

FSST NEWS

Forum of Superconductivity	No. 137
Science and Technology News	

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

<FSST NEWS No.137 目次>

<トピックス 1>

新しい BiS₂ 系層状超伝導体 首都大学東京 水口 佳一 2

<トピックス 2>

単一磁束量子読み出し回路を用いたアレイ型超伝導単一光子検出器システムの開発
 情報通信研究機構 山下 太郎 7

<トピックス 3>

最近のヘリウム不足の背景 ガスレビュー 大家 泉 12

<会議報告 1>

第39回シンポジウム会議報告 物質・材料研究機構 松本 明善 15

<会議報告 2>

第80回ワークショップ会議報告 東芝 田崎 賢司 16

<会議報告 3>

第1回超伝導科学技術セミナー ～若手技術者向け講習会～

- (1) セミナー開催の背景 昭和電線ケーブルシステム 小泉 勉 18
- (2) セミナーの概要 鉄道総合技術研究所 荒井 有気 18
- (3) 超伝導科学技術セミナーに参加して
 - (3)-1 ティーイーピー 今 康一 19
 - (3)-2 古河電気工業 中山 亮 20
 - (3)-3 東北大学 柳生 穂高 21
 - (3)-4 物質・材料研究機構 藤岡 正弥 22
 - (3)-5 昭和電線ケーブルシステム 菅根 秀夫 22
 - (3)-6 東芝 研究開発センター 小林 奈央 23
 - (3)-7 フジクラ 栗原 駿 23
 - (3)-8 東京海洋大学 都筑 啓太 24

<授賞発表>

「第17回超伝導科学技術賞」発表 審査委員会委員長 太刀川 恭治 25

<研究室紹介>

- (1) 名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻量子集積デバイス工学研究グループ 28
- (2) 金沢工業大学先端電子技術応用研究所 29
- (3) 古河電気工業(株)パワー & システム研究所超伝導応用開発部 30
- (4) 九州大学大学院総合理工学府物質理工学専攻 中島・波多研究室 31
- 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

<トピックス 1>

新しい BiS₂系層状超伝導体

Novel BiS₂-based layered superconductors

首都大学東京

水口 佳一

Tokyo Metropolitan University

Y. Mizuguchi

1. はじめに

層状構造を持つ超伝導体は超伝導研究における最も重要なテーマの一つとして研究されてきた。その理由の一つは、銅酸化物系 [1-4] や鉄系超伝導体 [5-8] において高い超伝導転移温度 (T_c) が観測されたためである。また、層状物質では低次元的な構造に由来した特異な物性が発現し、それが超伝導発現機構と関連することがあり、物理的興味が尽きないことも理由の一つだ。さらに、層状物質の特徴として類似物質の多様性が挙げられ、新超伝導物質探索を行う研究者にとっては絶好の舞台である。鉄系超伝導体を例に挙げると、超伝導を発現する共通の超伝導層は、Feの正方格子と陰イオンが結合したFeAs層やFeSe層である。FeAs系においては、ブロック層としてLiやBaイオンの層やREO層などを取ることができ、多くの超伝導体が発見され T_c が55 Kまで上昇した。FeSe ($T_c = 8$ K) においてはFeSe層間へのKイオンなどインターカレーションにより T_c が30 K以上に上昇した[9]。このように、ブロック層構造の最適化や層間へのインターカレーションにより様々な超伝導物質が合成でき、その構造に依存して超伝導特性が大きく変化することが層状超伝導体の大きな魅力といえる[8, 10]。

層状超伝導体の探索を行う際に重要なのは、“共通の超伝導層”が存在することである。上述の通り、鉄系超伝導ではFeAs層やFeSe層が共通の超伝導層であり、銅酸化物においてはCuO₂層がその役割を果たす。もし、このような共通の超伝導層を発見することができれば、多くの類似超伝導物質を創出することができ、高温超伝導や非従来型超伝導の発現が期待できる。2012年に我々は、BiとSで構成されるBiS₂層を有する層状超伝導物質を発見した[11, 12]。これまでにBiS₂層を基本とした類似超伝導体が発見されており、世界中で物質探索レースが始まったところである[13-18]。現在最高の T_c は10 K程度だが、今後の物質探索によりさらに高い T_c を示す可能性が十分にある。本稿では、BiS₂系層状超伝導体の結晶構造と物性について紹介する。さらに、これまでに分かっている実験的・理論的な結果

を元に、BiS₂系においてどうすればさらに高い T_c が実現できるかについて議論したい。

2. BiS₂系の結晶構造

これまでに発見されているBiS₂系超伝導体の結晶構造は図1に示す(a) Bi₆O₈S₅型および(b) LnOBiS₂型の二種類に分類できる(Ln=Lanthanide)。どちらも図1(c)のような二枚のBiS₂層(超伝導層)とブロック層の積層構造である。図1(d)に示す通り、BiS₂層をab面方向に描画すると、BiとSは正方格子をとることがわかる。BiS₂層はNaCl構造と類似の構造であり、NaClの片方の原子サイトを50%欠損させ、層状にした構造ととらえられる。

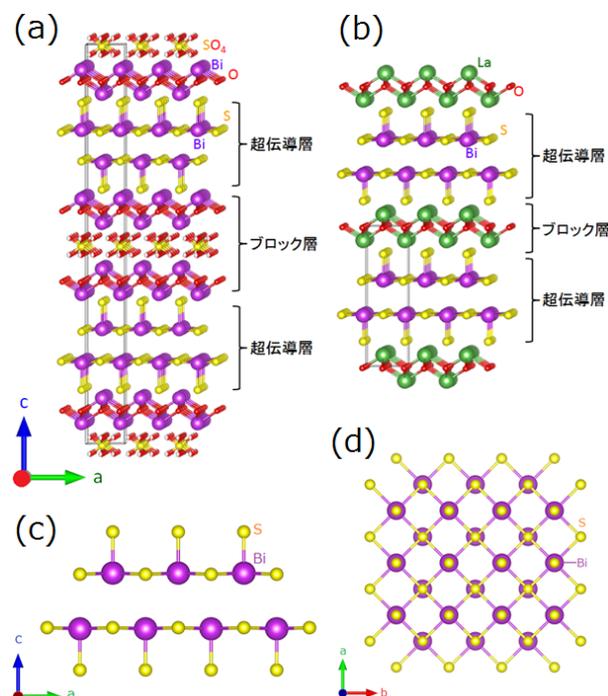


図1 (a) Bi₆O₈S₅の結晶構造. 超伝導を示す組成(Bi₄O₄S₃)ではSO₄サイトに部分欠損が存在する。(b) LaOBiS₂の結晶構造。(c, d) BiS₂超伝導層の拡大図。

図1(a)はBi₆O₈S₅の結晶構造である。空間群はI4/mmm(正方晶)であり、二枚のBiS₂層(伝導層)とBi₄O₄(SO₄)層(ブロック層)がc軸方向に交互に積層している。バンド計算によるとBi₆O₈S₅はBi³⁺のバンド絶縁体であることがわかる[11]。ブロック層のSO₄サイトが部分的に欠損すると電子キャリアが生じ、BiS₂層に供給されることで金属(超伝導体)となる。最も超伝導特性がよい試料の組成はBi:O:S = 4:4:3のとき得られ、 $T_c^{\text{zero}} = 4.5$ Kを示す。Bi₄O₄S₃は、Bi₆O₈S₅のSO₄サイトが50%欠損した場合と形式上一致する(Bi₆O₈S_{4.5} = Bi₄O₄(SO₄)_{0.5}Bi₂S₄)。

しかし、BiS₂系の単結晶は未だ得られておらず、詳細な単結晶構造解析は行われていない。よって、SO₄サイトの欠損に関してはあくまで仕込み組成からの推測であり、単結晶の育成と詳細な構造解析が今後の課題である。図1 (b)はLaOBiS₂の結晶構造である。Bi₆O₈S₅と同じように二枚のBiS₂層とLaOブロック層の積層構造である[12]。このLaOブロック層は鉄系超伝導体LaFeAsOのブロック層と非常に類似しており、BiS₂系も鉄系と同様に類似超伝導物質の多様性が期待できる。実際に最近、LaOブロック層の代わりにSrFブロック層を挿入したSrFBiS₂が合成され、電子ドーピング(SrサイトのLa部分置換)により超伝導が確認されている[17,19]。

3. BiS₂系の超伝導特性と相図

次に、BiS₂系の超伝導特性について、LaOBiS₂系を例に紹介する。LaOBiS₂多結晶の電気抵抗率を測定したところ、半導体的な電気伝導が観測された。また、バンド計算からもバンドギャップを持った半導体であると予想された[12,20]。そこで、BiS₂層に電子キャリアをドーピングするために、ブロック層のOサイトのF部分置換を試みた。鉄系超伝導の経験から、LaO層のO²⁻をFで部分置換することにより伝導層のBiS₂層に電子キャリアが供給されると期待できるためである。LaO_{1-x}F_xBiS₂はx ~ 0.5付近まで単相を合成することができ、格子定数のc軸はF濃度の増加とともに減少した。

図2に固相反応法により合成したLaOBiS₂とLaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂の電気抵抗率の温度依存性を示す。F置換により電気抵抗率は減少し、x ~ 0.5においてT_cが約2.5 Kの超伝導転移を確認した。BiS₂系超伝導には、母相の半導体に電子ドーピングを行うことで発現されるという共通の性質があるようだ。観測されたT_cはBi₄O₄S₃より低く、さらに磁化率測定を行うと反磁性の体積分率は10%程度と低いことがわかった。そこで、超伝導特性の改善を期待し、“高圧下アニール”を試みたところ、超伝導特性が驚くほど上昇した[21]。

図3に固相反応で合成したLaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂(as-grown)と高圧下アニールを施したLaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂(HP-annealed; 2 GPa, 600°C)の電気抵抗率の温度依存性を示す。as-grown試料に比べ、高圧アニール試料は電気抵抗率が減少し、T_c^{onset}は10.6 Kまで上昇し、T_c^{zero}も7.8 Kまで上昇した。磁化率測定においても反磁性シグナルが100%に近い体積分率を示し、バルクな超伝導が高圧下アニールにより誘起されたと考えられる。興味深いことは、高いT_cを示したLaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂(HP-annealed)においても電気抵抗率の温度依存性は金属的ではなく、半導体的な振る舞いが残っていることである。この原因はいまだ解明されていないが、BiS₂系超伝導は半導体的

な伝導の近傍で最適化される特徴がある。La系についてT_cとF濃度の関係をまとめると図4のような相図を得る。すべての組成でas-grown試料に対して高圧下アニール試料の方が著しく高い超伝導特性を示す。また、x ~ 0.5付近に頂点を持つドーム状のF濃度依存性を示す。

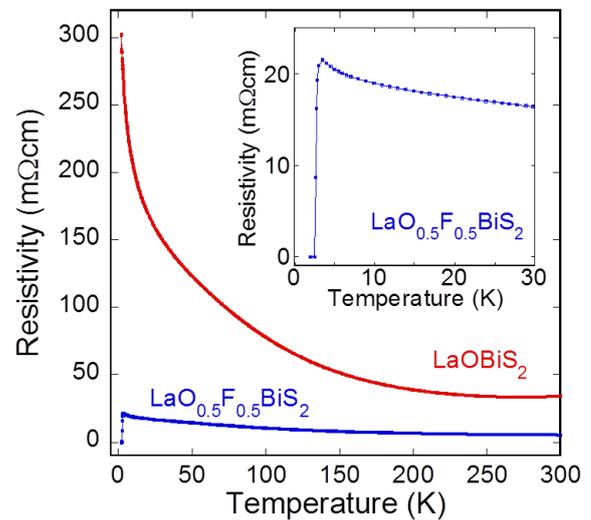


図2 LaOBiS₂およびLaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂の電気抵抗率の温度依存性。どちらの試料も固相反応法により合成した。挿入図は超伝導転移近傍の拡大図。

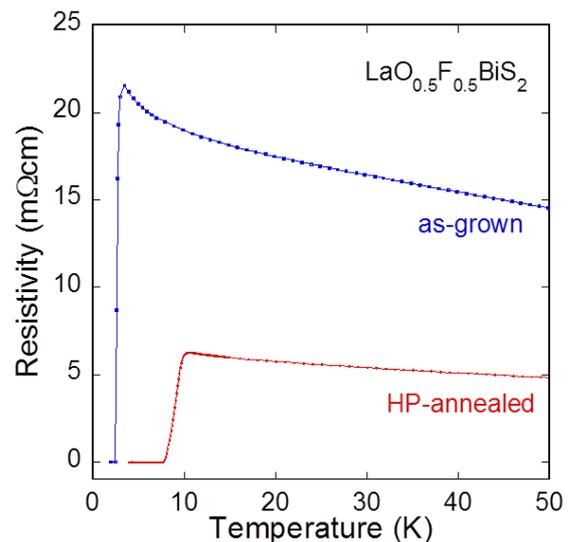


図3 固相反応により合成したLaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂(as-grown)および高圧下アニールを施したLaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂(HP-annealed)の電気抵抗率の温度依存性。

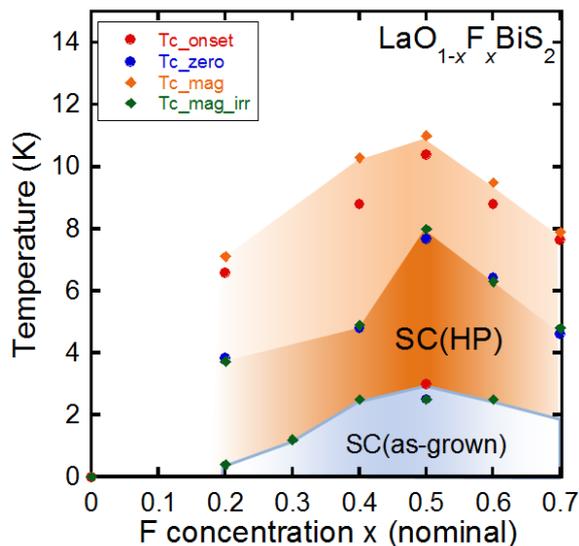


図4 $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ の相図。F濃度 (x) は仕込み組成である。 T_{c_onset} および T_{c_zero} は電気抵抗率測定から見積もった。 T_{c_mag} は磁化率が減少し始める温度であり、 $T_{c_mag_irr}$ は磁化率測定においてZFCカーブとFCカーブが分岐する温度とした。

4. BiS_2 系の圧力効果: 超伝導特性と結晶構造の相関

$\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ を高圧下アニールすると、as-grown 試料と比べて格子定数 a および c が減少する。よって、高圧アニールは結晶構造に何らかの影響を与えていることは確かである。そこで、Laサイトをイオン半径の小さな別のランタノイドで置換してみた。ブロック層を構成する元素のイオン半径を小さくすると格子定数が減少し、化学圧力印加効果を得ることができる。これまでに、 $\text{Ln} = \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Yb}$ において超伝導試料が合成されている[13-16,22]。表1に最適な合成条件と格子定数をまとめてみた。○はバルクな超伝導を示す試料、△はフィラメンタリーな(不完全な)超伝導試料を示し、×は非超伝導試料を示す。

表1 最適な超伝導特性を得るための合成条件

	La ($x=0.5$)	Ce ($x=0.7$)	Nd ($x=0.3$)	$\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$
as-grown	△	△	○	○
HP	○	○	△	×
a 軸	4.062 Å	4.040 Å	4.000 Å	3.959 Å
c 軸	13.27 Å	13.26 Å	13.50 Å	41.24 Å
空間群	$P4/nmm$	$P4/nmm$	$P4/nmm$	$I4/mmm$
T_{c_zero}	7.8 K	6.0 K	5.2 K	4.5 K

$\text{Ln} = \text{La}, \text{Ce}$ においては高圧下アニールした試料で最適な超伝導特性が得られた。一方で、 $\text{NdO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ においては固相反応法により合成した試料のみ最適な特性を示した。これは、ブロック層を構成するランタノイドのイオン半径を $\text{La}^{3+} \rightarrow \text{Nd}^{3+}$ へと小さくしたことで、高圧下アニールと同様の効果が得られたと考えられる。残念なことに T_c はイオン半径の減少とともに下がってしまった。表1の格子定数を見ると、 a 軸はランタノイドイオン半径とともに減少している。 T_c の減少と a 軸の減少には相関がありそうである。一方で、 c 軸は T_c と顕著な相関を見せない。これは、最適な超伝導特性を得るための最適F置換量が系により異なることと、 c 軸がF置換量に非常に敏感なためである。ここで、 $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$ のデータもあわせて考えてみよう。 a 軸はNd系よりさらに小さいが、図1 (a)の結晶構造からわかるとおり、 $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$ は非常に大きな c 軸(ブロック層)を持つ。ところがNd系とそれほど変わらない T_c である。これらの情報から推測できることは、 BiS_2 系の超伝導特性や発現機構は c 軸の大きさには鈍感であり、 a 軸の大きさと強く相関している可能性である。

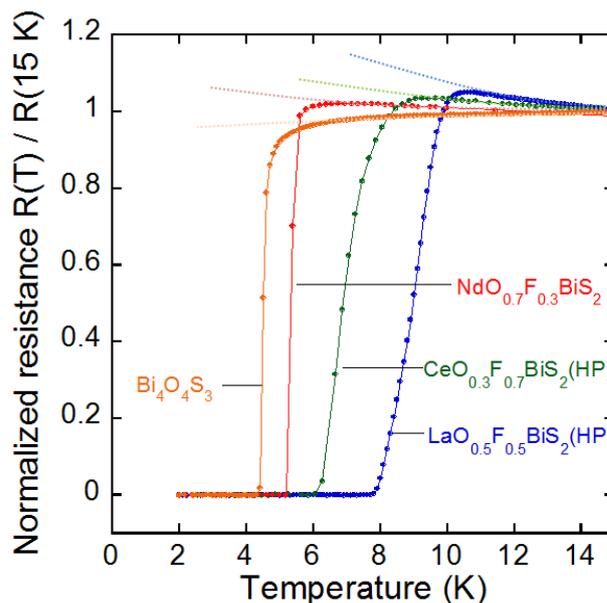


図5 $\text{LnO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Ce}, \text{Nd}$) および $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$ の規格化した電気抵抗の温度依存性。それぞれ、組成および合成条件を最適化した試料のデータである。図中の点線は視覚補助。

