

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

2013年5月号

2013年5月9日発行

掲載内容 (サマリー) :

特集 : 超電導 世界のプロジェクト

○米国における電力網超電導技術の最近の状況

(原題 U. S. Activity in Superconductor Technology for Power Grid)

○超電導関連 2013年5月-6月の催し物案内

○新聞ヘッドライン (3/20-4/19)

○超電導速報ー世界の動き (2013年3月)

○「応用物理学会ー接合、回路作成プロセスおよびデジタル応用」報告

○電子情報通信学会チュートリアルセッション「超伝導デジタル技術の展望」報告

○隔月連載記事ー風力熱蓄積発電 (その3) - 「太陽熱発電」

○読者の広場(Q&A)ー「高温超電導線には各種あるようですがその区別、特徴などの差異がよくわからないので教えて下さい。」

[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

〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13

Tel (03) 3536-7283 Fax(03) 3536-5717

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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

特集：超電導 世界のプロジェクト



Save Earth by Superconductor

本年度、ISTEC Web21 では新たな試みとして、
特集 “超電導 世界のプロジェクト” の連載記事を始めます。

世界の技術者において、現在の各国の超電導開発の状況を自分の意見も交えて紹介して頂きます。日本の読者には情報が得にくい国外の現状がわかるかと思えます。

今月号は、A. P. Malozemoff 博士（前 AMSC 社技術副社長）による米国の最新事情です。開発当事者でもあった氏の今となつての感想もあり、興味深い記事になっています。

読者の参考になることを期待します。

ISTEC
山田 穰

*なお、本文は、A. P. Malozemoff 博士による寄稿 “U. S. Activity in Superconductor Technology for Power Grid”（原文 <http://www.istec.or.jp/web21/web21-2013-E.html> に掲載）を ISTEC の責任で翻訳したもので、文中の意見などは Malozemoff 博士の見解です。「禁：無断転載」

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

米国における電力網超電導技術の最近の状況

(原題 U. S. Activity in Superconductor Technology for Power Grid)

著者 : A. P. Malozemoff, 37 Walnut St., Lexington MA 02421

要旨

米国において、超電導線の特性向上と電力網装置の技術デモンストレーションは活発に続いている。これらは米国政府当局の援助を受けており、線材、ケーブル、モータ、変圧器に関する多くの製造業者と（電力、ガスなどの）公益事業者が実施している。米国は、商用第2世代高温超電導線の供給において世界をリードしている。AMSC社とSuperPower社がそれを担っており、その他多数の起業家精神に富んだ線材開発への努力がなお進行中である。

しかしながら米国の超電導線と電力網技術における活動は、米国エネルギー省の超電導電力装置に関する開発プログラムの終了に大いに衝撃を受けた。これは、過去20年間にわたり米国のこの分野における中心的活動であったので当然であろう。現在取り組んでいる応用はまだ政府の援助と商用化が必要であるが、将来の花開く超電導電力装置の商用マーケットへの橋渡しとして、成長する米国（そして世界の）産業界を支えていくであろう。

諸言と外観

本報告では、超電導電力網技術の米国の成果の現状と将来展望を述べる。2013年のWolsky [1]による報告を基礎としている。これは、本領域における会社と特定のプロジェクトのレビューである。

本論文での焦点を、銅系超電導体 [2] を使った、特に第1世代 (1G) の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (BSCCO-2223) や第2世代 (2G) の $\text{RE}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (REBCO-123, REは希土類元素とイットリウムを表す) を使った電力系統網技術にあてる。MgB₂もわずかに含む。これには、限流器や回転機応用が考えられている。この3つの線材は、磁気共鳴画像診断、高エネルギー物理、高磁場研究用マグネットなどのマグネット応用に有望であるが、ここでは述べない。ただし、超電導線のさらなる市場拡大になる場合には言及する。

概して、米国の成果はその展望と思慮の深さから世界をリードしている。

- ・まず、世界をリードしている2つの第2世代 (2G) の高温超電導線材 (HTS) メーカーがある、AMSC社とSuperPower社である。
- ・さらに世界で最も進んだHTSケーブル設備、LIPAケーブルがある。これは、2008年からニューヨーク市近くのロングアイランドグリッド網で運転されている（当初は1Gでその後2Gで3相のうちの1つを置き換えた）。
- ・さらに世界で最も進んだ高温超電導回転機、36 MW 船用推進モータが、米国海軍研究事務所 (ONR; U. S. Navy's Office of Naval Research) により2008年に実証デモがなされた。

現在、大きなプロジェクトはいくつも進行中で、ニューヨーク市の電力網での世界初の限流機能付き高温超電導ケーブル、28 MWの限流器変圧器など目白押しである。これらを表1にまとめた。

AMSC、Boeing、Emerson Electric、General Electric、Southwire、Varian Power SystemsそしてWaukesha Electric Systemsの各社は米国に本社を置く産業界のメンバーである。小さな業者で線材を開発販売するのは、Grid Logic、Hyper Tech Research、MetOx、Superconductor Technologies Inc. (STI) そして3G-HTSで、コイルやシステムに関する業者には、Advanced Magnet Lab、BEW

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

Engineering, Empirical Systems Aerospace、そして Tai-Yang がある。主な米国の公益事業者には、American Electric Power、Con Edison、the Long Island Power Authority(LIPA)そして Southern California Edison がある。

財政を援助する政府機関には、国防総省 (Departments of Defense)、 エネルギー国土安全保障省 (Energy and Homeland Security) と (米国) 航空宇宙局 (NASA) がある。関連開発を行う機関は、Argonne、Brookhaven、Los Alamos そして Oak Ridge の各国研と多数の大学がある (特に、フロリダ州立大の Applied Superconductivity Center、Center for Advanced Power Systems とヒューストン大学の the Texas Center for Superconductivity)。超電導の電力応用は、超電導商用化連合 (CCAS; the Coalition for Commercial Applications of Superconductivity)、地中ケーブルに関する EPRI プログラム 36 (EPRI's Program 36 on Underground Transmission) そして IEEE 限流器試験ワーキンググループ (the IEEE Working Group on Fault Current Limiter Testing) のもとで研究され、推進されている。

もちろん、現在の米国の成果のかなりの部分は、外国企業に所有されている以下の会社にもよっていることを認識しておかなくてはならない。SuperPower Inc. は現在、日本の古河電工所有である。TECO-Westinghouse は台湾の会社 TECO の所有である。また、外国企業であるスイスの ABB 社の米国支社や、外国の会社自体 (フランスの Nexans や Air Liquide)、または一部外国所有のジョイントベンチャー (Ultera; 米国の Southwire Company と デンマークの nkt cables による) によって生みだされた成果もある。

挑戦

以上の活発な成果にもかかわらず、近年は米国の電力系統網技術の未来にも暗雲が漂っている。1つは 20 年続いた DOE の電力系統整備課の超電導電力プログラムの終了である。このプログラムは、HTS 線材の開発を組織的に行い、超電導電力機器のデモを行うために垂直統合的に産業界のチームを率いた。

また、これまで鍵となる LIPA、Columbus-Bixby、Albany ケーブルプロジェクトを支援してきた (最初の LIPA はまだ稼働しており、Albany は役目を終えて大分経つ、Columbus-Bixby は、2012 年度に終了予定である)。更に、限流器の開発も支援し、Siemens、Nexans、AMSC による単相限流器のデモが成功し、開発は絶頂期に達した。その限流器も中止したのであるが、これらの中止理由は、“技術は十分熟した、もう企業は政府援助無しに商用化できる”、という意味合いであった。

このことは超電導交流ケーブルと限流器では正しい。しかし、風力用超電導発電機、変圧器、長距離直流ケーブルでは正しくない。これらの装置では、HTS と MgB₂ 線が、商用規模の電力機器デモに適する妥当な線材特性を実現しているが、さらに線材特性が改善され、コストも下がれば商業化に近づくであろうし、進行中の政府支援の研究が役に立つであろう。

同様に米国空軍研究所 (AFOSR; the U. S. Air Force Office for Scientific Research) による他のプログラムも終了した。超電導線の材料科学を探る MURI program で、これも数年前に終わった。しかし、この分野で AFOSR は、新しく、より高温の、望ましくは室温超電導体を探すプログラムを開始した。電力機器開発を中止した DOE は、新たにエネルギーフロンティア研究センター (EFRC; Energy Frontier Research Center) のプログラムを開始して新超電導探索を始めた。これは、DOE の基礎エネルギー科学部 (Basic Energy Sciences Department) が支援して、創発超伝導研究センター (CES; the Center for Emerging Superconductivity) が行う。

