本田財団レポート　No. 149
第 126 回 本田財団懇談会（2013 年 6 月 14 日）

# 「核融合エネルギー
# ～国際協力で進む人類究極のエネルギー源の開発」

一般財団法人高度情報科学技術研究機構 理事長
**関　　昌　弘**

公益財団法人 本田財団

# 講師略歴

## 関　　昌　弘（せき　まさひろ）

**一般財団法人高度情報科学技術研究機構 理事長**

**《略　　歴》**

大学卒業後日本原子力研究所に入所。東海研究所において原子炉や核融合炉の熱工学に関する研究に従事。1988 年から那珂（なか）研究所において非常に強い熱衝撃を受ける固体の溶融、蒸発、破壊特性に関する研究を行い、プラズマに向き合う固体壁の設計、開発を進めた。その後、国際協力による国際熱核融合炉（ITER）の工学設計活動において、日本国内チームにおける工学研究開発の指揮・統括を行い、ITER 工学設計の完成に貢献した。2006 年から高度情報科学技術研究機構（RIST）において計算科学技術分野の高度化に関する研究を統括するとともに、引き続き核融合の研究開発にも参画し、ITER 建設活動の科学技術諮問委員会委員を務めた。なお、RIST は、2012 年以来スーパーコンピュータ「京」の登録施設利用促進機関として、「京」の利用者選定および利用者支援を行っている。

１９６９年　東京大学工学部原子力工学科卒業
１９６９年　日本原子力研究所　東海研究所　入所
１９８２年　工学博士
１９８８年　日本原子力研究所　那珂研究所　加熱工学第１研究室長
２００３年　日本原子力研究所　那珂研究所長
２００５年　日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所長、核融合研究開発部門長
２００６年　一般財団法人高度情報科学技術研究機構理事長

**《国際委員等》**

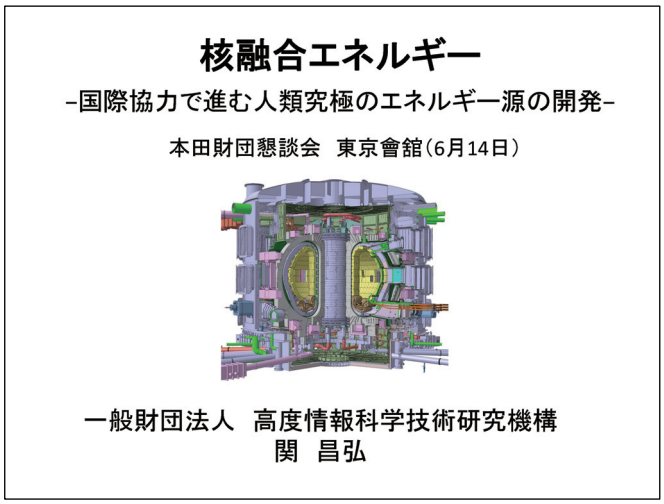
１９９１年　国際熱核融合実験炉工学設計活動　技術諮問委員会委員
２００１年　ドイツ マックスプランクプラズマ物理学研究所 科学諮問委員会委員
２００５年　国際エネルギー機関（IEA）核融合調整委員会議長
２００７年　ＩＴＥＲ建設プロジェクト　科学技術諮問委員会委員

**《主な受賞歴》**

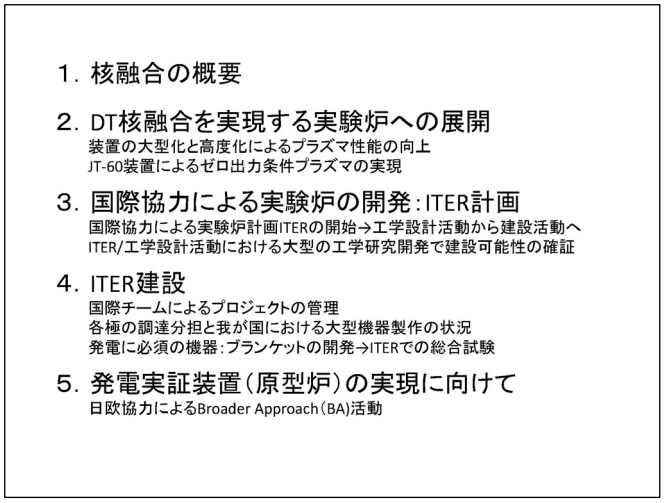
２００２年　日本機械学会　技術功績賞

**《主な著書・編著、他関連刊行物》**

２００１年　『核融合炉工学概論―未来エネルギーへの挑戦』日刊工業新聞社




私は長く原子力機構の那珂核融合研究所におりまして、ITER[※1]（イーター）に関する仕事をしてきました。那珂核融合研究所を卒業してもう 7～8 年になりますが、今日は人類究極のエネルギー源の開発を、国際協力プロジェクトの ITER で進めているというお話をしようと思います。




図－1

〈図－１〉　本日のお話は、まず核融合の概要ということで、核融合に関する初歩的なお話をした上で、「DT 核融合を実現する実験炉への展開」と題して、装置の大型化と高度化によるプラズマ性能の向上、さらに JT-60 という、那珂核融合研究所にある大型装置によるゼロ出力条件プラズマの実現についてお話します。今日の私のお話は、核融合といっても重水素、三重水素の核融合、すなわち DT 核融合、そしてそれを実現するためのトカマク型の装置に限定して、お話を進めていきます。もちろん、ITER に使用されるのもトカマク型装置です。

その次に、「国際協力による実験炉の開発計画」ということで、ITER の比較的初歩の時代の工学設計活動（EDA）の話を少しさせていただき、建設活動へ移行するに当たってのさまざまな課

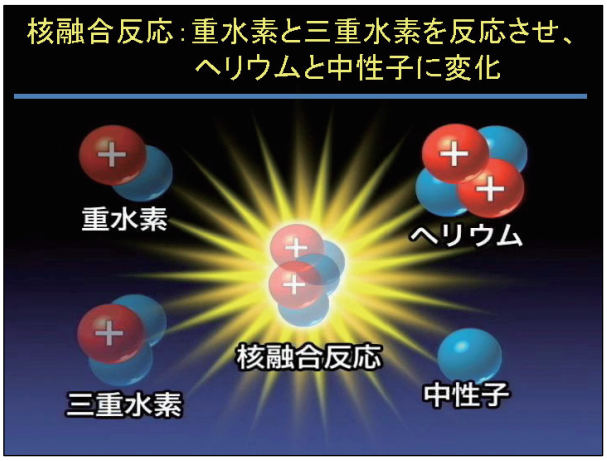
[※1] 国際熱核融合実験炉の意。国際協力によって核融合エネルギーの実現性を研究するための実験施設

題を解決してきたお話をご紹介します。4 番目は、その ITER の建設についてです。国際チームが出来上がってプロジェクトの管理をしていますが、国際チームの概要、各極の調達分担と、日本が担当する装置の製作状況についてお話します。

後でお話しますが、この ITER というプロジェクトは、参加極がお金を出し合い国際チームがそれを使って物を作るのではなく、各極が分担して物を作り、フランスのカダラッシュにある ITER サイトでそれを組み立てることになっています。

最後に、ITER の後継機である発電実証装置（原型炉）の実現に向け、日欧協力による Broader Approach（BA）活動が進んでいます。これは青森県の六ヶ所村と、那珂研のある茨城県の那珂市が中心ですが、この活動で工学的な研究開発を行い、ITER と合わせ技できちんと発電ができる原型炉の実現に向かっていきます。こういう話の流れで、核融合はそろそろエネルギー源として使えますよというお話をさせていただきたいと思います。ですが正直、「核融合エネルギーは早期に実現出来る」ということを皆様に納得いただけるような、説得力のあるお話をできるか、難しいかなと思っています。

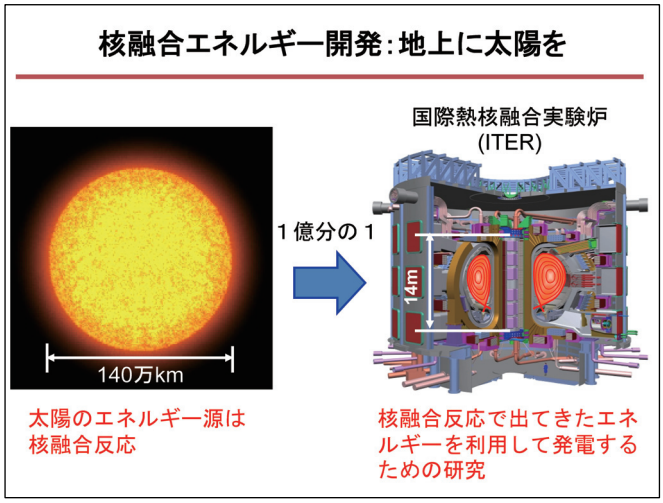
## ■核融合の概要




図－2

〈図－2〉　まず、核融合の初歩ですが、重水素（D）と三重水素（T）が核融合反応をして、ヘリウムと中性子を生みます。これが我々の狙っている DT 核融合反応です。それぞれ反応の結果生じるエネルギーは、約 17.6MeV（メガエレクトロンボルト）です。中性子のエネルギーがそのうち 80％の 14.1 MeV で、ヘリウムが 3.5 MeV になります。大事なことは、DT 核融合反応の結果生じるエネルギーの大半は、中性子の運動エネルギーとして出てくるということです。

このために、核融合装置から実際に熱を取り出すということは、この中性子をいかに熱に変えるかということが問題になります。ここが核融合装置の非常に難しいところになっているのではないかと思います。

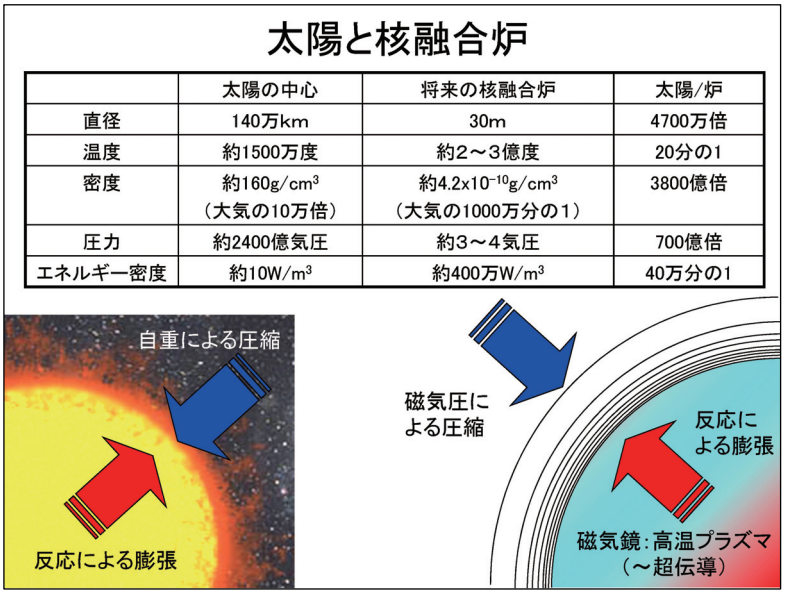



図－3

〈図－3〉　我々は、「地上に太陽を」というキャッチフレーズでその魅力をアピールしてきましたが、実は太陽の中で起こっている核融合反応は水素と水素の核融合反応であり、とてもゆっくり進んでいく反応です。その反応を閉じ込めているのは、太陽という直径 140 万 km もある大きな天体の重力です。とてもそんな巨大な重力を地上に実現することはできないので、何か別の方法で

