

# FSST NEWS

(社)未踏科学技術協会  
平成23年10月20日発行  
〒105-0003  
東京都港区西新橋1-5-10  
新橋アマノビル6階  
Tel: 03-3503-4681  
Fax: 03-3597-0535  
Email: fsst@sntt.or.jp

Forum of Superconductivity	No. 131
Science and Technology News	

## <FSST NEWS No.131 目次>

### <トピックス 1>

GdBCO 内挿コイル超伝導マグネットによる 24 テスラの磁場発生  
物質・材料研究機構 松本 真治、木吉 司……………2

### <トピックス 2>

鉄白金系高温超伝導体の発見  
岡山大学大学院自然科学研究科、JST-TRIP 野原 実……………6

### <会議報告 1>

第 26 回国際低温物理会議報告 産業技術総合研究所 伊豫 彰……………11

### <会議報告 2>

(1) 第 22 回国際磁石技術会議 物質・材料研究機構 西島 元……………12  
(2) MT22 会議報告 — 加速器用および大型マグネット関連 —  
高エネルギー加速器研究機構 佐々木 憲一……………13

### <会議報告 3>

#### EUCAS/ISEC/ICMC

(1) EUCAS 会議報告 — Large Scale — 早稲田大学 王 旭東……………14  
(2) EUCAS, ISEC, ICMC 超伝導 100 周年記念会議報告 — エレクトロニクス関連 —  
横浜国立大学大学院工学研究院 吉川 信行……………16  
(3) 超伝導 100 周年会議報告 — Materials セッション — 東京大学 山本 明保……………17  
(4) 超伝導 100 周年会議報告 — 線材部門 — 物質・材料研究機構 藤井 宏樹……………18

### <会議報告 4>

応用物理学会 超伝導 100 周年特別シンポジウム「100 年の歴史に学ぶ超伝導」  
国際超電導産業技術研究センター 筑本 知子……………19

### <会議報告 5>

日本物理学会 超伝導 100 周年記念講演 産業技術総合研究所 竹下 直……………20  
○The 15<sup>th</sup> Japan-US workshop on advanced superconductors ……………22  
○第 16 回超伝導科学技術賞候補者公募 ……………24  
○研究会の動き ……………25  
○国内超伝導関連会議／国際会議及び国外の主要な会議 ……………25

## <トピックス 1>

### GdBCO 内挿コイル超伝導マグネットによる 24 テスラの磁場発生

Generation of a magnetic field of 24 T using a  
GdBCO insert coil.

物質・材料研究機構

松本 真治、木吉 司

ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社

大塚 昭弘、濱田 衛

理化学研究所

前田 秀明

千葉大学

柳澤 吉紀、中込 秀樹

株式会社 JEOL RESONANCE

末松 浩人

National Institute for Materials Science

S. Matsumoto, T. Kiyoshi

Japan Superconductor Technology, Inc.

A. Otsuka, M. Hamada

RIKEN

H. Maeda

Chiba University

Y. Yanagisawa, H. Nakagome

JEOL RESONANCE, Inc.

H. Suematsu

#### 1. はじめに

RE系酸化物高温超伝導 (HTS) 線材で製作したコイルを組込んだ超伝導マグネットは、実用段階になりつつある。我々は、(独) 科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ) 研究課題名「高温超伝導材料を利用した次世代 NMR 技術の開発」において、高温超伝導材料を超伝導マグネットおよび NMR プロブに応用した、次世代高温超伝導 NMR システムの開発を行っている。本研究課題においては、HTS コイルのみで NMR マグネットを製作することにより、従来の低温超伝導 (LTS: Nb-Ti, Nb<sub>3</sub>Sn) NMR マグネットに比べて、マグネットのサイズをコンパクトにすることを目指している。さらに、HTS 材料を用いた NMR 検出コイルを組込んだ低温プロブを開発し、測定感度を向上させることを目指している。HTS マグネットと HTS 検出コイルを組み合わせた HTS-NMR システムを開発し、マグネットのコンパクト化と測定感度の両立を図ることで、研究・開発現場での、強磁場 NMR システムの活用を容易にできると期待している。

本プロジェクトでは、600 MHz (14.1 T) HTS-NMR システムの開発を目指している。

LTS 線材による強磁場 NMR マグネット開発においては、マグネットを運転したときに線材に作用するフープ応力が、線材の耐力 (代表的には 200 MPa 程度) を超えないように設計 (フープ応力基準) されている。マグネットのコンパクト化のため、線材に求められる条件は、LTS 線材より高い臨界電流密度特性と耐力である。最近では、Bi2223 補強線材や RE 系線材といった HTS 線材が、マグネットのコンパクト化に適したものであるとして有望視されている。特に、RE 系 HTS 線材は、高い臨界電流密度特性 ( $> 1,000 \text{ A/mm}^2 @ 30 \text{ T}, 4.2 \text{ K}$ ) と耐力 ( $\sim 1 \text{ GPa}$ ) を有するので、マグネットのコンパクト化への応用が期待できる。

RE 系 HTS 線材を用いて NMR マグネットを製作するためには、まず、線材のコイル化技術を確認する必要がある。非磁性の HASTELLOY<sup>®</sup> 基板を持つ線材を用いてテストコイルを製作し、17.2 T の印加磁場中で特性を評価した。コイルの製作は、NMR マグネットで要求されるレイヤー巻線で行った[1]。これらのテストコイルの製作と特性評価より得られた知見をもとに、実機サイズに近い内外径を持つ内挿コイルを製作し、17.2 T の磁場を発生させる Nb<sub>3</sub>Sn および Nb-Ti 超伝導コイルと組み合わせ、4.2 K の運転温度で、超伝導マグネット単独での最高磁場 24.0 T を発生させることができた。

#### 2. RE 系 HTS 線材のコイル化技術の構築

RE 系 HTS 線材を NMR マグネットへ応用するためには、テープ形状の線材をコイルに巻線する必要がある。テープ形状の線材を用いてコイル化する場合、パンケーキ巻線により製作するのが一般的であるが、NMR マグネットにおいては、高い製作精度、コイル断面あたりの高い運転電流密度が求められるため、レイヤー巻線による製作が不可欠である。よって、RE 系テープ線材でのレイヤー巻線コイル化技術を確認する必要がある。また、RE 系線材を用いてコイルを製作する場合、線材の剥離が容易に起きてしまうことに注意を払わなければならない。特に、コイルをエポキシ樹脂で含浸した場合、コイルの劣化が顕著に現れることが報告されている[2]。我々のグループでは、剥離の原因について検討するとともに、RE 系線材をコイル化するときには、含浸材にエポキシ樹脂を使用するよりも、ワックス (パラフィン) を使用するか、含浸を行わない方が線材の剥離を引き起こさないと結論を得た[2,3]。

RE 系線材を用いたレイヤー巻線でのコイル製作技術の確認のため、テストコイルを製作し、17.2 T の印加磁場中において、テストコイルの強磁場中での特性、特に

表 1. REBCO テストコイル諸元・特性

REBCOコイル	#1	#2	#3	#4
線材形状 [mm]	4.00×0.11	5.00×0.22	4.00×0.11	4.00×0.11
コイル内径 [mm]	79.10	79.00	78.90	79.10
コイル外径 [mm]	82.50	85.30	83.50	82.40
コイル長 [mm]	98.44	100.54	100.09	96.60
層数	8	10	8	8
ターン数	179	186	184	180
通電電流 [A]	353@10T	398.8@17.2T	293@17.2T	209.2@17.2T
電流密度/線材 [A/mm <sup>2</sup> ]	802.3	362.5	665.9	475.5
電流密度/コイル [A/mm <sup>2</sup> ]	377.6	234.2	234.2	236.3
BJR [MPa]	340	262	473	331

耐電磁力特性を評価してきた。テストコイルは、50 μm厚の非磁性HASTELLOY®を基板とするSuperPower Inc.製線材(RE-S; #1, #3, #4)および100 μm厚の非磁性HASTELLOY®を基板とする株式会社フジクラ製(RE-F; #2)の線材を使用し製作した。テストコイル製作に用いられた各線材には、安定化銅層が含まれている。テストコイルは、巻線後、ワックスによる含浸を施した。これらのテストコイルの諸元および特性を表1に示す[1]。コイルにかかる電磁力を、BJRであらわす。巻線内の線材が独立に動く仮定すると、フープ応力はある線材を貫く磁場の軸方向の磁場 $B$ 、線材(絶縁のない状態)の通電電流密度 $J$ 、その点の半径 $R$ の積 $BJR$ で見積もられる。表1にはコイル内での最大のBJRを示している。コイル#1は、10 Tの印加磁場中で試験中、通電電流353 Aでクエンチしコイルが焼損した。コイル#2は、試験プローブの容量限界である400 Aまでの通電に成功し、最大のBJRは262 MPaと見積もられた。コイル#3は、4層目に線材間接続を導入し、実機コイルでは不可避である線材間接続を含めたコイル特性を評価した。結果は、17.2 Tの印加磁場中で293 Aまで通電したところでコイルは、クエンチした。最大のBJRは473 MPaと見積もられた。この結果は、線材間接続の有効性とRE系線材のもつ、高い臨界電流密度特性と耐電磁力特性を示している。コイル#4は、#1と同様の結果であり、RE-S線材を用いたコイルでは、#3で非常に良い特性を示したが、特性にばらつきがみられた。RE-F線材で製作したコイル#2は、さらに高い電磁力下での特性評価が必要であったので、400 MPa以上の電磁力下での特性を検証するためにコイルを製作し、17.2 Tの印加磁場中で評価した。

### 3. GdBCO内挿コイルによる24 T発生

これまでに得られた、RE系線材のコイル化技術に関する知見をもとに、さらに強磁場中での耐電磁力特性を評価するために、100 μm厚の非磁性HASTELLOY®を

表 2. GdBCO 内挿コイル諸元・特性

GdBCO内挿コイル	
線材形状 [mm]	5.00×0.15
線材形状(絶縁込) [mm]	5.10×0.25
コイル内径 [mm]	50.27
コイル外径 [mm]	112.80
コイル長 [mm]	88.33
層数	124
ターン数	2010
通電電流 [A]	321@17.2T
電流密度/線材 [A/mm <sup>2</sup> ]	428.0
電流密度/コイル [A/mm <sup>2</sup> ]	233.6
BJR [MPa]	408

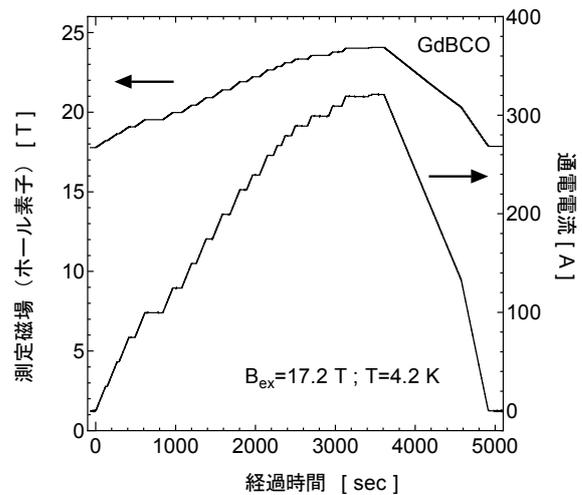
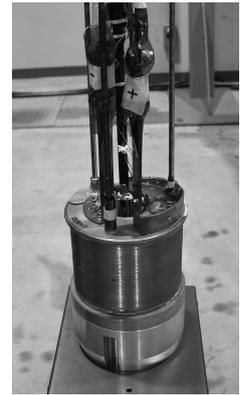


図 1. 4.2 Kにおける GdBCO 内挿コイル通電電流および中心磁場。中心磁場は、ホール素子により測定。

基板とする株式会社フジクラ製Gd-Ba-Cu-O (GdBCO)線材(RE-F)を用いて、実用機レベルのコイル内外径を有するGdBCO内挿コイルを製作し、同様に中心磁場17.2 Tの超伝導マグネットに組込み、特性を評価した。製作したGdBCOコイルの諸元を表2に示す。内径50.27 mm、外径112.80 mm、コイル長88.33 mmをもつコイルである。コイル長は試験用サイズではあるが、内径や外径は、NMRマグネットの最内層コイルの実用機レベルのものであり、コールドボアは直径40 mmである。コイルはレイヤー巻線で作製され、ワックス含浸を施した。

GdBCO、Nb<sub>3</sub>Sn、Nb-Tiコイルからなる超伝導マグネットは、4.2 Kで試験された。GdBCOコイルは、Nb-TiおよびNb<sub>3</sub>Snコイルが発生させた磁場中(中心磁場17.2 T)において単独で励磁された。GdBCOコイルは、図1に示すように、コイル電圧を注意深く観測しながら、徐々に通電電流を増加させた。その結果、0.1 μV/cmのコイル電圧基準以下で、321 Aまで、クエンチすることなく通電することができた。GdBCO、Nb<sub>3</sub>Sn、Nb-Tiコイルからなる超伝導マグネットが発生する磁場をホール素子

で測定した。図1に測定したマグネット中心磁場を示す。ホール素子は、通電電流が321 Aのとき、24.07 Tを示した。

GdBCO等のRE系線材の臨界電流は、線材がテープ形状のため、テープ面を貫く磁場の方向に大きく依存する。今回、GdBCOコイルを製作・評価するにあたり、GdBCO線材の臨界電流のテープ面を貫く磁場角度依存性は次式を用いた[4]。

$$\frac{I_c(B, \theta)}{I_c(B, 0)} = \frac{4^2}{(\theta^{1.8} + 4^2)}(1 - 0.16) + (0.16) \quad (1)$$

テープ面を貫く磁場の角度 $\theta$ は、臨界電流が最大となる磁場がテープ面内にあるときを $\theta=0^\circ$ と定義している。実際は、GdBCO層のc軸の傾きにより、 $\theta=0^\circ$ において臨界電流が最大とはならない[5,6]。しかしここでは、c軸の傾きの影響については考慮していない。

