

地上に太陽を : 核融合研究の現状と将来

堀内, 利得 / Horiuchi, Ritoku

(出版者 / Publisher)

法政大学人間環境学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

人間環境論集 / 人間環境論集

(巻 / Volume)

8

(号 / Number)

特集号

(開始ページ / Start Page)

37

(終了ページ / End Page)

51

(発行年 / Year)

2008-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00006145>

地上に太陽を

— 核融合研究の現状と将来 —

堀内 利得

自然科学研究機構 核融合科学研究所 シミュレーション科学研究部 新領域シミュレーション研究系

私が所属する自然科学研究機構という名前についてまず最初に疑問がわいたのではないかと思いますので、簡単に説明します。2004年までは国立研究所の核融合科学研究所だったのですが、法人化され、いろいろな組織統合が行われました。そのときに我々の核融合科学研究所と、あと4つの研究所、皆さんご存じの国立天文台、それから岡崎に3つの研究所（分子科学研究所、生理科学研究所と基礎生物学研究所）、この5つの研究所が1つの組織として自然科学研究機構という組織をつくりました。核融合科学研究所はその中の一員となったので、最初にわざわざ自然科学研究機構という言葉をつけました。

きょうは、その核融合科学研究所で行っている研究、すなわち核融合というのは何かという話をしたいと思います。核融合という言葉を開いただけで拒否反応を示す方がいるかと思いませんので、それをなるべく易しくお話したいと思っています。

1. 宇宙はプラズマで満たされている

宇宙のエネルギーの源はすべて核融合であります。太陽の中心に非常に高温のプラズマが存在しています。そこでは自分自身の重力のために非常に高密度で高温の状態が実現しており、そのため、自発的に核融合反応が起きています。この核融合反応では、非常に膨大なエネルギーが解放され、宇宙全体に流れていきます。例えば、夜、月が輝いているのは反射ですが、恒星が輝いているのは、すべてこの核融合のエネルギーがその源です。

そして、核融合反応で解放されたエネルギーは太陽内部や太陽大気でいろいろな複雑な現象

を起こしますし、我々の地球にも伝わってきて、生命現象に影響を及ぼす様々な現象が引き起こされます。太陽や星では、物質はほとんどプラズマという状態になっていますし、宇宙はほとんどプラズマで満たされていると思っていただいても結構かと思えます。プラズマでない、鉱物、水、空気等で占められている地球のような惑星は宇宙の中で特殊な存在です。

まず、「プラズマとは何かという」ことをお話した上で、そのプラズマがなぜ核融合を起こすかということをお話しします。

太陽や恒星で起こっていることの解明は、国立天文台の方で行っている研究でありまして、そこで起こっている核融合を我々の地球で実現しようとするのが、我々の核融合科学研究所の研究の目的であります。我々の研究所には大型ヘリカル装置、略称としてLHDという名前と呼ばれる装置があります。この装置の中に、太陽にあるような高温のプラズマを閉じ込めて核反応させるにはどうしたら良いのか、ということ进行研究しています。プラズマを閉じこめるために必要な道具として非常に強い磁場を使います。我々は、この磁場のことを、しばしば、「磁場のかご」という言い方をします。現実には、この装置の中で、核融合が起こっているわけではなく、様々な基礎研究を積み上げるなど、長い道のりを経た結果、核融合発電を実現しようというのが研究の現状です。

実はこのような研究をする上で非常に重要な役目をしているのは数値シミュレーションです。実際、このような閉じこめ装置の中に入って、プラズマがどうなっているかを調べるにはいろいろな計測方法がありますが、やはり自分の目

で直接見たいという希望があります。直接見ることのできないプラズマの内部がどうなっているか知りたいというときには、シミュレーションが非常に有効です。シミュレーションを使って、核融合装置の中のプラズマがどうなっているか、実際に核融合反応を起こすために、高密度、高温の状態をつくるにはどうしたらよいかということの研究することも、我々の仕事です。

YOKOという、十何年前に上がった太陽観測用の人工衛星があります。これが太陽の表面で起こっていることに関する、非常に鮮明な像を最初に与えてくれました。図1左図を見てください。これは、その観測データで、人間の目では見えない非常に波長の短い軟X線と呼ばれる電磁波で見た時の映像です。よく見ると、太陽大気で、非常に複雑な、そして活発な活動が発生していることがわかります。この活発な太陽大気の現象を、我々は太陽フレアという言い方をします。太陽の中心領域で行われた核融合反応のエネルギーがいろいろな複雑な形で伝わってきて、太陽大気でこのような太陽フレアと呼ばれる爆発現象を起こします。

物理的に何が起こっているかという説明はちょっと難しいので避けますが、この活動領域で非常に大きなエネルギーが解放され、非常に大きなプラズマの流れや、X線や紫外線など、さまざまな光が放出されています。このような爆発現象は太陽の中で起こっている、非常にダイナミカルな動きを反映しています。太陽内部で磁場が生成され、その磁場とプラズマが複雑に絡み合った結果、このような現象が引き起こされているということがわかっています。



軟X線観測 (YOKO, JAXA)。

太陽中心部での核融合反応で開放されたエネルギーが、様々な現象の源



磁場閉じこめ装置内でのプラズマシミュレーション (T. Watansho, NIFS)

図1 軟X線観測とプラズマシミュレーション

先ほどもいいましたように、我々の核融合装置ではプラズマを閉じ込めるのに、磁場のかごを使っています。同様に、太陽フレアを始めとする太陽でのプラズマの関関係した現象を考える上でも、磁場の存在は無視出来ません。

このような太陽で起こっていることを地球で再現してみることはなかなかできないですが、計算機シミュレーションによりその複雑な動きを調べることができます。図1右図はシミュレーションによりドーナツ状のプラズマを計算機の中に再現したものを示しています。ドーナツ状のプラズマの表面で何が起こっているのか、あるいは、ドーナツを輪切りにした場所でプラズマがどんな動きをしているのか、ということをシミュレーションで調べています。

本日の話ですけれども、今お話しましたように、核融合を理解していただくには、まず、プラズマというのは何かという話から始めます。太陽もそうですが、宇宙というのはほとんどプラズマでできています。地球に住む我々の周りにはプラズマはほとんどありませんが、宇宙ではプラズマが一番標準的な状態として存在します。そのプラズマが非常に高温、高密度になって、太陽の中心で核融合を引き起こしているということをまずご理解いただきたいと思います。

核融合をなぜ地上で実現しなければいけないかということが、本日の重要なテーマだと思います。その理由の1つがエネルギー問題です。未来のエネルギー問題をどのように解決するかという問題を考えたときに、核融合発電というのは非常に重要な話となっています。

もう1つが環境問題です。今、二酸化炭素による地球温暖化という話がいろんなところで話題となっているかと思っています。この問題を解決するためのいろいろな試みがされています。1つの解決方法が、核融合発電を実現することです。本当に核融合発電を実現することができるのであろうか。例えば、2~3年のうちに核融合発電ができるかという質問に対しては、ノーです。しかし、今、ある将来的なビジョンの下、地上で核融合反応を起こして発電するための様々なプロセスに関する研究を進めています。例えば、核融合を起こすための条件を明らかにします。

