

ITER TFコイル開発から学んだこと、そして原型炉への展望

5) 原型炉用TFコイル製作の課題

Lessons learned from ITER TF coil development and load to DEMO

5) Subjects for manufacturing DEMO magnets

今川 信作

IMAGAWA Shinsaku

核融合科学研究所

NIFS

1. 原型炉用超伝導コイルの開発課題

超伝導コイルの最大経験磁場、コイル平均電流密度、許容応力は、原型炉の主半径やメンテナンス空間などの基本仕様の決定において極めて重要であり、原型炉の実現のためには、ITERで開発された超伝導コイルよりも高い磁場を高い電流密度で発生可能な超伝導コイルの開発が必要である。特に中心ソレノイド(CS)コイルの高磁場化と高電流密度化は、必要な磁束を確保しつつトカマク主半径の小型化を可能とする。また、トロイダル磁場(TF)コイルの高磁場化と高電流密度化は、プラズマ体積の小型化と炉内構造物設置空間やメンテナンス空間の拡大を可能とする。導体に働く電磁力は磁場と電流値の積で与えられ、コイルに働く電磁力は磁場の二乗に比例することから、高磁場化と高電流密度化の両立には、機械強度の高い導体の開発とコイル構成材料の許容応力の向上が必要である。

超伝導コイルの巻線・組立技術に関しては、ITERのTFコイルにおいてラジアルプレート方式が初めて採用され、様々な技術開発の成果の下に実機の製作が進んでいる。ITERのCSコイルにおいては、厚肉ジャケットのケーブル・イン・コンジット(CIC)導体のワインド・リアクト・トランファー方式(最終形状に曲げ加工後にNb₃Snの生成熟処理を行い、絶縁処理を施しながら弾性範囲内で巻線)が開発された。ラジアルプレート方式は導体周囲の絶縁物に働く応力を軽減するために開発され、現在の原型炉TFコイルでも主案とされているが、製造コストが高いことから、原型炉においては製造コスト低減方法や代替方式の検討が続いている。原型炉の超伝導コイルの巻線・組立技術はITERの経験が基盤となると考えられるが、ITERよりも大きくなるため製造設備は新たに開発・整備する必要がある。また、ITERで開発された技術を継続して発展させるため、途切れないように開発を進めることに配慮が必要である。

2. 超伝導導体の開発課題

原型炉用超伝導導体には、高磁場における高い臨界電流密度(J_c)かつ大電流に加えて、熱サイクルと電磁力による臨界電流(I_c)の低下が少ないことが求められる。また、ITER用と同様に、高い冷却安定性、Nb₃Snと同等の耐放射線性と放射化、長尺線材(kmクラス)、低コスト、量産性なども求められる。実用化段階の高磁場線材として、Nb₃Sn、Nb₃Al、ReBCOテープ線材が挙げられるが、ITERにおける実績を考慮するとNb₃Sn-CIC導体が候補である。CIC導体は、核融合装置用に開発された、大電流導体に適した撚り線構造である。交流損失が少ない、濡れ面積が広く冷却安定性が高い、高強度コンジットに収納されて機械強度が高いなどの利点を有するが、コンジットとの熱収縮差に起因する残留圧縮ひずみによる I_c 低下が欠点である。

ITERでは、全てにCIC導体が採用され、CSコイルに13.0 T、40 kAの厚肉ジャケット導体のパンケーキ巻線、TFコイルに11.8 T、68 kAの薄肉ジャケット導体とラジアルプレート方式が採用された[1]。CSコイルとTFコイルにはNb₃Sn線材、トロイダル磁場(PF)コイルにはNbTi線材が採用され、R&Dの実施と企業間の競合により、特にNb₃Sn線材の性能向上と価格低減が進んだ。ITER工学設計活動の大型試作として1990年代に実施されたTFモデルコイルとCSモデルコイルにおいて、冷却と励磁の繰り返しでNb₃Sn線材の I_c 低下が明らかとなり、銅比、撚りピッチ、ポイド率の変更、素線 I_c の向上などの対策を実施し、最終的に短い撚りピッチの採用により要求値を満足することに成功した[2-4]。コンジットとの熱収縮差による高い圧縮ひずみの下に、熱サイクルと電磁力による曲げひずみが重畳されてNb₃Snの許容ひずみを超えることが原因と考えられているが、定量的な評価手法は確立していない[5-8]。2019年度の原型炉概念設計におけるTFコイルの最大経験磁場と導体電流値は13.7 T(現在の設計値は13.9 T)、83 kAに設定さ

れており[9], 導体電磁力も素線本数も ITER の 1.5 倍になるため, ITER と同じ設計思想を採用する場合においても導体試験による確認が必須である。

3. 低温構造材料と絶縁材の開発課題

コイルの高磁場・大型化には, 構造材の厚さと強度の増大に加えて, 導体や絶縁材の高強度化も必要である。ITER-TF では 600 MPa の最大膜応力に対して 0.2% 耐力が 1,000 MPa のステンレス鋼が開発された[10]。ITER-TF コイル重量の 90% は構造材が占めており, 軽量化のためにも高強度材の開発が必要である。

