

大学共同利用機関法人

自然科学研究機構

核融合科学研究所

超伝導・低温グループ

外部評価報告書

平成17年10月

社団法人

低温工学協会

# 目次

1. はじめに .....	1
2. 評価概要 .....	2
3. 項目別の評価 .....	6
3. 1 これまでの研究成果 .....	6
3. 1. 1 評価の観点 .....	6
LHD 超伝導・低温システムの開発、改良研究、ヘリカル炉設計研究の 目標に対する成果	
3. 1. 1. 1 自己評価 .....	6
3. 1. 1. 2 外部評価委員会の評価 .....	8
3. 1. 2 評価の観点 .....	10
核融合関連の超伝導・低温工学基礎研究の目標に対する成果	
3. 1. 2. 1 自己評価 .....	10
3. 1. 2. 2 外部評価委員会の評価 .....	11
3. 1. 3 評価の観点 .....	11
他分野への応用研究の進展	
3. 1. 3. 1 自己評価 .....	11
3. 1. 3. 2 外部評価委員会の評価 .....	12
3. 2 今後の研究指針・目標 .....	12
3. 2. 1 評価の観点 .....	12
ヘリカル炉設計研究及び要素技術開発研究の目標と研究開発計画	
3. 2. 1. 1 自己評価 .....	13
3. 2. 1. 2 外部評価委員会の評価 .....	14
3. 2. 2 評価の観点 .....	16
LHD 超伝導低温システムの高性能化研究の目標と研究計画	
3. 2. 2. 1 自己評価 .....	16
3. 2. 2. 2 外部評価委員会の評価 .....	17
3. 3 共同研究の成果・進め方 .....	18
3. 3. 1 評価の観点 .....	18
共同研究成果	
3. 3. 1. 1 自己評価 .....	18
3. 3. 1. 2 外部評価委員会の評価 .....	19
3. 3. 2 評価の観点 .....	20
共同研究の進め方	
3. 3. 2. 1 自己評価 .....	20
3. 3. 2. 2 外部評価委員会の評価 .....	20

3. 4	研究体制・大学院教育・国際協力など	21
3. 4. 1	評価の観点	21
	核融合用大型超伝導応用研究の COE としての役割	
3. 4. 1. 1	自己評価	21
3. 4. 1. 2	外部評価委員会の評価	22
3. 4. 2	評価の観点	22
	今後の研究の展開に必要な研究体制	
3. 4. 2. 1	自己評価	22
3. 4. 2. 2	外部評価委員会の評価	23
3. 5	外部評価委員会のその他の助言、提言	24
4.	まとめ	26
資料 1	超伝導・低温グループ外部評価委員会 委員名簿	27
資料 2	外部評価委員会実施報告書	29
資料 3	外部評価委員の評価意見	33
資料 4	超伝導・低温グループの自己評価概要	51

## 1. はじめに

自然科学研究機構 核融合科学研究所の依頼により、超伝導・低温グループの外部評価を行った。今回の外部評価は、超伝導・低温に関する専門家集団である低温工学協会として引き受けたものである。

外部評価の経過は以下のとおりである。

### 委員会発足までの経緯

- ・平成 17 年 1 月 14 日 核融合科学研究所本島修所長が、低温工学協会山藤馨会長を訪問し、核融合科学研究所超伝導・低温グループの外部評価を低温工学協会に依頼したい旨の説明がなされる。
- ・平成 17 年 1 月 28 日 核融合科学研究所超伝導・低温グループ外部評価の依頼の申し入れを低温工学協会として受諾することを理事会で承認する。
- ・平成 17 年 3 月 3 日 低温工学協会運営委員会において、外部評価を実施するための委員の人選、外部評価のスケジュール案が審議される。
- ・平成 17 年 3 月 23 日 本島所長、三戸炉システム・応用技術研究系主幹が、カールスルーエ研究所 (FZK) 技術物理研究所 (ITP) の Peter Komarek 所長を訪問し、外部評価委員に加わっていただくことを依頼する。
- ・平成 17 年 4 月 外部評価委員が決定され、委員委嘱手続きがなされる。

添付資料にあるように、5 月、7 月、8 月に 3 回の委員会と 1 回の臨時委員会を開催し、核融合科学研究所から、これまでの成果、今後の活動方針などの資料提出、説明を受け、評価を行った。

- ・平成 17 年 7 月 22 日 低温工学協会理事会で外部評価実施状況の中間報告を行う。
- ・平成 17 年 10 月上旬 核融合科学研究所超伝導・低温グループ外部評価報告書最終取りまとめを行う。
- ・平成 17 年 10 月 21 日 低温工学協会理事会において外部評価報告書の内容説明を行う。
- ・平成 17 年 10 月末日 低温工学協会から核融合科学研究所に外部評価報告書を提出する。

外部評価委員会委員名簿を資料 1 に、外部評価委員会実施報告書を資料 2 に添付する。

## 2. 評価概要

自然科学研究機構 核融合科学研究所超伝導・低温グループのこれまでの研究成果、今後の研究活動方針について外部評価を行った。これからの研究活動、研究成果に密接に関係する共同研究、研究体制、若手研究者育成、研究設備についても評価を行った。研究成果については、主として過去5カ年に遡るものについて評価対象としたが、建設初期からの成果についても適宜評価した。

評価項目を以下に示す。

- ・ これまでの研究成果
  - LHD 超伝導・低温システムの開発、改良研究、ヘリカル炉設計研究の目標に対する成果
  - 核融合関連の超伝導・低温工学基礎研究の目標に対する成果
  - 他分野への応用研究の進展
- ・ 今後の研究指針・目標
  - ヘリカル炉設計研究及び要素技術開発研究の目標と研究開発計画
  - LHD 超伝導低温システムの高性能化研究の目標と研究計画
- ・ 共同研究の成果・進め方
  - 共同研究成果
  - 共同研究の進め方
- ・ 研究体制
  - 核融合用大型超伝導応用研究の中核的研究機関（COE）としての役割
  - 今後の研究の展開に必要な研究体制
- ・ 大学院教育、国際協力の進め方

まず、各項目について、超伝導・低温グループより、自己評価の資料の説明を受け、それに対する質疑応答をする形で評価を進めた。臨時委員会を含めて4回の評価委員会を持ったが、会議日程および内容については、付録に添付した外部評価委員会実施報告書に示す通りである。提出された資料および説明、質疑応答に基づき、各委員が夫々評価を行い、それを本報告書にまとめた。

なお、各委員から提出された評価を資料3として添付した。当該グループによる成果、今後の研究開発計画等の自己評価は資料4に添付した。また、より詳しくは別冊としてまとめられているので、適宜参照いただきたい。

今回の外部評価の概要を以下にまとめる。

## これまでの研究成果への評価

- ・ 世界最大級の核融合用大型超伝導マグネット・システムをスケジュール通りに完成させた点を高く評価する。この超伝導マグネット・システムは、核融合実験装置として複雑な形状を持ち、かつ高精度が要求されるものである。また、システム、装置設計、導体開発、マグネット製造法の開発、品質管理など、その開発研究は多岐に亘っている。それらに対して当該グループの技術、研究開発能力が遺憾なく発揮された結果であり、高く評価する。
- ・ 中心磁場 3 T の当初目標値が達成されていない点は残念である。しかし、その後の種々の問題解明のための研究により、設計・開発段階で予測できなかった導体の動的安定性の問題を掘り起こし、改善のための方向性を見いだしたことを評価する。
- ・ 共同利用研究所として、研究者に装置を安定かつ恒常的に提供することは、学術的な研究活動とともに、極めて重要な責務である。このことは、成果として表に現れにくい点であるが、当該グループが、非常に高い稼働率で LHD の超伝導マグネット・システムを運転し、共同研究に供与してきたことは、装置の維持管理に不断の努力を払ってきたことによるものであり、高く評価する。
- ・ また、これまでの開発研究、設備の安定運転のための維持・改善により、アルミ安定化導体の安定性の定量化、ケーブル・イン・コジット導体の付加的損失機構の解明、常伝導伝播の振る舞いの解明などの学術的成果に加えて、超伝導バスラインの開発、「核融合用超伝導マグネットのデータベース」の構築、伝導冷却パルス超伝導マグネットの開発、冷凍システム用ダイナミックシミュレータの開発などの技術的成果が数多く得られており、高く評価する。
- ・ これらの成果は、核融合炉以外の他分野にも応用できる技術成果であり、実際に他分野への応用研究が行われている点も評価する。

## 今後の研究指針・目標への評価

- ・ ヘリカル炉設計研究では、実用炉開発の中でヘリカル炉の位置付けがあまり明確ではないが、これの位置付けをすることは研究所自体、もしくは核融合コミュニティ全体の役割であるとしても、当該グループとしては、総花的に開発項目を列挙するのではなく、達成すべき工学的到達点と重要度、難易度を、年度毎に具体的に分かり易く整理する必要がある。また、計画の遂行に見合った研究体制の検討をしておくことが重要である。
- ・ また、この設計研究を推進する中で、ヘリカル炉のシナリオが変更された場合にも、研究で得られた成果が他の方式の炉への展開が可能となるような目標設定とそれに基づく研究開発を設定する必要がある。さらに、当該グループの行っている超伝導・低温技

術は、この分野での共通基盤技術に関するものであり、例えば ITER への協力も必要に応じて対応できるように配慮する必要がある。

- ・ LHD 高性能化研究では、過冷却方式の採用による初期目標磁場の達成を支持する。また、この研究が将来の核融合炉用の超伝導マグネット技術に役立つかを検討する必要がある。

#### 共同研究の成果・進め方への評価

- ・ 共同研究を行うことで、ケーブル・イン・コンジット導体の特性評価、伝導冷却パルスマグネット開発など、多くの学術的、技術的成果が得られており、超伝導・低温分野における COE としての役割を十分に果たしていると評価する。ただ、共同研究の中で、一般共同研究は、ここ数年 1 件当たりの研究費が小額過ぎるために、十分な機能を果たしていない傾向があり、将来計画に沿った研究テーマの選択と予算配分の重点化が必要である。
- ・ また、低温実験棟の設備は、試験専用設備として国内随一の性能と規模を有しており、不断の整備と改良を行い、共同利用試験設備としての機能を付加し、有効に活用されることが望まれる。

#### 研究体制・大学院教育・国際協力などへの評価

- ・ 当該超伝導・低温グループは、LHD あるいはヘリカル炉に限らず、磁気閉込型核融合装置用超伝導マグネットを開発・設計、評価することができる世界的レベルの研究能力を備えていると評価する。ヘリカル核融合炉用超伝導マグネット・システムの開発に限らず、当該グループのポテンシャルを生かす工夫がなされることを提言する。
- ・ 将来計画を考えた時、若手研究者の育成ができるような体制作りが必要である。その一つとして、5 年一貫制教育の総合研究大学院大学の充実や連携大学院などの導入を積極的に検討することを助言する。
- ・ 一方、今後の核融合炉の発展を想定すると、高温超伝導体の適用が重要となってくるものと考えられ、材料分野を含む研究体制の強化をはかる必要がある。

以上の評価を基に、評価委員会は以下のように助言する。

今後の核融合関連分野において、超伝導・低温技術は必要不可欠な共通基盤技術である。特に、磁気閉込型核融合装置においては、超伝導・低温技術なしには成立しない。当該超伝導・低温グループは、我が国のみならず世界的に見ても高い学術的、技術的ポテンシャルを有している。今後とも、大型超伝導コイルシステムの R&D、設計、評価を行う世界的レベ

ルの研究機関として発展していくことが望まれる。LHD は世界的に見ても重要な全超伝導実験装置であることから、超伝導装置でなければ得られない貴重なデータを蓄積することが肝要である。今までの研究開発のノウハウを一層具体化し、系統的な研究と地道な研究を融合させることを期待する。

### 3. 項目別の評価

#### 3. 1 これまでの研究成果

##### 3. 1. 1 評価の観点

**LHD 超伝導・低温システムの開発、改良研究、ヘリカル炉設計研究の目標に対する成果**

##### 3. 1. 1. 1 自己評価

- ・ LHD 建設期においては、工学 R&D を計画的に実施することによって遅延なく建設を完了させた。強制冷却と浸漬冷却の 2 種類の世界最大級の超伝導マグネットを± 2mm の高精度で完成させただけでなく、多重コルゲート管を用いた超伝導送電システムや汎用計算機を用いた分散制御システムを世界に先駆けて実用化した。
- ・ LHD 超伝導・低温システムは、ヘリカルコイルの到達電流値が目標値の約 90%に制限されていることを除いて設計時の目標値を達成した。
- ・ 各機器の保守と改造を計画的に実施することによって毎年 7 ヶ月の連続運転を 7 年間実現してきている。
- ・ 超伝導状態を保った定常運転時間は 25,031 時間、予冷・加温を含む低温システムの総運転時間は 36,753 時間に達し、大型超伝導低温システムの高い信頼性を実証している。
- ・ 運転実績に基づいた設計の見直し及び適切な装置改良、機器更新により、低温システムの性能と信頼性を向上している。
- ・ 詳細設計及び建設時の被冷却体の熱負荷低減努力により、4.4 K の定常熱負荷を初期設計値の約半分に減少させて、余裕をもった低温システムの運転を可能とした。
- ・ ヘリカルコイル導体の開発において、高純度アルミニウムと銅の複合時のホール電流による磁気抵抗増大現象を解明し、CuNi を高純度アルミニウムに被覆することにより、この磁気抵抗増大を抑制した導体を開発した。
- ・ ヘリカルコイルの巻線においては、複合超伝導線材の三次元成形技術、13 軸数値制御の巻線機、高剛性スペーサ、レーザー変位計による位置測定とスペーサ合せ加工技術等を開発して、高精度巻線を実現した。また、現地巻線におけるコイルの品質管理方法も確立した。
- ・ ポロイダルコイル導体開発において、高安定ケーブル・イン・コンジット導体の設計指針を確立すると共に、長尺のケーブル・イン・コンジット導体の製造と品質管理技術を確立した。また、ケーブル・イン・コンジット導体の超伝導接続技術も確立した。
- ・ LHD を用いた工学研究においては、以下に示すように、大型超伝導コイルに特有の現象を明らかにすると共に、新しい診断技術の開発を進展させた。また、核融合装置に特有な

コイル電流制御方法や電力系統安定化の研究を進展させた。

- ・ 高純度アルミニウムを安定化材としたヘリカルコイル導体において、電流拡散遅れによって動的な冷却安定性が低下する機構を明らかにした。
- ・ ヘリカルコイル巻線の導体の動きによって発生するバランス電圧のスパイク信号と AE 信号の相関を観測した。また、バランス電圧のスパイク信号の波高解析により、冷却サイクル及び励磁を重ねる毎に機械的擾乱が減少することを確認した。
- ・ ヘリカルコイルの I ブロックで 17 回の常伝導伝播を観測、ピックアップコイルによる常伝導伝播観測方法の開発により、常伝導発生位置の特定に成功した。また、ヘリカル導体のホール効果による異方性のため、有限長の常伝導部が一方向のみに伝播する特異な電磁現象を観測した。
- ・ 気泡が溜まりやすく冷却特性が悪化し易いヘリカルコイル下部から常伝導部が発生することを確認した。
- ・ 過冷却改造により、ヘリカルコイルの動的冷却安定性が改善し、安定な高磁場運転が可能になることを定量的に示した。
- ・ 実機ヘリカルコイル過冷却改造に必要な機器として低温排気コンプレッサー等を開発し、過冷却 R&D 試験設備で実際に使用することにより、運転特性データを取得すると共に信頼性を確認した。
- ・ ポロイダルコイルにおいて、ケーブル・イン・コンジット導体特有の長時定数の結合電流の存在とその損失重量を明らかにすると共に、交流損失の各成分、履歴損失、結合損失（長時定数成分を含む）の評価式を確立した。
- ・ コイル電源制御に先進の制御理論を適用して、電流制定時間 1 秒以内を満足する非干渉制御システムを開発した。
- ・ プラズマ消滅時の擾乱抑制を目的とした超伝導コイル電源の新しい制御系を開発した。
- ・ フライホイール MG から流出する変動高調波を特殊フィルタの追加により抑制し、LHD 電力系統の安定化に成功した。
- ・ ヘリカル炉設計研究においては、超伝導マグネットの支持構造とブランケット構造の最適化研究を進展させて、LHD 相似形の核融合炉 FFHR の設計を進展させた。
- ・ LHD の設計と製作においては、溶接、巻線、品質管理等に高度な技術が要求され、その技術を開発するためには企業の高度な技術基盤が不可欠であった。企業と連携して技術開発に取り組むことによって製造技術の進歩と技術者の育成に寄与した。
- ・ ヘリカルコイルでは、目標値の約 90%の電流値で常伝導伝播が繰り返して発生するために、それ以下に運転電流が制限されている。電流拡散に伴う動的な冷却安定性の低下が主な原因であり、設計時点で予見することは困難であったと判断されるが、実機製造前に実導体

のコイル試験を行わなかったことは反省すべき点である。

#### <今後の展開>

- ・ ヘリカルコイル導体の開発において、動的な安定性評価と十分な一様磁場空間が必要であることが判明、試験設備を整備すると共に試験法の標準化を研究する必要がある。
- ・ 実機ヘリカルコイルの過冷却改造による安定性向上の実証と、過冷却 R&D コイルと実機ヘリカルコイルの安定性改善の比較検討によるモデルコイル試験の有効性を検証する。
- ・ ポロイダルコイル電流可変において結合電流（電流分布不均一）が安定性に与える影響を評価する必要がある。
- ・ LHD の信頼性向上のためには、経年変化を検知する新しい故障診断法の開発が必要である。
- ・ 低温制御システム等に用いられている汎用ハードウェアの世代交代が早く、互換性を保ったソフトウェアの移植性の向上が今後の課題である。
- ・ 冷凍負荷に応じた低温システムの運転モードの変更と消費電力の低減方法に関する研究が今後の課題である。
- ・ ヘリカル炉設計については、ヘリカル型核融合炉の特長を生かした早期実現のための課題を明らかにするために、まず、導体やマグネットの構造を具体化する必要がある。
- ・ ヘリカル型核融合炉のための要素技術として、高磁界・高電流密度ヘリカルコイルの製法を開発する必要がある。

### 3. 1. 1. 2 外部評価委員会の評価

- ・ 超伝導 LHD コイルシステムの開発・製作に際して、最も技術的に困難であったのは、複雑な三次元構造を持つ大型ヘリカルコイルであった。ヘリカルコイルは、大きな電磁力に耐える高い圧縮剛性を持ち、約 10 m のコイル最大直径に対し、 $\pm 2$  mm という高精度の製作精度が要求された。この開発は、当時国際的にみても他に例をみない最先端技術を駆使する必要があった。そのため、ヘリカルコイルの開発にあたり、種々の候補導体の試作・性能評価が行われた。評価にあたっては、導体およびコイルの安定性、複雑な形状のコイルに対する巻線性および製作性、耐応力性等系統的な評価がなされ、これを基に導体を選定し、製作技術を具現化し、高い品質管理技術の下に、ほぼ期待通りのコイル性能を発揮させた。これらの評価は、全て超伝導・低温グループが行ってきたものである。ヘリカルコイルの製造にあたっては、メーカーの優れた製造技術に負うところが大きいと、それとともに当該グループの R&D 成果とメーカーの製造技術が有機的に結び付き、開発当時全く前例のなかった高精度、大型、複雑な形状を持つヘリカルコイルをスケジュール通りに

完成したことを高く評価する。

- ・ 共同利用研究所にとっては、共同利用をする研究者に安定かつ恒常的に装置を提供できることは重要である。そのためには、装置の点検・保守は不可欠である。超伝導 LHD コイルシステムの完成後、当該グループは、継続的な点検・保守によって、稼働率 95%以上の安定した運転を7年間にわたり継続し、プラズマ物理実験に貢献してきた。これは、毎年年間7ヶ月に及ぶ超伝導・低温設備の連続運転が可能になるよう、問題点を先取りした保守・改善を綿密に行ってきた努力によるものであろう。このような地道な仕事は、論文などのように成果として表に出にくいものであり、評価されにくいだが、当該グループが、大型超伝導・低温機器を長期間にわたり安定に連続運転し、LHD 実験に装置を安定して提供してきた点は最も高く評価されるべきである。
- ・ 他でもまれな大型超伝導・低温設備の長時間運転実績により、極めて貴重な情報が蓄積されていると考えられ、研究成果と同様に、十分に尊重されるべきである。運転実績を分析し、記録に残すことは、プロジェクトの価値を一層高めることになるとともに、これからの同様の超伝導・低温システムにとって貴重な財産になるので、是非そのための方策を取られることを助言する。
- ・ LHD コイルの開発にあたり最も心配していた安定性について問題があり、電流値が当初目標にわずかであるが達しなかったことは残念である。LHD 製作当時は知られていなかった動的安定性など導体の限界性能を決定づけている要因をある程度解明している点は評価されるが、今後さらに不安定性の原因を解明し、大型高電流密度マグネットの設計技術を完成することを期待する。また、例えば、設計段階での問題点はどうかであったのか、その後の研究により問題を解消し設計値を実現する技術的進展があったのかなど、原因と経緯を明らかにし、その総括を見えやすいかたちでまとめ、公開の記録として残すべきである。このことは、今後の超伝導・低温分野の発展に寄与するものである。
- ・ 運転磁場性能が、3 T 未満に制限されたことについて、本質的に二相ヘリウムによる浸漬冷却における発熱部でのバブルの発生と、コイル設計における、冷却路設計に検討が至らなかった点は、率直に反省されるべきである。しかし、常伝導転移現象の発生による遮断トラブル発生後、問題点を徹底的に究明し、過冷却法による单相ヘリウム冷却への対策を明確に示し、その具体化を進めていることを高く評価する。
- ・ LHD の開発研究、製作、運転の中で、以下のような多くの学術的、技術的成果が得られている点は高く評価する。今後さらに成果が上がることを期待する。アルミニウム安定化導体の安定性の定量化、ケーブル・イン・コンジット導体の付加的交流損失機構の解明、強制冷却と浸漬冷却の大型コイルの開発、超伝導バスラインの開発、ケーブル・イン・コンジット導体コイルの設計法の確立、高精度大型超伝導コイルの設計手法と製作技術の開

発、ヘリカルコイルのクエンチ検出システムの構築、高純度アルミニウム安定化大型導体特有の電流拡散時定数の影響に関する発見、電磁力支持構造物開発、大型冷凍機システムならびにダイナミックシミュレーションシステム開発など。

- ・ヘリカルコイルのみならず大口徑ポロイダルコイルも現地で製作し、必要かつ十分な品質管理技術を確立した。その結果、所定の性能が得られたことは、ITERにも繋がる技術として評価する。これまでの設計、開発研究、製作、維持・改善等によって得られた数々の知見は、将来のヘリカル炉の開発に限らず他の核融合装置の開発、さらには他の分野へ応用できる共通の技術が多く、貴重な財産である。

### 3. 1. 2 評価の観点

#### 核融合関連の超伝導・低温工学基礎研究の目標に対する成果

##### 3. 1. 2. 1 自己評価

- ・核融合応用を目的とした基礎研究の推進により、大型超伝導導体に特有の電磁現象を明らかにすることができた。
- ・ヘリカルコイル用導体に用いられたアルミニウム安定化複合超伝導導体では、安定化材ホール係数の相違から磁気抵抗が増大し、安定性が悪化することを明らかにした。
- ・ポロイダルコイル用のケーブル・イン・コンジット導体では、撚線の撚り乱れや素線間の接触抵抗のバラツキなどに起因する電流分布の不均一から、100秒を超える長時定数の結合電流が発生し、結合損失の重畳によるコイル運転周波数領域での交流損失の増大が起きることを世界で初めて明らかにした。
- ・長時定数結合損失の発生しない導体構造として、成型撚線を基本とし、導体内の誘導起電力を制御することにより交流損失を低減した新しい導体構造（電流分布制御型導体）を提案し、縮小導体の開発を行ってその性能を実証した。
- ・超流動ヘリウム的大型流路における熱輸送特性とヘリウム中の熱伝達特性に関する研究を大きく進展させた。
- ・高温超伝導の応用研究が、共同研究によって大きく進展した。大容量電流リードや磁気浮上コイルの開発がその成果として挙げられる。
- ・高温超伝導コイルを核融合実験装置へ応用した世界初の例として、東京大学との共同研究で、Mini-RT装置の磁気浮上高温超伝導コイルの開発に成功した。

### <今後の展開>

- ・ 大型超伝導体特有の電磁現象の把握と、その成果に基づいた先進導体構造の開発研究は重要なテーマであり、研究を更に進展させる必要がある。
- ・ 超流動ヘリウムの研究に関しては、LHD への適用が未定となったため、他分野への応用を探ると共に、核融合炉に超流動ヘリウム冷却を適用する得失を明らかにする必要がある。
- ・ 高温超伝導の電流リードへの応用については、既に実用段階にきており、ITER への採用や他の核融合装置、他分野への普及も期待される。
- ・ 高温超伝導を核融合用大型超伝導マグネットに応用するためには、今後の継続的な基礎研究の積み重ねが必要である

### 3. 1. 2. 2 外部評価委員会の評価

- ・ LHD システムの高性能化という観点からみて、これまで当該グループが行ってきた要素的研究ならびに基礎研究についての積極的な取り組みを高く評価する。いうまでもなく、そこから派生した超伝導・低温研究に関する当該グループが得た基盤的技術に関する成果は極めて貴重であり、核融合分野だけでなく、広く超伝導・低温工学関連分野へ貢献していることを特記したい。
- ・ これらの基礎研究は、今後核融合炉への応用、他分野への応用が考えられ、継続的に進めるべきであるが、核融合のロードマップ、研究体制などをよく考慮して、取り組むべきである。
- ・ 具体的に以下のような貴重な研究を高く評価する。
  - 超伝導送電を初めとして幅広い波及効果がある超伝導バスラインの開発と導入。
  - LHD 第 2 期計画への準備としての超流動ヘリウム冷却に関する基礎的研究。
  - 高温超伝導体の大電流リードへの応用研究。
  - 大型アルミ安定化導体のホール効果による磁気抵抗増大現象の解明。
  - ケーブル・イン・コンジット導体の長時定数結合損失に関する研究。
  - Mini-RT 装置用磁気浮上高温超伝導コイルの開発研究。

### 3. 1. 3 評価の観点

#### 他分野への応用研究の進展

#### 3. 1. 3. 1 自己評価

- ・ 電流制御型撚線構造の導体を瞬低対策 SMES 用の伝導冷却型低温超伝導パルスコイルに

応用して、低交流損失と高い安定性の両立を実証した。

- ・ リッツ線や高熱伝導性スペーサ(ダイニーマ)等を用いた高排熱特性のコイル構造により、低温超伝導導体を用いた伝導冷却のパルスコイルが実現可能であることを実証した。
- ・ 伝導冷却型のコイル構造でも高い排熱特性を得ることが可能であることから、伝導冷却構造のヘリカル炉用超伝導コイルの実現可能性を示すことができた。
- ・ 大型ヘリウム冷凍システムのダイナミックシミュレータの開発に世界で初めて成功した。

#### <今後の展開>

- ・ 伝導冷却型低温超伝導パルスコイルの開発成功は、超伝導コイルの取り扱いを容易にし、信頼性を高める方式として、様々な分野への応用が期待される。
- ・ パルス管冷凍機は、電流リードへの応用をはじめとして将来の分散冷凍システムを実現する研究として今後の発展が期待される。
- ・ 他分野への応用研究については、核融合研究で得られた成果の社会への早期還元の見点からも、研究所の研究資源を有効に活用し、さらに推進していく必要がある。

### 3. 1. 3. 2 外部評価委員会の評価

- ・ 当該グループは、これまでの開発研究活動で蓄積してきた技術と実験環境資源を活用し、LHD 開発において得られた研究成果、基盤技術を、例えば SMES における設計の最適化など、関連技術分野へ早期に適用する姿勢を、COE の責務のひとつとして、高く評価する。
- ・ 国プロにおける超伝導応用開発などへの何らかの関わりが出てくるものと思われ、培われた研究資源、ポテンシャルを維持することが重要である。
- ・ 具体的には、以下のような点で成果を上げてきており、評価する。
  - 構造材あるいは超伝導に関するデータの、核融合炉データベースへのまとめ。
  - 瞬低対策 SMES 用の伝導冷却型パルスコイルへの応用。
  - 大型ヘリウム冷凍システム安定性評価や設計に有効なダイナミックシミュレーションシステムの構築。

