

掲載内容 :

会議報告 : 2016 Applied Superconductivity Conference (September 4-9, 2016)

内容 :

- | | |
|------------------------------------------|-------|
| ○ 全体概要 | 大久保雅隆 |
| ○ エレクトロニクス分野 | 神代 暁 |
| ○ 大規模応用分野 | 中村武恒 |
| ○ 材料分野 (BSCCO, 鉄系, MgB ₂ 線材等) | 熊倉浩明 |
| ○ 材料分野 (コート線材関連) | 松本 要 |

事務局から

- ISS2016 のプログラムが確定しました

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

〈発行者〉

国立研究開発法人産業技術総合研究所 T I A 推進センター 超電導 Web21 編集局

〒305-8560 茨城県つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第1

Tel: 029-861-5264 Fax: 029-862-6048

超電導 Web21 トップページ : <https://www.tia-nano.jp/ascot/tyoudendou/index.html>

会議報告 : 2016 Applied Superconductivity Conference (September 4-9, 2016)

「全体概要」

(国研) 産業技術総合研究所 大久保 雅隆

隔年に米国各地で開催されている応用超伝導会議は、他の多くの分野と同様に、世界最大のその分野の国際会議である。今年、デンバーで開催され、第1回のASCが開催されてから50年目の節目に当たる。米国を含めて37カ国から1635名の参加があった。これらの数は、2000年頃と大差なく、高温超伝導フィーバーが過ぎ去って時間が経過しても参加者が減っていないのは驚きである。超伝導分野の研究人口は減っていないと思われる。国別では、米国43%、日本18%、中国8%、韓国7%、ドイツ5%、イタリア3%、スイス3%という内訳であった。国別内訳は、主催国を除いて、11月につくばで開催された検出器と国際標準に関する国際会議IWSSD2016(参加者総数101名)と同様であり、超伝導関連の会議では普遍的と思われる。上記が、超伝導研究開発の主要国を示している。国の経済状況を考えるとイタリアが奮闘しているとの印象がある。ここ10年くらいで大きく変わったのは参加登録費で、2倍程度に高くなっている。スポンサーの減少によるのかもしれない。

1701編のアブストラクトが提出され、1667編が採用されている。IEEEのプロシーディングへの投稿数は747で、分野毎の内訳は以下の通りである；エレクトロニクス：168、大規模応用：431、材料：148。

口頭発表では、8つの基調講演があった(高温超伝導発見30年(マグネット)、素粒子物理のためのコライダー、超伝導計算機、高温超伝導ジョセフソン接合の応用、高温超伝導の30年(材料)、理論、電圧標準、中国の応用超伝導)。日本からは、後述のように横浜国大の吉川信行教授がデジタル計算機応用について紹介した。中国の講演では、中国国内にコライダーを建設する計画があるとのアナウンスがあった。ジョセフソン接合の応用では、機器の直接市場は大きくはないが、社会的に大きなインパクトがあった例として、SQUID 鉱物探査による鉱山の立ち上げ期間の飛躍的短縮が紹介された。超電導の存在意義をアピールできるよい例と考えられる。講演間のオーバーラップが感じられるものもあった。全ての基調講演はウェブキャストされている¹⁾。

前日の日曜日にはエレクトロニクスのショートコースを聴講した。原理からデバイス応用まで非常によくまとめられた講義であった。ISTECの時代からIEC国際標準化を進めてきたが、残念ながら、このショートコースや一般の発表の多くはIEC電気用図記号に準拠しておらず、特に、しばしば抵抗とインダクタンスが異なっている。超伝導で初となる図記号であるジョセフソン接合と常電導・超電導境界が、IEC 60417に会議終了後の9月17日に収録されたが(IEC 60617にも同じ記号を提案中)、抵抗とインダクタンスの普及の現状が上記であるので、新たな標準の普及には長時間を要することは容易に想像がつく。この標準化は、IEC-IEEEの合同で進めている。線材でも多くの標準が発行されている。ASCの期間中にも非公式の会合が開催されているので、是非出席して頂きたい。

米国の線材とエレクトロニクスの状況を比較すると、米国の標準技術研究所であるNISTに以前あった線材の部隊は無くなり、Fermi labやAmerican Superconductorに移っている。NISTには検出器の部隊が残っている。しかしながら、米国内には複数の線材企業に加えて、HypressやStarCryoなどといったエレクトロニクス企業が多数あり、ASCは、やはり米国の層の厚みを感じる会議である。次回は、2018年10月28日～11月2日にシアトルで開催される。

1) <http://ieeecsc.org/pages/plenary-series-applied-superconductivity-conference-2016-asc-2016>

