

講演録 I¹ 核融合をめぐる最新状況（挨拶）

牛草 健吉

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー研究開発部門長

参議院調査室において、核融合に特化したシンポジウムが開催されることは、本当にありがたく幸せなことだと思います。

量子科学技術研究開発機構、QSTは2017年に新しい組織として設立されましたが、核融合自体は昭和30年代から取り組まれています。QSTはITERの国内機関として、また日本と欧州の協力による核融合共同研究開発活動である「幅広いアプローチ活動（BA活動）」の実施機関として国から指定されており、核融合の研究開発に国を代表して取り組んでいます。国からは「オールジャパンで、産業界も大学も研究機関と一緒に核融合研究開発を進めてください。」といった御指摘をいただいて研究開発活動に取り組んでいます。

実験炉ITERが出来上がりつつあり、モノが見えだしてきました。現地では、本体の据付組上が始まる時期を迎えています。また、茨城県那珂市の那珂核融合研究所において新たに大型実験装置「JT-60SA」が建設中で、

2020年には動き始めます。現在、このような非常に重要な節目になっています。

また、文部科学省が取りまとめた「核融合研究開発のアクションプラン」、そして「原型炉開発ロードマップ」があり、これらには「ITERの次に向けた研究開発活動を進めなさい」といったことが記されております。そうした意味でも、ITERの建設、JT-60SAの運転、そして次のステップに踏み込む重要な節目を迎えておりまして、国民の方々の御理解、御支援は是が非でも必要です。

今回、こうした場で、国の重要な施策に関わる方々に、我々の研究開発活動を紹介する機会を設けていただいたことに感謝いたします。我々は核融合研究を国民に還流できるよう取り組んでいますが、皆様方にも本日の話を聞いていただきましたら、是非ともその話を国民に還流していただけるよう御協力いただければと思います。

本日はどうぞよろしくお願いたします。

資源エネルギー・シンポジウム（参議院第三特別調査室主催、2019年1月18日（金））

（講演者） 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

核融合エネルギー研究開発部門	那珂核融合研究所	栗原研一	所長
	六ヶ所核融合研究所	池田佳隆	所長
（来賓及び同行者）核融合エネルギー研究開発部門		牛草健吉	部門長
核融合エネルギー研究開発部門研究企画室		竹永秀信	室長
同ITER・BA業務推進グループ		松本太郎	グループリーダー
同		谷口正樹	上席研究員

¹ 講演録I～IVは、2019年1月18日の「資源エネルギー・シンポジウム」（参議院第三特別調査室主催）における講演の記録である。なお、講演録II及びIIIで使用されている図表は全て講演者が講演において用いたものである。

講演録Ⅱ 核融合の研究開発をめぐる現状

— 過去・現在・近未来 —

栗原 研一

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー研究開発部門

那珂核融合研究所長

1. 核融合エネルギーはなぜ究極でどう難しいか
2. 日本の核融合エネルギー開発
3. ITERプロジェクトにおける調達活動の進展
4. JT-60SAプロジェクトの進展
5. 核融合エネルギー実現に向けた原型炉ロードマップ
6. 先端技術の波及効果

1. 核融合エネルギーはなぜ究極でどう難しいか

(1) 核融合とは何か

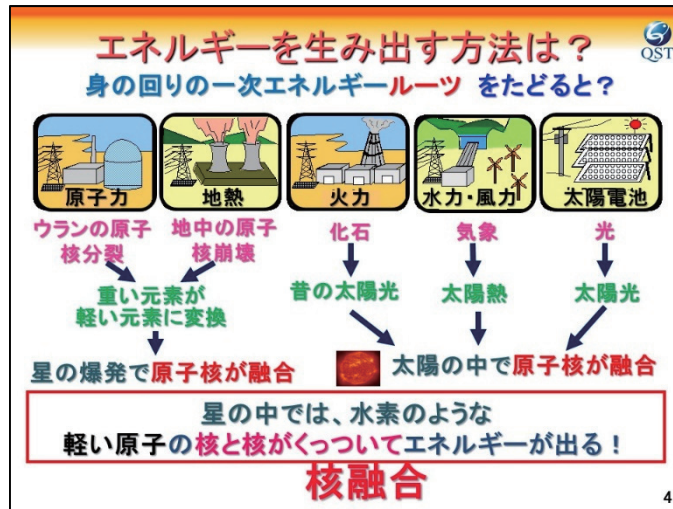
皆様にとって核融合はあまり馴染みのないものだと思います。核分裂は原子力発電所で行われている方法ですが、核融合とは一体どこで起きているのか、なぜ究極のエネルギー源と言われるのか、なぜ実現が非常に困難だったのかということです。そこで、核融合について説明する前に、そもそも、世の中の「エネルギー」とは一体どういったものなのか、元々のルーツは一体何であるのかについて説明します。

この図表1には、左から「原子力」、「地熱」、「火力」、「水力・風力」、「太陽電池」といった、

一般的に使用できる一次エネルギーが挙げられています。それぞれのルーツをたどりますと、原子力はウラン、地熱は地中の原子核崩壊といったように、重い元素が軽い元素が変わるときのエネルギーを活用するものです。では、この重い元素はどこでできたかと言いますと、星の爆発で起きた原子核融合が元になっています。一方で、図表1の右側にある火力、水力・風力そして太陽電池は、全て太陽の光あるいは熱を利用するエネルギー、すなわち太陽で起きている核融合反応が元になっています。

これらを総括しますと、水素のように軽い原

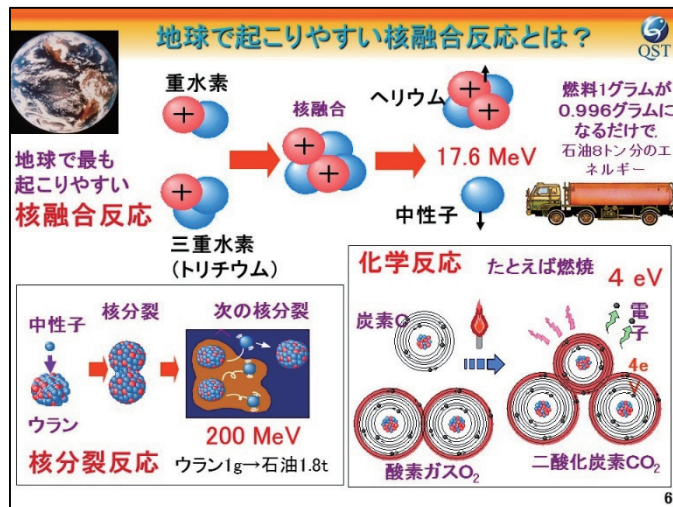
図表 1



図表 2



図表 3



子核と原子核同士がくっ付いてエネルギーを生み出すのが核融合で、全てのエネルギー源のルーツと言えます。最も身近な核融合と言えば太陽であり、太陽で起きている核融合反応を地上で実現しようということから、核融合研究は「地上に太陽を」というキャッチフレーズで言われています。

(2) 太陽での核融合と「地上の太陽」の相違

太陽では何が起きているのか説明します。太陽の半径は 70 万km、中心温度は 1,600 万℃、そして圧力は 2,400 億気圧という莫大な圧力で、そこでは四つの陽子がくっ付いてヘリウム (He) に変わる核融合が起きている。

核融合反応の際の発熱について説明します。太陽の 1 m³当たりの発熱量はわずか 10W しかありません。他方で、人間が「おしくらまんじゅう」すると、大体 1 m³当たり 1,000W 程度の発熱量になるということで、太陽の発熱量は極めて小さなものです。したがって、太陽の反応を地上で実現できたとしても、太陽の反応それ自体では地球上では使い物になりません。

図表 2 には星の大きさを記しました。木星は太陽に比べて 8 分の 1 程度で内部で核融合は起こらず、地球はさらにその 10 分の 1 程度です。このように地球は非常に小さい。地球の中心温度は 6,000℃程度で、圧力は 400 万気圧程度のため、地球が太陽程度の大きさだったなら、地球の中心部でも核融合反応が起きていたかもしれません。しかし地球では起きず、地球より大きな木星でも核融合反応は起きません。こうしたことから、核融合反応が生じる圧力の実現は非常に難しいことが分かります。

(3) 核融合反応とエネルギー

核融合反応とは、まさに「わずかな質量が膨大なエネルギーに変わる」という原理です。このことは 1905 年にアインシュタインが見付けた「 $E=mc^2$ 」という有名な式で表されます。m は質量、c は光速¹、 c^2 はその 2 乗ということで、小さな質量から莫大なエネルギーが生まれることが示されています。例えば、図表 3 の右側に示したとおり、核融合に伴う質量欠損により燃料 1 g が 200 分の 1 g 軽くなり、石油 8 t 分という莫大なエネルギーが生じます。

エネルギーを効率的に得るためには、どの元素を用いた核融合反応が良いのかで見ると、太陽で起きている反応では全く使いものにならないことは分かったので、地球上で起こりやすい反応の有無を調べたところ、重水素²と三重水素 (トリチウム)³の核融合が非常に効率的に大きなエネルギーを生ずることが分かりました。重水素は海水中に無尽蔵にあり、三重水素も製造可能です。そして、重水素と三重水素の核融合で 17.6MeV⁴という非常に大きなエネルギーが生じます。先の図表 3 には、他の方法によるエネルギーを記しましたが、このように、核分裂反応は 1 回で 200MeV と大きなエネルギーが生じる一方で、例えば火力発電に使われる化学反応では 1 回わずか 4 eV しかエネルギーを生じません。こうして比較すると、核融合反応が、いかに効率よくエネルギーを生み出せるものなのかが分かります。

(4) 核融合反応とプラズマ

核融合の研究者は、核融合反応をどう起こすかで苦労してきました。重水素は海水中に無尽

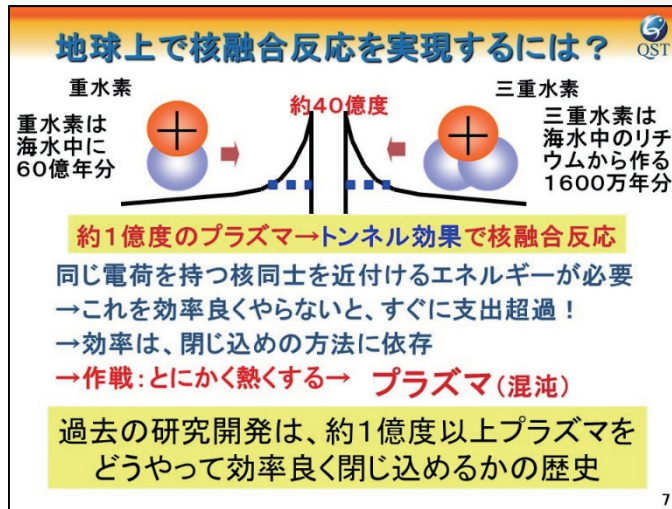
¹ $C=299,792,458\text{km/s}$

² ²H (デューテリウム、重水素)。なお、¹H (水素) は陽子 1、²H は陽子 1・中性子 1

³ ³H (トリチウム、三重水素)。³H は陽子 1・中性子 2

⁴ メガ電子ボルト。1 電子ボルト (1eV) = $1.602 \times 10^{-19}\text{J}$ (ジュール)、1MeV (1 メガ電子ボルト) = 106eV。eV はエネルギーの単位で電圧の単位である V (ボルト) とは異なる。

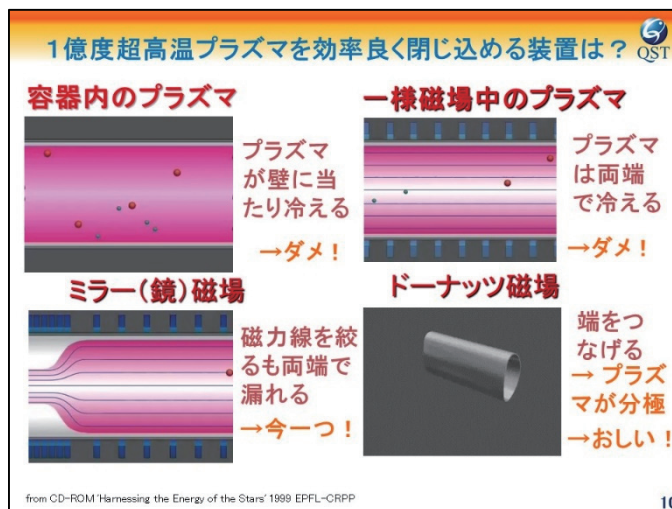
図表 4



図表 5



図表 6



蔵、約 60 億年分位はあります。それから三重水素は海水中のリチウムから作る想定ですとリチウムの資源量は約 1,600 万年分と実質的に無尽蔵といってよい。この重水素と三重水素の原子核同士をぶつけることがエネルギーを最も容易かつ効率的に取り出せることは分かりました。しかし重力ではぶつけられません。

そこで、原子核同士をぶつける何らかの方法が必要となります。図表 4 に整理しましたが、まず温度を上げる必要がありました。重水素も三重水素も原子核はプラスの電荷を持っているため、プラスとプラスを近づけようとしても反発して容易にはぶつからないことから、原子核の速度を上げてぶつかるようにする必要があります。そこで、どの程度の温度にすればぶつかるのかと言うと、約 1 億℃、このくらいの高温になりますとトンネル効果⁵が発生することで核融合反応が起きることがこれまでの実験で判明しています。ただ、温度を上げるといっても上手くやらなければ、すぐに支出超過、すなわち投入エネルギーが大きくなって赤字、すなわち発電プラントには結び付きません。

とはいえ、まずは、とにかく高温にしようということで、1940 年代から核融合研究が始まって、最初のうちは秘密研究として、その後すぐに平和利用のためオープンな研究へと変わっていきました。温度を上げるには、プラズマ状態を利用します。プラズマとは、ロシア語で「ごちゃごちゃ」、「混沌」といった意味です。プラズマと言いますと病原菌の名前にもありますが（マイコプラズマ等）、いま説明しているプラズマは、プラズマ TV 等のプラズマと同じです。この 1 億℃以上のプラズマ状態を維持するための閉じ込め方法の確立が、これまでの研究者の闘いでした。

さて、プラズマとはこういった状態を言うのかを水为例として説明します。水は、氷という固体の状態、そして温度を上げると水になります。さらに水の温度を上げると蒸気となって気体になります。さらに温度を上げると原子核と電子とがバラバラに近い状態、すなわち乖離状態になります。さらに温度を上げて 1 万℃以上にすると原子核と電子とが完全にバラバラになり、10 万℃を超えると、気体そのものが完全なプラズマ状態、つまり「原子核と電子とが自由に飛び交うプラズマ」が実現します。

このプラズマは、実は身の回りにもありまして、図表 5 のように、例えば、雷、オーロラ、そしてもちろん太陽もそうです。さらに身近なものとして蛍光灯があります。蛍光灯には水銀のプラズマが点いており、プラズマは 1 万℃になります。1 万℃と言いますと通常はガラスが溶けてしまいますが、1 万℃になるのは管の中のごく一部分であって密度も大変小さいため、管の表面温度は高温にならず、ガラスであっても蛍光灯を点けることができます。その他、炎は一部がプラズマになっており、また、ネオンサインにもプラズマが利用されています。

（5）プラズマ閉じ込め方法～トカマク方式～

「プラズマの閉じ込め方法」は、これまで核融合の研究者が最も苦勞してきたことですが、現在の閉じ込め方式に至るまでの研究プロセスの一部を図表 6 で紹介します。

①**容器内のプラズマ**：まず容器内にプラズマを閉じ込めることを研究しました。この方式は、プラズマが飛び交うこと自体は良いのですが、プラズマが壁に当たり冷えてしまうことが分かり、これでは駄目ということになりました。

⁵ 量子力学の特色を示す現象の一つ。量子力学では、粒子のもつ全エネルギーよりも高いポテンシャルの壁をその粒子が通り抜ける確率が 0 ではないこと。（新村出編『広辞苑（第 7 版）』（岩波書店、2018 年）2144 頁）

②一様磁場中のプラズマ：磁場を使うと、プラズマが良い按配に磁場に巻きつくことから上下の壁にぶつからなくなります。しかし両端ではぶつかってしまうことから、これでは駄目ということになりました。

