

超電導 Web2.1

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

掲載内容（サマリー）：

特集：超電導応用 磁気分離

- 磁気分離特集号の掲載にあたって
- 磁気力制御薬剤配送システム
- 磁気分離のシミュレーション技術とその展開
- 磁化活性汚泥法～沈降分離、膜分離を使わない磁気分離による生物学的水処理法
- 磁性吸着剤と超伝導高勾配磁気分離を用いた高度浄水処理の検討
- 無電解ニッケルめっき廃液からのニッケルの回収

- 超電導関連 2014 年 5 月-6 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（3/19-4/20）
- 世界の動き
- 再生可能エネルギーと超電導
- 隔月連載記事「高温超伝導電力機器の冷却技術」（その 3）
- 連載記事「やさしい電力系統のはなし」（第 4 回）
- 研究室紹介（東京大学大学院工学系研究科 応用化学専攻 岸尾研究室）
- 読者の広場「リニアモーター化が 2027 年に営業開始で、いよいよ走り出すと聞きましたが、その後、どうなっていますでしょうか。長年言われている超電導の実用化がいよいよ本番で気になるところです。」

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

〈発行者〉

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

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

Tel 044-850-1612 Fax044-850-1613

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



この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



特集：超電導応用 磁気分離

「磁気分離特集号の掲載にあたって」

大阪大学大学院工学研究科
環境・エネルギー工学専攻
教授 西嶋茂宏

磁気分離法とは、粒子に作用する磁気力の差を利用して粒子を分離する手法であり^{1),2)}、古くは鉱石選別（大粒径の強磁性体の分離）に用いられてきた技術である。その当時の磁気分離は磁石本来の磁場勾配のみで対象物質を分離する、開放勾配型磁気分離法（Open gradient magnetic separation, OGMS）が適用され、その後、強磁性細線を磁場内に配置して高勾配磁場を形成させ、大きな磁気力を発生させる高勾配磁気分離法（High gradient magnetic separation, HGMS）が開発された³⁾。これにより、従来では分離不可能であった微細粒子の分離が可能となり、大量高速処理を要する製紙業用カオリン粘土精製や製鉄排水純化などで実用化された。その後、磁場発生源の超伝導化も進み、超伝導高勾配磁気分離法となり、常磁性を示す有価物の回収など幅広い分野への応用に向けて研究が行われている⁴⁾。磁気分離が分離対象物質を吸引することを駆動力にすることに対し、分離対象が置かれた環境となる作業媒体を磁氣的に牽引することを駆動力とする磁気アルキメデス浮上現象が近年発見された⁵⁾。この技術を用いることにより、常磁性や反磁性といった磁化率の小さな物質どうしを分離する可能性についての検討も行われている。このように磁気力を利用した分離技術は、開放勾配型磁気分離法、高勾配磁気分離法、磁気アルキメデス分離法の3つに大別され、各分離法の適用範囲（SI 単位の磁化率）を図1に示す。また、磁気分離の前処理として、反磁性体や常磁性体に対して、強磁性粒子を物理・化学的に付与する磁気シーディング法を適用すれば、弱磁性体も低磁場源で分離でき、条件を整えれば高速・大量処理も可能となる。その他にも、イオン化している物質を晶出させ磁気分離することも可能である。このように、3つの磁気分離技術と前処理技術を利用すれば、物質の磁化率を制御することによって幅広い物質を分離することが可能となる。表1に本特集で取り上げた記事をまとめた。

表1 本特集で取り上げた技術

用途	難分解物質	下水処理	ニッケル回収	タンパク質の結晶化	MDDS
磁気シーディング	磁性活性炭 磁化ゼオライト	Fe_3O_4	晶出	シミュレーション	Fe_3O_4
磁場発生源	超伝導磁石	永久磁石	超伝導バルク磁石	超伝導磁石	超伝導バルク磁石
著者	Miura	Sakai	Oka・Fukui	Okada	Mishima

本特集では水処理技術のうち磁気シーディングを利用した例として、磁性吸着剤を用いた例と磁化活性汚泥法について紹介している。前者は水中の汚染物質を吸着して回収するシステムであり、後者は活性汚泥（微生物）に強磁性を付与した生物ろ過であり、磁気力によりその汚泥反応の循環サイクルを向上させている。同じ磁気シーディング技術を利用しているものの、両者は分離機構が全く異なるシステムである。磁気シーディング技術として両者共に強磁性粒子を用いるため、低磁

超電導 Web2.1

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

場の永久磁石や電磁石でもシステムの構築が可能であるが、高速大量処理の際には超伝導磁石が必要となってくる。また、メッキ廃液からのニッケルの回収ではイオンとして存在するニッケルを前処理で晶出後に磁気分離を行っている。この場合、磁化率が小さいため、超伝導バルク磁石を磁場発生源として使用している。

磁気分離システムの構築の際には、磁場発生源の種類や規模および分離法の選択などを踏まえたうえで、事前の計算によって分離に必要な磁気力を見積もっている。その計算の一例についても「磁気分離のシミュレーション技術とその展開」として紹介してある。

磁気分離としては括れないが、いわゆる磁気力制御技術の一つとして磁気ドラッグデリバリーシステム (Magnetic Drug Delivery System : MDDS) についても紹介してある。磁気分離とその基本原理は同様で、さらにその応用として体内の微小領域で分離対象物の動態 (位置) 制御を磁気力によって行っている。この分野から生まれた技術は、磁気分離にも適用可能であり、例えば、磁化率に応じた精密な分離なども可能にすると考えられる。

詳細については、以降の原稿でお読みいただきたい。

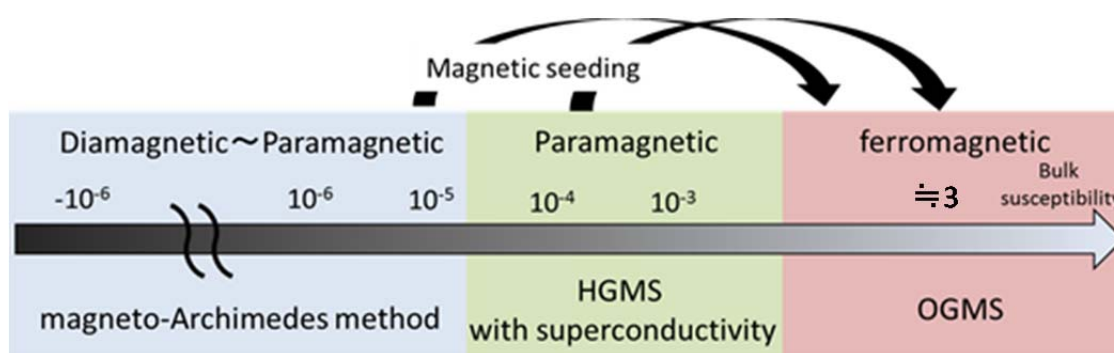


図 1 磁気力を用いた分離法の応用範囲

参考文献：

- 1) 原健司：磁気分離の歴史-大量希薄懸濁系処理への磁気分離技術応用に関する研究開発，第 10 回 磁気力制御・磁場応用夏の学校 (2011)
- 2) 福井聡：磁気分離の基礎 I - 磁気力制御における磁性粒子に働く磁気力とドラッグカー，第 8 回 磁気力制御・磁場応用 夏の学校 (2009)
- 3) 公害対策電気技術常置専門委員会：大勾配磁気分離技術の現状と動向，電気学会技術報告書 II 部第 114 号 (1981)
- 4) 西嶋茂宏，武田真一：高勾配超伝導磁気分離を用いた廃水浄化装置-強磁性粒子の利用，粉体粉末冶金協会「環境保護に必須のナノテク材料」(2007)
- 5) 廣田憲之：伝導冷却型超伝導磁石を使用した反磁性のデモンストレーション，低温工学, Vol.41, No.8 (2006)

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

特集：超電導応用 磁気分離

「磁気力制御薬剤配送システム」

大阪大学大学院工学研究科
環境・エネルギー工学専攻
三島史人

投薬治療における副作用や薬効低下の問題を解決する手法として、薬剤を生体内の患部に局所的に集積させる、薬剤配送システム（DDS; Drug Delivery System）の研究が進められている。従来の DDS は、薬剤の化学的もしくは生物学的特性を機能化した手法が多く、これらの手法では能動的かつ局所的な集積が困難であった。そこで、物理的外力である磁気牽引力を用いた磁気薬剤配送システム（Magnetic DDS、以降 MDDS）が注目されている。我々はこれまでの研究として、磁性を付与した薬剤（以降、磁性薬剤）を投与後、血管の分岐部で磁気力により任意の流線方向に磁性薬剤牽引することで、患部付近への薬剤濃度を高めることが可能であることを示した^{1),2)}。これは、一般に磁気分離技術の強磁性や常磁性の物質を磁気力によって吸引し目的部にて分離する手法を、生体内の血管という微小領域に適用した応用例である。この磁気力制御技術をさらに精密に制御し、体内深部の局所目的患部に磁性薬剤を集積（吸引）しようと考えているのが現在の MDDS である。これらの磁気力制御技術の発展は、工業的スケールの磁気分離としても新たな応用先を派生させる可能性も持っている。本稿では、その磁気力制御方法について紹介する。

高磁場高勾配磁場を用いることで、遠方から強磁性物質を吸引できる。しかし体外の一方からのみ磁場を印加するという手法では、強磁性薬剤は体表面に集積するため、体内深部に病巣が存在する場合には適用が困難である。この問題を解決するために、我々は磁場回転型 MDDS という手法について提案している³⁾。図 1 に示すように、標的部を中心として磁場を回転させることで、標的部のみ磁性薬剤を集積させ、それ以外の領域における集積を防ぐことが可能である。体内深部の直径約 10 mm 以内を標的領域として、磁性粒子の集積についての解析（粒子軌跡シミュレーション）を行い、その結果をもとに、磁場の強さや回転周波数を決定し、模擬毛細血管を用いた回転磁場による集積実験を行い、患部から離れた位置からの磁場制御による局所的な薬剤集積の可能性を検証した。

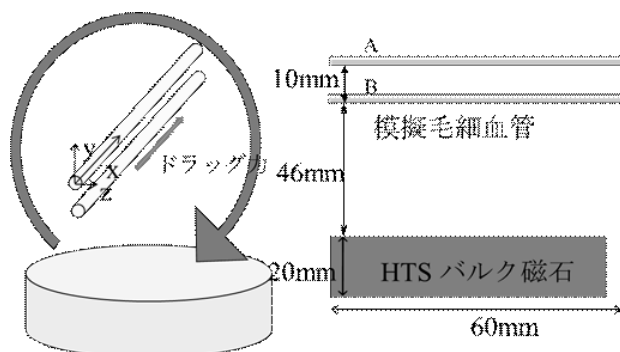


図 1 磁場回転型 MDDS の概念図

2 本の模擬毛細血管（モデル A、B）に模擬血液を流し、外部磁場としては HTS バルク磁石（表面磁束密度 4 T、直径 60 mm、厚さ 20 mm）を用いた。回転中心軸と磁石間の距離は 50 mm 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

内部の細管間の距離は 22 mm とした。モデル A の細管が位置する回転軸中心での磁束密度は約 0.34 T である。粒径 50 nm のマグネタイトを 0.2 g/L となるようにマグネタイト懸濁液を調製し、定量送液ポンプを用いて、模擬毛細血管に流速 3 mm/sec で流し、実験中は模擬毛細血管モデルを 4 rpm の速度で回転させた。集積結果を図 2 に示す。

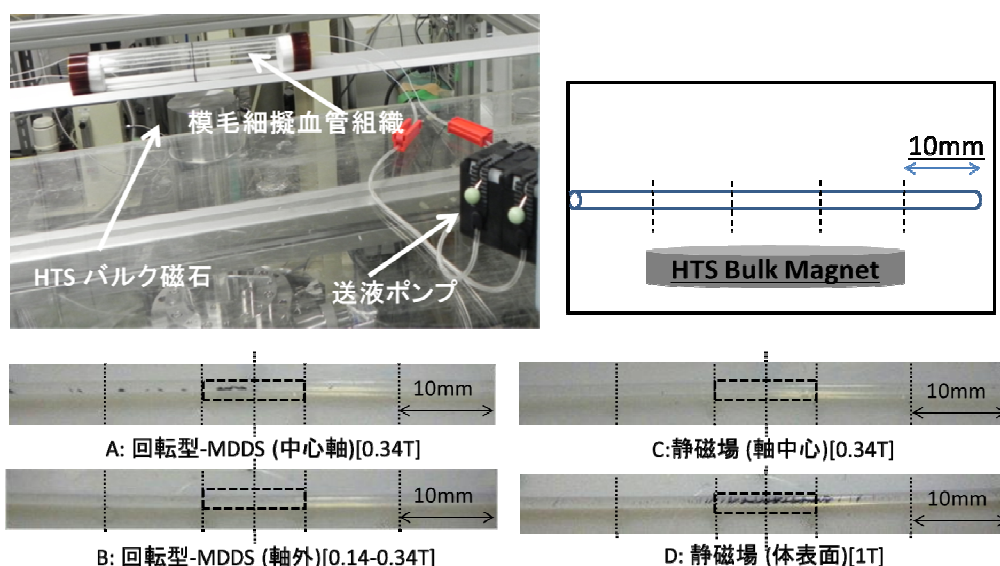


図 2 磁場回転型 MDDS 実験とその模擬血管内での集積結果

回転させずに MDDS を行った体表面付近 (1 T) での集積結果には少し及ばないものの、磁場を回転させることで、回転軸上に位置する細管の中心軸から ±5 mm の範囲に磁性薬剤を集積させることが可能であることが示された。また、静磁場印加では集積が困難な低磁場勾配磁場領域 (中心軸上) でも、回転させることで効果的に集積が可能であることが確認された。

このような磁気制御手法を利用することで、MDDS だけでなく、従来の磁気分離技術においても、さらに選択性のある分離や分離効率向上の可能を有すると考えられ、磁気分離 (磁気力制御方法) には今後もさらに新しい展開が期待される。

参考文献：

- 1) 磁気標的型薬剤送達システムの磁石配置の検討 -分岐部近傍の磁石の配置とその効率-、三島史人、藤本祐孝、武田真一、泉佳伸、西嶋茂宏、低温工学 41(8)、365-369、(2006)
- 2) S.Nishijima, F.Mishima, Y.Tabata, H.Iseki, Y.Muragaki, A.Sasaki and N.Saho: "Research and Development of Magnetic Drug Delivery System Using Bulk High Temperature Superconducting Magnet", IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 2257-2260
- 3) M.Chuzawa, F.Mishima, Y.Akiyama and S.Nishijima: "Precise control of the drug kinetics by means of non-invasive magnetic drug delivery system", Physica C 484 (2013) 120-124

