

Just around the corner

動きだした ITER 計画

Nature Vol.436 (318-320) 7/21 July 2005

AFF/時事

核融合反応でエネルギーが得られるまで、あともう少しだ。物理学者たちは 50 年にわたってこういい続けてきた。その考えの正しさを証明すべく、ついに ITER 計画が実現に向けて始動した。だが、ITER の装置は本当に動くのだろうか。Geoff Brumfiel が取材した。

「ともかく、ほっとしている」。国際熱核融合実験炉「ITER」の建設場所がついに決まったという知らせが今年 6 月に届いたとき、Gerald Navratil はその心境をこういい表した。Navratil はコロンビア大学（米国ニューヨーク）のプラズマ物理学者で、米国の ITER チームの一員である。決定までの 18 か月間、Navratil は ITER 誘致をめぐるフランスと日本の闘いをなすすべなく、ただ傍観するしかなかった。

両国の激しい争いが続くあいだに、米国の ITER 計画への支持が徐々にトーンダウンしていくのを Navratil は感じていた。しかし、ITER の建設場所がフランス南部のカダラッシュに決まった

今、Navratil は前向きな気持ちでいる。「とうとう建設場所が決まった。これで行く次々の段階へ進むことができる」と彼は話す。

核融合研究は、どうしても政治とかわからざるをえない。太陽をまね、核融合反応でエネルギーを得るという構想自体はすばらしいものだとされたが、着想から現在まで約 50 年、実現することはなかった。今回ここまで来るとにさえ、研究者たちが乗り越えなければならなかった技術的科学的障害は数多かった。しかし、ITER はついに核融合が実現可能なエネルギー源であることを、懐疑的な政治家や他分野の科学者たちにも証明してみせる。研究者た

ちはそう期待している。もしすべてがうまくいけば、ITER の 6 極の国際パートナー（中国、欧州連合、日本、韓国、ロシア、米国）からの建設資金が今冬にも出そろい、2006 年に建設開始、2016 年に稼働しはじめることになっている。

ITER は、水素を数億℃に熱してできたプラズマを連続して数分間安定に保ち、その間にプラズマからエネルギーを引き出すという設計だ。ほとんどの核融合研究者は、ITER はその過程で消費するよりも多くのエネルギーを作れるはずだと考えている。しかし、予測されるエネルギーを得るのはむずかしいのではないかと、また、期待されるだ

け長くプラズマを安定に保つのは簡単ではないのではないかと考える研究者もいる。メリーランド大学カレッジパーク校のプラズマ理論研究者 William Dorland は、「あらゆる科学実験と同じように、ITER がうまく動かない可能性はある」と話す。

しかし ITER は、もはやただの科学実験ではない。建設費は 55 億ドル（約 6,200 億円）で、地球上にこれまで建設された科学実験施設のなかでも最も高価な部類に入る。テキサス大学オースティン校のプラズマ物理学者で、米国エネルギー省 (DOE) の核融合科学諮問委員会委員長でもある Richard Hazeltine は、「ITER は予測どおりの性能を発揮し、この研究分野の信用を回復させるはずだ」と断言する。

甘かった予測

核融合は単純なアイデアだが、実際に実現するのはむずかしい。重い原子核の崩壊からエネルギーを得る核分裂と異なり、軽い原子核（通常は水素）が互いに衝突して融合し、新しい元素（たとえばヘリウム）ができるのが核融合だ。水素原子核どうしの衝突を起こすには、正の電荷をもつ核どうしの電気的な反発力に打ち勝つ必要があり、そこにむずかしさがある。核融合は、原子核が超高速で運動するか、高密度に詰めこまれたときのみ起こる。つまり、核融合を起こすには、きわめて高温で高密度のプラズマが必要なのである。

私たちの最も近くで起こっている自然界の核融合といえば、太陽での核融合だ。太陽の中心核内部では、正の電荷をもつ水素原子核が中心方向へと重力で引きつけられ、高温高密度になり、核融合を起こしてヘリウムに変わる。しかし、地球上では重力にかわるなんらかのくふうが必要となる。

