

核融合用超電導マグネットの技術進歩

Recent Technical Improvement on Superconducting Magnet for Nuclear Fusion

超電導技術は、これからの核融合装置にとって欠くことのできない要素技術の一つであり、国内外でその研究開発が活発に進められている。

日立製作所及び日立電線株式会社では、超電導材料から各種装置に至る広い技術分野で鋭意開発を行ない、数多くの成果を挙げてきた。近年の成果の中で特筆すべきものは、(1)合金系及び化合物導体の高磁界化、大電流化、パルス導体及び強制冷却導体の開発、(2)核融合装置への適用を目的とした大型マグネットの製作、実証、(3)超流動ヘリウム冷却、磁気冷凍などの新冷却法の研究開発、(4)各種研究試験設備の拡充、などである。

斎藤龍生* Ryusei Saitô
 多田直文** Naofumi Tada
 尾形久直*** Hisanao Ogata
 野口弘二**** Kôji Noguchi

1 緒言

将来のエネルギー源を目指すトカマクをはじめとする磁気閉じ込め核融合装置では、高磁界を効率良く発生させ、エネルギー収支を成り立たせるために、超電導技術を適用することが今や不可欠である。

日立製作所及び日立電線株式会社(以下、日立と総称する。)は早くから超電導技術の開発に鋭意取り組んできたが、核融合の分野でも政府関係機関を中心に進められている各種プロジェクトに積極的に参加し、技術的側面から貢献するとともに、自らの研究開発も進めている。

本報告は、前回の報告¹⁾に続き超電導技術の進歩の中で、日立の寄与と研究開発の成果を中心に述べるものである。

2 超電導技術開発の概要

超電導マグネットを対象とした技術開発は、応用側(ニーズ)からの高度な要求と開発面での技術の進歩が呼応しながら、着実に成果が積み上げられている。ここ数年の新しい動きとしては、

- (1) 超電導マグネットの大型化技術の開発
- (2) 化合物系線材を用いた高磁界マグネットの実用化
- (3) 強制冷却や超流動ヘリウム冷却など、新しい冷却方法によるマグネットの開発
- (4) パルス励磁を主眼とした各種要素の開発などである。

図1に、磁気核融合装置の主コイルを対象とした超電導マグネットの開発状況を磁束密度と磁気エネルギーで整理して示す。

3 超電導導体の技術進歩

3.1 超電導材の開発

現在、日立で開発されている各種の超電導導体の臨界電流密度特性を図2に示す。

これら超電導材のうち、NbTi、Nb₃Snは既に実用化されており、核融合用としてよりいっそうの高性能化と量産化が課題である。最近、Nb₃Snの高磁界特性を改良したのものとして、15 T級の磁界発生が可能な(NbTi)₃Sn極細多心線が開発され^{2),3)}核融合用としても一躍注目を浴びつつある。

3.2 超電導導体の構造

核融合用超電導導体は、トカマクのトロイダル磁場コイル

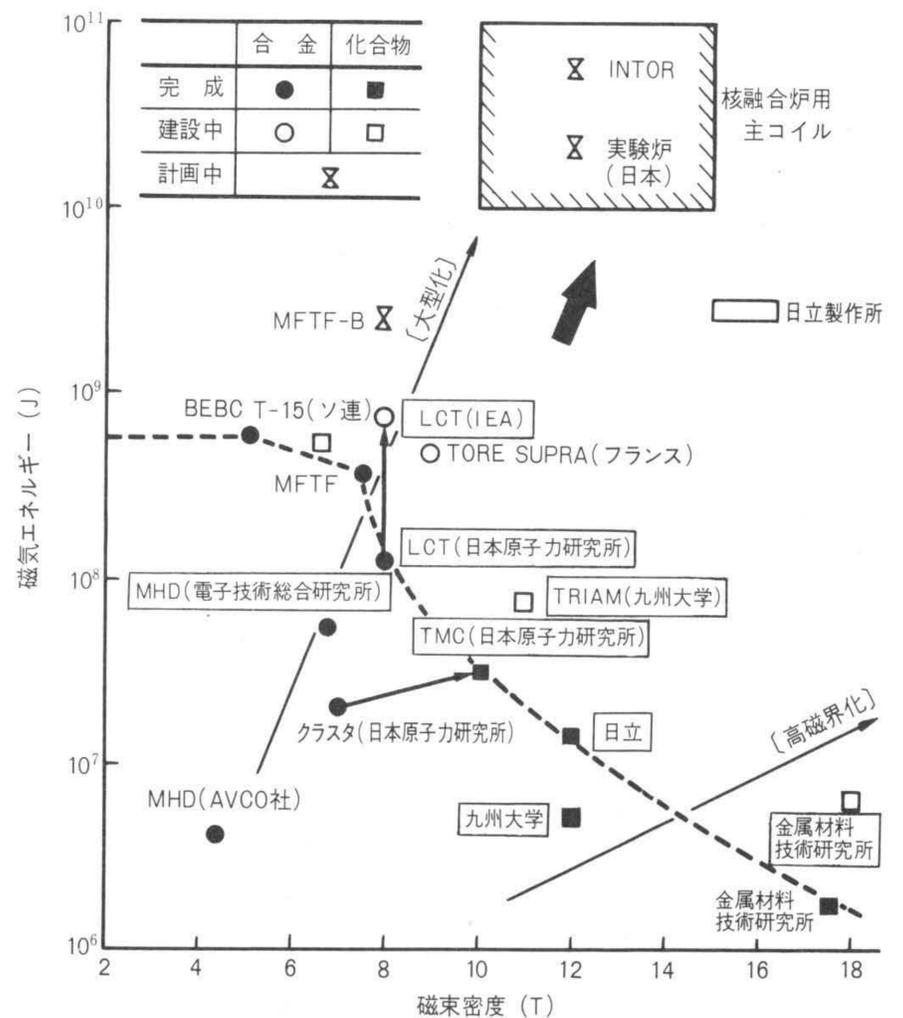


図1 超電導マグネットの開発状況 核融合炉の主コイルを目標として見た場合、現在から将来への開発の動向を示す。高磁界化と大型化の観点から鋭意開発が進められている。

などのプラズマの閉じ込めを目的とした主磁場コイル用と、ポロイダル磁場コイルなどのプラズマの点火、位置形状制御を目的とした制御磁場コイル用に大別される。導体構造から見た場合、これらは更に、浸漬冷却型と強制冷却型に分ける

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所機械研究所 工学博士 **** 日立電線株式会社土浦工場

