

21p-2

RESEARCHS ON  
ACCELERATOR-BASED TRANSMUTATION

T. NISHIDA, T. TAKIZUKA, H. TAKADA, T. SASA, S. MEIGO, M. MIZUMOTO,  
H. KATSUTA, Y. KATO and H. YOSHIDA

Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

## ABSTRACT

The conceptual design study on the transmutation system using an intense accelerator and the relevant basic researches are being carried in Japan, USA, some EC countries and Russia. The accelerator-based system for transmuting the minor actinides and long-lived fission products has two types of fast and thermal subcritical cores. Some descriptions are given about concept of each type system and the present status of these research activities.

## 加速器利用消滅処理の研究

## 1. はじめに

大型加速器は、大電流化の見通しが立つにつれ、核燃料生産、核廃棄物処理及びRIの生産など原子力工学分野における利用が検討されてきた。近年、使用済核燃料中に含まれる長寿命のマイナアクチナイド(MA: Np, Am, Cm)や核分裂生成物(LLFP:  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ )を処理する加速器消滅処理システムの具体的な検討が進められると共に、カスケードコード開発や核破碎実験など関連基礎研究が積極的に行われている。最近では、軍用組成のものも含めてプルトニウムの評価が流動的であり、核不拡散の問題も絡んでプルトニウムを加速器消滅処理システムによって燃焼処分しようという研究も始められている。ここでは、これまで提案されている加速器消滅処理システムの概略と各国で進められている開発研究の現状について報告する。

## 2. 加速器消滅処理システム

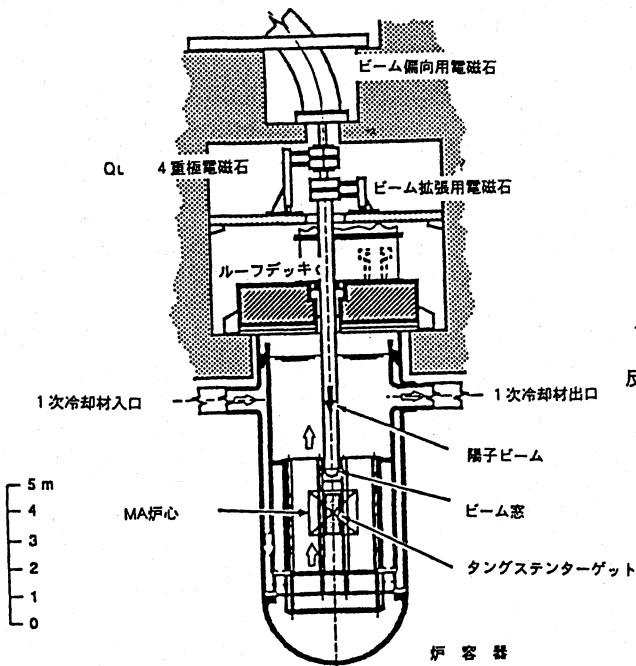
陽子加速器及び電子加速器を利用した消滅処理システムがそれぞれ検討されているが、ここではより有望と考えられる前者の場合について述べる。加速器出力ビームとして得られる数GeV~数十MeVの陽子がNpなど重い核種と衝突した時、核破碎を起すと同時に、40個以上の中性子が発生することはよく知られている。しかし、核破碎反応だけを消滅処理に利用するには大電流が必要であり、また発熱反応でないためエネルギー収支は負になる。現在

では、発生した核破碎中性を増倍してMAを核分裂反応により消滅すると共に、核分裂エネルギーを利用してエネルギー収支を正にできる加速器・未臨界炉心ハイブリッドシステムが検討されている。常に未臨界状態で運転できることから、核的安全性や設計の自由度上で有利な点が多い。FPの消滅は熱中性子の捕獲による核変換によって行うため、エネルギー収支としては負となる。

## 2-1. 高速炉心型

2-1-1. MA合金燃料・Na冷却型システム (JAERI, OMEGA計画)<sup>1)</sup>

高速核分裂反応によってMAを効率的に消滅処理するために、(1)硬い中性子スペクトルが必要である、(2)高温冶金法により再処理がコンパクトにできるなどの理由から、2種類の合金系(Np-15Pu-30Zr, AmCm-35Pu-10Y)の燃料を採用した。炉心部は、固体ターゲットとその周りのMA合金燃料集合体から構成されており、いずれもナトリウムの上昇流で冷却される。陽子ビームは、タングステン・ターゲットに入射して核破碎中性を発生し、炉心を駆動する。(第1図) ターゲットは、出力分布が平坦化して消滅効率を改善するため設けられ、また、炉心中央部で反応が最大になるように密度及び形状が最適化された。1.5 GeV, 39 mAの陽子ビームで運転する時、中性子実効増倍係数 0.89の炉心では、250 kg/yのMAの処理及び加速器所要電力の倍以上の電力の