次に、その条件を実現するためにプラズマを閉じ込める装置に関する研究を行います。その装置の中に閉じ込められたプラズマに起こっている様々な物理課程を理解して、より性能のよい閉じ込め装置にするためにはどうしたらよいかという研究を行います。

2. プラズマとは何か

まずプラズマとは何かという話をします。図2を見てください。先ほど、宇宙ではプラズマが一番ポピュラーだといいましたけれども、地球ではそうではなく、固体とか液体、気体というのが、我々の回りでは圧倒的に多い存在です。この3つはどういう関係になっているかというと、皆さんもご存じのように、例えば水を例にとりますと、0℃以下になると氷になります。これは固体とって、分子間の結合が非常に強くなりまして、お互いの位置関係が固定されてしまいます。そのような状態を固体といいまして、非常にかたい状態です。岩石もそうですし、地球を構成しているものの大部分はこういう固体でできています。

それを、ちょっと温度を上げてやります。例えば0℃から5℃、10℃と温度を上げていくと、当然、氷が溶けて水になります。これは液体なので、分子と分子をつないでいる結合が解けて、分子はこの容器の中で自由に動き回ることができま。さらに、どんどん温度を高くしていくと、今度はお湯が沸騰し、気体となって、空気中に流れていきます。その状態を普通、気体といます。ここまでは、皆さんも、良くご存じの話です。では、どんどん温度を上げていったらどうなるか。例えば1万℃近くに上げて見ま

しょう。水を構成している原子の中には、プラスの電荷をもった原子核と、マイナスの電荷をもった電子があります。1万℃近くの温度では、それらがばらばらに分かれてしまい、それぞれが全く、個々ばらばらに動き回る状態になります。これがプラズマです。

くせ者はこの電荷です。プラズマが普通の気体と違うのは、電荷があることで、そのことが核融合を考える上で非常に難しい問題を引き起こしています。例えば磁石とは磁石のN極とN極を近づけると反発し合います。同様に電荷もプラスとプラスは近づこうとするとお互いに反発し合って、なかなか近づけない。これが核融合研究をする上で非常に大きな問題になっています。

プラズマは地球上に殆ど存在しないといっていましたけれども、皆さん、実は幾つか例をご存じだということで紹介します。一番身近で考えられるのはオーロラです(図3左上)。これは南極の昭和基地で観測されたオーロラの写真です。太陽から流れてきたプラズマは地球が磁場に覆われているため直接地上には到達しません。地球を取り巻く磁場の覆いのすき間から侵入し、磁力線に沿って流れてきたプラズマが地球の構成する窒素とかネオンとか、そういうガスにぶつかって発光する現象がオーロラであります。

それから、オーロラを人工衛星からみると、真ん中に薄く白くみえているのが南極大陸です(図3左下)。南極大陸の回りにうっすらと、白く明るくなっていますが、これがオーロラです。これも先ほどと同じように、あるプラズマが地上に降ってきたときの光る発光現象になってい

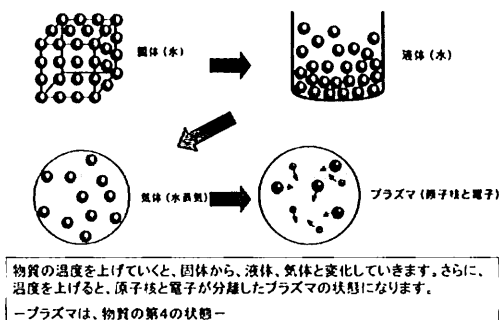


図2 固体・液体・気体・プラズマ



図3 プラズマの例

ます。

そして、先ほどおみせしました太陽ですが、太陽もやはりプラズマでできています。先ほどお見せしたのは人工衛星YOKOによるのですが、その後、打ち上げたTRACEという人工衛星では、非常に高分解のデータが得られます(図3右上)。うっすらとみえているのが太陽の表面です。光で見ると、ここが太陽の境目になっているのがみえるのですが、X線でみますと、太陽の表面の上にまだ明るいものが光っていることがわかります。磁場の中にプラズマが閉じ込められていて、あるメカニズムで発光するということがわかっています。

それからもう1つ身近な例としては、夏になると時々見ます雷です(図3右下)。これは、雲と地上との間に、荷電が空間的に貯まってきて、それがお互いに引き合って電流が瞬間的に流れる。その電流が流れているときに空気にぶつかって発光する現象でして、プラズマ状態が実現したためにできる現象であると考えることができます。

ほかにもたくさんあります。最近ではプラズマテレビというものを出てきていますし、広い意味でいうと、蛍光灯の中もプラズマ状態になっていると考えることもできます。

3. プラズマと核融合

これからは若干頭が痛くなる話なのですが、水は皆さんご存じの H_2O という化学式で表され、水素と酸素という2つの原子でできて、それぞれが結びついて1つの分子をつくっています。問題は、この大きさです。例えば、1つの分子は、実は10のマイナス8乗センチという非常に小さなサイズです。今、問題にしているのは、このサイズではなくて、もっと小さいサイズ、即ち、これをさらに10万倍程度に拡大したミクロの世界です。例えば水素をこのサイズまで拡大してみますと、水素の中心に原子核があって、その原子核の回りに電子というマイナスの荷電をもった粒子が雲のように取り巻いています。原子核の中に正の荷電を持った陽子が1個しかないものが水素ですが、その他にいろいろな原子核が存在します。典型的

な大きさとしては、10のマイナス13乗という、ちょっと考えたって想像できないような非常に小さい原子核が存在します。

この原子核を使って、核融合反応を起こすというのが我々の目的です。通常では分子になっていたものを、分子間の結合を解いて分子を裸にして、さらに原子核を出すためにプラズマ状態にして、そのプラズマ状態になった原子核を取り出して、その原子核同士の反応をさせるというプロセス(核融合反応)を地上で実現することが求められています。

太陽の中では核融合反応が起こっています。ゆっくりですが、太陽の中心で水素の原子核同士がぶつかって、いろいろな反応過程を通して、例えば水素からヘリウムが合成するような核融合反応が起こっています。その結果、原子核の小さいものから大きいものへと変化します。この変化のことを核融合といいます。原子核が大きくなる、即ち、核融合が起こるときに膨大なエネルギーが解放されます。

核融合にはいろいろなプロセスがありますが、太陽の中で主に起こっている反応は、水素を元にしたもので、非常にゆっくり起こります。地上で核融合発電するにはもうちょっと早く反応するプロセスが必要であるため、水素の仲間であり重水素を使います。通常の水素は原子核の中に陽子というプラスの荷電をもった粒子が1個あるのですが、荷電をもたない中性子と呼ばれるものが余分に1個入った原子核があります。これは重水素と呼ばれます。それから中性子が2つ入ったもの、これが三重水素です。重さでいうと、水素が1としたら、重水素が2、三重水素が3という重さです。重水素と三重水素は水素よりちょっと重いけれど、水素の仲間として、水素と同じ化学的性質をもっています。そのようなものを使って核融合反応させると非常に早く進むので、現在、核融合研究ではこの重水素、あるいは三重水素を使った核融合反応というのが大きな流れとして行われています。

