

# 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3月号

2013年3月1日発行

## 掲載内容 (サマリー) :

### 特集 : 超電導産業機器技術の展開 \*

- 超電導産業機器技術 (鉄道分野) の動向
- 船舶用超電導モータの技術開発の進展
- 超電導磁気分離装置開発の進展
- 超電導免震装置の開発状況

\* なおイットリウム系電力機器については、5月号で別途特集を組みます。

- 超電導関連 2013年3月-4月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン (1/21-2/20)
- 超電導速報-世界の動き (2013年1月)
- 「電力・エネルギーフォーラム」報告
- 隔月連載記事-風力熱蓄積発電 (その2) - 「再生可能エネルギーの実態」
- 読者の広場(Q&A)- 「大阪で超電導ケーブルの実証試験が始まったと TV や新聞で報道されていますが、横浜での実証試験との違いや、超電導ケーブルのメリットはどのようなものなのでしょうか？」

[超電導 Web21 トップページ](#)

### 超電導 Web21

(発行者)

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

〒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：超電導産業機器技術の展開

### 「超電導産業機器技術（鉄道分野）の動向」

東京大学大学院  
新領域創成科学研究科  
教授 大崎博之

超電導技術の産業分野への応用の中でも、交通輸送分野、特に鉄道分野への応用を目指した研究開発の動向を概観する。

電気鉄道への超電導技術の応用可能性として、これまでに車載変圧器やエネルギー貯蔵装置、超電導ケーブルの適用可能性などが提案され、研究開発が行われてきた。その中で最近、JSTの戦略的イノベーションプログラムの研究プロジェクトとして、直流き電系への超電導ケーブルの応用に関する研究開発が進められている。電車の駆動のためのエネルギーを供給する直流き電系は、一般に電圧が低いので大きな電流が流れる。そのため、き電線でのジュール損失が大きく、回生ブレーキが利用できなくなってしまう回生失効も生じやすくて、システムのエネルギー効率が低下するという課題がある。そこで、き電線と並行に、例えば隣接する変電所間をつなぐ形で超電導直流ケーブルを導入することにより、それらの課題の解決や軽減、さらに変電所の有効活用、設備容量低減効果などが期待されている。シミュレーションによって、それらの効果が定量的に評価されていて、また、直流超電導ケーブルを製作して実験的研究も進められている<sup>1,2)</sup>。鉄道総合技術研究所では、東京都国分寺市にある研究所内の試験線に沿って超電導ケーブルを敷設し、鉄道車両を使用する試験が予定されている。

交通輸送分野での高温超電導モータの研究開発は、船舶用超電導モータや自動車用超電導モータなどが進められている。船舶推進用モータについては本特集でも取り上げられ、自動車用については、住友電工での電気自動車開発や中村武恒先生（京都大学）らによる超電導誘導同期モータの研究などがある<sup>3,4)</sup>。現時点では直接、鉄道用をターゲットにした超電導モータの研究開発は見られないが、船舶用や自動車用の超電導モータの研究開発成果は鉄道用にも活用できると考えられる。

超電導リニア中央新幹線についてのこの1年間の動きは、一昨年までのめまぐるしい展開と比較すると落ち着いている。山梨リニア実験線は、設備更新・延伸工事が引き続き進められていて、総延長42.8 kmとなる実験線で、営業仕様の新型車両L0系による走行試験が平成25年末までには開始される予定である。また、車両L0系の先頭車が、平成24年11月22日に山梨リニア実験線の車両基地に搬入された。全長約28 mで、先端のノーズ部分は約15 mである。東京・名古屋間の営業ルート沿線では環境アセスメントが進められていて、平成25年秋までには詳細なルートや駅の位置が絞り込まれる予定である。一方、超電導リニアにも適用可能なY系コイル技術の研究も進展している。鉄道総合技術研究所ではY系コイルの研究が進められてきたが、最近、5 Tを発生する冷凍機冷却コイルの製作・試験結果が報告されている<sup>5)</sup>。今後はレーストラック形状のコイル製作や、電磁加振等の負荷をかけた時の特性試験や冷凍機電源ダウン時の対応などへと、さらに検討が進められていくことを期待したい。

#### 参考文献：

1. H. Ohsaki, Z. Lv, N. Matsushita, M. Sekino, T. Koseki, M. Tomita; "Superconducting Power Cable Application in DC Electric Railway Systems," IEEE Transactions on Applied Superconductivity,

# 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

---

- Vol.23, No.3, pp.3600705, June 2013.
2. 富田優, 福本裕介, 鈴木賢次, 石原篤, ミリアラ ムラリダ: 鉄道用超電導き電ケーブル, RRR, Vol.69, No.5, pp.20-23, May 2012.
  3. 新里剛, 荒川聡, 尾山仁, 坂寛延, 早崎俊克: 超電導電気自動車の開発, SEI テクニカルレビュー, Vol.182, pp.65-68, 2013年1月.
  4. 中村武恒: 高温超電導誘導同期回転機の開發現状, 低温工学, Vol.47, No.6, pp.384-391, 2012年6月.
  5. 小方正文, 水野克俊, 長嶋賢: 5T 発生可能な単段冷凍機冷却によるイットリウム系高温超電導磁石 ー要素試験ー, 2012年度秋季低温工学・超電導学会, 2P-p28, p.179, 2012年11月.

[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

## 特集：超電導産業機器技術の展開

### 「船舶用超電導モータの技術開発の進展」

東京海洋大学  
海洋科学技術研究科  
教授 和泉 充

電気推進船はその環境特性・省力性・操船のしやすさから普及が期待されるが、一層の CO<sub>2</sub> の排出削減のためにはモータや発電機などパワーデバイスの高効率化が必要である。国土交通省では、新造船政策ロードマップを策定し、イノベーション促進・海事クラスター強化を狙った革新的省エネ技術の開発など、海洋環境イニシアチブ等による受注力強化政策の下で、船舶からの温室効果ガス (GHG) 削減のため、船種毎にエネルギー効率設計指標 (EEDI) 等の義務化により、フェーズ 0~3 の 4 段階の削減率を設定して、2025 年までに CO<sub>2</sub> 30 % 削減船を世界に先駆けて建造するという。環境規制対策として期待される新エネルギー船舶 (LNG 燃料船) の実用化と普及拡大が目され、ここでも電気推進船が普及すると期待される。

超電導モータを電気推進船の推進動力用として捉えた場合には、電気推進用モータの超電導化による高トルク密度化、低負荷運転時の効率化がポイントになる。トルクは回転子の体格と界磁の磁気装荷 (Wb/m<sup>2</sup> または T)、さらに電気装荷 (A/m) の 3 つの積で決まる。超電導磁石の適用による磁気装荷の増大はメリットとなり、トルクを決める他のパラメータを目的により最適化することができる。これから船型の改善による輸送効率の向上がメリットとなる<sup>1)</sup>。

米国 AMSC 社が開発した 36.5 MW の船舶推進用同期モータでは、2011 年の段階で、陸上試験施設において、全出力・負荷試験までが完了し、重量 75 トン、定格が 36.5 MW, 120 rpm で効率 97.3 % を示したと報告されている。欧州 SIEMENS 社では、発電機が長期耐用試験にはいつている。4 MW の船舶用モータ (HTS III) の稼働試験が進んでいるようである。ASC2012 では、中国から 1 MW, 500 rpm の船舶推進用モータの開発事例が報告されている。また、GE 社は、高温超電導線材を使用しないで NbTi 線材による固定界磁コイルを利用した風力発電向けの 10 MW 同期発電機的设计開発を ASC2012 で発表した。設計思想として注目される。熱サイフォン冷却による回転電機子型であり、この目的のためのスリップリングも開発している。

わが国の開発を振り返ると、船用超電導推進システムとして住友重機械工業により、480 kW の超電導直流単極モータの試作開発研究が 1980-86 年代にかけて行われ、さらに後年に超電導電気推進コンテナ船の研究開発が同社を中心に行われた<sup>2)</sup>。当時は、高温超電導体の出現以前であり、ヘリウムの液化システムと一体のシステム設計を必要とした。高温超電導の船舶モータへの応用の可能性検討は、社団法人造船研究協会により日本財団の助成を受けて行われている<sup>3)</sup>。船舶用モータの開発事例として、100 kW クラス以上の設計や試作を例にあげる。まず、IHI グループによるアキシシャルギャップ型モータの開発がある。この産学グループでは、回転電機子型、誘導子型同期モータの開発に続き、400 kW クラスのモータとして永久磁石を回転子とし、電機子にビスマス系高温超電導線材を巻線した超電導電機子を採用したモータを試作している<sup>4)</sup>。同じアキシシャルギャップ型モータとしては、ビスマス系線材をコアレス回転界磁 8 極に巻き線し、通常導体を集中巻線電機子とした設計・試作例がある<sup>5)</sup>。

川崎重工業を中心とする産官学のグループでは、ビスマス系線材を巻き線したレーストラックコ

# 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

イルを開発してラジアル型船舶用同期モータにおいて 1 MW, 190 rpm の出力の成立性の検証が行われ、内航船の運航データから高温超電導モータを設備した電気推進船の普及による省エネ効果等を報じている<sup>6)</sup>。さらに現在、3 MW の同期機が開発中である。また、JST の戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ) においては、20 MW クラスの大出力回転機の成立の鍵となる技術要素についての研究がすすめられている<sup>7)</sup>。

次に周辺技術からポイントを拾う。界磁の冷却において、AMSC 社はヘリウムガスの循環による冷却を採用しており、また SIEMENS 社の開発では、ネオンガスの熱サイフォン冷却が採用されている。後者は工夫をすればシステム容量をかなりの程度小型化できること、特に静止系から回転系への冷媒配管を、行きと戻りの 2 重管とすることなく単管で措置できることなどの熱機械設計上のメリットがあり、回転子とモータ外部の冷却装置を接続する回転継手 (ロータリージョイント) なども超小型化が可能である。最後に指摘しておきたいのは電機子とトルクチューブである。開発例の多くは通常導体の電機子巻線を固定子とするが、その設計と製作には十分な配慮がされているようである。また、トルクチューブからの回転子内への入熱の抑制は冷却側の負荷に大きく関することからもモータとしての使用目的、形態に応じた工夫が求められる。

電気推進船はその環境特性・省力性・操作性の良さから普及が期待されるが、そのためにはモータなどのパワーデバイスの小型・高効率化が必須となる。超電導モータは、船舶分野で重要な低回転で高効率かつ高トルクの特徴を持つために電気推進船への適合性が注目された結果、開発が進められてきた。国内外での開発事例が積み重ねられてきた現在、モータ単体の機器設計や試作というアセンブルエンジニアリングのフェーズから、モータの実用性、耐久性の評価を経て、モータを含めた電気推進システムを構成開発するシステムエンジニアリングのフェーズへの移行が進むと期待される。

## 参考文献：

1. 例えば、<http://www.nedo.go.jp/content/100184147.pdf>.
2. "超電導電気推進コンテナ船の開発の報告書"、1990年、日本船舶機器開発協会、日本財団図書館 <http://nippon.zaidan.info/seikabutsu/1990/00383/mokuji.htm>.
3. "高温超電導電動機の動力機関への応用検討" 報告書"、2005年、造船技術開発協議機構、日本造船研究協会、日本財団図書館、<http://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2003/00390/mokuji.htm>.
4. 深谷敦子、津田哲平、大田友哉、超電導電機子形モータの進展—液体窒素アキシヤルギャップギャップ同期モーター、低温工学 47 巻 370 (2012).
5. 例えば、[www.jrtt.go.jp/02Business/Research/pdf/Brief/2004-04ss.pdf](http://www.jrtt.go.jp/02Business/Research/pdf/Brief/2004-04ss.pdf).
6. 梅本勝弥、柳本俊之、船舶推進用高温超電導モータの研究開発の状況、低温工学 47 巻 377 (2012).
7. 柳本俊之、塚本修巳、梅本勝弥、林和彦、加藤武志、和泉充、高尾智明、福井聡、藤本康孝、大出力超電導回転機器に向けたキーハードの開発、低温工学 48 巻 (2013).

