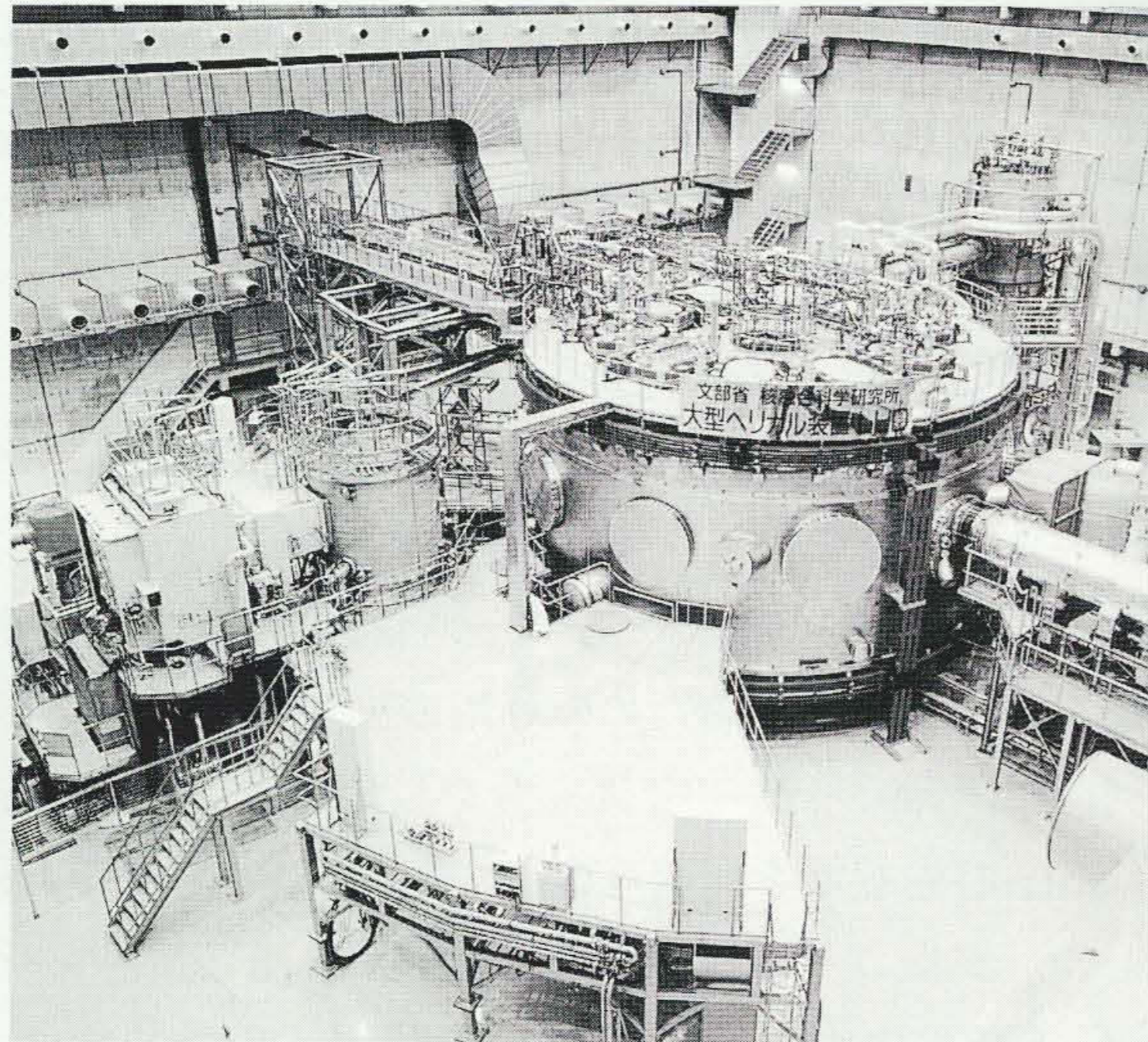


超電導技術による大型ヘリカル装置(LHD)の完成

Completion of the Large Helical Device (LHD)

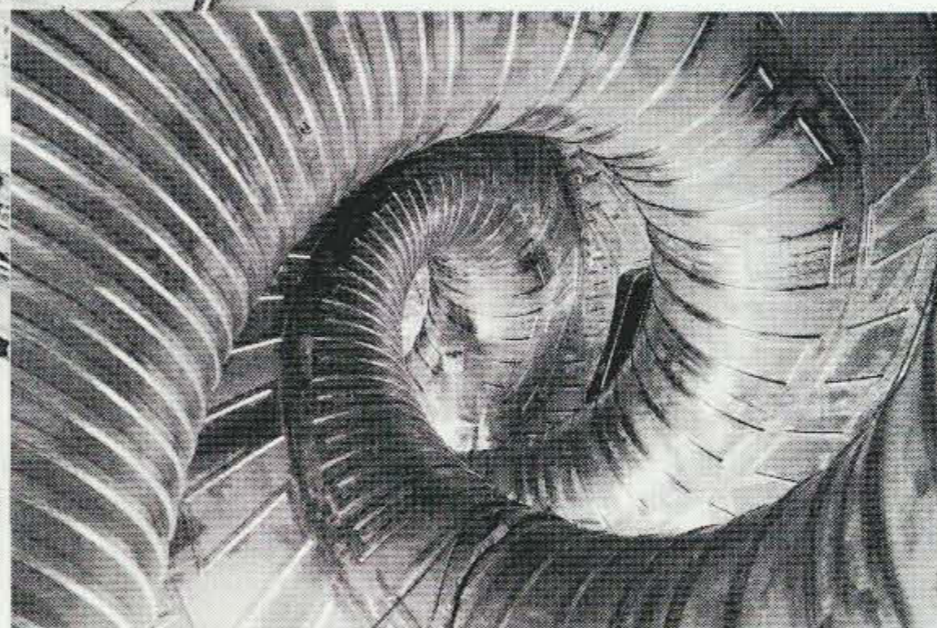
本島 修 Osamu Motojima 上出泰生 Taisei Uede
浅野克彦 Katsuhiko Asano 森山國夫 Kunio Moriyama



(a) 全体の外観



(b) 初プラズマの生成



(c) プラズマ真空容器の内部

大型ヘリカル装置(LHD)
超電導ヘリカルコイルによる、世界最大のヘリカル形核融合装置である。

人類の究極のエネルギー源「核融合炉」の実現を目指した研究開発が世界各国で推進されている。文部省核融合科学研究所で、1990年から8年計画で進めてきたLHD(大型ヘリカル装置)プロジェクトでは、世界最大のヘリカル形核融合装置がこのほど完成し、1998年3月31日のプラズマ初点火から本格的な実験を開始した。

