

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. 6

[技術情報室]

TRUリサイクル研究に関する検討報告書

1992年12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

社 内 資 料
PNC 8420 93-003
1992年12月



TRUリサイクル研究に関する検討報告書

TRUリサイクル検討ワーキンググループ*

要 旨

本ワーキンググループは、平成4年9月17日に検討を開始し、平成4年12月3日までの約3ヶ月間に亘り、TRU核種をリサイクルするため、新しいいくつかの核燃料サイクルプロセス概念とそのための施設、再処理を始めとする各プロセスから発生する廃棄物の量とその処理及びTRU燃料の形態、仕様、規格、核不拡散性の評価等について検討を行った。本報告書は、ワーキンググループでの議論と検討結果についてまとめたものである。

検討を通して、TRUリサイクルに必要な、再処理、燃料製造、炉心特性、廃棄物等技術的側面と核不拡散性等政策的な側面からその特質のいくつかは明らかにしたが、多くの今後開発すべき課題を有しており、これらの整合性を図った、或いは最適なリサイクルシステムはどうあるべきか、今後より総合的な検討、議論を進める必要があると考える。

* 付録1：TRUリサイクル検討ワーキンググループメンバー一覧参照

目 次

| | |
|---|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 新再処理プロセスについて | 3 |
| 2.1. 再処理プロセスの選定とプロダクト | 3 |
| 2.2. 高レベル廃液中のTRU核種分離プロセスとしてのTRUEX法の特徴及びプロセス設計の考え方 | 3 |
| 3. 新燃料製造プロセスについて | 7 |
| 3.1. 転換プロセスの選定 | 7 |
| 3.2. 燃料製造・加工プロセスの選定とプロダクト | 8 |
| 3.3. 転換、燃料製造・加工プロセスを含めたトータル評価 | 8 |
| 4. 遠隔自動化の見通しについて | 9 |
| 4.1. 転換施設から見たTRU転換プロセスの遠隔自動化の見通し | 9 |
| 4.2. プル工場から見たTRU燃料製造・加工プロセスの遠隔自動化の見通し | 10 |
| 5. 新プロセスから発生する廃棄物の種類及び量 | 13 |
| 5.1. 新再処理から発生する廃棄物の種類及び量 | 13 |
| 5.2. TRUEXプロセスから発生する廃棄物の種類及び量 | 13 |
| 5.3. 新燃料製造プロセスから発生する廃棄物の種類及び量 | 13 |
| 6. TRU燃料設計について | 16 |
| 6.1. TRU燃料の炉心特性に与える影響 | 16 |
| 6.2. 希土類元素の核的評価 | 20 |
| 7. 核不拡散のトータル評価について | 21 |
| 8. 研究開発課題及び施設の概念 | 23 |
| 8.1. 実施すべき研究開発課題 | 23 |
| 8.2. 施設の概念 | 24 |
| 9. 検討結果 | 25 |
| 10. おわりに | 31 |
| 11. 謝辞 | 34 |
| 12. 引用文献 | 35 |

図一覧

表一覧

図-1~15

表-1~44

付録1

付録2

付録3

1. はじめに

エネルギー資源の大半を海外に依存している我が国は、資源を最大限有効に利用するため、プルトニウムを効率良くなりサイクルする核燃料サイクル技術の開発を推進している。

一方、世界的にはウラン資源の開発は順調であり、天然ウランの市況は緩んでいる。また、軽水炉用濃縮ウランの供給についても、当分の間不足の心配はない。こうした資源供給の安定ということもあり、軽水炉定着の基調は当分変化しそうもなく、従って、軽水炉へのMOX利用も緩やかなテンポでしか進んでいない。

こうした中で、高速増殖炉の開発を進め、プルトニウム利用を積極的に進めようとする我が国の路線が、必ずしも十分な理解と支持を得られていないのが昨今の状況であろう。この背景には様々な要因があるが、その主たるものは、高速増殖炉の経済性について確たる見通しが得られないこと、高速炉の開発をさらに進めるための財政負担に英、独等は耐えられないこと、米、独、英等大多数の先進国は当分プルトニウムに依存しなくともよいエネルギー事情にあること、STARTの合意、二極冷戦の終結、ソ連邦の崩壊等により、軍事用プルトニウムが過剰となる一方、水平拡散問題が改めてクローズアップされてきたこと等が挙げられよう。我が国にとってこそ、プルトニウムの利用によりエネルギー供給の安定化を図ろうとすることは、極めて重要な選択であると考えられるが、多くの国ではプルトニウムをエネルギー資源と見なさなくて事足りる。こうした国では、プルトニウムは軍事物質としてのみ見なされるか、又は環境面から、プルトニウムは安全に処分されるべき廃棄物と見なされる。或は、全く逆に、開発途上国であっても、将来の選択肢としてプルトニウムの利用を掲げる国もある。

このような状況にあって、プルトニウム利用を進める上で当面障害となっているように見える幾つかの問題に焦点を当て、その打開を図ろうすることは大変に重要であり、本検討とりまとめの動機となっている。即ち、プルトニウムのリサイクル利用に伴って発生する高レベル廃棄物、TRU廃棄物等の処理・処分の問題、比較的高濃度のプルトニウムを取り扱うことに伴う核拡散対策の問題等に関し、一層改善された核燃料サイクルの一つとして、TRUリサイクルシステムを検討の対象に据えるということである。¹⁾

TRU燃料に関する研究は、PNC内ではこれまで消滅処理という観点から、炉心核設計研究が比較的進んでおり、TRUを5%程度まで含む大型高速炉の均質炉心および非均質炉心は、充分成立するとの検討結果は、既に得られていた。²⁾

廃棄物の地層処分に於いては、高レベル放射性廃液中の核種を分離しない場合と、TRU、Sr/Cs、Tc等をできるだけ分離した場合とでは、潜在的毒性指数の値が経過年数に対して全体的に一桁下がると言う試算もなされている。

今回我々は、炉心核特性について、希土類のTRU燃料に与える影響の検討を行ったところ

- 1) 希土類元素が多くなると、燃料の燃焼反応度が大きくなり、5%程度が限度となる。
- 2) 径方向ブランケットに希土類を含むTRUを添加しても、炉心特性に殆ど影響を与

えず、また、希土類を含むTRUの添加量も炉心に添加する場合より多くできると考えられる。

と言う結果を得た。^{3), 4)}

このような核的検討も含め本検討会では、TRU核種をリサイクルするため、新しいいくつかの核燃料サイクルプロセス概念とそのための施設・設備、再処理を始めとする各プロセスから発生する廃棄物の量とその処理及びTRU燃料の形態、仕様、規格、核不拡散性の評価等について検討を行い、重要ないくつかの特性を明らかにした。以下に、これまでに行った検討の内容を報告する。

2. 新再処理プロセスについて

新再処理プロセスの概念は、2つのケースが考えられる。

Case1. は、再処理工程の第二サイクルに於て、NpをPu製品側に回収するための運転条件を定めることにより、Minor ActinideのうちのNpをPuと共にリサイクルすることができる。なお新再処理プロセスに於て(Pu+U)の混合抽出を行うために、Pu第三サイクルをスキップすることは検討対象としないこととする。

Case2. は、再処理工程の第一サイクルでのラフィネートをTRUEXプロセスへ移送し、ここで、Am, Cm等のMinor Actinideを回収し、ここで得られたTRU溶液と、再処理からのNpを移行させたPu製品溶液及びU精製工程からのU 製品溶液の三者を混合し、転換工程へ移送するいわゆる新再処理プロセスの導入である。新再処理プロセスの概念の一例を図-1に示した。

それぞれのプロセスの選定とプロダクトについては、2.1及び2.2で述べることとする。

2.1. 再処理プロセスの選定とプロダクト

2.で述べた2つのケースに於て、再処理プロセスでは、NpをPu製品側に回収するための運転条件を定めること以外特に変更はないため、プロダクトの算出にあたっては、NpをPu製品に移行させることを前提とする。

新再処理プロセスからのプロダクトを考えるには、検討に先立ち、基準となる使用済み燃料を設定する必要がある。ここでは、軽水炉の高燃焼度化に伴い、今後多く再処理が予想されることを考慮し、基準燃料として、PWR燃料、燃焼度55,000MWD/t、比出力46MW/t、冷却期間3年の使用済み燃料を設定し、ORIGEN2M86により、生成核種の計算を行った。計算の前提条件を表-1に、また、照射後燃料の特性を表-2に示した。

これらを前提として、各工程に於ける各核種の分配係数等を考慮し、新再処理プロセスから生産される、Pu製品溶液、U製品溶液及びラフィネート溶液（ここからTRUEXプロセスを経て、Minor Actinide等の核種が回収される。）の推定計算を行った。なお、推定計算は前提条件として、Npは可能な限りPuと共に回収することとし、Am, Cm等のTRU核種は、全量ラフィネート溶液に随伴するものとした。また、1日の処理量は、0.7tとする。これらをもとに、新再処理プロセスに於ける、核物質収支図の一例を作成した。核物質収支図（例）を図-2に示す。

2.2. 高レベル廃液中のTRU核種分離プロセスとしてのTRUEX法の特徴及びプロセス設計の考え方

再処理高レベル廃液中に含まれる、TRU核種を分離するためのプロセスが備えるべき要件の一つは、Purexプロセスとの成立性が確保されることで、そのためには選定するプロセスが充分なTRU分離能力を持つことに加え、スケールアップ性に代表される工学

的発展性も見通す必要がある。TRU核種分離が可能な湿式プロセスとして、現状ではイオン交換法、沈殿法及び溶媒抽出法が挙げられる。溶媒抽出法は、金属精練の分野での工業化に対し十分実績のあるプロセスであり、基本的には、常温操作で操作されるので、安全性に優れ、かつ抽出装置材料は比較的安価な物で済む。

一般的に抽出反応速度は速い為、反応装置のコンパクト化が可能で、連続及び遠隔操作化も比較的容易に達成される。使用済み溶媒は再生され、リサイクル使用が可能であることにより、二次的廃棄物の発生を低減化できることなどが特徴的である。

TRU核種分離用の抽出剤は、大きくリン系と非リン系に別れ、リン系は酸性及び中性的配位座数が、単座及び二座のキレート剤が中心となっている。非リン系は、アミン、アミド系が主に研究されている。

最近は、性能の優れた二座配位型抽出剤に感心が集まり、動燃においても、1990年度後半から、原子力委員会及びオメガ計画の方針を受け、有機リン系の二座配位子型抽出剤であるCMPO(O₂D[IB]CMPO)を用いた、TRU分離プロセスの研究を進めている。⁵⁾

TRUEX法で最も重要なことは、通常の30%TBP/n-ドデカンPurex溶媒に極めて少量のO₂D[IB]CMPOを混ぜることで両抽出剤が相乗的に改質され、全く抽出特性の異なる抽出剤(TRUEX溶媒) が出来上がることである。また、注目すべき特性はこの溶媒が0.5モルの低硝酸濃度から5モルの高硝酸濃度まで多価のTRU及びランタニドを極めて効率良く抽出する性能を持ち、TBP/CMPO/希釀剤の系では、種々の希釀剤との組み合わせに於いて幅広く相両立性が認められることである。

O₂D[IB]CMPOとTBPとの混合溶媒(TRUEX溶媒) によるTRUEXプロセスの特徴を以下にまとめると。

- 1) CMPOの添加量はTBPに対し1/7~1/5でよい。従って、混合溶媒の物理的性質及び安定性は、Purex溶媒のそれと殆ど同様である。TBPの添加量は対象液が高レベルラフィネットの場合は1.0Mで問題はないが、高レベル濃縮廃液の場合は第三相生成を回避するため、TBP濃度、操作温度の増加、あるいは高レベル濃縮廃液の希釀が必要となる。
- 2) 多座配位型抽出剤の特徴である、広範囲の硝酸領域からの、Ⅲ、Ⅳ、Ⅵ価TRUの定量抽出が可能である。
- 3) 高レベル廃液の硝酸濃度調整工程が不要である。また、抽出条件での分配比は硝酸濃度依存性が低いため、抽出操作が容易である。
- 4) 高い除染性が期待できる。
- 5) 炭酸ソーダは、劣化溶媒の α 、 γ 核種の除去に有効であり、とくに廃溶媒の処分時に於ける最終除染に使用できる見通しを得た。
- 6) CMPOによるTRU分離プロセスは1)、2)、3)の理由でPurexプロセスと同じ抽出

サイクル構成が適用される。

TRUEXプロセスはPurex溶媒をベースとしているので、Purexプロセスとの両立性も良い。従って、Purexの技術開発で養ったハード技術（清澄技術、抽出技術等）がそのまま転用できる利点も指摘できる。

主な課題としては、

- 1) TRU及び希土類元素は、TRUEXプロセスで同一挙動をとるため、その分離が必要となれば、そのためのプロセスを付加しなければならない。
- 2) 易抽出性の妨害核種（例えばRu）に対するインヒビター、難逆抽出性アクチニド（例えばPu）に対するソルトフリーの逆抽出剤の開発が必要である。
- 3) 廃溶媒処分法として、現行の有機リン系の廃溶媒処分法が適用できるかの検討、さらに完全に無機物にまで分解する技術の開発が望まれる。

以上の様な知見をもとに、再処理Purexプロセスより発生する、高レベルラフィネートを主体とする廃液よりTRUを回収する工程を検討した。プロセス構築のための前提あるいは条件を下記にまとめる。

- 1) 分離対象液は第一サイクル高レベルラフィネート（HAR）を主体とし、酸回収濃縮液を添加した液とする（第三相回避のため高レベル濃縮液とはしない）。
HAR中間槽では溶解液中から除去された不溶解残渣が合流する設計となっている。従って、TRUEX工程に先立ち不溶解残渣を再度除去する工程を設ける。
- 2) フィード液中の易抽出性核種、Zr, Mo等を非抽出性とするためにシュウ酸等の錯化剤を添加する必要がある。シュウ酸はTRUEX工程のラフィネートに排出されるため、FP濃縮工程、あるいはその前段階で分解する。
- 3) TRUEX工程にはインベントリーの少ない遠心抽出器を採用する。これにより、廃溶媒発生の抑制を図る。
- 4) 濃縮前の水相には希釀剤洗浄を施し、溶解したTBP 及びCMPOの除去を図る。廃希釀剤は、そのまま廃棄物とするかプロセス溶媒に戻す。プロセスに戻す場合には、溶媒インベントリーが増すため廃溶媒の一部となる。
- 5) TRU分離促進剤には廃棄物抑制の観点から、HFの様な高腐食性化合物あるいは炭酸ソーダの様な塩は、可能な限りその使用を控える。そのためのTRUEXプロセスの改良、高度化研究を行なう（現在R&D中）。

6) 劣化溶媒洗浄法として、活性アルミナ等による二次洗浄を施さなければならない可能性がある。

7) TRU分離後のFP廃液は、蒸発濃縮、減容が必要である。また、蒸発濃縮の過程での脱硝及び酸回収の必要性について検討する必要がある。

図-3にTRUEXプロセスを利用するTRU核種分離工程の概念図を示す。

基準燃料をもとに、新再処理プロセスから生産される、ラフィネート溶液をTRUEX工程プロセスで処理した場合の、TRUプロダクトの推定計算を行った。推定計算は前提条件として、Am, Cm等のTRU核種は、全量TRUEXプロセスで回収するものとし、希土類元素は、3価のTRUに100%随伴し、また、Ru及びTcの一部は、TRUのプロダクトに随伴するものとした。

これらをもとに、TRUEXプロセスに於ける、核物質収支図の一例を作成した。核物質収支図（例）を図-4に示す。

3. 新燃料製造プロセスについて

これまでMOX燃料の製造は、閉じ込め機能あるいは遮蔽機能を有するグローブボック内で行われている。しかし、TRU燃料の製造は、高線量となり遮蔽を施しても、グローブボックスで行うことは不可能である⁶⁾。従って、TRU燃料製造を行う場合には、セル構造の施設が前提となる。ここでは、セル構造の施設で、TRU燃料を製造するとした場合、どのような転換工程及び燃料製造・加工工程が適切かと言うプロセスの最適化を図るためのプロセス選定を行った。

それぞれのプロセスの選定とプロダクトについては、3.1及び3.2で述べることとする。

3.1. 転換プロセスの選定

従来、動燃事業団に於ける転換方法は、マイクロ波加熱脱硝法を採用している。この方法は、Pu溶液及びU溶液を任意の混合割合で転換できるという、核不拡散上の観点からも大変優れた方法である。

しかし、今回の検討対象であるMinor Actinide、R.E等を多く含む溶液を転換する場合、得られる製品が飛散しやすい粉末であるため、セル内での保守作業等を想定した場合、バックグラウンドの上昇により線量が高くなる等の理由から、必ずしも最適な転換法とは言い難い。

そこで、マイクロ波加熱脱硝法を含め、他の分野で溶液から粉末あるいはスラッジ状に転換する方法を、いくつか選択し、TRUを含む溶液の転換法について検討を行った。検討対象とした転換法の概略を表-3に示す。

検討対象とした転換法の中から、最適な方法を絞り込むため、プロセスの簡単さ、取り扱い上の安全性、製品の品質等の評価項目を決め、点数付けを行った。評価にあたっては、1点が最低点、5点が最高点とし、評価点に1点の付いた方法は、総合点が特に良い場合を除き今後の検討対象から除外することとした。

その結果、点数の高い順に、ドラムドライヤー法で混晶スラリーを得る方法、化学沈殿法で混晶スラリーを得る方法、ゲル化法で混晶顆粒を得る方法の順となつたが、凍結乾燥法が10点台であることを除き余り差はなかった。比較評価の特長として、混晶粉末を製品として得る方法は、保守時のクリーンナップ作業による被ばく等の観点から微粉が発生するために1点がつき検討対象から除外された。比較評価の結果を表-4に示した。

比較の結果、製品（プロダクト）として混晶顆粒、混晶スラリーを得る転換方法が有力と判断した。従って、燃料製造工程と結びつけて、どの転換法が適切かを選定することとした。

ただし、混晶スラリーを得る転換法は、焙焼・還元等何らかの方法で混晶スラリーを得る前に、酸化物形態にする等の検討が必要と思われる。

3.2. 燃料製造・加工プロセスの選定とプロダクト

TRU燃料の製造・加工を行うには、被ばく上の観点から、現在のようなMOX燃料を取り扱うグローブボックスでは困難である。従って、シンプルで、しかも保守性、作業性等のやり易い工程が望まれる。また、転換工程からの、製品粉末の形状（例えば、粉末、顆粒等）によって、最適な成型法を選択する必要がある。

ここでは、製造・加工工程を、成型工程と加工工程に分け選定を行った。成型、加工工程では、セラミックス分野で採用されている方法をいくつか選択し、原理、長所、短所を見ながら、プロセスの簡単さ、取り扱い上の安全性、製品の品質等の観点から、点数付けを行った。その結果、点数の高い順に、混晶顆粒を出発物質する金型成型法、バイパック法、混晶スラリーを出発物質とする押出成型法、微細顆粒を出発物質とする押出成型法となった。ここで、混晶粉末を出発物質とする金型成型法、ホットプレス法、微細顆粒を出発物質とする金型成型法は、保守時のクリーンナップ、被ばく等の観点から微粉が発生するために1点が付き、検討対象から除外された。成型法の概略を表-5に、比較評価表の結果を表-6に示した。

