

原子力委員会 核融合研究開発基本問題検討会

第三段階における炉工学研究開発の進捗：核融合科学研究所 - LHD用超伝導コイル，プラズマ加熱機器等の研究開発 -

核融合科学研究所 今川信作

1．はじめに

炉工学研究開発の進捗ということでは，次期大型装置あるいは核融合炉への適用を目指した要素技術あるいは応用技術の研究開発についても総括する必要があると思われるが，ここでは LHD の装置建設と実験遂行のための炉工学研究開発について，その主要な成果を纏める。

2．LHD における炉工学研究開発の進捗

(1) 超伝導コイルと支持構造物

LHD の鳥瞰図を図 1 に示し，超伝導コイルの主要な仕様を表 1 に示す。LHD は 1990 年に建設が開始され，1997 年に完成した。超伝導線には NbTi が選択され，1.8 K の超流動ヘリウム冷却との組合せによって 4 T の中心トロイダル磁場を発生する設計が行われた。その後，建設計画が 2 段階となり，第 1 期は中心トロイダル磁場が 3 T で，超伝導コイルは 4.4 K の常流動ヘリウム冷却となった。そのために第 1 期の最大経験磁界や定格電流値は LCT と同程度であるが，それでも約 1 GJ の磁気エネルギーを有する世界最大の超伝導コイルシステムである。3 大トカマク装置に匹敵する規模の，全コイルが超伝導の大型装置が，計画通りに建設可能であることが実証された。

LHD は 1 対の超伝導ヘリカルコイルと 3 対の超伝導ポロイダルコイルから構成される。ヘリカルコイルには巻線作業性が優先されて浸漬冷却方式の複合導体が採用され，ポロイダルコイルには当時の先進技術であった強制冷却方式のケーブル・イン・コンジット導体が採用されている。精度の良いプラズマ閉込め磁場を生成するために，全てのコイルに ± 2 mm の位置精度が要求され，巻線および支持構造物の製作において様々な工夫が施された。また，電磁力による変形も ± 2 mm 程度に抑制する設計が採用されたことから，主要な電磁力支持構造物の板厚は 100 mm に設定され，接続部は全て溶接構造が選択された。LHD 本体の組立順序と主要な溶接開先形状を図 2 と 3 に示し，溶接変形の主な結果を表 2 に示す。陸上輸送の制約から，ヘリカルコイルと外側ポロイダルコイルは現地で巻線され，さらに，電磁力支持構

造物や断熱真空容器等も 10 あるいは 20 分割で工場製作されて、現地で全体組立と溶接作業が行われた。主要な機器が現地製作であり、かつ、高精度の溶接構造物である点も次期大型装置の先駆けとなっている。

溶接変形抑制のために、工場内では主に電子ビーム溶接が採用された。現地では初層 TIG + MAG (または SMAW) 溶接が採用されて、周期対称性を重視した溶接工程管理を行った。具体的には、LHD の周期数 10 に対して 5 つの溶接チームを編成して、各チームの溶接が同時進行となるように管理した。その結果、3 mm 程度の溶接変形が生じる場合でも周期対称でない溶接変形成分は ± 1 mm 以内に収まり、溶接変形を設計に取り込むことによってコイル位置精度 ± 2 mm を実現するために必要な精度が達成された。

(2) コイル電源・送電システム

超伝導コイルの電源システムには大電流を維持する以外に異常発生時には蓄積された磁気エネルギーを安全に系外に放出することが要求される。定格 7.2 kV, 2 kA, 遮断電流 31.5 kA の直流遮断回路には、新たに限流ヒューズ式が開発された。一般産業品として市販されている部品のみで構成されており、部品の信頼性は安定しており安価かつコンパクトな遮断回路である。600 回の動作試験を行って信頼性を実証し、さらに開閉器の多重化とパイロブレーカの追加を行って故障確率 10^{-6} の高信頼性を達成している。

