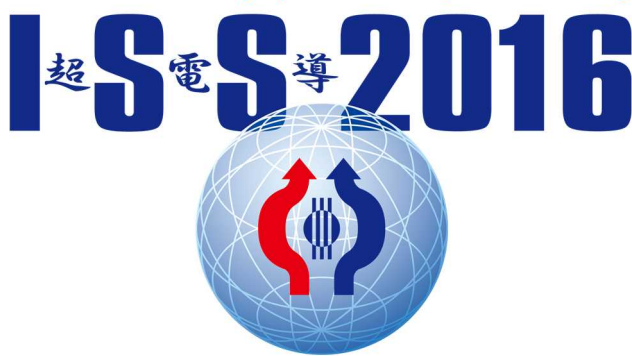


会議報告: 29th International Symposium on Superconductivity (December 13–15, 2016)

「全体概要」

国立研究開発法人産業技術総合研究所 ISS2016 事務局 沖 健志朗

29th International Symposium on Superconductivity


 TOKYO INTERNATIONAL FORUM, JAPAN
December 13-15, 2016

国立研究開発法人産業技術総合研究所は、平成28年12月13日(火)～15日(木)の3日間、東京国際フォーラム(東京都千代田区)にて第29回国際超電導シンポジウム(ISS2016)を開催した。今回は、主催が国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)から産総研に移管されて初めてのシンポジウムの開催となった。

ISSは、国内外の超電導に関する研究や技術開発の成果発表と国際交流を通して、超電導産業技術の開発と実用化の促進、一般社会への普及・啓蒙を図ることを目的に毎年開催

しており、今年で29回目を迎えた。今回は、海外参加75名(前回105名)を含めて参加者数は427名(前回454名)、参加国数は15ヶ国(前回15ヶ国)とほぼ昨年と同規模となったが、海外参加者がかなり減少したことから、次回は海外招待者を増加させる対応を図っていきたい。

一方、発表数は招待講演者44名(前回50名)を含め口頭講演111件(前回129件)、ポスター講演210件(前回160件)の合計321件(前回289件)となり、合計数は前回から約1割増加した。

講演の論文は査読を経た後、ProceedingsをIOP Publishing社のオンラインジャーナルJournal of Physics: Conference Seriesで刊行する予定となっている。

初日は、オープニングセレモニーとして、経済産業省保坂伸大臣官房審議官とNEDO 渡邊重信省エネルギー部長のご挨拶をいただき、金山敏彦 ISS2016 実行委員会委員長の特別講演が行われた。引き続き、バルセロナ材料科学研究所のXavier Obradors教授による“Progress in the Development of Nanostructured Coated Conductors in Europe”と題した講演から始まり、大阪大学基礎工学研究科附属極限科学センターの清水克哉教授による“High Pressure Superconductivity in Sulfur Hydride”など6件の基調講演が行われた。その後、ガラス棟会議室において、1回目のポスターセッションが盛況に行われた。

2日目、3日目は、物理/化学、線材/バルク、電子デバイスおよびシステム応用の4分野に分かれて、口頭発表ならびに2回目のポスターセッションが行われた。それぞれの分野とも、関係する発表の後、熱心な討議が行われていた。

3日目午後のクロージングでは、ISS2016 実行委員会の岡田事務局長より、今回のシンポジウムの概括報告と来年のISS2017が12月13日～15日にイイノホール(東京都千代田区)で開催されることが紹介された。

ISS2016 Report



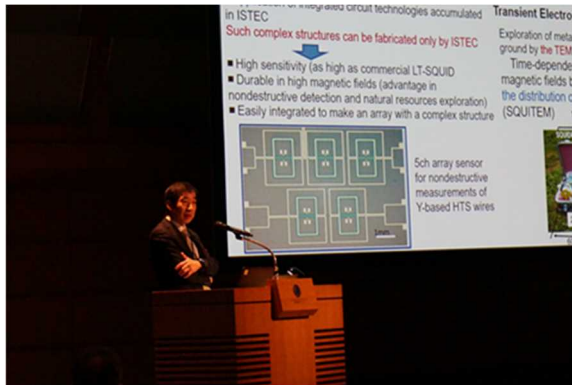
(国研) 産業技術総合研究所 T I A 推進センター 〒305-8560 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第1 Tel: 029-862-6122



経産省保坂大臣官房審議官のご挨拶



NEDO 渡邊省エネルギー部長のご挨拶



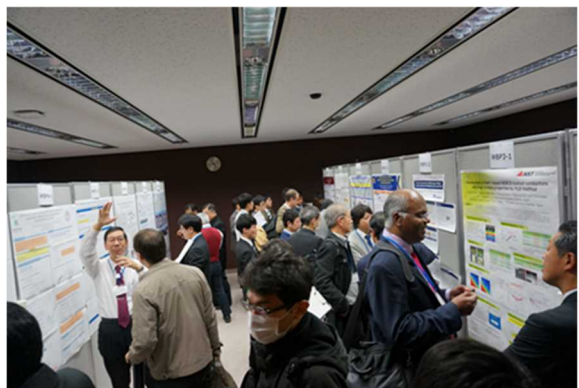
金山 ISS2016 実行委員長の特別講演



バルセロナ材科学研 Obradors 教授の基調講演



阪大極限科学センター清水教授の基調講演



ポスターセッション状況



オーラルセッション状況



会議報告 : 29th International Symposium on Superconductivity (December 13–15, 2016)