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

## 特集：超電導産業機器技術の展開

### 「超電導磁気分離装置開発の進展」

大阪大学大学院  
環境エネルギー工学研究科  
教授 西嶋茂宏

超電導磁気分離の技術が実用化の段階に至っている。特に従来の技術では実施が困難だった分野に応用が広がっている。ここでは、飛灰の除染（放射性セシウム）および酸化セリウムの回収について紹介する。

放射能汚染地域において、可燃性瓦礫や草木を焼却すると、放射性セシウムが高濃度に濃縮された焼却灰が発生する。これらの焼却灰のうち飛灰に多くセシウムが含まれると言われており、この飛灰の放射性セシウムは水洗により溶出する。この溶出した放射性セシウムを無機吸着剤に吸着させた後に、超伝導磁気分離装置を用いて磁性吸着剤を懸濁液から分離する手法が開発され、南相馬市で検証された。本システムは(株)MSエンジニアリングが、磁性吸着剤は三菱製紙(株)が開発した。磁性吸着剤は、放射性セシウムに対する吸着効果が大きいゼオライト、フェロシアン化鉄などの無機吸着剤と磁性粒子を複合化したものである。当該磁性吸着剤は数百kgでの量産が可能であると言う。

超電導磁石システムの特徴は、磁気フィルターを超電導磁石ボア外に配置したことである。キャタピラのような磁気フィルターを、水平に設置した超電導磁石（磁石軸が水平になっていると云う意味）のフランジ部の近傍に、室温ボアを跨ぐように垂直に配置する。そのフィルターに懸濁媒を磁場の比較的強い部分に吹きかけ、磁気分離する。フィルターに磁気的に牽引された吸着剤は、キャタピラのように移動するフィルターで磁場の低い部分まで移動し、空気により吸引回収される。本手法は、大量処理するために開発されたものであり、分離物の回収、フィルターの洗浄が容易になるように工夫されている。本システムは、磁石ボアの外部にフィルターを有するので、フィルターの経験磁場は低く（ $\sim 0.7$  T）、ネオジウム磁石と同程度である。広い作業空間にこの強さの磁場を実現することが超伝導磁石を採用する理由であると言える。ただし、分離対象物質が強磁性体を含んだ磁性吸着剤であるため、その飽和磁化は、 $0.6$  T程度以下の外部磁場で達成されるので、当該磁性吸着剤を用いる場合は、十分な磁場強度である。磁気分離の原理を巧みに取り込んだシステムと言える。

福島県南相馬市にて焼却飛灰を除染する実証プラントを建設し（焼却飛灰3 t/日を処理）、実際に放射性セシウムを含む焼却飛灰から、放射性セシウムを除去し、良好な結果を得ている。



図1 飛灰の除染に利用された超電導磁石システム

# 超電導 Web21

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

酸化セリウムの再生を、高勾配磁気分離と磁気アルキメデス法の組み合わせを用いて行った例がある。酸化セリウムは、ガラス用の研磨材として使われているが、純粋な酸化セリウムでなく、バストネサイトと呼ばれる酸化セリウムを主とする希土類化合物である。用途としては、ガラス研磨であるが、液晶を使った表示装置のカバーガラスの表面仕上げ、フォトマスクなどの仕上げ、さらには、ハードディスク基盤の表面仕上げに使われており、酸化セリウム研磨剤の用途は広い。希土類元素が輸入されにくくなり、一時その価格は急騰したが、現在は落ち着いている。しかしながら、危機以前のレベルからすると依然、価格は高止まりしており、元素戦略的にもこれらの材料の再生が望まれている。このため従来は廃棄していた酸化セリウム研磨剤を再生することが望まれているのである。

研磨剤は水に懸濁させた状態で使用され、使用後は凝集剤で水処理される。このため廃棄研磨剤は、酸化セリウム、ガラス、場合によっては凝集剤から発生するアルミナ、酸化鉄、残留凝集剤からなる粘性の高いスラリーとなっている。この中から酸化セリウムを回収するのである。まず、凝集の解消をpH制御により行い、酸化鉄成分を高勾配磁気分離法で除去する。続いて、磁気アルキメデス法でシリカ、アルミナを浮上させて除去し、酸化セリウムを回収する。pH制御は粒子表面のゼータ電位を制御するために実施する。凝集が解消された後、高勾配磁気分離を実施し酸化鉄を分離する。酸化鉄は鉄系の凝集剤が使用された場合発生する。スラリーを焼成して高分子凝集剤を処理するが、その際に酸化鉄が発生する。焼成条件により酸化鉄の組成は異なるが、高勾配磁気分離法を採用し、どのような組成であっても酸化鉄（粒子径1～10 μm）が除去できるようにしている。その後、磁気アルキメデス法でアルミナ、ガラス等を分離する。アルミナは、やはりアルミニウム系の凝集剤から発生するものであり、ガラスは研磨する相手材である。ガラスとアルミナは反磁性物質であり、酸化セリウムは常磁性である。このため、アルミナとガラスは磁気アルキメデス法で浮上分離される。このための超伝導磁石には、 $200 \text{ T}^2/\text{m}$ 以上の磁場積が必要で、これを磁石のボア外に作った（磁場で3 T）。



図2 磁気アルキメデス法に利用された超電導磁石

当該プロジェクトは、(株)前田マテリアルが平成23年度「希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業」としてNEDOより受託し、超電導磁石は(株)超電導機構が制作した。

[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

## 特集：超電導産業機器技術の展開

### 「超電導免震装置の開発状況」

東北大学大学院

工学研究科 電気エネルギーシステム専攻

教授 津田 理

耐震・免震など多くの地震対策技術は、地震時の被害抑制に大きく貢献しているが、東北地方太平洋沖地震では、建物の倒壊や損傷などの被害を抑制できたものの、建物内部での被害は大きく、東北大学でも被害総額の四割以上が建物内部（研究設備等）に関するものであった。これに対し、これまでに、超電導体固有の電磁特性である“ピン止め効果”を利用した、超電導体と永久磁石で構成される磁気浮上型超電導免震装置を考案し、免震原理検証ならびに水平振動伝達特性評価を行ってきた。以下では、その後の進捗状況として、実用化に向けた大きな課題の一つである浮上力改善について検討した結果について述べる。

永久磁石とバルク体を用いた磁気浮上システムで発生する浮上力は、バルク体に鎖交する全方向の磁束密度の大きさと磁束密度勾配に依存するため、大きな浮上力を得るには、バルク体に鎖交する全方向の磁束密度と磁束密度勾配を大きくすることが有効である。しかし、超電導免震装置では、一方向（永久磁石長手方向）の磁束密度を一樣とし、バルク体に復元力が働かない様にして水平方向の振動伝達を除去するため、磁束密度が一樣となる方向の磁束密度や磁束密度勾配を浮上力として活用することができない。また、超電導免震装置を実用化する場合のバルク体冷却には、冷凍機による伝導冷却が不可欠となる。この場合、バルク体は真空層を有する低温容器内に収納されるため、永久磁石とバルク体間のギャップは大きくなる。そこで、永久磁石から離れた位置において大きな磁束密度および磁束密度勾配が得られる永久磁石形状・配置、ならびに、その永久磁石に対して効率よく浮上力が得られるバルク体形状・大きさについて検討した。その結果、1) 図1 の様な永久磁石の同極同士を対向させて磁束密度を高める Halbach 配列が有効である、2) 免震対象物の重量に関わらずバルク体と永久磁石間の距離を一定に保ち、設置面積を有効に利用するには、図2 の様な永久磁石を地盤に垂直に配置させる「ラジアル型」が有効である、3) Halbach 配列の中央にバルク体を永久磁石長手方向に並べて使用すると、浮上力を効果的に得るこ

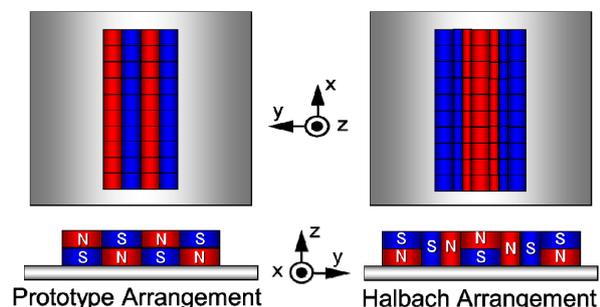


図1 超電導免震装置の浮上力改善用永久磁石配列

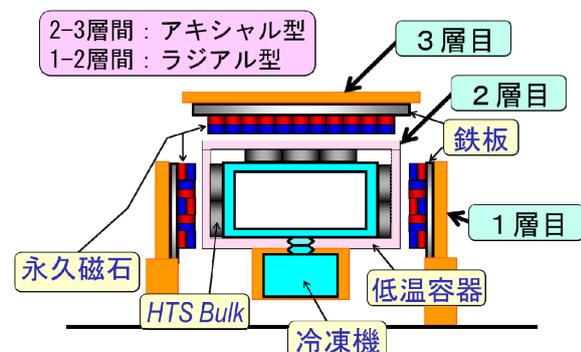


図2 永久磁石配列（アキシヤル型とラジアル型）

# 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

---

とができる、4) バルク体は、薄いほどバルク体単位体積当たりの浮上力（浮上力密度）が大きくなり、少量の厚いバルク体を並べて使用するより、多量の薄いバルク体を使用する方が効果的である、5) Halbach 配列を構成する永久磁石は、永久磁石の厚さを厚くするよりも、永久磁石数（面積）を増加させる方が浮上力改善に適している、6) 免震対象物の浮上安定性をバルク体と永久磁石間の磁気剛性で確保できる範囲であれば、永久磁石間の反発力を利用したハイブリッドシステムの採用により大きな浮上力改善を見込める、ことを明らかにした。現在は、静止時の浮上安定性の確保と水平振動に対する振動伝達率の抑制という、相反する条件を満足する静止浮上安定システムの研究開発を進めている。

## 参考文献：

1. M. Tsuda, *et al.*: “Dependence of Lateral Stiffness on Magnetic Field Distribution at Field-Cooling Process of HTS Bulk System”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity 14 (2004) 948-951.
2. M. Tsuda, *et al.*: “Vibration Characteristics in Magnetic Levitation Type Seismic Isolation Device Composed of Multiple HTS Bulks and Permanent Magnets”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity 17 (2007) 2059-2062.
3. M. Tsuda, *et al.*: “Improvement of Levitation Force Characteristics in Magnetic Levitation Type Seismic Isolation Device Composed of HTS Bulk and Permanent Magnet”, Journal of Physics 97-012104 (2008) 1-6.
4. S. Sasaki, *et al.*: “Suitable Shape and Arrangement of HTS Bulk and Permanent Magnet for Improving Levitation Force in a Magnetic Levitation Type Superconducting Seismic Isolation Device”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity 20 (2010) 985-988.
5. S. Sasaki, *et al.*: “Stationary levitation and vibration transmission characteristic in a superconducting seismic isolation device with a permanent magnet system and a copper plate”, Physica C 470 (2010) 1791-1794.