この動きの根本にあるのは、AFOSR と EFRC-CES の両政府当局にとって、超電導の実用化困難の根源は、結局冷凍冷却の負荷、コストとそのシステムの複雑さにあるとの見解である。その解消には室温超電導が必要であるとの考えが最終的な彼らの決断にある。これは、現在の超電導材料が電力商用応用への成功に値する十分な過程にあると信じている者へのチャレンジである。実際、

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

室温超電導体を見つける困難さ以外に、その応用への適用性についての疑問が呈されている。たとえば室温超電導体が見つかったとしてもその非常に短いコヒーレンス長や熱的活性化エネルギーは、粒界の障壁効果、フラックスクリープを増大させ、その結果、臨界電流を減少させる [3]。ごく最近では、CES はフラックスクリープを良く理解し、臨界電流を向上させる新しい試みを始めた（ただし、風力発電機用の動作条件（訳注：温度、磁場）に焦点を絞っている）。

他に失望させられた件は、米国海軍による電気推進船のための超電導モータ開発の保留である。実験室の試験で成功を収めた 36 MW 船用推進モータであるが、船上での試験は遅れに遅れている（多分、永遠に陽の目は見ないであろう）。また、米国空軍での、全電化航空機用高速超コンパクト発電機に対する関心は低いままである。

最後に、最も失望したものを上げよう。それは最近、真に商用的な米国の電力プロジェクトがないことである。線材価格がまだ極めて高く、冷却系も値段が高く、複雑であっても、公益事業者は HTS 電力機器でしか得られない利益を商業的に得るであろう。例えば、LIPA ケーブルのような超電導交流ケーブルは、現在すでにデモがうまくなされ世界中で試験されている。密集した地下インフラのある市街地では、公益事業者はこれらのケーブルを使ってコンパクトで大容量電力地下電力網を提供し、街の通りを掘り返したり、現在の地下インフラを再建設したりする必要はない。

こうした新技術の利用の遅れには多くの理由がある。大規模な経済恐慌、それに続く景気回復の遅れは一時的に電力需要の成長を遅らせ、その結果、市街地での大容量電力網のニーズを減退させる。LIPA そして Bixby ケーブルは実際の系統内で使用が始まっており、実用可能性、長期信頼性試験が行われているが、公益事業者が技術に疎い点や、その遅れの一因であろう。コストのトレードオフもまた重要な因子である。それはケーブル初期設置費用の超電導による低減が必須であり、これで十分現在の高価な HTS ケーブル自身と冷凍機インフラと見合う必要がある。同様な問題は、回転機や限流器でもある。そして、風力発電、変圧器、直流ケーブルもまた、まだまだ開発、デモが不十分である。これらの技術は、新しく見直す必要がある。

プロジェクト

一方、米国では多くの重要なプログラムが続けられており、それらを表の I、II にまとめた。線材会社としては、AMSC と SuperPower が研究と生産に活発であり、商用化に励んでいる。その売上げは増加している。例えば、AMSC 社は 2G 線材の販売を続けており、2010 年には韓国の LS ケーブル社から受注し 3,000 km を数年で納入する。これは世界で最大の受注規模である。Hyper Tech Research は、12 kV 限流器プロジェクトのために英国の Rolls Royce and Applied Superconductivity Ltd. に MgB₂ 線を納入する。いくつかの新しい開発と製造努力が Grid Logic (MgB₂)、MetOx (2G HTS)、STI (2G HTS) そして 3G-HTS (丸線の YBCO) の各社で行われている。これら各社は 2G 線材の製品化を確立した AMSC 社、SuperPower 社に大きく遅れてはいるが、彼らには自身の製造プロセスに関する長期間の経験がある。いずれにせよ、時間がたてば結末はわかるであろう。

またいくつかの政府プロジェクトは米国の会社を線材開発の面で援助している（表 II）。ARPA-E は、DOE の新部署が援助する革新エネルギー技術であり、高性能または新規な HTS 線を開発する一連のプロジェクトを持っている。EFRC-CES プログラムは、前に述べたように、AMSC 社と SuperPower 社とが一緒に遂行している。これらのプログラムは有益であるが、以前の DOE 超電導電力機器プログラムのような統一され、組織化された手法に比べて見劣りする。以前のプログラムでは、オークリッジ研究所、ロスアラモス研究所をかなりサポートしていたが、今はその役割はない。

応用の分野（表 I 参照）で、多分最も重要なのは、AMSC 社と Con Edison 社による Hydra プロジェクトである。これは、13.8 kV 電圧階級の配電システムのニューヨーク市の 2 つの変電所をつなぐ限流機能付き AC ケーブルを設置するものである。このプロジェクトは、国土安全保障省

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

(Department of Homeland Security) により援助されており、ニューヨークの金融地区のような重要な資産の安全を守ることがゴールである。これは、その地域の電力を供給する変電所に代替エネルギーの系統を接続し、提供することで実現するものである。ケーブルは、Ultera 社で作製され、冷却系は Air Liquide 社が造る。他の 2 つのプロジェクトは直流ケーブルを目指している。先進電力センター (CAPS; the Center for Advanced Power Systems) が率いている海軍のプロジェクトは、船内電力配電のための直流ケーブルのプロトタイプを研究し作製することである。商用 Tres Amigas プロジェクトは米国の 3 地区を主な非同期電力系統直流ケーブルでつなぐものである (第 1 段階では従来技術を使うが、その後 HTS を使う)。

他の主なプロジェクトは、Waukesha Electric Systems 社による限流機能付き超電導変圧器プロジェクトである。SuperPower 社と Southern California Edison 社 (SCE) がそのパートナーである。その 28 MVA (69 kV/12.47 kV) システムでは、小型化、限流機能、火災防止のために油の使用を避けることに焦点をあてている。これは SCE の系統で試験される。独立した単体の超電導抵抗型限流器もまた、Varian Power Systems による自社プログラムの中で開発中である。AMSC と Nexans が組んで、米国市場に配電レベルの超電導限流器を提供する。

風力発電技術は Advanced Magnet Lab (AML) 社が率いる複数メンバーによるプログラムの中で、DOE のエネルギー効率と再生可能エネルギー局 (EERE; Energy Efficiency and Renewable Energy) の支援のもとに実行されている。GE は、最近買収した Convertteam 社の英国子会社と一緒に超電導発電技術に興味を持って自社内で進めている。残念なことに、米国海軍研究事務所 (ONR) の 36.5 MW 船用推進モータが以前デモされたが、回転機に関しては進んだ技術を使った大出力の風力用回転機の米国プログラムはまだ無い。

ABB によるプログラムは、ブルックヘブン研究所 (BNL)、SuperPower 社と一緒に、ARPA-E の支援を受けつつ、超電導磁気エネルギー貯蔵 (SMES) を開発している。ゴールは、間欠的な風力、太陽光発電 (を補完するため) のエネルギー貯蔵である。しかし、現在の研究開発費に応じたフェーズは設計とコイルデモに限定されている。良く引用される SMES の応用は、(擾乱に) 敏感な電力網と工業電力網施設に対する瞬時電圧低下の防止である。しかし、10 年以上前に、AMSC 社は 9 つの系統内商用 SMES システム (低温超電導使用) をこの目的で敷設した。これらは実際電力系統用の世界初の超電導製品であった。しかし、AMSC 社は最終的にこの製品をあきらめ、今日広く使われている廉価なパワエレによる方法を選んだ。これで位相が異なる無効電力を供給する。もう 1 つボーイング社により実施されているエネルギー貯蔵のプロジェクトがある。これは ARPA-E に支援され、超電導ベアリングを使ったフライホイールによる貯蔵を対象としている。

電力系統応用以外に、他の幾つかの政府に支援されたプログラムもある。これは、超電導線材に関して市場が牽引するものである。DOE の高エネルギー物理プログラムは、将来の粒子線加速器用 HTS 線を支援し、米国国立衛生研究所 (NIH; the National Institutes of Health) は超高磁場の HTS-NMR に興味を持ち、全米科学財団 (NSF; National Science Foundation) の 32 T (テスラ) の HTS 製マグネット、すなわち国立強磁場マグネット研究所 (NHFML; the National High Field Magnet Laboratory) の共用マグネットにも関心を持っている。

結論

まとめると、ここ 20 年、米国の会社と政府は大きな投資を行い超電導線と電力系統の装置を開発してきた。大きな商業的市場があり、超電導の電力装置へのニーズがあると期待していた。線材は今やいつでも入手可能であり、多くの応用がデモンストレーションされた。産業界は、いつでも成長できる態勢が整っている。しかし、政府の支援はまだ非常に重要であり、線材の特性をより完全なものとし、他の重要な応用をデモンストレーションすることが必要である。これにより、産業界を引っ張っていき、商業市場の開拓につなげることができるであろう。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

