

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

掲載内容（サマリー）：

トピックス：

○理事会報告

特集：冷凍・冷熱技術

○スイッチ一つ、全自動化されたブレイトン冷凍機

○高性能冷凍機の開発

○高温超電導応用機器向け単段 GM 冷凍機

○超電導関連 2015 年 6 月 - 7 月の催し物案内

○新聞ヘッドライン (4/20-5/19)

○「世界の動き」

○「第二回冷凍部会例会／第一回超電導応用研究会シンポジウム、および石狩ケーブル PJ 見学会」報告

○「第二回冷凍部会例会／第一回超電導応用研究会シンポジウム」報告：石狩直流超電導ケーブルプロジェクトの概要

○隔月連載記事 鉄道と超電導（その 3）

○隔月連載記事 IEA-ISS（その 3）

○研究室紹介 東京大学大学院総合文化研究科 広域科学専攻関連基礎科学系 前田研究室

○読者の広場 鉄カルコゲナイドでヘリウムレス MRI が将来できるかも、と聞きました。一方で MRI には丸線が望ましい、とも聞きます。今度の超電導線は丸線 が可能となるのでしょうか？

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

〈発行者〉

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3 丁目 2 番 1 号 KSP A-9

Tel 044-850-1612 Fax044-850-1613

超電導 Web21 トップページ：<http://www.istec.or.jp/web21/web21.html>



この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

トピックス：理事会報告

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
専務理事 清川 寛

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)は、第 6 回理事会を 5 月 18 月 (月) 15 時から KSP ホテル 707 号室で開催し、平成 26 年度事業報告、平成 25 年度決算について全員一致で承認しました。なおこれらについては、来る 6 月 3 日 (水) 10:00 から開催される第 4 回の定時評議員会においても承認される必要が有ります。

理事会においては、報告事項として「研究開発の実施状況について」(ISTEC/HP の「会員様専用ページ」ご参照ください。)についても報告・説明されました。

なかでも線材・パワー応用分野では、高温超電導コイル基盤技術プロジェクトにおいて、線材分割幅を小さくすることで超電導コイルの磁化緩和が短時間化できることや、安価な MOD 線材の磁場中特性の大幅な改善等の画期的な結果が得られています。また物性・デバイス分野では、高温 SQUID の応用開発に関し、成功裡に終了した磁場偏差計開発や、継続プロジェクトである石油分野への応用を目指した要素技術開発の他に、金属資源探査で実用化が始まっている SQUITEM の改良機開発や、内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)」の一つであるインフラ劣化保全・評価のための高感度磁気非破壊検査といった新規プロジェクトについても紹介しています。

これらの実施状況、及びこれら以外についても、6 月 8 日 (月) 9:30 からタワーホール船堀で行われる「超電導技術動向報告会 2015」で報告いたします。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：冷凍・冷熱技術

「スイッチ一つ、全自動化されたブレイトン冷凍機」

大陽日酸株式会社

開発・エンジニアリング本部 プロジェクト推進統括部 超電導プロジェクト
上森賢悦

高温超電導電力機器は省エネルギー電力技術の切り札として有望視され、実現のため研究・開発が盛んに行われている。近年、超電導ケーブルや超電導限流器分野では実用化研究の最終段階となり、一部では実系統での試験も計画されている。それ故に高温超電導電力機器の冷却に適した冷凍機の必要性が高まっている。高温超電導電力機器用の冷凍機では、①超電導安定維持に必要な冷却温度制御と冷却能力、②長期連続運転が可能な高い信頼性、③高い冷却効率(省ランニングコスト)、④コンパクト化(設置の省スペース化)、⑤設備コストの低減などの項目が求められている。

ところで、高温超電導電力機器の全般的な冷却温度は 20 K から 80 K と考えられているが、とりわけ超電導ケーブルの分野では、70 K 運転で 2~10 kW が必要とされている。現在市販されている小型冷凍機は冷却能力が 80 K 運転で 1 kW 程度と小さく、またその構造上摺動部を有しているため通常年 1 回程度のメンテナンスを必要としている。一方、深冷空気分離装置やヘリウム液化機等の極低温大型冷凍機では耐久性に実績のある非接触な軸受を備えた膨張タービンが採用されているが、冷凍能力の面でもあまりにも過大である。そこで高温超電導電力機器冷却に適した冷凍機を目指し、NEDO「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」において、ネオンガスを作動ガスとした 65 K 運転、2 kW ターボブレイトンネオン冷凍機を開発した。

当社ではそれ以降も 2 kW 冷凍機のブラッシュアップを継続し、昨年は図 1 に示すようにコモンベース上に全ての機器やコールドボックス(熱交換器)が搭載できるようコンパクト化を実施した。さらに冷凍機の運転操作性を重視し、運転プログラムの改良・改善を重ね、スイッチ一つで起動から目的の液体窒素温度制御までを可能とする自動運転技術を確認した。冷凍機停止も操作一つで実行できるようプログラムされ、既に商品に組み込まれている。

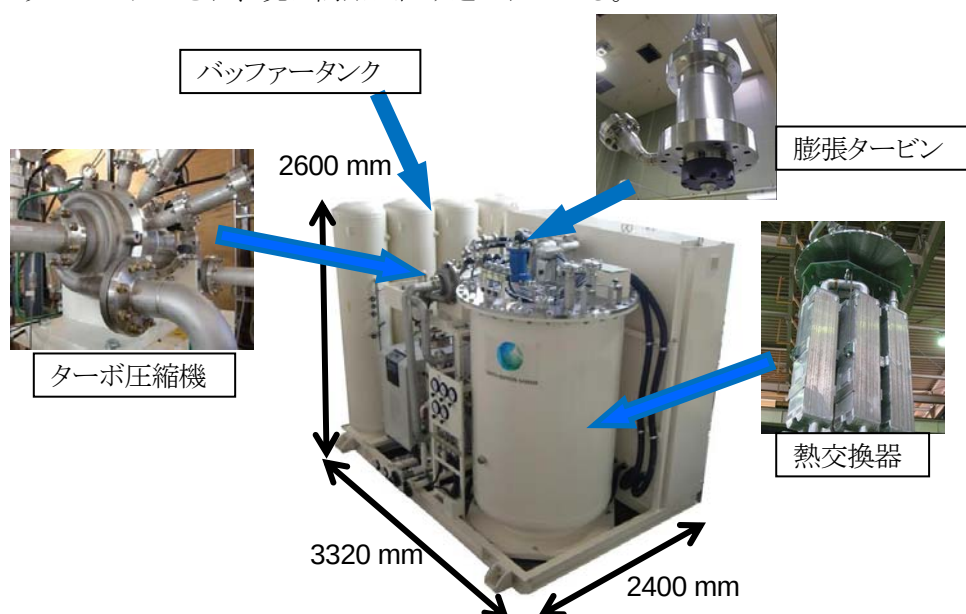


図 1. 2 kW ターボブレイトンネオン冷凍機

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

そして現在は冷凍機消費動力の低減に取り組んでいる。冷却温度 70 K、冷凍能力 2 kW での圧縮機消費動力は現状では約 50 kW であるが、これを改善するため新型圧縮機を開発中である。これが実現すれば数 kW の消費動力低減となり、さらに構成機器の簡素化が可能となる。

ところで、高温超電導電力機器の実証研究が実系統規模になるに従い、5 kW～20 kW 級といったより冷凍能力が大きい冷凍機が要求されてきている。その対応として当社では 10 kW 級冷凍機の開発に着手し、昨年度に試作機を製作した。図 2 に試作した 10 kW ターボブレイトンネオン冷凍機を示す。冷凍機の概要は、横置きのコールドボックスの中に熱交換器が内蔵されており、コールドボックスの上部にタービン・コンプレッサーが設置されている。現在 10 kW 冷凍機は性能評価を実施中であり、更なる改良・改善を重ね、近々商品としてラインナップを予定している。