### 3. 2 今後の研究指針・目標

#### 3. 2. 1 評価の見点

ヘリカル炉設計研究及び要素技術開発研究の目標と研究開発計画

### 3. 2. 1. 1 自己評価

- ・ 自然科学研究機構の第 II 期中期計画終了の前年(2014 年)までに、炉設計研究及び要素技術開発研究の成果としてヘリカル炉を実現するための開発課題を具体的に示す必要があり、今後 10 年間の計画的な研究遂行が必要とされている。
- ・ LHD の建設、運転、実験の成果を取り入れたヘリカル炉の設計研究は、LHD の成果を最大限に活用すると共に、実験の意義を高めるためにも必要とされている。
- ・ LHD と相似形のヘリカル炉として、FFHR (Force Free Helical Reactor)の設計研究を 1993 年より継続しており、超伝導コイル部の詳細設計が行える段階にまで進展してきている。
- ・ 核融合炉の経済性と小型化を実現するためには、先進超伝導技術の開発研究を推進する必要があり、高磁場化による炉の小型化、高電流密度化によるコイルのスリム化などが求められている。
- ・ 高磁場化により、炉の小型化が可能であり経済性に優れた炉が実現できる。また、高電流密度化により、コイルのスリム化が可能であり、ブランケットや放射線シールドのための空間をより多く確保することができ、信頼性やメンテナンス性に優れた炉が実現できる。
- ・ ヘリカル炉設計及び要素技術開発研究の進め方として、研究の基盤となるのは、超伝導・低温システムに関する基礎研究及び LHD 高性能化研究の成果である。それらの研究成果に基づき、ヘリカル炉設計研究から得られる超伝導低温システムへの要請を受け、新しい超伝導マグネット・システム及びプラントの設計・開発研究を実施することが必要とされている。
- ・ ヘリカル炉設計と有機的に連携した新しい概念による高磁場・高信頼性・低コストマグネットの設計研究に基づき、超伝導マグネットの要素技術開発研究を具体的に実施する必要がある。
- ・ 炉設計研究と連携した要素技術開発の進め方として、以下に示す手順が適切かつ着実であると判断している。まず、高磁場特性に優れた金属系先進超伝導導体（素線）の開発研究を推進する。その研究成果を受け、大電流容量導体の複合化を行い、導体の試作及び短尺導体試験による特性の確認・実証を行う。次に、ヘリカル系の特徴を生かした新コイル構造の原理実証試験の成果に基づき、巻線の試作を行う。最後に、開発された先進超伝導導体を用いて、モデルコイルを製作し、その性能を実証する。
- ・ モデルコイルによる実証試験では、新しく開発した導体/コイル構造を採用した実証試験用コイルを製作し、冷却・励磁実験を行って性能を実証する。また、更に先進的な導体（例えば $MgB_2$ 導体や高温超伝導導体）やコイル構造を模擬した要素試験用コイルを製作し、実証試験用コイルのバックアップ磁場中で試験し、複数の超伝導材料、コイル方式の開発

を可能にする。

- これらの開発研究には、実規模短尺導体の高磁場環境下での試験に必要な高磁場導体試験装置や、モデルコイルの製作など、予算措置が必要な項目も含まれるが、低温実験棟の既設設備を改造して最大限に活用することで予算の低減を図ることが可能である。
- また、試験装置の開発そのものが重要な研究テーマとなることから、国内及び国際的な共同研究を進めて効率的な開発研究を行うことが必要である。
- ヘリカル炉設計研究及び要素技術開発研究の推進により、共同研究に基づく広範な分野と連携して、炉システム統合研究の基盤を構築することが可能になると考えられる。

#### <今後の展開>

- 2014年までのヘリカル炉設計研究及び要素技術開発研究の成果を発展させて、2030年以降と予定されるヘリカル炉の建設を可能とするための工学研究の道筋をつけておく必要がある。
- 第III期中期計画(2016年～2021年)においてヘリカル系の研究は、LHD実験の成果を受けて先進LHD装置の設計・建設へと発展する。
- ヘリカル炉は、プラズマディスラプション等のない定常炉である特徴を生かして、先進的なコイル構造を採用することが可能である。
- ヘリカル炉設計に基づく要素技術開発の成果は、炉の形態に関わらず、発電実証プラントにも適用可能な一般的な技術を提供することが可能である。

### 3. 2. 1. 2 外部評価委員会の評価

- 実用炉開発の中でヘリカル炉の位置づけが明確ではないが、ヘリカル炉の工学的設計ならびに設計を目指した要素技術開発の筋道を付けることは、核融合科学研究所もしくは核融合コミュニティ全体の役割である。示されたロードマップにおいて、ヘリカル炉に必要な開発項目を、総花的に列挙するのではなく、達成すべき工学的到達点と重要度あるいは難易度で、よりわかりやすく整理する必要がある。特に、ヘリカル炉設計研究開発計画は、計画と開発課題との関連性をより明確化する必要があると考える。人員規模、執行可能な予算規模において、これらの開発計画が実行できる体制となっているのか不明確な点があるので、そのための当該グループの体制作りが必要である。
- 開発すべき技術開発課題を、ヘリカル炉固有のものと超伝導・低温装置に共通する技術開発課題とに明確に区分すると、より開発方向が明確になってくるものと思われる。また、ヘリカル炉実現に向けて必要な研究の独自性と共に、同時に研究成果の波及効果も視野に入れた活動を通して、核融合分野のCOEに加えて超伝導・低温工学分野でも大型応用の

フロンティアとしての成長を期待する。

- **LHD** 超伝導・低温システムの高性能化研究の年次計画では、高性能化で得られた成果が、将来のヘリカル炉、例えば **FFHR** にどのように生かされるかをもう少し明確にする必要がある。また、計画自体が現有の人員や今後利用可能と想定される予算規模の観点から、研究計画の実現性を十分検討する必要があるだろう。目標が高いことは良いが、到達できない目標設定では、熟慮した計画とは言えない。研究目標を根本的な課題の解決に絞り込む必要があるだろう。
- ヘリカル炉設計研究、実用化開発研究を進める中で、研究の成果がヘリカル炉以外の方式の炉への展開が可能となるような目標の設定と研究開発を行っていく必要がある。超伝導・低温技術は共通基盤技術であり、十分に対応できるものである。例えば、**ITER** への協力も必要に応じて対応できるようにする必要があるだろう。
- 以下に示す具体的研究課題が考慮されることを期待する。
  - これまでの独自の研究や共同研究の成果の中に、これからのヘリカル炉実現に向けた研究の基本となるアイデアや萌芽的成果が多く見られるので、これらのポテンシャルを最大限活かす体制づくりに期待する。
  - **LHD** 用の実コイルで観測された導体の限界性能を決定づけている要因（例えば、ケーブル・イン・コンジット導体の長時定数の結合電流）を排除して性能を向上させる抜本的な方策の検討が、ヘリカル炉要素技術開発研究計画の中で明示されるべきである。
  - 将来のヘリカル炉あるいは他の磁気閉込核融合炉を考えると、先進超伝導導体の **Nb<sub>3</sub>Sn** 導体や **Y** 系導体の開発は重要であり、実施すべき課題である。一方で、先進導体の開発は、超伝導技術一般として捉えることができるので、この観点から、外部資金の積極的導入や目的を共有する他の研究機関との共同研究等を有効に活用し、効率的な研究を目指すべきである。なお、高磁場化と高電流密度化に関しては、世の中の超伝導線材の進展を期待するのか、あるいは核融合科学研究所が線材開発に主体的に関与するのかの方策を明らかにする必要がある。
  - 装置の大型化に伴い、機械的応力の問題が重要になる。このため、最大応力の低減法、超伝導コイルのクエンチ検出・保護のための **AE** の活用など、新技術を開発することを期待する。
  - 材料技術開発についても先導的な役割を期待する。**FFHR** のデザイン情報をタイムリーに公開することにより、材料開発の意欲も刺激されることになる。とくに商業炉に用いられる超伝導材料に課せられる特性は、超伝導材料コミュニティ全体の開発目標として重要である。

### 3. 2. 2 評価の観点

#### LHD 超伝導低温システムの高性能化研究の目標と研究計画

##### 3. 2. 2. 1 自己評価

- ・ LHD 高性能化研究の目的は、LHD の性能を最大限に発揮させ、高性能なプラズマ閉じ込め実験を可能にすることであり、研究所の重要な研究テーマと認識している。そのための方策として、以下に示した高性能化のための改造・改良を計画している。
- ・ 超伝導コイルの高性能化研究では、運転範囲の拡大、冷却安定性の向上（ヘリカルコイルの過冷却改造）、コイル電流可変モード実験への対応、大型超伝導コイルの特性の解明、異常診断技術の確立を推進する。
- ・ 低温システムの高性能化研究では、長期連続運転に対する信頼性の向上、過冷却改造対応、電流可変モードによる熱負荷増加への対応、ダイナミックシミュレータの構築と発展、運転制御方式の最適化・高効率化を推進する。
- ・ 更に、超伝導コイル高磁場化のための要素技術研究や、コイル電源システムの高性能化研究を推進する。
- ・ LHD 超伝導低温システムの高性能化研究として、過冷却改造によるヘリカルコイルの冷却安定性向上が最も高い優先順位で求められている。
- ・ ヘリカルコイルの過冷却改造を実施することにより、コイルの運転温度を現状の 4.3 K から 3.5 K に下げ、過渡的な常伝導転移の発生を抑制し、安定な高磁場運転が可能になる。
- ・ コイル電流可変モード実験への対応は、プラズマ実験中のダイナミックな磁気軸変位などを可能にし、高ベータの達成など高性能なプラズマ実験成果が期待されている。
- ・ コイル電流可変モードへの対応は、磁気軸変位、電流駆動、 $\gamma/Bq/B_0$ 等の磁場配位を、プラズマ実験中にダイナミックに変化させ、高性能なプラズマ閉じ込めを可能にする。
- ・ 従来の 33 V ~ 45 V から 100 V ~ 200 V へ、電圧を増強したコイル電源及び電源制御系の改造を行うことにより、電流掃引速度はこれまでの約 8 倍となるため、交流損失によりポロイダルコイルの温度が上昇する。このため、詳細な損失特性の把握により温度上昇の正確な評価とコイルの安定な運転を可能にする対策を実施する必要がある。
- ・ LHD の信頼性向上は高性能化のための改造と並んで重要な研究課題と認識している。
- ・ LHD は長期間の連続運転を実現している大型超伝導低温システムの先駆的な装置として、今後もその特性の把握や故障を未然に防ぐための診断技術の開発などが求められている。

##### <今後の展開>

- ・ LHD の超伝導低温システムの高性能化のための改造箇所以外の部分について、適切な周

期での機器交換や更新を計画的に行う必要がある

- ・ LHD 各機器の交換時期を正確に判断するための診断方法を確立する必要がある
- ・ LHD は、プラズマ実験装置として重要であるだけでなく、実際に稼働している大型超伝導・低温システムの長期信頼性を実証できる貴重な装置である。その実績は、長期運転が必要な大型実験装置や将来の核融合炉用パワープラント設計へ大きなインパクトを与えるものと考えられる。従って、長期信頼性を検証するため、運転実績、各種特性の変化等を継続的に測定し、データベース化することが必要である。
- ・ 超伝導ヘリウム冷却技術は、超伝導材料の性能を最大限まで引き出す冷却方式であることから、核融合実験装置及び核融合炉の超伝導システムの冷却方式の選択肢として重要な技術であると認識し、研究を継続する。

### 3. 2. 2. 2 外部評価委員会の評価

- ・ 現在の LHD 装置から最小の費用で最大の成果をあげてを考えると、超伝導・低温システムの高性能化はきわめて有効な技術開発である。LHD 超伝導・低温システムの高性能化計画は、それぞれが重要な位置づけにあることが示されていて、分かりやすい形になっているが、各課題の関連性が多少薄いように思えるので、今後さらに計画を煮詰めるよう提言する。
- ・ 常伝導転移現象、遮断トラブルの発生後、問題点を徹底的に追及、究明することで、過冷却法による単相ヘリウム冷却への対策を明確に示し、その後の具体化を進めてきた点は高く評価する。
- ・ 過冷却改造によるヘリカルコイルの冷却安定性向上は重要な試みである。研究所としてできるだけの対応が望まれるが、モデルコイルによる試験結果を十分に検討し、過冷却改造によって装置の安定性がどこまで得られるかを事前に評価しておく必要がある。
- ・ LHD コイルの高性能化研究として過冷却改造をすることの意義について、次の観点からもう一度十分に検討し、評価しておくことが重要である。
  1. 過冷却にすることにより、現在のヘリカルコイルの不安定性が解消するか。擾乱のエネルギーを定量的に評価できないか。
  2. 過冷却/NbTi コイルというシナリオが将来の核融合炉用のマグネット技術に本当に役立つか。
  3. 安定な高磁場運転の達成と過冷却改造のための研究開発コストが見合ったものになるのか。
- ・ 長期信頼性実証研究、診断予防・診断予寿命に関する研究は重要な課題であり、核融合分野では初めての試みと思われる。この研究は、LHD システムの長期安定維持・運転に大

大きく寄与するのは勿論のこと、超伝導関連技術の確立に大きな貢献をすると確信する。是非、この研究を積極的に推進することを期待する。

- ・ 近い将来ハンドリングが容易な高温超伝導導体が開発された場合に備えて、低温システムの大幅な見直しの検討も必要である。
- ・ 装置の安定性、信頼性向上のため診断技術の向上およびいわゆる各 부품の性能の安定化（標準化）が求められるが、たとえば超伝導材料に限れば、その基礎特性のみならず、機械－電磁特性のような複合特性の測定方法および予測方法の確立も必要である。

### 3. 3 共同研究の成果・進め方

#### 3. 3. 1 評価の観点

##### 共同研究成果

#### 3. 3. 1. 1 自己評価

- ・ 過去 5 年間に実施した共同研究の件数は 164 件（年平均 33 件）であった（超伝導関連研究に限る）。
- ・ 大学共同利用機関として全国の大学等の研究者と共同研究を進めてきた。その研究テーマは、超伝導材料、絶縁材料、低温機器、電気機器と広い領域を網羅している。
- ・ 民間との共同研究においては、核融合用に開発した技術を民生機器にも応用した。
- ・ 基礎研究と応用研究がバランスよくリンクし進められており、核融合技術はもとより他分野で広く活用できる研究成果が得られている。
- ・ 基礎研究の成果として、超伝導工学・低温工学における新しい知見を得た。具体例として、ケーブル・イン・コンジット導体の熱的・電磁気的特性、電流制御型撚線導体の電磁気的特性、高温超伝導体の電磁気的・機械的特性、超流動ヘリウムの熱輸送・熱伝達特性、複合構造体の熱伝導特性、熱音響冷凍機の基礎特性、ヘリウム中における電気絶縁特性などが挙げられる。
- ・ 基礎研究の成果は応用研究に生かされ、核融合炉そして他分野にも応用できる要素技術を開発した。具体例として、瞬低対策 SMES、大電流容量高温超伝導電流導入部および電流リード、冷凍プラントシミュレータ、レーザー核融合用クライオターゲット、パルス管冷凍機冷却電流リード、電磁力平衡コイルなどが挙げられる。
- ・ ヘリカル炉設計研究において大学との広範囲な共同研究と連携し、炉構造の最適化を行った。また超伝導マグネットの設計研究を開始した。そして炉設計研究に必要な核融合炉用超伝導マグネットの設計、製作、試験、運転等に関するデータベースを構築した。

- ・ 民間との共同研究においては、核融合用に開発した技術を民生機器にも応用した。具体例として、大学との共同研究で考案された電流制御型燃線をその低損失特性を生かし、瞬低対策用 SMES 装置開発に応用した。また LHD ヘリウム液化冷凍機の運転実績を用いて、大型冷凍プラントのダイナミックシミュレータを開発した。これまで行ってきた熱音響冷凍機の研究は、パルス管を内蔵した電流リード開発に進展している。さらに低温実験棟の大型導体試験装置を用いて、SMES 用ケーブル・イン・コンジット導体および高温超伝導ラザフォードケーブルの特性評価を実施した。

#### <今後の展開>

- ・ 共同研究の内容を充実し、期待される成果が上げられるようにサポート体制の更なる強化を図る。
- ・ 核融合科学研究所・低温実験棟の設備、共同研究受け入れ体制を広く宣伝し、大学等および民間との共同研究を活性化し、研究資源を有効に活用する。

### 3. 3. 1. 2 外部評価委員会の評価

- ・ 共同研究は、双方向型共同研究、LHD 計画共同研究、一般共同研究、民間等との共同研究に分けられている。これらの共同研究を通して、ケーブル・イン・コンジット導体の特性評価、新型導体開発、伝導冷却パルスコイル開発、Mini-RT 装置用高温超伝導磁気浮上コイル開発、ヘリウム冷凍機システム用ダイナミックシミュレータ開発など、現在のスタッフと予算規模としては、多岐にわたる研究分野で共同研究の実績を上げてきていると高く評価する。この活動において、大学等の研究機関あるいは民間からの研究パートナーの積極的な参加は、COE としての活動が浸透していることによると評価する。
- ・ 超伝導核融合装置開発は多岐に亘っており、広く叡智を集めるためにも他の研究機関と共同研究を行う方式は大変良い。加えて、LHD 関連装置を用いた教育と当該超伝導・低温グループのミッションを考えると、共同研究で育った次世代の研究者は、わが国の超伝導・低温技術コミュニティにとって貴重な財産である。今後とも継続的にこのシステムが発展することを望む。
- ・ ただ、それぞれの共同研究がどこに貢献しているか分かりにくいので、ヘリカル炉への貢献、核融合分野への貢献、民生機器等への貢献、基礎研究などへの貢献を区別しておくとうい。
- ・ 当該グループの LHD 超伝導・低温システムの高性能化研究ならびにヘリカル炉システム設計研究計画に沿って、さらに研究分野をうまく分けつつ、相互の関連も積極的にとった系統的な体制が重要になってくると思われる。

- ・ 民間等との共同研究による成果を高く評価する。特に、技術力は一朝一夕で達成できるものではないので、民間の技術力を維持する上でも、将来計画を遂行する上でも民間等との共同研究は重要であり、継続的に進めるべきである。

### 3. 3. 2 評価の観点

#### 共同研究の進め方

#### 3. 3. 2. 1 自己評価

- ・ 共同研究は、一般共同研究、LHD 計画共同研究、双方向型共同研究の3つのカテゴリで構成されており、幅広い分野及び共同研究の形態に対応している。
- ・ 上記の共同研究のテーマは、全て公募により募集され、研究所外部の委員を含む共同研究委員会の審査を経て採択及び予算配分が決定されている。
- ・ 研究成果は、研究所から成果報告書、Annual Report を発行している他、個別には学会発表、論文投稿がなされている。
- ・ 年度末の成果報告会および研究会において研究成果を発表し、活発な議論が交わされている。

#### <今後の展開>

- ・ 低温実験棟が共同研究のニーズに合った設備となっているか継続的な調査・改善を進めていく。
- ・ 所内世話人が研究内容により深く関わることにより、共同研究者からの要請に適確に応えられるようにする。

#### 3. 3. 2. 2 外部評価委員会の評価

- ・ 当該グループによる共同研究は、核融合関連の大型超伝導・低温システム研究の COE 的役割を果たしており、共同研究の進め方として適切と評価する。成果報告会においても、毎回全国から多くの研究者の参加があり、活発な議論が行われ、情報交換の場の提供という側面も機能していると判断する。
- ・ 一般共同研究においては、1 件当りの研究費が小額過ぎること、将来構想の中での共同研究の位置づけが明確でなく、散漫になっている傾向があり、件数を絞り、研究計画にとって意味のある研究費レベルとする必要があろう。
- ・ また、平成 13、14 年度に特許出願が数件なされているが、これまでの多くの研究成果

から勘案すると必ずしも多いといえない。できるだけ特許申請をするように努めるべきである。

### 3. 4 研究体制・大学院教育・国際協力など

#### 3. 4. 1 評価の観点

##### 核融合用大型超伝導応用研究の COE としての役割

##### 3. 4. 1. 1 自己評価

- ・ 超伝導・低温グループは、LHD の大型超伝導・低温システムの研究開発、設計、建設、運転の立ち上げに中心的な役割を果たすと共に、システムの安全で安定な運転、性能を維持するためのシステム保全、高性能化のための装置改良などに関する研究を一貫して行ってきた。
- ・ また、核融合炉の実現に向けた炉システム工学の総合化、高度化の一環として、LHD の建設・実験成果と運転実績に立脚した先進核融合炉の設計研究及び要素技術の開発研究に取り組んでいる。
- ・ 更に、超伝導及び低温に関する基礎研究から周辺機器を含むシステム開発までの幅広い応用研究を行うと同時に、他分野との連携や産業応用を積極的に推進しており、核融合用大型超伝導応用研究の COE としての役割を果たしていると考えられる。
- ・ LHD は実際に運転している大型マグネットの研究が行える貴重な工学実験装置でもあり、これまで大型マグネット特有の現象、課題が見いだされた。
- ・ 低温実験棟には 75 kA まで通電可能な導体/コイル試験設備が準備され、大容量酸化物電流リードなどに代表される核融合用要素技術の研究に役立てられた。

##### <今後の展開>

- ・ 先進的な核融合用超伝導システムの設計・開発のためには、開発の最終目標を念頭に置いた基礎研究の積み上げが必要不可欠である。
- ・ 大学等との共同研究を基盤として、民間との共同研究や他分野との連携を更に発展させる必要がある。
- ・ ドイツのカールスルーエ研究センターと締結予定の研究所間学術交流協定など、超伝導・低温関連の応用研究を軸とした国際的な共同研究を積極的に推進する。
- ・ 現状の導体試験装置では 9 T のバックアップ磁場を発生するが、次世代核融合装置の研究には、より高磁場の試験設備の整備が必要である。

- ・ 共同研究のニュースに応じて低温実験棟の超伝導・低温関連実験設備の整備増強を図っていく必要がある。

### 3. 4. 1. 2 外部評価委員会の評価

- ・ LHD に限らず磁気閉じ込め型の核融合装置用超伝導マグネットのキーワードは、大型マグネット、大型大電流導体、高磁界、極低温冷却、高機械強度であり、これらを開発・設計、評価するための世界的レベルでの能力を COE は備えていなければならない。これらに対し、当該グループは国内では日本原子力研究開発機構（旧日本原子力研究所）と並んで高いレベルの能力を持っており、これまで COE としての役割を果たしてきたと評価する。
- ・ 今後も LHD を使用した超伝導コイルの研究課題を見出し、国内外の広い連携の下で研究を実施し成果を得ることで、COE としての期待に答えられると考える。また、ITER 建設における我が国の重要な立場を考えるならば、当該グループの能力を有効に活用することも念頭に入れる必要がある。
- ・ 適切な年齢構成による、少数精鋭でありつつ、中堅スタッフが充実しており、活力に溢れる研究チームである。
- ・ 大型超伝導・低温試験設備に関して、核融合科学研究所のみが保有する装置も多く、これまで有効に活用されてきた。しかし、設備の一部は、今後行うべき研究内容に即した性能向上が十分ではないと考えられるので、他研究機関とも連携しつつ、先進的な設備へと整備・増強する必要がある。

### 3. 4. 2 評価の観点

#### 今後の研究の展開に必要な研究体制

#### 3. 4. 2. 1 自己評価

- ・ 超伝導・低温グループは、LHD の性能を最大限に発揮させるための装置の維持改良研究と LHD の成果を将来へつなぐヘリカル炉設計研究及び要素技術開発研究をバランス良く進めるために、必要不可欠な分野構成となっている。
- ・ 構成メンバーの専門が、超伝導工学、低温工学、材料工学、電力工学、核融合工学と多岐に渡っているため、核融合用超伝導・低温システムの開発研究を総合的に進めることができる。
- ・ 総合研究大学院大学核融合科学専攻の大学院生に核融合用超伝導コイル開発についての

研究指導を行い、研究者を育成している。

- ・ 国際協力による海外からの研究者を含む共同研究者の受け入れ、特別共同利用研究員などによる大学院学生の受け入れなどにより、研究の陳腐化を防ぎ、グループの活性化を図っている。

#### <今後の展開>

- ・ ヘリカル炉設計研究及び要素技術開発研究、LHD 高性能化のための研究を効率的に進めるため、構成メンバーを考慮して、優先順位に基づいた研究テーマの厳選と集約化が必要である。
- ・ 5年一貫制博士課程の導入に伴い、より教育・人材育成に力を注ぐ必要がある。
- ・ 他分野との連携研究などにより、新しい学問分野の創出にもつながる研究の展開が求められている。
- ・ 超伝導工学・低温工学の進展に貢献できる共同研究体制を維持し、更に発展させていく必要がある。

### 3. 4. 2. 2 外部評価委員会の評価

- ・ 現スタッフのレベルは、核融合用大型超伝導応用研究の COE として、超伝導材料研究分野を除く広範な領域をカバーし、低温超伝導／液体ヘリウム冷却の導体・マグネットの開発に関しては高レベルで、十分な研究体制が整っている。しかし、中長期的な視点に立つと高温超伝導の大型導体化、大型高磁界コイル化の R&D が重要であるが、これに関しては必ずしも十分な体制とはいえない。将来の動向を見ると高温超伝導体のマグネット適用は核融合装置としては必須になると考えられるので、今後、その体制作りを行っていく必要がある。
- ・ 将来計画を推進する上で、マイルストーンを明確にし、それに沿って材料分野の研究体制の強化をはかる必要がある。また、今後は各種の共同研究の役割もさらに重要になるので、全国的な研究グループの組織化にもさらに配慮をする必要がある。
- ・ 核融合関連研究の今後の進展からみて、次の世代を担う若い研究者・技術者の育成が、不可欠である。これは、当該グループの活力を維持するためにも重要である。この点からは、すでに、総合研究大学院大学核融合科学専攻で核融合用超伝導コイル開発についての研究教育を実施していることは非常に有効で意義深い。また、5年一貫制教育体制の導入は、研究者の育成に相応しい形態であり、積極的取り組みを期待する。しかし、そのためには、基礎となる科目、あるいは材料等の専門科目などシラバスの充実が必要である。

### 3. 5 外部評価委員会のその他の助言、提言

- ・ 「3. 1. 2 核融合関連の超伝導・低温工学基礎研究の目標に対する成果」に関する助言、提言。
  - 高温超伝導体に関する基礎研究の進展が少ない。将来の核融合炉の高磁界化、コンパクト化を考慮した開発研究への取り組みが必要である。
  - 3. 1. 1 節で、工学的成果の具体的な結論が何であったか、また、高温超伝導の基礎研究項目の具体的な内容を明らかにする必要がある。
  - 超流動ヘリウム冷却に関する基礎研究は、今後のヘリカル炉開発計画に必要となったときに対応できるようにしておくために重要である。しかし、高磁界化路線として今後の流れを考えると、高温超伝導／4.2K~20K 冷却に重点が移ると考えられるので、これに対応した研究目標を立てる必要がある。
  
- ・ 「3. 1. 3 他分野への応用研究の進展」に関する助言、提言。
  - 大型導体の試験・評価は今後とも要望があるものであり、研究所の研究資源の有効活用の推進が必要である。
  - 核融合科学研究所独自の超伝導機器 R&D プロジェクトの提案を期待する。
  - 当該グループが持つ超伝導・低温技術についてのポテンシャルを今後とも維持すべきである。
  - LHD 用マグネット・システムで開発された技術は高度な技術であり、例えば複雑形状の磁界を持つシステムへの応用研究を期待する。
  - ダイナミックシミュレーションシステムの完成度を高める更なる開発活動を期待する。
  
- ・ 「3. 3. 1 共同研究成果」に関する助言、提言。
  - LHD によるプラズマ研究で大きな進展が得られれば、当初設計で想定した運転回数を超えて LHD の実験運転を継続する可能性がでてくる。このため、今後はこれまでに以上に超伝導コイルシステムの保守、点検、修理、あるいは改造等が非常に重要となる。このような業務も超伝導コイル技術開発研究の一部と捉え、不断の努力を続けることを期待する。またこれにより、超伝導コイルシステム、ひいては核融合炉の高い信頼性と安全性を示せれば、核融合研究における大きな貢献となる。
  - 超伝導コイルの有効な診断技術は未だ存在せず、上述の観点からも重要な研究課題と考える。また、本技術は他分野への波及効果も大きく、積極的な研究展開を期待する。

- 「3.4.1 核融合用大型超伝導応用研究の COE としての役割」に関する助言、提言。
  - 現在の核融合科学研究所の超伝導・低温技術グループは、広く、核融合装置用の超伝導・低温技術に関する COE 的研究グループと考えると、その極めて高いポテンシャルをヘリカル炉にも共有できる範囲内で、研究の枠を柔軟に広げるべきであろう。核融合分野での世界的見地からの抜本的な研究体制再構築も必要であろう。
  - 次のステップの核融合炉を実現するための開発課題が明確になった時点で、それに基づいた高磁場の定量的な提案をすると良い。
  - 試験設備の充実は重要であるが、それだけでは COE に成り得ず、反対に維持費の確保やそれを使用した研究テーマ獲得の難しさなどを考えると、試験設備の増強は他の研究機関と連携するなど、核融合研究全体の中で計画を策定すべきである。

#### 4. まとめ

核融合科学研究所の超伝導・低温グループは、歴史的流れとして本島修先生、山本純也先生（故人）、佐藤定男先生、佐藤隆先生、三戸利行研究系主幹へと引き継がれ、高いレベルの研究成果を着実に積み重ねてきた。我が国において、核融合関連の大型超伝導応用研究や大型超伝導装置冷却関連研究の中核的研究グループとして位置付けることができる。世界的に見ても、今後とも関連分野の学術発展の中心的役割を果たしていくものと期待している。

LHD 装置が我が国で最も大きく世界的にも代表的な全超伝導実験装置であること、また、最近、ITER の設置サイトがフランスのカダラッシュに決定したことを考慮すると、我が国における LHD の重要度は一層高まったと言える。このため、装置の安定な運転を第一とするが、超伝導装置でなければ得られない貴重なデータを蓄積することが肝要である。特に、将来の実用核融合炉のために、大型超伝導マグネットの監視やクエンチ検出・保護技術は、核融合装置の信頼性、安定性の確立にとって有意義である。

