超電導 Web21

（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283
2013 年 6 月号
2013 年 6 月 3 日発行

掲載内容（サマリー）：

特集：イットリウム系超電導電力機器技術開発
○高温超電導電力貯蔵システム（SMES）の研究開発
○超電導電力ケーブルの研究開発
○超電導変圧器技術開発の成果
○超電導電力機器用線材の技術開発
○超電導電力機器の適用技術標準化

特集：冷凍・冷熱技術
○ここまで進んだブレイトン冷凍機
○高温超電導ケーブル実証プロジェクトの冷却システム運転状況
○イットリウム系酸化物超電導線材を利用した低熱侵入電流リードの開発
○超伝導ケーブル用の断熱 2 重管及び低温系について

特集：超電導　世界のプロジェクト
○中国における超電導電力応用の最近の進展
（原題 Recent Progress of Superconducting Technology for Power in China）

○超電導関連 2013 年 6 月-7 月の催し物案内
○新聞ヘッドライン（4/20-5/19）
○超電導速報－世界の動き（2013 年 4 月）
○「2013 年度春季低温工学・超電導学会」報告
○隔月連載記事－医療用加速器と超電導（その 3）
○読者の広場(Q&A)－「超電導はスマホに使えないのでしょうか？」

超電導 Web21 トップページ

超電導 Web21
〈発行者〉
公益財団法人　国際超電導産業技術研究センター　超電導 Web21 編集局
〒135-0062　東京都江東区東雲 1-10-13
Tel (03) 3536-7283　　Fax(03) 3536-5717
超電導 Web21 トップページ：http://www.istec.or.jp/web21/web21.html

この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。
http://ringring-keirin.jp

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2013 年 6 月 3 日発行

超電導 Web21

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

特集：イットリウム系超電導電力機器技術開発

「高温超電導電力貯蔵システム（SMES）の研究開発」

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

これまで種々の超電導機器の開発が進められてきたが、電力機器の中で現在唯一実用化、商品化されているのは SMES のみである。これは SMES の持つ機能・性能が、その実用化された用途に於いて、他の手法・手段に対して費用面でメリットがあった為であり、言い換えれば代替え機器・手段に対してコストメリットが無い場合、これは電力機器に限らず技術的には成立しても、実用化、商品化が行われることはない。

また、機能面で超電導特有の現象を利用し、機器として超電導らしさを持っても、その機能自体にニーズがなく、または他の手段、もしくはシステムで現状の対応や将来の課題解決の見通しが出来ている場合も同様である。

加えて、超電導機器では極低温冷却が必要であり、その極低温状態維持に必要なコストと、電力機器では状況によってはコストよりも重要となる信頼性の面も課題となる。特に、電力システムに直列に組み込まれる機器では、万が一の機能喪失の場合に備えて多重化されるため、現実的な導入メリットが低下し、更に常電導機器との多重化となれば一層低下する。

SMES は、電力貯蔵という機能から基本的には並列機器であり、SMES 自体の機能が停止・喪失した場合に、組み込まれた電力システムの機能喪失につながることはない。このため、導入によるメリット面での比較でよく、コストメリットがある場合、実適用が図られる。

今回のイットリウム系超電導電力機器技術開発は、これに先立って実施された超電導応用基盤技術研究開発でのイットリウム線材の 200 m または 500 m 級長尺製造技術開発を受けての機器開発プロジェクトであり、プロジェクト前半で機器製作に必要な線材を製造し、歩留まり等の向上を量産製造によって確立、プロジェクト終了時に線材の実用化・商品化を実現させるとともに、終了時にはプロジェクト後半で製作する機器を使っての実証試験を行い、実用化を図るという計画で進められたものである。

SMES においては、開発目標であったコイルシステムが、トロイドコイルシステムであったため、線材製造とコイル製作を並行して進めることが可能である一方、プロジェクト後半での機器製作は、フルトロイドコイルシステムにするには、プロジェクト期間内での製造可能線材量が足らず、複数個コイルの部分検証での計画であったこと、その時点ではイットリウム系コイルとしては最大サイズの φ60 cm 級の試験コイルにおいて、イットリウム系線材の構造に起因する剥離現象と考えられるコイル特性低下が確認されたため、プロジェクト後半の計画を変更し、SMES も含めすべてのコイル応用の信頼性に共通する剥離対応技術の開発を進めた。

今回の超電導電力機器技術開発における SMES 開発は、電力系統制御用大容量 SMES を想定した SMES 貯蔵部のコイル開発であり、コイルの大型化が必須となるが、大型コイルでは超電導線材の特性よりも通電に伴い発生するフープ応力がコイルの成立性を決定する。このため、引っ張り強度に優れたイットリウム系線材の特徴を最大限に発揮させるコイル化技術の開発とその限界性能の把握を行い、大容量 SMES 実現の技術的見通しをつけることを目指したものである。

© ISTEC 2013 All rights reserved.

当初の目標であったフープ応力 600 MPa 級の高強度高磁界コイルは、イットリウム系線材の機械強度の強さを活かすコイル化手法の開発で目標を達成したが、トロイドコイルシステムの部分検証用の φ60 cm 級コイルにおいて、冷却のヒートサイクルによって超電導特性の低下が発生し、また線材の製造プロセスの違いによってもその低下状況が異なることが確認された。

ここで、イットリウム系線材を通常のコイル化手法であるエポキシ等の樹脂で含浸・一体化した場合、コイル内部に発生する引っ張り応力は、線材内部の積層面を剥離させる方向に作用し、基板／中間層間や中間層／超電導層間、もしくは超電導層自体を破断させる。コイル化検討当初よりこの現象は想定されていたが、特に冷却に伴う熱応力は、コイルの内外径比に依存し、ターン数の多い大型コイルでは致命的な問題となる。

今回の SMES 開発における最大の成果は以下に示す新型コイル構造の開発にある。

コイル化での特性低下は、コイルを一体化させることで内部応力が発生し、この応力によって線材が剥離し、コイル通電特性が低下する。これを抑制するには、線材の耐剥離力を上げるか、もしくは内部応力を線材剥離力より下げれば良いわけであるが、剥離の起点が線材内部の欠陥によることと測定面積に応じて耐剥離力が低下することを確認した。

また、コイルに発生する内部応力は、コイルの内外径比によって決まり、コイル分割の手法でもコントロール可能であるが、ミクロンサイズの欠陥の存在を実際に使用する数百m長さの線材長さの中で考えれば、無限長下での存在確率であり、剥離力がゼロとなる部位の存在を工業的には排除できない。

このことから信頼性のあるコイルを作製するには、線材特性に依存しないコイル化技術の確立が必要となる。

今回開発したコイル構造は、

- 含浸構造をとらず非含浸のコイル構造を持ち
- 新開発の低温硬化型変性ポリアミド樹脂により線材をコーティング被覆
- コイル外殻を側壁と側板で構成
- コイル内部をパラフィンで充填

この4つの特徴を有し、以下YOROIコイル（Y-based Oxide superconductor and Reinforcing Outer Integrated coil）と呼ぶ。

線材の剥離現象には、非含浸構造をとることで発生を抑制し、樹脂モールドが受け持つ電気絶縁に対して、イットリウム系超電導体の特性低下を起こさない低温で硬化が可能なポリアミド樹脂で線材自体を絶縁被覆し、そして最大の特徴は、コイルに発生するフープ応力をコイルの側板で支持させる。

この構成により、大型コイルの制約であったコイルフープ応力の制約が大幅に改善され、イットリウム系の線材強度を超えるような高強度コイルが実現した。

（詳細は、低温工学 Vol.48 No.5 (2013)「高強度パンケーキコイル（Yoroi-coil）の開発」参照）

超電導の最も優れた特徴は高磁界を発生させられることにあるが、これまで大型コイルでは超電導特性ではなく機械強度が制約となって、その特徴を十分に発揮させることが出来なかった。

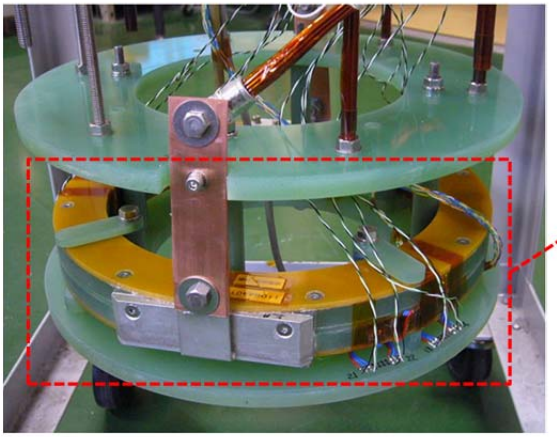
今回の YOROI コイルの開発は、SMES コイルのような円形コイル以外にも異形コイルにおいても適用可能であり、今後種々の応用にイットリウム系線材の適用可能性を拡げるものである。

SMES コイルシステムにおける YOROI コイル適用効果に関しては、次号 7 月号にて紹介する予定としている。

© ISTEC 2013 All rights reserved.

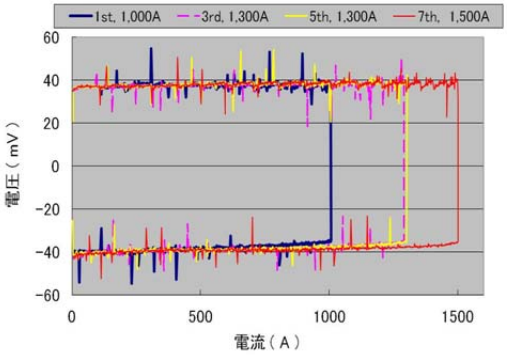
（公財）国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283

構造強化型コイル (Yoroi-coil)

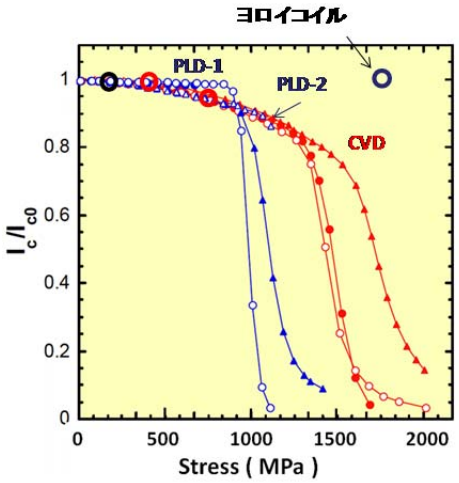


SMES要素技術検討(2011)
ダブルパンケーキ型
内径：219 mm
外径：240 mm
高さ：30 mm
最大電磁応力: 1.7 GPa

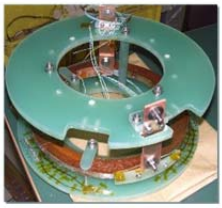
コイル通電 1,500A(電源の最大出力) @ 8 T,



Y系超電導コイル開発状況

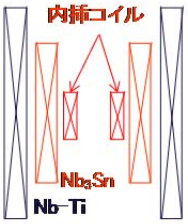


SMES要素技術検討(2010)
シングルパンケーキ型
内径：200 mm
外径：250 mm
高さ：12 mm
最大電磁応力: 740 MPa



Y系超電導モータ(ISTEC)
平傘型レーストラック型
短径：184 mm
長径：514 mm
高さ：86 mm
最大電磁応力: 150MPa

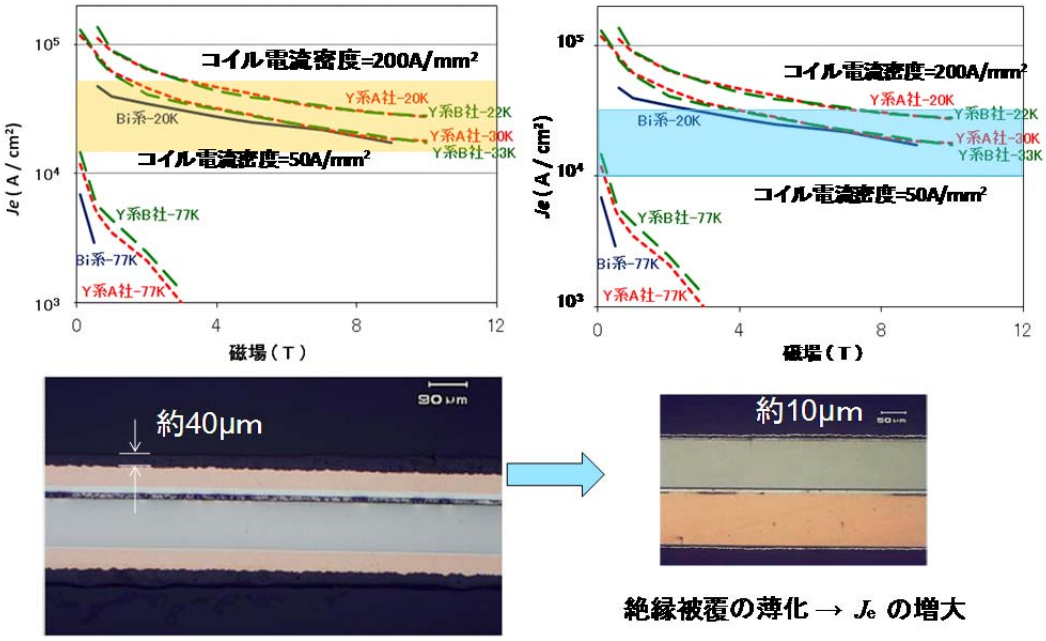
NMR開発用内挿コイル(理研)
レイヤー巻
内径：50 mm
外径：113 mm
高さ：88 mm
最大電磁応力: 408MPa



© ISTEC 2013 All rights reserved.

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

コイルの高電流密度化の検討



超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2013 年 6 月 3 日発行

超電導 Web21

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

特集：イットリウム系超電導電力機器技術開発
「超電導電力ケーブルの研究開発」

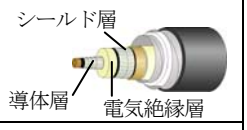
公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所 電力機器研究開発部
部長　大熊 武

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㈱、古河電気工業㈱、㈱フジクラ、昭和電線ケーブルシステム㈱、㈱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

© ISTEC 2013 All rights reserved.

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、さらに電力系統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

© ISTEC 2013 All rights reserved.

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、「イットリウム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 A/cm-w(@77 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。

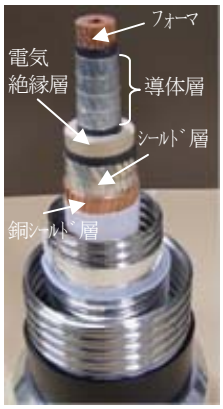


図 3　大電流ケーブル（一相分）

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。

© ISTEC 2013 All rights reserved.