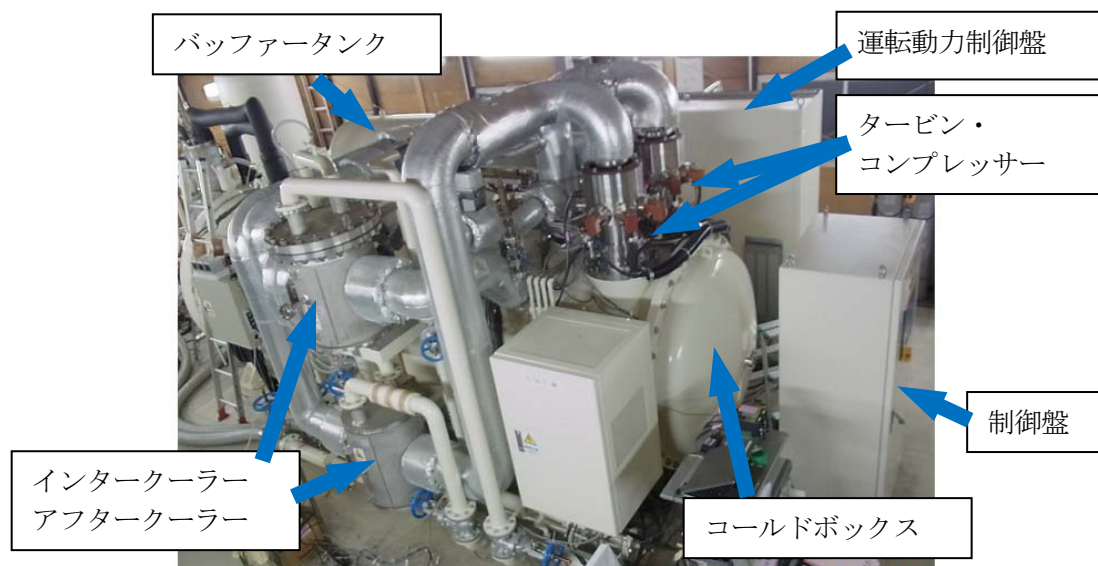


図 2. 10 kW ターボブレイトンネオン冷凍機(試作機)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：冷凍・冷熱技術

「高性能冷凍機の開発」

株式会社前川製作所

副主任研究員 仲村直子

NEDO「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」では、実系統において、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」で開発したブレイトン冷凍機の1年の連続運転を行い、冷凍機の長期的性能や信頼性、運用性等を検証する。本稿では、開発したブレイトン冷凍機およびプロジェクトの今後の予定を紹介する。

ブレイトン冷凍機の開発目標は、単機冷凍能力 5 kW、COP : 0.1、メンテナンス間隔 30,000 時間とした。冷凍機の大容量、高効率等の開発目標を考慮して、逆ブレイトンサイクルを採用し、逆ブレイトンサイクルの特性を最大限に生かすために圧縮機・膨張機にターボ型を用いた。1 段目と 2 段目のターボ圧縮機、さらに 3 段目のターボ圧縮機とターボ膨張機を一体化し、膨張機で発生した動力を回収することで、冷凍機の効率向上に寄与させた。回転機の構造面および効率面に最も影響を与える音速を考慮して冷媒にはネオンガスを用いた。

前川製作所で既に商品化されたブレイトンサイクルの空気冷媒冷凍機のターボ圧縮機・膨張機と、ヘリウム液化冷凍機の超小型ターボ膨張機の設計技術、流体・構造解析の技術を駆使して回転翼の開発を実施し、目標の断熱効率 0.8 をほぼ達成した。さらに、ブレイトン冷凍機の性能試験の結果、冷凍機出口の液体窒素温度 77 K での冷凍能力は 5.8 kW、COP は 0.1 であり、開発目標を達成した。

本開発で考案した圧力制御方式を用いると、定格回転数で一定に保ちながら循環するガスの圧力を変化させることで、体積流量を変えずに質量流量を変えて容量制御を行うため、COP 一定での高効率運転が可能になる。本冷凍機では、冷凍能力比 0.65～1.0 において COP 一定の高効率運転が可能であることが分かっている。

開発したブレイトン冷凍機は、工場試験および東京電力 旭変電所への移設を終え、旭変電所にて試運転を行っている。冷却システム単体での健全性を確認した後に、高温超電導ケーブルと連携させ、実系統での連続運転を行い、様々な角度から冷凍機の検証を行う予定である。また、ターボ圧縮機、膨張機に関しては、構造上の工夫により、さらなる効率向上が望めることも分かっており、引き続き検討を進める予定である。さらに、高温超電導ケーブルシステムの実用化に向けて、冷凍機を含めた冷却システム全体でのコンパクト化や低コスト化等の検討を進めたいと考えている。



図 1 旭変電所に移設したブレイトン冷凍機

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：冷凍・冷熱技術

「高温超電導応用機器向け単段 GM 冷凍機」

住友重機械工業株式会社

精密機器事業部 技術部

李 瑞

1. まえがき

一般的に、超電導機器の冷却には LHe、LN₂ などの冷媒を用いたシステムと、冷凍機を用いたシステムの二つに大きく分けられる。高温超電導応用機器の分野では、システムの安全性と日常運用管理のし易さを理由に、冷凍機による冷却システムへの期待が高い。本稿では、この高温超電導応用機器向けに新しく開発された単段 GM 冷凍機を紹介する。

2. RDK-500B 単段 GM 冷凍機的主要仕様

本機は幅広いシステムに適用できるために、80 K 付近で大きな冷凍能力を確保しつつ、20～30 K 領域においても高い冷凍能力を有している。また、設置角度による冷凍能力低下を極力抑制されているだけでなく、冷凍効率を重視した開発の結果、冷凍機の駆動には大型圧縮機を必要とせず、高圧ガス保安法適用除外の圧縮機が使用できるため、ユーザーにとって導入し易い冷凍機となっている。

(1) 冷凍機ユニット型式：RDK-500B (Fig.1)

圧縮機ユニット型式：F-70LP

(2) 入力電源：AC200 V 三相 (50/60 Hz)

消費電力： (定常時) 7.5/9.0 kW (50/60 Hz)

(起動時) 8.5/9.8 kW (50/60 Hz)

(3) サイズ、重量：

(冷凍機ユニット) 25 kg, 約 H570×W180×L325 mm

(圧縮機ユニット) 100 kg, 約 H575×W443×L493 mm

(4) 冷凍能力：

(50 Hz) >40 W at 20 K, >80 W at 30 K (Fig.2)

(60 Hz) >45 W at 20 K, >94 W at 30 K (参考値, Fig.2)

(5) 適合規格：UL, CE 規格、RoHS 指令に適合。

高圧ガス保安法適用除外。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612



Fig.1 冷凍機ユニット
RDK-500B

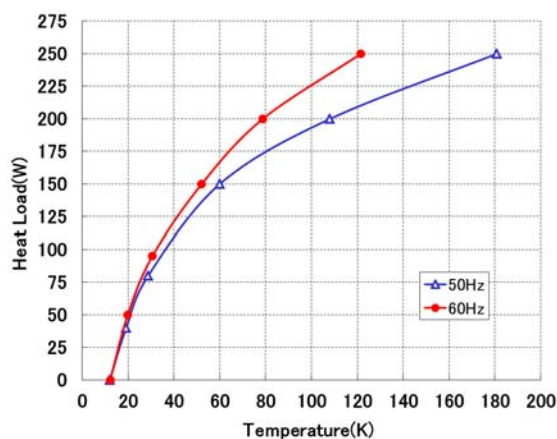


Fig.2 RDK-500B 冷凍能力線図

3. 冷凍効率及び冷凍能力の設置角度依存性

単段 GM 冷凍機の冷凍効率 (COP) は単純に入力電力に対する冷凍能力の大きさに評価できる。本機の冷凍能力が 46 W at 20 K(6.8 kW)と 85 W at 30 K(6.9 kW)(ともに 50 Hz)であるので、冷凍効率 COP は 0.0068 at 20 K と 0.0123 at 30 K で比較的高い数値となっている。