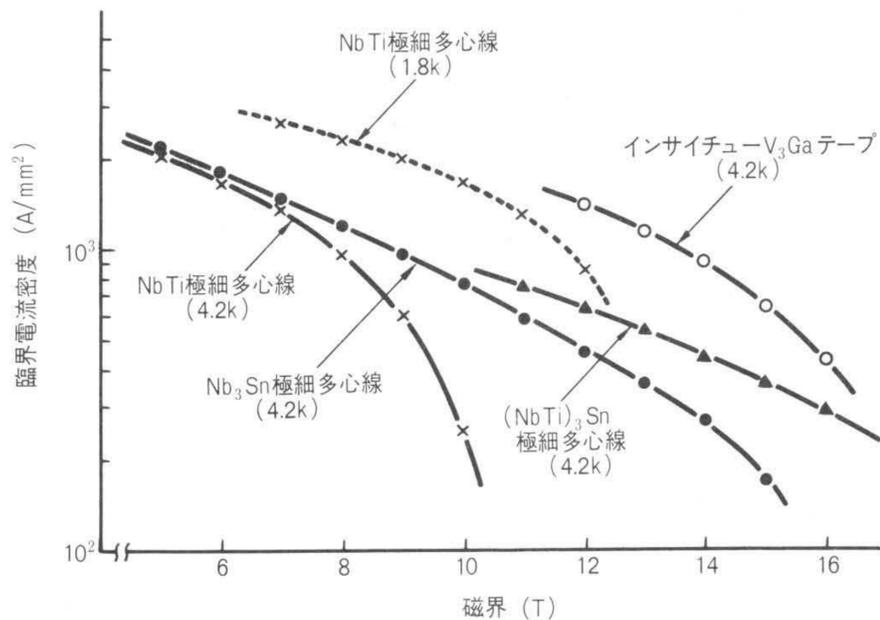


図2 日立で開発した各種超電導材の磁界-臨界電流密度特性
本曲線から下側が超電導状態で、超電導材の材質、製法及び温度によって臨界電流密度特性が異なる。これら超電導材は使用目的によって使い分けられる。

ことができる。

浸漬冷却型の主磁場コイル用導体を代表するものとして、日本原子力研究所の指導を得て製作・納入したLCT導体(NbTi, 20kA, 8T), TMC-1導体(Nb₃Sn, 10kA, 10T), これらの成果を生かして製作した九州大学応用力学研究所納めのTRIAM-1M導体(Nb₃Sn, 10kA, 11T)がある。いずれも加工硬化した無酸素銅門型安定化材中に、NbTi又はNb₃Sn超電導線を埋め込んだ構造で、液体ヘリウムへの熱伝達特性を良くするため、導体表面にサーモエクセル(日立電線株式会社商品名)加工と黒化処理を施した高性能の大容量導体である。図3にTRIAM-1M導体の横断面を示す。

強制冷却型の主磁場コイル用として、日本原子力研究所向けに製作したSTEP-II導体の例を図4に示す。これは高純度Alを内蔵したNb₃Sn素線のバンドル型で、15kA, 12T級の安定性に優れた導体である。

一方、制御磁場コイル用導体は、浸漬冷却型として図5に3MJパルスコイル用導体(NbTi三相構造成型より線, 3.8kA, 5T)の横断面を示す。また強制冷却型としては30kA, 7Tを開発目標とした日本原子力研究所のNbTi三相構造バンドル導体(30kA, 7T, 15kA, 0.3T)及び自社試験コイル用導体(6kA, 5T)などを開発した。

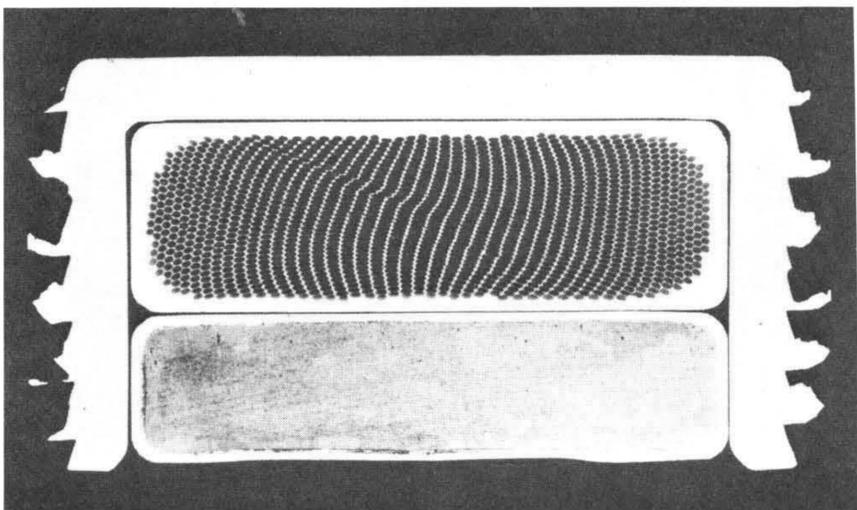


図3 九州大学応用力学研究所納めTRIAM-1M用超電導導体の横断面
7.1×14.0mm²の横断面で、門型形状の安定化銅(表面はサーモエクセル加工を施したもの)の中に、Nb₃Snのモノリスと銅被アルミ線を埋め込んだ10kA, 11Tの高性能超電導導体である。

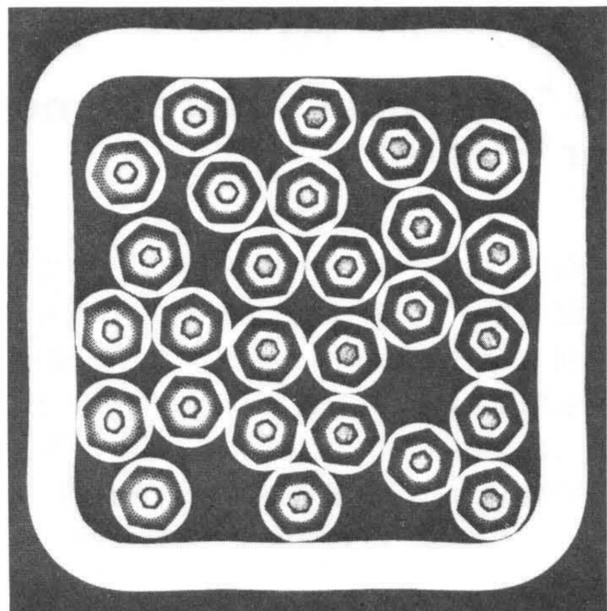


図4 日本原子力研究所STEP-II用強制冷却型超電導導体の横断面
17.2×17.2mm²のステンレス鋼管中に高純度Alを内蔵したNb₃Sn素線が27本より合った15kA, 12T級のバンドル導体で、Nb₃Sn素線間に超臨界圧Heが強制的に流され冷却される。

