

核融合炉への挑戦

須藤 滋

総合研究大学院大学教授核融合科学専攻／自然科学研究機構核融合科学研究所副所長

太陽や星のエネルギー源となっている核融合を、地上で制御された炉として実現しよう。50年前にスタートしたその研究は、未知の学問分野への挑戦であった。

最先端の科学技術は映画や小説に先取りされて描かれることが多い。『バックトゥーザフューチャー』という映画の第1作ではタイムマシン車デロリアンのエネルギー源はプルトニウムを使った核分裂炉であったが、パワーアップを図り、第2作ではエネルギー源は核融合にグレードアップされている。

核融合反応は核分裂反応よりも早くから知られていたのだが、そのエネルギーを取りだすほうは核分裂炉（現在の商用原子炉）が先に実現した。核融合炉は1950年ごろから精力的に研究されているが、商用炉実現までもう少し地道な研究開発が必要だ。そこでの日本の役割は大きい。

核融合炉実現に必要な条件

まず、核融合を人工的に起こすには1億度という超高温状態が必要である。原

子核はそれぞれプラスの電荷をもっているため、低温ではたがいに反発して融合できない。高温になると原子核が加速され、衝突・融合が引き起こされる。

また、高い粒子密度も必要である。密度が低いと有用な反応数が少ないが、密度が高いと活発に反応が起こるようになる。核融合炉を実現するには、 10^{20}m^{-3} （1ccあたり100兆個）の密度が必要となる。

このような超高温・高密度では、物質は原子核と電子がばらばらになり（電離）プラズマと呼ばれる状態になっている。このプラズマを一定の場所にとどめておかなければならない。太陽や星では、その重力が非常に大きいため、高温の粒子も飛び散らずに星の内部にとどまていられる。しかし、地球上で人類が制御する核融合のレベルでは、重力でプラズマを閉じ込めることは不可能である。そうかと言って、ステンレスの容器のようなものに入れると、高温のプラズマに接したとたん、壁などの物質がたちまち蒸発して電離し、プラズマになってしまう。そこで、電気を帯びた粒子が磁力線に巻きついて運動するという性質に着目して、磁力線で編んだかごのような容器に閉じ込める方法が考えられた。

この閉じ込め磁場の性能がよければ、プラズマを熱い状態に保っておくことができる。しかし実際には、高温のプラズマからは、熱の伝搬や光や粒子の散逸などによるエネルギー損失が常にある。この損失をプラズマの加熱（核融合で発生した

パワー自身でもよい）によって補ってやる必要がある。炉を経済的に成り立たせるには、追加熱のパワーをできるだけ低く抑えなければならない。つまり、プラズマのエネルギーが逃げにくく、エネルギーを閉じ込めておく時間を長くすることが、核融合炉実現の重要な条件の一つとなる。この条件の目安として、「エネルギー閉じ込め時間」が1秒以上必要である。

さらに、経済的な炉の成立のためには、長時間運転を持続できること、磁場の圧力で規格化したプラズマの圧力（ベータ値）が5%以上であること（ベータ値が高くなるほど閉じ込め磁場の圧力を相対的に小さくできるので、建設コストを下げることができる）、十分な寿命の構造材を用い、かつ低放射化の性質をもつ材料を選ぶこと、があげられる。これらをすべて満たさなければいけないのだが、現在のところは容易ではなく、重要な研究課題となっている。

さらに50年前、核分裂炉のプロセスは核変換と従来の固体物理学を基礎として理解できるものであったが、プラズマの振る舞いは未知であり、その解析には新しい学問手法が必要だった。時間がかかっているのは、まさにこのような新しい領域を実験と理論の両輪で切り開く必要があったためである。

トカマクによる核融合出力実験

核融合からエネルギーを取り出す研究は、第二次世界大戦中にアメリカ、ソ連、

プラズマとは

物質の状態は一般に、温度の上昇にともなうて、固体から液体、気体へと変化していく。さらに温度を上げると、物質の構成要素である原子から電子がはぎ取られ（電離）、原子核（またはイオン）と電子はそれぞれ高速で不規則に運動するようになる。この電子と原子核（またはイオン）が多数集まっている状態を「プラズマ」と呼んでいる。太陽をはじめとして、宇宙の物質はほとんどがプラズマ状態になっている。地球上では、高温の炎、オーロラ、蛍光灯として目にすることができる。

イギリスなどで極秘に行われていた。戦後、その原理を用いた水素爆弾（水爆）が製造され、1952年にアメリカで最初の実験が行われた。そのころから、平和利用を求める機運ははぐくまれ、爆発によらずに制御された状態の熱核融合の研究が始まったのである。