図4に示すように、例えば、三重水素と重水素がぶつくと、反応が起き、最初にあった水素よりも重いヘリウム(水素を1としたらヘリ

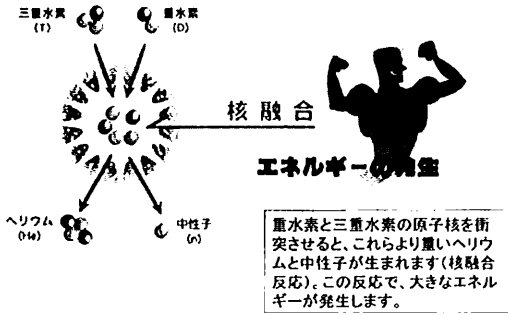


図4 核融合とは

ウムは4の重さをもったもの)になります。このように、より重い原子核に変化する際の反応のことを核融合といいまして、そのときに膨大なエネルギーが発生します。

この反応ではヘリウムといっしょに荷電を持たない重さ1の中性子が同時に生まれます。このとき、なぜエネルギーが発生するかというと、三重水素と重水素が反応し、質量が少なくなったことがその原因です。反応前の2つの粒子の質量の合計は、新しくできたヘリウムと中性子の質量の合計より若干減っています。減った分が、核融合のエネルギーとなって解放されます。もしはかりではかると、最初にあった方が重くて、次に出てきたものが軽くなります。この軽くなった分だけがエネルギーとして解放されます。どのくらいのエネルギーに対応しているかというと、例えば反応前の粒子1グラムが反応した場合、発生するエネルギーは、石油換算で表現しますと、8トンの石油の燃焼で発生するエネルギーに等しいということがわかっています。石油を燃やすより非常に効率の良い反応であることがわかります。

4. 核融合発電の必要性

次に、核融合発電を計画するに至った直面する大きな2つの問題について考えてみましょう。1つは化石燃料が今後、あと40~50年でなくなってしまうのではないかと危惧感があります。これはエネルギー問題です。もう1つ大きな問題は二酸化炭素です。特に化石燃料は燃焼したときに必ず酸素と結びついて二酸化炭素であるとかメタンガスであるとか、地球の環境を

悪くするような廃棄物が出ます。すなわち、環境問題です。今、一番大きな問題になっているのは地球の温暖化であります。このままでは地球が、特に人類が生存するような環境を維持することが非常に難しい、今の文明を維持するにはどうしたらいいかという問題に対して、新しいエネルギー源が必要であるという結論が導き出されました。

図5を見てください。1日当たりのエネルギーを何が供給しているかということ、過去の、19世紀からずっとたどってくと、最初は現在のような石油とか石炭を使った発電というのは行っていなかったもので、薪など、自然に、目の前にあったものを使いました。20世紀に入るところから、石炭を使った燃料、例えば石炭を使った発電などが行なわれました。そのうち石炭よりももっと効率がいいということで、石油を使ったエネルギー供給ができるようになりました。特に、自動車に使うガソリンや様々な産業で使う重油等はすべて石油からとれていますので、自動車の文明が発達するに連れて、どんどん供給量がふえてきています。

それから、最近になって出てきたのが、いわゆる原子力発電です。ただし、発電の結果、放射性物質をつくり出します。そのため、この高度の放射性物質をどう廃棄するかということが非常に大きな問題となっています。

というわけで、クリーンで、地球環境にやさしいエネルギーがどうしても必要です。

もう1つのエネルギー問題の大きな原因は人口の増加です。18世紀、19世紀は、緩やかに増加してきたのですが、20世紀に入るやたちまち

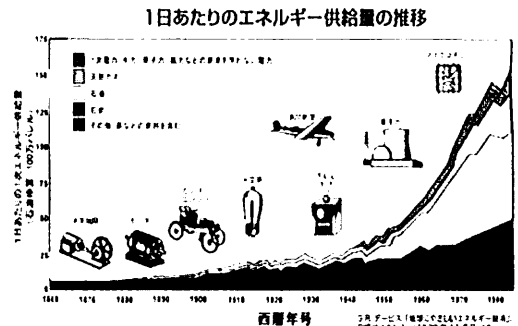


図5 エネルギー供給量について

非常に急激に人口が増えています。当然、人口が増えていけば、その人口に見合う以上に消費するエネルギーも増えていきます。特に文明が高度に発達してきて、今や、我々は電気製品なしには生きていけないような状況になっています。世界中のあらゆる人がそういうものを使うようになれば、ますます一人当たりの消費量が増えます。そのため、単純に人口増加に比例するのではなくて、人口増加の何倍という格好で消費するエネルギーが増えていっています。

今いった石油とか石炭、そういうものが未来永劫にあれば、それをなるべくクリーンに使う方法を開発すればよろしいのですが、1つの大きな問題は、石炭に関しては割と豊富に残っているのですが、一番問題となる、汚い排気、二酸化炭素等を空気中に放出しますので、このまま使うというのは考えなければいけない。さらに、その他の化石燃料、石油とか天然ガス、また原子力発電に使っているウランとかというのは、実は大体50年程度でなくなってしまうというのが、今の試算です。

そうすると今、使っているガソリンエンジンであるとか、石油を使った火力発電所、そういうものを維持していこうと思っても、あと50年たったら、使うことができなくなるということになります。図6は、横軸は時間で、縦軸はエネルギーの消費量と供給量です。今のところ、地球にある化石燃料を中心として使っていれば、我々が必要とするエネルギーに見合うだけのエネルギー源が供給されています。ところが、あと50年ぐらいうると、使用できるエネルギーと

の間にギャップが生まれまして、このギャップを何か別のエネルギー源で供給してやる必要が出てきます。このギャップを埋めるエネルギー源として何を考えるか、いわゆる「代替資源」をどのように作り出すのかというのが、我々人類にとって大きな問題になっています。

あと50年後には何かの形で皆さんが使えるような化石燃料以外のエネルギーを作り出さないと、我々の今の文明は維持できないというのが、この図の意味するところであります。

日本で発電に使われているエネルギー源ですが、圧倒的に多いのが石油、天然ガス、石炭です。水力もありますけれども、化石燃料が圧倒的に多く、他はクリーンの問題がある原子力発電を使っています。一番クリーンである水力発電はほんの少しです。他には、風力発電や、地熱発電などのクリーンな新しいエネルギー源は、本当に少ししかない。現存の技術では、そういうクリーンなエネルギー源でエネルギーギャップをカバーすることが非常に難しいというのがわかるかと思います。新しいエネルギー技術が必要なのです。

