核融合炉開発用超電導機器

今野 雅行(こんの まさゆき)　能瀬 眞一(のせ しんいち)　榊 喜善(さかき きぜん)

1 まえがき

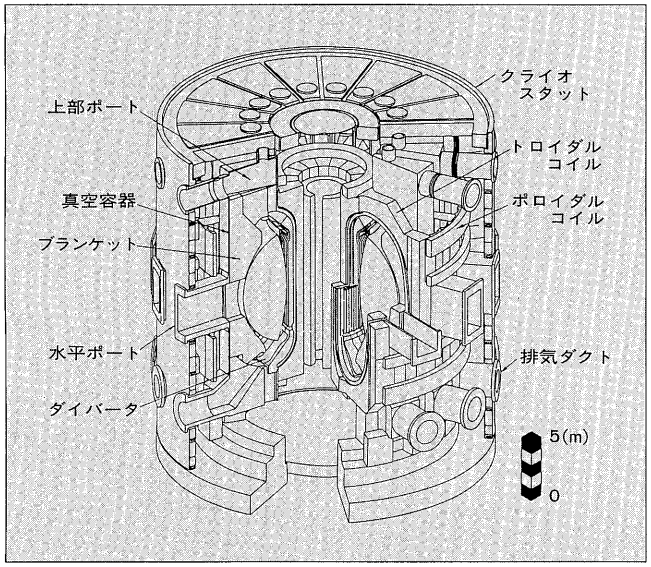
核融合炉は，クリーンかつ燃料である重水素が海水からほぼ無尽蔵に入手できるため，人類最後のエネルギー源として期待されている。核融合炉は長年の研究開発を経て，現在実験炉建設計画が具体化する段階に至っている。

磁場による高温プラズマの閉込め方式は，エネルギーバランスの見地から実用規模炉において超電導方式しか成り立たない。国際熱核融合実験炉（ITER：International Thermonuclear Experimental Reactor）は昭和63年から国際原子力機関（IAEA）のもとで日米欧露の四極共同作業で進められている。この計画では，2005年（平成17年）ごろまでに超電導コイルを全面的に採用した熱出力1,000 MW級の炉を建設する。**図1**にITERの概念鳥観図を示す[(1)]。日本では日本原子力研究所が中心となってITERを推進している。

一方，文部省核融合科学研究所は，ITERが採用する方式とは別方式の大型ヘリカル装置（LHD）を建設中である。LHDは定常的な磁場閉込め制御核融合を実現しやすいと考えられており，大掛かりな原理実験を平成9年から開始する予定である。

本稿では，主として上記2研究所で進められている核融合炉の研究開発に対する富士電機の超電導機器開発状況を紹介する。

図1 国際熱核融合実験炉（ITER）の概念鳥観図



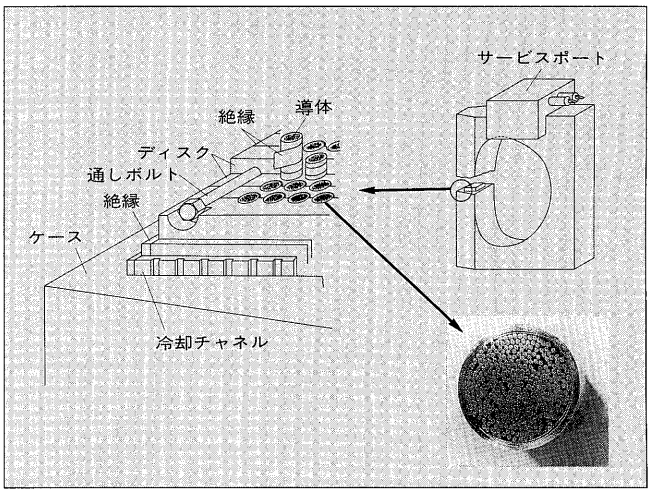
2 核融合炉用超電導コイル

2.1 ディスク形超電導コイル[(2)]

ディスク形超電導コイルは，核融合実験炉のトロイダルコイル用に日本原子力研究所と共同で開発したものである。本コイルは**図2**に示すとおり，絶縁された導体を溝付きのディスクで固定し，コイル容器に収納するものである。このコイルは直接ディスクで導体を支持固定するため，巻線全体が強固なものになることと強大な電磁力などによる超電導導体の劣化を極力抑えることを主な特長としている。また，絶縁に関しては，耐放射線性のある絶縁材を容易に採用することができる構成であり，絶縁に対する信頼性を向上させることができる。

