
掲載内容（サマリー）：

特集：核融合炉と超電導

- 国際熱核融合実験炉（ITER）用超電導コイルに使用される超電導材料とその要求性能
- 発電実証炉のための超電導材料
- 大型ヘリカル装置（LHD）と超電導技術
- 核融合エネルギーの利用実現の展望

- 超電導関連 8－9 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（6/21－7/20）
- 超電導速報－世界の動き（2004 年 6 月）
- 標準化活動－第 9 回 IEC/TC90 超電導標準化国際会議迫る－
- 特許情報
- 応用物理学会超伝導分科会研究会より
- 隔月連載記事－ITER 超電導コイル開発への道のり（その 4）
- 読者の広場(Q&A)－「核融合炉」はなぜ「地上の太陽」と呼ばれるのでしょうか？

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

〈発行者〉

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

〒105-0004 東京都港区新橋 5-34-3 栄進開発ビル 6F

Tel (03) 3431-4002 Fax(03) 3431-4044

超電導 Web21 トップページ：<http://www.istec.or.jp/Web21/index-J.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。

特集：核融合炉と超電導

「国際熱核融合実験炉 (ITER) 用超電導コイルに使用される超電導材料とその要求性能」

日本原子力研究所

核融合工学部

超電導磁石研究室長 奥野 清

国際熱核融合実験炉(ITER)計画は、日本、欧州連合(EU)、ロシア、米国の 4 極による国際協力として 1988 年に概念設計活動が開始され、1992 年から 9 年間に渡る工学設計活動を経て 2001 年に最終設計報告書がまとめられた。現在は中国、韓国を加えた 6 極で 2010 年代半ばの完成を目指し、建設地の選定が行われている。

ITER 超電導コイルは、図に示す様にトロイダル磁場(TF)コイル、中心ソレノイド(CS)、ポロイダル磁場(PF)コイルの 3 種類があり、これらのコイルには、直径 0.8mm の超電導素線を約 1,000 本束ねた撚り線を金属管に封入した強制冷却型導体が使用される。TF コイルと CS は 12～13T の磁場で運転されるため超電導材料として Nb_3Sn が使用され、PF コイルは 6T 以下の磁場であるため NbTi が用いられる。

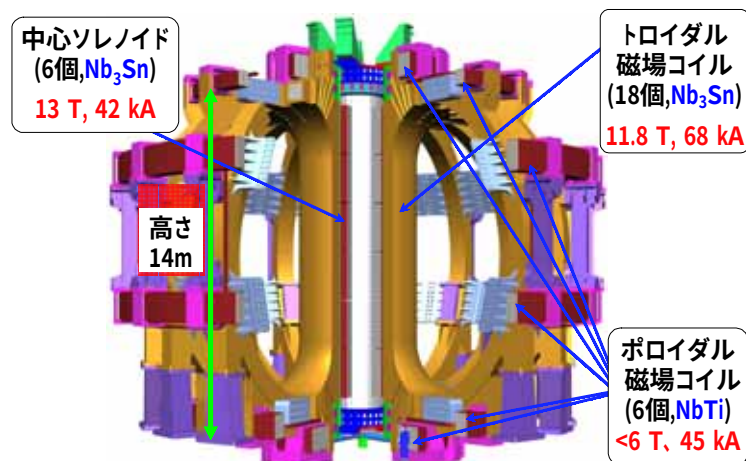


図 国際熱核融合炉(ITER)の超電導コイル

工学設計活動では、ITER 実機環境の高磁場 (13T)、大電流 (46kA) で運転される CS モデル・コイルを開発した。本開発では、高い電流密度と低いヒステリシス損失を有する高性能 Nb_3Sn 素線を開発することが重要課題の一つであった。 Nb_3Sn 線材の代表的製法として、ブロンズ法と内部拡散法がある。ヒステリシス損失が元々小さいブロンズ法では、臨界電流密度を向上させるためブロンズ中のスズ濃度を上げる必要があり、硬いブロンズ(14%スズ濃度)に対応できる線材製造技術を開発した。現在では 15%～16%の高スズ濃度ブロンズが開発され、さらなる高電流密度化が可能となった。一方、高電流密度化が比較的容易な内部拡散法では、ヒステリシス損失の低減が課題であったが、フィラメント間ブリッジングを防止して損失を低減する手法を確立した。これらにより、高電流密度と低ヒステリシス損失を同時に実現する高性能 Nb_3Sn 素線の開発に成功し量産技術を確立した。

一方、CS モデル・コイルを試験し詳細に評価することで、設計手法や設計精度が向上した。その成果として ITER 実機における Nb_3Sn 素線の要求性能として、12T、4.2K での臨界電流密度が 700 A/mm^2 以上(ブロンズ法)、 800 A/mm^2 以上(内部拡散法)、ヒステリシス損失の上限 1000 mJ/cm^3 ($\pm 3\text{T}$) が示された。これらは、モデル・コイルで開発した技術の外挿で十分達成可能である。なお、ITER に必要な Nb_3Sn 線材の重量は約 500 トン、NbTi 線材は約 250 トンである。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：核融合炉と超電導 「発電実証炉のための超電導材料」

国際熱核融合実験炉（ITER）の建設地の決定が遅れに遅れていることは周知の通りであるが、ITER が商用核融合炉開発の第一歩であることは間違いない。ITER の使命が「核融合反応と炉工学の実証」にあるのに対して、「発電実証炉」は、文字通り「発電を実証する」ことにある。その後「商用発電」に向けた「核融合発電プラント」の建設が続くことになる。

核融合炉開発も、他の装置開発と同様、原理実証だけではなく発電コストが市場競争力を有するか否かが強く問われている。核融合炉建設費の約 1/3 が超電導関連機器で占められるといわれており、図 1 に示すようにプラズマ閉じ込めのための磁場強度が発電コストに大きく影響することが知られている。

図 1 に見られるように、発電コストは磁場強度とプラズマの β 値に関係する。ITER における発生磁場（マグネットを構成する線材に加わる最大磁場）は 13 テスラ(T)で、この磁場強度では発電原価の点で既存の原子力発電との競争は困難とされている。「発電実証炉」における超電導マグネットでは、現在 2 つのオプションが考えられている。一つは発生磁場 16T で、これには Nb_3Al の超電導線材の使用が可能であるとされている。この磁場でコスト競争力をもつためにはプラズマ物理の一層の進歩、即ち高 β 化* が要求される。もう一つのオプションは 20T 程度の磁場を発生させることで、これには高温超電導線材、とりわけ Y 系の線材が最有力候補となる。この線材を用いるメリットは現状の β 値で高い核融合出力が得られることにある。従って商用炉の実現に繋げるためには、 β 値を上げるか磁場強度を 20T 程度にするかの選択が迫られる。Y 系の高温超電導長尺線材が開発

