

FSST NEWS

Forum of Superconductivity

Science and Technology News

No. 126

発行

(社)未踏科学技術協会

平成 22 年 7 月 15 日発行

〒105-0003

東京都港区西新橋 1-5-10

新橋アマノビル 6 階

Tel : 03-3503-4681

Fax : 03-3597-0535

Email: fsst@snt.or.jp

<トピックス 1>

種々の電子顕微鏡法から明らかになった 鉄系超伝導 $REFeAsO_{1-x}F_x$ 多結晶体の 組織学的特徴

Key microstructure of $REFeAsO_{1-x}F_x$
Fe-pnictides explored by various microscope
techniques

米国立強磁場研究所

*東京大学大学院工学系研究科

亀谷文健, A. Polyanskii, 山本明保*, J. Jiang,

E. Hellstrom, D. Larbalestier

National High Magnetic Field Laboratory

*School of Engineering, University of Tokyo

F. Kametani, A. Polyanskii, A. Yamamoto*, J. Jiang,

E. Hellstrom, D. Larbalestier

1. はじめに

鉄系超伝導体 $LaFeAsO_{1-x}F_x$ が発見されてから、この材料系は新しい高温超伝導体として注目され、様々な角度から精力的に研究が進められている。その結果、鉄系超伝導体の特性が徐々に明らかになってきた[1-7]。このような現状から、次に考察すべき命題のひとつが、この材料系における実用化の可能性である。実用化を前提に鉄系超伝導体を考察するとき、もっとも重要になるのが、多結晶試料中を流れる超伝導電流の臨界電流密度 J_c である。しかしながら、近年報告されている多結晶バルク材は、どれも結晶粒間 J_c が低いものが多く、銅酸化物高温超伝導体と同様に、結晶粒界で超伝導電流がブロックされている可能性が考えられる。銅酸化物系高温超伝導体の場合、超伝導オーダーパラメータ由来の電流ブロック効果により、粒界方位差が $3-5^\circ$ を

超えると、結晶粒間 J_{cGB} は、結晶粒内 J_c から粒界傾角 θ に対して指数関数的に減少することが知られている[8-11]。この場合、ランダムな結晶方位関係をもつ多結晶体では、たとえ粒内の J_c がどんなに高くても、試料全体では超伝導電流をほとんど流すことができない。このように、鉄系超伝導体が実用材料となり得るかを考える上で、多結晶体の結晶粒間電流輸送特性は必要不可欠なファクターとなる。

結晶粒間電流輸送特性を考察するとき、多くの場合、その材料が超伝導電流をブロックする不純物相の含まれない単相であり、さらに充填率が100%であると仮定する。しかしながら、鉄系超伝導体は複数の元素からなる多元系物質であり、この場合、そもそも100%単相を得るのは非常に難しい。実際に、同じく多元系物質である銅酸化物超伝導体でも、Y系Bi系問わず、多くの場合不純物が存在する。この場合重要なのは、不純物の体積分率および分散である。不純物の体積分率が20%以下であれば、分散の仕方如何によっては、超伝導電流のブロック効果よりも磁束ピンニング効果の方が強く観察される。つまり、多結晶体において電流輸送特性を議論するときは、その試料の組織学的な特徴を捉えていないと、的を得た議論は困難ということになる。

そこで、本稿では、著者らが行った $REFeAsO_{1-x}F_x$ ($RE1111$) の走査型電子顕微鏡 (SEM) および透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた組織観察結果の一部を紹介する。組織観察で得られた知見が、その他の実験手法で得られたデータとどのように繋がるのかを併せて解説する。

2. $REFeAsO_{1-x}F_x$ 多結晶体の微細組織

SEM観察は、材料の組織観察をする上で、比較的簡便かつ、倍率範囲が低倍率から高倍率まで広い、よく使われる手法である。鉄系超伝導体の組織観察においても、非常に有益であった。ただ、簡便な手法ゆえ

に、あまり超伝導研究では注視されないが、特に、多元系多相組織には、理想的に鏡面研磨を施した試料表面へのSEM、特に反射電子SEM観察の重要性を強調しておきたい。鏡面研磨面を観察することで、超伝導相の結晶粒形、および粒径、そして結晶粒方位解析(OIM)を用いることで各結晶粒の方位や結晶粒界の方位差を明らかにでき、さらに不純物相の分散や体積分率を見積もることができるからである。

Fig.1(a)に鏡面研磨を施したSm1111試料の反射電子SEM像を示す。先にも述べたとおり、RE1111は、現在のところ単相試料を得るのが難しく、本研究で使用了試料も、Fig.1に示すとおり、不純物相を含む多相組織となっている。EDX解析より、灰色のコントラストが、主相であるSm1111、白そして濃灰色のコントラストが、それぞれ不純物相の Sm_2O_3 とFeAs相であることがわかった。Fig.1 (a)でわかるように、典型的な多結晶体Sm1111の組織は、不純物相がSm1111粒内もしくは粒間に分散していることがわかる。特に、FeAs相がSm1111結晶粒の

間を満たしているように見えること、そして形状がランダムであることから、FeAs相は、Sm1111相形成時には液相として存在しており、常温では、Sm1111結晶粒間をアモルファスに近い状態で満たす、いわゆるウェッティング相として存在していると思われる。また、Fig.1 (b)のSm1111相の結晶方位マップが示すとおり、各Sm1111結晶粒はab面方向に広い板状の形状をしており、なおかつランダムな方位を向いていることがわかる。ゆえに、結晶粒同士には特定の方角関係は見られず、ほぼ全ての結晶粒は大傾角粒界で囲まれていることになる。これは、試料作製時に結晶方位をコントロールしているわけではないので予想される結果ではあるが、試料全体を流れる粒間の超伝導電流を考える上では非常に重要である。なぜなら、結晶粒間を超伝導電流が流れるには、大傾角結晶粒界をまたぐ必要があるからである。

近年著者らが評価したSm1111とNd1111は、磁化測定から、粒界間を流れる臨界電流が、今まで報告された中で最も高いものの一つであることがわかっている。[12]

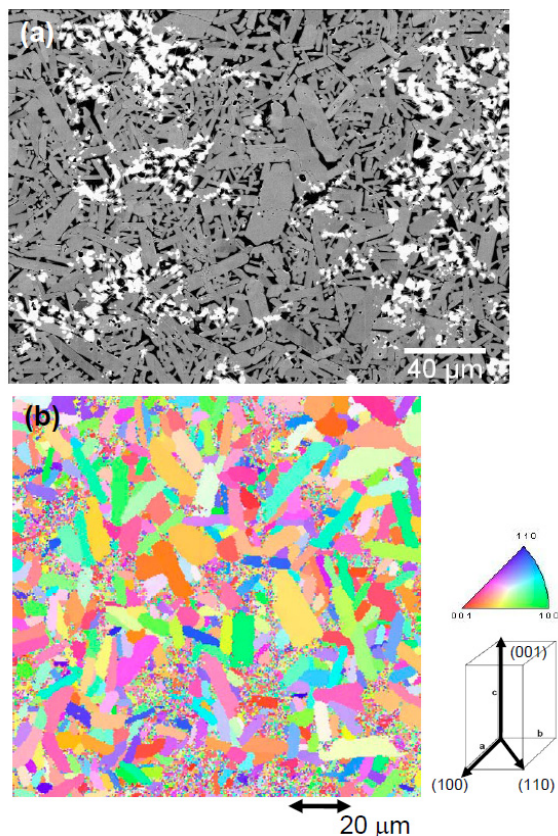


Fig.1 (a) Back scattered electron (BSE) SEM image on the well-polished surface revealing the multi-phase microstructure. Respective gray, black and white contrasts represent Sm1111, Fe-As and Sm_2O_3 . (b) Inverse pole figure shows grain orientations by different colors. There is no low angle grain boundary, meaning that supercurrent must flow across random high angle grain boundaries.

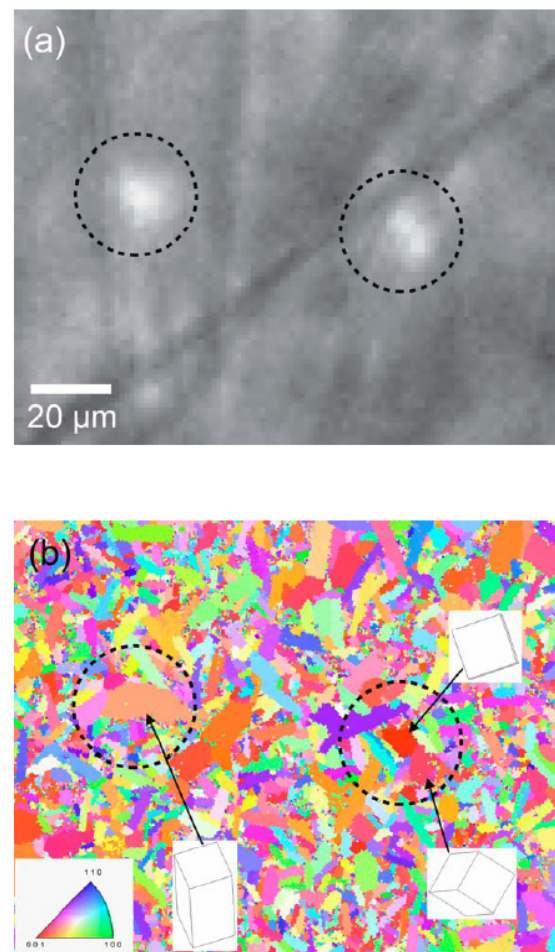


Fig.2 (a) Typical high J_c bright spots of the MO image on the Nd1111 sample. (b) Inverse pole figure map of the exact same region. Black-circled areas correspond to the high J_c spots in (a).

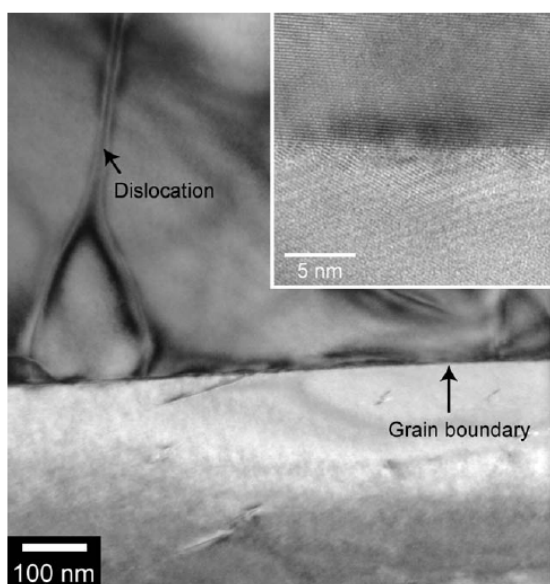


Fig.3 TEM image of a clean high angle grain boundary in a Sm1111 bulk. The inset of the HREM image of the same grain boundary proves no thin wetting amorphous phase on the grain boundary.

しかし、これらのSm1111およびNd1111多結晶試料でさえ、粒間 J_c と粒内 J_c では、異なる J_c の温度依存性を示し、磁気光学顕微鏡(MO)観察から、超伝導状態での磁束侵入は非常に不均一であることがわかった[12, 13]。このMOは、試料の鏡面研磨表面上を観察するのがもっとも高い解像度が得られ、さらにSEM像の対応も容易である。不均一なMO像の中で、高い J_c 領域が微細組織のどの部分に対応するかを調べるため、Nd1111試料中の全く同じ領域同じ研磨面をEBSD-OIMで測定し、結晶方位マップとを対応させた(Fig.2)。なお、Fig.2(a)に見られる直線コントラストは、観察に用いたインディケータ薄膜上の傷であり、試料由来のものではない。Fig.2(a)と(b)の比較からわかるように、高い J_c を示す領域は、基本的に一つの比較的大きなNd1111結晶粒に対応している。また、高い J_c を示す結晶粒は、比較的赤に近い色、すなわち[001]方向に近いことから、強いMOコントラストは、Nd1111結晶のab面内をループする超伝導電流からもたらされていると考えられる。

3. 結晶粒界組織

前述のSEM像とMO像との比較からは、Sm1111もNd1111試料も、ランダムな結晶方位関係をもつ多結晶体であり、超伝導状態では非常に不均一な振る舞いをしていることがわかるが、MOイメージングの解像度の限界から、この時点では、結晶粒界が銅酸化物超伝導体と同様の傾向をもつかどうか(3-5°以上の粒界は超伝導電流をブロックするか)を結論付けることはできない。一

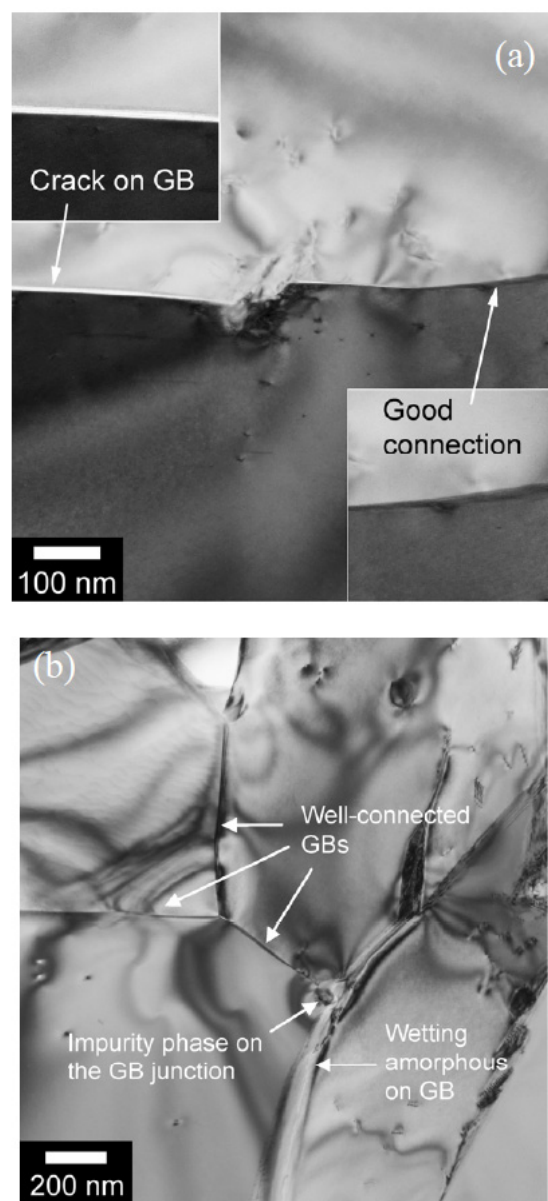


Fig.4 TEM images showing grain boundaries in the Nd sample obstructed by (a) cracks and (b) the wetting amorphous phase and Nd_2O_3 .

方、MO像において、これら多結晶体の臨界状態が観察されたことは[12, 13]、これらの試料では、大傾角粒界を含んでいるにもかかわらず、粒間電流が試料全体を流れていることを示唆する。ただ、多相組織であることを考えると、これらの試料中の結晶粒界がクリーンである確証はない。このため、特に粒界組織観察にTEMが非常に有効となる。

FIBにより選択的に不純物のないクリーンなSm1111粒界を抜き出し、TEM観察をした結果を図3に示す。ランダム多結晶体のため、Sm1111の結晶粒界は、YBCO線材などにみられるような単純なチルト粒界ではなく、チルト粒界とツイスト粒界が混じったようないわゆるランダム粒界となっている。このTEM像からわかるように、粒

界上にウェットティングなアモルファス相や粗大析出物の偏析は観察されず、シャープな粒界コントラストが見られた。また、インセットの高分解TEM像は、同じ結晶粒界が入射電子線と平行になるようにTEM試料を傾けた後、HREM観察をしたものであるが、粒界上であっても、上下の結晶粒の格子フリッジがはっきり観察されることから、この結晶粒界上には、アモルファス相などの薄い超伝導ブロック層すら存在せず、組織学的にクリーンな結晶粒界であることがわかる。しかしながら、非選択的なTEM観察からは、結晶粒間の接合が完全ではない粒界が散見される。Fig.4にこのような非選択的なTEM観察で得られたNd1111の結晶粒界組織を示す。Fig.4(a)では、粒界の左側ほぼ半分に10 nm厚程度のクラックが存在し、超伝導電流が阻害されている可能性が考えられる。また、Fig.4(b)では、ほとんどの結晶粒界がシャープなコントラストを示し、組織学的に結合性がよいことが示唆されるが、一部の粒界には50 nm程度のアモルファス相が存在し、これもまた超伝導電流ブロック因子となる。

このように、高い粒界間 J_c を持つ試料であっても、選択的及び非選択的TEMで粒界組織を観察すると、多くがクリーンな粒界であるものの、アモルファス相などの超伝導ブロック因子が存在する粒界も散見されることから、この材料系における結晶粒界の超伝導特性を結論付けるのは、それほど簡単ではないのが現状であると思われる。

4. まとめ

鉄系超伝導体の中でも臨界温度 T_c 及び上部臨界磁場 H_{c2} が高いSm1111 及び Nd1111 多結晶体の組織学的特徴を述べてきたが、今まで報告されている同系試料の中でも、非常に高いクオリティを持つ試料であっても、試料中の粗大かつ粒界に存在する不純物やクラックがブロック要因の一つとなって、超伝導状態が不均一になっているのが現状であり、将来の実用化を睨んだ多結晶体の粒間電流輸送を考察するには、不純物などの超伝導電流ブロック因子が微細かつ均一に分散したより高純度の試料の作製が不可欠であろうと思われる。

