

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) :

トピックス :

○第 4 回理事会の開催報告

特集 : 超電導線材技術の進展

- IBAD/PLD 法による Y 系線材の技術動向
- Y 系線材の技術動向 (産業界の動向-昭和電線ケーブルシステム株)
- Y 系線材の技術動向 (産業界の動向-古河電気工業株)
- DI-BSCCO 線材の現状と 2014 年の展望
- MgB₂ 線材のプロセス技術の進展
- HTS 線材の核融合用導体応用の動向

- 超電導関連 2014 年 4 月-5 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン (2/19-3/20)
- 世界の動き
- 再生可能エネルギーと超電導
- 学会・シンポジウム報告-「応用物理学会」報告
- 隔月連載記事「超電導センサ」(その 2-高温超電導 SQUID 磁気センサとその応用)
- 連載記事「やさしい電力系統のはなし」(第 3 回)
- 研究室紹介 (中部大学-超伝導・持続可能エネルギーセンター)

[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>



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

トピックス：第 4 回理事会の開催

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

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) 理事会が、平成 26 年 3 月 24 日に KSP ホテル会議室で開催され、平成 26 年度事業計画、平成 26 年度収支予算が満場一致で議決されました。また顧問として新たに北澤宏一東京都市大学学長が就任すること、臨時評議会の招集などが議決あるいは承認されました。

[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：超電導線材技術の進展

「IBAD/PLD 法による Y 系線材の技術動向」

株式会社 フジクラ
新規事業推進センター 超電導事業推進室
研究開発部長 飯島康裕

Y 系線材は平滑な金属基板上に高度に結晶配向させた薄膜を成長させたテープ構造という点で共通しており、低コストで歩留よく製造する量産体制の確立のために信頼性高い製法が求められている。フジクラにおいては、一貫して物理的气相法である IBAD 法中間層と PLD 法超電導層の組み合わせによる Y 系線材プロセス開発を続けてきた。PLD 法は気相合成法としては特殊な製法であるが、従来懸念されたエキシマレーザーのランニングコストが近年低下している他、制御パラメーターが少なく、材料収率が高い (50 %程度)、紛体焼結のみで原料を構成できる等、多元系酸化物膜を作製する上で生産性やコスト面で総合的に有利な点も多い。更に蒸着領域全体を均熱炉方式で輻射加熱する (ホットウォール方式) 等の試みで、より熱平衡に近い条件で膜成長面の温度コントロール性改善が図られた結果、ロット内、ロット間の全長均一性が高くなる傾向が見られ、現在 10 mm 幅線材において 300-500 m 単長程度の成膜がルーチンで行われている。一方、市販にあたってはこれを 5 mm 以下の線幅に裁断し、安定化銅被覆と絶縁を施して線材を構成するが、線幅が小さくなるほど局所的欠陥による影響が露になり、ユーザー要求を満たす均一性を長尺で維持するのが難しくなる傾向にある。

IBAD 法 Y 系線材は高強度の Ni 基合金を基板として用いることから、当初より機械特性の高さが期待された。液体窒素中で 1 万回の繰返し引張試験を実施した結果、0.46 %歪、765 MPa の応力において劣化無く超電導特性が維持されていることが確認されており (図 1)、脆性材薄膜であっても高強度基板に支えられて大きなフープ力のかかる強磁界応用等を想定出来ることがわかる。一方、樹脂含浸コイルにおいて問題となる垂直引き剥がし方向の剥離力については、脆い超電導層での応力分担が避けられず、線材構造と巻線双方の工夫を要する。フジクラにおいては 7.2 km の線材を用いて、含浸剤の影響を低減する工夫をした 24 層の含浸パンケーキコイルを作製し、25 K 駆動で 5 T の磁界を発生する 20 cm ボア径の伝導冷却コイルを開発した。同コイルは 2012 年秋に製造後、社内の磁場特性評価設備で実用に供され、これまでの 1 年半の稼働に於いて劣化等の問題は生じていない。

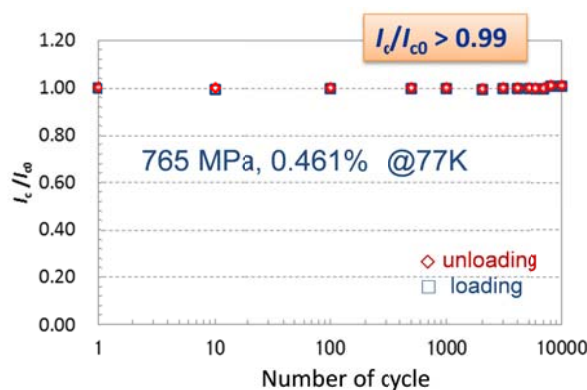


図 1 液体窒素中の 1 万回の繰返し引張試験結果

超電導 Web2.1

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

また、NEDO「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」プロジェクトに於いて、4 mm 幅の IBAD/PLD 法線材を 4 層計 60 本撚り合せた構造にて 15 m 長のケーブルを試作した結果、77 K, 5000 A の通電で 1.4 W/m の低ロスを達成した（図 2）。これは同一容量のケーブルに対してより少ない線材量で熱負荷を下げられることを意味し、均一性の高い Y 系線材を用いることで線材境界部の垂直磁界成分の影響が低減し、ケーブル製造のコストダウンに繋がるという予測が改めて検証されている。

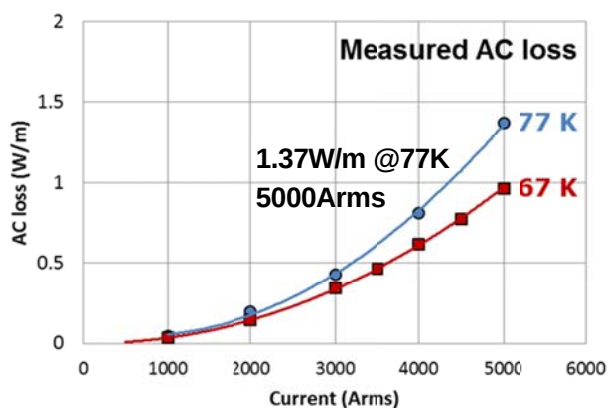


図 2 IBAD/PLD 法線材を用いて作製した 15 m 長モデルケーブルの通電 ac ロス

IBAD/PLD 法による Y 系線材については、今後も均一性の高い高特性を重視した形で量産製造技術開発及び信頼性検証を進め、結果コストダウンに繋がっていくことを期待している。現在 10 mm 幅で 300 km/年の製造を想定する大型のホットウォール方式製造装置のライン化を進めており、品質、歩留の更なる向上と、製造キャパ拡大を検討している。

[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：超電導線材技術の進展

「Y 系線材の技術動向（産業界の動向）」

昭和電線ケーブルシステム株式会社
技術開発センター 超電導線材開発グループ
グループ長 小泉 勉

当社は、TFA-MOD（トリフルオロ酢酸塩・有機酸塩塗布熱分解）法を用いたイットリウム系超電導線材の磁場中特性の向上を目的とした人工ピンニングセンターを導入させた線材について開発を行っている。昨年度成功裏に終了した「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト (M-PACC)」において開発を行った、非超電導体である BaZrO_3 (BZO) ナノ粒子を超電導層内に分散させ、ピンニングセンターとして機能させた線材を「nPAD-YBCO® (nano-Particle Artificial-pinning-center Distributed YBCO)」と称し、量産化に向け体制を整えているところである。

図 1 に nPAD-YBCO® の構造及び外観を示す。本線材は、厚さ 0.1 mm の高強度金属である Hastelloy™ テープ上に、高配向した中間層を成膜し、超電導層、安定化層を成膜した構造をとっている。

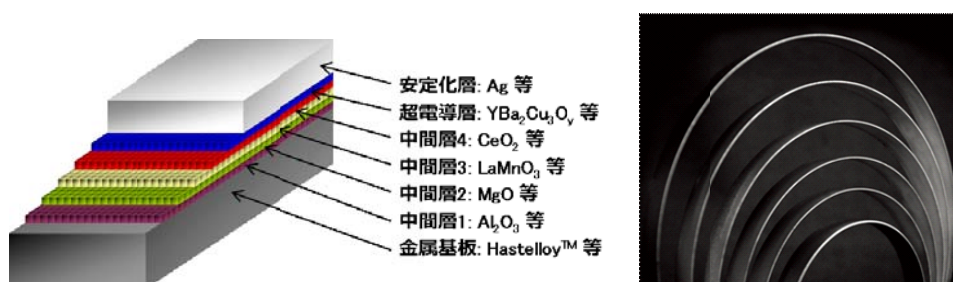


図 1 nPAD-YBCO® の構造及び外観

TFA-MOD 法は、イットリウム系超電導体を構成する有機金属塩溶液を高配向した中間層が成膜された金属基板上に塗布し、仮焼、本焼を施し作製される。当社は、本焼工程に一括焼成可能な電熱バッチ式一括処理プロセスを用いており、おおよそ2日間で本焼工程が完了することが特徴である。また、nPAD-YBCO® も同様の製法をとっており、YBCO 線材と同様な製造工程を用いることが可能であることから、同様なコストで製造することが可能である。現在、当社においては、使用用途に合わせた線材の提供に努めるべく、YBCO 線材及び nPAD-YBCO® の2種類の線材に関し量産化を目指している。

これまで、Bi系超電導バルクを用いた電流リードの販売を行っており、千本以上の販売実績を持っているが、超電導体がバルク体であったが故に、曲げや外的衝撃に弱いことに加え、容易な容量アップが困難であった。特に磁場環境下での使用においては、Bi系超電導体を用いていることから、設置環境に制限が生じるなど、多くの課題があった。この度、nPAD-YBCO® の開発に成功したことにより、磁場環境下においても使用可能な nPAD-YBCO® 超電導電流リードの開発にも成功することが出来た。図2に nPAD-YBCO® 超電導電流リード標準品の外観を、表1に主な仕様を示す。

これまで、様々な超電導線材を用いて超電導電流リードの開発を行っていたが、磁場中特性が壁となり、大量の線材を必要としたため、低熱侵入量の実現が非常に困難であった。nPAD-YBCO®

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

超電導電流リードは、nPAD-YBCO®を超電導部に使用することで、使用される線材量の少量化が可能となり、表1のような低熱侵入量設計が可能となった。今後、nPAD-YBCO®超電導電流リードの普及・販売についても努めていく。



図 2 nPAD-YBCO®超電導電流リード外観

表 1 nPAD-YBCO®電流リードの主な仕様

項目	YPL①	YPL②	YPL③
定格電流 (A) [@77K, Self field]	250	500	1,500
熱侵入量 (W) [77K-4.2K]	0.02	0.05	0.11
サイズ(mm)	220 ^L ×9 ^W ×16 ^t	220 ^L ×16 ^W ×16 ^t	220 ^L ×23 ^W ×16 ^t

[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：超電導線材技術の進展

「Y 系線材の技術動向（産業界の動向）」

古河電気工業株式会社
研究開発本部 高温超電導事業化チーム
主任研究員 畠山英之

古河電工は、鉄道総合技術研究所殿と共に次世代フライホイール向け高温超電導マグネットの開発に成功したと 2014 年 3 月 10 日に新聞発表致しました。この開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の「安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発」プロジェクトの中で実施したものであり、110 A の通電特性と 2 トンを超える浮上力を発生することを確認しました。

(http://www.furukawa.co.jp/what/2014/kenkai_140310.htm)

このコイルでは、米国 SuperPower 社（SP 社）が製造した第 2 世代高温超電導線材（REBCO 線材）を用いています。SP 社の REBCO 線材は、中間層に IBAD-MgO を導入することで成膜速度の飛躍的な向上に成功し、超電導層では成膜速度、人工ピン導入、メンテナンスコストなどの観点から MOCVD 法を選択し、世界で始めて高性能（高 I_c ）の線材を量産販売しています。SP 社の現在の動向としては Waukesha Electric Systems 殿と共同で 2G 線材を用いた超電導限流トランスの開発と実証を進めており、また、2011 年からはヒューストン大学他と共同で、DOE の ARPA-E REACT プログラムにより風力発電機用を目的とした磁場中特性の高性能化を進めています。さらに古河電工の有する 17 T 高磁場超電導磁石等を利用し、共同で I_c -B 評価を行い、高磁場 MRI、インサートコイル向け線材の開発も進めております。SP 社は今後も人工ピン導入技術により高磁場、高強度のマグネットニーズにあった線材の開発を行います。

SP 社/古河電工は 2G 線材のリーディングカンパニーとして、顧客と連携を密に保ちつつ、2G 線材応用技術の実現を通して社会に貢献することをめざし、性能向上と、低コスト化を日夜努力しております。

[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

特集：超電導線材技術の進展

「DI-BSCCO 線材の現状と 2014 年の展望」

住友電気工業株式会社
超電導製品開発部
部長 林 和彦

住友電気工業株式会社が製造している DI-BSCCO 線材 (Bi2223 線材) は、ケーブル応用やコイル応用 (含む電流リード) の幅広い分野の実証試験や研究で使用されている。

一般に、77 K、自己磁場下での臨界電流値 (I_c) が線材特性の代表値とされるが、実際は、ケーブル応用やコイル応用に対して、運転条件 (温度や磁場) が異なるため、それぞれの運転条件に合わせた I_c の向上が必要となる。特に冷凍機で冷却可能な 30 K 以下のコイル応用に対しては、Bi2223 超電導体のキャリアドープ状態の制御により、磁場中の I_c 特性が向上する手法を既に製造工程に取り入れている。またコイル応用では、コイルのコンパクト化のため、超電導線材の臨界電流密度 (J_e) の向上も求められ、伸線加工、圧延加工技術を改善し、 I_c を低下させることなく、線材の薄肉化の開発も行っている。現在、従来の Type H よりも 0.03 mm 薄い、厚さ 0.20 mm の DI-BSCCO 線材の開発に目処が立ち、この薄肉化線材の早期の商品化を目指しているところである。

