えれば、この事実は直感に大きく反していると言える。この高強度放射の原因として考えられる一つの有力な候補が、メサ温度の不均一性である。ジョセフソン接合の臨界電流密度 j_c は温度に依存するため、温度の不均一

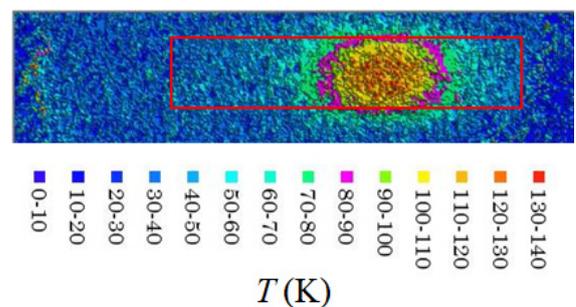


図2 南らによって観測された固有接合メサ内部の温度分布。赤線で囲まれた部分がメサ領域。メサ内部で不均一な温度分布が発生し、一部は $T_c \sim 80$ Kを大きく上回っている。(図は筑波大学の南英俊氏に提供していただいた。)

性は j_c の不均一性を引き起こす。この j_c の不均一性による横プラズマの強い励起は理論的にも報告されており[16,24,30]、高温メサからの強いTHz波放射の大きな要因となっていると考えられる。

4. レーザー照射を用いた高強度THz 放射デバイス

前節で述べた状況を踏まえ、我々は積極的に温度分布を制御する事で放射強度の向上を狙った新たなTHz放射デバイスを提案した。図3に本研究で提案した固有接合メサとレーザー系を組み合わせたデバイス構造を示す[18]。このデバイスではレーザー照射によって固有接合を局所的に加熱する事ができる。本研究ではこのデバイスの動作特性を調べるため、二次元の計算モデルを用いてTHz波放射の数値シミュレーションを行った。本研究では接合間の位相差が全て等しいというin-phase近似[16,23,24]を用いて、メサ内部の電磁場と位相ダイナミクスは式(3)、(4)を解く事で求めた。また、メサ外部の電磁波はMaxwell方程式を解く事で求めた。更に、固有接合内部のジュール発熱を考慮した熱伝導

局所的なレーザー照射

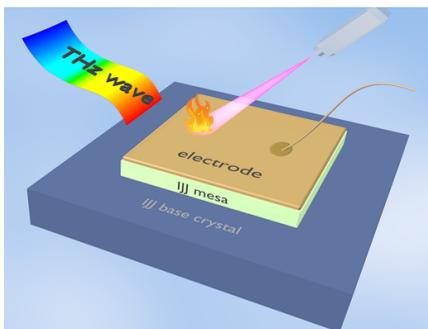


図3 本研究で提案したレーザー系と固有接合メサを組み合わせたデバイス構造。レーザーによる局所加熱によってメサ内部（黄緑）に不均一な温度分布を強く誘起し、THz波放射強度を増大させる。

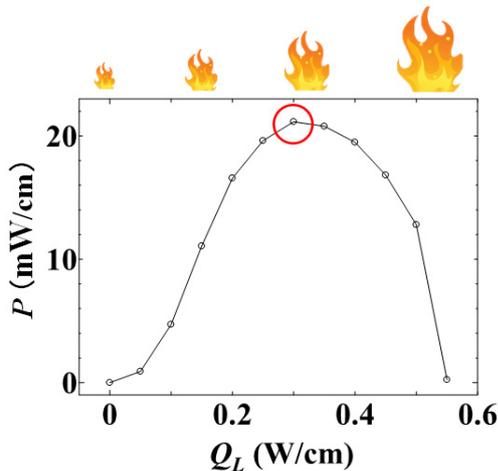


図4 放射強度 P のレーザー照射強度 Q_L 依存性

方程式も同時に解く事で、デバイス構造の温度分布も求めた。図4に計算したTHz波放射強度 P とレーザーの照射強度 Q_L との関係を示す。この図から、レーザー照射によってTHz波放射強度が著しく増大している事がわかる。また同時に、照射強度 Q_L には最適な値がある事がわかる。温度分布の解析から、この最適な Q_L は照射部分の温度が「超伝導臨界温度 T_c よりわずかに低い」状態を作る特別な照射強度である事がわかった。よく知られているように、 T_c 近傍において臨界電流密度 j_c が急激に減少する事から[1,31]、最適な Q_L 条件では大きな j_c 不均一性が得られる。この T_c 近傍における j_c の大きな不均一性が放射強度の増大をもたらしていると考えられ、実際にBenseman等の実験ではこのような状況において最大の放射強度が得られている[28]。更に本研究では、レーザー照射位置の違いによるTHz波放射強度の変化を調べた。図5に放射強度 P とレーザーの照射位置 x_L との関係を示す。この図から、照射位置がメサの端部($x_L = 0$)になる場合に最大の放射強度が得られる事がわかる。このデバイスの発振条件では、電磁波の半波長に対応した定在波モードがメサ内部に発生する(式(4)において $n = 1, m = 0$ の共振条件に対応)。このモードは、メサ中心に反対称な電場分布を示す。そのため、端部を加熱する事で得られる反対称な j_c 分布が強くプラズマモードを励起するのだと考えられる。

以上のように、我々はレーザー照射を用いた外部からの温度制御により、THz波放射強度の著しい向上が可能である事を示した。また、その最適なレーザー照射条件も明らかにした。本研究の計算結果から、300~500 μm 程度の長さを持った一般的な三次元デバイスの放射強度を見積もると、その最大強度は実用的な放射強度である1 mWを超える。本デバイスは従来のメサ型デバイスにレーザー系を追加するだけの単純なシステムである。従って、既存の実験技術を用いた作製が可能であり、近い将来実験的検証が進む事が期待される。

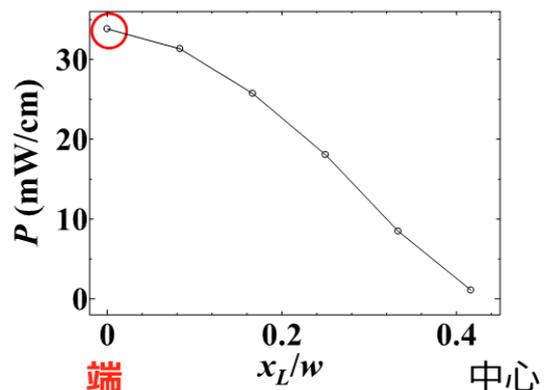


図5 放射強度 P のレーザー照射位置 x_L 依存性

5. まとめ

高温超伝導体単結晶における層状構造は、天然のジョセフソン接合列、即ち固有ジョセフソン接合(固有接合)として振る舞う。近年、新たなTHz波源の候補として、この固有接合の交流ジョセフソン効果を利用したTHz発振器の研究が進んでいる。我々は実用的な高出力THz発振器の開発に向けて、レーザー照射による温度制御を利用した新たなTHz発振器を提案した。今後、本研究で提案したようなmW級の固有接合THz発振器が作製されれば、テラヘルツ工学の分野において非常に大きなインパクトを与えるだろう。

近年、メサ型試料作製に関する実験技術の大きな進展が見られ、10～30 μ Wの固有接合発振器が高い歩留まりで作製されるようになってきている[32]。また最新の研究では、77 Kを超える高温環境において動作する発振器も報告されている[33]。そのため、固有接合THz発振器の実用化に向けた研究が、今後更に加速することが期待される。

参考文献

- [1] A. Barone and G. Paterno, “*Physics and Application of Josephson effect*” (John Wiley & Sons, New York 1982).
- [2] D. N. Langenberg *et al.*, Phys. Rev. Lett. **15** (1965) 294
- [3] P. Barbara *et al.*, Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 1963
- [4] L. Ozyuzer *et al.*, Science **318** (2007) 1291
- [5] R. Kleiner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **68** (1992) 2394
- [6] M. Tonouchi *et al.*, Nat. Photonics **1** (2007) 97
- [7] K. Kadowaki *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 023703
- [8] H. B. Wang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 057002
- [9] T. Kashiwagi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 010113
- [11] M. Tsujimoto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108** (2012) 107006
- [12] I. Kakeya *et al.*, Appl. Phys. Lett. **100** (2012) 242603
- [13] D. Y. An *et al.*, Appl. Phys. Lett. **102** (2013) 092601
- [14] T. M. Benseman *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103** (2013) 022602
- [15] S. Sekimoto *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103** (2013) 182601
- [16] H. Asai *et al.*, Phys. Rev. B **85** (2012) 064521
- [17] H. Asai *et al.*, Appl. Phys. Lett. **101** (2012) 112602
- [18] H. Asai *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104** (2014) 112601
- [19] S. Sakai and N. F. Pedersen, J. Appl. Phys. **73** (1993) 2411
- [20] T. Koyama and M. Tachiki, Phys. Rev. B **54** (1996) 16183
- [21] M. Tachiki *et al.*, Phys. Rev. B **71** (2005) 134515
- [22] S. Lin and X. Hu, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 247006
- [23] A. E. Koshelev and L. N. Bulaevskii, Phys. Rev. B **77** (2008) 014530
- [24] T. Koyama *et al.*, Phys. Rev. B **79** (2009) 104522
- [25] K. Tamasaku *et al.*, Phys. Rev. Lett. **69** (1992) 1455
- [26] M. F. Crommie and A. Zettl, Phys. Rev. B **43** (1991) 408
- [27] H. B. Wang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 017006
- [28] T. M. Benseman *et al.*, J. Appl. Phys. **113** (2013) 133902
- [29] H. Minami *et al.*, Phys. Rev. B **89** (2014) 054503
- [30] T. Koyama *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **24** (2011) 085007
- [31] S. Kashiwaya and T. Yukio, Rep. Prog. Phys. **63** (2000) 1641
- [32] 柏木隆成ら, 2014年日本物理学会秋季大会, 8pBD11
- [33] 南英俊ら, 2014年日本応用物理学会秋季学術講演会 18p-A21-5

<トピックス 2>

日本における ITER 超伝導コイルの開発 Development of ITER superconducting coil in Japan

日本原子力研究開発機構
小泉 徳潔、布谷 嘉彦
Superconducting coil development group, JAEA
N. Koizumi, Y. Nunoya

1. はじめに

発電を目指す核融合炉用超伝導マグネットでは、ジュール損失が無く、大型化や高磁場化、高性能化が可能な超伝導マグネットの使用が必須である。日本、欧州、米国、ロシア、中国、韓国、インドの7極で開発が進められている国際熱核融合実験炉 (International Thermonuclear Experimental Reactor; ITER) [1]においても、超伝導コイルが使用される計画である。ITERは2020年11月の運転開始を目標に、欧州をホスト極としてフランスのサン・ポール・レ・デュランスで既に建設が開始されている。

この中で、日本は準ホスト国として、ホストの欧州に次ぐ大きな貢献が期待されており、本体機器の約2割の調達を分担する。とりわけ、本体建設費の約1/4を占める超伝導マグネットの調達では、Nb₃Sn超伝導体やトロイダル磁場コイルなどの主要部分を分担し、参加7極中最大の貢献を行う計画である。

以下に、ITERの超伝導マグネットの構成を説明し、日本におけるITER超伝導マグネットの製作の進展について記述する。

2. ITER超伝導マグネットの構成と調達分担

ITER超伝導マグネットは、図1に示されるように、18個のトロイダル磁場(TF)コイル、1組の中心ソレノイド(CS)、6個のポロイダル磁場(PF)コイル及び磁場補正コイル(CC)から構成される[2]。超伝導マグネットはITERの中でも最も最先端の機器であることから、最後に参加したインドを除く6極で、技術を競いながら製作を進める形となっている。TFコイルでは、日本を含めた6極が导体(Nb₃Sn导体)を製作し、日本と欧州の2極がそれらを使用してコイル製作を行う。また、TFコイルで使用される構造物(コイル容器)は全量、日本が製作する。CSでは、日本が导体を全量製作し、米国がコイル化する。PFコイルは、中国、欧州、ロシアが导体(NbTi导体)を製作し、欧州が5個、ロシアが1個のコイルを製作する。電流及び冷媒の供給のためのフィーダーやCCは中国が製作する。

なお、日本においては、日本原子力開発機構(原子力機構)が、国内実施機関として、日本における上記の調達を実施することとなっている

3. 超伝導体

ITERでは、図2に示すケーブル・イン・コンジット(CIC)导体が使用される。TF导体は、直径0.8 mmのNb₃Sn超伝導素線900本、銅線522本を撚り合せて、直径43.7 mm、肉厚2 mmの円形断面を有するステンレス鋼製ジャケットに収めた構造で、定格電流値は68 kA (11.8 T)、長さは430 m及び760 mである。CS导体は、直径0.8 mmのNb₃Sn超伝導素線576本、銅線288本を撚り合せて、49 mm四方の正方形断面を有するジャケットに収めた構造で、定格電流値は40 kA (13.0 T)、長さは610 m及び910 mである。PF、CC导体も、CS导体と同様に、正方形断面のCIC导体であるが、素線はNbTiを使用している。

3.1 TF导体開発

TF导体では総量約400トンのNb₃Sn素線が必要である。図3に、6極で製作されているTFコイル用素線[3]の断面写真を示す。原子力機構では、2008年から世界に先駆けNb₃Sn素線の量産を開始しており[4]、既に全量(33本)のTF导体の製作[5]を完了している。

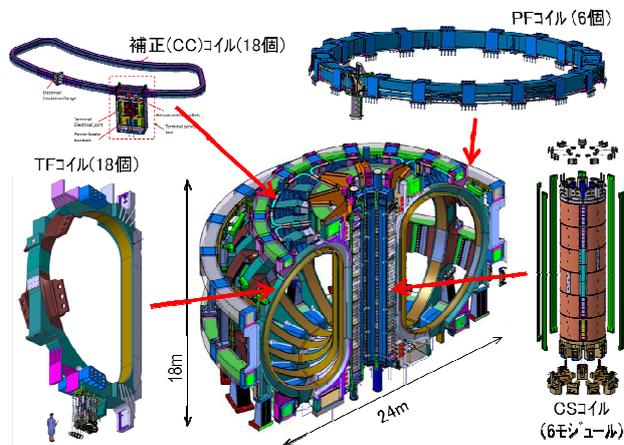


図1 ITER超伝導マグネット

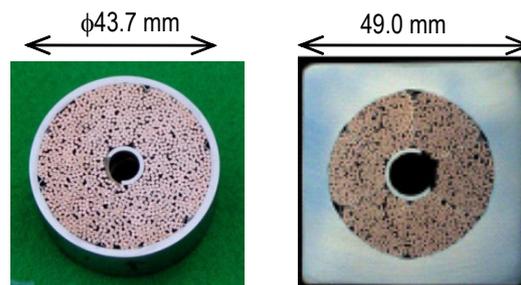


図2 TF导体(左)とCS导体(右)