③ミラー（鏡）磁場：磁場をもう少し工夫し、端を絞りキャンディの包み紙のようにすれば、プラズマは端で鏡のように反射されて中ほどに戻ります。しかし、一部のプラズマが両端から抜け出てしまうことが分かり、これでは駄目ということになりました。

④ドーナツ磁場：プラズマが抜け出さないように端を繋げれば良いのではないかとということで、ドーナツ状の磁場を研究しました。ドーナツ型の容器の周りにコイルをぐるっと並べることでドーナツ型磁場が出来上がるので、プラズマがくるくる回り良いだろうと見られましたが、電子と原子核とでは動き方が異なり、電子と原子核とが上下へバラバラになることが判明し、大変良さそうでしたが極めて惜しく、まさに残念な結果となりました。

こうして核融合の研究者は閉じ込め方式について苦悶したのですが、ロシア人が閃き、「磁力線を捻る」というアイデアを考え出しました。これは図表7のトカマク装置であって、こ

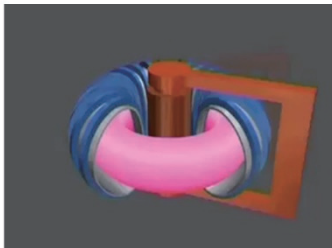
のアイデアは1940年代後半に生まれたと言われていますが、その当時は秘密研究だったので正確な年代は分かっていません。このアイデアが世の中に知られるようになったのは1950年代になってからでした。

「磁力線を捻る」ため、電流をプラズマに流したところ、先程の磁場と、この電流の作り出す磁場とが合成され、らせん状の磁力線になり、その結果、上と下とに分かれていた電子と原子核に、上下がなくなり、いい按配に閉じ込められることが判明しました。これを、ロシア人が付けた名称で「トカマク」と言い、トは電流(ток)、カは容器(камера)、マは磁気(магнитный)の最初の2文字、クはコイル(катушка)の頭文字と、それぞれのロシア語の文字を取った「トカマク(Tokamak)」が装置の名称として登場しました。ソ連がトカマクを発表した当時は冷戦時代で東西往来がなかったため、西側研究者はこの実験結果を信じませんでした。そこで、ソ連が計測装置を持って計測しに来いという話となり、実際に英国の核融合研究者がモスクワの研究所を訪問しトカマク装置で測定したところ、性能の良いことが判明、世界の核融合研究はトカマク型でやることになりました。

図表7

1億度超高温プラズマを効率良く閉じ込める装置は？ QST

ロシア人のひらめき(1940年代-1950年頃)：磁力線をひねるためにプラズマに電流を流す「トカマク装置」の大発明！



ト ток 電流
カ камера 容器
マ магнитный 磁気
ク катушка コイル

コイルによって磁力線の容器を作り、その中に電流を流しプラズマを閉じ込める装置

from CD-ROM 'Harnessing the Energy of the Stars' 1999 EPFL-CRPP 11

2. 日本の核融合エネルギー開発

これまでの日本の核融合に係る研究開発の状況を説明します。日本で核融合を先導したのは湯川秀樹先生です。湯川先生は1935年に「力とはキャッチボール」と提唱され「中間子」を予言、日本人初のノーベル賞を受賞されました。1957年、核融合の使用、利用に向け設置された原子力委員会核融合反応懇談会の初代会長に就任しました。その直後、「核融合懇談会（現：プラズマ・核融合学会）」を設立しました。



栗原研一 那珂核融合研究所長

（1）核融合発電の仕組み

核融合発電の現段階での理解について説明します。核融合発電の仕組み自体は、既に述べたとおり、重水素と三重水素との核融合によりヘリウムと中性子が出る反応が炉心で起き（燃焼プラズマ）、出てきた中性子をプラズマの外側に設置したブランケットのリチウムに当てることで三重水素を生成するとともに、中性子を熱に変えることで外側に流れる冷却水を熱水にし、それをタービンで回して発電するもので、図表8のとおりです。

核融合炉の燃料のうち三重水素は核融合炉で生成し再び燃料として燃焼プラズマ反応に寄与するため、核融合炉の外から投入するものは、海水中に無尽蔵にある重水素とリチウムの二つとなります。そして核融合炉で特に重要なことは、エネルギーがどれだけ増えるかということです。つまり、投入エネルギーの何倍のエネルギーが出てくるかがポイントで、これを「エネルギー増倍率⁶（Q値）」といい、実用炉ではQ値30程度が必要とされます。

核融合反応の発生については、真空中に磁力線による容器を作り、ここに常温で牛乳瓶数本分といった非常に少ない量の燃料ガスを入れて加熱しプラズマ状態にすることで、比較的容易に核融合反応を起こせることが分かったことから、核融合反応による中性子のエネルギーを熱に変える発電が研究されてきました。

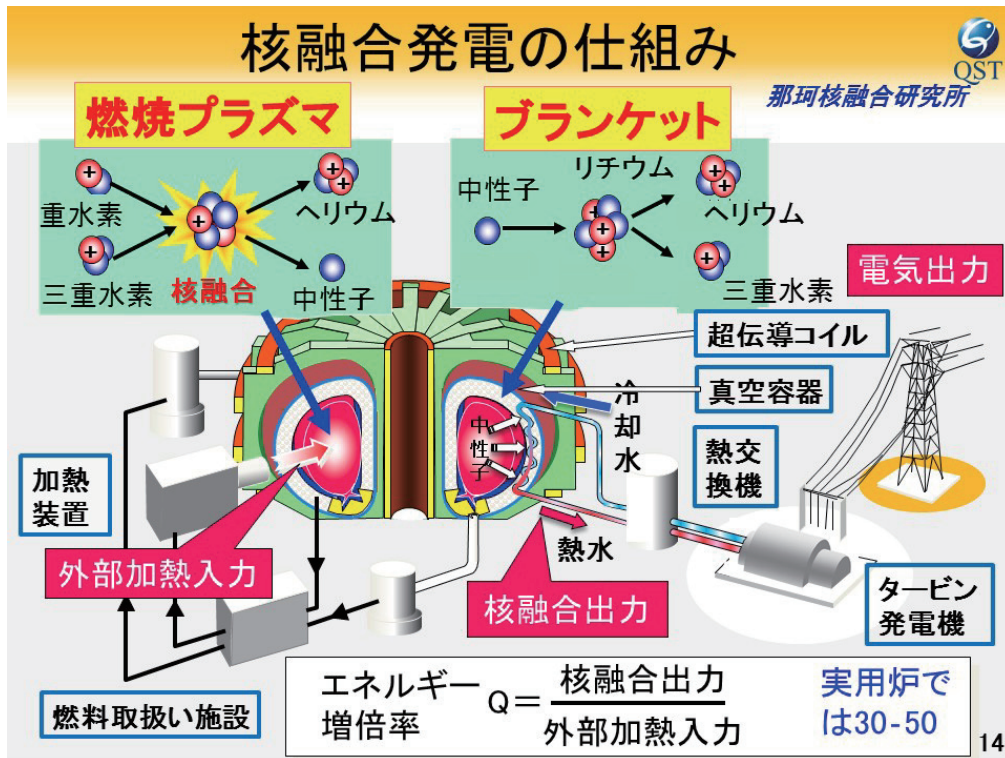
（2）Q値向上の取組

これまで日本そして世界は、どのような形でQ値の記録を伸ばしてきたのかを説明します。

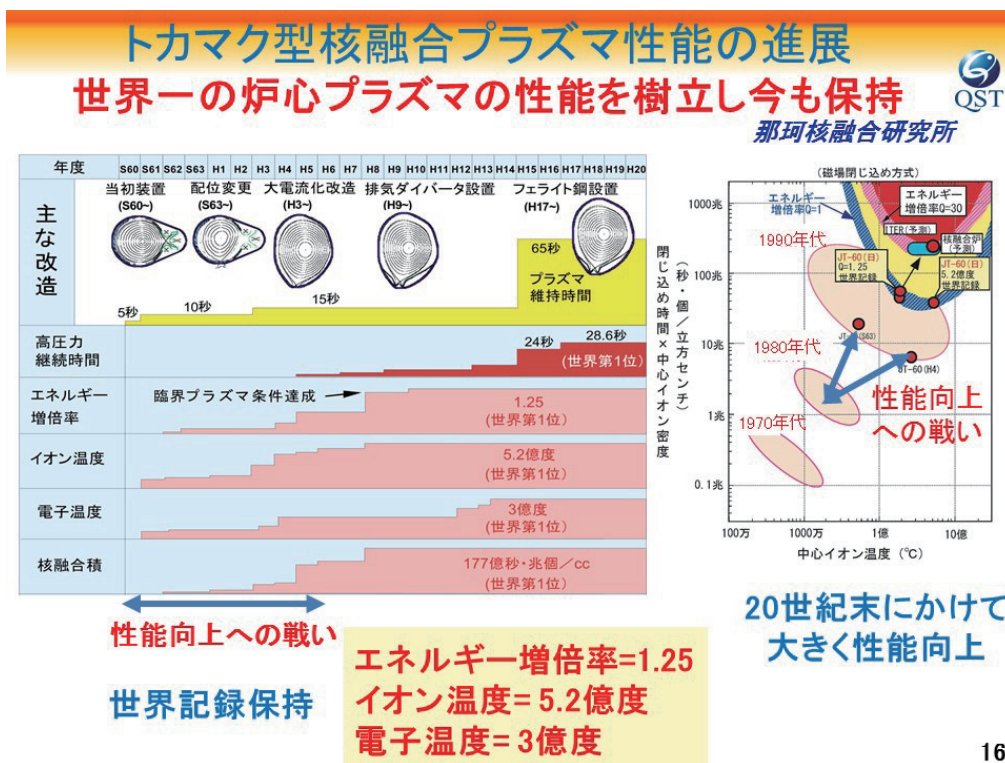
1985年、日本の核融合実験装置JT-60が運転を開始しました。図表9の左側に主な指標を記しましたが、先ほど述べたエネルギー増倍率が一番上、そしてイオン温度、電子温度、そして核融合積の順となっています。これらの指標は、JT-60の運転開始からしばらくの間はデータが伸びなかったため、核融合は実現しないのではないかといった厳しい状況が続きました。しかし、その後、図表9の「主な改造」のとおり、真空容器中のプラズマの形を変えてブレークスルーが達成されました。そして入れたエネルギーの1.25倍を出しました。

⁶ プラズマに外部から注入した加熱入力エネルギーと核融合反応でプラズマから放出される出力エネルギーの比をいい、 $Q = 1$ のときを臨界プラズマ条件と呼ぶ。経済性の観点から実用炉においては $Q > 30$ が必要と考えられている。（プラズマ・核融合学会広報委員会作成プラズマ・核融合に関する用語解説<<http://www.jspf.or.jp/yogo2008/>>）

図表 8



図表 9



先ほど実用炉ではQ値 30 以上が必要と述べたとおり、Q値 1.25 では、まだまだプラントとしては赤字となります。そこで、現在、これを何とか黒字になる程度、つまり数十倍のQ値実現のための取組が続いています。

さて、このJT-60ではイオン温度 5.2 億℃という非常に高い温度を達成し、当時のギネスブックの世界記録を獲得しました。さらに電子温度 3 億℃を達成しました。図表 9 の右側にあるグラフは性能の進展を示しており、現在の核融合実験では、「あと少し」で実用化といったところまで来ています。

(3) 核融合実験の実際

核融合実験の実際は、プラズマの中での核融合反応が、どうすれば起きやすくなるのかを研究するものです。

図表 10 の左側にはカメラの映像をリアルタイムで可視化したものが描かれています。プラズマが着火すると、プラズマが点いた真ん中の部分は全く見えなくなりますが、下の方は光ります。これは、プラズマ自身は高温になると可視光線をほとんど出さないため何も映らなくなり、白く光るところは、温度が低く映ります。プラズマの中は核融合反応により中性子が出て、カメラの素子が中性子の影響で障害が出るため、カメラは2日もすると使えなくなります。

(4) 核融合エネルギー実現の方法～他のプラズマ閉じ込め方式～

トカマク型以外のプラズマ閉じ込めの実現方法の代表的なものとして、図表 11 のとおり、「ヘリカル方式」と「慣性核融合方式」があるので紹介します。これまでに様々な閉じ込め方式のアイデアが出ては消えていきました。なお、だいぶ前に「常温核融合」という大ニュースが飛び交ったことがありますが、あれは「核融合ではない」との結論でして、残念なが

ら常温で核融合は簡単には起きないことがこれまでの実績です。

①「ヘリカル方式」：岐阜県土岐市にある核融合科学研究所で研究されている実験です。図表 11 の右側にプラントの写真がありますが、ヘリカル方式はトカマク方式に比べると性能は高くない現状です。

②「慣性核融合(レーザー方式)」：大阪大学レーザー科学研究所レーザー核融合科学部門で研究されている実験です。慣性核融合は、周りからレーザーを照射し原子核の中心部分に極めて高い圧力を発生させて圧縮することで核融合反応を起こそうというものです。図表 11 の左下に、金色のじょうごのような形のものがありますが、これは金(Au)です。この方式は日本のアイデアで、これを取り付けることにより、非常に効率的に核融合を起こすことができることが分かってきましたが、この方式を用いても核融合発電の実現までには、まだまだ時間要するだろうと考えられています。

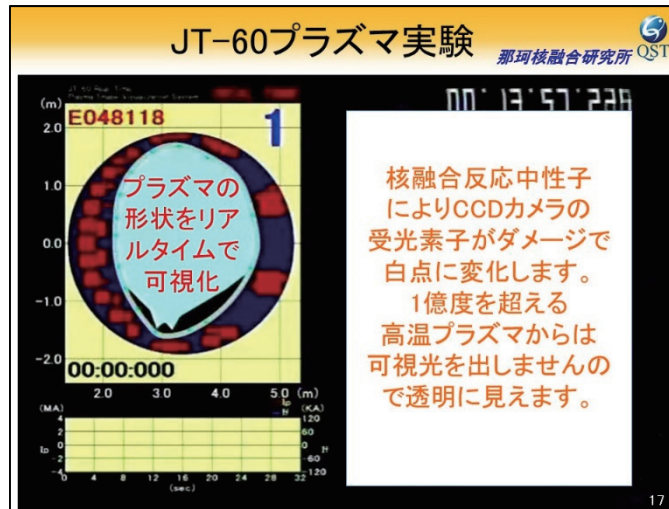
(5) 核融合炉の安全上の特徴

核融合の特徴として安全性が挙げられます。最近では安全・安心がセットで言われるようになっております。図表 12 は左に核融合炉、右に核分裂炉(原子炉)を並べたものです。

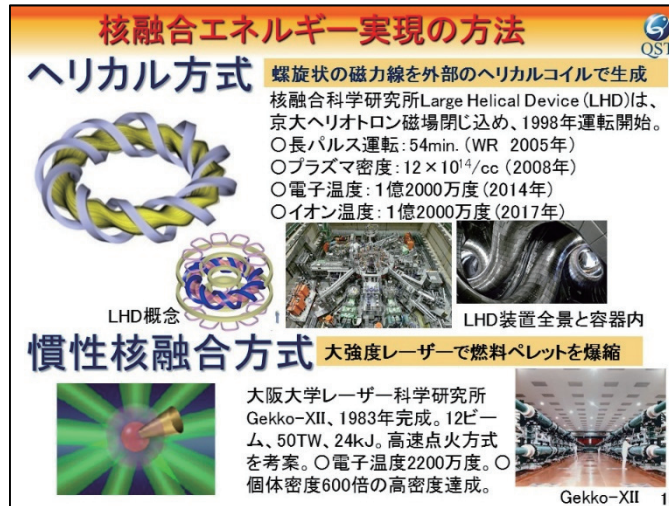
右側の核分裂炉の説明から始めますと、核分裂は連鎖反応、すなわち核分裂でウラン(^{235}U)から中性子が出て、それが次のウランに当たり核分裂を起こす連鎖反応です。ウランから出た中性子は、減速されて、次のウランに当たる反応の繰り返しで、ある程度、自動的に進んでしまします。一方で、発電して電気に変えて制御するループが外側にありますが、根本的に、炉心の維持は内側のループであるため、原理的に暴走が潜在的に存在します。