これらの特長の確認ならびに製作上の各問題点を解決するために，ダミー導体を用いた外径2.5mのダブルパン

図2 トロイダルコイル用ディスク形超電導コイルの概念図



今野 雅行

昭和56年入社。原子力プラントの計測制御システムならびに超電導コイル開発のエンジニアリング業務に従事。現在，エネルギー事業本部原子力事業部原子力技術部課長補佐。

能瀬 眞一

昭和49年入社。超電導応用機器の研究・開発に従事。現在，(株)富士電機総合研究所応用装置研究所研究マネージャー。理学博士。

榊 喜善

昭和26年入社。変圧器の試験，検査，設計および超電導機器の開発に従事。現在，富士テクノサーベイ(株)主幹技師。

図3　3ターンコイル

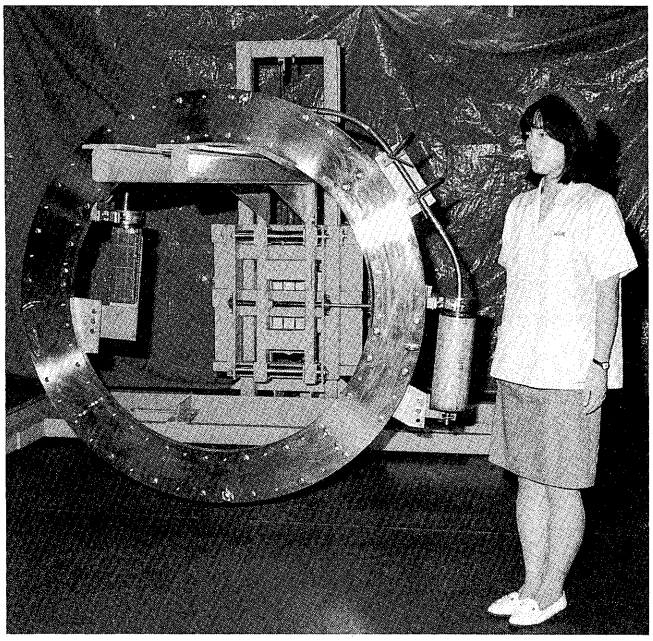
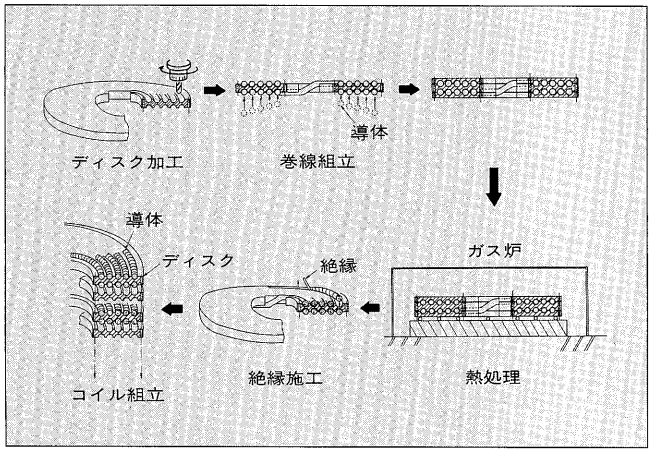


図4　ディスク形超電導コイルの製作手順



ケーキコイルと，30kA の Nb_3Sn 導体を用いた外径 2 m の3ターンコイルを製作した。**図3** に3ターンコイルを示す。

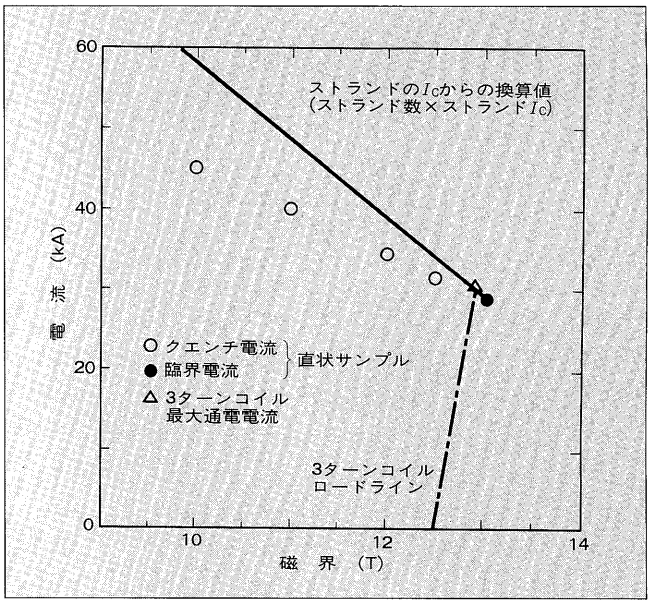
コイル製作は**図4** に示すとおり，ディスクの溝加工，巻線組立，Nb_3Sn の形成のための熱処理，絶縁施工，コイル組立の手順で実施しており，製作上，以下の点に留意している。

