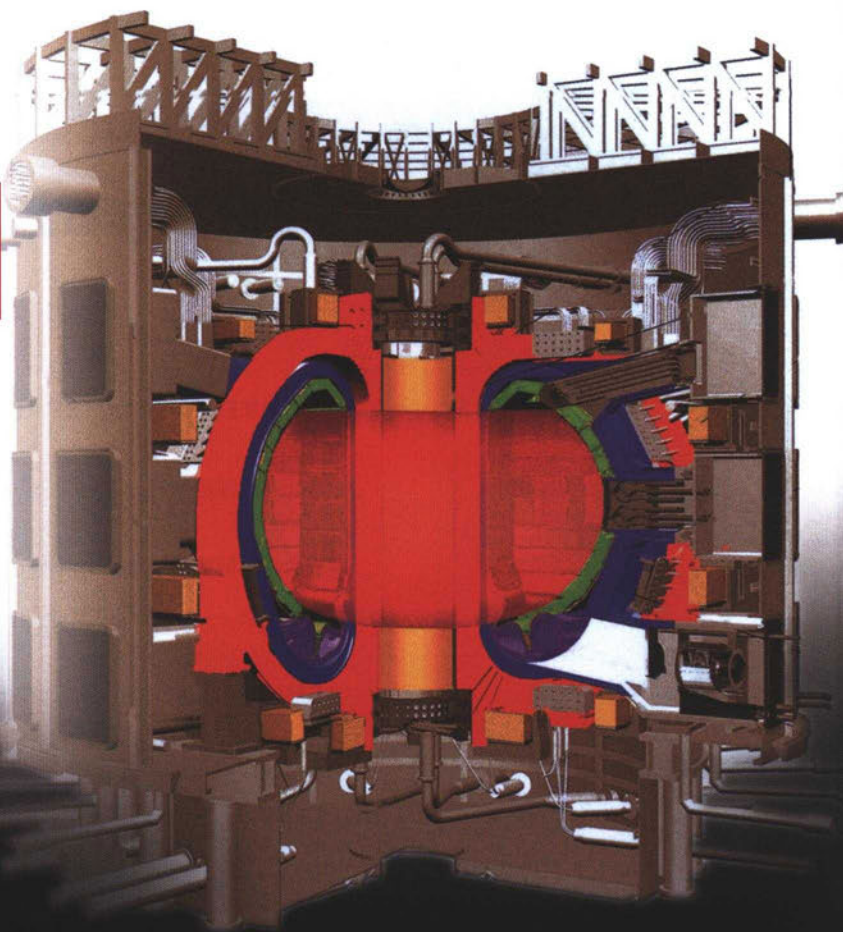


人類初の核融合実験炉 「ITER計画」

核融合エネルギーの利用を目指す国際プロジェクトのITER(イーター)計画が進行している。核融合エネルギーは、燃料資源が豊富、環境や安全性に優れている、などの理由から期待されてきたが、高温のプラズマを扱うなど技術的に未知の分野も多い。これまで日本は、核融合炉の構造材料や真空容器の研究で世界をリードして来た実績を持っている。今後、日本の研究成果がITER計画にどのように活用されるのか大いに注目される。

ITER (概念図)

主要諸元:核融合出力50万kW、プラズマ主半径(外側)6.2~6.5m、プラズマ副半径(内側)1.9~2.4m、プラズマ電流1300~1500万A(写真提供:ITER機構)



世界各国が参加する大型プロジェクトが始動

地中海に面した南フランスの港町、マルセイユ。ここから程近いカダラッシュという町で、現在、国際プロジェクトが進行中である。

ITER(イーター:ラテン語で道、旅の意味)とは国際熱核融合実験炉のことである。ITER計画は、核融合実験炉の建設・運転を通じて平和利用のための核融合エネルギーの科学のおよび技術的な実現可能性を実証することを目指す国際共同プロジェクトであり、日本、EU、ロシア、米国、韓国、中国、インドが参加している。

1985年の米ソ首脳会談をきっかけに始まったプロジェクトは、概念設計活動(1988~90)、工学設計活動(1992~2001)を経て、2001年7月に最終設計報告書がまとめられ、建設に必要な技術的準備が完了した。その後国際チームにより、日本およびドイツで実験炉建設のための研究が継続されてきた。2007年10月、実験炉の建設と運転を主導するITER国際核融合エネルギー機構が設置され、南フランスのカダラッシュで実験炉の建設が開始された。