一方で、核融合は核融合反応そのものの環境設定が核融合反応の作り方であって、自己

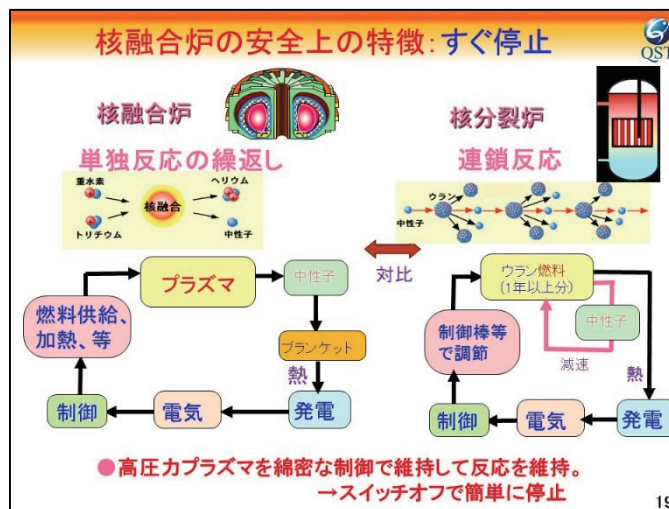
図表 10



図表 11



図表 12



的に反応が進行する状況になく、燃料の供給や加熱を制御することで直ちに止められるところが核分裂炉（原子炉）との大きな違いです。

（６）日本の核融合エネルギー実用化への戦略

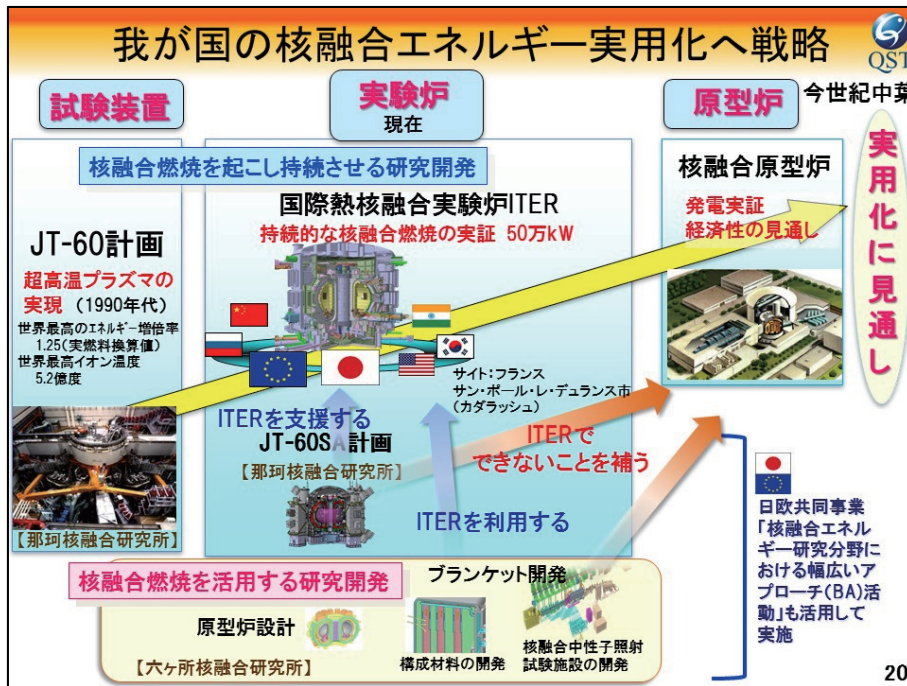
図表 13 は、日本の核融合戦略を表しています。日本の核融合研究は原型炉開発に向かって進んでいます。現在は、実験炉の段階にあり、国際熱核融合実験炉 ITER は、世界で唯一の核融合実験炉となります。その次の段階が原型炉で、ITER は発電には供せず原型炉にいち早くたどり着くため ITER を用いた試験を行います。「ITER」とは、ラテン語で「道」や「旅行」といった意味ですが、ITER での実験だけで原型炉に進められれば最も良いが、それだけでは原型炉を効率よく設計・開発することは難しいため、ITER と並行して、日本と欧州とで BA 活動が実施されています。BA 活動とは、那珂核融合研究所（那珂研）での実

験装置 JT-60SA 計画⁷⁷、そして六ヶ所核融合研究所（六ヶ所研）でのブランケット開発に向けた研究で、この点は実は非常に重要なポイントであって、ITER と BA の合わせ技でもって初めて原型炉が実現できる、そして（ITER と BA 双方に関わる）日本と欧州だけが全ての必要な技術を手中に収められるということが戦略的な観点です。

（７）BA 活動の構成

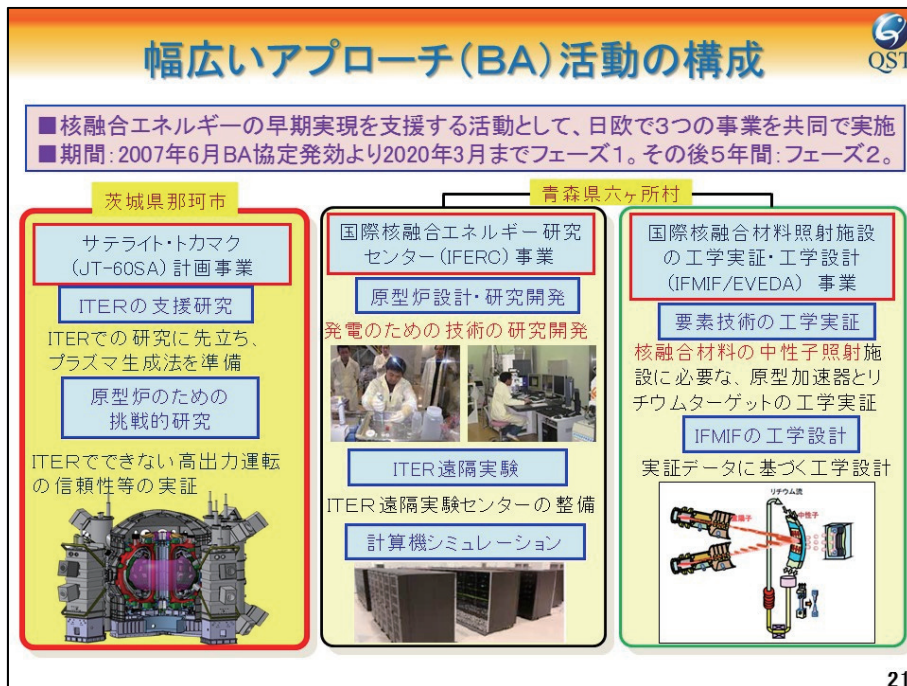
「BA 活動」とは、図表 14 のとおり、那珂研で実施している JT-60SA 計画、そして六ヶ所研で実施している国際核融合エネルギー研究センター活動と材料照射用のプロトタイプ加速器 IFMIF の建設が現在の主なものです。那珂研では約 100ha の敷地のうち約 40ha 弱を利用して JT-60SA 計画に係る活動を続けています。

図表 13



⁷⁷ JT-60SA 計画の前身である JT-60 計画は 2012 年 10 月に試験装置の解体を完了した。JT-60SA は、この JT-60 で使われた既存インフラを活用して組み立てられている。

図表 14



3. ITERプロジェクトにおける調達活動の進展

ITERの概況を述べたいと思いますが、特にITERの規模が非常に大きいことを伝えたいので、そうした点を軸に概要を簡単に述べます。図表 15 をご覧ください。

ITERは世界の7極で取り組まれています。この7極の「極」は、30か国の集合体であるEUが参加しているため7か国でなく7極と言っています。7極は、日、欧、米、露、インド、中国、韓国です。当初は日、欧、米、露でしたが、実験炉ITERの建設が決まった途端にインド、中国、韓国が参入しました。後から参加した極も、それまでの過去の知財を含め全て共有できるので、過去には、後から入ってきたのに、前に開発した分も含めて全て利用できるのはいかがでしょうかといった議論がありました。核融合は平和利用目的だからか堅いことは言わないというところがこの業界の良いところなのでしょう。現在、実験炉ITERは、フランス南部のサン・ポール・レ・デュランスで建

設されています。

ITER機構長はベルナルド・ビゴ氏、そして副機構長は、日本人の多田栄介氏と韓国人のイ・ギョンス氏の2人です。実験炉ITERは、熱出力50万kW、これは電気出力換算で3分の1とすると、およそ17万kW相当のプラントとなります。そして、投入エネルギーの10倍は出すということで研究されます(Q値=10以上)。ITERは2025年に初プラズマ、その後2035年に本格的な燃焼実験(重水素と三重水素による燃焼実験)を実施する計画です。

(1) ITER建設サイト

2018年10月現在、現場全体の状況は図表16に示したとおりで、建設工事は非常に広大な敷地で着々と進んでいます。その図の左側の丸いところは本体室の生体遮蔽です。その奥に組立用の建屋があって、そこで組み立てられた機材を本体室に持ってきて組み上げます。図表16

の右側には、核融合装置を動かすための電源、冷却、ガス供給、加熱等々の諸設備があり、全体としてこうした大規模なシステムとなっています。

I T E R 建設への日本の貢献の概要を述べますと、日本は I T E R の主要機器を担当しており、図表 17 のとおり、一番大きなものでは超伝導トロイダル磁場コイルで、上から下まで約 16m 程のステンレス容器製の超伝導磁場コイルで、1mm の精度で製作しなくてはならず、現在、1 基目が出来上がりつつあるところです。それ以外にも、様々なハイテク機器を担当していきまして、こうした機器を製造できるのは日本と欧州くらいでしょう。

(2) 日本分担の I T E R 機器製作

・超伝導トロイダル磁場コイルは非常に巨大なもので、現在 1 基目が出来つつあって、今後、これを真空容器の周りに縦に並べていきます。こうした機器は、基本的には物納のため、日本から運搬し現地で組み立てます。これは三菱重工と東芝とが担当しています。

・超伝導中心ソレノイド導体は、ドーナツ状の真空容器の中心部に装着するもので、日本が担当した超伝導線の製作は終了し、成形作業を担当する米国で作業が続いています。これも非常に超伝導導体の本数が多く大きなものです。

・中性粒子入射加熱装置は、核融合炉の非常に重要な装置で大きなものです。これを製造する

に当たっては、モックアップの試験体を 2012 年に製作するところからスタートしました。装置製作を担当しているのは日立製作所です。こうした非常に巨大な機器を、搬入時の横になっている状態から立ち上げるだけでも大規模なシステムが必要になります。この装置の巨大なトランスを、日本から I T E R サイトへ輸送する際は、日立市の工場から港まで、通行量の少ない真夜中に、経路上の歩道橋を持ち上げて、そこを通過して運びました。現在、現地において据付と耐電圧試験が始まっている状況です。

・高周波加熱装置は、日本が非常に高い技術・品質を有している分野であって、キヤノン電子管デバイスが担当しています。

・プラズマ対向ユニットは、先ほどの図表 10 で白く光った、熱が最も集中する部分を製造するもので、三菱重工を中心に担当しています。

・トリチウム除去設備は、放射性物質のトリチウムを扱うため取扱方法が非常に重要で、日本と I T E R 機構と一緒に取り組んで、試験がかなり進んできたところです。

・ブランケットの遠隔保守機器は、軌道上に取り付けられて動くロボットで、プラズマ内で発生した中性子を受け止めるブランケットの保守のための機器です。これは大型ロボットアームの先端にマニピュレーターを装着して 4 t や 6 t といった大重量物を遠隔操作で動かし狭隘ギャップから取り出して嵌め込む等のための機器です。

図表 15

世界の7極が取り組むITER計画

実燃料で持続的な核融合燃焼の実証
熱出力 50万kW, エネルギー増倍率10(外部加熱5万kW)

日、欧、米、ロ、印、中、韓が共同で建設中

約30m

ITER機構を2007年に設立
各国内機関が構成機器を分担製作
QSTは日本の国内機関

11月時点で初プラズマ進捗率:60%

2025年: 初プラズマ
2035年: DT燃焼実験

サイト全景

図表 16

建設が進むITERトカマク複合建家周辺

(2018年10月)

図表 17

日本が製作分担する最先端の主要本体機器

那珂核融合研究所 QST

- (1) 超伝導トロイダ磁場コイル
 - ・19構造物
 - ・9コイル
- (2) 超伝導中心ソレノイド導体
 - ・49導体
- (3) 中性粒子入射加熱装置
- (4) 高周波加熱装置
- (5) ダイバータ
- (6) トリチウムプラント設備
- (7) 遠隔保守機器
- (8) 計測装置
 - ・5計測装置

(1)人のサイズ

外側ターゲット

・ジャイロロン 8機、水平ランチャー
・1MeV電源高圧部・高電圧プッシング3基・加速器1基
・ブランケット遠隔保守装置
・トリチウム除去系

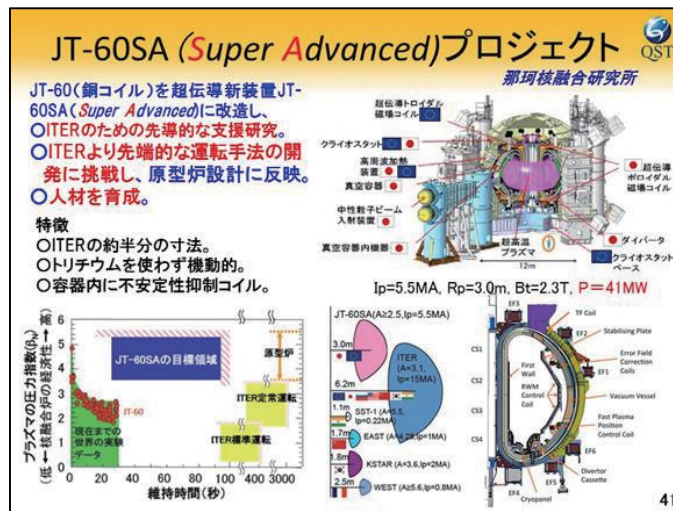
27

4. JT-60SAプロジェクトの進展

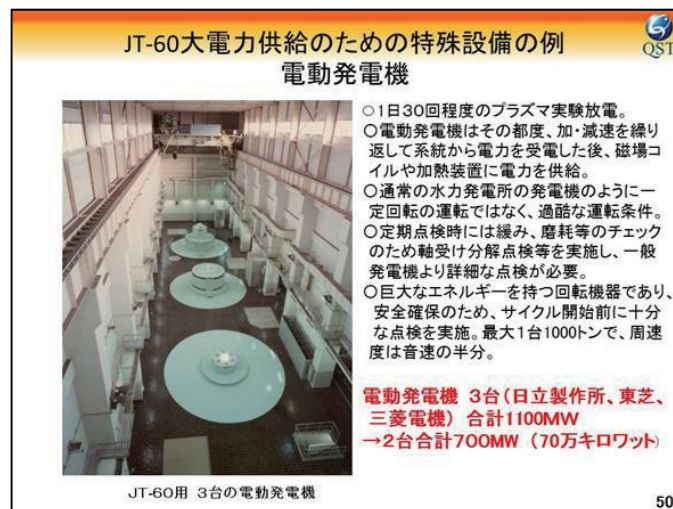
JT-60SAプロジェクトは、①ITERのための先導的な支援研究を行うこと、②ITERよりも先進的な運転手法の開発に挑戦し原型炉設計に反映すること、そして③人材の育成、このように大きく三つの目的を有するプロジェクトです。図表18の中央下側に、各種の核融合装置の大きさを比較した図がありまして、ブルーはITER、レッドはJT-60SAです。これらは大きさは異なりますが、い

れも同じような形をしており、JT-60SAはITERと同様の実験が可能な点がポイントとして、相違と言えば、JT-60SAの方がITERよりもプラズマ圧力を上げた実験が可能であることです。したがって、JT-60SAによる実験の成否次第で、将来の原型炉をより小さくできる可能性が秘められていると言っても過言ではありません。

図表 18



図表 19



(1) JT-60SA本体組立

JT-60SAのこれまでの組立状況を説明します。それぞれの機器を、那珂研に搬入しては組み立てることを繰り返しています。日本単一での建設でも複数企業が参入すると、その進め方は容易ではありませんが、JT-60SAの組立は欧州が入っており、日欧共同事業それ自体の難しさがある部分もあります。