また、転換、製造・加工プロセスに於いては核物質のロスが無いものとし、再処理、TRUEXプロセスからの製品をそのまま燃料とした場合の、核物質収支図を図-6に、新燃料プロセスから生産される、TRU燃料の組成例を図-7に示した。

3.3. 転換・燃料製造・加工プロセスを含めたトータル評価

3.1.では転換法として、ドラムドライヤー法で混晶スラリーを得る方法、化学沈殿法で混晶スラリーを得る方法、ゲル化法で混晶顆粒を得る方法、噴霧熱分解法で混晶微細顆粒を得る方法が検討対象として残った。また、3.2では、混晶顆粒を出発物質する金型成型法、バイパック法、混晶スラリーを出発物質とする押出成型法、微細顆粒を出発物質とする押出成型法が選定された。

これらの結果、得点だけで決定するなら、ゲル化（液滴ゲル化法）－金型成型法あるいはゲル化（液滴ゲル化法）－バイパック法の組み合わせであるが、ドラムドライヤー法または化学沈殿法－押出成型法の組み合わせ、噴霧熱分解法－押出成型法との組み合わせも得点に大きく差のことから今後の検討対象として残すこととした。

TRU燃料製造のフローを図-5に示す。

4. 遠隔自動化の見通しについて

TRU燃料の転換、製造、加工を行う場合、高線量となるため、MOX燃料を取り扱っているグローブボックスでの作業は不可能である。従って、セル内に遠隔、自動化の設備、機器を設置し、燃料の転換、製造、加工を一貫して行える設計としなければならない。ここでは、これまで開発した、10KgMOX転換施設及びプル第三開発施設の自動化レベル、信頼性のレベルを基準として、TRU燃料を製造するために、設備、機器が目標とすべき遠隔、自動化の技術的見通し及び目標とするレベルについて、各プロセスの設備、機器毎に検討を行った。

尚、再処理工程は、現状に於てもセル作業であり、遠隔自動化の実績を多く有していることから、今回の検討対象には加えなかった。

4.1. 転換施設から見たTRU転換プロセスの遠隔自動化の見通し

10KgMOX転換施設では、受入・溶液混合の溶液取扱工程と、脱硝・焙焼還元～粉碎～中間貯蔵～ロット混合～充填までの粉末取扱工程、及び廃液・廃気処理工程を持っていいる。

このうち溶液取扱工程は、再処理工場と同様、主要な機器がセル内に設置されており、サンプル採取作業と電磁弁の保守作業（年1回程度）を除けば、遠隔自動化は現状でもほぼ達成されている。サンプル採取と電磁弁の保守作業の遠隔自動化についても、詳細設計での機械設計レベルで対応可能であると思われる。従って溶液取扱工程の遠隔自動化については、施設の操業開始時に発生する初期故障を除けば、特に問題はない。

廃液・廃気処理工程は、グローブボックス内に設置されているが、現在でも遠隔自動化の程度は高く、残る問題も詳細設計での材料及び機械設計レベルで対応可能と思われる。従って廃液・廃気処理工程の遠隔自動化についても、施設の操業開始時に発生する初期故障を除けば、特に問題はない。

一方、粉末取扱工程は、定常運転はほぼ遠隔自動化を達成しているものの、機器の補助作業や保守のための手作業が残っており、またこのためにグローブボックスから放射性廃棄物を多量に発生している。手作業としては以下のようない項目がある。

- 1) 実在庫調査に伴うクリーンアップ作業（年1回）
 - 2) 一部の気送設備及び混合機の閉塞除去作業（月数回）
 - 3) 気送設備自動運転の補助作業（月数回）
 - 4) 焙焼還元炉の一部の部品交換作業（年数回）
 - 5) 焙焼還元炉の排気管の閉塞除去作業（年1回）
 - 6) その他、隨時機器補修
 - 7) GB内廃棄物整理作業（年数回）
 - 8) GB付帯設備（グローブ、フィルター等）の定期的な保守作業
- 保守を要する原因としては、疲労や腐食、放射線による材料の劣化、粉末飛散による

材料の磨耗・線量増加、粉末の閉塞、及び機器設計のミスなどがある。材料の劣化については、現在取り扱っている程度の放射線レベル及び化学的活性度を桁違いに超えないならば、これまでの経験や基礎的な試験データから、遠隔自動化に必要な信頼性を確保することは可能と思われる。一方、機器設計のミスについては、コールド試験及びウラン試験段階で徹底的に洗いだす必要がある。

粉末取扱工程における粉末飛散及び粉末閉塞の問題は、転換粉末の粉末物性（特に $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の微細粉末の粒度分布）が変わらないならば機器の機械設計レベルで対応せざるを得ない。現状の転換施設では、クリーンアップによっても回収できない粉末として毎年新たに発生しており、グローブボックス内の狭所や低レベル固体廃棄物中に移行していると推定される。

TRU転換プロセスの遠隔自動化を達成するためには、第一に定常運転時に粉末を飛散させないこと、次に粉末閉塞ができるだけ低減し、閉塞発生時にもできるだけ粉末を飛散させないで処置できること、飛散した粉末は発生場所において回収できるようにすること、グローブボックス内に粉末回収の困難な場所を作らないことが肝要である。特に脱硝直後の粉末は、水分含有率が多く化学形態が安定でなく閉塞を生じやすい。一方焙焼還元以降の粉末は非常に飛散し易い性質がある。これらの問題を解決するためには、段階的な機器開発が必要であり、現時点では完全な遠隔自動化の見通しは無い。定常運転は遠隔自動化できても、保守は遠隔操作にとどまると思われる。そして保守頻度をいかに低減させるか、遠隔保守をいかに容易に行なえるよう設計するかが焦点になると思われる。それとともに、転換～ペレット製造工程を一施設に收め、焙焼還元以降の工程を大幅に短縮することは有効であろう。

4.2 プル工場から見たTRU燃料製造・加工プロセスの遠隔自動化の見通し

(1) 燃料製造設備・機器の自動化の現状

現在製造設備・機器の自動化が最も進んでいる施設は、プル第三開発室である。この施設の自動化は、以下の設計思想で建設された物である。

- ① 運転は、遠隔全自動
- ② 保守、クリーンナップは、グローブ作業（手作業）
- ③ 設備・機器の信頼性は、1ロット処理中ノンストップ

しかし、これまでの運転実績から評価すると表-7及び表-8の自動化レベル、表-9及び表-10の信頼性レベルは、相方とも1のレベルと言える。従って、プル第三開発室の設計思想を満足していないのは、設備・機器の自動化と言うより、設備・機器の信頼性である。

(2) 燃料加工・組立設備・機器の自動化の現状

燃料加工・組立設備・機器の設計思想も燃料製造設備・機器と同様の思想である。これまでの運転実績から表-7～表-10に示すレベルで言えば自動化レベルは1、信頼性レベルは3に近い。従って、当初の設計をほぼ満足する完成度を有していると言える。

(3) TRU燃料製造・加工に必要な自動化技術

TRU燃料製造・加工に必要な自動化レベル及び信頼性レベルを検討する前提としては、プル第三開発室FBRライン (5tonMOX/Year).規模の処理量で、現在の燃料と同等の品質管理レベルを有し、不良品、スクラップ等は再処理側に戻しリサイクルして使用するものとする。

TRU燃料製造・加工工程では、取り扱う原料の線量が高いことを考慮し、保守、クリーンナップをロット処理毎に行うとすれば、保守、クリーンナップ作業も遠隔にならざるを得ない。従って、表一7~10に示した自動化のレベルは3、信頼性のレベルは3が必要である。

自動化レベル3は、遠隔操作型の設備・機器とする必要があるため、設備・機器の設計から開始することとなり、開発には相当の予算、時間を要するものと思われる。ただし、PNCでは、既にホットラボでの実績もあることから、その技術能力は充分有していると思われる。また、信頼性レベル3に到達するためには、まず人、予算、体制の強化を行い研究開発を進め信頼性レベル2をクリアーした後、更に段階的に信頼性レベルを向上して行かなければならない。

燃料加工・組立工程は、ペレット製造工程と比較して信頼性レベルが高く、特に自動化レベルの向上を重点とした研究開発が必要と思われる。

(4) TRU燃料製造・加工工程設備・機器個々の評価

TRU燃料製造・加工に必要な自動化レベル及び信頼性レベルを3と位置づけが、設備・機器個々には、その達成レベルに違いがある。

工程には、粉末を取り扱う設備・機器、ペレットを取り扱う設備・機器又は密封線源として取り扱う設備・機器等があるが、ここでは、ペレット製造工程設備・機器と加工・組立工程設備・機器に分けて個々の設備・機器に於ける自動化レベル及び信頼性レベルの検討を実施した。

①ペレット製造工程設備・機器

原料工程では、高線量の粉末を取り扱うことから容易に人が近付けないと考えられる。従って、自動化レベル及び信頼性レベルは3となる。しかし、この設備は、複雑な動きではなく単純であるため、粉末飛散防止、粉末集塵気孔、位置決め機構等の開発で信頼レベル3は可能である。また、遠隔保守についても故障発生が少ないのであり、部品の数も比較的少ないため、部品の遠隔操作のための改良も多くの時間を必要としないと思われる。

造粒工程の自動化レベル及び信頼性のレベルは3となる。造粒・整粒工程での信頼性は既に3のレベルにある。しかし、自動化レベル3の達成に必要な遠隔保守についての開発は未着手であり、遠隔保守用の部品開発が必要である。この工程では、細かな機器調整のどうさが少ないとや、部品も比較的大きいことから、遠隔操作のための改良も多くの時間を必要としないと思われる。

ペレット成型工程は、粉末の物性変化に伴うダイスの変更や微調整を頻繁に必要とすることから、今後多くの課題を解決しなければならない。特にプレス本体の機能を分割し可能な限り密封・遮蔽ボックス外に配置するような工夫も含めて遠隔操作部品の削減や遠隔操作型プレスの開発が必要と考えられる。

また、成型後のグリーンペレットの寸法、重量測定機器についても信頼性向上に向けた研究開発が必要である。この開発は、後に述べる検査機器の開発により解決可能である。

焼結工程は、自動化レベル1、信頼性レベル4まで到達している。この工程は、定期点検時の清掃ロボットの開発やモリブデン皿のパレタイズ機器の信頼性向上など、さらなる高度化に向けた技術開発を進める計画であり、TRU燃料製造で被ばくが問題となることはない。

検査工程は、ペレットのハンドリングの信頼性向上が重要である。自動化レベルは1で対応可能であるが、信頼性レベルは3まで向上させる必要がある。信頼性レベル3を達成させるためには、駆動部の耐久性試験やペレット屑の連続回収機構の開発といった、細かでしかも地味な試験研究が重要となる。検査工程の設備・機器の遠隔保守化は部品点数の多さや部品の細かさを考慮すると、実現は極めて難しいと考えられる。

この工程では、ペレットの保管場所の遮蔽強化を図り、保守作業を行う場合は、核物質の退避という現在の第三開発室の設計思想を取り入れることで、被ばく対策は可能と考えられる。

表-11～13にTRU燃料製造工程設備・機器に必要な自動化、信頼性レベルを示す。

②加工・組立工程設備・機器

加工・組立工程設備・機器の完成度の高いことは先に述べたが、この工程はペレットを一つの集合として取り扱うことという観点から、被ばくに対する考慮が必要である。

現在グローブボックス作業で行っている、充填・溶接工程及び燃料要素解体工程については、自動化レベル3が必要である。これらの設備・機器に於いては、遠隔保守が可能な設備・機器構成にするための研究開発が必要となる。また、信頼性向上に向けての開発が必要である。尚、この工程は、ペレットの破片等の散乱もあり、その対策が必要である。

燃料要素をペレット単位で処理するワイヤ巻き付け工程、燃料要素総合検査工程、タグガスカプセル開封工程及び集合体組立工程の設備・機器については、自動化レベルを3まで向上させ、多少の故障は遠隔で補修可能とする。尚、これらの設備・機器の信頼性レベルは既に2に達している。

加工・組立工程設備・機器のモックアップ試験を必要とするのは、特に充填・溶接工程と燃料要素解体工程である。

表-14及び表-15にTRU燃料加工・組立工程設備・機器に必要な自動化、信頼性レベルを示す。

5. 新プロセスから発生する廃棄物の種類及び量

新プロセスから発生する廃棄物の種類、量を推定するため、現在、再処理及び製造・加工各プロセスから発生する廃棄物の種類、量について調査を行った。調査結果をそれぞれ表-16及び図-8に示す。これをもとに以下5.1～5.3で詳細な検討を進めた。

5.1. 新再処理から発生する廃棄物の種類及び量

新再処理から発生する廃棄物量を推定するため、平成元年度から平成3年度までに再処理工場から発生した、可燃性、難燃性及び不燃性廃棄物並びに低放射性濃縮液及び極低放射性濃縮液の調査を実施した。（表-16参照）

その結果、平成元年度から平成3年度の可燃、難燃及び不燃性廃棄物の合計は、非TRU廃棄物で約3,200本、TRU廃棄物で約1,300本であった。ただし、これらの区分は暫定的な物であり明確ではない。また、1年を通じて一定した発生量ではなく、定期検査に入ると発生量は増加する。

濃縮液発生量は、平成元年度から平成3年度の間調査したが、平成2、3年度に於て、ほぼ再処理工場の計画運転レベルである平均90t/年の処理を達成しており、平成3年度の値が今後の推定データとして有効と考えられる。アスファルト固化体発生率は、低放射性系が約4.1本/m³、極低放射性系が約3.6本/m³である。

新再処理工程に於いては、基本的にプロセスの変更はなく、従って発生する廃棄物の量、種類には殆ど変更はないと考えられるが、年間処理量が変動することによって、インターチャンペーン中に発生する廃棄物量が増加するために、年間発生する廃棄物量も変動することとなる。

5.2. TRUEXプロセスから発生する廃棄物の種類及び量

2.2.で検討した工程及び物質収支に基づき、TRUEXプロセスから発生すると考えられる廃棄物を推定した。検討結果を表-17に示す。

高レベルFP廃液及び蒸発濃縮液以外の廃棄物については、工程の抽出機器として遠心抽出器を採用した場合、発生量を著しく低減化できるものと予測される。

5.3. 新燃料製造プロセスから発生する廃棄物の種類及び量

3.3.の転換、燃料製造・加工プロセス（転換工程を含む）で選定した、プロセスから発生する廃棄物の量及び種類について検討を行った。発生すると予測される廃棄物の種類について表-18～表-22に示した。

また、廃棄物（廃液を含む）の発生量の推定計算にあたっては、製造量、TRU元素を含有する燃料組成等が密接に関係するため、計算前提を限定して行った。

(1) 計算前提

①TRU燃料の炉特性評価に於て、燃焼可能と考えられる希土類元素、TRU元素を含有する燃料組成のものを想定する。

燃料組成：Pu約16%、TRU約1.5%、希土類約4.8%

②再処理からのPu低除染溶液全量（37l）に、前述の燃料組成となるように、U濃縮液、TRU溶液を混合し、転換、製造するものとする。

③①の燃料組成とするためには、Pu低除染溶液全量（37l）、U濃縮液約99l、TRU溶液約74lを混合し転換することとなる。従って、出発原液の合計は210lである。このときのTRU燃料製造量は約51kg—Metalとなる。

④年間製造量は、もんじゅによる集合体照射試験を想定し、2～3体／年（約100kg—TRU酸化物燃料）とする。

(2) 廃液発生量の推定

①化学沈殿法の場合、 $210 \times 2l$ の硝酸溶液（約3.2N； $(6 \times 37 + 0.2 \times 99 + 5.7 \times 74) / 210$ ）を中和するためにアンモニア溶液を使用する。例えば1Nのアンモニア溶液を使用する場合 $210 \times 2 \times 3.2 = 1344l$ 使用することとなる。従って、ゲル生成過程で少なくとも1760lの廃液が発生する。

②ゲル化法（内部ゲル化法の場合）では、420lの硝酸溶液にHMTA（ヘキサメチレンテトラミン）及び尿素を、原液に対して約20%程度の容量を加えることとなり、液滴生成工程で $210 \times 2l + (210 \times 0.2) \times 2l = 500l$ の廃液が発生する。また、ゲル化工程で、シリコンオイルが約50~100l、ゲル洗浄工程で溶媒（四塩化炭素あるいはアセトン）が原液の2~3倍量発生する。

③ドラムドライヤー法及び噴霧熱分解法では、原液の硝酸がそのまま気化し回収酸として生成する。

④プル工場は、乾式工程であるが、TRU燃料製造プロセスは湿式工程が含まれるため、上記以外に高、低レベルのTRUの工程廃液（工程洗浄用、機器洗浄用及びプロセス廃液）が発生する。（発生量は不明）

(3) 放射性廃棄物発生量の推定

①プル工場（5tMOX）の1年間の廃棄物発生量は、可燃廃棄物約600本、難燃廃棄物約400本、不燃廃棄物約200本である。（図-8参照）

TRU燃料の製造量を100kg/年とすると、 $100/5000=1/50$ であるから、TRU燃料製造に伴うTRU廃棄物発生量は、可燃廃棄物約12本、難燃廃棄物約8本、不燃廃棄物約4本である。この場合、各プラントに於ける製造量の違いを考慮にいれていないので、小規模、少生産であるTRU燃料の製造施設に於いては、さらに多くの廃棄物が発生すると考えられる。

②プル工場は、乾式工程であるが、TRU燃料製造工程は湿式工程が含まれるため、上記以外に高、低レベル放射性のTRU可燃、難燃廃棄物（工程除染用、機器除染用）が発生する。（発生量は不明）

（4）TRU廃棄物に対する考え方

TRU廃棄物として、低、高レベル廃液、可燃、難燃、不燃廃棄物が発生するが、これらの処分シナリオをどのように考えるか。

例えば、低、高レベル廃液を処理したとして、回収したTRU元素をリサイクルできるか？

可燃、難燃、不燃廃棄物を処理したとして、TRU元素を回収しリサイクルできるか？またその最終的な処分はどのようにするのか？

これらについては、TRU燃料製造施設を設計する前に整理されなければならない。

6. TRU 燃料設計について

6.1. TRU燃料の炉心特性に与える影響について

改良Purex+TRUEX法によって回収されるU, Pu+Np, Am+Cm+R.Eの3種類の製品溶液の混合割合をコントロールして製造されるTRU燃料について、検討項目、検討条件等を定め、FBRに装荷した場合の炉心特性の検討を行った。なお、TRU燃料の中性子発生量、発熱量及びTRU燃料の線量当量率についても合わせて検討した。^{3), 4), 7)}

(1) 検討項目

①U, Pu+Np, Am+Cm+R.Eの3種類の製品溶液の混合割合をパラメータとしたTRU燃料装荷FBRの炉心特性

(Pu富化度、燃焼反応度、増殖比、最大線出力、TRU核種インベントリー、TRU消滅率等)

解析ケースとしては次のものを選定した。

イ.基準ケース (TRUなし炉心)

ロ.TRU均質装荷炉心 (TRU: 約5%、希土類なし)

ハ.Case-1 (希土類: 約4.8%混入、TRU: 約1.5%)

ニ.Case-2 (希土類: 約19%混入、TRU: 約2.8%)

ホ.Case-3 (Npのみ: 約1.5%、希土類なし)

ヘ.Case-4 (径プランケットにTRU添加、TRU: 約5%、希土類なし)