図 5　高電圧ケーブル（単心）

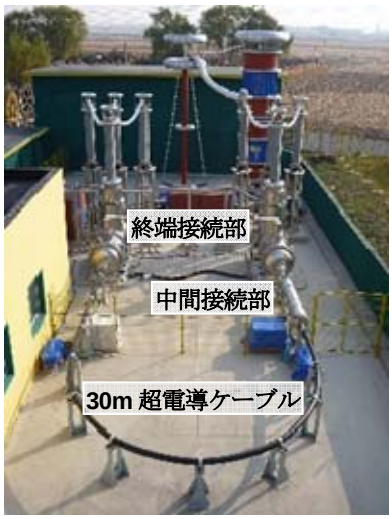


図 6　275kV／3kA 級高電圧ケーブルシステム
（古河電工　瀋陽古河電纜(中国)）

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. Y agi et.al., “Design and Long-term V erification Test of 27 5 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

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2013 年 6 月 3 日発行

超電導 Web21

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

特集：イットリウム系超電導電力機器技術開発
「超電導変圧器技術開発の成果」

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、2 MVA 級超電導変圧器モデルの検証にて、66/6 kV 20 MVA 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（100 m 長、5 mm 幅・3 分割）、②巻線技術開発（低損失化≦無加工線材の 1/3、2 kA 級大電流化）、③冷却システム技術開発（2kW@65K、COP 0.06@80 K）、④限流機能付加技術開発（過大電流を定格の 3 倍以下）、⑤2 MVA 級超電導変圧器モデル検証（2 MVA 級の試作・評価、 実用 20 MVA 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。

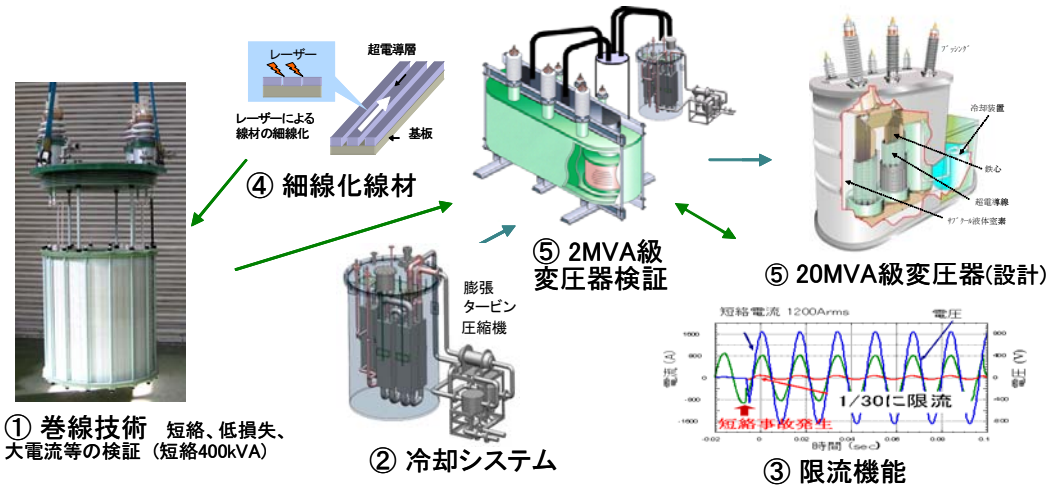


図 1　超電導変圧器技術開発の概要

1.　2 kA級大電流巻線技術の検証

20 MVA 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 1673 A 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

© ISTEC 2013 All rights reserved.

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 2 kA 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 2057 A 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

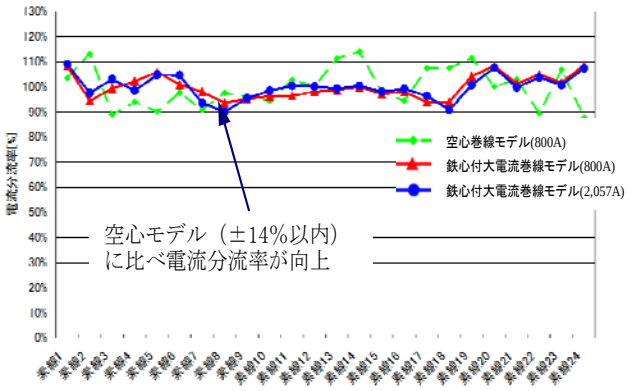


図 3　大電流巻線モデルの素線間電流分流測定結果（空心、鉄心付）

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	ｻﾌﾞｸｰﾙ液体窒素冷却
冷却能力	2kW@80K

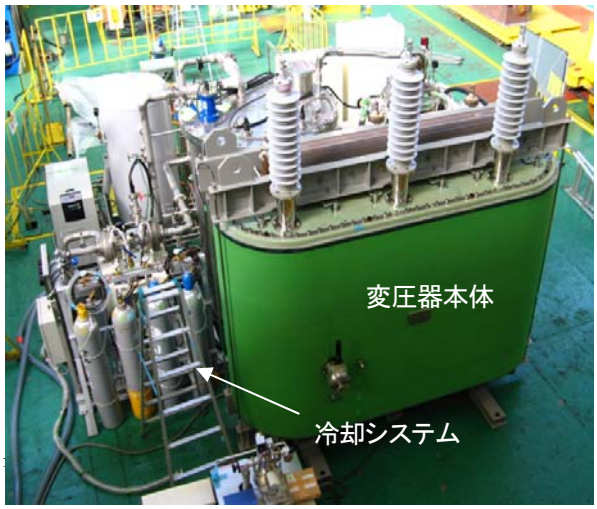


図4　2 MVA変圧器モデルの外観

© ISTEC 2013 All rights reserved.

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

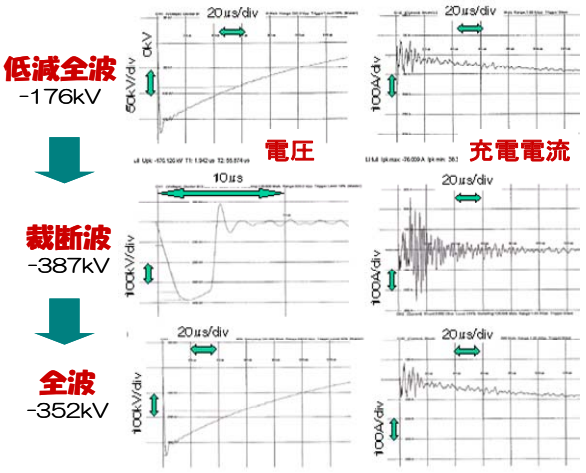


図 5　雷インパルス耐電圧の試験結果

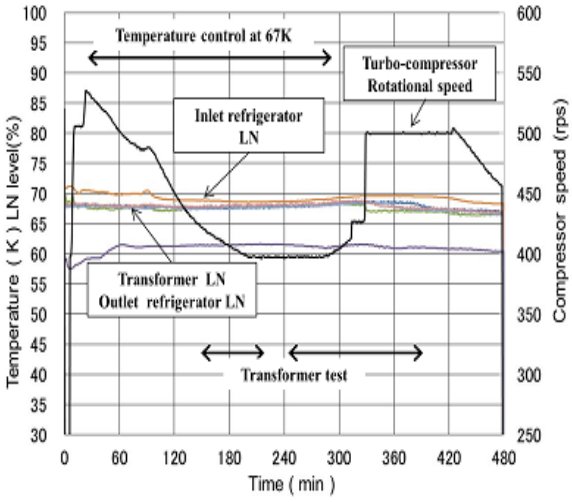


図 6　冷却システムの試験結果

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。

© ISTEC 2013 All rights reserved.

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 交流損失/銅損 鉄損 熱侵入	46 % 31% (交流損失) 7 % 8 %	100 % 91 % (銅損) 9 % -
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 %

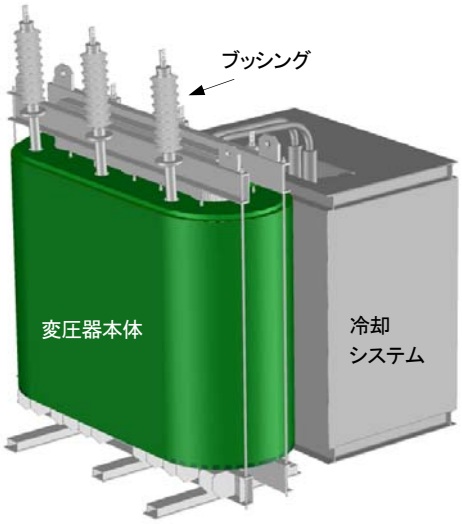


図 7　20 MVA 超電導変圧器の概念図

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

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2013 年 6 月 3 日発行

超電導 Web21

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

特集：イットリウム系超電導電力機器技術開発
「超電導電力機器用線材の技術開発」

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 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となる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となる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Ic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Je線材製作技術	・300A/cm-w-1GPa-50m ・Je=30kA/cm^2-50m	■500A/cm-w-1GPa-200m ■Je=50kA/cm^2-200m
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

© ISTEC 2013 All rights reserved.

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≧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-w10 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_e ）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_e 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_e 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パワーのさらなる向上と

© ISTEC 2013 All rights reserved.

ともに酸素分圧制御によるプ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_e 値として 52 kA/cm^2 以上を実現し、J_e 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 化とともにレーザパワーのさらなる向上とともに酸素分圧制御によるプ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 A/cm-w(@77 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 A/cm-w(@77 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となる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	■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 Ic 線材 作製技術開発	<PLD>■54 A/cm-w@77 K,3 T- 200 m ■770 A/cm-w@77 K,0.1 T- 158 m <MOD>■50A/cm-w@77 K,3 T-124m ■524 A/cm-w@65 K,0.1 T- 100 m	最終 目標達成
(3)低損失線材 作製技術開発	<PLD> ■2 mm-w -I_c≧540 A/cm-w -200 m ■5 mm-w・10 分割 損失 1/10 - 100m <MOD> ■4 mm-w-I_c≧590 A/cm-w -80 m ■5 mm-w・10 分割　損失 1/10 - 100m <RABiTS-PLD>　■2 mm-w-I_c≧400 A/cm-w -78 m	最終 目標達成
(4)高強度高 J_e 線材 作製技術開発	<PLD> ■$I_{c,min}$ > 500 A/cm-w – 1GPa - 200 m ■J_e>52 kA/cm^2 - 200 m <RABiTS-PLD>■J_e>52A/cm^2 – 短尺	最終 目標達成

© ISTEC 2013 All rights reserved.

超電導 Web21

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

(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＞ｹｰﾌﾞﾙ線材⇒(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) Je 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=1353A/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=141A/cm-w@77 K,3 T(PLD) →I_c=1400A/cm-w@50 K,3 T 相当 200 m I_c=54A/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 μm 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 μm ハステロイ ™ 基板線材 $I_{c,min}$=539A/cm-w-J_e>52 kA/cm^2 -200 m 100 μm ハステロイ ™ 基板線材 $I_{c,min}$>500A/cm-w-1GPa-200 m （Ag30μm 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_cxL＝422 kAm） SuperPower(米国)：IBAD-MOCVD 1065 m 長-I_c=282 A/cm-w@77 K,s.f. (I_cxL＝300 kAm)	フジクラ：IBAD-PLD 816 m—I_c=572 A/cm-w@77 K,s.f. （I_cxL＝467 kAm） ↓ 長尺特性でリード 長さは米韓が先行

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2013 年 6 月 3 日発行

超電導 Web21

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

特集：イットリウム系超電導電力機器技術開発
「超電導電力機器の適用技術標準化」

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
標準部
部長　角田好喜

1. はじめに

我が国は、超電導技術の国際標準化を積極的に推進してきており、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の事業と並行して超電導電力機器の国際標準化をめざすことは産業競争力強化の観点からも重要である。

そこで、「超電導電力機器の適用技術標準化」の事業では、超電導線材やこれを適用した超電導電力ケーブル等超電導電力機器に関する標準化に必要な技術動向や標準化ニーズ動向の調査を実施し、国際標準化合意の醸成を図りつつ、国際的な規範文書原案につながる規格素案の作成を行った。これによって、超電導電力機器の早期実用化、市場導入の円滑化、グローバル市場の拡大が促進されるものと期待される。

国際標準を作成する場合、国内外技術集約から国際規格発行さらに普及という段階を経るが、その流れを図 1 に示す。本事業では、平成 20 年度～24 年度の 5 年間、調査・国内外技術集約、規格素案作成、国際合意醸成までを行った。国際標準化戦略、規格原案作成については、平成 22 年度～24 年度の 3 年間にわたり超電導規格開発委員会活動を通じて進めた。さらに、IEC（国際電気標準会議）規格発行のために規格の審議を行うが、この活動は IEC/TC90（超電導）で並行して行うこととした。なお、我が国は、IEC/TC90 の幹事国を務めている。

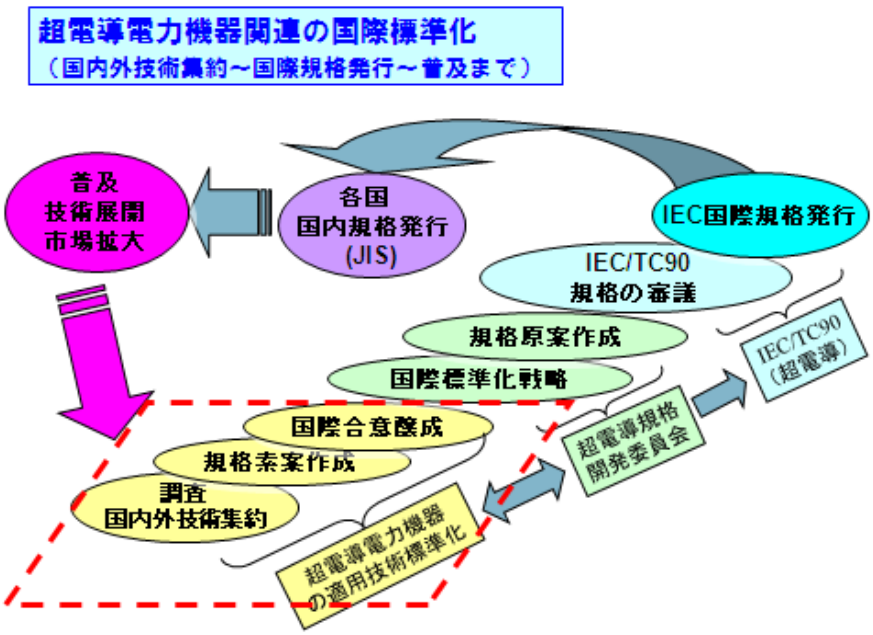


図 1　超電導電力機器関連国際標準化（国内外技術集約～国際規格発行～普及）

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2. 開発目標及び達成状況

「超電導電力機器の適用技術標準化」においては、5 ヶ年のプロジェクト終了までに、「超電導線材並びにその試験方法の IEC 国際規格提案に資すること」、「超電導電力ケーブル並びにその試験方法の IEC 国際規格提案に資すること」、及び「超電導変圧器、SMES 等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案の作成等」を開発目標とした。このため、超電導線材と超電導電力ケーブルについては、IEC 国際規格の提案に必要な規格素案の作成と国際標準化合意の醸成を行った。また、変圧器や SMES 等の超電導電力機器については、標準化の基礎となるデータ等の体系化のために調査を行ない、標準化素案を作成した。さらに、冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向けた提案資料の作成、国際標準化合意の醸成を行った。本事業の活動の結果、すべての最終目標を達成した。以下、個別の取組み内容を紹介する。

3. 超電導線材技術標準化

超電導線材技術標準化については、超電導線材の試験方法を調査するとともに、イットリウム（Y）系超電導線材並びに実用超電導線材の特徴を整理した。また、米国、欧州、アジア等の現地調査や国際専門家討論会を通じて情報集約並びに国際合意状況の把握を行った。これらを基に超電導線材の通則の素案を作成し、IEC/TC90 での審議を経て NP（新業務項目提案）として採択され WG（ワーキンググループ）13 が設置された。超電導線材の通則は、一般的な分類と特性試験法の二本立てとして検討され、それをもとに最初の CD（委員会原案）が作成され審議が行なわれている。また、Y 系超電導線材の臨界電流測定に関する規格素案を作成した。さらに、Y 系超電導線材の短尺臨界電流測定方法に関して、本格的な国際試験所間比較のプレ評価として国内 RRT（ラウンドロビンテスト）を行い、IEC/TC90 に技術情報を提供した。この結果は 2012 年 8 月の IEC/TC90 の西安会議で WG3 から報告され、今後市販の線材を使って国際的な RRT を行うことが確認された。国内 RRT の結果の一例を図 2 に示す。

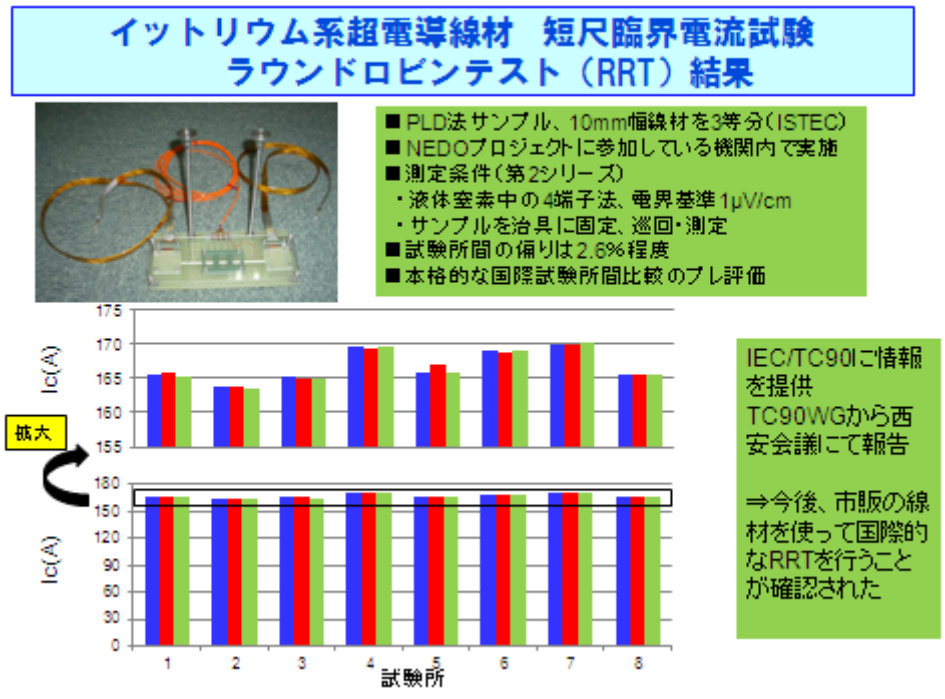


図 2　Y 系超電導線材　短尺臨界電流試験　国内ラウンドロビンテスト結果

© ISTEC 2013 All rights reserved.