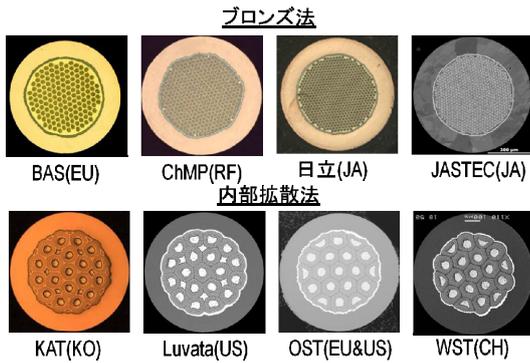


図3 ITER TFコイル用素線断面

3.2 CS導体開発

CSは最大13 Tの強磁場を発生し、ITERの寿命中、6万回のパルス運転が行われるため、CS導体の製作着手に先立ち、CS導体がこのような要求性能を満たすことを実証するため、サルタン装置による検証試験を実施した。初期の導体性能は、十分に高いものであったが、繰り返し通電により、徐々に臨界電流性能が低下する現象が観測された[6]。

この原因として、図4に示すように、導体断面の高磁場側で発生した素線の大きな曲げが挙げられる。CS導体では、巨大な電磁力で撚線が、低電磁力側に押し付けられて、図4に示すように、高電磁力側に隙間が発生する。ここでは、素線が比較的自由に動けるようになり、素線とジャケットの熱収縮差によって、素線が座屈して、大きな曲げ変形が発生すると考えられている。詳細については、[6,7]を参照されたい。

そこで、この大きな曲げを防止することを目的に、撚線ピッチを短くした改良CS導体の試験を実施した。その結果、繰り返し励磁による劣化は無くなり[8]、劣化の問題

が解決されたため、実機導体の製作に着手した。

4. 超伝導コイル

CSは高さ12 m、外径4 mのソレノイドで、同一形状のモジュールを6個重ね合わせた構造をしている(図1)。それぞれのモジュールは6個のヘキサ・パンケーキと1個のクアドロ・パンケーキで構成される。

PFコイルは大口径のリング状コイルで、トカマク上部からPF1～6と名付けられている。巻線部は2条持ち(two-in-hand)のダブル・パンケーキ(DP)構造で、外径は、最小のコイル(PF1及び6)で9 m、最大のコイル(PF3及び4)で25 mである。コイル製作では、PF1の調達ロシアが担当し、ロシア内の工場で作製される。一方、欧州が調達を担当するPF2～6は、ITERサイトの現地工場で作製される計画である

TFコイルは、図5に示すように、高さ16.5 m、幅9 mのD型コイルで、巻線部はDP構造としている[9]。各DPは超伝導導体をラジアル・プレート(RP)と呼ばれるステンレス鋼製板材の上下面に掘った溝に収める構造を採用している。7個のDPを積層し、その外周に対地絶縁を施し真空含浸を行って巻線部を構成する。巻線部には面内力で最大6万トン、面外力で最大6千トンという巨大な電磁力が発生し、これらを支持するため、巻線部は高強度ステンレス鋼の構造物に挿入され、封止される。

TFコイルの製作は、欧州及び日本で進められているが、これまでに類例のない大型超伝導コイルの開発を成功させるため、欧州及び日本で実規模試作を含めた技術検証が成功裏に進められている。TFコイルは、ITER超伝導マグネットの中で、その製作が最も困難なコイルであり、日本における技術検証の詳細、及び実機製作の進捗について、以下に示す。

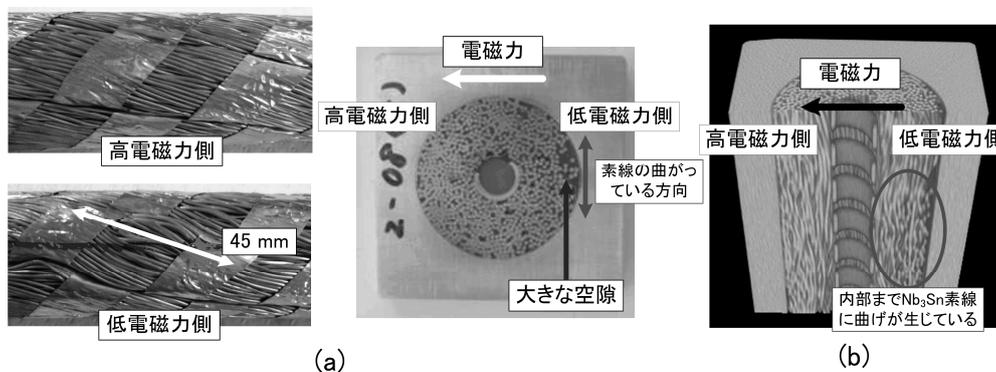


図4 性能検証試験後の撚線の観察結果 (a)目視による観察 (b) X線CTによる観察

4.1 TFコイルの製作手順と技術課題

最適化されたTFコイルの製作フローは、以下のとおりとなる。1) RPのセグメントを機械加工で製作し、最終組立前の4分割RPセグメントまで組み立て、2)これと並行して、1コイル当たり長さ4.6 kmのTF導体を、高さ約16.5 m、幅約9 mのD型に数mmの寸法公差を満足するように巻線し、3)冷媒入口部、ジョイント部を取付け、4) Nb₃Sn生成のための650°C、100時間以上の熱処理を行い、導体長を測定し、5)これにRP溝の周長が合致するように、4分割RPセグメントの最終組立を行い、6) RPの溝に、ガラス・テープとポリイミド・テープを積層して巻き付けた導体を挿入(トランスファー)し、7) 導体固定用のカバー・プレート(CP)を被せ、CPをRPにレーザー溶接し、8) DP全体にガラス・テープとポリイミド・テープを積層して巻き付け、9) 導体絶縁とDP絶縁を同時に耐放射線性の樹脂で含浸し、10) 2枚のサイドDP (sDP)と5枚の標準DP (rDP)の合計7枚のDPを積層し、DP間のジョイントを接続し、11) これらに耐放射線性の樹脂で対地絶縁を施して巻線部を製作し、12) 巻線部と並行してサブ・アッセンブリと呼ばれる4つのコイル容器セグメントも製作し、13) 巻線部とこれらのサブ・アッセンブリを組合せ、溶接、含浸することで、TFコイルとして一体化する。詳細については、[9,10]を参照されたい。

上述のTFコイルの製作において、主な技術的課題は、TFコイルの大きさに対して、数mm程度の厳しい寸法公差が要求されていることであり、典型的な例として、トランスファーが挙げられる。トランスファーでは、熱処理後の導体をRP溝に挿入するが、巻線及び熱処理によって導体長が伸縮するにもかかわらず、熱処理後の導体長とRP溝の長さの許容差は±0.02%であった。一方、先行して実施した中規模試作の結果[11,12]、全てのDP (63枚)に対して、上記の高精度を達成することは困難であり、RPの組立時に、巻線と熱処理による導体長の誤差を吸収する方法が考案された[9]。しかし、本方法を採用しても、±0.05%の公差を達成する必要がある。

本公差を達成するためには、1) 高精度で巻線寸法(導体長で±0.01%)を管理できる巻線技術の開発、2) 熱処理時の導体の伸縮量を想定した公差(全体で±0.02%、各ターン間のばらつきで±0.01%)で正確に予測する技術、3) RPの高精度製作技術(±0.01%)、及び4) 巻線、RPの高精度寸法計測技術(±0.01%)が必要となる。これらの技術検証のために、実規模試作を実施しており、これらの結果について、次項で紹介する。

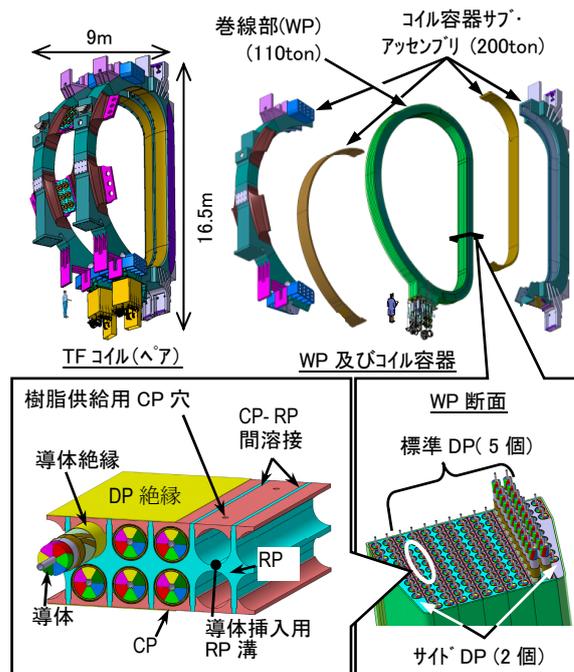


図5 TER TFコイル及び構造物

4.2 TFコイル実規模試作

1) 巻線試作

導体の長さは巻線ヘッド近傍に取付けたエンコーダで連続的に測定するが、導体とエンコーダ間で滑りが発生して、これによる誤差が蓄積されるため、目標の±0.01%の精度で導体長を管理することは困難である。そこで、光学的な導体長測定手法を開発し、採用している[11]。具体的には、レーザ・マーカと2台のCCDカメラで構成される導体長測定装置により、3m毎に光学的に導体の長さを測定し、この長さでエンコーダにより測定された導体長を補正して、高精度に導体長を管理する。

上記の手法により理論上は導体長を高精度で管理できるが、様々な誤差により巻線後の導体長に誤差が生じることから、巻線したターンに付けたマーキングと設計位置との差を測定し、その差を逐次フィード・バックして、ターン毎に導体長を高精度に管理する手法を採用している。

本巻線機を用いて、銅撚線を使用した実規模ダミー導体でrDPの巻線を、TF導体を使用してsDPの巻線を実施した。図6に巻線後のダミーrDPの写真を示す。巻線後のダミーrDP及びダミーsDPの各ターンの導体長の測定結果の設計値からのずれ量を図7に示す。図より、目標とした±0.01%の精度を達成できることが確認できた。

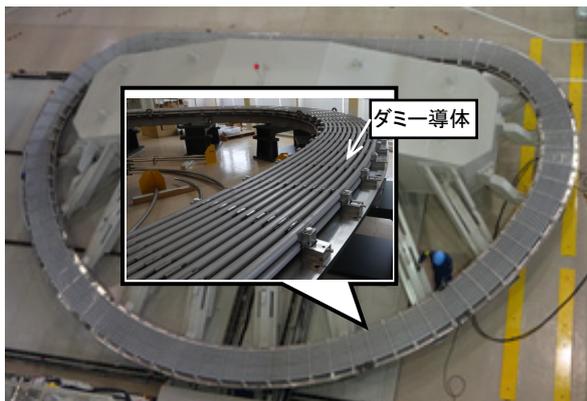
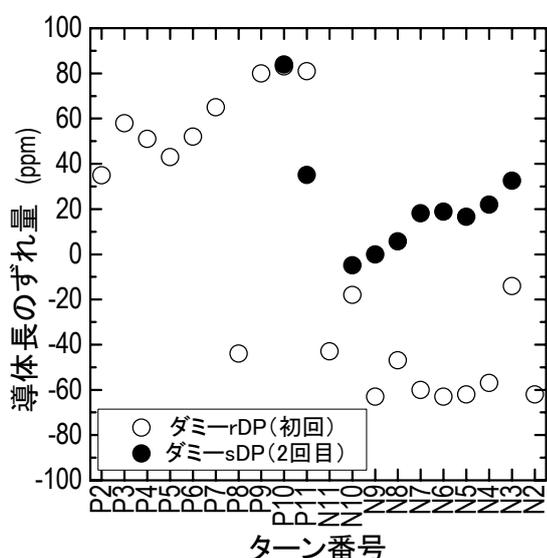


図6 新たに開発した巻線機によって試作したダミーrDP巻線



うことで、熱処理後の巻線形状を設計値に対して、目標とする±0.02%の高精度で管理できる目途が立った。

また、新熱処理炉は真空炉であり、酸素や水分などのガス濃度も目標の200 ppm以下に管理でき、加えて、熱処理温度である650°Cで±5°Cの高精度の温度管理も可能であることが確認できた。

4) RP試作

実規模サイドRP (sRP) の試作も実施しており、高精度で製作が可能であることが検証できている。

5) 重要コンポーネントの試作、試験

TFコイルのジョイントや冷媒入口部等の重要コンポーネントについては、性能検証試験を実施した。

例えば、ジョイントについては、実規模ジョイント・サンプルに対して、NIFSが所有する試験装置を用いて、運転条件である68 kA、2 Tで通電試験を実施し、要求値である3 nΩに対して十分小さい1 nΩのジョイント抵抗が達成可能であることを確認した[14]。

その他にも、冷媒入口部の疲労試験を成功裏に終了している。

以上の実規模試作の成果から、日本では実機TFコイルの製作に着手している。実機製作の進捗については、次項で簡単に説明する。

また、欧州においても、日本と同様に実規模試作等が進められ、加えて、実機コイルの製作にも着手している。

4.3 TFコイル実機コイルの進捗

ITERの要求工程を満足するために、日本では、各段階毎に実規模試験で検証されたプロセスから、実機コイルの製作を開始している。

製作に長期間を有するRPについては、2013年10月よりRPセグメントの製作を開始し、10枚分のRPセグメントの製作を完了している。

巻線部については、巻線、熱処理、及びトランスファー試作の後、2014年3月から巻線を開始し、4個の巻線を完了し、また、1個のDPの熱処理を成功裏に完了している。なお、これらの巻線では、±0.01%の導体長管理に成功しており、また、熱処理による導体の伸びは0.07%と評価され、予測範囲内である。

5. まとめ

ITERでは、高性能で大型の、類例を見ない超伝導マグネットの実現を目標として、ITER参加各極は最高の超伝導技術をフルに活用して調達活動を実施している。

日本では、導体製作において、日本が調達を担当する33本の全てのTF導体の製作を成功裏に完了し、日本が全量の調達を担当するCS導体について、繰返し通電で発生した劣化現象について、素線の座屈による大きな曲げであることを示すとともに、撚線ピッチを短くすることで、この曲げが防止できることを示した。この結果を受けて、実機CS導体の調達に着手した。

また、TFコイル製作のための実規模試作を実施し、±0.01%の導体長管理を可能とする巻線技術を開発、検証し、加えて、導体のRPへのトランスファー試験を実施し、トランスファーが可能であることを確認した。また、実機熱処理試験を実施し、熱処理による導体の伸びを約0.06%と評価した。加えて、RPの高精度製作技術を検証した。これらの成果から、実機TFコイルの巻線部製作を進めている。

参考文献

- [1] ITER, Project report (On line). Available: <http://www.iter.org/reports.htm>.
- [2] K. Okuno, *et al.* Nucl. Fus. **47** (2007) 456.
- [3] A. Devred, *et al.*, Supercond. Sci. Technol., **27** (2014) 044001.
- [4] 名原啓博ら, 低温工学 **47** (2012) 140.
- [5] 濱田一弥ら, 低温工学 **47** (2012) 153.
- [6] T. Hemmi, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., **22** (2012) 4803305.
- [7] T. Hemmi, *et al.*, Supercond. Sci. Technol., **26** (2013) 084002.
- [8] Y. Nabara, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014) 4200705.
- [9] 小泉徳潔ら, 低温工学 **47** (2012) 135.
- [10] K. Matsui, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., **22** (2012) 4203005.
- [11] 松井邦浩ら, 低温工学 **47** (2012) 160.
- [12] 松井邦浩ら, 低温工学 **47** (2012) 166.
- [13] 高野克敏ら, 低温工学 **47** (2012) 178.
- [14] H. Kajitani, *et al.*, "Evaluation of ITER TF Coil Joint Performance", IEEE Trans. Appl. Supercond., **25** (2015) (to be published).