ト.Case-5 (径プランケットにTRU添加、希土類: 約19%混入、TRU: 約2.8%)

上記ハ～トのケースの3種類の製品溶液の混合割合については、核開部プル開室の資料（別添付録2参照）に基づいて決定した。

②中性子線発生量及び発熱量

③TRU燃料の線量当量率

④TRU燃料の融点及び線出力の推定

(3) 検討条件

①Pu,TRU核種の同位体組成比

燃焼度55,000MWd/t、冷却期間3年のPWR使用済み燃料の同位体比を基本とした。（表-23参照）

②U,Pu+Np, Am+Cm+R.Eの混合割合

付録2のプル開室が提示した以下の4ケースを基に、表-24のケースを選定した。但し、

臨界調整のためPu富化度は若干調整した。 ^{99}Tc およびRuの中性子吸收効果はR.Eに含めた。

- Case1 ; (Pu+Np+Am+Cm+R.E+U) 酸化物
- Case2 ; (Pu+Np+Am+Cm+R.E+U(U/Pu=2)) 酸化物
- Case3 ; (Am+Cm+R.E) 酸化物
- Case4 ; (Pu+Np+U) 酸化物

③炉心条件

基準炉心は、表-25に示した仕様の100万kWeFBR炉心である。

④解析コード及びライブラリー

炉心計算は、JENDL-3を基にした群定数セットを用い、CITATIONコードで行った。

線源強度評価にはORIGEN-2コード、線量当量率計算にANISNコード、断面分析ライブラリーにPSL-50を使用した。

(4) 炉心燃料として装荷した場合の炉心特性³⁾

FBRに炉心燃料として装荷した場合の炉心特性の検討結果を以下にまとめた。

①炉心特性状重要な燃焼反応度は、現状の大型炉心設計では3% $\Delta k/kk'$ 程度としており、この点からTRU1.5%添加燃料では、希土類元素の混入は5%程度が限度である。しかし、制御棒本数を増加して、4% $\Delta k/kk'$ 程度程度まで燃焼反応度を許容する設計例もある。その場合希土類の混合は、10%程度が限度となる。（表-26参照）

②増殖比は希土類元素の混入によって低下し、混入率7%以上で1.0以下となる。（表-26参照）

③TRUや希土類を多量に混入させた場合、溶融線出力が低下することが予想されるため（表-27参照）、炉心燃料集合体の増加（最大線出力の低減化対策）が必要である。

④TRU消滅率は TRU添加率に依存し、TRU添加率が少ないほど消滅率も低下する。（希土類の量には余り影響されない。）TRU添加量が少ないと、消滅するのはNp-237のみとなり、他の核種は増加する。

(5) 径方向ブランケットとして装荷した場合の炉心特性⁴⁾

FBRに径方向ブランケットとして装荷した場合の炉心特性の検討結果を以下にまとめた。

①TRU又は希土類を含むTRUを径方向ブランケットに添加した場合は、炉心特性に殆ど影響を与えない。Pu富化度も基準炉心の場合と同程度でよい。（表-28参照）

②TRUの消滅に関しては、炉心全体で見ると、炉心内でのTRU生成の方が径方向ブランケットでのTRU消滅より多くなるため、TRUは消滅せずに増加する。なお、径方向ブランケット部での消滅率は5~6%であり、炉心にTRUを添加した場合の消滅率約10%より低くなる。（表-29~32参照）

③①のことから、希土類を含むTRUの添加量は、炉心に装荷した場合よりも多く出来ると考えられるため今後の検討価値は有ると思う。但し、TRUの添加量については、ブランケットでの発熱量、流量配分等を考慮して決定する必要がある。

(6) 中性子発生量及び発熱量について³⁾

TRU燃料の中性子発生量及び発熱量についての検討結果を以下にまとめた。

①TRU燃料の中性子発生量は、TRU（特に²⁴⁴Cmの量）の添加率増大に伴って大幅に増加し、5%TRU添加燃料の場合、新燃料の中性子発生量は、5%TRU添加燃料の使用済み燃料（2年冷却）の中性子発生とほぼ同じになる。²⁴⁴Cmを除きNpのみ添加した燃料の場合、中性子発生量は基準燃料（TRU無し）とほぼ同等となる。（表-33参照）

②TRU燃料の発熱量は、²⁴⁴Cmの増加に伴って増え、²⁴⁴Cmが少ない場合は²³⁸Puによる発熱が主となる。

(7) 線量当量率評価について⁷⁾

TRU燃料の線量当量率評価についての検討結果を以下にまとめた。（表-34及び別添付録2参照）

①表面に於ける線量当量率をTRU無しの基準燃料と比較すると、5%TRU添加燃料の場合、新燃料同士では約300倍、燃焼後2年冷却ではFPからのγ線が線量当量率の大部分を占めるため、照射済燃料同士では基準燃料と同等である。

②TRU1.5%添加、希土類5%添加燃料の場合、新燃料同士では約20倍、燃焼後2年冷却の照射済燃料同士では基準燃料と同等である。

③TRU2.8%添加、希土類19%添加燃料の場合、新燃料同士では約100倍、燃焼後2年冷却の照射済燃料同士では基準燃料の約1.2倍となる。

④Cmを除きNpのみ添加した燃料の場合は、新燃料同士では約1.5倍となる。また、燃焼後2年冷却の照射済燃料同士では基準燃料と同等である。

(8) 燃料としての成立性に関する今後の検討課題

今後の検討課題を以下にまとめた。

①炉心特性上TRUと希土類元素の添加率は、TRU、希土類はそれぞれ5%が限界と考えられる。従って、TRU燃料を成立させるためには、TRU製品溶液に95%以上含有する希土類元素の分離技術開発が必要となる。

②TRU燃料の発熱量は、²⁴⁴Cmの増加に依存するため、燃料製造工程、加工工程、燃料の梱包等一連の工程に於て熱対策が必要である。例えば燃料製造工程で内部ゲル化法を採用した場合、出発溶液を0°C付近に保つ必要があり、²⁴⁴Cm等の発熱によって、液滴を造る前にゲル化してしまうことが考えられる。

③燃料に5%TRUを添加した場合、新燃料の中性子発生量は使用済み燃料の中性子発生とほぼ同じになる。また、表面に於ける線量当量率は約300倍となることから、燃料製造工程、加工工程、燃料の梱包等一連の工程に於て中性子及びγ線被ばく対策が必要である。

(9) 定量的なTRU燃料の形態について

もんじゅ燃料の規格と予測されるTRU燃料の仕様の比較を表-35に示した。(4)に於ける検討の結果つぎのことが予測される。

①TRU燃料のプル富化度は、15~20%前後と考えられる。

②TRU燃料に添加できるTRU、希土類はそれぞれ最大で5%程度と考えられる。

③所定のFissile率調整を、混合或いは転換段階で行なわなければならず、TRU燃料へ添加するPu,TRU,希土類等の富化度の変動幅は、従来のMOX燃料例えば「もんじゅ」燃料よりも大幅に増えると考えられる。

④TRU燃料の、O/M比、蒸発性不純物、金属不純物等の変動幅も、「もんじゅ」燃料より大きくなると考えられる。

⑤TRU燃料の外観、寸法精度、均一度等は、もんじゅ燃料よりも相当悪くなると考え

られる。

⑥TRU燃料の、融点、熱伝導度等の物性値は、通常のMOX燃料と比較して低下する。

以上、TRU燃料は、これまでのMOX燃料ペレットに比較して相当特性の劣るものと考えなくてはならないだろう。

6.2 希土類元素の核的評価

燃焼度55,000MWd/tのPWR燃料から取り出されるR.E元素をFBRにリサイクルする場合に核的な観点から問題となるR.E元素について検討した。燃焼度55,000MWd/tのPWR燃料から取り出されるR.E元素の各同位体（以下、「R.E核種」という。）の熱炉及び高速炉のスペクトルに対して1群縮約した中性子吸收断面積を表-36^{8),9)}に示す。このように全てのR.E核種に対して熱中性子吸收断面積より高速中性子吸收断面積の方がかなり小さく $\sigma_{(Fast)} / \sigma_{(Thermal)}$ の値が $10^1 \sim 10^4$ のオーダーである。また、熱炉及び高速炉のスペクトルで1群縮約したU及びPuフィッサイルの核分裂断面積を表-37^{8),9)}に示した。これらの核分裂断面積に対するR.E核種の中性子吸收断面積の比 $\sigma_a^{(R.E)} / \sigma_f^{(Fissile)}$ を表-38に示す。

ここでこの比が大きい核種については中性子利用効率上悪影響を及ぼすものと考えられる。例えば、 $\sigma_a^{(R.E)} / \sigma_f^{(Fissile)}$ 比が1より大きいということは、Fissileが核分裂を起こす確率よりR.E核種が中性子を吸収する確率が大きいことを意味する。

この $\sigma_a^{(R.E)} / \sigma_f^{(Fissile)}$ 比が1より大きい値について表-38中で網かけを施した。このようにR.E核種をFBRにリサイクルした場合に $\sigma_a^{(R.E)} / \sigma_f^{(Fissile)}$ 比が1より大きく中性子利用効率上悪影響を及ぼすであろうと考えられる核種はPm（プロメチウム）、Sm（サマリウム）、Eu（ユウロピウム）、Gd（ガドリニウム）及びDy（デスプロシウム）にみられが、熱炉において中性子吸收断面積が大きく、中性子毒として用いられるSmやGdの $\sigma_a^{(R.E)} / \sigma_f^{(Fissile)}$ 比は高速炉においてはかなり小さくなり、他の核種との断面積の差が熱炉ほど顕著に現われない。また、これらの $\sigma_a^{(R.E)} / \sigma_f^{(Fissile)}$ 比が1より大きい核種はPWRの使用済燃料から取り出されるR.E元素のうち約2wt%を占めるに過ぎないが、R.E元素の炉心内での混合割合によっては、R.E元素が中性子吸収することにより核特性を低下させることになる。従って、R.E元素の混合割合は、核特性を今後、定量的に評価することにより定めて行く必要がある。

7. 核不拡散のトータル評価について

核不拡散の強化手段としては、(1)技術的対応 (2)保障措置の改善・強化 (3)核物質防護の改善・強化 (4)制度的手段が考えられる。TRUリサイクルについてそれぞれの観点からその核不拡散性について考察・評価した。(表-39参照)

(1) 技術的対応

TRUリサイクルの採用により、核兵器への転用抵抗性は、兵器材料としての品質の低下及び転用手数の増加により向上することが期待される。従って、サブナショナルな転用(テロリストによる盗取等)に対してはかなり有効であろう。しかしながら、日本のような原子力先進国については、結局の所プルトニウムの単体分離・抽出は技術的に可能と判断されることとなろう。このことはTRUリサイクルの採用による技術的対応は転用時間を長くするものの、これだけをもって核不拡散上充分ということにはならない。

(2) 保障措置の改善・強化

上述のことを、現行の国際(IAEA)保障措置制度の指標である「転用時間(核兵器への推定転用時間)」で見ると、TRUリサイクルは、取り扱い核物質が照射済み燃料に相当すると考えられれば、月のオーダーにランクされる可能性があり、現在のU/Puリサイクル(概ね週のオーダー)より核拡散抵抗性は向上する(表-40参照)。しかしながら、他方で査察官の接近可能性やプルトニウムの計量性の低下が考えられ、高度の遠隔保障措置システムの採用が必要である。

(3) 核物質防護措置の改善・強化

同様に、現行の核物質防護制度の防護区分で見てみると、取り扱い核物質が照射済み燃料に相当すると考えられれば、区分IIにランクされる可能性があり、現在のU/Puリサイクル(概ね区分I)より核拡散抵抗性は向上する(表-41参照)。またTRU関連施設を共同立地できれば、その核物質防護性(特に輸送頻度減少による輸送上の核物質防護性)は一層向上する。

(4) 制度的対応

これは、過去にINFCEの場を通じて議論された、地域核燃料センター、国際プルトニウム貯蔵、国際使用済み燃料貯蔵構想等の国際的な仕組みのなかでプルトニウムを管理し、プルトニウム利用の透明性を向上しようとするもので、TRUリサイクルにあっても、一層の核拡散抵抗性の確保の点から考慮に値する。

以上の結果をまとめると、TRUリサイクルの採用により、取り扱い核物質の核兵器への転用可能性は低下し、また保障措置性や核物質防護性も核拡散抵抗性の観点からは総合的に向上することが期待でき望ましい。しかしながら、これだけをもってしてプルトニウム利用推進を計るのは、国際的な理解を得る上で困難であろう。日本が核兵器への

転用を行なわないという国際的な透明性をより一層計る必要がある。そのためには、現行の保障措置・核物質防護措置の改善・強化のほかに、上述した国際的な制度的対応（例えば、TRUリサイクルセンターの国際的共同運営、プルトニウムの国際管理等）についても再考する必要がでてくるものと思われる。

8. 研究開発課題及び施設の概念

8.1. 実施すべき研究開発課題

(1) 再処理プロセスにおける研究開発課題

再処理プロセスでは、Npをいかに効率良くPuの製品と共に同伴させるかというのが一つの課題である。そのため、ビーカ試験及びOTLに於ける小型試験装置によるNp抽出条件（温度、酸濃度、流量等）の把握、さらには東海再処理工場による実試験が必要である。また、Pu製品中にUを同伴させPu,U比を制御する必要がある場合には、Pu, U濃度コントロールに関するR&Dが必要である。

再処理プロセスにおける研究開発課題を表-42にまとめた。

(2) TRUEXプロセスにおける研究開発課題

TRUEXプロセスはPurex溶媒をベースとしているため、過去高速炉燃料再処理技術開発で養った多くの技術を適用できるという利点がある。よって多くの核種分離技術の中で最も早く工業化の目途をつけやすい技術と考えられる。

しかしながら、TRUEXプロセスで得られるTRUのⅢ価と希土類元素分離技術については、表-43、表-44に示す主な分離法のどの方法を付加すべきか、あるいは新たな分離技術を創生すべきか、検討を急ぐ必要がある。

表-45、表-46にTRUEXプロセスを工学的に成立させるための主要課題とそれに対する技術の現状及び溶媒抽出プロセスの各工程毎にR&D方針をまとめた。

(3) TRU転換プロセスにおける研究開発課題

転換法はいくつかのオプションがあるが、共通した課題として、Pu, U及びTRU製品溶液をいかに均一に混合するかといった、原液の均一混合調整法の検討が必要である。

顆粒製品を得る方法（噴霧熱分解法、ゲル化法）では、金型あるいは燃料ピン（バイパック法の場合）への充填性を良くするために何水準かの顆粒調整が必要であり、そのために顆粒形状（粒径、密度等）調整条件の検討が必要である。

湿式転換法（化学沈殿法、ゲル化法）では、最適沈殿生成条件、HMTA,尿素／原液比といった出発溶液の調整法の検討が必要である。

これらいずれの転換法に於いても硝酸系の廃液発生は避けられず、転換プロセスからの廃液処理技術、TRU元素回収技術の研究は不可欠である。更に、ゲル化法、化学沈殿法の場合は、シリコンオイル、硝酸アンモニウム等の廃棄物が発生するため、これらの処理技術開発も不可欠となる。

その他、共通技術として、転換プロセスからTRUを含んだ可燃、難燃性の廃棄物が発生するため、廃棄物処理技術開発、遠隔操作用装置の技術開発が必要である。

転換プロセスにおける研究開発課題を表-47～51にまとめた。

(4) TRU燃料製造・加工プロセスにおける研究開発課題

混晶顆粒を用いて金型成型法を採用する場合は、混晶顆粒の強度評価、バインダーの選択、成型圧等の成型条件の検討、脱脂、焼結及び脱ガス条件の把握等の燃料製造に関する検討及びピン加工技術開発が必要である。

混晶微細顆粒または混晶スラリーを用いた押出成型法の場合には、原料の混練条件、最適脱気条件、押出成型条件、焼結条件、脱ガス条件等の燃料製造に関する検討及びピン加工技術開発が必要である。

混晶顆粒を用いたバイパック法では、顆粒の強度評価、焼結条件、顆粒の配合法等の検討及びピン加工技術開発が必要である。

その他、共通技術として、燃料製造・加工プロセスからTRUを含んだ可燃、難燃性の廃棄物が発生するため、廃棄物処理技術開発、遠隔操作用装置の技術開発が必要である。また、(3)、(4)の共通技術として、臨界管理、保障措置技術開発が必要である。

燃料製造・加工プロセスにおける研究開発課題を表-47～51にまとめた。

8.2. 施設の概念

東海事業所では、現在、湿式分離研究とTRU燃料に関する基礎的な研究を行っている。今後は、現在の研究を発展させ、実HLWからのTRU湿式分離のプロセス研究、照射用TRU燃料の製造及びこれに伴うTRUに関する基礎研究など、TRUリサイクルの実証に向けた研究開発を行う計画である。

TRUリサイクルの研究開発を行なう上では、多量のTRUを取り扱う必要が生じるが、TRUはプルトニウムに比べて中性子線、 γ 線の放出率が大きく、従来のグローブボックスの様な設備では取り扱いが困難である。従って、TRU研究のためには新たな設備が必要である。更に、TRU研究については未知の分野であるため、TRU燃料開発一つをとっても、基礎物性測定から始める必要があるなど、TRUリサイクルの実証までには様々な研究開発課題があり、内容とスペースを伴った、本格的なTRUリサイクル研究開発施設（以下「TRUリサイクル研究センター」と言う。）が必要である。

TRUリサイクル研究センター（図-9参照）では、核種分離、転換、製造・加工プロセス、TRU基礎研究の研究開発を始め、製造したTRU燃料の照射試験及び炉物理研究を行なうためのTRU研究炉、照射後試験施設等を設け、一貫したTRUリサイクル研究開発を行ない、基礎データの取得を中心に実施する。

また、本施設は、世界的に見ても数少ない本格的なTRU研究施設であること及び核燃料利用の国際的な透明性を示すため、広く国内外の研究の場として利用できるようにする。

これらの研究を行なうためには、HLW及びTRU燃料の輸送を極力少なくすること及びTRU廃棄物の処理、処分等の問題があるため、廃棄物処理施設、再処理工場等を有する東海事業所に設置するべきである。