4. 超電導電力ケーブル技術標準化

超電導電力ケーブル技術標準化については、既存規格及び超電導電力ケーブル関連技術動向を調査し、CIGRE（国際大電力システム会議）及び IEC/TC20（従来の電力ケーブル）等との連携により国際専門家討論会を通じて情報集約並びに国際標準化合意の醸成を行った。これらを基に Y 系を含む高温超電導線材等を適用した超電導電力ケーブルシステムの一般要求事項並びにその試験方法の規格素案を作成した。作成した規格素案の概要を表 1 に示す。また、CIGRE で作成を進めていた超電導電力ケーブル試験方法のガイドラインに関する検討を行い、CIGRE に情報提供した。これらの結果、CIGRE からはガイドラインが発行されることになり、IEC では、TC20、TC90 及び数人のボランティアからなる JahTF（ジョイントアドホックタスクフォース）が設置されることになった。今後、国際合意を背景に超電導電力ケーブルの IEC 国際規格提案を目指した活動が行なわれることになる。

表 1　超電導電力ケーブル並びにその試験方法の規格素案の概要

超電導電力ケーブルシステムの一般要求事項　規格素案	超電導電力ケーブルの試験方法規格素案
1. 適用範囲	1. 適用範囲
2. 引用規格	2. 引用規格
3. 用語及び定義	3. 用語及び定義
4. 使用条件	4. 一般要求事項 4.1　一般試験条件 4.2　超電導固有試験条件
5. システム構成	5. 試験 5.1　試験の種類 5.2　試験対象 5.3　試験項目 5.4　超電導固有試験方法
6. 性能	6. 性能 6.1　基本諸元明示事項 6.2　固有性能明示事項 6.3　交流超電導電力ケーブル性能事例
7. 試験	
8. 表示	
9. 付帯事項	
附属書A（参考）交流超電導電力ケーブルの基本構成概念	附属書A（規定）交流超電導電力ケーブルの固有試験方法 附属書B（参考）CIGREで検討した形式試験の内容 附属書C（参考）交流超電導電力ケーブルの試験事例
附属書B（参考）超電導電力ケーブルの構成概念	
附属書C（参考）交流超電導電力ケーブルシステムの試験項目	

5. 超電導電力機器関連技術標準化

超電導電力機器関連技術標準化については、Y 系を含む超電導線材等を適用した SMES、超電導変圧器等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等を調査するとともに、技術動向並びに標準化ニーズ調査も実施した。これらの結果を基に SMES、超電導変圧器の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化素案を作成した。作成した標準化素案の概要を表 2 に示す。また、超電導限流器等超電導電力機器の標準化を進めていく上で他機関との連携が必要との議論がなされた。そうした中で IEC/TC90 と CIGRE D1（材料と新技術に関する研究委員会）との間でリエゾン（連携）関係を結ぶことになり、国際合意醸成活動を行った。さらに、冷却システムの安全性、運用性を考慮した規制緩和に向け、過去の超電導電力ケーブルに関する提案資料の調査を行い、また、関係機関へのヒアリング等により最新の動向調査を行い、規制緩和に向けた提案資料を作成した。

© ISTEC 2013 All rights reserved.

表 2　SMES、超電導変圧器の標準化素案の概要

SMESの標準化素案
1. 適用範囲
2. 引用規格
3. 用語及び定義
4. 原理
5. 特性試験項目
6. 特性試験方法
7. 報告
8. 付帯事項
附属書A（参考）代表的SMESシステムの入出力と貯蔵容量 附属書B（参考）超電導磁気エネルギー貯蔵装置の基本的要素の概念構成 附属書C（参考）SMESシステムの推奨試験方法 附属書D（規定）SMESデバイスの試験方法 附属書E（参考）超電導磁気エネルギー貯蔵装置の概念図および仕様例

超電導変圧器の標準化素案
1. 適用範囲
2. 引用規格
3. 用語及び定義
4. 構成
5. 使用条件
6. 定格及び一般要求事項
7. タップ
8. 接続
9. 温度上昇
10. 絶縁
11. 短絡強度
12. 表示
13. 安全、環境及びその他の要求事項
14. 裕度
15. 試験
16. 付帯事項
附属書A（参考）超電導変圧器概念図 附属書B（参考）超電導変圧器の照合並びに注文の際の指定事項 附属書C（規定）超電導変圧器の超電導固有の試験方法

6. 今後の進め方

超電導線材技術標準化については、超電導線材の通則について、平成 25 年度に CD2（委員会原案第 2 版）が発行され、平成 26 年度に CDV(投票用委員会原案)提案が行われ、それらを通して IEC 国際規格化をめざした活動が行われる。また、Y 系線材の臨界電流測定に関する国際 RRT が行われ、IEC 国際規格化が進められる。超電導電力ケーブル技術標準化については、J ahTF が設置され、国際規格提案をめざした活動が行われる。超電導電力機器関連技術標準化については、IEC/TC90 と CIGRE D1 のリエゾンにより超電導電力機器の共通事項について連携した活動が行われる。規制緩和に向けては、他機関と連携した活動を行うことが重要である。本事業で得られた成果をもとに超電導電力機器の国際標準化をめざした活動を継続していきたい。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2013 年 6 月 3 日発行

超電導 Web21

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

特集：冷凍・冷熱技術

「ここまで進んだブレイトン冷凍機」

大陽日酸株式会社
超電導プロジェクト
奈良範久

省エネルギー電力技術の切り札として期待されている高温超電導電力機器が実用化研究の段階に入り、高温超電導電力機器の冷却に適した冷凍機のニーズが高まっている。高温超電導電力機器用の冷凍機では、①超電導維持に必要な冷却温度と冷却能力、②長期連続運転が可能な高い信頼性、③運転時の冷却効率（省ランニングコスト）、④コンパクト化（設置の省スペースの化）、⑤設備コストの低減などの項目が求められている。

現在、高温超電導電力機器を冷却する為に用いられる冷凍機の使用温度域は 40 K から 80 K で、冷凍能力は 65 K 運転で 2 kW から 10 kW くらいだと考えられている。現在市販されている小型冷凍機は冷却能力が 80 K 運転で 1 kW 程度であり、またその構造上摺動部を有しており、通常年 1 回程度のメンテナンスを必要としている。一方、深冷空気分離装置やヘリウム液化機等の極低温大型冷凍機では冷凍能力・耐久性に実績のある膨張タービン方式が採用されているが、冷凍能力の面であまりにも過大である。そこで高温超電導電力機器冷却に適した冷凍機を開発すべく、ネオンガスを作動ガスとしたターボブレイトンネオン冷凍機を 2011 年度に試作した。

試作した冷凍機は、主にターボ圧縮機、主熱交換器、膨張タービン、サブクール熱交換器、液体窒素循環ポンプにより構成されている。図 1 に冷凍機と超電導機器を組む合わせた冷却システムの簡単なフローを示す。サブクール熱交換器で約 66 K まで冷やされたサブクール液体窒素により超電導機器が冷却される。また、ターボ圧縮機、膨張タービンには摺動部を有さない磁気軸受を採用し、メンテナンスフリーを実現している。図 2 は、2 MVA 級超電導変圧器と冷却システムを組み合わせた高温超電導変圧器冷却試験の実施風景である。中央のコールドボックスの中に主熱交換器が内蔵されており、コールドボックスの上部に膨張タービンが設置されている。ネオンを圧縮するためのターボ圧縮機はコールドボックスの横に設置されている。超電導変圧器の熱負荷に対応したターボ圧縮機の回転数自動制御により、超電導変圧器内の液体窒素温度変動を±1 K に安定運転できることを確認した。また、負荷に対応した運転により減量時の効率が大きく改善した。

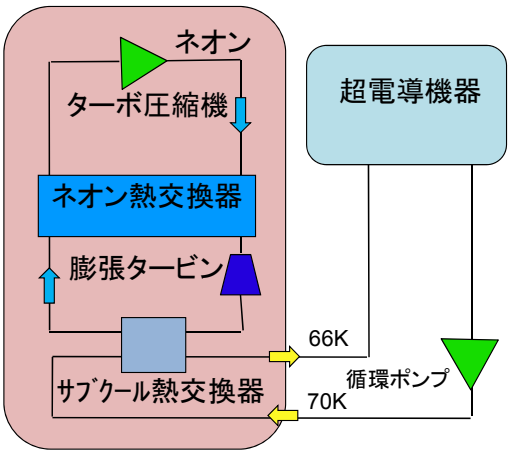


図 1　超電導機器冷却システムフロー

© ISTEC 2013 All rights reserved.

変圧器冷却試験では実験のための補機類が必要だったため図 2 に示すように大きな設置スペースが必要であった。商用機では必要のない補機類を外し、機器の配置を再検討して、図 3 に示すようにコンパクト化したパッケージ型ターボ冷凍機とした。パッケージ型ターボ冷凍機は超電導機器を 65 K まで冷却可能で、65 K での冷凍能力は 2 kW である。また、写真に示すようパッケージでの輸送設置が可能である。

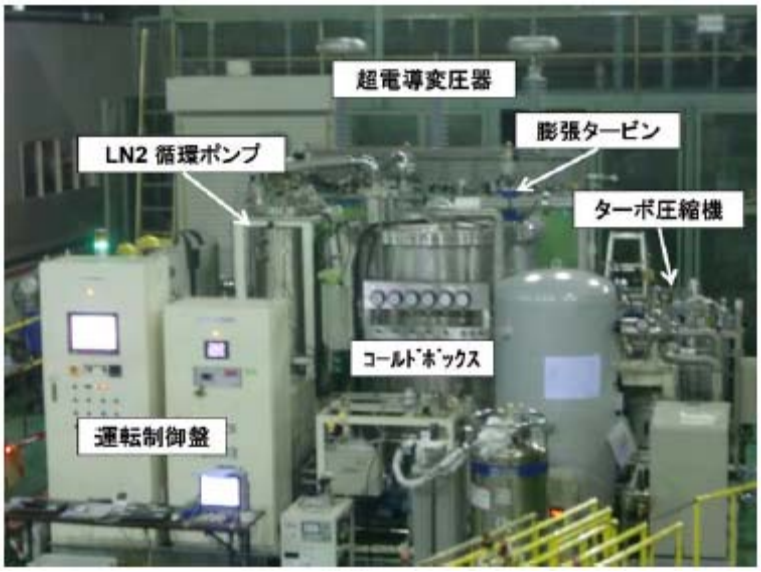


図 2 高温超電導変圧器冷却試験

図 3 パッケージ型 2 kW ターボ冷凍機

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2013 年 6 月 3 日発行

超電導 Web21

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

特集：冷凍・冷熱技術

「高温超電導ケーブル実証プロジェクトの冷却システム運転状況」

株式会社前川製作所
副主任研究員　仲村直子

高温超電導ケーブル実証プロジェクトでは、東京電力旭変電所に高温超電導ケーブルを導入し、電力系統内での高温超電導ケーブルや冷却システムの性能、運用性、信頼性、保守性等の検証を行っている。本プロジェクトは、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から委託を受け、東京電力、住友電気工業、前川製作所の 3 社で実施している。電力系統連系に先立ち、冷却システム単体試験、高温超電導ケーブル接続試験を行い、システムの健全性を確認した。2012 年 10 月 29 日に電力系統連系を行い、約 1 年間の連続運転に入った。電力系統連系以降、基本的には無人で自動運転されており、日間の負荷変動や冷却システムの運転状態を遠方監視し、ケーブル熱負荷や冷凍能力等の性能評価を実施している。2013 年 5 月末で約 210 日経つが、大きなトラブルもなく、液体窒素無補給にて安定した運転を継続している。

本冷却システムは冷凍能力 1 kW@77 K のスターリング冷凍機、循環ポンプ、リザーバタンクから構成し、冷媒にはサブクール液体窒素を用いた。スターリング冷凍機は熱交換器部での圧力損失と温度制御性を考慮して 3 並列×2 台に配置した。循環ポンプは遠心式 2 台を並列に配置した。なお、冷凍機の 3 列のうち 1 列および循環ポンプの 2 台のうち 1 台は予備機である。高温超電導ケーブルの実用化を考えると、現状のスターリング冷凍機では容量、効率、保守性共に十分でなく、大容量・高性能冷凍機の開発が必要であるため、本プロジェクトでは、2011 年 2 月より実証試験と並行して、冷凍能力 5 kW、COP0.1 を目標としたブレイトン冷凍機の開発を行っている。

スターリング冷凍機のメンテナンス間隔は 8000 時間であり、本実証試験中に順次メンテナンスを実施する必要がある。本冷却システムは、冷却運転を維持しながら冷凍機の取替えが出来るようにバイパスラインおよび開閉バルブを設けており、2013 年 4 月より 1 台ずつ冷凍機のメンテナンスを開始した。冷凍機取替え作業中および作業後の液体窒素の温度、圧力、流量に大きな変動がないことから、液体窒素系内に水分を混入させることなく冷凍機取替え作業を行うことができた。今後、順次冷凍機のメンテナンスを行いながら、超電導ケーブルシステムの季節間変動（電力負荷、熱負荷）を含めた長期運転データを取得し、性能、運用性、信頼性、保守性等の検証を行っていく。

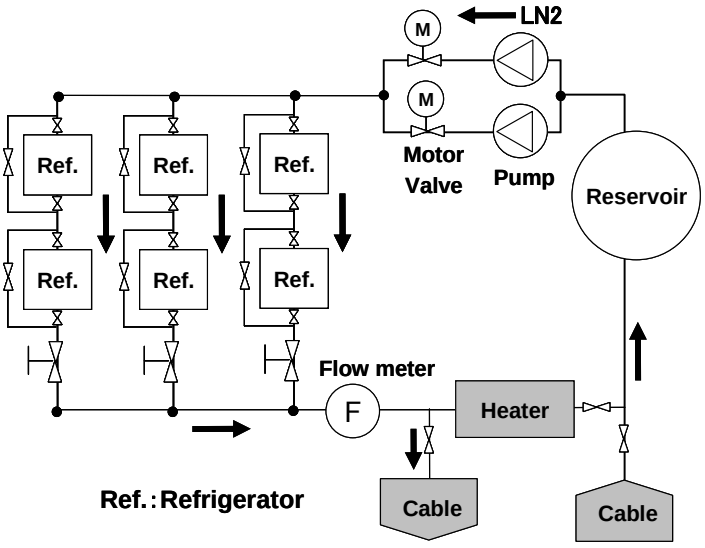


図 1　システムフロー

© ISTEC 2013 All rights reserved.