会議報告 : 2016 Applied Superconductivity Conference (September 4-9, 2016)

「エレクトロニクス分野」

(国研) 産業技術総合研究所 神代 暁

1. はじめに

Applied Superconductivity Conference 2016 において、エレクトロニクス分野の講演予稿総数は 431 件 (口頭 171 件、ポスタ 260 件) であった。内訳を右表に示す。いわゆる検出器関連(磁気計測用 SQUID を除く)が 181 件と 40%以上を占めた。エレクトロニクスだけに限っても、オーラル講演は 3 会場でのパラレルセッションとなったので、全てを聴講することは不可能であった。ここでは、著者の特に印象に残った講演に絞り報告する。

2. デジタル回路

プレナリーセッションで、吉川 (横国大) が、超低消費電力型磁束量子パラメトロン回路の理論と研究開発状況を講演した。

3. Transition Edge Sensor (TES) と SQUID による多重読出

TES は応用の広い熱型検出器ゆえ、エレクトロニクス講演数の 16% を占める。ここ数年、エネルギー分解能 ΔE を下げる競争から、多画素化時に重要となる、特性・性能の場所均一性向上技術やその背景物理、および多重読出技術に研究の中心が移った。

TES アレイの多重読出法として、時分割(TDM)、コード分割(CDM)、周波数分割(FDM)、マイクロ波帯周波数多重法(MW-Mux)の 4 種類がある。最も技術が成熟し、ガンマ線や X 線の光子計数分光器用として、1 系統の室温信号処理系に 32 画素 TES の信号を多重化するシステムを完成・性能評価した米国標準研究所(NIST)が、多重化数 N 増大に対する信号対雑音比の低下が原理的に生じない CDM において、1 系統 32 画素 TES の信号多重化を行い、 $\Delta E = 2.8 \text{ eV @ } 5.9 \text{ keV}$ を得た¹⁾。また、TDM に比べ ΔE に占める読出雑音の影響を低減できることを実験的に示した¹⁾。他の 3 方式に比べ 2-3 桁大きな多重化数を期待できる MW-Mux に関して、第二世代のガンマ線 TES 分光器や、ガンマ線 TES より 1 桁高速な X 線 TES アレイの読出技術としての研究をはじめ、TES 以外に SQUID 読出への適応性を持つ Metallic Magnetic Calorimeter(MMC)や量子ビットへ応用する研究が紹介された。NIST では、8 系統の室温処理系を用いた TDM 読出法により実現した 256 画素ガン

表 項目毎の講演予稿数

	Presen.	Oral	Poster
Total	431	171	260
TES	70	38	32
SQUID	68	22	46
Nanowire	64	28	36
Digital	59	24	35
Device	32	7	25
Fabrication	25	11	14
Quantum Bit	22	6	16
MKID	22	8	14
Microwave	17	5	12
Mixed Signal	15		15
Circuit	8		8
STJ, Mixer	7		7
NMR Coil	6	6	
Package &	6	6	
System	5	5	
Integration	5	5	
Standard	5	5	
Magnetic	5	5	
Device	5	5	
MgB2 Detector	5	5	
(DET)	5	5	
Non-equilibrium	5	5	
DET	5	5	

マ線分光器の画素数を 512 に上げ、MW-Mux 法で読出す分光器を開発中であり、4 画素同時読出の分光結果 $\Delta E = 47 \text{ eV} @ 97 \text{ keV}$ を報告した。この値は、2013 年発表の結果 $\Delta E = 63 \text{ eV}^2)$ に比べ改善した。MMC 読出では、ドイツ Heidelberg 大から、昨年度より雑音を 1 桁下げ、冷却 HEMT 増幅器で決まる磁束換算値 $2 \mu\Phi_0/\text{Hz}$ まで低減したとの報告がなされた。

TES の物理に関して、TES を弱結合超伝導体 (Josephson 接合) として扱い、その振舞を Josephson 効果や位相スリップを基に説明することが近年行われている。本年は、関連発表の数・質ともに増加した。TES を交流駆動する FDM 読出法では、交流ジョセフソン効果により $I-V$ 特性上に電流ステップによる「よじれ」が出現し、これが光子検出時の性能低下をもたらすことがオランダ宇宙研から報告されている³⁾。本現象の明確化のため、同一 TES に対し二種 (DC, AC) のバイアス駆動による対照実験が望まれる。オランダ宇宙研の TES に対し、AC バイアス周波数 ($\approx 1 \text{ MHz}$) より大きな信号帯域を持たせたマイクロ波多重読出法を適用した両者の特性・性能比較の試みが、NIST から報告された。