次に着目したいのは、常伝導状態の電気抵抗の振る舞いである。図5に $\text{LnO}_{1-x}\text{F}_x\text{BiS}_2$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Ce}, \text{Nd}$) および $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$ の15 Kで規格化した電気抵抗の温度依存性を示す。点線で示した通り、 $\text{La} \rightarrow \text{Nd}$ に変化させると半導体的な伝導が抑制されていくことがわかる。さらに、 $\text{Bi}_4\text{O}_4\text{S}_3$ においては金属的な電気抵抗の温度依存性が

観測される。ところが、最も高い T_c は半導体的な伝導を示すLa系で観測され、より金属的になるに従い T_c が減少していく。つまり、BiS₂系の超伝導特性は半導体的な伝導領域で最適化されるといえる。

最後に、高压セルを用いた高压下電気抵抗率測定をBi₄O₄S₃ および LaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂ に対して行った。Bi₄O₄S₃ の T_c は図6 (a)に示すように圧力の印加とともに減少した。一方で、LaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂ の T_c は図6(b)のように1 GPaまでの圧力印加により上昇し、さらに高い圧力領域では減少する振る舞いを見せた。このような T_c の圧力印加に対する敏感性は鉄系超伝導と類似しており、BiS₂系においても局所的な構造パラメータが超伝導特性の決定に強く寄与していることがわかる。前述の議論と合わせて考えると、 a 軸の長さが T_c を支配している一方で、別の局所構造が超伝導発現の鍵を握っているという仮説が立てられる。実際に最近の理論研究で、LaOBiS₂系においてブロック層のLaとBiS面内のSの距離を変えることでバンド構造が大きく変化するという結果も得られている[23]。

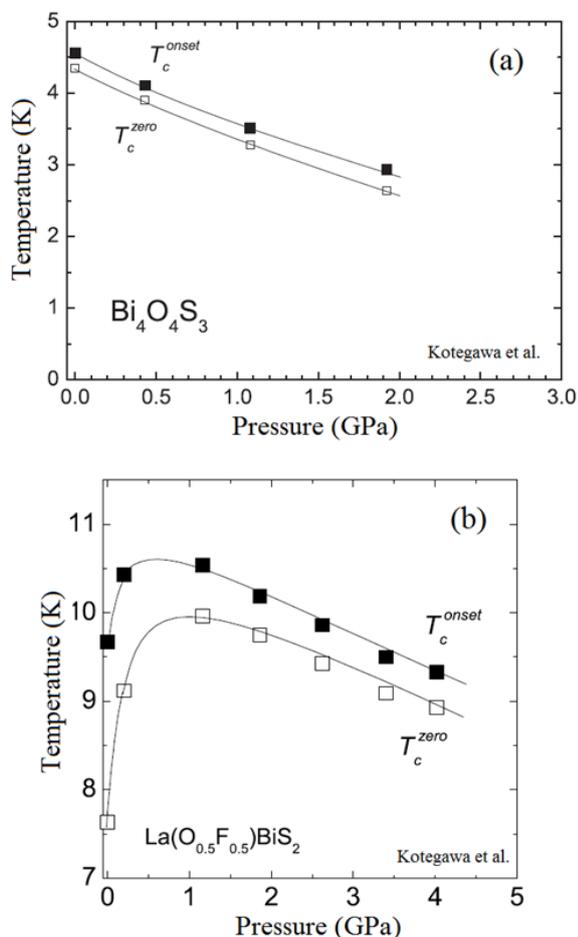


図6 (a) Bi₄O₄S₃および (b) LaO_{0.5}F_{0.5}BiS₂(HP) の T_c の圧力依存性。

5. 高い T_c を実現するには

ここまで、BiS₂系の合成条件と超伝導特性について紹介してきた。さらに、圧力効果の議論から超伝導特性と結晶構造が強く関連しているという仮説を立てた。また、BiS₂系超伝導は半導体的な伝導領域で最適化されているという実験事実が得られている。以上を元に、推測の範疇ではあるが、BiS₂系においてさらに高い T_c が実現する可能性について議論したい。

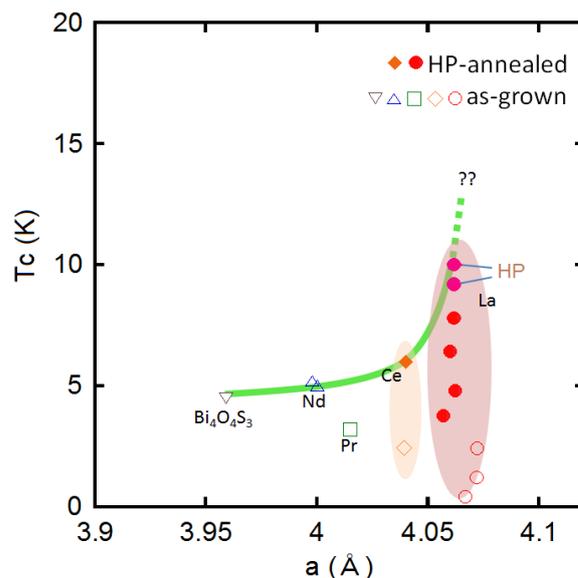


図7 BiS₂系の T_c の格子定数(a 軸)依存性。塗りつぶしたデータ点は高压アニール試料を示し、白抜きのデータ点は固相反応試料(as-grown)を示す。HPと記したデータ点は高压下電気抵抗率測定の結果である。

図7はこれまでに得られているBiS₂系超伝導体の T_c と格子定数(a 軸)をまとめた図である。La系およびCe系では、固相反応試料は T_c が低くフィラメンタリーな超伝導しか示さず、高压下アニールすることで高い T_c を示すバルクな超伝導特性が得られる。合成条件を最適化により得られたそれぞれの系の最高の T_c を比較すると、図7の太線のようなカーブを描ける。ここから、La系よりもさらに大きな a 軸を持つ物質を開発できれば、さらに高い T_c を実現できることが期待できる。 a 軸が長くなると、例えば面内のBi-Bi間距離が長くなる。それに伴い T_c が上昇することは、BiS₂系超伝導は半導体的な伝導領域で最適化されるといふ実験事実と矛盾しない。しかし、La³⁺はランタノイドで最大のイオン半径を持つため、LnOBiS₂型のブロック層ではこれ以上大きな a 軸は実現できない。そこで一つ目の戦略は、Bi₆O₈S₅型構造のBi₂O₂層をLa₂O₂層に変えることである。つまり、図8(a)のような結晶構造を持ち、組成式はLa₄O₄(SO₄)

Bi₂S₄となるはずである。実際に、La₄O₄Bi₂S₅という *I4/mmm*空間群を持つ物質の報告が過去にあり、これはブロック層としてLa₄O₄Sを持つと考えられる[24]。*a*軸は4.16 ÅでありLaOBiS₂より長い。Sの代わりにSO₄イオンを挿入できれば、さらなる*a*軸の伸長が期待できる。二つ目の戦略は、鉄系超伝導で開発されたペロブスカイト型ブロック層を挿入することである。図8 (b)のような物質を合成できれば、Ba²⁺を用いることでより長い*a*軸が期待できる。予想される組成式の例はBa₄TM₂O₆Bi₂S₄ (TM=遷移金属)である。それぞれ、最適なドーピングによりBiS₂層で超伝導が発現すると期待できる。

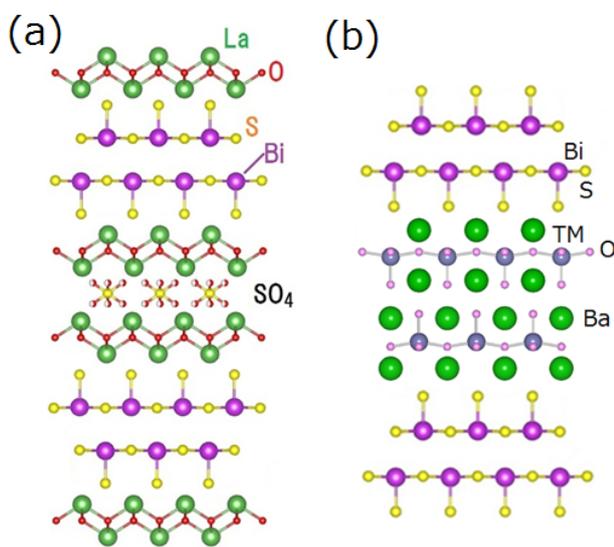


図8 (a) La₄O₄(SO₄)Bi₂S₄および (b) Ba₄TM₂O₆Bi₂S₄の予想される結晶構造。

6. まとめ

最近我々は、BiS₂層を有する一連の層状物質が超伝導を発現することを発見した。超伝導が発現する層はBiS₂層であり、ブロック層の構造を変化させることで様々な超伝導体が発見されている。超伝導特性はいくつかの局所的な結晶構造パラメータと関連している可能性が高く、特に格子定数の*a*軸が強い相関を持つと考えられる。今後、新物質の開発や単結晶の育成を達成し、詳細な物性測定と理論解析を進めていくことで、超伝導機構が解明されることを期待する。そこから、室温超伝導の発見に向けた、何らかのヒントが得られることを強く期待している。

謝辞

本稿で紹介した研究は、物質・材料研究機構(NIMS)ナノフロンティア材料グループの高野義彦グループリーダー、出口啓太氏、出村郷志氏、産業総合

技術総合研究所(AIST)ナノ移動解析研究グループの後藤義人グループ長、藤久裕司主任研究員、電気通信大学量子・先進理工学専攻の黒木和彦教授、臼井秀知氏、鈴木雄大氏、神戸大学物理学専攻の小手川恒准教授、藤秀樹教授、富田佑介氏、首都大学東京物理学専攻の門脇広明准教授、高津浩助教、青木勇二教授、東中隆二助教、首都大学東京電気電子工学専攻の三浦大介准教授、井澤宏輝氏、大町篤史氏との共同研究により得られました。深く感謝いたします。また、助言をいただいたNIMSナノフロンティア材料グループの岡崎宏之氏、S. J. Denholme氏、首都大学東京物理学専攻の中井祐介助教、真庭豊教授、佐藤英行教授、堀田貴嗣教授、山梨大学クリスタル科学研究センターの長尾雅則助教、三浦章助教に感謝いたします。また、今回の新超伝導物質発見を達成する過程において、NIMS物質・材料データベース(MatNavi)から多くの情報を得ました。本稿で示した結晶構造図はVESTAにより作成しました[25]。本研究は科学研究費補助金(研究活動スタート支援:238600425001)、JST戦略的国際科学技術協力推進事業(EU-日本:超伝導)などの支援の下で得られました。

参考文献

- [1] J. G. Bednorz, and K. A. Müller: Z. Physik B Condensed Matter **64** (1986) 189.
- [2] M. K. Wu, J. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, U. Q. Wang, and C. W. Chu: Phys. Rev. Lett. **58** (1987) 908.
- [3] H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi, and T. Asano: Jpn. J. Appl. Phys. **27** (1988) L209.
- [4] A. Schilling, M. Cantoni, J. D. Guo, and H. R. Ott: Nature **363** (1993) 56.
- [5] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hosono: J. Am. Chem. Soc. **130** (2008) 3296.
- [6] Z. A. Ren, W. Lu, J. Yang, W. Yi, X. L. Shen, Z. C. Li, G. C. Che, X. L. Dong, L. L. Sun, F. Zhou, and Z. X. Zhao: Chinese Phys. Lett. **25** (2008) 2215.
- [7] K. Ishida, Y. Nakai, and H. Hosono: J. Phys. Soc. Jpn. **78** (2009) 062001.
- [8] Y. Mizuguchi, and Y. Takano: J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 102001.
- [9] J. Guo, S. Jin, G. Wang, S. Wang, K. Zhu, T. Zhou, M. He, and X. Chen: Phys. Rev. B **82** (2010) 180520.
- [10] Y. Mizuguchi, Y. Hara, K. Deguchi, S. Tsuda, T. Yamaguchi, K. Takeda, H. Kotegawa, H. Tou,

and Y. Takano: Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 054013.

- [11] Y. Mizuguchi, H. Fujihisa, Y. Gotoh, K. Suzuki, H. Usui, K. Kuroki, S. Demura, Y. Takano, H. Izawa, and O. Miura: Phys. Rev. B **86** (2012) 220510.
- [12] Y. Mizuguchi, S. Demura, K. Deguchi, Y. Takano, H. Fujihisa, Y. Gotoh, H. Izawa, and O. Miura: J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 114725.
- [13] S. Demura, Y. Mizuguchi, K. Deguchi, H. Okazaki, H. Hara, T. Watanabe, S. J. Denholme, M. Fujioka, T. Ozaki, H. Fujihisa, Y. Gotoh, O. Miura, T. Yamaguchi, H. Takeya, and Y. Takano: J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 033708.
- [14] D. Yazici, K. Huang, B.D. White, A.H. Chang, A.J. Friedman, and M. B. Maple: Philosophical Magazine **93** (2013) 673.
- [15] R. Jha, S. K. Singh, and V.P.S. Awana: arXiv:1208.5873.
- [16] J. Xing, S. Li, X. Ding, H. Yang, and H. H. Wen: Phys. Rev. B **86** (2012) 214518.
- [17] X. Lin, X. Ni, B. Chen, X. Xu, X. Yang, J. Dai, Y. Li, X. Yang, Y. Luo, Q. Tao, G. Cao, and Z. Xu: Phys. Rev. B **87** (2013) 020504.
- [18] D. Yazici, K. Huang, B. D. White, I. Jeon, V. W. Burnett, A. J. Friedman, I. K. Lum, M. Nallaiyan, S. Spagna, and M. B. Maple: arXiv:1303.6216.
- [19] H. Lei, K. Wang, M. Abeykoon, E. S. Bozin, and C. Petrovic: arXiv:1208.3189.
- [20] H. Usui, K. Suzuki, and K. Kuroki: Phys. Rev. B **86** (2012) 220501.
- [21] K. Deguchi, Y. Mizuguchi, S. Demura, H. Hara, T. Watanabe, S. J. Denholme, M. Fujioka, H. Okazaki, T. Ozaki, H. Takeya, T. Yamaguchi, O. Miura, and Y. Takano: EPL **101** (2013) 17004.
- [22] S. Demura et al., to be published.
- [23] K. Suzuki, H. Usui, and K. Kuroki: arXiv:1211.6880.
- [24] V. S. Tanryverdiev, O. M. Aliev, and I. I. Aliev: Inorg. Mater. **31** (1995) 1358.
- [25] K. Momma, and F. Izumi: J. Appl. Cryst. **41** (2008) 653.

<トピックス 2>

単一磁束量子読み出し回路を用いたアレイ型超伝導単一光子検出器システムの開発

Development of multi-pixel superconducting nanowire single-photon detector array system with single-flux-quantum readout circuit

独立行政法人 情報通信研究機構

山下 太郎、三木 茂人、寺井 弘高、牧瀬 圭正、
王 鎮

National Institute of Information and Communications
Technology

T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, K. Makise,
and Z. Wang

1. はじめに

超伝導単一光子検出器 (Superconducting nanowire Single-Photon Detector, SSPD) は、低ダークカウント、高検出効率、低ジッタ等の数々の優位性を有し、近年では量子情報通信や量子光学実験をはじめとする幅広い分野で精力的に利用されている[1-5]。SSPDは膜厚数nmの超伝導ナノワイヤをミアンダ状に配置した構造を持ち、ナノワイヤに単一光子が吸収されると超伝導状態が局所的に破壊され、抵抗状態(常伝導状態)へと転移する。この際、SSPDにはバイアス電流が印加されているため、有限な電圧パルスが発生し光子を検出することが可能となる。

SSPDの特長のひとつに高速応答性が挙げられるが、実際の応答速度はミアンダ状の長いナノワイヤに起因する力学的インダクタンスに律速されており、現状では数10 - 100 MHz程度に留まっている[6]。応答速度を向上させるためには、受光面積を小さくしてナノワイヤ長を小さくすればよいが、その場合には受光部と入射光との光結合効率が減少してしまい、システム全体としての検出効率が損なわれてしまうというトレードオフの問題が存在する。この問題を解決するために提案されたのが、アレイ型 SSPD である[7-9]。アレイ型 SSPD では、SSPD を独立した複数のピクセルに分割することで、各ピクセルのナノワイヤを短くして応答速度を向上させ、かつ全体として受光面積を確保することができるため、高速応答性と高検出効率の両立が可能となる。さらに、アレイ型 SSPD には空間分解能や擬似的な光子数識別性といった新しい機能が備わるため、その実現が期待されている。

アレイ型 SSPD における問題点のひとつとして、信号読み出しにおける熱流入の問題があった。図1(a)に示

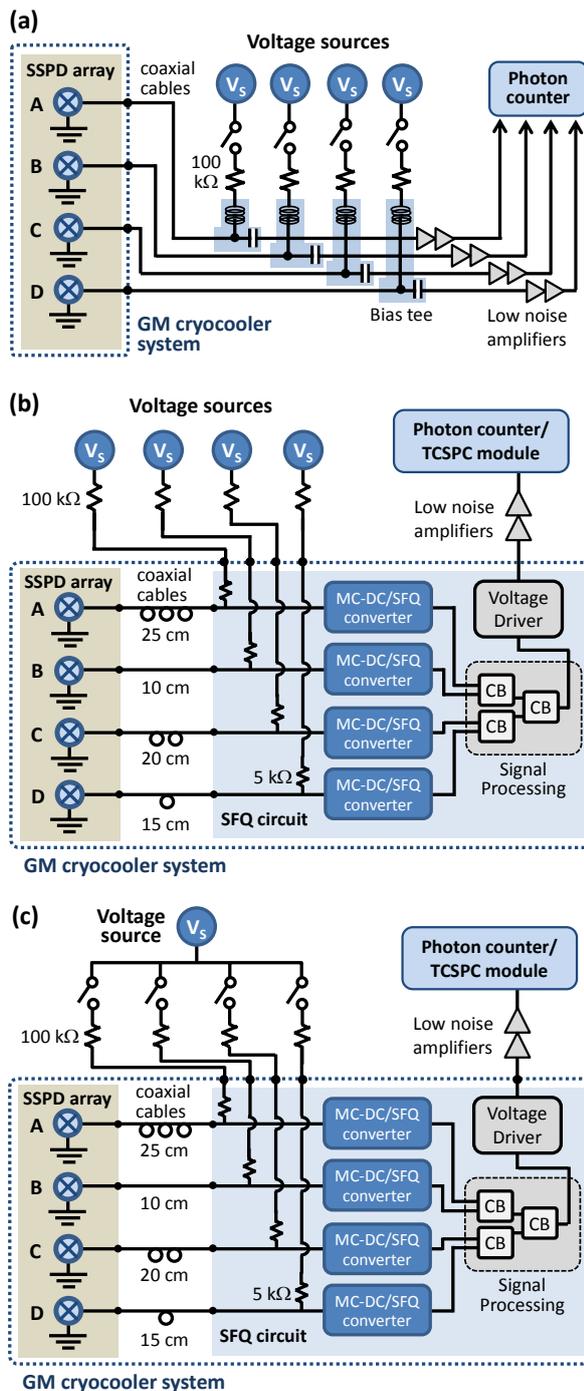


図1 実験セットアップの概念図。(a)従来のSSPDの読み出し方法。(b)独立した4チャンネル電圧源を用いたSFQ読み出し方法。(c)単一電圧源を用いたSFQ読み出し方法。