通電電流が321 Aのとき、GdBCOコイル内で最も負荷率(通電電流 $I_{op}$ の磁場の強度と角度に依存した臨界電流 $I_c(B, \theta)$ に対する比) $I_{op}/I_c(B, \theta)$ が最大となる磁場と角度をコイルの諸元を用いて計算した。負荷が最大となるのは、GdBCO線材を貫く磁場が19.23 T、角度 $\theta=8.95^\circ$ の場合で、負荷率 $I_{op}/I_c(B, \theta)=0.74$ となった。この点での負荷を図2に示す。図2中の臨界電流の磁場依存性は、(1)式より $\theta=8.95^\circ$ の場合について得られたものである。また、負荷が最大となるコイル内での位置は、コイル上下端面上、半径41.38 mmの円周上にあった。

321 Aの電流を通電しているときの、GdBCOコイル内での電磁力 $BJR$ の最大値は、408 MPaでありその位置は、コイル上下端面上、最外周上にあった。GdBCOコイルは、LTSコイルでの値を大きく上回り、400 MPaを超える高い耐電磁力特性を示した。

GdBCO、Nb<sub>3</sub>Sn、Nb-Tiコイルからなる超伝導マグネットが発生する磁場をホール素子で測定した結果は、図1に示したように、通電電流321 Aで24.07 Tに達している。GdBCOコイルは、Nb<sub>3</sub>Sn、Nb-Tiコイルが発生する17.2 Tの磁場中で励磁を行ったので、図1においては、マグネット中心磁場をGdBCOコイルへの通電電流に対してプロットしている。GdBCOコイルに通電する前に、ホール素子により測定されたコイル中心磁場は、17.78 Tであったので、GdBCOコイルは、6.29 Tの磁場を発生することに成功している。また、各コイルの室温でのパラメータを用いた場合、計算により得られたマグネット中心の磁場は、23.96 Tである。一方、銅を室温から4.2 Kへ冷却することにより得られる熱収縮率と同程度の0.3%の収縮率を考慮したコイルパラメータを用いた場合、計算により得られたマグネット中心の磁場は、24.03 Tであった。よって、GdBCO、Nb<sub>3</sub>Sn、Nb-Tiコイルからなる超伝

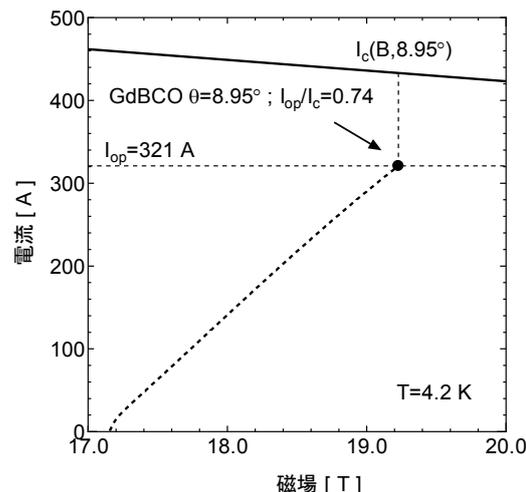


図2. 4.2 KにおけるGdBCO内挿コイルの負荷率。負荷が最大となるコイル内の位置、その点にある線材を通過する磁場の角度および強度が通電電流に依存する。通電電流321 Aの場合、負荷率を決定する点を通過する磁場、角度、負荷率は図のように決まる。各通電電流での負荷率を破線で表示する、ただし負荷率を決定するコイル内の位置は各電流により異なる。

導マグネットが、マグネット中心において24.0 Tの磁場を発生することに成功したと考える。この結果は、超伝導マグネットが発生させた磁場(マグネット中心磁場での単純な比較)の最大の値である。これまで、超伝導マグネットが達成した最大値は、Bruker BioSpin社により達成された1 GHz-NMRマグネットの中心磁場23.5 T(運転温度2.2 K以下)であった[7]。今回、より大きな磁場を、400 MPaを超える高い耐電磁力特性を示し発生させることができたことに加え、これまで20 Tを超える超伝導マグネットが約2 K以下の超流動ヘリウム中で運転されてきたことに対し、今回の結果を液体ヘリウム温度4.2 Kにおいて達成できたことは、コンパクト化したHTS-NMRシステムを開発し、産業・研究現場での強磁場NMRシステムの活用を目指している本研究を大きく前進させるものと考えている。また、RE系線材の強磁場中での特性は、National High Magnetic Field Laboratoryにおいて、外部磁場に、19 T水冷銅マグネットを用いて、直径9.5 mmのボア径をもつYBCOコイルを内挿したマグネットが、26.8 Tの中心磁場の発生に成功したことが報告されている[8]。今回24.0 Tの磁場発生に成功したGdBCOコイルは、内径50.27 mm、コールドボア径40 mmであり、実用機レベルの内径サイズを有しており、400 MPa超の高い耐電磁力特性を実証できたことから、GdBCO線材を用いたコイルは、さらなる強磁場中での運転実績を蓄積し、その結果を応用することが大いに期待されている。しかしながら、RE系線材を用いたコイルを実用化するた

めには、いくつかの課題がある。その中で、最も重要なものは、RE系コイルのクエンチによる劣化の問題である。この問題は、これまで多くの報告がなされてきた、例えば、我々のプロジェクトの中で行ってきた試験においても、コイルのクエンチ後の著しい劣化が認められた[1]。よって、RE系コイルを実用化するには、クエンチ保護の方法、あるいはコイルをクエンチさせない方法を確立する必要があり、本プロジェクトにおいても現在検討を行っている。

#### 4. まとめ

(独)科学技術振興機構の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ)研究課題名「高温超伝導材料を利用した次世代NMR技術の開発」において、高温超伝導(HTS)マグネットとHTS検出コイルを組み合わせた、HTS-NMRシステムを開発し、マグネットのコンパクト化と測定感度を向上させることで、研究・開発現場における、強磁場NMRシステムの活用を容易にすることを目標とした、次世代HTS-NMRシステムの開発を行っている。本プロジェクトでは、600 MHz (14.1 T) HTS-NMRシステムの開発を目指しており、その実現のためにRE系線材のコイル化技術の構築を進めてきた。Gd-Ba-Cu-O (GdBCO) 線材を用いて、実用機レベルのコイル内外径を有するGdBCO内挿コイルをNMRマグネットに求められるレイヤー巻線で製作し、Nb<sub>3</sub>SnおよびNb-Tiからなる、中心磁場17.2 Tの超伝導マグネット中で試験を行った。その結果、超伝導マグネットが発生させる磁場では世界最高の、マグネット中心磁場24.0 Tを発生することができた。また、このとき、GdBCOコイル内での最大*BJR*が408 MPaに到達していると見積もられ、GdBCOコイルの高い耐電磁力特性を示すことができた。今回の結果は、RE系線材の特徴である、高臨界電流密度、高耐電磁力特性を活かすことで達成できる、コンパクト化HTS-NMRマグネットの開発を大きく前進させるものであった。

#### 謝辞

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ)の支援によって行われた。

本コイル試験は、(独)物質・材料研究機構強磁場ステーションの支援を受けて行われた。

#### 参考文献

- [1] S. Matsumoto, S. Choi, T. Kiyoshi, A. Otsuka, M. Hamada, H. Maeda, Y. Yanagisawa, H. Nakagome and H. Suematsu: The 22<sup>nd</sup> International Conference on Magnet Technology 1DP1-3.
- [2] T. Takematsu, R. Hu, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, D. Uglietti, T. Kiyoshi, M. Takahashi and H. Maeda: *PhysicaC* **470** (2010) 674-677.
- [3] Y. Yanagisawa, H. Nakagome, T. Takematsu, T. Takao, N. Sato, M. Takahashi and H. Maeda: *PhysicaC* **471** (2011) 480-485.
- [4] A. Otsuka, T. Kiyoshi and M. Takeda: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **20** (2010) 596-599.
- [5] B. Maiorov, B. J. Gibbons, S. Kreiskott, V. Matias, Q. X. Jia, T. G. Holesinger and L. Civale: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **15** (2005) 2582-2585.
- [6] D. Uglietti, H. Kitaguchi, S. Choi and T. Kiyoshi: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **19** (2009) 2909-2912.
- [7] <http://www.bruker-biospin.com/pr090601.html>
- [8] D. Larbalestier: National High Magnetic Field Laboratory News & Press Releases (2007) August 7

## <トピックス 2>

### 鉄白金系高温超伝導体の発見 Discovery of Iron-Platinum-Arsenide Superconductors

岡山大学大学院自然科学研究科、JST-TRIP  
野原 実  
Okayama University and JST-TRIP  
M. Nohara

#### 1. 高温超伝導体とサンドイッチ

第一世代の超伝導物質は、今からちょうど100年前の  
カマリング・オネスによる発見をその祖とする金属系超  
伝導体といえる。今日までに第一世代では $MgB_2$ におい  
て最高の超伝導転移温度39 Kが実現されている[1]。第  
二世代は、1986年にベドノルツとミュラーが発見した銅  
酸化物超伝導体で、その最高の転移温度はHg系におけ  
る135 Kとなっている。2008年東京工業大学の細野ら  
によって発見された鉄系超伝導体は、第三世代の超伝  
導体と位置づけることができる[2]。第二世代の銅酸化  
物、第三世代の鉄系に共通の特徴に、層状の結晶構  
造がある。いずれも、超伝導を担う $CuO_2$ 層あるいは  
 $Fe_2As_2$ 層の間にスペーサー層と呼ばれる層間物質が挟  
まった構造を持つ。これはサンドイッチに例えることが  
できる。パンにあたる部分が超伝導層で、ベドノルツとミュ

ラーは $CuO_2$ でできた、とてもおいしいパンを発見した。  
細野らは $Fe_2As_2$ でできた、また別のおいしいパンを発見  
した。この2種類のパン以上に魅力的なパンは、いまの  
ところ見つかっていない[3]。

限られたパンしか手に入らない状況で、コックたちの  
腕の見せ所は具材の工夫にある。鉄系超伝導体では、  
今日までに開発された層間物質(具材)は大きく3つに  
分類できる。その第一類がアルカリ金属やアルカリ土類  
金属で、 $LiFeAs$ のLi [4]、 $BaFe_2As_2$ のBa[5]が該当する。  
この具材は素材が限られており、物質のバリエーション  
は出尽くした感がある。最高の超伝導転移温度は  
( $Ba_{0.6}K_{0.4}$ ) $Fe_2As_2$ における38 Kである[5]。第二類は、螢  
石構造から派生する層間物質群で、 $LaFeAsO$ のLaO層  
[2]や $CaFeAsF$ のCaF層[6]がある。この具材も、素材がア  
ルカリ土類金属と希土類金属に限られる。希土類元素  
を置換した $GdFeAsO$ において鉄系における最高の転移  
温度56 Kが実現されている[7]。第三類が金属酸化物か  
らなる層間物質群で、ペロブスカイト型構造の層間物質  
をもつ $Sr_3Sc_2O_5Fe_2As_2$  [8]や $Sr_4(Sc,Ti)_3O_8Fe_2As_2$  [9]、ペ  
ロブスカイト型構造と岩塩型構造が複合した層間物質を  
もつ $Sr_4V_2O_6Fe_2As_2$  [10]や $Sr_4(Al,Ti)_2O_6Fe_2As_2$  [11,12]  
がある。これらの化合物のホモログス・シリーズも第三類に  
含まれる [9,13-16]。第三類では $Ca_3(Mg,Ti)_3O_8Fe_2As_2$   
が最高の転移温度47 Kを示す[17]。参考までに、図1に  
第一類から第三類までの代表的な化合物の結晶構造  
をまとめておく。

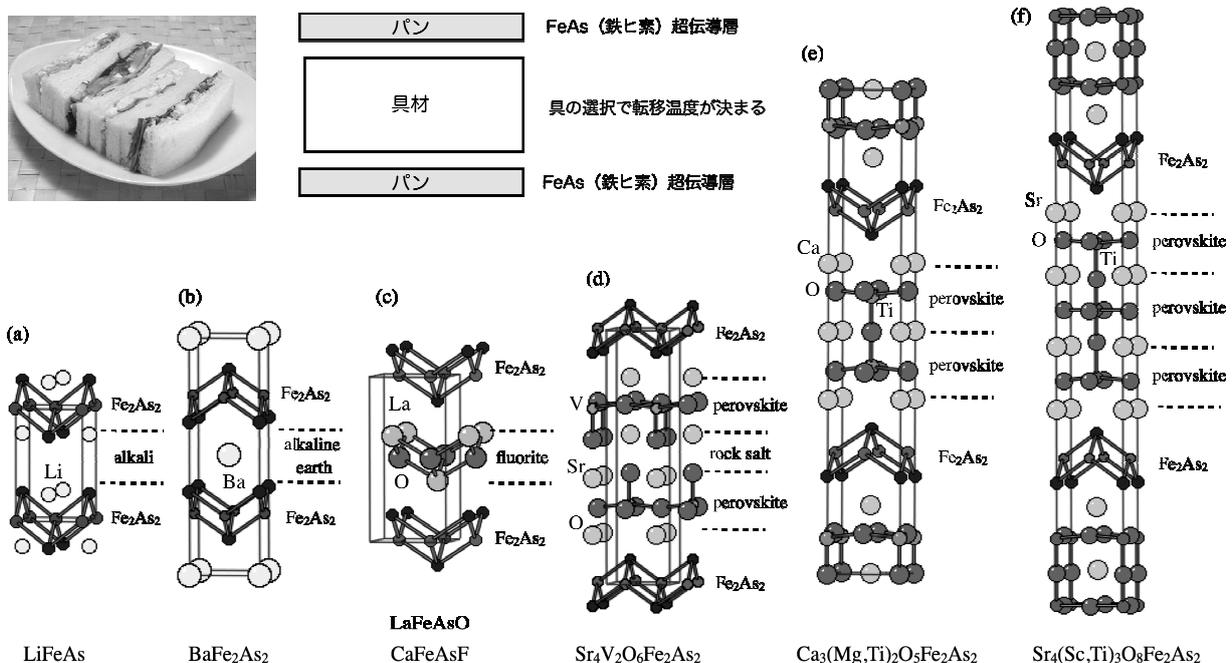


図1. 鉄系超伝導体の基本構造。超伝導を担う $Fe_2As_2$ 層と層間物質(具材)から構成される。

このような状況において、私たちの研究チームは全く新しい層間物質、すなわち第一類のイオンでもなく、第二類や第三類の酸化物(フッ化物)でもない、第四の層間物質—砒化物—からなる新しい鉄系超伝導体を発見した[18]。それが $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$ であり、最高で38 Kの超伝導転移温度を示す。本稿では、まず、 $\text{CaFe}_2\text{As}_2$ における $\text{As}^{3-}$ イオンと $[\text{As}_2]^{4-}$ 分子の形成から始めて、鉄白金系超伝導体発見の経緯を説明する。次に結晶構造の特徴とドーピング機構について解説し、最後に今後の展望について概観したい。

