

核融合科学研究所 大型ヘリカル装置の完成

Completion of Large Helical Device for National Institute for Fusion Science

甲斐 俊也
KAI Toshiya

高野 広久
TAKANO Hirohisa

斎藤 房男
SAITO Fusao

本島 修
MOTOJIMA Osamu

人類究極のエネルギー源を旨とした核融合の研究は、現在、世界各国において活発に進められている。このたび、文部省 核融合科学研究所が1990年から8年計画で建設を進めていた大型ヘリカル装置(LHD: Large Helical Device)が完成し、予定どおり98年3月31日にプラズマ実験を開始した。LHDの建設にあたり、さまざまな検討、検証試験を行い、世界最大級の大型超伝導コイル、プラズマ加熱装置などを開発・製作した。今後、LHDによる核融合炉実現に向けた研究の進展が期待されている。

Research in the field of fusion technology has been progressing around the world. The Large Helical Device (LHD) under construction since 1990 at the National Institute for Fusion Science (NIFS) has now been completed. The LHD plasma experiment began on schedule on March 31, 1998.

NIFS and Toshiba developed the large-scale superconducting coils and plasma heating system for the LHD. From now on, the LHD is expected to greatly contribute to the progress of fusion science toward the realization of a fusion reactor.

1 まえがき

世界各国でさまざまな方式の核融合の研究が進められているが、大型装置による研究は、日本原子力研究所の臨界プラズマ試験装置(JT-60)、およびアメリカ、欧州でのトカマク型装置によるものが中心であった。文部省 核融合科学研究所は、わが国独自の方式であるヘリカル型装置による核融合の研究を本格的に行うため、90年から8年計画で、約1,000億円の前算を投じ、岐阜県土岐市にLHDを建設した⁽¹⁾。

LHDの建設にあたっては、さまざまな検討、検証試験を行い、世界最大の強制冷却型超伝導ポロイダルコイルをはじめ、負イオン源を用いた中性粒子入射加熱装置、168 GHz ジャイロトロンを用いた電子サイクロン共鳴加熱装置といったプラズマ加熱装置などを開発し、今後の大型核融合装置に向けての製作技術を確立した。

2 LHDの概要

LHDは、わが国独自のアイデアであるヘリオトロン磁場により核融合臨界条件に近い1億度のプラズマを閉じ込め、核融合炉開発に必要な各種のプラズマ物理学と核融合炉工学の研究を進めることを目的としており、高温プラズマの定常保持を大きなミッションとして掲げている。このため、1.6 GJに達する巨大な磁気エネルギーをもつ超伝導システム、数十MW出力のプラズマ加熱装置、閉止型ヘリカルダイバータなどを備え、最適化した磁場配位において無電流定常プラズマを生成し、その性質を実験的に実証す

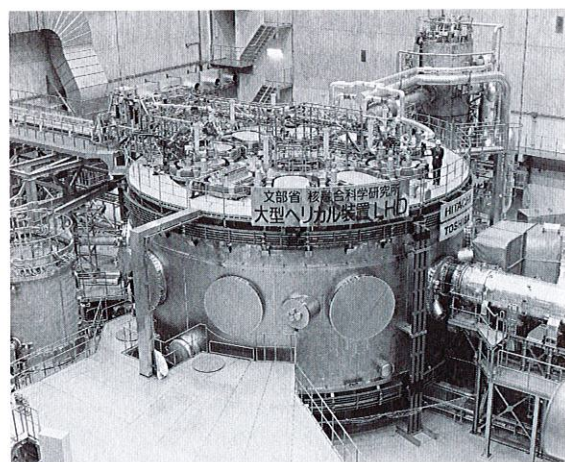


図1. 核融合科学研究所 大型ヘリカル装置(LHD) 超伝導コイルを用いた世界最大のヘリカル型核融合実験装置。

View of LHD

る予定である^{(1),(2)}。

LHDの外観を図1に示す。写真中央の断熱真空容器内に、プラズマ真空容器、超伝導コイルなどが収納されており、プラズマの大きさは $R=3.9\text{ m}$ (プラズマ大半径)、 $a=0.6\text{ m}$ (プラズマ小半径)である。磁場強度は当面3 T(テスラ)で運転され、最終的には4 Tへ増強する。プラズマ真空容器外側の2本の螺(ら)旋状のヘリカルコイルによりヘリオトロン磁場を作るとともに、計6本のポロイダルコイルによりプラズマの位置、形状を制御する。これらすべてのコイルを超伝導化した世界最大のヘリカル型核融合実験装置である。

