一般社団法人 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会

FSST NEWS

<FSST NEWS No.141 目次>

Forum of Superconductivity

Science and Technology News

CODEN: FSNEFR

2014-4-30

発行 一般社団法人 未踏科学技術協会 平成26年4月30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

くトピックス 1> BaZrO3 ナノ粒子導入 BaFe2(As0.67P0.33)2 超伝導薄膜における磁場中超伝導特性 成蹊大学 三浦 正志………2 くトピックス 2> 鉄系超伝導線材の開発の現状 物質•材料研究機構 戸叶 一正………6 くトピックス3> 断熱型磁束量子パラメトロンを用いた超低電力集積回路の研究 横浜国立大学 竹内 尚輝………11 く会議報告1> 産業技術総合研究所 日高 睦夫………16 第83回ワークショップ会議報告 く会議報告 2> 第40回シンポジウム会議報告 物質•材料研究機構 松本 明善………17 く授賞発表> 「第18回超伝導科学技術賞」発表 審查委員会委員長 太刀川 恭治………18 <研究室紹介> (1) 慶應義塾大学理工学部物理情報工学科的場研究室&神原研究室 (2) 大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻量子生体材料工学領域22 (3) 東京大学大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 大崎研究室23 (4) 名古屋大学大学院工学研究科 結晶材料工学専攻 生田研究室 (5) 九州工業大学大学院工学研究院 物質工学専攻 エネルギー・超伝導材料学研究室 …………26 ○研究会の動き28 ○国内超伝導関連会議/国際会議及び国外の主要な会議29

<トピックス 1>

BaZrO3ナノ粒子導入 BaFe2 (Asost Poss)2 超伝導薄膜における磁場中超伝導特性

Pinning landscape in BaZrO₃ nanoparticle-introduced BaFe₂(As_{0.67}P_{0.33})₂ superconductor films

> ¹ 成蹊大学大学院、² 超電導工学研究所 三浦正志¹、田辺圭一²

¹ Graduate School of Sci. & Tech., Seikei University, ² Superconductivity Research Laboratory, ISTEC Masashi Miura¹, Keiichi Tanabe²

1. はじめに

東京工業大学 細野秀雄教授の研究グループにより 発見された鉄系超伝導体[1]の中でも $BaFe_2As_2$ (Ba122)は、臨界温度(T_c)が高いだけでなく、磁場応 用上重要となる高い臨界磁場(H_{c2})や小さい異方性(γ) を示すため、実用線材NbTi (4.2 K)等と置き換える材料 として世界中で注目されている[2-3]。

近年、応用に向けてBa122線材や薄膜の作製が盛ん に行われている。パウダーインチューブ(PIT)法で作製 したKやCoドープBa122線材は、自己磁場において比 較的高い臨界電流密度(J_c)を示すが、更なるJ_c向上が 必要である[4]。さらにパルスレーザ蒸着(PLD)法を用 いて作製したCoドープBa122薄膜(Ba122:Co)において、 4.2 Kにおいて自己磁場J_c(J_c^{s.f.})>1 MA/cm²を示すこと が報告されている[3]。しかし、これらの薄膜においても マグネット応用に向け、高い磁場中J_cが必要である。磁 場の増加に伴いJ_cが低下する要因としてローレンツ力に よる磁束の運動がある。これらの運動を抑制するために 酸化物超伝導体であるREBa₂Cu₃O_y(RE123)線材では、 磁束のサイズと同程度の人工磁束ピンニング点の導入 が試みられ、磁場中J_c向上が確認されている[5-8]。

本研究では、Ba122系材料の中でも比較的T_cが高く [9]、PLD薄膜作製時に化学的に安定なBaFe₂(As_{1-x}P_x)₂ (Ba122:P)に着目し、①As/P組成比(x)制御による高特 性Ba122:P薄膜の作製、②磁場中J_c向上に向けた人工 ピンニング点導入Ba122:P薄膜の作製を試みた。

2. BaFe₂(As_{1-x}P_x)₂薄膜のAs/P組成制御

2.1 作製方法

Nd:YAGのPLD装置を用いてMgO単結晶基板上に ~100 nm厚のBa122:P薄膜を作製した。また、PLDター ゲットの組成比をx=0.25、0.33、0.40及び0.50と変え

Ba122:P薄膜の組成を制御した[10]。

作製した薄膜の結晶構造をX線回折(XRD)法を用 いて評価した。T_c、J_cは四端子法を用いて、電気抵抗率 の温度依存性および電流-電圧特性(閾値1 μV/cm)か ら算出した。薄膜の微細構造観察を透過型電子顕微鏡 (TEM)、組成をTEM装置に付随したエネルギー分散 型X線分析(EDX)を用いて評価した。

2.2 BaFe₂(As_{0.67}P_{0.33})₂薄膜の超伝導特性

図1(a)、(b)に異なるxのPLDターゲットで作製した Ba122:P 薄膜の $T_{c,zero}$ 及び異方性パラメータ ($\gamma_{H}=H_{c2}^{ab}/H_{c2}^{c}$)を示す。 $T_{c,zero}$ は、0.01 $\rho_{N}(T)$ として算出 した。図1(a)よりx=0.33において $T_{c,zero}=26.5$ Kと最も高い 値を示すことが確認された。これはBa122:P単結晶と同 じ傾向である[9]。また、図1(b)より最も $T_{c,zero}$ の高い x=0.33薄膜においてマグネット応用上重要である γ_{H} が 最も低い $\gamma_{H}=1.54$ を示した。これはRE123の γ_{H} ~7に比べ て非常に低い値である。

図2 (a)、(b)に高い*T*_{c,zero}、最も低い_Hを示した*x*=0.33 薄膜の15 Kにおける*J*_cの磁場依存性(H||c)及び1 Tに おける*J*_cの磁場印加角度依存性(15 K)を示す。



図1 Ba122:P薄膜の(a) T_{c,zero}、(b) 異方性パラメータの x依存性



図2 x=0.33薄膜の(a) J_c-B、(b) J_c- θ特性

x=0.03薄膜は、As/P組成、薄膜作製条件を最適化する ことで15 Kにおいて自己磁場 $J_c(J_c^{s.f.})=1.4$ MA/cm²と高 い超伝導特性を得ることに成功した。しかし、図2(a)に 示す実用線材であるNbTi(4.2 K)[11]やMgB₂薄膜(15 K)[12]に比べてまだ磁場中 J_c が低いことが分かる。図 2(b)より15 K、1 Tにおける J_c 特性は、異方的かつ低いこ とが分かる。また、x=0.33薄膜の $J_{c,max}/J_{c,min}$ は1.76であり、 ほぼ異方性パラメータh=1.54と同程度であることより磁 束ピンニング点の影響よりhを反映していると考えられ る。更なる磁場中 J_c 向上には、組成及び結晶性の最適 化だけでなく磁束ピンニング点導入が必要である。

3. 磁束ピンニング点としてのBaZrO₃ナノ粒子 3.1 REBa₂Cu₃O_y薄膜におけるBaZrO₃ナノ粒子

BaZrO₃(BZO)は、RE123と同じ結晶構造、良好な格子整合性及びRE123作製時に安定であることからRE123薄膜に導入される人工磁束ピンニング点の一つである[5-6,8]。また、同じBZOでもRE123を作製する手法、作製条件によりその形状が変わることが知られている[13]。特に、有機金属塗布(MOD)法では、RE123薄膜中のBZOは、ナノ粒子状に形成される。図3(a)にMOD法により作製したRE123+BZO薄膜のab面方向のTEM



図3 RE123+BZO薄膜の(a) planar-view TEM像、 (b) *J*_c- *θ*特性

像を示す。図よりBZOのサイズは、77 Kにおける磁束の サイズの約3倍の25 nm、密度は~50×10²¹ [/m³]と3 T の磁束間隔(28 nm)に相当する高密度なBZOが均一に 分散していることが分かる。図3(b)にRE123+BZO薄膜 の77 K, 1TにおけるJ_c-θ結果を示す。図よりBZOを導入 していない薄膜が異方的かつ低いJ_cを示すのに対して RE123+BZO薄膜は、等方的かつ高いJ_c特性を示すこと が分かる[8]。ナノ粒子は、3次元形状であるため、1次元 形状であるナノロッド等に比べて、導入によるT_c、J_cの低 下が少ない。また、その形状からあらゆる磁場印加角度 に対して有効的に磁束の運動を抑制する効果的な人 工欠陥である。

3.2 BaFe₂As₂系薄膜における磁束ピンニング点

Ba122薄膜における磁束ピンニング点としては、PLD 薄膜作製時に自然に導入されるc軸方向の刃状または 螺旋転位がc軸方向の磁場中J。を向上させる報告があ る。また、Wisconsin大は、Ba122:Co薄膜に柱状や超格 子構造に酸化物を導入することでc軸及びab面方向の 磁場中J。が向上することを報告しているが、その特性は 異方的かつ低い[14]。そこで本研究では、等方的かつ 高い磁場中J。を実現するために、これまでRE123薄膜で 有効性が確認されたナノ粒子を選択した。

4. BaZrO3導入BaFe2(As0.67P0.33)2薄膜

4.1 BaZrO₃導入BaFe₂(As_{0.67}P_{0.33})₂薄膜の微細構造

筆者らは、ナノ粒子としてさまざまな材料を検討して いるが、本研究では、BZOを選択した。Ba122:P+BZO 薄膜は、~3 wt%BZOを最適組成であるx=0.33のBa122 母相に導入したPLDターゲットを用いて作製した。薄膜 評価は、2.1節と同様に行った。

図4(a)及び(b)にBa122:P+3wt%BZO薄膜の高分解 TEM像及びXRD測定結果を示す。図4(a)より~8 nmサ イズのナノ粒子を確認できる。このサイズは、15 Kにお ける磁束の直径 (2 ξ (*T*))とほぼ同じである。このナノ粒 子の材料を同定するため、組成、構造分析及びXRD測 定を行った。その結果、XRD結果(図4(b)参照)及び組 成分析よりナノ粒子はBZOであることが確認された。



図4 Ba122:P+3wt%BZO薄膜の(a) 高分解能TEM像、 (b) XRD測定結果

また、Ba122:P+3wt%BZO薄膜におけるBZOナノ粒子の個数密度は、~6.8×10²² [/m³]であり、3.5 Tの磁束間隔(26 nm)に相当する高密度な分散であることがわかった[15]。

4.2 BaZrO₃導入BaFe₂(As_{0.67}P_{0.33})₂薄膜の超伝導特性

BZOナノ粒子をBa122:P薄膜内部に高密度分散させることに成功したが、BZOナノ粒子が超伝導相の結晶性や $T_{c,zero}$ にどのような影響を及ぼすのかを調べる必要がある。図5(a)、(b)に密度の異なるBZOナノ粒子導入Ba122:Pの面内配向性($\Delta \phi$)及び $T_{c,zero}$ を示す。図5(a)より高密度なBZOを導入しても結晶性が低下していないことが分かる。また、図5(b)よりBZOナノ粒子導入による $T_{c,zero}$ の低下は確認されなかった。これは、BZOが母相の組成にほとんど影響を及ぼしていないと考えられる。

図6にBa122:P+3wt%BZO薄膜の15 Kにおける磁場 中J_c特性を示す(H||c)。比較のために4.2 Kにおける NbTi [11]、16 KにおけるWisconsin大の人工欠陥導入 Ba122:Co薄膜[14]及びMgB₂薄膜(15 K)[12]の特性も 載せてある。



図5 Ba122:P+BZO薄膜の(a) 面内配向性(∠/∅)、 (b)*T*_{c.zero}のBZO密度依存性



図6 Ba122:P+BZO薄膜の15 KにおけるJc-B特性



図7 Ba122:P+BZO薄膜のFp-B特性

図6より15 KにおいてBa122:P+3wt%BZO薄膜は、15 K におけるMgB2薄膜及びWisconsin大の人工欠陥導入 Ba122:Co薄膜より高いことが確認された[15]。また、この 特性はすべての磁場で4.2 KにおけるNbTiを超え、 Ba122としては世界最高レベルの磁場中Jcを示した。