[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 '13/3月-4月の催し物案内

### 3/7-9

SIS2013 Superconductivity Interdisciplinary Seminar 2013

場所：ホテルアルパイン，長野

問い合わせ：[http://csj.or.jp/communication/2013/sis\\_0307.pdf](http://csj.or.jp/communication/2013/sis_0307.pdf)

### 3/8

第4回超電導応用研究会シンポジウム 超電導技術の高効率鉄道システムへの適用可能性

場所：鉄道総合技術研究所 国立研究所

問い合わせ：[http://csj.or.jp/application/2012/4th\\_0308.pdf](http://csj.or.jp/application/2012/4th_0308.pdf)

### 3/12-14

The 7th Mechanical and Electromagnetic Effects in Superconductors (MEM13)

場所：Aix-en-Provence, France

問い合わせ：<http://www.mem13.com/event/>

### 3/15

2012年度低温工学 九州・西日本支部研究会 / 第4回材料研究会

場所：九州大学伊都キャンパス内 稲盛ホール

問い合わせ：[http://csj.or.jp/materials/2012/4th\\_0315.pdf](http://csj.or.jp/materials/2012/4th_0315.pdf)

### 3/18-22

APS March Meeting 2013

場所：Baltimore, Maryland

<http://www.aps.org/meetings/march/>

### 3/21-3/23

電気学会全国大会

場所：名古屋大学 東山キャンパス

問い合わせ：<http://www2.iee.or.jp/ver2/honbu/03-conference/index.html>

### 3/26-29

物理学会年次大会

場所：広島大学東広島キャンパス

問い合わせ：<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/>

### 3/27-29

金属学会春期講演大会

場所：東京理科大学神楽坂キャンパス

問い合わせ：[http://jim.or.jp/MEETINGS/2013\\_spr/2013\\_spring.html](http://jim.or.jp/MEETINGS/2013_spr/2013_spring.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

---

## 3/27-30

応用物理学会春期学術講演会

場所：神奈川工科大学

問い合わせ：<http://www.jsap.or.jp/index.html>

## 4/1-5

2013 MRS Spring Meeting & Exhibit

場所：San Francisco, California

問い合わせ：<http://www.mrs.org/spring2013/>

## 4/6-9

5th International Conference on Cryogenics and Refrigeration

場所：Hangzhou, China

問い合わせ：<http://www.doe.zju.edu.cn/ICCR2013/>

## 4/16

第39回シンポジウム/第17回超伝導科学技術賞授賞式

場所：タワーホール船堀 小ホール

問い合わせ：<http://www.snitt.or.jp/~fsst/20130416.html>

## 4/16-18

第47回空気調和・冷凍連合講演会

場所：東京海洋大学 海洋工学部 85周年記念会館

問い合わせ：<http://www.jsme.or.jp/event/detail.php?id=2026>

## 4/19

電子情報通信学会 研究会発表会 マイクロ波超伝導，マイクロ波一般

場所：機械振興会館

問い合わせ：<http://www.ieice.org/es/sce/jpn/>

(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

## 新聞ヘッドライン (1/21-2/20)

超電導ケーブルで送電 省エネへ実用化探る 国内で相次ぎ実験開始 日経産業新聞 1/21  
 兵庫県立大など 鉄系高温超電導体で電子・格子振動の変化を観測 日刊工業新聞 1/22  
 超電導ケーブル 工場で 住友電工が実験 信頼性を検証 日本経済新聞 1/23  
 鉄系高温超伝導体の格子振動と電子状態 科学新聞 1/25  
 世界最高水準の電圧 超電導ケーブル開発 古河電工など 東京読売新聞 1/30  
 超電導核融合炉が着工 原子力機構 19年3月運開 電気新聞 1/30  
 27.5万V超電導送電を実証 高い性能、健全性確認 古河電工 電気新聞 1/30  
 絶対温度153度 高温超電導で新記録 産総研・理研 15万気圧で達成 日経産業新聞 1/31  
 超電導(1)究極の省エネ材 実用化へ(よくわかる) 日経産業新聞 1/31  
 送電ロス極小の超電導線 古河電工 30年耐久確認 日経産業新聞 1/31  
 超電導(2) 部材開発 日本勢が先頭 日経産業新聞 2/01  
 水銀系銅酸化物 絶対温度153度で超電導 - 産総研など発見 日刊工業新聞 2/01  
 古河電気工業・柴田光義社長 トップインタビュー 化学工業日報 2/04  
 超電導(3) 材料 加工しやすさがカギ 日経産業新聞 2/04  
 超電導(4) 送電実験 欧州勢が先行 日経産業新聞 2/05  
 銅加工業の課題と対策 松本正義 IWCC 会長に聞く 鉄鋼新聞 2/06  
 超電導(5) コスト削減へ総力戦 日経産業新聞 2/06  
 高温超電導物質の新鉱脈 ビスマスなど相次ぎ発見 日経産業新聞 2/08  
 「世界最高水準」高温超伝導ケーブル 科学新聞 2/08  
 従業員10年で2.5倍雇用どう創る? 住友電気工業 松本正義氏 日本経済新聞 2/10  
 超電導 商用前倒し視野 古河電工、住友電工が研究加速 電気新聞 2/13  
 他素材代替 加速に歯止めを 国際銅加工業者協議会 松本正義会長 日刊産業新聞 2/14  
 ITER用ソレノイド導体 超伝導性能の改善成功 科学新聞 2/15  
 超伝導転移温度「史上最高」 産総研・理研チームが153K達成 科学新聞 2/15  
 京大 ルテニウム酸化物の超電導で「一次相転移」を確認 日刊工業新聞 2/20

(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1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



#### 鉄系超電導線でブレークスルー

#### Brookhaven National Laboratory (2013年1月9日)

米エネルギー省 Brookhaven 国立研究所の科学者たちが率いる共同研究グループは、高性能な鉄カルコゲナイド系超電導線材の生成に成功した。この研究成果は、今後の本質的なエネルギー集約型への技術開発に新しい経路をもたらす可能性がある。ユニークな層状構造を持つ新たな線材は、高温超電導線材に伴う高額な製造費を回避できるとともに、低温超電導線材をしのぎ、並外れた高磁場下でもより大きな電流を運ぶことができる。鉄系超電導体は機械的には半金属性であるため、磁場中ではほぼ等方性を示すという事実に加え、壊れにくく長尺線材に成形しやすい。線材に必要な原材料（鉄、セレン、テルル）は比較的安価であり、その合成プロセスは、銅酸化物系 HTS 線材に必要な温度の半分程度で行うことができる。飛躍のキーポイントとなったのは、フィルムと基板間に酸化セリウム層を設けることによって臨界電流密度を劇的に増大させ（1 平方センチメートル当

# 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

たり 100 万アンペア以上)、さらに物質が超電導状態になる臨界温度も上昇させる(積層工程無しで生成される同化合物と比較して 30%)という発見であった。フィルムは、30 T (テスラ) で 1 平方センチメートル当たり 20 万アンペアを記録する電流を運ぶことができた。さらに、同研究グループは Rolling-Assisted Biaxial Textured Substrate (RABiTS) と呼ばれる柔軟性のある金属性物質上に薄膜を成長させ、同様な実験を遂行した。Brookhaven 国立研究所の物理学者 Qiang Li 氏は、「我々は、構造や化学組成を微調整していく上で、臨界電流と転移温度両方をさらに向上させることができると信じている。次のステップは、より高性能な新しい超電導体発見へと導くために、今回の研究成果を裏付けるメカニズムの解明、すなわち“構造と特性の関係”を正確に特定することである。」と述べた。同研究グループの研究成果は、Nature Communications でオンライン公開されている。

(出典)

Source: “Breakthrough Iron-based Superconductors Set New Performance Records”

Brookhaven National Laboratory press release (January 9, 2013)

URL: <http://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=11485>

Contact: Justin Eure, jeure@bnl.gov



## 超電導線材製造能力を倍増

Luvata (2013年2月4日)

Luvata 社は、15 年リースを新しく締結し、コネチカット州ウォーターベリー市にある現在の超電導線材製造施設の見直しを行なった。新しく改装された施設では、さらに製造スペースが拡大され、最先端の研究設備が設置される。施設の改装は 2014 年末までに完了する予定である。同社は、この追加的容量増加により、MRI のアプリケーションに使用される超電導線材の売上の倍増を見込んでいる。

(出典)

Source: “Luvata signs new lease to expand manufacturing capacity of MRI superconducting wire”

Luvata press release (February 4, 2013)

URL:

<http://www.luvata.com/en/News-Room/Press-Releases/Luvata-signs-new-lease-to-expand-manufacturing-capacity-of-MRI-superconducting-wire-/?backurl=/en/News-Room/Press-Releases/>

Contact: Susan Porter, susan.porter@luvata.com

## ▶電力応用



## 10MW 風力プロジェクト

Tecnalia (2013年1月8日)

TECNALIA は、ヨーロッパにおける SUPRAPOWER リサーチプロジェクトのコーディネーター役を

# 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

任されることになった。このプロジェクトの目標は、超電導発電機を利用し、革新的で軽量かつ丈夫で信頼性の高い 10-MW 級洋上風力タービンを設計し、洋上風力発電産業のソリューションに飛躍的進歩をもたらすことである。プロジェクトの具体的な目標には、コンパクトな超電導発電機を使用することで、タービンヘッドの重量、サイズ、そしてコストを約 30 %削減することが含まれる。研究コンソーシアムは、ヨーロッパ 7 カ国から産業界そして学業界の共同研究者で構成され、Columbus Superconductors 社が、プロジェクトに必要な超電導線材を供給することになっている。