一方、冷凍能力の設置角度依存性について、Fig.3 の通り、設置角度の影響を完全に無くすることはできなかったが、冷凍能力の低下は最大で 24 %以下に抑制されている。

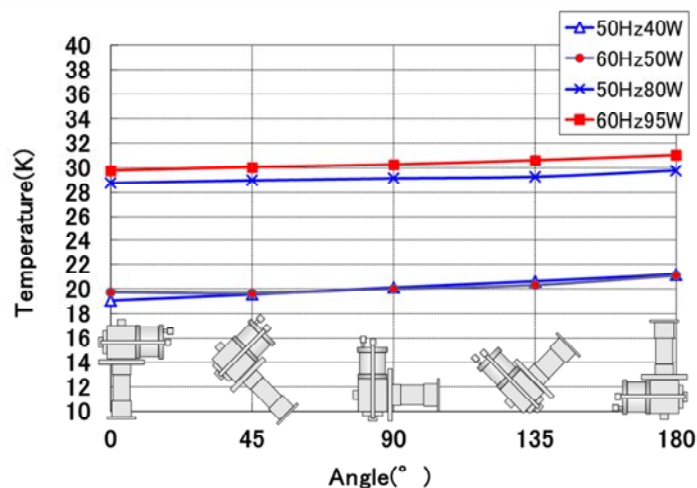


Fig.3 RDK-500B 冷凍能力の設置角度依存性

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

超電導関連 ‘15/6 月－7 月の催し物案内

6/3-6/5

日本伝熱シンポジウム

福岡国際会議場

<http://htsj-conf.org/symp2015/>

6/9

第三回液体水素冷却 MgB₂ 超電導線の開発と応用に関するフォーラムのご案内

東京大学山上会館

http://www.csj.or.jp/materials/2015/1st_0609_01.pdf

6/6-9

15th International superconductive Electronics Conference

名古屋大学

<http://isec2015.org/>

6/28-7/2

Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference
(CEC-ICMC 2015)

Tucson, USA

<http://www.cec-icmc.org/>

7/22-24

第 21 回結晶工学スクール

大阪大学

<http://annex.jsap.or.jp/kessho/>

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

新聞ヘッドライン (4/20-5/19)

- 古河電工 高温超電導線材事業 5 年で本格実用化図る 日刊産業新聞 4/20
- 超電導モーターの電気バス 住友電工が実証実験 エネルギー効率大幅改善 鉄鋼新聞 4/20
- 住友電工 引っ張り強度 400 MPa の超高強度ビスマス系高温超電導線材を開発 日刊工業新聞 4/20
- 住友電工 新高強度超電導線材で超伝導科学技術賞受賞 化学工業日報 4/20
- 東北大など 分子性超電導体の転移温度 最大化条件を発見 化学工業日報 4/21
- 米アプライドマテリアルズ タイで超電導限流器を受注 過剰電流を瞬時に抑制 電気新聞 4/22
- 古河電気工業 日光事業所 世界一争う超電導技術、ノーベル賞 陰で支える 日本経済新聞 4/22
- 超電導磁石 中国が新用途 中級レベル技術に光 日経産業新聞 4/24
- JR 東海、リニア米輸出へ 鉄道営業権申請 日本経済新聞 4/25
- 東大など 超電導で起きる現象、グラファイトでも 日経産業新聞 4/28
- 「究極の省エネ」ムダなく送電 超電導ケーブル 鉄道路線で成功 運行本数の増加へ道 日本経済新聞 4/30

(編集局)

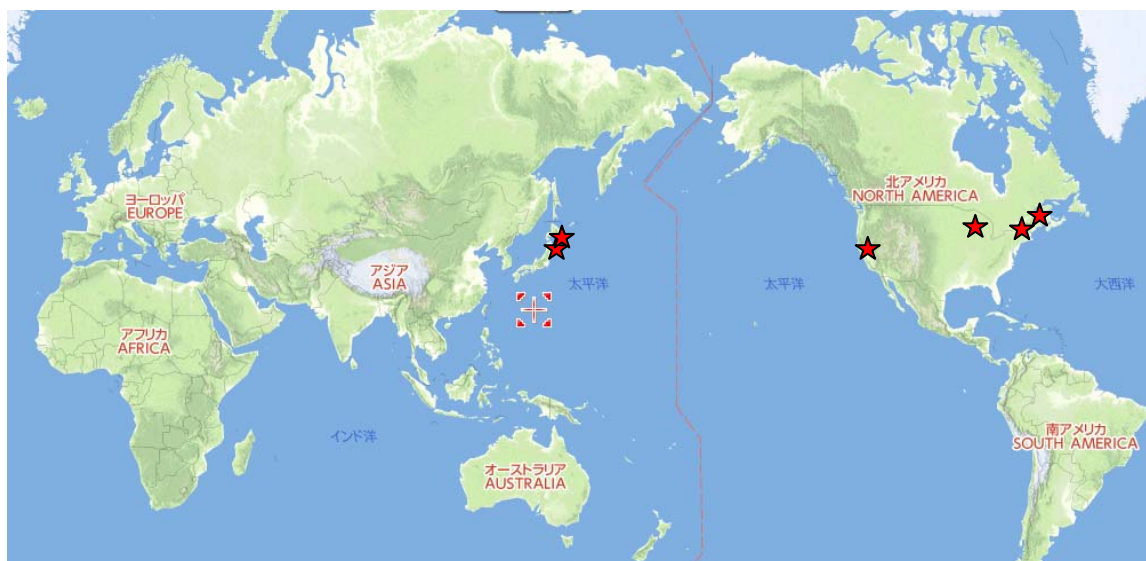
[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

世界の動き

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
特別研究員 山田 穰



★News sources and related areas in this issue

▶線材

格安基板を販売開始

田中ホールディングス社 (2015年4月7日)

田中ホールディングス株式会社は、田中貴金属工業株式会社がYBCO系超電導線材を用いて、銅配向金属基板の専用生産ラインを構築し、2015年4月に予定されている量産体制を確立したことを発表した。

この超電導線材では、ニッケル合金の代わりに安価で配向性の高い銅を使用することにより、50 %以上コスト削減を実現できる。銅は、薄膜剥離につながる酸化に敏感であるというのが弱点の一つであるが、酸素バリア金属層にパラジウムを含有した特殊ニッケルめっき液を用いることで配向性と表面平滑性が向上される。

製造及びサンプル出荷は、2008年12月から開始されているが、田中貴金属工業が、中部電力そして鹿児島大学との共同開発により、超電導線材の銅配向金属基板の開発に初めて成功したのは同年10月のことであった。なお、この技術は、長距離大容量の送電ケーブルや、高磁場を必要とする磁気共鳴画像装置(MRI)及び核磁気共鳴分析装置(NMR)、大型船舶用モーターなど、今後様々な分野での応

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

用が見込まれる。同社は、2020年までに年間12億円の売り上げを目指す。

Source: "Establishment of Mass Production System for Textured Cu Metal Substrates Using YBCO Superconducting Wire" (7 Apr, 2015) Topics
<http://pro.tanaka.co.jp/en/topics/fileout.html?f=170>

▶産業応用

艦船用先端HTS消磁システム

AMSC社 (2015年4月20日)