謝辞

共同研究者のA. Gurevich(米国立強磁場研)、Z.A. Ren, Z.X. Zhao(中国科学院物理研)の各氏に感謝する。なお、本稿に記した研究は、米国立科学財団(NSF)、米国エネルギー省(DOE)、米国空軍科学研究所(AFOSR)、日本学術振興会の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano and H. Hosono, *Am. Chem. Soc.* **130** 3296 (2008)
- [2] G. F. Chen, Z. Li, D. Wu, G. Li, W. Z. Hu, J. Dong, P. Zheng, J. L. Luo and N. L. Wang, *Phys. Rev. Lett.* **100** 247002 (2008)
- [3] Z. A. Ren, J. Yang, W. Lu, W. Yi, X. L. Shen, Z. C. Li, G. C. Che, X. L. Dong, L. L. Sun, F. Zhou and Z. X. Zhao, *Europhys. Lett.* **82** 57002 (2008)
- [4] Z. A. Ren, J. Yang, W. Lu, W. Yi, G. C. Che, X. L. Dong, L. L. Sun and Z. X. Zhao, *Cond-mat arXiv:0803.4283v1* (2008)
- [5] Z. A. Ren, W. Lu, J. Yang, W. Yi, X. L. Shen, Z. C. Li, G. C. Che, X. L. Dong, L. L. Sun, F. Zhou and Z. X. Zhao, *Chin. Phys. Lett.* **25** 2215 (2008)
- [6] Hunte F, Jaroszynski J, Gurevich A, Larbalestier D C, Jin R, Sefat A S, McGuire M A, Sales B C, Christen D K and Mandrus D 2008 Very high field two-band superconductivity in $\text{LaFeAsO}_{0.89}\text{F}_{0.11}$ *Nature*, **453**, 903-905 (2008)
- [7] J. Jaroszynski, S. C. Riggs, F. Hunte, A. Gurevich, D. C. Larbalestier, G. S. Boebinger, F. F. Balakirev, A. Migliori, Z. A. Ren, W. Lu, J. Yang, X. L. Shen, X. L. Dong, Z. X. Zhao, R. Jin, A. S. Sefat, M. A. McGuire, B. C. Sales, D. K. Christen, and D. Mandrus, *Phys. Rev. B* **78**, 064511(2008).
- [8] D. C. Larbalestier, A. Gurevich, D. M. Feldmann, and A. Polyanskii, *Nature* **414**, 368 (2001).
- [9] H. Hilgenkamp and J. Mannhart, *Rev. Mod. Phys.* **74**, 485 (2002).
- [10] D. M. Feldmann, T. G. Holesinger, R. Feenstra, C. Cantoni, W. Zhang, M. Rupich, X. Li, J. H. Durrell, A. Gurevich, and D. C. Larbalestier, *J. Appl. Phys.* **102**, 083912 (2007).
- [11] A. A. Polyanskii, A. Gurevich, A. E. Pashitski, N. F. Heinig, R. D. Redwing, J. E. Nordman, and D. C. Larbalestier, *Phys. Rev. B* **53**, 8687 (1996).
- [12] A. Yamamoto, A. Polyanskii, J. Jiang, F. Kametani, C. Tarantini, F. Hunte, J. Jaroszynski, E. Hellstrom, P. Lee, A. Gurevich, D. Larbalestier, Z. Ren, J. Yang, X. Dong, W. Lu and Z. Zhao: *Supercond. Sci. Technol.* **21**, 095008 (2008).
- [13] F. Kametani, A. Polyanskii, A. Yamamoto, J. Jiang, E. Hellstrom, A. Gurevich, D. Larbalestier, Z. Ren, J. Yang, X. Dong, W. Lu and Z. Zhao: *Supercond. Sci. Technol.* **22**, 015010 (2009).

<第 14 回超伝導科学技術賞を受賞して>

(1) 超伝導技術が拓く先端基礎科学

— 素粒子・宇宙・粒子加速器 —

Advance Basic-Science Progressed with
Applied Superconductivity – Elementary
Particle and Cosmic-ray Physics, and Particle
Accelerators

高エネルギー加速器研究機構

山本 明

High Energy Accelerator Research Organization

A. Yamamoto

1. はじめに

宇宙のはじまり、物質の究極構造を探る素粒子・宇宙物理、加速器科学の世界では、高エネルギーに加速した陽子や電子等の素粒子の衝突現象の観測を通して、実験的に宇宙の初期過程を探る。『超伝導技術』は、粒子を加速、軌道制御する為、『高磁場・高電場を生成』する為の不可欠な基盤技術として発展し、エネルギーフロンティアにおける基礎物理の推進役を担っている。また、自然な加速機構でもある宇宙の彼方から降り注ぐ宇宙粒子線(宇宙線)の観測、特に飛翔体等の利用した観測では、厳しいエネルギー、重量制限環境下に置いて、強磁場環境を形成する為に、超伝導技術は、本質的な役割を果たしている。

2. 粒子加速器における超伝導技術

エネルギーフロンティアを目指す粒子加速器では、陽子シンクロトロン等の円形加速器におけるビーム軌道制御に、超伝導磁石が本質的な役割を果たしている。米国Fermilab-Tevatronを基点として、米国BNL -RHIC、欧州CERN-LHC加速器(図1)へと開発が進展し、NbTi超伝導体を超流動He温度において利用することで、粒子加速器として、8.4 Tまでの実用的な磁場利用技術が確立した[1-5]。今後の課題は、Nb₃Sn、Nb₃Al等のA15型化合物超伝導体の活用によって、粒子加速器として、15 T級磁場利用を視野に据えたアップグレードが課題となる[6]。日本はLHC加速器超伝導磁石の開発において、衝突点磁石の開発(図2)に貢献するとともに、高磁場での機械強度特性に優れるNb₃Al超伝導材の加速器応用開発(KEK-NIM協力)に取り組んでいる[7,8]。LHC加速器アップグレード計画を通して、実用化の進展が期待されている。

電子を用いたエネルギーフロンティアを目指す線形加速器においては、直線的に粒子を加速する為に、高電界(電場)を発生する超伝導加速空洞技術が本質的

表 1. 超伝導加速器: LHC から ILC へ

	LHC	ILC
Particle	p/p	e+/e-
Accelerator type	Circle	Linac
Collision Energy (TeV)	14	1
Circumference/length (km)	26.7	31
Luminosity (cm ⁻² s ⁻¹)	10 ³⁴	2x10 ³⁴
Critical SC Technology	Magnet	Cavity
SC Dipole magnetic field (T)	8.4	
SCRF cavity gradient (MV/m)		31.5
Numbers of twin-dipoles	1232*	
Number of cryomodules		1,680
Cryogenics (kW @ 1.8K)	8 x 2.4	10 x ~2
Completion (year)	2008	TBD

* two-in-one

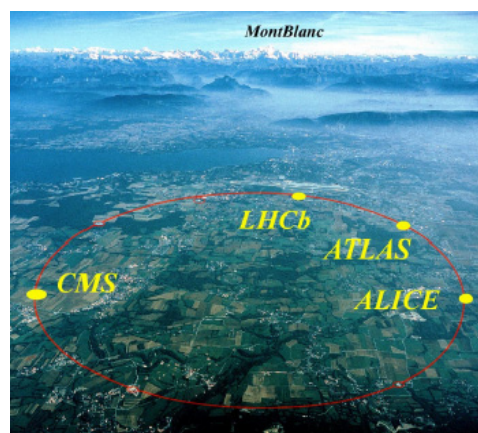


図 1. LHC 加速器の鳥瞰図：2008 年完成。



図 2. LHC ビーム衝突点磁石：日米協力による貢献。

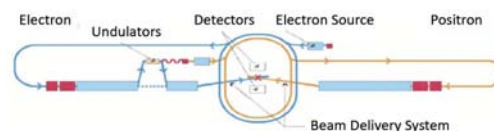


図 3. ILC： 加速器将来計画レイアウト：国際協力による設計・基礎技術開発中。

な役割を果たす。LHCを越える次世代加速器として、全世界規模での国際協力による国際リニアコライダー加速器(ILC)が計画され、直線距離で30 kmを越える超伝導加速器(図3)の建設をめざし、35 MV/mを目標とした超伝導加速空洞技術開発が精力的に進められている。

3. 素粒子・宇宙線観測における超伝導技術

素粒子実験、宇宙線観測では、素粒子の衝突反応を、大規模な磁場空間のなかで捉え、荷電粒子の偏向極率半径を精密に測定することによって、衝突反応機構を探る。この時、粒子検出器の高性能化を計るうえで、理想的には磁場空間のみを求め、磁場発生に必要なコイル・磁石要素は、できる限り物質的に透明化、低減化(軽量化)を計ることが求められる。このために超伝導磁石技術が本質的役割を果たす。特に、粒子透過性を極限的に追求した『薄肉超伝導磁石』の技術開発では、NbTi超伝導材としつつ、高強度アルミ安定化技術開発が大きく進展し(図4,5)、4Tレベルまでの粒子検出器用大型超伝導磁石の標準技術として確立した。高純度アルミニウムをベースに、良く制御した特定金属を微量添加し加工硬化を加えることにより、標準的な銅安定化材を上回る高強度化に成功している [1, 2, 9]。

アルミ安定化超伝導線技術は、宇宙線観測実験の分野に応用が広がり、エネルギー環境、重量制限が極めて厳しい飛翔体実験において、宇宙空間強磁場実験環境への道を切り拓いた[10, 11]。南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙観測実験(BESS)の成功(図6, 7)は、近く打ち上げが予定されている宇宙ステーション・宇宙線観測実験装置(AMS)技術開発への先導的な役割を果たした。

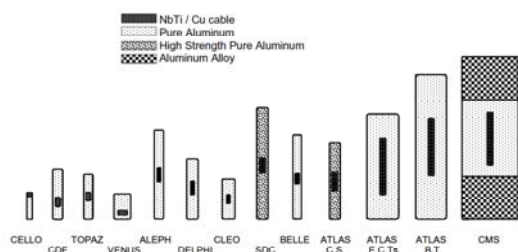


図 4. 粒子検出器用アルミ安定化超伝導体の進展。

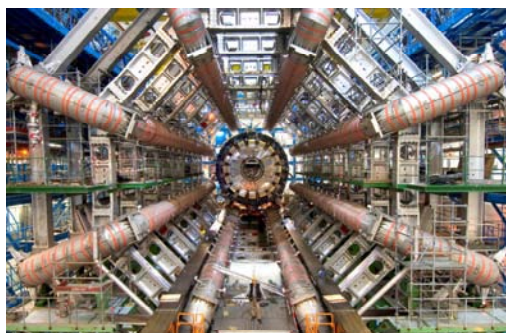


図 5. LHC-ATLAS 実験超伝導磁石システム。中心に薄肉ソレノイド、周囲にトロイダルコイルが配置されている。

4. まとめ、これからの展望

超伝導技術は、粒子加速器、素粒子実験、宇宙線観測の基礎科学の分野において、高磁場・高電場を生成する為の不可欠な基盤技術として発展し、エネルギーフロンティア物理の推進、宇宙の成り立ちへの理解に深く貢献している。今後、LHCアップグレード、ILC計画[12]の実現を目標として更なる技術開発の進展が期待される。

謝辞

この度の超伝導科学技術賞の受賞にあたり、素粒子、宇宙線、加速器分野を代表しての超伝導技術開発への御評価と受けとめ、心より感謝致します。

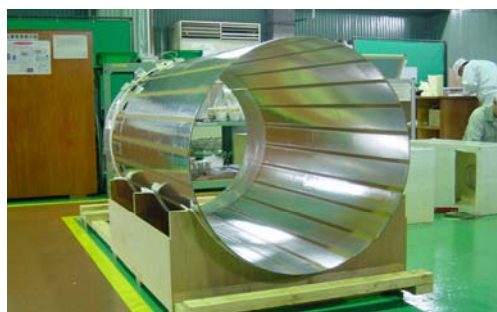


図 6. 南極周回気球実験 BESS-Polar・高強度アルミ安定化薄肉超伝導磁石



図 7. 南極周回気球飛翔超伝導スペクトロメータの打ち上げ (2007 年 12 月)

参考文献

- [1] A. Yamamoto, Nuclear Instrum. & Methods, A **449** (2002) p. 255.
- [2] A. Yamamoto, IEEE Trans. Appl. Superc., **14**, No.2 (2004) p. 477.
- [3] 山本明, 加速器, **2**, No.2 (2005) p.263.
- [4] 山本明他, 日本物理学会誌, **62**, No. 12 (2007) p. 935.
- [5] A. Yamamoto et al., IEEE Trans. Applied. Superc., **15**, No.2 (2005) p. 1084.
- [6] A. Devred et al., IEEE Trans. Appl. Superc., **15**, No.2 (2005) p.1192.
- [7] A. Kikuchi et al., IEEE Trans. Appl. Superc., **18**, No.2 (2008) p. 1026.
- [8] K. Tsuchiya et al., IEEE Trans. Appl. Superc., **18**, No.2, p.1204 (2008) p. 1031.
- [9] A. Yamamoto et al., Nuclear Phys B (Proc. Suppl.) **78** (1999) p. 565.
- [10] A. Yamamoto et al., IEEE Trans. Applied Superc., **12**, No. 2 (2002) p. 438.
- [11] 山本明他, 物理学会誌, **58** (2003) p. 86.
- [12] A. Yamamoto, IEEE Trans. Applied Superc., **19**, No.3 (2009) pp. 1387.

(2) イットリウム系超電導線材 及びその応用開発

Development of YBCO coated conductor and its applications

(財)国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所 所長 塩原 融
Superconductivity Research Laboratory, ISTEC
Y. Shiohara

1. はじめに

酸化物高温超電導材料が発見¹⁾されて20余年が経過した。超電導技術は送電線網に代表される電力機器のみならず、医療機器、産業応用等多様な波及効果が期待でき、21世紀のエネルギー施策、CO₂排出量削減等への貢献が期待できる国家的に極めて重要な技術である。また、国際競争の中で我が国が優位である点でも重要である。

我が国は、昨年秋に誕生した民主党政権で、鳩山(前)首相が、条件付きではあるものの2020年でのCO₂削減率を1990年比で▲25%にする旨を国連で演説し、本年1月31日にはコペンハーゲン合意に基づき、国連気候変動枠組み条約の事務局に中期目標として正式に提出した。また、「環境・エネルギー問題」を喫緊の課題であるとして、「グリーンイノベーションの推進」を政策課題の一つに掲げている。この目標を達成するには、ありとあらゆる技術・手段を総動員して対応する必要がある。「超電導」は、電気抵抗がなく極めて効率的でコンパクトな設計が可能なことから、地球温暖化防止対策の切り札としても期待され、その早期の実用化が求められている。本稿では、「イットリウム系超電導線材及びその応用」と題し、地球環境問題と超電導技術の進捗を解説する[2]。

2. 二酸化炭素排出削減への超電導技術の貢献

科学技術政策担当大臣及び総合科学技術会議により平成22年5月21日に制定された「平成23年度科学・技術重要施策アクション・プラン」の中にグリーンイノベーションの主要な課題が設定されており、その中で「超電導送電」は政府全体が戦略的に取り組むべき「課題解決に必要な方策」として、その特徴に応じた導入・展開を図るために、研究開発と普及促進の取り組みが必要と記述されている。

二酸化炭素(CO₂)は最も重要な人為起源の温室効果ガスであり、全世界で約500億トンの総排出量が報告されており、そのうち日本は約12～13億トンのCO₂排出量で、火力発電が1/4、自動車が1/5を占めている。2006

年の統計結果によれば、日本の発電に際してのCO₂排出原単位は0.39 kg-CO₂/kWhであり、各種発電電力量の非化石電源比率は約38%で、内訳は原子力:28%、水力:8%、再生可能エネルギー他が2%である。一方、化石電源比率は61%で、内訳は石油:11%、ガス:23%、石炭:27%である。電気事業連合会の報告[3]によれば、2020年度までに、電力業界では、非化石電源比率すなわちゼロエミッション電源比率50%の目標達成による電力CO₂排出原単位の低減に期待しているとのことである。

各国のCO₂排出原単位は、アメリカ:0.56 kg-CO₂/kWh、イギリス:0.50 kg-CO₂/kWh、ドイツ:0.50 kg-CO₂/kWh、イタリア:0.44 kg-CO₂/kWh、中国:0.86 kg-CO₂/kWh、インド:0.97 kg-CO₂/kWhである。ほぼ同一の非化石電源比率(39%)であるドイツと比しても、日本の発電CO₂排出原単位は0.39 kg-CO₂/kWhと低く、発電効率等の技術が進歩・成熟していることが伺える。我が国の温暖化ガス削減目標は、既に成熟してきている技術に対して、さらなるCO₂排出削減を課することになる[3]。因みに、このCO₂排出原単位に関しては、フランスは原子力発電比率が79%と高く、0.08 kg-CO₂/kWhであり、カナダは水力発電比率が58%と高く、0.19 kg-CO₂/kWhと報告されている。

また、各国との排出権取引により目標を達成するためのクレジット購入額は、1990年比25%削減(2005年比30%削減)を想定し、2005年比15%分を国内対策で削減し、残り15%分をクレジット購入で達成とした場合、5年間で約2兆～4兆円(15～30ユーロ/t-CO₂)の負担となる。このように我が国が世界へ約束した目標は非常にチャレンジングであり、さらに2050年目標に対しては、研究者の叡智を集結してあらゆる可能性を探索する必要があると考えられる。

技術が成熟している我が国の送配電時のロス是非常に少なく、常電導送電では、1980年頃から5%台を推移しており、現状でほぼ限界の5%の送配電ロスが報告されている。この送配電ロスを低減させるためには、革新的技術の導入が不可欠であり、超電導送電ケーブルの導入を目指して研究開発が進められている。試算によると、1500 MVA級の送電容量に対し、現状の常電導送電では約740 kW/kmの送電損失が報告されているが、交流超電導送電では約200 kW/kmに低減されると見込まれている。同様に変圧器においても効率向上が見込まれている。再生可能エネルギーの導入促進を想定した将来の電力系統は、図1に示すように、原子力発電及び火力発電に加えて大規模な太陽光発電サイト(メガソーラー)、風力発電(ウインドファーム)、各家庭での太陽光発電を超電導送配電ケーブル・超電導変圧器・超