(1)　ディスクはその厚さに対し，大幅な溝加工が必要である。加工によるディスクの変形を抑えるため，加工手順や加工速度などを調整し，変形を許容値内に抑えるよう製作した。

(2)　超電導導体の熱処理は，電気炉を用いて温度管理するのが一般的であるが，核融合実験炉用のトロイダルコイルは，その大きさから，現有設備ではガス炉を用いることになる。このコイルもガス炉を使用して熱処理を実施した。

(3)　トロイダルコイルの絶縁は，20kV 程度の耐電圧性能が必要であるとともに，耐放射線性に優れている必要がある。一般的に超電導コイルの絶縁は，エポキシ系の樹脂を使用しているが，耐放射線性に優れている，BT（ビスマレイミド・トリアジン）レジンを採用し，絶縁材料としての適用性を確認した。

図5　3ターンコイル試験結果



3ターンコイルの通電試験結果を**図5** に示す。このコイルは 13T の磁界において，使用電源の最大容量である 30 kA までクエンチすることなく通電できた。この値は，素線の臨界電流値からの推定値と良く一致しており，超電導導体に劣化が生じていないことを示している。

この開発により，ディスク形超電導コイルに関する製作上の課題を解決でき，トロイダルコイル用のパンケーキ巻線に適用できることが実証された。

2.2　導体試験用機器

超電導導体について，臨界電流などの特性を把握するためには，少なくとも試験環境となる磁界と，導体に通電するための電源が必要となる。核融合装置用導体を考えた場合，磁界は 8 ～12T は必要となるとともに，容量が 40kA 程度となるため導体寸法も大きくなる。

富士電機は，核融合装置用などに用いる大形導体の試験用に，環境磁界を発生させるシミュレーションバックアップコイルと，電源装置の代わりに大電流を超電導導体に供給する超電導トランスとを製作し，日本原子力研究所へ納入した。

2.2.1　シミュレーションバックアップコイル[3]

シミュレーションバックアップコイルは**図6** に示すとおり 2 個のコイル（内径：313mm，外径：675mm，高さ：197mm）で構成されたスプリットコイルであり，スプリット空間に大形の超電導導体を配置することにより，臨界電流の測定に必要な環境磁界を被試験体に与えるものである。

本コイルは中心において 8T の磁界を発生させることができるとともに，スプリット空間を変えることにより，核

融合装置などで用いる超電導導体の大きさに対応した試験ができる。

本コイルは NbTi の矩形（くけい）導体を用いるとともに，3段階のグレーディングを行っている。また，コイルは巻線後プリストレスをかけることにより，通電時の巻線内の導体の動きを抑制する製作方法を採用している。これにより，励磁試験においてはクエンチ（超電導状態が壊れ常電導状態が急速に拡大する現象）なしに定格電流まで通電することができた。

2.2.2 超電導トランス[4]