3 超伝導ポロイダルコイルの開発

核融合の実現には抵抗損失のない超伝導コイルの実用が不可欠であり、LHD では、大型装置としては世界で初めて全コイルの完全超伝導化を採用した。このため、超伝導導体の開発やコイル製作技術の確立が重要課題であり、その開発から着手した。

89 年からの各種導体、小規模コイルの試作、検証を経て、91 年から LHD に用いる実機ポロイダルコイルの製作を開始した。これらのコイルは、それぞれ上下一対の内側垂直磁場 (IV) コイル、内側形状制御 (IS) コイル、外側垂直磁場 (OV) コイルで構成され、プラズマを制御する変動磁場を発生し、低交流損失が要求されることから、強制冷却方式が採用された。図 2 に完成したポロイダルコイルを、表 1 にその主要諸元を示す。OV コイルは、外径 12 m、磁気エネルギー 251 MJ に及ぶ世界最大の強制冷却超伝導コイルである。

コイル製作にあたり、図 3 に示すようにさまざまな課題があり、各種解析および試作検証を行い、設計・製作を進めた。

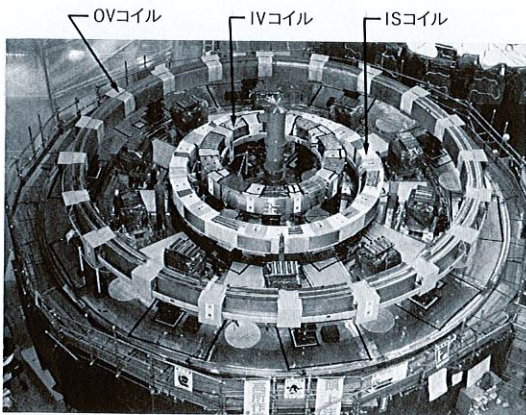


図 2. 超伝導ポロイダルコイル 3 対のポロイダルコイルのうち、下側 3 個を LHD ベルジャー底板に設置したところを示す。

Complete poloidal coils on cryostat base of LHD

表 1. ポロイダルコイルの主要諸元
Main specifications of poloidal coils

項目	IV	IS	OV
コイル中心径 (m)	3.6	5.64	11.1
コイル高さ (m)	0.47	0.47	0.54
質量 (t)	16	25	45
起磁力 (MA)	5.0	4.5	4.5
バンケーキ数	16	16	16
ターン数	15 × 16 = 240	13 × 16 = 208	9 × 16 = 144
磁気エネルギー (MJ)	68	104	251
導体長さ (km)	2.7	3.7	5.0

(コイル 1 個当たりの値)

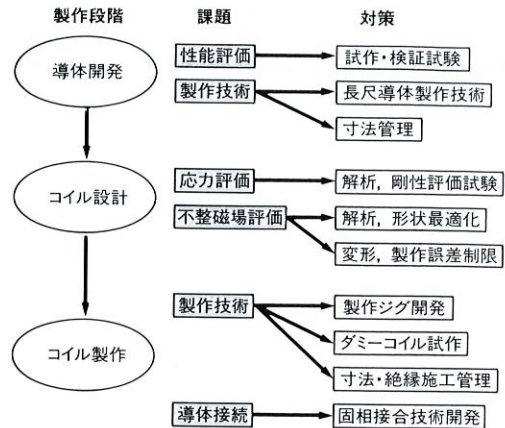


図 3. ポロイダルコイル開発の経緯 各製作段階における技術課題と対策を示す。解析や試作検証を進め、製作技術を確立した。

Development of poloidal coils

強制冷却導体は、コンジットと呼ばれる管の中に超伝導線を多数本撚(より)線し挿入した構造で、素線とコンジットの間に超臨界圧ヘリウムを流し冷却する。このため、機械的強度や電気絶縁性能、信頼性、製作性などの面から、大型コイルに適している。導体の性能として重要なものに、臨界電流、安定性などが挙げられるが、研究・開発用コイルや試験導体などにより数々の検証を行い、これらの仕様を決定した。