電導電力貯蔵(SMES)等でリンクさせる超電導電力系統の構築が期待される。

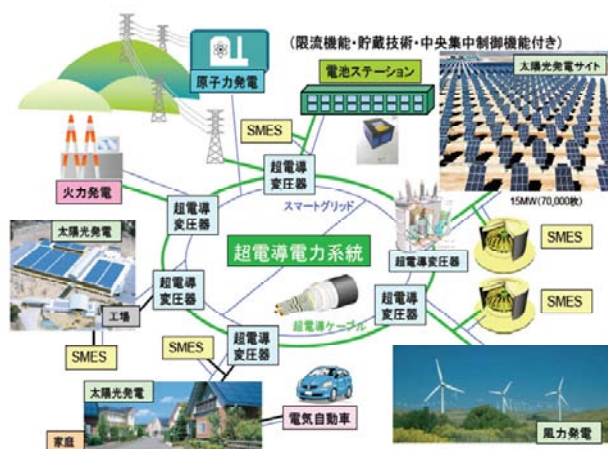


図1 将来の電力系統概念図

3. Y系高温超電導線材の特長

Y系高温超電導線材とは $REBa_2Cu_3O_x$ (RE: 希土類金属)銅酸化物高温超電導材料を基板上にテープ状に薄膜積層した線材であり、以下の特長が大きな開発の動機となり、日米欧を中心として世界中で熾烈な開発競争が繰り広げられている。

- ① 銀の使用量が少なく、高臨界電流が可能のため、大幅なコスト低減が見込める。
- ② 磁界中での臨界電流密度(J_c)が高く、高磁界応用が可能である。
- ③ 金属基板選択の自由度から、機器開発に重要な機械的な高強度が期待できる。
- ④ 高臨界電流密度化により、オーバーオール臨界電流密度(J_c)の向上が見込める。
- ⑤ 金属基板上に絶縁中間層を介した薄膜積層構造を有するため、線材作製後の細線化等の後加工により交流損失の低減が可能である。
- ⑥ 安定化層の選択・膜厚制御等により、常電導時の電気抵抗制御が可能であり、SN転移型限流器用線材に適している。

Y系超電導線材の開発は、近年急速に進展し、機器開発を開始できるレベルまでに到達してきている。わが国では、平成20年度から国のプロジェクトとしてY系線材による機器開発を中心とした「イットリウム系電力機器技術開発[4]」プロジェクトが開始され、上記の特長を有するY系超電導線材の応用先として、超電導電力機器による都市部への大容量安定供給を目指した電力貯蔵装置(SMES)、送電ケーブル、変圧器の超電導化の研究開発が、Y系超電導線材のさらなる性能向上、コスト低減等を目指した線材開発とともに進められている。

4. Y系高温超電導電力機器技術開発

Y系超電導線材が有する高機械強度、磁界中高臨界電流特性等の特長を活かした、コンパクトで高磁界・高温動作を実現することが可能なSMESの開発が進められている。伝導冷却方式の高磁界コンパクトSMESの研究開発の一環として既に、高磁界下でのフープ応力試験で、11 Tの外部高磁界中でのコイルの繰り返し通電試験により、560 MPaの電磁応力耐性を確認するとともに、Y系線材4本の集合導体を用いた約600 mmφの実規模コイルを製作し、2 kAを超える大電流通電を実証している。

超電導電力ケーブルの開発では、66 kVの電圧階級において高い電流容量(5 kA級)をもつ大電流型ケーブルの開発と、電流容量は3 kA級ながら高い電圧(275 kV)階級で使用可能な送電ケーブル開発を進めている。超電導ケーブル特有の冷却損失も加味した送電ロスを、従来の地中送電線のロスの1/3に低減し、CO₂削減効果を期待するとともに、コンパクトな形状での大容量送電を可能とする技術開発が進められている。超電導材料を用いた電力機器応用においては、電気抵抗によるジュール損失の大幅な削減は見込めるものの、第2種超電導体中の磁束の変動に起因する交流損失(磁化損失)の低減が大きな課題である。これまで、交流送電ケーブルの交流損失の低減には、Y系線材の細線化により、ケーブル断面を真円形状に近付けることが有効であることが実験及びシミュレーションで示され、既に3 kA級導体を製造し、0.5 W/mまでの交流損失低減に成功している。さらに撚線ケーブルに対して、半径2 mでの曲げ試験で臨界電流特性の劣化がないことも確認している。

超電導変圧器の開発では、20 MVAの実用機用小型モデルとして、低交流損失[5]を実現できる2 MVA級の変圧器モデルを試作し、性能を検証する計画で、重量1/2、設置面積2/3、不燃、高効率を目指した開発を進めている。また、数百MVA級の変圧器に限流機能を付加させる技術開発、さらには高効率のブレイクンサイクル方式の大型冷凍機の開発も並行して実施している。変圧器の超電導化は臨界電流密度の向上により、変圧器本体のコンパクト化は見込めるものの、超電導ケーブルと同様に交流損失の低減なくしては、冷却装置を含めた全システムとしてのコンパクト化、高効率化の達成は困難である。Y系線材は金属基板とYBCO超電導層の間の酸化物中間層が、絶縁特性を有していることから、超電導層の細線化(溝加工)により、細線化された各素線(フィラメント)が電気的に絶縁された状態となり、結合損失の低減に加えて交流損失(磁化損失)の低減が可能となる。また、細線化されたY系線材の転位巻き線を含めたコイル化の実現により、コイル形態での交流損失

の低減が日本において初めて成功し、超電導変圧器の実現が期待されることとなった。

このように、Y系線材を用いた電力機器の重要な要素技術の開発が進められている。高温超電導線材の開発はこれまで銀シース線材であるBi-2223線材の開発で線材長尺化に成功しており、このBi系線材を用いた機器開発が進められてきた。最近になって、Y系線材の高性能化・長尺化技術開発が大きく進歩し、図2に示すように、ほぼ同一の断面積 ($\sim 1 \text{ mm}^2$) での臨界電流 (I_c ; A@77K, s.f.) と長さ (L ; m) の積は、殆ど同程度の300,000 Amに達してきている。日本では結晶粒の配向を線材に具備させる技術としては、IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) とCladタイプRABiTS™ (Rolling Assisted Bi-axially Textured Substrates) 基板を用いている。また、中間層及び超電導層は、PLD、MOCVD、スパッタ法等の気相法と、有機酸塩溶液の塗布・熱分解法による溶液法の成膜技術によるプロセス研究開発が進められている。

1987年のYBCO高温超電導材料の発見後、酸化物高温超電導材料の線材化は、世界中でYBCO材料での研究開発が進められてきている。最近になって、日本では、製造速度(成膜速度)の向上、高臨界電流密度、磁界中高臨界電流特性等が見込めるGdBCO超電導材料への転換が気相法成膜で適用されている。また、(株)フジクラで開発された結晶粒無配向金属基板上にイオンビームアシスト蒸着法(IBAD法)[6] と呼称される結晶粒配向中間層を形成する手法が多く用いられている。(株)フジクラ及び(財)ISTECでは、IBAD-GZO/CeO₂基板上にPLD法により超電導層を形成する超電導線材の開発を行ってきており、特性及び製造速度の観点から、超電導層にGdBa₂Cu₃O_y相を適用した線材で、504 m長で350 A/cm-幅の線材作製に成功し、開発指標としている I_c (臨界電流)・ L (長さ) の積で当時の世界最高値(176 kAm)を得ている。

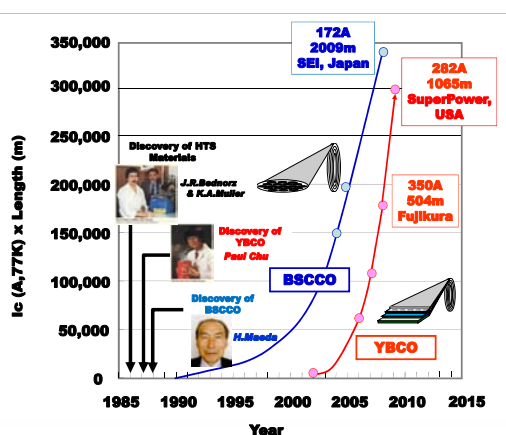


図2 高温超電導線材の開発の進展

一方、昭和電線ケーブルシステム(株)及び(財)ISTECでは、TFA-MOD法によるアプローチで線材開発を進めている。同法は、金属有機酸塩を含んだアルコール系溶液を塗布し、反応炉内で焼成(仮焼・本焼)することにより超電導層を形成する手法である。高真空のチャンバーや高価な熱源が不要であることから、原理的に低コストが期待できるプロセスである。また、この方法は水蒸気を消費し、弗化水素を放出するガスの出入りで結晶粒の配向化が可能であることから高特性が期待できるプロセスでもある。さらに、反応機構の解明や高 J_c 膜作製技術の開発(出発組成をBa-deficientにシフトする[7] 等)、シミュレーションを用いたガス流の精密制御焼成炉の開発などにより急激に開発が進んだ。最近では、上記のPLD線材と同様の基板上で、500 m長で310 A/cm-幅の特性を有する線材の作製に成功しており、 $I_c \cdot L$ 値でPLD線材とほぼ同等のレベルに到達している。

磁界中臨界電流特性の向上に関しては、超電導層の厚膜化とともに、人工ピン止め点の導入技術開発としてBa-Zr-O (BZO) 系の非超電導相の分散が有望視され、研究開発が精力的に進められている。さらに、Y系線材の特性均一化も研究開発の進歩が著しく、最近では(株)フジクラがIBAD-MgO/PLD-GdBCOの製造法により、170 m長の線材で臨界電流の均一度が $\pm 1.35\%$ の線材作製に成功している。また、(財)ISTECは、TFA-MOD法による線材作製に対してBZOの人工ピン止め点の分散に成功し、臨界電流特性の印可磁界角度異方性を解消している。

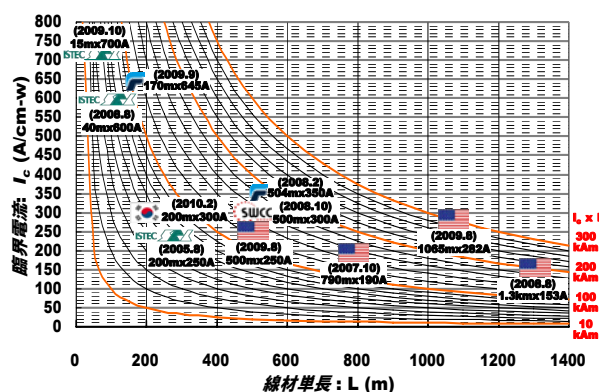


図3 Y系線材開発の国際比較

長尺化と高臨界電流を目指したY系線材作製プロセスの研究開発はこれまで日米で熾烈な競争が繰り広げられている。図3にY系線材開発の2010年2月の時点での国際比較を示す。米国は線材の長尺化技術(図の横軸)の進歩が著しく、日本では臨界電流(図の縦軸)向上が進んでいる。また、最近になって特筆すべき点は、

韓国における線材開発の進歩である。これまで殆ど図中に表示されていなかったレベルの特性及び長さがIBAD-MgO/RCE-YBCO (RCE:反応性共蒸着法)の線材作製プロセスによる200 m/300 Aの成果が報告され、これまで世界をリードしてきた日本の線材製造技術においても予断が許されない状況にある。

5. まとめ

超電導技術は機器の高効率化、コンパクト化等のメリットにより、地球環境問題であるCO₂削減に大きく寄与できる技術であるとともに、現状の日本の優位性を維持し、成長戦略分野としても期待されている。これまで多くの長所を有していることから期待されながらも、Bi系超電導線材に比べて開発が遅れていたY系超電導線材は、日米を基軸とする国家プロジェクトを中心に急激な進歩を遂げ、長さや特性の面を活かした機器の開発を始めることが可能なレベルに到達した。この開発の成果は更なる本格的な機器開発プロジェクトへと繋がっている。今後は、実機サイズでの機器開発を経て、機器の導入・普及期を迎えるものと考えられ、超電導機器実用化という夢の実現が可能になるものと期待される。

ー 謝辞 ー

本稿は、(社)未来科学技術協会超伝導科学技術研究会から筆者が第14回超伝導科学技術賞を受賞した記念として執筆させて頂きました。尚、本稿で引用した日本の成果は、主に、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「超電導応用基盤技術研究開発;第II期」プロジェクトおよび「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトの成果である。

参考文献

- [1] J. G. Bednorz, K. A. Muller : Z. Phys. B**64** (1986) 189.
- [2] 塩原 融:超電導 Web21 (2010)7月号
- [3] 電気事業連合会 HP:「電気事業におけるCO₂排出量削減に向けた取り組みについて」2008年7月8日
- [4] Y. Shiohara *et al* : Physica C **469** (2009) 863.
- [5] H. Okamoto, H. Hayashi, M. Iwakuma, T. Izumi, Y. Shiohara *et al* : Physica C **468** (2008) 1731.
- [6] Y. Iijima, N. Tanabe, O. Kohno and Y. Iken : Appl. Phys. Lett. **60** (1992) 769.
- [7] T. Izumi, Y. Shiohara *et al* : Physica C **463-465** (2007) 510.

(3) 層状およびカゴ状構造を有する 新規超伝導体の開発

Development of New Superconductors Having Layered or Cage-like Structures

広島大学大学院工学研究院

山中昭司

Faculty of Engineering, Hiroshima University

S. Yamanaka

1. はじめに

層状結晶では、共有性の強い化学結合で構成される二次元結晶層が、ファンデルワールス力や弱い静電力で積層している。結合の弱い層間の“すきま”に外から原子やイオン、分子を挿入する反応をインターカレーションと呼んでいる。挿入される化学種(ゲスト)が電子やホールドーパントとして作用し、結晶層(ホスト)との間で電荷移動が起こる場合には、結晶の物性が劇的に変化する。半導体が金属となり、低温で超伝導を示すものもある。そのような層状結晶として、遷移金属ジカルコゲン化合物やグラファイトが有名である。インターカレーションが起こる層状結晶の種類はあまり多くないが、最近発見された新しい高温超伝導体の殆どが層状結晶であり、超伝導層と電荷調整層の役割を分担する2種類の結晶層が交互にインターカレーションした層状構造になっている。インターカレーション構造体では、超伝導層へのキャリアの注入は層を構成する原子の直接置換ではなく、層間の電荷調整層から行われており、このことが、高温超伝導の実現に有利であると考えられる。

インターカレーションは層状結晶だけでなく、フラレーン分子のパッキングでできる“すきま”や、カゴ状構造を有する物質の“すきま”に関わる反応も広い意味で、同じように取り扱われる。筆者らは、新しいインターカレーションのホストとなる層状窒化物とカゴ状構造を有するシリコンクラスレート化合物を開発し、超伝導体となることを見出した。構造化学的な特徴と超伝導特性について、紹介する。

2. 電子ドーパ層状窒化物の合成と超伝導

新しく開発した3元系層状窒化ハロゲン化合物MNX (M = Ti, Zr, Hf; X = Cl, Br, I) には図1に示すように2種類の層状多形がある[1,2]。窒化物層が直交格子でFeOClと同形の α 型と、二重ハニカム構造の β 型である。ハロゲン原子層に挟まれた窒化物層が積層して構造が作られている。ハロゲン原子層間にアルカリ金属をインターカレーションすることにより、窒化物層に電子がドーパされる。 β 型層状窒化物はバンドギャップが3-4 eVのバン

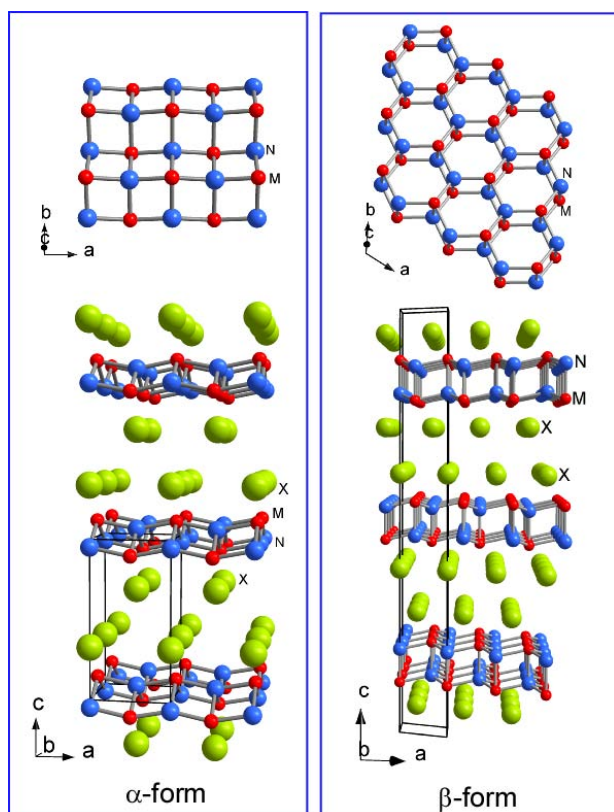


図 1. 層状結晶 MNX (M = Ti, Zr, Hf; X = Cl, Br, I) における 2 種類の多形

ド半導体であるが、電子ドーピングにより、黒色の金属に変化し、低温で超伝導を示す。電子ドーピングした β -ZrNClの超伝導転移温度(T_c)は13-15 Kである[3]。層状窒化物で最も高い T_c を示す超伝導体は、Liとテトラヒドロフラン(THF)がコインターカレーションした β -Li_{0.48}(THF)_yHfNClで、 $T_c = 25.5$ Kである[4]。溶媒分子(THF)のコインターカレーションにより、結晶層間は18.7 Åにも拡大している。アルカリ金属の種類を変えたり、ドーピング量を変化させても、 T_c は殆ど変化しないが、コインターカレーションにより、層間距離が増大すると、 T_c は約1.5-2.5 K増加する傾向がある[5,6]。 β -型層状窒化物の物性が詳しく調べられているが、この超伝導は、キャリア密度がきわめて低いことや、電子-フォノン相互作用が弱いこと、同位体効果が極めて小さいこと、超伝導ギャップ比が5-8で大きいことなどが特徴であり、従来のBCS超伝導機構では理解が難しいunconventionalな超伝導体と考えられている[2]。