## 2. 固体中における $\text{As}_2$ 分子の形成と解離

1981年のノーベル化学賞は「フロンティア軌道理論」の福井謙一と「化学反応における軌道対称性保存則」のロアルド・ホフマンに与えられた。この理論は主に有機分子間の化学反応を扱うものであるが、ホフマンは無機結晶中の「化学反応」についても多くの示唆に富む論文を著している。そのひとつが $\text{ThCr}_2\text{Si}_2$ 型構造(122型)の遷移金属ニクタイトにおける $\text{As}_2$ 分子の形成と解離で[19]、今日鉄系超伝導の分野では「格子コラプス転移」として知られている。

122型遷移金属砒化物 $\text{AETE}_2\text{As}_2$  (AEはアルカリ土類金属; TEは遷移金属)は、図2に示すように、 $\text{TEAs}_4$ 四面体からなる $\text{TE}_2\text{As}_2$ 面が積層した構造をとる。AEイオンが糊の役割を果たす。元素横断的に見渡すと、早い周期の遷移金属を含む $\text{BaMn}_2\text{As}_2$ や $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ は長い $c$ 軸長をもつが、後半の周期へ移るに従って $c$ 軸長が縮んでくる。この $c$ 軸長の変化は $\text{TE}_2\text{As}_2$ 層間のAs-As間の距離の変化、すなわち化学結合の変化によるものである。 $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ では層間のAs-Asは非結合でAs-As間距離は3.890 Åである。一方で、 $\text{BaCu}_2\text{As}_2$ では層間のAs-Asが結合軌道を作りAs-As間距離が2.558 Åと著しく減少する。

砒素原子Asの電子配置は $4p^3$ である。 $\text{As}_2$ 分子では、結合性の $\sigma$ 軌道と $\pi$ 軌道、反結合性の $\pi^*$ 軌道と $\sigma^*$ 軌道が形成され、6つの電子が $\sigma$ 軌道と $\pi$ 軌道を完全に占有する。さらに4つの電子を付け加えると、 $\pi^*$ 軌道が完全に占有される。これが、砒素分子が $[\text{As}_2]^{4-}$ の価数を安定に取る理由である。さらに2つの電子を加えると、全ての反結合性軌道が占有されるので、 $\text{As}_2$ 分子は解離し、 $\text{As}^{3-}$ イオンとなる。「格子コラプス転移」では、このような $[\text{As}_2]^{4-}$ 分子の形成と $\text{As}^{3-}$ イオンへの解離が固体中で起きている訳である。

ホフマンの理論を説明しよう[19]。図2のようにFe, Co, Ni, Cuの順で見えていくと、原子核からの引力ポテンシャルが強まり、 $3d$ バンドのエネルギーが下がる。一方で、 $d$ 電子数の増加に対応してバンドのフィリングが増える。こ

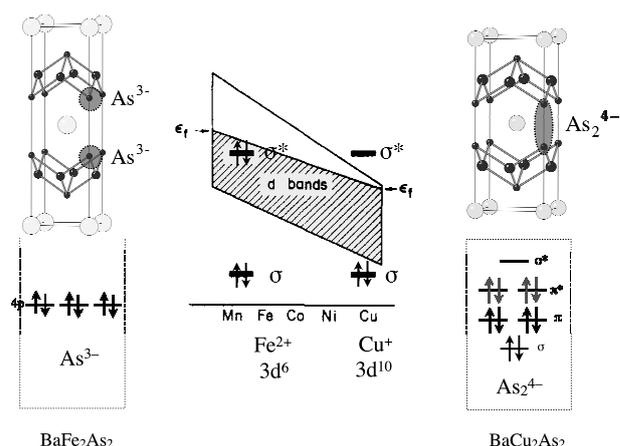


図2. 122型ヒ素化合物における遷移金属元素に依存した面間のAs-As結合の生成[19]。

の競争で、結果として $d$ バンドの化学ポテンシャル(フェルミエネルギー)はFe, Co, Ni, Cuの順に低くなる。ここでAs  $4p$ 軌道が遷移金属 $d$ 軌道とエネルギー的に拮抗していることがポイントである。 $\text{As}_2$ 分子の反結合 $\sigma^*$ 軌道を考えると、 $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ では $\sigma^*$ 軌道よりも $d$ バンドの化学ポテンシャルが高い。このため、 $\sigma^*$ 軌道が占有され $\text{As}_2$ 分子は解離する。すなわち、 $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ ではAs-As間に化学結合が形成されず $c$ 軸長は長い。 $\text{BaCu}_2\text{As}_2$ では $\sigma^*$ 軌道よりも $d$ バンドの化学ポテンシャルが低くなる。このため、 $\sigma^*$ 軌道は非占有となり $\text{As}_2$ 分子が形成される。すなわち、 $\text{BaCu}_2\text{As}_2$ ではAs-As間に化学結合が形成され $c$ 軸長が短くなる。

## 3. 格子コラプス転移

鉄系超伝導体の母物質 $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ では $\text{Ba}^{2+}$ のイオン半径が大きいので、面間のAs-As結合は簡単には形成しない。しかし、イオン半径の小さい $\text{Ca}^{2+}$ を用いると、 $\text{Fe}_2\text{As}_2$ の層間距離が短くなるので、As-As結合の形成が容易になる。実際 $\text{CaFe}_2\text{As}_2$ に1 GPa程度の静水圧を加えるとAs-As結合の形成を伴う格子コラプス転移が生じる[20]。

化学置換によっても格子コラプス転移を起こすことが可能である。例えばRhをドーブした $\text{Ca}(\text{Fe}_{1-x}\text{Rh}_x)_2\text{As}_2$ では、Rh量 $x = 0.020$ で反強磁性斜方晶相が消失し、コラプスしていない正方晶相となる。ここで超伝導が発現する。ところが、これより僅か0.5% だけRh量を増やすと、 $\text{As}_2$ 分子の形成を伴う格子コラプス転移が起こり、超伝導が消失する[21]。格子コラプス転移に伴いスピ揺らぎが消失するなどの現象が起こるので、超伝導発現機構につながる情報が得られるものとして多くの研究が進められている[22]。

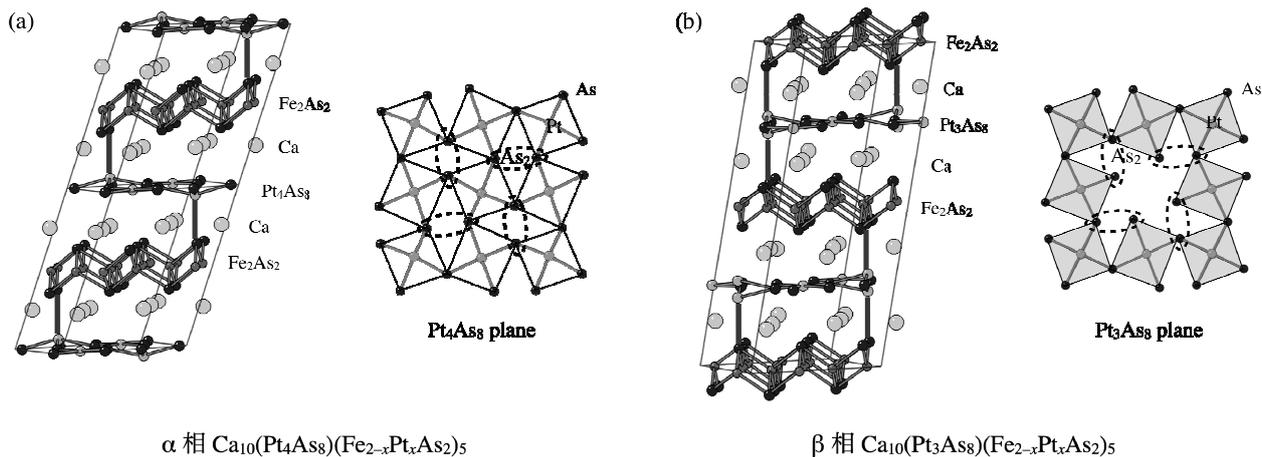


図3. 新しい鉄白金系超伝導体の結晶構造[18]。(a)は転移温度38 Kを示す $\alpha$ 相、(b)は転移温度13 Kを示す $\beta$ 相。

#### 4. 発見の経緯

このような状況を念頭に、私たちの研究チームでは $\text{CaFe}_2\text{As}_2$ における様々な化学種の置換効果を調べていた。そのなかでPtをドープしていくと格子コラプス転移に類似した構造変化が起こり、臨界温度38 Kの超伝導が発現することに気がついた。1年以上にわたる相同定の努力の結果、実際に起こったことは、格子コラプス転移による「層間のAs-As結合の生成」ではなく、 $\text{Pt}_4[\text{As}_2]_4$ 層という新しい(第四類の)層間物質の生成を伴う「層内におけるAs-As結合の生成」であった。化学組成式は $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$ であり、 $x = 0.36$ において38 Kの超伝導が現れた。また、Pt量の少ない $\text{Pt}_3[\text{As}_2]_4$ 層をもつ $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_3\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$ も同定された。この相は $x = 0.16$ で臨界温度13 Kの超伝導を示した[18]。

#### 5. 新しい層間物質(具材)

名古屋大学の澤グループによる結晶構造解析により $\alpha$ 相  $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$  と  $\beta$ 相  $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_3\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$ の2相が同定された。図3に示すように、両者とも $\text{Fe}_2\text{As}_2$ 層をもつ。Feの一部がPtで部分置換されている。超伝導を担う $\text{Fe}_2\text{As}_2$ 層が、 $\alpha$ 相では $\text{Pt}_4[\text{As}_2]_4$ 層と、 $\beta$ 相では $\text{Pt}_3[\text{As}_2]_4$ と交互に積層する。 $\text{Ca}^{2+}$ イオンがこれらのヘテロ界面を接着している。 $\alpha$ 相、 $\beta$ 相ともに単斜晶で空間群P-1である。構造パラメータの詳細は論文を参照してほしい[18]。

この新しい層間物質は、図3に示すように、 $\text{PtAs}_4$ の平面四角形が角を共有してつながった歪んだPt正方格子からなる。 $\text{PtAs}_4$ 平面四角形が交互に回転することで、面内でダイマー状のAs-As結合( $\text{As}_2$ 分子)が形成される。このようなAs-Asダイマーはパイライト構造をとる $\text{PtAs}_2$ に見られる。すなわち、 $\alpha$ 相の $\text{Pt}_4[\text{As}_2]_4$ 層はパイライト $\text{PtAs}_2$ の $ab$ 面から派生した構造と見なすことができる。Ptが周

期的に欠損すると $\beta$ 相の $\text{Pt}_3[\text{As}_2]_4$ 層が得られる。

Pt正方格子のサイズは約4.4 Åである。これは $\text{Fe}_2\text{As}_2$ 層のFe正方格子のサイズ( $\text{CaFe}_2\text{As}_2$ においてFe間の距離は約3.9 Å)と比べて著しく大きい。この為、 $\text{Pt}_4[\text{As}_2]_4$ 層と $\text{Fe}_2\text{As}_2$ 層の間にミスマッチが生じる。このため $ab$ 面内に $\sqrt{5} \times \sqrt{5}$ の超格子構造が現れる。

ミスマッチの影響は $\text{Fe}_2\text{As}_2$ 層内にも現れる。例えば、 $\alpha$ 相ではAs-Fe-Asの結合角 $\alpha$ が $109.08^\circ$  から $109.55^\circ$ の間に分布する。この値は正四面体の結合角 $109.47^\circ$ に近い。 $\alpha$ 相がこの系で最高の臨界温度38 Kを示すことから、この系も李らの提唱する「正四面体則」-  $\text{FeAs}_4$ が正四面体に近づくと超伝導転移温度が上昇する - に従うように見える[23]。 $\beta$ 相の結合角は10あるFeサイトについて $106.92^\circ$  から $110.09^\circ$ の広い範囲で分布している。正四面体からのずれが大きく、転移温度も13 Kと低い。

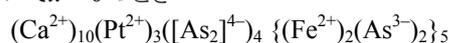
$\text{Pt}_4[\text{As}_2]_4$ 層と $\text{Pt}_3[\text{As}_2]_4$ 層は完全にフラットではなく、一部のPtが平面から上(下)にシフトしている。このPtのほぼ直上(直下)に $\text{Fe}_2\text{As}_2$ 層のAsが位置しており、面間でPt-As結合を生成する傾向にあることが分かる。このような面間でのPt-Asの化学結合は $\text{SrPt}_2\text{As}_2$ において見ることができる。 $\text{CaBe}_2\text{Ge}_2$ 構造をとる $\text{SrPt}_2\text{As}_2$ は、 $\text{PtAs}_4$ 四面体からなる $\text{Pt}_2\text{As}_2$ 層と、その逆構造である $\text{AsPt}_4$ 四面体からなる $\text{As}_2\text{Pt}_2$ 層が交互に積層した構造をとり、層間にPt-As結合が形成される。面白いことに、この化合物は約470 Kで電荷密度波転移を示し、さらに5.2 Kで超伝導に転移する[24]。このように、Pt-Asから成る層は金属的電気伝導を示すだけでなく超伝導すら示すことがある。今回発見した鉄白金系超伝導体でも $\text{Pt}_4[\text{As}_2]_4$ 層や $\text{Pt}_3[\text{As}_2]_4$ 層が電気伝導を担うのか興味を持たれる。最新のバンド計算によると、Pt-As層のフェルミレベルでの電子状態密度は小さい、すなわちPt 5d軌道は積極的に超伝導へ関与していないようである[25]。

