

超電導 Web21

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

掲載内容 (サマリー) :

トピックス :

○ISTEC/SRL の移転及び組織変更のお知らせ

特集 : 平成 25 年度超電導技術動向報告会報告

○Y系プロジェクトの最終成果概要と期待される今後の高温超電導基盤技術開発

○超電導電力機器用線材の技術開発- (前月号より再掲載)

○超電導電力ケーブルの研究開発- (前月号より再掲載)

○超電導変圧器技術開発の成果- (前月号より再掲載)

○高温超電導電力貯蔵システム (SMES)の研究開発 (2) ~YOROI コイル適用効果~

○ISTECにおける高温 SQUID 技術開発の最近の進展

○SQUITEMによる金属資源探査

○超伝導単一光子検出器 SSPD の開発状況

○新超電導物質の探索の進展

○高温超電導関連技術の国際標準化動向

○超電導の鉄道分野への応用

○洋上風力発電機開発への高温超電導技術適用の期待と課題

○超電導関連 2013年7月-8月の催し物案内1

○新聞ヘッドライン (5/20-6/19)

○超電導速報-世界の動き (2013年6月)

○隔月連載記事-風力熱蓄積発電 (その4) - 「風力発電」

○読者の広場(Q&A)- 「絶対温度 153 ケルビンの高温超電導 - このような新規物質を探索するときにはどんな苦勞がありますか?」

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

〈発行者〉

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

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 Web21

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

トピックス：ISTEC/SRL の移転及び組織変更のお知らせ

ISTEC/SRL は、本年7月1日以降、長年あった江東区東雲を離れ下記のように神奈川県方面へ順次移転いたします。またこれを機に「組織変更」も行います。

ISTEC/SRL は、今後も我が国超電導産業お発展等に一層貢献してまいる所存です。読者の皆様方にも、このWeb21を始め、引き続きご支援賜りますようお願い申し上げます。

【本拠地の移転】

〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3丁目2番1号

かながわサイエンスパーク R&D ビジネスパークビル A棟9階

●事務局（含むWeb21編集局）7月1日～ 業務開始

電話（代表）044-850-1611 （web21編集局）044-850-1612 （FAX）1613

●線材・パワー応用研究部 8月以降に移転完了※

電話（線材）044-850-1616、1617

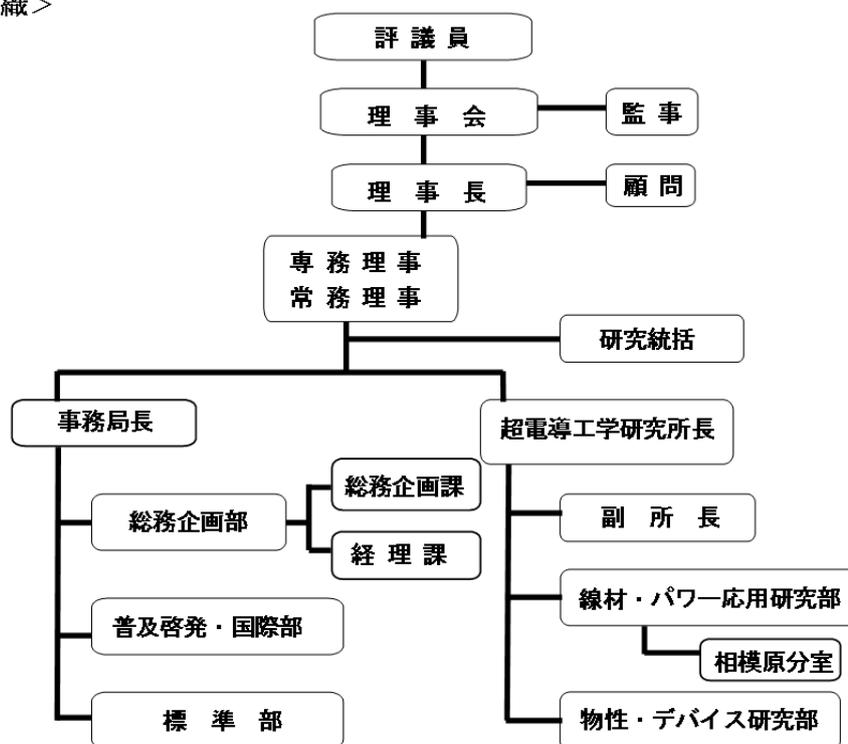
〒223-0051 神奈川県横浜市港北区箕輪 2丁目11番19号

●物性・デバイス研究部 8月以降に移転完了※

※研究部は当面は東雲残留。具体的移転時期等の問い合わせは下記へお願いします。

旧線材 03-3536-5711、旧デバイス 03-3536-5700

<新組織>



[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：平成 25 年度超電導技術動向報告会報告

「Y 系プロジェクトの最終成果概要と期待される今後の高温超電導基盤技術開発」

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
所長 塩原 融

はじめに

経済社会の基盤となる電力の安定的かつ効率的なエネルギー供給システムを実現するため、システムを適正に制御し、電力供給を安定化させるための技術及び発電電力を無駄なく輸送するための高効率な送電技術の確立は重要な課題である。そのため、世界的にも我が国が最先端の技術力を有する超電導技術を活用して、コンパクトで大容量の電力供給が期待できるイットリウム(Y) に代表されるレアアース系銅酸化物高温超電導線材（以降 Y 系超電導線材と称す）を用いた超電導電力機器の開発を目的とした「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクト（以降、「Y 系プロジェクト」と称す。）は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託を受けて、公益財団法人国際超電導産業技術センター（ISTEC）、電力会社、線材メーカ、重電メーカ等 11 機関、23 大学及び国立研究所が共同研究体を構成して、平成 20 年度～24 年度にわたり実施し、平成 25 年 2 月 28 日に成功裏に終了した。

本プロジェクトにおいては、超電導電力貯蔵システム(SMES)、超電導電力ケーブル及び超電導変圧器の実用化に向けた重要な要素技術を開発し、また、これら超電導電力機器に最も適した超電導電力機器用線材の技術開発並びに実用化の共通基盤となる超電導電力機器の適用技術標準化に向けた取組みも併せ行った。なお、本プロジェクトが取り組む超電導電力機器（SMES、電力ケーブル、変圧器）及び Y 系超電導線材の位置付けとしては、第 3 期科学技術基本計画(H18～H22)を踏まえた総合科学技術会議にて、推進 4 分野における重要な研究開発課題に取り上げられた。また、経済産業省の施策としては、エネルギーイノベーションプログラムにおける Cool Earth—エネルギー革新技術計画にて選定された CO₂ 大幅削減 21 技術の中の超電導高効率送電に選定され、超電導技術分野の技術マップ（平成 19 年 4 月制定）のエネルギー・電力分野機器開発にも位置づけられている。また、平成 23 年 8 月 19 日に閣議決定された第 4 期科学技術基本計画(H23～H27)においても、「安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現のため、分散エネルギーシステムの革新をめざし、超電導送電の研究開発を促進し、海外展開を図る。」とされている。

今回開催された「超電導技術動向報告会 2013」においては、Y 系プロジェクトの最終成果概要及び期待される今後の高温超電導基盤技術開発とともに、プロジェクト内の研究開発テーマ毎に詳細が報告された。さらに、今後の超電導研究への期待を、新超電導物質の探索、高温 SQUID 技術を含めた薄膜デバイス、超電導の鉄道分野、洋上風力発電機開発への高温超電導技術適用を含めた超電導機器応用の分野、高温超電導関連技術の国際標準化動向において第一線で活躍されている先生方ならびに研究者から報告された。

1. Y 系プロジェクトの最終成果概要

Y 系プロジェクト(H20～H24)は、新エネルギー技術開発機構 (NEDO) からの委託研究開発で、(公

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

財)国際超電導産業技術研究センターを代表委託先とし、11企業、23大学等が共同研究体を構成して研究開発を進めた。本プロジェクトは、図1の超電導電力機器による都市部への大容量安定供給の概念図に示すように、Y系超電導線材の高特性を活用した電力機器として、超電導電力貯蔵システム(SMES)、超電導電力ケーブル、超電導変圧器を対象に、Y系超電導線材の高特性化とともに将来の実用化、導入・普及に目途をつける重要な基盤要素技術開発を行うことを目的として開発を進めた。

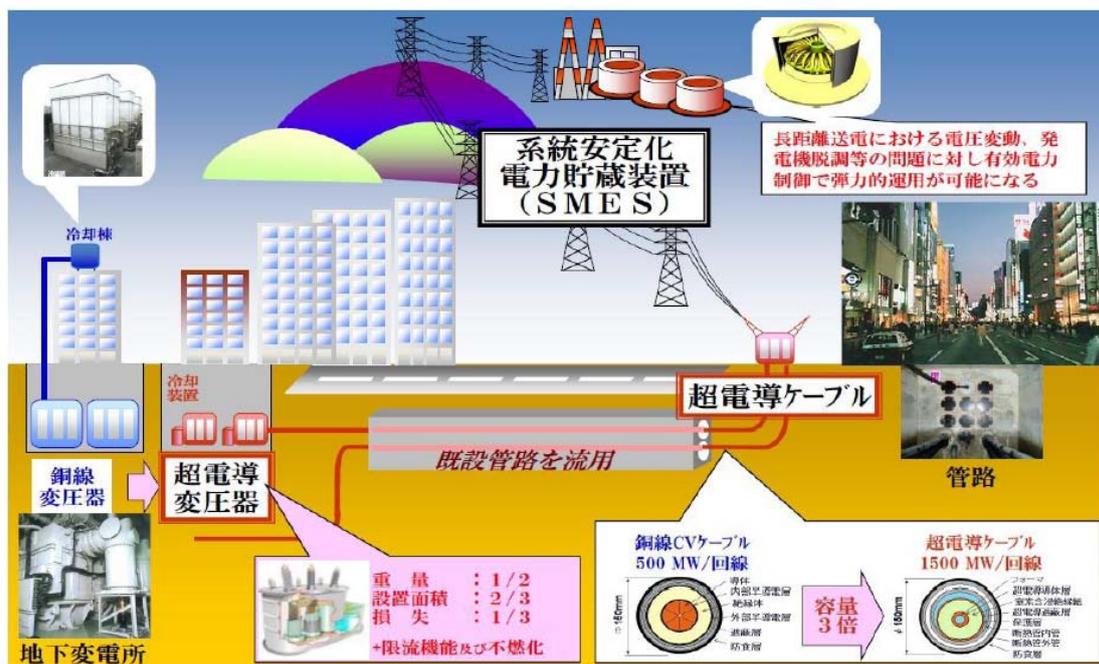


図1 超電導電力機器による都市部への大容量安定供給の概念図

1.1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

SMESの研究開発に関しては、(1)2 GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発、(2)高効率コイル伝導冷却技術開発、(3)SMES対応線材安定製造技術開発、及び(4)高信頼性・高耐久性SMESコイル要素技術開発を進め、系統安定化用及び負荷変動補償・周波数調整用途に適用できる規模の2 GJ級大容量Y系超電導線材SMESコイルを可能とする高磁界・コンパクトコイルの要素技術や、20 K以上の高温運転を想定した伝導冷却構造を開発した。最終年度には、2 GJ級SMESの実現に資する要素技術の開発、及びコイル保護技術の確立を目的として、SMESコイルシステム化技術に必要である高耐久性・高信頼性コイルの検討・評価を実施した。コイルの通電特性を低下させる要因の一つであるY系超電導線材の剥離について、評価方法、及び試験結果による剥離強度の確率的予測について検討し、線材耐力に適合したSMESの最適コイル化技術を検討し、図2に示すようなコイル構造体全体で、フープ応力によって発生する応力・歪みを抑制する新規コイル構造(Yoroi-coil)を開発した。本コイル構造では1.7 GPaのフープ応力に耐え得るという試験結果を得た。また、このコイル構造の応力分担の状況を解析し、コイル巻線のみでなくコイルの枠材や側板がコイルに作用する電磁力を分担していることを明らかにし、本コイル構造が優れた耐久性を有していることを明確にした。

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

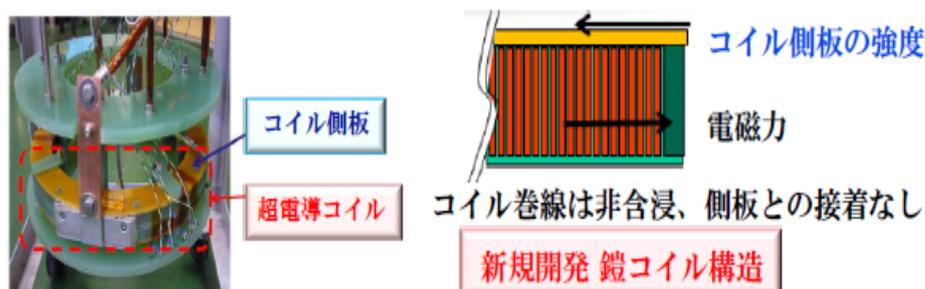


図2. コイル巻線への応力の低減を目的に、非含浸コイルにより、
応力をコイル側板で支持する補強構造を有する新規開発の鎧コイル
(Yoroi-coil: Y-based oxide superconductor and reinforcing outer integrated coil)

1.2 超電導電力ケーブル研究開発

Y系超電導線材を用いた超電導電力ケーブルは、低損失・コンパクトで大容量送電を可能とし、既存管路を活用して送電容量の増大が期待されることから、66 kV/5 kA 大電流ケーブルと 275 kV/3 kA 高電圧ケーブルを開発した。ケーブル開発で重要な要素技術となる低交流損失化・大電流導体化・大容量接続・三心一括・コンパクト化・高電圧絶縁（高電圧絶縁材料選定・絶縁設計・ブッシング）・高電圧接続・低誘電体損失化等の技術を開発した。スラッシュ窒素冷媒を用いたケーブル冷却の検討を行うとともに、要素技術を組み合わせた大電流及び高電圧ケーブルシステムを開発し、性能を検証した。

66 kV 大電流ケーブルシステム検証では、図3に示す世界最小レベルの低損失・世界最大の送電密度を有するコンパクトな三心一括ケーブルシステムを作製し、課通電試験（66 kV/三心一括/5 kA、15 m 長）を実施し、150 mmφの管路に収納可能で、ケーブル損失（交流損失(導体層、シールド層)、誘電体損失）が 2.1 W/m-相@5 kA 以下の目標を達成・検証した。



図3. 66 kV -5 kA 大電流ケーブル検証用システム概観

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

275 kV 高電圧ケーブルシステム検証では、図 4 に示す世界でもトップの低損失・コンパクトなケーブル検証システムを構成し、課通電試験 (275 kV/単心/3 kA、30 m 長) を実施し、外径 150 mmφ 以下で、ケーブル損失 (交流損失(導体層、シールド層)、誘電体損失) 0.8 W/m-相@3 kA 以下の目標を達成・検証した。



図 4. 275 kV - 3 kA 高電圧ケーブル検証用システム概観

1.3 超電導変圧器の研究開発

Y 系超電導変圧器は、高効率化やコンパクト化・軽量化が期待できる。また、冷媒の液体窒素が不燃で絶縁性能が高く、保守性にも優れている。これらの特長から、(1)Y 系超電導線材による巻線技術開発、(2)冷却システム技術開発、(3)限流機能付加変圧器技術開発、(4)超電導変圧器対応線材開発、(5)66/6.9 kV-2 MVA 超電導変圧器モデルの検証と配電用 20 MVA 級超電導変圧器の設計を進め、コンパクトで高効率な配電用超電導変圧器の実現に資する重要な基盤技術を開発した。

2 MVA 級超電導変圧器モデル検証では、三相非磁性で容器容量 10 m³ 級の大型非磁性保冷容器 (GFRP 製) を開発し、保冷性能 (既存の小型容器相当の 20 W/m² 以下) を試験にて検証した。その後、巻線製作、変圧器組立を行い、変圧器巻線性能試験を実施した上で 66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルを試作し、冷却システムと組み合わせて、図 5 に示す超電導変圧器システムを構成した後、課通電試験を実施し、性能を満足することを検証した。さらに最終年度には、2 MVA 級超電導変圧器モデルの設計、性能試験、評価に加え、大電流巻線モデル等の検証、検討結果を踏まえ 20 MVA 級超電導変圧器を設計した。設計結果を既存油入変圧器と比較すると、損失は冷凍動力を考慮しても油入変圧器の 46 % で、重量及び設置面積は鉄心の軽減等から 50 % 程度となる結果を得た。

冷凍機開発と冷却システム開発では、冷凍機の基本プロセス、コールドボックス他の設計、及び運転プロセスシミュレーションにて COP 0.06 (最終目標>0.06) @80 K を理論的に確認し、本プロジェクト後半において、図 6 に示すターボ圧縮機、膨張タービン及び熱交換機を組み合わせ

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

たネオンを作動ガスとして使用した Ne 冷凍機の単独性能試験において、冷凍能力 2.17 kW@65 K、COP 0.06@80 K を確認した。また、サブクール液体窒素の循環冷却試験では冷却システムの負荷変動に対する良好な追従性を確認するとともに、長期連続試験によって冷却システムの健全性と耐久性を検証した。

なお、冷凍機開発の実施者の(株)大陽日酸は本プロジェクト終了後、開発成果である 2 kW 級無摺動(メンテナンスフリー)ブレイトンサイクル冷凍機の販売事業化を開始する予定である。



図 5. 冷却システムと組み合わせた 2 MVA 級超電導変圧器モデルシステム概観

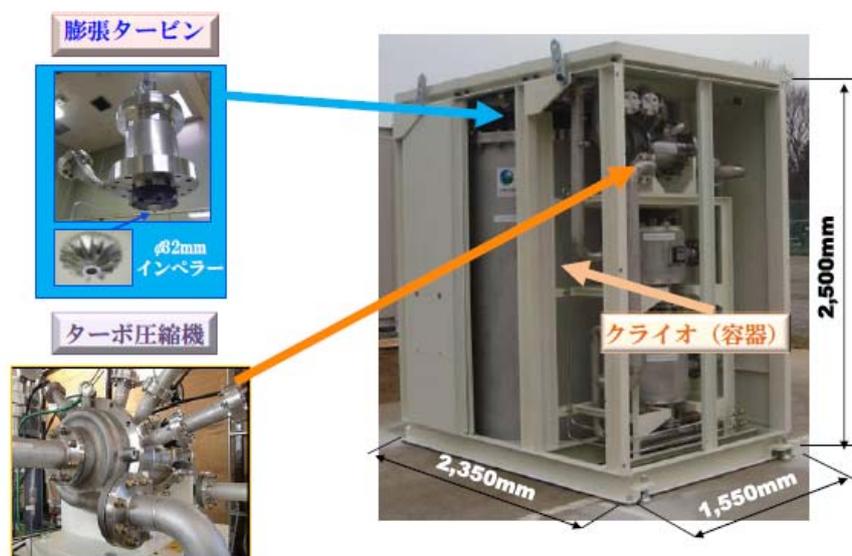


図 6. Ne ターボブレイトン冷凍機概観

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

1.4 超電導電力機器用線材の技術開発

Y系超電導線材の実用化には、さらなる特性向上と各機器の仕様に対応した線材開発が必要であった。IBAD-PLD 及び IBAD-MOD 線材に加え、結晶粒配向金属基板-PLD 線材、IBAD-MOCVD 線材も含めて、磁場中臨界電流特性、機械強度、工業的臨界電流密度の向上、交流損失低減技術開発と密接に関係する線材特性の均一性向上、低技術コスト化等の研究開発を進め、今後の長期信頼性試験等の実用化技術開発の際に必要な性能、及び製造速度等を満足させる線材作製技術とその安定製造技術を開発した。さらには、2020年頃を想定した電力機器の導入・普及開始の際のコストを含めた必要条件を満たす線材作製技術を開発した。

研究開発項目は、以下の5項目である。(1)保存環境や運転環境を模擬した様々な環境下に線材を保存し、 I_c 等の特性の経時・経年変化の評価を行うとともに、劣化機構の解明やその抑制方法の検討を行った線材特性の把握、(2)高磁場中(～10 T)での応用となる SMES、及び比較的低磁場(～0.1 T)ながら、垂直磁場成分が関与するソレノイドコイルが想定されている超電導変圧器等の応用を想定し、磁場中高臨界電流線材作製技術開発を目的とした磁場中高臨界電流(I_c)線材作製技術開発、(3)交流応用が想定されている超電導電力ケーブル、超電導変圧器から求められる線材として交流損失低減のためのフィラメント化等超電導特性均一線材作製技術、及び細線加工技術の開発を目的とした低交流損失線材作製技術開発、(4)強磁場下での強いフープ力が想定される SMES、及び冷却時熱収縮長の裕度を内部構造で確保しにくく、冷却時の応力負荷が想定される大電流ケーブルから求められる高強度、高 J_e 線材の開発を目的とした高強度・高工業的臨界電流密度(J_e)線材作製技術開発、(5)電力機器応用の実用化技術開発の際に必要な性能及び製造速度等を満足させる Y系超電導線材作製技術の開発を行い、より低コストで提供できる線材開発をめざした低コスト・歩留向上技術開発。