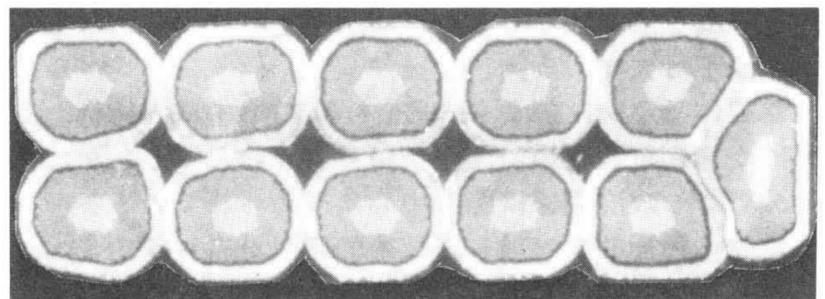


図5 3MJパルスコイル用超電導導体の横断面
外径1.18mmのCu/CuNi/NbTi三相構造超電導線を11本成型より線して、2.1×6.7mm²とした3.8kA/5T級の低損失パルスコイル用導体である。

更に、(NbTi)₃Sn材は今後の高磁界コイル用導体として極めて有望であり、金属材料技術研究所納めの超高磁界マグネット用に、平角モノリス導体(1.3kA, 16T級)を開発した。

これらの導体は、いずれも日立が開発した高液圧押出法で生産されたもので、極めて均一性が良く、優れた性能の導体として広く好評を博している。

3.3 超電導導体の性能向上

超電導導体の性能を向上させるためには、前述の開発と並行してこれをサポートする技術の整備も重要である。とりわけ、高磁界、大容量導体の開発のためには、高磁界、大口径の導体評価設備が必要であり、ボア径φ270mmで12T級の高電流密度で操作性に優れたマグネットを開発した⁴⁾。

更に、大容量導体では低熱損失の導体接続が極めて重要であり、様々な接続構造の検討を進めている。

また、将来の核融合炉では、超電導導体の高速中性子照射による影響が重要である。特に安定化材の照射による電気抵抗の増加により、超電導マグネットの寿命が決定されることから、日本原子力研究所と共同で照射研究を行ない、実用安定化材について貴重なデータを得た⁵⁾。

4 超電導マグネットの技術進歩

4.1 解析技術

浸漬冷却コイルの安定化解析については、マドック理論を加味した解析手法を確立し、また各種外乱に基づく常電導転移部の発達、消滅の応答特性を定量的に把握できるようになった⁶⁾。これらの解析結果は各種の実験を通じて実証され、いわゆる完全安定化コイルについては正確な機器設計が可能

となった。

部分安定化コイルについては、常電導移転部が急速に伝搬していく状況、及びクエンチバック効果をも考慮した解析手法を開発した。

強制冷却コイルについては、制限電流の概念を導入した安定化解析を行ない導体の開発に反映した。

電磁気解析では、特に高電流密度コイルで、転移時に局部的に発生する電圧の評価を行なうことにより、絶縁破壊の予防診断を可能とした。

超電導マグネット構造体に、外部変化磁界が作用した場合の電磁氣的、熱的影響の評価について、従来の原因要素別加算法から、これらを総合的に取り扱う手法を導入することにより、実測とより正確に符合する解析数値を得られるようにした⁷⁾。

4.2 製作技術

高性能な超電導コイルを得るための基本は、励磁時の変位をいかにして小さく抑えるかである。

巻線の面では、円形コイルに対しては張力制御巻線、特殊形状コイルに対しては、ギャップレスを指向した成形巻線法を開発した。コイルとこれを囲み力を保持する容器、及び両者を連結する部材も含めての高剛性を確保するため、材質、構造に留意を払うとともに、焼ばめ手法による一体化を大形装置にまで適用し、良好な結果を得ることに成功した。

またコイル容器は、液体ヘリウム温度で真空リークタイトでなければならない。シール溶接技術に電子ビーム溶接などの新手法も取り入れ好結果を得ている。

図6、7は前述のLCT及びTMC-1コイルであり、これらの製作技術が適用されている。

図8は、図5に示した導体を用いた3MJ規模のパルスコイルである。社内での試験で既に定格2kA、5.1Tの連続パルス運転に成功している。ここにも開発された製作技術の幾つかが駆使されている。

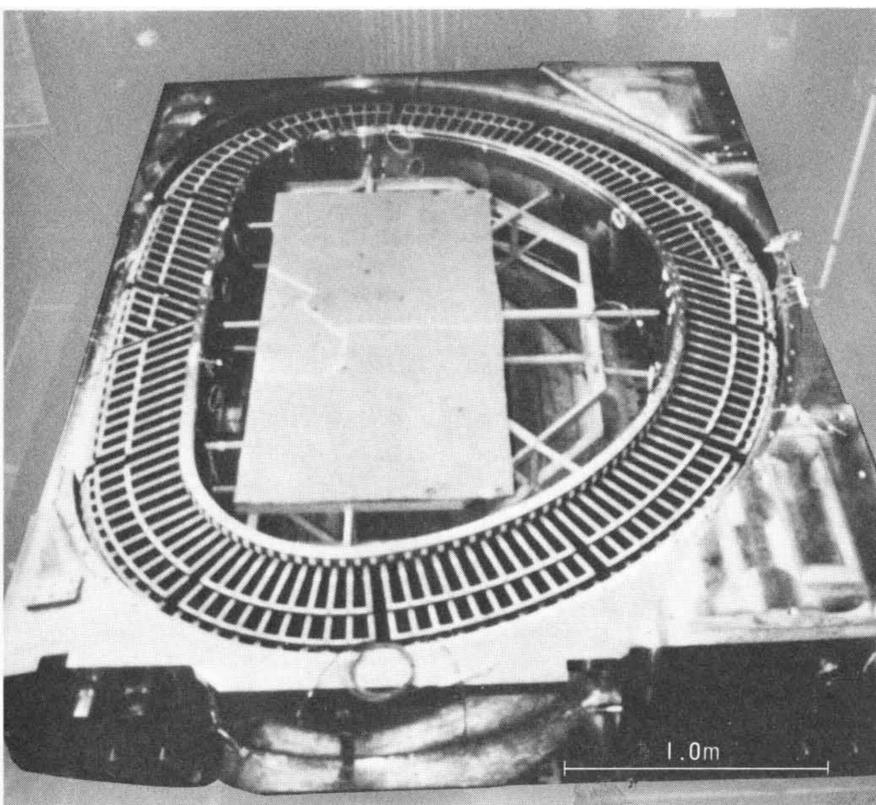


図6 日本原子力研究所用LCTコイル 日本原子力研究所が進めている国際協力プロジェクトの一つである。6個のコイルユニットでトロイダルコイルを構成するもので、日本からは日本原子力研究所の作業のもとに日立が製作した。核融合炉用を目指す大型コイル開発のマイルストーンとして時代を画するものである(最大磁界8T、電流10,220A、単独エネルギー110MJ)。

