



核融合炉に用いられる 構造材料

夢のエネルギーとされてきた核融合の実現を目指す動きが活発化している。建設が進む国際熱核融合実験炉 (ITER)に加え、スタートアップ企業による研究開発も進んでいる。核融合炉のシステムと、それに使われる構造材料に求められる特性や今後の課題について紹介する。

建設中の国際熱核融合実験炉 (ITER)。画面左に見えるD型の巨大な構造物 (トロイダル磁場コイル) を据え付けている様子。画面中央の柱状構造物は中心ソレノイド。

画像提供: ITER Organization

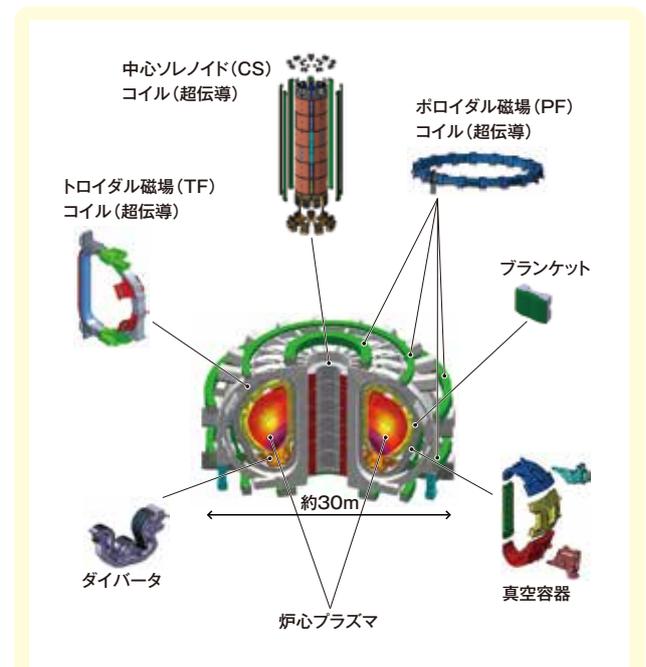
建設が進むITER

現在、フランス南部のサン=ポール=レ=デュランスで国際熱核融合実験炉 (ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor)の建設が進められている。2025年の運転開始を目指し (2016年6月ITER理事会で決定)、日本・欧州・米国・ロシア・韓国・中国・インドの7極が参加している。ITERでは、磁場でプラズマを閉じ込めるトカマク方式が採用されている。プラズマとは、電子とイオンがそれぞれ独立して運動している状態で、自然界では太陽のほかに、オーロラ、雷などで見られる。

ITERは、核融合反応を起こす炉心プラズマ、真空容器、プラズマ閉じ込めのための強磁場を発生する超伝導コイル、プラズマからの熱・粒子負荷を受けるダイバータ、中性子のエネルギーを遮蔽し、熱に変え、トリチウムを生産するブランケットなどから構成される (図1)。

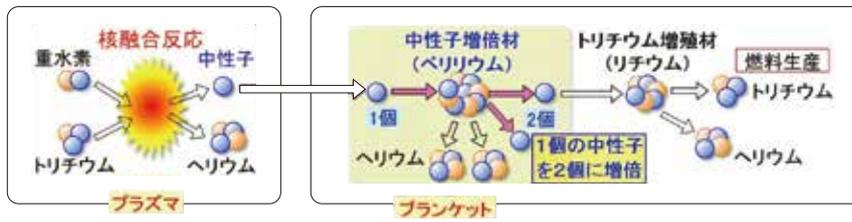
核融合反応を起こすために、ITERのプラズマは密度 10^{20} 個 m^{-3} 、温度9000万℃、閉じ込め時間3.7 sを実現する必要がある。これに必要な磁場はプラズマ中心で5.3 Tとされ、ドーナツ形状の断面を囲むように配置されるプラズマ閉じ込めのための磁場を作るトロイダル磁場 (TF) コイル、プラズマ電流を誘起するための磁束変動を与えた

り、プラズマの位置を制御する役割を持つ、ドーナツ周方向に並行に配置されるポロイダル磁場 (PF) コイル、およ



量子科学技術研究開発機構の資料を基に作成

図1 ITERの基本構造の模式図



発生エネルギーの約80%をもつ高速中性子はプラズマと相互作用せずにブランケット内部に侵入し、熱エネルギーやトリチウム生産に利用される。 α 粒子(ヘリウムイオン)はプラズマの温度を上げ、反応を開始・維持するために使用される。