LHDの特徴である長時間のプラズマ持続を実現するうえで必要となる高精度ヘリカル形状化技術や、超電導技術などをはじめとする数多くの課題の解決が、装置建設に必須であった。日立製作所は、当初から種々の試作開発や検証実験を含むさまざまな検討を行い、装置の心臓部である超電導ヘリカルコイルをはじめとする本体、プラズマ加熱装置、中央制御装置、さらにガス注入装置や総合ユーティリティシステムなどを設計、製作した。これらの各機器は安定に運転され、LHDのプラズマ実験は順調に進められている。

今後、LHDによる核融合プラズマ実験で大きな進展が期待されるとともに、装置建設を通して開発、確立された技術が、多方面にわたって、これからの大型プロジェクトや種々の分野に適用拡大されるものとする。

1 はじめに

未来のエネルギー源として期待される核融合技術の分野では、世界各国で種々の方式について研究が進められている。文部省核融合科学研究所は、1990年から8年間をかけてわが国独自のアイデアによるヘリカル方式で、世界最大のLHDを完成した。LHDでは、定常運転でプラズマ閉込めを行い、炉心プラズマのための重要な物理的、工学的研究を本格的に行うことを目的としている。

ここでは、この装置の完成に至るまでの技術開発の経緯と、主要機器について述べる。

2 LHDの概要

LHDでは、ヘリカル方式による閉込め原理の実証というこれまでの段階から、炉心に近いプラズマ閉込め(イオン温度：1億度)と定常運転(閉込め持続時間：1時間)を実際に実現するという段階へと実験を進め、核融合炉開発に必要なプラズマ物理と炉工学の研究を行うことを目的としている。

このため、ヘリカル磁場強度3 T、プラズマ体積28 m³、主半径3.9 mなどが決定され、全体として1.6 GJにも及ぶ巨大な超電導コイルシステムが必要となった。このシステムは、数十メガワットを出力するプラズマ加熱装置や、

表1 LHDの主要諸元

カッコ内の数値は第Ⅱ期計画値を示す。

項目	仕様
主半径	3.9 m
副半径	0.975 m
ピッチ数(l/m)	2/10
プラズマ体積	20~30 m ³
磁場	3 T(4 T)
磁気エネルギー	0.96 GJ(1.6 GJ)
総質量	1,500 t

ガス注入装置、全体を制御する中央制御システムなどから成る巨大なものである。最適化した磁場配位で平均無電流プラズマを生成し、実験的に検証していくことをミッションとしている。プラズマ物理と装置技術の高いレベルでの融合の下に成立するシステムとも言える。

LHDの主要諸元を表1に示す^{1),2)}。

3 LHD本体

3.1 装置の概要

超電導技術は、高電流密度とコンパクト化、および経済性の観点から、大型核融合装置には不可欠な技術である。このLHDでは、定常運転などの目的のために、プラズマ閉込めに必要なコイルをすべて超電導化した、世界最大級の超電導プラズマ試験装置である。本体は、超電導コイルを支持する構造物や、断熱支持脚を収納する大型クライオスタット、プラズマ真空容器で構成し、装置外径13 m、高さ9 m、質量1,500 tに及ぶ。