コイル電源を放射線遮蔽壁の外側に設置するために、約 50 m の送電システムが必要であった。そのために、最小曲げ半径が 1.5 m のフレキシブルな超伝導送電ラインが世界に先駆けて開発された。その仕様を表 3 に示し、配置図を図 4 に示す。コルゲート管を 5 重にして 80 K ガスヘリウム用のチャンネルを追加したことによって、4 K の熱負荷は 0.3 W/m に抑制されている。配線、配管等については 3 次元 CAD (Computer Aided Design) を活用した事前検討が十分に行われ、1 系統あたりの敷設を 9 日間で完了させることができたことも大きな成果である。

(3) 冷凍システム

LHD の超伝導コイルと支持構造物は 850 ton の重量と 1,000 m³ の表面積を有する世界最大級の極低温構造物である。これらを極低温に維持するために、5.6 kW @ 4.4 K と 20 kW @ 40-80 K の冷凍能力と 650 liter/h の液化能力を有するヘリウム液化冷凍機が建設された。LHD のヘリウム冷却系統図を図 5 に示すが、ポロイダルコイル用の超臨界圧ヘリウムとヘリカルコイルや電流リード用の液体ヘリウム、および、輻射シールド用の 40 K のガスヘリウムを発生する多目的冷凍機となっている。10 kW 級の大型ヘリウム冷凍機は加速器用に実用化された実績があったので、これ

らの冷凍システムを更に高効率化することによって全体のプロセス効率が 20%を超えるシステムが構築された。設計通りの性能が達成され、現在は毎年約 7 ヶ月におよぶ連続運転の実績をあげている。LHD 本体の近傍にサブクーラー（液体ヘリウムタンクと熱交換器）と流量調整弁を内蔵したバルブボックスを配置することによって LHD 本体に良質の冷媒を供給可能としたシステムも、次期大型装置に適用可能な技術である。

LHD の熱負荷の設計値と実測値の比較を表 4 に示す。設計と実測値が良く一致している点は、極低温機器の設計および製造技術の高さを実証したといえる。

（４）プラズマ真空容器

LHD のプラズマ真空容器は、ヘリカルコイルの部分がくりぬかれたトーラス形状をしており、複雑な形状である。多数の部片に分割して成形し、溶接によって組み上げる方法が採用された。しかも、ヘリカルコイルの内側部分は、ヘリカルコイルの完成後に分割されてポートから搬入され、全周溶接によって組み込まれた。複雑形状の薄板大型構造物の製造技術は、次期大型装置にも適用可能な基盤技術と考えられる。

（５）プラズマ対向壁

LHD では定常加熱実験のために 3 MW 定常加熱の熱負荷に耐えるダイバータ板の開発が行われた。熱負荷のピーキング係数を 2.5 と仮定して 0.75 MW/m^2 の定常熱負荷が開発目標とされ、製作コストの低減とメンテナンス性の改善を目的に、水冷パイプにボルトで固定する構造のダイバータエレメントが開発された。等方性黒鉛のタイルを無酸素銅のヒートシンクにボルトで固定し、さらにこのヒートシンクを水冷パイプにボルトで固定する方法が採用されている。これらの接触面にカーボンシートを挿入して熱伝導を改善し、また、材質や構造を工夫することによって目標性能が達成された。

（６）プラズマ加熱

ECH は大電力を達成するために 3 T の共鳴周波数である 84 GHz の他に 2 倍高調波の 168 GHz のジャイロトロン管の開発が進められた。1 MW 級の定常出力を実現するためにはジャイロトロン管の真空窓の温度上昇による破損の問題を解決する必要があったが、低損失の窒化ケイ素窓を開発して通過電力の制限を大幅に改善することができている。主な成果を表 5 に示す。

ヘリカル系においては高速中性粒子の吸収分布と捕捉された高速イオンの閉じ込めを最適化するために NBI は接線入射が望ましい。接線入射ではビームのプラズマ

中を通過する距離が長くなるためプラズマ中心にビームを吸収させるには高い入射エネルギーが必要である。効率良く大電力の高エネルギー中性ビームを実現するには大電流負イオン源の開発が必要であった。実験開始後も改良を重ねて、表 6 に示すように世界最高性能の負イオン NBI を実現しており、さらに高出力化を目指して研究開発が進められている。