ITER計画が目指すのは、人類が初めて、地上で50万kWの核融合エネルギーを発生させることであり、核融合エネルギーの科学的・技術的成立性を実証するものである。総建設費は約5,000億円。今後、関係各国で建設、部品調達を分担し、2017年の実験炉の組立完了を目指す。

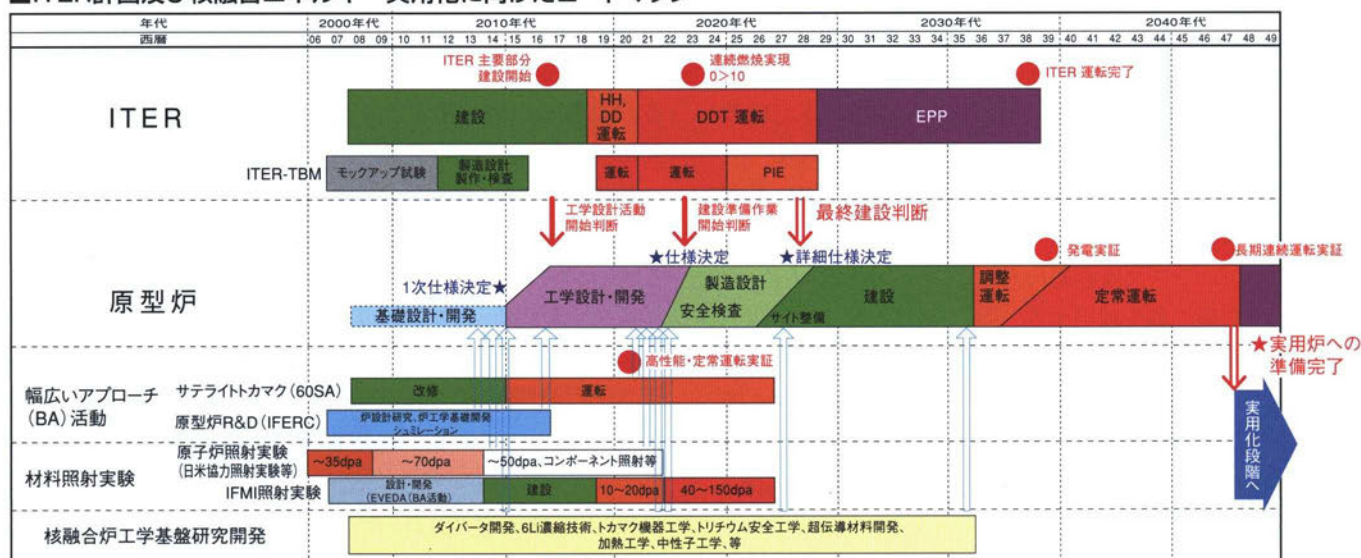


フランス・カダラッシュのITERサイト(2017年竣工予定)。ITERを中心に、世界各国から研究者が集まり最先端の核融合研究を行うことになる。(写真提供:ITER機構)

世界的な核融合エネルギー利用の研究は、1950年代から本格的に始まった。1970年代の石油危機を経て、化石資源を使用しないエネルギーへの期待が高まり、核融合エネルギー研究が急速に発展した。1980年代になると、米国のTFTR、EUのJET、日本のJT-60が建設された。この3つの実験装置により、超高温プラズマの特性を解明する科学的実証研究が大きく進展した。なお日本における核融合研究は、旧日本原子力研究所が中心となっており、長年進められてきたが、現在は日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)が引き継いでいる。

またITER計画と並行して国際プロジェクト「幅広いアプローチ(Broader Approach)計画」が実施されている。これは、日欧の各国が役割分担をしつつ、原型炉*に必要な開発を主導しよう