第 2 次世界大戦後まもなく、米国とロシアの科学者たちは、水素原子を強い磁場で締めつけることによって、水素を熱し、高圧にすることのできる装

ITER のトカマク装置——高温プラズマをどうやって閉じ込めるか

高温のプラズマを磁場で閉じ込める作業をたとえて、核融合科学者たちはよく、ゼリーを輪ゴムでまとめるようなものだという。

磁場を作るコイル

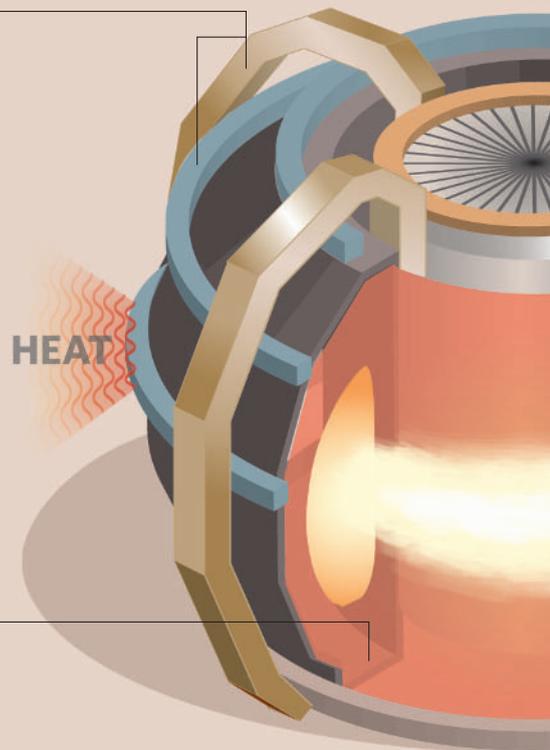
これらの超伝導磁石は装置の周囲を横方向と縦方向に取り巻いている。これがプラズマを ITER の中心部に保つための輪ゴムにあたる。