α 型構造の層状窒化物TiNClもバンド半導体であるが、アルカリ金属の他に、有機塩基のピリジンやアミン分子がインターカレーションし、超伝導体に変化する[7]。アルカリ金属による電子ドーピングでは、 $T_c \approx 16.3$ Kであるのに対し、ピリジンでは8.6 Kである。アルキルジアミン(H₂N-(CH₂)_n-NH₂)は、側鎖の長い分子が結晶層に平行にインターカレーションし、アルカリ金属と同様な $T_c \approx$

16.3 Kの超伝導体が得られる[8]。中性有機分子のインターカレーションにより、電荷移動がどのように起こり、超伝導体となるのか、理論的な解明が待たれる。

岩塩型構造の金属窒化物MN (M = Ti, Zr, Hf) はそれぞれ、 $T_c = 5.6, 10.7, 8.8$ Kの超伝導体である。上述の層状窒化物の結晶層は、岩塩構造から薄い窒化物層をスライスし、ハロゲン原子層でサンドイッチした構造であるが、電子ドーピング窒化物層の T_c は岩塩型のそれに比較して、かなり高い。原子間距離M-Nを比較してみると、層状結晶の方が岩塩型よりも約0.1-0.15 Å短くなっており、面内の結合が強く、これが超伝導の実現に有利に作用するように思われる[2]。

3. シリコンクラスレート超伝導体

フラーレンの結晶の“すきま”にアルカリ金属やアルカリ土類金属をインターカレーションすることにより、 T_c が30 Kを越える超伝導体が見出され、同じように金属原子を内包し、カゴ状構造を有するシリコンクラスレートでも超伝導体となるのではないかと、期待が高まった。しかし、それまで知られていたアルカリ金属を内包するNa₈Si₄₆などでは超伝導は見つからなかった。筆者らは、バリウムを内包するシリコンクラスレート(Na, Ba)₈Si₄₆を初めて合成し[9]、これが $T_c = 4$ Kの超伝導体となることを見出した。Baを内包するシリコンクラスレートBa₈T₆Si₄₀ (T = Ag, Au, Ni, Cu, Pd, Pt) は既に合成されていたが、シリコンネットワークに遷移金属(T)が置換されており、これは超伝導を示さなかった。この原因として、遷移金属が電子のトラップとして作用し、超伝導を阻害することが考えられた。遷移金属を含まない二元系クラスレートBa₈Si₄₆は高温高压条件を用いることにより、初めて合成された。この T_c は8.0 Kで超伝導を示した[10]。

高温高压を用いることにより、さらに新規な二元系シリサイドLaSi₅やLaSi₁₀が合成されており、新規カゴ状超伝導体がえられている[11,12]。

4. まとめ

筆者は粘土やリン酸ジルコニウムといった層状結晶からインターカレーションの研究をスタートした[13]。これまで、上述の物質以外にも、数種類の超伝導体を発見しているが、すべて、層状結晶かクラスレートのようにカゴ状構造を有するいわゆる“すきま”を有する物質ばかりである。粘土などの研究の延長線上から超伝導体を発見することができたのは、超伝導体が層状結晶を中心とする“すきま”をもった物質群から見つかっており、筆者らの研究領域がこれらに重なっていることが大きな原因であると思われる。引き続き、新規超伝導体の開発を目指しているが、次の超伝導体もやはり“すきま”をもつ物

質であると期待している。

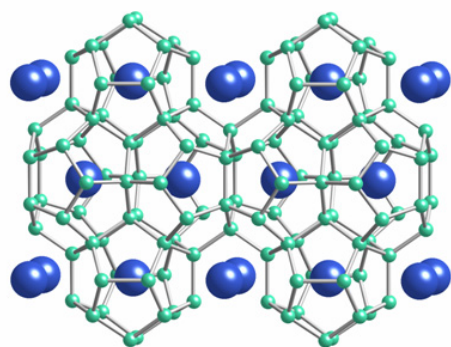


図2. シリコンクラスレート $\text{Ba}_8\text{Si}_{46}$ の構造

参考文献

- [1] S. Yamanaka: *Annu. Rev. Mater. Sci.* **30** (2000) 53-82.
- [2] S. Yamanaka: *J. Mater. Chem.* **20** (2010) 2922-2933.
- [3] S. Yamanaka, H. Kawaji, K. Hotehama, and M. Ohashi: *Adv. Mater.* **8** (1996) 771-774.
- [4] S. Yamanaka, K. Hotehama, and H. Kawaji: *Nature* **392** (1998) 580-582.
- [5] K. Hotehama, T. Koiwasaki, K. Umemoto, S. Yamanaka, and H. Tou: *J. Phys. Soc. Jpn.* **79** (2010) 014707/1-10.
- [6] T. Takano, T. Kishiume, Y. Taguchi, Y. Iwasa: *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 247005/1-4.
- [7] S. Yamanaka, T. Yasunaga, K. Yamaguchi, and M. Tagawa: *J. Mater. Chem.* **19** (2009) 2573-2582.
- [8] S. Yamanaka, and K. Umemoto: *Physica C* (2010) in press.
- [9] H. Kawaji, H. Horie, S. Yamanaka, and M. Ishikawa: *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 1427-1429.
- [10] S. Yamanaka, E. Enishi, H. Fukuoka, and M. Yasukawa: *Inorg. Chem.* **39** (2000) 56-58.
- [11] S. Yamanaka, S. Izumi, S. Maekawa, and K. Umemoto: *J. Solid State Chem.* **182** (2009) 1991-2003.
- [12] S. Yamanaka: *Dalton Trans.* **39** (2010) 1901-1915.
- [13] S. Yamanaka: *J. Ceram. Sci. Jpn.* **112** (2004) 421-427.

(4) 高温超伝導体の T_c 決定要因

What determines T_c of high- T_c superconductors?

産業技術総合研究所

永崎洋、伊豫彰、李哲虎

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

H. Eisaki, A. Iyo, C.H. Lee

1. はじめに

高温超伝導体の最大の魅力はその高い超伝導転移温度(T_c)にあることは言うまでもないが、それと同様、あるいはそれ以上に興味深いのは、超伝導を示す物質、構造のバリエーションの多彩さであろう。銅酸化物高温超伝導体、鉄ヒ素系超伝導体の基本構造はそれぞれ銅と酸素、もしくは鉄とヒ素から構成される2次元平面(CuO_2 面及び FeAs 面)であり、高温超伝導はそれら基本ユニットがブロック層と呼ばれる構造を挟んで積層した結晶構造において出現する。個々の構成元素は他の元素と置き換えることができ、又、間に挟むブロック層の種類も多様であるため、様々な元素、構造の組み合わせを有する物質の合成が可能である。新しい元素の組み合わせ、新奇な結晶構造を有する物質においてより高い T_c が実現するのではないかという期待のもと、精力的な物質開発競争が世界中で行われている。とりわけ、銅酸化物高温超伝導体の T_c がここ10年来上昇を見せていないことから、新しく登場した鉄ヒ素系超伝導体に対する T_c の最高記録更新への期待は高い。

では、多種多様な超伝導体の T_c を決めている要因は何であり、又、より高い T_c を実現するためにはどのような物質を作り出せばよいのであろうか。時間とマンパワーに制限がないのであれば、しらみつぶしに可能な組み合わせを試し、高い T_c を有する物質をひたすら探し続けるという方法もとれるであろうが、それではあまりにも非効率すぎるし、その成否は多分に運任せになってしまう。むしろ、現存する様々な超伝導体の特徴を精査し、それらの物質において T_c と相関しているパラメータを抽出し、 T_c 向上に向けた指針を確立した上で、物質合成面からそのパラメータの最適化に取り組むという道筋が、一見回り道に見えても、より着実であると思われる。我々は、このような方針に基づき、これまでに銅酸化物、鉄ヒ素系超伝導体を対象として、 T_c を決定づける物質パラメータの抽出およびその最適化を試みてきた。銅酸化物高温超伝導体においては、実際に物質パラメータの最適化によって、現存する超伝導体の T_c の向上に成功を収めている。

我々が提唱する T_c 向上のキーワードは、銅酸化物高温超伝導体においては「ブロック層の化学的乱れ」であり、鉄ヒ素系超伝導体においては「鉄ヒ素四面体の正四面体性」である。本稿では、特に後者の結果について紹介する。前者に興味のある方は、参考文献[1]をご覧ください。

2. 酸素欠損型 1111 系の発見と T_c 最高値の普遍性

東工大グループによる $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ (1111系鉄ヒ素超伝導体)の発見を受けて、我々が当初定めた目標は、鉄ヒ素系超伝導体の新しい物質合成法の確立とそれを利用した新ドーピング方法の開発であった。特に我々のグループでは、現有する高压合成法を有効に活用することを念頭に置いて研究を進めた。幸いなことに、高压合成法は鉄ヒ素系超伝導体を合成する上で極めて有効であることが極めて早い段階から明らかとなっていた。とりわけ、当時多くの研究グループが苦労していた有毒のヒ素の飛散という問題点を回避することができたことは、迅速な試料合成・評価体制を構築する上で非常に有益であった。実際、研究を開始してから2週間足らずの間に、酸素欠損型 LnFeAsO_{1-y} (Ln :希土類元素)が、東工大グループが発見したフッ素置換型超伝導体 $\text{LnFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ と同様の高い T_c を有する高温超伝導体であることを示すことが出来た[2]。更に、常圧合成では合成不可能であった重希土類元素 ($\text{Ln}=\text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$) を含む一連の1111系超伝導体の合成にも成功を納めた[3]。これらの試料の T_c は、常圧合成で得られた物質とほぼ同じであり、結果として T_c の向上は実現できなかったが、得られた結果は、本系の T_c が顕著な構造敏感性を有していることを指し示すものであった。図1に、1111系における T_c の結晶構造長(a 軸長)依存性を示す。 T_c は結晶軸長が縮むにつれて単調に増大し、54 Kにまで上昇した後はほぼ一定値をとる。現時点では、重希土類で実現している $T_c = 54$ Kが鉄ヒ素系超伝導体の T_c 最高値として認知されている。

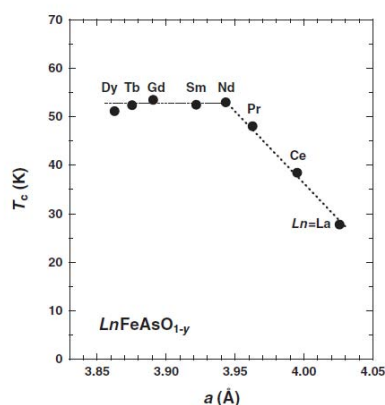


図1. LnFeAsO_{1-y} 系の T_c の a 軸長依存性

3. 鉄系超伝導体の構造と T_c との相関

鉄ヒ素系超伝導体の T_c は、結晶構造パラメータの微小な変化に対して極めて敏感に反応する。前述した T_c の顕著な Ln 依存性はその一例であるが、それ以外にも、 $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ の T_c が圧力印可によって26 Kから43 Kにまで上昇すること[4]や、それとは対照的に、元々 T_c の高い NdFeAsO_{1-y} では、圧力印可によってその T_c は54 Kから20 K以下にまで急激に減少すること[5]が知られている。

これらの実験結果はいずれも、超伝導と結晶構造に強い因果関係が存在することを示している。我々は、両者の相関を明らかにするため、 LnFeAsO_{1-y} 試料を用いた粉末中性子回折による結晶構造解析を行った[6]。特に超伝導電流が流れるFeAs層の結晶構造が重要な鍵を握っていると考え、FeAs₄四面体の局所構造の精密決定を行った。

図2挿入図に示されるように、FeAs₄四面体の形状はボンド角 α , β で特徴づけることができる。 $\alpha = \beta = 109.47^\circ$ のときにFeAs₄四面体は正四面体となる。図2中の黒丸で示したように、1111系では、ボンド角 α は Ln の置換によって特徴的な変化を示す。 T_c が最も高い NdFeAsO_{1-y} では、 α は約 110° であり、FeAs₄四面体はほぼ正四面体配置を有しているのに対し、 CeFeAsO_{1-y} 、 LaFeAsO_{1-y} と T_c が低くなるにつれて、 α の値は単調に増大する。 LaFeAsO_{1-y} では α は 113° にまで至り、FeAs₄四面体はc軸方向に潰れた形状となる。

上記の結果は、 T_c の値と鉄ヒ素四面体の形状との間に一定の相関があることを示唆する。この傾向は1111系固有のものではなく、鉄系超伝導体において一般的に成り立っている。図2には、これまで知られている鉄(ニッケル)系超伝導体における T_c と α の関係も同時にプロットされている。この図から、ほぼ例外なく、FeAs₄が正四面体のときに T_c が最も高くなる傾向を示していることが読み取れるであろう。例えばAsの代わりにPを構成要素として含む系では、ボンド角 α はAsを含む系よりも大幅に大きな値をとる。P系の T_c が低い原因は、FeP₄四面体の形状が最適化されていないからと解釈することも可能であろう。

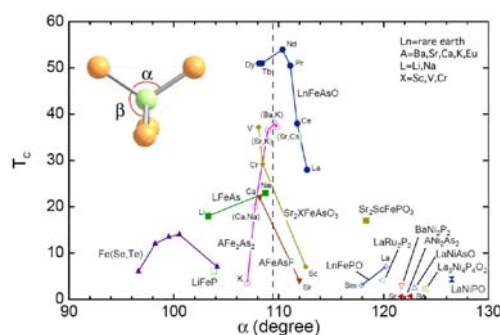


図2 鉄系超伝導体の FeAs₄ ボンド角と T_c との関係。挿入図は FeAs₄ 四面体の形状を表している。

鉄ヒ素面の正四面体性と T_c が相関する理由は未だ明確ではない。理論的には、鉄面とその上下に存在するAsの高さが T_c を決定づける「スイッチ」として機能しているという指摘がある[7]。鉄の3d軌道から形成されるバンドの形状がAsの高さによって敏感に変化することや、母物質における磁気秩序の形態がAs原子の高さに大きく依存しているということが予想されている。

4. おわりに

これまで述べた結果は、新型鉄系超伝導体の T_c が結晶構造に強く依存すること、特にFeAs₄正四面体の形状の最適化こそが高 T_c 実現への鍵であることを強く示唆している。今後の課題は、如何にこの設計指針を物質開発の現場で役立て、実際の物質の T_c 向上を実現するかである。これから高 T_c 物質開発の本番となる。今後も研鑽を積み、鉄ヒ素系高温超伝導体の T_c 更新に向けて努力を続けていきたい。

参考文献

- [1] 永崎洋、柏谷聡、内田慎一：日本物理学会誌第 **64** 巻第 8 号 602 (2009) .
- [2] H. Kito, H. Eisaki, A. Iyo, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 63707 (2008).
- [3] K. Miyazawa, K. Kihou, Parasharam M. Shirage, Chul-Ho Lee, H. Kito, H. Eisaki, A. Iyo, J. Phys. Soc. Jpn. **78**, 34712 (2009).
- [4] H. Takahashi, K. Igawa, K. Arii, Y. Kamihara, M. Hirano, H. Hosono, Nature **453**, 376 (2008).
- [5] N. Takeshita, A. Iyo, H. Eisaki, H. Kito, T. Ito, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 75003 (2008).
- [6] C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, H. Kito, M.T. Fernandez-Diaz, T. Ito, K. Kihou, H. Matsuhata, M. Braden, and K. Yamada: J. Phys. Soc. Jpn., **77**, 083704 (2008).
- [7] K. Kuroki, H. Usui, S. Onari, R. Arita, H. Aoki, Phys. Rev. B **79**, 224511 (2009).