LHD全体の概略構造を図1に示す。

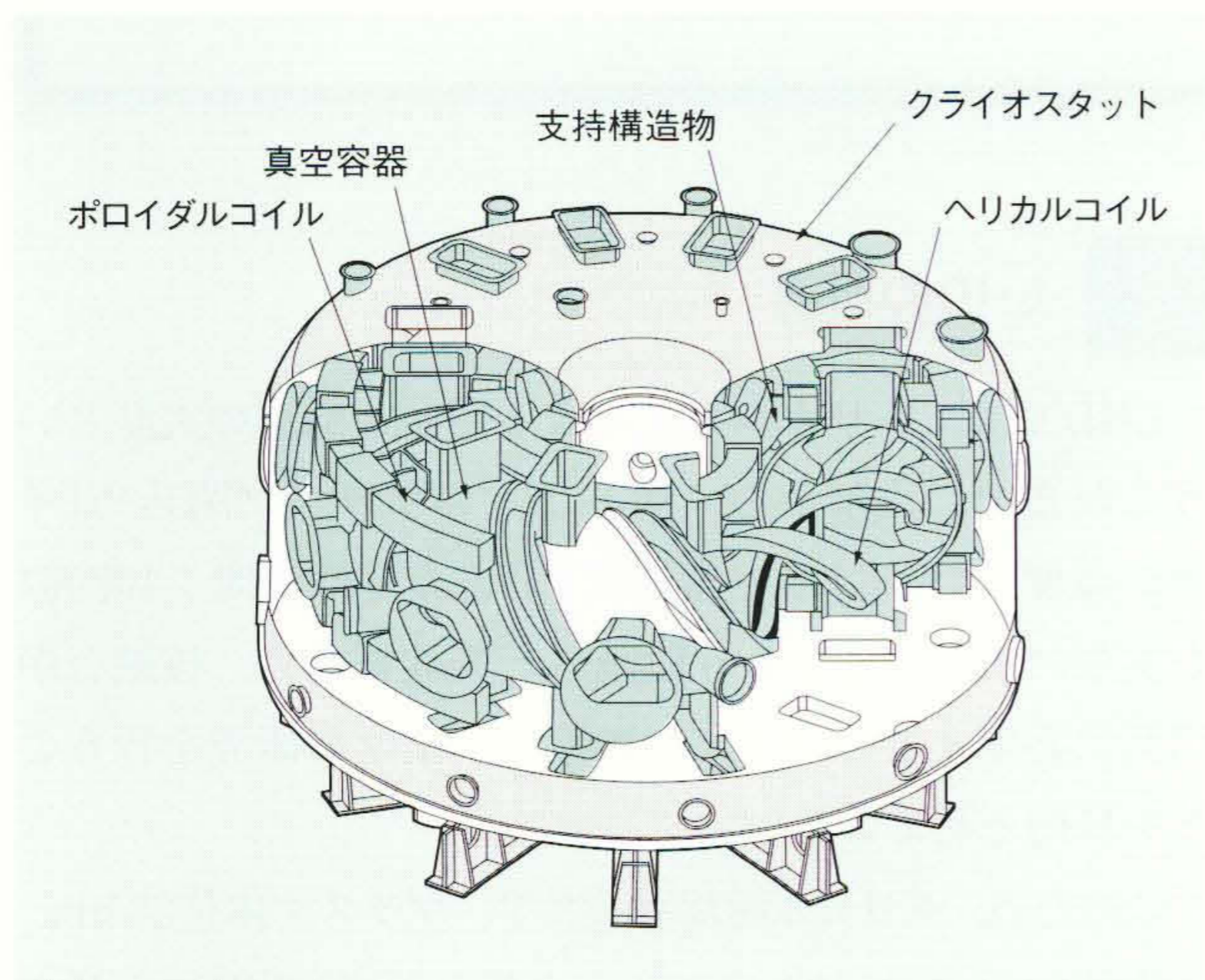


図1 LHD全体の概略構造

極低温部(ヘリカルコイル、電磁力支持構造物など)は、ベルギー内で断熱支持脚によって支持されている。

3.2 超電導ヘリカルコイル系

ヘリカルコイルには、その形状の複雑さに起因する製作上の問題と、実験的要請に基づくプラズマ位置への近接による支持構造の制約という課題がある。高精度、高信頼性も含めたこれらの課題に対しては、(1) 試作開発、(2) 製作設備・生産技術の開発、(3) 製作時の試作検証といったステップによって克服した。1989年から約3年間をかけて、各種方式の導体³⁾、小規模超電導ヘリカルコイル、実サイズモデルでの導体巻線成形技術の開発、小規模巻線機の試作・検証を行った。この結果を受けて、ヘリカル成形に耐えられ、かつ安定性に優れた超電導導体とするために、安定化材にCu-Ni被覆アルミニウムを用い、銅シースを電子ビーム溶接で一体化した複合超電導導体や、そのための専用の生産設備を開発した。同時に、1991年から3年間を費やして13軸NC(Numerical Control)巻線機を開発し⁴⁾、コイル巻線成形技術を確立した。実機コイル製作段階でも各種の開発検討を行い、(1) 巻線後張力を付加する巻線技術、(2) 巻線状態の表面精度をレーザ計測し、この結果に基づいてオンラインで絶縁スペーサの形状加工に用いて巻線精度を向上させる技術、(3) 高強度・低熱収縮の各種絶縁材料の開発などにより、ヘリカルコイルの高精度化と剛性向上を実現した⁵⁾。また、総長36 kmに及ぶ巻線では超電導線の接続が必要であり、超電導線どうしを直接はんだ接合する方式により、従来のはんだラップ接続よりも接続抵抗が1けた低い低抵抗接続技術(接続長400 mm:0.6 nΩ, 9 T, 4.2 K)も開発した。

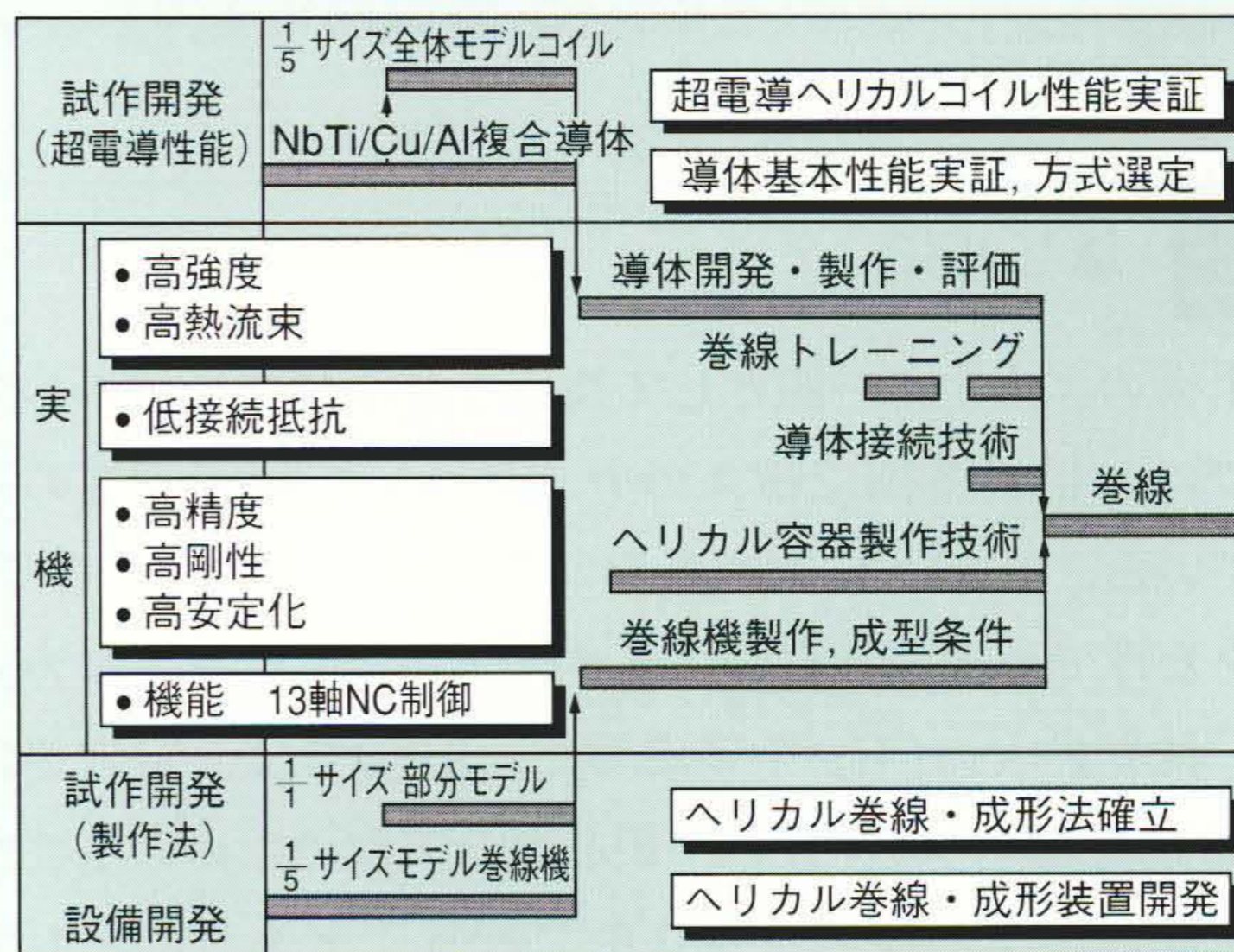


図2 ヘリカルコイルの開発経緯

要求仕様を満足するために、導体、コイル、設備など、さまざまな分野での技術開発を行った。

ヘリカルコイルの開発経緯を図2に示す。

完成したヘリカルコイルと超電導導体の断面を図3に、ヘリカルコイルの主要諸元を表2にそれぞれ示す。ヘリカルコイルは2条のコイルから成り、外径8 m、総巻数900ターンで、電流17.3 kA、電流密度53 A/mm²、磁気エネルギー1.6 GJ(4 T, 1.8 K冷却時)などの仕様が要求されている。冷却方式は、巻線作業性を考慮して浸漬冷却方式を採用した。

