

超電導 Web21

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

掲載内容（サマリー）：

トピックス：

- T_c 上昇の兆し
- 高感度磁気センサを用いたインフラ劣化評価のための非破壊検査技術の開発

特集：超電導産業機器技術の展開

- 超電導産業機器技術の動向
 - 船舶用高温超電導モータ
 - 超電導磁石を用いた自然由来汚染土壌浄化技術の紹介
 - 磁気特性評価用マグネットの開発
 - 超電導加熱炉の現状
-
- 超電導関連 2015 年 3 月 - 4 月の催し物案内
 - 新聞ヘッドライン（1/20-2/19）
 - 「世界の動き」
 - 隔月連載記事 鉄道と超電導（その2）～超電導フライホイール蓄電装置～

[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 Web21

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

トピックス： T_c 上昇の兆し

東京大学
名誉教授 内田慎一

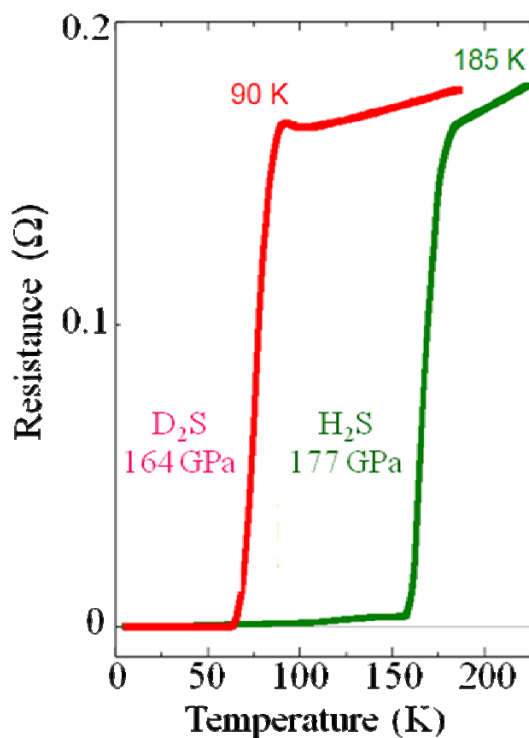
1986 年の銅酸化物の発見により高温超伝導の夢が実現し、 T_c は常温まで上昇するかにみえた。しかし、現実には 1993 年に T_c が 135 K に (20 万気圧の高圧化では 164 K) 達して以来、 T_c の上昇は止まってしまった。2008 年に発見された鉄系化合物も、同じ年に $T_c = 55$ K を記録して以来上昇していない。

最近になって T_c の沈黙を破るかもしれない実験結果が相次いで発表された。1 つは、Y 系銅酸化物 (YBCO) であり¹⁾、2 つ目は硫化水素 H_2S である²⁾。更に、鉄系の FeSe でも $T_c = 109$ K が報告されている³⁾。

YBCO の T_c は 93 K であるが、超伝導のゆらぎ (位相の揃っていない電子対の形成) を示す現象は 150 ~ 200 K の高温から観測されている。最近発表された実験結果は、強力なパルス状の赤外光を YBCO に照射したとき、一瞬にしても、350 K に近い温度で電子対の位相が揃うことを示すものである。この「瞬間常温超伝導」の寿命は僅かピコ (10^{-12}) 秒であるが、銅酸化物は結晶構造を最適化できれば常温超伝導も不可能ではないことを示している。

硫化水素は常温・常圧では気体である。しかし、地球内部の圧力に匹敵する 180 万気圧の高圧をかけると固体金属化し、190 K もの高温で超伝導転移を示すという結果が発表された。電気抵抗は 190 K で急激に落下している。水素を同位体の重水素 D で置換すると、抵抗の落下温度が 90 K に下がることも報告されている。現在 (2015 年 2 月) のところ、他のグループによる追試実験報告はないが、理論研究は活発である。多くは、50 年近く前に予言された水素固体金属が硫黄の助けを借りて実現したのではとの解釈である。水素は最も軽い元素なので、その格子振動周波数が他の固体に比べ著しく高いというのが根拠である。この超伝導が本物だとすると、最高の T_c が BCS フォノン機構で実現したことになる。

FeSe という鉄系で最も単純な構造の化合物は、通常 $T_c = 8$ K の超伝導体である。SrTiO₃ の基板の上に FeSe を 1 原子層だけ真空中で蒸着すると T_c が一桁以上上昇するというのである。2 原子層以上のときは T_c は急激に低下し、更に厄介なのことには、空気中に取り出すと劣化してしまうことで



図説明：超高压下での H_2S の電気抵抗。高压下で H_2S は H_3S に変わり、 H_3S が高温超伝導を示していると理論的に予測されている。H を同位体の D に置換すると、電気抵抗が落下する温度が半減する。

超電導 Web21

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

ある。 $T_c = 109\text{ K}$ を記録したのは、かなり際どい電気抵抗測定である。しかし、真空中で実験できる光電子分光では、高い T_c に見合う大きな超伝導ギャップが観測されている。

いずれもが、極限状況下での高温超伝導である。従って、追試するのは簡単ではないが、単純に USO として片付けることのできない実験的根拠をもっている。全く異なる物質系で独立に報告されていることは、 T_c の沈黙の終わりが近づいていることを予感させるものである。

参考文献：

1. S. Kaiser *et al.*, Phys. Rev. B 89, 184516 (2014).
解説：N. Peter Armitage, Nature Materials 13, 665 (2014).
2. A. P. Drozdov, M. I. Erements, and I. A. Troyan, <http://arXiv.org/abs/1412.0460>. ニュース 解説：
<http://www.nature.com/news/superconductivity-record-breaks-under-pressure-1.16552>.
3. J.-F. Ge *et al.*, Nature Materials <http://dx.doi.org/10.1038/nmat4153> (2014).
解説：I. Bozovic and C. Ahn, Nature Physics 10, 892 (2014).

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

トピックス：

高感度磁気センサを用いたインフラ劣化評価のための非破壊検査技術の開発

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
所長 田辺圭一

我が国の道路、橋、トンネルなどの社会インフラは高度成長期に集中的に整備され、総額 800 兆円に達している。例えば、全国で道路と橋は 70 万、トンネルは 10 万箇所もあり、その多くが 50 年以上の年数を経過しつつあるため、2012 年の笹子トンネル事故のような重大事故のリスクや維持補修費の急激な増大が懸念されている。このような背景から、平成 26 年度にスタートした内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（Strategic Innovation Promotion Program: SIP）の中で、「インフラ維持管理・更新・マネジメント」が重要な 10 課題の一つに選定された。藤野陽三・横浜国立大学教授をプログラムディレクター（PD）とし、新技術に基づくシステム化されたインフラマネジメントによる維持管理サイクルの実現と、維持管理市場形成や海外展開を目標とし、非破壊検査技術、構造材料、ロボット技術、情報通信技術、アセットマネジメントなどの他分野にまたがる研究テーマの公募が昨年の夏に科学技術振興機構（JST）と新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から行われた。

塚田啓二・岡山大学教授を研究代表者とする「インフラ劣化評価と保全計画のための高感度磁気非破壊検査」は、JST 公募の先端的な計測技術による点検・モニタリング・診断技術の研究開発の枠組みで採択された。この研究開発には、岡山大学以外に、ISTEC、（一財）発電設備技術検査協会、九州大学が共同研究グループとして参加しており、磁気抵抗（MR）センサや SQUID などの高感度磁気センサを用いた橋梁等のインフラを対象とした磁気非破壊検査装置の開発を平成 26 年度から約 3 カ年で行い、その実フィールドでの性能評価を平成 29 年度からの 2 カ年で行う計画である。