第1図 加速器MA合金燃料消滅処理システム

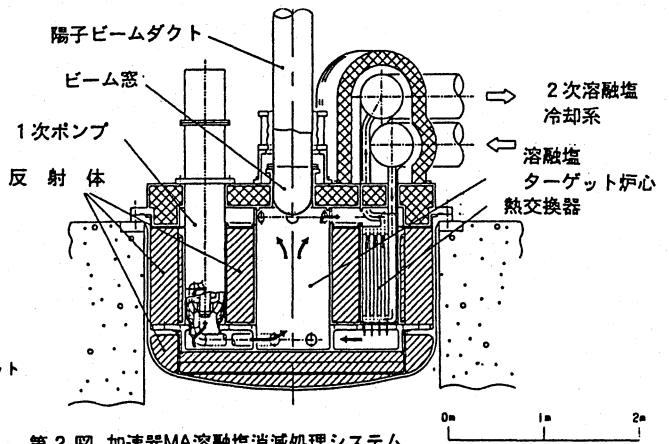
生産ができると予測されている。ビーム窓の損傷は、ビーム径を広げることにより緩和され、1年以上の連続使用が可能である。被覆材の照射特性データから、燃料体は1800日位の炉内滞在が可能との技術的見通しが得られた。

BNLは、Na冷却・MA混合型MOX燃料型及びHe冷却・窒化物コーティング粒子燃料型の消滅処理システムを提案しており、いずれも鉛ターゲットを持つ中性子実効増倍係数0.98～0.99の臨界に近い高速体系である。その結果、低出力規模（1.5 GeV, 2～8 mA）の多段サイクロトロン加速器を使用しても十分に消滅率及びエネルギー収支が得られるとしている。<sup>2)</sup>

2-1-2 MA 溶融塩燃料型システム (JAERI)<sup>3)</sup>

溶融塩炉の成立性は1960年代に設計および運転が行われたフッ化物溶融塩実験炉 (MSRE) で実証されているが、これは熱中性子増殖炉であり、ここで提案されているのは、消滅処理を目的とした加速器駆動型の溶融塩高速炉である。MAの溶解度がより大きい塩化物溶融塩 ( $64\text{NaCl}-31\text{MgCl}_2-5\text{PuCl}_3$ ) を燃料塩として採用した。これは、フッ化物塩よりも中性子スペクトルを硬くする効果もある。反応槽内部は、MA溶融塩を満たした反応領域とその周りに1次冷却系（熱交換器、溶融塩ポンプ）が配置され、両者は内部反射体によって仕切られている。（第2図） MA溶融塩は、陽子ビームに対するターゲットの役割と1次冷却材の働きをも兼ねるため、構造をシンプルにできると共に、MAの装荷量を少なくすることができる。また、燃料塩の流動性によって、

MAの供給および反応生成物の除去をオンラインで連続的に行うことが可能である。1.5 GeV, 25 mAの陽子ビームで運転する時、中性子実効増倍係数0.92の炉心では、250 kg/yのMAの処理及び加速器所要電力の自給ができる。



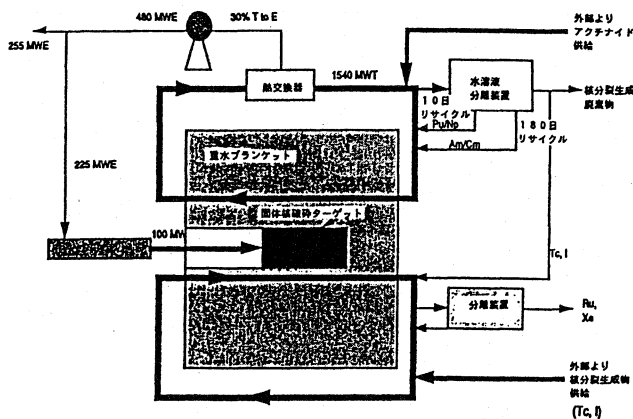
第2図 加速器MA溶融塩消滅処理システム

2-2. 熱中性子利用型 (LANL, ATW 計画)<sup>4)</sup>

大出力加速器の陽子ビームをターゲット（溶融鉛、鉛・ビスマス、タングステン）に入射させて発生する中性子を重水ブランケットによって減速し、非常に高い熱中性子束 ( $\sim 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>·sec) を形成してブランケット内を循環するMAやLLFPを熱中性子核分裂や捕獲反応で消滅するシステムである。陽子加速器の出力ビーム（1.6 GeV, 250 mA）は、4系統のCANDU型ターゲット／ブランケット・モジュールに分けて照射される。第3図に示すように、各モジュールの重水ブランケット内に循環させるループが水平に配置され、インベントリは、MA 325kg, LLFP 100 kgと比較的少量で良い。1モジュール当たり年にMA 625 kgと核分裂生成物 75 kgが消滅でき、480 MWの電力を供給できる。また、MA及びLLFPの水溶液あるいはスラリーを用いるので連続的な消滅核種の供給と反応生成物の除去が可能である。高中性子束照射に曝されるため、炉構成材料の寿命評価が重要な問題である。このシステムは、主として軍用廃棄物 (MA, LLFP) を消滅処理する専焼システムを目標としているが、将来的には、発電、核燃料増殖 (Th232 → U233) および消滅処理 (プルトニウム燃焼を含む) を並行して行う総合発電プラントを目標としている。

