

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更。 2001. 6. 6

[技術情報室]

放射性廃棄物の消滅処理研究の現状について

1992年11月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複
管
い。

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001



放射性廃棄物の消滅処理研究の現状について

実施責任者：高橋武士

報告者：加瀬 健

小無健司（現在、東北大金研）

要旨

放射性廃棄物の消滅処理は原子炉によるFPの消滅処理が1964年にBNLのSteinbergによってはじめて提案され、1970年代にはいろいろな消滅処理方法が研究されていた。一時、研究は中断されていたが、1980年代後半になって、再び消滅処理研究が注目を集め、現在盛んに研究が行われている。本報告書は、その各消滅処理研究の概要及び、最近の消滅処理研究の現状と動向をまとめたものである。

放射性廃棄物の消滅処理研究の現状について

目次

I . はじめに	1
II . 消滅処理の対象となる核種	1
III . 消滅処理への要件	2
III - 1 . 消滅速度	2
III - 2 . 消滅エネルギー	3
IV . 消滅処理の方法	4
IV - 1 . 陽子による消滅処理	5
①高エネルギー陽子による ¹³⁷ Csの消滅処理	5
②高エネルギー陽子によるTRUの消滅処理	6
IV - 2 . γ 線による消滅処理	7
IV - 3 . 中性子による消滅処理	8
IV - 3 - 1 . (n, γ)、(n, f)反応による消滅処理	8
①Taubeの消滅炉	9
②米国ANS炉	10
③原子炉による消滅処理	11
④Moving target法による消滅処理	14
⑤陽子加速器と未臨界炉のハイブリッド消滅処理(LANL)	15
⑥陽子加速器と未臨界炉のハイブリッド消滅処理(JAERI)	19
⑦陽子加速器と未臨界炉のハイブリッド消滅処理(BNL)	20

⑧陽子加速器と未臨界炉のハイブリッド消滅処理 (I T E P)	21
⑨磁場閉じ込め型の核融合炉による消滅処理	21
IV-3-2. (n, 2n) 反応による消滅処理	22
①ミュオン触媒核融合 (μ C F) 炉を利用した消滅処理	22
②慣性核融合 (I C F) 炉を利用した消滅処理	23
③自由イオン標的を用いた高速中性子発生装置	24
IV-3-3. 加速器による ^{137}Cs の消滅処理法の比較	24
IV-3-4. その他の方法	26
①放射性同位元素を完全電離して β 崩壊の寿命を短くする	26
②非弾性散乱 (クーロン励起を含む) による β 崩壊の加速	26
V. まとめ	27
- 参考文献 -	32

I. はじめに

放射性廃棄物は、原子炉からの使用済燃料等から発生する。その中には、長寿命の放射性核種が含まれており長期にわたってこれらの安全性を確保する必要がある。現在のところこれら長寿命の放射性廃棄物の処理処分方法としては、これをガラス固化体として厳重に封じ込め深地層中に処分することにより、人間環境より隔離する方法の研究開発が進められている。ここでは、核変換によって長寿命放射性核種の短寿命化または安定化する方法、いわゆる消滅処理について述べる。

長寿命放射性廃棄物は、超ウラン元素、T R U (transuranic elements) と核分裂生成物、F P (fission products) に分類することができる。この内T R U については、本来核分裂の可能性を持っている核種であり、燃料として核燃料サイクルの中に取り込むことが可能と考えられる。最近の消滅処理研究は、このT R U の消滅処理に集中している。一方、核分裂生成物核種の中で中性子の反応断面積の小さい核種については、通常の原子炉単独で消滅処理を行うことは難しく、何らかの新しい消滅処理手法を開発する必要がある。

II. 消滅処理の対象となる核種

消滅処理の対象核種の主なものを表1に示す。この表1において生成量とは、出力1GWeの原子炉の年間生成量を示している。中性子反応断面積はF P に対しては熱中性子吸収断面積を、T R U に関しては熱中性子吸収断面積と核分裂断面積の和を示している。(括弧内は核分裂断面積) 消滅処理の対象となる核種はこの生成量が大きく、半減期が長く、かつ熱中性子吸収反応の断面積が小さいために原子炉では消滅せずに使用済み核燃料中に残ったものである。

表1 主な消滅処理対象核種

核種	半減期(年)	中性子反応 断面積(b)	生成量	
			(Ci/年)	(kg/年)
^{85}Kr	11	1.7	3.0×10^5	0.79
^{90}Sr	29	0.014	2.5×10^7	17.8
^{93}Zr	1.5×10^6	1.3-4	61	24.0
^{99}Tc	2.1×10^5	20	433	25.5
^{107}Pd	6.5×10^6	1.8	3.6	7.0
^{129}I	1.6×10^7	27	1.0	5.8
^{135}Cs	2.3×10^6	8.7	13.5	11.7
^{137}Cs	30	0.25	3.5×10^4	39.5
^{237}Np	2.1×10^6	181(1.6)	11	14.4
^{241}Am	432	603(1.3)	5.0×10^3	1.46
^{243}Am	7380	79(1.1)	601	3.03
^{243}Cm	28.5	720(2.0)	55	0.01
^{244}Cm	18	15(2.0)	5.8×10^4	0.72
^{245}Cm	8500	2347(1.6)	4.1×10^3	0.03

Ⅲ. 消滅処理への要件

消滅処理は、①放射能のリスクを低減するという基本的な目的と②エネルギーシステムの中に組み入れられねばならないという要請があるために、少なくとも消滅速度と消滅エネルギーの2つの特性が要求を満たしている必要がある。この点が消滅処理研究と基礎研究の原子核実験が大きく異なる点である。

Ⅲ-1. 消滅速度

粒子線場での消滅速度は、

$$\lambda_{\text{eff}} = \int \sigma(E) \cdot \phi(E) dE$$

となる。ここで、 $\sigma(E)$ は断面積であり、 $\phi(E)$ はエネルギーEを持つ粒子のfluxを表す。また、実効半減期は、この核変換による消滅速度と自然崩壊速度 λ_{nat} を用いて、

$$\tau_{eff} = \ln 2 / \lambda_{eff}$$

のように表される。ここで $\lambda_{eff} = \lambda_{nat} + \lambda_{eff}$ である。これにより明らかのように、速い消滅速度を得るためには、大きな断面積を用いるかまたは、高強度の粒子線束を用いる必要がある。消滅速度を大きくすれば処理期間を短縮することができるばかりではなく、以下に示すように原子炉と消滅処理装置からなるエネルギーシステム内での放射性核種の蓄積量を減少できる。

例えば、1台の原子炉から発生する放射性核種を1台の消滅処理装置で処理する場合を考えてみる。発電炉の出力、稼働率、熱-電気変換効率をそれぞれ、 E_R (W)、 h 、 η_R とすると、核分裂収率 Y の核種の発生速度 S (sec^{-1}) は、

$$S = \frac{h}{\eta_R} \cdot \frac{Y \cdot E_R}{1.6019 \times 10^{-19}} \cdot \frac{1}{E_{fiss}} \quad (1)$$

となる。ここで、 E_{fiss} (MeV) は、一回の核分裂で放出されるエネルギーである。長寿命の放射性核種の蓄積量 W の時間変化が、

$$dW/dt = S - W \cdot \lambda_{eff} \quad (2)$$

で表されると仮定すると、平衡状態では $W = S / \lambda_{eff} = S \cdot \tau_{eff} / \ln 2$ となる。たとえば、 $h=0.75$ 、 $\eta_R=0.33$ 、 $Y=0.06$ 、 $E_R=10^3 \text{MWe}$ 、 $E_{fiss}=200 \text{MeV}$ として τ_{eff} を2年とすると $W = 643 \text{mol}$ となる。この量は、 ^{137}Cs では、88kgとなる。これが、1GWeの発電炉一基と消滅処理装置（実効半減期2年）1台のシステムに対応する平衡時の蓄積量である。すなわち、消滅処理では文字どおり放射能をゼロにすることはできないが蓄積量を少なくしてゼロと見なせるまで減少させることが必要でありそのためには速い消滅速度を達成しなければならないことが分かる。

III-2. 消滅エネルギー

次に、放射性廃棄物を発生するときに核分裂によりどれだけのエネルギーが得られているかを調べる。消滅対象核種の核分裂収率を Y とし、核分裂エネルギーを E_{fiss} 、熱から電気への発電効率を η_R とすると、1核種が原子炉で生成される

ときに得られるエネルギーは、 $E_{max} = \eta_R \cdot (E_{fiss}/Y)$ となり、これが、消滅処理に使用できる最大電気エネルギーである。例えば、 $Y=0.06$ 、 $E_{fiss}=200\text{MeV}$ 、 $\eta_R=0.33$ とすると $E_{max}=1100\text{MeV}$ となる。消滅処理のエネルギーバランスの評価を行うためには、この値と消滅エネルギーとを比較する必要がある。

消滅エネルギーを加速器による消滅処理を例にとりて考えてみる。1個の核種を変換するために必要な粒子ビームパワー (E_{tr}) は、反応確率 P と加速粒子のエネルギー E_{part} を用いて次のように表される。

$$E_{tr} = \frac{E_{part}}{P} \quad (3)$$

反応確率 P は、ターゲット内で核反応と同時に起こる競争過程によって決まる。

なお、原子炉を使用する消滅処理法の場合、原子炉自体がエネルギーを生産する装置であるため、放射性廃棄物を装荷することによる原子炉の出力の低下を無視すれば、原則的には消滅エネルギーはかなり小さい。

消滅エネルギーを評価するには、上式で決まる E_{tr} に装置電源からビームエネルギーへの変換効率 η_{beam} を考慮する必要がある。消滅処理過程を取り入れた核燃料サイクルが電力源となるためには、次のエネルギーバランスの条件を満たす必要がある。

$$E_{tr}/\eta_{beam} < E_{max} \quad (4)$$

IV. 消滅処理の方法

核分裂生成物の消滅処理は、1964年に米国BNLのSteinbergによって最初に提案された¹⁾。Steinbergは、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{85}Kr を原子炉で消滅することを考えた。その後、これに続いて陽子加速器による消滅処理²⁾、核融合炉による消滅処理³⁾等幾つかの方法が提案されている。これらの提案を以下に簡単に紹介する。