ICRF では 25 から 100 MHz の周波数帯域で、高出力で定常運転が可能な加熱装置が開発目標とされた。大電力化の最大の課題は損失によって発生する熱の除去と高電圧の発生による放電であった。前者は熱設計の高度化によって解決し、後者については各コンポーネントの技術開発がおこなわれた。特に問題となったインピーダンス整合器には新規開発した液体スタブ方式が採用された。液体と気体での高周波波長の違いを利用し、液体部の長さを変えて位相を調整する方式である。液体には高周波誘導損失のすくないシリコンオイルを用いて 1% 以下の損失を実現している。セラミックフィードスルー開発では多くの方式を試験した結果、円錐台型のセラミックス形状を採用して 40 kV の耐電圧を確保するなど、システムとしての完成度が高められた。同軸伝送路の内導体を冷却水が循環する方式を世界で始めて採用し、全ての系統を冷却水が循環する方式を採用し、定常運転に適合出来るシステムを完成した。プラズマに直面して設置されるアンテナに関しては、真空中での R & D 試験で 30 分の試験を完了し、プラズマ実負荷での加熱実験（現在は 150 秒まで）と開発が進行中である。主な成果を表 7 に示す。

（ 7 ） 炉設計

LHD の建設と並行して、共同研究を主体としたヘリカル型核融合炉の概念設計が進められてきた。その代表例として、FFHR（Force Free Helical Reactor）の設計活動が挙げられる。ヘリカルコイルを電磁力が低減される形状とすることによって中心トロイダル磁場を 10-12 T に高めた設計である。熔融塩 FLiBe 液体ブランケットを採用して固有安全性を高めた点も特徴の 1 つである。大学からの新しいアイデアを取り込みながら、FFHR の設計活動は現在も継続している。他にも LHD と類似の磁場配位をモジュールコイルによって成立させた MHR（Modular Heliotron Reactor）の概念設計も提案されている。これらの先進的な炉設計活動と並行して、製作性や保守性に重点をおいた炉設計活動も開始されている。