各研究開発項目の成果をまとめて表1に示す。

表1 超電導電力機器用線材の技術開発の成果のまとめ

テーマ	最終目標	主要成果
①線材特性の把握	各種機器環境に対する耐久性を評価	<ul style="list-style-type: none"> 剥離現象機構解明⇒低中強度原因除去 分割線材耐久性評価
②磁場中高 I_c 線材作製技術	50A/cm-w @77K,3T-200m	<ul style="list-style-type: none"> PLD線材：BHO添加141A@77K,3T (短尺) 54A@77K,3T-200m MOD線材：YGdBCO+BZO 50A@77K,3T-124m
	400A/cm-w @65K,0.1T-100m	<ul style="list-style-type: none"> PLD線材：770A/cm-w@65K,0.1T-158m MOD線材：524A/cm-w@65K,0.1T-100m
③低損失線材作製技術	2～4mm幅500A/cm-w-200m	<ul style="list-style-type: none"> PLD線材：2mm幅 540A/cm-w-200m MOD線材：4mm幅 590A/cm-w-80m RABiTS線材：2mm幅 400A/cm-w-72m
	5mm幅10分割-100m-無分割に対し損失1/10	<ul style="list-style-type: none"> PLD線材：5mm幅-10分割-100m-損失1/10 RABiTS線材：$J_e > 52\text{kA/cm}^2$ (短尺)
④高強度高 J_e 線材製作技術	$J_e = 50\text{kA/cm}^2$ -200m	<ul style="list-style-type: none"> PLD線材 $J_e > 52\text{kA/cm}^2$-200m (70μm^2基板) RABiTS線材：$J_e > 52\text{kA/cm}^2$ (短尺)
	500A/cm-w -1GPa-200m	<ul style="list-style-type: none"> PLD線材 >500A/cm-w - 1GPa - 200m
⑤低コスト・歩留向上技術	技術コスト2円/Am実証	<ul style="list-style-type: none"> PLD線材：604A/cm幅-35m@30m/h⇒1.6円/Am MOD線材：605A/cm幅-30m@5,10m/h⇒1.6円/Am RABiTS線材：1600A/3cm幅@2.2m/h⇒2.7円/Am
	中間目標技術の安定製造技術	<ul style="list-style-type: none"> 全ての線材種：線材メーカー各社が各々数km以上の線材に対して歩留まりの評価を実施

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

2. 超電導研究開発の今後の展開

Y系プロジェクトでは、コンパクトで大容量の電力供給が期待できるY系超電導線材を用いた超電導電力貯蔵システム(系統安定化用2GJ級SMES)、超電導電力ケーブル(66kV/5kA大電流ケーブル及び275kV/3kA高電圧ケーブル)、超電導変圧器(66/6kV/20MVA級配電用変圧器)について、これまでのNEDO事業の成果を進展させ、2020年頃の導入と普及を見通す基盤要素技術の開発を実施した。また、超電導電力機器に不可欠な要素である線材の作製技術研究開発においては、我が国の技術的蓄積と開発能力を集中し、性能向上、コスト低減、歩留り向上、高速製造、量産化要素等の技術開発に取り組んだ。

本研究開発において、超電導電力機器の導入と普及に重要な要素である「技術仕様」、「成立性」、「信頼性」、「コスト・高効率化」についての見通しを得た。次段階の「実用化技術開発」では、その見通しを確実なものとし、線材、冷却技術を含めた個別の超電導電力機器の長期信頼性の検証とともに、電力機器システムとしての電力系統への連系試験を実施して、既存の競合技術に対する超電導機器の優位性を確立することが必要と考える。2011年の東日本大震災以来、日本の電力をとりまく環境は大きく変わり、2013年2月時点で稼働している原子力発電所は大飯原発の3、4号機の2機だけであり、残りの原子力発電所の再稼働もすぐには行われない見込みである。一方、政府は太陽電池や風力発電等再生可能エネルギーの利用を促進していく方針であるが、電力需要に対する割合はまだ小さく、発電所立ち上げに立地選択や建設に時間がかかる水力発電所を増やすことも容易ではないと考えられ、当面は火力発電の増強により対応されていくものと予想される。また、最近の電力会社の経営状況を踏まえると、計画的更新からオーバーホールによる取替え時期の延伸や不良設備・機器のみの取替えなど部分更新・修繕へと移行する方向も考えられていることから、市場は大幅に縮小する可能性もあり将来市場は不透明である。しかしながら、近い将来、電力機器の大量の既存設備の経年による更新は避けられないことから、その機会を捉えて超電導電力貯蔵システム、超電導電力ケーブル、超電導変圧器等を実用化し、導入することが期待される。今後の電力系統の安定化さらには超電導産業の創出に、世界をリードしている本プロジェクトの成果が大いに貢献できるものと確信している。

また、再生可能エネルギーの導入量の増大に伴い、種々の超電導機器の導入も期待されるとともに、産業用、輸送用、医療用等に対して効率向上の利点から大幅なCO₂削減に貢献できることから、本プロジェクトの成果である超電導機器基盤技術の波及的効果を狙った応用の展開にも大いに期待される。

2.1 高温超電導コイル基盤技術開発

我が国が有する高温超電導技術を活かして、放射線治療・診断機器等の省エネ化、低コスト化や産業用モータの高性能化を促進するプロジェクトが平成25年度から開始する計画が経済産業省から公開されている。高温超電導コイルは、医療向け大型加速器の小型化、次世代自動車や高速鉄道のモータの高効率化、風力発電の発電機などの損失低減に活用されると期待されている。具体的には、高温超電導コイルの実現に当たっての新たな材料の開発や、コイルの設計製造技術の開発を実施する計画が公開されており、開発対象は高温超電導線材を用いたMRIと医療用シンクロトロン型加速器、及びガントリーを対象とした診断・治療用のマグネット開発である。表2に各種医療用超電導マグネットの磁場に要求される仕様をまとめた。

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

表2 重粒子線癌治療用各種加速器及びMRI超電導マグネットの磁場に要求される仕様

(a) 重粒子線癌治療用各種加速器超電導マグネットの磁場に要求される仕様(均一性等)

加速器の種類	励磁形態	磁場形状	磁場強度	磁場精度
シンクロトロン	パターン励磁	2極、4極	1.5T~3T	10~100ppm/100mmの範囲
FFAG 加速器	直流励磁	複合傾斜磁場	同上	同上
サイクロトロン	直流励磁	一様な静磁場	同上	10 ppm/全面

(b) MRI超電導マグネットの磁場に要求される仕様(均一性等)

磁場の種類	磁場強度	磁場精度	時間
外部静磁場	1T, 1.5T, 3T, 7T&11T	1ppm/視野	恒常的
外部傾斜磁場	同上	10mT/m~	一時的

(1) MRIの高温超電導化

現在普及しているMRIは、大量の液体ヘリウムを冷却剤に使用しているためヘリウムの供給ひっ迫の影響を強く受ける。そのため、公募される本事業では高温超電導材料の適用によりヘリウムの使用を大幅に低減しつつ、従来のMRI用低温超電導コイルと同等の性能、安全性、経済性を有する① 高安定磁場コイルシステム基盤技術の研究開発を行い、また、従来のMRIと比較して、さらに高解像度化と計測核種の拡大を図ったMRI等に適用でき、サイクロトロン等にも応用が可能な10T程度までの高磁場を安定かつ均一に発生可能な② 高磁場コイル基盤技術の研究開発を行うことの公募予定が公開されている。

MRIに関しては、世界市場規模は、2018年までに60億米ドルを超える見通しであり、既に飽和状態にある米国市場においても買い替えが進んでおり、今後の成長は、新規高磁場システム導入、低磁場・中磁場のMRIへの買い替えによって活性化される見通しである。世界市場シェアはSiemens Healthcare (25%)がリードし、GE Healthcare (20%)、Philips Healthcare (13%)、東芝メディカルシステムズ (12%)、日立メディコ (9%)が続き、上位3社は海外企業であり、「追いつけ・追い越せ」が望まれる産業分野である。また、日本はMRIの冷却に不可欠なヘリウムの供給を100%輸入に頼っているが、昨年来大幅な減少となり、昨年9月の輸入量は4ヵ月前と比べ35%減少した。液体ヘリウムは約80%が医療用のMRIに使われているが、今後輸入量が急速に回復する見込みは乏しいとみられている。このような現状で、将来の液体ヘリウムを使用しないMRIマグネットの実現には、日本が世界をリードしている高温超電導線材を使用し、高温運転・均一磁場発生をめざした高温超電導マグネット研究開発こそが、将来、確固たる先端技術として日本が医療機器分野で世界をリードできる基盤研究であり、国の積極的支援により開発を促進すべきテーマと期待される。

NMRは核磁気共鳴周波数を測定して原子や分子の結合状態に関する情報を得ることからNMR分光法とも呼ばれている。一方、通常のMRIでは、人体の約75%が水分であるため、水素原子の核磁気共鳴を利用し共鳴現象を起こしている状態で、外部のパルス的な高周波磁界を切り、原子核が定常状態に戻るまでの緩和時間を測定して、水の分布状態を周囲の分子との結合状態を反映させて画像化する。水素原子のみならず体内に存在する炭素(¹³C)やリン(³¹P)等の画像化も行われている。国内のMRI市場は従来の主力機種であった0.5T~1.0Tの中磁場超電導装置が、永久磁石装置に代わ

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

り、1.5 T 以上の高磁場装置と市場が 2 分されてきている。今後は薬事承認が得られた全身用 3.0 T 装置が普及するものと予測されている。さらに海外の MRI 研究開発のトレンドとしては受信される MR (磁気共鳴) 信号の強度を向上させることにより、高精細画像や高速撮像が有利となることから、MRI 装置での磁場強度を高めることをめざした研究が進められている。さらに、7 T、11 T の全身用磁石も研究開発が進められている。今後、臨界温度並びに比熱 (熱容量) が高いことから、熱的に安定で高磁場特性を有する Y 系超電導線材を用いることにより、低温運転でのクエンチ (超電導状態が振動、過電流等で壊れること) を回避出来る高温超電導 MRI の開発が期待される。そのためには空間的且つ時間的に均一な磁場発生が要求されることから、超電導線材の高特性・均一化に加え、擬永久電流モード運転を可能とする超電導線材間の超低抵抗超電導線材接続技術の開発、さらには、鉄シム・ヨーク等の調整技術が重要となる。

(2) 癌治療用重粒子線加速器の高温超電導化

陽子線、重粒子線を利用した放射線治療は、正常な細胞へのダメージを抑えつつ、高エネルギー、高精度で粒子線を癌細胞に照射できるため、患者の身体的負担が小さい癌治療方法として注目されているが、一方で、設備が大型で高コストなことが導入の障害となっている。そのため、装置の小型化、低コスト化を目標に、医療用重粒子線加速器システムに適応可能で、科学技術用の超大型加速器、産業用回転機等への応用も期待できる高温超電導可変高磁場コイルの研究開発を行う計画である。具体的には、① 医療用重粒子線加速器本体マグネット及び ② 粒子線ビーム経路部・照射部 (ガントリー) マグネットに適用できる時間的に磁場強度を制御可能な高温超電導コイルの技術開発を行うことの公募予定が公開されている。

高齢化社会が進むとともに、食生活の変化等により、癌患者、癌による死亡が増加している。しかし、我が国の放射線治療を受ける患者数は欧米諸国と比較して低い割合 (25 %程度) にある。政府の癌対策基本計画では、放射線治療法の推進とともに、治療機器の研究開発を推進することとしている。

現在、癌治療装置の世界市場のうち、放射線治療装置は年々伸びている状況にあり、2008 年は 38 億ドルに達している。放射線医療装置の売り上げの伸び率 (10~26 %) は医療機器全体の伸び率 (4~6 %) に比べて大きい。また、地域別の市場規模では米国約 50 %、欧州約 34 %、アジア約 13 %となっており、世界シェアは欧米の上位 3 社で市場の 90 %以上を占有している。

外科治療と同程度以上の治療効果を有し、癌病巣部にのみ放射線線量の集中が可能であることから、生体内への放射線侵襲による負担が少ない。これまで既に 5,000 人を越える治療実績のある重粒子線治療に対し、治療に用いる加速器システムについて高温超電導技術等を用いることによる大幅な小型化、省エネ化を図った低コスト医療用重粒子線加速器を開発し、放射線療法のみならず推進を図るとともに、放射線治療システム産業の国際競争力強化を図ることが検討されている。

医療用粒子線加速器関連のマグネットへの高温超電導線材の応用に関しては、現状のシンクロトロン常電導加速器はサッカー場規模級の巨大設備で、重粒子線 (炭素線) の場合で 120-340 億円、使用電気料金も 1500 万円/月と高価で、課題である。高温超電導線材を使用することで、コンパクト化、低消費電力・省エネが可能となると考えられ、日本がともに世界をリードしている放射線治療技術と高温超電導線材を使用し、重粒子線加速器用高磁場電磁石を開発するとともに、加速器イオン入射部、加速部、ビーム出射部、ガントリー等の飛躍的小型化を図り、さらにこれら要素機器を組み合わせ加速ビーム制御技術を開発し、従来システムに対し大幅に小型化、省エネ化を図った低コスト小型医療用重粒子線加速器を実現することが期待される。

荷電粒子が磁場の中を運動するとき軌道が曲げられる。質量 m 、電荷 e の荷電粒子が、速度 v で磁束密度 B の一様な磁場の中を、磁場に直角に運動する時、粒子に働くローレンツ力 F は、 $e v B$ であり、円軌道の半径が r であれば、ローレンツ力と遠心力の釣り合いの条件から、以下の関係

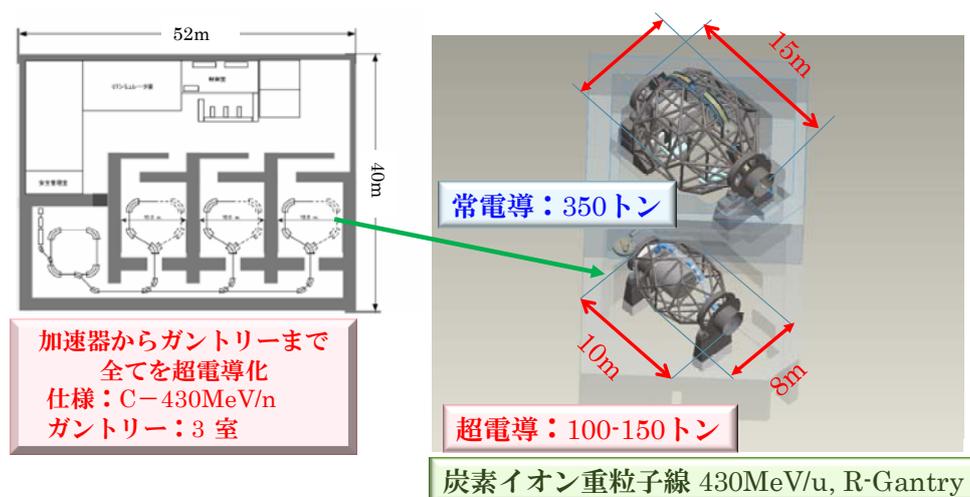
超電導 Web21

(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

が得られる。

$$m v^2/r = e v B$$

即ち、高磁場（高 B ）の適用により重粒子線の曲げ半径（ r ）が小さくなり、小型化が期待できる。さらに現状の常電導マグネットに対して高温超電導技術の適用により、発熱及びジュール損失等が大幅に低減され、超電導冷却システムを考慮しても年間数千万円レベルの電気料金の大幅な低減が期待できる。



出典：野田耕司：放射線医学総合研究所重粒子医科学センター
25th Int'l Sympo. on Superconductivity, Tokyo, Dec 5, 2012

図7 高温超電導を適用した Super MINMAC

(3) 第3世代線材開発

前述のMRI及び医療用粒子線加速器本体及び照射部ガントリーへの高温超電導線材の適用には、現状性能の高温超電導線材及び加工技術を用いたコイル化技術開発により、機能検証レベルの見通しは得られるものと期待できる。しかし、確固たる先端技術としての高温超電導技術適用の費用対効果創出に対しては、低コスト化、発生磁場の空間的・時間的均一化が重要で、そのための共通基盤技術として、線材性能均一化・低コスト化、超低抵抗接続技術、液体ヘリウムフリー冷却技術、線材・コイル性能（特に均一性）評価技術開発は不可欠であり、コイル化技術開発と並行して開発するテーマとして、明確に開発対象とした実施計画での公募予定が公開されている。

これまで、高温超電導線材の開発は臨界電流と長さ及びコストを指標として開発が進められ、また、常電導機器の置き換えによる超電導機器の機能検証も進められてきた。今後の高温超電導線材研究開発は、これまでの機能検証の成果を踏まえ、競合機器・技術に対しての絶対的優位性の確立が求められている。さらに、磁場応用では発生磁場の時間的・空間的均一性が要求され、電力機器応用とは異なる線材の磁場中性能の大幅な向上、性能均一性、歩留り向上、低コスト化等が求められることになる。

尚、線材の低コスト化に関しては、材料費及び設備費（導入・維持費）の限界から2,000~3,000円/mをめざすとともに、Am（アンペア・メートル）単価での低コスト化は性能向上が必須となる。

超電導 Web21

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

線材の今後の開発は、筆者が最初に提案した以下の目標を満足する第3世代(3G)超電導線材の開発により、世界をリードする超電導技術に繋がるものと期待している。

- 超高臨界電流: J_c 、e.g. 2,000 A/cm-幅, 2 μm -厚、($J_c > 10 \text{ MA/cm}^2$) @77 K, 自己磁場
- 高磁場中の超高臨界電流: $J_{c, \text{min}}-B$ 、高 B_{c2} 線材 e.g. 500 A/cm-幅 @65 K, 4 T
- 結晶粒配向度: $\Delta\phi < 2^\circ$
- 性能均一性: 線材幅&長手方向均一性 0.5%以下、線材間性能均一性 1.0%以下
- 低コスト化: 1 円/Am@65 K, 4 T

第3世代線材の開発に関しては、米国においても昨年からのエネルギー省(DOE)の ARPA-E プロジェクトの大型風力発電機の開発の中で進められている。欧州・韓国においても、Y系線材開発の新規プロジェクトの計画の実施が開始されることもあり、今後も日米欧韓での超電導線材開発競争が繰り広げられるものと考えられる。

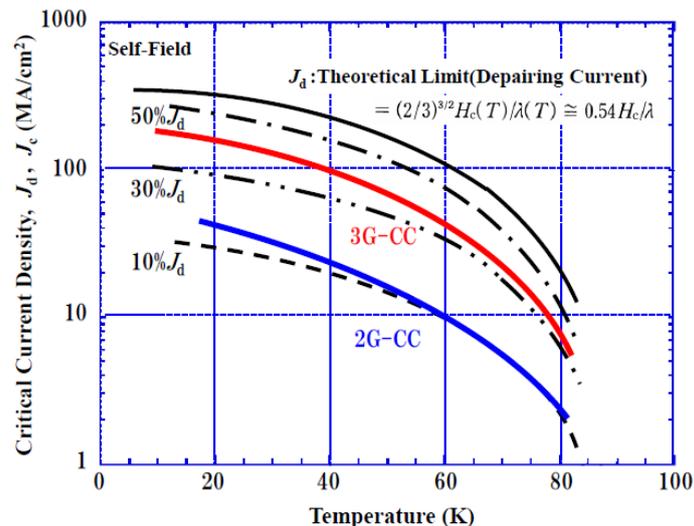


図8 2G及び3G線材の臨界電流密度特性(J_c -T)と対破壊電流の理論的限界値(J_d -T)

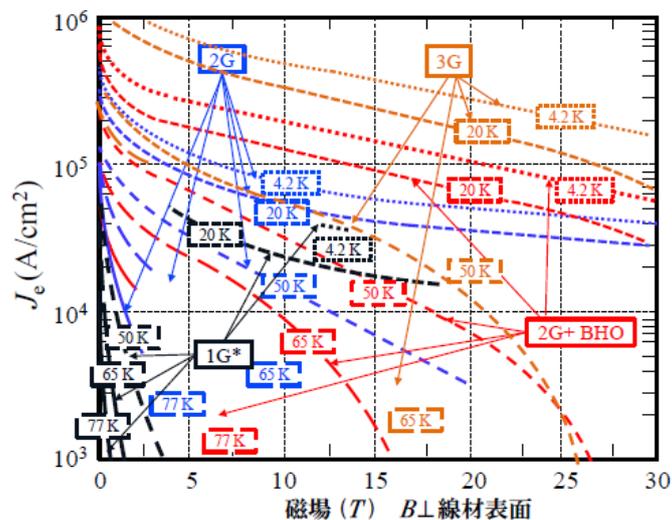


図9 各種線材の磁場中臨界電流特性(1G vs 2G vs 2G+BHO vs 3G)