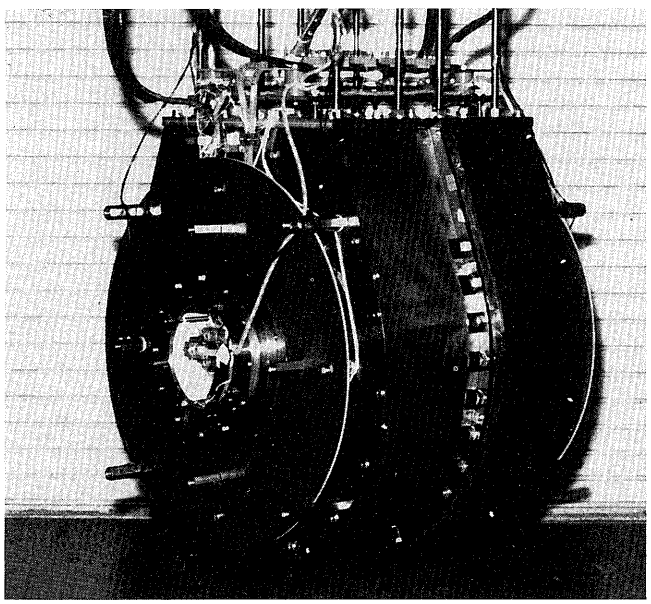
核融合装置に用いる超電導コイルの定格電流は，現在，30kA 以上で計画されているため，導体の臨界電流としては少なくとも2倍の60kA 以上が必要となる。このため，超電導導体の試験に必要な大電流を小容量の電源装置から供給することを目的として開発したのが**図7**に示す超電導トランス（外径：600mm，高さ：1,200mm）である。

超電導トランスは一次巻線と，その外側に配置した二次巻線とで構成しており，一次側に電流を流すことにより，二次側に大電流を誘起させるものである。二次電流はターミナルに接続した被試験体との接触抵抗により減衰するため，一次電流の定格値までの立上げを1分程度で行うこととしており，各巻線のボビンならびにフランジも FRP を採用している。通電試験においては超電導トランスの一次電流を 6 kA とすることで，二次側に約 100kA の電流を供給することができた。

2.3 特有事象模擬コイル

核融合装置用超電導コイルとして考慮すべき課題に，プラズマによる磁界変化が与える影響と，トロイダルコイルとポロイダルコイル配置の関係から，導体の環境磁界が一方向だけでないことによる影響とが挙げられる。これら核融合装置特有の課題について調査するための試験装置として製作した超電導コイルがディスラプションシミュレーション（DS）コイルと重畳コイルである。両コイルとも日本原子力研究所へ納入した。

図6　シミュレーションバックアップコイル



2.3.1 DS コイル[5]

DS コイルは，核融合装置においてプラズマが崩壊した場合の磁界変化が，超電導導体に与える影響を調査するためのものであり，Nb_3Sn 導体を使用したワインドアンドリアクト方式（Nb_3Sn が未生成の線を巻線し，コイルごと加熱処理して Nb_3Sn を生成させる方法）のコイルである。

図8に DS コイルの外観を示す。本コイルは3個のコイルから構成されており，最内層のコイルと中間に位置するコイルとの間に被試験体を配置する構造である。

主な特長は，11T のバックグラウンド磁界中において被試験体位置で 2T の磁界が発生することと，DS コイルで磁界を 2T 変化（時定数 20ms）させてもバックグラウンドコイルがクエンチしないように漏れ磁界を小さくしている点である。励磁試験においては，バックグラウンド磁界が 11T 時に 2T の磁界を発生させるとともに，DS コイルの定格電流（1,000A）から時定数 20ms での遮断を実施し，漏れ磁界が小さいことの確認を行った。

2.3.2 重畳コイル

重畳コイルは，トロイダル磁界とポロイダル磁界が重畳した場合の導体の超電導特性を調査するためのものである。重畳コイルは，12T のバックグラウンドコイル（内径：ϕ140mm）内に水平に配置するもので，被試験体の超電導導体にバックグラウンドコイルによる 12T の磁界を印加した状態において，水平方向に 2T の磁界を重畳するものである。このコイルは 12T の磁界において水平に配置されているため，定格電流（1,000A）通電時には約 20kN・m の回転力が発生する。この電磁力を支持するため，コイルのフランジなどをかなり強固なものとしている。**図9**に重畳コイルの外観を示す。

3 特殊用途

3.1 ジャイロトロン用超電導マグネット[6]