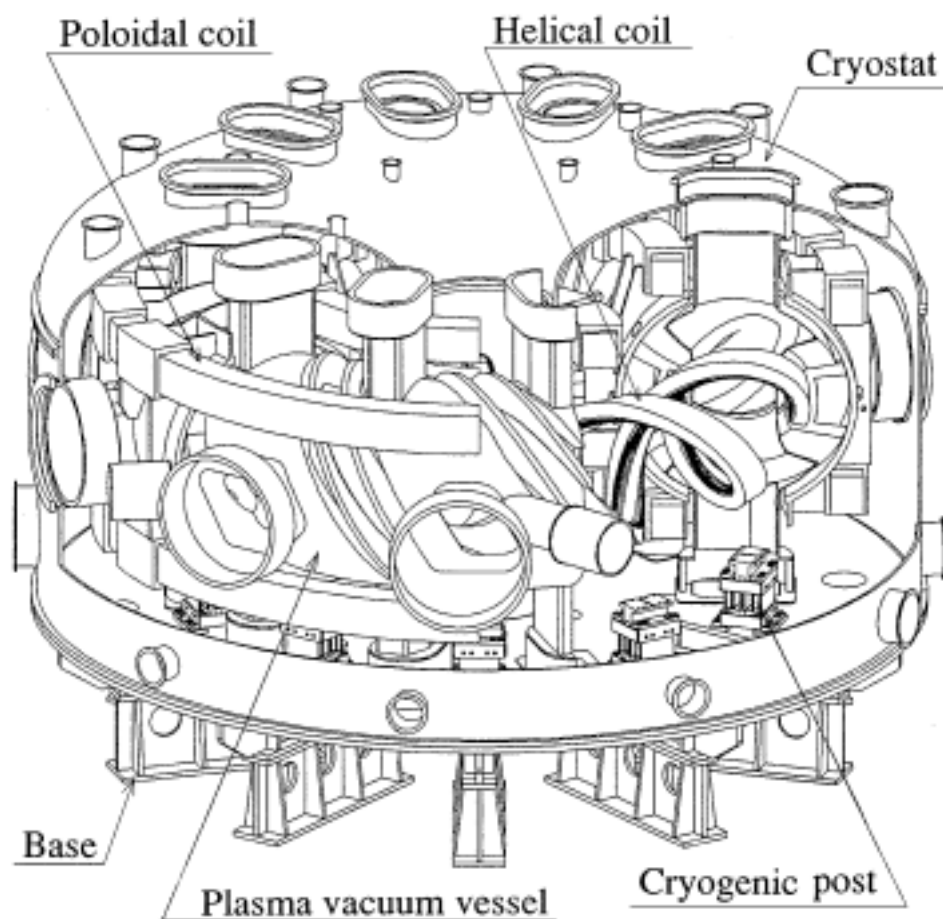


図1 LHD 本体の鳥瞰図（クライオスタットの外径は約 13.5 m）

表1 LHD の超伝導コイルの仕様

項目	HC (第 期)	OV	IS	IV
主半径 (m)	3.9	5.55	2.82	1.8
小半径 / コイル中心高さ (m)	0.975	1.55	2.0	0.80
最大起磁力 (MA/コイル)	7.8	-4.5	-4.5	5
定格電流 (kA)	13	31.3	21.6	20.8
臨界電流 @最大磁場 (kA)	22	93.9	64.8	62.4
最大磁場 (T)	6.9	5.0	5.4	6.5
ターン数 × 層数	450	144	208	240
巻線部平均電流密度 (A/mm ²)	39.9	33.0	31.5	29.8
最大磁気エネルギー (GJ)	0.93	0.61	0.22	0.16
重量 (ton/コイル)	75 (*1)	45	25	16
導体全長 (km/コイル)	17.65	5.02	3.69	2.71
NbTi 重量 (ton/コイル)	2.00	1.76	1.12	0.98