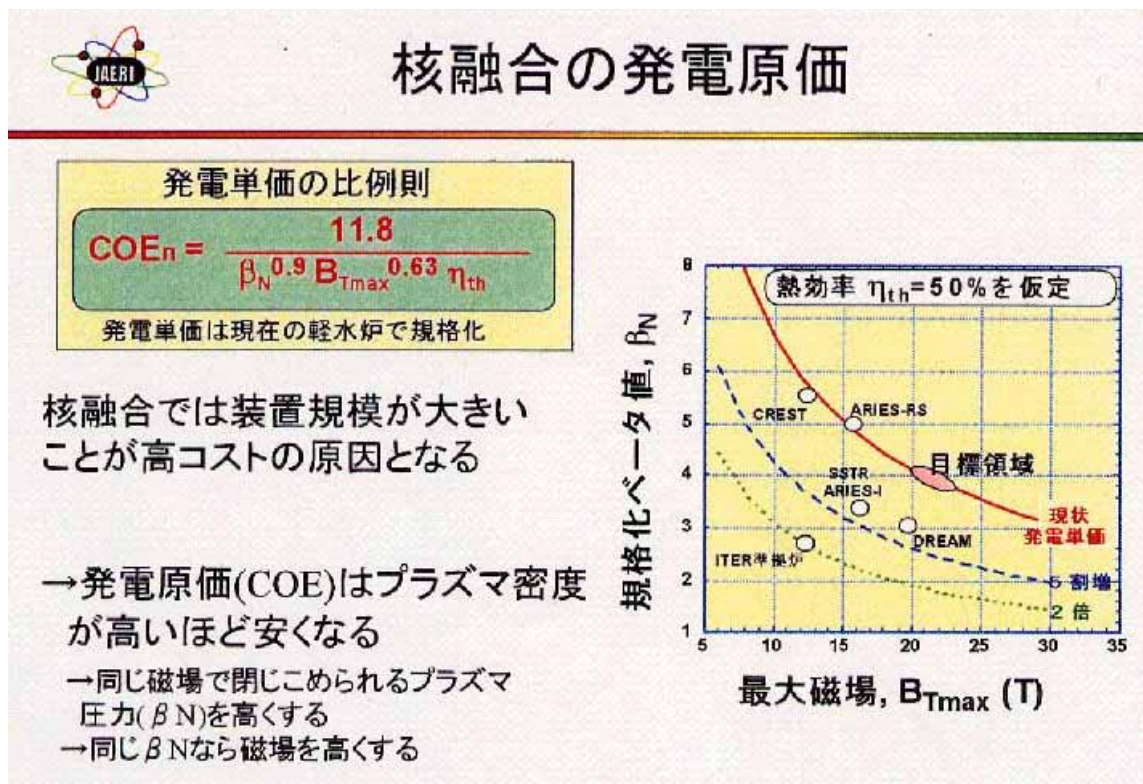


図 1 核融合炉の発電単価の磁場とベータ値との関係（出展 日本原子力研究所）

されれば、図 2 に示すように、運転温度を適切に選べば 20T 以上の磁場発生は原理的には可能である。線材としてのポテンシャルはある。

残念ながら、現在 Y 系の線材は世界的にみても 100m 前後の長さのものしかできていないが、核融合炉開発のような巨大プロジェクトが線材開発の牽引力になり得ることは磁気浮上鉄道用マグネットにおける NbTi 線材の開発（超電導線材断面と銅のそれとの比が 1:1）の例を見ても明らかである。発生磁場が高くなればマグネットに加わる電磁力は大きくなり、構造材料の開発も含めたマグネット製造技術にも格段の困難を伴うことが予想されるが、それら乗り越えて開発を成功に繋げる努力が必要である。「発電実証炉」は 2030 年頃に運転開始と考えられている。これから約 10 年程度の R&D を経て本格設計が始められると考えられることから、この間に Y 系線材の R&D を進め、「発電実証炉」や「商用発電炉」への適用の可否を見極めることが必要と考えられる。さらにここで開発される線材製造技術は一般産業用超電導機器にも適用できるので、エネルギー問題解決と同時に一般産業への超電導機器の適用・普及も促進されることが期待される。

Comparison of J_c -B-T properties: YBCO, (Nb,Ti)₃Sn

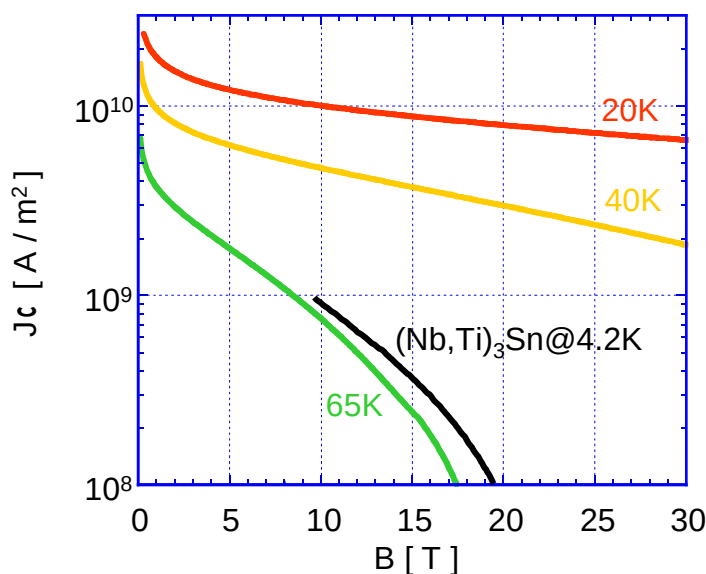


図 2 YBCO の磁場と臨界電流密度との関係((NbTi)₃Sn 線材との比較)
(出展 九州大学 木須氏)

* 高 β 値化

β 値とは、トカマク型など磁場閉じ込めに用いる核融合炉の効率の指標である。

β 値は、プラズマ粒子密度、プラズマ温度および印加磁場によって決まる。したがって、核融合炉の効率を上げるためには、強い磁場中で高い β 値の動作が重要である。

(SRL/ISTEC 特別研究員 堀上 徹)

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：核融合炉と超電導 「大型ヘリカル装置（LHD）と超電導技術」

核融合科学研究所
大型ヘリカル研究部
炉システム・応用技術研究系
研究主幹 三戸利行

大型ヘリカル装置(LHD)は、全ての磁場閉じ込めコイルを超電導化した世界初のヘリカル型プラズマ実験装置であり、ヘリオトロン磁場配位による無電流・定常プラズマの閉じ込めを可能としている。LHD の特徴である超電導コイルシステムは、2 本のヘリカルコイルと 3 対のポロイダルコイルで構成される。プラズマ中心磁場は 3 T、コイルの蓄積エネルギーが 0.9 GJ の世界最大級の大型超電導システムである。核融合科学研究所 (NIFS) では、1991 年度から

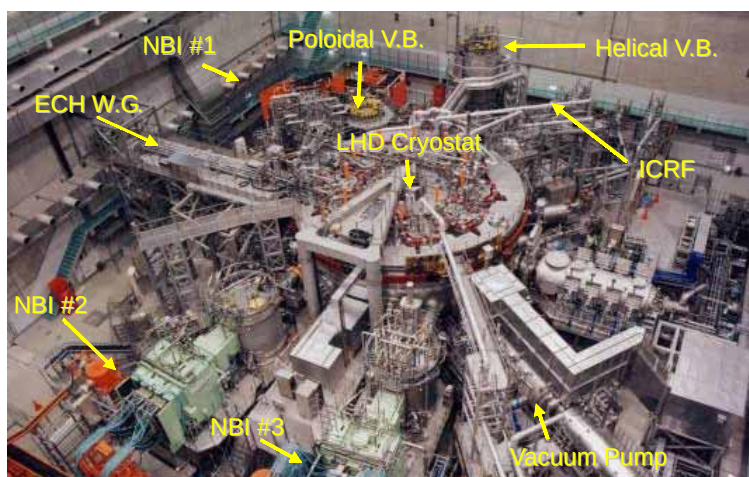


図 1 LHD 実験棟本体室内部

の 8 年計画で LHD の装置建設を完了し、1998 年 3 月からプラズマ実験を開始した。図 1 に LHD 実験棟本体室内の配置を示す。中心に設置された LHD クライオスタットを 3 種類のプラズマ加熱装置 (NBI, ECH, ICRF)、低温システムから各超電導コイルへの寒冷を分配制御するバルブボックス (Helical V. B., Poloidal V. B.) 等が取り囲んで設置されている。

クライオスタットの内部構造を図 2 に示す。ヘリカルコイルは大半径 3.9 m、小半径が 0.975 m で、大半径方向を 1 周する間に小半径方向を 5 周する。2 本のヘリカルコイル (H1, H2) で構成される。複雑な 3 次元形状の巻線をプラズマ実験から要請される誤差 ± 2 mm 以下の高い位置精度で行うため、13 軸制御の専用巻線機を用いて 1995 年 1 月から 1996 年 5 月までの 1 年半に渡って昼夜連続の巻線作業を実施して完成した。

3 種類のポロイダルコイルは、内側から内側垂直磁場 (IV) コイル、内側形状磁場 (IS) コイル、外側垂直磁場 (OV) コイルと呼ばれ、それぞれ上下 1 対のコイルで構成される。最も大きな OV コイルは中心直径が 11.1 m に達し、現存する世界最大級の強制冷却型超電導コイルである。

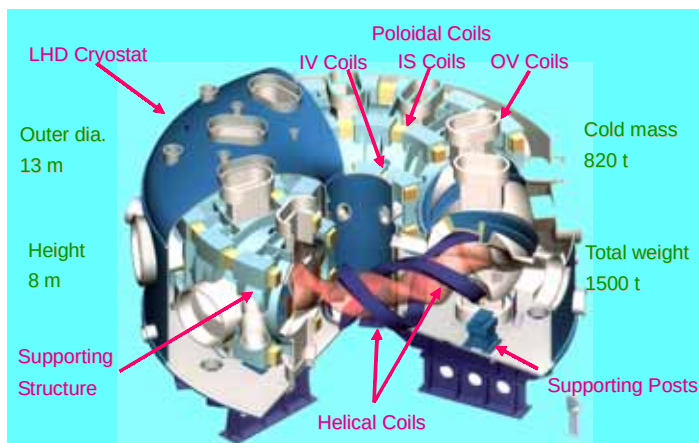


図 2 LHD クライオスタット内部

LHD では、電源から超電導コイル

に電流を供給する送電線に超電導バスラインを開発し使用している。最大定格電流は 31.3kA、総延長は 497m に達し、世界最大規模の直流超電導送電線を実現している。

