

# シンポジウム記念講演 3

## 「核融合とエネルギー」

—核融合発電は人類の持続可能なエネルギー源になれるか！

日本大学理工学部物理学科

教授 高橋 努

理工学部物理学科の高橋と申します。

「核融合とエネルギー」というタイトルでこれからお話しますが、核融合エネルギーは、まだ発電という形では実現できていないエネルギーです。今日は、核融合エネルギーの原理およびその開発の現状、実現までの開発計画、実現したらどのような波及効果を与えるのかという3つの観点からお話ししたいと思います。

いつもは、実験室で核融合を実現するために後ほど説明する「プラズマ」を生成し閉じ込めるための実験装置を作り改良しながら、いかに効率よく長時間高温のプラズマを閉じ込めるかという研究を行っています。

核融合とは何か、まず原理を最初に説明したいと思います。先ほど新田先生のお話で「質量がエネルギーと等価である」という話がありました。この原理を使ってエネルギーを発生するのが核融合です。実は、燃焼などの化学反応で発生するエネルギーも同じ原理で発生していますが、何が違うかということ、変化する質量が非常に微量であるということです。

物質は原子からできています。原子は、中心にプラスの電荷持つ原子核があり、その回りを負の電荷を持った電子が回っている構造で理解します。原子核は陽子（正の電荷を持つ）と中性子（電荷を持たない）からできています。原子核ができ上がったときの質量と、それを構成する陽子や中性子の質量の総和とは異なっていて、原子核になると質量は減少します。この質量の減少分に相当するエネルギー ( $E=\Delta mc^2$ ) が放出され、より安定な原子核になっていきます。このエネルギーを結合エネルギーといいます。

世の中に存在するいろいろな原子核について、質量数と核子1個当りの結合エネルギーの関係を

示したものが、図1になります。左側が軽い原子核で、右が重い原子核です。一番安定な状態にあるのが質量数56の鉄の原子核です。それよりも軽い原子核は融合することによってより鉄の原子核に近づいていき、重い原子核は逆に分裂することによってより鉄の原子核に近づいていきます。重い原子核が分裂するとき出てくるエネルギーを利用するのが、原子力発電（核分裂炉）です。それに対して軽い原子核同士が融合したときに発生するエネルギーを利用するのが核融合エネルギー（核融合炉）で、将来、核融合炉を地上に実現したいと考えています。

地上で核融合炉を実現するために、我々が注目しているのはヘリウムという物質の周辺にある結合エネルギーの大きなジャンプです。核融合反応がどういうところで起っているかということ、実は、宇宙では普通に起っている現象で、様々な宇宙の現象を引き起こすエネルギー源になっています。太陽や恒星が明るく輝くのは、水素が燃えてヘリウムになるという核融合反応が起きているからです。さらに生成されたヘリウムが融合してさらに重い原子核ができエネルギーを創り出してい

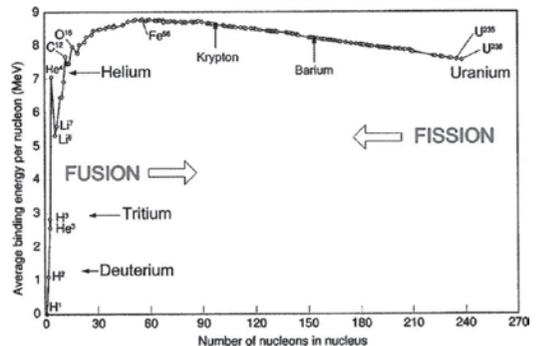


図1 質量数と結合エネルギー (F. F. Chen, An Indispensable Truth, Fig.4.1 から転載)

ます。燃える燃料がなくなり核融合反応が止まると重力崩壊が残り燃料が一気に燃え出す超新星となり、爆発が起きその残骸から新たな恒星の卵ができ、再び、核融合が始まり、そのエネルギーにより輝き出します。このような現象を繰り返しながら、宇宙は進化（輪廻）しているのです。宇宙空間では、核融合反応はとても身近なものなのです。地球に降り注ぐ太陽光エネルギーは、核融合反応から発生したエネルギーです。化石燃料の源である植物もまた、太陽エネルギーから創り出されたものといっても良いでしょう。現在注目されている、自然エネルギー（風力発電、太陽光発電）も、また核融合反応に由来するエネルギーということになります。