ATW型消滅処理システムは、ヨーロッパやロシアで関心が高く関連研究がLANLとの協力研究として進められている。スウェーデンでは、ATWの溶融塩 (LiF-BeF) ターゲット・ペブルベッドブランケット型の消滅処理システムの検討を行っており、ロシアでは<sup>5)</sup>、重水炉の経験を生かして、軍事用組成のも

のも含めてプルトニウム燃焼用にATW計画を発展させたABC計画を進めている。



第3図 ATW型ターゲットブランケットモジュール

### 3. 関連基礎研究

加速器消滅処理では、核破砕反応の起こる数GeV～数十MeVのエネルギー領域での核反応データが重要であるが、現状では測定値が十分に存在しない。このため、消滅処理に関係する核種の核データと核子の反応データの測定、整備および評価が国際機関(OECD/NEA)を通して各国にリクエストされている。このような事情から、現在の消滅処理研究では、カスケード過程シミュレーションコード(NMTC/JAERI, HETC/3STEP, HETC/KFA2)が使用されているが、その計算精度の評価のため計算モデルの検討やベンチマーク計算が盛んに行われている。原研では、前平衡過程の組みみや高エネルギー核分裂の評価など計算モデルの改良を行った。<sup>6)</sup> 加速器消滅処理システムの設計研究には、これらのコードに加えて十数MeV以下の反応過程を扱うコードも必要で、MCNP, MORSE-DDおよびTWOTRAN2等の中性子輸送コードと結合させたコードシステム(ACCEL, HERMES, LAHET)が整備されている。

また、カスケード過程解析コードの予測精度の向上を図るには、高エネルギー陽子による核破砕実験、特に厚いターゲット実験での測定値と比較検討する必要がある。原研では、高エネルギー物理学研究所(KEK)のシンクロトロンブースタの500MeV陽子を用いて核破砕基礎実験を実施している。積分実験では、鉛体系内に分布させた鉄、ニッケル、金などの放射化検出体の $\gamma$ 線を測定を行い、核破砕反応生成物である $^{43}\text{K}$ などの生成を確認した。また、中性子しきい値反応( $^{60}\text{Ni} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$ )の反応率空間分布の測定値と計算値の比較を行った結果、ビーム入射軸近くでストリーミングの影響と考えられる不一致が見られた。<sup>7)</sup>

### 4. おわりに

将来の原子力発電では、安全性および核不拡散の観点から群分離・消滅処理を含めた核燃料サイクルの構築が必要と考えられる。それが達成された時、引き続き基幹的なエネルギー源としての役割を担っていくことができるであろう。加速器消滅処理システムは、先端的な消滅効率の高い安全な技術として、有力な選択肢と成り得るものである。加速器消滅処理の研究は、近年、核廃棄物の地層処分サイト決定の難航、群分離・消滅処理に関するオメガ計画(日本)やスピン計画(仏)の推進、加速器技術の進歩などによって、諸外国でも活発化しつつある。

現在、エネルギー収支の観点から、加速器・未臨界炉心の消滅処理システムの概念検討が進められている。固体燃料高速炉心のシステムでは、消滅効率は目標値の70～80%を達成できる見通しが得られているが、さらに消滅率向上や工学的成立性を検討する必要がある。溶融塩炉心や高熱中性子束炉心のシステムでは、連続処理などより効率的な消滅処理が期待できるが、溶融塩や材料など基礎的検討が必要な段階である。

消滅処理用大強度加速器は、当面、消滅処理工学試験を主とした多目的利用のE T A級加速器(陽子工学センター)を着実に開発していくことが必要で、その成果が来世紀の原子力利用に新たな展望を開くと確信する。

### 参考文献

- 1) T. Takizuka, et al.: NEA/P&T REPORT No. 7, p. 398-414(1992).
- 2) H. Takahashi: PSI-Proc. 92-02, ISSN 1019-6447, p. 65-82 (1992).
- 3) H. Katsuta, et al.: NEA/P&T REPORT No. 7, p. 242-272(1992).
- 4) J. R. Ireland: PSI-Proc. 92-02, ISSN 1019-6447, p. 27-64 (1992).
- 5) V. D. Kazaritsky, et al.: Proc. 8th Journees SATURNE(1994).
- 6) T. Nishida, et al.: PSI-Proc. 92-02, ISSN 1019-6447, p. 535-553(1992).
- 7) 高田 他: 核データ研究会報文集(1992).