図7にBa122:P+3wt%BZO薄膜の5 K及び15 Kにお ける巨視的ピンニング力(F_p)を示す。15 Kにおける Ba122:P+3wt%BZO薄膜の F_p は、Ba122:P薄膜より3倍 以上高く、MgB₂(15 K)及びNbTi(4.2 K)より高い。さら に、5 KにおいてBa122:P+3wt%BZO薄膜の F_p は、 Nb₃Sn(4.2 K)より高く、65 KにおけるRE123+BZO薄膜 とほぼ同程度であることが確認された。

図8にBa122:P+3wt%BZO薄膜の15 K、1 Tにおける *J*_c- 0特性を示す。図よりBa122:P薄膜は、Wisconsin大の 人工欠陥導入Ba122:Co薄膜に比べて高い*J*_cを示すが、 異方的かつ*J*_cがまだ低いことが分かる。



図8 Ba122:P+BZO薄膜J_c-θ特性(15 K)

一方、Ba122:P+3wt%BZO薄膜は、15 K、1 Tにおいて $J_{c,min}$ =1.5 MA/cm²とWisconsin大の薄膜のその値に比べ 7倍以上も高い J_c を得ることに成功した。また、等方性を 示す $J_{c,max}/J_{c,min}$ =1.1とマグネット応用に適した特性を示 すことが確認された。これは、RE123におけるBZOナノ 粒子同様(図3参照)に粒子状のBZOがあらゆる磁場印 加角度に対して有効的に磁束の運動を抑制したことを 意味する。

5. まとめ

本研究では、鉄系超伝導体のマグネット応用を目的 に、ナノ粒子がBaFe₂As₂ 薄膜の磁場中 J_c 特性に及ぼ す影響について検討を行った。As/P組成制御した BaFe₂(As_{0.67}P_{0.33})₂薄膜内部にBaZrO₃ナノ粒子を人工磁 束ピンニング点として超伝導特性を低下させることなく、 高密度に導入することに成功した。その結果、15 Kにお けるBa122:P+3wt%BZO薄膜は、すべての磁場で4.2 K におけるNbTiを超えるBa122としては世界最高レベルの 磁場中 J_c を示した。また、15 K、1 Tにおいて $J_{c,min}$ =1.5 MA/cm²とWisconsin大の欠陥導入Ba122:Co薄膜に比 べ7倍以上も高い J_c を得ることに成功した。さらに等方性 を示す $J_{c,max}/J_{c,min}$ =1.1と非常に等方的なマグネット応用 に適した特性を得ることに成功した。

現在、燃料電池自動車の開発により水素ステーションに水素を液体水素(20K)で貯めることが計画されている。もし、今回作製したBal22:P+BZO薄膜線材の20Kにおける磁場中J。をNbTi (4.2 K)と同程度のまで向上させることができれば、20Kでの鉄系超伝導体を用いた応用が可能となり、水素社会に貢献する創エネ、蓄エネに役立つと考えられる。

本研究は、日本学術振興会 最先端研究開発支援 プログラム[FIRST (中心研究者:細野秀雄教授)]によ り助成を受けて実施したものである。また、米国ロスアラ モス国立研究所における研究は、US DOE及びOffice of Basic Energy Sciencesの支援を受けたものである。

参考文献

- Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. J. Hosono: J. Am. Chem. Soc. **130** (2008) 3296.
- [2] K. Tanabe and H. Hosono: Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 010005.
- [3] T. Katase et al.: Nature Communications 2 (2011) 409.
- [4] J. D. Weiss et al.: Nature Materials 11 (2012) 682-685.
- [5] J. L.MacManus-Driscoll et al.: Nature Materials 3 (2004) 439-443.
- [6] B. Maiorov et al.: Nature Materials 8 (2009) 398-404.
- [7] K. Matsumoto et al.: Supercond. Sci. Tech. 23 (2010) 014001.
- [8] M. Miura et al.: Phys. Rev. B 83 (2011) 184519.
- [9] S. Kasahara et al.: Phys. Rev. B **81** (2010) 184519.
- [10] M. Miura et al.: Appl. Phys. Express 6 (2013) 093101.
- [11] L. D. Cooley et al.: Phys. Rev. B 53 (1996) 6638-6652.
- [12] C. G. Zhuang et al.: Supercond. Sci. Technol. 21 (2008) 082002.
- [13] M. Miura et al.: Supercond. Sci. Technol. 23 (2010) 014013.
- [14] S. Lee et al.: Nature Materials 12 (2013) 392-396.
- [15] M. Miura et al.: Nature Communications 4 (2013) 2499.

<トピックス 2>

鉄系超伝導線材の開発の現状

Present status of the development of iron-based superconducting wires

物質·材料研究機構 戸叶 一正、高 召順、松本 明善、熊倉 浩明 National Institute for Materials Science K. Togano, Z.S. Gao, A. Matsumoto, H. Kumakura

1. はじめに

2008年に発見された鉄系超伝導体[1]は、銅系酸化 物に次ぐ高い臨界温度Tcと高い臨界上部臨界磁界 (H_{c2})を有するために、物性研究のみならず応用面から も注目されている。構造的にも非常に変化に富んでおり、 主なものとしてSmFeAsO_{1-x} $F_x(T_c=55 \text{ K})$ などの1111系、 LiFeAs($T_c = 18$ K) の111系、(Ba,K)Fe₂As₂($T_c = 38$ K)な どの122系、さらにはFeSe(T_c = 8 K)などの11系などが報 告されている。図1にはこれらのHc2(T)曲線を他の材料 と比較して示した。鉄系超伝導体はいずれも立ち上がり $(-dH_{c2}/dT)$ が鋭いのが特徴で、したがってT_cに比してH_{c2} が非常に高くいずれも50 Tを優に超えるものと推定され ている[2]。また、現在線材開発が最も進んでいる122系 は、高温酸化物超伝導体に比べると異方性がはるかに 小さく、それに伴い結晶粒間の弱結合の問題も緩和さ れるため、後述するように高い輸送臨界電流密度(J_)が 得やすい。これらのことから鉄系超伝導体は液体ヘリウ ム温度のみならず、冷凍機冷却や液体水素の中温度 領域における強磁界発生に有望と考えられ、その線材 化の研究が進められているところである。ここでは、まず 開発が最も進んでいるPIT (Powder-in-tube) 法による



^{6.} 謝辞

122系線材の開発状況について最新の情報を紹介し、 さらに122系以外のPIT線材の試みについても簡単に述 べる。最後に、優れた特性が得られているCoated Conductorの開発状況についても触れてみたい。

2. PIT-122線材の開発

最初に最も開発が進んでいる122系のPIT線材につ いて解説する。PIT法は文字通り粉末を金属管に詰め て加工、熱処理する方法である。最初に詰める粉末が、 構成元素の原料混合粉であるin-situ法と、予め生成し ておいた超伝導化合物粉末(前駆体)であるex-situ法に 大別される。122系ではBa、Sr、Kなど空気中で不安定 な元素を含むため、ex-situ法が今のところ最も多く試み られている。予め反応させた高品質の122系化合物は 空気中でも比較的安定で、取扱しやすい。 PIT法による 線材の試作は発見直後から行われてきたが、粒間弱結 合のために測定される輸送 J。が実用レベルには程遠く 低い問題があった。しかし、図2に示すように輸送J。はこ の数年の間に急速な向上を示している。弱結合の問題 を大幅に改善し、大きな輸送J。を最初に得たのはフロリ ダ州立大学国立強磁場研究所(NHMFL)のグループ で、彼らはCIP(冷間静水圧プレス)、HIP(熱間静水圧 プレス)の高圧技術を駆使している[3]。一方、中国科学 院電気技術研究所(IEE-CAS)のグループは銀より硬い 鉄を被覆材とすることによりSr-122について高い配向度 を達成し、磁界中で初めて104 A/cm2を超えるJcを発表 した[4]。しかし、高圧合成のような高度な技術を用いず、 また被覆材としては鉄よりも安定な銀を用いて高J。がも し得られれば、そのほうが実用的にはるかに有利なこと は明らかである。このような観点から筆者達のグループ は通常の冷間加工、熱処理による銀被覆Ba-122線材の 開発をかねてから進めてきていて、最近磁場中でも実 用レベル(10⁵ A/cm²)を超える輸送J。を達成することに









成功した。ここでは、このような筆者達のグループにお けるBa-122線材の結果を中心にして、最近の122系線 材の開発状況を紹介してみたい[5-9]。

図3には筆者たちのグループが試みているBa-122 テープの作製法を示した。Ba-122前駆体は構成元素の 材料をボールミルなどにより混合後、反応させて作製す る。122系の場合は高品質の前駆体を作製することが肝 要である。この前駆体粉末を銀管に詰めて溝ロール、ス ウェージ、線引き、圧延などにより最終的な線材、あるい はテープなどに加工し、焼結のための熱処理を施して 線材とする。ただし、今のところは緻密化、配向化の関 係でテープ材とすることが多い。図4にはBa-122の圧延 およびさらに一軸圧縮を加えたテープの代表的なJ_c-H 特性を示した。圧延のままの4.2 K、10 TにおけるJ_cはこ の場合4.4×10⁴A/cm²(4.2 K, 10 T)である。しかし、この 圧延材にさらに一軸プレスを加えると著しくJ_cは向上す



図5 圧延およびプレス後のBa-122 PITテープのSEM写真。左 (a),b))は断面をイオン研磨後、右((c),d))は破断面で観察

る[9]。プレス材のJ。は6 Tの磁界まで10⁵ A/cm²を超えて おりほぼ実用レベルのJ。が達成されたと言える[9]。なお 極く最近、IEE-CASのグループは銀被覆Sr-122テープ に熱間のプレスを適用して、10 Tで10⁵ A/cm²を超えるJ。 を発表した[10]。図4にはこれらのデータに加え、比較と してNb-Ti線材、Nb₃Sn実用線材および現在実用化が 進められているMgB₂線材の特性を比較して示してある。 これから分かるように鉄系線材のJ。は強磁界まで磁界依 存性が極めて小さく、これらの実用線材をはるかに凌ぐ 優れた高磁界特性を示していることが分かる。

このような圧延、一軸プレスによるJ。の向上は、かつて Bi-2223テープでも報告されていた。Bi-2223テープの 場合は1)配向化、2)緻密化、3)クラックの方向変化など がその原因とされていて、122系の場合も同じ原因によ るものとまず類推される。しかし配向化についてはその 傾向は若干見られるものの、Bi-2223テープのような顕 著な配向は観察されていない。このことは122系の結晶 異方性がBi-2223よりも小さいことから納得できる。一方、 緻密化とクラック方向の変化は122系の場合も明らかに 観察できる。図5は圧延テープおよびプレステープのボ イドおよびクラックのSEM写真を示した[7.9]。ボイドは観 察され易いように最後にイオン研磨してある。圧延材、 プレス材ともに丸線材に比べてボイドが減少し緻密化し ているが、写真から特にプレス材でボイドが大幅に減少 し高い充填度が達成されていることが分かる。また、ク ラック方向の変化もBi-2223と同様に観察されている。圧 延によって生じるクラックはテープ長手方向に垂直に走



るのに対して、一軸プレスを加えるとクラックの方向が テープの長手方向に走るように変化する。したがってプ レステープでは輸送電流に対する有効断面積が大きく なり、圧延のままよりもさらにJ。が高くなったものと推定さ れる。

