

特別チーム超伝導コイルWG活動報告
**Report of Superconducting Magnet Working Group on Joint Special Design
 Team for Fusion DEMO**

宇藤 裕康
 Hiroyasu UTOH

量子科学技術研究開発機構
 National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

1. はじめに

原型炉設計合同特別チームでの原型炉の基本概念設計において、超伝導コイルシステムの概念構築は緊急の課題であり、同特別チームではチーム内外の専門家による「原型炉超伝導コイルワーキンググループ」を設置し、平成27年11月より原型炉用超伝導コイルの基本概念の構築ならびに今後の開発方針の策定に向け検討課題を議論した。本発表では原型炉超伝導コイルワーキンググループ活動の報告としてワーキンググループの活動内容および主な議論、原型炉超伝導コイル概念設計の方向性について報告する。

2. 原型炉超伝導コイルワーキンググループ設立の経緯と活動内容

特別チームで実施されたBA設計レビューにおいて、原型炉超伝導コイル概念構築のために設計強度、大型コイルの製作性、超伝導線材の選択などを最優先課題として取り組むべきとの指摘を受け、これら重要かつ幅広い検討課題に対応すべく特別チーム内外の専門家による「原型炉超伝導コイルワーキンググループ(以下、超伝導WG)」(主査：日渡良爾(特別チーム・システム設計グループ・グループリーダー))を平成27年11月に設置し、活動を開始した。

超伝導WGでは、原型炉用超伝導コイルの基本概念の構築ならびに今後の開発方針の策定(コアチーム報告書チャートによると平成29年を想定)を目的に、下記の原型炉用超伝導コイルの主要課題項目を中心に各専門家から情報提供を受け、WGメンバー内で議論した。

超伝導WGでの検討項目：

- ・原型炉超伝導コイル概念設計
- ・炉心プラズマからの要求磁場精度
- ・超伝導コイルの保守・故障時の対応策
- ・ITERにおける超伝導コイル製作の技術進展と

原型炉用超伝導コイル(大型コイル製作)への課題・提案

- ・Nb3Sn線材の開発進展と将来性
- ・Nb3Al線材の開発進展と大型コイル製作への技術課題
- ・高温超伝導線材(ReBCO)の開発進展と将来性
- ・低温高強度構造材開発の現状と原型炉への見通し
- ・超伝導線材・超伝導コイル用絶縁材の耐放射化性能の現状と原型炉への見通し
- ・原型炉用導体・コイル大型試験設備の計画検討

超伝導WG構成メンバー：

日渡良爾(主査)、宇藤裕康(幹事)、小泉徳潔、辺見努、井手俊介、坂本宜照(以上、量研機構)、今川信作、柳長門(以上、NIFS)、小野嘉則、伴野信哉(以上、NIMS)、淡路智(東北大)、雨宮尚之(京大)、長谷川満(三菱電機)、坂成人(三菱重工)、伊藤保之(東芝)(順不同)

超伝導WG会合を6回開催し、主要な検討課題について情報の取り纏めおよび議論を完了した。

3. 主な議論の内容

原型炉用超伝導コイル設計に関して、現在特別チームではITERからの技術的飛躍が最小限となるようITER超伝導コイル仕様を設計の出発点としているが、中心ソレノイド(CS)供給磁束を十分確保する場合に炉全体が大型化($R_p \sim 8$ m)し、それに伴いトロイダル磁場(TF)コイルも大型化している。大型TFコイルにおいては、ITER-TFコイル製作の経験からラジアルプレート方式では製作期間やコスト面から、合理化の必要があり、オプションとして新たな巻線方法の検討も大型コイル巻線製作のR&Dと合わせ

て必要であるとの意見が出された。また、大型コイル製作の観点から、原型炉での炉心プラズマからの要求磁場精度の明確化が早期に求められた。原型炉用超伝導コイルの開発計画としては、超伝導コイル開発には時間を要することから、原型炉設計と並行し、導体の高磁場化・高Jc化、構造材料の高強度化などの開発研究に着手し、原型炉設計の進展と開発状況を総合的に判断して、具体的な数値目標を設定することが肝要であるとされた。また、JT-60SAやITERで開発された技術を継続して発展させるため、人材育成や技術の伝承・発展を考慮した開発計画とその実施が強く求められた。