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

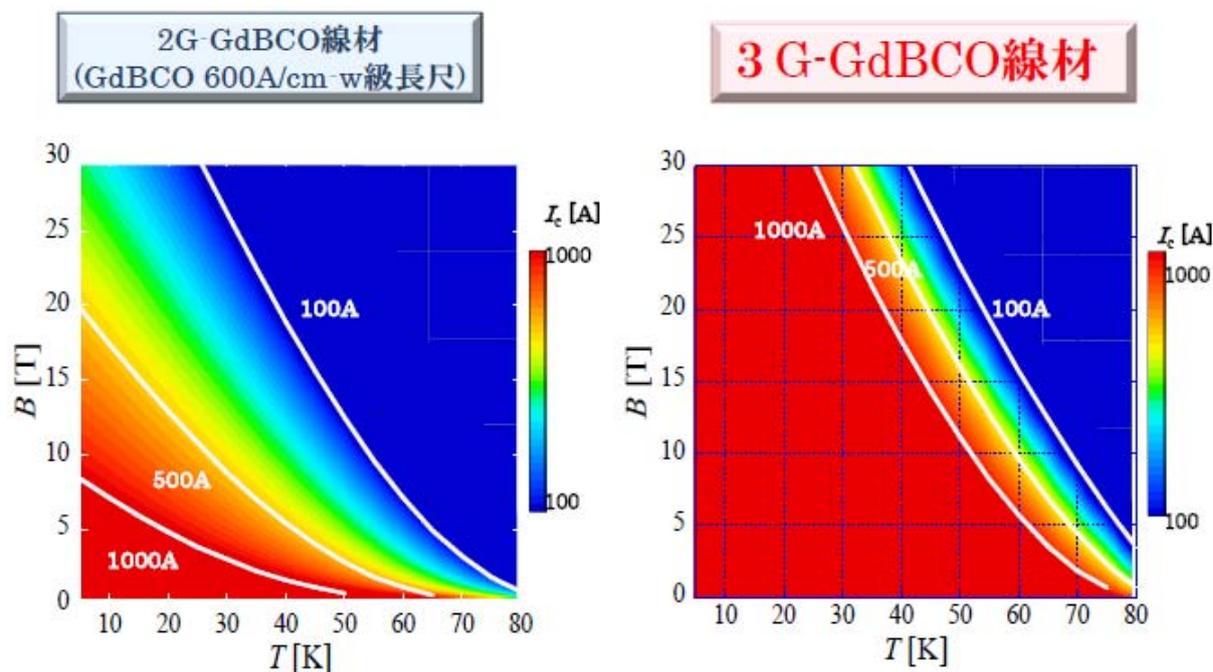


図 10 3G-GdBCO 線材の I_c - T - B マップ

2.2 超大型洋上浮体式超電導風力発電機の開発

風車は、1 万点以上の部品から構成されており、広い産業の裾野を有している。また、2011 年末時点の全世界の風車の累積導入量は 237 GW であり、再生可能エネルギーの中で最も導入普及が進んでいる。我が国において、さらに風車導入を促進するためには、設備利用率向上による発電コストの低減が不可欠である。我が国特有の自然条件（台風・乱流・落雷等）に十分に耐える部品（発電機・増速器・ブレード・支柱・浮体プラットフォーム等）として高度化や低コスト化が求められている。また上記の自然条件に対する信頼性を向上し、事故・故障頻度を低減することが求められている。さらに、年々大型化する風車の部品やコンポーネントの性能を向上し、発電性能を向上するとともに、風車に係る信頼性及び性能を向上し、発電コストの低減を図ることも重要である。風車部品高度実用化開発では、素材選定や風車設計の見直し等を行い、発電機・増速器・ブレード等の主要コンポーネントの性能の向上（高効率化、大型化、軽量化等）を計画している。

本研究開発では、風力発電に係る基礎研究、応用研究から革新的技術開発を行うとともに、洋上風力発電導入ガイドラインや落雷リスクマップなどを整備することで、風力発電のさらなる導入拡大及び産業競争力の強化に資し、中長期的にも他の再生可能エネルギーと同程度の発電コストをめざすことで、新たな産業の育成及び国際競争力の強化に資することを目的としている。

我が国を始め、世界的に研究開発が進められている 5 MW 以上の大型洋上風車については、今後、市場が大幅に拡大することが予想されており、我が国企業が強みを発揮する部材や部品、コンポーネントの開発を推進することで、我が国企業の国際競争力を高め、国際的なマーケットを獲得することが期待されている。

研究開発の具体的内容としての風車部品高度実用化開発では、発電機やブレード等の主要コンポーネントや主要部品の性能向上や信頼性・メンテナンス性向上に関する実用化開発を素材レベルか

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

ら一体的に実施し、故障頻度の低減、停止時間の削減を図り、風車設備利用率・発電量を向上することが重要である。

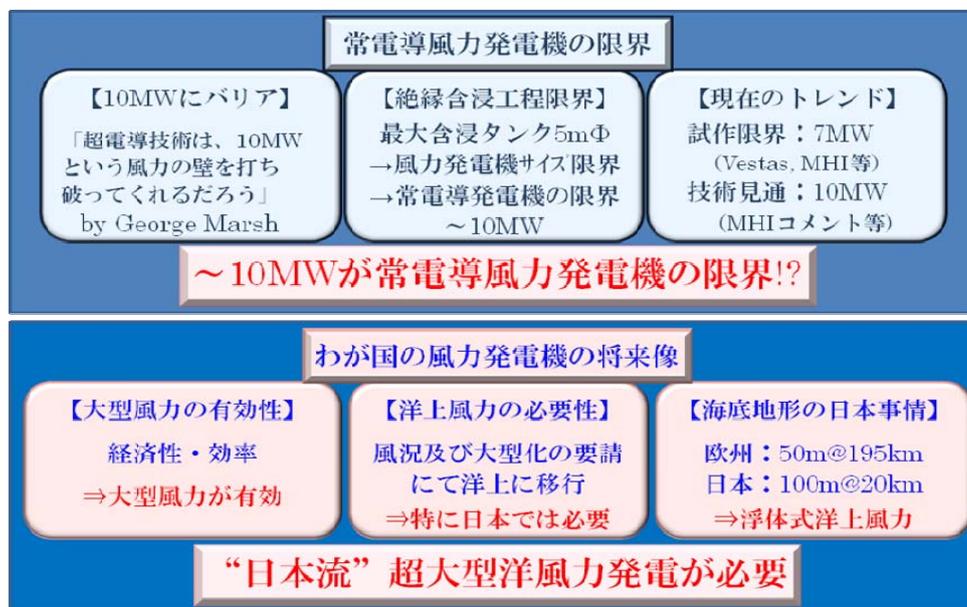


図 11 常電導容量限界と日本型風力発電機の将来

Y系超電導線材は高温・高磁場中での臨界電流特性(I_c)が非常に高いことから、省エネルギーの観点から種々の応用への展開も大いに期待されている。同期電動機等回転機の出力は回転数に比例するが、産業用電動機 (>1000 rpm)、船用モータ(100~300 rpm)の開発は、省エネ効果を発揮できることから、今後一層の開発が期待されている。さらには、永久磁石(PM)を使用した同期電動機の回転子の永久磁石を、Y系超電導線材を使用した界磁子コイル(電磁石)に置き換え、永久磁石の材料であるNd, Dy等、希土類系希少金属の使用量を大幅に削減する目的でのモータ用界磁子コイルの研究も進められている。

再生可能エネルギー、CO₂排出削減の目的での超電導風力発電機(数十rpm)の開発も、Y系超電導線材を用いることにより、高効率小型軽量化、大容量化が可能となることから、米国、欧州で開発が進められようとしている。図11には常電導風力発電機容量の限界と日本流超大型風力発電機の必要性を示す。常電導風力発電機は、ナセル重量の限界等で10MWに大きなバリアが存在すると言われている。遠浅の海岸線が少ない我が国の特徴から、日本における風力発電への課題(大型化、利用・稼働率向上、洋上利用拡大、コスト低減等)の解決には、浮体式洋上風力発電の導入が期待されている。我が国においては20mを越える津波等の高波に対応出来る浮体式支持構造のコストを考慮すると、経済的にも常電導風力発電機では実現が困難な風力発電機の超大型化(>15MW)が不可欠であり、鉄心フリー発電機による軽量化、同期発電機による効率向上、メンテナンスコスト低減のための増速ギア(変速機)レス化も重要であり、界磁子をY系超電導電磁石に置き換えることを目的とした開発の重要性が認識されつつある。風車の翼の大きさの2乗に比例して風力発電機が風力エネルギーを受けることから、超大型化することにより洋上浮体式風力発電機の損益分岐点(Break-even cost)発電容量を満足出来ることになる。我が国が世界をリードしている高温超電導技術と洋上浮体式風力発電技術の融合による日本流超大型風力発電機の実現が大いに期待される。

3. 高温超電導研究開発の現状

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

本動向報告会において、最後に、ガートナー社が造り出した高温超電導研究開発の進展を、特定の技術の成熟度、認知度、社会への適用度を示す図であるハイプ・サイクル図 (http://www.gartner.co.jp/research/methodologies/resear_hype.php)を用いて、「技術の黎明期」、「過度な期待のピーク期」、「陳腐化・幻滅期」、「生産性の安定期」を経由する新規技術に関しての記述方式で、BSCCO (1G) 線材、REBCO (2G) 線材、及び3G 線材、また、超電導電力機器(送電ケーブル、変圧器、SMES)、洋上浮体式風力発電機、MRI、医療用 HTS 重粒子線加速器等のマグネット、さらには室温超電導の各技術研究に関して、現状のステージを私見ではあるが、まとめた(図 12 参照)。

ハイプ・サイクルとは、幅広いテクノロジー及びアプリケーションの成熟過程と市場における普及(採用状況)を把握するため、そのライフサイクル全体を5段階に亘って分析したものである。市場に新しく登場したテクノロジーやアプリケーションはまず過度にもてはやされ(すなわち、ハイプ)、そうした熱狂が冷める時期を経て、最終的に市場や市場分野における意義や役割が理解されるようになる。ハイプ・サイクルはその典型的な経過を示している。

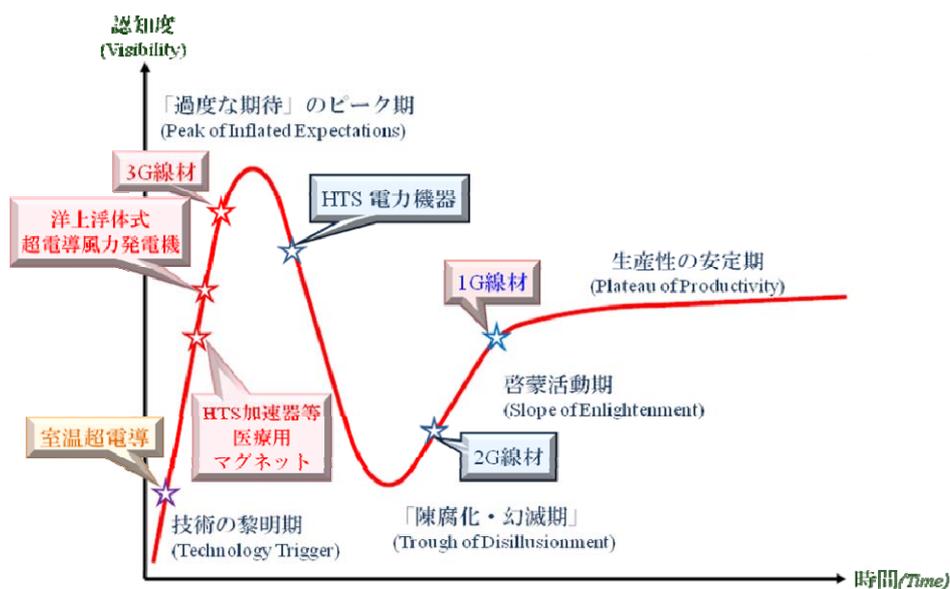


図 12 高温超電導技術のハイプサイクル (Hyper Cycle)

尚、各サイクルの定義は、以下の通りである。

テクノロジーの黎明期: 画期的な新技術としての潜在的な可能性への期待から、初期の PoC (Proof-of-Concept : 機能検証) やメディアで取り上げられることで、世間から大きく注目されるようになる。通常は実際に利用できる製品が存在せず、商業面での真の有効性は証明されていない。

「過度な期待」のピーク期: 初期段階における世間からの注目が、一部の成功例を熱狂的にクローズアップされる。しかし、しばしばこの裏には多数の失敗例が隠れている。一部の企業はこの段階で行動を起こすが、ほとんどの企業は静観する。

幻滅期: 当初の約束に答えることができず、過度に高まった期待や興味が失われていく。この段階でベンダーの淘汰や消滅が起こる。生き残ったベンダーだけがこの技術への投資を継続して製品を改善し、初期導入者はメリットを享受するとともに満足度が高まる。

啓蒙活動期: 失敗からさまざまなことを学び取り、初期導入者の実際の経験から新技術の有用性

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

が徐々に明らかになって来る。この新技術が企業にもたらす効果について、より当を得た洞察力に富む理解が広がり、具体化していく。淘汰され少数になったベンダーから第2世代の製品が提供される。この時期には、リスクを冒す覚悟のある企業が技術を前向きに採用し、ある程度のリスクを受け入れられる企業はパイロット的に投資を行い、保守的な企業は依然として静観している。

生産性の安定期: 主流としての導入、採用が始まる。技術は適度なレベルにまで成熟し、効果が実証されている導入プロセスを経て、企業へ確実なメリットをもたらす。ベンダーの実行能力を評価する基準が、より明確に定義される。生産性の安定期の最終的な高さは、この技術が有用性を発揮できる市場の幅広さや、ニッチ（すき間）市場への適応性によって決まる。

今後の高温超電導技術が我が国の重要な技術として産官学一体となって開発が進められることを期待している。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：平成 25 年度超電導技術動向報告会報告

「超電導電力機器用線材の技術開発」 - (前月号より再掲載)

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 線材開発研究部
部長 和泉輝郎

本テーマにおいては、本プロジェクト終了直後に想定されている「実証試験時期に必要な高い仕様の線材の開発」、さらには、その後 2020 年頃に始まるとされている「導入・普及時に必要となる、さらに高い仕様の Y 系超電導線材の開発」で構成されている。SMES、超電導変圧器、超電導送電ケーブルの機器における上記の各時期に必要な線材仕様を其々中間目標、最終目標とされた。具体的には、その中の目標値を要素技術毎に再編し、5 つのテーマに再編して線材開発を実施した。表 1 には、各テーマの中間目標及び最終目標をまとめる。

表 1 超電導機器用線材の技術開発における目標値

テーマ名	中間目標	最終目標
①線材特性の把握	・ケーブル耐久試験適正条件の決定	■各種機器環境に対する耐久性を評価(内部目標)
②磁場中高 I_c 線材作製技術	・30A/cm-w @77K,3T-50m ・300A/cm-w@65K,0.02T-50m	■50A/cm-w@77K,3T-200m ■400A/cm-w@65K,0.1T-100m
③低損失線材作製技術	・2mm幅-300A/cm-w-50m ・5mm幅5分割-50m-分割無しに比べて交流損失1/5	■2~4mm幅-500A/cm-w-200m ■5mm幅10分割-100m-分割無しに比べて交流損失1/10
④高強度高 J_e 線材製作技術	・300A/cm-w-1GPa-50m ・ $J_e=30\text{kA}/\text{cm}^2-50\text{m}$	■500A/cm-w-1GPa-200m ■ $J_e=50\text{kA}/\text{cm}^2-200\text{m}$
⑤低コスト・歩留向上技術	・技術コスト3円/Amの実証	■技術コスト2円/Amの実証 ■中間目標技術を安定に作製可能な技術を確立する。

以下には、それぞれのテーマの主なる成果をまとめる。

1. 線材特性の把握

実用線材を想定し、保存環境、運転環境及び事故環境を加速・模擬した様々な環境下に線材を供し、特性の経時・経年変化を評価する。必要に応じて抑制する手法の提案をめざした。

まず、超電導送電ケーブルの作製前の保存環境(40°C、相対湿度 100%)に対する湿度への耐性の評価として高温、高湿度化での劣化挙動を調査し、 I_c の劣化速度が温度に対してアレニウス式に従うことを明らかにし、上記保存環境での劣化開始時期として 9 年を要することが推測された。また、加熱負荷や応力歪み耐性、その他通電・過電流負荷に対する評価を行い、ケーブル用耐久試験計画書を作成することで中間目標を達成した。後半には、変圧器応用を念頭に置き、同機器において低損失化に必要なスクライブ線材の耐環境性の評価を行うとともに、剥離現象に対する機構解明及びその強度向上法の開発を行った。剥離現象に対する検討では、剥離面観察を実施し、剥離強

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

度決定要因と強度の関係を明らかにすると共にそれぞれの抑制手法を開発することで高剥離耐性を有した線材作製に成功し最終目標を達成した。

2. 磁場中高臨界電流 (I_c) 線材作製技術開発

高温でコンパクトな超電導機器をめざす観点からは、各機器の使用環境でより高い性能が求められている。具体的には、変圧器応用での 0.1 T 近傍の低磁場領域から SMES での 11 T 程度の高磁場領域まで広い磁場領域でのさらなる臨界電流及び機械強度等の特性向上が必要であり、「高特性厚膜化」や「人工ピン止め点導入関連技術開発」等により磁場中での高 I_c 特性を有する Y 系超電導線材の作製技術を開発した。

低磁場 (0.1 T) 目標に対しては、人工ピン止め点を導入しない線材で厚膜化により特性向上を図り、IBAD-PLD 線材では GdBCO 線材において高速製造条件での厚膜高 J_c 線材を実現し、158 m 長 (膜厚 1.6 μm) で 725 A/cm-w (@65 K, 1 T 以上) の線材作製に成功し、IBAD-MOD 線材においても、中間熱処理という手法を開発し、超電導膜の緻密化、均質化を図り、100 m 長 (膜厚 2.0 μm) で 524 A/cm-w (@65 K, 1 T 以上) の線材作製に成功し、最終目標を達成した。

高磁場目標達成に対しては、IBAD-PLD 線材において従来実績のある BZO ピン止め点に対し、厚膜での磁場中特性の劣化の少ないより効果的な BaHfO_3 (BHO) を見出した。この材料系において 200 m 長で 54 A/cm-w (@77K, 3T 以上) の線材作製に成功し、最終目標を達成した。一方、IBAD-MOD 線材においては、上述の中間熱処理を BZO 添加膜に施すことにより 124m 長で 50 A/cm-w (@77 K, 3T 以上) の線材作製に成功した。

3. 低交流損失線材作製技術開発

交流応用が想定されている超電導電力ケーブル、超電導変圧器において交流損失を低減するために、超電導電力ケーブルでは、真円断面形状からのずれや線材間ギャップ数・間隔等の制御が適用され、超電導変圧器では、コイル形状における垂直磁場成分の変動に伴う交流損失低減のためのフィラメント (細線) 化、転位巻線等の技術が適用される。これらの機器作製に対応可能な Y 系超電導線材の作製技術が必要である。ここでは、「特性均一線材作製技術開発」及び「細線化加工技術開発」により「超電導電力ケーブル」及び「超電導変圧器」開発に求められる低交流損失線材の作製技術を開発した。

IBAD-PLD 線材及び IBAD-MOD 線材共通の IBAD 系中間層形成技術において洗浄工程導入による効果を確認した。この技術を適用し IBAD-PLD 線材では、200 m 長の均一線材を作製し、2 mm-w 線材で $I_c \geq 540$ A/cm-w を実現し、ケーブル対応最終目標値を達成した。また、同様に 100 m 長線材を作製し、これを 5 mm-w へ切断後 10 分割スクライビングすることで変圧器対応線材を作製し 1/10 の損失低減効果を確認することで最終目標を達成した。一方で、IBAD-MOD 線材においても 100 m 長線材で 5 mm-w 10 分割加工を施し、交流損失 1/10 への低減を確認し、最終目標を達成した。

4. 高強度・高工業的臨界電流密度 (J_c) 線材作製技術開発

強磁場下での強いフープ力が想定される SMES 及び冷却時収縮長の裕度を内部構造での確保が困難であり、冷却時の応力負荷が想定される大電流ケーブルに対しては、高強度、高 J_c 線材の開発が必要である。そこで、「高強度金属基板対応線材作製技術開発」及び「高臨界電流 (I_c) 化技術開発」により「SMES」及び「超電導電力ケーブル」開発に求められる磁場中での高強度、高 J_c 線材の作製技術を開発した。

強加工により開発した高強度基板等の利用において、さらなる高 I_c 化技術を展開し、目標達成を図り、IBAD-PLD 線材において、中間層の結晶粒高配向化に加えてレーザーパワーのさらなる向上と

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

ともに酸素分圧制御によるブルーム形状制御を行う等により、70 μm 厚の高強度金属 217 m 長の基板上で成膜を行い、 J_c 値として 52 kA/cm^2 以上を実現し、 J_c に関する最終目標値を達成した。さらに、100 μm 厚の高強度金属基板を用い、200 m 長線材を作製し、 I_c で 500A/cm-w(@77 K, s.f.) 以上を得ると共に 1 GPa 以上の強度の確認により最終目標を達成した。

5. 低コスト・歩留向上技術開発

本プロジェクト開始時には、技術コストとして 8~12 円/Am の技術を実現しているが超電導機器の実用化にはさらなるコスト低減が必要であり、IBAD-MgO 中間層系と Ni 配向金属基板系を基軸として安価な基板の開発とともに超電導層形成技術に関しては、PLD 法及び MOD 法を基軸に高 I_c 化、高速化、高材料収率化、高製造歩留り化等の技術を開発し、さらなる低コスト化を図った。