Table I. Sponsored U. S.-Based Power Systems Projects

Project Sponsor	Application	Title	Technical Targets	Status, Target	Member	Budget, Period	Source
DOE OE	Cable	LIPA HTS Cable I and II	138kV/2.4kA, 600m 3-phase cable system in-grid, Phase I with 3 1G HTS cables, Phase II with 1 2G HTS cable	In operation since 2008, Phase II complete 2012	AMSC(lead), Nexans, Air Liquide, LIPA	\$49 M, 2003-2011; \$0.2 M, 2012	Wolsky 2012
DHS	Cable	Resilient Electrical Grids (Project Hydra)	13.8 kV/4 kA, 170 m, 3-phase coaxial fault-current-limiting cable to be installed in NYC grid.	25m test completed, full cable being fabricated	AMSC (lead), Con Edison, Ultera, Air Liquide, Altran, ORNL	\$29 M, 2007-2014	Wolsky 2012
Tres Amigas LLC	DC Cable	Tres Amigas Super Station	DC power transfer between 3 main U. S. interconnects; first phase not superconducting	Raising funds	Tres Amigas LLC	TBD	Wolsky 2012; http://www.tresamigasllc.com/location.php
DOD ONR	DC Cable	Superconducting DC Cable	Study of helium-cooled DC superconducting cable for warship power; demo of 1 kV 30 m monopole cable	Underway	CAPS, Southwire, NSWC	\$5M, 2007-2013	Wolsky 2012
DOE Smart Grid	Transformer	Fault Current Limiting Superconducting Transformer	28MVA, 3-phase (69kV/12.47kV) with current limiting, 2G HTS wire, Smart Grid commun./control, in-grid test starting by end 2013	Design under development	Waukesha (lead), SuperPower, SCE, ORNL, TCSUH	\$21.5M (\$10.7M from DOE), 2010.2.1-2015.1.31	Wolsky 2012, http://www.smartgrid.gov/sites/default/files/waukesha-oe0000244-final.pdf
DOE EERE	Wind generator	Fully Superconducting Direct-Drive Generator for Large Wind Turbines	Performance tests of specific drivetrain components, build and demonstrate a sub-scale system and complete detailed design for 10 MW, using MgB ₂ conductor	case study	AML, Emerson Electric, Argonne, Creare, BEW Engineering	Phase I \$0.7 M, Phase II \$2.5 M, 2012-2014	Wolsky 2012
NASA	Rotating machine	High-Fidelity Sizing Model for Superconducting Rotating Machines	Model for high-power superconducting machines for electrical generators and turbo-electric propulsion fans.	Started	AML, Boeing, Empirical Systems Aerospace	\$0.9 M, 2011.6.13-2014	Wolsky 2012
DOE ARPA-E	SMES	Magnetic Energy Storage System	Storage using ultra high field HTS magnets, for storing intermittent wind and solar power, technology demonstration only in first phase	first wire delivered, coil trial begun	ABB (lead), Brookhaven Nat'l Lab, SuperPower	\$4.2M, 2010.10.1-2013.9.30	Wolsky 2012, http://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-projects/magnetic-energy-storage-system
DOE ARPA-E	Flywheel	Grid-Scale Rampable Intermittent Dispatchable Storage (GRIDS)	In-grid demonstration of flywheel energy storage system with advanced fiber technology and superconducting bearings	Design complete, assembly underway, June 2012	Boeing Research & Technology	\$2.3 M, 2010.10.1-2013.9.30	Wolsky 2012, https://www.uaf.edu/files/acep/BoeingFlywheelOverview_06_20_2012.pdf

Table II. U. S. Sponsored Wire Projects

Project Sponsor	Application	Title	Technical Targets	Status, Target	Members	Budget, Period	Source
DOE ARPA-E	Wire	Improved Superconducting Wire for Wind Generators	Higher current 2G HTS wire (RABITS™-MOD process) with several fold reduction in cost and minimal rare earth, for direct drive wind generators	Started	BNL (lead), AMSC	\$1.5 M, 2012.1.1-2013.12.31	http://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-projects/Improved-superconducting-wire-wind-generators
	Wire and Coils	Low-Cost Superconducting Wires for High Power Wind Generators	Engineer nanoscale defects in superconducting film: focus on IBAD-MOCVD REBaCuO films, quadruple current relative to today's wire [3000 A/12mm-width (30K, 2.5T), \$36/kAm]	Started	UH(lead), SuperPower, TECO, Tai-Yang, NREL	\$3.1 M (phase 1, 80% funded), 2012.2.22-2014.12.31	http://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-projects/low-cost-superconducting-wire-wind-generators
	Wire	Low-Cost High-Temperature Superconducting Wires	Novel wire process using fine superconducting MgB ₂ particles in metal matrix	Announced 2012.12.19	Grid Logic	\$3.8 M	http://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-news-item/arpa-e-awards-130-million-66-transformational-energy-technology-projects
DOE BES	New Superconductors and Wire	Center for Emergent Superconductivity: an Energy Frontier Research Center	Finding new superconducting materials, understanding mechanism of HTS, controlling vortex matter to raise 2G HTS critical current	Ongoing	BNL (lead), ANL, UIUC, LANL, AMSC, SuperPower	\$22M (phase 1), 2009-2013	http://science.energy.gov/bes/efrc/centers/center/ ; Wolsky 2012

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

参考文献：

[1] A. M. Wolsky, "Today's Activity in the U. S. to Make Economical Superconductor, and Equipment Incorporating It, for the Power Sector", work done for and sponsored by the signatories of the International Energy Agency Implementing Agreement for a Cooperative Program for Assessing the Impacts of High-Temperature Superconductivity on the Electric Power Sector, International Energy Agency, Nov. 2012, (3 January 2013, 154 pages).

注) これは [ISTEC 会員用ホームページ](#) にその全和訳が載っている。

[2] A. P. Malozemoff, "Second Generation High-Temperature Superconductor Wire for the Electric Power Grid", Annual Reviews of Materials Research 42 (2012), pp. 373-397.

[3] A. P. Malozemoff, "Electric Power Grid Application Requirements for Superconductors", MRS Bulletin 36 (2011), pp. 601-7.

[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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

超電導関連 '13/5月-6月の催し物案内

5/13-15

第 87 回 低温工学・超電導学会
タワーホール船橋

<http://www.csj.or.jp/conference/2013s/index.html>

5/15-17

International Conference on Quantum Metrology
Poznan, Poland

<http://www.kwant.et.put.poznan.pl/>

5/15-17

SEAD25 第 25 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
箱根ホテル小涌園

<http://www.ed.u-tokai.ac.jp/sead25/>

5/20

超電導動向報告会 2013
タワーホール船橋

<http://www.istec.or.jp/conference/gijyustudoukou.html>

5/20-23

MAMA-Trend Trends, challenges and emergent new phenomena in multi-functional materials
Sorento Italy

<http://mama-trend.spin.cnr.it/>

6/11-12

第 1 回超電導応用研究会シンポジウム
除染情報プラザ、福島市

http://www.csj.or.jp/application/2013/1st_0611.pdf

6/17-21

CEC-ICMC
Anchorage, USA

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

6/20-21

第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム
千葉大学西千葉キャンパス

<http://www.jsme.or.jp/pes/Event/symposium.html>

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

6/23-25

The 25th Space Cryogenics Workshop

Girdwood, Alaska

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

6/24-28

The International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD)

Pasadena, California

<http://conference.ipac.caltech.edu/lt-15/>

[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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

新聞ヘッドライン (3/20-4/19)

- 地震の横揺れ軽減装置 超電導使い浮かせて守る 東北大・奥村組 実用化狙う 3/26 日本経済新聞 朝刊
- 時速 500 キロの秘密 台車取り付け完了 超低温が原動力 3/27 日本経済新聞
- 安価な鉄で超電導物質 岡山大 加工容易な結晶 3/27 日経産業新聞
- 超電導送電 4 団体委託 経産省 石狩湾新港の計画で 3/30 北海道新聞 朝刊
- 北海道の大規模超電導プロ 住友電工がケーブル供給 4/01 鉄鋼新聞
- 超電導リニア① 浮かして走らせ世界最速 4/01 日経産業新聞
- 超電導リニア② 半世紀を経て開発大詰め 4/02 日経産業新聞
- 超電導リニア③ 採算重視 直線ルートに 4/03 日経産業新聞
- 超電導リニア④ 日の丸鉄道 海外へ前進 4/04 日経産業新聞
- インタビュー日本の頭脳 IGZO 開発 東工大教授 細野秀雄氏 4/04 日経産業新聞
- インタビュー日本の頭脳 主な実績 超電導物質相次ぎ発見 4/04 日経産業新聞
- 超電導リニア⑤ 全線開通に向け議論活発 4/05 日経産業新聞
- 鉄系超伝導基本物質 転移温度で世界記録 4/05 科学新聞
- 住友電工 「夢の新材料」は市場評価を一変させるか 4/08 日本経済新聞
- 鉄道送電用の超電導ケーブルを開発 富田優氏 4/08 日本経済新聞 夕刊
- 風力発電「30 倍必要」 自然エネ 35%なら 経産省 4/12 朝日新聞
- 各地での風力発電、急増に東北電が「待った」 / 東北・共通 4/12 朝日新聞
- 未踏科学技術協会、超電導研究 6 件を表彰。 4/18 日経産業新聞
- ITER 計画 主要機器製作が本格化 4/18 電気新聞
- 超電導の新現象発見、理研・NEC、正確な電流測定に活用 4/19 日本経済新聞
- 超電導で新現象 磁力線 物質をすり抜け 理研・NEC 発見 4/19 日経産業新聞
- リニア中央新幹線：中間駅、美乃坂本駅に併設を 建設促進県期成同盟、JR 東海に要望書 / 岐阜 4/19 毎日新聞
- 社説 / 国際標準取得の簡素化—早期定着で国際競争力高めよ 4/19 日刊工業新聞
- 原子力機構と理研 磁石磁壁の振動運動を超電導体で高精度測定 4/19 日刊工業新聞