<会議報告 1>

第 84 回ワークショップ会議報告

Report on the 84th Workshop

(独)産業技術総合研究所

伊豫 彰

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

A. Iyo

(一社)未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会が主催する第84回ワークショップが、7月22日(火)に全日通霞ヶ関ビルで開催された。今回は、「新しい超伝導体のホットな話題、最新の理解」というテーマで、研究現場で試料合成や物性測定を実際に行っている6人の若手研究者による講演が行われた。その内訳は、鉄系高温超伝導体に関する講演が4件、BiS₂系新超伝導体に関する講演が1件、鉄系以外の新超伝導体に関する講演が1件であった。

最初に鉄系超伝導体の発見者である神原陽一氏(慶應義塾大学)が「1111相鉄系超伝導体の相図に関する最新の話」と題する講演を行った。LaFeAs(O,F)に代表される1111相の電子磁気状態相図に関して、磁性と超伝導の共存する組成領域は無いことが、丁寧に合成した試料を用いた実験により示された。磁性と超伝導の共存は122相で報告例があるが、これは試料中の半強磁性相と超伝導相の偏析によるもので、本質的でないというのが神原氏の見解であった。1111相について、Fの代わりにHを用いることによって、Fの2倍以上のドーピングが可能となること、相図上に二つのT_cドームが現れることなど興味深い現象も紹介された。試料中のFやHの定量性に関する詳細なコメントがあり、化学屋としてのこだわりが感じられる講演であった。

次に、「122相超伝導体に関する最新の話と理解」と題する中島正道氏(大阪大学)による講演が行われた。BaFe₂As₂を代表とする122相には、例えばSrNi₂P₂など大変多くの物質バリエーションが存在すること、超伝導発現方法も多彩であることなどが紹介された。BaFe₂As₂が母物質の場合、超伝導はBaサイトのK置換、FeサイトのCo置換およびAsサイトのP置換によって誘起されることが示された。それら置換サイトの違いによって生じる電気抵抗率のドーピング量依存性や最高T_cの違いについて、わかりやすい説明がなされた。最後に、FeAs面内の異方性に関する最新の実験やその解釈が述べられた。ネマティック秩序といった新しいキーワードも現れ、122相が物理的に興味深い現象を内包しているという印象を受けた。

1111相や122相と並んで鉄系を代表する物質群である11相に関して、今井良宗氏(東京大学)が講演「11相超伝導体に関する最新の話と理解」を行った。講演前半に、11相が大きな圧力効果を示しT_cが4倍(~ 30 K)も増大すること、Fe(Se,Te)層間に有害な過剰鉄が入りやすく、様々なアニール法によって過剰鉄が取り除かれていることなど、11相の特徴が紹介された。講演後半に最も興味を引いたのは、SrTiO₃基板上に成長させたFeSe単ユニットセル膜における高温超伝導の可能性である。輸送特性では、T_c > 100 Kを示唆する報告も出ているとのことである。T_cの大幅な増強に基板のフォノンが関与しているとの議論もあり、今後の研究動向が注目される。11相の派生物質であるA_xFe_{2-x}Se₂(Aはアルカリ元素)やFeSe層間への様々な分子がインターカレーションにより、T_c = 30 ~ 45 Kの物質が発見されていることも紹介された。

上記の3つの相に属さない鉄系超伝導体について荻野拓氏(東京大学)が「ユニークな構造を持つ鉄系新超伝導体」と題して講演した。冒頭、ペロブスカイト関連構造をブロック層とする物質や既知化合物同士の積層により生成した新物質などが紹介された。ペロブスカイトブロック層を持つ化合物について、ブロック層の厚みが増大するほど不可逆磁場が小さくなることが図示された。ただし、ブロック層の導電化により、この状況が変わりうるとのコメントがなされた。最近発見された新超伝導体(Ca,RE)FeAs₂(112相)(REは希土類元素)に関してAs-Asボンドを有する超伝導体として整理され、T_cのRE依存性などが示された。化学的見地から見た鉄系超伝導体が整理・分析されており、今後戦略的な物質探索によって新しいブロック層を持つ新物質が発見されるのではと言う期待を抱かせる講演であった。

水口佳一氏(首都大学東京)は「BiS₂系、BiSe₂系超伝導体の最新情報と可能性」と題して、自ら発見した新超伝導体に関する講演を行った。この系には、新しいブロック層やBiSe₂系も新たに加わり、現在計15もの超伝導群を形成するまでになっている。As-grown試料で数KだったT_cが、加圧あるいは高圧下でのアニーリングにより、最大約11 Kにまで上昇することが示された。加圧下の構造解析により、T_c上昇には構造相転移による高圧相への移行が関係していることが示唆されているとのことである。単結晶の育成にも成功しており、今後より詳しいT_cの上昇メカニズム解明が期待される。この物質は、新しい超伝導ネットワークの発見により次々と研究が展開していく好例であろう。

最後に、「次々と出現する新奇超伝導体」というタイトルで、石田茂之氏(産総研)が鉄系の発見以降に報告された新奇超伝導物質に関するレビューを行った。鉄

系以降、物質探索が活性化し、50以上の新超伝導体が報告されているとのことである。構造的あるいは物理的な見地から分類を行い、それぞれに付いて詳細な説明がなされた。例えば、鉄系122相類縁物質では、 SrPt_2As_2 ($T_c = 5.2 \text{ K}$) など10種類もの新超伝導体が列挙された。最後に、産総研で最近発見されたBa-Ir-Ge化合物や Ba_2Bi_3 、 $\text{ZrP}_{2-x}\text{S}_x$ などの新超伝導体が紹介された。

このワークショップを通じて受けたメッセージは、銅系、 MgB_2 や鉄系などの強烈なインパクトを持つ超伝導体の発見の陰には、その何十倍もの数の新超伝導体の発見があることである。さらにその裏にはその何十倍もの試行錯誤があるに違いない。冒頭の下山会長から紹介された故前田弘先生の言葉の通り、とにかく実際に挑戦することが次の大発見のために大事であると感じた。超伝導物質の大発見は、20年毎になされるという年表が示されたが、前倒して次の高温超伝導体が発見されることを期待したい。

<会議報告 2>

ASC 会議報告

Report on Applied Superconductivity
Conference 2014

(1) BSCCO および MgB_2 線材 BSCCO and MgB_2 Coated Conductors

物質・材料研究機構 松本 明善

2014年8月10日～15日の期間、米国東海岸沿い中域にあるノースカロライナ州のシャーロット市において開催された応用超伝導会議について報告を行いたい。この地名についてよく知っているという方は少ないと思われるが、(1)UAのハブ空港、(2)バンクオブアメリカとワコビア銀行が本店を置いている(3)NASCARレースの発祥の地であることから米国では日本人が考えるより有名であるらしい。実際、最初のオープニングでもChairmanのElie K. Trackはレーシングスーツに身を包みNASCARを模した登場の仕方でこれまでの会議ではあまり観られない演出であり、今年のテーマも“Race to Energy Efficiency”であった。さて会議自体であるが、全体的な印象はこれまでと大きく変わっていない気がするが、発表についてはMaterial:414件、Large scale:766件、Electronics:388件とLarge scaleが最大となったことが印象深い会議であった。まさに会議の名の通り、超伝導が応用へ向けて研究がシフトして行っていることを数自体で表しており、喜ばしい状況でもあるといえる。

さて、ここでは開催された応用超伝導会議におけるBSCCO線材および MgB_2 線材の最近の動向について報告を行う。全てを網羅することは困難であるため、著者の興味深いところに特化して報告することをお許し願いたい。 MgB_2 に関するセッションおよび発表数はそれぞれ6セッション、50件であった。BSCCOに関するセッションおよび発表数はそれぞれ4セッション、50件であった。偶然にも公表された発表件数は同数であった。

BSCCO線材については強磁場用線材として開発を行っているBi2212線材がアメリカで行われており、関連する発表が多く、Bi2223線材については住友電工からだけである。今回はBSCCO線材のセッションの一つが急遽前田弘氏のメモリアルセッションとして設定された。セッション開始前に熊倉浩明氏、佐藤謙一氏、Pamidi Sastry氏、Justin Schwartz氏より前田氏との思い出について語られた。日本側からは研究だけでなく、趣味のテニスや絵画についての話や、米国では退職後に仕事をしていた米国強磁場研究所での様子が語られた。Bi2212線材は低温高磁場下での特性が優れており、現在、強磁場用マグネット線材として注目されており、アメリカで研究が盛んに行われている。線材作製メーカーであるオックスフォードのH. Miao氏からは最近の特性改善について報告があった。Bi2212線材は熱処理中にガスが発生し、大きな空隙になることが問題となっており、線材特性劣化の要因となっていた。これに対して、製造過程を見直すことにより製造過程におけるCとHの量を70%削減することに成功し、線材特性向上に成功した。それらの結果、現在、4.2 K、15 Tの磁場中で $J_c = 550 \text{ A/mm}^2$ を達成することができたことを報告した。一方で、NHMFLのJ. Jiang氏はBi2212線材における問題点を指摘した上で、加圧焼成が有効である事を示した。Bi2223線材においては加圧焼成が住友電工により商品化されているが、Bi2212線材においても有効であることを示した。その結果、短尺ではあるが、4.2 K、20 Tの磁場中で $J_c = 640 \text{ A/mm}^2$ を達成することができたことを報告した。Bi2212線材においてはこの2つのグループが突出しており、米国でのプロジェクトを牽引している。その他にはBi2212の粉末の作製方法や組成を改善したものについて多数の報告があった。

MgB_2 についてはGeneva大学のR. Fulukiger氏が基調講演でほぼ全ての線材の現況および様々な応用機器開発が行われているとの講演があった。Hypertech社のM. Tomsic氏からは MgB_2 線材の現況について報告があった。 MgB_2 線材は原料のMgを粉末で挿入するかロッドで挿入するかによってPIT (Powder In Tube) 法およびIMD (Internal Mg Diffusion) 法あるいはAIMI (Advanced Internal Magnesium Infiltration) 法として分

類されているが、Hypertech社ではPIT (in-situ) 法を1G、AIMI線材を2G線材と称して開発を進めている。1G線材は4.2 K, 10 Tおよび20 K, 5 Tで $\sim 10^4$ A/cm²近くに達していることを示した。一方、2Gでも J_c 、 J_c ともに上昇しつつあることを示した。一方で、多数の応用機器プロジェクトを抱える同社であるが、限流器、風力発電用タービン、MRI、直流ケーブルの現状について報告があった。最後に4.2 K, 1 Tで5ドル/kAmの線材コストも5年後には1/10まで下げることを目指していると報告があった。その他、中国科学院のY. Maからはグラフェン添加による特性向上、Wollongong大のM. S. A. Hossain氏からはトルコのPavezyum社のCでカプセルしたB粉末の特徴について報告がそれぞれあった。今回はさらに多くの報告があり、日本からも線材ではNIMSやバルクでは東大から、それぞれ報告があったが割愛させていただいた。また、MgB₂線材の超伝導接続の話も行われており、基礎から応用へと幅広く報告が行われていることが印象深かった。

(2) Material: REBCO 線材

Material: REBCO Coated Conductors

九州大学 大学院システム情報科学研究所
井上 昌睦

Graduate School of Information Science and Electrical
Engineering, Kyushu University
M. Inoue

Materialのセッションには口頭発表とポスター発表を合わせて390件程度がエントリーされており、その内容は、LTSからMTS、HTSに亘る幅広いものであった。本稿では、REBCO線材に関する話題の中からいくつか紹介したい。

REBCO線材の開発状況として、フジクラ、昭和電線、SuperPower、AMSC、SuNAM、Brukerといった主要な線材メーカーの諸特性が報告された。REBCO線材を用いた機器の開発において必要不可欠な、線材の長尺化と臨界電流の空間均一性の向上についての取り組みが主要成果のひとつとして紹介されており、プロセスの改善により数100 mから1,000 m程度に亘り臨界電流(I_c)の空間分布の標準偏差が10 A/cm-wを下回るに至るとの報告が各社からなされている。但し、臨界電流の標準偏差は計測時の電圧端子間距離に依存するため、注意が必要である。

I_c の空間的揺らぎに対する統計性について、T. Kiss (Kyushu Univ.)から報告がなされた。走査ホール素子

顕微鏡(SHPM)による局所 I_c 分布の計測結果から、空間周波数(f)に対するスペクトルを調べると、低周波において $1/f$ で減少する振る舞いが見られた。これは、特定の周波数で観測される強いスペクトルが線材作製時の特定の原因に依るのに対して、作製プロセス上のシステムノイズとして存在する揺らぎであることを意味しており、今後は、このような統計的解析によりプロセス固有の揺らぎについて考察することが重要である。