すように、従来のSSPDの読み出し方法では、1ピクセルあたり1本の同軸ケーブルが必要となる。ところが同軸ケーブルは熱伝導率が高いため、ケーブルを通じて室温側から冷凍機内部に熱が流入してしまう。そのため、従来の読み出し方法をアレイ型SSPDにそのまま適用した場合、ピクセル数の増加に伴い熱流入が増え、素子の冷却が困難となる。そこで、この問題を克服するため

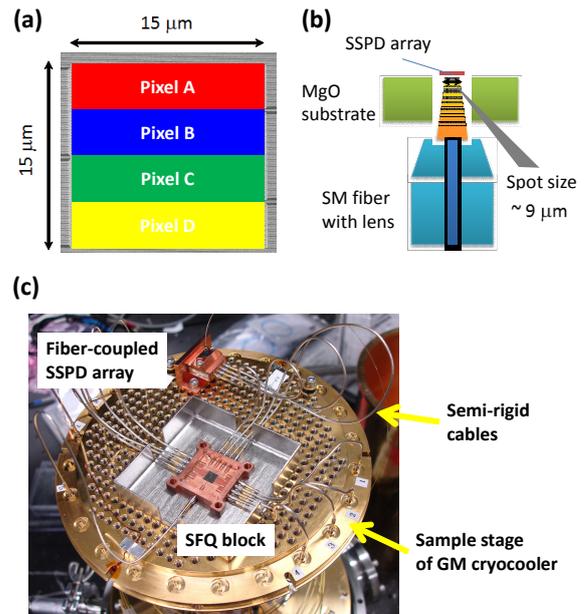


図2 (a)4ピクセルSSPDアレイ。(b)光結合方法の概念図。(c)冷凍機内サンプルステージの実装写真。

に提案されているのが、単一磁束量子 (Single- Flux-Quantum, SFQ) 回路を用いた読み出し方法である [10-12]。SFQは低消費電力かつ超高速性を兼ね備えた超伝導デジタル素子であるが、このSFQ回路をアレイ型SSPDとともに冷凍機に実装し、SSPDからの出力を冷凍機内でSFQ回路で信号処理することにより、室温から導入する同軸ケーブルの本数を大幅に減らすことが可能となる。今回我々は、冷却能力0.1 Wの小型Gifford-MacMahon (GM) 冷凍機にアレイ型SSPDとSFQ読み出し回路を実装し、その動作実証に世界で初めて成功したので報告する [13,14]。

2. 素子の作成及び実装方法

今回我々は、窒化ニオブ (NbN) によるリニア配置型の4ピクセルSSPDアレイを作成した。図2(a)に示すように、 $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ の受光部が空間的に4分割された構造をもち、NbNナノワイヤの膜厚は4.5 nm、線幅100 nm、周期200 nmである。素子作成に関する詳細は、文献 [15]を参照されたい。作成した素子における各ピクセルの超伝導臨界電流 (I_c)は、ピクセルAから順番に、38.1, 37.5, 39.1, 39.9 μA であり、超伝導転移温度 (T_c)は全ピクセルともに10.4 Kであった。素子の受光部に効率良く入射光を結合させるため、光ファイバー付きの小型パッケージに素子を実装した。図2(b)に示すように、基板の裏面側から光ファイバーを通じて受光部(ミアンダ部)に光が照射される。入射光は、光ファイバーの先端に融着された小型のGRINレンズにより絞られることにより、受光部におけるスポット径が約9 μm となり、素子との高い

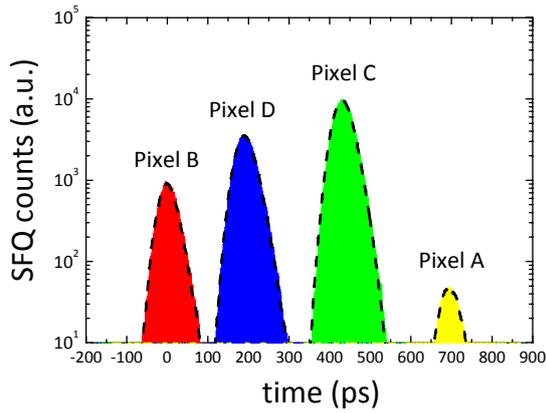


図3 時間相関SFQカウントのヒストグラム。塗りつぶされた部分が各ピクセルを単独でバイアスした場合、破線が全ピクセルを同時にバイアスした場合のヒストグラムを表す。

光結合が保証されている。また小型パッケージには110 GHzの高周波まで対応した4つの小型RFコネクタが導入されており、コプレーナ導波路を通じて各ピクセルと接続されている。

SFQ読み出し回路は、超電導工学研究所(SRL)の2.5 kA/cm² Nbスタンダードプロセスを用いて作製された。今回作製した回路には、入力部として4つの磁気結合型DC/SFQ (MC-DC/SFQ) コンバータが存在し、SSPDからの入力パルスに応じてSFQパルスが発生する。MC-DC/SFQコンバータの詳細については、文献[10]を参照されたい。発生したSFQパルスは、3つのconfluenceバッファ(CB)ゲートからなる信号処理部によってマージされ、1本の出力信号として出力される。マージされたSFQパルスは電圧ドライバにおいて振幅1.8 mV、パルス幅1.6 nsの矩形波に変換され、一般的な測定器により容易に読み出し可能な信号として出力される。

今回、SSPD素子が実装された小型パッケージ及びSFQ回路を、冷却能力0.1 Wの無冷媒GM冷凍機に実装した(図2(c)) [16]。この冷凍機システムには9本の同軸ケーブルが実装され、そのうち1本はSFQからの出力読み出し用、残りの8本がSSPD及びSFQ回路へのバイアス電流印加用に用いられた。バイアス用の8本の同軸ケーブルは、将来的には熱伝導率の小さなDCケーブルに置き換えることによって、冷凍機への熱流入を抑制することが可能である。また、SFQ回路は磁束トラップを避けるために、2重の磁気シールドによって遮蔽されている。素子が配置されたサンプルステージは2.35 Kまで冷却され、熱変動は5 mK以内に収まっている。SFQ回路に40 mA程度のバイアス電流を印加することにより、サンプルステージ温度は2.42 Kまで上昇するが、SSPD

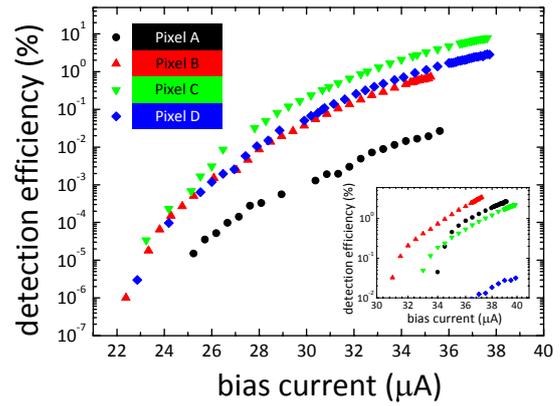


図4 各ピクセルのシステム検出効率のバイアス電流依存性。Inset: 再アラインメント後のシステム検出効率。

及びSFQとも、十分に動作可能な温度領域であるため問題は生じない。

3. 実験セットアップ

今回我々は、SFQ回路によるSSPD信号読み出しの基本動作を実証するため、時間分解測定システムを構築した。図1(b)及び(c)に示すように、アレイ型SSPDの各ピクセルは独立した4チャンネル電圧源もしくは単一の電圧源によりバイアスされ、SFQ回路の入力ポートへ同軸ケーブルを通じて接続されている。ピクセルA, B, C, Dに接続している同軸ケーブルの長さは、それぞれ25, 10, 20, 15 cmであり、5 cmの差が設けられている。そのため各ピクセルから出力されたパルスは、異なる長さの同軸ケーブルを通じてSFQ回路へ入力することにより、入力ポートに到着するタイミングに差が生じることになる。同軸ケーブルにおける信号の遅延を5 ns/mと仮定すると、5 cmあたり250 psの時間差が発生するが、これはSFQパルスのジッタである数10 psに対して十分大きい。このため、各ピクセルからの出力パルスがSFQ回路によりマージされた後でも、パルスのタイミングを測定することにより、どのピクセルからの出力パルスであるかを特定することが可能となる。光源としては100 fsのパルス幅をもつ波長1550 nmのパルスレーザーを用いた。複数ピクセルの同時応答を防ぐため、後段のアッテネータにより1パルスあたり0.1光子程度まで光強度を減衰させて冷凍機内へ入力した。そして、1 psの時間分解能をもつ時間相関単一光子カウンティング(Time-Correlated Single-Photon Counting, TCSPC) モジュールを用い、パルスレーザーからの同期信号とSFQ回路からの出力パルスの時間相関を測定した。

4. 実験結果：時間相関カウントのヒストグラム

4.1 独立バイアス方式

まず、独立した4チャンネルの電圧源によりSSPDをバイアスした場合(図1(b))の動作検証を行なった。図3に、得られた時間相関SFQカウントのヒストグラムを示す。まず塗りつぶされた部分は、各ピクセル単独でバイアスした場合のヒストグラムを表している。図から分かるように、各ピクセルからの信号は50–54 psの半値幅をもち、ピクセル毎に異なるタイミングで出力されている。ピークの高さがピクセルによって異なるのは、ピクセル毎の検出効率の違いに起因するが、この点に関しては次章で議論する。次に、図3における破線は、全ピクセルを同時にバイアスした場合の時間相関SFQカウントを表す。図から、全ピクセルが同時に動作しSFQ回路によってSSPD出力がマージされた場合でも、各ピクセルからの出力信号が時間分解されていることが分かる。また、各ピクセルを個々にバイアスした場合と比較しても、ヒストグラムの中心時間及び半値幅に有意な差がないことが確認された。以上の結果から、ピクセル間の干渉(クロストーク)が存在しないことが証明され、各ピクセルからの出力信号が正しくSFQ回路によってマージされていることが実証された[13]。

4.2 並列バイアス方式

次に、図1(c)に示すような並列バイアスのセットアップを考える。前節で検証した4チャンネル独立電圧源によるセットアップの場合、ピクセル毎に印加するバイアス電流を調整できるという利点がある反面、ピクセル数分の電圧源が必要となるというデメリットがある。そのため、将来的に実現すべき大規模(多ピクセル)なアレイ型SSPDを見据えた場合、ピクセル数によらず単一の電圧源で駆動可能な並列バイアス方式による動作検証を行なうことが重要となる。並列バイアス方式の場合には、共通の電圧が全ピクセルに印加するため、全ピクセルが均一性の高い特性をもつことが要求される。今回我々が作成した素子の I_c は37.5–39.9 μA と均一性が良いため、この方式を適用することが可能である。そこで我々は、前節で述べた独立バイアス方式の場合と同様に、並列バイアス方式を用いて時間相関SFQカウントのヒストグラムを測定した。その結果、並列バイアス方式を用いた場合でも、クロストークフリーで正常なSFQ読み出し動作が行われることを確認した[14]。

5. 実験結果：システム検出効率

最後に、各ピクセルの検出効率について考察を行なう。図4に、SFQ読み出しを用いたシステム検出効率のバイアス電流依存性を示す。この測定では、光源として

波長 1550 nmの連続光源を用い、 10^6 光子/秒程度まで光強度を減衰させてSSPDへと入力し、出力されたSFQパルス数をパルスカウンターにより測定した。図から分かるように、ピクセルCが7.9%と最も高い検出効率を示し、その両側に配置されたピクセルB及びDが各々0.7%、2.8%の効率を示した。一方で、ピクセルAの検出効率は0.1%以下と極めて小さいことが分かった。これは素子の歩留まりによるものではなく、入射光と受光部のアラインメントが僅かにずれ、スポットの中心がピクセルC付近に位置しているために生じたものであることが予想される。入射光のスポット径は約9 μm であるため、ピクセルAにはほとんど光が入射していないことになり、アラインメントのずれが極めて小さい検出効率の原因となる。これを確認するため、入射光スポットの中心位置がピクセルB付近に位置するように再アラインメントした後、検出効率の測定を行った。得られた検出効率のバイアス依存性を図4のinsetに示す。期待された通り、今度はピクセルBが最も高い検出効率を示し、スポットの中心から最も遠くに配置されているピクセルDが一番小さな検出効率を示すことが確認された。

以上の検出効率の分布とアラインメント位置による変化は、作製したアレイ型SSPDが空間分解能をもつことを示している。今回我々が構築した時間分解読み出し法を利用することにより、得られたSFQカウントのピークレベルの変化から単一光子が入射した位置の情報が得られることを意味しており、将来的にはイメージングセンサーやスペクトロスコープシステム等への応用が期待される。また、今回得られたシステム検出効率は計11.4%となり、量子暗号鍵配送の実験で用いられた従来型(単ピクセル)SSPDと同程度の性能を既に示しているが[3]、今後は光学キャビティ構造の付加[17]やインターリーブ(入れ子)型アレイ構造の採用により検出効率の向上が期待される。

6. まとめ

今回我々は、小型GM冷凍機にアレイ型SSPDとSFQ読み出し回路を実装し、その動作検証を行った。構築した時間分解読み出し法を用いて、時間相関SFQカウントを測定することにより、ピクセル間のクロストークなく正常にSFQ読み出し動作していることが確認された。またSSPDへのバイアス方式としては、独立バイアス及び並列バイアスについて検証し、どちらの場合でも正常動作することを実証した。本結果は、将来の大規模なアレイ型SSPDシステムの実現に向けた重要な基礎となるものである。

参考文献

- [1] G. N. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, and R. Sobolewski, *Appl. Phys. Lett.* **79** (2001) 705-707.
- [2] R. H. Hadfield, *Nature Photonics* **3** (2009) 696-705.
- [3] M. Sasaki, M. Fujiwara, H. Ishizuka, W. Klaus, K. Wakui, M. Takeoka, S. Miki, T. Yamashita, Z. Wang, A. Tanaka, K. Yoshino, Y. Nambu, S. Takahashi, A. Tajima, A. Tomita, T. Domeki, T. Hasegawa, Y. Sasaki, H. Kobayashi, T. Asai, K. Shimizu, T. Tokura, T. Tsurumaru, M. Matsui, T. Honjo, K. Tamaki, H. Takesue, Y. Tokura, J. F. Dynes, A. R. Dixon, A. W. Sharpe, Z. L. Yuan, A. J. Shields, S. Uchikoga, M. Legré, S. Robyr, P. Trinkler, L. Monat, J.-B. Page, G. Ribordy, A. Poppe, A. Allacher, O. Maurhart, T. Länger, M. Peev, and A. Zeilinger, *Optics Express* **19** (2011) 10387-10409.
- [4] B. S. Robinson, A. J. Kerman, E. A. Dauler, R. J. Barron, D. O. Caplan, M. L. Stevens, J. J. Carney, S. A. Hamilton, J. K. W. Yang, and K. K. Berggren, *Opt. Lett.* **31** (2006) 444-446.
- [5] C. M. Natarajan, A. Peruzzo, S. Miki, M. Sasaki, Z. Wang, B. Baek, S. Nam, R. H. Hadfield, and J. L. O'Brien, *Appl. Phys. Lett.* **96** (2010) 211101.
- [6] A. J. Kerman, E. A. Dauler, W. E. Keicher, J. K. W. Yang, K. K. Berggren, G. Gol'tsman, and B. Voronov, *Appl. Phys. Lett.* **88** (2006) 111116.
- [7] E. A. Dauler, B. S. Robinson, A. J. Kerman, J. K. W. Yang, K. M. Rosfjord, V. Anant, B. Voronov, G. Gol'tsman, and K. Berggren, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** (2007) 279-284.
- [8] E. A. Dauler, M. J. Stevens, B. Baek, R. J. Molnar, S. A. Hamilton, R. P. Mirin, S. W. Nam, and K. K. Berggren, *Phys. Rev. A* **78** (2008) 053826.
- [9] S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, K. Makise, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, *Phys. Procedia* **36** (2012) 77-81.
- [10] H. Terai, S. Miki, and Z. Wang, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009) 350-353.
- [11] H. Terai, S. Miki, T. Yamashita, K. Makise, and Z. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **97** (2010) 112510.
- [12] S. Miki, H. Terai, T. Yamashita, K. Makise, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **99** (2011) 111108.
- [13] T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, K. Makise, and Z. Wang, *Opt. Lett.* **37** (2012) 2982-2984.
- [14] T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, K. Makise, and Z. Wang, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 2500804.
- [15] S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17(2)** (2007) 285-288.
- [16] S. Miki, T. Yamashita, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, *Opt. Lett.* **35** (2010) 2133-2135.
- [17] S. Miki, M. Takeda, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, *Opt. Express* **17** (2009) 23557-23564.