最後に新しい具材の厚みについて考えたい。層間物質の役割のひとつは超伝導を担う $\text{Fe}_2\text{As}_2$ 層を隔て、2次元的な電子状態をつくることにある。では、どの程度の層間距離が適当であろうか。55 Kで超伝導を示す $\text{SmFeAsO}$ では層間のFe間距離 $d$ が約8.6 Åで、これより $d$ が短いと、 $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ や $\text{LiFeAs}$ のように転移温度が下がる傾向にある。一方で、47 Kで超伝導を示す $\text{Ca}_4(\text{Mg}, \text{Ti})_3\text{O}_8\text{Fe}_2\text{As}_2$ の層間距離 $d$ は16 Å程度であり、これより $d$ が長くなると転移温度が下がるように見える。 $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$ の層間距離は、この中間の約10 Åで、第一類から第三類までの従来の層間物質では得られなかった領域に位置する[18,26,27]。適当な元素置換などのエンジニアリングにより、38 Kよりも高い転移温度が実現できる可能性がある。

## 6. キャリアドープの仕組み

$\alpha$ 相、 $\beta$ 相ともにホール係数は負の値を示し電子ドープ系である[18]。 $\alpha$ 相 $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$  ( $x = 0.36$ )は、金属的な電気伝導とほとんど温度によらないホール係数を示し、超伝導最適組成に近いといえる。 $\beta$ 相 $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_3\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$  ( $x = 0.16$ )の電気抵抗率は約100 K以下で局所的な傾向を示し、ホール係数も温度に強く依存することからアンダードープ領域にあるといえる。

さて、2節で述べたように二原子分子状の砒素の価数は $[\text{As}_2]^{4-}$ である。Pt-As層では全ての砒素が面内でダイマーを形成しており、 $[\text{As}_2]^{4-}$ の状態にあるといえる。一方で、 $\text{Fe}_2\text{As}_2$ 層では砒素間の直接の結合がないので、砒素の価数は $\text{As}^{3-}$ である。従って、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Pt}^{2+}$ とすれば、 $\beta$ 相において $x = 0$ のとき



のように電荷バランスを取ることができる。従って、 $\text{Fe}_2\text{As}_2$ 層のFeをPtが部分置換しない $\beta$ 相( $x = 0$ )を、鉄白金系超伝導体の母物質と見なすことができる。ただし、今の合成法では必ずFeサイトにPtが固溶し、 $x = 0.16$ (すなわちPt濃度8%)の試料が生成する。このPtが電子を供給すると考えられ、結果としてアンダードープ領域の物質が得られる。

$\alpha$ 相の層間物質は、 $\beta$ 相の層間物質( $\text{Pt}_3\text{As}_8$ )からPt量が増え、( $\text{Pt}_4\text{As}_8$ )になる。この為、Pt-Asから $\text{Fe}_2\text{As}_2$ 層へ新たな電子が供給される。さらに $\text{Fe}_2\text{As}_2$ 層のFeにPtが固溶し $x = 0.36$ (すなわちPt濃度18%)の時、超伝導最適組成となる電子が供給され、38 Kの超伝導が発現する。

このように、超伝導を担う主役元素Feを大量のPtで部分置換しているにもかかわらず、38 Kという高い温度で超伝導が発現するのは驚くべきことである。実際、銅酸化物高温超伝導体では、超伝導の主役元素であるCu

を部分置換しても強力な対破壊効果によって超伝導は現れない。鉄系超伝導体においても、例えば、 $\text{BaFe}_2\text{As}_2$ のFeサイトをCoで部分置換しても、せいぜい24 Kの超伝導が現れるだけで[28]、BaをKで部分置換した場合の38 Kよりも低い。 $\text{SmFeAsO}$ でもFeサイトのCo部分置換で得られる転移温度は15 Kで[29]、OをFで部分置換した場合の55 Kと較べると著しく低くなる。

なぜPtが良いのか、今のところ筆者はその答えを持ち合わせていない。しかし、その理由は、より高い臨界温度の実現に直結するものではないかと感じる。

## 7. まとめと展望

2010年1月に卒業論文研究の中から、Ca-Fe-Pt-As四元系が30 Kを越える高い超伝導転移温度を示す結果が出てきた。構造解析も化学組成分析も難航を極めた。 $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$ という複雑な組成式と結晶構造をみれば、宜なるかな、と思う。2010年8月5日には38 Kでシャープな超伝導転移を示す単結晶が得られた。しかし、積層欠陥のない単結晶構造解析に使える結晶を得ることは簡単では無かった。結局、最終的な結晶構造のリファインが完了したのは2011年5月末であった。JPSJに投稿した論文は最短の審査を経て8月中旬にはWebに掲載された。

この超伝導体は、細野らが発見した鉄系超伝導体の派生ではあるが、第4の層間物質—白金砒素—という新しい食材をコックたちに提供することになった。化学組成や構成元素を工夫することで、さらにおいしいサンドイッチに仕立て上げたいと思う。

## 謝辞

本研究は、岡山大学の工藤一貴、垣谷知美、西窪義博、檀浦匡隆、野坂俊夫、名古屋大学の奥健太、西堀英治、澤博、東京大学(現名古屋大学)の山本剛久との共同研究によるものです。彼女・彼らの協力無しには、この答えにたどり着くことは出来ませんでした。

## 参考文献

- [1] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, *Nature* **410** (2001) 63-64.
- [2] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hosono, *J. Am. Chem. Soc.* **130** (2008) 3296.
- [3] このパンで多くの研究者が養われているといえる。まさに言い得て妙である。ちなみに、パンにワインを添えることもできる。K. Deguchi, Y. Mizuguchi, Y. Kawasaki, T. Ozaki, S. Tsuda, T. Yamaguchi, and Y. Takano, *Supercond. Sci. Technol.* **24** (2011)

- 055008.
- [4] J. H. Tapp, Z. Tang, B. Lv, K. Sasmal, B. Lorenz, P. C. W. Chu, A. M. Guloy, *Phys. Rev. B* **78** (2008) 060505.
- [5] M. Rotter, M. Tegel, and D. Johrendt, *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 107006.
- [6] M. Matsuishi, Y. Inoue, T. Nomura, H. Yanagi, M. Hirano, and H. Hosono, *J. Am. Chem. Soc.* **130** (2008) 14428-14429.
- [7] C. Wang, L. Li, S. Chi, Z. Zhu, Z. Ren, Y. Li, W. Wang, X. Lin, Y. Luo, S. Jiang, X. Xu, G. Gao, and Z. Xu, *EPL* **83** (2008) 67006.
- [8] X. Zhu, F. Han, G. Mu, B. Zeng, P. Cheng, B. Shen, H. -H. Wen, *Phys. Rev. B* **79** (2009) 024516.
- [9] N. Kawaguchi, H. Ogino, Y. Shimizu, K. Kishio, J. Shimoyama, *Appl. Phys. Express* **3** (2010) 063102.
- [10] X. Zhu, F. Han, G. Mu, P. Cheng, B. Shen, B. Zeng, H.-H. Wen, *Phys. Rev. B* **79** (2009) 220512.
- [11] H. Ogino, K. Machida, A. Yamamoto, K. Kishio, J. Shimoyama, T. Tohei, Y. Ikuhara, *Supercond. Sci. Technol.* **23** (2010) 115005.
- [12] P. M. Shirage, K. Kihou, C.-H. Lee, H. Kito, H. Eisaki, A. Iyo, *Appl. Phys. Lett.* **97** (2010) 172506.
- [13] H. Ogino, Y. Katsura, S. Horii, K. Kishio, J. Shimoyama, *Supercond. Sci. Technol.* **22** (2009) 085001.
- [14] Y. Matsumura, H. Ogino, S. Horii, Y. Katsura, K. Kishio, J. Shi-moyama, *Appl. Phys. Express* **2** (2009) 063007.
- [15] S. Sato, H. Ogino, N. Kawaguchi, Y. Katsura, K. Kishio, J. Shi- moyama, H. Kotegawa, H. Tou, *Supercond. Sci. Technol.* **23** (2010) 045001.
- [16] H. Ogino, S. Sato, K. Kishio, J. Shimoyama, T. Tohei, Y. Ikuhara, *Appl. Phys. Lett.* **97** (2010) 072506.
- [17] H. Ogino, Y. Shimizu, K. Ushiyama, N. Kawaguchi, K. Kishio, J. Shimoyama, *Appl. Phys. Express* **3** (2010) 063103.
- [18] S. Kakiya, K. Kudo, Y. Nishikubo, K. Oku, E. Nishibori, H. Sawa, T. Yamamoto, T. Nozaka, and M. Nohara, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) 093704.
- [19] R. Hoffmann and C. Zheng, *J. Phys. Chem.* **89** (1985) 4175-4186.
- [20] A. I. Goldmann, A. Kreyssig, K. Prokes , D. K. Pratt, D. N. Argyriou, J. W. Lynn, S. Nandi, S. A. J. Kimber, Y. Chen, Y. B. Lee, G. Samoiyuk, J. B. Leão, S. J. Poulton, S. L. Bud'ko, N. Ni, P. C. Canfield, B. N. Harmon, and R. J. McQueeney, *Phys. Rev. B* **79** (2009) 024513.
- [21] M. Danura, K. Kudo, Y. Oshiro, S. Araki, T. C. Kobayashi, and M. Nohara, *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) 103701.
- [22] S. Kasahara, T. Shibauchi, K. Hashimoto, Y. Nakai, H. Ikeda, T. Terashima, and Y. Matsuda, *Phys. Rev. B* **83** (2011) 060505(R).
- [23] C. -H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, H. Kito, M. T. Fernandez-Diaz, T. Ito, K. Kihou, H. Matsuhata, M. Braden, K. Yamada, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77** (2008) 083704.
- [24] K. Kudo, Y. Nishikubo, and M. Nohara, *J. Phys. Soc. Jpn.* **79** (2010) 123710.
- [25] C. Löhnert, T. Stürzer, M. Tegel, R. Frankovsky, G. Friederichs, D. Johrendt, *Angew. Chem. Int. Ed.* **50** (2011) 9195.
- [26] J. Shimoyama, *JPSJ Online – News and Comments* [August 31, 2011].
- [27] C. -H. Lee, *Koatsuryoku no Kagaku to Gijutsu* **19** (2009) 119.
- [28] J. -H. Chu, J. G. Analytis, C. Kucharczyk, and I. R. Fisher, *Phys. Rev. B* **79** (2009) 014506.
- [29] Y. Qi, Z. Gao, L. Wang, D. Wang, X. Zhang, and Y. Ma, *Supercond. Sci. Technol.* **21** (2008) 115016.

## <会議報告1>

### 第26回国際低温物理会議報告

#### Report on the 26th International Conference on Low Temperature Physics

(独)産業技術総合研究所  
伊豫 彰  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology  
A. IYO

第26回国際低温物理会議(LT26)が8月10日～17日の日程で北京国際会議中心にて開催された。IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics)によって主催されるこの会議は、超伝導だけでなく超流動や磁性、冷凍機など、低温に関わる幅広い分野の議題が取り扱われる。前回の会議はKamerlingh Onnes氏によるヘリウムの液化100周年にあたる2008年にアムステルダムで開催された。今年の会議は1911年の超伝導発見から100周年にあたるため、記念の特別セッションが設けられた。

全ての講演に先立ち、低温物理で顕著な業績を挙げた研究者に贈られるロンドン賞(3人)とシモン賞(2人)の授与式が行われ、ジョセフソンジャンクション(Schön氏(Karlsruhe Institute of Technology))やボルテックス(Mooij氏(Delft University of Technology)、Koppin氏(Aalto University))に関する記念講演が行われた。プログラムは、プレナリーセッションで3～6件の講演の後、5つのパラレルセッションが午前と午後であり、それぞれ25件の発表がなされ、続いてポスターセッションが行われるという形式で進められた。発表件数は1470件もあり、前回のLTの1390件から増えている。これは、中国からの参加者が増えたためではなかろうか。

超伝導100周年記念のイブニングセッションでは、Kes氏(Kamerlingh Onnes Lab)、Bednorz氏(IBM Zurich Research)、Steglich氏(Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids)の3人が講演を行った。約100年前、金属の電気抵抗率は低温で発散するのか、あるいは下がり続けるのかが論争となっていた。それを検証する過程で水銀の超伝導が発見されたことは有名な話である。Kes氏は当時の状況をKamerlingh Onnes氏の実験ノートなどの資料を用いて紹介した。超伝導による永久電流が実証されたニュース(1914年)は、すぐさま世界中に伝わり、理論家を巻き込んだ謎解きへと進展していったようである。Bednorz氏は言うまでもなく、銅酸化物高温超伝導発見の功績により、Müller氏と共にノーベル賞を受賞した人物である。講演の中に紹介さ

れた「Discovery was made by people who see everybody else is seeing but think nobody else is thinking (Albert Szent-Gyorgyi)」が印象的であった。Steglich氏は、最初の非従来型超伝導体であるCeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>から話を始め、非従来型に特徴的な性質を示した後、より高いT<sub>c</sub>を持つ物質探索指針を提示した。

超伝導に関連する発表をざっと数えたところ約560件であった。その内訳は、やはり約3年半前に発見された鉄系超伝導関連が最も多かった。特に、最近中国で発見されたK-Fe-Se系の超伝導体については、独立したオーラルとポスターのセッションが割り当てられていた程度であり、ほとんどは中国の研究者の発表で占められていた。新超伝導体の発見者であるChen氏(Chinese Academy of Sciences)は、この系の特徴や他の鉄系物質との違いを述べた。この系では、試料が超伝導領域(T<sub>c</sub> ~ 30 K)と反強磁性領域(T<sub>N</sub> ~ 520 K)に相分離しているという見解が優勢であるが、一様だという意見もあった。

