

加速器駆動システムを用いた核変換技術の研究開発の現状



辻本 和文

Tsujimoto Kazufumi

((国研)日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター)

1 はじめに

原子力発電所で用いた後の核燃料である使用済燃料には、様々な放射性物質を含んでいる。その中には半減期が1,000年を超える長寿命のものもあるため、使用済燃料を着実に処理処分し、これらの長寿命核種を長年に渡って確実に閉じ込めておくことは原子力利用の大きな課題となっている。核変換技術とは、使用済燃料に含まれる長寿命の核種を短寿命化することで、放射性廃棄物の処分の負担を軽減することを狙った技術である¹⁾。

典型的な使用済燃料の約95%は元の燃料に存在していたウラン(U)の同位体(主に²³⁸U及び²³⁵U)であり、Uが中性子を吸収して生じるプルトニウム(Pu)の同位体が約1%を占める。ネプツニウム(Np)、アメリシウム(Am)、キュリウム(Cm)といったマイナーアクチノイド(MA)は約0.1%である。核分裂の結果生じる核分裂生成物(FP)は4%程度を占めるが、そのおよそ1割が長寿命核種(半減期30年程度以上)である。我が国では、UとPuは再処理によって使用済燃料から回収され、エネルギー源として再び利用する方針であり、MAとFPが高レベル放射性廃棄物(HLW)として地層処分される。従って、HLWの長期に渡る環境等への影響は、主にMAによってもたらされることになる。

そこで、MAを別の物質に変換することができれば、長期に渡るHLWの影響を劇的に下げることが可能になる。図1は、放射性廃棄物の潜在的有害度

(放射性物質が人体に摂取された場合の被ばく線量として定義される)を、使用済燃料、再処理後のHLW及びHLWからMAを核変換したものについて比較したものである。図には原料とした天然ウラン9tの持つ潜在的有害度も示している。使用済燃料の潜在的有害度が原料とした天然ウランの潜在的有害度を下回るまでに要する時間はおよそ10万年であるが、HLWは数千年、核変換後は数百年まで短縮されている。このように、使用済燃料を再処理し、さらにHLWからMAを回収して核変換することで、放射性廃棄物処分の負担の軽減に役立つ可能性がある。

MAを核変換する方法としては、様々な核反応を利用した方法が検討されたが、現在は、原子炉や加速器中性子源で発生させた中性子による核分裂反応を用いる方法が有力視されている。中性子によるMAの核分裂反応は中性子のエネルギーが1MeV以上の領域で大きくなるので、MAを核分裂させて核変換するためには、高速中性子を用いるのが効率的である。高速中性子を供給する方法としては、高速炉と加速器中性子源が考えられている。特に、核変換専用のシステムとして、加速器中性子源でMAを主成分とした燃料を装荷した核変換専用の高速未臨界炉を駆動する加速器駆動システム(Accelerator Driven System: ADS)が注目されている。2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」では、放射性廃棄物の減容化・有害度低減のための研究開発として、高速炉や加速器を用いた方法への取組を進