(注記) HC はヘリカルコイル，OV, IS, IV はポロイダルコイル

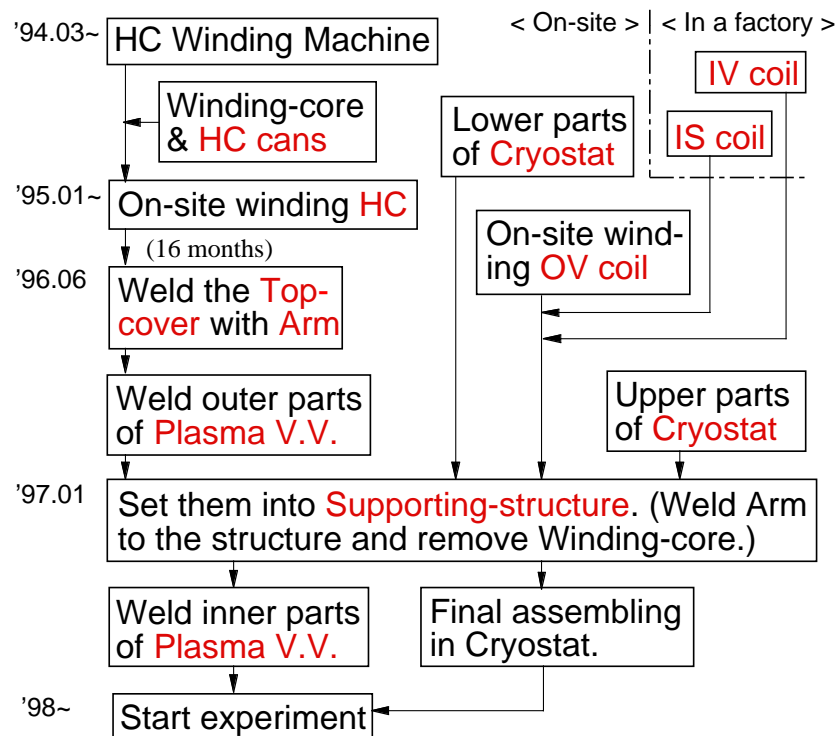


図2 L H D本体の組立フロー

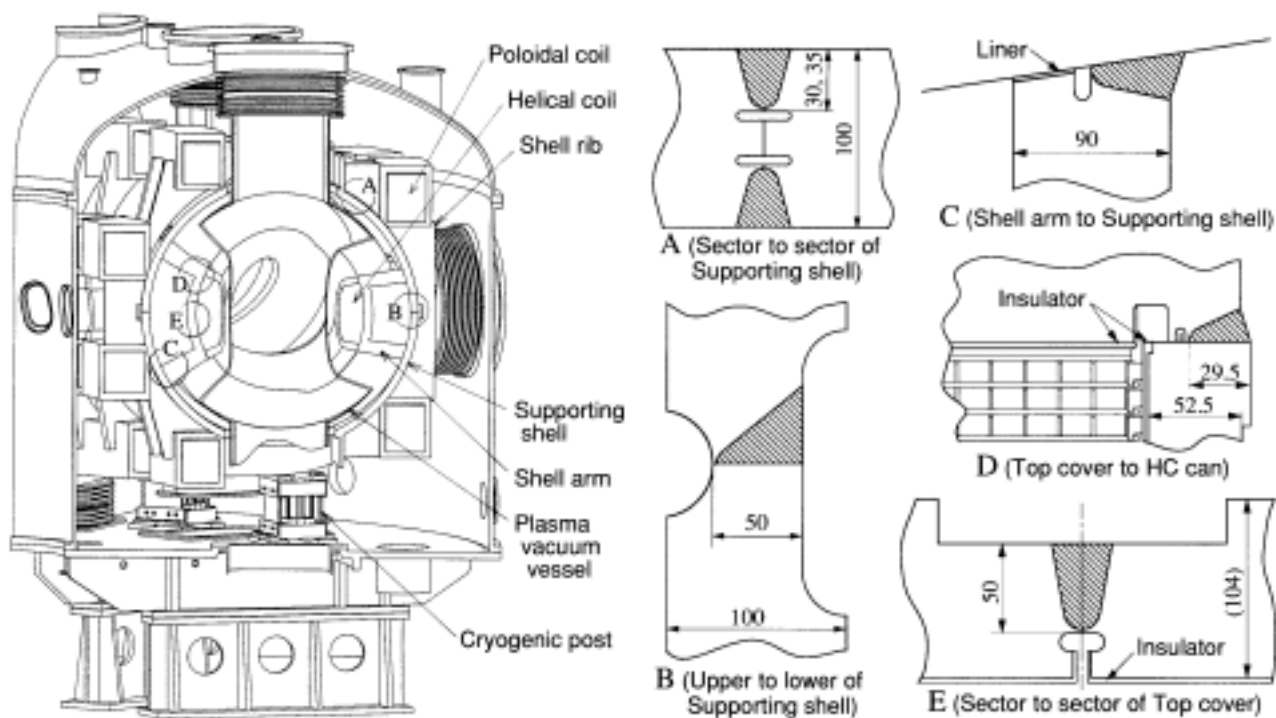


図3 L H Dの主要な溶接部と開先形状

表 2 極低温支持構造物の溶接変形（測定位置は周期対称な 10箇所）

部片 (溶接場所)	溶接深さ (mm)	溶収縮 (mm)	変形 (mm)
下側支持シェル (セクター間)	60, 70	1.27 ± 0.17 [外] 1.78 ± 0.18 [内]	2.8 ± 0.75 [PC 固定座(半径)] 2.7 ± 0.50 [シェル中心(半径)]
上側支持シェル (セクター間)	60, 70	1.64 ± 0.19 [外] 1.93 ± 0.21 [内]	3.1 ± 0.75 [PC 固定座(半径)] 2.6 ± 0.75 [シェル中心(半径)]
HC 容器 (内外赤道部)	30 ~ 55	1.6 ± 0.65	0.81 ± 0.17 [側板(転倒方向)] 0.80 ± 0.17 [側板(小半径方向)]
HC 容器と上蓋 (側板・上蓋間)	29.5	1.4 ± 0.60 2.5 ± 1.2	0.86 ± 0.57 [上蓋(小半径方向)] 1.7 ± 0.65 [側板(転倒方向)]
全体組立 (上下支持シェル間)	50	2.9 ± 0.44 [外] 2.0 ± 0.60 [内]	0.45 ± 0.50 [OV 固定座(半径)] 2.0 ± 0.85 [OV 固定座(高さ)]