IV-1. 陽子による消滅処理

陽子による核反応は、入射粒子の運動エネルギーが、ターゲット核のクーロン障壁を越えると顕著になり、エネルギーが増加するにつれて (p, n)、(p, 2n) 等のチャンネルが順次開いていく。特に高エネルギーで核が破碎される現象を核破碎 (spallation) と呼んでいる。

陽子の場合、競争過程としてターゲット物質中の電子との相互作用 (イオン化) によるエネルギー損失が起こる。入射陽子が1次核反応を起こす確率は、次のように簡単に見積もることができる。

$$P = 1 - \exp(-\sigma N_0 R/A) \quad (5)$$

ここで、Aはターゲット核種の質量数であり、 N_0 はアボガドロ数をあらわし、Rは飛程をあらわす。 σ に関しては、実験値を系統的に分類することで得られた計算式 (systematics) より求められる non-elastic cross section (全断面積から弾性散乱を除いたもの) の値を用いることができ⁶⁾、Rについても各物質中での飛程が、式にまとめられている⁷⁾。2次反応まで含めた解析は、モンテカルロシミュレーション計算コード等を使用して行うことができる。

① 高エネルギー陽子による ^{137}Cs の消滅処理

図1は、(5)式を用いて計算した例である。この例ではいろいろなエネルギーの陽子を ^{137}Cs ターゲットに打ち込んだ場合の反応確率が計算されている。また、図1には、核破碎反応によって生成した2次粒子による反応を加えた場合の反応確率の計算結果を比較のために示してある。2次反応を含めると反応確率は増えるが、反応の分布が広く散らばっており消滅速度の点で有効に利用することが難しい。図1の例では、入射陽子ビームパワーが450MWの時に消滅処理の実効半減期が2年となるような円柱ターゲット体系を考えた場合の反応確率である。

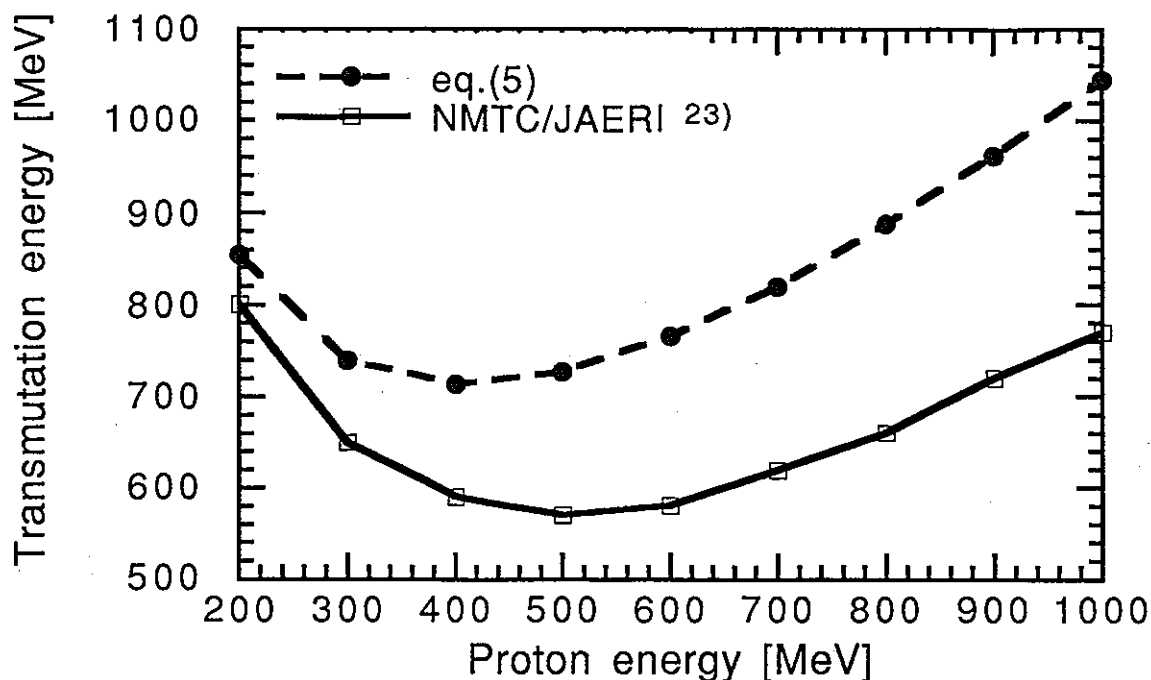


図1 入射陽子エネルギーと消滅エネルギー

② 高エネルギー陽子によるTRUの消滅処理

高エネルギー陽子を直接、TRUのターゲットに入射させ、消滅を行うシステムがスイスPSIのH.U. Wengerらによって提案されている²⁶⁾。そのシステム概念図を図2に示す。陽子加速器のエネルギーとしては、1GeVを考えている。ターゲットを疑似無限体系とした場合のこのシステムでの核変換の効率を表2に示す。入射陽子あたり約5個の核変換が見積もられるが、これでもまだエネルギーバランスを成立させることは難しい(消滅エネルギーは約200MeV)。表2に示されているように、ブランケットでのFPの消滅や核燃料の増殖等、陽子1個あたり約30個発生している中性子の効果的な利用が今後の課題である。

Target:	Pure Np-237	Minor actinide mixture	Actinide mixture
No. of spallation products	1.1	1.0	1.0
No. of high-energy fissions	4.2	4.0	4.1
No. of transmuted nuclei	5.3	5.0	5.1
No. of neutrons below 15 MeV	30.9	30.5	31.0
Total energy deposited (GeV)	1.60	1.56	1.58

表2 Efficiency of high-energy reactions in a quasi-infinite target (per incident 1 GeV proton)

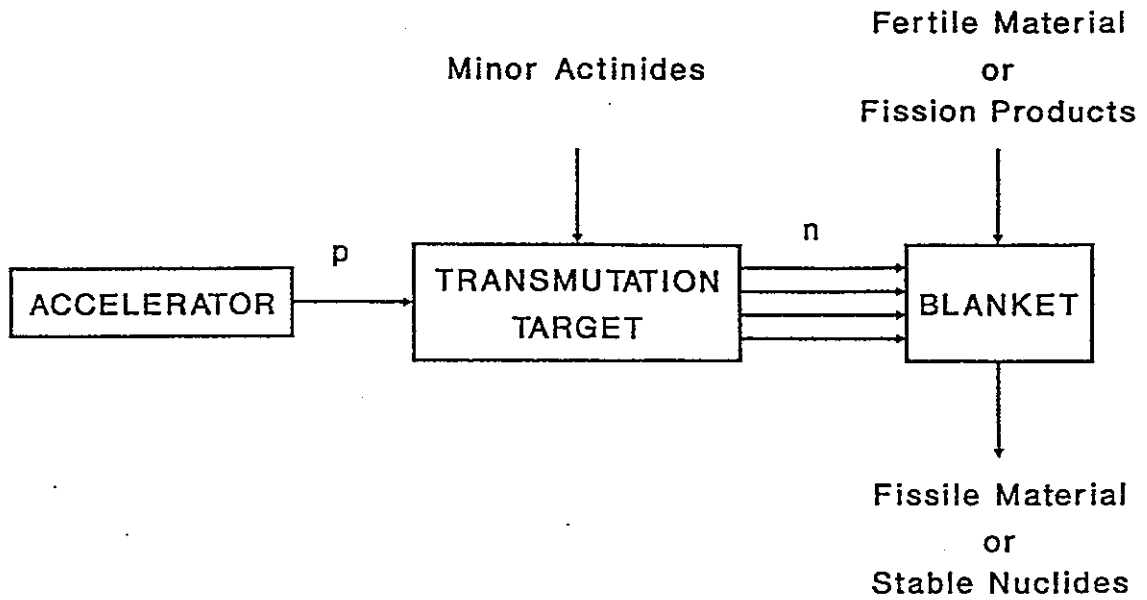


図2 システム概念図

N-2. γ 線による消滅処理⁴⁾

γ 線による光核反応は、核種によってあまり大きな差がなく、一般に図3に示すようになる⁵⁾。 γ 線エネルギーが粒子放出のthreshold ($\sim 8\text{MeV}$) を越えると反応が始まり、 $10\sim 20\text{MeV}$ の間で巨大共鳴 (Giant Dipole Resonance: GDR) と呼ばれるピークを示す。これを越えると (γ, n) 、 $(\gamma, 2n)$ 等のチャンネルが順次開いてくるが全反応断面積としては小さくなる。約 150MeV を越えると pion を生成することが可能になり、 300MeV 近傍に Δ 共鳴と呼ばれる強い共鳴を示す。

γ 線の場合も競争過程は物質との相互作用であり、電子対生成、コンプトン散乱、光電効果である。例えば、 γ 線のエネルギーを 15MeV とすると競争過程としては、主に電子対生成による粒子損失が主になる。 ^{137}Cs を例にとって 15MeV の γ 線の反応確率を計算すると次のようになる。

$$P = \frac{\sigma(\gamma, n)}{\sigma_{\text{tot}}} \sim \frac{\sigma(\gamma, n)}{\sigma_{\text{pair}}} = \frac{300\text{mb}}{9b} = 0.033 \quad (6)$$