では次に、地上に核融合を実現する方法について説明します。原子核と原子核を近づけると原子核はプラスの電荷を持っているので反発力（クーロン力）が働いてなかなか接近させることができません。原子核の大きさ（ $10^{-12}\text{m}$ ）の領域まで近づけるには、このクーロン力に逆らって他の原子核を近づけるためにする仕事に相当するエネルギーを原子核に与える必要があります。すなわち、温度を上昇させ、原子の運動を活発にすると、お互いに接近して衝突する確率が増えます。ある程度まで互いの距離が近づくと、こんどは、核力という引力が働いて接近し易くなる性質が表れてきます。そういう状態まで持っていくエネルギーを計算しますと、 $5 \times 10^3 \text{ eV}$ （ $1\text{eV}$ は、約1万度に相当）で、およそ5億度の温度に相当します。すなわち、重水素、水素の同位体を5億度ぐらいまで熱していくと核融合反応が起きる状態を作ることができる予想されます。

我々はこういう状態を地上に実現しようと様々な研究をしています。このような高温状態の物質はどういう状態になるか想像してみましょう。温度を上げていくと、物質は、固体、液体、気体と相転移していきます、気体の温度をさらに上昇させると、原子核の周りを回っている電子が自由に動けるような状態になって、プラスの電荷の原子核とマイナスの電子とが互いに自由に動き回っている状態（電離する）になります。この状態をプラズマ状態といい、核融合を実現するにはこのプラズマ状態の燃料を安定に長時間保持することが必要になります。

地上で核融合を起こすとき用いる反応を紹介します。重水素と三重水素の核融合反応です。重水素と三重水素を融合させると、ヘリウムと中性子が発生する反応です。温度が低く（1億度）でも、容易に起る反応です。さらに、重水素と重水素を融合させるD-D反応、重水素とヘリウム3を融合させる反応、水素とホウ素11を融合させる反応等があります。後者二つの反応は、中性子の発生が極めて少ない反応で。放射性物質を使わない、放射性物質の発生が極めて少ない核融合反応です。このような、核融合反応の可能性を考えると、核融合エネルギーは、21世紀に必要とされるエネルギーが持つ様々な性質を兼ね備えていることが分かります。

実際に反応率を計算すると、D-T反応はほかの反応に比べて反応率も高く、温度も低いところで起ることがわかります。人類が最初に目指す核融合反応は、このD-T反応ということになります。もし、 $\text{D-}^3\text{He}$ 反応や $\text{p-}^{11}\text{B}$ の反応を利用できるようになると、究極の原子力のエネルギーになる可能性があります。

実際に、どのようなプラズマ状態を作る必要があるかと申しますと、温度が10億度で1cmの立方体の中におよそ100兆個のプラズマ粒子を1秒間閉じ込めると核融合反応がおきます。この状態をローソン条件と言います。そこでわれわれは、この高密度、高温状態を長時間維持することを目指す研究をやっています。

ではこのような高温高密度の状態を実験的にどのように作るかを説明しましょう。このような高温の状態を金属の容器では閉じ込めることはできません。そこでプラズマ状態の性質を利用します。プラズマ粒子は、電気を持った粒子なので磁場（磁力線）に絡み付いて螺旋運動する性質があります。電磁石で様々な磁場構造を作り、磁場（磁力線）の鳥籠をつくりその中にプラズマ粒子を閉じ込める方法を用います。これを磁場閉じ込め核融合といいます。もう一つの方法は、慣性核融合という方法です。物質は、静止しているものは静止し続けるという慣性の法則に従います。この性質を利用して、燃料を小さい球状のターゲット内に封じ込め、外側からレーザー光線や重イオンビームを照射し表面を温めて飛び散らせ、その