外部からの加熱

1 億°C を超える温度にプラズマを加熱するため、ITER ではソレノイドのほかに外部からの電波とマイクロ波を用いる。

ダイバーター

ダイバーターは核融合反応でできた高温のヘリウム原子を吸収する。ダイバーターは超高温と高レベルの照射に耐えられなければならない。

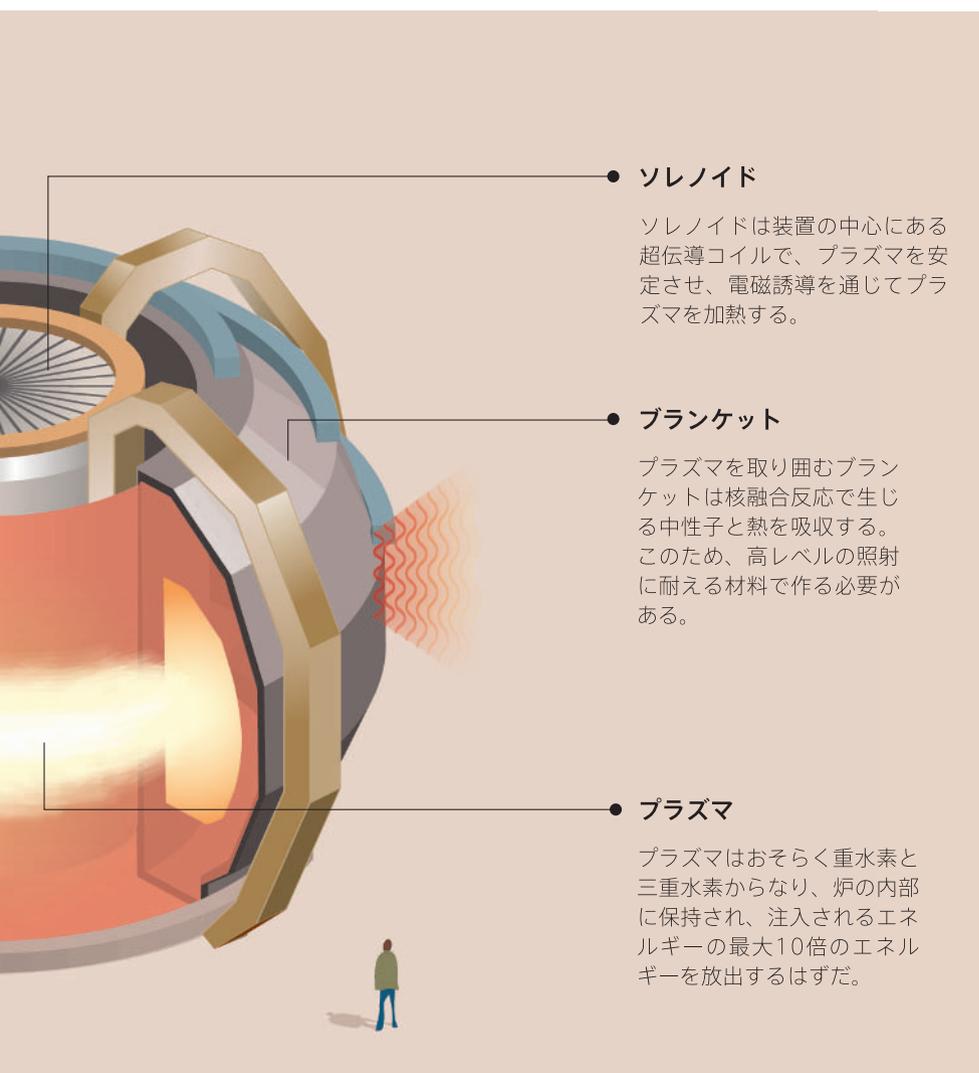


置の研究に取り組みはじめた。さまざまな装置が考案され、実験が繰り返された。それらの装置それぞれに利点やくふうが見受けられた。しかし、1960 年代になると、核融合研究者たちの研究は 1 つの装置デザインへと収れんしていく。トカマクである。

トカマクは、ロシアの物理学者 Andrei Sakharov と Igor Tamm が考案したドーナツ型の装置で、一連の重なり合う磁場を用いて高温高密度のプラズマを炉壁の内部に保持する（上図を参照）。トカマク技術は 1970 年代に急速に進歩し、多くの研究者が 21 世紀初頭までに原型の発電所を作ることができると考えられるようになった。

だがやがて、こうした予測はあまりに楽観的だったことがわかる。トカマク内部に保持されるべき高エネルギーの水素ガスは、磁場の拘束から漏れだし、閉じこめられることを拒んだのだ。研究者たちは、自分たちのプラズマの安定性と乱流についての理解が不十分であることに気づいたが、そこからの研究の進みは遅かった。装置に入れるエネルギーと同量のエネルギーが発生する臨界プラズマ条件に近づきはじめていたのは、今でも日本原子力研究所那珂研究所（茨城県那珂市）にあるトカマク装置「JT-60」だけである。

それでも、ドイツのガルヒングで欧州核融合開発協定 (EFDA) における技



● ソレノイド

ソレノイドは装置の中心にある超伝導コイルで、プラズマを安定させ、電磁誘導を通じてプラズマを加熱する。

● ブランケット

プラズマを取り囲むブランケットは核融合反応で生じる中性子と熱を吸収する。このため、高レベルの照射に耐える材料で作る必要がある。

● プラズマ

プラズマはおそらく重水素と三重水素からなり、炉の内部に保持され、注入されるエネルギーの最大10倍のエネルギーを放出するはずだ。

外部からの加熱技術を使うことになるだろう。

また、「これ（強力な磁場）以外のITERの大きな強みはその大きさにある」とITER設計チームの一員でウィスコンシン大学マディソン校のRaymond Fonckは話す。簡単にいえば、高温のプラズマがより広い空間をさまよわなければならないほど、プラズマのふるまいはよくなるのだとFonckは説明する。ITERは、ドーナツ型のプラズマリングの半径が6.2メートル、プラズマ体積が840立方メートルで、これまでのどのトカマクよりも2倍大きい。