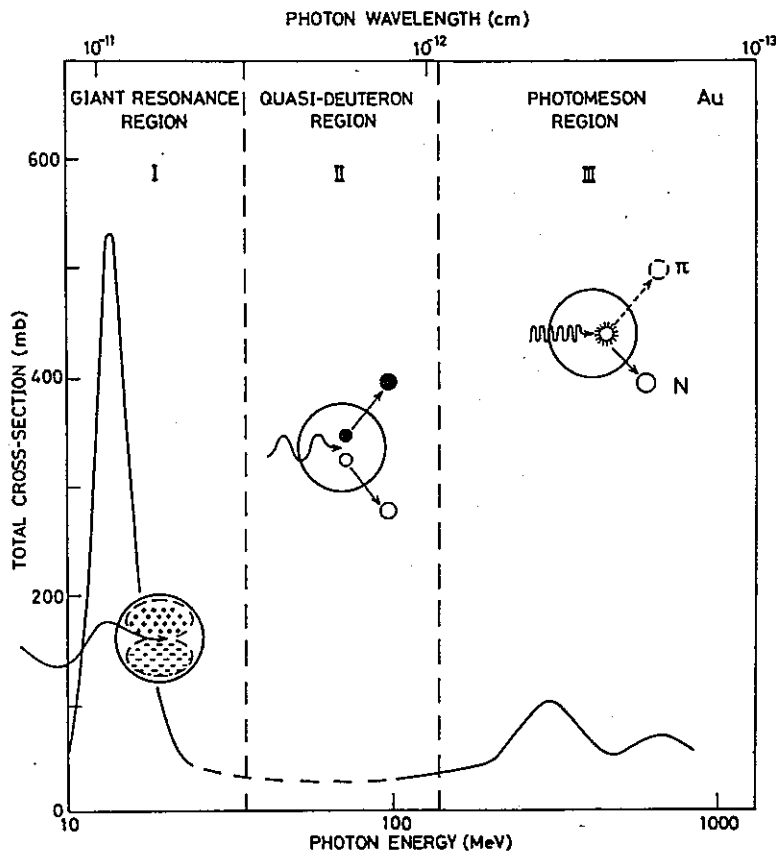


図3 ^{197}Au の光核反応断面積

IV-3. 中性子による消滅処理

IV-3-1. (n, γ) 、 (n, f) 反応による消滅処理

中性子による核反応は、クーロン障壁以上のエネルギーでは、本質的に上述した陽子の核反応と同じである⁵⁾。中性子による核反応の特徴は、低エネルギーでの放射捕獲反応、すなわち (n, γ) 反応である。中性子を用いる消滅処理では反応確率Pは大きくエネルギーバランスを満足させることは比較的容易であるが、これとは反対に速い消滅速度を得ることが難しい。すなわち、消滅処理の対象となる核種は、原子炉の熱中性子場中での核反応断面積が小さいために生き残ったものであり、表1に示すように、 (n, γ) 反応断面積の小さい核種が多い。特に ^{137}Cs 、 ^{90}Sr は断面積が小さく、消滅速度を1年程度にしようとするれば、図4に示すように、 $10^{17} \sim 10^{18} (\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1})$ の極めて高いfluxが必要である。

ここでは、 $10^{16} (\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1})$ の熱中性子束を目指した例を紹介する。

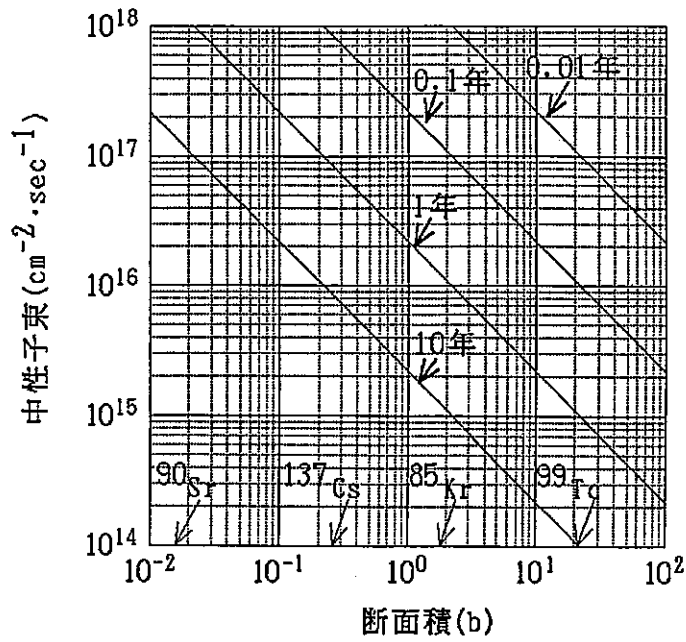


図4 反応断面積に対する消滅速度と中性子束

①Taubeの消滅炉

Taubeは (n, γ) 反応による¹³⁷Csと⁹⁰Srの消滅処理を検討しており、炉のデザイン及び消滅処理のシナリオについて述べている⁸⁾。炉のデザインは同心球の中心に¹³⁷CsODと⁹⁰Sr(OD)₂を循環させ、その外側に熔融燃料を循環させ、FP装荷領域を $2 \times 10^{16} (\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1})$ の熱中性子束を得るものである。(図5参照) 高フラックスを得るため出力密度を10.5kW/ccと高くしており、除熱及び燃焼劣化の問題を回避するため熔融燃料を採用し、平均12m/sの速度で循環させる。熔融燃料はいまだ実用化されていないが、Taubeは加速器や核融合炉による消滅処理よりも熔融燃料の方が実現性が高いと主

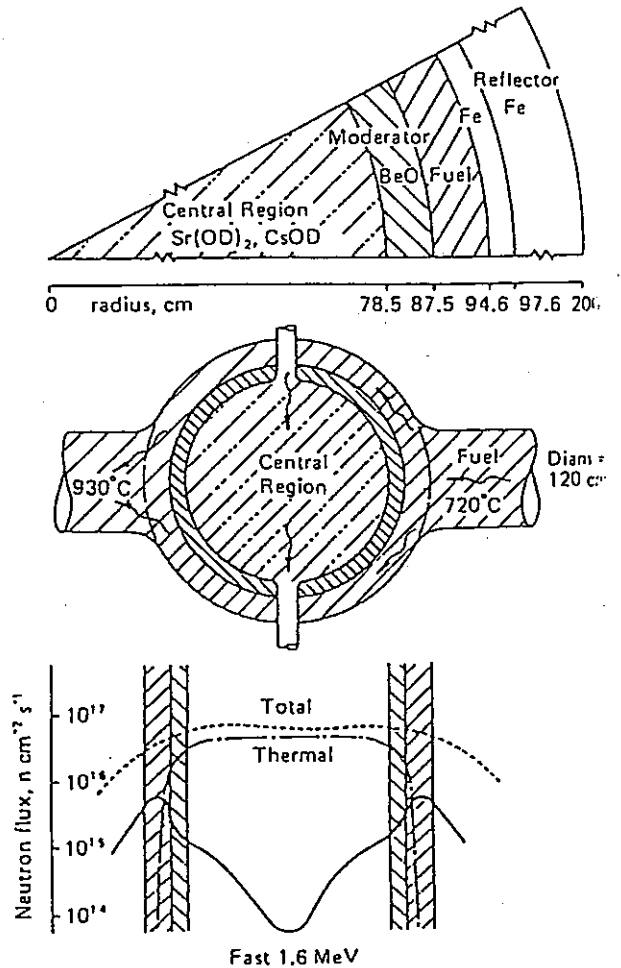


図5 Taubeの消滅炉

張している。消滅処理のシナリオは、将来は核分裂原子炉を廃止するときに原子炉28GW_{th}に消滅炉1基をセットにして、100セットから始めて1セットになるまで1セットずつ段階的に原子炉を停止をするというものである。

Taubeは結論で、エネルギーバランスは正であり、自然崩壊よりも速く消滅処理が行える（実効半減期が8.95年）が、構造材の放射化による放射性廃棄物が多量に発生すること、炉のリスクが上がることを指摘している。

②米国ANS炉

米国の現在稼働中の高フラックス研究炉（HFIR）は60年代半ばに運転を開始したが、近年、実験要求を満たさなくなってきた。一方、70年代の初めよりフランスのInstitute Laue-Langevin（ILL）の研究炉が世界最高の 2×10^{15} ($\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$)の中性子束を提供している。ANSプロジェクトは、ILLを上回る 10^{16} ($\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$)の熱中性子束の実現を目指すものである。¹⁰⁾

ANSプロジェクトは米国エネルギー省の監督のもとにオークリッジ国立研究所が主管し、1986年から炉の概念設計を開始した。現在、炉の建設には至っていない。参加機関は、アイダホ国立工学研究所、テネシー大学、バブコック・ウィルコックス社等である。陽子加速器を用いる等いくつかの設計案が出されたが、1988年2月に原子炉を用いる案が採用された（図6参照）。燃料は93%濃縮 $\text{U}_3\text{Si}-\text{Al}$ 板状燃料とし、重水で冷却する。板状燃料は構造強度がよい渦巻型の配置

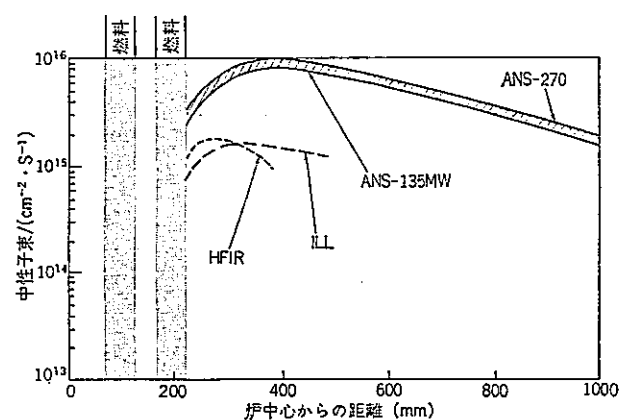
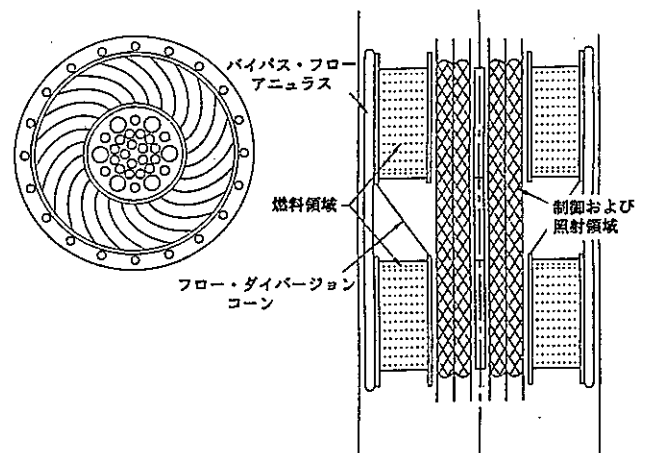