反作用で内側に衝撃波を駆動して燃料を圧縮し、高温高密度状態をつくる方法（慣性核融合）です。今日は、前者の磁場閉じ込め核融合の話をしたしたいと思います。

図2のように円筒状の容器の中心に直線上の電流を流すと直線を中心とする同心円状の閉じた磁力線（点線）ができます。この磁力線に垂直な方向からプラズマ粒子を入射させると正のプラズマ粒子（イオン）と負のプラズマ粒子（電子）は、磁力線に絡みついて直線電流の回りを回転していきますが、磁場の曲率によって遠心力が働き、次第にイオンは上へ、電子は下へ、回転の中心が運動（ドリフト運動）をしていきます。この結果、荷電分離がプラズマ中に発生し局所的な電場生じます。この電場と磁場により新たなドリフト運動（電場ドリフト）が発生します。しかし、この閉じた同心円状の磁力線を螺旋状に捻ると、円筒の容器の中に閉じ込まっていくという性質が表れます。このねじれた磁力線を磁場に絡み付いたプラズマに電流を流すことにより作る方法をトカマクと呼びます。また、外に置くコイルをねじることによって、ねじれた磁力線をプラズマ中につくるヘリカル方式があります。トカマク方式はソ連で開発された方法ですが、ヘリカル方式は日本人が考えた方法です。

実際にプラズマ粒子を閉じ込める研究が始まったのは1950年代からです。その後トカマク方式をソ連で開発したのは1960年代になってからです。鉄芯があり、これに鎖交するようにドーナツ状の容器がおかれます。変圧器の原理でドーナツ容器の中にプラズマ粒子を作り、電流を流します。ドーナツ容器には、閉じた磁力線を作るためにポロイダル方向に巻かれた電磁石が設置されます。この電磁石の作る磁力線とプラズマ粒子の作る電流の磁力線が螺旋状の磁力線が形成されます。この方式が、磁場閉じ込め方式の中で最も良い閉じ込め特性を示しています。様々な大きさのトカマク装置が、日本、米国、ヨーロッパ、ロシア（当時はソ連邦）の国々で作られました。その中でも大型トカマクと呼ばれる3つの装置、JET（欧州連合）、TFTR（米国）JT-60（日本）が作られました。これらの装置を使って研究が進められ、高温プラズマを生成維持するために外からプラズマに注入されたエネルギーと、核融合反応で

出力されるエネルギーとが等しい臨界状態が実現されました。さらに、JET、TFTRの装置では重水素・三重水素を使って実際に核融合反応で生成された出力を取り出しています。規模的には10MWから15MWの核融合出力を1秒発生させることができました。これは、一般家庭1000軒ぐらいが消費するエネルギーに相当します。ま

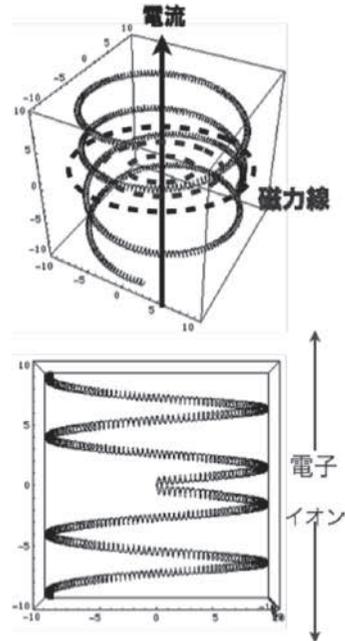
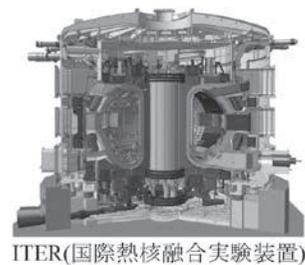
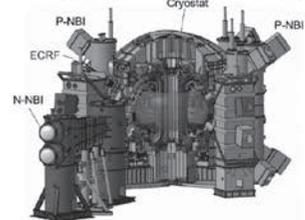


図2 単純トーラス磁場によるイオン、電子の運動



ITER(国際熱核融合実験装置)



JT-60SA (幅広いアプローチ計画によるサテライトトカマク)

図3 建設中のトカマク (ITER, JT-60SA ホームページから転載)