8.1.で述べた研究を行なうための施設概略図及びセル概略図を図-10～15に示した。

9. 検討結果

検討の結果を以下にまとめる。

- (1) 基準燃料として、PWR燃料、燃焼度55,000MWD/t、冷却期間3年の使用済み燃料を設定し、ORIGEN2M82により、生成核種の計算を行い、1日の処理量を、0.7tに設定した場合、新再処理プロセスから生産される、Pu製品溶液中のPu及びNpの金属重量は、それぞれ、8,140g、740gであった。また、U製品溶液中のUの金属重量は、約651Kgであった。
- (2) 基準燃料をもとに、新再処理プロセスから生産される、ラフィネート溶液をTRUEX工程プロセスで処理した場合、TRUプロダクトの金属重量は、それぞれ、Am374g、Cm62g、Tc44g、R.E12.5Kg、Ru73gである。その他、若干のPu,U,Npが含有する。
- (3) 転換プロセスについて検討した結果、ドラムドライヤー法、化学沈殿法、ゲル化法の順となったが余り差はなかった。比較評価の特長として、混晶粉末を製品として得る方法は、保守時のクリーンナップ作業による被ばく等の観点から微粉が発生するため検討対象から除外された。また、製品（プロダクト）としては、混晶顆粒、混晶スラリーが有力と判断された。
- (4) 燃料製造・加工プロセスについて検討した結果、混晶顆粒を出発物質する金型成型法、バイパック法、混晶スラリーを出発物質とする押出成型法、微細顆粒を出発物質とする押出成型法の順となったとなった。また、製品（プロダクト）としては、ペレット、バイパック燃料、長尺燃料が有力と判断された。
- (5) 転換・燃料製造・加工工程を含めたトータル評価では、ゲル化（液滴ゲル化法）一金型成型法あるいはゲル化（液滴ゲル化法）一バイパック法、噴霧熱分解法一押出成型法の組み合わせが有力と判断された。しかし、ドラムドライヤー法または化学沈殿法一押出成型法の組み合わせも得点に大きく差のないことから今後の検討対象として残すこととした。
- (6) TRU転換プロセスの遠隔自動化を達成するためには、第一に定常運転時に粉末を飛散させないこと、次に粉末閉塞ができるだけ低減し、閉塞発生時にもできるだけ粉末を飛散させないで処置できること、飛散した粉末は発生場所において回収できるようにすること、セル内に粉末回収の困難な場所を作らないことが肝要である。特に脱硝直後の粉末は、水分含有率が多く化学形態が安定でなく閉塞を生じやすい。一方焙焼還元以降の粉末は非常に飛散し易い性質がある。これらの問題を解決するためには、段階的な機器開発が必要であり、現時点では完全な遠隔自動化の見通しは無い。定常運転は遠

隔自動化できても、保守は遠隔操作にとどまると思われる。そして保守頻度をいかに低減させるか、遠隔保守をいかに容易に行なえるよう設計するかが焦点になると思われる。

(7) TRU燃料製造・加工に必要な自動化レベル及び信頼性レベルは、それぞれ3のレベルが必要である。自動化レベル3は、遠隔操作型の設備・機器とする必要があるため、設備・機器の設計から開始することとなり、開発には相当の予算、時間を要するものと思われる。また、信頼性レベル3に到達するためには、まず人、予算、体制の強化を行い研究開発を進め信頼性レベル2をクリアした後、更に段階的に信頼性レベルを向上して行かなければならない。燃料加工・組立工程は、ペレット製造工程と比較して信頼性レベルが高く、特に自動化レベルの向上を重点とした研究開発が必要と思われる。

ただし、設備・機器個々には、その達成レベルに違いがある。

(8) 新再処理工程に於いては、基本的にプロセスの変更はなく、従って発生する廃棄物の量、種類には殆ど変更はないと考えられるが、年間処理量が変動することによって、インター・キャンペーン中に発生する廃棄物量が増加するために、年間発生する廃棄物量も変動することとなる。

(9) TRUEXプロセスから発生すると考えられる廃棄物を推定した結果、高レベルFP廃液及び蒸発濃縮液以外の廃棄物については、工程の抽出機器として遠心抽出器を採用した場合、発生量を著しく低減化できるものと予測される。

(10) TRU燃料の製造量を100kg/年とすると、転換工程からの推定廃液発生量は、ゲル化法（内部ゲル化法の場合）では、約500lの廃液が発生する。また、ゲル化工程で、シリコンオイルが約50～100l、ゲル洗浄工程で溶媒（四塩化炭素あるいはアセトン）が原液の2～3倍量発生すると考えられる。また、TRU燃料製造工程はこれ以外に湿式工程が含まれるため、さらに高、低レベルのTRUの工程廃液（工程洗浄用、機器洗浄用及びプロセス廃液）が発生する。（発生量は不明）

(11) TRU燃料の製造量を100kg/年とすると、TRU燃料製造に伴うTRU廃棄物発生量は、可燃廃棄物約12本、難燃廃棄物約8本、不燃廃棄物約4本である。この場合、各プラントに於ける製造量の違いを考慮にいれていないので、小規模、少生産であるTRU燃料の製造施設に於いては、さらに多くの廃棄物が発生すると考えられる。また、TRU燃料製造工程は湿式工程が含まれるため、上記以外に高、低レベル放射性のTRU可燃、難燃廃棄物（工程除染用、機器除染用）が発生する。（発生量は不明）

(12) TRU燃料製造施設では、TRU廃棄物として、低、高レベル廃液、可燃、難燃、不燃廃棄物が発生するが、これらの処分シナリオをどのように考えるか。また、可燃、難燃、不燃廃棄物を処理したとして、TRU元素を回収しリサイクルできるか、またその最終的な処分はどのようにするかについては、TRU燃料製造施設を設計する前に整理さ

れなければならない。

(13) TRU燃料の炉心特性及び一般的な特性について検討を行なった結果を以下に示す。

①TRU1.5%添加燃料では、希土類元素の混入は5%程度が限度である。しかし、制御棒本数を増加して、4% $\Delta k/kk'$ 程度程度まで燃焼反応度を許容する設計例もり、その場合希土類の混合は、10%程度が限度となる。

②増殖比は希土類元素の混入によって低下し、混入率7%以上で1.0以下となる。

③TRUや希土類を多量に混入させた場合、溶融線出力が低下することが予想されるため、炉心燃料集合体の増加（最大線出力の低減化対策）が必要である。

④TRU消滅率は TRU添加率に依存し、TRU添加率が少ないほど消滅率も低下する。
(希土類の量には余り影響されない。) TRU添加量が少ないと、消滅するのはNp-237のみとなり、他の核種は増加する。

⑤TRU又は希土類を含むTRUを径方向ブランケットに添加した場合は、炉心特性に殆ど影響を与えない。Pu富化度も基準炉心の場合と同程度よい。

⑥TRUの消滅に関しては、炉心全体で見ると、炉心内でのTRU生成の方が径方向ブランケットでのTRU消滅より多くなるため、TRUは消滅せずに増加する。なお、径方向ブランケット部での消滅率は5~6%であり、炉心にTRUを添加した場合の消滅率約10%より低くなる。

⑦希土類を含むTRUの添加量は、炉心に装荷した場合よりも多く出来ると考えられるため今後の検討価値は有ると思う。但し、TRUの添加量については、ブランケットでの発熱量、流量配分等を考慮して決定する必要がある。

⑧TRU燃料の中性子発生量は、TRU（特に²⁴⁴Cmの量）の添加率増大に伴って大幅に増加し、5%TRU添加燃料の場合、新燃料の中性子発生量は、5%TRU添加燃料の使用済み燃料（2年冷却）の中性子発生とほぼ同じになる。Cmを除きNpのみ添加した燃料の場合、中性子発生量は基準燃料（TRU無し）とほぼ同等となる。

⑨TRU燃料の発熱量は、²⁴⁴Cmの増加に伴って増え、²⁴⁴Cmが少ないと場合は²³⁸Puによる発熱が主となる。

⑩表面に於ける線量当量率をTRU無しの基準燃料と比較すると、5%TRU添加燃料の

場合、新燃料同志では約300倍、燃焼後2年冷却ではFPからの γ 線が線量当量率の大部分を占めるため、照射済み燃料同志では基準燃料と同等である。またCmを除きNpのみ添加した燃料の場合は、新燃料同志では約1.5倍となり、燃焼後2年冷却の照射済み燃料同志では基準燃料と同等である。

(14) 燃料としての成立性に関する今後の検討課題を以下に示す。

①炉心特性上TRUと希土類元素の添加率は、TRU、希土類はそれぞれ5%が限界と考えられる。従って、TRU燃料を成立させるためには、TRU製品溶液に95%以上含有する希土類元素の分離技術開発が必要となる。

②TRU燃料の発熱量は、 ^{244}Cm の増加に依存するため、燃料製造工程、加工工程、燃料の梱包等一連の工程に於て熱対策が必要である。例えば燃料製造工程で内部ゲル化法を採用した場合、出発溶液を0°C付近に保つ必要があり、 ^{244}Cm 等の発熱によって、液滴を造る前にゲル化してしまうことが考えられる。

③燃料に5%TRUを添加した場合、新燃料の中性子発生量は使用済み燃料の中性子発生とほぼ同じになる。また、表面に於ける線量当量率は約300倍となることから、燃料製造工程、加工工程、燃料の梱包等一連の工程に於て中性子及び γ 線被ばく対策が必要である。

(15) 定量的なTRU燃料の形態としては、

①TRU燃料のプル富化度は、15~20%前後と考えられる。

②TRU燃料に添加できるTRU、希土類はそれぞれ最大で5%程度と考えられる。

③所定のFissile率調整を、混合或いは転換段階で行なわなければならず、TRU燃料へ添加するPu,TRU,希土類等の富化度の変動幅は、従来のMOX燃料例えは「もんじゅ」燃料よりも大幅に増えると考えられる。

④TRU燃料の、O/M比、蒸発性不純物、金属不純物等の変動幅も、「もんじゅ」燃料より大きくなると考えられる。

⑤TRU燃料の外観、寸法精度、均一度等は、もんじゅ燃料よりも相当悪くなると考えられる。

⑥TRU燃料の、融点、熱伝導度等の物性値は、通常のMOX燃料と比較して低下する。

このように、TRU燃料は、これまでのMOX燃料ペレットに比較して相当特性の劣るものと考えなくてはならないだろう。

(16) 高速中性子のエネルギー領域に於ける、UおよびPuなどの核分裂性核種の核分裂断面積に対するR.E核種の中性子吸収断面積の比が1より大きくなるR.E核種は、Pm,Sm,Eu,GdおよびDyに見られたが、これらの核種はPWRの使用済み燃料から取り出される全R.E元素の約2wt%に過ぎないが、R.E元素の炉心内での混合割合によっては、R.E元素が中性子吸収することにより核特性を低下させることになる。従って、R.E元素の混合割合は、核特性を今後、定量的に評価することにより定めて行く必要がある。

(17) 核不拡散性について考察した。内容は以下の通りである。

TRUリサイクルの採用により、取り扱い核物質の核兵器への転用可能性は低下し、また保障措置性や核物質防護性も核拡散抵抗性の観点からは総合的に向上することが期待でき望ましい。しかしながら、これだけをもってしてプルトニウム利用推進を計るのは、国際的な理解を得る上で困難であろう。日本が核兵器への転用を行なわないという国際的な透明性をより一層計る必要がある。そのためには、現行の保障措置・核物質防護措置の改善・強化のほかに、国際的な制度的対応（例えば、TRUリサイクルセンターの国際的共同運営、プルトニウムの国際管理等）についても再考する必要がでてくるものと思われる。

(18) 実施すべき研究開発課題を以下に示す。

①再処理プロセスでは、Npをいかに効率良くPuの製品と共に同伴させるかというのが一つの課題である。そのため、ビーカ試験及び小型試験装置によるNp抽出条件（温度、酸濃度、流量等）の把握、さらには東海再処理工場による実試験が必要である。また、Pu製品中にUを同伴させPu, U比を制御する必要がある場合には、Pu, U濃度コントロールに関するR&Dが必要である。

②TRUEXプロセスはPurex溶媒をベースとしているため、過去高速炉燃料再処理技術開発で養った多くの技術を適用できるという利点がある。よって多くの核種分離技術の中で最も早く工業化の目途をつけやすい技術と考えられる。

しかし、TRUEXプロセスで得られるTRUの3価と希土類元素分離技術については、主な分離法のどの方法を付加すべきか、あるいは新たな分離技術を創生すべきか、検討を急ぐ必要がある。

③転換法はいくつかのオプションが考えられるが、共通した課題として、Pu, U及びTRU製品原液の均一混合調整法の検討が必要である。

顆粒製品を得る方法（噴霧熱分解法、ゲル化法）では、金型あるいは燃料ピン（バイ

パック法の場合)への充填性を良くするための顆粒形状(粒径、密度等)調整条件の検討が必要である。

化学沈殿法、ゲル化法では、最適沈殿生成条件、HMTA,尿素／原液比といった出発溶液の調整法の検討が必要である。

これらいづれの転換法い於いても硝酸系の廃液発生は避けられず、転換プロセスからの廃液処理技術、TRU元素回収技術の研究は不可欠である。更に、ゲル化法、化学沈殿法の場合は、シリコンオイル、硝酸アンモニウム等の廃棄物が発生するため、これらの処理技術開発も不可欠となる。

④混晶顆粒を用いて金型成型法を採用する場合は、混晶顆粒の強度評価、バインダーの選択、成型圧等の成型条件の検討、脱脂、焼結及び脱ガス条件の把握等の燃料製造に関する検討及びピン加工技術開発が必要である。

混晶微細顆粒または混晶スラリーを用いた押出成型法の場合には、原料の混練条件、最適脱気条件、押出成型条件、焼結条件、脱ガス条件等の燃料製造に関する検討及びピン加工技術開発が必要である。

混晶顆粒を用いたバイパック法では、顆粒の強度評価、焼結条件、顆粒の配合法等の検討及びピン加工技術開発が必要である。

その他、共通技術として、臨界管理、保障措置技術開発が必要である。

(19) TRUリサイクルの実証までには様々な研究開発課題があり、内容とスペースを伴った、本格的なTRUリサイクル研究センターが必要である。

これらの研究を行なうためには、HLW及びTRU燃料の輸送を極力少なくすること及びTRU廃棄物の処理等の課題への適切な対応が必要であり、再処理工場及び関連する廃棄物処理施設を有する東海事業所に設置するのが最も効率的と考えられる。

10. おわりに

本ワーキンググループでは約3ヶ月をかけて、以上の検討を実施した。このワーキンググループの中で、9.の結果以外に、今後検討あるいは議論が必要と思われるいくつかの点についてまとめてみた。

(1) Non-proliferation性又はAnti-proliferation性がどう向上するかに関して、提案しようとするサイクルについての評価が必要となるが、これは相当に厄介な問題である。核物質の転用抵抗性は増すかもしれないが、プルトニウムの計量性は低下するとう、利害得失が交錯する可能性がある。従って、技術的観点からだけでは、核不拡散性が向上すると言いきることができなくなる可能性も考えておかなければならない。

(2) この検討は、地層処分技術が成立することを前提としてはいるが、サイクルの輪の外への廃棄物の"GOES OUT"（輪から外へ出て行く廃棄物）を最少とするサイクルの検討は非常に重要である。

軽水炉の使用済み燃料を、炉から排出した組成に可能な限り近い状態でリサイクルすることを考えた場合、リサイクルする先は軽水炉より高速炉の方が良さそうであるが、その際、どうしても余分なもの、邪魔になるものだけを除去する処理を行なう。ウランは多すぎるから、不要な分は除き、除いた分は将来に備え保管する。また、核分裂生成物も多すぎるから除かなければならぬが、何のために何を除くか。更に、炉を運転する上で支障になる物質は除去しなければならない。

このようなタイプのリサイクルが成り立つとすると、この燃料サイクルは、「限りなく使用済み燃料に近い燃料を高速炉にリサイクルし、物理的に成り立つぎりぎりの燃料サイクルである。」と言える。

一度このような条件を満たすサイクルはどのようなものかを調べたうえで、サイクル技術上のその他の制約条件を考慮の上、軽水炉から高速炉への過渡期において、研究開発の対象とするサイクルを明らかにしていくことが、世界のコンセンサスを得るための良いアプローチではないかと思われる。

具体的には、TRUの他に、廃棄物のリスク低減に寄与する核分裂生成物、燃料の希釈剤として使用可能な核分裂生成物等をリサイクルし、その分ウランのリサイクルを減らすことの可能性を調べることである。

(3) (2) のサイクルを調べるためにも、また今提案されつつある"NP サイクル"¹⁰⁾を調べるためにも、高速炉の非均質な炉心ブランケット構成の可能性をシステムティクに追及することが大変重要である。この場合、増殖比は可変パラメータである。

(4) 地層処分等廃棄物問題への影響については、定量的に評価する必要がある。特に²³⁷Npの地層処分上の負担軽減、Pu等の同様の問題等が重要である。また、新たな再処理、燃料製造等に伴う被ばくの評価も併せて必要である。

(5) Pu, UにNp, Am, Cmあるいは希土類元素を加えてうまく固溶させることができるか、また、どの程度までなら添加してうまく燃料とすることができるかは、全く未知の問題であり、新たなイノベーションを必要とするかもしれない。また、単に多成分系であるというだけではなく、かなりの発熱が予想され、高温の原料の成型に相当の困難も予想される。これらの点は研究開発の重点領域である。

更に、取り扱う物質は強い放射能と高い発熱性を有しており、これに対応できる遠隔操作技術の開発も不可欠である。

このような燃料製造の困難さの問題から、出来上がる燃料の性能は相当低く抑えられ、経済性を犠牲にする可能性が十分にある。従って、出来るだけ品質のよい燃料を、出来るだけ低成本で製造する技術を狙うという我々の基本的スタンスが、益々重要となる。

(6) 本検討の結果以上のような"今後の検討テーマ"が出てきたが、ここでこの検討作業を行なった際の問題意識を振り返って整理しておきたい。

①検討対象としたサイクルは、軽水炉技術が現在よりも一層成熟した時代に於ける軽水炉の使用済み燃料から、ウラン資源の利用効率の向上、廃棄物処分の負担軽減及び核拡散抵抗性の向上の3つの目標に沿うリサイクルを考えるということで、対象に据えたものである。この3つの目標を個別に見れば、それぞれのメリットは小さいかもしれないが、総合的に見て、検討の価値があるのではないか。

②TRUEX法については、過去3年ほど検討を続けてきた結果、相当程度の知見が得られている。このため、本検討全体がTRUEX法の採用に比較的強く依存したものになっている。

③転換・製造については、従来の経験から、微粉の取り扱いを極力避け、かつ遠隔製造可能な技術を探るという観点での調査が重要と考え、広範にフィージブルな技術を検討することになった。

④このリサイクルを検討するにあたって、大型高速炉技術及び深地層処分技術は既に存在する、もしくは成立の見通しが立っているとしている。

(7) 本検討の結果、我々は、改めて次のような問い合わせにどう答えるかを問われているという点が、大変明快になったと考える。

ウラン及びプルトニウムの核分裂エネルギーを利用しようとする結果、核分裂反応に付随して生ずる核分裂生成物、TRU核種等の「新しく生み出された物質」について、我々はどうしようとしているのか。廃棄物として処理・処分するのか、新たな資源として利用するのか、いつの時代にどのようにしようとしているのか。そして、我々が新たに

TRUのリサイクルを提案するとすれば、日本全体ではその「新しく生み出された物質」はどうなるのか。つまり、いつ、どの位の量利用され、蓄積され、処分されるのか。その際の利用効率、安全性、経済性等は、現在の延長線でのプルトニウム・リサイクルの場合と比べて、どうなると評価されるのか。また、世界全体ではどうなるのか。或いは、世界に与えるインパクトは何なのか。

(8) この間に答えるための詳細な検討を行なうには、原子炉内で新たに発生する全ての元素及び核種について、核燃料サイクル全体を通じての挙動を個別に評価し、総計することが必要である。

これを、現在我々が持っている基礎データ（核データ、物性データ、プロセスデータ等）の精度に見合った詳細さで実行しなければならない。

更に、上記評価の結果をもとに、資源利用効率、経済性、安全性、核拡散抵抗性等についての評価を実行しなければならない。

(9) TRUリサイクル問題は、核分裂エネルギーの利用に伴ういくつかの重要な課題を解決しなければならないという点で、プルトニウム・リサイクル問題と本質的に同じである。但し、取り扱う技術領域は、従来のプルトニウム・リサイクルの場合よりも広くなる。従って、TRUリサイクル問題に照明をあてることは、従来のプルトニウム・リサイクル問題の現状と将来を明らかにすることでもある。