米国海軍では、AMSC社の高温超電導体(HTS)装置、特に同社の先進超電導消磁システムを使用して、船舶電力アプリケーション用HTS送電ケーブルのハードウェアを開発しようとしている。このような消磁システムは、艦船の磁気的な痕跡を消し、海底地雷の危険性を低減できる。電力効率を図るため重量と消費電力制限が求められるプラットフォームにおいて、先進消磁システムを適えるのはHTS技術である。HTSを利用したこれら技術は、作動電力を大幅に削減させ、従来のものに比べ消磁システム総重量を50～70 %低減させる。

同社は米国金属処理中核研究所と共同開発し、HTS消磁ケーブル関連製造コストの合理化に取り組んできた。ManTechプログラムと呼ばれる製造技術局で習得した高度なケーブル製造プロセスの知識は最適化され、フルスケールでの艦船の製造において配送及びコスト目標を達成できると期待される。

同社社長兼最高経営責任者であるDaniel P. McGahn氏は、「走行距離約75000マイル、実行時間20000時間以上という、艦船に装備する先端HTS消磁システムプロトタイプが開発された。」と述べた。同社は今、電力、駆動、および保護装置に関する多様なアプリケーションを介して、米海軍艦隊のHTS技術の拡張に取り組んでいる。

Source: "AMSC Announces U.S. Navy's Intention to Order High Temperature Superconductor (HTS) Equipment" (20 Apr, 2015) Press Release
<http://ir.amsc.com/releases.cfm>
 Contact: Kerry Farrell, Kerry.farrell@amsc.com

▶加速器

初の加速器用Nb₃Sn磁石

DOE National Laboratories (2015年4月20日)

米国エネルギー省(DOE)のフェルミ国立加速器研究所は、ニオブ3スズ(Nb₃Sn)製の超電導磁石の開発と製造に取り組み、設計電界を11.5テスラに達成させることに成功した。比較としては、1980年代初期に作られたテバトロン粒子加速器用ニオブチタン(Nb-Ti)系双極磁石が上げられるが、その電界は約

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

4テスラであった。また大型ハドロン衝突型加速器に使用されている最も強力なニオブチタン磁石は、約8テスラで作動する。それゆえ、世界で初めて報告されたこのツインアパーチャー加速器磁石は、数十年もの間世界中で行われてきたNb₃Sn導体とその関連磁石技術の研究開発努力の賜物と言える。

Nb₃Sn磁石技術の進歩とCERNとの継続的な共同開発によってこの革新的技術が活用され、今後の大型ハドロン衝突型加速器のアップグレードを有効にしていくと考えられる。

Source: "New superconducting magnet achieves high-field milestone"

(20 Apr, 2015) DOE Pulse

<http://web.ornl.gov/info/news/pulse/no437/story3.shtml>

Contact: Kurt Riesselmann, media@fnal.gov

▶核融合

1000トンのITER-CSコイルを製造

General Atomics社 (2015年4月10日)

General Atomics社(GA)は、核融合高温プラズマを生成し駆動する1000トンの超電導電磁石でできたITERセントラルソレノイド(CS)を製造する予定である。GA社は、カリフォルニアを拠点とする技術革新企業であり、半世紀以上もの間核融合研究で世界をリードしてきた。

ITERとは、世界最大の実験用トカマク核融合炉の設計と構築を目指し、35か国が連携する国際的核融合研究プロジェクトである。米国のITER事業部長であるNed Sauthoff氏は、「このセントラルソレノイドは、磁気パルスを利用してトカマクプラズマ中に電流を通すことができるため、ITERの心臓部の役割を果たす。プロジェクトを成功させるため、GA社が施す貢献は非常に重要なものである。」と述べた。

ソレノイドは、250,000ポンドの重さを持つ磁石モジュール用のコイル層に、長さ4マイルの金属導体を巻きつけて製造する。GA社は、7つのモジュール（セントラルソレノイドを構成する6つと、予備の1つ）を製造する予定である。これら製造は、収容能力200トンに及ぶエア駆動式輸送カート、1200 °F対応の二対流式オープン、また長さ125マイルのグラスファイバーテープ適用の二層式絶縁機など、10ヶ所の超電導磁石用カスタム製造ステーションに分かれて行われる。

Source: "General Atomics Fabricates the World's Largest Superconducting Electromagnet"

(10 Apr, 2015) News & Media

<http://media.ga.com/2015/04/10/general-atomics-fabricates-the-worlds-largest-superconducting-electromagnet/>

Contact: Lisa Petrillo, lisa.petrillo@ga.com

▶デバイス

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

初の実用的量子コンピューター

IBM 社 (2015年4月29日)

IBM 科学者チームは、2種類の量子エラー（ビットフリップと位相フリップ）を同時に検出し測定する機能を今回初めて発表した。さらに、4つの超電導量子ビットの正方格子に基づいた新しい正方格子量子ビット回路も実証した。この回路は、動作中の量子システムに達するためにより多くの量子ビットを加えることで、大規模化が可能な唯一の物理アーキテクチャーである。

これらの発見は、実用的で信頼性の高い大規模量子コンピューターの設計に必須要件となる量子エラー訂正にとって重要な進捗である。量子コンピューターをわずか50量子ビットで構成することができれば、現在のスーパーコンピューターの上位500システムを組み合わせても不可能な最適化とシミュレーション分野で新しい機能を発揮することが可能である。

「研究者たちはこれまで、ビットフリップ、あるいは位相フリップのどちらか一方の量子エラーを検出することはできたが、両方同時に検出することはできなかった。この分野における従来の研究ではリニアアレイを使用したため、システムの量子状態に不完全な情報を与えるビットフリップエラーのみを見出し、量子コンピューターにとっては不十分であった。」と同社量子コンピューター事業部長 Jay Gambetta 氏は述べた。ビッグデータ処理の必要条件として、量子コンピューターはかつてない大型データベースはもちろん、大量の蓄積された多様な非構造化データを迅速に処理できる。最終的には、人の意思決定の仕方や研究者が重要な発見をする方法までもが変わってしまうかもしれない。

この研究は、情報先端研究プロジェクト活動(IARPA)のマルチ量子ビット・コヒーレント・オペレーションプログラムによって助成され、研究成果はジャーナルNature Communicationsの4月29日号に掲載されている。

Source: "IBM Scientists Achieve Critical Steps to Building First Practical Quantum Computer"
(29 Apr, 2015) News Release
<https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/46725.wss>
Contact: Christine Vu, vuch@us.ibm.com

▶基礎

T_c を高める方法

東北大学 (2015年4月20日)

東北大学のKosmas Prassides教授率いる国際研究チームは、加圧下で新群フラーレン物質を基にした非在来型超電導体の電子特性を研究している。今回初めて同研究チームは、転移温度より高温の通常金属状態である絶縁体と、この非在来型超電導体の超電導ペアリングメカニズムとの関係について解明した。

本研究成果は、米国の科学雑誌Science Advancesに掲載され、そこでは超電導を制御し、最高転移温度に達成した分子の電子状態を解明することによって、分子からなる超電導体を追求する上で新たな

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

高温超電導体開発に導くことを示した。

さらに本研究では、ヤーン・テラー金属と呼ばれる新しい物質の状態を明らかにし、電子で取り巻く分子と格子の特性をフェルミ準位で最適化することによって、超電導が現れ、超電導転移温度が最大値をとることを証明した。

電子構造が持つ超電導特性上の影響は、絶縁体状態では、磁気生成する陰イオンのヤーン・テラーと呼ばれる歪みを起こしていることも明らかにした（2012年度Nature Communications 3、912号）。化学的には、最も知られている超電導体と異なる新規電子構造を形成できるため、新たな分子性超電導物質の開発に向けて大きな期待が高まる。

