

2.2.11 装置工学

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。研究テーマは次の通りである。

- (1) LHD 超伝導コイルの性能確認と健全性確認
- (2) LHD 超伝導コイルにおけるバランス電圧信号と音響(AE)信号を用いた機械的擾乱の診断(成蹊大学との共同研究)
- (3) LHD 電磁力支持構造物のひずみ測定
- (4) LHD 超伝導ポロイダルコイルにおける超長時定数磁場の観測(東北大学、山口大学との共同研究)
- (5) LHD 超伝導コイル電源の電流制御-プラズマ電流消滅時の制御特性向上(大阪大学との共同研究)
- (6) バランス電圧測定によるコイル位置精度評価
- (7) LHD 電磁力支持構造物の二相流ヘリウムによる冷却の最適化(日本原子力研究所(当時)との共同研究)
- (8) LHD ヘリカルコイルの過冷却(サブクール)改造

これらの研究課題についての成果の概要を以下に述べる。

(1) LHD 超伝導コイルの性能確認と健全性確認

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、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。システムの健全性は、2)で述べるバランス電圧測定、AE 測定、そして 3)で述べるひずみ測定によって検証している。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おり、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。

(2) LHD 超伝導コイルにおけるバランス電圧信号と音響(AE)信号を用いた機械的擾乱の診断

2.1) はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)の超伝導コイル群では、励磁に伴って各コイルのバランス電圧に多数のスパイク信号が観測される。これまでヘリカルコイルで観測されるスパイク信号に対して「パルス波高解析」を適用することで、巻線の機械的特性に関する定量的情報を得る手法を開発してきた。第7サイクル実験からは、ヘリカルコイル容器に AE(音響)センサーを取り付け、励磁に伴って発生する AE 信号の測定を開始した。バランス電圧の冷却サイクルに伴う推移や、AE 信号との対比を調べた結果について以下にまとめる。

2.2) バランス電圧信号の冷却サイクルに伴う推移

励磁に伴ってヘリカルコイルに観測されるバランス電圧スパイク信号の総和を励磁履歴に対して調べると、図 2.2-46 に示すように、各冷却サイクルにおいて同じ条件の2回目以降の励磁では、1回目と比べて総和が減衰することがわかる。これは巻線のトレーニング効果を表しているものと解釈できる。また、加温と再冷却の後、次のサイクルにおける最初の励磁では、ある程度までスパイク信号強度が初期化されるものの、冷却サイクルを重ねるごとに強度が減少していることも明らかとなっている。

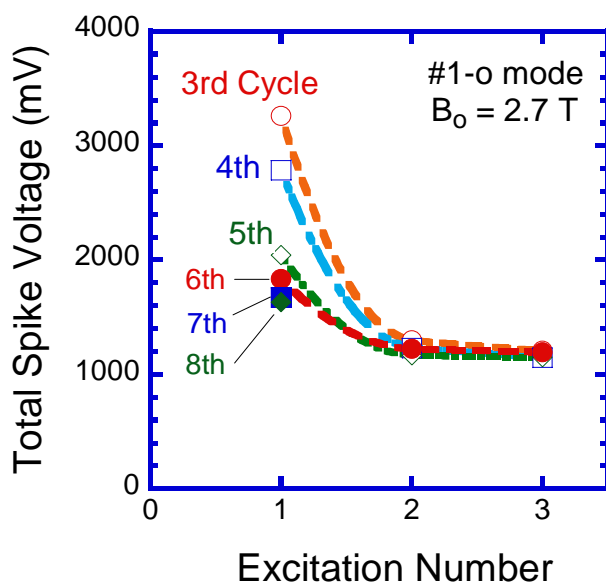


図 2.2-46 ヘリカルコイルのバランス電圧スパイク信号の総和の励磁履歴

2.3) AE 信号とバランス電圧信号の比較

LHD の超伝導コイル群において励磁に伴って発生する機械的擾乱についてさらに詳しく調べることを目的として、AE 信号の測定を開始した。ヘリカルコイル容器の4カ所に AE センサーを取り付け、エンベロープ信号をサンプリング周波数 10 kHz で取得した。測定信号の1例を図 2.2-47 に示す。図には、ヘリカルコイルのバランス電圧信号について、低周波数領域(10 Hz)と高周波数領域(1 kHz)の計測結果も合わせて示している。これについて、高周波数領域では低周波数領域には観測されないタイミングで信号が観測されているが、これ

までの観測の結果、高周波数領域にかかる信号の一部は、ポロイダルコイルが変位することによって生じる機械的な振動をピックアップしているものであることが明らかとなっている。AE 信号についてもポロイダルコイルの振動を捉えているものが多数あることがわかっている。

一方、AE 信号の積分値について励磁回数に対する依存性を調べたところ、図 2.2-48 に示すように2回目の励磁より減衰し、バランス電圧の測定結果と類似の傾向を示していることも明らかとなった。