次の問題ですが、地球環境、特に地球温暖化という人類生存にとって驚異となる問題に我々直面しています。地球温暖化とはどういうことかといいますと、我々の地球では、太陽から来るエネルギーを源として、植物が生育し、動物がそれを食べて生活を営んだり、我々が必要な食物としてとったりして、さまざまなエネルギー循環が起きています。実は太陽から地上までに到達するエネルギーの多くは目にみえる光（可視光）で来るのですが、一旦地上に到達しますと、地球上の物質に吸収されます。そして、吸収されたエネルギーは、赤外線といって、可視光よりも長い波長の、我々の目にはみえない光として、また宇宙に出ていきます。我々が地球上で使った後、必要ないものは赤外線となって地球から出ていき、大体地球の環境というのは定常に保たれるようになっていきます。空気の中には二酸化炭素であるとかメタンガスが含まれています。このガスが、赤外線となって外に逃げようとする熱エネルギーのある部分を遮断して、地球にもう1回戻してしまいます。今は割

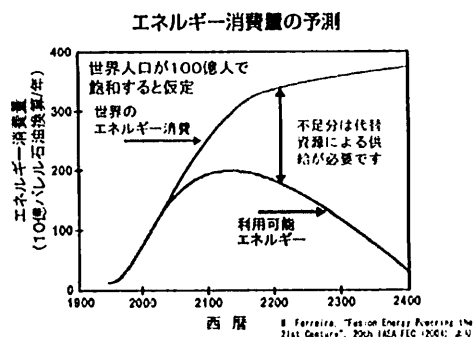


図6 エネルギー消費量と供給量の予測

と量が少ないからよろしいのですが、これがどんどん増えていくとどうなるでしょうか。この赤外線というのはメタンガスとか二酸化炭素の中を通りにくい性質を持っていて、一方、太陽からくる可視光は通しますので、太陽から来る光のエネルギーはどんどん地球にたまってしまいます。その結果、地上の空気や海水温度が上昇してしまう、すなわち、地球温暖化が進んでいきます。

それからもう1つ問題があります。二酸化炭素やメタンガスは、雨が降ると酸性雨になります。水と結びついて酸性の性質を示す雨となって地上に降り注ぎ、地上を酸性雨で汚染していきます。その結果、さまざまな場所で松枯れであるとか、植物が育ちにくいような環境、土壤汚染をつくり出してしまおうということで、これも大きな問題となっています。

では、核融合はどうかという話題に移りましょう。まず、核融合の燃料はどこから手に入れるのか。答えは水の中であります(図7)。海水の一部が燃料として使えます。海水の大部分は、 H_2O という化学記号で書けるよく知られている水ですが、わずかですが、 H_2O のHが「水素」のかわりに「重水素」でできている海水や、トリチウムでできている海水が含まれています。例えばドラム缶1本の中に重水素が6グラムぐらい含まれています。6グラムというのは少ないようにみえますけれども、海水というのはほとんど無尽蔵にあるので、重水素も無尽蔵にあると思っただけで構いません。この6グラムの重水素からどのくらいエネルギーを核融合で取り出すことができるかという、石油で換

算するとドラム缶250本分のエネルギーに対応します。核融合反応は燃焼反応とは異なり、 CO_2 やメタンガスを発生しません。放射能の問題を気にするかもしれませんが重水素の場合、基本的には放射能の問題もクリーンであるというのが、開発の大きなうたい文句になっています。

このように、核融合では二酸化炭素を出しませんので、当然、地球温暖化の心配はありません。また、海水から燃料供給ができるということで資源の問題もあり得ません。今後の問題は、いかに核融合反応を地上で制御しながら起こすかということです。太陽の中で起こっているのだから、地上で再現できないわけではないということで、今からもう40数年前に研究が始められています。

5. 核融合反応の3大条件

太陽のどこでも核融合が起こっているわけではなく、太陽の中心でなければ核融合反応は起こりません。というのは、核融合反応が起こるためには、3つの条件があります。すなわち、(1)温度が高く、(2)密度が非常に高い、(3)狭い領域に長いことプラズマが存在する必要があります。

まず温度ですが、核融合を地上で起こすためには1億 $^{\circ}C$ という非常に高温が必要です。実は太陽の中心というのは1億 $^{\circ}C$ に達していません。その太陽の中心よりも温度の高い状態をつくらなければ、核融合を地上で起こすのは非常に難しいということになっています。

もう1つは高密度です。非常に高密度のプラズマを1秒以上閉じ込め必要があります。これは非常に短いように感じますが、後でおみせしますように、プラズマというのは非常に暴れん坊で、1秒も狭い領域に閉じ込めるのは非常に困難です。この暴れん坊のプラズマを核融合反応に必要な時間だけ、狭い領域に閉じ込めて置くための研究が、まさに核融合の研究になっています。

こういう状況を実現するためにプラズマをある狭い領域に長いこと閉じ込めるための装置が要ります。先ほど大型ヘリカル装置という装置を紹介しましたが、これがプラズマを閉じ込める装置になっています。ところが、そんな閉じ

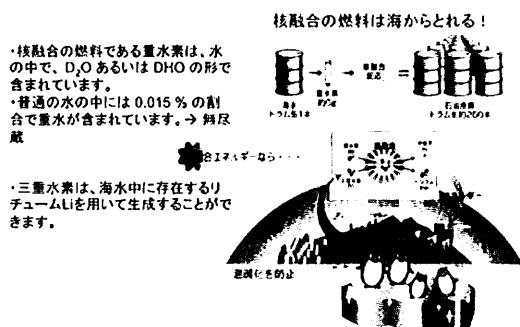


図7 核融合の燃料について

込め装置は太陽の中心部にはありません。太陽の中心部はどうなっているかというと、太陽自身が非常に大きな質量をもっているため、自分自身の質量で自分自身を閉じ込めることにより、核融合できる状態が自動的に作られています。こういう状況を地上でつくるためには、太陽中心に匹敵する重力の強い状態をつくることは期待できないので、重力以外の力でプラズマを閉じ込めるための装置をつくらなければいけない。これがなかなか難しい研究になっています。

5.1. 条件1：温度約1億℃

まず高温の条件について話します(図8)。先ほど話をしたように、核融合反応とはプラスの電荷をもった原子核同士をぶつけて、原子核の中身の組み合わせを変えて、重い原子核をつくりだす反応です。温度が低いということは、このぶつかるときの速度が遅いということになります。遅い速度でぶつけようとすると、プラス同士の荷電をもった粒子というのは反発し合って、なかなか近づきません。反応するためには、この2つが非常に近い距離に近づかなければいけないわけで、その反発力にうち勝って近づくために、温度を非常に高くしないと近づけません。ということで、近づくための温度を計算すると、地上で核融合反応を起こすためには1億℃ぐらいが必要です。