基板/中間層開発においては、ベッド層に Y_2O_3 を配することにより、IBAD 層成膜時のアシストビームのさらに強い照射が可能となり、結果的に中間層としての結晶粒配向度の向上に成功した。PLD 線材においては、この中間層の結晶粒高配向化技術の適用による高 J_c 化とともにレーザーパワーのさらなる向上とともに酸素分圧制御によるブルーム形状制御等により高特性厚膜化の技術開発を行い、30 m/h で $I_c=604 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K,s.f.})$ の特性を得て 1.6 円/Am の技術コストを実証することができた。一方、IBAD-MOD 線材では、中間熱処理プロセスの開発により、緻密化及び均一化の向上が見られた。加えて、塗布法の改善を図り、クラック発生を抑制して厚膜化することに成功し、2.3 μm の厚膜超電導線材において、製造速度 5 m/h (本焼 10 m/h) で $I_c > 605 \text{ A/cm-w}(@77 \text{ K,s.f.})$ の特性を得ることで 1.6 円/Am の技術コストを実証し、いずれの方法においても最終目標を達成した。また、本プロジェクト終了後に想定されている実用化技術開発時期に必要な中間目標レベルの線材の安定製造技術開発に関して線材メーカーが主体となり開発を行った。

最終的に、表 2 に示す通り、全てのテーマで目標を達成することができた。

表 2 超電導電力機器用線材の技術開発における最終目標達成状況

中間目標	研究開発成果	達成度
(1) 線材特性の把握	<ul style="list-style-type: none"> ■ 電力ケーブル耐久試験適正条件を決定 ■ 剥離現象機構解明⇒低中強度原因除去 ■ 分割線材耐久性評価 	最終目標達成
(2) 磁場中高 I_c 線材作製技術開発	<p><PLD> ■ 54 A/cm-w@77 K, 3 T- 200 m ■ 770 A/cm-w@77 K, 0.1 T- 158 m</p> <p><MOD> ■ 50A/cm-w@77 K, 3 T-124m ■ 524 A/cm-w@65 K, 0.1 T- 100 m</p>	最終目標達成
(3) 低損失線材作製技術開発	<p><PLD> ■ 2 mm-w -$I_c \geq 540 \text{ A/cm-w}$ -200 m ■ 5 mm-w · 10 分割 損失 1/10 - 100m</p> <p><MOD> ■ 4 mm-w -$I_c \geq 590 \text{ A/cm-w}$ -80 m ■ 5 mm-w · 10 分割 損失 1/10 - 100m</p> <p><RABiTS-PLD> ■ 2 mm-w -$I_c \geq 400 \text{ A/cm-w}$ -78 m</p>	最終目標達成
(4) 高強度高 J_c 線材作製技術開発	<p><PLD> ■ $I_{c,\text{min}} > 500 \text{ A/cm-w} - 1\text{GPa} - 200 \text{ m}$ ■ $J_c > 52 \text{ kA/cm}^2 - 200 \text{ m}$</p> <p><RABiTS-PLD> ■ $J_c > 52 \text{ A/cm}^2 - \text{短尺}$</p>	最終目標達成

超電導 Web21

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

(5)低コスト・歩留向上 技術開発	<PLD>■ $I_c=604$ A/cm-w @30 m/h -35 m 1.6 円/Am <MOD>■ $I_c=605$ A/cm-w @5,10m/h -30 m 1.6 円/Am	最終 目標達成
	<住友電工>ケーブル線材⇒(代表値) 2 mm-w 線材特性歩留 : 47% <古河電工>ケーブル線材⇒(代表値) J_e 特性歩留 : 36% <フジクラ>変圧器線材⇒(代表値) 低磁場特性歩留 : 88% <昭和電線>低コスト線材⇒(代表値) 低コスト条件歩留 : 64%	最終 目標達成

また、これらの成果の世界的な位置付けを表3にまとめる。いずれも世界最高レベルの成果であり、日本の優位性がより際立った結果となった。

表3 Y系超電導線材開発に関する世界動向との比較

研究テーマ	世界動向	本プロジェクト成果と位置づけ
(1) 線材特性の把握	■劣化挙動、剥離挙動については系統的に評価した例はない	必要な負荷に対する試験を実施 剥離機構解明及び解決策提案 世界初の系統的な成果
(2) 磁場中 高臨界電流(I_c)線材 作製技術開発	LANL (米国) : IBAD-PLD(短尺) $I_c=234$ A/cm-w@75 K, 1T SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 短尺 $I_c=1353$ A/cm-w@50 K, 3 T 50 m $I_c=14$ A/cm-w@77 K, 3 T amsc (米国) : RABiTS-TFA-MOD 短尺 $I_c=10$ A/cm-w@77 K, 3 T	短尺 $I_c=141$ A/cm-w@77 K, 3 T(PLD) → $I_c=1400$ A/cm-w@50 K, 3 T 相当 200 m $I_c=54$ A/cm-w@77 K, 3 T(PLD) 短尺 $I_c=56$ A/cm-w@77 K, 3 T(MOD) 124 m $I_c=50$ A/cm-w@77 K, 3 T(MOD) 世界最高の磁場特性 (特に長尺)
(3) 低交流損失 線材作製技術開発	SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 短尺 12 mm-w 線材を 12 分割 長尺 報告なし	100 m-5 mm-w 10 分割-損失 1/10(PLD) 100 m-5mm-w10 分割-損失 1/10 (MOD) 世界的に先行した技術
(4) 高強度高工業的 臨界電流密度(J_e) 線材作製技術開発	SuperPower(米国) : 50 μ m 厚ハステロイ™ 金属基板 ⇒800 MPa amsc (米国) : 結晶粒配向金属基板⇒426 MPa	70 μ m ハステロイ™ 基板線材 $I_{c,min}=539$ A/cm-w- $J_e>52$ kA/cm ² -200 m 100 μ m ハステロイ™ 基板線材 $I_{c,min}>500$ A/cm-w-1GPa-200 m (Ag30 μ m 想定) 世界最高強度
(5) 低コスト・歩留向上 技術開発	SuNAM (韓国) : IBAD-共蒸着法 1000 m— $I_c=422$ A/cm-w@77 K, s.f. ($I_c \times L=422$ kAm) SuperPower(米国) : IBAD-MOCVD 1065 m 長- $I_c=282$ A/cm-w@77 K, s.f. ($I_c \times L=300$ kAm)	フジクラ : IBAD-PLD 816 m— $I_c=572$ A/cm-w@77 K, s.f. ($I_c \times L=467$ kAm) ↓ 長尺特性でリード 長さは米韓が先行

超電導 Web21

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

特集：平成 25 年度超電導技術動向報告会報告

「超電導電力ケーブルの研究開発」 - (前月号より再掲載)

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 電力機器研究開発部
部長 大熊 武

超電導電力ケーブルは、コンパクトな形状で大容量送電を可能とし、既存の電力ケーブルに比べて送電損失を低減することが可能であることから、省エネルギー、地球温暖化対策に貢献できることも期待されている。(公財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) 超電導工学研究所 (SRL) では、高電流密度・低損失などの特長を有するイットリウム系超電導線材を用いることにより、更なる低損失化、コンパクト・大容量化を目指した「超電導電力ケーブルの研究開発」を平成 20 年度より経済産業省から (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) を通じて、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクト (平成 20~24 年度) のなかで実施し、平成 25 年 2 月末に完了した。本稿では、このプロジェクトで実施した超電導電力ケーブルに関する研究開発の概要を紹介する。

1. 超電導電力ケーブルの開発

本プロジェクトでは、66 kV/5 kA 級大電流ケーブルおよび 275 kV/3 kA 級高電圧ケーブルの 2 種類のケーブル開発を行うとともに実用化に重要な要素技術の開発を、ISTEC、住友電気工業株、古河電気工業株、(株)フジクラ、昭和電線ケーブルシステム株、(株)前川製作所、(一財) JFCC が連携して実施した。本プロジェクトにおける前半 3 ヶ年では、各ケーブル開発に重要な要素技術である低交流損失技術、大電流導体化・大容量接続技術および高電圧絶縁・高電圧接続技術などの要素開発を行うとともに、イットリウム系超電導線材の安定製造・加工技術などの研究開発を行った。また、後半 2 ヶ年においては、これらの成果をもとにケーブルシステムの製造および各種システム検証試験を行い、ケーブルシステムとしての健全性を検証するとともに表 1 に示す各ケーブルの開発目標を達成した。

表 1 イットリウム系超電導電力ケーブルの開発目標

名称	大電流ケーブル	高電圧ケーブル
仕様 構造(容量)	66 kV、5 kA 三心一括 (570 MVA)	275 kV、3 kA 単心 (1420 MVA)
外観		
直径	150 mm φ 管路に 収納可能	150 mm φ 以下
損失	2.1 W/m-相@ 5kA	0.8W/m-相@ 3kA
耐過電流	31.5 kA、2 秒	63 kA、0.6 秒

1.1 66 kV/5 kA 級大電流ケーブル

大電流ケーブルの開発においては、三相 66 kV、5 kA の電流を通電可能とする三心一括型ケ

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

ケーブルの開発および終端接続部を有する 15 m 級ケーブルによる検証試験を行った。

ケーブルの総損失は 2.1 W/m-相 (交流損失 2.0 W/m-相、誘電体損失 0.1 W/m-相) 以下とし、既存のケーブル用管路 (直径 150 mm) に収納可能なサイズのケーブルを設計・作製し、さらに電力システムに導入した際の系統事故に耐え得る構造とし、31.5 kA-2 秒の過電流通電に対してもケーブルに損傷・性能劣化が無いことを短尺ケーブルサンプルによる過電流試験にて確認を行った。

イットリウム系超電導線材は超電導層の厚さが数 μm と薄いために平行磁場に対する磁化損失は非常に小さいが、ケーブル形状とした際の損失は主に線材間のギャップにて発生する垂直磁場によって支配される。このため、線材を細線化してケーブル化した際の層断面を真円に近づけることによって線材間ギャップの垂直磁場を低減して交流損失の低減を行った。大電流ケーブルでは 30 mm 幅で成膜したテープ線材を 2~4 mm 幅に細線化し、導体層 4 層のうち磁場の影響を最も受けやすい最外層 (4 層目) に 2 mm 幅線材、その他の導体およびシールド層に 4 mm 幅線材を用いた Hybrid 構造のケーブルコアを試作して交流損失特性を検証した結果、1.5 W/m-相 (@71 K, 5 kA) を達成した。さらに全て 2 mm 幅に細線化した超電導線材を用いた導体を試作し、0.4 W/m-相 (@74 K, 5 kA) を達成した。

15 m 大電流ケーブルシステムにおいては、導体の最外層のみに 2 mm 幅線材を用いた Hybrid 構造のケーブルを適用した。図 1 にケーブルシステムに用いた三心一括型ケーブルの構造を示す。図 1 に示すようにケーブルの中心には銅撚り線のフォーマを設け、ケーブルの機械的強度を担うとともに系統事故などにより発生した過電流をバイパスする役割を持たせている。このフォーマの周囲に細線化した超電導線材をスパイラル状に 4 層巻いて導体層を形成し、その外側に電気的な絶縁材料による電気絶縁層、さらにその外側に超電導線材 2 層と銅によるシールド層によって 1 相分のケーブルコアを形成し、このコアを 3 本より合わせた三心一括の構造としている。



図 1 大電流ケーブル (三心一括)



図 2 66kV/5kA 級大電流ケーブルシステム (住友電工 熊取試験場)

この三心一括構造のケーブルにて図 2 に示すような 15 m 長ケーブルシステムを構築した。大電流ケーブルシステムは両端に終端接続部 (端末) を設け、一方の A 端末では電流リード、ブッシングを介して課通電設備に接続し、もう一方の B 端末では三相分のケーブルを端末容器内

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

にて短絡する構成としている。

本大電流ケーブルシステムにて定格電流 5 kA 通電時のケーブル損失 (2.1 W/m-相以下)、耐電圧試験および長期課通電試験などを実施し、各試験項目にて当初の目標を達成し、66 kV 級大電流ケーブルシステムとしての健全性を検証した。

さらに、「リ튠系超電導電力機器技術開発」プロジェクトのなかの「超電導機器用線材の技術開発」において得られたこれまでの研究成果である高 $I_c = 500 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K})$ 級線材を用いて、図 3 に示すように三心一括構造の一相分のケーブルを作製して、図 4 に示すような 66 kV / 5 kA, 10 m 級ケーブルシステムを構築し、高 I_c 線材による交流通電特性を検証した。その結果、高 I_c 線材の使用により負荷率を低減させることで 0.95 W/m-相 (@67 K, 5 kA) の低損失化および短尺サンプルにて 1.37 W/m-相 (@77 K, 5 kA) を確認した。



図 3 大電流ケーブル (一相分)



図 4 66kV/5kA 級大電流ケーブルシステム
(フジクラ 佐倉事業所)

1.2 275 kV/3 kA 級高電圧ケーブル

高電圧ケーブルの開発においては、単相 275 kV、3 kA の電流を通電可能とする単心ケーブルの開発、電気絶縁材料の選定・電気絶縁特性試験および終端接続部と中間接続部を有する 30 m 級ケーブルによる検証試験を行なった。

ケーブルの総損失は 0.8 W/m-相 (交流損失 0.2 W/m-相、誘電体損失 0.6 W/m-相) 以下とし、ケーブルの外径は 150 mm 以下のケーブル構造とした。また、63 kA-0.6 秒の過電流通電に対してもケーブルと中間接続部に損傷・性能劣化が無いことを短尺ケーブルサンプルによる過電流試験にて確認した。交流損失の低減については、大電流ケーブルと同様に細線化した超電導線材を適用したケーブルを構成し、3 mm 幅に細線化した超電導線材を用いた導体により 0.124 W/m-相 (@73.7 K, 3 kA) を達成している。

図 5 に 30m 高電圧ケーブルシステムに用いた単心ケーブルの構造を示す。図 5 に示すように銅撚り線のフォーマの周囲に細線化した超電導線材をスパイラル状に 2 層巻いて導体層を形成し、その外側に電気的な絶縁材料による電気絶縁層、さらにその外側に超電導線材 1 層と銅によるシールド層によって 1 相分のケーブルコア (単心ケーブル) を形成している。この単心ケーブルにて図 6 に示すような 30 m 長ケーブルシステムを構築した。高電圧ケーブルシステムは、両端に終端接続部を設け、電流リード、ブッシングを介して課通電設備に接続し、さらに単心ケーブル同士を接続する中間接続部を設けた構成としている。

超電導 Web21

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



図5 高電圧ケーブル（単心）



図6 275kV/3kA 級高電圧ケーブルシステム
(古河電工 瀋陽古河電纜(中国))

本高電圧ケーブルシステムにて定格電流 3 kA 通電時のケーブル損失 (0.8W/m-相以下)、耐電圧試験および長期課通電試験などを実施し、各試験項目にて当初の目標を達成し、275kV 級高電圧ケーブルシステムとしての健全性を検証した。

謝辞：本稿で紹介した研究成果は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託によるものです。

参考文献：

- ・N. Fujiwara, H. Hayashi, S. Nagaya, Y. Shiohara, “Development of YBCO power devices in Japan”, Physica C 470 (2010) 980-985.
- ・大熊、「イットリウム系超電導電力ケーブルの開発状況」、低温工学 46 巻 6 号、2011 年
- ・大屋、芦辺他、「66kV 級三心一括型薄膜高温超電導電力ケーブルの開発」、H25 年電気学会全国大会、5-150
- ・吉田、永田他、「66kV 級大電流イットリウム系高温超電導ケーブルの開発」、H25 年電気学会電力・エネルギー部門大会
- ・J. Liu, M. Yagi et.al., “Design and Long-term Verification Test of 275 kV- 3 kA YBCO Superconducting Cable”, H25 年電気学会電力・エネルギー部門大会

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：平成 25 年度超電導技術動向報告会報告

「超電導変圧器技術開発の成果」 - (前月号より再掲載)

九州電力株式会社 総合研究所
電力貯蔵技術グループ長・超電導変圧器サブリーダー
林 秀美

イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト（以下、Y系プロジェクト）の一環として進めている超電導変圧器技術開発では、九州電力が主体となり、九州大学、岩手大学、国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム、富士電機、大陽日酸及びJFCCと共同で要素技術及びシステム技術の開発を平成20～24年度で行った。本開発は、2MVA級超電導変圧器モデルの検証にて、66/6kV 20MVA級超電導変圧器システムが成立することを見極める、また、数百kVA級変圧器モデルで超電導線材を利用した限流機能を検証することを目標として実施した。

具体的には、①超電導変圧器対応線材開発（100m長、5mm幅・3分割）、②巻線技術開発（低損失化≦無加工線材の1/3、2kA級大電流化）、③冷却システム技術開発（2kW@65K、COP 0.06@80K）、④限流機能付加技術開発（過大電流を定格の3倍以下）、⑤2MVA級超電導変圧器モデル検証（2MVA級の試作・評価、実用20MVA級設計）を進め、それぞれの技術開発は着実な成果を挙げて最終目標を達成し、平成25年2月で終了した。（図1）

これまでに、2011年11月号では上記技術の①と④を、2012年12月号では③と⑤の進捗状況を紹介した。今回は、検証試験を終えた最終成果として②のうち大電流化と⑤の成果について紹介する。

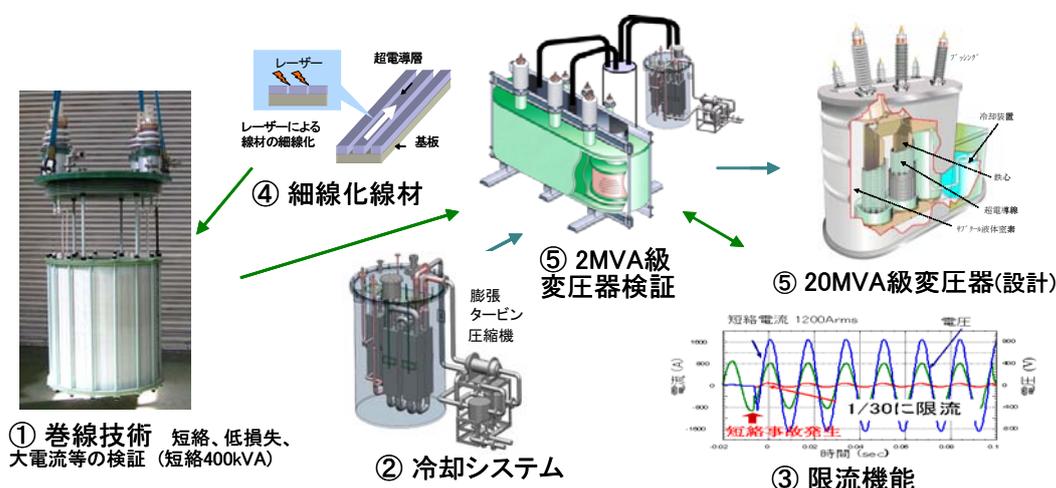


図1 超電導変圧器技術開発の概要

1. 2kA級大電流巻線技術の検証

20MVA 実用超電導変圧器の概念設計では、二次側巻線の定格電流は1673Aのため素線24本からなる並列導体（線材12重ね2並列）とした。その素線は素線間電流を均一化することにより並列素線数が低減でき、変圧器の損失やコストの低減が図れる。一方、超電導変圧器の巻線は電気抵抗が殆ど無いため、素線間電流を均一にするには素線の位置を変える転位技術によりインダクタ

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

ンスの均一化のみで対応する必要がある。これまでに、24本並列導体の空心巻線モデルで電流分流を15%以下に抑制する転位技術を確立した。今回、鉄心付の2kA級大電流巻線モデル(24本並列導体)を試作して電流分流特性を測定した。その巻線モデルの試験状況を図2に、鉄心付巻線の二次巻線に最大2057A通電した各素線の電流分流測定結果を空心モデルと比較して図3に示す。同図から各素線の電流分流率は90.1%~109.0%となり、空心モデルより良好な結果となった。



図2 2 kA 級大電流巻線モデルの試験状況

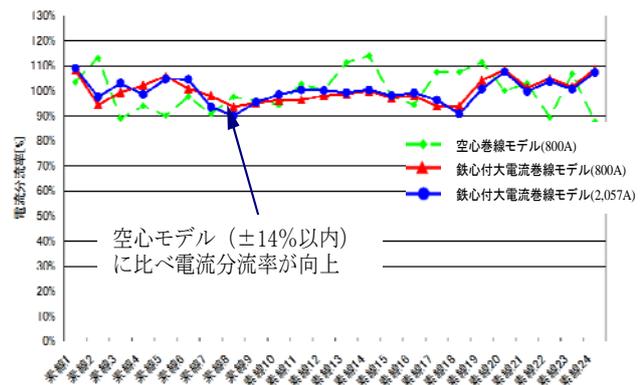


図3 大電流巻線モデルの素線間電流分流通測定結果(空心、鉄心付)

2. 2 MVA超電導変圧器モデルの検証

20 MVA級実用超電導変圧器の実現に向け、超電導変圧器の特性や製作技術及び冷却システムと組み合わせた技術を見通すため、実機と同一電圧で実機相当の巻線構成となる最低容量である2 MVA級超電導変圧器モデルを試作して、性能を検証した。本モデルの試験はJEC2200変圧器に準拠し、変圧器の基本性能、絶縁性能及び熱的性能の試験を行った。その変圧器モデルの諸元を表1に、変圧器モデルを図4に示す。

表1 2 MVA 変圧器モデルの諸元

相数、結線	3、Y-Y
定格電圧	66 kV/6.9 kV
定格電流	17.5 A/167.4 A
%インピーダンス	3 % (2 MVA 基準)
巻線層数	8 層/2 層
ターン数	918/96
V/N	41.5
導体構成	1 本/8 並列(4 重 2 並)
線材断面寸法	5.3 mm×0.35 mm
線材長	6.3 km/3.8 km
冷却方式	ガブケル液体窒素冷却
冷却能力	2kW@80K