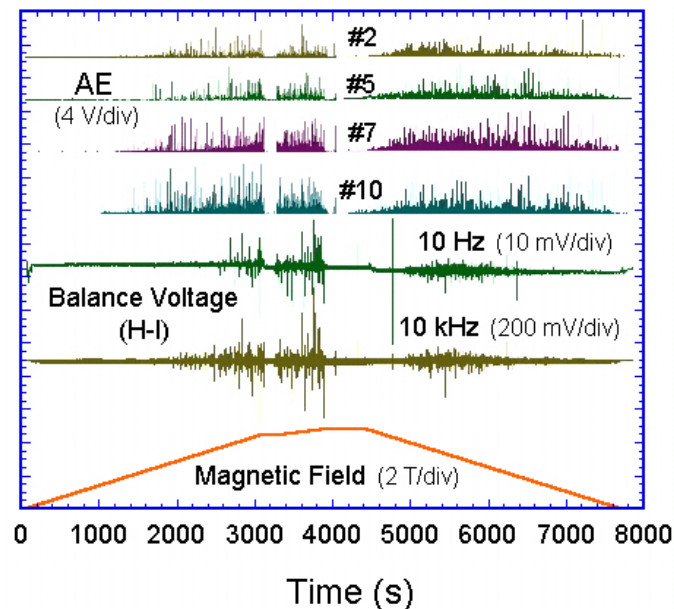


図 2.2-47 ヘリカルコイルのバランス電圧信号と AE 信号

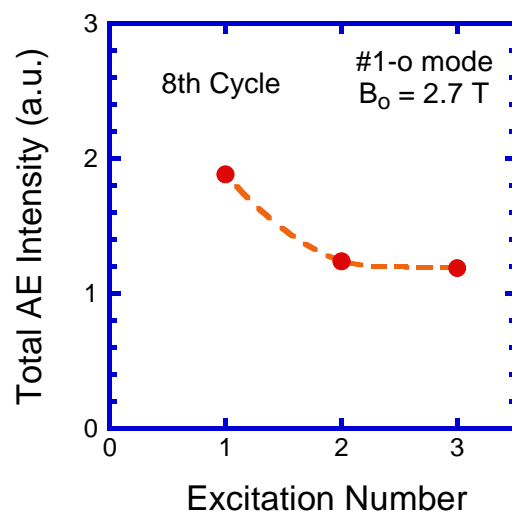


図 2.2-48 第8サイクルにおける励磁回数に対する AE 信号の変化

(3) LHD 電磁力支持構造物のひずみ測定

LHD 電磁力支持構造物は超伝導コイルとともに 4.5 K に冷却され、巨大な電磁力を支持している。材料は板厚 100 mm の SUS316 鋼である。LHD 建設時に電磁力支持構造物の内側及び外側赤道面に、各 10 箇所、ひずみゲージを貼付しており、その出力を実験サイクル毎に点検し、異常の有無を検討している。励磁によって渦電流が発生し、SUS316 鋼の温度

が上昇するが、0.02 T/min という低速励磁では、温度上昇は起こらない。ただし、液体ヘリウム供給元の圧力変動によって 0.03 度程度の温度変化がある。図 2.2-49 に 2000 年 10 月 4 日の測定結果と 2004 年 11 月 24 日の測定結果とを比較して示す。両者は最小分解精度 ± 3 デジット以内 (1 デジットは 2.5×10^{-6} ひずみに相当) にあり、有意な差は認められない。図 2.2-50 は過去 8 回のポロイダル方向ひずみの計測結果をまとめたものである。横軸はセクター番号で、10 セクターの内側赤道、外側赤道での測定結果である。各測定位置でひずみの絶対値は異なるが、これはポート形状などが異なるためである。しかし、いずれの位置においても、測定値は最小分解精度 ± 3 デジット以内にある。トロイダル方向ひずみの計測結果もポロイダル方向ひずみと同じ傾向を示している。これらのことから、建設から 9 年経過したひずみゲージは依然として正確に動作しており、かつ、電磁力指示構造物の赤道面付近の溶接部は健全であることが分かる。