図2 重水素-三重水素(DT)核融合反応

画像提供：量子科学技術研究開発機構

びドーナツ形状の中央の穴に配置される中心ソレノイド(CS)の3種類の超伝導コイルが設置されている。

核融合反応に耐える構造材料とは

太陽での核融合反応では、4つの水素からHeを生成する反応が進んでいるが、その条件は1500万℃、鉄の20倍の密度が必要で地上での実現は難しい。水素の核融合反応にはそのほかに、重水素(D)と三重水素(トリチウム、T)のDT反応、Dとヘリウム3(^3He)のD ^3He 反応、DとDのDD反応が挙げられる。

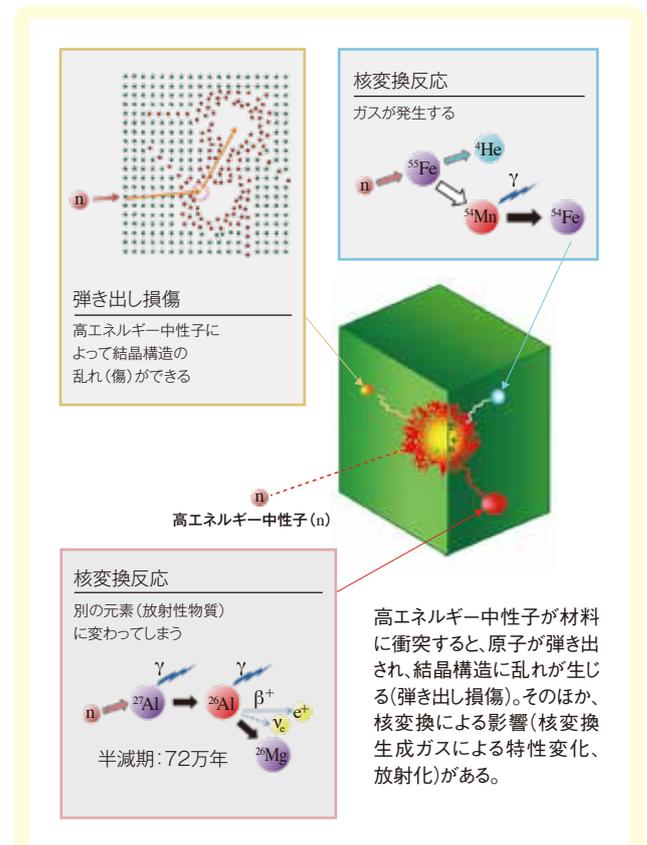
DT反応は、相対的に低いエネルギーで最も高い核融合係数(核融合反応の起こりやすさ)を持つ。DT反応に用いられる重水素は、海水からほぼ無尽蔵に回収できるが、トリチウムは自然界にはほとんど存在していない。そのため、核融合で発生した中性子を、中性子増倍材(ベリリウムなど)に当てて、中性子の量を増やし、その中性子とトリチウム増殖材(リチウムなど)の反応により、トリチウムを生産する必要がある(図2)。リチウムは将来的に海水から回収することが想定されており、重水素とともにほぼ無尽蔵といえる資源である。D ^3He 反応は効率がよく、廃棄物が少ないことから「理想の核融合」とも呼ばれるが、現在の技術で実現可能なイオン温度での核融合係数は小さく、また、 ^3He は地球上にはほとんど存在しないため、月などで採取する必要がある。DD反応は燃料が自然界に豊富に存在するが、核融合係数が小さいため、現在の技術での実現は難しい。このため、ITERではDT反応による核融合が行われている。

1gの燃料から石油約8t相当のエネルギーを取り出すことが可能な核融合炉では、従来の核分裂炉(原子炉)と比較して、構造材料は非常に高いエネルギーの中性子束に曝されることになる。そのため、中性子により材料中の格子原子が弾き出され、原子配列などの構造が変化する弾き出し損傷を受ける。さらに、核変換生成物であるヘリ

ウムや水素などのガス原子が材料中に多量に生成されることによる材料特性劣化が懸念されている(図3)。

たとえば、核変換ヘリウムは材料中の空洞、結晶粒界などに偏在し、空洞の内圧を上昇させ、体積膨張(ポイドスエリング)を促進したり、粒界強度の低下、粒界ヘリウム脆化などを引き起こす。そのほかにも、核変換反応によりタングステンから生成するレニウムやオスミウムなどの材料への影響を検討する必要がある。