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導応用 磁気分離

「磁気分離のシミュレーション技術とその展開」

物質・材料研究機構
微粒子工学グループ
岡田秀彦

高磁気力を使った磁気分離として広く用いられている高勾配磁気分離のシミュレーション技術の展開について紹介する。磁気分離は、廃棄物処理等に使われているが他の濾過手段と異なり高温、高圧、強酸性、強アルカリ性、放射能が存在するような極限環境でも使用できるという特徴を持っている。これは、図 1 の様にマグネット等の主な装置はその極限環境の外に置かれ、対象物を直接捕獲する強磁性体細線（SUS430 の金網が使われることが多い）のみが分離対象と同じ環境に置かれるという構造のためである。一方、極限環境で使用する磁気分離装置を開発する場合、その極限環境で実験を繰り返すことは非常に難しいため、シミュレーションと実験と組み合わせることで分離可能性や分離条件、装置の構造等の開発を効率的に行うことができる。

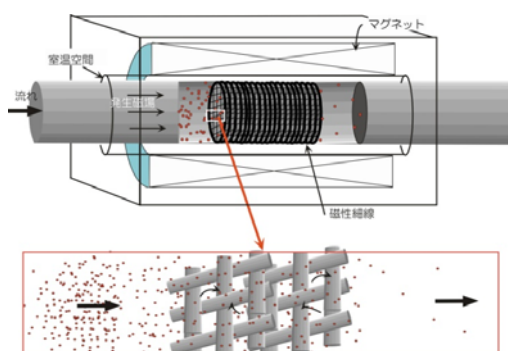


図 1 高勾配磁気分離の概念図

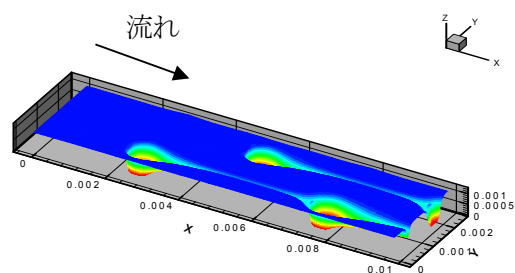


図 2 シミュレーションによる強磁性細線の周囲の濃度分布

磁気分離装置内での磁気力による流体内の微小粒子の移動を模擬する方法として Navier-Stokes 方程式と拡散方程式を使ったシミュレーションプログラムを紹介する。図 2 はその計算例で強磁性細線の周囲の粒子の濃度分布の計算結果である。この方法では、細線周囲の磁気力、流れの分布とそれによる粒子の運動と分布を求めている。実際の実験ではこのような詳細な観測はできないため、シミュレーションを使うことで、個々の細線の配置等の装置の構造や運転条件の最適化が可能となる。

近年、磁気力を使った対流の制御技術が注目されている。薬品などの研究開発ではタンパク質の構造解析のために高品質な結晶が必要とされ、対流抑制のため宇宙の微小重力環境での結晶化実験も行われている。地上で類似の環境を作る方法として磁気力により重力を相殺する方法が提案され結晶化実験も行われているが、実際の結晶化過程での対流の観測は難しく、対流の影響は調べられていない。磁気分離で用いたシミュレーション技法を超伝導マグネット内の重力を相殺する位置に置かれた容器内のタンパク質溶液の運動の解析に用いた例を図 3 に示す。計算結果から対流は磁気力が無い場合の約 1/10 に抑えられていることが分かった。このシミュレーションを用いることで、

超電導 Web2.1

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

磁気力による対流発生メカニズム、対流が抑制される条件等も得られるため、実験条件の設定にシミュレーションが有効であることも分かった。

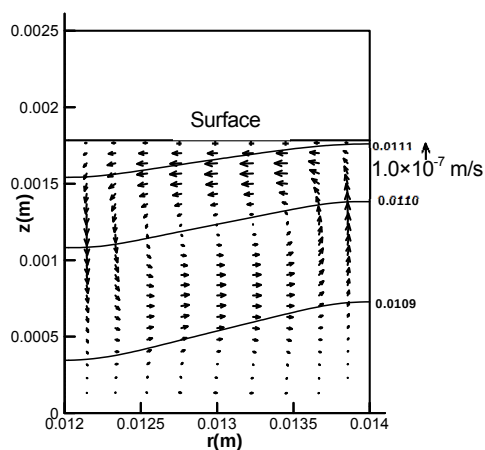


図 3 実際の磁気力分布を用いた対流の計算結果。等高線は濃度を示す。

磁気力は遠隔力であるため、外部とは隔絶された環境で有効であるため、その現象の観測は難しい。シミュレーションにより研究開発が進展することを期待している。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

特集：超電導応用 磁気分離

「磁化活性汚泥法～沈降分離、膜分離を使わない磁気分離による生物学的水処理法」

宇都宮大学大学院工学研究科
物質環境化学専攻
酒井保藏



動画 1

<磁化活性汚泥法とは>

従来の活性汚泥法は、優れた水処理であるが、①沈降分離しやすいよう微生物の沈降性を維持するのが難しい、②増殖する微生物が余剰汚泥と呼ばれる新たな環境負荷となる、の二つの欠点を有する。我々は活性汚泥法に磁気分離を導入することで改善を目指した。活性汚泥は凝集性微生物を中心とした微生物フロックであり、本来、磁気分離できないが、微生物フロックがマグネタイトを強く吸着するためマグネタイトを添加すると磁気分離できるようになる。また、微生物は増殖と死滅を繰り返しているが、マグネタイトは系内の微生物フロックに物理的な吸着平衡で捕捉されているため、微生物が代替わりしてもマグネタイトは系内で吸脱着をしながら繰り返し利用される（動画 1）。

磁気分離は微生物の性状に関係なく分離できるため①の問題は解決できた。②は一定の負荷（栄養供給）条件で、系の生物総量の増殖速度と、死滅・分解による減少速度がバランスするような大量の微生物を磁気分離で系内に保持できるため、見かけ上、増殖しない状態が維持され、解決できた。磁化活性汚泥法と呼んでいるこの新しい水処理法は国内はもとより、[Nature News^{1\)}](#)や [Chemical Engineering News^{2\)}](#)に取り上げられるなど海外でも注目されている。磁化活性汚泥法は、まだ開発途上であるが、実用化されれば、水処理の基幹技術になりうる技術である。中小規模施設では永久磁石による磁気分離が優位であるが、日量数千 m^3 を越えるような、大規模水処理設備では、永久磁石による磁気分離では大量の希土類磁石を必要とするため超電導磁石が優位になると予想される。連続的に分離汚泥を排出できる超電導磁気分離装置の開発が期待される。

<最近の研究動向>

中小規模での実用化を目指した研究開発と、研究用装置の標準化と普及による研究のすそ野拡大の両面で進めている。

超電導 Web2.1

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

(a) 宇都宮市水再生センターのパイロットプラントによる実証研究

宇都宮市水再生センターのパイロットプラント（槽深 4 m、容積 8 m³）を用い、中小水処理プロセス向けの磁気分離装置を開発中である。市販装置（最大磁束密度 0.5 T）を基に最適化を進めている（図 1）。大規模施設には超電導磁気分離装置の開発が期待される。

(b) 農場廃水への磁化活性汚泥法の適用

大学附属農場や栃木県内の牧場廃水処理への適用について実廃水を用いて検討している。処理時間を半減以下にでき、窒素やリン回収も可能であった。実用化をめざし企業と共同研究中である。

(c) 工場廃水への磁化活性汚泥法の適用

アジア新興国でパイロットプラントを建設し、工場廃水処理の可能性を検討している³⁾。また、食品廃水を対象とした磁化活性汚泥法の実用化研究を水処理企業と共同で進めている。

(d) 磁化活性汚泥実験装置の標準化と普及

磁化活性汚泥法や磁気分離を利用した新規プロセスを容易に実施できるように、標準磁化活性汚泥実験装置（図 2）を開発し、磁気分離研究のすそ野の開拓のため貸与を開始している。



図 1. パイロットプラントに設置されたドラム型磁気分離装置



図 2. 5 L 標準磁化活性汚泥装置

参考文献：

- 1) Nature News, 2003/3/28 (news030324-8),
<http://www.nature.com/news/2003/030328/full/news030324-8.html>
- 2) Chemical Engineering News, 2005/12/21,
(<https://pubs.acs.org/cen/news/83/i52/8352wastewater.html>)
- 3) 第 87 回 2013 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, IP-p19, p.73, (2013)
(<http://www.csj.or.jp/conference/2013s/1P.pdf>)

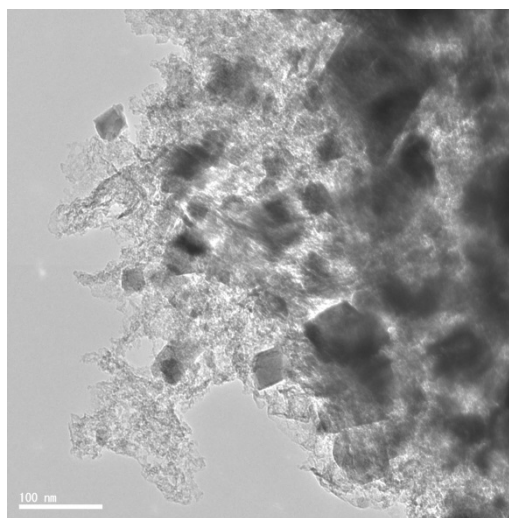
超電導 Web2.1 トップページ

特集：超電導応用 磁気分離

「磁性吸着剤と超伝導高勾配磁気分離を用いた高度浄水処理の検討」

公立大学法人 首都大学東京
理工学研究科 電気電子工学専攻
准教授 三浦大介

近年、難分解性溶存有機物（主にフミン酸）による河川や湖沼、内湾の水質への影響が懸念されている。また、これらの有機物は発がん物質のトリハロメタン前駆体であり、上水道への影響も大きい。現在、水道局ではオゾン処理と微生物活性炭による高度浄水処理法で原水からの溶存有機物やアンモニア窒素等の除去を行っているが、トリハロメタン前駆体の除去率はいまだ 60 % 程度に留まっており¹⁾、オゾン発生時の消費エネルギーの増加や、使用済み生物活性炭などの二次廃棄物の発生など、まだ多くの課題を抱えている。これらの問題を総合的に解決する処理方法として提案するのが、磁性吸着剤と高勾配磁気分離機を組み合わせた新しい浄水処理システムである。この手法を用いれば小スペースで高速・大量処理が実施でき、二次廃棄物を出さないゼロエミッションの浄水処理が可能となる。



開発した磁性活性炭の TEM 写真

今回開発した磁性吸着剤は、活性炭から作製するメソ孔磁性活性炭(MMPC)、酸化磁性活性炭(Ox-MAC)、及び石炭灰から作製する磁性ゼオライト(MZL)の 3 つである。これらの磁性吸着剤は、除去対象に合わせて磁性と吸着性能を付与している。MMPC は対フミン酸用の活性炭で、その作製方法はヤシガラ活性炭に硝酸鉄を含浸させ、ガス賦活を行う事で表面にフミン酸吸着に有効なメソ孔とマグネタイトを生成させる。その磁化は硝酸鉄の濃度に依存しており、最大 30.7 emu/g を持つ。Ox-MAC は対アンモニア態窒素用の活性炭であり、活性炭を高濃度・高温の硝酸に長時間浸けて酸化処理を行う事で、活性炭表面にアンモニア態窒素を引き付ける酸性官能基を導入したものである。また、活性炭の細孔にナノマグネタイトを物理的に含浸吸着させることで磁性を付与させた。その磁化はマグネタイトの含浸時間に依存しており、最大 0.99 emu/g を持つ。MZL はアンモニア態窒素を良く吸着するゼオライトに磁性を与えた吸着剤である。作製方法は、ゼオライトの原材料である石炭灰と塩化鉄を混和した後、水酸化ナトリウムを添加し、反応させることでマグネタイトの粒をゼオライトが包み込むような形で MZL が生成される。これよりゼオライトに磁性が付与され、最大 35.2 emu/g の磁化を持つ。

作製した磁性吸着剤の吸着性能を評価するために、除去対象物質の溶液に磁性吸着剤を添加させた後、0.5 T 永久磁石によって簡易磁気分離をした後、溶液の残留濃度を分光光度計によって計測して（フミン酸はそのまま、アンモニア態窒素はインドフェノール法）、除去性能を確認した。本研究では、吸着剤の投入量と攪拌(反応)時間を実験条件として変更する事で、その依存性を確認した。

図 1、2 に濃度 74mg/L のフミン酸溶液に MMPC を添加し攪拌吸着させ、さらに磁気分離した後の除去性能結果を示す。約 20 分で MMPC のフミン酸吸着量は飽和する事がわかり、MMPC は吸

超電導 Web2.1

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

着剤投入量が 5000 mg/L の時、フミン酸を最大 92.3 % 除去した。使用後の吸着剤を 335℃ で 15 時間熱することで、81.8 % の吸着性能が回復した。図 3、4 に濃度 0.8mg/L のアンモニア態窒素溶液に Ox-MAC と MZL を其々添加して、除去性能を測定した結果を示す。吸着時間は化学吸着特有で短時間であり、Ox-MAC は投入量 2000 mg/L で 74.9 %、MZL は投入量 1000 mg/L で 88.7 % の除去率を達成した。さらに Ox-MAC は 120℃ で 12 時間熱する事で 91 % の吸着性能が回復し、MZL は塩化ナトリウム水溶液に 12 時間攪拌する事で、Na とのイオン交換により 88 % の吸着性能が回復した。