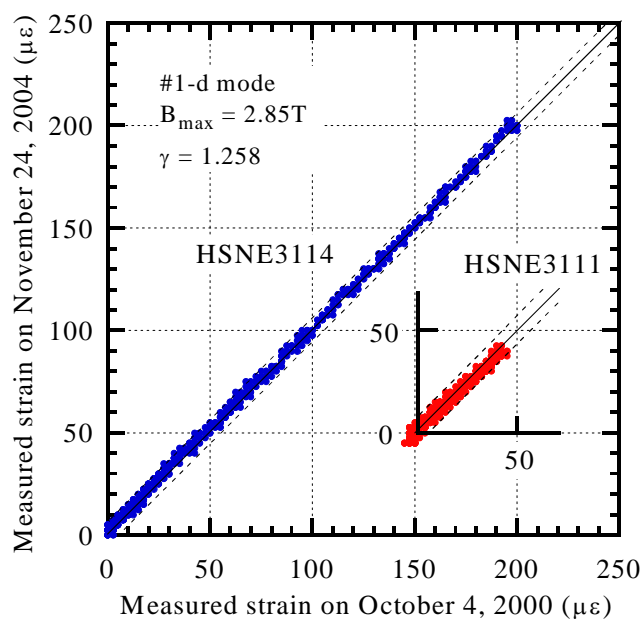


図 2.2-49 2000 年 10 月 4 日の測定結果と 2004 年 11 月 24 日の測定結果の比較

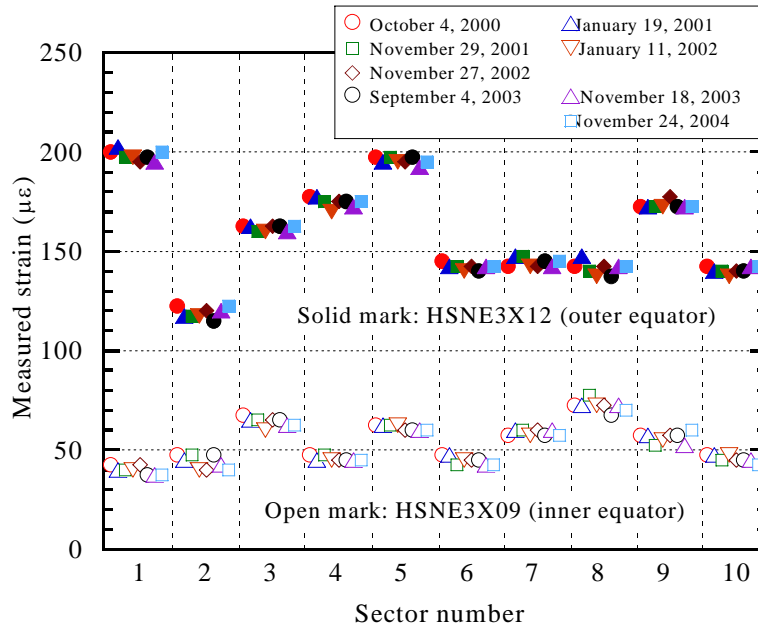


図 2.2-50 5 年間のポロイダル方向のひずみ測定結果(内側赤道と外側赤道)

(4) LHD 超伝導ポロイダルコイルにおける超長時定数磁場の観測

4.1) はじめに

ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体を用いた大型超伝導コイルにおいて、コイル近傍の磁場を測定したとき、通電電流が一定であっても長い時定数を持った小さな磁場変化が観測されている。この磁場の長時定数成分はコイル内部の結合電流ループによるものと考えられているが、その電流経路が複雑なために、定量化には至っていない。本研究では、CIC 導体を用いている LHD ポロイダルコイル(IS コイルおよび OV コイル)の近傍にホール素子を取り付け、磁場の長時定数成分の観測を試みた。

4.2) 測定方法

図 2.2-51 に LHD の断面図とホール素子の取付け位置を示した。IS コイル、OV コイルの内周面にそれぞれ4個のホール素子を取り付けた。上側コイルと下側コイルに 180 度方位を変えて 2 カ所ずつに素子を取り付けた。測定した磁場の方向は一軸で鉛直方向である。観測は、通常のプラズマ実験期間に連続して行う。また IS コイルと OV コイルのみで通電する特別な通電実験も実施した。