表 3 超伝導送電システムの仕様

項目	仕様
9本の平均長さ	55 m
定格電流	32 kA
耐電圧	dc 5 kV @ 80 K He gas
最小曲げ半径	1.5 m
300 K から 80 K への侵入熱（実測値）	< 3 W/m
80 K から 4.5 K への侵入熱（実測値）	< 0.5 W/m

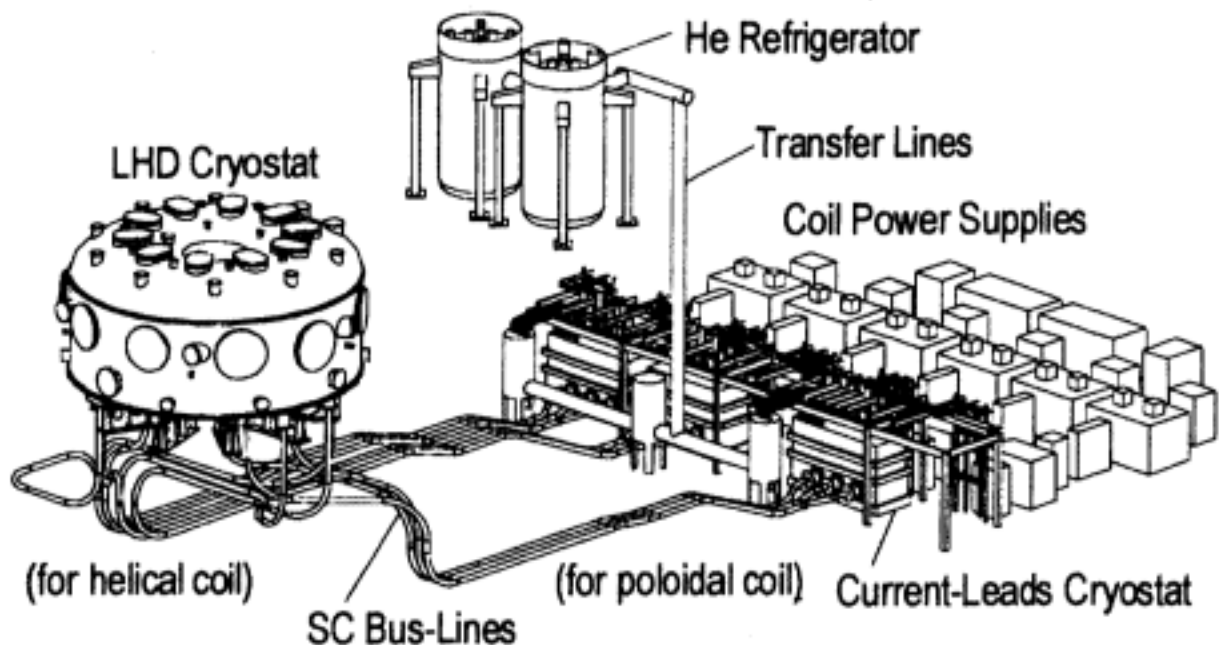


図 4 LHDの超伝導送電システム

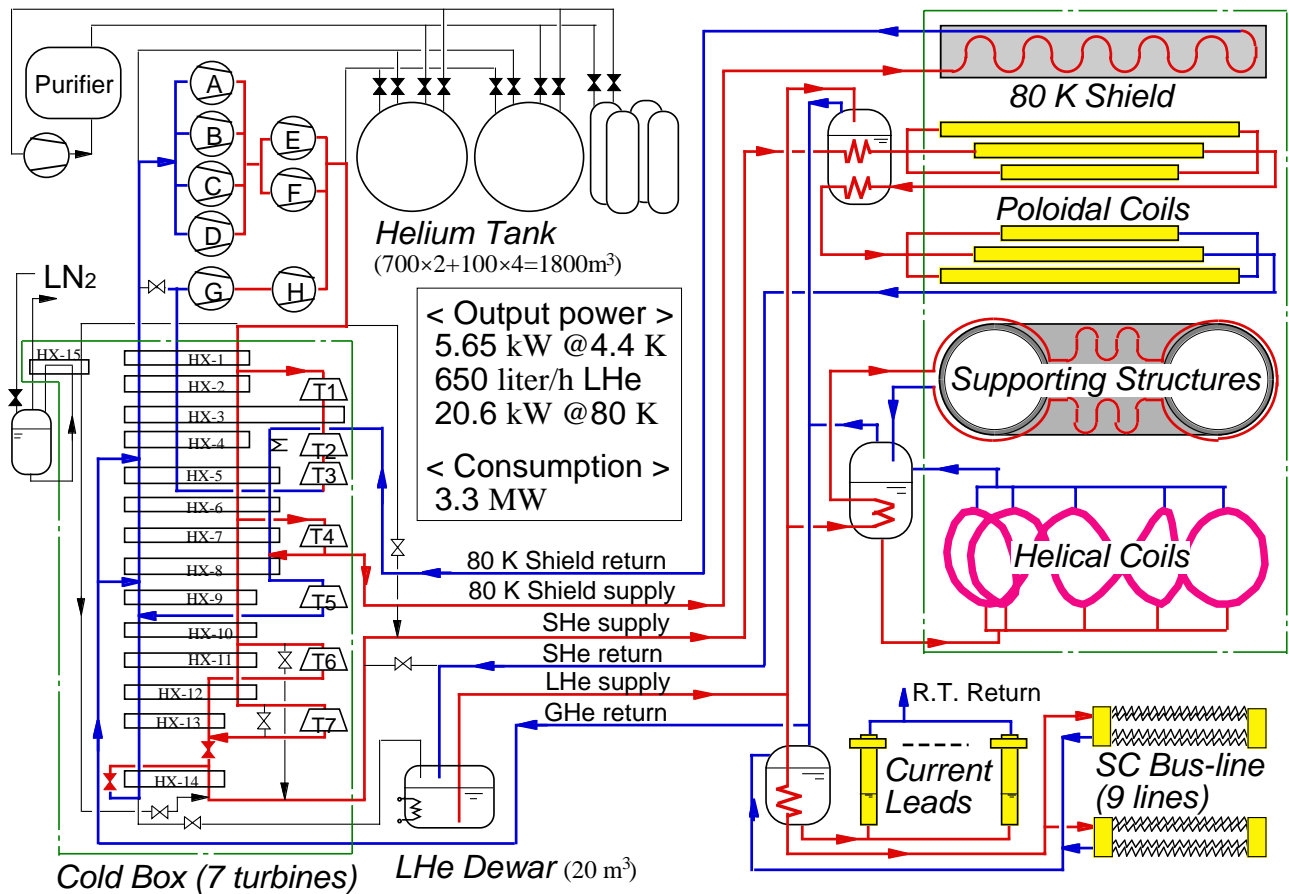


図5 LHDのヘリウム冷凍システム

表4 LHDの熱負荷

item	Weight or Area	Heat load (kW)	
		design	measured
Helical coils	155 ton	0.070	0.087
Support structures	485 ton	0.278	0.148
Poloidal coils	182 ton	0.210	0.217
SC bus-lines		0.150	0.145
HC & PC valve-box		0.023	-
Current lead cryostat		0.310	-
Transfer lines		1.010	
(Sum of 4 K)	822 ton	(2.051)	(1.940)
Inner 80 K shield	422 m ³	5.54	3.23
Outer 80 K shield	587 m ³	3.06	3.83
Cryogenic post		0.82	0.80
SC bus-lines		1.50	1.15
HC & PC valve-box		1.14	1.12
Current lead cryostat		0.62	0.54
Transfer lines			1.5
(Sum of 80 K)		(14.18)	(12.17)