最後に、旭変電所の高温超電導ケーブルの日々の運転状況は下記のウェブサイトで確認することが出来るため、興味のある方にはぜひ閲覧して頂きたい。
http://www.sei.co.jp/super/cable/jissho.html

図２　冷却システム

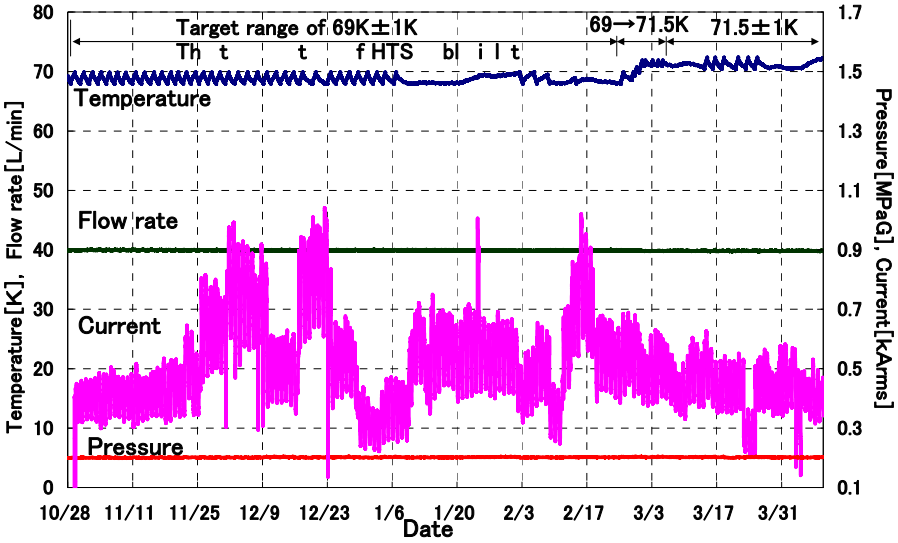


図３　系統連系後の実証試験の運転状況

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2013 年 6 月 3 日発行

超電導 Web21

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

特集：冷凍・冷熱技術

「イットリウム系酸化物超電導線材を利用した低熱侵入電流リードの開発」

昭和電線ケーブルシステム株式会社
技術開発センター 新エネルギー技術開発グループ
箕輪昌啓

マグネット、モーター、ケーブル、変圧器など超電導線材を利用した応用機器開発が近年活発に行われているが、超電導応用機器を経済的に稼働させるためには機器を低温に保持するためのコストを低く抑えることが必要である。この為により効率の良い冷凍機の開発や断熱性能に優れた低温容器の開発が進められている。また、通常室温に設置される電力の供給部と極低温下にある機器を電気的に接続する導体部分からの熱侵入低減は、通電容量が大きくなるほど重要な課題となる。超電導機器用の電流リードはこの電力供給部と超電導応用機器との間に設置され、電源（室温）から超電導機器（極低温）に電力を供給する機能と、室温から極低温への温度勾配により伝導する熱量をできるだけ低減する機能を担っている。

電流リードの導体として利用できる材料はその設置環境により異なるが、環境温度が液体窒素温度よりも低い場合はビスマス系などの酸化物超電導体を採用することが出来る。酸化物超電導体は銅よりも熱伝導率が非常に小さく伝熱による熱侵入を低減できる。また、稼働時にはジュール熱を発生させること無く大電流の通電が可能で、超電導機器用の電流リードとして理想的な性能を有している。一方、液体窒素を冷媒として利用する超電導ケーブルなどの端末においては、電流リードの設置環境はより高温となるため導体に超電導体を用いることは出来ない。この場合、ペルチェ素子を導体部に利用したペルチェ電流リードを用いることにより、ケーブル端末への熱侵入を低減する検討が行われている [1)]。

導体に超電導体を用いた電流リードとして、ビスマス系のバルク体を利用した超電導電流リードが知られている。このビスマス系電流リードはマグネットなどの超電導機器に利用されているが、過大な衝撃や応力によりバルク体が破損し易いという課題がある。また、大型の超電導機器や設置場所の磁場環境によっては複数のビスマス系電流リードを使用しなければならない。このような課題を解決することを目的にイットリウム系のテープ線材を利用した超電導電流リードが開発されてきている [2)]。イットリウム系のテープ線材では可撓性のある金属基板上に超電導体が薄く形成されることから、衝撃に強く、また、線材を曲げた状態でも使用することが可能である。さらに最近では大きな臨界電流値を有し、磁場による特性変化が小さな人工ピン入りのイットリウム系超電導線材が開発されてきている [3)]。これにより、衝撃に強く、かつ、通電容量と熱侵入量のバランスを従来品よりも改善した電流リードの設計が可能になると考えられる。

イットリウム系テープ線材は通常 5 mm から 10 mm 程度の幅で製造され、電流リードの設計時には複数本のテープ線材を束ねて電極に接続し、必要とされる通電容量を確保する必要がある。この時、線材と電極との接合部の電気抵抗値が線材間で異なると通電時に偏流が発生し、設計通りの通電容量が得られなくなる恐れがある。特に数 kA 以上の大きな通電容量が必要となる電流リードでは大きな課題となることから、ロゴスキーコイルを用いた定量的な偏流の評価が行われている [4)]。このような評価により偏流が電流リードの通電性能に与える影響を把握し、抵抗値のばらつきの小さな接合技術を検討することにより、大容量で高性能の電流リードが開発されてくるものと期待される。

最後に当社の開発例として、イットリウム系テープ線材を導体に使用した 1 kA 級電流リードの仕

© ISTEC 2013 All rights reserved.

様案を表 1 に示す。本仕様案に基づき試作した電流リードの外観を図 1 に示す。本試作品を用いて 3.3 kA（@77 K, s.f.）、30 分の連続通電を行った結果、抵抗値の増大やクエンチの発生は認められなかった [5]。今後は線材特性を生かした更にコンパクトな電流リードを設計・開発していく予定である。

表 1　1kA 級電流リードの仕様案 [5]

定格電流(A)	1000
大きさ(mm)	340×54×60
電極間距離(mm)	200
温度領域(K)	77-4.2
外部磁場(T)	0.5
熱侵入量(W)	≦0.3
構造	350A級×3本一体化

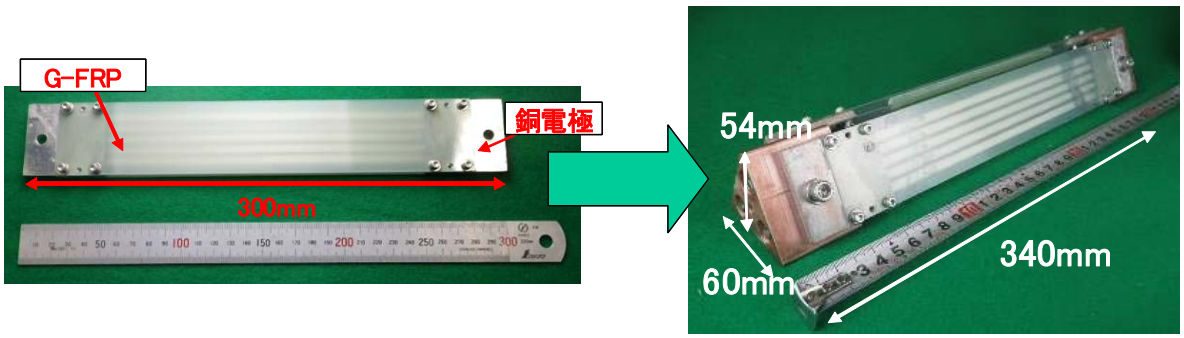


図 1　1 kA 級電流リード試作品 [5]

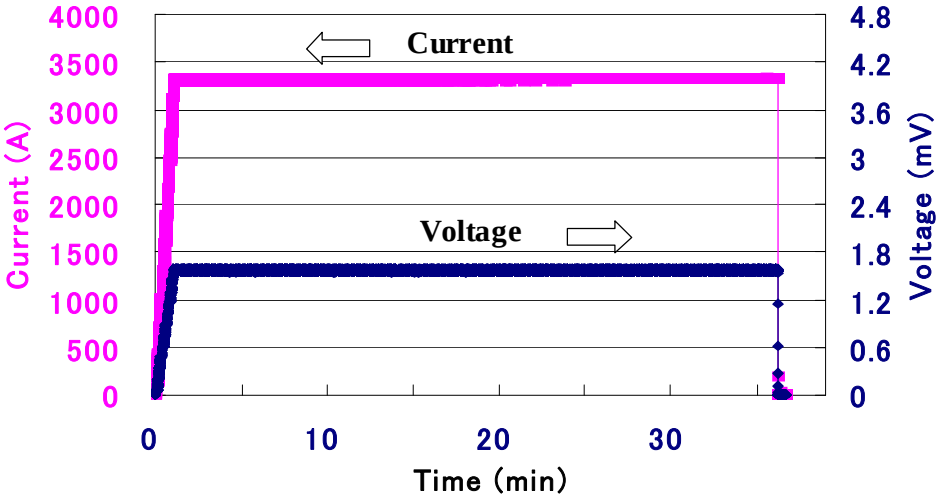


図 2　連続通電試験結果 [5]

© ISTEC 2013 All rights reserved.

参考文献：

1) 河原敏男，　他：2012 年秋季 第 73 回 応用物理学会，13p-PA3-6 (2012)
2) Y. Yamada *et al* : IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21 pp. 1054 – 1057 (2011)
3) 木村一成，　他：2012 年度秋季低温工学・超電導学会，1A-a07 (2012)
4) 本橋春樹，　他：2012 年度秋季低温工学・超電導学会梗概集，1B-a02 p. 19 (2012)
5) 髙橋亨，　他：2013 年度秋季低温工学・超電導学会，2P-p29 (2013)

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

特集：冷凍・冷熱技術

「超伝導ケーブル用の断熱 2 重管及び低温系について」

中部大学大学院工学研究科
超伝導・持続可能エネルギー研究センター
教授　山口作太郎
准教授　渡邊裕文

中部大学は 千代田化工建設、住友電工、さくらインターネットと協力して北海道石狩市で稼働中のデータセンター向けに直流給配電を行う超電導直流ケーブル設備を経済産業省予算で建設することになった。長さは 500 m と 2000 m であり、2 本のケーブル・システムを作り、石狩プロジェクトと呼んでいる。建設の基本的な考え方は、将来に向けてより長いケーブルを安価に作ることが目標であり、このために設計標準化や LNG 冷熱利用などの検討を行っている。以下では断熱 2 重管の基本構造と LNG 冷熱利用について考え方を簡単に紹介する。

リターン・パイプの組み込み

超伝導ケーブルは同軸構造を取るため、一本で往復導体がある。一方、今回の装置は実際に利用するため送電端と受電端が離れている。このため、リターン・パイプが必要になる。冷凍機への熱負荷はケーブルを収納している低温パイプとリターン・パイプの熱負荷の和となる。これをできるだけ低くすることが求められる。図 1 に断面構造例を 2 つ示した。一番外側のパイプは真空を保持するための常温パイプであり、内管には液体窒素冷媒が流れている。そして、一方の内管には HTS ケーブルが入っている。左図は 2 本の常温パイプにそれぞれ低温配管が 1 本ずつ入っている。右図は一つの常温配管に 2 本の低温配管が入っている。輻射熱の検討では、右図構造の熱侵入量が少ない。低温配管が互いに常温壁に対して影になるからである。また、この方が将来的には安価に製造できると考えている。一方、狭い配管内で現地溶接の必要性が出てくるので、溶接信頼性を高める工夫も必要と考え、現地で溶接ロボットを使うことを検討中である。

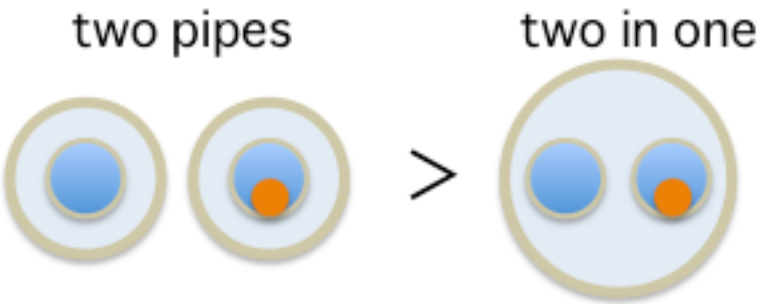


図 1　断熱 2 重管の基本構造：
2 本の低温配管を一本の真空配管に入れると熱侵入量が低い

© ISTEC 2013 All rights reserved.

尚、流量は 2 つの配管は同じであり、一方にはケーブルが入っているので、リターン・パイプ径は少し小さくすることになる。また、安価に作るために、外管は亜鉛メッキ鉄管を利用し、低温配管はステンレス管を使う予定である。長距離冷媒循環の圧力損を最小にするために、直管を配管に多用し、2000 m であっても流量～40 L/min, 圧力損～0.1 MPa 程度を想定している。このため、現状のポンプで循環が可能と考えている。

真空排気系にはケーブルの両端で真空ポンプを用いる予定である。排気速度は～500 L/s であり、ターボ分子ポンプの利用を想定している。但し、排気時間がコンダクタンスや多層膜断熱材（MLI）からの outgas 量によって大きく変わるので、ケーブル中間部にも真空ポンプを設置することを予定し、実質的な排気時間は長くても 1 週間程度になることを目標としている。

LNG 冷熱利用

LNG は主にメタンから成り、LNG 温度は 113 K 程度とされる。液体窒素温度より 40 K ほど高いだけなので、この冷熱を利用して超伝導ケーブルを低コストで低温保持する検討を行っている。簡単な検討では、冷凍機 COP は 300 K-77 K の熱サイクルで 0.2 – 0.3 程度まで上がるようである。現状のスターリング冷凍機が 0.067 程度なので、5 倍程度の改善となり、実現すると大きなシステム経済性の向上につながる。

現在、日本には 25 箇所の LNG 基地があり、世界最大の輸入国である。一方、LNG 冷熱は 90 % 以上が捨てられている。LNG の多くは発電所の燃料になっていることやその多くが東京湾や大阪、名古屋などの大電力消費地にあるため、LNG 冷熱利用を利用し、超電導送電することは技術的な合理性が高い。このため、LNG 冷熱利用は超電導利用の標準モデルになると思われる。このため、冷凍機の COP 改善の机上検討を行う予定である。そして、次のステップとして、LNG 冷熱利用の冷凍機開発が行われることを期待している。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

特集：超電導　世界のプロジェクト

本年度、ISTEC　Web21 では新たな試みとして、特集 “超電導　世界のプロジェクト”の連載を 4 月号から開始しています。

今 5 月号は、中国科学院　電気工学研究所 Xiao 博士と精華大の Han 教授による中国の最新事情です。莫大な人口を抱えて発展する中国の一端が超電導開発にも現われています。

読者のご参考になることを期待します。

ISTEC
山田穣（和訳）

***なお、本文は、上記両名による寄稿“Recent Progress of Superconducting Technology for Power in China”**（原文 http://www.istec.or.jp/web21/pdf/13_05/Extra%20May_pj.pdf に掲載）を **ISTEC の責任で翻訳したもので、文中の意見など原著者の見解であります。**

「禁；無断転載」

© ISTEC 2013 All rights reserved.

超電導 Web21

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

中国における超電導電力応用の最近の進展
（原題 Recent Progress of Superconducting Technology for Power in China）

著者：
中国科学院　電気工学研究所 Liye Xiao
精華大学 Zhenghe Han

中国では電力源の多くは西部、北西部地区にある。一方、多くの電力消費地は南部と東部にある。よって、この電力送配電システム構造から中国は大規模な国家的電力網を必要とする。全ての地域電力網は互いに接続され、国家電力網は国のほとんど全ての地域をカバーする。このため、この電力系統の安定性を保ち、送電ロスを削減することは重要な課題となっている。

超電導技術はこの電力系統の安定性と損失を減らす可能性のあるソリューションとなりうるため、長く中国科学技術省（MOST）により“超電導 863 プラン”として支援されており、また、中国科学院（CAS）からも支援されてきた。最近では、国家電網公司と中国南方電網公司*のような電力系統会社も電導技術に関して多くの関心を払いつつある。

この報告では、超電導材料とその電力系統への応用の最近の進歩に関して概観し、特に、YBCO、BSCCO テープ線材、鉄系線材、10kV 超電導変電所、超電導直流ケーブル、限流器、SMES に関して述べる。

*訳注：国家電網公司；世界最大の電力送配電会社で、中国南部への送配電を行う中国南方電網公司と共に、中国全土へ送電・変電・配電をしている。以前の国家電力公司が電力機構の「発送電分離」で 2002 年に生まれた。別の 5 大発電会社である大唐（中国大唐集団公司）・中電投（中国電力投資集団公司）・国電（中国国電集団公司）・華電（中国華電集団公司）・華能（中国華能集団公司）が発電する電力の送電のみを行う。5 つの子会社があり、華北電網公司、東北電網公司、華東電網公司、華中電網公司、西北電網公司である。三峡ダムも華中電網公司が担当する地域にあり、「西電東送」の主要役割を担う。

中国南方電網公司；中国南部へ電力の送電・変電・配電を行う会社で、その他の地域へは国家電網公司が送電を行なう。以前の国家電力公司が電力機構の「発送電分離」（中国語：廠網分離）で 2002 年に生まれた。送電のみを行う。範囲は雲南省・貴州省・広西省・広東省・海南省の 5 省。「西電東送」プロジェクトの南方ルートが担当範囲。国家電網公司、広東省、海南省の共同投資会社である。
以上 Wikepedia から抜粋（http://ja.wikipedia.org/wiki/）。

1. 超電導材料

1.1　中国における YBCO、BSCCO 線材の開発

・上海交通大学（SJTU）による YBCO 薄膜線材のプロジェクトは中国科学技術省（MOST）に

© ISTEC 2013 All rights reserved.