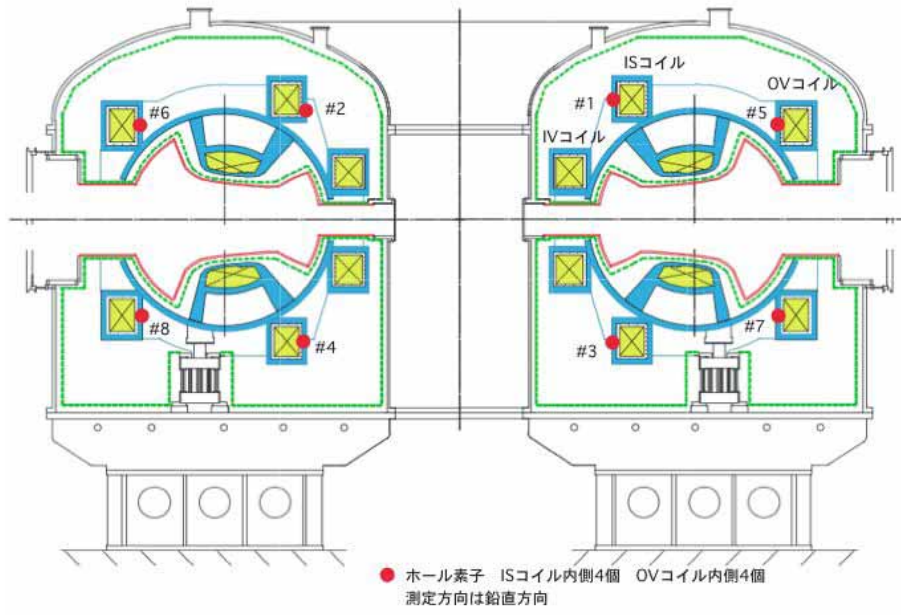


図 2.2-51 LHD の断面図とホール素子の取り付け位置

4.3) 実験結果

図 2.2-52 は典型的な測定データである。IS コイルに 14 kA (OV コイルに 4.6 kA) を通電し、1 時間保持した後、減磁した。減磁が終了し、電源とコイルを切り離れた後の磁場の変化を図に示した。電源と切り離されているにもかかわらず、磁場の変化が観測された。その変化を指数関数を用いてフィッティングした曲線を、図の中に同時に示した。測定磁場のオフセットには、素子自身のオフセット、アンプのオフセットに加え、減衰が見られない残留磁場が総合的に含まれている。そしてフィッティング曲線の減衰時定数は約 2000 秒であった。他の LHD ポロイダルコイルにおいても、これまでの観測例と同様の長時定数成分が存在することが確認された。さらに非通電時だけでなく、通電中のフラットトップで電流値が変化していない状態でも、磁場の微小変化は観測された。構造物の渦電流ではこのような長時定数減衰は発生しない。従って超伝導性に関係した結合電流ループに起因していると考えられる。

これまでに、通電を保持する時間が長いと、減磁後に観測される変化の時定数も長くなるということが分かっている。IS コイルについての結果を図 2.2-53 に示した。いずれも IS コイルを 14 kA まで通電した後の、残留磁場の変化時定数を示した。ホールド時間がゼロの場合(三角波通電)は、時定数は 500 秒程度である。一方、ホールド時間を 1 時間にすると時定数は 1000 ~ 2000 秒に増大した。この現象から結合電流ループの時定数は一つではなく、広く分布していることが分かった。

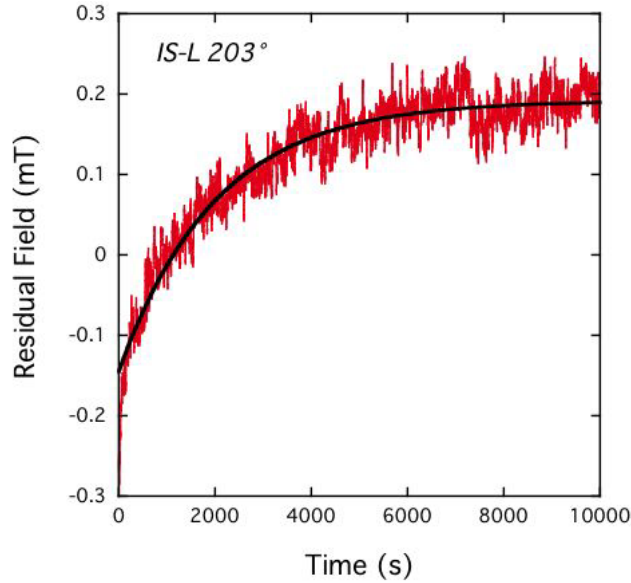


図 2.2-52 IS コイルを 14kA から減磁した際の残留磁界の変化

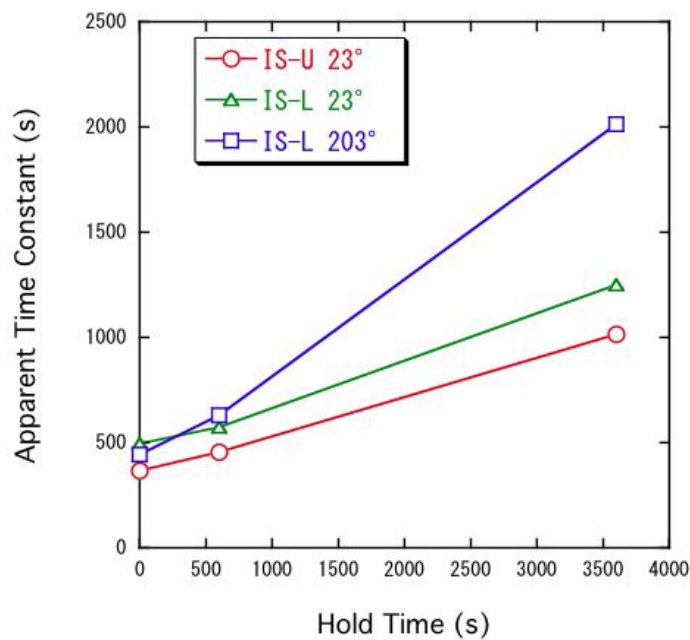


図 2.2-53 IS コイルを 14kA まで通電した後の残留磁場の変化時定数

(5) 超伝導コイル電源の電流制御

5.1) 研究の目的

核融合プラズマ実験装置用超伝導コイル励磁電源には所定の実験条件を達成するために下記の条件が要求される。また、将来の核融合装置においても同様の条件が予想される。

- ・所定の精度でコイル電源を制御できること
- ・所定の動的制御が可能であること
- ・システムパラメータの変動、外乱に対して頑強、安定であること

・超伝導コイルシステムに与える擾乱が少ないこと

本研究はこれら条件を満たす電流制御システム開発を目的としている。

5.2) これまでの成果

外乱信号の影響を抑制する制御系を構築するための理論である H 制御設計手法を利用して、安定性と制御特性の両立を図った制御系を設計してきた。その過程で、以下に示す制御システムを開発した。

