

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）：

特集：超電導技術動向報告会

- MRI の市場動向と製品化課題
- HTS 機器冷却システムの現状と将来
- 医療用超電導コイルプロジェクトにおける共通基盤技術の研究開発
- 超電導直流送電システム開発
- 10 MW 超級風車の調査研究 - 超電導発電機の要素技術研究開発
- 高温 SQUID の資源開発分野、非破壊検査への応用
- 高温 SQUID 磁力計による地震に伴う地磁気変化計測
- 超電導センサの宇宙観測応用 ALMA 国際プロジェクト
- 新超電導物質の探索
- 強磁場マグネット
- 世界のプロジェクト紹介

- 超電導関連 2014 年 6 月-7 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン (4/19-5/20)
- 世界の動き
- 再生可能エネルギーと超電導
- International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2014) 報告
- 隔月連載記事「超電導センサ」(その 3) - 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の開発現状と今後の展望
- 連載記事「やさしい電力系統のはなし」(第 5 回)
- 研究室紹介 (九州大学大学院 システム情報科学研究院 木須研究室)
- 読者の広場「直流超電導ケーブル、って聞きますが、家庭に直流はは良いのでしょうか？危なくはないですか？」

[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 Fax 044-850-1613

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 Web2.1

(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：超電導技術動向報告会

「MRI の市場動向と製品化課題」

三菱電機株式会社
技術顧問 山本俊二

1. はじめに

人体にメスを入れることなく、また放射線を用いることなく、脳をはじめとする人体全ての部位の任意断面画像を得ることができる核磁気共鳴法によるイメージング技術（MRI: Magnetic Resonance Imaging）が実用化され 30 年の年月が経つ。今や大病院のみならず、かかりつけの身近な病院にまで、この診断技術が広まり、がん診断などに広く利用されている。

この診断技術にとっては、高磁場が大きなポイントであり、そのため、超電導技術が製品に浸透している。

2. MRI 市場動向

従来から永久磁石タイプ（0.1 T～0.4 T）が MRI 用として広く普及している。超電導技術の進展とあいまってこれらが 1.5 T 超電導マグネット方式に徐々に置き換わっている。現在最も広く普及しているのが、1.5 T タイプの超電導 MRI システムである。近年では、1.5 T 超電導タイプの上位機種として 3 T の MRI が病院で使われだし、空間分解能の高い画像を提供し始めている。

2.1 世界の普及状況

MRI システムの最新の状況は、北米放射線学会がわかりやすい。MRI、CT、PET (Positron Emission Tomography) など画像をベースにした診断機器に多くの時間とスペースをかける場である。最新は 2013 年 12 月、参加者 6 万人、学会発表 10000 件、メーカ展示約 500 社でシカゴで開催された。

MRI 市場は、3 T タイプが増加しているものの、依然として 1.5 T が主流である。最近の装置は人体が入るクリアボアが大、装置の軸長短と、従来機にあった閉塞感がほとんど無い開放的な装置が多くなっている。また、装置の低騒音化がさまざまな方法でトライされている。画像の鮮明さに深く関係する磁場均一度は、解析技術や巻線技術が進歩し、もはや当たり前のように達成されている。

超電導タイプについては水平型（水平円筒形）と共に開放型（超電導 C 型マグネット形状）で医者のオペレーション空間を十分に取った特徴あるものも展示、広く需要を喚起している。

3 T の MRI 装置内部に PET を組み込み、PET 診断と MRI 診断を同時に実施できる構成としたものも製品化され、診断技術がさらに高精度化されている。

2.2 国内の普及状況

現在、国内では、多くの MRI 装置が稼働し、がんや血管に関する診断が行われている。図 1 に、2013 年 4 月現在の国内での臨床用全身 MRI システムの稼働

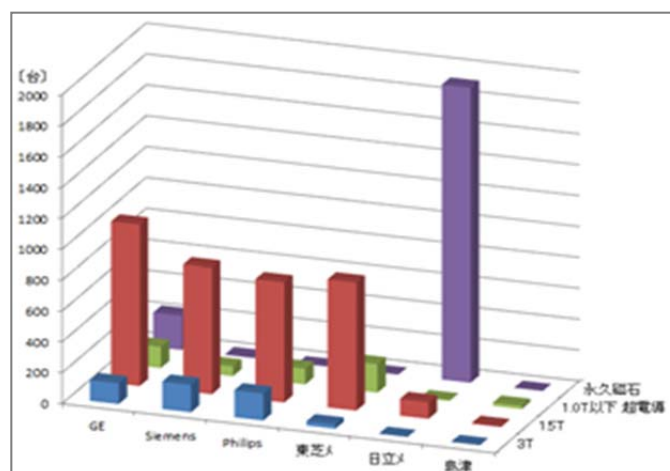


図1 国内 MRI 稼働台数
(2013/4 現在。「月刊新医療」データ使用)

超電導 Web2.1

(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

台数を示す。メーカーごとに特徴があり日立メディコは 0.1-0.4 T 永久磁石タイプの稼働台数が支配的であり、GE、東芝メディカル、Siemens、Philips の各社は、超電導（主に 1.5 T）が支配的である。図から明らかなように、超電導 1.5 T と永久磁石の 2 種で、稼働台数の 80 % を占める状況である。

3. MRI の課題

MRI マグネットの超電導から見た大きな課題は、①磁場強度、②磁場の空間均一性、③磁場の時間安定性である。磁場強度は、超電導の大きな特徴であり、蓄積エネルギーの高密度化により、常電導方式を大きく越える磁場を発生できる。MRI ならではの特徴が②③である。均一磁場仕様に対応するため、高度な解析によるコイル配置設計、磁界調整技術および高精度の巻線工作技術など、設計/製造/試験の総合的な技術力が必要である。高安定磁場は、永久電流と呼ばれる状態を超電導接続により具現化する製造技術である。

また、患者の立場で考えるならば、④閉塞感がなく、⑤短時間での撮像が可能で、かつ、⑥超電導を意識しないで済むものが必要といえる。

4. 今後の展望

医療用画像診断技術は、現在大きな進歩の途上にあるといえる。超電導技術はこれら医療用画像診断機器の発展を支える基本技術である。

f-MRI など脳機能の研究には 3 T 以上の MRI 装置が既に使われている。フランスでは 11.7 T の超強磁場全身 MRI システムが現在製作途上にある。

また、ヘリウムレスへの挑戦、高温超電導 MRI マグネットの可能性など可能性が広がっている。高温超電導 MRI については、イットリウム系、ビスマス系など広く研究されているが、既に MgB_2 線材を使用した全身用 0.5 T-MRI が製品化されている。今後高温超電導導体の進展（性能、コスト）により、大いに可能性があると考えられる。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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：超電導技術動向報告会「HTS 機器冷却システムの現状と将来」

コールドテック

代表 上岡泰晴

高温超電導応用機器（HTS 機器）の冷却は、通常機器に対する大きなハンディキャップであるにもかかわらず、現在までその開発は殆どされていなかった。図 1 に示すように、HTS 機器に最適な能力を持つ冷凍機は存在していなかったのである。最近になって、冷凍能力が温度 65 K で 2 kW の Turbo-Brayton 式の冷凍機が開発され、10 kW の冷凍機も開発が進んでいる。これらの冷凍機は、主に高温超電導ケーブルの冷却を目途にしているが、HTS 変圧器や大型の HTS モーターにも使用可能である。

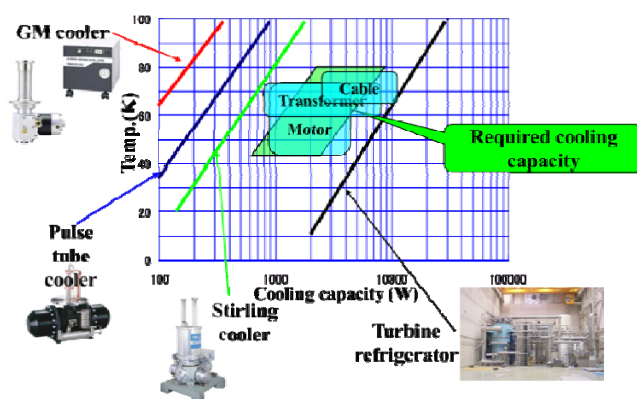


図 1 冷凍機と HTS 機器に必要な冷凍能力

表 1 HTS 機器に必要な冷却システム

Cooling capacity	
Cable	2 - 20 kW @65K
Transformer	2 - 5 kW @65K
Motor	0.5 - 5 kW @65K
Size	Compact
Maintenance interval	30,000h
Efficiency	High >0.06 @65K

表 1 には HTS 機器冷却に必要な仕様を示した。サブクール液体窒素冷却に対する仕様であるため、温度は 65 K とした。実用化時に必要なのは冷凍能力はもとより、メンテナンス間隔が重要であり、30,000 時間（3 年以上）の間隔が要求されている。このような要求に答えるには Turbo-Brayton（磁気軸受けまたはガス軸受）式冷凍機が最適であろう。

一方、G-M 冷凍機、パルス管冷凍機あるいはスターリング冷凍機等の、より小型の冷凍機は、限流器、小型モーター、ミキサーなどが社会インフラや工場、自動車、船舶に使用される場合、冷凍能力は十分でも、30,000 時間というメンテナンス間隔の確保が大きな課題となる。場合によっては 10,000 時間でも使用可能な用途に HTS 機器の使用を見いだす必要がある。今までは、入手できる冷凍機を使用して冷却システムを構築してきたが、それぞれの HTS 機器に最適な冷凍機を開発する必要があり、主に冷凍機の冷却部形状には開発の余地が十分にある。

冷却システムは冷凍機だけでは成り立たず、LN ポンプ、熱交換器や断熱容器、配管が重要な構成機器となる。特に LN ポンプは、現在でも実用化に耐えるポンプが無く、早急な開発が望まれる。HTS ケーブルの場合、吐出圧 1MPa、流量 5 L/min～100 L/min、メンテナンス間隔 30,000 時間が要求され、いずれも難しい課題である。現在検討に値するポンプは、BarBer Nichols 製ポンプや、工業用 LN ポンプあるいは LNG ポンプであるが、少流量低吐出圧または、大流量高吐出圧大侵入熱であって、少流量高吐出圧のポンプが無い。メンテナンス間隔に至っては全く不十分である。しかも少流量高吐出圧のポンプの開発は技術的に非常に難しいので、開発開始が急務である。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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：超電導技術動向報告会

「医療用超電導コイルプロジェクトにおける共通基盤技術の研究開発」

産業用超電導線材・機器技術研究組合、(公財) 国際超電導産業技術研究センター
和泉輝郎

1. 背景及び共通基盤技術の研究開発の意義

平成 25 年度より開始した、「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト」(経済産業省委託事業)は、高温超電導線材を用いたコイルの MRI や重粒子線加速器システムの医療応用等への適用を目指した基盤技術開発を目的とした事業である。

本事業は、以下の 3 つのテーマから構成されている。「高温超電導定磁場コイルシステムの研究開発」では、ヘリウムの供給逼迫を受けて、ヘリウムレス MRI を目指した開発を行い、「高温超電導可変磁場コイルの研究開発」では、効果的ながん治療法として注目されているガントリー及びシンクロトン加速器を含めた重粒子線加速器システムの小型化、低コスト化を目的とした開発を行っている。これらのテーマでは、比較の実用規模に近いサイズのコイルを試作し、性能を評価する内容である。一方で、「共通基盤技術の研究開発」では、上記の 2 つのテーマに対する技術支援と共に発展途上である「線材」「コイル化技術」「冷却技術」「評価技術」などの要素技術の高度化を押し進め、より競争力を有した機器実現のための先進的機能を有したコイルの開発を目指している。

2. 共通基盤技術の研究開発の具体的な内容

本テーマの中では、各要素技術に関して、我々が有する技術的な強みを更に強化し、これらを活用した機器を目指した開発を進めている。ここでいう、“強み”とは、磁場中高 I_c 特性線材やスクライビング加工技術及びこの加工線材を用いたコイル化技術などである。これらの強みを更に高度化することにより、液体窒素中運転も含めたヘリウムフリー MRI や、変動磁場運転下においても磁束クリープによる発熱を含めた発熱を抑制した小型加速器システムを期待することができる。この開発においては、「磁場中高特性長尺線材」「均一特性線材」「磁化緩和挙動制御技術」「線材加工技術」などの共通した要素技術の開発が必要である。そこで、「共通基盤技術の研究開発」では、研究開発の効率化の観点から、これらの要素技術を横断的に取りまとめて開発を進めている。(下表参照)

(i) 線材およびコイル基礎特性把握 (H25～H27)	Y 系超電導線材及びこれを用いたコイルの通電特性、磁化・交流損失特性、磁場変動直後の短時間の緩和を含む広範囲の時間スケールに亘る磁化緩和速度を把握する。
(ii) コイル化技術開発 (H28～H29)	(i)の結果を受け、サブクール液体窒素浸漬冷却方式モデルコイル及び伝導冷却方式モデルコイルを試作し、適用性を見通す技術を検証する。
(iii) 磁場中高 I_c 線材長尺化技術開発 (H25～H29)	これまでに開発された短尺での最高レベルの特性を実用レベルの低コスト・長尺で実現することを目指す。
(iv) 超低発熱線材作製技術開発 (H25～H29)	磁場変動に伴う発熱、接続部発熱を抑制するため、線材特性の均一性向上、微細加工技術、簡便な超低電気抵抗接続技術などの開発を行う。

3. 研究開発成果と今後展開

磁場中高 I_c 線材の長尺化において従来の 2 倍の磁場中特性 ($I_c = 54 \Rightarrow 108 \text{ A/cm 幅@77K, 3T: 94m}$) の実現や、線材の分割加工により磁化及び磁化緩和終了時の定常状態までの時間等を小さくすることが可能であることを確認するなどの成果が得られている。今後は、上表の開発内容を押し進め、

超電導 Web2.1

(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

空間的磁場均一性に必要な遮蔽磁場の抑制や、時間的均一性に必要な磁化緩和挙動や発熱抑制効果等をコイル形状で検証を推し進める方針である。

謝辞：本研究は、高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省の委託により実施したものである。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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：超電導技術動向報告会

「超電導直流送電システム開発」

中部大学 I-SPOT

筑本知子、渡邊裕文、浜辺 誠、ユーリ・イワノフ、高野廣久、山口 作太郎

千代田化工建設株式会社 I-SPOT

腰塚博美

住友電気工業株式会社 I-SPOT

林 和彦

さくらインターネット株式会社 I-SPOT

澤村 徹

1. はじめに

「超電導直流送電」は、長距離・大容量送電に優れるため、次世代送電技術として、注目を集めている。本技術は国内では、中部大学超伝導・持続可能エネルギー研究センターで既に 200 m の送電システムが実証済みであり、昨年からはじまった石狩プロジェクトは、その技術をベースに、実用化レベルのシステムの構築を目的としている。

2. 石狩プロジェクトの概要

本プロジェクトは、平成 24 年度経済産業省からの委託により「高温超電導直流送電システムの実証研究」として開始され、石狩新港地域を実証サイトとして、高温超電導直流送電システムを建設し、データセンタ等の直流需要施設に直流電源施設あるいは商用交流変電所からの送電を行うことによって、トータルシステムとしての実運用システムの構築、さらに将来の長距離送電システムを実用化するための技術的、制度的課題を抽出することを目的としている¹⁾。計画では 2 回線を設置し、回線 1 はさくらインターネット株式会社の石狩データセンタと同社保有の太陽電池を約 500 m の超電導ケーブル（住友電工製 BSCCO ケーブル、同軸・双方向通電）で接続して通電安定性の検証に供し、回線 2 は km 級の送電システムを公道脇に設置し、長距離送電のための準備・検討を実施する予定である。(Fig.1)

初年度は主に設計及び機器の製造・購入を実施するとともに、各種検証試験を行った。2 年目となる今年度は現地工事による、システムの完成及び試験運転を行う。

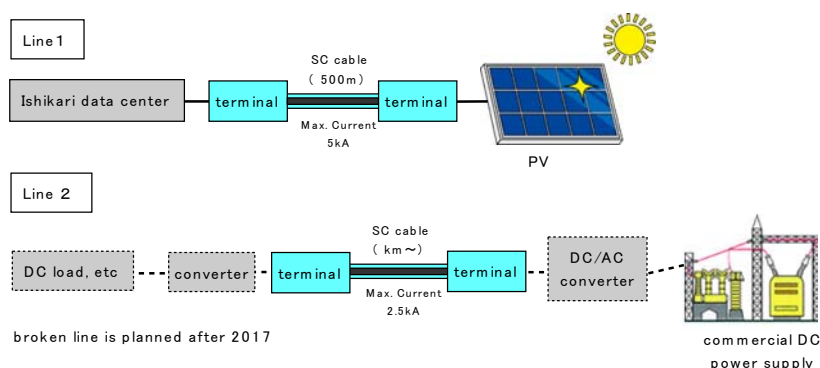


Fig.1 Schematic illustration of test lines in Ishikari Project

超電導 Web2.1

(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

2. システムの構成

将来の長尺ケーブルシステムを目指す上で、いかに熱侵入量を抑え、冷却効率を高めるかが重要なポイントとなる。そこで、本システムの配管に用いる断熱二重管については、冷媒の圧力損失が小さくなる直管を採用し、熱侵入量及びコスト低減のためケーブル配管 (65 A) & リターン配管 (50 A) を同じ外管に入れ、また新しく開発された多層断熱材を採用する。これにより、配管からの熱侵入量について、1.5 W/m 以下を目指す。また、超電導ケーブル端末には中部大学が開発したペルチェ電流リード (PCL) を採用し、低熱侵入化を図る。冷凍機については、NEDO プロジェクトにて開発された太陽日酸製ターボブレイトン冷凍機 (2 kW) を超電導ケーブルシステムとしては世界で初めて採用する。本冷凍機は磁気軸受を採用しているため、長期間メンテナンスが不要という利点がある。その他、ケーブルの熱収縮対策等についても検討を行っている。

謝辞 本研究は経済産業省 委託事業「高温超電導直流送電システムの実証研究」として実施した。

参考文献：

1) S. Yamaguchi et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.88 (2013) p.23

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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：超電導技術動向報告会

「10 MW 超級風車の調査研究 - 超電導発電機の要素技術研究開発」

独立行政法人 産業技術総合研究所
エネルギー技術研究部門
超電導技術グループ長 山崎裕文

自然エネルギー導入量の飛躍的拡大は、我が国が取り組むべき最重要課題の一つであり、風力発電に関しては、発電サイトの総発電容量を増大させ発電コストの低減をもたらす風車の大型化と洋上への拡大が大きなトレンドとなっている。このため、NEDO 新エネルギー部では、風力発電高度実用化研究開発事業の中で「10 MW 超級風車の調査研究（平成 25～26 年度）」を実施することになった。本研究開発テーマでは、「全体設計グループ（日立製作所）」、「要素技術グループ（産総研・東大・三重大・風力エネルギー研究所）」の 2 グループが風車全体の概念設計を行い、我々「発電機グループ（産総研・古河電工（新潟大学・上智大学）・前川製作所（東京大学）」が、10 MW 超級風車用超電導発電機を製作するための要素技術の研究開発を行う。

大型風車の回転速度は ≤ 10 rpm と小さいため、多段増速器（ギア・ボックス）を用いて発電機の回転速度を 100 倍以上にする方式が一般的であるが、発電機の大容量化（ >6 MW）に伴って増速器が技術的限界に達すると見られている¹⁾。このため、増速機を用いないダイレクト・ドライブ方式（ギアレス、大型多極同期発電機）が有望視されているが、現用技術の延長では大容量化に伴う体格・重量の増大やコスト増が大きな問題として懸念されている¹⁾。高電流密度・高磁界を特長とする超電導技術を利用することで小型軽量の大容量発電機を製作できることが最近の設計研究で示されており^{2), 3)}、それが実現すれば、洋上風力発電の普及拡大を大きく促進することが期待される。ただ、発電機の超小型軽量化が可能である空心コイル方式（回転子のみ超電導）は、高価な高温超電導線材を大量に使用するため、10 MW 級発電機に期待される 3~4 億円というコストの実現は困難である。回転子に鉄心利用超電導コイルを用いても従来型発電機の半分程度に軽量化できるため、線材利用量が 1 桁程度小さい鉄心利用方式を前提にした。鉄心（インナーヨーク）全体を冷却することは困難であるので、鉄心の各突極の回りに配置される超電導コイルのみを冷却するコイルモジュール方式（図）を採用する。