この核融合反応を閉じ込めて制御しなくてはなりません。

そのために我々は、重水素と三重水素（トリチウム）を非常に高い温度にして、原子核と電子がバラバラになったプラズマ状態にします。さらに温度を上げていくと、その原子核が非常に速い速度で動き回り、電場の壁を越える途中のトンネル効果で核力の及ぶ範囲に近づきます。お互いに衝突することもあるのです。それで核融合反応が起こります。これを連続的に一定の空間内で起こすために、磁石を使った装置を考えてきました。



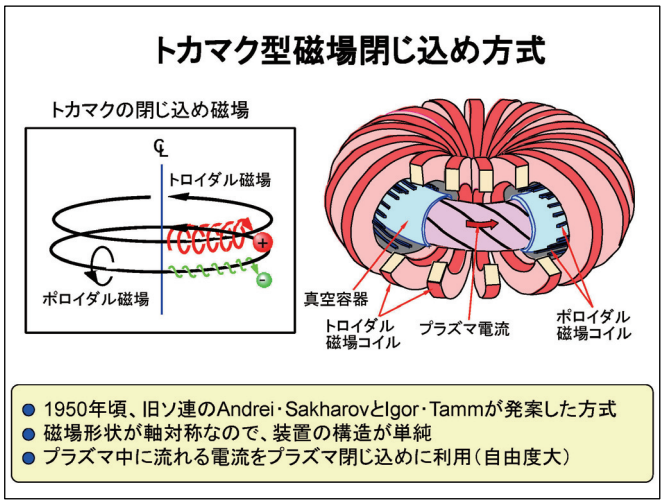

| | 太陽の中心 | 将来の核融合炉 | 太陽/炉 |
|---|---|---|---|
| 直径 | 140万km | 30m | 4700万倍 |
| 温度 | 約1500万度 | 約2～3億度 | 20分の1 |
| 密度 | 約160g/cm$^3$（大気の10万倍） | 約4.2x10$^{-10}$g/cm$^3$（大気の1000万分の1） | 3800億倍 |
| 圧力 | 約2400億気圧 | 約3～4気圧 | 700億倍 |
| エネルギー密度 | 約10W/m$^3$ | 約400万W/m$^3$ | 40万分の1 |

**図－4**

〈図－4〉　太陽と核融合反応の主な違いですが、今お話をしたように、太陽は直径が 140 万 km あり、温度は比較的低くて約 1500 万℃です。密度は 160 g /cm$^3$ と、大気の約 10 万倍もあります。反応率が低い陽子（普通の水素の原子核）同士の核融合反応のため、エネルギー密度としては 10W/m$^3$ と非常に小さい値になります。

それに比べ我々が狙っている核融合炉というのは、直径が 30m ほど、温度が 2～3 億℃にもなります。圧力は、普通の感覚で言えばとても高密度ではなく、大気の 1000 万分の 1 しかありません。このほとんど真空状態の中にわずかに重水素と三重水素を入れ、非常に高い温度まで加熱して原子核と電子をバラバラにします。さらに加熱を続けると、高速で動いている重水素の原子核とトリチウムの原子核がぶつかって、核融合反応を起こします。そういう装置をこれから作っていきます。

図の左下部分は、左側が自重による圧縮で太陽の核融合反応が成立しているところ、そして右側がその自重に代わるものとして、我々が地上で非常に高い温度のプラズマを閉じ込めて核融合反応を起こさせるために、磁気を使うという概念です。

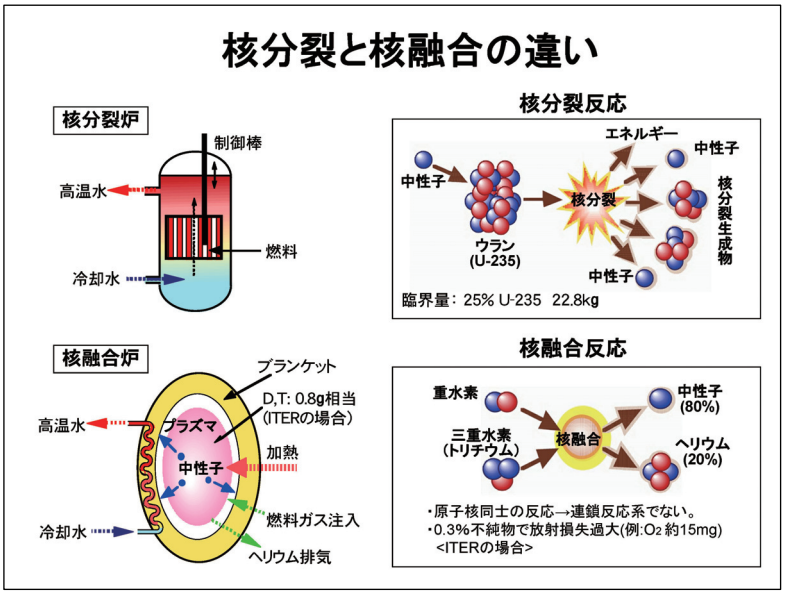



図－5

〈図－5〉　先ほど言ったトカマク型の磁場閉じ込め装置ですが、地上で DT 反応を実現するためには、高温でバラバラになった原子核と電子とで構成されているプラズマがあちこちに行ってしまわないように、それを磁石で閉じ込める必要があります。この薄くスライスされた、赤いドーナツの形をしたようなものが、「トロイダル磁場コイル」と呼ばれている電磁石です。この磁石をグルッと円形に並べることにより、ドーナツの表面に沿う方向に磁場ができます。

この中の気体は非常に薄いため、真空容器を置いて外から他の気体が入ってこないようにします。トカマク型の特徴は、このプラズマの中に電流を流すという点にあります。電流をどんどん流してやると、この電流によって自分自身を取り巻く丸い磁場ができます（ポロイダル磁場）。

この磁場とトロイダル磁場コイルが作る磁場とを組み合わせると、バネを伸ばしたようなねじれた渦巻き状の磁場ができますが、この磁場がプラズマを閉じ込める性能に優れています。現在、このトカマク型装置で温度も密度も高いプラズマを閉じ込めることに成功しています。




図－6

〈図－6〉　核融合の話を進める前に、核分裂と核融合の違いについて説明しておきます。核分裂は、ウランのような大きく重い原子核が、中性子を吸収して分裂する反応のことです。したがって、この反応を起こさせるのに、温度条件とか、密度とか、そういったものは一切ありません。必要な量だけをある一定の場所に集めてやれば、分裂反応は連続的に起こります。

この核分裂反応の結果生じるのは、核分裂生成物と新たな中性子 2～3 個です。この中性子が近くのウランに当たってまた反応が起こる、つまり連続的な反応、連鎖反応が起こることになります。またこの核分裂生成物というのは、反応によって生まれたところからあまり動かず、すぐそばで完全に動きを止めます。つまり、この核分裂生成物の持っている運動エネルギーは、反応して生まれた場所のすぐそばで熱エネルギーに変わるのです。

実際に核分裂炉では、燃料棒を燃料ピンの中に入れていますが、燃料ピン自身が発熱しているのと同じような状況になります。そして、その燃料ピンを直接冷却材で冷やし、冷却材の温度を高めてタービンを回す仕組みになっています。

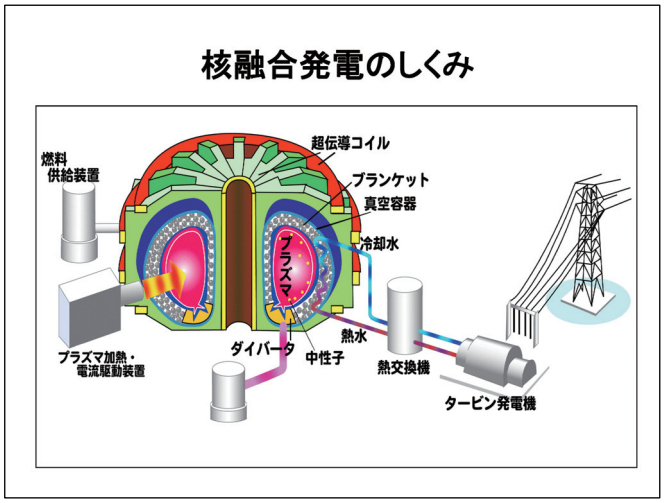
他方、核融合はプラズマを作り、このプラズマの温度をいつも非常に高くしておかないと、核融合反応は続きません。ただし、外部からの加熱によって温度を高くするだけでなく、自分自身の核融合反応によって生じるエネルギーで加熱をするということも可能です。

重水素 1 つと三重水素 1 つが融合すると、中性子が 1 つ、ヘリウムが 1 つ出てきます。先ほどお話したように、エネルギーの大半は中性子のほうが持っていますが、この中性子がここから等方的にあちこちへ出て行きます。その中性子の運動エネルギーを、何らかの方法で熱に変換しなければなりません。プラズマの外にブランケットという固体の装置を置き、その中で中性子が減速して熱を発生します。次に冷却材をブランケットの中に通して、その熱を取り出します。これが核融合炉の基本プロセスです。もしプラズマの中に直接冷却水を流してプラズマから熱をもらうようなことをすると、プラズマが冷えて核融合反応が止まってしまうことになります。

後でまたお話しますが、ここで出てくるヘリウムというのは約 3.5MeV で、プラズマの温度は 1～2 keV（キロエレクトロンボルト）ほどですから、1000 倍から 2000 倍ぐらい温度が高いこと

になります。したがって、DT 反応をしているプラズマでは、このヘリウムが他の重水素や三重水素にぶつかり、それを加熱するという自己加熱の状況が起こります。この自己加熱が優位になるような領域で反応を持続させてやれば、外部からの加熱エネルギーが不要となり、正味のエネルギーをたくさん生産できるわけです。

## ■DT 核融合を実現する実験炉への展開

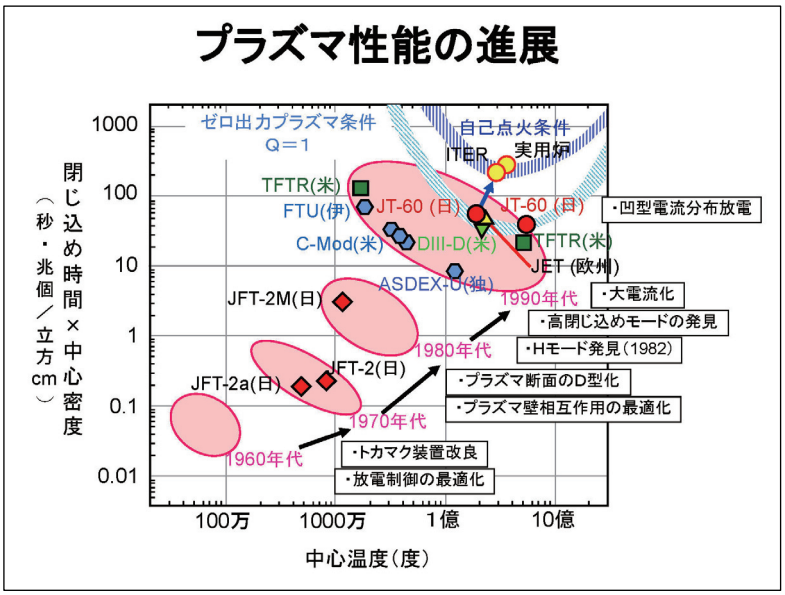



図－7

〈図－7〉　核融合発電の仕組みとしては、真ん中にプラズマを閉じ込めるための磁石を置きます。反応の結果生じる中性子を、このすぐ外に置いているブランケットで受け止め、その運動エネルギーを熱に変えて冷却水の温度を上げ、タービンを回します。この辺りは通常の火力蒸気タービンと何ら変わることはありません。