しかし、ITERの強い磁場と巨大な大きさをもってしてもなお、深刻な難題が残るとDorlandはいう。これまでの装置と異なり、ITERは取りこむエネルギーよりもたくさんのエネルギーを放出するように設計されている。これまでは単に加熱を弱めることでプラズマの温度を制御できた。しかし、もしITERがうまくいったら、そのプラズマは自身の核融合反応のエネルギーで核融合を続けるはずだ。これは、炉から出るエネルギーの処理方法が今後研究されなければならないことを意味している。「要は、小さな場所に大量のエネルギーを押しこめ、制御しながらエネルギーを取り出す、ということだ。これは簡単ではない」とDorlandは話す。

ITERが放出するエネルギーのほとんどは、高速で運動する中性子だ。中性子は、プラズマを取り囲む、ベリリウム（軍の装甲にも使われている材料）で覆われたブランケットに照射される。核融合反応のもう1つの副産物である高温のヘリウム原子は、トカマクの底部に置かれる炭素で覆われた構造、ダイバーターが主に捕獲する。ただし、ITERが放出する強烈な熱と放射線に対処するのにベリリウムと炭素が最適だと全員が考えているわけではない、とNavratilはいう。ITERの後に建設される実証炉で、ベリリウムと炭素に代わって使われる可能性のある材料の候補



日本のトカマク実験装置「JT-60」

術面の指揮をとるRoberto Andreaniは、「ITER計画が1985年に初めて提案されたとき、装置をトカマクにするのはいうまでもないことだった。これまでの核融合研究の歩みを通じて、ト

カマクはもっとも信頼できる装置であり続けてきたと私は思う。トカマクはITERでも唯一の合理的な選択肢だ」と語る。

規模を縮小

ITERの目標は野心的で、水素燃料（水素の2種の同位体である重水素と三重水素の混合物）のプラズマを7～15分間しっかりと保持し、1億℃を超える温度に加熱して約500メガワットのエネルギーを取り出すとされる。前述のJT-60がもつ、高温高压プラズマの持続時間世界記録は現在24秒である。ITERは目標達成のため、JT-60よりも25%強力な超伝導磁石を用い、多数の

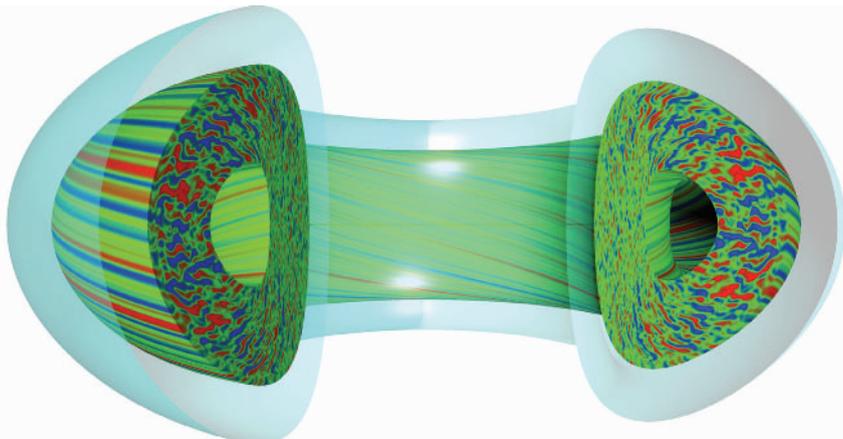
がタングステンだ。よりよい構造材料の探索のため、日本に材料の試験施設が作られる可能性がある（コラム「材料試験施設は日本に？」を参照）。

また今後ある時点で、商業用核融合炉建設の実現を念頭に、生じた余分な熱を利用する方法を見つける必要があるだろう。ITERはそのための設計はされていないが、将来の装置では、生じたエネルギーを取りだして利用することが求められる。おそらく、液体の冷却材でブランケットとダイバーターを冷却し、炉を出た高温の冷却材で水を熱し、その水で蒸気タービンを回すという設計になるだろう。

ITERの設計において予測がむずかしいのが、炉内でのヘリウムの増殖だ。従来のトカマクで起こせる核融合は少なく、できるヘリウムと中性子も少量だった。しかし、ITERではかなり多くの高温ヘリウムができるだろう。ITER設計チームのもうひとりの米国人物理学者、ウィスコンシン大学のStewart Pragerは「そのヘリウムが残りのプラズマとどのように相互作用するかについては、完全に予測できない可能性がある」と話す。ITER設計チームは、炉壁に放射性の三重水素が蓄積しすぎることも心配している。三重水素の蓄積量には、安全面の理由で厳しい制限があるからだ。