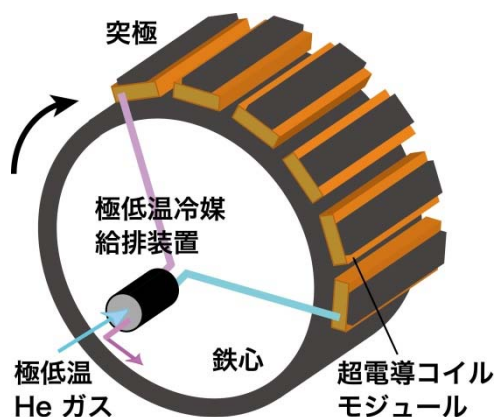


図 突極型超電導回転子と極低温冷媒給排装置の概念図

超電導 Web2.1

(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

本調査研究では、鉄心利用超電導発電機を製作するための重要な要素技術である 3 つのキーコンポーネント：(1) 超電導コイルモジュール、(2) 高信頼性ブレイトン冷凍機（～1 kW@20–40 K、メンテナンス間隔 > 30,000 h）、(3) 超電導回転子用冷媒給排装置について研究開発を行う。さらに、上記 3 つのキーコンポーネントの研究開発成果を活用し、コスト試算も含めた発電機全体の評価を行って、10 MW 超級風車に用いる超電導発電機の実現可能性を実証する予定である。

参考文献：

- 1) 野澤哲夫：日経エレクトロニクス, 1110 号, pp. 63–71 (2013)
- 2) 福井 聡：低温工学, 47 巻 6 号, pp. 362–369 (2012)
- 3) Y. Terao, M. Sekino and H. Ohsaki: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23, p. 5200904 (2013)

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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：超電導技術動向報告会

「高温 SQUID の資源開発分野、非破壊検査への応用」

(公財) 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 田辺圭一

超電導量子干渉素子 (SQUID) を利用した磁気センサは、フェムトテスラ ($fT = 10^{-15} T$) レベルの高い磁場感度を持ち、ニオブ (Nb) 薄膜を用いたいわゆる低温 SQUID 磁気センサを 50-100 チャンネル以上実装した脳磁計、心磁計などの医療機器が製品化されている。これらは、磁気シールドルームを用い、地磁気を完全に遮蔽し高精度の計測を行うものである。一方、RE123 系高温超電導薄膜を用いた高温 SQUID 磁気センサは、世界中どこでも手に入る液体窒素による簡易な冷却で使えるという大きな利点があるが、資源探査など磁気シールドのないフィールドでの有用性が近年実証されてきており、その応用範囲が大きく広がりつつある。これは、高温 SQUID 磁気センサの感度や磁場耐性などの性能が向上したことに加え、効率的な冷却や外来ノイズの遮断など実装技術が進展したことによる。

(公財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) では、平成 22 年度から 24 年度にかけて、(独法) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) の委託を受け、高温 SQUID 磁気センサを用いた次世代の金属資源電磁探査実用機 (SQUITEM3 号機) 用の SQUID 磁力計の開発を行った。この装置は、地上の敷設したコイルを用い、地中に誘導電流を伝搬させ、誘導電流の作る 2 次磁場の減衰の仕方をコイルの中心に置いた SQUID 磁力計で測定し解析することにより、地中比抵抗の深さ方向分布を評価するものである。SQUID 磁力計は図 1 に示すように非常にコンパクトなもので、1 リットルの液体窒素で 1 日の探査作業を行うことができる。ISTEC 独自の薄膜積層技術を用い作製した SQUID 磁気センサは、高い磁場感度と磁束トラップ耐性を両立させている。SQUITEM3 号機は、従来機に比べ 1 桁大きなコイル電流を印加した急激な磁場変化中での測定が可能で、これにはセンサ性能の向上に加え、測定に必要な周波数 100 kHz 以上のノイズを効率的に遮断する電磁シールドを磁力計に施していることも寄与している。^{1,2)} 本装置は、オーストラリア鉱山地区での野外試験で、フラックスゲートやインダクションコイルなど従来型センサを用いた電磁探査装置より優れた探査深度をもつことが実証され、平成 25 年度からは南米等での実探査に用いられている。

平成 24 年度からは、JOGMEC 石油部門の委託で、石油増進回収 (EOR) に用いられる油層に注入した CO_2 のモニタリングへの SQUID 磁気センサの適用をねらいとした技術開発にも取り組んでいる。これは、 CO_2 や水が浸入した油層の比抵抗が違ふことを利用し、地中での水平方向長距離に亘る比抵抗分布を金属資源電磁探査と類似の手法を用い評価する試みである。³⁾ しかしながら、油

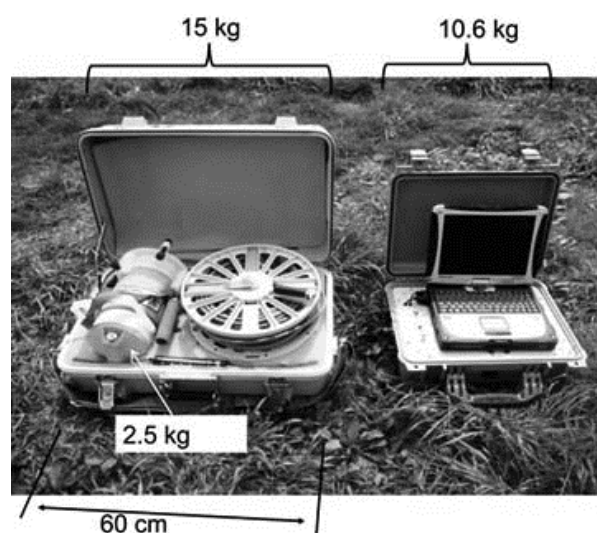


図 1. JOGMEC の委託で開発された SQUITEM3 号機。左の円筒状が ISTEC 開発の磁力計、右は三井金属資源開発 (株) が開発した受信機。

超電導 Web2.1

(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

層は地下 2000-3000 m の位置にあるため、掘削した坑井中で磁力計とコイルをそれぞれ動作させる必要がある。すなわち、限られた内径の坑井中の 30-70 MPa の高圧、200 °C 程度の高温といった極限環境で SQUID 磁気センサを動作させなければならない。また、坑井には鋼管ケーシングが入っているため、周波数の高い磁気信号は急激に減衰してしまうという問題もあるが、低周波でも感度が高いという SQUID 磁気センサの特長を活かすことができる。JOGMEC の平成 25 年度「技術ソリューション事業」において ISTEK は、SQUID 磁力計用の要素技術の開発を担当し、耐圧耐熱容器として金属に比べ電磁測定への影響の小さな外径約 80 mm のプラスチック容器を試作し、その耐圧耐熱性能を検証した。また、図 2 に示すように、JOGMEC の柏崎テストフィールド内に掘削した鋼管ケーシング入りの試験孔の水中 50 m に磁力計を投入し、SQUID 磁気センサの低ノイズ動作と 100 m 以上の遠方においたコイル信号の受信に成功した。今後、さらに 1,2 年をかけて、坑井内 1000 m 以上の深部で SQUID 磁力計を安全・確実に動作できる基盤技術の確立を目指している。この技術は、将来的には地熱探査や海底での資源探査など他の資源開発分野への展開も期待できる。

同じく、SQUID 磁気センサの低周波での高感度性能を活かせる分野として、非破壊検査がある。例えば、金属部材の表面付近の欠陥検査に一般的に用いられている渦流探傷 (ECT) 法のセンサとして SQUID 磁気センサを用いることにより、配管裏面の欠陥など部材深部の欠陥検知が期待できる。これまで、アルミやインコネルの多層試料などの模擬試験体を用いた基礎実験では、その深部欠陥検出性能がある程度実証されている。⁴⁾ また、保温材下配管の腐食や減肉など化学プラントや発電プラントなど産業インフラ維持の点でニーズの大きな対象への適用も期待できる。非破壊検査に関しては、従来法に対しての SQUID 磁気センサの優位性が大きく発揮できる対象を見極め、それを検証していくことが課題である。非破壊検査の現場では、ノイズ源が少なくなく、また検査スペースも限られているなど、従来の SQUID 磁気センサの常識では不利な要素があるが、資源開発分野適用検討の中で開発された実装技術を活用することで、実用化への道が拓けるのではないかと考えている。

本報告会で紹介した成果の一部は、(独法) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) の「平成 25 年度技術ソリューション事業」、「平成 22 年度～平成 23 年度次世代 SQUITEM 機器開発・SQUID 磁力計開発」に関する委託技術開発の一環で実施された。JOGMEC 関係各位に感謝します。

参考文献：

- 1) JOGMEC NEWS, vol. 34, p. 8, Sept. 2013.
- 2) T. Hato, A. Tsukamoto, S. Adachi, Y. Oshikubo, H. Watanabe, H. Ishikawa, M. Sugisaki, E. Arai, and K. Tanabe, Supercond. Sci. Technol., vol. 26, p. 115003, Nov. 2013.
- 3) JOGMEC 平成 24 年度 石油技術開発本部年報, p. 110.
- 4) J. Kawano, T. Hato, S. Adachi, Y. Oshikubo, A. Tsukamoto, and K. Tanabe, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, p. 428, June 2011.



図 2. 鋼管ケーシング入り試験孔中に SQUID 磁力計を投入している様子。

超電導 Web2.1

(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：超電導技術動向報告会

「高温 SQUID 磁力計による地震に伴う地磁気変化計測」

首都大学東京大学院

システムデザイン研究科 情報通信システム学域

准教授 大久保 寛

我々の研究グループでは、これまで野外における地球磁場（地磁気）観測を継続的に行ってきている。その中で平成 20 年 6 月 14 日に発生した岩手・宮城内陸地震において、国内・国外を通して初めて、地震断層運動により発生した地球磁場変化信号を動的に直接観測することに成功した¹⁾。この観測結果によって、地震が発生した時刻から地球磁場信号がゆっくりと明確に変化していることが明らかになった。

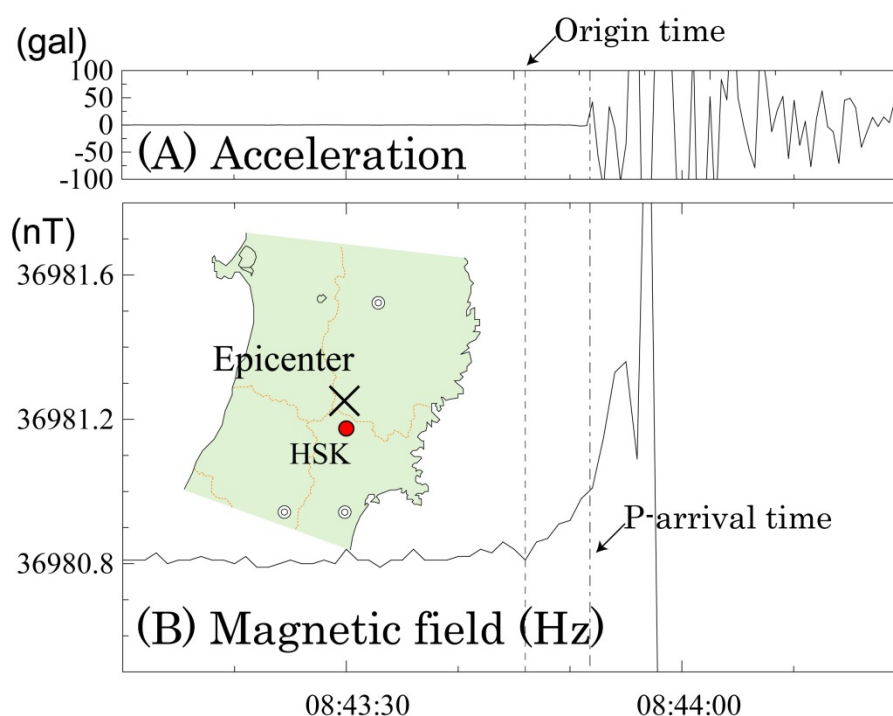


図 1 宮城県細倉観測地点（HSK）における岩手・宮城内陸地震発生時の観測波形
(A)加速度，(B)：垂直方向地球磁場信号

このとき、観測点での磁場の変化は地震波が観測地点に到達する前に始まっており、地震断層運動に伴い地震発生と同時に震源域で磁場が変化することがわかった。

磁場変化は観測点までほぼ光速で伝わるため、地震断層運動に伴って変動する地球磁場信号を利用することで、地震の発生をいち早く知ることが可能となる。これは地震を地震波以外のパラメータである磁場変化を利用して検知する全く新しいタイプの最速の緊急地震『超』速報の開発可能性を秘めている。

超電導 Web2.1

(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

しかしながら、このシステムを実現するためにはクリアしなければならない問題がある。それは、磁場観測センサにおける感度の問題である。岩手・宮城内陸地震時に観測された磁場変化量は、震源距離が 26 km 程度の細倉観測点において数 100 pT 程度であった。実際、磁場変化の大きさは、震源までの距離、角度、深さなど地理的な関係によって変化する。これは場合によって、計測できる磁場の変化量がさらに小さい可能性を示唆しており、したがって、今後このシステムを実現するには連続観測を行うための超高感度磁場計測技術が不可欠である。すなわち、地震断層運動に伴う磁気変化量を明確に観測するために、ピコ・テスラ範囲の極めて高感度な磁力計が必要なのである。

そこで我々は、地球磁場（地磁気）観測用の高温超電導 SQUID (HTS-SQUID) 磁力計システムの開発を試みた。この HTS-SQUID 磁力計の特徴としては、(1) 磁場 3 成分を高感度に計測できること、(2) 温度特性が極めて良いこと、(3) 液体窒素によって超伝導を維持できるため、ランニングコストが小さいこと、などのメリットが考えられる。特に地磁気観測には長期の連続観測が不可欠であり、将来的には多点観測が望まれることを考えると、超伝導状態を液体窒素で維持できるという点はシステムの実現可能性を大いに高めるものである。

我々は、HTS-SQUID 磁力計によって地球磁場を連続観測するフィールドとして、いわき市（福島県）にいわき観測点 (IWK) を設け、常時観測を開始している（図 2、図 3）。現在、本システムは非常に安定して稼働しており、地震に伴ういくつかの磁場変化信号も得られている。今後、さらにデータを蓄積することで、本システムの実用化の可能性を検討していく予定である。

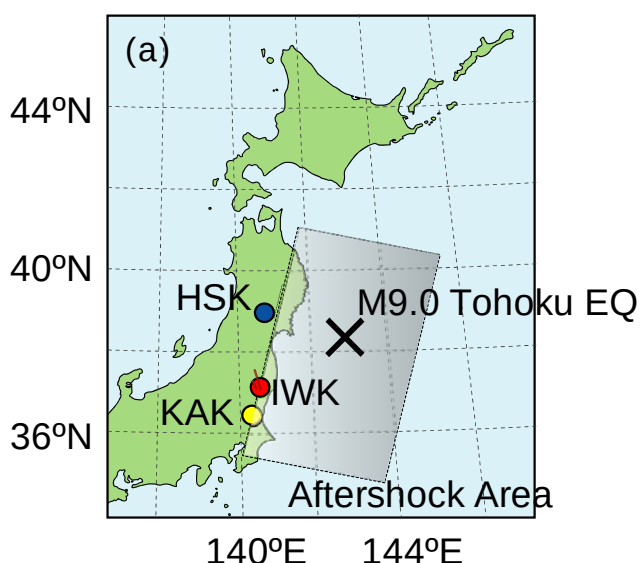


図 2 観測点と日本地図



図 3 地磁気観測用 HTS-SQUID 磁力計

参考文献：

- 1) K. Okubo, et al., "Direct magnetic signals from earthquake rupturing: Iwate-Miyagi earthquake of M 7.2, Japan, EPSL 305, 1, pp. 65, 2011.

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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：超電導技術動向報告会

「超電導センサの宇宙観測応用 ALMA 国際プロジェクト」

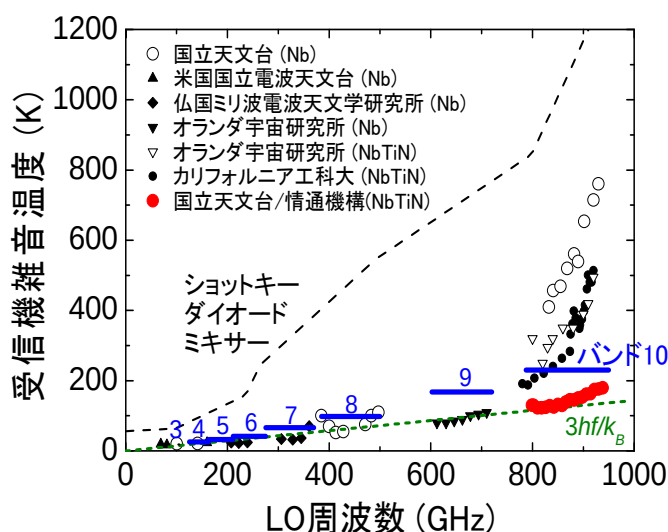
独立行政法人 情報通信研究機構 テラヘルツ研究センター
テラヘルツ連携研究室 室長 鶴澤佳徳



図 1 標高 5,000 m のアタカマ砂漠に誕生した ALMA 望遠鏡 (山頂施設の写真)

南米チリ北部にある標高 5,000 m のアタカマ砂漠に誕生したアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) は、東アジア・北米・欧州合同で建設した地上最大の電波望遠鏡である (図 1 は山頂施設(AOS))。国立天文台では、望遠鏡を構成する 66 台のパラボラアンテナの全てに搭載されるミリ波、サブミリ波帯ヘテロダイン受信機のうち、バンド 4 (125-163 GHz)、バンド 8 (385-500 GHz)、バンド 10 (787-950 GHz)用の超伝導受信機の開発・製造を行ってきた。このうち ALMA の最高周波数帯となるバンド 10 受信機開発は 2005 年から始まり、2013 年に全ての受信機の製造・試験が終了した。本稿では、筆者が国立天文台においてバンド 10 受信機の開発責任者であった立場から、その成果について紹介する。

ALMA プロジェクトから要求された最も厳しい性能仕様は受信機雑音温度 (量子雑音の 5 倍以下) であった。バンド 10 は、従来用いていたニオブ(Nb)のギャップ周波数を超えるため、我々は新たな超電導材料として窒化ニオブチタン(NbTiN)を開発し、世界最高性能の SIS ミキサの実証に成功した。チリに出荷した 73 台全ての受信機 (含スペア) で、ALMA の厳しい仕様を満足した。図 2 は、これらの受信機で得られた各測定周波数での最小雑音を示したものである。量子雑音の 3 倍程度まで到達しており、他の低い周波数バンドの従来型 Nb 受信機とほぼ同等の性能が得られた。また AOS において、バンド 10 受信機を搭載したアンテナ 2 台を用いて実施した、世界初となるテラヘルツ帯での干渉試験にも成功しており (図 3)、その優れた受信機性能が実証されている¹⁾。



参考文献：

1) <http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/>

図 2 ALMA 雑音仕様(青線)と実証した性能 (赤丸)

超電導 Web2.1

(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

Band 10 First Fringe (CM02-CM09) with ACA correlator at AOS, Orion-KL CO (J = 7-6)

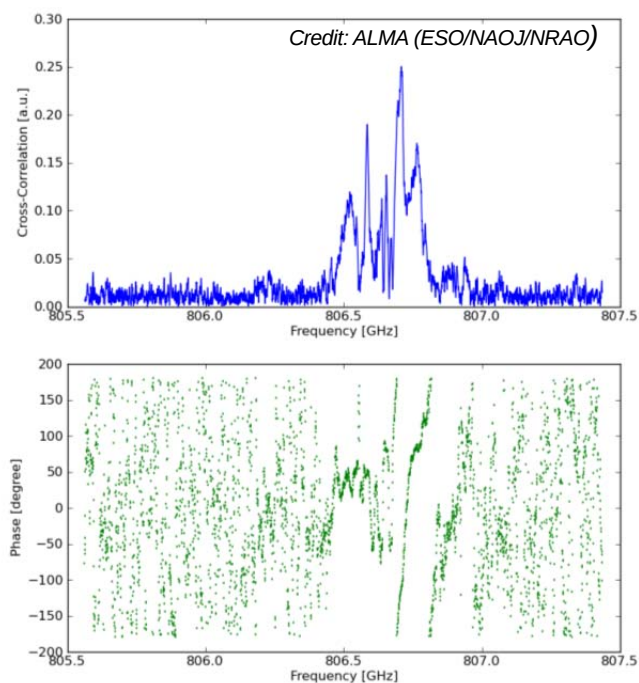


図 3 オリオン KL からのスペクトル（上）と位相（下）

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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：超電導技術動向報告会