線材の機械強度も実用化には必要である。DI-BSCCO 線材の機械強度を高めるために、素線の両面に金属箔を、半田接合によりサンドイッチさせる方法が取られている。これにより I_c が低下することなく、線材の強度向上が可能となる。現在、金属箔に銅合金及びステンレスを適用した Type HT-CA と Type HT-SS を商品化している。Type HT-CA はケーブル応用で使用されるケースが多い。またコイル応用では、超電導マグネットの強磁場化及び大型化により、フープ応力に耐える高強度な超電導線材が求められているが、Type HT-SS では強度が不足し、高磁場コイルに適用できないケースがあった。しかし、最近、ステンレスよりも高強度な金属箔が提案され、この金属箔を半田接合された試作品 (Type HT-XX) では、77 K の引張強度が 500 MPa 以上に到達し、Type HT-SS や Type HT-CA と比較して、約 2 倍の強度が得られている。この線材はコイル応用へ幅広く採用されることが期待できるため早期の商品化を目指している。

表 1 に、現状の製品及び 2014 年の予定新製品のラインアップを示す。Type G は被覆材に金-銀合金を使用することにより低熱伝導率を実現した線材であり、電流リード用として、加速器や核融合応用を始め世界中のマグネットメーカに納入実績がある。Type ACT-CA は交流応用に開発されたスリム線材であり、Bi2223 超電導フィラメントをツイストし、交流損失を低減したタイプである。

2014 年の展望としては、従来の Type H より 0.03 mm 薄肉化された DI-BSCCO 線材を 4 月以降より販売開始し、6 月以降は Type H から完全に移行する予定である。素線の Type H の変更により、同時に Type HT-SS 及び Type HT-CA も薄肉化される。さらに、77 K の機械強度を 500MPa に向上させた Type HT-XX については、試作品を供給し、6 月までに製品ラインアップに加える予定である。

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

表 1：現状の製品及び 2014 年の予定新製品のラインアップ

Wire Type	Type H	Type H released in 2014	Type HT -SS	Type HT-CA	HT-XX Released in 2014	Type G	Type ACT-CA
平均幅 (mm)	4.3±0.3	4.3±0.3	4.5±0.3	4.5±0.3	4.5±0.3	4.3±0.3	2.8±0.3
平均厚さ (mm)	0.23±0.03	0.20±0.03	0.30±0.04	0.36±0.04	0.28±0.04	0.23±0.03	0.31±0.04
補強材	—	—	ステンレス	銅合金	XX	—	銅合金
Ic@77K, sf (A)	180, 190, 200						60, 70
Je@Ic Max @77K, sf (A/mm ²)	200	230	145	120	155	200	80
許容引張張力@R.T. (N)	80	80	230	280	500	50	150
許容引張強度@77K (MPa)	130	130	270	250	500	90	270
許容両曲げ直径@R.T. (mm)	70	70	60	60	40	110	40

※機械強度は臨界電流が 95 %に低下するレベル（参考値）

※2014 年の予定新製品の仕様は変更の可能性有り

[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：超電導線材技術の進展

「MgB₂ 線材のプロセス技術の進展」

独立行政法人 物質・材料研究機構
超伝導線材ユニット
特命研究員 熊倉浩明

MgB₂ 線材の作製法としては、MgB₂ の原料粉末を金属管に充填して線材に加工し、その後熱処理をする powder-in-tube (PIT) 法が一般的であるが、MgB₂ の充填率が低いために J_c も低いという難点がある。一方、Mg 棒の周囲に同心円状に B 粉末層を配置し、Mg を B 層へ拡散によって供給して MgB₂ を生成させる内部 Mg 拡散 (internal Mg diffusion (IMD)) 法¹⁾では MgB₂ 層の充填率を 100 % 近くにまで高くすることが可能で、これによって MgB₂ 層当たりの J_c を大幅に向上させることができるという利点があり、最近では IMD 法による線材開発も盛んになってきた。良く知られているように IMD 法では超伝導フィラメントの中心に大きな空隙が残留するという問題があるが、PIT 法との比較において IMD 法では充填率向上による J_c の増大が大きいために、この空隙も含めた線材全断面積当たりの $J_c(J_e)$ も IMD 法線材の方が PIT 法線材よりも高くなっている。

MgB₂ 線材においては、原料粉末の純度が重要であり、特に B 粉末の純度が J_c に大きく影響することはよく知られている。また、原料粉末に炭素や炭素化合物を添加することによって MgB₂ 線材の高磁界での J_c が大きく向上することも知られている。最近ではカーボンコートした高純度アモルファス B 粉末を原料に用い、IMD 法を適用することによって J_c ならびに J_e 共に高い MgB₂ 線材が作製されるようになってきている²⁻⁴⁾。図 1 には、このカーボンコート B 粉末を用いて IMD 法で作製した MgB₂ 線材の代表的な J_c - H 特性⁴⁾を、PIT 法 MgB₂ 線材、ならびに Nb-Ti および Nb₃Sn 実用線材の特性と比較して示した。カーボンコート B 粉末を用いた IMD 線材では 4.2 K、10 T で 10^5 A/cm² を越える J_c が得られ、20 K、5 T でも 76,000 A/cm² という高い値が得られている。また 20 K、4 T では 10^5 A/cm² をはるかに越える J_c 値が得られる。ごく最近では、4.2 K、10 T の J_c は 13 万 A/cm² を越えている。これらの J_c はよく知られた SiC 添加線材よりも高くなっているが、これについては SiC 添加線材では Mg₂Si が析出して J_c の阻害因子になっているためと考えられる⁵⁾。 J_e についても最近の IMD 法線材では 4.2 K、10 T で 1 万 A/cm² を越えており、フ

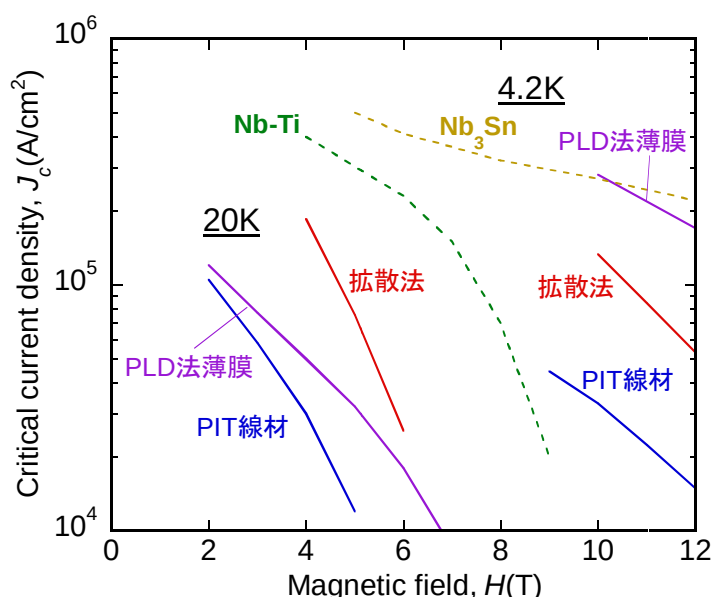


図 1 Mg 内部拡散(IMD)法による MgB₂ 線材の 4.2 K ならびに 20 K における J_c - H 特性。比較のために PIT 法 MgB₂ 線材、Nb-Ti ならびに Nb₃Sn 実用線材の特性も示す

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

ロリダ大学と Hyper Tech Research, Inc. のグループは 4.2 K、10 T で $17,000 \text{ A/cm}^2$ の J_c を得ている²⁾。今後、IMD 法の最適化等により、 J_c ならびに J_e 特性の更なる向上が期待できよう。また、IMD 法による長尺化の研究も始まろうとしている。上述したように 20 K においても実用レベルの J_c が得られつつあることから、液体ヘリウムを使用しない 20 K 近傍の温度での MgB_2 の利用が現実味を帯びて来つつある。

参考文献

- 1) H. Kumakura, J. Phys. Soc. Jpn **81**(2012) 011010.
- 2) G.Z. Li, *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **25**(2012)115023.
- 3) G.Z. Li, *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **26**(2013) 095007 .
- 4) S. J. Ye, *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **26**(2013) 125003.
- 5) 東川甲平他、第 87 回 2013 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 p98.

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

特集：超電導線材技術の進展

「HTS 線材の核融合用導体応用の動向」

大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
核融合科学研究所ヘリカル研究部
准教授 柳 長門

核融合は燃料が豊富に存在し、安全性が高く、環境負荷が小さいため、地球温暖化抑制の切り札、さらには、地球寒冷化の場合にも対処できる究極のエネルギー源として期待される。現在、欧州、日本、米国、ロシア、中国、韓国、インドの 7 極の国際協力によってトカマク型の熱核融合実験炉 ITER の建設が南フランスのカダラッシュにおいて進んでいる。また、「幅広いアプローチ (BA)」計画として、JT-60SA が日本において建設されている。これらの装置では、プラズマ閉じ込め磁場を発生する超電導コイルにケーブルインコンジット (CIC) 導体を用いられる。ITER のトロイダル磁場 (TF) コイル用導体では、最大経験磁場 11.8 T において、電流値 68 kA の仕様である。CIC 導体は冷却安定性が高く、交流損失も小さいため、大型コイル用導体として世界標準となっている。現在、ITER と JT60-SA 用の超電導導体とコイルの製作が進んでおり、日本は相当量を担当している。

ITER では核融合燃焼の 1000 秒達成が目標であり、その後、定常あるいは準定常的な発電実証を行う原型炉の建設に移行する。2040 年代初めをターゲットとしてこれをどう進めるか、各国で真剣に議論が行われている。原型炉は ITER よりさらに巨大となるため、心臓部であるマグネットには依然大きな技術課題が残る。特に、ITER 技術の延長として CIC 導体を選択することで十分かどうか議論がある。線材として Nb_3Sn に代えて歪に強い Nb_3Al を適用すべきか、さらに大型化したときに ITER で問題となり、撚線ピッチの最適化で回避できた繰返し励磁に伴う臨界電流の低下問題がどうなるか等、検討課題は多い。加えて原型炉の後、2050 年代を目標として多数の商業炉を展開していくことを想定すると、できるだけ簡素なコイル巻線と冷却構造を選択し、製作も容易にできることが求められる。そこで、低温超電導 (LTS) 線材に代えて高温超電導 (HTS) 線材を用いることで多くの問題を根本から解決できる可能性がある。近年の急速な線材特性と製造技術の進展を受けて、これが遂に現実的な選択肢として入ってきた。

HTS 線材の大型マグネット用導体への適用はまだ小規模な検討段階であるものの、欧米を中心に活気が出始めている。すでに良く知られているように、現在以下の 3 種類の導体が議論の主流となっている。(1) W. Goldacker (KIT) による Roebel-Assembled Coated Conductor (RACC) 導体¹⁾、(2) M. Takayasu (MIT) による Twisted Stacked-Tape Cable (TSTC) 導体²⁾、(3) D. van der Laan (ACT) による Conductor on Round Core (CORC) 導体である³⁾。(1) の RACC 導体は、テープ線材に空間的な転位を入れることが可能であることを最初に提唱した。ただし、線材の一部を切り欠くことが必要である。撚りを導入することと大容量化するためには、Roebel ケーブルを多数本用いてラザフォード型導体にする。(2) の TSTC 導体は、テープ線材を積層した後で全体としてツイストする。よって、線材間の完全な転位はないが撚りは導入でき、多数本を使って CIC 導体にする構想がある。(3) は多数本のテープ線材を芯の周りに積層しながら短いピッチで巻きつける構造であり、撚りを与えるとともに全体として比較的短い曲げ半径を可能とする。CORC を 6 本用いた CIC 導体が提案されており、端末を工夫することで分割型の TF コイルに用いる構想も出されている。上記のいずれの導体においても、テープ線材がフラッ

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

トワイズ方向には小さな曲率で曲げられる特性をうまく利用することで転位や撚りが導入できている。現在、いずれもプロトタイプ導体が試作され、温度 4.2 K、磁場 ~20 T において 4-5 kA レベルの結果を達成している。併せて、大容量化と長尺化の試みが行われているが、いずれもテープ線材を複雑に撚り合わせる構造であるため、線材の一部に局所的な機械歪が生じる問題がクローズアップされつつある。今後、実際のマグネットに適用できるよう完成度を上げられるかが、注目される。また、これらの導体を用いて実際の大型コイル巻線を具体的にどのように設計するか、まだ本格的な設計案は出ていない。

これらに対して第 4 の導体候補として、核融合科学研究所 (N. Yanagi, Y. Terazaki, A. Sagara) と東北大学・量子エネルギー工学専攻 (S. Ito, H. Hashizume) のチームが共同で開発している「単純積層型 HTS 導体」がある。これは、ヘリカル型核融合炉を対象として開発を進めているものである。ヘリカルはトカマクと異なりパルス運転を伴わないため、ゆっくりとしたコイルの励磁に伴い線材間に多少の偏流が生じたとしても、HTS 線材の本質的に高い冷却安定性のために許容できる。よって、従来の LTS 導体で鉄則とされてきた素線の細線化、撚り、転位の全てを導入しないという発想を取り得る⁴⁾。単純積層の場合には、線材に局所的な歪が生じないとともに、線材間に隙間を入れず銅とステンレス製ジャケットに納めるため、導体全体として、例えば CIC 導体 (断面の 3 割程度にボイドが存在) に比べても圧倒的に強固なものに仕上がる。

現在、単純積層型 HTS 導体のプロトタイプを試作して、試験を行っている⁵⁾⁻⁷⁾。フジクラ製 GdBCO 線材 (FYSC-SC10、幅 10 mm、厚み 0.22 mm、臨界電流 ~600 A@77 K、s.f.) を合計 54 枚用い、3 列×18 層で単純積層して銅ジャケットとステンレスジャケットに収めた。サンプルの基本構成を図 1 に示す。このタイプの導体をレーストラック形状の 1 ターン短絡コイルサンプルとして、外部磁場を変化させることで通電を行った⁵⁾。導体サンプルの全体を図 2 に示す。短絡のため直線部の片側に接続部を設けているが、これには東北大学で開発された機械的ブリッジ接続を入れている⁶⁾。試験の結果、温度 20 K、外部磁場 5.3 T で 100 kA に至る電流値を得た (図 3)。この場合、100 kA でクエンチが生じ急速に電流が減衰したが、これは試験部からではなく固定の甘かった円弧部から生じたものと推測され、今後この部分の改良を行って再試験する計画である。温度を 30 K まで上げてクエンチが生じなかった例では、線材単線の臨界電流特性をもとに導体内の自己磁場分布・電流分布を自己無撞着に解くことで導体全体の臨界電流が説明できる⁷⁾。温度 4 K において最大電流 120 kA に達した通電例では、クエンチが生じず、接続抵抗によって減衰している。減衰時定数とコイルの自己インダクタンスより、接続抵抗は 2 nΩと求まる。この接続構造を用いることで、直径 30 m を超える連続ヘリカルコイルを短尺導体の「接続方式巻線」によって迅速に製作できると判断でき、検討を進めている⁴⁾⁻⁷⁾ (図 4)。数千箇所にも及ぶ接続を確実に仕上げるため、産業用ロボットによる接続部の自動施工について十分な技術構築が必要である。これが確立できれば、同様の方法は他の大型マグネットや特殊構造のマグネットにも適用することが可能と期待できる。