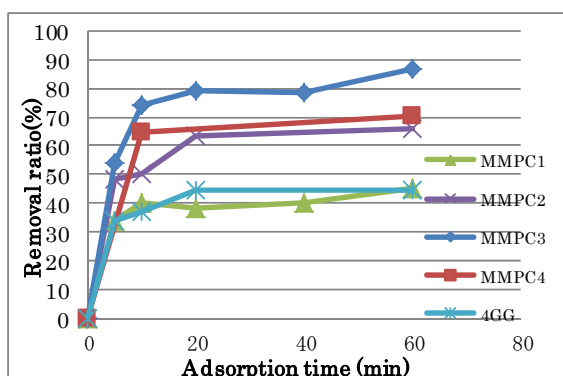


図 1 MMPC フミン酸除去率 時間依存性

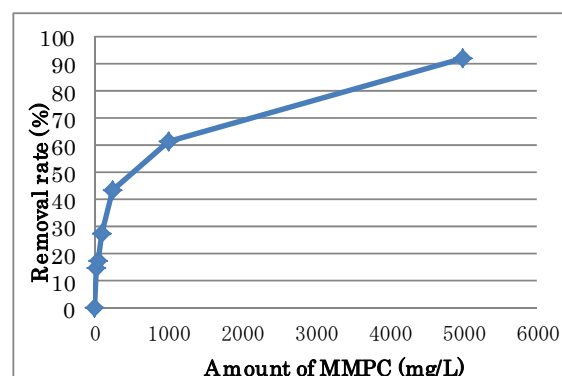


図 2 MMPC フミン酸除去率 投入量依存性

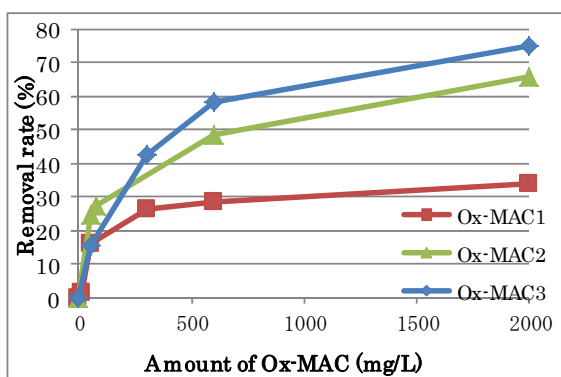


図 3 Ox-MAC アンモニア態窒素除去率 投入量依存性

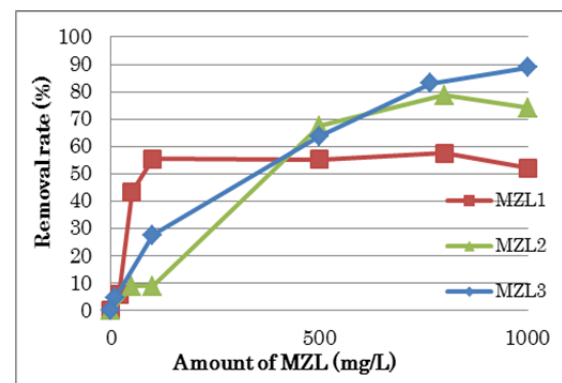


図 4 MZL アンモニア態窒素除去率 投入量依存性

最後に超伝導磁石で、溶液から磁性吸着剤を磁気分離し、磁気分離性能を評価した。実験方法は、MMPC を 50mg/L の割合で添加した試料水 10L を、磁性細線フィルターを装填している磁場 2T の超伝導磁石内部に 1m/s の速さで送り込んだ。この超伝導磁石から排出される試料水に残留する MMPC の量を磁気分離で集め、高性能電子天秤で測定する。その結果を図 5 に示す。磁化 16.7emu/g の MMPC は全く漏れずに磁気分離が出来る事が確認でき、この結果は磁気分離シミュレーション結果とも一致した。

これより、高勾配磁気分離機と磁性吸着剤を用いた浄水システムの高度浄水処理場への適用が可能であると期待できる。

超電導 Web2.1

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

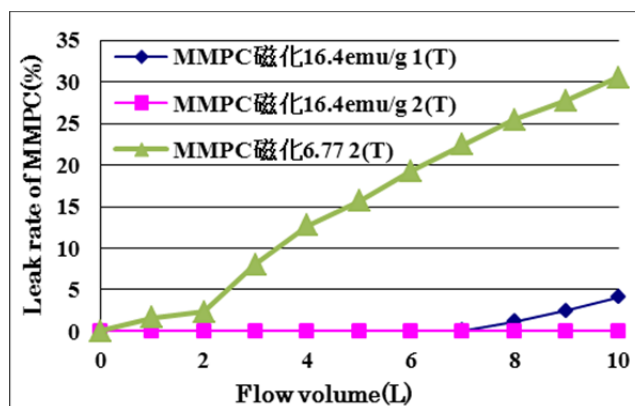


図 5 MMPC の磁気分離実験結果

参考文献:

- 1) 東京都水道局 宮垣融「Bromate Formation and its Control in Advanced Water Treatment System、高度浄水処理における臭素酸の生成と制御」

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

特集：超電導応用 磁気分離

「無電解ニッケルめっき廃液からのニッケルの回収」

新潟大学工学部
岡 徹雄、福井 聡

自動車産業や電子産業等で広く利用されている表面処理技術に無電解ニッケルめっきがある。めっき浴中のニッケルイオンが次亜リン酸により還元析出することから、複雑形状の製品も、めっき浴に浸すだけで耐摩耗性や耐食性に優れる均一な皮膜が得られる。めっき反応で生じる亜リン酸イオンの増加は製品への異常析出などの不良の原因となるため、めっき液は頻繁に更新され、液中に残るニッケルイオンと共に廃棄される。このめっき廃液の処理は、環境負荷や工程コストに影響を与え、とくに希少金属であるニッケルの廃棄は、資源保全の観点からも現プロセスの改善が望まれている。

めっき廃水からニッケルの回収する例を図 1 に示す。加熱と pH 調整により亜リン酸ニッケルを晶出させてリンを溶液から取り出し、これに硫酸を反応させて硫酸ニッケルの結晶を生成する。硫酸ニッケルはめっき浴に補充する主原料であり、これを連続生成すれば原材料の有効利用とめっき液の長寿命化に極めて有効である。硫酸ニッケルの結晶はニッケルが過飽和に溶解した領域で析出させることができその温度領域は 40～60℃ である¹⁾。しかし硫酸ニッケルの生成は不安定で長時間かかることなどから、従来この再生工程は現存しなかった。ここに磁気を利用して硫酸ニッケル結晶と亜リン酸ニッケル結晶をその磁性の差を用いて分離することができリサイクルが可能となる。強磁場の生成にはコンパクトな構成で 3 テスラ級の磁束密度が期待できる高温超電導バルク磁石を用いる。小型冷凍機によって 30 K まで冷却されたバルク磁石には、パルス磁場あるいは静磁場によって励磁され、擬似永久磁石として用いることができる。

図 2 に硫酸ニッケルの結晶が生成する途中で、処理液から結晶が磁極に吸着する様子を示す。硫酸ニッケル結晶の磁化率は 3.33×10^{-4} と小さく、常磁性のアルミニウムとほぼ同程度であるが、亜リン酸ニッケルの 2 倍の磁気力が発生でき²⁾、強磁場により効果的な分離が期待できる。図 3 に示すように、2T の磁極を用いて処理液から分離した結晶では、結晶中の硫酸イオンに対するリンの濃度比が大幅に減少しており、硫酸ニッケル結晶の優先的な磁気分離を示すことができた³⁾。結晶の純度を上げたり、磁場空間の最適化を図ることで、上述した工業的なメリットが立証できると考えている。

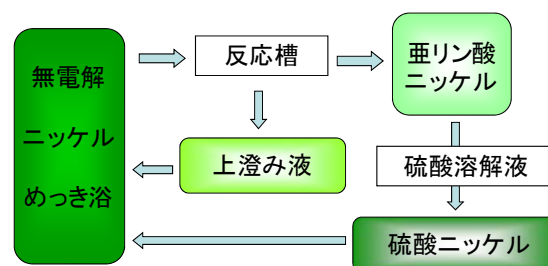


図 1 亜リン酸ニッケルと硫酸ニッケルの生成とリサイクル



図 2 磁気分離の実際

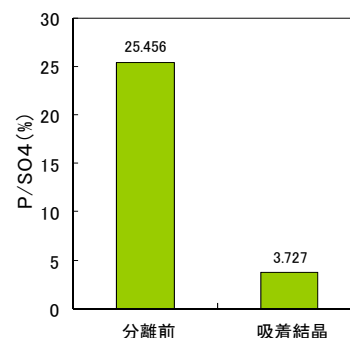


図 3 分離結晶の成分濃度比

超電導 Web2.1

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

参考文献：

- 1) 松井富士夫、ウエムラテクニカルレポート 44、1999、21-24
- 2) T. Oka *et al.*, Physica C, 496, 2014, 58-62
- 3) 岡徹雄他、平成 25 年電気学会全国大会シンポジウム、2013.3.20、名古屋、6-S7(8-10)

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

超電導関連 ‘14/4 月－5 月の催し物案内

5/15-19

International conference „Superconductivity for Energy 2014“

Savoy Beach Hotel, Paestum, Italy

<http://s4e.fisica.unisa.it/index.html>

5/19

超電導技術動向報告会 2014

タワーホール船堀

<http://www.istec.or.jp>

5/21-23

第 26 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム

アイーナ岩手県民情報交流センター

<http://www.ndesrc.eng.iwate-u.ac.jp/sead26/>

5/23

低温工学・超電導学会 関西支部 第一回講演会

兵庫県立先端科学技術支援センター

http://www.csj.or.jp/kansai/2014/1st_0523.pdf

5/26-28

第 89 回低温工学・超電導学会研究発表会

タワーホール船堀

<http://www.csj.or.jp/>

5/27

低温工学・超電導学会 第 4 回社員総会

タワーホール船堀

http://www.csj.or.jp/caj/2014/4th_generalmeeting.pdf

6/8-13

International Conference on Modern Materials and Technologies (CIMTEC 2014)

Montecatini Terme, Italy

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

6/9-12

International Cryocooler Conference (ICC18)

Syracuse, NY, USA

<http://cryocooler.org/>

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

6/16-20

5th International Particle Accelerator Conference (IPAC14)

Dresden, Germany

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

6/19-20

第 10 回 核融合エネルギー連合講演会

エポカルつくば

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

6/26-27

第 19 回 動力・エネルギー技術シンポジウム

福井県民ホール

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

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

新聞ヘッドライン (3/19-4/19)

- 炉 実現に黄信号設計変更で遅滞 費用追加負担も 日本経済新聞 朝刊 3/19
- 特集 ヘリウム危機、超えゆく技術 (写真は語る) 日本経済新聞 朝刊 3/22
- NIMS が金を含む超電導体発見 強磁場耐性開発に期待 電気新聞 3/27
- 高エネ研・東工 鉄系超電導物質に新たな反強磁性領域を発見 日刊工業新聞 3/28
- 次世代大型フライホイールの開発 円盤の回転で蓄電一軸受に新技術 交通新聞 4/02
- 開発プロジェクト 5 者で業務分担 総研が取りまとめ役 交通新聞 4/02
- 第二世代高温超電導線材を使用—鉄道総研 交通新聞 4/02
- 山梨大学の熊田伸弘教授と田中功教授ら 新タイプの酸化物超電導材料 日経産業新聞 4/02
- 古河電工 第 2 世代高温超電導線材 米子会社、薄型 30 ミクロン追加 日刊産業新聞 4/08
- 未踏科学技術協会、熊倉研究員ら、超伝導特別賞 日経産業新聞 4/12
- JR 東海、リニア技術、米に無償供与 各国の鉄道計画、受注へアピール 日本経済新聞 朝刊 4/12
- CaFeAsH から非希土類の鉄系超伝導体で最高の Tc (47K) 科学新聞 4/18

(編集局)

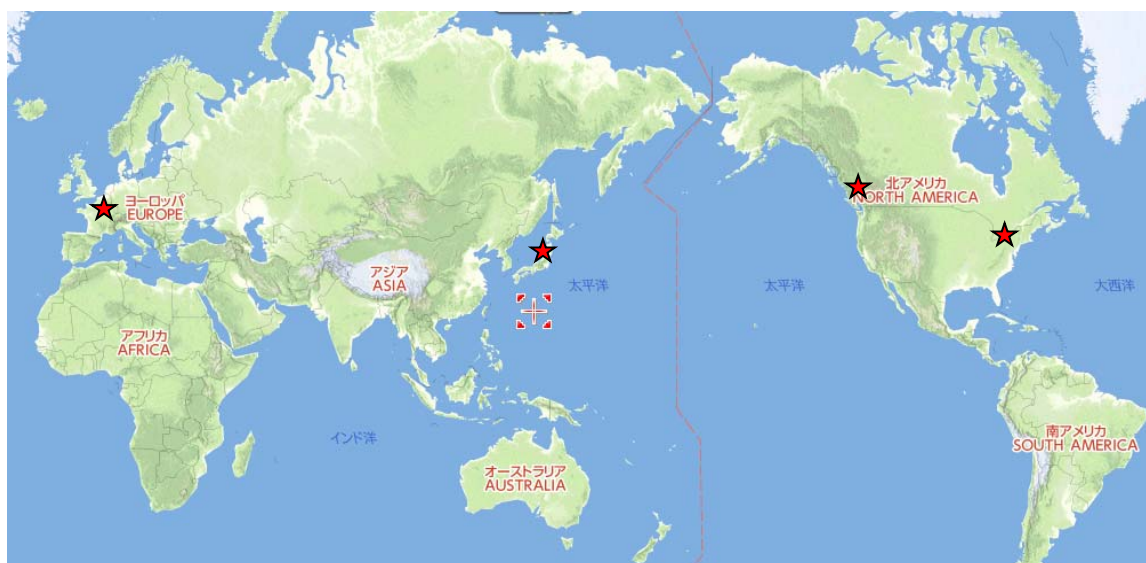
[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

世界の動き

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



★ 今月のニュース発信地

▶デバイス

2014 年 Smart Company 50 に選ばれる

D-Wave Systems Inc. (2014 年 2 月 18 日)

世界初の商業用量子コンピューター会社である D-Wave Systems 社は、MIT テクノロジーレビューの中で、“2014 年世界で最も革新的な 50 社”のひとつとして選ばれ、革新的技術を持つテクノロジー企業の年次リストにその名前を挙げた。これまで Amazon、Google、IBM、そして Microsoft などの企業が選ばれた名誉ある賞である。このリストに選別されるには、その年内において独創的で価値ある技術を全て実証し、競合他社に強い影響を与えると同時に、その技術が市場で受け入れられた企業ばかりである。また、これら企業は、我々の生活に変革を与える可能性が最も高い破壊的革新を実現できると考えられている。D-Wave Systems 社の量子コンピューターは、量子力学の法則に忠実に基づいているので、そこから算出された成果は、機械学習、ミッション計画での複雑な最適化問題、癌研究、そして財務モデリングなど、多くの異なったドメインで起こる複雑なコンピューティング問題の解決に役立つと期待されている。