(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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

超電導速報—世界の動き (2013年3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



★ 記事のニュース発信地、関連地

▶ 線材



SUPERCONDUCTOR TECHNOLOGIES INC. [ハノーバー・メッセ国際産業技術見本市でY系線材を展示](#)
Superconductor Technologies (April 1, 2013)

Superconductor Technologies社 (STI) は、2013年4月8日から12日にかけてドイツのハノーバーで開催されるハノーバー・メッセ国際産業技術見本市のSuperConductingCity館でConductus®超電導線材を展示すると発表した。この展示会は世界最大規模であり、再生可能エネルギー並びに従来の発電、電力供給、送電、配電、および貯蔵などに焦点が置かれる。同社のマーケティング及び製品管理事業部副社長であるAdam Shelton氏は、「SuperConductingCity館は、一カ所の格好の場所で複数の顧客グループとの接点を作る理想の場である。昨年、弊社のConductus 2G HTS線材の製品ラインを立ち上げる上でハノーバーは理想の環境であった。その成功を生かし、今年はConductus線材を展示し、さらにはテキサス州オースティン市商工会議所と共同で参画する予定である。」と述べた。SuperConductingCity館は、超電導産業界において世界をリードする展示場である。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

Source: "Superconductor Technologies Exhibiting in SuperConductingCity at Hannover Messe World Trade Fair"

Superconductor Technologies press release (April 1, 2013)

URL:

<http://phx.corporate-ir.net/staging/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1801789&highlight>

Contact: Investor Relations, Cathy Mattison or Becky Herrick of LHA for Superconductor Technologies Inc., invest@suptech.com, ; HTS Wire, Mike Beaumont of STI, mbeaumont@suptech.com

▶ 電力応用

AmpaCity プロジェクト：世界初の超電導限流器 (SFCL) 付き 1 km 超電導ケーブル

Nexans (2013年4月2日)

Nexans 社はドイツの電力会社 RWE 社と共に、"AmpaCity"プロジェクトで使用される新しい超電導ケーブルの開発段階およびプロトタイプ試験を完了したと発表した。省スペースでエネルギー効率の高い 10 kV 級 HTS ケーブルシステム (長さ 1 km) の生産は 3 月に始まっている。ケーブルは、2013 年の終わりにドイツのエッセン市内にある 110 kV 級銅線ケーブルを交換するために使用され、40 MW に及ぶ電力の輸送が可能になる。この HTS ケーブルは、銅線ケーブルに比べ 5 倍の電力を流すことができ、銅線ケーブルとの交換は、外径を同一に維持しながら行える。インストールされれば、この 10 kV 級三相同軸型ケーブルは、世界最長の超電導ケーブルとなる。超電導限流器 (SFCL) と超電導ケーブルが組み合わさることもまた、世界初のことである。SFCL は、Nexans SuperConductors 社で製造され、短絡電流による過負荷からグリッドとケーブルを保護するために使用される。専門家は、このような革新的なケーブルシステムは、性能と費用効果両面において、エネルギー消費型である銅線ケーブルとすぐに競合できる立場になると予測している。

Source: "Type testing of the recently developed superconductor cable for the "AmpaCity" project successfully completed"

Nexans press release (April 2, 2013)

URL:

http://www.nexans.com/eservice/Corporate-en/navigatepub_142482_-32599/Type_testing_of_the_recently_developed_superconduc.html

Contact: Angéline Afanoukoe Press relations, Angeline.afanoukoe@nexans.com

▶ 基礎

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283



超電導体を走る津波

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (2013年3月27日)

ドイツ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) の国際研究チームは、強力なテラヘルツレーザー（照射部を量子化磁束 **Vortex** に変え、それを津波のように超電導体を通過させることができる精密なレーザー光）を用いて、選択的に超電導体の伝導性に影響を与えることに成功した。典型的な超電導体において、電子は抵抗なしに超電導層内を流れるのだが、その超電導層に挟まれた絶縁層を介して"トンネル"することもできる。超電導のメカニズムは、層内と層間では異なると考えられるのである。HZDR 研究チームは、電子がどのようにして一つの層からもう一つの層まで垂直に超電導特性を輸送することができるのか、そしてその輸送が水平な層内で超電導を中断せずに制御することができるのかという点に興味を持った。そこで研究者たちは、特殊で調節可能なレーザー波長の点滅を生成する自由電子レーザーを使用することにした。短い間隔で点滅するこれらテラヘルツ光が、正しい周波数で超電導体の物質層を貫通すると、超電導層の間の電子トンネル特性を直接変更することにより、選択的かつ局所的に超電導性を停止させることができる。この光が、反対方向に回転する一対の常伝導 **Vortex** 電流を生成し、これらの **Vortex** が、光とともに超電導体を通して移動、いわゆるソリトン波を形成するのである。この波は、超電導体にどんな欠陥があろうともその形成を保持し、津波のような既に知られているソリトン波の性質に似通っている。超電導体内部に光生成されたこれらの **Vortex** は、情報の保存や輸送など、多くの新たな応用につながる可能性を秘めている。この研究チームの結果は、**Nature Materials** に掲載されている。

Source: "Light Tsunami in a Superconductor"

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf press release (March 27, 2013)

URL: <http://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=38838&pNid=0>

Contact: Dr. Christine Bohnet Press officer at HZDR, c.bohnet@hzdr.de

やはりヒッグス粒子

CERN (2013年3月13日)

CERN は、昨年発見された素粒子について、さらなる手掛かりにつながる新たな暫定的結果が得られたことを発表した。前回の発表時 (2012年7月) に利用可能であったデータの2.5倍におよぶデータ量を分析した結果、この新粒子の正体が、素粒子に質量を与えるとされるヒッグス粒子であることを強く示唆すると結論付けた。この粒子が、素粒子物理学の標準モデルに一致したヒッグス粒子なのか、それとも標準モデルを超える素粒子理論で予想される最も軽量の粒子であるのかは、判断がつかないとしており、更なるデータ解析が必要となる。ATLAS のスポークスマンである Dave Charlton 氏は、「この素晴らしい最新データは、献身的に研究を重ねてきた多くの人々による多大な努力の賜物である。新粒子は、標準モデルにあるようなヒッグス粒子のスピンとパリティを有すると指摘されており、我々は今まさにヒッグス粒子探索の計測プログラムに着手したところである。」と述べた。新粒子が、標準モデルのヒッグス粒子であるかどうかを判断するために、研究者たちは新粒子の崩壊過程を精密に測定し、その観測結果を標準理論の予測値と比較するつもりである。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

尚、これらの崩壊過程の特性を明らかにするには、はるかに膨大な量のデータが LHC で収集される必要がある。

Source: "New results indicate that particle discovered at CERN is a Higgs boson"

CERN press release (March 13, 2013)

URL:

<http://press.web.cern.ch/press-releases/2013/03/new-results-indicate-particle-discovered-cern-higgs-boson>

Contact: press.office@cern.ch

▶ 経営・決算



2012 財務報告と線材開発進捗

Superconductor Technologies Inc. (2013年3月7日)

