

FSST NEWS

発行

(社)未踏科学技術協会
平成22年4月26日発行

〒105-0003

東京都港区西新橋 1-5-10

新橋アマノビル 6階

Tel : 03-3503-4681

Fax : 03-3597-0535

Email: fsst@sntt.or.jp

Forum of Superconductivity

Science and Technology News

No. 125

<トピックス1>

ナノ粒子が分散したY系超電導線材の 透過型電子顕微鏡観察

Transmission electron microscopy study of
yttrium based coated conductors with nano
sized particles

(財)ファインセラミックスセンター ナノ構造研究所
加藤 丈晴、平山 司
Nanostructures Research Laboratory,
Japan Fine Ceramics Center
T. Kato and T. Hirayama

1. はじめに

Y系超電導線材は、図1に示すように、金属テープ基板上に高2軸配向のセラミックス中間層、さらに超電導層が積層された構造になっている。この積層構造には異相界面が存在し、線材の製造プロセス中に反応層が界面に形成されたり、基板構成元素が異相界面を貫き超電導層まで拡散することがある。さらに、超電導層は配向結晶により構成され、その結晶配向、結晶粒界、結晶欠陥、粒内および粒界に形成される第2相等は超電導特性と密接に関係がある。これらの微細構造及び組成分布を明らかにすることは、より高性能な超電導線材を開発する上で極めて重要である。透過型電子顕微鏡(Transmission electron microscopy; TEM)の空間分解能はサブナノメートルを達成しており、図1に示した微細構造や組成分布を直接観察することが可能である。

以上のような構造を有するY系超電導線材であるが、近年、数100 m~1 km級の長尺線材の開発が盛んに行われている[1]。これらの線材は、超電導電力貯蔵システム(SMES)、超電導変圧器、超電導ケーブル等の超電導機器開発に用いられている。Y系線材は液体ヘリウム(4.2 K)よりさらに高温の液体窒素中(77 K)で超電導

となり、臨界電流(I_c)が高いため、Y系線材を用いた超電導機器では、機器全体のコンパクト化も期待できる。しかしながら、これらの機器では、Y系線材が高磁場に曝され、 I_c が低下する問題がある。この I_c 低下を抑制するため、超電導層に人工ピンニングセンターとしてナノ粒子を分散させる試みがなされている[2-8]。特に、レーザー蒸着(Pulsed laser deposition; PLD)法では、超電導層中にナノロッド[2, 4-6]を形成することが可能であり、有機酸塩塗布熱分解(Metal organic deposition; MOD)法では超電導層中にナノ粒子[7,8]を分散させることが可能である。透過型電子顕微鏡を用いれば、これらのナノロッドおよびナノ粒子の構造、分布、組成等を解析することができる。本稿では、PLD法により成膜されたBaZrO₃(BZO)ナノロッドが分散したYBa₂Cu₃O_{7-x}(YBCO)層[6]および、MOD法により形成されたBZOナノ粒子が分散したY_xSm_{1-x}Ba₂Cu₃O_{7-y}(YSmBCO)層[8]のTEMによる微細構造解析の例について述べる。

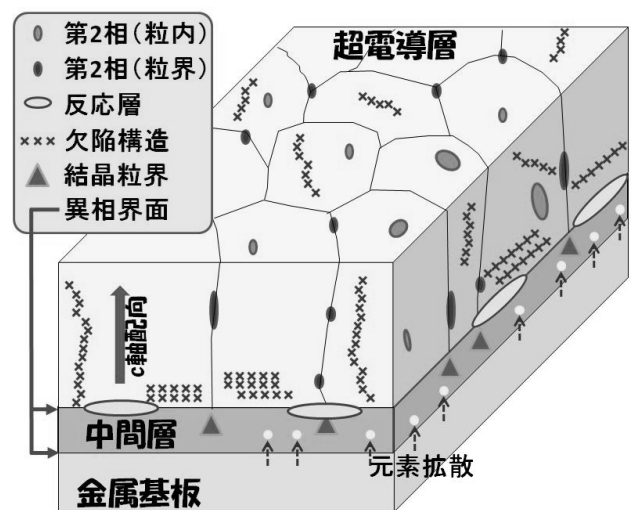


図1 イットリウム系超電導線材及び欠陥構造の模式図

2. BZO ナノロッドが形成された PLD-YBCO 層

基板に $\text{CeO}_2/\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 中間層 [9,10] が成膜された Hastelloy テープを用いた。イットリウム安定化ジルコニア (YSZ) が 2 vol% 混合した YBCO ターゲットを用いて、PLD 法により YBCO 層を基板上に成膜した [4]。以上のように成膜された YBCO 層を TEM 観察するため、集束イオンビーム (Focused ion beam; FIB) 法によりサンプルを薄片化し、さらに、薄片化サンプル表面に形成された FIB ダメージ層を除去するため、Ar イオンビームを照射し TEM 観察用サンプルに仕上げた [11]。

図2に CeO_2 上に形成された BZO ナノロッドが分散した YBCO 層の断面 TEM 像を示す。図2の矢印は YBCO 結晶の粒界を示す。YBCO 結晶内部に連続した斑点が観察される。さらに、図3に YBCO 層から得られた電子回折図形を示す。電子回折図形から YBCO は c 軸配向結晶であることが分かる。また、図3には、BZO に対応する回折斑点が現れていることから YBCO と BZO との間に、以下のような結晶学的方位関係が存在する。 $(100)\text{YBCO} // (100)\text{BZO}$ 、 $(001)\text{YBCO} // (001)\text{BZO}$ [6]。以上のような結晶学的方位関係から、BZO が存在する領域は、YBCO と BZO が重なりモアレ縞として現れる。

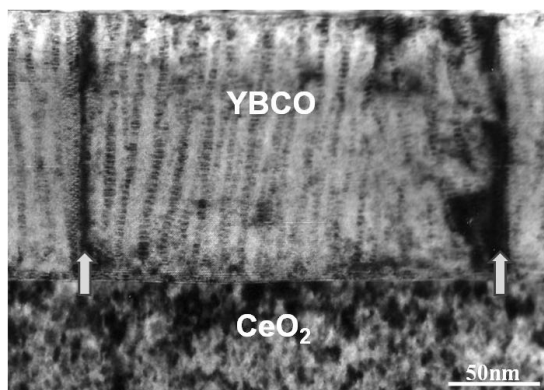


図2 BZO ナノロッドが分散した YBCO 層の断面 TEM 像

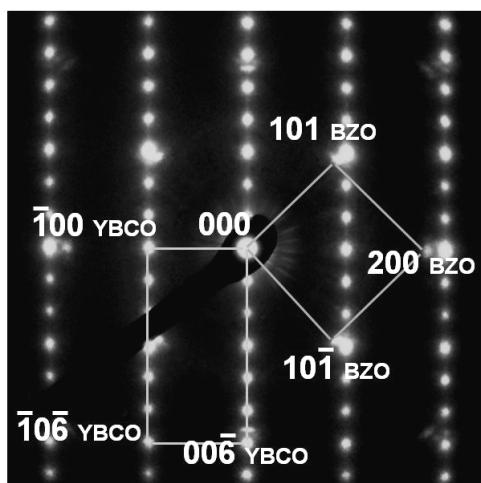


図3 BZO ナノロッドが分散した YBCO 層から得られた電子回折図形および YBCO と BZO の面指数

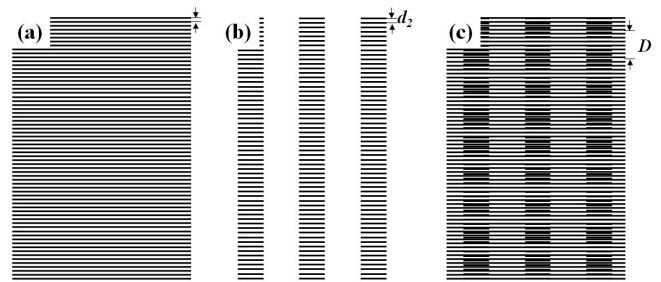


図4 (a) YBCO の格子 d_1 、(b) BZO ナノロッドの格子面間隔 d_2 、(c) YBCO と BZO ナノロッドがオーバーラップして現れるモアレ縞間隔 D

モアレ縞とは図4で示すように、格子面間隔が異なる2種類の結晶が重なる際に現れる縞である。1つの結晶の面間隔を d_1 、もう1つの結晶の面間隔を d_2 、互いの結晶のなす角を θ とすると、モアレ縞間隔 D は次のように表記することができる。

$$D = d_1 d_2 / |d_1 - d_2| * \cos \theta$$

d_1 と d_2 にそれぞれ、YBCO、BZO の格子定数を代入して導かれるモアレ縞間隔 D と図2の斑点の間隔がほぼ一致することから、BZO はナノロッドとして CeO_2 直上から YBCO 層表面まで存在し、ほぼ基板鉛直方向に揃っていることが分かる [6]。

次に、このサンプルの平面 TEM 像を図5に示す。図5から、BZO ナノロッドはおよそ 5 nm 径であり、YBCO 層中に均一に分布していることがわかる。さらに、図6に BZO ナノロッドの高分解能写真を示す。BZO と YBCO の格子ミスフィットはおよそ 8% である。そのため、図6の矢印で示すように YBCO に余分な面を形成し、BZO が存在していることが分かる。以上のような断面および平面 TEM 観察から、BZO ナノロッドは YBCO の c 軸方向にほぼ揃っており、YBCO 層中に均一に分布していることがわかった。このサンプルに YBCO の c 軸方向から磁場が進入した場合、ナノロッドが形成されていないサン

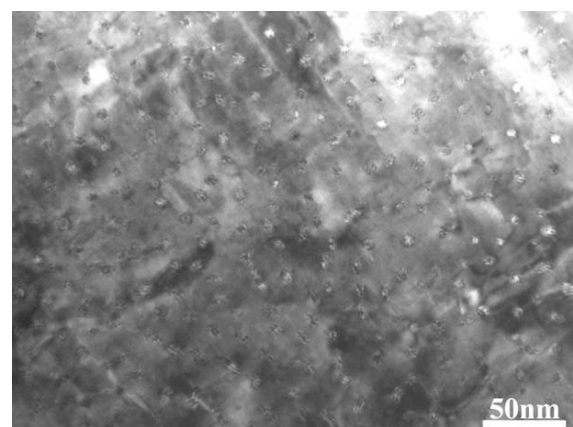


図5 BZO ナノロッドが分散した YBCO 層の平面 TEM 像

プルに比べ、 I_c の低下が抑えられている[4,6]。その理由は BZO ナノロッドの分布が大きく関与していると結論できる。

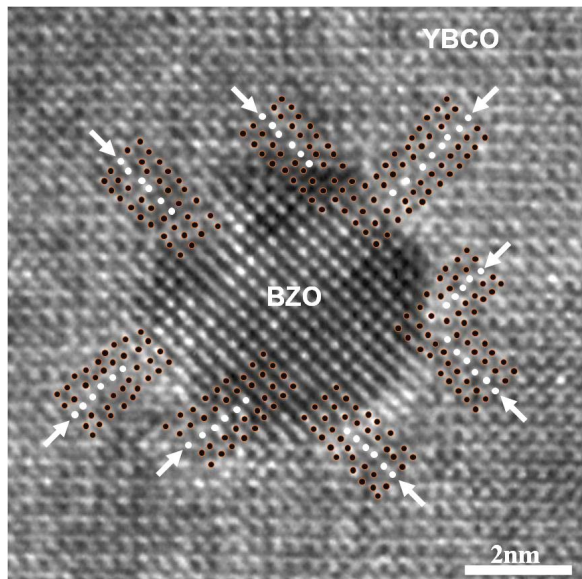


図 6 BZO ナノロッドの高分解能像

3. BZO ナノ粒子が分散した MOD-YSmBCO 層

基板は2節で記した基板と同様の Hastelloy テープを用いた。Y、Sm、Ba および Cu のトリフルオロ酢酸塩に 1 wt% のジルコニアナフテン酸塩を加えた MOD 溶液を用いた。MOD 溶液は、YSmBCO の化学量論組成より、やや Ba 不足の組成である。この溶液を用いて、塗布、乾燥の仮焼プロセスを数回繰り返し、本焼プロセスを行い、YSmBCO 層を形成した[7]。以上のように作製されたサンプルを TEM 観察するため、前述のサンプルと同様に、FIB による薄片化と、その後 Ar イオンによるクリー

ニングを行い、TEM 観察サンプルに仕上げた[11]。

図7に BZO ナノ粒子が分散した YSmBCO 層の断面 TEM 像を示し、TEM 像の A~D 領域から得られた電子回折図形を(i)~(iv) に示す。YSmBCO 層のほとんどは c 軸配向結晶により構成されている。YSmBCO 層内部には平均粒子径150 nm の $(Y,Sm)_2Cu_2O_5$ (225) 相がいくつか存在する。さらに、およそ20 nm 径の BZO 粒子が分布している。これら225相および BZO ナノ粒子の結晶方位はランダムであり、回折コントラストの影響で、不均一なコントラストとして現れる。また、YSmBCO 層と CeO_2 層との間の一部に、 $BaCeO_3$ が形成されている[8]。

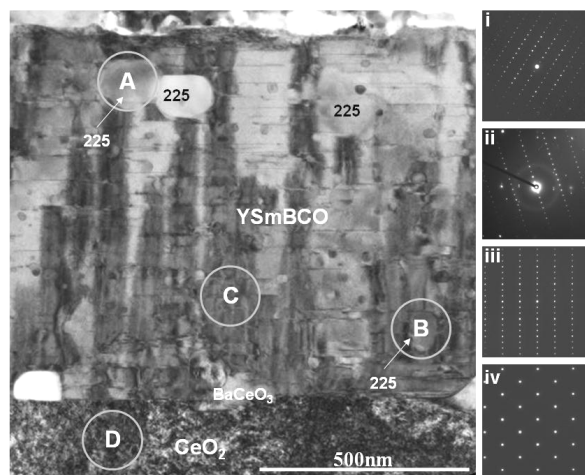


図 7 BZO ナノ粒子が分散した YSmBCO 層の断面 TEM 像

図8(a)-(g)に Zr、Y、Sm、Ba、Cu、O、Ce の EDS 元素マップおよび、図8 (h) に元素マッピングを行った領域の TEM 像を示す。これら結果から、Zr を含む粒子が YSmBCO 層全体に均一に分布していることが分かる[8]。