高温での応用を考えた場合は、4.2 K以上の温度で のJ_c-H特性が重要となる。図6はBa-122、Sr-122テープ の高温でのJ_c-H特性を示した[8]。比較のためにMgB2 線材の曲線を示したが、122テープは20 Kの高温までJ。 の落ちが殆どなく、優れた磁界特性が保持されることが 分かる。また将来のマグネット応用にはJ。の磁界方向に よる異方性も気になることである。図7はSr-122テープの J。の角度依存性を示した[8]。J。は磁界をテープ面に平 行に印加した場合に最も高く、垂直に印加した場合に 最も低くなる。この振る舞いはBi-2212テープやBi-2223 テープと同じである。しかし、異方性は2程度とBi-2212 やBi-2223テープの異方性よりも小さい。このことはc軸 配向度がビスマス系テープほど高くないことと関連して いると思われる。いずれにしても、122テープの異方性 は超伝導マグネット応用に決定的な障害とはならないと 思われる。

3. その他の鉄系PIT線材

122系以外では1111系、11系についてもPIT法が試み られたが、現在まで122系に匹敵するような良好な結果 は得られていない。1111系はT。が122系よりさらに高くな るため、高温での応用には魅力がある。しかし、構成元 素が多くなって組成コントロールが難しくなるうえに、合 成温度が一般的には1000°C以上の高温になるため被 覆材の選択が難しくなるなどの問題があり、これらが優 れたJ。を得るうえでの大きな障害となっている。最初に 1111系にPIT法を適用したのはIEE-CASのグループで、



銀シースを用いin-situ PIT法により比較的低温で合成 することに成功している[11]。その後、慶応大一NIMSの グループによってバインダーを加えたex-situ PITによる 線材化が試みられた[12]。しかしいずれの輸送J。も数 kA/cm²程度(4.2 K,自己磁界)に留まっていた。これは 低温で合成したために、不純物の残存、粒間弱結合が 生じたためと思われる。最近IEE-CASのグループは Sm-1111について、Snの添加および加工、熱処理条件 の工夫によって2.2x10⁴ A/cm²と一桁近く輸送J。を上昇さ せることに成功した[13]。しかし磁界中のJ。は10² A/cm² の低い値に留まっており、さらに改善の努力が必要であ る。

11系はT_cは低いが、H_{c2}は高く、しかも毒性の高いヒ素 を含まないという利点があり、PIT法による線材化が試み られてきた。最初に試みられたのはNb₃Snの内部拡散 に近い手法で、Fe管にTeSeの粉末を入れて加工後、両 者間に反応を起こさせて11層を形成させる手法である [14]。その後、同手法の改善やex-situ法も試みられてい るが[15]、J_cは極めて低い値に留まっている。しかし、 Nb-Tiに替わり得る材料としてもっと研究されて良い材 料である。

3. Coated Conductor法によるFe系線材の開発

前述したように発見直後に多く試みられたPIT線材は、 弱結合の問題によって、テープとして流れる輸送J。は極 めて低かった。一方、東工大のグループはCo-doped Ba-122薄膜を種々の傾角をもつバイクリスタル上に生成 させ、その間の臨界電流密度を測定することによって弱 結合の度合いの評価を行った[16]。図8にその結果を示 す。同様の測定は、高温超伝導体が発見された直後に YBCOについて行われており、その結果も図中に比較 のために示してある。これから分かるように粒間J。は粒間 の方位差(傾角)の増加とともに減少するが、その度合



を通して流れるJ。の角度依存性[16] YBCOの結果と比較してある。

いはYBCOよりBa-122のほうがはるかに小さい。このことは基盤の配向度が低くとも高いJ。が得られることを示唆しており、実用化にはそれだけ有利となる。

この知見をもとに、東工大のグループはYBCO線材 で現在開発が進められているCoated Conductorの手法 をCo-doped Ba-122に適用した[17]。基盤はハステロイ テープ上にIBAD法により二軸配向させたMgOで、その 配向度はYBCOで通常使われているものより弱い。図9 にそのJ_c-H特性を示した。これから分かるようにテープ は期待通りの優れた輸送J_c特性を示し、4K、自己磁界 中のJ_cは10⁶ A/cm²を超え、磁界中でも10⁵ A/cm²を優に 超える。実用的に極めて有望な結果である。

一方、Brookhaven 国立研究所は同じCoated Conductorの手法を11系に適用し、図9に示したように同様に優れたJ_c-H特性を得ている[18]。基盤はRABiTS法 によって二軸配向させており、その上にFeSe_{0.5}Te_{0.5}を生 成させている。30 Tの強磁界までJ_cの磁界依存性は小さ く、10⁵ A/cm²以上の高い値が保持されていることが注目 される。また、異方性もPITテープと同様に小さい。これ らの鉄系Coated Condutorテープは特性的には実用レ ベルをクリアしており、今後はいかに長尺線材を作製し ていくかが課題となる。

5. まとめ

以上、鉄系超伝導線材の開発の現状を紹介した。 PIT法で作製した122系テープは最近急速に輸送よ特 性が改善されて、実用領域に入ったと言ってもよい。し かし、制御すべきパラメータは多く今後さらによが向上 する可能性は十分にある。プロセスとしてはBi-2223線 材の製造法に非常に近いものがあり、長尺化は難しくな



特性[17,18]

い。Nb-Ti、Nb₃SnはもとよりMgB₂をも凌ぐ優れた高温磁 界特性をもつことが分かり、液体ヘリウムのみならず冷 凍機冷却や液体水素という中温度領域での応用にも有 望なことが実験的に証明されている。一方、Coated Conductorに関しては、122系、11系ですでに実用レベ ルを十分クリアした特性が報告されているが、長尺化技 術の開発が今後の課題である。いずれにしても最近の 一連のJ_c向上は、鉄系超伝導線材の開発が初期の段 階を抜け出し、いよいよ実用化の段階に入ってきたこと を示している。

参考文献

- Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hosono, J. Am. Chem. Soc. **130**(2008) 3296.
- [2] 例えば M. Putti, I. Pallecchi, E. Bellingeri, M.R. Cimberle, M. Tropeano, C. Ferdeghini, A. Palenzona, C. Tarantini, A. Yamamoto, J. Jiang, J. Jaroszynski, F. Kametani, D. Abraimov, A. Polyanskii, J.D. Weiss, E.E. Hellstrom, A. Guverich, D.C. Larbalestier, R. Jin, B.C. Sales, A.S. Sefat, M.A. McGuire, D. Mandrus, P. Cheng, Y. Jia, H.H. Wen, S. Lee and C.B. Eom, Supercond. Sci. Technol. 23(2010) 034003.
- [3] J.D. Weiss, C. Tarantini, J. Jiang, F. Kametani, A.A. Polyanskii, D.C. Larbalestier and E.E. Hellstrom, Nature Materials 11(2012) 682.
- [4] Z.S. Gao, Y.W. Ma, C. Yao, X.P. Zhang, C.L. Wang, D.L. Wang, S. Awaji and K. Watanabe, Scientific Reports, 2(2012) 998.

- [5] K. Togano, A. Matsumoto and H. Kumakura, Solid State Commun. 152(2012) 740.
- [6] K. Togano, Z.S. Gao, H. Taira, S. Ishida, A. Iyo, K. Kihou, H. Eisaki, A. Matsumoto and H. Kumakura, Supercond. Sci. Technol. 26(2013) 065003.
- [7] K. Togano, Z. Gao, A. Matsumoto and H. Kumakura, Supercond. Sci. Technol. 26(2013) 115007.
- [8] A. Matsumoto, Z. Gao, K. Togano and H. Kumakura, Supercond. Sci. Technol. 27(2014) 025011.
- [9] Z. Gao, K. Togano, A. Matsumoto and H. Kumakura: Scientific Reports 4(2014) 4064.
- [10] X.P. Zhang, C. Yao, H. Lin, Y. Cai, Z. Chen, J. Q. Li, C.H. Dong, Q. J. Zhang, D.L. Wang, Y.W. Ma, H. Oguro, S. Awaji and K. Watanabe, arXiv:1403.6704.
- [11] L. Wang, Y. P. Qi, D. L. Wang, Z. S. Gao, X. P. Zhang, Z. Y. Zhang, C. L. Wang, and Y. W. Ma, Supercond. Sci. Technol. 23(2010) 075005.
- [12] M. Fujioka, T. Kota, M. Matoba, T. Ozaki, Y. Takano, H. Kumakura, and Y. Kamihara, Appl. Phys. Express 4(2011) 063102.
- [13] Q.J. Zhang, C.L. Wang, C. Yao, H. Lin, X.P. Zhang, D.L. Wang, Y.W. Ma, S. Awaji and K. Watanabe, Appl. Phys. Lett. 113(2013) 123902.
- [14] Y. Mizuguchi, K. Deguchi, S. Tsuda, T. Yamaguchi, H. Takeya, H. Kumakura, and Y. Takano, Appl. Phys. Express 2(2009) 083004.
- T. Ozaki, K. Deguchi, Y. Mizoguchi, Y. Kawasaki,
 T. Tanaka, T. Yamaguchi, H. Kumakura and Y.
 Takano, J. Appl. Phys. **111**(2012) 112620.
- [16] T. Katase, Y. Ishimaru, A. Tsukamoto, H. Hiramatsu, T. Kamiya, K. Tanabe, H. Hosono, Nature Commun. 2(2011) 409.
- [17] T. Katase, H. Hiramatsu, V. Matias, C. Sheehan, Y. Ishimaru, T. Kamiya, K. Tanabe and H. Hosono, Appl. Phys. Lett. 98(2011) 242510.
- [18] W.D. Si, S.J. han, X.Y. Shi, S.N. Ehrlich, J. Jaroszynski, A. Goyal and Q. Li, Nature Commun. 4(2013) 1347.

<トピックス 3>

断熱型磁束量子パラメトロンを用いた 超低電力集積回路の研究

Extremely energy-efficient integrated circuits using adiabatic quantum-flux-parametron

横浜国立大学大学院工学府 竹内 尚輝,山梨 裕希,吉川 信行 Department of Electrical and Computer Engineering, Yokohama National University N. Takeuchi, Y. Yamanashi and N. Yoshikawa

1. はじめに

最先端のスーパーコンピュータでは10 PFLOPSを超 える演算が可能であるが[1]、すでにその100倍の演算 能力を有した次世代の計算機、Exaスケールコンピュー タの実現に向けた研究が行われており、2018年の完成 を目指したロードマップも掲げられている [2]。しかしな がら、CMOS回路でExaスケールの演算を実現しようと すると、その消費電力は~100 MWから~1000 MW程度 になるという見積もりが出されており [2-4]、これは発電 所一基分の総出力に相当する莫大な電力である。よっ て、将来の情報社会に不可欠になるであろうExaスケー ルコンピュータを実現するためには、論理デバイスの根 本的な低電力化が必要と言える。

CMOSに比べ1000分の1程度の消費電力で動作可 能な単一磁束量子(rapid single-flux-quantum: RSFQ) 回路 [5] は、Exaスケールコンピュータを実現するため の有力な候補として考えられる。しかしながらRSFQ回路 では、DCバイアスのために必要な抵抗ネットワークに よって大きな静的消費電力が生じるため、潜在的な低 電力性を十分に引き出せているとは言えない。そこで近 年、RSFQ回路よりも静的消費電力の小さい低電力超伝 導ロジックの研究が盛んに行われている [6-9]。これに 対し我々の研究している断熱磁束量子パラメトロン (adiabatic quantum-flux-parametron: AQFP)[10,11] 回 路は、静的消費電力だけでなく、後述する断熱動作に よって動的消費電力も低減可能である。よってAQFP回 路を用いることにより、極めてエネルギー効率の高い演 算システムが実現できると期待できる。

本論文では、これまでに取り組んできたAQFP回路の 低電力性の実証に関連した研究成果を報告する。3章 では断熱動作の実証について、4章ではAQFP回路の 最小ビットエネルギーについて、5章ではAQFP回路を 用いた可逆計算機の提案と論理演算に伴う最小消費エ ネルギーについて述べる。