一方、TapestarTMや連続通電 I_c 測定などの標準的な検査を通過した線材であっても、局所的には J_c が低下している領域があり、RoebelケーブルやMulti-filament線材などの加工線材への使用においては十分でないこともあるとの報告もなされている。A. Polyanskii (ASC, NHMFL)らは、MOIにより局所的な低 I_c 部を特定し、当該箇所の顕微鏡観察を通じて低 I_c の原因を考察している。金属基板の欠陥がバッファ層のクラックや欠陥につながり、超伝導層の2軸配向成長が大きく阻害されているのが低 J_c の原因とのことである。同様の報告は、M. Weigand (Univ. of Cambridge)も行っており、基板の粒界が中間層から超伝導層にかけてmeandering grain boundariesを形成する例を示している。これらの結果は、REBCO線材内部の J_c 分布の評価は、長手方向だけでは必ずしも十分ではなく、幅方向を含めた2次元での評価が重要であることを意味している。 J_c の2次元分布計測にはSHPMが有効であり、K. Higashikawa (Kyushu Univ.)が同手法を用いた J_c 分布評価を行っている。また、V. Selvamanickam (Univ. of Houston)もSHPMを導入したとの報告を行った。24 filamentsの線材の電流分布の可視化を実現しているとのことである。

REBCO線材のJointについては、口頭発表とポスター発表の両方でセッションが設けられるほど多くの報告がなされた。また、昨年Resistance-freeの超伝導接続について報告を行った韓国のKJoins社はブースの展覧を行っていた。

W. Straka (NC State Univ.)は、KJoins社と同様、安定化層を除去した超伝導面をface to faceに張り合わせる超伝導接続について報告した。12 MPaの圧力を加え熱処理する手法で、接続後は、Resistance-freeには至っていないものの、 J_c 及び n 値の変化はほとんどなかったとのことである。

T. Lécresse (MIT)は、ダブルパンケーキ(DP)コイルのコイル接続について報告を行った。一般的な接続方法である線材を上下に重ねて半田(In:80%, Sn:15%, Ag:5%)接合したLap jointにおいては、32 nΩから143 nΩ程度のバラつきの大きい接続抵抗値になる(100以上のサンプルによる試験)が、6 mm幅の素線を平行に並べ、その上に12 mm幅の線材をある程度の長さ

亘って半田(Pb:37%, Sn:63%)接続するBridge jointと呼ばれる接続方法では、77 Kで30~36 n Ω 、4.2 Kで20 n Ω 程度の接続抵抗が安定的に得られることを報告している。同手法を用いた94-DPコイルにおいて設計どおりの発熱特性が得られていることも報告している。

Y. Zhang (SuperPower)は、delaminationについて報告を行った。pin-pull法およびanvil法によるc軸方向の引張試験を100サンプル以上に対して行ったところ、引張力と試料の破壊確率との関係が、Weibull関数でよく記述できることを報告した。このときの破壊確率1%のtensile strength($\sigma_{0.01}$)は、約18 MPaとのことである。また、peel試験により剥離特性を調べたところ、多くの場合はREBCO層内で剥離しているとのことであった。

Abraimov (NHMFL)は、32 T超伝導マグネットの開発プロジェクトの一環として実施した168本のREBCO線材(SuperPower社製)の臨界電流特性について報告を行った。4 K、17 T、磁場印加角度18°(テープ面に平行な角度を0°と定義)における I_c の統計分布を調べたところ、標準偏差は平均値の16%程度であった。これは、77 K、自己磁場での I_c の標準偏差12%に比べると若干大きいものの、同一線材に対する相関は比較的良く一致しているとのことである。168本の線材は、2種の装置で作製されており、さらに膜厚も異なっているものの、上記の I_c のバラつきは同程度とのことである。

X. Aixia (Univ. of Houston)は、高濃度のZrを添加したREBCO線材において高いピンニング特性が得られることを報告した。25%のZr添加によって巨視的ピン力密度は16 GN/m³が、不可逆磁場は15 Tが得られている。また、15%のZr添加では、3 μ mまでの厚膜化に成功し、65 K、5 Tでの角度に対する最小の I_c が300 A/mm²程度に達したとのことである。また、77 K、3 Tでの I_c と30 K、3 Tでの I_c との相関について調べたところ、Zrの添加量に関わらず傾き19.5 A/12 mm-w程度の線形性が得られるとの報告がなされた。30 K、65 Kなどの間の温度でも線形性は得られていることが示された。但し、77 K、1 Tの I_c との相関は得られていないとのことである。

(3) 強磁場高温超伝導(HTS)コイル

Large Scale HTS coils

物質・材料研究機構
松本 真治
National Institute for Materials Science
S. Matsumoto

多数の高温超伝導(HTS)コイルに関連する発表が

行われた。各地でHTSコイルを用いた20 Tを超える強磁場磁石開発が進行中であり、同時に、HTSコイル応用における課題も解決が急がれるといった状況にあるとの印象をもった。最終日のプレナリーセッションにおいて、Boebinger氏(NHMFL)が述べたように、今後の強磁場環境の発展にむけて、強磁場を利用する側からの、HTSコイル技術開発への期待は大きい。

HTSコイルを用いた強磁場磁石開発については、淡路氏(東北大学)より25 T伝導冷却型磁石、Hornung氏(KIT)より20 T磁石の25 Tへのアップグレード、Lalitha氏(BNL)よりSMES用24 T磁石、Shen氏(FNAL)よりBi-2212コイルの応用、Wang氏(CAS)より25 T磁石、Iwasa氏(MIT)より1.3 GHz NMR磁石、前田氏(理研)より1.2 GHz NMR磁石開発に向けての検討、Markiewicz氏(NHMFL)より大口径900 MHz NMR磁石の将来的な25 Tへのアップグレード、Bird氏(NHMFL)より60 Tハイブリッド磁石の構想、Weijers氏(NHMFL)より32 T磁石について報告があった。

HTSコイル応用における課題、とくに、RE系コイルにおける、含浸されたコイルの熱応力による線材の剥離、遮蔽電流の影響、コイル保護等の問題についての議論が多く行われた。含浸コイルの剥離問題については、宮崎氏(東芝)より、コイルの内外径比をある一定内に抑さえ、径方向の熱応力を低減させることで回避できると報告があった。また、Fleshler氏(AMSC)より、両側に銅を貼り合わせ線材で製作したコイルは含浸を行ったが剥離は生じなかったと報告があった。遮蔽電流対策については、柁川氏(九州大学/MIT)より、NMR磁石のための遮蔽電流を除去する補償コイルを用いる方法が提案された。金氏(理研)より、NMR磁石への利用を想定したスクライビング線材について報告があった。また、有谷氏(早稲田大学)より、多層コイルにおける遮蔽電流が作る磁場について実測結果と数値解析結果の比較について報告があった。前田氏(理研)により、RE系コイルを用いたNMR磁石では遮蔽電流の効果が大きいと、従来のシムコイルでは十分な効果が得られず、最内層の超伝導シムコイルや室温鉄シムが必要であり、高分解能NMR測定には困難がともなうと報告があった。コイル保護については、Gavrilin氏(NHMFL)より、現在開発中でクエンチヒーターの搭載が予定されている32 T磁石のクエンチ解析について報告があった。現在、東北大学で開発中の25 T磁石については、淡路氏(東北大学)より、HTSコイルの交流損失は2台の冷凍機で対応可能であること、宮崎氏(東芝)より、HTSコイルの分割と外部保護抵抗の最適化でクエンチ時の電流増大を抑制できることについて報告があった。自己保護とコイル電流密度が増加するという利点により、期待と関心が集

まっている非絶縁コイルについて非常に多くの報告があった。Hahn氏(MIT)の講演においては、どのくらいの大きさまで非絶縁コイルが適用可能かの議論が繰り広げられた。柳澤氏(理研/千葉大学)より、非絶縁コイルが自己保護に至るメカニズムについて報告があった。Iwasa氏(MIT)より、1.3 GHzを超えるような強磁場NMR磁石には非絶縁コイルが不可欠であるとの見解が示された。

Bi-2212コイルの実機サイズの磁石への応用について報告があった。Bi-2212コイル開発については、Shen氏(FNAL)やTrociewitz氏(NHMFL)より報告があった。また、Boebinger氏(NMHFL)とMaeda氏(理研)より、Bi-2212内層コイルを組み込んだNMR磁石をNHMFLと理研で共同開発することが発表された。

HTSコイル関連では、Iwasa氏(MIT)より、永久電流モードHTSシムコイルについて報告があった。また、Marshall氏(NHMFL)より、Bi-2223テープ線材を積層させたHMFLのハイブリッドマグネット用20 kA級の電流リード開発について報告があった。加速器用HTSコイル開発について、Kirby氏(CERN)、佐野氏(京都大学)、小柳氏(東芝)より報告があった。小柳氏(東芝)より、加速器用サドル型コイルの巻き線方法の確立とコイル試験結果について報告があった。

(4) 磁石応用以外のコイル化技術

Coiling Technology without Magnet Applications

京都大学
中村 武恒
Kyoto University
T. Nakamura

磁石応用以外の超伝導コイル化技術(MRI/NMR、核融合等、積極的な磁場発生装置としての応用を除いたもの)については、希土類(RE)系高温超伝導テープ材ならびにMgB₂線材を適用した講演が多いとの印象を持った。前者材料については、特有のテープ構造に伴う問題(遮蔽電流特性、剥離特性、クエンチ特性他)が、また後者については、安価であることを武器とした低温・高磁場発生が主たるテーマと思われる。また、上記コイル応用としては、風力発電に関する講演が多いとの印象を持った。本稿では、筆者の興味を引いたテーマを中心として報告する。

SIEMENS(Germany)のPeter Kummethらは、"Design and development of a test-rig for HTS generator components"と題して、発電機応用を目指した高強度レーストラックコイル(7ストランドのRoebelケーブルを使

用、コイルエンドの曲げ径: 50 mm)の開発状況を報告した(1Lor1A-01)。幾つかのコイルを試作して、液体窒素温度において600 A以上の臨界電流を実現している。最終目標として、3 kA@30 Kを設定しているとのことであった。筆者は、液体窒素温度における上記臨界電流値は非常にsuccessfulとの印象を持った。今後は、連続ならびに短時間定格出力密度他の観点から、既存(常伝導)回転機に対する圧倒的優位性を明確化することが重要と思われる。同様のことは、航空機への超伝導技術適用を検討しているAirbus Group Innovations(UK)のF. Bergらも主張していた(1Lor1A-08)。Airbus社では、超伝導航空機を実現する際の最も重要な課題が冷却技術と認識しているということであった。

Kyoto University(Japan)のTaketsune Nakamuraらは、"Tremendous enhancement of torque density in HTS induction/synchronous machine for transportation equipments"と題して、輸送機器用20 kW級高温超伝導誘導同期回転機の研究開発状況を報告した(1Lor1A-05)。ビスマス系高温超伝導テープ材をバンドルしたかご型二次巻線を最適設計・試作して、回転数1800 rpmにおいて飛躍的な出力密度の改善に成功したと説明された。

Massachusetts Institute of Technology(USA)のS. Hahnらは、"A 7-T/78-mm Cold Bore Multi-Width No-Insulation GdBCO Magnet: Construction and Operation"と題して講演を行った。異なる幅(MW: Multi-Width)のテープ材を適用して、ホットスポットに伴う焼損を回避するためにターン間非絶縁(NI: No-Insulation)技術を施した7 T級マグネットの開発成果を報告した(1Lor1C-01)。また、Korea University(Korea)のHaigun Leeらは、"Study on the variation of partial insulation winding scheme on the time constant of GdBCO coils"と題して、NI-GdBCOコイルに部分絶縁を施した際の励磁時定数との関係を検討した(1Lor2D-02)。Korea Universityのグループは、RE系高温超伝導テープ材の超伝導接続技術についてベンチャー企業を立ち上げる等、同コイルの実用化に精力的に取り組んでいる(本会議中、当該企業の展示ブースも設けられていた)。本講演では、さらにコイル充放電特性を改善するための部分絶縁(PI: Partial Insulation)の検討結果を報告した。様々に部分絶縁を施した場合の放電特性を実験および解析結果に基づいて検討していたが、現状はtrial-and-errorの段階にあるとの印象を持った。NI若しくはPIコイルについては、回転機の界磁コイルに適用した場合の検討結果も報告された(4LPo1L-01、4LPo1L-02)。

Tampere University of Technology(Finland)のTiina Salmiらは、"Modelling quench protection heaters in an

HTS coils"と題して講演を行った(2Lor3B-06)。同グループは、20 T級高温超伝導加速器マグネット開発(CERN)の一環として、当該マグネットのクエンチ保護技術を研究している。高磁場高温超伝導マグネットのクエンチ保護に際しては、低温超伝導マグネットの場合に比較して、①クエンチ検出時間に遅れが生じる、②非常に大きなエネルギーを吸収する必要がある、という問題を解決する必要があるが、本講演ではクエンチ検出遅れに着目して、LARP高磁場Nb₃Snマグネット保護用ヒータ技術転用の観点からシミュレーションベースで検討された。運転温度4.5 Kの場合について、Current Sharing温度20 K以下で遅れが20-80 msになるなど、具体的結果が報告された。今後、高温超伝導マグネット保護技術としての一般化が期待される。

ポスターセッションでは、REBCOコイルについて、非絶縁(NI: No Insulation)化特性、遮蔽電流特性、剥離特性、Roebelケーブル化に関する講演が複数あった。また、University of Colorado(USA)のグループは、大電流容量・低インダクタンス特性を有する希土類系 Conductor on Round Core(CORC™)ケーブルについて報告した(3LPo1C-02)。

3日目の夜に、ナイトセッション"10 Up: 10 Years beyond the 50th Anniversary of High Field Superconductivity - sponsored by Oxford Superconducting Technology and Magnet Systems"が開催された。本セッションは、10名の著名な研究者が招待講演を行い、その後質疑を行うというユニークなスタイルで行われた。内容としては、低温超伝導材料から高温超伝導材料までカバーされ、その応用や評価技術についてもレビューされた。特に高温超伝導材料を使用したコイル化技術に関しては、当該材料がまだ発展途上ということもあり、材料特性の進展を意識して研究開発する必要があり、さらにコイルの要求仕様を満たす評価技術の知識も重要であるとの印象を持った。今後、材料開発、評価技術、応用に根差したコイル化技術の研究開発が補完的に推進され、超伝導コイルの実用分野がさらに進展することを期待する。

(5) 2014年応用超伝導会議で垣間見た 超伝導検出器研究の最前線

Cutting Edge of Superconducting Detectors in
Applied Superconductivity Conference 2014

産業技術総合研究所
神代 暁

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
S. Kohjiro

1. はじめに

Applied Superconductivity Conference は米国で隔年開催される応用超伝導関係の世界最大級の会議であり、2014年度は、米国North Carolina州のCharlotteで8月10-15日に開催された。本会議は、エネルギー、材料、エレクトロニクスの3分野から成るが、エレクトロニクスでは388件の発表があった。エレクトロニクスの口頭発表に限っても、Plenaryを除き2-4会場での並列セッションが設定され全講演の聴講は不可能であった。検出器関係(SQUID磁力計を除く)の発表件数は147件、内訳は、超伝導転移端(TES)60件、ナノワイヤ(SNSPD)46件、ヘテロダイナミキサ18件、力学的インダクタンス(MKIDs)13件、トンネル接合(STJ)4件、その他6件であった。なお、MKIDsの構成要素であるマイクロ波共振器の特性や雑音に関しては、検出器ではなく量子情報処理とマイクロ波のセッションで多くの発表がなされた。本稿では、STJ, MKIDs, TESの多画素化を中心としたトピックを述べる。