Source: “D-Wave Systems Named to MIT Technology Review’s 2014 List of the 50 Smartest Companies”

超電導 Web2.1

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

D-Wave Systems Inc. press release (February 18, 2014)

URL:<http://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-systems-named-mit-technology-reviews-2014-list-50-smartest-companies>

<http://time.com/4802/quantum-leap/>

Contact: Beth Sanzone, dwave@launchsquad.com

量子コンピューティングで米国科学研究財団 と共同研究

D-Wave Systems Inc. (2014 年 2 月 24 日)

D-Wave Systems 社とメリーランド大学ボルチモアカウンティ校に所在するマルチコアの高生産性を目標とする米国科学研究財団 (CHMPR)は、共同研究を締結し、量子力学と古典的コンピューティングを組み合わせた研究を進めることを発表した。CHMPR は、計算実施基準を高めるのに必要とされる生産性、性能、そしてスケーラビリティという課題に取り組む研究コンソーシアムである。D-Wave Systems 社は、量子コンピューティング分野での画期的な研究に欠かせない洞察を提供することで、このコンソーシアムへの貢献が期待されている。

D-Wave Systems 社は、物理学とコンピュータサイエンスでの新たな発見をコンピューテーションの革新的研究に統合していくことを目的として、1999 年に設立された。同社の主力製品である 512 クビット D-Wave Two™ コンピューターは、計算を大幅に高速化する量子力学的方式を利用した新しいタイプの超電導プロセッサを使用している。昨年 2013 年には、NASA、Google、そして USRA が共同設立した新しい量子人口知能研究所に、D-Wave Two システムが設置された。また Lockheed Martin 社は、512 クビット D-Wave Two コンピューター用に、これまでに開発された 128 クビット D-Wave One™ システムのアップグレード版を購入している。

Source: "D-Wave Systems Joins the NSF Center for Multicore Productivity Research (CHMPR)"

D-Wave Systems Inc. press release (February 24, 2014)

URL:<http://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-systems-joins-nsf-center-multicore-productivity-research-chmpr>

Contact: Beth Sanzone, dwave@launchsquad.com

▶基礎

グラフェンを超電導にする方法

University of Vienna (2014 年 2 月 11 日)

角度分解光電子分光(ARPES)として知られる強力な光電子分光法を使用し、ウィーン大学を拠点とする国際研究チームは、カルシウムドーピングしたグラフェンの基礎となる超電導ペアリングのメカニズムについて報告した。炭素原子で構成され、1 原子層の厚さしか持たないグラフェンは 2004 年に初めて発見され、現存する中で最も汎用的で素晴らしい物質の一つであると考えられている。当時、初めての存在が分かった二次元物質に対する反響は大きな話題をよび、その発見者はノーベル賞を受賞したほどである。電子の意図的導入（ドーピング）により、グラフェンの類似物質（グラファイトやフラーレンなど）が超電導になることは知られているが、グラフェン自体が超電導にな

超電導 Web2.1

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

るという実験的報告はこれまで全くなかった。研究者たちは、グラフェンに超電導を誘導させる最も有望なドーピング候補はカルシウムであると解明し、約 1.5 K の臨界温度で超電導が現れることを発見したのである。この臨界温度は確かにかなり低い（フラーレンは約 33 K で超電導になる）ものの、グラフェンは一層の炭素原子層物質であるため、比較的容易に化学的な修飾が用いられ、その他多くの物質に比べていくつか大きな利点を持っている。その上、様々な積層順序で原子層数を増やすこともでき、また、いくつか異なる方法でドーピングもできる。このような汎用性は、実験的に多くのオプションを可能にし、超電導全般、特に炭素物質への理解が一層深まることになる。この研究グループの成果は Nature Communications に掲載されている。

Source: “How to make the wonder material graphene superconducting”

University of Vienna (February 11, 2014)

URL: [http://physik.univie.ac.at/en/news/news-detail-view/archive/2014/february//article/wie-man-grap-hen-supraleitend-machen-kann-2/?tx_ttnews\[backPid\]=110280&cHash=8cb388048e6bbd4846922282eed7ab0f](http://physik.univie.ac.at/en/news/news-detail-view/archive/2014/february//article/wie-man-grap-hen-supraleitend-machen-kann-2/?tx_ttnews[backPid]=110280&cHash=8cb388048e6bbd4846922282eed7ab0f)

Contact: Alexander Grüneis alexander.grueneis@univie.ac.at

▶経営・決算

中国裁判所 AMSC を支持：対 Sinovel 訴訟

AMSC (2014 年 2 月 19 日)

AMSC 社は、Sinovel Wind Group 社 (Sinovel 社)、および Guotong Electric 社に対する 2 件のソフトウェア著作権侵害訴訟の管轄権に関して、中国最高人民法院が AMSC 社側を支持し審理が進められることを決定したと発表した。最高人民法院は、各法廷システムの商事仲裁主張とは独立した別の著作権侵害事件として、両訴訟を審理すると裁定した。ここで問題となっている訴訟とは、Sinovel 社が起こした一部の契約違反と知的財産窃盗が発覚した後、2011 年後半に AMSC 社が Sinovel 社に対して起訴した 4 件の訴訟のうち 2 件のことである。また AMSC 社は、Sinovel 社に対し、商事仲裁訴訟と企業秘密訴訟も展開している。

Source: “China’s Supreme People’s Court Decides in Favor of AMSC on Jurisdictional Matters”

AMSC press release (February 19, 2014)

URL: <http://ir.amsc.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=826639>

Contact: Kerry Farrell, kerry.farrell@amsc.com

超電導 Web2.1

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

“世界の動き” その他（各社新聞発表以外のソースから）

・“JR 東海 2014 年度超電導リニア計画を発表” 超電導磁石製造費 360 億円を見込む

JR 東海は 4 月 3 日に 2014 年度の重点施策を発表したが、その中で、超電導リニアによる中央新幹線計画や名古屋駅での JR ゲートタワー計画などを発表した。

超電導リニア中央新幹線計画に関しては、今年度、東京都・名古屋市間で「環境影響評価書」の公告と工事実施計画の認可申請を行う。超電導リニア技術の更なる進化のため、2014 年度末までに新型車両 L0 系全 14 両の投入を完了し、現在 7 両編成で実施している山梨リニア実験線での走行試験を最長 12 両編成に拡大する。これは営業運転仕様の車両・設備であり、この走行試験で、営業運転への車両や地上設備の保守体系の確立をめざす。また、我々にはうれしい超電導リニアの体験乗車を 2014 年度中には実施する。なお、超電導磁石の製造費 360 億円を見込む。超電導にとっては大きな市場である。

すでに名古屋駅の新駅ビル「JR ゲートタワー」も順調に進行中であり、2017 年 4 月にグランドオープンにする。東海道新幹線開業 50 周年企画の実施も 2014 年度の重点項目のひとつ。記念企画商品の発売、グループ会社やリニア・鉄道館での各種催しの実施などに加え、「東海道新幹線開業 50 周年記念高速鉄道国際会議（仮称）」を開催する計画である。

Source:

1. <http://linear.jr-central.co.jp/newsrelease/news/140319.html>
2. <http://news.livedoor.com/article/detail/8048189/>
3. <http://news.mynavi.jp/news/2014/04/03/037/>

・リニア新幹線の技術、米に無償提供 日米首脳会談で表明予定へ

マスコミ各紙（2014 年 4 月 13 日）

注）編集部：執筆時点（4 月 25 日）では、本文最後にありますように、日米共同声明の内容は不明ですので、あくまで予定としてお読みください。

4 月 13 日時点のマスコミ発表によれば、日米首脳会談において、日本の超電導リニア新幹線の米国への技術導入で合意することで、日米両政府が最終調整に入った。首脳会談で安倍晋三首相は、リニア受注を実現するために、リニア技術は無償提供することを表明する。JR 東海も政府と足並みをそろえている。

Web21 でも既報のとおり、日本政府と JR 東海は、アメリカのワシントンとニューヨークの間を「リニア」で結ぶ計画を提案している。時速 500 キロでワシントンとニューヨークの間(360km)が現在の特急列車の所要時間 2 時間 45 分から大幅に短縮され、1 時間以内になる。日本は、まずはワシントンとボルティモアの間、60 キロを 15 分で結ぶ計画を提案していて、その後、ニューヨークまでの延長を目指す。

技術提供の場合、「ライセンス料」を受け取るのが一般的だが、リニア新幹線をアメリカに確実に売り込むこと優先した。首相は「インフラ輸出」を、重要な成長戦略のひとつに位置付けている。

超電導 Web2.1

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

日本の独自技術によるリニアの売り込みが成功すれば、超電導もアメリカや他の海外市場開拓への大きな弾みとなる。

首脳会談のため、安倍首相は 4 月 12 日、JR 東海の山梨リニア実験センターを訪れ、ケネディ駐日アメリカ大使とリニア中央新幹線に試乗し、日本の技術力をアピールした。ケネディ大使は「アメリカにも同じ恩恵を与えてくれると期待したい」とコメントした。

Source: <http://sankei.jp.msn.com/politics/news/140413/plc14041309220003-n1.htm>

NHK ニュース「「各国にトップセールス」リニア試乗で首相」より 2014/04/13 09:22

http://www.huffingtonpost.jp/2014/04/12/linear-abe-sales-us_n_5140765.html

<http://www.asahi.com/articles/ASG4D4HBGG4DUTFK008.html>

追記：昨日、日米首脳会談が終了したが、同報道によれば、

“会談後、共同声明を発表予定である。これとは別に超電導リニア新幹線などでの協力や目標を盛り込んだ共同文書もまとめる。”とあり、後日発表される内容が楽しみである。

Source: http://www.nikkei.com/article/DGXNASFS2400D_U4A420C1000000/

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

再生可能エネルギーと超電導

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

世界でケーブル Pj 活発化：未踏シンポジウム

4 月 15 日タワーホール船堀で、(社)未踏協会 超伝導科学技術研究会により、第 40 回シンポジウム/「超伝導 2014－未来を拓く超伝導ケーブル－」が開催されたので、参加した。再生可能エネルギーに関連したものを紹介する。

講演のタイトル

- ①「高温超伝導ケーブル実証試験」 東京電力 本庄 昇一
- ②「高圧超伝導送電」 古河電工 八木 正史
- ③「直流超伝導き電線」 鉄道総合技術研究所 富田 優
- ④「石狩直流超伝導プロジェクト」 中部大学 山口 作太郎
- ⑤「世界のケーブルプロジェクト動向」 住友電工 林 和彦

発表全体は上記の通りである。上記①、②はいずれも昨年度終了し、一部継続研究を行っているが、成功裏に終了したものである。東電の試験は系統連携、古河の試験は 275 kV の高圧であり中国での試験が売りである。③は、鉄道用であるが、日本の鉄道の多くは直流であり、そこに超電導を使うと、通常の損失はもちろん、変電所容量、回生エネルギー回収など様々な優位点があり、現在、昨年成功したものより長い 300 m 長でかつ実際の鉄道の環境に近いケーブル試験を行っている。④は経産省からここ 1-2 年でかなりの投資がなされているが、石狩市の新港湾地区に再生可能エネルギー、データセンター用の直流ケーブルを超電導で敷設しようというものである。プロジェクト実施担当の千代田化工や中部大学はもちろん石狩市など地元の行政も力を入れている様子である。最終的には 2 km の直流超電導ケーブルで太陽光発電所からさくらインターネットのデータセンターを結び、エネルギーの効率的運用を目指す。

林氏からは世界のケーブルプロジェクトの紹介があったが、日本以外に欧州、ロシアで 1 km, 2.5 km の計画があり、両国で活発な取り組みがなされていることが分かった。その中でケーブルでは実用化を見越した国際標準化の動きも活発化しているとの報告もあった。IEC への超電導ケーブルの試験法の標準化を当 ISTEK も参加して積極的に業界各社と進めている。

Source: <http://www.sntt.or.jp/~fsst/20140415.html>

産総研“福島再生可能エネルギー研究所”が開所

4 月 18 日東京の日経ホールで開所式が行われた。産業技術総合研究所の中鉢良治理事長、米国、オーストラリアの再生可能関連研究機関長、福島県知事、研究所のある郡山市長、『福島再生可能エネルギー研究所』長の大和田野芳郎氏他が講演し、「世界中の知恵を結集させ、世界的な課題の解

超電導 Web2.1

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

決に取り組んでいきたい」との意向を表明した。この研究所を、「福島県を再生可能エネルギー先駆けの地とするための大きな推進力になるようにしたい」との意気込みを大いに感じた。研究所は、再生可能エネルギーの関連産業を、原発事故からの復興を進める福島県の産業の柱に育てるための研究開発拠点として設置された。

総工費はおよそ 100 億円で、5 万 5000 平方メートルの敷地には、再生可能エネルギー太陽光パネルや風力発電の施設などが設置され、地熱も含めた再生可能エネルギーの研究開発を進める。また、地元の大学、民間企業との連携を積極的に進め、地場産業の発展に寄与したいとの意向が良くわかった。

同機関のホームページには、意欲ある下記目標が掲げられている（一部省略）。

“太陽、風力、地熱、水力、バイオマス等の再生可能エネルギーは、我が国の貴重な国産エネルギー源であり、エネルギー供給の多様化や安定化、地球温暖化防止等を目的に、早期の大量導入が期待されています。時間的に大きく変動する、コストが高い、場所ごとに適切な技術の選択が必要、等の課題を解決する必要があるため、以下の基本目標を掲げている。

1. 水素や蓄電池等のエネルギー貯蔵とパワーエレクトロニクスを駆使した統合システム技術を開発し、時間的に変動する大量の再生可能エネルギーを活用する技術モデルの実証
2. 軽量安価な太陽光発電モジュール等の革新的技術の研究開発と大幅なコストダウンの実現
3. 健全な技術普及と社会による受入れを支えるための地熱、地中熱等の再生可能エネルギーデータベースの構築と提供

これらを、企業や大学、海外研究機関等と共同で行い、素早い事業化と普及に繋げると共に、長期的な人材育成にも貢献していきたいと考えている。“

超電導も高効率ケーブル、SMES、風力用発電機、系統安定化、保護用の限流器など貢献できるチャンスが大きい。

Source:

<http://www3.nhk.or.jp/news/html/20140419/t10013871551000.html>

http://www.fukushima.aist.go.jp/ja/01_greeting/01_greeting.html

<http://www.fukushima.aist.go.jp/ja/symposium/guidance.html>

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

【隔月連載記事】

高温超伝導電力機器の冷却技術（その 3）

大陽日酸株式会社

開発・エンジニアリング本部

つくば研究所長 吉田 茂

3. 冷却システムの構成機器（冷凍機以外）

高温超電導機器に限らず極低温で冷却する装置には、冷凍機以外にも構成機器が必要である。ここでは主な構成機器としてクライオスタット、液体窒素ポンプ、トランスファーチューブを取り上げてみる。

3.1 クライオスタット

高温超電導体のような被冷却体を極低温に維持し続けるためには高性能な断熱容器（クライオスタット）内に収納されなければならない。クライオスタットというと、一般的に断熱された円筒容器を連想するが、高温超電導ケーブルのような数 km にも及ぶ超電導線材の収納配管もクライオスタットと呼ばれている。一方、小型冷凍機のコールドヘッドを侵入熱から守るために覆い被せて真空断熱層を形成する器は、真空チャンバーと呼ばれることが多い。また、クライオスタットの多くは、ステンレス製であるが、非磁性や電気絶縁性が要求される場合には FRP（繊維強化プラスチック）製のクライオスタットも製作されている。特に、液化ガスを保持する二重壁ガラス製の断熱容器はデュワーと呼称されている。

クライオスタットには高度な断熱性能が要求されているが、通常のクライオスタットの場合、侵入熱の大部分は伝導熱侵入である。断熱容器は必ず外部へと繋がる内槽容器壁やクライオスタット内へ電流を導入するための端子があり、ここからの侵入熱を最小にすることが大切である。この熱伝導侵入熱はフーリエの法則（式 3-1）に従う。

$$Q = -\lambda(T) \frac{\Delta T}{L} A \quad (\text{式 3-1})$$

ここで Q：熱量、 λ ：熱伝導率、 ΔT ：温度差、L：長さ、A：断面積

λ は温度依存性があるので、常温から極低温への侵入熱量を計算するには熱伝導積分値を用いる。この値は、市販の物性値ソフトウェアにより簡単に得ることが出来る。注意すべき事は、純金属はその純度により熱伝導率に差異があるので、用いる材料の RRR（残留抵抗比）により推算する。また合金や複合材料については、当然その組成により差異があるので、実物を計測しなければならない。しかし、概略計算をするにはデータベースの値で充分と言える。

（式 3-1）から解るように、伝導熱侵入を防ぐには、狭く長い出入り口と薄い壁が良いことになる。広口のクライオスタットでは充満するガスの伝導侵入熱が内槽壁の侵入熱と同等以上になる。さらに、ガスの場合は対流熱伝達が生じるので、ガスの流れを抑制するバッフル等の充填物を詰め込むことが有効である。

一方、もう一つ断熱容器で考慮しなければならないことは輻射による侵入熱である。極低温用のクライオスタットでは通常、真空断熱技術が利用される。真空断熱層に反射材を施工したものは MLI（多層真空断熱）と呼ばれる。MLI が施工された平行板間の伝熱量は以下の簡易式で計算される。

$$Q = \frac{\varepsilon}{2(n+1)} \sigma s (Th^4 - Tc^4) A \quad (\text{式 3-2})$$

超電導 Web2.1

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

ここで Q : 熱量、 ε : 反射材の放射率、 n : 反射材積層数、 σ : ステファン-ボルツマン定数、 Th : 高温、 Tc : 低温、 A : 断面積

真空断熱技術が有効となるには断熱層の真空度を 10^{-2} Pa 以下に保たなければならない。

また、(式 3-2) は理想的な施工状態の式であり、現実的には反射材とスペーサーによる MLI を貫通する方向に熱伝導が発生する。さらに、輻射熱は、MLI の施工方法により大きく異なることが知られているので、施工方法と侵入熱の相関は各社のノウハウとなっている。そこで、輻射熱を見積もる場合には (式 3-2) に安全率を乗じたり、見掛け熱伝導率を導入して計算する事がある。

クライオスタットは通常円筒形の形状を持っているが、最近用途により複雑な形状のクライオスタットが製作されている。ここではその一例として、図 3-1 に超電導変圧器用の GFRP (ガラス強化プラスチック) 製クライオスタットを示す。レーストラック形状の断面を持ち、長径 1,200 mm、短径 700 mm、高さ 1,000 mm の容器であり、2 箇所の常温空間貫通部 (磁気回路用鉄心貫通部) が具備されている。GFRP は鋼と比較すると引き張り強度は同等であるが、ヤング率が約 1/10 であるため、応力による変形が著しい。従って真空断熱層の外壁と内壁が接触して断熱効果が失われる危険がある。また、広口からの熱伝導侵入を抑制するためには可能な限り内槽の肉厚を薄くする必要がある。そこで、真空断熱層内に突っ張りの支柱を設け、断熱効果の維持と内壁の強度不足を補う工夫がされている。形状が複雑であるため強度計算や変形量の見積には応力解析ソフトを利用している。従来の強度計算は定められた計算式に従って行っていたが、近年では応力解析ソフトが欠かせない道具となっている。市販のソフトは熱伝導も連成して解けるようになっている。

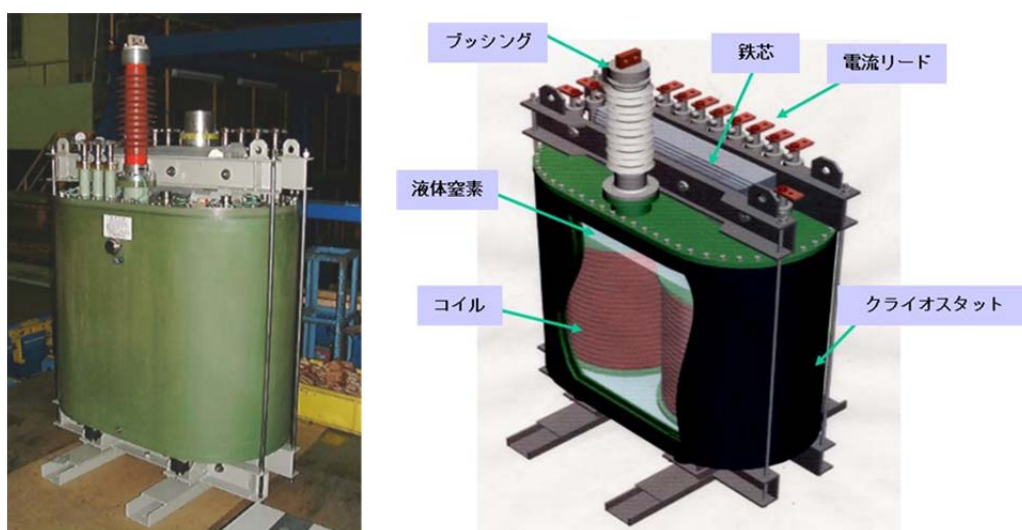


図 3-1 超電導変圧器用 GFRP 製クライオスタット

3.2 液体窒素ポンプ

高温超電導機器を液体窒素により循環冷却する場合には、液体窒素ポンプが必要となる。特に電力機器の冷却用となると 24 時間長期連続運転が要求され、メンテナンス間隔の長期化が最優先事項となる。現在、液体窒素のタンクローリーや貯槽タンクへの注入・吐き出し用に用いられている低温液化ガスポンプは、メカニカルシールの耐久性の理由により長時間の連続運転には不適である。また、LNG 用のポンプも市販されているが、流量が過大であることとメンテナンス時間が 10,000 時間以下という問題がある。現在、流量が 30~50L/min の液体窒素循環用として用いられているのは米国製の遠心ポンプであるが、軸受けの耐久時間は短く、3,000~5,000 時間程度である。図 3-2 に米国製の液体窒素循環ポンプのカタログ写真を示す。LNG ポンプや液体窒素循環ポンプはサブマ

超電導 Web2.1

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

ージ型やキャンドモータ型にしてノンシールポンプとなっているが、長期連続運転には軸受けの耐久性が不足している。そこで今後の液体窒素ポンプについては、軸受けを含めた長期信頼性向上が開発の鍵である。



図 3-2 米国製低温ポンプ (<http://www.barber-nichols.com>)

ところで、遠心式のポンプは軸受けが問題となるが、これを解消するために容積変化部分に金属ベローズを用いた往復動型の低温ポンプもある。往復動型は大流量ポンプには不向きであるが、数 10L/min の流量であれば十分な性能を持つ。金属ベローズの収縮伸張を利用しているため、摺動部分が無い分だけ信頼性は向上しているが、課題は吸排気弁の信頼性確保である。

3.3 トランスファーチューブ

機器と機器とを連結し、低温流体を流すための真空断熱管をトランスファーチューブと呼んでいる。超電導ケーブルは長距離の細長い真空断熱配管で構成されているが、この真空断熱配管は超電導ケーブルを収納する目的なので、こちらはクライオスタットと呼ばれている。

トランスファーチューブはその扱い易さの観点から、配管途中にフレキシブル部分を持つものと持たないものがある。図 3-3 には、フレキシブル部分を持つトランスファーチューブの一例を示す。フレキシブル部分は内管、外管ともにフレキシブルチューブで製作され、可撓性を持たせている。また、トランスファーチューブは低温流体を流す配管であるから、当然その両端は他の機器との接続部分となる。開放容器や広口容器に接続する場合は、その先端を容器に差し込み、フランジ等でシール接続する。一方、真空断熱配管同士や容器から突き出た低温流体出入り口との接続ではバイオネット (Bayonet) 接続される。バイオネット接続は真空断熱されたメス部に、やはり真空断熱されたオス部を挿入し、連結される。図 3-3 のトランスファーチューブは、両端がバイオネットのオス部となっており、その両端部は機器やクライオスタットに挿入接続出来るようになっている。バイオネット接続部は、常温からの伝導熱侵入部分となるので、長い方が侵入熱量は小さい。しかし、接続部の寸法制限や取り扱いの容易さから通常 200 mm～400 mm 程度である。バイオネット接続は、垂直方向だけではなく、水平方向の接続も可能である。嵌合されたオス部とメス部の隙間に気化した液化ガスが滞留し、常温から低温への温度勾配層を形成して冷熱の漏洩を防ぐことが出来る。

さて、トランスファーチューブの侵入熱であるが、管長が長い場合は真空断熱層からの侵入熱が支配的となる。真空断熱層には MLI が施工されており、その侵入熱は 1～2 W/m 程度と見込まれている。当然、侵入熱量は管径の大きさに依るが、低温側の温度依存性は比較的小さい。(式 3-2) に

超電導 Web2.1

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

において、 $(Th^4 - Tc^4)$ の値は高温側温度（常温）が 300 K であれば、低温側温度の影響が少ないからである。

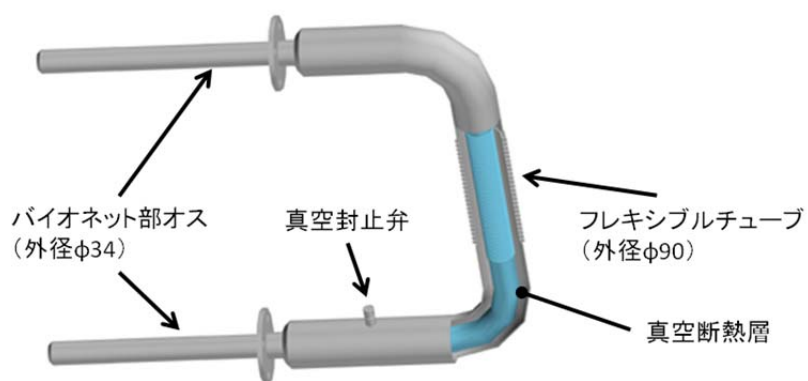


図 3-3 トランスファーチューブ

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 4 回)

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
常務理事 渡辺 勉

さて、今回は電力系統を形作る発電設備の解説をします。
最初に電力系統での発電設備の機能を解説し、電力系統に種々存在する設備の特徴を解説します。

6. 発電設備の機能

○基本機能の整理

発電設備には以下の基本機能があります。

- ① 需要が求める電気エネルギーの供給
- ② 需要とバランスする電力を発生
- ③ 電力を流通させるために必要な電圧を発生
- ④ 電力を流通させるために必要な無効電流を供給

電力系統に繋がる(「連系する」：前回解説した連系と同じ意味です) 発電設備は基本的に上記機能があります。なお、この機能は一体的に発揮されます。

ところで、機能を発揮するには、発電設備自身、電気エネルギーを消費し、所内電力と呼ばれます。

なお、ここでは、説明を簡単化するため送電ロスと所内電力は需要に含めます。また、電力系統内の電気エネルギー貯蔵機能も需要に含まれているとします。

○電気バランスの特徴 (①、②の説明)

第 3 回でも使用したシンプルな電力系統で解説します。(図-18)

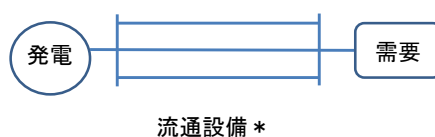


図 18 電気バランス検討のための電力系統

まず、1 日の需要 (エネルギー) が 24 kWh とします。1 kW の電力を 24 時間連続使用するとこの電力量 (電気エネルギー) になります。発電設備は 24 kWh のエネルギーを生み出せる能力があるとします。(図-19)

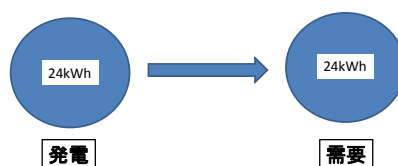


図 19 電気のバランス：1 日のエネルギーバランス (kWh)

超電導 Web2.1

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

電圧、無効電力等が適切に制御され、流通設備運用も問題ないとしても、この電力系統で需要にエネルギーを供給できるかはわかりません。

図-20 で、例えば、電源出力パターン-1 なら可、パターン-2 なら不可です。どちらのパターンも 24 kWh 発電していますが、発電設備と需要は綱引きしており（第 1 回解説）、バランスしないと電力系統は機能しないからです。常に需要電力＝発電電力となることが、電力系統が機能するための必須条件です。