プラズマ閉込めに悪影響を及ぼす不整磁場を低減するには、ヘリカルコイルの高い製作精度と電磁力による変形を3.4 mm以下(4 T時)にすることが必要である。このため、シリンダ状の厚板(約100 mm)構造物をコイル容器に溶接し、コイルを外側から強固に支持する剛構造方式とした。この極低温支持構造物の一体化では、溶接変形も極力抑える手法を開発し、総合精度で±2 mm(磁場精度 $\pm 5 \times 10^{-4}$ に対応)の寸法精度を達成した。

極低温部分の組立状態を図4に示す。

3.3 真空容器、ベルジャ、総合組立

支持構造物と一体となった超電導ヘリカルコイルは、

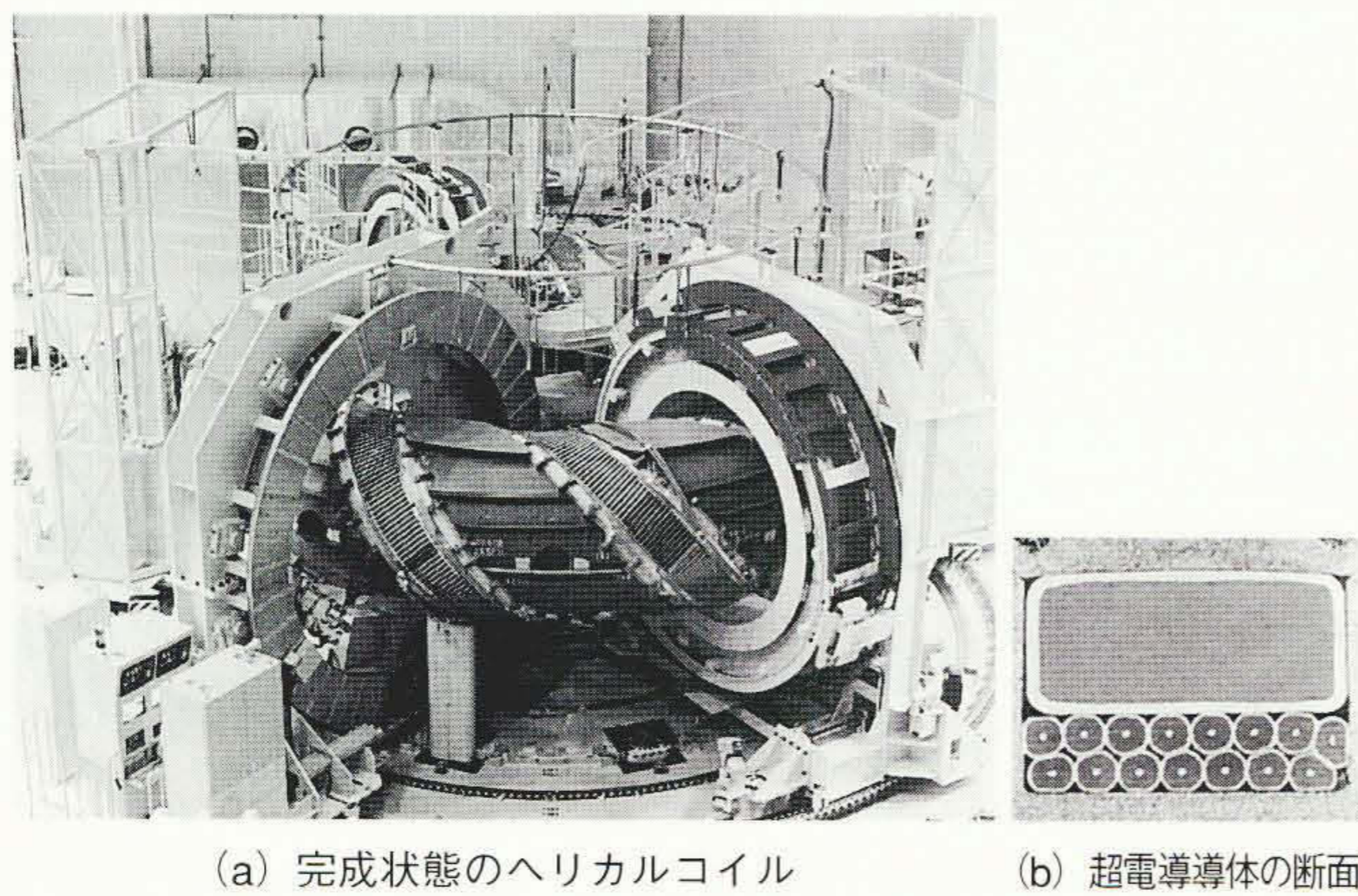


図3 ヘリカルコイルと超電導導体の断面

特殊な巻線機で製作したヘリカルコイルと、これに使用した超電導導体の断面を示す。

表2 ヘリカルコイルの主要諸元

カッコ内の数値は第Ⅱ期計画値を示す。

項目	仕様
起磁力	5.85 MA(7.80 MA)
中心・最大磁束密度	3・6.9 T(4・9.2 T)
コイル平均直径	7.8 m
電流	13 kA(17.3 kA)
電流密度	40 A/mm ² (53 A/mm ²)
磁気エネルギー	0.96 GJ(1.6 GJ)
冷却方式	浸漬(加圧超流動)
超電導導体	NbTi・Cu・Al複合