ITER で作ろうとしているのはこの炉の部分ですが、ITER では高い温度の冷却水を取り出すようなことはしません。理由については後で若干触れますが、ITER では、将来的に高い温度の熱を取り出すことのできるプラズマを作ることができることを実証するのが、最大の目的になっています。

とは言うものの、我々はまだ、DT 反応を長い時間実現した経験はありません。ヨーロッパの JET という装置では、重水素と三重水素を実際にプラズマにして反応をさせていますが、そこからエネルギーが発生できるような、重水素と三重水素が長時間にわたりしっかり反応しているプラズマは、まだ作ったことがありません。

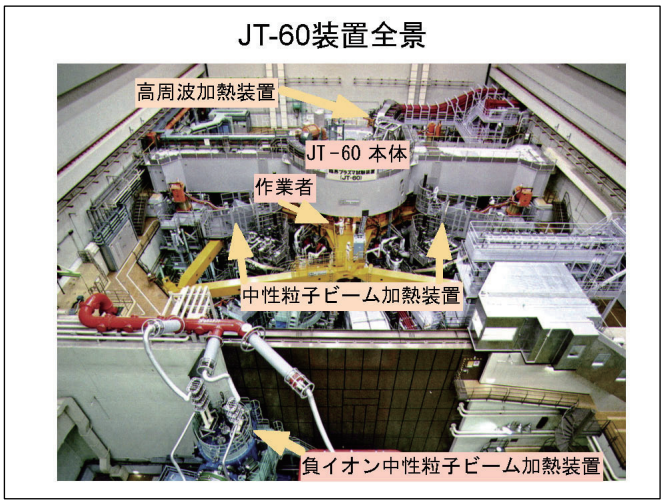



図－8

〈図－8〉　これまでの研究は、そういう反応が起こるような優れた高性能プラズマを作るために、水素なら水素、重水素なら重水素のプラズマを作り、そのプラズマの密度を上げたり、温度を上げたりする研究をずっと進めてきました。1960 年代、70 年代、80 年代、90 年代と装置は進化し、プラズマの性能は上がってきました。この間にトカマク装置の改良、放電制御の最適化、あるいはプラズマ断面の D 型化、プラズマ壁相互作用の最適化など、いろいろな方法でプラズマの性能を上げてきました。大事なことは、単純ですが、装置サイズの大型化です。この発展は、装置をどんどん大きくしていくことで、いいプラズマを生成してきたということです。

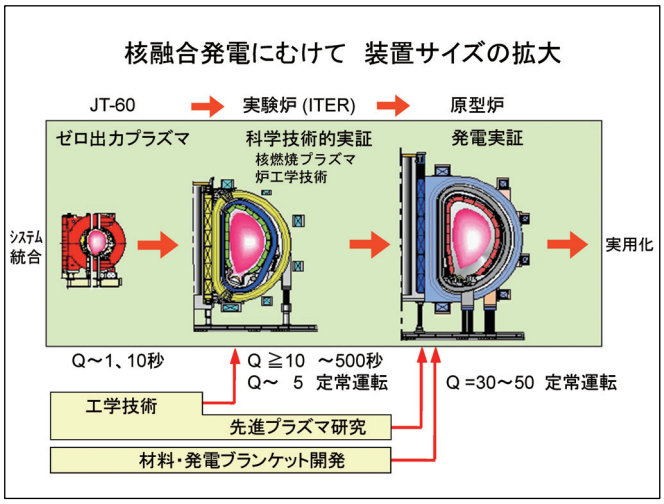
この図は、縦軸が閉じ込め時間と中心密度の積、横軸はプラズマの中心温度です。ですから、右上に行けば行くほど温度が高く、密度も高い、閉じ込め性能に優れた性能のいいプラズマを示していることになります。水色のラインを「ゼロ出力プラズマ条件」と言っていますが、これはそのプラズマを作るのに必要な加熱パワーと、DT 反応の結果出てくるパワー、中性子とヘリウムのパワーの合計が同じになるような条件を示した線になります。実は、JT-60 という装置でこれを達成しています。

こうした研究をずっとやってきて、1980 年代から、十分大きいエネルギー源になるプラズマを作ることができるような、そんな装置を作れば、外部からの入力に対する出力の比（Q＝出力／外部入力）が 10 や 20 程度のエネルギーを生産するプラズマを実現できる、ということが見通せる状況になってきました。そのような認識を踏まえ、1980 年代後半ぐらいから ITER の設計活動を始めたわけです。そこにあったのは、人々のエネルギー源になるようなプラズマを実現するためには、どのような装置を作ればよいのかという問題意識でした。




図－9

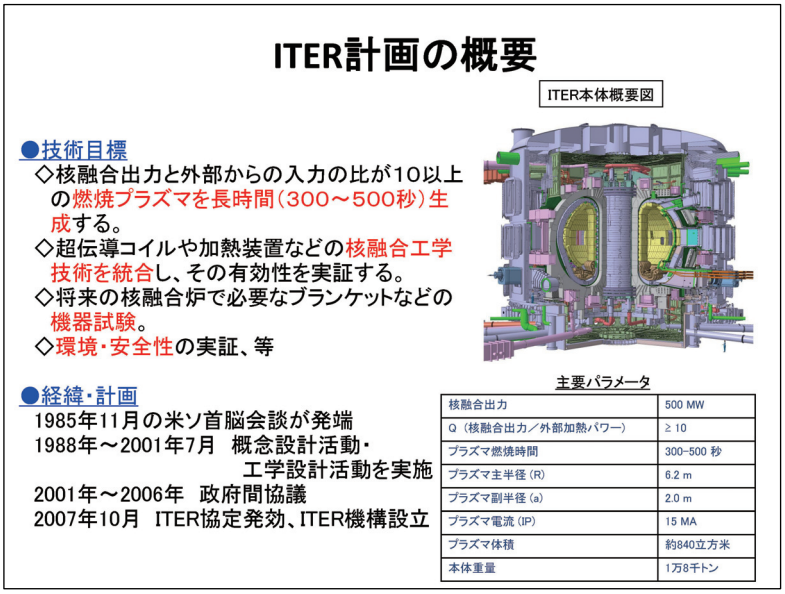
〈図－9〉　これは JT-60 装置の全景ですが、実はこの写真では、JT-60 という装置の本体はほとんど見えていません。中央辺りに作業者がいて、この架台の下に本体があります。高周波加熱装置は、電子レンジの原理でプラズマを加熱する装置です。それから中性粒子ビーム加熱装置という、ぬるい風呂に温度の高い湯を注ぎ込んで加熱するのと同じような原理でプラズマを加熱する装置があります。プラズマはこの中にあります。いかにトカマクが複雑でたいへんな装置であるかということが、お分かりいただけるかと思います。




図－10

〈図－10〉　核融合発電に向けた装置サイズの拡大という話をしましたが、実は JT-60 という装置は直径 3m ほどの装置です。実験炉の ITER においては、10m 規模の装置になります。この ITER ぐらいの装置から、原型炉になるともっと大きくなるのかというと、今の考えではほぼ同じ大きさのまま、実際に電気を起こすことができる原型炉に進んで行くと考えられています。ですから、1960 年代の装置というのは本当に小さな装置でしたが、それをいろいろ技術的な工夫を凝らして、どんどん大きくしてきたわけです。

## ■国際協力による実験炉の開発：ITER 計画




図－11

〈図－11〉　ITER 計画の概要について話を進めさせていただきますが、ITER の技術目標は、まず第１に、核融合出力とプラズマを加熱するために必要な外部からの入力の比Ｑが 10 以上という、エネルギー生産量の多いプラズマを作ろう、そして、そのプラズマを長い時間閉じ込めよう、300 秒～500 秒の長い時間プラズマを生成しようということでした。

そのために現在 JT-60 等では、銅の磁石を使って磁場を作っていますが、銅の磁石ではどうしても力量不足です。しかも、たとえ電気伝導率の非常に高い銅であっても、強い磁場を作るために必要な大きな電流を流すと、銅での発熱が非常に大きな値になってしまい、エネルギー生産装置には全く不向きです。トカマク型のような磁場閉じ込め装置をエネルギー源とするためには、超伝導磁石を使うことが必須の要件になってきます。

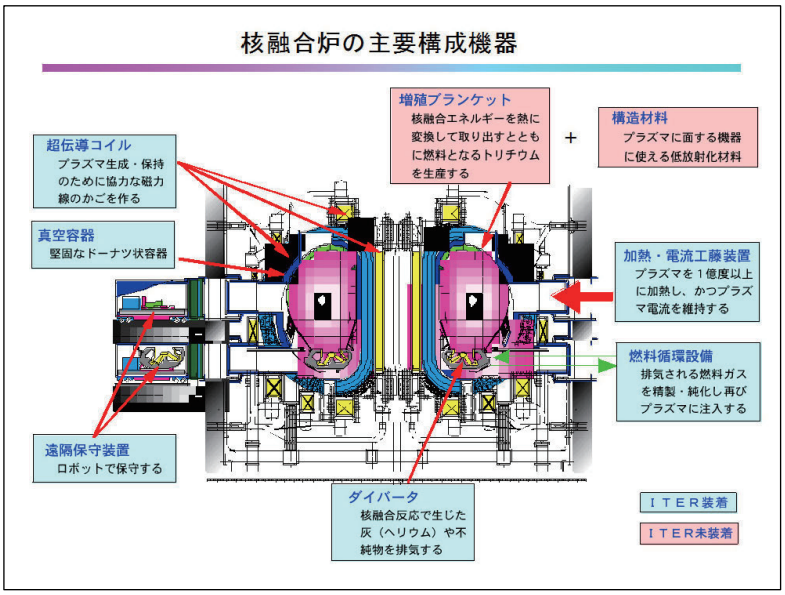
超伝導磁石やプラズマを加熱する装置等の大型の機器について、それらを統合して核融合装置を構成し、その工学技術を実証することが、ITER の２つ目の大きな技術目標になっています。

さらに ITER としては、先ほどからお話している中性子の運動エネルギーを熱に変えるブランケットといった、重要な機器の試験を行うことも目標としています。また核融合で使う三重水素、つまりトリチウムは、実はこの世の中にはほとんど存在しません。ですから、トリチウムという燃料は人工的に作らなくてはいけませんが、それはリチウムに中性子をあてて作ります。後でブランケットのところでお話しますが、熱エネルギーを生産し同時に燃料であるトリチウムも作るという、そういった難しい課題を持つブランケットは、ITER に装備するにはまだ開発が十分に進んでいません。