TES の応答速度向上に向けた構造上の改善、例えば、TES 性能に大きな影響をもたらすメンブレン上の TES の伝熱特性改善に関する種々の試み、TES とその真上に設けたバルク吸収体との間の熱伝導を担う柱材質のエポキシから金属への交換、吸収体を TES と同じ平面上に配置するサイドカー型等が、複数機関から発表された。なお、金属製柱の先駆機関は東大⁴⁾であり、NIST が日本発の技術を採用したことになる。

4. Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID)

MKID は、シンプルな構造と、MW-Mux 同様のマイクロ波共振器に基づく周波数多重読出を特徴とする。カリフォルニア大サンタバーバラ校 (UCSB) では、10,000 画素の近赤外帯光子計数アレイのプロジェクトがスタートし、約 2,000 個の共振器の共振周波数や共振 Q 値の均一性が調べられた。また、分解 $\approx \lambda/\Delta\lambda = 5.3 @ \lambda = 694 \text{ nm}$ を得た。

MKID による典型的な分光法は、光学フィルタで入射光を複数帯域に分けた後、各帯域毎の入射電力を力学的インダクタンス (KI) 変化を基に計測することに基づくが、波長の比較的長いミリ波・サブミリ波帯では、光学フィルタ体積が観測機器の体積を支配するとの問題があった。チップ上のアンテナ-インダクタンス間に、超伝導薄膜から成るバンドパスフィルタを構成すれば、大型の光学フィルタを排した分光が可能となる。オランダデルフト大学で研究開始された標記オンチップ分光器⁵⁾を、カリフォルニア工科大が、気球搭載型の地球大気中での微量分子濃度計測用 512 画素検出器を目標として採用し、400 GHz 帯で 9 画素読出の実験結果を示した。

インダクタ材料として、第一種超伝導体である Al に比べ、大きな磁界侵入長と KI を持つ TiN が注目されたが、近年、Ti と N の混合比の場所分布が大きく、ウエハ上での特性均一性を得にくいとの問題が指摘されている。UCSB では、 $T_c = 0.9 \text{ K}$ 、準粒子緩和時間 $= 20 \mu\text{s}$ 、テストチップ上での共振 Q $\approx 10^6$ の PtSi に着目し、50 mm \times 50 mm 領域でのシート抵抗分布が、TiN に比べ高い均一性を持つことを示した。

参考文献

- 1) K. M. Morgan *et al.*, Appl. Phys. Lett., **109** (2016) 112604.
- 2) O. Noroozian *et al.*, Appl. Phys. Lett., **103** (2013) 202602.
- 3) L. Gottardi *et al.*, Appl. Phys. Lett., **105** (2014) 162605.
- 4) S. Hatakeyama *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., **25** (2015) 2101603.
- 5) A. Endo *et al.*, Appl. Phys. Lett., **103** (2013) 032601.

会議報告 : 2016 Applied Superconductivity Conference (September 4-9, 2016)

「大規模応用分野」

京都大学 中村武恒

大規模応用分野では、超電導機器単独の研究開発だけでなく、電源系や冷却系等の周辺技術も含めてシステム全体を意識した検討が比較的多いとの印象を持った。以下、筆者が興味を持った講演を中心に報告する。

RIKEN(Japan)の Y. Yanagisawa らは、REBCO/ Bi-2223 /LTS コイルを組み合わせた 28 T マグネットの開発状況を報告した。REBCO inner coil によって 6.52 T、Bi-2223 middle coil によって 4.49 T を発生し、LTS outer coil の 17 T と合わせて 28 T を発生させるマグネットであり、接続技術などの開発結果も含めて説明された。

