

■ 話題を追う

核融合を活用した新しい核燃料サイクル、 原発燃料不足と核のゴミ問題 同時解決の切り札となるか？



橋爪 秀利 氏

Hidetoshi Hashizume

仙台高等専門学校 校長
東北大学 名誉教授

● INTERVIEWER
平井克典（当社執行役員調査部長）

核融合を活用した核変換システムの仕組み

政府のエネルギー基本計画では、電源構成に占める原子力発電の割合を2040年度時点で2割程度に高める目標を掲げています。一方、原発を稼働した際に発生する使用済み核燃料の取扱いは、依然として課題となっています。

橋爪先生が考案された「新しい核燃料サイクル」には、核融合を新しい発想で活用することにより、将来的に原発燃料不足と放射性廃棄物問題の同時解決を図り得る可能性があると聞き及んでおります。今回はその「新しい核燃料サイクル」についてお伺いいたします。

——はじめに、核融合の基本的な仕組みから、ご解説いただけますか。

橋爪 まず、核融合と核分裂について説明します。核融合と核分裂はどちらも原子核同士の反応によって発生する核エネルギーであり、少ない燃料で大きなエネルギーを生み出すことができます。

核分裂は重い原子核（ウランなど）が二つに分裂するときにエネルギーを放出する反応で、原子力発電で利用されています。一般的な原子力発電である軽水炉では、普通の水（軽水）を冷却材と減速材として兼用し、低濃縮ウランを燃料にして運転されます。ウランなどが中性子



を吸収して分裂し、さらに多くの中性子を放出し、それが次の核分裂を誘発する、という連鎖反応を利用しています。

一方核融合は、重水素（²H、陽子1つと中性子1つからなる水素の安定同位体）と三重水素（³H、陽子1つと中性子2つからなる水素の放射性同位体）の反応が利用されます。これは太陽で起きている反応と同じ原理になります。核融合反応は非常に高温の状態でしか起こり得ないため、それを起こすためには燃料を加熱してプラズマ状態にする必要があります。この反応によりヘリウムとともに中性子が発生し、核融合発電は発生した中性子の持つ運動エネルギーを熱に変換して発電に利用することを目指しています。核融合は燃料供給や電源を切れば瞬時に反応が止まるため暴走リスクは極めて低く、原子力発電（核分裂）と比べて高レベルの放射性廃棄物が発生しない点もメリットと言えます。

——核融合反応を起こすためにはどのような方法があるのでしょうか。

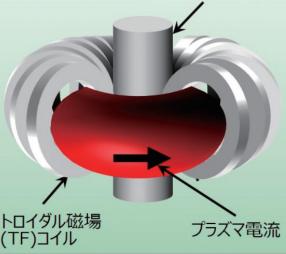
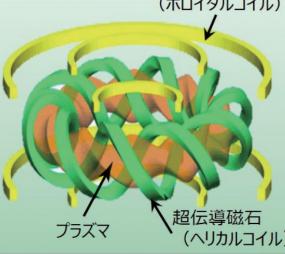
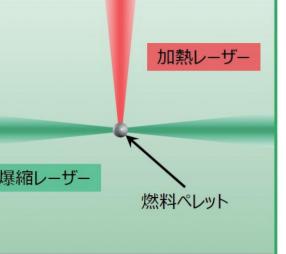
橋爪 核融合を起こす方法は主に2種類考案

されています。少量の固体燃料ペレットに対して強力なレーザーを当てるとき、表面が蒸発するので、反力を用いて核融合反応が推進されるのがレーザー方式です。これに対して、現在実用化に向けて研究開発が進められているのは磁場閉じ込め方式で、代表的な方式としてトカマク型とヘリカル型があります。どちらも超伝導マグネット（強力な電流を流し、非常に強力で安定した磁場を発生させる電磁石）で1億度以上の超高温プラズマを閉じ込めます。プラズマとは、プラス電荷を持つ陽イオンとマイナス電荷を持つ電子に分かれ、運動している状態を指します。電荷をもつ粒子は磁力線に沿ってらせん運動する性質があるため、磁場を使ってプラズマを閉じ込め、さらに加熱することで超高温の核融合プラズマを生成するというのが、磁場閉じ込め方式です。