したがってITERにあるブランケットに相当する部分は、実は鉄のブロックであり、中性子を外に逃がさない、遮蔽するためにだけ使われています。遮蔽するといっても、中性子はその中で減速して熱に変わりますから、この鉄のブロックは温まります。それを冷却材で冷やして、一定の温度に保つことになっています。核融合の出力は約 500MW です。プラズマの燃焼時間としては 300～500 秒で、プラズマの主半径が 6m ぐらいという装置です。

ITER 計画は、1985 年の米ソ首脳会談がきっかけで始まりました。1988 年から 3 年間、概念設計活動を行い、1992 年から工学設計活動を行いました。工学設計活動では、ドイツのガルヒン、茨城県の那珂市、アメリカのサンディエゴという 3 カ所に設計センターを設け、そこに各極の研究者、技術者が集まって設計を行いました。

それと同時に、たとえば大型の超伝導磁石を使うとか、装置を大きくするとか、性能を上げるとか、あるいは新しい機器を入れるということになると、それらが実際に作れるかどうかは、十分な確証がありませんでした。そのために、ITER の工学設計活動の中ではかなり綿密な工学 R&D を行い、その結果や実証試験を踏まえ、これで実験炉 ITER を作ることができるという見通しを得ました。その後 2001 年から 2006 年までの長きにわたり政府間で協議を行い、2007 年 10 月にめでたく ITER 協定が発効して ITER 機構が発足し、建設活動に入ることになりました。




図－12

〈図－12〉　核融合の主要構成機器を簡単にお話しておきます。先ほどから話に出ている超伝導コイルが 3 種類あります。トロイダルコイル、ポロイダルコイル、センターソレノイドコイルです。大きなドーナツ型の真空容器があり、その中にプラズマができます。また、遠隔保守装置というのもあります。

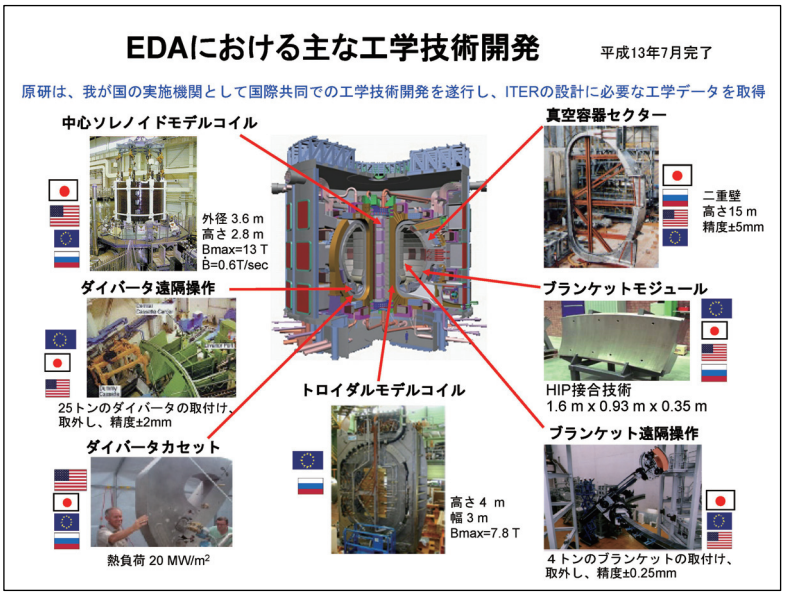
実は DT 反応で生じる中性子を熱に変えて遮蔽するという話をしましたが、中性子が当たることにより、プラズマ周辺の材料は全部、放射化されます。したがって、いったん核融合装置の中で DT 反応を実現すると、その真空容器の中の装置やブランケットなどは全て、放射化しています。するとそこでそれを取り替えるとか保守をするためには、ロボットを開発しておく必要があります。そうでないと、何か故障などがあっても修理は難しく、その装置全体が使えなくなってしまうのです。遠隔保守装置は、核融合の主要構成機器の 1 つになっています。

また、ダイバータという、核融合で発生した燃えかすのヘリウムを除去する装置があります。さらには燃料を供給する装置も必要です。燃料である重水素と三重水素は、実際のプラズマ中には 1g 程度しかありませんが、それは燃えてしまいますから、常時それを供給してやる装置が必要です。それから加熱・電流駆動装置ですが、トカマクはプラズマの中に電流を流して自分で磁場を作らないとプラズマがうまく閉じこもりませんから、どうやっても自分の中に電流を作る装置が要るということで、外部から電流を流せるような装置が必要になるのです。

ITER では、この青色で記した箇所の装置は開発が完了しています。工学設計活動の中で大型の工学 R&D を行い、必要な性能の装置が作れるところまで技術レベルを上げました。

しかしながら ITER では、ブランケットあるいは構造材料は、発電を行う炉に直接使用できるものではありません。ブランケットは ITER を試験装置として試験を行い、そのブランケットを次の発電を実証する装置の中で使っていこうと考えています。構造材料としては、ITER の運転期間と積算の中性子照射量を勘案し、実績のあるステンレス鋼を用いています。しかし次の発電実証炉になって中性子がより多く出てくる段階になると、ステンレス鋼では厳しいと言われています。最も有望なのはフェライト鋼です。だいたい 8～9％のクロムを入れたフェライト鋼を構造材料として

使うことになっていますが、試験するブランケットそのものも、フェライト鋼を使って構成する予定です。この構造材料の開発については、最後に BA 活動の中でまた若干触れさせていただきます。

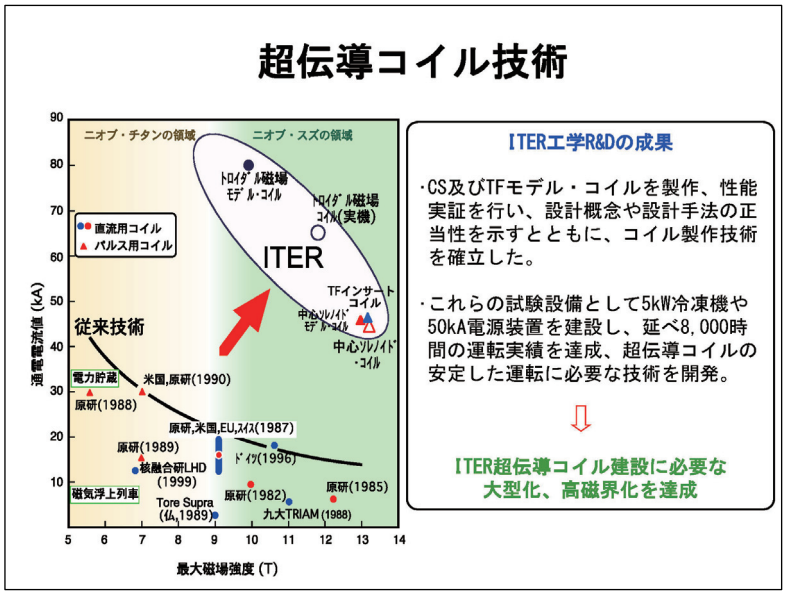



図－13

〈図－13〉　さて、EDA（工学設計活動）における主な工学技術開発ですが、7 大工学 R&D を実施しました。まず、中心ソレノイドモデルコイルに参加したのは日本、アメリカ、ヨーロッパ、ロシアです。現在の建設活動と違い、設計活動に参加したのはこの 4 極でした。その後建設活動になってからは、ここに中国、韓国、インドが加わり、全部で 7 極になっています。

その次にダイバータの遠隔保守機器の開発、ダイバータカセットを製作する技術、トロイダルモデルコイル試験、ブランケットの遠隔操作をする機器の開発、ブランケットのモジュール、さらには真空容器のセクターなど、実規模のものを作って製作が可能か、製作コストは妥当か、などを確認しながら、ITER を見据えて工学技術の開発と設計を一緒に行ってきました。

特にこの大型の工学 R&D は、物を作る技術開発という観点から非常に重要でしたが、もう 1 つはコスト低減のためにも非常に有意義でした。我々がこういった工学 R&D を国内の産業界と一緒にやりましたが、作れるか作れないか分からないものを作っていくときには、最初の試作コストは非常に高くなりました。こうやればできるということが分かってから後は、コストを大幅に削減できることがわかりましたので、こういった R&D をやることにより、実験炉の建設コストを低減化することができたと言えます。



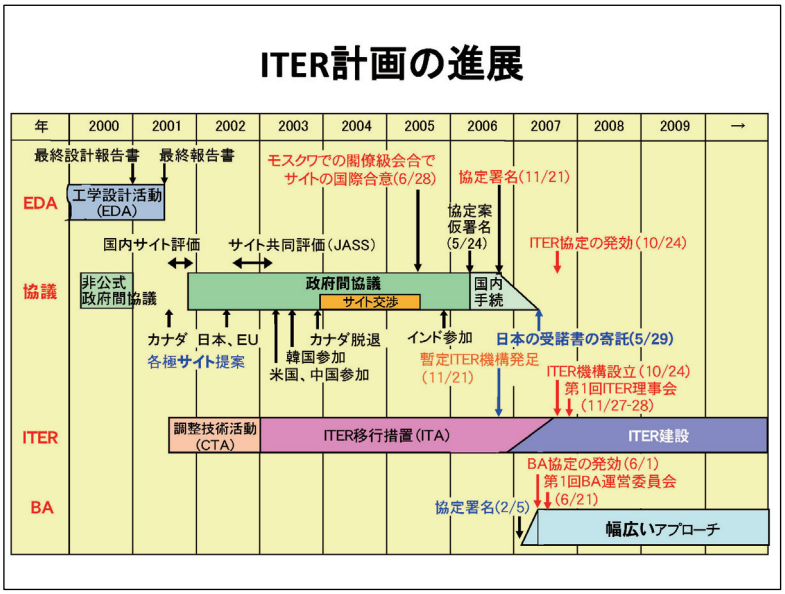

図－14

〈図－14〉　ここで、超伝導コイルの技術がどれほど進歩したかということをお示ししておきたいと思います。左のグラフは、縦軸に超伝導磁石への通電電流を取っています。簡単に言えば、通電電流が大きくなるということは、大きな磁石になるというイメージです。上に行けば行くほど大きな磁石です。横軸は最大磁場強度をテスラ（T）で表しています。右に来れば来るほど、強い磁場を発生する磁石ということになります。

我々が工学設計活動でコイルの R&D を始めた当時の技術レベルはと言いますと、磁場は低いけれども比較的大きなコイルは、ニオブ・チタンという材料を使って作られていました。小さいけれども強い磁場を必要とするコイルは、ニオブ・スズを使って作られていました。

技術レベルがこういう状況にあったときに、ITER で要求された中心ソレノイドコイルの仕様は、磁場がより高く、サイズの大きなものでした。ですから、この程度の技術力から要求性能を満足するコイルを開発できる技術力に到達できるか、工学設計活動の大きな R&D の目標でした。そこで実機並みのコイルを作って試験を行いました。その結果、多くの失敗を克服し、ITER の仕様にきちんとかなう大型のコイルを作ることはできる、ということを実証しました。このような工学設計活動の成果を基に、建設に移行していったわけです。