Superconductor Technologies 社は、2012年12月31日締め第4四半期並びに通年決算を発表した。第4四半期の純収益は、前年同期の28万4000ドルに対して110万ドルとなった。当四半期の純損失は、前年同期の310万ドルに対して230万ドルであった。また、通年の純収益は前年度と同額の350万ドルとなり、純損失は前年度の1340万ドルに対し、今年度は1090万ドルであった。同社の社長兼最高経営責任者である Jeff Quiram 氏は、「我々 STI 社は、次世代(2G)HTS 線材の大手メーカーになることを目指し、2012年はまさに転機の年であった。昨年、Austin 市にある Advanced Manufacturing Center of Excellence 施設に Conductus[®]線材を製造する装置一式がインストールされてから、IBAD システムが作動し、既に数四半期に亘って仕様を満たす素材が一貫して生産されている。さらに、新しい SDP (表面塗布法) システムも作動し、ここ 2 週間における連続運転では、弊社の基板性能要件を満たす幅 10 センチメートル、長さ 50 メートルの基板を生産することに成功した。より長尺且つ幅広い線材基板を製造する上で重要な節目に達したことになり、今後、長尺な Conductus 線材の製造に向けて十分に活用される。また我々は、新規の 100 メートル RCE (反応性共蒸着) 装置の生産工程をいくつか完了させた。技術チームは、この機器の生産向上に向けて一層の進捗を遂げ、近い将来、操作上に残された問題を解決していくと信じている。」と述べた。さらに同氏は、「第4四半期にかけて、限流器と超電導モータ応用の品質保証試験を行ってもらうため、新たな潜在顧客に向けて Conductus 線材のサンプルを出荷した。弊社は現在、これまでに報告された業界標準の特性を超える 2G HTS 線材を生産中である。2013年に入り、最大 100 メートルという長さの Conductus 線材のパイロット生産開始に向けて準備を整えている。」と付け加えた。2012年12月31日時点、同社の現金および現金同等物残高は 360 万ドルである。

Source: "Superconductor Technologies Reports 2012 Fourth Quarter and Year-End Results"

Superconductor Technologies Inc. press release (March 7, 2013)

URL:

<http://phx.corporate-ir.net/staging/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1793486&highlight>

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

Contact: Investor Relations, Cathy Mattison or Becky Herrick of LHA for Superconductor Technologies Inc., invest@suptech.com, ; HTS Wire, Mike Beaumont of STI, mbeaumont@suptech.com

[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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

「応用物理学会—接合、回路作成プロセスおよびデジタル応用」報告

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 デバイス研究開発部
主管研究員 鈴木秀雄

このセッションは 3/29 日に行われ、14 件の発表があった。大別すると、1-低消費電力関係、2-超伝導センサからの出力を超伝導回路でデジタル処理する関連と、3-新たなプロセス技術に関する発表に大別される。

1. 名大の田中らは RSFQ 回路を低電圧で動作させることにより、接合をアンシャント状態で動作できることを示した。バイアス抵抗が小さくなることでこれがシャント抵抗として有効になるとの理解である。横国大の沼口らはビットシリアル SFQ マイクロプロセッサ用の 32 ビットのシフトレジスタを、3 段直列バイアスする技術で低消費電力化したメモリを発表した。直列接続することで入出力がグランド電位に対して DC オフセットが加わるが、その対策はまだされていなかった。また、同大学の佐藤らは多数の超伝導センサからの多数の入力合流回路を、磁気結合型の SQUID で構成する回路に関して報告した。残念ながらレイアウトミスで実験はできておらずシミュレーションでの動作確認にとどまった。名大の滝波らは、低電圧動作の RSFQ 回路での接合間での干渉を評価した結果を報告した。クロック線とデータ線が並走した JTL についてシミュレーションと実験で検討した結果、クロック線の JJ がスイッチすることで電流がデータ線に回り込み、誤動作を引き起こすことが分かった。その影響はバイアス供給線の浮遊インダクタンスが大きいほど顕著であり、多層構造プロセスである ADP は標準プロセスより有利であることが示された。横国大の司らは断熱型量子磁束パラメトロン (AQFP) の二つの JJ の臨界電流値 (I_c) のばらつきが動作マージンに与える効果を、10 段接続の回路で I_c を正規分布でばらつかせてシミュレーションすることにより調べた。 $I_c = 50 \mu\text{A}$ 、 $L_{in} = 30 \text{ pH}$ の場合には、 $\sigma = 0.9 \mu\text{A}$ 程度以下に抑える必要があることを示した。同大学の竹内らは、AQFP 回路駆動用のオンチップ交流電源を弛張発振器と超伝導共振回路で実現する研究を継続している。今回は J_c を 10 kA/cm^2 に上げることで、最大発振周波数を従来の 2 倍以上である 10 GHz 以上に高めることができることを示した。

2. 横国大の佐野らは、質量分析の一手法である超伝導ストリップ検出器 (SSD) による TOF-MS の飛行時間測定回路としての SFQ-TDC のタイミング見直しと定電流化の改良結果を報告した。TDC としての動作は確認したものの、入力時間差のヒストグラムをとると 60 ns~90 ns のばらつきがあり、SFQ 本来の性能はまだ示せていない。同大学では、磁束固定とオンチップで行うために磁束タンク回路を設けて帰還をかけた構成の回路を検討している。現在の構成ではその特長ははっきりせず、何らかの工夫が必要ではないかとのコメントがあった。また、同大学の村松からは、TOF-MS の SSD の DC 電流出力を検出する DC/SFQ コンバータの入力部に、可変バイアスを追加した構成による入力感度向上に関するシミュレーションと実験結果が示された (最小感度: $150 \mu\text{A}$ から $82 \mu\text{A}$ に向上)。NICT の梶野らは、超伝導ナノワイヤー単一光子 (SPD) の高速化を目指し、受講面積を縮小した素子の応答速度を評価した実験結果を示した。 $15 \mu\text{m}^2$ から $1.5 \mu\text{m}^2$ に縮小することで応答周波数を 100 MHz から 10 GHz に改善された。名大の伊藤らは、100 万画素の中性子検出器を目指して低消費電力化がはかれる運動インダクタンスを利用した検出器 (CB-KID) アレイと、SFQ 回路による読み出すシステムを目指している。今回は読み出しの比較器に QOS を用い、その

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

後段にカウンターを用いて尤度判定を行う方式の基本動作を示した。

3. 東京農工大の相原らは、 CaF_2 , MgF_2 , SrF_2 , の3種類のフッ化物バリアを用いた MgB_2 ジョセフソン接合を作製し、その特性を比較した。これらの中では、Fの結合力から考えて SrF_2 が最も有望であるとの見解であった。NICTの寺井らは、エピタキシャル $\text{NbN}/\text{AlN}/\text{NbN}$ 接合を用いた超伝導量子ビットのデコヒーレンス時間を改善するには、 MgO 基板表面もしくは基板電極界面に存在する2順位欠陥の排除が必要と考え、エアー絶縁のプロセスを開発している。このエアー絶縁のためのBHFによるエッチング後の乾燥時に表面張力による破壊を防ぐために、MEMSでも使われている超臨界乾燥法をテストし、良好な結果を得た。名大の伊藤らは、磁性ナノ粒子 Fe_3O_3 薄膜の周波数特性をSQUIDの共振ステップを用いて評価した結果を示した。この評価ではキャパシタンスCの効果も加わるので Fe_3O_3 薄膜の塗布箇所を変えてCの効果を引き出している。その結果においても、周波数が数10 GHzから数100 GHzと高くなるにつれてインダクタンスの減少がみられることを示した。

[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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

電子情報通信学会チュートリアルセッション「超伝導デジタル技術の展望」報告

独立行政法人 産業技術総合研究所
ナノエレクトロニクス研究部門
上級主任研究員 日高睦夫

岐阜大学で行われた電子情報通信学会総合大会において、同学会超伝導エレクトロニクス研究専門委員会が企画したチュートリアルセッション「超伝導デジタル技術の展望」が、3月21日に開催された。このセッションでは、超伝導デジタル技術の最新動向のみならず超伝導以外の新探索デバイスや新概念アーキテクチャの研究開発動向、半導体回路設計から見た超伝導回路の特徴、半導体スーパーコンピュータ（スパコン）の動向、問題点と超伝導回路への期待が、それぞれの分野の第一人者から講演され、超伝導デジタル回路を多角的に見直す絶好の機会となった。

国際的な半導体ロードマップ委員会 ITRS（International Technology Roadmap for Semiconductors）の中で新探索デバイスを扱う ERD（Emerging Research Devices）の日本委員会の主査である東芝の木下氏から、「超伝導以外の新探索デバイスの研究開発動向」と題する講演があった。ERDの研究開発動向は、新材料や新規デバイスの原理実証を行った後にその用途を探るというこれまでのボトムアップ的なアプローチから、アプリケーションやシステム側からの要請をスペック化し、それを満たすような技術を研究開発するというトップダウン的なアプローチにシフトしてきている。特に Von Neumann ボトルネックと呼ばれる MPU、メモリ、ストレージ間のデータ転送によるボトルネックを解消するための ERD が強く望まれている。この状況の中で超伝導デバイスに期待することは、超低消費電力ロジックデバイスと、特定用途向け高性能プロセッサやセンサなど CMOS と組み合わせることで CMOS が弱い機能を補うものである。この場合、CMOS とのインターフェイスが重要となる。

