

小特集

磁場閉じ込め核融合炉に向けた超伝導マグネット材料工学

Superconducting Magnet Technologies for Magnetic Confinement Nuclear Fusion Reactor

1. はじめに

西村 新, 妹尾和威

核融合科学研究所

(原稿受付: 2006年7月27日)

磁場閉じ込め核融合炉のキーコンポーネントである超伝導マグネットにおける材料工学について, 過去および最近の研究動向を紹介する. 近く建設が開始される ITER, あるいは将来の核融合炉において要求される材料特性について言及し, 研究課題を要約する.

Keywords:

fusion reactor, superconducting magnet, electromagnetic force

大型ヘリカル装置の完成後10数年の期間をあけて中国で EAST が First Plasma を点火した. EAST はトカマク型プラズマ実験装置としては世界で始めて TF コイル, PF コイル, CS コイル, すべてのコイルを超伝導化したものである. 韓国の KSTAR, インドの SST-1 計画もそれぞれ建設が進められている. ITER は 7 極の正式調印が終わり, いよいよ ITER 機構が動き始めた. 約10年後には燃焼持続時間400秒, 核融合出力 500 MW のプラズマが創出される. 大型超伝導マグネットシステムは, 超伝導コイル最大経験磁場 13 T, コイル電流 68 kA など[1]の性能を有しており, 将来の核融合発電炉に近づくパラメータを有する実験炉である.

核融合炉の性能は, 磁場の強さや装置サイズ等に依存する. トカマク型のプラズマ閉じ込め時間 τ_E は, 例えば ITER93H 則によるスケージングにより式(1)で表される[1]. 式中, τ_E : エネルギー閉じ込め時間[s], I_p : プラズマ電流[MA], B : 磁場[T], P : 加熱パワー[MW], M : 質量[amu (atomic mass unit)], R : 大半径[m], n_e : 電子密度[$10^{19}/\text{m}^3$], ϵ : 小半径/大半径, κ : 楕円率である. τ_E に影響を及ぼす装置パラメータは, 大半径が最も効果が大きく, 次に磁場の順となる.

$$\tau_{E,th,ELMy} = 0.031 I_p^{1.06} B^{0.32} P^{-0.67} M^{0.41} R^{1.79} n_e^{0.17} \epsilon^{-0.11} \kappa^{0.6} \quad (1)$$

さて, 磁場を一定として装置の大きさを2倍にした場

合, 2倍の通電電流が必要である. 電磁力は 2^2 倍になる. したがって, τ_E の優れた装置ほど, 高磁場かつ大電磁力となる. 発生するコイル電圧について見ると, 装置(コイル)サイズが2倍になればインダクタンスは2倍になり, 磁気エネルギーは 2^3 倍になる. 遮断時にはこのエネルギーをある時間内で外部保護抵抗にダンプする必要がある. 局所的な常伝導転移が起こればその場所にコイルの持つエネルギーが集中し, コイルが損傷することさえも考えられる. 保護抵抗へのダンプ時間を同一にするためには, 遮断時のコイル電圧は 2^2 倍になる. このように, 大型・高磁場化を達成していくためには, 他の超伝導応用分野にはない厳しい課題を克服してゆかなければならない. さらに, これらに加えて核融合特有の負荷である中性子あるいはガンマ線照射があり, 各種材料の特性劣化が生じる.

ITER 超伝導マグネットに必要とされるパラメータは以下のとおりである. 最大磁場: 13 T, 導体単位長さあたりの最大電磁力: 約80 トン/m (11.8 T × 68 kA), 構造材料の耐力: 1,000 MPa 以上, 遮断時電圧: 10 kV 以上, コイル絶縁体における照射線量 (radiation dose) の上限: 10 MGy, 中性子フルーエンス: 10^{22} 個/ m^2 , 導体内の核発熱: 1 kW/ m^3 , 構造物内の核発熱: 2 kW/ m^3 等である. 将来, ITER の設計条件より厳しい条件で20年以上稼働できる核融合炉を設計するとき, 各種の材料が最も大切な項目であることが推察される[2].