Source: "How to maximize the superconducting critical temperature in a molecular superconductor"
(20 Apr, 2015) News

<http://www.tohoku.ac.jp/en/news/research/news20150420.html>

Contact: Prof. Prassides Kosmas, k.prassides@wpi-aimr.tohoku.ac.jp

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

「第二回冷凍部会例会／第一回超電導応用研究会シンポジウム、および石狩ケーブル PJ 見学会」 報告

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
普及啓発・国際部
部長 岡崎 徹

表記研究会に参加し、超電導ケーブルの現状について聴講した。石狩ケーブルに関する発表は別途として、休憩後は超電導ケーブルの現状について二件、古川電工の向山氏と住友電工の大屋氏(増田氏代理)の講演が続いた。その中で二つの考え方が小生なりに理解できて興味深かった。一つは超電導の特性を最大限に生かした設計を行う、というどちらかというとシーズ側からのアプローチ、そしてもう一つは既存系統へ無理なく導入するためには、というどちらかというとニーズ側からのアプローチである。前者は古川電工の超高電圧直流ケーブルの設計理念であり、あるいは中部大の直流ケーブルであろう。後者は住友電工の三芯一括型超電導ケーブルの設計理念である。どちらも共通しているように思えたのは如何に土木工事をせずに構築するか、である。石狩 PJ でもかなりの部分が土木工事に費やされた様子である。



図 1 まっすぐに伸びる断熱管

続いて冷凍機についての発表が大陽日酸の平井氏とジェック東理社の青木氏から有った。大陽日酸からは新たに超電導ケーブル向けに開発されたネオンガスを用いた冷凍機の開発も報告された。超電導ケーブルなど液体窒素冷却用で、摺動部が無く長期の寿命が期待される。ヘリウムの液化にはヘリウムガスを利用した圧縮機が必要となるが、ガス分子運動速度の関係でこの方式では相当な回転数となるため非常に難しいであろう、とのことである。

小生は風力熱の概要発表を中部大の筑本教授、さくらインターネットの片山氏の後に行った。両氏とも超電導ケーブルには高稼働率が必要だ、と言っていた後だけに、風力熱発電はケーブルの高稼働率が達成できるので好都合だ、との発表には納得して頂けたと思う。また、発熱機そのものに超電導を利用する案についても、鉄による磁気回路作成が不可能な高温での利用、という事でこれも超電導応用のひとつとして有望と受け取っていただいた。

翌日は石狩超電導ケーブル PJ のサイト見学であった。500 m の太陽光パネルからデータセンターへの供給ライン (地下埋設済み)、および 1 km の地上置き直流超電導ケーブルの工事が進みつつあり、特に 1 km のラインはそのスケール感が従来より遙かにすばらしく、未来を感じさせるものであった。ただこの部分は将来的に解体されるとのこと、勿体ない気もするので何らかの物理計測、例えば極超長波などの計測などに応用できないものか、などと思った。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612



図 2 断熱管の曲がり部

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

「第二回冷凍部会例会／第一回超電導応用研究会シンポジウム」報告：石狩直流超電導ケーブルプロジェクトの概要

中部大学・超伝導・持続可能エネルギーセンター
教授 筑本知子

表記研究会にて、今年度 3 年目を迎えた「高温超電導直流送電システムの実証研究」（通称：石狩プロジェクト）（経済産業省委託事業）について紹介を行った。本稿では、その概要について報告する。

石狩プロジェクトでは図 1 の二回線を用いての実証試験が計画・実施されている。回線 1 は太陽光～データセンター間に直流超電導線(500m)を地下埋設設置し、通電安定性を検証した後、実運用する。一方、回線 2 は直流超電導線(1km)を地上置きとして、上流側に仮設電源、下流側に仮設負荷を設置し、回線 1 で確認できない特殊試験を行い、今まで知見のなかった事項に関する検証を行う予定である。なお、回線 1 では 1 カ所、回線 2 では 2 カ所の中間接続部を設けており、複数カ所の接続部というのは、世界で初めてである。

プロジェクト開始から 3 年目を迎え、回線 1 については、既に建設が終了し、1 月中旬から 2 月上旬にかけて、冷却システムのための液体窒素ミニフローによる性能確認を終え（図 2）、本シンポジウムの翌週から約 1 ヶ月かけて第一回目の冷却および総合運転試験（循環冷却試験、入熱量・圧力損失測定、通電試験等）を実施する予定である。一方、回線 2 については、積雪の影響により冬期は工事を中断していたが、5 月中旬より工事を再開、10 月末頃までに工事を終了し、その後、初期冷却と試運転、各種試験を年度内に実施する予定である。

なお、工事の様子は、石狩市のサイト <http://benri.i-eris.tv/chodendo/chodendo.html> で動画を見ることができるので、是非ご覧ください。

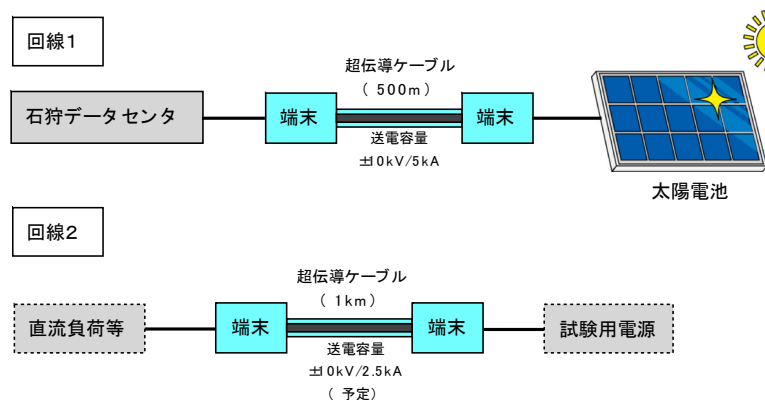


図 1. 試作システムの構成



図 2. 回線 1 の冷却システム

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

鉄道と超電導 (その 3)

～超電導き電ケーブルの研究開発①～

公益財団法人 鉄道総合技術研究所
 研究開発推進室 担当部長
 超電導き電ケーブル課長 超電導応用研究室長
 富田 優

はじめに

信頼性、利便性、経済性、環境調和性を有する鉄道は、エネルギー消費の合理化・効率化が必要とされる今世紀に、ますます重要性を増していく。鉄道技術基盤で電力・電気技術の果たす役割は大きく、そこでは、超電導の持つ低損失、高密度電流、高磁場といった特性に基づいた新しい機器やシステムが大いに活躍できる。また、電気抵抗がゼロで送電できる超電導を鉄道用の送電線に適用することで、回生効率の上昇、電力損失の低減、変電所の負荷平準化や集約化、レール電位の抑制などが期待される。

鉄道用超電導ケーブルの導入効果

直流電気鉄道における変電所間隔は、き電方式、線路条件、電気車電流、運転条件、電源事情などによって異なり、車両に電気を送るためのき電線は、電気抵抗があるため流れる電流に応じて電圧が変動（電圧降下・上昇）する。このため、変電所間隔は、都市間を結ぶ路線では 10～15 km、多くの電流容量を必要とする大都市圏の路線では 3～5 km 程度であり、多くの変電所の設置が必要である。

超電導ケーブルを鉄道の送電線へ適用すると、超電導体の電気抵抗がゼロである特性から、損失なく電気を遠くまで運ぶことができる。このため、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所数の削減、回生効率の向上が期待できる。また、レールに流れる帰線電流を超電導ケーブルに流すことで大地への漏れ電流もなくなり、電食の問題も解決できると期待される¹⁾。