LHD 超電導・低温システムの運転履歴を図 3 に示す。2004 年春までの 6 年間に 7 回の安定な長期連続運転を実施して、高性能なプラズマ実験を可能にしている。1 回の運転は、低温システムの精製運転、1 ヶ月弱の予冷運転、約 5 ヶ月の定常運転、1 ヶ月弱の加温運転で構成され、年間の 2/3 以上の昼夜連続運転を実施している。この間、安定な連続運転に支障を来すようなシステム故障や超電導コイルの経年変化による特性劣化等は観測されておらず、核融合用大型超電導・低温システムの高い信頼性と安定性を実証し続けている。

- 1998年2月からの6年間に7回の長期連続運転を実施
- 超電導状態を維持した定常運転の時間は、21,887時間
- LHD超電導低温システムの総運転時間は、31,963時間
- コイル励磁回数：804回
プラズマショット数：48,721回

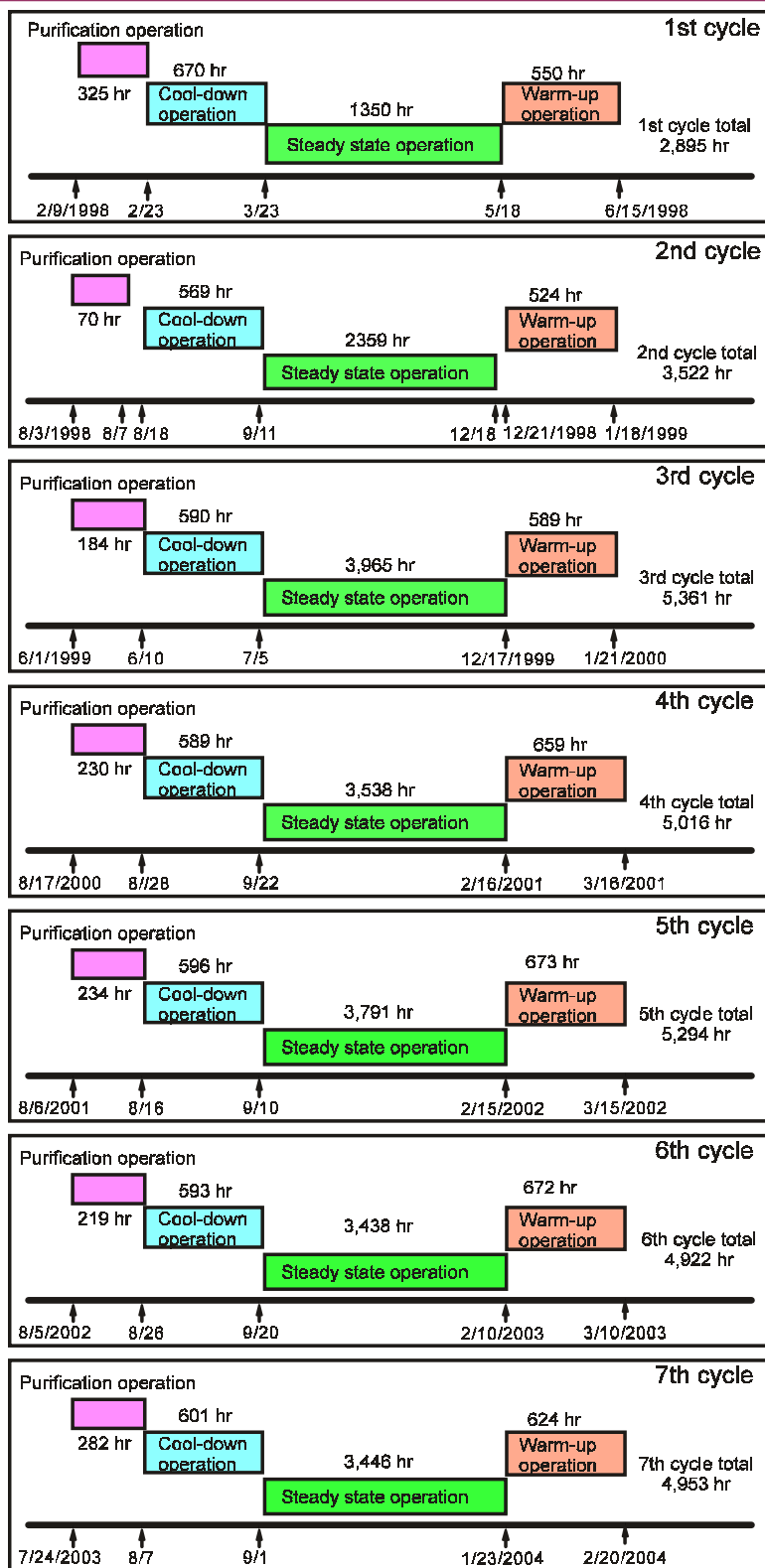


図 3 LHD 超電導・低温システムの運転経過

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：核融合炉と超電導 「核融合エネルギーの利用実現の展望」

株式会社 三菱総合研究所
エネルギー研究本部 エネルギー政策研究部
部長 諸住 哲

地球環境問題においては、化石エネルギーの消費に伴い排出される二酸化炭素による温室効果により、地球規模での温暖化が起こっていることはほぼ確実と考えられており、この二酸化炭素の放出量を低減することが地球環境の保全のためには不可欠である。従って、化石エネルギーの消費を抑制し、二酸化炭素を排出しないエネルギー源に転換することが、現在のエネルギー問題の焦点となっている。核融合については二酸化炭素を放出しないエネルギー源として注目されているほか、燃料資源である重水素とリチウム金属は、海水中には無尽蔵と云って良い量が含まれており、地域に偏在しないため、資源を巡る問題でも利点をもっているため、核融合は究極のエネルギー源として注目されてきた。

人類は、既に、水素爆弾の形で地上で核融合を実現している。しかし、水素爆弾で核融合を起こせる時間は瞬間的であり、このような方法ではエネルギーを取り出し利用するのは極めて難しい。核融合のエネルギーを利用するためには、核融合反応を発生・維持し、制御することで、定常的に熱を取り出すことが必要である。このため、これら物質をプラズマ状態にして封じ込めて、反応を制御することが核融合をエネルギーとして利用する上で重要な技術となる。プラズマ状態を封じ込める強磁場を出すために強力なコイルが必要となるが、磁場閉じ込めによる核融合にはトカマク型やヘリカル型などのいくつかの方式がある。核融合による発電が成立するためには、まずプラズマ中心温度とプラズマ封じ込め密度と閉じ込め特性時間（保温特性）の積で決まる臨界プラズマ条件をクリアし、さらに次の段階として燃焼プラズマの達成と長時間燃焼を実現することが必要である。

トカマク型の核融合実験設備としては原研那珂研究所に昭和 60 年に設置された JT-60 がある。

現時点では日本の JT-60 などの、世界の三大トカマク炉において、臨界プラズマ条件に到達した段階になっている。JT-60 に続くプロジェクトとして、国際熱核融合実験炉 ITER がある。ITER は、本格的に燃焼プラズマを実現する装置であり、核融合により 50 万 kW の継続的なエネルギー発生を実証するもので、燃焼プラズマの達成と長時間燃焼を実現するため、新しい実験炉が必要になり、国際共同プロジェクトとしての ITER が必要になってきたわけである。ITER が成功した後は、その次のステップはもう核融合による発電を実証する原型炉と考えられている。