——それでは、先生が考案された核融合を使った核変換システムとは、どのような仕組みなのかをご解説いただけますか。

橋爪 核融合で発生した中性子を利用する核変換システムでは、ヘリカル型の核融合炉を使い

■核融合反応を起こす方法

●トカマク型（磁場閉じ込め）	●ヘリカル型（磁場閉じ込め）	●レーザー方式（慣性閉じ込め）
 <p>○TFコイルが作る磁場と、プラズマ電流が発生させる磁場を重ね合わせ、ドーナツ状のねじれた磁場のかごを形成 ○閉じ込め性能が高く、核融合反応に必要な条件のプラズマ生成に成功 ⇒ ITERで採用 ○プラズマ電流はCSコイルや加熱装置により発生 ⇒ プラズマの安定性に課題 ○日本は、JT-60でイオン温度5.2億度（世界記録）達成など、世界トップレベル</p> <p>〔核融合実験炉ITER<ITER機構> 大型トカマク装置JT-60SA <(国研)量子科学技術研究開発機構>〕</p>	 <p>○ドーナツ状のねじれた磁場のかごを作るため、ねじれたコイルを使い、プラズマ電流を必要としないことが特徴 ○プラズマの安定性に優れ、長時間運転に優位性 ⇒ LHDによる定常運転（約1時間）は世界記録 ○プラズマはコイルに沿ってらせん状になる ⇒ 粒子が飛び出しやすく、閉じ込め性能に課題</p> <p>〔大型ヘリカル装置LHD <(共)核融合科学研究所>〕</p>	 <p>○燃料ペレットをレーザーで瞬時に加熱・蒸発させ、中の燃料に爆発的な圧力をかける爆縮という現象を発生 ○閉じ込め時間は燃料プラズマが慣性によりその場に留まるほんの一瞬であり、その間に核融合反応を起こす必要 ○レーザーの効率向上や、大量のペレットに順次レーザーを精密に照射し続けること等が課題</p> <p>〔激光XII号・LFEX <大阪大学>〕</p>

出所：文部科学省 HP より抜粋

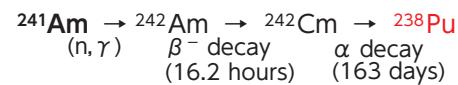
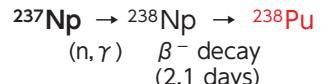
ます。設計は従来からほとんど変えていないため、核融合で電気を作ろうと思えば作れます。トカマク型もヘリカル型も基本的に似たような形で、ドーナツの表面状に配置された超伝導コイルの内側にプラズマを閉じ込めます。核融合で発生した中性子は電荷を持たないため、磁場の影響を受けずにプラズマから飛び出します。そして、ドーナツ状超伝導コイルの周りに配置されたブランケットと呼ばれる壁にぶつかり、核融合発電ではこの運動エネルギーを熱エネルギーに変えて発電します。電荷を持たない中性子は磁場の影響を受けないため周囲のあらゆる方向に飛び出しますが、ドーナツ状コイルの一部下方に高レベル放射性廃棄物を設置できる領域(MA変換領域)を設け、そこで下方に飛び出した中性子と反応できるようにします。設置された高レベル放射性廃棄物と中性子が反応した結果、半減期(放射性物質が放出しながら減少し、その量が元の半分になるまでにかかる時間)が短い別の放射性物質に変換されます。

——その「MA変換領域」ではどのような反応が起きているのでしょうか。

橋爪 高レベル放射性廃棄物でマイナーアクチノイド^{※1}(MA)と呼ばれるネプツニウム

■核変換により起こる変化

MAを核分裂ではなく中性子捕獲を主として核変換
→Pu偶数核種の生成



出所：橋爪教授提供資料より抜粋

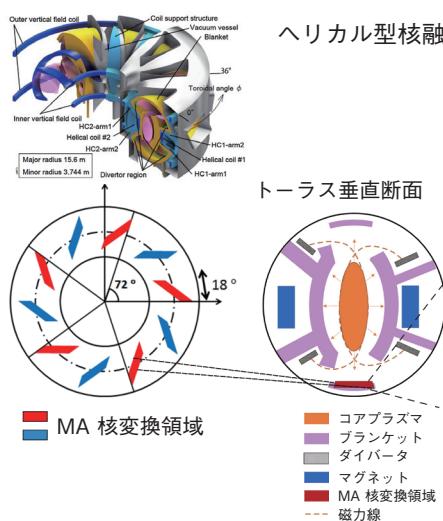
237 (^{237}Np)をMA変換領域に配置すると、核融合反応で発生した中性子を吸収して核変換という反応が起ります。実際に起こる反応は、半減期が約214万年と長い ^{237}Np が中性子を1個吸収して ^{238}Np になります。その後2日程度で、 ^{238}Np は原子核が不安定な状態から安定な状態へ変わる時に原子核から電子を放出(ベータ崩壊)して、原子番号がひとつ大きいプルトニウム 238 (^{238}Pu)に変化します。 ^{238}Pu の半減期は約88年になります。