図4 2 MVA変圧器モデルの外観

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

変圧器モデルの主な試験項目を表 2 に示す。全ての試験項目で良好な結果を得た。その中で、図 5 に示す雷インパルス耐電圧試験では、352 kV の全波インパルス試験においても異常は無く健全であった。また、図 6 に示す冷却システム試験ではサブクール液体窒素を 30 L/min で循環運転したが、変圧器内部の液体窒素温度は約 67~68 K で推移し、超電導コイルが確実に冷却されていることが確認できた。

表 2 主な試験項目

基本性能試験	巻線抵抗、直流I-V特性、変圧比、短絡インピーダンス及び負荷損、無負荷損及び無負荷電流
絶縁性能試験	絶縁抵抗、短時間交流耐電圧、雷インパルス耐電圧
熱的性能試験	熱侵入量、保冷容器、巻線初期冷却特性、冷凍機停止時特性、冷凍機初期冷却特性、冷却システム冷凍能力、定格通電時冷却特性

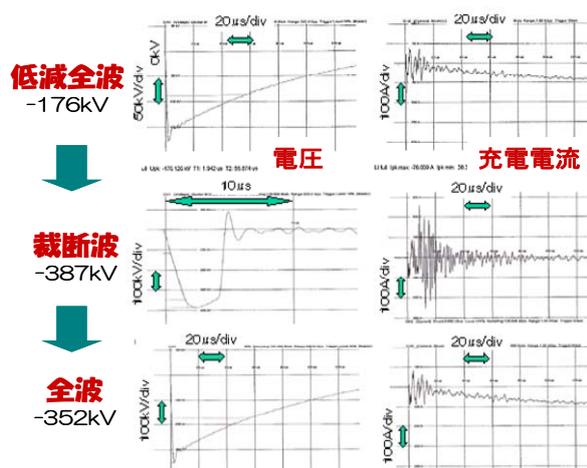


図 5 雷インパルス耐電圧の試験結果

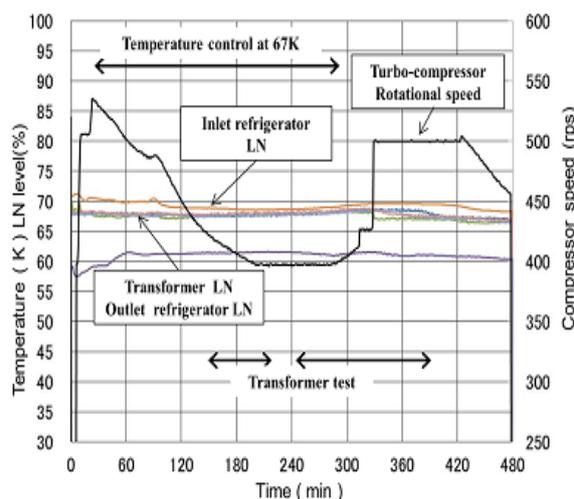


図 6 冷却システムの試験結果

3. 20 MVA 実用超電導変圧器の設計検討

前述の要素技術や変圧器システム技術の開発成果に基づき 20 MVA 実用超電導変圧器の設計を行った。その設計条件は、①線材量削減や保護等から限流機能を付加して%インピーダンスは 10 % (限流機能無し 15 %)、②絶縁確保のため巻線はサブクール液体窒素で冷却、③鉄心は冷却装置の熱負荷回避から室温空間に配置、④巻線は GFRP 製巻枠に超電導線を配置した円筒巻線、とした。設計は巻線のターン間電圧をパラメータとして鉄心重量、線材長さ、巻線高さなどを解析して行い、最適な 41.5 V/ターンとした。設計した超電導変圧器の諸元を表 3 に、概念図を図 7 に、超電導変圧器と油入変圧器の比較を表 4 に示す。表 4 から超電導変圧器は油入変圧器より重量や設置面積が約半分で、かつ高効率なことが確認できる。

超電導 Web21

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

表 3 20 MVA 変圧器の諸元

相数、結線等	3、Y-Y、限流機能付加
定格電圧	66 kV/6.9 kV
定格電流	175 A/1,674 A
%インピーダンス	10 % (20 MVA 基準)
ターン数	918/96
V/N	41.5
導体構成	3 並列(3 重)/24 並列(12 重 2 並)
線材断面	5.3 mm × 0.35 mm
線材長	18.0 km/15.1 km

表 4 超電導変圧器と油入変圧器の比較

種類	超電導	油入
損失	46 %	100 %
交流損失/銅損	31% (交流損失)	91 % (銅損)
鉄損	7 %	9 %
熱侵入	8 %	-
効率	99.7 %	99.4 %
重量(冷却システム含む)	50 %	100 %
設置面積(同上)	51 %	100 %

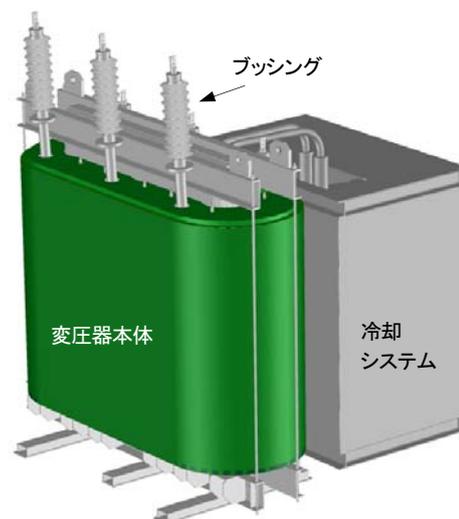


図 7 20 MVA 超電導変圧器の概念図

4. まとめ

超電導変圧器の技術開発は平成20～24年度までの5年間に亘って進め、今回、2 kA級巻線技術や2 MVA超電導変圧器システムの性能が検証できた。また、これらの成果を反映した設計にて、20 MVA 実用超電導変圧器の特性や既存油入変圧器と比較して有利な性能を見通すことができ、プロジェクトの目標を達成できた。さらに、これらの殆どの技術が世界初である。

今後、これらの成果を基に産業用や電力用などの変圧器へ本技術が展開され、実用化が促進されることを期待する。なお、本プロジェクトで開発した冷却システムは大陽日酸にて商用化が図られた。

本技術開発は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) から受託して実施したものである。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：平成 25 年度超電導技術動向報告会報告

「高温超電導電力貯蔵システム (SMES)の研究開発(2)～YOROI コイル適用効果～」

中部電力株式会社

技術開発本部 電力技術研究所

超電導プロジェクトリーダー 長屋重夫

イットリウム系超電導線材のコイル応用のうち SMES への適用は、他の機器、分野への適用に比べ、現状のイットリウム系線材に最も有利な応用である。これは、SMES における超電導コイルの役割が、磁気エネルギーの貯蔵であり、極端なことを言えば、電流が流れさえすれば、その機能を満足させることが出来るからである。

イットリウム系線材の材料面での強みと弱みは、先月号に述べたが、コイル化応用への実用化を考えた場合、線材長さの制約がある。長尺化に向けた開発も進められてきたが、歩留まりやコストの面から、現実的には 2~3 百 m の線材での応用となる。

このため、研究開発レベルのコイルならば、そのような長さでも利用可能であるが、製品レベルの超電導機器に適用するには、接続が不可避となるものの、イットリウム系線材は、その製法・構造上、超電導接続が不可能である。

磁場精度や磁場時間安定性が求められる MRI や加速器応用では、超電導接続が出来ない点は、性能上、非常に大きな制約となるが、SMES ではこれがなく、接続部は熱負荷となるが、コイルシステム全体での冷却バランスが成立すればよい。このため、短尺線材の接続による長尺線材が利用可能であり、線材供給面からの制約がない。

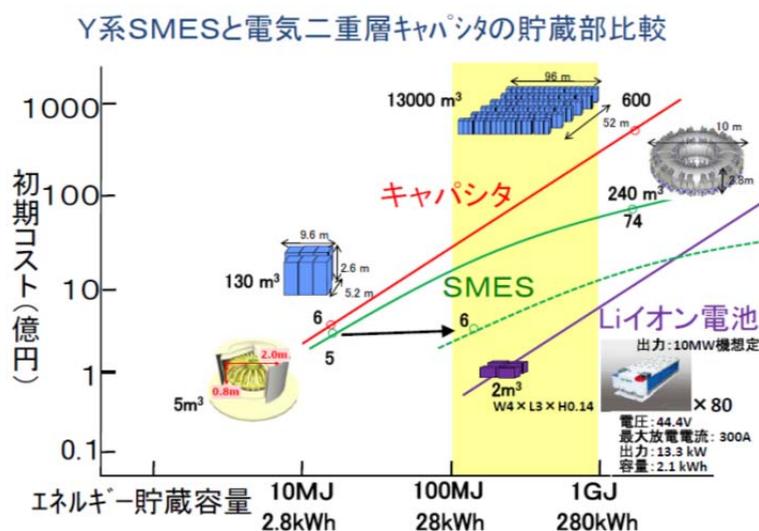


図 1

瞬時電圧低下補償システムとして実運用されている SMES も含め、当初のイットリウム系線材の適用および今回の YOROI コイル適用の場合による貯蔵部のコスト比較を図 1 に示す。20 MJ の貯蔵エネルギーを持つコイルが、瞬時電圧補償システムとして実稼働しているが、今回の YOROI コイルを適用した場合、コイルの高強度化が実現することにより、フープ応力の制約が緩和され、大

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

口径コイルが可能となる。さらに線材の負荷率も同時に上げることが出来、当初、20 MJ 級の SMES コイルとして想定していたシステムで、60 cm 級コイルを 80 cm 級に変更することで、約 10 倍のエネルギー貯蔵が可能となる。コスト面では、線材量も増えることになるが、線材利用率が上がることにより、2 割程度の増加となる。

また、出力 1 万 kW で、充放電回数を考慮した比較を図 2 に示す。SMES では、充放電の繰り返しによる貯蔵部の劣化は発生しないが、キャパシターや電池では、劣化を考慮して充放電深度を下げるため、繰り返し回数が多い場合は、貯蔵部容量を増やすことになる。

図 3 には、各種電力貯蔵装置と SMES の比較を示すが、YOROI コイルを適用した SMES では、SMES の弱点であった、エネルギー密度の低さが、大幅に改善されることがわかる。

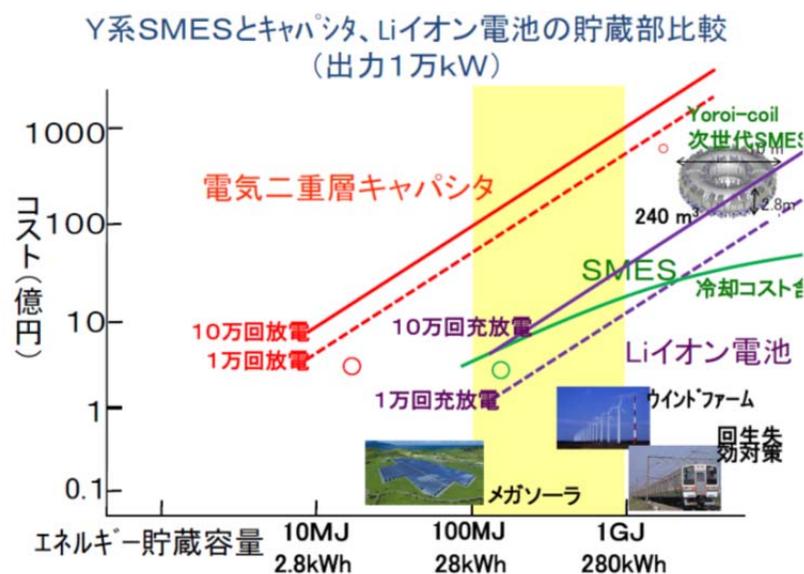


図 2

各種電力貯蔵装置との比較

種類	Ni水素	Liイオン	NaS	超電導 フライホイール	電気二重層 キャパシタ	SMES
コスト (万円/kW)	△ 10	△ 20	△ 24	◎ 7	◎ 5	◎ 2~6
寿命 (サイクル数)	△ 5~7年 2000回	△ 6~10年 3500回	○ 15年 4500回	◎ 20年以上 制限なし	○ 15年 10万回以上	◎ 20年以上 制限なし
大容量化	△ ~MW級	△ 1MW級 まで	○ MW級 以上	○ 単体MW 並列化要	◎ 10MW級	◎ 10MW 以上
充電状態の 計測・監視	△	△	△	◎	◎	◎
安全性	○	△	△	○	○	○
温度管理の 必要性	○ 無	○ 無	△ (≥300℃)	△ 冷却要	○ 無	△ 冷却要
エネルギー密度 (Wh/L)	40~100	200~300	144	66	0.04	金属系:0.1 Y系:1 YOROI:6

図 3

超電導 Web21

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

これまで SMES は、秒オーダーの繰り返しの多い大出力分野への応用が検討されてきたが、今回の高強度コイル化技術により、今後の再生可能エネルギーの導入拡大や電力ネットワークのスマートグリッド化に対して、有力なデバイスの1つとなると考えられる。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：平成 25 年度超電導技術動向報告会報告

「ISTEC における高温 SQUID 技術開発の最近の進展」

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
副所長 田辺圭一

超電導量子干渉素子 (SQUID) は超電導現象特有のマクロ量子効果を利用した超高感度の磁気センサであり、例えば低温超電導体 Nb を用いた SQUID (低温 SQUID) は、脳磁などの生体計測に利用されている。一方、Y 系高温超電導材料を用いた SQUID (高温 SQUID) は、磁場感度の点では低温 SQUID に劣るものの、簡易な液体窒素冷却で使用できるためコンパクトで低コストの計測システムや野外使用のシステムに適している。また、SQUID は、直流から高周波まで一定の高い磁場感度を有する、冷媒冷却でかつ量子効果を利用しているため磁場感度の温度に対する安定性が極めて高いなど他の磁気センサにない特長を有している。ISTEC では、以前の NEDO プロジェクトで開発、蓄積した酸化物高温超電導集積回路作製技術を活用し、薄膜積層型の高温 SQUID を開発してきた。薄膜積層型の高温 SQUID は、薄膜 1 層を用いた従来の高温 SQUID に比べ 5 倍以上という高い磁場感度をもち、粒界接合ではなくランプエッジ型接合を採用しているため、多くの応用で必要となる磁場印加に対する耐性が高いアレイ化や、複雑なセンサ構造にも対応可能という利点をもつ。このような利点を活かし、5 チャンネル SQUID アレイを用いた Y 系分割加工線材用の非破壊検査装置や、JOGMEC プロジェクトによる金属資源電磁探査装置実用機の開発にすでに成功している。また、JOGMEC プロジェクトでは、SQUID による磁場偏差測定を利用した金属資源探査装置試作機の開発や、石油分野への応用を目指した調査研究も昨年度行い、良い結果を得ている。その他、首都大学東京ほかとの共同研究では、地震の原因となる地殻破壊に伴う微弱な磁場変化の検出を目的とした地磁気観測装置を開発し、福島県いわき市に設置し常時観測を行っている。

一方、JST の S-イノベプロジェクトでは、平成 21 年度より、日立製作所、日立ハイテク、九州大学、岡山大学、豊橋技術科学大学と共同で、先端的なバイオ・非破壊センシング装置・システムの実現を目指した研究開発を行っている。この中で、ISTEC は、より高性能の高温 SQUID を開発すると共に、共同研究機関に試作した SQUID を供給する役割を担っている。このプロジェクトの中で有力な出口候補として考えている超低磁場 NMR/MRI や非破壊検査装置では、磁気センサは 10-100 mT 程度の磁場にさらされる。このような環境中で高温 SQUID を動作させることを目的とし、磁場検出コイルは銅線のような常電導材料で構成し、磁気シールド中に置いた高温 SQUID と結合させる「検出コイル分離型」の SQUID を開発した。図 1 に示すように、SQUID 本体は環境雑音をキャンセルできる差分型 (グラディオメータ) とし、常電導検出コイルとの結合効率を上げるため、別基板上に超電導薄膜 1 層で作製したマルチターン入力コイルを SQUID 本体に重ねる構成とした。検出コイルの配線は入力コイルの電極パッドにハンダ付けされる。さらに、この SQUID と入力コイルをプラスチックキャップで密閉封止し、種々の装置で検出コイル仕様を変えるだけで共通使用できるようにモジュール化した。常電導検出コイルを用いた場合は、直流や低周波での磁場感度は低下するが、液体窒素冷却し抵抗を下げることによって、1 kHz 以上の周波数領域では、超電導検出コイルを用いた場合と遜色のない高い感度が得られる。実際に、 $35 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ 程度の高い感度が実証された。

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

高温 SQUID を磁気シールドのない環境で用いる場合、磁束トラップによるノイズ増加が問題になる。まず、地磁気中冷却の場合にも SQUID の超電導薄膜中に磁束がトラップされないようにするには、その線幅を $5\ \mu\text{m}$ 程度以下にすればよい。さらに、磁場感度を向上させるため、数ターンの入力コイルを SQUID ループの周りに巻き付け、検出コイルとの結合効率を改善した「ハイブリッド型」の高温 SQUID を開発し、最高で $18\ \text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ という、入力コイル積層型の SQUID に迫る高い感度を実証した。このような SQUID を用いても、センサの冷却時には温度勾配による熱起電力等で弱電流が流れ磁束トラップが発生する場合がある。磁束トラップが発生した場合、センサ部分の温度をヒータで T_c 以上に上昇させた後、再冷却するトラップ抜きという作業を行うが、その際にもできるだけ均一な加熱と冷却を行うことにより、磁束トラップの発生が抑制され、 $1\ \text{Hz}$ 程度の低周波まで低い磁束雑音が得られることが最近わかった。センサの冷却やトラップ抜き工程の最適化を行うと共に、磁束トラップが生じやすい”弱い”部分をセンサから排除するプロセスの見直しを行っていくのが今後の課題である。

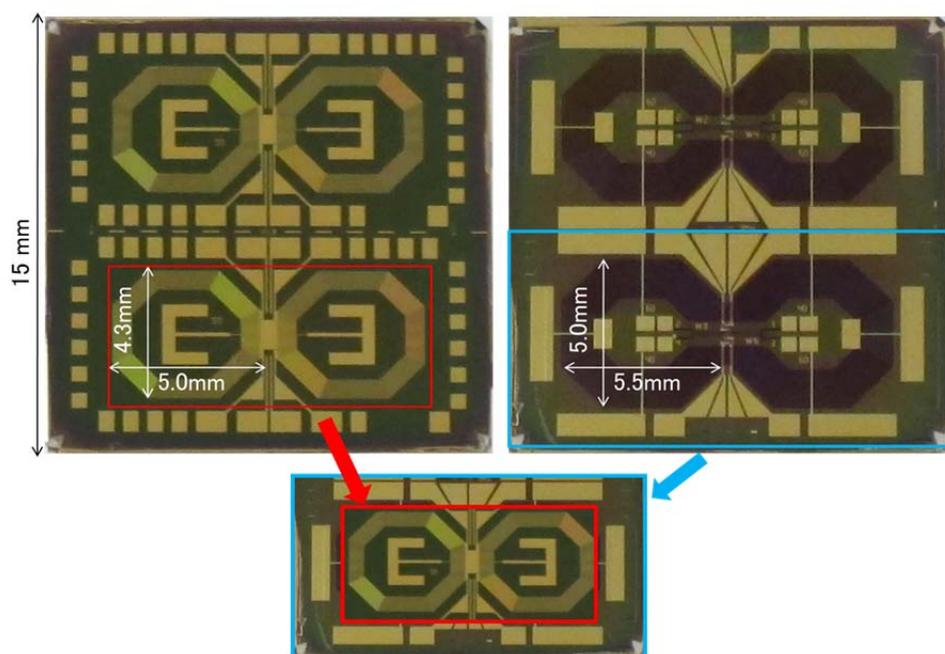


図1 JST S-イノベプロジェクトでISTECが開発した検出コイル分離型高温 SQUID。
左上が入力コイルチップ、右上が SQUID グラディオメータチップ。それぞれを
切り出して、下のようにならべて積層配置する。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：平成 25 年度超電導技術動向報告会報告

「SQUITEM による金属資源探査」

独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構
資源探査部
杉崎真幸

電磁気の性質を利用した物理探査技術の一手法である TEM 法は、金属鉱床の探査に広く利用されています。TEM 法は、地上に敷設したループ状の導電線にオン・オフ時間のある信号を入力し、電流遮断後の誘導電流から生じる磁場を測定することで、地下の比抵抗分布を測定する手法です。近年の鉱床の深部化に伴い、従来装置よりもより精度が高く、深部の情報を取得できる TEM 装置の必要性が増したことから、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) では、高感度の磁力センサである高温超電導量子干渉素子 (HTS-SQUID) を用いた TEM 装置 (SQUITEM) を開発し、金属鉱床探査に利用しています。

SQUID 磁力計は、磁場の時間微分 (dB/dt) を測定する従来の誘導コイル型磁力計と異なり、磁場そのもの (B -field) を測定します。 B -field 測定は dB/dt 測定と比較して信号の時間減衰が遅いため、より遅い時間 (深い深度) までデータが取得できるという利点があります。また、SQUID は金属交差探査で用いられている他の磁場センサと比較してノイズレベルが極めて小さく、かつ十分に広い周波数帯域を持つという特長があるため、より大深度の測定が可能となります。