a)超伝導コイル電流のみを検出し使用する制御系

b)プラズマ電流も検出し、制御擾乱を抑えた制御系

・プラズマ電流に関わらずコイル電流を一定とする制御

本制御では、プラズマ電流変化時にコイル電流が一定に保たれるが、コイル電圧は大きく変動し、特にプラズマ電流が急速に減少したときの動揺が著しい。

・プラズマ電流による鎖交磁束変化を抑制する制御

本制御では、プラズマ電流変化時にコイル電流が変化するが、コイル電圧の変動は少なく、プラズマ消滅時の擾乱も小さく抑え得る。

これまでの実験で、プラズマ消滅時の信号が過大となる結果、制御系に擾乱が入るといった問題があった。そこで、新たに、プラズマ電流信号に非線形フィルタ(一定レベル以下の信号には作用せず、一定以上の信号に対しては LPF 特性を持たせた)を挿入して、過渡時擾乱抑制を検討した。その結果を以下に纏める。

実験結果を図 2.2-54、2.4-55 に示す。図 2.2-54(a)は電流一定制御時のコイル電流および電圧、(b)がこのときのプラズマ電流である。プラズマ実験中もプラズマ電流変化率に対抗するコイル電圧が発生し、コイル電流を一定に保っていること、プラズマ消滅時の電圧もコイル電源定格以内であってその後に擾乱は生じていない。本実験では、プラズマ電流が低めであったことから、擾乱抑制効果のうち非線型フィルタによる割合の同定は困難である。しかしながら、本制御システム自体は高速な現象にも擾乱が少なく運転可能なことが示唆された。図 2.2-55(a)は磁束一定制御時のコイル電流と電圧、(b)がこのときのプラズマ電流である。フィルタ回路周辺のオフセット除去が不完全なため、コイル電流にドリフトが生じた。プラズマ生成消滅前後を通して、過大な電圧は発生していない。今後は、フィルタを含めたパラメータの最適化、非線型制御の検討、従来の P 制御への技術移行を検討予定である。