「新超電導物質の探索」

東京大学大学院

工学系研究科 応用化学専攻

准教授 下山淳一

水銀に始まる 100 年以上にわたる超電導の歴史を通して、新しい超電導物質の探索は常に人気がある研究課題であり、いくつかの旬（フィーバー）の時期を経て今日に至っている。臨界温度(T_c)の記録は、元素、続いて金属の炭化物、窒化物や合金、さらに金属間化合物、最後に銅酸化物によって塗り替えられ、現在では常圧下の T_c は 138 K、高圧下のゼロ抵抗温度としては 153 K が最高となっている。図 1 は超電導体の臨界温度の変遷を表したものである。初期には既存の元素や化合物などを冷却して超電導になるかどうか調べられていたが、徐々に類似構造・組成を持つ物質が意図的に合成されるようになっていった。つまり、新しい超電導体を探すために新しい物質が合成されるようになった。

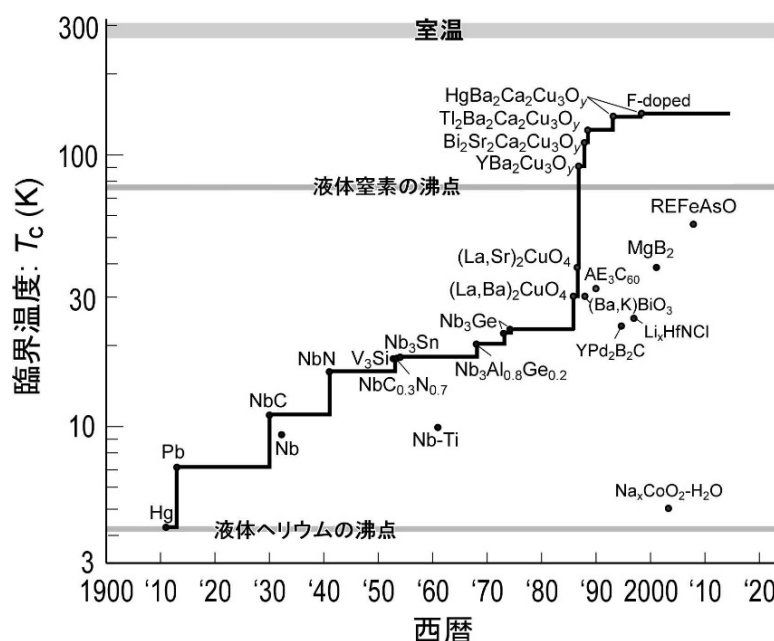


図 1 超電導体の臨界温度(T_c)の変遷

1953 年に発表された Hardy and Hulm の論文¹⁾では 30 種のケイ化物、ゲルマニウム化合物が合成され、うち 8 種が超電導を示し、 T_c が V_3Si において最高 17 K に達したことが報告された。これは当時の T_c の記録となったが、 V_3Si の結晶構造である A15 型構造に注目が集まり、直後に $T_c=18$ K の Nb_3Sn が発見される²⁾など A15 型金属間化合物の超電導体が旬の時期を迎えた。そして、1986 年以降銅酸化物の超電導体が次々と発見されたが、最初に超電導が発見されたアルカリ土類金属ドーピング La_2CuO_4 以外は全て化学組成も結晶構造も新しい物質であった。図 1 からわかるように、銅酸

超電導 Web2.1

(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

化物超電導体が旬であった時期に T_c の最高記録は急激に上昇している。特に、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ が登場した際には T_c の最高記録が 50 K 以上更新され一気に液体窒素の沸点 (77 K) をも超え、“高温超電導”の言葉が定着した。このような大きな T_c の上昇は当時の研究者の多くの予想を超えるものであり、最初の報道の直後にはその真偽が疑われたが、1 ヶ月以内に世界各地で 90 K 級の高い T_c が再現し、続々と類縁物質群で超電導が発見されていった。

2001 年に超電導であることが発見された MgB_2 は既知物質で市販されている化合物であったが、2008 年以降に続々と発見された鉄系超電導体の多くは新物質であり、今日でも新超電導体が次々と報告されている。 MgB_2 の 39 K や鉄系超電導体の 55 K という T_c は記録的に高いものではないが、決して低くもなく、液体 He を冷却に必要としない超電導材料として期待されている。

さて、これだけ長い歴史がありながら、新超電導物質の探索において王道は無い。超電導を目的として作製されたわけではない物質、目的としなかった未知物質が超電導を示した例は極めて多い。一方、超電導現象の理論はほぼ確立しているが、新超電導物質の探索に生かされた例はほとんど知らない。加えて、新しく合成を狙う物質が超電導を示すかどうか、 T_c はどれだけ高くなるかについては確度の低い予測すらできないのが実情である。要するに、新超電導物質の探索には 100 年前と同じく、“やってみなければわからない！”といった楽しみ(夢)の要素が残っている。もちろん、今日、偶然にも世界のどこかで室温超電導体(室温付近に T_c を持つ超電導体)が見つかっていてもおかしくないのである。但し、室温超電導体が見つかったからといっても、おそらく室温で使える超電導材料にはならない。室温で使える超電導体は真の高温超電導体である。

参考文献：

- 1) G.F. Hardy and J.K. Hulm, *Phys. Rev.* **89** (1953) 884.
- 2) B.T. Matthias, T.H. Geballe, S. Geller, and E. Corenzwit, *Phys. Rev.* **95** (1954) 1435.

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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：超電導技術動向報告会

「強磁場マグネット」

東北大学 金属材料研究所
強磁場超伝導材料研究センター
准教授 淡路 智

高温超伝導線材が販売されるようになり、これらを用いた応用超伝導機器開発が世界各国で進んでいる。特に希土類系高温超伝導 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (RE123、RE は希土類元素) 線材は、優れた機械特性と、高い磁場中臨界電流密度を有することから、強磁場マグネットへの応用が開発当初から期待されていた。現在では、米国国立強磁場研究所 (NHMFL) で進行中の 32 T 超伝導マグネット開発をはじめとして、世界中で強磁場超伝導マグネット開発が進んでいる¹⁾。一方で、高温超伝導材料は、テープ形状であることや高い臨界温度を有することなどから、従来材料にはない問題が指摘されている。Hotspot による焼損や、RE123 の多層構造に起因した剥離による劣化などである。これらに関しても、いくつかの解決手法が提案されつつあり高温超伝導強磁場マグネットの実現が期待される。本講演では、いくつかの代表的な高磁場超伝導マグネット開発について紹介し、特に東北大金研で実施されている 25 T 無冷媒超伝導マグネット開発や、計画されている 50 T 級ハイブリッドマグネットなど、高温超伝導強磁場マグネット開発について述べる。

図 1 は 1990 年以降に開発されてきた液体ヘリウム冷却超伝導マグネット (SM) 及び無冷媒超伝導マグネット (CSM) による発生磁場の推移である。図中に示してある材料名は、最内層コイルに用いている材料であり、2000 年以降金属系超伝導材料から高温超伝導材料へ変化していることが分かる。2014 年の現時点では、超伝導マグネットによる発生磁場はヘリウム冷却で 24 T、無冷媒で 20 T が最高となっている。図中の括弧で示したシンボルは、いずれも NHMFL で実施された、常伝導の水冷銅マグネットによるバックアップ磁場中 (19 T もしくは 31 T) で実施した小コイルによるテスト結果である。これらのテストでは、最高で 35 T の磁場発生に成功しており、純粋な意味での超伝導マグネットではないが、高温超伝導材料の高い能力を実証した結果として報告されている。したがって、高温超伝導材料は少なくとも 35 T 以上の磁場発生を担える能力を有していることになる。東北大金研の 25 T 無冷媒超伝導

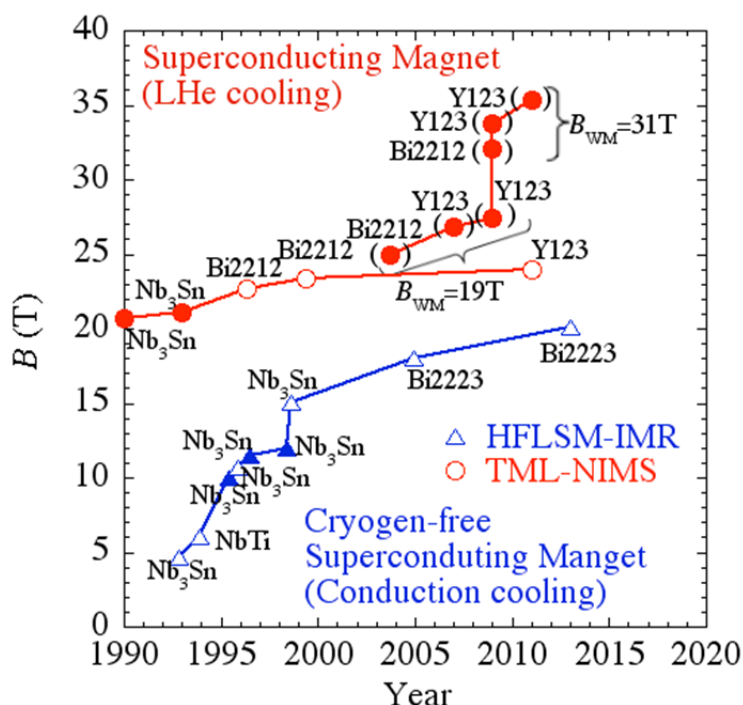


図1 液体ヘリウム冷却及び無冷媒超伝導マグネットによる発生磁場の推移。白抜き三角は金研強磁場センター、白抜き丸は物材機構による結果。

超電導 Web2.1

(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

マグネットと NHMFL で開発されている 32 T 超伝導マグネットは、外側に NbTi と Nb₃Sn の金属系超伝導マグネットを配し、内側の RE123 マグネットで最高磁場を狙う構造を採用している。いずれも約 450 MPa と高い電磁力設計となっており、RE123 の優れた機械特性を活用した設計が大きな特徴となっている。

参考文献：

- 1) D. Markiewicz *et al.*, IEEE TAS 22 (2012) 4300704.
- 2) S. Awaji *et al.*, IEEE TAS 24 (2014) 4302005.

[超電導 Web2.1 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：超電導技術動向報告会

「世界のプロジェクト紹介」

(公財) 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

研究開発の分野でもグローバル化は一層進んでおり、他国、或いは世界の趨勢を把握しておくことは重要である。ISTEC では、例年、超電導シンポジウム (ISS) の開催や超電導サミット (ISIS) のサポートを積極的に行っている。昨年は、世界の超電導分野の代表的研究者に各地域の動向をまとめて頂き、ISTEC の On line journal 「超電導 Web21」に掲載した。また、編集部でその他の情報と合わせて、表形式で見やすい「世界の現行プロジェクト」も発信した¹⁾ (下記表)。こうした情報が、各会員企業、機関ほか皆様の開発や企画立案に有効利用されている。

今回は、この中から世界のプロジェクトの主要部分を紹介する (日本のプロジェクトは、今回、他の講演があるので除いた)。

以下、各国の主要な状況である。

EU : EUROTAPES-Pj (線材開発) が多数の機関を含んで開始された。ただし、長さ、 I_c などの目標は、過去の日米のものと比べると、そう高くない。一方、世界最長級の 1 km の高温超電導ケーブル (AmpaCity-Pj : ドイツ Essen) が終盤にさしかかってきた (最終年 2016 年)。また、風力応用検討が 4 つもある (内、GE の Hydromenie Pj は終了。他は表の通り)。中で、Suprapower Pj は低コストの MgB_2 線材によるものである。イタリアの線材ベンチャー、コロンバス社の存在が大きい。

米国：欧州同様、風力応用への検討が増えている。長尺が作製しやすい MgB_2 線材の機器検討も出てきた。フロリダの高磁場応用のコイル開発も始まった。東北大コイルと同様 YBCO 線材を使った最初の大型コイルになると思われる。耐電磁力、クエンチ対策など実用的なシステム設計が検討され、今後の大型コイル開発に有益な情報が得られる。

韓国：従来の線材開発 Pj (DAPAS) が終了したが、JEJU-Pj での風力、太陽光発電など再生可能エネルギー用の実証プロジェクト (AC、DC ケーブルほか) が活発である。

ロシア：最近、超電導開発が活発化している。Superconducting Industry Project の線材、各機器開発以外に、世界最長級 2.5 km の St. Petersburg (サンクトペテルスブルク) のケーブル実証試験も活発に進められている。ROSATOM や Federal Grid Company を中心にして進められている。お国柄、エネルギーには強い関心がある。

なお、中国は ISIS2013 へ参加しておらず、最新情報も得られていない。Web21 上の情報も 2012 年のデータであり、その中からトピックス的なものを紹介する。

参考：

1) http://www.istec.or.jp/web21/pdf/14_03/all.pdf (ISTEC Web21 2014 年 3 月号)

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

Web21 世界の現行プロジェクト ISIS 2013.1.1.2.2 時点				
国	Project (PJ) 名	機関、内容		
		対象機器、線材	概要及び目標	現状
	ECCOFLOW PJ	限流器	16.5kV/1kA級、24kV/1kA級抵抗型限流器(Y系)の実系統導入を計画(2013)	12kV/800A級(2011)、12kV/1kA級(2012)抵抗型限流器(BI2212)レクチュールを変電所に設置。24kV/1kA級限流器が2012年末完成、近々試験開始。
	AmpaCity PJ	ケーブル限流器	10kV/2.3kA-1km三相同軸ケーブル(BI系)、10kV/2.3kA級抵抗型限流器(Y系)開発	プロトタイプ試験が成功裏に終了し、2013年末から運転開始予定
	EUROTAPES PJ	線材(Y)	ABAD, RABITS基板、YBCO線材および製造プロセスの高性能化:500m, 100€/kAm、丸線化など	2012年スタート、200m-250A (BRUKER)
	Suprapower PJ	風力発電機	10MW以上のHTS風力発電の開発ギアなし MgB ₂ 冷却系R&D (KIT) 建設費10MWで€2.8M以下	2012年12月スタート。10MW機設計中 (重量30%減、効率95%以上)
	Hydrogenie PJ	風力発電機	軽量、高効率発電機の開発、He力スを使った冷却	43 Kで1.7 MW、214 rpmの運転実証 (2013.April)
EU	INNWind.EU PJ	風力発電機	10-20MWの高効率洋上風力	Siemens, Suzlon, Gamesa, DTUほか27機関
	HTS-Geno PJ	風力発電機	回転機大型2G界磁とデーストリグ	KIT, Siemens
	DCケーブル PJ	直流ケーブル	kA級試作	Nexans
				予算、期間、参考データ先など (記載なしは不明)
				ISIS2013
				ISIS2013
				ISIS2012 ISS2013
				ISIS2013
				不明。E.U. Framework Programme 6 funded project (2006-2010の結果を使用)
				ISIS2013
				ISIS2013
				ISIS2013

表 世界の現行プロジェクト (欧州部分)。ISTECホームページのWeb21誌上では、これ以外に米国、韓国、中国、ロシアの一覧も掲載しているので参考ください。

超電導 Web2.1

(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 ‘14/6 月－7 月の催し物案内

6/8-13

International Conference on Modern Materials and Technologies (CIMTEC 2014)

Montecatini Terme, Italy

http://www.cimtec-congress.org/2014/general_outline.asp

6/9-12

International Cryocooler Conference (ICC18)

Syracuse, NY, USA

<http://cryocooler.org/>

6/16-20

5th International Particle Accelerator Conference (IPAC14)

Dresden, Germany

<http://www.ipac14.org/>

6/19-20

第 10 回 核融合エネルギー連合講演会

エポカルつくば

<http://www.jspf.or.jp/10rengo/>

6/26-27

第 19 回 動力・エネルギー技術シンポジウム

福井県民ホール

<http://mech.u-fukui.ac.jp/~spes2014/index.html>

7/7-9

International Workshop on Low Temperature Electronics

Grenoble, France

<http://www.wolte2014.org/>

7/7-11

ICEC/ICMC International Cryogenic Engineering Conference & International Cryogenic Materials Conference 2014-05-23 Twente, Netherlands

<http://www.icec25-icmc2014.org/index.html>

7/9-11

2014 ESAS Summer School

Oxford, UK

<http://school.esas.org/>

超電導 Web2.1

(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

7/24

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

JST 東京本館B1 大会議室

MgB₂関連フォーラム実行委員会 (Email: hamajima@ecei.tohoku.ac.jp)

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

最近の技術動向として、液体水素を基軸とした持続可能社会を構築するために、液体水素温度で使用できる MgB₂ 超電導線の性能向上開発や、液体水素の種々の特性把握、再生可能エネルギーへの応用開発などが研究推進されています。JST の ALCA では、「新エネルギー構築のための液体水素冷却 MgB₂ 超伝導線を用いた電力変換システム」の課題で、MgB₂ 線材開発やそれを支える液体水素の基礎特性、また、再生可能エネルギーを有効利用するための水素システムと MgB₂ 超電導コイルで構成するハイブリッド貯蔵装置の開発を行っています。

今回は特に液体水素冷却の MgB₂ 超電導線の性能向上に関する内容を中心に、下記の先端研究をされている講師の先生方に最新情報や研究成果を報告していただき、多くの研究者や技術者で議論して一層の早期開発につなげるために、多数の皆様方のご出席をお願いいたします。

場所：JST 東京本館 B1 大会議室 (130 名)

日時：平成 26 年 7 月 24 日 (木)

参加費：無料

10:00 ~ 10:30	熊倉浩明 (NIMS)	ALCA プロジェクトにおける MgB ₂ 線材開発
10:30 ~ 11:00	白井康之 (京大)	液体水素冷却 MgB ₂ 線の通電特性
11:00 ~ 11:30	濱島高太郎 (前川製作所)	液体水素冷却 MgB ₂ コイルを利用した再生可能エネルギーの有効利用
----- 昼食 -----		
13:00 ~ 13:30	山本明保 (東大)	MgB ₂ バルクならびに線材における組織学的特徴と高 J _c 化の課題
13:30 ~ 14:00	前田 穂 (日大)	次世代 MRI 装置の実現に向けた MgB ₂ 線材技術の開発
14:00 ~ 14:30	木須隆暢 (九大)	MgB ₂ 線材における局所電流分布と微細組織
----- 休憩 -----		
15:00 ~ 15:30	梶原昌孝 (岩谷産業)	液化水素型ステーションの動向
15:30 ~ 16:00	達本衡輝 (JAEA)	長期安定運転のための J-PARC 核破砕中性子源用低温水素システムの開発
16:00 ~ 16:30	沼澤健則 (NIMS)	磁気冷凍による水素液化への可能性

主催：MgB₂ 関連フォーラム実行委員会 (連絡先：濱島高太郎, Email: hamajima@ecei.tohoku.ac.jp)

協賛予定：未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会, 電気学会 超電導応用技術委員会,
低温工学・超電導学会 超電導研究会, および, 材料研究会

掲載予定：電気学会誌, 低温工学誌, 低温工学ホームページ, Web2.1, 他

(編集局)

超電導 Web2.1

(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 (4/19-5/20)

- 超電導送電技術 安全性を実証 NEDO が公募 日刊産業新聞 4/21
- 春の叙勲喜びの声 瑞宝中綬章 青山学院大学教授 秋光純氏 日本経済新聞 朝刊 4/29
- ILC 国内誘致へ 産業界の期待と挑戦 (1)課題は費用と研究者確保 日刊工業新聞 5/05
- ILC 国内誘致へ 産業界の期待と挑戦 (2)蓄積生かし超電導加速空洞 日刊工業新聞 5/06
- JAEA など、銅酸化物超電導体で電子状態の観測に成功 化学工業日報 5/07
- 古河電工の米子会社 米の超電導「限流器実証プロ」向け 超電導線材を納入 鉄鋼新聞 5/08
- ILC 国内誘致へ 産業界の期待と挑戦 (3)東芝 日刊工業新聞 5/08
- ILC 国内誘致へ 産業界の期待と挑戦 (4)三菱電機－医療用に超電導マグネット 日刊工業新聞 5/09
- 日の丸リニア 「開国」の皮算用 無償で技術提供 米に申し出 海外普及でコスト抑制 JR 東海、今秋にも工事開始 日経産業新聞 5/09
- 昭和電線子会社が Y 系超電導ケーブル開発 中国・天津で実証へ 電気新聞 5/14
- 3 種の量子ビームを用いて銅酸化物超伝導体の電子の動きを観測 科学新聞 5/16
- ISTEC が都内で報告会を開催 超電導技術の動向紹介 電気新聞 5/20