こういった問題が理由で、ITERの規模は当初の計画よりも縮小された。当初の計画ではITERは現在の倍の大きさ、核融合反応を起こしている水素プラズマを連続して数時間保持し、約1,500メガワットのパワーを出すと言われていた。しかし、各国政府は見積もられた費用に当惑し、Dorlandたちが指摘した技術的な不確かさもあって、目標と費用を引き下げる再設計が行われた。

技術的懸念の一部は、ここ10年間で大きく進歩したプラズマ乱流の数値シミュレーションでわかったことだった。しかし、プラズマの外側がどれほど高



プラズマのふるまいに関するシミュレーション技術が進歩し、ITERはうまく動くだろうと予測されている。

温になるかについての不確かさは残っており、これが最終的にITERがどれほどうまく機能するかに影響する、とDorlandは指摘する。

ともかく前へ

シミュレーション技術が進んだせいもあって、縮小され、費用も安くなったITERはきちんと機能するとほとんどの科学者は考えている。オックスフォードに近い英国原子力公社(UKAEA)カラム科学センターで核融合の経済性を研究しているプラズマ物理学者のDavid Wardは「欧州では核融合の将来性に関して楽観的だ。しかし、ITERを実現させるまでには現在の技術水準からさらに大きな進歩が必要だろう」と話す。ITERは第1世代の商業炉の建設に向けた技術的情報をもたらすだけでなく、核融合エネルギーの価値が認識されるための決定的役割を担うだろうとWardはいう。

この意見にDorlandも同意しているが、ただし書きが1つあるという。「私はITERはうまく動くと思う。しかし、実は、ITERが稼動する前に別の核融合装置がより大きなパワーを出すことに成功すると思っている」。Dorlandによると、トカマクに追いつく可能性のある設計案は6案ほどあるが、今のとこ

ろ最も注目しているのは「球状トラス」とよばれるトカマクの変種だという。これはドーナツというより穴のあいたリングに似ている。この形状のおかげで、高温の水素プラズマと炉の外側の壁との間にはっきりした境界面ができ、プラズマをもっときつく締めつけることができる。この設計なら、扱いにくいトカマクほど大がかりにしなくても核融合を実現できるかもしれない、とDorlandは指摘する。

これに対してHazeltineは「たとえそれが本当だとしても、核融合に長くかかわってきた者は、別の装置が先んじることを期待するよりもITERで前進するほうがベターだと考えている」と話す。国際的な核融合研究は、数十年にわたって「約束」が実現されないまま巨額の投資を続けてきたため、Hazeltineの言葉を借りれば「もろく壊れやすい状態」にある。「核融合科学は消えていく瀬戸際にある。ともかく前に進み、このやっかいな炉を動かしてみせる必要があると私は思う」とHazeltineは話した。