ITER の TF コイルにおいて高応力部の構造材に JJ1 が採用されており, 極低温での 0.2% 耐力が平均で 1200 MPa, 仕様値(保証値)として 1000 MPa が達成されている[11]。一般に鉄鋼材の開発には相当の期間と費用が必要で, 強度向上は容易ではないと考えられるが, ITER 以上の高磁場を発生させるのであれば, 更なる高耐力の構造材(例えば仕様値として 0.2% 耐力が 1200 MPa 程度)が望まれる。ITER 用に量産された JJ1 の特性の分散を評価して, 原型炉への適用性を評価すると同時に, 新たな候補材の開発を基本設計の段階で行う必要がある。また, 原型炉の TF コイルは ITER よりも大型となることから, 厚板構造物の生産技術や高精度加工・溶接技術を発展させる必要がある。

原型炉の超伝導コイルに働く電磁力はさらに強大となることから, 絶縁材の高強度化または応力低減構造の開発が必要である。また, 放射線遮蔽に対する要求を軽減するため, 耐放射線特性に優れた絶縁材の開発を並行して行う必要がある。強磁場・大型超伝導コイルの巻線技術は, 核融合分野に特有な高度な技術であるため, 継続的な技術開発に加えて技術伝承にも配慮が必要である。

4. 原型炉用超伝導コイルの開発方針

原型炉用超伝導コイルの現状の候補導体は, 実績とコストの両面から, PF コイルが NbTi-CIC 導体, TF コイルと CS コイルが Nb₃Sn-CIC 導体と判断される。原型炉超伝導コイルに向けて特に重要な開発課題は(1)導体の高磁場化・高 J_c 化と(2)巻線構造・冷却構造・支持構造の高強度化である。ITER 建設で開発された技術をさらに発展させる必要があるため, 人材育成や技術の伝承・発展に考慮した具体的な開発計画を速やかに策定し, 着実に実施していく必要がある。

2019 年度の原型炉概念設計の TF コイルには Nb₃Sn-CIC 導体が採用されており, この要求 I_c 値を ITER の CS コイル用に開発された Nb₃Sn 線材で

満足するためには, 使用状態のひずみを ITER と同程度の 0.6% 以下に収める必要がある。ケーブル本数も電磁力も ITER の 1.5 倍程度に増大する原型炉において, ITER の短い撚りピッチ対策が, 導体の製作性を含めて十分に有効かどうか極めて重要であり, 電磁力影響が大きい場合は原型炉の基本パラメータの見直しも必要となるため, 工学設計に移行する前に(2025 年頃までに)実規模の導体試作と性能確認試験を実施すべきである。また, 原型炉の基本寸法を決定づける TF コイル構造物の許容応力は, ITER の 1.2 倍を想定しており, 絶縁材料を含めて既存材料の改良や代替材料の開発が必須である。材料開発には時間が必要であり, その開発成果次第では炉の基本構造を見直す必要もあるため, 工学設計に移行する前までに材料仕様を決定できるまでの進展が必要である。

コスト低減とケーブル横剛性向上に I_c 改善が有効であることから, Nb₃Sn 素線の性能向上や熱収縮差を軽減する低熱収縮ジャケット材の適用などの研究開発を平行して進めるべきである。加速器用に高性能 Nb₃Sn 線材の開発が先行しているが, 核融合用には, 機械強度に優れ, 低コストの線材が必要であることから, 独自の開発プログラムが必要である。超伝導コイル性能の確認のためには, 実規模サイズのモデルコイルによる実証が必須であり, モデルコイルの製作および冷却システムや電源システムの設計製作は大型超伝導技術の伝承・発展において重要である。その製作と試験実施に 5 年程度を要することから, その結果を実機設計に反映させるためには実機製作開始より 10 年程度前から製作に着手することが望ましい。それまでに, 導体, 構造材料, および, 絶縁材料の開発を量産性実証の段階まで完了しておく必要がある。

引用文献

- [1] N. Mitchell *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **22**, 4200809 (2012).
- [2] N. Mitchell, Fusion Eng. Des. **66-68**, 971 (2003).
- [3] A. Devred *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **27**, 044001 (2014).
- [4] 名原 *et al.*, 低温工学 **51**, 102 (2016).
- [5] N. Mitchell, Cryogenics, **45**, 501 (2005).
- [6] D. Bessette, IEEE Trans. Appl. Supercond. **24**, 4200505 (2014).
- [7] M. Breschi, D. Macioce and A. Devred, Supercond. Sci. Technol. **30**, 055007 (2017).
- [8] N. Mitchell, M. Breschi and V. Tronza, Supercond. Sci. Technol. **33**, 054007 (2020).
- [9] K. Tobita *et al.*, Journal of Physics: Conf. Series **1293** 012078 (2019).
- [10] 濱田, J. Plasma Fusion Res. **83**, 33 (2007).
- [11] 櫻井, 井口, 中平, 低温工学 **54**, 459 (2019).