より支援されている。2010 年末に彼らは 100 m 長で 194 A/cm（77 K,自己磁場）の臨界電流 I_c を持つ線材の作製に成功した。今は、100 m 長で 300 A/cm 級の線材作製も可能である。西北有色金属研究院（NIN）は、年産 30-50 km の能力を持つ Ni-W 合金 RABiTS テープの製造ラインを確立した。

・Bi-2223 テープは主に InnoST 社で年産 200 km の規模で製造されている。標準的な線材の臨界電流 I_c は 120 A (77 K, 自己磁場)である。また、InnoST 社は絶縁した線材、電流リード用 Ag-Au 合金シースの線材も供給している。さらに高温超電導電流リード、コイルも色々な顧客に提供している。

1.2 鉄系超電導線材、テープ

最近、中国科学院、電気工学研究所（IEE）の Yanwei Ma 博士のグループは、パウダー・イン・チューブ法による鉄系超電導線材の製法を初めて開発した。これは、Pb 添加 $Sr_{1-x}K_xFe_2As_2$ (Sr122) と鉄シースを使い、圧延して c 軸配向を得る方法である。彼らは、冷間圧延条件の最適化と Sn 添加により高特性の配向 Sr122 テープを得た。これらは共に結晶粒間の結合性を改善する。図 1 に示すように、4.2 K では臨界電流密度 J_c の磁場依存性は非常に小さく、J_c は 10 T で 1.7×10^4 A/cm^2 、14 T で 1.4×10^4 A/cm^2 の高い値を示した。これらの値はこれまで報告された鉄系超電導線材の中で最も高く、実用時に要求される J_c レベルに近づいている。

ごく最近、ニクタイド系単心線材に使われる技術を用いて、先述の Ma のグループは、Ag/Fe クラッドの 7 芯の $Sr_{1-x}KxFe_2As_2$ 多心線材、テープを作製した。この線材は 4.2K、自己磁場で 2.1×10^4 A/cm^2 の高い J_c を示し、高磁場での磁場依存性も非常に小さかった（Appl. Phys. Lett. 102 (2013) 082602）。これらの結果は、鉄系超電導体の高磁場応用への強い潜在能力を明確に示した。

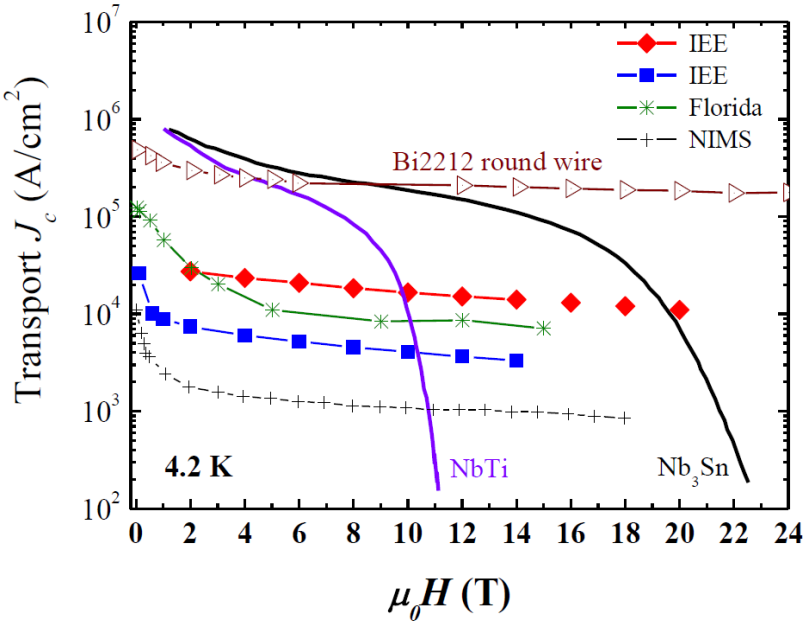


図 1 配向性 Sr122 線材の 4.2 K における臨界電流密度 J_c と印加磁場の関係。
他の鉄系、Bi2212 系、従来の Nb 系超電導線材も比較のため併記した。

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2 電力系統における超電導技術

2.1　10 kV 超電導変電所 [1]

本プロジェクトはこの10年間、電気工学研究所が支援してきた。この超電導変電所は、3相75 m長 10kV/1.5kA 高温超電導ケーブル、3相10kV/1.5kA 超電導限流器、3相 10kV/0.4kV高温超電導変圧器（容量630 kVA）と1MJ/500kVAのSMESを組み合わせたものである。これらは、2004-2008年に変電所または配電系統で試験されたが、甘粛省の白銀市工業団地 (Baiyin Industrial Park of Gansu Province）に全超電導変電所として集結された。全景を図2に示す。

2011 年 2 月初旬から始まった検証試験結果から、この配電系の事故や超電導電力機器の電気的短絡はいずれもなかった。冷凍機・冷却系の事故は、変圧器のクライオスタットの交換、液体窒素ポンプで復帰できる。この超電導変電所の運転により、SMES が電力供給の信頼性と質を大きく改善できることが実証された。

図 2 超電導変電所の様子

2.2　360 m/10 kA 超電導直流電力ケーブル [2]

超電導の直流電力送電への可能性を実証するため、電気工学研究所は2007年に10 kAの高温超電導直流ケーブルの開発を開始した。10 kAの大電流通電テストのため、アルミ製造会社（訳注：アルミ精錬は大電流を使う）である中孚実业（中浮（の作り）実業）(Zhongfu Group)で実証試験を行っている。

2012 年 9 月に、河南中孚实业（Henan Zhongfu Gr oup）社内に成功裡に電力ケーブルを設置することができた。ケーブルの曲げ特性・性能試験に関して、超電導ケーブルの敷設時に、ケーブルは 9 回の曲げが想定・設計されており、そのうち 3 か所は垂直方向の曲げ、6 か所は水平方向の曲げであり、最少曲げ半径は 3 m である。このケーブルは、変電所とアルミ電解工場をつなぐブスバーであるが、従来の電力ケーブルとともに工場の電力供給に使われている。敷設されたケーブルの全景を図 3 に示す。

© ISTEC 2013 All rights reserved.

図 3 敷設後の 10 kA 高温超電導直流ケーブル全景（訳注：写真中央水平部ライン）

2.3　220 kV/800 A 超電導限流器 [3]

最近、鉄心飽和型超電導限流器（FCL）が中国の Innopower 超電導電力ケーブル社で開発された。2011 年の工場テスト後、5 つに分解され、天津石各荘変電所（Shigezhuang substation of Tianjin）に送られた。2012 年の第 1 四半期にこの機器の受け入れ試験が実行された。図 4 に搬入据え付け後の限流器を示す。この受け入れ試験は天津電力会社（Tianjing Power Company）により行われた。その結果、分解輸送、再組立て、据え付け後も、その機能が確認された。その性能と信頼性を試験するため、この限流器の実系統試験が進められている。

図 4　天津の石各荘変電所の 220kV/800A 超電導限流器

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2.4　1MJ/500kVA高温超電導SMES　[4, 5]

SMESがBSCCOテープで作製され4.2 Kで運転された。このSMESコイルは44個のダブルパンケーキコイルからなり、その中の両端のコイルは1本のテープで巻かれ、他の38個は2本のテープを共巻したものである。異方性を考慮して、両端の3個のコイルは他の残りのコイルと同じ臨界電流を持つように、並列に励磁した。この SMESは、甘粛省白銀市（Baiyin City, Gansu Province）の10 kV超電導変電所に移動する前に、北京の門頭溝区変電所（Beijing Mentougou Substation）で試験された。この試験により、電力品質がSMESにより効果的に改善できた。例えば、系統電流の変動歪は5.13 %から1.33 %と大幅に低減された。

2.5　1 MW高温超電導モータ

1 MW高温超電導モータ（図5）は武漢研究所海洋電気推進科（Wuhan Institute of Marine Electric Propulsion）によりBi-2223テープで作製された。このモータは500 rpmで回転する4極の高温超電導同期モータである。

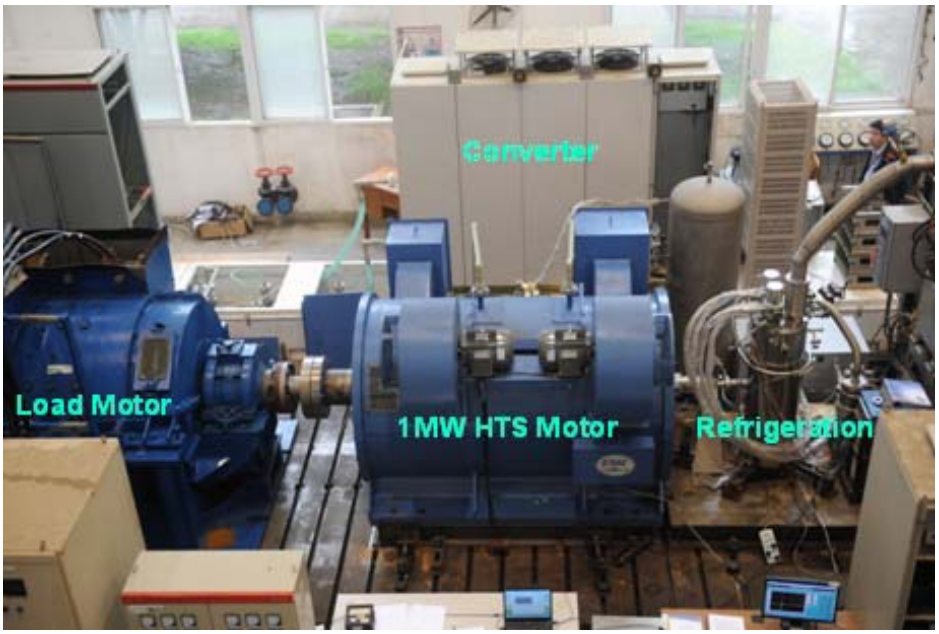


図5　1 MW高温超電導モータ

3. まとめ

超電導電力技術は中国の電力系統の安定性、効率化に貢献できる可能性のある技術であることから、中国科学技術省や中国科学院と電力会社により研究開発が支援されている。これまで数年間に亘り、中国では BSCCO テープ、YBCO テープ、鉄系超電導線材などの高温超電導材料の研究開発に大きな進展があり、また、超電導変電所、直流ケーブル、限流器、SMES、モータなどの製造、実証試験が成功裡に進んでいる。

© ISTEC 2013 All rights reserved.

参考文献：

[1] Xiao L.Y., Dai S.T. and Lin L.Z. *et al* (2012), Development of the World's First Superconducting Power Substation, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.22, 5000104.

[2] Xiao L.Y., Dai S.T. and Lin L.Z.*et al* (2012), Development of a 10kA HTS DC Power Cable, IEEE Transactions on Applied. Superconductivity, 22, 5800404.

[3] Xin Y., Gong W. Z., Cui J.B. *et al* (2013), Factory and Field Tests of a 220 kV/300 MVA Statured Iron-Core Superconducting Fault Current Limiter, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23, 5602305 (to be published).

[4] Xiao L.Y., Wang Z.K., Dai S.T., Zhang J.Y., Zhang D., Gao Z.Y., Song N.H., Zhang F.Y., Xu X. and Lin L.Z. (2008), Fabrication and Tests of a 1MJ HTS Magnet for SMES, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 18, 770-773

[5] Dai S.T., Xiao L.Y., Wang Z.K., Guo W.Y., Zhang J.Y., Zhang, D.　Gao Z.Y., Song N.H., Zhang Z.F., Zhu Z.Q., Zhang F.Y., Xu X., Qiu Q.Q., and Lin L.Z. (2012), Development and Demonstration of a 1MJ High T_c SMES, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 22, 5700304

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

超電導関連 ‘13/6 月－7 月の催し物案内

6/11-12
第 1 回超電導応用研究会シンポジウム
除染情報プラザ、福島市
http://www.csj.or.jp/application/2013/1st_0611.pdf

6/14
第 1 回材料研究会シンポジウム　超伝導体を用いたセンサー技術
国際超電導産業技術研究センター　東雲
http://www.csj.or.jp/materials/2013/1st_0614.pdf

6/17-21
CEC-ICMC
Anchorage, USA
http://www.cec-icmc.org/

6/20-21
第 18 回動力・エネルギー技術シンポジウム
千葉大学西千葉キャンパス
http://www.jsme.or.jp/pes/Event/symposium.html

6/23-25
The 25th Space Cryogenics Workshop
Girdwood, Alaska
http://www.spacecryogenicsworkshop.org/

6/24-28
The International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD)
Pasadena, California
http://conference.ipac.caltech.edu/ltd-15/

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/

© ISTEC 2013 All rights reserved.

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 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

新聞ヘッドライン（4/20-5/19）

○ 送電ロスなしで電車動かせ ―超電導実験、一般家庭用でも（日曜版）　日本経済新聞　4/21
○ 「リニア駅を京都に」　増田代表幹事が抱負　経済同友会＝京都　大阪読売新聞　4/27
○ 物材機構、超電導線材ヘリウム不要 マイナス 236 度　市販冷凍機で実現　日経産業新聞　5/09
○ 大陽日酸　超電導電力機器用ターボ冷凍機を開発　冷媒にネオンガス　化学工業日報　5/10
○ 国際超電導産業技術研究センター（インフォメーション）　日経産業新聞　5/14
○ 超電導体移転温度　電子対の強さと関係　広島大・大阪府大が解明　日刊工業新聞　5/14
○ リニア新駅案に知事　切符売り場設置訴え＝山梨　東京読売新聞　5/16
○ データ編 ―国際標準づくり、欧米追う日本、交渉仕切る人材育成カギ（アジア跳ぶ）　日本経済新聞　5/17
○ リニア中央新幹線：阿部知事、中間駅に疑問　「地域振興と発展に理解を」　毎日新聞　5/18

（編集局）

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

超電導 Web21

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

超電導速報―世界の動き（2013 年 4 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 穣

★　記事のニュース発信地、関連地

▶電力応用

高温超電導による次世代発電のブレークスルー

GE Power Conversion（2013 年 4 月 3 日）

GE Power Conversion 社は、比較的小さな空間内で効率的に電力を得ることができるという画期的技術を組み入れた発電機 Hydrogenie のテストを無事完了した。Hydrogenie は、回転子巻線に超電導を利用して 43 K で作動する。2012 年後半に行われテストでは、毎分 214 回転という速さでその定格負荷 1.7 MW を超えて作動できることが証明され、設計面での予測と期待を満たした。同社の Hydrogenie プロジェクトマネージャーである Marin Ingles 氏は、「この技術はまさに飛躍的進歩である。この技術によって水力並びに風力発電装置の効率が劇的に向上され、将来、更なる応用に発展するかもしれない。」と述べた。最新の超電導体は、比較的安価な金属基板上にセラミックの超電導層を成膜して作られ、従来の銅巻線の約 2 %の断面を有する線材を製造する。サイズが小さくな

© ISTEC 2013 All rights reserved.