2. AQFP回路の断熱動作

図1にAQFP回路の等価回路図を示す。ジョセフソン 接合 J₁, J₂を含んだ2つの超伝導リングから形成される。 AQFP回路の動作原理は、後藤英一らによって開発さ れたQFP回路 [12] に基づく。ACバイアス電流 I_xを用い て磁束バイアスをリングに供給すると、入力電流 I_{in}の符 号に応じて左右どちらかのリングに磁束量子が保持され る。この結果、論理状態の "0"と"1"を表現できる。 AQFP回路はAC駆動であるため、静的な消費電力は零 である。また、リングのインダクタンスを最適化することに より [11]、回路の状態を断熱的に変化させることが可能 であり、スイッチングエネルギーを低減可能である。

ディジタル素子のポテンシャルエネルギーは図2(a) のようなダブルウェル型で表すことが可能である [13]。 CMOSやRSFQ回路を始めとした非断熱回路では、回 路にエネルギー障壁Ebと同程度のエネルギーを供給す ることにより、回路の状態を図2(b)のように非断熱的に スイッチさせる。この際、回路に供給されたエネルギー は全て熱として消費される。さらに、熱雑音によるエラー を防ぐため、一般的にエネルギー障壁の大きさは ~1000kBT以上でなければならない。ここで、kBはボルツ マン定数、Tは温度である。このため非断熱回路では、 スイッチの際に~1000 kgT以上のエネルギーが消費され る。これに対しAQFP回路では、図2(c)のようにシングル ウェルのポテンシャルをわずかに傾けることにより、状態 を断熱的にスイッチさせる。このため、ビットエネルギー をEbよりも小さくすることが可能である。また、断熱動作 におけるスイッチングエネルギーは動作速度に比例す るため [14]、原理的にはsub-k_BTのビットエネルギーが 実現可能である。



図1 AQFPゲートの回路図。ACバイアス電流 4が供給されると、磁束量子が左側("0")もしくは右側("1")のループに保持される。

3. Sub- $I_c \Phi_0$ ビットエネルギー動作の実証

AQFP回路の消費エネルギーは極めて小さいため、 実験的にその低電力性を実証することは困難である。 そこで我々は、超伝導共振器を用いてビットエネルギー を測定した [15]。図3は消費電力を測定するための回 路図である。AQFPゲートはL, Cから成る超伝導共振器 と磁気結合している。ここで、共振器と測定系の間のQ 値 Qesが十分高ければ、超伝導共振器のQ値は極めて 高いため、供給されたエネルギーのほとんどがAQFP ゲートで消費される。このような結合条件において系の 挿入損失 S21を測定すると、(1)式からAQFPの消費電 力を測定することが可能である。



図2 スイッチ動作のエネルギーモデル。縦軸は各系の ポテンシャルエネルギー、質点は回路の状態を表 す。(a) 1 bitのメモリ。(b) 非断熱的スイッチ。回 路の状態は不可逆的にジャンプし、回路に供給さ れたエネルギー(エネルギー障壁と等しい)は全 て熱として消費される。(c) 断熱的スイッチ.エ ネルギー障壁を除去し、わずかにポテンシャルを 傾斜させることにより、微小なエネルギーで状態 をスイッチさせる。



図3 超伝導共振器を用いたAQFPゲートの消費電力測 定回路。AQFPゲートは図中心の超伝導共振器と 磁気結合している。





図4 5 GHzでの消費電力の測定。(a) チップ写真。(b) 測定結果。測定系の損失は4.0 dBを仮定した。入 力電力 Pinが増加すると、より速くポテンシャル を変化させるため、AQFPゲートの消費電力 Pqp も増加する。

$$P_{qfp} = \frac{P_{in}}{2} S_{21} (1 - S_{21}), \tag{1}$$

ここで、P_{afp}はAQFPゲートの消費電力、P_{in}は入力電力 である。図4(a) はAIST-STP2プロセス [16] を用いて作 製した5 GHz超伝導共振器とAQFPゲートのチップ写真 である。図4(b)は消費電力の測定結果である。ここで、 測定はネットワークアナライザのパワースイープを用い た。入力電力を次第に大きくしていくと、 $P_{\rm in}$ = -57 dB付 近でSuが突然ドロップすることが分かる。これは、AOFP ゲートが十分なエネルギーを共振器から供給されてス イッチング動作を始めたことを示している。測定系の損 失4.0 dBを考慮して式(1)からその消費電力を求めると、 Pin = -57 dBにおいて~50 pWであった。動作周波数は5 GHzであるため、ビットエネルギーは10 zJ ~ 0.1 IcΦ0で あった。ここで、I。Ф。はジョセフソン回路のエネルギー障 壁を表し、Icは接合の臨界電流値、Φoは磁束量子であ る。以上より、AQFP回路のビットエネルギーがエネル ギー障壁 I. Ф。以下であることを実証し、AQFP回路の断 熱動作の確認に成功した。



図5 アンシャント接合を用いたAQFPゲートの消費エ ネルギー。ACバイアス電流 *I*xの立ち上がり時間 に比例してビットエネルギー *E*bitは下がり、熱エ ネルギー *k*BT以下のビットエネルギーが実現で きる。

4. Sub-k_BTビットエネルギー動作の実現

これまでの検討では、ジョセフソン接合にシャント抵抗 を接続して接合のMcCumber係数 [17,18] β_c (= Q^2) を ~1(クリティカルダンピング)となるように調整していた。こ こで、 β_c を大きくすると接合のイントリンシックなスイッチ ング速度は増加し(アンダーダンピング)、回路の状態 はより断熱的に変化する。その結果、AQFP回路のさら なる低電力化が可能である。このような考察から、AQFP 回路のビットエネルギー E_{bit} は下記のように表される [19]。

$$E_{bit} \approx 2I_c \Phi_0 \frac{\tau_{\rm sw}}{\tau_{\rm rf}}, \qquad (2)$$

ここで、て、いは接合のイントリンシックなスイッチング時間、 $\tau_{\rm rf}$ は $I_{\rm x}$ の立ち上がり/立ち下がり時間である。図5は シャント抵抗を外して接合のβを最大にした場合(β ~ 2600)のビットエネルギーのシミュレーション結果と式(2) を用いた計算結果である [19]。ここで、Ic=50 µA, Tsw ~ 0.05 ps, 4.2 Kにおいて $I_c \Phi_0 \sim 1800 k_B T$ である。 $\tau_{\rm ff} \epsilon \sim 1000$ ps以上にすると、非断熱的スイッチの熱的リミットである Landauerリミット (= $k_{\rm B}T \ln 2$) [20] を下回ることが分かる。 さらにこのときのBit-error-rate (BER) を回路シミュレー ションにより計算すると、10-23以下であった。つまり、熱 エネルギーよりも小さいビットエネルギーであるにも関わ らず、BERは十分低い値であった。以上より、AQFP回 路はSub-kgTビットエネルギー動作が可能であることを 確認した。本結果は、エントロピーの減少しない系では、 AQFPのビットエネルギーに下限値が無いことを示して いる。

5. 超伝導可逆計算機

前章までの検討結果から、AQFP回路がたしかに断 熱的にスイッチング動作を行っていること、さらに接合の Q値の向上と動作周波数の低減によりいくらでもビットエ ネルギーを低減できることが示された。本章では、AQFP 回路を用いた論理演算に伴う最小の消費エネルギーに ついて検討を行う。

論理演算に伴う消費エネルギーの下限値は、消去す る情報の量(エントロピーの減少量)により決まると考え られており [20]、近年実験的にも確認されている [21,22]。そこで、エントロピー変化を伴わない論理演算 として、Fredkinにより可逆計算が考案された [23]。可逆 計算では、原理上無限小の消費エネルギーで論理演 算を行うことが可能である。これまでに、Fredkinゲート [23] などの理論的な可逆論理ゲートが考案され、これら を物理的に実現するための物理モデルやデバイスが研 究されてきた [23-27]。しかしながら、物理デバイスを 使って可逆計算を実現した(可逆計算に最小の消費エ ネルギーが存在しないことを実証した)研究例は未だ報 告されていない。可逆計算を実現するためには、2つの



図6 RQFPゲート。(a) ブロック図。ここで、MAJ (a, b, c) = ab+bc+caである。(b) 消費エネルギーの計 算結果.計算には、入出力バッファゲートの消費 エネルギーも含まれている。全ての接合はアン シャント接合 ($\beta_c \sim 2600$) である。

課題がある。1つは、超低電力な論理デバイスが必要に なることである。これは、情報消去に伴うエネルギーが *k*BT程度と非常に小さいためである。もう1つの課題は、 非断熱的なエネルギー損失を防ぐためには可逆論理 ゲートは論理的にも物理的にも可逆でなければならな い点である [14]。CMOSやRSFQ等の非断熱回路では、 スイッチングの際に~1000 *k*BT以上のエネルギーが失わ れるため、可逆論理ゲートのビルディングブロックとして は適さない。これに対し、AQFP回路では*k*BT以下のエ ネルギーで動作可能であるため、ビルディングブロック として適している。本研究では、アンシャントAQFPゲート を用いて論理的にも物理的にも可逆な論理ゲートを考 案し、可逆計算を実現した。

図6(a) に、我々の提案する可逆論理ゲートである Reversible quantum-flux-parametron (RQFP) ゲート[28] のブロック図を示す。3つのMajority (MAJ) ゲートと3つ のSplitter (SPL) ゲートにより構成される。AQFP回路で は、MAJゲートとSPLゲートは同じ回路構造を有し、 データの伝搬方向だけがファンクションを決定する。こ のため、RQFPゲートの回路トポロジーは左右対称となり、







図7 RQFPゲートの動作実証。(a) チップ写真。(b) 測 定結果.正しい論理動作が確認された。

論理的にも物理的にも可逆である。図6にRQFPゲート の消費エネルギーの計算結果を示す。全ての入力デー タパターン(a, b, c)に対して、I_xの立ち上がり/立ち下 がり時間に反比例して消費エネルギーが低減すること が分かる。これは、RQFPゲートに含まれる全てのゲート が断熱的に動作しているためである。以上より、論理的 にも物理的にも可逆なRQFPゲートを用いた論理演算に は、最小の消費エネルギーが存在しないことが示された。 我々の知る限り、実存する物理デバイスを用いて可逆 計算を実現した例は本研究が初めてである。図7に AIST-STP2プロセスを用いて作製したRQFPゲートと低 速 (100 kHz) での動作実証結果を示す。全ての入力 パターンにおいて、正常論理動作を確認した。

6. まとめ

AQFP回路の低電力性の実証に関する研究成果を 報告した。超伝導共振器を用いてAQFPゲートの消費エ ネルギーを測定し、断熱動作実証を行った。また、β。の 向上と動作周波数の低減により、ビットエネルギーがい くらでも低減可能であることを数値解析により示した。さ らに、AQFPゲートを用いて論理的にも物理的にも可逆 なRQFPゲートを提案し、RQFPゲートを用いた論理演算 には最小の消費エネルギーが存在しないことを数値解 析により実証した。また、AIST-STP2プロセスを用いて RQFPゲートを作製し、動作実証を行った。

以上より、AQFP 回路の極めて高いエネルギー効率 が示された。また、すでに AQFP ゲートを用いた論理回 路 [29] や低電力ラッチ [30] の動作実証も行われて おり、AQFP 回路を用いた超低電力演算システムの実 現が期待される。

謝辞

本研究に使用された回路は、(独) 産業技術総合研 究所(AIST)の超伝導クリーンルーム(CRAVITY)にお いて、AIST-ADP2プロセスを用いて作製された。 AIST-STP2は、(公財)国際超電導産業技術研究セン ター(ISTEC)のニオブ集積回路プロセスをAISTにて発 展させたものである。

参考文献

- [1] TOP500 SUPERCOMPUTER SITES: http://www.top500.org/
- [2] A. Geist: SciDAC Rev., 16 (2010) [Online]. Available: http://www.scidacreview.org
- [3] P. Ball: Nature **492** (2012) 174.
- [4] R.F. Service: Science **335** (2012) 394.