潜在的有害度：各放射性核種の人体への影響(線量換算係数)で重みづけした指標

放射能(ベクレル)を人体に摂取した時の被ばく(シーベルト)に換算した数値

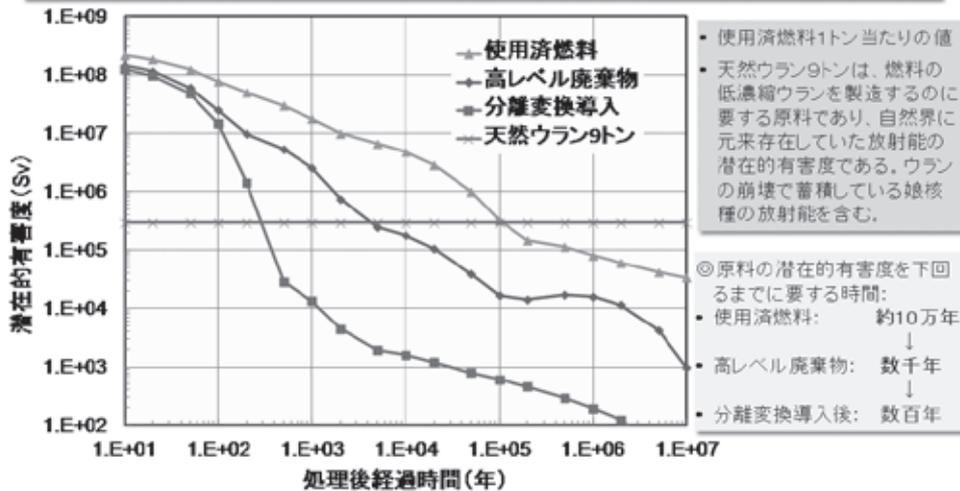


図1 核変換による潜在的有害度の低減の効果

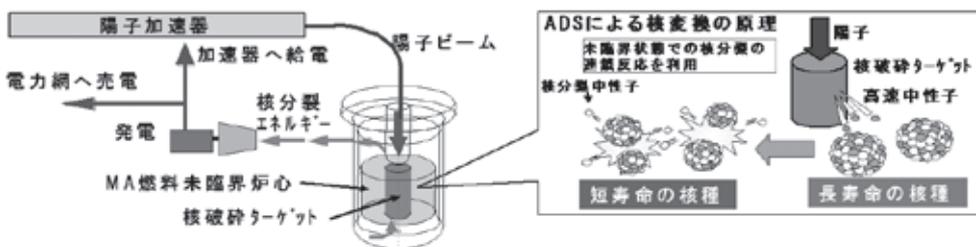


図2 加速器駆動システムの原理

めることが記載されている²⁾。本稿では、ADSの概要及び我が国における研究開発計画等を紹介する。

2 加速器駆動システム

2.1 システムの概要

ADSは、図2に運転原理を示すように、加速器と未臨界炉を組み合わせたシステムである。加速器で数百 MeV から数 GeV に加速した陽子を標的である重核種に入射すると、核破砕反応と呼ばれる反応が起き、大量の中中性子が放出される。標的物質の周りにMAを主成分とする燃料を設置しておき標的から放出された大量の中中性子を照射すると、MAは中中性子を吸収して核分裂反応を起こし核分裂生成物になる。臨界状態、すなわち核分裂の連鎖反応が外部中中性子源無しに一定状態で保持される通常の原子炉とは異なり、ADSではMA燃料を装荷した炉心を常に未臨界状態にしておく。これにより、加速器

からのビーム入射で未臨界炉心内での核分裂連鎖反応は一定状態に保持されるが、ビームを止めれば直ちに連鎖反応は停止するため、安全性の高いシステムとすることができる。

MAの核変換に高速炉等の臨界炉心を用いる場合には、原子炉の運転制御性の観点からいくつかの問題点が生じる。例えば、ナトリウム冷却高速炉では、正のフィードバック効果を持つ冷却材ボイド反応度が大きくなる一方で、負のフィードバック効果を持つドブラー効果は小さくなる。このために、高速炉では装荷できるMAは燃料の数%程度に制限される。一方、ADSは未臨界なので上記の問題点の影響は小さく、燃料の約60%程度までMAを装荷することが可能となる。したがって、ADSをMA核変換に用いることの利点は、比較的小さいシステムにMAを大量に装荷してMAの核変換量を大きくし、効率よく核変換を行うことができるという点にある。

2.2 ADS用加速器と中性子源

加速器からの粒子ビームを利用して中性子源として用いることができる核反応は、重陽子ビームによるDT核融合反応やストリッピング反応、電子線ビームを用いた制動放射線による(γ, n)反応、陽子ビームによる核破碎反応等があるが、ADS用としてはできるだけ効率よく中性子を発生できるものが望ましい。高エネルギー陽子による核破碎反応は、発生中性子当たりの投入エネルギーが少なく、かつ除熱量が少なくすむ利点がある。