(5) 電気二重層トランジスタによる 電場誘起超伝導の発見

Discovery of electric field induced
superconductivity by an electric double layer
transistor

東北大学 WPI 材料機構

上野和紀

WPI-AIMR, Tohoku University

K. Ueno

1. はじめに

絶縁体に伝導キャリアを導入し電気の流れる金属状態にすることで超伝導体を作る。この「キャリアドーピング」のコンセプトは銅酸化物超伝導体の開発という大きな成功をもたらした。その後も同一のコンセプトに基づきフラーレンの超伝導や最近の有機半導体ピセンの超伝導などさまざまな材料に超伝導が実現されている。しかし、不純物置換のような化学的な手法により高濃度のキャリアドーピングが可能な材料は非常に限られている。材料の化学的性質によらずキャリアドーピングを行う方法があれば、今までにない新しい超伝導体、高温超伝導体が見つかるに違いない。

私は博士課程の大学院生だった際に新しいキャリアドーピングの手法、「電界効果キャリアドーピング」の研究を始め、紆余曲折の末、全く伝導キャリアのいない絶縁体、SrTiO₃を電場のみで超伝導にすることに成功した[1]。最近ではZrNClでの $T_c = 15.2$ Kの電場誘起超伝導[2]の発見へと研究が広がり、今回、超伝導科学技術賞を受賞する榮譽に浴することができた。

本稿では私の経験に沿って電場誘起によるキャリアドーピングの手法と電気二重層トランジスタという新しいデバイスについて紹介し、この手法によって初めて実現された超伝導について簡単に述べたい。

2. 電界効果キャリアドーピング

電界効果は電場と言う物理的な力のみによって材料のキャリア濃度を制御する手法である。半導体シリコンに電界効果を応用した電界効果トランジスタ (FET, MOSFET) は集積回路やメモリなどの基本素子として広く使われ、現在のシリコンテクノロジーを支える屋台骨となっている。

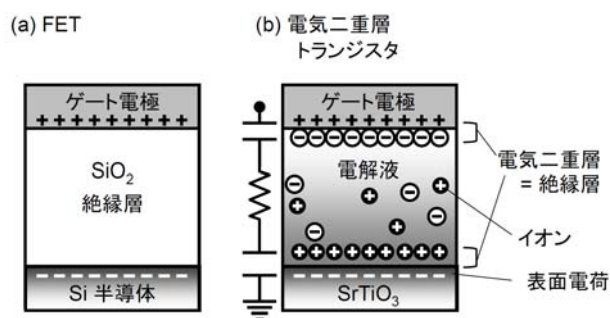


図 1 (a) 電界効果トランジスタ(FET)のデバイス構造
(b) 電気二重層トランジスタのデバイス構造と電解液の等価回路

シリコンMOSFETは図1(a)に示すように半導体チャネル、絶縁層、金属(ゲート電極)を積層した構造を持っている。金属と半導体の間にゲート電圧を印加すると、電界効果により半導体表面には電圧に比例した伝導キャリアが蓄積する。従って、ゲート電圧により電気の流れない「オフ」状態から電気の流れる「オン」状態に半導体をスイッチさせるトランジスタ動作が可能である。一方、同様の構造で半導体のキャリア濃度を制御する電界効果キャリアドーピングが可能であり、特に極低温で高移動度半導体に起きる量子ホール効果などの物性評価のために広く使われている。

電界効果による超伝導制御の研究はMOSFETが発明された1960年にさかのぼる[3]。とくに銅酸化物高温超伝導体の発見以降、絶縁体から超伝導へ電界によるスイッチングを試みる実験が数多くなされてきた[4,5]。しかし、超伝導は多数のキャリアを必要とする現象であり、銅酸化物超伝導体ですら格子あたり0.1個程度の伝導キャリアを必要とする。電界効果で制御可能なキャリア濃度は絶縁層の絶縁耐圧で決まり、MOSFETの熱酸化シリコン膜で絶縁耐圧は10 MV/cm程度、シートキャリア濃度にして $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 程度の制御が限界である。キャリアが半導体表面1 nmに閉じ込められたとして、このキャリア濃度は格子あたり0.004個程度であり、電界効果のみで絶縁体に超伝導を誘起するのは非常に難しいとされてきた。

この常識を塗り替えるかに見えた大事件が2000年から2002にかけてルーセントテクノロジー・ベル研究所のJ. H. Schönによって行われた捏造研究であり、私の人生にも大きな影響を与えた[6]。彼は50 MV/cmという非常に絶縁耐圧の高い Al_2O_3 薄膜をスパッタ法で作製したと称し、フラーレンから始まりペンタセン、銅酸化物などあらゆる材料で電場誘起超伝導を報告した。私はこれらの研究に触発され、電場誘起超伝導の研究を博士研究として開始した。私が実際にスパッタで作製した Al_2O_3 絶縁膜の絶縁耐圧は室温で7 MV/cm、低温で9

MV/cm程度と Al_2O_3 としては良好な値だったが、当然Schönの50 MV/cmは全く再現できなかった。さらに、この絶縁膜を用いてペンタセンやアントラセンなど有機半導体へのトップゲート構造FETの作製を試みたところ、有機物がスパッタダメージにより炭化しまい、FETデバイスの作製すらできなかった。こうして一年近くかけてSchönの研究はおかしい、ということだけが分かった。

そこで、新しい研究テーマとして始めたのが、最終的に今回の受賞へもつながった酸化物半導体 SrTiO_3 を用いたFETの開発である。 SrTiO_3 は低キャリア濃度超伝導体として知られ、また高移動度半導体としても知られている。スパッタ Al_2O_3 絶縁膜を不純物を含まない絶縁性の SrTiO_3 単結晶上に作製することでFETデバイスの開発を行った。 SrTiO_3 が化学的に安定な酸化物でスパッタダメージに強いこと、高品質な SrTiO_3 単結晶が容易に購入できたことなどが幸いして SrTiO_3 は良好なFET動作を示した。さらに酸化物半導体 KTaO_3 でも同様に良好なFETを開発し、ペロブスカイト酸化物がFETデバイスのチャネルとしても有用であることを証明できた[7]。私は博士課程修了とともにFETの研究から離れたが、その後、東大リップマーズグループによるエピタキシャル界面を用いた SrTiO_3 FET[8,9]、高木グループによる有機絶縁層を用いたFET[10]など、低温でのデバイス動作や電場による絶縁体金属転移が報告されている。

3. 電気二重層トランジスタ

FETでは制御可能なキャリア濃度が小さすぎ、電場誘起のみによる超伝導の実現は難しい。この限界を破るためには電気二重層トランジスタという全く新しいトランジスタの開発が必要だった。

電気二重層トランジスタの構造の概略図を図1(b)に示す。FETの固体絶縁層に代わり、液体(溶媒)にイオンの溶け込んだ電解液を採用した構造を持つ。このデバイスにゲート電圧を印加すると、電解液の中のイオンは半導体、ゲート電極の表面へ移動し、図に示すように0.5 nm程度の厚さの電気二重層を構成する。電気二重層はFETの絶縁層と同様に働くから、半導体にはゲート電圧に比例したキャリア蓄積が生じる。さて、電解液はイオン導電体、半導体や金属は電子導電体である。従って、電解液と半導体・金属の間の電気伝導は電気二重層の中でのイオンへの電子の授受、すなわち電気化学反応によって起きる。もし電解液・半導体界面が電気化学的に安定であれば、電解液の電位窓(典型的には3 V程度)以上の電圧をかけない限り電解液に電流は流れない。実際、電気二重層は50 MV/cmを超える絶縁耐圧を持ち、固体絶縁層の限界をはるかに超える高濃度のキャリア蓄積がわずか数Vのゲート電圧印加で可能

である。

電気二重層トランジスタは共同受賞者である岩佐義宏教授、下谷秀和博士により開発されたものである。従来からpHセンサー、酵素センサーなど液体センサー応用を目的にカーボンナノチューブやダイヤモンド薄膜をチャンネルとした電気化学トランジスタが開発されてきた[11,12]。これらのデバイスは電気二重層をFETのゲート絶縁層とし、電解液の化学電位の変化を抵抗の変化によって検出しようとするものである。下谷らはカーボンナノチューブをチャンネルとした電気化学トランジスタでゲート電圧によりフェルミエネルギーを制御できることを示し[13]、続いて有機半導体をチャンネルとした電気二重層トランジスタによりSiO₂絶縁膜をはるかに超える高いキャリア濃度制御が可能であることを示した[14]。さらに酸化物半導体ZnOをチャンネルとした電気二重層トランジスタの開発を行い、良好なデバイス特性と、電場誘起絶縁体-超伝導転移を報告した[15]。また、イオン液体電解液により最大 $4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ の高濃度キャリア蓄積が起きることをホール測定により証明している[16]。

4. 電場誘起超伝導

電気二重層トランジスタで蓄積可能な高濃度のキャリアを用いれば、完全な絶縁体から出発して電場のみによる超伝導を実現できるに違いない。東北大金研で有機物の岩佐グループ、酸化物の川崎グループの強みを組み合わせ、酸化物での電場誘起超伝導を目指した研究が開始された。私は博士研究でのFETの経験を生かし、まずはSrTiO₃での電気二重層トランジスタの開発を試みた。

低温でのトランジスタ動作に欠かせないのは低温でも良好なオーム性電極である。SrTiO₃ FETの研究を参照し、SrTiO₃表面にイオンミリングにより酸素欠陥を導入し、 n^+ ドーピング層とすることで良好なオーム性電極を作製した[9]。電解液としてZnOで用いられた有機ポリマー電解液を用いることで、図2に示すような非常に明瞭なゲート誘起の絶縁体金属転移が観察された。また、低温でホール測定によりキャリア濃度を測定したところ、ゲート電圧に比例して最大 10^{14} cm^{-2} までキャリア濃度が増加した。このキャリア濃度はFETで実現可能なものの10倍であり、超伝導を作り出すのに十分な値である。そこでデバイスを希釈冷凍機により20 mKの極低温まで冷却、図2挿入図に示すように0.4 Kで鋭い抵抗の低下とゼロ抵抗を確認した。ゼロ抵抗状態はわずかな磁場の印加や測定電流の増加によって破壊され、この状態が超伝導によるものであることが確認された。また、転移温度である0.4 Kは不純物ドーピングによる T_c とほとんど同じ値である。これはSrTiO₃の超伝導が材料の化学

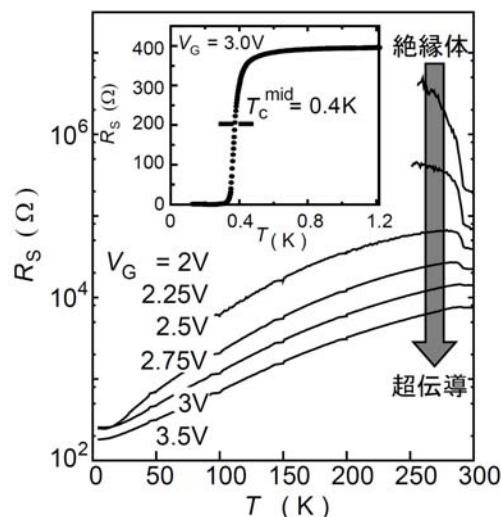


図2 電場誘起による絶縁体 — 超伝導転移。ゲート電圧 $V_G > 2.5$ で抵抗が温度とともに下降する金属伝導を起こし、極低温 0.4 K でゼロ抵抗への超伝導転移を示す。

的な組成の変化、格子定数の変化などに関係なく、キャリア濃度の変化のみによって誘起されていることを示している。

さらに高温での超伝導を目指し、岩佐グループの叶劍挺博士らにより層状化合物ZrNClへのデバイス開発が行われ、格子あたり0.07個程度の高濃度キャリアドーピングと $T_c = 15.2 \text{ K}$ の超伝導転移が報告されている[2]。酸化物と層状化合物という全く異なる材料に対し電場誘起超伝導が実現しており、本手法が新しい超伝導体探索に真に有用であることを示している。

5. 今後の展開

今回紹介したSrTiO₃とZrNClでの超伝導はどちらも化学ドーピングにより従来から超伝導になることが知られている材料である。我々は次のステップとして従来知られていない超伝導材料を発見へ研究を進めており、最近、新規超伝導体KTaO₃を発見した。今後、続々と新規超伝導体を発見し、従来知られていない超伝導の新大陸を発見したい。

なお、本稿は私の記憶に基づいて書かれており、不正確な点も数多くあるかと思う。関係者の皆様のご寛恕を請いたい。

参考文献

- [1] K. Ueno, S. Nakamura, H. Shimotani, A. Ohtomo, N. Kimura, T. Nojima, H. Aoki, Y. Iwasa, and M. Kawasaki, Nature Mater. **7**, 855 (2008).
- [2] J. T. Ye, S. Inoue, K. Kobayashi, Y. Kasahara, H. T. Yuan, H. Shimotani, and Y. Iwasa, Nature Mater. **9**,

125 (2010).

- [3] R. E. Glover, III and M. D. Sherrill, Phys. Rev. Lett. **5**, 248 (1960).
- [4] J. Mannhart, J. Strobel, J. G. Bednorz, and Ch. Geber, Appl. Phys. Lett. **62**, 630 (1993).
- [5] C. H. Ahn, S. Gariglio, P. Paruch, T. Tybell, L. Antognazza, J.-M. Triscone, Science **284**, 1152 (1999).
- [6] J. H. Schön, *et al.*, Nature **406**, 702 (2000), J. H. Schön, *et al.*, Nature **408**, 549 (2000), J. H. Schön, *et al.*, Nature **414**, 434 (2001) など。研究捏造については Nature **418**, 120 (2002), Nature **420**, 728 (2002)など。
- [7] K. Ueno, I. H. Inoue, H. Akoh, M. Kawasaki, Y. Tokura and H. Takagi, Appl. Phys. Lett. **83**, 1755 (2003).
- [8] K. Shibuya, T. Ohnishi, T. Uozumi, T. Sato, M. Lippmaa, M. Kawasaki, K. Nakajima, T. Chikyow and H. Koinuma, Appl. Phys. Lett. **88**, 212116 (2006).
- [9] T. Sato, K. Shibuya, T. Ohnishi, K. Nishio and M. Lippmaa, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, L515 (2007).
- [10] H. Nakamura, H. Takagi, I. H. Inoue, Y. Takahashi, T. Hasegawa, Y. Tokura, Appl. Phys. Lett. **89**, 133504 (2006).
- [11] H. Kwarada, Y. Araki, T. Sakai, T. Ogawa and H. Umezawa, Phys. Stat. Sol. (a) **185**, 79 (2001).
- [12] M. Kruger, M. R. Buitelaar, T. Nussbaumer, C. Schonenberger, L. Forro, Appl. Phys. Lett. **78**, 1291 (2001).
- [13] H. Shimotani, T. Kanbara, Y. Iwasa, K. Tsukagoshi, Y. Aoyagi and H. Kataura, Appl. Phys. Lett. **88**, 073104 (2006).
- [14] H. Shimotani, H. Asanuma, J. Takeya, and Y. Iwasa, Appl. Phys. Lett. **89**, 203501 (2006).
- [15] H. Shimotani, H. Asanuma, A. Tsukazaki, A. Ohtomo, M. Kawasaki and Y. Iwasa, Appl. Phys. Lett. **91**, 082106 (2007).
- [16] H. T. Yuan, H. Shimotani, A. Tsukazaki, A. Ohtomo, M. Kawsaki, and Y. Iwasa, Adv. Funct. Mater., **19**, 1046 (2009).

(6) テラヘルツ天文学を拓く超伝導技術 Superconducting technology for developing terahertz astronomy

国立天文台
鵜澤佳徳

National Astronomical Observatory of Japan
Y. Uzawa

1. はじめに

「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」というテーマで栄誉ある本賞を頂いた。ALMAは「アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計」の略で、現在南米チリの標高約5000 mの広大な台地に国際共同プロジェクトとして建設中の地上最大の電波望遠鏡である[1](図1は完成予想図)。観測周波数は30 GHzから950 GHz (0.95 THz) であり、バンド10は0.78-0.95 THzの最高周波数帯である。電波天文学は、電磁波検出技術の向上と共に発展しており、ALMAでは観測周波数をテラヘルツ帯まで伸ばすことによって、すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡が誇る世界最高の空間解像力の約10倍となる0.01秒角を達成し、系外惑星の直接観測や、宇宙の誕生、生命の起源など宇宙科学の飛躍的な進展が期待されている。

しかし、すでに実用化されている超伝導ニオブを用いたSIS受信機技術では、材料に起因する本質的な動作周波数限界(約0.7 THz)のため、バンド10周波数帯の電磁波を高感度に検出することは原理的に不可能であった。それを打破するためのポストニオブ技術として1990年代から、ニオブの約2倍の動作周波数限界を有する窒化ニオブ系技術の研究開発が活発に行われてきたが、これまでALMA望遠鏡に搭載可能な性能は得られていなかった。国立天文台では2005年秋からバンド10受信機の研究開発を本格的にスタートし、約4年という短い期間でALMA望遠鏡に搭載しうる受信機の開発に成功した。世界的にも困難とされていたバンド10受信機開発を世界に先駆けて成功させた裏には、情報通信研究機構と国立天文台の両機関が10年以上も前から独自に行ってきた研究の融合があったお陰であると考えている。日本にはすでに世界最高性能のテラヘルツ超伝導受信機を実現できる土台が出来ていたのである。

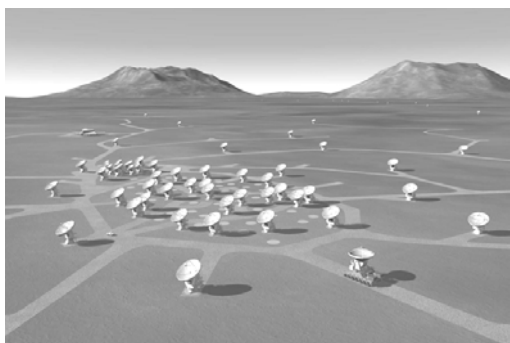


図1 ALMA 完成予想図 (©ALMA (ESO/NAOJ/NRAO))

2. 窒化ニオブ系技術

情報通信研究機構(旧通信総合研究所)では、1990年代から、原理的にニオブより高温、高速動作が可能な窒化ニオブ系超伝導技術の研究開発をスタートさせた。当時は、YBCOなどの酸化物超伝導体の研究がもてはやされていたが、1980年代に研究されたニオブ技術が超伝導エレクトロニクスの世界を一変させたことを鑑み、我々は次世代の超伝導材料候補として薄膜や接合などデバイス化が比較的容易と考えられる金属系超伝導体に着目したのである。本研究は、1991年に完成したばかりの関西先端研究センター(現神戸研究所)で開始され、この年に入所した私は幸運にもこれに参加させていただいた。クリーンルームの立ち上げ、高周波測定系の立ち上げと、まさにゼロからのスタートであった。

窒化ニオブ系超伝導体の持つ潜在的な能力を最大限に引き出すよう、テラヘルツ帯SISデバイスの実現に向けた基礎的な研究を担った。超伝導特性が明かなニオブ系のようにうまくいかず、試行錯誤を繰り返すことになり、長い間研究成果が出せなかったが、この経験こそが窒化ニオブ系超伝導体の特性を深く知る機会だったと考えている。昨今の目先の業績を問うような成果主義では無かったため、自由な雰囲気の下、じっくり研究に取り組めたことも良かったのではないだろうか。諸問題を1つずつ解決し、ようやく窒化ニオブ系SIS超伝導受信機を、世界で初めて低雑音動作に成功させたときの喜びは今でも忘れない[2,3]。その後さらに研究を発展させることによって、磁場侵入長が長い窒化ニオブ系特有の回路設計手法の基礎を確立し、未開拓電磁波領域であるテラヘルツ帯の開拓のために最も有望な超伝導技術であることを示したと考えている。今なお、量子情報通信への応用など、新たな分野に向けた研究開発が続いている[4]。

3. 天文観測用受信機技術

国立天文台では、1980年代半ばからニオブ系超伝導技術や導波管技術の研究開発に取り組み、野辺山宇宙電波観測所のミリ波帯SIS受信機やアタカマサブミ

リ波望遠鏡実験 (ASTE) のサブミリ波帯SIS受信機などの開発に豊富な経験を持っていた。特に低雑音動作に欠かせない高品質Nb/AlOx/Nbトンネル接合の作製技術を確立し、10 kA/cm²程度までの臨界電流密度を持つSISトンネル接合を標準的に作製することが可能となっている。これら長期に渡る研究の蓄積をベースに、ALMAバンド4(125-163 GHz帯)およびバンド8(385-500 GHz帯)受信機を先行して開発しており、優れた性能を実現していた。