JT-60SAの架台はスペインが製造し、この架台に三菱電機の超伝導トロイダル磁場コイルを積み上げていきます。架台の据付が終わると、東芝の真空容器の組立、すなわち、やぐらを立てて、比較的薄い材質でできた40度分のバラバラの容器部品をミリ単位の要求精度で溶接して据え付けていきます。要求精度は、例えると「スルメの網焼き」に近いと言っています。スルメの網焼きでフラットなスルメを作るのはほとんど不可能と思うでしょうが、それと同様の難しさで精度出しをしなければならぬ点が、この技術の難しさです。そして、欧州製の超伝導トロイダル磁場コイルを搬入して、起立させて一基ごとに取り付けます。具体的には、ドーナツ状の機器に1か所空いているところがあるので、そこに1基入れてコイルの取付部を回し、また新たに1基取り付けて回すを繰り返し、合計18基の超伝導トロイダル磁場コイルを取り付けるという、大変に地道な作業で、これにも1mmの精度が求められます。

超伝導トロイダル磁場コイルの設置に当たり、欧州側から、16・17基目が2か月の工程遅れになるとの話がありました。これに対して、我々は、工程を取り戻すように強く主張しました。その結果、通常は船便での輸送ですが欧州は空輸して工程を取り戻すこととなりました。世界最大級の輸送機アントノフ(A n - 1 2 4 型機)をチャーターして2基を中部国際空港に空輸しました。超伝導トロイダル磁場コイルは1基で60tもあるため、飛行機に載せられる

か分かりませんでしたが、幸いなことに2基一緒に空輸できました。なお、アントノフが中部国際空港に到着した際は、ニコニコ動画の生中継を実施し5万人の視聴を得られました。多くの方々は飛行機に注目したのですが、核融合のPR活動にも良い機会となりました。

その後、トロイダル磁場コイルを搬入し積み重ねていき、今後は、非常に巨大な中心ソレノイドコイルの製作及び取付、巨大なクライオスタット上蓋の製作及び取付、さらにクライオスタット熱遮蔽体を製作して全体を覆う等、2020年3月の装置完成に向けて、安全に注意しつつ非常に慎重に作業を進めているところです。

(2) その他のインフラ～電動発電機等～

JT-60SAを動かすために必要となるその他の装置、例えば、加熱装置、中央変電所や電動発電機といった諸設備は、敷地内にある既存インフラを活用することとしておりまして、このうち、特に特徴的な設備の「電動発電機」を紹介します(図表19)。

この電動発電機は、JT-60SAに電力を供給するための特殊設備でして、3台の大きなコマから成っています。この3台のコマは、手前から三菱電機、東芝、日立製で、それぞれが約1,000tです。こうした特殊な電動発電機を必要とする理由は次のとおりです。JT-60SAは瞬間的に原発1基分のパワーを必要としますが、そのための電力を既設の電力系統から取ると一帯の停電を招く可能性がある。すなわち、JT-60SAが組み立てられている茨城県那珂市から栃木県に通っている系統線から電気を取ると、栃木県一帯が停電する可能性があります。そのため、電力を運動エネルギーに変えるために10分程度かけて系統から受電してコマを回して、その後、系統受電を切断し、この運動エネルギーを持ったコマで発電する方法を用いることで実験が可能となります。も

もちろん核融合発電所が実現すれば、発電所内で環流するようになりますが、JT-60SAは

実験装置のため、こうした巨大なインフラが必要になります。

5. 核融合エネルギー実現に向けた原型炉ロードマップ

JT-60SAは図表20のとおり、2020年3月に完成し、ITERは2025年に初プラズマ（運用開始）、2035年に重水素・三重水素の実験（DT実験）を開始します。DT実験が始まった時点で見通しが立てば、直ちに原型炉の建設に入ることを考えています。そうすると最短で、その時点から10年程で原型炉ができて、2045年以降、核融合炉で発電した電気が系統に流れ御家庭に流れることが最速の計画です。

文部科学省の核融合科学技術委員会が「原型炉研究開発ロードマップ」を策定しました。これにはポイントがいくつかあります。2020年のJT-60SAの完成、2025年のITER運転開始、さらに2035年のDT実験の開始を最も大きな節目として原型炉の建設判断があるとうことで、この時点で原型炉を作るとの判断に至れば、早期の発電が実現し得るため、このロードマップのシナリオに従い、できるだけ早期に核融合を実現したいと考えています。

（1）原型炉研究開発ロードマップ

図表21のとおり、原型炉研究開発ロードマップに示された道筋は、核融合開発が、既に

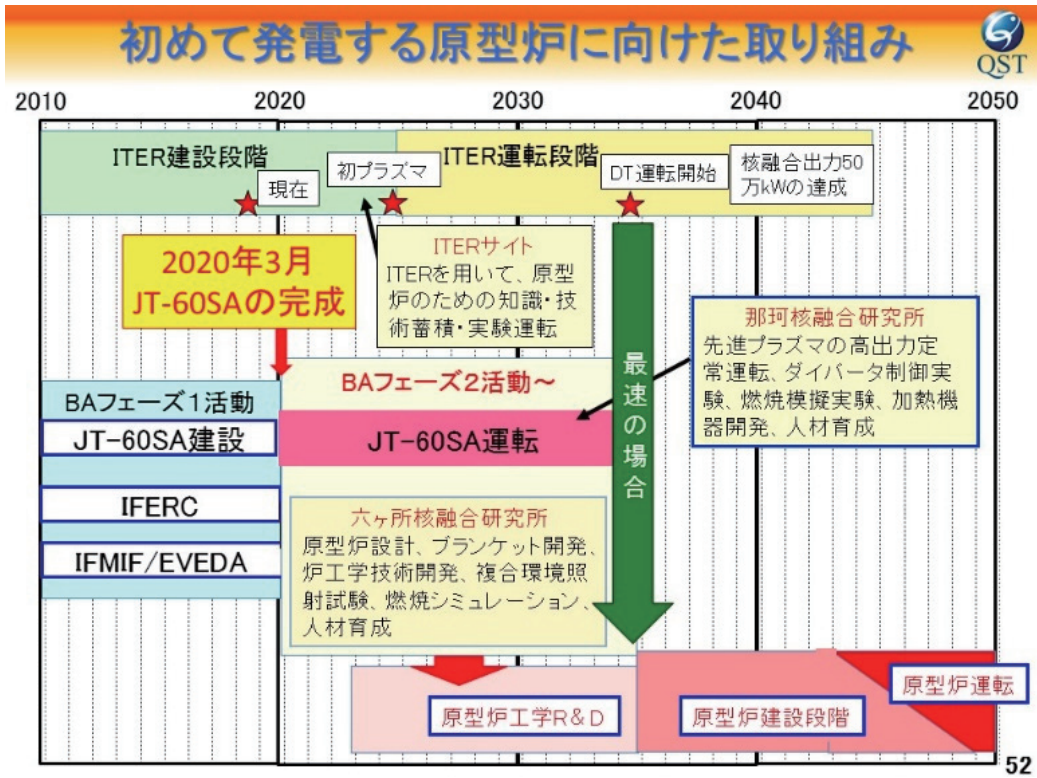
各種原理的な検討を経て、様々な困難を克服し、トカマク型での成功を背景に、いよいよ発電が見込める段階に来つつあることを踏まえ、トカマク型で原型炉を目指すと言われています。

なお、ITER計画は、先程述べたとおり、7極の共同プロジェクトでもありマネジメントが非常に難しく、モノづくりも大変ですが、7極の様々な国・地域が様々なことを主張する中で意思を統一して前に進むこと自体が、まさに人類の一つの挑戦であると考えています。また、ITERを支援・補完し、人材育成に貢献するためのJT-60SAがITERよりも先に完成するので、日本の存在感をJT-60SAによって前面に出しながら、ロードマップに従って進んでいくということになります。

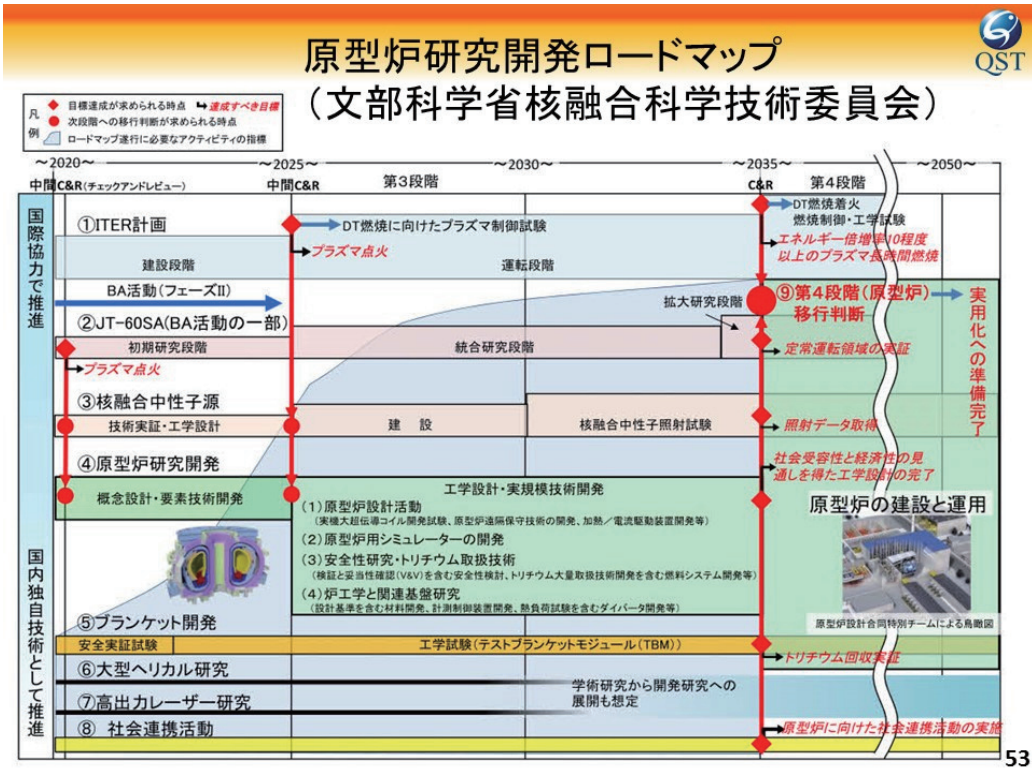
（2）核融合研究の政策上の根拠

なお、日本の核融合研究の政策的根拠は、エネルギー基本計画でありまして、核融合研究は、基本計画において「トカマク方式」と明記されるとともに、「ITER活動」及び「幅広いアプローチ活動」が明記されています。

図表 20



図表 21



6. 先端技術の波及効果

核融合の産業波及効果については、例えば、MRI⁸は核融合研究の成果もあって非常に早期に実用化されました。既に核融合研究は見えないところで数多くの産業に還元されており、「核融合」のブランドシールがあれば貼っていきたくらいです。この他にも、日本の中部地方に、基幹系統 50Hz・60Hz の変換施設がありますが、そこには JT-60 の「サイリスタ」という半導体素子が応用されておりまして、

50Hz・60Hz の行き来が早期に実現できたことも世の中では認知されていないものの核融合研究の成果によると自負しています。

今後、核融合が新聞紙面上に様々なマイルストーン達成等で登場するタイミングはあろうと思っています。

大変長い時間になりましたが、御清聴ありがとうございました。

(くりはら けんいち)

⁸ Magnetic Resonance Imaging、磁気共鳴画像

講演録Ⅲ 核融合原型炉に向けた研究開発

— 六ヶ所核融合研究所での活動 —

池田 佳隆

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー研究開発部門

六ヶ所核融合研究所長

1. 核融合フロンティア
2. 核融合原型炉研究開発の推進に向けて
3. 原型炉研究開発ロードマップに係る六ヶ所研の取組
4. 六ヶ所研の研究概要～B A活動～
5. I T E R－T B M計画
6. ビデオ「地上の太陽を目指して」
7. リチウム回収技術研究開発
8. 核融合中性子源計画（A－F N S）
9. 核融合中性子源研究の社会的還元例
10. 六ヶ所研の展望

1. 核融合フロンティア

六ヶ所研における核融合研究の現状について「核融合原型炉に向けた研究開発」ということで紹介します。核融合研究は、最終的には核融合で発電することを目的としており、六ヶ所研では、その発電を行う原型炉に向けた研究活動を中心に取り組んでいます。

Q S T¹が研究している核融合は、ドーナツ型の真空容器内に高温プラズマを生成し、この中で、重水素・三重水素を燃焼させることです。

重要なことはドーナツ型の真空容器内に高温プラズマを作れるか、燃料を燃焼させることができるか、性能を上げることができるかということです。こうした「炉心プラズマ研究」には、50万kW相当の燃焼を行うI T E Rでの研究、核融合炉の性能を上げるためのJ T－6 0 S Aを用いて行う那珂研の研究があります。

一方、「炉心プラズマ研究」だけでは核融合発電にはつながりません。核融合により発生す

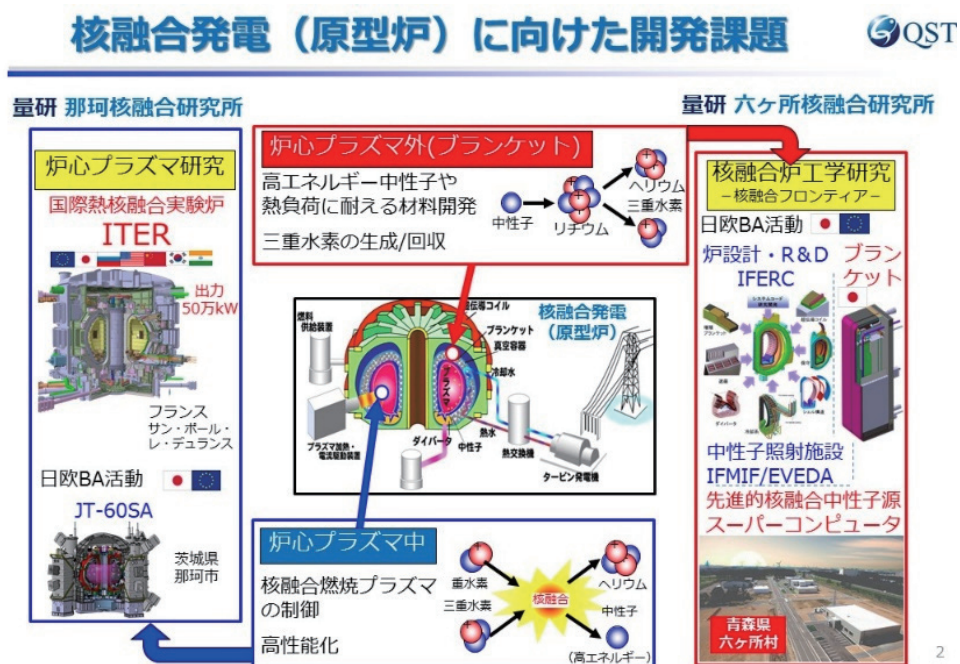
¹ 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構。

る中性子はエネルギーが高いことから、核融合炉がそうした中性子や熱負荷に耐えられるのかも重要で、六ヶ所研ではそれら材料開発研究を含めた様々な活動を行っています。

さて、核融合の燃料は、重水素と三重水素です。重水素は海水中に無限にあります。三重水素は天然にはほとんど存在しません。したがって三重水素を製造する必要があります。そこで、核融合で発生した中性子を海水中に豊富に存在するリチウムに照射し、三重水素を製造することとしています。この機能を果たすブランケット（英語ではブランケットと言えは毛布

ですが）の研究開発があります。こうした炉心プラズマ研究以外の研究開発を核融合炉工学、あるいは「核融合フロンティア」と言っており、六ヶ所研で行っています。これにはスーパーコンピューターや加速器を用いた研究開発もあります。このように、核融合で発電するため、那珂研での高温プラズマ状態を作って核融合反応を起こす環境を作り出す研究、六ヶ所研での核融合反応による中性子を用いた燃料の製造や熱を取り出すための研究、この二つの研究所の取組が両輪となって、初めて核融合発電、原型炉が実現できると思います（図表1）。

図表 1



2. 核融合原型炉研究開発の推進に向けて

日本の核融合研究の考え方について、国は、段階的に判断しながら進めるということで、2017年12月18日、文部科学省に設置されている核融合科学技術委員会が取りまとめた「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」において示されています（図表2）。大事なことは、ITERでの50万kW核融合出力の実現は2035