(出典)

Source: "Tecnalia will shake up offshore wind market with smaller wind turbines"

Tecnalia News (January 8, 2013)

URL:

<http://www.tecnalia.com/en/energy-and-environment/news/tecnalia-revolutionize-offshore-wind-turbines-smaller.htm>

Contact: <http://www.tecnalia.com/en/contact/contact-form/contact-form.htm?idc=1>



## Nexans 社限流器に多量の線材販売：欧州最大の超電導グリッドへ

**AMSC (2013年1月29日)**

AMSC 社は、Nexans 社から超電導限流器(SFCL)で使用される高温超電導 Amperium®線材の発注があったことを発表した。Nexans 社とその共同研究者が手がけている都心部の高電圧機器を超電導システムに取り替えるプロジェクト“AmpaCity”において、この SFCL はサージプロテクターとして使用される。具体的には、この SFCL を利用することによって故障電流レベルを低下させ、電力システムへの安全且つ信頼性の高い相互接続を可能にし、超電導ケーブルに過負荷保護機能を提供できる。超電導ケーブルと SFCL は共に、Nexans 社が製造する。今回の発注を前に、Nexans 社と AMSC 社は共同で、同様な中程度域電圧の SFCL を北米市場に導入する意向であることも最近発表されている。

(出典)

Source: "AMSC to Provide Wire for Fault Current Limiter in Europe's Largest Superconductor Grid Project"

AMSC press release (January 29, 2013)

URL:

[http://files.shareholder.com/downloads/AMSC/2165855216x0x631262/eb526163-5cc4-42db-94a1-29590379d6c0/AMSC\\_News\\_2013\\_1\\_29\\_Commercial.pdf](http://files.shareholder.com/downloads/AMSC/2165855216x0x631262/eb526163-5cc4-42db-94a1-29590379d6c0/AMSC_News_2013_1_29_Commercial.pdf)

Contact: Kerry Farrell, [kerry.farrell@amsc.com](mailto:kerry.farrell@amsc.com)

## ▶産業応用



## 高温超電導 NMR マグネットとその技術を貸与

# 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

## HTS-110 Limited (2013年1月28日)

HTS-110 社は、ニュージーランドの研究者並びに科学者を支援するため、高温超電導 (HTS) 技術を1年間提供することを発表した。同社は、ハイテク産業、材料物性研究、そして素粒子物理学で使用されるアプリケーション用に無冷媒型超電導マグネットを製造しており、最新型マグネットは NMR アプリケーションで使用されるものである。同社は、潜在的な技術進歩の共有と推進ができるよう、ニュージーランドの研究者にこの技術へのアクセス権を1年間付与することを計画している。Scott Technology 社の常務取締役である Chris Hopkins 氏 (HTS-110 社の主要株主) は、「我々が成し遂げた成果を非常に誇らしく思う。世界に先駆ける技術をニュージーランドで開発し、さらには同国におけるトップレベルの研究機関が利用できるようにしたいと願ってきた。最近では、この技術のユニークな特質について、米国、日本、そしてイタリアの製薬、医療、その他関連業界で試験的に取り込まれ、注目を集めている。」と述べた。

(出典)

Source: "A World First Gift for NZ Researchers"

HTS-110 Limited press release (January 28, 2013)

URL: [http://www.scott.co.nz/news/pdf/2013\\_A\\_World\\_First\\_Gift\\_for\\_NZ\\_Researchers.pdf](http://www.scott.co.nz/news/pdf/2013_A_World_First_Gift_for_NZ_Researchers.pdf)

<http://www.hts-110.co.nz/>

Contact: <http://www.hts-110.co.nz/contacts/new-zealand>

## ▶ 基礎



## 新秩序の発見：磁石、超電導体…Nature 誌掲載

### Rutgers University (2013年1月30日)

ウラン、ルテニウム、そしてシリコンで作られた特殊物質に存在する新しいタイプの対称性についての説明が、Rutgers 大学の物理学教授ら2名によって提案された。物質が 17.5 K 以下に冷却されると、その物質を通る電気の流れが微妙に変化し、電子の磁場が、物質の主な結晶軸に沿って整列する。教授らの提案によると、物質中の磁気的および電気的特性の評価において、この整列は新しいタイプの隠れた秩序または対称性から生じるといふ。この原理に基づいた新秩序は、ギリシャ語の矛という言葉に因んで矛秩序 (hastatic order) と名付けられ、その名前は、この物質のもつ高度な秩序特性と物質中を流れる電子が整列する現象を反映している。この新しい概念には、新種の物質、磁石、超電導体、そしてその他未知なる特性を持つ物質状態について洞察をもたらしてくれる可能性が秘められる。現在、同教授らによってこの矛秩序の実験的証拠への探索が始まっている。この理論的知見内容は、Nature に掲載されている。

(出典)

Source: "Rutgers physics professors find new order in quantum electronic material"

Rutgers University press release (January 30, 2013)

URL: [http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2013-01/ru-rpp013013.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2013-01/ru-rpp013013.php)

# 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

<http://news.rutgers.edu/medrel/research/rh-2013-1/rutgers-physics-prof-20130130>

Contact: Carl Blesch, [cblesch@ur.rutgers.edu](mailto:cblesch@ur.rutgers.edu)

## ▶ 経営・決算

### ヘリウム不足の解決

#### Air Products (2013年1月30日)

Air Products 社のヘリウム資源開発責任者である Walter Nelson 氏は、ベルギーのブリュッセルで行われた欧州工業ガス協会 (EIGA) シンポジウムで、ヘリウム事業のあらゆる側面について講演を行い、ヘリウム供給不足をはじめ、供給の維持並びに供給量の増加に関わる重要な施策を議論した。同氏は、「化石燃料と同様に、ヘリウムは有限資源である。知られているだけでも 100 年以上の需要を満たせる供給量は十分にあり、探査と掘削技術の進歩によってさらに大量のヘリウムを探し出せるチャンスがある中、我々にはこの有限資源を維持する必要がある。ヘリウム市場において現在のような供給不足は前代未聞である。天然ガス中のヘリウムガス回収の開発と利用を目的としたエネルギー部門の投資が必要とされる。」と述べた。さらに、米議会が現在検討中の米国土地管理局 US Bureau of Land Management: BLM) のヘリウム貯留槽 (世界のヘリウム需要の 30 % を供給) に関する法案が、明暗をわける重要な要因となると言われている。同氏は、「BLM の操作を延長させ、この重要なヘリウム供給源の利用を続けるには、米国の議員が躊躇することなく直ちに法案を可決させる必要がある。法案が可決され、BLM が連邦政府の貯留槽の操作を続ける権限を更新しない限り、予備として残っているヘリウム全てにアクセスできなくなるのである。そうなればヘリウムの利用という点で、米国と世界への影響はまさに混沌としたものになるであろう。BLM にヘリウム供給権限を持続更新させること、または新法案を与えることが、新しく発表された天然ガスおよびヘリウム生産工場を稼働させるまでの間の橋渡し期間となるのである。」と説明した。現在、新たな三つのヘリウム源 (米国、カタール、アルジェリア) が、2013 年に稼働すると予定されている。

(出典)

Source: "Air Products' Helium Director Talks Market Supply Solutions at EIGA"

Air Products press release (January 30, 2013)

URL:

<http://www.airproducts.com/company/news-center/2013/01/0130-air-products-helium-director-talks-market-supply-solutions-at-eiga.aspx>

Contact: Christopher Talbot, [talbotc@airproducts.com](mailto:talbotc@airproducts.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

## 電力・エネルギーフォーラム「イットリウム系超電導コイル技術開発」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

特別研究員 山田 穰

平成 25 年 1 月 30 日、(独) 理化学研究所 横浜研究所 研究交流棟ホールにて、電気学会 電力・エネルギー部門 超電導応用電力機器技術委員会 (山本俊二 委員長)、ならび低温工学・超電導学会の協賛で、電力・エネルギーフォーラム「イットリウム系超電導コイル技術開発」と題して Y 系コイルの最近の進展についての講演、討論が行われた。講演後には会場の理研の NMR 設備見学も行われ、有意義な会議であった。主な講演内容は以下の通りであった。

プログラム：

### I. Y 系超電導コイル開発の現状と研究開発課題

1. 10:10-10:45 「SMES 応用」 長屋重夫 (中部電力)
2. 10:45-11:20 「NMR 応用」 柳澤吉紀 (千葉大・理研)
3. 11:20-11:55 「磁気浮上応用」 長嶋 賢 (JR 総研)
4. 13:00-13:35 「回転機応用」 塚本修巳 (上智大)
5. 13:35-14:10 「加速器応用 (FFAG 等)」 雨宮尚之 (京大)
6. 14:10-14:45 「加速器応用 (サイクロトロン)」 石山敦士 (早大)

### II. ディスカッション 15:00-17:00 「応用機器開発の今後と線材開発への期待」

ここ数年の Y 系線材の進展により、km 級の線材が手に入るようになり数 10~100 km の線材を要する機器の設計も現実的に可能になってきた。これを背景に「S イノベ: 戦略的イノベーション創出推進プログラム (JST)」や「イットリウム系超電導電力機器技術開発: SMES (NEDO)」でイットリウム (Y) 系コイルの試作・評価試験が活発化している。本会議では最新の結果を各々持ち寄り、議論し、今後の課題を検討した。

まず、中部電力の長屋らはこれまで行ってきた SMES 開発で検討してきた“YOROI コイル”を発表した。SMES コイルの冷却、運転中に生じる剥離応力、電磁力に耐える導体化、コイル化に成功している。これは新たな含侵材、コイル構造を用いて耐応力性を向上させたもので、実際にモデルコイル試験で 1750MPa に耐える結果を示した。また、エネルギー貯蔵の他の製品、Li イオン電池などとの比較で、GJ 級のものになるとコスト的な SMES の優位性が指摘されたのは印象深かった。



図 1 世界初の ReBCO-NMR コイル。左 -ReBCO コイル、右-これを内装した NMR 全体。600 MHz-14.1 T

# 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

千葉大・理研の柳澤は、かねてから研究している NMR 応用時に問題となる遮蔽電流効果について講演した。Y 系コイルは高強度に耐えるため、高磁場 NMR の大幅なコンパクト化が期待できるが、遮蔽電流効果のため、NMR 励磁後、磁場が時間とともに減衰・変動していく問題があった。従来の Bi 系では 20 日程度で所定磁場に落ちつくが、Y 系では約 2 年の長時間を要する。この課題を解決するため、コイルの励磁電流を所定値より Overshoot させ (5%程度)、所定の磁場と安定度を数日程度に短縮できることを示した。実際に ReBCO コイルを内蔵した 500~600 MHz 級 NMR (~12 T) を製作し (図 1)、本 Overshoot 法の有効性を確認し、実際の NMR に Y 系コイルが使えることを示した。Y 系コイルの有望な応用先としておおいに期待できる。