中性子照射のほかにも、プラズマイオンがプラズマ対向壁(プラズマに対向する面)に衝突することで発生する



量子科学技術研究開発機構の資料を基に作成

図3 核融合反応が材料に与える影響

壁材料原子の弾き出し(物理スパッタリング)なども考慮する必要があり、核融合炉に使用する材料には、高温・高密度炉心プラズマに与える影響が制御可能な範囲であることや、ブランケットやダイバータを交換するまでの数年間の運転期間に壁が損耗・破壊されないこと、放射化やトリチウム吸蔵が問題にならないことなどの特性が求められる。

ITERで使用される鉄鋼材料

ITERで鉄鋼材料が使用される主な構成要素として、真空容器、超伝導コイルケース、ダイバータ、ブランケット(テストブランケットモジュール)が挙げられる。

真空容器ではSS316L(N)-IGが採用されている。これは原子力グレード(N)をベースとして、さらに厳しい要件を満足するITERグレード(IG)のSS316Lである。

超伝導コイルケース用部材には、SS316LNとJJ1が採用されている。SS316LNはSS316Lに窒素添加した一般的に用いられている鋼種である。JJ1は強度と靱性の向上のため高窒素添加、低炭素化、高Mo添加された高Mn系ステンレス鋼である。

ITERで使用される超伝導体は Nb_3Sn で、通常、約4 Kに冷却される。このため超伝導コイルケースには、4 Kでも靱性に優れ、かつ約6万 tもの電磁力に耐えられる高強度材が必要である。具体的には、4.2 Kで1200 MPa以上の0.2%耐力、200 MPa $m^{1/2}$ 以上の破壊靱性値 K_{IC} が目標値として設定されている。

超伝導コイルのうち、TFコイルはドーナツの周方向に18基設置される、高さ16.5 m、幅9 m、質量310 tの巨大な構造物である。TFコイルへ加わる電磁力に対抗するため、巻線部はステンレス製大型構造物と一体化されている。また、プラズマを閉じ込めるための高い磁場精度が要求されるため、電流中心線の誤差は数ミリオーダーでの組み立て精度が要求される。

DT核融合反応が起こると α 粒子(ヘリウムイオン)が生成する。これに加えて、真空容器から少量の不純物がプラズマ内に侵入するが、これらがプラズマ内に蓄積するとプラズマの出力低下を引き起こす。そのため、プラズマからこれらの不純物を排出するのがダイバータの役割である。

ダイバータに使用される鋼材、XM-19はオーステナイト鋼のSS316/SS316Lなどと比較してマンガン、窒素が多く含まれる、強度を向上させた鋼種である。

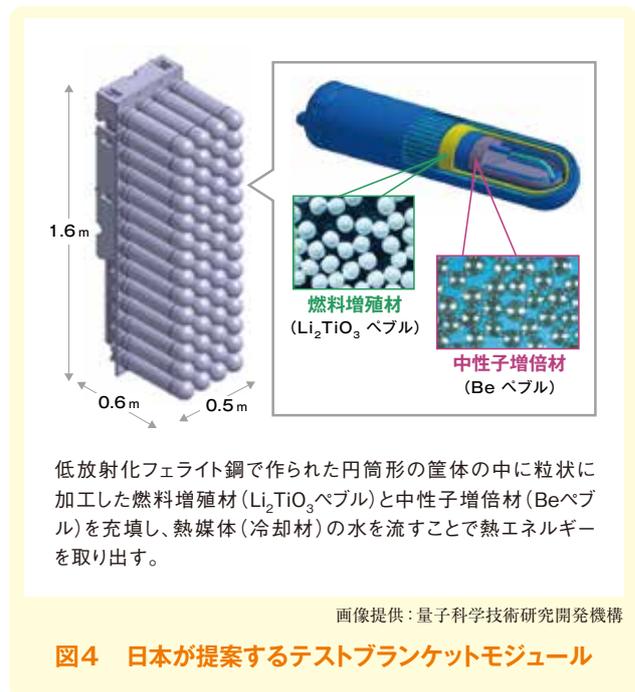


図4 日本が提案するテストブランケットモジュール

ITERにおけるブランケットの役割

ブランケットは、プラズマからの中性子を受け止め、エネルギーを熱媒体に与えるエネルギー変換を行い、燃料となるトリチウムを生産する、核融合炉でも重要な構成要素である。ただし、ITERに取り付けられるブランケットは、水で冷却されたステンレス鋼ブロックで構成されており、主な機能は炉心プラズマからの中性子の遮蔽で、トリチウムの増殖機能や発電機能は持っていない。トリチウムの増殖や発電は、テストブランケットモジュールと呼ばれる大型の冷蔵庫程度の大きさのブランケットで行われる計画である。