年頃の予定ですので、「この時点で、その次の段階（原型炉の建設）へ進むのかどうかを決める」ということです。しかし、2035年は先のことでもあるので、2020年頃、そして2025年頃に「中間チェックアンドレビュー（以下「中間C&R」という。）」を実施するというです。中間C&Rは、国の施策に照らし研究開発が進

展しているかどうかをチェックし、進んでいれば次の段階に進む、進んでいなければもう少し頑張れということをやっています。

また中間C&Rを行う項目が①～⑦の項目に整理されました。①はITERの進捗状況で、最も重要なことは2035年頃の燃焼実証です。②は定常プラズマに係る研究開発で、那珂研で

取り組んでいる日本と欧州によるJT-60SA研究に関するものです。そして、④、⑤、⑥は、六ヶ所研で取扱う研究開発ミッションで、原型炉に関わる、材料開発、原型炉設計、そして原型炉設計に必要な研究開発を段階的に進めることです。

図表 2

我が国の核融合開発戦略：原型炉への移行判断 QST

- 文科省の核融合科学技術委員会にて、我が国の核融合開発戦略を定める「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」が2017年12月18日、策定。
- 同報告書では、核融合原型炉への移行判断をITERの核燃焼が見込まれる2035年頃に行うこと、それまでに2回（2020年頃と2025年頃）の中間C&Rを実施することが記述。
- ④⑤⑥は主として六ヶ所核融合研究所が担う。

原型炉段階への中間C&Rの考え方（抜粋&要約）

項目	第1回中間C&R（'20年頃）	第2回中間C&R（'25年頃）	原型炉段階への移行判断（'35年頃）
① ITERによる燃焼制御の実証	・技術目標達成計画の作成。	・ITER技術目標達成計画への反映	・Q=10程度以上の維持と燃焼制御の実証。
② 定常プラズマ運転技術の確立	・JT-60SAによる研究開始。	・JT-60SAによる定常運転の達成。	・ITERによる非誘導電流駆動プラズマの実現。 ・JT-60SAによる高性能定常運転の実証。
③ ITERによる統合化技術の確立	・JT-60SA建設による統合化技術基盤の確立。	・ITERの運転開始。	・ITERの運転・保守を通じた統合化技術の確立。
④ 原型炉に関わる材料開発	・核融合中性子源の概念設計の完了。	・核融合中性子源の建設開始 ・リチウム確保技術の原理実証	・核融合中性子源による材料の初期照射データを取得 ・リチウム確保技術の確立。
⑤ 原型炉に関わる炉工学技術開発	・ブランケット工学試験設備によるブランケット設計に必要なデータの取得。	・ITER-TBM（テストブランケット）1号機製作 ・安全性確認試験の完了。	・ITER-TBMによるトリチウム回収 ・核融合中性子源によるトリチウム挙動評価技術の検証。
⑥ 原型炉設計	・原型炉概念設計の基本設計。	・原型炉概念設計の完了。	・原型炉工学設計の完了。
⑦ 社会連携	・アウトリーチ活動計画の立案。	・アウトリーチ活動の推進と社会連携活動の実施。	

表中赤字：特に六ヶ所研に期待される項目

3. 原型炉研究開発ロードマップに係る六ヶ所研の取組

2017年12月に策定された「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」を踏まえ、2018年7月、「原型炉研究開発ロードマップ（一次まとめ）」（図表3）が策定されました。このロードマップの基本的な考え方は「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」と同様で、①～⑧に整理され、2020年頃と2025年頃の間C&R、2035年頃に原型炉へ進むかどうかと、段階的に判断するとうたっています。この8項目のうち、六ヶ所研では③～⑤に取り組んでいます。

③の核融合中性子源に係る研究とは、核融合

炉の「弱いところ」、すなわち核融合炉材料の寿命の問題に係る研究です。核融合反応で発生する非常に高エネルギーの中性子は、材料の健全性に影響を与えると懸念されることから、その寿命を予め明らかにする必要があります。すなわち、材料の寿命が100年間持つならば、その間は、材料を交換せずに済むので非常に経済的となりますが、仮に寿命が短いのであれば随時交換する必要があり、経済面で大きな影響が生じます。そうしたことから、中性子の材料への影響を明確にすることが国の方針の一つと

なっています。

④の原型炉研究開発に係る研究は、こういった原型炉設計を行うのかです。最終的には「設計=コスト」につながることから、それに向けた「原型炉設計活動」、「原型炉シミュレーターの開発」、「安全性研究・トリチウム取扱技術」、「炉工学と関連基盤研究」について、「概念設計・要素技術開発」そして「工学設計・実規模技術開発」と段階的に進めることとしています。

⑤のブランケット開発に係る研究は、核融合反応を起こす炉心プラズマを取り囲む構成要素であるブランケットが、核融合反応で発生した熱を取り出せるか、核融合反応で発生した中性子を用いて三重水素の製造ができるかとの研究を段階的に進めることとしています。

⑥、⑦は大学等での他の閉じ込め方式に係る研究²で、それらが適切に行われているかを段階的にチェックすることとしています。

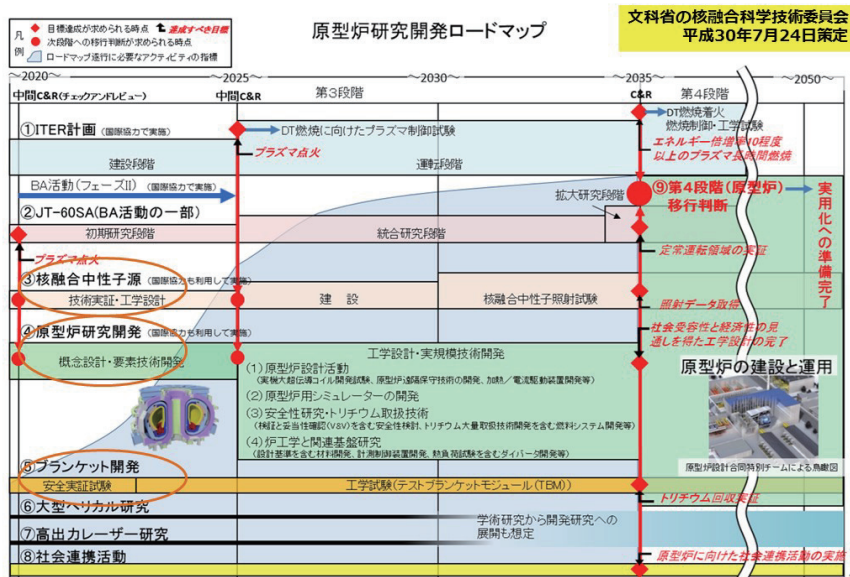
⑧社会連携活動は、実は本日のシンポジウム



池田佳隆 六ヶ所核融合研究所長

もこの活動に当たります。これまで核融合研究は予算を使っている割には国民に知られていないと言われていました。そのため、国民に核融合のことをもっと知っていただき、核融合研究推進の可否を国民が判断していただけるように、核融合研究をしっかりと説明することとしています。

図表 3



² 自然科学研究機構核融合科学研究所のヘリカル方式研究、大阪大学のレーザー方式研究。

4. 六ヶ所研の研究概要～BA活動～

六ヶ所研で取り組まれている核融合中性子源、原型炉研究開発、そしてブランケット開発について、さらに述べます。

六ヶ所研における研究活動は、BA活動のフレームで行われています。BA活動は、ITER活動を支援し補完するものとして、日本と欧州の協定³に基づく国際事業として行われているものです。BA活動の目的は、核融合エネルギーの早期実現で、そのための三つの取組を掲げています。一つ目は「国際核融合エネルギー研究センター」、二つ目は「核融合材料設備等の工学設計」でこれらは六ヶ所研で行い、三つ目は「サテライト・トカマク計画⁴」でこれは那珂研で行います。このBA活動は、図表4のとおり、日本政府と欧州の欧州原子力共同体（ユーラトム）とで協定を締結し、運営委員会

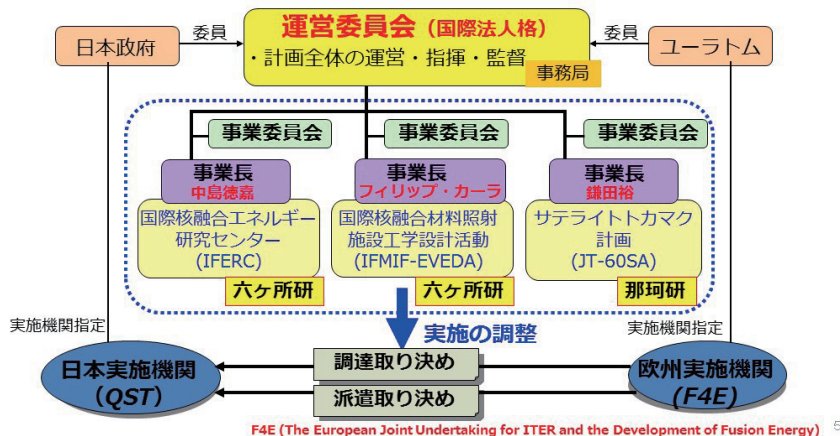
の下、三つの事業委員会が設けられています。

日本の実施機関はQSTで、欧州側カウンターパートはFusion For Energy⁵です。BA活動は、日本と欧州とで予算を半分ずつ出し合って運営されていますが、日本で実施されるため、欧州の資金で機器の一部を製造し日本に持ってきます。そして、那珂研でのJT-60SA等の建設や、六ヶ所研でのIFMIF原型加速器を建設します。また、欧州側の人間が来日して研究開発活動を行います。すなわち、日本は、ホスト国として欧州側研究者と一つのチームとなって研究開発活動に取り組んでいます。正直なところ、文化の違う国際共同事業は大変ですが、那珂研及び六ヶ所研でのこうした国際共同事業の取組は、日本の科学分野における新たなアプローチ⁶だと思います。

図表 4

幅広いアプローチ (BA)活動：ITER計画を支援・補完

- 日欧国際協力の下で、核融合エネルギーの早期実現を支援する活動として、3つの事業を行う。
- IFERC事業：原型炉の概念設計及び研究開発，ITERの遠隔実験研究，核融合計算シミュレーション研究
- IFMIF/EVEDA事業：原型炉に必要な高強度材料の開発を行う核融合中性子源の設計・開発
- サテライト・トカマク事業：JT-60の超伝導化、ITERの運転シナリオの検討や先進的なプラズマ研究



³ 「核融合エネルギーの研究分野におけるより広範な取組を通じた活動の共同による実施に関する日本国政府と欧州原子力共同体との間の協定（BA協定）」

⁴ ITERと同じ型の核融合実験装置である「JT-60SA」を建設して実験を行う計画。

⁵ The European Joint Undertaking for ITER and the Development of Fusion Energy (F4E)

⁶ BA協定は、日欧メンバーによる運営委員会の指揮及び監督のもと、三つの事業委員会、事業長、事業チームを設置し、日本国内で事業を実施するとしている。

5. ITER-TBM計画

六ヶ所研では、日欧での国際共同研究の取組とは別に「ITER-TBM計画⁷」に取り組んでいます。ITERは50万kWの核融合出力を実現する実験装置として国際協力の下で取り組まれています。ITERの50万kW出力実現の後は、国際競争に変わります。すなわち、発生した熱をどう取り出すか、三重水をどう作るかは、国際競争で行う「ブランケット」開発次第となります。

ブランケットの方式は、日本、欧州、中国等で異なっており、どの方式が最善かが、将来の

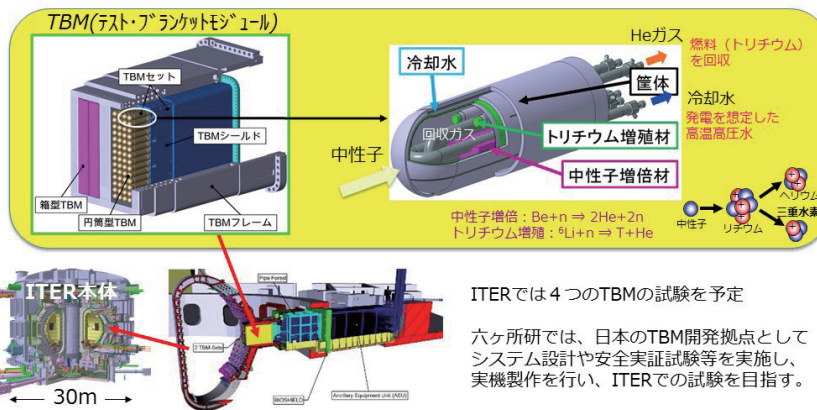
核融合研究の在り方を決めると言って過言ではありません。ITER-TBM計画は、そのための、まさにコンペティションです。なお、ITERには各方式のブランケットを装着できるように用意されています。

2035年頃には、日本、欧州、中国等の極が、自らのブランケット方式をITERに装着し、いずれの方式が最善であるかを競い合うこととなります。六ヶ所研は、それに向けた日本の実施母体として準備に取り組んでいます。

図表 5

ITER-TBM計画：ITERを用いたブランケット開発

- ブランケット：核融合中性子から熱と燃料（トリチウム）を生産。
- ITER-TBM計画：ITERに、TBM(ブランケット・テスト・モジュール)を装着し、核融合燃焼条件下でブランケット機能を検証。
- ITER-TBM計画は国際競争：TBMの方式は、各極により異なり、どの方式が優れているかを競い、それを原型炉ブランケットに反映。
- 日本：水冷却・固体セラミック増殖材方式を採用。



⁷ ITER-Test Blanket Module 計画

6. ビデオ「地上の太陽を目指して」

ここまで説明したことを踏まえ、六ヶ所研の現状のビデオである「地上の太陽を目指して」を流します。このビデオは、これまでの六ヶ所研の経緯、原型炉の設計への取組、「ITERテスト・ブランケット・システム」の概要、さらにIFMIFという核融合炉の材料評価のための核融合中性子源に係る研究等を紹介しています。

六ヶ所所の概要 (ビデオ紹介)

地上の太陽を目指して
 六ヶ所研のこれまでの変遷
 核融合原型炉の設計に向けて
 国際核融合エネルギーセンター
 日欧ですすめる原型炉設計・R&D調整
 原型炉設計合同特別チーム
 原型炉の予備的な研究開発
 計算機シミュレーションセンター
 ITER遠隔実験センター
 ITERテストブランケットシステム
 ITERテストブランケット
 リチウム回収技術
 IFMIF工学設計・工学実証活動
 核融合中性子源の整備
 六ヶ所研の展望

○池田所長あいさつ

ビデオ1) 六ヶ所研のこれまでの変遷

120年5月4日格工業団地
 122年3月研究3棟完成
 現在の六ヶ所核融合研究所

皆さんこんにちは。ここ青森県上北郡六ヶ所村にある六ヶ所研は、日欧の共同事業であるBA活動を中心に核融合炉の実用化に向けた様々な研究開発を進めています。

六ヶ所研は、BA活動の協定締結の翌年2008年から当時の日本原子力研究開発機構の新たなサイト、「国際核融合エネルギー研究センター」として建設工事が開始され、2010年にBA活動の研究開発のための施設、三つが完成

し、本格的な研究開発活動を開始しました。では、核融合エネルギーの実用化に向けてどのような活動が行われているのか御紹介しましょう。

○国際核融合エネルギー研究センター

ビデオ2: 国際核融合エネルギーセンター「IFERC」

国際核融合エネルギーセンター
 日欧ですすめる原型炉設計・R&D調整
 原型炉の予備的な研究開発
 原型炉設計合同特別チーム(全日本体制)

BA活動のもと、国際核融合エネルギー研究センター（IFERC）事業では、「原型炉設計・研究開発調整センター」、「計算機シミュレーションセンター」及び「ITER遠隔実験センター」において、日欧共同の研究開発を進めています。また、「原型炉設計・研究開発調整センター」による核融合原型炉の概念設計活動では、核融合エネルギーで発電する原型炉の実現のため課題を検討し、どのように核融合炉を安定に安全に動かし、保守するかというような課題に取り組むとともに、原型炉の早期実現に必要な物理・工学課題についての研究開発項目を提示してきました。2017年にこれらの結果を第二中間報告書⁸としてまとめています。