2. トンネル接合 (Superconducting Tunnel Junction; STJ) 型

112画素のSTJを無冷媒の断熱消磁冷凍機に実装した0.1-1 keV帯のX線吸収分光用検出器を、米国Star Cryoelectronics社とLawrence Livermore国立研究所が開発した。112画素アレイは、入射単一光子に対し半導体量子検出器の約1/6のエネルギー分解能 $\Delta E \approx 8$ eV、計数率 2×10^5 Count / 秒(= 2×10^3 Count / (秒・画素) $\times 112$ 画素)、受光面積約5 mm²の性能を持つ。放射光施設を利用するX線吸収分光や蛍光X線分析による材料解析への応用を想定している。

3. マイクロ波力学的インダクタンス(Microwave Kinetic Inductance Detectors; MKIDs) 型

10^3 - 10^5 画素MKIDsの実現を目指した複数のプロジェクトが欧米で進行中である。米国カリフォルニア工科大から、波長 $\lambda = 350$ μ mのサブミリ波応用のプロジェクトMAKOにおいて、第一世代の400画素単一偏波検出器による月や木星の観測例が紹介された。インダクタンス材料はTiNで、臨界温度 $T_c \approx 1.4$ Kの画素間偏差0.15 Kが、共振周波数の設計値からのずれの要因としている。チップをレンズアレイ上にマウントし入射波との結合効率向上を図った第二世代の雑音の支配要因が、0.5 kHz以下では誘電体と電極界面の二準位系、3 kHz以上ではチップ後段に配置した冷却高電子移動度トランジスタ増幅器にあり、現状到達値は、背景輻射雑音に比べ7倍高いことを明らかにした。第三世代では、二偏波同時観測かつチップ上の占有面積節約が可能な電

極構造を考案した。米国カリフォルニア大サンタバーバラ校とNASAは、近赤外・可視光帯の2024画素MKIDs開発を紹介した。スパッタ成膜TiNを材料とし、共振器を92%、性能良好な画素を70%のイールドで作製した。イールド向上のため、Atomic Layer Deposition成膜TiNや新材料PtSiによるMKIDsの試作・評価を行っている。米国標準研究所(NIST)とペンシルバニア大は、気球搭載のサブミリ波帯天文観測用イメージャー($\lambda = 250, 350, 500 \mu\text{m}$ の3バンド)を開発している。 $\lambda = 250 \mu\text{m}$ の入射波に対する最小検出限界を表す等価雑音電力(NEP)として、背景輻射で制約される $\text{NEP} \approx 10^{-16} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ を得た。

4. 超伝導転移端 (Transition Edge Sensor; TES) 型

4.1 概要

TESは、熱型検出器であるがゆえに、広範な波長域の電磁波・光子やエネルギー粒子に対し、既存検出器を遥かに凌ぐ低雑音性と、電熱帰還により半導体の熱型検出器を大きく上回る高速応答性を併せ持つ。TESの動作は、X線天文観測、物質の組成分析・化学状態分析、中性粒子の質量分析等への応用を持つ光子計数 (Calorimeter) 型と、ミリ波・サブミリ波帯の天文学や隠匿武器検出等に資する連続波の振幅検出 (Bolometer) 型の二つに大別できる。前者では ΔE (eV)、後者ではNEP ($\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$)が性能指数となる。前者では主に受光面積拡大による検出効率向上の観点、後者ではイメージングの観点から、多画素化が必要な用途が多く、 10^2 - 10^4 画素システムのマイルストーンとして、10-300画素アレイの性能・パラメータの均一性向上や、システムの体積・消費電力を支配する極低温冷却系の小型化・簡素化を図るための読出信号の極低温多重化を中心とした研究成果の報告が多く見受けられた。

4.2 応用

TESの黎明期から研究が行われている天文観測応用 (X線Calorimeter、ミリ波・サブミリ波Bolometer) では、米国NASA、NIST、オランダ宇宙研究所 (SRON) 等で1000-2000画素アレイの開発にまで進展している。その一例として、2016年度に南極のミリ波望遠鏡の搭載システムを 1.6×10^4 画素に拡張する計画がある。また、物質分析用240画素Calorimeterとして、NISTは、元素分析用放射X線検出TES120画素 ($\Delta E \approx 3 \text{ eV}$)と、化学分析用X線吸収分光TES120画素 ($\Delta E \approx 9 \text{ eV}$)を、同一チップ上の異なる位置に配置し、化学結合情報を含む元素分析システムを開発した。これを用いて、例えばプラスチック爆弾と硝酸アンモニウムの識別が可能としている。Bolometerでは、ドイツの企業Supraconが、Leibnitz光技術研究所とともに、20 m離れた場所から隠匿武器検出

可能な 64×256 画素 (64個の直線状TESアレイを走査)で毎秒25枚のフレームレートと $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ の視野を持つシステムを開発した。NISTも251画素を開発中で、光学系の損失を差し引いた値では、地上の背景輻射に迫る低雑音性 ($\text{NEP} \approx 10^{-15} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$)を得ており、今後1004画素へ拡張する計画である。

4.3 作製技術、物理

NISTでは、 32×32 画素TES (材料: MoAu) の臨界温度 $T_c \approx 80 \text{ mK}$ の不均一性を評価し、 5 mK 以下を得た。 $70 \mu\text{m}$ 長のMoAu上に $3 \mu\text{m}$ 幅のNbをストライプ状に配置し、近接効果による T_c 制御性を調べた。バイアス電流による自己磁界を打ち消す補償磁界をTESに印加することにより、 ΔE が印加磁界値やバイアス点抵抗値に左右されにくい状況が得られることを明らかにした。この条件の基で、時間多重読出による30画素合成スペクトルを取得し、 5.9 keV のX線に対し $\Delta E = 3.1 \text{ eV}$ 、すなわち、TES単画素の世界最小値 $\Delta E = 1.6 \text{ eV}$ @ 5.9 keV の2倍に納まる値を得た。構造上、超伝導電極に両端を挟まれた弱結合とみなせるTESの諸特性を、印加磁界によるジョセフソン電流変調の理論を基に説明する研究が約2年前に現れ、今回も数件の発表があった。また、 50 keV 以上のガンマ線検出で用いるバルク吸収体の材料最適化指針と性能予測に関する理論的報告がなされた。

4.4 多画素信号の極低温多重読出

多重読出には、時分割 (TDM)、コード分割 (CDM)、周波数分割 (FDM) の3方法が提案され、TDM、CDMはNISTを中心に、FDMはSRONと日本のJAXAを中心に研究されて来た。NISTは、TDMの多重化画素数を制約する切替機構の過渡応答時間の 240 ns から 60 ns への低減に成功した。また、8画素TESのCDMで、 $2.3 \leq \Delta E \leq 3.4 \text{ eV}$ @ 5.9 keV を実現した。さらに、 8×20 画素のうち94画素TESを用いて 4.5 - 8 keV の広範囲なスペクトルを示し、X線データベース改良プロジェクトへの適用を述べた。

これら従来方式は、いずれも 1 - 10 MHz 程度の読出帯域を使う。NISTは、MKIDs同様の薄膜超伝導共振器を用い、読出帯域を数GHzに拡大したマイクロ波帯FDMに関し、これまで $40 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ であった白色雑音領域でのSQUID入力換算雑音電流を、SQUIDと入力コイルとの相互インダクタンス増加により、 $17 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ へ低減することに成功した。

5. おわりに

次回会議は2016年デンバーで開催予定である。

(6) デジタルとその関連技術 Digital Electronics and Related Technology

名古屋大学
田中 雅光
Nagoya University
Masamitsu Tanaka

8月10～15日に米国シャーロットにおいて、Applied Superconductivity Conference (ASC) が開催された。ASCはElectronics、Materials、Large Scaleの3分野から構成されるが、本稿ではElectronicsの中でデジタル回路とその関連技術に関する発表を幾つか紹介する。

今回のASCで注目すべきは、米国で開始された超伝導コンピュータシステムに関する大型プロジェクト「Cryogenic Computing Complexity (C3)」の進展だろう。11日の最初の招待講演は、プロジェクトを立ち上げたIARPAのManheimer氏が登壇した。消費電力の増大により、現在の半導体技術の延長では今後スーパーコンピュータの劇的な性能向上が見込めないこと、超伝導コンピュータシステムは、energy-efficiency (単位エネルギーあたりの処理能力) が桁違いに高く、それを打破する可能性があることといったプロジェクトの背景を説明し、5年間のプロジェクトの目標や課題を紹介した。論理回路開発に2チーム (IBM、Northrop Grumman)、メモリ開発に2チーム (Raytheon BBN、Northrop Grumman) が参加することが明らかとなった。プロセスはMIT Lincoln Laboratory (LL) に新たにファブを立ち上げ、0.25 μm ニオブ10層デバイス ($J_c = 10 \text{ kA/cm}^2$) の提供を目指している。C3では、プロトタイプとして、10 GHzの64ビットマイクロプロセッサや256 MBメモリといった、かなり野心的な目標を掲げている。達成は容易ではないが、プロセス開発に見られるように相当の投資が行われており、今後の研究開発の動向から目を離せない。

C3に関連した成果を幾つか挙げると、まずプロセスについてMIT LLのTolpygo氏が11日のAdvanced Nb Circuit Fabricationセッションで招待講演を行ったほか、複数のポスター発表があった。248 nmのフォトリソグラフィを用いたデバイス作製では、平坦化処理、均一なジョセフソン接合の作製、積層コンタクトやサブミクロン幅の細線パターンの形成などに成功しており、全体として順調に進んでいる印象を受けた。低消費電力論理回路の開発では、IBMがHypresとともに取り組むERSFQ/eSFQ回路及びNorthrop Grummanが取り組むRQL回路が採択されている。前者については、HypresのKirichenko氏によるメモリ用のデコーダ回路及び8ビット並列加算器に関する2件の口頭発表などがあった。後

者については、Stoutimore氏からMIT LLの8層プロセスで試作した基本回路 (彼らはシフトレジスタと呼んでいるが、機能としては信号伝送路である) の評価結果に関する報告があり、最大で16,400接合の回路を含む合計34,400接合からなるテストチップの動作を確認したとのことである。Q. Herr氏によるレジスタファイル設計やStrong氏による乗算器の設計報告などがあり、プロセッサの要素回路の開発も進んでいるようである。RQLはこれまでのRSFQとは異なり、交流駆動となるが、設計自動化に関する報告もあり、設計技術に関する進捗も見られる。メモリに関しては、12日の招待講演でNorthrop GrummanのA. Herr氏がJosephson Magnetic Random Access Memory (JM RAM)に関する発表を行った。これは、ビット情報を、磁性層を超伝導体で挟んだSFS接合に保持するタイプのメモリであり、0.25 μm プロセスにおいて1ビットを記憶するメモリセルが5.5 μm 四方にレイアウトでき、3 MB/cm²が実現できる見込みとのことである。実際のメモリシステムでは、メモリセルだけでなく周辺回路も性能を大きく左右する。今回の発表では、より読み出しを行いやすいようメモリセルを改善し、読み出し用の駆動回路設計 (詳細はその後のMiller氏が報告) などに関する報告があったが、メモリシステムを実現するにはまだ解決すべき課題も多いと感じた。

RSFQ回路に関しては、これまでのASCと同様に日本からの成果が多数を占めた。横浜国大のグループは、32ビット浮動小数点演算器 (Peng氏、招待講演)、FFT向け演算回路 (坂下氏)、特定の計算問題向けハードウェア (Xu氏) の動作実証に関する報告を行った。NICTの寺井氏からは64ピクセル超伝導単一光子検出器 (SSPD) の信号処理回路に関する報告を行った。また、低消費電力回路に関する発表としては、名古屋大の田中が定電圧駆動によるRSFQ回路について、10 kA/cm² プロセスによる0.2 μW 、35 GHzのマイクロプロセッサ、及び産総研と開発した20 kA/cm² プロセスによる、より高速な回路の動作実証の2件を報告した。横浜国大の吉川氏及びNICTの竹内氏らは、物理的極限に迫るほど消費電力の小さな断熱動作磁束量子パラメロン (AQFP) に関する成果を報告した。

今回、11日及び12日にメモリに関する口頭セッションが2つ設けられた。11日の招待講演を行ったロシア科学アカデミーのBol'ginov氏は、HypresとともにMagnetic Josephson Junction (MJJ)によるメモリの研究を進めており、 $\sim 0.7 \text{ mV}$ と十分に高い $I_c R_n$ が得られていること、不揮発・非破壊読み出しを実証したことなどを報告した。この分野では、理論的な側面も含め、SFS接合などの研究が活発になっており、今後が期待される。

このほか、14日にMixed Signalの口頭及びポスター

セッションがあり、横浜国立大学の佐野氏による質量分析用の時間-デジタル変換器やHypresによるアナログ-デジタル変換器(ADC)に関する複数の報告があった。この分野はシステム化に近い段階に来ている研究開発も多く、特に、MRIでより詳細な情報を得ることを念頭とした、Hypresの多チャンネル入力ADCなどが興味深かった。一方で、性能等に関する学術的な考察も研究が引き続き進められており、バンケットで前座を務めた、自称科学者コメディアン Sarwana氏(Hypres)は、40 GHz以上のサンプリング周波数では、性能向上はするが必ずしも理論通りではないことを、Rumsfeldの言葉を引用しながらユーモアを交えて報告した。

HypresのMukhanov氏は、13日の基調講演で「Superconductive Energy-Efficient Computing」というタイトルの下、C3及びこれら最近の研究成果を含め、超伝導エレクトロニクスの動向を分かりやすく解説した。

<会議報告 3>

国際材料研究学会連合-アジア国際会議 2014

(IUMRS-ICA 2014) 会議報告

Report on the IUMRS-ICA 2014

九州大学
東川 甲平
Kyushu University
K. Higashikawa

2014年8月24日から30日にかけて、国際材料研究学会連合-アジア国際会議2014(International Union of Materials Research Societies - International Conference in Asia 2014: IUMRS-ICA 2014)が、福岡大学の七隈キャンパスにて開催された。本会議は、材料関連科学・工学分野における研究交流や世界第3極の材料研究ソサイエティ構築を目的として1993年を第1回として発足しており、第15回となる今回は日本MRSを主催として開催された。参加者は全体で28カ国から2000名にのぼり、海外からは420名の参加があったとのことである。本会議では、Plenary Lectureをはじめ、研究テーマごとに分かれた50のシンポジウムで研究発表が行われた。また、40歳以下の研究者を対象としたYoung Scientist AwardsのFinalist Sessionも開催された。