同じく ITRS/ERD 委員会で世界の新概念アーキテクチャの議論をリードする北大の浅井先生から、「新概念アーキテクチャ：考え方と新規デバイスの利用機会」と題する講演があった。超伝導デバイスなどの ERD の活躍が期待されるアーキテクチャとして、自然界や生物などの演算パラダイムから発想を得るニューラルネットワークに代表されるモーフィックと呼ばれるものと、雑音やゆらぎを積極的に取り入れることによりバラツキ緩和や特性改善を行うものが紹介された。

超伝導デジタル側からは、名大の藤巻先生による「超伝導デジタル回路の研究開発動向」と横国大吉川先生による「超伝導メモリの研究開発動向」が紹介された。超伝導 SFQ 回路は超高速性と低消費電力性が両立するロジック回路であるばかりでなく、そこで使用される PTL と呼ばれる超伝導配線はほとんど電力を消費せずに光と同じ速度で信号を伝えることができ、複雑なプロセッサが 50 GHz で動作することが実証されている。最近の研究トレンドはさらなる低消費電力化であり、熱雑音限界に迫る究極の低消費電力デバイスが研究開発されている。メモリは長らく超伝導デジタル回路のボトルネックと言われてきた。これはインダクタンスに磁束を蓄える方式であるため、1ビットの保持に必要な面積を小さくすることができず大容量化が困難なためであった。最近、強磁性体層を超伝導体で挟んだ接合を用いることにより、メモリ面積を大幅に低減できる技術が提案され、超伝導メモリの大容量化に向けた研究が盛んになってきている。米国では、これらの超低消費電力 SFQ 回路と磁性体メモリを用いた超伝導コンピュータプロジェクトが開始されようとしていることが報告された。

京大の高木先生は半導体論理回路設計が専門であるが、JST のプロジェクトで SFQ 回路の論理設計と設計ツール開発に取り組んできた経験を基に「超伝導デジタル回路の論理設計」と題する講

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

演を行った。SFQ回路は、パルスの有無で論理を表現する、スイッチングが非常に高速である、という CMOS 回路と大きく異なる特徴がある。これらの特徴を考慮して、同期方式やビットシリアルやビットパラレルなどのデータ処理方式、クロック配信方式に独特の手法を用いる必要がある。大規模回路を設計するには、これらの特徴を取り込んだ設計ツールの開発が不可欠である。まず、セルベース設計とセル間配線のインフラを立ち上げた上で、自動配線ツールなどの設計ツールが開発されてきており、より容易に SFQ 回路を設計できる環境が整いつつある。

スパコンが専門である九大の本田先生は、高木先生と同じく JST プロジェクトで SFQ 回路のスパコン用アーキテクチャを研究した経験から「ポストエクサスケールスーパーコンピュータの実現の観点から見た超伝導デジタル回路への期待」と題する講演を行った。スパコン性能ランキング TOP500 の推移を外挿すると、スパコン性能は 2018~2020 年にはエクサスケールに達し、2023 年頃には現在の 1,000 倍の 10 エクサスケールに達する。しかし、これらを実現するためにはスケラビリティの壁と消費電力の壁が立ちふさがる。スケラビリティの壁とは、スパコンは高度な並列化によって高速性が達成されているが、計算に並列化できない部分が僅かでも残ると高速性が著しく阻害されることである。消費電力の壁とは、建築可能なスパコンの最大消費電力 20~30 MW から導かれる消費電力あたりの性能はエクサスケールスパコンで 50 GP/W であり、現在の技術トレンドを外挿するとこの数値は到底達成できないことである。超伝導デジタル回路への期待として、並列処理が不可能な逐次実行部分に高速の超伝導デバイスを適用することによりスケラビリティの壁を乗り越えること、および数百 GP/W の性能が可能な超伝導回路を用いることにより消費電力の壁を乗り越えることである。

超伝導デジタル回路をどのように使えば、半導体技術のボトルネックを解消できるのか。そのためどのような技術開発が必要なのかなどを考えさせられるセッションであった。

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

風力熱蓄積発電 (その3) - 「太陽熱発電」

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/国際部長 岡崎 徹

1. はじめに：色々な熱システム

風力熱蓄積発電は従来風力よりも安価に安定出力を実現可能で、再生可能エネルギーの大量導入に最適なシステムとなる可能性を秘めている。風力熱蓄積発電は、外観的には風力発電と同じで、構成要素はタワー型太陽熱発電と多くが共通であり、いわば風力発電と太陽熱発電のハイブリッドとも言える。風力発電については次回述べるとして、本項では主に太陽熱発電（英語名 CSP: Concentrated Solar Power）について解説する。

2. 太陽熱発電の概要

2.1 概要

太陽熱発電¹⁾は、基本構造や動作原理は簡単である。太陽光を集光すれば高温が得られる。その高温で蒸気を作り蒸気タービンなどを回して発電する。

一方、そのプロセスに使用する材料や機構は様々でバリエーションは幅広い。例えば集光のやり方では主な物でも3つ、熱を輸送する方法も気体（空気）、液体（多種）、まれに固体との混合、と多様な物が提案されて試験されている。蓄エネルギー方式も媒体を上記の何にするか、潜熱を利用するのか顕熱だけ利用するのか、化学変化も導入するのか、などなど多彩なものが提案され試験されている。言い方を変えれば最良システムはまだ無く一長一短があるものと思われる。風力発電や太陽光発電（PV）が、エネルギー伝達の方法として銅ケーブルしか使用しておらず、使用機器も太陽熱と比べてバリエーションが少ないのと対照的である。

2.2 メリット・デメリット²⁾

熱システムのメリットは、スケールメリットが出しやすいという点である。電気の場合、基本的には1のエネルギーを扱うには1の材料が必要で、スケールメリットは量産効果にある。例えば電池の場合には電気化学反応を利用するが、それに採用する化学変化を決めた瞬間に単位体積あたりに貯蔵可能なエネルギー量の理論最大値は定まり必要化学物質の量も決まる。よってある時点でそのコストは材料コストによって支配される。その使用材料が稀少材料であれば大量生産するほどに高コストになる可能性もある。さらに大型化すればするほど多種多様な監視装置や個々の部品のばらつきを平均化するための付加装置、さらには冷却装置や防災装置も必要となり、大型化はなかなか単位エネルギーあたりの低コスト化に繋がりにくい。

一方、熱によるエネルギー蓄積では蓄熱材以外の容器や循環系の数量は蓄積エネルギー量に比例しない。蓄熱材は安価なのでエネルギーコストにはあまり響かない。体積は長さの3乗、面積は2乗に比例するのも一因である。これは言い方を変えると小型には向かないことにもなる。これらをイメージ化したものを図1に示す。

熱システムは即応性が悪い、という課題がある。電池は立ち上がりは速いが、熱は一旦機械的な運動に変える必要があり、その機械部品も慣性や熱膨張の問題があるため急激な変化をさせることは難しい。おおまかには電池は変化（kW）が大きくかつ総量（kw-h）が小さい場合が得意で、

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

逆に熱蓄積は変化が小さく長い周期の変化に対応させることに向いている。

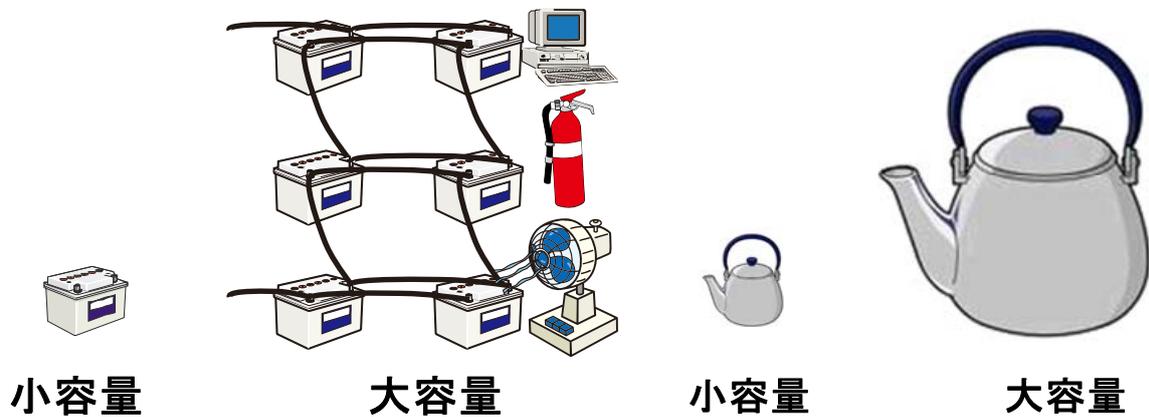


図1 化学的エネルギー蓄積（蓄電池）と熱エネルギー蓄積の違い

2.3 事故時対応、保守など

熱エネルギー蓄積は事故時に自身が貯蔵する以上のエネルギーを放出しない。溶けた塩などがタンクから液体として流出する場合も有り得るが、防液堤など目に見える安全対策が可能である。海に流れ込んだ場合でも、例えばハワイの溶岩流が海に流れ込むようなイメージで大爆発する様な事態は発生しがたいと思われる。煉瓦蓄熱に至っては事故時にはひたすら冷えるのを待てば良い。