<トピックス 3>

最近のヘリウム不足の背景

Background of the latest helium shortage

株式会社ガスレビュー

大家 泉

K.K. Gas Review

I. Oe

1. ヘリウム需給の構造的変化

2012年秋以降、深刻なヘリウム供給タイトが半年以上に渡って続いている。過去にも米国のヘリウムプラント不調や天然ガス需供の変動あるいは積み出しの港湾ストライキなどの要因によって供給不足に陥ったことが何度かあるが、ほとんどは一過性のものであり、2～3カ月、長くても半年ぐらいで収束し、事なきを得てきた。

しかし、目下のヘリウム不足はこれまでの経験的なものとはかなり様相が違っている。第一に2000年頃から世界的なヘリウム需要の成長と世界最大のヘリウム生産国である米国のヘリウム採取ガス田が枯渇気味であるため、供給余力が減少している。アルジェリアが1995年、カタールが2005年に生産を開始、主に欧州向けに輸出しているが、まだ世界の生産量の20%弱を占めるに過ぎない。

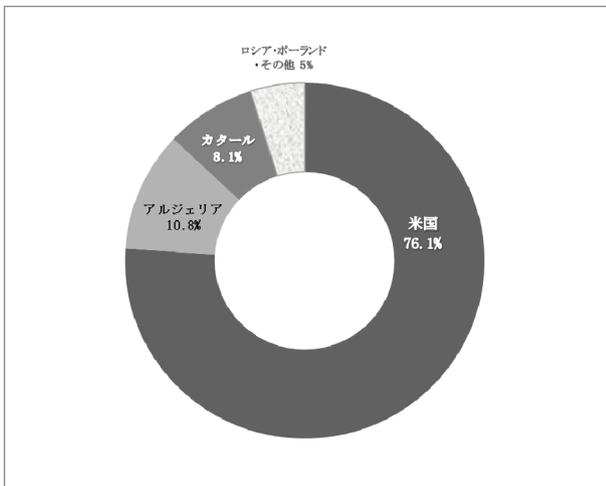


図1 世界のヘリウム生産量の国別シェア (2011年)

※米国地質調査資料

加えて、中国、韓国はじめ日本以外のアジア諸国でのヘリウム需要の増加が、日本向け輸出玉を絞るといふ現象を生んでいる。ヘリウム利用技術は周知のようにハイテク産業や先端研究開発に直結し、1990年代までは米国のアジア向け輸出の行く先はほとんど日本に限られていた。ところが、2000年以降アジア諸国でMRIの

普及や半導体、自動車産業の成長で輸出先が多様化、米国の販売量のうち、2007年には日本向けが25%に対し、その他アジア向けが32%と逆転、2010年に日本向けは20%と更にウェートが低下している。米国にとって、すでに日本はアジアで唯一の大得意先ではなくなっているのである。

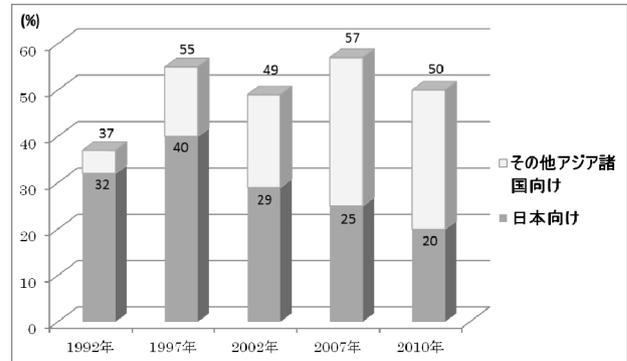


図2 米国の販売量に占めるアジア向け輸出比率の推移

※米国地質調査資料

米国は国の鉱山局が粗ヘリウムの備蓄管理を行ってきた。資金調達のため、1996年より段階的に民営化し、民間ガス会社への粗ヘリウムの販売の自由度が高くなったが、ここに来て、政府はヘリウムの戦略物資としての価値を見直し、一定の備蓄量の確保を指導しているといわれる。BLM(米国土地管理局)の借金が返済されれば、粗ヘリウムの販売量は大きく絞られるとみられる。というのも2008年を境に、輸出用が米国内消費を上回り、このまま放置すれば、米国内のヘリウム資源の縮小につながりかねないからである。その背景にはシェールガス革命があり、新規の天然ガス田の開発の停滞や天然ガス需要の後退によって、新規ヘリウムソースの確保が鈍るといふ判断があると思われる。

従って、今後のヘリウム不足は単なるプラントの不調や港湾ストライキではなく、ヘリウムを巡る構造変化といえ、我国でも中長期的な取組みが必要となろう。今年5月にはカタールの新規プラントが稼働、我国にも輸入される見通しであるが、これによって極端な不足は解消に向かうと思われる。しかし、今後、需要が年率3～4%ずつ成長すれば、いずれ不足問題が再燃する。ロシアが東シベリアでヘリウム生産に参入する動きがあるが、同国の天然ガス事業の進み具合によって、左右され、まだ明確なソースとして期待できるかは確定的ではない。ヘリウム需給の動向、当面注視せざるを得ないのである。

2. 主導権を握る米国

ヘリウムは空気中にも0.0005%程度含まれているが、これを深冷分離法などで抽出するにはあまりにもコスト

が高く、現実的にはヘリウムリッチの天然ガス田からの回収、分離で生産されている。ヘリウムリッチといっても天然ガス田に含まれるヘリウム量は多くて2~3%、少ないもので0.5%程度、それ以下となれば採算性に問題があるとされる。

ヘリウムの生産と利用を圧倒的にリードしたのは豊富な天然ガス田に恵まれる米国であった。その利用が軍事用飛行船から始まったことから国家戦略的に生産と管理が行なわれ、1925年には早くも国家備蓄体制を敷いている。

第二次世界大戦後も米国の製販独占体制が続くが、ヘリウムの用途が飛行船ばかりでなく、通信、宇宙開発などに拡大するにつれ、東西冷戦を背景に旧ソ連やポーランドでも生産されるようになった。しかし、どの時代から、どの程度生産されたのか、詳しいことは判明していない。いずれにしても、こと自由主義圏に関する限り、少なくとも1990年までは米国は唯一のヘリウムソースであった。

従って、日本のヘリウム供給は長らく米国からの全量輸入に頼らざるを得なかった。第二次大戦後は、特殊な用途が出る度にガス企業が小容器で輸入し、細々と供給するに過ぎなかったが、低温工学研究やリークテスト、分析用が増加するにつれ、1960年代中頃から本格的な輸入体制を敷いた。具体的には複数の工業ガス企業が米国のヘリウム権益を持つそれぞれのガス企業と中長期の輸入契約を結び、9,000フィート~1万2,000フィートのコンテナで、液体ヘリウムを海上輸送する体制を敷いた。米国西海岸から約1カ月をかけて輸送されるが、我国のガス企業は液ヘリコンテナからデューワーや容器に小分け充填する充填所を開設し、国内の“ヘリウムメーカー”となったが、実態は輸入企業で、設備費の高いコンテナを所有し、メンテするのは米国企業であり、もちろんビジネスの主導権は米国側にあった。売り手、買い手の力関係は時代や需給状況によって、微妙に変化し、価格や為替の変動も合わせ、常に国内ヘリウム動向は、不安定な状態にさらされるのである。

3. 新ソースが相次いだ2000年以前

そうはいつても、2000年までのヘリウム供給は比較的安定していたといつてよい。1982年に米国内の天然ガス需要の急減でヘリウム採取量が減り、極端な供給タイトと価格高騰はあったものの、80年、90年代を通じて概ね深刻な供給不足は起きなかった。世界のヘリウム生産をほぼ独占する米国が需要の増加に合わせて、エクソンの大プラントなど新ガス田を開発、純度60%程度の粗ヘリウムをテキサス州アマリロにある政府直営の貯蔵基地に備蓄した。民間ガス会社もヘリウム精製プラント

を増強で対応した。大型の設備投資が行なわれる時々ヘリウムの価格は値上げされたが、円高基調がそれを吸収した。1995年からアルジェリアでも年間2,000万 m^3 の生産プラントが稼働し、欧州への供給基地となった。

これにより、1997年の米国の欧州向け輸出比率は約22%まで落ち込んだ(1992年は47%)。日本向けの供給余力は充分であった。同年の米国の全販売量は1億7百万 m^3 で過去最高を記録し、輸出量2,950万 m^3 のうち40%の1,180万 m^3 が日本向けに販売された。我国のヘリウム需要は1990年代~2000年に大きく成長し、年間1500万 m^3 を超えたが、米国の民間ガス企業はBLM(米国土地管理局)から粗ヘリウムを購入し、精製して、日本への輸出量を増加させた。

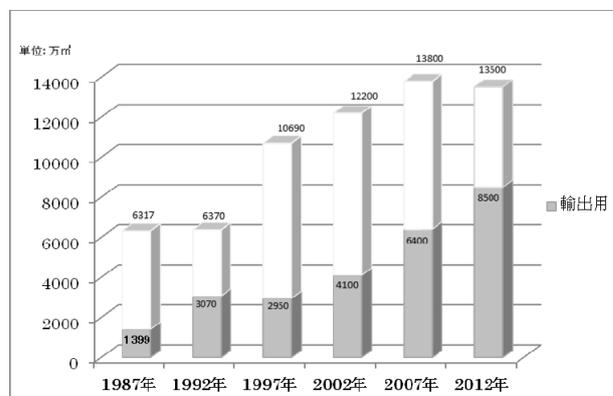


図3 米国のヘリウム販売量の推移

※1997年以降米国地質調査調べ
 ※1992年以前米国鉱山局調べ

4. カタールでの増強期待

しかし、2000年を超えた頃から度々、世界的にヘリウムが不足する現象が起きるようになった。基本的な原因は元々希少な資源であるヘリウムの需要の成長である。1997年以降、米国のヘリウム販売量は毎年1億 m^3 を超え、このところ1億3千万 m^3 ~1億4千万 m^3 で推移している。米国内の消費は1999年の9千万 m^3 強をピークに下がり続け、5千万 m^3 ~7千万 m^3 で推移しているのに、輸出量は拡大の一途を辿り、2012年は8,500万 m^3 達した。

2000年初頭の世界の生産能力は現在とさほど変わらず1億8千万 m^3 強と推定され、このうち87%は米国に集中している。つまり、同国の生産能力は1億6千万 m^3 弱で、1億3千万 m^3 ~1億4千万 m^3 を販売するとすれば、フル操業に近い。どこかプラントでトラブルが起きれば供給タイトとなるのは当たり前である。特にエクソンのユリシーズの3,360万 m^3 /年、ブラックスエアの2,800万 m^3 /年、エアプロダクツのリベラル2,800万 m^3 /年、BOC

(現在は太陽日酸)のオーティス2,900万m³/年の大型プラントのウェットは高いものがある。

2000年夏にはプラックスの不調、エクソンの操業率低下、アルジェリアの定修長期化が重なり、日本向け供給がプロポーズに対して25%カットされたことがある。

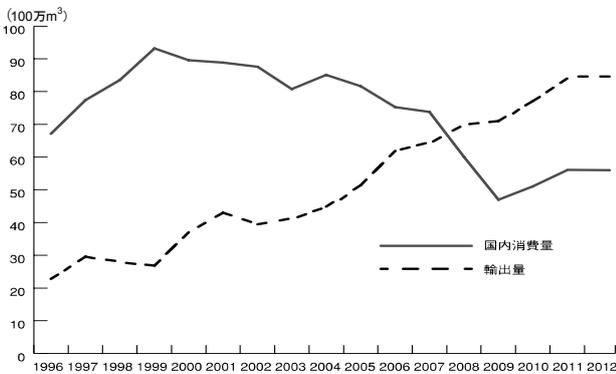


図4 米国のヘリウム内需と輸出の推移
※米国地質調査資料

2005年にカタールの新プラント年産600万m³が、2006年にオーストラリアの同600万m³/年が稼働したが、それも焼け石に水で、2006年から2007年にかけて大幅な供給不足が再発した。BLM(米国土地管理局)のパイプラインの故障、エクソン精製工場の修理、アルジェリア爆発事故の後遺症が重なったため、ガス供給会社は不可抗力条項を発動して、大幅供給制限を行なった。

現在のヘリウム不足はまさに2006年～2007年の再来といえ、実は2011年秋から始まっていた。エクソンプラントの定修の長期化、BLMの粗ヘリウム装置の停止、粗ヘリウムの配給制の実施、アルジェリア、カタール、ロシアプラントの低稼働や停止など様々な要因で調達には困難を極め、2012年の秋以降、極端に表面化したとみた方が良い。2013年5月からカタールの第2プラント2,000万m³/年稼働すれば、当面の需給タイトは和らぐと思われるが、このうち日本のガス企業の引取り枠は800万m³/年である。米国で新プラントの出現の可能性が薄いことを見越して、すでにロシアが東シベリアでの2018年からのヘリウム回収を公表しているが、まだ当分先のことである。従って需要動向は米国のヘリウム備蓄戦略、老朽化プラントの動向次第では数年のうちに再び不足が起きかねない不安定さに変わりはない。

5. 日本の需要は成熟化

国のヘリウム需要は光ファイバーや半導体向けの成長で2001年に1,832万m³をつけたのをピークに下降気味で2006～2007年に1,500万m³～1,600万m³に盛り返したことはあったが、リーマンショック以後は1,200万m³～1,300万m³で推移している。米国の国内消費もほぼ

同様の経緯を辿っており、いわば先進国型成熟期にあるとみてよい。医療用MRI、光ファイバー、半導体の3大用途で59%を占めているが、MRIはヘリウム節減型機種が普及しており、むしろ消費量は減少している。光ファイバーや半導体にしても全盛時の需要はなく、幸か不幸か、現在の供給不足でもそれなりの供給が維持できている要因となっている。もし、ピーク時の1,800万m³もの需要情勢であれば、今のようなタイト感では済まなかったであろう。

これまでも、今後もヘリウムは中長期的な先端技術開発に欠かせぬガスであり、中長期的な確保体制を官民で検討せねばならない。と同時に、高温超電導など、ヘリウム代替技術革新も急がねばならない。

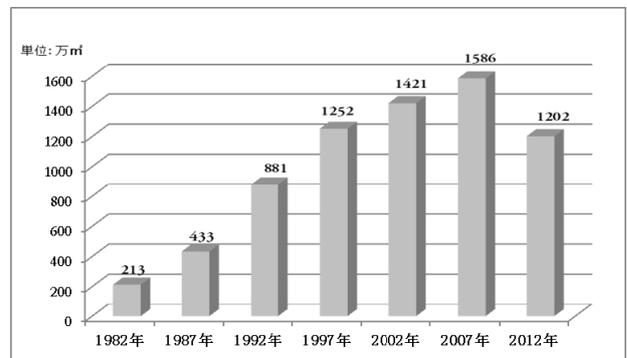


図5 日本のヘリウム需要の推移
※JIMGA資料

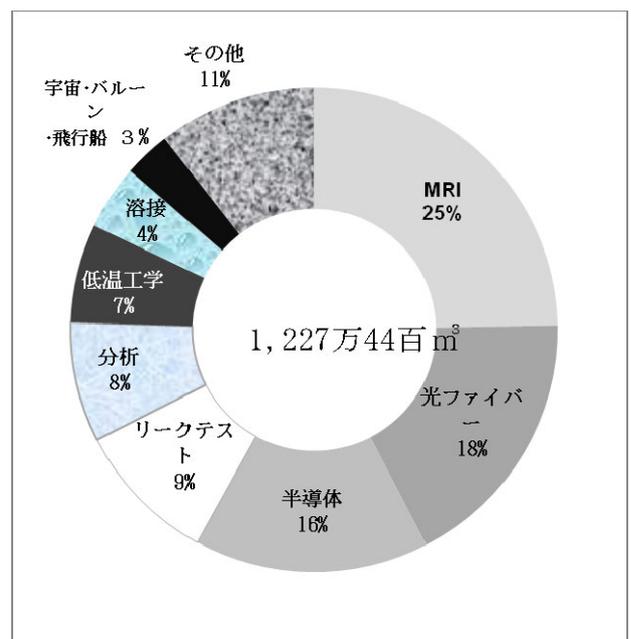


図6 2011年の我国のHe用途別シェア
※JIMGA資料

<会議報告 1>

第 39 回シンポジウム

Report on the 39th Symposium

物質・材料研究機構

松本 明善

National Institute for Materials Science

A. Matsumoto

第39回超伝導科学技術研究会シンポジウムが4月16日(火)タワーホール船堀小ホールで開催された。参加者は80名であった。今回のシンポジウムはサブテーマを「超伝導応用最前線」と称しているように、実用化が始まりつつある高温超伝導体についての講演が多数あった。

前半部分では特別賞を受賞された住友電気工業株式会社(以下住友電工)フェローの佐藤謙一氏の講演と超伝導科学技術研究会顧問の北澤宏一氏から基調講演があった。佐藤氏からは住友電工におけるビスマス系高温超伝導体の黎明期から現在の躍進期までの開発状況について講演がされた。ビスマス系超伝導線材の開発はこの25年の間、山あり谷ありの歴史であり、その間に得られた6つの教訓について示唆に富むお話が聞けた。これまで多くのものを作ってきた住友電工であるが「作ってみせる」という点においてGM冷凍機で冷却する高温超伝導のマグネット、ケーブル、自動車等の実機を作製し、実際に動かしてみることが大きなインパクトを与えることを示してきた。もちろんその中には科学的、工業的なバックアップがあってこそ達成してきた功績である。また、最近の企業活動としても重要な国際標準化についての現状についても講演が行われた。



佐藤謙一氏の基調講演の様子

北澤氏からはエネルギーのこれからと超伝導への期待として講演があった。福島原子力事故の民間事故調査委員会委員長を務められた経験から原子力のメリットとデメリットからそのとき何が起きたか、またその後の状況についてまで講演があった。原子力についてはウラン1 kgと1000トンの化石燃料が同じエネルギーを生むという他の何物にも替えられない大きな魅力がある一方で、対価として出てくる放

射線をうまく閉じ込める必要がある。今回の事故はその閉じ込めに失敗した例であり、同じことを繰り返してはいけないため、多くの政策転換が今なされようとしている。このため、原子力の再稼働には大きな壁が立ちほだかった状態にある。一方で、停止している原子力に替わるエネルギーを生み出さないといけない状況から自然エネルギーの導入を進める必要がある。その中で、日本は日本が誇る技術力を生かした形で、総力で対応していく必要があることについて講演が行われた。

午後からは受賞講演も含めて現在の超伝導技術の進展について5件の講演が行われた。1件目は超伝導科学技術賞を受賞したISTECの波頭経裕氏からの金属資源電磁探査用SQUID磁力計実用機の開発についての講演があった。現在、注目されている資源探査であるが、衛星や航空機を使った広域探査からボーリング等によるピンポイントの探査まで幅広い探査方式がある中で、今回の探査機はその中間に位置する装置である。ボーリングは地中の資源の正確な分布がわかる一方で、1カ所1000 m掘るのに1億円の費用が発生する。このため、そのピンポイントを決定する装置として大変有用であるとの講演があった。

2件目は同じく受賞者の京都大学の浦山慎一氏から世界初のBi2223高温超伝導体を使ったMRIの開発について講演があった。Bi2223線材を使ったコイルは高性能な電源を用いた電源駆動式のものであるが、MRI撮像に要求される十分な磁場均質度が得られることを示した。これらの技術的な開発を経て、1.5 Tでのパイナップルの断面や猿の脳の断面写真を市販器と遜色ないレベルで撮像することに成功した。一方で、さらなる高い磁場である3 Tの励磁も達成することができた。しかしながら、減磁中にコイルが焼損してしまったため、3 Tでの撮像はできていない。現在は原因究明を行っているところであるとの講演があった。