JOGMEC では、ISTEC、三井金属資源開発株式会社 (MINDECO) とともに、次世代 SQUITEM (SQUITEM 3 号機) 機器開発プロジェクトを実施し、平成 24 年度に SQUITEM 3 号機 (図 1) を完成させました。素子や FLL 回路、フィールドノイズに対するシールド方法の検討等の結果、SQUITEM 3 号機は従来装置よりも操作性・可搬性が向上し、また装置の特長である大きなスルーレート (単位時間あたりに装置が追従できる磁場変化) を活かし、従来装置では測定が難しかった地下深くまでデータを取得できるようになりました。



図 1 SQUITEM 3 号機概観

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

野外において実施した性能評価試験の結果、スルーレート（実測値 10.5 mT/sec）、ノイズレベル（実測値 20-25 fT/hz^{1/2}@10 kHz）等のスペックの向上を確認しただけでなく、従来装置（誘導コイル磁力計）よりもより深く、より精度の高い解析が可能となることが確認されました。図2は、得られた TEM データを解析し、ボアホール検層で測定された実際の地層比抵抗と比較したものです。従来装置（誘導コイル磁力計）よりも深部まで地層比抵抗の特徴を捉えた解析がなされており、SQUITEM 3号機の優位性が確認されました。

今後、SQUITEM 3号機は、JOGMEC の実施している金属鉱床探査プロジェクトに活用されていく予定です。

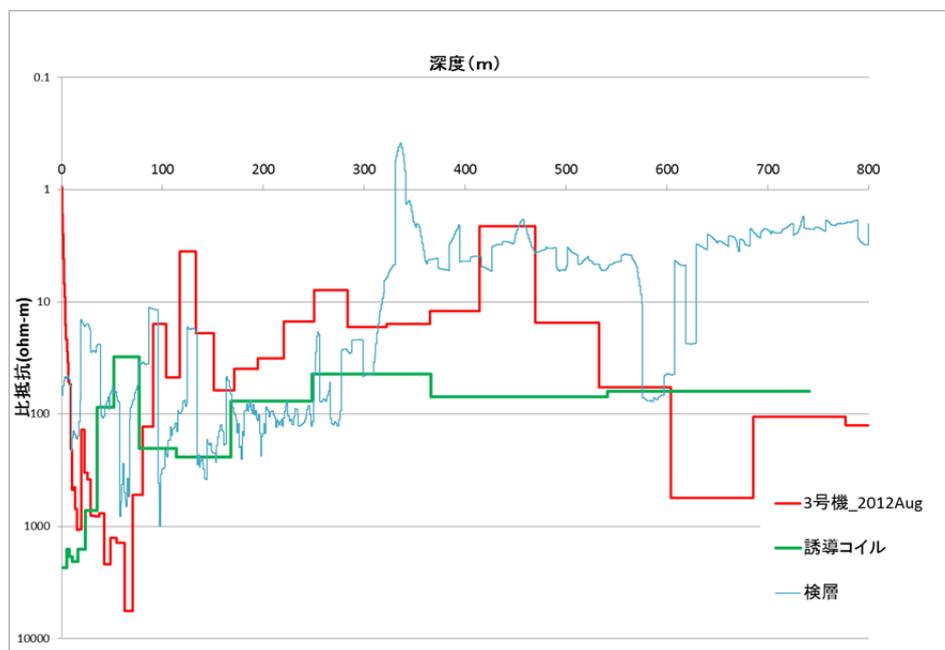


図2 比抵抗逆解析結果

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：平成 25 年度超電導技術動向報告会報告

「超伝導単一光子検出器 SSPD の開発状況」

情報通信研究機構

神戸未来 ICT 研究所

研究マネージャー 寺井弘高

超伝導ナノワイア単一光子検出器 (SSPD) は、高検出効率、高計数率、低暗計数率、低ジッタ、広波長帯域という優れた特性から、量子鍵配布 (QKD) システムをはじめとする量子情報通信分野ですでに広く使用されている¹⁾。この SSPD の研究開発において、システム検出効率の飛躍的な向上、多ピクセル化による計数率の向上など、この数年で世界的に大きな進展が見られた。本稿では、我々のグループでの最近の進展も含めて、SSPD の最新の研究開発動向を紹介する。

SSPD のシステム検出効率は、光ファイバと SSPD の結合効率、ナノワイアの光吸収効率、フォトン吸収したナノワイアが電気パルスが発生する確率、という 3 つのファクターで決まる。結合効率については、様々な方法で 100 % 近い値が達成されており、高いシステム検出効率を実現するためには、残り 2 つのファクターであるナノワイアの光吸収効率とパルス発生確率を如何にして極限まで高めるかが課題となっている。昨年、米国国立標準技術研究所 (NIST) のグループからシステム検出効率が 93 % に達する SSPD が報告され²⁾、ほぼ同じ時期にマサチューセッツ工科大学・リンカーン研究所のグループからもシステム検出効率が 70 % を超える SSPD が報告された³⁾。これまで、SSPD の心臓部であるナノワイアには NbN の極薄膜 (厚さ 5 nm 程度) が広く使われていたが、NIST の SSPD ではナノワイアに WSi が使われている。WSi は膜が均質かつ臨界温度が 3.7 K 程度と NbN よりも低い。そのため、従来の SSPD ではナノワイアの臨界電流ぎりぎりまでバイアスしないと十分なパルス発生確率が得られなかったが、WSi を用いた SSPD では臨界電流の半分以下のバイアス電流でも、ほぼ 100 % のパルス発生確率が得られている。このことは、適切な黒体輻射による迷光対策を施すことで、1 cps 以下の極めて低い暗計数率でも最大のシステム検出効率を得られることを意味している。一方、NIST やリンカーン研究所の SSPD のもう 1 つの特徴として、ダブルサイドキャビティと呼ばれるデバイス構造がある。ナノワイアの両側に反射層を設けフォトンキャビティ内部に閉じ込めることで、ナノワイアへの電界集中効果を高め、フィリングファクタ (ナノワイアの面積が受光面積全体に占める割合で通常は 50 % 程度) を大きく上回る 100 % 近い光吸収効率が得られる。このような、光吸収効率およびパルス発生確率の改善により、この 1 年ほどで SSPD のシステム検出効率に劇的な改善が見られた。しかしながら、WSi 薄膜の臨界温度が低い代償として、ナノワイアの臨界電流が 120 μ A でも 4 μ A 弱と小さい。そのため、出力信号の SN 比が低く、結果的にシステムジッタが 100 ps 以上と大きい。また、WSi SSPD の実用的な動作温度は 2 K 以下であり、冷却の簡便性という観点でも課題がある。

我々のグループでは、100 V 電源で駆動可能な 0.1 W の小型 GM (Gifford McMahon) 冷凍機に 6 チャンネルの SSPD を実装し、暗計数 100 カウントでのシステム検出効率として 67 % 以上を達成している⁴⁾。図 1 に我々のグループで開発した SSPD の断面構造と、観測されたシステム検出効率、暗計数率、ジッタのバイアス電流依存性を示す。我々の SSPD でもダブルサイドキャビティ構造を採用しており、超伝導薄膜としては WSi よりも臨界温度の高い NbTiN を用いている。2.2 K で WSi SSPD の 5 倍近い 18 μ A 程度の臨界電流、最大 75 % のシステム検出効率、67 ps のジッタが得られている。表 1 に各研究機関で開発している SSPD のシステム性能をまとめた。我々の開発した SSPD は、冷却の簡便性やジッタまで含めた総合性能では、米国 NIST やリンカーン研究所に対して優位性を持っていることがわかる。これまで述べてきたように、高い検出効率を達成するためには、臨

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

界温度の低い超伝導薄膜を用いることが望ましいが、そのトレードオフとして、ナノワイアの臨界電流が小さく、結果的にジッタが増大する。今後、このトレードオフを如何にして解決するか、何を目標としてシステム性能を最大化するかが重要となってきている。

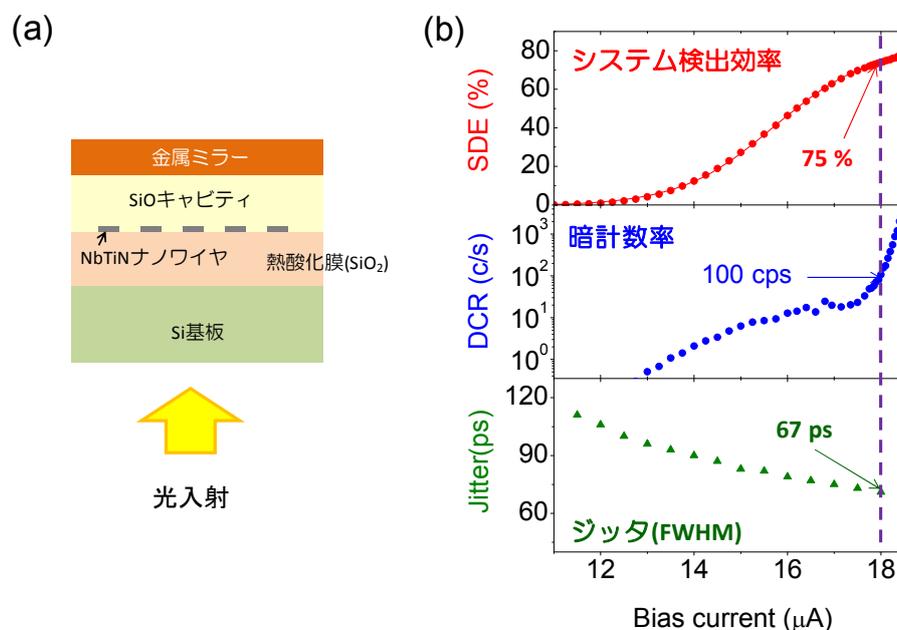


図1 NICTで開発中のSSPD (a) ダブルサイドキャビティ構造の断面図、(b) システム検出効率、暗計数率、ジッタのバイアス電流依存性

表1 SSPDのシステム性能比較

(NIST:米国国立標準技術研究所、MIT LL: マサチューセッツ工科大学リンカーン研究所、NICT: 情報通信研究機構)

	NIST	MIT LL	NICT
検出効率 ($\lambda=1550\text{nm}$)	93%	>70%	75%
暗計数	1kHz(黒体輻射による)	1kHz(黒体輻射による)	100Hz
ジッタ	150ps	40-80ps	67ps
動作温度	300mK	2.5K	2.2K
冷凍機	断熱消磁	GM	GM
光結合方式	パッケージング	ナノポジショナ	パッケージング

SSPDのもう1つの特徴として高い計数率がある。競合する半導体アバランシェフォトダイオード(APD)では100MHz程度の計数率が限界であるのに対して、SSPDでは潜在的に1GHzを超

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

える計数率での動作が可能である。しかしながら、現状の SSPD では、ナノワイアのカイネティックインダクタンス L_k と負荷抵抗 R による L_k/R 時定数で応答速度が決まっており、光ファイバと 100% 近い結合効率を達成するために必要な $10\sim 15\ \mu\text{m}^2$ の受光面積では APD と同程度の計数率である。この L_k による計数率の制約を打破するため、主に 2 つのアプローチが提案されている。1 つは受光面を複数に分割するマルチピクセル化であり、もう 1 つは導波路上へのナノワイアの作製である。

マルチピクセル化により、全体としての受光面積を確保しつつ、各々のピクセルを小型化できるため、さらなる高速動作が可能となる。また、単一の受光面では実現できなかった光子数識別も可能となる。マルチピクセル化における最大の課題は信号の読み出しである。読み出し用 RF ケーブルの本数が増大するため、冷凍機への熱負荷が増大し、小型 GM 冷凍機への実装が困難となる。読み出し用 RF ケーブルを削減するためには、冷凍機内部での信号処理が必要である。我々は単一磁束量子 (SFQ) 回路による極低温信号処理を世界に先駆けて提案し、原理実証を進めてきた⁵⁾。図 2 にマルチピクセル SSPD と SFQ 信号処理のシステムイメージを示す。SFQ 回路は、100 GHz を上回るクロック周波数で動作可能、かつ 10,000 個のジョセフソン接合を含む回路でも数 mW の低消費電力で動作するため、極低温環境下での信号処理に適している。我々はこれまでに 4 ピクセル SSPD アレイと SFQ 信号処理回路を 0.1 W GM 冷凍機に実装し、クロストークフリー動作の実証に成功している⁶⁾。今後は、さらなる大規模アレイ化による高速化の追求、イメージングへの応用展開を進めていく予定である。

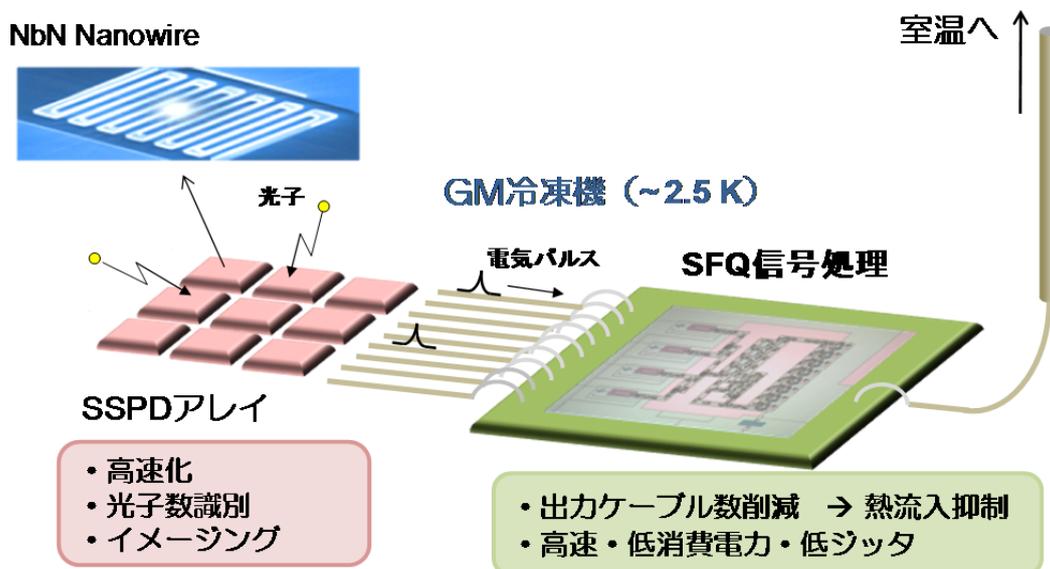


図2 NICTで開発中のマルチピクセル SSPD のシステムイメージ

一方、導波路上の SSPD では、導波路中を進行する光子をナノワイアにより吸収する。オンチップの検出効率は最大 91% に達し、ワイア長が $40\ \mu\text{m}$ 以下と短いため、1 ns を切る信号減衰時間、ジッタについても 20 ps 以下を達成している⁷⁾。しかしながら、ファイバと導波路の結合損失や導波路の伝送損失まで含めたシステム検出効率については数%程度であり、今後これらの損失をどこまで低減できるかは未知数だが、すでに垂直入射型 SSPD で達成している 90% 以上のシステム検出効率を超えることは難しいと思われる。導波路で構成した量子光学回路と量子ドットや導波路型 SSPD を集積化する取り組みがすでに行われているが⁸⁾、今後もそのような方向で研究が進められていくものと思われる。

超電導 Web21

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

最後に、SSPDの今後の応用展開について述べたい。まず、1550 nm 波長帯では、これまで同様、量子暗号システムや量子光学実験等で利用されていくものと思われる。また、米国では地上-衛星間通信のパルス位置変調方式による光リンク実証実験で SSPD が使用されており⁹⁾、このような衛星間、地上-衛星間通信への応用も今後のターゲットの1つになる。一方、SSPDは非常に低ジッタであるため、LIDAR (Light Detection and Ranging) への応用でも有望視されている。3D イメージの取得やリモートセンシングなど、従来の APD よりも高精度なデータが得られるものと期待されている。また、可視よりも短波長領域では、APD や電子増倍管 (PMT) という強力なライバルが存在するため、これまであまり応用が進んでいなかったが、この波長領域でも原理的に APD や PMT の検出効率を凌駕する SSPD の実現は十分に可能である。究極の高感度、低ノイズ (アフターパルスフリー)、高ダイナミックレンジ (高計数率) を兼ね備えた光子検出器として、共焦点顕微鏡など様々な機器への応用展開が考えられる。今後、1550 nm 以外の波長領域も開拓することで、通信分野だけでなく、バイオ・医療分野をはじめとするより広い応用展開も視野に入ってくるものと思われる。

参考文献：

- 1) M. Sasaki *et al.*, Optics Express 19, 10387, 2011.
- 2) F. Marsili *et al.*, Nature Photonics 7, 210, 2013.
- 3) D. Rosenberg, A. J. Kerman, R. J. Molnar, and E. A. Dauler, Optics Express 21, 1440, 2013.
- 4) S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, and Z. Wang, Optics Express 21, 10208, 2013.
- 5) H. Terai, S. Miki, and Z. Wang, IEEE Trans. on Appl. Supercond. 19, 350, 2009.
- 6) T. Yamashita, S. Miki, H. Terai, K. Makise, and Z. Wang, Optics Lett., Vol. 37, 2982, 2012.
- 7) W. H. P. Pernice *et al.*, Nature Communications 3, 1325, 2012.
- 8) G. Reithmaier *et al.*, Nature Scientific Reports 3, 1901, 2013.
- 9) M. E Grein *et al.*, Int. Conf. on Space Optical Systems and Applications, 78, 2011.

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：平成 25 年度超電導技術動向報告会報告

「新超電導物質の探索の進展」

岡山大学大学院
自然科学研究科
教授 野原 実

新しい超電導物質を自由自在に設計し、高い温度で超電導にすることができないだろうか。この野望に向かって、私たちの研究室では「ヒ素の化学結合の制御」を利用した鉄系超電導物質の開発を進めている。アイデアは、1981年に福井謙一とノーベル化学賞を共同受賞したロアルド・ホフマンの著書にさかのぼる¹⁾。それによると、 ThCr_2Si_2 型構造を持つ遷移金属ヒ素化合物では、遷移金属 d バンドのフェルミエネルギーと As_2 分子の π^* 反結合分子軌道のエネルギーが拮抗する。従って d バンドの電子数に応じて π^* 軌道の電子数も変化する。 π^* 軌道が非占有であれば As_2 分子が形成され、占有されれば分子は解離する。すなわち、d バンドの電子数を変えることで、固体中の As_2 化学結合を自由自在に切断・形成できる。2008年に鉄系超電導物質が発見されたとき、いくつかの国内外のグループが、このアイデアを ThCr_2Si_2 型構造の CaFe_2As_2 に適用できないだろうか考えた。

実際、 CaFe_2As_2 に Rh ドープすると結晶の c 軸方向に As-As 結合ができることが判明した。 CaFe_2As_2 では、超電導を担う FeAs 層は隣の FeAs 層と Ca を挟んで隔たっており、FeAs 層間の化学結合は無い。ここに Rh をドープすると、FeAs 層間に As-As 結合が形成され、層間隔が急激に 10%程度減少した。面白いことに、この化学結合の形成（化学反応）は 50 K もの低温で起こった²⁾。残念ながら、化学結合ができると転移温度 15 K の超電導は消失した。3次元性が高まったからだと考えられる。しかし固体中の化学結合制御というホフマンのアイデアは実証できた。

CaFe_2As_2 に Co などの様々な遷移金属をドープしてみると、上述した Rh と同じことが起こった。しかし Pt は例外であった。 CaFe_2As_2 は、Pt 許容量（固溶限界）が低く、十分な量の Pt をドープできないため超電導を示さなかった。もちろん FeAs 層間の As-As 結合形成も起こらなかった。しかし、大量の Pt を仕込んで無理矢理に合成を進めたところ、新しい層間物質 Pt_4As_8 層を持つ新物質 $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_2\text{As}_2)_{10}$ が析出した。この化合物は最高で 38 K の超電導を示した³⁾。 $(\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4})\text{Fe}_2\text{As}_2$ に並ぶ記録である。面白いことに Pt_4As_8 層には As_2 分子が含まれていた。結局 Pt ドープでも、ホフマンのアイデアとは違った形ではあるが、As-As の化学結合形成が生じた訳である。ちなみに Pt_4As_8 層は絶縁性で、このため超電導を担う FeAs 層の 2次元性が高まって高 T_c が得られたと考えられている。Fe は四面体配位を好む。実際 FeAs 層は FeAs_4 四面体からできている。一方 Pt は平面四配位を好む。このような異なる配位化学を示す元素を混ぜると自然は困惑し、その解決策（妥協策?）として、自然は Pt 四面体配位からなる Pt_4As_8 層を創出した!