■ITER計画及び核融合エネルギー実用化に向けたロードマップ



核融合エネルギーフォーラム核融合開発ロードマップ等報告会(08.9.26)資料を元に作成

という計画であり、発電炉の設計、遠隔実験技術、計算機によるシミュレーション、強くて長寿命の材料など、幅広い技術開発が進められている。

ITER計画の意義は、わかりやすく言えば、これまでの研究成果を生かし、核融合燃焼が実現可能かどうかを実証する、ということである。しかしこれは最終目的ではなく、次の目的として、核融合エネルギーによって発生した熱を発電に利用することがある。そのためITERの建設および運転の後、次の段階として原型炉による発電を実証する必要がある。今後の予定では、ITERの建設に約10年、その後研究には約20年がかかると見込まれており、実用化はさらに先となる。世界的な国際プロジェクトとして進行している核融合エネルギー研究は、時間的にも今後数十年先までを見越した超大型プロジェクトなのである。

環境にやさしく、安全性の高い核融合エネルギー

核融合エネルギー利用の大きな特徴は、他のエネルギー源に比べ燃料が豊富であることである。核融合反応の燃料となる重水素は海水中に豊富に存在し(33g/m³)、また三重水素(トリチウム)は地球上に埋蔵量の多いリチウム(クラーク数27)から作り出すことができる。しかも重水素と三重水素の燃料1gで、石油8tに相当するエネルギーを発生することができる。

反応の過程ではヘリウムを排出するが、CO₂やNO_xを発生することはない。また排出する放射性廃棄物は低レベルで、従来技術で処理処分が可能である。さらに反応時の安全性が高く、事故時には燃料供給を停止すれば反応を速やかに停止することができる。このように環境負荷や安全性の点で優れた特徴を持っている。

ところで、核融合反応を起こすには重水素と三重水素の原子核同士を超高温プラズマにすることが不可欠である。これは電

核融合反応とは

核融合反応とは、軽い元素の原子核同士を融合させ、重い元素に変化させる反応である。核反応には、原子核が融合する「核融合」と、原子核が分裂する「核分裂」とがあるが、原子核の融合と分裂が起る反応であるため、化学反応に比べて格段に大きなエネルギーが発生する特徴がある。太陽や他の恒星のエネルギー源も、核融合によるものである。

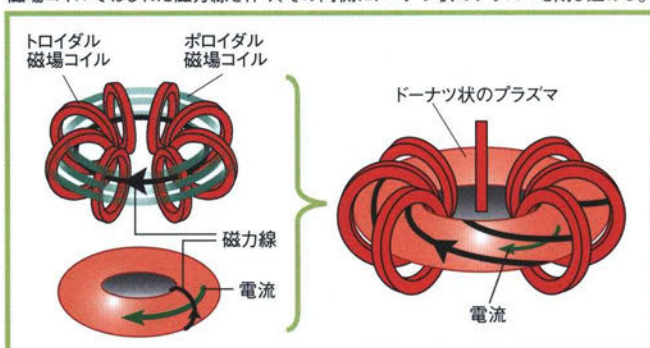
地上で核融合反応を起こそうとするには、重水素と三重水素(トリチウム)を融合させ、ヘリウムと中性子に変化させる反応を利用する。軽い原子同士を融合させ重い原子に変える時、質量が減少する分のエネルギーを発生するが、これが核融合エネルギーである。発生したエネルギーは、ヘリウム原子核や中性子の運動エネルギーの形で発生する。

核融合反応の仕組み



■トカマクの原理

磁場コイルでねじれた磁力線を作り、その内側にドーナツ状のプラズマを閉じ込める。



*原型炉:ITERの次段階に建設し、プラント規模での核融合発電を実証する炉。

子が自由に運動するようにして、原子核同士を近くに引き寄せる必要があるからだ。しかし、原子核は正の電荷を持っているので近づけると互いに反発する。この反発力(クーロン斥力)よりも強い力で原子核同士を近づけるためには、プラズマを1億℃以上という超高温にし、さらにこのプラズマを高密度で閉じ込め、熱の損失を抑えることが重要になる。

1億℃以上のプラズマは容器に入れることができないため、閉じ込めるために磁力線を利用する。電気を帯びた粒子には磁力線に巻きついて動く性質があり、この性質を利用し、電流を流すコイルを使ってねじれた磁力線を作り、ドーナツ状のプラズマを閉じ込める。