プラズマ閉じ込め向上のためには、高精度の磁場が必要であり、コイルの不整磁場低減のため、冷却・励磁時の変形、製作誤差を 2 mm 以下に抑える必要がある。厳しい寸法精度を実現するために、先行して実機サイズのダミーコイルの試作を行い、各コイルの製作条件を決定した。これらを反映し、厳しい寸法管理と絶縁施工管理を行った結果、現地で製作した OV コイルにおいても、2 mm 以下の寸法精度 (2×10^{-4} の精度) を実現した。さらに、フィーダ形状、層間渡り形状、層間接続位置の最適化を行うとともに、導体接続部のコンパクト化を実現した。導体接続部は、NbTi フィラメントどうしを固相接合する方式を採用し、素線の接合本数、加熱温度、加圧圧力を最適化した^{(3),(4)}。

完成した IV-L コイルは、LHD に組み込む前に、冷却通電試験を実施し、コイル単体としての性能、健全性を確認した。ポロイダルコイルのほか、ヘリカルコイル、電磁力支持構造物など、LHD の総冷却質量は約 850 トンにも及ぶが、LHD 全体の総合冷却運転は順調に進み、予定どおり約 1 か月で完了した。その後の励磁試験、プラズマ実験中も、コイルは安定した運転が行われている。

4 プラズマ加熱装置の開発

LHD のプラズマ加熱装置には、電子サイクロトロン共鳴

加熱装置 (ECH), 中性粒子入射加熱装置 (NBI), イオンサイクロトロン共鳴加熱装置 (ICRF) がある。表 2 に、東芝が製作した ECH, NBI の主要定格を示す。

表 2. ECH, NBI の主要諸元

Main specifications of ECH and NBI systems

装置名称	主要定格
電子サイクロトロン共鳴加熱装置 (ECH)	ジャイロトロン定格 : 168 GHz, 500 kW エネルギー回収型
	ジャイロトロン台数 : 6 台
	コレクタ電源定格 : DC-60 kV, 42 A×3
中性粒子入射加熱装置 (NBI)	負イオン源定格 : 180 kV, 40 A
	負イオン源台数 : 2 台
	ビーム種 : 水素
	加速電源定格 : DC-170 kV, 45 A×2

4.1 ECH の製作

ECH とは、ジャイロトロンから発振される大電力ミリ波をプラズマに入射し、プラズマ中の電子を加熱するものであり、LHD プラズマの生成と加熱には不可欠なものである。LHD は、84 GHz および 168 GHz という周波数の違う 2 種類の ECH 装置を備えている。

キーコンポーネントであるジャイロトロンについて、東芝はこれまで日本原子力研究所との共同開発などで世界のトップレベルの成果を上げており、LHD に用いるジャイロトロンは、高効率、大出力を可能とするエネルギー回収型 (CPD (Collector Potential Depression) タイプ) のものを採用した。電源は、これまでの大電力制御用真空管の代わりに GTO (Gate Turn Off) スイッチを採用し、全半導体化を図った。装置外観を図 4 に示す。ECH は、今後ジャイロトロン台数の増強を行い、最終的なシステム出力 5 MW 以上は世界最大のものとなる予定である。