3件目ではフジクラの大保雅載氏よりRE123高温超伝導体を使ったマグネットの開発について講演があった。RE123超伝導体はビスマス系と比較して磁場に対して強いいため、マグネット応用として有望である。しかしながら、均一な特性を有する長尺線材が生産できていなかったためにISTECを中心として線材開発が行われてきていた。ここ数年、1 km級の線材が作製できるようになり、今回のコイル開発の下地ができた。23 K付近の冷却まで、260時間を要し、その後励磁試験を行ったところ、中心磁場5 Tを発生することに成功したことについて報告があった。

4件目と5件目は超伝導ケーブルに関する講演が、東京電力の本庄昇一氏、鉄道総合技術研究所の富田優氏よりあった。いずれも高温超伝導体の有望な応用先

であるが、昨年度より日本初の実系統への実証試験が始まった旭変電所での状況について報告があった。現時点ではケーブル等に大きな問題は起きておらず、安定して運転が行われている。一方で、プロジェクト内ではブレイク方式の冷却装置の新たな開発が進行中で、冷却技術が長距離送電のためには大きなキープポイントとなっていることが報告された。

一方で、富田優氏からはSイノベから波及した形で、太陽光発電から発生した電力を超伝導ケーブルで送電するプロジェクトについて報告がされた。日本における鉄道の多くは直流送電が行われており、トンネルや土地の狭い鉄道では超伝導送電が向いている。一方で、JR各社は省エネの意識が高く多くの場所で太陽光の導入が行われている。そのような状況下で、得られた電力をより効率よく使う点において、超伝導送電は魅力的な選択肢の一つであり、今後ともプロジェクトを進めていきたいとのことであった。

今回のシンポジウムはタイトルにもあるように高温超伝導体を使った応用機器の最新事情が伺えた有意義な会議であった。ようやく実規模の応用が可能になった高温超伝導体応用機器であるが、これまで、夢はありながら、応用に至ってなかった。これまでの長年の素材開発を行ってきた企業努力はすさまじいものがあったと想像され、今しばらく我慢の時間が続くかもしれないが、夢が形となって出てきつつあることが考えられる会議であった。

<会議報告 2>

第80回超伝導科学技術研究会ワークショップ 会議報告

Report on the 80th FSST Workshop

株式会社 東芝
田崎 賢司
Toshiba Corporation
K. Tasaki

第80回超伝導科学技術研究会ワークショップが、2013年1月16日(水)に全日通霞ヶ関ビルディングで開催された。今回のテーマは「電力グローバルネットワークは実現するのか？」で、直流電力ケーブルや超伝導電力ケーブルの開発状況、超伝導送電の経済性評価、電力ネットワークを構築したときのメリットや課題について、5名の講師の方々にご講演いただいた。参加者は48名で、活発な質疑応答が交わされ、大変盛況なワークショップであった。

以下、今回の講演について紹介する。最初に、電源開発(株)の森川達之氏より「直流海底ケーブルの開発状況」というタイトルで講演いただいた。電源開発(株)が手がけた海底ケーブルには、北海道と本州とを結ぶ北本幹線、四国と本州とを結ぶ阿南紀北幹線があり、いずれも直流送電である。海底ケーブルは布設費用の観点から、同容量でケーブル重量の小さい直流送電が用いられている。直流ケーブルは大きく分けてOFケーブル(Oil Filled Cable)、MIケーブル(Mass Impregnated Non-Drain Cable)およびXLPEケーブル(Cross-Linked Polyethylene Cable)の3種類がある。OFとMIは紙-油絶縁方式であり、XLPEは固体絶縁方式である。それぞれ一長一短があり、OFは送電距離、MIは送電容量に問題点がある。一方、XLPEは送電距離および送電容量がともに大きく取れるポテンシャルがあり、電源開発(株)が開発を進めている。阿南紀北直流幹線向けには、定格電圧DC±500 kV、定格電流2,800 AのOFケーブルを開発した。布設距離50 km、ケーブル重量5,000トンド、欧州から借り受けた海底ケーブル布設専用船で1週間の工期で布設を完了した。海底ケーブルは、船のいかりが引っかからないように、海底3 mに埋設しているとのことである。

(株)NTTファシリティーズの武井務氏より「情報通信電源の直流化と超伝導への期待」というタイトルで講演いただいた。従来のアナログ方式での通信用電源は、交流/直流、電圧レベルが様々であったが、デジタル方式への移行に伴い、直流48 Vに統一することになっ

た。直流給電の方が、交直変換の段数が少なく済み、低損失である上に、機器の小型軽量化、低コスト化、高信頼化が実現できるとのことである。一方、近年の情報通信機器のニーズの増大、機器の小型化、高密度化により、電力配線の増大、ホットスポットの発生、電源設備設置スペースの不足、空調装置スペースの不足などの問題が生じている。電力配線削減に向け、現在高電圧直流給電方式(例えば380 V)への転換にも取り組んでいる。また、(株)NTTファシリティーズでは電力システムへの取り組みも積極的に行っており、H15～19年度に独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)プロジェクトで愛知万博でのマイクログリッド実証研究、品質別電力供給システム実証研究、1962年に福岡県小呂島、1997年に久米島、2011年意山梨県北杜市でそれぞれ太陽光発電等のシステム構築を実施し、H24～26年には、環境省プロジェクトで山形および帯広で直流給配電システム開発・実証研究を進めている。最後に、今後直流配電網が発展していくと、系統の低損失化、安定化を実現するために超伝導技術が必要となるとの期待を述べられた。

住友電工(株)の林和彦氏からは、「超伝導送電の経済性評価」というタイトルで講演いただいた。住友電工(株)では、高い性能を有するビスマス系高温超伝導線材を用いて、米国オルバニープロジェクト(仕様:350 m、35 kV、800 A、三心一括型、2002～2008年)をはじめとして、様々な超伝導ケーブルプロジェクトに参画しており、超伝導ケーブルの有効性を実証している。現在、横浜市にある東京電力(株)旭変電所では、日本で始めて超伝導ケーブルを実系統に連携して、長期の信頼性を評価する試験が、2012年10月29日にスタートし、現在も運転を継続している。超伝導ケーブルの特徴は、大容量、コンパクト、低送電損失であり、従来の管路を利用して容量アップが図れることから、低コストでのケーブル布設が可能になる。送電容量1,500 MVAでの試算では、従来の交流ケーブルに比べ、交流超伝導ケーブルでは送電損失1/4、建設コスト1/3、直流超伝導ケーブルにすると、送電損失1/40、建設コスト1/10が見込める。今後、長距離冷却などの技術面での課題が解決されれば、経済性では超伝導ケーブルの実用化が望めるとのことである。

NEDOの臼井賢司氏からは、「NEDOの超伝導ケーブル開発プロジェクト」というタイトルで講演いただいた。最初に国内での超伝導ケーブルプロジェクトを総括いただいた。H11～14年に民間事業として東京電力(株)／住友電工(株)がBi系高温超伝導ケーブルの課電・通電試験を実施したのを皮切りに、H12～16年に超伝導発電関連機器・材料技術研究組合が500 m長のBi

系超伝導ケーブルのフィールド試験を実施、NEDOプロジェクトとしてはH19～25年に「高温超伝導ケーブル実証プロジェクト」で、Bi系超伝導ケーブル(仕様:240 m、66 kV、200 MVA、三心一括型)を試作し、東京電力(株)旭変電所で実系統連系試験を実施、H20～24年に「イットリウム系超伝導電力機器技術開発」で世界最高電圧、最大容量のY系超伝導ケーブル(仕様:30 m、275 kV、3 kA、1,420 MVA、単心型)の試作を完了させた。今後超伝導ケーブルの実用化に向けては、コストダウン、冷却技術の確立、現用機器との接続、安全性／信頼性の課題をクリアする必要があるとのことである。

東京電力(株)の石井英雄氏からは、「電力ネットワークへの再生可能エネルギー導入の技術と課題」というタイトルで講演いただいた。現在の電力系統は、主には火力発電の出力制御により、周波数は 50 ± 0.2 Hz、電圧は 101 ± 6 Vに維持されている。今後は、原子力発電の依存度低減、化石燃料の依存度低減を進める一方、再生可能エネルギーを最大限利用しようとする動きが、国策により進んでいく。国内での再生可能エネルギーの主体は住宅用太陽光となる見込みで、この場合系統末端部に電源が大量に置かれることにより、周波数や電圧の制御は、従来と比べて格段に難しくなるとのことである。現在、太陽光や風力を大量に導入した場合の電力系統安定化開発を進めており、28法人が参画する「次世代送配電系統最適制御実証事業」などで、分散電源としてのPVや燃料電池、蓄電池としてのEVなどを取り入れた系統制御の実証実験も行われている。

いずれの講演も、講演終了後の質問が絶えることなく活発な議論が交わされ、大盛況であった。今回は超伝導分野に限らず、直流ケーブルや電力系統安定化の事業に携わっている方々にも講演いただき、そこから超伝導分野へのニーズが発掘できることを期待し企画した。電源の多様化、省エネニーズの高まりにより、今後は電力の効率的なネットワーク化、直流化などが進むことが今回の講演で示唆された。さらなる省エネ化、省スペース化の観点で超伝導ケーブルの出番も十分にあり得ることが予期できるものであった。

<会議報告 3>

第1回超伝導科学技術セミナー

～若手技術者向け講習会～

The 1st Forum of Superconductivity Science
and Technology Seminar

(1)セミナー開催の背景

昭和電線ケーブルシステム株式会社

小泉 勉

SWCC Showa Cable Systems Co., Ltd.

T. Koizumi

平成25年2月22日(金)～23日(土)に栃木県日光市の古河電工健康保険組合鬼怒川荘において、第1回超伝導科学技術セミナー～若手技術者向け講習会～が開催された。

過去の話ではあるが、1980年代後期に液体窒素中で超伝導現象を示す「高温超伝導体」が発見され、1990年代初期に超伝導フィーバーが起こった。当時は、様々な機関において、線材、バルク、デバイスなどの高温超伝導に関する研究開発が精力的に行われていた。同時期、金属超伝導の分野においては、MRIやマグレブなどの超伝導機器の実用化が進んでいるところであった。生まれたばかりの超伝導と成熟した超伝導が身近にあり、当時の若手研究者には、様々な思いが感じられていた。また、超伝導に関するセミナーも豊富で、若手研究者が超伝導を学ぶに当たり、非常に良い環境に恵まれていた。そのような時代の中、超伝導フィーバーが終わりを迎える頃、高温超伝導は実用化に向けた研究開発が盛んになり、同時に金属超伝導は成熟産業へと姿を変え、現在に至っている。

最近の本誌編集委員会において、ある話題から、今後の超伝導について意見交換が行われた。その話題の中で、実用化に向けた研究開発が進む一方で、若手の活躍があまり目立っておらず、今後の行く末に皆が不安を抱いていた。これからの超伝導業界を担っていく若手研究者に、より深い知識とより広い視野を持ってもらいたいとの意見が出され、皆、自分達が引き継いできたものを後進にも引き継いでもらいたいという強い思いを持っていたことは言うまでも無かった。そのような中、人材育成を目的とした平成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、皆の思いが叶い、未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会の主催で本セミナーが開催される運びとなった。

本セミナーは、超伝導の基礎と応用を基本として、普

段若手研究者が触れる機会が少ない、異分野交流を目的とし行われた。セミナーの詳細については、後述の会議報告に譲ることとする。

今回のセミナーには、外部講師が3名招かれ、役員講師8名、役員5名、事務局1名により運営され、団体会員12名、一般4名、学生7名の計23名の若手研究者が参加し、総数40名のセミナーとなった。1日目の夕食後には、懇親会が開催され、講師と若手研究者、若手研究者同志により、講義の中では出来なかった異分野交流が活発に行われ、貴重な体験を持つことが出来たのではないかと感じた。

受講生には、テキストを復習するとともに、手渡された修了証書を見返すことで、今回のセミナーを思い起こしていただき、後輩たちにも伝えていっていただきたいと思う。今回の成功を基に、次回のセミナーはさらに充実したものになることを期待する。

(2)セミナーの概要

鉄道総合技術研究所

荒井 有気

Railway Technical Research Institute

Y. Arai

第1回超伝導科学技術セミナー～若手技術者向け講習会～が、平成25年2月22日(金)から23日(土)に栃木県日光市の古河電工健康保険組合鬼怒川荘にて開催された。本セミナーは、人材育成を目的として、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、未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会の主催で開催された。冒頭の挨拶で、未踏科学技術協会の木村理事より、超伝導に携わる様々な分野の人々が本セミナーに参加しているので、ぜひ人と人とのパイプを作ってほしいとの希望が伝えられた(写真)。

挨拶に引き続き、最初の講義として、産業技術総合研究所の伊豫氏から「超伝導の基礎」についての講義がなされた。超伝導の発見から現在に至るまでの歴史やマイスナー効果等の超伝導現象の特徴についての全体を俯瞰する紹介があった後、自身の専門である新超伝導物質探索についての詳しい講義がなされた。

2つめの講義は明星大学の仁田氏により、「超伝導の電気応用基礎-電力機器応用-」について行われた。電力送配電について熟知された立場から、超伝導材料とシステムを橋渡しすることの重要性を説かれた。また、疎くなりがちな国内の電力機器応用の要求点について、様々な情報を冗談も交えて講演された。

3限目には九州大学の木須氏より、「超伝導体の電磁特性、臨界電流特性」についての講義があった。前

半部分で理論やシミュレーションに基づいた電磁特性、臨界電流特性の説明があった。後半には、これらの現象を計測するに当たってのテクニックやノウハウなどが紹介され、計測の実務を行うことの多い若手技術者には非常に有益であったと言える。

1日目の最後の講義は、早稲田大学の石山氏により、「超伝導の医療応用」についてであった。すでに広く利用されているMRIの高磁場化や高温超伝導化だけでなく、ドラッグデリバリーやがん治療、非侵襲診断さらには脳機能の解明などへの適用についての紹介があった。

この後、講師、受講生を交えての夕食会があり、講義の時間内では収まらなかった質疑応答や、各参加者の研究テーマをはじめとした意見交換を行い、交流を深めることができた。さらに、場所を移しての懇親会も大いに盛り上がり、夜遅くまで親睦を深めた。さらに宿泊する部屋割りも異分野のメンバーで構成されており、ここでもパイプを広げられるように工夫がされていた。



写真 挨拶をする木村理事

2日目は東京大学下山氏による「超伝導材料の科学(総論)」で開始された。超伝導材料の歴史の概説から始まり、主に銅酸化物系超伝導材料の特性向上のための系統的な研究とそれに基づく戦略についての講義があった。ブレイクスルーのためには、超伝導関係者内の異分野交流が必要だとして、本セミナー受講生への期待を寄せた。

次の講義は「金属系超伝導線材」について低温工学・超電導学会の田中氏からなされた。とかく高温超伝導体に目が行きがちであるが、今後もしばらくの間は市場規模のほとんどが低温(金属系)超伝導体である。金属系超伝導線材が乗り越えてきた開発課題の歴史と今後もまだ発展の余地があること、MRI、ITER、LHCなどで用いられるのも金属系超伝導線材であることについて講義するとともに、今後の超伝導線材への技術継承の必要性について訴えられた。

休憩をはさんだ後の「高温超伝導線材」の講義は、Bi系、 MgB_2 について物質・材料研究機構の北口氏が、

RE系についてフジクラの飯島氏が担当された。対比してみることで、コーテッドコンダクターの製作の困難さを再認識した。将来展望として、開発が進むと、高温ではRE系およびBi系、低温では金属系、その間では MgB_2 と住み分けがなされるだろうとの予想も語られた。また、Bi系は低磁場・ケーブル応用向きとのことで、今回紹介のあった送電ケーブル実証試験により、緒に就いたと言えるだろう。

国際超電導産業技術研究センターの日高氏からは、「超伝導デバイス」についての講義があった。SQUIDをはじめとした、超伝導でなければなしえない、または、冷却コストを上回る効果がある超伝導デバイスについて網羅的に紹介があった。デバイスの作製法の話もあり、日頃超伝導デバイスに触れる機会の少ない受講生にとっては、まさに異分野交流になったのではないかと思う。

最後の講義は「超伝導機器の設計技術」と題して、日立製作所の和久田氏と東芝の田崎氏から講義がなされた。和久田氏は主にNMR、MRI用の低温超伝導磁石を設計するためのシミュレーションの手法について講義した。田崎氏は高温超伝導磁石を設計するにあたって、低温超伝導磁石と大きく思想がことなる線材の磁場角度依存性、伝熱冷却設計について講義した。

全ての講義が終わった後、「10年後、20年後、30年後の超伝導」と題したフリーディスカッションを行い、今後の超伝導について講師・受講生交えて議論した。

最後に下山委員長より受講生一人ひとりに修了証書が手渡され、閉講となった。参加者は産官学、様々な分野から合計40名で盛況のうちに終了した。今後は2~3年ごとにセミナーを開催予定とのことである。

(3) 超伝導科学技術セミナーに参加して

(3)-1 報告/Report

ティーイーピー株式会社
今 康一
TEP Corporation
K. Kon

弊社は、大正4年から続くセラミックスを専門に扱っている会社です。長い歴史の中で「次世代セラミックスにチャレンジ」の精神を持ってやってきました。2006年に酸化物高温超伝導体(主に銅系酸化物)の製造を開始し、以前から親交があった下山淳一先生には技術顧問として御指導を頂いております。セミナーの参加も超伝導の勉強になればと先生に紹介して頂いたのがきっか

けです。他の参加者の方々とは違い専門的な研究をしているわけではなかったので講義についていけるか心配でしたが、基礎から始めて頂いたので理解しやすかったと思います。専門的な内容になってしまうと勉強不足の私には難しい部分もございましたが、講演者の方々が丁寧に説明して下さい、幅広い分野を取り上げてもらえたので知識を広げる事ができました。交流の機会のある場として企画して下さった懇親会では普段交流することができない先生方の貴重なお話を聞く事ができ、有意義な時間を過ごすことができました。

このセミナーを通して、参加した講演者、関係者各位の方々が若い世代の研究者を温かく見守って支えていこうという気持ちを強く感じました。そして若い研究者達もそんな先輩方を信頼、尊敬しその気持ちに応えようと努力しているのがわかりました。このようなすばらしい関係性がある限り超伝導技術は将来に渡ってますます発展していくだろうと確信しております。

弊社が研究という形で実際に貢献することは難しいですが、そのお手伝いをさせてもらえればと思いますし、そうなれるよう努力する所存です。

超伝導技術のますますの発展を願いますとともに、このように貴重な機会を与えて下さった関係者各位の皆様方に深く御礼申し上げます。

(3)-2 報告／Report

古河電気工業株式会社

中山 亮

Furukawa Electric Co., Ltd.