(編集局)

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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 (2014 年 4 月)

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



★ 今月のニュース発信地

▶電力応用

超電導限流器 2 台を受注、約 3.6 億円

Nexans (2014 年 4 月 1 日)

ネットワークオペレーターである Western Power Distribution (WPD 社) は、Nexans 社製の超電導限流器 2 台を設置することで、英国バーミンガムにある配電網の将来的安定化を計っている。限流器の発注には、設計、製造、さらに関連した開閉装置など革新的装置を恒常的に設置することも含まれており、その総額は約 260 万ユーロとされている。Nexans 社にとって、英国からの超電導限流器の注文は、今回で 3 度目であり、最大規模のものである。バーミンガムのネットワークにおける先駆的技術の導入は、FlexDGrid プロジェクトの一環であり、その狙いは、持続可能な資源から生成されるより多くの電力が受けられるよう、将来的に安定したネットワークを存続させることにある。新しい装置では、分散電力源または再生可能電力源から高電力を取り入れることができ、その目的達成への貢献が期待される。多くの場所で、新しい変電所建設を伴う電力網を拡張する必要性がなくなると考えられている。

二酸化炭素排出量を低減するための国家政策である Low Carbon Networks Fund から受けた 2,000 万ユーロは、FlexDGrid プロジェクトの助成金となる。このプロジェクトの目的は、故障の軽減、原因把握の改善、そして故障電流レベルの引き下げである。故障電流レベルを監視する測定システムが 10 ヶ所の変電所に据え付けられ、さらに 5 ヶ所の変電所には電流制限技術が装備される予定

超電導 Web2.1

(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

である。Nexans 社製の限流器は、その 5 ヲ所の変電所のうち 2 ヲ所で使用され配備される唯一の超電導装置である。バーミンガムの Chester Street 変電所と Bournville 変電所に設置されるこの 2 台の Nexans 社製限流器の電圧は 11 kV、そして Chester Street では公称電流 1,600 A で、Bournville では公称電流 1,050 A で作動するように設計されている。

“Nexans supplies two superconducting fault current limiters for permanent use on Birmingham's distribution network

Nexans Press Release (Apr 1, 2014)

URL:http://www.nexans.co.uk/eservice/UK-en_GB/navigatepub_149242_-33580/Nexans_supplies_two_superconducting_fault_current_.html

Contact: Angeline.Afanoukoe@nexans.com

超電導限流器用する高温超電導線材を納入

SuperPower Inc. (2014 年 4 月 30 日)

SuperPower 社は、Applied Materials 社の超電導限流器(SFCL)システムに使用する次世代高温超電導(2G HTS) 線材を納入した。この SFCL は、ニューヨークにある Central Hudson Gas and Electric 社 (Central Hudson 社) が所有し運営する Knapps Corners 変電所におけるグリッド実証試験に据え付けられる。エネルギー産業に関与する大手テクノロジー企業の一社である Applied Materials 社は、Central Hudson 社の所有運営する変電所での限流器システムの設置並びにグリッド実証試験に向けて、まずはシステムの組み立てが完了したことを 2014 年 4 月 15 日に発表した。このシステム検証には、Central Hudson 社と SuperPower 社のほかに、ニューヨーク州エネルギー研究開発公社 (NYSERDA)や Three-C Electrical 社もチームメンバーとして参加している。システム検証及び評価は 2014 年 5 月に開始し、その後一年間に亘って実施される予定である。尚、性能データはニューヨーク州公益事業委員会に提供される。

SuperPower 社の社長、白坂有生氏は、「SFCL プロジェクトにおいて Applied Materials 社と共に仕事ができることを大変光栄に思っている。米国および世界のエネルギーインフラの劣化は、古い設備を修繕し交換する我々の能力を上回っている。エネルギー用途で SFCL のような超電導技術を利用することは、古くなった機器交換の必要性に対処するだけでなく、増え続けるより多くの電力需要への対応を可能にする。」と述べた。

また、SuperPower 社は、ECCOFLOW と呼ばれる欧州連合(EU)の共同プロジェクトにも次世代高温超電導(2G HTS)線材を提供している。ECCOFLOW では、ヨーロッパの電力会社 5 社を含む 15 のヨーロッパ機関のチームによって、超電導限流器の設計、構築、試験が行われている。

Source: “SuperPower wire further advances the future commercialization of SFCLs”

SuperPower Press Release (Apr 30, 2014)

URL:

<http://www.superpower-inc.com/content/superpower-wire-further-advances-future-commercialization-sfcls>

Contact: Mickey Lavicska, mlavicska@superpower-inc.com

超電導 Web2.1

(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

▶線材

MgB₂ 大電流ケーブル : 20 kA 通電

CERN (2014 年 4 月 14 日)

High-Luminosity LHC プロジェクトの枠組みの中で、CERN 超電導チームの専門家たちは、二ホウ化マグネシウム(MgB₂)超電導体で作られた長さ 20 m のケーブル 2 本で送電線を構成し、温度 24 K で世界記録 20 kA という大電流通電に成功した。CERN の超電導及び超電導デバイス部部长、Amalia Ballarino 氏は「この検証は、MgB₂ を使用した低温送電システムの開発において重要な過程である。」と述べている。この目的のために、テストステーションが CERN で設計され組み立てられた。これを使用して、24 K (約-249 °C) という温度での試験を行うことができた。ヘリウムガスを強制的に流すことによって、この温度は 20 メートルの送電線全体に均一に保たれる。開発を続けた結果、長さ 20 m の MgB₂ 超電導線材 2 本でなる送電ケーブルで、世界記録 20 kA という電流通電に成功し、この技術が将来の送電において大きな可能性を秘めていることが証明できた。

High-Luminosity LHC の全体装置では、超電導マグネットに電流を供給する電力変換器が、現在の LHC トンネル内から地表もしくは放射線の照射されない地下部分に移され、この新しい低温電力供給システムを介してマグネットに接続されることになる。

Ballarino 氏はまた、「当初の開発の目標は、20 kA の DC ラインを温度 20 K(-253°C)で検証することであり、マグネットに電力を供給する上で CERN が設定した要件に近いものであった。今回の検証結果によって、このような高電流ケーブルでも、液体水素もしくはそれより高い温度で運転が可能であることが示され、さらには関連基盤技術の有用性も証明された。」と述べた。

CERN Press Release (Apr 14, 2014)

URL:<http://home.web.cern.ch/about/updates/2014/04/world-record-current-superconductor>

Contact: Cian O'Luanaigh, Web content editor of CERN

長尺で 500A/cm を達成

Superconductor Technologies Inc. (2014 年 4 月 29 日)

Superconductor Technologies 社(STI)は、絶対温度 77 K で 1 センチ幅あたり 500 A (最小値) の臨界電流を持つ Conductus®線材のパイロット生産をフル稼働させることに成功した。この 4 mm 幅で 100 メートルに及ぶ線材は、10 mm 幅 50 メートル線材を加工処理して実現されたものである。

同社マーケティング及び製品管理事業部副社長、Adam Shelton 氏は、「システム設計容量 100 % という優れた生産性で、我々のパイロット生産の目標性能である 500 A/cm が達成された。この度、当社独自の RCE-CDR プロセスの有効性が実証され、重要な節目を迎えたことになる。サイズや重量の軽減、さらに他の性能の実質的向上によって将来有望な応用分野が拡張される可能性を考慮すると、高性能な 500 A/cm 線材は、我々の多くの顧客にとって非常に望ましいものである。」と述べた。

顧客に対して取り組むべき残された課題は、生産量である。小さな磁石では数百メートル、また中規模の送電プロジェクトでは数十万メートルに及ぶ範囲で、顧客が手掛けるプロジェクトによってはデバイスごとに大量の線材が利用される。そこで、同社では、年間 750 km の初期生産量を戦略

超電導 Web2.1

(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

的に計画している。それに対応する生産量が可能規模の RCE-CDR 装置が既に設計され、2013 年後半にはその組み立てが始まる。2014 年第 2 四半期末には長さ 1 km、年間で 750 km の線材を生産できる設備の据え付けが完了する予定である。

Source: "Superconductor Technologies Inc. Achieves Conductus Wire Performance Milestone
Superconductor Technologies Inc. Press Release (Apr 29, 2014)

Contact: Cathy Mattison or Kirsten Chapman invest@suptech.com

URL:<http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1923310&highlight>

▶基礎

Bi2212 線のピンニング検討

North Carolina State University (2014 年 4 月 17 日)

ノースカロライナ州立大学の研究者たちは、超電導体 Bi2212 の性質を向上させられると思われる 1.2 nm から 2.5 nm の大きさのナノスケールな不純物を発見した。同大学の博士課程学生、Golsa Naderi 氏は、「このナノスケールの不純物あるいは欠陥は、磁束を捕捉する 'ピン止め'点として機能する。」と述べた。これらピン止め点なしでは、磁界が存在すると、磁気渦が動き回り、抵抗性を持ち、超電導を妨げる。

研究者たちはまた、ミクロン単位で測定された大きな不純物が、Bi2212 の超電導特性に有害であることを発見した。これら不純物が非常に大きいため、電流の障壁として作用し、電子の経路を強制的に変更させ、物質の超電導を弱めるからである。同大学材料科学工学部長、Justin Schwartz 博士は「Bi2212 線材にとって、超電導体 Bi2201 の大規模な欠陥が重要な問題であるということは、我々の研究でこれまで示唆してきた。今回の研究では、それが裏付けられた。」と述べている。研究者たちは今、ナノスケールにおいて Bi2201 は有害ではなく、性質を改善させる可能性があるとの見解に至った。

材料科学者にとって重要な次のステップは、長年処理している Bi2212 線材のプロトコルを再評価し、大きな不純物の生成を最小限にする方法を決定することである。研究論文「BiSrCaCuO/Ag 丸線における BiSrCuO 合成の役割について: c 軸輸送特性と磁束ピン止め」が、Applied Physics Letters オンライン版で公開されている。

Source: "Impurity Size Affects Performance of Emerging Superconductive Material"

North Carolina State University Press Release (Apr 17, 2014)

URL:<http://news.ncsu.edu/releases/wms-schwartz-bi2212-2014/>

Contact: justin_schwartz@ncsu.edu

▶経営・決算

超電導 Web2.1

(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

経営状況と新製品

AMSC (2014 年 4 月 4 日)

AMSC 社は、マサチューセッツ州、ウィスコンシン州、そして中国における労働者の 5 % から 10 % を解雇すると発表した。その数週間後、同社最高経営責任者である Daniel McGahn 氏は、経営が軌道に乗ってきていることを発表した。同社は、4 年ぶりに 3 月締め四半期に現金を生み出すことができた（同社計画を一年前倒しで達成）。事業再編計画では、解雇並びにウィスコンシン州での施設閉鎖などを余儀なくされているものの、事業強化を図り、現在成長段階に至っている。事業再編の影響を受けて、2014 年度第 4 四半期には、年間 300 万ドルの収益確保を見込んでいる。2013 年 12 月 31 日締め 9 ヶ月間で、同社収益は、2012 年同期の 6,700 万ドルとほぼ同額の 6,780 万ドルに達した。

McGahn 氏によると、同社は来年以降、送電網と米海軍に焦点を当てた 2 つの製品に注力する動きである。Resilient Electrical Grid と呼ばれる送電網製品は、電力会社が都市部インフラにおいてより多くの電力容量やその冗長性を得ることを可能にする。同氏は、来年中には、この製品の注文を受けるであろうとの見解を示している。

また、同社は、磁氣的に作動する地雷を避けるため、乗務員が船舶の磁気特性を調整したり、シールドできる新たな製品の開発に米海軍と共に取り組んできた。消磁と呼ばれる技術は、第二次世界大戦にさかのぼるものであるが、その技術の利用について McGahn 氏は、同社が船の配線とマグネットケーブルを軽量化することで、それらを使いやすいものにすることができたと述べている。さらには、この技術によって、従来の方法より良好に消磁できると付け加えた。同氏は、この製品の米国市場は年間約 1 億ドル、また米国及び同盟国を合わせた総市場では約 10 億ドルに値すると推測している。

Source: "AMSC CEO: 'Things are only going to get better' after restructuring"

Boston Business Journal (Apr 4, 2014)

URL: <http://www.bizjournals.com/boston/blog/techflash/2014/04/amsc-ceo-things-are-only-going-to-get-better.html?page=all>

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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

再生可能エネルギーと超電導

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

2014 年春季低温工学・超電導学会

5 月 26-28 日タワーホール船堀で開催された。参加者は約 400 名で例年通りであった。発表は 201 件（内ポスター 47 件）であった。会議全体では、新しく始まった METI の高温超電導マグネット Pj の東芝、三菱の MRI や加速器コイルの発表が大勢を占めたが、再生可能エネルギーに関連した報告を以下紹介する。

□石狩 DC ケーブル Pj : 2 件。まだ、これからなので主に計画、システム構成などが報告された。実験は、中部大で実施している、熱侵入測定やペルチェ電流リードがあった。

1C-p05 超伝導直流送電システム用断熱二重管の熱侵入測定（中部大）

1C-p06 石狩市でのデータセンターへの電力輸送 超電導直流ケーブルプロジェクト 2
筑本 知子, 山口 作太郎（中部大）; (千代田化工); 林 和彦（住友電工）; (さくらインターネット)

□その他、交流、直流ケーブルでの発表が 10 件程度、風力発電、水素冷却（燃料電池インフラとの連携か）、SMES（再生エネによる出力変動補償）があった。

2C-a09 自然エネルギー出力変動補償用 SMES の通電電流を考慮した入出力制御法の検討
津田 理（東北大）; 濱島 高太郎（八戸工業大）; 新富 孝和（日大）; 植田 康博（KEK）; 高尾 智明（上智大）; 岩城 勝也（岩谷産業）

□ケーブルに関しては、かねてから冷却が問題とされているが、着実に進んでいるようである。下記は、聴講できた発表であるが、東電ケーブル用のブレイトンサイクル冷凍機で 5 kW, COP~0.1@77 K を達成できている。筆者には大きな進歩と思われた。また、課題の信頼性も 3 万時間達成のめどを得たとしている。さらに本システムでは冷凍機が止まった時のための、液体窒素サブクーラータンクも整え、事故に備えたシステムになっており、着実にケーブルシステムとして進歩している。

2C-a01-03 高温超電導ケーブル用冷却システムの開発：冷却試験状況

大野 隆介, 植田 翔太, 小松 峻介, 仲村 直子, 工藤 瑞生, 矢口 広晴, 町田 明登（前川）; 本庄 昇一（東京電力）

Source:

2014 年春季低温工学・超電導学会予稿集

福島沖風力発電所：超大型 7MW 機 5 月中に工事を開始

福島沖の浮体式洋上風力発電所は、すでに 2 MW 「ふくしま未来」機が運転している¹⁾が、最新の情報によれば、さらに、5 月に超大型の 7 MW 機の工事を開始し、2014 年末までに 2 基が運転を開始する。2 MW 機の直径が 80 メートルだったが、今回は 2 倍以上の 167 メートルにもなる。発

超電導 Web2.1

(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

電した電力は、海中を走る「ライザーケーブル」と呼ぶ特殊な 22 kW、66 kV の送電ケーブルを通じて福島県内に供給される。

これまでの他の国内洋上風力（北九州など）の実績では、洋上では陸上よりも年間平均風速が速く、設備利用率は、陸上風車の 20 %を上回って 30 %程度まで上昇する。このため、今回の設備は、年間の発電量は 4000 万 kWh を超えて、一般家庭で 1 万世帯以上に相当する電力を供給することができる²⁾。

超電導分野の学会でも、従来の 10 MW から、15-20 MW 級の超電導風力システムの検討が始まっている。技術的にも、今回の福島沖風力の成功の可否が与えるインパクトは大きなものとなり、日本近海での洋上風力発電の可能性を高めるものとなろう。

Source:

- 1) 資源エネルギー庁 HP,
- 2) スマートジャパン HP <http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1404/30/news019.html>

火力発電が 90%を突破、再生可能エネルギーは 8.2%にとどまる。

超電導の応用としては、世界各国でケーブル、風力発電機、限流器、SMES、通常の発電機など電力分野が多い。よって、昨今の電力源の使われ方を抑えておくことは重要である。今回、電気事業連合会が電力会社 10 社による 2013 年度の発電電力量の内訳を公表した。2013 年度に発電した電力量のうち、火力発電の比率が初めて 90 %を突破し 90.5 %に、LNG（液化天然ガス）ガス火力だけでも全体の 50 %以上になった（他社からの受電分を除いた発電電力量の合計は 7436 億 kWh）。また、水力を含めて再生可能エネルギーは 8.2 %である。ちなみに、風力は 0.47 億 kWh、太陽光は 0.84 億 kWh、地熱が 24.1 億 kWh であり、ほとんどの再生可能エネルギーは地熱によるものであることは従来と大差ない。

Source:

- 電気事業連合会 HP,
スマートジャパン HP <http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1405/27/news013.html>

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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

「International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2014)」報告

(公財) 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
副所長 兼 線材・パワー応用研究部長 和泉輝郎



Antalya、トルコ

International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2014)が、2014.4.27～5.2の期間でトルコ南部の地中海に面したリゾート地である Antalya で行われた。

この会議は、2008 年の Side から 1 年おきにトルコで開催されており初回の 350 名から毎回参加者が劇的に増加しており、今回は 1300 名の参加があった。Director は、トルコの超電導研究の中心を担っているアンカラ大学にある Center of Excellence for Superconductivity Research(CESUR)の所長でもある Dr. Ali Gencer である。トルコは、国家的な科学技術振興の一環として、CESUR を創立し超電導研究開発に力を注いでいる。彼の説明によると、トルコでは上記の振興策の成果として、指標としている Publication Ranking の中で、2000 年に 7,000 報以下であった論文数が 2012 年には 28,000 報まで伸びているとのことであった。ちなみに、これまであまり認知していなかったが、GAZI 大学で Coated Conductor(CC)を開発しているとのことであった。



Dr. Ali Gencer

ICSM会議の初日(4/27)のOpening Ceremonyの後Public Outreach Plenary Sessionが公開で実施された。このPlenary Session ではノーベル賞受賞者のDr. K.A.Muller氏から”Over Half a Century of Research in Oxides”と題した講演で、STO材料の研究開発の一環としてのLa系酸化物超電導材料の発見に関して、高齢ではあるが、かなりの詳細が講演された。今回のICSM2014の講演の参加者数ベースでの統計では、Opening後の公開基調講演3名、本会議では9件のPlenary、8件のHalf Plenary、267件のInvited Oral、228件のContributed Oral、545件のPosterの講演で合計1060件の講演数がAbstract 提出ベースでの統計数値である。参加者数は

事務局紹介で、85ヶ国からの約1300名であった。尚、日本からの発表は、Plenary:1件(Dr. Shiohara: iSTERA/ISTEC)、Invited Oral:27件(筆者他)、Contributed Oral:15件、Poster: 10件の合計53件であった。

以下には、CC を中心とした超電導線材及びその応用に関する主な講演に関して報告する。

超電導 Web2.1

(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

CC に関わる基調講演としては、Dr. Shiohara : (ISTERA/ ISTE) が CC 開発の歴史から最近の医療応用を目指した高温超電導コイル開発、第三世代線材の必要性などに関して紹介された。

CC のセッションでは、冒頭に筆者が磁場中特性の改善に関する報告を行った。ここでは、磁場中特性に関して、世界最高特性を有している、EuBCO+BHO 系の開発内容に関する解説を行い、特に長尺線材においても短尺と遜色ない特性が得られていることなどを紹介した。以下には、引き続いて行われた講演における新規知見を整理する。



Dr. Yuh Shiohara

Prof. Kiss (Kyushu Univ. : CC の評価技術開発とその解析)