※1 原子番号92のウランよりも原子番号が大きい(93番以降の)元素の総称で、プルトニウムを除いたもの。

——88年程度であれば、人間が責任を持つ現実的な保管期間になりますね。

橋爪 そう思います。さらに ^{238}Pu は高速炉^{※2}の炉心(燃料)として利用することができます。

■ヘリカル型核融合炉での放射性廃棄物の核変換領域の位置

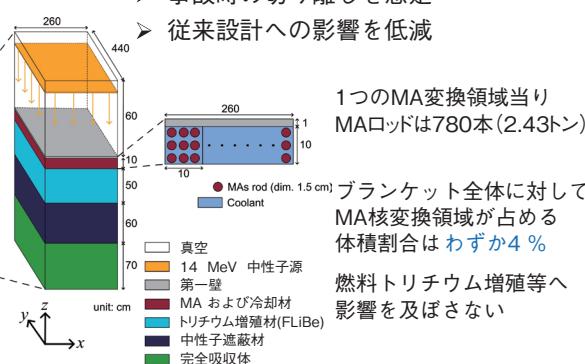


ヘリカル型核融合炉FFHR-d1

核融合炉内におけるMA核変換領域の位置

ヌル点下側のブランケット領域

- 十分な中性子束があり、熱負荷が小さい
- 事故時の切り離しを想定
- 従来設計への影響を低減



1つのMA変換領域当たり
MAロッドは780本(2.43トン)

MA核変換領域が占める
体積割合はわずか4%
燃料トリチウム増殖等へ
影響を及ぼさない

出所：橋爪教授提供資料より抜粋



核変換した²³⁸Puが15%含まれた炉心を利用すると、初期の反応度（核燃料の燃えやすさのような概念）を抑制でき、従来の炉心よりも扱い易く、安定操業につながります。

※2 核分裂反応が高速の中性子によって維持される原子炉のこと、使用済み核燃料から再処理したプルトニウムを燃料として再利用する次世代の原子炉。

——原発で発生した半減期の長いネプツニウムが、核融合を活用して再利用可能な形に変換される非常に画期的なシステムだと理解しました。核変換システムで、他に利用できる高レベル放射性廃棄物はありますか。

橋爪 アメリシウム241 (²⁴¹Am)などが核変換可能であり、他にも原発で出てくるMAで原子番号が大きいものを想定しています。

——核変換システムの核融合炉でヘリカル型を採用されたのはなぜでしょうか。

橋爪 トカマク型の形状は一見単純に見えますが、アルファベットのDの形をした超伝導マグネットが知恵の輪状になっていて複雑です。そのため、メンテナンスは大がかりになり、もし故障した場合の修理期間も1年かかるとも言われています。これは工学装置として、大きな課題です。

一方、ヘリカル型はマグネットとマグネットの間の隙間が大きく、その隙間からメンテナンスできます。また、核変換で生成されたものを比較的容易に取り出すこともできます。加えて、プラズマからの距離が離れていることや、元々ブランケットがある場所をMA変換領域としたため、従来設計を大きく変更する必要がないなどの利点があります。

——トカマク型はメンテナンス面で課題があるとのことですが、国際熱核融合実験炉(ITER)計画ではトカマク型が採用されています。

橋爪 それは早くからトカマク型が核融合反応に必要な超高温プラズマを効率よく閉じ込められると、実験で示してきたことが一因だと思

います。さらに、実験装置を作るまでが比較的容易なこともあります、トカマク型が採用されているのだと思います。

新たな核燃料サイクルの提案

——これまで先生が進められてきた核融合に関する研究について、ご紹介いただけますか。

橋爪 大学生時代は高速炉について研究したいと思っていたのですが、核融合を研究している先生と縁があり、核融合の研究を始めました。当時はトカマク型が全盛期でした。しかし、実際に核融合炉を運用しようとしたときにメンテナンス面で課題があると考え、高温超伝導体を使用して超伝導マグネットを分割することを考えました。超伝導マグネットを分割することで、複雑な形状のマグネットを作ることが容易になり、またマグネットの一部に不具合が生じた場合の交換が可能になり、メンテナンス時にマグネットの一部を取り外すことで炉内構成機器の交換が容易になるためです。