- [5] K.K. Likharev and V.K. Semenov: IEEE Trans. Appl. Supercond. 1 (1991) 3.
- [6] Y. Yamanashi, T. Nishigai, and N. Yoshikawa: IEEE Trans. Appl. Supercond. 17 (2007) 150.
- [7] O.A. Mukhanov: IEEE Trans. Appl. Supercond. 21 (2011) 760.
- [8] Q.P. Herr, A.Y. Herr, O.T. Oberg, and A.G. Ioannidis: J. Appl. Phys. **109** (2011) 103903.
- [9] M. Tanaka, M. Ito, A. Kitayama, T. Kouketsu, and A. Fujimaki: Jpn. J. Appl. Phys. 51 (2012) 053102.
- [10] N. Takeuchi, D. Ozawa, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa: Supercond. Sci. Technol. 26 (2013) 035010.
- [11] N. Takeuchi, K. Ehara, K. Inoue, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa: IEEE Trans. Appl. Supercond. 23 (2013) 1700304.
- [12] M. Hosoya, W. Hioe, J. Casas, R. Kamikawai, Y. Harada, Y. Wada, H. Nakane, R. Suda, and E. Goto: IEEE Trans. Appl. Supercond. 1 (1991) 77.
- [13] V.V. Zhirnov, R.K. Cavin, J.A. Hutchby, and G.I. Bourianoff: Proc. IEEE 9 (2003) 1934.
- [14] K.K. Likharev: Int. J. Theor. Phys. 21 (1982) 311.
- [15] N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa: Appl. Phys. Lett. **102** (2013) 052602.
- [16] S. Nagasawa, Y. Hashimoto, H. Numata, and S. Tahara: IEEE Trans. Appl. Supercond. 5 (1995) 2447.
- [17] D.E. McCumber: J. Appl. Phys. 39 (1968) 3113.
- [18] W.C. Stewart: Appl. Phys. Lett. 12 (1968) 277.
- [19] N. Takeuchi, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa: Appl. Phys. Lett. **103** (2013) 062602.
- [20] R. Landauer: IBM J. Res. Dev. 5 (1961) 183.
- [21] A. Bérut, A. Arakelyan, A. Petrosyan, S. Ciliberto, R. Dillenschneider, and E. Lutz: Nature 483 (2012) 187.
- [22] A.O. Orlov, C.S. Lent, C.C. Thorpe, G.P. Boechler, and G.L. Snider: Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 06FE10.
- [23] E. Fredkin and T. Toffoli: Int. J. Theor. Phys. 21 (1982) 219.
- [24] R.W. Keyes and R. Landauer: IBM J. Res. Dev. 14, 152 (1970).
- [25] K. Likharev: IEEE Trans. Magn. 13 (1977) 242.
- [26] V.K. Semenov, G.V. Danilov, and D.V. Averin: IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 938.
- [27] J. Wenzler, T. Dunn, T. Toffoli, and P. Mohanty: Nano Lett. 14 (2014) 89.

- [28] 竹内尚輝: 横浜国立大学博士論文 (2014).
- [29] K. Inoue, N. Takeuchi, K. Ehara, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa: IEEE Trans. Appl. Supercond. 23 (2013) 1301105.
- [30] N. Takeuchi, T. Ortlepp, Y. Yamanashi, and N. Yoshikawa: J. Appl. Phys. 115 (2014) 103910.

く会議報告1>

超伝導科学技術研究会 第 83 回ワークショップ会議報告

Report on the 83rd FSST Workshop

産業技術総合研究所 日高 睦夫 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology M. Hidaka

「多ピクセル超伝導検出器で探る材料、核物質、宇宙の謎」と題する未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会の第83回ワークショップが、3月10日に全日通霞が 関ビルで開催された。

超伝導検出器は他のデバイスでは実現できない究極 の感度・分解能を有しているため、様々な先端科学技 術分野でなくてはならないツールとして使われている。 超伝導検出器を実用化するための一番の課題が、検出 面積が小さく測定に時間を要することであり、それを解 決するための手段が多ピクセル化である。本ワーク ショップでは、前半で多ピクセル化のための技術開発の 現状が紹介され、後半で材料分析、放射線計測、宇宙 観測における最先端の研究が紹介された。

産総研の浮辺は、蛍光X線分析および質量分析用 超伝導トンネル接合(STJ)検出器を100ピクセル化する ためのプロセス技術を紹介し、それにより計測時間が 1/100に短縮され利便性が大いに向上したことを述べた。 今後さらに多ピクセル化を進める予定であるが、その際 多数の入出力線を介した極低温への熱流入が問題とな るため、入出力の多重化や低温での信号処理は必須 の課題であることが主張された。

横国大の吉川は、超伝導単一磁束量子(SFQ)回路 を用いたデジタル多重化技術について述べた。SFQ回 路は超高速かつ低消費電力であり、超伝導検出器と同 じ極低温で動作できるため、超伝導検出器の信号処理 回路として期待されている。日本はデジタル多重化で先 行しており、NICTの多ピクセル超伝導ナノワイヤ検出器 (SSPD)出力の多重化や、横国大・産総研のSFQ-TDC (Time-to-Digital Converter)を用いたSSPD出力の信号 処理が行われている。これらの実験は冷凍機中で行わ れており、実用化を意識した開発が行われている。

産総研の神代は、マイクロ波共振に基く周波数多重 読出しについて紹介した。マイクロ波運動インダクタンス 検出器(MKID)は、信号入射により壊れるクーパーペ アの数に比例して超伝導線の運動インダクタンスが変 化し、共振回路の共振周波数がずれる現象が利用され る。1,000個程度のMKID出力を1本の出力線で読み出 すことが可能であり、天体観測を始め様々な応用に展 開されている。また、産総研で開発中の超伝導転移端 検出器(TES)読出しを目的としたSQUIDを可変インダク タンスとして用いて共振回路を形成する方法の現状が 述べられた。駆動方法の工夫およびNbとNbNのハイブ リッド回路を用いることにより、世界最高の低雑音特性 が得られている。

後半の講演では超伝導検出器の具体的な応用例が示された。物材機構の原は、電子顕微鏡に搭載される TESを用いた材料分析装置(EDS)の開発現状を紹介した。大半の電子顕微鏡は、観測画像の組成分析を行う EDSが搭載されている。TES-EDSは半導体-EDSに比べ てエネルギー分解能が一桁高いため、半導体-EDSで は他の原子のピークと重なり分離不可能であった原子 のピークをはっきり同定することができる。現在TESを多 ピクセル化する開発に取り組んでおり、これが成功すれ ば電子顕微鏡画像に対応したTES-EDSによる原子マッ プの取得が可能となり、電子顕微鏡を用いた材料分析 の世界を一変するようなインパクトが期待できる。

東大の高橋は、ガンマ線TESによる放射能計測について述べた。核物質から放射されるガンマ線はエネルギーが高く物質の透過能が高いため、放射能計測にはTESに厚い吸収体を設けたガンマ線TESが用いられる。 通常のGe検出器では、エネルギー分解能が低いため多数のピークが重なっている場合は小さなピークの同定が難しいという問題点があり、福島事故の汚染水分析でもCl-38が誤認識されるという問題が生じており、よりエネルギー分解能が高い検出器が求められている。 検出効率を上げるためのTESの多ピクセル化と低温での信号処理が実用化への鍵となる。

JAXAの満田は、超伝導検出器よる宇宙観測につい て紹介を行った。最近の宇宙論の発展は目覚ましく、宇 宙の大半は暗黒エネルギーや暗黒物質と呼ばれる未 知のものでできており、バリオンと呼ばれる"普通"の物 質はたった4%しか存在しないことが知られるようになっ た。しかもバリオンの大半は存在が確認されておらず、 ミッシングバリオンと呼ばれている。これらの宇宙の謎を 探るには宇宙のX線を観察する必要があるが、宇宙から のX線は大気に吸収されるため地上では見ることができ ない。そこでTES等の超伝導検出器を衛星に搭載し、 宇宙で観測する計画が進行している。JAXA等の各国 の宇宙機関では、多ピクセル化した衛星搭載用超伝導 X線検出器の開発を行っている。

く会議報告2>

第 40 回シンポジウム報告

Report on the 40th Symposium

物質·材料研究機構 松本 明善 National Institute for Materials Science A. Matsumoto

今回のシンポジウムは超伝導2014-未来を拓く超伝 導ケーブルーという題目で行われた。

午前は特別賞を受賞した蔡兆申氏と熊倉浩明氏より 基調講演を頂いた。本講演の詳細は7月頃発刊予定の 受賞者からの記事があるので割愛する。

午後に本シンポジウムのテーマである超伝導ケーブ ル関連の講演、最後にパネルディスカッションが行われ た。東京電力の本庄昇一氏からは平成19年度より行わ れた旭変電所での超伝導ケーブル実証試験の報告が 行われた。5年にわたる長期実証プロジェクトは昨年度 に無事終了し、1年超にわたって一般家庭に超伝導 ケーブルを通った電気が供給されたことを報告している。 全長240 mであった超伝導ケーブル自体については線 材、冷却も含めて問題なく試験が行われたことが報告さ れた。一方で、スケールアップをするためにはいくつか の重要な課題(特に冷却系)も出てきており、それらに 対する対策も検討がなされていると報告があった。

古河電工の八木正史氏は275 kV-3 kAの高圧電線 ケーブルの実証試験についての講演を行った。本試験 はY系線材を使用したケーブルプロジェクトである。当 初線材からの交流損失も考慮していたが、実際は絶縁 体の誘電損失の方が大きいことがわかり、絶縁体の種 類や配置についていくつかの検討を経て実証試験を中 国瀋陽で行うことができた。今回のケーブル実証試験で は、実系統への接続ケーブル長の短さ、冷凍機を使用 等が今後の課題になるだろうと報告があった。

鉄道総研の富田優氏には鉄道用超伝導き電ケーブ ルについて報告を頂いた。鉄道においては直流電化区 間がJRで36%、民鉄で72%であり、直流送電を得意と する超伝導ケーブルが使われる可能性がある産業の一 つである。超伝導線を鉄道き電線に導入する際のメリッ トは、都心部の電車数が多く混雑しているようなところで は電力回生失効率の上昇、場合によっては変電所削 減が可能という大きなメリットがあり、鉄道総研内部でも 重要な技術として認識されつつある。S-イノベプロジェク トでは様々な要素技術の検討を行い、最終的に鉄道総 研内に超伝導ケーブルの敷設を行った。当初プロジェ クト内では30 m長であったものを300 mまで延長して冷 却を含め、電車走行時の実証試験を行っていることが 報告された。

中部大学の山口作太郎先生から石狩直流超伝導送 電プロジェクトについての概要説明があった。超伝導 ケーブルとしては500 mと2000 mの2本を作製し、500 m ケーブルは太陽電池からデータセンターの直流サー バーまで直流によって電力供給する。一方、2000 m ケーブルは公道側の地下に設置することが決まってい る。プロジェクト中では熱侵入や長いケーブルでの熱収 縮問題、冷却等種々の課題を検討していく予定にして いることが報告された。

住友電工の林氏からは世界各国のケーブル開発状況について講演をいただいた。世界各国の状況としては各国の状況に合わせて進行しており、そのプロジェクトも欧米だけでなく、中国・韓国・メキシコ等の新興国まで広がっている様子が報告された。

パネルディスカッションではケーブルの将来展望と課 題についてディスカッションが行われた。まず、上岡氏よ りケーブルを冷却し小さなポンプで圧力を稼ぐことは大 変であり、現時点ではそのような目的を持ったポンプが なく、開発もされていないことが問題であると指摘があっ た。一方で、石狩プロジェクト(2km程度)ではアイシン 精機が作製を担当しているが、さらなる長距離と例えば 標高差100 m程度まであるところに敷設を考えた場合、 やはり新たなポンプの開発が必要である。ニーズと仕様 (熱、流量、圧力)がはっきりすれば機械メーカーとして も動くことができるが、本格的に市場ができるかどうかわ からないと現時点では動きようがないことも指摘された。 一方、ケーブル自体については今後様々な試験が必 要だが、例えば工事中に傷が入ったときどうするのか等 の試験についてもここ3年ほど試験していきながら見て みたい。最後に超伝導ケーブルの導入に関して、いき なり長距離送電という解は実現性が無く、最も導入する にふさわしいのはどのようなところなのか、そのために必 要なことは何か。材料屋のような川上の人から川下の ユーザーに至るまでこのようなことを議論する場があっ た方がよいということも議論された。