超伝導科学に関する研究発表は、上記シンポジウムの1つであるRecent Advances in Superconductivity - Materials, Processing, and Applicationsにて行われた。内訳は、keynoteが2件、invitedが23件、その他が17件

であり、材料の基礎から線材化、機器応用まで、非常に幅広い領域をカバーした構成となっていた。紙面の都合上限られるが、以下に個別の講演について紹介する。

まず、keynoteとして、ISTECのTeruo Izumi氏からは、希土類系コート線材に関するレビューがあった。基板や成膜法の選定に関する歴史の紹介があり、現在では世界の各社で臨界電流値(I_c)×長さ(L)が堅調に更新されている事が紹介された。具体的には、Fujikuraによる577 A×1040 mをはじめ、SupePower、SWCC、AMSC、SuNAMからも数百A×数百から千m級の報告が相次いでいる様子が報告された。また、新勢力として、SuperOX(500 A級×500 m)やShanghai Jiao Tong University(500 A級×100 m)などの発展が著しいことについても言及があった。その他、人工ピン導入や交流損失低減に関する各社の取り組みについての紹介があった。特に、スクライビングによるマルチフィラメント線材に関しては、今後のMRI等の高精度高磁界応用の鍵を握る遮蔽電流の課題に関して、磁化の絶対値の低減のみならず、その早期緩和にも資する重要な技術になるとのことである。これらの取り組みを踏まえて、機器開発と二人三脚で3G線材の開発を目指すべきと締められた。

もう1つのkeynoteとして、Brookhaven National LaboratoryのQiang Li氏から、米国のプロジェクトについて、希土類系コート線材を用いたSMESや風力発電を中心に紹介があった。米国では、低炭素社会やスマートエネルギーインフラをキーワードに、2009年よりAdvanced Research Projects Agency Energy (ARPA-E) というプロジェクトがDOEによって進められており、その予算規模は4億ドルにのぼる。この中で、超伝導に関しては、風力発電、SMES、低交流損失導体の開発などで5テーマの採択があり、Brookhaven National Laboratoryが中心的な役割を担っている2テーマについて紹介があった。まず、SMESのテーマに関しては、現状の秒オーダの運転から更に長時間かつ大電力の運転を目指し、系統のエネルギーマネジメントにも適用可能な大容量のSMESの開発をコンセプトとするものである。この中で、エネルギー貯蔵密度の向上は重要な課題であり、24-30 Tにも達する超高磁界SMESのアイデアが紹介された。また、電力変換にも耐え得る高速な永久電流スイッチの実証にも成功しており、13時間のエネルギー貯蔵において99%の効率を達成できるとのことである。一方、風力発電のテーマに関しては、発電機の超伝導化により、永久磁石を用いたものと比較して3桁程度少ない量の希土元素の使用でよく、軽量化によって10 MW級以上の大容量の風力発電が可能となる。これに関連しては、線材の磁界中特性の向上が鍵となるが、“Solid State Catalyst”機

能を有する構造のバッファ層によって、低コストかつ高特性の線材作製に成功していた。

その他、Invitedの講演を中心に下記に簡単に紹介する。FujikuraのIijima氏からは、前述の線材の開発状況とともに同社の特長である高均一な線材特性の紹介があった。また、77 Kの特性と20 Kの特性の相関について、剥離などの機械的な取り扱いに配慮した取り組みについて報告があった。SuNAMのLee氏からも、同社の線材開発状況の報告があり、特に同社の特長であるRCE-DRという高速な製造手法について制御を最適化した報告があった。SWCCのKimura氏からも同社の線材開発状況の報告があり、また非常にコンパクトな電流リードの製品紹介があった。九工大のMatsumoto氏からは、BSOのナノロッドの長さを断続的に変化させる手法について紹介があり、角度依存性とともにもその有効性が議論された。Kansas大のWu氏からは、ナノロッドの成長形態の決定メカニズムについて、ひずみの状態から説明可能である旨の報告があった。Seoul大のYoo氏からは、韓国における人工ピン導入戦略についての報告があった。九大のKaneko氏からは、3次元微細構造可視化技術についての紹介があり、BHOの観測例の報告があった。東北大のAwaji氏からは、ランダムポイントピンとc軸相関ピンの相互作用についての議論があった。九州大のHigashikawa氏とKiss氏からは長尺線材の均一性の評価基準に関する報告があった。東大のOgino氏からは鉄系超伝導材料に関して、122系と112系の開発状況とメカニズムに関する報告があった。NIMSのTakano氏からは、新超伝導材料であるBiS₂系に関して、磁性と超伝導性の観点から知見が述べられた。IFW DresdenのIida氏からはBa-122系について、基板の相違によるひずみの影響が議論された。岩手大のFujishiro氏からは、バルク超伝導体の捕捉磁界に関するレビューとともに、パルス着磁法による記録の報告があった。Shanghai Jiao Tong UniversityのYao氏からは、薄膜を種晶とする高特性なバルクについての報告があった。NIMSのKumakura氏からは、MgB₂線材の開発状況について報告があり、安価かつ高特性を達成するカーボンドープ法や、長尺線材作製の取り組みについての言及があった。Western Super-conducting TechnologiesのYan氏のグループからも、MgB₂線材の開発状況について報告があり、HyperTechやColumbusに次いで線材の供給体制が整っている印象があった。NIMSのTogano氏からは、122系の線材に関して、1軸プレスやロール圧延、またシース材を工夫することにより、10 T中で10⁵ A/cmのJ_cを達成する状況にまできていることについて紹介があった。九工大のMatsushita氏からは、縦磁界効果を利用したケーブル応用について進捗の報告

があった。Russian Scientific R&D Cable InstituteのVysotsky氏からは、液体水素冷却MgB₂ケーブルのデモ成功についての報告があった。九大のIwakuma氏からは、限流機能付き高温超伝導変圧器の実証成功について報告があった。東芝のTasaki氏からは、希土類系コイル線材のコイル化技術に関して、剥離の問題を解決するコイル構造や含浸法についての紹介があった。京大のNakamura氏からは、20 kW級の高温超伝導かご形誘導モータの同期運転と過負荷運転の実証成功の報告があった。GUINAのFuger氏からは、超伝導マグネットを用いた単極回転機についての紹介があり、特に径の異なる回転子を組み合わせることで直流から直流への電力変換が直接高効率に行える可能性について言及し、注目を集めていた。

以上が、超伝導に関するシンポジウムの簡単な報告であるが、本シンポジウムの参加者には九州大学伊都キャンパスへのLab tourも用意されていた。また、会議全体では別途Young Scientist AwardsのFinalist Sessionが開催され、九大のHigashikawa氏がBronze Awardを受賞した。材料研究の非常に幅広いテーマを扱う本会議において、超伝導のテーマから受賞者が出たことは喜ばしいことである。次回は韓国のJeju島で開催される。



図1 Li氏によるkeynoteの様子



図2 九州大学へのLab tourの様子

<研究室紹介>

(1)名古屋大学 エコトピア科学研究所 グリーンシステム部門 早川研究室 Hayakawa Laboratory, Division of Green Systems, EcoTopia Science Institute, Nagoya University

(1)研究室スタッフ

早川直樹教授、花井正広客員教授、小島寛樹准教授、秘書1名、学生：課程3名、博士後期課程3名、卒研生4名

(2)研究室の簡単な紹介

早川研究室では、環境調和型電気エネルギーシステムの構築に向けて、電気エネルギー流通(送電・変電・配電)システムの効率化・環境負荷低減に関する研究を行っています。次世代の高機能型電気エネルギーシステムを実現する革新技術の中でも、損失を小さくでき、電流密度を大きくすることができる超電導技術は、極めて重要な位置を占めると考え、本研究室では、電力機器・システム技術、高電圧・電気絶縁技術と並び、超電導応用電力技術を研究の柱の一つとしています。

(3)特徴ある装置

超電導電力応用においては、高電圧に対する電気絶縁技術が重要な基礎技術の一つとなります。本研究室では、交流250 kV、直流350 kV、インパルス800 kVが印加可能な高電圧電源及びクライオスタットを所持しており、各種の高電圧・電気絶縁試験を可能としています。このクライオスタットは0.5 MPaまで加圧可能であり、サブクール環境下における試験も可能です。また、試験は電磁遮蔽されたシールドルーム内で実施され、絶縁破壊の端緒となる極微小な部分放電を高感度で検出できます。



図：シールドルームに置かれた高電圧印加試験用クライオスタット

(4)これまでの成果、最近のトピックス

超電導応用電力機器の中でも、超電導体が過電流通電時に抵抗を発生する特性を利用した限流器は、電力システム構成・運用の考え方を大きく変える機器として期待されています。一方で、限流器、ケーブル、変圧器などの機器単体としての開発だけでなく、それらが導入された電力システムを想定して、限流機器と電力システムとの協調(限流協調)を考慮した機器・システム開発が必要です。特に、超電導電力システム全体としての効率向上を目指すためには、機器の複合化、機能統合に関する技術開発も重要となってきます。本研究室では超電導変圧器と超電導限流器を複合化した超電導限流変圧器(Superconducting Fault Current Limiting Transformer: SFCLT) [1]や、超電導ケーブルに限流機能を統合した超電導限流ケーブル(Superconducting Fault Current Limiting Cable: SFCLC) [2]の実現に向けた研究に、機器開発とシステム解析の両面から取り組んでいます。

また、超電導応用電力技術の共通基盤となる極低温電気絶縁についても、極低温液体および固体絶縁物との複合絶縁系に関して、放電・絶縁破壊の物理メカニズムに立脚した技術開発を行っています。特に、上記の SFCLT や SFCLC を含む抵抗型の超電導限流器においては、電界ストレス下に限流による熱的ストレスが過渡的に印加される、いわゆる動的電気絶縁が絶縁設計上極めて重要となります[3]。本研究室では現在、この動的電気絶縁の重要性に着目し、その基礎的特性の解明から、動的電気絶縁における設計基盤技術の確立を目指しています。

(5)連絡先

〒464-8603 名古屋市千種区不老町
名古屋大学 IB 電子情報館北棟 7 階
e-mail: nhayakaw@nuee.nagoya-u.ac.jp, kojima@nuee.nagoya-u.ac.jp
http://www.hayakawalab.nuee.nagoya-u.ac.jp/

参考文献

- [1] N. Hayakawa, H. Kojima, M. Hanai and H. Okubo, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 1397-1400.
- [2] H. Kojima, T. Osawa, N. Hayakawa, M. Hanai and H. Okubo, J. Phys.: Conf. Ser. **507** (2014) 032026.
- [3] N. Hayakawa, T. Matsuoka, S. Nishimachi, H. Kojima and M. Hanai, Applied Superconductivity Conference (2014) ILOr3A-03.

(2) 日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・シミュレーション技術開発室 Simulation Technology R&D Office, Center for Computational Science and e-Systems, Japan Atomic Energy Agency

(1) 研究室構成(H26年9月22日現在):

室長: 町田昌彦研究主席、研究系職員9名、任期付研究員2名、博士研究員1名

(2) 研究室の簡単な説明:

当該研究室は日本原子力研究開発機構(原子力機構)のシステム計算科学センター(スパコン運用やITに係る業務等を実施)に所属し、原子力研究開発分野における最先端の計算科学技術(シミュレーション技術)を開発し、原子力の安全且つ効果的な利用に貢献すべく研究開発を行っています。原子力研究開発分野は広範囲に及ぶこともあり、様々なシミュレーション研究を実施していますが、特に力を入れているのは材料シミュレーション研究です。原子炉や加速器等は構造材料、核燃料材料、機能材料等の様々な先端的材料から構成されていることもあり、各材料に対し、中期計画を立案し最新のシミュレーション技術を開発しています。中でも、機能材料である超伝導材料は最も有用で革新的な材料の一つと見做し、室長を始めとして、主に2~3人の研究員が常時シミュレーション研究に従事しています。

(3) これまでの成果:

これまでに、当室では超伝導の基礎や超伝導応用を目指した新型デバイス開発に寄与するため、シミュレーション技術の開発を進めてきました。基礎分野では、超伝導発現機構解明を目標とし、スパコン上で超並列計算が可能な厳密対角化法、密度行列繰り込み群法を開発し、地球シミュレータを有効活用する研究成果では、スパコンの高度利用研究分野にて最も権威ある賞と言われているゴードンベル賞に2年連続(2005、2006年)でノミネートされた他、応用数学会からは2011年に業績賞を頂くことができました。一方、超伝導応用に対しては、高温超伝導体が層状超伝導体であり、結晶構造そのものがジョセフソン接合となっている固有ジョセフソン効果の理論及びシミュレーション研究を進め、積層ジョセフソン接合間の結合様態やその電流電圧特性において現れる多重ブランチ構造の起源[1]を明らかにした他、ジョセフソン磁束によるTHz発振機構を提唱する[2]等の成果を挙げて来ました。

(4) 最近のトピックス:

21世紀に入り、様々な特徴を有する超伝導体が次々と発見されてきましたが、それらの物性を系統的に明らかにする研究に最近は力を入れて取り組んでいます。特に、計算機の発達と共に様々な材料分野で第一原理計算を用いた材料設計が行われ始めていますが、当室では、超伝導物性予測を目標として、第一原理計算による電子状態[3]やフォノン計算[4]等の研究を実施しています。また、最近では、鉄系超伝導体の多バンド超伝導の特異な物性[5]やスピン軌道相互作用が重要な役割を果たすトポロジカル超伝導体の物性についても研究を進めています[6]。

(5) 特徴ある研究方法:

超伝導体の物性解明や材料特性の予測等を目指すため、最新のスパコンを使いこなす大規模シミュレーション技術を開発することが、特徴ある研究方法となっています。今後、スパコンは益々巨大化し、高速性能が向上しますが、その分、使い勝手が悪くなると考えられます。しかし、上手に利用することができれば、超伝導体の材料設計も夢ではないかもしれません。

(6) 参考文献:

- [1] M. Machida, T. Koyama, and M. Tachiki, Phys. Rev. Lett. **83**, 4618(1999).
- [2] M. Machida, T. Koyama, A. Tanaka, and M. Tachiki, Physica C **330** 85(2000).
- [3] H. Nakamura, M. Machida, T. Koyama, and N. Hamada, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 123712(2009).