——ヘリカル型でも製造できる工学的目途がついたということでしょうか。

橋爪 そう考えます。核融合のベンチャー企業であるヘリカルフェュージョンでも別の方法で超伝導マグネットを作ろうとしていますので、いずれにせよヘリカル型の実現可能性は高まっていると思います。

——経済合理性という面で実用化の目途はついているのでしょうか。

橋爪 現状では、核融合発電で10万kWを作る場合、8万kWはプラズマ発生や磁場を作るために中で使ってしまうので、純粋に発電して供給できるという意味では2万kWくらいになると言われています。つまり、発電に使用する電力の方が実際に供給して利用できる電力よりも多くなるということです。さらに、この規模の試験装置1台を作るのに5兆円以上かかるとも試算されています。これでは、核融合は安

全てクリーンなエネルギーという夢の技術のままになってしまいます。初期コストが高すぎるのです。核融合発電一本槍では実用化は難しいと思いました。しかし、高レベル放射性廃棄物の処理に核融合が利用できるという原子力発電と核融合を組み合わせた新しい核燃料サイクルがあれば、高レベル放射性廃棄物の処理コストを核融合炉が負担していると解釈することで、核融合発電の実用化に向けて経済合理性を見出せると考えます。

——核融合を発電で利用するというよりも、核燃料サイクルの中に組み込むというわけですね。それでは原発で出る高レベル放射性廃棄物のうち、核融合炉で再処理・再利用できる量はどれくらいになるのでしょうか。

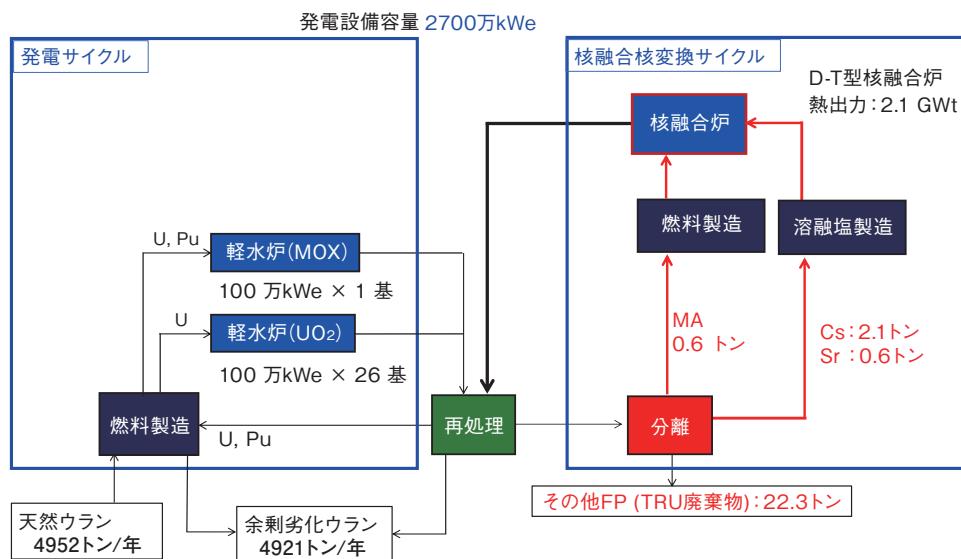
橋爪 例え、電気出力 100 万 kWe の軽水炉 27 基（発電設備容量 2,700 万 kWe）では、燃料として天然ウランが 4,952 トン / 年必要になります。これを濃縮して、約 30 トン / 年が実際の燃料として使われます。余剰劣化ウランは 4,921 トン / 年出てきます。核融合炉の熱出力が 2.1GWt と考えると現在狙っている核