図6 米国ANS炉

とする。冷却をよくするため上下2分割した炉心としている。中性子の漏れが多いコンパクトな炉心を大型重水タンクに入れ、炉外の重水中で $10^{16}(\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1})$ の熱中性子束を実現する。

以上に示した例は、そのまま長期・大量のFPの消滅処理に適用できるものではないが $10^{16}(\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1})$ の熱中性子束炉の工学的な実現可能性があることを示している。

③原子炉による消滅処理

事業団では、現状の技術またはその延長上において達成できる技術を用いた high flux のFP消滅処理用原子炉（FP消滅炉）の核特性について研究を行った^{11)、12)}。この炉は炉心を熱中性子主体のFP装荷領域と高速中性子主体の燃料領域に分け、FP領域における熱中性子とFP核種の吸収反応により、FP核種を消滅させることが特徴である。昭和63年度、平成元年度は、消滅炉の核特性、燃焼特性、消滅特性などの各特性の全体の傾向を把握することに重点を置き、研究を進めてきた。その結果、FP消滅炉の長期運転達成には、金属燃料とダクトレス燃料集合体の適用が有利であることが分かった。また、FP消滅炉の消滅特性を評価するために定義した消滅率と出力密度やPu富化度などの炉心パラメータとの関係が分かった。さらに、FP装荷領域と燃料領域の境界でFP装荷領域からの熱中性子の影響により鋭い出力ピークが生ずること、高い消滅特性（高中性子束）を得るためには高出力密度が必要となり、反応度劣化の問題が生じること等の問題点を摘出した。平成2、3年度は、現状の高速炉における出力ピーキング係数や燃焼反応度の制限値を考慮し、出力ピーク

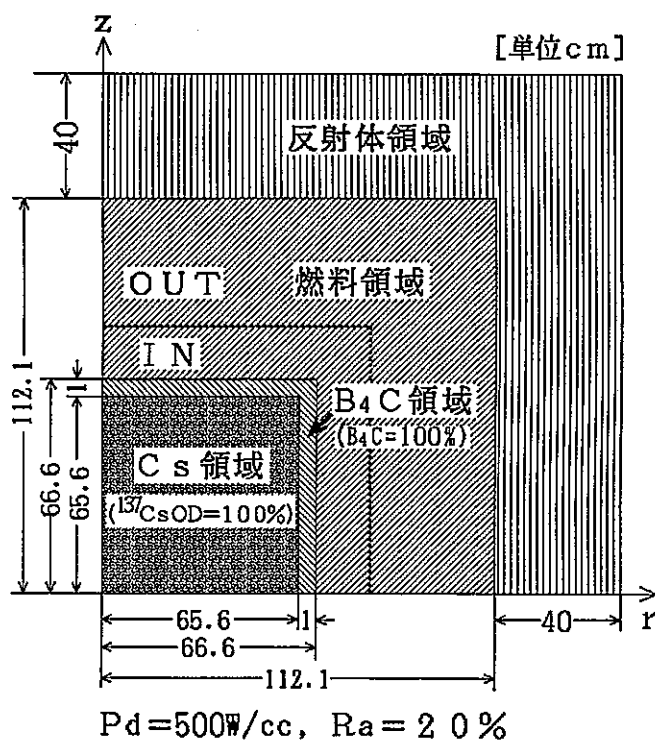


図7 FP消滅炉の形状

の問題を解決した上で、数々のパラメータ解析を実施し、この制限内で最も消滅特性の良い炉心を示した。ここでは平成2、3年度の成果を示す。消滅の対象はFPとして原子炉から多量に発生し、しかも、消滅の困難とされる ^{137}Cs を選んだ。従来のFP消滅炉には、Cs領域と燃料領域の境界付近に鋭い出力ピークが生じていたが、それを抑えるためにCs領域と燃料領域の間に B_4C 領域を設けた(図7参照)。さらに、Cs領域の中性子束を上げるためにCs領域の回りすべてを燃料で囲んだ体系を考えた。中性子の体系外へのもれを少なくするために外径と高さを等しくした。燃料は昭和63年度、平成元年度の燃焼解析で有利であることが判明した体積比55%の金属燃料U-Pu-10Zrを使用した。そして、消滅率、燃焼反応度及び出力ピークキング係数に目標値を定め、種々のパラメータ解析を実施した。目標値は消滅率に関しては自然崩壊の1.5倍(3.5%/y)以上、燃焼反応度劣化と出力ピークキング係数は高速炉並の3%/y以下、1.7以下とした。

パラメータ解析として、まず B_4C 領域の厚さを2cmと固定し、出力密度(Pd)及びCs領域の炉心に対する体積割合(Ra)依存性を調べた。技術的達成度を考慮した結果、Pd=500W/cc、Ra=20%の場合が燃焼反応度、出力ピークキング係数の目標値を達成し、消滅率の良い体系であることが分かった。しかし、この体系でも消滅率の目標値を達成することはできなかった。そこで、 B_4C 領域の厚さを2cmから1cmに薄くしたところ3つの目標値を達成することができた。

次に、さらに消滅率の向上を目指し、燃料領域を2領域(内側燃料領域INと外側燃料領域OUT)とし、Cs領域に近い部分の燃料(内側燃料)のPu富化度を上げることによってCs領域における中性子束の向上を図った。その結果、Cs領域で平均熱中性子束 $3 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 、消滅率3.84%/yの値が得られた。図7は最適化されたFP消滅炉の体系である。表3に最適化されたFP消滅炉の特性を示す。

表3 F P 消滅炉心の構成及び特性

出力	3.5 GW _{th}
出力密度	500 W/cc
燃料	金属燃料 (U-Pu-10Zr)
燃料体積比	55%
燃料スミア密度	75% T.D.
燃料領域	2領域 (内側、外側)
Pu 富化度 (内側燃料領域)	15 w/o
Pu 富化度 (外側燃料領域)	9.76 w/o
内側燃料領域の厚さ	7.5 cm
外側燃料領域の厚さ	38.0 cm
炉心外径	224.2 cm
炉心高さ	224.2 cm
B ₄ C 領域の厚さ	1 cm
反射体領域の厚さ	40 cm
Cs 領域の外径	131.2 cm
Cs 領域の高さ	131.2 cm
Cs 領域の炉心に対する体積割合	20%
¹³⁷ Cs 装荷量	5750 kg
¹³⁷ Cs 消滅量 (自然崩壊を含む)	220.5 kg/y
消滅率	3.84%/y
Cs 領域の平均熱中性子束	$3.05 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
燃焼反応度	1.83%/y
出力ピーキング係数	1.7

④ Moving target法による消滅処理

中性子捕獲断面積には共鳴領域に鋭い大きなピークが存在する。この大きな値を利用できれば、速い消滅速度を達成することができる。しかし原子炉から得られる中性子のエネルギーは連続分布しており共鳴エネルギーに一致したエネルギーの中性子束を効率良く得ることは困難である。そこで中性子エネルギーを制御する代わりに原子核を一定のエネルギーに加速し、実質上共鳴ピークのエネルギーに相当する中性子束を利用する方法 (moving target 法) を提案した¹³⁾。

消滅処理核種としては加速しやすさを考慮し、比較的質量が軽く、共鳴ピークのエネルギーが低い、つまり加速に必要なエネルギーが小さい ^{99}Tc を考えた。中性子源としては、中性子束 $10^{15}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ の原子炉を考え、 ^{99}Tc を加速する際はできるだけ多量に処理できるように ^{99}Tc を微粒子状 (半径 $0.01\mu\text{m}$ 、 ^{99}Tc 原子約 3×10^5 個から成る。今後これをmacronと呼ぶ) にし、それをイオン化し使用する。加速器では ^{99}Tc を共鳴ピークに相当するエネルギーまで加速し貯蔵リングに入射する。貯蔵リングは真空度 10^{-10}Torr 、半径 3.4m (磁場 10 テスラ) のリングを考えた。消滅処理装置の概念図を図8に示す。

この装置を使用し、 1GWe の原子炉から出てくる ^{99}Tc と消滅処理装置で処理する ^{99}Tc が平衡状態にある時の装置の蓄積量は 50g (0.5mol) となる (実効半減期 14 時間)。そこで消滅処理装置に対して " 原子核の運動を維持する時間 (Life Time) = 14 時間 " と " 運動させる原子核の量 = 0.5mol " という条件について検討した。Life Timeに影響を及ぼすものとしては残留ガスとの相互作用が考えられる。残留ガスとの相互作用をmacronと残留ガス (H_2 を仮定) との弾性散乱で近似しその影響を計算した。その結果macronは衝突を繰り返し約 2 時間で共鳴のピークをはずれ中性子捕獲断面積が半分になる領域までエネルギーを失うことがわかった。次に原子核の量の影響、つまり空間電荷効果について述べる。macronをリング内に閉じ込めるためには電荷により生じる反発力を押さえる必要がある。これを外部磁場だけで行おうとすると現実には不可能な大きな磁場となる。当然、電子による中性化が必要になってくる。しかしこの中性化を電流で行うと非常に大きな電流値となるので、中性化用電子は閉じ込める必要がある。つまり、 ^{99}Tc は一定エネルギーで円運動を行わせ、中性化用電子はその近傍に閉じ込めるような磁場を作らなければならない。数種類の形状の磁場を検討したところ、強力なミラ