当該グループのミッションはヘリカルシステムの開発と運用に関わるもので、研究開発活動もヘリカルシステムに方向づけられている。しかし、超伝導・低温技術は核融合炉実現のための基盤技術であることから、磁気閉じ込め型核融合装置全般を広く見て、さらに高温超伝導体の導入を視野に入れた高磁界大型超伝導コイルシステムの R&D、設計、評価を行う世界的レベルの研究機関として発展していくことが望まれる。

今後、ITER の建設には、我が国の超伝導・低温技術分野の叡知を結集することが不可欠であり、当該グループが持つ研究開発能力を活用し、共有化していくことが必要であり、重要である。

超伝導・低温技術、特に大型設備に対する技術は、一朝一夕で養われるものではない。また、一機関だけで確立できるものでもなく、官民の協力が重要である。今までの研究開発のノウハウを一層具体化し、系統的な研究と地道な研究を融合させることを期待する。

今回実施された外部評価が、核融合科学研究所超伝導・低温グループの今後の活動のために有効に活用されれば幸いである。

自然科学研究機構 核融合科学研究所

超伝導・低温グループ外部評価委員会 委員名簿

委員長 新富 孝和 日本大学 大学院総合科学研究科 (低温工学会長)

委員 Peter Komarek Forschungszentrum Karlsruhe

〃 秋田 調 (財)電力中央研究所 研究企画グループ

〃 石郷岡 猛 成蹊大学 理工学部 (低温工学協会専務理事)

〃 奥野 清 日本原子力研究所 (現日本原子力研究開発機構)  
核融合工学部

〃 長村 光造 京都大学 大学院工学研究科

〃 佐藤 明男 物質・材料研究機構 強磁場研究センター

〃 住吉 文夫 鹿児島大学 工学部

〃 塚本 修巳 横浜国立大学 大学院工学研究院

〃 仁田 旦三 東京大学 大学院工学系研究科

〃 濱島高太郎 東北大学 大学院工学研究科

〃 船木 和夫 九州大学 大学院システム情報科学研究院

〃 山本 明 高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設

世話人 西村 新 自然科学研究機構 核融合科学研究所  
炉工学研究センター



平成 17 年 5 月 20 日

## 第 1 回 核融合科学研究所超伝導・低温グループ外部評価委員会 実施報告書

## 1. 委員会実施日

平成 17 年 5 月 20 日

## 2. 委員会名

第 1 回 核融合科学研究所超伝導・低温グループ外部評価委員会

## 3. 委員会実施場所

核融合科学研究所 管理棟 4 階 第 2 会議室

## 4. 委員会開催時間

13 時 30 分 ～ 17 時 30 分

## 5. 委員会出席者

委員長：新富孝和（日本大学、低温工学会長）

委員：秋田 調（電力中央研究所）、石郷岡 猛（成蹊大学）、奥野 清（日本原子力研究所）、長村光造（京都大学）、佐藤明男（物質・材料研究機構）、住吉文夫（鹿児島大学）、仁田旦三（東京大学）、濱島高太郎（東北大学）、船木和夫（九州大学）、山本 明（高エネルギー加速器研究機構）

核融合科学研究所：本島 修、小森彰夫、三戸利行、佐藤元泰、野田信行、前川龍司、岩本晃史、濱口真司、田村 仁、力石浩孝、山田修一、相良明男、高畑一也、今川信作、柳 長門、西村 新

## 6. 委員会内容

- ・配布資料確認（三戸主幹）
- ・新富委員長挨拶 委員紹介
- ・本島所長挨拶 出席者紹介
- ・小森総主幹から今回の外部評価に当たっての概要説明
- ・今川教授から LHD における工学研究の成果について説明
- ・高畑助教授から共同研究・基礎研究の成果について説明
- ・三戸主幹から今後の 10 年間の研究方針について説明
- ・新富委員長の議事進行により、今後の進め方を審議

上記のとおり 委員会が終了しましたので、報告します。

委員会実施責任者

炉工学研究センター 教授  
西 村 新 印

平成 17 年 7 月 7 日

## 第 2 回 核融合科学研究所超伝導・低温グループ外部評価委員会 実施報告書

### 1. 委員会実施日

平成 17 年 7 月 6 日

### 2. 委員会名

第 2 回 核融合科学研究所超伝導・低温グループ 外部評価委員会

### 3. 委員会実施場所

自然科学研究機構 東京連絡所 会議室

### 4. 委員会開催時間

13 時 00 分 ～ 17 時 15 分

### 5. 委員会出席者

委員長：新富孝和（日本大学、低温工学会長）

委員：秋田 調（電力中央研究所）、石郷岡 猛（成蹊大学）、奥野 清（日本原子力研究所）、長村光造（京都大学）、佐藤明男（物質・材料研究機構）、住吉文夫（鹿児島大学）、塚本修巳（横浜国立大学）、仁田旦三（東京大学）、船木和夫（九州大学）、山本 明（高エネルギー加速器研究機構）

核融合科学研究所：小森彰夫、三戸利行、今川信作、高畑一也、西村 新

### 6. 委員会内容

- ・配布資料確認（新富委員長）
- ・前回委員会の実施報告書、議事メモの確認（新富委員長）
- ・配布資料の全体的な説明（三戸主幹）
- ・今川教授からこれまでの研究成果について説明
- ・三戸主幹から今後の研究方針・目標について説明
- ・高畑助教授から共同研究の成果・進め方、研究体制について説明
- ・新富委員長の議事進行により、質疑、討議
- ・新富委員長の議事進行により、今後の進め方を審議

上記のとおり 委員会が終了しましたので、報告します。

委員会実施責任者

炉工学研究センター 教授  
西 村 新 印

平成 17 年 7 月 21 日

臨時 核融合科学研究所超伝導・低温グループ 外部評価委員会 実施報告書

1. 委員会実施日

平成 17 年 7 月 20 日 (水)

2. 委員会名

臨時 核融合科学研究所超伝導・低温グループ 外部評価委員会

3. 委員会実施場所

核融合科学研究所 管理棟 4 階 第 2 会議室

4. 委員会開催時間

13 時 30 分 ～ 16 時 50 分

5. 委員会出席者

委員長：新富孝和（日本大学、低温工学会長）

委員：Peter Komarek (FZK)、奥野 清（日本原子力研究所）、佐藤明男（物質・材料研究機構）、塚本修巳（横浜国立大学）

核融合科学研究所：本島 修、小森彰夫、三戸利行、相良明男、今川信作、山田修一、高畑一也、柳 長門、力石浩孝、前川龍司、田村 仁、岩本晃史、西村 新

6. 委員会内容

- ・新富委員長挨拶。
- ・本島所長挨拶。
- ・Komarek 氏挨拶。
- ・会議の進行手順の説明（新富委員長）
- ・配布資料の説明（三戸主幹）
- ・新富委員長の議事進行により、質疑、討議。  
主として Komarek 氏の質問、コメントに対する回答、議論を中心に進行。
- ・新富委員長の議事進行により、報告書のまとめ方、今後の予定を審議。

上記のとおり 委員会が終了しましたので、報告します。

委員会実施責任者

炉工学研究センター 教授

西 村 新 印

平成 17 年 8 月 24 日

### 第 3 回 核融合科学研究所超伝導・低温グループ外部評価委員会 実施報告書

1. 委員会実施日

平成 17 年 8 月 23 日 (火)

2. 委員会名

第 3 回 核融合科学研究所超伝導・低温グループ 外部評価委員会

3. 委員会実施場所

自然科学研究機構 東京連絡所 会議室

4. 委員会開催時間

13時30分 ～ 17時00分

5. 委員会出席者

委員長：新富孝和（日本大学、低温工学会長）

委員：秋田 調（電力中央研究所）、石郷岡 猛（成蹊大学）、奥野 清（日本原子力研究所）、長村光造（京都大学）、佐藤明男（物質・材料研究機構）、住吉文夫（鹿児島大学）、濱島高太郎（東北大学）、船木和夫（九州大学）、山本 明（高エネルギー加速器研究機構）

核融合科学研究所：西村 新

6. 委員会内容

- ・配布資料確認（新富委員長）
- ・前回委員会および臨時委員会の実施報告書、議事メモの確認（新富委員長）
- ・会議の進行手順の説明（新富委員長）
- ・新富委員長の議事進行により、各評価項目の評価内容について討議
- ・新富委員長の議事進行により、報告書の構成、まとめ方を審議

上記のとおり 委員会が終了しましたので、報告します。

委員会実施責任者

炉工学研究センター 教授  
西 村 新 印

## 核融合科学研究所 超伝導・低温グループ 外部評価委員の評価意見

## 1. これまでの研究成果

## 1. 1 LHD 超伝導・低温システムの開発、改良研究、ヘリカル炉設計研究の目標に対する成果

## 評価委員意見

- ・ これまでにない大規模の超伝導システムを所定の期間中に実現し、これを長期にわたって安定してプラズマ関連実験に供している学術的、技術的成果は、比類が無く、国際的に見ても最大級の評価に値する。(A 委員)
- ・ LHD 改良研究においては、アルミニウム安定化導体の安定性の定量化、ケーブル・イン・コンジット導体の付加的損失機構の解明など、超伝導工学における最先端の研究成果を出しており、LHD 計画を含む今後の各種の大型超伝導システムにおける超伝導コイル技術確立への寄与が大きい。(A 委員)
- ・ LHD システムを実現するに当って、システムそのものの開発に加えて、確立した基盤技術の明確化とそれぞれの基盤技術確立にどのような貢献をしたか、についての詳細評価をしてほしい。例えば、「±2mm の高精度で完成」という表現に加えて、この成果を実現する新規の基盤技術とはどういうものだったのか、その技術確立にどのような貢献をしたか、がわかるような具体的な記述があると、これまでの成果の裏づけ説明が完備します。(A 委員)
- ・ ヘリカルコイルの到達電流値が目標値の約 90%に制限されていることについては、その総括が見えやすいまとめがほしい。例えば、設計段階での問題点はどうか、その後の研究により問題を解消し設計値を実現する技術的進展があったかどうか、など。(A 委員)
- ・ 今後の展開については、これからの 5 年間、10 年間の研究スケジュールに沿ったさらに具体的な研究内容の記述があると独自性が出しやすいと思う。(A 委員)
- ・ 複雑な 3 次元構造をもつ大型のヘリカルコイルには、電磁特性と冷却特性の他、巻線加工のための塑性や電磁力保持のための剛性まで充分配慮した導体が求められた。多くの候補導体について検討を行って最終的に採用した導体は、ほぼ期待通りのコイル性能を發揮させた。この開発研究の成果は高く評価できる。(B 委員)
- ・ 複数の大型コイルの性能を長期間維持できている点は、世界的に見ても優れた成果である。(B 委員)
- ・ LHD 製作当時は知られていなかった導体の限界性能を決定づけている要因を解明している点も評価できる。(B 委員)
- ・ LHD 超伝導・低温システムの開発では、強制冷却と浸漬冷却の大型コイルを開発、また、超伝導ブスバーなど、重要な大型化の実績を築いた点は大いに評価できる。(C 委員)
- ・ 毎年の連続運転が可能となるような保守点検を含めた実績は重要である。この保守点検、運転などに費やす時間はどの程度でしょうか。更なる自動化や省力化は必要でしょうか。(C 委員)
- ・ 改良研究でも動的安定性低下の原因を究明し、過冷却の特性改善を定量的に示した点は高く評価できる。「今後の展開」の欄にも優先順位として記述されては如何でしょうか。後で出てきますが、ここでも重要な位置付けと思われます。(C 委員)
- ・ ヘリカル炉の設計は次の目標となる大きな課題ですので、高磁界・高電流密度の定量化を示して、そのためのルートマップを作成すると、何時頃までにどのような開発が必要かが明確となるでしょう。(C 委員)
- ・ 超伝導 LHD コイルシステムの中で最も技術的に困難であったのはヘリカルコイルであった。ヘリカルコイルの開発にあたり、種々の候補導体の試作・評価が行われた。評価にあたっては、安定性、複雑な形状のコイルに対する巻線性、耐応力性等系統的な評価がなさ

れ、これを基に導体が選定された。ヘリカルコイルの製造にあたっては、メーカーの優れた製造技術が高く評価できるが、それとともに核融合科学研究所の R&D 成果とメーカーの製造技術が有機的に結び付き、開発当時全く前例のなかった高精度、大型、形状複雑なコイルを完成したことを高く評価したい。さらに、高い稼働率で、7年間にわたりコイルを運用できていることは大いに評価できる。ただし、LHD コイルの開発にあたり最も心配していた安定性について問題があり、電流値が目標にわずかであるが達しなかったことは残念である。今後不安定性の原因を解明し、大型高電流密度マグネットの設計技術を完成することを期待する。(D 委員)

- CIC 導体に関しての損失特性を明らかにし、CIC 導体コイルの設計法に貢献したことは評価できる。今後は冷却システムを含め CIC 導体コイルの設計法を確立することを期待する。(D 委員)
- 複雑な形状を有する超伝導ヘリカルコイルの現地製作では、数々の技術的問題に遭遇しながらも産業界と連携してこれらを解決し、遅滞無くコイルを完成したことは高く評価できる。(E 委員)
- ヘリカルコイルのみならず大口径ポロイダルコイルも現地で製作し、必要かつ十分な品質管理技術を確立し、その結果、所定の性能が得られたことは、ITER にも繋がる技術として評価できる。(E 委員)
- 冷凍機等の周辺機器を含めた超伝導コイルシステムが、適切な保守や独自の工夫、改良により、超伝導コイルに起因した長期の運転休止期間も無く、長年に亘り信頼性高く安定した運転を行ってプラズマ研究を支援してきたことは高く評価できる。(E 委員)
- これらを通じて、日本の産業界における低温・超伝導技術の飛躍にも大きく貢献できたことも評価できる。(E 委員)
- ヘリカルコイルが設計点に到達せずクエンチする現象について、その原因は定量的には十分に説明されておらず、超伝導コイル技術の発展のため、原因の完全究明に向けた更なる努力が望まれる。(E 委員)
- その一方で、プラズマと超伝導コイルが電磁氣的に強くカップリングした環境の中で、ヘリカルコイルのクエンチ検出システムが設計どおり動作し、ヘリカルコイルに損傷を与えることなく磁気エネルギーの放出が安全にできたことは、超伝導コイルシステムの信頼性を高めるもので評価できる。(E 委員)
- LHD の製作実績と運転期の性能評価により、LHD 超伝導コイルシステムの設計に用いられた設計手法や設計基準の妥当性が検証されるとともに不完全な点も明確となったと考えられる。次期ヘリカル炉の設計のため、また、大型超伝導コイル技術として、本成果を有効に活用して設計指針、基準等の整備・見直しが行われることを期待する。(E 委員)
- 現在、LHD 装置が安定して運転されていることは、超伝導・低温システムが正しく開発されたとの証である。(F 委員)
- 一方、初期の設計値までの磁界が発生できていないことは、今後の同様なプロジェクトへの参考のために、詳細に原因と経緯を明らかにし、公開の記録として残しておくべきと考える。(F 委員)
- 現在も定期的かつ連続的に運転されていることは、超伝導・低温システムの長期運転情報を蓄積しつつあることである。LHD の安定運転に注力することが第一の目標ではあるが、運転の実績を分析し記録に残しことは、プロジェクトの価値をいっそう高めることとなると思われる。(F 委員)
- 常電導コイルを使っては不可能な高磁界を超伝導コイルにより実現出来た。特に、消費電力を気にせず長時間の実験が出来ることは、核融合・プラズマ研究に多大な貢献をしたと評価出来る。(G 委員)
- 高純度アルミニウムで安定化した大型導体特有の現象として、電流の拡散時定数の影響が有ることを発見したことは、学問的にも意義有る事と評価出来る。(G 委員)
- 世界に先駆けて多重コルゲート管を用いた超伝導バスラインを導入したことは、先進的研究として評価できる。(G 委員)

- ・複雑な形状を持つヘリカルコイルではあるが、要求される性能を引き出すよう設計し、導体開発を行い、企業との共同作業により製法を確立することによって、高精度の世界最大の超伝導マグネットを完成させたことは高く評価できる。(H 委員)
- ・励磁電流が当初目標の 90%に制限されている点は、設計マージンの取りかた、冷却に対する予測に問題があったと考えられる。しかしながら、どこに問題があるかを追求し、問題点を把握するとともに、解決方法を提示している点は評価できる。(H 委員)
- ・このような課題解決に向けていろいろな研究を行ってきており、アルミ安定化複合導体におけるホール電流による磁気抵抗増大現象、常伝導部のトラベリング現象、長いループ電流による長時定数結合電流に関する知見、プラズマ実験に必要な電流安定制御法の確立など、学際的にも技術的にも興味があり、かつ超伝導技術にとって有益な知見を多く得ていることは評価できる。(H 委員)
- ・共同利用研究所にとっては、共同利用をする研究者に安定かつ恒常的に装置を提供できることは重要である。そのためには、装置の点検・保守は重要である。当グループは、普段の点検・保守によって、プラズマ実験を 95%以上の稼働率で実行できるよう装置を維持してきている。これは、毎年年間 7 ヶ月に及ぶ超伝導・低温設備の連続運転が可能になるよう、夜間の点検・保守が行われていることによる。このような地道な仕事は、論文などのように成果として表に出にくいものであり、評価されにくいのが、本グループが、大型低温機器を長期間にわたり安定に連続運転し、共同実験に装置を供与してきた点は高く評価できる。(H 委員)
- ・なお、大型低温設備の長時間運転実績は、我国においては同じ大学共同利用法人高エネルギー加速器研究機構を除いて無く、極めて貴重な情報が蓄積されていると考えられ、十分に尊重されるべきである。(H 委員)
- ・これまでの設計、開発研究、製作、維持・改善等によって得られた数々の知見は、将来のヘリカル炉の開発に限らず他の核融合装置の開発、さらには他の分野へ応用できる共通の技術が多く、貴重な財産である。(H 委員)
- ・プラズマ物理実験装置である磁気浮上コイルへの応用、あるいは伝導冷却型瞬低用 SMES への応用はその一例である。(H 委員)
- ・LHD 用のマグネットとその周辺装置を開発し、長時間の実験を成功させたことに関して低温工学・超伝導工学の観点からのみならず、システム工学などの点からも高く評価される。(I 委員)
- ・ただし、下記の件に関して、明確な結論を出してほしい。(I 委員)
- ・予定の電流が出なかった理由 (I 委員)
- ・ヘリカルコイルの基盤技術は完成したのか? (I 委員)
- ・蓄積エネルギーにおいて最大級の超伝導磁石をメーカーとの協力で、現地で製作し完成させたこと、そして、安定した運転を 7 年間に亘り継続し、プラズマ物理実験に貢献していることは非常に高く評価されるべきである。安定な運転継続の為に、性能を維持した運転継続のため、問題点を先取りした保守、改善を綿密に行ってきた努力が伺われる。(J 委員)
- ・運転磁場性能が、3 T に制限されたことについて、浸漬冷却 (本質的に 2 相ヘリウム) における熱発生部におけるバブルの発生と、コイル設計における、冷却路設計に検討が至らなかった点は、率直に反省されるべきであるが、常伝導転移現象の発生、遮断トラブル発生後、問題点を徹底的に究明し、その過冷却法による単相ヘリウム冷却への対策を明確に示し、その具体化を進めていることを高く評価する。(J 委員)
- ・アルミ安定化超伝導体における安定性の研究は、アルミ安定化導体におけるホール効果の影響であることをつきとめ、対策を施した安定性にすぐれた導体開発に結びついていることを評価する。(J 委員)
- ・FzK の研究者はじめ、多くの国内外の研究者から LHD の成果に対して高い評価と大きな期待が寄せられている。今後も先進的・先導的な技術開発に意欲をもって取り組まれることを期待します。(K 委員)

- 冷凍機を含む LHD の長時間運転の実績は評価できる。(L 委員)
- The boundary conditions of the helical topology and the size of the device required an extended development program for the magnet system, especially the helical coil, but also for the poloidal field ring coils. The group executed a careful development and experimental verification program. As usual this was started with the evaluation of options and the decision on the conductor design. Fruitful collaboration with conductor manufacturers has been essential for manufacturing, however all testing and evaluation was done by the NIFS group. While the conductors for the forced flow poloidal coils proved also very successful during later coil operation, the cryogenically stabilized bath cooled conductor for the helical coils experienced some problems. The group reacted with some design changes and their verification tests which proved successful. (M 委員)
 

(和訳) LHD のヘリカル形状と装置サイズなどの設計条件によって、ヘリカルコイルやポロイダルコイルなどの磁石システムの拡張開発プログラムが必要であった。当該グループは注意深く開発と実験実証プログラムを実施してきた。通常なされるように、このプログラムは幾つかの選択肢の評価と導体設計を決定することから開始された。装置製造のためには、導体製造企業との実効的な共同研究作業が重要であったが、試験と評価は全て核融合科学研究所の当該グループが行った。強制冷却型ポロイダルコイル用導体は、建設後の運転において大変優れた性能を示したが、ヘリカルコイル用浸漬冷却型導体は幾つかの問題点があることが分かった。当該グループは、幾つかの設計変更と検証試験を行い、それらの試験に成功している。
- A challenging task was the fabrication development of the helical coil. Intensive work together with industry which designed and built the winding equipment was following very good sub-size experimental development and brought the success. To verify the technology of the poloidal coil design, one of the smaller coils was tested in the laboratory before further fabrication of the others. Thereby the largest ring coil had to be fabricated on site. Also these tasks have been performed very well. (M 委員)
 

(和訳) 挑戦的な仕事はヘリカルコイル製作法の開発であった。巻線機的设计と製作を行った企業と一緒に集中的な仕事が行われ、大変緻密なサブサイズでの試験開発が行われ、巻線機の開発に成功した。ポロイダルコイル設計の技術確認のために、小さなコイル(IV コイル)のうちの一つが、その他のコイルを製作する前に研究所で試験された。それによって、最も大きいポロイダルコイルが現地で製作され、これらの製作作業は首尾よく達成された。
- An interesting and so far unique development has been that for the flexible superconducting bus bars with the substantial length of more than 50 m. At that time it was a brave undertaking, but prepared well by a full scale mock-up and was very successful. (M 委員)
 

(和訳) 大変興味深くかつユニークな開発の一つは、50 m 以上の長さを有する、フレキシブルな超伝導バスラインである。その当時、その開発は勇気のいる計画であったが、実物大のモックアップの試作などの十分な準備の下に進められ、成功裏に製作された。
- The specific task for the cryogenic system was the development of the control system to cope with the complicated cooling circuits. (M 委員)
 

(和訳) 低温システムに関わる特筆すべき仕事は、複雑な循環冷凍系を上手く制御するための制御システムの開発であった。
- In the later coil operation the maximal stable current remained below the expected value. This slightly reduced cryogenic stability performance of the helical coil was mainly the only problem which limited the LHD performance as far as the superconducting magnet system is concerned. The group investigated very carefully this performance and with a novel detection system safe plasma operation of the device for all the years so far, of course with a slightly reduced magnetic field value, was achieved. Simultaneously the group used the operation to investigate in much detail the stability limit, partially in fruitful collaboration with some universities. In a nice model experiment local conductor movement as reason has been identified and there is hope that with the planned sub-cooling of the helium the stability margin will be increased sufficiently to achieve the full 3 T field in the device and the preparation for the design of this cooling temperature reduction

was started. (M 委員)

(和訳) 実際のコイル運転では、最大安定電流は予想値に至らなかった。ヘリカルコイルで見られたこのわずかに低い極低温安定性は、超伝導コイルシステムに関する限り、主として LHD の性能をわずかに限定したにすぎない。当該グループは、大変注意深くこの現象を検討し、もちろん磁場は少し低いままであったが、優れた検出システムを駆使してこれまで何年にもわたって安全なプラズマ実験が行われるように装置を維持してきた。同時に、部分的には大学との有益な共同研究を通じて、グループは安定限界をより詳細に検討するための実験を行った。工夫したモデル実験で、その原因が局所的な導体の動きにあることが明らかにされ、ヘリウムの過冷却により安定性マージンを増加させ、当初の目標値である 3 T を十分に達成することができるであろうと期待されている。そして、冷却温度を低下させる設計準備が始められている。

## 1. 2 核融合関連の超伝導・低温工学基礎研究の目標に対する成果

### 評価委員意見

- LHD システムの高性能化という観点からの要素的研究について、積極的な取り組みを高く評価する。また、その成果は、広く超伝導・低温工学関連分野への貢献していることを特記したい。(A 委員)
- マンパワーの問題もあり研究テーマを限定する必要性は理解できるが、高温超伝導体に関する基礎研究の進展が少ない。(B 委員)
- 超流動研究は重要な研究および技術です。ヘリカル形核融合炉に必要なことが分かった場合には対応できるようにしておくことも重要です。しかし、全ての技術や研究を発展させるのは無駄が出てきますので、核融合炉のロードマップの中で議論すると良いと思われまます。(C 委員)
- 超伝導コイルの超流動ヘリウム冷却に関する今までの研究成果は大いに評価できる。(D 委員)
- しかし、今後の高磁界化路線として、主として高温超伝導/4.2K~20K 冷却、低温超伝導/1.8K 冷却の 2 つに分けることができる。今後の流れを考えると前者の方に重点が移ると考えられる。これに対応した研究の目標を立てる必要があると考えられる。(D 委員)
- 超流動ヘリウム冷却に関する基礎的な研究を実施し、LHD 第 2 期計画の準備を進展させた努力は評価できる。(E 委員)
- LHD における超伝導・低温研究は、基盤的技術を開発することが主たる目的ではなく、LHD の完成と安定な継続的運転であると考えれば、これまでの研究成果は十分である。なお、LHD から派生した超伝導・低温研究に関する基盤的技術は、極めて貴重な成果であることは言うまでもない。(F 委員)
- 超伝導バスラインの導入は、超伝導送電などを初めとして幅広い波及効果があり、高く評価出来る。(G 委員)
- 超流動ヘリウム冷却に関する基礎研究、高温超伝導に関連した研究およびそこから得られる技術は、今後核融合炉に限らず、他の分野にも使われる可能性がある。したがって、本グループが行ってきた研究と成果は評価されるべきであり、今後とも継続的に行っていくことが望ましい。(H 委員)
- 基本的に大きな成果を出されたと評価するが下記の点に関して具体的な結論が必要か？(I 委員)
- 第一項の工学的具体的成果の有無 (I 委員)
- 高温超伝導の基礎研究項目の具体化 (I 委員)
- 高温超伝導体の大電流リードへの応用は、この分野における特色ある取り組みであり、その積極的な取り組みを評価する。(J 委員)
- チャンネル中の超流動ヘリウムの熱移送特性などの基礎研究は過渡特性も含めて大きく進展しているが、マグネット安定性の設計データとして具体的に提言できるレベルまで達

していない。(L 委員)

- 超流動ヘリウム冷却の得失を議論する上でも、具体的な目標に向けて基礎研究を押し進めるべきである。(L 委員)
- The skill and the excellent laboratory equipment developed for the LHD research is also a very good basis for carrying out research and development not strictly mission oriented for LHD, but of general value to the field. The group has executed an impressive number of such projects well related to the fusion magnet technology area. As highlights one might mention the levitating HTS coil for the Mini-RT-Device of the University of Tokyo, the development of HTS current leads with different HTS material and different design and the small SMES of UPS type. In all these projects nice fundamental measurements have been carried out. Also for the tokamak type DEMO reactor now more effort is going in the direction of HTS conductor development and one could easily combine the effort of the different laboratories for both reactor types. The projects have been performed in high quality with publications of international standard, the expectations have certainly been fulfilled. (M 委員)

(和訳) LHD 研究のために開発された、技術力のある優れた研究設備は、厳密に LHD に関係した研究開発のみならず、この分野で一般的な価値を持つ開発研究を実施するためにも大変重要な基盤である。当該グループは核融合磁石技術分野に関連する多くの貴重な研究を実施してきた。そのハイライトとして、東京大学の Mini-RT 装置用浮上 HTS コイル、異なった HTS 材料と異なった設計による HTS 電流リードの開発、UPS タイプの小型 SMES をあげることができる。全てのプロジェクトにおいて、優れた基本に忠実な手法が実施された。また、トカマク型の DEMO 炉では高温超伝導線材の開発に向けて多くの努力が払われており、トカマク形やヘリカル型を研究している機関でのそれぞれの努力を容易に統合することができる。