5 日夕刻のセッション「HTS Motors and generators I」では、はじめに Charles “Chuck” Oberly 博士(Air Force Research Laboratory, USA)の Memorial Session が設けられ、博士の超電導回転機やその周辺技術に関する功績が紹介された。Rolls-Royce North American Technologies (USA)の D. Loder は、actively-shielded generator 実現のための Nb₃Sn コイルの検討結果を報告した。本研究は、NASA FW/AATT HEP Technology Roadmap に基づいて航空機用途への適用を目指しており、特に高出力密度(33.0 kW/kg@2030 年、41.1 kW/kg@2035 年)が目標の一つに掲げられていた。講演では、設計例と基礎実験結果が説明された。Kyoto University (Japan)の T. Nakamura らは、輸送機器応用を目指した高温超電導誘導同期モータについて、20 kW 級プロトタイプ機の開発成果と 50 kW 級モデル機の研究開発現状を報告した。50 kW 級機では、回転子だけでなく固定子もビスマス系高温超電導巻線で構成する全超電導機の開発状況が報告され、世界初となる本格的な全超電導負荷試験の計画が説明された。University of Lorraine (France)の A. Colle らは、航空機応用を目指した磁束バリア型超電導回転機の検討結果を報告した。本グループは、50 kW@5000 rpm 程度の小型回転機の開発を目指しており、目標とする比出力は>15 kW/kg である。講演では、超電導コイルと超電導バルクを組み合わせた磁束バリア型回転機の原理が説明され、基礎実験結果が紹介された。Tokyo University of Marine Science and Technology (Japan)の H. Jing らは、波力エネルギー変換のための大型超電導リニア発電機について、設計結果を報告した。まず、波力エネルギー変換システムについて概観した後、超電導リニア発電機の意義について説明した。そして、最大出力 2 MW、運転温度 77 K とした詳細な設計結果ならびに永久磁石機との比較検討結果を報告した。

The University of Edinburgh (UK)の Q. Li らは、高温超電導大型風力発電システムについて講演した。世界全体で見た風力エネルギー市場は、再生可能エネルギー部門の 1/3 を占め、例えば中国では、2020 年までに 200 GW の発電を目指しているとの説明があった。その後、クローポール型発電機の構造が説明され、さらに 10 MW (88 極、10 rpm)の設計例と基礎検討結果が報告された。THEVA 社の M. Bauer らは、EcoSwing Project の一環として実施されている風力発電機向高温超電導界磁巻線の開発状況を報告した。本プロジェクトでは、フルスケールの MW 級高温超電導ダイレクトドライブ風力発電機を開発するとともに、Thyborøn (Denmark)の既存風力タービン(3.6 MW、14 rpm、回転子直径 128 m)に搭載して発電試験を実施する予定であり、5 か国から 9 グループが参画している。THEVA 社で開発した GdBCO 薄膜線材(最大臨界電流: 360 A@77 K&self-field)を使用して界磁コイルを試作し、University of Twente で試験を実施する体制で進められている。サブスケールコイルの試作と試験が完了し、液体窒素大気圧沸点(77 K)の臨界電流と n 値はそれぞれ 216 A、37 であった。さらに、フルサイズのコイル試作ならびに試験も終了して

いる。その他、10 MW 級ダイレクトドライブ風力発電機を対象としてエネルギーコストの観点から回転機トポロジーの比較検討を実施した結果(Delft University of Technology (Netherlands)他)が報告された。

CEA Saclay, Irfu の L. Quettier は、Iseult/INUMAC (French-German Initiative on *Imaging of Neuro Disease Using High Field MA*gnetic Resonance and Contrastophores) の 11.7 T whole body magnet プロジェクトの建設進捗を報告した。本マグネットの仕様としては、蓄積エネルギー338 MJ、インダクタンス 308 H、電流 1483 A、長さ 5.2 m、直径 5 m、質量 132 t であり、1.8 K に冷却された NbTi 導体を使用される。11.7 T 発生時の磁界安定度と同空間均一度の目標値は、それぞれ 0.05 ppm/h、 < 0.5 ppm on 22 cm DSV である。建設中の写真が紹介されたが、その圧倒的なスケールに圧倒された。2017 年に試験が予定されている。

ポスターセッションでは、胸部イメージング用 1.5 T open-MRI の設計結果(Texas A&M University, USA)、MRI 応用を目指した伝導冷却 MgB_2 コイルの基礎実験結果 (The Ohio State University, USA)、 MgB_2 線材を用いた 3 T 無冷媒 MRI マグネットのモデリングに関する検討結果 (The Ohio State University, USA)、whole-body REBCO MRI の遮蔽電流に伴う不整磁界に関する解析的検討結果 (Waseda University 他, Japan)、GdBCO 高温超電導伝導冷却 MRI マグネットの開発とイメージング結果の報告(Mitsubishi Electric 他, Japan ; 高温超電導マグネットによる 3 T イメージング成功は世界初)など、高温超電導技術の強力な牽引力を感じさせる発表が多くあった。また、回転機関連では高温超電導風力発電機に関する講演が多く、今後プロトタイプ機など実機による検証が楽しみである。超電導ケーブルについても、66 kV 級交流送電ケーブル(全長 40 m)を用いた短絡事故時安全性と信頼性に関する検討 (Sumitomo Electric Industries 他, Japan)など、着実な実績が積み上げられており、実用化が強く期待される。最近のトピックとしては、非接触電力伝送に関する講演が目をつけた。会議後にプログラムを見返すと、他にも沢山の有意義な講演があったが、筆者の調査不足で見逃してしまったこと、ご容赦願いたい。