5.2. 条件2：密度 10^{14}cm^{-3}

次に、高密度の条件について話します。なぜ高密度が必要かということ、プラズマ中では、その多くの原子核が、適当にあち行ったり、こ

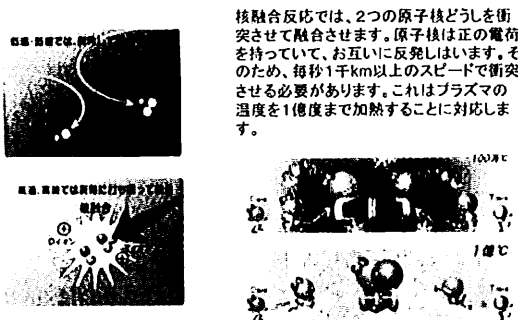


図8 核融合反応には高温が必要

っち行ったり運動しています。核融合を起こすには、その運動している原子核が、たまたま反応する相手にぶつかなければいけないわけです。ぶつかる確率は、密度が低いと非常に少なく、なかなか反応しません。反応がスムーズに進むためには、近くにたくさん、反応する相手がないといけないことになります。なるべく密度の高い状態が好ましいというわけで、1立方センチメートルあたり 10^{14} という、非常に高密度が必要になります。

5.3. 条件3：閉じこめ時間1秒以上

最後に、閉じ込め時間という条件があります。これは何かといいますと、「やかんと魔法瓶」の図9に示したように、閉じ込め時間というのは、熱の逃げにくさをあらわしています。一旦高温で核反応をしやすい状態を作ったとします。その状態が長く維持できれば核反応がずっと続きます。一方、すぐ冷えてしまうと、また反応しないような状態に陥ってしまいます。そのため、効率よい閉じ込め状態をつくるためには、なるべく熱が逃げにくい、すなわち閉じ込め時間の長い、装置をつくる必要があります。それはどういう意味かといいますと、図9のように、やかんと魔法瓶で例を示しますと、やかんを93℃に沸騰させて置いておくとどうなるか。時間が80分ほどたつと、47度以下に落ちてしまいますが、魔法瓶では、24時間たって初めて、47℃以下の温度に下がります。魔法瓶は非常に効率のよい、熱が逃げないようなシステムになっていることが判ります。これは、魔法瓶の構造が熱を遮断するような構造になっていることに起因します。核融合装置の場合も同じで、一旦高温

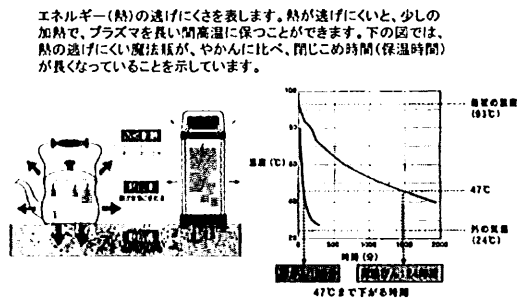


図9 閉じこめ時間の条件

にした状態が長く続くような装置では、容易に核融合反応を継続することができます。発生した熱がじゃじゃ漏れで、直ぐに無くなってしまいう装置では、核融合反応する状態を維持するのが困難となってしまいます。核融合反応のためにはプラズマを長いこと閉じ込められるような装置が必要というわけです。

6. 磁場によるプラズマの閉じこめ

次の問題は、「そのような装置を作ることができるのか」、ということです。なるべく専門的なことは避けたいのですけれども、これから専門的な話を若干しますことをご勘弁ください。

核融合反応を起こすための3つの条件があります。この3つの条件を1個1個満たしてもだめで、同時に3つの条件を満たさないとはいけません。そのため、プラズマがどういう性質をもって、どういうときにこういう条件に近づきやすいかということ調べる必要があります。

太陽の場合、重力でプラズマを閉じ込めますけれども、地上では、磁場のかごといい、プラズマが磁場と非常に強く結合するという性質を使って、大きな磁場をかけ、磁場のかごとをつくり、その中にプラズマを閉じ込める方式を採用します。我々が今行っている研究の主流は、この磁場のかごとを使った磁場核融合閉じ込め装置を使った研究であります。この研究にも、閉じ込めに使う磁場のつくり方によって、トカマク装置、またはヘリカル装置という2つの大きな流れがあります。

地球を例に磁場の話をしましょう(図10)。地球というのは永久磁石で、地球を取り巻く形で、磁場の力をつないだ線(磁力線)が書けます。

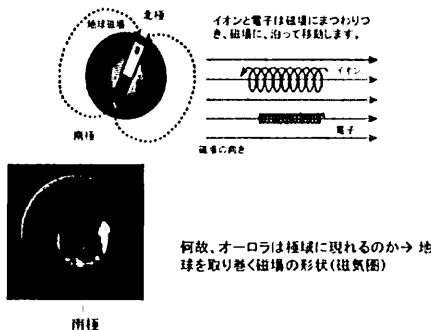


図10 地球の磁場とオーロラ

このような磁場があると、荷電をもった粒子(プラズマ)はこの磁場に巻き付くため、磁場方向には運動できるのですが、磁場を横切る方向には動くことができません。この性質を使ってプラズマを閉じ込めようとするのが、磁場核融合の大きな目標です。

オーロラが地球の南極や北極とかなの限られた地域でのみ見られるという事実も、この磁場とプラズマの関係から説明できます。太陽から飛んできたプラズマは地球が磁場で覆われているため直接地上までは到達できません。太陽から飛んできたプラズマは、地球の磁場、磁気圏の中に、じわりじわりと浸み込んで行き、赤道面近傍のプラズマシートと呼ばれる領域に一旦溜れられます。このプラズマシートを通過する磁力線が地上に到達するところが南極や北極の近くに存在します。その後、プラズマシートに溜められたプラズマは、この磁力線に沿って運動して極域に到達し、オーロラとして発光します。これはまさに、プラズマが磁力線に巻き付いて運動しやすいという性質があるからです。この性質を使って、プラズマの閉じ込め装置を作ろうとするのが、核融合研究の1つの大きな流れです。

それでは、どんな磁場の形状が、プラズマの閉じ込めに適しているかを考えて見ましょう。もし直線上の磁場だと両端がありますから、せっかく閉じ込めたとしても、プラズマが端から逃げてしまう。端をつくらなければよいということで考えられたのが、ドーナツ状のプラズマ閉じ込め装置です。図11を見てください。プラズマは磁場に沿って動こうとする性質を持っていますので、磁力線の端と端をつないで1本にしてしまえば、どこからも逃げられなくなります。このようなドーナツ状の磁場のかごのことをトーラスといいます。トーラス状の磁場をつくってやると、端がなくなることによって非常にプラズマが長いこと閉じこめることができます。

直線状だと磁場の強さに強弱がなかったのですが、このようにトーラス状にすると、内側の磁場と外側の磁場に強弱が生まれます。この磁場の強弱がまたくせ者です。プラズマは磁場の