「第 18 回超伝導科学技術賞」発表

18th 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18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16年間で合計120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25年12月9日と同26年2 月5日の2回にわたり第18回超伝導科学技術賞審査委 員会が開かれ、合計20件の候補に対して慎重な審査が 行われた結果、7件(内特別賞2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上げるとともに、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・プロセスの研究、応用技術の開発等の 長い道のりを経て、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。

此度のシンポジウムは超伝導ケーブルの開発にス ポットが当てられており、この分野でも実用化への過程 が進んでいるのは喜ばしい限りです。今後、線材の臨 界温度が上昇してLNGの冷熱利用から、さらに配電系 統まで超伝導の利用が進めば、都市の美観にも大きく 貢献することでしょう。これはまだ夢の話ですが、今後こ のような夢を目指して超伝導分野で新奇な芽が生まれ 育つよう、熱心な研究が進められることを期待いたしま す。

終わりに今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ましたら誠に幸いに 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 熊倉 浩明 殿

「超伝導線材のための材料科学研究に対する貢献」

超伝導材料に関する研究を開始して以来35年間に わたり、この分野の第一線で活躍を続けている。新しい *in situ*法V₃GaならびにNb₃Sn線材の開発、Nb₃Al線材に おける急加熱・急冷法の開発をはじめとして、Bi-2212線 材における溶融・凝固法の確立、MgB₂線材におけるマ グネシウム内部拡散法の開発、鉄系Ba-122線材の開発 等、各種先進材料について線材化への先頭を走る顕 著な研究成果をあげてきた。その一方で、ピン止め機構 の解明やピン止め点導入等を目指した基礎的な研究に も取り組んできた。このように、超伝導線材のための広 範な材料科学研究に一貫して取り組み、この研究分野 をリードしてきたことは高く評価される。

研究発表論文数は500編を超えており、その成果に 対し諸学協会や文部科学省より表彰も受けている。さら に、2006年度より国際低温材料会議の組織委員として 貢献している他、海外の諸学会で重要な役割を果たし ている。

以上のように、超伝導材料科学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。

② 蔡 兆申 殿

「超伝導量子コヒーレント物理の実証とデバイス開拓」

巨視的なサイズの超伝導体が一つの波動関数で記述できるコヒーレントな状態を持ち、その位相がジョセフソン接合を用いて制御できることにいち早く着目し、優れた研究グループを率いて超伝導量子コヒーレント物理の実証とデバイス開拓に取り組んできた。その結果、世界初の固体量子素子となる超伝導量子ビットを実現し、その後も量子もつれ状態の実現に成功するなど、超伝導量子コンピュータに向けた先導的な役割を果たしてきた。また、近年ジョセフソン効果と双対な関係であるコヒーレント量子位相スリップ[Coherent Quantum Phase Slip (CQPS)]の実証実験に成功するなど数多くの世界的成果を挙げている。

研究者として素晴らしい業績を残すだけでなく、数々の大型プロジェクトのリーダーとして、国内外の多くの若 手研究者を育成してきており、超伝導エレクトロニクスの 発展に対する貢献は極めて大きい。

超 伝 導 科 学 技 術 賞

高橋 博樹 殿

「層状超伝導体の圧力効果に関する研究」

結晶に対する圧力印加は格子の圧縮による様々な 物性の変化を引き起こし、層状の結晶構造を持つ物質 においては格子収縮の異方性のためさらに複雑な変化 が起こる。層状構造を持つ銅酸化物超伝導体では一般 に*c*軸方向の収縮が大きいが、これはブロック層の組成・ 構造に大きく依存し、さらに付随する局所構造や電子 状態の変化は超伝導特性に直接影響する。本受賞者 は精度、信頼性に優れる低温高圧装置を開発し、多種 の銅酸化物超伝導体の*T*_cに対する圧力印加効果に関 する研究を系統的に進め、*T*_cの圧力依存性に関する総 合的な結果・解釈を世界に初めて示した。このほか、ス ピンラダー系銅酸化物における圧力誘起超伝導の発見 や、最近では鉄系超伝導体における高*T*_c化の可能性を 世界に先駆けて明らかにした。

高橋氏の一連の高圧下における超伝導特性の精緻 な評価は、様々な層状超伝導体のT。を支配する因子の 理解や、より高いT。を持つ新超伝導体の物質設計指針 を与えるなど、超伝導科学技術の物性研究および物質 研究分野の発展に顕著に貢献するものである。

② 堀米 仁志 殿、加藤 愛章 殿、神鳥 明彦 殿、緒方 邦臣 殿、細野 剛良 殿

「超伝導量子干渉素子を用いた心磁計による胎児不整 脈診断学の確立」

胎児期の不整脈は心筋細胞の電気活動の異常によ るものであるが、母体内の胎児に直接電極を貼ることが できないため、心電図による診断は非常に困難であっ た。これに対し、本受賞者らは磁場変動として胎児の心 筋の電気的活動を測定できる超伝導量子干渉素子 (SQUID)を応用した高感度心磁計に注目し、胎児心臓 から発生する微弱な信号を心磁計を用いて母体腹壁上 から非侵襲的に検出して、胎児不整脈の出生前診断を 行った。また、1000例以上の正常胎児の心磁図の正常 値を集め、体系化した。これらによって致死性不整脈と されるQT延長症候群などを正確に診断できることを世 界で初めて示した。この胎児不整脈診断法の確立は、 子宮内胎児死亡率の低減に貢献するものと評価される。 以上のように、本受賞者らの研究は、超伝導技術を用 いて周産期医学における新しい学問領域の創出に貢 献したものであり、本受賞に値すると考えられる。

③ 富田 優 殿、福本 祐介 殿、石原 篤 殿、 大崎 博之 殿、増田 孝人 殿、 玉田 紀治 殿

「高温超伝導ケーブルを用いた次世代鉄道送電システムの開発」

既に様々な省エネルギー技術が投入されている鉄道 分野において、超伝導直流ケーブルは、今後の一層の 省エネルギー化への切り札となり得る技術である。富田 氏をリーダーとする産学連携チームは、鉄道送電のた めの超伝導直流ケーブルシステムの開発を進めてきた。 鉄道送電に適用するために高温超伝導ケーブルの特 性、安全対策や熱収縮対策を含む超伝導ケーブル設 計と冷却システム信頼性向上、鉄道電力システムにお ける超伝導直流ケーブル運用シミュレーションによる導 入効果検証と広範な要素技術開発に取り組んできた。 それらを組み合わせて5 kA級の超伝導ケーブル(31 m)を鉄道総研構内試験線に敷設し、このケーブルを通 じて給電する形で電車の走行試験を行うことに成功した。 さらに本受賞者らは、直流電化鉄道への超伝導ケーブ ル適用の省エネルギー効果を世界に先駆けて明らかに した。

以上により、この分野での先駆的研究開発を行った 功績は大きい。

④ 鬼頭 豊 殿、市川 裕士 殿、渡部 充彦 殿、 大屋 正義 殿、仲村 直子 殿、 大野 降介 殿

「電力実系統での高温超電導ケーブルシステムの開発 および実証」

受賞者らは、高温超伝導ケーブルシステムを日本で 初めての実系統に接続し1年以上の長期にわたり約7万 世帯に安定に電力を供給する実証試験に成功した。こ のシステムはビスマス系高温超伝導線材を用いた三心 一括型高温超伝導ケーブルと液体窒素を冷媒とする循 環冷却システムを組み合わせたものである。高温超伝 導ケーブルでは均一性に優れる高I。線材の開発、線材 構造・ケーブル構成の最適化による低交流損失化が図 られ、さらに長距離ケーブルシステムを視野に入れた接 続部も設けられた。また、冷却システムでは2台のポンプ と6台の冷凍機の運転調整によって冷媒温度の制御や、 長期運転を想定したポンプ、冷凍機の交換が通電試験 中に行われた。このように、将来のケーブルシステムに 展開可能な技術が試されたことも本試験の特徴である。

システム全体の安定な運転実績は、社会に超伝導 ケーブル導入の効果や信頼性、日本の超伝導ケーブ ルシステム技術の高さをアピールするものであり、その 運転記録は今後の超伝導ケーブルシステムの設計や 高効率運転とその管理に極めて貴重なものとなった。こ のように本試験の成功は、超伝導ケーブルシステム普 及に向けての顕著な成果である。

⑤ 八木 正史 殿、滕 軍 殿、大熊 武 殿、

丸山 修 殿、水谷 照吉 殿、向山 晋一 殿 「275 kV級高温超電導ケーブルの開発および関連絶縁 技術の確立」

超伝導ケーブルは送電容量が大きいほど省エネ効 果が大きいことから、220 kV以上の高電圧超伝導ケー ブルの実用化は地球温暖化対策としてのCO₂排出削減 に大きく寄与することができる。

しかしながら、高電圧ケーブルの実用化には、電気 絶縁に対してより高い信頼性が求められ、現用の電力 ケーブルにおいても長い歴史を経て技術確立が行われ てきた。

受賞者らは、高電圧化に伴う、誘電損失の増加対策、 合理的な高電圧絶縁設計、高電圧低温絶縁技術の確 立などの課題に取り組み、世界に先駆けてイットリウム 系線材を用いた275 kV-3 kAの超伝導ケーブルを開発 した。さらに中国瀋陽市で約1年にわたる試験を実施し、 成功裏に完了した。この中国での実施は、超伝導分野 での大容量送電線という日本の先端技術を中国に広め るだけでなく、欧米や東南アジア諸国においても高く注 目されている。

これらの理由から、超伝導科学技術賞にふさわしい 業績といえる。



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40回シンポジウム/第18回超伝導科学技術賞授賞式 平成26年4月15日 タワーホール船堀

<研究室紹介>

(1) 慶應義塾大学理工学部物理情報工学科的場研究室&神原研究室 Matoba Lab. & Kamihara Lab., Department of Applied Physics and Physico-Informatics, Keio University

(1)研究室構成(H26年4月現在)

教員: 的場正憲教授, 神原陽一准教授 学生: 28名

(2)研究室の簡単な説明

私どもは慶應義塾大学理工学部 物理情報工学科に所属する神原研究室(超伝導物質探索研究室)、及び的 場研究室(電子物理研究室)で形成される研究グループです。主目的は銅酸化物高温超伝導体、鉄系超伝導体 につづく第三の高温超伝導体の発見であり、実験を基盤とした新物質探索/新物性評価を2010年4月より継続し ています。しかしながら、超伝導転移温度50 Kを超す(新)物質群を発見することは、時間のかかるテーマですので、 鉄系超伝導体を利用した短尺線材の試作、及び性能評価(輸送臨界電流密度(J_c)、拡張ビーンモデルを仮定し た磁気モーメント測定による間接測定によるJ_cの測定)などの工学応用上重要な知見を蓄積しながら、研究手段を 広げている最中です。

ところで、d電子軌道やf電子軌道に由来する価電子による状態密度がフェルミ準位に位置する物質は、わずかな組成の変化により光学的、磁気的、電気的性質が大きく変化する特徴があるため、例えば磁性体として盛んに研究された物質が、超伝導体や熱電変換材料として優れていることが門外漢に寄って明らかにされた例は数多くあります。そのような研究目的と異なった機能性を見逃さないための手法、すなわち偶然に頼らないセレンディピティの確立を重要と考えています。

これまでに、高温高圧熱処理、密度汎関数法による電子構造シミュレーション、低温から高温の輸送現象測定、 ⁵⁷Feメスバウワ分光を始めとする超微細構造評価、放射光X線結晶構造解析を新物質に施すことが可能な環境を、 国内外の共同研究を介して小規模ながら構築しました。上述のアプローチは散漫になりがちではありますが。様々 な物理現象を精確に測定する技術の蓄積が、主目的である第三の高温超伝導体の発見につながると信じて、学 生ともども切磋琢磨を継続している研究室グループです。