一方で物理的に物体が循環するため保守管理が必要であるが適切な保守管理を行えばコスト的にも大きな課題となることは無いであろう。特に太陽熱発電は化石燃料をほとんど使用しないので集光部以外の保守管理は一般の火力より容易になる。

3. 集光方式

太陽熱発電は集光のやり方で、タワー型、トラフ型、フレネル型の大きく3つに分類される(図2)。他にディッシュ型等もあるがここでは割愛する。

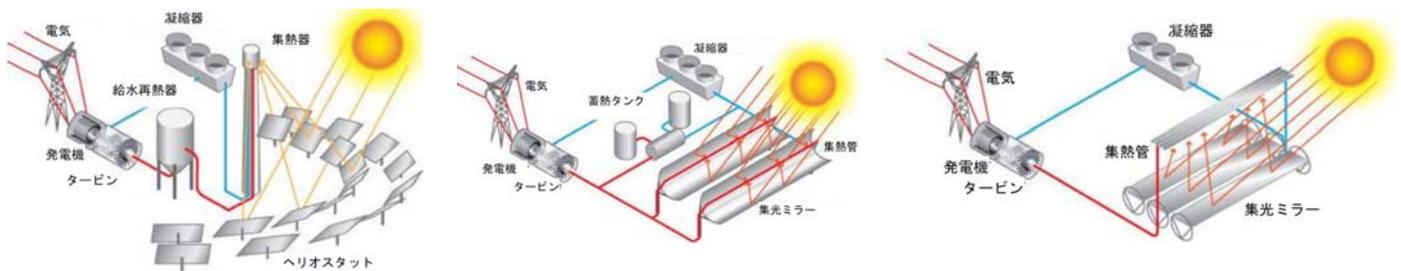


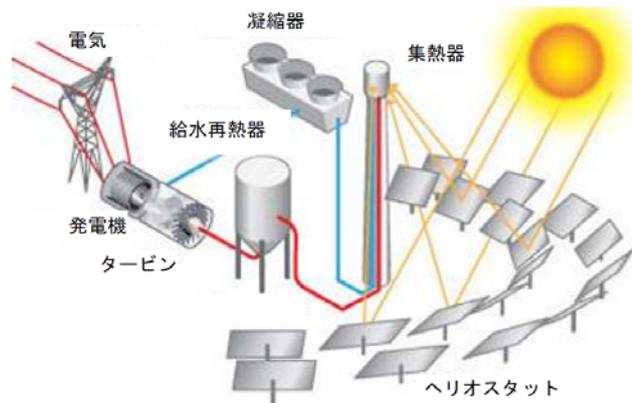
図2 タワー型(左)、トラフ型(中央)、フレネル型(右) 太陽熱発電システム(1)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

3.1 タワー型

中央のタワー（数十～百数十 m）の周囲に鏡（ヘリオスタットとも呼ばれる）を配置し、タワー上部に集光する。太陽を追いかけるため反射鏡に 2 軸追尾装置が必須で後述のトラフ型などよりも複雑になるというデメリットがある。しかし高温が得られやすく、蒸気タービンの効率向上が望める。また鏡の直前に受熱装置がないため鏡の洗浄が容易である。集熱部が小さくそこからの放熱も小さいため熔融塩など高温使用可能だが常温では固体の熱媒体を採用しやすい。24 時間発電を実証している試験プラントの例を図 3 に示す。



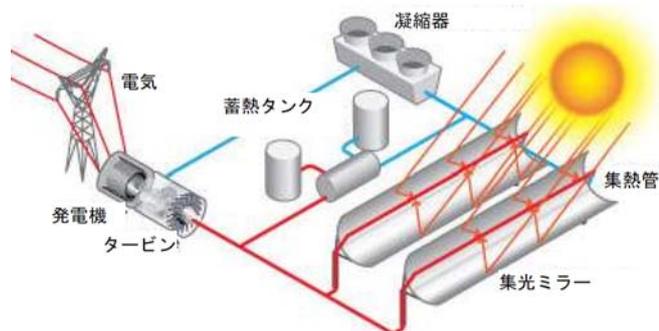
このタワー型に限らず太陽熱発電を効率良く成立させるためには直達日射と呼ばれる、散乱されないまっすぐな光が必要である。そのため砂漠地帯など立地が限られてしまうという制限がある。



図 3 24 時間発電実証中の太陽熱発電所（スペイン、トレソル社）

3.2 トラフ型

溝状の凹面鏡の焦点に直線的な集熱器を備え、1 軸のみの追尾で太陽光を集光する方式である。メリットは、構造が簡単な点である。しかし集熱管(Absorber Tube)の表面積が大きく、太陽熱を集熱すると同時に自分自身からも放熱してしまうという欠点があり、また長い集熱管の昼夜における熱膨張・収縮を吸収するための構造を実現するのが難しかった。そのため長らく熱媒体としては常温でも液体である熱媒油しか採用されてこなかったが、近年の大型 PJ では熔融塩が採用され、高温化への試行が行われている。トラフ型の場合広大な受光フィールドで受熱するため km 単位の熱媒循環を行う場合もある。

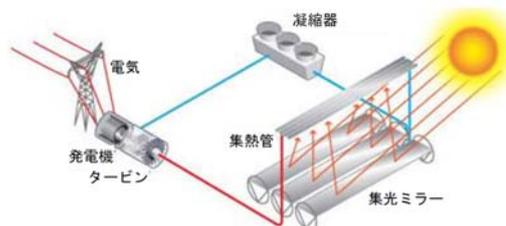


超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

3.3 フレネル型

トラフ型は大きなまとまった面積の鏡が必要であり、耐風性能を維持するために強い構造物が必要である。その欠点を補うのがフレネル型で、細長い短冊状の鏡を水平に多数配置し、高い位置に固定された集熱器に集光するシステムである。この方式は集熱管の位置が固定されるため、熱媒体を使用せずに直接蒸気を発生させる DSG(Direct Steam Generation)と呼ばれるシステムを実現しやすい。DSG を採用すると熱交換器を削減することが可能となり、システムコストの削減が期待出来る。



上記いずれのシステムにも共通するが、鏡で太陽光を集光するため全体システムは光学系となり、そのシステム全体が風などの影響で動かないよう、鏡の基礎は丈夫に作る必要がある。

4. 蓄熱、熱の輸送³⁾

4.1 ダブルタンクシステム

蓄熱方式で現在実用化されているシステムである。低温タンクと高温タンクの二つを使いエネルギー蓄積時には低温側から高温側に熱媒を加熱して移動させ、放出時には逆を行う。熱の輸送に使う熱媒としては熱媒油または熔融塩を用いる。蓄熱タンク内の液体と循環する熱媒の種類を同一としているシステムと異なる物としている物がある。

熱の輸送について必要なパイプ太さについては図4に示すテストプラントのタワーがスケルトンになっており見やすい。受光器およびタワーと比べてさして断面積を必要としていないことが見て取れる。トラフ型の場合はタワー型よりも長距離の熱輸送が必要になるが、それでも図5に示される程度の配管である。

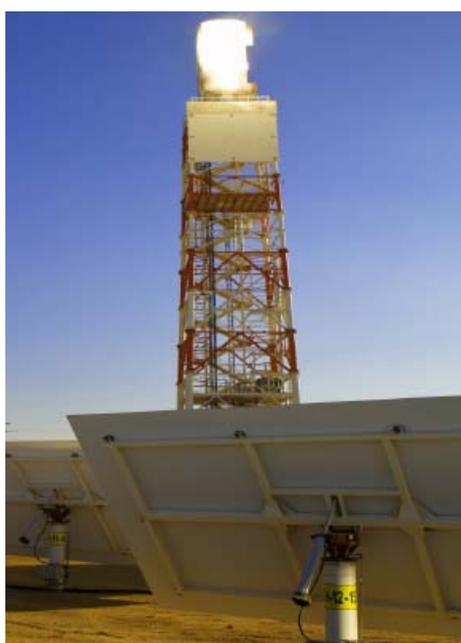


図4 米国 Bright Source 社のタワーを望む⁴⁾



図5 Siemens 社太陽熱プラントの熱媒配管⁵⁾

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

4.2 シングルタンクシステム

これは一つのタンク内に熱勾配を設けるシステムである。同じタンク内に高温部と低温部が存在し、両者の熱絶縁も2タンクシステムほど完全では無いので長期エネルギー保存には向かない。しかしタンク内の液体総量はエネルギー蓄積量に関わらず一定でトータル設備コストも安くなると見込まれている。