- ・高配向基板上における人工ピン(APC)導入線材と人工ピンは導入していない超高配向基板上線材の J_c -B 特性を評価した結果、 ~ 10 T 程度の中磁場領域では APC 入り線材が高い特性を示したが、高磁場領域で逆転することが明らかになった。これにより、基板の配向性に関して、自己磁場中の I_c は $\Delta \phi$ が 3 度以下では大きな変化はみられないものの、磁場中特性には効果があると推察されることがわかった。これにより、APC 入り線材に超高配向基板を組み合わせることで更なる特性向上が見込めることが分かった。一方で、APC の均一制御が難しい場合、超高配向基板の導入で超均一特性を実現する選択もあり得ると考えられた。結論として、磁場中特性、均一性、コストのベストコンビネーションを考えるにあたって、もう一つの選択肢が加わったと考えられる。

Prof. Hong (Korea Polytechnic Univ. : 韓国における CC 及びその応用に関する Review)

- ・SuNAM ではプロセス改善が行われ、長尺線材の均一性向上に著しい成果があった。この成果では、特に中間層から超電導層に大気暴露することなく成膜するシステムが効果的であると考えているとのことであった。
- ・IcL の世界最高値の更新 $600 \text{ A} \times 860 \text{ m} = 516 \text{ kAm}$
(参考：フジクラによる従来の最高値 $572 \text{ A} \times 816 \text{ m} = 467 \text{ kAm}$)
- ・磁場中特性 $123 \text{ A/cm-w} @ 30\text{K}, 3.5\text{T}$
(参考：EuBCO+BHO 特性 $527 \text{ A/cm-w} @ 65\text{K}, 3.6\text{T}$)

Dr. Li (Shanghai Jiao Tong Univ. : 中国における CC の開発動向)

- ・このグループは、amsc から移籍した人が中心になって活動しているとのこと。
- ・プロセスは、IBAD 及び配向金属基板上に PLD 法で超電導層を形成。
- ・厚膜における a 軸配向粒に関して、Dy の添加により改善し、 $2.8 \mu\text{m}$ 厚で 780 A/cm-w (50 cm)を得ている。
- ・上記の成果を長尺化に展開し、 100 m - 500 A/cm-w の成果を挙げている。開発、1~2 年で、長尺化に成功したのは注目すべき成果である。

Dr. Urayama (Kyoto Univ. : HTS による 3T-MRI の開発)

- ・BSCCO による 3T-MRI の設計、製作、評価の結果の紹介で、これまでも情報は紹介されていたが確認できた新規知見を纏める。
⇒最大経験磁場 平行磁場 5 T 垂直磁場 3.6 T
⇒3 T 発生時の磁場空間均一性 845 ppm (コイルのみ) → 63 ppm (シム)
(1.5 T で 5 ppm まで均一化したことを考えると鉄シム効果が小さくなったと推察できる。3 T に対する均一化が改善の必要性があると考えられる。)
- ・3 T 運転 3 回目において減磁中に発熱、暴走し、コイルが破損。電極部が焼損。
- ・1 回目、2 回目二比べて 3 回目は昇磁、減磁のスピードを速くしたので、それが発熱の要因であると考えているとのこと。

超電導 Web2.1

(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

(MRI においても磁場変動に対する発熱抑制が必要であることを示しており、細線化の重要性がより明確になったと考えられる。)

Dr. Burkley (VICTORIA Univ. : New Zealand における HTS 機器開発の現状)

- CC を用いた MRI の試作。4.8 km 線材を用いて 1.5 T-MRI(125 A)を試作。
(CC で試作した点は価値があるが、磁場が 1.5 T で京大成果の域は超えていないと考えられる。)
- Robel 導体を用いた変圧器の開発。3 相 1 MVA 変圧器で、通電電流は 1390 A で交流損失が半減できたとの報告。今年中に、グリッド連結を予定とのこと。
(1 MVA より大容量で実用的な規模での損失低減が Robel 導体で実現できるか？既存の高効率常電導変圧器に対するメリット創出が可能か？など、MRI も合わせて試作以降の実用化シナリオが必ずしも明確にはなっていない。)

Dr. Masson (Univ. of Houston : 米国における超電導風力発電開発の現状)

- 米国では 2 種類の超電導洋上風力発電機を開発中。
 - ①MgB₂を用いた全超電導発電機
 - ②CC を用いた超電導発電機の開発 (ALPA-E)
- MgB₂ 全超電導発電機
 - ⇒10 MW-10 rpm 3.5 mφ-140 t @15~20 K
 - ⇒相反する発電機重量、ロス (冷凍機重量) の間での調整が必要。
 - ⇒2012~2014 に開発を実施。交流損失低減が課題。
- CC 超電導発電機(ALPA-E)
 - ⇒10 MW-8 rpm
 - ⇒発電コスト目標

現在	27 c/kWh	
2020	10 c/kWh	10 GW
2030	7 c/kWh	54 GW

⇒線材仕様 2760A@35K, 2.75T(B//c) 12mmw-0.15mmt

(現在は情報が少ないので $I_c(B//c)$ で設計しているが、必ずしも $I_c(\min.)$ ではないことを指摘すると、今後は角度依存性を勘案していく)

⇒電機子は MgB₂ を想定している。

Dr. Malozemoff (amsc : amsc における線材開発及び機器開発)

- 配向金属基板上での MOD 線材において、基板の非磁性化と超電導層の厚膜化の開発を実施。
 - ⇒Ni-9 %W で非磁性化且つ高配向を実現
 - ⇒1.2 μm 厚/coat で高特性実現 →184A/4mm(460 A/cm-w)-600m
- 回転機対応線材開発
 - ⇒2014 年コイル用 CC 385A/cm-w @30K, 1.5~2T
~580A/cm-w@30K, 3T
(参考 : EuBCO+BHO 特性 2730 A/cm-w @30K,3T)
- 線材評価における電圧タップ間距離の影響を解析
 - ⇒従来からの報告ながら、タップ間距離を長くとると欠陥が見えなくなるので注意が必要。
- face-to-face の重ね合わせ線材
 - ⇒500 m/450 A+55 0A(1,000 A) 線材
 - ⇒SUS 板のサンドイッチ構造で剥離強度が 115 MPa まで向上

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

Dr. Melhem (Oxford : 高磁場コイル開発)

- ・ヘリウム不足に対応した low/zero Liq. He 機器開発を目指す。
⇒Cryogen Free との謳い文句ながら、可能であれば Liq.N2 は Welcome
(HTS コイル PJ-共通基盤技術で提案している液体窒素運転 MRI を支持する内容と考えられる)
- ・23 T 以上の High Field 磁石に関して線材の候補としては Bi2212 と CC が対象である。次のステージでは、両線材を用いて開発を進める。例えば、Florida で 32 T マグネットなどが対象で CC を想定している。

Dr. Patel (Cambridge Univ. : スタック CC)

- ・Y 系線材をスタックして補足磁場を確保する成果
⇒十数枚の CC のスタックで 7 T の補足磁場
(NdFeB 永久磁石、Y 系バルク超電導体とほぼ同等)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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】

超電導センサ（その 3）－ 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の開発現状と今後の展望

独立行政法人 情報通信研究機構
未来 ICT 研究所 ナノ ICT 研究室
研究マネージャー 寺井弘高

1. はじめに

超伝導ナノワイヤ光子検出器（SNSPD または SSPD、本稿では SSPD に名称を統一する）は、高検出効率、低暗計数率、高計数率、低ジッタ、広波長帯域という魅力的な特長を兼ね備えており、世界中で活発な研究開発が行われている。表 1 に各種光子検出器の性能をまとめた¹⁾⁻⁸⁾。従来、1 μm 以下の光波長では光電子増倍管（PMT）や Si 単一光子アバランシェフォトダイオード（SPAD）が、通信波長帯（1550 nm）では InGaAs SPAD が広く用いられてきた。SSPD は深紫外から中赤外の光波長に対して高い検出感度を持ち、特に 1550 nm の性能で InGaAs SPAD に対して大きな優位性を持つことから、量子鍵配送をはじめとする量子情報分野への応用が期待されている。SSPD は計数率やジッタにおいて他の技術に比べて優位性があるものの、検出効率は同じ超伝導技術を使う転移端センサ（TES）に比べて大きく劣っていた。しかしながら、最近の研究の進展により 1550 nm で 93 % という検出効率も報告されており、TES と同等のレベルにまで達している。本稿では、SSPD の動作原理、研究開発の現状、今後の展望について紹介する。

表 1 各種光子検出器の性能

検出器	検出効率	暗計数率	最大計数率	ジッタ	動作温度	光子数識別	参考文献
PMT	40% @500 nm	100 Hz	10 MHz	300 ps	300 K	○	1
PMT	2% @1550 nm	200 kHz	10 MHz	300 ps	200 K	○	2
Si SPAD	65% @650 nm	25 Hz	10 MHz	400 ps	250 K	×	3
InGaAs SPAD	10% @1550 nm	91 Hz	10 kHz	370 ps	200 K	×	4
InGaAs SPAD	10% @1550 nm	16 kHz	100 MHz	55 ps	240 K	○	5
TES	95% @1550 nm	---	100 kHz	100 ns	0.1 K	○	6
SSPD	93% @1550 nm	~ 1 Hz	25 MHz	150 ps	< 2 K	×	7
SSPD	80% @1550 nm	40 Hz	30 MHz	68 ps	2.2 K	×	8

PMT: Photo-multiplier tube, SPAD: Single-photon avalanche photodiode, TES: Transition edge sensor,
SSPD: Superconducting nanowire single-photon detector

2. 動作原理

SSPD の構造を図 1 に示す。厚さ 10 nm 以下の薄い超伝導薄膜を幅 100 nm 以下のナノワイヤに加工し、メアンダ状に受光領域全体に敷き詰めた至ってシンプルな構造をしている。動作原理としてホットスポットモデルと呼ばれる仮説を紹介する⁹⁾。まず、ナノワイヤに一定のバイアス電流を印可した状態で、光子がナノワイヤに吸収されたとする（図 1 a）。光子のエネルギーによりナノワイヤの一部の超伝導状態が局所的に破壊された領域（ホットスポット）が形成される（図 1 b）。バイアス電流はこのホットスポットを回避して流れるが、バイアス電流を超伝導状態が壊れるぎりぎりのところ（臨界電流値）まで印可しておく、ホットスポットを回避した電流がナノワイヤの臨界電流密度を超えて、ついにはナノワイヤの断面全体にわたって超伝導状態が壊れる（図 1 c）。ナ

超電導 Web2.1

(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

ノワイアが超伝導状態では素子両端の電圧はゼロであるが、図 1 c の状態ではホットスポット近傍に負荷抵抗よりも十分大きな抵抗が発生し、バイアス電流は負荷側（出力側）に流れる。バイアス電流が負荷側に流れることで、ホットスポットのエネルギーが緩和し、ナノワイアが初期状態に戻る。このような一連の動作により、ナノワイアが光子を吸収する毎に、スパイク状の電圧パルスが素子の両端に現れ、この電圧パルスを計測することで光子を検出することができる。

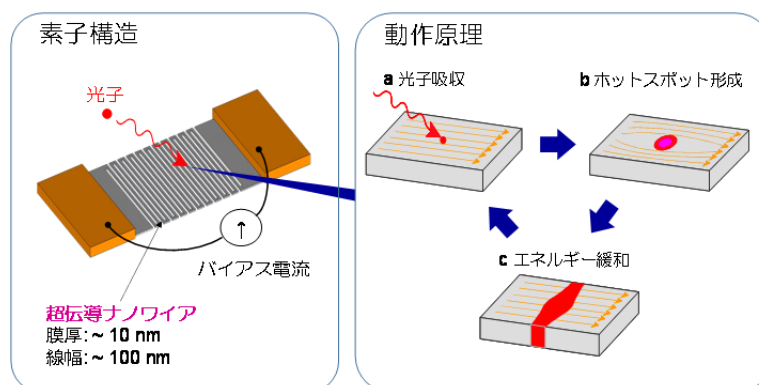


図 1 SSPD の素子構造と動作原理（ホットスポットモデル）

3. 研究開発の現状

情報通信研究機構（NICT）では 100 V 電源で駆動可能な 0.1 W の小型 GM（Gifford McMahon）冷凍機に 6 チャンネルの SSPD を実装したシステムを開発した（図 2）。この冷凍機は水冷が不要であるため、家庭用 100 V 電源があれば、いつでも、どこでも使用することができ、液体ヘリウム等の冷媒を供給することなく、長時間の連続運転が可能である。使いやすさへの配慮は、優れた性能にもかかわらず冷却が必要であるために敬遠されがちな超伝導エレクトロニクスにとって極めて重要である。SSPD の研究開発において、検出効率にここ数年で大きな改善が見られた。本稿では、SSPD の検出効率改善に向けた取り組みについて、少し詳しく解説したい。

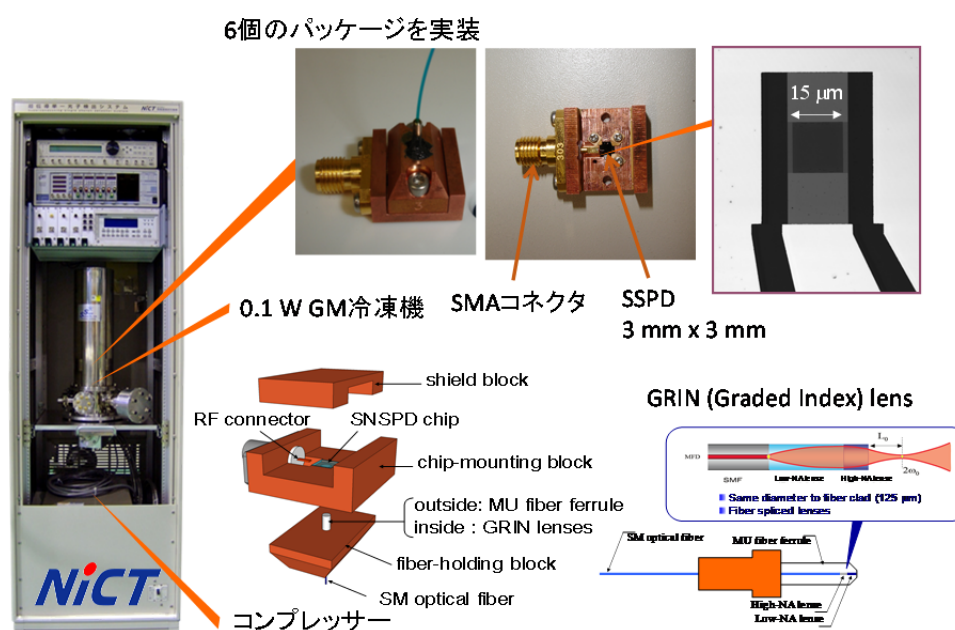


図 2 NICT で開発した 6 チャンネル SSPD システム

超電導 Web2.1

(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

SSPD のシステム検出効率を決める要素として、①ファイバとの結合効率、②ナノワイアの光吸収効率、③パルス発生確率の 3 つがあり、これらを掛け合わせたものがシステム検出効率を与える。ファイバとの結合効率については、NICT ではファイバと SSPD 受光部との位置合わせをコンパクトに実現するための専用パッケージを開発した (図 2)。SSPD の受光面積を $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ とし、 $1550\ \text{nm}$ 用シングルモード (SM) 光ファイバの先端に融着した GRIN レンズによりビームを絞り込むことで、ほぼ 100 % のファイバ結合効率を達成している¹⁰⁾。

光子がすべて SSPD の受光面に入射したとして、それを検出するためにはナノワイアが光子を吸収しなければならない。当初、基板上に $5\ \text{nm}$ 厚の超伝導薄膜を形成しナノワイアに加工しただけであったが、これでは光子が超伝導薄膜を透過してしまい高い効率で光子を吸収できない。そこで、透過した光子を再びナノワイアに戻すため、検出波長の $1/4$ の厚さの誘電体を介して金属反射層を設ける (キャビティ構造) 等の工夫が必要となる。現在、NICT では図 3 (a) に示すダブルサイドキャビティと呼ばれる構造を採用している¹¹⁾。熱酸化膜 (厚さ $\lambda/4$) 付きの Si 基板上にナノワイアを形成し、さらに厚さ $\lambda/4$ の誘電体を介して金属反射層を形成する。光子は基板の裏面から入射する。

ナノワイアの両側にある金属層と Si 層が光反射層として機能し、中央にある超伝導ナノワイアでの光電界が強められる。このようにナノワイアの両側に光反射層を設けることで、100 % 近い光吸収効率を達成することが可能である。ここで興味深いのは、受光面積全体に占めるナノワイアの面積 (フィリングファクタ) が 0.5 程度でも、光吸収効率として 100 % 近い値が得られる点である。我々はナノワイアの線間距離が大きい場合 (低フィリングファクタ) でも、90 % を超える光吸収効率を達成できることを、COMSOL と呼ばれる有限要素法を用いた市販のシミュレータによる計算で見いだした。この計算に基づき設計・作製した低フィリングファクタの SSPD において高い光吸収効率を得られることを実験的にも確認している¹²⁾。

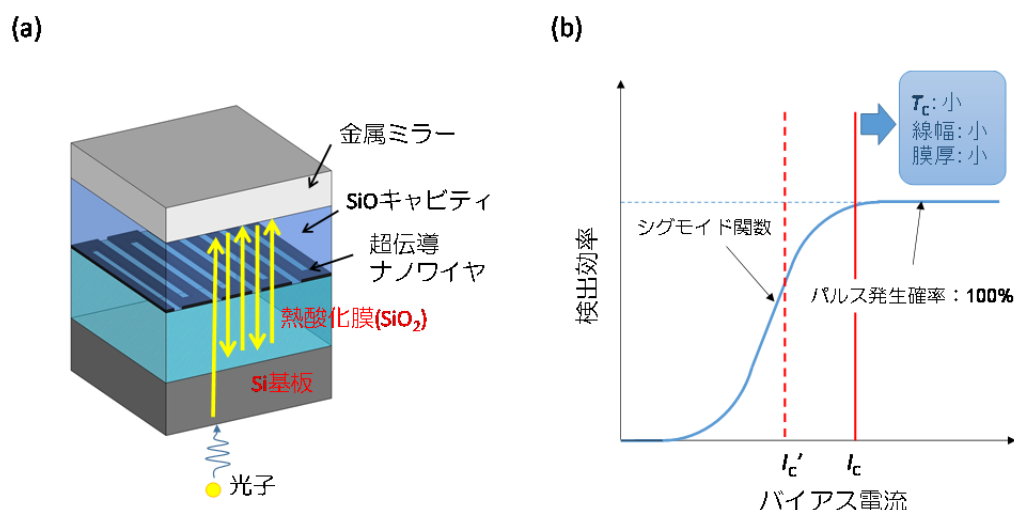


図 3 システム検出効率を決める 3 つの要素、(a) ダブルサイドキャビティ構造、(b) 検出効率のバイアス電流依存性とパルス発生確率

光子がナノワイアに吸収されたとして、最終的に電気信号として室温に取り出さなければ、光子を検出したことにはならない。SSPD の検出効率を決める最後の要素であるパルス発生確率は、光子の吸収によりナノワイアの超伝導状態が壊れ、電気信号が出力される確率であり、超伝導材料のエネルギーギャップ、ナノワイアの形状 (膜厚・線幅) や特性の均一性により決まる。その様子を

超電導 Web2.1

(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 3 (b)に示す。一般的に、検出効率のバイアス電流依存性はシグモイド関数で近似でき、検出効率が飽和した右側の領域において、パルス発生確率が 100 %となる。この図から明らかなように、臨界電流 I_c と呼ばれるナノワイアに印可できるバイアス電流の上限値がシグモイド関数の右側に位置するほど、高いパルス発生確率が得られる。そのためには、超伝導体のエネルギーギャップが小さい、もしくは膜厚が薄く、線幅が細い（容積が小さい）ほうが望ましい。しかしながら、もしナノワイアの特性に不均一があると、 I_c は最も特性の悪い部分で制限されるため、 I_c に到達する以前の I_c' まではしかバイアス電流を印可することができない。これは、高いパルス発生確率を達成する上で明らかに不利となるため、できるだけ特性の均一なナノワイアを実現する必要がある¹³⁾。一方、超伝導体のエネルギーギャップが小さい、もしくはナノワイアの膜厚が薄く、線幅が細いと、 I_c そのものの絶対値は小さくなる。 I_c が小さいことは出力信号の SN 比が小さくなるため、読み出しのジッタが大きくなる。つまり、検出効率とジッタにはトレードオフが存在する。