主として開発するのは、交流あるいはパルス磁場を鋼材や金属配管等のインフラ部材に印加し、誘起される渦電流が作る 2 次磁場の時間応答や周波数応答を磁気センサで計測し、解析することにより部材の減肉、腐食、亀裂などの欠陥を調べる装置である。このような磁気非破壊検査の特長は、比較的厚い鋼材の裏面や保温材下の配管など超音波法や光学的手法などの非破壊検査では調べられない部位の検査が期待できることにある。特に、ISTEC が作製する高温 SQUID センサは、高周波から低周波までの広い周波数領域に亘って他の磁気センサに比べ桁違いの高い感度を有するため、欠陥起因のより小さな磁気信号の変化を捉えることができる。

プロジェクト開始以降、共同研究者による全体会議が複数回行われ、橋梁中の鋼材の裏面欠陥等を当面の第 1 優先検査対象とすること、MR センサを用いた溶接部等対象のハンディタイプの検査装置と高温 SQUID を用いたロボットや台車搭載型の超高感度検査装置開発を並行して進めることなどの方針が決まった。現在、フィールドを有する協力企業として三井造船と中国電力が参加しているが、今後は他のポテンシャルユーザーや装置開発メーカーとの協力体制も構築していく予定である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：超電導産業機器技術の展開

「超電導産業機器技術の動向」

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

これまで産業応用の分野でも種々の超電導機器の開発が行われてきており、その中の幾つかは着実な成果を生み出している。リニアモーターカーは、JR 東海が 2027 年に東京―名古屋間での営業運転を決定し、報道によると建設工事に着手し開業に向けて順調に推移しているようである。また、医療応用でも従来の MRI に加えて癌治療用粒子線加速器などへの超電導の応用も試みられている。本 Web21 ではこれらの分野でも特集を出しているの、今回はそれ以外で最近進展のある産業機器についていくつか紹介したい。

高温超電導モータは、産業部門の電力需要の 60 %以上を占めるモータの損失を低減するための有望な技術として注目され、当初、産業用大型モータを目標に米国を中心に研究開発が進められたが、その後、ターゲットは船舶推進用の低速・大トルクモータへと移り、米国、ドイツ、日本、韓国などで大型モータの開発と試験が行われた。我が国では、ここ数年は船舶用モータを中心に川崎重工業と東京海洋大学を中心に研究開発が盛んに進められ、Bi 系線材を使った 3 MW モータが試作試験されている。超電導モータの仕様は出力 3 MW、回転数 160 rpm で、効率 98 % の高効率を達成している¹⁾。また、自動車用超電導モータへの超電導応用も京都大学中村氏や住友電工で行われている。

前記リニアは低温超電導であるが、鉄道総研では Y 系線材に変えたコイルでのリニア応用検討や直流き電線、フライホイールの検討を行っている。古河電工は、このフライホイールに用いるコイルを Y 系線材で作ることに成功している²⁾。平成 27 年に山梨県米倉山に新たに建設するメガソーラーとの連系試験を行う予定とのことである。

産業応用では、ここ数年、特に欧米での再生可能エネルギーへの検討が盛んである。大型風車で大出力の発電を行おうという目的で超電導の適用が検討されている。10 MW を超える大型風車（現行汎用市販機は高々 2 MW）になると、風車のタワー頂上にある発電機も数百トンを超える大きなものとなり、構成、運用するのに機械力学的に限界がある。他方、超電導を使えばその発電機が大幅に軽量、小型化できる。このため、欧州では SupraPower や InnWind（10-20 MW の超電導機を検討。Siemens ほかに参加。）と言ったプロジェクトで超電導機の開発が始まっている。また、日本でも、平成 25 年度より、NEDO 事業「風力発電高度実用化研究開発・10 MW 超級風車の調査研究」がスタートしている（産総研ほか）³⁾。Y 系線材を用いた発電機を作り、かつ、鉄心も使うことで線材量も少なくし、発電機の大きさ、重量を常電導機の場合の半分にしながら、コストも実現的なものに抑えることができると云う³⁾。

また、再生可能エネルギー応用では新たな試みも出てきている。風力熱発電への応用である。詳細は、本号後述の ISTEK 岡崎氏の解説にあるが、風力で得た電気を熱で貯める装置である。その装置に、超電導を使うと、すなわち超電導コイルを用いた蓄熱機を使えば 600 °C の高温での蓄熱が可能となり、大幅に効率が向上するという。

また、阪大の西嶋氏は超電導を用いた磁気分離を検討しており、実際に福島において汚染された汚泥を効率的に分離処理する手法をここ数年検討、実地試験されている。

以上見たように、超電導の応用はかなり幅広くなってきており、産業応用でもその効果が大いに

超電導 Web21

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

期待されている。特に、再生可能エネルギーの利用は、現在の私たちに課せられた課題であり、これに超電導が役立つ可能性は大いにある。

参考文献：

1) NEDO 成果報告 船用モータの開発：

http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201405/20140000000056.html

2) 古河電工発表 フライホイール：https://www.furukawa.co.jp/what/2014/kenkai_140310.htm

3) 産総研報告 高温超電導大型風車：<https://unit.aist.go.jp/energy/event/20140305/proc/B2.pdf>

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：超電導産業機器技術の展開

「船舶用高温超電導モータ」

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、環境負荷、経済性、操船性、安全性、低振動性や省力化等の面において優れた潜在的特徴をもつことから、研究船、タンカーやクルーズ船として積極的に活用されており、国内においても普及が図られてきた。電気推進用の動力モータとしては、直流モータ、誘導機や同期機に加えて単極機等が適用あるいは構想されてきた。界磁極の高温超電導化による高いトルク密度、出力密度、低負荷運転時の高効率化を伴う体格の小型化あるいは軽量化が開発のポイントとなる¹⁾。

米国 AMSC 社が開発した 36.5 MW の船舶推進用同期モータや、欧州 SIEMENS 社が開発した 4 MW の船舶用モータ (HTS III) においては全出力・負荷試験や長期耐用試験等が先行している。

近年の海洋開発への関心の高まりを踏まえて、陸から離れた沖合での石油やガス開発等に必要作業船・オフショア船や砕氷船等の推進動力としても省エネルギー化や小型化が実現できる超電導モータがあらためて期待されている。川崎重工業では、ビスマス系線材を巻き線したレーストラックコイルを開発して出力 3 MW、回転数 160 rpm のラジアルギャップ型同期機が完成している²⁾。現在、コイルや出力などの特性試験に加えて実用化に向けたさらなる取り組みが陸上試験設備において進められている³⁾。また、船舶用超電導モータのメリットをより顕著に実証するためには、大出力機の試作研究が必須である。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 クラスの大出力超電導同期機の成立の鍵となる強靱 (ロバスト) な高温超電導界磁コイルとその保護、大出力機の設計に対応した熱サイフォン方式による回転子冷却システムなどの技術要素についての実証的研究が行われ、国内においても大出力化に対応する研究が行われてきた⁴⁾。このように国内外での開発事例が積み重ねられつつある現在、高温超電導モータの設計や技術要素の持続的研究とともに、推進システムとしての大出力機とその信頼性や安全性の確立をめざした研究の重要性が増すものと思われる。

参考文献：

1. 和泉 充, 船舶用超電導モータの技術開発の進展, http://www.istec.or.jp/web21/pdf/13_03/all.pdf.
2. 川崎重工業株式会社 (2013). http://www.khi.co.jp/english/pressrelease/detail/20130529_1e.html
3. 尾立圭巳, 船舶用超電導モータの開発現状, 日本船舶海洋工学会東部支部ワークショップ “電気推進船；現状とその将来技術動向”, 平成 26 年 12 月 10 日, (2014).
4. 塚本修巳, 大出力超伝導回転機器に向けたキーハードの開発、JST 戦略的イノベーション創出推進プログラムシンポジウム, “超伝導システムによる先進エネルギー・エレクトロニクス産業の創出”, 平成 26 年 12 月 15 日, (2014).