R. Nakayama

平成25年2月22~23日に開催された、一般社団法人未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会主催の超伝導科学技術セミナーに参加してきたので、内容を報告する。本セミナーは超伝導の基礎物理学から線材、マグネット、電力網など、超伝導に関する各分野について、第一線で活躍されている方々が講演を行うというもので、栄えある第1回目の開催である。また、超伝導科学技術研究会会長である下山先生(東京大学)の、若手研究者同士で活発な交流をしてほしいという意向により、参加者は私も含め、業務上、学業上で超伝導に携わる若手が非常に多く、講義中は偉大な先輩方から1つでも多くのことを学び取ろうというムードが漂っていた。

講義を行う先生方も受講者の気概に呼応するように超伝導の学問としての純粋な面白さやユーモア、経験談や失敗談を交えた興味深く、かつ気迫溢れる講義を行って下さり、気が付けば大学院生時代以来の専門

的な講義に付いていけるだろうかという私の杞憂は立ち消え、講義の世界に入り込んでいた。会場は古河電気工業鬼怒川保養所であり、東京からおよそ2時間程度、東武鉄道鬼怒川温泉駅から徒歩10分のところに位置している。現地へ向かうにはちょっとした小旅行であり、澄んだ空気や山々等の景観が都会とは別世界であるため気持ちを高めることが出来、セミナーに適した会場であった。参加者はスタッフを含めて全部で40名であり、その内講演者数は11名であった。

第1回超伝導科学技術セミナーは、開講の挨拶における下山先生の「なぜ今セミナーを開催するのか」という問いで幕を開けた。下山先生は更に続ける。「日本はアカデミックな分野でも、企業でも常に競争原理が働いており、また、競争は年々激化している。当然、異なるコミュニティに属する人間同士は活発な交流及び情報共有がしづらい状況となっているが、1つのコミュニティだけで何かを成し得ると言うのは非常に難しい事である。そこで、今回は様々なバックグラウンドを持つ若手達にセミナーを受けるだけではなく、休憩時間や懇親会で活発に交流してもらい、今後も一生続く人間関係を築き、日本の将来の科学技術の発展に繋げて欲しい。」

この希望こそが本セミナーの本質であり、下山先生の意図であると感じた。後述するが、懇親会は先生方、若手の区別無く明け方まで非常に盛り上がり、セミナーの本懐は達成されたと感じている。

以下、講義内容を紹介する。最初の講義は、産業総合技術研究所の伊豫先生が“超伝導の基礎”という題目で行った。内容は金属における電気抵抗の定義にはじまり、ケルビン卿とドルーデの議論、オンネスによる超伝導現象の発見といった歴史的な側面の解説の後に、クーパー対、超伝導ギャップ等のBCS理論の基礎をおさらいし、最後に銅酸化物超伝導、鉄系超伝導について解説しており、まさに超伝導の歴史から物理的基礎、現在の状況までを広く網羅するトップバッターに相応しい講義であった。

明星大学の仁田先生から、“超伝導の電気応用基礎—電力機器応用—”という題目で、発電から各家庭に電気が送り届けられるまでの電力網の仕組み、スマートグリッドにおける超伝導機器の役割、スマートグリッドを取り巻く現状についての講義があった。各方面からスマートグリッドの有用性が叫ばれる昨今、実は完全な導入が躊躇われているというのは意外であった。

九州大学の木須先生から、“超伝導体の電磁特性、臨界電流特性”という題目で、磁束ピンニング、高温超伝導体の電流輸送特性モデリング、超伝導材料の電磁気特性の計測手法についての講義があった。特に、磁束ピンニングの概念として図上でポテンシャルを模した

山一谷にフォノンを模した調和振動子を配置して説明しており、視覚的に非常にわかりやすい説明であったのが印象的である。

早稲田大学の石山先生から、“超伝導の医療応用”と題して、MRIやNMRといった超伝導を応用した医療機器について、また、重粒子線がん治療、脳高次機能解明などの最新の研究についての講義があった。重粒子線がん治療については従来使用されてきたシンクロトロンに比べて小型化が可能で安全性・信頼性の高いサイクロトロンを導入が検討されており、粒子がサイクロトロンを1周するのにかかる時間を一定にするための等時性磁場を発生させるために、超伝導コイルが必要とのことであり、人の命を救う技術に超伝導が関わっていることを非常に嬉しく感じた。

ここまでが1日目の内容である。これらの講義が正午過ぎから夕方にかけての決して長くはない時間で終わったということをお伝えすれば、いかに本セミナーの講義が横断的であり、かつ凝縮されたものであるということがおわかりいただけると思う。1日目の講義のあとは、夕食を兼ねた懇親会が設けられ、講義の合間の休憩中などは緊張からか口数が少なかった参加者同士も活発に交流していた。懇親会後は申し合わせたわけではないにも関わらず、若手参加者達が先生方の滞在する部屋に大挙として押しかけ、大先輩方の貴重な教えに耳を傾けており、気が付けば明け方になっていた。

スペースの都合で詳細を記せないのが非常に残念であるが、2日目は総論としての“超伝導材料の科学(東大・下山先生)”に始まり、医療用MRI等の技術を支える材料についての“金属系超伝導線材(低温工学・田中様)”、高温超伝導ケーブル等に用いられる材料についての“高温超伝導線材 I/II(NIMS・北口先生/フジクラ・飯島様)”、ジョセフソン接合を用いたSQUIDについての“超伝導デバイス(ISTEC・日高先生)”、コイルにおける磁場設計について議論した“超伝導機器の設計技術 I/II(日立・和久田様/東芝・田崎様)”についての講義があり、2日目も非常に盛りだくさんの内容であった。

次回の本セミナーは2、3年後に開催される予定とのことである。

(3)-3 報告/Report

東北大学
柳生 穂高
Tohoku University
H. Yagyū

2月22～23日に古河電工健康保険組合 鬼怒川荘で第1回超伝導科学技術セミナー～若手技術者向け講習会～が開催されました。私は、指導教員の先生からこのようなセミナーがあると教えていただき、勉強になると思い、同じ研究室のメンバーと一緒に参加しました。

最初にセミナー全体について記述します。参加者は、講演者の先生方も含めて40名ほどで学生は10人程度であり、多くは企業からの参加者でした。講演は各テーマについて1時間ずつ行われました。講演の内容は、超伝導体の基礎から様々な技術応用まで広い範囲にわたっていて、興味深い話を多く聞くことができました。

講演についてですが、下山先生をはじめとした11名の先生が講演をしてくださいました。それぞれについて枚挙していくとページが足りなくなってしまうので申し訳ありませんがいくつかピックアップして紹介したいと思います。

「超伝導の基礎」と題して、産業技術総合研究所の伊豫彰先生が講演されました。電気抵抗ゼロ、マイスナー効果、ジョセフソン効果といった超伝導現象の基礎から、Hgから始まり金属化合物、銅酸化物、鉄系といった超伝導物質の移り変わりまで丁寧に紹介してくださいました。超高圧下で超伝導転移する元素や電気二重層トランジスタを用いた新しいドーピングの方法、また、新物質探索の方法として高圧合成法を用いたダイヤモンド超伝導体や鉄系超伝導体など主に物質そのものに着目したお話をしてくださいました。

「超伝導の医療応用」と題して、早稲田大学の石山敦士先生が講演されました。超伝導マグネットの応用としてMRIの基本原理解、NMRスペクトルによるタンパク質の構造決定、薬剤配送システム(MDDS)の現状など紹介していただきました。特にMDDSでの薬剤の深部蓄積の話は初めて聞いたので非常に興味深かったです。また、SQUIDの応用として脳の活動を見るといったお話もしてくださいました。

「超伝導材料の化学(総論)」と題して、東京大学の下山淳一先生が講演されました。超伝導体が材料としてどのように歩んできたのか、どういった応用がきくのかについて紹介していただきました。RE123系銅酸化物、Bi系銅酸化物、二ホウ化マグネシウム、鉄系の転移温度や臨界磁場といった物性などから線材化に対してどうい

た利点があるのかなどのお話をしてくださいました。

最後に部屋割りについてです。主催者側の意向として超伝導という枠組みの中にある異分野同士でのコミュニケーションをとってほしいということがあり、所属の違う参加者同士で部屋をまとめていました。これは非常に良かったと思います。実際に部屋にいた時間は短かったのですが、部屋に戻った時にほかの方々と会話を交わすことで楽しく時間を過ごすことができました。また、1日目の夕食からそのあとの懇親会を通して多くの先生、参加者方と交流を深めることができ、非常に有意義な時間を過ごすことができました。

私の研究は新超伝導物質の探索であり、応用について考える機会はあまり多くありません。しかし、今回のセミナーを通して普段では得ることのできない情報に触れることができました。第2回の開催があるようでしたらまた参加したいと思います。

(3)-4 報告/Report

物質・材料研究機構
藤岡 正弥

National Institute for Materials Science
M. Fujioka

第1回超伝導科学技術セミナー ～若手技術者向け講習会～ 私は学会以外にこのような超伝導のイベントに参加した事は今回が初めてである。当初このセミナーについて知った時はただの勉強会だろうと思い、あまり乗り気ではなかった。葉に書かれている名立たる講師陣の面々は、かなり興味を惹くものがあったが、参加を決意した理由としては、今後の身の振り方を決める上で情報収集が大きかった。副題にもある「若手」という言葉は私にとって非常に重要なキーワードである。私は博士号取得後、ポスドク研究員として鉄系超伝導体の研究に従事しているが契約期間も残り1年。同じような境遇の人もいるだろうと参加を決意した。

プログラムは非常によく練られたものであった。超伝導の基礎的な分野から、実用化にむけた応用研究。そして超伝導市場の推移に至るまで幅広く学ぶ事ができた。また、少人数という利点から、講師に直接質問する時間も十分にとられており、かなり充実した時間を過ごせた。

技術者向け講習会と言うだけあって、私が想像していたよりも、多くの企業人が参加していた。今となっては、改めて貴重な時間だったのではないかと感じている。というのは、同じ超伝導研究でも、基礎と応用ではやっている事がまるで違う。私の研究分野は完全に基礎という

わけではないが、自分の試料を商品として見るような事はまずしない。彼らが研究している事は、今後自分の研究が形になって、いざ実際に金儲けをしようという段階で必要になる事だと認識した。たしかに、超伝導の研究をしている以上、いつかは実用化するという出口を意識して、研究をするべきではないかと感じた。自分がやっている研究の次の段階を見せてくれた事は大きな糧になった。

また、今回のセミナーでは企業人だけでなく、学生や、それぞれ自分と同じような境遇の人達と知り合えた。全員が同じ超伝導という分野に携わっているが、細かい領域の違いで学会でもあまり交わらない人達も多かったと思う。しかし今回のセミナーでは、同世代のそういった人達と出会い、情報交換を通して同じ超伝導でも、少し違った視点から興味を持てるきっかけを与えてくれた。その事は非常に意味があったのではないかと思う。彼らとの出会いが今回のこのセミナーの一番の収穫であったと感じている。

(3)-5 報告/Report

昭和電線ケーブルシステム株式会社
菅根 秀夫

SWCC Showa Cable Systems Co., Ltd.
H. Sugane

2月22日から23日にかけて、古河電工健康保険組合鬼怒川荘において第1回超伝導科学技術セミナーが開催された。講習内容は超伝導の歴史を含めた基礎事項から始まり、材料、線材応用、機器応用と多岐にわたった。本セミナーは若手技術者向け講習会ということであったことから、基本的な部分や実験時に陥りやすいミス、現在世界で開発・実用化されている応用機器の紹介といった、若手にやさしい内容が盛り込まれていた。普段触れない知識も広い範囲で基礎から学べるという点で貴重な機会になった。特に、大学卒業以降、基礎的な内容を講義形式で学ぶことができる機会というのは非常に限られてしまうため、大学時代に超伝導分野を専攻していなかった技術者にとっては格好の勉強の場だと感じた。自分の業務に最も近い講演であった超電導機器の設計技術においては、今まで用いていなかった解法の紹介などがあり、業務にも直接活用できる内容であった。

また、22日の夕食後には懇親会が開催された。この場では他の参加者の方々と交流を持つことができた。学会に参加していても発表のカテゴリが異なり、互いに認識を持つことが無かった方々と交流を持てたことを考

えると、領域を同じくしている若手技術者同士の顔つなぎの場として非常に良い環境であったと感じられる。

今回本セミナーに参加して、日中の講義とは別に、このような交流の機会があることは非常に重要なことだと感じた。経験年数の近い技術者同士のつながりが広がれば、自身の属する団体以外からの刺激をより強く受けられるようになり、モチベーションアップのきっかけの1つになり得るのではないかと思えるからである。今回は第1回ということであったが、第2回、第3回と続いてゆくことで各団体間の距離が縮まり、更には新しく入ってくる方々にとっても輪の中に入る良いきっかけの場になってゆくのではないかと感じた。

(3)-6 報告/Report

(株)東芝 研究開発センター
小林 奈央

Toshiba Corporation, Corporate Research & Development Center
N. Kobayashi

セミナー参加当時、入社1年目で超伝導技術に関わり始めたばかりでした。本セミナーが若手技術者向け講習会ということで、大学や企業において新たに超伝導技術に携わり始めた人向けに開催されることを知り参加させて頂きました。

講義内容は超伝導の物理的特性から、材料、設計技術と応用に至るまで多岐にわたっていました。講師の方々は、これまで超伝導技術開発を牽引してきた大学の先生や企業の研究者で、基礎から丁寧にご講演して頂きました。特に興味深かったのが、超伝導材料の線材応用に関する講演でした。普段材料の研究開発を行っている私にとって、どのように使われどんなニーズがあるかを知ることは非常に重要なことです。これまでの線材応用の流れと今後それがどう推移していくのかを把握することで、自分が行う研究の位置づけが出来たと感じています。また医療機器やデバイス応用に関する講義は、超伝導技術の幅広さと奥深さを勉強することができた有意義な内容でした。

また、参加者の多くが大学や企業の若手研究者だったので、同じような境遇の方々とお話しができたことは私自身励みになりました。同じ超伝導技術に関わっていく者として切磋琢磨し合っていければと思います。

セミナー全体を通して、講師の方々との距離が近く、若手でも話しやすい雰囲気を作られていたと感じました。疑問に思えば気軽に質問することが出来、それに対してとても丁寧に答え頂きました。超伝導のこれからを熱く語っておられた姿が非常に印象的で、私自身今後

の研究開発に対するモチベーションが高まりました。今回とても貴重な会を開催して頂き誠に感謝しております。本セミナーで出会った方々と今後も交流を続け、ご助言を頂きたいと思っています。実際機会がなければ難しいことだと思いますので、ぜひまたこのような会を開催して頂きたく、最後にお問い合わせ申し上げます。

(3)-7 報告/Report

フジクラ
栗原 駿
Fujikura Ltd.
C. Kurihara

第1回超伝導科学技術セミナーは2月22～23日栃木県日光市(古河電工健康保険組合鬼怒川荘)で開催された。鬼怒川ということで温泉、景色と素晴らしい環境の中行われた。今回のセミナーは講師・参加者ともに産・学・官と各方面から集まり、開催目的の通り「横断的」な顔ぶれとなった。また、若手技術者向けのセミナーということで、参加者は20代が大半であった。

セミナーは11人の講師が担当され行われた。内容については基礎から応用まで、金属系超電導体から銅酸化物高温超電導体までと非常に幅広いものであり、大変勉強になった。また、応用に関しても多分野にわたって説明され、電力、医療、通信など、超電導の可能性を強く感じるものであった。そして、運転コストやクエンチのリスクを考慮すると、高い温度で運転できる銅酸化物高温超電導体への期待は大きいと感じた。

また、産・学・官及び世代を越えた交流ができたことも非常に有意義であった。食事をしながら、入浴しながら、酒を飲みながら超電導について語り合う機会は大変貴重であった。2日間は長いと参加前は思っていたが、寝食を共にすることで単なるセミナーを越えた経験となった。

今回のセミナーでの講義、交流を通して超電導業界における自分の立ち位置を確認できた。超電導のポテンシャルゆえに、線材に求められることは多い。線材メーカーの一員として、超電導の応用を広げられるよう課題を克服していくことが責務だと思う。

第1回ということで今回が初めてとなるセミナーであったが、とても有意義なセミナーであった。次回は2,3年後の予定とのことであるが、これからも開催されることを期待したい

(3)-8 報告／Report

東京海洋大学 博士後期課程 3年
都築 啓太

Tokyo University of Marine Science and Technology
K. Tsuzuki

平成25年2月22日～23日の2日間、第1回超伝導科学技術セミナーが開催されました。

「若手技術者向け」と副題が挙げられておりますが、次世代の超電導開発を担う若手技術者のディスカッション・親睦の集いだけでなく、講師の方々を含めた活発な討論が行われました。

9人の講師の専門分野に関してそれぞれ1時間ずつ、中身の濃い講義が開かれました。内容としては、超電導の基礎や材料開発にはじまり、電力機器応用や医療応用、デバイス応用などの専門講義が開かれました。半日で4限分という大学さながらのタイトなスケジュールでしたが、それぞれの講座で、有意義な情報交換や討論がなされました。討論の内容としては、ベテラン勢からヒン

トを得ようと新規材料探索に携わる若手の技術者からの活発な質問や、技術の応用展開に関する日常的な疑問、そのノウハウに関するディスカッションなど幅広いテーマで活発に意見交流がなされました。

討論に参加された若手技術者の皆様は、各分野のベテラン勢で構成される講師の方々や同分野での夢の実現を目指す同じ世代の若者の意見を聞くことで、今後の研究活動の参考になったと思います。また講師の方々にとっても日本の超電導技術開発を担う若手との顔合わせという機会となり、すべての人にとって有意義な会合になりました。

また、開催地であった「東京の奥座敷」と呼ばれる鬼怒川温泉は豊かな自然に囲まれ、地の利にも恵まれておりました。開催地が第1回となる本セミナーの開催にとってふさわしい環境であった事も、参加者の活発な交流とセミナーの成功につながったのではないかと思います。