陽子加速器で得られるビームには、パルスビームと連続ビームの2種類があるが、ADSでは出力変動を抑える意味から連続ビームを用いるのが望ましい。陽子加速器には大きく分けて線形加速器と円形加速器があり、円形加速器には一定磁場で加速に従って軌道が外側に変化するサイクロトロンと、磁場が変動しながら同一軌道を加速するシンクロトロンがある。シンクロトロンは、原理的にパルス運転にならざるをえないので、ADS用には向いていない。サイクロトロンは陽子ビーム量を増やしたときにビームの損失率が大きくなり、10 MW程度以上の大出力化は困難であると考えられている。このため、線形加速器がADS用の陽子加速器として最も有望であると考えられている。

核破碎反応で発生する中性子数は、標的核種の質量数にほぼ比例するので、質量数の大きい核種を標的核種に用いる。核破碎反応では他の加速器中性子源に比較してターゲットに付与されるエネルギーが小さく除熱量が少なくすむ利点があるとはいえ、固体ターゲットの場合には除熱を考慮したターゲット設計が困難である。したがって、現在はターゲット自体を冷却材として使える液体ターゲットを用いるのが主流の考え方である。液体ターゲットとしては、水銀は常温で液体であるため扱いやすいが、中性子吸収断面積が大きくADS用には向いていない。鉛は融点が高く(327.5℃)、液体状態に保つための余熱が大変でシステム全体の温度が高くなりすぎる欠点がある。ADS用液体ターゲットとして最も注目されているのは、鉛ビスマス共晶合金である。鉛45%とビスマス55%の場合、融点(124℃)から沸点(1670℃)まで幅広い温度域で液体であるために比較的扱いやすい。ただし、ビスマスの中性子捕獲反応で α 線放出核である ^{210}Po (半減期138日)が

生成されることや、500℃以上の高温領域で鋼材の腐食が大きくなるという課題もある。

陽子ビームを加速するためには、加速する陽子の損失を抑制するために加速管内の真空度の高く保つ必要がある。このために核破碎ターゲットと陽子加速器との間に設ける隔壁を「ビーム窓」と呼ぶ。ビーム窓は高出力の陽子ビームが透過するために、透過の際の発熱を抑制する観点からは薄いほうが望ましいが、真空境界を保持する点からは構造強度が求められる。ビーム窓に対しては、このような相反する条件を満たすための最適な設計を行う必要が求められる。ビームによる発熱を抑制する観点から、陽子ビームの透過電流密度は、できるだけ低くして発熱密度を小さくしたほうがよい。これにより、ビーム窓材料の陽子による照射損傷を抑制することもできる。電流密度を下げるためには、ビーム径を広げる方法と陽子の加速エネルギーを上げる方法が考えられるが、コストや技術的実現性等の観点から最適な条件を設定する必要がある。

3 加速器駆動システムの技術開発課題

日本原子力研究開発機構(JAEA)が提案しているADS概念は、図3に示すような熱出力800 MWのタンク型液体鉛ビスマス冷却システムである³⁾。加速器には、加速エネルギー1.5 GeV、最大出力30 MWの超伝導陽子線形加速器を用いる。このシステムで年間約250 kgのMAを核変換可能である。これは、電気出力100万kWの軽水炉10基で年間発生しているMAの量に相当する。また、800 MWの熱出力から270 MWの発電が可能であり、超伝導加速器へ給電した残りは売電することも可能である。

こうした新しいシステムでADSを実現するには多くの技術課題を克服する必要がある。これらの技術課題とともに、ADS実用化に向けて計画されているプロジェクトについて紹介する。

3.1 大強度陽子加速器

核破碎ターゲットに陽子を供給する陽子加速器については、現状では1 MWクラスが実現できている段階であり、さらに一桁以上の大出力化が必要となる。また、ADS用加速器に求められる要件に、安定性とエネルギー効率がある。安定性に関しては、