会議報告 : 2016 Applied Superconductivity Conference (September 4-9, 2016)

「材料分野 (BSCCO, 鉄系, MgB₂ 線材等)」

物質材料研究機構 熊倉浩明

Bi-2212 線材については、強磁界マグネットの内層コイルを念頭に置いて、米国 Florida Univ. を中心として活発に研究が進められている。Bi-2212 は丸線が容易に可能でその点で有利と考えられている。Oxford Superconductor Technology (OST) 社では、以前より PIT 法により Bi-2212 多芯丸線材の開発を進めているが、ビレットの大きさを 2kg から 10kg に拡大して 800m 長の線材を作製し、特性は 2kg の時と同じレベルを維持できるようになったとしている。また、充填粉末を工夫するとともにスウェーピング加工で充填率を向上させ、15T, 4.2K, 1m 長の線材で 350A/mm² の J_c を得ている。線材の最大の長さは 2,000m とのことである。

Florida Univ. のグループでは、高圧熱処理 (いわゆる overpressure processing) を行っており、100bar の加圧で 1,000A/mm² 以上の J_c (4.2K, 5T) を得ている。プリカーサ粉末は Nexans 社製で線材は OST が作製している。また、Bi-2212/Ag-alloy 多芯丸線材の超電導接続の研究も進めており、接続部の抵抗 $R < 5 \times 10^{-12} \Omega$ を実現している。接続の方法は、丸線材端部の外側のシース材をエッチングで除去し、二本の端部をプリカーサ粉末とともに銀管に挿入後加圧して熱処理をするという簡便な手法を適用している。

米国、Solid Materials Solutions のグループは、Bi-2212/Ag 線材の補強について発表した。丸線材は難しいので最初は角線材とし、補強テープ材を四面に拡散接合によって貼り付けている。貼り付けは熱処理前に行うが、四隅には銀が露出しているため、部分溶融-除冷時の酸素の出入りには支障が無いとしている。このようにして 400MPa の引っ張り応力に耐え得る線材が得られるとしている。現在はまだ補強線材の長さは 20m レベルであるが、近い将来には 200m 級にまでスケールアップすると述べた。

一方の Bi-2223 テープ線材では住友電工が精力的に開発を進めており、高強度テープ線材が出来つつあるが、Florida Univ. ではこの住友電工製の Bi-2223 テープを用いても強磁界マグネット用の内層コイルの製作を進めており、すでに 4T の磁界発生に成功している。今後 Bi-2212 内層コイルとの比較検討を進めるものと思われる。

鉄系線材については、まず中国の電工研究所が 10m 級の単芯ならびに多芯 (Sr,K)Fe₂As₂ テープを *ex situ* PIT 法で作製している。 J_c は 18,000A/cm² (4.2K, 10T) で短尺テープよりもかなり低いが、 J_c の均一性はかなり良好である。また、10m 級の 7 芯テープを用いて小型のダブルパンコイルを試作し、励磁試験を行っている。コイルの J_c も短尺テープの J_c よりも低いが J_c の磁界依存性は短尺テープと同じとしている。

東大の為ヶ井グループは、*ex situ* PIT (Ba,K)Fe₂As₂ 線材に対して HIP 処理を行って充填率を向上させることにより、 2.1×10^4 A/cm² (4.2K, 10T) の J_c を得ている。また、SrFe₂As₂ の Sr を一部 Na で置換した (Sr,Na)Fe₂As₂ も注目される超伝導体であるが、これについても *ex situ* PIT 法で線材を作製し、一軸プレスしたテープにおいて 4.2K、自己磁界中で 50,000A/cm² の J_c を得ている。

その他、イタリア、Genova Univ. のグループは、原料として極めて活性な K を避けるために、As の一部を P で置き換えた BaFe₂(As_{0.68}P_{0.32})₂ 相の線材化を試みている。固相反応で BaFe₂(As_{0.68}P_{0.32})₂ を合成し、粉碎して銀管に充填してテープに加工後、熱処理をしているが、 J_c はまだかなり低い。Ohio State Univ. のグループも *ex situ* PIT 法で (Ba,K)Fe₂As₂ の線材化について発表した。が、 J_c はやはり低いレベルにとどまっている。おそらく、両グループともに作製したプリカーサ粉末の品位が低いためであろう。