以下に、私の印象に残った幾つかの講演について簡潔に紹介する。吉澤氏(岩手大)は、Co置換量を系統的に変えたBa(Fe,Co)<sub>2</sub>As<sub>2</sub>単結晶について超音波による測定を行い、構造ゆらぎと超伝導に強い相関があることを指摘した。花栗氏(理研)は、Fe(Se,Te)超伝導体の磁場下でのSTM観測を行い、電子の干渉パターンの解析からs<sub>±</sub>波と呼ばれるクーパ対の構造と矛盾しないことを示した。芝内氏(京大)は、BaFe<sub>2</sub>(As,P)<sub>2</sub>について、磁場侵入長、熱伝導などの測定を行い、超伝導ギャップについてノードのあるs波で実験結果を説明できることを示した。久保園氏(岡山大)は、K(Rb)ドープPiceneの最新の成果を発表し、K<sub>3</sub> Piceneという組成でT<sub>c</sub> = 7 Kと18 Kの超伝導が生じているとした。岩佐氏(理研)は、電気二重層トランジスタ(EDLT)による電界ドープ法の説明を行い、この方法によってKTaO<sub>3</sub>やZrNClに超伝導を誘起できたことを紹介した。

クロージングセッションにて、次の会議が2014年8月6日～13日の日程でアルゼンチンのブエノスアイレスにて開催されることがアナウンスされた(Chair: Hernandez氏(Universidad de Buenos Aires))。その時までには、新高温超伝導体が鉄系に続き日本から発見されることを期待したい。

おわりに: 会議が開催された会場からは、2008年北京オリンピックのメインスタジアム(通称 鳥の巣)が見える。この会場は、1997年にM2S-HTSCで使われた会場と同じであることを途中で知った。周囲の景色があまりにも違うので気づかなかつたのだ。周りには近代的な建造物が建ち並び、多くの車が激しく行き交っている。そのような光景は、14年前には無かつたように思う。また、工場の

生産活動に伴うスモッグのせいであろうか、太陽が霞んで見えないことが多かった。これら、様々な場面で急速に発展している中国を実感させられた。

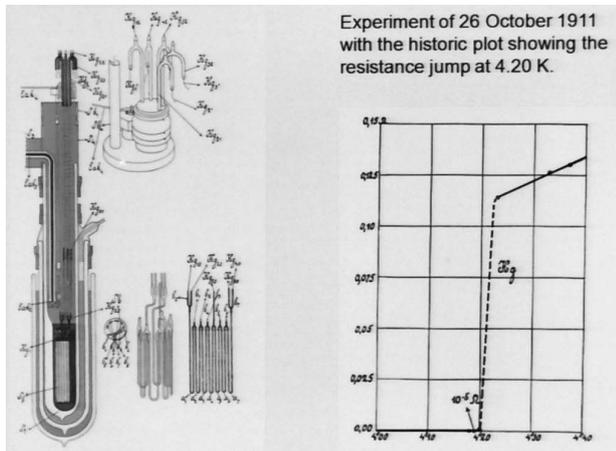
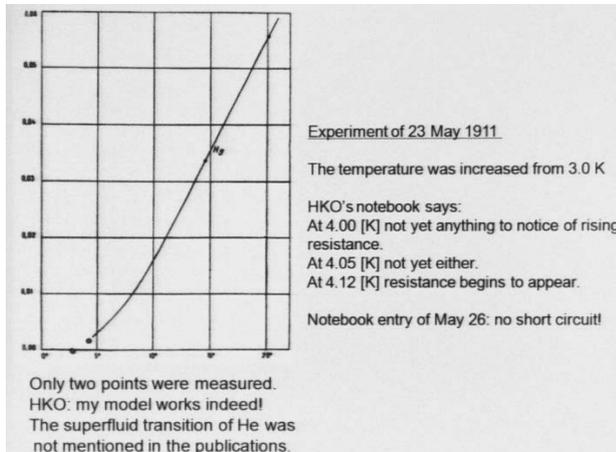


図. 1911年5月23日に、Kamerlingh Onnes氏によって測定されたHgの電気抵抗率（横軸の一目盛りは5K）。この時点では、数点のプロットしかなされていない。同年10月26日、4 K付近がより詳しく測られ、教科書でお馴染みの歴史的な図が作成された（Kes氏の講演資料より）。

## <会議報告 2>

### (1) 第22回国際磁石技術会議 22<sup>nd</sup> International Conference on Magnet Technology (MT-22)

— High- $T_c$  Materials and Magnets —

物質・材料研究機構

西島 元

National Institute for Materials Science

G. Nishijima

フランスのマルセイユで開催されたMT-22は900人を超える参加者があり、盛会であった。最多発表件数国は日本であり、次いで中国であった。その差は僅差であり、2年後のMT-23は米国開催のために中国からの参加者は減少すると予想されるものの、4年後のMT-24では中国が最多発表件数国となるかもしれない。

さて、高温超伝導のマグネット応用における重要なトピックは希土類系コート線材 (YBCO、GdBCO) を用いたコイル開発である。コート線材はマグネットテクノロジーのフェーズに入り、多くのグループでR&Dが始まった。そうすると様々な課題が露になってくる。この課題を共有し、解決していくことでマグネットテクノロジーが進化する。例えば昨年Physica CおよびASCで前田らが指摘したエポキシ樹脂含浸による剥離問題はほぼ共通の認識であり、どのグループも剥離抑制を念頭に置いたコイル開発を行っている。

D. MarkiewiczはNHMFLの32 T超伝導マグネット計画について発表した。マグネットは直径32 mmのコールドボアを有し、4.2 K浸漬冷却である。外層のNb<sub>3</sub>SnおよびNbTiからなる低温超伝導コイル (250 mm ボア) で15 Tを発生し、コート線材インサートで17 Tを発生する設計である。インサートはダブルパンケーキで設計されているが、ジョイントおよび磁場均一度については課題とのことである。このインサート開発のためのR&Dとして、線材 $I_c$ の磁場印加角度依存性、電磁機械特性、ラップジョイントの機械特性、クエンチ保護、フープ応力試験等が実施されており、第一段階の目標はクリアしたとのことであった。

同じNHMFLのTrociewiczは、エポキシ含浸による剥離を抑制した開発例を報告した。ポリエステル収縮チューブを被せて絶縁した線材を巻線し、含浸することで剥離を回避し、劣化のない含浸コイル製作に成功した。試験コイルはSuperPower社の線材を用いて製作され、31.2 Tバックアップ磁場中で4.2 Tを発生することに成功した。

一方、日本の強磁場マグネットでは東北大-東芝が30 T超伝導マグネットおよび18 T無冷媒マグネットのアップグレードについて発表した。東北大の渡辺は47 Tハイブリッドマグネットの設計について報告した。このマグネットは室温ボア径440 mmの超伝導アウトサートと15 MW-27 T水冷マグネットから成る。超伝導アウトサートはYBCO、 $Nb_3Sn$ 、NbTiを用いた設計であり、運転電流が900 Aのため、 $Nb_3Sn$ はラザフォード導体が採用されている。YBCOインサートは2層にグレーディングされ、内径480 mm、外径751 mm、高さ704 mmである。最大フープ応力は469 MPaで設計されている。

また、東芝の丸川は東北大18 T無冷媒超伝導マグネットを23 Tにアップグレードする設計について発表した。現在、18 T無冷媒マグネットはBi2223インサートが2.5 T発生しているが、これをGdBCOインサートに入れ替えることで7.5 Tに増強する設計である。コイルはダブルパンケーキ巻きであり、現在のBi2223インサートと同じサイズ(内径90 mm、外径176 mm、高さ $\sim$ 250 mm)のコイルとなる。R&Dとして剥離試験を行い、得られた剥離強度範囲内での巻線、含浸に成功した。

NIMSの松本らは1.03 GHz NMRに向けて高温超伝導インサート開発を行っており、コート線材を用いたソレノイドコイル開発について報告した。最近、フジクラ製GdBaCuO線材を用いたソレノイド(内径50 mm、外径113 mm、高さ88 mm)をバックアップ磁場17.24 T中で励磁し、合計24 T発生に成功した。これは4.2 Kの超伝導マグネットとしては世界記録である。

HTS線材を用いたテストコイルが磁場を発生できるようになれば、次の課題は大電流化ということになるだろう。つまり、核融合炉用マグネットのケーブル・イン・コンジット導体や加速器用マグネットのラザフォード導体のような数10 kA容量の導体を作れるかどうかである。直流送電を狙うなら更なる大容量化も必要であろう。この課題に対して、NISTのvan der LaanはSuperPower製GdBaCuO線材を用いたケーブル開発を行い、磁場中での通電に成功した。ケーブルは5.5 mm径のフォーマに巻き付けられており、可撓性に優れている。

KIT(カールスルーエ工科大学)のBarthはRoebel導体の開発について報告した。Roebel導体はパンチング時の劣化も少なくなってきた。2.6 kA級導体の磁場中通電試験では、導体長手方向中央部を24 Wヒータ加熱した状態で12 Tにおいて2 kAの $I_c$ を得ている。

一方で、線材開発においては、Bi系もRE系もテープ形状から脱していない。脱する気が無いようにも見える。これに対してNEXANSはRE丸線の開発に取り組んでいる。テープ状の基板をチューブ状に加工し、溶接する。この技術は注射針製造技術をもとに手の内にあるとのこ

とであった。この外側にバッファ層および超伝導層を製膜する。現在の50  $\mu$ m厚基板では硬いために柔軟性が出ない。将来的には薄い基板を銅線の周りにチューブ成型することで、フレキシブルな丸線を目指すとのことであった。

現状で唯一の高温超伝導丸線であるBi2212は世界でOSTのみが開発を続けている。応用としてはOSTによる研究用マグネット開発、NHMFLによる強磁場インサート開発、LBNLによる加速器用レーストラックコイル開発が行われている。従来、長尺線材やコイル熱処理時の劣化という問題があったが、熔融状態におけるボイドの発生が原因であるということが分かり、CIP(冷間等方圧プレス)やスエーピングによって高密度化することで解決されつつある。しかし、コイルの場合は不純物の影響も大きく、依然として課題が残されている。

## (2) MT22 会議報告

### — 加速器用および大型マグネット関連 —

#### Report on the MT22

#### — Accelerator and large scale magnet —

高エネルギー加速器研究機構  
佐々木 憲一

High Energy Accelerator Research Organization  
K. Sasaki

フランス・マルセイユにて、2011年9月12～16日に開催された、MT22 (22<sup>nd</sup> International Conference on Magnet Technology) が開催された。全体の参加者は約900名であり、これまでで最多という事であった。以下、加速器用磁石および大型磁石関連の発表について報告する。

本会議では、加速器用磁石のセッションとしては、プレナリー1、口頭3、ポスター11がプログラムされていた。

LHC関連の報告では、コミッションとその物理実験の最初の結果に焦点を当てた講演が、最終日のプレナリーにてL. Evansにより行われた。1993年頃当初からの設計パラメータとの比較で、エミッタンス等のパラメータについてはほぼ設計値を達成しつつあることが述べられた。最大の目標であるヒッグス粒子の探索結果については、今年の12月までに、想定されているエネルギー領域大まかな探索が終了する予定であり、年末には何らかの報告があるという事であった。まとめとして、世界最大の加速器のコミッション・運転を成功させた要因が、主2極電磁石の大量生産の成功等の技術的要素もさることながら、携わった研究者や技術者のハード

ワークと経験、チームワーク等の人的要素も重要であるということが述べられ、非常に印象深かった。

その他のLHC関連では、アップグレードに関する報告が多かった。L. Rossiによる招待講演では、今後10年をかけてルミノシティを向上させるHL-LHC (High Luminosity LHC) 計画と、さらにその先の構想としてHE-LHC (High Energy LHC) について紹介があった。HL-LHCについては、いまだフレキシブルな計画であるとしており、主たる開発要素である衝突点付近4極磁石に用いる超伝導材料について、Nb<sub>3</sub>SnまたはNbTiのどちらを使用するかに関する決定を今後2、3年の内に行うということであった。HE-LHCについては、26から33 TeVの究極のビームエネルギーを目標として、16から20 Tの磁場を発生する2極磁石が必要であると述べた。当然、高温超伝導をスコープに入れているが、導体としての特性や加速器磁石製作技術の向上などの様々な技術的課題があるため、これから少しずつ研究開発を行っていくということであった。

HL-LHC用4極磁石開発に関しては、CERNによるNbTi磁石開発の現状が、G. Kirbyにより報告された。ケーブル絶縁を工夫する事で熱はけを改善し、運転可能磁場を向上させる磁石の開発について紹介された。

Nb<sub>3</sub>Snを用いたHL-LHC用磁石開発は、アメリカのLARPによる報告が多数あった。今回は磁場測定結果について、いくつか報告されており、要求されている加速器品質磁場に対する評価が漸く行われ始めた。残念ながら磁場精度はまだまだ要求仕様には達していないが、今後の改善が期待される。

LHC以外の加速器プロジェクトとして、ドイツのFAIRから、数件報告があった。今回は、セプタム磁石や補正磁石等、メインリングの主磁石以外の設計検討が多かった。予算の一部が承認され、現在は各磁石の製作仕様書を策定している段階ということであり、次回以降、実機製作報告が増加するであろう。

その他加速器用磁石開発として、耐放射線性の高い磁石開発に関する報告があった。近年の加速器の性能向上により、磁石が高放射線環境下に設置されるケースが多くなっている。K. TanakaやE. Hiroseは、常伝導ではあるが、J-PARCでの磁石開発結果について報告した。超伝導磁石でも高放射線下で使用されるような磁石開発が始まっており、アメリカで計画されているMu2e実験用ミューオン捕獲用ソレノイドの開発について、M. Lammが報告を行った。アルミ安定化線の性能(主にRRR)と放射線の関係について、日米で共同研究を行っており、冷却時に放射線の影響により劣化したRRRは、一度サーマルサイクルを行う事でほぼ元に戻せるという報告がなされた。今後も、耐放射線性樹脂の開発な

どで共同研究がなされる予定である。

HTSを用いた加速器磁石の基礎開発・検討については、日本のN. Amemiyaのグループが精力的に発表を行っていた。小型レーストラックコイルを組み合わせた2極磁石の磁場測定結果や、YBCOテープ線材を用いたRadialセクター型FFAGコイルの線材配置検討結果について報告があった。