1980年代に建設された3つの実験装置は、磁力線による閉じ込め方式としてトカマク方式を採用しており、ITERもトカマク方式である。トカマク方式では、ドーナツ形のプラズマがらせん状にねじれた磁力線によって閉じ込められる。ITERでは、真空容器に巻きつくように、18本のトロイダル磁場コイル(1個約300t)が円周状に縦方向に配置され、ドーナツの中央にソレノイドコイル、外周にポロイダル磁場コイルが配置される。

核融合炉では、高温プラズマの熱の損失を抑え、外部から加えたエネルギー量より核融合で発生するエネルギー量が大きくなることが求められる。核融合出力をプラズマへの加熱入力で割ったものをエネルギー増倍率(Q)と呼び、その値が1になることを臨界プラズマ条件という。そして臨界プラズマ条件は、プラズマ温度、プラズマ密度、エネルギー閉じ込め時間の積によって表すことができる。JT-60では、1996年に臨界プラズマ条件を達成しており、1998年には世界最高の $Q=1.25$ のプラズマの生成に成功している。ちなみに、ITER計画の炉心プラズマ性能は $Q=10$ 以上(誘

導運転の場合)を目標としている。 $Q=10$ 以上になれば、重水素、三重水素を取り出すのに必要なエネルギーをまかなうことができる。また将来の定常運転では、 $Q=30\sim50$ 程度あれば十分だと考えられている。

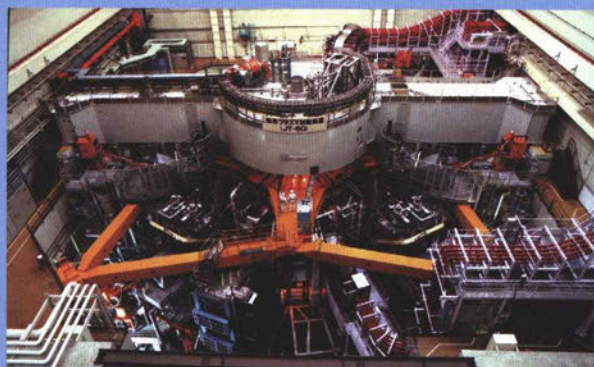
臨界プラズマ条件に達した後、もしプラズマの密度と閉じ込め時間との積が十分高ければ核融合反応の量が多くなり、発生する熱だけでその後も反応を持続することができる。このように、自分の燃焼エネルギーのみで燃焼が続く条件を自己点火条件という。

発電用ブランケットに適した低放射化フェライト鋼

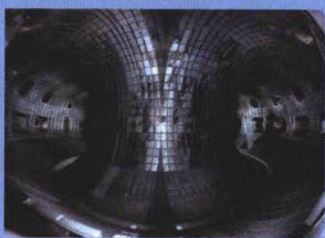
ITER計画によって、高温プラズマによる核融合燃焼の持続・制御の見通しが立ったら、次の段階では、そのエネルギーを出力し発電する装置が必要となる。核融合発電では、プラズマからのエネルギーを熱に代え、高温の水として取り出し、タービンを回して発電する。この際プラズマからの熱と高いエネルギーの中性子の入射を受けるのが「ブランケット第一壁」と呼ばれる壁である。ブランケットは、ドーナツ状の高温プラズマを包み込みプラズマを守る、まさに毛布の役割をする機器である。ITER計画では、この構造材料にオーステナイト系ステンレス鋼が使用されることになっている。

すでに原子力機構では、ITERの後の原型炉を想定して発電用ブランケットの開発を進めている。これは厚さ約50cmの壁であり、1個4tのブロック約400個で構成されている。発電用ブランケットの内部には冷却管が埋め込まれており、ここで核融合出力を熱に変えて取り出す。冷却材の出口温度は320～510℃に達する。発電用ブランケットの内部にはこのほか、三重水素の増殖材である Li_2TiO_3 、中性子増倍材であるベリリウムが配置され、それぞれの機能を発揮する。