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：超電導産業機器技術の展開

「超電導磁石を用いた自然由来汚染土壌浄化技術の紹介」

大阪大学大学院 工学研究科
教授 西嶋茂宏

鹿島建設はシールドトンネル工事で発生するヒ素汚染土壌の浄化技術を、超電導磁気分離システムを利用して確立した。注目すべき技術と考え、ここに紹介する。

近年、土木工事に伴う残土中の自然由来の重金属汚染が問題になっている。首都圏では地下の鉄道・道路整備や東京オリンピックの土木工事が、またリニア中央新幹線の建設などの大型の土木工事が近い将来考えられ、それらに伴う自然由来の汚染土壌の発生が、今後大きな問題になると考えられている。ここでいう重金属とは土壤環境基準で指定されているもので、カドミウム、鉛、(六価)クロム、ヒ素、水銀、銅、セレン、フッ素、ホウ素等である。化学的には金属ではないが、ヒ素、フッ素、ホウ素も重金属等に分類されている¹⁾。そもそも、重金属等はどのような箇所に存在するのであろうか？大陸地殻の元素量に比して、日本列島の地殻上部の平均値で見ると、鉛、ヒ素が多く、河川堆積物の平均値で比較すると、亜鉛、鉛、ヒ素が多いことが示されている²⁾。日本列島には火山・温泉、鉱山・鉱床が存在しており、これに伴い自然由来の重金属が存在することになる。鉱山からはヒ素・カドミウム・鉛等が発生し、温泉からはホウ素・ヒ素等、花崗岩からはフッ素等、蛇紋岩からはクロム、海水からはホウ素、フッ素等、海成堆積物からはヒ素・鉛・フッ素等が発生するとされている³⁾。結局、日本全土で自然由来の重金属の発生の可能性があることになる。ヒ素、鉛、水銀、カドミウム、クロムが国内でどのように分布しているか文献²⁾に示されているが、基本的に全国に広く分布している様子がみてとれる²⁾。

実際に問題になった重金属について、自然由来と判断された事例数（平成 14 年 10 月調査）⁴⁾をみると、78 事例中 31 例がヒ素で最も多く発生しており、次いで鉛、フッ素、水銀となっている。この調査結果が日本全体を反映しているとは考えにくい、ヒ素、鉛、フッ素、水銀の 4 種が自然由来で頻度が高く発生する汚染元素であると言ってもよいと思われる。人為由来も含めた平成 24 年の特定有害物質別の要措置区域等指定件数⁵⁾では、カドミウム、ヒ素、水銀などからなる重金属等（第二種）による不適合（汚染）は全体の 80 %を占めている。重金属による土壌汚染の頻度が高いことが理解できる。

土壤環境基準は土壤溶出基準と土壤含有量基準の 2 種類であるが、自然由来の重金属含有土壌の場合、実際に基準を超過するのは土壤溶出基準である⁶⁾。ヒ素を例にとると、全含有量が高くない（土壤含有量基準以下）堆積岩、海岸の沖積層、平野下の洪積層において土壤溶出基準を超えることがあるとされている²⁾。また、処理すべき自然由来重金属含有土壌の発生量は、日本汚染土壌処理業協会によると 2022 年度までで年間 300～500 万トンと試算されている⁷⁾。ここまですと、i)自然由来の重金属汚染土壌の問題は日本全国で起こる可能性がある、ii)ヒ素、鉛、フッ素、水銀が問題になりそうである、iii)土木工事に際しては溶出基準を満足させる必要がある、iv)大量の処理すべき土壌が発生する可能性がある、という事である。

このようなことを背景にして、鹿島建設は MS エンジニアリングと協力して、自然由来のヒ素を浄化するための超電導磁気分離を利用する方法を開発した⁸⁾。本手法は、シールド工法で発生する泥水中のヒ素（鉛も可能）の処理を行う技術である。従来は凝集沈殿法により汚染土を重金属とともに沈殿させ、脱水ケーキとして廃棄処分していた。この手法では、廃棄物の量が多く、しかも処理に多額の経費が必要である。また、管理型処分場やセメント工場などの中間処理施設需要もひっ迫していることも問題であった。これらの問題点を解決するのが本手法である。磁気分離を利用す

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

る手法は、ヒ素を吸着する鉄粉を泥水に混合し、ヒ素を吸着した鉄粉を超電導磁気分離する手法である。まず、鉄粉（粒子径 120 ミクロン程度）を泥水中に投入し、土壌から溶出した重金属イオンを鉄粉で吸着する。このメカニズムは以下のように説明されている。ヒ素は地表近くの酸化状態では五価のヒ酸イオンとなっており⁹⁾、pH が 4～8 の土壌の間隙水では H_2AsO_4^- あるいは HAsO_4^{2-} の陰イオンとなっている¹⁾。鉄粉から水に溶解した鉄イオンが水酸化物として鉄粉表面に再吸着する際にヒ酸イオンを捕獲するとされている。実際に 150 m³ の汚染土壌で本手法を利用した処理で溶出基準を満足していたことを確認した。

次に、重要な事は、この重金属イオンを吸着した鉄粉を回収することであるが、泥水中から効果的に鉄粉を回収するために、超電導磁気分離法を利用したのである。鉄粉を土壌重量の 30 %程度懸濁させると、ヒ素溶出濃度が 1/10 程度まで低下する。実際、処理前は最大 0.092 mg/L であったのが、処理後は <0.005 mg/L となった。（ヒ素およびヒ素化合物の環境溶出基準は 0.01 mg/L である。）しかし、鉄粉の量が多く、この回収率を向上させることが当該手法を成立させるためのキーテクノロジーであった。図 1 に装置の外観写真を示す。大量処理のために超電導磁石外に磁気フィルターを設置している。このためフィルター位置での磁場強度は 0.2 T 程度と低いものの、その磁場範囲は広範囲にわたり、対象が鉄粉であることもあいまって、良好な回収率（99.9 %以上）と大きなスループット（60 m³/h 以上）を実現している。汚泥水と鉄粉との接触時間は 10～20 分で上記の除去率を達成している。また、鉄粉は 75 回使用してもその性能は低下しなかったとしている。対象とする汚泥水の濃度にもよると思われるが、自然由来のヒ素の溶出濃度に対しては複数回の使用が可能であることを明らかにしている。（鉄の吸着の飽和は 0.5～1.0 g/kg 程度と考えられている。）



図 1 開発した超電導磁気分離システム

さて対抗技術として、鉄粉回収のための遠心分離機を使用する方法、永久磁石を利用したマグネットセパレーターを使用する方法などが提案されている。いずれの方法が主流になるかは今後の推移を見守る必要があるが、大量の残土処理をおこなう必要を考えると、本手法のメリットは大きいと思われる。