## ■ITER 建設



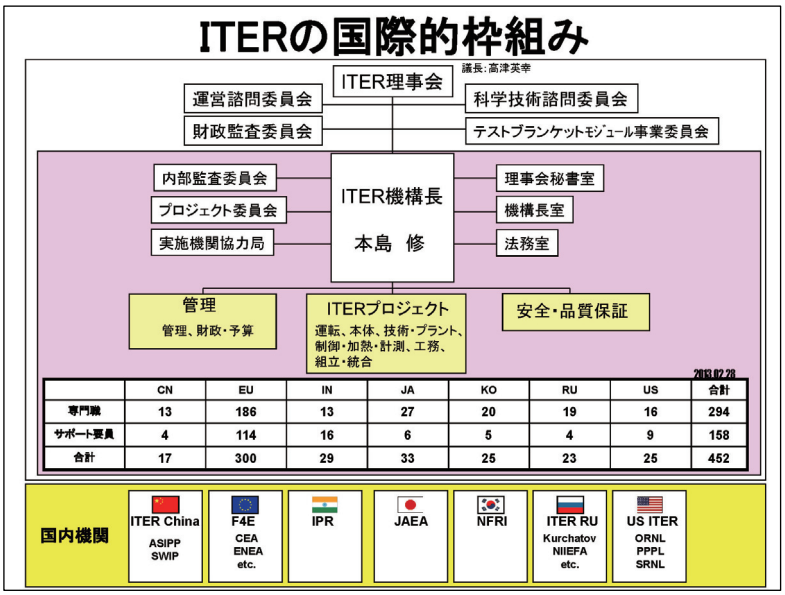

図－15

〈図－15〉　ITER 計画の進展については、2001 年まで ITER の工学設計活動が行われ、最終設計報告書が出されています。この頃から、建設に向けて非公式の政府間協議が行われました。先ほどお話したように、実際には 5～6 年の長きにわたり建設を判断する政府間協議を行い、サイト交渉を行いました。日本はサイトの有力候補としてヨーロッパと厳しい綱引きをしましたが、大接戦の末フランスに建設することとなり、日本では日欧協力による「Broader Approach」という事業を実施することになりました。この政府間交渉をやっている間に、調整技術活動、ITER の移行活動を行い、そして 2007 年以降、建設に移ってきました。

実は政府間交渉が始まる前の ITER の設計は、1 兆円規模の大きなサイズのものでしたが、いかに国際協力とはいえ、建設にかかるためにはそれを半分ぐらいに圧縮しなくてはならないということになりました。そのため現在の設計は、短期間に非常に苦労して装置全体のサイズを半分程度にしたものです。しかし小さくしたことによって、いくつかのデメリットが生じました。エネルギー増倍率が小さくなったこともありますが、ITER で発電することが難しくなってしまったこともその 1 つです。

ITER で発電しようと思うと、今の状況でもできないことはありませんでした。中性子を減速させて熱を発生させるブランケットは鉄のブロックです。単なるブロックではありますが、中性子によって発生する熱量は、そこに増殖ブランケットを置いてもほぼ同じです。ですから、もちろん設計によりますが、冷却材の入口温度をたとえば 250℃とか、300℃にすれば、出てくる冷却水の温度が 350℃程度のものは当然得られます。そういった高い温度の冷却材出口温度が得られれば、それで発電することは可能です。

しかしそのためには、冷却配管および機器を全部、熱伸び対策や断熱施工も含め、高い温度に対応できるように対策を考えなくてはなりません。しかし、装置を小さくするためにまずそういうスペースを削らざるを得ませんでした。現状の ITER では、機器や配管の温度を高いところまで上げることはできません。冷却水の出口温度はおよそ 200℃程度です。

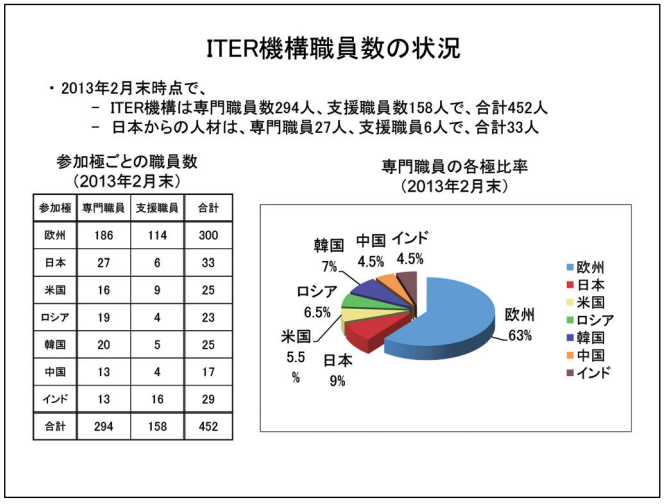



図－16

〈図－16〉　ITER の国際的枠組みですが、ITER 理事会というのがあります。つい先日まではロシアの Velikhov さんという、ITER が始まったころからロシアの代表をしている高名なアカデミシャンが議長でした。現在の議長は、日本原子力研究開発機構の特別研究員である高津英幸さんが務めています。その ITER 理事会には、運営、科学技術、それぞれに関する 2 つの諮問委員会があります。その他に、財政監査委員会とテストブランケットモジュール事業委員会が理事会に直接付属しています。

理事会の下に ITER 機構長が置かれています。ピンクの枠の部分が、フランスのカダラッシュで集まって仕事をしている ITER 機構です。現在の ITER 機構長は本島先生で、これまで核融合科学研究所の所長等を歴任された方です。初代の ITER 機構長は、今日いらっしゃっている池田要さんが担当されました。

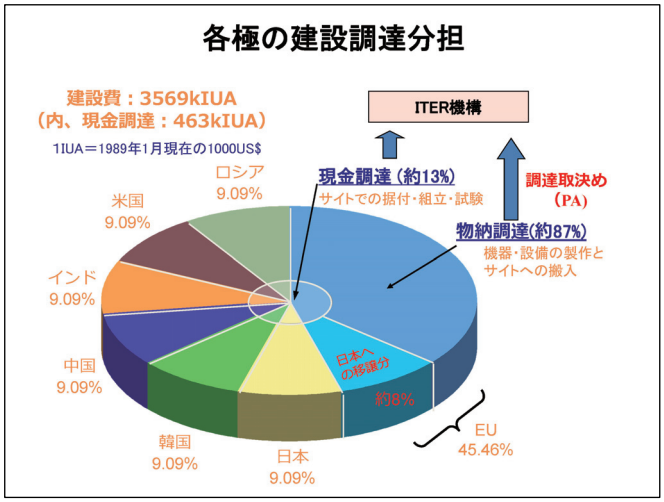
池田さんは、まだ建設初期の各極の足並みも十分そろっていない始動期にたいへんなご苦労をされてプロジェクトを指揮し、不十分なインターフェースを補完するなど製作設計を完成させました。建設という実作業の開始に当たり、核融合科学研究所で大型のヘリカル装置を作ってこられた本島先生にバトンタッチされました。また ITER の機構の中には、管理部門、ITER プロジェクト部門、安全・品質保証の部門という 3 つの大きな部門があり、中には内部監査委員会やプロジェクト委員会など、多くの部署を抱えた一大組織になっています。




| 参加極 | 専門職員 | 支援職員 | 合計 |
|---|---|---|---|
| 欧州 | 186 | 114 | 300 |
| 日本 | 27 | 6 | 33 |
| 米国 | 16 | 9 | 25 |
| ロシア | 19 | 4 | 23 |
| 韓国 | 20 | 5 | 25 |
| 中国 | 13 | 4 | 17 |
| インド | 13 | 16 | 29 |
| 合計 | 294 | 158 | 452 |

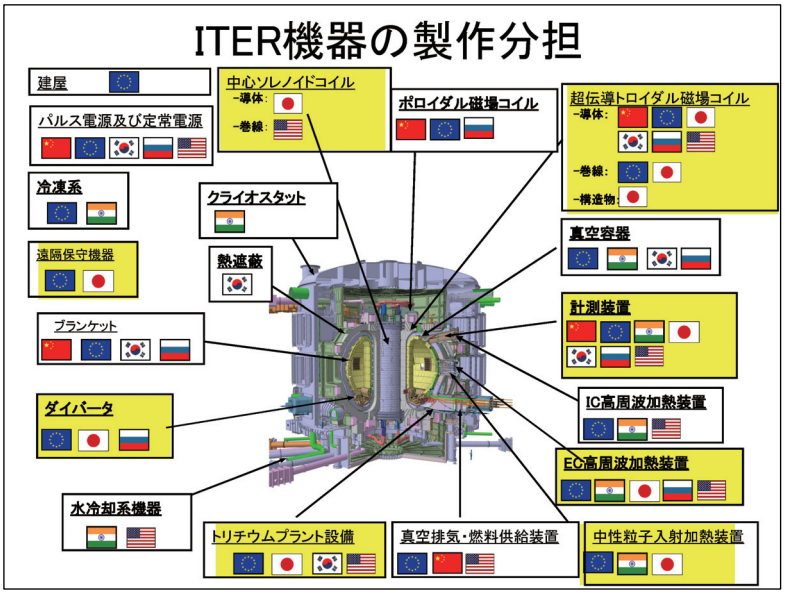
図－17

〈図－17〉　2013 年 2 月現在、職員総数は 452 人ですから、大きな組織です。人数が圧倒的に多いのはやはり欧州で 63%、約 300 人を占めています。日本は約 9%で、専門職員が 27 人、支援職員が 6 人、合わせて 33 人が行っています。一番少ないのがインドと中国です。専門職員を 13 人ずつ送り込んでいて、中国は支援職員 4 名、全部で 17 名です。インドは支援職員が非常に多く、16 名が行っていますから、全部で 29 名です。

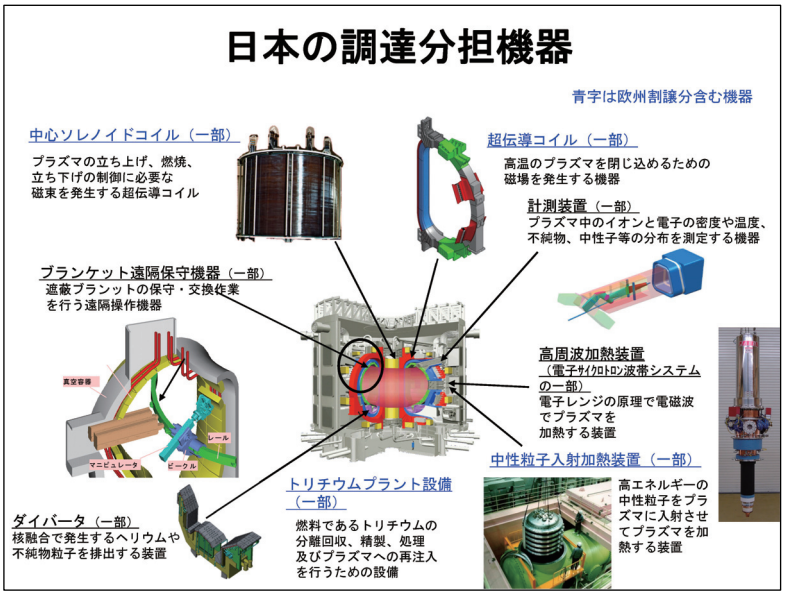



図－18

〈図－18〉　各極の建設の調達分担ですが、ヨーロッパがサイトを取ったということで、物納調達は EU が全体の 45%、残りの 6 極で約 9%ずつを分担しています。物納調達は全体の 87%で、現金の調達が 13%です。つまり、各極は自分の分担分の 13%は現金で払うことになっています。