と思われる。

MgB₂線材については、まず Columbus Superconductors のグループが BEST PATHS(BEYond State-of-art Technologies for rePowering Ac corridors and multi-Terminal HVDC Systems)プロジェクトにおける MgB₂線材開発について紹介した。線材は、MgB₂プリカーサ粉末を金属管に充填する *ex situ* PIT 法で作製した多芯線材である。MgB₂粉末は自社で作製している。320kV の直流送電ケーブルを目的としており、ケーブルは多数の撚り線からなる銅コアのまわりに多数(24-36本)の MgB₂線材をツイストをかけながら巻き付けた構造である。20K で 10kA (電力としては 1-3.2GW) の送電をコンパクトなケーブルで行えるように、1.5mm 径の MgB₂線材を開発したとしている。

米国の Hyper Tech Research のグループは、同社が作製している MgB₂線材とその応用への取り組みについて紹介した。線材の作製は PIT 法を改良した CTFF 法で作製しているが、いわゆる第二世代の内部 Mg 拡散法(AIMI法)でも多芯線材を作製しており、 J_c は単芯線材で 12,200A/cm²(4.2K, 5T)と CTFF 法線材を凌ぐ値が得られている。また MgB₂層あたりの J_c では 157,000A/cm²(4.2K, 10T)が AIMI 単芯線材で得られたとしており、これは MgB₂線材としては最高の J_c 値であろう。応用としては、1.5T ならびに 3.0T の MRI のほかに、5-20MW の風力発電、SMES、DC 送電ケーブルなど、種々のものが考えられるとしている。MRI についてはマグネットの技術開発をスタートさせており、マグネットの磁場分布など種々の解析を進めている。また 36 芯の CTFF 線材を用いて React & wind 法で MRI 用コイル(内径 46cm)の試作も進めており、冷凍機冷却による励磁試験の結果、短尺線材の特性と良い一致が得られたとしている。さらに超伝導接続の研究も進めている。

中国、電工研のグループは、各種の内部 Mg 拡散(IMD)法 MgB₂線材について発表した。プリカーサ粉末としては B ではなく MgB₄を用いて線材を作製している。 J_c は B 粉末を使った場合と比べてまだ高くはないが、線材全断面積における MgB₂断面積を上昇させることが可能で、B 粉末の場合よりも高い J_c を得ることができるとしている。また、B 粉末を用いて IMD 法で 100m 級の 6 芯線材を作製している。線材外側のシースはモネル材で Nb をバリア材として用いている。この断面構造で均一な 100m 級線材が作製可能であるとし、 J_c のバラツキは小さく、4.2K、8T で 10⁵A/cm²以上の J_c (平均値)が得られたとしている。ただし、100m 級線材を熱処理してから短尺試料をサンプリングして J_c 測定をしたものではなく、未熱処理線材から短尺線材をサンプリングして熱処理を行っている点が若干気になるところである。この他、ドイツの Leibniz-Institute for Solid State and Materials Research のグループからも IMD 法による 7 芯線材の発表があった。

日立製作所のグループは 300m 長の *in situ* PIT 法 MgB₂多芯線材を用い、内径 120mm、外径 190mm のコイルを試作して冷凍機冷却により、励磁試験を行った。その結果、24K ならびに 27K でのコイルの I_c は短尺線材の I_c とよく一致しており、均一性の優れた 300m 長線材が得られたとしている。24K では 2.3T の B_{max} を得ている。また、多芯線を用いて超伝導接続によってループを形成し、トラップされた磁界の減衰から接続部の抵抗として $R < 10^{-13}\Omega$ を得ている。

PIT 法 MgB₂線材の超伝導接続については、米国、Ohio State Univ.のグループも研究を進めている。React & wind コイルならびに wind & react コイルのための超伝導接続技術について発表した。やはりループによる発生磁場の減衰から接続抵抗を評価している。また同グループは CTFF 法による MgB₂線材にナノサイズの Dy₂O₃や Nd₂O₃などの希土類酸化物を添加し、これらによって生成される MgB₂の結晶粒が微細化されるとし、Dy₂O₃を添加した線材で 4.2K、12T で 1.7x10⁴A/cm²とカーボンドープした線材より約 2 倍高い J_c を報告した。さらに同グループでは、PLD 法で作製した MgB₂薄膜に対して、100 Torr の O₂ガス中でアニールすることにより、 $B_{c2}=14T$ が得られる温度を 15K から 21K にまで高めることができたとして述べた。酸素原子が電子散乱中心となって B_{c2} が増大したとしている。

その他、韓国の Korea Univ.や Korea Institute of Materials Science からも PIT 法 MgB₂線材の発表があった。研究は始まったばかりでまだ高いレベルではないが、昨年に MRI を最終目標とした 5 年間で約 10 億円の MgB₂プロジェクトがスタートしたとのことで、今後その研究開発が活発になることが