参照：

1. 和田真一郎、土壌中における重金属類の動態、地球環境 15 (2010)15-21
2. 国土交通省リサイクルホームページ- 通達・基準・マニュアル類、建設工事における自然由来重金属等含有 岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）
3. (財) 日本ガス機器検査協会 HP、土壌汚染調査・対策
4. 環境省 HP、土地の土壌の特定有害物質による汚染状態が専ら自然に由来するかどうかの判断方法及びその解説 Appendix-3
5. 環境省 HP、平成 24 年度土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果
6. 井上千弘 自然由来土上汚染をもたらす重金属類の環境中での形態変化の解明、平成 25 年度 環境研究総合推進費 終了成果報告集 5B-1107

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

7. 環境新聞 2014/10/22
8. 伊藤圭二郎、川端淳一、仁木丈文、鉄粉と磁気分離による泥水中の砒素抽出技術、第 20 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 (2014) S1-03
9. (財) 化学物質評価機構, CERI 有害性評価書 砒素およびその無機化合物 (2008)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：超電導産業機器技術の展開

「磁気特性評価用マグネットの開発」

住友電気工業株式会社
超電導製品開発部 応用開発部
部長 加藤武志

磁気特性評価装置には、BH カーブトレサ¹⁾、振動試料型磁力計(VSM)²⁾などがある。従来の装置では、①鉄心型常電導コイルでは高保持力磁石の測定が不可、②パルス磁場による測定では渦電流による測定への影響が大きい、③従来の超電導マグネットでは測定時間が長い、などの課題があった。

これらの課題に対応すべく、今回開発した冷凍機伝導冷却型超電導マグネットシステム³⁾は、DI-BSCCO 線を用い、質量を 100 kg と従来システム本体の 1/4 まで軽量化、寸法も奥行 0.8 m、幅 0.3 m、高さ 0.3 m と 1/5 まで大幅に小型化し、従来システムで既に実現済の磁場励減磁速度 5T/30 秒から 6T/30 秒へと約 20 %増加という更なる高速化を実現した。本システムは、永久磁石の検査工程の磁化特性測定等への適用を視野に入れて開発したシステムだが、ハードディスク検査装置等のほか、磁場中熱処理炉等の製造装置など他応用への適用も可能である。

【超電導マグネットシステムの概要】

型名	DI-BSCCO-MS 6 T-70
磁場強度	±6 T
室温ボア径	Φ70 mm
励減磁速度	6 T/30 sec.
運転電流	250 A
インダクタンス	約 1 H
磁場均一度	0.3 %/10 mmDSV
寸法	0.8 m×0.3 m×0.3 m
質量	約 100 kg



図 1 は高速励減磁を繰り返した時のデータだが、励減磁の繰り返しによる交流損失でコイルの温度が上昇するが、高温超電導の特徴である高い臨界温度による大きな温度マージンによりクエンチすることなく安定な運転が確認できている。この運転パターンに限らず、様々な運転が出来、例えば冷凍機を停止し、冷凍機からの振動の無い状態での励減磁も可能だ。本マグネットの初期冷却は約 14 時間であり、前日の帰宅前にスイッチオンしておけば、翌日朝には稼働できるほどの短時間冷却であり、必要なときだけ冷却すれば良い。

図 2 は、VSM による測定の一例であるが、鉛筆の先ほどの小さな試料でもきれいな BH ループが測定されている。測定時間は 6 分程度と従来と比べて格段に速くかつ精度の良い測定が可能となっている。

超電導 Web21

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

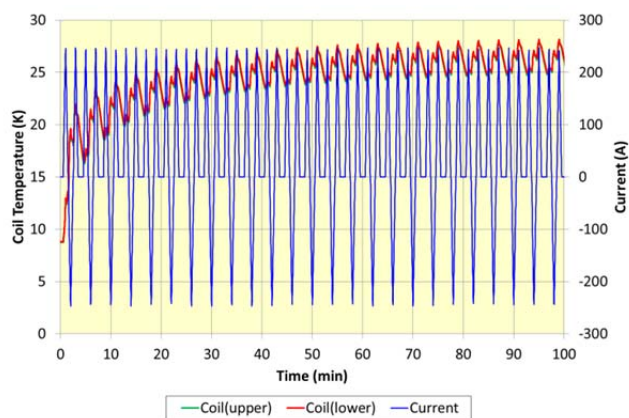


図 1

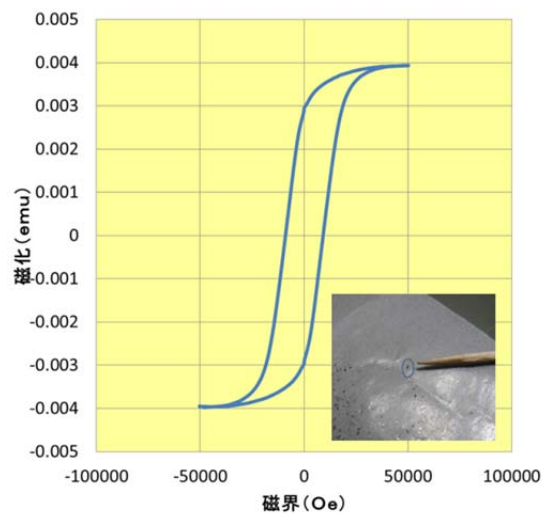


図 2 東英工業(株)での VSM の測定例
(SmCo 微小片)

- (1)http://www.j-ndk.co.jp/product/jikisokutei/bh_curve_tracer.html#sub_03
- (2)<http://www.toeikogyo.co.jp/products/sei-01/vsm-5hsc.html>
- (3)http://www.sei.co.jp/super/magnet_coil/system.html#6t

超電導 Web21 トップページ

超電導 Web21

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

特集：超電導産業機器技術の展開

「超電導加熱炉の現状」

国際超電導産業技術研究センター

普及啓発・国際部

部長 岡崎徹

1. 誘導加熱炉

超電導と加熱炉。極低温に冷却する必要のある超電導と、高温に加熱する炉。たとえ「高温超電導（でも-200 °C）」でも相性が悪いと思われるが、実は最も産業用に実用化し広く普及する少し手前まで到達した技術である。その概要と現状を述べる。

アルミ型材などを製造する場合は、円柱状のアルミ塊が原材料となる。この塊を押し出し機に挿入し心太（ところてん）の様に押し出し製造する。しかし塊が室温のままでは堅く、巨大な押し出し機が必要となる。そこで塊を溶けない程度に暖めて柔らかくしてから押し出す。この加熱に従来はガス加熱か誘導加熱が用いられてきた。しかしガス加熱は、設備は安いが加熱時間が長く、エネルギー効率も悪くランニングコストが高い。

誘導加熱は電磁誘導現象を用いて加熱する方法で、家庭の IH クッキングヒータと同じ原理である。IH クッキングヒータではコイルからの交流磁場で加熱し、熱効率が「一般には」高い。しかし IH クッキングヒータにアルミフライパンは使用できないと同様、工業用誘導加熱でもアルミなどを暖めるには向かない。またアルミや銅はコイルと同程度の抵抗しかないため、金属塊と同程度の発熱がコイルで発生し、理論上の効率でも 50 %を下回る。

2. 超電導加熱炉

これに対して超電導誘導加熱は少し違ったアプローチをした。コイルによって交流磁場を作る代わりに、一定磁場を作る。一定磁場であるので永久磁石でも良いが、電磁石を用いても小電力ですむ。この一定磁場中で金属塊を強制回転させるのである。磁場中で導体が動けば渦電流が流れ加熱される。これは回転式誘導加熱とも説明される（図 1）。

