

ITER TFコイル開発から学んだこと、そして原型炉への展望

6) 原型炉用TFコイルの概念設計

Lessons learned from ITER TF coil development and load to DEMO

6) Conceptual design of TF coil for DEMO

宇藤 裕康
Hiroyasu Utoh

量子科学技術研究開発機構

National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

1. はじめに

現在、原型炉用超伝導コイルは、アクションプランに沿って原型炉設計合同特別チームにて概念設計中である。原型炉用超伝導コイルは、ITERでの技術開発をベースに技術的飛躍が最小限となるよう ITER 超伝導コイル仕様を出発点として検討されている。一方、現在設計中の主半径 8.5m の原型炉(JA-DEMO)^[1]は ITER と比較して炉が大型化しており、それに伴い原型炉用トロイダル磁場(TF)コイルの磁気エネルギーは ITER の約 4 倍、コイル寸法は ITER の約 1.5 倍となっている。

本講演では、原型炉超伝導コイルの主要諸元と合わせてこれらの原型炉超伝導コイルの概念設計研究の最近の進展と課題について報告する。

2. 原型炉用TFコイルの主要諸元

原型炉の超伝導コイルシステムは、16 個の TF コイル、6 つのモジュールからなる中心ソレノイド(CS)と 7 個のポロイダル磁場(PF)コイルにより構成される(図 1 参照)。

原型炉用 TF コイルの仕様を表 1 に示す。超伝導線材は ITER と同様に Nb₃Sn を選択し、導体はケーブル・イン・コンジット(CIC)導体、最大磁場強度は 14 T 程度である。巻線方法は、絶縁の信頼性(絶縁材にかかる応力)と現在の知見・技術からベースラインとしては ITER TF コイルと同じラジアルプレート(RP)方式を採用している。4 K での構造材設計耐力としては、TF コイル内脚部において 1,200 MPa を想定しており、ITER とは異なる高強度極低温構造材料が求められている。

3. 原型炉用TFコイルの主要課題と解決に向けた取り組み

原型炉に向けた TF コイルの設計・開発では、
①大型 TF コイル製作の合理化 (製作コストの

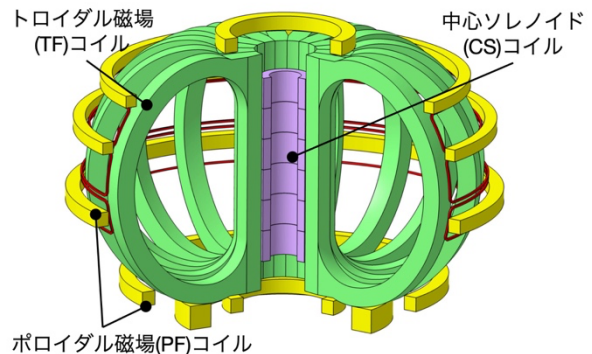


図 1 原型炉用超伝導コイルの概念図

表 1 ITER と原型炉での TF コイル諸元表

	ITER	原型炉
超伝導線材	Nb ₃ Sn	Nb ₃ Sn
最大磁場強度	11.8T	13.9T
TF コイル本数	18	16
全起磁力	164MAT	255MAT
導体電流値	68kA	83kA
ターン数 (コイル 1 本)	134	192
構造材設計耐力(最大)	1000MPa	1200MPa
全磁気エネルギー	41GJ	153GJ
TF コイルの水平/垂直 方向ボア(中心-中心)	9m/14m	14m / 20m

大幅な増加) と②高電磁力下における大電流導体の開発、③高強度極低温構造材料の開発を特に重要な課題と捉え、研究開発を進めている。

3.1 大型TFコイル製作の合理化

大型 TF コイル製作の合理化に関連する取組として、原型炉における超伝導コイルに対する製作・設置の要求公差を明らかにし、製作精度の緩和策の検討を行った。本シンポジウムの ITER TF コイル製作からの lessons learned にもあるように(S7-3 など)、製作精度は製作期間や製作コストに影響する。特に、大型化した原型炉 TF コイルで ITER での製作要求公差をそのま