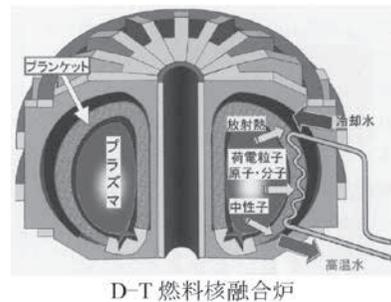
た、出力は小さいものの4MWで6sの長時間運転も行われました。このように、核融合の科学的な実証は1990年代に行われました。

現在とこれからの計画について少しお話しします。研究が始まったのは1950年代からで、60年代にトカマク方式ができて、30年後の1990年代に臨界状態付近のプラズマをつくることまで研究が進みました。これらの研究成果を基に自己点火プラズマを目指す実験装置の設計が行われました。この装置は、一国でつくるような規模のものではなくて、国際協力（日米欧州、ロシア）でITER（国際熱融合実験炉）という装置を作ろうという計画です。（図3参照）臨界状態にあるプラズマをさらに加熱して核融合の出力で燃えていく自己点火状態をつくらうという実験装置です。この設計に基づいて実験装置を現在建設中ですが、建設費用は5000億円と言われていました。2006年から建設が開始されました。当初は2016年に最初のプラズマをつくって実験を開始する予定でしたが、ヨーロッパの経済事情等もあって、現在は2020年に実験開始の予定になっています。国際プロジェクトとしては、もう一つ、日本のJT-60を改造して、アスペクト比の小さな超伝導コイルを用いたトカマク装置JT-60SAが建設されます。この二つの実験装置を国際協力のもとで実験研究を行い、D-T燃料を安定に燃焼するにはどうするか、核融合炉として長時間運転の実証、燃料の3重水素をつくりながらエネルギーを取り出す燃料の生産システムの実証、核融合炉材料の開発などをこれらの装置で行う予定にしています。また、装置を解体して、炉の解体処理技術の開発研究を最終の5年間に計画されています。核融合炉として、今の原子力発電所のような形（原型炉）で実際に登場するには、さらに10年から20年が必要と思われます。ITER装置やJT-60-SA装置でいろいろなことが分かり、それを基にして実際の炉内の様々なシステムを設計して、実際の発電炉となる原型炉を、2050年をめどに設計建設するという計画が進められています。おそらく今世紀の後半か終わりぐらいになると、実際に核融合による発電が開始されるのではないかと思います（?）。そして、エネルギーシステムとして運用していくには、核融合炉で燃やす燃料の生産から最終的に残る廃棄物の処理までの一連の流

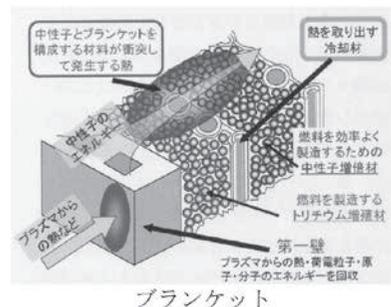
れを確立することが重要になります。

エネルギーの問題を考えると、大事なことが幾つかあります。重要なことは、エネルギーの保存則が成り立つことです。自然エネルギー、熱エネルギー、電気エネルギー、原子力エネルギーとありますが、これはエネルギーのかたちを変えているだけです。その結果、廃棄物が出てきたり、環境に影響を与える物質が生産されたりすることになります。このようなことを考慮して考えることが必要です。また、エネルギーは必要ときに必要な量を使えるかどうか、エネルギー資源を供給するスピードが早いかどうか、需要と供給の関係もありますし、経済や社会のニーズ・要求もあります。日本などの先進国ですと、インフラの整備との兼ね合いで、新しい技術が、そのまま今あるエネルギーシステムの中に適応できるかなども重要なポイントになります。最近出た小西哲之さんの『エネルギー問題の誤解 いまそれを解くエネルギーリテラシーを高めるために』でいろいろな観点から議論されていることを紹介しながら核融合発電を考えていきたいと思います。

D-T反応を用いる核融合発電は、核融合反応で発生するエネルギーを、火力発電や原子力発電と同じように、水から水蒸気を発生させ蒸気タービ



D-T 燃料核融合炉



ブランケット

図4 核融合炉とブランケットの概念  
(プラズマエネルギーのすべて 図3.7を転載)