4.3 固体蓄熱

熱媒体とは別に固体の顕熱を利用して蓄熱する物である。蓄熱材料として検討されている物は、煉瓦や耐熱コンクリート、グラファイト、砂などがある。煉瓦の場合には鉄鋼の高炉において同種の物が既に操業しており、長い稼働実績がある。一方で熱媒体として今のところ空気という比較的熱容量の小さな媒体しか熱輸送に使えないという制限がある。コンクリートの場合は金属パイプをコンクリート中を通して熔融塩などを循環させる方法もある。

4.4 その他の蓄熱方法

その他、物質の凝固・融解の際の潜熱を利用する相変化システムも提案されている。蓄熱と言うよりもエネルギーの蓄積になるがスチームアキュムレータという蒸気を貯蔵するシステムは以前から実用化されている。ただ圧力容器となるためかエネルギーあたりのコストはあまり安くない。

4.5 蓄エネルギーコスト

大型プラントでの蓄エネルギーコストについては $25\$/\text{kWh-t}$ が見込まれている (『t』は熱エネルギーを示す)³⁾。日本の家庭用蓄熱暖房機等でもこれに近い実績はある。熱エネルギーを電気エネルギーに変換する際の効率を少なめに見て 25% (最大では 45%) とすると、蓄電エネルギーコストは $100\$/\text{kWh}$ に相当し、日本円に直すと 10 千円/ kWh となる。これは政府が 2012 年に発表したグリーン成長戦略の目標蓄電池コスト 23 千円/ kWh ⁶⁾ と比べて半分以下である。

5. 発電部

発電部分は火力発電所と同じで、温度、規模により熱電気変換効率は大きく代わり数%~ 45% である。コンバインドサイクルになると最大 60% となる。太陽熱からの入力を通常の火力発電所の補助的な熱源として利用し、余熱や再熱課程などに用いている例もある。

日本の火力発電所は燃料を輸入に頼るため海岸沿いにしか立地していない。そのため火力発電所には豊富な冷却水が必要との印象がある。しかし水を使わないドライシステム、セミドライシステムなどが実用化されており総計 100 GW の設備が世界で稼働している。クーリングタワーなど設備コストが増加するが、水利権や水処理費用が不要となるため発電コストとしては同等になるとの試算もある⁷⁾。

近年は kW オーダーに近い小型・低温においてバイナリ発電を採用し廃熱も利用するコージェネレーションに似たシステムも提案されている⁸⁾。小型のため発電効率は低いが発電機周囲の工場や民家への熱輸送も簡単であり、一つの応用として有望である。

参考文献：

- (1) <http://www.nedo.go.jp/content/100107273.pdf>
- (2) http://www.dlr.de/tt/en/desktopdefault.aspx/tabid-4727/7819_read-12192/
- (3) <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2011/119320.pdf>
- (4) <http://www.brightsourceenergy.com/>
- (5) <http://www.energy.siemens.com/hq/en/renewable-energy/solar-power/>

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

- (6) <http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/kihonmondai/28th/28sankou2-1.pdf>
- (7) <http://www.spx.com/en/search-results/?q=dry%20system>
- (8) http://www.riken.jp/pr/press/2013/20130110_1/

[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 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

読者の広場

Q&A

Q: 「高温超電導線には各種あるようですがその区別、特徴などの差異がよくわからないので教えて下さい。」

A: 超電導線材は、超電導体の完全導電性を利用しているため、従来の金属導線のようにジュール熱の発生による電力の損失が起こらない。そのため、大電流の無損失輸送や電力の貯蔵等が可能となる。また、断面積が小さくても大電流を流す事ができるため、既存の設備を用いて大量に電力を輸送する事が出来る。現在、金属・合金系超電導体である NbTi や Nb₃Sn 等で作製したコイルを用いて強磁場発生マグネット等が実用化されている。高温超電導体としては、Bi 系 (Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x) 超電導線材が市販されている。Bi 系高温超電導線材は、これまでの多くの実績で培われた金属系超電導線材同様に、超電導材料をパイプなどに充填し、引き抜き、伸線加工などをして所用太さ仕上げ、多芯化することも可能になってくる。Bi 系超電導体は、臨界温度 T_c が 110 K と高いが、77.3 K においては強磁場下での超電導特性の劣化が大きいため、高磁場発生用マグネットに応用した場合の動作温度は 30 K 程度となってしまう。これらの金属・合金系及び Bi 系超電導体を用いた超電導線材の場合、問題点として、超電導線自身と冷媒として使用する液体ヘリウムのコスト高が挙げられる。Y 系 (YBa₂Cu₃O_y) 超電導材料は T_c が 90 K 程度と液体窒素温度以上であり、強磁場下においても従来の金属・合金系超電導体よりも高い超電導特性を示す事から、超電導線材の大幅なコスト削減が可能になると考えられる。Y 系超電導材料を用いて超電導線材を作製する場合、結晶構造に依頼する超電導特性の異方性を考慮する必要がある。臨界電流密度 J_c は、c 軸方向よりも a; b 面内方向の方が大きいため、基板表面に対して平行に Y 系超電導材料の a; b 面を揃える必要がある。また、結晶軸がずれて接合している傾角粒界でも J_c の損失が起こり、全体としての J_c を下げてしまう事が報告されている。このため、高い J_c を持つ Y 系超電導線材を作製するためには、長尺基板表面に対して垂直に Y 系超電導材料の c 軸を揃え、なおかつ基板表面に平行な面内においても結晶軸方位を揃える必要がある。図に Y 系テープ状超電導線材の模式図を示す。下地となる金属テープ材料としては、Ni-Cr 合金、Ni や Ag 等が考えられている。金属テープと Y 系超電導材料の間に設けられた緩衝層は、金属テープと Y 系の格子定数緩和や、金属元素の Y 系超電導材料への拡散を防止する役割を持っており、Y₂O₃ 安定化 ZrO₂ (YSZ)、CeO₂ や Zr₂Gd₂O₇ 等が用いられる。これらの基材上に Y 系超電導材料を有機金属化学蒸着法 (MOCVD) やパルスレーザー蒸着法 (PLD) などの薄膜作製方法でエピタキシャル成長させることで、結晶軸方位の揃った Y 系超電導材料が得られる。そのためには、基材材料自信の結晶軸方位を揃える必要がある。その方法としては、(1) 金属テープの結晶軸を揃える方法と、(2) 多結晶の金属テープ上に結晶軸方位を揃えた緩衝層を形成する方法の二種類が挙げられる。(1) としては、圧延・熱処理によって金属テープの結晶軸方位を揃える RABiTS (Rolling Assisted Bi-axially Textured Substrate) 法、(2) としては、成膜中の緩衝層にイオンビームを照射する事によって緩衝層を配向させる IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) 法等が用いられる。現在では、IBAD 法で作製した基材上に Y123 を成膜した長尺高 J_c -Y123 超電導線材が開発されており、実用化に向けて大きく前進している。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

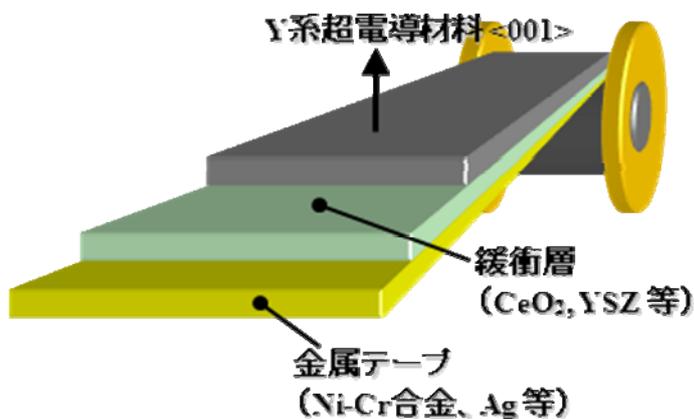


図 Y系超電導線材
YBa₂Cu₃O_y coated conductor

回答者：名古屋大学大学院 工学研究科 教授 吉田 隆 様

[超電導 Web21 トップページ](#)

「Web21 についてのご意見・ご感想、「読者の広場」その他で取り上げて欲しい事項、その他のお問い合わせは、超電導 Web21 編集局メール web21@istec.or.jp までお願いします。」