一磁場はこの条件を満たす可能性があることが分かった。

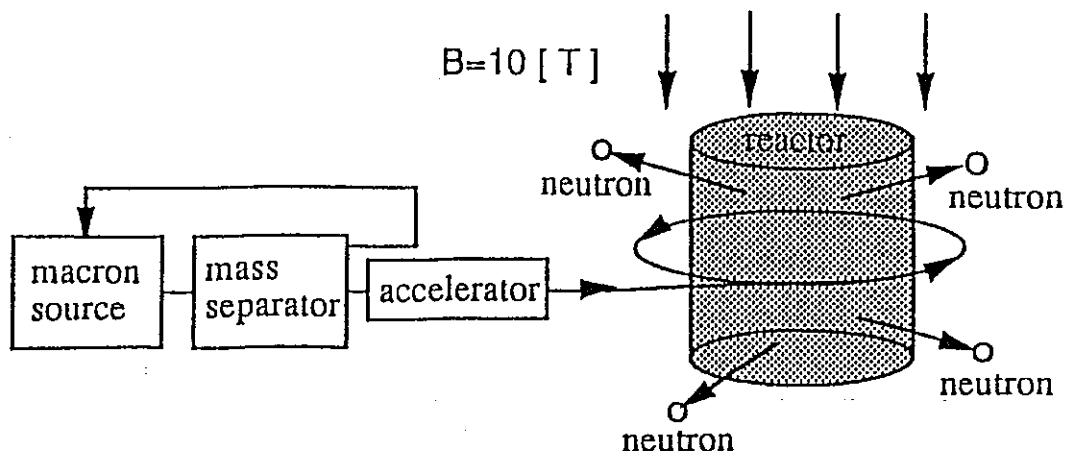


図8 Moving target法による消滅処理装置の概念図

⑤陽子加速器と未臨界炉のハイブリッド消滅処理 (LANL)

米国ロスアラモス国立研究所のBowmanらは陽子加速器と未臨界溶融塩炉のハイブリッド消滅処理システム、ATW計画を提案している¹⁴⁾。消滅処理の対象核種はTRU及びFPである。このシステムは、Pb-Biターゲットに陽子を入射させ、核破碎反応で発生させた中性子をD₂Oで減速させ、10¹⁶cm⁻²s⁻¹の消滅領域を作り、ここでTRU及びFPの処理を行うというものである。彼らは消滅処理の対象としてまずHanford Defence Wasteを考えており、その次に商用炉の廃棄物を対象としたシステムをめざす。前者の場合のターゲット-ブランケット構成図を図9に示す。

Neutronics Results (1-D)

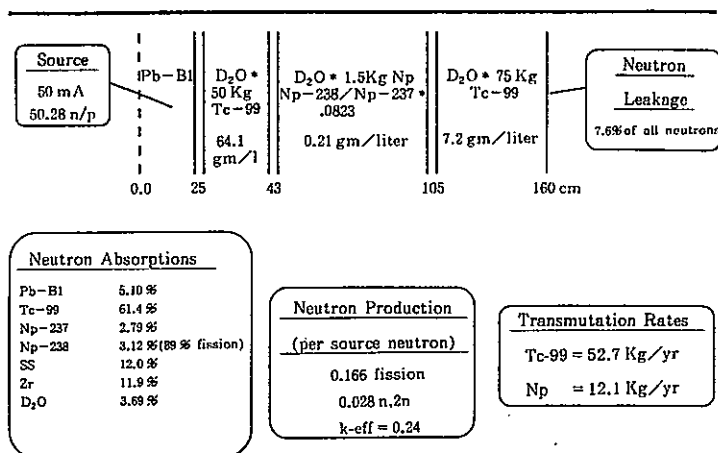


図9 ターゲット-ブランケット構成図

陽子加速器は0.8GeV、50mAのものを使用する。図9から計算した ^{99}Tc 及び、 ^{237}Np 、 ^{238}Np の消滅エネルギー（消滅処理対象核種を1核種消滅するのに要するエネルギー）と実効半減期を表4に示す。

表4 Hanford Defence Waste を対象としたシステムの計算結果

	消滅エネルギー	実効半減期
^{99}Tc	26MeV	1.3y
^{237}Np 、 ^{238}Np	270MeV	23d

なお、Hanford Defence Waste を対象としたシステムでは発電は行わない。

商用炉の廃棄物を対象としたシステムでは、1.6GeV、125mA陽子加速器を使用する。そのシステム構成図を図10、加速器、原子炉の仕様等を表5に示す。

表5 加速器の仕様、その他

陽子エネルギー	1.6GeV
電流値	125mA
k _{eff}	0.81
発電量	4200MWe
加速器使用電力	発電量の約10%
FP処理量	650kg/y
TRU処理量	350kg/y
処理能力	3Gwtの原子炉10基分

Energy Park for Waste Transmutation

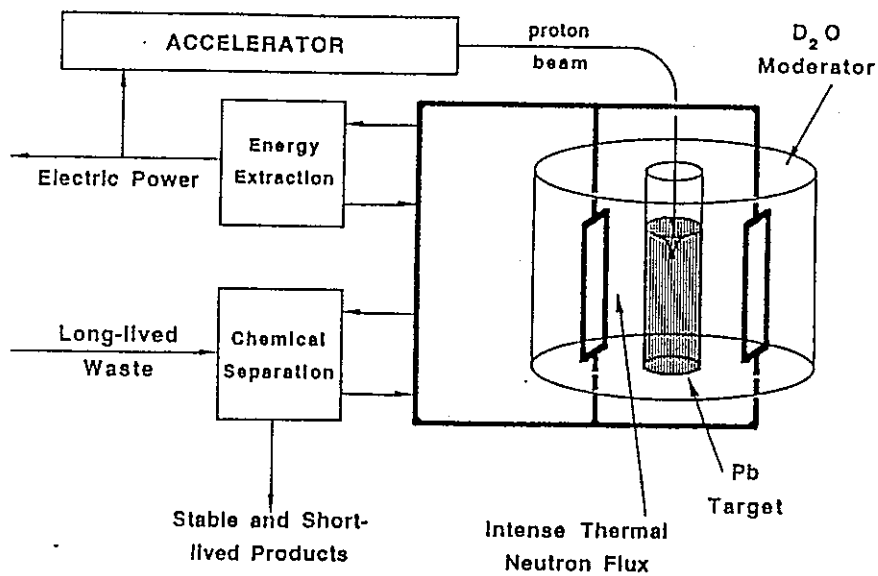
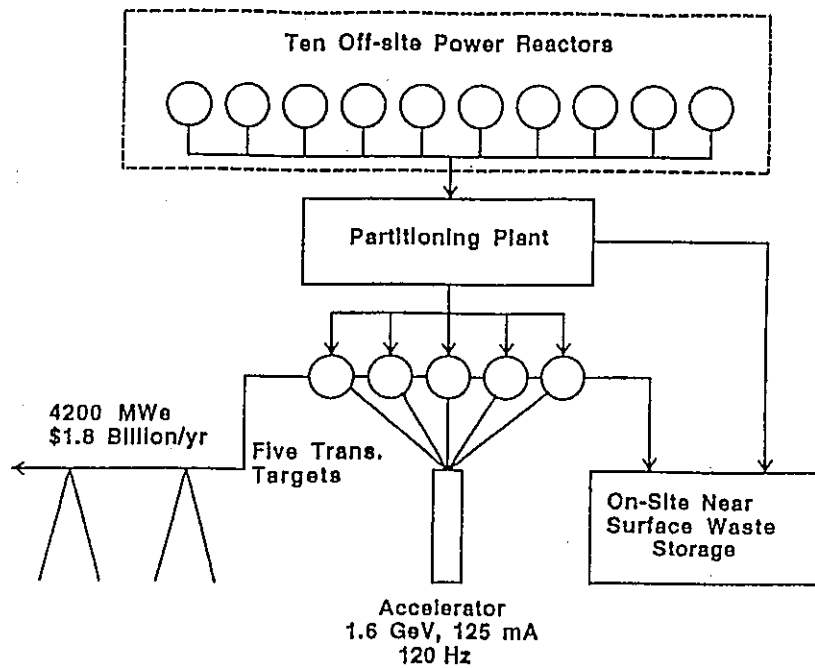


図 10 消滅処理システム構成図

同研究所の提案するシステムでは、図10に示されているように陽子加速器からの125mAの電流は25mAずつの5本のビームに分割され、各々5つのスポレーションターゲット（原子炉）に入射することになる。1つのターゲットごとに3GW_eの商用炉2基分のTRU及びFPを処理するので、総計10基分のTRU及びFPを処理できる。また、原子炉からの発電量の約10%で加速器の電力がまかなえることになっている。ただし、これらの値は1次元の輸送計算あるいは概算値である。

また、TRUの主成分である²³⁷Npは熱中性子による核分裂断面積が吸収断面積の約1/200なので、今まで高速中性子による消滅処理法のみが提案されてきた。しかし、このシステムでは大強度熱中性子束を利用するため、²³⁷Npを²³⁸Np（半減期 2.1d）に核変換させてから、崩壊する前に熱中性子による核分裂反応で消滅できる。（図11参照）²³⁸Npは2100bと大きい核分裂断面積を持っているので、早い消滅速度が期待できる。

A High Thermal Neutron Flux Allows Efficient Fission of Higher Actinides

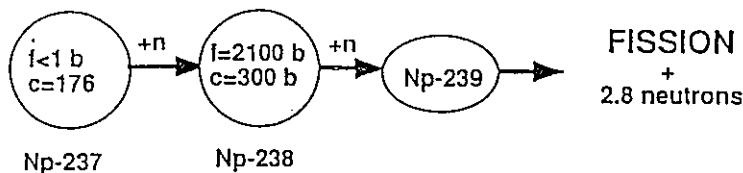


図11 大強度熱中性子束による²³⁷Npの核変換

そのため、図12に示されているように他の消滅処理システムに比較して非常にインベントリーが小さくて済むという特徴を持つ。この熱中性子束を消滅に使用する点と低インベントリーである点がこのシステムの新しい点である。

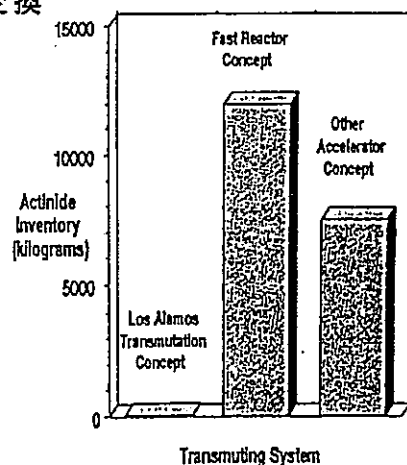


図12 インベントリー比較

⑥陽子加速器と未臨界炉のハイブリッド消滅処理 (J A E R I)