「Physics and Chemistry 分野」

東京大学大学院工学系研究科 為ヶ井 強

会議の運営が産総研 (AIST) に移行して第1回目の ISS2016 においては、これまで Physics and Chemistry/Vortex Physics と称してきた分野を、Physics and Chemistry という名称に統一している。しかし、内容を見ると、これまでと同様に超伝導体の物理、化学に加え、磁束物理を含む臨界電流関係の内容も含んだ分野となっている。

今回も多数の発表があり、口頭発表、ポスター併せて 80 件強の発表があった。初日の Plenary Lecture セッションでは、硫化水素における高温超伝導の確認と超伝導相の構造に関する最新の結果を Shimizu (阪大) が紹介した。ドライアイスの温度 (194 K) を超える高温超伝導が、ますます確実なものとなってきたと言えよう。

2日目、3日目には、全体で 35 件の口頭発表があった。招待講演 25 分、一般講演 15 分と短めの講演時間ではあるが、内容の濃い講演が多数あった。もちろん、ポスター発表にも優れたものが多数あったが、紙面の都合上、口頭発表のみを紹介する。

2日目は鉄系超伝導体に関する発表から始まった。Iyo (AIST) は、122 系から派生した $AeFe_4As_4$ ($Ae = Ca, Sr, Eu, A = K, Rb, Cs$) の発見と、その超伝導特性を紹介した。Ogino (AIST) は、As 鎖というユニークな構造を内包する 112 系において、Ca のサイトに Eu と La を入れることにより、超伝導が発現することを報告した。Nohara (岡大) は、 $Sr_{1-x}Ba_xNi_2P_2$ において、P-P 結合の有無による構造転移が超伝導特性に与える影響を調べた。Ishii (物性研) は、 $BaTi(Sb_{1-x}Bi_x)_2O$ において Bi 置換量により T_c が 2 ドーム構造を持つことを報告した。Sato (東北大) は、 $TiSe_2$ と $MoSe_2$ に Li と有機分子を同時に挿入することにより、超伝導が発現することを発見した。Ohgushi (東北大) は、Fe-S が梯子構造を持つ $BaFe_2S_3$ に 10 GPa 以上の高压を印加することにより、超伝導化 ($T_c \sim 24$ K) することに成功した。この発見を受け、Arita (RIKEN) は第一原理計算により $BaFe_2S_3$ の電子構造を調べ、フェルミ面付近の状態が $3d_{xz}$ と $3d_{x^2-y^2}$ で表されること、また、電子相関が 1111 系より強いことを見出した。Tanaka (NIMS) は、相分離が起きていることが知られている $K_xFe_{2-y}Se_2$ の構造の詳細を、微視的な組成分析により明らかにした。Hosoi は、 $FeSe_{1-x}S_x$ において斜方晶が消える $x \sim 0.17$ 付近が、ネマティック感受率が発散する量子臨界点となっていることを見出し、超伝導特性との関係を議論した。Urata (名大) は、NdFeAs (0, F) 薄膜を様々な基板上に MBE 法により作製し、その物性を評価した。Nakayama (東北大) は、バルクで 10 K 足らずの T_c しか持たない FeSe が単層化することにより 50 K 以上に T_c が上昇する原因を、高分解能角度分解光電子分光測定から詳細に議論した。Shiogai (東北大) は、薄片化した FeSe を電気化学的にエッチングすることにより薄くし、電場を印加することによっても高温超伝導が発現することを見出した。また、Ueno (東大) は、 $FeSe_{1-x}Te_x$ 薄膜を用いて電気 2 重層トランジスターを形成し、高温超伝導を発現させることに成功した。Kittaka (物性研) は、重い電子系における超伝導研究のきっかけとなった $CeCu_2Si_2$ における詳細な比熱の測定から、この系にはこれまで言われていたようなギャップノードが存在しないことを示した。Takenaka (東大) も $CeCu_2Si_2$ における磁場侵入長の精密測定と、その電子線照射による効果から、フルギャップであると結論付けた。Kwok (アルゴンヌ国立研究所) は、パーマロイに電子線リソグラフィーにより微細加工を施しスピンアイス構造を作製し、その上に蒸着したアモルファス MoGe 中の磁束量子の制御に成功した。Tamegai (東大) は、 $BaFe_2(As, P)_2$ における磁束のピン止めとダイナミクスを、電子線により欠陥導入した試料と未照射試料を比較することにより詳細に議論した。Fujita (阪府大) は、微小な d 波超伝導体を s 波

