

Superconducting Systems Developed for Fusion Device and their Applications for
Electrical Power Systems

カ石 浩孝, 炉システム応用技術研究系

核融合研

CHIKARAISHI Hirotaka and Superconducting Group

NIFS

hchikara@nifs.ac.jp

はじめに LHD はプラズマ閉じ込めに必要な磁場発生コイル、およびコイルへの給電線を超伝導化した、全超伝導のプラズマ実験装置である。蓄積磁気エネルギーは約 1GJ(3T 運転時)に達し、世界最大級の超伝導コイルシステムである。このシステムを開発するため、大容量の導体開発をはじめとして大型超伝導コイルシステムに関する R&D を実施した。本報告では、LHD の超伝導コイルシステム開発で得られた研究成果、および電力分野への波及効果について報告する。

主要な研究成果 LHD の超伝導システム開発で得られた主な成果を以下に示す。

[ヘリカルコイル] ヘリカルコイルは、プラズマ表面と真空容器の間隔を確保するための高い電流密度 ($40\text{A}/\text{mm}^2$)、複雑な 3 次元形状を高精度 (2mm) で製作するための柔軟性、コイルクエンチを起こさない完全安定性が要求される。そこで、銅安定化された NbTi のラザフォードケーブルに、ヘリウム温度で抵抗率が低く (銅の約 1/10) 熱伝導率が高い高純度アルミを安定化材として使用する導体構成を採用した。開発過程において、異種金属の接合によるホール効果のため実効抵抗が増大すること、その防止策として安定化材表面に抵抗層を付与が有効であることを示した。また、大型超伝導コイルでは、発熱の低減およびコイル空間削減のため導体接続技術が重要であり、超伝導素線を使用した接続部材による接続方法を開発し、低抵抗かつ省スペースの接続を可能にした。LHD 運転開始後の装置試験では、常伝導伝播の非対称性、Traveling Normal Zone 現象といった大電流導体に関する知見が得られつつある。

[ポロイダルコイル] ポロイダルコイルに関しては大電流定常運転時に安定であるだけでなく、将来の磁場変動実験においても十分な安定度および耐電圧のあることが要求された。このため、ステンレスコンジット内に超伝導素線のバンドルを挿入し、素線間を加圧超臨界ヘリウムで冷却し、電気絶縁をコンジット外部に施す CICC 導体を採用した。CICC 導体においては、従来は交流損失低減のため素線間絶縁を施すことが常識とされていたが、1. 素線絶縁による電流分流の抑制が直流通電時の安定性を阻害すること、2. 素線絶縁を行わずとも、CICC のボイド率を適切に選定することによ

り実用上充分小さい交流損失に抑制可能なことを明確にした。また導体接続部においては超伝導フィラメントを直接超伝導接続する方式を開発した。これにより、接続抵抗を $1\text{n}\Omega$ 以下に低減すると同時に、接続部に必要な空間を抑えることに成功した。

[バスライン] バスラインの開発にあたっては、万一液体ヘリウム供給が停止した場合でも 30 分間は通電可能なこと、内部がガスでおおわれた状態でも所定の耐電圧 (運転電圧 DC 2kV) を有すること、漏洩磁界が小さいこと、敷設作業が容易なことを条件とした。このため、温度上昇を抑えるために充分な量のアルミ安定化材を付与したアルミ安定化導体を採用した。漏洩磁界を抑え狭隘な空間で敷設可能とするように、往復の超伝導導体を可とう断熱配管に挿入し端末処理まで終えた一体型のケーブルを開発した。この一体型ケーブル方式の開発より、ケーブル全体を工場製作してドラムに巻き搬送し現地で延線敷設することを可能にし、常伝導電力ケーブルと同等の作業環境を実現した。

電力分野への適用可能性 得られた成果が電力分野に与えた、あるいは与えうる効果は以下のものがある。

[超伝導エネルギー蓄積装置] ポロイダルコイル開発で得られた技術は、大エネルギーを短時間で充放電する必要のある、系統安定化用大容量超伝導エネルギー蓄積装置で要求される技術と重なる部分が多い。また、バスラインで開発されたアルミ安定化導体の技術、ヘリカル導体で得られた大電流ラザフォードケーブルに関する成果は伝導冷却パルスコイルに適用可能であり、瞬停対策の小規模エネルギー蓄積装置応用に応用されている。

[高温超伝導電流リード] LHD 装置の機能向上に向けて、高温超伝導電流導入部の開発を共同研究として実施し、室温から 4.2K への 20kA 導入部を開発した。4.2K から 1.8K への電流導入部開発でも成果が得られている。これらの成果は、電力用超伝導機器の電流導入部に直接適用可能である。

まとめ LHD 装置建設において開発した主要超伝導技術およびその電力応用について概説した。上記以外、紙面の都合で割愛せざるを得なかった技術についても当日報告する。