ジャイロトロンは**図10**に示すように，磁界中で電子が，

図7　超電導トランス

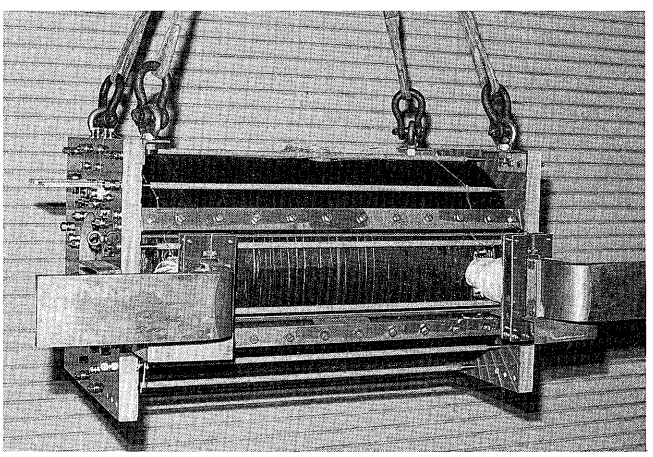


図8　ディスラプションシミュレーション（DS）コイル

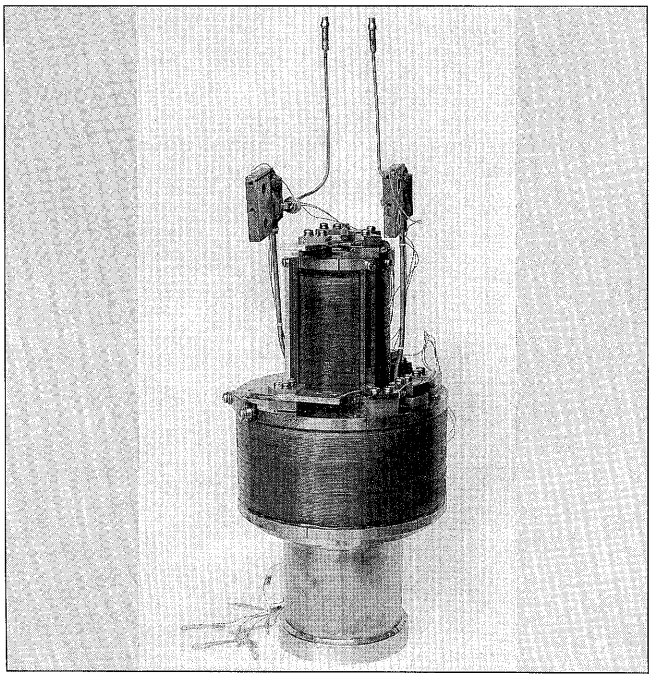


図9　重畳コイル

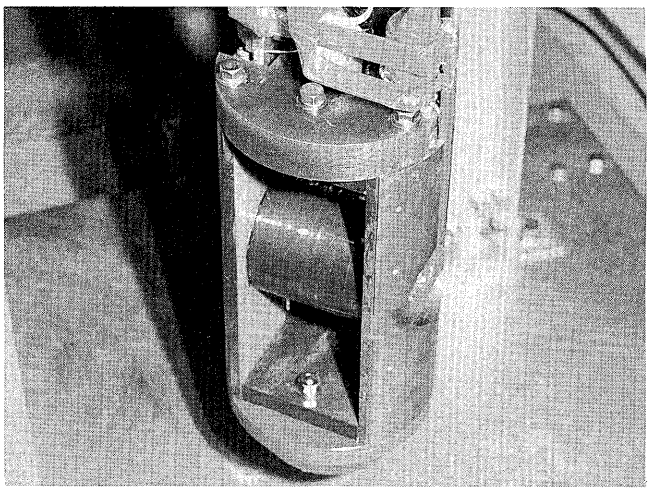
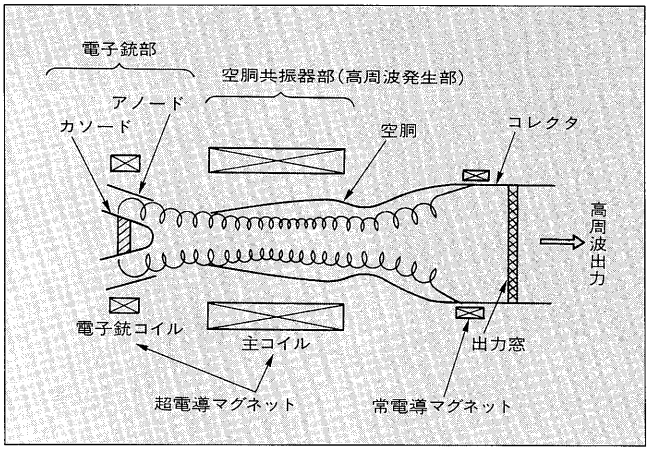


