**はじめに**



核の問題となると、原子爆弾、水素爆弾の核兵器の問題がまず浮かび、身近な問題として原子力発電の安全性や放射性廃棄物の問題が深刻である。しかし核分裂と核融合は全く違う。大きな違いは核分裂ではありとあらゆる放射性原子核が発生するが核融合では発生する放射性原子核が決まっていて、しかも放射性の自然減衰が速いことである。アメリカが行ったビキニ環礁での水爆実験で焼津の第五福竜丸が放射能を浴びて久保山愛吉さんが亡くなったが、これは水素爆弾を爆発させる引き金に原子爆弾を使ったからである。その上、核分裂の原子炉は、廃棄場所や運搬が問題となる放射性廃棄物を大量に生み出す。

私は大学院の研究テーマに核融合を選んだ。そして三十年間、六十歳まで核融合の世界に暮らして来た。核融合は魅力溢れた世界である。とりわけ日本にとって有意義である。そのお話をしましょう。

**核融合と核分裂**

筆者は昔からのくせで、ついつい「核融合の研究」と言ってしまうのですが、私の仕事は正確に言うと「核融合反応を使った発電炉（発電所）の研究」です。那珂核融合研究所（＊）で発電炉の実現に向けて研究と実現に携わってきました。

石油や石炭を使った発電所では、石油あるいは石炭を燃やして発生する熱をもとに電気を発電しています。石油や石炭が燃えて熱を出すのは、「化学反応」で、石油や石炭の構成物である炭素や水素の原子の原子核には、何の変化も起きません。原子核の周囲にある電子の結合が変化するだけの反応です。

一方、今の原子力発電は、ウラニウム（ウラン）という重い（多数の陽子と中性子からできた）原子核が分裂するときに発生する熱を使います。

そして、核融合発電は、水素の同位体（原子核にある陽子の数は１つだけど、中性子の数が違う原子核）同士の原子核が融合する反応、すなわち核融合反応で出てくる熱を利用します。

（＊）旧日本原子力研究所、改組されて現在は量子科学技術研究開発機構（QST）の那珂核融合研究所。茨城県那珂市にあります。

**燃料の必要条件　、自然発火しないこと**

熱を発生する反応は三つです。化学反応（石油・石炭）、核分裂反応、そして核融合反応です。ここで「燃料」としての必要条件を考えてみましょう。何といっても第一に必要なのは、反応の結果として熱が出ることです。他に必要条件は？　ガソリンやアルコールなども火がついて熱が出ますが、台所や暖房には使われません。どうしてでしょうか。それは、ガソリンなどは、発火点（燃えだす温度）が低くて、自然発火する可能性があって危険だからです。

燃料として使う燃料の条件は、夏の暑い時でも、自然発火しないこと、かつ、必要な時には簡単に火が付くように、発火点がそれほど高くないことです。

要するに、燃料は燃えやすいことが必要だが、マッチで可能な程度の高温がないと燃えださないことが燃料としての条件なのです。

**制御棒**

では、核反応のほうはどうでしょうか。核分裂反応は、臨界量の燃料が集まると自然に核分裂反応が始まってしまいます。北極のような低温でも関係ありません。今の原子力発電に使う燃料をソフトボールくらいの大きさに集めたら、自然に核分裂反応が起こってしまいます。それは核燃料がいつも弱い放射線（中性子線）を出していて、多量の核燃料が集まると、中性子線の量が持続した核分裂反応を起こすのに十分な量になってしまうからです。

今の原子炉では、核燃料を詰めた縦に長い燃料棒と、中性子線を吸収する物質を詰めた縦に長い制御棒とを混ぜて配置しています。制御棒を上に引き上げると中性子線の吸収が減って核分裂反応が持続するようになります。核分裂物質を集めただけでは、自然の反応停止メカニズムがないので、人工的に反応を制御するしくみを付け加えているのです。