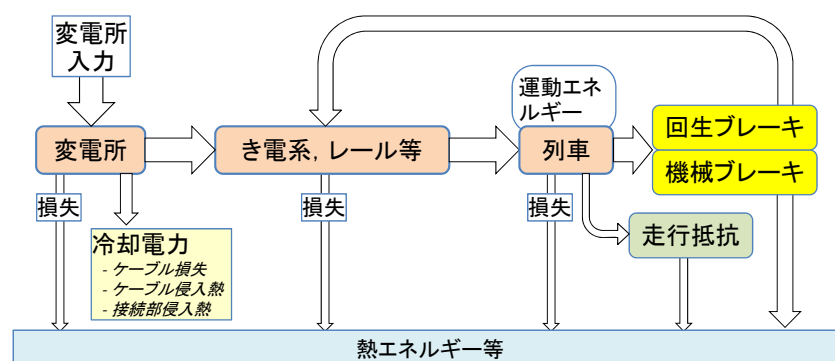


図1 直流き電系のエネルギーフロー

直流き電回路のエネルギーフローを図1に示す。変電所からき電回路（帰線としてのレールも含めて）を通じて電気車に電力が供給され、電気エネルギーが電気車の駆動エネルギーに変換される。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

その運動エネルギーの一部は制動時に回生エネルギーとしてき電回路に回生され、残りは機械ブレーキによって熱となる。また、走行抵抗も特に高速時には無視できない。変電所やき電線、電気車の中ではジュール損失等のエネルギー損失がある。超電導ケーブルを導入した場合には、き電線のジュール損失の低減、回生率の向上（回生失効の抑制）というエネルギー上のメリットと、機械ブレーキの使用頻度の低下によりブレーキのメンテナンスコストの低減が期待される。また、超電導ケーブルの導入方法によっては、変電所設置数の削減や冗長性（信頼性）の向上等も期待できる（図2）。一方、超電導ケーブルの損失、端末や接続部、配管からの熱侵入等に対して、超電導ケーブル温度をほぼ一定に保つための冷却電力が必要であり、変電所等から供給することになる。

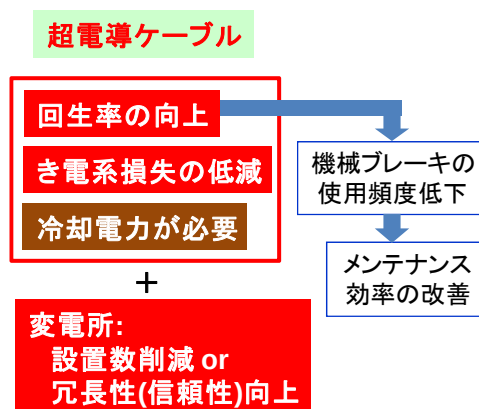


図2 超電導ケーブル導入のメリット

鉄道用超電導ケーブルの試作

2007 年、鉄道への応用に向けた、臨界電流値が 1.5 kA 級の超電導ケーブルの試作を行った。超電導ケーブル 1 本で P 層および N 層が通電可能とするため同軸構造とし、P 層にき電電流、N 層に帰線電流を通電することを想定している。通電試験を行った結果、P 層で 1.7 kA、N 層で 2.2 kA の臨界電流値を確認した。また、通電時の漏洩磁場について測定し、実用上の通電方向となる双方向通電において、漏洩磁場を抑制できることを確認した。

超電導ケーブルは低損失で大電流を送電することができる一方で、液体窒素温度付近までの冷却が必要となる。そのため、超電導ケーブルは真空断熱配管内に設置されるものの、多少の熱侵入により温度上昇が生じ、超電導状態の維持が困難となる。そのため、冷却ステーションを設け、冷却した液体窒素を循環する必要がある。循環させるためには冷媒経路の確保する必要があるため、フォーマ内部に冷媒経路を設け、見かけ上 1 本の配管で冷媒の行き帰りをを行う方式を採用した。これまでの検討結果をもとに、2010 年、実路線においても使用可能な 8 kA 級の鉄道用超電導ケーブルを製作した（図3）²⁾。臨界電流値を測定した結果、10 kA 以上の臨界電流値を確認した。この値は都心部の主要幹線の遮断容量に相当する必要電流容量である。



図3 8 kA 級鉄道用超電導ケーブル

超電導き電ケーブルの車両走行試験

これまでの材料評価結果を超電導ケーブルの設計に反映し、鉄道車両を用いた走行試験向けに鉄道用超電導き電ケーブルの仕様を決定した。2012 年以降、鉄道総研内の構内試験線に本ケーブルを敷設し、鉄道に必要な各種実験を進めている（図4）。液体窒素による冷却試験および通電試験を行い、国内外で初めて、超電導ケーブルを介し電車への送電に成功し、現在、車両走行試験を行っている。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612



図 4 構内試験線に敷設した超電導き電ケーブル例
(左：30 m 級ケーブル、右：300 m 級ケーブル)

おわりに

鉄道システムへの超電導ケーブル導入を目指し、超電導線材の特性評価試験を行った。評価結果をもとに設計を進め、30 m、300 m 級の超電導き電ケーブルを製作し、鉄道総研の構内試験線に敷設後、冷却・通電試験による健全性を確認後、車両走行実験を行った。今後は、試験結果から運用上の課題点を抽出し、鉄道事業用として適用可能な超電導き電ケーブルの実現を目指していく。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省からの補助金および（独）科学技術振興機構(JST)の「戦略的イノベーション創出推進プログラム（S-イノベ）」の支援を受けて実施している。

文献：

- 1) M. Tomita *et al.*: “Next generation of prototype direct current superconducting cable for railway system”, J. Appl. Phys. 109, 063909 (2011)
- 2) M. Tomita *et al.*: “Development of 10 kA high temperature superconducting power cable for railway systems”, J. Appl. Phys. 111, 063910 (2012)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

IEA-ISS ジョイントセッション登壇者の寄稿 (その 3)

「IEA-HTS-IA (国際エネルギー機関高温超電導委員会) Young Generation Award」

上智大学大学院・高尾研究室

修士 1 年 葛 雅志

私は本セッションにおいて「ASPCS による再生可能エネルギーの有効利用及び MgB_2 導体の特性調査」について発表を行った*。近年、地球温暖化が急速に進行しており、二酸化炭素排出量の削減が緊急の課題である。そのため、発電時に二酸化炭素を排出しない再生可能エネルギーの導入が世界各国で進んでいる。しかし、再生可能エネルギーは天候や地形によって出力が不規則に変動してしまうため、導入量が制限されてしまう欠点がある。そこで我々は、先進超伝導電力変換システム(Advanced Superconducting Power Conditioning System:ASPCS)を提案している。ASPCS は SMES、燃料電池、電気分解装置で構成されており、再生可能エネルギー源の変動補償を行うシステムである(Fig. 1)。SMES は即応性を有しており、大電力を瞬時に入出力できるため、電力需要の激しい変化にもミリ秒単位で対応でき、また繰り返しの使用に対する耐久性も持ち合わせている。