日本が提案しているテストブランケットモジュールは、水冷却固体増殖方式テストブランケットで、構造材として低放射化フェライト鋼F82Hを使用する計画である(図4)。

低放射化とは、材料中に含まれる元素のうち、中性子の照射によって核変換され、長寿命の放射性核種となる元素を、核変換しても短寿命の放射性核種となる元素に置き換えることにより、中性子照射された材料の放射化の度合いを低下させることで、放射性廃棄物の量を低減することが目的である。

低放射化フェライト鋼F82Hは、Fe-Cr-CにWなどの低放射化元素を加えて高温強度などを調整した日本で開発された低放射化フェライト鋼の一つで、代表的な組成はFe-8Cr-2W-0.2V-0.04Ta-0.1Cである。

実用化への鍵を握るブランケット開発

ITERにおける低放射化フェライト鋼を用いたテストブランケットモジュールから取り出せる熱は原子力発電並みの300℃程度が想定されている。しかし、より高温の熱を取り出すことができれば、発電効率は大幅に向上する。そのためにはより高温に耐えうるブランケット材料を使用する必要があり、現在、冷却材温度が700℃のバナジウム合金、1000℃のSiC複合材料などが研究されている。冷却材温度が1000℃になれば、水素生産も可能になり、さらに効率を上げることも可能となる(図5)。

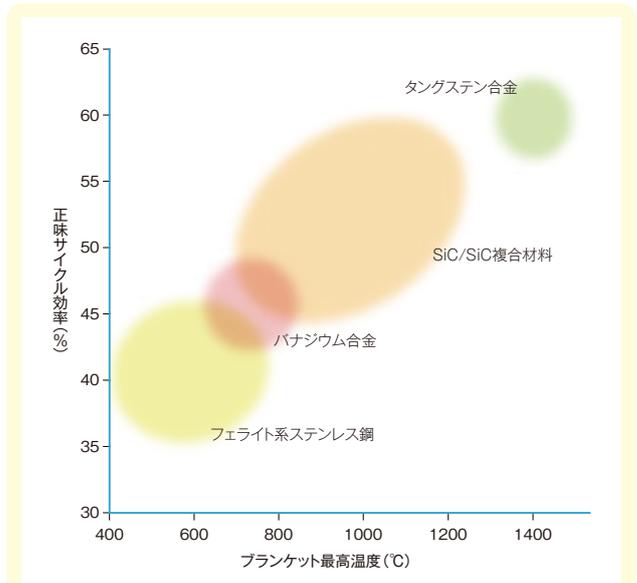
ITERの熱出力は500 MWだが、動力炉では出力3 GWが想定されている。出力や用途に応じたブランケットの開発が今後、重要になってくる。ITERに参加する各国に加え、商業核融合エネルギー開発のベンチャー企業の英トカマクエナジー社や、日本の京都フュージョンリアリング社、米ゼネラル・アトムクス社などでも、低放射化フェライト鋼に代わる材料の検討が行われている。

また、原型炉や動力炉で使用するためには、低放射化フェライト鋼にも解決すべき課題が少なくない。

たとえば、原型炉や動力炉で使用するためには、低放射化フェライト鋼を工業規模で製造・加工する必要があり、そのための技術の確立が今後の課題である。

接合技術の開発も課題の一つだ。低放射化フェライト鋼の溶接金属は、延性および靱性を調整するために溶接後熱処理(PWHT: Post Weld Heat Treatment)が必要になる。ブランケットは遠隔操作による炉内交換が予定されているため、設置・交換時のPWHTを省略できる接合技術が必要になる。さらに、低放射化フェライト鋼とステンレス鋼など、異材との接合技術も必要である。

人類が「地上の太陽」である核融合発電を実現し、利用するまでには解決すべき課題が数多く残されており、さらに研究段階を着実にクリアしていく必要がある(図6)。しかし、建設が進むITERに加え、試運転を開始した日本のJT-60SAをはじめとして、ベンチャー企業



加藤雄大: J. Plasma Fusion Res., 80(2004) 1, 12-13を基に作成

図5 ブランケットの温度と対応できる材料

も含めた各国での核融合開発は加速している。脱炭素の切り札としても核融合発電の一刻も早い実現に期待したい。

- 取材協力: 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構
大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所
- 取材・文 石田亮一



図6 核融合発電のロードマップ

出典: 文部科学省ホームページ 核融合研究 (https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/019.htm)