だから、大地震などで制御棒による制御が効かなくなると、大事故になる可能性があるのです。

**一億度の実現**

では核融合反応はどうなのでしょうか。核融合反応は水素同位体だけではなく、ホウ素と水素などいろいろな種類の核融合反応があります。

自然界では核融合反応は恒星の中で起こっています。恒星である太陽も、主に水素の核融合反応であの大きなエネルギーを出しています。どの核融合反応も、何億度という超高温がないと反応が起きません。その中で一番低い温度で核融合反応を起こすのが重水素（原子核が陽子１個と中性子１個で出来ている）と三重水素（原子核が陽子１個と中性子２個で出来ている）の核融合反応で、１億度で反応が起こります。

これでわかるように、核融合反応の場合の安全スイッチは、反応に必要な超高温です。ちょっとやそっとでは、こんな高温は作れないので、気が付かないうちに核融合反応が起きてしまった、などということはないのです。

**核融合の研究開発**

世界で核融合の研究が始まったのは１９４０年代ですが、それからもう８０年もたったのに、いまだに核融合発電所は実現していません。それほど１億度を作るのが難しいのです。それほど核融合反応を使った発電所は安全なのだ、とも言えるでしょう。

次回以降に書くように、燃料（重水素と三重水素）を微妙に工夫した磁場で閉じ込めて、これもまた核融合用に特別に開発した装置で１億度まで加熱するのですが、この装置のどこかが地震などでちょっとでもずれると、あるいは壁から１グラム以下でもごみが高温の部分に入ると、炉内の温度が下がって、いやおうなしに核融合反応は止まってしまいます。核融合炉には本性的に高度な安全性がついている、とも言えるでしょう。この点だけでも、核融合発電炉を目指す研究開発は、日本にとって、そして世界にとって、大事なものだと筆者は思っています。

**タイタニック号と石炭発火点**

エピソード的なお話をしますと、石炭には良質なものから泥炭まで、多くの種類があります。良質な石炭は表面にうっすらと油成分が付いています。良質な石炭は、多量を一か所に集めておくと、自然発火してしまうことがあります。

１９１２年に北大西洋で氷山と衝突して沈没した有名なタイタニック号は、豪華客船ですから、最上級の石炭を多量に積んでいました。そして、その石炭が石炭庫の中で自然発火してしまいました。

そのため、急いで目的地のニューヨークに到着しようと思って、氷山の情報があったにもかかわらず、航路を変更しないで、ついに氷山に衝突してしまったのです。氷山に衝突しないでも、もしかしたら船火事で沈没してしまったかもしれません。

**核兵器の安全性**

安全性ということでは、核兵器の安全性も大事なことです。意図しないときに自然発火（自然爆発）しないようにすることは、容易ではないのです。

戦争の好きな人は、核兵器を持とう、などと言ってますが、安全性について考えてみたことはあるのでしょうか。

核兵器を持っていること自体だけでも、それは大変なことなのです。威力のある核兵器ほど、自国内で爆発してしまったら大変なことになります。核兵器を搭載した大陸間ミサイルのある秘密基地に勤務しているひとびとは毎日、死ぬほどの危険・ストレスを感じているでしょう。

２４時間いつでも大統領から命令されたら、直ちにロケットを発射しなければいけない。けれども、どんなことあっても発射ボタンを間違って押してはいけない。どんなことがあっても、基地内で、領土内で、核弾頭が爆発するようなことが起ってはいけない。

実際には、爆発しないように、何重にも安全ロックをかけて、どんな間違いがあっても核弾頭が爆発しないようにしているのですが、しかし、必要な時には、数秒のうちに何重もの安全ロックを全部外して、発射しなければいけない。筆者の経験からは、そんなことが可能なのか疑問に思います。

**怖い核兵器の老朽品**

しかも、米国もロシアも、持っている核弾頭、ロケットは、ほぼ５０年前の老朽品です！　米国はその核ロケットの維持のために、年間２０００億円程度使っているそうです。一方、ロシアの維持費はその５分の１以下で、ちゃんとしたメンテナンスはできていないと思われます。