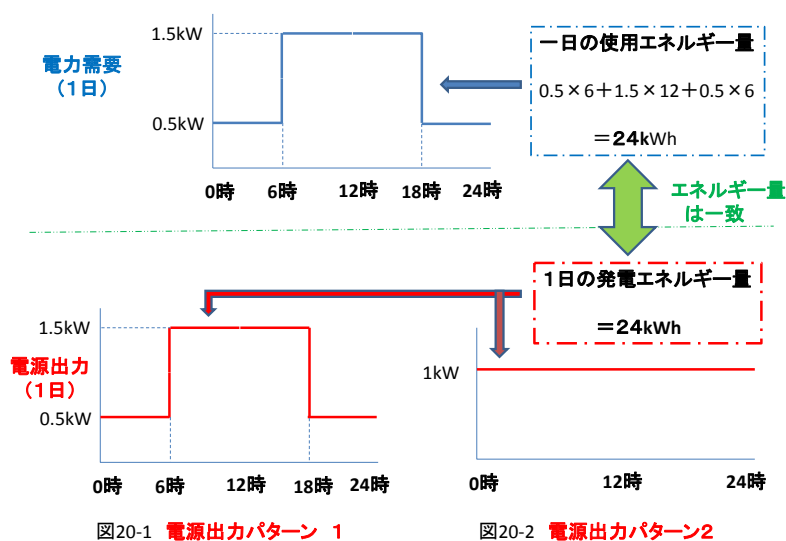


図 20 電気のバランス； 1 日の電力バランス (kW)

バランスしないと、交流系統では周波数が上昇・低下し発電設備の運転可能な限界を超え停止し電力系統が維持できません。直流系統では回転型の発電設備は同様に回転数の上昇・低下、非回転型発電設備（太陽光など）も電圧上昇・低下で運転できる範囲を超え電力系統が維持できません。（図-21：専門的には電圧安定性と同様の現象ですが、少し難しいので説明は省きます）

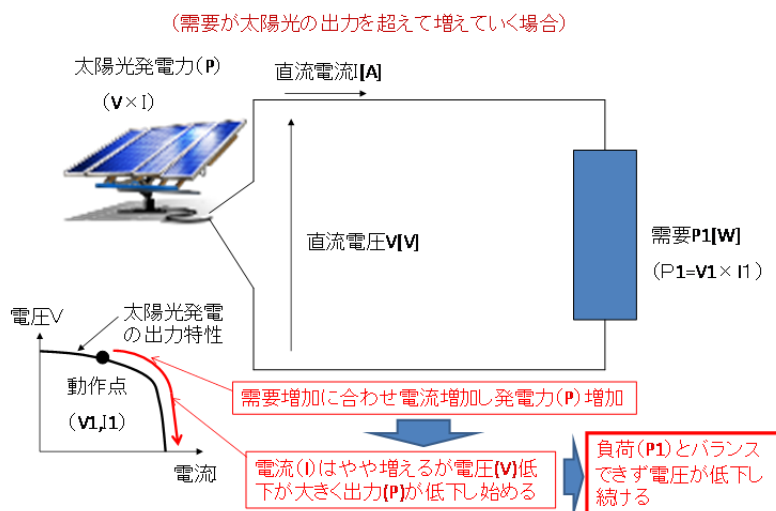


図-21 直流系統で電力バランスが維持できない場合の様相（例）

超電導 Web2.1

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

なお、出力パターン 2 は発電設備が必要に付き合わず悪意？を持っている様にも見えますが、通常、発電設備は最も高い効率の出力で一定運転するのが最経済的ですので、本来この出力パターンが望ましいのです。

繰り返しになりますが、電力系統では、①のエネルギーバランス維持 (kWh) とともに、電力 (kW) 維持も同等に必要、なのが重要なポイントです。

この様に電気のバランスには 2 つの要素がありますが、電力の関係者は、発電設備の電気エネルギーバランスへの寄与を「kWh 価値」、電力バランスへの寄与を「kW 価値」と分けて評価してきました。通常、価値は金額で評価されますが、簡便な評価として、kW 価値を固定費 (= 発電設備の運転状態に関わらず必要な費用)、kWh 価値を発電設備の可変費 (発電設備の出力に合わせ変化するコスト) が、主に電力自由化前 (発電設備の価値が頻繁に売買しない時代) に使用されていました。(安い方が良い → 価値が高くなります)。

なお、自由化後の世界で発電価値を二つに分ける是非、は論争されています。

(余談) 30 分同時同量？

図-20 の出力パターン 2 の横軸 (24 時間) を 30 分としても (図-22)、電力系統は運転できませんが、現行の電力自由化制度では、30 分間で発電電力量 (エネルギー) と需要量 (エネルギー) が一致すれば OK とする「30 分同時同量」が基本的な考え方となっています。「これで安定供給は大丈夫？」との指摘が自由化直後からされています。

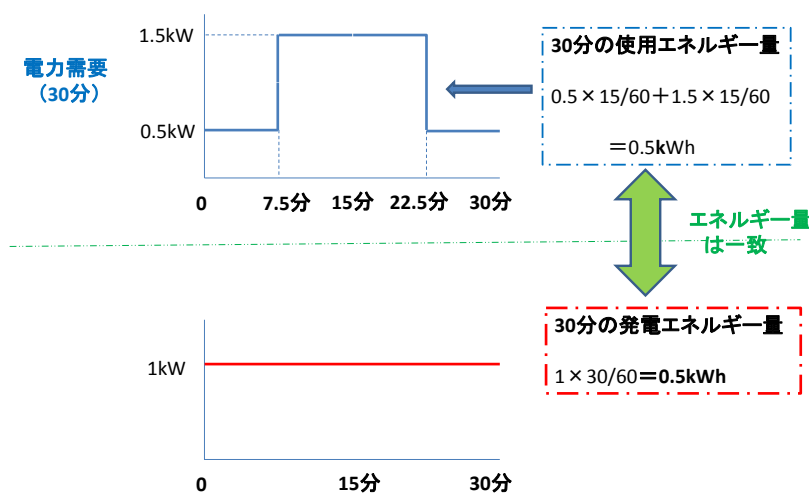


図20-2 電源出力パターン2 (30分)

図 22 電気のバランス ; 30 分間の電力バランス (kW)

「30 分同時同量」が実現するのは図-23 で、電力供給事業者が発電出力 (kW) を調整又は電力市場から調達し需要に合わせることを「促す」仕組みで、電力 (kW) バランス維持を求めています。発電と需要のずれ (図-23) は別の発電設備が調整する、のが前提です。30 分同時同量は電力系統維持に必要な瞬時瞬時の電力同量 (電力 (kW) バランス維持) とは別の意味があると考えた方が良いでしょう。(なお、この表現は日本独特で英語等へ翻訳できません。) 一方、諸外国では、負荷追随、すなわち、需要に対応した供給力を用意し電力のバランス維持に貢献させる仕組みがあるので、日本の考え方が「ガラパゴス」ではないと思います。ただ、電力 (kW) バランスを「促す」仕組みは種々考えられ、「30 分同時同量制度」に必要以上に拘ることは無いと思います。

超電導 Web2.1

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

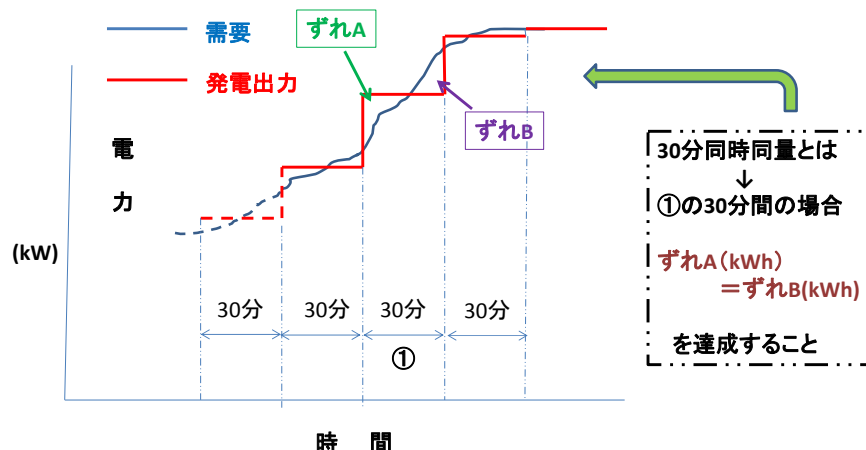


図 23 30 分同時同量の考え方 (→ 負荷追随)

・電気バランスの特性から得られる発電設備の特徴

簡単なモデルを用いながら、電気「二つバランス」がもたらす独特な様相と結果的に現れる発電設備の特徴を紹介します。4 発電機、4 需要家の電力系統ですが「一国」をイメージし、外部連系はないとします。(図-24) ここからは、数字が多くなりますが何とかイメージをつかんでいただければ一。

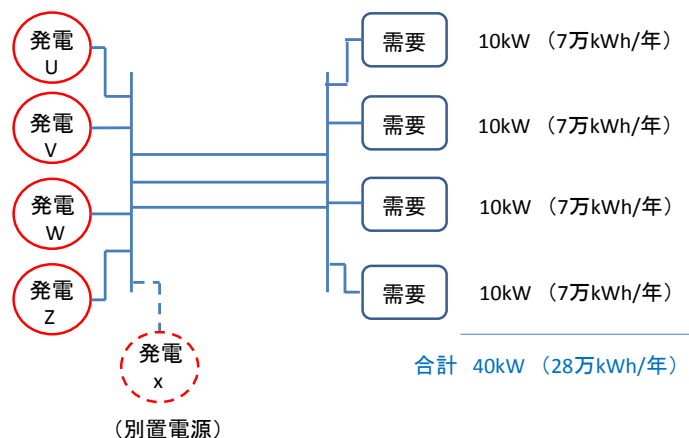


図 24 電気バランス検討用電力系統

【ケース 1：エネルギー源；均等にバランス、従来型電源構成】

「従来型電源で構成」とは、簡単に言えば再生可能エネルギーの様な「発電電力はお天気次第等」の発電設備がない場合です。

① エネルギー (kWh) バランス

さて各需要家は同じ最大電力 (10 kW)、使用電力量 (7 万 kWh) も同じとします。なお、最大電力と使用電力量から、負荷率が得られます。

$$70000 / 10 \times 8760 \text{ (24 時間} \times 365 \text{ 日)} \times 100 = 80 \% \text{ です。}$$

超電導 Web2.1

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

世界的に見ると、負荷率は概ね 60～80 % です。(日本は 70 % 強)

(なお、家庭では「電流」で契約されますが、電圧 100 ボルトの場合、 $\text{契約電流} \times 100[\text{ボルト}] / 1000 = \text{最大電力 (kW)}$ と考えて良いでしょう)

さて、発電側は、4 エネルギー源が平等に (25 % づつ) 供給が「政策」になっているとします。 総需要エネルギー総量 28 万 kWh (7 万 kWh $\times$ 4) を 4 エネルギー源で供給するので、各発電電力量は 7 万 kWh です。(図-25)

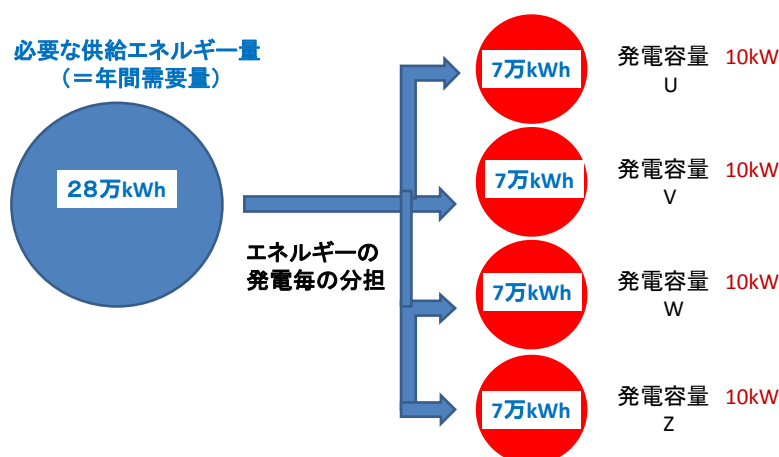


図 25 パターン 1 のエネルギーバランス

② 電力 (kW) バランス

○4 需要家の合計需要カーブ

ピーク期間：夏・冬 (半年→4380 時間とします) は 40 kW (昼も夜も一定)、残るオフピーク期間 (半年) は 24 kW (昼も夜も一定) とします。(図-26)

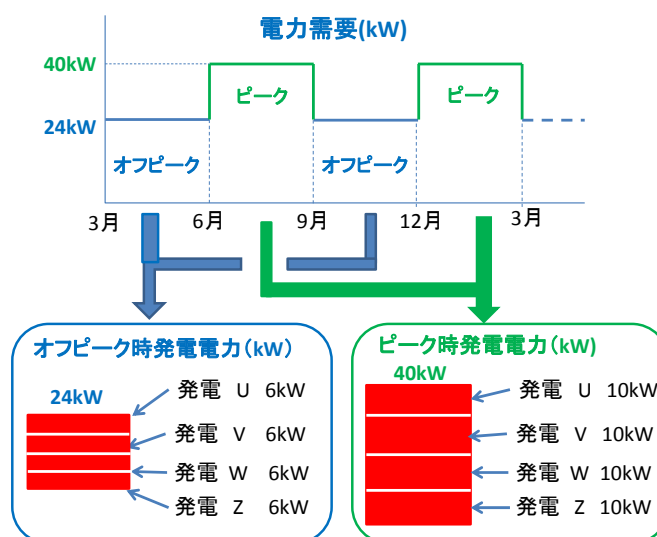


図 26 パターン 1 の電力バランス

超電導 Web2.1

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

$(40 \times 4380 + 24 \times 4380) / 40 \times 8760 \times 100 \rightarrow$ 負荷率 80 % となります。

電力バランス維持では、電力系統全体の時々刻々の電力需要（需要曲線＝ロードカーブ）が重要となります。（ここでは比較的シンプルな想定です）

○夏・冬の電力バランス（いわゆる需要ピーク時間の電力バランス）

発電設備各 10 kW とすると、フル出力（40 kW）で需要とバランスできます。しかしながら、通常、電力系統ではこれで良としません。発電機が故障などで停止すると直ちに電力不足となるので、安定供給上問題あり、となります。ここでは、1 箇所（10 kW とします）停止は対応する、とします。このためには 10 kW の発電設備が別に必要となります。ここでは「別置電源」と呼びます。