JR 総研の長嶋は、リニア用の高温超電導コイルを検討しており、今回、1 T の永久電流モードコイル (モバイルコイル) (図 2) と 5 T の冷凍機冷却コイルを発表した。1 T コイルでは、50 K 以下の高温動作を 8 時間以上続けることができた。また、5 T コイルでは、冷却仕様を簡単化し、単段の冷凍機や輻射シールドのない簡単な構造として、実用化へ向けたメリットを追求している。なお、本コイルは 40 K では 6 T を達成している。また、コイル通電時の導体劣化を防ぐためシアノクリレート樹脂を含浸に用いている。

いずれのコイルでも接続は半田であるが、実際の大型のコイルでの実用時には問題にならないとのことであった。5~6 T の磁場が高温で可能となり、今後のリニア応用が期待される。

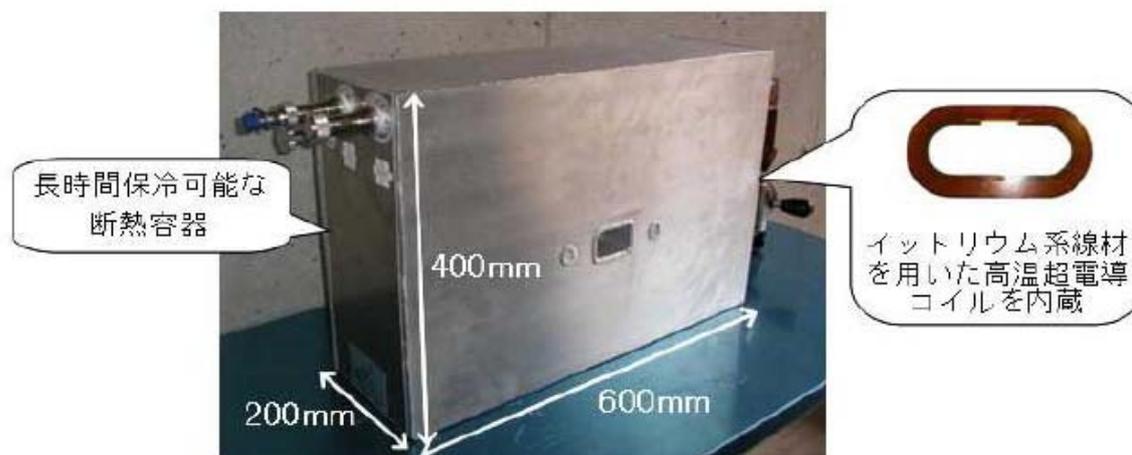


図 2 JR 総研のモバイルコイルシステム。電源、冷凍機なしで 1T を長時間発生。これ以外に 40~50K 動作 5~6T コイルの作製にも成功している。

上智大の塚本は、引張疲労試験から線材幅方向の端部にマイクロクラックが生じて劣化が始まることを指摘した。このため、多数回励磁するコイルでは繰り返し応力がかかり、クエンチに至る重大事故につながる。今後、線材の検査、使用基準作りが重要と思われた。

京都大学の雨宮は、S イノベの結果から、固定磁場強収束 (FFAG) 加速器の利点、Y 系加速器用要素コイルの結果 (図 3,4) を示した。特に世界で初めて三次元変形させた Y 系コイルの作製の実績を示せたことは非常に意義が大きい。こうした複雑な形状のコイルは金属系である NbTi 線の独壇場であるが、Y 系線材コイルが使える見通しがでてきたことは今後の応用の枠を広げ、大いに今後期待できる。セラミックスである Y 系薄膜、中間層薄膜部分を含む複合体線材での機械特性を

# 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

より詳細に把握し（たとえばエッジワイズ曲げなど）、その限界（前記、上智大の繰り返し特性なども含んで）を明らかにしてコイル作製技術をさらに高めることが重要である。



図3 三次元巻線機



図4 加速器用の高精度三次元変形コイル。  
左は加速器中のコイル配置。

早大の石山はサイクロトロン加速器の検討について発表した。この加速器用コイルの設計で、彼らの最新の Y 系コイルの機械強度 (1.7 GPa) を用いると、使用線材量を 43 % も大幅に減らすことができるとのことであった。また、サイクロトロンでは  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  の磁場精度が要求されるが、1) 遮蔽電離流の効果は、線材のスリット化により大幅に低減でき、また、2) コイル巻線は発生磁場の均一度に大きく影響を与えるが、線材の厚みのバラツキ、巻線時のバラツキを考慮しても  $\pm 80 \mu\text{m}$  に収まっており、最終的に必要とされる  $10^{-4}$  を十分達成可能との解析結果を示した。

上記講演後には、線材作製側からフジクラ、ISTEC、古河 (SuperPower)、住電からの代表者が現在の線材と今後の開発方向について発表し、コイル側開発者との意見交換を行なった。線材側に対しては、今後の有益な開発方向（価格、特性ほか）などが議論された。なお、その中で住友から、ITER 用電流リードに Bi 系線材が採用されたとの報告があった。一般商用製品にまさる厳しい使用基準がある ITER 製品に使われることは、高温超電導も研究開発用でなく、いよいよ汎用市販製品の仲間入りかと、同業者として喜ばしいことである。

[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2） - 「再生可能エネルギーの実態」

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

再生可能エネルギーの大量導入には、その出力不安定性対策が重要である。これの具体的対策については意図する・しないに関わらず推定や誤解、誇張に基づく資料も多く、現実が見え難くなっている。本稿では恣意が入りづらい実績資料を元に、再生可能エネルギーを電力系統に大量導入する場合の姿を明らかにする。その中で図1に示す風力熱蓄積発電（WHP; Wind Heat Power）の役割を述べたい。

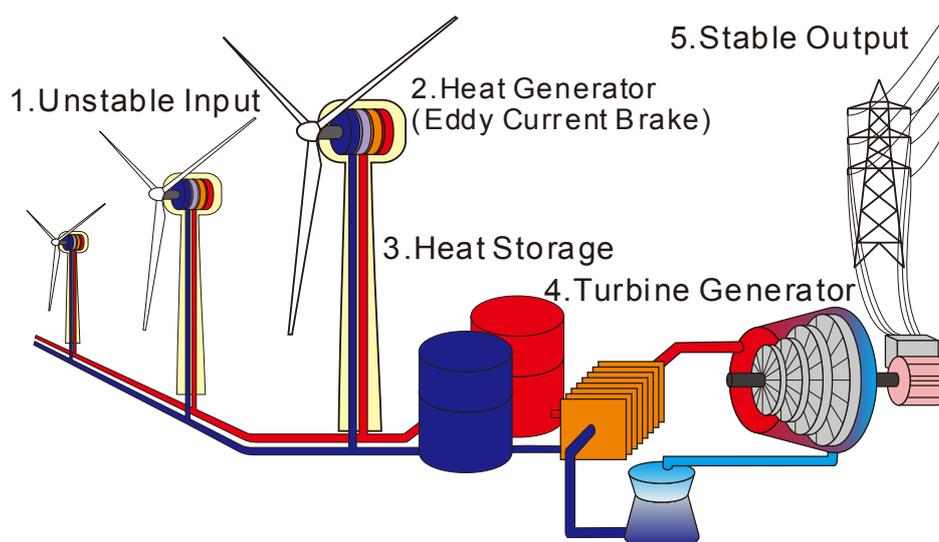


図1 風力熱蓄積発電の構成

## 2. 再生可能エネルギー導入先進国の実例

## 2.1 デンマーク

デンマークでは風力で総発電量（kWh ベース）の20%を風力で賄っていると言われており（図2）。これを詳しく Danish Energy Agency 発行の Energy Statistics 2010 から調べると、まず図3の様に1980年比2010年まで電力消費量はほぼ増加していない。同時期の電力設備容量の変遷を調べると図4の様に風力が大量に導入されると同時に大型火力設備は維持したまま小型火力を増強している。結果として電力消費が一定なのに従来型発電設備を25%増加させている。

またデンマークは北欧諸国と海底ケーブルで強力に相互接続され活発な取引が行われている。この取引状況と風力の発電量について CEPOS（デンマークの政府系シンクタンク）が詳しく分析している。これによると風力か火力か電力の由来判別は難しいものの、最初に述べたような総発電量

# 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

の20%を風力で賄っているとは到底言えず、4%ぐらいが自国消費で残りは輸出している、と分析されている。理由は、風力は需要に合わせた発電が出来ないため電力取引価格が安価な時間帯に輸出せざるを得ない事が多く、逆に必要時に輸入する場合には取引価格が高いからである。結果としてデンマークは世界一とも言われる電力コストになっている。

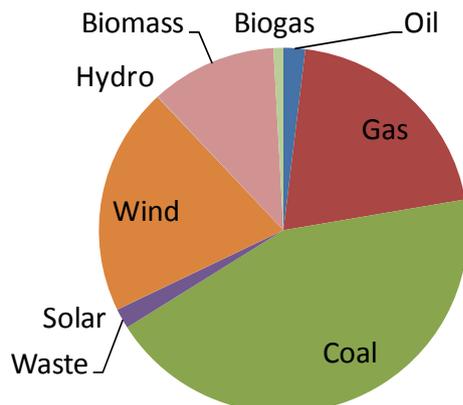


図2 デンマークのエネルギー源別発電シェア (出典: Danish Energy Agency “Energy Statistics 2010” より作成)

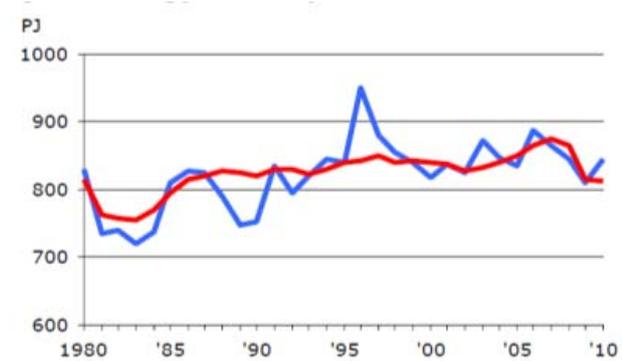


図3 エネルギー使用量の変化。赤色は年ごとの気象要素を加味した場合で、30年間ほとんどエネルギー消費量が一定である事を示す。縦軸が拡大されていることに注意。(出典: Danish Energy Agency)