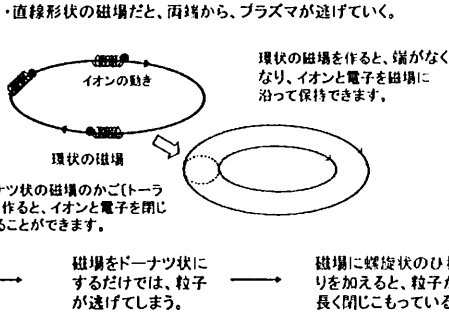


図11 ドーナツ状の磁場のかご

強い領域から弱い領域へ流れるような性質があります。この性質はプラズマの閉じ込めには非常に都合が悪い。どうした良いか。外側に逃げ出そうとしているプラズマを内側に戻してやる工夫が必要となります。ここでヘリカル磁場の登場です。すなわち、磁力線にらせん状のひねりをつけて、外側にあった磁力線を内側に、内側にあった磁力線を外側につなぐようにしたら良いということがわかります。いわゆるヘリカル状の磁場をつくってやると、プラズマが閉じ込め磁場の内側と外側を行ったり来たりすることによって長いこと閉じこもることがわかっています。

図12は、我々の研究所にありますが研究用に開発したバーチャルリアリティ装置で、我々がCompleXcopeと呼んでいるものです。この装置を使うと、ヘリカル状の磁場の中にプラズマがどのように閉じ込められているかを、われわれの目で直接確認できます。図12に示されたらせん状に曲がったものが、磁場を作り出す2つの超電導のコイルです。この超電導コイルの中に電流を流すと、それを取り巻くような形で磁場が形成されます。この磁場によってプラズマは閉じ



図12 磁場のヘリカル状のひねり

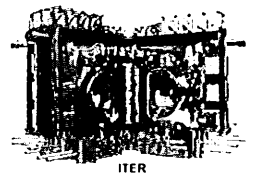
こもっています。実際に、核融合装置の中に入って、プラズマの動きや磁力線形状は見ることはできませんが、この装置を使うと、仮想空間上に映し出された閉じ込め装置の中に入って、磁場のかごを3次元的に視測したり、プラズマの動きを追跡することにより、プラズマがどのように閉じこもっているのかを知ることができます。

現在、主流となっている核融合研究が2つあります。それは、先ほどのらせん状の磁場の作り方によって考えられてきた2種類の磁場閉じ込め装置を用いた研究です(図13)。現在、国際協力で有名になっていますITERという装置があります。これはフランスのカダラッシュというところに建設されることになっています。これはプラズマを閉じ込める磁場の作り方がトカマクといわれる方式の作り方をしている装置です。もう1つ大きな流れとしまして、ヘリカル型の磁場閉じ込め装置です。これは我々の研究所にありますような、最初から、ヘリカル形状のコイルに電流を流してヘリカル磁場をつくり、その中にプラズマを閉じ込める方式です。核融合研究ではこのような大きな2つの流れがあって、それぞれ、相補的な関係になっています。それぞれが、先ほどの核融合三大条件を満たすプラズマを作るための研究を進めているというのが実状です。

7. 数値シミュレーションでプラズマの性質を探る

このようなプラズマ閉じ込め装置で、実際に、

- 1. トカマク方式→ ITER
日本、米、欧、中、印、韓が共同で進める国際熱核融合実験炉で、フランスの建設する。



- 2. ヘリカル方式→ LHD (大型ヘリカル装置)
核融合科学研究所にあるヘリカル型の磁場閉じこめ装置で、2本の超電導コイルによってヘリカル状の磁場を作る。

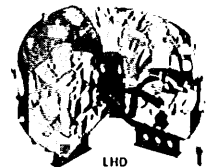


図13 代表的なトーラス状の磁場閉じ込め装置

先ほどの三大条件を満たすようなことがいきなりできれば、それで万々歳なのですが、なかなかそうはいかないというのが、我々の研究で苦労している点であります。どうしてできないかという、いわゆるプラズマというのは、暴れん坊です。太陽の中心にいれば、非常に強い重力によって、なかなか外へ逃げようとしませんが、それでも太陽の表面というのは、先ほど軟X線の映像で示したように、非常に複雑な運動をしています。やはり狭い領域にプラズマを閉じ込めようとすると、狭い領域は嫌だといって、そこから飛び出してしまう性質を持っています。いわゆる不安定性と呼ばれる、プラズマの閉じ込めにとって非常に危険なことが発生します。

これを制御しないと、我々が最終的な目標としているような核融合プラズマというのはできない。どのように制御するかということで、いろいろなプラズマの性質を調べています。プラズマには自己組織化といって、自分自身で自分の好む磁場形状や密度分布を持った形状へと変化していきこうとする性質を持っています。これは、いわゆる生物の自己組織化のアナロジーからつくった言葉ですが、プラズマにもそういう安定な配位があります。自己組織化した安定な配位とは何かということのをあらかじめ研究しておいて、それに近い性質を持った装置をつくってやると、長いこと閉じこもっているであろうと推測して、プラズマ閉じ込め装置の設計をしています。

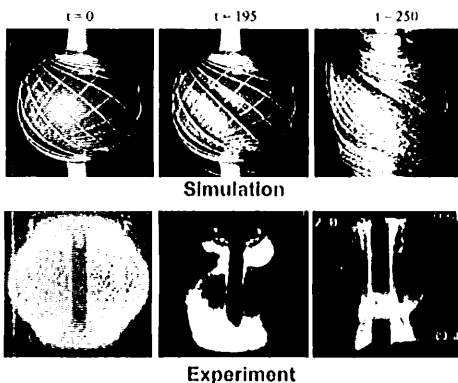


図14 球形トカマクの不安定性。シミュレーション(上)と実験(下)の比較

図14は計算機で行ったシミュレーションの例です。下図が実験結果で、上図がシミュレーションを表しています。両方を比べていただくと、非常によく似たプロファイルになっていることがわかります。プラズマ不安定性が発生した結果、プラズマの閉じ込めが破壊されたことを示しています。シミュレーション研究では、このような実験結果を基に、まずは、実験結果を計算機の中に再現し、次に、どのような不安定性が発生したために、プラズマの閉じ込めが壊れたのかという原因を探ります。

もう一つ、大切なプラズマの性質としまして、自己組織化があります(図15)。プラズマをほっておくと、最初の配位が不安定だとしても、やがて安定な配位に自分自身でたどり着きます。外側の円が書いてあるところは閉じ込め容器だと思ってください。このような形状のプラズマからシミュレーションを始めると、閉じ込め容器の中でヘリカル状の変形が起こって、最終的に、ほとんど時間変化しない定常状態に落ち着きます。最終的にヘリカル状の磁場配位に落ち着いたと言うことは、このようなヘリカル磁場が安定な配位であることを示しています。ですから、このような安定配位に近いような配位で閉じ込め装置をつくってやることによって、プラズマを長いこと維持できるということが推測できます。

もう一つ、先ほどから何度か出ている地球の磁場なのですが、これも有名な話で、地球の磁場というのは自動的に形成されます(図16、口絵7)。その過程はダイナモという言葉で理解されています。地球をどんどん掘っていくと、金