■臨界プラズマ試験装置「JT-60」

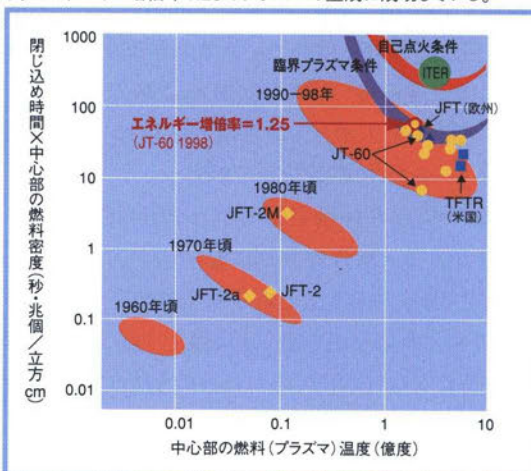


1985年から稼働している、世界三大トカマクの1つ。トカマク本体は、直径約15m、高さ13m、総重量5,000t。1996年にプラズマ温度5.2億℃を達成し、「世界でもっとも高い温度」としてギネスブックに掲載されている。右は真空容器の内部で、表面はグラファイトタイルで覆われている。



■炉心プラズマ性能の進歩(プラズマの閉じ込め性能の向上)

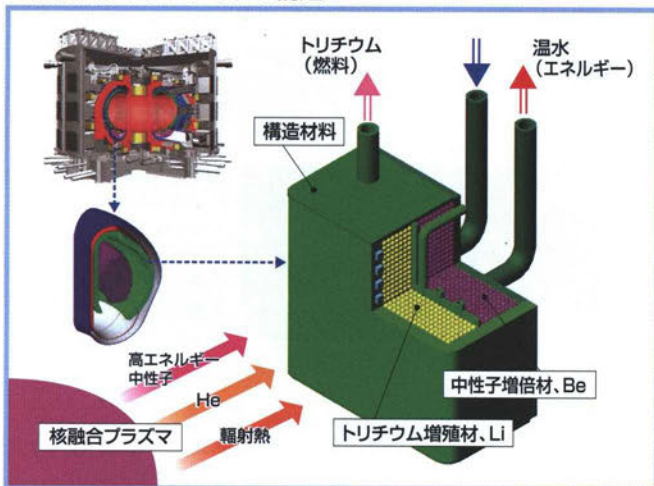
炉心プラズマ性能は、右上の臨界プラズマ条件、さらに自己点火条件の領域を目標に進歩してきた。1998年6月、原子力機構では、世界最高のエネルギー増倍率1.25のプラズマの生成に成功している。



発電用ブランケットの構造材料は、重水素と三重水素との核融合反応によって発生する14MeVの中性子の照射を受けるため、誘導放射能*1を可能な限り少なくすることが求められる。もちろん構造材料としての強度、延性、韌性や加工・接合性にすぐれ、放射線環境での耐久性に優れる(照射による特性変化が少ない)、強磁場に耐える、熱媒体等としての金属や冷却水に対する化学的安定性がある、などの特徴が求められる。上記のような要求特性を満足する構造材料として、現在、低放射化*2フェライト鋼が最も有望と考えられている。

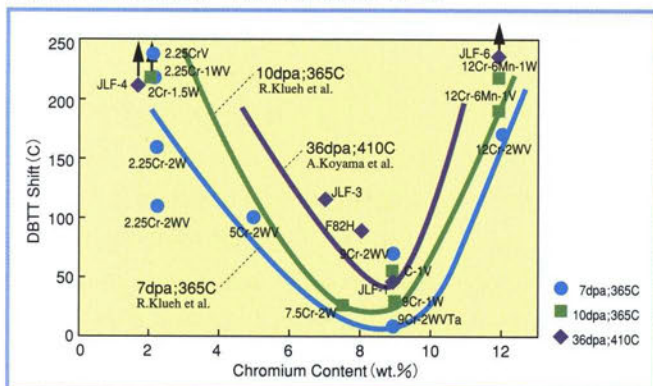
低放射化フェライト鋼とは、耐熱鋼をベースに、低放射化を図った鋼種であり、欧米や日本の研究機関、大学等で開発が行われてきた。代表的な鋼種であるF82H^{*3}では、低放射化、溶接性、高温クリープ特性、韌性を確保できるような成分となっている。このうち低放射化については、元素により利用の可否が決まるため、放射能減衰が速く、低放射化材料を構成できる元素である鉄、クロム、タングステンなどを利用することになる（本誌連携記事参照）。耐熱鋼などに使用されるニッケルやコバルトは使用できない。