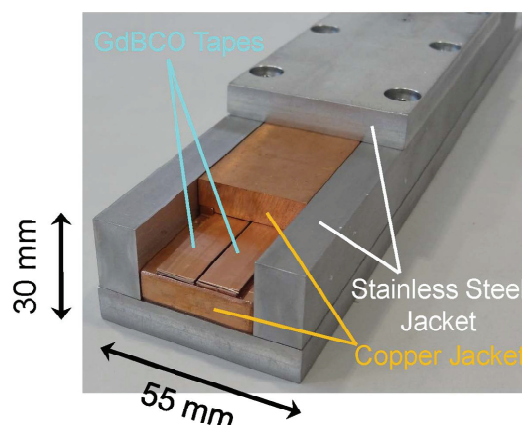


図 1 単純積層型 HTS 導体の構成。(この写真はモックアップで、GdBCO 線材は 2 列 6 層。実際の導体サンプルでは、3 列 14 層。)

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

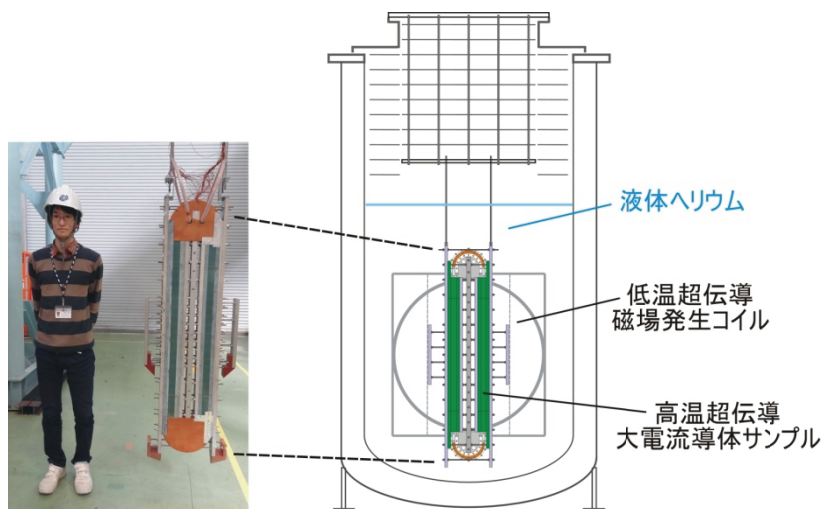


図 2 導体サンプルの全体写真と NIFS 大型導体試験装置におけるサンプルの装着の様子。

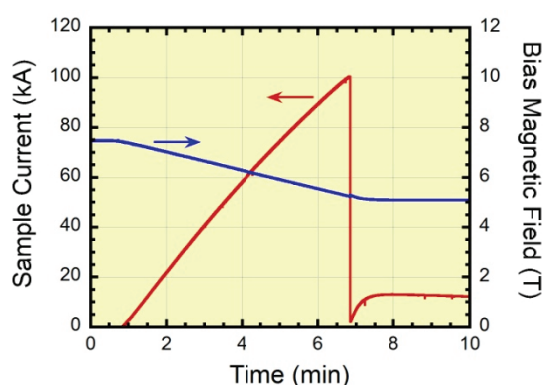


図 3 温度 20 K における通電試験結果の一例。
最大電流到達時に外部磁場は 5.3 T。

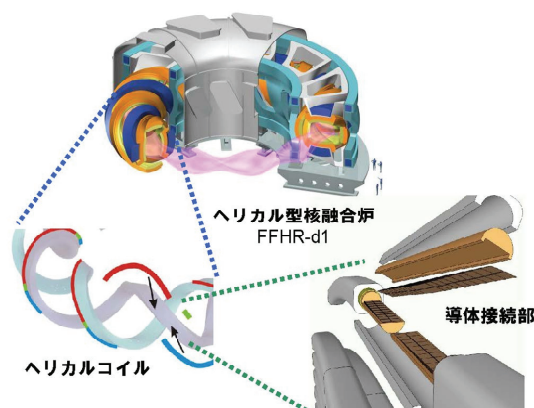


図 4 高温超伝導導体を用いたヘリカルコイルの接続方式巻線の概念図。

参考文献

- 1) W. Goldacker *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 22 (2009) 034003.
- 2) M. Takayasu *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 25, 014011 (2012).
- 3) D.C. van der Laan *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 22 (2009) 065013.
- 4) N. Yanagi *et al.*, Plasma Fusion Res. 9 (2014) 1405013.
- 5) N. Yanagi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 24 (2014) 4202805.
- 6) S. Ito *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 24 (2014) 4602305.
- 7) Y. Terazaki *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 24 (2014) 4801305.

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

4/1-5

2013 MRS Spring Meeting & Exhibit

San Fransisco, USA

<http://www.mrs.org/spring2013/>

4/7-11

Cryogenics2014

Prague, Czech Republic

<http://www.cryogenics2014.cz/>

4/8-11

International Workshop on Lunar Science Applications

CocoaBeach, FL, USA

<http://lsaworkshops.com>

4/15

第 40 回シンポジウム/第 17 回超電導科学技術賞授賞式

タワーホール船堀

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

4/17

冷凍部会 2013 年度第一回例会

産業技術総合研究所 臨海副都心センター

http://www.csj.or.jp/reitob/2014/1st_0417.pdf

4/17,18

マイクロ波超伝導／マイクロ波一般 研究会

機械振興会館

<http://www.ieice.org/es/sce/jpn/>

4/18

東北・北海道支部 2013 年度総会・講演会・見学会

東北大学金属材料研究所

http://www.csj.or.jp/tohoku/2014/generalassembly_0418.pdf

4/27-5/2

4th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2014)

Antalya, Turkey

<http://icsm2014.org/>

超電導 Web2.1

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

5/15-19

International conference „Superconductivity for Energy 2014“

Savoy Beach Hotel, Paestum, Italy

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

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/>

5/26-28

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

[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

新聞ヘッドライン (2/19-3/20)

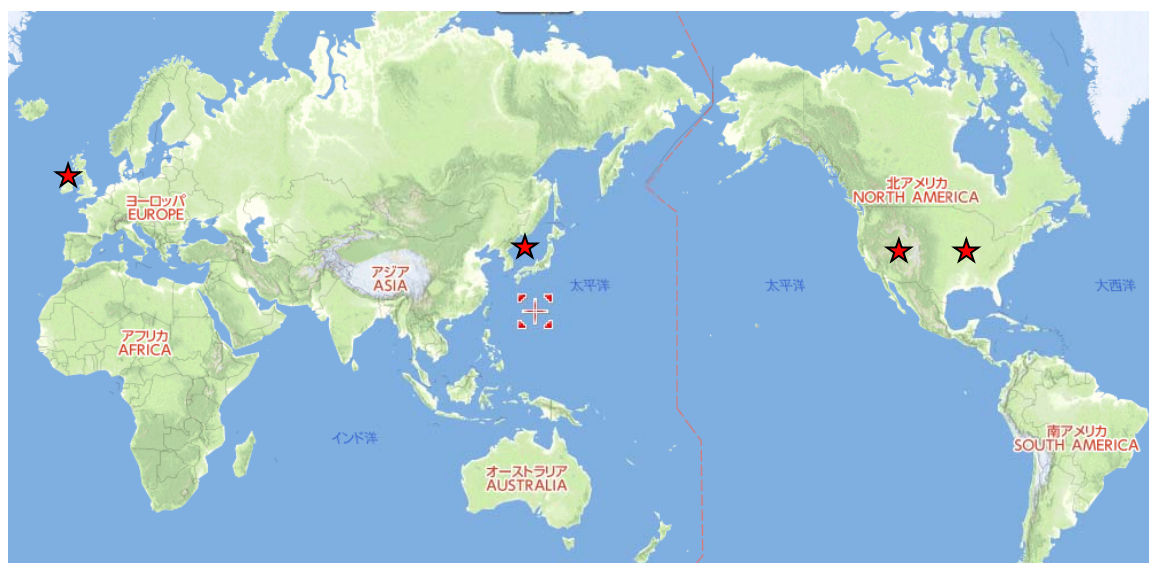
- 経産省 超電導直流送電実証委託を公募 来月 17 日まで 日刊産業新聞 2/25
- 超電導ケーブルの現状 調査研究報告書要約 日本メタル経済研究所 奥山等主任研究員 日刊産業新聞 2/27
- 山梨大学 新超電導体を発見 金属酸化物系、低温で生成 鉄鋼新聞 3/07
- 東工大 層状セレン化合物 外部電界印加で金属様への相転移に成功 化学工業日報 3/10
- 古河電工と鉄道総研 高強度・高温超電導マグネットを開発 メガソーラーと連系試験 日刊産業新聞 3/11
- 鉄道総研と古河電工、大型ホイール用高温超電導のマグネット開発 日刊工業新聞 3/17

(編集局)

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

世界の動き (2014 年 12 月)

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



★ 今月のニュース発信地

▶デバイス

超電導スピントロニクス次世代コンピューター

University of Cambridge (2014 年 1 月 15 日)

ケンブリッジ大学の研究者たちは、スピントロニクス分野の飛躍的發展ともいえる、コンピューティング革命の基礎となりうる新技術を発表した。彼らは、マイクロエレクトロニクス集積回路に既に現れ始めているような“スピンを利用した”新機能デバイスの高効率エネルギー源として、超電導体が使用できるとの証拠を初めて提供した。超電導体とスピントロニクスは、これまで両立しないと考えられていた。しかしこの新しい研究では、超電導体に流れる電流内において、電子の自然なスピンを操作することができ、さらに検出することができると示されている。超電導と電子スピンを両方同時に操作するために、研究者たちは、希土類ホルミウムから成る磁気層を介在物質として追加した。この層内では、磁気が回転し、スピン操作に利用される磁性パーマロイ層を有する非共線インタフェースを形成する。クーパー対がこの回転磁気層を通過する際、平行スピンを形成し電子の 1 つを効果的に“フリップ”させるが、対のペアリングは保存される。今回の研究では、この平行スピンのクーパー対を検出することに成功し、その存在が確認されたのである。材料科学工学部の Niladri Banerjee 博士は、「クーパー対がスピンの伝達物質として機能するという事は、これまで直接実証されたことがなかった。この度、超電導がスピントロニクスにおいて重要な役割を果

超電導 Web2.1

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

たしていることが明らかになり、重大な一歩を刻んだと言わざるを得ない。」と述べた。ここでの研究結果により、スピントロニクスにおいて超電導体が使用され、はるかに高効率なデバイスの開発に向けて新たな道が切り開かれたと評価される。この研究グループの研究成果は、*Nature Communications* に掲載されている。同研究チームは、次のステップとして、超電導スピン流に基づいたメモリ素子を試作し、彼らの研究法の有効性を高めるために新たな物質の組み合わせを探索することを計画している。

Source: "Superconducting spintronics pave way for next-generation computing"

University of Cambridge press release (January 15, 2014)

URL:

<http://www.cam.ac.uk/research/news/superconducting-spintronics-pave-way-for-next-generation-computing>

(This work is licensed under a Creative Commons.)

Contact: Tom Kirk, tdk25@cam.ac.uk

▶基礎

超電導と磁性：その秘密の解明

Los Alamos National Laboratory (2014 年 1 月 3 日)

ロスアラモス国立研究所の研究者たちが関わった二つの異なる研究において、超電導と磁性の関係に新たな所見が生み出された。磁性電子は、移動しない剛性配置の中に自らを閉じ込める一方、超電導体中の電子は、自由に移動する超電導電子ペアを形成し電流抵抗ゼロで電流を流せるため、超電導と磁性はしばしばライバルと見なされている。しかしながら、上記二つの研究では、Cerium-Cobalt-Indium₅ (CeCoIn₅) の新しい超電導体にある電子には、超電導性と磁性が両方同時に備わっていることが示された。ポール・シェレー研究所 (PSI) で行われた実験では、右回りと左回りのスピンで形成された電子ペアと同様に、同じ方向に回るスピンの電子ペアにも全く新しい超電導が観察された。後者の状況では、電子に超電導性と磁性の両方が備わったときのみ、超電導現象が現れた。さらに、その磁性電子の配置は、印加磁場の方向を修正することによって操作することができた。PSI 研究チームのリーダーである Michel Kenzelmann 氏は、「物質に見られた挙動は完全に予想外であり、確かに純粋な磁気効果があるというわけではない。しかし今回の研究結果は、新しい超電導状態がスピン密度波状態と共にその物質内に生じることを明らかに示している。」と述べた。これらの所見は、超電導へとつながる電子の量子状態を直接制御できる可能性、言わば将来の量子コンピューターの推進力への重要な能力になり得ることを示唆している。

第二の研究では、少量の不純物を CeCoIn₅ に導入したところ、予想外にも、この不純物の働きにより、超電導電子が磁気秩序状態にあるナノサイズの液滴を形成した。不純物の量を増加すると、液滴は成長して最終的に重なり、その物質全体に磁性を引き起こした。そしてその磁気物質に圧力を印加すると、不純物の効果は全体的に逆転し、物質は再び超電導を発現した。磁気共鳴画像法と同じような手法を用いても磁気秩序状態のナノ液滴は実際持続するものの、この手法では、超電導によってナノ液滴が隠れてしまうということを研究者たちは発見した。

これらの研究を組み合わせると、CeCoIn₅ 中の電子は、これまで考えられていたよりもずっと種々の状態に適応可能であることが示される。両研究の共同研究者である Joe Thompson 氏は、「超