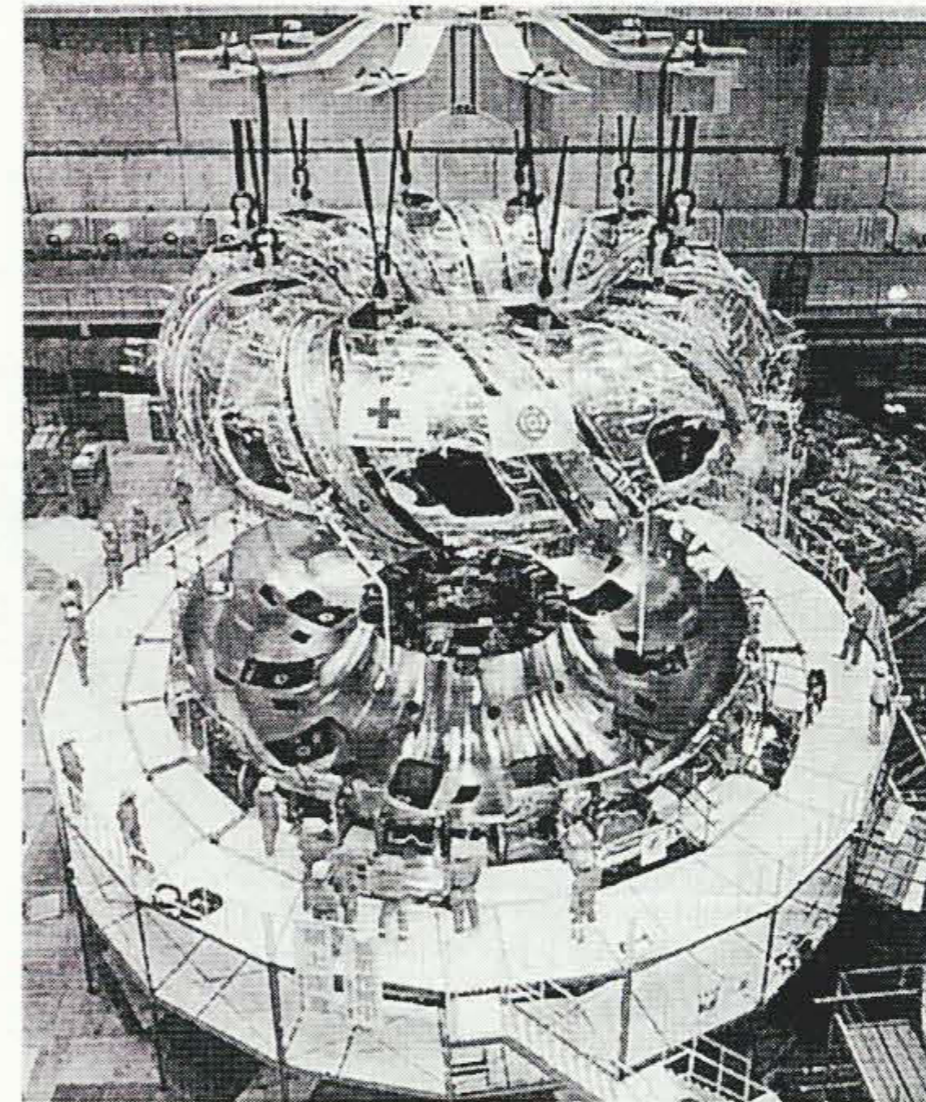


図4 極低温部の組立

ヘリカルコイルと電磁力支持構造物の組立状況を示す。この極低温部の冷却質量は850 tに及ぶ。

ポロイダルコイルも含めて、冷却質量が850 tにも及ぶ。プラズマ真空容器を断熱して設置し、これらを10本の断熱支持脚で支え、ふく射シールドなどの構造体とともにベルジャに収納して、装置本体の完成となる[31ページの図(a)参照]。

LHD本体の建設を通して開発した主要技術をまとめて表3に示す。

4 大電力NBI

4.1 装置の概要

NBI(Neutral Beam Injector: 中性粒子入射・加熱装置)はLHDの主加熱装置として計画され、2ビームライン合計15 MWの加熱を目標として開発が進められてきた。今回のLHDには、NBIが2台設置される。日立製作所は主に2号機を担当し、1998年8月に納入した。翌9月から、核融合科学研究所で本体プラズマへの入射・加熱実験が開始された。

4.2 装置の構成

LHDの中性粒子入射は、負イオン源で負イオンを生成、加速して、中性化セル内で負イオンを電氣的に中性化し、入射ポートを通して行われる。NBIの特徴は大型イオン源を2台使用した大出力であり、NBIには高性能な大型負イオン源が要求される。NBIの主な仕様は以下のとおりである。

- (1) イオン種：H⁻、(2) ビームエネルギー：180 keV、
- (3) ビーム引き出し時間：10 s、(4) イオン源数：2、
- (5) ビームライン数：1、(6) ビーム焦点距離：13 m

装置は、ビームライン、イオン源電源、冷却水設備、真空排気装置、制御装置などに大別できる。ビームラインとイオン源電源の特徴は以下のとおりである。

- (1) ビームラインは、水平に2台設置したイオン源、形

表3 LHDプロジェクトで開発された新技術

設計や製作、検査技術、設備などで多くの開発が行われ、これらの新技術の大型核融合装置への適用拡大が期待される。

分類	区分	部 位	内 容	特 徴	
本体構造	材料	電磁力支持構造物	ステンレス材	低温靱性(加熱条件)、溶接性良	
		ヘリカルコイル	絶縁材・スペーサ・樹脂	高剛性、低熱収縮、高精度、ヘリカル形状	
	設計・製作	超電導導体	ヘリカルコイル	Cu-Ni被Al/安定化銅シース溶接	長尺、高強度、高安定化
			ヘリカルコイル	成形加工、コイル製作法	三次元、高精度、ギャップ低減
				コイル構成	高電流密度
		導体接続	低接続抵抗、高強度		
		コイル容器	溶接、機械加工	狭あい部、高精度、三次元NC加工	
		電磁力支持構造物	溶接、機械加工	大型、高精度、高強度	
		プラズマ真空容器	成形加工	任意形状、三次元	
		ふく射シールド	銅-SUSクラッド構造	高熱伝導、高強度	
		断熱支持脚	多重板バネ折返し、配置	熱収縮変位吸収、低熱侵入、高剛性、耐震	
		断熱真空容器	溶接、機械加工	大型	
	計測	計測素子、計測線	高精度計測、ノイズ対策		
	検査	超電導導体	非破壊試験	超電導線と銅シース間はんだ接着状態	
コイル、容器		寸法計測	三次元複雑形状		

状の異なる2個の真空容器、これらの真空容器をつなぐ中性化セル、および入射ポートで構成する(図5参照)。イオン源が2台あるので、入射ポート部以外は除熱を考慮し、受熱機器をビーム軸ごとに設置した。