図10　ジャイロトロンの基本構造



らせん運動することを利用して，電子のエネルギーを高周波のミリ波エネルギーに変換する装置（真空管）である。[7] このためジャイロトロンは核融合プラズマの加熱用として期待されている。数十 GHz を超える周波数を発振させるためには電子のサイクロトロン周波数の関係から安定な高磁界が必要である。低コストで安定な高磁界を実現するためには，超電導コイルを磁界発生装置として採用する必要がある。

図11は 100GHz 帯 1 MW 級高周波加熱発振管用として日本原子力研究所へ納入した超電導マグネットを示す。発振管が設置されるマグネットの室温口径は 220mm，中心磁界は 5.0T，定格電流値における蓄積エネルギーは約 590 kJ である。**図12**はこのマグネットの回路を示したもので，主コイルと電子銃コイルは直列接続で同一電源で励磁し，磁界調整用の補助コイルは別電源で励磁する。永久電流スイッチの採用により永久電流モード運転ができる。多層断熱や着脱式電流リードおよび 20K/80K シールド冷凍機の採用により，極低温部への熱侵入量は，0.1W 以下を実現している。これにより，冷媒の液体ヘリウムの充てんなしに連続50日以上の通電ができる。

3. 2　超伝導バスライン[8]

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置用をめざし，超伝導バスラインを同所および古河電気工業(株)と共同で開発している。超伝導バスラインは電流リードと超電導コイル間を超電導導体で接続する装置である。**図13**にヘリカル装置における超伝導バスラインの概略配置計画図を示す。この装置を用いることにより，従来，コイル近傍に設置しなければならなかった電流リードを電源近傍など任意の位置に設置でき，配置上の制約を大幅に緩和できるとともに，超電導コイルへの給電ラインとしての性能向上が図られる。

超伝導バスラインの定格電流は 30kA，長さは 45～60m となる。超電導導体は，高い安定性と機械的たわみ性の要請からアルミニウム安定化成形より線を使用する。多層断熱層（SI）をもつ四重のコルゲート管の最内層にアルミニウム安定化超電導導体を配置し，冷媒の液体ヘリウムはこの最内層を流れる構成である。給電ラインとしての高い信頼性が要求されるため，バスラインはすべて工場で製作し，その敷設だけを現地で実施するよう設計してある。また，現地では所定のルートに沿って敷設できるよう，通常のケーブルと同様曲げられる構造となっている。

4　材料開発

超電導コイルは一般的に，発生する自己磁界が大きいことおよび高い電流密度のために，常電導コイルに比べ，電磁力は大きくなる。その強大な電磁力による導体の動きを阻止しないと超電導コイルはクエンチしてしまう。

このため超電導コイルの一部を構成する絶縁材の役割は重要である。富士電機では，超電導コイル用絶縁材（樹脂）の開発を実施しており，極低温，耐放射線，高強度接着など用途別に開発し，前章までで紹介した各超電導コイルに使用している。

図11　ジャイロトロン用超電導マグネット

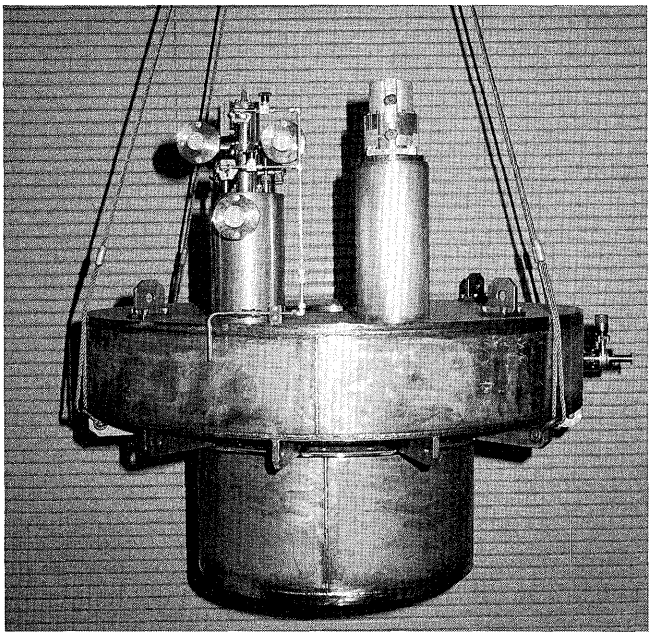
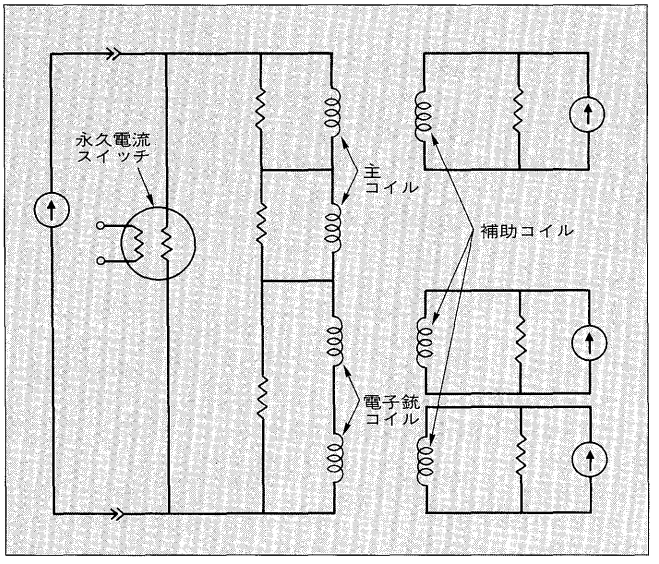