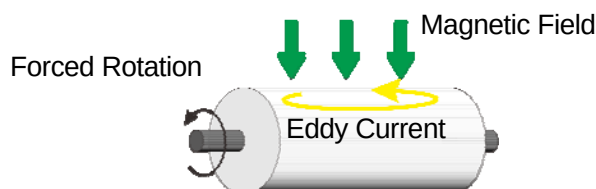


図 1 回転式誘導加熱

この方式そのものは古くから知られていたが、被加熱物の金属塊に磁性があると磁場に吸引され、（図 1 には示していないが）上下いずれかの磁極に張り付いてしまう。またアルミなど磁性が無い場合には、大空間に磁場を作るための電力が大きくなりシステム効率が落ち、長らく実用化されることはなかった。

超電導 Web21

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

この課題を解決したのが超電導である。超電導は MRI でも良く知られているように小電力で大空間に強力な磁場を作ることが出来る。炉の場合は工場の中で、かつ 500 回転／分で回転する金属塊の近くに配置されるため堅牢性が必要とされる。そのためこの超電導炉は高温超電導で初めて実用化された。その超電導炉稼働状況を図 2 に示す。従来の誘導加熱より半分の消費電力となり、その省エネ効果も相まって大いに普及することが期待された。現在も欧州を中心に数台が稼働しているが、残念ながらその後広く普及したという話は聞かない。理由の一つはアルミ型材需要の減少であろう。日本では 2000 年頃をピークに需要が漸減している（図 3）。そのため余剰設備が増えランニングコストが下がると言えども新規設備導入には厳しい状況である。世界的には中国が大きくアルミ需要を増やしているが初期設備投資の大きさを嫌われ苦戦している状況である。



図 2 稼働中の超電導炉。超電導というハイテクを意識させない。

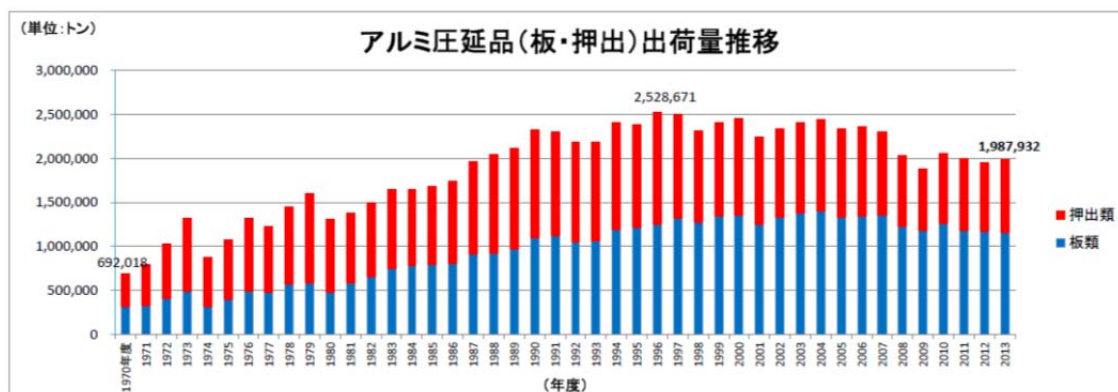


図 3 アルミ圧延品の出荷量推移。(一社) 日本アルミニウム協会 HP より

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

3. 風力熱発電への応用

この超電導炉を再エネ分野に応用するという動きがある。風力熱発電と呼ばれ、安定電力を得るために蓄熱という極めて安価なシステムを利用するものである。熱から電力への変換は 40 % と低く、蓄電池を用いた場合の 70 % と比べて見劣りがする。しかし建設コストの安さから電力コストにすると蓄電池併設システムの半分程度で発電できる。これにこの超電導加熱炉を応用すると、磁性体が存在しない高温でも運用が可能となる。1000 °C 以上の温度を得てガスタービンを駆動すれば 60 % の効率も視野に入ってくる。ただし設備コストも増加するため経済性が見極めが重要である。蛇足であるがガスタービンには内燃式も外燃式もあり、超臨界二酸化炭素ガスタービンになると 700 °C 10 MW 電気出力で 50 % の効率を目指した物が開発中である。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

超電導関連 ‘15/3 月－4 月の催し物案内

3/6

環境調和型磁気支持応用技術の動向

鉄道総合技術研究所国立研究所

http://www.iee.jp/ias/wp-content/uploads/sites/6/2013/12/LdForum20150306_02.pdf

3/11-14

応用物理学会 春季講演会

東海大学湘南キャンパス

<https://www.jsap.or.jp/activities/annualmeetings/index.html>

3/18

CRAVITY シンポジウム

産業技術総合研究所つくば中央第 2 事業所

http://www.csj.or.jp/application/2014/4th_0318_01.pdf

3/18-20

日本金属学会 春季講演大会

東京大学駒場キャンパス

http://jim.or.jp/MEETINGS/2015_spr/news/meeting-guide.html

3/21-24

日本物理学会 第 70 回年次大会

早稲田大学 早稲田キャンパス

<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/index.html>

3/24-26

電気学会全国大会

東京都市大学世田谷キャンパス

http://www.iee.jp/?page_id=4347

電気学会中のシンポジウム

S8：高温超電導マグネットの実用化に向けて

<http://www.gakkai-web.net/gakkai/iee/program/2015/sympo/sympo.html#S8>

4/3

次世代 NMR シンポジウム

新エネルギー・産業技術総合開発機構霞ヶ関分室

http://www.csj.or.jp/event/co-sponsor/2015/riken_0403.pdf

4/12-15

Joint UK-Japan Workshop on Physics and Applications of Superconductivity

King's College, University of Cambridge, UK

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

<http://www.iop.org/events/scientific/conferences/calendar/index.html#/?i=1>

4/15

第 1 回冷凍部会（公開）例会

産業技術総合研究所臨海副都心センター別館

http://www.csj.or.jp/reitob/2015/1st_0415.pdf

4/15-17

第 49 回空気調和・冷凍連合講演会

東京海洋大学 海洋工学部 85 周年記念会館

http://www.jsrae.or.jp/info/3ren_49.html

4/22

超伝導エレクトロニクス研究会（SCE）

機械振興会館地下 3 階 2 号室

<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 〒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 (1/20-2/19)

- 古河電工米子会社 第 2 世代高温超電導線材 機械特性試験を拡充 日刊産業新聞 2/04
- 東大、鉄カルコゲナイドの超電導臨界温度を 23K に高める事に成功 日刊工業新聞 2/05
- 鉄化合物膜で超電導 東大 強力な磁石に道 MRI に応用 日経産業新聞 2/12
- イーター トロイダル磁場コイル用高性能な超伝導導体を開発 科学新聞 2/13
- 分子科学研―理研 光でオン・オフする超電導トランジスタ開発 化学工業日報 2/16

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

世界の動き (2014 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



★News sources and related areas in this issue

▶線材

2G超電導線用機械特性評価装置

SuperPower 社 (2015 年 1 月 26 日)

SuperPower 社は、自社の 2G HTS 線材の機械／電気機械特性を評価する専用施設を独自開設したと発表した。2G HTS 線材の超電導特性は、応力やひずみによる影響を受けるため、HTS 機器の設計、製作、操作を行う上で機械特性をより良く理解することが非常に重要となる。それゆえ、これらの試験施設を開設することで、2G HTS 製品の性能特性が保証され、継続的に改良を重ねていくことが期待される。同社はまた、採用している評価方法が適用規格に合致することを確認するため、IEC/TC90 超電導委員会と密接に連携している。顧客の機器応用をサポートするため、試験データは顧客に提供される。