ンを回し発電するシステムを用います。

D-T 炉で使うトリチウムは、自然界にはほとんどない物質で、これをどうやってつくり出すかが重要になります。核融合反応で発生する中性子とリチウムの原子核反応からトリチウムが発生します。核融合反応を起こしながら、燃料も生産するシステムになります。いまの原子炉（核分裂炉）と違って燃料は外から、最小限の燃焼に必要な燃料だけを炉の中に供給しながらエネルギーを取り出そうというシステムになります。（図4参照）

核融合発電で皆さんにアピールしたいのは、反応の結果、高レベル放射性廃棄物は出てこないことです。発生する中性子は、炉壁の表面に当たることによって炉内が放射化します、それが一番懸念される場所ですが、現在、炉材料の研究が進んで、放射化しにくいものや半減期の小さい材料の開発が進んでいます。そのような材料を使うことによって放射性物質はかなり低減できると思われれます。半減期 100 年以下のもので核融合炉ができそうだという見通しもできました。このようになると、放射性廃棄物を貯蔵する考え方も大きく変わってきます。いまの原子炉ですと、反応の結果出てくる物質は高レベルの放射性物質で、半減期は 100 万年とか 1 億年とかで、それを最後まで管理・処理しなければ原子力発電のシステムは成り立ちません。福島の問題が起きる前にもそれは分かっていた、再処理の問題、高速増殖炉等の研究がなされていました。核分裂炉と比べると、核融合で発生する放射性廃棄物の問題はかなり低減できると思われれます。核分裂炉（原子炉）の中には、連鎖反応を起こすために必要な燃料が入っています。また、反応の結果出てきた廃棄物もこの中に詰まっている。これが核融合と違うところです。核融合の場合、必要な燃料だけを、外部から供給します。また、高レベル放射性廃棄物は出てきません。核分裂の場合はいろいろな放射性物質が発生します。核融合も原子力のエネルギーですが、かなり違うことを皆さんに分かってほしいと思います。

炉の中で発生したエネルギーで発電するために、熱エネルギー（水蒸気の流れに変換する）に変換するのがブランケットです。ブランケットの構造は図4のようなになっています。熱を取り出す部分と中性子をつかって燃料を製造する部分の

二つのシステムがここに組み込まれています。中性子は、燃料の生成だけでなく、熱の発生吸収にも使われます。

燃料の三重水素は、自然界にはほとんどない物質です。核融合反応ができれば炉内で生産できます。三重水素は、水というかたちで無尽蔵にあります。リチウムに関してもほとんど問題になりません。われわれが注意しなければならない大きな問題は、初期燃料に使う三重水素の量が限られていることと、三重水素自身は放射性物質であることです。半減期は 13 年ぐらいですが、水と結びつく生物体内に入る恐れがあります。廃棄物以外のかたちで管理・保管されている量は世界で 200kg ぐらいしかありません。最初の 3 三重水素燃料をどのように供給するか、核融合炉内での燃料生産システムの生産率を高める必要があるかと思えます。また、ホウ素という物質は自然界にあまりない原子ですが、中性子を制御するために重要な物質です。

燃料供給は外から必要な分だけ入れるので、暴走の心配はないと思います。核融合反応はもともと難しい反応なので、燃料の供給を中止し、温度を下げれば自然に反応が止まり暴走が起きない仕組みになっています。炉内にある放射性廃棄物としては、数分の燃料分の三重水素（炉の出力に依存して数字は変わってくる）と中性子による放射化される炉材料などの灰の放射性物質です。核融合で出てくる放射性物質は、燃えている間は、中性子により放射化される可能性があります。止めた後は、半減期が短いものが多いので急激に減少し、廃棄物貯蔵を考える場合、かなり軽減されます。

CO<sub>2</sub> の発生量は、建設時、エネルギー生産時含めて他の発電に比べて少ないが、ITER の建設費、5000 億円、からもわかるように、発電コストをいかに下げていくかが問題になってくると思えます。放射性物質は先ほど言ったように三重水素等いろいろありますが、高レベル放射性廃棄物が出てこないのが、核融合発電所内で管理できるぐらいのレベルの放射性物質だと言えます。ITER 装置でさらに開発を進めて、このような問題はなお一層クリアになっていくでしょう。