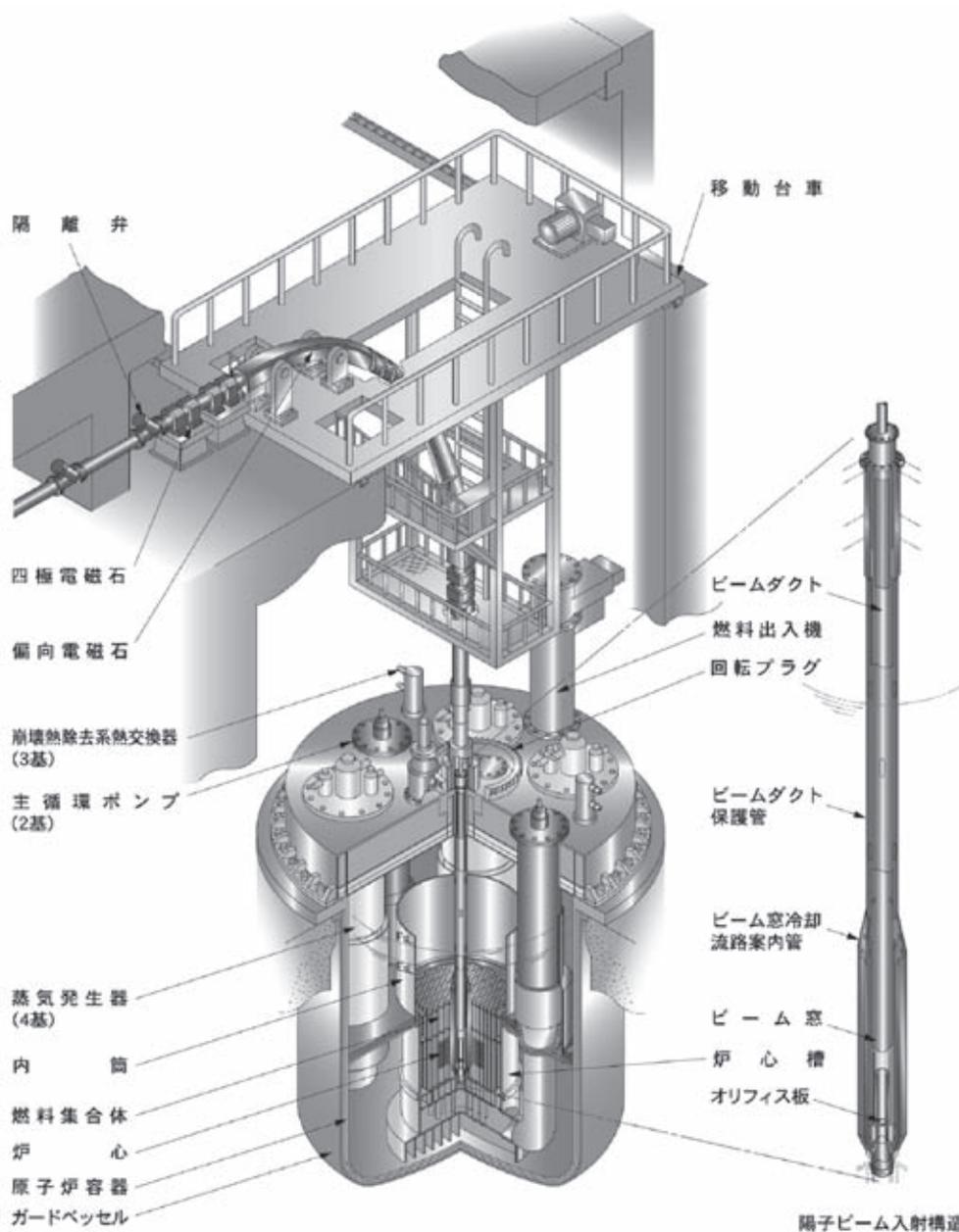


図3 日本原子力研究開発機構で検討している熱出力 800 MW の鉛ビスマス冷却タンク型 ADS 概念図

通常の加速器と同様に頻繁に高電圧部の放電等によるビームの不意の停止（ビームトリップ）を起こしては、その都度、未臨界炉心の出力が下がるため、機器が熱サイクル疲労で損傷する可能性がある。また、数分を超えるような加速器の停止時には発電系まで含めて再起動が必要となり、設備稼働率が極端に悪くなる可能性もある。ADS 主要機器の許容ビームトリップ頻度と ADS 用加速器の推定トリップ頻度との比較検討では、特にビーム復帰まで数分以上を要するビームトリップ頻度を減らす必要がある