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

電導は、新たな驚きを与え続けてくれる。その秘密が明らかにされるにつれ、我々は電子の中にある量子世界の詳細を学び、未来の技術に向けていかにそれらを利用できるか、新しい方法の模索が始まるのである。ロスアラモスで約 10 年前に発見された CeCoIn_5 内の超電導は、我々の多くが探し求めてきたロゼッタストーンかもしれない。」と述べた。両研究はいずれも、*Nature Physics* オンライン版に掲載されている。

Source: "Secrets of Superconductivity Revealed"

Los Alamos National Laboratory press release (January 3, 2014)

URL:

<http://www.lanl.gov/newsroom/news-stories/2014/January/superconductivity-and-magnetism.php>

Contact: Nancy Ambrosiano of Communications Office, nwa@lanl.gov

高温超電導の探究

Oak Ridge National Laboratory (2014 年 1 月 27 日)

オークリッジ国立研究所の研究者たちは、高温超電導体の生成における化学ドーパントの重要な役割を最近の研究で分析し、その論文記事が *Physical Review Letters* に掲載された。ドーパントは、物質の結晶構造に不均一性と障害を取り込む。科学者たちは、化学ドーパントによって事前にドーピングされた物質の挙動がどれほど変わるかを理解し、より高温で機能する超電導体を設計することを目指している。論文の主執筆者である Krzysztof Gofryk 氏は、「この研究を通じて、我々は超電導と不均一性の相互作用を理解することができる枠組を作り上げた。従って、我々は初めてドーパントの副作用を明確に把握することができたのである。」と述べた。さらに、チームリーダーである Athena Safa-Sefat 氏は、「鉄系超電導体に使用する我々のバルクスケール並びに原子スケールの測定法により、ドーパントがクラスター化した結晶中の高濃度ドーピング領域から、強力な超電導が発現していることが明らかになった。もしこのようなクラスターが組織的に入り込む結晶をデザインすることができれば、我々は、はるかに高性能な超電導体を生成することができるかもしれない。」と付け加えた。

Source: "ORNL study advances quest for better superconducting materials"

Oak Ridge National Laboratory press release (January 27, 2014)

URL:

<http://www.ornl.gov/ornl/news/news-releases/2014/ornl-study-advances-quest-for-better-superconducting-materials>

Contact: wallira@ornl.gov

“世界の動き” その他（各社新聞発表以外のソースから）

Y 系マグネットで次世代蓄電池システム

鉄道総研、古河電工ほか (2014 年 3 月 10 日)

Y 系線材を用いて、鉄道総合技術研究所と古河電気工業は大型フライホイール用の高温超電導マグ

超電導 Web2.1

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

ネットを開発した。米国の SuperPower（古河電工の子会社）が製造した Y 系線材を使ったもの。これにより、大容量超電導フライホイール蓄電装置を作る。このマグネットを使えば約 2 トンのものが浮かせら、摩擦なく回転エネルギーを貯蔵できる。本マグネットは 50 K（マイナス 223°C）で超電導となり、従来の 20 K（マイナス 253°C）よりも高い温度で超電導となるため、液体窒素を使わない小型冷却装置で運用でき、運転にかかる電力が減ることから全体的な蓄電効率を高くできる。今後は、コイルを追加して実規模のフライホイールの浮上試験を実施。1 組あたり 4 トンのフライホイールを持つ蓄電装置を開発し、平成 27 年に山梨県米倉山において新たに建設するメガソーラーで利用するという

Source: <http://www.rtri.or.jp/press/2014/20140310.html>

“次世代フライホイール向け高温超電導マグネットの開発に成功”

メガソーラー等との連携により、効率的な電力エネルギーの貯蔵が可能に

新ペロブスカイト型酸化物超伝導体を発見

山梨大学、東工大、広島大学（2014 年 3 月 4 日）

山梨大学クリスタル科学研究センター、東京工業大学応用セラミックス研究所、広島大学の研究グループは、新規ビスマス酸化物超伝導体 $(\text{Na}_{0.25}\text{K}_{0.45})(\text{Ba}_{1.00})_3(\text{Bi}_{1.00})_4\text{O}_{12}$ を発見した。磁化率の測定で、臨界温度は 27 K であった。この超伝導体はバリウムとナトリウムおよびカリウムが規則的に配列する A-サイトオーダーダブルペロブスカイト型構造で、高温超伝導体の探索や超伝導メカニズムの解明の新たな指針となる。

この研究成果は、ドイツの科学誌「Angewandte Chemie International Edition（応用化学誌 国際版）」のオンライン版で 2 月 27 日に公開された。

Source: <http://www.titech.ac.jp/news/2014/025248.html>

“新しい規則性を持つペロブスカイト型酸化物超伝導体を発見”

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

先月号でもお伝えしたように、2014 年度の再生可能エネルギーの買い取り価格案が提示された。洋上風力分野が新設され、かつ、その買い取り価格が従来の 1.5 倍以上にもなった。すなわち、陸上風車に比べて初期投資額も大きくでき、超電導発電機を検討する余地が広がる。超電導風力発電機の検討は、現在、欧米日で国プロとして検討がなされている。

・再生エネルギーH26 年度買い取り価格:太陽光は買い取り価格下げ、洋上風力は上げ

固定価格買い取り制度 (FIT) *の買い取り価格 (単位円/kWh の税抜価格)

	2013 年	2014 年
太陽光 住宅	38	37
産業用	36	32
風力	22	36 (洋上) *新設
		据え置き (地上)
地熱	26	据え置き
水力	24	14 (水路)
		据え置き (上記外)
バイオマス	39	据え置き

各紙報道の通り、再生可能エネルギー固定価格買い取り制度(FIT)の 2014 年度の買い取り価格が上記表の通り 3 月 7 日に固まった。太陽光パネルの効率向上が一段と進み、太陽光 (非住宅) の価格を 36 円から 32 円に引き下げる一方、洋上風力の買い取り価格を 36 円に引き上げ、設置を促進する (先月号本誌既報の通り、ようやく日本で運転実績の出してきた洋上風力のコストが明らかになったため)。

経済産業省の審議会「調達価格等算定委員会」(委員長・植田和弘京都大学教授) が同日、価格案を提示した。月内に茂木敏充経産相が正式に認定する。太陽光の価格引き下げは、住宅・非住宅とも 2 年連続。

風力は、洋上風力の買い取り枠を新設し、価格を 36 円とした。13 年度まで大型風力は一律 22 円だったが、洋上の方が建設費用などが高いことを考慮。洋上風力を将来の再生エネの柱に育てる狙いもある。

*固定価格買い取り制度 (FIT)

現在は高コストの再生可能エネルギー (太陽光、風力、地熱ほか) を国民皆で買い支えて、将来

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

の主要電源に育てる制度。発電事業者が設置コストを回収できるように、試算に基づき、買い取り価格を毎年決めている。これで、業者の積極的な設備投資を促す。運転開始から 20 年間、電力会社が決まった価格（固定価格）で買い取る。買い取り費用は電力会社が電気料金に上乗せする。

Source:

2014 年 3 月 7 日 日経、毎日新聞 ほか各紙

・いよいよ 8 MW 機が登場：大型風力

世界最大出力: Vestas 社が三菱重工と 8 MW 機の運転に成功

本年 1 月 28 日、世界で最も出力の高い風力発電用風車が立ち上がった。デンマーク Vestas Wind Systems が出力 8 MW の新型機 (V164-8.0MW) の試運転に成功した¹⁻⁴⁾。同社は昨年設立された三菱重工業と Vestas 社の合弁会社で、新型機に三菱重工業のドライブトレインを組み合わせ低コスト大出力の製品とする。

ローター（羽根）の先端までの高さは 220 m、ローターの直径は約 160 m で受風面積は 2 万 1000 m²=サッカー競技場 3 つ分と広大なものである。出力は、欧州の家庭の欧州の家庭 7500 世帯分にもなる。今後同社は、ユトランド半島の Østerild にある大規模風力タービンのためのデンマーク国立テストセンターにおいて、今後数カ月間評価を続けるとのこと。

大型機の効果：同じ必要電力なら、少数機でカバー可能。導入コスト、運用管理コストも低くできる。特に、設置が面倒な洋上風力発電では効果大である。管理時に高さ～100 m のタワーへの上り下りなど、メンテ、維持費用も低減できる。

参考情報

- ・デンマークでは国全体の年間全電力の 33.7 %を風力発電から得ている。
- ・Vestas は風車メーカーとして世界シェア 1 位。5 万基以上が世界 73 カ国で稼働中。陸上設備で 1 位、洋上風力発電でも Siemens に次いで 2 位。
- ・大出力風力タービンの開発競争：
他の大出力機には、陸上用 7.5 MW (独エネルギーコン Enercon の E126)、洋上用 6 MW (独 Siemens と仏 Alstom) がある。大幅需要増のため、この分野では激しい競争が繰り広げられている。韓国のサムスン重工業は、昨年英スコットランドに 7 MW 機の試作品を設置し、また、三菱重工は福島沖浮体式洋上風力に 7 MW 機での発電を試みている。さらに、仏 Areva とスペインの Gamesa は最近、8 MW 機の共同開発を加速する計画だと発表した。

Source:

1. <http://vestas.com/en/media/news#!company-news>
"28 Jan 2014 World's most powerful wind turbine now operational"
2. <http://video.vestas.com/video/7108123/v164-80-mw-taking-offshore-wind-power>
3. <http://www.afpbb.com/articles/-/3007549>
4. <http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1402/06/news089.html>

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

・ -253 度の液体水素専用船が実現か 水素社会を支えるインフラに期待

高温超電導の強い味方に: 将来、20 Kの冷媒が活用可能

燃料電池車を中心として、水素社会構築のための投資が盛んになりつつある。川崎重工業は、本年 2 月に大量に製造した水素を液化して運搬する設備を開発した¹⁾³⁾。今回、液化水素運搬船に搭載する貨物格納設備の基本承認 (AiP: Approval in Principle) を日本海事協会より取得した。今回の設備は、世界初となる液化水素運搬船の液化水素格納部で、液化天然ガス(LNG) 運搬船などの技術を基に開発した極低温蓄圧式の液化水素専用貨物格納設備 (容積: 1250 m³)である。LNG に比べて蒸発しやすい液化水素の輸送に適した真空断熱構造を採用している。輸送中の液化水素の蒸発を最小限に抑えるため、新たに開発した真空断熱システムを採用した二重殻貨物槽構造で、貨物槽の支持には、新たに開発した熱を伝えにくい GFRP (ガラス繊維強化プラスチック) を用い、断熱性能も向上させている。

同社では、「わが国では燃料電池車の市場投入や代替エネルギー政策の加速により、近い将来、水素市場の拡大が予想されている。当社が市場投入を目指し、開発を進めている液化水素運搬船 (容積 2500 m³) は、これを見込んだもの。また、船内の蒸発ガスの有効利用を見据え、燃料電池、水素ガスタービンなどの試験設備を有した船上実験室を併設する計画である。」とコメントしている。下記 2) に、社会インフラとしての水素エネルギーなどの利用構想がある。

こうした液体水素 (-263 °C=20 K) の冷媒使用が一般的になれば、高温超電導機器の応用も大きく広がる。

Source:

1. http://www.khi.co.jp/rd/news/detail/20140106_1.html
2. http://www.khi.co.jp/csr/pdf/creation_01.pdf
3. <http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1402/25/news077.html>

・ 直流送電の話題：再生可能エネルギーでの効率化

以前紹介した経産省の超電導直流ケーブルの石狩プロジェクトがあるが¹⁾、それ以外に常電導でも直流送電への取組みが盛んである。超電導の出番がさらに高まるか期待される。

日本での再生可能エネルギー投資の活発化を受けて、最近、直流(DC) 送電に関する話題が多い。沖縄では DC マイクログリッドの研究²⁾が、北海道ではデータセンターの DC 化^{3),4)}が検討されている。スイス ABB 社⁵⁾は、1000 V 以上の高い電圧で送電し、発電時や送電時のロスを減ら「HVDC (高圧直流送電)」技術を開発している。大規模な風力発電所やメガソーラーに HVDC 対応の発電システムを採用すると、発電量を数%増やせる利点があるという⁶⁾。

再生エネルギー発電源の主力となる大出力風力発電所やメガソーラーで、海外と日本での違いが電圧である。海外では 1000 V など高電圧の直流送電に対応している。他方、日本では電圧が高い機器でもせいぜい 600 V で、1000 V が使えるようになれば、ロスが減り、発電量を増やすことができる。発電事業者には、売電量 (売上げ) が大きく変わることになる。

Navigant Research 社、ローレンスバークレー国研²⁾によれば、直流送電は交流に比べ 7-8 %も効

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

率的だという。サクラインターネット³⁾では、昨年、直流給電データセンターを実現し、従来の効率が 70-80 %であったものが、1 回の変換ですみ効率が 90 %以上になり、年間数千万円が浮くとのこと。データセンターでは、通常、サーバに至るまでに交流→直流→交流変換を 3 回も行っておりロスが大きかったが、これが 1 回で済みロスが大きく減る。

同社によれば、「ここ数年のスマートフォンなどの急速な普及によるデータ量の爆発的増大やシステムのクラウド化、また、東日本大震災後の災害対策強化によって、データセンターの需要増は激しい。その消費電力も増え続け、年平均で 5.9 %増加し、2016 年までに 125 億 kWh（一般家庭換算で、約 35 万軒分）になると予測される」とのこと。

また、海外では、大規模送電分野でも直流化が盛んである^{5), 6)}。スイス ABB は、中国の向家ダムから上海までの 1980 km（九州から北海道間距離）の送電を直流送電で実現した。効率は 93 %と高い上に、最大 7200 MW もの電力を送電できる。また、同社は北海 130 km 沖合にある洋上風力発電所（400 MW）とドイツ国内も直流送電で結んだ実績がある。

Source:

1. 本誌 2013 年 11 月号特集：超電導電力機器技術の展開
「石狩プロジェクトの現状」
2. <http://business.nikkeibp.co.jp/article/interview/20140212/259653/>
“沖縄の直流送配電網が途上国を救う”
3. http://www.sakura.ad.jp/press/2013/0321_hvdc/
“さくらインターネットと NTT データ先端技術、世界初、直流給電データセンターを実現”
4. <http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1203/08/news104.html>
“電力を食い過ぎるサーバ、NTT データが直流とクラウドで解決”
5. <http://scw.nikkeibp.co.jp/article/scw/20131023/370304/>
“スイスの ABB、高電圧の直流送電技術を出展”
6. <http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1307/02/news079.html>
“交流から直流へ変えると 8 %も効率が上がる、2025 年には 2.3 GW が直流に”

[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

「第 61 回応用物理学会」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 線材・パワー応用研究部
主管研究員 町 敬人

2014 年第 61 回応用物理学春季学術講演会が青山学院大学相模原キャンパスにて 3 月 17 日から 4 日間の日程で開催され、超電導に関する講演は 17～19 日に行われた。シンポジウムまで含めると、超電導に関する講演件数は 160 件にのぼった。「評価（はかる）-超伝導材料の評価技術 基礎から応用まで-」と題されたシンポジウムでは、東大前田京剛氏の総括的な講演から始まり、ARPES、中性子散乱、STM、電子顕微鏡、ハイブリッド顕微鏡とミクロからマクロに至る様々な技術により評価した結果が紹介された。接合、回路作製プロセスおよびデジタル応用のセッション（13 件）では、SFQ 回路作製やその応用、金属間化合物超電導体の接合などの講演があった。基礎物性（35 件）では、REBCO や MgB_2 バルク作製、その他の銅系、非銅系超電導体の合成と物性、Pnictide 系超電導体の合成と物性についての講演があった。薄膜、厚膜、テープ作製プロセスおよび結晶成長（26 件）では、2 日目に主に REBCO の成膜やナノロッド形成、微細構造その他の関連講演が、3 日目に Fe-As 系の成膜方法や成長機構と MgB_2 作製法やその他の銅系酸化物薄膜に関する講演があった。臨界電流、超伝導パワー応用（12 件）では、REBCO、Bi2223、Fe-As 系テープ線材、 MgB_2 など幅広い材料における臨界電流特性とその向上方法についての講演があった。アナログ応用および関連技術（26 件）では、光子検出やアンテナ、SSPD や STJ、SQUID 素子を用いた様々な検出技術についての講演があった。ポスター講演は 42 件であった。

いくつかトピックスを挙げると、九工大の松本らはナノロッド周辺のひずみについてスーパーコンピュータを用いてシミュレーションを行い、成膜温度などに起因する界面の転位やひずみを再現できる可能性が出てきたと報告した。名古屋大の一野らは、バルクでは報告の多い Cu サイトへの 3d 金属の置換を行った結果、 H_2 の増加がみられ、これは平均自由行程が短くなった可能性があるとして報告した。

京大の中および内間ら（土井研）は、線材基板として使用する配向鉄へのバッファ層として YSZ よりも価格の安い CSY(Ca 安定化 ZrO_2)を試したところ CSZ+ CeO_2 上に YBCO を 2 軸配向することに成功したことを報告した。島根大の山田らは、熔融 KOH を用いた手法で、低温、高 PO_2 での 124 生成を行っており、この手法から求めた状態相図はこれまで報告のあった 123-247-124-211 の温度-圧力相図とよく一致していることを報告した。東工大の佐藤ら（細野研）は、 $(\text{Fe},\text{Co})_2\text{As}_2$ の成膜方法について、成長速度 $3 \text{ \AA/s}$ および基板温度 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ が最適条件であり、ターゲット基板距離を変化させて臨界電流密度の高い膜を得られたと報告した。自己磁場で $J_c=7.1 \text{ MA/cm}^2$ であり、9 T 中においても $J_c>1 \text{ MA/cm}^2$ の膜が得られ、角度依存性で a,b 方向と c 方向の差が少ない等方的な膜が得られたということであった。構造分析を行った結果、膜中の欠陥は膜の中間付近から c 軸方向に発生していることが分かった。物材機構の熊倉らは、SiC 点かした MgB_2 線材で Mg 内部拡散法の方が高い J_c が得られるのは充填率が高いからであり、またその場合に B 粉末としてトルコ製のアモルファス粉末（粒径数 100 nm）を用いるのがよいと報告した。農工大の内藤らは、HPCVD という MgB_2 特有の成膜方法において、ジボラン(B_2H_6)よりも安定なデカボロン($\text{B}_{10}\text{H}_{14}$)を用いる方法を模索し、最高で 20 K、 20 MA/cm^2 の J_c が得られていたが、デカボロンの原料によって特性が大きく変わるので、デカボロンの蒸留をするべきであると報告した。

[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

【隔月連載記事】

超電導センサ（その 2）－ 高温超電導 SQUID 磁気センサとその応用

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

1. はじめに

本特集の第 1 回目では、超高感度を最大の特長とする種々の超電導電磁波センサと SQUID（超電導量子干渉素子）を中心とする超電導磁気センサについて、まず総論として、その原理と特徴、応用分野などをまとめた。第 2 回目では、液体窒素による簡易な冷却で使用できる銅酸化物高温超電導薄膜を用いた高温超電導 SQUID 磁気センサの構成と主な応用について紹介する。

2. 高温超電導 SQUID 磁気センサの構成

2.1. 基本構成

第 1 回目でも説明したように、SQUID 磁気センサの基本要素は、ジョセフソン接合（ヒステリシスをもたない弱結合型の接合）を 2 個含む超電導閉ループ（直流 SQUID の場合）であり、数 10 ミクロン程度の大きさと数 10 pH から 100 pH 程度のインダクタンス (L_{SQ}) をもつ。SQUID 磁気センサでは、ほとんどの場合、測定対象に応じたサイズや形状の磁場検出コイルをこの基本要素に結合させて用いる。高温超電導薄膜 1 層からなる高温超電導 SQUID 磁気センサでは、図 1(a) に示すように、検出コイルは SQUID ループに直接結合されている。この場合、検出コイルでの外部磁束密度 B_p に対し閉ループに伝達される磁束 Φ_s は、 $\Phi_s = B_p A_p (L_{SQ}/L_p)$ となる。その伝達効率、 $A_{eff} = \Phi_s/B_p = A_p (L_{SQ}/L_p)$ は面積の単位をもち、有効面積と呼ばれる。ここで、 L_p 、 A_p はそれぞれ検出コイルのインダクタンスと面積である。1 cm 程度のサイズの超電導薄膜からなる検出コイルのインダクタンスは 10 nH 程度と大きいので、伝達効率は悪く、有効面積は検出コイル面積の 1/100 程度以下となる。

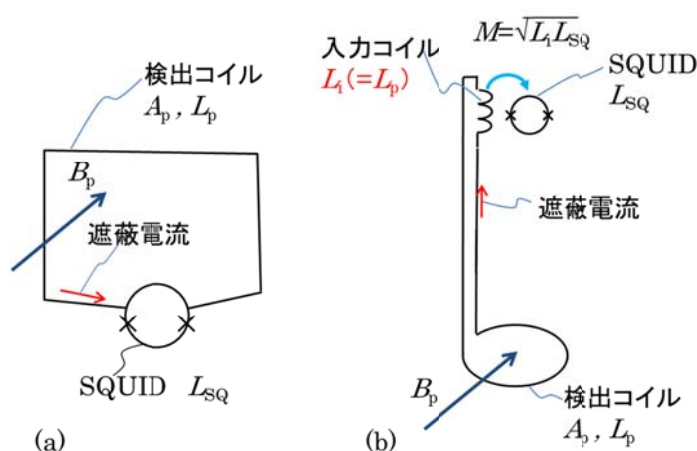


図 1. (a)直接結合型、(b)磁気結合型のセンサ配置

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

一方、ほとんどの低温超電導 SQUID 磁気センサでは、図 1(b) に示すように、検出コイルはインダクタンス L_i の入力コイルを介して SQUID ループに磁氣的に結合されている。入力コイルの巻数を多くして、 $L_p \cong L_i$ とすることで伝達効率は最大になり、その場合、 $A_{\text{eff}} \cong A_p (L_{\text{SQ}}/L_p)^{1/2}$ と、約 1 桁の改善が得られる。SQUID 磁気センサの磁場雑音（小さければ磁場感度が高いことを意味する）は、接合の特性やインダクタンスの設計で決まる SQUID 自体の磁束雑音を有効面積で割ったものである。このようにトランス構造は、例えば、マルチターンの超電導薄膜入力コイルを絶縁層を介して SQUID ループに積層することで作られる。高温超電導薄膜を積層する技術は難しいが、後で示すように、ISTEC ではこのような積層構造をもつ高温超電導 SQUID を開発している。

SQUID 磁気センサは、磁化率測定装置など比較的強い磁場中で使用する場合、検出コイルのみを磁場中に置き、SQUID 自体は磁気シールド中に配置する“分離型”の構成が採用される。低温超電導の場合は、Nb-Ti の超電導線と超電導スイッチを用いこの構成が実現できるが、高温超電導では超電導接続の技術が確立されていないため、接続部のみあるいは検出コイルを常電導線とした構成にならざるを得ない。この場合には、常電導抵抗 R_p の存在のため直流と低周波では感度が大きく低下するが、 $f_{\text{cutoff}} = R_p/2\pi(L_p + L_i)$ で表される遮断周波数（典型的な値としては 100 Hz 前後）より上の周波数では一定の高い感度が得られる。

2.2. 薄膜積層型高温超電導 SQUID

高温超電導 SQUID のほとんどは、超電導薄膜 1 層のみを用いた直接結合型の SQUID であり、ジョセフソン接合としては、バイクリスタル接合や段差型接合といった粒界接合が利用されている。図 2 には、ISTEC で開発された薄膜積層型の高温超電導 SQUID の断面構造を模式的に示す。90 K 以上の T_c をもつ SmBCO など RE 系の高温超電導薄膜 2 層と複数の絶縁層から構成され、下層の超電導膜の斜面上に形成されるランプエッジ型のジョセフソン接合を採用している。接合の絶縁体バリアとしては、超電導相から組成のずれた極薄膜をまず堆積した後、続けて上部超電導薄膜を堆積することにより生じる界面付近の原子拡散と再結晶化を利用している。¹⁾ この接合は、接合界面が上部超電導薄膜で覆われているため、粒界接合に比べ磁場印加での磁束トラップが生じにくいという特長がある。上部超電導薄膜は、接合だけでなく入力コイル等のセンサ要素の作製にも同時に使われる。

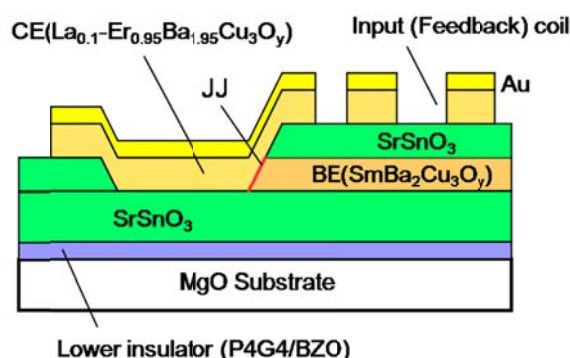


図 2. ISTEC で開発した高温超電導 SQUID 用の酸化物薄膜積層構造

図 3(a) には、薄膜積層技術を用いて 15 mm 角の MgO 基板上に作製された磁気センサの写真を示す。拡大写真のように、幅 2 μm 、20 ターンの入力コイルが SQUID ループ（200 μm 角）に積層されたこのセンサは、1 kHz 程度以上の白色雑音領域で 10 $\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ という市販の低温超電導 SQUID に迫る低い磁場雑音（高い磁場感度）を示す。一方、磁気シールドなしの地磁気中でセンサを用いる場合、冷却時に SQUID ループに磁束がトラップされ、低周波での磁場雑音が増大する。これを防ぐため、SQUID ループの線幅を 5 μm 程度と細くし、入力コイルをその周りに巻き付けたセンサも開発されている。²⁾ 図 3(b) には、磁場の勾配（空間変化）を検出する差分型センサ（グラジオメータ、上の検出コイル 1 つを用いたセンサはマグネトメータと呼ばれる）の代表例を示す。2 つの磁場検出コイルを“8”の字”型に配置し、2 つの検出コイルに鎖交する磁束の差分に比例した電流が

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

中心付近にある SQUID ループに流れ込むようになっている。地磁気など外来磁場の変動分が自動的にキャンセルされるので、磁気シールドを使用しない非破壊検査等への応用に適している。図 3(c) には、“分離型”の構成のために開発されたセンサを示す。SQUID チップ自体も外来雑音の影響を抑制するため差分型になっており、別基板上に作製したやはり差分型の 59 ターンの入力コイルチップを貼り合わせて用いる。入力コイルチップには、常電導線で作った検出コイルからの配線をハンダ接続して用いる形になっている。

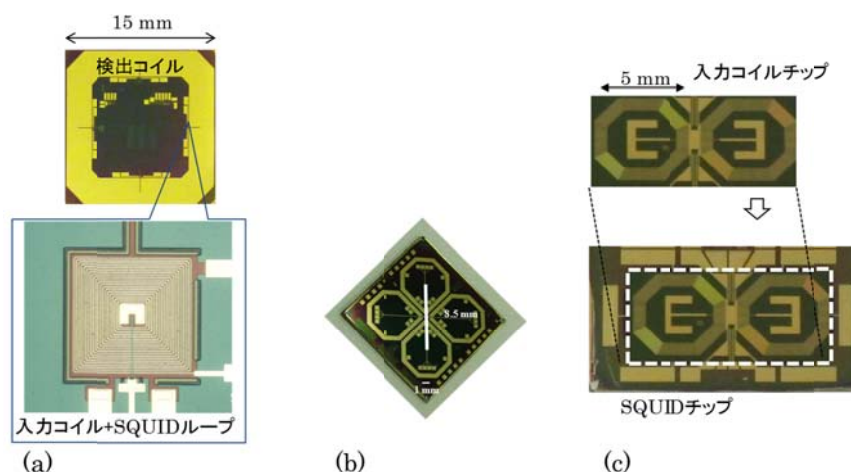


図 3. ISTEC で開発した各種の高温超電導 SQUID 磁気センサ

高温超電導 SQUID 磁気センサでは、冷却時に接合近くの薄膜にトラップされた磁束により低周波雑音が増大する現象が多く見られるため、ヒータ等でセンサ近傍の温度を一旦 T_c 以上に上げて再冷却する“トラップ抜き”が行われる。不均一な温度勾配がつかないように冷却すると、上記グラジオメータでは数 Hz 程度の低周波まで $3\text{--}10 \mu\Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ という低い磁束雑音が得られることがわかっている。これは、4.2 K 動作の Nb 系低温超電導 SQUID の約 5 倍程度で、動作温度の違いでほぼ説明できる値である。