次に, ITER TF コイルの設計例をもとに, 核融合用大型

超伝導マグネットを構成する各種材料の占積率および特徴を述べる。

図1はITER-TFコイルの断面に占める各種材料の割合を表したものである。最大80トン/m²×134ターン分の電磁力を支持するために、断面に占める構造材料の割合は最も高くなる。電気絶縁材料は、コイル電流遮断時の高電圧に耐えるように、ガラスクロス／ポリイミドフィルム／ガラスクロス絶縁で構成される。耐放射線性に優れたポリイミドフィルムが機械的に破壊しないように、ガラスクロスで挟んだ構造が採用されている。コンジット (Conduit) は、その内部に超伝導素線を有し、超伝導素線を強制冷却するための管路である。また、これにより超伝導熱線ケーブル同士は力学的に絶縁され、隣接する導体からの電磁力を超伝導素線が受けることはない。強制冷却冷媒は超臨界圧ヘリウム (SHe) である。SHeは固体の約千倍の比熱を有することから、パルス通電における過渡温度上昇および放射線熱負荷による温度上昇を抑制する働きがある。超伝導ケーブルは約1,000本の超伝導素線で構成され、素線は主に超伝導材料と安定化銅の複合体である。高磁場 (TF, CS コイル) 導体ではNb₃Sn化合物、低磁場 (PF コイル) 導体ではNbTi合金が用いられる。安定化銅は超伝導材料に比べて約1.5倍の体積があり、常伝導転移時の電流バイパス回路の役割を果たす。安定化銅を配置することによって、超伝導破壊時のコイルの温度上昇を150 K程度に抑制すること

ができる。そして、超伝導コイルの焼損あるいは局所温度上昇による機械的な破損を防止できる。

図1に示したように、核融合炉用大型超伝導マグネットにおいては、通常の超伝導機器と比較にならないほど構造材料比率が大きい。そのため、電流通電に必要な超伝導材料の占める割合は非常に小さい。現在のITER用マグネット設計では、これら構成材料比率は種々検討され、ほぼ最適比率になっていると考えられる。表1に核融合炉の概念設計例を示す[2-5]。核融合発電炉、DEMOあるいはFFHR (Force Free Helical Reactor) を展望する時、超伝導マグネットへの要求はさらに厳しくなる。ITERとDEMOの比較をすると、DEMOでは最大磁場15 T、通電電流100 kA程度が必要とされ[6]、その結果、導体の受ける電磁力は80トン/m²から150トン/m²に増加する。遮断時電圧も15 kV以上になる。照射線量についてもさらに増加することが容易に予想される。このように、将来の核融合発電炉設計においては、ITER以上の電磁力、電流遮断時の耐電圧、放射線量が見込まれ、より大きな構造材料比率、絶縁材料比率が求められる。超伝導材料の比率は縮小されるにもかかわらず、超伝導ケーブルの通電電流は増加させなければならないというジレンマがある。

本小特集においては、このような現状を踏まえて、ITERおよび将来の核融合発電炉のための大型超伝導マグネット材料の現状と将来展望について議論する。現状のマグネッ

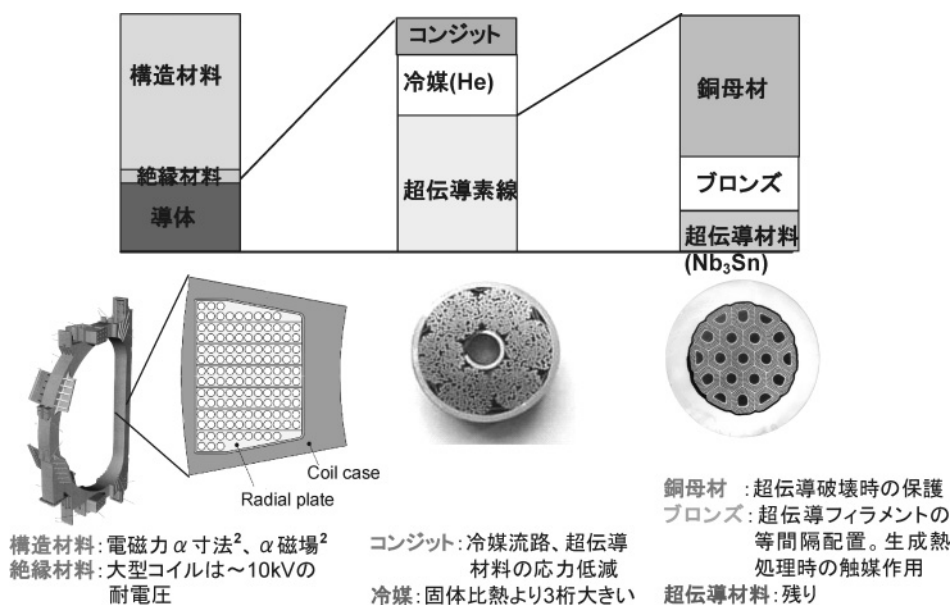


図1 ITER-TF コイル断面における各構成要素の占積率と役割・機能。

表1 核融合炉の概念設計例。

	ITER	SSTR	VECTOR	DEMO(Low-A)	DEMO(EU)	ARIES-A	FFHR-2m1	FFHR-2m2	HSR4/18
R_p [m]	6.2	7	3.2	5.5	9.1	6.75	14	16	18
a [m]	2	1.7	1.4	2.3	3.03	1.8	3.22	4.33	2
B_{max} [T]	13	16.5	19	15.7	13.6		13.3	13	10
B_T [T]	5.3	9	5	5.1	6.8	11.3	6.18	4.43	5
I_p [MA]	15	12	14	18.3	29.2	10.2	—	—	—
P_{fus} [GW]	0.5	3	2.5	3.1	4	2.56	1.9	3	3