米国国立標準技術研究所 (NIST) では、ナノワイアに超伝導転位温度が 3.7 K 程度の WSi 採用し、 I_c の半分以下のバイアス電流で、ほぼ 100 % のパルス発生確率、検出効率としても 93 % を達成している⁷⁾。しかしながら、 I_c が 4 μ A 弱と小さいため、ジッタが 150 ps 程度と大きい。図 4 に NICT で開発した SSPD の検出効率、暗計数率のバイアス電流依存性、および SSPD のジッタ測定結果を示す。NICT ではナノワイアに NbTiN を採用し、95 % 以上のパルス発生確率、検出効率としても暗計数率 40 cps において 80 % を達成している。検出効率は NIST の SSPD に劣るものの、臨界温度が高い NbTiN を採用することで、ジッタとして 68 ps が得られている。

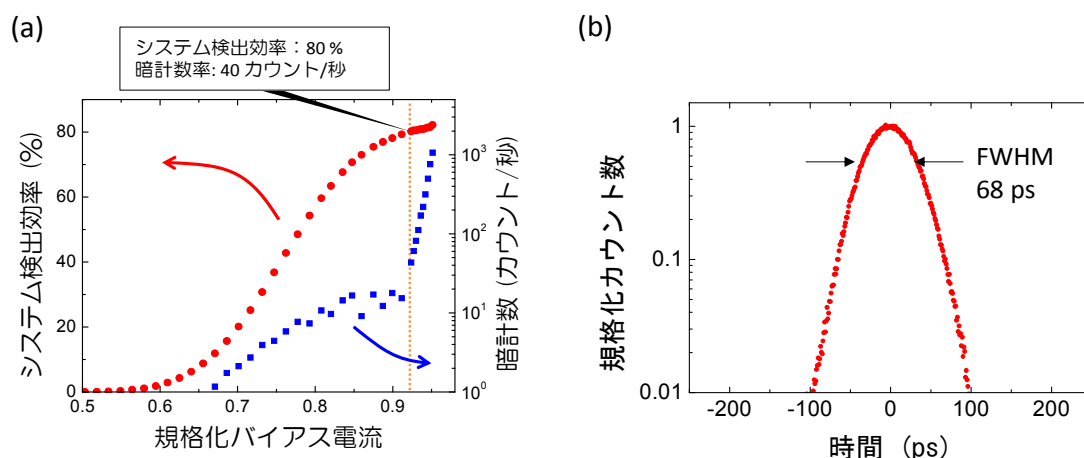


図 4 (a) システム検出効率、暗計数率のバイアス電流依存性、(b) SSPD の FWHM ジッタ

表 2 SSPD の性能比較

	NIST	MIT LL	NICT
検出効率 ($\lambda=1550\text{nm}$)	93%	>70%	80%
暗計数	1kHz(黒体輻射による)	1kHz(黒体輻射による)	40Hz
ジッタ	150ps	40-80ps	68ps
動作温度	300mK	2.5K	2.2K
冷凍機	断熱消磁	GM	GM
光結合方式	パッケージング	ナノボジショナ	パッケージング

超電導 Web2.1

(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

表 2 に現在研究開発が最も進んでいると思われる米国 NIST、マサチューセッツ工科大学リンカーン研究所 (MIT LL)、NICT の SSPD についてシステム性能をまとめた^{7), 8), 14)}。それぞれ一長一短があり、どの SSPD が優れているとは一概に言えないが、小型冷凍機で動作する取り扱いの簡便さ、小型で信頼性の高い光結合方式、ジッタまで含めた総合的な性能を考えると、NICT で開発した SSPD は米国 NIST や MIT LL と比べても十分に優位性を持っていると言える。

4. 今後の展望

SSPD の検出効率についてはここ数年で大きく改善したが、それ以外にも性能改善の余地は多く残されている。ここでは、多ピクセル化と広波長帯域化に焦点を当て、今後の研究開発の展望について述べてい。

4.1 多ピクセル化

SSPD の特長の 1 つに高い計数率がある。競合する PMT (Photo multiplier tube) や SPAD (Single-photon avalanche photodiode) 等では 100 MHz 程度の計数率が限界であるのに対して、SSPD では潜在的に 1 GHz を超える計数率が可能である。しかしながら、現状の SSPD では、ナノワイアのカイネティックインダクタンス L_k と負荷抵抗 R による L_k/R 時定数で不感時間が決まっており¹⁵⁾、 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ の受光面積では 30 MHz 程度の最大計数率となっている。この L_k による最大計数率の限界を打ち破るためには、受光面を複数に分割する多ピクセル化が有効である¹⁶⁾。多ピクセル化により、ファイバ結合に十分な受光面積を確保しつつ、各々のピクセルを小型化できるため、さらなる高速動作が可能となる。また、単一の受光面では実現できなかった光子数識別も可能となる。

多ピクセル化における最大の課題は信号の読み出しである。読み出し用同軸ケーブルの本数が増大すると、冷凍機への熱負荷が増大し、小型 GM 冷凍機への実装が困難となる。読み出し用同軸ケーブルを削減するためには、冷凍機内部で信号を処理する必要がある。我々は単一磁束量子 (SFQ) 回路による極低温信号処理を世界に先駆けて提案し、原理実証を進めてきた¹⁷⁻¹⁹⁾。図 5 に多ピクセル SSPD アレイと SFQ 信号処理のシステムイメージを示す。SFQ 回路は、100 GHz を上回るクロック周波数で動作可能、かつ 10,000 個のジョセフソン接合を含む回路でも数 mW の低消費電力で動作するため、極低温環境下での信号処理に適している。我々はこれまでに 4 ピクセル SSPD アレイと SFQ 信号処理回路を 0.1 W GM 冷凍機に実装し、クロストークフリー動作の実証に成功している²⁰⁾。

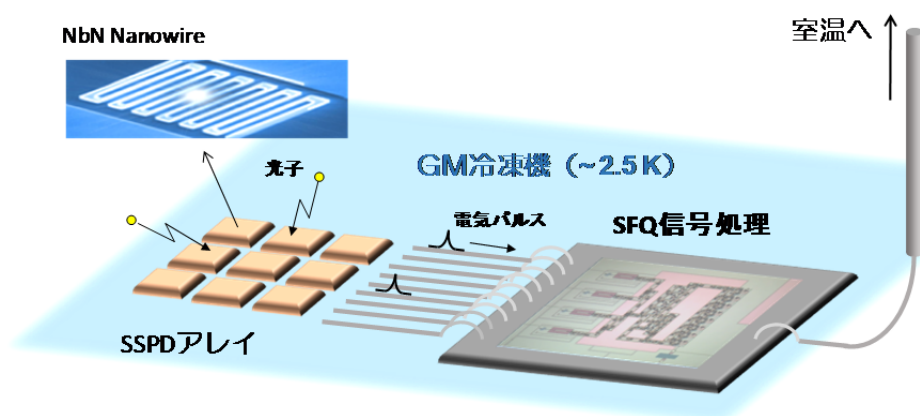


図 5 多ピクセル SSPD アレイと SFQ 信号処理の実装イメージ

超電導 Web2.1

(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

受光面を N 分割すると、 L_k が $1/N$ になる効果と、各ピクセルに光子が当たる確率が $1/N$ になる効果で、最大計数率は N^2 で改善する。従って、高速化については、16 ピクセル程度の SSPD アレイで 1 GHz 以上の最大計数率を達成できるだろう。一方、NICT ではイメージングが可能な 64 ピクセル SSPD アレイシステムを現在開発中であるが²¹⁾、この程度の規模のアレイになると、SFQ 信号処理の真価が発揮されるはずである。しかしながら、本格的なイメージングには数万～数百万ピクセルが必要であり、SFQ 信号処理を利用したとしても配線数の削減が重要課題となるであろう。このような課題を解決できれば、シングルフォトンイメージングという究極のカメラの実現も夢ではないかもしれない。

4.2 広波長帯域化

図 6 に SSPD に期待される応用分野を波長帯によって整理した。SSPD はこれまで通信波長帯を中心に開発が進められてきた。量子情報通信分野でのニーズがあるにもかかわらず、この波長帯に優れた光子検出器がなかったためである。しかしながら、1 μm 以下の波長帯については、PMT や Si SPAD という強力な競合技術があり、これまで本格的な研究開発が行われてこなかった。1550 nm での検出効率が 90%を超え、原理的に短波長でも同程度の検出効率は十分に達成できることから、今後 1 μm 以下の波長帯においても SSPD の応用が進むものと考えている。高い検出効率に加えて、SSPD には SPAD にはないアフターパルスフリーという低ノイズ性や、1 GHz を超える高計数率という特長があり、ハイエンドな光子検出器として存在意義は十分にあると考えられる。

SSPD の広波長帯域化を実現するには、目標波長に応じた光キャビティ構造を如何に作り込むかが重要になる。1550 nm では図 3 (a)に示したダブルサイドキャビティ構造で、基板の裏面から光を入射していたが、1 μm 以下の光は Si に吸収されてしまうため同じ構造は利用できない。単純に誘電体の膜厚を目標波長に最適化するだけでなく、誘電体多層膜等を導入して光キャビティを設計・作製する必要がある、そのための光学設計技術も重要になってくるものと考えられる。SSPD の暗計数率を低減するには、室温の黒体輻射の影響を抑制する必要があるが^[22]、誘電体多層膜をうまく設計することで、目標波長以外の光子をフィルタリングでき、暗計数率をさらに低減することも可能となるだろう。また、図 6 に示す応用の多くでは、自由空間からの光との結合が必要であり、コア径の大きいマルチモードファイバが用いられている。マルチモードファイバとの高効率な結合を実現するためには、SSPD の大面積化が必要であり、最大計数率の低下を余儀なくされる。高い計数率が要求される応用では、多ピクセル化がより重要になってくるかもしれない。いずれにしても、広帯域化により、通信分野だけでなく、バイオ・医療分野をはじめとするより幅広い応用展開が視野に入ってくるものと期待される。

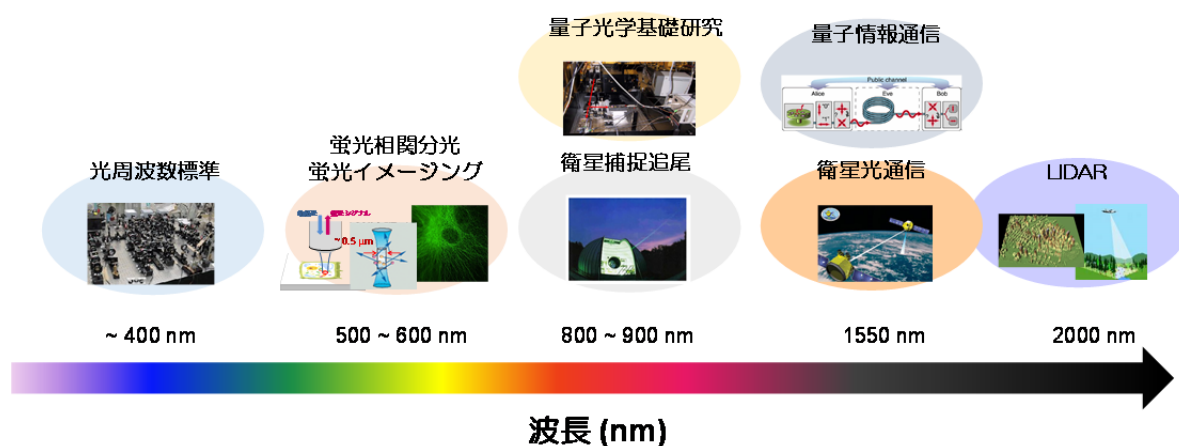


図 6 SSPD に期待される応用分野と波長帯

超電導 Web2.1

(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

参考文献：

- 1) <http://jp.hamamatsu.com/resources/products/etd/pdf/m-h7422e.pdf>.
- 2) http://jp.hamamatsu.com/resources/products/etd/pdf/NIR-PMT_APPLI_TPMO1040E02.pdf.
- 3) http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/RelatedLinks/SpecificationSheets/SPC_PhotoDetectors.pdf.
- 4) C. Gobby, Z. L. Yuan, and A. J. Shields, Appl. Phys. Lett. 84, 3762–3764 (2004).
- 5) A. R. Dixon, Z. L. Yuan, J. F. Dynes, A. W. Sharpe, and A. J. Shields, Opt. Express 16, 18790–18797 (2008).
- 6) A. E. Lita, A. J. Miller, and S. W. Nam, Opt. Express 16, 3032–3040 (2008).
- 7) F. Marsili *et al.*, Nature Photonics 7, 210, 2013.
- 8) <http://www.nict.go.jp/press/2013/11/05-1.html>.
- 9) G. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, and R. Sobolewski, Appl. Phys. Lett. 79, pp. 705-707, 2001.
- 10) S. Miki, T. Yamashita, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, Opt. Lett. 35, 2133 (2010).
- 11) S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, and Z. Wang, Optics Express 21, 10208, 2013.
- 12) T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, and Z. Wang, Optics Express 21, 27177, 2013.
- 13) A. J. Kerman *et al.*, Appl. Phys. Lett. 90, 101110, 2007.
- 14) D. Rosenberg, A. J. Kerman, R. J. Molnar, and E. A. Daule, Optics Express 21, 1440, 2013.
- 15) A. J. Kerman, E. A. Daule, W. E. Keicher, J. K. W. Yang, K. K. Berggren, G. Gol'tsman, and B. Voronov, Appl. Phys. Lett. 88, 111116, 2006.
- 16) E. A. Daule, B. S. Robinson, A. J. Kerman, J. K. W. Yang, K. M. Rosfjord, V. Anant, B. Voronov, G. Gol'tsman, and K. K. Berggren, IEEE Trans. on Appl. Supercond., 17, pp. 279-284, 2007.
- 17) H. Terai, S. Miki, and Z. Wang, IEEE Trans. on Appl. Supercond. 19, 350, 2009.
- 18) H. Terai, S. Miki, T. Yamashita, K. Makise, and Z. Wang, Appl. Phys. Lett., 97, 112510, 2010.
- 19) S. Miki, H. Terai, T. Yamashita, K. Makise, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, Appl. Phys. Lett., 99, 111108, 2011.
- 20) T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, K. Makise, and Z. Wang, Optics Lett., 37, 2982, 2012.
- 21) S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, and Z. Wang, Optics Express 22, pp. 7811-7820, 2014.
- 22) H. Shibata, K. Shimizu, H. Takesue and Y. Tokura, Appl. Phys. Express, 6, 072801, 2013.

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 5 回)

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
常務理事 渡辺 勉

さて、今回も発電設備の解説を続けます。

前回、電力系統での発電設備量の需要量に対する比率である設備率を紹介し、電力系統の信頼性を表す目安となることを説明しましたが、もう一つの信頼度目安である（供給）予備率について、まず解説します。

○予備率（力）とは？

予備率（力）＝（供給可能発電力（kW）／最大需要（kW）－1）×100

設備率が比較的長期（年）のトレンド（いわば基礎体力）を表すのに対し、予備率はその時々比較的短期的にみた電力系統の信頼性（いわば瞬発力）を表す指標です。例えば、設備率は、発電設備が定期検査で止っても発電設備量にカウントしますが、予備率ではカウントしません。このため、例えば、需要が想定より増加し定期検査時期をずらすと、最大需要が増えても供給可能発電力も増え予備率が大きくなることもあります。一方、設備率は小さくなります。

一方、設備率は、長期停止し設備を大幅修理する場合は発電設備量に含めないなど電力系統の基礎体力を表わす工夫がされます。

一般的に予備率は 7-10 % が適正、最低 3 % 必要等と言われますが、どの程度の信頼性を電力供給に求めるかで数字は異なってきます。また、同じ信頼度を目指す場合も、需要規模が大きいほど予備率を下げられる可能性があるなど、あまり固定的に考えない方が良いと思います。

○「毎年の予備率」、「明日の予備率」、「当日の予備率」の算定条件の違い

「毎年の予備率」を算出する時点では、日々の状況が確定していないところがありますから、平均的よりやや厳しめの数値に基づき算定します。例えば、水力の発電力は過去実績に基づき小さめの発電力を選びます。また、発電設備を点検停止する場合、例えば、発電力 1 kW を月の途中、中日の 15 日に停止する場合、その月の発電力を $1 \text{ kW} \times 15/30 = 0.5 \text{ kW}$ とします。実際の可能発電力は 1 kW 又は 0 kW ですが、いわば一ヶ月を平均化した数字 (0.5 kW) を使います。「明日の予備率」では、この部分は実際の数字を使います。

「明日の予備率」と「当日の予備率」でも、算定条件が変わってきます。例えば、ガスタービン発電設備は、気温次第で発電可能出力が増減しますが、例えば気温が上がる程、出力が低下するのですが、直近の気温想定に合わせて算定されます。

(余談) 頭の痛い「揚水発電供給力の評価方法」

3.11 直後、電力会社の供給力の説明の中で揚水発電供給力の予備率への織り込み方がマスコミを賑わせました。(その頃、私はいわき(東北電力管内)で津波復旧、食料確保に専念中) 揚水発電力で予備率が数%変わりますから、厳しい需給状況では注目されます。極端な場合、需要が一定(フラット)、揚水発電以外に余分発電能力がないと、水をくみ上げる余力がありませんから揚水発電力は零になります。(図-33) これほど極端でなくても、需要が一定に近づくにつれ揚水発電力が目減りする、「発電力の潜在化」(潜って発電力がなくなるイメージ)が発生します。

超電導 Web2.1

(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

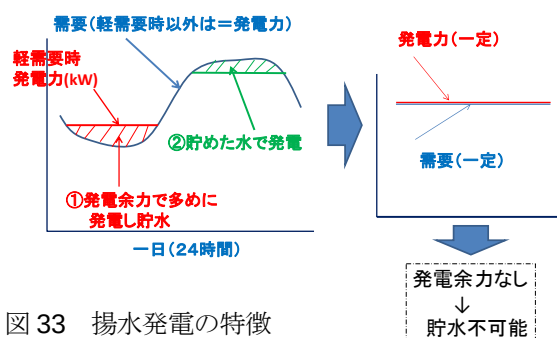


図 33 揚水発電の特徴

このような状況を単純化モデルで示しますので(図-34、図-35)、お時間があるようでしたら読者もチェックいただければ――。

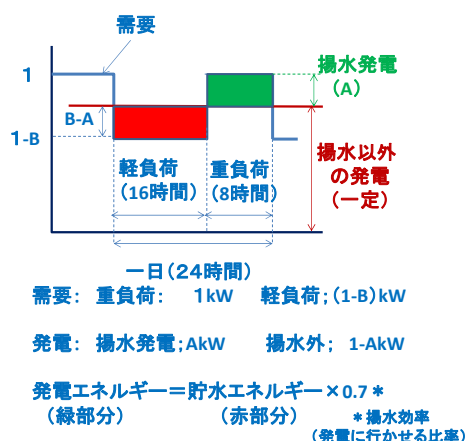


図 34 需要曲線と揚水発電力の関係 (単純モデル)

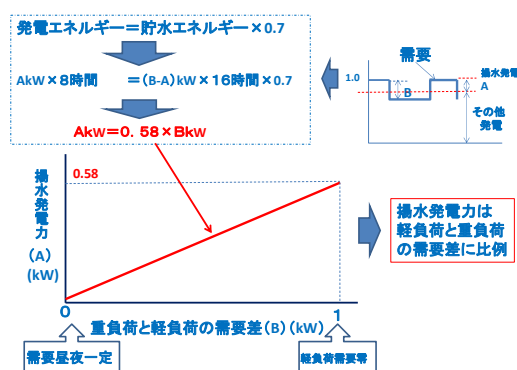


図 35 重負荷と軽負荷と揚水発電力の関係 (単純モデル)

3.11 直後は輪番停電や夜間の電力利用などで、需要カーブが通常と比べ大小の差が小さくなり揚水発電力が相当潜在化したと想定されます。更に、休日(日曜日)の需要低下時に余裕発電力で水を汲み上げ、平日に少しずつ分けて発電されますが(図-36)、週末(金曜日頃)には、それ以前の(需要の予想以上の増加等で)水を使い尽くすことも想定されます。これに伴い週末の供給力が厳しくなる場合があります。いづれにしても揚水供給力は評価が難しいです。(なお、図-34 で揚水効率(貯蔵ロス等による効率低下)を説明していますが、蓄電池等も貯蔵に伴いロスが発生します。)