融合炉 1 台の熱出力は 1.5GWt なので、1.4 基あれば原子力発電で出てきた高レベル放射性廃棄物の MA と核融合炉で再処理する量がバランスするということになります。MA ではない使用済み核燃料に含まれるストロンチウム (Sr) とセシウム (Cs) は、溶融塩という形にして、この溶融塩が固化しないための熱源 (^{90}Sr と ^{137}Cs) に利用することを想定しています。これまで高レベル放射性廃棄物はガラス固化体にして、地中深くに埋める必要がありました。核融合を利用した核燃料サイクルでは、放射性廃棄物を有効利用していくと残りが 22.3 トンになります。これは地層処分相当低レベル放射性廃棄物 (TRU 廃棄物) になります。

——余剰劣化ウランは利用することなくそのまま残るのでしょうか。

橋爪 そうです。余剰劣化ウランは保管しておけばいいと思っています。劣化ウランの半減期は約 45 億年とものすごく長いですが、放射線量は小さいです。保管しておいた劣化ウランは将来的に高速炉が実現した場合に、高速炉の燃料として使えます。高速炉が実現した場合を想

■核融合炉を導入した新たな核燃料サイクル



出所：橋爪教授提供資料より抜粋



定すると、電気出力 150 万 kW_e の高速炉 32 基（発電設備容量 4,800 万 kW_e、先述の軽水炉での発電設備容量の 2 倍弱）の発電設備があれば、燃料として必要な劣化ウランは 43 トン / 年になります。現在劣化ウランの国内保有量は 9,000 トンになるので、現状でも 200 年以上発電可能な量を確保している状態です。

新核燃料サイクルの実現可能性と課題

——新核燃料サイクルを実現する上での課題などはありますか。

橋爪 一番の課題は、ネプツニウムなどをどういう形態で核融合炉に入れるのが適しているのか、酸化物や窒化物、金属などが候補になり様々な検証が必要なことです。他にも溶融塩の中に入れた時に、融点や粘性といった物性がどうなるかなど検証する必要があります。実際に実験することが非常に難しいので、量子力学などの基礎法則から物質の性質を計算・予測する第一原理計算を使い、ひとつひとつ検証しています。やみくもにやるわけではなく、ある程度予想をしながらやっていくことが大事なポイントになってくると思います。

——次に施設面や人材面での課題はありますか。

橋爪 施設面では国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）を利用するのが早いと思います。残念ながらムーンショット型研究開発事業からは外れてしまったため、資金が豊富にあるというわけではありません。核融合は実現まで長い期間を要するので、国には研究内容の有用性をきちんと理解して頂いた上で、長期的な視点を持って予算をつけてほしいと思います。人材面では、核燃料を専攻している人は少ないですが、JAEA などにしっかり予算がついてくれれば、優秀な人材も集まり、適した人材を確保できると考えます。

——高市首相が掲げる重点投資対象 17 分野の中には核融合があり、これまで以上に注目

が高まっていると思います。国や研究機関、企業とどのような取組みをされているのか教えて頂けますか。

橋爪 研究機関では施設面でも協力関係にある JAEA と一緒に取組んでいます。基本的に高速炉も原子核分裂なので、核融合を競合のように感じていたかもしれません、この核融合を利用した核燃料サイクルを説明すると有用性をご理解いただけ、人材面でも連携ができ始めています。また、トカマク型を推進している方からも、この核燃料サイクルをトカマク型でも導入したいという話をいただいている。

——海外からの反応などはございましたか。

橋爪 この研究は米国では 2024 年 6 月に発表しましたが、今のところ米国からの反応はありません。米国は核燃料の再処理を行わず、使用済み核燃料を直接処分するワンスルーアップ方式を採用しています。米国には砂漠という使用済み核燃料を保管できる場所が豊富にあるため、再処理・再利用するという考え方自体がなかったようです。トランプ大統領が就任して以降、核燃料サイクルを行うという方針に変わったため、今後は状況が変化する可能性があると思います。

——将来的に核融合発電が実現してくるのは、いつぐらいとお考えでしょうか。

橋爪 核融合発電の定義によりますが、投入したエネルギーより小さいエネルギーを発電することは、近々実現できると思います。実用化という意味では、場所を決めて原型炉を建設することなども考えると 2040 年代後半から 2050 年ぐらいになるのではないかと思っています。

——エネルギー問題は喫緊の問題になりますので、ぜひ早期に実用化してほしいと思います。本日は、未来のエネルギーである核融合と、放射性廃棄物問題を解決し得る新たな核燃料サイクルについてご解説頂き、ありがとうございました。

（対談日：12 月 16 日 福田）