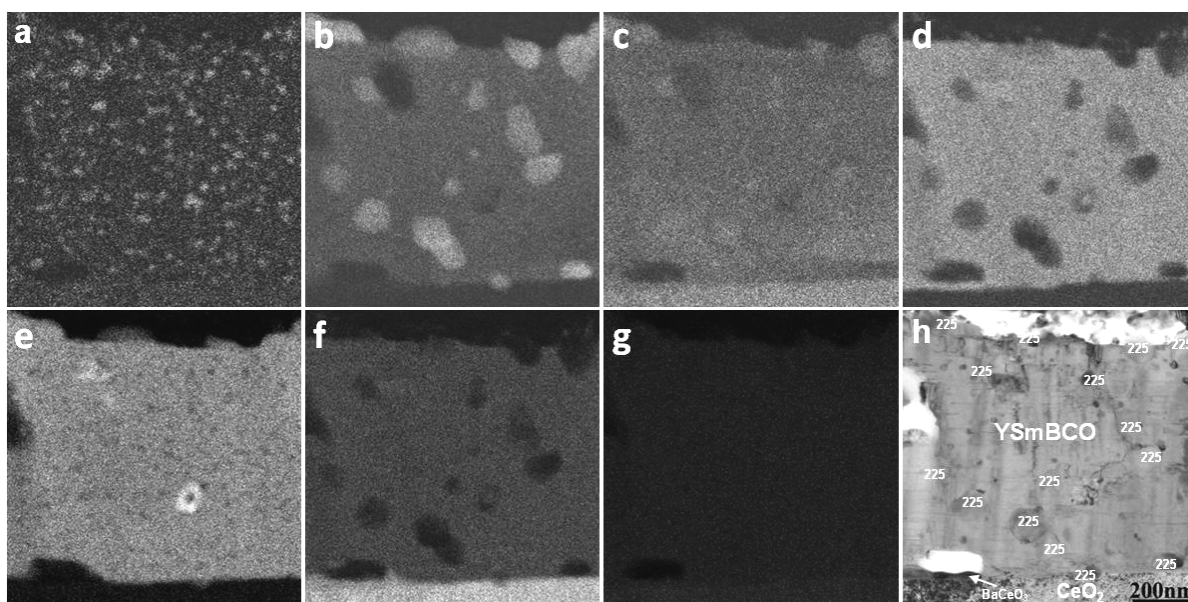


図 8 EDS 元素マッピング結果。(a)Zr、(b)Y、(c)Sm(d)Ba、(e)Cu、(f)O、(g)Ce マップおよび (h)EDS マッピングを行った領域の TEM 像

しかしながら、図7のTEM像、およびEDSマッピングの結果のみでは、正確にナノ粒子をBZOと同定できたわけではない。そのため、Zrを含む粒子からナノビーム電子回折図形を撮影する試みを行った。

図9(a)に、矢印で示しているおよそ15 nm径の粒子のTEM像、図9(b)に(a)の領域のZr元素マッピング、図9(c)に(a)にて矢印で示した粒子の拡大TEM像、図9(d)に粒子から得られたナノビーム電子回折図形および、BZOの面指数を示す。このナノビーム電子回折図形からBZOの[110]入射であることが判明し、Zrを含むナノ粒子がBZOであると同定できた[8]。

Y系超電導層は、その結晶の異方性により、 I_c の磁場侵入角度依存性が知られている。しかしながら、本節で紹介したBZOナノ粒子が分散したYSmBCO層では、 I_c の磁場侵入角度依存性が極めて小さくなっている[7]。高磁場中において、YSmBCO層に均一に分散したBZOナノ粒子が3次元ピンニングセンターとして有効に働いており、高磁場中の I_c 特性が改善できたと考えられる[7,8]。

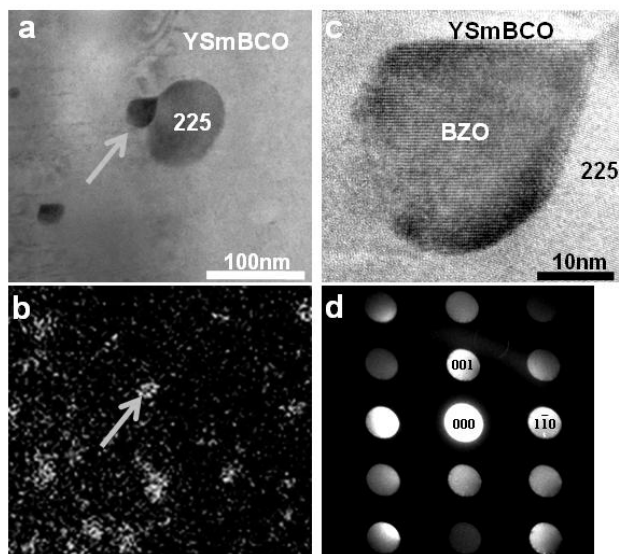


図9 (a) およそ 15nm 径の粒子 (矢印) の TEM 像、(b) (a) の領域の Zr 元素マッピング、(c) (a)にて矢印で示した粒子の拡大 TEM 像、(d) (c)の粒子から得られたナノビーム電子回折図形および BZO の面指数

4. まとめ

超電導層内部にBZOナノロッドおよびBZOナノ粒子を分散させ、高磁場中で超電導特性が改善された超電導線材のTEM観察結果について紹介した。前述のように超電導特性とその微細構造の間には密接な関係があり、TEMを用いれば、超電導層の微細構造を直接観察できる。そのため、超電導特性を理解する上で、極めて有効な評価方法であるといえる。また、以上のような超電導層の微細構造解析結果から、超電導線材の設

計指針も得ることが可能である。今後も高性能な超電導線材を開発する上で、TEMによる微細構造解析技術は重要な役割を果たすと思われる。

謝辞

本稿で紹介した研究成果は、イットリウム系超電導電力機器技術開発業務の一環として、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ある。

参考文献

- [1] M. P. Paranthaman and T. Izumi, MRS Bull., **29** (2004) 533-541.
- [2] J. L. M. Driscoll, S. R. Foltyn, Q. X. Jia, H. Wang, A. Serquis, L. Civale, B. Maiorov, M. Hawley, M. P. Maley, D. E. Peterson, Nature Materials, **3** (2004) 439-443.
- [3] T. Haugan, P. N. Barnes, R. Wheeler, F. Meisenkothen, M. Sumption, Nature, **430** (2004) 867-870.
- [4] Y. Yamada, K. Takahashi, H. Kobayashi, M. Konishi, T. Watanabe, A. Ibi, T. Muroga, S. Miyata, T. Kato, T. Hirayama, Y. Shiohara, Appl. Phys. Lett., **87** (2005) 132502.
- [5] M. Mukaida, T. Horide, R. Kita, S. Horii, A. Ichinose, Y. Yoshida, O. Miura, K. Matsumoto, K. Yamada, N. Mori, J. J. Appl. Phys. Part 2-Lett. & Exp. Lett., **44** (2005) L952-L954.
- [6] T. Kato, H. Sasaki, Y. Gotoh, Y. Sasaki, T. Hirayama, K. Takahashi, M. Konishi, H. Kobayashi, A. Ibi, T. Muroga, S. Miyata, T. Watanabe, T. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, Phys. C, **445-448** (2006) 628-632.
- [7] M. Miura, T. Kato, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, T. Hirayama, Appl. Phys. Express, **1** (2008) 51701.
- [8] T. Kato, M. Miura, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, T. Hirayama, Y. Shiohara, J. Electron Microsc., in printing.
- [9] T. Muroga, T. Watanabe, S. Miyata, H. Iwai, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, T. Kato, H. Sasaki, Y. Sugawara, T. Hirayama, Phys. C, **412-414** (2004) 807-812.
- [10] T. Kato, T. Muroga, Y. Iijima, T. Saitoh, T. Hirayama, I. Hirabayashi, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, Y. Ikuhara, Phys. C, **412-414** (2004) 813-815.
- [11] H. Sasaki, T. Matsuda, T. Kato, T. Muroga, Y. Iijima, T. Saitoh, F. Iwase, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, T. Hirayama, J. Electron Microsc., **53** (2004) 497-500.

<トピックス 2>

S-イノベで動き出す超伝導システム研究

Big step towards superconducting system development by JST's "Strategic Promotion of Innovative Research and Development" (SPIRE)

科学技術振興機構・住友電気工業(株)
佐藤 謙一
Japan Science and Technology Agency
Sumitomo Electric Industries, Ltd.
K. Sato

1. はじめに

科学技術振興機構の新しい制度“産学イノベーション加速事業 戦略的イノベーション創出推進(略称:S-イノベ)”のテーマである「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」は超伝導の持つ低損失、高密度電流、高磁場、高速性、高感度などの特性に基づいた新しい機器、システムの生まれる可能性を考慮し、これまでのさまざまな研究開発プロジェクト成果を最大限活用するとともに、長期的視点のもとで実用機器・システムにつながる研究開発とあわせて超伝導応用の学術的・技術的基盤の着実な構築を目指すものです。

この背景としては、図1に示すように高温超電導線の開発が進み、工業材料として考えられる特性評価指数が300,000 Amと量産レベルで達したこと、また応用製品の開発までには図2に示すように応用基礎研究から要素技術、プロトタイプの開発へと長期間を要すること、今後の新産業の創出のためにはサイエンスに支えられたブレークスルーが必要なことがあります。

高温超伝導材料とその応用の推進を大学などの基礎研究と企業の研究開発を並行させる産学連携による効率的な研究開発推進体制を構築し、合計で最長10年の3つのステージ;応用基礎研究(ステージⅠ、全額委託)、要素技術の研究開発(ステージⅡ、全額委託)、アプリケーションの研究開発(ステージⅢ、マッチングファンド)を1つの制度でサポートします。この制度の考え方を図3に示します。

アプリケーションとしては、エネルギー・環境、産業・輸送、医療・バイオ、センシング、情報・通信の各分野を含みます。具体的な例としては、直流電力ケーブル(再生可能エネルギーとの連系、都市内・ビル内・鉄道用、水素利用との連携など)、回転機(風力発電機、船舶用、自動車用や産業用モータなど)、磁気分離、加速器、

MRIやNMRなどの高磁場応用、SQUID、エレクトロニクス回路、などの機器・システムおよびそれに必要な材料高度化を対象として公募しました。

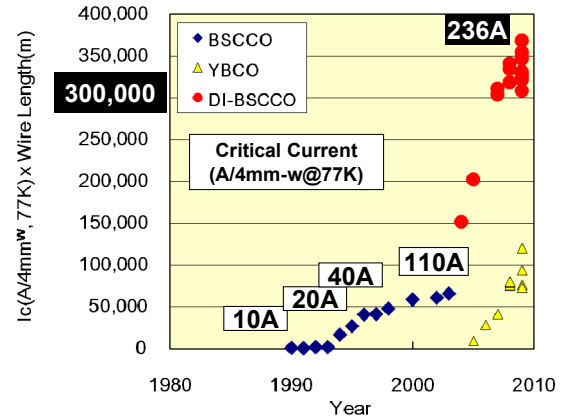


図1 高温超電導線の歩み

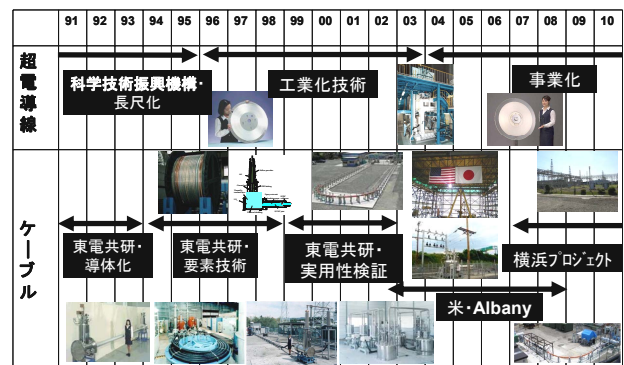
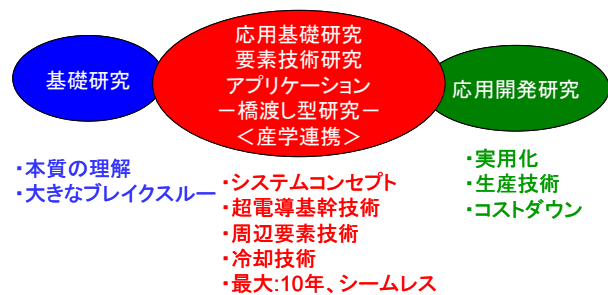


図2 高温超電導応用製品の歩み(ケーブルの例)



・“新しい産業創出の礎を築く”
・高温超電導のフロンティアを切拓く・日本が主導

図3 超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出

2. 運営の方針

人類社会の発展や地球規模のさまざまな問題の解決に資するため、高温超伝導のポテンシャルを最大限引き出し、超伝導システムとして新しい産業創成の礎を築き、さらにその技術の普及による新産業の創出を望みう

る地平を切り開きます。

エネルギー・環境、産業・輸送分野では、低炭素時代の実現を目指した電力・エネルギー基盤技術や世界規模の再生可能エネルギー利用のための基盤技術および超伝導の持っている省エネルギー基盤技術からアプリケーション技術への転換を目指します。医療・バイオ、センシング、情報・通信分野では、高齢化社会や地域の医療を支える超伝導医療機器の基盤技術や生命科学者が容易にアプローチできる情報技術を駆使した超伝導科学基盤計測技術の構築、実現を目指します。いずれも新しいコンセプトに基づいた超伝導応用のフロンティアを切り開くものが期待されます。

期待される10年後の姿としては、材料基礎研究から実用機器研究開発をつなぐ実用基盤研究および学術研究の高度化を狙い、成果としては、2050年超伝導社会の実現が見通せる高温超伝導応用システムの実用基盤技術の確立とプロトタイプ製作・試験です。例えば、マーケット競争力のある機器開発につながる研究成果、システムに最適な実用材料の研究成果、ターゲットシステムを想定しながらもさまざまな機器・システムに共通となる実用技術基盤となる研究成果があります。

また各課題共通となる冷却技術についても検討の場を設けるとともに、複数課題の研究開発の成果を共有しより効果的・効率的な開発が可能な場も設けてゆきます。

3. 課題選定結果

先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出に関する研究提案を広く募り、新しいコンセプトに基づいた超伝導応用のフロンティアを切りひらくものを期待しました。その結果、電力・エネルギーシステム、回転機、加速器、医療や先進分析機器、などテーマに相応しい多岐にわたる優れた応募がありました。

本テーマでは、表1に示す関連の多様な分野の専門家であるアドバイザー8名に協力いただき、採択課題の選考を行いました。応募の15件を対象に、書類選考により面接選考対象として9件を選び、最終的に5件の採択に至りました。

その結果、採択された研究内容は、表2に示すとおり船舶用回転機に関する提案が1件、鉄道分野に関する提案が1件、加速器に関する提案が1件、NMRに関する提案が1件、SQUIDに関する提案が1件となりました。結果として、移動体分野、医療応用、センシングからエレクトロニクス分野までのバランスのとれた構成になったと考えております。

プロジェクト終了後の成果として、2050年超伝導社会の実現が見通せる高温超伝導応用システムの実用基盤技術の確立を目指し、応用基礎研究から産業の礎となる要素技術開発、アプリケーションの研究開発まで、着実な進展を得ていかなければならないと考えます。