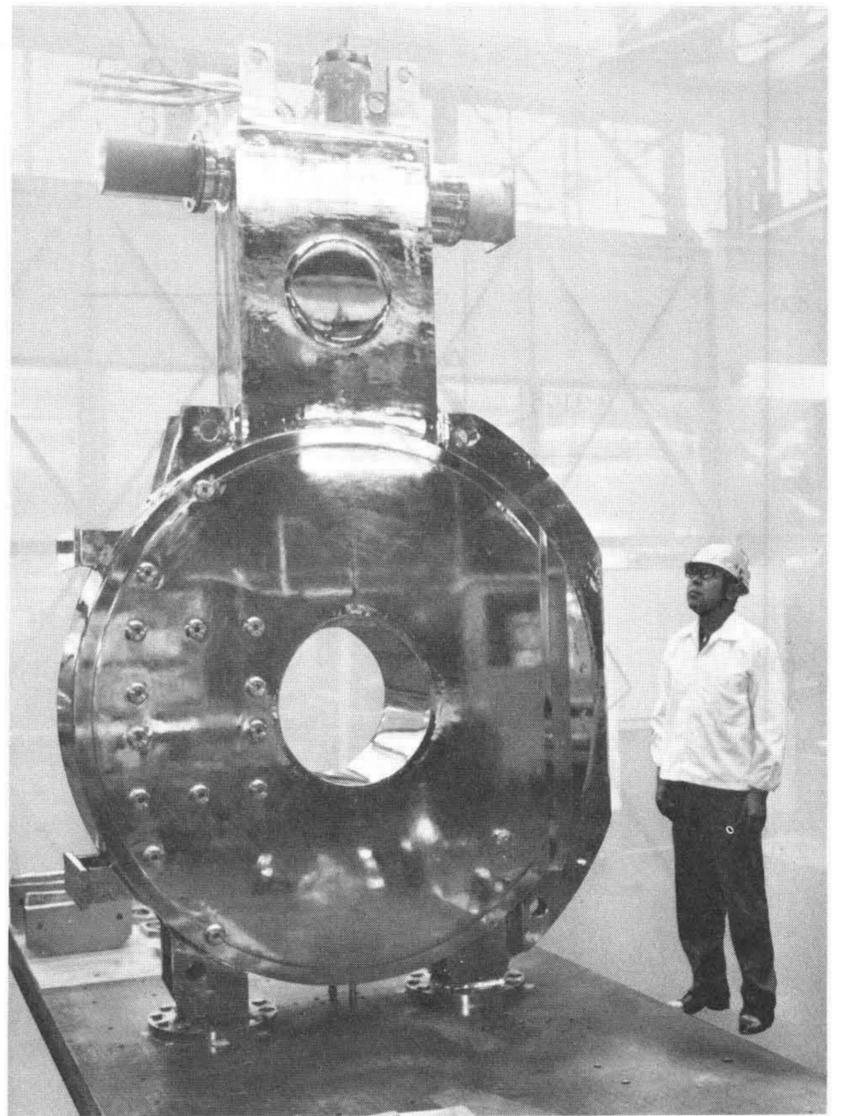


図7 日本原子力研究所用TMCコイル 日本原子力研究所での核融合用高磁界コイルの開発を代表するものの一つである。化合物系材料(Nb_3Sn)を大型コイルに適用したものととして画期的である(最大磁界10.2T、電流6,050A、総エネルギー39MJ)。

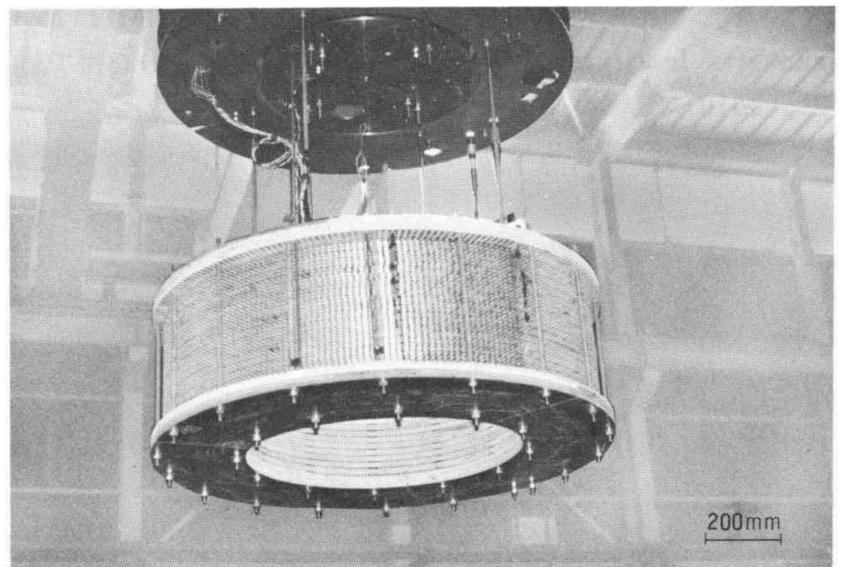


図8 3MJパルス励磁用コイル 図5の導体を用いたコイルを示す。冷却及び低交流損にも特に留意した構造となっている。

4.3 要素技術研究

金属材料については、ステンレス鋼を中心に母材及び溶接部の各種強度評価試験を行ない、それぞれの製品製作に成果を適用した。

非金属材料では、FRP(ガラス繊維強化プラスチック)について、高剛性、低熱収縮材の開発を科学技術庁科学技術振興調整費を受けて行ない、NBS(National Bureau of Standards)規格認定のG-11CRと同等以上の性能をもつ材料を開発した⁸⁾。図9に開発状況の一例を示す。