⁸ Second Intermediate Report of BA DEMO Design Activity (DDA), 19 February 2017

○原型炉設計合同特別チーム



六ヶ所研では、原型炉研究開発ロードマップに従って原型炉の研究開発を進めるため、「原型炉設計合同特別チーム⁹⁾」を設置しています。

このチームは産業界、大学、研究機関からなるオールジャパン体制で、六ヶ所研が原型炉に向けた研究開発の中核拠点になります。これまで技術会合を毎年30回以上開催、のべ約400名が活動に関わっています。「原型炉設計合同特別チーム」の活動では、増殖ブランケットなどの各機器の設計から原型炉プラント全体の設計まで幅広く概念設計を進めています。また、日欧協力で行う要素的研究開発では、原型炉に必須となるプラズマからの中性子を受け止めて、そこから熱を取り出すことで燃料を作り出す役割を担う増殖ブランケットの材料、特にその構造材料や中性子増倍材料となるベリリウム合金¹⁰⁾、トリチウム¹¹⁾増殖材料となるリチウム化合物¹²⁾などの先進的な機能材料の開発や、トリチウムの安全取扱いの研究開発に重点が置かれています。

これらの研究開発を行っている原型炉R&D棟には、様々な材料分析装置、実験装置が置かれ、構造材料や機能材料の研究開発だけでなく、DT燃焼実験¹³⁾を行ったイギリスの核融合

実験装置JETのタイルやダストの分析も行われています。

○計算機シミュレーションセンター（CSC）



CSCでは、2012年1月からスーパーコンピューター「六ちゃん」を運用し、核融合の研究開発のための理論シミュレーション開発を開始、極めて高い稼働率、利用率で大きな成果を挙げ、2016年末まで運用しました。この成果を元に、次の核融合研究開発用スーパーコンピューターを導入、2018年6月から本格的な運用を開始しました（「六ちゃんII」）。このスーパーコンピューターは、初代「六ちゃん」に比べ性能は2倍以上高く、ITERやJT-60SA等の実験予想解析、そして原型炉設計等が格段に進むことが期待されます。

○ITER遠隔実験センター

フランスで建設中のITERの実験を将来六ヶ所から遠隔で行い、ITERで得られるデータの全てをここに転送し、原型炉開発のために利用する、これが「ITER遠隔実験センター」の役割です。

遠隔実験に必要なとなるソフトウェアの開発、遠隔実験システムのための環境、機器、ネット

⁹⁾ 文部科学省核融合科学技術委員会の審議に基づいて核融合原型炉開発の技術基盤構築を進めるために、原型炉の概念設計及び研究開発を担う全日本体制の組織

¹⁰⁾ 核融合反応で消費した以上の三重水素を生成するため中性子をベリリウムに当て中性子を増倍する。

¹¹⁾ 三重水素（トリチウム）

¹²⁾ 三重水素を生成するために中性子をリチウムに当てる。化学的に安定なリチウム化合物（例えばチタン酸リチウム）

¹³⁾ 重水素（D）と三重水素（T）を使ったDT燃焼試験

ワークシステムの整備完了を経て、ITERと
の世界最大規模の大量データ高速転送試験や
国内外のプラズマ実験装置との遠隔実験を始
めています。

2018年11月28日には、フランスCEAカ
ダラッシュ研究所¹⁴のトカマク実験装置WES
T¹⁵との遠隔実験が成功。青森県の高校生達に
も現場で見てもらいました。今後は「ITER
遠隔実験センター」とスーパーコンピューター
を活用することで、ITER等の運転、実験、
データの国内集積拠点とするとともに、その解
析を効率的に行う核融合情報基盤システムの
整備を進めたいと考えています。

○ITER-TBM



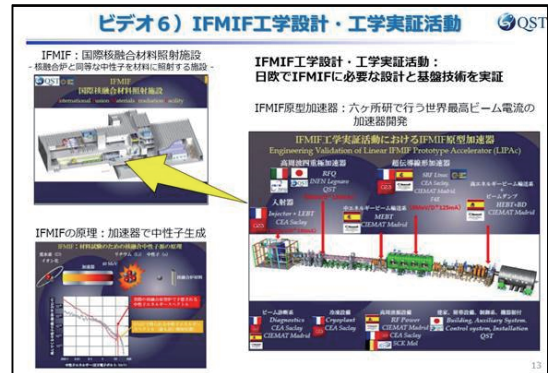
ITERでは、将来の核融合原型炉の増殖ブ
ランケット設計に向けたデータを取るために
各極独自のものを持ち寄り性能を競い合う「I
TERテストブランケット計画」を実施します。

ITERでは国際協力で建設、運転を進めま
すが、核融合反応の熱を取り出し、燃料となる
三重水素を生成する増殖ブランケットに関し
ては、各極が様々な方式を提案していて、この
「ITER-TBM」の試験でどの方式が良い
かその性能を競い合うことになります。日本が

ITERに持ち込むテスト・ブランケット・シ
ステム¹⁶は、六ヶ所研に施設を設け、試作、製
作、様々な試験を行う等を計画しています。

このITERテスト・ブランケット・システ
ムや、将来の核融合原型炉に入れるトリチウム
増殖材であるリチウム化合物に必要なリチウ
ムを確保することが重要です。そのため、現在
輸入に頼っているリチウムを海水から回収、生
成し、賄うための研究開発もこの六ヶ所研で
行っています。この技術は電気自動車のリチウ
ム電池の資源リサイクルなどにも応用するこ
とができます。

○IFMIF



核融合炉の高温のプラズマを取り巻く真空
容器内の機器のために開発した材料が、核融合
反応で発生する非常に高いエネルギーを持った
中性子や熱に耐えなくてはなりません。この
ような核融合炉の環境で、材料の健全性を試験
するための重要な施設が「国際核融合材料照射
施設」、IFMIFです。

IFMIFでは、重水素をイオン化¹⁷し、そ
れを加速器で加速し、アルカリ金属元素である
リチウムに当て、ほぼ核融合炉で発生する中性

¹⁴ フランス原子力代替エネルギー庁（CEA）の原子力研究センターで、ITER建設サイトに隣接

¹⁵ CEAの超伝導コイルのトカマク装置。Tungsten(W) Environment in Steady-state Tokamak

¹⁶ Test Blanket System。ブランケット試験体に加えて、冷却材循環システムや三重水素回収システムを合わせたブランケット機能試験システム。ITERにおける、これらの総合試験をITER-TBM計画という。

¹⁷ 重水素原子（陽子1個、中性子1個）から電子を剥ぎ取り、プラスの電荷をもつイオンとすること。イオン化した重水素イオンは、加速器の電界でビーム（束）となって加速される。

子と同じようなエネルギー・スペクトル¹⁸を持った中性子ビーム¹⁹を発生させます。

六ヶ所研では、これまで欧州と協力して I F M I F の工学設計や様々な実証試験を実施してきました。I F M I F では、材料にできるだけ多くの中性子を照射するために必要となる 40MeV²⁰、125mA というこれまでの加速器では出したことがない大電流の重水素イオンビーム²¹を連続発生する加速器 2 基から成ります。これを作るためのプロトタイプである「I F M I F 原型加速器」を日欧で分担し合い、設計、製作して、現在、六ヶ所研で実証試験を行っています。この原型加速器で 9 MeV、125mA という大電流の重水素イオンビームを連続発生させることを目指しています。

現在、高周波四重極加速器 (R F Q)²²の実証試験が開始されており、2018 年 6 月に初めての水素イオンビームの加速に成功し、現在重水素イオンビームの試験の準備を進めているところです²³。R F Q の実証試験と併行して、残りの超伝導線形加速器²⁴やビームダンプ²⁵を含めた高エネルギー輸送系²⁶が六ヶ所研に搬入されてきており、組立作業も開始されています。2019 年内には全ての機器の据え付けが完了する予定です。

○先進的中性子源 (A-FNS)



I F M I F / E V E D A 事業²⁷の成果を元に原型炉の材料開発に必須の先進的中性子源「A-FNS²⁸」を六ヶ所に建設すべくその概念設計を進めています。

現在、B A 活動のもと、日欧共同で実証試験を行っている I F M I F は、国際協力を前提とした核融合材料照射試験²⁹に特化した研究です。一方で六ヶ所研では、日本の原型炉開発ロードマップに沿って、これまで得られた成果を元に先進的中性子源「A-FNS」を開発しようと計画しています。「A-FNS」では、核融合炉材料照射はもとより、発生する中性子を医療、産業、他分野の学術、放射性同位元素製造³⁰等にも利用することを考えています。将来的には関連施設を呼び、新たな産業を興すニュートロン・フォレスト³¹へ発展することでしょう。

¹⁸ 生成する中性子の個数とそのエネルギーの分布を示したもの

¹⁹ 重水素イオンビーム (束) がリチウムに衝突して発生する中性子ビーム (束)

²⁰ メガ電子ボルト

²¹ 電流は、電荷数 (イオン数) × 速度であり、大量の重水素イオンを加速することを意味する。

²² 高周波を内部に貯めて、強くなった高周波電界でイオン束が広がらないように加速する装置

²³ 水素は重水素の半分の重さであり、半分の高周波電界で加速できるため、初めに水素イオンで試験

²⁴ 超伝導材料の加速器で、電気抵抗がないので少ない高周波入力で高い電界が得られる。

²⁵ Beam Dump。加速したビームを受け止めるエネルギー吸収体

²⁶ イオンビームが周囲に衝突しないように調整する装置

²⁷ I F M I F (International Fusion Materials Irradiation Facility) / E V E D A (Engineering Validation and Engineering Design Activities)。国際核融合材料照射施設/工学実証・工学設計活動。B A 活動の一つ。

²⁸ A-FNS (Advanced Fusion Neutron Source) は、B A 活動の成果を基にした日本独自の核融合中性子源計画

²⁹ 核融合中性子源による中性子を材料に照射し、中性子耐久性を評価する試験

³⁰ 中性子等を照射し、放射線を放出する元素を人工的に製造すること。

³¹ 中性子 (ニュートロン) を用いて林 (フォレスト) のように続々と新産業創成するとの意味の造語

○おわりに 池田所長

このように六ヶ所研が中核となり、ITERやJT-60SAなどと連携を取りながら核融合原型炉の概念設計と研究開発を進めるとともに、核融合中性子源の整備を進め、2035年頃に求められる原型炉の建設判断に必要な核融合炉工学に係る技術情報を整備し、原型炉をできればこの地に建設したいと思っています。



7. リチウム回収技術研究開発

それでは、このビデオで説明したもののうち、幾つかの取組を説明します。

リチウムは、核融合にとって三重水素を製造する原料となります。リチウムは海水に豊富に存在しますが、採取方法に係る研究は容易に進んでいませんでした。しかし、ここ10年程の研究で「リチウムだけを通す膜」の開発に成功、実際に海水からリチウムだけを取り出せるようになりました。図表6は実際に海水から採取したリチウムの写真です。現在、この研究は実験室レベルですが、今後は、パイロット・プラント・レベル³²にする等、必要な量の採取の実現に向けて国内の関係機関と議論しています。

一方、リチウムは、これまではスマートフォンのリチウム電池向け程度の需要でしたが、電気自動車のバッテリー向け需要が開拓されたことからその消費量は大きく変化しています。そうした意味で、リチウムの確保は、中国を始めとする諸外国との国際競争となる等、社会的な問題になってきています。そこで、我々のリチウム採取技術がこうした方面に活用できるのではないか、特に、海水からリチウムを採るだけでなく、使い終わったリチウム電池の再利用にも応用できるのではないかということで、

現在、国内メーカーと、この技術応用に精力的に取り組んでいます。

ここでは、リチウム透過膜がどのようにリチウムだけを通すのかを模式的に図にしています。リチウム透過膜の右側に海水、あるいは使用済みリチウム電池溶液を入れ、左側に純水を入れて電気を流すと電流（リチウムイオン）が流れるというものです。リチウム透過膜を、イオン伝導体³³と言いますが、これは非常に薄いものです。今後は大量生産を可能とするとともに、品質の信頼性を確保しなければならず、さらに産業へ展開するためにはコストの問題の解決が必要です。我々の試算では、既に市場に出回っているリチウムよりも低コストでの製造が可能ではないかということで、産業革新機構³⁴等と産業展開の可能性等を議論しています。具体的には、このリチウム分離膜、現段階では非常に小さいものですが、今後、大型化ができ海水を大量に流して大量のリチウムを採取できるようになれば、低コストが可能となります。現在は青写真の段階ですが、この技術を元に、海水からのリチウム採取、電気自動車のリチウム電池向けのリチウム再利用といった産業展開を図りたいと思っています。

³² 本格的なプラント建設に先立ち、製造コストや安全性、信頼性を確かめる試験プラント

³³ 特定のイオン種を伝導（透過）させる材料

³⁴ 産業や組織の壁を越えて次世代の国富を担う産業を育成・創出することを目的に設立した官民ファンド組織。2018年9月に株式会社産業革新投資機構に改組

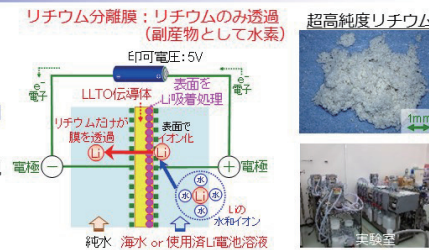
図表 6

リチウム回収技術：海水や使用済リチウム電池からリチウム資源回収



リチウム回収技術

- リチウムは、核融合炉の燃料(三重水素)の原料
- 海水や使用済リチウム電池等からリチウムを回収する技術(特殊なリチウム透過膜)を開発
- 現在の実験室規模から、パイロットプラント規模での大量回収技術の実証を検討中。



超高純度リチウム



リチウム資源循環システム

- 電気自動車の普及に伴い、近年、電池原料のリチウム価格の急騰、資源不足が懸念。
- リチウムは輸入に100%依存しており、リチウム資源確保は日本のものづくり産業に必須。



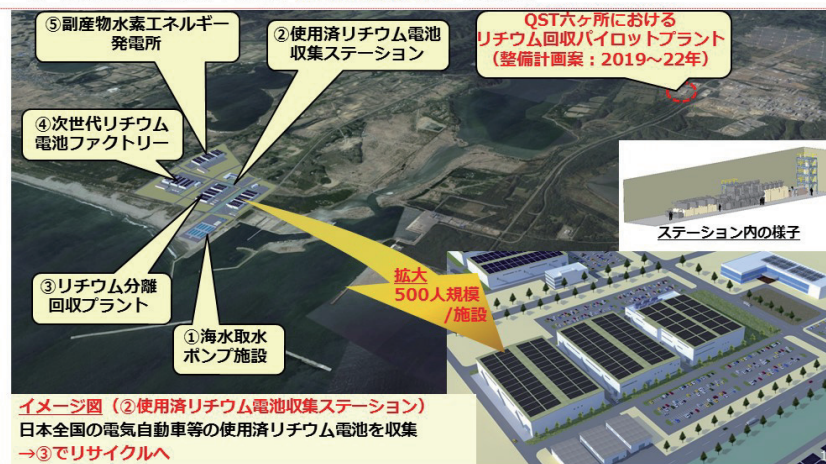
QSTをハブとした民間企業とのアライアンス(業務提携)事業を発足、資源不足が懸念される2025年頃までに社会実装を目指す。

図表 7

リチウム回収技術が拓く新たなリチウム産業イメージ



- パイロットプラント&アライアンスにて得られたデータをもとに、海水リチウム回収、電気自動車等用リチウム電池リサイクルの社会実装を目指す。
- ①~⑤の施設に展開し、世界初のリチウム資源タウンへと発展。



8. 核融合中性子源計画 (A-FNS)

核融合中性子源³⁵に係る研究は、核融合における大きな問題の一つである「核融合により発生した中性子は、エネルギーが非常に高いことから、核融合炉の材料に与える影響がどうなるのか」といった問題に係る研究です。ITER