(2) イオン源電源は、プラズマ生成用のアーク電源、フィラメント電源、バイアス電源、ビーム引き出しを行う引き出し電源、およびビーム加速を行う加速電源で構成する。加速電源以外は高電位(180 kV)側にフロートした電位に設けられるので、がいしで絶縁されたテーブル上に設置される。

4.3 大型負イオン源

負イオン源の開発でも、日立製作所は、研究開発用の $\frac{1}{6}$ サイズと $\frac{1}{3}$ サイズの負イオン源を担当し、 $\frac{1}{3}$ サイズの負イオン源でH⁻電流最大16.2 A、ビームエネルギー最大125 keV、ビーム引き出し時間最大10 sに成功した⁴⁾。NBIのイオン源は、この成果を基に大型化したものである。その外観を図6に示す。このイオン源の特徴は以下のとおりである。

- (1) 低ガス運転(0.2~0.4 Pa)が可能であり、負イオンの生成効率が低い。
- (2) 大面積(幅250 mm×長さ1,250 mm)で均一なビームが引き出せる。

4.4 今後の展開

LHDでは長時間運転が可能のため、ビーム加熱を行うNBIに対しても、長時間入射の要求が高まっている。長時間運転のための改造も計画されており、日立製作所は

これにも対応していく考えである。

5 制御装置(中央制御システム)の開発

5.1 制御装置の機能

このシステムは、LHD全体を統括し、下記の機能を持つ制御装置である。

- (1) LHD全体の運転モード、コイル冷却、コイル通電、プラズマ実験などの全運転モードの移行維持管理を行う。
- (2) プラズマ実験モードで、パルス運転、定常運転の実験シーケンスを実行し、サブシステムに制御信号を出力することにより、LHD装置全体との協調をとりながら、プラズマ点火を行う。
- (3) プラズマ点火の2分前に計測装置を起動した後、ガスパフ装置や電源装置などに、高精度(0.1 ms単位)タイミングを出力し、再現性に優れたプラズマ実験を行う。