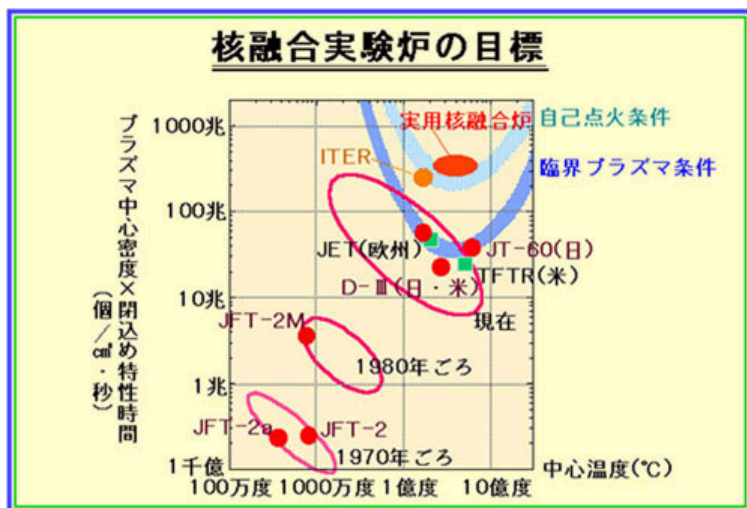


図 実用核融合炉の開発における ITER の位置づけ
出典：日本原子力研究所 那珂研究所／国際熱核融合実験炉
ITER ホームページ

超電導関連 8-9 月の催し物案内

8/6-7

第 2 回材料研究会／東北・北海道支部合同研究会「高温超伝導薄膜・バルクの合成と物性評価技術」

場所：弘前大学理工学部（弘前市）

主催：低温工学協会／東北・北海道支部

問合せ：Tel&Fax: 0172-39-3636、

e-mail: knaka@si.hirosaki-u.ac.jp（中島健介）

8/16-22

韓国で 7T 超伝導マグネットを巻こう

場所：KBSI(韓国基礎科学支援研究院)（大田広域市）

主催：低温工学協会

問合せ：Tel: 029-863-5453, Fax: 029-863-5470

e-mail: inquire@akahoshi.nims.go.jp

8/25-27

第 9 回超伝導・低温若手セミナー「今、学ぶ人のための超伝導講座 3-極低温材料評価と超伝導の先端・基礎・応用-」

場所：繋温泉 清温荘（盛岡市）

主催：低温工学協会／東北・北海道支部

問合せ：代表 Tel&Fax: 019-621-6412、

e-mail: katagiri@iwate-u.ac.jp（片桐一宗）

8/30-9/10

SCENET, the European Network for Superconductivity 5th SCENET SCHOOL ON SUPERCONDUCTING MATERIALS AND APPLICATIONS

場所：Hotel Monterrey, Salamanca, Spain

主催：SCENET

問合せ：

SCENET, IMEM-CNR, Secretariat (I. Rinaldi);

Tel: +39-0521-269284、

Fax: +39-0521-254352

8/31

平成 16 年度電気学会基礎・材料・共通部門大会テーマ付きセッション「高温超電導材料」

場所：仙台国際センター

主催：(社)電気学会 基礎・材料・共通部門 電気学会東北支部

問合せ：Web: <http://www.iee.or.jp>、

<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/Abumon>

9/1-3

Meeting of TC90: SUPERCONDUCTIVITY

場所：ARGONNE NATIONAL LABORATORY

主催：US NATIONAL COMMITTEE/IEC

American National Standards Institute

Tel: +1-630-252-2000

Web: <http://www.anl.gov>

9/1-4

2004 年秋季第 5 回応用物理学会講演会 効用物理学一般 磁場応用

場所：東北学院大学 泉キャンパス（仙台市）

主催：応用物理学会

問合せ：Tel: 029-863-5619、Fax: 029-863-5571

e-mail: HIROTA.Noriyuki@nims.go.jp

9/2-3

第 16 回低温工学サマーセミナー

場所：KKR 片瀬ニュー向洋（藤沢市）

主催：低温工学協会

問合せ：Tel: 03-3818-4539、Fax: 03-3818-4573

e-mail: ss-office@m.aist.go.jp

9/8

2004 年度 超電導応用研究会・冷凍部会共催講演会「超電導ケーブル」

場所：電力中央研究所 横須賀地区 別館 3 階 大会議室

主催：低温工学協会

問合せ：Tel: 046-856-2121、Fax: 046-856-3540

e-mail: tori@criepi.denken.or.jp

（編集局）

[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (6/21-7/20)

- 高圧力プラズマの維持 世界最長、24 秒間達成 原研 6/22 電気新聞
- ITER 次官級会合 誘致結論先送り 日欧こう着続く 6/22 電気新聞
- JR 東海 新幹線の競争力を向上 6/24 日刊工業新聞
- 脳脊髄液減少症 疑ってみては 患者 10 万人以上の見方 6/29 日本経済新聞 (夕)
- 東芝メディカル 米製陽電子断層撮影装置を投入 来年度シェア 30%目標 7/1 日刊工業新聞
- 抗うつ薬の適切用量 陽電子放射断層撮像 PET で治験データ 放医研 7/1 日刊工業新聞
- 高エネ研と岡山大 関節軟骨を高精度撮影 SPring-8 利用 7/1 日刊工業新聞
- 次世代機能性材料の開発 セラ層状化合物活用へ 熊本大 結合度合い異なる特性に着目 7/2 日刊工業新聞
- 国内最大のヘリウム冷凍機模擬装置 極低温まで動作解析 核融合科研と日本酸素 7/2 日刊工業新聞
- 九州大学・円福敬二教授 磁氣的免疫反応装置 微量たんぱく質検出 がん早期発見に威力 7/2 日刊工業新聞
- がん検査最新装置「PET」医療機関に優れた味方 7/2 日経産業新聞
- 記者の目 国際熱核融合実験炉「日本誘致にこだわるな 巨額負担に国民不在 7/6 毎日新聞
- 大深度地下 リニア実験 市街地への影響調査 JR 東海着手 7/7 朝日新聞
- MRI で温熱治療 がん組織を“狙い撃ち”神奈川県立がんセンターなどが新技術 7/7 日刊工業新聞
- 超電導の仕組みに共通性 金属とセラミックス 東大研究グループが解明 7/8 毎日新聞、日経産業新聞、日刊工業新聞
- 海外ハイテクラッシュ 超電導材、太さ毛髪の 2 割 7/8 日経産業新聞
- 高温超電導技術 日本勢、製品化で先行 送電線、都市で普及期待 リニアカーのコスト圧縮 7/9 日本経済新聞
- SPring-8 の挑戦 II 1 マイクロメートルの周長変動観測 電磁石の配列で可能に 7/9 日刊工業新聞
- SMES の成果報告 超電導エネルギー貯蔵研究会 7/14 電気新聞
- 超電導式磁気共鳴画像診断装置 東芝 第 34 回機械工業デザイン賞 経済産業大臣賞 13 製品に輝く栄誉 7/15 日刊工業新聞
- 国際熱核融合実験炉誘致 EU と対立 交渉再開メド立たず 負担限界 日本に断念論も 7/19 日本経済新聞



[超電導 Web21 トップページ](#)

【ビジネストレンド】超電導速報 ― 世界の動き (2004 年 6 月)

電力

American Superconductor (2004 年 6 月 9 日)

American Superconductor Corporation 副社長兼最高技術責任者 Alex Malozemoff は、Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 評議会により 2004-2005 年の超電導に関する Distinguished Lecturer に任命された。Malozemoff 氏は、2004 年 6 月から 2005 年 9 月まで IEEE の特別大使として大学、企業、電子機器ユーザー等全世界の幅広い聴衆に HTS 線材の現状及び将来動向について講演を行う。IEEE により Distinguished Lecturer に任命されたのは Malozemoff 氏が 3 人目である。Malozemoff 氏は、電力ケーブル、超小型高効率船舶用モーター、電力グリッド安定化システムといった応用製品の実用開発そして商業化につながる磁性材料、超電導材料の物理的特性に関する先駆的な研究により世界的に有名である。超電導評議会会長 Moises Levy 教授は、「超電導は IEEE の興味ある電気、電子のような応用分野でますます重要になってきている。専門分野におけるその才能や幅広い知識を持っている Malozemoff 氏は、広範な IEEE の中であって超電導分野が成長分野であるとの認識を高めることができる素晴らしい大使として活躍していただけるものと思っている。」と語った。Malozemoff 氏の講演の要約は <http://www.ewh.ieee.org/tc/csc/DistinguishedAlex.html> で入手できる。

(出典)

“American Superconductor CTO Named IEEE Distinguished Lecturer”

American Superconductor press release (June 9, 2004)

<http://www.amsuper.com/newsEvents/news.html>

American Superconductor (2004 年 6 月 21 日)