4. 原型炉超伝導コイルの開発方針

WG内での議論を踏まえ、原型炉設計合同特別チームとして、2017年の一次仕様に向けた原型炉用超伝導コイル設計のベースラインは、現状のコイル技術と炉システム設計の観点から、基本的な構造はITER超伝導コイルを踏襲し、代表的な設計パラメータは以下のようにした。TFコイル線材はNb₃Sn、最大生成磁場は13T程度、導体電流値<100kAのケーブルインコンジット導体、最大設計応力は800MPaとする。TFコイル寸法は炉システム設計(炉心プラズマ寸法、増殖ブランケット、遮蔽、トロイダルリップル値、遠隔保守ほか)に基づき決定されるが、ITERの1.5倍程度(高さ：18m、幅：12m)が想定される。ITER-TFコイル製作の経験からラジアルプレート方式では製作期間やコスト面において課題が多いが、絶縁材にかかる応力支持、大電流導体のD型巻線方法など、現在の知見・技術からベースラインとしてはラジアルプレート方式を採用する。ただし、今後コイル製作の観点から合理化の必要があり、オプションとして新たな巻線方法の検討も大型コイル巻線製作のR&Dと合わせて行う。

2017年のベースラインから、より原型炉の実現性を高めるため、2020年以降のC&Rに向けては、TFコイルを始めとする超伝導コイルシステムの小型化のため、TFコイル本数や炉内機器の最適化など、炉システム設計と整合を取りつつ、再検討する。炉全体寸法(プラズマ大半径など)の小型化に向け、CSコイル高磁場化(>13T)やHTSを用いたコイル薄型化による供給磁束の増大などの方策を検討する。

ラジアルプレート方式では製作期間やコスト面において課題が多い。この課題を解決するため、コイル製作の合理化の観点から、①巻線

製作上の緩和策、②新たな巻線方法の検討、などをR&D含め早期に開始する必要がある。①巻線製作上の緩和策としては、炉心プラズマからの要求磁場精度としては1x10⁻⁴を目標に、原型炉での巻線・製作・組立精度の影響を明確化すると共に、同誤差磁場を許容するための炉心プラズマ運転方法も合わせて検討する。②新たな巻線方法の検討としては、矩形導体方式をベースに絶縁材にかかる応力支持、大電流導体のD型巻線方法などの解決策を検討する。

超伝導線材は原型炉全体設計および各超伝導線材の開発状況を踏まえ、2027年頃に最終決定する。低温超伝導線材の開発方針は高Jc化、特に機械強度の向上などに向けた開発を進め、電流導体としては、100kA級のケーブルインコンジット導体を主案に、電磁力の増加を考慮した改良型導体の構造検討に早期に着手し、2020年以降の導体試作、2027年以降の大規模モデル試験に備えて設計仕様の明確化を図る。

低温鋼の高強度化は現行の原型炉設計では必須である。一方、材料開発には時間がかかることから、ベースラインで設定した設計応力800MPa(極低温での0.2%耐力1200MPa)を開発目標に、原型炉超伝導コイル開発において加速すべき最重要R&D項目の1つとして早急に着手する。また、耐力1200MPaの構造材の開発リスクに対し、①コイル構造の最適化による最大応力の低減、②耐力1000MPaを用いた炉設計オプションを並行して検討する。

原型炉超伝導コイルの開発目標としては、高めの暫定的な目標値として最大経験磁場15-16T、導体電流値100 kAとする。この目標値での超伝導特性を評価するためには大型の高磁場導体試験設備の研究開発が必要であり、電磁力による性能低下を正しく評価する導体試験法の確立と合わせ、DEMO用のCSモデルコイルを先行して製作し、導体試験装置として活用できるように整備することを検討する。

以上を踏まえ、原型炉超伝導コイル開発において加速すべき最重要項目は、

- ・高強度低温鋼の開発
- ・大型TFコイルの製作コスト合理化のための検討(R&D含む)

であり、これらの項目および計画は「原型炉開発総合戦略タスクフォース」へ提案し、アクションプランへの反映を働きかける。同時に、原型炉設計特別チームにて原型炉超伝導コイルの設計仕様・基本設計を早期に構築し、全日本体制での超伝導コイル開発の基盤とする。