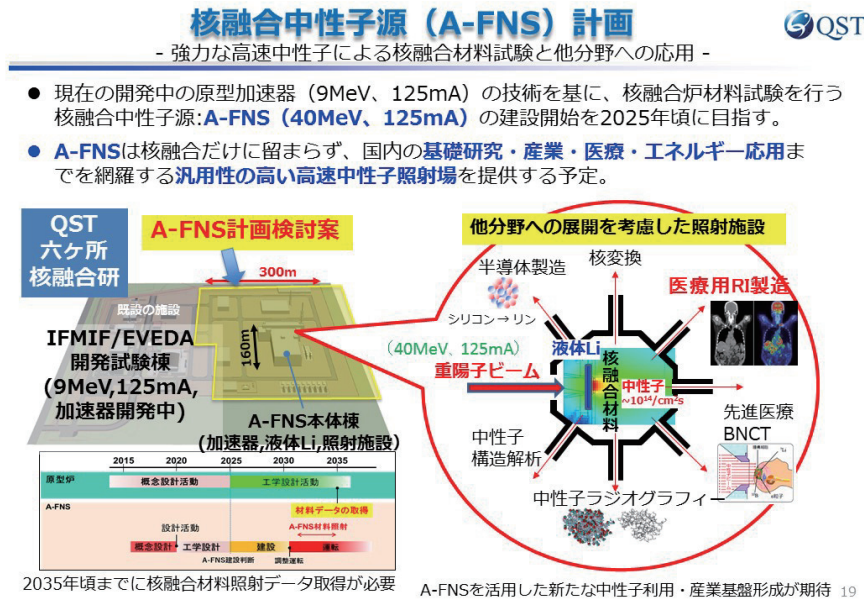
実験が控えています。ITERにおける中性子の発生量は、原型炉における中性子の発生量と比べるとまだまだ少ないため、加速器を用いて原型炉と同等量の中性を発生させる研究を行う必要があります。「ロードマップ」の

³⁵ 核融合反応で発生する中性子と同等なエネルギーを有する中性子を生成する装置

おり、2035 年までに原型炉の建設判断に必要な材料照射データを揃えるには、2025 年頃までに核融合中性子源を建設着手する必要がある

り、それに間に合うよう、2020 年の核融合中性子源の概念設計完成に向け、六ヶ所研で取り組んでいます。

図表 8



9. 核融合中性子源研究の社会的還元例

現在開発中の核融合中性子源の目的は、まずは核融合材料の評価を行うことですが、発生する中性子が非常に多いことから、透過や散乱した中性子の産業応用として、医療用ラジオアイソトープ³⁶の製造、シリコンからリンに変える半導体製造、さらに中性子を用いて内部構造を調べるといった応用について、現在、国内の日本アイソトープ協会³⁷他、各界の様々な方面と相談しながら検討しています。このうち3事例を紹介し、核融合研究の産業応用を紹介します。

(1) 医療用ラジオアイソトープ

医療用ラジオアイソトープ (R I)³⁸を紹介します (図表 9)。医療用には様々なR Iが用いられております。特にモリブデン 99³⁹、これはテクネチウム 99⁴⁰の親核種⁴¹ですが、これは核医学診断 (がん診断等) に使われ、市場規模で年間 200 億円程となっています。現在、日本の研究炉が全て止まっているためR I 製造ができず、全量が輸入されています。そこで、この分野の先生方からは、何とか国内で製造でき

³⁶ 放射線を放出する放射性同位体 (ラジオアイソトープ) の医薬品

³⁷ アイソトープ・放射線に関する利用技術の向上と普及啓発の推進を図るとともに、放射線安全を確保し、国民が安心できる安全な社会の形成に資することに努め、もって科学技術の振興と国民生活の向上に寄与することを目的とした公益社団法人

³⁸ Radioisotope (RI)

³⁹ モリブデン (元素記号 Mo、原子番号 42) の放射性同位体であり、半減期 66 時間で核医学診断で用いられるテクネチウム-99m (元素番号 Tc、原子番号 43) となる。

⁴⁰ ガンの診断で使われるγ線を放出する放射性同位体

⁴¹ ある原子が別の放射性物質の崩壊によって生まれた際の元となった放射性物質 (核種)

ないかという話を伺っており、核融合中性子源を使った製造ができないかを研究しています。図表9のとおり、左側から重陽子ビームをリチウムターゲットに当てると中性子が核融合材料に当たりますが、このリチウムと核融合材料との間にモリブデン 100⁴²を気送管で交換することでモリブデン 99の製造が可能です。その量も、わずか3日間照射するだけで国内需要の99%をカバーできます。すなわち国内需要のほとんどをこれで賄えるので、こうした研究開発を企業の方々と一緒に進め実現したいと考えています。

(2) 半導体製造

中性子を用いた半導体製造⁴³を紹介します(図表10)。これは中性子ドーピング(添加)法と言われており、シリコンに中性子を当てるとリンが生成し半導体になります。こうした技術は昔からあり、国内では研究炉で実施していましたが、現在、研究炉が全て止まっているため、国内では行われていません。中性子を用いた半導体製造は、需要が非常に大きいと考えております。核融合中性子源A-FNSでは図のように中性子を当てますが、散乱した中性子は直線的に当たるのではなく、空気のように拡が

ります。リンを効率よく作るには低エネルギーの中性子をシリコンに当てる必要があります、このため減衰機構⁴⁴を入れて半導体製造にも応用できるA-FNSを設計したいと考えています。

(3) 中性子ラジオグラフィ

中性子ラジオグラフィ⁴⁵を紹介します(図表11)。これは内部構造分析と言われており、X線解析(レントゲン)と同様のものと考えて良いです。ヒトにX線を当てるとヒトの骨が見えるように、中性子は金属を透過するので、金属の中の状態を調べることができます。こうした技術は既に関発されており、例えば、原子炉の燃料の中の状態やロケット、航空エンジンのタービン、さらにガソリンエンジンといったものを、中性子ラジオグラフィを用いて内部の状態を調べることが行われています。加速器を用いたラジオグラフィができれば、レントゲンと同じように電気を止めれば測定停止するという点で、非常に使い勝手の良い内部構造分析装置となります。この装置は、核融合材料から「コリメーター⁴⁶」を通して中性子を試料に当てることでその内部分析を行うことを考えており、この分野への活用も意識しつつA-FNSを実現したいと考えています。

⁴² モリブデンの安定同位体であり、中性子を受けると放射性同位体のモリブデン 99 に変換する。

⁴³ シリコン単結晶中にリンが添加することで半導体とする製造手法

⁴⁴ 中性子を水素等に衝突させてそのエネルギー(速度)を遅くする機構

⁴⁵ 中性子線が物質中を透過した際、物質による吸収(あるいは透過)の大きさの差を用いて物質の透過像を取得する技術

⁴⁶ 放射線ビームを平行にし集束させる装置

図表 9

例 1) 医療用ラジオアイソトープ (RI) 製造

- 医療用には、様々なラジオアイソトープが用いられているが、多くは海外の原子炉から輸入。

例えば、 ^{99}Mo とは・・・

- 核医学診断（がん診断等）で最も利用されている $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の親核であり、現在、**全量輸入**
- 原子炉の停止や輸送のトラブルの懸念から、**国内製造による安定供給が求められている**
- 骨、心筋、脳血流などのシンチグラフィに使用
- 市場規模としては年間約**200億円**（薬価ベース）



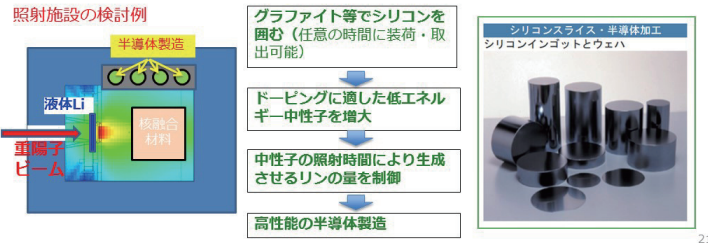
図表 10

例 2) 半導体製造

- 中性子ドーピング：中性子は高い物質透過性を持つため、単結晶内の核種を均一に核変換することができるので、半導体製造に適している。

例えば、シリコン半導体製造における ^{30}Si では・・・

- $n + ^{30}\text{Si} \rightarrow ^{31}\text{Si} \rightarrow ^{31}\text{P} + \beta$
- 海外の原子炉では、12インチ径（約30cm径）のシリコン半導体の製造実績
- 国内では研究炉停止により製造停止（JRR-3：年間4トン）
- 世界の生産量は年間150トン。半導体製造としては1兆円程度。



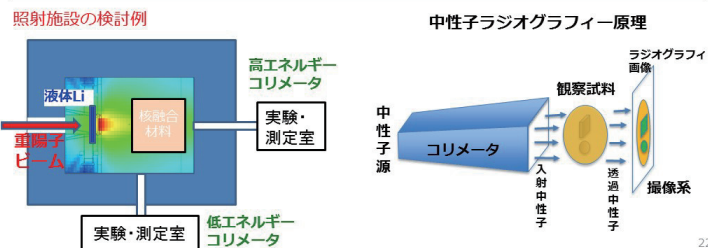
図表 11

例 3) 中性子ラジオグラフィ (内部構造分析)

- 中性子ラジオグラフィ：中性子は、X線が透過しにくい鉄、鉛、ウラン等の重金属を透過するため、これら重金属で構成された物の内部を検査することが可能。

例えば、原子炉の中性子で実用化された分野は・・・

- 1) 原子炉燃料の健全性確認検査、2) 宇宙ロケット、航空機エンジン等の構造材腐食検査、3) 内燃機関内の燃料の輸送状況、潤滑油の状態等の挙動観察等
- これら工業分野以外にも、美術品への応用、埋蔵文化財への応用、農業への応用等。
- A-FNSでは、低、中、高エネルギーの中性子を用いたラジオグラフィが可能



(4) 中性子源研究の産業への波及効果

この「モノをつくり、未来を創る中性子源」(図表 12) は、内閣府が取りまとめたもので、中性子源研究の産業への波及効果を簡単にまとめたものです。

このとおり、中性子の産業応用への展開の可

能性は高いと言えます。これまで中性子源と云えば研究炉のみで、使い勝手の良い加速器による中性子源がなかったことから、六ヶ所研で取り組んでいる核融合中性子源 A-FNS はそれら産業分野に活用できる可能性が高いと考えています。

図表 12



10. 六ヶ所研の展望

最後に、六ヶ所研の展望について述べます。やはり重要なことはITERです。図表 13の横軸に示したように、ITERが2025年頃に初プラズマ⁴⁷を達成し、2035年頃に重水素と三重水素を用いた50万kWの核融合出力を達成することが核融合研究戦略のキーとなります。

一方、日本と欧州との国際事業のBA活動は、当初は2020年3月までの予定でした(BAフェーズ1)。BA活動開始時は、日本と欧州とが互角に分担・取り組む初めての国際共同事

業ということもあり、なかなか大変でしたが、現在、上手く行きつつあることから、2020年からの5年延長に向け協議中です(BAフェーズ2)。BA活動の成果は日本と欧州の知財共有となりますが、一方、日本の核融合開発の観点からは、全てを欧州と共有するだけでなく、BA活動と並行し、日本独自の知財を確保しつつ、例えば「ITER-TBMブランケット」、「リチウム回収」等、日本独自のものを研究開発することが必要です。すなわち、7極の取組(I

⁴⁷ 装置が完成しプラズマを点けること。最初は水素プラズマを予定し、装置の性能確認を行った後、2035年頃に重水素と三重水素による燃焼実験を行う予定。

ITER)、日欧の取組 (BA活動)、そして日本独自の取組の三つを上手く組み合わせることによって原型炉を実現したいと考えています。

六ヶ所研の当面の希望は、2025年頃、核融合中性子源関係施設を六ヶ所村近辺に設置することです。これができれば、図表13のとおり、中性子源を用いた様々な産業が六ヶ所村で展開できると考えています。そして、ITERが順調に進捗し、かつ六ヶ所研において核融合炉建設に係る諸データが揃い、そして2035年頃に原型炉の建設を判断していただければ、現時点で六ヶ所研に原型炉を建設するとは決まっ

てないものの、六ヶ所研に原型炉を持ってきたいと考えております。六ヶ所研で原型炉を建設するとなれば、核融合は、様々な分野の産業の固まりのため、原型炉を中心に様々な産業が広がっていくものと考えています。

こうしたことを見据えつつ、息の長い核融合研究ではありますが、適宜、研究成果を国民の皆様へ発信し続け、国民の皆様とそうした進め方で良いのか確認しながら取り組んでいきたいと考えています。

以上でございます。御清聴ありがとうございました。

図表 13



(いけだ よしたか)

講演録Ⅳ 資源エネルギー・シンポジウム 質疑応答

（質問１）後継者育成策

質問者 核融合炉の研究開発は、実験炉 ITER そして原型炉までは国等が主体的に取り組み、その後は、民間による商用炉に向かうとの道筋と思いますが、まだまだ長い時間が掛かると感じています。

ところで、原子力分野では、最近、後継者難と言われています。原子力を学ぼうとする者が少ない、あるいは過去に見られたような原子力を海外で学ぶといった動きも少なくなったと言われています。さらに、新規制基準への適合性検査は時間を要することもあり原子力発電所の再稼働が進んでいないという実情もあり、今後は後継者が育たなくなるといった懸念を背景に、原子力人材の確保のためにも原子炉は動かすべきといった意見があります。他方で、こうした問題は、核融合分野にはないのではと思うのですが、しかし、今後、長期にわたり継続的に優れた研究者を供給し続けなければならない、それはそれで容易でないとも思えます。

そこで、今後の実用炉稼働時期との兼ね合いでの後継者・研究者育成をめぐる問題や取組等を伺います。

栗原¹ 今後、原型炉の研究開発に向けて、どう取り組むべきかは、一番のポイントです。優秀な人材をどうやって供給し続けるのかですが、実のところ、だいぶ前から比較的コンスタント

に核融合を志す学生がいます。

それでは問題は何かということ、我々の組織の方が、人員削減等で学生を採用できない状態となって、核融合研究を志望する学生が就職できないといった状況がしばらく続いていました。ただ最近では、ITERができつつある、JT-60SAができつつあるということで、キャリアパスとしての道筋が、QSTだけではなく、ものづくりが入っているため核融合関連メーカーに行くパスもできてきています。また、ITERに行くパスもできてきています。こうしたキャリアパスを、学生側でも次第にイメージできるようになってきています。こうなると、これまでは博士課程まで進むと就職が難しくなるので早々に修士卒や学部卒で就職、しかも核融合ではないところに就職する方々がいましたが、現在では、むしろ博士課程で核融合を研究したいという方が増えつつある、こうした素地が出来上がりつつあると思っています。

こうした動きが好循環に繋がっていけば、2035年の原型炉建設判断に向けて、若い人たちの力を結集できるのではないかと考えており、いまはその素地が形成されつつある段階にあると認識しています。

¹ 栗原研一（量子科学技術研究開発機構（QST）核融合エネルギー研究開発部門那珂核融合研究所長）



「資源エネルギー・シンポジウム」の様子

牛草² 私の方からもう少し率直に話をしますと、例えば、六ヶ所研で任期付研究員を募集すると外国人の応募ばかりです。東大や京大等でも博士課程に進むのはアジア系の学生が非常に多いという実情にあり、日本人の後継者育成の観点から大変な危機的状況にあります。この要因を考えますと、まず「任期付」研究員は通例では最長5年程度の期間しかなく、その後、任期を迎えるたびに選択を迫られます。「それはしんどい」ということで、修士課程の後、博士課程へは進まなくなっています。

日本は、国民の税金でITERやBAへ巨額の予算を投じています。これは、日本に核融合の技術をしっかり還流し、日本の将来に役立つということなのですが、核融合研究に若い日本人研究者が集まらないので、こうした状況を改善するために様々な議論を行っています。核融合研究は国の補助事業で、その人件費は運営費交付金で賄われています。核融合の研究開発事業は長く続くものなので、任期制限のない人材を雇えるよう補助金で賄えるようにと文部科学省そしてQSTの人事関連部署とも議論し、2019年度から補助金を活用して期間の定めのない研究者を雇えるようにしました。

大事なことは、2020年にはJT-60SAが稼働します。これは欧州の装置でもあって、

既に欧州の研究機関や大学から日本に学生を出してJT-60SAを使って論文を書かせたい、学位を取らせたいといった話が来ています。当然のことながら日本もそうあるべきです。そこで、各大学の分室を那珂研に設置することを大学と議論しています。