American Superconductor Corporation (AMSC) は、Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) と電子、電気兵器システム等先端軍事応用に向けた超高性能次世代 HTS 線材の開発に関する契約を締結した。この超高性能次世代 HTS 線材は、同社のナノ技術により生み出された次世代 HTS 線材を使った材料科学技術を応用することにより作りだされるものである。同契約は、3 年間、310 万ドルの規模である。同社社長 Greg Yurek は、「この新しい契約では、我々の次世代 HTS 線材技術を基礎に線材性能を格段に向上させる低価格製造方法を開発することに主眼を置くことになるだろう。本契約の目標は特別な軍事用途向けのニーズを満たすことであるが、その波及効果として商用次世代線材の改善にもつながるものと考えている。」と語った。本プロジェクトは Naval Research Laboratory (NRL)、Oak Ridge National Laboratory (ORNL)、Los Alamos National Laboratory (LANL) との協力の下に進められる。なお、これら協力機関と DARPA との契約は別途締結の予定。AMSC は、高効率冷凍システムの開発を目指す DARPA の Superconducting Hybrid Power プログラムにも参加しており、そこからも DARPA の資金供与を受けている。

(出典)

“American Superconductor Announces DARPA Contract to Develop Ultra-High Performance Second Generation HTS Wire for Military Applications”

American Superconductor press release (June 21, 2004)

<http://www.amsuper.com/newsEvents/news.html>

Intermagetics General Corporation (2004 年 6 月 28 日)

ニューヨーク州オルバニーの2つのNiagara Mohawkの変電所を結ぶ350m—HTSケーブルの起工式がニューヨーク州知事George E. Pataki及び各界の著名人の出席のもと執り行われた。住友電工、BOC Group、Niagara Mohawk、National Grid Companyが、プロジェクト・リーダーであるSuperPowerとともに、従前の銅ケーブルと比べて高効率、高信頼性、高い安全性を持つHTS電力ケーブルのデモンストレーションを目指すことになる。New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA) 及び連邦エネルギー省はともにこのプロジェクトに資金を提供する。Pataki州知事は、「ニューヨーク州は、クリーンな空気、エネルギー・セキュリティの改善、そして継続可能な経済発展を可能とする先端エネルギー技術の推進という面で国内のリーダー的存在である。環境を保護しつつ、信頼性を高め、電力需要家に安価な電力を供給するということを可能にするSuperPowerのHTSケーブルのような革新技术を支援できることを誇りに思う。」と述べた。SuperPower社長Philip J. Pellegrinoは、「超電導ケーブルは従来のケーブルに比べて3～5倍の電力を運ぶことができるのに加え、より効率的で（7～10%の電力伝送に伴う損失を軽減、ひいては同じ程度のグリーンガスを低減）、低い電圧で送電可能（昇圧、降圧トランスが不要）、冷却には不燃ガスの使用（非オイル）ということで、一般にずっと受け入れやすくなっている。」と付け加えた。

（出典）

“Intermagetics' Superpower Subsidiary Begins Construction Phase of HTS Cable Project for New York Utility”

Intermagetics General Corporation press release (June 28, 2004)

<http://ir.thomsonfn.com/InvestorRelations/PubNewsStory.aspx?partner=10215&storyId=116431>

通信

Superconductor Technologies Inc. (2004 年 6 月 15 日)

Superconductor Technologies Inc. (STI)は、Sunnyvale工場統合、人員削減、その他のコスト削減対策を含むコスト削減プログラムの実施に着手した。これによりSTI社のブレイクイーブン点を引き下げることができるものと考えている。Sunnyvale工場の研究開発活動は、Santa Barbara工場と統合することになっている。人員は約20%、50人削減の予定である。さらに、反応性共蒸着プロセス(RCE)として知られる低コストウェーファー処理プロセスの導入を考えている。現金及び非現金リストラ費用は370万ドルと見込まれ、その大部分は第2四半期に発生する。以上のようなリストラにより四半期当たり170万ドルの支出削減になる。

また、STI社は、一般株式2000万株の新規発行保証人が追加300万株の購入オプションを行使したと発表した。これにより株式購入総額としては1840万ドル、内STIには約1680万ドルの資金が入ることになる。この新規株式公開は、Needham & Company, Inc.が主幹事をMerriman Curhan Ford & Co.が副幹事を務めた。

（出典）

“Superconductor Technologies Announces Cost Reduction Measures”

“Superconductor Technologies Underwriters Exercise Option for 3,000,000 Additional Shares of Common Stock”

Superconductor Technologies Inc. press releases (June 15, 2004)

<http://ir.thomsonfn.com/InvestorRelations/PubNewsStory.aspx?partner=5951&storyId=115765>

<http://ir.thomsonfn.com/InvestorRelations/PubNewsStory.aspx?partner=5951&storyId=115764>

基礎

U.S. Department of Energy and Brookhaven National Laboratory (2004 年 6 月 2 日)

米国エネルギー省 Brookhaven National Laboratory は、英国の Rutherford Appleton Laboratory、日本の東北大学と共同で、従来はある種の実験事実と矛盾すると考えられてきた高温超電導メカニズムを支持する証拠を発見した。非超電導状態にある LBCO(1-Ba;8-Cu) の静的な状態のものの磁気的励起を測定していた時、この状態ではホールにより分かたれた狭い反強磁性領域、即ちストライプパターンとして知られる状態が見られるが、磁気励起のパターンが YBCO で見られる状態と非常に酷似して見えた。ある研究者達は、ストライプを持つ物質にはこのような励起パターンはあり得ないとしていた。ストライプ状態の LBCO1:8 が YBCO と類似の磁気的励起を持つということは、材料が超電導状態であっても（即ち Cu と Ba の比が 8:1 以外の状態であっても）、そこにはストライプが存在するのではないかということを示唆している。この研究を行った研究者達は、この結果はストライプ・コリレーションは高温超電導にとって本質的なものではないかという考え方を支持するものであると考えている。本研究は Nature 2004 年 6 月 3 日号に掲載される。

(出典)

"Fluid 'stripes' may be essential for high-temperature superconductivity"

Brookhaven National Laboratory press release (June 2, 2004)

<http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/2004/bnlpr060204.htm>

U.S. Department of Energy and Ames Laboratory (2004 年 6 月 25 日)

エネルギー省 Ames Laboratory では、 MgB_2 に炭素をドーピングすることにより臨界磁場強度を倍にすることに成功した。 MgB_2 の B の 5% を炭素で置換することにより、臨界磁場強度が 15T から 36T に増加した。一方、この置換により臨界温度は 39K から 35K に低下したものの、それでも臨界磁場の温度依存性は、NbSn（臨界磁場は約 30T が限界）よりも優れている。この結果は有望ではあるが、臨界電流をより増加させるということが課題として残っている。研究者達は TiB_2 を CVD で材料中に均一に分布させることでこの問題を解決しようとしている。研究者達はこの研究により、MRI、研究用強磁場マグネット、加速器用マグネットに現在使用されている超電導材料の低コスト化に寄与したいとしている。

(出典)

"Ames Lab Physicists 'Perturb' Superconductor to New Heights"

Ames Laboratory press release (June 25, 2004)

<http://www.external.ameslab.gov/news/release/2004rel/mgboride.htm>

(ISTEC 国際部長 津田井 昭彦)

[超電導 Web21 トップページ](#)

標準化活動 8 月のトピックス

－第 9 回 IEC/TC90 超電導標準化国際会議迫る－

国際電気標準会議(IEC: INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION)とアメリカ国内委員会(U.S. NATIONAL COMMITTEE)は、来る 2004 年 9 月 1 日から 3 日の 3 日間イリノイ州のアルゴンヌ国立研究所において、第 9 回 IEC/TC90 超電導標準化国際会議(General information concerning the meeting of TC90: SUPERCONDUCTIVITY)を開催する。この会議には、日本から京都大学教授長村光造をはじめ 10 名が派遣される。

会議開催の詳細を次に示す。

会議名：General information concerning the meeting of TC90: SUPERCONDUCTIVITY

場所：ARGONNE NATIONAL LABORATORY

9700 South Cass Avenue, Argonne Illinois, USA

Tel: +1-630-252-2000

Web: <http://www.anl.gov>

主催：U.S. NATIONAL COMMITTEE and INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC)

この会議前半 9 月 1 日から 2 日の 2 日間ワーキンググループ(WG)会議が開催され、つぎの審議及び報告が予定されている。

- WG10：バルク超電導体の捕捉磁束密度試験方法の改訂 CDV 審議
- WG2：NbTi 複合超電導体の直流臨界電流試験方法メンテナンス進捗
- WG3：銀シース Bi 系酸化物超電導体の直流臨界電流試験方法メンテナンス進捗
- WG4：Nb₃Sn 複合超電導体の残留抵抗比試験方法メンテナンス進捗
- WG5：NbTi 複合超電導体の室温引張試験方法メンテナンス進捗
- WG7：Nb₃Sn 複合超電導体の直流臨界電流試験方法メンテナンス進捗
- WG8：超電導体のマイクロ波帯表面抵抗試験方法メンテナンス進捗
- WG9：ピックアップコイル法及び磁力計法による交流損失試験方法メンテナンス日程
- WG11：抵抗法による超電導体の臨界温度試験方法メンテナンス進捗