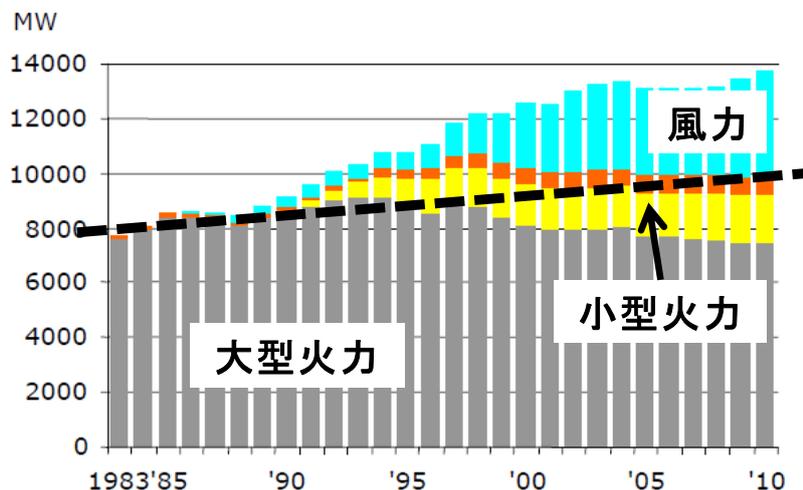


図4 デンマーク発電設備容量の変遷 (出典: Danish Energy Agency)

## 2.2 スペインの実績

スペインもデンマークと同様に自然エネルギーを大量に導入した。スペインはピレネー山脈を越える送電線建設が景観問題から難しいために、電力系統的には孤島に近い。この点で周辺国と繋がっているデンマークとは様相が異なる。

スペインは2000年から2010年にかけて主に風力を2.4 GWから24.8 GWへと2010年の全体

# 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

設備容量97 GWの中で大きく増加させている。その際に即応答性のあるガス火力を0から25.2 GWまで新規導入した(図5)。この間の電力消費は35%増のため、電力消費量の増分よりも火力の設備容量増分の方が多い。結果として70%を超えることが珍しくない火力の設備稼働率は30%を切っている。

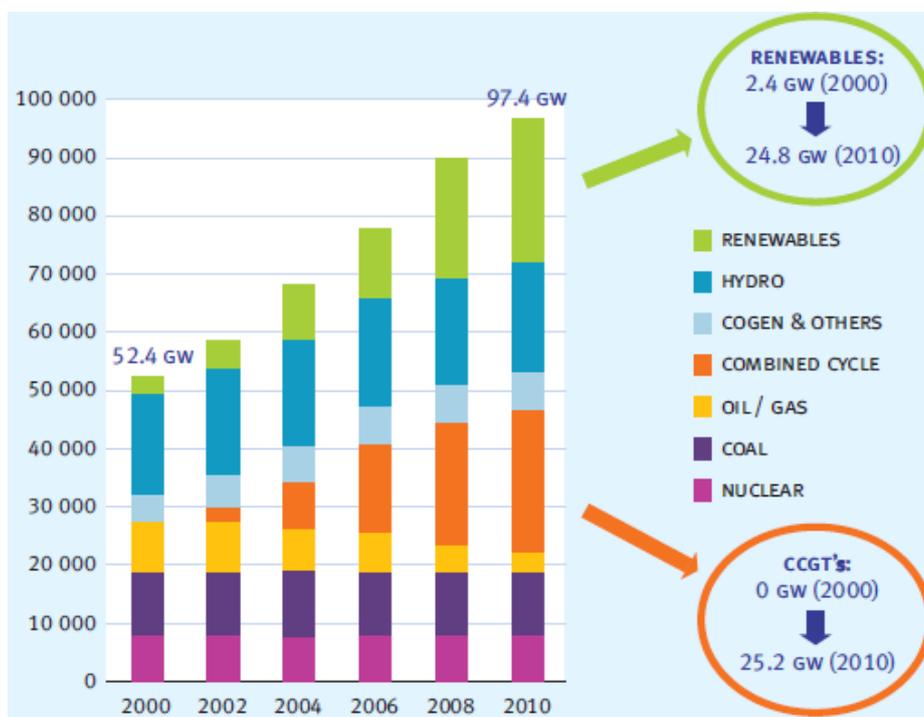


図5 スペイン発電設備量の変遷。この間に電力消費量は35%増加。この増加以上の従来型発電設備の増加を行った(出展 RED Electrica de Espania)

以上のようにデンマークもスペインも風力の大量導入によって従来型発電設備を削減せず、逆に増加させていることがわかる。

さて、次の項目以降はその他の国の計画を紹介する。計画で有り実績ではないため、将来推計への不確実性がある事を予め述べておく。

## 2.3 ドイツの計画

欧州の中で大きな電力需要を持ち、2011年にはkWhベースで10%程度の再生可能エネルギー導入を達成したドイツはどうであろうか。その将来像はGerman Energy Agency、通称 dena のGrid Study II(2010)に詳しい。計画では2008年比2020年には全体の電力消費を8%削減し、一方風力の導入量を30%とし、原発は20%から7%に順次削減する。原子力を含む従来型発電設備量は14%を削減しているため、デンマークやスペインほどの設備冗長性増大にはなっていない。設備冗長性をあまり大きくしなくとも良い計画の根拠は、デマンドサイドマネージメントなどの開発要素を考慮したためであり、この開発が進まなければデンマークやスペインと同様な設備構成になるであろう。

現在、ドイツでは太陽光が非常に大きな比重を占めるようになってきた。しかしあまりに電力費が高騰したため見直しが行われ、今後の太陽光導入は大幅に減る見込みである。図6には再生可能

# 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

エネルギーの中での設備容量 (kW) とその発電量 (kWh) を示す。太陽光 (PV) は設備容量に比べて発電量が少ないことが明らかで、元々の設備コストの高さもあり、この大量導入は電力コストを大幅に押し上げる結果となっている。また火力発電所と同様の運用が可能なバイオマスが占める割合が多い。この中身については精査が必要であろう。

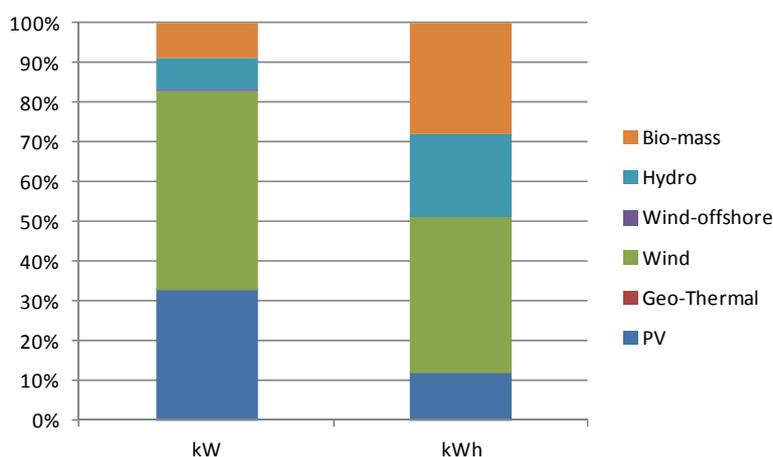


図6 ドイツ再生可能エネルギーの容量 (kW) と発電量 (kW-h) (2010, 出展 : BDEW)

## 2.4 アメリカの実績・計画

アメリカはまだ 2010 年において再生可能エネルギーのシェアは水力を除くと 3.5 %と欧州より遙かに小さい上に、地域ごとに小さな電力会社が存在するため、なかなか全体像として確度の高い資料・計画が得られにくい、例を示す。図 7 に米国 NREL/DOE 資料”20 % Wind Energy by 2030”(DOE/GO-102008-2567 2008/07) のミネソタ州における数日間の運転状況を示す。

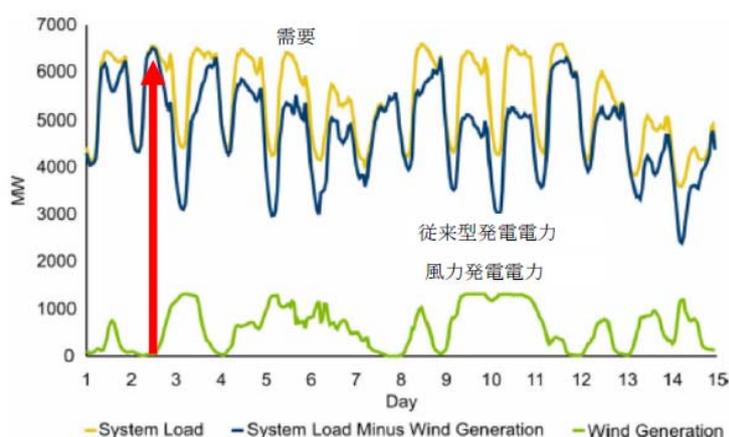


図7 アメリカ・ミネソタ州における電力需要と風力発電量の関係

2 日目 (矢印) には風力の出力がゼロの時間帯に最大需要が発生している。すなわち従来型発電設備は風力の導入に関係無く維持する必要があることがわかる。一方で需要が少ない時間帯に風力が最大出力となり、従来型発電の出力を大きく下げることが必要となっている。すなわちシステムを安定運用するためには従来の設備容量を維持しつつ、出力調整が容易な発電設備、すなわちガス火力が必要となる。最新の情報としてフォーブス電子版記事”Why It's The End Of The Line For Wind Power”(2012/12)でも火力の維持が必須であると紹介されている。

# 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

## 2.5 広域連携による平準化

再生可能エネルギーに関しては広域連携することでその出力不安定性は平準化される、との主張もある。これについては図7のデータも広域連携した結果の風力出力であり、平準化は必ずしも行っていない事がわかる。さらに広域なドイツのデータを図8に示す(German Wind Energy Report 2010)。ここでもドイツ全土の風力出力は緩やかではあるが変動し、需要が大きい時に風力から必要な電力の供給が難しい期間があることがわかる。年間を通じてみればほぼゼロになる時間帯も有り得る。

それでも少しは発電しているので、非常に大量の風力を導入すれば、との議論も生じるが、すると良風時には電力が余り発電停止をせざるを得ず、稼働率の低下に繋がり、発電コストが上昇する結果となる。