具体的には、最近行われたプロジェクトの完成させるために、同社は、液体窒素の中で機械／電気機械試験を行い、長手方向または横方向の応力下で臨界電流を測定することを可能にした。アンビル引張試験に加え、横方向の引張応力下における線材の機械的挙動の調査やピン・プル試験と剥離試験も行われた。現在、圧壊試験と捻り試験装置に取り掛かり、機械／電気機械試験能力の確立に向けて注力している。

Source: "Superpower has established comprehensive testing capabilities for the assurance of the mechanical/electromechanical performance of its 2G HTS wires"

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

(26 Jan, 2015) News Release

<http://www.superpower-inc.com/content/superpower-establishes-comprehensive-testing-capabilities-assurance-mechanicalectromechani>

Contact: Mickey Lavicska mlavicska@superpower-inc.com

▶デバイス

超電導コンピューター用ナノメモリー

NIST (2015 年 1 月 23 日)

近年のクラウドコンピューティングの需要拡大により、世界中で集中型コンピューティング施設の構築が促されている。このような施設は、半導体を利用した電子機器を一日 24 時間稼働させて利用する。そのため、通常多くの電力を必要とし、大量の熱が発生し、この熱を取り除くにはまた多くのエネルギーが必要とされる。

そこで有望な代替技術として期待されているのが、超電導 (SC) コンピューターである。数ギガヘルツで作動する半導体コンピューターに比べ、SC コンピューターは少量のエネルギーしか使わず、ギガヘルツ帯周波数で動作するジョセフソン接合 (JJ) を使用している。知能先端研究プロジェクト活動局 (IARPA) は、最近の研究活動のもと、SC コンピューティングの大きな躍進が遂げられる日が近いことを確認し、その実現可能性を調査するために複数年プログラムを立ち上げた。

IARPA プログラムにおいて、NIST の科学者たちは、極低温で機能する SC コンピューター用の新しいナノスケールメモリ技術を開発し、実証試験を行っている。この技術開発では、JJ の高速性を活かした低エネルギー・コンピューティング環境を構築できる。また、ナノスケール特性評価が非常に困難とされるスピントロニクス効果を最初にモジュールに取り入れたのは、NIST の研究チームである。2014 年に発表された彼らのメモリモジュールは改良型 JJ であり、非磁性金属によって分離された 2 つの異なる磁性物質でできた厚さ 100 ナノメートルの多層障壁から構成されている。現在、その異なる障壁構造とメモリに使用された物質の挙動について調査中である。

同研究チームのサポートメンバーであり、NIST 磁性研究グループのリーダーである Ron Goldfarb 氏は、「低損失である超電導ロジックとハイブリッドタイプの不揮発性磁気メモリを組み合わせることで、10 年以内にメインフレーム計算機システムやデータ記憶装置に革命がもたらされるかもしれない」と、述べている。

Source: "Hybrid memory device for superconducting computing"

(23 Jan, 2015) News/Multimedia

<http://www.nist.gov/pml/electromagnetics/magnetics/hybrid-memory-device-for-superconducting-computing.cfm>

Contact: Burm Baek burm.baek@nist.gov

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

▶基礎

超電導ナノワイヤー

University of Copenhagen (2015 年 1 月 12 日)

コペンハーゲン大学の研究者たちは、アルミニウムを基礎とした新しいタイプの‘ナノワイヤー’結晶の生成において飛躍的成功を収めた。この新型ナノワイヤー結晶は、原子スケールで半導体あるいは金属の電気特性を示す。彼らの研究は **Nature Materials** に記載されており、完全な電気コンタクト形成の実証や、何十億もの同質の半導体-金属ナノワイヤーハイブリッドのチップが生成されることも証明されている。

この新しい物質は半導体と金属の両方を含み、極低温で超電導特性を示す。Thomas Sand Jespersen 准教授は、ナノワイヤー結晶の研究拠点がニールスボーア研究所ナノサイエンスセンターで立ち上げられて以来、この分野で 10 年以上もの実績を積んできた。同氏は、このハイブリッド物質には偉大な可能性が潜んでいると考えている。ナノワイヤー生成に伴う様々な課題は、外部とリンクする良質の電気コンタクトを作成することにある。世界中の研究チームが、これまでナノワイヤーと電気コンタクトを個別に作成してきたが、この新しい手法によって電気コンタクトの品質と再現性が共に大幅に改善しつつある。Peter Krogstrup 准教授は、こういった改善は、新しいタイプのナノスケール電子部品を開発できる機会を増やし、電気特性についてこれまで以上に高精度な研究開発が推進されると説明している。

Source: "New superconducting hybrid crystals developed at the University of Copenhagen"

(12 Jan, 2015) News

<http://www.nbi.ku.dk/english/news/news15/new-superconducting-hybrid-crystals-developed-at-the-university-of-copenhagen/>

Contact: Peter Krogstrup krogstrup@nbi.ku.dk

超電導フィンガープリントと発現機構

Cornell University (2015 年 1 月 6 日)

コーネル大学の科学者たちは、特殊な揺らぎによって電子同士がペアを組むと考えられる「フィンガープリント」を特定し、「非従来型」超電導体において、電気抵抗がゼロになる超電導状態を作り出すことに成功した。同研究グループにより、電子同士がペアを組む起源はスピン揺らぎであることが証明された。

従来型超電導体では、極低温で、クーロン反発力を超える格子振動との交換によって電子対が生成され、超電導が起こるということがよく理解されている。しかし、「非従来型」超電導体の超電導発現機構は謎のままである。このような超電導体では、電子は反強磁性体を形成する傾向があり、反強磁性秩序状態を示す前にスピンの揺らぎが発生する。

物理学科准教授である Eun-Ah Kim 氏は、「これらのスピン揺らぎが電子対を作り出すという事実は、長年にわたって推測されてきたものの、それを証明するにはかなりの困難を伴ってきた。アルミのような単純な金属には通用した方法が、より高温の超電導体には通用しないのである。」と説明した。

超電導 Web21

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

いわゆるマルチバンド系と呼ばれる新種の鉄系非従来型超電導体では、エネルギーを与えられた電子は、様々に異なった振舞を示し、各々動作速度も異なる。そこで同研究グループは、準粒子干渉イメージングと呼ばれるエネルギーの運動量測定技術を使用することで、スピン揺らぎによるフィンガープリントと格子振動によるフィンガープリントを区別することに成功した。彼らの研究成果は、12 月 22 日発行 Nature Physics オンライン版で、「鉄プニクチド超電導体における反強磁性スピン揺らぎの‘フィンガープリント’を特定」と題する記事に掲載されている。

Source: "High-temperature superconductor 'fingerprint' found"

(6 Jan, 2015) Cornell Chronicle

<http://news.cornell.edu/stories/2015/01/high-temperature-superconductor-fingerprint-found>

Contact: Anne Ju amj8@cornell.edu

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

【隔月連載記事】

鉄道と超電導 (その 2)

～超電導フライホイール蓄電装置～

公益財団法人 鉄道総合技術研究所
浮上式鉄道技術研究部 低温システム
研究室長 長谷川 均

鉄道に超電導技術を適用する試みは複数ある。鉄道総研で研究テーマ化された内容だけでも、超電導磁気浮上式鉄道 (超電導リニア)、超電導き電ケーブル、車両用高温超電導変圧器、超電導磁気軸受を用いたフライホイール、SQUID によるレールの非破壊検査等がある。今回の連載では、この中からいくつかのテーマについて、鉄道総研の直接の担当者が分担して最新の研究開発状況を紹介することとしたい。