2011年、米国ヒューストン大グループが CaFe_2As_2 に希土類元素の Pr をドープすると 49 K という高い温度で超電導を示すと報告した。しかし、この超電導は僅か 300 Oe の磁場で消失し、バルク超電導ではなかった。Pr は Ca より（イオン半径が）小さいので、Pr をドープすると FeAs 層間に As-As の化学結合が生成する。Pr は電子をドープする役割も果たす。このため、Pr ドープでは化学結合と電子数が同時に変化してしまう。そこで私たちは、La と P を用いることにした。La は Pr と同様、電子をドープできる。しかし Ca と同じ大きさなので構造は変わらない。一方 As と等電子配置の P はドープしても電子数を変えない。しかし As よりもイオン半径が小さいので構造を変えることができる。その結果 La と P を組み合わせさせた「コドーピング」により電子数と構造の「独

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

立」チューニングが可能となり、図1に示すように、Laを18%、Pを6%ドーピングした CaFe_2As_2 において45 Kのバルク超電導を実現することができた[4]。これは鉄系122型における超電導転移温度の最高値、 $(\text{Ba}_{0.6}\text{K}_{0.4})\text{Fe}_2\text{As}_2$ における38 K、を5年ぶりに更新するものである。現在、詳細な結晶構造解析の実験を進めているが、ここでもAs-As結合の形成・切断が重要な役割を果たしていると考えている。また、この化合物では T_c を高く保ちつつ希土類元素の使用量を大幅に削減できた。臨界電流密度の向上に有効な122型構造の小さな異方性とあいまって、超電導線材などへの応用が期待される。

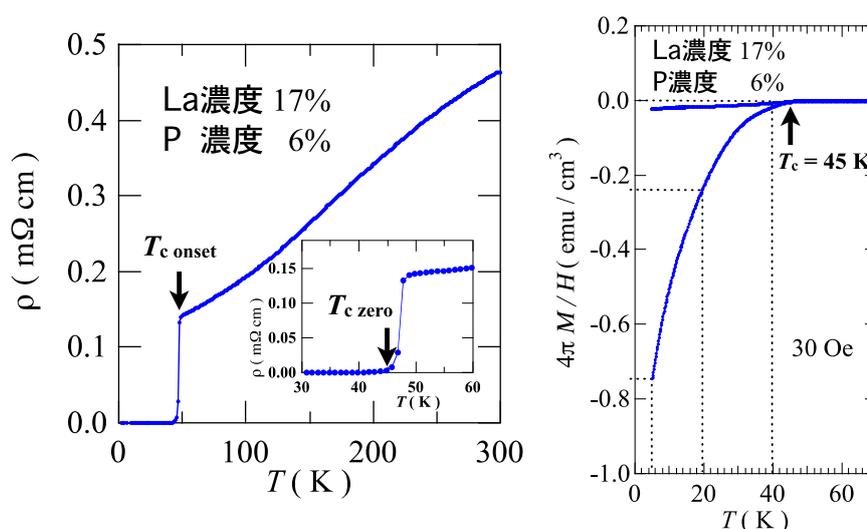


図1 鉄系 CaFe_2As_2 にLaとPをコードーピングすると、 $T_{c\text{onset}} = 48\text{ K}$ 、 $T_{c\text{zero}} = 45\text{ K}$ のバルク超電導が発現した。122型の T_c の記録38 Kを5年ぶりに更新。

参考文献：

- 1) R. Hoffmann, *Solids and Surfaces: A Chemist's View of Bonding in Extended Structures*, Wiley-VCH, New York (1988).
- 2) M. Danura *et al.* *J. Phys. Soc. Jpn.* 80, 103701 (2011).
- 3) S. Kakiya *et al.* *J. Phys. Soc. Jpn.* 80, 093704 (2011).
- 4) K. Kudo *et al.* *Scientific Reports* 3, 1478 (2013).

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：平成 25 年度超電導技術動向報告会報告

「高温超電導関連技術の国際標準化動向」

九州工業大学大学院
情報工学研究院
名誉教授 松下照男

現在、地球環境保全のために CO₂ の削減が掲げられているが、超電導電力技術はそれ自体が高エネルギー効率技術であり、また太陽光発電などの直流に近い電力を有効に送電できるケーブル、超電導エネルギー貯蔵装置、限流器などの機器がスマートグリッド実現のための重要な要素としても期待されている。これらの超電導電力機器については、我が国では NEDO プロジェクト「リチウム系超電導電力機器技術開発」で開発研究が行われるとともに、超電導電力機器技術調査委員会が組織され、各種電力機器について、将来の国際規格化を見越して通則素案が検討されてきた。

以上の背景から、近い将来において国際標準化の秩序の下で超電導電力機器が社会に導入されることが期待されるが、そのためには国際規格の制定とそれに続く各国の国内規則の制定が必要で、それらが完成するまでに 10 年近い年月がかかることを意識して、標準化のスタート時期を探らなければならない。

超電導関連技術の国際標準化は IEC (International Electrotechnical Commission : 国際電気会議) の 90 番目の委員会 TC90 で審議されており、13 の作業グループと 1 つのアドホック・グループが活動している。これまでに制定された国際規格は超電導用語が 1 件、特性の試験法が 16 件、超電導機器の通則が 1 件の 18 件である。また現在、審議中のものは試験法が 3 件、超電導線材の一般等級事項と試験法がそれぞれ 1 件である。さらに数件の試験法と超電導センサーの通則について、近く審議を開始する予定である。このように、現在はまだ、試験法の規格が大部分で、超電導機器の通則はわずかな数に留まっている。今後、超電導機器の通則の制定をスピードアップするよう努力する必要がある。

そうした中で、超電導電力ケーブルの規格化のための試験法の検討を行っていた CIGRE (国際大電力会議) の WG B1.31 からレコメンデーションが提出され、それに基づいて TC90 が TC20 (電力ケーブル委員会) に協力する形で規格化を検討することになった。また、そうした CIGRE における検討に沿う形で、すでに超電導電力機器技術調査委員会の下で超伝導電力ケーブル小委員会において通則案を検討してきている。

今後は超電機器の試験項目が整備されるにつれ、規格化すべき試験法の数が一挙に増大するため、各 WG の委員の充実を図るとともに、具体的な通則素案の検討を早めに行う必要がある。ただし、製品規格など、場合によって標準化の国際合意の醸成が難しい場合もあるので、情報発信を怠らず、的確に情勢を判断しながら粘り強く交渉を行っていくことが肝要である。一方で、我が国における国際標準化への阻害要因について検討し、規制の解除や緩和について行政に働き掛けを行うことも心がけておかねばならない。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：平成 25 年度超電導技術動向報告会報告

「超電導の鉄道分野への応用」

公益財団法人 鉄道総合技術研究所
研究開発推進室担当部長
材料技術研究部 超電導応用研究室長
富田 優

鉄道総研では基礎から応用まで様々な超電導技術の開発を行っているが、その中でも鉄道分野への応用を目指した超電導技術について紹介する。

鉄道応用を目指した超電導ケーブルの開発では、直流電気鉄道の送電線として適用することを想定し開発を始め、超電導線材の通電試験およびその結果に基づいて超電導ケーブルを製作し、各種特性評価試験を行っている。電気抵抗がゼロで送電できる超電導を鉄道用送電線に導入することで、回生効率の上昇、電力損失の低減、変電所の負荷平準化や集約化、レール電位の抑制などが期待される。また、鉄道での将来の自然エネルギー利用を想定し、太陽光発電の超電導ケーブル接続による電力供給通電の試験も行っている。現在の電気鉄道に適用可能な超電導ケーブルとして、10 kA級の臨界電流値をもつ5 m長の超電導ケーブルを製作し、液体窒素に浸漬冷却した通電試験を行った。また、これまでのケーブルシステムの特性試験の結果をもとに、鉄道総研所内の試験線へ31 m長の超電導ケーブルを導入した(図1)。現在は、冷却・通電試験や実車両を用いた実証試験を行っている¹⁾。また、評価試験と並行し、実路線を対象としたシミュレーションによる確認を進めており、実証試験の結果と合わせて導入効果について明らかにし、鉄道事業用として適用可能な超電導ケーブルの実現を目指していく。



図1 鉄道路線に導入した31 m超電導ケーブル

在来鉄道への応用研究として、鉄道車両用変圧器の超電導化の可能性について検討を進めている。また、鉄道のより一層の省エネルギーを目指し、超電導コイルと超電導バルク体を組み合わせた磁気

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

軸受により回転部の摩擦抵抗をなくしたフライホイールを支持する蓄電装置の開発を行っている。

本研究の一部は、(独) 科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」における研究課題「次世代鉄道システムを創る超電導技術イノベーション」の支援を受けて行っている。

また、本研究の一部は、国土交通省の補助金を受けて行っている。

参考文献:

1) M. Tomita, H. Ohsaki, T. Kiss, N. Amemiya, T. Masuda, N. Tamada: Abstracts of CSJ Conference, 87 (2013)20

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

特集：平成 25 年度超電導技術動向報告会報告

「洋上風力発電機開発への高温超電導技術適用の期待と課題」

一般社団法人 日本風力エネルギー学会
会長 勝呂幸男

1. 風力発電設備

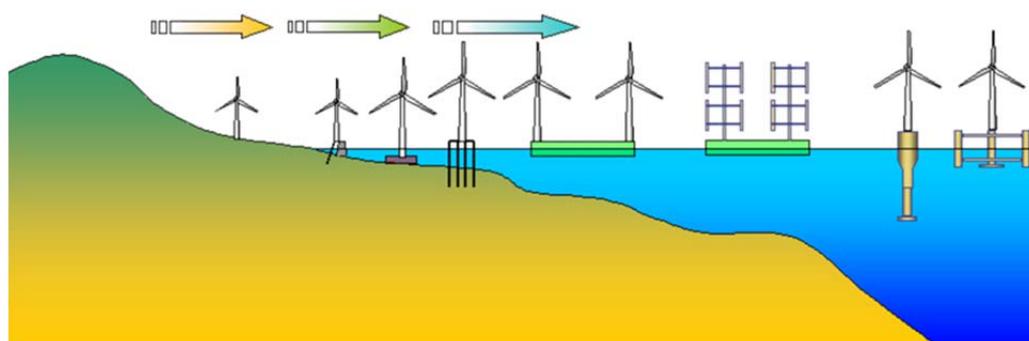
風力発電装置は右図に示すような 3 枚の翼を持つ構造で、再生可能エネルギーの中で最も潜在量が大きく、発生電力コストも安価で世界中で建設されている。今までは、陸上の風の強いところを中心に多くの風車が建設されてきた。2012 年に世界中で 44,711MW の風車が建設され、累計では 282,430MW に達している。わが国は山岳地域が多く、台風等が有り厳しい自然環境にあるが、2012 年 7 月の全量買い取りと Feed In Tariff と呼ばれる買い取り価格が決定し、今後は加速的に増加すると予想されている。また、風車の大型化と洋上への進出が期待されている。



2. 洋上風車

わが国は周囲に海がありその海岸線の長さで世界第 6 位の経済的排他水域を生かした洋上風車への期待は大きい。洋上風車は陸上設置と比較して、① 良好な風況、② 少ない乱れ、③ 大型化で採算向上、④ 離隔設置で騒音問題の影響を削減等の利点が考えられる。勿論洋上風車設置については、① 日本近海は深い水深、② 台風を代表とした厳しい自然環境、③ 海洋生物への環境影響、④ 水深により異なる工法でコストアップになるといった課題もある。

想定される洋上風車の設置を NEDO の資料から下図に示す。



この様な動きは欧州、米国でも先進的に行われており、わが国においても着床式や、浮体式の洋上風車建設が進めている。洋上風車では基礎や支持構造物、海底ケーブル敷設といった工事費用があるから割高な電気代となる恐れがあるが、高風況による発生電力で補い、余りの出るような高効率、型軽量化が期待される。

超電導 Web21

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

3. 高温超電導技術の洋上風力発電装置への適用

洋上発電のコスト低減には機器の大型化、高風況下への設置、信頼性の向上等を考慮した構造物の製造・据え付けといった多くの面からの総合的なコスト削減対策が必要である。また、大型化計画が直面している技術的な課題を克服する必要がある。それらの多くの課題解決のために超電導技術を適用した発電機の採用が期待される。即ち、

① 大出力化により機構的に従来型常温発電機の製造限界を超電導技術による発電機内の高磁束化で克服。② 高磁束化された小型発電機により重量と寸法増加が抑える。③ 発電機の重量低減は地盤荷重を減少することが可能になる。④ 軽量化された地盤は、タワー等の支持構造物を軽量化できる。⑤ これ等の技術で全ての機器を軽量化し、コスト低減に貢献する。⑥ 超電導による電気抵抗ゼロを実現することで高効率化が可能になる。

一方で低温状態を保つための冷却装置が必要といった新たな課題も出てきていることを忘れてはならない。

4. 高温超電導技術のエネルギー機器への期待

洋上風力発電機への超電導技術の適用だけではなく、この技術を電力貯蔵、送電、新しい電力ネットワークの形成に適用することで、日本の電力エネルギー環境を、再生可能エネルギーが中心となり、環境に優しく、経済活動を活性化させ、エネルギーの安全・安定供給に役立つことが可能になる。

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

超電導関連 ‘13/7月－8月の催し物案内

7/5

『高温超伝導体の鉦脈を探せ』

(公財)国際超電導産業技術研究センター、東京

<https://annex.jsap.or.jp/support/division/super/kenkyukai/47th.pdf>

7/7-11

ISEC 14th International Superconductive Electronics Conference
Cambridge, USA

<http://www.isec-2013.org/>

7/14-19

MT-23 International Conference on Magnet Technology
Boston, USA

<http://www.mt23.org/>

7/22

超伝導エレクトロニクス研究会 (SCE)

機械振興会館地下3階2号室、東京

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

7/23-24

未踏科学技術協会 創立40周年記念シンポジウム ～未踏科学・技術が解決する日本の課題～
アルカディア市ヶ谷、東京

<http://www1.sntt.or.jp/sws/>

7/26

水素エネルギー社会の実現へ、関西からの挑戦
岩谷産業(株)中央研究所、尼崎市

http://www.csj.or.jp/kansai/2013/2nd_0726.pdf

7/26

極低温冷凍機の進展とその応用
全日通霞ヶ関ビルディング、東京

<http://www.sntt.or.jp/~fsst/20130726.html>

7/31-8/1

低温工学 東北・北海道支部研究会／第2回材料研究会のご案内
グランドサンピア八戸

http://www.csj.or.jp/tohoku/2013/2nd_0731.pdf

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

8/19-23

低温技術講習会「77K 小型冷凍機を作ろう」

物質・材料機構 桜地区、筑波

http://www.csj.or.jp/reitob/2013/summercamp_0819.pdf

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

新聞ヘッドライン (5/20-6/19)

- 世界最高電圧の超電導線を試験、古河電工、中国で 日経産業新聞 5/21
- 産総研など、超電導体でイオン検出-TOF-MSへ応用期待 日刊工業新聞 5/21
- リニア新幹線 早期開業を 東京一大阪間 関経連がシンポ 大阪読売新聞 5/22
- 岡山大、イリジウム・テルル化合物で分子融解の超電導発見 日刊工業新聞 5/25
- 大強度電子ビーム加速、高エネ研など成功、超電導装置使い 日経産業新聞 5/30
- 電気、ロスなく電車へ、鉄道総研が超電導ケーブル 日本経済新聞 5/31
- 超電導 カフェで学ぶ 15日、名古屋 実験しながら紹介=愛知 中部読売新聞 6/01
- 超電導モーター、船用に、川重、年内に性能試験 日経産業新聞 6/03
- 千代田化工や住友電工 超電導ケーブル実験始動、送電ロスほぼゼロ 日経産業新聞 6/07
- 66kV 大電流・低損失超伝導電力ケーブル NEDO プロジェクトで開発 科学新聞 6/07
- 「3の数字が特別な意味」多成分超伝導で起きる新規物性現象の解明 科学新聞 6/08
- 分子状イリジウム鎖の化学結合切断で超伝導 科学新聞 6/08
- 大強度電子ビームの超伝導加速に最先端技術を用いて実現 科学新聞 6/15
- 鉄道総合技術研究所・超電導応用研究室富田優氏、超電導、鉄道で実用間近 (核心直談) 日経産業新聞 6/18

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

超電導速報—世界の動き (2013年6月)

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所

特別研究員 山田 穰



★ 記事のニュース発信地、関連地

▶線材



2G 線材、増加する受注量と財務報告

Superconductor Technologies Inc. (2013年5月8日)

Superconductor Technologies 社(STI) は、2013年3月30日締め第1四半期の決算報告を発表した。第1四半期純収益は、前年同期の39万9,000ドルに比べ、77万6,000ドルとなった。純損失は、前年同期の300万ドルに比べ、240万ドルとなった。2013年3月30日時点で、同社の現金および現金同等物残高は170万ドル、さらには普通株式並びにワレントによる公募増資として195万ドルを受け取っている。

同社の社長兼最高経営責任者である Jeff Quiram 氏は、「我々は、超電導の様々なニーズに応え、多様な顧客基盤を確立することによって、Conductus®線材の商業化に向けて戦略を掲げ実践している。2013年に突入り、当社はパイロット生産を開始するところまで到達した。4月23日、我々は、特定の製品設計において Conductus 線材を適格とみなす戦略顧客数社から発注を受理した

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

ことを発表した。この発表以来、当社受注残高は伸び続けている。今後、2013年第3四半期までに生成できる線材については、現在、既に受注並びに成約済みのもので全て消費される見込みである。」と述べた。同社はこの先、製品評価を満たす目的で線材を必要とする顧客を優先して、Conductus®線材の出荷を進める予定である。保留中の顧客注文のほとんどは、その目的が250-400A/cm-wの臨界電流を持つ線材である。これに加え、ケーブル実証プロジェクトに使用される500A/cm-wの臨界電流を持つ長尺線材の生産に焦点を当てて取り組んで行く。

Source: "Superconductor Technologies Reports First Quarter 2013 Results"

Superconductor Technologies Inc. press release (May 8, 2013)

URL:<http://phx.corporate-ir.net/staging/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle&ID=1816855&highlight>

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



[ニューヨーク州超電導技術サミット開催。線材からMRIまで](#)

らMRIまで

SuperPower (2013年6月3日)

5月7日、ニューヨーク州アルバニー市にあるニューヨーク州立大学ナノスケール理工学部 (CNSE) で、第3回ニューヨーク州超電導技術サミットが開催された。このサミットは、ニューヨーク州エネルギー研究開発局 (NYSERDA) の後援を得るとともに、MTECH Laboratories、GE Global Research、Hypres社、Philips Healthcare、そしてSuperPower社の協賛によって開催された。サミットでは、GEおよびPhilips両社が超電導MRI事業で大きな成功を収めていること、さらに電力網の一層の向上を狙った超電導の新たな応用について強調された。これに関して、NYSERDAの局長兼最高経営責任者であるFrancis J. Murray Jr.氏は、「我々は、ニューヨーク州の送電システムの向上に取り組んでいるが、超電導技術こそが、今後拡大するエネルギー需要に対応できるよりスマートで優れた耐久性を備え、柔軟な送電網を構築する上で必要な電力供給を実現できるまたとない画期的な技術と考えている。NYSERDAは、ここニューヨークで超電導の画期的な研究とその応用に取り組んでいる企業と連携し、これまで成果を収めてきたことを誇りに思う。」と述べた。現在、ニューヨーク州では3つの重要なプログラムが展開されており、SuperPower社が運営するアルバニーHTSケーブルプロジェクトでは、2006年から2009年にかけて、世界で初めて超電導ケーブルを実系統に接続した。また、Long Island電力公社 (LIPA)が現在、ケーブルの建設を進めており、間もなくProject Hydraのケーブルが、ニューヨーク市にあるConsolidated Edison社の電力網に敷設される予定である。NYSERDAは、いずれもエネルギー効率における超電導ケーブルの有用性を実証する取り組みの一環として、これらプロジェクトを支援してきた。

MTECH Laboratoriesの社長兼共同設立者であるMichael J. Hennessy博士は、サミットで繰り返し取り上げられたテーマを総括し、「超電導線材のサプライヤーであるSuperPower社をはじめ、GEやPhilips社などの機器およびシステムの開発業者、CryoMech社やQ-Driveなどの冷凍機のプロバイダー、そしてTech Valleyハイスクール、SCCC、CNSE、Union大学、またUnion大学大学院など、当社の社員に影響を与え、その教育および育成の場となっている学校やSTEMプログラム

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

に至るまで、ニューヨーク州では、超電導応用を支えるさまざまな事業が展開されている。これこそが、他にはない我々の強みである。」と述べた。

サミットで発表された他の開発プログラムには、SuperPower 社と Brookhaven 国立研究所が ABB 社と Houston 大学と共同で進めている超電導磁気エネルギー貯蔵システム(SMES)の開発に加え、風力発電機のための希土類元素に代わる資源開発に向けたプログラムが 2 件含まれており、それぞれ SuperPower 社が参画、Brookhaven 国立研究所が展開するプログラムである。また、量子計算や情報処理、医療技術、そしてエネルギー貯蔵についての最近の開発動向についても議論された。サミットでは、“超電導...ニューヨーク州から世界へ”と題する短いビデオが紹介され、<http://youtu.be/uQRgAYzkU1s> で見ることができる。

Source: “New York’s Superconductivity Industry Highlights Technology and Economic Benefits”
SuperPower Inc. press release (June 3, 213)

URL:<http://www.superpower-inc.com/content/new-york's-superconductivity-industry-highlights-technology-and-economic-benefits>

Contact: Traute F. Lehner, tlehner@superpower-inc.com

▶エレクトロニクス



‘グーグル、NASA、USRA “D-Wave Two™” 量子

コンピュータを新型人工知能研に設置、間もなく稼働

D-Wave Systems Inc. (2013年5月16日)

D-Wave Systems 社は、NASA、Google、そして大学宇宙研究協会 (USRA) が共同で新設した Quantum Artificial Intelligence 研究所に、512 量子ビットの新型量子コンピュータ D-Wave Two™ を設置すると発表した。この量子コンピュータは、機械学習を進歩させ、難解なコンピュータサイエンスの問題解決を可能にするために使用される。システムのインストールは既に始まっており、量子コンピュータは、今年度第 3 四半期中に研究者によって利用される予定である。選択プロセスの一環として、Google、NASA、そして USRA は、D-Wave 512 量子ビットシステムがクリアしなければならない一連の評価基準及び受入れテストを作成した。D-Wave Two システムは、全ての性能要求仕様を正常に満たし、いくつかのケースでは仕様を大幅に超過するなど良好であった。