原研が提案しているシステムでは、1.5GeV、39mAの陽子加速器を使用する¹⁵⁾。システム構成図を図13、加速器、原子炉の仕様等を表6に示す。3GW_tの商用炉10基分のTRUを処理できる。発電量は246MW_eであり、約50%で加速器の電力をまかなえる。

ロスアラモス国立研究所のシステムとの違いは高速中性子束を消滅に使用する点、TRUのみを対象にしている点、固体燃料を使用する点である。シミュレーション計算による評価の他に、鉛ターゲットによる陽子照射実験も行っている。また、固体燃料炉ではなく、熔融塩炉を利用したシステムの概念設計も行っている¹⁶⁾。この場合の予備解析の結果、1.5GeV-25mAの陽子加速器を使用すると、年間3GW_tの原子炉10基分の処理が可能で800MW_tの熱出力が得られるということが求められた。(k_{eff}は0.92)

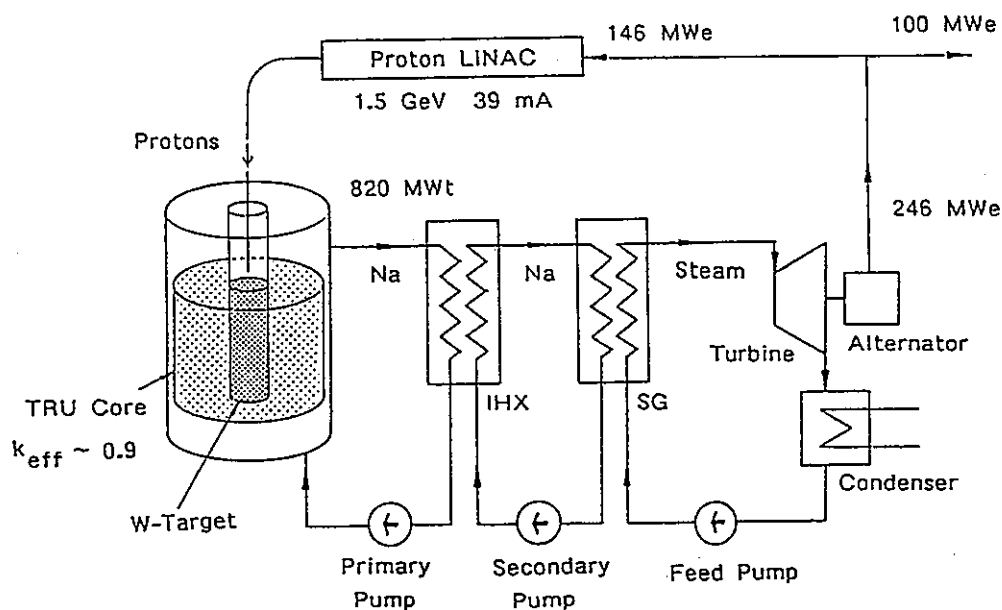


図13 消滅処理システム構成図

表6 加速器の仕様、その他

陽子エネルギー	1.5GeV
電流値	39mA
k_{eff}	0.89
発電量	246MWe
加速器使用電力	発電量の約50%
TRU処理量	250kg/y
処理能力	3GWtの原子炉10基分

⑦陽子加速器と未臨界炉のハイブリッド消滅処理（BNL）

米国ブルックヘブン国立研究所で提案しているPHOENIX計画の概念図を図14に示す¹⁷⁾。加速器とのハイブリッドであることを除けば、酸化物燃料使用で液体Na冷却の高速炉の技術が応用できる。加速器からの電流を平均的に広げ、均一に8つのターゲットに入射させることが課題である。消滅処理の対象としてはTRUとI（ヨウ素）を想定している。

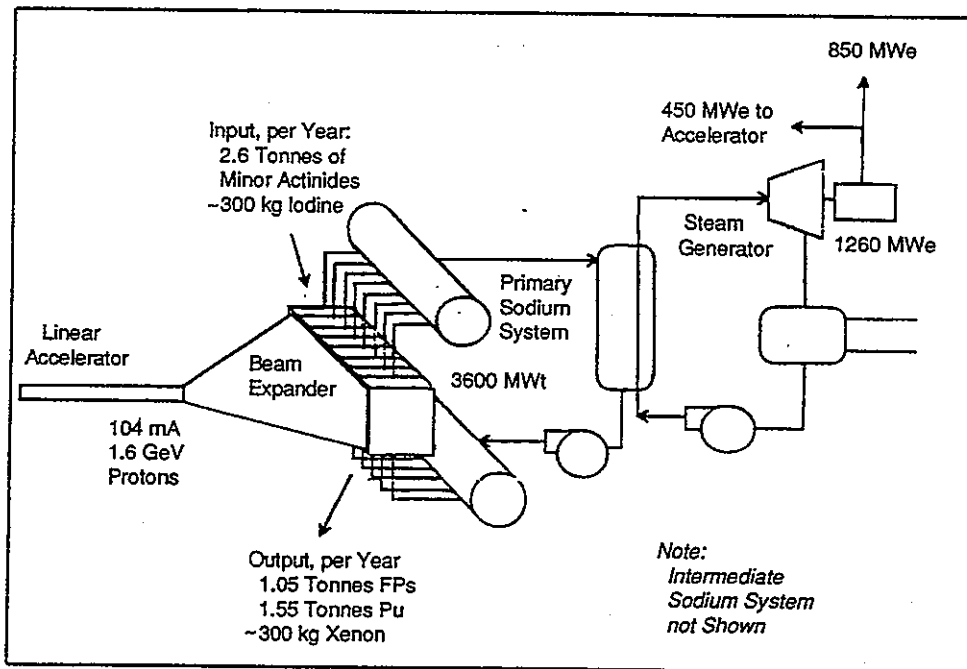


図14 PHOENIX計画概念図

⑧陽子加速器と未臨界炉のハイブリッド消滅処理 (I T E P)

ロシアの I T E P (Institute of Theoretical and Experimental Physics) では、LANLに類似の陽子加速器と未臨界炉のハイブリッド消滅処理システムについての評価を行っている¹⁶⁾。そのシステム概念図を図15に示す。このシステムの場合、TRUは熔融塩中ではなく、D₂O中に溶解させる仕様になっている。使用する陽子加速器は1.6GeV-300mAで、TRUの処理量は500kg/年である。

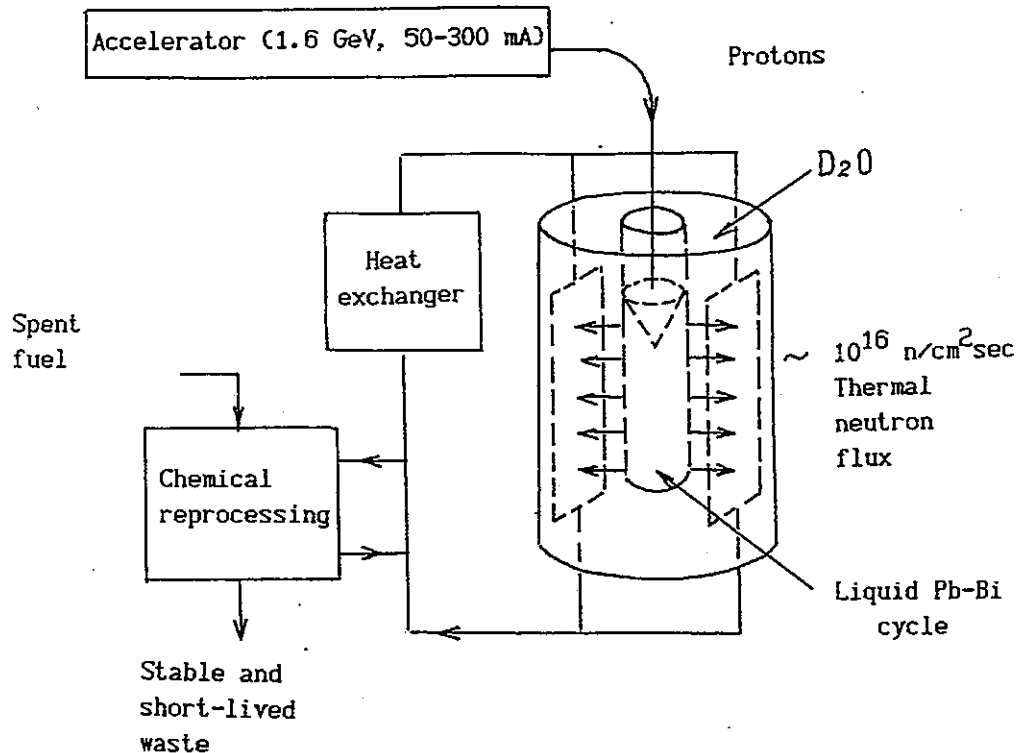


図15 システム概念図

⑨磁場閉じ込め型の核融合炉による消滅処理

この方法は、磁場閉じ込め型の核融合炉の第一壁近傍にTRUを装荷し消滅処理を行うものである。消滅処理に関する制限は、第一壁負荷の制限のために中性子束を高く取ることが難しい点である。消滅処理に有利な点は、原子炉に比べて熱出力当たりの中性子の発生数が多いために多量の処理が期待できる点である。表7に深井²⁶⁾の計算結果を示す。

表7 磁場閉じ込め型の核融合炉による消滅処理

熱出力 [MW]	2600
第1壁中性子負荷 [MW/m ²]	10
中性子束 [10 ¹⁵ cm ⁻² s ⁻¹]	4.1
実効半減期 [年]	4.7
装荷量 [kg]	140000
処理量 [kg]	19000

N-3-2. (n, 2n) 反応による消滅処理

(n, 2n) 反応断面積はほとんどの核種において数bの大きさなので、(n, γ) 反応断面積の小さい核種 (¹³⁷Cs、⁹⁰Sr等) に対しては有効な消滅処理方法と思われる。