今回は副題の通り、鉄道総研における「超電導フライホイール蓄電装置」の開発状況について紹介する。

鉄道を含めた電力事情一般について

2011 年の東日本大震災は、日本のインフラについて直接的なダメージを与えただけではなく、電力系統の考え方そのものにもインパクトを与えた。特に、原子力発電に対する考え方は大きく転換し、電力会社のあり方、送配電分離への移行などシステム全体の変革を求められている。これまでの安定した原子力、火力、水力による発電、送電、配電、消費というエネルギーの流れから、風力、太陽光など不安定ではあるが再生可能なエネルギーへの移行を進めざるを得ない状況となってきた。消費側の対応としては省エネの推進であるが、これには限界があり、不安定なエネルギーを有効に使う手段として、蓄エネの活用が必須という状況になってきている。

一方、電気鉄道についてみる。もともと鉄道は、省エネと言われており、一人を同じ距離、同じ時間で運ぶために必要なエネルギー消費が他の乗り物に比べ小さい。さらに電気鉄道では、減速時に発生するエネルギーを電力として回生することができるという大きな利点がある。しかし、ハイブリッド自動車の登場で、この回生エネルギーの有効活用は、電気鉄道だけのメリットではなくなってきた。そうすると、電気鉄道における回生電力の無駄、すなわち回生失効は、重要な課題となってきており、何らかの蓄エネ装置の開発が求められている。

蓄エネ装置について

電気エネルギーは電子の運動エネルギーであり、電圧と電流により単位時間当たりのエネルギーが定義される。電気エネルギーはクリーンで、扱い易く、送電損失も少なく、漏えいがほとんどない、即応性が高く制御が容易といった利点がある。これは他の、石油やガスなどの燃焼用エネルギー、空圧や油圧などの圧力によるエネルギーの伝達に比べ、圧倒的優位に立っているといっているだろう。ところが唯一かつ最大の欠点として、電気エネルギーのまま貯蔵することが非常に困難である (SEMES のように直接電気エネルギーを貯める方式もある)。これは電気エネルギーを何らかの別エネルギーの形に変換し蓄えなければならないことを意味する。このエネルギー変換においては必ず損失が発生してしまい、電気→何らかのエネルギーへ変換→エネルギー貯蔵→何らかのエネルギー→電気の変換という流れでは、エネルギー変換が 2 回入ることになり、大きな損失となってしまう。

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

蓄エネ装置として真っ先に思いつくのが、二次電池（蓄電池）である。二次電池は電気エネルギーを化学エネルギーに変換し蓄える。二次電池の歴史は古く、複雑な変換装置も必要としない、排気ガスや騒音なども発生せず、エネルギー密度も大きい。このため、携帯機器、バックアップ電源などで多数使用されている。近年、リチウムイオン電池の登場により、エネルギー密度も格段に高くなり、装置全体の軽量化に貢献している。

二次電池にも課題はあり、寿命や劣化の問題、容量が 100 % 使用できない、有害廃棄物の発生、容量により出力が限定される等が考えられる。

これらの問題を解決する手段として、電気エネルギーを回転（運動）エネルギーに変換して蓄積するフライホイール装置が検討されている。フライホイール装置は、電気エネルギーを電動機により回転エネルギーに変換する。回転体の損失を抑える工夫をすることで蓄エネを行って、必要な時に電動機を発電機として運転することで電気エネルギーとして取り出すことができる。いわゆる弾み車による機械式蓄エネ装置であり、原理としては非常に簡単である。エネルギー密度は二次電池に比べて劣るものの、寿命や劣化の問題など先にあげた欠点を克服できると考えられている。フライホイール装置が実用化できるポイントは、回転体の損失を如何に小さくするかにかかっている。さらに突き詰めていくと、如何に小さな損失の軸受（ベアリング）を開発することができるかに集約される。

鉄道総研では、このような状況のもと、超電導磁気軸受を適用することで、フライホイール装置が実用化することを目指し開発を進めている（図 1）。

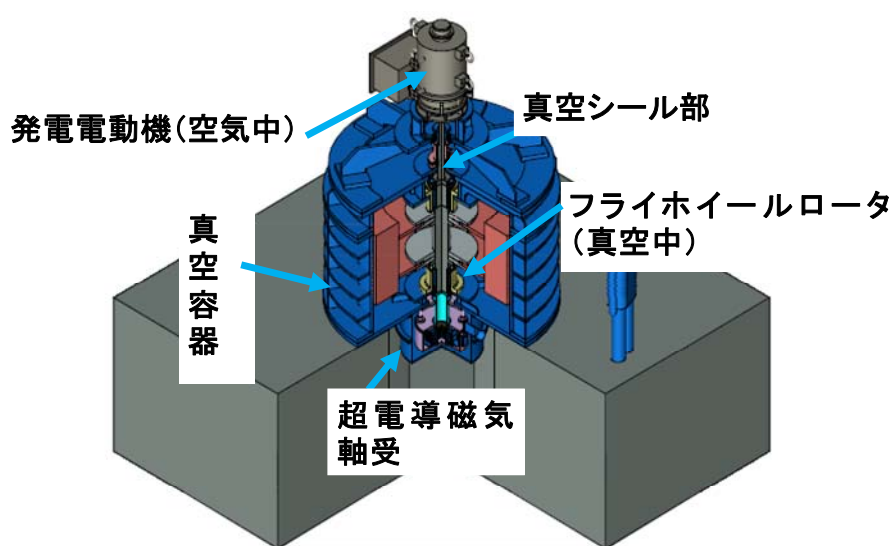


図 1 フライホイール蓄電装置の概要

超電導磁気軸受

人類は車輪が考案された、はるか昔から軸受を作ってきた。軸受は、回転方向にのみ自由度を持ち、他の方向に拘束することにより、車輪や回転体の支持に使用される。すなわち、重量物を支えたりした状態でも、スムーズに損失なく回転する装置と言えよう。構造の単純なものとしては平軸受のように円筒の中に軸が通っており、潤滑材などで摩擦を少なくするものがある。数量的に、世の中の大部分を占めているのが、コロや玉を使用したいわゆるボールベアリングであろう。これらの機械的に接触を持った構造の軸受は、大きな荷重を支えられ、ガタも少ないという特徴がある。

超電導 Web21

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

一方で、高速回転に向かない、給脂が必要、振動が伝達するなどの欠点もある。

これらの欠点を解決するために考案されたのが、磁気軸受である。磁気軸受は磁力を利用し、ステータ（固定子）とロータ（回転子）の間を非接触で電磁的に支持することで超高速回転にも耐え、摩擦もほとんどなく、摩耗が全くないなどの利点がある。欠点としては、電源や制御装置が必要であり、クリアランス（ギャップ）もある程度大きくなってしまう。

磁気軸受には大きく分けて二種類ある。一つ目が能動型磁気軸受で AMB(Active Magnetic Bearing) であり、もう一つが受動型磁気軸受である。受動型磁気軸受には大きな支持力を安定して発生させるため超電導を使用する方式が大部分であり（永久磁石だけでは安定して浮上することができないため）SMB(Superconducting Magnetic Bearing)と呼んでいる。磁気浮上式鉄道になぞると、AMB がトランスラピッドやリニモなどの吸引浮上方式、SMB が誘導浮上方式である JR マグレブとなる。AMB と SMB の特徴も吸引浮上と誘導浮上との比較とほぼ同じで、ギャップの大きさや電源や制御のあり方が違うこととなる。