3. 高温超電導 SQUID 磁気センサの応用例

これまでに、高温超電導 SQUID 磁気センサを応用した様々な装置が開発され、一部実用化されている。ここでは、磁場印加なしに自然に発生する磁場変化を計測するケースと、磁場を印加することにより誘起される微弱な磁場変化を計測するケースに分けて、その代表例を幾つか紹介する。前者の代表例としては、心臓や脳の活動によって発生する微弱な磁場変化を測定する生体磁気計測がまず挙げられる。脳磁計測の報告も最近あるが、³⁾ 高温超電導 SQUID 磁気センサの感度は脳磁計測にはぎりぎりのレベルである。より発生磁場の大きい心磁に関しては、実用化には至らなかったが、51 チャンネルの高温超電導 SQUID 磁気センサを用いた液体窒素冷却の MCG (Magneto-cardiogram) 計測システムが以前試作されている。⁴⁾ 生体磁気計測システムには現状では地磁気を遮蔽する磁気シールドルームが必要であり、コスト低減の足かせになっている。一方、高温超電導 SQUID 磁気センサは地磁気変化の精密測定にも用いることができる。図 4(a) には、地震の原因となる断層破壊に伴う微弱な地磁気変化を測定するために、福島県いわき市に設置された計測システムの写真を示す。3 個の SQUID 磁気センサで地磁気の x,y,z 成分の時間変化を 1 pT の感度で連続測定 (サンプリング時間間隔は 0.02 s) している。図 4(b) には、昨年 9 月に起こった計測システムから距離 15 km の地点を震源とする M5.8 の地震前後の観測データの例を示すが、地震波が到達する 3 秒前に 50 pT 程度の大きな地磁気変化が現れている。このような地磁気変化を計測

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

することで、地震の P 波を利用した現用システムより早い地震緊急速報を出すシステムが構築できるのではないかと期待されている。⁵⁾

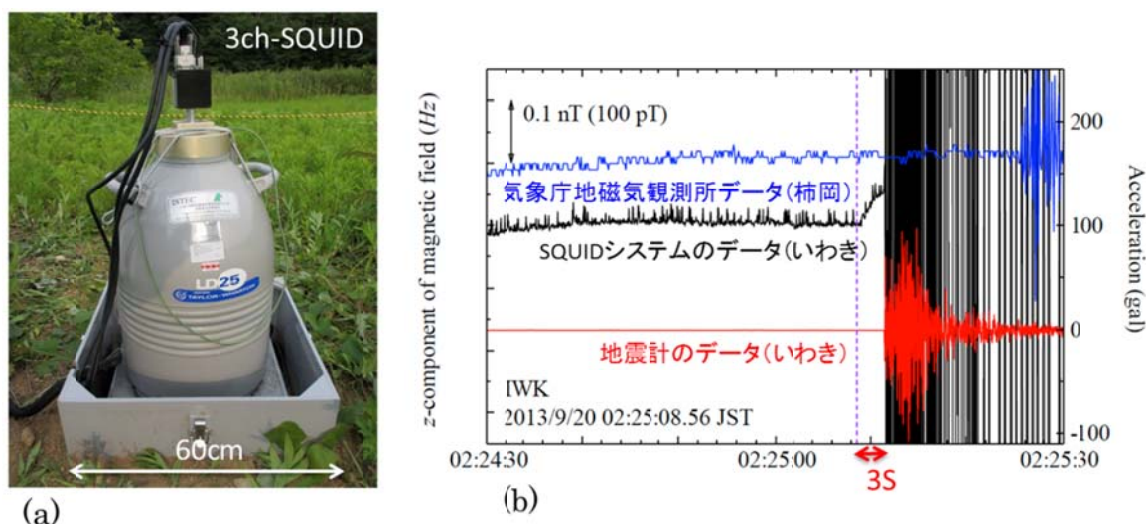


図 4. (a)高温超電導 SQUID 磁気センサを用いた地磁気計測システム、(b)いわき地方で起きた地震前後の SQUID 及び地震計データ (ISTEC、首都大学東京、東北大学、テラテクニカ、福島高専との共同研究)

後者の代表例としては、渦電流（誘導電流）を利用した非破壊検査や金属資源探査が挙げられる。図 5(a) には、過渡電磁応答（Transient Electro-Magnetic: TEM）法による金属資源探査の原理を示す。地表に 100-200 m 角に敷設したコイルにパルス電流を流すと、電流が Off になると同時に誘導電流が地下に誘起され地中深く伝わっていく。この誘導電流の減衰は地下の比抵抗に依存するため、コイルの中心に置いた高温超電導 SQUID 磁気センサで誘導電流の作り出す磁場の時間変化を計測することで、低比抵抗の金属鉱床の存在やその深度を検知することができる。図 5(b) には JOGMEC の委託で開発された実用機の写真を示す。左が、SQUID センサ冷却用の液体窒素容器と接続ケーブル、右が受信機である。この実用機は約 1000 m の深さの探査が可能で、⁶⁾ 海外での探査に使用されている。

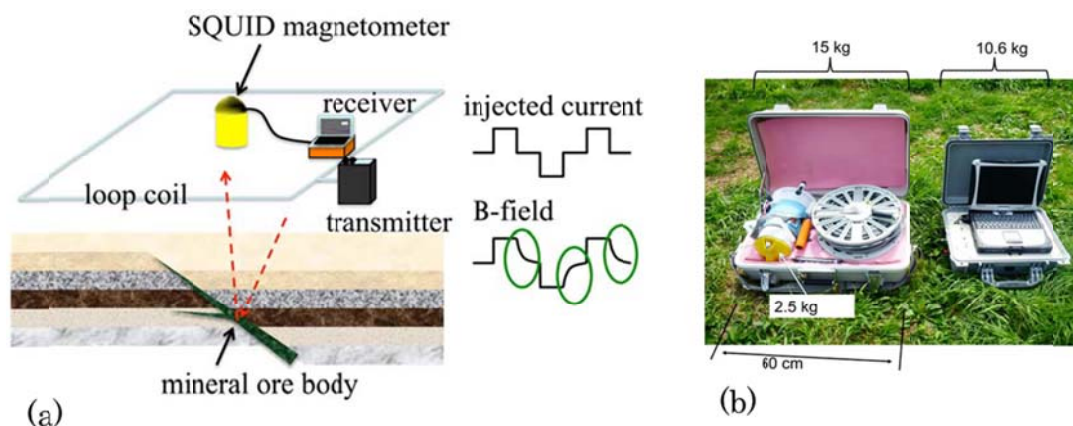


図 5. (a) TEM 法による金属資源探査の原理、(b) 高温超電導 SQUID を用いた金属資源探査装置実用機 (JOGMEC 委託により ISTEC、三井金属資源開発が開発)

超電導 Web2.1

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

金属部材に交流磁場を印加し、部材中に誘起される渦電流分布の欠陥周りでの異常を微弱な磁場変化として検出する渦流探傷 (Eddy Current Testing: ECT) 法は、汎用的な非破壊検査法の一つであり、主として常電導コイルが磁気センサとして用いている。常電導コイルは高周波でのみ高い感度をもつものに対し、SQUID は渦電流が金属部材の深部にまで到達できる低周波でも高い感度を有するため、磁気センサとして用いた場合、配管裏面のき裂などの深部欠陥の検出が期待できる。一方、多くの実用金属部材は磁性材料で、大きな表面磁化をもっている。このような部材に SQUID を直接近づけると動作不能になるが、前節で述べたような常電導検出コイルを用いた“分離型”の構成を取ることで磁化した材料の検査が可能になる。⁷⁾

その他、磁場印加により誘起される微弱な磁場変化を計測する高温超電導 SQUID 磁気センサの応用としては、簡易型の磁化率計測装置、⁸⁾ 磁気微粒子マーカを利用した免疫検査装置⁹⁾やガン検査装置、超低磁場 NMR 検査装置¹⁰⁾ などの開発が進められている。また、一部実用化されている食品中の金属異物検査装置¹¹⁾ や上記の免疫検査装置では、永久磁石を用い金属異物や磁気微粒子を磁化する方法が用いられている。

参考文献：

- 1) 田辺圭一, “ジョセフソン接合作製技術の進展”, 電子情報通信学会誌, vol. 95, p. 736 (2012).
- 2) A. Tsukamoto, S. Adachi, Y. Oshikubo, and K. Tanabe, “Design and fabrication of directly-coupled HTS-SQUID magnetometer with a multi-turn input coil”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, p. 1600304 (2013).
- 3) M. I. Faley, U. Poppe, R. E. Dunin-Borkowski, M. Schiek, F. Boers, H. Chocholacs, J. Dammers, E. Eich, N. J. Shah, A. B. Ermakov, V. Y. Slobodchikov, Y. V. Maslennikov, and V. P. Koshelets, “High- T_c DC SQUIDs for Magnetoencephalography”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, p. 1600705 (2013).
- 4) 神鳥明彦, “心磁計開発の最先端”, 応用物理, vol. 74, p. 580 (2005).
- 5) 大久保 寛, 波頭経裕, 塚本 晃, 田辺圭一, 大西信人, 古川 克, 磯上慎二, 竹内伸直, “緊急地震速報システムの実現に向けて”, 検査技術, vol. 19, p. 1 (2014).
- 6) T. Hato, A. Tsukamoto, S. Adachi, Y. Oshikubo, H. Watanabe, H. Ishikawa, M. Sugisaki, E. Arai and K. Tanabe, “Development of HTS-SQUID magnetometer system with high slew rate for exploration of mineral resources”, Supercond. Sci. Technol., vol. 26, p. 115003 (2013).
- 7) J. Kawano, A. Tsukamoto, S. Adachi, Y. Oshikubo, T. Hato, K. Tanabe, and T. Okamura, “Development of non-destructive evaluation system using an HTS-SQUID gradiometer for magnetized materials”, Phys. Procedia, vol. 27, p. 336 (2012).
- 8) K. Sakai, M. M. Saari, T. Kiwa, A. Tsukamoto, S. Adachi, K. Tanabe, A. Kandori and K. Tsukada, “Development of a compact DC magnetometer using HTS-SQUID and a rotating sample”, Supercond. Sci. Technol., vol. 25, p. 045005 (2012).
- 9) 円福敬二, “磁気ナノマーカーを用いたバイオ免疫検査法の開発”, まぐね, vol. 2, p. 596 (2007).
- 10) H. -C. Yang, “High- T_c SQUID-detected nuclear magnetic resonance and imaging for assaying biomolecules and detecting tumors”, 6th East Asia Symposium on Superconductive Electronics, 27-SA1-1, Yonezawa, Japan, Oct. 2011.
- 11) S. Tanaka, H. Fujita, Y. Hatsukade, T. Nagaishi, K. Nishi, H. Ota, T. Otani and S. Suzuki, “[A food contaminant detection system based on high- \$T_c\$ SQUIDs](#)”, Supercond. Sci. Technol., vol. 19, S280 (2006).

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 3 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、今回からは電力系統を形作っている設備の解説をしていきます。
最初に電力系統設備を理解する上で重要な電力系統の特徴を解説し、イメージをある程度描いていただいた上でそれぞれの設備の特徴に入っていきたいと思います。

5. 「電力系統の周波数が同じである」のイメージ

○まず、水泳競技の「シンクロ」を思い浮かべて

さて、電力系統は主に交流電気の電力で形成されています。交流系統でつながっている場合、その中で周波数は同じです。例えば、西日本では静岡でも鹿児島でも発電機は同じ周波数 (60 Hz) で発電しています。東日本では、青森と沼津の発電機は 50 Hz で同じです。この同じ周波数で発電していることを工学的には「同期運転」(Synchronous Operation) しているといいます。Synchronous の動詞形は Synchronize なのですが、水泳競技にあるシンクロ (Synchronized swimming) の Synchronize と同じ意味です。シンクロでは音楽に合わせて (特に団体戦では) 皆が一致した動きで演技をしますが、同期運転では、同じ周波数に合わせて発電機が一致した動きをしている、との基本イメージを持っていただいて結構です。
シンクロの場合、猛練習を重ねて一致した動きができる訳ですけど、発電機も猛訓練が必要なのでしょうか？

○次に高校野球のスクラム応援を思い浮かべる

高校野球の応援では、応援歌に合わせて (Synchronize して) 肩を組んで応援します。(スクラムを組んでの応援) 肩を組むことで、少し不自由な感じになりますが、一方、各人の動きが少しぐらいずれても全体として統一した動きとなります。

発電機も一旦肩を組み合うと (同じ周波数で同期運転に加わると)、後は相互の発電機が影響を及ぼし合い、一致した動きが実現します。この様な影響を及ぼし合う力は同期化力と呼ばれ、交流系統独特の特徴を生み出します。同期化力があるため、発電機はシンクロのような猛練習の必要はありません。ところで、例えば、スクラムの真ん中に「お相撲さん」の様な力の強いメンバーいて勝手な動きをすると、スクラムができなくなるでしょう。同様に、同期化力もある程度以上の「無理がかかる」状況が生じると、限界に達して一致した動きができなくなります。一致した動きができなくなると発電機同士で周波数が維持できなくなり (同期運転できない)、結局、発電した電気が送れなくなり停電になってしまいます。

ここで言う「無理がかかる」状況にはいろいろな場合がありますので、別の項で解説していきます。ここではまず、発電機が「スクラム」を組んでいるイメージを覚えてください。

(余談) 「同期水泳」との言い方が広まっていれば良かったのですが？

「シンクロ」が注目され始めた頃、密かに、いずれ日本語訳がされて「同期水泳」との言葉が広まれば良いけれど、と密かに期待しました。と言うのも、電力系統の専門家が使う「同期」のイメージがなかなか理解されないからです。ただ、日本では、「同期」と言えば、入社や入学が「一致」

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

するだけで、後はばらばらに行動するイメージがあります。例えば同期会などに使われていて、シンクロがイメージする同期とは違い過ぎますから、日本語訳としては使いづらかったのではと推測します。(ちなみに英語では、同期会の「同期」は「same」や「contemporary」を使い、Synchronizeとは違う概念です)「同期」のイメージが広まる絶好の機会が失われたのは実に残念なのですがやむを得ない?