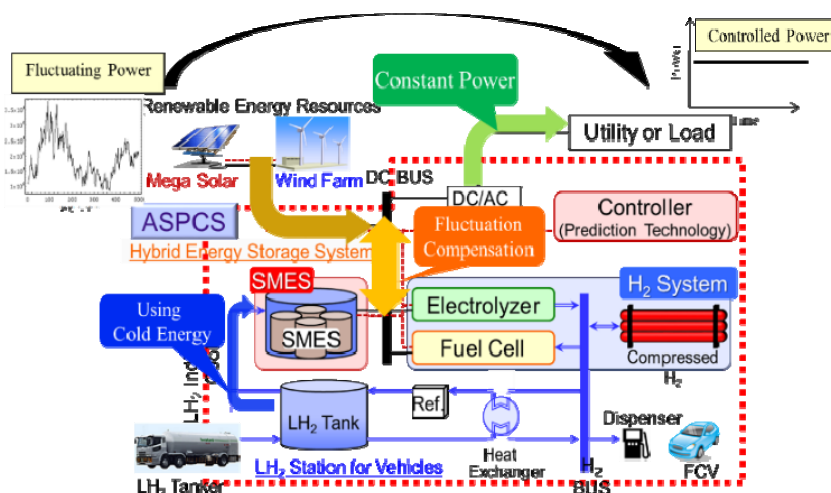


Fig.1. ASPCS 概要

一方で、FC と EL を組み合わせた水素貯蔵システムは、応答性は分～時間オーダーの応答性であるが、大容量のエネルギー貯蔵に優れている。そこで ASPCS では SMES と水素貯蔵システムという特性の異なる 2 種類の電力貯蔵システムを用いて、再生可能エネルギーの出力変動を効率的に補償する。また、ASPCS は今後普及が見込まれる燃料電池車用水素ステーションに併設し水素貯蔵設備を共有し、液体水素(20 K)で SMES コイルを冷却する。つまり、水素をエネルギー源としてだけでなく、寒剤としても使用することができる。将来のエネルギー社会には、ASPCS のように【①再生可能エネルギー②水素③超伝導】を組み合わせ、CO₂ の削減や安定的な電力供給を目指すシステムが必要ではないだろうか(Fig. 2)。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

また、ASPCS では SMES コイルの線材には、液体水素温度(20 K)で超伝導状態となり、かつ大電流化と経済性において有望な MgB_2 線材を用いる。しかし、 MgB_2 の 7 本撚線の液体水素温度(20 K)・外部磁場下についての特性は十分に把握されていない。そのため、私は ASPCS のコイル設計のため、 MgB_2 撚線の特性を調査している。具体的には、Fig. 3 の装置を液体水素で浸漬冷却し、外部磁場(1~5 T)下で臨界電流がどのように変化するかを測定した(Fig. 4)。測定結果は予測される結果よりも少し悪い特性となったので、現在劣化の原因を撚線構造等から模索している。

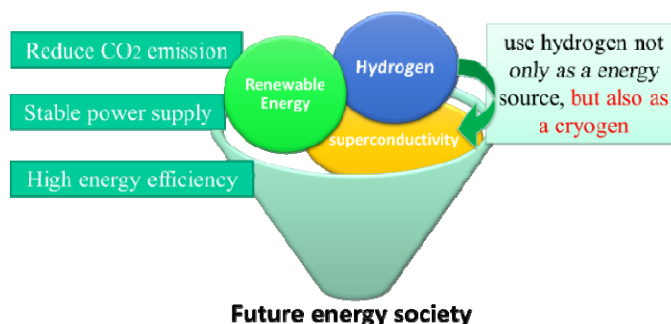


Fig.2. 将来のエネルギー社会イメージ

本セッションでは、著名な審査員方の前で発表を行うことができ、そしてその後の懇親会では発表者や審査員方と交流することができ、大変光栄であった。また、同世代である他の発表者達の魅力的な発表内容に感銘を受けたとともに、互いの研究内容を深く語り合うことができ、とても刺激的な 1 日だった。特に、同世代の発表者から積極的に国際会議に挑戦していることを聞いたことは、私にとって大きな衝撃であり、私自身もそれを目指すきっかけとなった。そして、大勢の人を相手に英語で発表を行ったことはもちろん、他の発表者達から刺激を受けたこと、著名な審査員方と交流できたこと等、本セッションを通じてたくさんの得難い経験をする事ができた。この経験を糧に、将来国際的に活躍できる人材になれるよう努めていきたいと思う。

最後となりましたが、このような貴重な発表の場を与えて頂きましたこと、IEA-HTS-IA および ISS の皆様に深く御礼申し上げます。

※本研究は独立行政法人科学技術振興機構 (JST) が実施している、先端的低炭素化技術開発事業(ALCA) のプロジェクトの一環であり、高エネルギー加速器研究機構、前川製作所、東北大学、八戸工業大学、岩谷産業、中部電力との共同研究である。

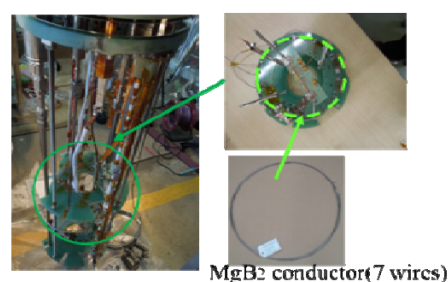


Fig.3. MgB_2 7 本撚線の測定サンプル

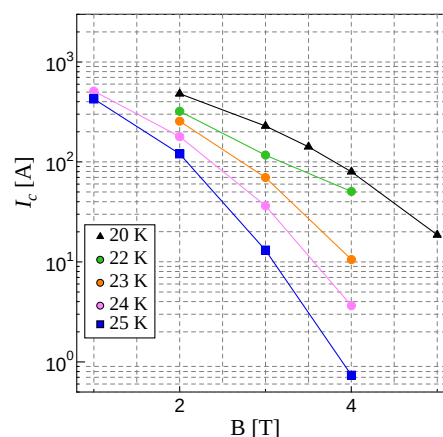


Fig.4. I_c -B 特性測定結果

超電導 Web21

(公財)国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

研究室紹介

「東京大学大学院総合文化研究科 広域科学専攻関連基礎科学系 前田研究室」

東京大学 大学院総合文化研究科
広域科学専攻 関連基礎科学系
教授 前田京剛

研究室メンバー構成 (2015.5.20 現在)

前田京剛 (教授)、今井良宗 (助教)、秘書 1 名
博士研究員: 鍋島冬樹 (学振 PD)
博士課程大学院生: 岡田達典 (D3)
修士課程大学院生: 3 名

連絡先: 研究室 HP-URL : <http://maeda3.c.u-tokyo.ac.jp>

研究室研究内容概要

私どもの研究グループは、上記のように規模の小さい研究グループですが、量子凝縮現象、特に超伝導現象について、(1)新奇超伝導体の開発、(2)新奇超伝導体の超伝導発現機構解明、(3)超伝導状態の新奇現象の研究、(4)新奇超伝導体の応用を意識した研究 のいずれの側面の実験的研究も過去に行ってきました。が、中でも(2)(3)に重きをおいて研究活動を展開しています。手法的には、マイクロ波-THz 領域の複素電気伝導度を、バルク単結晶、エピタキシャル薄膜、粉体などあらゆる試料にたいして寒剤中で低温まで評価することをコアに据えています。

最近 4-5 年の実践テーマよりいくつかを抜粋して列挙しますと、

(A) 銅酸化物高温超伝導体の超伝導状態の研究-I. 交流伝導度に現れる超伝導ゆらぎ測定による電子相図の研究: 周波数を連続的に変化させて、LSCO系でほぼ全領域のドーピングに対して、超伝導ゆらぎを測定し、実験的に電子相図を決定し、可能な理論を絞り込んだ。

(B) 銅酸化物高温超伝導体の超伝導状態の研究-II. 磁束線格子のダイナミクスの摩擦の物理への応用: 駆動された磁束量子格子のダイナミクスが、摩擦の物理に登場する運動方程式と酷似していることに注目し、磁束量子を界面摩擦のモデル系として据え、所謂摩擦の法則 (アモントン・クーロンの法則) の成立条件を明らかにした。

(C) 銅酸化物高温超伝導体の超伝導状態の研究-III. 高温超伝導体SFQの基礎: 発見以来30年経過した今なお、理想的なジョセフソン接合作製の困難な銅酸化物超伝導体において、なぜそれが困難かを理論家と共同で明らかにし、それに基づき、絶縁膜を用いない新たなアイデアで接合作製を試みた。その方式で、SQUID動作も確認された。(特許3件取得)