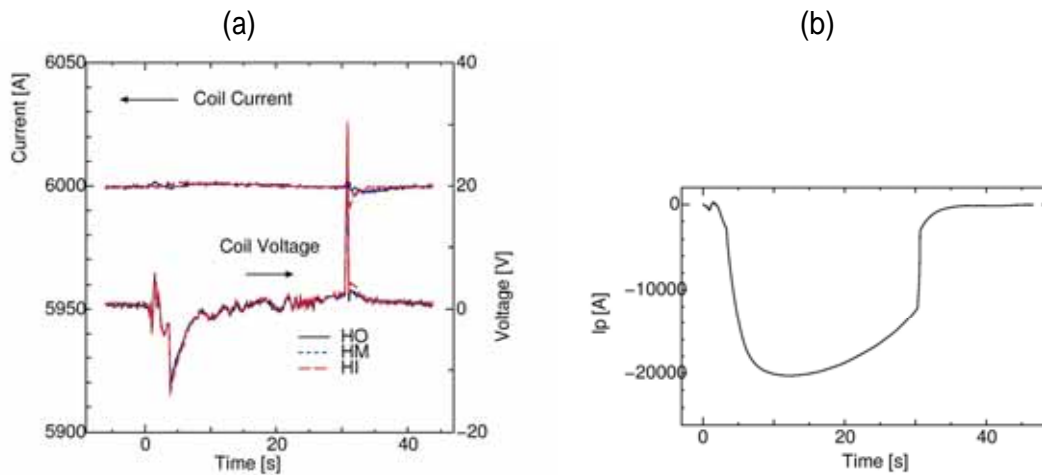


図 2.2-54 コイル電流一定制御の実験結果 (a)コイル電流および電圧 (b)プラズマ電流

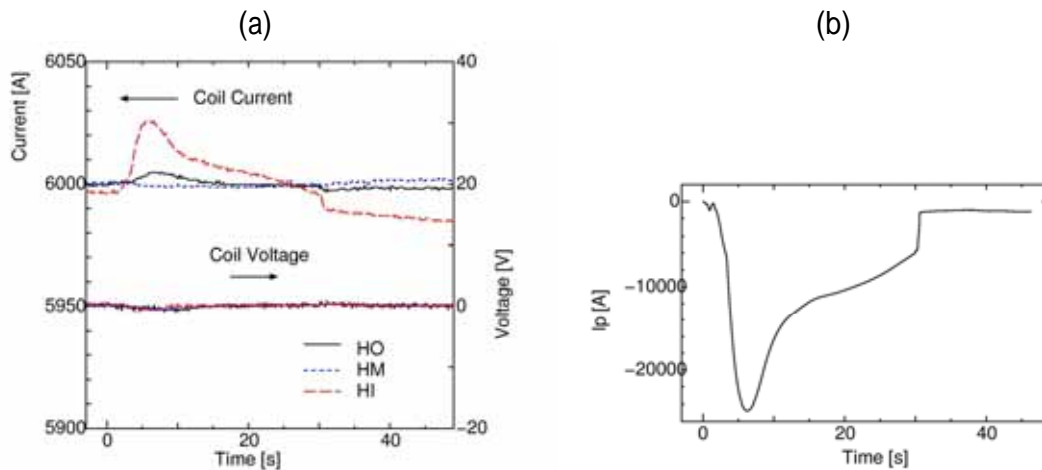


図 2.2-55 鎖交磁束一定制御の実験結果 (a)コイル電流および電圧 (b)プラズマ電流

(6) バランス電圧測定によるコイル位置精度評価

ヘリカル型核融合実験装置あるいは核融合炉においては、閉じた磁気面を形成する精度良い超伝導コイルシステムが必要である。超伝導コイル対におけるバランス電圧計測から、超伝導コイルシステムの幾何学的な精度を評価することを目的に実験を行った。

コイル対の単体励磁実験結果から、コイル対を成す 2 つの超伝導コイル各々(例えば、OV 上、OV 下)と、別のコイル対(例えば HI コイル対)との相互インダクタンスの誤差は $M \sim 0.3\text{mH}$ 程度であった。線電流近似による簡易的なインダクタンス計算より、前記相互インダクタンス誤差は剛体的な位置不整を想定する場合、 $\sim 1\text{mm}$ の位置ずれに相当する。真空磁気面マッピングにおいて観測されているナチュラル・アイランドの原因になるような 8mm 程度の剛体的な位置不整、言い替えればコイル中心位置不整および傾きは存在しないことが推定される。

本サイクルでは LID コイル群(A 電源系統、B1 電源系統、B2 電源系統)とコイル対を成す 2 つの超伝導コイル各々との相互インダクタンスの違いも評価している。この場合の M は最大で 0.03mH 程度であった。現在、超伝導コイル間のバランス電圧のアンバランスとしては

観測されない超伝導コイルの非等方性変形の可能性も視野に入れて、実験データを分析している。

(7) LHD 電磁力支持構造物の二相流ヘリウムによる冷却の最適化

LHD 電磁力支持構造物の冷却方式は、二相流ヘリウムによる 20 並列の強制冷却であるが、その熱特性は詳細には調べられておらず、また二相流の冷媒流量の配分など、最適な冷却条件についても研究がなされていない。そこでまず、電磁力支持構造物の冷媒を 2 時間停止して再開する実験を行い、各並列流路および電磁力支持構造物の温度上昇および冷媒供給再開後の温度不安定の有無を調べた。その結果、次のことが分かった。

- (1) 電磁力支持構造物の温度上昇から定常熱負荷の概算が可能である
- (2) 現状の冷媒流量においては並列流路間の温度不安定性は生じない(小さい)
- (3) 各流路には固有の周期の温度振動が観測されるが、1 K 以内の振動であり許容されるレベルである。

(8) LHD ヘリカルコイルの過冷却(サブクール)改造

LHD のヘリカルコイル導体では、高い冷却安定性を確保するために安定化材に高純度アルミニウムが採用された。しかしながら、導体断面の大型化によって低抵抗の安定化材への電流拡散時間が長くなったことが原因で、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起こり得ることが明らかとなり、それ以下の電流値(約 11.2 kA)で運転されてきた。そこで、冷却安定性を改善して高磁場励磁を可能とするために冷媒温度を下げる改造を第 10 サイクル前に実施した。追加した過冷却システムが所定の性能を達成することを確認してから、サブクールされた状態での励磁試験を行い、11.5 kA までの励磁に成功した。

冷媒温度を下げる方法として、ヘリカルコイル全体を減圧する方法と入口側に減圧熱交換器を追加して圧力は変えずに過冷却状態にする方法の 2 通りを比較・検討して、絶縁破壊電圧と大気混入防止の面で有利な後者の方式を選択した。図 2.2-56 に示すように、低温排気圧縮機を採用することによってコンパクトな設計が可能となり、設置空間の問題は解決された。また、既設ヘリウム冷凍機的能力で供給可能な 3.0 K の過冷却ヘリウムは約 50 g/s と見積もられており、ヘリカルコイルの定常侵入熱が約 100 W であることから、この場合のヘリカルコイル出入口の平均温度は約 3.5 K まで低下できることになる。この改造による改善効果を定量的に調べるため、同一仕様の導体で製作されたモデルコイル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。モデルコイルの冷却方式は、できるだけ実機を模擬するため低温排気圧縮機を用いた冷却システムを新しく準備した。モデルコイルは内半径が 200 mm で 24 列×12 層のレイヤー巻コイルであり、最大経験磁界がヘリカルコイルと同じである。導体間に等間隔で配置されている絶縁スペーサに挿入されたヒータによって局所的に常伝導部を発生させて、導体長手方向の電圧タップにより伝播の有無を判定した。飽和ヘリウム中では、電流値が閾値(動的な最小伝播電流 $I_{(mp)}$)である 10.6-10.7 kA を超えると 1 ターン以内の片側伝播が始まり、さらに電流値を上げると 1 ターンを超えて低磁場領域までの片側伝播、両側伝播と回復、クエンチと変化した。片側伝播は LHD ヘリカルコイル