以上の様に、TRUリサイクル研究は、技術的側面と政策的な側面から、たくさんの課題を有しており、これらの整合性を図った解決を求めるべく、今後検討、議論を進める必要がある。

11. 謝辞

本ワーキンググループの検討を進めるに当たり、「TRU燃料の炉心特性に与える影響の検討」について、大洗工学センター技術開発部中性子工学グループの若林利男担当役にお願い致しました。この書面を借りて御礼申し上げます。

12. 引用文献

- 1) 岸本洋一郎ら；「TRUサイクルの課題と展望」
PNC ZN8020 92-004 (1992)
- 2) 山岡光明、石川眞、林 秀行、若林利男；「高速炉によるTRU消滅処理に関する研究 (I) 」
PNC ZN9410 91-365 (1991)
- 3) 若林利男；「新プロセスから生産されるTRU燃料の炉心特性に与える影響の検討」
中性子工学技術資料 NF-92-013 (1992)
- 4) 若林利男；「希土類を含むTRU燃料の炉心特性に与える影響の検討 (2) 」
中性子工学技術資料 NF-92-014 (1992)
- 5) 小沢正基、根本慎一、河田東海夫；「二座配位型抽出剤による再処理高レベル廃液中のアクチニド元素の湿式分離研究」
PNC TN130 92-002 (1992)
- 6) 山本偉政ら；「TRU核種含有燃料取扱いに係わる線量当量評価 (I) 」
PNC ZN8410 92-199 (1992)
- 7) 山本偉政、中村邦浩；「新再処理プロセスから生産されるTRU燃料の線量当量評価について (改訂版) 」
プル開室E-シート プル開-04-217 (1992)
- 8) ORIGEN-2 Code Library,"Advanced Oxide LWR-Pu/U".
- 9) ORIGEN-2 Code Library,"PWRU".
- 10) 新再処理・Pu利用戦略検討W/G；「新再処理・Pu利用戦略検討W/G報告書 (案) 」
(1992)

図一覧

- 図-1 新再処理プロセス概念図
- 図-2 新再処理プロセスにおける核物質収支(例)
- 図-3 TRUEX法を応用した分離プロセス概念図
- 図-4 TRUEXプロセスにおける核物質収支(Tc回収TRUEXの場合)
- 図-5 TRU燃料製造フロー
- 図-6 再処理工程から転換、燃料製造工程の核物質収支
- 図-7 新プロセスから生産されるTRU燃料組成例
- 図-8 PFPP工程別放射性廃棄物発生量
- 図-9 TRUリサイクル研究センター鳥瞰図
- 図-10 TRUリサイクル研究センター1階平面図
- 図-11 TRUリサイクル研究センター2階平面図
- 図-12 転換セル・核種分離セル・受入セル平面図
- 図-13 TRU燃料製造セル・ピン加工セル平面図
- 図-14 集合体組立・梱包室平面図
- 図-15 TRU燃料製造セル概要

表一覧

- 表-1 新再処理検討対象燃料
- 表-2 照射後燃料(ORIGEN2M86)の特性
- 表-3 転換方法の違いによる長所・短所の比較
- 表-4 TRU燃料転換プロセスの選定
- 表-5 成型方法の違いによる長所・短所の比較
- 表-6 TRU燃料製造工程の選定
- 表-7 設備・機器の自動化レベルの定義
- 表-8 設備・機器の自動化レベルと必要な測定機器
- 表-9 設備・機器の自動化レベルの定義
- 表-10 設備・機器の信頼性レベルと必要な測定機器
- 表-11 TRU燃料製造工程設備・機器に必要な自動化・信頼性レベル
- 表-12 TRU燃料製造工程設備・機器に必要な自動化・信頼性レベル(続き)
- 表-13 TRU燃料製造工程設備・機器に必要な自動化・信頼性レベル(続き)
- 表-14 TRU燃料加工工程設備・機器に必要な自動化・信頼性レベル
- 表-15 TRU燃料加工工程設備・機器に必要な自動化・信頼性レベル(続き)
- 表-16 再処理施設における廃棄物発生量
- 表-17 TRUEXから発生する廃棄物の組成及び量の推定
- 表-18 TRU燃料製造工程における予測発生廃棄物形態の問題点と対策案
- 表-19 TRU燃料製造工程における予測発生廃棄物形態の問題点と対策案
- 表-20 TRU燃料製造工程における予測発生廃棄物形態の問題点と対策案
- 表-21 TRU燃料製造工程における予測発生廃棄物形態の問題点と対策案
- 表-22 TRU燃料製造工程における予測発生廃棄物形態の問題点と対策案
- 表-23 各元素の同位体組成比
- 表-24 Pu低除染溶液、U精製溶液、TRU溶液の混合によるTRU燃料組成の計算例
- 表-25 100万kWe基準FBRの主要炉心仕様
- 表-26 炉心特性の比較(平衡サイクル)
- 表-27 各TRU組成及び混入率での燃料溶融線出力、燃料融点
- 表-28 炉心特性の比較(平衡サイクル、ブランケット装荷)
- 表-29 TRU元素のインベントリ、消滅率(炉心全体)
(Case-4、TRUブランケット装荷、TRU:5%、希土類なし)
- 表-30 TRU元素のインベントリ、消滅率(ブランケット部)
(Case-4、TRUブランケット装荷、TRU:5%、希土類なし)
- 表-31 TRU元素のインベントリ、消滅率(炉心全体)
(Case-5、TRUブランケット装荷、TRU:2.8%、希土類:19%)
- 表-32 TRU元素のインベントリ、消滅率(ブランケット部)
(Case-5、TRUブランケット装荷、TRU:2.8%、希土類:19%)
- 表-33 中性子発生量及び発熱量の計算結果 (ORIGEN2)
- 表-34 新燃料と使用済燃料の線量当量率比較
- 表-35 もんじゅ燃料とTRU燃料の仕様比較

- 表-36 希土類元素の核的評価
- 表-37 希土類元素の核的評価
- 表-38 希土類元素の核的評価結果
- 表-39 核拡散抵抗性評価
- 表-40 完成したプルトニウム又はウラン金属構成要素への推定物質転換時間
- 表-41 核物質防護の区分
- 表-42 再処理において実施すべきR&D項目
- 表-43 主なアクチニド/ランタニド分離法(溶媒抽出法)
- 表-44 主なアクチニド/ランタニド分離法(イオン交換法)
- 表-45 TRUEXプロセスの基本的課題とPNCにおける解決方針
- 表-46 TRUEXプロセスの基本的課題とPNCにおける解決方針
- 表-47 TRU燃料製造プロセスにおいて実施すべきR&D項目
- 表-48 TRU燃料製造プロセスにおいて実施すべきR&D項目
- 表-49 TRU燃料製造プロセスにおいて実施すべきR&D項目
- 表-50 TRU燃料製造プロセスにおいて実施すべきR&D項目
- 表-51 TRU燃料製造プロセスにおいて実施すべきR&D項目

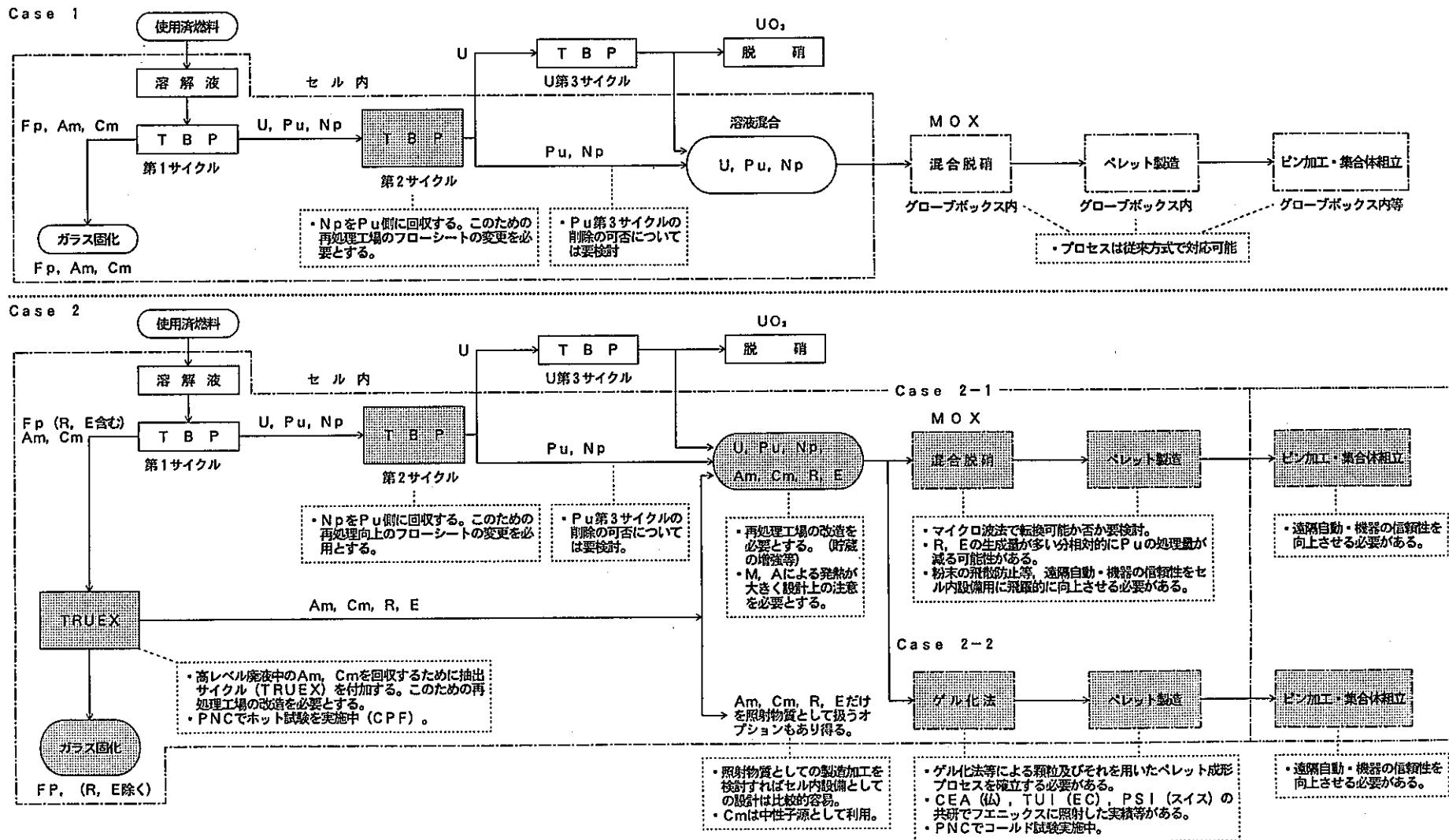


図-1 新再処理プロセス概念図

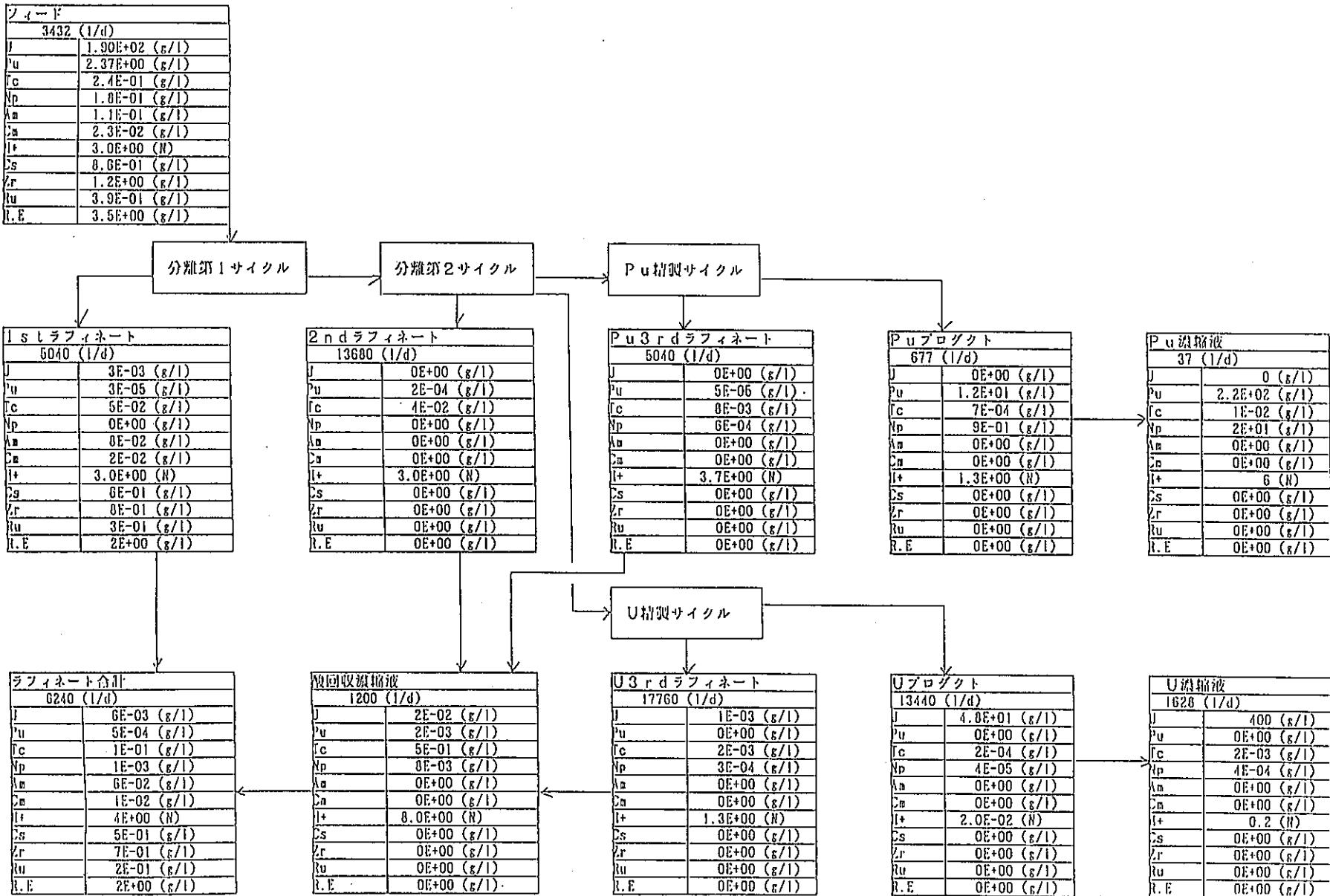


図-2 新再処理プロセスにおける核物質収支(例)