超電導磁気軸受を適用したフライホイール装置

フライホイール装置は、回転体の回転数の二乗及び慣性モーメントに比例して蓄えられるエネルギーが大きくなる。すなわち重い物を高速で回転することで、大量のエネルギーが蓄積されることとなる。回転数には二乗で比例するため、一般的には重量よりも高速で回転させた方がコンパクトになるが、周速度により最高回転数は制限を受ける。これは、ある限度を超える周速度以上になると回転体の破断強度を遠心力が上回ってしまい、破損に至ってしまうためである。回転体の重量は大きいほどよいので密度の高い材料を使用したいところだが、遠心力に打ち勝つためには、強度の高いものが要求される。炭素繊維強化プラスチック(CFRP) はまさにこの特徴にマッチングしており、高速回転させるフライホイール装置にはこの材料が使用される（図 2）。



図 2 CFRP ロータ（クボテック株式会社）

高速で回転させるためには、磁気軸受が必要なことは前述のとおりであるが、鉄道総研では、スケールアップのため、大きな重量の回転体も支えられることを条件として、磁気軸受に超電導方式を採用することとした。

超電導 Web21

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

超電導磁気軸受にも様々な方式があるが、大きな重量という点に着目し、ステータに REBCO 系超電導コイル、ロータに Gd 系超電導バルク体を使用した。この方式ではピンニングではなく、反磁性を利用し、理論上超電導コイルの臨界電流までの大きな荷重を支持することが可能となるとされている。

超電導磁気軸受の超電導コイルは冷凍機による伝導冷却であり、50 K 以下を実現し、ロータの超電導バルク体は、希薄ヘリウムによる分子伝導と輻射により冷却され、冷却と風損低減を両立している。

図 3 に示すような構成の軸受により 40 kN(4 tonf) 以上の支持に成功している。支持荷重は、超電導コイルの通電電流の二乗に比例していることが試験結果からも読み取れる (図 4)。

現在、NEDO の助成事業「次世代フライホイール蓄電装置の開発」にて、鉄道総研、クボテック、古河電工、ミラプロ、山梨県の 5 社の協力でこのような超電導磁気軸受を使用した実証機を製作中であり、平成 27 年度には太陽光発電所を利用した、実証試験を行う予定である。

実証機や実証試験の詳細については、後日ご報告したいと考えている。

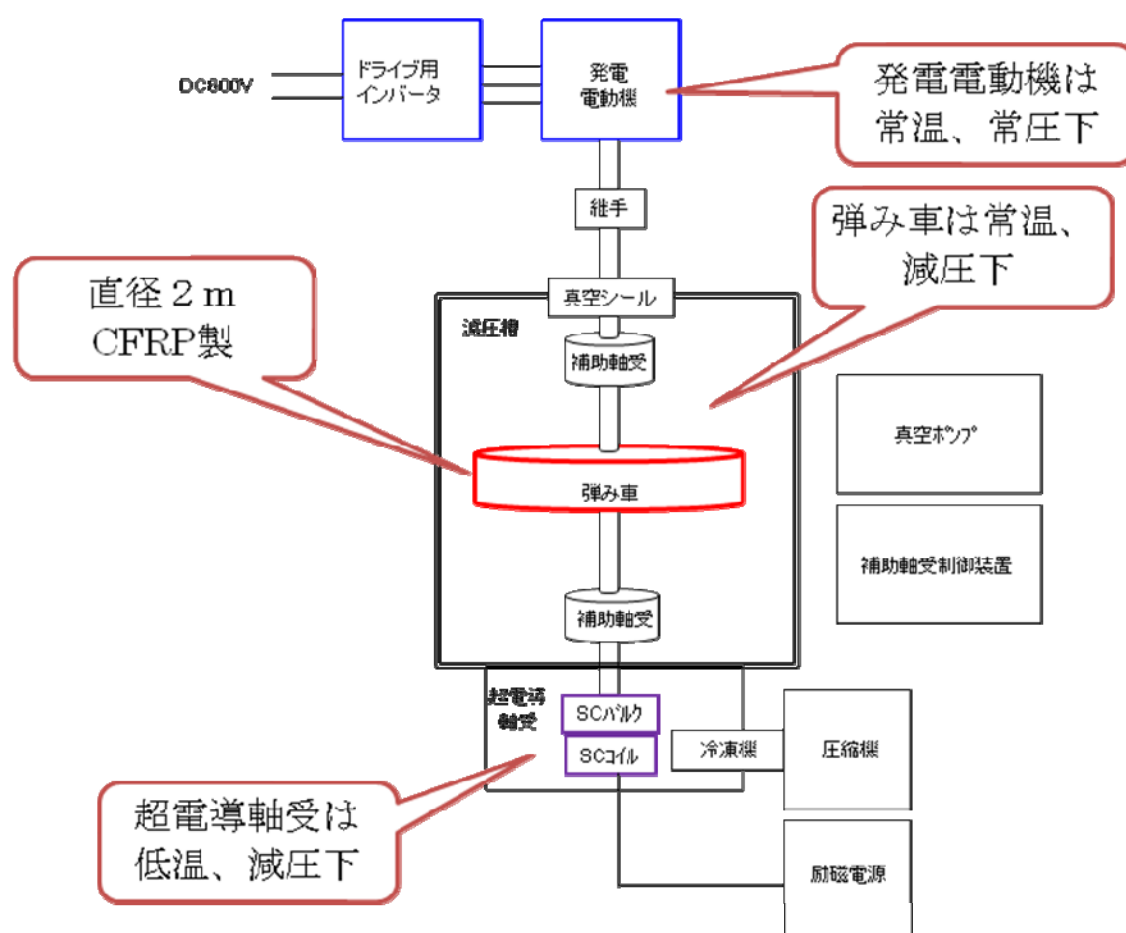


図 3 超電導フライホイールの構成

超電導 Web21

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

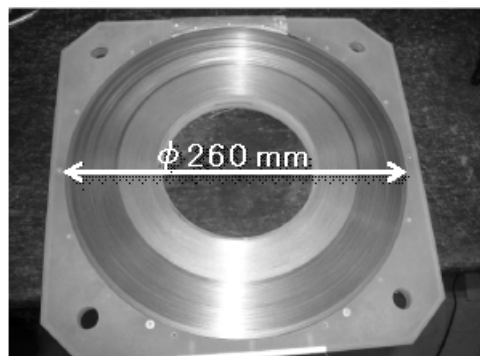
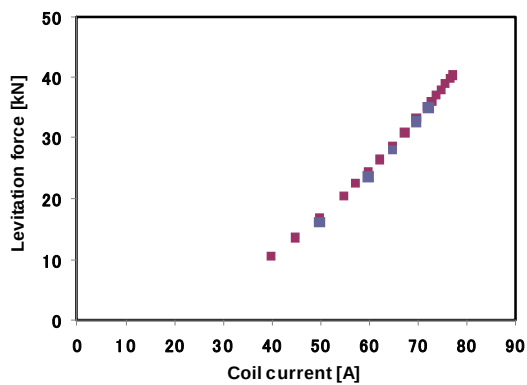


図4 超電導磁気軸受の支持荷重

(平成 26 年秋季低温工学会 1B-p03 「超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発④～冷却試験結果」 向山他)

[超電導 Web21 トップページ](#)