ると電磁コイル内に巻線がより多く収まるため、従来のマグネットよりも大幅に小型で軽量な高電力なマグネットが生成される。このように、従来機と比較した場合、超電導が導く効率性と軽量化は重要な利点として掲げられる。同社は、2006 年から 2010 年まで行われた欧州連合フレームワークプログラム 6 の資金プロジェクトの一環として、Hydrogenie 1.7 MW 214 r pm HTS 発電機の開発に多大に携わってきた。このプロジェクトが成功を収め、今後は、既存の自流式水力発電所のアップグレードなど、超電導機器に関する持続的な研究開発が図れるフレームワークが形成されていくと考えられる。

Source: “GE Successfully Trials Breakthrough High-Temperature Superconducting Technology for Next-Generation Power Generation”
GE Power Conversion press release (April 3, 2013)
URL:
http://www.genewscenter.com/Press-Releases/GE-Successfully-Trials-Breakthrough-High-Temperature-Superconducting-Technology-for-Next-Generation-3ef3.aspx
Contact: Masto Public Relations, information@mastopr.com

エネルギー機器プロジェクトの進捗

SuperPower Inc.（2013 年 4 月 8 日）

SuperPower 社並びに数多くの機器開発やデモプログラムで提携するプロジェクトパートナーたちは、市場対応機器の実現に向けて重要な進捗があったことを発表した。SuperPowe 社からは、SMES 、風力タービン、そして限流変圧器等の試作機製造で使用される高性能超電導体を、予定通り引渡し、納入できることが報告された。まず、米国エネルギー省は、28MVA-3 相超電導限流（SFCL）機能付変圧器のプロジェクト（カリフォルニア州アーヴァイン市にある Southern California Edison 社のスマートグリッド変電所で 2 年間の系統連係運用を含む）の開発を支援している。この変圧器は小型且つ油冷却の必要性がないことに加え、電圧変化に急速に対応し、それを高電力レベルで受動的に抑制できる限流（FCL）機能が付加されることで、安全性という利点に富んでいる。最近行われた垂直磁場で交流損失が生じた場合の導体性能テストに関しては、大きな反響を生んでいる。今後、様々な研究成果が検証されていくことで、冷却システムの一層の簡素化や、変圧器の大幅な低損失化への道が与えられるはずである。
また、 米国エネルギー省のエネルギー先端研究計画局のエネルギープログラム（ARPA-E）は、超電導磁気エネルギー貯蔵（SMES）システムを開発する別のプログラムの資金提供を行っている。直結型パワーエレクトロニクスコンバータ付きの 10 kW、1.7 MJ 級小型試作機で実証されたように、このプログラムの目的は、競合的且つ高速対応なグリッドスケールの MWh 級 SMES を開発することにある。この開発チームには、ABB 社をはじめ、Brookhaven 国立研究所、SuperPower 社、そして Houston 大学が参画している。現在、このプロジェクトで使用される全コイルが製造され、最終テストが進行中である。さらには、このプロジェクトの一環として、新規の超電導バイパススイッチとパワーエレクトロニクスコンバータの構築とテストも実施され、新しいプラズマ MOCVD 超電導層成膜システムの機能性実証にも成功した。
2 番目の ARPA-E プロジェクトでは、同社は、Houston 大学、TECO-Westinghouse 社、Tai Yang Research 社、そして米国立再生可能エネルギー研究所と提携し、ハイパワー風力発電機に使用さ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

れる高性能で低価格の超電導線材とコイルの開発に取り組んでいる。Houston 大学は、装置作動状態（30 K、2 T）で HTS 線材の電流密度を 4 倍改善させることを目指している。TECO-Westinghouse 社の R&D 主席研究員 Haran Karmaker 氏は、「電力範囲 10 MW から 20 MW の沖合風車に適用するハイパワーなダイレクトドライブ方式風力発電機に唯一実行可能な技術として、HTS 線材の励磁特性を利用すれば、 実用レベルまで発電機のサイズと重量を減らすことができる。SuperPower 社が 4 倍ものパフォーマンスアップを目指す HTS 線材の仕様は、10 MW 級ダイレクトドライブ方式発電機の設計に使用されている。商用アプリケーションのモデルとなっている電気、機械および熱性能を含む詳細な設計研究は、プログラム内で調査中である。」と述べた。

上記の各プログラムの重要な要素として、Houston 大学では次世代 HTS 線材の開発が、機械工学科 M.D. Anderson 主任教授である Venkat Selvamanickam 博士の指揮の下、継続して進められている。同教授は、「ARPA-E REACT プロジェクトでは、HTS 薄膜のナノスケール欠陥を巧みに操作して風力発電機の作動条件における臨界電流を 65 %向上させたことをはじめ、我々は既に、高性能 HTS 線材の開発に重要な進捗を遂げている。ARPA-E SMES プロジェクトでは、新規の HTS 成膜システムの開発を通じて化学反応プロセスを利用し、2 マイクロメートル未満の HTS 薄膜を作り、過去最高の臨界電流に達することができた。交流損失の大幅削減を実現するため、米国エネルギー省によるスマートグリッド FCL 変圧器プロジェクトと米国陸軍研究所による SMES プロジェクトにおいて、多芯 HTS 線材の技術開発に取り組んでいく。」と述べている。

Source: “SuperPower and Program Partners Announce Progress in Energy Device Demonstration Projects”
SuperPower Inc. press release (April 8, 2013)
URL:
http://www.superpower-inc.com/content/superpower-and-program-partners-announce-progress-energy-device-demonstration-projects
Contact: Traute F. Lehner,　tlehner@superpower-inc.com

CORDIS
Community Research and Development Information Service

超電導風力発電

CORDIS（2013 年 4 月 23 日）

欧州連合が出資するプロジェクト SUPRAPOWER では、強力で信頼性が高く、その上軽量な超電導洋上風力タービンの製造に取り組んでいる。4 年にわたるこのプロジェクトでは、スペイン Tecnalia のコーディネートのもと研究開発を進めている産業界および科学界 9 機関と提携して、それぞれの専門知識を活用している。このプロジェクトチームの見解は、超電導技術を応用することで、従来技術と比較して、運用並びにメンテナンスコスト面で大幅な削減ができることにあり、将来、10 MW 級超電導発電機を備える効率的且つ高強度な小型風力発電所の建設が可能となる。このような超電導の応用は、エネルギーや原材料の著しい節約を可能にし、タービンの寿命を延ばすことができる。Tecnalia のエネルギー· 環境部門でプロジェクト· コーディネーターのアシスタントをしている Iker Marino Bilbao 氏は、「我々が初年度に掲げた主な目標は、モジュール式回転クライオスタットの概念を検証することである。その後、超電導による発電機スケールモデルの概念的設計に着手し、2014 年には発電機コイル（500 kW 規模の発電機）の構築に向けて、超電導ダミーコイルの設計、構築、そしてテストも行うつもりである。」と述べた。これらの画期的ソリューションによって、タービンヘッド重量および全体のサイズを小さくすることが期待でき、その結果、製造費

© ISTEC 2013 All rights reserved.

を 30 %低減することができる。
風力発電は、ヨーロッパ全体のエネルギー生産の効率向上に大きく貢献すると期待され、欧州連合は、温室効果ガスの排出を削減し、エネルギー安全保障を強化する取り組みの一環として、1990 年比 20 %以下に排出量を削減する目標を設定した。

Source: “Super wind turbines represent a major technological breakthrough”
CORDIS press release (April 23, 2013)
URL: http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=EN_NEWS&ACTION=D&RCN=35671
Contact: For more information,
SUPRAPOWER　http://www.suprapower-fp7.eu/
Tecnalia http://www.tecnalia.com/en
Karlsruhe Institute of Technology (KIT), http://www.kit.edu/kit/english/index.php
European Commission – Energy, http://ec.europa.eu/energy/efficiency/index_en.htm

▸エレクトロニクス

量子コンピュータ会社を米国に設立

D-Wave Systems Inc.（2013 年 5 月 2 日）
D-Wave Systems 社は、米国の商用量子コンピュータ企業の正式な立ち上げを発表した。業界の専門家でスーパーコンピューティングのベテランでもある Robert “Bo” Ewald 氏が、この新会社の社長として米国ビジネスを指揮すると同時に、最高収益責任者としてグローバル展開する顧客運営を率いる。なお、オフィス並びに研究開発施設は、カリフォルニア州パロアルト市に新設された。
D-Wave Systems 社の最高経営責任者である Vern Brownwll 氏は、「Bo Ewald 氏の参加は、当社事業において得るところが大きい。彼は、スーパーコンピュータ業界の伝説的人物である。彼の高い知識と影響力は、研究、防衛と知性、エネルギー、製造業、金融サービス、そしてゲノミクスなど幅広い分野に至り、最先端の高性能ソリューションを提供してきた。彼は、キャリアを通して、組織が最も困難とする課題を解決に導くことに専念してきたが、このことはまさに我が社 D-Wave の使命と完全に一致する。今日、米国における当社の存在を正式に発起し、今後、グローバルに事業拡大を遂行していく中、Bo Ewald 氏を迎え指揮を執ってもらうことは大変喜ばしいことである。」と述べた。また、Ewald 氏も、「D-Wave 社が開発する量子コンピュータや顧客が使用するアプリケーションは、私がこの業界で見てきたものよりもさらに革新的なものとなるだろう。システム上でサイエンスフィクションからサイエンスファクトに変わる、つまり、人々が今日夢見ているだけの問題解決が実際に成し遂げられていくのである。」と付け加えた。
D-Wave の主力製品である D-Wave One™は、計算を大幅に加速する量子力学を使用した新しいタイプの超電導プロセッサを基礎としている。2010 年には最初のユニットが Lockheed Martin 社によって購入され、世界初の商用量子コンピュータの販売となった。

Source: “Quantum Computing Firm D-Wave Systems Launches U.S. Business; Industry Veteran Bo

© ISTEC 2013 All rights reserved.

Ewald Will Lead U.S. Business and Global Customer Operations"
D-Wave Systems Inc. press release (May 2, 2013)
URL: http://www.dwavesys.com/en/pressreleases.html#investment_2012
Contact: Janice Odell, jan@fordodell.com

▶医療応用

冷却ケアフリーの NMR 用マグネット生産開始

Bruker（2013 年 4 月 15 日）

Bruker 社は、完全統合型ヘリウム再液化システムを搭載した窒素フリーの超電導マグネットシステムである Ascend™ Aeon 600 および 700 を新たに市場導入した。この Aeon の技術は斬新で、ユーザーのメンテナンスを必要とせず、長期にわたってケアフリー操作を可能にする。液体ヘリウム並びに窒素補充の必要性を排除することで、600 MHz と 700 MHz マグネットは、ユーザーの利便性と寒剤供給からの実質的解放を可能にする。さらに、同社は現在、窒素フリーで、液体ヘリウムの蒸発率が極めて低く、また液体ヘリウム補充が 18 ヶ月毎のみという冷凍機冷却型 Ascend Aeon 400 および 500 マグネットの提供も積極的に行っている。同社は、既に Ascend Aeon 400 および 500 マグネットシステムを 20 台近く、世界中の顧客の研究所に設置している。また、これらシステムの冷却メンテナンスサービスを定期的に提供するため、顧客は今後何年間もケアフリーでシステム操作に従事することが期待される。同社は、低振動型冷凍機の統合システムを搭載し、独自の高度冷却設計を組み込んだこの新しい Ascend Aeon 技術の導入が、現在直面しているヘリウム不足とヘリウム価格上昇に関する世界的懸念への対策になると考えている。Bruker BioSpin 株式会社の社長 Werner Maas 博士は、「長年にわたり、既に何百という当社の前臨床 MRI マグネットが市場で利用されている。一方、NMR では高解像度のための安定性とスペクトル純度を求める需要が極度に高かった。このことが、ここ最近まで冷凍機冷却型 NMR マグネットの利便性を追求し、市場導入する上での妨げとなっていた。過去数年間にかけて独自の技術躍進とマグネットおよび冷凍システム統合の更なる最適化のおかげで、当社のマグネット部門研究者たちはついに、高解像度 NMR の顧客にも利用してもらえる'ケアフリーな' Ascend Aeon というオプションを作り上げることができたのである。」と述べた。

Source: "Bruker Introduces Actively Refrigerated Ascend™ Aeon Magnet Produced Line"
Bruker press release (April 15, 2013)
URL:
http://www.bruker.com/news-records/single-view/article/bruker-introduces-actively-refrigerated-ascendTM-aeon-magnet-product-line.html
Contact: Dr. Thorsten Thiel, thorsten.thiel@bruker.com

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2013 年 6 月 3 日発行

超電導 Web21

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

「2013 年度春季低温工学・超電導学会」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
特別研究員　山田 穣

第 87 回目となる低温工学・超電導学会が 5 月 13 日から 15 日に、東京、江戸川区のタワーホール船堀で行われた。参加者は 381 人、発表件数は 198 件であった。

今回は、国際性を高めるために、いくつかの仕掛けがあり、1）国際交流若手賞、2）招待講演で初のトルコからの超電導の発表などが企画された。1）は 35 歳以下の若手で会議発表、質疑応答を英語で行なうもので、エントリー者の中から選ばれて、海外出張、交流などの援助に資金が供与される、2）は、Scientific and Technological R&D Progress in Turkey over the Last De cade with specifics focused on "Cent er of Excellence for Superconductivity Research (CESUR), Vision, Mission and Roadmap"と題して、トルコ　アンカラ大の Ali Gencer 教授が講演された。トルコの 10 程度の大学が連携して超電導の研究を進めようとしているが、特に応用を重視しているとのことであった。日本の協力を期待していると再三強調された。

全体のプログラムは、図 1 の通りである。今回は特にコイル関係の発表が多かった。

以下、聴講できた発表の内、主な内容を記す。

機器関係（ISTEC 高木智洋、中西毅、山田穣）

要旨

- Y 系コイルの検討が増えてきた。特に、絶縁厚を例えば 50 μから 8 μに減らすと、コイルに必要な線材量が数分の 1 になるなどは、今後の機器作製で総合的検討が必要であることを示す。
- より高精度のマグネット作製技術が検討されている（NMR, MRI,加速器用では 1 ppb,1 ppm の均一度、コイル作製技術、磁場補正技術が必要）

開催日	A会場	B会場	C会場	D会場
5/13（月）	受付 9:30～			
	10:30－12:00 Y系コイル化技術(1)	10:30－12:00 交流損失	10:30－12:00 HTSバルク・善磁	10:30－12:00 計測・基礎 (1)
	昼食			
	ポスター手短か紹介 / 展示案内　13:15－14:15（A会場）			
	ポスターセッションⅠ 14:15－15:30（Poster会場） 計測・基礎(2), 超伝導特性評価・Fe系線材, HTSバルク・応用, 磁気分離処理, 送電ケーブル, Y系コイル化技術(2), Contributed poster			
	15:45－16:30 Y系コイル	15:45－16:30 直流送電ケーブル	15:45－16:30 核融合(1)	15:45－16:00 疲労
				16:00－16:30 A15 線材
	16:45－17:45 HTSコイル	16:45－18:00 交流送電ケーブル	16:45－18:00 核融合(2)	16:45－17:45 ピンニング
開催日	A会場	B会場	C会場	D会場
5/14（火）	9:45－11:15 回転機	10:00－11:15 Y系基礎(1)	10:00－11:15 MgB_2(1)	10:00－11:15 冷凍機
	ポスター手短紹介 11:30－12:15（A会場）			
	昼食			
	ポスターセッションⅡ 13:15－14:30（Poster会場） 小型冷凍機・磁気冷凍, 冷却システム(1), MgB_2(2), Y系基礎(2), 加速器(1), 電気機器, Y系コイル特性・保護, コイル化技術			
	総会 14:40－15:40（A会場）			
	特別講演1 15:50－16:50（A会場） 次世代モビリティとサステイナブルな交通システム 須田義大（東大生研）			
	特別講演2 16:50－17:50（A会場） Scientific and Technological R&D Progress in Turkey over the Last Decade with specifics focused on "Center of Excellence for Superconductivity Research (CESUR), Vision, Mission and Roadmap" Professor Ali Gencer（トルコ アンカラ大）			
	懇親会（学会会場2階 瑞雲の間）18:00－20:00			
開催日	A会場	B会場	C会場	D会場
5/15（水）	9:30－10:45 加速器(2)	9:45－10:45 冷却システム(2)	9:30－10:45 鉄系超伝導薄膜・線材	9:45－10:45 磁気分離
	11:00－12:15 次期定常強磁場施設(1)	11:00－12:15 HTS線材特性	11:00－12:15 MgB_2 バルク	11:00－11:45 医療用磁気分離
	昼食			
	13:15－14:30 次期定常強磁場施設(2)	13:15－14:15 MOD法線材	13:15－15:00 ITER	
	14:45－15:30 コイル応用	14:30－15:30 Y系線材		

図 1 学会発表プログラム全体

© ISTEC 2013 All rights reserved.