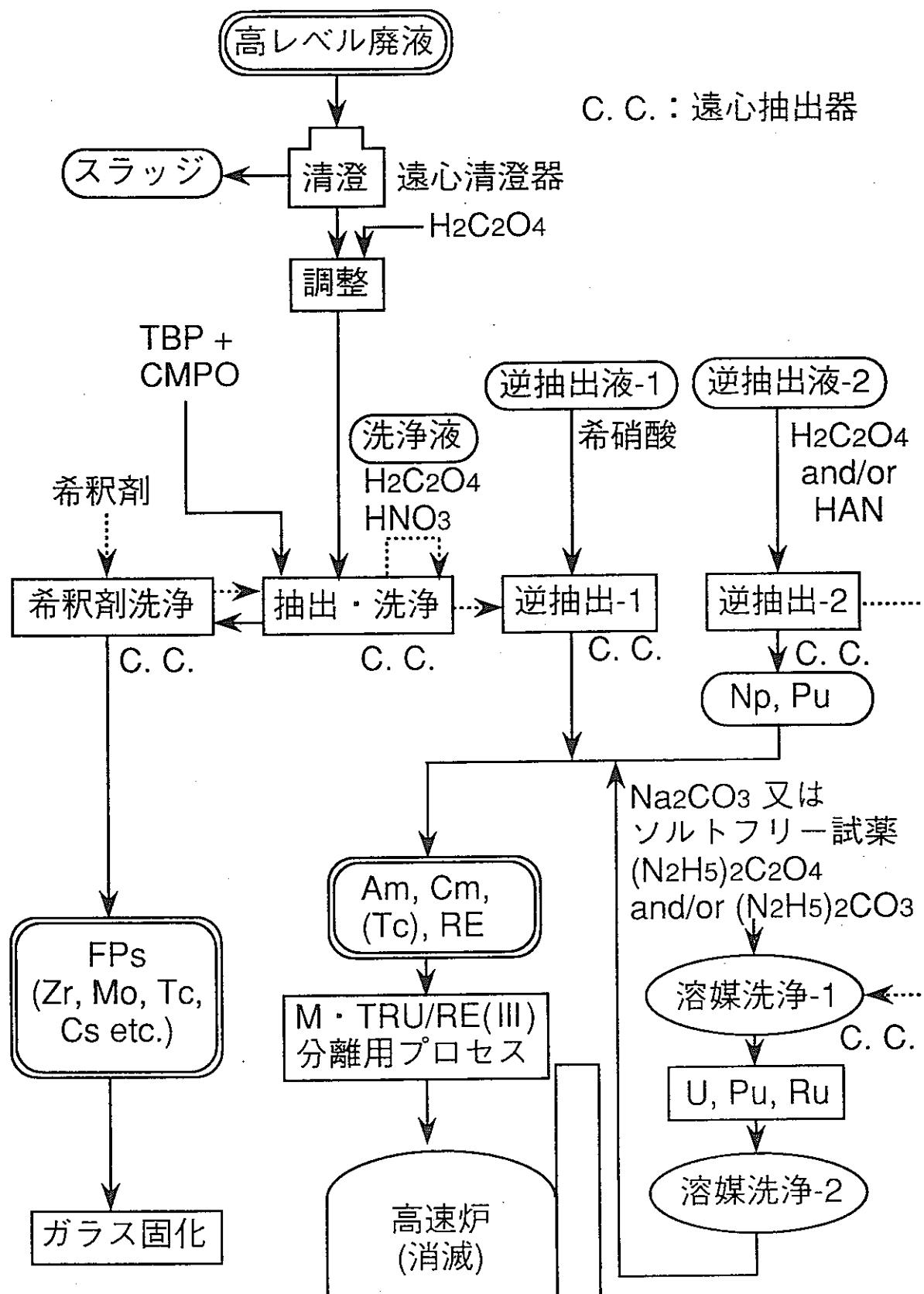


図-3 TRUEX法を応用した分離プロセス概念図

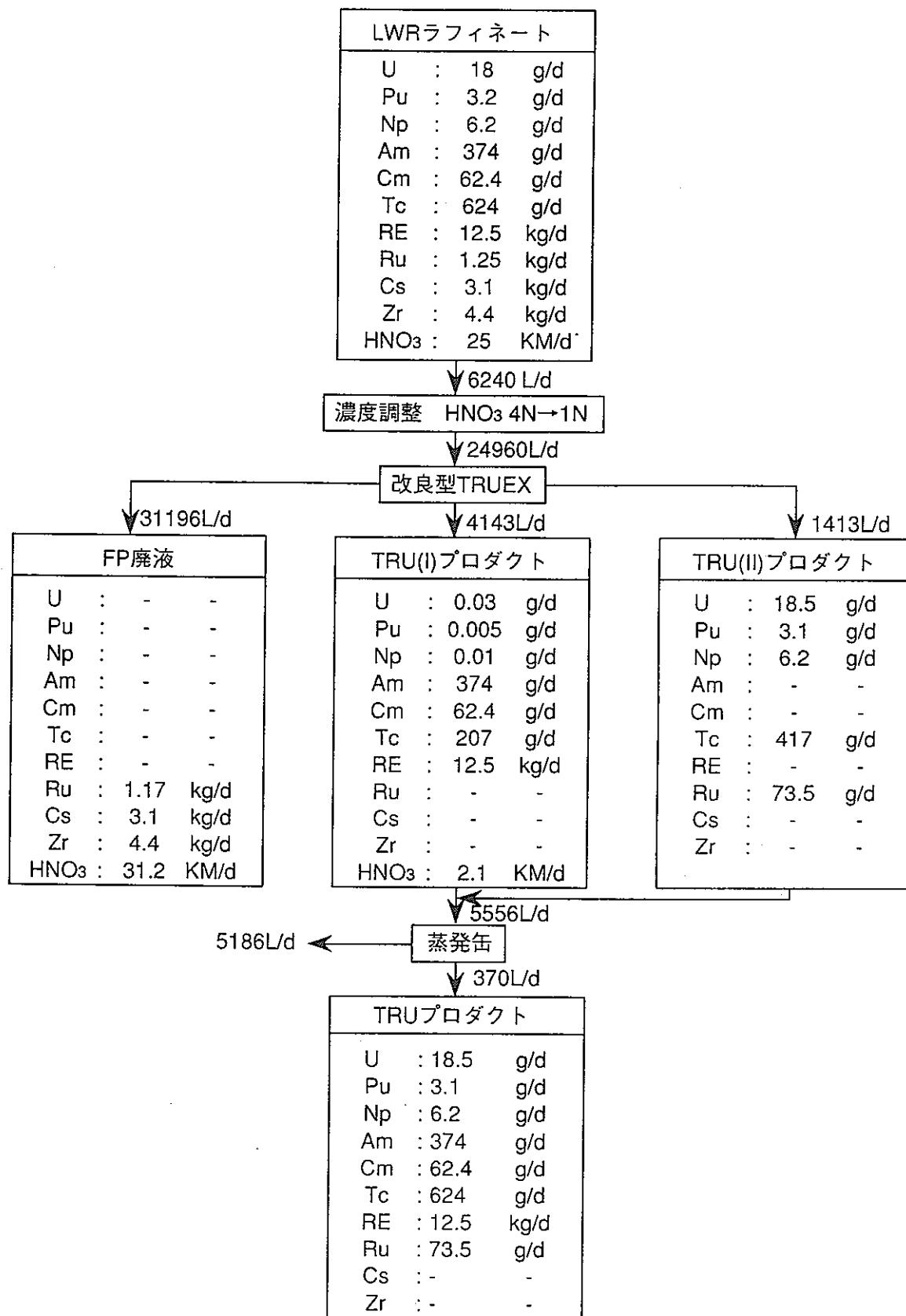


図-4 TRUEXプロセスにおける核物質収支
(Tc回収TRUEXの場合)

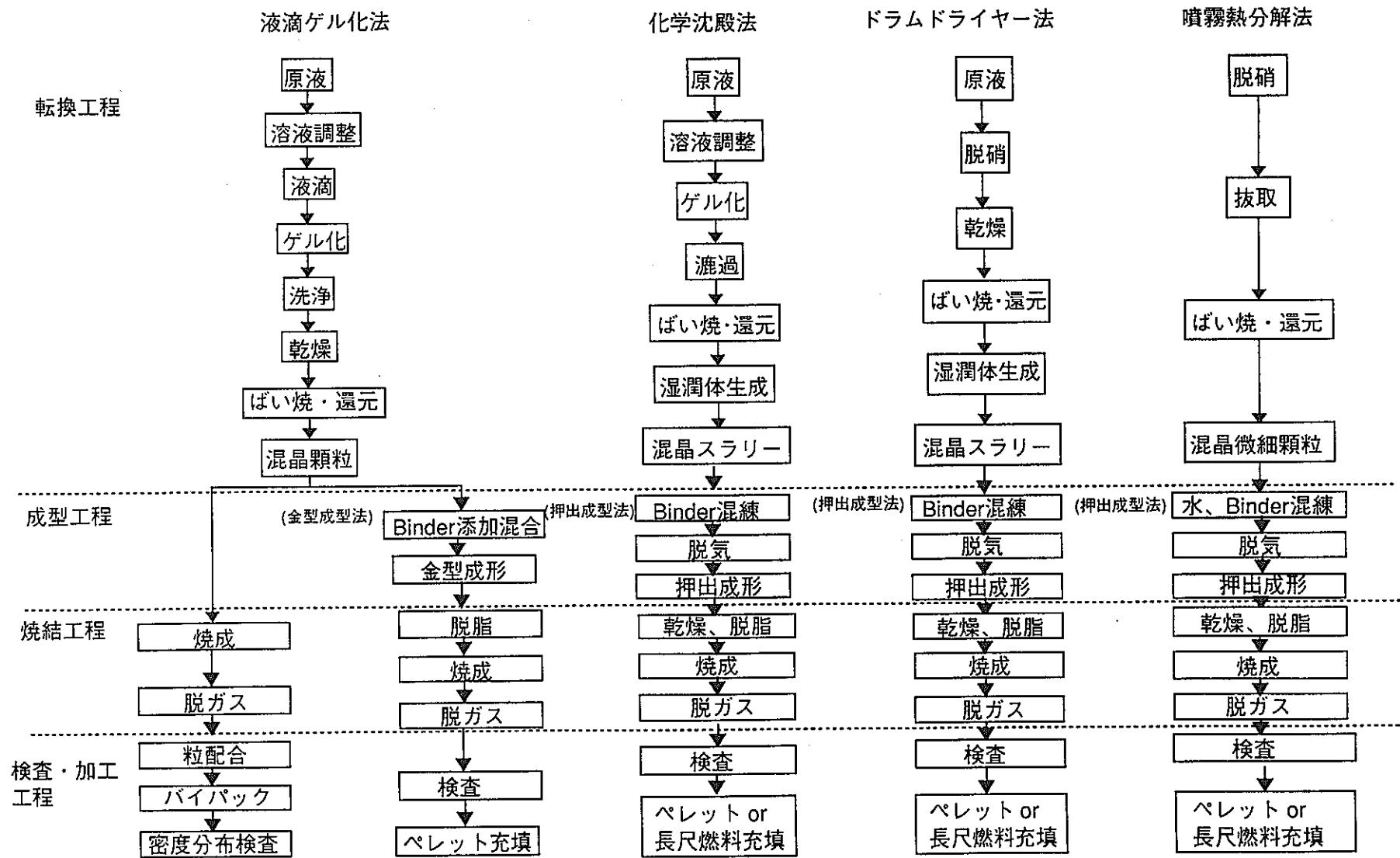


図-5 TRU燃料製造フロー

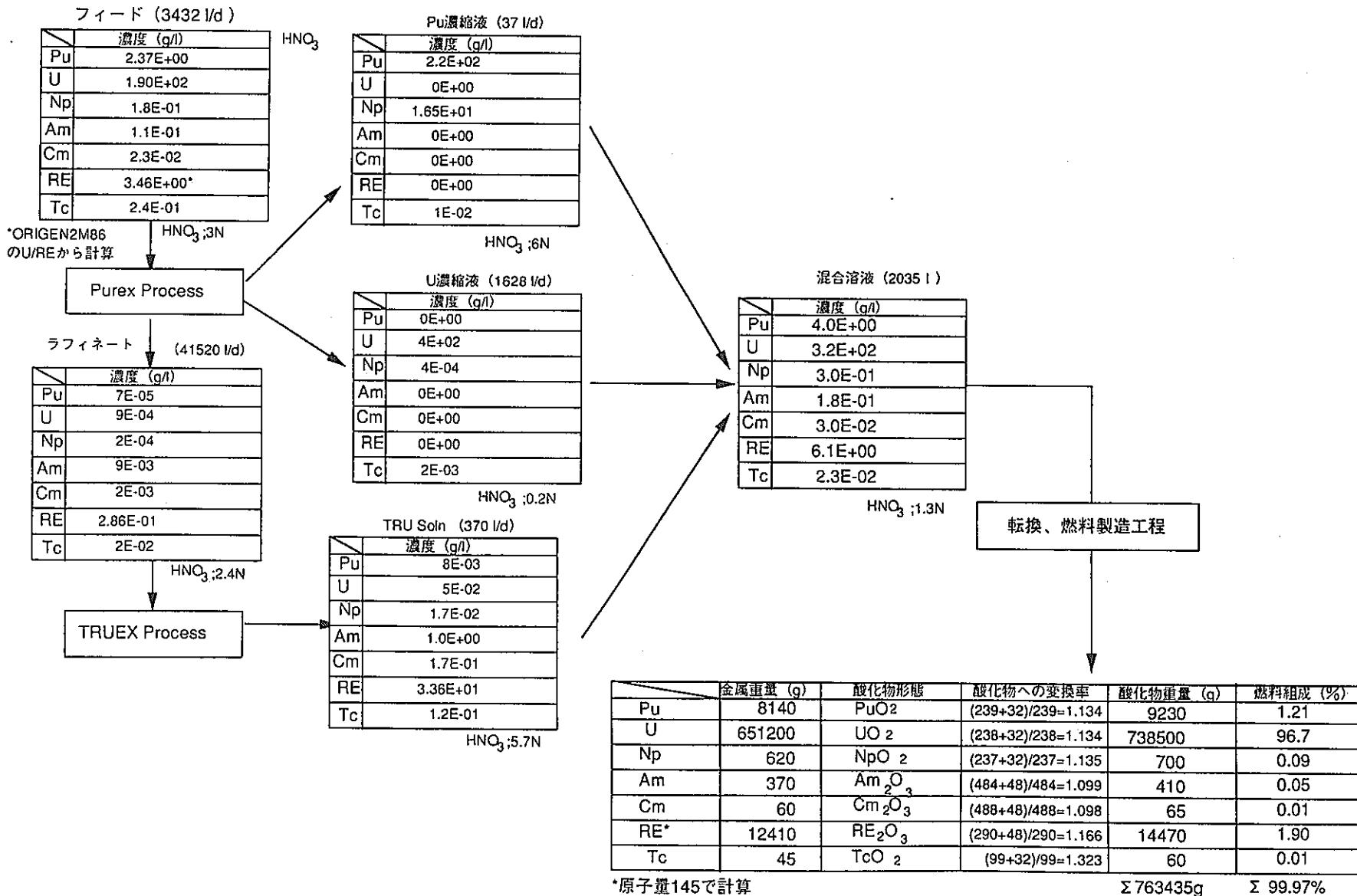


図-6 再処理工程から転換、燃料製造工程の核物質収支

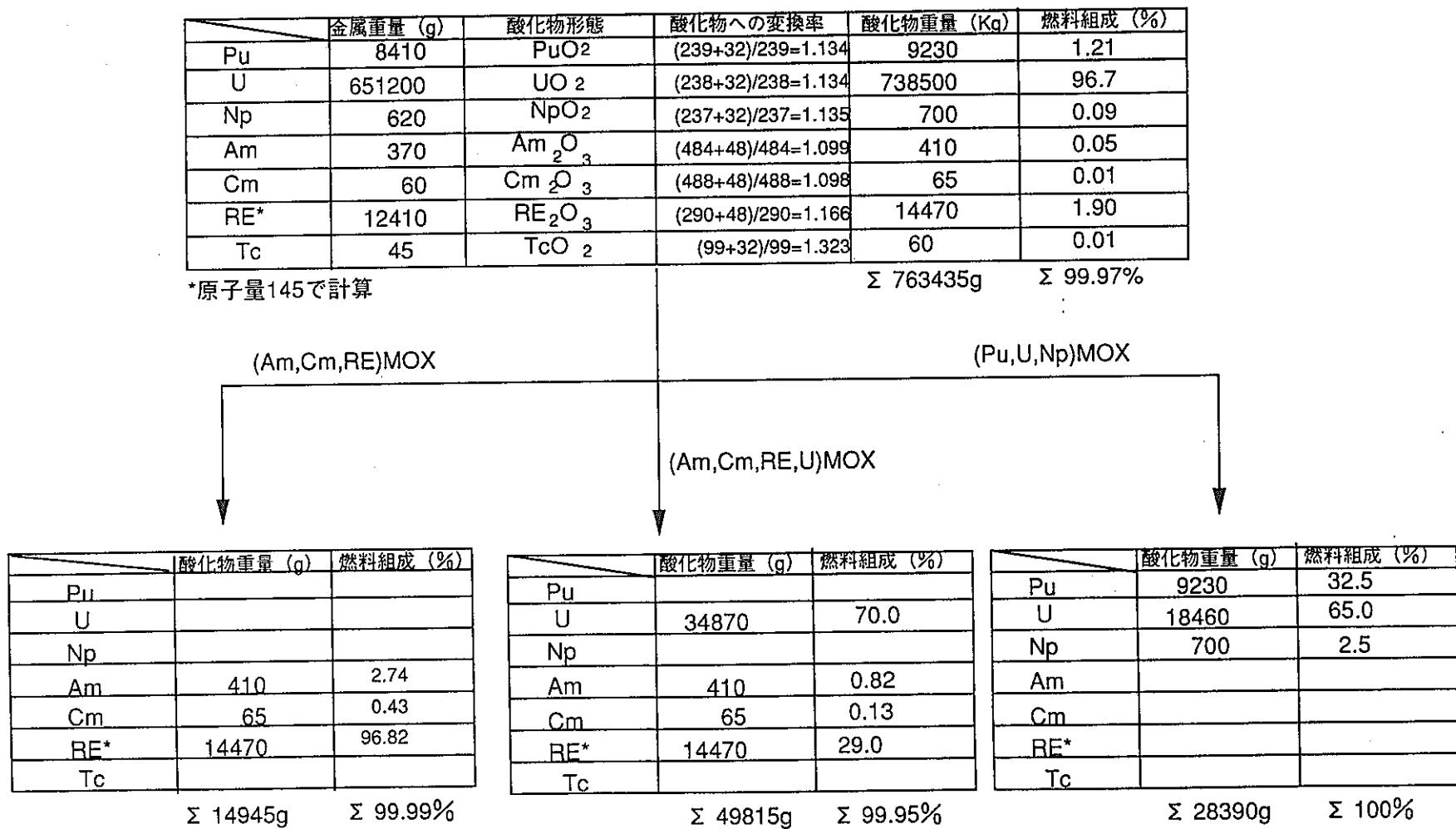


図-7 新プロセスから生産されるTRU燃料組成例

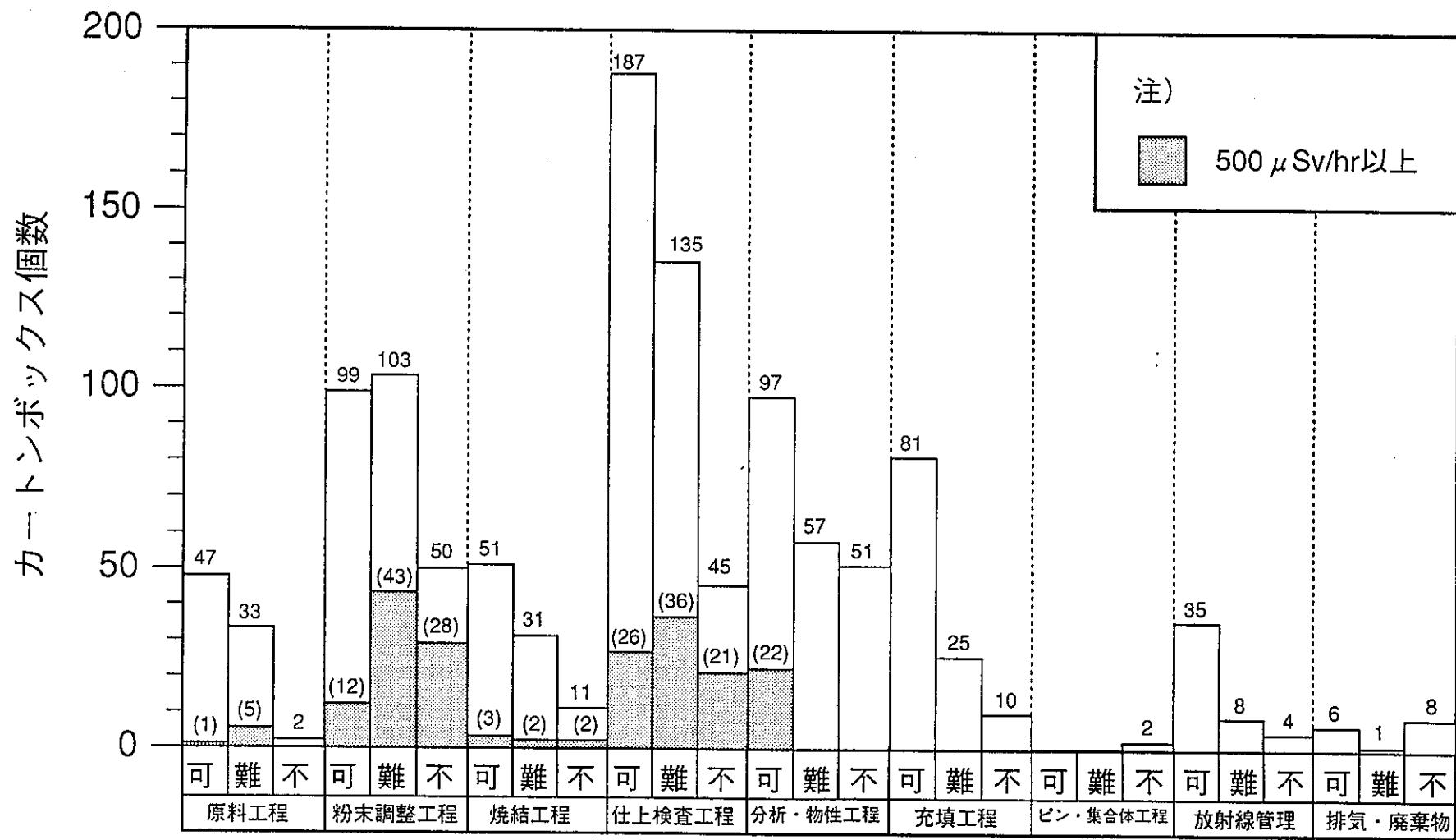


図-8 PFPF工程別放射性廃棄物発生量 (H3.10~H4.9)