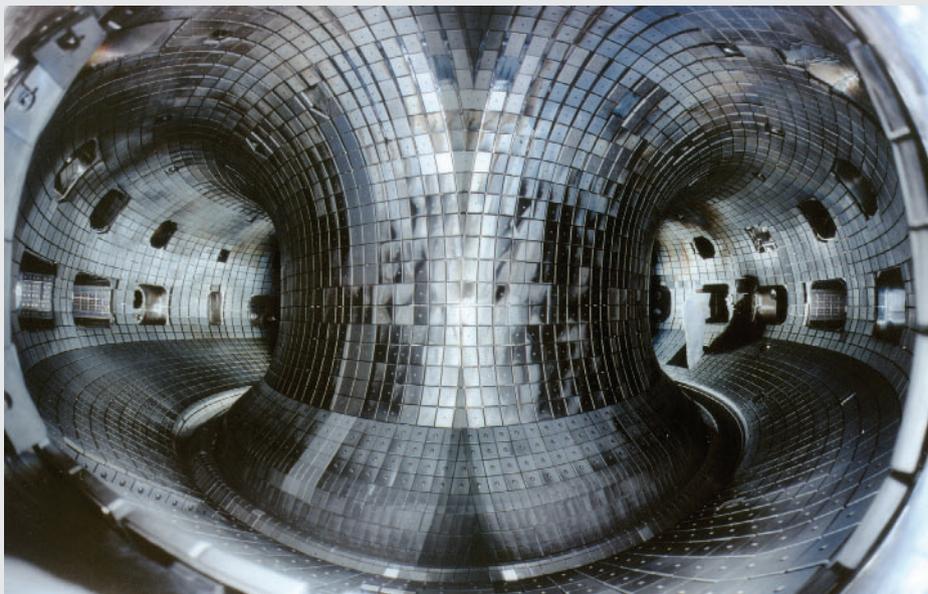
Geoff BrumfielはNatureのワシントン特派員(物理科学担当)。

材料試験施設は日本に？

欧州は核融合研究資金のすべてをフランスでのITERの実験に投じようとしているが、その脇で日本の核融合研究者たちがいくつかの計画で先頭に立つべく奮闘している。日本は、材料試験に関する施設を建設し、新しいプラズマ実験のために既存のトカマク装置「JT-60」（右の写真）の性能を上げ、ITERに続く核融合実証炉「DEMO」の設計センターを誘致する可能性がある。

こうした計画案の中で注目すべきは、国際核融合材料照射施設（IFMIF）だ。この施設の目的は、ブランケット（図を参照）など核融合炉の構造で使用される重要な材料が、プラズマから出る大量の高エネルギー中性子に耐えられるかどうかを確かめることだ。このためIFMIFには、約14メガ電子ボルトのエネルギーをもち、既存の中性子源よりも数桁高い強度の中性子線を作ることのできる線形加速器が必要となる。

日本原子力研究所（JAERI）那珂研究所の奥村義和・ITER業務推進室長によると、材料はITERやDEMOで生じる高エネルギーの中性子に耐えなければならないが、ITERやDEMOのような高い照射強度での耐性はこれまで試されたことがないという。そのような過酷な状況に耐えられることを安全



日本原子力研究所の大型トカマク実験装置「JT-60」の内部。ドーナツ状の空間部分にプラズマを閉じ込める。

規制当局に証明するためには、IFMIFでの実験が不可欠だ。現時点ではデータはゼロなのだと言っている。

高エネルギーの中性子は構造材料中に入った原子を弾きだし、やがては材料の強度を弱めてしまう恐れがある。ITERは、短時間のパルスで核融合を行うように設計されているため、構造材料の損傷は小さいはずだ。一方、DEMOは数年間にわたって連続的に稼動する必要があるとされ、材料を弱める中性子による損傷の蓄積は、ITERの30倍をこえる可能性がある。

ITERの主たる構造材料として現在選択されているのはステンレス鋼だ。一方、DEMOでは耐熱フェライト鋼が使われるかもしれない。

これは照射に対する耐性が高い。しかし、核融合科学者たちはさらに高い効率（つまり、さらなる高温）を目指しているため、炭化ケイ素などの新しい材料が必要となるかもしれない。高津英幸・日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部次長は「効率と安全性のバランスをどうとるかについては、すべての国が独自の見方を持っている」と話す。

しかし、40年間のプロジェクトで3,100億円（ITERの費用の約4分の1）の費用がかかるIFMIFが建設されるのか、それが日本になるのかははっきりしない、と高津はいう。英国などのほかのITER計画参加国もIFMIFの誘致に熱心で、日本が確保したITER計画におけ

る今後の特権的立場に対して不満を表明する国もある（*Nature* 435, 1142-1143; 2005を参照）。IFMIF誘致をめぐる交渉は難航も予想される。

しかし、多くの核融合科学者が「軽視されてきた分野」と考えている材料科学を大きく前進させるためには、この試験施設は必要なものだ。東北大学金属材料研究所の松井秀樹教授（原子力材料工学研究部門）は「材料科学に配分される予算は、核融合研究予算の1～2%にすぎなかった。偏りがあったのは事実だ」と話す。

David Cyranoski