■核融合炉ブランケットの構造



■低放射化フェライト鋼の照射脆化特性

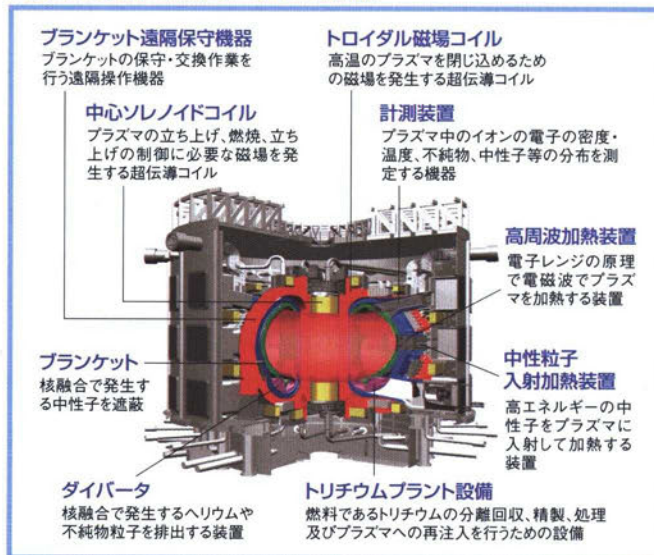
このグラフではDBTT(延性-脆性遷移温度)が低いほど、照射脆化特性に優れている。クロム量が7~9%で最も脆化しにくくなる。



出典: A. Kohyama, A. Hishinuma, D.S. Gelles, R.L. Klueh, W. Diets, K. Ehrlich, Low-activation ferritic and martensitic steels for fusion application, *Journal of Nuclear Materials*, 233-237(1996). 138-147

また、照射脆化という、中性子の照射により材料が脆くなる性質がある。この性質は、クロム量の変化に依存し、クロム量が7～9%で最も脆化しにくいことが明らかになっている。F82Hのクロム量はこの範囲内にあり、耐照射脆化特性でも他材料に比べて優れている。

■日本が製作を分担するITER機器



日本がリードする核融合工学研究

核融合研究は、機械工学、電気・電子工学、材料工学、熱工学、低温工学、化学工学、制御・計測工学、真空工学など、幅広い工学分野に支えられている。とくにITER実験炉の計画とともに、核融合炉を構成する機器の開発が大きく進展しその成果は他の分野にも波及している。

例えば核融合炉において高温プラズマを閉じ込めるために超伝導技術が不可欠だが、原子力機構では高磁界(13T以上)を発生できるニオブ・スズ超伝導線材の開発及び量産化に成功している。この技術を応用し高磁場、大口径の超伝導コイルを用いてシリコン単結晶の大型化、高品質化が図れ、新材料の創出に大きな役割を果たした。また核融合炉における真空技術の応用により、超清浄、超高真空を実現する真空機器及び分析装置の研究が進み、その結果はナノテクノロジーや環境分野の研究に大きく貢献してきた。

●核融合工学研究の波及効果例



シリコン単結晶引き上げ装置に
用いられた超伝導コイル



超高真空化で使用する 真空ポンプ

原型炉へ適用するための技術的課題

F82Hのほか、ブランケット構造材の候補として、低放射化フェライト鋼より高温強度に優れるバナジウム合金やSiC/SiC複合材への期待が高まっている。F82Hの使用温度の上限は550℃以下とされているのに対し、バナジウム合金は700℃以下、SiC/SiC複合材は1,100℃以下であり、高効率発電システムへの対応が期待できるからである。とはいえ、現在のところF82Hを始めとした低放射化フェライト鋼が最も有望視されているが、その理由はこれまでの実績にある。F82Hはすでに1980年代から研究されており、高温クリープ特性および靱性などについて、研究データも豊富に残されている。また鉄鋼材料であるため、工業的技術要素が豊富であり、強度、靱性、伝熱特性など、さまざまな特性にすぐれている。とくに大型構造物を構成する材料として加工や溶接における信頼性が高く、経済性の点からも優位である。