58年に開かれた第2回ジュネーブ国際会議では研究情報の機密が解除され、公開されるようになった。しかし、研究が進められるにつれて、プラズマの制御が生易しいことではないことが認識されるようになった。そんななかで、68年の第3回IAEA（国際原子力機関）プラズマ物理制御核融合国際会議において、ソ連のT-3トカマクという装置で温度500万度、閉じ込め時間5ミリ秒という当時としては良好な結果が発表された。イギリスのチームが現地まで出かけて行って精密測定を実施し、データの確認を行った。T-3トカマクでは、プラズマに電流を流し、そこでつくられる磁力線が外部コイ

ルによる磁力線と合成され、磁力線のかごがつくられて、プラズマを閉じ込める。これをきっかけに世界はトカマク方式全盛時代に入った。

1970年代には石油危機をきっかけにエネルギー資源への関心が深まり、核融合研究に追い風が吹いた。欧州ではJET（所在地はイギリス）、アメリカでTFTR、日本でJT-60（のちに改造されてJT-60Uと命名）という大型トカマクが建設された。これらを「三大トカマク」と呼ぶ。

一方、1980年代にはドイツのASDEXという中型装置で、プラズマの閉じ込めがいきよに2倍良くなる輸送の障壁をつくる手法（Hモード）が発見され、JETやJT-60などにも適用された。

三大トカマクのうち、JETとTFTRは重水素と三重水素を用いた核融合実験を計画していた。93年から97年にかけて重水素と同程度の量の三重水素を用いた高加熱パワー実験がTFTRで行われ、中性粒子ビームの入射で熱核融合パワー

10.7MWを94年に得た。ここでは核融合で生じたアルファ粒子によるプラズマの再加熱の研究も行われた。

この前後が、人類が本格的に熱核融合パワーをはじめて取り出した時期である。1997年には、JETでも16MWの熱核融合パワーを発生させるに至った。このときの核融合出力と加熱パワーの比Q値は0.65にまで達した。このQ値が1になると、入力パワーと出力パワーが釣り合う「臨界条件に達した」という。なお、日本のJT-60では三重水素を用いた実験は行わず、96年にパラメータとしてもし重水素の半分を三重水素に置き換えたならQ値が1になるはずという意味で、臨界条件に達したとしている。