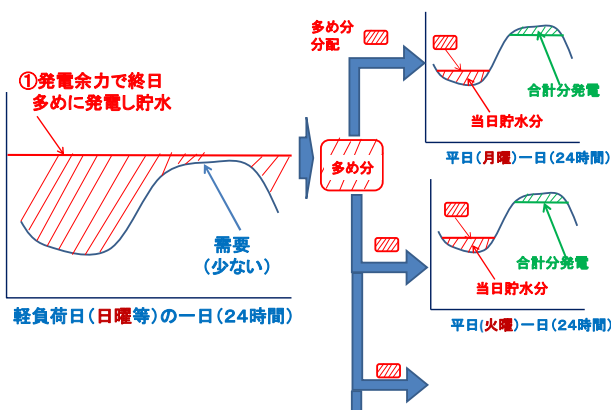


図 36 軽負荷時貯水による揚水発電力の週間運用 (イメージ)

超電導 Web2.1

(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

○発電と需要のずれを小さくするための対応

前回述べた程度の電力 (kW) バランス維持では、発電と需要の間のずれはなくなり、電力系統維持には、以下の様な更なる対応が必要です。

① 需要の動向を予測した発電力調整 (図-37)

「ずれを小さくする」には発電出力を需要に合わせて比較的短期間に変化する必要があります。このため、前回述べたミドル電源とピーク電源から系統運用者が時々刻々事前に出力を指定し発電出力を指示します。(運転指示用コンピュータ入力での対応もあります) 発電設備は指示を受けてから実際に出力が変わるまでに時間がかかりますから、運用者は需要の動きを事前に予測し指示します。通常、専用通信設備で発電設備と運用者が直結されます。なお、指示は、通常、燃料費の安い電源から優先して指示が出されますから経済負荷運用と呼ばれます。

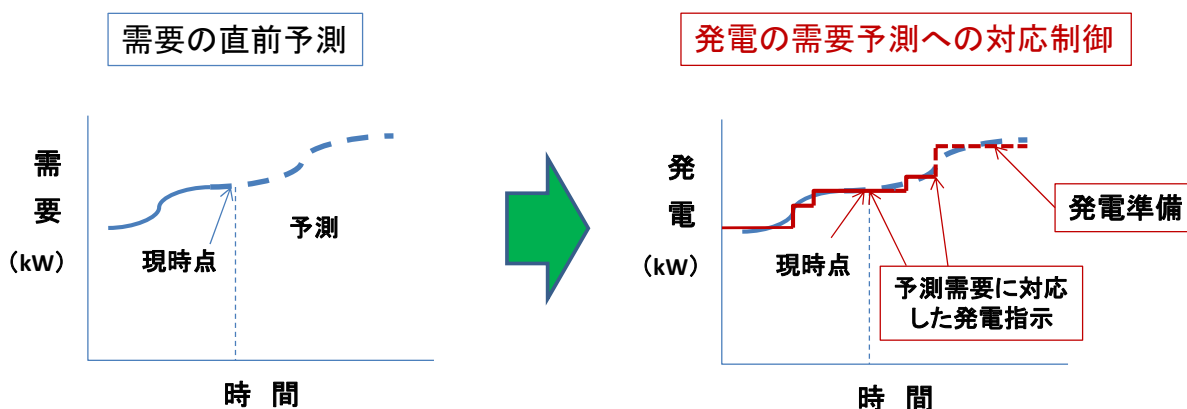


図 37 発電と需要のずれを小さくする：①予測制御運用

② 周波数変化を抑制する発電力調整 (図-38)

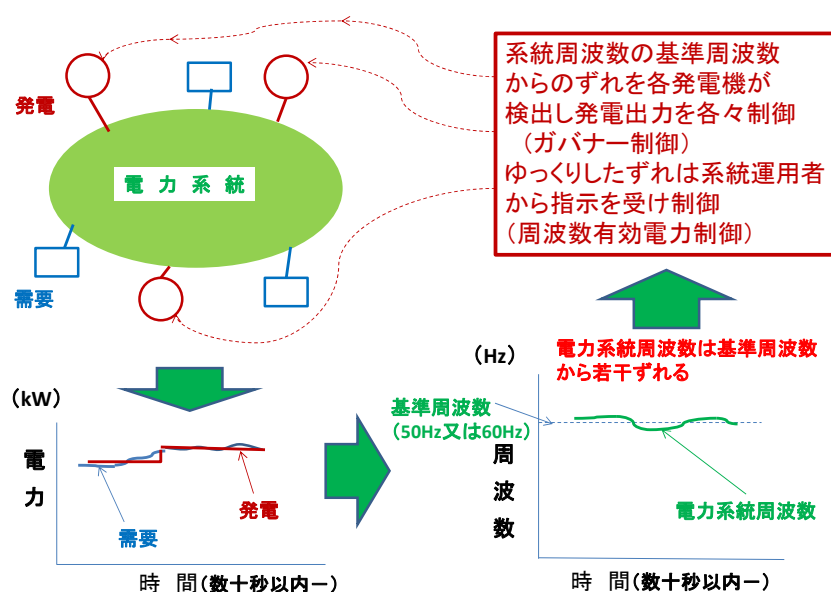


図 38 発電と需要のずれを小さくする：②周波数調整制御

超電導 Web2.1

(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

①の発電力調整は予測に基づくため「ずれ」は残ります。このずれにより電力系統では周波数が 50 Hz 又は 60 Hz 近辺で若干変動します。この変動を検知し解消するため発電出力を変化させ周波数変動を改善する制御が行われます。この役割は、発電設備に付属する周波数変化を検出し発電機出力を変化させる装置、ガバナー（調速機）が荷います。ガバナーは通常どの発電機にも設置され、本来、周波数変化が発電機に悪影響を生じさせないように発電機を守る（「保護する」）ための装置です。この機能が働くことで電力系統の周波数維持に良い効果を与えます。なお、この機能を止め（ガバナーロック）運転される場合もありますので確認が必要です。なお、ガバナー使用時も（ガバナーフリー）、一定の変化限度（出力の数%）を設け設備に過度なストレスをかけない様にします。出力の変化範囲は小さいですが変化は比較的速いので「小まわりのきく出力調整」ができます。また、比較的ゆっくりした成分のずれに対し、①で述べた運用者との専用通信設備を利用して周波数有効電力制御が行われます。

①周波数の急激又は大幅な変化を解消する緊急対応（図-39）

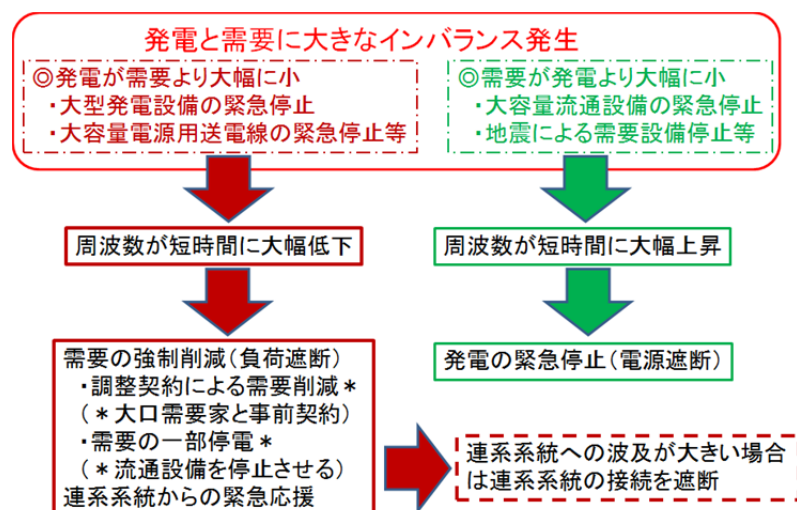


図 39 周波数維持のための緊急対応

①や②の対応では間に合わないときやずれが非常に大きいとき、

- ・発電力が需要より相当大きく周波数が大きく上昇する場合、発電機を自動的に停止させます（電源遮断）
- ・需要が発電力より相当大きく周波数が大きく低下する場合、需要を自動的に電力系統から切り離します。（負荷遮断）なお、この場合、停電が発生しますが、電力系統全体の停電を回避するため停電させます。
- ・バランス維持できそうにない電力系統とバランス維持ができそうな電力系統に分けます。（系統分離）（図-40） 流通設備の決められた点で遮断器（ブレーカー）を自動的に又は手動で開きます。この場合、「バランス維持できそうにない電力系統」は全部停電やむなしとし、残る電力系統を救います。

（余談）電力系統は「非情な世界」

イタリア全土停電の場合（2003 年）。イタリアで電力バランスが維持できない（発電力が需要に対し不足）と判断された時点でフランス等から切り離されました。もともとフランスから電力融通を受けていましたので、切り離された瞬間一挙に発電不足が深刻化しイタリア全土の停電に

超電導 Web2.1

(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

なりました。(図-40 の A がフランス、B がイタリアです) フランスにすれば「イタリアの影響を受けず無事で良かった」ですが、イタリアは一国が「犠牲」になる非情な対応となりました。

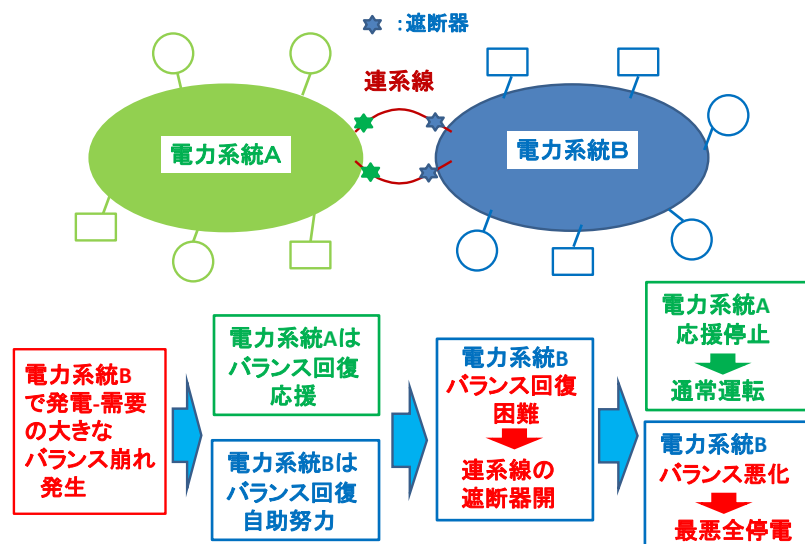


図 40 電力系統分離（分割）

ずれを解消するための準備・実施には費用（コスト）がかかります。電力会社が電力供給を独占的に対応していた自由化前は、個々の発電設備の役割に応じたコスト区分けは細かくしていませんでした。電力自由化が進むと、これらの役割はアンシラリー（補助的）サービスと定義され、必要量の確認やコスト分類を明確化する必要があります。なお、アンシラリーは「補助的」と訳せますが、このサービスがないと電力系統運用不能ですから、「補助的」なものではありません。（元々の英語表現が良くない珍しい?例と思います。）

なお、費用算定はなかなか難しく、例えば機能①は、需要増加が予想される時に発電設備の供給能力を一部使わず出力増加準備する必要があり、本来、能力を使って最適運転すれば販売できたはずの電力販売を犠牲にしたと考え算定されるのが諸外国では一般的です。これは経済学の機会費用（オポチュニティーコスト）に該当しますが、実際の算定方法は種々考えられます。

アンシラリーサービスは、範囲が広く複雑ですので、「自由化」の項であらためて総合的に解説します。

○再生可能エネルギー電源の拡大と発電・需用のずれへの対応

気候次第で発電力が変動する再生可能エネルギー（以下再生発電力）の比重が拡大すると発電と需要のずれの様相が変わります。まず、再生発電力は、かなり大幅な出力変化を生じる可能性が有ります。次に再生発電力を完全に予測することは不可能ですから、需要予測の予測との違いと合わせてずれの発生が拡大すると予想されます。(図-41) 以下では、需要から再生発電力を引いた残りを「修正需要」と呼ぶこととします。

発電機能への影響を考えるには、まず、修正

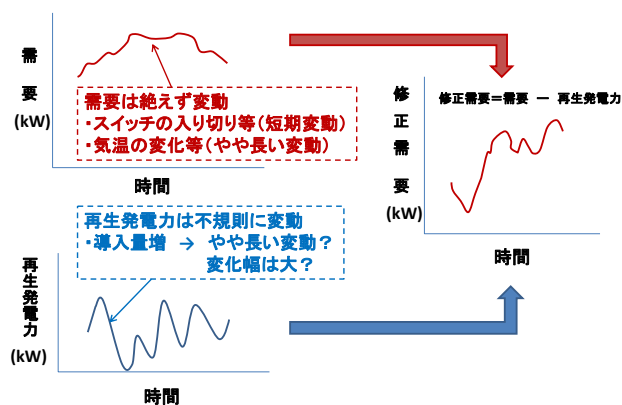


図 41 再生発電力と修正需要

超電導 Web2.1

(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

需要の的確な予測ができる必要があります。需要側での蓄電システム等も含め想定手法を常に向上していく必要があるでしょう。

(余談) 気象予測精度向上にも期待！！

的確な予測に関しては、気象予測の精度向上も期待したいです。例えば、今の予報の台風暴風雨圏、円内は同じ暴風が吹き大雨が降るとされますが、風速 25 m 以上では風力発電停止、大雨なら太陽光出力ほぼ零となり、大型台風が接近する場合、再生発電力が広い範囲で一気に零との予測になります。一方、台風銀座の和歌山で育った経験から、暴風圏内全域が全てその様な状況になることはない！です(「目」以外でも風が弱く日が照る場合もあります。) から、暴風雨圏に代わる適切な台風影響予測の開発が望まれます。これらを含め再生発電力の特性に対応する気象状況の予測精度向上が期待されます。

修正需要の予測向上が図られたとしても、調整力①、②が現在以上に必要と思われます。一方、修正需要は、本来需要よりも需要レベルは小さくなるので、ベース電源の出力変動対応も必要になる可能性があります。なお、水力発電(特に水を貯められる貯水式)は、再生発電力への調整力として有効活用が期待されますが、揚水発電の場合、水をくみ上げる際に(通常、夜間や週末)出力調整できない設備が多いため、変化可能な設備への改造が必要と思います。

また、蓄電設備による変動吸収が考えられますが、近場の変動対策だけでなく電力系統全体での吸収も望まれますから、総合的なコントロール方法が重要となると思います。

なお、電力系統間の連系を図り(強化し)、対応するのも一つの対策です。簡単な例でイメージを説明します。図-42 の系統 A、B は単独では発電電力と需要がバランスしていないので運転できません。両系統を連系すると発電と需要はバランスし運転可能となります。これは非現実的な例ですが、再生発電力は連系し広域化するほど全体として平均化する効果が期待できると考えられます。ただし、この際、系統 A、B 間連系線に不規則な電力を流せるのが前提となります。この場合、「理論的には」発電と需要バランスで決まるままとするのが良いですが、欧州では(勝手な)「まま」に流れることが電力系統にとり重荷となっています。(前回参照) このため、再生発電力が増え影響が大きくなるとバランス維持のために、系統連系について必要量や運転方法が重要な課題となります。なお、再生電力の配置に系統間アンバランスが大きい場合、例えば図 42 の A で再生電力が多く B で少ない場合、①②の余力がある電力系統(通常は B)の力を借りる方策が検討されます。

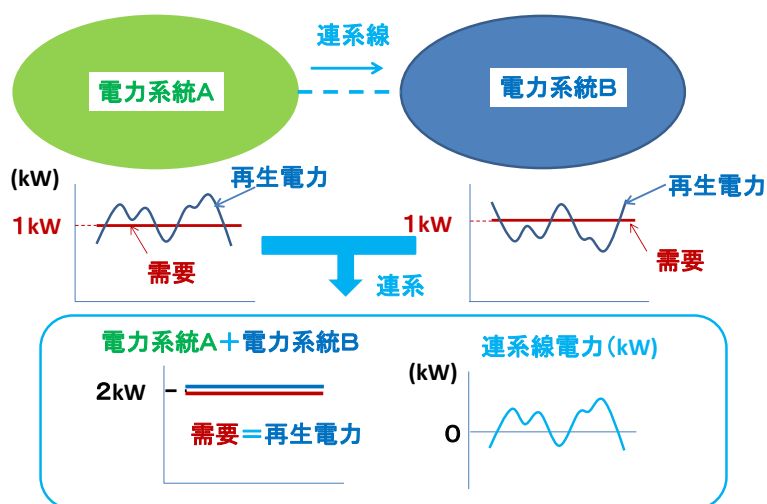


図 42 再生電力と連系効果

超電導 Web2.1

(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

(余談) 周波数変動は本当に怖い！？

発電と需要にずれがあると周波数が変動する訳ですが、周波数は、変動が数% (通常、3 %程度) を超えると需要家や発電設備への影響が顕著化すると言われています。発電側では、ガスタービンなどは周波数変動に敏感で数%の変動で影響が出てくる場合があります。この点は設備導入時に設備の特徴を確認しておくとい良いでしょう。過去にマレーシアで周波数変動が原因でガスタービンが大量に停止し大停電となった例がありました。

なお、ゆっくり変動するなら変動幅がもう少し大きくても大丈夫な気がします。発展途上国では、意図的に周波数を下げ運転する場合があります。周波数を下げると需要が減る (電車のスピードが落ちて使用エネルギーが減るイメージ) ことを活用し?、不足気味の発電力で系統運用する「生活の知恵」として周波数低下をさせている様です。私の見るところ、ピーク需要時間帯に“安定的”に周波数を下げ運転しても (5 %程度)、余り問題ないように見えました。

ところで、インバータを使用した需要 (最近のエアコンなど) は、周波数が下がっても一定出力が確保でき需要家にとって優れもののなのですが、「周波数を低下させ需要削減」する立場からは「伝家の宝刀が使えない嫌な需要」になるかも知れません。今後は発展途上国を含め増加してゆくと思います。

○電力バランス維持機能以外の基本機能

・電力流通に必要な電圧維持機能

電力=電圧×電流ですから、電力を流通設備へ送り出すには電圧を適切なレベルに維持できることが大切です。一般的に発電設備電圧は比較的低く設定し発電設備を小型にし、変圧器を通して高い電圧に変換 (変圧) し流通設備で電力送電するのに適した電圧とします。(図-43) なお、発電機は、通常、設備内の電気磁石用の電流制御 (励磁装置) で電圧を調整しますので、この仕様設定が大切です。電圧維持に必要な設備仕様、特に大容量発電設備の場合は、電力系統シミュレーションで検討し決定する必要があります。

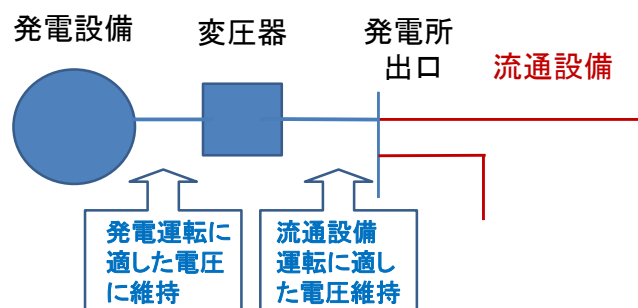


図 43 発電設備の電圧維持イメージ

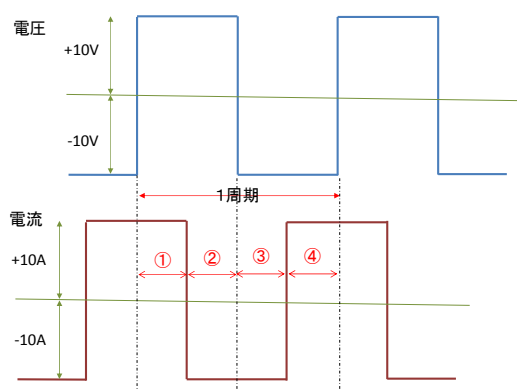
・電力流通に必要な無効電流供給機能

発電設備を電力系統と交流連系すると無効電流のやりとりが生じます。

発電設備は優れた無効電力調整 (やりとり) 機能を発揮しますので解説します。以前、電流位相が 90 度ずれた電流は電力を運ばないことを説明しましたが (第 1 回の図-6)、実は 90 度のずれ方は二種類 (パターン) あります。(図-43) この 2 パターンの電流、図 A と B は同時に流すと打ち消されます。発電機は励磁装置の制御で電流 A、B どちらも流せます。(詳細は専門書参照) 電力系統では、A や B の無効電流を打ち消し適正に運用されるのですが、発電機は打ち消し効果を上手に働かせます。(説明は次回以降の流通設備編を参照下さい)