超伝導体で囲んだ素子における、双晶境界の影響を詳細に検討した。Mele (室蘭工大) は、Nd、Eu、Gd を混ぜた NEG-123 ターゲットを用いて PLD 法により薄膜を作製し、その特性を報告した。Crisan (ルーマニア国立研究所) は、Ag によるシーディングや多層膜化を組み合わせた YBCO 薄膜における、点状・線状ピン止中心の効果を広範囲に調べた。Ooi (NIMS) は、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ 単結晶を FIB 加工により微細化し、その中における少数の磁束量子が引き起こす融解転移を、様々な形状の試料について詳細に調べた。Kita (北大) は、磁場印加下における超伝導電流に対するローレンツ力を定式化し、磁束量子コアのチャージングについて議論を行った。Dobroka (東工大) は、様々な条件により初期状態を準備した磁束系が、過渡応答において示すメモリー効果を、詳細に研究した。Kitano (青学大) は、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ からなる微小 SIS 接合における高次のスイッチング特性に対するマイクロ波照射効果を調べた。Adachi (名大) は、縦磁場配置における磁束量子系のダイナミクスを時間依存 G-L 方程式のシミュレーションにより扱った。

3日目は、Fukumura (東北大) による Bi^{2-} が正方格子を組む $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Bi}$ における超伝導 ($T_c \sim 2 \text{ K}$) の発見の報告から始まった。過剰酸素の導入が超伝導発現に重要とこのことである。Saito (東大) は、2次元超伝導体における量子グリフィス相の存在を報告に加え、 MoS_2 薄片にイオン液体を用いて強電場印加することにより、面平行な H_{c2} が常磁性リミットを越えること、及び、非相反超伝導電流の観測を報告した。Ichioka (岡大) は、電場誘起超伝導体における面平行磁場下での対破壊効果に対する考察を行った。Jinno (首都大) は、 BiS_2 系における超伝導に対する化学圧力の効果を $\text{Eu}_{0.5}\text{La}_{0.5}\text{FBiS}_{2-x}\text{Se}_x$ を用いて調べた。Putzke (ブリストル大) は、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ の高圧下での量子振動を詳細に測定し、この系における準粒子の質量が、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ と異なり、 T_c 増大に伴い減少することを見出した。Kusafuka (名大) は、ナノロッドの直径が大きい $\text{Ba}_2\text{SmNbO}_6$ と小さい BaHfO_3 を同時に導入した SmBCO を薄膜の特性を調べ、 J_c - B 特性に2種類のプラトーが生じることを確認した。Ishida (東大) は、 $\text{Bi}2212$ におけるネマチック揺らぎを詳細に調べるために、Pb 置換した単結晶における電気抵抗の応力依存性を詳細に調べた。Goryo (埼玉大) は、六方晶の SrPtAs で生じる可能性があるトポロジカルに保護されたカイラル d 波状態に関し、詳細な理論的検討を行った。Hoshino (RIKEN) は、 A_3C_{60} において、有効フント結合が負になることにより、軌道依存のモット転移が生じることを示した。

会議報告: 29th International Symposium on Superconductivity (December 13–15, 2016)

「Wires and Bulk 分野」

株式会社フジクラ ^a、(国研) 産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 ^b飯島 康裕 ^a、吉田 良行 ^b

本分野のセッションでは、口頭発表 24 件（うち基調講演を含めた招待講演 14 件）及び、ポスター発表 59 件があった。

基調講演では ICMA/CSIC の Obradors により欧州で 9 カ国 21 機関が参加するコンソーシアム: EUROTape の動向が紹介された。新たな試みでは、ABAD (Alternating Beam Assisted Deposition) 法中間層と溶液塗布法を組み合わせた開発例として、インクジェット印刷による超電導層の I_c が 240 A/cm (77 K, 0 T) に達したことが紹介された。また先駆的人工ピン開発として、2 層ペロブスカイト材料やナノ粒子分散技術の動向等が紹介された。また、産総研の岡田により日本の国家プロジェクトを主体とした超電導技術開発の進展と新しいコンソーシアム: ASCOT 設立についての報告があった。

HTS 線材セッションでは、米国 Houston 大の V. Selvamanickam から、線材表面温度を精密に制御した新しい MOCVD 法により、高い磁場中特性を有する REBCO 線材を得たとの報告があった。人工ピンとして Zr を 15% 添加しており、 I_c は 8,705 A / 12 mm (@30 K, 3 T, $B // c$, 超電導層膜厚 4.2 μm) という非常に高い値であった。また、米国 DOE より新たな産業機器向け超電導線材開発助成プログラムが発足することが決まり、米国の 3 グループ (Houston 大/SuperPower 社、AMSC 社、STI 社) にそれぞれ 4.5 M \$ / 3 年の予算がつくと紹介があった。NY 州立大の A. Goyal は、2 層ペロブスカイトを含む各種のロッド状第二相による人工ピンについて、微視的観察による格子歪の評価結果を紹介し、低温領域の磁束ピン力との相関を示唆した。九工大の松本からは REBCO 線材の人工ピン開発について、ポテンシャルが極めて大きいこと、多くの可能性が未着手であり大きなチャンスが広がっていることが紹介された。