表1 アドバイザー

役職	氏名	所属機関・役職
プログラムオフィサー	佐藤 謙一	住友電気工業株式会社 フェロー、 材料技術研究開発本部 超伝導担当技師長
アドバイザー	岡部 洋一	放送大学 副学長
	上岡 泰晴	大陽日酸株式会社 顧問
	木村 錫一	愛媛大学 名誉教授
	谷口 治人	東京大学 大学院工学系研究科 特任教授
	塚田 啓二	岡山大学 大学院自然科学研究科 教授
	濱島 高太郎	東北大学 大学院工学研究科 教授
	堀上 徹	社団法人 低温工学協会 副会長
	山田 忠利	菱電化成株式会社 相談役

表2 採択された研究内容

課題名	PM(プロジェクトマネージャー): 課題の取りまとめ役	開発リーダー	所属
		研究リーダー	
高温超伝導SQUIDを用いた先端バイオ・非破壊センシング技術の開発	○	神島 明彦 園福 敬二	株式会社 日立製作所 九州大学
大出力超伝導回転機器に向けたキーハードの開発	○	柳本 俊之 塚本 修巳	川崎重工業株式会社 横浜国立大学
高温超伝導を用いた高機能・高効率・小型加速器システムへの挑戦 ―医療用加速器から実用化し、将来のエネルギー・環境分野への応用展開、ニュートロニクス/ミュオニクスといった新産業創出を見据えて―	○	吉行 健 雨宮 尚之	株式会社 東芝 京都大学
高温超伝導材料を利用した次世代NMR技術の開発	○	末松 浩人 木吉 司	日本電子株式会社 独立行政法人 物質・材料研究機構
次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション	○	富田 優 北口 仁	財団法人 鉄道総合技術研究所 独立行政法人 物質・材料研究機構

(1) 高温超伝導 SQUID を用いた先端バイオ・非破壊センシング技術の開発に向けて
Development of advanced HTS SQUID system for biological diagnosis and nondestructive evaluation

九州大学
 圓福 敬二
 Kyushu University
 K. Enpuku

1. 始めに

科学技術振興機構の「戦略的イノベーション創出推進事業」において、「高温超伝導 SQUID を用いた先端バイオ・非破壊センシング技術の開発」の研究課題が採択された。本稿では、本課題の概要について紹介する。

2. 研究課題の概要

SQUID 磁気センサの高感度性を用いることにより、従来に無い高性能性と新機能を有する先端センシングシステムの開発が可能となる。既に、低温超伝導 SQUID は先端科学計測の分野で大きな実績を有しているが、産業応用への展開を可能とするためには、高温超伝導を用いた SQUID センシングシステムの開発が不可欠である。しかしながら、高温超伝導 SQUID は低温のそれ

に匹敵する高い性能を持つことが理論的には示されているものの、作製プロセス等が未熟なため、その潜在的な性能は充分には引き出されていない。また、ピコテスラ程度の微弱磁界を高精度に計測し、この結果を再構成して機能・診断情報を得るため磁気イメージング技術の開発も不十分である。このため、高温超伝導 SQUID の応用システムへの展開が制限されているのが現状である。

従って本研究では、高温超伝導 SQUID 磁気センサのポテンシャルを最大限引き出すことにより、低温 SQUID に匹敵する高感度性と高い信頼性を持つ SQUID システムを開発し、種々の産業応用へ展開することを目的としている。研究課題の概要を図1に示す。研究課題の目標の一つは産業応用が可能な高性能で信頼性の高い高温超伝導 SQUID システムの開発である。このために、積層化技術を用いて高感度で耐磁場特性に優れた高温超伝導 SQUID を開発する。また、雑音除去法や磁界補償法などを高度化し、磁場中動作が可能なセンサシステムを開発する。

もう一つの目標は、SQUID と先端磁気イメージング手法を用いたバイオ・非破壊技術の開発である。すなわち、医療診断や再生医療のためのバイオセンシング技術を開発し、免疫検査、培養心筋細胞検出、心磁検出、および超低磁場 MRI への応用展開を図る。また、エネルギー分野で重要となる電池や農業分野で重要となる水分の分析・評価のための非破壊検査システムを開発する。

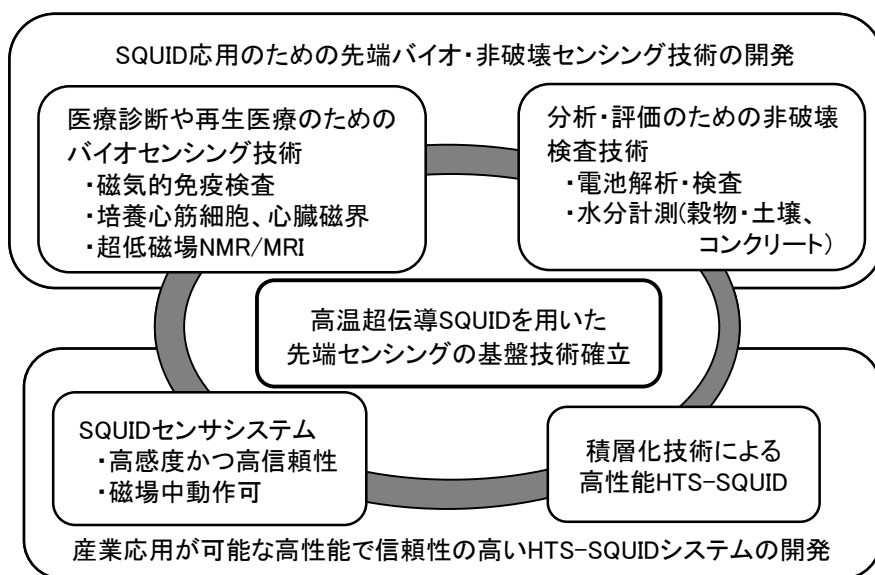


図1 研究課題の概要

これらのプロトタイプの開発・評価を通して、従来にない高性能と新機能を有する先端バイオ・非破壊センシング技術を開拓し、超伝導センシング機器の基盤技術を確認することを目標としている。また、磁気計測による診断・機能情報の検出を通して、磁気医学、磁気バイオ、磁気化学、及び磁気分析・検査などの新しい学際分野の開拓も目指している。

3. 研究計画

本研究の開発体制を図2に示す。参画している研究機関と機関毎の代表者は、九州大学(圓福敬二、PM, 研究リーダー)、日立製作所(神鳥明彦、開発リーダー)、日立ハイテクノロジーズ(鈴木博之)、(財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)(安達成司)、岡山大学(塚田啓二)、豊橋技術科学大学(田中三郎)であり、6機関の共同研究により研究課題を推進していく予定である。

本研究では、高温超伝導 SQUID を用いたピコ磁気計測システムを開発するとともに、非接触での診断・機能情報の検出のための磁気イメージング技術を開発する。これらを用いて、医療診断や再生医療のためのバイオセンシングシステムや分析・評価のための非破壊検査システムを開発する。

高温超伝導 SQUID センサとしては、積層化技術を用いた集積型の SQUID センサを開発する。これまでの実績を進展させることにより、理論限界に近い10 fT/Hz^{1/2}程度の磁界感度を持つとともに、耐磁場特性の優れたセンサの作製技術を確認する。また、グラディオメータ構成技術、アレイ化技術、センサ冷却技術など実用センサ開発に必要な要素技術を確認する。

このセンサを用いた集積化センサアレイを開発し、医療診断や再生医療のための先端 SQUID バイオセンシングシステムを開発する。具体的には以下の装置の開発を計画している。

- (a) 血液検査などの医療診断のための磁気マーカーを用いた迅速・高感度な免疫検査装置
- (b) 心機能のトータルな検査・診断のためバイオ磁気イメージング装置
- (c) 再生医療で用いられる培養心筋細胞の活動検出装置
- また、励起磁界中での動作を可能とする、検出コイルと SQUID を分離した検出コイル分離型のシステムを開発する。このシステムを以下の装置開発へと展開する。
- (d) マイクロテスラ程度の超低磁場を用いた NMR/MRI 装置
- (e) エネルギー関連で重要となる電池の検査や電気化学反応の解析装置
- (f) 農業分野における穀物や土壌中の水分、及びコンクリート中の水分の迅速・高感度検査装置

これらのセンシングにおいては、ピコテスラ程度の微弱磁界を高精度で信頼性良く検出する必要がある。また、得られた磁場情報から本来知りたい機能・診断情報を取り出すためのデータ解析技術も重要となる。一般的には、試料からの信号磁界をマッピングし、この磁界マップを再構成することにより、機能・診断情報が得られる。このためのピコ磁気イメージング技術を開発する。

研究の最終段階では、開発した SQUID システム、センシング技術、及び磁気イメージング技術を統合し、種々の応用プロトタイプの開発につなげていく予定である。

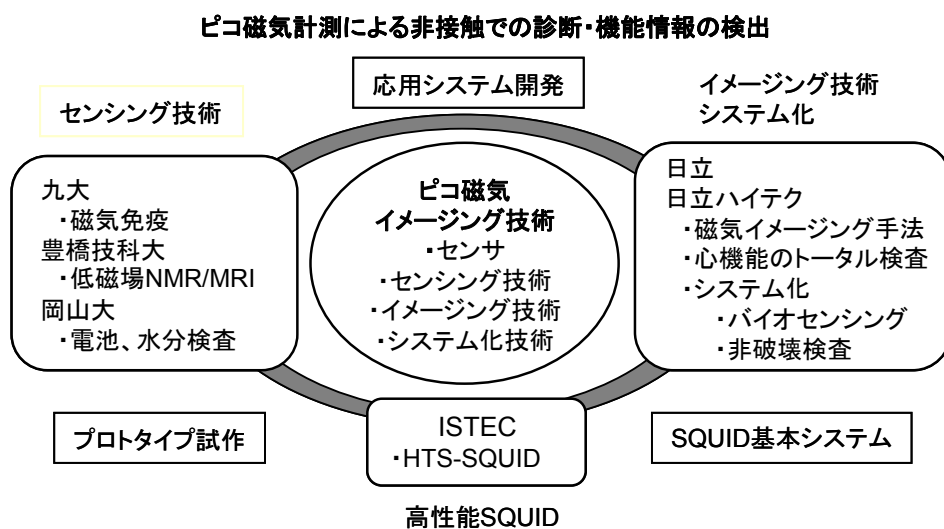


図2 研究組織と役割分担

4. 終わりに

高温超伝導 SQUID を用いた先端バイオ・非破壊検査システムに対する期待は大きく、これまで種々の開発が行なわれてきた。これは、磁気計測が非接触かつ非破壊で試料内部の信号検出を可能にするという他にはない特徴を有するためである。これまでの研究によりその有用性は実証されつつあるものの、産業応用システムへの展開は停滞しているのが現状である。その主たる原因は産業応用に耐えうる高性能で信頼性の高い SQUID システムが十分に開発されていないためである。また、ピコテスラ程度の微弱磁界を高精度に計測し、この結果を再構成して機能・診断情報を得るため磁気イメージング技術の開発も不十分である。

これらの課題を解決するためには、産学が連携し、それぞれの特徴を生かして互いに補完しあう共同研究が必須となるが、これまでこのような研究はなされてこなかった。今回の科学技術振興機構の「戦略的イノベーション創出推進事業」において、産学協同研究の枠組みが可能となったことは、SQUID システムの開発にとって非常に重要である。このプロジェクトを通して SQUID センシング機器の基盤技術を確立し、医療、安心・安全、エネルギー及び農業分野における社会的課題の解決に貢献していきたいと考えている。

(2) 高温超伝導を用いた高機能・高効率・小型加速器システムへの挑戦

Challenge to high-functional, efficient, and compact accelerator systems using high T_c superconductors

京都大学
雨宮 尚之

Kyoto University
N. Amemiya

1. はじめに

荷電粒子を電場による力で加速する装置が加速器であるが、粒子をある程度高い速度(エネルギー)まで加速しようとした場合、電場による加速部(高周波加速空洞など)を有効に利用するために、粒子を周回させ同じ加速部を繰り返し通過させるということが行われる。これが円形加速器である。荷電粒子を周回させるためには、磁場によるローレンツ力を利用するが、粒子のエネルギーが一定であるならば、磁場が強いほどローレンツ力は大きくなり軌道半径、すなわち円形加速器も小さくできる。しかし、銅線で巻いた電磁石(マグネット)では発生できる磁場はたかだか2 T程度であり、粒子のエネルギーが大きくなるにつれ装置は大型化してしまう。また、銅線で巻いたマグネットではジュール損失も大きく、運転に必要な電力も大きくなってしまう。

これまで、医療用や産業用の中小型加速器には、主に銅線で巻いたマグネットが用いられてきた。一方で、高エネルギー物理研究用の大型加速器では、粒子のエネルギーが極めて大きく粒子を周回運動させるためには高い磁場が必要なことから液体ヘリウムで冷やす低温超伝導線に巻いた超伝導マグネットも用いられる。このような超伝導マグネットは、冷却効率が数百分の一であることを考慮しても、消費電力を銅マグネットより小さくできる。原理的には、医療用や産業用の中小型加速器においても超伝導マグネットは魅力的であるが、冷却システムが複雑になり超伝導化してもトータルではメリットを享受しにくいこと、低温超伝導マグネットではクエンチ(超伝導が突然壊れる現象)の呪縛から逃れられないことなどが、超伝導マグネットの利用を妨げてきた。

高温超伝導も発見から二十余年が過ぎ、材料科学分野の研究開発努力により、ようやく長くて性能のよい高温超伝導線が製造されるようになってきた。イットリウム系やビスマス系の高温超伝導線によれば、冷却効率の良い高い温度領域で運転できること、高い温度領域では物質の比熱が大きいこと超伝導状態の安定性もよくなることから、超伝導化の敷居をずっと低くできる。しか

し、高温超伝導線で加速器用の超伝導マグネットを巻いた例はなく、また、固有の技術課題も多く、それらを解決しなければ加速器用高温超伝導マグネットは実現できない。

2. 採択課題の概要

京都大学(大学院工学研究科、原子炉実験所)、東芝、高エネルギー加速器研究機構、放射線医学総合研究所、日本原子力研究開発機構からなる研究開発チームにより、科学技術振興機構 産学イノベーション加速事業【戦略的イノベーション創出推進】(略称 S-イノベ)の一環として「高温超伝導を用いた高機能・高効率・小型加速器システムへの挑戦」という課題名の研究開発プロジェクトが平成22年1月から10年計画でスタートした。プロジェクトの概観を図1に示す。このプロジェクトは、

- 1) 加速器マグネットを高温超伝導化するための共通基盤技術として位置付けた「機能結合型・高効率加速器用高温超伝導マグネット技術」を確立し、
- 2) これをもって実用機と同スケールのプロトタイプマグネットを作り、
- 3) プロトタイプマグネットを放射線医学総合研究所の加速器 HIMAC のビームラインに設置しその機能を実証する

ことを目指すものである。

加速器としてはモジュール型のマグネットを並べることによって構成できる固定磁場強集束(FFAG)加速器やシンクロトロンを想定している。特に、FFAG 加速器は、直流励磁マグネットで構成可能でかつ強集束という特徴を有している。