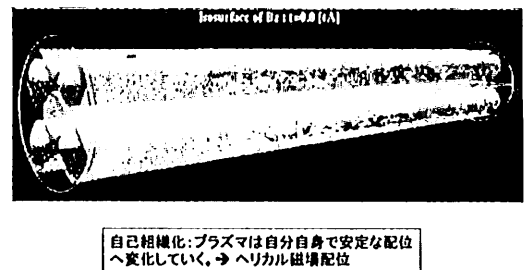


図15 プラズマの自己組織化を再現した数値シミュレーション

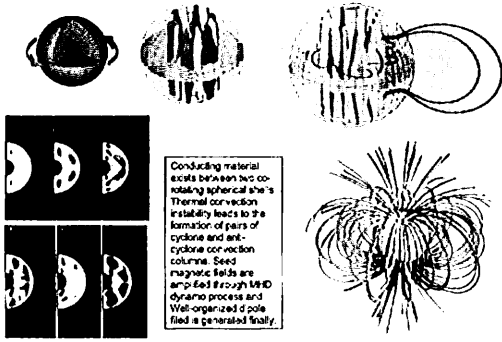


図16 ダイナモによる地球磁場の生成（カラーは口絵7を参照）

扇状の内核（図16左上の赤い部分）に突き当たります。その外側に流体状になった外核があります。内核というのは非常に温度が高くて、外側の外核に行くに従ってどんどん温度が下がります。その中でダイナモという非常に面白い物理過程が起こって磁場を生成しています。もしこのダイナモが起らなかったとしたら、地球には磁場が生まれなくて、我々人類を含む生命は、発生しなかったと言われていました。そのようなダイナモによって、最終的にここに示されたような非常にきれいな磁場が発生し、生命のために非常に良い環境が地球自身によって作り出されたのだといえます。このように、地球磁場の生成過程もプラズマの自己組織化の代表的な例であるといえます。

具体的にどんな物理過程が地球内部で起っているのかを説明します。温度の高い内核表面と温度の低い外核の外側境界の間には温度差が存在します。この温度差が原因となって熱対流が外核の内部に柱状に生まれます。この対流には右回りと左回りの2種類が存在し、その境に内向きに強い流れができ、磁場の強度が増幅されていきます。幾つかのプロセスを経た後、最終的に、非常にきれいな構造をもった磁場に成長します。

8. 核融合炉のしくみと実現への道のり

そのようなプラズマの性質を使って、プラズマを閉じ込めるのに一番良い環境、磁場閉じ込め装置を作ったとしましょう。次の問題は、核融合反応で発生したエネルギーを取り出して、

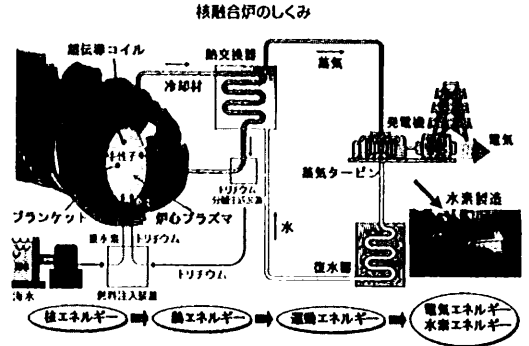


図17 核融合炉の仕組み

どのように発電に結びつけるのかということなのです。

最終的に、どのようなものを考えているかを図17で説明しましょう。閉じ込め装置内にある高温のプラズマが核融合反応すると熱が出ます。その熱を、この冷却材を通して熱交換機で一次冷却水から二次冷却水の形で回してやります。その結果、非常に高温の蒸気ができます。この蒸気を使ってタービンを回すことによって発電することができます。タービンを回す段階などは普通の水力発電や火力発電と同じですが、その回す蒸気をどうやってつくるかというところが違ってきます。

ということで、これを順繰りに回すことによって、我々に必要なエネルギーをとるとというのが、最終的な目標です。

現在、核融合プラズマをつくるための、例えば磁場をつくるためのコイルの配置であるとか、エネルギーの入射方法であるとか、プラズマをコントロールするパラメーターをどのようにとったら良いかということの研究をしています。その結果、核融合反応を起こすための条件を満たすプラズマができつつあるというのが現状であります。

今、研究に使っているのは、我々のところでは水素プラズマですが、次の段階では、核反応させるための材料としての重水素を使った実験が必要になります。重水素を使った実験をすることによって、どのくらい効率よく核融合反応が起こるかということがわかります。当然、核融合反応が起これば、核融合で出てきた高速の

粒子が壁にぶつかります。この時、閉じ込め容器の壁をなるべく、長い間、痛まないように保つための材料開発も必要になります。さらに、熱を取り出す装置、ブランケットというのですが、そういうものも開発しなければなりません。

最終的に、この装置が核融合発電として有効であるということを科学的に実証して、商業炉として使えるようになります。こういうプロセスがまだしばらく続いていきます。実際、トカマク方式の磁場閉じ込め装置であるITERと呼ばれる装置の開発研究が、国際協力のもとで進行中です。これらの装置での研究成果を集大成して、次のステップで実証炉を作り、長い道のりの末、最終的に核融合発電を商業ベースで行うことのできる商業炉へと繋がっていくことをご理解頂きたいと思えます。

以上でお話を終わりにしたいと思えます。ありがとうございました。

○司会者 ありがとうございました。

質問がある方は挙手をお願いします。

○学 生 ご講演をありがとうございました。

資源エネルギーの調達というには三大要素がありまして、経済性ですとか安定性と環境性です。環境性については、今回の件で理解できましたけれども、経済性ですとか安定性、そういうものについて、どのように見通しをされているのか。今、図で見ましたが、それは大体どのくらいを目途にされて描かれているのか。何十年後なのか、それとも何百年後なのか、その辺の見通しがわかれば教えてください。

○堀 内 非常にいい質問かと思えます。なかなかその質問に対して、具体的な数字を上げて答えるのは難しいかと思えます。経済性については、例えば実証炉とか、そういうレベルに行けば、当然そういうことを考えなければいけないのですけれども、今の段階というのは、先ほどからの話にありますように、まだ実験炉であって、最終的な装置の概要が具体的な数値でもって、確定されているわけではありません。たとえば、経済性を考慮するときには、壁材料、ブランケット、熱交換機、等々の閉じ込め装置以外の所も含めて、効率

を考えなければならぬわけです。実現するまでには、かなり長い道のりがありますので、最終的な回答はもう少し時間が欲しいところ です。

次に、最終的にはいつ実現するかという、先ほどの一番関心のある質問ですが、核融合研究の出発から既に、半世紀近くかかっています。あと40～50年後に化石燃料が非常に少なくなるわけですので、30年とか40年後には核融合発電を実現しなければ行けないという目標を設定しています。現在、着実に研究が進んでいるのは事実です。40年か50年か、また30年かという、数字に関しては若干あいまいですが、大体そのレベルで実現しようというのが、我々の今、目標としているところで