(3)特徴的な写真(図参照)

(4)これまでの成果と現在のトピックス

- a. 鉄系層状混合アニオン化合物超伝導体の電子状態相図の作製
- b. Powder-in-tube法による鉄系超伝導線材の作製
- c. スタンナイト=クラマイト型カルコゲン化合物の熱電性能評価
- d. マルチアンビルセルを用いた共有結合性化合物へのキャリアドープ
- e. 層状クロム金属間化合物/二次元近藤格子系の電子物理

(5)連絡先

〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1 E-mail: kamihara_yoichi@appi.keio.ac.jp URL: https://sites.google.com/site/2010mklab/ 23棟-305号室(内線番号 47522 / 42522)



(2)大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻 量子生体材料工学領域

Graduate School of Engineering Osaka University Division of Sustainable Energy and Environmental Engineering Quantum Beam and Biomaterials Engineering

(1)研究室スタッフ

教授 西嶋茂宏、 講師 秋山庸子、助教 三島史人

特任研究員 7名 学生 21名

(2)研究室の簡単な紹介

超伝導磁石の実用化を目指しR&Dを行っている研究室です。実用化までに至っている超伝導応用を見てみる と、すべて磁場の利用技術の分野であることに気づきます。次の実用化される超伝導応用の分野も磁場応用となる 可能性が高いと思っています。そこで "磁場利用でさらなる幹となる応用は無いのか?"を基本に置きながら、応 用の可能性を検討しています。

(3)これまでの成果、最近のトピックス

平成12年度には㈱TKXと協力し、近畿通商産業局より助成を受け「<u>半導体工場の無機懸濁廃液磁気清澄シス</u> <u>テム</u>」の開発を行いました[1]。平成13年から4年間NEDOから助成を受け、双葉商事㈱と共同で「超伝導磁気分離 <u>を利用した製紙工場からの廃水処理システム</u>」を開発しました[2]。平成18年度には、やはりNEDOの助成を受け、 日立メディコ、東京女子医科大学、京都大学、日立製作所とともに"<u>磁気誘導DDS(MDDS)による次世代治療シス</u> <u>テム"</u>を検討しました[3,4]。平成20年度には環境省の助成により、日本板硝子エンジニアリング㈱と一緒に<u>"磁気ろ</u> <u>過器によるドラム缶洗浄水の浄化"システム</u>の開発を行いました[5,6]。平成23年度には前田マテリアル㈱に協力し てNEDOから助成を受け"磁気アルキメデス法によるレアアース(酸化セリウム)のリサイクル技術開発及びリサイク ルシステムの構築"を実施しました[7]。いずれも超伝導磁石の強力な磁場を利用した応用です。

最近では、福島の除染(実際はセシウムの濃縮ですが)を磁気分離を用いて行なう実験を行っています。この研究は環境省からの助成を一部受けています。またJSTからの助成を受けつつ、火力発電所の性能維持を超伝導磁気分離で行う試みを始めています。

(4)特徴ある装置

各種開発したシステムは会社に設置されています。(稼働状況は不明ですが。)本研究室に設置されている装置は、10 Tの直径100 mmの室温ボアを持つ超伝導磁石と、3 T(着磁によってはさらに高い磁場維持も可能)のバル

ク超伝導磁石です。また、磁場の低 い領域で実施するためにハルバッハ 型の永久磁石が2基あります。これら の磁石を利用しながら、職員は学生 たちと力を合わせて磁場応用の研究 を行っています。写真は3 Tのバルク 超伝導磁石でアルミニウム粒子を磁 場で吸引しているところです。高勾配 磁場を発生させると、常磁性材料や 場合によっては反磁性材料も吸引す ることができます。バルク磁石ではこ のような現象を直接見ることができま す。ソレノイド磁石ではボアの中の現 象であり、簡便には観察できません。

高勾配磁気分離 (HGNS)



図 バルク超伝導磁石と磁場を利用したアルミニウムの磁気分離

(5)連絡先、ホームページアドレス

西嶋茂宏 Tel: 06-6879-7896 E-mail: nishijima@see.eng.osaka-u.ac.jp 住所: 吹田市山田丘2-1 http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/seeqb/seeqb/

参考文献

- [1] S.Nishijima, Y.Izumi, S.Takeda, et.al, IEEE Trans. Appl. Supercond 13 (2003) 1596.
- [2] S.Nishijima and S.Takeda, IEEE Trans. Appl. Supercond. 16 (2006) 1142.
- [3] S.Nishijima, S.Takeda, F.Mishima, et.al, IEEE Trans. Appl. Supercond. 18 (2008) 874.
- [4] S.Nishijima, F.Mishima, Y.Tabata, et.al, IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 2257.
- [5] F.Mishima, T.Terada, T.Ohnishi, K.Iino, H.Ueda, S.Nsihijima, IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 2165.
- [6] F.Mishima, Y.Akiyama, S.Nishijima, IEEE Trans. Appl. Supercond. 20 (2010) 937.
- [7] F.Mishima, T.Terada, Y.Akiyama, S.Nishijima, IEEE Trans. Appl. Supercond. 21 (2011) 2059.

(3)東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 大崎研究室 The University of Tokyo, Graduate School of Frontier Sciences, Department of Advanced Energy, Ohsaki Laboratory

(1)研究室の概要

電気エネルギーの効率的利用と先進的電磁界応用システムの実現を目指し、超電導体などの先端材料を活用 して、優れた特性を有する電気機器およびシステムの研究を進めています。電磁現象解析や機器設計、これらの 実験的検証、およびシステム検討、フィージビリティ研究などを行い、その対象は、電力・エネルギー分野から交通 輸送、産業応用、医用分野などに広がっています。

(2)研究室構成

大崎博之教授、および大学院生、学部4年生、秘書

(3) 最近の主な研究内容

(a) 電力・エネルギー分野への応用

再生可能エネルギーの導入拡大へ向け、洋上風力発電などへの適用が期待される10 MW級大型風力発電機の検討を行っています。大トルク、超低速回転を特徴とするこのような発電機について、従来技術では達成が極めて困難な軽量・コンパクト構造を目指し、三次元有限要素法を使った電磁界解析に基づく特性評価および発電機概念設計を進め、永久磁石型も含め、各種発電機設計の比較、評価を行ってきました。また、電力系統に連系された超電導風力発電機について、風車やシャフト等の機械的構造や、励磁装置や電力変換装置等の電気機器との相互作用も含めて、発電機の定常および過渡解析を各種条件下で実施し、過渡トルクや交流損失などの解析的な評価も行ってきました。この他、電力系統における事故電流を抑制するための超電導限流器、超電導技術に基づくエネルギー貯蔵システムなどの設計研究、特性解析、モデル実験なども行ってきました。

(b) 交通輸送・産業応用分野への応用

超電導磁気浮上鉄道用の高温超電導マグネットの設計や、鉄道の電力供給システムに超電導ケーブルを適用 することによるシステム損失低減や変電所数削減の可能性等について検討しています。電車に電力を供給する鉄 道変電所の間を、超電導ケーブルによって相互に接続する方式を基本適用形態とし、解析対象の路線を電気回 路モデルによって記述して、MATLAB-Simulinkにより解析しています。電車の駆動特性や空力特性もモデルに取 り入れ、超電導電力ケーブルへの熱負荷および冷凍効率等も仮定して、システム全体での省エネルギー化の可能 性を評価しました。これまでの結果から、超電導ケーブルの導入が回生ブレーキの利用率向上、損失の低減、変 電所数の削減あるいは保守低減などに有効であることが示されています。また、超電導ケーブル導入時の鉄道電 カシステムにおける短絡事故電流を評価し、その抑制方法などについても検討を進めています。

(c) 超電導体の電磁現象

機器に使用される超電導体中の電磁現象を明らかにするために、有限要素法などに基づく電磁界・熱伝導場・ 電気回路等の連成解析ツールを開発し、そのツールや市販のソフトウエアを使って様々な数値解析を行ってきまし た。例えば、RE系バルク超電導体を回転機やMRI、NMR等へ適用することの可能性を探ったり、あるいはRE系線 材や抵抗型限流器の電磁的および熱的特性の解析などを行ったりしてきました。また、RE系超電導線材を、磁界 の空間的均一性と時間的安定性が要求される超電導コイルで使用する場合に問題となる遮蔽電流の影響を実験 的に調べてきました。最近では、バルク超電導体のJ_c-B特性を評価する手法として、バックグランド磁界中での微 小磁界中冷却法による方法を提案し、実験と数値解析に基づいて、その手法の評価や精度向上を進めています。 これらの超電導体の電磁現象に関する実験的研究においては、30 cm径室温ボアを有する5 T無冷媒マグネットを 長年使用してきました(図)。



図 30 cm径室温ボアを有する5 T無冷媒マグネット

(4)連絡先

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 教授 大崎 博之 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5 東京大学新領域基盤棟307 Tel.: 04-7136-5527, FAX: 04-7136-3830, e-mail: ohsaki@k.u-tokyo.ac.jp http://www.ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

(4)名古屋大学大学院工学研究科結晶材料工学専攻 生田研究室 Nagoya University, Graduate School of Engineering, Department of Crystalline Materials, Ikuta Laboratory

(1)研究室スタッフ(平成 26年4月現在)

生田博志教授、畑野敬史助教

(2) 生田研究室における超伝導研究

生田研究室では、様々な機能性材料の示す有用な物性の発現機構の解明に取り組むとともに、将来の応用を 意識した研究も行っている。中でも、超伝導は非常に重要なテーマの1つであり、銅酸化物および鉄系超伝導体の 研究に取り組んでいる。銅酸化物超伝導体については、この数年は主にBi₂Sr₂CuO_{6+x}のSrを希土類(RE)元素で 部分置換すると、同一キャリア量でのT_cがRE元素に依存することに着目し、主に超伝導と擬ギャップ相の関連を調 べてきた。また、より応用に近い研究として、REBa₂Cu₃O₂系の溶融バルク超伝導体を育成し、非常に大きなピン止 め力を持つ材料を開発してきた。この材料開発は一応の区切りが付いているが、その応用として開発した「強磁場 スパッタ装置」を用いた薄膜成長は引き続き行っている。一方、2008年に鉄系超伝導体が発見されてからは、分子 線エピタキシー(MBE)法による鉄系超伝導薄膜の成長にも取り組んでいる。特に、2011年秋からはJSTの国際科 学技術共同研究推進事業(戦略的国際共同研究プログラム)に採択され、生田を日本側代表者として日本6グルー プとEU6グループからなる国際共同研究「鉄系超伝導体デバイスの物理的・工学的基盤の構築」を進めている。

(3)特徴ある装置

現在、2台のMBE装置を使って鉄系超伝導体の薄膜成長に取り組んでいる。1台は6元の蒸着源を持ち、これは現在LnFeAs(O,F)(Ln=ランタノイド元素)の成膜に用いている。もう1台は、写真に示す装置で、5元と3元の二つ

の成長室を備えている。このMBE装置は、現在はAEFe₂As₂系(AE=アルカリ土類元素)の成膜に用いており、成長室が二つある利点を利用して、超伝導接合のために*in-situ*での多層膜作製にも取り組んでいる。