本プロジェクトは極めて優秀な形で実施され、成果は国際誌に出版された。また、予想したことが実証されている。

### 1. 3 他分野への応用研究の進展

#### 評価委員意見

- LHD 開発において得られた研究成果、基盤技術を早期に関連技術分野へ適用する姿勢を、COE の責務のひとつとして、高く評価したい。(A 委員)
- 金属系超伝導体を使った伝導冷却型パルスマグネットを世界に先駆けて成功させた、そのオリジナリティーの高さと開発能力は高く評価できる。(B 委員)
- 他分野への応用研究をさらに発展させるためには、専任のスタッフを増強する必要がある。(B 委員)
- 他分野への応用として、瞬低対策 SMES 用の伝導冷却型パルスコイルへの応用は評価できます。(C 委員)
- 他に構造材に関するデータや、超伝導に関するデータで、核融合炉データベースにまとめたことも重要な成果と思われます。(C 委員)
- 国プロでは今後とも超伝導応用開発が行われ、また、一般企業での開発も行われることも想定されるので、大型導体の評価の要望が出てくると考える。従って研究所の研究資源の有効活用の推進は必要である。(D 委員)
- また、核融合科学研究所の独自の超伝導機器 R&D プロジェクトの提案も期待したい。(D 委員)
- 核融合以外の他分野への超伝導・低温研究に関する成果の応用を目指すよりは、まず今後の核融合用の超伝導・低温技術の高度化を旨とすべきであると考えます。(F 委員)
- AE を用いた超伝導コイルの監視技術は、容易に他分野における大型構造物の健全性のチェックに応用出来ると思われる。(G 委員)
- 本グループが持つ超伝導・低温技術についてのポテンシャルが、伝導冷却型瞬低用 SMES

あるいは大型ヘリウム冷凍機ダイナミックシミュレータを実現したわけであり、今後ともこのポテンシャルを維持することが重要である。(H 委員)

- ・ 超伝導マグネットとその応用技術に関する貢献を高く評価する。一方、LHD 用マグネットシステム技術は高度な技術であり、その応用も必要ではないか？例えば、複雑形状の磁界 (I 委員)
- ・ 核融合科学研究所で蓄積された技術、実験環境資源を活用し、効率が重要な評価基準となる SMES 等における設計の最適化を試みたことを評価する。(J 委員)
- ・ ヘリウム冷却システムのダイナミックシミュレーションは今後、実用機等での装置の大型化に伴い不可欠な技術となる。その為の礎となることは間違いない。(J 委員)
- ・ 大型ヘリウム冷凍システムのダイナミックシミュレーションは熱負荷の変動に対する冷凍システムの安定性を議論する上で必須であり、他の大型冷凍システムを設計する上でも有効なツールになるだろう。さらに完成度を高めることを期待する。(L 委員)
- ・ The above mentioned work on HTS coils and current leads is of high value for all other applications of HTS conductors. Also the work on heat transfer is of general importance. In addition, SMES development gets in Japan at present increasing recognition, which means that the NIFS group can make valuable contribution to that too. (M 委員)

(和訳) 上述した HTS コイルや電流リードの研究は、HTS 導体を他の全ての分野に応用する点で高い価値がある。また、熱輸送に関する研究は一般的な重要性がある。加えて、核融合科学研究所での SMES 開発研究が日本国内において認識されつつある。これらのことは、当該グループが他分野に対して価値のある貢献を行っていることを意味している。

## 2 今後の研究指針・目標

### 2. 1 ヘリカル炉設計研究及び要素技術開発研究の目標と研究開発計画

#### 評価委員意見

- ・ LHD 開発による工学的到達点と今後の開発目標としてのヘリカル炉に必要な工学的達成点との関連をさらに判りやすく（できれば、数量化）してほしい。それぞれの技術開発分野における、今後の 5 年・10 年の研究期間に即した具体的な課題と達成目標の提示があるとさらに独自性をアピールできると思う。(A 委員)
- ・ これまでの独自の研究や共同研究の成果の中から、これからのヘリカル炉実現に向けた研究の基本となるアイデアや萌芽的成果が多く見られるので、これらのポテンシャルを最大限活かす体制づくりを期待します。(A 委員)
- ・ ヘリカル炉実現に向けて必要な研究の独自性と共に、同時に研究成果の波及効果も視野に入れた活動を通して、核融合分野の COE に加えて超伝導・低温工学分野でも大型応用のフロンティアとしての成長を期待します。(A 委員)
- ・ LHD 用の実コイルで観測された導体の限界性能を決定づけている要因（例えば、ケーブル・イン・コンジット導体の長時定数の結合電流）を排除して性能を向上させる抜本的な方策の検討が、ヘリカル炉要素技術開発研究計画の中で明示されるべきである。(B 委員)
- ・ ヘリカル炉用の Nb<sub>3</sub>Sn 導体や Y-123 の導体の開発研究計画の策定が望まれる。(B 委員)
- ・ 超伝導技術は装置開発技術ですから、次世代のヘリカル炉の設計で、現有技術の延長線上で製作可能かどうか、あるいは、ドラスティックなブレイクスルーが必要ななどを明らかにして、多くの超伝導装置に共通する技術開発と、ヘリカル炉に固有の技術開発課題を明確に区別すると、開発方向がわかりやすくなっていくと思われま。特に、FFHR は既に詳細設計までのレベルに達しているので、「今後の展開」の欄に記述してあるように、それを進めるのが重要と思われま。そのようなロードマップを作成すると、次のステップなどが分かってきます。図 3-3 の年次計画は全体の流れが少し弱いような感じを受けま。例えば、高磁場化の研究では、何テスラが必要で、そのために、超流動冷却が最も適

切であるのかどうか、次の炉設計にどのように反映されるのかが分かると研究計画が理解しやすくなると思われます。その中で、現在の過冷却技術等の位置付けを検討するとともに良いと思われます。(C 委員)

- ・ 実用炉開発においてヘリカル炉の位置づけが明確ではないが、ヘリカル炉建設の工学研究の道筋を付ける役割を担えるのは核融合科学研究所しかない。その意味でヘリカル炉設計を目指した要素技術開発を行う必要性は十分にある。しかし、ヘリカル炉のシナリオが種々の要因でだめになった場合にも研究の成果が他の方式の炉への展開が可能となるような目標の設定と研究開発を行っていく必要があると考えられる。(D 委員)
- ・ 日本における核融合研究が整備、統合、集約化される中で、ヘリカル炉実現に向けた超伝導コイルの長期的研究を実施する必要性(何故、今やらなければならないのか)や有用性(他分野への波及等)を十分に説明し、現有の人員や今後利用可能と想定される予算規模に対して見合った研究計画が立案され実施されることを要望する。本計画では、研究目標をファンダメンタルな課題の解決に絞り込み、個々の研究課題や具体的目標、相互の関係、複数の選択肢がある場合の判断基準などを明確にすべきと考える。(E 委員)
- ・ 先進超伝導体の開発は重要で実施すべき課題と考える。一方で、その開発の必要性はヘリカル、あるいは核融合だけに限ったものではなく、超伝導技術一般のとして捉えることが出来る。この観点から、外部資金の積極的導入や目的を共有する他の研究機関との共同研究等を有効に活用し、効率的な研究を目指すべきと考える。(E 委員)
- ・ 現在のヘリカルコイルは交換が不可能で、このようなヘリカル炉を将来、電力業界が受け入れるとは考えにくい。研究目標の一つとして、この点を解決する設計概念を提示することを含めるべきと考える。(E 委員)
- ・ 今後の研究開発成果をまずヘリカル炉へ適用することを考えることは適切であるが、核融合研究の今後は、炉型を含めまだ不透明であるので、磁気閉込核融合装置全般への適用も可能な超伝導・低温技術の開発を目指すべきではないか。(F 委員)
- ・ 今後の研究指針・目標については、将来の実用炉を念頭に置いた検討がなされるべきである。それには、一層の高磁場化と高電流密度化が期待される。これに併せて装置の大型化も伴うので、機械的応力の問題が重要になると思われる。このため、最大応力の低減法、超伝導コイルのクエンチ検出・保護のための AE の活用など、新技術の開発が期待される。(G 委員)
- ・ 本グループの目指す将来計画の適否を議論するためには、我が国の核融合計画の中でのヘリカル炉の位置づけを明確にする必要があるが、その位置付けを評価することは本委員会の任務を超えたものと考えられる。しかし、ITER に対する取り組み、あるいは将来の当該分野におけるヘリカル炉の位置付け、取り組みに関して研究所としてはっきりさせる必要がある。そのような中で、本グループの活動はおのずと決まってくると思われ、その方針に対応するだけのポテンシャルを持っていると考える。また、それは超伝導・低温技術が共通基盤技術であることによる。(H 委員)
- ・ ヘリカル炉は、他の方式より、物理的に OK であるが工学的に難しいとされている。ここでの開発研究がヘリカル型成功の鍵を握っていると考えられる。その観点から、さらなるシステマチックな方針と目標を提示する必要があると思われる。(I 委員)
- ・ ヘリカル炉設計については、あと10年での設計完成目標は良くわかるが、先進 LHD 装置との整合性、時間的なつながりがあまり明確でない。相互の意味、スケールの比率など、もう少し具体的な最適化検討が必要であると感じた。(J 委員)
- ・ 材料技術についても先導的な役割を期待する。FFHR のデザイン情報をタイムリーに公開することにより、材料開発の意欲も刺激されることになる。とくに商業炉に用いられる超伝導材料に課せられる特性は、超伝導材料全体の開発目標として重要である。(K 委員)
- ・ 研究指針はお題目の域を出ていない。研究計画としては、どれだけの開発人員を投入し、どれだけの資金をつぎこむ心づもりがあるのかを具体的に示す必要があるだろう。(L 委員)
- ・ 高磁場化と高電流密度化に関しては、世の中の超伝導線材の進展を期待するのか、あるい

は 核融合科学研究所が線材開発に主体的にコミットするののかの方策が見えない。(L 委員)

- It is logic that NIFS must carry out reactor studies for helical type machines and that thereby the superconductivity group has to play an important role. For the case that in the middle of the next decade the detailed design of a helical type reactor will be started, the strategy plan for the development work on conductors and coils is appropriate. The coordinator of the reactor studies explained very well how these studies are structured and how much input is coming from university collaborations. Some major parts concern solely the work of the group itself, namely the question of advanced conductors for the coils together with the construction of model coils and that of the remote maintenance, in the last case by sophisticated CAD modelling.
- So far it seems to be foreseen that the conductor and coil studies will cover a rather large spectrum of options. This is understandable taking into account that the reactor specifications are not very definite yet It is well justified, that the different conductor materials as A 15 and HTS are considered, slightly critical might be to look also at  $MgB_2$  and on He II cooling. For a reactor to be built around 2020 the reference goal should be probably to use HTS at elevated temperature and only if this is not possible, for reasons of technology or costs, to consider A 15 conductors and lower temperature. Studies for advanced refrigerators should just go in hand with the reference conductor choice and are therefore not very urgent, especially if one takes into account that just now very large He-plants are under construction or already in operation for CERN and in near future for ITER too.
- However, taking into account that Japan has to carry out a challenging ITER coil fabrication task already now, it might be useful to consider the participation of the NIFS group in this project.
- In all cases the planned high field dipole type conductor test facility would provide an excellent extension of conductor testing capabilities. (M 委員)

(和訳) NIFS はヘリカル型の炉研究を実施しなければならず、したがって、超伝導・低温グループがその重要な役割を果たさなければならないのは自明である。次の 10 年間の計画の中ほどからヘリカル型炉の詳細設計が開始される場合には、導体やコイルの開発研究に関する戦略が適切でなければならない。炉研究のコーディネーターは、如何にそれらの研究が組織化され、大学との共同研究によって如何に多くの成果が得られているかを十分に説明した。幾つかの主要部分はグループ単独の仕事になるであろう。すなわち、モデルコイルの製作とともにコイル用先進導体の開発や遠隔保守に関する課題などである。最後の課題については概念的な CAD モデルが必要である。

導体とコイルの開発研究は色々な選択肢を含むことになるものと予想される。炉の仕様が充分明確でないことを考慮するとこのことは明白である。A15 とは異なる超伝導材料や HTS が考えられており、多少厳しいものはあるものの  $MgB_2$  や He II 冷却にも可能性があるということは十分に理解できる。2020 年頃に建設されるであろう核融合炉に対して、超伝導から見たゴールはより高い温度で HTS を使用することであり、技術やコストが原因で HTS が使用できない場合のみ、A15 型導体や 4.2K 以下の温度を考えることになるであろう。先進冷凍機に関する研究は導体選定と連携して進められなければならないが、CERN で運転が開始されようとしている大型のヘリウム冷凍プラントや ITER 用の近未来のプラントなどを考慮すれば、冷凍機に関する研究は切迫したものではない。

しかしながら、日本が意欲的な ITER のコイル製作を担当しなければならないことを考えると、NIFS 当該グループの ITER プロジェクトへの参加を考えることは意義あることであろう。

いずれの場合にしても、計画されている高磁場双極磁石を用いた導体試験設備は、優れた導体試験能力を増強するために必要である。

## 2. 2 LHD 超伝導低温システムの高性能化研究の目標と研究計画

### 評価委員意見

- LHD 規模の超伝導設備の長期信頼性確保の試みは、LHD の成功のみに留まらない超伝導

関連技術の確立に計り知れない貢献をするはずですが、これまでに実施してきている長期間の連続運転のためのバックアップ技術の継承と発展をぜひ実現してほしい。(A 委員)

- ・ 長期運転時の超伝導設備の性能診断・保証についても、地道ではあるが重要度が高い研究課題です。実験設備としての維持管理の中で系統的に進めてほしい。(A 委員)
- ・ 現在の LHD 低温システムの性能は高く評価できる。(B 委員)
- ・ 近い将来ハンドリングが容易な高温超伝導導体が開発された場合に備えて、低温システムの大幅な見直しの検討も必要である。(B 委員)
- ・ ここに記述している高性能化研究はそれぞれが重要な位置付けにあることが示されて、大変分かりやすい形となっています。(C 委員)
- ・ 診断予防、診断予寿命に関する技術は成熟した分野になるに従い重要な課題です。この方向性を提案されたことは、核融合分野では初めてのことと思われまので、この研究のリード役を期待します。(C 委員)
- ・ ただし、各課題の関連性が少し薄いようにも感じられます。(C 委員)
- ・ LHD コイルの高性能化研究として過冷却改造をすることの意義について、次の観点からもう一度よく評価する必要がある。
  1. 過冷却にすることにより、現在の不安定性が解消するか。
  2. 過冷却/NbTi コイルというシナリオが将来の炉用のマグネット技術に本当に役立つか。
  3. 高ベータの達成可能性と改造のため過冷却改造のための研究開発コストが見合ったものになるのか。
- ・ 以上の観点からの評価で意義があると見なされれば高性能化研究の目標と計画は適切といえる。(D 委員)
- ・ 現在の LHD 装置から最少の費用で最大の成果をあげることを考えると、超伝導・低温システムの高性能化はきわめて有効な技術開発である。(F 委員)
- ・ 過冷却改造によるヘリカルコイルの冷却安定性向上は重要な試みである。なお、LHD コイルは、浸漬冷却とはいえ冷媒の供給流量をかなり制御出来るので、強制冷却に近い性質もある。これを活用することも一つの方策と思われる。(G 委員)
- ・ 定常炉という特徴のある LHD が各種プラズマ研究に重要な位置を占めていると考えられ、本装置の性能向上のための改善は重要であろう。その点で、過冷却を採用し、3 T を安定に出せる改造は議に適うものであろう。所としてできるだけ対応が望まれるが、モデルコイルによる試験結果を十分に検討し、過冷却改造によって装置の安定性がどこまで得られるかを事前に評価しておくこと。(H 委員)
- ・ 装置を安定に維持・運転することは、研究開発と同様に重要である。そのための普段のたゆまない改善は必要不可欠であり、所としてもその点を十分に配慮する必要がある。(H 委員)
- ・ 上記と同じような考えで、より詳細なロードマップが必要と思われる。(I 委員)
- ・ LHD 低温システムが毎年7ヶ月、7年間に亘り安定に運転されていることは特筆に値する。特に、故障を未然に防ぐ為の診断技術の開発、先手、先手でおこなってきた機器、制御システムの更新、高性能化、スタッフの熱意がこれを可能にしたと信じる。今回の評価のなかでも、特に高く評価されるべきである。(J 委員)
- ・ 装置の安定性、信頼性向上のため診断技術の向上およびいわゆる各部品の性能の安定化(標準化)が求められるが、たとえば超伝導材料に限れば、その基礎特性のみならず、機械—電磁特性のような複合特性の測定方法および予測方法の確立も必要と考えられる。とくに素線、ケーブル、コイルといった階層毎の特性のみならず、それらを統合するような取り組みが望まれる。具体的な例としては素線内の残留ひずみおよび不均質ひずみ分布、フィラメントの破断強度のワイブル分布、真性ひずみ効果等を考慮することによりさらに精度の高い診断が可能になると考えられる。すなわち、たとえば有限要素法等でコイル中のひずみ分布を計算するとき素線の情報をより正確に取り込むことに相当する。(K 委員)
- ・ The committee discussed briefly if during further operation of LHD before the change to

sub-cooling the size of the disturbances can be estimated by more detailed analysis of the acoustic emission during coil charging to get even more confidence than by the good experiments so far, that the sub-cooling will become of full value. (M 委員)

(和訳) 本評価委員会では、過冷却改造前の更なる LHD 運転において、励磁中の AE 計測などのより詳細な分析によって擾乱の大きさを定量的に評価すれば、これまでの優れた実験で得られたものよりもより高い信頼性のある性能評価ができるし、そうすれば、過冷却によって 3 T を確実に達成できるであろう、ということについて議論した。

### 3 共同研究の成果・進め方

#### 3. 1 共同研究成果

##### 評価委員意見

- ・現在のスタッフと予算規模としては、多岐にわたる研究分野で実績を上げていると思う。(A 委員)
- ・研究パートナーの積極的な参加は、COE としての活動が浸透していることによると評価する。(A 委員)
- ・今後については、本体の 5 年・10 年期間の研究計画に沿って、さらに研究分野をうまく分けつつ相互の関連も積極的にとった系統的な体制が重要になると思う。(A 委員)
- ・一般共同研究は、広い領域を網羅することに重点が置かれており、その結果、件数が多くてすべての研究課題で成果が十分に上げられているとは言いがたい。(B 委員)
- ・成果報告会は毎回盛会であり、情報交換の場の提供という側面は良く機能している。(B 委員)
- ・民間との共同研究の成果は高く評価できる。(B 委員)
- ・共同研究は基礎研究と応用研究をバランスよく推進し、また、大学や民間との共同研究も幅広く実施し、超伝導マグネットの設計応用への活用やデータベースの蓄積など、多くの優れた成果をあげてきていると思われます。(C 委員)
- ・超伝導核融合装置開発は多岐にわたっており、他の研究機関と共同研究を行う方式は大変良い。成果は十分上っていると考えられる。(D 委員)
- ・過冷却改造によるヘリカルコイルの冷却安定性向上は、その原因が定量的には完全に解明されてはいないものの、これまでに実施した解析検討や検証実験を考慮すると、技術的には過冷却改造により定格達成の可能は高いと判断する。しかしながら、その実施は最終的には費用対効果で判断すべきと考える。(E 委員)
- ・LHD 第 2 期計画の実施が見直され、また、将来的にも核融合炉に超流動ヘリウム冷却が選択される可能性は無い(システムが複雑となり電力業界が受け入れるとは考えにくく、また、世の中の流れである高温超伝導と逆の方向)ことを勘案すると、超流動ヘリウム冷却に関する研究は終結すべきと考える。(E 委員)
- ・LHD によるプラズマ研究で大きな進展が得られれば、当初設計で想定した運転回数を超えて LHD の実験運転を継続する可能性がでてくる。このため、今後はこれまで以上に超伝導コイルシステムの保守、点検、修理、あるいは改造等が非常に重要となる。このような業務も超伝導コイル技術開発研究の一部と捉え、不断の努力を続けることを期待する。またこれにより、超伝導コイルシステム、ひいては核融合炉の高い信頼性と安全性を示せれば、核融合研究における大きな貢献であると考えられる。(E 委員)
- ・超伝導コイルの有効な診断技術は未だ存在せず、上述の観点からも重要な研究課題と考える。また、本技術は他分野への波及効果も大きく、積極的な研究展開を期待する。(E 委員)
- ・LHD 関連装置を用いた教育との超伝導・低温グループのミッションを考えると、共同研究で育った次世代の研究者は、わが国の超伝導・低温技術において、貴重な財産である。

(F 委員)

- ・「共同研究」との呼称も含めて、核融合科学研究所の超伝導低温研究部門における共同研究の役割を再確認することも必要ではないか。(F 委員)
- ・共同研究については、十分成果を上げていると評価出来る。(G 委員)
- ・本グループとしては1人当たり年間3件強の共同研究を行ってきており、また、成果も挙げていることは評価できる。(H 委員)
- ・夫々の共同研究が何に貢献しているか、即ちヘリカル炉への貢献、核融合分野での貢献、民生機器等より幅広い分野への貢献、あるいは超伝導・低温分野における基礎研究などへの貢献と、分類分けをしておくこと。(H 委員)
- ・企業との共同研究は、企業の技術力を維持する上でも、将来計画を遂行する上でも重要である。このような技術は、一朝一夕で達成できるものでないことは肝に銘じておくべきである。(H 委員)
- ・広く共同研究を進められていることを高く評価する。一方、それらの共同研究は、核融合科学研究所の研究成果の利用か、研究の補完か？等の分類が必要である。(I 委員)
- ・大学、民間ともに非常に幅広く関連分野の共同研究を推進されており是非、継続的に発展されたい。(J 委員)
- ・共同研究のベクトルが必ずしも揃っていないとはいいたいがたい。将来構想の中でのその研究の位置づけが明確でないからだろう。(L 委員)
- ・超伝導技術の COE として総花的に研究を進めるのであれば、研究投資額が少なすぎる。(L 委員)
- ・A large amount on collaboration has been carried out and is in progress. Partners are universities as well as industry. As already mentioned in the chapter for LHD development, industry collaboration was essential for some parts of the magnet system. For the reactor design and development activities, the collaboration with universities dominates the work in fruitful manner. For the detailed investigation of the LHD helical coil performance again university collaboration was very helpful and was executed in good spirit. It is very good that this is now continued for the conductor development toward a reactor, because especially here many options have to be compared. (M 委員)

(和訳) 多くの共同研究がなされてきており、また、現在でも進行中である。共同研究の相手は企業と大学である。LHD 開発の部分で述べたように、企業との共同研究は磁石システムのある部分では重要である。炉設計や炉開発活動では、大学との研究協力が、実際に成果が期待できるという意味において重要である。LHD ヘリカルコイルの性能評価に関わる詳細な研究においても大学との研究協力は有益であり、良好な関係を保ちながら実施されてきている。色々な選択肢が比較されなければならないので、炉に向けた導体開発が引き続き進められていることは良いことである。

### 3. 2 共同研究の進め方

#### 評価委員意見

- ・核融合関連の大型超伝導システム研究の中心的役割を果たしているため、共同研究パートナーの積極的な協力が得られている。(A 委員)
- ・今後の研究計画の中では、特に大学との多方面にわたる研究を集約していく必要から、共同研究として進める部分の位置付けがより重要になると思われるので、重点課題の設定、共同利用設備の充実など、共同研究をさらに活発に進める体制強化の検討も必要であろう。(A 委員)
- ・一般共同研究の1件当たりの研究費が小額過ぎる。件数を数分の1に絞るべきであろう。(B 委員)
- ・民間との共同研究については、十分な成果が上がっていることと今後の期待も大きいことを勘案し、専任の教員枠を設けるなどの研究所全体のサポートシステムの構築が望まれる。

(B 委員)

- 3つの形態の共同研究は、それぞれの特徴を持って進められており、望ましい形と思われます。(C 委員)
- また、年度末の成果報告会や研究会は有効に機能しており、共同研究が一部のところに限られることなく、多くの研究者に公開され、議論されており、今後も一層の継続が望ましいと思われます。(C 委員)
- 共同研究の進め方に関しては、成果報告会では活発な討論もあり、適切といえる。(D 委員)
- 核融合科学研究所における共同研究の役割を考えると、学術的成果を尊重した進め方でよいと考える。(F 委員)
- 今後とも共同研究による研究推進が必要であるとすれば、基盤的な研究設備の更新も含めて、共同研究に投入する研究資源の確認が必要ではないか。(F 委員)
- 共同研究の進め方については、適切であると評価出来る。(G 委員)
- 3.1節で述べたことと同様に、夫々どの分野に貢献する成果かを分かるようにすること。(H 委員)
- 平成13、14年度に特許出願が数件なされているが、これまでの多くの研究成果から勘案すると必ずしも多いといえない。できるだけ特許申請をするように勤めるべきである。(H 委員)
- 共同研究推進の意欲が感じられ、高く評価するが、上述のように、その共同研究の意義を十分認識された方策が必要と思われる。(I 委員)
- 貴研究所の低温実験棟の設備は、試験専用設備として、国内随一の性能、規模を有しており、積極的に共同研究が進められるとともに、一部、共同利用としての機能も付加されると良いと思う。(J 委員)
- 長期に継続される研究課題の場合には、ある年限ごとに、第三者あるいは外部からの研究成果についての評価があってもよいのではないか。(K 委員)
- It is useful when the group offers its capabilities for specific tasks of other universities, if possible and in line with the general goals, as e.g. demonstrated with the levitating HTS coil for the plasma experiment of the University of Tokyo. Also international collaboration is not neglected and can even be increased, based on the good results. (M 委員)  
もしそれが可能であって、また、お互いの目標が一致しているのであれば、東京大学のプラズマ実験装置用の浮上 HTS コイルのように、他大学独自の計画に協力することは良いことである。また、国際共同研究も進められており、良い成果を得つつ増やされてゆくであろう。

#### 4 研究体制・大学院教育・国際協力など

##### 4.1 核融合用大型超伝導応用研究の COE としての役割

###### 評価委員意見

- LHD の開発と安定した長期運転を通じて、また、共同研究を通じて、核融合用大型超伝導応用について国際的にも高い評価の研究成果が出されており、COE としての役割を果たしている。(A 委員)
- 低温実験棟内の設備は、これまでの開発研究には十分な役割を果たしてきたが、今後行うべき研究内容に対しては、陳腐化しつつある。(B 委員)
- 大型試験設備で、核融合科学研究所のみが保有の装置も多いので、それらが上手く活用されていると思われます。(C 委員)
- 次のステップの核融合炉を実現するための開発課題が明確になると、そのための定量的な高磁場が必要となりますので、それに基づいて定量的に提案されると良いと思われます。

(C 委員)

- ・ LHD に限らず磁気閉じ込め型の核融合装置用超伝導マグネットのキーワードは大型マグネット、大型大電流導体、高磁界、極低温冷却、高機械強度であり、これらを開発・設計、評価するための世界的レベルでの能力を COE は備えていなければならない。これらに対し、核融合科学研究所は国内では日本原子力研究所と並んで高いレベルの能力を持っている。(D 委員)

- ・ 超伝導ヘリカルコイルを建設し運転する唯一のグループとして、国内外の研究機関、産業界と連携しつつ主体的に研究を実施し、COE の役割を十分に果たしてきたと評価できる。

(E 委員)

- ・ 今後も LHD を使用した超伝導コイルの研究課題を見出し、国内外の広い連携の下で研究を実施し成果を得ることで、COE としての期待に答えられると考える。(E 委員)

- ・ 試験設備の充実が重要であるが、それだけでは COE に成り得ず、反対に維持費の確保やそれを使用した研究テーマ獲得の難しさなどを考えると、試験設備の増強は他の研究機関と連携するなど、核融合研究全体の中で計画を策定するべきと考える。(E 委員)

- ・ 現在の核融合科学研究所の超伝導・低温技術グループは、広く、核融合装置用の超伝導・低温技術に関する COE 的研究グループと考えると、そのきわめて高いポテンシャルをヘリカル炉だけに投入するのは非効率であると考え。世界的見地からの抜本的な研究体制再構築も必要ではないか。(F 委員)

- ・ LHD の研究体制は、我が国核融合用大型超伝導応用研究の COE として十分整備されていると評価出来る。(G 委員)

- ・ 現員のスタッフによるこれまでの研究活動と研究成果を考えると、活発な活動を行い、核融合用大型超伝導応用研究の COE としての役割を果たしてきたと評価できる。(H 委員)

- ・ LHD を成功させた体制は、非常に高く評価される。(I 委員)

- ・ 三戸主幹以下、適切な年齢構成による、少数精鋭でありつつ、中堅スタッフが充実しており、活力に溢れる研究チームであると感じる。それらの研究者が実験装置を活用し、また共同研究等を通して、成果を最大限に引き出しており、COE としての役割を十分果たしている。(J 委員)

- ・ 非超伝導電流リード、大容量酸化超伝導リード等について先進的な研究成果が得られており、国際的な超伝導電流リードの標準化の活動にも、その得られた知見を積極的に利用することが期待される。(K 委員)

- ・ The group is well known in the international communities of applied superconductivity and fusion. It is present in most of the relevant international conferences with well received contributions. There are very few groups in Japan which are comparable.

