

## 核融合炉マグネットシステムの保全に関する基礎検討 Basic study on maintenance of magnet systems for fusion power plants

今川信作  
Shinsaku Imagawa

自然科学研究機構核融合科学研究所，総研大  
NIFS NINS, The Graduate University for Advanced Studies

核融合炉の超伝導マグネットシステムには高い信頼性が要求される。ITERと同様のNb<sub>3</sub>Snケーブル・イン・コンジット導体を採用する場合、冷却回数や繰り返し電磁力によって超伝導特性が変化することを考慮する必要がある、また、放射線による特性変化も考慮が必要である。さらに、安定化材である銅の導電率は中性子照射によって高くなり、絶縁物は放射線照射と経年変化によって強度だけでなく絶縁耐圧も低下することが知られている。温度計などの重要な計測素子も放射線による劣化を考慮する必要がある、信頼性の高い運転状態を維持するためには、これらの特性の変化を監視し、計画的に性能確認、コイルの昇温、計測素子の交換などが必要と考えられる。

大型ヘリカル装置（LHD）の超伝導システムにおける検査と機器更新の目安を表1に示す。ヘリカルコイルは短い常伝導伝播が生じ得る電流値までの励磁を昇温・再冷却毎に実施しており、25年間の運転で超伝導特性の変化は観測されていない。ヘリウム冷却システムは高压ガス設備（冷凍則）であるため、年1回の点検を実施している。安全弁動作試験や低温弁の分解点検の際には、ヘリウムの純度維持のため3回の真空置換を実施しており、この際のヘリウムの損失量は少ない。精製器の運転でもヘリウムを損失するため、全体として損失を最小化することが重要な課題となっている。

現場計器や真空ポンプはメーカー推奨の更新周期を目安に計画的に更新しており、95%を超える稼働率を維持してきた。それでも初期故障や想定より早い経年劣化による故障は避けられない。LHD超伝導システムで経験した経年劣化の事例として、ヘリウムタンクのマンホールのパッキンからの漏洩、循環圧縮機のベアリング摩耗による振動増大、内部吸着器の性能低下、冷却配管の絶縁管（繊維強化プラスチック）からの漏洩、現場盤の制御用直流電源の出力不

良、低温弁の位置検出レバーの動作不良などがある。また、ヘリウム液面計の断線や抵抗温度素子の特性変化も観測されており、後者については制御側で対応している。ヘリウム系のパッキン交換はヘリウムの損失を伴うので、タンク類は可能な限り溶接構造にすべきである。有機材料の電気絶縁管は経年劣化が避けられない。放射線環境下では劣化が加速されるため、標準としてセラミックス絶縁管を使用できるように法令・規則を整備することが望ましい。

核融合炉において超伝導コイルの特性変化を監視する方法として、定期点検後の運転再開時に分流開始温度など実機コイルの超伝導特性を測定することも考えられるが、そのための設備が必要となるだけでなくコイルクエンチの可能性もあるため、実現可能性の検討が必要である。監視用の短尺の超伝導導体を厳しい環境の位置に設置しておき、定期的に性能確認を行って実機コイルの性能を予測する方法も考えられる。絶縁物など劣化が懸念される材料については、テストピースを実機コイル近傍に配置しておき、定期的に試験を実施することが考えられる他に、実機コイルの電気特性等の監視による劣化診断技術の開発が望まれる。

表1 LHD低温システムの検査と機器更新の目安

周期	機器の検査・更新
毎年	安全弁の動作試験，圧力計の校正，気密試験，冷却完了後の通電試験
3年	He循環圧縮機分解点検
5年	UPSバッテリー，真空ポンプのベアリング
10年	低温弁の分解点検（ダイヤフラムやパッキンの交換），UPS，制御電源，ヒータ電源，絶縁アンプ，現場計器，クエンチ検出器のオーバーホール
15年	真空ポンプ，電動機類，TMPコントローラ，真空計，制御システム
未交換	He循環圧縮機本体，低温タービン，低温弁本体，安全弁本体，温度素子，液面センサー，未開放のポートのパッキン