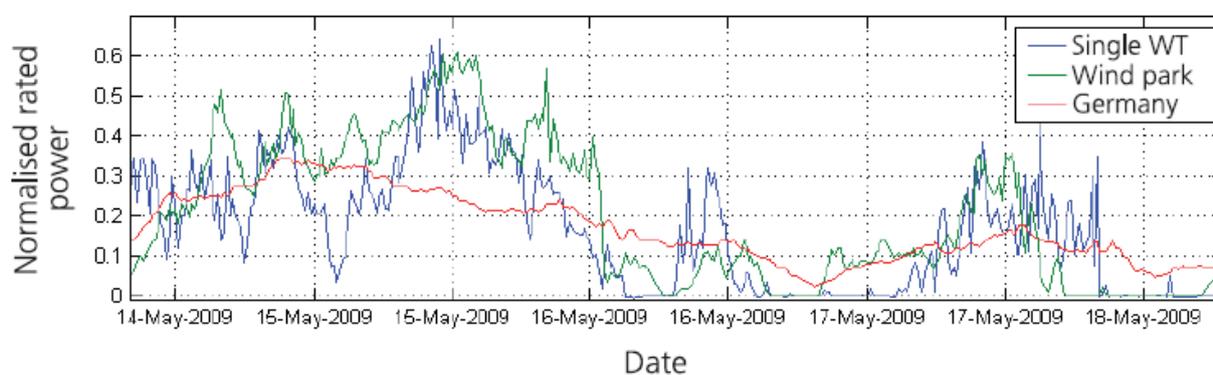


図8 ドイツの風力出力変化図。風車一基(Single WT)の場合と、複数台(Wind park)の合算出力、そしてドイツ全土の風力出力を相対比で表している。

なお、ここまでで風力の導入は二酸化炭素排出量削減に効果が無い、というイメージを持たれかねない。世の中の風力導入反対意見資料には、風力導入は火力の稼働率低下・間歇運転を招き燃料消費量は逆に増えている、との主張も散見される。しかし前述の米国 DOE 資料では図9の様に風力を20%導入した際には電力コストをほとんど上げずに燃料の炊き減らしが実現できることが示されている。

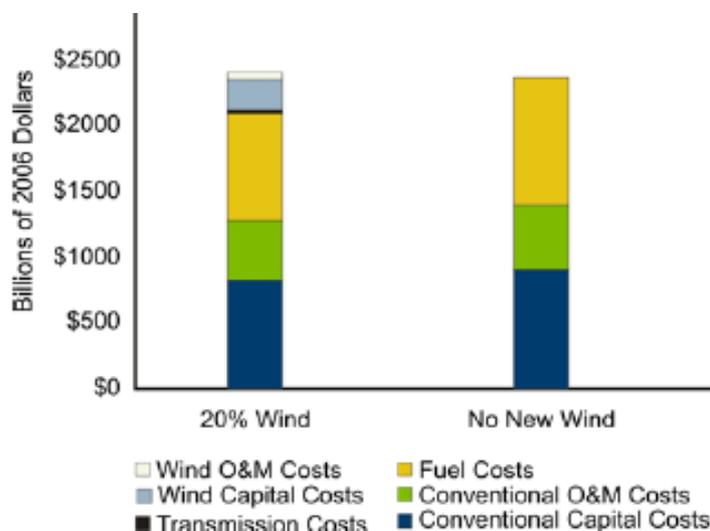


図9 アメリカの20%風力導入計画による燃料炊き減らし(▲16%)効果予測

# 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

風力の不安定出力に対する対策として蓄電池や圧縮空気蓄積が良く引き合いにだされる。同じ DOE 資料の 80 ページには、強固な送電網を構築できればこれらの技術導入の経済合理性は無い、と記されている。Dena の Grid Study II にも同様な記載がある。ただこれは数時間単位での出力平準化を念頭においており、短時間の急激な変動には電池などが有効である事は忘れてはならない。

以上のように従来型風力（あるいは太陽光）を大量に系統に導入するには

- (1) 最低限、等量の待機火力が必須
- (2) 送電網が弱いと不安定性は拡大する。その対策に火力がさらに必要。

ということが実績から明らかであろう。特に(2)については重要で、ヨーロッパの送電系統運用者連絡会 (entso-e; European network of transmission system operators for electricity) はその 10 年開発計画の中で早急な国家主導による送電網増強に着手しなければ電力の安定供給は難しくなると警告している。

### 3. 日本の現状

日本の状況はどうであろうか。まず既に北海道や東北での風力発電導入はほぼ上限に達しており、これ以上の風力増設は系統の安定に悪影響を及ぼす、という事が知られている。これに対して、電力会社間にて相互電力融通を強化すれば十分であり、火力の増強などに言及した資料は少ない。この点を調査した。

図 10 は日本の電力会社の設備容量 (kW) を示した物であるが、これを見ると風力の導入が限界に達している北海道、東北を東京とが強固に接続されれば数倍の容量となるため、あと数倍の風力導入は問題なく可能となることが推定できる。2013 年 2 月時点の政府方針は、今後の 10 年で風力を 3 倍に増やすとなっている。すなわち 2010 年時点で 1 %の導入量を 3 %にするだけである。この程度であれば各電力会社間の調整力融通を可能とすれば良いことがわかる。ただし送電網の増強が重要であろう。

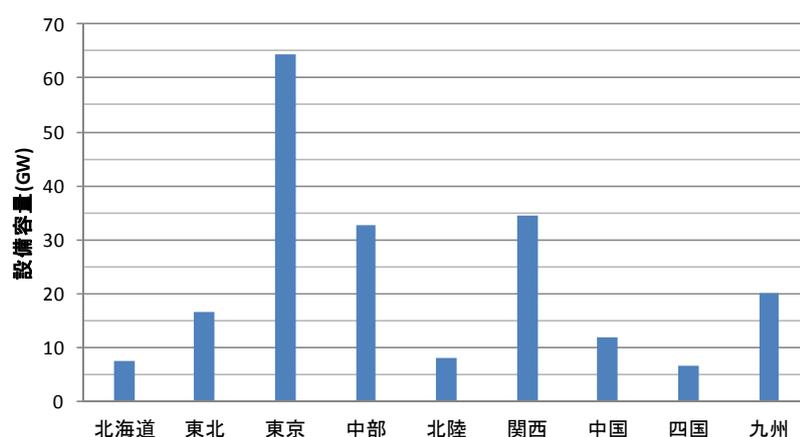


図 10 日本の各電力会社の設備容量(2009)

しかし、この風力導入量が数%（太陽光など他の再生可能エネルギーも含む）よりも多く導入する場合には、前項で述べたデンマークやスペイン、ドイツなどと同じ状況になるであろう。いずれにしても風力の導入によって従来型発電設備の削減は難しいと言わざるを得ないため、日本では『まだ』課題とはなっていないのが実情であろう。

# 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

## 4. 現状の再生可能エネルギーを導入したシステムの姿

ネット百科事典 Wiki ペディアで風力発電について調べると 2013 年 2 月現在で下記のような記述があり、これが風力に関する現時点での一般認識であろう。

『火力発電を減らして風力発電で代替するにあたっては、・・・』

しかし上記の実態を踏まえると正確には、

『火力発電の燃料消費量を減らし二酸化炭素排出量を削減するために風力発電を導入するにあたっては、火力発電設備の維持、場合によっては増強および・・・』

となることが明らかになったかと思う。

## 5. 風力熱蓄積発電による安価で効果的な二酸化炭素排出量削減

風力熱蓄積発電を導入すれば上記 Wiki ペディア原文のままの状態を実現出来る。理由は、風力熱蓄積発電は太陽熱発電と同じく、安価で資源的にも不安が無く安心な蓄熱を利用できるためである。ただ風力熱蓄積発電は本質的に熱機械であるためある程度、例えば設備容量が 10 MW を超えないと経済性が出てこない。そのため従来型風力との組み合わせも有効であろう (図 11)。

小型、例えば数百 kW 程度であっても熱需要が旺盛な地域であれば発電後の排熱も利用出来る。例えば寒冷地に導入することで石炭暖房などを廃止して **PM2.5** の削減にも貢献出来る。離島などでは真水を作るための熱源としても利用出来る。

蓄熱槽を大きくすればほぼ 100 % の再生可能エネルギー発電システムが実現できるが、長期の無風時にはボイラを追加し燃料を炊いて発電し続ける、という手段も取れる。また同じ熱エネルギーを取り扱う太陽熱発電と併設すれば、設備利用率が上がりさらなるエネルギーコストの削減も可能となる。

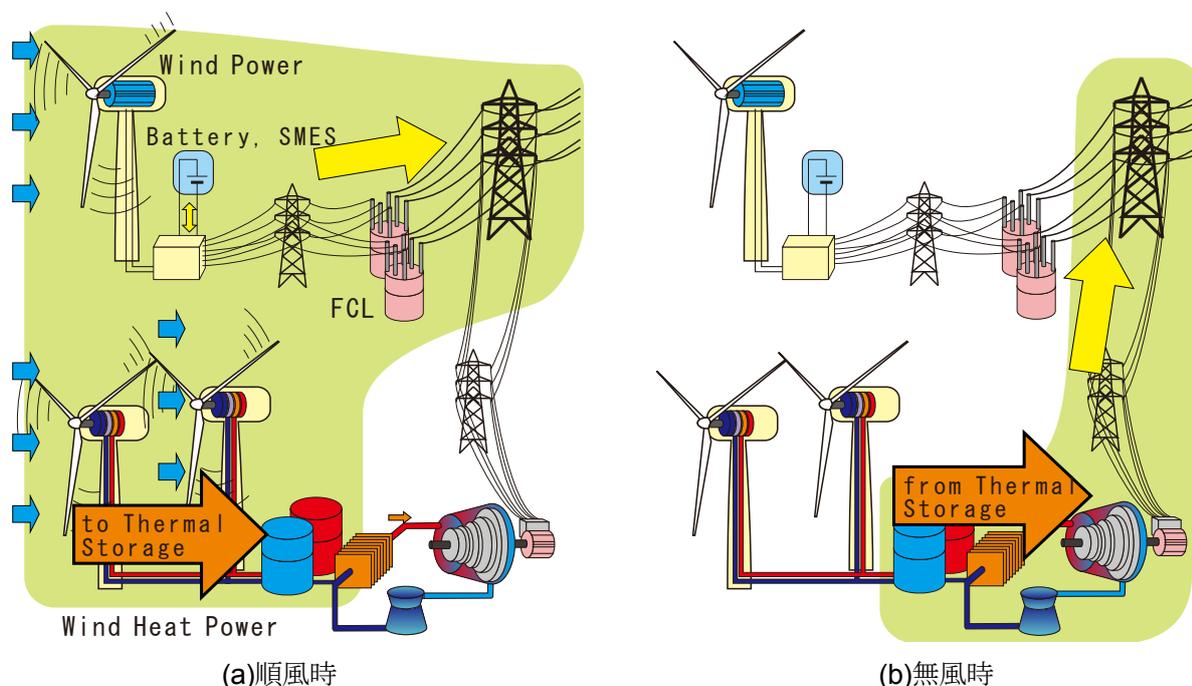


図 11 風力発電との連携運転

[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:**「大阪で超電導ケーブルの実証試験が始まったと TV や新聞で報道されていますが、横浜での実証試験との違いや、超電導ケーブルのメリットはどういうものなのでしょうか？」