ことが分かっている⁴⁾。エネルギー効率については、加速器の加速空洞を高純度ニオブの超伝導体で製造して超伝導化することで加速器性能（エネルギー効率）を飛躍的に向上できると考えられる。

3.2 核破碎ターゲット

核破碎ターゲットは、ADS に核破碎中性子を供給する重要な機能を持つ、従来の原子炉には無い ADS 特有の構成機器である。特に、ビーム窓に関しては、陽子ビームによる発熱、陽子や中性子によ

る照射損傷、鉛ビスマスによる外圧や腐食等を考慮する必要があるが、寿命等を考慮した設計を十分な精度で実施できるほどのデータは揃っていないのが実情である。このため、1990年代から様々な試験が行われてきたが、その中でも2006年に実施されたMEGAPIEは特筆すべき実験である⁵⁾。この実験には、日本を含む8カ国が参加し、スイス・ポールシェラー研究所のSINQ中性子源施設に鉛ビスマスターゲットを設置し、0.7 MWの出力で4か月間の運転に成功した。その後、ターゲットを分解して鋼材の試料を作製し、照射影響を評価するための照射後試験を各国が分担して実施している。しかし、MEGAPIEだけでは温度や照射量の観点で十分なデータが得られているとはいえないため、後述するように、JAEAではJ-PARC加速器を用いた体系的な照射データの取得を計画している。

なお、このような過酷なビーム窓の設計条件を回避するために、「窓なしターゲット」という概念の研究開発も行われている。これは、真空との境界に鉛ビスマスの自由液面を保持して、そこに直接陽子ビームを当てる概念である。革新的な概念ではあるが、鉛ビスマスの自由液面の保持方法、揮発性核種の蒸発による真空度の悪化、陽子ビーム制御方法等に多くの課題がある。

3.3 未臨界炉心

未臨界炉心の冷却材には、前述のように核破砕ターゲットと同じ鉛ビスマスを使うことが主流となっているが、550℃を超えるような高温では鋼材に対して腐食性が高くなることが知られており、日本をはじめ、多くの国でループ試験や静的腐食試験が行われている。鋼材の腐食を抑制するためには、鉛ビスマス中の酸素濃度を適切にコントロールすることが有効であり、そのための技術開発も進められている⁶⁾。

MAを主成分とする燃料で構成される未臨界炉心の冷却には、核破砕ターゲット冷却と同じものを使用するのが設計上合理的である。液体ターゲットの場合には、ターゲット材が炉心冷却材としても使用される。ADSの未臨界炉心では炉心中心に強力な核破砕ターゲットを設置するために、中性子源近傍で出力密度が大きくなってしまふ。炉心の冷却性能や燃料の燃焼度の観点からはできるだけ出力密度を平坦化する必要があり、適切な炉心設計が必要とな

る。また、燃料の燃焼に伴い実効増倍率は変化するので、未臨界炉心の出力を一定に保つためにはビーム出力を調整するか炉心反応度を調整する必要がある。出力ピークの抑制等を考慮した炉心設計には、核破砕ターゲットで生じる中性子のエネルギー、角度分布等の特性や、炉心の燃焼に伴う燃料中の核種組成の変化等を正確に把握することが必要である。核破砕中性子の特性測定やMA核種の核データ測定等が行われてきているが、これらを総合的に試験するための実験が必要である。JAEAでは、後述するように、J-PARCにおいてADSの設計に資するための実験施設を建設する計画である。