実際、去年の後半、ロシアの大陸間ロケットが発射基地内で爆発して、基地がなくなってしまったというニュースがありました。

**核融合炉の重水素と三重水素で、燃料輸送問**題**解決**

核融合炉の燃料は、重水素と三重水素です。重水素は海水の中に１％以下ですが含まれています。割合は少ないけれど、海水の量は大量なので、核融合炉が世界中のエネルギー全部を（電力だけでなく、石油・石炭を使っているところも）まかなうことになっても、約１億年は枯渇しません。

もう一つの三重水素は、自然にはほとんど存在しないので、リチウムを核融合炉の壁に埋め込んでおいて、中性子と反応させて、核融合炉の中で作り出します。そうです、ボタン電池やスマホに使われている電池のリチウムです。

リチウムは現在年に１００トンくらい輸入されていますが、核融合炉が日本のすべてのエネルギーを賄うことになっても、年に５００トン程度で十分なはずです。現在、多量の石油・石炭を輸入していて、タンカーの航路で紛争などがあると非常に困る状況にありますが、リチウム５００トンの輸入には、ほとんどリスクはありません。

（注）全消費エネルギーと同じだけの核融合反応出力をえるためならば、年に約２５０トンのリチウムがあればいいのですが、熱から電気への変換効率が最高でも５０％程度なので、年に５００トンが必要です。

電池などで使ったあとのリチウムでも何の問題もないので、リチウム電池をどこか決まった場所に捨てておいていただければ、将来の核融合炉の燃料として使うことができます。

なお、リチウムは吸着剤を使って海水から採取することも可能で、それが実用化できれば、燃料は全部国産で、外国に頼る必要はなくなります。

最初のうちは、電力分だけを核融合で賄うでしょうけれど、それだけでも大型タンカーを毎日往復させて運ぶ原油の量が半分に減ります。そして将来、石油を運ぶ必要がまったくなくなれば、そのプラスは大きいでしょう。石油は戦争の危険地域から海賊のいる海域を通って、常に大きなリスクを冒して運搬しているのですから。

この点だけでも、我が国とって核融合炉が、大変大きな利点をもっているということがお判りと思います。

**我が国は、西欧とほぼ同時に研究を開始**

核融合の研究開発は１９５０年ころから米国、英国、ソ連（今のロシア）などで開始されました。日本でも東大や阪大などで、ほぼ同時に核融合の研究が始まりました。多くの先端科学技術の中で、西欧の研究開始と余り遅れずに日本も研究を開始した点で、我が国にとって珍しい研究分野と言えます。２回にわたって、世界と日本における核融合の研究開発の歴史を紹介してみようと思います。もちろん、科学的な要素も解説します。

**核融合反応には１億度が必要**

前回書いたように、核融合反応を起こすには１億度という超高温が必要です。どうして？それは重水素と三重水素（以降、文字数の節約のため、それぞれＤ、Ｔと略記することにします）の原子核同士を近づけて融合させるためです。原子は原子核と電子雲で出来ていますが、原子核同士を融合するには、まず電子雲を剥がして、中に入っていた原子核同士をくっつけなければなりません。ところが、原子核はプラスの電気を持っています。プラスの電気を持った同士を使づけると強い反発力が出てきます。ちょうど二つの磁石のＳ極とＳ極をくっつけようとしても反発してくっつけられないのと同じです。

では、どうするのか。ちょっと馬鹿みたいですが、二つの原子核を超高速に加速して、反発力があっても軌道が曲がらないうちに衝突させてしまうのです。ここで「温度」の定義を思い出すと（本誌２０２４年４月号３６ページ）原子や原子核が動くスピードを「温度」で表すでした。１億度の時、重水素の原子核は毎秒１０００kmくらいで飛んでいます。青森から下関までを2秒弱で飛ぶ速さです。