D-T 反応を使うと、いまお話ししたようなことがあります。核融合に関する技術開発が進む

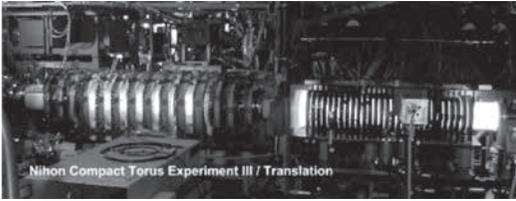


図5 磁場反転配位プラズマ発生装置 NUCTE III

と、放射性フリー（反応しない、用いない）の核融合反応も実用化できるのではないかと思います。実際に、そのような核融合反応を実現するための研究も行われています。我々の研究の宣伝にもなるかもしれませんが、我々は上記反応を起こすことが可能と考えられているプラズマ閉じ込め法（磁場反転配位：FRC）の実験的な研究を行っています。最近、アメリカのベンチャー企業がこの磁場反転配位プラズマ閉じ込めの実験装置で先進的な基礎研究を始め、かなりよい結果が出ています。

図5は、我々が理工学部船橋校舎に持っている装置写真です。これを使いながら研究を行っています。D-<sup>3</sup>He 反応ができますと、放射性物質は発生しないので、発生物質は、水素とヘリウムの荷電粒子となります。この荷電粒子を使い直接発電を行うことができます。いままで熱エネルギーに変換することで発電していたんですが、加速器の逆の原理で、装置端部に電極を置いて、電極間の電位差をうまくコントロールしていくと直接電流が取り出せる、直接発電という新しい方法も使えるという話があります。このような基礎研究を筑波大学のガンマ10という装置で実際のプラズマを使って実験研究が開始されています。このように、核融合ができると、様々な波及効果が出てきます。

核融合エネルギーの電力以外の使い方として、新材料の合成や分解、熱源として（1000度ぐらいの領域でも）利用できます。利用温度がこの程度になりますと水素製造の新しい方法となります。また、はやぶさをご存じかと思いますが、その推進エンジンはプラズマを噴き出してその反作用で推進力を得ています。NASAでは、地球から

木星や土星に行く、惑星間航行ロケットに核融合反応を用いる研究も始めております。

また、ITERの装置では、各構成部分（ブランケット、ダイバータ）が分解できるようなかたちで核融合炉の構成がなされています。ブランケットやダイバータを遠隔操作でロボットを使って中から取り出し交換する技術開発もITERプロジェクトの中に入っています。炉というと、ただのどんがらのようなものを想像されると思いますが、幾つかセクターに分けて、全て取り外しできるようになっています。それで放射化された物質をロボットで遠隔操作し取り出し交換する技術開発も併せて開発しているのが核融合研究の一面です。

核融合エネルギーが実現すると、いまの原子力発電に比べて数多くの利点があります。安全で、夜間も通して1日中一定出力を出すようなベース電源としての位置づけもできると思います。特に自然エネルギーを利用した分散型電源システムになったときのベース電源としての役割も十分担えると思います。経済活動が活発になり、エネルギー需要の増加とともに核融合エネルギー技術はもっと必要なものになるのではないかと思います。ただ、核融合エネルギー実現のために最も重要なことは、核へのアレルギーをどう取り除くかです。

ITER計画はもともと、ヨーロッパ、日本、アメリカ、ロシアなどによる国際協力で行っていたプロジェクトですが、中国、韓国、インドなどの国々が、自国のエネルギー問題・環境問題解決への道が開けるのではないかということで、研究に参加するプロジェクトになりました。

核融合エネルギー開発ではこれまでにいろいろな新しい装置がつくられ、新技術が開発されてきました。そこで培われた技術の伝承も最近問題になってきています。核融合研究の成果として日本で開発された独自技術が多くあります。それを広く伝承し、新技術開発を行うことによって、もう一回「技術立国」を復活することもできるのではないかと考えております。

以上です（拍手）。