このような理由から、競合する鋼種の中で、実用レベルにあるのはF82HとEUの1鋼種のみと言われている。

今後の課題として、原型炉で使用する溶解規模(50~100t)における製作技術の実証が挙げられる。現在の予想では、2020年代後半に原型炉建設が開始されると見られるが、低放射化フェライト鋼の製作技術は今後10~20年以内に100tレベル、20~25年以内に1,000t以上レベルにまで高める必要があると言われている。しかし現在、国内では最高5tまでしか溶解できず、今後さらに大型製品の製造が必要となる。すでに原子力機構では、企業との協力により従来の耐熱鋼の製鋼技術の応用によって対応できる見通しを得ているという。ただし今後、50~100tの実用化規模で溶解するとなると話は別である。例えば高品質原料の確保、製鋼における不純物元素の調整、圧延・熱処理条件の最適化など、検討すべき課題は多く、今後はこのような点でも企業や大学とのより連携した研究が期待される。

照射実験や計算機科学を活用した材料開発

これまで日本は、高温プラズマの分野だけでなく、真空容器内機器の材料や構造設計などの核融合工学の分野においても世界をリードしてきた。代表的な例である低放射化フェライト鋼F82Hは、照射損傷に強い特性を持つことから、発電用ブランケットだけでなく、その他の装置にも使用されることが期待される。しかし、現在の研究成果だけで、そのまま原型炉へ適用するのは難しい。

原型炉実現に向け、核融合炉設計やさまざまな工学実証に役立てるため、ITER計画と並行して進められているのが、前述した「幅広いアプローチ計画」である。この中に日本の提案による国際核融合材料照射施設工学設計及び工学実証活動(IFMIF*)。

世界で初めて、試験用ブランケットの実規模モデル製作と実証試験に成功

2008年8月、原子力機構は、発電用ブランケットの第一壁の実規模モデルの製作と性能実証試験に世界で初めて成功したと発表した。このモデルは、今後、ITER実験炉の炉心で実施する性能試験を行うための、世界初のブランケット試験体である。

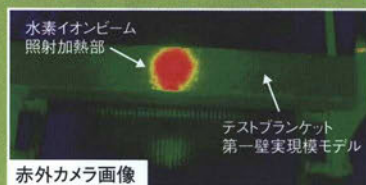
プラズマに直面する第一壁は、低放射化フェライト鋼製の多数の構造体からなる複雑で大きな構造のため、従来の溶融型の接手法では、残留歪みによる溶接変形が著しく、十分な精度が得られなかった。そこで、熱間等方圧加圧接合(HIP)法を適用し、熱処理工程を改良、加工精度の向上とHIP工程中の変形防止方法の工夫を施した。実機熱負荷条件下での熱耐久性試験に成功した。この成果は、ブランケットの国際的な技術開発競争において日本の優位性を明らかにしたものである。



第一壁断面



低放射化フェライト鋼製の発電用ブランケット第一壁のモデル。ITERと同じ熱負荷条件下で繰り返し加熱試験を行い、接合不良や破損による異常がないことを確認した。



●熱負荷試験条件
ビーム熱流束:0.5MW/m²
ビームパルス幅:30s
冷却水入口圧力:15MPa
冷却水入口温度:280℃
流速:2m/s

EVEDA)の技術実証活動の計画がある。現在、青森県六ヶ所村で、工学実証などを行う設備等の建設が進んでいる(2010年完成予定)。また今後、材料の照射損傷に関して、スーパーコンピュータを利用した計算機材料科学への期待も高まっている。

1949年、日本人初のノーベル賞(物理学賞)を受賞した湯川秀樹は、原子核の中の陽子と中性子を結びつける中間子の存在を予言し、その後の核融合研究に大きな影響を与えた。それから半世紀余がたち、2008年度には日本で育った3人の物理学者がノーベル物理学賞の栄誉を受けた。

日本で培われてきた先端科学へのチャレンジ精神は、現在の核融合研究にも脈々と受け継がれている。早くとも21世紀半ば以降に実用化が見込まれる核融合エネルギー利用。科学技術の高いハードルを超えるには、多くの研究者たちのチャレンジが不可欠である。

*IFMIF:国際核融合炉材料照射施設。照射実験による材料挙動の把握などの研究を行う加速器型中性子照射施設。六ヶ所村には実物の約2分の1サイズのIFMIF加速器が建設される。