① ミュオン触媒核融合 (μCF) 炉を利用した消滅処理

μCF 炉は、エネルギーの発生装置としてこれまで多くの研究がなされているが、強力中性子源としても魅力のある装置である。このμCF 炉からの14MeV 中性子による (n, 2n) 反応を利用した¹³⁷Csの消滅方法(その概念図を図16に示す)を検討した。その結果、実効半減期を2年に設定した場合、消滅エネルギーは195MeVとなった。¹⁹⁾

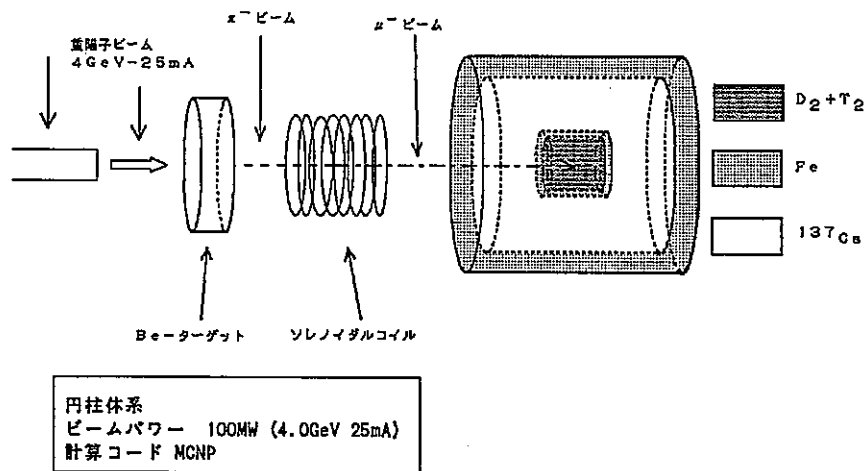


図16 μCFを利用した消滅処理法の概念図

②慣性核融合（ICF）炉を利用した消滅処理

ICFでは、重水素(D)及び三重水素(T)でできた燃料ペレットを強力なレーザーや粒子ビーム等を用いて超高密度に圧縮し、核融合反応を起こさせる。そこで、事業団では燃料ペレットとしてDT核の回りにFPを巻いたペレットを考え、DT核と一緒にFPを圧縮し、圧縮した状態で $(n, 2n)$ 反応によりFPを消滅した場合についての評価を行った²⁰⁾。

^{90}Sr の $(n, 2n)$ 反応断面積及び (n, γ) 反応断面積はそれぞれ1.7b、0.015bである。したがって、 ^{90}Sr の消滅処理に $(n, 2n)$ 反応を用いると、熱中性子照射による方法より断面積に関して約100倍有利になる。さらに、 ^{90}Sr を圧縮することで核反応率が増えるので、通常の状態における消滅処理より効率的となる。圧縮率を1000とすると圧縮後は圧縮前より100倍近く核反応率が増加するので、圧縮した状態で $(n, 2n)$ 反応により ^{90}Sr を消滅処理する本方法は、通常の状態では熱中性子を照射する方法より約10000倍効率的となる。

計算においては、圧縮率を1000、DT核の半径を $500\mu\text{m}$ と固定し、Sr領域の厚さをパラメータとして変化させ、消滅速度、消滅エネルギーを計算した。さらに、1ペレット中の ^{90}Sr をすべて消滅させるためのペレットの精製、加工のサイクル数を計算した。

計算の結果、 ^{90}Sr の消滅速度は自然崩壊の100万～1000万倍になり、極めて速い消滅速度が得られた。その結果、 ^{90}Sr の半減期28.8年が実効半減期数分のオーダーになることが分かった。

^{90}Sr を1個消すのに必要な消滅エネルギーは、装置の効率やビームエネルギーから内部エネルギーへの変換効率を100%と仮定すると数100MeVであり、これまでの方法による消滅エネルギーよりも小さな値となった。

1ペレット中の ^{90}Sr をすべて消すためのペレットの精製、加工のサイクル数は、DT核半径 $500\mu\text{m}$ 、Sr領域の厚さ $100\sim 1000\mu\text{m}$ のときは数100回となった。FPを含むペレットの製造が容易にできればよいが、現状から見て、サイクル数100回以上は現実的とは思われない。

サイクル数が数回から10数回となるペレットサイズを計算したところ、数 $1000\mu\text{m}$ のオーダーとなり、大きな値となった。大きなサイズのペレットをレーザー等で圧縮できるかどうか今後調べる必要がある。

③自由イオン標的を用いた高速中性子発生装置

加速器で高速中性子を得る方法として、例えば加速した d^+ イオンを液体リチウム標的に照射するシステムが過去に検討された。この方法ではビームの標的中のエネルギー損失が大きく1個の中性子を得るのに1.4GeVビーム・エネルギーを必要とし、エネルギー収支の観点から核変換用中性子源として適当でない。しかし標的を完全電離したイオンにできればビームのエネルギー損失が液体・金属・ガス状態の場合に比べて原理的には1000倍以上小さくなることが期待されエネルギー収支が大幅に改善される。この場合、ビームの標的中の平均自由行程が非常に長くなりビームを繰り返し使うことが可能となる。一例としてミラー磁場中のイオン軌道がこの目的にかなっており、この考えに基づいた核変換用高速中性子発生装置も検討されている²¹⁾。

IV-3-3. 加速器による ^{137}Cs の消滅処理法の比較

先に述べてきたように今までにいくつかの加速器を用いた消滅処理法が提案されている。¹⁾⁻⁴⁾そこで、それらの各方法に対して計算条件を統一し、ターゲット体積をパラメータとして消滅速度(実効半減期)と目的核種を1核種消滅させるときに必要なエネルギー(消滅エネルギー)を求め、各々の消滅処理法の比較を行った^{12)、19)}。

比較の対象とした消滅処理法とその計算条件をまとめて表8に示す。電子法は電子を直接ターゲットに入射させ、発生させた制動放射線で消滅させる方法で、主に (γ, n) 反応を利用する。 μCF 法はミュオン触媒核融合(μCF)中性子を利用して、主に $(n, 2n)$ 反応で消滅させる法である。陽子を利用する方法としては、直接陽子をターゲットに入射させ、主にスポレーション反応で消滅する方法(陽子法)と陽子を鉛に入射させ発生させた2次中性子を利用する方法(スポレーション中性子法)の2種類の方法について計算を行った。どのケースもできるだけ計算条件を等しくするため、3次元モンテカルロ計算コードを使用して計算することにし、対象核種としてここでは ^{137}Cs を取り上げた。

表8 計算条件

消滅処理方法	加速粒子	エネルギー	電流値	計算コード
		[MeV]	[mA]	
電子法	e ⁻	100	2000	EGS4 ²²⁾
陽子法	p	500	900	NMTC ²³⁾
スポレーション中性子法	p	1500	300	NMTC+MCNP ²⁴⁾
μCF法	d	4000	25	MCNP

計算結果として、実効半減期を2年に設定したときの消滅エネルギーを比較したものを表9に示す。原子炉で¹³⁷Csが1核種生じるとき得られる電気エネルギーは、核分裂で得られるエネルギーを200MeV、核分裂収率6%、発電効率33%を仮定すると、

$$200 \div 0.06 \times 0.33 = 1100$$

より、1100MeVとなる。加速器効率を50%と仮定すると、¹³⁷Csだけを消滅処理の対象と考へても、1核変換あたりに使用できるエネルギーは550MeV以下でないとエネルギー収支は成り立たない。表9より、μCF法とスポレーション中性子法の2者が消滅エネルギーが550MeV以下である。しかしながら、この場合先に述べたように消滅処理の対象核種として¹³⁷Cs 1核種しか考慮に入れてないが、実際は他にも消滅処理の対象として考へられている核種、⁹⁰Sr、⁹⁹Tc、¹²⁹I等が存在する。そのため、事実上エネルギー収支を成立させるには消滅エネルギーは少なくとも100MeV以下である必要がある。

表9 計算結果

消滅処理方法	消滅エネルギー	実効半減期
	[MeV]	[年]
電子法	4700	2.0
陽子法	570	2.0
スポレーション中性子法	510	2.0
μCF法	195	2.0

N-3-4. その他の方法

加速器を使った消滅の方法で、核変換を伴わないでβ崩壊の寿命の短い状態を作り出すことも原理的には可能である。これらの方法は現段階では消滅処理法として成立していないが興味深い方法である。

①放射性同位元素を完全電離してβ崩壊の寿命を短くする

イオンを十分に高いエネルギーに加速して薄膜を通過させると完全電離したイオンが得られる。電子の軌道が空孔になった同位元素ではβ崩壊する電子の終状態の位相空間が大きくなりβ崩壊が速くなる。表10にいくつかの原子核に対する横井の試算例を示す²⁵⁾。

表10 β崩壊の半減期短縮の計算例

親核	E β . max (keV)	自然崩壊半減期	裸イオンの崩壊半減期
³ H	18.6	12.3年	12.2年
¹⁰⁷ Pd	33.2	6.5×10 ⁴ 年	2.2×10 ⁴ 年
¹⁵¹ Sm	76.3	90年	8.2年

②非弾性散乱(クーロン励起を含む)によるβ崩壊の加速

⁸⁵Krのように基底状態よりも励起状態の核異性体の方がβ崩壊半減期が短い場合がある。このような場合には、クーロン励起や原子核の非弾性散乱により核種を変えずに核異性体を作ってやれば実効的にβ崩壊半減期を短くできる。