でも観測されており、その原因には超伝導線からアルミニウム安定化材に電流が転流する際に外部磁界を横切ることによる電磁現象が関与していると考えられている。また、1ターン以内で伝播が止まる原因は、導体の姿勢に伴う沸騰熱伝達の変化と考えられる。一方、過冷却ヘリウム中では、過冷却度に比例して $I_{(mp)}$ が上昇し、3.5 K では 11.7 kA まで上昇した。ヘリカルコイルで常伝導伝播が発生している場所が3層目と推定されることを考慮すると、図 2.2-57 に示すように、LHD ヘリカルコイル内の温度を 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ことになる。

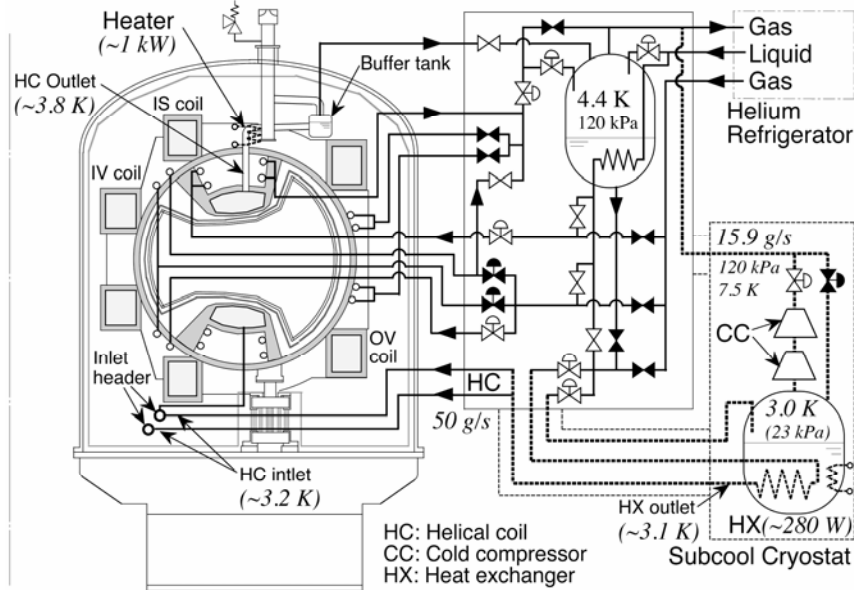


図 2.2-56 ヘリカルコイル冷却システムの過冷却改造

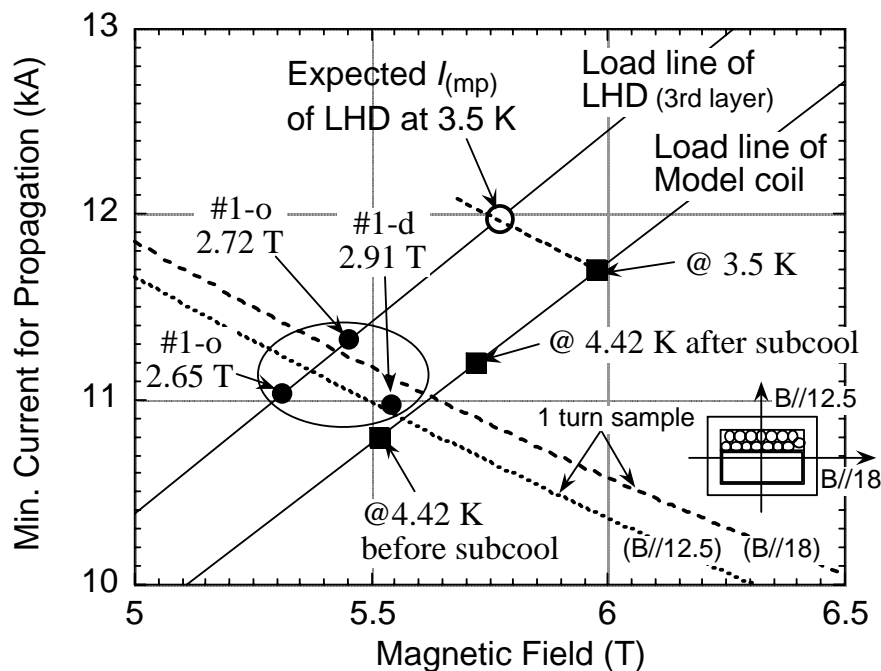


図 2.2-57 モデルコイルとヘリカルコイルの動的な最小伝播電流

第10サイクル実験前に、大型ヘリカル装置のヘリカルコイルの冷媒供給側に減圧熱交換器を追加する改造を実施した。まず、追加した過冷却システムの性能試験を行い、図2.2-58に示すように、ヘリカルコイルの入口と出口を各々3.2 Kと3.8 Kに低下させることに成功した。モデルコイルを用いた安定性試験では、最小伝播電流がサブクール度にほぼ比例して高くなる結果が得られており、低い温度を保持することが重要であるため、励磁に伴う温度上昇を評価した。図2.2-58から分かるように、励磁速度が速くなるほど、結合損失と構造物の渦電流損失が増大して温度上昇が大きくなる。評価の結果、通常の1/2の電流変化率3.5 A/sであれば、励磁に伴う発熱の約2/3がヒステリシス損失となり、11 kAまでの励磁においてもコイル出口温度を4.0 K以下に保つことができることを確認した。