表5 LHDにおけるECH機器の研究開発の進展

半導体ジャイロトロン電源 (NIFS)

- ・ジャイロトロン用半導体電源の構築、整備
- ・コレクタエネルギー回収型電源の実現
真空管を全く用いないジャイロトロン電源
3台のコレクタ電源を共通化し、アノード・ボディ電源を独立駆動
ビーム電流 126 A 10 秒、または 42 A 定常 (65 kV)

ジャイロトロン窓・真空窓の開発 (NIFS・金沢工大)

- ・SiN のジャイロトロン窓材料としての実用化
ジャイロトロン (168 GHz) に搭載
500 kW 1 秒を達成 6 台稼働
- ・SiN と強制空冷方式を用いた真空窓の開発。
LHD の真空窓として実用化 (82.7 GHz)

アンテナ・伝送系の構築 (NIFS・京大)

- ・コルゲート導波管を用いた複合伝送システムの構築
- ・等位相面法を用いた準光学ミラー設計手法の確立
LHD、WT-3、Heliotron-E の入射ミラー、
準光学伝送系の実現、高純度強収束入射ビームの実現

表6 LHDにおけるNBI機器の研究開発の進展

大型負イオン源の開発 (NIFS)

- ・LHD-NBI 用 Cs 添加型体積生成方式大型負イオン源
- ・大型アーク放電室：35 cm(幅) × 145 cm(高さ) × 21 cm(深さ)。
- ・大型負イオン加速器：(ビーム面積) $25 \times 125 \text{ cm}^2$ 。
- ・大電流負イオン生成：25 A (世界最大)。
- ・多ビームレット(770 本)の収束 (平均発散角 10 mrad)。

LHDにおける負イオンNBI装置の稼働 (NIFS)

- ・1998年に2台、2001年に1台のインジェクターが稼働。
- ・定格エネルギー(180 keV)の達成。
- ・入射電力：10.3 MW (世界最大)。(1台で 180 keV-4.3 MW 入射)
- ・信頼性の高い大電力短パルス入射 (2 秒、3 分周期)。
- ・110 秒の定常入射。

負イオン源の高性能化に関する基礎研究

- ・重水素負イオン源開発のための基礎データ収集 (山口大学)
- ・負イオン生成機構の解明 (同志社大学)
- ・負イオン生成に関する理論研究 (慶応大学、山口大学)
- ・高周波負イオン源の開発 (山口大学、名古屋大学、NIFS)
- ・ホローカソード型負イオン源の開発 (NIFS)

表7 LHDにおけるICRF加熱機器の研究開発の進展

定常大電力高周波発振器の開発 (NIFS)

- ・最大出力 1.9 MW (10 sec、50 MHz)
- ・最長パルス幅 5000 秒 (1.6 MW、50 MHz) (世界最高の試験性能)
- ・広周波数帯域発振キャビティの実用化 (25-100 MHz)
と低インピーダンスモードでの発振

大口径水冷式同軸伝送路開発 (NIFS)

- ・アルミ同軸管 (240 mm、内外導体共に水冷方式)
- ・定常耐電圧試験実績 50 kV、30 分 (世界最高の試験性能)

定常用インピーダンス整合装置の開発 (NIFS)

- ・液体スタブ整合装置の開発
液面高 (シリコンオイル) を変更することにより、通電中に整合調整が可能
- ・試験実績 50 kV、30 分 (世界最高の試験性能)

定常用真空窓 (セラミックフィードスルー) 開発 (NIFS)

- ・大口径、水冷方式、円錐形状アルミナのフィードスルーを開発
- ・真空中での通電試験 パルス 55 kV、10 秒
 定常 40 kV、30 分 (世界最高の試験性能)

定常用速波アンテナの開発 (NIFS)

- ・水冷方式で、RF 通電中に 15 cm 位置を可変
 - ・真空中の通電試験実績 40 kV、30 分
 - ・プラズマ加熱実験では現状 30 kV、150 秒 (世界最長のプラズマ加熱)
-