○学 生 安定性というところでは、海水からとれるということで、多分、海水は幾らでも、無限にあるかと思うのですが、その辺の取り出す装置というところでは、安定性という面でみて、いかがなのでしょう。

○堀 内 燃料としては、今いいましたように海水なので豊富で、幾らでも、無尽蔵にあるという言い方ができるかと思えます。それから安定性。装置の安定性からいいますと、例えばよくいわれるのが原子炉で爆発が起こったときに放射能汚染がどうのこうのという話が時々されます。核融合炉は逆に、これは燃料が次から次に補給しないと実現しないような装置でして、例えば何かのトラブルがあって、燃料が漏れたとすると、その時点で核融合反応は全部ストップします。そういう意味では、核融合反応を続けることが非常に難しい装置で、それだからこそ、我々として苦勞しているということで、逆のつらい話なのです。けれども、要するに原子炉発電に比べたら非常に汚染も少ない、安定な装置であるということがいえるかと思えます。

○司会者 ありがとうございました。

多分、こういうことだと思います。ウランを使った原子力発電というのは、ウランは黙っていても反応する。核融合は研究の道のりをみてわかるとおり、反応させるだけで大変

なので、事故が起こった場合はすぐとまるであろうということですね。

○学 生 きょうは貴重なお時間、聞いていただき、ありがとうございます。

質問なのですが、原子核を衝突させるには高い温度が必要だという話なのですが、それに発電所は耐えられるのでしょうか。

○堀 内 核融合反応するような高温のプラズマを磁場をかけずに直接閉じ込め装置に置いた場合、装置の壁に当たることにより直ぐに壊れてしまいます。それを避けるために、強力な磁場をかけて、直接、装置の壁に当たらないようにしています。その結果、時間は短いですが、核反応に必要な条件の1つである1億℃という高温のプラズマを実現しています。今、問題なのは、1億℃のプラズマを、核融合反応が起こるだけ長いこと狭い領域に閉じ込めておくにはどうしたらよいかです。要するに核融合反応に必要な3つの条件を3つ同時に満足するような状況はできていないのですけれども、核融合反応に必要な高温状態は問題なくできるというのが実状です。

○司会者 ほかに何かありますか。

○学 生 本日はお話、ありがとうございました。

発電所というと、デメリット、メリット、両方あるのが普通ですけれども、核融合炉が実現したときは、デメリットはほとんどないと考えてよろしいのでしょうか。

○堀 内 どここまで含めて考えるかによって非常に大きな問題で、例えばこういう議論をする人がいます。我々の先輩からずっと研究を行っていきまして、それに投資した資金を考えたときに、本当に見合った開発になっているかといわれると、当然、学問の発展上、そういう研究をせざるを得ないときに、それを投資とするかどうかによっては、非常に問題かと思えますけれども、実際、核融合炉ができた段階において、それは経済的な装置として維持できればよろしいということで考えていただければ問題ないかと思えます。

○司会者 ほかに何かありますか。

私から質問なのですが、現在の主流はトカマ

ク方式とヘリカル方式の2つだと思ってよろしいのですか。

○堀 内 昔からいいますと、非常に多くの装置が提案されて、つくられては消えて、つくられては消えたという長い歴史があります。今の主流は、先ほどいいました磁場閉じ込め方式を採用した大型装置であるトカマクとヘリカルの2つです。閉じこめの磁場のつくり方がちょっと違うということで、異なる名前が使われています。

もう1つ、この磁場の閉じ込め方式の違い方式として、慣性核融合という方式がありまして、これは燃料にレーザー照射にして、瞬間的に非常に高温、高密度の状態をつくり、核融合反応をさせようとするものです。この場合、定常的な反応を起こすような装置にはならないのですが、この方式でも核融合反応を起こすことによってエネルギー取り出すことができますと考えられています。

○司会者 つまり、磁場の形状が違うと思えばいいわけですか。ヘリカルは図をみせていただいたのですが、トカマクの場合はどういうことでしょうか。

○堀 内 両方とも磁力線の形状はヘリカルです。どのようにしてこの磁場を作るかという点が違います。電流が流れると磁場が発生します。磁場をつくるために電流を流すコイルを最初からヘリカル状にねじってつくってあるのがヘリカル方式の装置です。一方、トカマクの場合、外部コイルに流れる電流とプラズマ自身が作る電流の両者によってヘリカル状の磁力線を作ります。ヘリカル状の磁場をつくるという意味では一緒ですけれども、つくるネタがちょっと違うということです。

○司会者 わかりました。

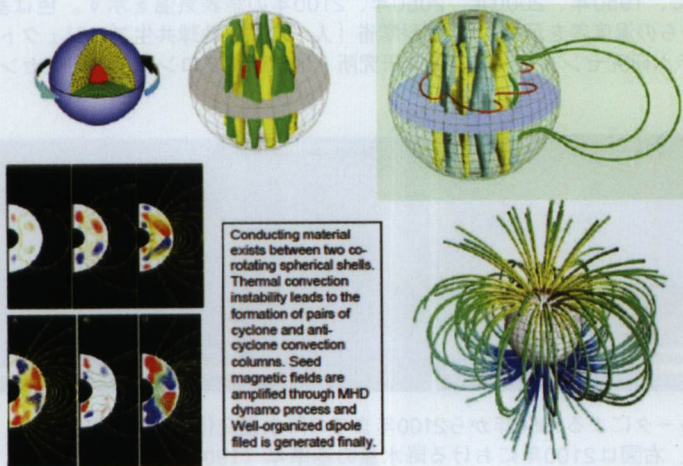
もう1点、質問なのですが、そこ（講演資料）にはD-D反応と書いています。現在では、三重水素と重水素の反応のどちらが主流なのですか。

○堀 内 トカマクで計画されているのは、重水素と三重水素を用いた実験です。ヘリカルではそこまで行っていません。今、閉じ込め実験に用いているのは水素プラズマです。水

素プラズマの場合、最初にお伝えしたのですが、核融合反応しにくい、要するにぶつかりにくいプラズマです。まずそれで閉じ込めがどのくらい効率よくできるかということ进行研究しています。次のステップでは、核融合反応の対象となる重水素を使った実験を行うことを計画しています。

- 司会者 最終的に、HとHは反応しないと思うのですが、実際、研究の段階を経て、実用段階となると、どういう、やはりD-Dを念頭に置いているのですか。
- 堀内 現実的にはD-Dが一番いいのですけれども、いろいろな考え方があって、D-Tを使ってやると効率よく反応が進むということで、今はD-T反応を用いた実験を行っているというのが主流です。
- 司会者 それはまた長い道のりですけれども、途中でいろいろ変わるのでしょうか。
- 堀内 変わる可能性もありますけれども、D-DかD-Tかということになるかと思います。
- 司会者 ほかに、短めならまだ大丈夫ですが、よろしいですか。
それではもう一度拍手をお願いいたします。
どうもありがとうございました。

(満場拍手)



口絵7 ダイナモによる地球磁場の生成 (48頁参照)