九州大の木須及び、井上からは、長尺 REBCO 線材における磁場中を含む長手方向 I_c 分布の統計的挙動解析についてのこれまでの進展、及び、77 K、磁場中 I_c と低温磁場中 I_c との相関性について紹介された。今後高い均一性が期待される人工ピン導入線材、及びスクライブ構造等を有する REBCO 線材開発のための有用な評価ツールとなる事が期待される。また、REBCO 線材の 2 次元特性分布評価技術として、九州大の東川からは Reel to Reel SHPM (Scanning Hall-Probe Microscopy) を用いた超電導層をスクライブした線材の各フィラメント I_c の長手分布や、Roebel ケーブル用線材素線の I_c 分布の測定結果等が紹介された。

次に線材メーカーとしてフジクラの飯島より、IBAD 中間層上において、ホットウォール PLD 法による 300 m 長の EuBCO-BHO 人工ピン線材の作製が報告された。得られた I_c は 1,755 A / 10 mm (@30 K, 2 T, $B // c$, 超電導層膜厚 2.6 μm) であり、成膜レートは 20 nm/sec 以上という高速レートであった。長手方向の I_c 均一性は 2.6% (Standard I_c deviation / Average I_c) であった。SuperOx Japan の Lee は、最近の SuperOx の成果と今後の開発予定について報告し、12 mm 幅換算でピン無し線材を 200–300 km/year 生産するという中期目標を発表し、事業展開の拡大が印象に残った。一方、唯一の Bi2223 系メーカーとして、住友電工の山崎は、高強度 Ni 合金をラミネートした DI-BSCCO 線材 (Type HT-NX) について最近の進展を報告した。単長 600 m の線材サンプルが作製されると共に、低接続抵抗、高機械特性を有する Type HT-NX 同士の新しい接合構造についての報告もあった。

また、産総研の和泉より、日本における PLD 法および MOD 法による人工ピン入り REBCO 線材の開発状況が報告された。MOD 法においては、九州大の寺西より MOD における BHO 粒径をコントロールする報告があったほか、昭和電線の木村からは MOD による人工ピン入り REBCO 線材の

開発状況の報告があった。人工ピンとして従来の BaZrO_3 に代えて BaHfO_3 を導入することで従来特性の2倍近い J_c (@77 K, self-field) = 4 MA/cm² の特性を得たとの事であるが、PLD で大きく改善した膜厚依存性については課題となっている。以上、銅酸化物系線材については、Bi2223 系に続いて REBCO 系の量産体制が着実に進むと共に、人工ピンや多芯化等の線材高性能化技術が、評価技術と相まって世界的規模で進展している様子が理解された。

一方、 MgB_2 系及び鉄系超電導線材の開発状況については、NIMS の熊倉より総合的な報告があった。 MgB_2 については内部 Mg 拡散法により J_c (@20 K, 4 T) = 1,500 A/mm² という高い値が得られており、100 m 級の線材を試作中との事である。鉄系については Ag-Sn 合金のダブルシーブ PIT 法で J_c が向上しており、 J_c (@4.2 K, 10 T) = 1,000 A/mm² という値が得られている。鉄系については、中国の Zhang 等からも LATE NEWS として 100 m 級の線材の作成について紹介された。

また、バルク超電導に関しては、Cambridge 大の Durrell らによる RE123 バルク試料での世界最高捕捉磁場 (17.6 T@26 K) の報告とともに青山学院大の下山による日本における RE123 バルク試料の現状と展望の報告があった。また、韓国からは、Y123 バルク試料の作製方法に関する報告があった。 MgB_2 バルク試料の報告については、岩手大の内藤による 16.2 K での 2.4 T の捕捉磁場の報告など MgB_2 においても多くの報告がなされ、低コストなバルク応用の可能性として関心が高まっている様子が伺われた。

会議報告 : 29th International Symposium on Superconductivity (December 13–15, 2016)

「Electronic Devices 分野」

(国研) 産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門 日高 睦夫

Electronics (ED)では19件の口頭発表と29件のポスター発表が行われた。内訳は作製プロセス9件、マイクロ波4件、SQUID9件、検出器13件、デジタル11件、量子ビット2件であった。