加速器以外の磁石について少しだけ紹介する。ITER計画のお膝元での国際会議ということもあり、核融合関連の発表も多数行われた。会議最初のプレナリーでは、ITERのDirectorである、O. Motojimaが、ITER計画の概要について紹介した。その中で福島での原発事故による影響にもふれた。安全面の見直し等が行われたが、線材の一部を供給する日本の会社に深刻なダメージが無かった事も幸いし、1年程度の遅れで計画が進行していくという事であった。全体の調達状況としては、7割程度の案件が進行中という事であった。また、現在運転中である韓国のKSTARや中国のEAST、および開発中である日本のJT-60SA等との技術的連携が大切であるということが強調された。

磁石製作技術として、CIC導体の接続に関する報告が多く、目を引いた。接続部で発生する偏流や交流損失に関する測定および解析結果についていくつか報告されていた。導体の撚ピッチを最適化する事で素線毎の接触抵抗のばらつきをある程度抑制できる事をS. Nakazawaらは報告した。この分野は長年研究が続けられているCIC導体コイルの基礎的技術であるが、コイル性能を確保するためには基本を追求していく事が重要であると感じた。

## <会議報告 3>

### (1) EUCAS 会議報告 — Large Scale — Report on the European Conference on Applied Superconductivity — Large Scale —

早稲田大学  
王 旭東  
Waseda University  
Xudong Wang

The European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS)は、1993年度より開催を続けてきた欧州主催の超電導技術全般に関する国際会議であり、今回が10回目の開催である。今年は、Heike Kamerlingh Onnes氏による最初の超電導体発見から100周年という記念す

べき年であり、彼が研究を行ったライデン大学に近いオランダのデン・ハーグが学会会場となった。また、今回はEUCASにISECとICMCも加わり、3学会が合同でSuperconductivity Centennial Conferenceでの開催となった。デン・ハーグは、アムステルダムとロッテルダムに次ぐオランダ第3の都市であるが、国会議事堂、王室の宮殿、中央官庁、各国の大使館などが置かれているため事実上のオランダの首都である。アムステルダムのスキポール空港からデン・ハーグ中心部に位置する中央駅までは約30分で、もう一つの主要駅であるHS駅までも同程度と非常に便利である。中央駅またはHS駅からトラムで約10分のWorld Forumが学会会場となり、設備もさることながら周囲は静かで緑が多く会議に適した会場であった。

参加者は44か国から全部で1105名であり、そのうち欧州539名、アジア321名（うち日本222名、中国56名、韓国12名）、北アメリカ112名であった。発表件数は口頭発表302件、ポスター発表742件で、うちLarge Scaleに関する発表は259件であった。

今回は、EUCASの直前にフランスのマルセイユでInternational Conference on Magnet Technology (MT)が開催されたこともあり、材料やデバイス分野などよりもLarge Scaleに関する発表は比較的少ないように感じた。学会は5日間開かれ、3日目にはHistory Dayと称した100周年記念講演(図1)が行われた。History Dayでは、8人の講演者が超電導の歴史・現状・未来について、各分野に関する講演を行った。最初の講演者はライデン大学のPeter H. Kes氏で、Heike Kamerlingh Onnes氏らの研究について、超電導体を発見した当時の研究状況や実験ノートなどを写真とともに紹介した。また、最後の講演はドイツKITのMathias Noe氏によるもので、ケーブル・SMES・回転機・変圧器・限流器・浮上装置といった電力応用に関して、各国の研究開発プロジェクトについての紹介があった。中でも、液体水素を使ったケーブル応用



図1. History Dayの会場



図2. Peter H. Kes氏の講演（写真左がOnnes氏）

が将来有望であることを強調した。高温超電導材料ならば液体水素温度(20.3 K)で飛躍的に臨界電流特性が向上することに加えて、将来の燃料電池の普及による水素需要の増加や供給基地、輸送ラインができることなども背景にある。

以下、Large Scaleに関する招待講演のうち2件を紹介する。

ロシアのRussian Scientific R&D Cable InstituteのVitaly Vysotsky氏から、"First Russian Long Length HTS Power Cable"と題して、ロシアにおける電力応用を主として超電導ケーブルの開発プロジェクトに関する報告があった。ロシアにおける超電導の電力応用プロジェクトは2007年に始まり、超電導ケーブル、限流器(10-20 kVクラスから110-220 kVクラス)、変圧器(2500 kVA)、SMES(30-60 MJ)が含まれる。中でも超電導ケーブルを最優先に開発を行われた。プロジェクトの最終目標として、モスクワにて単相200 m長×3の超電導ケーブル(住友電工製ビスマス線材使用)が作製され、その冷却・通電・短絡試験などが行われた。現在は系統連系試験も進行中である。日米に遅れながらも実用へ向けた研究開発が着実に進められているようである。

中国のInnopower Superconductor Cable Co., Ltd.のYing Xin氏から、"Development of 220 kV/300 MVA superconductive fault current limiter"と題して、超電導限流器の開発プロジェクトに関する報告があった。本プロジェクトは天津市政府と中国科学技術部の出資によるもので、220 kV/300 MVAの限流器開発を目指している。すでに性能確認の試験が進められており、天津にある変電所(定格220 kV/800 A)への試験運転(3年間)が予定されている。最大短絡電流50 kAを30 kA以下に抑えられるように設計されている。電力需要が急増している中国において、超電導機器の研究開発が急ピッチに進められている印象であった。

次回のEUCASは、2013年9月にイタリアのジェノバで開催される予定である。

**(2) EUCAS, ISEC, ICMC 超伝導100周年記念  
会議報告: エレクトロニクス関連  
Report on Superconductivity Centennial  
Conference: Electronics Area**

横浜国立大学大学院工学研究院  
吉川 信行  
Graduate School of Engineering, Yokohama National University  
N. Yoshikawa

超伝導現象は1911年4月8日にオランダ ライデン大の Kamerlingh Onnesらによって発見された。今回の EUCAS、ISECならびにICMCは、この超伝導発見100周年を記念してライデンに程近いオランダのデン・ハーグで9月19日から23日にかけて開催された。デン・ハーグはアムステルダムから西に列車で40分ほどのところにあるオランダ第3の都市で、オランダの政治的な中心である。13世紀頃の歴史的建造物やオランダらしい家並みが立ち並ぶ美しい街である(図1参照)。

本報告では、本会議のエレクトロニクス関連、特に筆者が専門とするデジタルエレクトロニクス分野の動向について述べる。

表1にエレクトロニクス関連の各研究分野の発表件数を示す。総発表件数は、通常のISECの単独開催時が200件程度であるのに対して1.5倍以上となった。分野ごとの発表件数は、SQUIDや検出器関係の発表が最も多く、その他、マイクロ波、回路応用、製作プロセス、新規デバイス、量子情報などの分野においても例年以上の発表件数があった。表2には国別の発表件数を示す。日本、ドイツ、米国が突出して多く、最近では中国からの発表件数も増えている。

プログラムの構成は、午前前半のセッションでは2件の plenary lecture が行われ、午前後半と午後後半では2つの並列セッションに分かれて口頭発表が行われた。また、ポスター発表は、午後前半のセッションで行われた。3日目は、「History Day」と称して100周年記念企画が行われた。

History Dayでは、Conference chairのRogallaより超伝導研究の100年をまとめた本の出版企画の説明の後、高温超伝導発見者であり著者の一人でもあるMuellerにその本が手渡され、会場より大きな喝采を得た。その後、Kamerlingh Onnes研究所のKesより、Onnesのノートなどの歴史的な資料に基づいて超伝導発見に至る当時の過程の詳細が報告された。また、RowellによるJosephson効果の発見、ClarkによるSQUID研究の歴史、Likharevによるエレクトロニクスの進展など、超伝導エレクトロニクスの創生期において活躍した研究者より、当

時の研究の様子やエピソードなどを含む講演があった。これまでに既知の知識としてテキストなどで勉強してきた物理現象について、発見当時の生の話を聞けたことは筆者としてワクワクする経験であり、今後の研究に対する励みとなった。

エレクトロニクス関係の plenary lecture では、Delft 大の Mooij から量子ビットについて、Karlsruhe 大の Siegel から検出器について、ISTEC の蓮尾氏からデジタルエレクトロニクスについての講演があった。

デジタル回路の研究動向としては、SFQ集積回路の規模や動作実証レベルでは、日本が依然として世界を大きく先行している。これに対して、米国は国策としてRQLやeSFQなどの新たな低消費電力ロジック回路を提案し、今回の会議である程度の規模の回路の動作実証を行ってきた。例えば、Northrop Grummanは、RQLロジックを用いて800接合規模の8-bit carry look-ahead adderを試作し6.2 GHzにおいて動作実証を行った。また、Hypresは、4.5 kA/cm<sup>2</sup> Nbプロセスを利用してeSFQロジックから成る2000接合規模の8-bit ripple carry adderを試作し20 GHzにおいて動作実証を行った。また、非同期式RSFQ回路を用いて8-bit Kogge-Stone adderを試作し、20 GHzにおいて正常動作を確認した。米国における低消費電力デジタル回路の基礎研究は急速に進んできており、今後、この分野での世界的競争が激しくなると思われる。

次回のISECは、2013年にボストンにて開催される。

表1. エレクトロニクス関連の各研究分野の発表件数

分野	口頭発表	ポスター発表	合計
SQUID	22	55	77
検出器	14	54	68
マイクロ波	8	14	22
回路、システム	11	32	43
量子情報	4	9	13
新規デバイス	16	29	45
製作プロセス	14	34	48
合計	89	227	316

表2. エレクトロニクス関連の国別発表件数

国名	件数	国名	件数
日本	74	台湾	13
ドイツ	47	オーストラリア	9
米国	34	フランス	8
中国	20	フィンランド	8
イタリア	19	韓国	8
ロシア	15	スウェーデン	7
オランダ	15	その他	46



図1. 国会議事堂があるデン・ハーグのビネンホフ

### (3) 超伝導 100 周年会議 (Materials セッション) 報告

#### Report on the Superconductivity Centennial Conference 2011 (Materials)

東京大学  
山本 明保  
University of Tokyo  
A. YAMAMOTO

Materials 関連では5件の基調講演、6つの講演セッションで72件の発表、13のポスターセッションで210件の発表が行われた。カバーされている分野は銅酸化物系、鉄系、 $MgB_2$ 、LTSの薄膜、バルク材料、臨界電流・ボルテックス、機械特性、理論など多岐にわたった。開催地のヨーロッパからの発表が最も多かったが、日本をはじめアジア諸国も目立ち、南米、アフリカからの報告もみられた。アメリカからの発表はやや少なく感じた。

はじめに、Materialsは2会場パラレル講演であり、発表件数も非常に多いことから、本報告が筆者の興味ある分野に偏ったことをお詫びしたい。以下、鉄系、 $MgB_2$ の薄膜、バルクと銅酸化物系バルクを中心に述べる。

100周年の記念会議ということもあり、基調講演では超伝導材料・応用の歴史を振り返るレビュー報告がメインであった。東京海洋大の和泉氏からは銅酸化物系バルクの基礎から最近の応用までのレビューが、ロスアラモス国立研のCivale氏からはYBCOと $MgB_2$ 、鉄系の磁束物理が報告された。また、9月21日に設けられたHistory Dayには、NIMSの熊倉氏より金属系から鉄系までの超伝導材料研究のレビューが報告された。

鉄系に関しては、デバイス応用を睨んだ高品質薄膜作製や磁束ピンニング力向上を目指した報告が多くなされた。

IFW Dresdenの飯田らはPLD法によりCoドーブBa122、Fe(Se,Te)薄膜を作製する際の鉄バッファー層の影響について報告した。TEM観察の結果から、鉄バッファー層とBa122層の間に極めて整合性の良い界面が得られ、鉄バッファーを用いることでMgOバイクリスタルやIBAD MgO基板、ペロブスカイト基板を用いても2軸配向Ba122薄膜が得られると述べた。東工大の平松らはPLD法により粒界傾角を3-45°まで変化させたCoドーブBa122バイクリスタルを作製し、銅酸化物系RE123と比較して臨界角が大きいことを報告した。また、122系における電子ドーブ効果を調べ、La, Ce, Pr, NdドーブBa122薄膜において、La, Ce系ではそれぞれ22 K, 13 Kの $T_c$ が得られたが、Pr, Nd系では超伝導が得られないことを報告した。名大の川口らはMBE法によりNd1111, PドーブBa122膜を作製し、バルクに匹敵する高い $T_c$ が得られたことを報告した。CNR-SPINのFerdegghiniらはFe(Se,Te)薄膜における基板由来の歪効果を調べ、バルクよりも5 K高い21 Kの $T_c$ が得られることを報告し、臨界電流密度 $J_c$ と臨界磁場について報告した。広島大のMeleらはFe(Te,Ch)とSe欠損FeSeエピ薄膜の超伝導特性について、IFW DresdenのHänischらはCoドーブBa122薄膜の $J_c$ とピンの角度依存性について報告した。米強磁場研のTarantiniらはCoドーブBa122とノンドープBa122を交互に積層させた多層膜のピンニング特性を報告した。人工的なピンを導入することで全ての磁場印加角度で $J_c$ の向上がみられ、4.2 K, 10-17.5 Tにおけるピン力密度が45-50 GN/m<sup>3</sup>に達したと報告した。

鉄系の多結晶体に関しては、ジェノバ大、CNR-SPINのPuttiらからSm1111多結晶体に対して高圧熱処理を、Fe(Se,Te)多結晶体に対して溶融熱処理、アニール処理を行った際の粒間臨界電流密度に及ぼす影響について報告があった。また、ウィーン工科大のEistererらはSm1111バルク、CoドーブBa122単結晶、Fe(Se,Te)薄膜に対して中性子照射を行い、 $T_c$ と上部臨界磁場に対する影響は小さいが、照射による欠陥が銅酸化物系と同様のピン力の向上をもたらすことを報告した。一方、中国科学院のZhangらはPIT法によりKドーブSr122線材を作製し、AgまたはPbの添加により輸送特性に向上がみられ、4.2 Kで50 A以上の $I_c$ が得られたことを報告した。