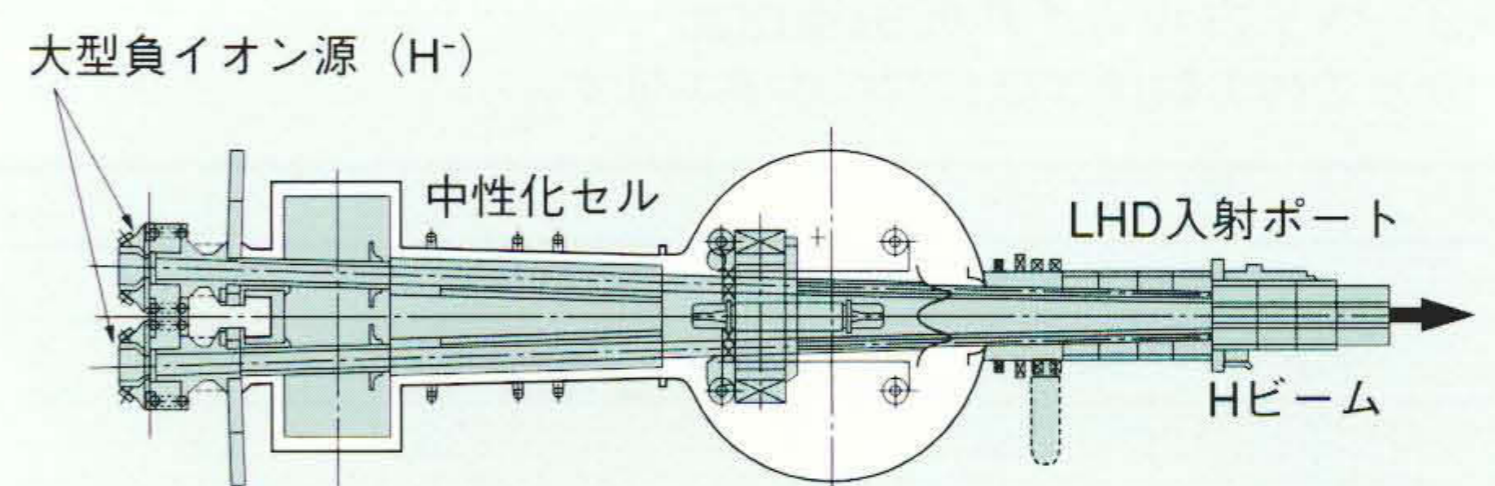


図5 ビームラインの構成

2台のイオン源で加速したビームが中性化セルで中性化され、入射ポートを通して本体装置に入射される。

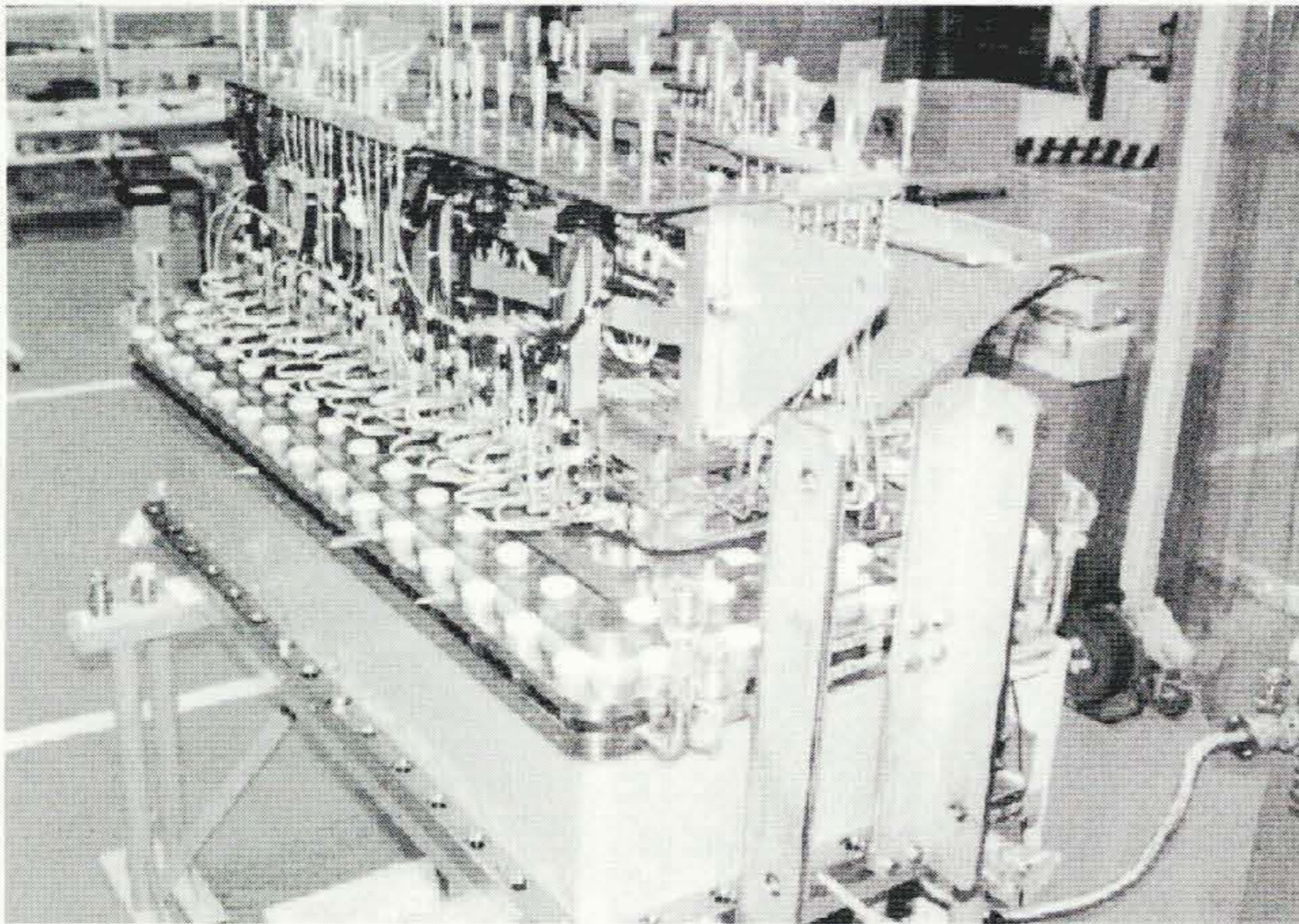


図6 大型負イオン源の外観

絶縁物にボイドレスFRP(繊維強化プラスチック)を使用した、長方形の大型(ビーム引き出し面積：250 mm×1,250 mm)負イオン源である。

(4) 真空容器本体やベルジャーなどのLHD本体の温度、ひずみなどのデータの収集、表示、保存を行い、警報監視を行う。

(5) 緊急減磁、急速減磁、通常減磁、制御停止の四つの保護レベルを設け、LHD全体の保護協調を行う。

5.2 制御装置の構成

制御装置の全体構成を図7に示す。

(1) 監視操作とデータサーバには、Windows NTパソコンを採用したクライアント-サーバ方式を適用した。トレ

ンド記録、実験制御の動作記録など、LHDの全情報をデータサーバで集中管理する構成とした。

(2) LHDの実験では、多くの実験者、運転者の共同作業で実験運転が行われる。このため、制御室の中央に150型ディスプレイ装置を設置して、情報の共有化を容易なものとした。

(3) 実験シーケンスについては、24時間運転が可能なFAパソコンを採用し、Windows NT上で動作するソフトウェアシーケンサによって実現した。

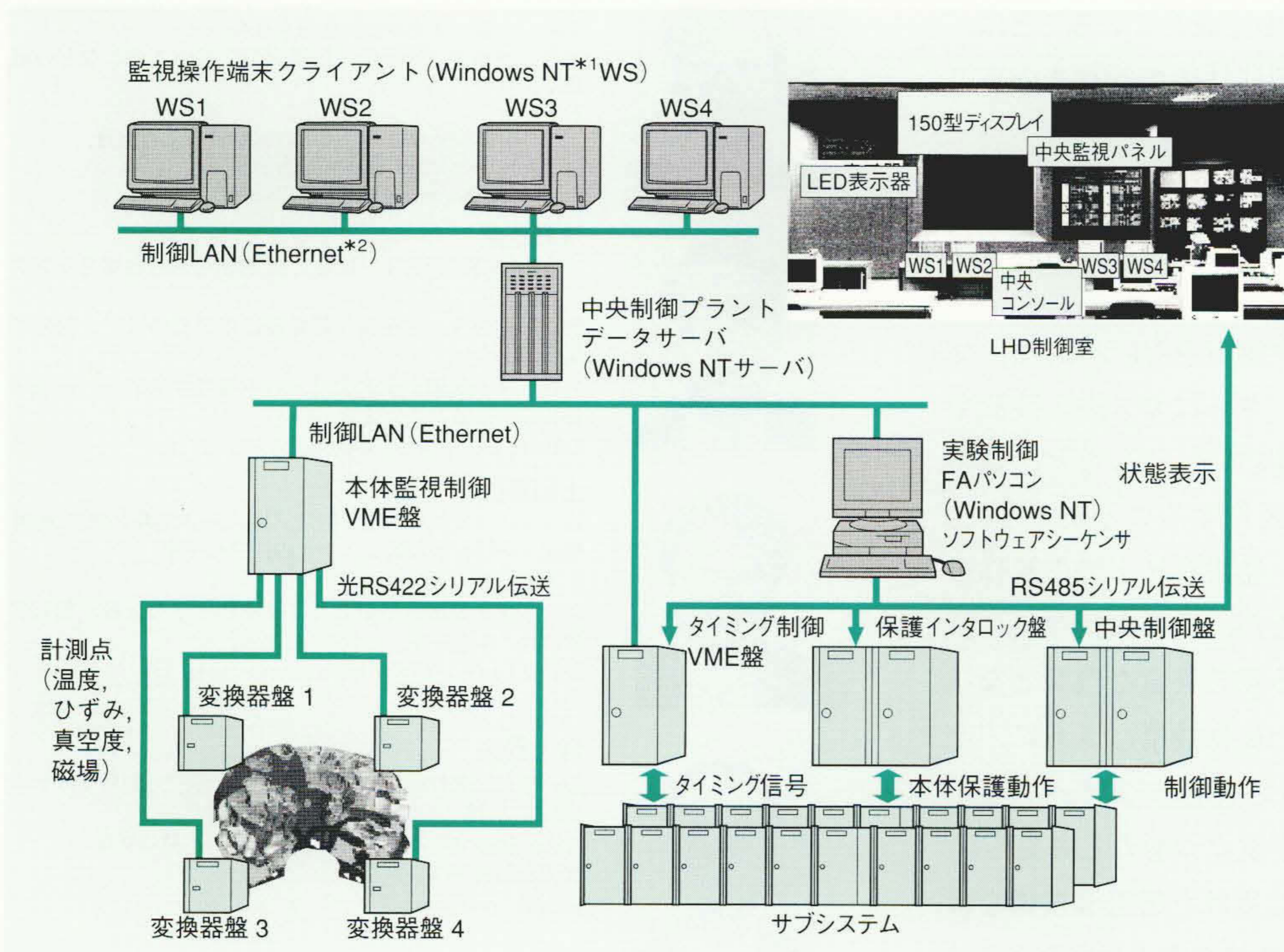
(4) システムの柔軟性と拡張性を考慮して、シリアル伝送方式を全面的に採用した。