ト設計や入手可能な材料を紹介し、併せてDEMOあるいは発電炉用の将来材料およびそれらの研究、開発のポイントを展望する。章立ては、構造材料、電気絶縁材料、超伝導材料と導体、そして中性子照射の影響で構成されている。以下に、各章の論点について述べる。

第2章の構造材料では、高強度、高破壊靱性の構造材料について述べる。日本原子力研究開発機構では、日本原子力研究所の時代から構造材料が重要であると位置づけ、1982年から長期的な材料開発を行ってきた[2]。目標として、(1)0.2% 耐力；1,200 MPa 以上、(2)破壊靱性 K_{Ic} ；200 MPa $\sqrt{m}$ 以上、(3)疲労強度、(4)耐食性、(5)加工性(切削性、溶接性)が設定された。歴史的な経緯や現在取り組んでいる課題、今後の開発課題について言及する。

第3章の電気絶縁材料では、電気絶縁特性の劣化の基本的な機構を考察し、耐放射線性をも考慮した材料開発の最新の成果について触れる。10 kV 以上の耐電圧を実現するためには、電磁力や冷却による熱ひずみで壊れない、あるいは微小き裂が形成されない材料が必要である。極低温下では、有機材料は脆弱になっており、き裂を生じやすくなっている。本章では、このような過酷な使用条件に耐え得る極低温電気絶縁材料の、材料設計の特徴について議論する。

第4章では超伝導材料および導体構造について述べる。大空間に磁場 10 T 以上を発生させ得る材料としては、現在のところ、金属間化合物系超伝導材料 (Nb_3Sn および Nb_3Al)に限られる。これらは優れた高磁場特性を有する反面、生成時に 700°C 程度の熱処理が必要であること、および機械的なひずみに対して特性が劣化するという性質を有している。これら超伝導素線の現状および将来展望について述べる。また、将来の発電炉のためには、高温超伝導材料に期待するところが大きい。高温超伝導材料の低温(約 20 K)、高磁場応用への可能性について言及する。さらに、巨大な電磁力を支えながら強磁場中で大電流を流し続ける超伝導導体について解説する。現在の超伝導導体は、前述の超伝導素線を撚り合わせたケーブル導体である。ITER-EDA において強大な電磁力による超伝導特性の劣化が報告されており[7]、その現象の解説と対策の方向性について述べる。

第5章では放射線照射の影響について述べる。核融合炉用超伝導マグネットでは、構造材料、絶縁材料、超伝導材料の共通の課題として、放射線(中性子、 γ 線)による照射劣化および放射化がある。電気絶縁材料では機械的強度の低下が起こる。超伝導材料については臨界電流や臨界温度が変化する。また、極低温における中性子照射により安定化材である銅やアルミニウムの電気抵抗率が増加する。将来の発電炉においては、超伝導マグネットシステムの冷却重量は 1 万トンを超える。したがって、材料の再利用あるいはメンテナンスの観点から、低放射化材料が適用されることが望ましい。低放射化材料研究の必要性、現状などを紹介し、材料開発指針についても触れる。

まとめとして、まず、将来の核融合炉用大型超伝導マグネットに用いられる材料に要求される諸特性、特徴を取りまとめる。そして、それらの材料研究に関連する研究の方向性について述べる。

核融合炉用の超伝導マグネット材料に関しては、他分野との研究連携はもとより、核融合炉工学分野において独自の材料開発研究が必要とされるものが多い。ITER あるいはそれ以降の装置に要求される材料には、核融合以外の超伝導マグネットシステムではそれほど必要とされない、非常に特化された、高性能なものや、同時に厳しい環境で使用されるものもある。核融合炉工学に携わる研究者が、主導的にこれらの材料開発研究を推し進めていかななくてはならない。

参考文献

- [1] プラズマ・核融合学会誌 73 Supplement, 21 (2002).
- [2] F. Najmabadi and the ARIES team, Fusion Eng. Des. 80, 3 (2005).
- [3] C.D. Beidler, E. Harmeyer, F. Herrnegger, Yu. Igitkhanov, A. Kendl *et al.*, Nucl. Fusion 41, 1759 (2001).
- [4] 菊池 満, 関 泰, 本島 修: プラズマ・核融合学会誌 70, 591 (1994).
- [5] A. Sagara, O. Mitarai, S. Imagawa *et al.*, Fusion Eng. Des. 81, 2703 (2006).
- [6] K. Okuno, A. Shikov and N. Koizumi, J. Nucl. Mater. 329-333, 141 (2004); 奥野 清: 核融合基本問題検討会資料
- [7] N. Mitchell, Fusion Eng. Des. 66-68, 971 (2003).