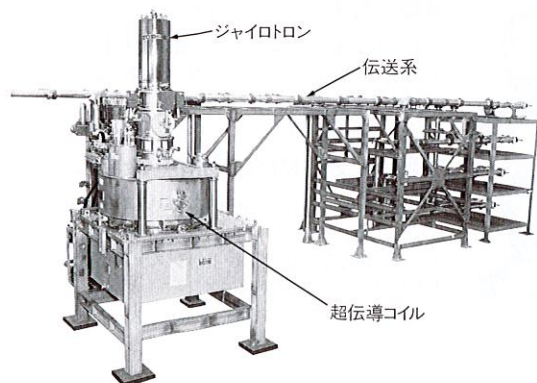


図 4. 168 GHz ECH システム ECH システムはジャイロトロン、超伝導コイル、伝送系などから構成される。

168 GHz ECH system

また、ジャイロトロンの出力伝送系は、導波管と呼ばれる円形管のほか、ビームの変換、結合のための収束鏡、マイクロ波の角度を変えるベンド部、真空窓をもつプラズマ入射アンテナ部などから構成され、ジャイロトロンから LHD 本体まで 100 m を超える伝送を行う。伝送系内部での放電を抑えるため、検証試験を行いながら、さまざまな改良を施したうえで、順次レーザによる軸調整を行い、0.1 mm 精度で組み立てた。LHD ファーストプラズマ発生にあたっては、84 GHz ジャイロトロン出力を伝送し、LHD に入射した。

4.2 NBI の製作

LHD は、1 機当たり 2 台の負イオン源を装着した 2 機の NBI を備えており、98 年 9 月からの第二サイクルプラズマ実験に使用される。NBI とは、正または負の水素イオンを中性化した高速中性粒子をプラズマに入射することで、高温、高密度プラズマを生成、加熱するものである。図 5 に、NBI ビームライン (イオンビームを中性化するとともに、残留イオンビームの回収を行う) の外観を示す。

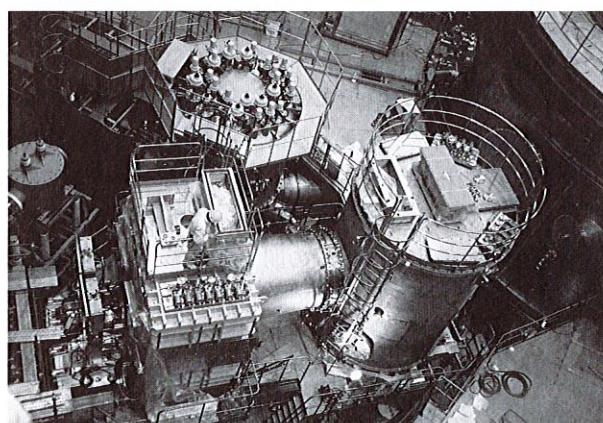


図 5. NBI ビームライン ビームラインと呼ばれる真空容器の中で、イオンビームの中性化や残留イオンビームの回収を行う。

Beamline of NBI system

近年の大型核融合実験装置用 NBI では、中性化効率の良い負イオン方式を用いることが不可欠であり、大出力負イオン源の開発が必要である。このため、90, 91 年度に NBI テストスタンドを製作し、これを用いて負イオン源の開発を進めてきた。1/6 サイズイオン源、1/3 サイズイオン源を順次製作し、1/3 サイズで 125 keV-16 A の引出しに成功、また、実機サイズイオン源の試験も初期の目標を達成した。

NBI には、負イオン源からイオンとともに出てくる水素と中性化されなかった水素を排気するため、クライオポンプを用いているが、従来のヘリウム凝縮タイプでは、大型の液体ヘリウム冷凍設備が必要となり高コストとなってしまうため、小型のクライオソーブションポンプを開発し、

これを多数取り付ける方式を採用した。これは、表面に吸着材をつけたパネルを、20 K 程度の極低温に冷却して水素ガスを吸着排気するもので、検証試験においても凝縮タイプと同等の排気特性を確認した。ビームライン当たりの排気速度は、1,360 m³/s (水素ガス換算) に達している。