- ・ However, if one looks into the plans for collaboration with universities and industry and the basic scientific research plan, the whole strategy for the next decade should perhaps be reconsidered in view of the recent decision on ITER construction. The challenging work for ITER which Japan has to carry out will certainly need beside the fabrication tasks in industry heavy support from the specialized laboratories. It must be clarified if the capabilities of JAERI in this respect will be sufficient or if not also the skill and the excellent laboratory equipment of the NIFS group might be needed too, e.g. to perform the intensive quality assurance measurements in support of industry. The NIFS group will certainly be well suited to make excellent contributions to the ITER tasks to ensure an optimal performance of the Japanese ITER package. (M 委員)

(和訳) 当該グループは応用超伝導や核融合の国際コミュニティで大変良く知られており、関係する多くの国際会議に出席し、研究報告を行っている。日本国内にはこのようなグループはほとんどといて良いくらい存在しない。

しかしながら、大学や企業との共同研究計画や基礎科学研究計画を考慮する場合、次の 10 年間の全研究戦略は、最近決定された ITER 建設の観点から恐らく再構築されなければならないであろう。日本がなさなければならない意欲的な ITER 建設では、企業における建設に関わる仕事の他に、特化された研究所のしっかりしたサポートが必要とされている。この点において、JAERI の総合的な能力が充分であるかどうか明らかにされなければ

ばならず、もし不足しているのであれば、企業を支えて徹底的な品質保証法を実施するために、当該グループの技術や優れた研究設備が必要とされるであろう。日本の ITER 建設分担において最高の作業を実行するために、当該グループが優れた貢献をするに大変ふさわしい立場にある。

#### 4. 2 今後の研究の展開に必要な研究体制

##### 評価委員意見

- ・核融合関連研究の今後の進展からみて、次の世代を担う若い研究者・技術者の育成が、不可欠である。この点からは、すでに、総合研究大学院大学核融合科学専攻で核融合用超伝導コイル開発についての研究教育を実施していることは非常に有効で意義深いと思う。一方で、関連企業を含む幅広い組織における核融合関連事業への従事者の増強の必要性からみると、現在の学生定員はまだ十分となっていないので、学生定員の増員がぜひ必要である。(A 委員)
- ・構成メンバーの専門が幅広く多岐に渡る配慮がなされているが、今後は各種の共同研究の役割もさらに重要になるので、全国的な研究グループの組織化にもさらに配慮が必要であろう。(A 委員)
- ・現スタッフのレベルは、核融合用大型超伝導応用研究の COE として、超伝導材料研究分野を除く広範な領域をカバーし、十分なレベルを有している。(B 委員)
- ・グループ全体の活力を維持するには、助手や博士課程の学生など、今後若い研究者の数を増やすことが望まれる。(B 委員)
- ・構成メンバー、研究指導者などは記述の通り申し分ないと評価できます。(C 委員)
- ・研究者の育成には、学生から研究者へ進むルートの例があると、学生はそれを参考にでき、自分の将来を描くことができますので、そのような例がありましたら、示していただくと良いと思われます。(C 委員)
- ・5 年一貫性教育を考えると、研究者の育成に相応しい形となりますが、シラバスを拝見していますと、特論が多く、もっと基礎となる講義、電磁気、電磁流体、熱力学、量子統計などの講義課目の充実が必要になるかと思われます。(C 委員)
- ・現在の研究体制としては LTS/液体ヘリウム冷却の導体・マグネットの開発に関しては高レベルで研究体制が整っている。しかし、中長期的な視点に立つと HTS の大型導体化、大型高磁界コイル化の R&D が重要であるが、これに関しては必ずしも十分な体制とはいえない。将来の動向を見ると HTS のマグネット適用は核融合装置としては必須になると考えられるので今後、その体制作りを行っていく必要がある。(D 委員)
- ・LHD 超伝導コイルシステムの保守、点検、修理、及び改造を行い、さらに COE としての役割を果たすためには、現構成メンバーの知識・経験は必要不可欠と考えられる。(E 委員)
- ・現構成メンバーは優秀な研究者集団であるが、LHD の今後 10 年以上に亘る運転計画を考えると、新人の導入・教育など技術の継承にも配慮することを要望する。(E 委員)
- ・核融合研究は、今後工学面の貢献が益々重要になるものと思われる。これに伴い、超伝導低温グループの役割が増大してくることは論を待たない。今後、さらに核融合発電の実現を視野に置いた展開として、電力会社との連携も考慮に入れるべきと思われる。(G 委員)
- ・現有スタッフは、超伝導・低温分野の研究陣として、大型設備の設計、開発、製作の経験を持ち、我国有数のポテンシャルを有すると評価する。また、構成メンバーは、超伝導、低温工学、核融合工学などに夫々配分されており、将来計画を進める上でバランスの取れたものとする。しかし、将来計画を推進する上で、更にどの分野のスタッフの充足を図るべきか、研究所として十分に考慮することが必要である。(H 委員)
- ・核融合科学研究所は総合研究大学院大学の機関研究所として、平成 4 年より若手研究者の教育を担当してきている。ほぼ、通年にわたって当大学院の院生が在籍し、教育活動を行っていることは評価できるが、更に学生の受入が活発化され、教育活動を充実するこ

とが望まれる。(H 委員)

- 特別共同利用研究員(受託学生)の受入は、平成元年の研究所発足当初より、常に複数の大学院生を受入れ、教育をしているが、望むらくはもう少し受入を増やすようにしたい。特別共同利用研究員の学位審査は夫々の大学で行われるために、学位取得に関しては表に出てこないが、院生の学位取得において大きな役割をしてきたことは明らかであり、高く評価できる。今後ともこの活動を推進することが望まれる。(H 委員)
- 上述のようにヘリカル型の成功の鍵は、工学的すなわちこのグループの先導的開発の成果に関わっている。その点から見ると、現在の体制は、受動的の印象が強い。積極的な開発へのコーディネーターを!! (I 委員)
- 確かに質問に対する回答にあったように、貴所には多岐な分野に渡る専門家がおられるので、核融合炉の実現を目指すという目的には当面十分な教育・研究指導が行われるものと考えられます。強いて言えば材料力学(構造力学)、材料熱処理論等の材料、機械の専門科目も充実されると良いのではないのでしょうか。(K 委員)
- さらに、5年一貫制教育と教育期間が長期にわたるようになると、他分野の教育も受けられるという機会がより多くあることが望ましいと考えられる。総合研究大学院の他所、あるいは近郷の大学院と連携してある一定の単位を貴所以外で取得するといったことも必要と考えられます。(K 委員)
- 将来のヘリカル炉の設計研究を進めるためには人員が不足している。(L 委員)
- これまでの研究の進め方は各期毎の目標が曖昧にみえる。中期計画の目標をグループでブレークダウンして、それぞれのグループの定量的な目的あるいはマイルストーンを立てた上で研究を推進することが必要ではないか。(L 委員)
- Promotion e.g. can be done by meeting people at conferences and through teaching at universities. The later one helps to get introduced to the faculty staff and to find out areas of common interest. Members of the group gave 16 lectures in different universities within the last five years and two lectures at SOKENDAI. Perhaps it might be useful to increase this in the future, if possible. The participation of group members in conferences and presenting papers was with 1.5 papers for each group member and year within international standard. It would be nice, if in future more PhD-students from SOKENDAI would find their way to fusion research and thereby to superconductivity and cryogenics.
- The group is well suited with its good collaboration contacts to universities and its participation in the SOKENDAI University program it is helping in the education of young scientist. (M 委員)  
(和訳) 学会で人々と議論することで、また、大学で講義することによって、共同研究は促進される。後者は学部のスタッフに知ってもらい、また、共通に興味を持つ分野を見つけ出すのに有効である。過去5年間に、グループのメンバーは、異なった大学で16の講義を担当し、総研大で2つの講義を行った。もし可能であるのなら、将来、この活動を広げてゆくことは有意義であろうと思われる。グループメンバーが会議に出席し、発表した論文件数は一人、一年当たり1.5編であり、国際標準内になっている。将来、より多くの総研大出身のPhD学生が、核融合研究や超伝導、低温工学の道を歩むことは大変良いことであろう。  
当該グループは大学との良好な協力関係を保っており、また、総研大の教育プログラムに参加している。このことは、若い研究者の育成に役立っている。
- The group has 11 scientists with a broad spectrum of activities. So they have to work hard to fulfil the expectations, however they manage well to succeed. Thus, the size of the group seems to be not much too small. (M 委員)  
(和訳) 当該グループは幅広い活動分野を持つ11人の研究者で構成されている。その期待に答えるために彼らは一生懸命に働いており、十分成果をあげている。したがって、グループの規模は必ずしも小さ過ぎるというようには思われぬ。

## 5 特記事項

### 評価委員意見

- 核融合科学研究所の超伝導・低温グループは、わが国において、核融合関連の大型超伝導応用研究や大型超伝導装置冷却関連研究の中核的研究グループとして位置付けることができ、世界的に見て、今後とも関連分野の学術発展の中心的役割を果たしていくものと期待している。(A 委員)
  - 超伝導・低温グループは、三戸研究主幹を中心にして、高いレベルの研究成果を着実に積み重ねてきており、COE としての存在感を内外に示している。今後も大変期待している。(B 委員)
  - 核融合科学研究所の超伝導・低温グループのミッションはヘリカルシステムの開発と運用に関わるもので、研究開発活動もヘリカルシステムに方向付けられている。しかし、将来的にはヘリカルシステムの位置づけが不透明である。このような状況の中、必ずしもヘリカルシステムにとらわれず磁気閉じ込め型核融合装置を広く見て、さらに HTS の導入を視野に入れて高磁界大型超伝導コイルシステムの R&D、設計、評価を行う世界的レベルの研究機関として発展していくことが望まれる。(D 委員)
  - LHD 装置が我が国で最も大きく世界的にも代表的な全超伝導実験装置であること、また、最近の ITER の設置サイトがフランスのカダラッシュに決定したことを考慮すると、我が国における LHD の重要度は一層高まったと言える。このため、装置の安定な運転を第一とするが、超伝導装置でなければ得られない貴重なデータの蓄積をすることが肝要と考えられる。特に将来の実用核融合炉のために、大型超伝導マグネットのモニタリングやクエンチ検出・保護のための技術の確立をすることは有意義であると思われる。なお、到達磁界の上限については、今後、励磁パターンのバリエーションや、励磁の順序などを工夫し、超伝導コイルの監視を十分行うことによって、当初の目標値である 3T をクリアすることは十分可能であると思われる。(G 委員)
  - ITER の建設が明らかになった現段階で、技術協力をどうするかは所全体の問題であるが、ITER の建設には、我が国のこの分野の知恵を結集することが必要である。所独自の将来計画の中で、所として本グループの役割を検討する必要がある。(H 委員)
  - ITER に限らず、本グループが持つ技術ポテンシャルを持続し、共有化していくことが必要であり、重要である。(H 委員)
  - 低温実験等の試験設備は、超伝導・低温試験設備として世界的に見ても有数の貴重な設備であり、有効に活用することが重要である。特に、核融合分野における将来計画を進めていく上で、この設備の活用は必要不可欠と考える。そのためには、現有設備の維持だけでなく、大型導体試験設備などの充実が肝要である。(H 委員)
  - 超伝導・低温技術（特に大型設備に対する技術）は、一朝一夕で養われるものではない。一度落ちたポテンシャルを元に戻すことは至難の業である。また、研究所だけで確立できるものでもない。官民の協力が重要である。持続的共同研究体制の推進が望まれる。(H 委員)
  - このミッションは、ヘリカル型核融合の成功と広く工学への貢献、その人材養成など非常に幅広い。それをこれまでは成功させている点は非常に高く評価する。(I 委員)
  - 核融合の成功はこのグループの成果のみに依存していることを念頭に先導的開発を期待する。(I 委員)
  - いままでの研究開発のノウハウを一層具体化し、システムチックな研究と地道な研究を融合させて欲しい。(I 委員)
  - The group prepared very well the large amount on documents for the evaluation. These documents are well structured and clear readable. It was also a pleasure to have the very open and detailed discussions with the group, which provided an additional good picture of their work. This effort is very much appreciated. (M 委員)
- (和訳) 当該グループは今回の評価のために大変多くの資料を作成した。これらの資料は

良く整理されており、分かりやすくできている。また、スタッフとの忌憚のない、詳細な議論を行うことができ良かったと思う。その議論を通じて、資料では得ることのできない当該グループの優れた仕事の様相を知ることができた。この努力には大変感謝する。

## 超伝導・低温グループの自己評価概要

核融合科学研究所

## 目次

1. LHDにおける工学研究の成果.....	53
1.1. LHD 建設期の成果.....	53
1.2. LHD を用いた工学研究.....	58
2. 共同研究・基礎研究の成果.....	61
2.1. 概要.....	61
2.2. 超伝導工学研究の成果.....	61
2.3. 低温工学研究の成果.....	64
2.4. 炉設計研究の成果.....	65
2.5. まとめ.....	67
3. 将来計画と今後の方針.....	68
3.1. はじめに.....	68
3.2. LHD超伝導・低温システムの高性能化研究.....	68
3.3. ヘリカル炉システム設計研究と要素技術開発研究.....	69
3.4. 基礎研究、応用研究、大学院教育の方針.....	71
3.5. まとめ.....	71
4. その他.....	72
4.1. スタッフ.....	72
4.2. 大学院教育.....	74
4.3. 設備.....	75

# 1. LHD における工学研究の成果

## 1.1. LHD 建設期の成果

### 1.1.1. LHD の概要

LHD 計画は、1986 年の学術審議会報告「大学における今後の核融合研究において」に基づいて策定されており、核融合プラズマの閉じ込め研究を大学共同利用として実施するプロジェクト研究である。LHD は、閉込め磁場を発生するコイルを全て超伝導とし、ヘリカルダイバータのための広い空間を確保して工学的な先進性を付加したヘリカル型環状磁場閉じ込め装置であり、1990 年から製作のための工学 R&D と詳細設計が開始されて 1997 年度後半より計画通りに運転が開始された。その後、2004 年までの 7 年間に 8 回の冷却とプラズマ実験を行い、大型超伝導・低温システムの安定した連続運転を実現することによって、最先端のプラズマ実験の円滑な遂行を可能としている。主要な機器構成を図 1-1 に示す。

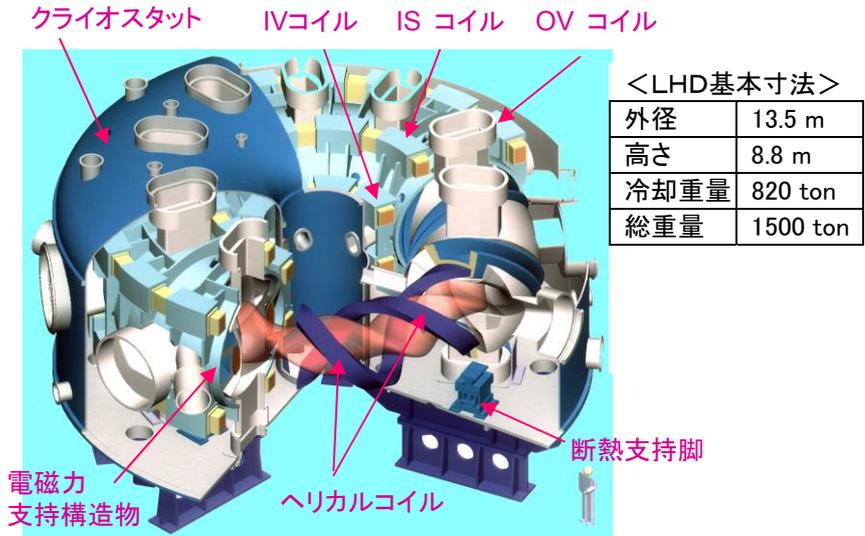


図 1-1 大型ヘリカル装置(LHD)

### 1.1.2. ヘリカルコイルの開発

ヘリカルコイルは世界最大の浸漬冷却方式の超伝導コイルである。精度の良い閉じ込め磁場を実現するために高い製作精度が、プラズマ最外殻と真空容器との間に十分な空間を確保するために高い電流密度が要求された。主要要求仕様と巻線完了時点の外観図を図 1-2 に示す。

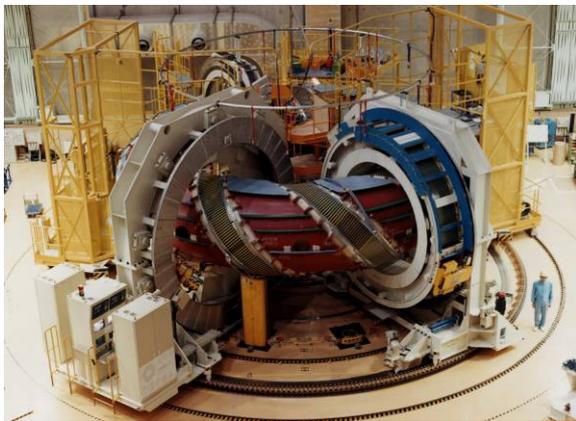


図 1-2 ヘリカルコイルの巻線完成時点の外観

表 1-1 ヘリカルコイルの要求仕様

大半径／小半径	3.9 m／0.975 m
コイル電流密度	40 (53) A/mm <sup>2</sup>
磁気軸中心磁場	3.0 (4.0) T
コイル最大磁場	6.9 (9.2) T
蓄積磁場エネルギー	0.92 (1.64) GJ
冷却方式	浸漬冷却 4.4 (1.8) K
製作精度	±2 mm

### 1) 導体開発

高い電流密度において冷却安定な条件を満足させるために、NbTi/Cu の超伝導撚線、高純度アルミニウム安定化材、電磁力を支持する銅シースを構成要素とする導体開発を行った。まず、10 kA 級の縮小導体を試作し、縮小導体の実験結果にもとづき、図 1-3 の左側に示す二つの候補導体 KISO-4B-R と Design-M が選定された。ところが、大型導体試験装置を用いて測定された回復電流は設計値を大きく下回り、外部磁場 6.9 T で 21.2 kA の運転電流値以上とする目標を達成できなかった。この原因は、導体断面内を流れる“ホール電流”による磁気抵抗によって導体抵抗が設計値の 2～3 倍に増加しているためであると判明し、その対策に取り組んだ。超伝導撚線からアルミニウムへの電流転流を阻害しないことも考慮して、試作の結果を踏まえて Cu-2%Ni (抵抗率は銅の約 100 倍) を選定した。また、冷却安定性の向上のため、導体外形を 12.5 mm×18.0 mm、定格運転電流を 13.0 kA に小さくすることを決断して、最終的には図 1-3 の右側に示す導体が開発さ

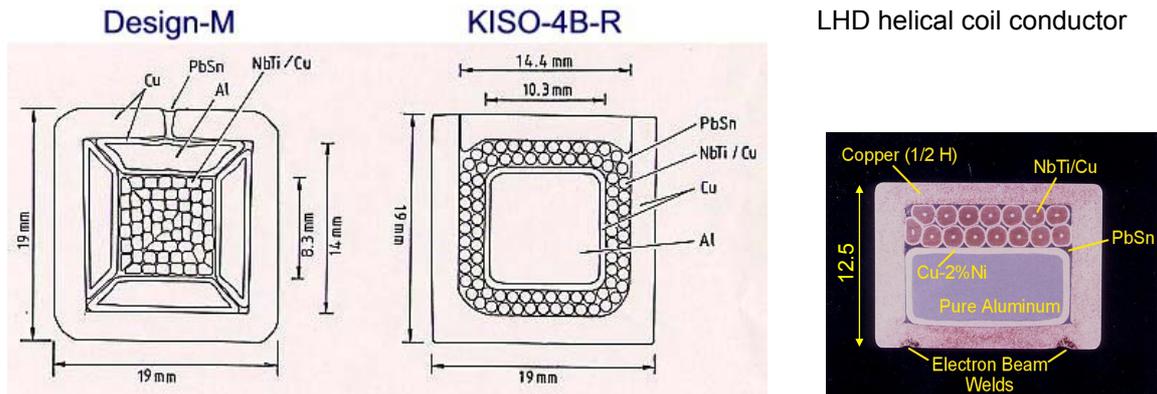


図 1-3 ヘリカルコイル用 21 kA 級候補導体および実導体の断面図

れた。銅シース材の蓋部に対しては電子ビーム溶接の適用に成功し、最大 100 MPa を越える励磁時の圧縮応力に対してのみではなく、ヘリカル形状への成形加工に対しても十分な強度を実現した。

## 2) 巻線法の開発と実機製作

ヘリカルコイル形状の超伝導コイルの製作は世界初の試みとなるため、KYOTO-SC、TOKI-HB、TOKI-MC 等の小型の超伝導ヘリカルコイルの製作から始め、ヘリカルコイル特有の捻れた巻線に適したコイル構造および巻線方法の開発を行った。位置精度の管理を容易にするために、精度良く製作したコイル容器に導体を直接巻き付ける方式を選択して、図 1-4 に示すコイル断面を決定した。

巻線機については、コストを含めた比較の結果、成形ヘッドをヘリカルコイルに沿って駆動させる方式を採用し、コンパクトな成形ヘッドと精密な駆動機構の開発を精力的に進めた。巻線精度とコイル剛性の向上には、導体を高精度でヘリカル形状に成形することが重要であった。矩形断面の長尺導体に曲げと捩りを同時に加えた塑性変形技術は新しい技術であったため、試作と解析によって成形方法と成形条件を研究し、材料の弾塑性特性を把握することによって、形状誤差が 5%以下の成形方法を確立した。成形ヘッドの開発と並行して小型の巻線機を試作し、R&D コイル(TOKI-HB)の巻線に適用してその作業性を調べた。その結果、実機の巻線機では 1 軸を追加して、成形ヘッドに 7 軸、成形ヘッドの移動に 2 軸、導体の供給に 4 軸と合計で 13 軸を数値制御することが必要となった。トロリーを介して制御データと電力を供給する技術の開発によって、成形ヘッド用のポロイダル回転リングに設置した 7 軸制御の計算機とトロイダル方向の駆動装置に設置したもう 1 台の統括計算機を同期させることを可能とした。

実機巻線においては、幅寄せによる張力印加、導体上面と層間スペーサの間への常温硬化型の高弾性樹脂の充填、レーザーを用いた導体上面の形状測定測定と層間スペーサ下面の合わ加工等の新しい技術を開発することによって、コイル容器に対する導体の相対位置精度として $\pm 1.5$  mm、層間の平均隙間として 50  $\mu$ m 以下を達成した。コイル容器の組立・溶接においては、3次元位置測定器(Vectoron)の適用や溶接変形の低減と周期対称性の確保等の工夫によって、最終的なコイル位置精度は目標である $\pm 2.0$  mm を達成した。

### 1.1.3. ポロイダルコイルの開発

#### 1) 導体開発

LHD ポロイダルコイルは、径の小さなものから順に、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)コイルと呼ばれる 3 対、6 個の円形コイルから構成される。この 3 対のコイルは、プラズマの位置制御、断面形状制御、周回電圧および漏洩磁場の制御を行うものであり、運転の自由度を広げている。ヘリカルコイルが浸漬冷却方式であるのに対し、ポロイダルコイルには超臨界圧ヘリウムを冷媒とする強制冷却方式、そして導体には NbTi ケーブル・イン・コンジット型を採用した。設計を始めた当初は、ケーブル・イン・コンジット導体を用いたマグネットの経験が世

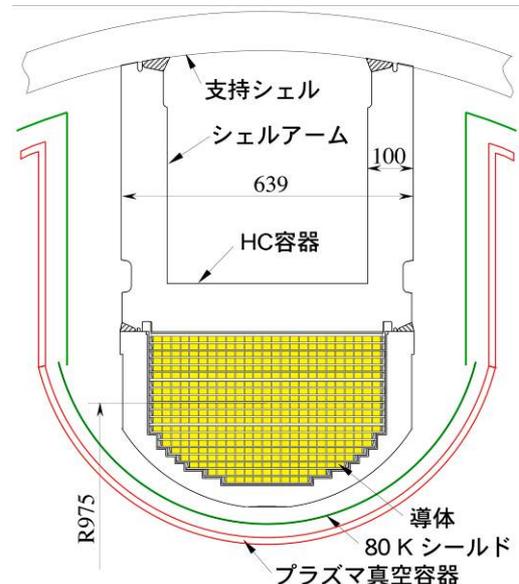


図 1-4 ヘリカルコイル断面図



図 1-6 ダブル・パンケーキコイルの巻線

界的に見ても少なく、そこで LHD では安全性・安定性を最重視した設計を行った。これは現在でも、適切な選択であったと言える。ポロイダルコイルは、第 II 期においてパルスの通電を行う計画となっており、最大 0.4~0.5 T/s の磁場変化を受ける。安全性、安定性を重視すれば交流損失が増加するが、冷却能力の増強によって運転を可能とする設計とした。

表 1-2 に各コイル用導体の諸元を示す。サブ冷却チャンネルは検討したが、設計時には製作信頼性が得られなかったため採用しなかった。コンジット形状はアスペクト比が約 1.2 の矩形とした。図 1-5 に IV コイル用導体の断面構造を示す。寸法等に差があるものの他の導体も同様の構造を有する。コンジットの応力がコイル単独でも許容値以下になるように、また、コイルの変形を 2 mm 以下に抑えるように、コンジットの厚さを決定した。その結果、3.0 と 3.5 mm とそれまでに作られたコンジットより厚いものとなった。

導体製作における重点品質管理項目には、(i) コンジット溶接部の探傷試験の徹底と、耐圧・気密試験に加えて液体窒素温度でのヘリウムリーク試験の実施。(ii) ボイド率の制御のため、素線径の製作誤差を 5 μm 以下に管理。(iii) 臨界電流と銅比の管理の徹底が挙げられる。製作された素線は、全ロットの両端の

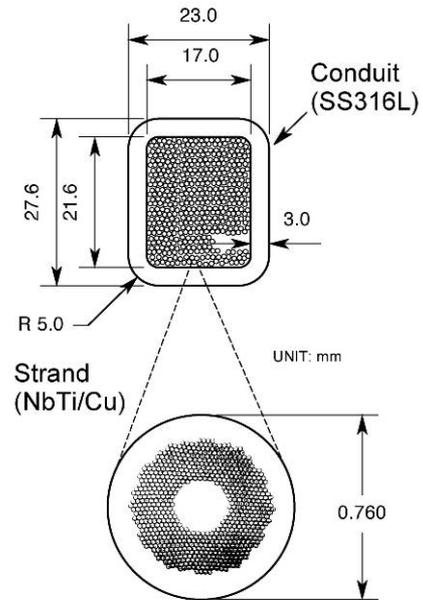


図 1-5 IV コイル用導体

表 1-2 ポロイダルコイルの諸元

CONDUCTOR	IV	IS	OV
Superconducting material	Nb-Ti	←	←
Operating current (kA)	20.8	21.6	31.3
Maximum Field (T)	6.5	5.4	5.0
Critical current (kA)	62.4	64.8	93.9
Number of strands	3×3×3×3×6=486	←	←
Void fraction (%)	38	←	←
Nb-Ti:Cu	1:2.7	1:3.4	1:4.2
Strand diameter (mm)	0.76	←	0.89
Conduit material	SUS316L	←	←
dimension (mm)	23.0×27.6	←	27.5×31.8
thickness (mm)	3.0	←	3.5
Inlet helium temperature (K)	4.5	←	←
COIL	IV	IS	OV
Center diameter (m)	3.6	5.64	11.1
Height (m)	0.47	0.47	0.54
Total weight per coil (tons)	16	25	45
Magnetomotive force (MA)	5.0	4.5	4.5
Overall current density (A/mm <sup>2</sup> )	30	31	33
Number of turns	15×16=240	13×16=208	9×16=144
Stored energy of a pair of coils (MJ)	161	220	625
Number of flow paths	16	16	16

臨界電流と銅比を測定し、さらに、完成した導体の臨界電流を大型導体試験装置で測定し、撚線・造管による素線の臨界電流が劣化していないことを確認した。

## 2) コイル R&D

製作開始までに2個のR&Dコイル(直径約2 m)を製作し、試験した。最初のR&Dコイルは、安定性の不足から、コイルの限界性能の半分以下の電流値においてクエンチし、それ以上の電流を流すことができなかった。導体内部の素線の表面をフォルマールで絶縁したことが原因であることが判明したので、導体の外形寸法を変えずに、素線の表面を銅の剥き出しとする新しい導体を製作し、第2のR&Dコイルを製作した。改良R&Dコイルは限界性能に達するまでクエンチすることなく通電することができた。誘導ヒーターを用いた安定性マージンの測定も行い、ヘリウムの熱容量を最大限利用した高い安定性を有することが確認された。この結果からケーブル・イン・コンジット導体の持つ高い性能が実証され、それを引き出すための設計指針が得られた。その設計指針はそのままポロイダルコイルの導体設計に応用された。

## 3) 巻線方法の開発

3対のコイルはすべて8個のダブルパンケーキを積層した構造であり、同様の方法で製作された。図1-6にダブル・パンケーキコイルの巻線機を示す。まず導体ボビンから下層の導体の下に下層の台に繰り出し、渡り部分に冷媒導入孔を取り付けてから、下層の巻線開始となる。巻線直前の導体には、ポリイミドテープを半硬化のガラス繊維強化プラスチックで挿んだ絶縁テープが巻き付けられる。巻芯ベース上に導体を接続方向に張力をかけながら巻き付けた後は、緩みを生じないよう外周から多数本の油圧式押さえ治具で固定する。下層が巻き終わると、これを固定し、上層を巻き始める。2 mm以下の製作誤差を維持するために、巻線中は常に寸法測定を行い、絶縁物の厚さを調節しながら巻線した。巻線が終了すると、専用の加熱炉の中で絶縁物中のエポキシ樹脂を硬化させる。完成したダブル・パンケーキコイルは、層間絶縁シートを挟み、8個が積層され、最終的に1個のコイルとなる。