最後に、今回参加された若手技術者の皆様が、今回のセミナーで行った研修・討論を機会に技術の向上と今後の糧となるように願っております。



鬼怒川荘玄関前で

＜授賞発表＞

「第17回超伝導科学技術賞」発表 On the 17th Superconductivity Science and Technology Award

審査委員会 委員長
太刀川 恭治

The Chairman of The Selection Committee
K.Tachikawa

(1) 「第17回超伝導科学技術賞」の選考にあたって

本賞は、超伝導関連分野における永年の功労者に対する感謝、強いインパクトのある研究の評価、活発な若手への応援、関連企業グループへの精神的支援、学会、官界、報道界からの貢献に対する感謝等の表明を目的としております。平成9年に発足してから、これまでの15年間で合計114件に達する多くのテーマが受賞されております。

今回の応募に対しては平成24年12月18日と同25年1月16日の2回にわたり第17回超伝導科学技術賞審査委員会が開かれ、合計17件の御推薦に対して慎重な審査が行われた結果、6件(内特別賞1件)が選定されました。受賞された各位に心からお祝いを申し上げますとともに、益々の御活躍をお祈りいたします。

超伝導は新物質の探求に始まり、材料・プロセスの開発、応用技術との整合等の長い道を経、社会のお役に立つ実用領域に達します。今回の賞もこれらの各段階における成果により授与されたものと言えましょう。

超伝導の研究開発はいま切り替え期に当たっていると思われまふ。新物質の探求については、これまでの経緯をまとめて指針を得る時期にあります。材料開発と応用についても、それぞれの長所と問題点を整理して、現実的で効率のよい方向付けをすることが望まれます。

終わりに今



審査委員長 太刀川恭治氏の挨拶

回の賞がいささかでも受賞者各位の功績に報い、また超伝導分野の一層の活性化に役立って、冒頭に述べた目的に沿うことが出来たら誠に幸いに存じます。今後も本賞の公募に対し、広い関連分野から多数の御応募をいただくことを期待しまして今年度の選考経過の御報告といたします。

(2) 受賞者、授賞テーマと授賞理由

特別賞

① 佐藤 謙一 殿

「超伝導線材の開発と応用並びにその国際標準化への貢献」

ビスマス系酸化物高温超伝導体の発見後、原料粉末調製からスタートして20年以上にわたりその線材化研究に努め、加圧焼成法による特性向上にも成功して均一な特性をもつ長尺線材の製造技術を確立した。さらに同線材を用いたマグネットやケーブルの開発に進み、世界をリードする成果を挙げた。このように新しい超伝導線材の開発に取り組み、その応用への道筋を開いた積極性は高く評価される。その他希土類系酸化物高温超伝導線材や各種金属系超伝導線材の開発にも寄与した。

一方、1989年以来 IEC/TC90 の幹事として超伝導線材及び機器の国際標準化に尽くした成果も大きい。さらに2001年より国際低温材料会議の Board Member を務め、国内でも低温工学・超電導学会会長として活動している。以上のような超伝導の発展に寄与した功績は超伝導科学技術賞特別賞に相応しいものとして表彰する。

科学技術賞

① 土井 俊哉 殿

「高温超伝導薄膜線材とその基板材料に関する研究」

土井氏は酸化物高温超伝導線材黎明期から、金属基材上への薄膜形成に関する研究に精力的に取り組んできた。ロール圧延と焼鈍熱処理を組み合わせることで結晶方位の揃った圧延再結晶集合組織を有する様々な基板材料を開発した。高温超伝導体薄膜作製でも優れた成果をあげつつ、自ら開発した基板材料と組み合わせて高臨界電流密度線材の可能性を示してきた。配向銀基板を用いたタリウム系酸化物高温超伝導線材、ステンレスに集合組織を有する銅を貼り合わせた基板を用いて作製した希土類酸化物系コーテッドコンダクタ、アルミ基材上に MgB₂ を配向形成した線材の何れでも高い臨界電流密度を実現した。さらに、よりコスト面で優れた基板材料を目指して再結晶集合組織を有

する鉄系合金基材の開発にも取り組んでいる。

以上のように、高温超伝導薄膜線材とその基板材料に関する研究において、基礎から工業のプロセス基盤にわたる優れた成果を得、多くの有益な知見を与えた土井氏の業績は高く評価される。

② 佐藤 昌利 殿、藤本 聡 殿、
佐々木 聡 殿、Markus Kriener 殿、
瀬川 耕司 殿、安藤 陽一 殿

「トポロジカル超伝導体の理論と実証」

トポロジカルな量子状態に関する研究がこの数年、急速に進展している。なかでもトポロジカル超伝導体においては、マヨラナ励起とよばれる新たな励起状態出現の理論的な予言が注目されたがその実証は困難と考えられていた。これに対し、佐藤氏、藤本氏はスピン軌道相互作用とゼーマン磁場の影響を研究し、これらによって通常の s 波伝導状態がマヨラナ励起を伴ってトポロジカル超伝導体に量子相転移することを理論的に初めて示した。これは、マヨラナ励起実証の方法を示すもので、トポロジカル超伝導体実現の道を拓いた。安藤氏らのグループはトポロジカル超伝導体の候補として挙がっていた $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ について十分に大きな超伝導体積分率を有する単結晶試料の合成に独自の技術によって初めて成功し、ポイントコンタクトの実験によってトポロジカル超伝導体であることを発見した。本授賞者らの研究は様々な新しい物理が期待されるマヨラナ粒子を実験的に研究する舞台を創出したものである。

③ 波頭 経裕 殿、塚本 晃 殿、
安達 成司 殿、田辺 圭一 殿

「金属資源電磁探査用高性能 SQUID 磁力計実用機の開発」

金属資源電磁探査用 SQUID 磁力計は、金属 SQUID を用いたものは利便性にかげ、酸化物 SQUID を用いたものは性能が十分でないという問題点があった。受賞者らは、世界トップの希土類酸化物系超伝導薄膜積層技術とランプエッジ接合作製技術を有し、高感度かつ高磁場耐性の酸化物 SQUID 開発に成功した。これを用いて次世代金属資源電磁探査用 SQUID 磁力計開発を行い、従来の酸化物系試作機に比べ1桁以上高い信号／雑音(S/N)比とスルーレート(磁場変化追従能力)をもつ実用機開発に成功した。また、磁力計と受信機から構成される探査装置全体の大幅な小型化、軽量化を達成し、アタッシュケース2個に収まるポータブルな形に仕上げたことで、国内外の野外試験でその性能と利便性を実証することができた。これにより、1000 m 以上の大深度金属資源探査への適用と普及が期待さ

れるとともに、酸化物 SQUID を利用した種々の探査装置や非破壊検査装置など今後の実用装置開発の突破口となる功績を上げた。

④ 大保 雅範 殿、藤田 真司 殿、
原口 正志 殿、齊藤 隆 殿

「400 kJ 級 RE123 系 5 テスラ高温超伝導マグネットの開発」

RE123系高温超伝導線材は高い温度領域に於いて最も実用的な磁場中高特性を期待できる線材であるが、受賞者らはIBAD法で作製した高配向基板の上にPLD法で超伝導層を成膜することにより、超伝導層の厚膜化と高 J_c 化を同時に実現することに成功した。全長816 mで77 Kでの臨界電流値572 A/cmを得るなど、実用レベルの長尺線材で高臨界電流特性を示すRE123系高温超伝導線材の製造技術を確立した。受賞者らは、総長7.2 kmにも及ぶ高 J_c 線材を製造し、また並行して開発を進めてきたコイル化技術を適用することで、400 kJを超える蓄積エネルギーを持つ実用規模の超伝導マグネットの開発に成功した。本マグネットを24 Kに冷却して通電することで、ボア径20 cmにおいて5 Tの磁場を安定に発生し得た。100 kJを超えるRE123系超伝導マグネットは世界初の成果であり、25年に渡る開発期間を要したRE123系線材の実力が実証されるとともに、今後進展が期待される電力機器、産業機器、医療応用等を目指した実用的な超伝導マグネット開発の試金石ともなるものである。

⑤ 福山 秀直 殿、浦山 慎一 殿、
武田 和行 殿、尾崎 修 殿、
寺尾 泰昭 殿、Michael Poole 殿、
中島 巖 殿

「高温超伝導 3 T-MRI 装置の開発」

MRIは超伝導応用機器として、市場的に極めて重要であり、高度の技術レベル・完成度が求められる。超伝導マグネットの発する磁場には優れた空間的均一性と時間的安定性が必要であり、傾斜磁場コイルや分光計といった関連技術も揃って初めて実現できる。受賞者らのグループはビスマス系高温超伝導線材を用いて伝導冷却型の脳研究用3 T-MRI装置(均一磁場空間 半径250 mm、軸方向200 mm)の開発に取り組んだ。超伝導マグネット、傾斜磁場コイル、分光計、制御系を含めた装置一式を自ら開発・製作してシステムを構築した。1.5 T運転では、磁場均一度5 ppmを達成し、市販のMRI装置に比べて遜色の無い画像の取得に成功した。また、マグネットの蓄積エネルギーが2.3 MJにも達する最高磁場3 Tの発生にも成功した。

以上のように、高温超伝導線材を用いて臨床用 MRI 装置に近い規模の伝導冷却マグネットの製作・運転に成功したこと、周辺技術も自ら開発してシステムを構築

し実用レベルの断層画像取得に成功したことは、高温超伝導応用技術を実用レベルへと進める大きな一歩であり、特筆すべき成果として高く評価される。



一般社団法人 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会 第 39 回シンポジウム／第 17 回超伝導科学技術賞授賞式
平成 25 年 4 月 16 日 タワーホール船堀

＜研究室紹介＞

(1)名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻量子集積デバイス工学研究グループ Research Group of Integrated Quantum Devices, Department of Quantum Engineering, Nagoya University

1. 研究室スタッフ(平成 25 年 4 月現在)

教授:藤巻朗、准教授:赤池宏之、特任講師:田中雅光

学生:16名

2. 研究室の簡単な紹介

当研究室では、超伝導を利用し、従来の半導体では実現不可能な、超高速超低消費電力エレクトロニクスを創製します。物理極限に迫る低エネルギー情報処理回路により、スーパーコンピュータ並の高性能デスクトップコンピュータやモバイルスマートルータの実現を目指します。また、超伝導センサシステムによる、中性子などの量子ビームを用いた高分解能イメージング・計測技術を開発し、これまでに観測のできなかった現象の可視化や科学の解明に貢献します。さらに、高温超伝導体、磁性体、ナノ構造等を利用した、高機能・新機能デバイスの創出にも取り組みます。

3. これまでの成果、最近のトピックス

3.1 単一磁束量子回路による超高速超低消費電力情報処理

単一磁束量子(SFQ)回路は、超伝導ループ内で量子化された磁束の有無を‘1’と‘0’に対応させて演算を行うデジタル回路で、数十GHzから100 GHz以上の高速動作性と、従来の半導体デバイスに比べて3桁以上小さな低消費電力性が魅力的な次世代集積回路技術です。これまでに、大規模SFQ回路のための設計・実証基盤技術の確立を他の研究機関と協力して進めてきました。図1はスーパーコンピュータのアクセラレータ用に試作した演算器アレイです。設計した回路の試作は産業技術総合研究所で行われています。50 GHzで動作する16個の演算器を搭載しており、約30,000個のNb/AIO_x/Nbジョセフソン接合を集積した、世界最大規模のSFQ回路です。最近では、更なるSFQ回路の低消費電力化に関する研究を進めており、物理的な極限に迫る究極の情報処理回路を目指しています。

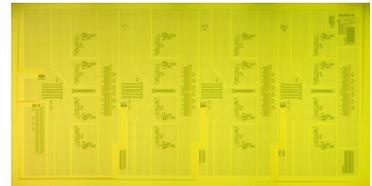


図1 次世代スーパーコンピュータに向けて試作した超伝導集積回路チップ

3.2 超伝導センサシステムによる中性子を用いたイメージング

超伝導を用いれば、X線やテラヘルツ波、中性子などを検出する高感度センサを作ることができます。本研究室では、現在サブミクロンの分解能を持つ、100万画素中性子イメージングシステムの開発を目指して開発を進めています。これは、メアンダライン状の超伝導細線を直交させて2層形成し、その交点で¹⁰Bと中性子の核反応熱を生じさせるアイデアを利用しています。先に述べたSFQ回路を用いて、運動インダクタンスの微小な変化を高感度で検出するとともに、高速で大容量の読み出しを実現します。

3.3 高性能・新機能デバイスの創出

本研究室ではデバイスの作製も行っています。これまでに高温超伝導体による積層型ジョセフソン接合を用いて作製した、フリップフロップの500 GHz動作の実証や、理想整流素子を狙ったナノブリッジ構造をもつデバイスの作製などを行ってきました(図2)。最近では、超伝導メモリ素子への応用等を目指し、磁性ナノ粒子の利用や超伝導スピンドバイスの作製にも取り組んでいます。また、電波天文学で用いられるサブミリ波帯電磁波検出器等を念頭

に、高品質なNbN/AlN_x/NbN接合の作製にも取り組んでいます。

連絡先、ホームページアドレス等
名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻藤巻研究室
〒464-8603 名古屋市千種区不老町
Tel. 052-789-3323
URL <http://www.super.nuqe.nagoya-u.ac.jp/>

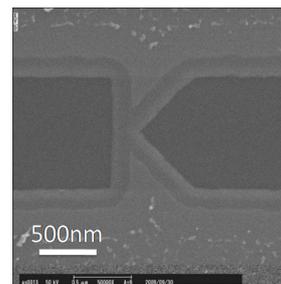


図2 高温超伝導体 (YBCO) を用いて作製したナノブリッジデバイス

(2) 金沢工業大学 先端電子技術応用研究所 Applied Electronics Laboratory, Kanazawa Institute of Technology

本研究所は1998年に開設され、超伝導デバイスを中心とした磁気センシング技術を医学や工学へ応用する研究を行なっている。

脳磁計 (MEG: magnetoencephalograph)

本研究所のクリーンルームではSQUID磁気センサの製造試作を行なっているが、このセンサを用いると、ヒトの神経や筋肉に流れる電流を体外から非接触で検知することが可能になる。本研究所は横河電機やイーグルテクノロジー (金沢工大発のベンチャー企業) と協力して、脳機能の研究や診断に役立つ装置として脳磁計の実用化に成功している。また、脳磁計の応用研究のために、ドイツ連邦物理工学研究所、米国メリーランド大学、米国ニューヨーク大学、豪州マッコーリ大学認知科学センターとも連携しており、そこでは、ヒトの言語認知のメカニズムを解明するのに脳磁計が有益であるとして研究を進めている。特にマッコーリ大学では小児の時期に言語能力の発達が著しいことに注目し、小児専用の脳磁計を設置し、ギリシャの哲学者アリストテレス以来の長年の疑問である「何故ヒトはかくも短期間に言語能力を身につけるのか?」に答えるべく研究を行なっている。図1は文法に誤りのある文章の呈示に大きな反応が出るのが分かった例である。反応部位は母国語が中国語の小児と英語の小児で同じであるなどの知見を得ており、今後のヒトの言語能力獲得のメカニズムの解明に役立つものと思われる。



図1 小児用脳磁計の使用例

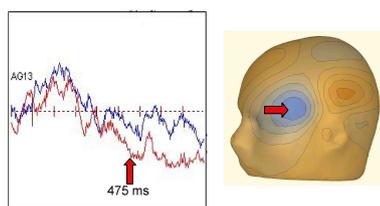


図2 脊磁計と電流源の解析結果

脊磁計 (MSG: magnetospinograph)

脳磁計の研究で培った技術は、脊髄神経を流れる電流を体の外から非接触で検知する技術にも応用され、横河電機、東京医科歯科大学、首都大学東京と共同で世界初の装置である脊磁計を開発した。手足のしびれや運動の障害などの症状は、脊髄神経での信号の伝わりの悪いことが原因である症例が多く、従来はこれを確かめるための検査として、脊椎に直接電極を挿入して神経の電気信号を測るという高度な手技を要する方法がとられていた。開発された脊磁計を用いることにより、この信号を体外から磁気信号として非接触で検知することが可能になり、患者に負担の少ない有用な検査が可能になると期待されている。東京医科歯科大学では頸椎に異常のある患者の検査を従来の電気計測と併用して行なった結果、9割の患者について診断結果が電気と磁気で一致することを確認して

いる。図2は被験者の首の後ろに発生する磁気を計測しているようすと、計測された磁気の分布からその源である電流を求めた結果である。電流密度が高い部位、低い部位が識別できる。この電流信号が時々刻々上方へ伝わっていくかどうかを検査の対象になる。

連絡先: 上原 弦

email: uehara@ael.kanazawa-it.ac.jp

研究所 URL: http://www.kanazawa-it.ac.jp/kit_ael/

(3) 古河電気工業株式会社 パワー&システム研究所 超電導応用開発部 FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD. Power & System Lab. HTS ENGINEERING Div.