また、9 月 3 日に開催される本会議ではアメリカ標準技術研究所 NIST の L. Goodrich 議長のもとで、つぎの報告並びに審議がなされる予定である。

- WG9 の審議経過報告
- WG10 の改訂 CDV 審議経過報告
- WG2, WG3, WG4, WG5, WG7, WG8, WG9 及び WG11 関連規格のメンテナンス報告
- TC90 標準化戦略の見直し
- 活動報告（わが国の標準化活動、各国活動、VAMAS 活動）
- 今後の活動計画（製品規格等新規業務提案項目審議）
- 次回第 10 回 IEC/TC90 超電導標準化国際会議開催場所及び日程審議

(ISTEC標準部長 田中靖三)

[超電導 Web21 トップページ](#)

特許情報

◆平成 16 年度第 1 四半期の公開特許

平成 16 年 4 月～6 月に公開された ISTEK 出願の特許をお知らせします。詳しい内容は特許庁のホームページ内の特許電子図書館等の特許データベースをご利用下さい。

1) 特開 2004-111203 「MgB₂系超電導線材の作製方法」：

本発明は、臨界温度 39K の MgB₂ 超電導線材に関するものである。銅等の金属チューブ内に、粉末状の Mg と B に適量の Ti 粉を加えた混合粉を封入し、圧延加工等の細線加工後、不活性ガスの加圧雰囲気中で熱処理を行う。細線加工と熱処理を複数回繰返すことにより、温度 4.2K で臨界電流密度 $2 \times 10^5 / \text{cm}^2$ 以上の MgB₂ 超電導線材が得られる。

2) 特開 2004-149378 「基材上に中間層を介して薄膜を形成する方法」：

本発明は、基材上に中間層を介して超電導薄膜を形成する方法において、良質の超電導薄膜（エピタキシャル薄膜）を形成し得る中間層材料の選択方法を提供するものである。本発明は、基材と中間層との界面 A の界面エネルギー Ea および中間層と薄膜との界面 B の界面エネルギー Eb を算出し、基材上に直接薄膜を形成したときの基材－薄膜界面 C の界面エネルギー Ec を算出し、そして $Ea < Ec$ かつ $Eb < Ec$ の条件を満たす中間層材料を選択することを特徴としている。

3) 特開 2004-149380 「単結晶性薄膜」：

本発明は、基材上の超電導性薄膜として、バルク材と同等以上の特性を有する良質の単結晶性超電導薄膜を提供するものである。本発明では、基材（例えば、BaZrO₃ 基材）上に形成する超電導性薄膜（例えば Sm123）を形成する際に、基材と薄膜とに共通に含まれる原子層（例えば BaO）が基材と薄膜との界面に存在し、両層がそれを共有するようにする。さらに、界面から 100 単位格子領域内の薄膜層が、ずれ角 ±2 度以内でエピタキシャル成長する割合が 50% 以上であることを特徴としている。

4) 特開 2004-161504 「RE-Ba-Cu-O 系超電導材料前駆体と RE-Ba-Cu-O 系超電導材料およびその製造方法」：

本発明は、大型バルク超電導体の製法に関するもので、新たな前駆体構造を採用し、Ag を添加した大型超電導体を作製する簡便な方法を提供する。RE-Ba-Cu-O 系混合物に Ag または Ag 化合物を所定量含有させた A 層上に、Ag または Ag 化合物の含有量を大幅に少なくした B 層を積層し、種結晶を B 層上に配置または埋設した構造の前駆体を準備し、前駆体を加熱して半熔融状態とした後冷却する方法で、種結晶を起点として RE123 超電導相を結晶成長させる。これにより、種結晶と Ag が反応して種結晶の融解温度が低下し溶解することを防止でき、大型バルクの作製が容易になった。

5) 特開 2004-161505 「酸化物超電導厚膜用組成物及び厚膜テープ状酸化物超電導体」：

本発明は、金属有機酸塩堆積法（MOD 法）による Y-Ba-Cu-O 系超電導膜の作製に適した前駆体原料を考案し、高速で均一に成膜した厚膜テープ状酸化物超電導体を提供する。酸化物超電導体の前駆体原料として、炭素数 6 以上のカルボン酸銅塩を含有することを特徴とし、これ以外にトリフルオロ酢酸イットリウムあるいはカルボン酸イットリウム、およびトリフルオロ酢酸バリウム等から選ばれた金属塩との混合物を採用し前駆体膜を形成する。この結果、前駆体膜中の F 元素が削減したことでクラックの発生が抑制され、高速成膜が可能になった。

（SRL/ISTEC 開発研究部長 中里克雄）

[超電導 Web21 トップページ](#)

応用物理学会超伝導分科会研究会より

去る、2004 年 6 月 28 日（月）、東京海洋大学にて、応用物理学会超伝導分科会主催の研究会『高温超伝導材料の高度化と強磁場応用』が開催されました。本研究会は、強磁場応用を目指した材料開発の基礎、各種材料の開発および応用開発について、その分野をリードされている方々を講師に招き、最近の研究開発動向について討論して頂いたものです。研究会は、第 1 部が高温超電導物質および評価の基礎、第 2 部は各種材料の開発状況について、第 3 部は応用開発動向と全 3 部で構成されました。

まず第 1 部は、東京大学の下山先生が、超電導物質の材料化への期待として、酸化物超電導物質のレビューおよびそれぞれの個性や可能性などについて説明されました。次に、九州工業大学の松下先生から、磁束ピンニング機構と臨界電流特性に関して、現状での理論的な解釈と評価の立場から材料の可能性および改善のポイントについて提言されました。また、九州大学の木須先生からは、高温超電導線材の臨界電流評価技術として、主に低温レーザー顕微鏡を用いた E-J 特性評価の重要性が議論されました。

第 2 部は、高温超電導材料の開発状況について、まず、芝浦工業大学の村上先生から、RE 系バルク材の開発動向として、極微細粒子分散やラメラ構造組織改善による J_c -B の向上、熱伝導および機械的特性改善による捕捉磁場の向上の話題が提供されました。次に、京都大学の松本先生から、低温超電導材料における人工ピン導入の歴史から最新の RE123 線材への RE_2O_3 アイランドや RE 置換による J_c 向上に関する最近の研究動向が話されました。物質・材料研究機構の熊倉氏からは、加圧焼結法による Bi2212 線材の特性向上ならびに MgB_2 線材の高性能化および 100m クラス、マルチコアの試作状況について講演されました。

第 3 部は超電導材料の強磁場応用として 4 件の講演がなされました。まず、JR 東海の寺井氏より、山梨実験線での超電導リニア実験状況、高温超電導コイルのメリットや試作状況の話題が提供されました。早稲田大学の石山先生からは、超電導マグネット応用として、NMR 用、単結晶引き上げ用等種々の応用製品が紹介されました。日立製作所の佐保氏からは、バルク体を用いた磁気分離装置のフィールドテスト結果等の話題が提供され、特に、国際規格の制定により海水の浄化に需要があるとのことでした。最後は、東京海洋大学の和泉先生より、推進用高温超電導モータの開発状況について紹介され、小型、軽量化の点で超電導モーターに十分競争力があるとお話をされました。

本研究会は、超電導関係の研究者以外の方にも興味を持っていただける内容となっており、会場に予備の椅子を沢山設置しなくてはならない程の盛況な会となっていました。

（SRL/ISTEC 材料物性研究部 バルク研究開発室 坂井直道）

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

ITER 超電導コイル開発への道のり（その 4）

日本アドバンスト・テクノロジー株式会社
安藤俊就

4.4 CIC 導体と実証ポロイダル計画

前章（「超電導 Web21」2004 年 6 月号参照）で、定常運転されるトロイダル磁場（TF）コイルの開発を目的とした LCT 計画において、CIC（ケーブル・イン・コンジット）導体で作られたコイル特性があまりよい結果が得られなかったと記したが、パルス運転されるポロイダル磁場（PF）コイルの設計を考えると低交流損失が期待できる CIC 導体は魅力であり、また、LCT 計画後に、CIC 導体についての開発研究も進み、その有効性、信頼性が高められるようになってきた。その有効性を決定的にしたのが実証ポロイダル・コイル（DPC）計画であり、その成果が ITER コイルへと繋がって行く。本章では ITER コイルの実現を可能にした CIC 導体について、最初はその生い立ちについて、つぎに DPC 計画での CIC 導体の成果について記す。