・東北大、物材機構で総額 120 億円を計画した高磁場コラボレーション施設建設が始まった。Y 系コイルにより最大 50 T の定常磁場発生施設を作る。これにより、米欧中国に遅れていた同種施設でのキャッチアップを狙う。

5 月 13 日（月）

Y 系コイル化技術 (1) 10:30 - 12:00

1A-a015 ミクロンの極薄ポリイミド皮膜による REBCO コイル電流密度の極大化
柳澤吉紀 （理研）ら他（千葉大）（三菱電線工業）（横浜市大）（理研）
1A-a02 ポリプロピレン絶縁 Re 系超電導線を用いたコイルの評価
横山彰一、井村武志 （三菱電機）
1A-a03REBCO コイルが切り拓く超伝導コイルシステムの新時代へ向けて －世界初の LTS/REBCO NMR システムにおける多次元 NMR－
柳澤吉紀 （理研）（千葉大）（JASTEC）（NIMS）（JEOL RESONANCE）（理研）
1A-a04 輻射シールドレス Y 系伝導冷却マグネットの通電特性
宮崎寛史（東芝）他
1A-a05 伝導冷却型イットリウム系コイルの磁場中通電特性
岩井貞憲（東芝）他
1A-a06 イットリウム系超電導線材を用いた鞍型コイルの開発
高山茂貴，小柳 圭，戸坂泰造，田﨑賢司，来栖 努，石井祐介 （東芝）

このセッションは、特に Y 系コイルの進展についてであるが、特に 1A-a01 5 ミクロンの極薄ポリイミド皮膜の講演が印象的であった。良く知られているが、コイル電流密度を上げると必要線材量は減るが、実際作製した 5 ミクロンの極薄ポリイミド皮膜線のデータをもとに、同じ発生磁場のコイルを絶縁被覆 20 ミクロンと 5 ミクロンで計算すると、線材量は数分の 1 になった。総合的に線材特性、あるいは導体特性を検討することが実際のコイルでは必要である。
また、1A-a06イットリウム系超電導線材を用いた鞍型コイルの開発 では、実際に Y 系線材により 3 次元的に変形した加速器用鞍型コイルを作製していた。その手法は、エッジワイズ曲げに対して Y 系線材は劣化しやすいので、巻線時に線材の内と外で等内周条件になるようにしている。これを特殊なコイル、磁場計算と巻線機により実現している。これにより長さ 400 mm、幅 140 mm、開口度+-70 度のコイルを劣化無く作製できていた。線材長は 25 m で 25 ターンのコイルを作製し、コイル I_c は 53 A、n 値は 28 であり、線材の劣化はなかった。実際の加速器でも 50 ターン位になるとのことなので、形状的な作製の目途はたったと思われる。

ポスターセッションでは、

2P-p17 次世代超電導サイクロトロンの開発：Y 系ダブルパンケーキコイルの巻線精度評価
斎藤 隼、王 旭東、石山敦士 他 （早大） 植田浩史 （阪大） 渡部智則、長屋重夫 （中部電力）
2P-p18 次世代超伝導サイクロトロンの開発：Y 系ダブルパンケーキコイルの磁場精度評価
有谷友汰、王 旭東、石山敦士 他（早大）； 植田浩史 （阪大） 渡部智則、長屋重夫 （中部電力）
で、加速器用コイルの精度に関しての検討結果が発表された。

加速器では磁場精度が 10^{-3}-10^{-4} 必要であるが、巻線の寸法誤差を測定したところ、各巻線層厚み（平均で 230 μ）に対して+-47 μの変動が測定された。また、コイルの厚みでは 300 μ程度の凸凹もあった。このため、コイルを励磁した時の磁場測定によれば、理想的な磁場分布に対して、中心磁

© ISTEC 2013 All rights reserved.

場で 1.5~2 %の差が生じていた。巻線寸法精度だけでなく、冷却による変形、遮蔽電流による影響もあるが、この精度をさらに 1-2 桁高めることが重要な課題である。

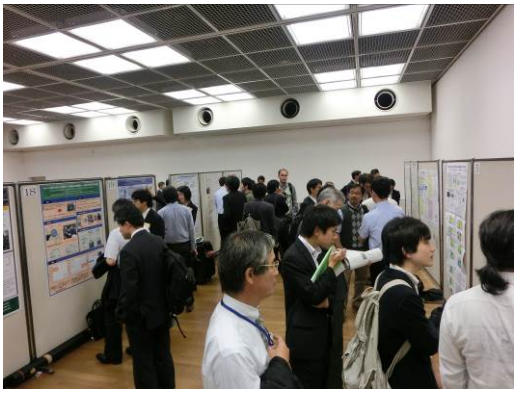


図 3 口頭発表会場、ポスターセッション会場風景

5 月 15 日（最終日）は、最近予算化された物材機構と東北大の高磁場コイルプロジェクトの講演が 2 セッションにわたり行われた。

次期定常強磁場施設 (1)　11:00 - 12:15

3A-a06　我が国における次期定常強磁場施設の建設計画　ー大型設備整備計画に関する学術会議マスタープランー
熊倉浩明、木吉 司, 清水 禎 （NIMS）； 渡辺和雄、佐々木孝彦、野尻浩之 （東北大）

3A-a07　50T 級ハイブリッドマグネット建設に向けた NIMS サイトでの 24MW 電源・水冷却設備整備計画と 15MW-35T ハイブリッドマグネット現状
二森茂樹、熊倉浩明、浅野稔久、松本真治、清水 禎 （NIMS）； 渡辺和雄、淡路 智、高橋弘紀、小黒英俊 （東北大）

3A-a08　仙台サイトでの 8MW-27.5T 無冷媒ハイブリッドマグネットの改善
鶴留武尚、櫻庭順二 他（住重） 渡辺和雄、淡路 智、小黒英俊 （東北大）； 花井 哲、井岡 茂 （東芝）

3A-a09　50T 級ハイブリッドマグネット用大口径 20T 無冷媒超伝導マグネットの設計
渡辺和雄、淡路 智、小黒英俊 （東北大） 熊倉浩明 （NIMS） 花井 哲、井岡 茂（東芝）
杉本昌弘、坪内宏和 （古河電工）

3A-a10　18T 無冷媒超伝導マグネットの改善：20.1T 磁場発生成功
花井 哲、土橋隆博、峯元祐二、井岡 茂（東芝）； 渡辺和雄、淡路 智、小黒英俊（東北大）

次期定常強磁場施設 (2)　13:15 - 14:30

3A-p01　高強度 Nb3Sn 線材とラザフォードケーブルの開発
杉本昌弘、坪内宏和 （古河電工） 渡辺和雄、淡路 智、小黒英俊 （東北大）

3A-p02　高強度 Nb3Sn ラザフォードコイルの磁場中通電特性
小黒英俊、渡辺和雄、淡路 智（東北大）熊倉浩明, 木吉 司, 二森茂樹（NIMS）；杉本昌弘、坪内宏和（古河電工）

3A-p03　REBCO テープ線材特性と電磁力試験
大保雅載、藤田真司、飯島康裕、伊藤雅彦、齊藤 隆 （フジクラ）； 淡路 智、小黒英俊、

© ISTEC 2013 All rights reserved.

渡辺和雄 （東北大）； 花井 哲、井岡 茂 （東芝）； MIYOSHI Yasuyuki, CHAUD Xavier, DEBREY Francois （LNCMI）

3A-p04　22T 無冷媒超伝導マグネット用 REBCO インサートコイル開発
宮崎寛史、岩井貞憲、戸坂泰造、田崎賢司、花井 哲、井岡 茂、石井祐介（東芝）淡路 智、小黒英俊、渡辺和雄（東北大）

3A-p05　25T 無冷媒超伝導マグネットの建設計画
淡路 智、渡辺和雄、小黒英俊（東北大）熊倉浩明（NIMS）宮崎寛史、戸坂泰三、花井 哲、井岡 茂（東芝）杉本昌弘、坪内宏和（古河電工）

2 セッションも占め、力の入りようがわかるが、これらは、高磁場コイルで欧米に比べて立ち遅れている日本の施設を高性能化しようというもので、物材機構に 50 T 定常磁場コイル、東北大に 25 T 超電導コイル、阪大、物性研に 100 T パルスコイルを設置する。4 機関が合同で文科省に申請している（強磁場コラボラトリ定常磁場施設）。第 1 期から第 3 期にわたる総額 120 億円の 8 年計画である。今年は、東北大と阪大分の一部が予算化されたが、今回、上記の通りそれぞれの機関の代表者が全容を報告した。

目玉は、つくばの物材機構に設置される 50 T ハイブリッドマグネットと東北大の 25 T 無冷媒超電導マグネット（冷凍機冷却式）であり、これにより遅れていた高磁場施設が欧米中国に追いつく。この実現のためには、Nb_3Sn 導体、Y 系導体が必要であり、また、マグネットの保護技術も重要となってくるので、種々の事前検討が重要となる。例えば、a09 で渡邊らは 50 T 級無冷媒ハイブリッドマグネットの事前検討を行っているが、そのためには 20 T の無冷媒超電導マグネットが必要である。これは NbTi を使わず、Nb_3Sn と Y 系導体からなる斬新なものであり、大口径 400 mm にも関わらず Y 系導体の長さはわずか 10 km で、900 A で運転する。設計のフープ力は安全を見て 300 MPa としている。

以上みてきたように、Y 系線材、導体、コイルともそれぞれさらに高度化が進み、今後の機器応用が期待される。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2013 年 6 月 3 日発行

超電導 Web21

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

「2013 年度春季低温工学・超電導学会（鉄系超電導薄膜・線材）」報告

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
材料物性バルク研究部 兼 線材研究開発部
主管研究員　宮田成紀

鉄系超電導体に関する発表は、口頭発表が 5 件、ポスター発表が 1 件（物質で分類すると 1111 系／1 件、122 系／2 件、11 系／3 件）であった。以下にその概略を報告する。

ISTEC の筑本らは、P 組成の異なる $BaFe_2(As_{1-x}P_x)_2$ 薄膜を作製し、P 以外の元素も含めた膜組成と超電導特性との相関について解析をおこなった結果を報告していた。超電導転移温度 T_c の x（P 組成）に対する依存性は、これまでに報告されているおよそ x~0.3 付近を頂点とするドーム状のラインに合致することがわかったが、一方、臨界電流密度 J_c に関しては低 x で J_c が極端に低い以外は明確な依存性を示さなかった。つぎに（T_c が比較的高いおよそ 25 K 以上の試料について）T_c、J_c それぞれ膜の Fe/Ba 比に対する依存性を調べたところ、T_c はほぼ Fe/Ba 比に依存せず一定となり、J_c は Fe-rich 領域において高い値を示す傾向が見られた。つまり、122 相の超電導特性は Fe/Ba 比に無関係である（x のみに依存する）が、Fe の組成が低い試料では、なんらかの阻害因子が働いて 122 粒同士のコネクティビティが弱くなっているため J_c 特性が低下している可能性が示唆される。例えば結晶粒界における第二相の析出などが考えられるであろう。

九州大学のグループから二件、走査型 SQUID 顕微鏡（金ら）および走査型ホール素子顕微鏡（東川ら）を用いた Fe(Te,Se) 薄膜の磁束分布観察についての報告があった。金らは、走査型 SQUID 顕微鏡を用いて Fe(Te,Se) 薄膜の磁束観察をおこない、磁束 1 本ごとの観測に成功していた。得られたミクロンオーダーの磁束分布プロファイルより素子の lift-off 距離を考慮してサブミクロンオーダーとなる薄膜上の磁束分布を求め、量子化磁束線の半径にあたる磁場侵入長を見積もった。その結果 4.3 K から 14.2 K の温度範囲において 300 nm から 950 nm の値を得、その温度依存性について解析をおこなったところ、T_c へ向けての発散性を示すλの逆数の関数形が温度 T にリニアな特徴的な温度依存性を示すことを報告していた。東川らは、走査型ホール素子顕微鏡を用い、同じく Fe(Te,Se) 薄膜試料について前述の SQUID 顕微鏡に比べややマクロなスケールにおける磁束分布の測定をおこない、ビオ-サバール方程式から逆問題の解として J_c 分布をもとめ、その均一性について評価をおこなっていた。5 K、10^{-11} V/m の閾値に相当する測定で得られた J_c 値の二次元分布から、4 K、10^{-4} V/m の条件における推定値に換算したところ、1.3 MA/cm^2 に最頻値をもつヒストグラムが得られ、これは直流四端子法をもちいたよりマクロな測定結果（約 1 MA/cm^2）と良い一致を示すことが確認されたことから本解析法の妥当性を主張していた。また注目すべき点として、試料の一部は 3.4 MA/cm^2 相当の高い J_c 値を有していることを挙げ、これは 11 系においてこれまで報告されたことのない非常に高い値であり、11 系材料がもつ潜在的な輸送電流特性の高さを示すものであるとのことであった。

物質・材料研究機構の戸叶らは、122 系の一つである $(Ba,K)Fe_2As_2$ を用いた Ag シース PIT 線材を作製し、その超電導特性と組織観察の結果について報告していた。これまでにも 10^4 A/cm^2 を超える高特性の PIT 線材を報告しているが、今回、工程として一軸圧縮を追加することにより、さらに大きく J_c が向上する結果が得られたことを報告していた。一軸圧縮の効果については配向性の向上ではなく、それまでロール圧延で入っていた線材の幅方向に走り電流の流れを妨げていたクラックが、マクロな輸送電流と平行な長手方向に変わったためであるとの解釈を示していた。一軸圧縮工程を数百メートル以上の長尺プロセスに適用する場合に工夫が必要であるが、4.2 K、10 T の温

© ISTEC 2013 All rights reserved.

度・磁場下において 2.1x10^4 A/cm^2 という PIT 線材としては非常に高い J_c 値が得られていた。

物質・材料研究機構の藤岡らは、従来、1200ー1300°C という高い温度で焼成されてきた SmFeAs(O,F) について焼成条件の検討をおこない、焼成温度を下げ、さらに注意深く徐冷をおこなうことにより不純物（とくに FeAs 相）の少ない高い T_c（オンセット T_c で 58.1 K）をもつ試料の作製に成功したことを報告していた。

首都大学の井澤らは、Fe(Se,Te) を用いた PIT プロセスにおいて、目的の超電導相の合成に構造相変態を伴う方法を報告していた。シース材である Fe チューブからの Fe の元素拡散を想定してコア材の Fe 組成を予め低くしておき（$Fe(Se,Te)_{1+d}$）、熱処理によって Fe(Se,Te)相を合成するというものである。このとき六方晶から正方晶への構造相転移を伴う。これはすでに同グループが FeSe 線材に適用したものであるが、いまのところ高い電流特性を得るまでには到っていないようすである。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2013 年 6 月 3 日発行

超電導 Web21

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

「2013 年度春季低温工学・超電導学会（交流損失・Y 系基礎）」報告

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所材料物性研究部
主管研究員　町 敬人

1. 交流損失セッション

鹿児島大の平山らは，Bi2223 線材で作製したコイルに交流磁界を印加し，コイルのインダクタンスと接続部の抵抗が分かれば結合損失が求められることおよび転位を施しても位置ずれがあると損失が大きくなることを報告した。鹿児島大の古川らは，ポインチングベクトル法による交流損失測定について，低磁界は交流輸送電流の影響により交流斜め磁界のみの理論から大きくずれ，高磁界ではよく一致すると報告した。同じく鹿児島大の樋口らは，ポインチングベクトル法を用いた損失測定において，円柱バルクの影響で損失を正しく評価できないことを報告した。これはピックアップコイルが渦電流をうまく拾えない可能性があり，囲い方に工夫が必要であるかもしれない。京大の米田らは複数素線の ROEBEL ケーブルの磁化損失は垂直成分が主で平行磁界成分はほとんど影響がないと報告した。京大の雨宮らは，スタックしたケーブルでバンドル導体を模擬し，実験と解析から ROEBEL とバンドル導体はほぼ同程度の損失であることを示した。実験ではなるべくサーマルサイクルを少なくした測定を行い，剥離の危険性を避けるようにしているということであった。東北大の中出らは，非対称歪み波電流（1 次と 4 次 5 次の高調波電流を印加，例えば 5 次だけを変化させた）に対する交流損失特性を評価し，対称，非対称のいずれにおいても通電損失を推定できたことを報告した。