いずれにしても同期を維持する(発電機間のスクラムを崩さない)ことが電力系統では非常に重要な考慮事項です。電力系統技術者は、常にこれを意識しながら電力系統の設備づくりや設備運用を行います。

なお、交流系統同士を直流系統でつなぐと同じ周波数であっても同期化力が生じません。つまり肩を組み合わせない状態で電気をやり取りすることになります。この場合でも、交流系統同士は直流設備を通じて影響を及ぼし合いますが、交流系統同士をつなげる(肩を組み合わせ)のに比べると、ドライな関係になります。(これも別項であらためて解説します。)

6. 電力系統の基本構成と特徴

電力系統の基本構成は図-11 のとおりです。発電設備、流通設備、需要で構成されます。バッテリーも電気を供給する時は発電設備、電気を貯める時は需要と考えれば良いでしょう。さて、図-12 の様に 2 つの電力系統が並んでいるとします。日本でも第二次世界大戦以前はこの様に電力系統がお互い無関係に並列していることが多くありました。

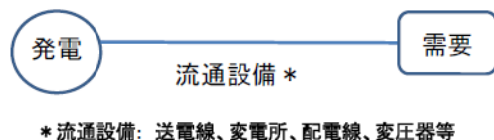


図 11 電力系統の基本構成

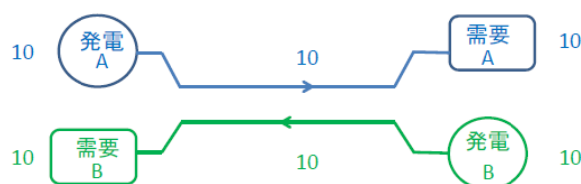


図 12 電力系統の初期(ばらばらに送り合っている)
(数字: 電力)

○電力系統の不思議 1: 連系の魔術

図-12 の 2 つの系統を繋ぎましょう。(図-13) 電力用語ではこのことを「連系する(系統を連ねる)」と言います。なお、連「係」と違う字を使うことにご注意ください。さて、図-12 と図-13 を比べると電気の流れ方が違います。

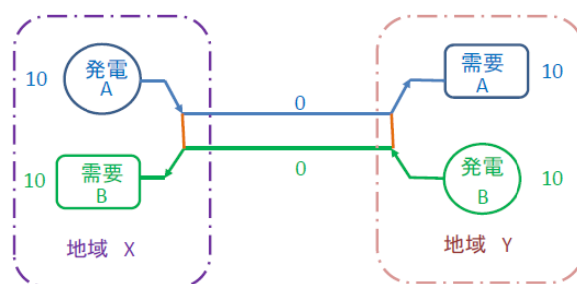


図 13 電力系統の進展(電力系統の連系化)

図-13 で判るとおり、左側を地域 X と右側を地域 Y とするとその間を結ぶ流通設備に電気が流れません。これは、前回で述べた電気の混ざり合う性質(プールの特性)で図-12 の左向きと右向きの電気が混ざり合いゼロとなるためです。ところで、この場合、X と Y の間の流通設備は流れがゼロですから、技術的には「必要ない」と言えます。A 発電と A 需要、B 発電と B 需要は電気のやり取りをしているのですが、やり取りする者同士が繋がっていないのに電気取引ができることになります。不思議と言えば不思議です。

超電導 Web2.1

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

(余談) イギリスと日本で電力取引を！？

イギリスの電力取引所を訪問した時、先方の担当者から、日本とイギリスとの電力取引市場を検討しないかとの誘いがありました。図-13 の X 地域をイギリス、Y 地域を日本とすれば、「取引の結果、双方に流れる電力が最終的に丁度ゼロになること」をルールとして電力取引を行えば、取引の結果 X 地域と Y 地域の電気の流れはゼロとなるので繋がっていなくても取引は可能になります。つまり、このルールに基づく取引を行えば、イギリスと日本は電氣的に繋がっていなくても、両国間での電力取引市場が作れます。正直、何となく抵抗感はあるのですが、物を取引する場合にルールを設定し、そのルールを守って皆が参加すれば取引できるのです。後は、その様な取引を望む人がどれだけいるかの問題です。(今のところ実現したとは聞いていませんからニーズが少ないのでしょうか。)

○電力系統の不思議 2：お隣さんが重要

図-13 に戻ります。ここで、A 発電設備が、安い電気を送るため品質の悪い、例えば電圧が一定しない電気を発電するとします。この場合、安く買えるのは A 需要家です。ところで、電圧が一定しないと工場の生産等に影響を与える等の問題を生じることがあります。図-13 で見ると、この影響を受けそうなのは、A 発電設備に近い B 需要家と考えて良いでしょう。ところで、B 発電設備は若干値段が高いですが良い電気を作り電圧も一定しているとします。B 需要家はそのため高い料金を負担しますが、電圧一定の恩恵を受けるのは安い A 発電設備の電気を買っている A 需要家です。少し頭が痛くなってくるかも知れませんが、電力系統では、誰から電気を買っているかではなく自分に近いところで電気を売っている人の影響を受けるのです。すなわち「お隣さんが重要」となる訳です。

このことから電力系統での電力取引に関わる特殊な特徴が出てきます。すなわち、「電力品質」で競うのが難しいのです。なぜなら「安い電気を買うのだから品質は下がっても良い」と言うような「発電設備と需要家（買う人）の 1 対 1 の取引関係」ができないのです。これも電力のプールの性質のためです。

(余談) 新規事業者の発電品質が悪そうで買うのが不安だ！！

電力自由化が始まった頃、このような話が一部で聞かれました。電力系統のプールの性質を考えるとデマと考えて良いです。ただ、次のことが言えます。

質の悪い電気で安く販売して利益を上げる発電機が出てくると他の発電機も「競争上」質を下げる懸念がある。一部の発電機が下げただけなら影響も小さいが、多数の発電機が質の悪い電気を発電し出すと電力系統全体の質が低下し「需要家も発電機も含め全員」が迷惑する状況となってしまいます。

このような事態を避けるためには、発電機が一定の技術的な資格を満たすことが重要になってきます。この資格は「連系要件」と呼ばれますが、当然、従来の電力会社（一般電気事業者）も守る必要があります。また、要件を決めるときには、できるだけ競争を促しつつ電気の質の悪化を避ける資格条件を発電技術の発展なども反映しながら、設定・見直ししていく必要があるでしょう。更に、電力系統に参加した後も要件を引き続き守っているかチェックが必要です。諸外国でもこのような発電設備の品質を持続するのにいろいろ苦労している様です。

(余談) 発電機がインフルエンザに集団感染！？—カリフォルニアの教訓

発電設備の品質には、設備だけでなく運転する人間も大きく影響します。カリフォルニアで自由化が始まった頃、競争を活発にするため発電機は全て取引所で取引し、安く発電する発電機から運転させる仕組みが採用されました。しばらく平穏に推移したのですが、ある

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

時からぽつぽつと発電機が止まり始めたのです。当時のカリフォルニアは発電機が不足気味で、発電機が止まると不足状態が拡大し取引価格が上昇したのです。その上昇幅が大きいため、発電するよりも一部の発電を止めて価格の上がる方が儲かることが発電事業者に分かり止りだしたと推定されました。(後で現地調査が行われたのですが「意図的に止めた証拠」は結局見つかりませんでした。英語で **Withdrawal** (日本語では撤退?) 問題と言われています) 停止発電機がインフルエンザ感染の様に増加し、終に電力系統内の発電能力が需要を大幅に下回る事態となりました。このため、電力系統運用者はやむを得ず、日本でも「**3.11**」で悪名が高くなった輪番停電を大規模に実施したのです。これが今も「自由化による大停電」として知られるエピソードで、カリフォルニアでは電力自由化が実質的に中止されました。(ちなみに発電事業者は、その年、素晴らしい営業業績を上げました。)

私は電力自由化を進めるべきと考えていますが、進めるに当たっては、自由化の仕組みと競争参加者の質と言う「人間側の要素」を常に評価し、必要に応じ適宜見直すことが、電気品質を維持するために重要と思われます。

○電力系統の不思議 3：電力系統の信頼度は発電と流通が複雑にからみあう

停電のしにくさを信頼度と言います。基本的に発電が需要より少なくなならないほど(厳密には「少なくなる確率が小さい」ほど)、くわえて流通設備が原因で発電が需要に届かない状況が少ないほど(確率が小さいほど)信頼度が高い、となります。電力系統では、発電と流通の要素が複雑にからみ信頼度が決まります。

・発電設備量の低減

図-12 に戻ります。発電 A は点検や故障等で停止することがあるでしょう。このために発電設備を 10 増して(A')20 にすることが考えられます。(実際は、この様な場合、需要を減らすことも検討される等複雑な様相となります、ここでは想定を簡単にします) 図では普段は発電しないと仮定しています。

発電 B も同様に考えて 10 増やして(B')20 にします。(図-14)

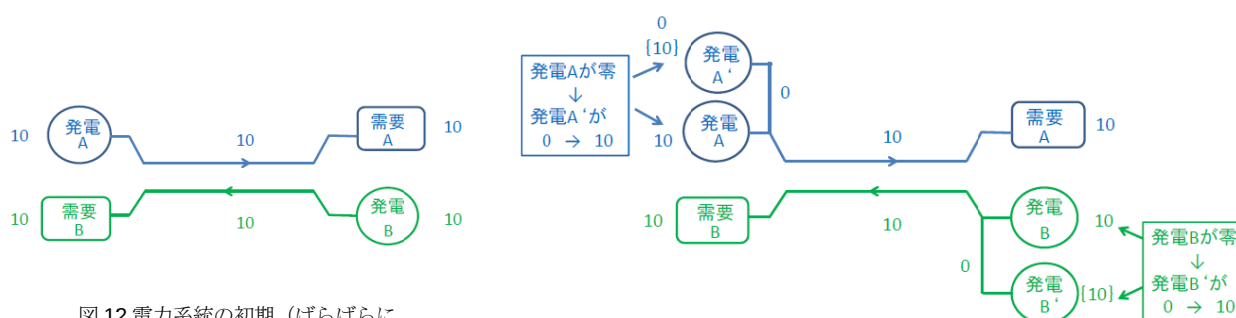


図 12 電力系統の初期 (ばらばらに送り合っている) (数字: 電力)

図 14 電力系統の信頼度確保 (連系なし)

さて、図-13 の系統構成でも発電設備の点検や停止を考えます。発電 A と発電 B が同時に止まることはめったにないと想定すると、発電設備 C を 10 置けば発電 A や発電設備 B の停止に対応できます。(図-15) この様に系統が連系されると発電設備を削減することが考えられるのです。ところで、不測の事態に対応する発電設備のことを予備力といいます。電力系統を連系することで予備力を共有し発電設備を減らせることになります。逆に言えば、同じ予備力でより多くの需要に

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

信頼度を下げることなく供給できるのとなるのですが、この効果は「連系線の予備力効果」と呼ばれます。

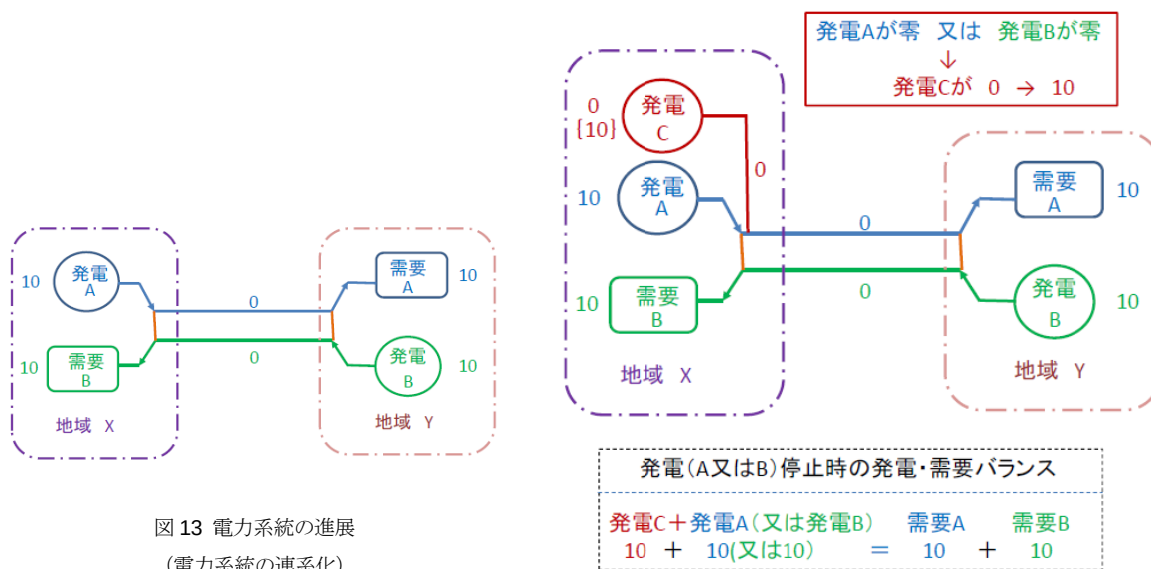
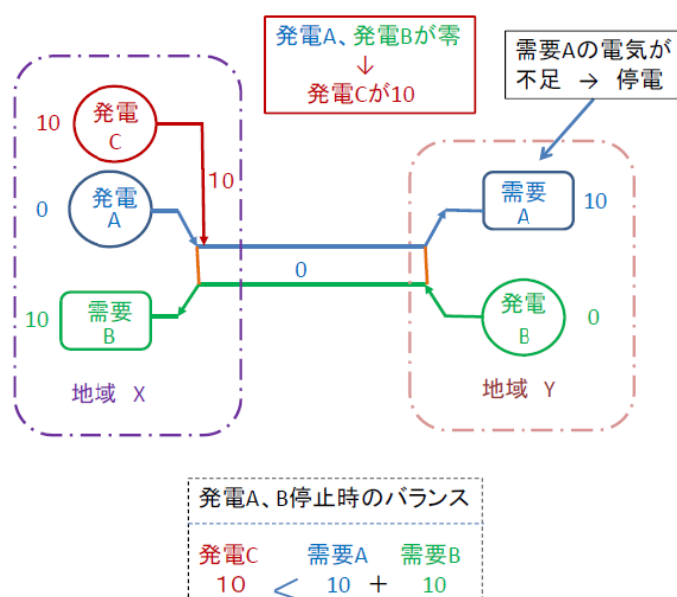