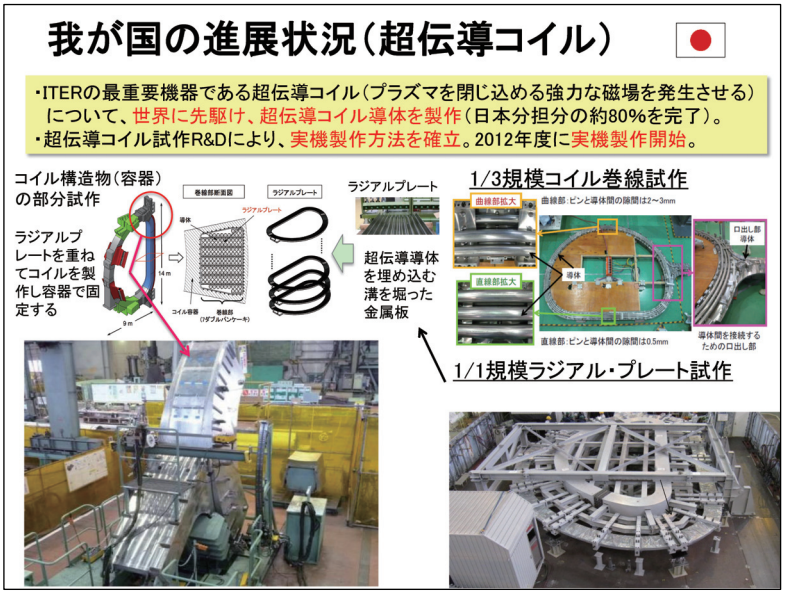

図－19




図－20

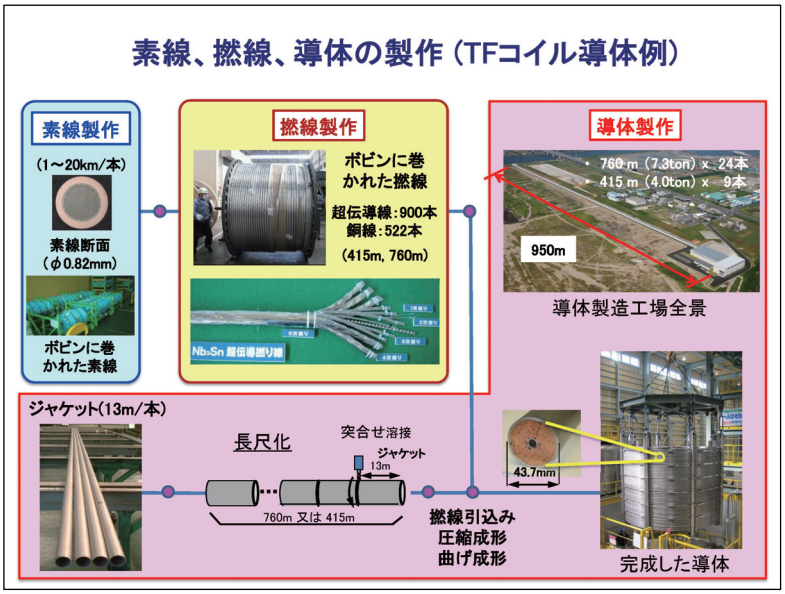
〈図－19、20〉　各極の機器の製作分担ですが、日本は重要な機器の多くの部分を分担しています。国内での調達は超伝導磁石を中心に進められています。EDA の中で、実際に実機に適用できる規模での工学 R&D をやって試作もしてきましたが、さて本物になるとまたもう一段大きくなるために、実規模の導体などの試作試験も行っています。

また、ラジアルプレートという、導体を納めそれにかかる力を受け止める分厚い支持板があります。超伝導磁石は大きくなればなるほど非常に大きな力がかかるので、低温構造材の開発が大きな課題になっています。磁場を強くするためには、いかに強い構造材料を開発するか。それが大きな課題になってきています。



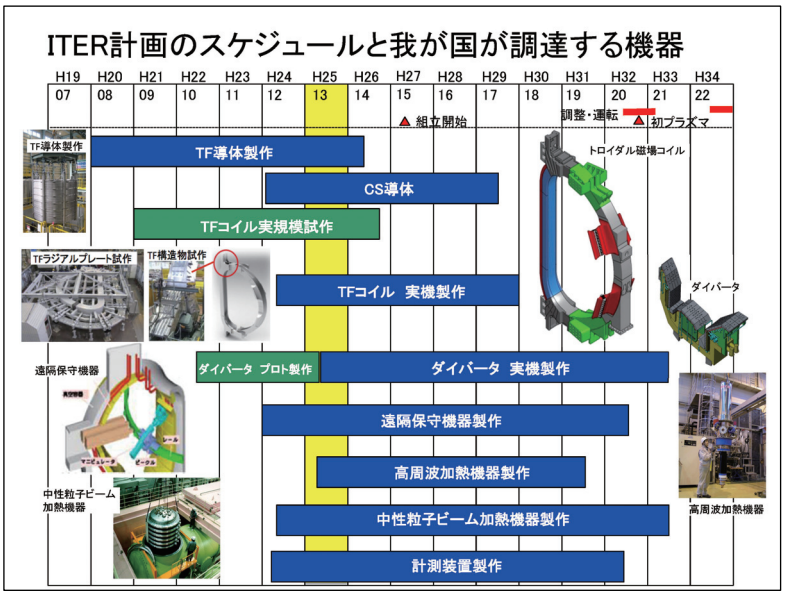

図－21

〈図－21〉　これは超伝導磁石製作に関する進捗状況の１例です。３分の１規模のコイルの巻線試験等が行われてきています。また、実規模のラジアルプレートも製作しています。当初は大きなインゴットを作り、それを削り出してプレートを作ろうという構想でしたが、それでは工数も日数もかかりますし、またコストもかかるということで、現在は HIP（熱間等方加圧法）を使った接合構造になっています。



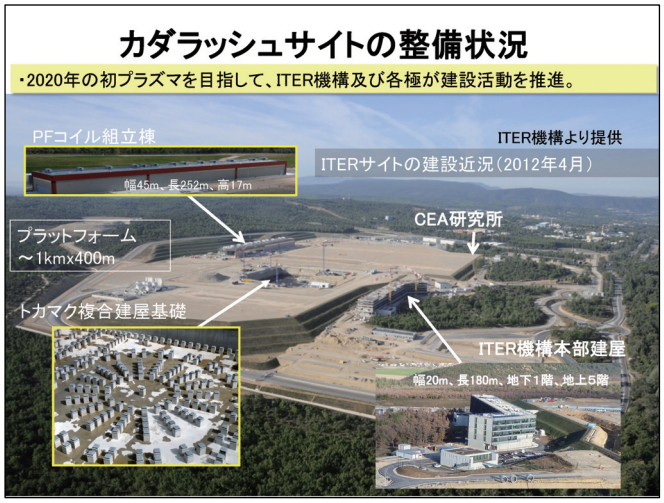

図－22

〈図－22〉　これも超伝導磁石の導体の製作例です。非常に長いコイルを作るために、950m にわたり超伝導撚線（よりせん）をジャケットの中に入れて圧縮します。それができる北九州の工場で製作しています。いま超伝導の素線はかなりの量が完成していて、33 本中 26 本が完成しています。



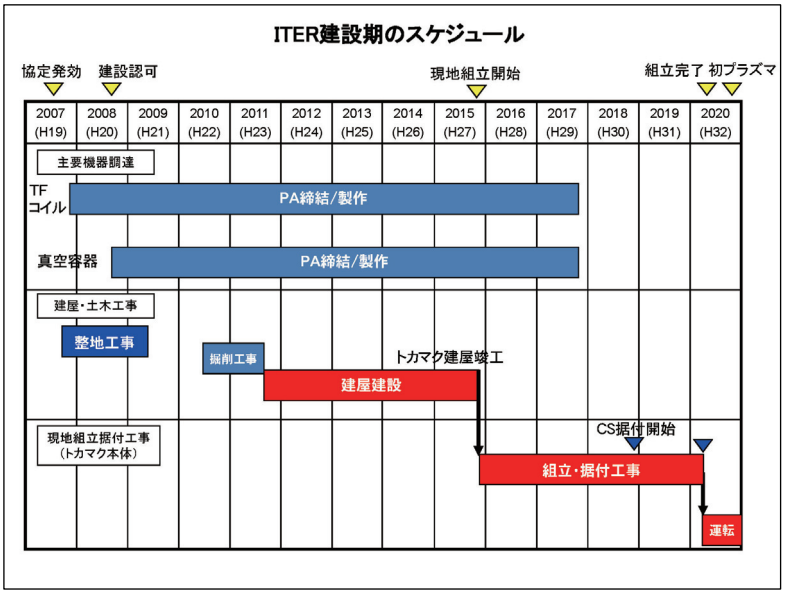

図－23

〈図－23〉　ITER 計画のスケジュールと日本が調達する機器です。青い線で示した部分は我が国が作っていくことになります。ITER で最初のプラズマを着けるのが 2020 年ごろの予定なので、それまでに早めに取り付ける装置、直前になってからの装置があります。製作する期間は違いますが、最初のプラズマを着けるまでには必要な機器が装備されることになっています。



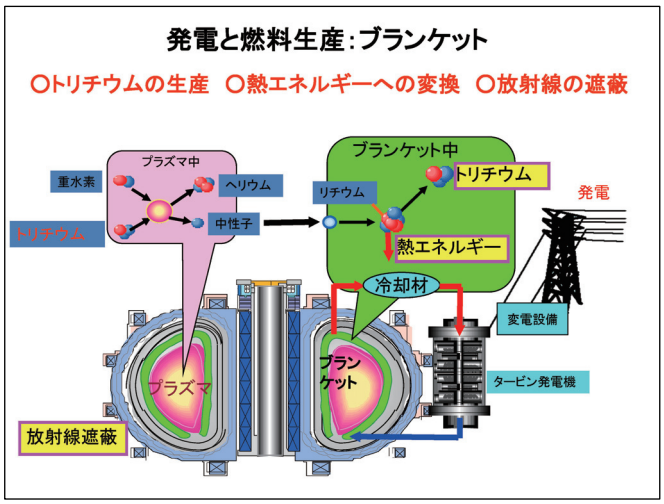

図－24

〈図－24〉　カダラッシュサイトの整備状況です。とても立派な ITER 機構本部の建屋ができていますし、トカマク建屋の基礎もでき、プラットホームというトカマクを載せる支持部分も出来上がってきている状況です。




図－25

〈図－25〉　ITER の建設スケジュールですが、現在の予定では、現地の組み立てが 2015 年から始まります。それまでには、各極が必要なものを作って納めていくことになっています。それから現地の据え付け、組み立てが行われ、2020 年ごろに最初のプラズマを着けることになっています。