本プロジェクトは、これらの実用加速器のモジュール型マグネットと同スケールのマグネットを実現する技術を確認し実証することを目指すものであり、本プロジェクトが所期の成果を達成すれば、その後、マグネットを加速器システムに組み込むための技術開発を行うことにより、高温超伝導加速器の実用化が可能になると考えられる。これが、目標設定の理由である。

3. 研究計画および各機関の役割分担

ステージ I, II においては、以下のような要素技術から構成される「機能結合型・高効率加速器用高温超伝導マグネット技術」を確立する。

- ① 高温超伝導による機能結合型マグネット技術: 偏向、集束といった複数の機能をひとつのマグネットで実現する技術
- ② 高精度磁場発生技術: 粒子軌道制御に必要な高精度の磁場を発生する技術

- ③ 高精度 3次元巻線技術: 加速器マグネット特有の立体的巻線を高精度で実現する技術
- ④ 高効率伝導冷却マグネット技術: 加速器特有の発熱を考慮した伝導冷却マグネット技術
- ⑤ 放射線環境対応技術: ビーム損失による放射線負荷に対応する技術
- ⑥ 高温超伝導加速器システム技術: ビーム光学など加速器としてのシステム設計技術

ステージ I, II においては、これらの要素技術を確認するための基礎研究を行うとともに、ミニモデルコイルにて要素技術を検証していく。ステージ II の終わりには、開発した要素技術を統合検証するためのモデルマグネットを試作する予定である。

ステージ III では、モデルマグネットをスケールアップして、実用機クラスのプロトタイプマグネットを試作する。プロトタイプマグネットにおいては、まず、マグネット単体でシステム(冷却)性能、磁場性能を調べ、その後、HIMACのビームラインに設置して、ビーム制御性、ビーム損失による熱暴走・クエンチの有無、耐放射線性などの加速器マグネットとしての機能実証を行う予定である。

上記の研究計画の中で、京都大学大学院工学研究科は高温超伝導電磁現象から高温超伝導マグネット技術、高エネルギー加速器研究機構はマグネット技術から加速器工学、京都大学原子炉実験所・放射線医学総合研究所・日本原子力研究開発機構は加速器システム技術とユーザとしてのシステム評価、東芝は製造技術の開発と大学・研究機関で研究された要素技術の実マグネットへのインテグレートを担当する。

4. 本プロジェクトの成果をもとに実用化が期待される高温超伝導加速器応用システム

本プロジェクトの成果により、以下のような応用システムの実用化が期待される。

- ① 重粒子線がん治療装置用超伝導加速器(FFAG 加速器やシンクロトロン利用)
重粒子線がん治療は、放射線治療の中でも特に副作用が少なく治療効果も高い治療法である。高温超伝導の適用により治療装置の小型化をはかり普及を促進する。重粒子線がん治療装置は、各県1台として国内50台、人口に比例するとして世界で2500台の需要が期待される。建屋コスト含め1台150億円の建設コストが超伝導による小型化で半減できるとするとその効果は大きく、また、1台年間10億円を超えるランニングコストの過半は電気使用料で、超伝導化によるその削減効果も大きい。
- ② 加速器駆動未臨界炉

高温超伝導を用いて、高エネルギー・大強度で高ビーム電力効率の陽子加速器を実用化することによって、高放射性・長寿命の核廃棄物処理(短寿命化)ならびにエネルギー生産が可能な安全な原子力システムである加速器駆動未臨界炉を実現する。加速器駆動未臨界炉では、加速器システムの効率が低いと、核廃棄物を処理するために、処理する以上の核廃棄物を出す軽水炉で発電して加速器を運転するようなことになり実用上意味がなくなる。具体的には、最低でも30%程度のビーム電力効率が必要とされるのに対し、現在の常伝導加速器のビーム電力効率はせいぜい数%とまりである。従って、高温超伝導適用によるビーム電力効率向上は、加速器駆動未臨界炉実現のために必須であると考えられる。

③ ニュートロニクス用中性子源

中性子の生成には、これまで原子炉や大型加速器といった大型装置が必要とされてきたため、X線や放射光利用に比べて普及が遅れているのが現状であり、様々な分野(例えば硼素中性子捕獲がん治療など)での小型で高強度の中性子源の開発が望まれている。すなわち、中性子利用を限られた科学研究ではなく、世の中で広く役に立つ工学(ニュートロニクス)にするためには、小型で高強度の中性子源の実現が必要である。具体的には、高温超伝導を使った小型で高強度な陽子加速器で生成された陽子ビームをターゲットにあてて中性子を生成する、小型加速器中性子源の開発が期待される。

④ ミュオニクス用ミュオン源

高温超伝導を用いた小型で高強度な陽子加速器により小型ミュオン源が開発できれば、未来の工学としてのミュオニクスの展開が期待できる。すなわち、現在既に行われている磁性体・超伝導体等に関する物性研究の高度化の他に、ミュオンビームの高い透過性を利用した核物質検知(核拡散防護)や火山の内部構造探査(火山噴火予知)等、従来のプローブ技術では実現不可能な検知能力を利用した環境・安全分野への貢献が期待されている。また、非常に高効率でミュオンが生成できるようになれば、未来のエネルギー源としてのミュオン触媒核融合の実現につながる可能性があり、実現されればその市場性は高く、経済へのインパクトも大きく、未来の産業としての事業性も高い。

謝辞

本研究は、産学イノベーション加速事業【戦略的イノベーション創出推進】として、科学技術振興機構からの委託により実施するものである。

(3) 高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発

Development of the next-generation NMR technology using HTS materials

日本電子株式会社

NM 事業ユニット NM 技術グループ

末松 浩人

NM Technical Group, NM Business Unit, JEOL Ltd.

H. Suematsu

1. はじめに

本課題は、独立行政法人 科学技術振興機構 戦略的イノベーション創出推進事業 研究開発テーマ「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出」において、平成21年11月に提案を行い、平成22年1月に採択されたものである。

日本の超伝導技術は、米国と並び世界トップレベルにある。しかし、その応用製品のひとつである NMR(核磁気共鳴)の産業化では、海外勢に押され気味である。

本課題では、国内の優れた超伝導技術をもつ機関、技術の出口としての NMR 技術をもつ機関、さらには NMR 技術を応用する機関が結集することにより、10年後の産業化への出口を見据えた研究開発を行う。

2. 採択課題の背景、目標など

NMR 分光法は、原子核のもつ核スピンの磁場中で分極(Zeeman 分裂)することを利用して(図1)。分子内の原子核が感じる微小な磁場変化や、ラジオ波パルス列操作による近隣核スピンとの相互作用などを直接観測することにより、分子構造の決定や成分の分析、分子運動性の解析などに広く用いられている。その装置構成を図2に示す。

なお核スピンを持つ原子核は例えば ^1H , ^{13}C , ^{15}N , ^{31}P , ^{19}F , ^{29}Si , ^7Li , ^{17}O , ^2H , ^{27}Al など多数あり、様々な核種が測定対象となる。

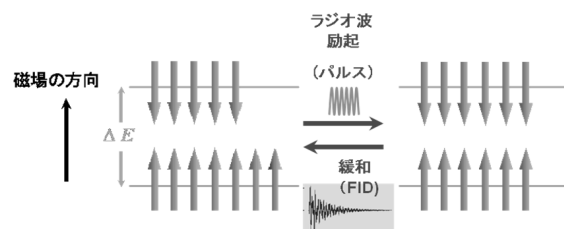


図1 Zeeman 分裂と核スピンの励起・緩和

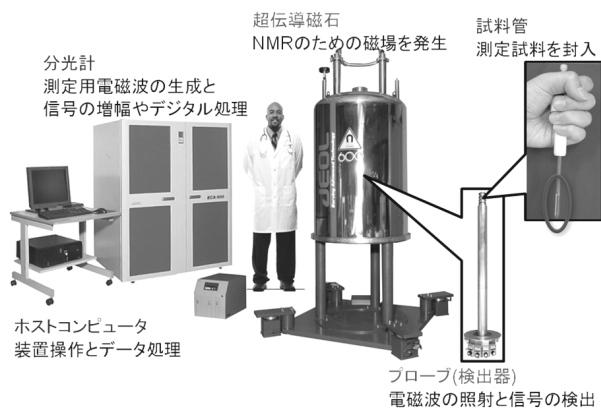


図2 NMRの装置構成

同種の分析法である質量分析法やX線回折法と比較と比較すると、以下のようなメリットがある。

- 試料の前処理不要
イオン化や結晶化など、手間のかかる前処理が不要。
- 非破壊測定
試料をそのままの状態を観測し、回収することが可能。
- 長い緩和時間(量子力学的コヒーレント状態の維持時間)
分子内、分子間の相互作用を探ることが可能。
- 選択的観測
特定の原子核の情報を得ることが可能。

つまり、応用範囲が広く情報量が多いNMR分光法は、非常に優れた分析法であり、幅広い分野で活躍している(図3)。



図3 NMRの応用範囲

このように応用範囲も広く優れたNMR分光法であるが、核スピンのZeeman分裂のような非常にエネルギー差の小さい遷移(周波数換算で10 MHz~1 GHz)を利用するため、原理的に感度が低いという難点がある。そのため測定に多数回のアベレージングが必要で非常に

時間がかかってしまう(長い場合、測定時間一週間程度)、あるいは他の分析法に比べ大量に被測定試料が必要という欠点がある。

上述の理由により、NMR装置開発の歴史は、ほぼ感度改善の歴史であったと言える。しかし、その結果、高性能機は装置が大型化、高価格化し、また技術的限界にほぼ到達している状態とも言える(図4)。



図4 現世代NMRの現状と課題

本課題では、NMRシステムの中核である超伝導磁石およびプローブ(検出器)に高温超伝導材料を適用し、性能と利便性を大幅に向上した次世代NMRシステムを開発する。具体的には、高強度の高温超伝導線材で高磁場超伝導磁石を小型化し、液体ヘリウムの補充を不要にすることで、一般施設への高磁場システムの設置を可能にする。また、高温超伝導材料をNMR検出コイルとする超高感度プローブの実用化研究を行う。これらを組み合わせることで、従来と比較して最大30倍の測定感度、最大1000倍のスループットを目指す(図5)。

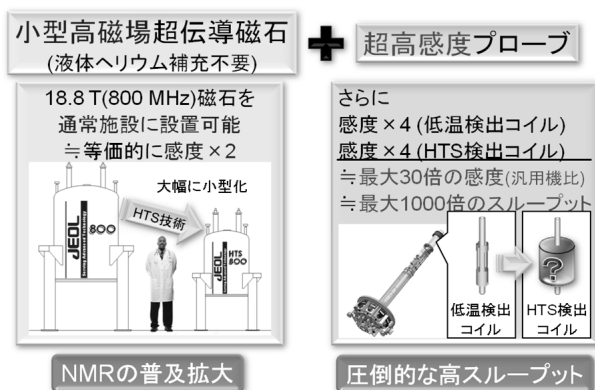


図5 開発目標: 汎用小型超高感度NMR

これにより、新規NMRユーザーの開拓、液体ヘリウムなどの冷媒を入手困難な地域への導入を促進する。さらに、小型高感度という特長を活かした多様な研究開発、医療診断、生産機関への普及拡大を実現する。本

課題は、NMRシステム開発で世界をリードし、超伝導技術を基盤にした新産業創出を目指すものである。

本課題はステージⅠが平成21年度～平成23年度、ステージⅡが平成24年度～平成27年度、ステージⅢが平成28年度～平成30年度の10年計画となっている。ステージⅠでは主に各種要素技術の確立を、ステージⅡでは中程度の磁場(NMR ¹H 共鳴周波数で300-500 MHz)でのシステムの実証を、最後のステージⅢでは高磁場(同 600-800 MHz)でのシステムの実証を目標とする。

研究開発体制を図6に示す。マグネット(磁石)開発を物質・材料研究機構 木吉研究リーダーを中心としたチームにて、プローブ開発を日本電子 末松(プロジェクトマネージャ兼開発リーダー、筆者)を中心としたチームにて行う。また、外部識者の方にアドバイザーとしてのご協力をお願いし、より効率的な推進体制を目指している。

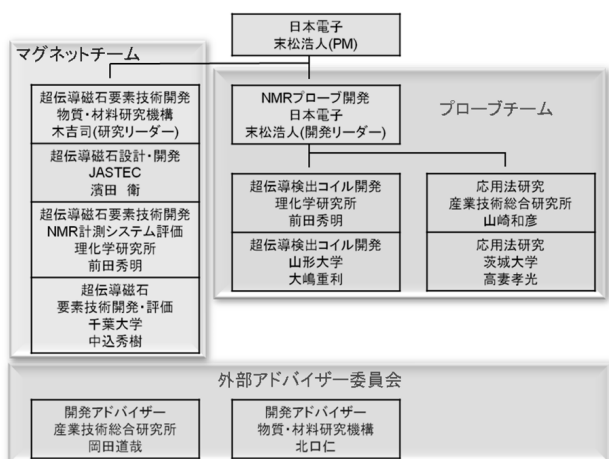


図6 研究開発体制図

なお、本課題の先行研究を紹介しておく。小型高磁場NMR超伝導磁石の開発に関しては、次の3つの先行研究がある。

- 先端計測分析技術・機器開発事業「超1GHz NMRシステムの開発」(H18～23)
- (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構超電導分野調査事業「高温超電導線材を利用した超高磁場 NMR の実用化可能性に関する調査」(H18～19)
- 原子力試験研究「核融合炉の強磁場化に向けた酸化物系高温超伝導線材の応力効果に関する研究」(H16～21)

超高感度 NMR プローブについては、次の2件の先行研究がある。

- CREST「材料開発に資する高感度多核固体 NMR 法の開発」(H17～22)
- 文部科学省リーディングプロジェクト「新方式 NMR

分析技術の開発」(H15～H19)

紙面の都合上、それぞれの内容については参考文献[1-6]を参照されたし。

3. おわりに

本課題が実現した暁には、通常の研究、試験施設に超高感度、超高スループットの NMR システムを設置可能となり、より多くの人々が分析法としての NMR の素晴らしさを、より簡単に、より短時間で享受出来るようになるかと予想する。

その結果、物質科学、生命科学、材料評価、医療・創薬、品質管理、食品検査など、非常に幅広い分野に大きな波及効果を与え、新産業創成の基盤を構築出来るものと信じている。

また枯渇が心配されるヘリウムの消費を抑制することで、環境問題への貢献も期待される。

謝辞

このようなチャレンジの機会を与えてくださった独立行政法人 科学技術振興機構に感謝します。また、発表の機会を与えてくださった社団法人 未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会に感謝します。

参考文献

- [1] T. Mizuno, K. Hioka, K. Fujioka and K. Takegoshi: Review of Scientific Instruments **79** (2008) 044706.
- [2] 大塚昭弘, 木吉司, 松本真治, 野口隆志, 小湊健太郎, 竹田雅詳: 低温工学 **43** (2008) 287.
- [3] 大塚昭弘, 木吉司: 低温工学 **42** (2007) 196.
- [4] Y. Yanagisawa, H. Nakagome, K. Tenmei, M. Hamada, M. Yoshikawa, A. Otsuka, M. Hosono, T. Kiyoshi, M. Takahashi, T. Yamazaki and H. Maeda: Journal of Magnetic Resonance **203** (2010) 274.
- [5] Y. Koyama, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, M. Hamada, T. Kiyoshi, M. Takahashi and H. Maeda: Physica C **469** (2009) 694.
- [6] 超電導応用研究会シンポジウム講演論文集 **15** (2008) 199.