2. Y 系基礎

九工大松本氏はダブル APC による Y 系薄膜の磁束ピンニング制御ということで，Y_2O_3, BSO の両方を導入して，組成に対する組織観察や J_c(B) 特性について報告し，W キンクに言及した。電中研一瀬氏は，Y123+$BaNb_2O_5$ および Sm123+$BaHfO_5$ のナノロッド形態について，成膜温度依存性の TEM 観察結果を報告した。東北大淡路氏は，面内磁場印加においてロスアラモスが報告した低温での Intrinsic pinning による n 値の変化について，より精密な実験を行うために曲がりくねって長いパターンを形成して測定した結果を報告した。n 値が温度変化する様子が明白に得られ，キンク対形成ポテンシャルで説明できることを示した。京大堀井氏は，Y124 を磁場中で 3 軸配向させることが可能となり，Y の一部を Ca に置換して T_c を向上させた試料においても配向することを示した。配向の原理は，静磁場と間欠回転磁場の組合せというユニークなもので，配向時に用いるエポキシの粘度が低すぎては緩和時間が短くてうまく配向しないことなどを補国した。東大下山氏は，RE123 粉末の臨界電流特性を高める方法として，粉末をサブミクロンまで細かくし，さらに粒度分布を制御することが有効であることを示した。粒径の細かい粉末は低温で焼結させて不可逆磁界や J_c を高めることができるということであった。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

2013 年 6 月 3 日発行

超電導 Web2.1

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

【隔月連載記事】

医療用加速器と超電導（その 3）

京都大学
大学院工学研究科
教授　雨宮尚之

3. 円形加速器

3.1　超電導の応用先としての円形加速器

医療用加速器の中でも円形加速器は荷電粒子の軌道を制御するために電磁石を用いており、超電導の応用が期待されている。特に重粒子線がん治療は、重粒子を加速する円形加速器の大きさが普及の妨げになっているが、電磁石に超電導を応用すれば円形加速器を小型化でき、さらに運転に要する電力も削減できる。以下では、円形加速器に関するいくつかの原理と、それらを応用した各種の円形加速器について解説する。

3.2　円形加速器とローレンツ力による荷電粒子の円運動

荷電粒子を加速するためには、一般に電場が用いられる。「電場による加速部」を有効に使うために、粒子を円形ないし螺旋形に周回運動させ、少数の「電場による加速部」を繰り返し通過させ少しずつ加速し、最終的には高エネルギーまで加速するようにした加速器が円形加速器である。なお、静電場の保存性から静電場を円に沿って周回積分すると零になるので、静電場で円形加速器を構成することはできず、一般には高周波電場が用いられる。

電場の強さ E、磁束密度（磁場）B の空間を速度 v で電荷 q の荷電粒子が運動しているとき、この荷電粒子に作用する電磁力（ローレンツ力）F は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{F}=q\left(\boldsymbol{E}+\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}\right) \tag{1}$$

粒子を円形に周回させるためには向心力を作用させる必要があるが、このために磁場 B による力を利用する。式(1)によれば、粒子の速度 v と垂直な方向に磁場 B を印加すれば、大きさは速さ v に比例し、方向は v と B に垂直な力 F を作用させることができる。これにより、速さ v が一定の重粒子を B に垂直な平面内で半径 r の円軌道に沿って周回させることができる。

$$r=\frac{mv}{qB} \tag{2}$$

このときの円運動の周期 T、角周波数ωは以下の通りとなる。

$$T=\frac{2\pi m}{qB} \tag{3}$$

$$\omega=\frac{qB}{m} \tag{4}$$

3.3　サイクロトロン

© ISTEC 2013 All rights reserved.

図 3-1 に示すように、紙面に垂直な一様磁場 B 中に、缶詰めの缶を二つに切ったような形のふたつの D 型電極を置く。D 型電極内部の中心 O の近くにθ方向の初速度をもった荷電粒子を入射すると、この荷電粒子は O を中心に円運動を始める。この荷電粒子がふたつの D 型電極の間隙にさしかかったときに、これを加速するような向きの電場 E が印加されていると、荷電粒子は加速され式(2)からわかるように軌道半径は大きくなる。荷電粒子が電極間隙にさしかかるときに常にこれを加速するように周波数が 1/T の高周波電場を印加すれば、荷電粒子は螺旋状の軌道を描きながら加速を続ける。これがサイクロトロンの仕組みである。式(3)によれば、電荷、磁場、質量が変わらなければ円運動の周期 T は不変であるので（サイクロトロンの等時性）、一定周波数の高周波電場で、入射直後の低エネルギーの粒子から出射直前の高エネルギーの粒子までを含む連続的な荷電粒子の流れ（CW）を加速し続けることができる。

荷電粒子のエネルギーが大きくなり相対論的質量増加が無視できなくなると、式(3)からわかるように荷電粒子の周回運動の周期が伸び、一定周波数の高周波電場のピークに間に合わず遅れて電極間隙に到達するようになり（加速位相のずれ）、加速の効率が下がる。加速位相のずれのために得られる粒子エネルギーは制限される。

また、磁場が時間的に一定、かつ、ほとんど径方向に対して一様であるために粒子エネルギーに比例して軌道半径が大きくなり、その結果、電磁石も大きくなってしまう。このこともサイクロトロンで得られる粒子エネルギーを実質的に制限している。

サイクロトロンは後述する集束性が弱く、粒子エネルギーを高めビーム強度を大きくすることは不得手であるが、構造が単純でかつコンパクトな円形加速器であり、比較的低エネルギーの領域では広く用いられてきた。医療分野で言えば、PET における陽電子放出核種の生成や陽子線がん治療装置に用いられてきた実績がある。

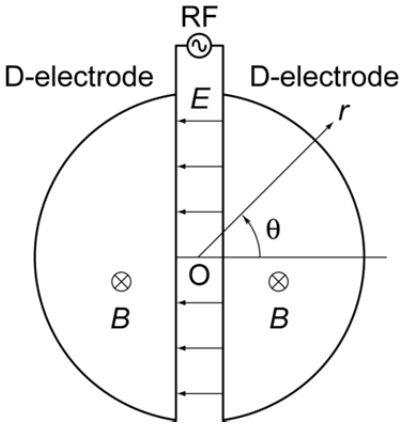


図 3-1　サイクロトロン

3.4　位相安定性原理

相対論的効果による加速位相のずれの問題を克服するためには、次式のような粒子のエネルギーEの関数である粒子の周回周波数 f(E)に合わせた高周波電場を印加すればよい。

$$f(E)=\frac{v_{\parallel}}{L} \tag{5}$$

ここで、$v_{\parallel}$は軌道方向の速度、L は 1 周の軌道長である。

今、図 3-2 のように時間変化する高周波電場を印加したとする。相対論的領域に入り、粒子のエネルギーが高いと質量が増加する場合を考えると、基準粒子に比べて高エネルギーの粒子は加速部に遅れて到達し、低エネルギーの粒子は早く到達する。今、電場が徐々に下がっていく位相（タイ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

ミング）で粒子を加速するとすれば、早く到達した低エネルギーの粒子は基準粒子より多く加速され、遅れて到達した高エネルギーの粒子は基準粒子より少なく加速される。結果として、粒子のエネルギーのずれは小さくなり粒子は集群（バンチング）し、安定に高エネルギーへ加速される。これを縦方向の集束と呼び、この原理を位相安定性の原理という。また、この縦方向の集束により粒子のエネルギーが振動することをシンクロトロン振動と呼ぶ。なお、加速器の分野では粒子ビームに沿った方向を縦方向と呼ぶことに注意を要する。

この原理を適用したサイクロトロンを周波数変調サイクロトロン、あるいはシンクロサイクロトロンと呼ぶ。しかし、粒子エネルギーを大きくしようとすると電磁石（鉄磁極）が巨大となるという欠点を持つ点は、通常のサイクロトロンと変わらない。

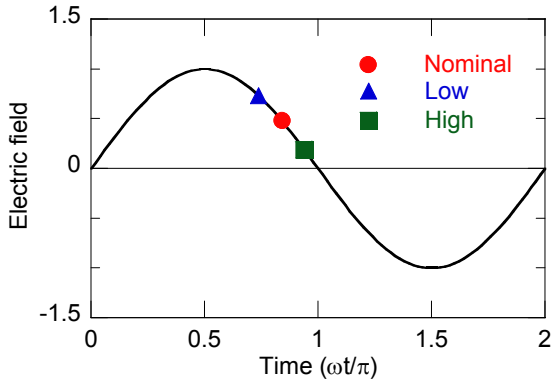


図 3-2　位相安定性

3.5　シンクロトロン

シンクロサイクロトロンを含めサイクロトロンにおいては、粒子軌道が螺旋状に広がっていくために、これを全て覆う偏向磁場を、大きな電磁石により発生する必要があった。これに対して、粒子の加速に応じて磁場を時間的に大きくしていけば、式(2)からわかるように粒子の軌道半径を一定に留めることができるはずである。粒子の軌道半径を一定に留めることができれば、電磁石はその軌道上にのみ偏向磁場を発生すればよい。

このような考え方に従って、位相安定性原理を適用して粒子の加速に応じて高周波加速電場の周波数を上げていくと同時に、式(2)で r が一定となるように偏向磁場 B を上げていくようにした加速器がシンクロトロンである。入射用線形加速器から低エネルギーの粒子を入射し、これを加速電場の周波数と電磁石の磁場を上げながら加速し、所定のエネルギーに達したら出射するという動作を繰り返すので、サイクロトロンのように連続的（CW）に粒子ビームを取り出すことはできない。図 3-3 に概念を示したように、偏向磁場は、小型の偏向電磁石を軌道上に並べることによって発生する。偏向電磁石の間の部分では荷電粒子は直線的に進むため、軌道の形状は完全な円にはならず、変わったところでは、レーストラック形状をしたものもある。後述するように、荷電粒子のビームを安定に周回させるためにはビームを横方向（ビームに直交する方向）にも集束させる必要があるが、初期のシンクロトロンはサイクロトロンと同様に集束が弱くビームの拡がりが大きく、広がったビームを覆うように偏向磁場を発生する必要があった。このため、サイクロトロンほどではないにしても、偏向電磁石が大きくなるという欠点があった。これに対して、現在のシンクロトロンでは、偏向電磁石の間の直線部にビームを集束させる機能を持った 4 極電磁石を置くことによってビームを強く集束し、ビーム径を大幅に小さくし、偏向電磁石の格段の小型化を実現している。この強集束の原理については、のちに詳しく説明する。

CERN の LHC をはじめ、現在の高エネルギーの物理学研究用円形加速器のほとんどが強集束のシ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

シンクロトロンである。また、重粒子線がん治療装置に用いられる円形加速器としても強集束のシンクロトロンが主流である。なお、今日ではシンクロトロンといえば強集束のものを指すので、いちいち、強集束シンクロトロンと呼ぶことはまれである。

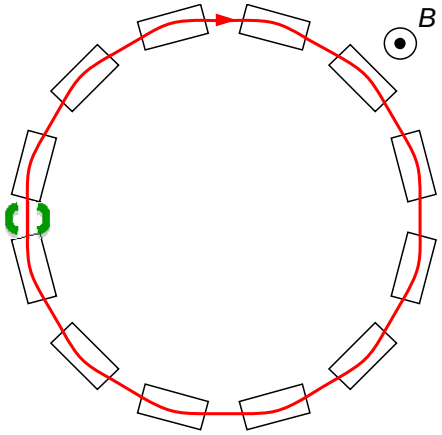


図 3-3　シンクロトロン（□：偏向電磁石、（ ）：加速空胴）

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.

超電導 Web21

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

読者の広場

Q&A

Q：「超電導はスマホに使えないのでしょうか？（工学院大学の広告より）」

超電導体を使って演算を行う単一磁束量子（SFQ）回路のクロック速度・消費電力積は、最先端 CMOS 回路より 10 万倍優れています。つまり、同じ処理を行うための消費電力が 10 万分の一で済むのです。一方、SFQ 回路を動作させるには零下 269 度の極低温環境が必要です。もし将来スマホの中で零下 269 度を長時間保持できるような驚異的な蓄冷剤が開発されたとしたら、現在 1 日しか持たないスマホのバッテリーが 100 年以上持つことになるかもしれません。

現実的な話では、スマホなどの携帯電話の基地局には超電導マイクロ波フィルタが既に用いられています。マイクロ波とは携帯電話の通信に使われている周波数が数百 MHz から数十 GHz の電磁波のことです。マイクロ波通信では、必要な周波数帯だけを選択するフィルタが必要です。超電導体は通常の金属と比べてマイクロ波帯での表面抵抗が 2 桁小さいため、マイクロ波の損失が小さくかつ周波数選択性が高いフィルタを作ることができます。

一般に携帯電話基地局で使用されている誘電体フィルタと超電導フィルタのマイクロ波透過特性を図 1 に示します。超電導フィルタは、誘電体フィルタに比べて周波数透過特性が極めてシャープであることがわかります。また、フィルタの作製はそう難しくなく、高温超電導体で容易に作ることができ、SFQ 回路と比べて冷却が格段に容易になります。

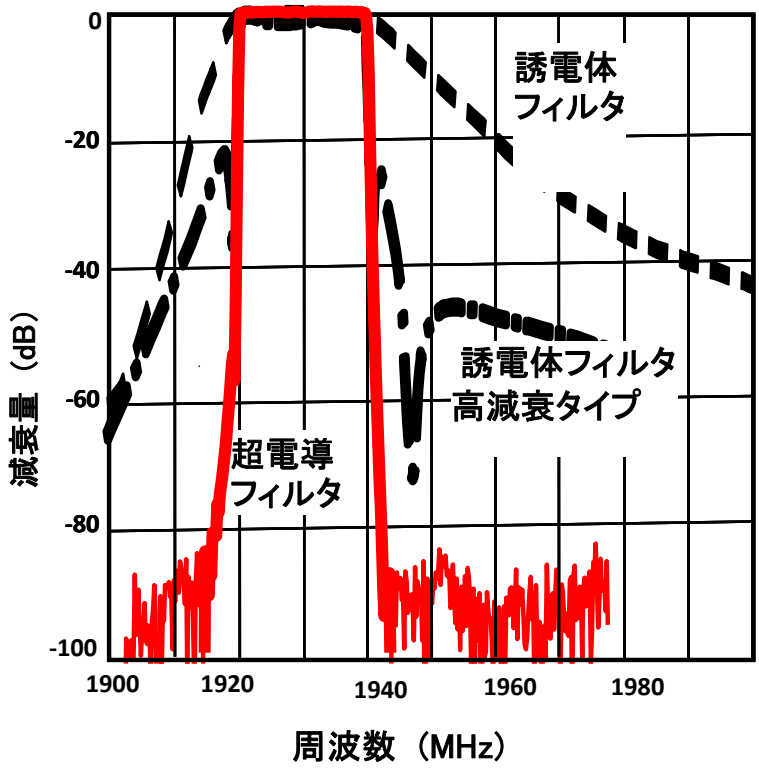


図 1 超電導フィルタと誘電体フィルタのマイクロ波透過特性

© ISTEC 2013 All rights reserved.

アメリカと中国では、超電導フィルタを用いた携帯電話基地局が実際に運用されています。これらの基地局を使っているユーザは、知らないうちに超電導体のクーパーペアを介して通信を行っていることになります。アメリカで超電導フィルタが使用されている理由は、複数の携帯電話会社の周波数帯が複雑に入り組んでおり、隣接する他社の周波数帯との混信を避けつつ、自社の周波数帯をできるだけ有効に利用するためにシャープな周波数特性を持つフィルタが必要なためです。中国では、低損失の超電導フィルタを用いて一台の基地局がカバーできる領域を広げることにより、広大な面積をより少ない基地局でカバーしようとしています。

日本ではまだ超電導フィルタを内蔵した携帯電話基地局は使われていませんが、スマホの普及によりマイクロ波周波数帯が今以上に混んでくれば、導入される可能性は十分にあると考えられます。

回答者：(独)産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門　上級主任研究員　日高睦夫　様

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2013 All rights reserved.