## 4) 実証試験

実機コイルの実証試験は、最初に製作された下側IVコイルを用いて行われた。全てのコイルは一貫した設計指針で製作し厳しい品質検査を行ったため、一つのコイルの実証試験で他のコイルの性能も確認できると判断した。実機における運転条件を可能な限り模擬したが、最大通電電流値を定格値の20.8 kAと設定したため、最大経験磁場は定格値の6.5 Tには到達せず5.2 Tとなった。試験は2回に分けて行われ、1回目は冷却試験、2回目は冷却・励磁試験を行った。冷却については、PCスリーブを用いた間接冷却によって初期冷却時間が大幅に短縮できることが確認された。励磁特性については、20.8 kA(最大経験磁場5.2 T)までクエンチすることなく安定に通電することができた。導体接続部の電圧発生は7個の接続部の平均で3 $\mu$ V @ 20.8 kAであり、熱損失としては0.06 Wという小さいことが確認された。さらに、この試験において、電空変換器など、磁場の影響を受け誤動作する計装機器が見つかり、LHD実機の現場盤等の配置設計に役に立った。実機運転が順調に開始されたことに対するこの実証試験の貢献は大きい。

### 1.1.4. 電磁力支持構造物の開発

超伝導コイルを支える電磁力構造物には、プラズマ実験からの要請で $\pm 2$  mmの高い製作精度が要求された。さらに、超伝導コイルに働く強大な電磁力による変形もそれと同程度に抑えることが要求された。電磁力支持構造物の開発においては、まず、図1-7に示す有限要素モデルを用いて構造解析を行い、全コイルを共通の支持構造物で完全拘束することによって、支持構造物の全重量を合理化できることを示した。次に、構造材料に関しては、SUS316の炭素及び窒素量の研究データをもとに溶接性と強度を両立した含有量の最適化を行うことに成功した。さらに、実際の組み立て工程においては、溶接による変形低減のために、溶接構造の検討と作業手順の対称性を制御することにより、要求された仕様を満足する構造物の組み立てができた。

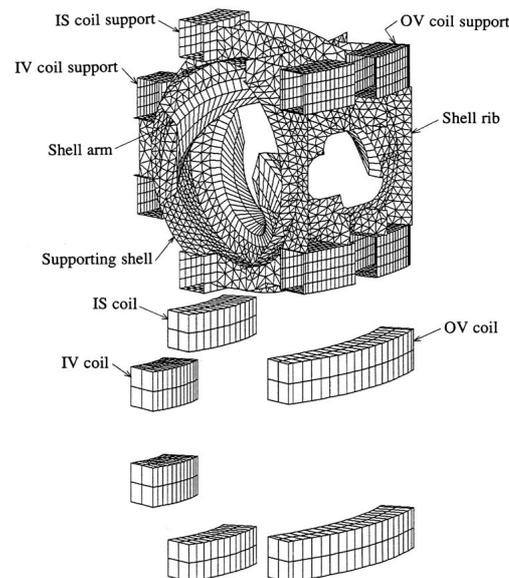


図 1-7 電磁力支持構造物の解析モデル

### 1.1.5. 断熱支持脚の開発

断熱支持脚には、超伝導コイルと電磁力支持構造物の総重量 822ton を少ない熱侵入量で、かつ、熱収縮の方向には柔らかく、その他の方向に対しては十分な剛性を持った構造で支えることが要求される。図 1-8 に断熱支持脚の全体概略図を示す。inner column(内柱)と outer column(外柱)はカーボン繊維強化複合材(CFRP)で、その他の部材の材料はすべて SUS316 である。断熱部材となる内柱と外柱に CFRP を採用した理由は、50K 以下での熱伝導率が通常のガラス繊維強化材よりも小さく、弾性率と圧縮強度が高いからである。

断熱支持脚は、半径方向には柔らかい構造であるため、地震解析が必要である。まず、等価な剛性の簡易モデルを求め、続いて、その簡易モデルを用いて全体について標準地震波による動解析を行った。その結果、半径方向応答の場合で、地震による加速度が準静的に作用した場合の3倍程度の応答加速度となった。ここで得られた最大変位を断熱支持脚の詳細モデルに強制変位として入力して構造解析を行い、健全性を確認した。

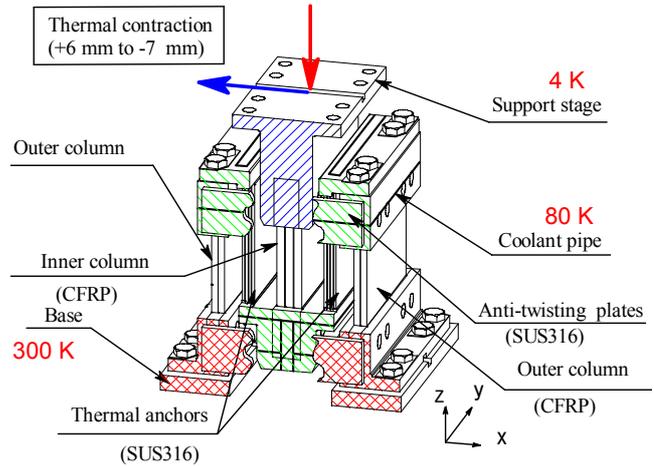


図 1-8 断熱支持脚の構造と運転時の温度分布

### 1.1.6. 超伝導バスラインの開発

超伝導送電方式の利点は、1) ジュール発熱がないので、電源容量及び運転コストが低減できる、2) 電流リードを装置本体から離すことにより、装置周辺の加熱機器や計測機器用の空間が十分に確保できる、等である。図 1-9 に示すLHD用の超伝導送電システムでは、耐電圧並びに電流値に対して余裕を持つこと、寒冷の供給が万一停止しても、30 分間の通電が可能であること等、高い信頼性が要求される。この仕様を実現させるために、先ずバスライン用超伝導導体として、アルミニウム安定化の NbTi/Cu 成型撚線を開発した。次に、長さ 20 m の超伝導バスラインの実機モデルを製作し、受電端部を短絡した状態で、冷却・通電試験を行い、電流 30 kA で完全安定であること、9 本の超伝導素線の電流分流の偏差は 7% 以下であることを確認した。また、寒冷停止状態での定格電流通電、および 2 kA/s の高速度で 40 kA の過電流通電を行い、高い信頼性、安定性を確認した。LHD 用超伝導送電システムは、世界最大規模、かつ、実稼働の送電システムとして今日までに大きなトラブルもなく順調に稼働しており、工学的のみならず経済的にも有用であることを実証しつつある。

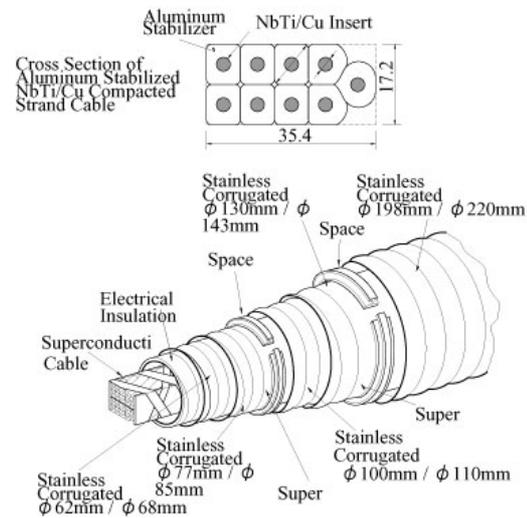


図 1-9 超伝導バスラインの断熱構造

### 1.1.7. 超伝導コイル励磁電源の開発

LHD においては 3 対のポロイダルコイル群及び 3 対のヘリカルコイル群を異なった電流値で励磁するために 6 台の直流電源を必要とする。低出力電圧・大電流電源で長時間運転することから、図 1-10 に示すように、大電流電源で実績のあるサイリスタ整流回路を元にした構成を選択し、発生するリップル電圧は後段に設置した LC 受動型直流フィルタにより除去する構成とした。整流素子の電圧降下による効率低下を防ぐため、サイリスタ整流回路においては、直列素子数が 1 で済む二重星型結線を採用した。クエンチ保護回路では、30 kA の直流電流を 2 kV の発生電圧に抗しながら遮断する直流遮断器が必要である。通常の真空遮断器では電流零点を作るためのコンデンサバンクが必要で接地面積が大きくなること、気中遮断器で

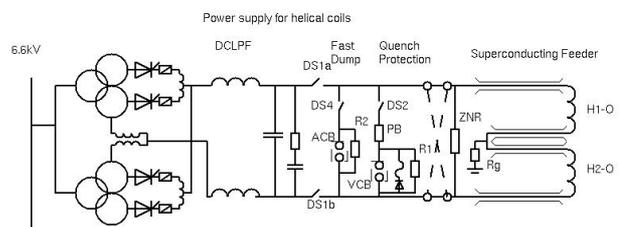


図 1-10 LHD超伝導コイル励磁電源

は消弧室の寸法が大きくなりやなり接地面積がかさむこと、および導入コストがかさむことから、小型の真空遮断器と電力用ヒューズを併用した遮断回路を開発した。

### 1.1.8. 低温システム

LHD低温システムは、超伝導システムの長期間連続運転を供給することを目的として開発された。図 1-11 に示す大型ヘリウム液化冷凍装置は、冷凍能力としては国内最大(9.1 kW @ 4.4 K)であり、液体ヘリウムの製造能力に換算すると1時間当たり2,600リットルに達する。1台の液化冷凍機で液体ヘリウム、超臨界圧ヘリウム、低温ガスヘリウムを供給する新しい低温システムであったために、ヘリウム液化冷凍装置単体での試運転を繰り返すと共に、超伝導コイルの熱負荷を模擬したダミー熱負荷装置を接続して、運転特性の把握と自動制御プログラムの構築を進めた。

低温制御システムはオープンシステムを採用し、将来の拡張性を優先した。また、汎用の VME ボードを利用し、制御プログラムを構築するためのプログラミング技術を最小限に抑えた設計として、運転員によるプログラムの修正などを可能とした。低温システムは24時間連続運転をおこなうと共に、大型のシステムであることから、各運転プロセス(冷却、定常、加温)は自動化された。LHDの長期連続運転を可能にするためには、高信頼性を維持することが必要不可欠であるため、制御システムのモジュールはすべて二重化され、故障発生時には自動切替をおこなう。また、LHD低温システム装置の信頼性を維持するためには、緊急時の自動シーケンスプログラムを構築する必要がある。これらのシーケンスプログラムは装置の安全性を高めると共に、故障を防ぐ重要な役割がある。実際に発生する事象としては、超伝導コイルクエンチ、停電等が考えられる。それぞれに応じたヘリウム液化冷凍機と超伝導コイルの自動切り離しプログラムが構築・検証された。

LHDの超伝導・低温システムは、1998年2月に開始したLHDの第1サイクル運転から、2005年2月に終了した第8サイクル運転まで、8回に及ぶ長期連続運転を経験している。それぞれの運転は、精製運転、1ヶ月弱の予冷運転、約5ヶ月の定常運転、1ヶ月弱の加温運転から構成されており、年間の 2/3 以上の昼夜連続運転をおこなっていることになる。この間、安定な連続運転に支障を来すようなシステム故障や超伝導コイルの経年変化による特性劣化等は観測されておらず、大型超伝導低温システムの高い信頼性を実証し続けている。

## 1.2. LHD を用いた工学研究

LHD は世界最大の超伝導コイルシステムを有する核融合実験装置である。装置工学実験では、プラズマ実験に安定した磁場を提供するための信頼性向上の研究を行ってきた。さらに大型超伝導コイルシステム特有の物理現象に関する研究も進めている。これまでに実施してきた研究テーマを表 1-3 に纏める。また、性能評価の概要を以下に纏める。



図 1-11 液化機室の配置

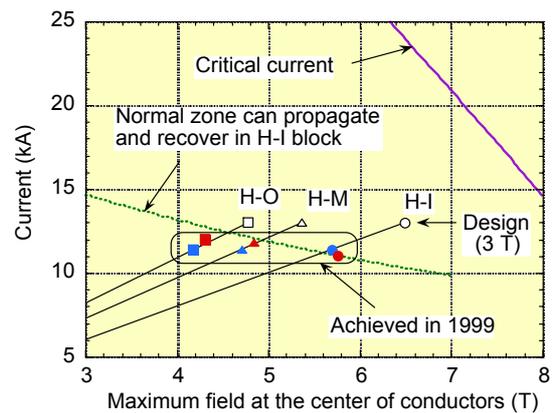


図 1-12 ヘリカルコイルの負荷曲線と到達値

表 1-3 LHD を用いた工学研究テーマ

- (1) LHD 超伝導システム (コイル、バスライン、クライオスタット) の性能評価
- (2) HC バランス電圧の波高分析と AE 信号との比較 (成蹊大との共同研究)
- (3) 大型超伝導コイル電流制御に関する研究 (阪大との共同研究)
- (4) LHD ポロイダルコイルにおける長時定数結合電流ループの研究 (東北大との共同研究)
- (5) ファイジー理論を用いた超伝導コイルの異常診断 (成蹊大との共同研究)
- (6) 電磁力支持構造物の二相流ヘリウム冷却の最適化 (原研との共同研究)
- (7) LHD 電磁力支持構造物のひずみ測定
- (8) LHD 電力システムの安定化
- (9) バランス電圧測定によるコイル位置精度評価
- (10) 極低温・強磁界中の構造材料の磁化

### (1) LHD 超伝導システムの性能評価

LHD は 1997 年 12 月に建設を完了して翌年 1 月より各機器の動作試験と気密試験等を行った。最終のヘリウムリーク試験において計 5 箇所の大リークが発見されたが、全てのリーク箇所(溶接部)の補修に成功した。1回目の冷却では流量計の測定範囲の不適合やヘリウムインベントリの過小評価等のトラブルがあったものの、計画通りに 4 週間で冷却を完了することができた。冷媒の圧力損失や熱負荷についても設計値と良く一致する結果が得られており、設計と製造の健全性が実証されている。第1サイクルでは計画通りに 1.5 T までの励磁を行って超伝導コイルシステムの健全性を確認した。約 4 カ月の 1.5 T プラズマ実験を経験してから第2サイクル途中の 10 月に標準 3.0 T までの励磁が試みられたが、その途中の 2.75 T においてヘリカルコイルに広域の常伝導伝播が発生して緊急減磁インターロックが働いた。ヘリカルコイルにおいては動的な冷却安定性の不足が明らかとなり、図 1-12 に示すように運転電流値は定格の 90%以下に制限されている。ポロイダルコイルと超伝導バスラインは最初から 4 T を定格値として設計されていることもあり、3 T 近傍までの励磁試験においては安定した超伝導特性を示している。

LHD では冷却サイクル毎に一連の励磁試験を行い、超伝導コイルシステムの健全性を確認してきている。特にヘリカルコイルについては、常伝導伝播が起り得る電流値までの励磁試験を毎回実施してきているが、これまでのところ冷却安定性の劣化は観測されていない。

### 1.3. LHD 高性能化研究

大型ヘリカル装置のヘリカルコイル導体には、高磁界中でも高い冷却安定性を確保するために安定化材として高純度アルミニウムが採用された。しかしながら、実機において定格電流値の約 90%の電流値において常伝導部の拡大伝播が観測され、その原因は低抵抗の安定化材への電流拡散遅れに伴う過渡的な発熱増加であることが、10 ターンコイル試験体やコイル状導体試験体で明らかとなった。そこで、冷却安定性を改善する方策を検討し、絶縁破壊電圧と大気混入防止の面で有利な過冷却ヘリウム冷却を選択した。改善効果を定量的に調べるため、同一仕様の導体の R&D コイルを製作し、図 1-13 に示す試験設備を用いて過冷却ヘリウム中の冷却安定性試験を実施した。常伝導伝播が起り得る電流値は、図 1-14 に示すように、過冷却ヘリウム中では冷媒流量には依存せずサブクール度に比例するような結果が得られた。一方、飽和ヘリウム中では、温度履歴に対応して冷却安定性に幅があることが分かっており、コイル内部のクオリティが重要な因子になっていると考えられる。1 ターン内で伝播が止まる電流値が存在することは、位置によってクオリティが変化していることを示唆しており、コイル下部では試験領域である 1 層目に泡が集まりやすく、局所的にクオリティが悪化すると考えられる。R&D コイルとヘリカルコイルの同等性については更に検討が必要であるが、コイル内部の温度を 3.5 K 程度に下げることによって 12 kA の励磁が期待できる。

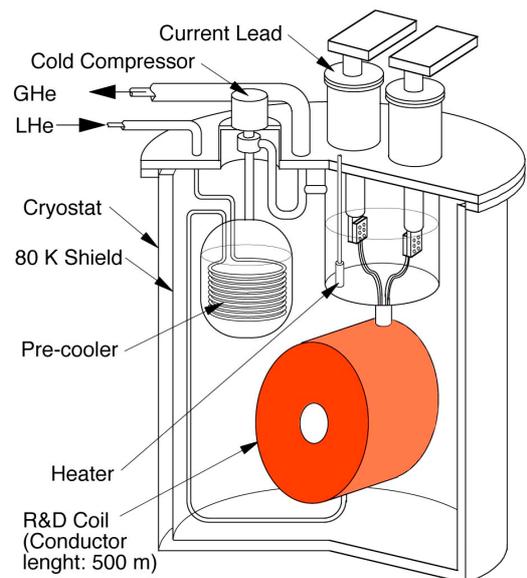


図 1-13 過冷却 R&D システム

### 1.4. まとめ

LHD の建設においては、世界初の大型超伝導ヘリカルコイル、ケーブル・イン・コンジット導体を採用した超伝導ポロイダルコイル、フレキシブルな超伝導送電システム等を実現するために、導体開発や高精度巻線技術の開発等が精力的に進められ、その結果として、装置建設を遅延無く完了することができた。また、国内最大のヘリウム冷凍システムやコイル電源においては、実績と信頼性を重視した機器構成が採用される一方で、汎用計算機を用いた先進的な分散制御システムが開発されて、高い信頼性と高い拡張性を両立させたシステムが構築されている。

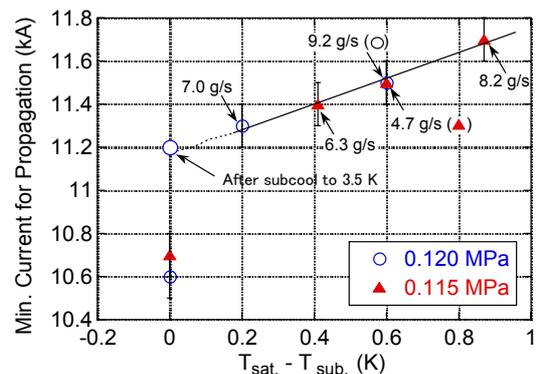


図 1-14 最小伝播電流の冷媒温度依存性

超伝導コイルシステムの性能試験においては、ヘリカルコイルの通電電流値が設計値の約 90%に制限されていることを除いて主要な目標値が達成された。また、超伝導コイルシステムは毎年 7 ヶ月の連続運転を高い稼働率で実現してきており、大型超伝導・低温システムの高い工学基盤を実証してきている。LHD を用いた装置工学実験では、大型超伝導コイル特有の電磁現象が明らかになり、診断技術（電圧タップ、ピックアップコイル、ホール素子、音響センサ等）の開発が進展した。また、核融合装置に特有なコイル電流制御法や電力系統安定化等の研究が進展した。

LHD の高性能化研究においては、ヘリカルコイル導体（高純度アルミニウム安定化）の動的な冷却安定性が明らかになり、また、温度低下による改善効果が定量的に把握されると共に低温排気圧縮機を用いた過冷却システムの要素技術が実証された。これらの結果に基づいて、ヘリカルコイルの冷媒温度を現状の 4.4 K 飽和状態から 3.5 K 過冷却状態に低下させる改造計画が立案され、進行中である。

## 2. 共同研究・基礎研究の成果

### 2.1. 概要

超伝導・低温グループはこれまで超伝導工学および低温工学に関する共同研究を推し進めてきた。共同研究は超伝導・低温に関する基礎特性を調べる基礎研究、そしてこれを応用し要素技術を開発する応用研究まで広い領域を含んでいる。また LHD を用いた工学研究も共同研究の枠組みで実行されている。そしてこれらの研究成果を発展させ、核融合炉設計研究を進めてきた。炉設計を進める共同研究体制も確立している。これら全ての成果は、核融合炉の早期実現に寄与するものであり、その多くは他分野へ応用できるものと期待される。

図 2-1 は、過去 5 年に共同研究を実施した大学、研究機関、民間会社の所在地を地図上に示したものである。全国の数多くの機関と共同研究を実施した。また図 2-2 には、同じく過去 5 年間の共同研究テーマの年度別実施件数を示した。毎年の共同研究の実施件数は約 30 件であった。さらに国際的な共同研究も実施してきた。超伝導核融合装置を持つ研究所との共同研究では、その設計・建設に貢献した。

本章では共同研究の成果について述べる。2.2 節は超伝導工学に関する研究成果である。前半に低温超伝導に関する研究、後半に高温超伝導の応用研究について述べる。そして 2.3 節が低温工学の研究成果となる。最後に 2.4 節で炉設計研究に関する成果を紹介する。紙面の関係で全ての共同研究の成果を紹介できなかった。ここで紹介できなかった研究成果も超伝導工学・低温工学の進展に大きく寄与している。

### 2.2. 超伝導工学研究の成果

#### ケーブル・イン・コンジット導体の特性評価

現在、核融合用超伝導コイル用導体としてケーブル・イン・コンジット導体が有望とされている。この型の導体は LHD ポロイダルコイルにも採用され、現在まで安定に運転を継続している。しかしポロイダルコイルを設計開始した当初は、その性能、特性が十分把握されていなかった。そこで共同研究を基盤としたケーブル・イン・コンジット導体の特性評価研究が、LHD 開発当初からこれまで継続的に実施されてきた。これまで行ってきた代表的な研究テーマをいくつかに分類して次に列記する。

電磁気的特性：臨界電流，履歴損失，結合損失（表面処理の影響，電磁力の影響），撚り乱れによる長時定数結合電流（損失測定，撚り乱れの観測），電流均流化法・損失低減法の研究（撚線の周期的短絡，変圧器による均流化）

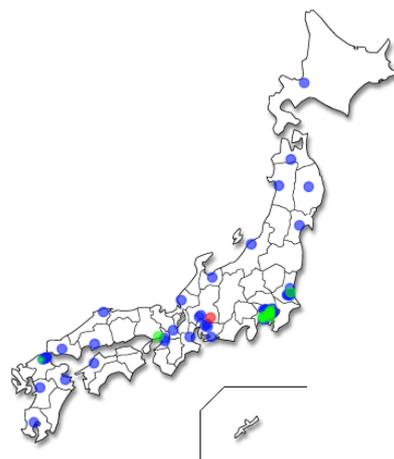


図 2-1 過去5年間に共同研究を実施した大学・研究機関・民間会社等の所在地（青：大学等，緑：民間会社等，赤：核融合科学研究所）

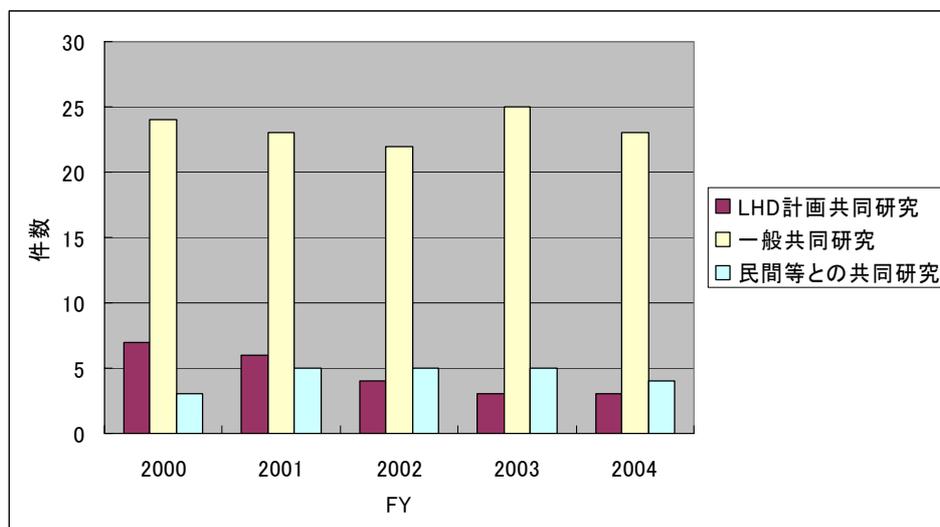


図 2-2 共同研究の年度別実施件数

機械的特性： 寸法精度，コイル剛性，コンジット強度，撚線の変形，素線の動き（素線動力学シミュレーションの適用），機械的損失の評価

熱的特性： 撚線内熱伝導率，ケーブル・コンジット間接触熱コンダクタンス，ホットスポット温度，安定性マージン

水力学的特性： 管摩擦係数，圧力損失(冷媒導入孔を含む)

これらの研究結果からケーブル・イン・コンジット導体の持つ潜在的な性能の高さが確認された。また一方でいくつかの課題も確認された。その一つが撚り乱れによる結合損失の増大である。この現象は大型超伝導導体特有のものであり，LHD ポロイダルコイルを運転することによってその現象が明確化するとともに，共同研究によって系統的な原因説明が行われた。

### 2.2.1. 電流制御型導体の研究開発と伝導冷却パルスコイルの試験

大型撚線導体の撚り乱れを抑制し電流分布を均一化するために，堅固に撚り合わせたラザフォードケーブルを使用した導体構造を提案した。この導体は，図 2-3 に示すようにラザフォードケーブルの外周をアルミニウム合金で覆ったアルミ押し出し型導体である。導体の外形は，後述する捻り巻線法のために，巻線が容易にできるよう円断面とした。導体の中心のラザフォードケーブルは，Cu/Nb-Ti 素線8本から構成されている。このラザフォードケーブルは，素線間接触抵抗を小さくするために，素線表面を洗浄してから撚線加工されている。このように，素線間を積極的に低い抵抗値で接続することによって，素線間接触抵抗に特性が左右されない導体の開発が可能である。一般に，素線間接触抵抗が小さくなると素線間結合損失が増大するが，ラザフォードケーブルは断面アスペクト比が大きいので，変動横磁界に対して異方性を持っている。つまりラザフォードケーブル幅広面に対して平行な変動横磁界(EO 磁界)が印加されると，素線間接触抵抗が小さくても素線間結合損失が小さい。結果として本導体は，EO 磁界中で，低損失性と高安定性を両立している。

次に，この新型導体の特徴を生かして 100kJ 級伝導冷却パルスコイルの開発研究を行った。このコイルでは，さらに新しい「捻り巻線方法」を採用した。この巻線方法では，ラザフォードケーブルの幅広面に平行な方向とコイル内で巻線導体に印加される局所的な磁界を一致させるために，巻線工程中に導体の捻り角度を連続的に調整する。この方法によって，コイルの安定性を確保したまま，交流損失を最小化した。コイル励磁試験では，コイル電流 1230 A(蓄積エネルギー150 kJ)の通電，交流損失を発生する繰り返しパルス運転，遮断試験を行い，新型導体が低損失化と高安定性の両方を有していることを実証した。

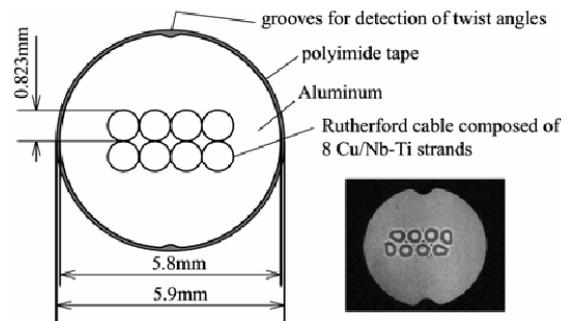


図 2-3 電流制御型導体の断面図と写真

### 2.2.2. 電流導入部への高温超伝導体の応用研究

将来の核融合炉への高温超伝導体の応用は重要な課題の一つである。最終的にはコイル用導体に応用されると期待されるが，それまでには長尺化，工学的臨界電流密度の増加，コスト低減という課題を解決しなければならない。しかしながら電流導入部への応用は現状の技術で十分可能である。熱伝導率が銅より2桁小さい高温超伝導体は，温度差が必要な電流導入部へ応用すると熱侵入が抑えられ，冷凍負荷の観点から有望な材料である。一方核融合炉では数 10 kA の電流容量が必要であり，大電流容量化が開発研究の主要な課題となった。次にこれまで共同研究で開発研究を行ってきた3種類の電流導入部について紹介する。

#### (1) LHD 用 1.8 K-4.4 K 高温超伝導電流導入部

LHD 建設当初から，ヘリカルコイルの冷却温度を 4.4 K から 1.8 K に減少し，プラズマ中心磁場を現在の 3 T から 4 T に増強する計画がある。その増強計