(4) 大出力超伝導回転機器に向けた キーハードの開発 R&D of key technology for large scale superconducting rotational machine

横浜国立大学¹
塚本修巳
川崎重工業²
柳本俊

¹Yokohama National University
O. Tsukamoto
²Kawasaki Heavy Industry
T. Yanamoto

1. はじめに

本研究開発(研究リーダー:塚本修巳、開発リーダー:柳本俊之(川崎重工))は海洋国家日本の海上輸送を支える船舶の推進効率を向上させる高効率で小型、大出力20 MW級の高温超伝導モータとそのキーハード技術の開発を目指すものである。

現在船舶を取り巻く環境面からの社会的圧力、すなわち、CO₂排出削減(燃費改善)および排出ガス規制は陸上の輸送機関と同様に厳しくなりつつある。このための、船用推進システムの高効率化、排出ガス規制への対応が迫られている。

図1には現在の主な船用推進システムの推進器および動力プラントが示してある。推進システムの選定は、排



図1 船用推進システム

ガス規制、省エネ・経済性、操船性、船内快適性を考慮して行われる。中でも電気推進方式に対する期待が高まっている。電気推進は、単に主機をモータに置き換えただけでは効率が悪化するが、船全体での電力供給の最適化、推進システムの船内配置、船形の自由度の向上、メンテナンスの単純化、操船性の向上、環境負荷の低減を可能にするためそのメリットが大きい。このため、近年電気推進システムへの転換が進んでいる。しかし、従来型の発電機、モータを用いる方式では効率の向上、大容量化に対して限界がある。そこで、これらの機器の超伝導化への期待がかかっている。

2. 船用推進モータの超伝導化のメリット

超伝導導体は高い電流密度を持っており、少ない損失で広い空間に高磁界を発生できる。従って、このような特長を活かし、船用推進モータを超伝導化するメリットは軽量コンパクト化と効率の向上である。特に、スクルーを直接駆動するモータは回転数が低く、超伝導化のメリットが大きい。図2には超伝導モータと常伝導モータとのサイズ、重量の比較が示してある。この図からわかるように出力が大きくなるに従い、超伝導機の軽量化・コンパクト

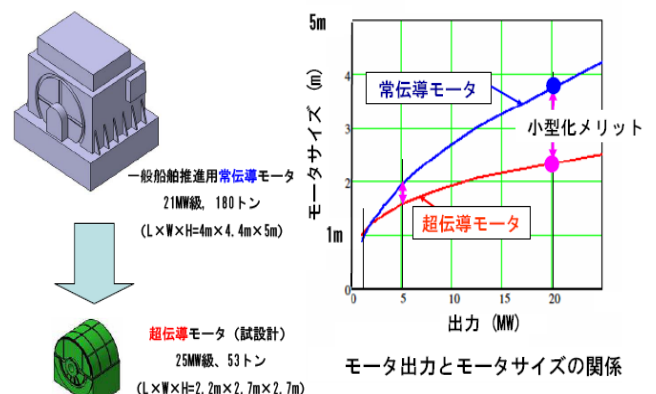


図2 超伝導モータと常伝導モータの重量サイズ比較

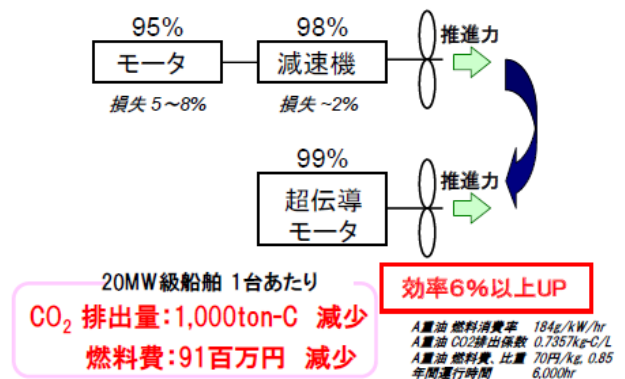


図3 20 MW級大型超伝導モータの省エネ効果(例)

化のメリットが大きくなる。20 MW 級機では180トンから53トンへの軽量化が可能になる。また、効率向上に関して図3に示してあるように、推進効率が従来のモータと減速機との組み合わせに対して、超伝導モータスクリュー直接駆動方式は6%程度の効率の向上が期待できる。これにより、年間運行時間を6千時間を仮定すると、年間9千万円程度の燃料費節減、1000トンの炭素排出量削減が可能となると予想されている。

以上のメリットのため、現在、超電導回転機の開発は世界的に進んでおり、米国は2007年に36.5 MWの船舶推進用モータを完成させており、またドイツも最近同様に4 MW 機を開発している。

本研究開発計画はこのような状況を踏まえ立案された。

3. 研究開発項目と開発計画概要

現在開発が進められている船舶推進用超伝導モータの出力密度は、580 kW/m³程度である。本研究では、これを超える世界最高水準の超伝導モータのためのキーハードを開発する。本研究開発は、在来のモータの高効率化を図るために、最先端の超伝導技術を応用した世界最高水準の高出力(20 MW 級)、軽量・コンパクトの超伝導モータを提供するものである。

具体的には、超伝導回転機の超伝導界磁コイルの変動磁界に対する損失を従来技術(Y系コイル:幅1 cmのY系薄膜導体、Bi系コイル:幅4 mmのBi銀シース線材を用いたフラットなレーストラックコイルを想定)に対して、Bi銀シースコイルで1/3に、Y系コイルでは1/5にする手法を明らかにする。また、超伝導界磁コイルの受ける機械的ストレス下でローバストかつ高い信頼性で超伝導性能(高電流密度、低損失性能)を維持するための導体/コイルの設計法を確立することを目標とする。

また、低コスト低損失の回転子(ロータ)・冷凍機一体型超伝導コイル冷却システムの開発を行い、従来の冷却システムと超伝導回転機間の冷媒輸送に伴う損失を削減することで総体としての高効率化とシステムの小型化を目指す。

以上を統合して、本研究開発では、総体としての船舶用大型超伝導回転機の高効率化とシステムの小型化に向けた設計技術の開発を目指す。

本研究開発は図4に示すように、超伝導コイル技術、超伝導コイル冷却技術および船舶推進用大型超伝導回転機設計技術それぞれを担当する3グループが緊密な情報交換を行い共同して研究開発を行うものである。

本課題においては、先行研究がかなりの程度進められており、ステージIの研究はすでに済んでいると考えられ、ステージIIから初めることとした。ステージII,IIIを含め5カ年計画となっている。表1~3には各グループのそれぞれのステージの目標が示してある。

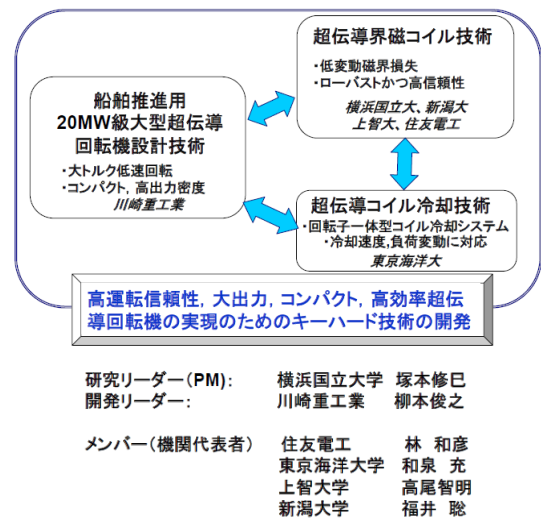


図4 研究開発の実施体制図と参加メンバー

表1 変動磁界損失低減界磁コイルの開発

先行研究 (シーズ)	ステージII (2009~2011)	ステージIII (2012~2013)
変動磁界損失の低減法 ・線材レベル、集合導体レベルでの損失低減法の原理検証 ・コイル(ソレノイド)の損失低減構造の数値解析による検証	変動磁界損失低減法 ・線材、集合導体、コイルの統合的設計による界磁コイル電磁環境下での損失低減法の明確化(Bi系:1/3, Y系:損失1/5)(横浜、新潟、住電) ・Bi系コイルでの損失1/3の検証(1次、2次小型試作コイル作成:住電、検証・評価:全員) ↓ Biコイルの設計法の明確化 ・Y系小型コイル設計(Biコイルの検証結果に基づく設計:横浜、新潟、住友)	ステージIIで開発された設計法、冷却方式に基づくBi系界磁要素モデルコイルの設計・製作(20MW機界磁コイルの1極分実コイルの設計:全員、製作:住友) 船舶用モータの環境下でのBi系界磁要素モデルコイルの特性試験による損失低減法、クエンチ保護設計法の妥当性検証(試験装置製作:各機関の保有設備を活用、検証・評価:全員) ↓ Y系小型コイルの試作と損失1/5の検証 (コイル製作:住友、評価:新潟、横浜)
ローバスト、高運転信頼性 ・繰返し応力の影響の評価法開発	ローバスト設計法の確立(上智) ・線材の繰返し疲労試験 ・10万回:1c劣化、損失特性への影響 ・線材の疲労特性とコイル設計	ローバストかつ高運転信頼度低変動磁界損失界磁コイルの設計法の確立
クエンチ保護法 ・CCの必要安定化銅量の算定	線材のクエンチ特性データ取得、エネルギー放出時間の設定(横浜)	

表2 超伝導コイル冷却技術の研究開発
(回転子一体型冷却システム)


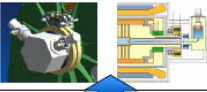
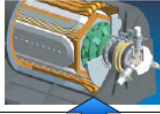

先行研究 (シーズ)	ステージⅡ (2009～2011)	ステージⅢ (2012～2013)
<p>極低温ロータリージョイント</p> <ul style="list-style-type: none"> ・低熱損失: 従来、50～70% 減(3.6 W/200 rpm) ・低機械損失: 0.04Nm ・高信頼性: ガス出口、～1000 rpm ・コンパクト: 従来、体積1/10 (全 300mm、直 120mm) 	<p>一体型冷却システムの基本設計と100 W冷却システムの試作と実証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・先行研究にもとづく負荷変動・熱解析 ・合金による基礎試験を実施、合金の制御性を評価 ・一体型超伝導コイル冷却システムの基本設計、製作 ・冷却制御実証試験 	<p>20 MW級超伝導回転機に対応する一体型冷却システムの試設計</p> <ul style="list-style-type: none"> ・20 MW級船舶用超伝導モータ対応 ・回転子一体型冷却システムの概念設計 ・同システムの熱解析 ・同システムの試設計 
	<p>6-(1)- 「モータ概念設計」: 川崎 6-(2)- 「コイル構造開発」: 住友 6-(3)- 「低損失コイル」: 横浜 6-(3)- 「コイル設計」: 全機関</p>	<p>6-(1)- 「モータ基本設計」: 川崎 6-(3)- 「コイル設計」: 住友 6-()- 「劣化抑制開発」: 上智・横浜</p>

表3 回転機設計技術の開発

先行研究 (シーズ)	ステージⅡ (2009～2011)	ステージⅢ (2012～2013)
<p>「船舶用高温超伝導モータ内ポッド推進システムの研究開発」NEDO H19～H21 (川重、海洋大、海技研)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・超伝導回転機設計・製作 ・ヘリウムガス給排装置の開発 ・設計・製作  <p>1MW級高温超伝導モータ</p>	<p>船舶用20MW級大型超伝導回転機を定めた概念設計を行う</p> <p style="text-align: center;">↓ ル寸法 電流値 冷却性能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・超伝導界磁コイルおよび冷却システムに対する要求を明確にする。 ・4- および で行う試験、試作モデルコイルの決定する。 	<p>ステージIIで得られた成果および、ステージIIIにおける界磁要素モデルコイルの評価結果を基にして船舶用20MW級大型超伝導回転機の基本設計を行う。</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <ul style="list-style-type: none"> ・船舶用20MW級超伝導回転機的设计手法を明確にし、キーハード技術として確立する。

4. まとめ

この研究成果で培われた技術は、商用船舶のみならず、大出力風力発電機や海潮流発電機の小型・軽量化、海洋開発や海底資源探査ビークルの発電機や推進機関、海洋調査船、砕氷船、大陸棚調査船舶、米国で構想されている100 MW級大型漁船等の推進システムに応用できるものであり、広い応用分野がある。

(5) 次世代鉄道システムを創る超伝導技術 イノベーション

Innovations of superconducting technology
originating next-generation railway systems

(財) 鉄道総合技術研究所

富田 優

Railway Technical Research Institute

M. Tomita

1. はじめに

鉄道は将来にわたって人・ものの輸送の根幹となるものであり、高度な文明社会を支える公共性の高い技術であり、信頼性(安全性、安定性)、利便性(速達性、快適性)、経済性、環境調和性を有する鉄道は、エネルギー消費の徹底的な合理化・効率化が必要とされる今世紀に、ますます重要性を増していくと考えられます。鉄道技術基盤で電力・電気技術の果たす役割は大きい。そこでは、超伝導の持つ低損失、高密度電流、高磁場といった特性に基づいた新しい機器やシステムが大いに活躍できます。

本稿ではJSTの産学イノベーション加速事業【戦略的イノベーション創出推進】の「超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業創出」の5テーマのうちの1つである「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」の研究課題の概要について紹介します。

2. 研究開発概要

我が国は、ビスマス系超伝導物質など高温超伝導物質をはじめとして、高温超伝導に多くのシーズを有しており、産学官によって基礎から応用にわたる様々な研究や開発が進められてきています。本研究課題では、それらの超伝導研究の成果を集約し最大限に活用し発展させ、鉄道分野に浸透させていくという長期的視点のもとで実用機器・システムにつながる要素技術を確立していくことで、鉄道技術への超伝導応用の学術的・技術的基盤の構築を目指しています。

本研究課題では、鉄道の広い範囲で超伝導の基礎技術を確立するため、電化区間への導入技術としては、鉄道用の送電ケーブルを目指した基盤研究を進め、非電化(無架線)区間への導入技術としては、超伝導による補助電源システムを目指した基盤研究を行います。具体的には次世代鉄道システム(図1)に必要な10 kA級の鉄道用直流超伝導ケーブルの開発と、補助電源装置と蓄電池を組み合わせた電力貯蔵システムについて検討を行います。また、材料性能向上は機器の経済性改善に直結するため、開発前半を中心に材料高度