(D) 銅酸化物高温超伝導体の超伝導状態の研究-IV. 高温超伝導体固有接合を利用した量子ビットの高温動作化の研究: Bi2212系固有接合を利用して、量子ビットとしての応用を念頭ににおいた巨視的量子トンネル現象の研究を行った。

(E) 鉄系新超伝導体の研究-I. 高品質鉄カルコゲナイド超伝導体薄膜の作製: (以下で詳述)

超電導 Web21

(公財)国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

(F) 鉄系新超伝導体の研究- II. 常伝導状態のホール効果、THz 伝導度測定による電子状態の研究:(E) で作製された薄膜を用いて、常伝導の電子状態を明らかにした。

(G) 鉄系新超伝導体の研究- III. 高周波伝導度測定や不純物効果による超伝導状態の研究：同じく、超伝導状態について明らかにした。

(H) 鉄系新超伝導体の研究- IV. フラックスフローの研究：鉄系超伝導体で初めて、且つ、系統的にフラックスフローを測定し、定量的解析から、フラックスフローが多ギャップ超伝導体としての超伝導ギャップの構造を色濃く反映したものであることを示し、さらに、超流体密度の温度依存性のデータを組み合わせることで、超伝導ギャップの構造を詳細に決定できることも明らかにした。従って、この方法は、角度分解光電子分光実験などが有効でない物質・試料に対しても、ギャップの構造を決定することのできる新しい方法である。

(I) β -Bi2Pd における $T_c=5.4\text{ K}$ の超伝導の発見： 新しいトポロジカル絶縁体を開発しようという研究の途上で副産物として発見された新超伝導体であり、新しい多ギャップ超伝導体の候補として注目されている。

(J) 低温動作マイクロ波頭微鏡の開発： 複素電気伝導度を局所的に測定できるようにしようと、STMとしても使える、マイクロ波伝導度頭微鏡（液体ヘリウム中動作可能）を開発した（空間分解能 200 nm以下）。これを用いて、鉄カルコゲナイド122系のメソスコピックに相分離した構造の中で網目状の部分が高い伝導度をもつ超伝導体であることを、初めて明らかにした。（図1）

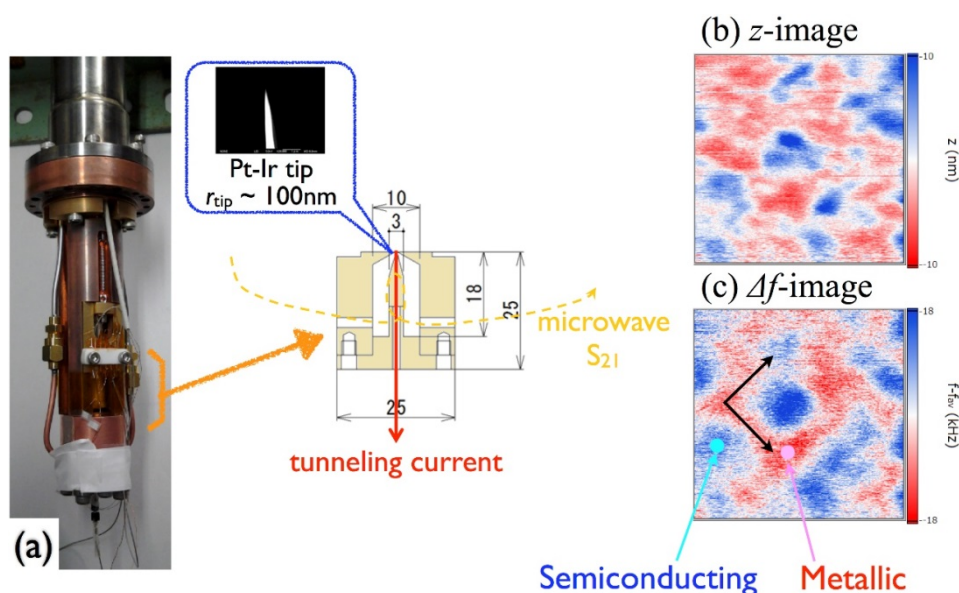


図1 マイクロ波頭微鏡の核心部とそれによって得られた鉄カルコゲナイド 122 系の電気伝導度分布

以上のリストのなかから、(E)項について、補足説明いたします。

我々は、鉄系超伝導体発見から半年ほど遅れて、この物質の研究に参入しましたが、その際、最初から PLD 法を用いた良質エピタキシャル薄膜の作製をテーマとしました。物質としては、構造的に

超電導 Web21

(公財)国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

もっとも単純、且つ、高温超伝導体としてのポテンシャルの高い、所謂鉄カルコゲナイド 11 系に注目しました。この物質では、Se を Te で部分置換した系においては、バルク試料は相分離のため作製不可能と考えられていましたが、Te の組成範囲 ($\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$ の表式で $0.1 \leq x \leq 0.4$) の試料も作製することに成功し、 T_c の値も $x=0.2$ 付近で最高の 23 K をとることがわかりました (図 2)。ここで得られた T_c の値は、物性測定が可能な品質の鉄カルコゲナイドエピタキシャル薄膜としては世界最高値であり、この研究により相分離の抑制による T_c の上昇、ひずみの導入による T_c の上昇、がともに達成されたことになります。現在では装置の改良を行い、超格子の作製を行い、さらなる T_c の上昇を狙っています。

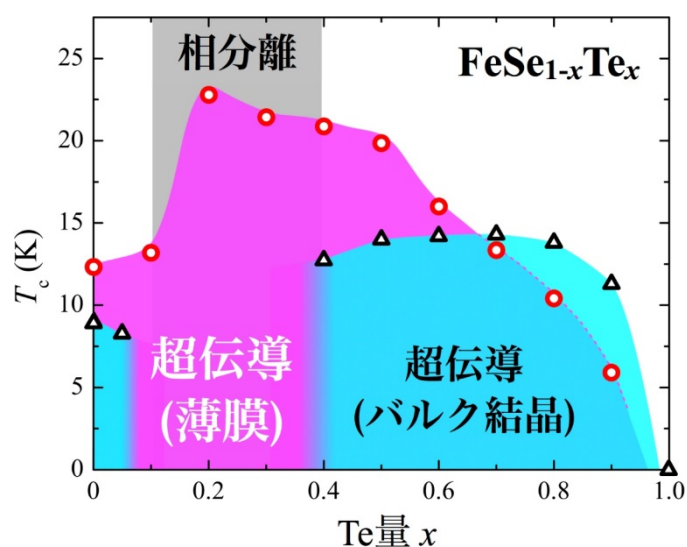


図 2 薄膜化によって相分離を抑制して作製された、鉄カルコゲナイド系の新しい電子相図

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

読者の広場

Q&A

Q. 「鉄カルコゲナイドでヘリウムレス MRI が将来できるかも、と聞きました。一方で MRI には丸線が望ましい、とも聞きます。今度の超電導線は丸線 が可能となるのでしょうか？」

A: 確かに、今回の成果として、 T_c が大幅に上昇し、臨界電流密度およびその磁場依存性についても十分な値が得られておりますので（未発表）、鉄カルコゲナイド超伝導体は、鉄系超伝導体のなかでも、同程度の T_c を持ついわゆる 122 系と比較しても全く遜色がなく、ヒ素を用いていない分だけ、実用的見地からもより望ましいと考えられます。しかし、鉄カルコゲナイドで丸線が可能か否かは、現状ではまだほとんど研究が着手されておきませんので、この点に関しては、「現状ではわからない」というお答えしかできません。今後の線材化に向けた応用研究の進展に期待したいと思います。

回答者：東京大学大学院総合文化研究科

広域科学専攻関連基礎科学系 教授 前田京剛 様

[超電導 Web21 トップページ](#)