4.4.1 CIC 導体

CIC 導体は MIT の Hoenig により、1974 年に核融合用コイル導体として提案し、開発を進めた。¹³⁾ その構造は図 13 の(a)に示すように超電導線を数十本束ね金属管に封入し、冷媒であるヘリウムガスを金属管内に強制的に流す構造である。すなわち CIC 導体である。核融合用導体はモノリス型導体で設計すると、定格電流が大きくなると単位体積当たりの安定効率が落ち、電流密度が低下する。しかし、CIC 導体は単位体積当たりの安定性効率が一定のため電流密度が導体の大きさに依存しない（但し、安定性以外の設計条件から低下することはある）。CIC 導体の出現は核融合に携わる超電導屋にとっては非常に誇れるアイデアで、他の超電導機器に対しても今日では採用されている非常に有効な導体になっている。初期の大型超電導コイル開発研究では MHD 発電や高エネルギー物理

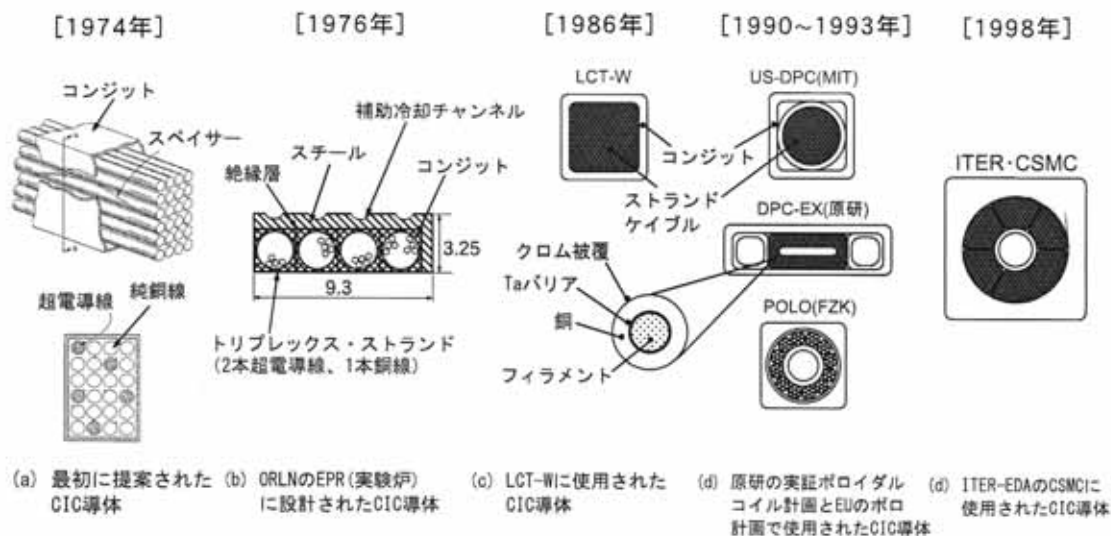


図 13 CIC 導体の開発の進展

での泡箱と加速器を対象とした開発研究から超電導技術は進展していたが、核融合を対象とした開発研究から超電導技術に貢献することが出来るようになってきた。(余談：超電導フィラメントのサイズ決めている超電導線の本質的安全性を最初に解析した Hancox も核融合用超電導コイルの設計屋である)。

この CIC 導体は、直ちに米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) が設計した核融合実験炉 (EPR) の TF コイルに採用された。この FER 用超電導コイルの設計を担当したのが Lue (現在は ORNL で高温超電導送電の開発を行っている) である。彼は MIT に行き Hoenig の下で CIC 導体について勉強した後、ORNL に戻り、Miller、Shen、Dresner らと精力的に CIC 導体について研究を行った。その最も大きな成果の一つが、冷媒をほとんど流さなくても導体は安定であることを実験的に示した (図 14)。¹⁴⁾ EPR では、この導体を採用する上で最も問題視されたのが、導体の安定性の確保である。

熱伝達係数が冷媒の流速の 0.8 乗に比例すると数十 cm/s の流速が必要であることが示された。そのためには大きなポンプが必要となり、そのポンプによる熱負荷が大きくなり設計が成り立つか問題視されていた。しかし、試作サンプルで実験を行うと、数 ms の擾乱に対しては、流速が小さくても安定に通電できることが分かり、CIC 導体の大きな問題は除去された。現在、ITER の TF コイルでは、流速は 10 cm/s 程度で設計されている。

この CIC 導体は核融合用コイルの開発とともに進展しており、それを図 13 に示す。最初の CIC 導体 (図 13(a)) はただ冷却面積を大きく取るための工夫であった。それが EPR の CIC 導体 (図 13(b)) になると、その後 CIC 導体の基本となっている超電導ケーブルの最初の撚り線となるトリプレクス構造が採用されている。しかし、1 ターンが 4 個の導体からなり導体間の不均一電流の発生には対策が未熟になっている。それが LCT-W の CIC 導体 (図 13(c)) になると完全にケーブル部がトランスポート構造になりケーブル内の電流分布は均一になる設計になり、この構造が現在も踏襲されている。しかし、LCT-W コイルは前章でも述べたようにコイルおよび導体の製作が十分でなかったために、CIC 導体の評価は高くなかった。それが原研が行った実証ポロイダル・コイル (DPC) 計画での成果で一気に評価が高まり ITER へと繋がって行く。

4.4.2 実証ポロイダル・コイル計画

原研ではクラスター計画、LCT 計画で TF コイルの開発が順調に成果を上げ、次に PF コイルの開発に本格的に取り組むことになった。それが実証ポロイダルコイル (DPC) 計画である。¹¹⁾ この計画ではそれぞれ内径 1m の上、中、下の 3 個のコイルから構成されるコイルシステム (図 15) で JT-60 のパルス電源を用いてパルス通電試験が行われた。上下コイル (DPC-U) は NbTi 素線からなる CIC 導体で製作された。中心に置かれる中コイルは取り替えることが出来る試験コイルである。原研は Nb₃Sn 素線からなる CIC 導体を用いて DPC-EX を、また、米国の MIT も同様に US-DPC を

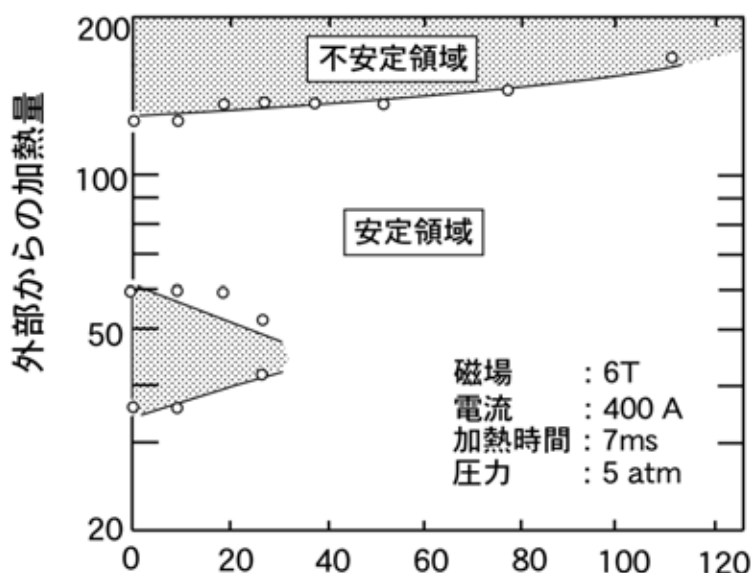


図 14 CIC 導体の安定性と冷媒流速

試験コイルとして製作した。それらの CIC 導体の構造を図 13(d)に示す。その試験結果は DPC-EX、US-DPC 共に 7 T の磁場をパルス運転で達成した。図 16 は DPC-EX のパルス運転時の電流波形である。17 kA・7 T までは 0.5s の立ち上げ、立ち下げで繰り返し実験を行ったが、コイルはクエンチせずに通電できた。¹²⁾ この DPC 計画において、CIC 導体は技術、製造面で次のような大きな進展があった。