**A :** 1969年7月20日に人類が初めて月面着陸に成功したちょうど37年後の2006年7月20日、アメリカ・ニューヨーク州の州都 Albany において、世界で初めて超電導ケーブルが実系統に接続されました（超電導 Web21 2006年9月号、住友電工超電導 Web<sup>1)</sup>）。次いで、2012年10月29日横浜で、日本で初めて超電導ケーブルが実系統に接続された（超電導 Web21 2012年12月号、住友電工超電導 Web<sup>2)</sup>）ことはまだ耳目に新しいことかと思われませんが、年が明けて、大阪でも超電導ケーブルの送電実験が始まるというニュースが1月3日の産経新聞1面トップを飾りました。また2/18のワールドビジネスサテライト（TV 東京系列）でも大阪の超電導ケーブルが紹介されています。

「超電導で超節電」や「原発3基分カバー」というようなアイキャッチが踊っていますが、本当に超電導ケーブルを使うとどのようなメリットがあるのか、という疑問ももつともです。これを、昨年10月に開始された横浜の超電導ケーブルと比較して説明したいと思います。

### <超電導ケーブル実証試験>

表1 超電導ケーブル実証試験の比較

	横浜	大阪
実施者	NEDO（委託者） 東京電力株式会社 住友電気工業株式会社 株式会社前川製作所	住友電気工業株式会社
系統電圧-電流	66kV-1,750A(200MVA)	3.3kV-210A(1.2MVA)
ケーブル仕様	66kV-3,000A(340MVA)	3.3kV-400A(2.4MVA)
長さ	240m	70m
機器	気中端末2、ジョイント1	気中端末2、ジョイント（分岐箱）1
事故電流条件	31.5 kA × 2 秒	2.4 kA × 0.123 秒
交流損失	1 W/m/相@3kA	0.05 W/m/3 相@210A
冷却方法	サブクール液体窒素循環冷却	サブクール液体窒素循環間接冷却
超電導線	<b>DI-BSCCO<sup>3)</sup></b>	<b>DI-BSCCO</b>



超電導配電システムの外観

# 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

## 機器類外観

ケーブル  
気中末端  
ジョイント



表1に2つのケーブル実証試験を比較して示しています。横浜が電力会社の高圧送電システムであることに對して、大阪はユーザー社内の配電システムで、電流値もかなり違います。このように、従来の多くの超電導ケーブルプロジェクトが電力会社の系統を対象としていたのに対して、今回の大阪ケーブルはデータセンター等の屋内配電線など直流を含む低電圧・大電流配電システムを対象にしていることが大きな違いです。

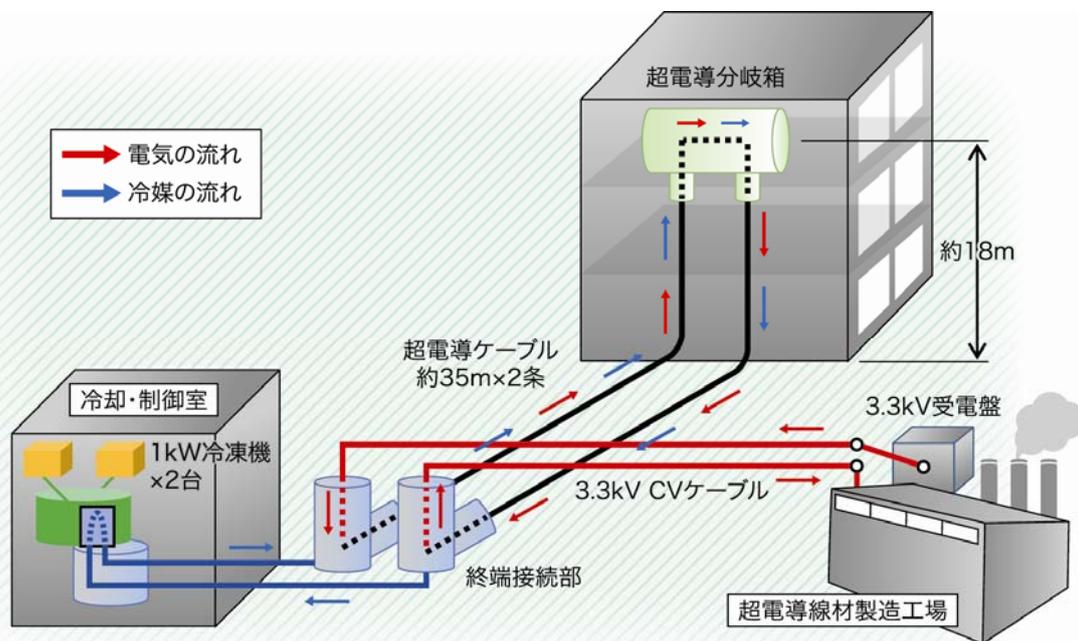


図1. 超電導配電システムの構成

そのため、スペースが限られた環境下でも、フレキシブルに導入できるように、超電導ケーブルをはじめとする機器の小型化を図っています。また、今までのプロジェクトでは2点間の送電が対象でしたが、配電、データセンター等では分岐や線路途中で電気を取り出す必要があります。このため、ケーブルを分岐する超電導分岐箱を新たに開発しています。

# 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

今回の実証線路では分岐はしていませんが、分岐箱は自由な角度で取り出し方向を設定することができるので、地上から 18 m 垂直に立ち上げたケーブルを 180 度ターンさせて地上に戻すという取り回しに使用しています。この 18 m の垂直立上げ部は、ビル内配電を模擬して、布設工法、高落差条件下での冷媒循環の安定性の実証などを行うものです。

このシステムでは無期限での長期運転を行う予定で、そこで得られる運転データを分析して、各構成機器の長期性能を確認するとともに、経年変化から最適な保守のあり方、非常時の保守体制の整備、確立を進めるものです。

## <超電導ケーブルのメリット>

横浜ケーブルの損失は、従来の 275kV-200MVA の CV ケーブルの損失 100 W/m に対して、約 5 W/m で、それを冷却する現在の冷凍機の効率(COP)が約 0.05 であるため、総合損失<sup>4)</sup>としてほぼ同一ですが、開発中の効率 0.1 の冷凍機を使用すれば、総合損失が 1/2 になります。

これはある特定の条件で超電導ケーブルの損失が従来の 1/2 になるというだけで、日本中の電力ケーブルを超電導にしたからといって、5% (発電所の出口からユーザーの入口 (=電力会社の販売電力) までの損失) と言われている送電損失が半分になるわけではありません。

送電損失にはケーブルの損失や変電所の損失も含まれますので、仮に交流損失がゼロ (もしくは全て直流送電で電圧変換ロスもないとした場合) で、冷却が不要な場合 (常温超電導!) には 5% のうちのケーブルの損失分がゼロになると想定できます。

まあ、それは当分の間は無理ですので、ケーブルの損失が 1/2 かもしくはそれ以上の損失低減を達成するような線路から超電導化を検討するのが現実的です。そう考えると、発電所何基分というような数字を導き出すのは非常に困難なことがわかってと思います。

それよりは、超電導という新しい技術をうまくスローインできるように、電流値が非常に大きい線路や、新たにトンネルを掘ることが難しいなどのような超電導ケーブルの他のメリットを有効に活用できる用途から徐々に活用してゆくべきでしょうし、既に、そのような考えで、新たな超電導ケーブルの導入が検討されています。

また、韓国では日本より超電導ケーブルに対する期待が大きいのですが、それはソウルにおける電力需要の集中が要因で、従来のように変圧器で徐々に電圧を落として送電するには、変電所用地が不足するためです。超電導ケーブルは従来ケーブルより大きな電流を効率よく流せるため、遠くから電圧を低く、電流を大きく送電することで、中間変電所を減らすことによって新しい送電線路を建設しようという計画です。

## <直流超電導ケーブル>

送電は交流で行われることが多いため、今まで開発されてきた超電導ケーブルは交流が殆どでした。しかし、そもそも超電導は交流より直流の方がもっとその真価を発揮します。例えば、横浜ケーブル 1 本で 340 MVA の電力を送電できますが、これを直流として使うと、耐電圧も上昇し、3 相の導体をそのまま 3 回線に使えば、その 4 倍以上の電力を送電することができます。従来ケーブルだと 2-3 m のトンネルを掘る必要があったものが、十数センチの管路を埋設するだけで超大型発電機 1 基分 (1500 MVA) 程度の電力を送ることができます。更に、交流損失がなくなるので、(接続部の抵抗は小さいので無視できるとして) 外部からの熱侵入分をのみ冷凍機で冷却することを考えればよく、総合損失も大幅に減少します。

また、直流であれば、三心一括導体の必要性も少なく、単心ケーブルを選択するという自由度もあります。さらに、最近、九州工業大学の松下先生が提唱されている縦磁界効果を使えば、送電可能な電流値も向上します。この場合、超電導線材を巻き付けるスパイラルピッチの調整は、交流用ケーブルに使用されてきた、層毎の通電電流を揃えるためのピッチ調整と互換性がないため、交直

# 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

両用にはなりません。

このような理想的な直流超電導ケーブル、現在は、直流送電系統やデータセンター、鉄道のき電線などに応用すべく、世界中でプロジェクトが始まっています。

## <超電導で超電導を作る。と?>

この配電システムは住友電気工業株式会社の超電導線材工場に電力を供給しています。超電導工場で働いている人々に「超電導（ケーブル）がやってきた」と言っても何の感慨もありませんが、「自分たちの作っている超電導線材で電気が送られている」と思うと超電導線材の品質に対して今まで以上に気を遣うと思われれます。勿論、超電導で送られた電気だからといって何も変わりはありませんが、**DI-BSCCO** made by **DI-BSCCO** は、さらに高いグレードの線材に進化していくと期待していいのではないのでしょうか。

参照：

1. <http://www.sei.co.jp/super/cable/albany.html>
2. <http://www.sei.co.jp/super/cable/jissho.html>
3. <http://www.sei.co.jp/super/hts/index.html>

DI-BSCCO（ディーアイ・ビスコ） 住友電工の銀被覆ビスマス系 ( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ) 超電導線。加圧焼成という特殊な焼結法と改善した製作方法を採用して従来比 2 倍以上の性能と品質を実現したもの。

4. 総合損失 従来の銅ケーブルに比べて超電導ケーブルは通電時の損失が大幅に小さくなりますが、それでもゼロにはなりません。その損失は熱になるので、超電導状態を維持する（低温に保つ）には、その熱分を冷却する必要があります。そのために必要な冷却装置の電力は追加の損失と考えて、それを含めた損失を総合損失とここでは呼んでいます。

ご回答者：湾岸所 マエストロ・シマヤ 様



© Fujikogei Co., Ltd 2012

[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](mailto:web21@istec.or.jp) までお願いします。」