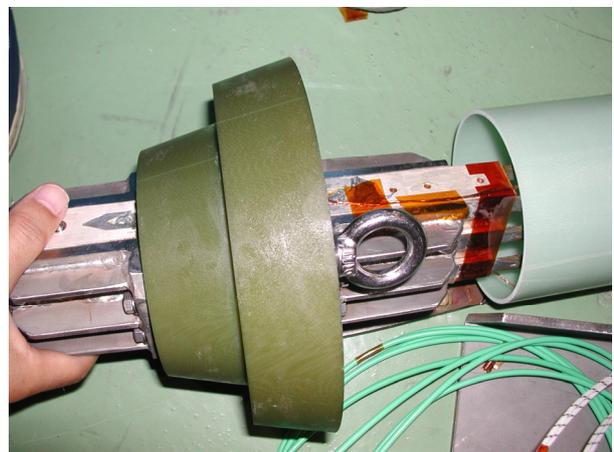


図 2-4 1.8 K-4.4 K 高温超伝導電流導入部

画の実現を目指して、1.8 K-4.4 K 高温超伝導電流導入部の開発研究を開始した。1.8 K の超流動ヘリウム冷却を行う場合、温度隔壁としてλプレートと呼ばれる熱絶縁材料により超流動ヘリウム-常流動ヘリウム間が仕切られる。ところがヘリカルコイル用導体には安定化材として高熱伝導率の高純度アルミニウムが用いられているため、この導体を用いてλプレートを貫通させた場合、一本あたり数10Wの大きな熱流入が超流動ヘリウム槽に生じる。従って冷凍負荷低減のためには1.8 K-4.4 K 高温超伝導電流導入部が不可欠となる。

電流導入部用材料には修正 QMG 法で作成された YBCO バルク導体を選定した。図 2-4 に開発した導入部の写真を示す。この導入部は幅 20 mm、長さ 140 mm、厚さ 10 mm のバルク導体を並列に3本並べた構造であり、必要な接続面積を確保し、機械的強度も確保することができた。通電試験は核融合科学研究所が保有する大型超流動ヘリウム実験設備を使用して行われた。試験の結果、20 kA の通電電流を20分間の安定に保持することに成功した。また通電中の接続部の抵抗は 1.45 nΩ であることが確認された。

### (2) 20 kA 高温超伝導電流リードの国際共同実験

高温超伝導体を電流リードに応用する開発研究では、LHD国際共同実験(LIME)の一環として、ドイツのカールスルーエ研究所(FZK)で開発された 20kA 級高温超伝導電流リード(図 2-5)の冷却通電実験を核融合科学研究所・低温実験棟において実施した。この電流リードには、Bi-2223 と呼ばれる高温超伝導材料を銀金合金のテープ状基材に埋め込んで作った超伝導線材を円筒表面に多数本スタックしたモジュール用いており、この高温端部には銅を材料とした熱交換部を接続し、低温端は NbTi の短絡部に接続されている。この電流リードサンプルを低温実験棟の大型超伝導試験設備に設置し、各種試験を行った。

20 kA の定格通電では、高温超伝導部の上端温度を 60 K で問題なく定格通電が可能であることが示され、極低温側への熱負荷として 7 W 程度が測定値から得られた。また、この電流リードサンプルでの限界通電性能を確かめるために、高温超伝導部の上端温度を 60 K、通電速度を 1 kA/s として高速通電実験を行ったところ、定格の 2 倍に相当する 40 kA までの通電に成功した。これは実験当時、高温超伝導電流リードとして、世界最大の電流値であった。以上の共同実験により、高温超伝導線材の採用により、液体ヘリウム温度への熱侵入量を従来の銅を用いた常伝導電流リードと比べて、約 1/4 にまで低減できることが確認された。また、定格電流を大幅に超える領域まで安定に通電を行うことができ、高い安定性と信頼性が実証された。

### (3) 拡散法 Bi2212 電流リードの開発研究

東海大学の山田らは拡散反応を応用した酸化物高温超伝導体(以降拡散法 Bi2212)を開発している。これは Bi を除いた  $Sr_2-Ca-Cu_2$  酸化物の基材を焼成し、その表面に超伝導層を生成するものある。この拡散法 Bi2212 の液体ヘリウム中での通電試験は核融合研と東海大学との共同研究として行われ、これまで外径 16 mm、長さ 60 mm の円筒形材料に対して、超伝導層における電流密度として 35 kA/cm<sup>2</sup> を達成したのを始め、外径 30 mm、内径 20 mm、長さ 200 mm の大型サンプルまでの各種形状での電気・機械・熱的な特性を評価してきた。

この超伝導体は任意の形状、大きさに焼成できるため、必要とする通電電流や、温度分布等の設計条件に応じて自由な形状を製作することが可能である。その特徴を生かして、コーン形状の電流リードを開発し、さらなる熱侵入量の低減を図った。コーン形状のサンプルによる実証試験のために、高温端の外径 30 mm、低温端の外径 20 mm、長さ 200 mm のサンプルの製作に成功し、高温端温度 50 K における 2 kA の通電試験等に成功した。また、コーン



図 2-5 20kA 高温超伝導電流リード全体写真

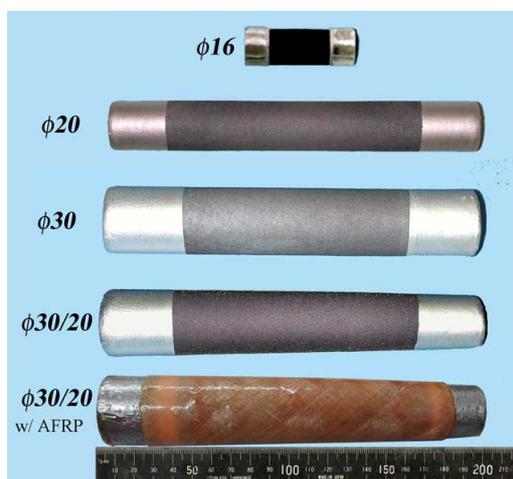


図 2-6 拡散法 Bi2212電流リードサンプル

形状に対するアルミナ繊維のフィラメントワインディングによる繊維強化を行い、機械的にも強固で、電流リードに適したサンプルの作成に成功した。図 2-6 にこれまで作成及び実証のための各種評価試験を行ったサンプルの一覧を示す。

### 2.2.3. Mini-RT 装置用高温超伝導磁気浮上コイルの研究開発

高温超伝導体をコイル用導体に応用する共同研究も行ってきた。その代表的かつ先進的な成果が、高ベータのプラズマ閉じ込めが期待できる内部導体装置への高温超伝導コイルの応用である。閉じ込めに必要とされるダイポール型の磁場配位は、プラズマ中に浮遊させたトーラス状の「内部導体」によって発生する。ただし、内部導体を用いて実際に高温プラズマの生成を行うためには、プラズマと干渉することのないように、給電ケーブルを必要としない磁気浮上超伝導リングが不可欠であり、これが技術的な課題となっていた。そこで東京大学高温プラズマ研究センターと共同で小型装置“Mini-RT”（図 2-7）の開発を行った。この装置は、直径 300 mm、重量約 17 kg の磁気浮上超伝導コイルを有する。Mini-RT 計画では、8時間の磁気浮上を行うことを目標とし、超伝導線材自身の持つ大きな比熱を有効に利用できる高温超伝導線材（銀シース Bi-2223 テープ線材）を採用した。運転温度範囲は 20-40 K である。これは、同線材に関する近年の飛躍的な技術的進歩に基づいて可能となった選択である。結果として、この装置は、核融合プラズマ装置に対する世界初の高温超伝導コイルの適用例のひとつとなった。



図 2-7 Mini-RT 装置の概観図

## 1.1. 低温工学研究の成果

### ダイナミックシミュレータの開発研究

これまでヘリウム液化冷凍機の動的シミュレーションは、複雑なプロセス計算を必要とするために構築不可能であるとされてきた。しかしながら、超伝導コイルシステムに必要となる大型冷凍プラントの動特性を把握することは、経済性・安全性を追求する上で必要不可欠である。そこで、本研究では産学連携共同研究により、世界初となるヘリウム液化冷凍機のダイナミックシミュレータ構築に成功した。このリアルタイムシミュレーション装置を利用することで、これまで実施不可能であった、制御プログラムの健全性確認や新しいプロセスデザインの最適化が可能となり、運転員教育にも重要な役割を果たすことができる。

### 2.3.1. 超流動ヘリウムデータベースの構築

近年、超流動ヘリウムを冷媒として利用した大型超伝導機器の建設や設計検討が行われている。このような大型機器を開発する場合には、膨大な情報（データベース）が必要となる。そこで、これまでに蓄えられた有用な情報の整理を行い、一般の研究者が利用可能な標記題目のデータベース構築を目的として、2000年度より3カ年間は科学研究費補助金の補助により、そして2003年度からは核融合科学研究所共同研究によりデータベースの構築を継続している。共同研究グループは物質・材料研究機構、高エネルギー加速器研究機構、京都大学、核融合科学研究所の複数の研究機関から構成されている。研究機関ごとに担当する項目を決め、主要な文献を検索した結果、2003年度までに1000件（2000年までの論文が対象）を超える論文を抽出した。平成16年度からは2000年度以降に出版された論文を検索し、155件の新たな論文が抽出された。データベース化された論文は項目ごとに分類され、キーワード、掲載雑誌名、カテゴリー、年代などでインターネットを経由して自由に検索が可能である。またデータベースを構築する際にこれまでに収集されていない項目が見つかった。そこで、本研究グループではデータベースの情報の充実と信頼性向上のためにそれらの項目に関する追加研究を行った。

### 2.3.2. パルス管電流リードの開発研究

パルス管冷凍機は低温部に可動機構が無いという特徴をもつため様々な分野で応用が期待されている。これまでに GM 方式の同軸型パルス管冷凍機と電流リードを組み合わせ、直接通電するハイブリッド型電流リードを実現できる可能性が日本大学の松原らにより示唆されている。この電流リードは冷却部分を被冷却体に適応させる柔軟性があり、さらに室温配管を電気絶縁することで高耐電圧電気絶縁が可能となる。

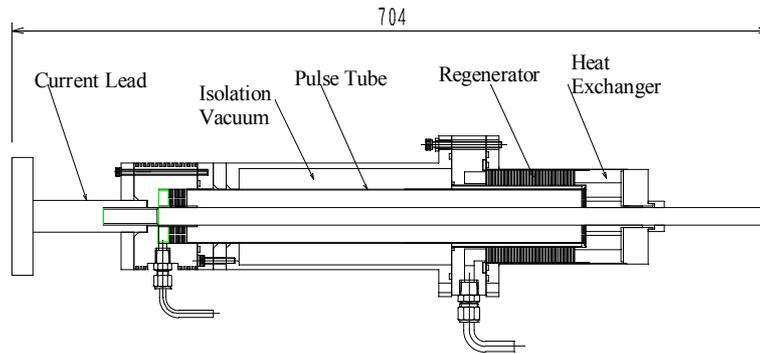


図 2-8 ハイブリッド型電流リードの設計図

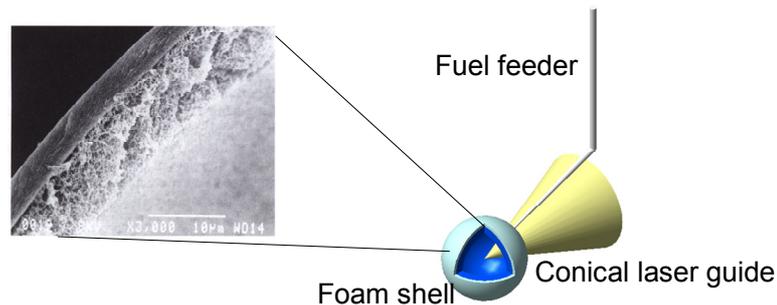


図 2-9 FIREX 計画用クライオターゲット

また従来型(ガス冷却型)と比較した場合、コンパクト化及び、容易な運転も可能となる。従って伝導冷却型超伝導コイルとの組み合わせや、大容量化による大型システムへの応用が期待されている。そこで、本研究では、GM方式の同軸型パルス管冷凍機に直接通電する方式の数kA級電流リード開発を行った。

数値解析より得られたパラメータを反映し、設計したハイブリッド型電流リードを図 2-8 に示す。日本大学で製作されたプロトタイプとの違いは、蓄冷器の長さを縮小し、パルス管と蓄冷器の間に真空断熱を設けたことである。この結果、蓄冷器での圧力損失を軽減すると共に、低温領域における、パルス管と蓄冷器内部での熱的な相互作用を排除した。今後冷凍機の冷却特性について実験研究をおこない、PV法で求めた結果と比較・検証することで、プログラムの精度向上を目指す。次に、1対のプロトタイプでの通電試験を実施し、実際の通電状態と冷却能力との比較をおこなう計画である。

### 2.3.3. FIREX 計画用クライオターゲットの開発研究

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心(以後、レーザー研)では高速点火方式と呼ばれる新方式によるレーザー核融合の研究が行われている。そして点火・燃焼実験にむけて First Ignition Realization Experiment (FIREX) 計画が進行中である。そこで核融合研とレーザー研は FIREX 用クライオターゲットの開発に向けた共同研究を開始した。真球・薄膜燃料層が要求されるクライオターゲットには、その仕様を実現するために新たにフォーム法が提案された。多孔質フォームとフォームクライオターゲットを図 2-9 に示す。フォームとは低密度多孔質プラスチックであり、あらかじめ球状に作られた薄膜フォーム(フォームシェル)に燃料となる水素を浸透・固化させることで、真球かつ均一な薄膜固体燃料層が形成されることを期待している。シェルの直径は  $500 \mu\text{m}$ 、燃料層厚は  $\sim 10 \mu\text{m}$ 、燃料導入管の先端径は  $\sim 10 \mu\text{m}$  である。共同研究ではレーザー研がフォームシェル、その他ターゲット構成部品の開発と組み立てを担当し、既にそのフォームシェルを 99.9%以上の真球度で製作する技術開発に成功している。核融合研ではフォームクライオターゲットへの燃料注入・固化技術開発を担当し、その開発のための実証試験装置を新たに製作した。

## 2.4. 炉設計研究の成果

### 2.4.1. ヘリカル炉 FFHR の設計研究

LHD の建設、運転、実験による物理及び工学成果の蓄積が着実に進展している。これらの豊富なデータベースを積極的に取り入れると共に、全国規模の共同研究として炉心プラズマ及び炉工学の広い分野と

連携することによって、ヘリカル型核融合炉の概念設計の構築を目指している。これによって、ヘリカル系装置の特長を最大限に引き出すと共に、各種プラズマ閉じ込め方式に共通な研究課題も含めて、基幹エネルギー発生総合システムの観点から各研究分野の課題と展望を明らかにし、広く核融合研究の前進に寄与することを主目的としている。

炉設計においては基本となる設計指針を定め、これに基づいたバランスの良い動力炉システム設計統合が重要である。本研究においては、上記の電磁力低減の長所に着目した設計指針(フォースフリー・ヘリカル炉:FFHR)を第1の特長としている。これにより、LHD プラズマ閉じ込めデータベースが許容する適度な電磁力低減の範囲で、強磁場化が可能になると同時に、コイル支持構造が簡略化でき、炉内構造物の保守交換に必要な空間が得られる。第2の特徴は、主として安全性の観点から、自己冷却式トリチウム増殖材として熔融塩フリーベ LiF-BeF<sub>2</sub> を選定していることである。即ち、トリチウム溶解度が極めて低いためトリチウム回収が容易でありブランケット全体でのトリチウムインベントリーが低い、漏出事象でも空気・水との反応性が低い、高温運転でありながら蒸気圧は低く、液体金属に比べて電気伝導度が極めて低いため MHD 圧損も低い、等、固有安全の観点からも極めて有望である。当然上記の強磁場化にも矛盾しない。このブランケットをプラズマとコイルの間の制約された空間に入れるには、ヘリカル・ピッチ・パラメータを小さくすることによって最外殻閉じ込め磁気面を小さくする。このことは最初の電磁力低減法と両立する。従って、全体として矛盾がない設計概念を形成している。

FFHR 炉設計研究は、設計概念を明確にする第1フェーズを 1993 年より開始し、上記の設計指針を基本とした FFHR1 の設計、これに続けて LHD 型の小型炉を目指した FFHR2 の設計を実施することによって、LHD 建設・実験と並行して一貫した概念設計活動を段階的に推進してきている。また、熔融塩ブランケットに関しては、当該研究が炉工学研究を啓発した経緯は高く評価されており、構造材料、化学制御、伝熱流動、等の要素研究への課題提示と設計評価において、国内外に対して先導的役割を果たしている。2003 年からは、上記の最適化に関する設計研究に重心を移した第2フェーズを開始しており、適正なブランケット空間を確保するとともに、炉内構造物の超寿命化と保守交換性を重視して、FFHR2 を改良した FFHR2m1 および FFHR2m2 に関する設計を進めている。併せて、大型ヘリカルコイルおよび冷却システムの概念設計、炉心プラズマ加熱機器の概念設計、電源・電力システムに関する課題整理、プラント総合効率の改良、等の炉システム設計研究の基盤拡大・強化を進めている。図 2-10 にはこれまで設計した炉の大半径とプラズマ中心磁場を示した。また図 2-11 には FFHR2m1 の鳥瞰図を示した。

#### 2.4.2. 核融合用超伝導マグネットのデータベース

大型磁場閉じ込め型核融合装置にとって超伝導マグネットは必要不可欠な構成要素であり、これまで各研究機関において独自に開発が進められてきた。例えば、核融合研においては LHD、日本原子力研究所においては ITER モデル・コイル等の大型超伝導コイル、九州大学応用力学研究所では TRIAM-1M の開発が行われ、それぞれに技術・運転経験を蓄積している。これらのデータを統合することは、核融合装置用の超伝導コイル設計、建設、運転に有用であると考えられることから、3研究所で「核融合用超伝導マグネットデータベース」を構築した。本データベースではこれらを(1)導体、(2)導体接続、(3)コイル、(4)構造材

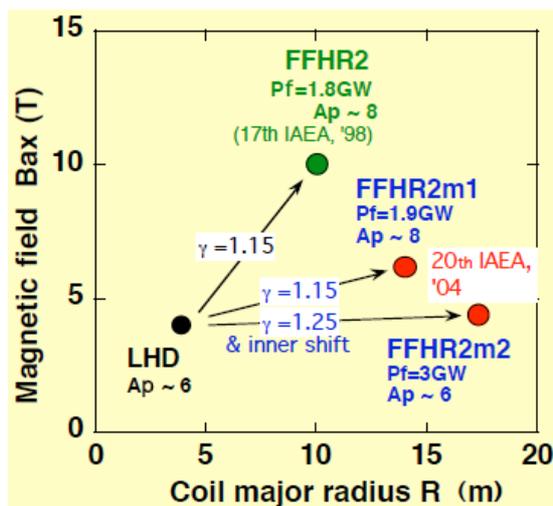


図 2-10 LHD, FFHR1, FFHR2, FFHR2m1 および FFHR2m2 の大半径とプラズマ中心磁場の比較

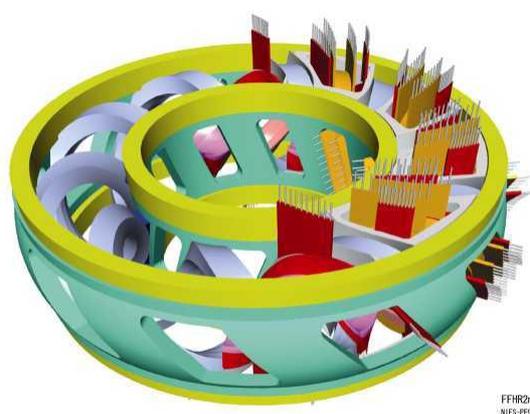


図 2-11 FFHR2m1 の鳥瞰図

料, (5)電気絶縁, (6)低温システム, (7)電源システム, (8)計測, (9)長期運転, (10)プラズマーマグネット間電磁現象制御 に分類, 整理した。構築したデータベースは, WWWにより参照できるようにした。本データベースは核融合のみならず超伝導コイルを使用する他の分野でも役立つものと期待される。

## 2.5. まとめ

超伝導・低温グループはこれまで超伝導および低温工学に関する共同研究を推進してきた。その成果を次に纏める。

- (1) 基礎研究の成果として, 超伝導工学・低温工学における新しい知見を得た。  
(具体例)  
ケーブル・イン・コンジット導体の熱的・電磁気的特性, 電流制御型撚線導体の電磁気的特性, 酸化物超伝導体の電磁気的・機械的特性, 超流動ヘリウム熱輸送・熱伝達特性, 複合構造体の熱伝導特性, 熱音響冷凍機の基礎特性, ヘリウム中における電気絶縁特性
- (2) 基礎研究の成果は応用研究に生かされ, 核融合炉そして他分野にも応用できる要素技術を開発した。  
(具体例)  
瞬低対策 SMES, 大電流量酸化物超伝導電流導入部および電流リード, 冷凍プラントシミュレータ, レーザー核融合用クライオターゲット, パルス管冷凍機冷却電流リード, 電磁力平衡コイル
- (3) ヘリカル炉設計研究において炉構造の最適化を行った。さらに超伝導マグネットの設計研究を開始した。また炉設計研究に必要な超伝導マグネットデータベースを構築した。

共同研究については, 基礎研究と応用研究がバランスよくリンクし進められてきたことを最後に強調したい。そして核融合技術はもとより他分野で広く活用できる研究成果が得られた。今後も超伝導工学・低温工学の進展に貢献できる共同研究体制を推進していきたい。

### 3. 将来計画と今後の方針

#### 3.1. はじめに

核融合炉を実現させるためには、炉の経済性、小型化の観点から超伝導の応用は必須条件とされている。超伝導核融合装置の開発が始まってから35年、核融合炉の設計が可能なレベルまで超伝導・低温技術は進歩してきた。しかし、商業炉としての経済性、小型軽量化、信頼性までを考えると残された課題は決して少なくない。核融合炉の早期実現のためには、現在稼働中で世界最大の超伝導装置であるLHDでの研究成果を最大限に活用し、超伝導・低温技術の開発研究を推進する必要がある。

超伝導・低温グループの研究方針として、核融合炉の早期実現を目指し、以下に示した2つのテーマを研究の柱とする。

- 1) LHD超伝導・低温システムの高性能化研究
- 2) ヘリカル炉システム設計研究と要素技術開発研究

更に、上記研究テーマの目標を達成するため、以下の基礎研究、応用研究を推進する。

- 3) 核融合用超伝導システム構築のための基礎研究
- 4) 核融合開発技術の他分野及び民間等への応用研究

#### 3.2. LHD超伝導・低温システムの高性能化研究

LHD高性能化研究の目的は、LHDの性能を最大限に発揮させ、高性能なプラズマ閉じ込め実験を可能にすることである。そのための方策として、以下に示した高性能化のための改造・改良を計画している。超伝導コイルの高性能化研究では、運転範囲の拡大、冷却安定性の向上（ヘリカルコイルの過冷却改造）、コイル電流可変モード実験への対応、大型超伝導コイルの特性の解明、異常診断技術の確立を推進する。低温システムの高性能化研究では、長期連続運転に対する信頼性の向上、過冷却改造対応、電流可変モードによる熱負荷増加への対応、ダイナミックシミュレータの構築と発展、運転制御方式の最適化・高効率化を推進する。更に、超伝導コイル高磁場化のための要素技術研究や、コイル電源システムの高性能化研究を推進する。

ヘリカルコイルの過冷却改造を実施することにより、コイルの運転温度を現状の 4.3 K から 3.5 K に下げ、過渡的な常伝導転移の発生を抑制し、安定な高磁場運転が可能になる。コイル電流可変モードへの対応は、磁気軸変位、電流駆動、 $\gamma/Bq/B0$  等の磁場配意を、プラズマ実験中にダイナミックに変化させ、高性能なプラズマ閉じ込めを可能にする。従来の 33 V ~ 45 V から 100 V ~ 200 V へ、電圧を増強したコイル電源及び電源制御系の改造を行う。電流掃引速度はこれまでの約 8 倍となるため、交流損失によりポロイダルコイルの温度が上昇する。このため、詳細な損失特性の把握により温度上昇の正確な評価とコイルの安定な運転を可能にする対策を実施する。

LHD は、プラズマ実験装置として重要であるだけでなく、実際に稼働している大型超伝導・低温システムの長期信頼性を実証できる貴重な装置である。その実績は、長期運転が必要な大型実験装置や将来の核融合炉用パワープラント設計へ大きなインパクトを与えるものと考えられる。従って、長期信頼性を検証するため、運転実績、各種特性の変化等を継続的に測定し、データベース化する。

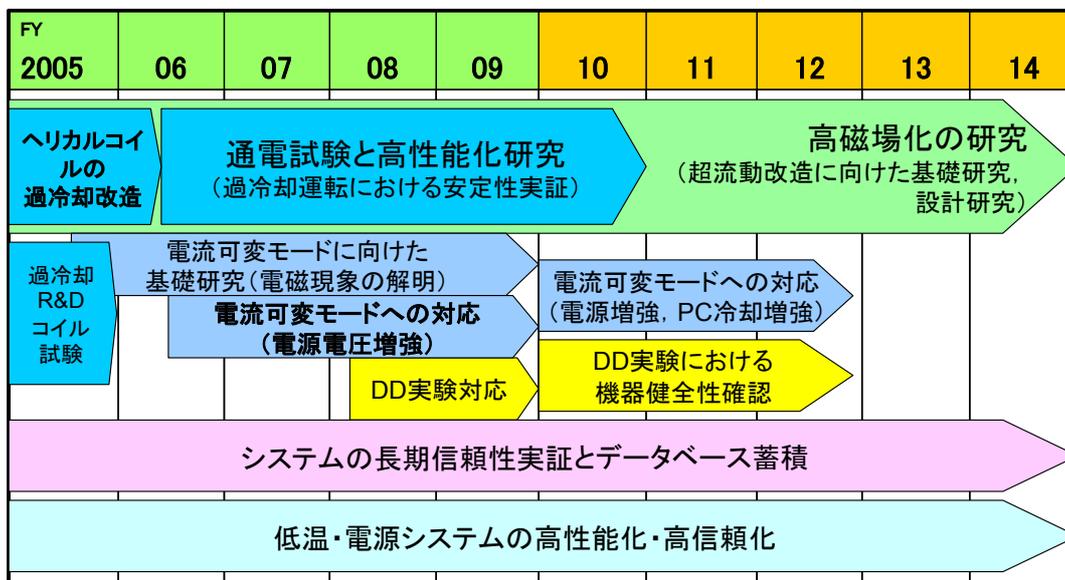


図 3-1 LHD 超伝導・低温システム高性能化研究の年次計画

図 3-1 に LHD 超伝導・低温システム高性能化研究の年次計画を示す。ヘリカルコイルの過冷却改造を 2005 年～2006 年に予定している。その後、電流可変モードへの対応を、1 T 以下の低磁場実験のみと 3 T の高磁場実験を含む場合の 2 期に分けて計画している。

### 3.3. ヘリカル炉システム設計研究と要素技術開発研究

ヘリカル炉設計研究の目標を以下に示す。

- 1) LHD の成果を取り入れて、ヘリカル型核融合炉の概念設計を構築する。
- 2) ヘリカル系の長所を最大限に引き出すと共に、核融合炉実現のための研究課題を明らかにする。
- 3) 共同研究に基づく広範な分野と連携して、炉システム統合研究の基盤を構築する。

ヘリカル炉設計及び要素技術開発研究の進め方を以下に示す。研究の基盤となるのは、超伝導・低温システムに関する基礎研究及び LHD 高性能化研究の成果である。そこから提案される新しい概念について、要素技術開発研究及び他分野／民間等との連携研究を実施してその有効性を確かめる。それらの研究成果に基づき、ヘリカル炉設計研究からの得られる超伝導低温システムへの要請を取り入れ、新しい超伝導マグネットシステム及びプラントの設計・開発研究を実施する。

核融合炉用超伝導マグネットに求められる技術的課題として、高磁場化・高電流密度化の要請がある。高磁場化により、炉の小型化が可能であり経済性に優れた炉が実現できる。また、高電流密度化により、コイルのスリム化が可能であり、ブランケットや放射線シールドのための空間をより多く確保することができ、信頼性やメンテナンス性に優れた炉が実現できる。現状の NbTi、Nb<sub>3</sub>Sn 等の線材では、一定値以上の臨界電流密度を確保するためには、最大経験磁場は 13 T 程度以下に限られる。先進的な超伝導線材の開発により、最大経験磁場を 16 T 以上にすることを目標としている。例えば東海大との共同研究で開発を進めている(NbTa)<sub>3</sub>Sn や低放射化材料である MgB<sub>2</sub>、高臨界磁場特性を持つ高温超伝導体等、共同研究を基盤として、高磁場特性に優れた先進超伝導線材の開発を推進する。

先進的な超伝導材料を如何に核融合用の大型超伝導コイル及び冷却システムの設計に結びつけていくかが超伝導・低温グループの主要な研究テーマとなる。現段階では、複数の先進超伝導材料候補を用い、導体構造設計、冷却温度、冷却方式、巻線構造、絶縁方式を検討し、更に、電磁力支持方法、コイル製作方法を考慮した複数の設計を行う。その際、ヘリカル炉は、プラズマディスラプション等のない定常炉である特徴を生かして、先進的なコイル構造を採用することが可能である。