ヘリカルコイル内部には温度計が設置されていないため、サブクールヘリウム冷却時の巻線部の温度を実測することができない。励磁試験前には、巻線部の温度はコイル出口温度よりも低いと考え、コイル出口を4.0 K以下に保持することによって「動的な最小伝播電流」は11.6 kA以上に高まると推測した。ところが3.5 A/sで11.0 kAまで励磁してすぐに、0.7 A/sで11 kA以上の高磁場励磁を試みたところ、11.4 kA付近において、コイル最上部付近から常伝導部の片側伝播が始まり、最も高磁場の内周赤道部で止まる現象が2回観測された。外周赤道部付近でも伝播速度が遅くなっており、冷却条件がコイル長手方向および断面内で不均一であることが示唆される。飽和ヘリウム冷却では、コイル最下部付近で常伝導伝播が始まり最上部付近で停止したことから、H-Iブロックへの気泡の集積による局所的な冷却の悪化が主要因と推察されている。過冷却ヘリウム冷却では、定常侵入熱によるコイル断面内温度分布に加えて、交流損失によってH-Iブロックの温度が局所的に高くなっている可能性がある。11 kAにおいて2時間以上保持した後に高磁場励磁を行うように励磁方法を変更してからは、11.5 kA相当までの励磁において常伝導伝播は観測されていない。現在、ヘリカルコイル内の自然対流を考慮した温度分布の解析を試みている。励磁速度と電流保持時間の最適化および締付励磁法の改良による高磁場励磁を計画している。

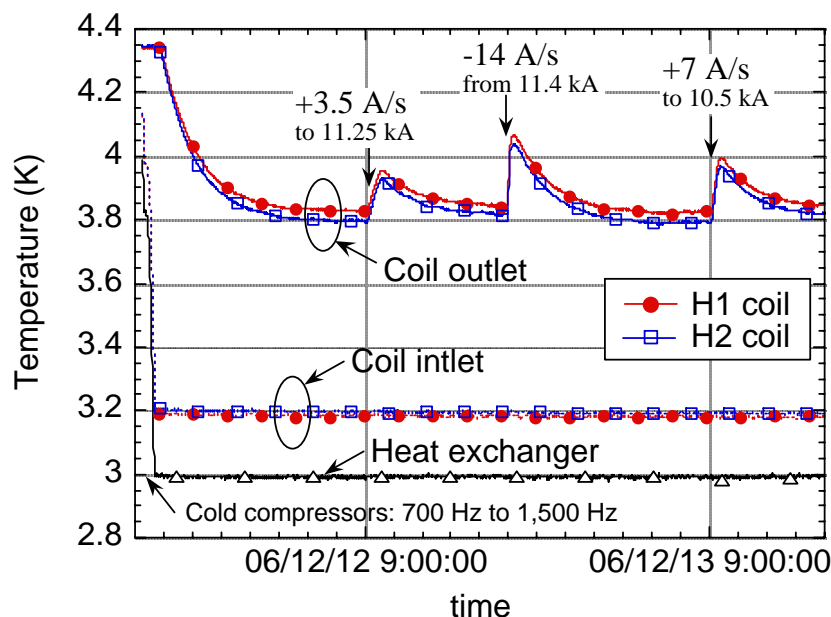


図 2.2-58 過冷却運転時のヘリカルコイル出入口の温度変化

(9) まとめ

装置工学実験では、大型超伝導コイルシステムの健全性、信頼性を確認する手法として、バランス電圧測定、ひずみ測定を継続的に行ってきた。システムの健全性が確認され、プラズマ実験に必要な磁場を提供することができた。また新たに音響(AE)測定を導入し、より正確に健全性を実証する研究を開始した。ヘリカルコイルの冷却安定性を改善するため、過冷却改造を実施し、計画どおりに、ヘリカルコイル温度を飽和温度 4.4 K から 3.8 K(コイル出口)まで低下させることに成功した。安定に高磁場励磁を行うためには、励磁に伴う交流損失による温度上昇に留意する必要があることが分かり、励磁方法の最適化を研究している。

大型超伝導コイルで初めて確認された残留磁場の変化は、コイルシステムの性能に影響を与えるものかどうか調査する必要がある。新しい電源制御技術は、プラズマの高性能化に直結する可能性があるため、早急な開発が望まれる。その他、コイル位置精度を評価する手法、並列流路の二相流ヘリウム冷却の最適化など新しい研究も開始された。