超電導 Web2.1

(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 1 回の図-6

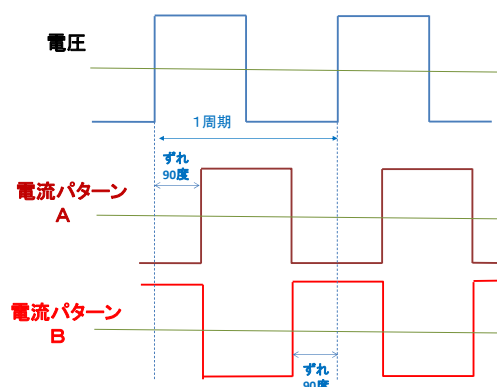


図 44 2 種類の無効電流イメージ

ただし、能力発揮には、発電機容量に無効電力電流分を見込む必要があり、具体的には、発電機容量 (kVA) > 発電機出力 (kW) となります (2-10 % 大となる)。また、高電圧に変換する変圧器設備容量 (kVA) 電圧変換比率も機能発揮に見合わせる必要があります。特に大容量発電設備の場合、電力系統シミュレーションで仕様を決めるのが良いと思います。

(余談) 無効電力関連の用語補足

電力系統で、A パターン、B パターン電流を適宜打ち消す制御を調相、その機能がある設備を調相設備と言います。発電機はこの面で、調相設備と呼ばれます。A 電流、B 電流を区別する場合、進相無効電流、遅相無効電流と呼びます。なぜ調相と言うのか、なぜ進み、遅れと言うか未だにすっきり頭に入りません。多分、電力技術者以外の方にとっては更に高い知的障壁と思います。「無効電力関連」は電力技術説明の鬼門と思います。

・その他

ー同期化力強化機能

第 3 回で交流電源の間には同期化力 (発電機間でスクラムを組むイメージ) が働いて相互に一体となり運転されていることを解説しました。このスクラム力を強めるために交流発電機の機能を指定する場合があります。

*励磁装置のグレードアップ

励磁装置の動作を速くするとともに、スクラム (同期化力) が崩れかける時に強くする能力を持たせることができます。なお、励磁装置をグレードアップすると発電機の絶縁等の強化も必要です。特に大型発電機の場合、電力系統シミュレーションでのグレードアップの是非を決定する必要があります。

*発電機リアクタンスの低減

発電機にはリアクタンス (無効電流を発生させる要素) があるのですが、これを低減すると発電機間のスクラムが組みやすくなります。(同期化力向上) この活用効果が大きい時、低リアクタンスとする設計とします。

その他に、発電設備機能の検討対象として、蒸気を使用する発電設備 (火力や原子力発電) のタービンバイパス容量 (緊急に蒸気を制御し発電設備の緊急運転性能を高める) の設定等があります。専門的なので説明は割愛します。なお、以上の様な機能向上には設備建設コスト増加が伴

超電導 Web2.1

(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

うので必要性は良く見当する必要があります。

○電源コストの考え方

発電設備を建設、維持、廃止するには、電源コストを算定し経済性を評価する必要があります。
電源コストは、マスコミ等でも報じられますから、簡単に考え方を説明します。

基本的には、各発電設備の利用率（稼働率）に基づき、燃料費、設備維持費、投資回収等を織り込み kWh 当たりの発電費用（円）を算定します。

利用率は、ベース電源 70-80 %、ミドル電源 50 %、ピーク電源 10-20 %が通常想定されます。

燃料費など発電量（kWh）に応じて発生する費用は可変費と呼ばれます。この場合 1 kWh 発電に要する費用（単価）は一定と想定されます。一方、設備維持費や投資回収は発電量に拘わらず一定みなされ、固定費と呼ばれます。

以下、例を用いながら説明しますのでイメージをつかんでみてください。

1 kW の電源に設置・維持・運転するのに下記コストが必要とします。

	可変費単価(kWh)	固定費（年間）	利用率
ピーク電源	15 円	1 万円	10 %
ミドル電源	5 円	3 万円	50 %
ベース電源	2 円	5 万円	80 %

可変費は概ね燃料費.....

1 kWh 当りの発電コスト（発電原価）（円）は次のとおりです。

$$\text{ピーク電源} = 15 \text{ 円} + 10000 \text{ 円} / (1\text{kW} \times 8760 \times 0.1) = 21.47 \text{ 円}$$

$$\text{ミドル電源} = 5 \text{ 円} + 30000 \text{ 円} / (1\text{kW} \times 8760 \times 0.5) = 11.85 \text{ 円}$$

$$\text{ベース電源} = 2 \text{ 円} + 50000 \text{ 円} / (1\text{kW} \times 8760 \times 0.8) = 9.13 \text{ 円}$$

この値がマスコミ等で良く報道されます。.....

これだけ見るとピーク電源は随分高いですが、なぜ使われるかを年間に要するコスト（1 kW の電源）で説明します。

$$\text{ピーク電源} = 1 \times 8760 \times 0.1 \times 15 \text{ 円} + 10000 \text{ 円} = 23140 \text{ 円}$$

$$\text{ミドル電源} = 1 \times 8760 \times 0.5 \times 5 \text{ 円} + 30000 \text{ 円} = 51900 \text{ 円}$$

$$\text{ベース電源} = 1 \times 8760 \times 0.8 \times 2 \text{ 円} + 50000 \text{ 円} = 64016 \text{ 円}$$

年間コストは、ピーク電源が圧倒的に安いので活用されます。.....

ここで横軸を利用率、縦軸を発電原価としてグラフ化してみると（図-45）、

ベース電源は利用率が下がると、発電原価は高くなり、ピーク電源より劣ることが判ります。一方、縦軸を年間コストとすると（図-46）、ピーク電源は利用率が上がると年間コストが急激に上昇します。ピーク電源は高い利用率の運転に向かないのです。

3.11 以降、本来のピーク電源の利用率が高くなり、年間全発電コストが大きく上昇しました。本来の低い利用率なら、電源全体の年間コスト削減に役立つピーク電源を、経済性を犠牲にして無理に運用したためと考えられます。

超電導 Web2.1

(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

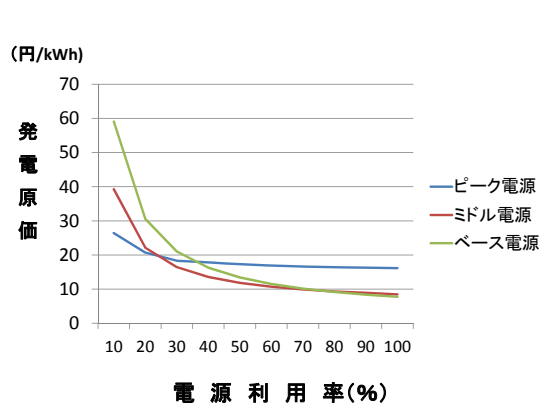


図 45 電源利用率と発電原価

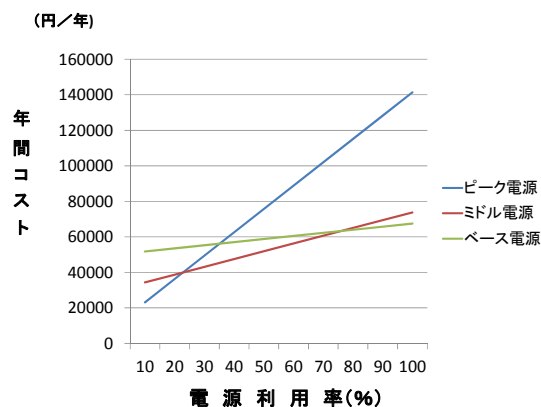


図 46 電源利用率と電源 (1kW) 年間コスト

なお、前回、ピーク電源は「元気な老人火力が良い」と言いましたが、「元気」とは維持費が比較的小さく（病院のお世話にならない）固定費低、「老人」とは古いがたまに活躍する、すなわち利用率低、のためです。

なお、大きな電源、例えば、100 万 kW 電源でも固定費を 100 万で割り kW 当たりのコストを求めれば検討方法は同じです。

実際の電源コストは、コストを長期に亘り想定し、年間の kWh 当りの平均固定費や可変費を求め算出します。この場合、将来の物価上昇や燃料費傾向なども考慮されます。また、将来コストは割引率を用いて現在価値で評価します。(図-47) なお、割引率は将来の金利動向なども考慮する必要があります設定は難しいです。

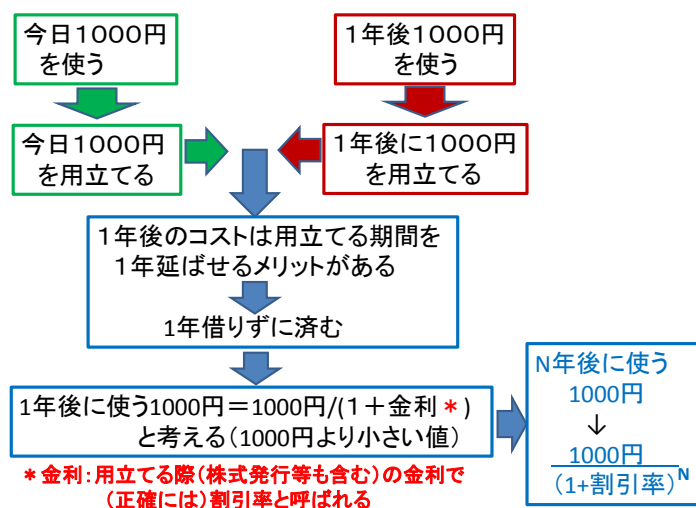


図 47 将来コストを現在のコストに見直す考え方

いづれにしても、発電コスト (原価) は、算定条件を良く理解する必要がありますし、条件次第で相当変動するので注意が必要です。

超電導 Web2.1

(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

(余談)「報酬率」の悲劇

将来要する費用を現在の価値に見直す際「割引率」を使います。これは、説明を省きますが、お金を用立てる（借入、社債発行、株式発行等）際のいわば平均金利です。ところで、電力料金算定の際、設備投資用資金の平均金利は報酬率と呼ばれますが、考え方は割引率と同じです。3.11 以降、この「報酬」との言葉のため、不当又は安易に利益分を料金に上乗せして料金を計算している！との論調が一時盛んになりました。資金をただで提供する人はいませんから、資金を用立てる際には割引率に相当する費用は必ず必要になります。結局、「報酬」との「言葉」が引き起こした（悲しい）悲劇と感じました。

電源設備はこの程度とし、次回から流通設備の解説に入ります。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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」

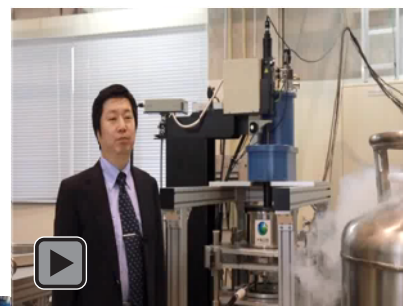
(Mac で動画をご覧になる時は、Acrobat Reader V9.2, V9.3 でご覧ください。)

(動画がご覧になれない場合は下記へ)

http://www.istec.or.jp/web21/movies/web21_201405_2.mp4

九州大学大学院
システム情報科学研究院 電気システム工学部門
教授 木須隆暢

超伝導技術で拓くグリーン／ライフ・イノベーション



超伝導材料は、損失をほとんど無視できる状態で、銅やアルミに代表される従来材料の 100 倍以上の大電流を運ぶことが出来ます。その優れた性能により、低炭素社会の実現や高度医療システム開発のためのキーテクノロジーとして期待されています。本研究室では、最先端の計測評価技術開発による超伝導材料の特性解明と高性能化、さらにその電力・エネルギー応用／医療応用の研究開発を行っています。本研究室は、超伝導システム科学研究センターの一講座も担っており、国家プロジェクトや民間との共同研究、国際共同研究も積極的に推進すると共に、これらの研究活動を通じて、電気電子工学分野の次代を担う若手研究者、技術者の育成に取り組んでいます。

1. 研究室メンバ (2014 年 4 月現在)

教授：木須隆暢 (超伝導システム科学研究センター併任、低温センター副センター長、iSTERA 福岡分室主管研究員兼務)、准教授：井上昌睦 (超伝導システム科学研究センター併任)、東川甲平 (九州電力寄附講座)、助教：Gracia Kim、学術研究員：Sham Mohan、技術職員：今村和孝、テクニカルスタッフ：佐藤智亜紀、学生：博士課程 3 名、修士課程 11 名、卒論生 8 名が在籍しています。

2. 主要研究テーマ

2.1 希土類系高温超伝導 (RE-123) 線材の特性解明と高性能化

超電導工学研究所ならびに線材メーカーとの共同研究により、高性能 RE-123 線材の開発に 20 年近く携わってきました。特に、線材の超伝導特性評価において実績をあげています。実環境下の局所損失計測システムや km 級長尺線材評価システムなど、多くの独創的な計測手法を開発するとともに、これらを用いた複合評価により、RE-123 超伝導線材の臨界電流 (I_c) の制限因子を明らかとし、プロセス開発に貢献しています。図 1 に示した、高磁界型低温レーザ顕微鏡では、高温超伝導線材内部の局所電界損失を μm オーダーの空間分解能で計測することが可能となります。数テスラ

超電導 Web2.1

(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

の強磁界中の局所損失の可視化は世界初の成果です。また、図 2 に示した、リール式高速磁気顕微システムでは、長尺テープ線材における面内の I_c 分布を非接触・非破壊に計測することが出来ます。長尺線材の 2 次元的な I_c 評価を実用的な評価速度 (36m/h) で実現した世界初の装置で、線材の信頼性試験やプロセス条件の最適化、耐加工性の評価などにおいて威力を発揮しています。

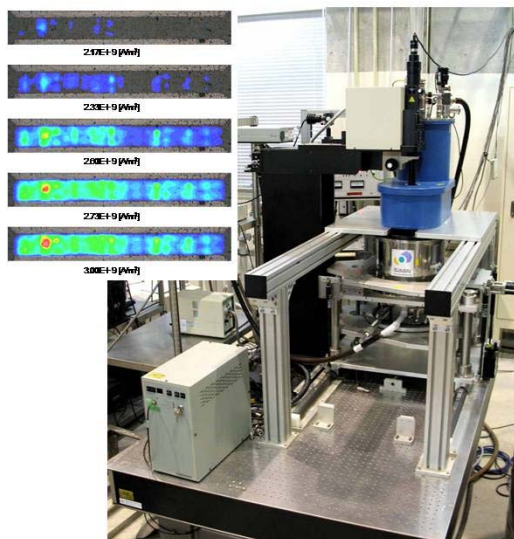


図 1 高磁界型低温レーザ顕微鏡

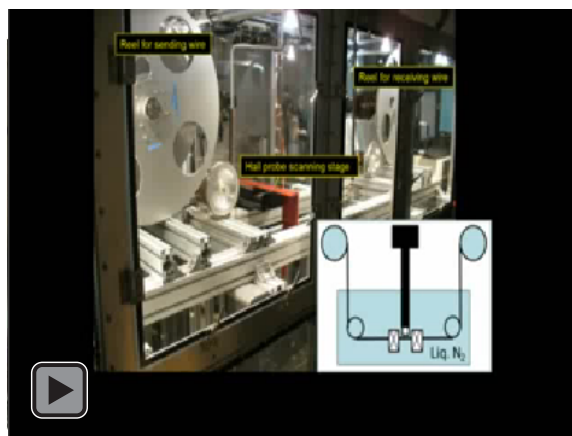


図2 リール式高速磁気顕微システム

(動画をご覧にならない場合は下記へ)

http://www.istec.or.jp/web21/movies/web21_201405_1.mp4

この他、走査 SQUID 磁気顕微鏡を用いた高感度磁気イメージングによる量子化磁束挙動の計測や、広範な実用環境下に亘る電流輸送特性の評価、更に、これらの詳細な実験を基に、各種製法により作製された RE-123 超伝導線材の電流輸送特性のデータベース化など、高温超伝導線材の実用化のための総合的な研究を行っています。

2.2 超伝導エネルギー／先進医療システムへの応用を目指した基盤研究

JST【次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション】の一環として、鉄道き電ケーブルへの適用を目的とした、超伝導電力ケーブルの研究を行っています。図 3 は、実時間シミュレータとハードウェアを組み合わせた系統連係模擬試験の一例を示しています。

さらに、経済産業省【高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト】の一環として、液体ヘリウムを用いない新型 MRI マグネット、ならびに癌治療のための重粒子線加速器マグネットの研究などを行っています。

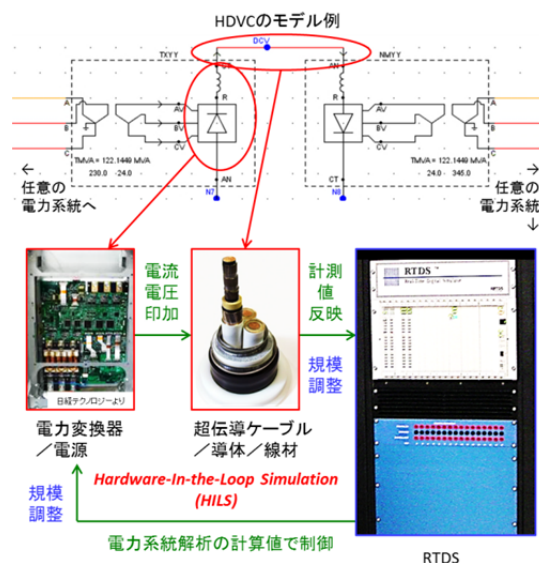


図 3 超伝導機器のハードウェア閉ループ試験

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

2.3 新超伝導材料の基礎研究と国際共同研究を通じたグローバル人材育成

近年我が国で発見された鉄系新超伝導体は、結晶構造の多様性や化学組成の柔軟性に富むことから、新しい系、新しい構造の超伝導体が生まれる可能性が大きいと期待されています。本テーマでは、JST【戦略的国際共同研究推進プログラム】の一環として、日本－EU 間の共同研究プロジェクト：SuperIron に参画し、鉄系超伝導体のポテンシャルの究明と、実用材料化の観点から性能向上の指針を明らかにすることを目指しています。同時に、国際共同研究や海外派遣を通じて、日欧間の強固な研究ネットワークを確立すると共に、若手人材の育成に取り組んでいます。

3. 連絡先

木須 隆暢 (kiss@sc.kyushu-u.ac.jp)
九州大学 伊都キャンパス ウェスト 2 号館 546 室
〒819-3095 福岡市西区元岡 744 番地

※研究室の見学は随時受け付けています。お気軽にご連絡下さい。研究室の詳細はホームページでもご覧頂けます。<http://super.ees.kyushu-u.ac.jp/>

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(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:「直流超電導ケーブル、って聞きますが、家庭に直流は良いのでしょうか？危なくはないですか？」

A: 現在の家庭で使われている機器は、インバーターを使った回転機、例えばエアコンなどは交流を直流に変換して使われています。また、もともと交流、直流どちらでも使える電気機器もあります。このため、最近、小さなコミュニティーを全て比較的低い直流電圧で結び、もともと直流で発電される太陽光と合わせ小さな直流電力システムを作るとの考え方が提案されています。これは単なるアイデアでなく、最近良くお聞きになるかも知れませんが「スマートグリッド」の一種類と考えられています。このことから分かる様に、直流を家庭に利用するのは、安全に関する基準を満たす限り問題ないと考えてください。

なお、直流を高い電圧（1000V 程度以上）で利用する際には、直流は種々の注意点や課題があります。このため高い電圧の需要家（工場など）が全て直流になることは当面考えられません。また、家庭が直流システムとなっても電力会社の交流システムの高い電圧（6 千ボルト以上）と結ぶには交流を直流に変換する装置が必要となり、この制御の仕方やコストが課題となります。このために、家庭側の直流システムで蓄電池を設けるなどして供給発電設備が停止しても電力会社に頼らない完全独立の直流システムとする考え方もあります。この場合は、蓄電池等のコスト負担などが新たな課題となります。

回答者：（公財）国際超電導産業技術研究センター 常務理事 渡辺 勉

[超電導 Web2.1 トップページ](#)