

冷凍部会だより

テーマ：高温超電導機器実用化への大きな潮流

第2回冷凍部会例会（公開）は、2026年6月30日(火)、川崎重工株式会社 東京本社9階会議室にて開催されました。

今回は冷凍部会初めての試みとして、韓国の Daejeon（大田）で開催された ICEC/ICMC の直後に海外の著名な方を招聘して講演をお願いすることになりました。ICEC/ICMC に参加しそうな方に連絡を取り、フロリダ州立大学の Sastry Pamidi 教授をお願いすることが出来ました。同時に九州大学の木須隆暢教授と核融合科学研究所の柳 長門教授にもご講演をお願いし、REBCO 線材実用化に向けた研究開発について講師の方々に纏めて頂くことになりました。

近年の低温工学及び超電導工学の分野では、航空機等への液体水素と高温超電導の応用、REBCO 線材実用化への研究開発、その線材を実用機器に生かそうとする小型核融合炉開発に見られるように、より実現性の高い研究開発が推進されています。従来の超電導発電機、超電導電力送電、SMES 開発等には見られなかった、過去の例から学んだ超電導機器実用化への大きな潮流とも言えます。講師の皆さんには、現在我々の分野において推進されているこれらの研究開発と実用化への状況を詳しく解説していただき、今回のテーマを「高温超電導機器実用化への大きな潮流」としました。なお、スライドは英語でお願いしました。また、参加者は38名でした。

最初は Pamidi 教授のご講演で Sustainable Liquid Hydrogen-Enabled Cryogenic Cooling of Superconducting Devices です。

HTS 応用機器は交通、電力、核融合をはじめ多くの産業に利用され、脱炭素社会へ大きな貢献が期待されます。そして低温技術が安価で扱い易く持続可能性のあるものになれば、超電導応用機器が社会貢献出来るようになります。また、低温技術は超電導機器の主な価格構成技術であります。

近年低温機器冷却に必要なヘリウムガスが従来の8倍にもなっているため、多くの低温機器の冷却が冷凍機によって行われています。強磁場マグネットやMRIも冷凍機冷却です。東北大学の28Tマグネット、GEとPhilipsのMRI、ASGのMgB₂ MRI マグネットが紹介されました。しかしながら低温冷凍機は効率が良くないため、商用機器としては運転コストが高くなります。冷却にはより安価な方法が必要です。そこで、液体水素冷却が代替冷却方法として考えられます。多くの国では国家資金や商業資金が水素関連技術に投資されています。水素がエネルギー輸送と貯蔵に使用されようとしています。効率的で大量のエネルギー貯蔵

が液体水素によって可能になります。そこには多くの企業や日本をはじめとする国が投資を行っています。クリーンエネルギーによる水素製造価格は下がり続けていて石油由来の水素に近くなっています。また水素の重量あたりのエネルギーは142 MJ/kg であり、ガソリンの44 MJ/kg に比較して3倍以上大きな値になっています。液体水素はエネルギー貯蔵と同時に20 Kにおける熱吸収媒体として非常に有効であり、冷凍機よりも有利なのです。

ここで提案するのは、HTS マグネットの液体水素を冷却源とした間接冷却です。液体水素の冷熱をヘリウムガス循環によって運び、HTS マグネットを冷却するのです。その蒸発潜熱は大きく、熱容量も10.5 kJ/kg・K@50 K であり、ヘリウム5.25 kJ/kg・K@30 K と他のガスに比べて大きな値を持っています。しかもその熱伝導率も他のガスより大きな値を持っています。このように、水素ガス及び液体水素はエネルギー貯蔵と共に、HTS 機器冷却に最適な多くの利点があるのです。

次に、FSU でのヘリウムガスを循環して HTS 機器を冷却するシステムを紹介します。実験研究では冷源として冷凍機を使用しています。5 MW HTS モーターや36 MW HTS モーターもこのシステムで冷却されています。NASA の HTS 応用航空機(IZEA)や U.S. Navy の HTS 応用艦船(ESRDC)の HTS 機器と冷却システムの研究開発を行ってきました。NASA と大学の連携によって2022年からの5年間のプロジェクトが行われているのが IZEA です。



IZEA Concept

Liquid hydrogen fuel, Liquid oxygen

Electric!