図:2つの成長室を備えたMBE装置。奥に見えるのが制御盤である。

(4)これまでの研究、最近のトピックス

ここでは鉄系超伝導体の薄膜作製に関する研究を紹介する。我々は鉄系超伝導体発見が報告された約半年後の2008年秋から、薄膜成長を開始した。元々は超伝導体の薄膜成長の経験はなかったが、これらの超伝導体が砒素を含むこと、またGaAs等のIII-V族半導体と結晶学的な共通点を有していることなどから、同じ専攻内でIII-V族 半導体等の薄膜成長を行っていたグループと相談しているうちに、共同で薄膜成長を目指した研究を開始すること とした。幸い、同グループにはその時点で使用していなかったMBE装置があったので、これを利用して研究をス タートした。また、成膜する系は、鉄系超伝導体で最もT_cの高いLnFeAs(O,F)とし、Ln元素にはNdを選択した。研 究を開始した当初は、全く相の形成が見られなかったが、様々に原料を変え、あるいは成膜条件を幅広く振り、成 膜を繰り返した結果、100枚ほど成膜したところで、単相のNdFeAsO薄膜の成長に成功した。ところが、初期の薄膜 は全く超伝導転移を示さず、そこからまた大きな山を乗り越える必要があった。最終的にはフッ素をドープしていな いNdFeAsO薄膜上にそのまま*in-situ*でNdOF層を堆積すると、フッ素が拡散してフッ化したNdFeAs(O,F)相が得ら れることを見出した。また、様々な基板で成膜して、特にCaF2基板で高いT_cの薄膜が得られることを見出して、現在 ではバルク体に匹敵するT_cを示す薄膜を成長できるようになった。

2011年初めごろからは、BaFe₂As₂薄膜の成長にも取り組んでいる。特に、T_cが比較的高く、かつ単結晶の研究 で非常に結晶性が高いと報告されていたBaFe₂(As,P)₂に注目し、その成膜に取り組んだ。この系はLnFeAs(O,F)に 比べると成長が容易で、比較的早い時期に単相薄膜が得られた。さらに、基板依存性を調べ、MgO基板上では薄 膜に伸長歪が加わるために相図が全体的にシフトすること、最高のT_cも33 Kと、バルク体よりもわずかだが高いこと などを見出した。また、試料中にFeが過剰に含まれると臨界電流密度 (J_c)が高くなることを見出し、最高で4.2 Kで 10⁷ A/cm²のJ_cを観測した。したがって、この系は応用の面からも非常に有望であると考えている。

さらに、ごく最近ではCaFe₂As₂系の薄膜成長にも取り組んでいる。これまで単相薄膜の報告例はなかったが、Caの蒸気圧が高いことに注意して供給量を調整することで、ごく最近、単相エピタキシャル薄膜を得ることが出来た。この系ではCaの一部をLn元素で置換するとAEFe₂As₂系で最も高いT_cが観測されると報告されており、今後、そのような薄膜の成長にも取り組む予定である。

(5)連絡先、ホームページアドレス等

〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科結晶材料工学専攻 生田博志

Email: ikuta@nuap.nagoya-u.ac.jp

HP: http://iku.xtal.nagoya-u.ac.jp/

(5)国立大学法人 九州工業大学大学院工学研究院 物質工学専攻 エネルギー・超伝導材料学研究室 Kyushu Institute of Technology Department of Materials Science and Engineering Energy and Superconducting Materials Laboratory

エネルギー・超伝導材料学研究室は、古くから「鉄の街」として知られる北九州市において100年以上の歴史を 持つ九州工業大学マテリアル工学科の一研究室として、九州工業大学戸畑キャンパスにおいて研究活動を行って いる。現在のメンバーは教授1名、助教2名、博士研究員1名、修士課程学生11名、学部学生7名(H26.2現在)であり、 九州工業大学内の他グループや電力中央研究所・名古屋大学・東北大学など学外の機関と連携して研究を推進 している。材料科学の知識を用いて高性能エネルギー材料を開発することが研究室の使命であり、超伝導線材高 性能化を目指して超伝導材料開発を行うことに重点を置いている。

活動の詳細

研究では、薄膜作製を中心として構造評価、特性評価、材料設計・解析を行い、超伝導材料の高性能化を行っている。現在扱っている超伝導材料はYBa₂Cu₃O₇(YBCO)、YbBa₂Cu₄O₈(Yb124)、HgBa₂CaCu₂O₆(Hg1212)、Fe(Te,Se)と、酸化物高温超伝導体から鉄系超伝導体まで多岐にわたっている。

薄膜作製にはパルスレーザー蒸着(Pulsed Laser Deposition; PLD)や有機金属分解法(Metal Organic Deposition; MOD)を用いている。薄膜X線回折装置(X-ray diffraction; XRD)を用いて作製した薄膜の配向性や格子定数を評価している。さらに走査型電子顕微鏡(Scanning electron microscopy; SEM)を用いて、表面・断面観察や電子後方散乱回折(Electron Backscatter Diffraction; EBSD)による方位解析を行っている。また透過型電子顕微鏡(Transmission electron microscopy; TEM)を用いたナノ組織観察も他研究グループと連携しながら進めている。特性評価においては、物理特性評価装置(Physical Property Measurement System; PPMS)を用いて薄膜の臨界電流密度(*J*_c)を温度・磁場・磁場角度を変化させながら測定し、ピンニング特性を測定している。材料設計・解析を行うために、第一原理計算(The Vienna Ab initio simulation package; VASP)を導入し、自由エネルギー計算による熱力学観点からの薄膜構造の設計・解析やバンド計算による超伝導特性の解析などを進めている。これらの結果を薄膜作製にフィードバックし、より高い性能を有する薄膜の作製を目指している。

主な研究テーマ

・J。向上を目指した新規人工ピン(Artificial Pinning Center, APC)開発

APCの開発は10年以上にわたって研究を続けている研究室の基幹テーマである。高性能YBCO線材の開発に おいてJ。の向上は今なお求められており、APCの制御が不可欠である。APCとしてナノロッドやナノ粒子を開発して きたが、現在はナノロッドに加えナノ粒子などの第二のAPCを導入したハイブリッドAPCに着目している。ナノロッド やナノ粒子単独では磁束制御に限界があることがわかってきたが、ハイブリッドAPCを用いればJ。値を向上させJ。 異方性を抑制することが可能になると考えられる。またハイブリッドAPCにより新しい磁束状態を実現し、それを解 析することにより磁束挙動の理解を深めることも目的の一つである。

BaSnO₃(BSO)ナノロッドに加えY₂O₃ナノ粒子を導入したYBCO薄膜を作製した。このハイブリッドAPCにおいてナノロッド及びナノ粒子の密度を制御することにより、高磁場でのJ_c値及びJ_cの異方性を改善することに成功した。

またYBCO+BSOとPrBa₂Cu₃O₇(PrBCO)の多層膜を作製することによりナノロッド+ナノレイヤーというハイブリッド APCを作製した。PrBCO層の厚さを厚くしたりYBCO+BSO層の厚さを薄くしたりすると磁束構造が変化し磁束ピン ニングが弱められていくことが分かった。

今後も引き続きハイブリッドAPCのさらなる構造制御を進めていく予定である。

・シミュレーションに基づく超伝導材料の解析

APCの要素ピン力はJ_cに支配的なパラメータでありAPCの界面状態に大きく依存するため、APCの界面状態の 解析が必要である。しかし界面構造は複雑であり、界面で何が起こっているかということを理解する必要がある。ま たキャリア変化や圧力印加により電子状態がどのように変化するかということは臨界温度(T_c)制御に向けて明らかに する必要がある。これらを計算機シミュレーションを用いて解析している。

界面構造の理解を目的として、第一原理計算、分子動力学(Molecular Dynamics; MD)計算、有限要素法 (Finite Element Method; FEM)応力ひずみ計算を行っている。FEMによりYBCO+BSO薄膜ではナノロッドに平行 な方向に弾性ひずみが存在していることが分かった。MD計算によりナノロッド界面には構造の乱れが存在すること が明らかになった。現在第一原理計算により界面での組成変化を計算している。今後これらの結果を統合的に解 析し、界面構造の理解を進めていく。

また第一原理計算によりY124やHg1201に圧力を印加したときのバンド計算を行っている。フェルミエネルギー近傍での状態密度の圧力に対する変化を解析し、T。制御に有効な材料及び条件を探索している。

・Yb124 薄膜における圧力効果

Y124は圧力によりT。が大きく増大しT。が100 Kを超える可能性があることが報告されている。この圧力効果を薄膜において実証することでT。の高い(>100 K)線材を開発できる可能性がある。そこでYb124薄膜の圧力効果実験を進めている。

PLDやMODでプリカーサを作製した後熱処理を行うex-situ法でYb124薄膜を作製した。XRDからYb124がエピ タキシャル成長していることを確認した。

九州工業大学基礎科学研究系の美藤教授の圧力印加実験の結果、Yb124薄膜において数KのT_c上昇を確認した。

・Hg1212 薄膜の作製プロセスの開発

従来線材よりも高いT。を有する120 K級超伝導線材を開発することを目的としてHg1212の薄膜作製プロセスの開発を行っている。

まず薄膜作製時に必要なHg1212ペレットを、グローブボックスと真空封入を用いて作製した。作製したHg1212ペレットはT_c =118 Kであることがわかった。RE212プリカーサ膜にHg1212ペレットからHgを導入するex-situプロセスによりHg1212薄膜を作製した。XRDからHg1212薄膜がエピタキシャル成長していることを確認した。今後、超伝導特性の解析を進め、120 K級超伝導線材の実現に向けてさらなる特性制御を進める。

連絡先

〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1 国立大学法人 九州工業大学大学院工学研究院 物質工学研究系 教授 松本 要 matsu@post.matsc.kyutech.ac.jp

研究会の動き

〔平成 26 年 (2014 年) 1 月 1 日~平成 26 年 (2014 年) 3 月 31 日〕

賞審査委員会

平成25年度第2回

- 日 時:平成26年2月5日(水)13:30~15:30
- 場 所:学術総合センター11階 共用会議室 出席者:委員9名
 - 事務局1名
- 議事:第18回超伝導科学技術賞の確定第18回超伝導科学技術賞の授賞理由の検討

幹事会

- 平成25年度第6回
- 日 時:平成26年2月5日(水)15:45~17:30
- 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:第83回ワークショップについて
 第40回シンポジウムについて
 第18回超伝導科学技術賞について
 平成26年度事業計画について
 FSST NEWSについて
- 第83回ワークショップ
- 日 時:平成26年3月10日(月)13:30~17:45
- 場 所:全日通霞が関ビル 8階 大会議室B
- テーマ:「多ピクセル超伝導検出器で探る材料、 核物質、宇宙の謎」

参加者数:33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 小原 春彦(産業技術総合研究所)】
- 13:35-13:50「イントロダクトリー」

日高 睦夫(産業技術総合研究所)

13:50-14:20「100ピクセル検出器実現技術とその 問題点」

浮辺 雅宏(産業技術総合研究所)

- 14:20-14:50「SFQ回路を用いたデジタル多重化」 吉川 信行(横浜国立大学)
- 14:50-15:20「マイクロ波共振に基く周波数多重読出」神代 暁(産業技術総合研究所)
- 【座長 日高 睦夫(産業技術総合研究所)】
- 15:40-16:20「電子顕微鏡による材料解析への超伝導 検出器の応用と多ピクセル化への期待」 原 徹(物質・材料研究機構)
- 16:20-17:00「ガンマ線TESによる放射能計測」 高橋 浩之(東京大学)
- 17:00-17:40「超伝導検出器による宇宙観測」満田 和久(宇宙航空研究開発機構)
- 17:40-17:45 閉会の挨拶木村 茂行(未踏科学技術協会)

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/春季	H26.5.26~5.28	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	H26.9.17~9.20	北海道大学 札幌キャンパス (北海道札幌市)	応用物理学会

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
27th International Conference on Low Temperature Physics	2014.8.6~8.13	Buenos Aires (Argentina)	http://lt27.df.uba.ar/
ASC2014	2014.8.10~8.15	Charlotte, NC (USA)	http://ascinc.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 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	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

イットリウム系超電導線材 **Fujikura**

高温超電導のベストサプライヤー

■ 特長

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





■ 線材構造



■ 標準仕様

- ▶ 線材幅(5mm, 10mm)、金属基板厚さ(75µm, 100µm)に応じた製品ラインアップ
- ▶ 標準臨界電流 Ic>500A/cm-wide@77K, 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 [µm]	安定化層 [µm]	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 TEL 043-484-3048 FAX 043-484-2472 Web http://www.fujikura.co.jp

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