ALMAでは、60基以上あるパラボラアンテナの各々にバンド1から10までの受信機を搭載することになっており、しかもその性能は世界最高かつ均一であることを要求している。受信機の性能は、その心臓部であるSISデバイスの性能に左右されるため、サブミクロンオーダーで制御された均一性の高い超伝導デバイス作製技術が必要であった。国立天文台では早くからこの点に着目し、量産用半導体プロセスに用いられている最高解像度0.35ミクロンを持つ紫外線露光装置(i線ステッパー)やICPエッチング装置などを導入し、超伝導デバイスの均一化に取り組んできた[5]。

4. 超伝導技術の融合

これまでにない世界最高性能を必要としているバンド10受信機を早期に実現するために取った我々の手段は、現有する世界最高の技術を利用、最適化することであった。すなわち、情報通信研究機構と国立天文台の持つ技術を融合させることである。低損失な特性が必要な高周波伝送線路部には情報通信研究機構の窒化ニオブ系技術を、そして低雑音特性が必要なSIS接合部には国立天文台のニオブ系技術を用いた。集中定数的なニオブ接合自身の周波数限界は、ギャップ周波数の2倍(約1.4 THz)であることに注意されたい。

図2にALMAバンド10受信機用に開発したSISミキサーを示す。外部からのテラヘルツ電磁波を指向性の優れたコルゲートホーンと呼ばれる導波管アンテナで受信し、金属導波管、そして水晶基板を用いたミキサーチップへと伝送する。ミキサーチップ上には、高品質な超伝導NbTiN薄膜上に直径1ミクロンの大きさを持つNb/AlOx/Nb接合を作製し、接合容量を同調するためなどのNbTiN/SiO₂/Alマイクロストリップ線路による超高周波回路を集積化した。この回路作製技術の研究に加え[5]、リーク電流の少ないSIS接合を得るために、従来に比べ低電流密度接合を用いて広帯域且つ低雑音動作を可能にする回路設計を研究することにより世界最高感度を達成できたと考えている[6]。

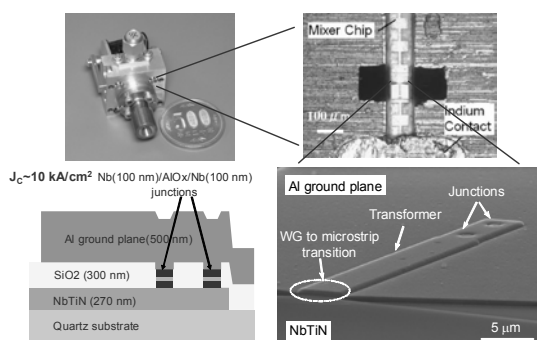


図2 研究開発したテラヘルツ帯 SIS ミキサー

5. おわりに

1990年代から窒化ニオブ系超伝導技術の実用化を目指した研究を続けてきたが、20年近くの時間を費やすことでテラヘルツ受信機という分野において、ようやくそれを達成しつつある。これまで述べたように研究を開始してから実用化へは非常に多くの時間が必要であり、しかもそれには研究の融合が重要な役割を果たした。実に多くの時間、人、そして金が必要であるかを学ばせていただいた。今後、この貴重な経験を活かし、天文に限らず世の中の役に立つための新たな超伝導技術の開発に挑戦し、微力ながらその発展に貢献したいと考えている。本研究の遂行には、受賞者の他に国内外の多くの人の協力を得て達成されたものであり、この場を借りて感謝を申し上げたい。

参考文献

- [1] <http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/>
- [2] Y. Uzawa, Z. Wang, and A. Kawakami: Appl. Phys. Lett. **69** (1996) 2435-2437.
- [3] Y. Uzawa, Z. Wang, and A. Kawakami: Appl. Phys. Lett. **73** (1998) 680-682.
- [4] <http://www2.nict.go.jp/w/w103/102/index.html>
- [5] M. Kroug, A. Endo, T. Tamura, T. Noguchi, T. Kojima, Y. Uzawa, M. Takeda, Z. Wang, and W. Shan: IEEE Tran. Appl. Supercond. **19** (2009) 171-173.
- [6] T. Kojima, M. Kroug, M. Takeda, Y. Uzawa, W. Shan, Y. Fujii, Z. Wang, and H. Ogawa: Appl. Phys. Express. **2** (2009) 102201.

(7) 急熱急冷法による Nb₃Al 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 Development of Cu Stabilising Technology for RHQT Processed Nb₃Al Conductor and Pioneering of Its Application for Large Current Capacity Cable

物質・材料研究機構

菊池 章弘

National Institute for Materials Science

A. Kikuchi

1. 開発の背景と推移

NbとAlを複合した前駆体線材に直接通電して、ジュール発熱により2,000℃近傍まで急加熱し、引き続き液体Ga浴へ導いて連続的に急冷する熱処理方法「急熱急冷法」がIijimaとInoue等により提案されたのが1996年のことである[1]。この急熱急冷法では、処理直後にNbにAlが過飽和に固溶したbcc合金相が生成し、その後800℃程度の追加熱処理でA15相のNb₃Alに相変態させるため、「急熱急冷・変態法」とも呼ばれる。液体Gaで急冷して過飽和固溶体を生成させ、その後A15-Nb₃Alに相変態させる原理は、1978年に米国のWebbによりボタン状サンプルで既に見出されていた[2]。この基本原理が参考にされたかどうかは定かではないが、多芯構造の線材に対して特殊な原理を適用できたことは大きな前進であった。過飽和bcc合金相はNbTiのような延性を有するため、巻き線や撚り線等の実用上も有利と考えられ、長尺化への期待も一気に高まった。

実用線材には安定化材が不可欠である。当然Nb₃Al線材においても、安定化材付与の課題解決に向けた検討が速やかに行われた。急熱急冷法Nb₃Al線材では、線材マトリックスに高温でも構造体として強度が維持できる純Nb等の高融点金属を使用する。安定化材となる純銅は溶融してしまうため、急熱急冷処理の後に複合しなければならない。当時(そして今も)、高磁場NMRが超伝導線材の応用の出口として位置づけられ、急熱急冷法Nb₃Al線材もそれを目指した。NMR磁石には平角形状の導体が好ましいことから、平角導体への加工と同時に銅箔を貼り合わせる手法(クラッド加工)が2001年頃にTakeuchi等により提案された[3]。強磁場ソレノイド磁石への応用に向けた研究開発は現在も引き続き行われている。特にNMR応用には超伝導接続という問題が残されており、その解決がポイントになる。

加速器におけるラザフォードケーブルや核融合炉でのCIC等の大電流容量を必要とする導体では、複数を束ねて撚るために丸線形状の線材が求められる。自

然な流れとして、平角クラッド加工の経験を基に丸い銅管に急熱急冷処理後の線材を挿入して伸線加工する安定化材の複合方法がInoue等により試された[4]。NbTiやNb₃Snでは数百mmの大径ビレットから大きな加工度を確保した伸線加工が行われ、Nbと銅はそれぞれ新生面が露出して強固に圧着される。しかし、急熱急冷法が適用できる前駆体線径は2.0 mm未満であり、僅かな加工度の塑性変形ではNb界面の不動態膜を破壊できず、丸線への安定化材の複合は十分なものではなかった。(平角線の場合でも、銅の密着は大きな剪断変形を伴う上下面のみで、左右側面は密着していない。)なお、現在もBannoが同様な検討を継続している[5]。

筆者等は、塑性変形に頼らない安定化材の付与技術の開発に2000年頃から取り組んだ。細径線材の表面に存在する不動態膜を剥ぎ取ると同時に薄い銅膜で覆い(イオンプレーティング処理)、その後に銅膜の表面に厚く銅を電解めっきする手法を試みた[6]。銅と線材の機械的、熱的及び電氣的な密着性は良好だった。種々の改良と長尺用処理装置導入等を経て、2005年になって初めて1kmを超える長尺線材に安定化銅が付与された急熱急冷法Nb₃Al線材を開発することに成功した[7]。大きなハードルはその処理速度にあった。当初、特にめっきの処理速度は遅く、0.5 m/hと工業的な量産レベルを満足させるものではなかった。(株)ヒキフネのKobayashi等による情熱ある協力とともに、様々なユニークな改良を加えて7 m/hまで処理速度を10倍以上高めることができた[8]。現在も、ITER向けNb₃Sn線材のクロムめっきの処理速度(約700m/h)と同等を目指し、更に100倍もの超高速化技術の開発に取り組んでいる。

2006年の春、1kmの銅安定化急熱急冷法Nb₃Al線材を筆者がフェルミ国立加速器研究所に持ち込み、初めて27本撚りの本格的なラザフォード型ケーブルを試作した。ケーブル長は30m程確保でき、半分の15mを使用して小型レーストラック磁石を試作し、もう半分はラックスポンプによる誘導電流試験やCERNのケーブル導体試験施設(FRESCA)での磁場中通電試験に使用した。レーストラック磁石等の作成にはYamada等の全面的な協力を得て、フェルミ研の最新の技術が投入された。評価試験を実施したところ、想定よりもかなり低い電流(磁場)でクエンチする問題が判明した[8, 9]。急熱急冷法Nb₃Al線材のマトリックスは純Nbを使用している。Nbが4.2K、低磁場下で超伝導状態にあるため、フィラメント間が結合して不安定化を招いた。直ぐさま線材製造にフィードバックし、Nb₃Alフィラメント間にTaをバリア材として挟み込んで結合の回避を図った。2度目のレーストラック磁石の作製と試験を経て、素線性能がラザフォード型大容量導体及び磁石で得られることを実証した[10, 11]。

2. 残される課題と将来展望

実用化のために必要な取り組みとして電解めっきの処理速度の超高速化がある。これまでの記述のように安定化銅の付与するための基盤技術は構築できている。超伝導線材ではない他製品において(例えば銅めっきピアノ線やNiめっきダイヤモンドワイヤー等)、連続めっきを適用した量産技術も存在する。もちろん、従来の既製品とは桁外れの厚さの銅を超高速でめっきするにはさらに追加の技術革新が必要だが、筆者自身は克服が困難だとは感じていない。むしろ、前駆体線材の製造と急熱急冷処理の2つのステージにおいて、安定して長尺化が図れることが大きな課題であると認識している。前者は、1979年にイタリアのCeresara等により提案されたNbシートAlシートを巻き込んだジェリーロール(JR)法[12]を採用している。粉末法、ロッドインチューブ法、CCE法等の他の前駆体製造法の提案もあるが、現状、JR法が量産製造に適用できる手法と判断している。NbとAlの反応速度は遅い。JR法によりNb/Al積層構造はナノスケールにまで作り込む必要があり加工限界を極める。さらに、不安定化を抑制するためにTaバリアをフィラメント間に挿入しなければならない。最近の研究では、このTaを基点にして断線が続発しており、純Nbよりも純Taの方が加工性に劣る気配がある[12]。加工歪みを除去するための中間焼鈍はAlが溶けるため適用できない。従って、大径ビレットから連続して冷間で塑性加工を実施するため、この大きな減面率に耐える冷間複合加工技術の確立が求められる。そのためには、極めて優れた延性を示す原料素材(特にNbやTa)の開発が鍵を握る。また後者については、少し特殊な急熱急冷処理を工業的な量産処理として成長させなければならない。高温急加熱と急冷のいずれについても、数km～数十kmもの長尺線材の長手方向に対して均一に実施されなければならない。その安定した制御技術の確立も必要である。

実用化とは実に険しい道のりである。物質・材料の基礎研究において、「○○への応用が有望」とか、「○○への実用化が期待」とかのフレーズがしばしば記述される。その研究の価値を的確に簡単に表現することができるからである。筆者も例外ではない。しかしながら、急熱急冷法Nb₃Al線材の研究開発に携わり、改めて、「言うは易く行なうは難し」を噛みしめている。Nb₃Alは、優れた耐歪み特性、高い上部臨界磁場、そして高い臨界電流密度の3つの実用条件の優位性を線材化の期待の要としてきた。この印籠を片手に急熱急冷法Nb₃Al線材の研究開発を行って、間もなく15年が過ぎ去ろうとしている。そろそろ三行半を突きつけられてもやむを得ない状況だが、幸いにも線材のエンドユーザーである加速器分野からは辛抱強く温かい支援を受けることができ

いる。核融合炉分野からも励ましのエールがある。新しい実用線材が登場するのを待ち続けてくれる多くの気持ちに報いなければならない。現在、CERNの世界最大の加速器(LHC)のアップグレード計画への実用を目指して、高エネルギー加速器研究機構の諸兄とともに急ピッチで量産技術の開発を進めている[13]。本研究開発は、限られた研究開発費にも関わらず、国境と業種の枠を超えた多くの研究機関と民間企業からの温かい協力・支援により、何とか前に向かって歩むことができている。心より感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] Y. Iijima, M. Kosuge, T. Takeuchi, and K. Inoue: Adv. Cryo. Engin., **42** (1996) 1447-1454.
- [2] G. W. Webb: Appl. Phys. Lett. **32** (1987) 773-775.
- [3] T. Takeuchi, N. Banno, T. Fukuzaki, T. Kiyoshi, S. Matsumoto, H. Wada, K. Aihara, Y. Wadayama, M. Okada, K. Tagawa, and K. Nakagawa: IEEE Trans. Appl. Supercond., **11** (2001) 3972-3975.
- [4] Private communication.
- [5] 伴野等:第 82 回 2010 年春季低温工学・超電導学会講演概要集(2010) 60.
- [6] A. Kikuchi, Y. Sakurai, K. Tagawa, T. Tekeuchi, H. Kitaguchi, Y. Iijima, N. Banno and K. Inoue: IEEE Trans. Appl. Supercond., **15** (2005) 3376-3379.
- [7] A. Kikuchi, K. Tagawa, M. Kobayashi, Y. Iijima, T. Takeuchi, and H. Kitaguchi: IEEE Trans. Appl. Supercond., **16** (2006) 1224-1227.
- [8] A. Kikuchi, R. Yamada, G. Ambrosio, N. Andreev, E. Barzi, C. Cooper, Y. Iijima, M. Kobayashi, H. Kitaguchi, S. Nimori, M. Lamm, K. Tagawa, T. Takeuchi, K. Tsuchiya, D. Turrioni, M. Wake and A.V. Zlobin: IEEE Trans. Appl. Supercond., **17** (2007) 2697-2701.
- [9] R. Yamada, A. Kikuchi, G. Ambrosio, N. Andreev, E. Barzi, C. Cooper, S. Feher, V. Kashikin, M. Lamm, I. Novitski, T. Takeuchi, D. Turrioni, A. Verweij, M. Wake, G. Willering and A.V. Zlobin: IEEE Trans. Appl. Supercond., **17** (2007) 1461-1464.
- [10] A. Kikuchi, R. Yamada, E. Barzi, M. Lamm, T. Takeuchi, D. Turrioni, and A.V. Zlobin: IEEE Trans. Appl. Supercond., **18** (2008) 1026-1030.
- [11] R. Yamada, A. Kikuchi, M. Tartaglia, G. Ambrosio, N. Andreev, E. Barzi, R. Carcagno, S. Feher, V.V. Kashikin, S. Kotelnikov, M. Lamm, I. Novitski, D. Orris, Y. Pischalnikov, T. Takeuchi, J.C. Tompkins, D. Turrioni, M. Wake, R. Wands, J. Xiao, M. Yu, A. Yuan, and A.V. Zlobin: IEEE Trans. Appl. Supercond., **18** (2008) 1039-1042.
- [12] S. Ceresara, M. V. Ricci, G. Pasotti, N. Sacchetti, and M. Spadoni: IEEE Trans. Magn., **15** (1979) 639-641.
- [13] 菊池等:第 82 回 2010 年春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2010) 62.