Turbine generators, Motorized propulsors, Fuel Cells, Superconductors,

Power systems and controls operating across wide temperature range

冷却システムは統合されて熱交換器への熱侵入を極小化し、液体水素配管を単純化し、各装置の冷却を多様化でき、個々の冷却コントロールを20 K から350 K まで弾力的に行えます。ここではヘリウムガスによる循環冷却を採用しますが、その利点は、

- そして 2025 年度はマイルストーンとして、高温超伝導線材を用いたトカマク型核融合炉の設計検討を進めました。その結果、ITER の約 1.5 倍の強度を有する極低温構造材料と組み合わせれば、トロイダル磁場コイルのプラズマ側表面最大磁場 25 T 超の条件において、主半径 3 m 台でも ITER

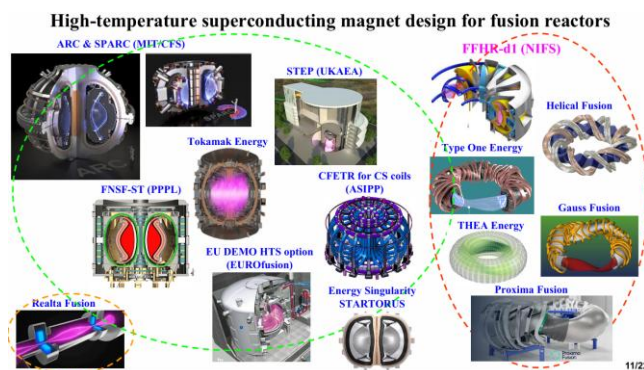
規模の核融合出力が得られ、かつコイルプラズマ間距離も十分確保できる見通しが示されました。極低温構造材料について、特に 0.2%耐力および破壊靱性値に着目した調査・分析を実施し、1500 MPa 超高強度構造材料実現に向けた候補材料の検討方針を決定しました。

最後は休憩を挟んで柳教授によるご講演で、

Current Status of Development of High-Temperature Superconducting Magnets for Compact Fusion Reactors

「コンパクト核融合炉への適用をめざした高温超伝導マグネット開発の現状」でした。

LHD、ITER を始めとする現状の核融合装置開発について説明頂いた後、新規企業による小型核融合装置について詳細な説明があり、小型核融合装置に必要な大電流 HTS 線材と HTS マグネットの開発について説明がありました。LHD はすでに研究を終了していますが、NIFS においては LHD 核融合装置開発に必要な機器が整備されています。HTS 線材を使用した高磁場核融合装置開発への投資は急速に増大していて 2025 年には世界で約 2.3 兆円となっています。核融合装置開発新規プロジェクトは 10 社以上になり、2030 年代始めには発電開始を目指しています。



小型核融合装置は、操作、輸送、建設、製作が容易で、精密な仕様に対応できます。HTS 線材の実用化により、強磁場の発生が容易となり、20T 以上の磁場が要求される小型核融合装置の実現が可能となったのです。現在は全世界で大電流高温超伝導体の設計と開発が行われていて、REBCO 線材を撚り線加工した導体と重ね合わせた導体の 2 種類の開発が主に行われています。超伝導体としては銅の安定化材と共にステンレス製のジャケット内に納めたものや、銅の表面に螺旋状に溝を切った所に線材を埋め込んだ物など多くの形状が提案されています。

新規企業による小型核融合装置開発プロジェクトでは、CFS/MIT が開発中の SPRAC と呼ばれるトカマクに向けた TFMC (Toroidal Field Model Coil) 試験装置で、20T@20K が得られています。また、NIFS と共同開発している Helical Fusion ではヘリカル型核融合炉のらせん状高温超伝導マグネット向けに開発した UROCOIC 導体でダブルパンケーキコイルを製作し、50 kA@9 T, 15 K を得ています。さらに、

FAST Project (Starlight Engine / Kyoto Fusionneering)では主半径 3-4m 規模の核融合装置を 2030 年代には発電実証装置を稼働させる予定です。

HTS 導体の開発が進んではいますが、核融合装置に使用される HTS 導体とマグネットには以下の解決すべき課題があります。

• Quench protection

How large a magnet can the no-insulation coil technique apply to?

Can the conventional balance-voltage measurement be applicable?

• Type of large-current conductors

Can simply-stacked (non-twisted) conductors be applicable?

• Neutron irradiation

How small a magnet can be for compact fusion?

Can GdBCO and EuBCO tapes be applicable?

• Demountable (remountable) coil technique

Is there a feasible method?

• Cooling

Can liquid neon be an option?

講演ではこれらの課題解決について研究開発状況が説明されました。冷却に関しては、

• Forced (internal) cooling / Indirect cooling / Pool cooling

• Helium gas / Supercritical helium • Liquid hydrogen

• Liquid neon について説明があり、HTS と LTS では熱物性が大きく異なるので、LTS と同じように考えなくても良いのでは無いかとの提案がありました。

今回の例会にはこの分野で中心的になっている方々にご講演をお願いしました。ご多忙中のところ、資料作成とご講演を快諾頂き感謝申し上げます。



ご講演中の Sastry Pamidi 教授



講演終了後の集合写真

(同) コールドデック 上岡泰晴