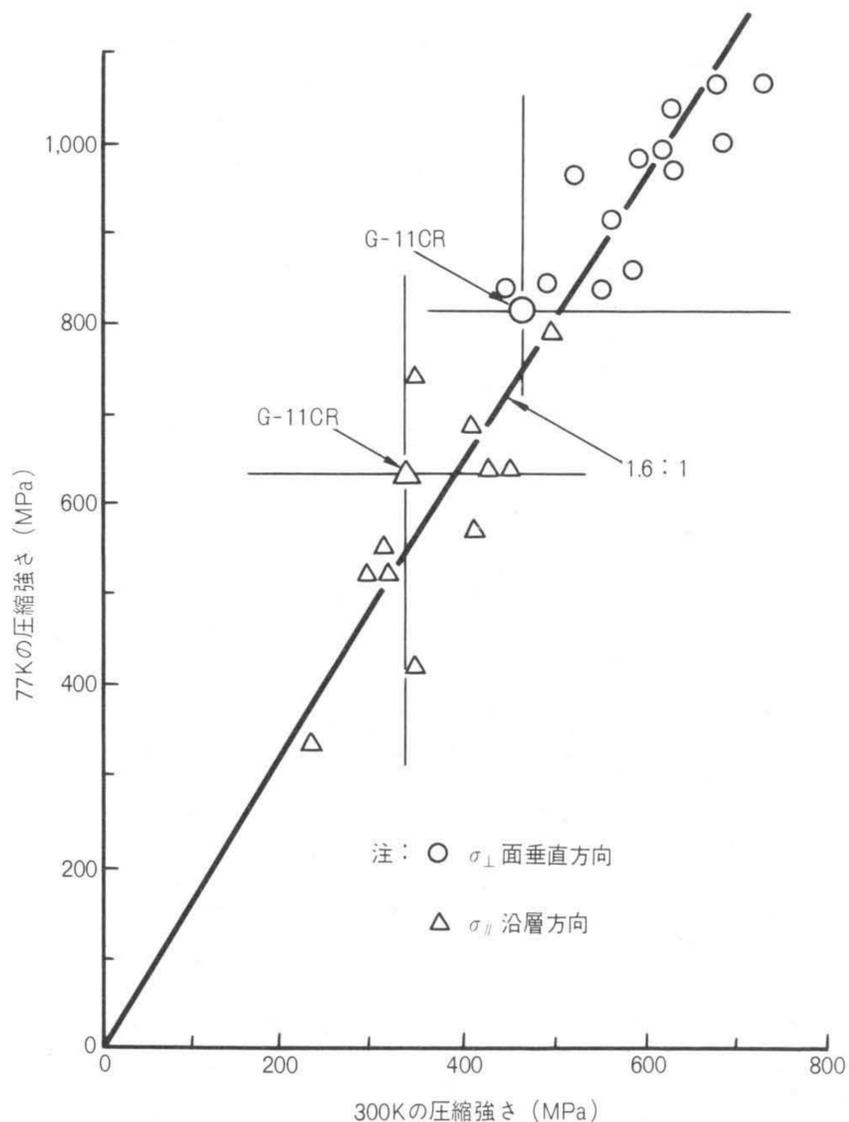


図9 高強度強化プラスチック材の開発 FRP(ガラス繊維強化プラスチック)を対象に、NBS規格C-11CR相当以上の特性をもつ材料の開発を行った。

コイル内のマイクロな動き、とりわけ巻線間の接着材に発生するはく離や微細なクラックなども、コイルの不安定性の一因となる。これらの現象を調べる基礎実験を米国MIT(Massachusetts Institute of Technology)の指導、協力を得て行なった。図10に実験結果の一例を示す。

一方、電気絶縁の観点からは、ヘリウムガス中の放電特性は極めて重要である。各種の電極形状と放電距離に対する放電電圧の関係を実験により求めた⁹⁾。

この外、化合物系超電導体使用コイルに対し、巻線後熱処理法の開発を行ない、前述のSTEP-IIに適用した。

5 マグネットの冷却、断熱技術の進歩

5.1 冷却技術

超流動ヘリウム冷却は超電導材の潜在能力を引き出し、更に高磁界への到達を可能にする点で有効である。温度を2.1K以下にすると、通常の液体ヘリウム(He I)は特異な性質を示す超流動ヘリウム(He II)に遷移する。超流動ヘリウムは、あたかも無粘性、無限熱伝導体であるような特性をもち、コイルの冷却にとっても有利である。この温度領域を実現するためには、液体ヘリウムを0.005MPa以下に減圧し、その飽和点での液体の蒸発潜熱によって、寒冷を発生させるのが一般的である。この寒冷を使って大気圧の液体ヘリウムを冷却すれば、大気圧の超流動ヘリウムが得られるが、図11はこのような原理に基づいて動作するクライオスタットと超電導マグネット¹⁰⁾である。超電導コイルは内径20mm、外径147mm、長さ100mm、使用した線材はNb-46.5wt%Ti合金線である。実験の結果、4.2Kでの発生磁界の上限が9.5Tであるのに対し、1.8Kでは最高12.3Tまで発生できた。