$MgB_2$ に関しては、線材開発に向けた基礎研究としてのバルク試料の合成・評価の報告が多かった。 $B_4C$ , SiCなどの炭素化合物のドーブが $J_c$ 向上に有効なことは知られているが、本会議ではドーブに加えて高密度化、フラックスジャンプ抑制、ACロス低減、バルク磁石などのトピックで新しい展開がみられた。また、中・東欧のグループが積極的に発表を行っていた。

IFW DresdenのHerrmannらは*in-situ*法 $MgB_2$ バルクに

おけるメカニカルアロイングの効果を報告した。ポーランド科学アカデミー高圧研のCetnerらは1 GPaの高圧下での熱処理がMgB<sub>2</sub>線材の緻密化と結晶粒径の微細化に有効であることをピンニング力解析から示した。また、大型コイル作製に向けてトロイダル高圧熱処理装置を開発しているとのことである。ジュネーブ大のSenatoreらは*in-situ*法MgB<sub>2</sub>線材に対し冷間高圧処理を行い、コネクティビティの向上によりJ<sub>c</sub>の改善が得られたことを報告した。東大の田中らは高温長時間の熱処理を施した*ex-situ*法MgB<sub>2</sub>バルクで、MgB<sub>2</sub>の自己焼結により高いコネクティビティが得られることを報告した。一方、ルーマニア国立材料研のBadicaらはスパークプラズマ法により作製したMgB<sub>2</sub>バルクに対する不純物添加効果を報告した。バルク磁石に関しては、東大の山本、鉄道総研の富田らが円盤型のMgB<sub>2</sub>バルクを作製し、30 mmφ、20 mm厚バルクにおいて17.5 Kで3 T以上の捕捉磁場が得られたことを報告した。

銅酸化物系バルク体では、Brunel大のHari Babuらは、Y<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>CuMO<sub>y</sub> (M: 遷移金属元素)相の添加によるナノ複合組織の導入によりJ<sub>c</sub>が大きく向上することを報告した。新日鐵の手嶋らは同社のバルク大型化、高捕捉磁場化に向けた最近の研究を紹介した。東大の杵村らは低圧純酸素雰囲気下において作製したバルクでは、固溶とボイドの抑制によって低磁場下でJ<sub>c</sub>の向上が得られることを報告した。岩手大の藤代らはパルス着磁時におけるバルク体内の磁束運動の3次元シミュレーションを行い、着磁パターンを変化させた際の磁束の分布と温度変化に関して再現性の良い結果が得られたことを報告した。

#### (4) 超伝導 100 年会議報告(線材部門)

##### Report on Superconductivity Centennial Conference (Wires and Tapes)

物質・材料研究機構  
藤井 宏樹  
National Institute for Materials Science  
H. Fujii

9/18夜から9/23の昼まで開催された超伝導100年会議(Superconductivity Centennial Conference)のセッションは多岐に亘るものであったが、そのうちWires and Tapesのセッションでは、9/19、20、22の3日間に168件の発表(招待講演3、口頭発表42、ポスター発表123)が組まれていた。それらの2/3弱がcoated conductor関連であり、また、会場も参加者で埋め尽くされていて、関心の

高さが窺えた。その他の内訳は、MgB<sub>2</sub>関連が25件、Bi系及びLTS関連がそれぞれ15件ほど、Fe系は1件であった。本来ならば最も件数の多いcoated conductor関連を中心に紹介すべきであるが、小生の能力の至らなさと関心とからMgB<sub>2</sub>に偏ったものになることをご容赦いただきたい。また、他のセッション、Materialsでも、Powder-In-Tube (PIT) 法で作製されたMgB<sub>2</sub>線材の評価、及びそれに用いる充填粉に関する発表が数多くあり、これらの発表についても紹介する。

MgB<sub>2</sub>線材の主要な作製法はPIT法であるが、本会議ではほとんどの発表が、*in-situ*法で作製した線材を対象としていた。J<sub>c</sub>特性向上を図るための手法として、(i)SiCや有機化合物の添加によって引き起こされる炭素置換によるB<sub>c2</sub>の向上、(ii)HIPなどの高圧処理によるMgB<sub>2</sub>コア層密度の改善、(iii)ボールミリングによる充填粉の微細化、活性化による粒界ピンニング及び結晶粒間結合の改善、が極めて有効であることが明らかとなり、これらの手法の検討に関する発表が多かった。

MgB<sub>2</sub>線材メーカーであるColumbus Superconductors社やHyper Tec Research (HTR)社は、本会議に出展しており、各国の研究機関と共同研究を行いつつ、開発を進めている。とりわけHTR社は共同研究に力を入れているようであり、同社の素線にHIPなどの高圧処理を施し、特性向上を図った発表が数多く見られた。例えば、Gajda(ILHMFLT, Poland)らは、4.2 K、10 TでのSiC添加線材のJ<sub>c</sub>値が、1 GPaのHIP処理で20 kA/cm<sup>2</sup>以上となり、40%以上の向上に相当する、と報告した。この理由として、コア層の密度向上や組織の均一化の他、ピン止め力の増大が挙げられた。また、Flükiger (Univ. of Geneva, Switzerland)らは、1.5 GPaのCold High Pressure Densification (CHPD) 処理によって、4.2 K、10 Tでのリンゴ酸添加線材のJ<sub>c</sub>値が2倍ほど向上し、40 kA/cm<sup>2</sup>に達した、と報告した。この理由として、Gajda氏らの指摘した改善点の他、炭素置換量の増大によるB<sub>c2</sub>の向上の寄与も指摘した。また、このCHPD処理装置では、200 m/dayの線材作製が可能であるとのことである。

シース材の工夫もされており、高価なNbをバリア層として使用しない試みもなされている。例えば、Morawski (IHPP, Poland)らは、シース材をCu合金とし、MgB<sub>2</sub>コア層を二重層、即ち内層と外層に分け、内層を*in-situ*法、外層を*ex-situ*法で作製する手法を採った。*ex-situ*層は*in-situ*層からのMgの拡散を防ぐためのバリア層として働き、シース材との反応を抑制するのに有効である。また、1 GPaの高圧下では、Mgの融点が770°Cまで上昇するので、Mgの蒸発による密度の低下を抑えつつ、高温焼結が可能となり、コア層の密度及び結晶粒間結合が改善されるとのことである。

## <会議報告 4>

### 応用物理学会超伝導 100 周年特別 シンポジウム「100 年の歴史に学ぶ超伝導」 Report on the Centennial Symposium “Past, Present and Future of Superconductivity”

(財)国際超伝導産業技術研究センター

筑本 知子

International Superconductivity Technology Center

N. Chikumoto

その他、充填粉に関する発表として、アモルファス状硼素(a-B)の作製に関するものがあった。*in-situ*法での硼素源として、a-B粉末の使用が一般的であるが、優れた $J_c$ 特性の得られる高品質な粉末は米国社製であり、輸出規制のために米国以外で入手することは困難となっている。そこで、独自に高品質a-Bを作製する試みがなされている。Materialsのセッションで、Vignolo (CNR-SPIN, Italy)らは $B_2O_3$ から炭素ドーブしたa-Bを得るプロセスを発表した。 $B_2O_3$ と溶解性炭素化合物を熱水に溶かし、液体窒素で凍結乾燥させた後、Mgで還元させてa-Bを得た。このプロセスに要する時間は1ヵ月、収率は30%程度とのことであった。なお、それを使用して作製した線材の4.2 K、5 Tでの $J_c$ 値は、市販粉使用線材のそれよりも10倍以上向上し、20 kA/cm<sup>2</sup>程度になった。

同じくMaterialsのセッションで、Herrmann (IFW-Dresden, Germany)らは、ボールミリングによる充填粉Mg + a-Bの活性化について発表した。それによると、100 kJ以下の付与エネルギーでは、Mgとa-Bの粉碎混合が起きるだけであるが、それ以上のエネルギーを与えると、メカニカルアロイングによるMgB<sub>2</sub>生成が起こり始め、10 MJでは50 wt%のMgB<sub>2</sub>が生成する。また、高エネルギーにするほど微細化は進み、10 MJ充填粉の4.2 K、10 Tでの $J_c$ は10 kA/cm<sup>2</sup>まで向上するが、線材加工時にソーセージングが起こることとであった。a-Bに関しては、その高純度化の効果が発表された。バルク試料では、HIP処理によって密度が一層増加し、DSC測定によって求めたMgB<sub>2</sub>の生成温度も525°Cとなり、低純度a-Bと比べて低下が認められたとのことであった。

また、同グループのKarioらからは*ex-situ*線材に関する発表があり、Glidcop/Nbシーすを用い、ボールミリングと5%のgraphite Cの添加で、単芯及び多芯線それぞれ12.4、8.8 Tで10 kA/cm<sup>2</sup>の $J_c$ が得られたとのことであった。多芯線での特性の低下は、幾つかのフィラメントがシーす材と反応しているためらしい。

Yamamoto (Univ. of Tokyo, Japan)らは、原料粉Mg + Bから*in-situ*法でMgB<sub>2</sub>のバルク体(30 mm 径 × 20 mm 厚)を作製した。ドメインやクラックのない良質な試料が得られ、2個重ねることによって、17.5 Kで3.1 Tの捕捉磁場を得ることに成功し、磁束クリープが極めて小さかったと報告した。

1911年にオランダのカマリン・オンネスが超伝導現象を発見して、今年が丁度100周年である。本特別シンポジウムでは、この100周年を記念し、様々な分野における超伝導材料・応用機器の研究開発のあゆみを振り返るとともに、次の100年に向けての展望を議論するという趣旨のもと、応用物理学会の超伝導分科会と東北支部の共同企画として、2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会の会期中に開催された。

会場は山形県郷土館「文翔館」の旧県会議事堂議場ホールで、1916年(大正5年)に建設されたというその建物は、超伝導の歴史を語るという本シンポジウムの趣旨にふさわしいものであった。

プログラムは3部構成で、午前中(第一部)は材料開発・現象解明といった基礎的な事柄を中心に扱い、午後は第二部の冒頭のシンポジウム内特別講演で歴史の総括と新たな100年に向けての展望を述べて頂き、続いで講演で応用開発の鍵を握る高温超伝導線材開発の現状の紹介、最後の第三部においては、パワー・デバイス分野の応用開発の現状と将来性について各論の紹介が行われた。参加者は約170名であった。

第一部最初の講演は「超伝導物質」というタイトルで、戸叶氏(NIMS)が100年の物質発見と材料開発の歴史を振り返った。戸叶氏によると、最初の50年の黎明期は、物性、実用両面から模索の時代であり、応用から見放された半世紀であったという。しかし、第二次大戦後、米国の電信・電気会社が優秀な研究者を多数抱え込んで磁石開発に着手し、1961年11月に開催された“International Conference on High Magnetic Field”を機に、一気に実用化の時代の幕開けを迎えた。次の大きなブレークスルーは1986年のLBCOをはじめとする高温超伝導体(HTSC)の発見。その後のMgB<sub>2</sub>、鉄系の発見などにより動作温度、材料の選択肢が増えたと述べた。

続いて、内藤氏(農工大)が「超伝導現象」に関して「超伝導理解の歴史」という切り口で、BCS理論確立までの状況、またその後のBCSの壁をめぐる議論について

て紹介するとともに、HTSCの理論の現状について述べた。

一方、松下氏(九工大)は電磁現象についてオーバービューを行うなかで、「超伝導現象の出現は電気現象と磁気現象の対称性の向上に貢献した」として、初等電磁気学への超電導導入のメリットを強調した。また、縦磁界効果により臨界電流が大幅に増加することを利用した大電流導体を提案した。

第一部の最後に田中靖三氏(低温工学)が金属系線材開発の歴史の紹介を行い、「Nb-Tiは超電導の母、Nb<sub>3</sub>Snは超電導の父である。子ども(HTSC)が一人前になるのには20年はかかる」と述べた。

特別講演では北澤氏(JST)は「超伝導は神童」というキーワードとともに、材料開発・現象の理解の歴史を様々なエピソードを交えながら紹介した。また、今後の展望に関して、「超伝導は再生可能エネルギーの鍵をにぎる重要な技術」と述べ、しかし、再生可能エネルギーへの投資に関して、日本は中国、ドイツに比べて、投資額が少ない現状を指摘した。

続いて、銅酸化物系線材について飯島氏(フジクラ)がレビューを行った。銅酸化物系線材の開発はいかに「配向組織」を作るかという工夫の連続であったが、ようやくY系において600 A級のものが出来るようになり、いろいろと応用が試せる段階となったということ、また、金属について50年の開発の歴史で既に高い信頼性と安価な供給体制が確立しているため、既に金属系が使われている場に銅系が入って行くのは難しく、特徴である「液体窒素冷却」あるいは「低温超強磁場」での応用で強みを発揮すると期待できると述べた。

第三部に入り、まず前田氏(理研)が「超伝導線材応用—超伝導マグネット技術を中心に」というタイトルでMRI/NMR用マグネット、超電導リニア用マグネットなどの開発の歴史と現状について紹介し、HTSC材料の課題について述べた。一方、デバイス応用に関しては、藤巻氏(名大)がデジタル応用、田中三郎氏(豊橋技大)がアナログ応用について紹介した。藤巻氏はデジタル応用の歴史は1962年のジョセフソン効果の発展に始まり、丁度来年が50周年ということ、SFQ素子はNbが主流で日本が世界でダントツの技術をもっており、CMOSに対して5桁の消費電力優位性をもつなど、半導体に対しての優位性が強化されつつあることなどを紹介した。また、田中氏は、SQUID素子の様々な応用例を紹介した後、HTSC-SQUIDについて実用レベルに達しているものの研究者人口が激減しており、是非若い学生達に興味をもってもらい、この分野に進んでほしいと訴えた。



図1. 文翔館旧県会議事堂外観  
(佐藤勝昭氏(JST)によるスケッチ)

## <会議報告 5>

### 超伝導 100 周年記念講演 Report on the JPS 2011 Autumn Meeting -100 Years of Superconductivity-

産業技術総合研究所  
竹下 直  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology  
N. Takeshita