図 3-2 に、ヘリカル炉用の超伝導導体及びコイル巻線構造の例を示す。左側は、撚り線内の撚り乱れや素線間の接触抵抗のバラツキ等による素線間の電流分布不均一が起き難い成型撚線を基本として転位導体を構成し、アルミニウム合金等の金属中に埋め込んだ電流分布制御型超伝導導体を用いて巻線し、巻線部分と冷却パネルを独立した構造とした間接冷却型のコイル構造例を示す。電流のパスと冷却パスを独立に最適化できるため、高効率でコンパクトなコイル構造が実現できる。中央部分は、CICC(ケーブルインコンジット導体)の撚線構造を改良し、撚り乱れ等による長時定数の結合損失の発生や、素線間に加わる圧縮応力による臨界電流の劣化などの問題を解決した CICC 改良型のコイル構造を示す。右側は、高温

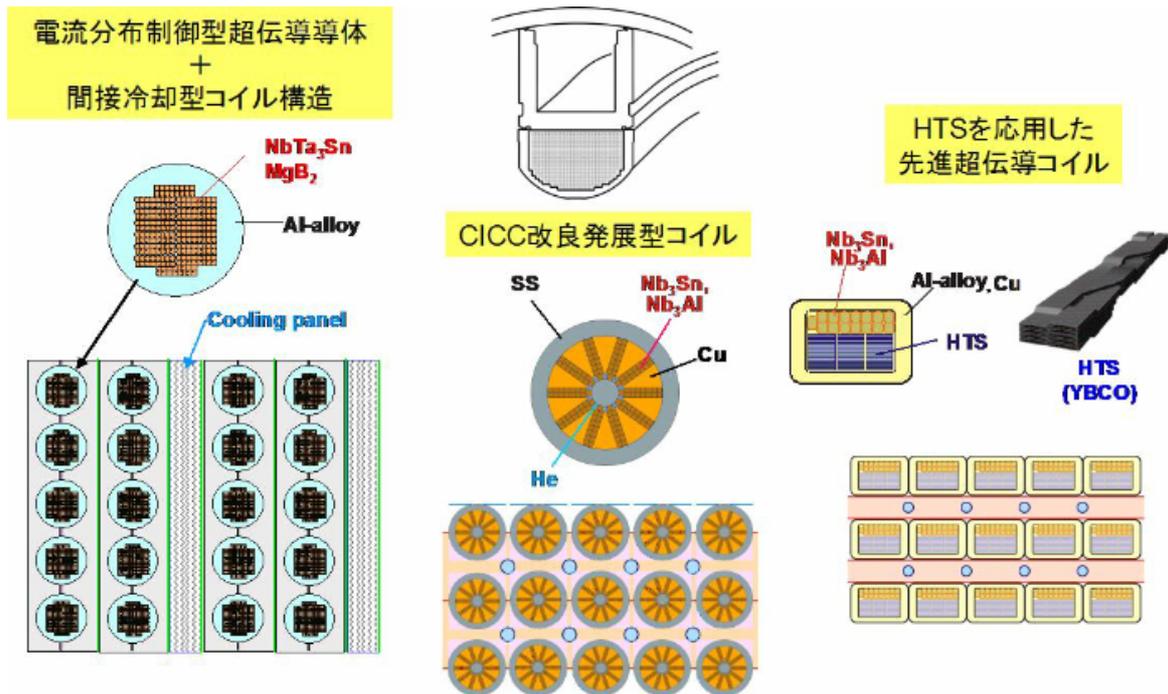


図 3-2 ヘリカル炉用超伝導導体およびコイル巻線構造案

超伝導体を用いたコイル構造例を示す。

核融合炉用超伝導マグネットに関する技術的課題として、軽量化による炉のコストダウンがあげられる。現在のマグネットシステムでは、冷却重量のほとんどが電磁力支持構造物で占められており、その割合は80%近くに達する。Virial 定理による計算結果から、理想的な構造設計をすれば更なる軽量化が可能であることを示唆しており、磁場の蓄積エネルギー100 GJ級のヘリカル炉では、冷却重量として10,000トン以下が設計の目標となる。ヘリカル炉のコイル支持構造として、冷却重量の低減とブランケット等のメンテナンス空間の確保、コイル位置精度等の要求を同時に満たした炉設計研究を推進する。

炉設計研究と連携した要素技術開発の進め方について以下に示す。ヘリカル炉設計と有機的に連携した新しい概念による高磁場・高信頼性・低コストマグネットの設計研究に基づき、超伝導マグネットの要素技術開発研究を実施する。共同研究等による先進超伝導導体の開発研究の成果を受け、大電流量導体の複合化を行い、導体の試作及び短尺導体試験による特性の確認・実証を行う。次に、新コイル構造の原理実証試験の成果に基づき、巻線の試作を行う。最後に、開発された超伝導導体を用いて、モデルコイルを制作し、その性能を実証する。モデルコイルによる実証試験では、新しく開発した導体/コイル構造を採用した実証試験用コイルを製作し、冷却・励磁実験を行って性能を実証する。また、更に先進的な導体(例えば高温超伝導体)やコイル構造を模擬した要素試験用コイルを製作し、実証試験用コイルのバックアップ磁場中で試験し、複数の超伝導材料、コイル方式の開発を可能にする。その際、電源、クライオスタットは低温実験棟に既存の設備を改造して使用し、開発コストの低減を図る。低温システムの開発研究では、LHDの成果をダイナミックシミュレータ等に取り入れ、低温技術に関する基礎研究、応用研究を統合して、プロセスの最適化、高効率化を図る。更に、核融合プラントとしての性能向上について、要素技術検討及び研究を推進する。超伝導ヘリウム冷却技術は、超伝導材料の性能を最大限まで引き出す冷却方式であることから、核融合実験装置及び核融合炉の超伝導システムの冷却方式の選択肢として重要な技術であると認識し、研究を継続する。

ヘリカル炉を目指した超伝導システム開発の年次計画を図 3-3 に示す。ヘリカル炉設計研究に基づき、高磁場・高性能超伝導マグネットの開発研究を推進する。開発の基本となるのは改良型 Nb<sub>3</sub>Sn や Nb<sub>3</sub>Al 等の金属系超伝導材料を用い、縮小導体開発、実規模導体開発、短尺試験を行う。平行して、先進コイル構造の開発研究、モデルコイル設計、モデルコイルによる実証試験を計画している。同時に、将来の発展を期待して高温超伝導体(HTS)や MgB<sub>2</sub> 等の先進材料を用いた導体/コイルの開発研究を推進する。これらの開発研究には、実規模短尺導体の高磁場環境下での試験に必要な高磁場導体試験装置や、モデルコイルの製作など、予算措置が必要な項目も含まれるが、低温実験棟の既設設備を改造して最大限に活用することで予算の低減を図る。また、試験装置の開発そのものが重要な研究テーマとなることから、国内及

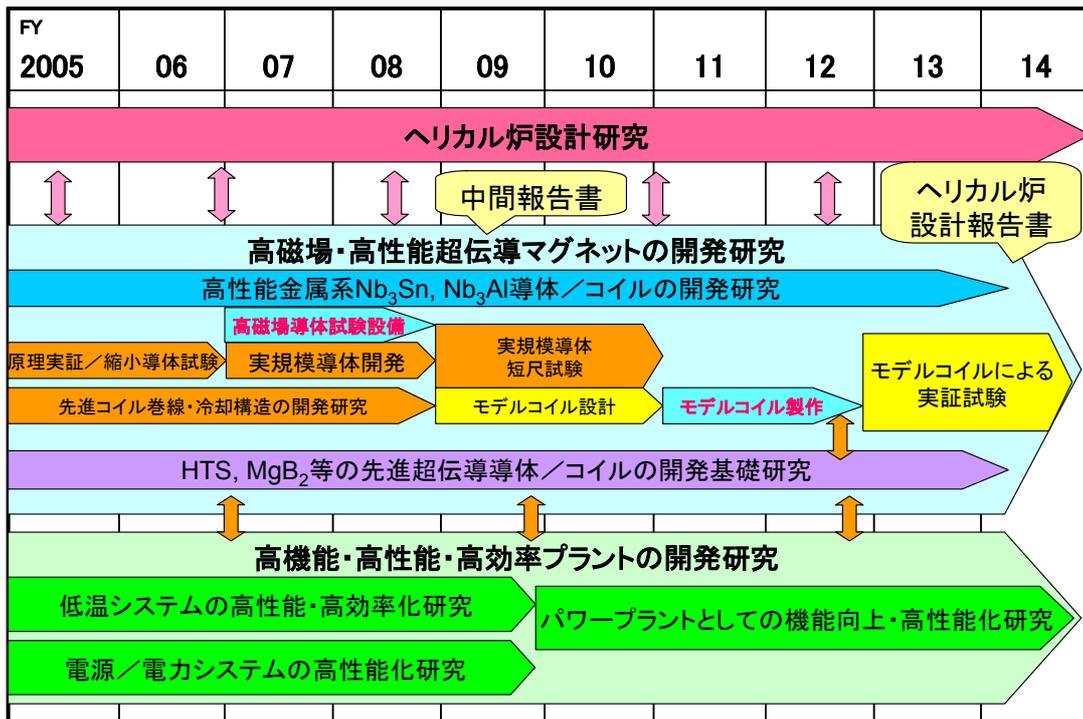


図 3-3 ヘリカル炉設計研究・要素技術開発研究の年次計画年表など

び国際的な共同研究を進めて効率的な開発研究を行う。

### 3.4. 基礎研究、応用研究、大学院教育の方針

先進的な核融合用超伝導システムの設計・開発のためには、開発の最終目標を念頭に置いた基礎研究の積み上げが必要不可欠である。核融合用超伝導システム構築のための基礎研究を充実し、新しいアイデアのマグネット設計への応用を積極的に推進する。

核融合研究の他分野及び民間等への応用研究の方針として、核融合で開発された技術は積極的に公表し、他研究機関、民間等との共同研究を活用して応用研究を推進する。応用研究で得られた成果は、核融合研究にフィードバックされると考えられる。

核融合科学研究所は、総合研究大学院大学に所属しており、物理科学研究科の核融合科学専攻を担当している。これまでの博士後期課程の学生の教育に加え、2006 年度からは学部卒業生を受け入れる5年一貫制課程を導入することになっており、大学院教育、若手研究者の育成を充実する。

### 3.5. まとめ

核融合科学研究所の超伝導・低温グループは共同研究を核とし、核融合用大型超伝導・低温システム研究のCOEを目指して今後の研究活動を以下のように推進する。

- LHD 超伝導・低温システムの高性能化研究により、核融合プラズマ研究に貢献するとともに、核融合炉工学に役立つ知見を集積する。
- LHD の成果を生かしたヘリカル炉設計研究と連携し、先進的な超伝導マグネット・システム、低温システム、プラント・システムの設計研究を行う。
- 同時に、そこから抽出された要素技術課題についての開発研究を推進する。
- 基礎研究基盤を充実し、学術基盤の充実を図ると共に、新しいアイデアを積極的に炉設計に取り入れる。
- 他分野および民間等との共同研究を推進し、核融合開発技術の他分野への応用を促進すると共に
- 最新技術を双方向的に核融合研究に取り入れる。
- 国際共同研究を推進し、超伝導核融合装置の開発、建設、実験に積極的に協力する。
- 大学院教育を充実すると共に、若手研究者の育成に努める。

## 4. その他

### 4.1. スタッフ

超伝導・低温グループは大型ヘリカル研究部・装置技術研究系を母体として、LHD の大型超伝導・低温システムの研究開発、設計、建設、運転の立ち上げに中心的な役割を果たすと共に、LHD の実験成功に多大な貢献をしてきました。2004 年度の自然科学研究機構の発足と研究所内の組織改編(図 4-1 参照)により、装置技術研究系を炉システム・応用技術研究系へ改組し、LHD の性能を最大限に発揮するための超伝導・低温システムの安全で安定な運転、性能を維持するためのシステム保全、高性能化のための装置改良などに関する研究を一貫して行うと共に、LHD の建設・実験成果と運転実績に立脚した先進核融合炉の設計研究及び要素技術の開発研究を実施しています。超伝導・低温グループは、超伝導及び低温に関する基礎研究から周辺機器を含むシステム開発までの幅広い応用研究を大学及び国内外の他の研究機関との共同研究を軸として実施すると共に、他分野との連携や産業応用を積極的に展開しています。炉システム・応用技術研究系の超伝導低温グループの体制を図 4-2 に示します。

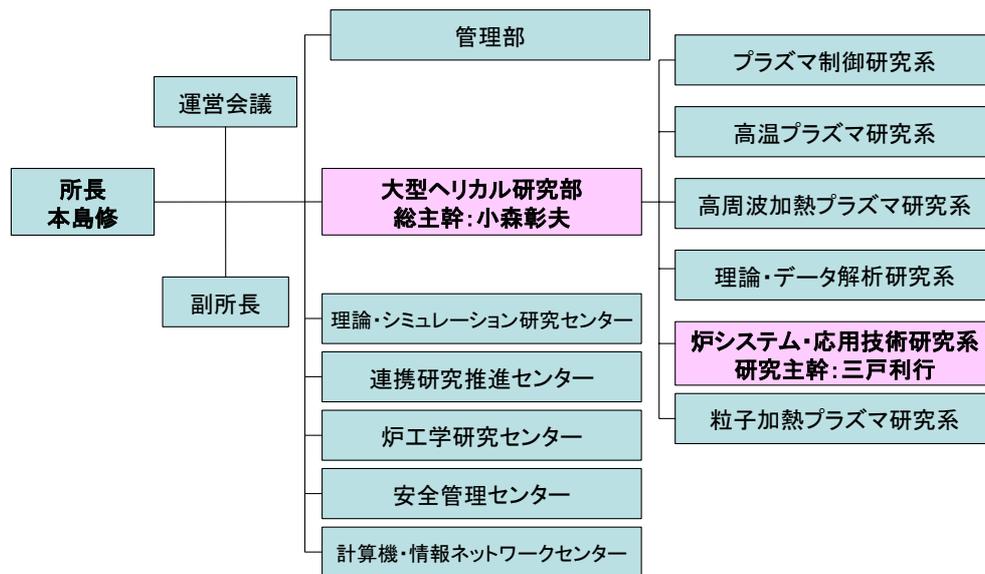


図 4-1 核融合科学研究所組織図



教授: 3名、助教授: 5名、助手: 3名 合計: 11名

客員教授: 松原洋一 客員助教授: 早川直樹(名大)

図 4-2 超伝導・低温グループのメンバー構成(平成17年度)

超伝導・低温グループは、超伝導及び低温に関する基礎研究から周辺機器を含むシステム開発までの幅広い応用研究を大学及び国内外の他の研究機関との共同研究を軸として実施すると共に、他分野との連携や産業応用を積極的に展開しています。炉システム・応用技術研究系の超伝導低温グループの体制を図 1.2 に、各メンバーの紹介を以下に示します。

### 低温工学研究部門

- 教授:三戸利行  
専門分野: 超伝導工学、低温工学  
研究内容: 炉システム・応用技術研究系研究主幹  
LHD 運転グループ責任者、LHD 低温システム主担当  
高温超伝導の核融合装置への応用研究、先進超伝導導体の開発研究、大型超伝導・低温システムの実用化研究、慣性核融合連携研究、産学連携研究(瞬停対策 SMES 研究、伝導冷却型超伝導パルスコイルの開発研究)
- 助教授:山田修一  
専門分野: 低温工学、核融合工学  
研究内容: LHD 超伝導バスライン主担当  
大容量超伝導送電システムの開発研究、瞬停対策及び系統電力安定化に関する研究、大型低温システムの保全に関する研究
- 助教授:前川龍司  
専門分野: 低温工学  
研究内容: LHD 低温制御システム主担当、LHD 低温システム担当  
LHD低温システムの保全及び改良に関する研究  
LHD低温制御システム及びリアルタイムシミュレーター構築に関する研究  
超流動ヘリウムの流体特性及び熱輸送特性の研究  
パルスチューブ電流リードの開発研究
- 助手:濱口真司  
専門分野: 低温工学  
研究内容: LHD ヘリカルコイル過冷却改造担当  
過冷却による安定性改善研究、超流動ヘリウムの熱輸送に関する研究  
低温実験棟・超伝導低温実験設備の保全

### 超伝導工学研究部門

- 教授:今川信作  
専門分野: 超伝導工学、低温工学、核融合工学  
研究内容: LHD 運転グループ責任者、LHD ヘリカルコイル主担当  
LHD 超伝導システムの性能向上のための研究、  
先進核融合炉設計研究及び核融合用大型超伝導システムの開発研究
- 助教授:高畑一也  
専門分野: 超伝導工学、核融合工学  
研究内容: LHD 装置実験リーダー、LHD ポロイダルコイル主担当  
核融合炉用超伝導マグネットの安定性・安全性研究  
低温実験棟・超伝導低温実験設備の管理
- 助手:田村仁  
専門分野: 超伝導材料工学  
研究内容: LHD ベルジャー(クライオスタット)主担当  
超伝導材料、導体及び利用機器の力学的挙動の研究、  
高温超伝導電流リードの開発研究
- 助手:(公募中)  
専門分野: 超伝導工学、核融合工学  
研究内容: LHD超伝導システムの安全な運用、性能向上のための改造等に関する開発研究、先進的な核融合炉の設計研究及び要素技術の開発研究

### 応用技術研究部門

- (教授:佐藤元泰)  
専門分野: 核融合学  
研究内容: マイクロ波によるプラズマおよび誘電体の加熱に関する研究、産学連携研究(マイクロ波によるセラミック焼結及び金属焼結)

- 助教授:柳長門  
専門分野: 超伝導工学  
研究内容: LHD ヘリカルコイル担当  
大型超伝導コイル及び導体の冷却安定性に関する実験研究と数値解析、核融合装置用先進超伝導コイルシステムの最適化に関する研究、相互交流型共同研究(超伝導磁気浮上コイルを用いた高 $\beta$ 先進プラズマ閉じ込め装置の開発研究)
- 助手:岩本晃史  
専門分野: 低温工学  
研究内容: LHD ポロイダルコイル担当  
超流動ヘリウム熱伝達、極低温における界面熱抵抗の研究、慣性核融合連携研究(慣性核融合用クライオターゲットの開発研究)

#### 炉システム研究部門

- 教授:相良明男  
専門分野: 核融合工学、プラズマ理工学  
研究内容: LHD プラズマ壁コンディショニング担当  
核融合炉設計、装置システム工学の総合化研究
- 助教授:力石浩孝  
専門分野: 電力変換工学  
研究内容: LHD 装置実験サブリーダー、LHD コイル電源主担当  
超伝導コイル電源の電流制御、クエンチ保護に関する研究、産学連携研究(瞬停対策 SMES 研究、高効率電力変換器、瞬低検出器の開発研究)

#### 4.2. 大学院教育

炉システム・応用技術研究系(旧装置技術研究系)において指導を行ってきた総合研究大学院大学核融合科学専攻学生一覧を以下に示します。

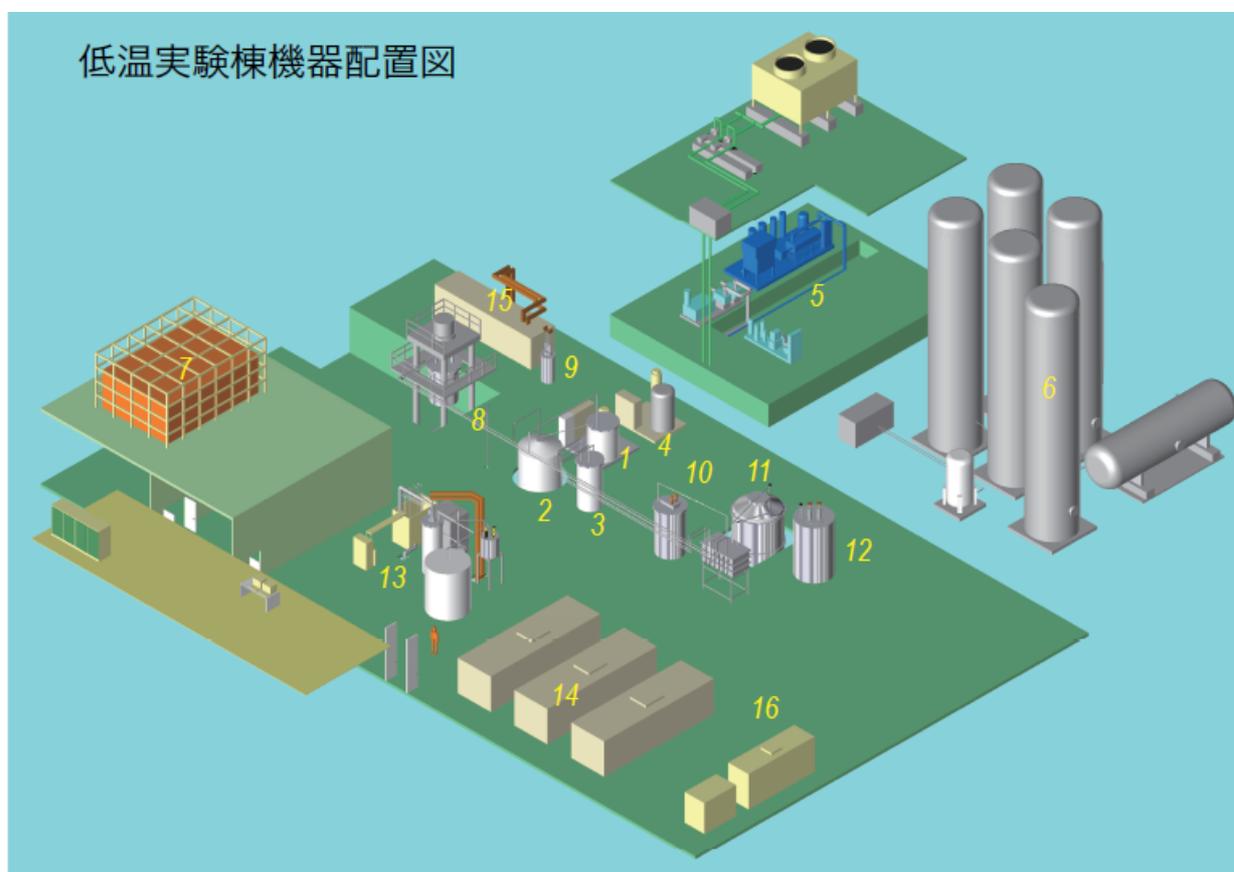
- ◆ 星野 昌幸:平成7年3月修了  
博士論文題目:「大型超伝導コイルの安定性と絶縁に関する研究」  
指導教官: 本島 修(※装置技術研究系において積極的に指導補助を行った)
- ◆ 仙波 智行:平成8年3月修了  
博士論文題目:「Thermal Behavior of Composite Superconductors and an Advanced Winding Method for Large Superconducting Helical Coils」  
指導教官: 本島 修(※装置技術研究系において積極的に指導補助を行った)
- ◆ 平野 直樹:平成10年3月修了  
博士論文題目:「大型超伝導導体の電流分布が安定ならびに交流損失に及ぼす影響に関する研究」  
指導教官: 三戸 利行
- ◆ 松永 晃治:平成11年9月修了  
博士論文題目:「BPSCCO 高温超伝導体の超伝導特性および機械的特性に及ぼす繊維添加の影響に関する研究」  
指導教官: 西村 新
- ◆ 辺見 努:平成17年9月修了  
博士論文題目:「核融合装置への応用を目指した高温超伝導線材の電磁特性に関する研究」  
指導教官: 三戸 利行
- ◆ バンサル ゴーラブ:平成17年4月入学  
研究内容: ケーブル・イン・コンジット型強制冷却超伝導導体の動的安定性に関する研究、低温高温ハイブリッド超伝導導体の開発研究、斜め配置型高磁場ダイポールマグネットの開発研究  
指導教官: 三戸 利行

また、総合研究大学院大学における指導の他に、核融合科学研究所の特別共同利用研究員として、全国の大学院の学生を毎年2～3名受け入れ、指導を行ってきています。

### 4.3. 設備

核融合科学研究所・低温実験棟は、大学共同利用機関の施設として、国内外の多くの方々に利用されています。1991年より運転を開始したヘリウム液化冷凍設備は、250 L/hの液体ヘリウムまたは50 g/sの超臨界圧ヘリウムを発生できる設備です。主要付属設備として、最大75 kAまでの各種直流電源、大型導体試験装置、強制冷却導体試験装置、超流動ヘリウム試験装置、極低温圧縮試験機などがあり、各種条件下での超伝導導体/コイル試験が可能です。図4-3と図4-4にこれらの低温実験棟の主要設備の概略を示します。また、500 L デュワー2台での小口供給も行っており、基礎実験も随時行うことができます。その他の要素試験のための設備以下に示す機器を備えて研究を進めています。

- ・HTS 導体試験装置: 小型冷凍機冷却を使用し、温度と磁場方向が可変
- ・超伝導素線試験装置: 9 T ソレノイドマグネットが付属し、ヘリウム冷媒温度と圧力が可変
- ・超流動ヘリウム試験設備: 大型および小型の試験設備があり、冷凍能力はそれぞれ 36 W @ 1.85 K、8 W @ 1.8 K で熱輸送、熱伝達特性の基礎研究に最適
- ・熱物性測定装置: 液体ヘリウム冷却型と小型冷凍機冷却型があり、熱伝導率等の低温物性を測定
- ・インストロン機械試験装置: 最大荷重20トンで液体ヘリウム中での機械試験が可能
- ・ガラスデュワー: 極低温の状態で大物観測が可能、温度素子の較正にも利用



#### ヘリウム液化冷凍設備

- 1 コールドボックス
- 2 液体ヘリウム貯槽
- 3 超臨界圧ヘリウム熱交換器
- 4 精製器
- 5 圧縮機
- 6 バッファータンク
- 7 ガスバッグ

#### 超伝導導体/コイル試験設備

- 8 極低温圧縮試験装置
- 9 中型導体/コイル試験装置
- 10 大型導体試験装置
- 11 強制冷却導体試験装置
- 12 過冷却R&Dシステム

#### 超流動ヘリウム試験設備

- 13 大型超流動ヘリウム試験設備

#### 直流電源

- 14 75 kA-21 V
- 15 30 kA-10 V
- 16 6 kA-20 V

図 4-3 低温実験棟の主要設備

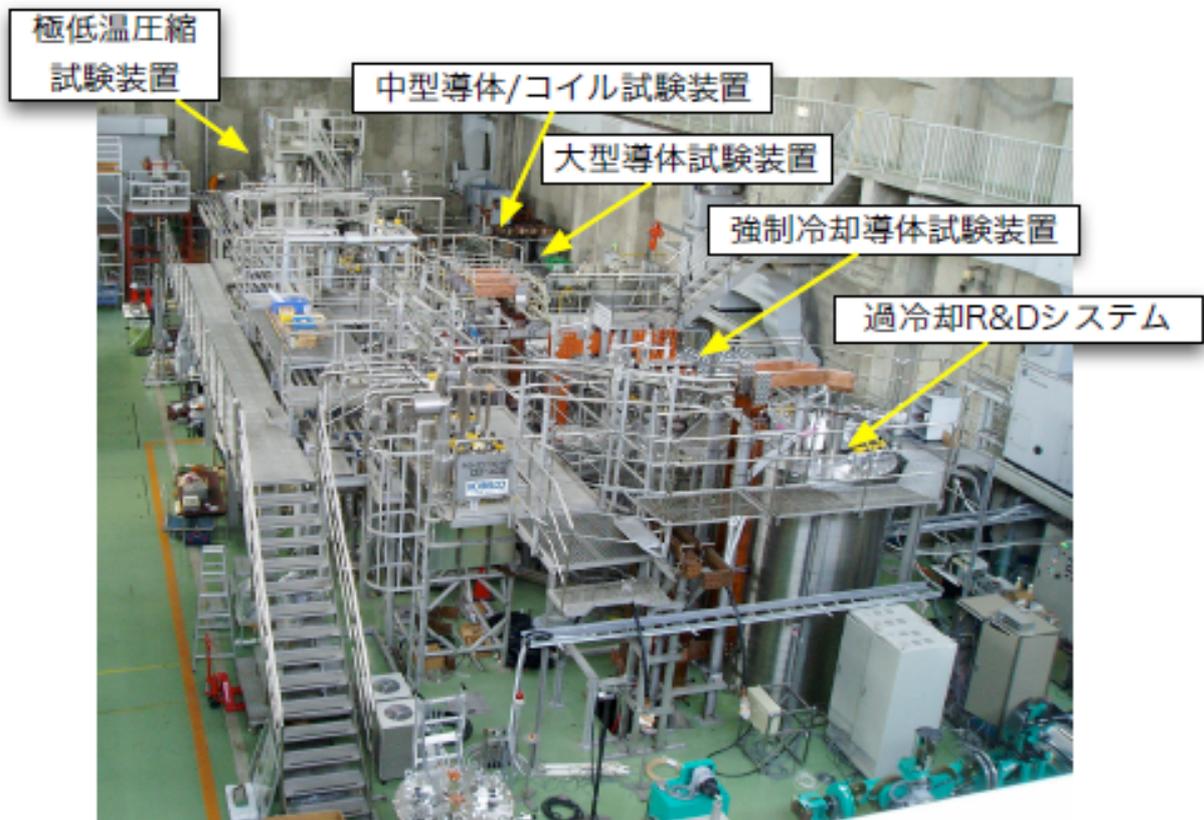


図 4-4 超伝導導体／コイル試験設備