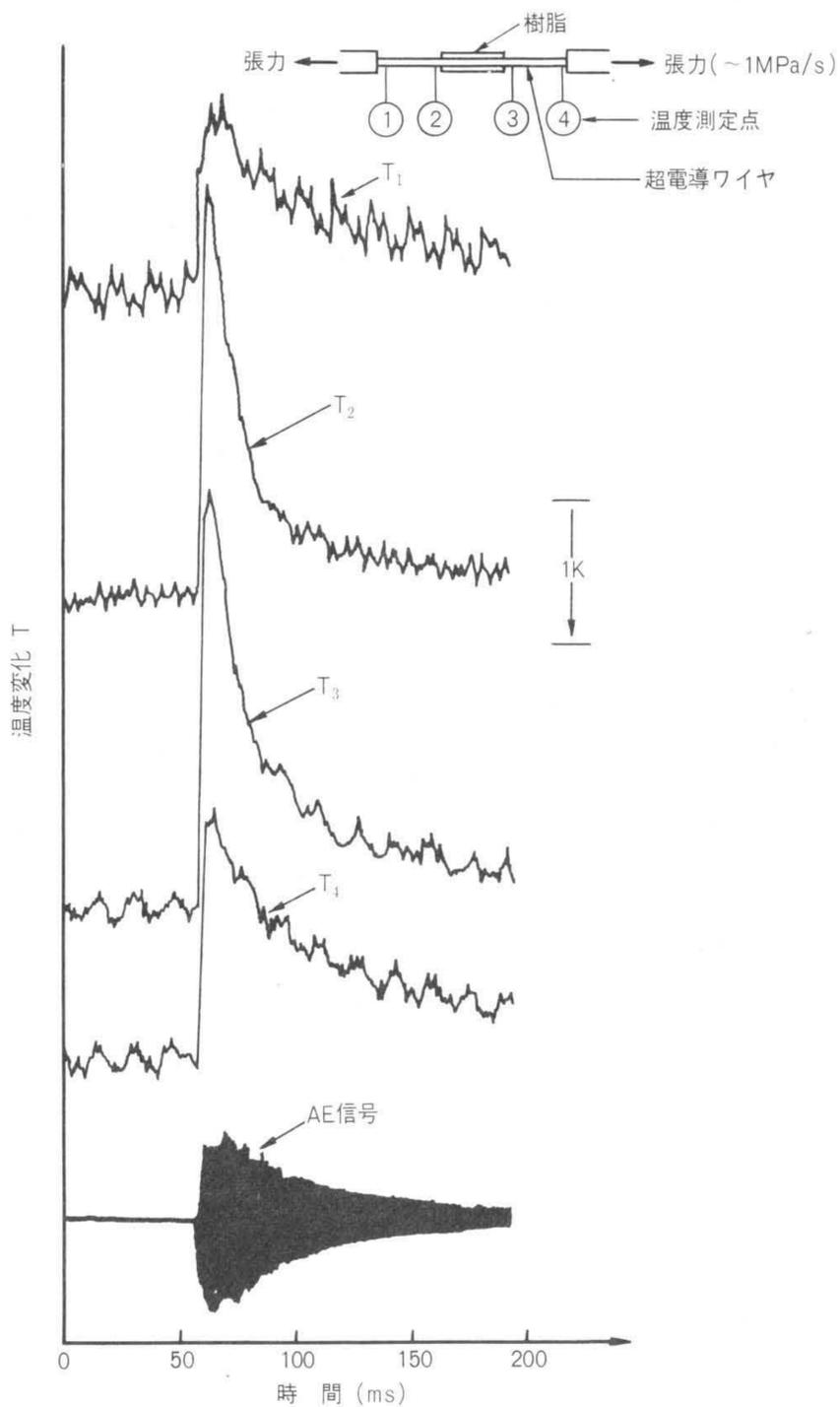


図10 レジンのマイクロクラックによる温度上昇 レジンがストレスを受けてクラックを生じる場合、ひずみエネルギーが熱発生形式で開放され、温度が上昇する。これが超電導コイルの不安定性の一因となる。

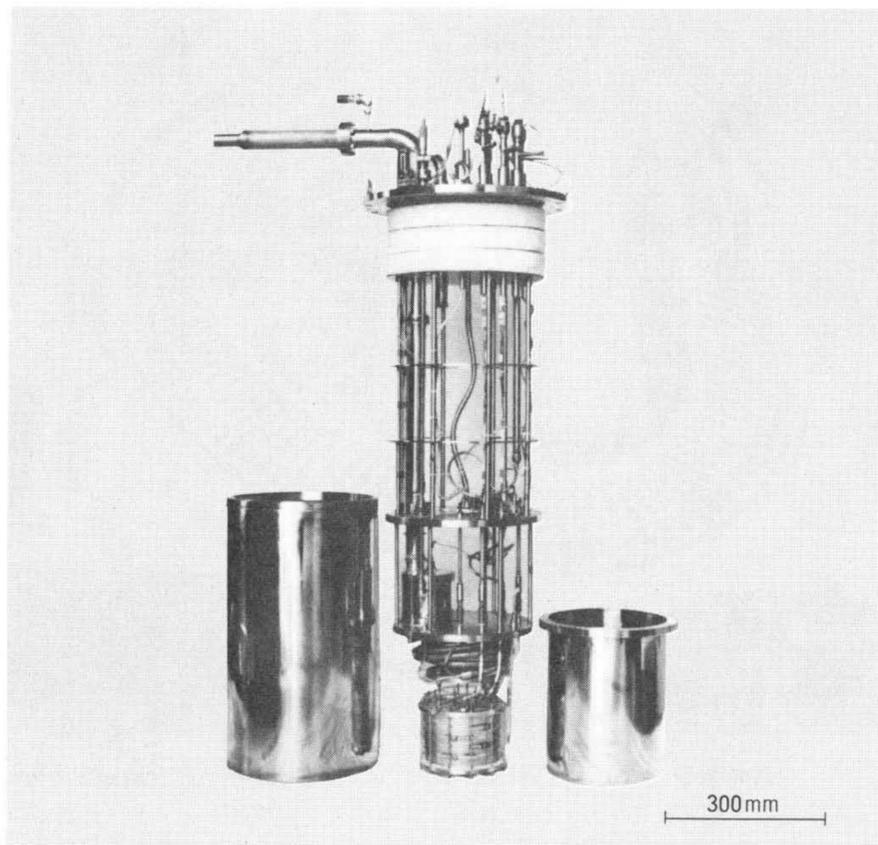


図11 超流動冷却超電導マグネット 大気圧超流動ヘリウムと超電導マグネットを収納するケース及びこれを取り巻く断熱ケースを取り外してある。

超流動ヘリウムの発生に好適な、他の冷凍方式として磁気冷凍が注目されている。これは、磁性体のエントロピーが磁界及び温度に依存することを利用して、冷凍サイクルを構成させるもので、従来ミリケルビン領域の超低温生成に用いられていた断熱消磁法と同一原理による。希土類ガーネットの

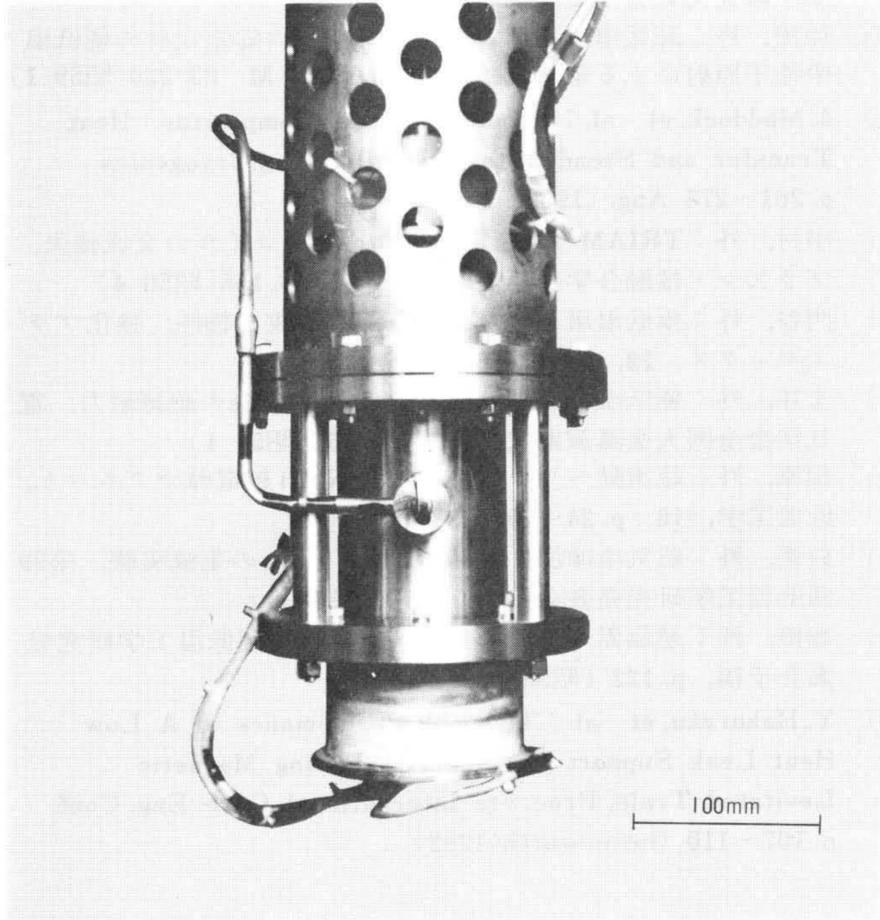


図12 往復動型磁気冷凍機 上下に対する超電導コイルを配し、中間の円筒(配管の出ているところ)内に超流動ヘリウムができる。軸心部に磁性体を含む往復動型ピストンがある。