図12　超電導マグネットの回路図

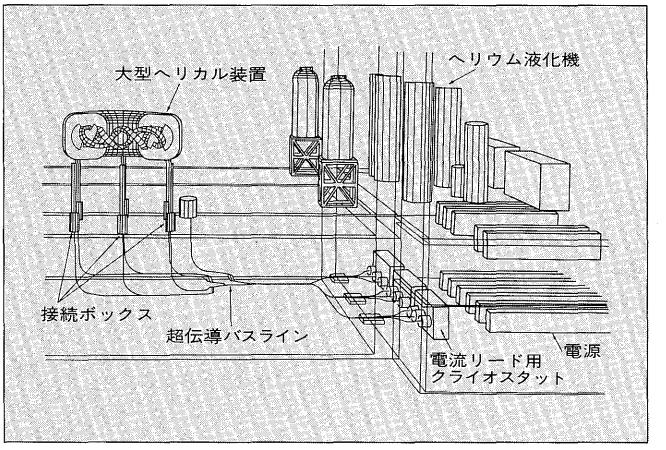


5　あとがき

核融合炉用として開発してきた超電導機器の概要を紹介した。核融合炉の実現には，今後さらなる研究開発が必要である。富士電機ではこれまでに蓄積してきた超電導応用技術を用いてその研究開発に積極的に取り組み，核融合炉実現に寄与していく所存である。

最後に，富士電機の核融合炉関連の超電導機器の開発は関係各位の並々ならぬご努力，ご協力により実施できたものであり，深く感謝の意を表する。特に，古河電気工業(株)殿および各種共同研究を通じ多大のご指導，ご鞭撻をいただいた日本原子力研究所殿ならびに核融合科学研究所殿には心から感謝の意を表する。

図13　超伝導バスライン概略配置計画図



参考文献

(1) 日本原子力研究所：核融合炉をめざして　核融合研究開発の現状1992年，第18回核融合研究成果報告会資料（1992年）

(2) Takahashi, Y. et al. : Development of the Advanced Disk Type Coil for the Toroidal Field Coil, Fusion Technology 1992, Vol.1, p.942-946 (1993)

(3) Takahashi, Y. et al. : The Superconducting Split Coil for the Large Scale Superconductor Test Facility, Cryogenics, Vol.30 September Supplement, p.576-580 (1990)

(4) Isono, T. et al. : Critical Current Measurements Using 13-T Spilt Coils and 100kA Superconducting Transformer, IEEE Transaction on Magnetics, Vol.27, No.2, p.1839-1842 (1991)

(5) 岩本収市ほか：プラズマディスラプション模擬コイルの製作，第48回低温工学・超電導学会講演概要集，D2-12, p.216 (1992)

(6) Konno, M. et al. : Superconducting Magnet System for High Power Gyrotron, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.3, No.1, p.551-554 (1993)

(7) 山本巧：プラズマ加熱用ジャイロトロン，電気学会雑誌，Vol.106, No.10, p.975-978 (1986)

(8) Mito, T. et al. : Conceptual design and development of a superconducting bus-line for the Large Helical Device, Fusion Engineering and Design, Vol.20, p.113-120 (1993)

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。