同じことは、X線或はγ線レーザーの吸収による励起を使っても可能である。

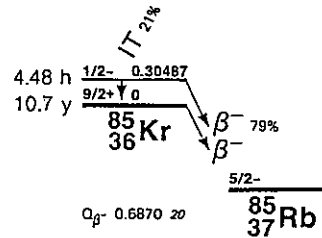


図17

V. まとめ

以上、消滅処理について簡単に述べてきたが、まとめとして、最近の各国の動向について以下に示す。

米国：

- ・ 1976～1979年の間、ORNLを中心として、群分離・消滅処理に関する技術、リスク、コスト等に関する総合評価が行われた。この段階の評価では、消滅処理を行う強いインセンティブはないと言う結果を得た。(ORNL-5566) しながら、1990年にその後の規制上の展開、技術の進歩等を考慮して再評価を行い、その結果、 ^{99}Tc と ^{129}I のみはインセンティブが存在するかもしれないという結論を得た。(ORNL/TM-11650、同書の翻訳はPNC TN8510 92-003)
- ・ LANLでは、1990年より陽子加速器と未臨界熔融塩炉とのハイブリッドシステムによる消滅処理法の研究を開始し(ATW計画)、現在研究中。(Nucl. Instr. Meth., A320 (1992)336等)
- ・ BNLでは、1991年より陽子加速器と未臨界固体炉とのハイブリッドシステムによる消滅処理法の研究を開始し(PHOENIX計画)、現在研究中。(BNL-46365(1991))
- ・ その他、ANL等でも研究されている。

ヨーロッパ：

ECのプロジェクトとしては、消滅処理研究は行われていないが、基礎的な関連研究が行われている。

- ・ EC共同体超ウラン研究所(TUI)では、TRUの燃料・化学に関する研究を行っている。
- ・ ドイツでは照射実験によるTRU核データ評価を行っている。
- ・ フランスでは、SPIN計画として群分離・消滅処理に関する研究を開始した。
- ・ PSIでは、陽子加速器を利用した消滅処理、アクチナイドサンプルの照射実験等を行っている。(PSI-Proceedings92-02)

ロシア：

- ・ ロシアでは、LANL類似のシステムでの消滅処理について研究を行ってい

る。(PSI-Proceedings92-02等)

日本：

- ・原研では、陽子加速器と未臨界炉とのハイブリッドシステムでの消滅及び原子炉による消滅の研究を行っている。また、鉛ターゲットに対する陽子照射実験を行っている。(PSI-Proceedings92-02、核変換研究会報告書PNC TN8100 92-011、原子核研究第36巻第6号等(1992))
- ・電中研では高速炉を利用したTRUの消滅処理研究を行っている。また、TUIと共同でTRUの照射実験も行っている。
- ・事業団では加速器あるいは原子炉を利用したFP消滅処理研究、そのほかに新しい消滅処理法の提案、核反応断面積の測定等を行っている。(FPの消滅処理研究PNC TN8410 92-083、核変換研究会報告書PNC TN8100 92-011等)

表11、12に最近、提案された加速器を利用した消滅処理方法の現状及び、各消滅処理法のまとめ²⁷⁾を示す。

表11 加速器を利用した消滅処理研究の現状

研究機関	消滅方法	対象核種	備考	発表論文等
LANL	陽子加速器と未臨界溶融塩炉とのハイブリッドシステムを利用して 10^{16} の熱中性子束を発生させ、消滅処理を行う。(ATW)	MA FP	MA処理量350kg/y、 FP処理量650kg/y	C.D.Bowman et al., Nucl. Instr. Meth., A320(1992)336.
原研	陽子加速器と未臨界固体燃料炉とのハイブリッドシステムを利用して 4×10^{15} の高速中性子束を生させ、消滅処理を行う。	MA	MA処理量350kg/y	T.Takizuka, PSI-Proceedings 92-002 (1992)112.
BNL	陽子加速器と未臨界固体燃料炉とのハイブリッドシステムを利用して消滅処理を行う。(PHOENIX)	MA I		C.J.Van Tuyle, BNL-46365(1991).
ITEP	LANLと類似の陽子加速器と未臨界溶融塩炉ハイブリッドシステムを利用して消滅処理を行う。	MA	MA処理量500kg/y	V.D.Kazaritsky et al., Proceedings 92-002(1992)174.
PSI	陽子加速器から陽子を直接、MAターゲットに照射し核破砕反応で消滅。2次中性子はFP消滅あるいは燃料増殖に使用。	MA (FP)	MA処理量75-90kg/y	H.U.Wenger et al., Proceedings 92-002(1992)512.

MA: Minor actinides

FP: Fission products

表12 消滅処理方法のまとめ (FP)

(a) 原子炉

炉型	溶融塩燃料炉	金属燃料炉
	Taube (1976)	PNC (1991)
熱出力 (MW)	7000	3500
中性子束 ($10^{15} n/cm^2 S$)	20	3
実効半減期 (年)	9	15
装荷量 (kg)	5460	5750
処理速度 (kg/年)	416	220
発生量 (kg/年)	100	50

(b) 加速器

加速粒子	電子	陽子		重陽子
	制動輻射 (γ, n)	核破砕 (p, sp)	核破砕-2次中性子 (γ, n)	μ 触媒核融合 ($n, 2n$)
消滅方式				
ビーム出力 (MW)	400	900	900	200
加速エネルギー (MeV)	100	500	1500	4000
ビーム電流 (mA)	4000	1800	600	50
消滅エネルギー (MeV)	4700	570	510	200
実効半減期 (年)	1	1	1	1
装荷量 (kg)	5.9	110	119	62
処理速度 (kg/年)	4.1	76	8	43

(c) 新しい消滅処理法

消滅処理	慣性核融合 ($n, 2n$)	Free Ion Target法 ($n, 2n$)	Moving Target法 (n, γ)
装置	レーザー 重イオン加速器	重陽子静電加速器 磁場閉じ込め装置	微粒子静電加速器 磁場閉じ込め装置 中性子源 (原子炉)
対象核種	^{90}Sr	^{137}Cs	^{99}Tc
装置仕様	(出力) 1.4 GWth (中性子発生数) 6.33×10^{20} 個/s	(D_2^+ 入射器) 2.3 A, 10 MeV (イオン密度) 10^{15} 個/cm ³	(微粒子入射器) 0.7 A (電荷密度) 3×10^{14} 個/cm ³
消極エネルギー (MeV)	6.3	40	5×10^{-4}
実効半減期 (年)	—	1.4	1.6×10^{-3}
装荷量 (kg)	—	63	0.05
処理速度 (kg/年)	570	32	22

表 1 2 消滅処理方法のまとめ (TRU)

(a) 原子炉

炉型	専焼炉		発電炉	
	金属燃料	粒子燃料	軽水炉	高速炉
熱出力 (MW)	170	1200	3410	2500
中性子束 ($10^{15} n/cm^2 S$)	3.6	8.4	0.37	3.3
実効半減期 (年)	9.5	4.0	14	18
装荷量 (kg)	666	2065	180	1450
処理量 (kg/年)	61	335	9	55
発生量 (kg/年)	—	—	24	35

注：核分裂のみを考慮

(b) 陽子加速器

方式	直接照射	ハイブリッド	
		高速中性子	熱中性子
加速エネルギー (GeV)	1.5	1.5	1.6
加速電流 (mA)	300	39	125
実効半減期 (年)	1	8.8	0.2
消滅エネルギー (MeV)	350	18	45
装荷量 (kg)	150	3160	100
処理量 (kg/年)	100	250	350

(c) 核融合炉

方式	トカマク、D-T Fusion 第一壁直後に装荷、高速中性子
熱出力 (MW)	2600
第一壁中性子負荷	$10 MW/m^2$
中性子束 ($10^{15} n/cm^2 S$)	4.1
実効半減期 (年)	4.7
装荷量 (kg)	140000
処理量 (kg/年)	19000

- 参考文献 -

- 1) M. Steinberg, G. Wotzak and B. Manowitz, BNL 8558(1964).
- 2) H. Takahasi, N. Mizoo and M. Steinberg, BNL-28779(1980).
- 3) W. C. Wolkenhauer, B. R. Leonard, Jr and B. F. Gore, BNWL-1772(1973).
- 4) K. J. Schneider, BNWL-1900(1974).
- 5) B. Bulow et al., "Handbook on Nuclear Activation Cross-Sections", IAEA TECHNICAL REPORTS SERIES No.156, IAEA, VIENNA(1974).
- 6) S. Pearlstein, Astrophys. J., 346(1989)1049.
- 7) J. F. Janni, Atomic Data and Nuclear Data Tables 27(1982)147.
- 8) M. Taube, Nucl. Sci. Eng. 61, 212(1976).
- 9) 土橋他, 日本原子力学会誌, No.11, Vol130(1988).
- 10) 大竹他, 原子力工業, No4, Vol. 35(1989).
- 11) 高下他, "F P 消滅処理用原子炉の研究", PNC N8410 91-139(1991).
- 12) 核変換技術開発ワーキンググループ平成元年度報告書,
PNC ZN8410 91-017(1991).
- 13) K. Konashi et al., Proc. Int. Conf. on Emerging Nucl. Energy Systems, ICENES'91, Monterey, California(USA) June 16-21, 1991.
- 14) C. D. Bowman et al., Nucl. Instr. Meth., A320 (1992)336
- 15) T. Takizuka, PSI-Proceedings 92-02, 112(1992).
- 16) Y. Kato et al., PSI-Proceedings 92-02, 133(1992).
- 17) C. J. Van Tuyle et al., BNL-46365(1991).
- 18) V. D. Kazarisky et al., PSI-Proceedings 92-02, 174(1992).
- 19) T. Kase et al., Muon Catalyzed Fusion 6, 512(1991).
- 20) 小無他, "F P の消滅処理研究", PNC TN8410- 92-083(1992).
- 21) 核変換技術開発ワーキンググループ昭和63年度報告書, PNC N4410 89-002(1989).
- 22) W. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. O. Rogers, SLAC-265(1985).
- 23) 中原他, JAERI-M 82-198(1982).
- 24) J. F. Briesmeister, LA-7396-M(1986).
- 25) 郷農他, "昭和63年度核変換基礎過程勉強会報告書", (1989)
- 26) H. U. Wenger et al., PSI-Proceedings 92-02, 512(1992).

27) ” 「核変換研究会」報告書” , PNC TN8100 92-011(1992).

28) FNT研究専門委員会・中性子利用ワーキンググループ, ” 中性子利用ワーキンググループ報告書, 日本原子力学会(1989).