別置電源はケース 2、3 でも出てきますが、その特徴から、ピーク電源と呼ばれます。ピーク電源は、発電機故障時だけでなく、猛暑で需要が想定より高くなる、需要内の自家発が故障で止まる場合等、様々な場面で活用されます。電力系統ではこの様に「運転機会が一定せずたまに活躍する」発電設備が必要です。電力系統でのピーク電源はケース 1 のイメージより運転時間は長くなる傾向がありますが、運用の特徴は基本的に変わりません。

ここで、ピーク電源（別置電源）の望ましい特徴を列記します。

=望ましい特徴 A（発電コスト面）

「普段は不要（殆ど使われない）」なので、建設コストは極力安い方が良く、使われない間の（維持）コストは安い方が良いでしょう。一方、燃料費は安いに越したことはないですが、運転時間が少ないのである程度高くても良いとも考えられます。

=望ましい特徴 B（エネルギー源面）

運転がいつになるか分からないしどれだけ継続が必要か分からないため、エネルギー源（燃料等）が機動的に得られることが望ましいでしょう。一方、普段から貯蔵しておく場合、貯蔵コストが低い方が良いでしょう。

=望ましい特徴 C（発電設備能力面）

（事故が起きた直後に）直ちに運転開始され必要な発電電力に達する必要があります。対応する故障発電機出力が一定しないものとにかく運転できる場合もありますから、発電電力を柔軟に変えられることが望まれます。

現状の電力系統では、ガス火力、石油火力、貯水式水力（揚水も含まれます）が概ねこの特徴を有します。なお、水力でも、貯水できないと（流れ込み式）、活躍して欲しい時に水がない可能性があるのでピーク電源と呼ばれません。

（余談）元氣な老人火力はピーク電源として余生をすごす

火力設備も年を経ると効率等が最新鋭と比較し見劣りしてきます。一方、建設するために借りたお金は返し終わり（減価償却終了と言います）、建設コストに相当する費用は零ですし、燃料貯蔵設備も通常利用でき、運転能力もそれなりです。つまり、特徴 A～C が備り、ピーク電源としてご活躍いただく可能性が有ります。3.11 の後、「老朽火力を保有している」との電力会社への批判がありましたが、「老人（火力）にも活躍の場がある」ことも分かっていたいただければと、「老化を実感する者」としてつぶやいています。

以上の電源構成で、年間を通じ各発電所が均等に発電し電力供給されれば、エネルギーバランス、電力バランスが維持されるでしょう。（図-26）

超電導 Web2.1

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

ところで、本電力系統では、需要電力 40 (kW) に対し電源設備が 50 kW となりますが、この電源設備量／最大需要電力の比を設備率と呼ばれます。本ケースでは、 $50/40=1.25$ です。電力系統によりますが、一般的に、設備率は 1.2~1.3 程度が適正レベルとされ、電力系統の信頼性を評価する重要な指標となります。ちなみに、ピーク時間帯にケース 1 では 2 発電所停止となれば停電が発生するので、「10 kW」で絶対大丈夫とは言えませんから、更に設備率を高めるオプションも有り得ます。

【ケース 2：一部エネルギー源重視の構成】

ケース 1 に対し、一つのエネルギー源（電源 U）のエネルギー供給比率を 40 %、他は 20 % ずつ均等とし、需要は同一条件のケースを考えます。(図-27)

① エネルギー (kWh) バランス

各エネルギー源の発電量は、電源 U 11.2 kWh、他は 5.6 kWh (×3) です。(合計 28 万 kWh) (図-27)。

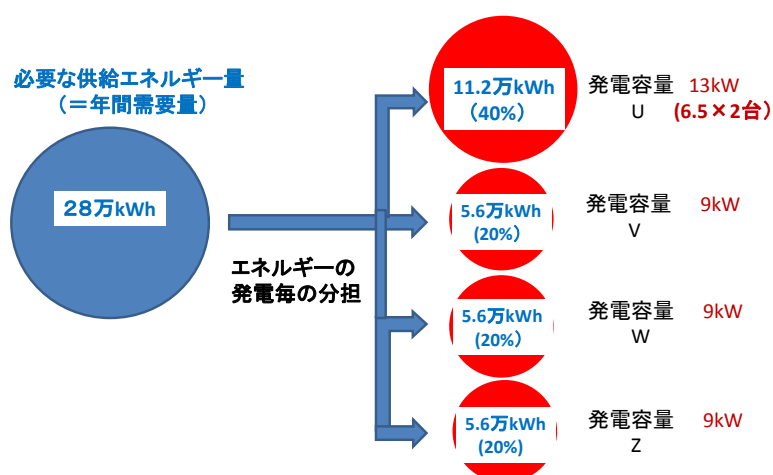


図 27 パターン 2 のエネルギーバランス

② 電力 (kW) バランス

電源 U が年間 11.2 万 kWh 発電するには、1 年中フル発電とすると、

必要発電力 (kW) = $112000/8760=12.8$ kW となります。

ここでは、電源 U の発電力を点検停止によるエネルギー供給力の低下を考慮してやや大きい 13 kW、これを 2 台で構成し運転するとします。(6.5×2 台)

ピーク需要 (40 kW) の電力に対応するには、 $40-13=27$ kW を V、W、Z 電源で供給する訳ですが、年間発電エネルギー量が同量なので、各電源設備量：9 kW (×3=合計 27 kW) とします。なお、実際には、各発電設備の建設コスト等を考慮し発電力が決まり同量とならない場合もあります。例えば、(発電効率等も考慮しつつ) 建設コストの安い電源容量を大きくする等も考えられます。これで、ピーク時の電力バランスがえられました。(図-28)

電源停止等に対応するピーク電源を、最大容量電源に見合う 9 kW とすると、合計発電容量は 49 kW($40+9$) となり、設備率 1.225 の電源構成となります。

超電導 Web2.1

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

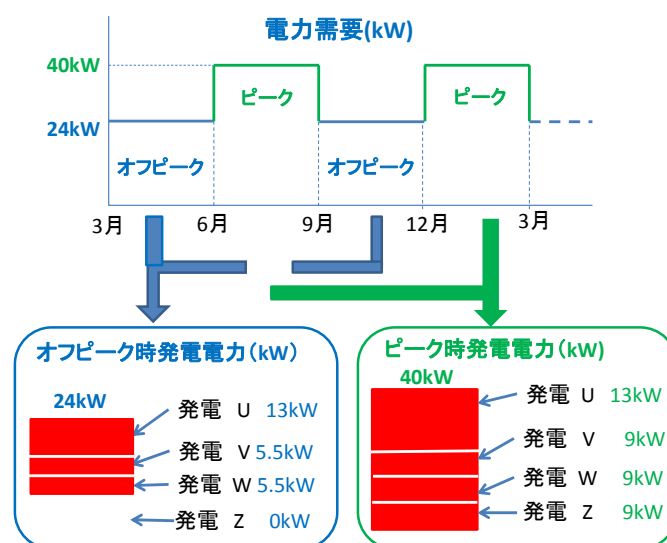


図 28 パターン 2 の電力バランス

(余談) 電力系統の大きさに合った電源容量を決めるのは難しい――

電源 U の発電力 13 kW を「2 台構成」とすると、この電力系統の最大発電容量は 13 kW でなく 9 kW になります。9 kW に対応し別置（ピーク）電源を決めるとする場合、13 kW 1 台構成で 13 kW の別置電源より設備率は下がります。通常、発電設備は容量が大きい程経済的（1 kW 当たりのコストが下がる）ですが、一方、発電機停止の影響が大きくなり対応コストが増える可能性があります。このため、両方の考え方の得失を良く検討する必要があります。

同様に 1 発電所当たりの電源設備量を決める際も考慮が必要ですが、3.11 後、電力会社の 1 発電所の発電容量が「集中立地で大きすぎる」との批判がありました。一方、発展途上国では電力系統の拡大や地域間連系（連系すると系統規模が実質的に拡大するので大容量設備に対応しやすくなる）の見通し等も踏まえ最大電源設備容量や発電所容量を決める必要があります。いずれにしても、種々の要素を考慮したかなり難しい判断となります。

さて、ケース 2 では、オフピーク期間の様相がケース 1 と異なってきます。電源 U は 13 kW（フル出力）で（ほぼ）1 年中運転し、年間エネルギー量 11.2 万 kWh となります。このため、オフピークの需要 24 kW のうち、13 kW は電源 U で供給し、残る 11 kW を 3 エネルギー源で供給することになります。供給力は 27 万 kW ですから、3 エネルギー源から同出力で供給すると、供給力に対する出力の比率は（稼働率）、 $11/27 \times 100 = 40\%$ となります。

火力電源の場合、稼働率が 50 % を下回ると発電効率が低下する等デメリットが大きいのので、例えば、順番に止め対応等を行います。1 台ずつ止めて 2 台運転すると、稼働率は $11/18$ ($9 \text{ kW} \times 2$ 台) $= 60\%$ となり 50 % を超えます。（図-28）

ここでは、電源の運転パターンが以下の二種類に分かれることに注目下さい。

- ・ 1 年を通じフル運転する電源 → ベース（ロード）電源と呼ばれます。
- ・ オフピーク時に出力調整する（又は停止）電源 → ミドル電源

ベース電源の望ましい特徴

=望ましい特徴 A（発電コスト面）

ベース電源はいつもフル運転ですから、運転コスト（特に燃料費）ができるだけ安い方がよい

超電導 Web2.1

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

でしょう。一方、常時運転されますから運転されない間の維持コストの大小を気にする必要は小さいでしょう。一方、建設コストは安い方が良いですが、燃料費が安い分で賄えるならある程度高くても良いと考えられます。

=望ましい特徴 B (エネルギー源面)

ベース電源の燃料は、年中一定量必要ですから、長期・安定的に入手できることが望ましく、また、貯蔵方法も工夫が必要な場合があります。

=望ましい特徴 C (発電設備能力面)

できるだけ、運転が継続されるのが望ましいので、設備保守/点検期間は短く、軽微な故障では停めることなく対応できることが望まれます。例えば、重要な部分を二つ持つ (2 重化) こととし、運転しながら直す、直さなくても運転できる等の設備信頼性の向上策が必要に応じ講じられます。

(余談) 原子力電源は経済性追求で設備投資を怠った！？

原子力はベース電源で望ましい特徴 C がありますから、信頼性にお金をかけることが必須です。3.11 への批判として、原子力部門への信頼性向上投資が不足していたとされますが、長期間停止に至る事態を避ける投資がされなかったことが仮に事実とすると、そもそもベース電源の考え方が理解されていなかったのでは？ (設備投資をためらう理由が解らないですから) と、電力関係者として忸怩たる思いに駆られます。

ミドル電源の望ましい特徴

ピーク電源とベース電源の両方の望ましい特徴を兼ねるのが理想ですが、どちらかと言えば、ベース電源に近い特徴が好まれます。需要次第、例えばバブル景気で想定以上の需要レベルが長期継続する、などがあると運転パターンがベース電源に近づくことがあるためです。

ちなみに、原子力発電比率が高いフランスでは、日本ではベース電源の役割を担っている原子力がミドル電源の役割も務めています。(ミドル原子力電源は発電出力を需要に合わせ出力調整をします)

【ケース 3: ケース 1 で 1 つのエネルギー源を再生可能エネルギー (太陽光+風力) に置き換えられた構成】

① エネルギーバランス

ケース 1 で、4 つのエネルギー源のひとつ (年 7 万 kWh) が再生可能エネルギー (太陽光+風力) とします。(図-29)

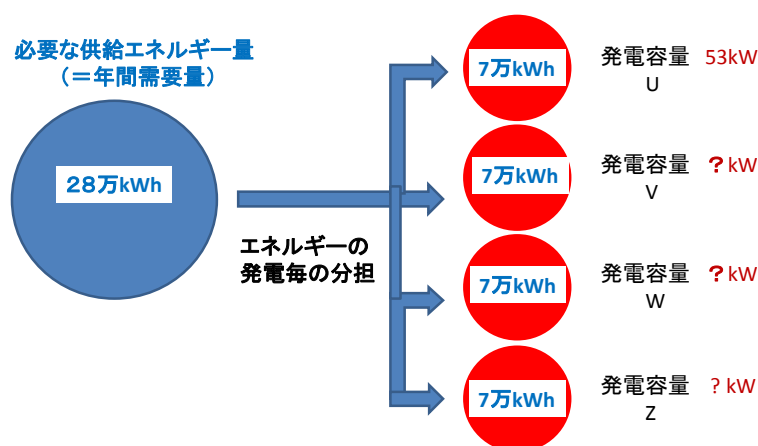


図 29 パターン 3 のエネルギーバランス

超電導 Web2.1

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

② 電力バランス

太陽光の設備利用率は 10 % 台前半、風力が 20 % 程度、両者を平均して設備利用率 15% と想定します。発電量と設備利用率から発電設備容量が決まります。

$$15\% \text{ (設備利用率)} = \frac{7 \text{ 万 kWh (年間発電量)} \times 100}{\text{発電設備容量 (kW)} \times 8760 \text{ 時間}} \text{ です。}$$

本式から再生可能エネルギー発電設備容量=53 kW が得られます。

なお、再生可能エネルギー電源の設備利用率は技術進歩等で大きく変わりませんから、発電量 (kWh) に対する電源容量が他電源と比較して大きくなる傾向は変わらないでしょう。例えば、太陽光の場合、夜は発電しませんから、最大利用率は 50 %、雨や曇りで出力は必ず低下しますから、日本では 20 % 程度が最大利用率と思われます。さて、53 kW がフル発電するとピーク需要 (40 kW) を超えますが、このような状況が「実際」に起こると電力バランスは維持できません。53 kW は分散していると想定すると、一斉にフル出力にならない可能性が高いと考えられます。例えば、太陽光パネルは向きが違えば、最大発電力の発生時間帯が異なってきます。

全部フル発電の合計と実際発生する最大発電力 (kW) の比を不等率と定義します。(不等率は、本来、需要家個々の最大需要合計と実際発生する最大需要の比ですが、同じ言葉を使用します。)

不等率 0.7* とします。(※数値の決め方が今後の検討課題です)

再生可能エネルギーの最大発電力は $53 \text{ kW} \times 0.7 = 37 \text{ kW}$ となります。

残る 3 kW を 3 エネルギー源の (どれかで) 賄うことになります。(図-30 左)