日本物理学会2011年秋季大会が9月21日より4日間の日程で富山大学五福キャンパスにおいて開催された。台風の接近により大会前半は余り天候に恵まれなかったが、後半は秋の北陸路らしい爽やかな空が戻ってきた。さて、今年はKamerlingh Onnesが自らが液化に成功した液体ヘリウムを用いて冷却することで水銀やスズ・鉛で超伝導現象を発見するに至ってから100周年である。これを記念して、大会初日に立木昌先生によるチュートリアル講演が「超伝導研究の歴史・現状・将来」と題して行われた。

立木先生のご講演はKamerlingh Onnesが発見した水銀の超伝導の話から始まり、その後のマイスナー効果の発見、と続いていく。第二種の超伝導体の発見についてもその重要性を強調されていた。BCS理論に関する回想は面白かった。BCS理論の発表後、当時これに関するシンポジウムがさっそく日本物理学会でも開かれたが、その場の雰囲気はBCS理論に対してはどちらかといえば否定的であったらしい。考えてみれば最初の現象の発見から理論的な裏付けまで50年近く経っているわ

けで、皆がそう簡単に納得するわけにはいかなかった？ と想像するのは容易である。続いて重要な発見としてジョセフソン効果について触れられた。目に見える量子的性質としての面白さだけではなく、日頃使っているSQUID素子や電圧標準など、超伝導現象の応用面としてその後に花開いた成果を考えると最も重要な発見の一つと言えるのは間違いない。

ここから先の話は、若い(?) 私にとっても身近なものになってくる。CeCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>に始まる異方的なギャップを持つ超伝導に関する興味は、銅酸化物の超伝導の発見によって、それまで誰も想像しなかったような高みにまで一気に超伝導転移温度を引き上げていく。そういえばあの頃、物理学会での発表も10分トーク(講演7分・質問3分)とかがあったよなあ、などと回想しつつ聞く。最後はMgB<sub>2</sub>やまさに現在進行中の鉄砒素系の超伝導など、ここ10年間ほどの話題提供だった。トポロジカル超伝導などの直近の話題に関しても、立木先生は大いに興味を持たれているご様子である。最後に今後の様々の応用面に関して言及されてご講演は幕となった。

筆者は2008年にアムステルダムにて行われたLT25にも参加していたが、こちらはヘリウム液化100周年を記念する会議でもあった。あれからもう3年。金属をどんどん冷やしていったときに電気抵抗率はどうなるのか？ というのはKamerlingh Onnesにとっては興味の中心であったはずで、そういった点からは、ややのんびりとした研究の流れを感じるかもしれない。その一方で、Kamerlingh Onnesは液体ヘリウムという極めて重要な実験の道具そのものも自分で用意したわけで、未踏の領域に進むための道路まで自分で作り上げた馬力は凄いものと改めて感ずる。超伝導研究を巡る状況は、立木先生のご講演にもレビューされていたように、停滞しているかと思えば突然の進展、新局面がもたらされる、という随分メリハリの利いた進展の仕方が繰り返されてきていると思える。超伝導には限らないと思うが、きっと(特に基礎的な研究は)連続的な進歩があると言うよりは「鹿威し」の様に、ある時突然、カコーンとブレイクスルーが起きて皆をびっくりさせるものであるのに違いない。だから一見進歩が無くても、竹筒のなかに水を注ぎ込む様な努力が求められるだろう。Kamerlingh Onnesの事を思い起こすと、何らかの実験技術的な進歩が一举にブレイクスルーを引き起こすことも今後も十分に起こりえるだろうと思う。結局、王道としては、多少不効率でも広い視野を持って普段から全方位的に周囲をつつき続けなければ、根本的に新しい事はなかなかでてこないのではないだろうか。



図1. 立木先生の講演

それにしても、改めてこのように超伝導の研究の系譜について話を聞いてみると、いかに超伝導という現象が物質という面でも、メカニズムという点でも、そして応用面においても、バリエーションが豊かで奥が深いか、と言うことを思い知らされる。そして今後も恐らく、同じような実感を抱き続けるのに違いない。MRIの装置の普及などで、超伝導現象も既に身近なものであるかもしれないが、リニアモーターカーの実現など超伝導が世の中を変えていくのはまだまだこれからのお楽しみである。

きっと我々はまだ、超伝導という新大陸の端っこによく取り付いただけなのだ。私が生きて見ることはもちろん叶わないが、超伝導200周年の記念講演はどんな内容になるのかを夢に見つつ、今日も実験に精を出すのです。

*Final Announcement*  
**The 15<sup>th</sup> Japan-US Workshop  
on Advanced Superconductors**

October 27-29, 2011

● **Sessions:**

- (1) HTS Tape (BSCCO Tape, YBCO Tape)
- (2) Critical Current AC loss
- (3) Thin Film Devices
- (4) New Materials
- (5) Al<sub>5</sub>, MgB<sub>2</sub>
- (6) Large Scale

● **Conference site:**

**Oct. 27-28 Sumitomo Club**

1-13-10 Edobori, Nishi-ku, Osaka, Japan  
TEL.06-6443-1986, FAX.06-6443-1907

**Oct. 29 Osaka Works of Sumitomo Electric Industries, Ltd.**

1-1-3 Shimaya, Konohana-ku, Osaka, Japan  
[http://global-sei.com/sei\\_info/office/index.html#osaka](http://global-sei.com/sei_info/office/index.html#osaka)



● **Organized by:**

Forum of Superconductivity Science and Technology (FSST),  
The Society of Non-Traditional Technology

● **Co-organized by:**

Sumitomo Electric Industries, Ltd. (SEI)  
National Institute for Materials Science (NIMS)

● **Supported by:**

THE TOKYO CLUB

● **Cooperated by:**

Ministry of Education, Culture, Sports, Science and  
Technology (MEXT)



● **Schedule (tentative):**

**Oct. 27 (Thu.) Sumitomo Club**

17:00-19:00 Registration  
18:00-19:00 Welcome party

**Oct. 28 (Fri.) Sumitomo Club**  
 9:15-17:00 Registration  
 9:30- 9:40 Opening Remarks (Multiple Room)  
 9:40-10:40 Oral session (Multiple Room)  
 10:40-11:00 Break  
 11:00-12:20 Oral session (Multiple Room)  
**12:20-13:40 Lunch**  
 13:40-15:40 Oral session (Multiple Room)  
 15:40-16:00 Break  
 16:00-17:40 Oral session (Multiple Room)  
**18:00-20:00 Banquet**

**Oct. 29 (Sat.) Osaka Works of Sumitomo Electric Industries, Ltd.**  
 9:15-12:00 Registration  
 9:30-10:50 Oral session (Room A & Room B)  
 10:50-11:10 Break  
 11:10-12:50 Oral session (Room A 11:10-12:30)  
 (Room B 11:10-12:50)  
**12:50-13:40 Lunch**  
 13:40-15:00 Oral session (Room A)  
 15:00-15:20 Break

**15:20-16:50 “Super Car” Test-Driving and exhibition of “Smart Grid” system**  
 16:50-17:00 Closing Remarks (Room A)

● **Presentation:**

Time of each presentation will be 20 minutes including discussion.  
 PC Projector with WINDOWS system will be available.

● **Proceedings:**

Proceedings will not be published.

● **Registration Fee:**

Members 20,000 yen, Non-Members 60,000 yen,  
 Students 10,000 yen

● **Secretary General: Jun-ichi Shimoyama**

The University of Tokyo  
 E-Mail: shimo@sogo.t.u-tokyo.ac.jp

● **Secretariat :**

Forum of Superconductivity Science and Technology (FSST)  
 The Society of Non-Traditional Technology  
 E-Mail: Japan-US2011@sntt.or.jp



## 第16回超伝導科学技術賞 候補者公募要領

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

### 趣旨：

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

### 顕彰の対象者：

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

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

### 賞の対象となる具体的な分野：

1. 超伝導新物質開拓に関するもの
2. 超伝導基礎理論に関するもの
3. 超伝導基礎実験に関するもの
4. 超伝導材料（線材、バルク、薄膜、導体など）の高性能化に関するもの
5. 超伝導プロセス技術に関するもの
6. 超伝導の測定、評価、標準化に関するもの
7. 超伝導機器、デバイス、システム等、超伝導の用途開発に関するもの
8. データベースに関するもの
9. 超伝導研究推進に産業界、学会、官界、報道界などから貢献したもの（功労賞に相当するものを含む）

各分野それぞれ1件とするものではなく、また、すべての分野に賞を設定するというものでもありません。

### 賞設定の目的：

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

### 授賞時期：

授賞式は、超伝導科学技術研究会主催のシンポジウムの時に行います。

### 授賞の伝達：

受賞者には事前に連絡するほか、企業及び国公立研究所の場合には、授賞決定通知を社長、機関長宛てに伝達します。また、授賞理由等は(社)未踏科学技術協会超伝導科学技術研究会の機関誌に掲載します。

### 募集・応募の方式：

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

超伝導科学技術賞候補者推薦書はホームページよりダウンロードできます。

### 推薦書の提出先：

社団法人未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会 賞審査委員会委員長宛

(〒105-0003 東京都港区西新橋 1-5-10 新橋アマビル 6階)

Tel:03-3503-4681 Fax:03-3597-0535 E-mail: [fsst@snt.or.jp](mailto:fsst@snt.or.jp) URL: <http://www.snt.or.jp/~fsst/>

推薦の締切：第16回超伝導科学技術賞推薦締切：平成23年12月5日(月)

## 研究会の動き

[平成23年(2011年)7月1日～平成23年(2011年)9月30日]

### 幹事会

平成23年度第3回  
日 時:平成23年9月8日(木)14:30～17:00  
場 所:学術総合センター11階 共用会議室  
出席者:幹事10名 事務局1名

### 議事:

- (1) 第78回ワークショップについて
- (2) 第15回日米ワークショップについて
- (3) FSST NEWS について

## 国内超伝導関連会議

### Conferences related to Superconductivity (Domestic)

会 議 名	日 付	開催場所	主催及び問合せ先
日本金属学会/秋期	H23.11.7～9	沖縄コンベンションセンター・ カルチャーリゾートフェストーネ (沖縄県宜野湾市)	日本金属学会
低温工学・超電導学会/ 秋季	H23.11.9～11	金沢歌劇座	低温工学・ 超電導学会

## 国際会議及び国外の主要な会議

### Conferences related to Superconductivity (International/Abroad)

会 議 名	日 付	開催場所	主催及び問合せ先
24 <sup>th</sup> International Symposium on Superconductivity (ISS2011)	2011.10.24～26	Funabori (Japan)	<a href="http://www.istec.or.jp/ISS/main_J.html">http://www.istec.or.jp/ISS/main_J.html</a>

## 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 超伝導線材ユニット 主任研究員	小泉 勉	昭和電線ケーブルシステム(株) 技術開発センター 超伝導線材開発グループ 主査
荒井 有気	(公財)鉄道総合技術研究所 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室 研究員	日高 睦夫	(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 電子光技術研究部門 超伝導エレクトロニクスグループ 主任研究員	木村 茂行	(社)未踏科学技術協会 理事長
		大貫留美子	(社)未踏科学技術協会

# イットリウム系超電導線材

高温超電導のベストサプライヤー



## <特長>

- 高磁場における高い臨界電流密度、高い機械強度を実現
- 臨界電流値(Ic) × 線材長(L)の値(Ic × L)で世界記録更新(2011.2)  
**572 A × 816 m = 466,752 Am (@77K, 0T)**
- 浸漬冷却・伝導冷却用コイル等、  
高磁場下の応用に適した高性能なコイルアプリケーションが可能
- 電力ケーブルの大容量・大電力化、コンパクト化、低送電損失化、  
高性能・高効率な超電導ケーブルが実現可能



## <標準仕様 \*1>

- 線材幅 (5mm, 10mm)、基板厚さ (75μm, 100μm) に応じた製品ラインアップ
- 単長 ~ 300m、Ic > 500A @77K,0T 級のスペックも対応可能

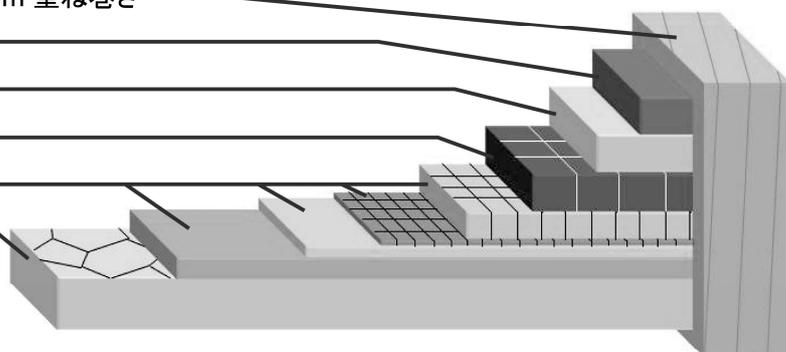
型名	線材幅 *2 (mm)	線材厚さ			臨界電流値 (A) (@77K, 0T)
		基板厚さ (μm)	安定化層厚さ (μm)	総厚さ (mm) *2	
FYSC-SC05	~ 5.15	75	75	~ 0.25	> 200
		100	100	~ 0.3	> 200
FYSC-SC10	~ 10.15	75	75	~ 0.25	> 400
		100	100	~ 0.3	> 400
FYSC-S05	~ 5.15	75	—	~ 0.15	> 200
		100	—	~ 0.2	> 200
FYSC-S10	~ 10.15	75	—	~ 0.15	> 400
		100	—	~ 0.2	> 400

\*1 上記仕様は2011年10月時点のものです。仕様のご確認等、何なりとお問い合わせ頂けますようお願い致します。

\*2 線材幅、厚さは絶縁テープを含む平均値となります。

## <構造>

- 絶縁テープ [ポリイミド] 12.5μm×2層; 25μm 重ね巻き
- 安定化層 [Cu] 75, 100μm
- 保護層 [Ag] 2 ~ 5μm
- 超電導層 [GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub>] ~ 2μm
- 中間層 [MgO, etc] ~ 0.7μm
- 金属基板 [ハステロイ®] 75, 100μm



お問い合わせ

## 株式会社フジクラ

新規事業推進センター 超電導事業推進室

〒285-8550 千葉県佐倉市六崎1440 TEL 043-484-3048 FAX 043-484-2472

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

Fujikura Superconductor