化にも取り組みます。

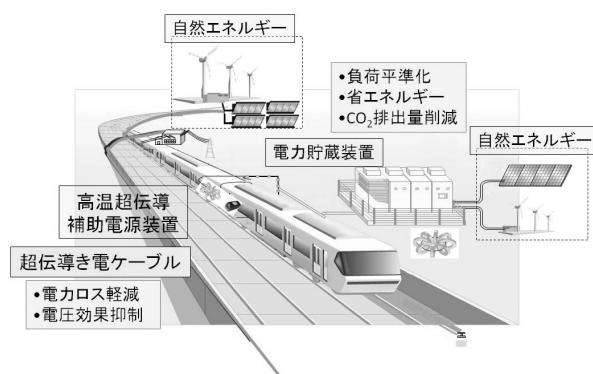


図1 次世代鉄道システム

2.1 直流超伝導ケーブル導入の意義

日本の鉄道には2007年3月現在18,000 kmを超える電化区間(直流電化:11,800 km、交流電化:6,200 km)と9,500 kmを超える非電化区間があります。近年、可変電圧可変周波数制御車両(VVVF制御車両)が都心部を中心に導入が始まっており、直流電化の優位性が高まっていますが、地方では変電所間隔を延ばせる交流電化も広く使われています。つまり、「直流電化で送電距離を延ばせること」がさらなる直流電化の優位性につながることになります。

一般的な在来線の架線では、直流電化区間の電圧が1500 Vであり、変電所間隔が2~3 km程度を超えると送電ロスが顕在化する課題があります。一方、超伝導材料は電気抵抗が無いため、直流で高い定格電流値が得られる可能性があり、変電所の数の削減も期待できます。また、電化区間の送電ロスは5%以下ですが、合計するとかなりのエネルギーをロスしていることになります。これを直流の超伝導へ置き換えることで送電時の送電損失、CO₂排出量は1/40にできると言われています。さらに都市圏を中心として鉄道輸送への需要と期待は今後も増大すると見込まれ、ターミナル駅等では必要電力の増大に対応するには、立地の制約から電力送電密度を上げる必要があり、銅やアルミの常伝導ケーブルによる送電では限界に近づいている事例も多々あることから、コンパクトな超伝導ケーブルは十分に従来の常伝導技術に対する競争力をもつことになります。

2.2 超伝導補助電源装置導入の意義

他方で、在来線の40%強が非電化という事実を踏まえると、非電化区間や、電化区間と非電化区間の接続がある場所でのどのような鉄道車両を使うかも地球環境の観点から見れば大きな問題となってきます。非電化区間では大半がディーゼルカーで運転を行っていますが、昨今ではディーゼルエンジンの環境に対する悪影響が

強く指摘され、環境対策を施す必要性があります。すでに鉄道総研ではバッテリーとして体積エネルギー密度に優れているリチウムイオン電池を用いた架線・バッテリーハイブリッド電車(架線とバッテリーのハイブリッドで走行を行う車両)の研究を行っていますが、これらは化学反応を利用しているため、急速充電ができない欠点を有しています。そこで、急速充電可能な超伝導補助電源装置と、充電量が多い装置や電池を組み合わせた電力貯蔵システムを構築し、お互いに補完しあう形で電力貯蔵を行えば、より有効なシステムになると考えられます。

2.3 材料高度化の意義

材料の高度化は、応用機器の経済性、安定性、安全性の改善に直結します。それは鉄道応用機器のみならず他の応用機器にも有効です。これとともに鉄道応用機器に求められる特有の性能についても高度化は図る必要があります。現状の線材性能は線材一本あたりの電流密度は高いもので200 A/mm²程度です。機器での使用に当たっては機器内での線材充填密度や安全率を考慮しなければならないため、機器としての電流密度は100 A/mm²程度となってしまいます。常伝導(銅やアルミ)を用いる機器を大きく凌駕するためには、機器としての電流密度で200 A/mm²を超えるようにしていかなければなりません。このためには線材レベルでは、現状の2倍の400 A/mm²を実現する必要があります。現在の線材では、高温超伝導材料自身のもっているポテンシャルを引き出しきっているとは言えません。微細組織制御手法の確立で線材特性の大きな改善が期待できることも意味しています。このため、開発前半を中心として材料高度化基盤への取り組みは機器の高度化技術として必要です。

3. 研究開発の流れ

3.1 研究開発体制

本研究課題はステージⅠ(応用基礎研究及び要素技術の研究開発)を2009~2012年度までの4年間で、ステージⅡ(要素技術の研究開発)を2013~2016年度までの4年間で、ステージⅢ(アプリケーションの開発)を2017~2018年度までの2年間でいきます。

参画企業は、(財)鉄道総合技術研究所(プロジェクトマネージャー兼開発リーダー 富田優)、住友電気工業(株)、(株)前川製作所、参画研究機関は、(独)物質・材料研究機構(研究リーダー北口仁)、東京大学(工学系研究科、新領域創成科学研究科)、京都大学(工学研究科)、九州大学(システム情報科学研究院、総合理工学研究院)の計10機関の共同研究による研究開発体

制で課題を進めていきます(図2)。その他、鉄道事業者からなるアドバイザー委員会を構成し、意見交換を通じて導入者側からの要求(「現場の声」)を開発する機器に反映させるための素地とします。

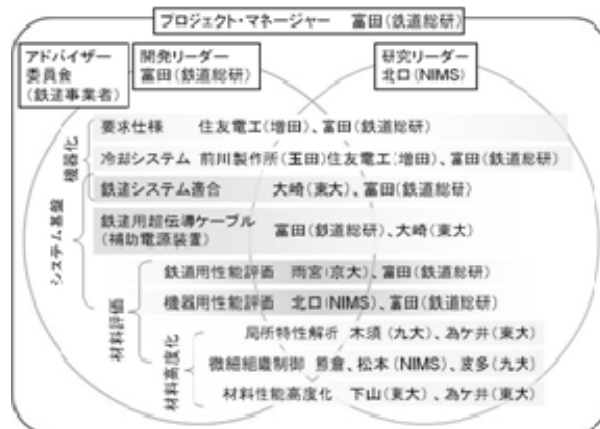


図2 研究開発体制図

3.2 研究開発工程

10kAの鉄道用直流超伝導送電ケーブル導入に向け、「鉄道システムとの融合」、「直流超伝導送電ケーブル」、「冷却システム」、「材料高度化」の4つのグループを柱として研究を行っていきます。また、超伝導補助電源装置に関しては、「鉄道システムとの融合」と連携をとりつつ、概念検討、基本設計検討に取り組んでいきます。研究開発工程と分担の概略を図3に示します。

鉄道システムとの融合

よりよい鉄道システムを作り上げるためには、鉄道の技術面での機能、性能を向上することはもとより、トータルのシステムの進化が必要です。巨大なシステムはサブシステムで構成され、サブシステム間には境界領域が生じます。鉄道システムでは技術分野相互の境界領域の他、学問領域、各国相互のシステム領域などが多数存在しています(図4)。多様な境界を含むシステムを進化させ鉄道の将来を拓くためには、超伝導ケーブルと他との調和が必要不可欠です。本テーマでは、シミュレーションや現場の声を参考にしながら各種超伝導装置の経済的・合理的な導入法や要求仕様などをステージⅠ、Ⅱで明らかにしていきます。

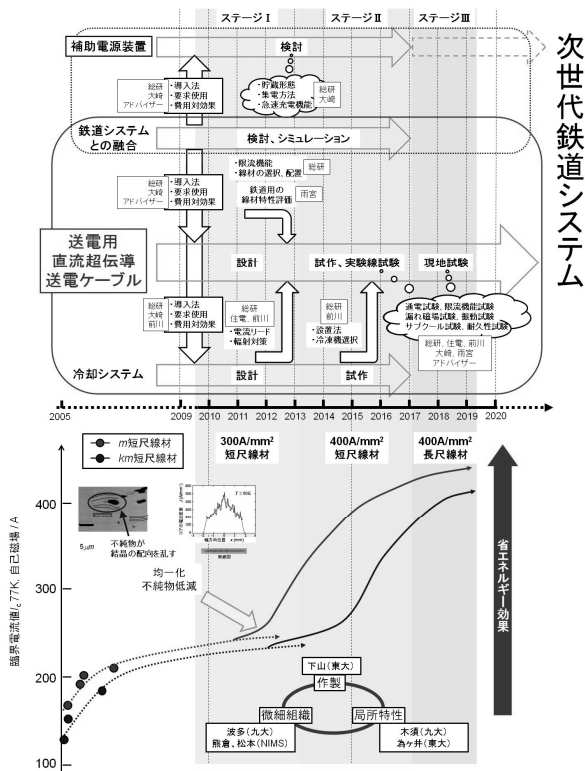


図3 研究開発工程と分担の概略

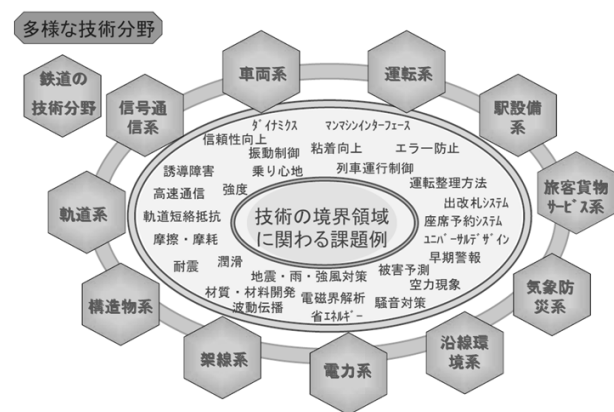


図4 鉄道技術を支える主要な技術分野

直流超伝導送電ケーブル

小型で高機能な「鉄道用」直流超伝導ケーブルの開発を目指し、線材・ケーブルの構成などの仕様をステージⅠで固め、ステージⅡでは鉄道総研が所有する実験線での各種試験を行い、ステージⅢでは営業線での試験を行います。

冷却システム

ステージⅠでは電流リードや輻射対策などの研究と鉄道路線への設置法(高架・非高架)の確立を中心に行います。ステージⅡでは超伝導ケーブルの模擬試験を行い、効率的な冷却法の確立を目指します。

材料高度化

線材性能を現状(線材あたりの電流密度200 A/mm²)から、ステージⅠで50%、ステージⅡ、Ⅲを通じて100%向上させて現状の2倍の性能を目指します。

4. おわりに

本研究課題実施によって、高温超伝導のポテンシャルを最大限引き出し、超伝導システムとして新しい産業創成の礎を築き、さらにその技術の普及による新産業の創出を望みうる地平を切り開いていくことが出来ると考えています。鉄道事業で長年運用されている直流送電方式に超伝導ケーブルを導入する試みは単純にも思えますが、システム構成から始まる多くの課題が山積しています。そこで得られる要素技術が鉄道事業に活かされるのはもちろんのこと、エネルギー・電力応用分野など様々な分野で広い技術として繁栄することを期待しています。

直流超伝導ケーブルは超遠距離無損失送電を可能にする技術であり、この技術は様々な分野との融合が可能です。近年、地球温暖化によりCO₂削減が強く叫ばれており、クリーンで豊かな地球を実現するために自然エネルギーの導入が進められていますが、太陽や風力からの発電はコスト高でお天気まかせ(間歇型)であるという弱点があります。そこで砂漠などの太陽の照る地帯、不毛な風の強い地帯、そして消費地、地球の東西・南北を超伝導ケーブルで繋ぎ、超伝導地球電力ネットワークを構成することで(GENESIS計画)、電力網にとって昼夜がなくなり、夏冬もなくなり、晴天や雨、風の吹く所、吹かない所も平均化され、自然エネルギーの泣き所である「お天気まかせ」が完全に解消されます。つまり、超伝導遠距離送電がベストミックス(地域にあった発電形態)を可能にし、自然エネルギー時代の幕を拓いてくれるのです。21世紀の技術は、人類と地球との共生を可能にするためにこそ存在し、この超伝導ケーブルはその切り札になれるのです。

<会議報告1>

第57回 応用物理学関係連合講演会 超伝導分科会企画「超伝導で”進む”未来技術の最新動向～超伝導の物流・交通への展開～」報告

Report on the symposium entitled “Latest Developments for Future Technologies on “Moving and Transportation by Superconductors” ” organized by superconductors division 57st annual meeting of the Japan Society of Applied Physics

(独)産業技術総合研究所

田中 康資

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Y. TANAKA

3月17日午後 応用物理学関係連合講演会で、7名の講演者を迎え、130名を越える参加者が集まり、超伝導の物流・交通への展開に関するシンポジウムが行われた。陸、海、空そして宇宙に向かって、リニア新幹線、自動車、船、飛行機、人工衛星、宇宙船への超伝導メカの搭載が紹介され、活発な議論が交わされた。

「超伝導の木の新しい果実として、交通・物流をつけ加えよう。」という下山超伝導分科会幹事長の序論で始まり、将来結実しそうな芽、蕾、花の話が6テーマ取り上げられた。

高温超伝導線材が実用化の水準に達し、次のステージとして、モーターを初めとした動力機器の開発と産業化、移動体高磁場機器の開発と用途開拓へ、高温超伝導材料の応用研究が足を踏みいれていることが、今回のシンポジウム開催の背景にある。特に飛翔体については、人工衛星やプラズマ、交通ロボットという異なる分野の研究者が、「超伝導機器の性能が良くなってきているのなら、是非取り入れてみよう。」という考え方で講演しており、超伝導応用研究が広がり、他の分野に浸透し始めているようで、超伝導応用の研究者の立場からすると、うれしく感じられる話題も多々あった。

地上、海上、大気圏の交通・物流においては、超伝導技術は、グリーンテクノロジーの一端を担うものと位置づけられている。

技術導入の呼び水として、高温超伝導材料を使った超伝導機器に期待されていることは「軽量化」である。東大 大崎氏の講演でも、リニア新幹線への高温超伝導の採用では、マグネットの軽量化が図れる点が、魅力

であると強調されていた。海洋大の和泉氏からも、軽量でコンパクトである点は、船舶用モーターにも必須であると紹介されていた(船もみかけほどスペースがあるわけではないそうである)。飛行機や、宇宙で利用するときにも、軽量化は欠かせない特性である。

もちろん、高温超伝導機器は、性能も優れている。京大 中村氏は、高温超伝導を使ったかご型誘導モーターの自動車のモーターとしての適性を強調した。広い回転数範囲で高トルク、高効率で、トランスミッションも省略できるので、冷凍機を積んでも、ハンデにはならない。「永久磁石モーターを凌駕する、高温超伝導誘導同期モーター開発プロジェクトに、参加しませんか?」という若手研究者への熱いメッセージもあった。超伝導応用研究を志す若手には、門戸を叩く良い機会だろう。

マイカーつまり、プライベート交通機関は、交通・物流の分野で、主要な二酸化炭素排出源である。超伝導の自動車への展開は、この本丸でのモーダルグリーンシフトを目指している。一方、マイカー(と自転車)のような従来型のプライベート交通機関に対し、新しい交通サービスとして、運転免許のいらぬプライベート飛行機による空中交通システムを構築しようというのが、産総研の岩田氏の提案であった。そこでも、静穏な超伝導モーターに対する期待は大きい。