PlenaryでNIMSの原から、走査透過電子顕微鏡(STEM)に搭載された超電導遷移端検出器(TEs)によるX線材料分析応用の話があった。耐熱鋼には強度などの特性を向上するために13種類の元素が様々な手法で添加されており、耐熱鋼構造のどの位置に各添加物が存在することで特性向上が得られているかを知ることが望まれている。しかし、既存の半導体検出器ではエネルギー分解能が最高でも130 eVと十分でなく元素の種類を確定できないという問題点があった。STEMに搭載されたTES-X線材料分析システムは、7.8 eVのエネルギー分解能で13種類の元素を全て分けて検出することができる。この装置に使用した0.1 K冷凍機は、希釈冷凍機とGM冷凍機を組み合わせたもので、50 μ Kの安定性を保って半年間動作できることが確かめられた。一方、TESのカウントレートは300 CPSと半導体検出器の20 kCPSと比べてはるかに小さく、測定に時間がかかるという問題点があった。NIMSはJAXA、九大、日立ハイテクサイエンス、日立ハイテク、大陽日酸、産総研と共同でSTEMに搭載可能な64ピクセルTESシステムを開発しており、来年度からNIMSにおいてユーザーに公開される予定とのことであった。

理研の猪股らから、量子通信や量子情報処理において不可欠のツールとなる共振器を用いた光子数検出器の報告があった。量子ビットに関連する光子はマイクロ波帯の小さなエネルギーが特徴である。 Λ タイプと呼ばれる三準位を利用することで、量子効率0.66 \pm 0.06、ダークカウント確率0.014 \pm 0.001、リセット時間 \sim 400 nsの良好な光子検出が実証された。この光子検出器は他のマイクロ波量子光学コンポーネントと容易に組み合わせることができるため、量子情報処理における基本要素となることが期待できる。理研のLinらは量子ビットの読出しに用いる磁束駆動のジョセフソンパラメトリックアンプ(JPA)について述べた。彼らのJPAはS/N比を向上しており、量子ビットのシングルショット読出しにも成功している。またこのJPAは位相同期発振器としても動作し、高速、高忠実度、非破壊読み出しが実証されている。

Chalmers工科大のOlssonらはAl/AlO_x/Alジョセフソン接合(JJ)トンネルバリアをSTEMで観測し、その画像強度プロファイルからAlO_x膜厚の分布を測定した。その結果、約2 nmのトンネルバリア膜厚において \pm 10%ほどの不均一があることがわかった。JJの臨界電流密度はトンネルバリア膜厚に対して指数関数的に変化するため、電流の90%はJJ面積の10%以下の領域で流れているという驚くべき結果が報告された。酸化ガス圧と酸化時間を3点ずつ変えた実験結果からは、酸化時間が長いほどトンネルバリア膜厚均一性が向上する傾向が得られている。Olsson研究室のZengらからAl-SiO₂界面のSTEM観察結果が報告された。超電導量子ビットデコヒーレンスの主要因はJJ周辺の絶縁体にあることがわかってきている。特にJJと基板との界面の影響が大きいと言われている。基板表面のSiO₂とAlとの界面が調べられ、界面付近5 nmの領域にAl、Siと酸素の混合物形成が観察され、欠陥準位の存在が示された。また、Alとフッ酸処理されたSi基板の界面にもAl、Siと酸素の混合物の存在が示唆される結果が紹介されたが、こちらの方は慎重な再試験が必要であると思われる。国立天文台のKrougらはNb/Al-AlO_x/Nb接合のトンネルバリアAlO_x上に膜厚が下部Alの半分程度のAlキャップ層を成膜することで、10 kA/cm²以上の高臨界電流密度を有するJJのリーク特性が劇的に改善できることを示した。このキャップ層がない場合は上部電極Nb成膜

時に Nb が AlO_x 中の酸素と反応し、実効的なトンネルバリア膜厚が低下するためリーク電流が増加するとの説明がなされた。キャップレーヤーを設けた臨界電流密度 25 kA/cm^2 、 $R_{\text{SG}}/R_{\text{N}} = 20$ の JJ を用いて 400–500 GHz 電波天文用受信器のテストが成功裏に行われた。産総研の永沢らから SiO_2 成膜方法改善による超電導デジタル回路プロセス歩留まりの大幅向上が報告された。最近産総研では SiO_2 膜成膜方法がバイアススパッタ法から PECVD 法に変更された。この変更前後に作製された Nb9 層プロセスを用いた SFQ シフトレジスタ回路のイールドから SiO_2 膜成膜方法変更が歩留まりに及ぼす効果が検証された。その結果、従来 13,000JJ に 1 個の割合であった欠陥率が 100,000JJ に 1 個の割合に大きく向上した。これは、PECVD 法により SiO_2 膜中のパーティクル数が大きく減少したためだと考えられる。