(8) NMR技術開発と超伝導

Development of advanced NMR spectrometer by means of superconducting technology

産業技術総合研究所

岡田 道哉

National Institute of Advanced Industrial
Science and Technology, (AIST)

M.Okada

1. はじめに

この度、超伝導技術を応用した我が国オリジナルの先端NMR技術開発に対して、「NMR高感度化のための新技術開発」と題し、超伝導科学技術賞を賜った。受賞者一同を代表し、ご指導、ご支援いただいた関係者の方々に、深く感謝申し上げたい。

NMR(核磁気共鳴)は、ライフイノベーションを計測技術の側面から支える重要な基盤技術であり、有機化学、無機化学、医療、及び、製薬等の分野で必須の分析装置として広く活躍している。このような最先端NMRは最新の超伝導技術、極低温冷却技術、アナログ／デジタルRF通信技術、超低ノイズRF回路設計・製作技術、高度なデジタルフィルタリング技術、スペクトル処理技術、加えて、均一・安定な磁場・温度制御技術、振動やノイズ等の外乱抑制技術等、幅広い計測システム基盤技術に支えられている。今回の受賞のポイントは、我が国で新たに開発された特徴的な二つの新技術に対するものである。以下では、その開発の背景及び開発技術の概略をご紹介しますとともに、我が国の超伝導産業の現状と、今後進むべき方向性について私見を述べてみたいと思う。

2. 高感度NMRの開発軸

古くから、NMRの高感度化には磁場を高めることが最も有効な方法であった。但し、これには大切な条件、即ち、NMRスペクトルが均一、かつ、長時間安定に得られること(NMRスペクトルの半値幅が0.5 Hz以下で、かつ、目的とするスペクトル周波数が時間的に変動しないこと)が担保されることが必要である。磁場強度を強くすると、核磁気共鳴周波数は磁場強度に比例して増加する[1]。例えば、水素原子核の核磁気共鳴周波数は、2.35 Tで100 MHzであるが、23.5 Tでは1000 MHz = 1 GHzとなる[2]。NMR計測では、一般に、水素原子核プロトンの化学シフトを観察する。磁場強度を高めると、化学シフト周波数も比例して増加するため、スペクトルの識別が容易になるというメリットがある。また、ピーク強度は磁場強度の3/2乗程度に比例して増すため、磁場強

度を増すほど微小なスペクトルを捉えやすくなる¹⁾。しかし、分子量の大きい複雑な化合物においてスピン結合によるピーク分離を確実に行うためにはスペクトルの半値幅は常に0.5 Hz程度必要とされている。つまり、磁場を強くしても、計測システムとして要求される磁場精度の絶対値は変わらないということである。一方、磁場を強くすることは、磁石を大型にすることを意味しており、製作技術としての難易度は極めて高くなる。

このような背景の下、最先端NMR開発は、

(1) 磁場強度を高める工夫を行うこと、

(2) 計測感度を別の方法で高める工夫を行うこと、
の二つの軸で同時に進められている。

ここで、(1)は超伝導マグネットの高磁場化技術開発が主である。一方、(2)は、計測プローブの改良が主であり、極低温度のヘリウムガスにより高周波回路で発生するノイズを極限まで低下させると同時に、検知コイルの電気抵抗を低下させて検出感度の向上を図っている。しかしながら、いずれの開発軸においても、計測感度の飛躍的向上を求めるためには、従来技術の延長上に無い新技術の開発が不可欠である。今回の受賞テーマでは、この二つの開発軸それぞれにおいて、我が国の英知を結集し、挑戦的な技術開発がなされ、大きな技術的進歩をなしたものである。

3. NMRの高感度化技術の最前線

現在市販されているNMR用超伝導磁石が発生する磁場強度は23.5 T(水素原子核の核磁気共鳴周波数で1000 MHz=1 GHz)である³⁾。詳細は公開されていないが、使用されている超伝導磁石は最新の高性能Nb₃Sn線材とNbTi線材による組み合わせコイルと考えられる。金属系超伝導線の性能は年々向上しており、特に高磁界側での進歩が著しいが、臨界磁場の壁が移動したわけではない。金属系超伝導材料の臨界磁界(〜24 T程度)の壁を遥かに越えることができる新材料として、酸化物系超伝導材料が期待されている。酸化物系超伝導材料の臨界磁界は25 Tを遥かに越える。しかし、酸化物超伝導材料をNMRへ応用するには、実用導体としての加工精度、巻線技術、接続技術など、多くの技術的課題を解決する必要があり、実用化はまだまだ先の話と考えられてきた。しかしながら、本受賞テーマのひとつの成果において、ビスマス系酸化物超伝導テープ線を、コイル状に巻き、500 MHz級のNMR装置に組み込んだ上で、極めて安定な電源と組み合わせることで、NMRスペクトル計測が可能となったことが世界ではじめて実証された。この成果は、酸化物系超伝導材料を用いた実用NMRシステムの設計が可能となったことを意味する。酸化物系超伝導磁石を用いた超高磁場NMR磁石の実現へ向

けて大きく前進した研究成果といえる。

もう一方のテーマでは、より挑戦的な試みであるが、計測プローブの構造を、感度が最大になるように予め最適設計した上で、そのプローブを用いたNMR計測に最適なスプリット型超伝導磁石を新たに設計製作するという試みである。いわば、現代NMRの基本設計を根本的に見直す考え方であり、「新方式NMR」と命名された。この方法によって、NMRプローブの計測感度は、同一の磁場強度において、最新の市販NMR装置のおよそ2〜3倍、一般的な汎用NMRと比較すると約10倍程度の高感度化が可能になった。結果、600 MHzクラスの新方式NMRで、世界最高S/N感度一万が達成された。

NMRは様々な高度技術を集約して初めて計測技術として完成される。今回、世界最高水準の計測技術を構築できたが、その基盤となったのは、金属加工技術、無機・有機材料技術、加工技術、研磨技術、成膜技術などの日本の優れた「ものづくり技術」であった。見方を変えると、世界最高水準の「ものづくり技術」を示すことが出来たと考えている。

4. 日本の超伝導技術の現状と将来

高温超伝導が発見されて20年を少し超えたが、一方で、日本の政治と経済は失われた20年といわれるほど混迷が続けている。この20年間で、我が国の超伝導技術は目を見張るほど進歩したが、欧米の超伝導産業との差は、この20年で大きく開いてしまった感がある。ヨーロッパでは、ブルカー、シーメンス、米国では、GE、アジレントテクノロジーなどの巨大企業がMRIやNMRで寡占ともいえる強い製品群を育成した。また、高温超伝導材料ではSuperPower社などの米系ベンチャー企業群の活躍がめざましい。翻って我が国の超伝導関連産業の現状をみると、厳しい表現をすれば、惨憺たる状況といわざるを得ない。研究開発の最前線では、世界をリードしているにもかかわらず、なぜ、産業界は勝つことが出来ないのだろうか。

世界の高感度NMRやMRI市場において、しかしながら、我が国の超伝導関連産業の寄与は、キー技術である小型冷凍機技術、高性能超伝導線技術などで活躍する企業が多数存在する。いわゆる、高性能部品やコアとなる主要部品では世界市場で健闘しているといえよう。一方で、大きな利益を生み出すはずの最終製品のシェアは、残念ながら極めて小さい。この二十年間、日本企業は欧米以上に努力をしてきたはずであるが、結果には大きな違いが生じた。では、今の私たちに何が不足しているのだろうか。欧米企業に出来ることが、なぜ私たちにできないのか。日本における超伝導技術開発には、何が不足しているのだろうか。

最近、地球環境問題で急速に注目されている「パワーエレクトロニクス」で著名な先生方との交流の機会が増えた。先日、その中心人物である松浪弘之先生から、先生の40年間にわたるSiCのご研究の歴史について直接お話をうかがう機会があった。SiCは、地球環境問題が注目される今、産業界から大変期待される新素材である。それに比較すると、高温超伝導は、発見から若干23～24年である。SiCに比較すると、まだまだ若い材料であり、将来飛躍するチャンスは十分にあると考えられる。今は、いろんな批判はあっても、地に足をつけてしっかりと努力の継続が必要な時と考える。

はやぶさの帰還成功が賞賛されている。小惑星イトカワへの着陸は成功したものの、その後、いく度もの絶体絶命の危機を乗り越えて、7年ぶりの帰還となった。この成功は、日本の技術レベルの高さと信頼性に対する自信を取り戻すきっかけになった快挙といえる。科学技術の成果が、産業界で売り上げや利益として社会に還元されることは、いまさら言うまでもなく大変重要なことであるが、もっと大切なことは、国民に夢、希望、自信を与えることではないだろうか。それができるのは世界一の科学技術であり、超伝導の果すべき役割ではないかと思う。今の私たちに最も必要なことは、自信を取り戻すこと、そして、若者に将来に向けての希望、夢を与えることであるように思う。地球環境、年金、医療・社会保障、高齢化、デフレなど将来への不安は尽きない。

サッカーワールドカップで日本がデンマークを圧倒して決勝トーナメント進出を決めた。日本の超伝導技術も世界トップを目指して走り続けてほしい。そのために自分ができることで、今後も貢献を続けたい。

参考文献

- [1] 荒田洋治、NMR の書、丸善、(2000)
- [2] Silverstein Webster 著、有機化合物のスペクトルによる同定法、第 6 版、東京化学同人 1999 年
- [3] <http://www.bruker-biospin.com/pr090601.html>

<会議報告 1>

第2回国際超伝導・磁性会議(ICSM2010)報告 Report on the 2nd International Conference on Superconductivity and Magnetism

東京大学
山本 明保
University of Tokyo
A. Yamamoto

国際超伝導・磁性会議 (International Conference on Superconductivity and Magnetism, ICSM) は、超伝導と磁性関連のヨーロッパの会議としては大規模なものであり、隔年でトルコにおいて開催されている。同じく超伝導分野の隔年の国際会議であるEUCASとは年が異なる。今年は地中海沿いの保養地であるアンタリヤにおいて、アンカラ大学がホストとして4月25日から30日の期間に開催された。議長はアンカラ大学のAli Gencer教授が務めた。

会議の直前にアイスランドでの火山の噴火があり、ヨーロッパの空港の多くが閉鎖された。そのため開催が危ぶまれたが、20日頃から空港が再開され、若干の発表のキャンセルはあったものの無事の開催となった。

会場はアンタリヤPorto Belloホテルで、目の前には地中海が広がっていた。空港や市内からは少し離れており、タクシーか乗合バスで移動する必要がある。バスの料金は1.5トルコリラ(100円弱)程度と安い、英語はあまり通じなかった。ホテル周辺には観光や買物ができる場所は無く(ビーチは有るが)、会議に集中するにはよい環境であったといえる。初日のウェルカムレセプションに始まり、トルコの民族舞踊や地中海クルージング、市内ツアー、バンケットなど、連日ソーシャルプログラムが充実していた。

会議には52カ国から約650名の参加者があり、国別で最も多いのが開催地のトルコ、そして独、日、米、英、伊、仏と続く。全体的にヨーロッパからの参加者が多かったが、地理的に近い中東、アフリカ、インドや東南アジアからの参加者も目立った。発表は7つのパラレルオーラルセッションとポスターセッションからなり、全体で約700件であった。超伝導と磁性分野がほぼ半分づつであり、超伝導分野では、鉄系超伝導体、ボルテックス、超伝導体・強磁性体ハイブリッド、理論、新超伝導体、銅酸化物系、 MgB_2 、炭素ベース超伝導体、テラヘルツ波・ジョセフソン接合、ACロス、応用などのセッションがあった。材料別の発表件数でみると、鉄系が最も多く、 MgB_2 、銅酸化物系が続き、ヨーロッパ諸国の新材料への意気

込みを感じさせた。

以下、基調講演・招待講演のいくつかを紹介する。

基調講演では、26日午前にFlukiger氏(スイスジュネーブ大)のチェアでCanfield氏(米Ames国立研)から銅酸化物系後の20年間に発見されたボロカーバイド、 MgB_2 、鉄ニクタイト系についての報告「Intermetallic superconductivity in the post copper-oxide age」があった。27日にはMoshchalkov氏(ベルギーINPAC)より、マルチバンド超伝導体 MgB_2 の単結晶中で、2種の秩序変数成分が $\lambda_1/\xi_1 < 1/\sqrt{2}$, $\lambda_2/\xi_2 > 1/\sqrt{2}$ を満たし、タイプ1とタイプ2の超伝導が同時に発現しているという報告「Type-1.5 Superconductivity」がなされ、注目を集めた。

MgB_2 セッションでは最初の招待講演で熊倉氏(NIMS)より「Development of high performance MgB_2 tapes and wires」というタイトルで、最近のNIMSのパウダーインチューブ法線材、拡散法線材の開発と、臨界電流特性、微細組織に関する報告があった。

新超伝導体セッションでは青山学院大の秋光氏より最近の新超伝導体探索に関する報告「New superconductors recently developed by our group」がなされた。また、ナノチューブ他、炭素超伝導体に関する発表も多くみられた。

ACロスセッションでは、Campbell氏、Brandt氏に続き、京大の雨宮氏から「Key issues in numerical AC loss calculations in coated conductors」という報告があった。

会議で最も時間が割かれた鉄系超伝導に関しては、基礎物性とともに、デバイス・高磁場応用等を睨んだ材料研究に関する発表もみられた。29日の応用物性セッションでは、Gurevich氏(米国立強磁場研)とPutti氏(伊ジェノバ大)より α 線照射したNd1111単結晶における不純物散乱と抵抗率、 T_c 、 B_{c2} の関係について、Fuchs氏(独IFW Dresden)より B_{c2} とPauli限界について報告があった。また、Karpinski氏(ETH)より1111系単結晶、Iida氏(独IFW Dresden)より122系薄膜、Ferdeghini氏(伊CNR/INFM)より11系薄膜の作製と物性について報告がなされた。一方、筆者より「Inter- and intra-granular critical current in iron pnictides」という題で1111系多結晶について、Ma氏(中国科学院)より122系線材について臨界電流特性向上に関する報告もなされた。薄膜、バルク・線材ともに高純度の試料の合成と結晶粒界の問題が高特性化に向けた課題のようである。なお、同セッション最後にECからJST-EC日欧協調研究助成「Fundamental Properties of Novel Superconducting Materials」に関するプレアナウンスが行われた。

講演が7会場パラレルであることもあり、内容が筆者の興味のある分野中心となったことをお詫びしたい。

本会議のプロシーディングスは特集号としてJournal

of Superconductivity and Novel Magnetism誌に掲載される。次回のICSMは2012年に再びトルコのアンタリヤで開催される予定である。



図1 ICSM 会議参加者の集合写真

<会議報告 2>

第75回ワークショップ報告 Report on 75th Workshop

物質・材料研究機構
熊倉 浩明
National Institute for Materials Science
H. Kumakura

去る6月16日に超伝導科学技術研究会の第75回ワークショップが東京大学(本郷)の武田ホールで開催された。今回のワークショップは(社)低温工学協会の材料研究会と合同で行われ、約110名とかなり多くの参加者があった。今回のワークショップは「超伝導オールスターズ ―開発・応用動向と高性能化の可能性―」という題目のもと、実用線材ならびに現在活発に研究開発が進められている先進線材について、それぞれの現状と将来展望を語っていただくために企画されたもので、6名の専門家による講演が行われた。また、講演終了後は、パネルディスカッションも行われ、線材研究者や線材のユーザーがパネリストとしてそれぞれの立場から意見を述べた。以下では、6名の講演について概略を報告したい。

まず最初に、元国際超伝導産業技術研究センターの田中靖三氏は、Nb-Ti線材について講演した。Nb-Ti線材は“超伝導線材の母”であるとし、超伝導市場約5.2千億円の約70%をNb-Ti線材が担っている、と述べた。またNb-Ti超伝導線材自体としても約180億円の寄与があるとしている。Nb-Ti線材の大きな応用としては、MRI診

断装置、LHC等粒子加速器、磁気浮上列車、宇宙計測などがあるとしている。材料科学的には、線材へ強加工をした後の α -Tiの時効析出が重要で、これによってピン止め点が増大して高い J_c が得られているとし、これがNb-Ti線材におけるブレイクスルーの一つであると述べた。また最近の人工ピン導入による高性能化についても述べた。線材化の観点からは銅との複合加工が重要で、これによって多芯線材が作製できるようになり、これもNb-Ti線材における技術的ブレイクスルーの一つであるとしている。さらにNb-Ti線材の J_c はまだ対破壊電流密度の6%程度に過ぎず、Nb-Tiにはまだ特性向上の可能性があると述べた。

神戸製鋼の宮崎隆好氏は同社の研究開発成果を中心にNb₃Sn線材について講演した。Nb₃Sn線材の強みとしては、10 T以上の高磁場で実用レベルの特性が得られ、また長尺かつ均一な加工が可能であることで、これまで強磁場超伝導マグネット用線材として実用化・高性能化が進められてきたと述べた。一方弱みとしては、巻き線後に熱処理をすること、歪に弱いこと、などを挙げた。Nb₃Snはいわゆるブロンズ法が発明されて実用化が達成されたが、その後も高性能化の試みがなされ、例えばCu-Sn合金中のSn量の増加によって J_c 特性の改善が得られていると述べた。またフィラメント形状の均一性を改善してn値を改善することも重要であるとしている。さらにTa補強による機械的特性の改善についても述べた。金属系線材の市場は少しずつ拡大してきてはいるが、Nb₃Sn線材のビジネスではプロジェクトによる牽引力が大きいとし、現在のITERに続くポストITERプロジェクトへの期待を述べた。

物材機構の竹内孝夫氏は、「加速器・核融合炉に向けたNb₃Al線材の開発」と題して講演した。Nb₃Alは実用化されているNb₃Snと同じ結晶構造を持つが、低温では組成が化学量論組成から外れており、通常の低温熱処理では高特性の線材を得ることはできず、高特性の線材は現在急加熱・急冷却によって得られる過飽和bcc固溶体を、低温アニールでNb₃Alに変態させることで得られている。すでに銅安定化複合技術も開発され、実用化に近づいてきていると述べた。耐歪特性については、Nb₃Snに比べて横圧縮応力に対する耐性に優れ、200 MPaを越えても劣化しないとしている。高エネルギー加速器用としては、ラザフォードケーブルが試作され、フィジビリティスタディが行われていると述べた。またフィラメント間のバリア材として、従来のNbの代わりにTaを用いることで低磁界安定性が大幅に改善されるとしている。核融合炉関連では、ITER後の実証炉用の超伝導線材として有望であるとし、CIC導体を試作してJAEAと共同で安定性の試験を行っているとした。また、14

MeVの中性子照射効果についても触れ、 Nb_3Sn よりも照射による臨界電流特性の劣化がかなり小さいとしている。

住友電工の林 和彦氏は、同社が開発しているビスマス系(Bi-2223)テープ線材について講演した。線材は原料粉末を金属管に充填して加工・熱処理を行うパウダー・イン・チューブ(PIT)法で作製をしているが、温度・圧力・雰囲気等をトータルに制御した加圧焼成法により、高いBi-2223の充填密度が得られ、優れた臨界電流特性が得られるようになったとしている。しかしながら、まだテープ線材にはテープ中央部と端部とで局所的な J_c に差異があり、中央部分の方が J_c はかなり高い。したがって現在の臨界電流特性にはまだまだ改善の余地があるとしている。応力、歪に対する臨界電流の耐性については、ステンレス補強や銅合金補強によって耐性が大きく改善すると述べた。応用としては、送電ケーブル、モータ/発電機、限流器、SMES、MRI、NMR、強磁界マグネットなど、種々のものがあり、特に送電ケーブルについては多くのプロジェクトが現在進行中であると述べた。将来に向けては、銅線との競争で10 円/Am、低温超伝導線材との競争では5 円/Amが当面のターゲットであると述べた。

フジクラの飯島康裕氏は「RE系超伝導線材の実用化の展望」と題して講演した。RE-123系は磁界中での J_c 特性がBi系よりも優れているので多くの応用が考えられるとしている。ただし、RE-123は2軸配向が必要であり、テープ状の線材がいわゆるIBAD法によって高強度の金属基板上に形成されている。現在世界中で開発競争が行われ、 $I_c \times L$ では米国に抜かれているが、 $I_c(J_c)$ では日