予想され、近いうちに世界のトップレベルに躍り出てくることも考えられよう。

Nb₃Sn 線材についても加速器などへの応用を志向したかなり多くの発表があった。Ohio State Univ. のグループは、内部酸化法を適用した PIT 線材について発表した。Nb-1%Zr 合金粉末ならびに SnO₂ + Sn 混合粉末を用いて線材を作製しているが、熱処理中に SnO₂ が Zr によって還元されて ZrO₂ が微細に析出し、これによって Nb₃Sn の結晶成長が抑制されて 30nm 程度の微細結晶の Nb₃Sn を生成させることができたと述べた。これによって F_p - B 曲線のピークが強磁界側にシフトして強磁界での J_c が改善されたとしている。また、Sn-Ti 合金粉末を使うと不可逆磁界が大幅に上昇すると共に、Nb₃Sn の成長速度が上昇するが、Nb₃Sn の結晶粒径にはほとんど影響を及ぼさないと述べた。

Florida State Univ. のグループは、Ti ならびに Ta 添加した Restack Rod Process (RRP) による内部 Sn 法 Nb₃Sn 線材について報告した。Ti 添加に比べて Ta 添加の方が若干高い T_c (onset) が得られるが、Ti 添加の方が Ta 添加よりも T_c の分布が狭いなど、より均一な線材が得られると述べた。これは Ti が Sn の拡散を促進して Sn の分布がより均一になるためとしている。また 12T 近傍では J_c は Ti 添加線材と Ta 添加線材ではほとんど変わらないが、 T_c の均一性を反映して Ti 添加線材の方が外挿で得た B_{c2} が 2T ほど高く、強磁界応用には Ta 添加線材よりも適するとしている。

会議報告 : 2016 Applied Superconductivity Conference (September 4-9, 2016)

「材料分野 (コート線材関連)」

九州工業大学 松本 要

2016年9月に、米国デンバーにて ASC2016 が開催された。ここでは、特に「Critical current and Flux pinning」と「Coated conductors: Flux pinning」に関わるセッションにおいて報告された内容に関してレポートする。

初日は、最初に米カンサス大の Wu から傾斜単結晶基板状に形成したナノロッド入り超伝導薄膜の結果が報告された。基板傾斜角度が 0.5 度以下 およびピン濃度が 5% 以下の領域ではロッドが c 軸配向するがそれ以外の領域では a 軸配向した。これは傾斜基板とピン濃度を調整することで 1 次元ピンおよび 2 次元ピンを導入できる可能性があることを示している。名大の三浦は 4.2 K, $B//c$ において、LTG (Low Temperature Growth) 法により SmBCO 薄膜を作製し $F_p = 1.6 \text{ TN/m}^3$ を、HTG (High Temperature Growth) 法 SmBCO では 1.3 TN/m^3 の値を達成した。LTG 法ではランダムピンの効果が顕著であり、HTG 法ではランダムピンとコラムナーピンの両方の効果があった。九工大の Alok は 211 相ナノ粒子を導入した薄膜の磁場印加角度依存性について報告した。ナノ粒子と積層欠陥の密度を考慮することで角度依存性が定量的に説明できることを示した。イタリア ENEA の Rizzo は BYTO, BYTO/BYNO ナノロッドを導入した薄膜を STO 基板上に作製し、4.2 K@12 T において 1 TN/m^3 を得たと報告した。一方、ABAD (Alternating Beam Assisted Deposition) 基板上では $400 \text{ GN/m}^3@10 \text{ K}$ であった。独 KIT の Sieger は ISD (Inclined-Substrate Deposition) 基板を模した微傾斜 STO 基板上に BHO 入り YBCO 薄膜を形成し、MOI (Magneto Optical Imaging) 法を用いて長手方向と横方向の J_c 分布を検討し、微傾斜 5~10 度が良いとの結果を得た。米 LANL の Civale はナノ粒子をドーピングした MOD 法薄膜に関してクリープレート S を用いて議論した。ナノ粒子によって S は小さくなるが、加えて重イオン照射をすると S は増大した。この理由については今後の課題とした。九大の井上は厚膜化に有利な BHO 入り EuBCO 薄膜線材の 25 T までの J_c 特性について報告した。25 T@4.2 K において 1500 A/cm-w の値が維持されていることが確認された。