今後、那珂研においてJT-60SAを使いながら学位を取って、そのまま任期付研究員として残ってもらう。加えて、新たに補助金で期間の定めのない研究者を雇える枠が始まります。JT-60SAで活躍し、ある程度実力が備わったらITERで活躍、そしてITERから戻ってから原型炉の研究開発に貢献頂く。こうしたキャリアパスを造らなければならないということで議論を始めているところです。

池田³ 大学の先生によると、学生は博士課程を卒業しても就職がないなら博士課程には進まないという話をよく伺います。我々の若い頃は、定年制の研究員採用が多かったのですが、今はそうではありません。もちろん研究者として、競争環境は非常に重要ですので、「君たちは永久就職だ」と言った途端にのんびりする者がいるかもしれません。しかし、核融合は息の長い研究なので5年経ったら代わるということでは問題です。長期間の研究なので、(落ち着いて研究に取り組める)定年制の研究者を採

² 牛草健吉 (量子科学技術研究開発機構 (QST) 核融合エネルギー研究開発部門長)

³ 池田佳隆 (量子科学技術研究開発機構 (QST) 核融合エネルギー研究開発部門六ヶ所核融合研究所長)

りたいのですが、今はそうした枠が少ないことから、学生たちから研究は諦めますと言われてしまうことが多いという実情があります。そうした意味で、牛草部門長の答えのとおり、何とか研究者の採用の間口を広くしたいと思いません。

I T E Rは、現在ものづくりフェーズにありますが、I T E Rの運転が始まった瞬間から、次は「ブランク」等、シビアな国際競争になるので人材が鍵となります。結局、研究の良し悪しは人で、「あいつがよく分かるから」で決まるものです。したがって、日本から訓練さ

れた研究者をどれだけI T E Rに送り込めるかが鍵です。また、J T - 6 0 S Aは、まさにそうした人材育成機能の軸ですので、日本の研究者がそこからI T E Rに行き、I T E Rでどれだけ活躍できるかです。そのため、次世代の研究者をJ T - 6 0 S A等にどんどん投入し、「君たちにはこういう将来ビジョンがある」ことを提示していかなければ、多額の予算を使ってもI T E Rの成果を日本に還元できないものと思います。この後継者育成問題にはしっかり取り組みたいと考えています。

（質問2）チェックアンドレビューによる事業継続性判断と後継者育成

質問者 後継者不足の背景に、テニユア⁴の人を採用し難いところがあるとの話でしたが、核融合の開発研究が長期的に続く見込みがありさえすれば、学生は選択しやすいと思います。他方で、核融合研究には進捗チェック、中間C&Rが何回か予定され、2035年頃に原型炉に進むかどうかの判断が予定されています。こうした中間的なレビューがあること自体は大事と思うのですが、中間C&Rでの評価次第で、いつか打ち切られてしまう事業と捉えられかねないと思うのです。そう考えますと、5年毎にチェックされて、評価次第で業界全体の存続が困難になるのであれば、核融合研究に骨を埋める覚悟を持って将来選択することは難しい気がします。そこで、この中間C&Rに対する所見を伺います。

牛草 核融合研究をめぐる非常に重要なこととして、I T E R計画は、既に動いているということです。I T E Rは2025年に運転を開始し、その後、2045年頃まで動きます。すなわち2045年までは継続します。その間の問題として、次のステップの原型炉に進めるかどうかで

あり、その条件として、材料データを揃えることや「ブランク」設計を終える等の結果を出すべきと記されています。こうした取組は既に始まっています。また、こうした国の方針へ対応するためには、それ相応の予算や人員の措置がなければ前に進めません。したがって、我々の理解では、中間C&Rは、我々の取組状況のチェックであると同時に、施策の進捗状況自体を確認するということです。こうしたことから、中間C&Rまでに取り組む必要のあることを明確化して進めるためにも国と相談していきたい。

池田 牛草部門長とは異なった観点からの回答となります。

中間C&Rがあり、いつ打ち切られてしまうか分からない研究はやらないという研究者は、私は核融合研究にはいらんと思っています。我々は、未知の解明に挑戦するターゲットを設定し、そのターゲットに挑戦する人間が欲しいと思います。もちろん、給料を支払わなければ良い学生が確保できませんけど。いずれにしても、課題評価の有無で、その分野に来る来ない

⁴ 任期付職員の実績を審査し、適格であれば専任教員として終身雇用する制度

という考え方は、新たな分野に挑戦する研究者

には合わないと思います。

（質問3）後継者育成と若い世代へのPR策

質問者 後継者育成の観点から、例えば法学部の学生であれば弁護士や政治家になりたい、文学部の学生であれば英語の先生や小説家になりたい等、将来への具体的なイメージがあると思いますが、高校三年生が「僕は核融合をやりたい」ということはあるのでしょうか。実際は、そう思えるだけの情報に接する機会がほとんどないのではないかと思います。そこで、大学院を目指す大学生だけでなく、もっと若い世代へのPRの在り方を伺います。

栗原 基本的に核融合の研究に携わるかどうかは、核融合の研究者としての未来があるかどうか、これをどう判断するのかであって、そのためには、まず核融合研究が世の中に認知されているということが条件にならうと思います。そして、現時点の認知度はどうか正直に言いますと、認知度は高いとは言えない。専門家コ

ミュニティは別としますと、ほとんど認知されておらず、この点、我々は大反省しています。したがって、高校生あるいは中学生でも良いかもしれません、そうした若い人たちが、核融合を知り「核融合は研究として面白い、人類の未来を支えるエネルギー源だ」と思ってもらうための活動は、これまでも行ってきましたが、今後、そうした活動を強化していき、世の中に情報発信していきたいと考えています。「ロードマップ」には社会連携とありますが、これはまさにPR活動を位置付けているものでして、これまでは各研究所や各組織でバラバラだったPR活動を、オールジャパンでのPR活動として有効に行っていくことが、社会連携として展開されます。今後、高校生や中学生、さらに広く、国民一人一人にわかって頂けるPR活動へと展開したいと考えています。

（質問4）2016年に核融合研究開発部門がJAEAから分離したことの影響

質問者 講演では、医療用RIの話や中性子を受け止めたブランケットの放射化への対応といった話がありました。また、ブランケットのリチウムでトリチウムを作る、真空容器で燃え残ったトリチウムを取り出して再利用するといった様々な取組が想定されます。こうした事柄は、全て原子力研究開発と深く関わっています。2016年の組織改編で核融合研究開発は、JAEAの一組織から、QSTの核融合エネルギー研究開発部門となりました。これまでJAEAとしてJRR-3⁵や常陽⁶といった研究炉を用いた諸研究等、様々な連携の取組があったと思いますが、今般、QSTの一部門となった

ことで、こうした取組がどう変わるのか。また、また、核融合研究開発部門として力をどう発揮しようとしているのか伺います。

牛草 核融合エネルギー研究開発部門はJAEAの一部門でなくなりました。しかし、それをもって「もう原子力とは関係ない」ことにはなりません。これまでの核融合研究は、どちらかと言えば、超高温下での良好なプラズマ状態の長時間保持というプラズマ工学研究が主流で、例えば資材の放射化への対応等といった研究は、いわばマイナー分野として既存の研究を活用していた状況でした。

ところが、核融合炉ということになりますと、

⁵ 主に中性子を利用した科学・研究また産業利用を目的にした研究用原子炉

⁶ 日本最初の高速度増殖実験炉

中性子源もそうですが、とてつもなく高い線量の状況が生まれます。例えば、ブランケットは遠隔保守ロボットで操作しなければならない、すなわちITERの中にロボットアームを入れてブランケットの取り外しを行うのですが、これは、ITERの真空容器の中は、人が入ればすぐに死んでしまう程の非常に高線量な場であるからです。核融合炉とはこうしたものなのです。したがって、このような非常に高い放射線の環境であっても全ての機器は当然に動かなければなりません。

また、核融合研究は、材料に係る電気の伝導度⁷がどう変わるのかといった基礎的なデータでさえ十分収集されていないまま、これまで研究が続けられていました。そのため、ロードマップには2035年に原型炉建設判断とありますが、それまで、こうした情報を収集しておく必要があります。こうした意味からも、JAEAの有するロボットでの遠隔操作方法、核融合エネルギー開発部門が豊富に有するトリチウムの取扱方法等、総合的に活用して行かなければなりません。

核融合研究拠点が六ヶ所村にある背景も同じことが言えます。六ヶ所村にある日本原燃株

式会社は、いま述べたような技術に関する情報をお持ちであり、原子力機構と原燃に協力を頂きながら、六ヶ所研で必要な技術開発を展開していくことを考えています。

このように、原子力機構との関係がなくなるということではなく、むしろ、核融合の研究開発は、緊密な連携の必要性を踏まえ展開されるべきものと考えています。

池田 核融合を進めていくためには、いまの牛草部門長の話、それから日本の産業界が鍵となります。結局のところ、機器を製造するのは産業界です。現在、福島で大変な御苦勞をされていますが、廃炉措置で用いられる遠隔ロボット技術を始めとする様々な機器を製造する産業界とは、様々な機会を通じて、核融合をどう展開していくのかを、オールジャパン体制で情報を共有しながら進めています。

原子力機構とQSTとは、法律に定められているとおり、研究対象が混在できません。しかし、様々なメーカーを始め、多くの関係機関と共通する技術等を共同して取り組むこと自体に変わりはありません。オールジャパンで使えるものは何でも使う。そうでなければ核融合の実現はできないものと考えています。

（質問5）磁場コイル設置に要する時間・核融合研究をめぐる反対論への対応

質問者 2点伺います。栗原所長の講演で2基の超伝導トロイダル磁場コイル⁸を空輸⁹したとの話がありましたが、このコイルの取付けに要する時間はどれくらいか伺います。

また、核融合と言いますと、それに反対する国民、グループ等があると思いますが、そうしたグループの活動によって仕事がスムーズに進まなかった、障害になった事例があれば教えてください。さらに、例えば国際協力が上手く

いかない、国際的な衝突等の外的要因で計画が進まないことはあるのか伺います。

栗原 JT-60SAの超伝導トロイダル磁場コイルは、まず那珂研に搬入し、その後、こん包を解いて起立させて、それを本体の近くに移動させます。そして、これを一つずつ本体に取付けては本体を回して取り付けるということを繰り返していきます。コイル一つは搬入されて2週間程で取付けといったイメージで、こ

⁷ 物質中における電気伝導のしやすさを表す物性量。電気抵抗の逆数

⁸ プラズマを閉じ込めるためにドーナツ状に配置する超伝導磁場コイル

⁹ 世界最大級の輸送機「アントノフ」による輸送

の取付精度は1mmです。

計画を進めるに当たって外的要因で進められなかった事例の有無について質問頂きました。ITERは7極の取組ですが、いわゆる対立構造にある国々が入っています。ITERは平和利用が目的のためか、これまで対立構造の顕在化はほとんどなく、一度だけ対立が顕在化したことがありました。ロシアでITERの会議開催が予定されていた際に、米国がロシアの武力侵攻を非難してロシアでの会議開催に強行に反対し、その結果、それまでは各極が持ち回りで開催していた会議でしたが、フランスのITERサイトで開催されたことがあります。それ以降、持ち回り会議でなくなり、ITERサイトでの実施となっています。それ以外、特段の問題は起きていないと思います。

牛草 国際協力で研究開発を進めることは大変難しいものです。現在、BA活動を日本と欧州とで実施し、これは非常に順調に進んでいるとの報告でしたが、そこに至るまでが本当に大変でした。特に、六ヶ所研で加速器の組立が行われていますが、これは本来であれば6年で研究開発を終える予定でした。しかし、欧州担当分の機器の搬入が遅々として進まず、予定の2010年が過ぎ、2013年を過ぎ、そして2019年になっています。BA活動は、欧州連合が一括して予算拠出するのではなく、欧州域内の各国研究機関がボランティアで出していることも原因でしょう。

さて、六ヶ所研にIFMIF原型加速器を作ることになっています。ここに至った経緯は概ね次のとおりです。ITERサイトの決定の際、日本と欧州とで競争になり、そのときにITERサイトを譲られた方は譲った方に460億円程を投資して核融合研究開発をやるということでした。その後、最終的に、日本はITERサイトを欧州に譲ってBAサイト得たのですが、その際、「欧州連合が460億円出す」とはっ

きり決まったわけではなく、「欧州全体の中で何とかやります」といった感じになってしまった。そうしたことから、ある研究機関の予算が足らなくなるとズレが生じてしまうといった実情もあり、ことは容易には進まず、ようやくものが揃ってきた状況です。このように、技術的な困難云々よりも、むしろ運営や財政などで障害が出やすい状況は確かにあります。

栗原 核融合への反対や懸念のある方々を想定し、ITERを日本へ誘致しようとした際、あるいはJT-60SA自体を建設しようとした際は、必ず地元の方を主な対象とした説明会を随所で行ってきています。例えば、ITERを那珂研に誘致しようとした際には、周辺の町会にあるような公民館等で様々な質問を受け付け、住民の方々の懸念が残らない状態までディスカッションしました。その際は「何か漏れませんか」、「騒音は大丈夫なのか」といった様々な質問を受け、そうした質問に対し、データを挙げて「大丈夫です」といった説明をして納得を頂くことを大前提として進めることが通例です。

核融合に対する懸念をお持ちの方がいること自体は、むしろ一般的なことと思っています。懸念をお持ちの方も推進の方も参加するオープンな場におけるディスカッションを通じて、我々の説明を「これは信用して大丈夫そうだな」と思ってもらえるかどうかの方が重要ですが、これまでのところ、幸いにも徹底的な反対はありません。徹底的な反対の起きない一つの可能性としては、核融合炉は中性子が発生するが全て炉内で止まって外部に出るものはほとんどないという、核融合炉自体の安全性が大きいものと考えています。

なお、日本へのITER誘致は、最終的には青森県に誘致しようという話になりまして、その際、私自身、青森県内の全ての市を訪問し、それぞれ会場に400人程の方が集まってディ

スカッションしました。そうした場では、いくらでも時間を使って議論したので、そうしたところで議論が尽くされ、ある程度は不安が解消

され、その結果として、誘致して良いだろうということになったものと認識しています。

（質問6）原子炉規制と核融合炉規制との在り方の相違及び必要となる法制度

質問者 核融合炉の実現に向けては、規制法そして規格・基準こそが大事との話でした。現在は「原子炉等規制法¹⁰」がありますが、それを見ますと、この法律の対象となるのは、燃料の核分裂によってエネルギーが発生する原子炉との理解で、核融合関係のJT-60SAやITERといった実験装置や実験炉は原子炉等規制法の対象になっていないとの理解で良いかということ。また、対象でないことから新たな規制法が必要といった場合、現行の、核分裂炉に係る法律と、どういう観点での相違が出てくるものなのでしょうか。例えば、核分裂ですと暴走して止められなくなり放射能漏れが起こるという最悪の事態を念頭に置いた規制と思いますが、核融合炉の場合ですと、先程の説明では「出てくるものがない」、「元々、安全性がある」ということでした。そこで、考えるべきリスクとして、中性子漏れといったことやトリチウムの扱い等、核融合炉に独特の問題があるのかを伺います。

栗原 現在の関連法令には原子炉等規制法が

ありますが、核融合の装置は同法の対象ではありません。ただし、放射線障害防止法¹¹の対象ではあります。

核融合炉には、中性子やトリチウムが漏えいする可能性がリスクとしてあります。この点について、日本にITERを誘致しようとした際、どういった法律が必要になるのかという議論を当時の原子力安全委員会¹²で行いました。その際は、原子炉等規制法をベースに法律を作った方が良いのか、あるいは、放射線障害防止法をベースに法律を作るべきではないかといった議論があり、放射線障害防止法をベースとすることが適切だろうとの結論が見えつつありました。ITER誘致が欧州に決まったことで議論が止まってしまいましたが、原子力安全委員会では法律案の策定に向けた指針的なものを検討されていたようです。

したがって、方法論的にはその際の議論をベースとし、原型炉を手掛けると決まった際に、改めて様々なリスクを踏まえ議論が行われるものと考えます。

¹⁰ 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和32年法律第166号）

¹¹ 放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（昭和32年法律第167号）

¹² 2012年9月19日廃止され原子力安全の規制等に関する事務は原子力規制委員会に一元化された。