**一億度は容易ではない**

まず、原子がどんなものか、思い出してみましょう。原子は原子核と電子で出来ています。電子はちょっと後に書く原子核より小さな粒なのですが、原子核の周囲を飛び回っていてどこにいるのか分からないので原子核を中心とする球形の電子雲と表現しています。原子の図や特殊顕微鏡写真として出てくる原子の図は電子雲の球形で、原子の種類にかかわらずどの原子もほぼ同じ大きさ、約０．１ナノｍ（1００億分の１ｍ）です。原子をどんなにぎゅっと詰めても、電子雲同士が接触するよりも詰め込むことはできません。原子核は陽子と中性子で出来ていて、陽子の数と中性子の数はほとんど同じです。陽子の数を原子番号といいます。陽子の数が同じで中性子の数が違う原子核を同位体と言います。そして、原子核と電子雲の大きさは電子雲を東京ドームだとすると、その中心にある1円玉が原子核、というほど原子核は小さいのです。それでも重さのほとんどすべては原子核の重さです。

さて、燃料のDとTは、最初はD2、T2と二つの原子がくっついた分子です。水素HがH2 であるのと同じように。これを加熱するとD、T　それぞれ単独の原子に分離します（解離）。さらに加熱すると１万度くらいで原子核（正の電気をもつ）と電子（負の電気を持つ）に分かれます。これを電離と言います。この、正の電気を持つ原子核（核融合の分野では、これを「イオン」と呼びます）と負の電気を持った電子が同数混ざった高温ガスを「プラズマ」と呼びます。

そして、1万度程度で出来たプラズマをいろいろな方法でさらに加熱して1億度以上の超高温プラズマにします。でも、当然ですが、1億度などという超高温を作ることは容易ではありません。。

**まずプラズマにする**

燃料のD、Tを1億度にする段階を簡単に見てみましょう。まず、D2、T2 ガスをプラズマにするのですが、それには「放電」を使います。雷の稲妻は自然の放電です。蛍光灯の中にも放電で出来たプラズマがあります。このように、燃料ガスをプラズマにして（電離して）低い温度のプラズマにする第1段階は電気を使います。

**プラズマを閉じ込める**

加熱するには、プラズマを1か所に閉じ込めておく必要があります。それには磁力線を使います。プラズマのイオン（原子核）も電子も磁力線に朝顔の弦のように絡まって動く性質があるからです。

１９５０年頃に米英ソで、秘密研究として核融合の研究が始まった直後から、ありとあらゆる磁場の形式が考案され、実験されてきました。でもなかなか高い温度のプラズマは作れませんでした。そのため１９５５年には、東西間で研究情報を交換し、共同研究も行うことになりました。当時の厳しい東西対立の政治状況の中で、核融合の分野だけでは、東西が仲良く一緒に研究を進めることになったのです。

その理由は、爆弾のように一瞬にエネルギーを放散する技術と、炉として安全にエネルギーを取り出す技術とは全く別物で、核融合の技術は戦争に無関係だからです。

そして、１９６５年頃にソ連から「トカマク型磁場」で高温のプラズマができたという大ニュースがありました。その時の「高温」は１００万度でした。米英は、そんな高温は信じられない、と言って、当時発明されたばかりのレーザーを使った計測器をモスクワ郊外のクルチャトフ研究所に持ち込んで計測をしました（１９６９年）。

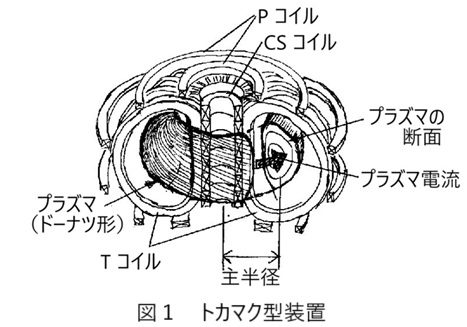
その結果、ソ連が言っていたよりももっと高い温度が確認され、それ以降、世界の核融合研究の中心はトカマク型に移行しました。政治の政界では「プラハの春事件（１９６８年）」のように戦争勃発直前のような状況だったのですが、核融合の世界では東西の研究者が仲良く共同研究をしていたのです。筆者の米国人の親友は、そのときにクルチャトフ研で活躍していて、当時の様子を聞かせてくれました。