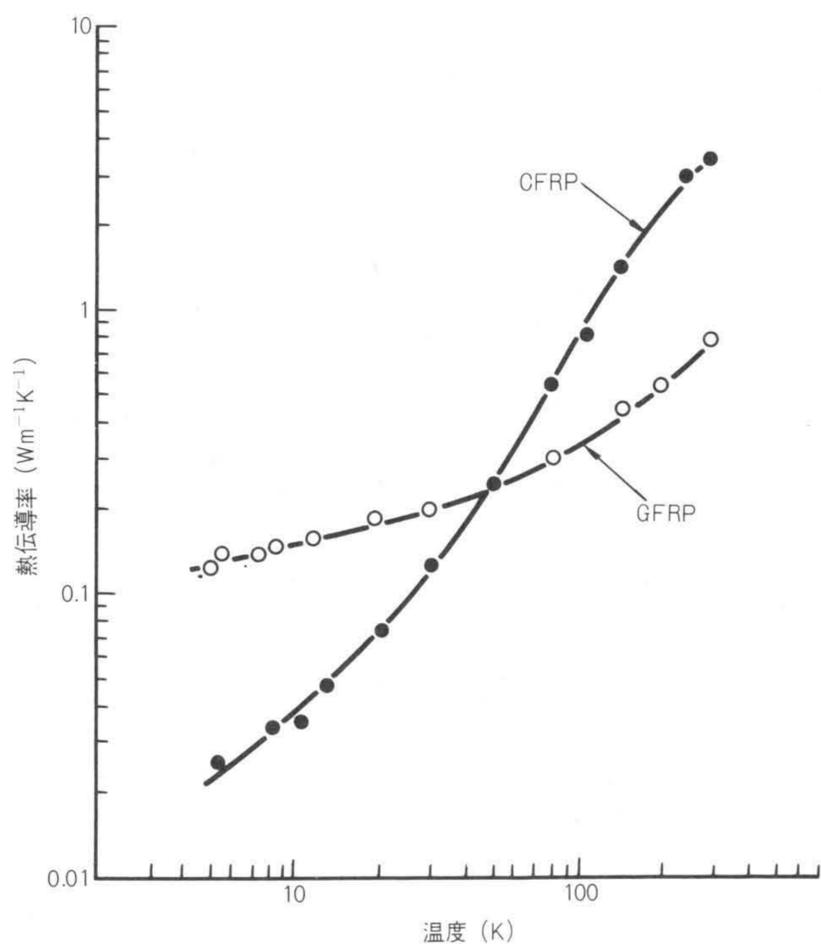


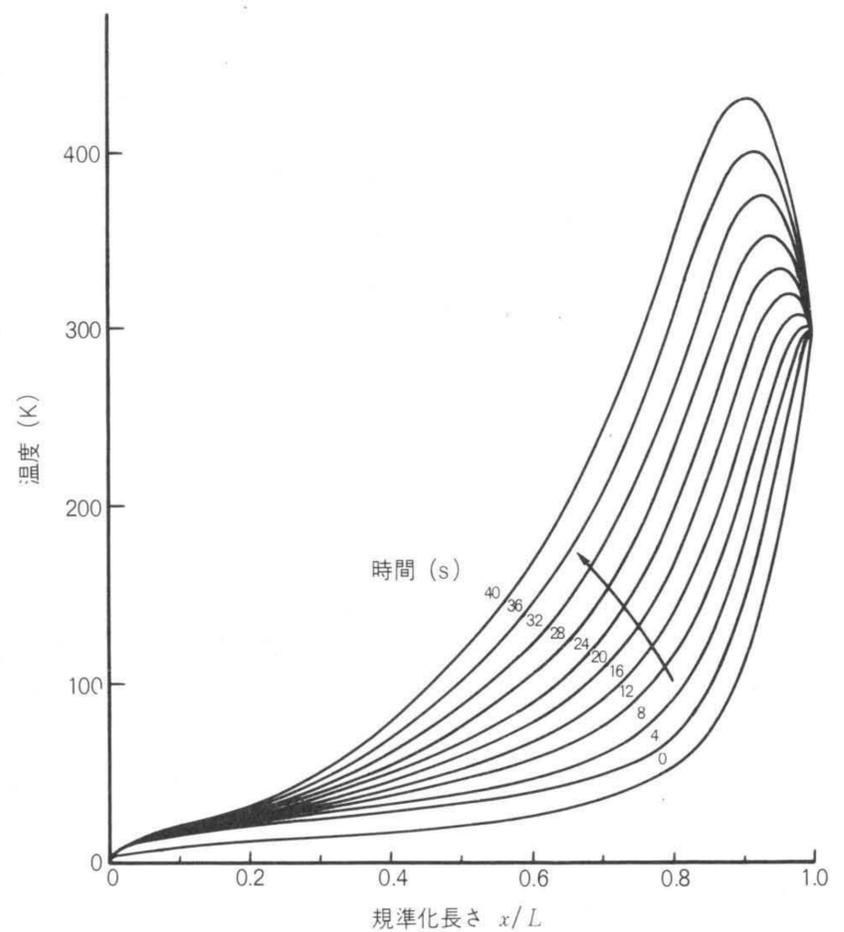
図13 断熱材料の熱伝導率特性 CFRP(カーボン繊維強化樹脂)は、GFRP(ガラス繊維強化樹脂)に比べて低温側で熱伝導率が小さく、CFRPとGFRPの組合せ利用が効果を挙げる。

一つである $Gd_3Ga_5O_{12}$ (略称GGG)は、温度 $1\sim 20K$ の領域で大きなエントロピー変化を示し、超流動ヘリウム生成に適している。図12は $3\sim 5T$ の磁界の中へ直径 $25mm$ 、長さ $25mm$ のGGG単結晶を出し入れして、連続的に寒冷を発生させる実験装置である¹¹⁾。可動部が少ないので信頼性が高く、ガス冷凍の場合に必要な減圧ポンプが不要なので、小形になるなどの特長に加えて、条件によっては磁気冷凍のほうが、ガス冷凍より高い冷凍効率を得ることも可能であり、超流動生成だけでなく、通常のヘリウム冷凍システムの中に磁気冷凍が組み込まれることも近い将来可能となろう。

またこれまでの浸漬冷却法に対比して開発が進められているものに強制冷却法がある。すなわち、超電導体の内部又は外部に、超臨界ヘリウム又は二相ヘリウムを循環させて冷却するもので、電気絶縁性の向上やマグネットの小形コンパクト化を目的としている。日立は図4に示したような内部冷却型導体を対象とした超臨界ヘリウム冷却試験¹²⁾を行ない、種々の冷却特性を取得した。更に、間接冷却型マグネットの二相流冷却の研究も進めている。