5 LHD 実験計画

LHD は、当初の予定どおり、98年3月31日にファーストプラズマを発生し、プラズマ実験を開始した。図6にファーストプラズマの写真を示す。核融合科学研究所においては、磁場強度 1.5 T での実験を行った後、定格磁場である 3 T に上げ、ECH, NBI, ICRF をすべて用いた高温高密度プラズマの生成、制御、定常運転実験を進めていく予定である。これらの実験を通じ、将来の核融合炉システムを構築するためのデータベースが得られるものと期待されている。

各装置に対して、今後は点検、改良、増強を計画的に進めていくとともに、LHD の第二期実験として予定されている 4 T 実験に向け、必要となる検討、研究・開発を実施していく予定である。

これまでの LHD 建設において、世界最大級の各装置を製作していく際に開発してきた設計・製作技術や、実際の運転において得られるデータの数々は、今後の大型装置建設のための貴重なデータベースとなる。これらを基礎とし、さらなるキー技術、システムの開発を進めていく必要がある。

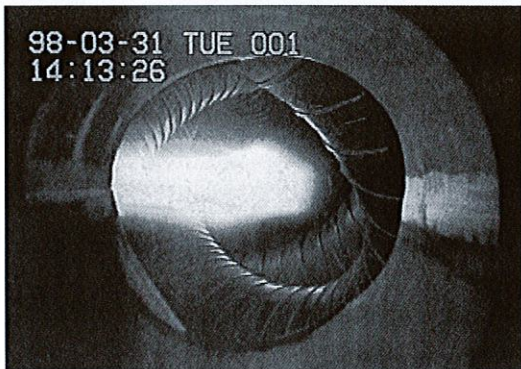


図6. LHD ファーストプラズマ 98年3月31日に、ECH を用いて発生したファーストプラズマを示す。

First plasma of LHD

6 あとがき

核融合科学研究所が、90年から8年計画で建設を進めてきた LHD が完成し、当初の計画どおりプラズマ実験を開始した。この計画どおりの目標の達成は、わが国の研究・技術レベルの高さを示していると言える。

LHD 建設にあたり、超伝導ポロイダルコイルやプラズマ加熱装置などの世界最大級の装置を、さまざまな検討、検証試験を実施し、開発・製作した。これらを通じて得られた知見、確立した製作技術、および今後の LHD の実験を通して得られるデータは、今後の大型装置建設に必ず役立つものと確信している。

謝辞

各装置の開発にあたり、多大なご指導、ご協力をいただいた関係各位に深く謝意を表する次第である。

文献

- (1) 本島 修. 大型ヘリカル装置計画にみる核融合研究の現状と展望. *Isotope News*, 1998年3月号.
- (2) 本島 修. 大型ヘリカル装置のための超伝導装置の開発と製作——小特集の企画にあたって. *プラズマ・核融合学会誌*, 72, 12, 1996, p.1302.
- (3) 高野広久, 他. 大型超伝導磁石. *東芝レビュー*, 53, 1, 1998, p.42-46.
- (4) 高畑一也. 大型ヘリカル装置のための超伝導装置の開発と製作——ポロイダルコイルの製作. *プラズマ・核融合学会誌*, 72, 12, 1996, p.1334-1339.



甲斐 俊也 KAI Toshiya

原子力事業部 先端エネルギー開発部グループ長。
核融合関連機器のシステム開発・設計に従事。プラズマ・核融合学会、日本機械学会会員。
Nuclear Energy Div.



高野 広久 TAKANO Hirohisa

京浜事業所 技監。
核融合装置、超伝導コイルなどの新規装置の開発・設計に従事。日本機械学会、日本原子力学会会員。
Keihin Product Operations



斎藤 房男 SAITO Fusao

原子力事業部 先端エネルギー開発部参事。
核融合関連機器のシステム開発・設計に従事。プラズマ・核融合学会会員。
Nuclear Energy Div.



本島 修 MOTOJIMA Osamu, D.Eng.

文部省 核融合科学研究所大型ヘリカル研究部研究主幹、教授、工博。
プラズマ物理学、核融合炉工学システムなどの研究に従事。大型ヘリカル装置実験責任者。
National Institute for Fusion Science