D-Wave システムは、機械学習、ウェブ検索、音声認識、プランニングとスケジューリング、太陽系外惑星の探索、およびミッション・コントロール・センターでの業務サポートなど、多岐にわたる複雑な問題に対応するアプリケーションを開発するために使用され、米国アカデミックコミュニティでは USRA 経由で広範に利用されることとなる。

Source: “D-Wave Two™ Quantum Computer Selected for New Quantum Artificial Intelligence Initiative, System to be Installed at NASA’s Ames Research Center, and Operational in Q3”

D-Wave Systems Inc. press release (May 16, 2013)

URL: <http://www.dwavesys.com/en/pressreleases.html>

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

Contact: Janice Odell, jan@fordodell.com

▶加速器



120 台の RF キャビティを受注

RI Research Instruments GmbH (2013年5月7日)

Bruker Energy & Supercon Technologies 社(BEST)の子会社ドイツ RI Research Instruments 社は、約 730 万ドル相当の超電導高周波加速空洞の追加製造を行うオプションを授与された。このオプションは、ドイツのハンブルク近くにある新しい国際研究施設 European XFEL に向けて、現在契約中である高周波加速空洞 300 台 (2,490 万ユーロ相当) に追加されることになる。最近、RI 社インフラ施設の適格性確認が正常に完了し、原契約分の一連の高周波加速空洞は、2013 年度第 2 四半期中に出荷が開始される予定である。Deutsches Elektronen-Synchrotron 研究所 (DESY) は、European XFEL の主要株主であり、加速器施設の建設と運営を任されている。

Source: "RI Research Instruments GmbH Received DESY Contract for 120 RF Cavities"

RI Research Instruments GmbH press release (May 7, 2013)

URL:<http://www.research-instruments.de>

Contact: Dr. Hanspeter Vogel, Hanspeter.Vogel@research-instruments.de

▶基礎



磁性と超電導が共存化？鉄系超電導体

Ames Laboratory (2013年6月5日)

米国エネルギー省の Ames 研究所は、鉄系超電導体の物質内にある磁性と超電導の密接な関係を支える電気抵抗に予想外の変化があることを報告した。この研究グループは、異なった化学置換を持つバリウム・鉄・ヒ素化合物に関して、導電層内の最小および最大抵抗を示す方向は、その化合物の組成に大きく依存し、いくつかの化合物では変化することを観測した。これらの変化は、潜在的な磁気的挙動と超電導現象が密接に関連していることで唯一説明できる。従来の超電導体では、磁性と超電導は互いに抑制し合うので共存することはない。しかし、鉄系超電導体では、強磁性と超電導が著しく共存していることがしばしば見られる。このような磁性と超電導が共存する領域では、物質の特性を特殊な方法で測定する必要があるが、結晶のドメイン領域での分裂 (すなわち双晶生成) によって測定が複雑になり、方向性のある電子特性の研究が困難になる。そこで Ames の研究者たちは、機械的に伸ばせる馬蹄形ブラケット状にしたワイヤーを使って、物理的に試料を支え、単結晶を引き離すという技術を開発した。これで、このドメイン構造生成を排除できた。彼らが開発したこのシステムは、液体ヘリウムクライオスタットに入れられ、所要の温度まで冷却される。その後、偏光顕微鏡を使用し、異なる構造ドメインを識別し、試料の非双晶化を確認した上で、電

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

気抵抗を測定する。この研究グループの研究成果は Nature Communications で報告されている。

Source: “Resistivity switch is window to role of magnetism in iron-based superconductors”

Ames Laboratory press release (June 5, 2013)

URL: <https://www.ameslab.gov/node/7748>

Contact: Ruslan Prozorov, prozorov@ameslab.gov

Breehan Gerleman Lucchesi, breehan@ameslab.gov

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

風力熱蓄積発電 (その4) - 「風力発電」

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
普及啓発/国際部長 岡崎 徹

1. 再生可能エネルギーの課題

風力に代表される再生可能エネルギー（以下、再エネと略称）を大量に導入することが期待されているが、再エネには系統側から見て様々な課題がある¹⁾。図1は特に顕著な課題を絵にした物で導入の主役となっている風力と太陽光には不安定出力の課題があるが、多くの例ではそれに目をつぶっているのが現状であろう。安定出力が可能な水力、地熱、太陽熱発電は立地の問題があり、異論もあろうが現実には主力になり難いと思われる（余談であるがダチョウが危険を感じたときに頭を隠す習性は無いそうである）。

風力熱蓄積発電は極めて安い熱エネルギー蓄積技術を利用するため再エネの最大課題の出力平準化、すなわち不安定出力に対する対策を安価に実現可能であることはWeb21の2012年11月号トピックスで述べた。このコスト計算についての詳細は最新情報も加えて2013年9月号で紹介する。今月は不安定出力以外の風力の課題を述べ、それに対する対策および風力熱蓄積発電のメリットを述べる。さらに発電機の超電導化効果についても述べる。



図1 現在の再エネの多くが直面する重要な課題

2. 不安定性以外の風力発電の課題

風力発電は現状で最も安い再エネとして期待されている。そのため欧州を始め相当な設備が建設され運用されている。そしてその不安定性以外の課題も顕在化してきている。その課題は立場によって異なり、主な物として以下の物が挙げられる。

超電導 Web21

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

- 地域住民から見て
 - a)振動・騒音、フリッカー（影の明滅）
 - b)パードストライク
 - c)景観（主観による）

- 事業者から見て
 - d)稼働率向上
 - e)長寿命化
 - f)発電量あたり設備コスト削減（建設・輸送込み）
 - g)系統までの接続
 - h)落雷対策（日本で突出した課題）

これらの多くは風車の低速回転化とタワー頂部の発電機軽量化という実は背反する対策によって軽減が可能である。これを以下に説明する。

3. 風車の低速回転化による効果

3.1 地域住民から見て

これは、a)～c)の、主に風車設置地域周辺への効果が高い。回転数を遅くすることで周辺への騒音は削減できる事が報告されている²⁾。立木などは騒音と認識される音を発生しない。ゆっくりと影が変化してもさほど気にならない。また鳥類もゆっくりとした回転で有れば衝突する事もない。ただ鳥類の人為的死亡数のほとんどは建物やその窓に起因しており、風車による死亡事例はわずかである³⁾。問題はその事故が衆人環視の元で発生してしまう点であろう。景観および近傍での羽通過に感じる恐怖感も、回転速度が遅くなれば軽減される物と思われる。古典的な映画にチキチキバンバンというミュージカルがある。これに出てくる風車などはゆっくり回転しているためか、生活に違和感なく溶け込んでいる様子で有った。景観問題は主観が大きいものの、こういう所にも解決のヒントが有るかもしれない。



図2 映画チキチキバンバンで撮影に使われたロンドン近郊の Turville 村にある風車

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

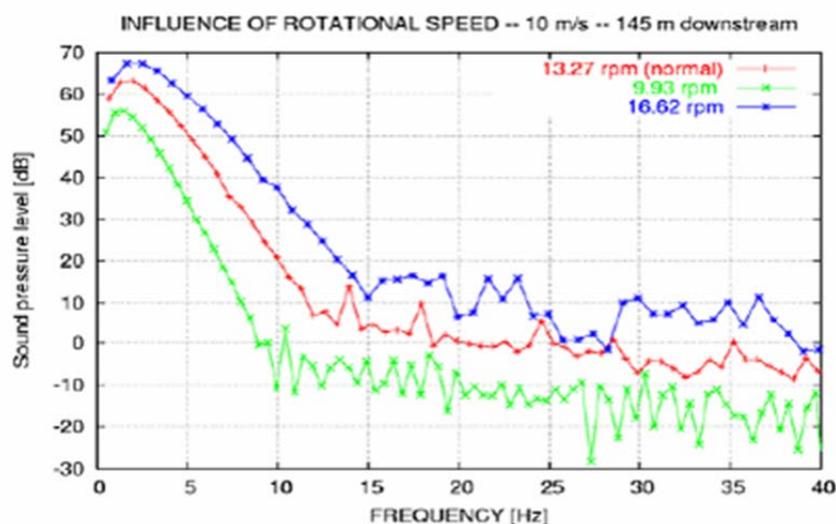


図3 風車回転速度による騒音変化程度²⁾

3.2 事業者から見て

この場合は d) e) の稼働率向上・長寿命化に効果があるが、後述の様に f) にはあまり好ましくない影響がある。風車の羽は 1 回転する度にタワー全面の影響による乱流によって疲労を受け、その積算が寿命に影響する。また回転系は一般に総回転数によって寿命が決まる。そのため概ね回転数が少ないほど寿命は長くなる。15 rpm の回転数で 20 年間、稼働率 30 % で運用すると 5 千万回の応力を受けることになる。この回転数が半分になれば単純には羽寿命や回転系の寿命は倍になる。現実にはもっと複雑であるが影響は大きいと言えよう。

g) の系統への接続は、その送電線を風力最大容量で建設するのに対して実際には風力の稼働率に倣って低い稼働率になってしまうのが課題で有る。風力熱蓄積発電では電力に返還後の稼働率は蓄熱の効果により高くすることが出来るのでこの部分の課題も緩和される。e) の課題については日本の、特に日本海側に顕著な問題である。

4. 低速回転化に伴う課題

4.1 低速回転化した際に必要な変更項目

以上のように低速回転化は様々なメリットをもたらすが、同時に色々な課題も出てくる。発電出力(パワー、W)は

$$\text{出力(W)} = 2\pi \times \text{風車回転数} \times \text{増速比} \times \text{発電機トルク} \quad \dots (1)$$

で表される。そのため風車回転数を半分にすると増速比を大きくするか、発電機トルクを大きくするしかない。すると、それぞれ次の問題点が生じる。

4.2 増速比増加の問題点

現状で最も風車の稼働率に影響を与えるのは増速ギアである。風車にも色々な種類があるが、一部の風車ではゆっくりとした回転数を 100 倍程度増速し、高速回転する小型の発電機を駆動している。ギアは定常的な回転なら比較的壊れにくい、風力の場合は回転数やトルクにムラがある。す

超電導 Web21

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

ると、微妙なしなりにより本来は点接触しているギアの歯同士がずれて微少な焼き付きを起こしてしまう。これを繰り返すことでやがては故障をしてしまう。

このギアはかなりの重量物で、一端故障すると大型クレーンでの全体交換しかない。そのためギアの故障率そのものは低くても稼働率低下には非常に大きな影響がある。図4に故障による停止時間の統計データを示すが、ギアの故障が安定稼働に与える影響が大きいことがわかる。この統計は少し古く現在は風車が大型化し、ギアも大型化している。そのため作業に必要なクレーンも特殊な大型機に限られてくるため、事態は深刻化している。例えば洋上風力でギアに故障が発生した場合、修理作業は海が穏やかな季節しかできずクレーン船の数も限られているため非常に長期に渡って停止することがある。

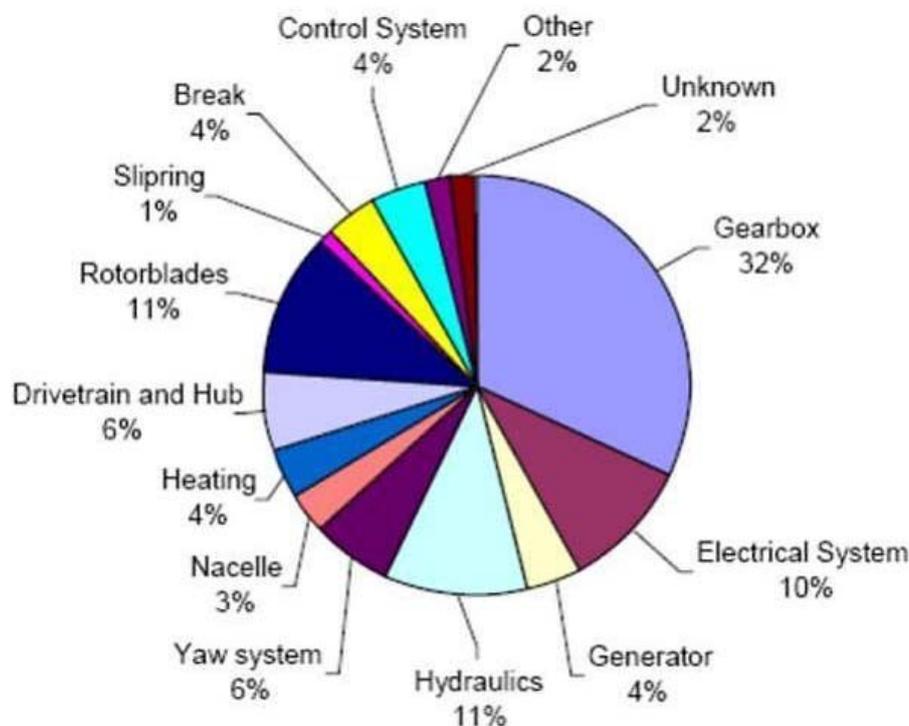


図4 風車停止時間に対する各種要因の割合⁴⁾

この問題を解決するために MW 以上の大型機ではダイレクトドライブ発電機を採用する例が増えている。しかし(1)式からもわかるように、増速比を1にして出力を維持しようとする発電機トルクを大きくするしかない。この発電機トルクは発電機の体格に依存するため発電機は大きく重たくなり 5 MW で数百トンもの重さになるものもある⁵⁾。これを運搬し、高く持ち上げ据え付けるのは発電機そのもののコストもかかる上に相当な運送・建設コストが追加される事になる。例えば風力発電の建設では輸送・建設費が全コストの 30% を超える場合もあり、その中のかなりの部分が重量物の運搬やクレーンなどに依存する。なお風車タワーの構造については、風に対抗するための要因が大きくタワー上部のナセル重量が変わってもほとんど必要強度は変わらない。

以上を考慮すると、低速回転化はメリットがあるものの、設備費の高騰を招き初期投資が増えるため、両者を勘案して適切な設計にする必要がある。その他、風のエネルギーを効率良く回転力に変換する空力を考慮すると、現状の三枚翼を多翼化する必要があり、翼のコストアップに繋がる可能性がある。一方遠心力も小さくなるため羽を分割構造とすることや、観覧車構造を採用することも考えられる。この場合は陸上輸送の課題が解消するので陸上での限界とされている 2 MW 機以上の大型機でも無理なく建設できる。

超電導 Web21

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

5. 小型・軽量を実現できる発熱機

超電導 Web21 の 1 月号 (連載-その 1) で述べたように、発熱機は同容量の発電機と比べてはるかに軽量化が見込める。簡単な発熱機の構造としては誘導モータの流用がある。誘導モータに直流を印加することで風車回転時には誘導モータの始動状態となる。このため同じ体格でも数倍のトルクを発生することが可能である。すると、(1) 式からわかるように設備費や建設費の高騰無しに風車の回転数を数分の 1 とする事が可能となる。

6. 発熱機の超電導化

この発熱機を超電導化すると、主に 3 つのメリットがある。

1) さらなる軽量化・低速回転化

超電導は、常電導と比べて遙かに大きな磁場を小電力で発生させられる。発熱機は渦電流の原理で発熱させるため、その発熱量は磁場の二乗、回転数 (極数) の $3/2$ 乗に比例する。例えば仮に磁場を 10 倍にすれば、同じ発熱量を得るための回転数は 100 の $2/3$ 乗倍、すなわち $1/20$ の回転数で良いことになる。すると低公害化および設備費の低減に寄与する。この程度の強磁場は超電導を採用すれば楽に実現できる。

2) 高効率化

風力熱蓄積発電では熱から電力に変換するプロセスが有り、蒸気タービン等を使用する。この蒸気タービン等は作動温度が高ければ高いほど効率が良くタービン耐熱温度の高温化開発が競われている。昨今では 700°C にも迫る勢いである。これにより蒸気タービン効率は 45 % にも達し、以前の『蒸気タービンは効率が悪い』という常識はかなり改善されつつある。よって発熱機からは出来るだけ高い温度の熱媒体を出力する事が望ましい。しかし一方、温度を高くすると磁性体は磁性を失うため常電導界磁では磁場が消失し、渦電流発熱をしなくなるという問題がある。

超電導は、非磁性の大空間に強磁場を小電力で発生させることも得意である。この様な使い方をしている例としてシリコン単結晶引き上げ炉の対流抑制用超電導マグネットがある⁶⁾。実は昨今のデジタル製品の低コスト化には超電導が裏方として活躍している。また Web21 の 1 月号で紹介したように超電導炉にも使用されている⁷⁾。



図 5 非磁性体でも渦電流加熱を容易にした超電導炉。金属を赤熱させることも可能。

超電導 Web21

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

3) 銅資源枯渇対策

発電機は構造材は別としておおよそ半分の重量を銅にするため、相当な重量の銅を使う事になる。そして 2020 年に 1000 GW 近い全世界の風力発電導入目標と現状の銅生産量とを比べると、風力発電機に数%以上の銅が消費されることになり、銅資源の高騰を招く。そのため超電導採用は重要である。

なお冒頭でも述べたが昨年度 11 月のトピックスで紹介した風力熱蓄積発電のコスト計算は、他方式との比較や過去の技術などと併せて 9 月号にて紹介する。

参考文献：

- (1) 横山明彦、“電力系統から見た大容量風力発電”，pp.299-302, 電学誌 129 巻 5 号,2009
- (2) H.A.Madsen “Low frequency noise from MW wind turbines – mechanisms of generation and its modeling”Riso-R-1637(EN)
- (3) http://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr191/Asilomar/pdfs/1029-1042.pdf
- (4) Johan Ribrant and Lina Margareta Bertling, “Survey of Failures in Wind Power Systems With Focus on Swedish Wind Power Plants During 1997-2005” IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 22, No.1, march 2007
- (5) 木村守、“大容量風力発電用発電機の特性比較”，pp.288-290, 電学誌 129 巻 5 号,2009
- (6) http://www.istec.or.jp/web21/past-j/06_03_all.pdf pp.1
- (7) http://www.istec.or.jp/web21/pdf/13_01/all.pdf pp.22-26

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

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

読者の広場

Q&A

Q: 「絶対温度 153 ケルビンの高温超電導 - このような新規物質を探索するときにはどんな苦勞がありますか？」

A: 独立行政法人産業技術総合研究所の竹下さんたちが、水銀系銅酸化物高温超電導体のひとつ Hg-1223 ($\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$) に 15 万気圧の超高圧をかけ、世界最高の絶対温度 153 K (零下 120°C) で電気抵抗ゼロを観測したことを受けてのご質問だと思います。1993 年、常圧 134 K で超電導を示す Hg-1223 が発見されました。ただちに高圧実験が行われ、約 30 万気圧で転移温度が 165 K まで上昇することが報告されました。これが、人類が到達した最高の超電導転移温度とされています。しかし実験データをみると、165 K で僅かに電気抵抗が減少しはじめるだけで、超電導のホールマーク (保証書) であるゼロ抵抗は示していません。今回、竹下さんたちは、高圧合成によって極めて良質の Hg-1223 試料を準備し、さらに高圧力をかけたまま電気抵抗率を測定することで、153 K という高い温度でゼロ抵抗を観測した訳です¹⁾。超電導転移温度の本当の世界記録が樹立されたと言えます。

さて、超電導 Web21 今月号の別ページ「新超電導物質の探索の進展」に物質開発の学術的な苦勞をいくらか記しました。ここでは、もう少し現場に近い苦勞を紹介します。(1) 高温超電導体 LSCO の単結晶を大量に作っていたが、ある時からパタリと合成できなくなった。一週間散々調べたところ、新たに購入した La_2O_3 の試薬瓶の中身が Y_2O_3 であることが判明。その業者は出入り禁止に。(2) 今や p 波三重項超電導として押しも押されぬ Sr_2RuO_4 。毎日単結晶を作り続けたが、全く超電導を示さない。約 1 年後、アルミナ乳鉢で混ぜた試料には数百 ppm の Al 不純物が入り超電導を破壊していたことが判明。高価なメノウ乳鉢を購入。いや、この不純物効果こそ p 波三重項の証拠であることに気づくべきだった。(3) ホウ炭化物超電導体の激しい開発競争が繰り広げられていたとき、某先生が試薬メーカーに「東京中のホウ素をかき集めて持ってこい」と言ったとか言わなかったとか。(4) 室温で電気抵抗がゼロになったとき、先輩が「お湯をかけろ」と言った。電圧端子が外れただけだった。PPMS などという便利な装置が無かったころの話。(5) ある新物質の先陣争いでストレスがたまり、大酒をのんで深夜帰宅中、自転車ごと道路の側溝に転落。流血しながら家へたどり着く。自転車も飲酒運転禁止だった。(6) 45 K の超電導の論文が掲載決定となり、研究室でシャンパンを開ける。ようやく苦い酒よりも美酒が多くなってきた。虚実入り乱れた話ですが、本当に「科学とは人間ドラマだなー」と思います。興味を持った学生さん、ぜひ私の研究室に進学して新超電導物質を発見しませんか。

1) N. Takeshita *et al.* J. Phys. Soc. Jpn. 82, 023711 (2013).

回答者：岡山大学大学院自然科学研究科 教授 野原 実 様

[超電導 Web21 トップページ](#)