(1) 伝送技術グループ構成員

中山 亮、八木 正史(マネージャ)、三觜 隆治、藤 軍、劉 勁、野村 朋哉、
平田 平雄、鈴木 光男、前里 昇 スタッフ6名、技術員3名

(2) 伝送技術グループ

超電導応用開発部伝送技術グループはスマートグリッドに代表される新インフラ、新エネルギー・マネジメント分野で社会に貢献する古河電気工業パワー&システム研究所(千葉)の中にあつて、40年以上継続して蓄積してきた技術をもとに、超伝導線材を用いた高電圧、大電力容量の高温超伝導ケーブルの研究・開発を行っています。

(3) 特徴ある装置

伝送技術グループでは、図1に示すように幅数mm、長さ数10 m~数100 mの長尺超伝導線材をスパイラル状に巻きつけて超伝導ケーブルを作製します。超伝導線材の性能評価は、図2に示す9000 Aまで出力できる直流電源を用いて行い、短尺抜き取りの I_c (臨界電流)、全長 I_c 、ケーブル化後抜き取り I_c を測定することにより、ケーブル化前、ケーブル化後の超伝導線材の I_c を管理・検証することができます。

また、ケーブル化後、実際に布設して送電を行うには電気絶縁材料の耐電圧特性評価が必要不可欠であるため、クライオ容器及び課電設備を用いることによって耐電圧特性試験を行い、基礎データを長期的に蓄積してきました。

(4) これまでの成果、最近のトピックス

架空送電線に匹敵する大容量をもつ275 kV - 3 kAのYBCO超伝導ケーブルをM-PACCプロジェクトの中で2008年より開発してきました。このケーブルは1.5 GWという架空送電線に匹敵する大容量で、将来の電力基幹線としての実用化が期待されています。伝送技術グループでは設計に必要な基礎技術として蓄積してきたデータに基づいて、30 mケーブルを作製しました。30 mケーブルを用いた検証試験は2012年秋季から中国遼寧省の瀋陽市に位置する瀋陽古河電纜で実施(図3)され、ケーブル I_c 、耐電圧特性、送電損失などの基礎特性を取得後に長期課通電試験を実施し、成功裏に終了しました。今後はヒートサイクルを含む試験の継続を予定しています。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものです。

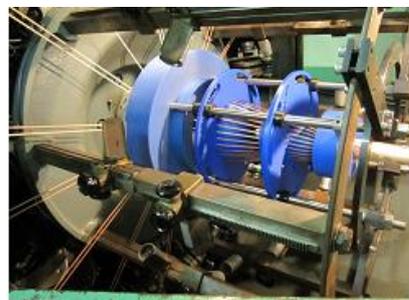


図1 ケーブル製造



図2 直流電源



図3 瀋陽における試験レイアウト

(5) 機器応用グループ

超電導応用開発部は、伝送技術グループの他に、機器応用グループを擁し、ケーブル以外の新規超伝導機器の開発を行っています。新規超伝導機器の一つとしてNEDO助成事業である「次世代フライホイール蓄電システムの開発」に参画し、高温超伝導を利用した超伝導磁気軸受けを開発しています。フライホイールとは、回転体の運動により電力を運動エネルギーとして貯蔵するものです。超伝導体の磁気浮上現象を利用した高温超伝導磁気軸受けを採用し、損失を無くし、より効率的な電力貯蔵を実現する次世代フライホイールの開発に取り組んでいます。

(6) 連絡先: 中山 亮 mail: mr252088@mr.furukawa.co.jp

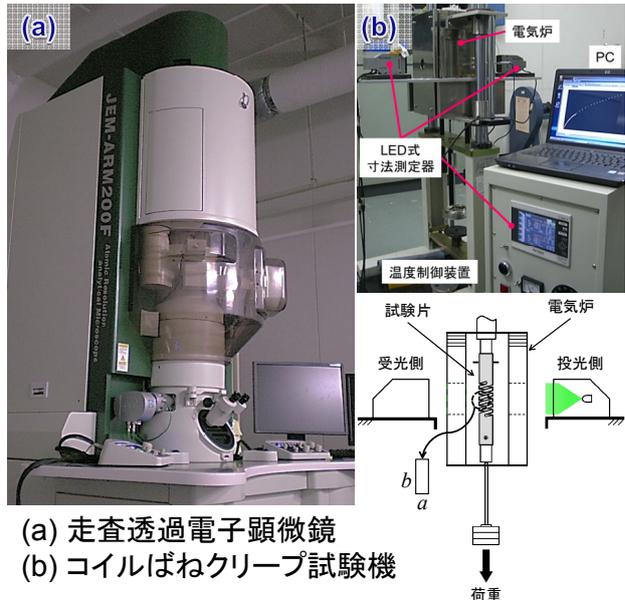
TEL: (0436) 42-1716 ダイヤルイン

(4) 九州大学 大学院総合理工学府 物質理工学専攻 中島・波多研究室

Structural Materials Science Laboratory, Department of Molecular and Material Sciences, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

(1) 研究室スタッフ: 中島英治 教授、波多聡 准教授、池田賢一 助教

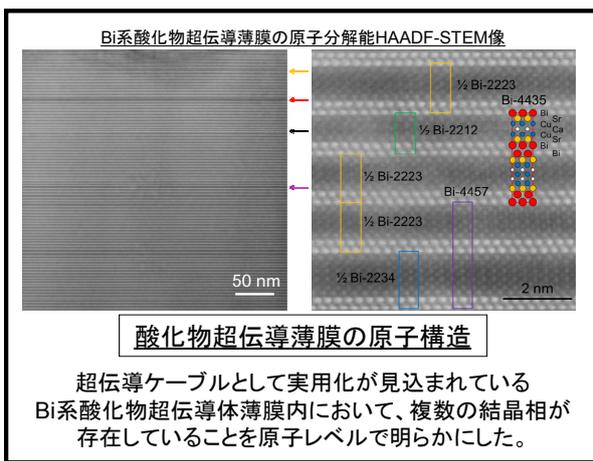
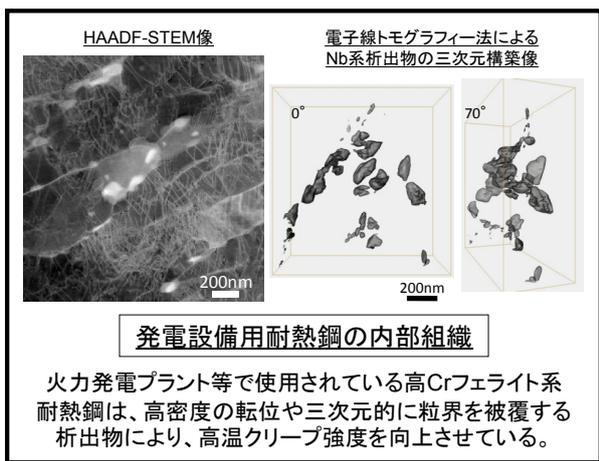
(2) 研究室の簡単な紹介: 運輸、航空など各種産業の基盤をなす機械や機器の多くは、金属、セラミックス及び半導体等の結晶性材料により構成されています。結晶性材料の力学的・機能的性質といった諸特性は、材料を構成する結晶粒の大きさ、方位及び配向性や結晶粒同士の界面となる結晶粒界といった内部組織に強く影響を受けます。そのため、結晶性材料の諸特性と内部組織の関係を明らかにすることが、構造材料(ものを形作る材料)や機能材料(電気的性質など物理的な特性を利用する材料)の開発には不可欠です。当研究室では、結晶性材料の力学的性質や機能的性質を決めている因子を、原子やイオンの配列、転位と呼ばれる線欠陥の運動特性、界面の構造等に分類し、優れた特性を発揮する新しい基盤材料を創り出すための基礎研究を行っています。



(3) 特徴ある装置: 原子やイオンの配列を直接観察できる収差補正走査透過分析電子顕微鏡(右上図(a))、実機使用環境を模擬した高温・極低ひずみ速度での材料の変形過程を高精度に測定できるコイルばねクリープ試験機(右上図(b))など。

(4) これまでの成果、最近のトピックス: 耐熱構造材料の高温における力学特性と内部組織に関する研究(左下図)、超伝導材料の臨界電流特性と微細構造に関する研究(右下図)、結晶性材料の極低ひずみ速度変形機構の評価、電子線トモグラフィーによる結晶性材料の三次元ナノ構造解析(左下図)、自動車用軽量材料の内部組織と力学特性の関係など。

(5) 連絡先、ホームページアドレス : 波多聡 (hata.satoshi.207@m.kyushu-u.ac.jp)、
http://www.mm.kyushu-u.ac.jp/lab_05/



一般社団法人 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会

第81回ワークショップ

「極低温冷凍機の進展とその応用の広がり」

日時：平成 25 年 7 月 26 日(金) 13:30~17:30

場所 全日通霞が関ビルディング 8階 大会議室B

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

(*プログラムは決まり次第ホームページに掲載します。)

研究会の動き

〔平成25年(2013年)1月1日～平成25年(2013年)3月31日〕

賞審査委員会

平成24年度第2回

日時:平成25年1月16日(水)10:00～12:00

場所:商工会館 7階 会議室7B

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確定
- (2) 第17回超伝導科学技術賞の授賞理由の検討

第80回ワークショップ

日時:平成25年1月16日(水)13:30～17:25

場所:全日通霞が関ビルディング 大会議室B

テーマ:「電力グローバルネットワークは実現するのか?」

参加者数:48名

プログラム:

13:30-13:35 「開会の挨拶」

下山 淳一

(超伝導科学技術研究会会長)

【座長 田崎 賢司(東芝)】

13:35-14:20 「直流海底ケーブルの開発状況」

森川 達之(電源開発)

14:20-15:00 「情報通信用電源の直流化と超伝導への期待」

武井 務(NTTファシリティーズ)

15:20-16:00 「超伝導送電の経済性評価」

林 和彦(住友電気工業)

16:00-16:40 「NEDOの超電導電力ケーブル開発プロジェクト」

白井 賢司(新エネルギー・産業技術総合開発機構)

16:40-17:20 「電力ネットワークへの再生可能エネルギー導入の技術と課題」

石井 英雄(東京電力)

17:20-17:25 閉会の挨拶

北口 仁

(超伝導科学技術研究会 副会長)

幹事会

平成24年度第6回

日時:平成25年2月18日(月)15:00～17:30

場所:学術総合センター11階 共用会議室

出席者:幹事8名
事務局1名

議事:

- (1) 第80回ワークショップについて
- (2) 第81回ワークショップについて
- (4) 第17回超伝導科学技術賞について
- (5) 第1回超伝導科学技術セミナーについて
- (6) 日米超伝導ワークショップについて
- (7) 平成24年度収支決算見込みについて
- (8) 平成25年度事業計画及び収支予算について
- (9) 超伝導本出版について
- (10) FSST NEWSについて

第1回超伝導科学技術セミナー

日時:平成25年2月22日(金)14:00～23日(土)15:00

場所:古河電工健康保険組合 鬼怒川荘

参加者数:40名

プログラム:

【2月22日(金)】

14:00-14:10 開講の挨拶、スケジュールの説明等

下山 淳一(東京大学)

14:10-15:10 「超伝導の基礎」

伊豫 彰(産業技術総合研究所)

15:10-16:10 「超伝導の電気応用基礎」

仁田 且三(明星大学)

16:20-17:20 「超伝導体の電磁特性、臨界電流特性」

木須 隆暢(九州大学)

17:20-18:20 「超伝導の医療応用」

石山 敦士(早稲田大学)

【2月23日(土)】

8:30-9:10 「超伝導材料の科学(総論)」

下山 淳一(東京大学)

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」

北口 仁(物質・材料研究機構) /

飯島 康裕(フジクラ)

11:00-12:00 「超伝導デバイス」

日高 睦夫

(国際超電導産業技術研究センター)

13:00-14:00 「超伝導機器の設計技術」

和久田 毅(日立製作所) /

田崎 賢司(東芝)

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

14:50-15:00 閉講式

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
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
応用物理学会／秋季	H25.9.16～9.20	同志社大学 (京都府京田辺市)	応用物理学会
日本物理学会／秋季	H25.9.25～9.28	徳島大学 (徳島県徳島市)	日本物理学会
2013 年度秋季 低温工学・超電導学会	H25.12.4～12.6	ウインクあいち (愛知県名古屋市)	低温工学・超電導学会

国際会議及び国外の主要な会議

Conferences related to Superconductivity (International/Abroad)

会 議 名	日 付	開催場所	主催及び問合せ先
CEC-ICMC2013	2013.6.17～6.21	Anchorage, Alaska (USA)	http://www.cec-icmc.org/
14 th ISEC	2013.7.7～7.11	Cambridge (USA)	http://www.isec-2013.org/
16 th US-Japan workshop	2013.7.9～7.12	Dayton (USA)	
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/

超伝導科学技術研究会 編集委員会 委員

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

これ一冊でわかる 超伝導実用技術

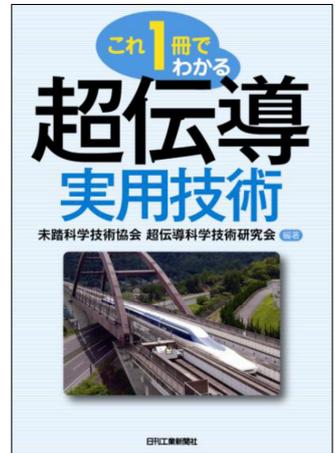
未踏科学技術協会
超伝導科学技術研究会 編著

A5判 並製 216ページ <2/25 発売>

定価 本体 **2,600** 円+税 (税込 **2,730** 円)

- ◎ 全国の書店でお求めになれます。
- ◎ 下記フォームで弊社にお申し込みの場合は送料をサービスさせていただきます。

新しい高温超伝導体の発見や応用などさまざまな分野で研究/実用化が進んだ今、技術の進展状況を体系化して解説します。他分野の高度な先端技術との融合により進化する超伝導技術のイメージがビジュアルで容易に把握でき、若手技術者のみならず派生分野の技術者が理解できるよう努めた書です。研究会に所属する大学、研究所、企業の専門家が分担執筆しています。



第I章 超伝導、超伝導材料の科学

1.1 超伝導現象の魅力と特徴

電気抵抗ゼロと永久電流/マイスナー効果/ジョセフソン効果/臨界温度/臨界磁場/第一種超伝導体と第二種超伝導体/臨界電流密度/磁束の量子化/磁束のピン止め/超伝導状態の限界

1.2 多様な超伝導体

超伝導物質の開拓史/元素超伝導体/合金の超伝導体/金属化合物・金属間化合物の超伝導体/銅酸化物超伝導体/二ホウ化マグネシウム超伝導体/鉄系超伝導体/多様な超伝導体/超伝導状態にする/新超伝導体を合成する特殊な技術

1.3 超伝導材料

超伝導材料に求められる性質①形態~超伝導線材~/同②超伝導特性/同②超伝導特性以外/超伝導材料の特性制御技術/ニオブ材料/ニオブ合金材料/ニオブスズ材料/二ホウ化マグネシウム材料/銅酸化物高温超伝導体①特徴/同②Y系デバイス/同③Y系線材/同④Y系バルク/同⑤ビスマス系/鉄系超伝導体の可能性

第II章 超伝導技術の応用展開

2.1 超伝導応用の広がりや冷却技術

超伝導応用の広がりや冷却技術/低温の世界/液体ヘリウムと液体窒素/極低温冷凍機/極低温冷凍機的应用/断熱技術

2.2 超伝導磁石の応用

超伝導磁石の特徴/磁気浮上列車(超伝導磁石ユニット)/磁気浮上列車(走行の仕組み)/シリコン単結晶引上げ装置/誘導加熱装置/NMR①

原理/同②高分解能装置/医療用MRI/超伝導加速器の魅力/大型加速器(LHC)/核融合炉(一般論)/核融合炉(ITER)/磁気科学/高磁場発生ハイブリッド磁石/超伝導バルク磁石の応用/超伝導磁気分離

2.3 超伝導の電力・エネルギー応用

超伝導送電の効果/送電ケーブル(交流)/送電ケーブル試験例/最新の送電ケーブル試験(旭変電所)/世界の超伝導ケーブル応用/SMES(超伝導電力貯蔵装置)/超伝導変圧器/超伝導限流器/超伝導発電機/超伝導フライホイール/超伝導モータ/船舶用超伝導モータ/自動車用超伝導モータ

2.4 超伝導デバイスの応用

超伝導デバイスに用いるジョセフソン接合/SFQ回路/SFQスーパーコンピュータ/超伝導量子コンピュータ/超伝導フィルタとその応用/量子電圧標準/SQUID磁場センサ/SQUIDの医療応用/超低磁場NMR/MRI/SQUID非破壊検査と免疫診断/SQUID地下資源探査/超伝導検出器とその多素子化/超伝導転移端検出器(TES)と放射線計測/超伝導検出器の材料分析応用/超伝導検出器の宇宙観測応用/超伝導検出器の量子暗号通信応用

2.5 ユニークな超伝導応用

超伝導磁気浮上デモと免震装置/鉄道技術

第III章 これからの超伝導

超伝導材料の実用限界と室温超伝導体の可能性/再生可能エネルギーと超伝導技術/未来の電力網と超伝導技術の利用(日本・世界)/水素利用社会における超伝導応用/がん治療用小型加速器/遠い未来の憂い、地磁気低下への対策/超伝導技術を取り入れた未来社会

ファックス申込書

お申し込み

FAX 03 (5644) 7400

● 振込手数料はお客様のご負担となります。

「これ一冊でわかる超伝導実用技術」

注文冊数：

冊

ご住所 〒

御社名

部署

お名前

電話番号

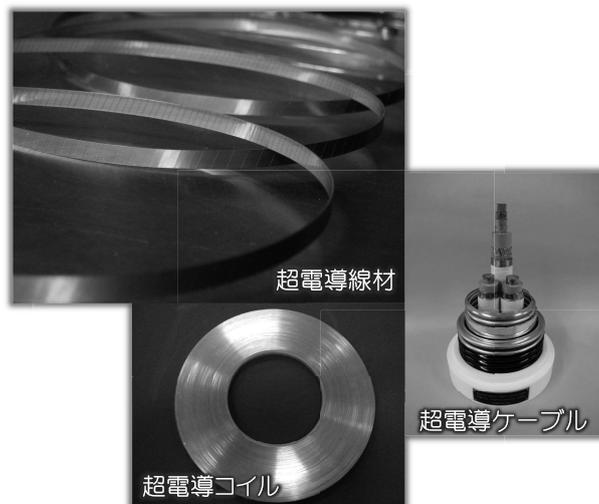
イットリウム系超電導線材

高温超電導のベストサプライヤー

Fujikura

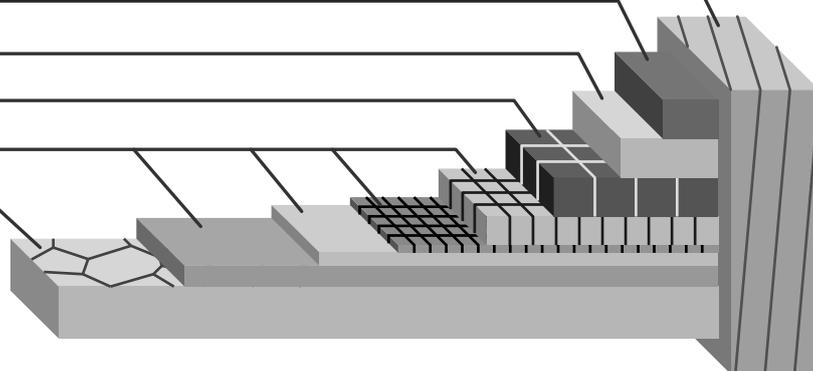
■ 特長

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



■ 線材構造

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



■ 標準仕様

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

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

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

株式会社フジクラ

新規事業推進センター 超電導事業推進室

〒285-8550 千葉県佐倉市六崎1440

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

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

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