自己点火をめざすITER計画

1985年、レーガンーゴルバチョフ会談の共同声明で核融合開発の協力が述べられ、実際に国際熱核融合実験炉（ITER）と命名されて、日本と欧州も加わるこ

核融合研究の歴史

1939年… H.A. ベーテ、太陽のエネルギー源として核融合反応プロセスp-pチェーンを提唱（ドイツ）

1951年… L. スピッツァーがステラレーター方式の研究を開始（アメリカ）

1952年… ビキニで初の水爆実験（アメリカ）

1958年… 第2回ジュネーブ国際会議で初めて各国研究情報公開
宇尾光治（京都大学）、ヘリオトロン概念を論文発表

1968年… 第3回IAEAプラズマ物理制御核融合国際会議：ソ連のT-3トカマクが温度500万度、閉じ込め時間5ミリ秒の良好な結果を発表



ヘリオトロンE

1980年… ヘリオトロンE装置完成（京都大学）
中型トカマク装置ASDEX（ドイツ）でプラズマの閉じこめが良好になる
Hモード発見（論文発表1982年）

1983年… 大型トカマクJET（欧州、装置所在地はイギリス）実験開始

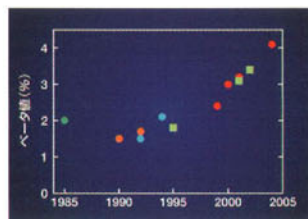
1985年… 大型トカマクJT-60（日本）実験開始

1989年… 全国大学共同利用の研究所として核融合科学研究所創立（初代所長 飯吉厚夫）

1994年… TFTRでDT実験により熱核融合パワー10.7MWを達成

1998年… 超伝導大型ヘリカル装置LHDにおいて最初のプラズマ生成試験成功

2003年… LHDでイオン温度1億2000万度、規格化プラズマ圧力4.1%達成



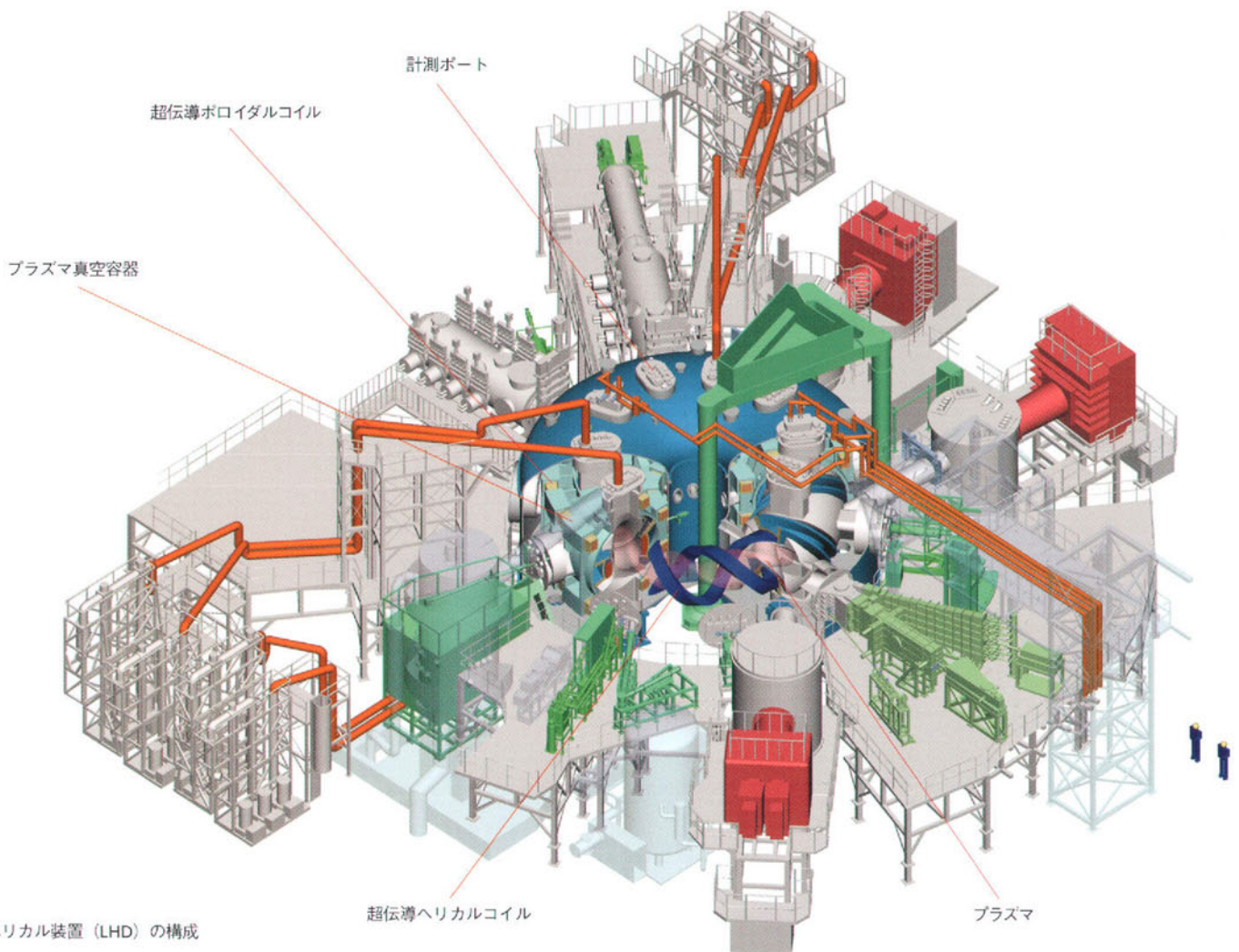
ヘリカル装置のベータ値の推移



宇尾光治教授



飯吉厚夫所長



大型ヘリカル装置 (LHD) の構成

になった。88年から90年まで、日本、欧州、アメリカ、旧ソ連の4極で概念設計活動が実施され、その成果を受けて92年に工学設計活動が開始された。最初に主導したアメリカが途中で脱退するなど紆余曲折があったものの、残りの3極は困難な情勢を耐えぬき、ITER 建設の方向にたどりついた。これを受けて、アメリカが復帰し、また中国と韓国が相次いで参加することになった。

核融合で発生したアルファ粒子によりプラズマを再加熱して核燃焼を続けることを「自己点火」と言うが、ITERは人類がはじめて制御熱核融合実験炉において自己点火を実証する装置である。そのため高エネルギーのアルファ粒子も十分に閉じ込めて、入力パワーを上回る十分な核燃焼を起こす必要があり、パラメー

タ的に現状で最も実績のあるトカマク方式が選ばれた。

ITERは2004年9月時点では、建設すべきサイトの誘致について日本の青森県六ヶ所村とフランスのカダラッシュががっぷり四つに組んでおり、アメリカと韓国が日本を応援し、ロシアと中国がフランスを支持するという構図である。

ヘリカルシステム研究の発展

一方、ヘリカル方式に代表される磁気閉じ込めの研究も、1950年代から並行して始まった。核融合技術が簡単ではなく、それぞれの方式に優れた点があったからである。例えばヘリカル方式の研究を推進した根拠は、トカマクのようにプラズマ内部に電流を流して閉じ込めを維持するシステムよりも、内部電流に頼ら