ま仮定すると、格段に高い製作精度が要求され、製作性が懸念される。超伝導コイルの要求製作公差を決めるのは、炉心プラズマからの誤差磁場である。原型炉では、超伝導コイルによる誤差磁場の目標値を $B_{TMEI}/B_t < 10^{-4}$ とし、ディスラプションに繋がるロックモードの回避に必要な誤差磁場への補正は、誤差磁場補正コイルを用いる方針とした。炉心プラズマでの誤差磁場は、JT-60SA での誤差磁場補正コイル設計に用いられた解析コードを用い、巻線誤差や設置誤差をモンテカルロ法で与え、評価した。解析の結果、各超伝導コイルに、ITER より 2~4 倍緩和した製作公差および設置公差を与えた場合でも、累積相対度数 95% (試行回数: 5000 回) での誤差磁場は目標値である $B_{TMEI}/B_t < 10^{-4}$ に収まることが明らかになっている。さらに、ロックモードの回避に必要な誤差磁場値 0.1 mT 以下も ITER 補正コイル電流値並の 200 kA で実現可能な見通しが得られたことから、原型炉での TF コイル製作精度は ITER より 2~4 倍緩和した公差と設定している。

その他、製作コストの合理化案の一つとして、巻線方式自身を RP 方式とは異なるオプション方式を検討している。上述のように、製作公差の緩和は可能であるものの、本シンポジウムの ITER での製作工程の説明にもあったように (S7-4 など)、RP 方式ではカバープレートの溶接工程などの製作工程が多い。一方、JT-60SA の TF コイルに採用されている矩形導体直接巻方式では、RP の加工やカバープレートの溶接工程は不要となり、製作の簡略化は可能になる。そこで、製作簡略化の代替オプションとして矩形導体方式で成立する概念を検討中である。矩形導体を用いた際の最も大きな課題は、ターン絶縁にかかる応力(特に層間剪断応力)の増大であり、これらの解決に主眼を置きつつ概念設計を継続中である。これまでの検討では、矩形導体レイヤー巻概念では、グレーディングにより、大幅に絶縁材にかかる応力を低減し、且つ超伝導線材(Nb_3Sn)の量を最大 62%削減可能な見通しが得られている。一方、新たな巻線方式を選択する場合には、ITER での製作実績を踏まえつつ、鍵となる要素技術の検討に早急に着手する必要がある。

3.2 高電磁力下における大電流導体の開発

高電磁力下における大電流導体の開発に関連する取組として、TF コイル導体の熱的安定性解析、導体内歪みを考慮した導体成立条件を検

討し、超伝導線材に要求される性能を評価している。その結果、ITER CS インサートコイル試験 (13 T, 40 kA) から外挿すると、ITER CS 導体並の短ピッチ燃線導体を 83kA 級で採用できれば、現状の ITER 素線で対応可能な見通しが得られた。一方、現設計はあくまで CS インサートコイル試験結果からの外挿であり、ITER 試験での J_c 劣化のメカニズムの解明や導体試作および試験による外挿性の検証が今後の重要な検討課題となる。

3.3 高強度極低温構造材料の開発

高強度極低温構造材料の開発に関連する取組として、まず原型炉に向けた極低温鋼(母材)の開発目標として、4 K での 0.2%耐力: 1,600 MPa 以上、4 K での破壊靱性値: 120 MPa \sqrt{m} 以上と定め開発を開始している。原型炉 TF コイルでは極厚の構造材料が大量に必要とされることから、鋼種としては、製造性、コストの観点からオーステナイト・ステンレス鋼に限定することとした。この開発では、既存鋼種の評価 (0.2%耐力 $\geq 1,200$ MPa 以上の実証) と ITER 構造材料開発の知見をベースに設計した新材料 (50 kg 溶解) の試作と評価を行い、候補材料の基本成分の絞り込みと成分の最適化を実施する計画である。既存鋼種の評価では、XM19 の機械特性評価により実機材で 0.2%耐力 > 1200 MPa は達成可能な見通しが得られている。一方、原型炉 TF コイルのような大型コイルでは溶接継ぎ手は必須であり、ITER での構造物製作の困難さの一つは溶接継ぎ手であったことから (S7-2)、今後は溶接性も考慮して進める計画である。

4. おわりに

原型炉用 TF コイル設計は、ITER TF コイルでの技術開発をベースとしているものの、ITER TF コイルよりもさらに大型化すること起因した課題点が明らかになっている。特に、大型コイル製作の合理化は、現在検討中の巻線方式のみならず、製作加工機器を含む製作方法など、現在進行中の原型炉概念設計の段階から、ITER TF コイル製作メーカーの知見を最大限取り入れることが、原型炉プロジェクトを実現するために必要である。

参考文献

- 1) K. Tobita *et al.*, Journal of Physics: Conf. Series **1293** 012078 (2019) .