地上を離れて、宇宙で超伝導を使うとなると、今度は、放射線に対する心配が出てくるようで、講演者からは、宇宙線に対する超伝導の耐久性について会場に逆に質問が投げかけられた。放射線の効果は、地道な基礎研究として行われてきた。その知識が、実用展開では必須になっている。

宇宙と超伝導は相性が良い。宇宙には、超伝導磁石が発生する大きな磁場が広がる空間がある。また、深宇宙ともなれば、放射冷却だけで20 Kくらいまで下がる。太陽電池パネルが発電する電力は、超伝導マグネットに流す数百Aという電流を容易に供給できる。

JAXAの坂井氏は、超伝導磁石の発生する磁気モーメントを使い、複数人工衛星の相対位置制御をするという、独創的な研究を紹介した。磁気モーメントを使わないと、人工衛星の位置制御をするのに、いちいち「推進」つまり運動量を捨てるための物質を吐かなければならない。磁気モーメントを使えば、回転モーメントのやりとりを衛星間でできる。複数の衛星が、集団で天体観測などのミッションをこなすことができるようになる。人工衛星軌道から離れて、ラグランジュポイントまでいけば、この技術はさらに有効であろう。

磁力線にプラズマを乗せれば、「プラズマの帆」ができ、この「帆」で「太陽風」を受けて、推進できる。JAXAの船木氏は、実験室での実験結果も交えながら、この

「推葉」のいらぬ宇宙探査機の紹介をした。「20 K まで下がるのなら、 MgB_2 が使えるのでは？」との会場の質問に、京大の中村氏から、「クエンチに対する安定性から、高温超伝導体は代えがたいものがある。」とのコメントがあった。コールドプレートは常に太陽と反対側にしておきたいが、クエンチすると姿勢制御に問題が起これ、これができなくなる。

今後、産業化を目指し、超伝導応用研究がほかの分野に浸透していくにつれて、今回のシンポジウムのように、材料研究者、システム研究者、超伝導応用機器研究者が、協力して議論を交わす機会がますます増えるのではないかと感じた。

大崎氏が、リニア新幹線の事業に関する詳細な報告を行ったことにも見られるように、超伝導は、確実に産業化への道を歩んでいる。和泉氏の紹介した海流・潮汐超伝導発電も海洋国家日本としては、世界に先駆けて実現させるだろう。そのように、超伝導が大活躍する未来は、元気に生きているうちに、見たいものだと思う限りであった。

<会議報告 2>

第 4 回超伝導応用研究会シンポジウム/ 第 7 回冷凍部会例会/ 第 74 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 FSST 74th workshop

(株) 東芝
田崎 賢司
Toshiba Corporation
K. TASAKI

第74回超伝導科学技術研究会ワークショップが、低温工学会超伝導応用研究会および冷凍部会と3社共催で、2010年3月2日(火)に前川製作所守谷工場で開催された。今回のテーマは「高温超伝導機器の冷却技術」で、高温超伝導線材を用いた変圧器、ケーブルおよびモータ用冷凍機ならびに冷却技術について4名の先生方からご講演いただいた。また、講演後には約1時間の工場見学を実施した。参加者は90名で、講演や工場見学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、鉄道総研の長嶋氏より、「鉄道車両用超伝導主変圧器に求

められる冷凍機」というタイトルで講演いただいた。鉄道車両は、省エネ、加速性能向上、軌道保守量低減、地盤振動低減を実現するために、その設計にあたっては軽量化が非常に重視されている。鉄道総研では、主変圧器の小型軽量化を目指し、1990年代から変圧器の超電導化に向けた研究開発を進めてきた。2001年より、Bi系高温超伝導線材を用いて、当時の最新型であった新幹線700系向け4 MVA 主変圧器の開発に取り組んだ。実機相当の主変圧器を試作し、66 K のサブクール液体窒素冷却で通電試験を実施した結果、4 MVA の出力、効率約98% (従来品96%) を達成した。重量についても、従来品3,000 kg に対して20%低減した2,400 kg の目標を得たとのことである。一方、必要となる冷凍機仕様は次のようなものである。①冷凍能力1 kW @ 66 K、重量600kg、COP (Coefficient Of Performance; 冷凍能力/消費電力) 0.05の実現、②高信頼性、③耐振性および耐衝撃性確保、④夜間の無電源状態での保冷対策、⑤8年以上のMTBM (Mean Time between Maintenance)、⑥低コスト。技術的ハードルは非常に高いが、CO₂削減などの環境政策をバネにして今後も開発を進めていくとのことである。

次に大陽日酸の吉田氏より、「高温超伝導変圧器用ブレイトン冷凍機の開発」というタイトルで講演いただいた。高温超伝導変圧器に必要な冷却能力は2-10 kW @ 65 K であるが、この領域はこれまでに需要がなかったため、市販の冷凍機の空白地帯となっている。この空白を埋めるためには、スターリング冷凍機やパルスチューブ冷凍機などの蓄冷式小型冷凍機のスケールアップか、あるいはブレイトン冷凍機の小型化のいずれかが必要となる。大陽日酸では、ブレイトン冷凍機が持つ大冷凍能力、長期信頼性、高冷却効率、省スペース、低コストという特長に着目し、ブレイトン冷凍機の小型化に取り組んできた。5軸制御型磁気軸受けを採用した膨張タービンの開発により、目標仕様2 kW @ 65 K、COP0.06 @ 80 K に対して、現状冷凍能力2.4 kW @ 65 K、COP0.05 @ 65 K まで到達している。今後は同じく5軸制御型磁気軸受けを採用した小型タービン圧縮機の開発により目標仕様の到達が可能である。2011年度には試作機が完成する予定とのことである。

次に、前川製作所の仲村氏より、「超伝導ケーブル向けスラッシュ窒素冷却システムの開発」というタイトルで講演いただいた。前川製作所では、高温超伝導ケーブルシステムの冷媒として、液体窒素と固体窒素粒子の混合冷媒であるスラッシュ窒素冷却システムの開発を進めている。スラッシュ窒素では、従来のサブクール窒素より低い温度(63.1 K 近傍)で冷却することができ、かつ固体窒素の融解潜熱により、長時間一定温度に維持で

きるというメリットがある。固体窒素粒子生成には、オーガ法を用いている。オーガ法とは、液体窒素を冷凍機などの冷却面で固化させ、掻き取り羽などを用いて固体窒素を掻き取る方法である。冷却面での熱流速と掻き取り速度を制御して、固体窒素粒子の生成量やサイズを制御している。実用化を考えた場合、サイズ1 mm以下の均一な粒子の生成が必要であるが、現状50～100 μmをピークにもつ細かい粒子の生成に成功しており、エジェクタノズル法や真空法などの従来方式と比較して良好な結果が得られている。現在、ケーブル冷却への適用に向けて、既に試作済みのスラッシュ窒素生成装置を用いた循環式の試験装置の開発を進めているとのことである。

最後に、東京海洋大学の和泉氏より、「船用超電導モータにおける冷却システム」というタイトルで講演いただいた。現在開発が行われている高温超電導モータの多くは、高温超電導コイルを搭載したロータが回転する回転界磁型を採用しており、熱伝導だけで冷却する無冷媒冷却方式の利用は困難である。したがって、冷媒を介してコイルを冷却する必要がある。そのための手段として、(1) 冷凍機で冷却したヘリウムガスを循環装置により強制的に還流させる方法、(2) 冷凍機により冷却・液化されたネオンガスをうい自然対流により冷却を行う「熱サイフォン方式」の2種類が考えられる。東京海洋大学では、システムの構造が簡素で小型軽量化が可能な熱サイフォン方式の開発に取り組んでいる。ネオンガスの凝縮器に無酸素銅製フィンを導入し、冷却効率を従来比で3倍程度向上させることに成功した。また、回転体に冷媒を供給する部位に、極低温冷媒を漏れることなく安定的に供給することを可能とする回転継ぎ手「Cryo-Rotary Joint」を開発し、従来比で体積1/10以下、重量1/12以下、熱損失1/3以下の小型高性能な回転継ぎ手が完成した。現在、高温超電導モータに、これらの要素部品を組み合わせた冷却システムを接続し、冷却・回転の評価試験を実施中とのことである。

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。全講演が終了した後、工場見学が行われた。参加人数が当初予定より大幅に増えたため、2班に分かれての見学となった。スラッシュ窒素試験装置では、装置の窓から液体窒素中に雪のように舞う固体窒素を見せていただいた。また、-60°Cで30 kWの冷凍能力を持つブレイトン冷凍機の実物を紹介いただいた。本装置開発した技術を用いて、今後液体窒素温度のブレイトン冷凍機の開発に取り組むとのことである。最後に、スクリー製造およびコンプレッサー組立ラインを見学させていただいた。コンプレッサーの製造能力は4,000台/年とのことであるが、現在

海外向けの需要が高く、ほぼフル稼働で操業しているとのことである。工場内は非常に整理整頓が行き届いているのが印象的であった。

今回のワークショップは、会場提供、ご講演、工場見学対応と前川製作所殿の全面的なご協力により、参加人数も多く、大変盛況な会議となった。前川製作所殿に心より御礼申し上げます。

<会議報告 3>

超伝導科学技術研究会 第36回シンポジウム報告

Report on the 36th Symposium for Forum of Superconductivity Science and Technology

(株)フジクラ 超電導プロジェクト室
飯島 康裕
Superconductivity Project Team., Fujikura Ltd.
Y. IIJIMA

「超伝導2010－超伝導の新たな可能性へ－」と題して超伝導科学技術研究会の第36回シンポジウムが4月13日、船堀タワーホールにて開催された。同時に第14回目となる超伝導科学技術賞授賞式が実施された。

例年本シンポジウムは同賞受賞者に関連する講演に加えて新しいトピックス講演を取り混ぜる構成となるが、今回は昨年度からスタートした科学技術振興機構 (JST) の産学連携 S-イノベプロジェクトで採択された超伝導プログラムについて特集講演が生まれ、超伝導科学技術研究会協賛企業の線材メーカー4社と併せて展示を行う形になった。S-イノベにはこれまで構想段階であった新しい超伝導応用がいくつか採択されており、出席者の関心も高く参加者は約120名と盛況であった。

今年は特別賞として高エネルギー物理学研究所 (KEK) の山本明教授と国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)・超電導工学研究所の塩原融所長が表彰され、記念講演が行われた。

先ずKEKの山本教授から、「素粒子・宇宙線・加速器科学分野における超伝導技術の開発」と題し、昨年の益川・小林理論のノーベル物理学賞受賞にも貢献することとなった高エネルギー素粒子物理実験加速器・計測機器技術の進展についてご講演戴いた。高速荷電粒子を精密に制御するためには超伝導技術を用いた強電磁界が不可欠であり、過去数十年に渡り継続的に開発され進歩を続けている高性能な金属系超伝導機

器の数々が紹介された。

続いてISTECの塩原所長から、“イットリウム系超電導線材及びその応用開発”と題して、氏が長期にわたりNEDOプロジェクト内で開発を牽引し、現状で最も高性能でかつ低コスト化が期待されるとされるイットリウム系超電導線材と、それを用いて現在進行している応用機器の開発状況が紹介された。環境エネルギー問題解決の有力技術として超伝導応用機器が果たすべき役割は大きく、国内外の期待が大変高まっていること、そして極低温冷却から開放する高温超伝導線材は最も重要な技術であり、今後は民間企業主導の産業化努力が重要になることを示唆された。

超伝導科学技術賞の授与式を経た午後セッションの最初は受賞者の1人である国立天文台の鶴澤佳徳准教授より、南米チリで建設が進められているアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) において、テラヘルツ帯観測に始めて適用される世界最高性能のNbN系SIS受信機の開発について講演頂いた。同受信機をALMA全体に適用すれば太陽系外の惑星の直接観測等が可能になるとのことで、今後これを用いた宇宙科学の飛躍的な進歩が期待される。

続いてS-イノベに関する特集セッションとなり、先ずJSTの石川知宏氏と同プロジェクトで超伝導プログラムオフィサーを務める住友電気工業の佐藤謙一氏から全体構想について説明を頂いた後、5人のプログラマネージャーからそれぞれの採択テーマについて目的と計画を紹介する講演が行われた。S-イノベの超伝導応用プログラムは、近年の大規模プロジェクトの成果で完成域に近づいた高温超伝導線材やSQUIDデバイスを用いて、これまで構想段階に留まっていた各種の超伝導応用技術に対し、最終的な基礎検証に必要な一定の補助を提供して産学協同で産業化への足がかりを得ようとするものである。

九州大学の圓福敬二教授からは、“高温超伝導SQUIDを用いた先端バイオ・非破壊センシング技術の開発”と題して、医療分野を中心とするこれまでにない先進的な非破壊検査技術に適用出来る高性能な高温超伝導SQUIDの開発プログラムが紹介された。

京都大学の雨宮尚之教授からは“高温超伝導を用いた高機能・高効率・小型加速器システムへの挑戦”と題して現在銅鉄マグネットで構成されている癌治療用加速器等の現実的な小型化、運転コスト低減に向けて、極低温におけるクエンチ問題の呪縛のない高温超伝導線による超伝導化を検討する計画が示された。

日本電子の末松浩人氏からは“高温超伝導材料を利用した次世代NMR技術の開発”と題して、大きさがネックになって普及が進んでいない500-800 MHz級のNMR

システムの小型化に寄与する高温超伝導マグネットを適用する開発プログラムが紹介された。

横浜国立大学の塚本修巳教授からは“大出力超伝導回転機器に向けたキーハードの開発”と題して、船用超伝導モーターの開発にあたり船舶応用の各種要請から機器の小型化・高効率化が重要であり、その実現のため求められる低ロス線材・マグネット技術を開発する計画が紹介された。

最後に、鉄道総合技術研究所の富田優氏から、“次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション”と題して、汎用鉄道技術における超伝導応用として直流き電線とその周辺技術の検証を行うプログラムが紹介された。直流超伝導き電ケーブルは、都市部で不可欠な直流電化に伴う諸問題(電磁障害や迷走電流等)を抜本的に解決可能で、送電ロス低減や小型化とは異なる鉄道システム特有のメリットを有している。

以上、究極の基礎科学で活躍する高性能な超伝導機器による成果はやはり大変素晴らしく、また社会的な広がり期待されてきた高温超伝導技術についても目に見える産業応用を世に示すための環境が漸く整いつつある。今後の線材コスト低減の進捗にもよるが、その産業化への手ごかりは既に充分あると感じさせる意義深いシンポジウムであった。

<授賞発表>

「第14回超伝導科学技術賞」発表 On the 14th 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14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、企業グループへの精神的応援、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13年間で合計93件に達する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21年12月25日に第14回超伝導科学技術賞審査委員会が開かれ、合計22件の御推薦に対して慎重な審査が行われた結果、8件(内特別賞2件)が選定されました。受賞の運びとなりまし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。