ず外部のコイルだけで閉じ込めるヘリカル方式のほうが長時間運転に向いているということにある。ヘリカルとは「らせん状」という意味で、らせん状の外部コイルで磁力線のかごをつくりプラズマを閉じ込める方式である。

このヘリカルシステムの研究は、日本やドイツを中心にアメリカ、オーストラリア、スペイン、ウクライナなどを含め国際的に着々と進められた。京都大学の宇尾光治教授は1958年、ヘリオトロンという概念を発表した。そして、ヘリオトロンA装置からB、C装置、さらにD装置と研究を進め、1980年には、当時大学でのレベルとしては破格の規模のヘリオトロンE装置を完成させた。

一方、ドイツでは、ヘリオトロンと同じ路線ながらコイルの構成が異なる

Wendelsteinを開発し、ヘリオトロンとたがいに競い合いながら研究を進めていた。

ヘリオトロンE装置では、プラズマの加熱方法として新しい方法が開発された。それまでは、変圧器の原理で過渡現象によりプラズマ中に電流を流してプラズマを加熱していた（ジュール加熱）。新しい方式は、電子レンジと同じ原理で、電磁波を水素ガス中に打ち込んで電離し、できたプラズマをさらに加熱した。そのためプラズマの不安定性のもとになる誘導電流が発生しない。ヘリオトロンEでの電磁波によるプラズマ生成・加熱手法は、現在では世界のヘリカルでのスタンダードになっている。

こうして無電流プラズマが高い閉じ込め性能を示すことがわかり、世界的に注目された。アメリカではATFというヘリカル装置を1988年に建設し、また、当時の名古屋大学プラズマ研究所でもコンパクトなヘリカル装置であるCHSで実験が行われた。これらの成果と、たとえばヘリオトロンEにおける高速中性粒子による良好な加熱とベータ値2%達成など、多くの知見が蓄積され、大規模な超伝導装置である大型ヘリカル装置LHDの設計に結実していったのである。

核融合科学研究所とLHDの役割

1970年代の日本では、トカマク、ヘリカル、レーザーによる慣性核融合を含めたいろいろな研究が行われていた。しかし、研究の大規模化にともない、1980年、学術審議会において「大学等における核融合研究の長期的推進方策について」との建議が出され、86年には学術審議会特定領域推進分科会核融合部会において「大学における今後の核融合研究について」との報告書が取りまとめられた。

これを受けて、核融合コミュニティ内では熱心な議論が展開され、大型計画へ一本化することが合意された。そして89年、全国の大学共同利用の研究所として核融合科学研究所が創立され、飯吉厚夫教授が初代所長となった。「核融合プラズマの学理と応用の研究を行うこと」



LHDでつくられた高温プラズマ

を明確な目的にしているように、学術研究として核融合開発にアプローチしているとするものである。こうして超伝導コイルを擁した次期大型ヘリカル装置LHDの建設が決まった。同時に、スーパーコンピュータを用いた理論・シミュレーション研究が、もう一つの柱として位置づけられた。

LHDはヘリカル型装置としては世界最大で、超伝導コイルが蓄えるエネルギーも0.9 GJと世界最大級である。その設計に際しては、研究所内外の多くの研究者が協力し、まさに日本の核融合コミュニティの英知が結集された。建設は90年に始まり、97年12月に装置本体の組み立てが完了した。その後、世界初のヘリカル型超伝導コイルの冷却と通電の実証を経て、98年3月31日にプラズマの最

初の生成試験に成功し、97年度内プラズマ生成の公約を果たした。

LHDによる実験は、98年の第1次実験サイクルから2003年度の第7次実験サイクルまで順調に進んでいる。今までに、プラズマ中心部での電子・イオン温度はそれぞれ1億2000万度、プラズマと磁場との圧力比である平均ベータ値4.1%などのパラメータを達成している。これらの成果は装置そのものの信頼性の高い工学技術の進歩を実証するだけでなく、プラズマ物理学における数々の成果、たとえば複雑な系であるプラズマが自発的に断熱性がよくなるような構造を形成する現象の発見など、新しい領域を切り開いている。この特集のPart 2では、プラズマ物理の最前線ではどのような研究が進んでいるのか、その魅力を紹介しよう。

須藤 滋(すどう・しげる)

修士課程のとき、霜田光一・現東大名誉教授（日本のレーザーの第一人者）の研究室でレーザーの薫陶を受けたのがきっかけで、プラズマのレーザー計測から核融合の分野に入りました。核融合の研究は物理から工学まで非常に幅広い分野の有機的集合から成り立っている独特のもので、発展途上にあることもあって、研究が進むにつれて当初の予想を超えた面白い現象がいくつも現れて、いつもわくわくさせられています。元氣な若手の研究にもってこいだと思います。