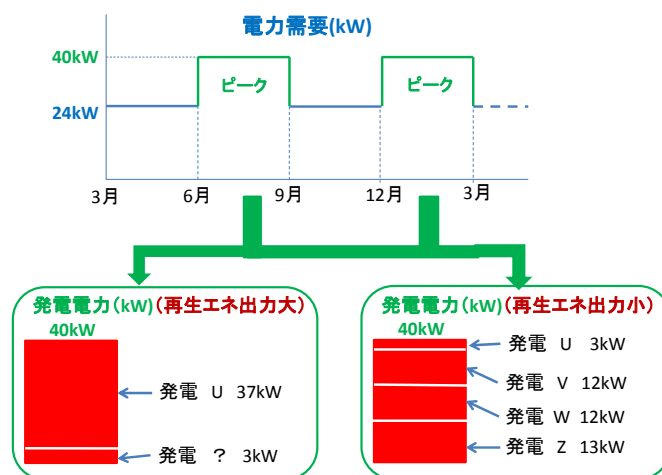


図 30 パターン 3 の電力バランス (ピーク時)

一方、再生可能エネルギー源の発電力が小さい状況の検討も必要です。夜間、太陽光発電出力は零、需要は昼・夜同じとの想定ですから、夜のピーク電力バランスが 3 エネルギー源の必要容量を決めるためには重要です。ここで、53 kW の内訳を、とりあえず太陽光: 28 kW、風力 25 kW と想定し、太陽光は夜間零、風力 25 kW の想定最低出力が必要となります。全部フル出力に対する最低発電力の比を最低不等率と定義し、最低不等率 0.12 (本値も検討課題) とし $25 \times 0.12 = 3 \text{ kW}$ を想定最低出力とします。この時 (夜間) 残る $40 \text{ kW} - 3 \text{ kW} = 37 \text{ kW}$ を 3 エネルギー電源で供給

超電導 Web2.1

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

する必要があります。同容量で供給する場合、 $37/3 \approx 12$ kW の電源容量がそれぞれ必要です。
(図-30 右)

12 kW の電源は、再生可能エネルギー源の出力変動が比較的早く発生すると想定すると、機動的な対応のため小容量電源とし小回りがきく様に対応するのが良いかも知れません。例えば 4 kW × 3 台、この様にすれば、(火力) 電源 1 台の最低出力 ($4 \times 0.5 = 2$ kW) を満たしながら機動的に対応できるでしょう。(図-31) なお、これらの電源は、ピーク電源の特徴を有するのが良いと思われます。以上の電源設備に 1 台停止 (4 kW) 対応のピーク電源を別置きすると、設備率は以下となります。

$$(53 + 36 + 4) / 40 = 2.33$$

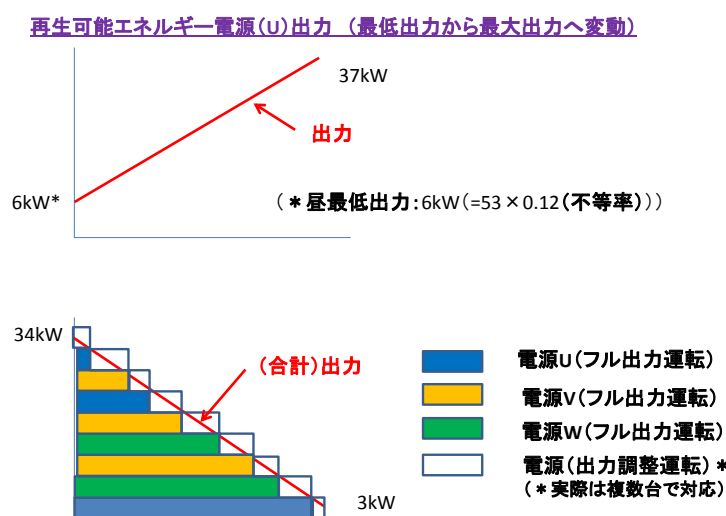


図 31 再生エネ出力変化と他電源の対応イメージ (昼間ピーク時)

オフピーク時 (今回ケースでは春・秋)、特に昼間の電力バランスは、今回の想定では、再生可能エネルギー発電力が、需要を相当上回り、このままでは電力系統が運転できません。(図-32)

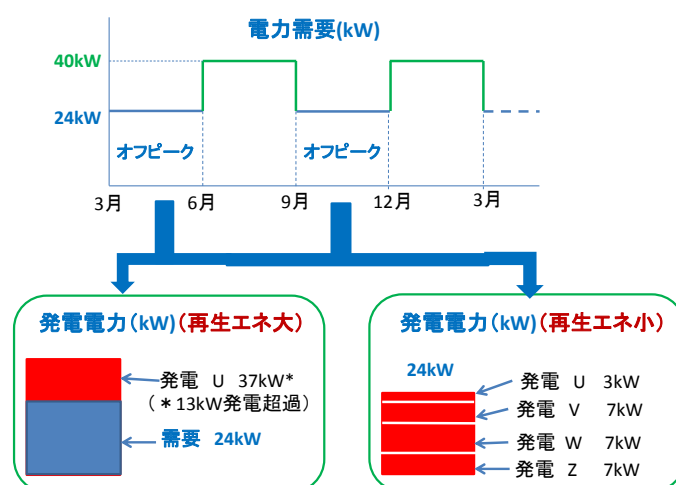


図 32 パターン 3 の電力バランス (昼間オフピーク時)

超電導 Web2.1

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

対応方法は今後の検討課題ですが、再生可能エネルギーの出力を絞ること（燃料費零ですから実害は小）、需要を増やすこと（再生可能エネルギーの出力が小さい時間帯の需要を移す → 負荷移行と言います）、超過分エネルギーを貯めるなど、対応策はありますから、経済性等も考慮しながら方向性を決めてゆく必要があると思われます。なお、ここでは他国（地域）と連系されていない前提で解説していますが、連系することが効果的な場合もあります。（今後、国際連系の項で説明します）

（余談） 自然に従って暮らすー日本人的生活観の復活？

「再生可能エネルギーの出力を絞る」のは「もったいない」、再生可能エネルギーに合わせ活動する（電気を使う）のは面倒だ、と思われるかも知れませんが、そもそも日本人は気候に合わせて上手に暮らすことをモットーとしてきましたし、また、必要以上のものは取らないし取ってしまったら返す気風がある様に思われます。再生可能エネルギーと上手に付き合うのは、そんな日本に戻るきっかけになるかも知れません。

さて、ケース 3 では設備率はケース 1、ケース 2 と全く異なります。すなわち、電力系統内の電源設備量は飛躍的に増加し、流通設備などにも様々な影響が出てきます。

ケース 3 から、再生可能エネルギー量の割合がある程度大きくなると、従来（ケース 1、ケース 2）とはかなり異なる電力系統様相（パラダイムシフト）が出現すると想定されます。私なりに（現実にならぬか想定しづらい面はありますが）今回のケース 3 を総括すると以下のとおりです。

- ① 設備率を見ただけでは電力（kW）バランスの評価ができなくなる
- ② 夜間の電力バランスに必要な供給力で必要発電設備量が決まる
- ③ 昼間の電力バランスでは発電電力過剰が対応のポイントとなる
- ④ ②、③の状況から多くの再生電源以外の電源はピーク型機能が必要となる。

なお、②、③から「深夜電力は安い」との常識が覆る可能性も高く、再生可能エネルギーの発電に合わせて需要を移行させる仕組みが合理的と思われる。

ところで、日本は（実質的に）蓄電機能を持つ揚水発電設備が相当量あるので（海外は少ないです）、その運用法等を見直してゆく必要もあると思われます。

（余談） 現在の再生可能エネルギー比率の高い国の対応

ヨーロッパでは、再生可能エネルギーの割合がケース 3 に近い、あるいは超えている国も既にあります。でもこの様なパラダイムシフトの声は聞こえてきません。個人的にも興味が有りましたので、ヨーロッパの系統運用者と意見交換しましたが、どうやら、現段階では、各国との系統連系の中で「適当」に処理している様です。例えばドイツの風力電力は、「勝手に」ベルギーやオランダの電力系統を通過し全体の把握が十分されていないのですが、「一時的な現象」として、工夫しながら（対応する系統運用者はぶつぶつ言いますが）対応している様です。確かに、欧州全体で考えれば、再生可能エネルギー量比率（発電量を制御できる水力は除きます）はまだそれほど大きくありませんから対応可能と思われます。

なお、最近、ドイツではミドル電源に相当する火力が次々廃止されていますが、パラダイムシフトが現実化しつつある様にも思われます。

（余談） 電力事業自由化が進むと「解説された状況」は変わるのでは！！？

本解説では、特定の間人（ここでは私）が発電設備構成を決めるような説明をしましたが、電力自由化が進めば競争原理で物事が決り、状況が違ってくるのではと思われるかも知れません。こ

超電導 Web2.1

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

の点、私なりに世界の電力自由化を俯瞰してきましたが、ある国（地域や州の場合もあり）のエネルギー政策に沿わない電力自由化はあり得ず、法制度や電力系統利用ルールがいわば「神の手」となり必要なコントロールがされると感じています。結局、自由化しても、「神の手」が発電設備のエネルギー源構成や設備量を「導いて」ゆくと思います。

次回も、引き続き発電設備の解説をしてゆきます。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

「研究室紹介」

東京大学大学院
工学系研究科 応用化学専攻岸尾研究室
准教授 下山淳一

本研究室は現在、4 名の教員（岸尾光二教授、筆者、荻野拓助教、山本明保助教）と渡邊彩子秘書、4 名の博士課程学生、10 名の修士課程、8 名の学部 4 年生によって構成されています。この 20 年以上にわたって高温超伝導体を中心に、機能性材料の研究・開発を行っており、研究課題が、機能性新物質探索、基礎物性制御、材料化技術開拓、材料特性改善と基礎から実用材料まで広くわたっていること、これら全てに“化学”の知識や技術を生かしていることが特徴です。また、常に「オリジナル」で「インパクト」と「汎用性」が大きな研究成果を目指しています。

研究では多様な物質群、薄膜、バルク、線材など様々な形態の材料を扱い、多岐にわたる物性評価を行っています。学生はそれぞれ独立した研究テーマを持ち、物質合成から物性評価まで責任を持って研究を行います。特に“化学”を武器に高純度試料の作製や精密化学組成の制御に力を入れており、学生 1 人当たり 2 台の電気炉があるなど常に合成設備の充実に努めています。

銅酸化物超伝導体については、化学組成を精密に制御した La214 系、Bi 系、RE123 系の単結晶を用いた異方性、ピンニング力の研究実績を背景に、最近では RE123 系の熔融凝固バルクや薄膜、Bi2223 線材の高 J_c 化の研究を企業と共同で進めています。このほか本研究室で発見した Re ドープ Hg 系超伝導体の材料化の可能性も未だ追求しています。MgB₂ については多結晶体の微細組織の制御手法や臨界電流特性の抑制因子に関する研究成果を生かすべく、近年は高特性線材開発を企業と共同で進めているほか、バルク磁石の開発にも力を入れています。さらに、鉄系超伝導体および類縁化合物に関してペロブスカイト型酸化物層を含む物質を中心に設計・探索を進めており、この 5 年間で 100 種以上の新物質を発見し、うち 25 種が超伝導を示しました (T_c は最高 47 K)。これら成果の詳細やこのほかの研究成果につきましては研究室ホームページ (<http://semrl.t.u-tokyo.ac.jp/>) にリストアップしてある発表論文や解説記事などをご覧ください。

また、隔月刊の「超電導コミュニケーションズ (SUPERCOR)」(1992 年創刊) によって、超伝導関連情報を今なお 1000 名以上の方々に発送し、ホームページ

(<http://semrl.t.u-tokyo.ac.jp/supercor/index.html>) でも閲覧いただけるようにしています。この出版事業は完全にボランティアで行っておりますため原稿料がタダですが、皆様からのご寄稿を随時受け付けております。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

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

読者の広場

Q&A

Q : 「リニアモーター化が 2027 年に営業開始で、いよいよ走り出すと聞きましたが、その後、どうなっていますでしょうか。長年言われている超電導の実用化がいよいよ本番で気になるところです。」

A : 【実験線ほか順調に推移。営業用と同じ 12 両編成で早々に試験開始。超電導磁石の製造費 360 億円を見込む。】

東海旅客鉄道株式会社は、平成 26 年 3 月 19 日に今年度の重点活動内容を発表しました¹⁾。それによれば、リニア計画も大きく進展しそうです。

2014 年度末までに新型車両 L0 系全 14 両の投入を完了し、現在 7 両編成で実施している山梨リニア実験線での走行試験を最長 12 両編成に拡大します。営業運転仕様の車両・設備での走行試験を続け、車両や地上設備の保守体系の確立をめざし、2014 年度中には、超電導リニアの体験乗車を実施する考えです。

超電導リニア体験乗車についてはさらに詳細が発表されています。2014 年 11 月、12 月および 2015 年 3 月に一般の方を対象にした「超電導リニア体験乗車」を山梨リニア実験線において実施します。JR 東海によれば、“できるだけ早く多くの皆様に時速 500 km の世界を体験していただくために、タイトな試験スケジュールの合間を縫って、体験乗車を実施したい。”¹⁾とのこと。

また、すでに昨年、体験乗車をしたマスコミ関係者によれば^{2),3)}、「快適性は断然高い。従来の実験車両の車体断面は円形だったが、L0 系では車内の居住性を上げるため、N700 系新幹線のような角型に変えた。『浮上して走る』リニアの性質上、車体の軽量化は不可欠。軽量化と居住性を両立させるため、車内のいたるところに工夫の跡が見える。たとえば座席は新幹線というよりもむしろ飛行機のシートのような薄型で軽量化されている。それでいて座り心地は新幹線と大差ないレベルに達している」。この時の試験走行した L0 系は 5 両編成だが、先述のように現在、営業上の編成と同じ 12 両編成まで増えていく予定である。

車両に搭載される電磁石等の製造費は 360 億円が見込まれているとのこと。超電導にとっては大きな市場である。

参考：

1. <http://linear.jr-central.co.jp/newsrelease/news/140319.html>
2. <http://news.livedoor.com/article/detail/8048189/>
3. <http://news.mynavi.jp/news/2014/04/03/037/>

回答者：(公財) 国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 特別研究員 山田 穰

[超電導 Web2.1 トップページ](#)