**トカマク型磁場**

米国は、当時使っていた装置を急遽改造してトカマク型にしました（STトカマク）。日本では、トカマク型の構造が比較的簡単なこととプラズマの体積を大きくできる点に着目して、すぐにトカマク装置を建設しました　　（JFT-2、　１９７２年運転開始）。

ソ連の次に本格的なトカマク装置を作ったのは日本（日本原子力研究所、現在は量子科学技術研究機構、QST）です。トカマク装置のプラズマはドーナツ形です。磁力線がドーナツ形（輪）になっていると、磁力線に沿っていくら動いても壁に当たることがありません。壁などにあたるとプラズマの温度はすぐに冷えてしまうのですが、ドーナツ形ならばプラズマが冷えることはありません。

プラズマ断面の中心と、ドーナツの中心の距離を「主半径」と言いますが、JFT-2の主半径は０．９ｍでした。現在、国際協力で建設中のＩＴＥＲという超大型のトカマク装置の主半径は６．２ｍです。５０年のうちに主半径を約7倍に大きくして、エネルギー取り出し実験のできる装置を建設しているところです。

図１にトカマク装置の基本構造を示します。まず、中心軸のまわりに放射状に配置した縦置きのTコイルで、ドーナツ状の強い磁場を作ります。そして中心軸に立てておいてあるCSコイルに電流を流してドーナツ状のプラズマをつくります。ドーナツ状のプラズマは、右の断面が見えるように一部を切って描いてあります。プラズマ表面は磁力線様子を斜めの線で示しました。水平に置いてある多数のコイルは、プラズマの位置などを制御するPコイルです。

筆者が研究を始めたころは、世界のトカマク装置のプラズマ・ドーナツの断面は円形でしたが、将来は断面をD形にすべきだと気が付き、筆者図１　トカマク型装置の実験チームは世界で最初にD型断面の本格的な（加熱装置を用いた）研究を行いました。

**太陽は１万５千度で核融合反応**

エピソード的なお話をしますと、核融合反応には１億度が必要と書きました。これはプラズマの密度が磁場装置で実現できる程度の値の場合です。太陽の中心部ではDTではなく、H４つが核融合してHeになる核融合反応が１万５千度で起こっています。太陽の中心部では、きわめて強い重力（引力）で水素原子核が地上の固体以上の高密度で存在しています。密度が高いので、温度が低くても核融合反応が継続するのです。

**自然の縮小モデル**

人類が作ってきたいろいろなものは、自然界に存在しているものより大きいのですが、核融合炉だけは逆です。飛行機に対しては蚊トンボのような小さな自然物がありますし、潜水艦に対してめだかのような小型の魚がいます。でも、核融合炉と同じ自然物は、恒星しかありません。この点からも、地上で核融合炉を実現することは、人類が経験したことのない挑戦なのです。

**ドーナツ形プラズマの断面形状**

１９７４年まで、世界のトカマク装置のプラズマ断面は円形でした。筆者が日本原子力研究所で研究を始めたとき最初に「非円形断面トカマク装置、ＤＩＶＡ」を設計、建設したのですが、その非円形は横長のたまご形でした。その装置の建設が終了したころ、炉として最適な断面はＤ形にちがいないと気づきました。それはエネルギー装置は全体として球形であることが物理的に妥当。球形にはまるドーナツの断面はＤ形だからです。球形が理想であることの証拠のひとつは恒星が球形であることです。また、効率のいいエンジンは、発熱部分が立方体など球形に近い形をしています。熱を放散する表面積が一番少ないかたちです。

筆者はＤＩＶＡ　の次に　ＪＴ―４　という装置の設計を担当しましたが、その設計報告書に上記のことを書いてあります。そして、加熱装置も備えた本格的なトカマク装置を使った世界で初めてのＤ形断面の実験をし、世界をリードする多くの成果を得ました。