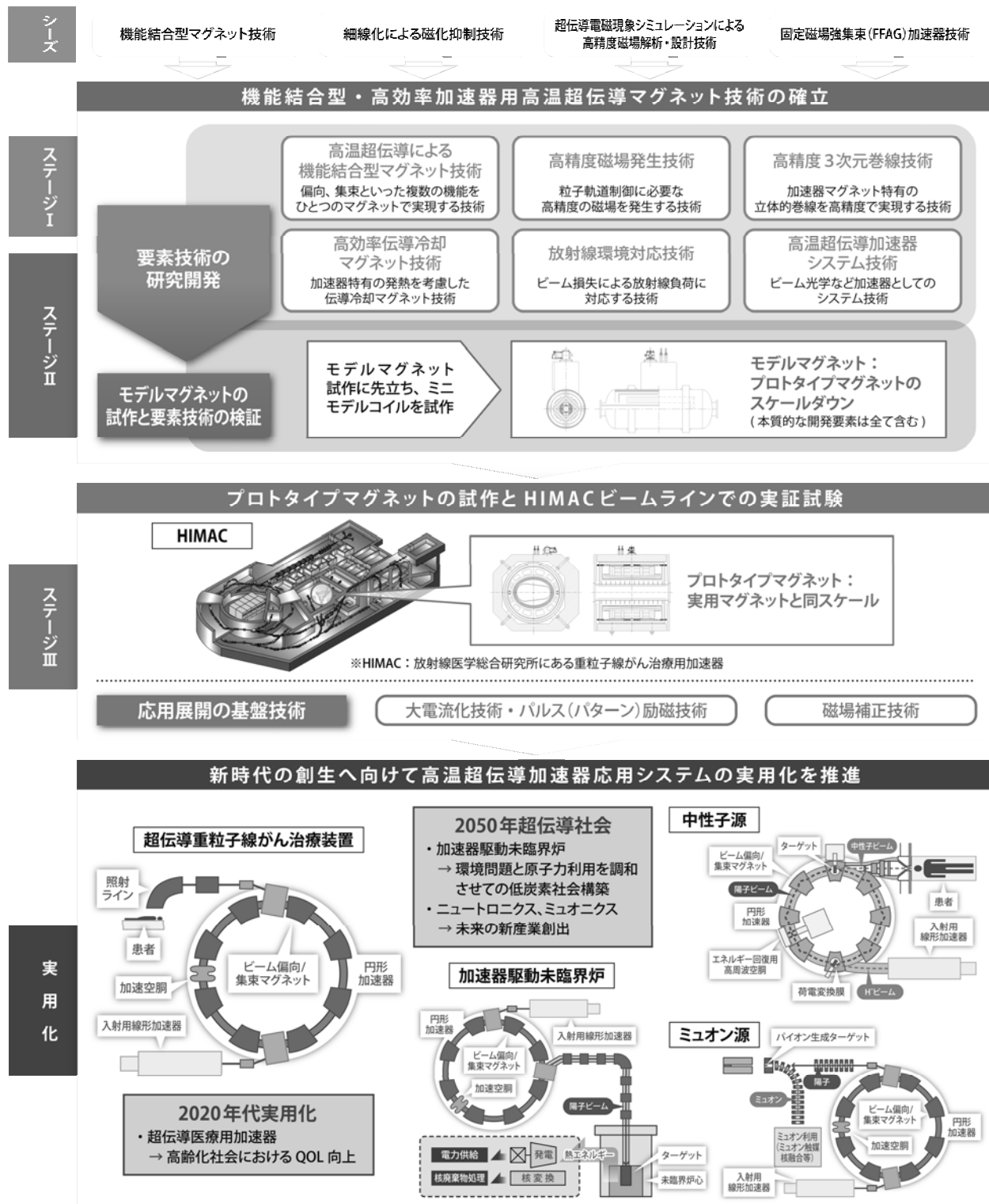
本がトップであるとしている。大型のIBAD装置による均一高配向成膜が行われ、最近では1時間で1 km長のIBADテープができるようになったと述べた。PLD法によるRE-123層の成膜では、線材を壁面で囲って加熱をするホットウォール法で厚膜化が達成されている。 I_c はほぼ膜厚に比例して増加しており、77 K、ゼロ磁界で1 kA以上の I_c が得られていると述べた。また、このホットウォール法は長手線材の I_c の均一度を高めるためにも有効である、としている。また、小型パンケーキコイルを試作して励磁試験を行った結果についても述べた。

日立製作所の和久田毅氏は、 MgB_2 線材について講演した。 MgB_2 は高温超伝導体では唯一永久電流モードでの運転が可能であり、原料コストが低くて線材の作製も比較的容易なのでNb-Ti実用線材の代替になり得る材料であるとしている。応用としては、MRIや液体水素を利用した航空機発電用コイルなどが有望であると述べた。現在、PIT法を主体として線材開発が活発に進められているが、 MgB_2 の充填率が高くないために実用的に十分な J_c が得られていないのが現状であるとしている。充填率を向上させるために、Mgの拡散法やホットプレス法も試みられているが、Mg拡散法では反応層あたりの J_c は高いものの、フィラメントの中心に大きな空隙ができて線材全体の J_c があまり上がらないのが問題であるとしている。ヘリウムフリーMRIについては、中心磁場を3テスラとして現在の長尺線材の臨界電流特性を5-10倍に向上させることができれば実現可能であると述べた。このためには、 J_c を向上させると共に、短尺の J_c を維持したまま長尺化することが必要であるとしている。



パネルディスカッション

FSST NEWS No.125 <トピックス2> (4)「大出力超伝導回転機器に向けたキーハードの開発」の項から、下記の図が欠落しておりました。お詫び申し上げますとともに、改めてここに掲載いたします。



研究会の動き

〔平成22年(2010年)4月1日～平成22年(2010年)6月30日〕

幹事会

平成22年度第1回
日 時:平成22年4月13日(火)12:00～13:00
場 所:タワーホール船堀 小ホール控室
出席者: 幹事10名 事務局1名
議 事:(1) 第74回ワークショップ開催報告
(2) 第36回シンポジウムについて
(3) 第75回ワークショップについて
(4) 第76回ワークショップについて
(5) 平成21年度本会活動の内部評価
(6) 平成22年度事業計画及び収支予算について
(7) 平成22年度総会について

佐藤謙一(住友電気工業)
13:45-14:15 「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」
圓福敬二(九州大学)
14:15-14:45 「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」
雨宮尚之(京都大学)
司会 飯島康裕(フジクラ)
15:20-15:50 「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(日本電子)
15:50-16:20 「大出力超伝導回転機器に向けた
キーハードの開発」

幹事会

平成22年度第2回
日 時:平成22年6月16日(水)10:00～11:30
場 所:東京大学 工学部 9号館 大会議室
出席者:幹事7名 事務局1名
議 事:(1) 第36回シンポジウム開催報告
(2) 第75回ワークショップについて
(3) 第76回ワークショップについて
(4) 平成22年度総会について

塚本修巳(横浜国立大学)
16:20-16:50 「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(鉄道総合技術研究所)
16:50-17:00 閉会の辞
木村茂行(未踏科学技術協会理事長)

第2回総会

日 時:平成22年6月16日(水)11:30～12:00
場 所:東京大学 工学部 9号館 大会議室
出席者:会員8名 オブザーバー3名 事務局1名
議 事:(1) 平成21年度事業報告及び収支決算について
(2) 平成22年度事業計画及び収支予算について

第36回シンポジウム／第14回超伝導科学技術賞授賞式

日時:平成22年4月13日(火)10:00～17:00
場所:タワーホール船堀 小ホール
テーマ:「超伝導2010 ー超伝導の新たな可能性へー」
出席者数:120名
ポスター展示:10件(企業4社、JSTプロジェクト6件)
プログラム:
司会 松本明善(物質・材料研究機構)
10:00-10:10 「開会の辞」
下山淳一(超伝導科学技術研究会会長)
10:10-10:50 「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」
山本 明(高エネルギー加速器研究機構)
10:50-11:30 「イットリウム系超電導線材及び
その応用開発」
塩原 融(国際超電導産業技術研究センター)
11:30-11:50 超伝導科学技術賞授賞式

＜超伝導の新たな可能性へ＞

司会 日高睦夫(国際超電導産業技術研究センター)
13:00-13:30 「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」
鵜澤佳徳(国立天文台)
13:30-13:35 「戦略的イノベーション創出推進事業について」
石川知宏(科学技術振興機構)
13:35-13:45 「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」

第75回ワークショップ

＜(社)低温工学協会材料研究会共催＞

日 時:平成22年6月16日(水)13:00～18:00
場 所:東京大学 本郷キャンパス 武田ホール
テーマ:「超伝導線材オールスターズ
ー開発・応用動向と高性能化の可能性ー」
出席者数:113名
プログラム:
座長 前田敏彦(高知工科大学)
13:00-13:10 開会の挨拶
低温工学協会材料研究会委員長
13:10-13:40 「NbTi線材」
田中靖三(元 国際超電導産業技術研究センター)
13:40-14:10 「Nb₃Sn線材」
宮崎隆好(神戸製鋼所)
14:10-14:40 「Nb₃Al線材」
竹内孝夫(物材・材料研究機構)
座長 熊倉浩明(物材・材料研究機構)
15:00-15:30 「Bi系線材」
林 和彦(住友電気工業)
15:30-16:00 「RE系線材」
飯島康裕(フジクラ)
16:00-16:30 「MgB₂線材」
和久田 毅(日立製作所)
16:30-17:50 パネルディスカッション
話題:超伝導産業を創出する超伝導線材の
高性能化の可能性と将来展開
司会 松本 要(九州工業大学)
パネリスト 上記講演者 6名
木吉 司(物質・材料研究機構)
長嶋 賢(鉄道総合技術研究所)
堀上 徹(低温工学協会 前副会長)
柳 長門(核融合科学研究所)
17:50-18:00 閉会の挨拶 超伝導科学技術研究会会長
18:00- 懇親会

超伝導科学技術研究会

平成 21 年度 事業報告

平成 21 年 4 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日

超伝導科学技術研究会が、平成21年度（平成21年4月1日から平成22年3月31日まで）の行った諸事業は次のとおりである。なお、事業報告および事業計画を総会の審議事項とするため会則を変更し、21年度より総会を開催している。

1. シンポジウムの開催:1回

第35回(参加者数90名)

日 時:平成21年4月15日(水)10:00～17:35
協賛団体:(社)応用物理学会、(社)低温工学協会、
(社)日本物理学会、(社)電気学会、
(社)電子情報通信学会、
(社)日本金属学会
場 所:日本科学未来館 みらいCANホール
テーマ:超伝導2009-使われる超伝導の時へ-

2. 超伝導科学技術賞

第13回授賞式

日 時:平成21年4月15日(水) 11:35～12:05
場 所:日本科学未来館 みらいCANホール
※ 第35回シンポジウムにて開催

3. ワークショップの開催:3回

第72回(参加者数60名)

日 時:平成21年6月24日(水)13:00～17:00
共 催:(社)低温工学協会材料研究会
場 所:東京大学 山上会館 2階 大会議室
テーマ:超電導材料と先端ナノ材料における
自己組織化

第73回(参加者数100名)

日 時:平成21年12月3日(木)10:00～17:45
共 催:(社)応用物理学会超伝導分科会
場 所:早稲田大学 西早稲田キャンパス
55N号館1階大会議室
テーマ:最先端医療で活躍する超伝導技術と
その未来展開

第74回(参加者数90名)

日 時:平成22年3月2日(火)13:30～17:00
共 催:(社)低温工学協会 超電導応用研究会、
冷凍部会
場 所:前川製作所 守谷工場
テーマ:高温超電導機器の冷却技術

4. FSST NEWS の発行:4 回(1回/3ヶ月)

No.121 (2009 年 5 月 8 日)
No.122 (2009 年 7 月 30 日)
No.123 (2009 年 10 月 15 日)
No.124 (2010 年 1 月 25 日)

5. その他

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

<幹事会:6 回>

平成21年4月16日(木)10:00～12:00
NIMS東京事務所 会議室
平成21年6月24日(水)10:00～11:30
東京大学山上会館 203会議室
平成21年8月24日(月)15:00～17:00
NIMS東京事務所 会議室
平成21年10月26日(月)15:00～17:00
NIMS東京事務所 会議室
平成21年12月25日(金)15:15～17:00
東京大学山上会館 002会議室
平成22年2月10日(金)15:15～17:00
NIMS東京事務所 会議室

<賞審査委員会:2 回>

平成21年12月25日(金)13:00～15:00
東京大学山上会館 002会議室
平成22年2月10日(金)14:00～15:00
NIMS東京事務所 会議室

<総会:1 回>

平成21年6月24日(水)11:30～12:10
東京大学山上会館 203会議室

<編集委員会:4 回>

平成21年4月16日(木)16:00～18:00
(社)未踏科学技術協会 会議室
平成21年7月16日(木)16:00～18:00
(社)未踏科学技術協会 会議室
平成21年10月5日(月)16:00～18:00
(社)未踏科学技術協会 会議室
平成22年1月7日(木)16:00～18:00
(社)未踏科学技術協会 会議室

<会員の状況>(H22.3.31 現在)

団体会員 16社16口
個人会員 18名

超伝導科学技術研究会

平成 21 年度収支決算書

平成 21 年 4 月 1 日～平成 22 年 3 月 31 日*

(単位：円)

項目		予算額 (X)	決算額 (Y)	予算額－決算額 (X－Y)
収 入 の 部	団体会費	3,200,000	3,200,000	0
	個人会費	180,000	170,000	10,000
	事業参加費収入	600,000	231,000	369,000
	事業資料代収入	340,000	402,500	△ 62,500
	調査研究収入	1,000,000	1,000,000	0
	雑収入	0	4,036	△ 4,036
	当期収入合計 (A)	5,320,000	5,007,536	312,464
	前期繰越収支差額	825,000	825,476	△ 476
	収入合計 (B)	6,145,000	5,833,012	311,988
支 出 の 部	シンポジウム・ワークショップ開催費	1,500,000	1,806,898	△ 306,898
	会議開催費	800,000	517,309	282,691
	印刷出版諸経費	720,000	837,090	△ 117,090
	調査研究経費	400,000	0	400,000
	共回事務費	0	4,544	△ 4,544
	管理費	669,000	601,130	67,870
	基本人件費	1,200,000	1,200,000	0
	予備費	31,000	0	31,000
	当期支出合計 (C)	5,320,000	4,966,971	353,029
当期収支差額 (A)－(C)		0	40,565	△ 40,565
次期繰越差額 (B)－(C)		825,000	866,041	△ 41,041

*平成 22 年 6 月 16 日の総会で承認済み

国内超伝導関連会議

Conferences related to Superconductivity (Domestic)

会 議 名	日 付	開催場所	主催及び問合せ先
応用物理学会／秋季	H 22.9.14～9.17	長崎大学 文教キャンパス (長崎県長崎市)	応用物理学会
日本物理学会／秋季	H 22.9.11～9.14	九州工業大学 戸畑キャンパス (福岡県北九州市)	日本物理学会
日本金属学会／秋期	H 22.9.25～9.27	北海道大学 (北海道札幌市)	日本金属学会

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
International Cryogenic Engineering Conference 23- International Cryogenic Materials Conference 2010(ICEC23-ICMC2010)	2010.7.19～7.23	Wroclaw (Poland)	http://www.icec-icmc.wroc.pl/
Applied Superconductivity Conference (ASC2010)	2010.8.1～8.6	Washington, D.C. (USA)	http://www.ascinc.org/
International Union of Materials Research Societies International Conference on Electronic Materials(IUMRS-ICEM)	2010.8.22～8.27	Seoul (Korea)	http://iumrs-icem2010.org/
International Union of Materials Research Societies International Conference in Asia(IUMRS-ICA)	2010.9.25-9.28	Qingdao (China)	http://www.iumrs-ica.com/en_index.php
23rd International Symposium on Superconductivity (ISS2010)	2010.11.1～11.3	Tsukuba (Japan)	http://www.istec.or.jp/ISS/

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	(独) 国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 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 超電導技術開発室 主査	大貫留美子	(社) 未踏科学技術協会

<FSST NEWS No.126 目次>

<トピックス 1>

- 種々の電子顕微鏡法から明らかになった鉄系超伝導 $REFeAsO_{1-x}F_x$ 多結晶体の組織学的特徴
米国立強磁場研究所 亀谷文健…………… 1

<第 14 回超伝導科学技術賞を受賞して>

- (1) 超伝導技術が拓く先端基礎科学 — 素粒子・宇宙・粒子加速器 —
高エネルギー加速器研究機構 山本 明…………… 5
- (2) イットリウム系超電導線材及びその応用開発
国際超電導産業技術研究センター 塩原 融…………… 7
- (3) 層状およびカゴ状構造を有する新規超伝導体の開発
広島大学 山中 昭司…………… 10
- (4) 高温超伝導体の T_c 決定要因
産業技術総合研究所 永崎 洋…………… 12
- (5) 電気二重層トランジスタによる電場誘起超伝導の発見
東北大学 上野 和紀…………… 14
- (6) テラヘルツ天文学を拓く超伝導技術
国立天文台 鵜澤 佳徳…………… 17
- (7) 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
物質・材料研究機構 菊池 章弘…………… 19
- (8) NMR 技術開発と超伝導
産業技術総合研究所 岡田 道哉…………… 21

<会議報告 1>

- 第 2 回国際超伝導・磁性会議 (ICSM2010) 報告 東京大学 山本 明保…………… 24

<会議報告 2>

- 第 75 回ワークショップ報告 物質・材料研究機構 熊倉 浩明…………… 25

- 研究会の動き……………28
- 平成 21 年度 事業報告……………29
- 平成 21 年度 収支決算書……………30
- 国内超伝導関連会議／国際会議及び国外の主要な会議……………31