図 15 電力システムの信頼度確保 (連系あり)

ところで、電力システムが連系されても発電設備 A、B が同時に止まると需要の全てに供給できません。(図-16) この様に、連系すること (又は連系する流通設備容量を増やすこと) は発電設備を増設することと完全には一致しません。



また、例えば、連系する系統同士が遠方 (例えば前述の英国と日本) とすると、信頼度の維持方策としては、発電設備を増設の方が連系設備を設置より低コストとなります。

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

(余談) 連系線論議は本当に難しい

電力系統を連系するか否か、連系する場合どの程度の容量とするか、は連系線論議と呼ばれ、日本でも議論されていますが、世界的にも常に活発に議論されています。

電力系統の連系（連系の要否や強化の要否）を検討するには、そもそも電力系統の信頼性度をどうするかが検討のベースとして必要になります。例えば、前の文章で「めったにない」と書きましたが、工学的には確率論を用い数値化し、例えば、10 年に一度、100 年に一度と数値化します。しかし結局は、10 年に一度も起こっては困るが 100 年に一度なら「しょうがないと諦める」等を決める必要が生じます。その際、連系に要するコスト次第で、安くできるのなら 100 年に一度の状況にも対応して欲しい、となるかも知れません。ところが、この場合、「かかるコスト次第」のレベルを 100 万円とするか、1 億円か等を決めなければなりません。更に、新たな連系流通設備が、例えば、国立公園を通過するとなれば、その社会的な影響（これもお金で換算できないですが「コスト」と考えることができるでしょう）も考える必要があるかも知れません。実際の検討では、更に様々な要素を考慮する必要が出てきます。従来は、電力会社が「これらの要素を一括して検討」して来た面がありますが、電力会社の機能分離が行われる中、今後、誰が検討しても非常に難しい課題となるでしょう。

いづれにしても、ここでは、発電と流通設備は信頼度と言う、いわば繋ぎあった「ロープ」によって「強かつ複雑に」結びついていることを理解いただければと思います。

○電力系統の分類：放射状系統、ループ系統、くし型系統、メッシュ系統

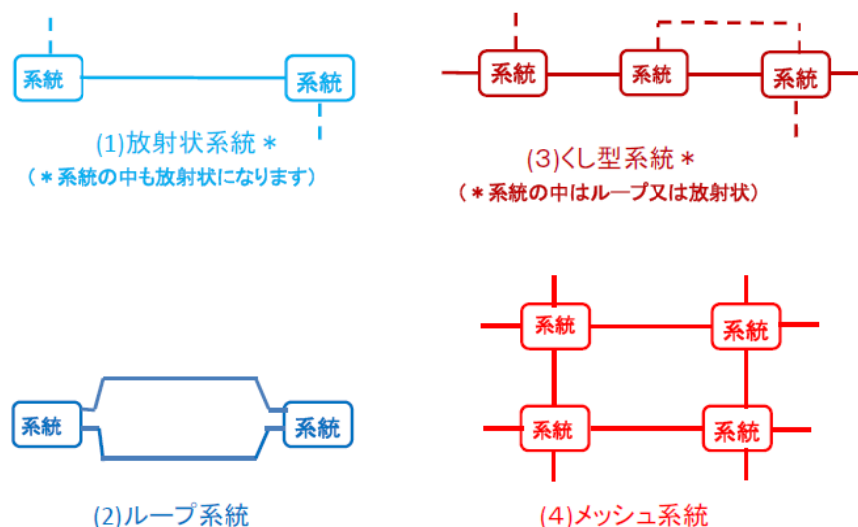


図 17 電力系統校正パターン

・放射状系統

図-11 で「発電」を「ひとつの電力系統」、「需要」も「ひとつの電力系統」と読み替えた系統構成は放射状系統と呼ばれます。(図-17-(1)) 放射状系統では、個々の系統の中も基本的に放射状になっています。

なお、連系する流通設備があっても普段は使用されない場合(図の点線)、放射状系統と呼ばれます。この構成は、何と言っても、「電気の流れがシンプル」です。日本の低い電圧の系統はこの構成が主流です。

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

・ループ系統

図-17-(2)の様に、流通系統で電気の流れに 2 つ道があること（数学的にはループがあること）構成はループ（輪型）系統と呼ばれます。一方の流れ道がなくても他方で電気が流せる（流せるだけの容量が必要ですが）などの特徴があります。なお、ループは「輪」ですが、直線の方が円より距離が短いので（建設コストが安くなります）、実際は「角ばる」ことが多いです。

・くし（串 or 櫛）型系統

図-17-(1)を横に並べて繋いで行きましょう。これが日本の電力系統の特徴と言われる「くし型系統」の基本構成です。（図-17-(3)）放射状系統のシンプルさ引き継いだ系統構成です。勿論、実際のくし型系統では需要や発電設備のつながり方は遥かに複雑になりますが基本的にこの構成となります。系統が比較的シンプルさを維持しつつ、「連系の基本的なメリット」も備えています。なお、図中の点線は普段使用されない連系設備（緊急時等に使用）を示しますが、この点線部分を直流設備で形成し常時使用する場合も、系統の特徴からくし型系統に分類されます。

・メッシュ型系統

図-17-(2)のループ系統を電力系統間でどんどん拡大していった構成がメッシュ（網型）系統と呼ばれます。（図-17-(4)）ループ系統の特徴を引き継ぎ発展させた系統構成で、ドイツの高電圧系統が典型で、米国東部の高電圧系統も概ね同様な構成です。一見、クモの巣的な構成となりますので、いかにも弾力性があり強い感じがしますが、複雑な構成となるので（実際の系統は綺麗な基盤の目になりませんし）運用にはそれなりの苦勞が必要です。

（余談）電力系統構成優劣論議があるのですが――

私は日本の高電圧系統に慣れ親しんできたので、くし型系統に愛着があります。一方、中国の華東地域（上海を最東端とする揚子江周辺地域）の電力系統に関するお手伝いをした際もくし型系統に近い形状、インドのお手伝いをした際はメッシュ系統、マレーシアのお手伝いをした際はくし型系統、と世界の様々な系統に触れるチャンスもありました。それぞれ、発電所の位置、需要の位置、それらの歴史的発展過程などから電力系統が形成されてきており、「日本型が良いからくし型に！」と言うのは無理な気がしました。一般的に、都市や州が均等ちらばっている場合はメッシュ系統（ドイツ、米国東部、インド）、需要や発電所が海岸線（日本、マレーシア）や大きな川（華東）沿いに分布している場合はくし型の傾向があるとの印象があります。結局、土地々で“慣れ親しんだ”電力系統構成を順次発展させていく方が、「もちはもち屋」の感覚から言っても、上手に形成・運用ができると思います。日本では、時々、どの系統構成が優れているかとの論争が行われますが、実り少ない気がします。

今回は電力系統の設備をマクロ的に捉えた解説を行いました。次回以降は、構成するそれぞれの設備の解説に入りたいと思います。まずは、発電設備から始めます。

[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」

中部大学・超伝導・持続可能エネルギーセンター
教授 筑本知子

エネルギー・スーパーハイウェイ (Energy Super Highway) 構想を目指して

超伝導の最大の利点は、送電ロスの少ないことによる電力の長距離送電が可能なこと。従って、究極的には直流発電を特徴とする太陽光発電等の再生可能エネルギーと組み合わせることによって、昼夜等の不安定さを地域レベルから地球レベルで解消し、人類に等しく安価なエネルギーを提供することが目的になります。これはちょうど 20 世紀末に情報が光ファイバーによって伝送されたように、安定した電力を全世界に届けることが可能となるでしょう。私たちはこれを「エネルギー・スーパーハイウェイ構想」と呼んでいます。

中部大学ではこのエネルギー・スーパーハイウェイの構築を究極の目標として (図 1)、超伝導直流送電を主テーマとして低損失システム開発を行うとともに、関連技術としてケーブルの長尺及び大容量化、パワーエレクトロニクス基礎研究等に取り組んでいます。直流送電システムに関しては、2005 年に文部科学省の補助を受け、世界初の 20 m 級高温超伝導直流送電 (CASER-1) に成功した後、さらに 200 m の装置 (CASER-2) (図 2) を藤原洋氏 (ナノオプトエネジー社社長) の寄附により 2010 年に建設し、原理実証試験に成功しました。この成功を受けて、昨年度、経済産業省からの委託により、石狩での「高温超電導直流送電システムの実証研究」(web21,2013 年 11 月号及び 2014 年 3 月号) の中心メンバーの一員として、世界最長となる 500 m および 2 km のケーブルシステムの設計、研究開発及び建設をすすめているところです。この他に、サハラ・ソーラーブリーダー計画 (http://www.jst.go.jp/global/kadai/h2202_algeria.html) にも参画して、北アフリカ (チュニジア、アルジェリア) との研究交流や、ドイツの Desertec 計画関係者との交流も含まれています。このため、センターに太陽光発電設備を設置し、太陽光発電との連携実験を行おうとしています。

2014 年 4 月 1 日現在のメンバーは、教員は山口作太郎センター長を筆頭に、高野廣久特任教授、河原敏男教授 (兼任)、浜辺誠准教授、渡邊裕文准教授、ユーリ・イワノフ准教授と筆者、研究員は 5 名、事務系の女性 3 名、学生 2 名と大所帯になっています。昨年 9 月からロシアよりイワノフさん、10 月に筆者が加わったことで、山口センター長の最近の口癖は「当センターは、昨今いわれているグローバル化、男女共同参画化でも先端となった」です。

主な研究テーマ

- ・ 超伝導直流送電システムの開発と運転研究
- ・ 低熱侵入真空断熱配管の開発と熱侵入測定
- ・ 低熱侵入型電流リード (ペルチェ電流リード) の開発と特性評価
- ・ 送電大容量化に向けた最適ケーブル構造の研究
- ・ 電力変換器の効率化、パワー素子加工技術の開発

など

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

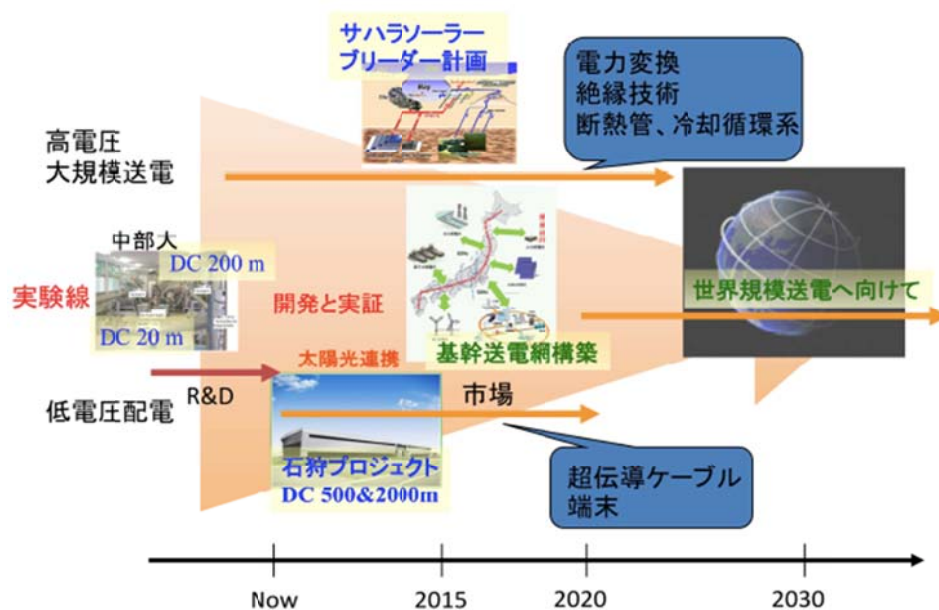


図 1 世界規模送電に向けた中部大学での超伝導直流送電システム研究開発

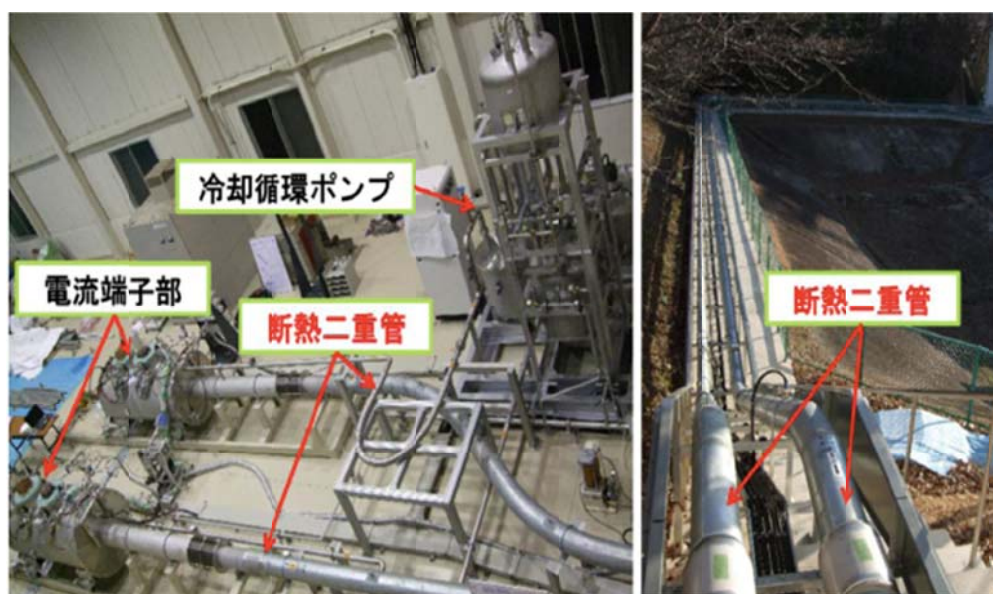


図 2 200 m 超電導直流送電実証設備 (CASER-2)

[超電導 Web21 トップページ](#)