横国大の Ayala らから断熱型量子磁束パラメトロン (AQFP) 回路の大規模化に向けた設計スキーム開発が報告された。最適化されかつ他セルとの接続性が保証された 4 個の基本セルからなる最小のセルライブラリが構築された。これらのセルにハードウェア記述言語 Verilog HDL を用いてタイミング情報が付加された。また自動配線ツールも開発されている。名大の田中らは世界で初めて完全動作に成功したメモリ内臓 SFQ プロセッサについて述べた。この回路では、必要とされる動作速度に応じて動作電圧が選択され低消費電力化を図る工夫が行われている。メモリはシフトレジスタ型 RAM が用いられており、命令及びデータが記憶される。この回路はビットシリアルであるが、より高性能が期待できるビットスライスやビットパラレル形式も開発されており、4 ビットスライス ALU の 50 GHz 動作および 8 ビットパラレル ALU の 50 GHz 動作に成功している。電通大の水柿らはフラックス増倍回路 (DFQAs) において入力パルス間隔変動により、DFQAs 回路の動作が高入力電圧側で劣化することをシミュレーションと実験両方から見出した。

豊橋技科大の田中は食品検査システム用に開発している極低磁場 (ULF) MRI の報告を行った。ULF-MRI は通常の MRI と比較して小型、低コスト、磁場均一性への要求が緩やかという利点があるが、信号が極端に小さいため SQUID による信号検出が不可欠になる。豊橋技科大では高温超電導 SQUID を核にした ULF-MRI システムを開発している。このシステムでは、試料は永久磁石で偏極された後 Cu 製のピックアップコイルが設けられた測定エリアまで搬送される。2D 高速フーリエ変換を用いた信号処理により比較的鮮明な水の画像が観察された。SUSTERA の波頭らから高温超電導 SQUID を用いた CO_2 探査システムの報告があった。石油に CO_2 を混ぜることによって、油田における石油の収量が大幅に増加することが知られており、油田において CO_2 が石油に浸透する様子を観察することが重要となってきている。SQUID の高感度特性はこの CO_2 モニタリングに極めて有効であると期待されている。一方、この応用では SQUID は水深 7000m に相当する 70 MPa の圧力、200 °C の高温環境で動作する必要がある。また、SQUID は地下 3000 m に設置されるため、そこへの信号伝達、蒸発した窒素ガスの回収が必要となる。SUSTERA ではこれらの課題を解決できるシステムを開発し、地下 300 m に SQUID システムを設置した実験において、800 m 離れた場所で発生した信号を検出することに成功した。近大の廿日出らは超音波による磁歪を利用したパイプ欠陥の高温超電導 SQUID 非破壊検査システムを開発している。Ni、Co、Fe を材料とするパイプに適用でき、SQUID のパイプからのリフトオフが 20 mm 以内であれば、長さ 100 m まで欠陥検出が可能なことが示された。阪大の横町らは高透磁率プローブを用いて STM と同時に磁場分布が観測できる高温超電導 SQUID 顕微鏡の進捗を報告した。従来このシステムの磁場像は鮮明でなかったが、その原因がプローブ側面で検出される測定点以外からの磁場にあり、この磁場はプローブの高さを変えることでキャンセルできることを見出した。プローブ高さを変調することで空間分解能 100 nm 以下の鮮明な磁場像を得ることに成功した。

国立天文台の小嶋らから ALMA 用 SIS ミキサの報告があった。ALMA はチリのアタカマ高原に設置された 66 台のアンテナからなる巨大電波望遠鏡である。35 GHz から 950 GHz の周波数領域を 10 個のバンドに分け、それぞれの周波数帯に応じた SIS ミキサが使用されている。国立天文台は最高周

波数帯のバンド 10 を含む 3 バンドの開発を行い、それぞれ 7 台の予備機を含む 73 台のヘテロダイナ受信機が納入されている。今後は、1.6 THz 帯のバンド 11 開発、マルチピクセル化、超広帯域受信機の開発を行っていくとのことであった。岡山大の石野らはダークマター探索に向けて開発中の超電導検出器 LEKIDs について述べた。ダークマターと相互作用した液体ヘリウムが、波長 80 nm (エネルギー 16 eV) のシンチレーション光を発生し、それを検出することでダークマターの確認を行うという提案が 3 年前になされた。石野らは Nb または NbN からなるクロストークが 1% 以下の LEKIDs および室温信号処理系の準備を進めている。筑波大の鈴木らからビッグバン以前の空間の急激な膨張 (インフレーション) 観測に向けカナリア諸島に設置された GroundBIRD の報告が行われた。GroundBIRD は CMB の B モード偏光を観察するためのもので、検出器には 145 GHz と 220 GHz 観測に対応した Al もしくは TiN を材料とする MKID が使用されている。検出器は理研のマスクアライナーと国立天文台のステッパーを用いるハイブリッドプロセスで作製されている。東大の高橋らから Ir を材料とした小型 TES の報告があった。Ir-TES には熱伝導が小さく面内でばらつきが出るという欠点があるが、転移温度が 113 mK と極低温冷凍機冷却に適した温度であることに加え、高抵抗であるため信号伝達が速いという利点がある。高橋らは光子数検出応用に向けた小型 Ir-TES の開発を行っている。大阪府大の石田らは CB-KID を用いたイメージング検出器の開発を行っている。CB-KID は入力信号によってクーパー対が破壊されることに起因するカイネティックインダクタンスの時間変化を利用した検出器である。この検出器では幅 1 μm 、全長 52.5 μm のミアンダ型ナノワイヤを XY 二方向に設置し、信号入力により発生する正負のパルスペアが両端に到達する時間を測定することにより、信号入射位置を特定することができる。レーザー光を使った実験によりイメージングが可能なが示された。