MAを主成分とするADS用の燃料については、酸化物や窒化物が検討されている。JAEAが中心となって検討しているADS概念では、窒化物燃料の使用を想定している。窒化物燃料は、融点や熱伝導度が高いことから燃料温度を抑えてFPガス放出やFPガススウェリングが小さくできること、アクチノイド窒化物は相互に結晶学的に類似していることから均一な混合燃料にできるため燃料組成の融通性が高いこと等の利点があると考えられる。一方で、酸化物に比べて燃料としての実証データが少ないことから、基礎データの取得や燃料製造試験や燃料照射試験を通じた技術的実証が重要な課題である。また、天然窒素中の¹⁴Nからは、(n,p)反応で半減期5730年の¹⁴Cが生成されるために、窒化物燃料の窒素には¹⁵Nを濃縮した窒素が必要となり、¹⁵N窒素の濃縮、燃料再処理工程での回収・再利用といった技術的課題もある。なお、欧州ではMA高含有燃料として酸化物分散型燃料の研究開発が行われている。

3.4 J-PARC核変換実験施設

JAEAでは、上記に挙げた研究開発課題のうち、核破砕ターゲットの工学と未臨界炉心の炉物理に関する実験研究を行うため、大強度陽子加速器施設J-PARCに、「核変換実験施設」(Transmutation Experimental Facility: TEF)を建設する計画である。TEFは、主に鉛ビスマス核破砕ターゲットの工学的な研究開発を行う「ADSターゲット試験施設」(ADS Target Test Facility: TEF-T)と、未臨界炉心の炉物理実験を行う「核変換物理実験施設」(Transmutation Physics Experimental Facility: TEF-P)で構成する複



図4 J-PARC 核変換実験施設概念図

合施設である。図4に施設の概念を示す。

J-PARCで既に運転している400 MeVの線形加速器(LINAC)から最大250 kWの陽子ビームを導入する。TEF-Tには鉛ビスマス核破砕ターゲットを置き、主にビーム窓材料の寿命に関するデータを取得する。発生した中性子や導入する陽子の一部を使って、多様な実験ができるようにする。但し、TEF-Tでは核燃料を用いない。

一方、TEF-Pでは核燃料を用いて、出力は低いもののADSの模擬実験を行う。導入する陽子ビームは10 W程度までとし、熱出力は500 W以下とする。最終的には10 kg以上のMAを装荷し、核変換システムの模擬物理実験ができるようにしたい。

4 今後の展開

核変換技術は、まだ基礎的な段階から個別技術の成立性を実証する段階へ移行している状況にあり、実現までには相当な研究開発が必要である。また、高レベル放射性廃棄物からの核変換対象核種の分離技術を含めて、幅広い分野に渡ってバランスの取れた研究開発を進めることが必要である。こうした幅広い分野の研究開発を進めるためには、一国だけで

は限度があり、国際協力の活用が不可欠である。ADSの研究開発に関しては、日本の他には、ベルギーを中心とした欧州や中国で研究開発が積極的に進められている。人類共通の課題である放射性廃棄物の安全な処理処分を実現するために、幅広い学術・技術分野で国際協力を活用して効果的に研究開発を進めるために、若い研究者・技術者がこの技術の実現を目指した研究開発に積極的に参加してくれることを願っている。

参考文献

- 1) 「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会編, 分離変換技術総論, (一社)日本原子力学会 (2016)
- 2) 「エネルギー基本計画」2014年4月
URL:<http://www.meti.go.jp/press/2014/04/20140411001/20140411001-1.pdf>
- 3) K.Tsujimoto, *et. al.*, *Nucl. Technol.*, **161**, 315 (2008)
- 4) H.Takei, *et. al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **49** (4), 384 (2012)
- 5) W.Wagner, *et. al.*, *J. Nucl. Mater.*, **377**, 12 (2008)
- 6) OECD/NEA, “Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies (2015 Edition)”
URL:<https://www.oecd-neo.org/science/pubs/2015/7268-lead-bismuth-2015.pdf>