現在超伝導の研究開発は、応用の主流となっている金属系超伝導線材の性能向上、超伝導の応用範囲を画的に広める銅酸化物系超伝導線材の実用化、常温超伝導の夢を秘める新物質の探索を3つの柱として進められ、重要性を増しております。

来年は超伝導現象発見後100周年を迎えようとしている折から、基礎、材料、応用等の諸分野で引続き新しい進展があると思いますので、本賞の公募に対し今後も広い関連分野から多数の応募をいただく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、またこれからの活動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。

(2) 受賞者、授賞テーマと授賞理由

特別賞

① 山本 明 殿

「素粒子・宇宙線・加速器科学分野における超伝導技術の開発」

近年飛躍的に発展した素粒子、宇宙線、加速器分野における超伝導応用技術の開発に大きいリーダーシッ

プを發揮した。まず国際協力により建設が推進された欧州共同原子核研究機構の大型ハドロン衝突型加速器において高度な性能の求められる超伝導磁石システムの完成に貢献した。さらにその素粒子物理実験用超伝導磁石を完成するとともに、南極周回気球による宇宙線観測用超伝導磁石の開発に成功した。この成果は、高強度化されたアルミニウム安定化超伝導線材を新たに開発し、超伝導コイルを極限的に薄く軽量化して、素粒子透過性の良い磁場空間を実現したことに基づく。またこの超伝導線材は理化学研究所の世界初の超伝導リングサイクロトロンにも用いられた。この様に新しい型の超伝導磁石と線材を開発して、先端科学技術と国際協力の進展に貢献した功績は極めて顕著なものと認められる。

② 塩原 融 殿

「イットリウム系超電導線材及びその応用開発に対する貢献」

塩原融氏は、国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所において、長年に亘りイットリウム系超電導線材及びその応用研究に関し、研究開発を牽引し、日本の技術を常に世界のトップレベルに維持する業績を挙げた。

NEDO「超電導応用基盤技術開発」プロジェクトにおいては、それまで互いに連携なく進められていた同線材の開発を国内で一元化し、とくにII期からはプロジェクトリーダーとして研究開発の方向性決定並びに各技術課題解決の指導を効果的に実施し、常に米国と高いレベルの開発競争を繰り広げた。同プロジェクトの成果を機器開発につなげるべくスタートした「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおいても引き続きプロジェクトリーダーとして日本における超電導機器開発の中心的役割を果たし、米国エネルギー省の国家プロジェクト評価委員を務めるなど、国際的にも広く活躍している。

以上、今日の超電導科学技術の発展に対する貢献は極めて顕著と認められる。

科学技術賞

① 山中 昭司 殿

「層状窒化ハロゲン化物、シリコンクラスレート超伝導体の開拓」

銅酸化物高温超伝導体の発見以来、層状構造を有する物質を中心に新超伝導体の開拓が活発に行われ、今日までに、ユニークな結晶構造を持つ超伝導物質が数多く発見されている。このなかで、山中氏は、固体化

学を背景に独自のセンスと巧みな合成技術を生かし、10種以上の新規超伝導物質系を開拓し、世界の物性研究者の注目を集めてきた。特に、層状窒化ハロゲン化合物では最高25.5 K (HfNCl系)の臨界温度が記録されたが、そこには窒化ハロゲン化合物の合成技術開発、インターカレーションによるキャリア注入と超伝導層間距離の調節による2次元性の制御、という発想・技術が組合わされている。さらに最近、伝導層の構造が異なるTiNCl系においても同様な手法で16.5 Kの超伝導を実現している。また、シリコンクラスレート化合物においても、金属原子を多様なケイ素のかご状構造に包接する発想のもと、数多くの新しい構造を持つ超伝導体を発見している。

以上、“すき間の制御とドーピングによる機能付与”の戦略により数多くの新規超伝導体系を開拓してきた一連の山中氏の研究は、超伝導物質研究分野の発展に顕著に貢献するものである。

② 永崎 洋 殿、伊豫 彰 殿、李 哲虎 殿 「高温超伝導体における T_c 向上指針の提唱とその実験的検証」

超伝導体における臨界温度 (T_c) の決定因子は多数あるが、その重要な因子の一つに結晶構造の歪みとそれに由来する電子状態の変化がある。本受賞者らはこれに着目し、銅酸化物および鉄ニクタイト高温超伝導体において、構成元素の選択や化学組成の精密制御など構造化学的観点から、より高い T_c が実現する指針を提唱し実験的に証明してきた。銅酸化物ではビスマス系およびタリウム系超伝導体において超伝導を担う CuO_2 面から離れた部分の局所的な構造、組成制御によって物質本来の高い T_c が実現することを示し、さらに最近の鉄ニクタイト高温超伝導体では、超伝導を担う鉄とヒ素の結合角が T_c の重要な決定因子となることを世界に先駆けて提唱し、一連の実験からその傾向を証明した。これらの実験において受賞者らは単結晶育成、後熱処理、高圧合成、中性子構造解析などの技術を駆使し、信頼性の高いデータをもとに臨界温度の傾向を明らかにしている。

以上の成果は、高 T_c の新物質設計、超伝導発現機構の理解、および高温超伝導材料の高機能化を促進するものであり、超伝導科学技術発展への寄与は極めて顕著である。

③ 川崎 雅司 殿、岩佐 義宏 殿、 上野 和紀 殿、下谷 秀和 殿 「電界誘起超伝導の発見」 これまで絶縁体の母物質に対して化学的なドーピン

グを行うことによって超伝導が発現した例は数多くあり、また超高压の効果によって超伝導を示す物質の存在もよく知られている。同様に非常に強い電界による絶縁体の超伝導化も原理的には可能とされていたが、超強電界に耐えられる絶縁膜が作製できず実証例はなかった。酸化物エレクトロニクス、有機エレクトロニクスの両分野で世界最先端技術を有する本受賞者らは、技術の融合と独自のアイデアによって強電界印加の課題を解決し、電界誘起による超伝導を初めて実証した。ゲート絶縁膜をイオン伝導体に置き換えることによって作製した電気二重層トランジスタにより、不純物を含まない絶縁性の SrTiO_3 単結晶へキャリア蓄積することで0.4 Kでの超伝導を実現した。さらに蓄積キャリア数を増大する技術開発を経てZrNClでは $T_c = 15$ Kを達成した。高濃度のキャリア蓄積技術が確立できたことにより、今後、多彩な系での超伝導化が大いに期待できる。

以上、本研究成果は物性物理学・物質科学における半世紀の夢を実現しただけでなく、超伝導物質探索に新しい可能性を拓いた意義深いものと位置付けられる。

④ 鶴澤 佳徳 殿、Kroug Matthias 殿、 武田 正典 殿、小嶋 崇文 殿、 藤井 泰範 殿、野口 卓 殿、王 鎮 殿 「ALMA 巨大電波望遠鏡バンド10用超伝導 SIS 受信機技術の開発」

技術的に未開拓電磁波領域となっているテラヘルツ帯において、世界に先駆けて、超伝導 SIS ヘテロダイナ受信機の開発に成功した。Nbのギャップ周波数からの制約を克服するために、1 THz以上のギャップ周波数を有する窒化ニオブチタン (NbTiN) に着目し、DCスパッタ法により優れた超伝導特性を有する NbTiN 薄膜の作製に成功した。また、 NbTiN 薄膜と SIS トンネル接合を集積した SIS ミキサ回路作製技術や導波管技術を開発した。これにより、日・米・欧国際共同プロジェクトである南米チリに建設中のアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) の最高周波数帯バンド10 (0.78-0.95テラヘルツ) 受信機に課された仕様である「量子雑音の5倍以下」という極めて挑戦的な雑音温度を世界で初めて達成した。これは、ALMA計画の実現に大きく貢献するだけでなく、テラヘルツ帯超伝導受信機の実用化に向けた技術的課題の克服に先鞭をつけたものである。

⑤ 菊池 章弘 殿、竹内 孝夫 殿、 山田 隆治 殿、Emanuela Barzi 殿、 土屋 清澄 殿、中川 和彦 殿、 小林 道雄 殿 「急熱急冷法による Nb_3Al 線材の安定化技術の開

発とその大容量導体への先駆的展開」

Nb₃Al 線材は耐歪み特性に優れており、巨大な電磁力がともなう高磁場磁石への応用が早くから期待されてきた。特に、急熱急冷・変態法線材は、低温拡散法線材よりも高い臨界電流密度を有するため、実用スケールの長尺線材の実現が待ち望まれていた。急熱急冷・変態法は、その製法の特殊性から、安定化銅の効率的な付与が長尺化とともに実用化における最大の課題となっていたが、受賞者らはその課題を解決し、安定化銅が強固に付与された1 km 超の長尺 Nb₃Al 線材の開発に初めて成功した。これにより、従来はソレノイド型コイルに限定されていた Nb₃Al 線材の応用範囲を、核融合炉や加速器用磁石等へ広く展開することが可能となった。さらに、受賞者らは、この新しい長尺銅安定化 Nb₃Al 線材を使用した加速器用ラザフォードケーブル導体及びこれを用いたレーストラック型磁石を試作するなど、実用性も確認している。これら一連の先駆的な研究は、加速器応用のみならず核融合炉応用などに対しても明るい見通しを与える成果と評価できる。

- ⑥ 岡田 道哉 殿、北口 仁 殿、
和久田 毅 殿、木吉 司 殿、
濱田 衛 殿、高橋 雅人 殿、
細野 政美 殿、柳澤 吉紀 殿

「NMR 高感度化のための新技術開発」

重要な超伝導応用機器である NMR では、検出感度向上が求められている。受賞者らにより、感度向上を目指した二つの画期的な NMR 技術が新たに開発された。一つは、高感度が期待できるソレノイド方式極低温冷却 NMR プローブ、及び、それを成立させるためのスプリット方式の NMR 用超伝導磁石 (600 MHz) という、どちらも世界で初めてとなる開発である。この新型 NMR 装置により世界最高の SN 感度 10,000 を実現したことは、NMR 計測の新しい世界を拓いていく成果である。もう一つは、高温超伝導コイルを用いた高分解能 NMR の開発である。高温超伝導コイルでは磁場の空間的均一度や時間的安定度に技術的困難があった。それらを克服して、電源駆動の高温超伝導コイルを使用した装置 (500 MHz) においても、タンパク質の高分解能 NMR スペクトルが永久電流運転マグネット使用時と同等に取得できることを世界に先駆けて実証した。これは、高温超伝導材料でしか実現できない更なる高磁場化による感度向上へむけての道を拓いていく成果である。以上のように、これら二つの開発は我が国の超伝導 NMR 技術を世界トップレベルまで牽引していく成果であり、その功績はきわめて大きい。

研究会の動き

〔平成22年(2010年)1月1日～平成22年(2010年)3月31日〕

第14回超伝導科学技術賞審査委員会

平成21年度第2回

日時:平成22年2月10日(水)14:00～15:00

場所:NIMS 東京事務所 会議室

出席者: 委員9名 事務局1名

議事:

(1) 授賞理由の確認及び授賞者の確定

幹事会

平成21年度第6回

日時:平成22年2月10日(水)15:15～17:00

場所:NIMS 東京事務所 会議室

出席者: 幹事8名 事務局1名

議事:

- (1) 第74回ワークショップについて
- (2) 第75回ワークショップについて
- (3) 第14回超伝導科学技術賞について
- (4) 第36回シンポジウムについて
- (5) 平成21年度収支決算見込みについて
- (6) 平成22年度事業計画及び収支予算について

第74回超伝導科学技術研究会ワークショップ/第4回超伝導応用研究会シンポジウム/第7回冷凍部会例会共催講演会

日時:平成22年3月2日(火)13:30～17:00

場所:前川製作所 守谷工場

テーマ:「高温超伝導機器の冷却技術」

出席者数: 90名

プログラム:

- 13:30-13:40 開会挨拶
- 13:40-14:10 「鉄道車両用超伝導主変圧器に求められる冷凍機」 秦 広 (鉄道総研)
- 14:10-14:40 「超伝導変圧器用ブレイトン冷凍機の開発」 吉田 茂 (大陽日酸)
- 14:40-15:10 「超伝導ケーブル向けスラッシュ窒素冷却システムの開発」 仲村 直子 (前川製作所)
- 15:10-15:40 「船用超伝導モータに求められる冷凍機」 和泉 充 (東京海洋大)
- 15:40-15:50 休憩
- 15:50-16:50 工場見学(スラッシュ窒素試験装置、圧縮機工場等)及び質疑 前川製作所
- 16:50-17:00 閉会挨拶

未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会
第75回ワークショップ
 (低温工学協会材料研究会と合同開催)
「超伝導線材オールスターズ -開発・応用動向と高性能化の可能性-」
 日時 : 6月16日(水) 13:00-18:00
 場所 : 東京大学武田ホール (文京区弥生 2-11-16)
 ※詳細は決まり次第ホームページに掲載します。
<http://www.snnt.or.jp/~fsst/event.html>

超伝導科学技術研究会 編集委員会 委員

松本 明善	(独)物質・材料研究機構 超伝導材料センター 主任研究員	日高 睦夫	(財)国際超伝導産業技術研究センター 超伝導工学研究所 低温デバイス開発室室長
伊豫 彰	(独)産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 超伝導材料グループ グループ長	木村 茂行	(社)未踏科学技術協会 理事長
小泉 勉	昭和電線ケーブルシステム(株) 技術開発センター 超伝導技術開発室 主査	大貫留美子	(社)未踏科学技術協会

<FSST NEWS No.125 目次>

<トピックス 1>

ナノ粒子が分散した Y 系超電導線材の透過型電子顕微鏡観察
ファインセラミックスセンター 加藤 丈晴、平山 司 …………… 1

<トピックス 2>

S-イノベで動き出す超伝導システム研究
科学技術振興機構・住友電気工業 佐藤 謙一 ……………5

(1) 高温超伝導 SQUID を用いた先端バイオ・非破壊センシング技術の開発に向けて
九州大学 圓福 敬二 ……………7

(2) 高温超伝導を用いた高機能・高効率・小型加速器システムへの挑戦
京都大学 雨宮 尚之 ……………9

(3) 高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発
日本電子 末松 浩人 ……………11

(4) 大出力超伝導回転機器に向けたキーハードの開発
横浜国立大学 塚本 修巳 ……………14

(5) 次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション
鉄道総合技術研究所 富田 優 ……………17

<会議報告 1>

第 57 回 応用物理学関係連合講演会
産業技術総合研究所 田中 康資 ……………20

<会議報告 2>

第 4 回超電導応用研究会シンポジウム／第 7 回冷凍部会例会／
第 74 回超伝導科学技術研究会ワークショップ
東芝 田崎 賢司 ……………21

<会議報告 3>

第 36 回 シンポジウム
フジクラ 飯島 康裕 …………… 22

<授賞発表>

「第 14 回超伝導科学技術賞」発表
審査委員会委員長 太刀川 恭治 ……………24

○研究会の動き …………… 27

○国内超伝導関連会議／国際会議及び国外の主要な会議 …………… 27