会議報告 : 29th International Symposium on Superconductivity (December 13–15, 2016)

「Large Scale System Applications 分野」

株式会社日立製作所 和久田 毅

大規模応用分野では、医療応用、電力応用、加速器など幅広い領域にわたる超電導応用の研究・開発についての報告や欧州や韓国における超電導応用開発状況についての概説が行われた。以下、筆者が興味を持った講演を中心に報告する。

NHMFL(USA)の H. W. Weijers らは 32 T オール超電導マグネットの開発状況を報告した。本マグネットは 15 T の LTS 磁石に 17 T の REBCO 磁石を組み合わせ 32 T の強磁場を発生するもので、20 年以上にわたって材料研究に供される予定である。磁石は 4.2 K の液体ヘリウム浸漬冷却であり、LTS 磁石と HTS 磁石は同一クライオスタット内に設置、別々の電源で駆動される。LTS 磁石は内側 3 層の Nb₃Sn コイルと外側 2 層の NbTi コイルから構成され、ボア径は 250 mm、定格 268 A で磁場強度 15.0 T を発生。HTS 磁石はコイル巻線内径 40 mm の 2 層ダブルパンケーキコイル構成で内側 20 段、外側 36 段、定格運転電流は 174 A。内側のコイル電流密度は 200 A/mm²、外側は 170 A/mm² と絶縁コイルながら高電流密度設計。磁気力によってヘリウムガスがコイル上部に滞留してしまうため、放射状のヘリウムチャンネルと銅製の熱伝導ストリップを備えたクーリングディスクが、コイルの上面に設置されている。

HTS コイルは機械的損傷がない限りクエンチしないため、HTS コイルへの損傷を与えないことが（例えば LTS がクエンチしても）基本思想。HTS コイル保護はクエンチヒータにより巻線全体をノーマル状態に転移させるアクティブ保護方式で、局所発熱による焼損や LTS 磁石ダンピング過程での電流乗り移りによる電磁力増大を防止する。ヒータはパンケーキ層間にミアンダ状の鉄シートをカプトンシート絶縁と FRP 補強を介して配置される。

クエンチシミュレータを開発しプロトタイプ磁石(27 T)での実測データをシミュレーションにフィードバックして、様々なケーススタディを行うことにより安全な運転条件を決定している。クエンチシミュレーションはコイルの I_c に敏感。32 T 磁石ではプロトタイプ磁石よりも温度マージンが大きい設計となっているためより多くのヒーターパワーを必要とする。コイルが配置される位置によって温度マージンが 10–40 K (I_{op} が I_c の 1/10–1/3) と大きく違うため、すべてのダブルパンケーキコイルの温度マージンを 10–20 K に揃えることが望ましいとのこと。20 年間での 50000 回の励消磁を想定し過負荷条件での繰り返し励磁試験等も実施。非常に緻密に検討を積み上げている印象を受けた。現時点で 32 T 磁石の LTS 磁石は開発完了、HTS 磁石は組込まれて 77K で励磁、磁場分布測定済み。単独でのクエンチ検出・保護システムの単独試験中。2017 年に 32 T 発生予定。

Mitsubishi Electric Corporation (Japan)の S. Yokoyama らは REBCO 線材を用いた MRI 開発について報告した。国内での HTS-MRI 開発は H25, 26 年度経産省の産業技術研究開発委託費および H27 年度の日本医療研究開発機構 (AMED) の委託・支援を受けて行われてきた。また、本年度より 5 年間の NEDO のプロジェクトがスタートしている。これまでのボア径 φ 230 mm の 3 T の MRI の開発結果、および、今後の開発計画を報告した。コイル巻線の寸法精度 (エラー) を目標 0.2 mm に対し 0.1 mm、また、コイル組み立て精度目標 1.0 mm に対し 0.5 mm を実現。2 回のシミングにより 2 ppm@25 mmDSV の磁場均一度、国産の超高安定電源によりドライブモード運転で 0.8 ppm/h の磁場安定度を達成し、空間分解能 0.1 mm のマウスの胎児の MRI 画像を得ている。遮蔽電流による磁場ドリフトは 4 A のオーバーシュートによって抑制でき、磁場均一度への影響もなかったとのこと。質疑応答ではコーテッドコンダクタのマルチフィラメント化は必要ない (少なくともこの磁石では必要なかった) とのことだった。さらに 2016–2018 年にボア φ 500 の 3 T アクティブシールド付の MRI の開発、2018–2020 年