シーケンサと各制御盤間の接続にはRS485シリアル伝送を適用し、オンオフ信号の入出力を数十ミリ秒で行っている。本体監視では、RS422シリアル伝送を適用し、LHD本体近傍に配置した変換器盤でデジタル化して、1秒周期のデータ収集を行っている。

(5) 緊急減磁や急速減磁、通常減磁の保護動作はハードワイヤードロジックとし、特に、コイル焼損事故につながる超電導コイルのクエンチに対しては負論理化を行い、フェイルセーフの構成をとった。

6 試験と実験

1998年1月に、ベルジャ(被排気容積：580 m³)とプラズマ真空容器(被排気容積：210 m³)の真空排気が開始さ



注：略語説明ほか

WS (Workstation)
LED (Light Emitting Diode)
VME (Versa Module Eurocard Bus)

*1 Windows NTは、米国およびその他の国における米国Microsoft Corp.の登録商標である。

*2 Ethernetは、米国Xerox Corp.の商品名称である。

図7 制御装置の全体構成

監視操作には、クライアント-サーバ方式のパソコンシステムを適用した。LHD制御室(右上)では、正面に150型ディスプレイを設置している。

れた。続いて2月には、冷却質量850 tの超電導コイル系の冷却が開始され、予定どおり約1か月で冷却を完了した⁷⁾。1998年3月23日から通電試験を開始し、27日には1.5 Tの磁場を達成した。その後、制御系やガスパフなどの周辺機器の調整を済ませた後、1.5 Tの標準磁場配位で、3月31日にプラズマ初点火に成功した⁷⁾。プラズマが生成される真空容器の内部とプラズマの写真を31ページの図(b)に示す。

プラズマ初点火以降、実験は順調に進められており、今後3 Tまで磁場を上げ、ECH(Electron Cyclotron Heating)、NBI、ICH(Ion Cyclotron Heating)といった各種加熱装置をすべて用いて、数十メガワットの出力レベルの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となっている。

LHDではさらに、装置の改良、増力が計画されており、第II期運転としてヘリカルコイルの超流動冷却化、4 T実験も検討されている。LHDの目指す無電流定常プラズマの物理を探求することにより、ヘリカル核融合炉への展望を切り開くことが期待されている。

7 おわりに

ここでは、LHDの完成に至るまでの技術開発と、この装置に用いられた主要機器について述べた。

LHDは8年間での建設が進み、平成9年度の完成、プラズマ点火を経て、平成10年度から実験が順調に進められている。当初の計画どおりに目標を達成していることは、わが国の核融合研究技術、装置製作技術のレベルの高さを示したものと言える⁸⁾。

LHD建設を通して種々の試作開発・検討を行い、多くの技術を開発し、確立した。その結果、世界最大の超電導ヘリカルコイル本体をはじめとして、三次元的プラズマ真空容器、大型クライオスタット(ベルジャ)や、プラズマ加熱装置、中央制御装置、さらにガス注入装置や総合ユーティリティシステム(中間ステージ)など、数多くの周辺機器を成功裏に設計、製作することができた。また、装置の規模が大きいため、建設サイトでの製作を長期にわたって行う必要があったが、これらは今後の核融合大型装置システムを建設する際の貴重な教訓となっており、得られた知見、確立した製作技術、さらに、今後LHDの実験を通して得られるさまざまなデータなどは、将来の大型装置の建設に必ず役立つものと考えられる。

LHDを通して格段の進歩を成し遂げた超電導技術をはじめとする各種技術では、今後、性能の向上はもとより、

操作性、信頼性、安全性などがますます重要となる。ユーザーの立場に立ってバランスのとれたシステムの見直し、構築も進めていく考えである。

終わりに、この装置の開発、建設にあたっては、関係各位から、多大なご指導、ご協力をいただいた。ここに深く謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) O.Motojima : Fusion Technology, 26, 437(1994)
- 2) O.Motojima : Fusion Energy, 3, 467(1996)
- 3) N.Yanagi, et al. : IEEE Trans.Magn., 27, 2357(1991)
- 4) S.Imagawa, et al. : IEEE Trans.Magn.32, 2248(1996)
- 5) S.Imagawa, et al. : Fusion Technology, 1996, 1027(1997)
- 6) Y.Takeiri, et al. : Development of a High-Current Hydrogen-Negative Ion Source for LHD-NBI System, journal of Nuclear Science and Technology(1998)
- 7) O.Motojima, et al. : Progress Summary of LHD Engineering Design and Construction, 17th IAEA Fusion Energy Conference(1998)
- 8) 社団法人プラズマ・核融合学会 : プラズマ・核融合学会特集大型ヘリカル装置(LHD)計画, Vol.74(1998)

執筆者紹介



本島 修

文部省 核融合科学研究所 教授、大型ヘリカル研究部研究主幹、大型ヘリカル実験推進本部長
現在、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
工学博士
プラズマ・核融合学会会員、日本原子力学会会員、日本物理学会会員、低温工学会会員
E-mail : motojima @ LHD. nifs. ac. jp



浅野克彦

1980年日立製作所入社、日立工場 核融合加速器開発センター所属
現在、核融合、加速器、超電導応用装置の設計、開発に従事
プラズマ・核融合学会会員、日本物理学会会員、電気学会会員、低温工学会会員
E-mail : asano @ cm. hitachi. hitachi. co. jp



上出泰生

1970年日立製作所入社、国分工場 ビーム応用装置部 所属
現在、中性粒子入射システムの開発に従事
工学博士
プラズマ・核融合学会会員、日本物理学会会員、電気学会会員、エネルギー・資源学会会員
E-mail : t-uede @ cm. kokubu. hitachi. co. jp



森山國夫

1979年日立製作所入社、大みか工場 原子力制御システム設計部 所属
現在、核融合・加速器制御システムの設計に従事
計測自動制御学会会員
E-mail : moriyama @ omika. hitachi. co. jp