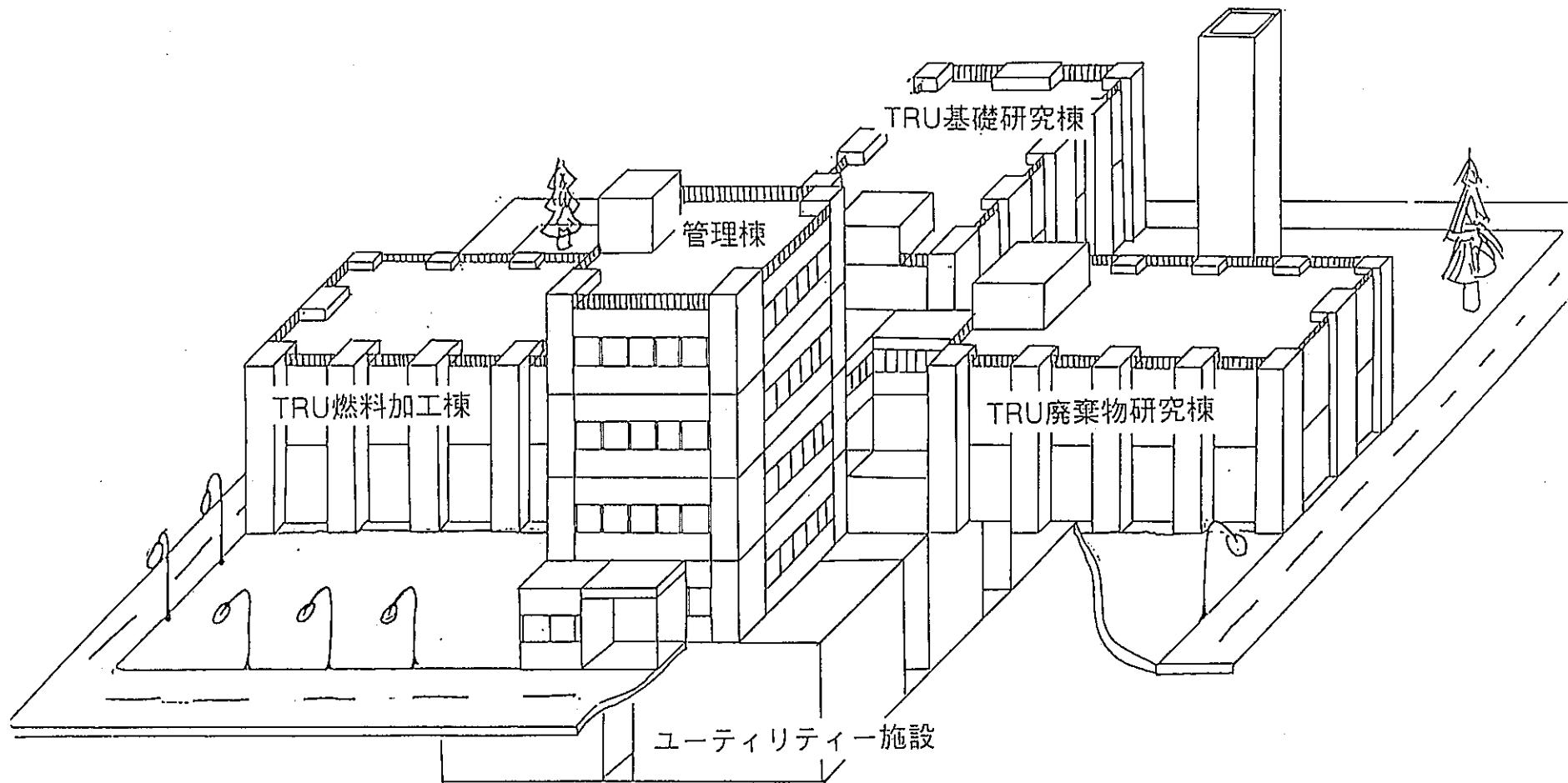


図-9 TRUリサイクル研究センター鳥瞰図

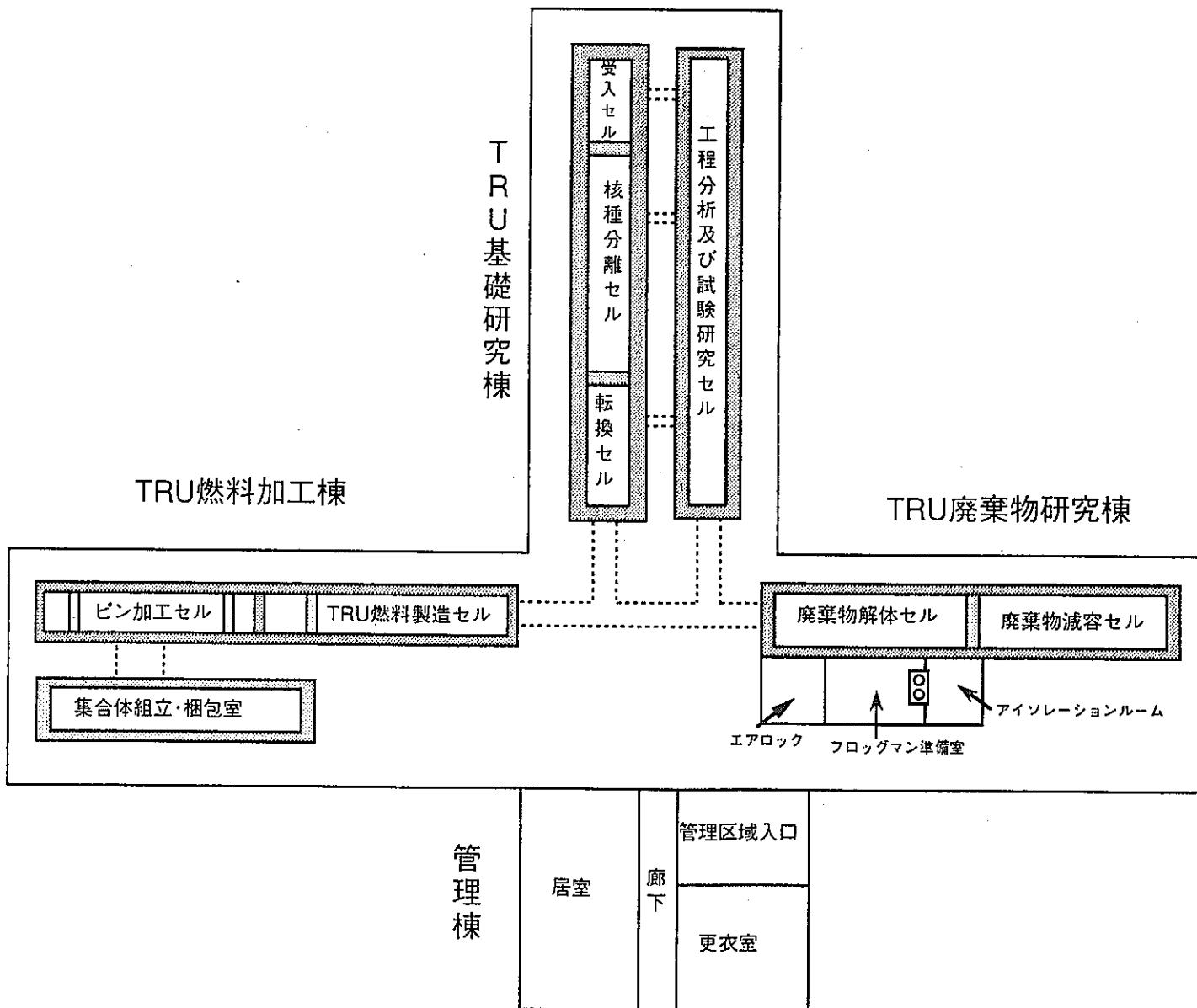


図-10 TRUリサイクル研究センター1階平面図

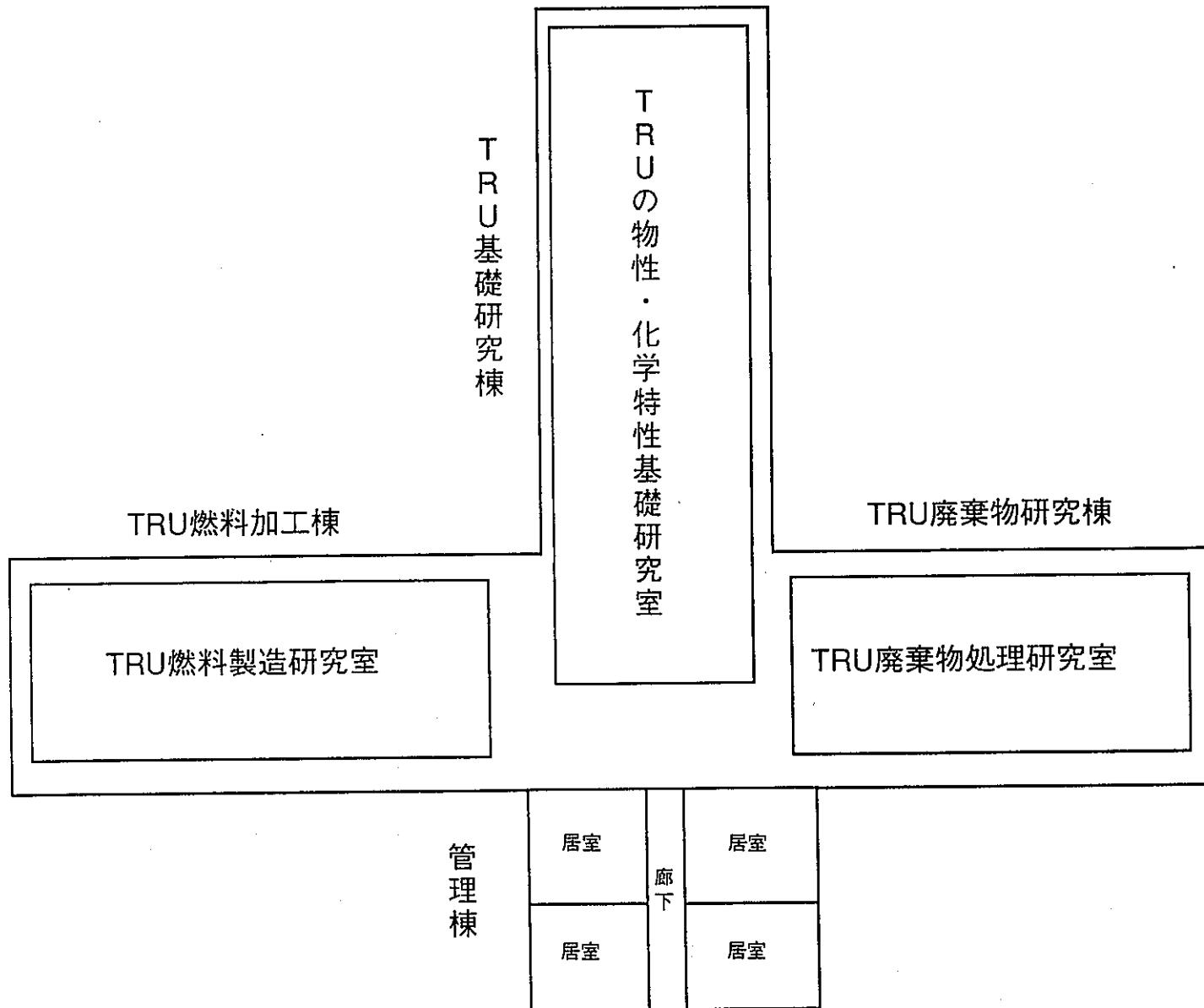


図-11 TRUリサイクル研究センター2階平面図

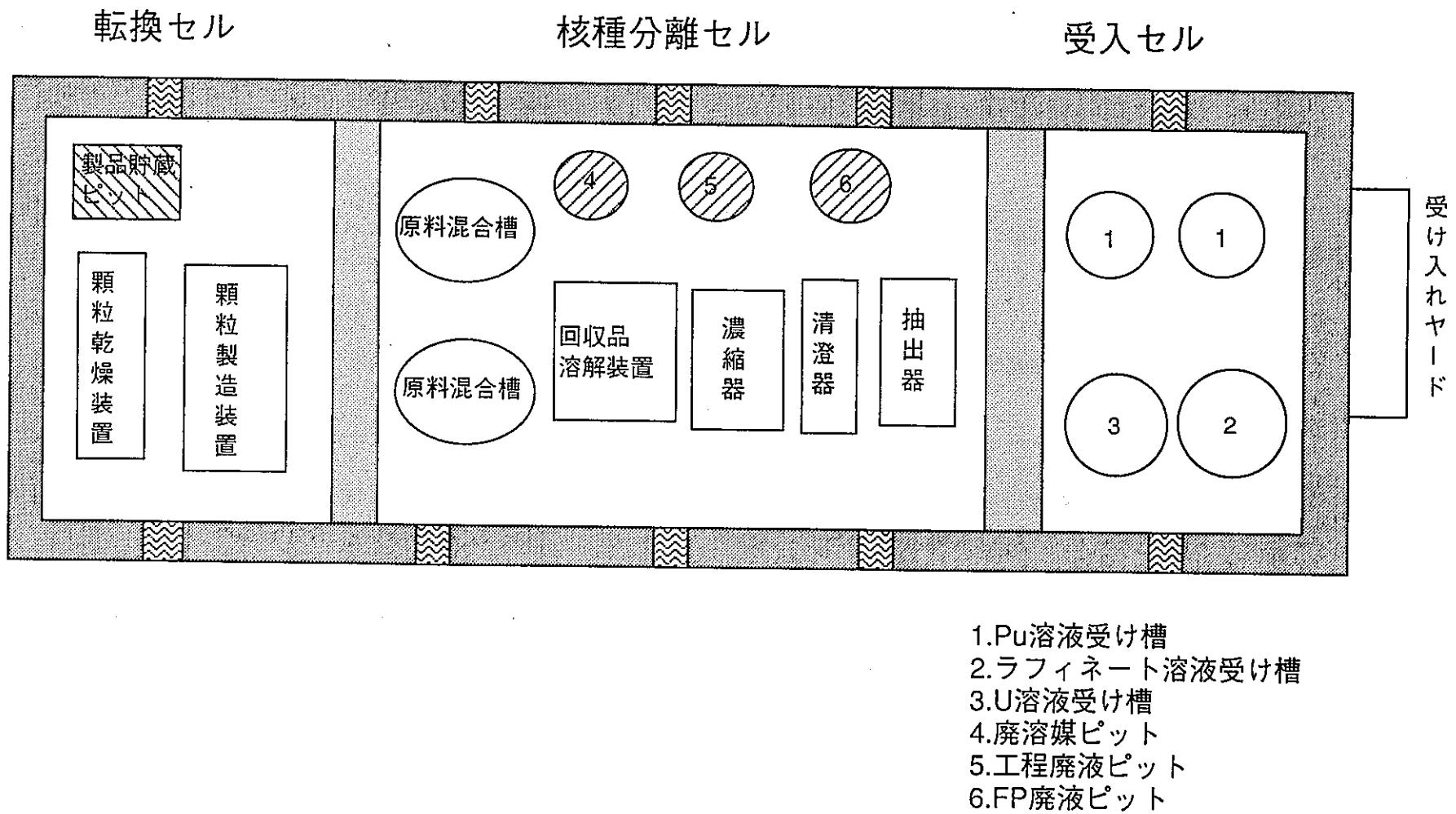


図-12 転換セル・核種分離セル・受入セル平面図

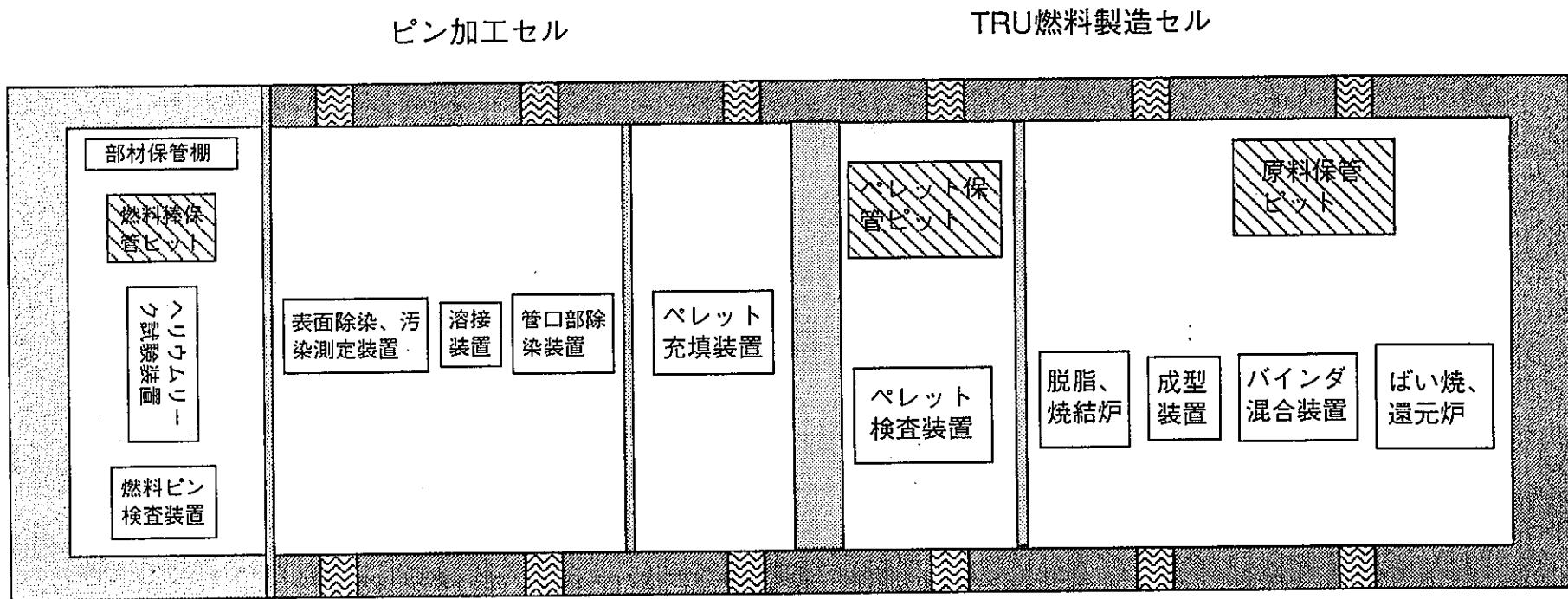


図-13 TRU燃料製造セル・ピン加工セル平面図

集合体組立・梱包室

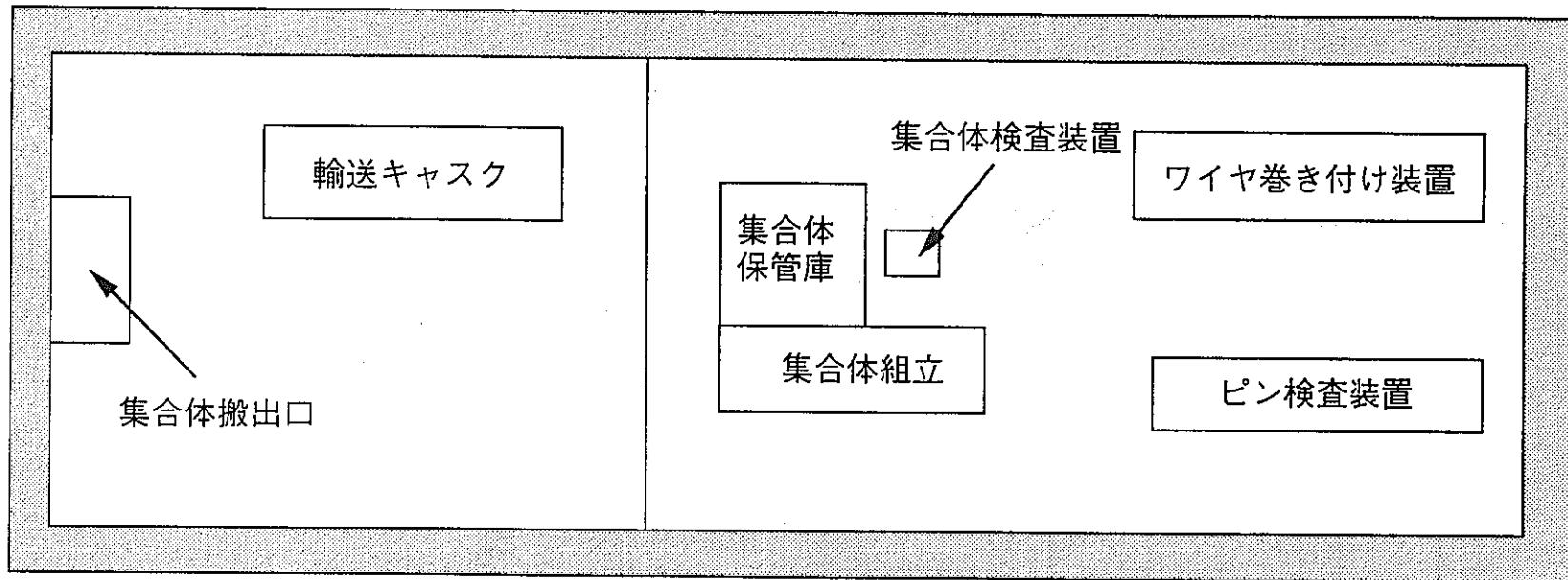


図-14 集合体組立・梱包室平面図

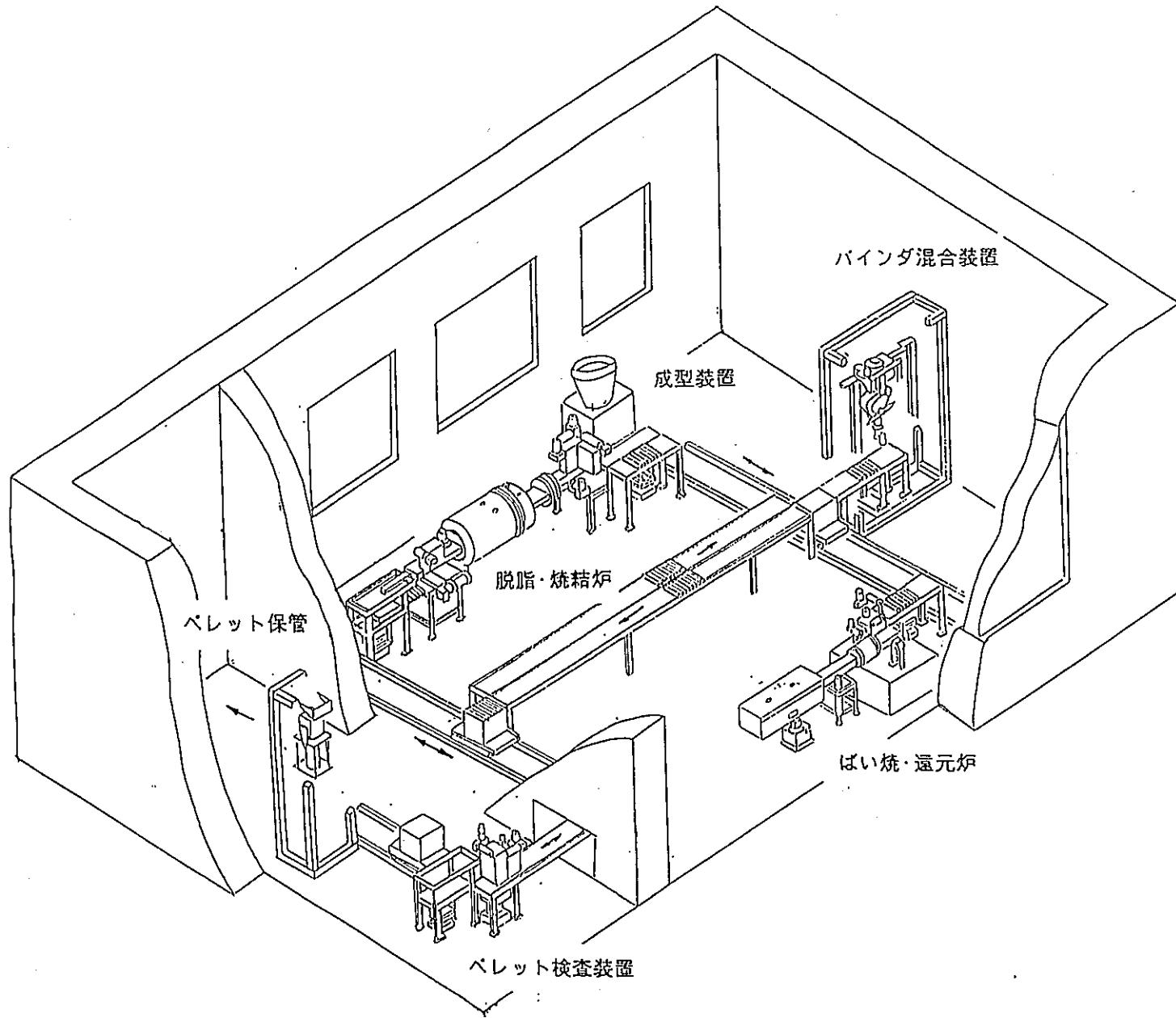


図-15 TRU燃料製造セル概要

表-1 新再処理検討対象燃料

| | |
|------------|--------|
| 初期濃縮度(%) | 4.5 |
| 燃焼度(MWD/T) | 55,000 |
| 比出力(MW/T) | 46 |
| 冷却期間(年) | 3 |
| 炉型式 | PWR |

表-2 照射後燃料(ORIGEN2M86)の特性

Actinides+Daughters

| | g/MTU | fissile(%) | Ci/MTU | α Ci/MTU | W/MTU | n/s/MTU |
|----|-----------|------------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| U | 9.302E+05 | 0.676 | 4.782E+00 | 8.449E-01 | 3.017E-02 | 1.174E+04 |
| Np | 8.587E+02 | — | 5.055E+01 | 6.056E-01 | 1.394E-01 | — |
| Pu | 1.160E+04 | 64.13 | 1.679E+05 | 7.428E+03 | 2.498E+02 | 1.203E+07 |
| Am | 5.419E+02 | — | 1.068E+03 | 1.048E+03 | 3.477E+01 | 9.996E+05 |
| Cm | 1.105E+02 | — | 9.148E+03 | 9.147E+03 | 3.216E+02 | 1.164E+09 |
| 計 | 9.433E+05 | — | 1.782E+05 | 1.762E+04 | 6.053E+02 | 1.178E+09 |

Fission Products

| | g/MTU | mol/MTU | Ci/MTU | W/MTU |
|--------|--|--|--|--|
| R. E.* | 1.692E+04 (30%) Y, La, Ce, Pr, <u>Nd</u> , Sm | 1.212E+02 (25%) Y, La, Ce, Pr, <u>Nd</u> , Sm | 4.251E+05 (35%) <u>Y</u> , Ce, <u>Pr</u> , Pm, Eu | 1.678E+03 (29%) <u>Y</u> , Ce, <u>Pr</u> , Eu |
| Tc | 1.185E+03 (2%) | 1.197E+01 (2%) | 2.010E+01 (0.002%) | 1.008E-02 (0.0002%) |
| 計 | 5.652E+04 (100%) | 4.803E+02 (100%) | 1.232E+06 (100%) | 5.703E+03 (100%) |

*主な元素、下線付は特に多いもの。

表-3 転換方法の違いによる長所・短所の比較

| No | 転換法 | 概要 | 長所 | 短所 |
|----|-----------|--|--|---|
| 1 | マイクロ波脱硝法 | 原料溶液をマイクロ波加熱により直接脱硝し、微粉体を得る方法。現在、動燃が採用している。 | 1.Pu,U混合溶液を直接粉末化できる 2.焼結性の良い粉末が得られる 3.PNCで実績あり | 1.硝酸根が残留する 2.装置が大型化する 3.微粉が発生する |
| 2 | 凍結乾燥法 | 原料溶液を凍結し、これを高真空下で凍結した表面から昇華によって乾燥を行なう | 1.粒子の凝結が起きないので極めて微細な粉末が得られる | 1.装置が大型化する 2.液体窒素を多量に使う 3.溶解性をもつ |
| 3 | 化学沈澱法 | 原料溶液にアルカリを加えpHを制御することにより水酸化物を得、その後、脱水乾燥して粉末を得る方法。 | 1.装置が単純 | 1.中和処理を行なうため多量の廃液が発生する 2.洗浄、ろ過、乾燥工程が必要 3.取り扱い量に制限あり |
| 4 | ドラムドライヤー法 | 原料溶液を蒸気で加熱した円筒ドラム表面で加熱乾燥し、ドラムに接したエッジでかきとる方法。かき取った粉末は、脱水乾燥し粉末を得る。 | 1.熱源が蒸気であるため、加熱がマイルド 2.原理が単純 3.廃液の発生が少ない | 1.乾燥工程が必要 2.硝酸溶液の乾固時のヒューム対策 |
| 5 | ゲル化法 | 原料溶液にHMTAと尿酸を加え、シリコンオイル中に滴下し、球状のゲル粒子を得、その後、洗浄乾燥し顆粒粉末を調整するのが代表的な例。 | 1.多元素でも均質な粒子が得られる 2.微粉末の発生がない 3.造粒工程を省略できる 4.遠隔操作が容易 5.緒外国で実績あり | 1.硝酸アンモニウムが多量に発生する（危険性を有するため処理が困難） 2.溶液のため、取り扱い量に制限がある |
| 6 | マイクロカプセル法 | カプセル化媒体中に芯物質を微粒子状に分散し、この系に壁膜となる物質を添加し各種の方法でカプセル壁を形成しそれを安定な膜に強化する方法 | 1.真球度が高く、均質な粒子が得られる 2.微粉末の発生がない 3.造粒工程を省略できる | 1.硝酸アンモニウムが多量に発生する（危険性を有するため処理が困難） 2.溶液のため、取り扱い量に制限がある |
| 7 | 溶湯粉碎法 | 原料溶液溶湯をるつぼ底部のノズルから流出させこの溶湯に対して空気等のジェットを衝突させると溶湯は飛散、凝固して粉化される。 | 1.成形性、圧縮性の良い粉末が得られる 2.得られる粉末は球状を呈する | 1.使用圧力が高い 2. |
| 8 | 噴霧熱分解法 | 高温炉内に原料溶液を噴霧し、瞬間乾燥、熱分解の過程を経て、球状粉末を得る方法。 | 1.得られる粉末は球状である | 1.装置が大型化する |

表-4 TRU燃料転換プロセスの選定

| 転換方法 | | マイクロ波脱硝法 | 凍結乾燥法 | 化学沈殿法 (液滴以外) | ドラムドライヤー法 | ゲル化法 (液滴ゲル化法) | マイクロカプセル法 | 噴霧熱分解法 |
|-----------|------------------|----------|-------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------|--------|
| 評価項目 | | | | | | | | |
| | | 1-1 | 1-2 | 1-3 3-1 | 1-4 3-2 | 2-1 | 2-2 | 2-3 |
| プロセスの簡単さ | 工程が少ない | 5 | 3 | 3 | 5 | 3 | 4 | 5 |
| | 原理が簡単 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | 計量管理(査察、保障措置) | 4 | 4.3 | 3.3 | 4 | 4.3 | 4 | 4.3 |
| 装置(転換工程) | 自動、遠隔 | 4 | 3 | 4 | 3.3 | 4 | 4 | 4 |
| | 保守性(クリーンナップを含む) | 1 | 1 | 1-3; 1, 3-1; 5~ | 0-4; 1, 3-2; 4~ | 4 | 4 | 4 |
| | 量産性 | 5 | 3.3 | 2 | 2.0 | 5 | 4.3 | 3 |
| 取り扱い上の安全性 | 火災、爆発 | 4 | 3 | 2 | 5 | 2 | 2 | 3 |
| | 臨界 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 被ばく(侵入時の被ばくを含む) | 2 | 3 | 2 | 2.7 | 2 | 3.3 | 2 |
| 実現性 | 開発の難度(全、人、期間) | 5 | 2 | 4 | 2 | 3.3 | 4 | 2.7 |
| | 実績(原子力、セラミックス業界) | 4 | 4.5 | 3 | 2.5 | 5 | 4 | 3 |