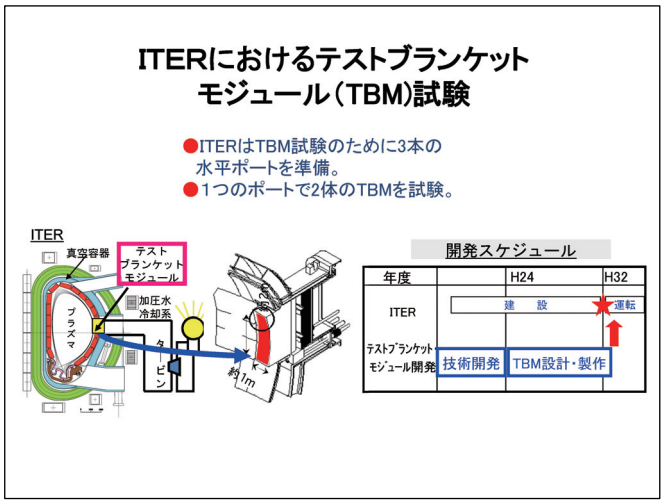



図－26

〈図－26〉　ブランケットですが、先ほどからお話しているように、DT 核融合反応をしてヘリウムと中性子が 1 個できます。この中性子が、ブランケットというプラズマを取り巻く装置の中に飛んできます。ここで減速して熱エネルギーになります。減速の途中にリチウムが置いてあります。リチウムは海水から取ることもできますし、鉱山から採取することもできますが、海水から十分取れる基礎技術は完成しています。このリチウムに中性子が当たると、トリチウムができます。

中性子１個からトリチウムが１個できますから、１つの核融合反応でトリチウムが１つなくなると、トリチウムが１つできることになります。しかし実は、中性子は全部ブランケットに入らずに、いろいろなところに飛んで行ってしまいます。この形だと、トリチウムは徐々に生産が足りなくなって減ってしまいます。

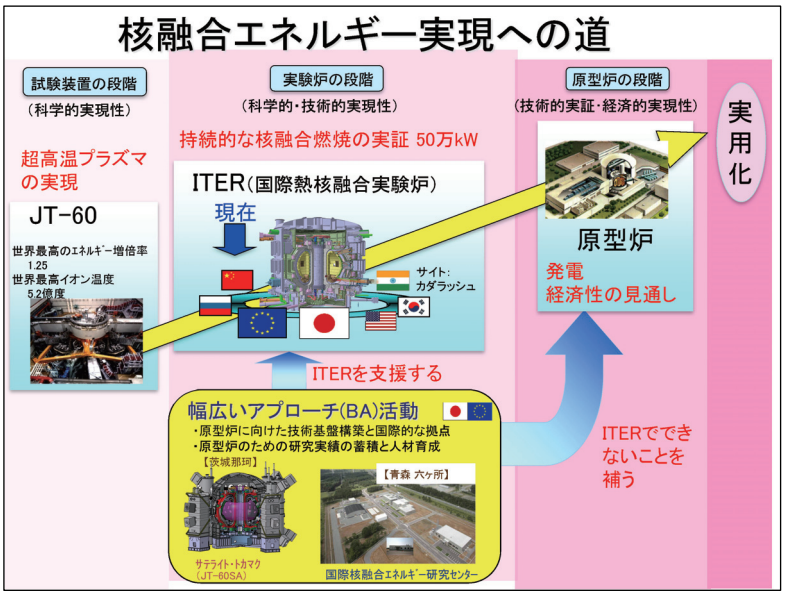
そのために中性子増倍材としてベリリウムを置いて、(n, 2n) [※2] 反応で中性子を２個に増やします。１個反応が起こると、トリチウムが２個できる仕掛けにします。実は中性子を２個とも有効に使えればいいのですが、やはりポート（穴）があったり、ブランケットを置けないところもあったりするため、実行効率が 1.2～1.3 辺りでトリチウムを作れます。それでもトリチウムは若干増やすことができるのです。こういう形で、将来の核融合炉では燃料を自分で生産しながら発電を行っていくことになろうかと思います。




図－27

〈図－27〉　これがテストブランケットモジュールの概要です。実際のブランケットの中に入っているのは、リチウムの化合物、あるいはベリリウムの化合物で、それは今の設計では、ステンレス鋼製の容器の中に粒状にして入れてある状態です。

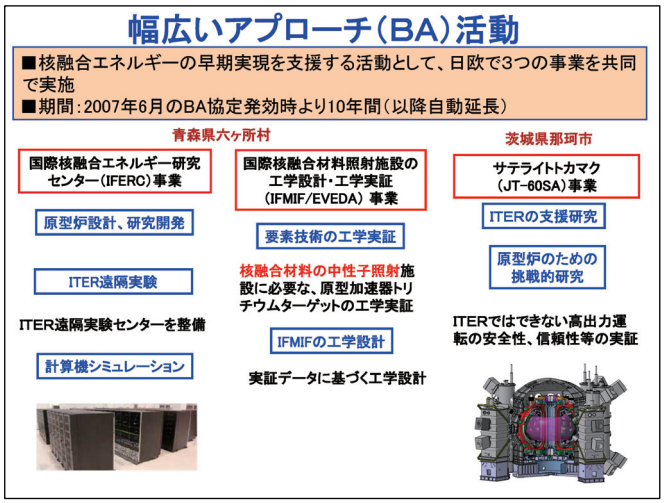
[※2] 中性子が起す核反応の１つで、中性子のエネルギーが高い場合に生ずる、２個以上の中性子を放出する反応




図－28

〈図－28〉　核融合エネルギーをどうやって実現するかというと、先ほどお話したように、燃焼プラズマをこの ITER という装置で実証し、そのプラズマの条件や性能をもとに、実際に発電を行って実証する装置を実現します。もう 1 つは、工学技術の開発に関する道筋です。ブランケットの試験は ITER を使って行い、その他、材料の試験や ITER を補完するようなプラズマ研究は BA 活動の中で行って、それらの合わせ技で原型炉に向けて十分なデータベースを確立しようと考えています。

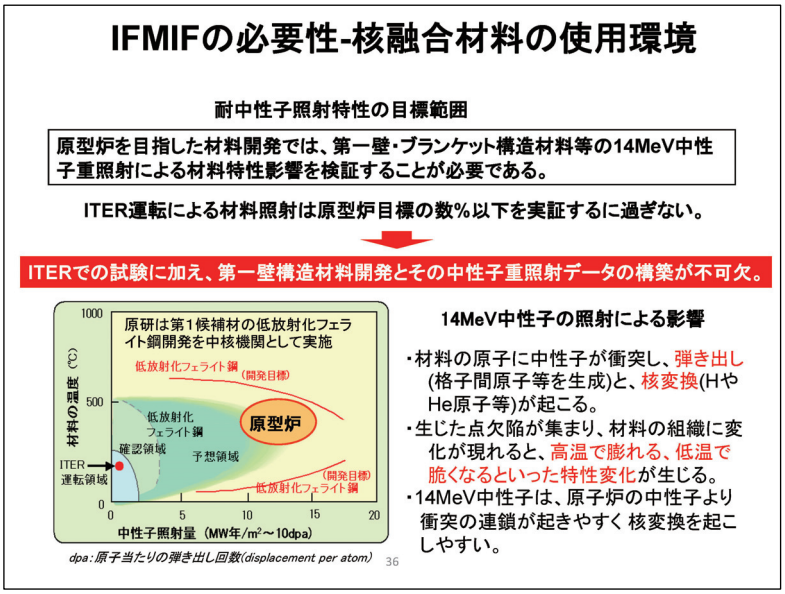
## ■発電実証装置（原型炉）の実現に向けて




図－29

〈図－29〉　BA 活動について若干ご説明すると、青森県の六ヶ所村で行われているのが「国際核融合エネルギー研究センター（IFERC）」という構想です。ここでは、原型炉の設計と計算機によるシミュレーションを行います。ITER が動いた暁には、ITER 遠隔実験ということで、ここから

直接 ITER の運転パラメータを設定することも構想されています。

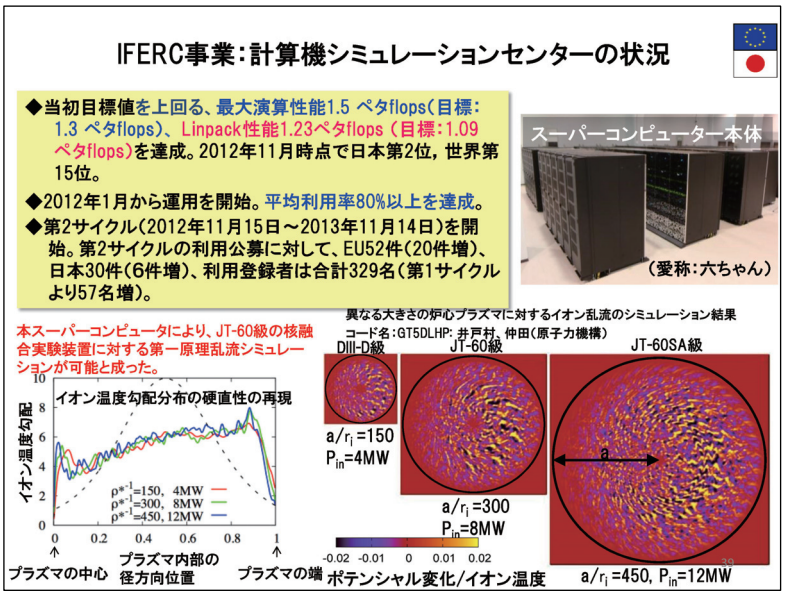



図－30

〈図－30〉　もう１つは、材料の高エネルギー中性子による劣化の状況を把握するために必要な、材料の照射試験装置があります。これが「IFMIF（International Fusion Material Irradiation Facility）」と呼ばれている装置です。IF が２つ M をはさんでついているものですから、アメリカやヨーロッパの人はあまりこの名前を好まないのですが、最近この BA 活動の中でやっと、現実的にこの実証試験をすることになりました。

IFMIF がなぜ必要かと言うと、要するに核融合で発生するエネルギーは 14MeV と非常に高いので、材料の損傷は原子炉における実験だけでは評価できないのではないだろうか、というのが一番の問題になっているためです。

左下のグラフは、横軸に dpa（displacement per atom、中性子照射量）、縦軸に材料の使用温度を取ったものですが、劣化が増えていくとある程度低い温度では脆性が出てきて使えないということで、温度マージンが狭くなってしまう。それがどの程度狭くなるかということを実際に確認するために、この材料照射試験装置が必要になっています。




図－31

〈図－31〉　さらに六ヶ所村には、IFERC のシミュレーションセンターがあります。我が国には、「京」という計算機が神戸にあります。今は世界で 3 位（2013 年 6 月 13 日時点）になりましたが、10 ペタ flops[※3] の計算能力を持った非常に速い計算機です。六ヶ所村には、核融合専用の 1.5 ペタ flops の計算機が置かれています。これはフランスの Bull という会社がインテル素子を使って作ったスーパーコンピュータですが、これで核融合についての膨大な計算をしています。ただ、核融合でもさらに膨大な計算をする人がいて、京も並行して使われています。