- [4] H. Nakamura, N. Hayashi, N. Nakai, and M. Machida, *Physica C* **469**, 1024 (2009).
[5] Y. Ota, M. Machida, T. Koyama, and H. Matsumoto, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 237003 (2009).
[6] Y. Nagai, H. Nakamura, and M. Machida, *J. Phys. Soc. Jpn.* **83** 064703 (2014).

(7)連絡先:

〒277-0871 千葉県柏市若柴 178-4-4
E-mail: machida.masahiko@jaea.go.jp
TEL:04-7135-2349, FAX:04-7135-2382

(3) 東北大学 大学院工学研究科 電気エネルギーシステム専攻 津田・宮城研究室
Tohoku University, Graduate School of Engineering, Department of Electrical Engineering,
Tsuda-Miyagi Laboratory

(1) 研究室スタッフ:

教授: 津田 理、准教授: 宮城 大輔、秘書: 田中 咲子、学生: 16名 (M2: 6名、M1: 5名、B4: 5名)

(2) 研究室の簡単な紹介:

東北大学には伝統的に超電導関係の研究室が多く、工学研究科、理学研究科をはじめ、電気通信研究所、金属材料研究所、流体科学研究所等の附置研究所において超電導関係の研究が盛んに行われている。当研究室は、工学部青葉山キャンパスの北側に位置しており、超電導線材・導体・コイルの交流損失等の電磁現象に関する基礎研究から、次世代の電力機器・システムや一般産業機器に関する応用研究に至るまで、超電導技術を軸とした電気エネルギー応用に関する研究を幅広く行っている。

(3) 特徴ある装置:

当研究室では、アイデアに基づき作製した小型モデルを用いた実験と、その妥当性検証のための理論解析を中心に行っている。このため、特筆する大型装置等はないが、特徴あるものとしては、図1のCIC導体用素線軌跡測定装置や図2の磁気浮上型超電導免震装置がある。図1は、核融合装置用のCIC導体を構成する超電導素線の軌跡を求めるための装置で、10 mm幅のCIC導体片の両断面の素線間抵抗を測定することで両断面の素線位置を明確にし、各素線位置の相互比較により素線軌跡を求めるものである。長尺導体の素線軌跡を求めるには多数のCIC導体片で測定する必要があるため多くの時間を要するが、本測定により、これまで不可能であった導体内部の電磁現象の詳細検討が可能となっている。現在は、この素線軌跡を用いて、CIC導体内の偏流現象と導体変形のメカニズムについて検討している。図2は、任意の水平振動伝達を除去可能な超電導バルク体と永久磁石で構成される磁気浮上型免震モデル装置である。地震被害のほとんどは水平振動に起因するため、水平振動の伝達抑制が可能になれば地震被害を大幅に削減可能となる。これまでに、本装置を用いた原理検証を終えており、現在は冷凍機を用いた大型装置の構築に向けた検討を進めている。

(4) これまでの成果・最近のトピックス:

超電導技術の適用には冷却エネルギーが不可欠となることから、超電導応用機器・システムの実用化には超電導体の低交流損失化が大きな課題となる。そこで、当研究室では、これまでに、超電導線をはじめ、超電導ケーブル、CIC導体、超電導コイル等における交流損失特性の把握や発生メカニズムの解明に取り組むとともに、様々な損失低減方法を提案してきた。また、交流応用だけでなく、超電導の「抵抗ゼロ」という特長を最大限に活用できる直流応用についても検討しており、これまでに、工場内の放射状交流系統間を直流連系することにより大幅なCO₂削減が可能となることを検証するとともに、この様な直流システムに有効となる、超電導ケーブル、超電導平滑リアクトル、超電導限流器等の提案・検討を行ってきた。しかし、「温室効果ガスの大幅削減」というチャレンジングな目標達成には、こうした電力機器の超電導化だけでは不可能であり、新たなエネルギーシステムの構築が不可欠となる。これに対し、自然エネルギーの有効利用を目指した、水素貯蔵とSMESによる電力貯蔵を組み合わせた複合エネルギー貯蔵システム(先進超電導電力変換システム)を提案している。そして、現在は、液体水素を用いたサーモサイフォン式間接冷却型SMESを含む1 kW級小型システムを構築し、自然エネルギーの大量導入を可能とする出力変動補償に適したシステム構成・制御方法について検討している。電力・エネルギー以外の産業応用については、上記の磁気浮上型超電導免震装置の大型化の検討をはじめ、酸化物超電導コイルのがん治療用重粒子加

速器やMRIへの適用を目指した、超電導コイルの低損失化や遮蔽電流の時間変化に起因する変動磁場の抑制方法について検討を行っている。

(5) 連絡先・ホームページアドレス等:

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-05
東北大学 大学院工学研究科 電気エネルギーシステム専攻 津田 理
Tel & Fax: 022-795-5020 E-mail: tsuda@ecei.tohoku.ac.jp
<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/hamajima/>



図1 CIC導体用素線軌跡測定装置



図2 磁気浮上型超電導免震装置

(4) 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 物質系専攻 芝内研究室
Shibauchi Laboratory, Department of Advanced Materials Science, The University of Tokyo

(1) 研究室スタッフ (2014年9月現在)

教授: 芝内 孝禎、助教: 水上 雄太

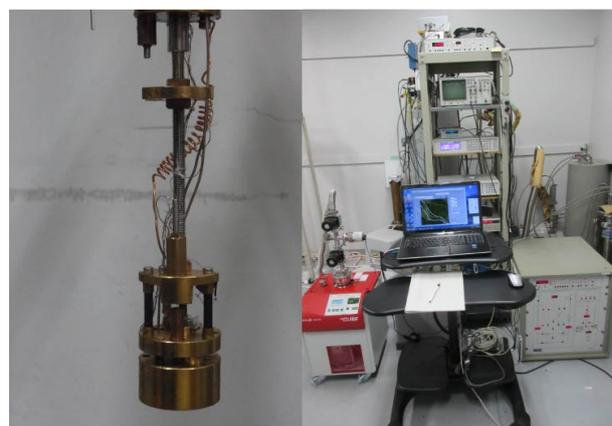
(2) 研究の概略

物質中の多数の電子が示す非自明な状態を解明する研究を、様々な低温物性実験技術を駆使して行っています。特に電子の持つ量子性が重要になった場合には、通常の金属や半導体の理論では説明できない状態が現れます。このような物質の量子相「Quantum Phases of Matter」を研究することは、現代の基礎物理学における最重要課題の一つです。研究室では、量子相に関連する以下のような多彩な現象を扱っています。

- 最難問と知られている高温超伝導発現機構の解明
- そのヒントを与えるのではないかと期待される量子臨界点の物理学
- 30年間の固体物理学の謎として知られる重い電子系化合物に現れる「隠れた秩序」の解明
- 理論的研究が先行して実験的な実証が求められている量子スピン液体やトポロジカル超伝導状態など

(3) 特色ある装置

超伝導体の最も基本的な物理量の一つである磁場侵入長の精密測定が希釈冷凍機温度まで可能なトンネルダイオード発振器を用いたシステム(写真参照)や、サイクロトロン共鳴などの測定が可能な60 GHzまでのマイクロ波領域での表面インピーダンス測定装置、およびベクトルマグネットを用いた角度分解磁気トルク測定装置などがあります。



(左) トンネルダイオード発振器 (右) 磁場侵入長測定システム

(4)これまでの成果、研究トピックス

様々な超伝導体の超伝導対称性の決定を行ってきました。特に最近では鉄系超伝導体が拡張型のs波に分類される非従来型の超伝導であることをいち早く決定しています。また、鉄系超伝導体の量子臨界点の存在を実験的に明らかにしました。更に、強相関電子系に現れる電子ネマティック相の研究では、磁気トルクの角度依存性とという新しい手法を用いて回転対称性の破れを明らかにし、重い電子系超伝導体URu₂Si₂における隠れた秩序相が回転対称性を破った状態であることを突き止めました。詳しくはホームページをご参照ください。

(5)連絡先、ホームページアドレス

〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5
東京大学 大学院新領域創成科学研究科 物質系専攻
芝内 孝禎
Email: shibauchi@k.u-tokyo.ac.jp
URL: <http://qpm.k.u-tokyo.ac.jp>

(5)九州工業大学大学院先端機能システム工学研究系(総合システム工学科) 小森研究室 Kyushu Institute of Technology, Graduate school of Engineering, Department of Applied Science for Integrated System Engineering, Komori Laboratory

(1)研究室概要

研究室では主に、超電導磁気軸受とその基礎特性に関する研究、電力貯蔵用フライホイールの研究・開発とその制御手法に関する研究、浮上型超電導モータに関する研究、などを行っている。低温関係以外では、制御型磁気軸受を用いた浮上型モータおよびポンプなどに関する研究も行っている。

(2)研究室スタッフ

教授 小森望充 大学院生・学部生(社会人学生2名)

(3)主な研究内容

(a)超電導磁気軸受とその基礎特性に関する研究

主に熔融法による酸化物高温超電導体の磁気軸受応用に関する研究を行っている。実験ではドーナツ状に加工した酸化物高温超電導体と円盤形永久磁石との反発力を用いて、回転ロータの浮上支持を行っている。その結果、超電導磁気軸受の剛性は、既に実用域にあった能動制御型磁気軸受の剛性と比べて1桁程度小さいことを明らかにした。さらに、試作した超電導磁気軸受を用いて、空気中で50,000 rpmもの高速回転が可能であることを示すと同時に、その回転時の動特性に関して評価検討を行っている。また、超電導磁気軸受を構成する上での問題点や超電導体独自の問題点なども明らかにした。

(b)電力貯蔵用フライホイールの研究・開発とその制御手法に関する研究

熔融法による酸化物高温超電導体と永久磁石とから構成される超電導磁気軸受の産業応用のためには、その剛性向上が重要な課題となっている。そこで、超電導磁気軸受の補助的な剛性強化法として能動型磁気軸受を用いる研究を行っている。この研究は、ハイブリッド型超電導磁気軸受として研究を進め、さらに電力貯蔵用フライホイールへ適用するに至っている。現在開発中のフライホイールシステムは、ドーナツ状に加工した酸化物高温超電導体と円盤形永久磁石による超電導磁気軸受と、電磁石からなる能動制御型磁気軸受とから構成される。回転主軸の浮上支持には永久磁石を用いており、今までにないシステム構成を採っている。回転主軸の制振手法として、バイアス電流を必要としない制御方式を開発した。

(c)浮上型超電導モータに関する研究

熔融法による酸化物高温超電導体を用いたシステム応用として、浮上型超電導モータに関する研究を行っている。現在、開発中のシステムは、ステータ側に45° ずつ設置された8個の電磁石と、高温超

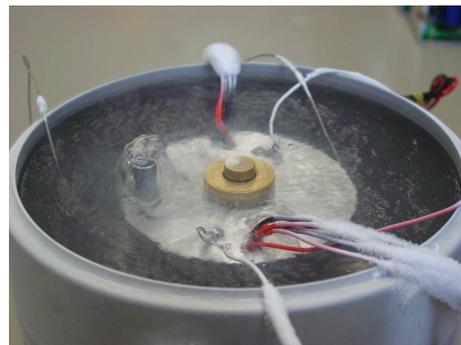


図 浮上型超電導モータのポンプ応用実験

電導体によるロータから構成される。このモータは構造上、能動的に完全非接触状態で浮上、回転が可能であるという、今までにない全く新しい機能を有している。現在に至るまで、4層型の浮上型ステッピングモータの回転駆動に対する性能・評価を行ってきており、その結果、500 rpm程度での非接触駆動が可能であることが明らかになった。また、ロータの回転時に、トルクにむらが生じることが判明し、その原因を明らかにした。

(d) 磁気軸受を用いた浮上型モータおよびポンプに関する研究

磁気軸受は、ステータ、ロータ、位置検出センサ、制御回路、ステータ制御用アンプなどから構成される。ロータは長さ10 mm、直径2.0 mm、質量0.1 g程度で、非常に小さい磁気軸受が構成できることを実験的に示し、注目を集めた。また、この磁気軸受の応用として、ロータ中心に永久磁石を取り付けた磁気浮上型のモータを試作し、更に回転駆動することに成功した。その性能評価の結果、小型軽量でしかも非接触浮上しているため30,000 rpmもの高速回転することが実験的に明らかにされ、浮上型モータの特性が注目されるようになった。基礎特性として、モータにおける電磁力の影響が回転特性に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。

(4) 連絡先

国立九州工業大学大学院先端機能システム研究系(総合システム工学科)

〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1

教授 小森望充

TEL&FAX: 093-884-3563 E-mail: komori_mk@yahoo.co.jp または komori@ise.kyutech.ac.jp

第19回超伝導科学技術賞 候補者公募要領

超伝導科学技術賞は、最初の高温超伝導体が発見された年から10年目に当たる平成8年度に、超伝導科学技術研究会によって創設されました。第1回の授賞式は平成9年4月に超伝導シンポジウムの会場で行われ、内外の大きな注目を浴びました。以来毎年シンポジウムの場において、超伝導科学技術の研究に関して卓越した業績を残された方々を顕彰してまいりました。本年も以下の要領で候補者の公募を行います。

趣旨：エネルギー、パイオ、情報、交通等、広範な分野においてキーテクノロジーとしての役割を果たすと期待されている超伝導は、基礎物性、材料、応用等に関する総合的な科学技術を形成しています。超伝導科学技術研究会はこれらの諸分野間の円滑な連携を図り、研究の振興に資するよう努めて参りました。本賞はこうした取り組みの一環であり、超伝導に関係する分野で卓越した研究成果をあげてこられた方々を顕彰しようとするものです。我が国では、超伝導の基礎から応用までの各方面で若手研究者を含む多くの研究者が国際的にも注目される活躍をしています。しかし、超伝導は境界領域の学問であるがゆえに既存の大きな学協会組織をもたず、学会賞・協会賞に相当するものが存在していませんでした。こうした状況に鑑み、本賞は、超伝導分野で日々たゆまぬ努力を続けている研究者の方々を励まし、その一層の発展の一助となることを目的として創設されました。

顕彰の対象者：

1. 基礎研究において世界的なインパクトを与えた者
2. 応用開発において、マイルストーンとなる高度な技術進展に寄与した者
3. 研究開発あるいは国内国際交流において、斯界分野の振興に大きな役割を果たした者

賞の数は年間数件程度を原則とします。発展途上の若手研究者も賞の対象とします。また、完全には確立していない研究成果や、実用化の域に達していない技術であっても、将来の発展性が期待できればポジティブに評価します。