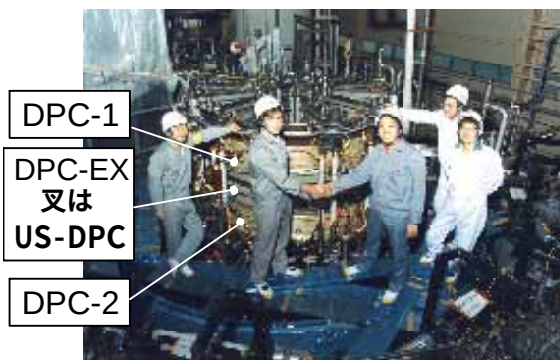


図 15 実証ポロイダルコイル計画のコイルシステム

- (1) Nb₃Sn 素線で、錫の安定化銅への拡散バリアにタンタル、バナジウムを採用することにより、ヒステリシス損失、フィラメント間結合損失の低減。
- (2) Nb₃Sn 素線の表面にクロム被覆により素線間結合損失の低減。
- (3) コンジットにインコロイ 908 の採用により、Nb₃Sn フィラメントに加わる圧縮歪み低減。
- (4) サブ・チャンネルの導入により、圧力損失の低減。

これらの開発は次のステップである ITER-EDA の CIC 導体の設計に引き継がれていく。

また、この DPC 計画と同時期に独国のカールスルーエ原子力研究所(KfK)でも超電導ポロイダル・コイルの開発研究をポロ計画として進めていた。¹⁵⁾ EU ではすでにトカマク型核融合装置であるトールスプラ（仏国）で TF コイルまではモノリス型導体を用いて超電導化することに成功している。しかし、パルス運転する PF コイルは超電導化されていなかった。それで、独国のカールスルーエ原子力研究所(KfK)で超電導 PF コイルを開発して、それをトールスプラの常電導 PF コイルを超電導 PF コイルに取り替える計画で始めた。その開発導体が図 13(d)に示す POLOCIC 導体である。所定の 1.4 T の磁場を約 100 T/s（トールスプラの PF コイル運転条件）で運転することに成功した。ただ、トールスプラの PF コイルを超電導化するまでには行かなかった。

このように、日本、米国、EU の ITER の主要国で同時期に CIC 導体が核融合用に有効であることを認識しあったことが、CIC 導体を現在の ITER の設計にすんなりと採用する大きな要因となったことは事実であろう。

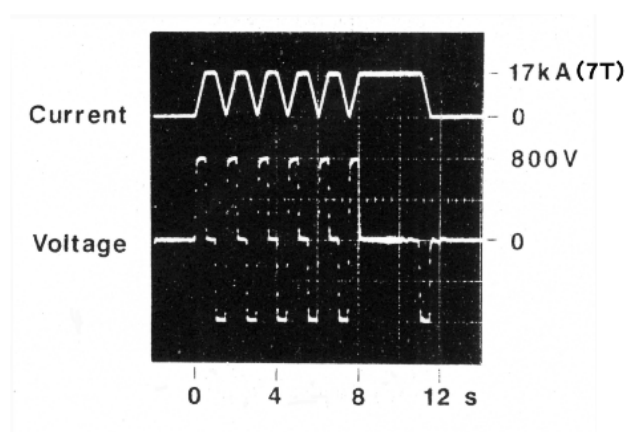


図 16 DPC-EX のパルス運転波形

参考文献

- 13) M. O. Hoenig et al.: IEEE Trans Mag-11 (1974) 569-572
- 14) J. W. Lue et al.: J. Appl. Phys. 51 (1980) 772-783
- 15) M. Darweschad et al. : Fusion Engineering and Design 36 (1997) 227-250

読者の広場

Q&A

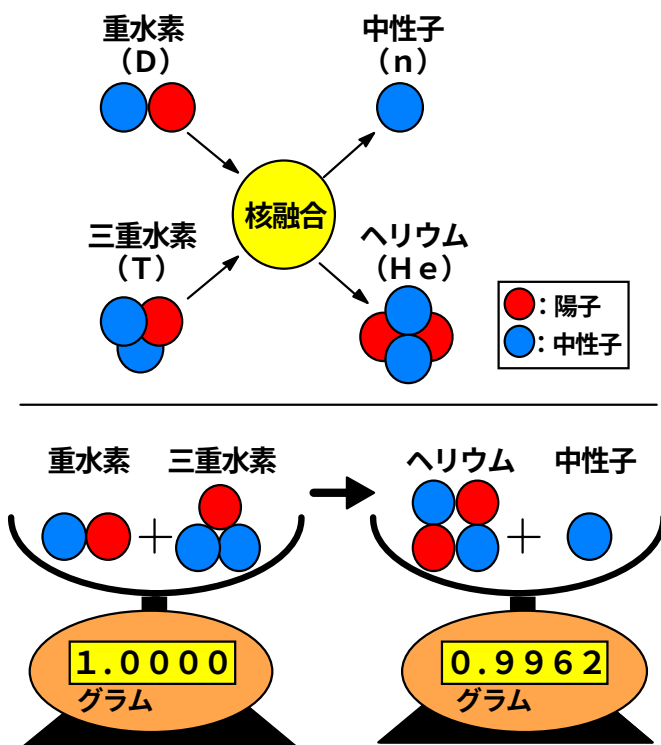
Q：「核融合炉」はなぜ「地上の太陽」と呼ばれるのでしょうか？

A：その理由は、ここで「核融合炉」と呼ばれている人類の新しいエネルギー源が、青空の中で熱く輝いている私たちの「太陽」と同じ核融合という方法でエネルギーを生み出すためです。これまで世界の科学者と技術者が力を合わせて「核融合炉」の研究を続けてきた結果、この核融合を「太陽」の中だけではなく、「核融合炉」を使うと私たちが住んでいる地球の上でも実現できることが分かりました。このことから、「核融合炉」が「地上の太陽」と呼ばれるようになりました。

ではこの核融合ではどんなことが起きているのでしょうか。そのために、まずとても小さな原子の世界へご案内しましょう。原子の世界を顕微鏡を通して見ると、私たちの体も色々な種類の原子が集まってできていることが分かります。私たちの体の 2/3 は水といわれていますが、水は水素原子二つと酸素原子一つが結合したものです。これまでに約 100 種類の原子が見つっていますが、その中で一番軽い原子が水素原子です。水素原子をよく見ると中心にプラスの電気を帯びた陽子と呼ばれる粒があり、その周りをマイナスの電気を持った電子が回っています。この中心の粒が原子核と呼ばれます。水素には性質の似た兄弟が 2 つあり、重水素と三重水素と呼ばれます。重水素の原子核は絵の様に陽子と電気を帯びていない中性子一つが結合し、三重水素の原子核は陽子一つと中性子二つが結合してできています。

これで「核融合炉」からエネルギーを生み出す役者が揃いました。ここからは原子よりもっと小さな原子核の世界のお話しになるので、「重水素の原子核」を「重水素」、「三重水素の原子核」を「三重水素」と短いニックネームで呼ぶことにします。「核融合炉」の中では、絵の様にこの重水素と三重水素が核融合を起こして、陽子二つと中性子二つが結合したヘリウムと呼ばれる新しい原子の原子核が生まれるとともに、中性子が一つできます。この核融合の前と後では、陽子の数は合計 2 個、中性子の数も合計 3 個で何の変化もないように見えます。

ところが核融合の前と後では、重水素と三重水素の重さの合計とヘリウムと中性子の重さ（ここでは質量（しつりょう）と呼びます）の合計が同じではないという不思議なことが起こります。重水素も三重水素もとても軽いので、例えば合計の質量が 1 グラムとなる個数の重水素と三重水素を用意してから核融合を起こさ



核融合でエネルギーが生み出されるしくみ

せてみます。こうして生まれたヘリウムと中性子全体の質量を計てみると、0.9962 グラムとなり軽くなっていることが分かります。

この質量の変化は 0.0038 グラムとほんのわずかです。ところが今から百年前の 1905 年にアインシュタイン博士は「質量とエネルギーは同じ仲間で、(エネルギー) = (質量) × (真空中の光の速さの 2 乗) の関係にしたがって、質量はエネルギーに変わることができ、エネルギーも質量に変わることができる。」という自然の法則を発見しました。この法則を使って、0.0038 グラムの質量がエネルギーに変わった時の大きさを計算してみると、石油 8 トン (8 百万グラム) を燃やして得られる大変大きなエネルギーであることが分かります。こうして「核融合炉」を用いると僅か 1 グラムの燃料ごとに、8 トンもの石油を燃やさずに発電を行うことが出来るようになります。

しかも石油や石炭を燃やす火力発電所とは異なり、「核融合炉」は地球の気温を上げてしまう二酸化炭素を発生しません。こうして、「地上の太陽」と呼ばれる「核融合炉」は地球の環境を守りながら、私たちの生活に必要な電気などを生み出すエネルギー源のエースとして期待され、世界の国々が協力して「核融合炉」の研究を進めているところです。

回答者：日本原子力研究所
核融合工学部
次長 辻 博史

[超電導 Web21 トップページ](#)