に 5 T の MRI を開発する計画である。3 T-MRI 磁石は発生磁場 2.9 T、内径 ϕ 580、外径 ϕ 1200、蓄積エネルギー 1.6 MJ、線材総長 72 km の規模で、漏洩磁場 5 ガウスラインは $3.2 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 。

Kyushu University (Japan) の K. Kajikawa は異常横磁界効果を利用した HTS 磁石の遮蔽電流磁化の消磁実験の結果について報告した。遮蔽電流磁化に対し直交する交流磁場を印加することにより磁化の低減が可能である(異常横磁界効果)。テープ面に垂直な遮蔽電流磁化に対し直交する磁場を印加するため、マグネット巻線に対し同軸配置とトロイダル配置の 2 種類のシェイキングコイルを使った消磁実験を行った。どちらのケースにおいてもテープ導体に対し中心到達磁場よりも大きな 30 mT 程度の交流磁場を数十 Hz で印加することによって、現実的な時間(分オーダー)で磁化を消磁できることを示した。NMR や MRI など高均一・高安定磁場や加速器など制御された磁場が必要な磁場応用にとって有望である。現状では交流磁場を印加するシェイキングコイルが銅製であるため損失が 100 W オーダーと大きく、液体冷媒を有する磁石に(のみ)適用することを想定しているとのことであった。

Siemens AG (Germany) の T. Arndt は電力応用を中心とした EU における超電導開発の状況について報告した。欧州では線材から電力機器にわたって多くの企業、研究機関が開発に参画し、また、多くの投資がされており非常に活発な印象を受けた。電力応用に関しては、DRYSMES4GRID という MgB_2 伝導冷却 SMES のプロジェクトが 2017–2019 年、2.7 M€ の予算規模で行われ、300 kJ, 100 kW のプロトタイプ SMES のフルシステムが開発される。風力発電では洋上 10 MW の MgB_2 風力発電機概念設計および検証を行う Suprapower プロジェクト(5.4 M€, 2012–2016 年)で MgB_2 ローターコイルおよびクライオスタットの回転評価機(RMV: Rotating Magnetic Validator)が製作・評価中である。また、EcoSwing プロジェクト(13.8 M€, 2015–2019 年)にてフルスケールの MW 級ダイレクトドライブ機を開発し既存風車(3.6 MW, 14 rpm, ローター直径 128 m)に載せ替えコスト競争力があることを実証する予定である。また、Horizon2020 の枠組みの中で HVDC Supergrid 用の FCL(1 kA, 50 kV)の開発が FASTGRID プロジェクト(2017–2020 年)で行われる。REBCO 線材の使用量を減らすため限流動作時の発生電圧を 2–3 倍にし、また、線材の均質性を改善する線材開発が行われ、ノーマル伝搬速度(NPZV)を 10 倍にしてより安全な運転可能とする current flow diverter という概念が導入される。

Changwon National University (Korea) の M. Park は韓国における超電導電力応用の状況について報告した。韓国では DAPAS(2001–2011 年, 10 M\$/yr)、GENI(2009–2013 年, 5 M\$/yr)、JEJU プロジェクト(2011–2016 年, 10 M\$/yr)とケーブル開発が積極的に行われ、この 15 年で 2 つの HTS 電力ケーブル(AC 22.9 kV, DC 80 kV)が実系統に導入され、AC 154 kV の電力ケーブルが実系統への接続の準備ができ、AC 22.9 kV の電力ケーブルが商用ケーブルとして購入リクエスト待ちの状況にある。また、世界初の完全商用の HTS 電力ケーブルシステムとして AC 23 kV, 50 MVA の 1 km の送電ケーブルと冷却能力 7.5 kW@69 K のターボブレイト冷却システムがインストールされることとなり、Shingal project(2016.9–2017.10 サイトはソウルの南およそ 35 km)がスタートした。さらに次のプロジェクトとして 2 km クラスの同軸電力ケーブルが計画されている(2017–2021 年, 30 M\$/5yrs)。開発項目は、23 kV, 50 MVA の同軸ケーブル、3 km クラスの電力ケーブル冷却システム、23 kV 電力ネットワーク保護アルゴリズムなど。

FCL については、2011 年より仁川で稼働している 23 kV クラスの FCL は 2012 年 2 月の実系統における線路故障時に正しく動作した。また、Gochan power test center の 154 kV クラスの FCL は 4 カ月安定して稼働しており実系統の線路故障待ち。その他、12 MW の風力発電機を 2025 年までに開発するロードマップが示された。1st Phase(2015–2018: 設計および 10 kW モデルサイズ)、2nd phase(2018–2021: 3 MW class prototype)、3rd phase(2021–2025: 12 MW 実システム)。