賞の対象となる具体的な分野：

1. 超伝導新物質開拓に関するもの
 2. 超伝導基礎理論に関するもの
 3. 超伝導基礎実験に関するもの
 4. 超伝導材料（線材、バルク、薄膜、導体など）の高性能化に関するもの
 5. 超伝導プロセス技術に関するもの
 6. 超伝導の測定、評価、標準化に関するもの
 7. 超伝導機器、デバイス、システム等、超伝導の用途開発に関するもの
 8. データベースに関するもの
 9. 超伝導研究推進に産業界、学会、官界、報道界などから貢献したもの（功労賞に相当するものを含む）
- 各分野夫々1件とするのではなく、また、すべての分野に賞を設定するというものでもありません。

賞設定の目的：

1. 強いインパクトのある研究に対する評価
2. 活発な若手への応援
3. 長年の功労者に対する感謝の表明
4. 企業の関連グループに対する精神的支援
5. この分野の関係者の努力に対する精神的支援

授賞時期：授賞式は、超伝導科学技術研究会主催のシンポジウムにおいて行います。

授賞の伝達：受賞者には事前に連絡するほか、企業及び国公立研究所の場合には、授賞決定通知を社長、機関長宛てに伝達します。

また、授賞理由等は(一社)未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会の機関誌に掲載します。

募集・応募の方式：超伝導科学技術賞、および超伝導科学技術賞特別賞候補者を募集します。特別賞は超伝導科学技術分野において多大な業績、功績を挙げられた個人が対象となります。自薦他薦を問いません。超伝導科学技術研究会に属する団体（担当者）、個人会員に推薦を依頼するほか、公募します。推薦依頼及び推薦提出先は審査委員会委員長とします。また、選考委員会内でも推薦可能とします。推薦理由の記述は比較的簡単なものとし、応募を容易にします。また、追加資料の提供を求めることができるものとし、対象者の国籍は問いませんが、日本国内での研究活動を賞の主たる対象とします。なお、超伝導科学技術賞は、1件につき、原則6名以内（1機関 4名以内、最大6名）とします。

超伝導科学技術賞候補者推薦書はホームページよりダウンロードできます。

推薦書の提出先：

一般社団法人未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会 賞審査委員会委員長宛

（〒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

E-mail: fsst@sntt.or.jp URL: <http://www.sntt.or.jp/~fsst/>

推薦の締切：第19回超伝導科学技術賞推薦締切：平成26年12月5日（金）

研究会の動き

〔平成26年(2014年)7月1日～平成26年(2014年)9月30日〕

第6回総会

日時：平成26年7月22日(火) 11:30～12:00

場所：商工会館 7階 7D会議室

出席者：会員18名(内欠席表決14名)

事務局：2名

議事：(1) 平成25年度事業報告案および収支決算案
(2) 平成26年度事業計画案および収支予算案

16:30-17:00 「BiS₂系、BiSe₂系超伝導体の最新情報と可能性」

水口 佳一 (首都大学東京)

17:00-17:30 「次々と出現する新奇超伝導体」

石田 茂之 (産業技術総合研究所)

17:30-17:35 閉会の挨拶

木村 茂行 (未踏科学技術協会理事長)

第84回ワークショップ

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

テーマ：「新しい超伝導体のホットな話題、最新の理解」

参加者数：39名

プログラム:

【座長 下山 淳一 (超伝導科学技術研究会会長)】

13:30-13:40 開会の挨拶

下山 淳一 (超伝導科学技術研究会会長)

13:40-14:20 「1111相鉄系超伝導体の相図に関する最新の話題」

神原 陽一 (慶應義塾大学)

14:20-15:00 「122相超伝導体に関する最新の話題と理解」 中島正道 (大阪大学)

15:00-15:40 「11相超伝導体に関する最新の話題と理解」 今井良宗 (東京大学)

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」 荻野 拓 (東京大学)

調査委員会 (日本原子力研究開発機構より受託調査)

平成26年度第1回

日時：平成26年9月12日(金) 13:30～15:00

場所：学術総合センター11階 共用会議室

出席者：委員9名

事務局：2名

議事：(1) 平成26年度調査研究内容、方針について
(2) 調査研究方法について
(3) ワークショップについて

幹事会

平成26年度第3回

日時：平成26年9月12日(金)15:30～17:00

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：2名

議事：(1) 第84回ワークショップ開催報告
(2) 第85回ワークショップについて
(3) 第2回超伝導科学技術セミナーについて
(4) 第17回日米ワークショップについて
(5) FSST NEWS について

第85回ワークショップ

日程：平成27年1月8日(木) 13:30～

場所：全日通霞が関ビル(千代田区霞が関3-3-3)

協賛(予定)：公益財団法人 低温工学・超電導学会、一般社団法人 プラズマ・核融合学会

テーマ(仮)：「巨大超伝導電磁石の開発と課題」

巨大な空間に、かつ強磁場を発生させる装置の代表格といえば核融合炉です。現在、日本を含む7カ国の国際協力で進められているITER(国際熱核融合実験炉)計画では、高さ14m、幅9mのD型コイル18個からなるトロイダルマグネットなど、過去最大の蓄積エネルギーとなる巨大な電磁石群が開発されます。今後この実験炉は、さらに実証炉、商業炉といった実規模装置へと進んでいきます。さらなる大型化、強磁場化の実現に向けて、我々は今ある限界を超えて、さらに新しい技術の扉を開いていかなければなりません。その成果は、新たな巨大電磁石の開発の礎となっていくに違いありません。今回は核融合炉、線材開発を専門とする講師の方々をお招きし、ITERマグネットを含む核融合炉の概要についてご講演いただくほか、さらに大型の電磁石を作るために何が問題となるのか、どういう取り組みがなされているのかについてご講演いただきます。

訃報:北澤 宏一 先生(超伝導科学技術研究会顧問・未踏科学技術協会副理事長)ご逝去

きたざわ こういち

北澤 宏一 先生 一般社団法人 未踏科学技術協会副理事長・超伝導科学技術研究会顧問 (東京都市大学学長)



1972年 マサチューセッツ工科大学材料科学専攻博士課程修了
1973年 東京大学工学部合成化学科助手
1981年 同物理工学科講師
1987年 東京大学工学部工業化学科教授
1999年 東京大学新領域創成科学研究科教授
2002年 科学技術振興事業団専務理事、(社)未踏科学技術協会理事
2003年 (社)未踏科学技術協会 副理事長
2007年 (独)科学技術振興機構理事長
2011年 (独)科学技術振興機構顧問

2011年 福島原発事故独立検証委員会(民間事故調)有識者委員会委員長

2013年 東京都市大学学長

超伝導科学技術研究会顧問の北澤宏一先生が、9月26日(金)13時24分にご逝去されました。71歳でした。

北澤宏一先生のご冥福を心よりお祈り申し上げます。

「お別れの会」は東京都市大学主催で後日行われる予定です。詳しくは下記HPをご覧ください。

(東京都市大学HP) <http://www.tcv.ac.jp/topics/>

尚、当研究会設立時よりご尽力された北澤先生の特集は本誌で改めて企画を致します。

(北澤宏一先生の略歴)

専門は、物理化学、固体物理、材料科学、磁気科学、超伝導工学。1986年末から1987年に起きた高温超伝導研究フィーバーの火付け役として知られる。1988年日本応用物理学会賞(論文賞)、1989年アメリカセラミックス学会フルラス賞、1996年日本応用磁気学会論文賞、2000年超伝導科学技術賞、2001年粉体粉末冶金協会論文賞 2002年紫綬褒章 他受賞多数。著書に、固体内の拡散(コロナ社)1976 P. G. Shewmon著 共訳、酸化物超伝導体の化学(講談社)1988、新磁気科学(アイピーシー)2002監修、科学技術者のみた日本・経済の夢(アドスリー)2003、「日本は再生可能エネルギー大国になりうるか」2012(ディスカヴァー・トゥエンティーン)他多数。文部科学省科学技術委員・学術審議会研究計画委員・評価分科会臨時委員等を務める。未踏科学技術協会 新超電導材料研究会(1987年発足 現 超伝導科学技術研究会)設立当初より幹事、副会長、顧問として尽力。2003年より未踏科学技術協会副理事長。2013年9月より東京都市大学学長を務める。

超伝導科学技術研究会
平成 25 年度 事業報告
平成 25 年 4 月 1 日～平成 26 年 3 月 31 日

超伝導科学技術研究会が、平成25年度(平成25年4月1日から平成26年3月31日まで)に行った諸事業は次のとおりである。

1. シンポジウムの開催：1回

第39回

日 時：平成25年4月16日(火) 10:00～17:25

協 賛：(公社) 応用物理学会、(公社) 低温工学
超伝導科学技術研究会

場 所：タワーホール船堀 小ホール

テーマ：超伝導2013 — 超伝導応用最前線 —

参加者数：80名

物質、宇宙の謎

参加者数：33名

2. 超伝導科学技術賞

第17回授賞式

日 時：平成25年4月16日(火) 11:50～12:20

場 所：タワーホール船堀 小ホール

※第39回シンポジウムにて開催

4. 16th US-Japan Workshop on Advanced superconductors

2013年7月9日(火)～12日(金)

University of Dayton Research Institute

5. 調査研究

委託元：(独) 日本原子力研究開発機構

委託研究題目：「核融合原型炉用超伝導コイル開発に関する産業界の技術調査」

委託研究機関：平成25年 6月1日(土)～平成26年1月31日(金)

3. ワークショップの開催：3回

第81回

日 時：平成25年7月26日(金) 13:30～17:35

協 賛：(公社) 低温工学・超電導学会、(一社) 電気学会

場 所：全日通霞が関ビルディング8階 大会議室B

テーマ：極低温冷凍機の進展とその応用の広がり

参加者数：69名

第82回 (* 日本原子力研究開発機構 受託調査
第2回WSと兼ねて開催)

日 時：平成25年12月26日(木) 13:00～17:05

協 賛：(公社) 低温工学・超電導学会、(一社) 日本物理学会、(一社) 電気学会、(一社) プラズマ・核融合学会

場 所：全日通霞が関ビルディング8階
大会議室B

テーマ：超伝導電磁石の大型化への挑戦

参加者数：53名

第83回

日 時：平成26年3月10日(月) 13:30～17:45

協 賛：(公社) 低温工学・超電導学会、(公社) 日本分析化学会

場 所：全日通霞が関ビルディング 大会議室B

テーマ：多ピクセル超伝導検出器で探る材料、核

ワークショップの開催：2回

第1回

日 時：平成25年 8月23日(金) 9:00～17:00

場 所：商工会館 6階 G会議室

テーマ：核融合原型炉用超伝導技術における研究
開発の現状と展望

第2回 (* 第82回 研究会WSと兼ねて開催)

日 時：平成25年12月26日(木) 13:00～17:05

場 所：全日通霞が関ビルディング大会議室B

テーマ：超伝導電磁石の大型化への挑戦

調査委員会の開催：3回

第1回 平成25年 9月6日(金) 13:30～15:30
学術総合センター11階 共用会議室

第2回 平成25年 10月7日(月) 13:30～15:30
学術総合センター11階 共用会議室

第3回 平成25年 12月26日(木) 10:00～12:00
全日通霞が関ビルディング 中会議室

6. FSST NEWSの発行：4回(1回/3ヶ月)

No.137 (平成25年5月15日)

No.138 (平成25年7月15日)

No.139 (平成25年10月18日)

No.140 (平成26年1月27日)

7. その他

期間中に会の運営を円滑に展開するため、開催された幹事会、賞審査委員会、総会、編集委員会は次のとおりである。

<幹事会：6回>

平成25年4月23日（火）13:30～15:30
学術総合センター11階 共用会議室
平成25年6月18日（火）15:00～17:30
学術総合センター11階 共用会議室
平成25年9月6日（金）15:45～17:30
学術総合センター11階 共用会議室
平成25年10月7日（月）15:45～17:30
学術総合センター11階 共用会議室
平成25年12月9日（月）15:45～17:30
学術総合センター11階 共用会議室
平成26年2月5日（水）15:45～17:45
学術総合センター11階 共用会議室

<賞審査委員会：2回>

平成25年12月9日（月）13:30～15:30

学術総合センター11階 共用会議室
平成26年2月5日（水）13:30～15:30
学術総合センター11階 共用会議室

<総会：1回>

平成25年7月26日（金）11:30～12:00
全日通霞が関ビルディング8階中会議室

<編集委員会：4回>

平成25年4月23日（火）15:45～17:45
学術総合センター11階 共用会議室
平成25年7月5日（金）15:00～17:30
（一社）未踏科学技術協会 会議室
平成25年10月7日（月）10:00～12:30
学術総合センター11階 共用会議室
平成26年1月15日（水）15:00～17:30
（一社）未踏科学技術協会 会議室

<会員の状況> （H26.3.31現在）

団体会員 10社10口 個人会員 15名

超伝導科学技術研究会
平成25年度収支決算書
(平成25年4月1日～平成26年3月31日)

(単位：円)

項目		予算額 (X)	決算額 (Y)	決算額－予算額 (Y-X)
収入の部	団体会費	2,000,000	2,000,000	0
	個人会費	150,000	150,000	0
	事業参加費収入	400,000	285,000	△ 115,000
	事業資料代収入	600,000	276,000	△ 324,000
	調査研究収入 (D)	2,000,000	2,003,967	3,967
	広告収入	145,000	62,000	△ 83,000
	雑収入	520,000	525,867	5,867
	当期収入合計 (A)	5,815,000	5,302,834	△ 512,166
	前期繰越収支差額	△ 61,000	△ 60,903	97
	収入合計 (B)	5,754,000	5,241,931	△ 512,069
支出の部	シンポジウム・ワークショップ開催費	980,000	916,921	△ 63,079
	会議開催費	250,000	103,860	△ 146,140
	印刷出版諸経費	750,000	836,095	86,095
	調査研究経費	2,000,000	2,003,967	3,967
	共通事務費	0	700	700
	管理費	574,000	494,830	△ 79,170
	基本人件費	1,200,000	960,000	△ 240,000
	予備費	0	0	0
	当期支出合計 (C)	5,754,000	5,316,373	△ 437,627
当期収支差額 (A)－(C)	61,000	△ 13,539	△ 74,539	
次期繰越差額 (B)－(C)	0	△ 74,442	△ 74,442	

平成 26 年 7 月 22 日の総会で承認済み

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
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
ISS2014	2014.11.25-11.27	Tower Hall Funahori, Tokyo	http://www.istec.or.jp/ISS2014/ISS2014.html

超伝導科学技術研究会 編集委員会 委員

松本 明善	独立行政法人物質・材料研究機構 超伝導線材ユニット 主幹研究員	小泉 勉	昭和電線ケーブルシステム株式会社 超電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