5.2 断熱技術

断熱技術については、特に高性能断熱材、低損失荷重支持体、低損失電流リード、高断熱性能クライオスタットなどの開発に注力している。図13は、荷重支持材料に最適なFRPの熱伝導率測定データの一部であるが、これを利用して多重円筒型支持体が開発されている¹³⁾。超電導マグネットに電力を供給する電流リード線は、大電流化とともに侵入熱の増加が著しい。そのため、液体ヘリウムの気化ガスを使って冷却する構造の開発が続けられている。図14は、このような電流リードの冷却材喪失事故を想定した解析の一例である。



注: x (低温端からの距離), L (リード全長)

図14 電流リード温度分布の時間変化 通電電流 $5,000A$ のもとで、突然冷却ガス流が停止した場合の温度分布計算値を示す。 $x/L=1.0$ は電流リードの常温端に相当し、 $300K$ は周囲温度に相当する。

6 その他

超電導技術の開発と製品の信頼性確保のためには、たゆまぬ研究に加えて、これをサポートする研究試験設備が必要である。

日立では、ヘリウム液化冷凍機、強制冷却試験ループ、大容量直流電源、パルス電源、エネルギー転送シミュレータ、高磁界マグネット、大形クライオスタットなどを設置するとともに、製作、組立などの作業環境、製作設備などを整備してこれに対処している。

7 結 言

核融合炉の構想が具体化するにつれ、超電導マグネットの開発も更に加速されることになる。既に国際原子力機関(IAEA)のINTOR、日本原子力研究所のFERなどの大規模装置の計画が進められており、超電導技術もこれらを目標にいつその研究開発が必要である。

超電導技術は、材料からシステムまでを含む総合プラント技術である。日立はこれまでに蓄積された技術を礎とし、各方面の指導と協力を得ながら、各々の技術分野にわたり鋭意開発を進めてゆく考えである。

終わりに、現在まで種々御指導をいただいた日本原子力研究所、科学技術庁金属材料技術研究所、九州大学、ほかの関係各位に対し厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 木村, 外: 超電導マグネットの核融合への技術開発, 日立評論, 62, 5, 381~386(昭55-5)
- 2) K. Tachikawa, et al.: Appl. Phys. Letter., 39, p. 766(1981)
- 3) K. Kamata et al.: Proc. Inter. Cryo. Mat. Conf., Colorado Springs, USA(1983)
- 4) 多田, 外: 高電流密度Nb₃Sn超電導マグネット, 第31回低温工学研究発表会予稿(昭59-5)
- 5) 仲田, 外: 超電導磁石用銅及アルミニウム安定化材の極低温中性子照射による電気抵抗変化, JAERI-M 83-230(昭59-1)
- 6) J. Maddock, et al.: Superconductive Composites: Heat Transfer and Steady State Stabilization, Cryogenics p. 261~273 Aug. (1969)
- 7) 中村, 外: TRIAM-1M超電導トロイダルコイルの交流損失, プラズマ・核融合学会第1回年会予稿, p. 155(昭59-4)
- 8) 門谷, 外: 極低温用エポキシGFRPの構成と物性, 強化プラスチック, 29, p. 537~543(昭58-12)
- 9) 永井, 外: 極低温および室温におけるガスHeの絶縁耐力, 電気学会全国大会講演論文集[2], p. 152(昭58-4)
- 10) 相原, 外: 超流動ヘリウム冷却12T NbTi超電導マグネット, 低温工学, 18, p. 24~29(昭58-11)
- 11) 白楽, 外: 磁気冷凍法による超流動ヘリウムの生成実験, 第29回低温工学研究発表会予稿, p. 105(昭58-5)
- 12) 堀田, 外: 超臨界ヘリウム循環装置, 第30回低温工学研究発表会予稿, p. 122(昭58-11)
- 13) Y. Hakuraku, et al.: Thermal Performance of A Low Heat Leak Support for Superconducting Magnetic Levitated Train, Proc. 9th International Cryo. Eng. Conf. p. 107~110 Butterworth(1982)

論文抄録

液体燃料使用の燃料電池

日立製作所 津久井 勤・他1名

電気学会雑誌 104-1, 40~43 (昭59-1)

燃料電池は、電気化学反応によって燃料のもつ化学エネルギーを直接電気エネルギーに変換する一種の直流発電装置で、効率が高く、騒音や廃ガスなどの問題が少ないという利点がある。

燃料に液体を用いる燃料電池は、エネルギー密度が気体(主として水素)を用いるものより低い、燃料の取扱いが容易なことから、小形軽量な汎用の可搬移動電源としては好適と考えられる。液体燃料としてはヒドラジンとメタノールがある。

ヒドラジン燃料電池の場合、電解液はアルカリ性型で、ヒドラジンが分解しやすく反応速度が大きいので、アノードには白金系触媒が不要なうえに、電極面積当たりの出力が40~60mW/cm²と比較的大きなエネルギー密度が得られている。

そのため、1960年代から1970年代にかけて運搬用や航路標識用として国内外で盛んに検討された。しかし、ヒドラジン燃料は高価なため汎用の電源として向かないこと

もあって、特殊用途の電源として開発研究が進められているにすぎない。

一方、メタノール燃料電池は、燃料として安価なメタノールを用いているため、汎用電源としての可能性が高いことから、しだいにクローズアップされるようになった。

この燃料電池の電解液にはアルカリ性型と酸性型がある。アルカリ性型の場合にはカソードで白金系触媒を不要とすることや、エネルギー密度も酸性型より多少大きくとれる利点があるが、炭酸ガスによって電解液が劣化するなどの根本的な問題がある。これに対して、酸性型は白金系触媒を多量に用いないと電気化学反応が十分行なわれないことや、酸による構成材料の腐食などの問題点があった。ところが、白金系触媒が大幅に低減できるようになってきたこと、耐食性のよいカーボン材料の開発が進んで、これが電極基体などの電池構成材料として使用可能になってきた。そのために、容易に電池として構成できるようになって

きたこともあって、1970年後半から再び見直され研究開発が行なわれるようになってきた。

電池の性能をみると、アノードに白金とルテニウムあるいはすすなどの二元系触媒を用いることにより、白金単独の場合より触媒活性が向上するなどの報告がみられる。現状では、白金使用量によって出力電圧が変わり、電流密度50mA/cm²のとき白金使用量によって0.25~0.45Vが得られている。白金使用量が3mg/cm²以下で、0.45Vに近い電圧が得られればコスト的にも十分実用できる領域に達するものと思われる。

一方、燃料であるメタノールの入手も比較的容易であり、自動車用や発電用の燃料としての検討も行なわれている。メタノールの生産が伸びると燃料コストも低下するとみられるところから、メタノール燃料電池は汎用の電源として大きな伸びが期待される。