## ■おわりに

核融合発電の実現はいつ頃になるだろうと考えると、核融合のコミュニティでは 2040 年辺りを考えています。だいたい、そんなところだろうと思います。実際に ITER が順調に進んでいけば、2040 年後半ぐらいのところで原型炉が運転に入り、実際に発電した電気を送ることができるだろうというロードマップを考えています。

ですから、いつも 50 年先と言って怒られてはきたものの、実験炉の ITER を実際に建設する段階になると、技術的な難しさも具体的に認識され、技術開発にどの程度の時間がかかるだろうかということも理解されてきたと考えます。その ITER の建設がこれから順調に行くか、今の絵のように順調に事が進むとはなかなか考えにくいところもありますが、うまくいけばこのようなスケジュールになるのではないかと思います。

---

※3　コンピュータの処理性能を表す単位の 1 つで、演算を 1 秒間に 1000 兆回行うことを表す単位

## まとめ

- エネルギー源の開発を目指す核融合実験炉ITERの建設は、7極が参加する国際協力で着々と進行している。
- 発電を実証するITERの次期装置開発に向け、日欧協力によるBA活動も着実に進展。
- 計画が順調に推移すれば、21世紀半ばまでには核融合炉による発電は可能と考える。

以上をまとめると、エネルギー源の開発を目指す核融合実験炉 ITER の建設は、7 極が参加する国際協力で着々と進行しています。また、発電を実証する ITER の次の装置の開発に向け、日欧協力による BA 活動も着実に進んできています。そして計画が順調に推移すれば、21 世紀半ばまでには核融合炉による発電は可能だろうと考えています。

ということで、ずいぶん思い込みが強い講演になってしまったかもしれませんが、私の現在の ITER に対する理解と、核融合の将来に対する展望をお話しました。ご清聴ありがとうございました。

【質疑応答】

**参加者：** 貴重なお話をどうもありがとうございました。実際に核融合による発電が実現したとなると、同じエネルギーを生み出すのにかかるコストは、たとえば従来の原子力や火力に比べどれぐらいになるのでしょうか。

**関　：** コストについては、以前にも評価をしたことがあります。たとえば環境にやさしいとか、燃料が要らないとか、廃棄物の処理が不要であるということも含めて評価をしました。どういうプラズマを作るか、どんな核融合炉が実現できるかにもよります。技術的進歩も見込んで、軽水炉に匹敵する値になっていたと記憶しています。

プラズマの性能をもっと上げなければいけないとか構造材料をどうするかとか、磁場ももっと強くしたいとか、経済性にすぐれた魅力的な核融合炉の姿についていろいろ議論をした記憶があります。具体的な数値についてはもう記憶がありませんが、最近また原子力機構のほうでいろいろと議論をされているのではないかと思います。

そういった意味で、究極と言ったわりには究極の説明をしませんでしたが、1 つには廃棄物のトランスウラニウムがありません。放射化物[※4] は必ず出ます。しかも、核融合炉は重いので量としてはかなり出ますが、基本的には鉄系なので体積としてはそんなにありません。それをうまく保管してやれば、100 年という 2 世代か 3 世代分の寿命の中で、そんなに無理して保管しておかなくてもいい状況にすることができるのです。

先ほどリチウムの話を出しましたが、燃料であるリチウムも海水から取り出す技術がほぼ確立されているので、今後大量に取り出せれば、燃料のほうも問題がなくなります。そういった意味では、究極と言っていいのではないかと考えています。

**池田要氏：** 私は、先ほどご紹介のあった池田と申します。最初に ITER の事業を立ち上げてきました。今のような質問が出るといつも私が答えていたのは、ITER では技術的な実証までする、という点です。先ほど関先生から、熱を取り出して水蒸気までやるけれども、発電はしないというお話がありました。ITER で核融合がエネルギーを生むという、技術的な実証は行いますが、経済的な実証は原型炉で行うことになります。たとえばどういう部分でどれだけの材料が長い間持つのかとか、それをどれだけの頻度で交換しなければいけないのかとか、そういう議論をしなければいけません。それを行って初めて、プラントとしての経済性が議論できます。

すると、原型炉の次が商業炉ということになりますが、そういう見当をつけるためにも、BA 活動とか、経済性立証のための材料の耐久性とか、そういった議論が必要だということになります。それを ITER と並行してやることにより、今のような質問に的確に答えられるのだろうと思います。その答えがないと商業炉になりません。ですから、それができるかどうかという見極めをしないと、21 世紀半ばといえども、本当に発電炉として実用化するかどうかという議論の答えにならない。それをこれからやろうということだと思います。

---

※4 中性子が構造物等を構成する原子と核反応し、構造物が放射能を帯びるようになった物

**本田財団理事長：**　理事長の石田です。ごく一般的な質問をさせていただきたいと思います。1 つは、先ほど関先生からご説明がありましたが、核融合炉というのは、今の発電用軽水炉と違い、福島第一原子力発電所のように核分裂生成物を広くまき散らすようなことはありません。すなわち、核融合生成物は核分裂生成物と比較して放射性を帯びていないから、核融合生成物は放射能を持っていません。ただし、お話にあったように、核融合の反応の過程では中性子を用います。中性子は放射能を帯びていないものに放射能を帯びさせるという機能があるはずですから、相当強い中性子によって、いろいろな装置が放射化してしまうということがあるのでしょうか。あるいはトータルで見て、核融合炉はより国民に受け入れられやすいエネルギーと言っていいのでしょうか。それとも必ずしもそうとは言い難いものなのか。それが 1 点目です。

2 点目は、21 世紀半ばまでに核融合炉による発電は可能と言われましたが、実際に核融合炉が今の核分裂の軽水炉のように、かなり大規模に我が国あるいは世界で利用されるようになるのは、いつになりますでしょうか。これは難しい質問ですが、いつというのが核融合をおやりになっている皆さんの常識になっているのか。その辺はいかがでしょうか。

**関　：**　1 つ目ですが、核融合炉も放射性物質を扱いますし、廃棄物も出ます。ですが、全体的な安全性という観点からは、核融合炉のほうが核分裂炉よりも優れていると言えるのではないかと思います。そういう意味ではより国民に受け入れやすいエネルギーだと思います。

2 つ目ですが、核融合炉が今の軽水炉のように大規模に利用されるようになるのはいつかということについては、私自身は十分に検討したことはありません。そのため、はっきりとは回答しにくいところです。1 つには、初期の燃料の確保も問題になるかと思います。とにかく、トリチウムを用意しておかないと反応が起こりませんから。

トリチウムの確保についてはいろいろな考えがあり、重水素のプラズマを付けて順次トリチウムを作るというアイデアも、京大の小西先生などが検討されていますが、1 号機ができて運転されていって、2 号機を造るときに 2 号機が最初から燃えようと思うと、しかるべきトリチウムが要ります。それをどれぐらいの期間で作れるかというと、それはブランケットでどれくらいトリチウムを余分に、燃やす量よりも多く生産できるかという、ブランケットの性能によります。

また先ほど、池田さんが非常に上手に補足してくださいましたが、たとえば構造材料としてフェライト鋼を用いて実用炉に至るとすれば、フェライト鋼の寿命はしかるべき核融合炉の中性子束から考えると、およそ 3 年程度と評価されています。3 年ぐらいたつと、どうしてもブランケットの容器を交換しなければいけません。一方、ブランケットの中味であるリチウムは、比較的狭い領域でたくさん中性子を受けてトリチウムを作ります。3 年ぐらいたつと、いわばバーンナップ（燃焼）が進んでしまいますので、そのリチウムを新しいものに入れ替えなければトリチウムの生産が十分にできないという状況が起こります。いずれにしても、何年かごとにブランケットを交換しなければならないという課題はあります。

核融合炉をどの段階で実用炉と同じとみなすかは、池田さんもおっしゃっていたように、どれぐらいの発電コストまで許容するかということによると思います。また、建設する場所の問題もあるのではないかと思います。核融合炉は安全性が高いから、比較的

都心部に近接して立地していいということになれば、現在の状況の中で、特に原子炉が考えなくてはならない送電ロスのようなものは考えなくてもいいという面もありますが、我が国には、原子炉や核融合炉などに具合のいい候補地はあまりありません。あまり遅れると場所がないというのは、ずいぶん昔に言われた記憶があります。

ご質問に対する明確な答えにはなっていませんが、核融合炉が今の原子炉のように 20 基も 30 基もあるという時期は、相当先になるのではないかと言わざるを得ないように思います。

**本田財団理事長：** つまりは、核融合炉というのはその原理上、今の福島第一原子力発電所のように過酷事故を起こすことはないということではないかと思いますが、今いみじくもおっしゃったように、フェライト鋼をたくさん替えなければいけない。そのフェライト鋼は中性子を相当浴びていて、放射能の高いフェライト鋼がたくさん出てくる。それをどこかで保管する。もちろん、そのフェライト鋼の持つ放射能というのは、たぶんストロンチウム 90 やセシウム 137 のように半減期 30 年というものではなく、比較的半減期の短い放射能かもしれませんが、そういうものがあるということですね。

核融合というのは放射能フリーではないことは今おっしゃったとおりだと思いますが、どれほど国民の皆さんに受け止めていただきやすいものかというのは、たぶん多くの方の大きな関心事だと思います。その辺をもう少しご説明いただければと思います。

**関　：** 確かにご指摘のような問題があり、従来からとにかく材料がないではないかというのは言われてきました。ノーベル賞受賞者の小柴先生にも「えっ、3 年ぐらいで替えるのか。それはちょっと問題ですね」と言われたことがあります。確かに 14MeV の中性子を受けて 10 年も 20 年もピンピンしている材料は、今のところ思い浮かびません。ブランケットは交換せざるを得ませんし、交換した構造材料を再利用するかなど、十分検討されているわけではありません。放射化しにくい材料、放射線に強い材料の開発は、これからも研究開発が必要な、大切な分野だと思います。

いずれにしても、石田理事長のご指摘の通り、核融合といえども放射化物の廃棄物は出すし、燃料に大量のトリチウムも使う。国民の皆さんから見れば「原子核」に起因したエネルギー発生装置であることは間違いありません。たとえば ITER については、放射性廃棄物の性質や量をはじめ、トリチウムの取り扱いなど十分な検討を行い、その安全性をサイト誘致の時に住民の方々にご説明をしてきました。ご理解をいただいてサイトとして立候補していただいたと考えています。しかし実用炉になると、中性子の量も桁違いで、「放射線と放射化物」の問題がより大きくなってくることは言うまでもありません。

そういったことも考えていくと、石田理事長がおっしゃったようなことについては、私個人としては、ポイントごとにはいろいろ考えましたが、十分に包括的に考えてきたとは言い難いところがあるとおもいます。しかし今の若い人たちはもっときちんと考えているのではないかと思いますので、ぜひ彼らの話を聞いてあげていただければ、ありがたく思います。

■このレポートは平成 25 年 6 月 14 日東京會舘において行われた、第 126 回本田財団懇談会の講演の要旨をまとめたものです。本田財団のホームページにも掲載されております。
講演録を私的以外に使用される場合は、事前に当財団の許可を得て下さい。

発 行 所　公益財団法人 本田財団
104-0028 東京都中央区八重洲2-6-20ホンダ八重洲ビル
Tel.03-3274-5125 Fax.03-3274-5103
http://www.hondafoundation.jp
発 行 者　松　澤　　聡