二日目は、米 AFRL の Haugan から多層膜 PLD 法と単一ターゲット PLD 法に関する報告があった。単一ターゲット法ではピン濃度を 5% 以上にすると T_c が劣化するが、多層膜法では 10% 程度まで T_c 劣化は起こらないことを示した。名大の土屋は LTG 法による BHO 入り SmBCO 薄膜の低温における J_c の磁場角度依存性を調べた。これよりピン濃度を変化したときのランダムピンおよびコラムナーピンのどちらが優勢になるかを詳細な磁気相図にまとめた。独 IFW の Hanisch は PLD 法による BYNO 入り YBCO 薄膜の J_c 最適化の報告を行った。77 K において 25 GN/m^3 を得ているが、レーザー周波数を 5 Hz 以上にすると T_c 劣化が起こると述べた。スペイン CSIC の Valles は CSD 法によるナノ粒子入り YBCO 薄膜のピン止め起源について TEM 結果を元に議論した。ナノ粒子近傍の積層欠陥がピン止めに有効であることを、新しいモデルを用いて説明した。名大の吉田は BHO ドープ SmBCO における一連の成果について報告した。LAO 基板上で $1.6 \text{ TN/m}^3@4.2 \text{ K}$ 、IBAD 基板上で $1.3 \text{ TN/m}^3@4.2 \text{ K}$ が得られたこととともに、77 K でも 32 GN/m^3 の高い値が得られたことを示した。産総研の和泉は TFA-MOD 法において、マルチコートプロセスに改良を施すことで YGdBCO 薄膜線材中に微細なナノ粒子を 30 nm の間隔で導入することに成功した。その結果、磁場中 J_c が従来に比べて大幅に増大することを報告し、低コスト線材として有望なプロセスであることを示した。米ヒューズ大の Selvamanickam と Majkic はアドバンスド MOCVD 法による最新の成果について報告した。この方式では、基板に 50 A 以上の電流を流す通電加熱法が採用されており、 a 軸粒の抑制に効果があるとのこと。また BZO ナノロッド直径が 7-8 nm から 2-3 nm への制御に成功し、ピンを高濃度にドーピングすることで 77 K と 30 K の J_c を比較するリフトファクターが大幅に向上したとのことであった。

四日目と最終日にも関連する複数のセッションがあった。フジクラの飯島は、Hot-wall 型 PLD を用いたナノロッド入り REBCO 薄膜線材の最新の成果について報告した。製膜レートを変化させた場合の人工ピンの効果を検討し、遅いレートで製膜した場合は $1.6 \text{ TN/m}^3 @ 4.2 \text{ K}$ が得られたことを示した。韓国ソウル大の Yoo は RCE-DR (Reactive Co-Evaporation by Deposition and Reaction) 法では 120 m/h の製造速度が得られていることと、直径が 100 nm のナノ粒子を制御することで磁場中 J_c が向上していることを報告した。スペイン CSIC の Obradors は CSD 法によってナノ粒子をドーピングすることで $600 \text{ GN/m}^3 @ 10 \text{ K}$ の値が得られると報告した。その起源としては、ナノ粒子周囲に形成される積層欠陥が主であるとした。九工大の松本は、PLD ターゲット交換法によって作製した BHO ナノロッド入り GdBCO 薄膜において、 $1 \text{ TN/m}^3 @ 10 \text{ K}$ が得られたことを報告した。この薄膜の J_c の温度依存性を調べたところ、薄膜に特有な δL ピンニング機構に従うことを示した。これ以外にも、米 NHMFL の Tarantini による鉄系超伝導体の人工ピンや、スイス CERN の Spina による Nb_3Sn への人工ピン導入の試みなどが報告された。

事務局から

ISS2016 のプログラムが確定しました

つくば応用超電導コンステレーションズ (Applied Superconductivity Constellations of Tsukuba (ASCOT)) は、今年6月に解散した国際超電導産業技術研究センター (International Superconductivity Technology Center (ISTEC)) から、「超電導 Web21」の発行とともに、国際超電導シンポジウム International Symposium on Superconductivity (ISS) の開催を引き継いでおります (<https://www.tia-nano.jp/ascot/iss2016/index.html>)。

第29回目に当たる今年は、12月13～15日に有楽町駅そばの東京国際フォーラムで開催します。おかげさまで、招待講演・Late Newsを含めて、昨年度の発表総数289件を上回る321件の発表が予定されております。既にプログラムが確定し、以下のページに公開されております。

<https://www.tia-nano.jp/ascot/iss2016/program/program.html>

参加の事前登録はすでに締め切りましたが、当日参加も受け付けております。参加費等の条件は以下のページに記載されていますので、皆様の積極的な参加をお待ちしております。

<https://www.tia-nano.jp/ascot/iss2016/participants/registration.html>