| 製品の品質 | 再処理での溶解性 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 均一性 | 2 | 2 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 |
| | 形状(規格との公差の制限) | — | — | — | — | — | — | — |
| | 密度 | — | — | — | — | — | — | — |
| | 成形性(流動性) | 3 | 2.5 | 3 | 2.5 | 1-3; 3, 3-1; 5; 5 | 4.5 | 4.5 |
| 照射特性 | PCCI | | | | | | | |
| | PCM | | | | | | | |
| | 特特性(熱伝導率、FP放出率等) | | | | | | | |
| | 形状安定性 | | | | | | | |
| 製造コスト | 資本費(設備投資等) | 4 | 2 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 |
| | 経営費(保守費、人件費等) | 3 | 3.5 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3.5 |
| 廃棄物 | 一次 | 5 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 |
| | 二次 | 5 | 5 | 3 | 3.5 | 4 | 4 | 4.5 |
| 総合評価 | | 26.1 | 18.0 | 24.8~27.2 | 26.4~28.4 | 26.7 | 26.0 | 26.5 |

注1: 5が最高評価、1が最低評価

注2: 評価点に1点の付いた方法は、特別に得点が高くない限り、検討対象から除外する。

表-5 成形方法の違いによる長所・短所の比較

| No | 成形法 | 概要 | 長所 | 短所 |
|----|------------------|--|--|---|
| 1 | 金型プレス成形 | パンチとダイスにより原料粉末を加圧成形 | 1.量産向きである 2.実績が豊富 | 一軸加圧である為成形圧力比分布を生じ、焼成後に変形、歪み、クラックを生じ易い |
| 2 | CIP成形 | ゴム型中の原料粉末に流体圧力を作用させて成形 | 1.等方的な静水圧加圧を用いる為成形密度分布が均一 | 1.装置が高価である 2.切削加工が必要である |
| 3 | 押出成形 | はい土をピストン等で口金を通して押し出して成形 | 1.量産向きである 2.複雑形状のものを作る事ができる 3.長尺ペレットも可 | 1.成形体に配向を生じる 2.原料には所定の可塑性、平滑性、保形性等が要求される 3.脱脂に時間要する |
| 4 | 射出成形 | 熱可塑性又は熱硬化性有機材料をセラミックス材料に加え、有機材料の加熱流動性を利用した成形法（押出成形法との違いは、押出後金型に入れる事） | 1.複雑な成形体を作る事が可能 2.寸法精度が高く、密度が均一 3.長尺ペレットも可 | 1.金型が高価である 2.脱脂に時間要する |
| 5 | 鋳込成形 (泥しよう鋳込) | 低濃度の泥しようを流し込み、着肉後排泥或はそのまま固化する | 1.複雑な形状のものを成形できる 2.設備の操作が簡単である | 1.量産向きでない 2.寸法精度が悪い |
| 6 | 鋳込成形 (加圧鋳込) | 加圧した泥しようを流し込み、鋳込圧力によって着肉時間を短縮した方法 | 1.量産向きである 2.複雑な形状のものを成形できる | 型には加圧力に基づく応力がかかるため、機械強度、耐摩耗性に強いものが要求される |
| 7 | HIP処理 | 一度焼結した焼結体を、加圧下で再度焼結する方法 | 1.理論密度に近いものを得る事ができる 2.高強度、高韌性のものができる | 1.量産向きでない 2.装置が高価である 3.高圧ガス取り扱い設備となる |
| 8 | | | | |

表-6 TRU燃料製造工程の選定

| 出発原料 | | 混晶粉末；Option 1 (1-1, 1-2, 1-3, 1-4) | | | 混晶顆粒；Option 2 (2-1, 2-2, 2-3) | | | | | 混晶スラリー； Option 3 (3-1, 3-2) | |
|-----------------|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 評価項目 | 製造工程フロー | 現プロセス | Binder混練 | B.M. 粉碎 | (微細顆粒) | Binder添加混合 | Binder添加混合 | ホットプレス | 投成 | Binder混練 | |
| | | ↓ B.M. 粉碎 | ↓ Binder添加混合 | ↓ 脱氣 | ↓ 金型成形 | ↓ 脱氣 | ↓ 金型成形 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱ガス | ↓ 脱氣 | |
| | | ↓ 過剰 | ↓ 押出成形 | ↓ 乾燥、脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱ガス | ↓ 脱ガス | ↓ 脱氣 | |
| | | ↓ 全型成形 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | |
| | | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | |
| | | ↓ 投成 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | |
| | | ↓ 脱ガス | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | |
| | | ↓ 検査 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | |
| | | ↓ ペレット充填 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | ↓ 脱脂 | |
| 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 |
| プロセスの簡単さ | 工程が少ない(検査を除く) 原理が簡単 | 3 3 | 3 3 | 5 2 | 5 3 | 3 3 | 3 3 | 4 4 | 5 2 | 5 2 | 3 4 |
| 装置 (成形・加工工程) | 計量管理(検査、保護措置) 自動、遮隔(検査を除く) 保守性(クリーンアップを含む) 量産性 検査の簡単さ | 3 3 1 3 4 2.7 3 3.5 4 2 | 3 3 1 3 5 2 3 1 3 | 3 3 1 3 5 2.7 3 3.5 4 3.2 | 5 4 3 3 3 2.7 3 3.5 4 3.2 | 3 3 1 3 5 2.7 3 3.5 4 3.2 | 3 3 1 3 5 2.7 3 3.5 4 3.2 | 4 4 2 3 3 3.5 4 3.5 5 4 | 5 4 2 3 3 3.2 4 3.2 5 4 | 5 4 2 3 3 3.2 4 3.2 5 4 | 3 3 2 3 3.3 3.5 |
| 取り扱い上の安全性 | 火災、爆発 臨界 扱はく(保守時の扱はくを含む) | 3 3 1 2.3 3 2.7 1 2 | 3 2 3 3 2 3 1 2 | 3 2 3 3 2 3 1 2 | 4 3 2 3 3 2.7 3 3.5 4 3.2 | 3 3 2 3 3 2.7 3 3.5 4 3.2 | 3 3 2 3 3 2.7 3 3.5 4 3.2 | 3 3 2 3 3 2.7 3 3.5 4 3.2 | 3 3 2 3 3 2.7 3 3.5 4 3.2 | 3 3 2 3 3 2.7 3 3.5 4 3.2 | 3 3 2 3 3 2.7 3 3.5 4 3.2 |
| 実現性 | 開発の難度(全、人、期間) 実績(瓶子力、セラミックス等) | 5 5 2 2 2 | 5 5 2 2 2 | 5 5 2 2 2 | 5 5 2 2 2 | 5 5 2 2 2 | 5 5 2 2 2 | 4 4 2 2 2 | 2 2 3 3 3 | 3 3 2 3 3 | 2 2 2.7 |
| 製品の品質 | 再処理での溶解性 均一性 形状(規格との変差の制御) 密度 燃料ビンの汚染 | 3 4 3 2 3 3.2 3 3 3 3 | 3 4 4 3 3 3 3 3 3 3 | 3 3 4 2 3 3 3 3 3 3 | 3 3 3 2 3 3 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 | 3 3 4 2 3 3 3 3 3 3 |
| 照射特性 | PCCI PCMI 熱特性(熱伝導率、FP放出率) 形状安定性 | 3 3 4 3 3.2 3 3 3 3 | 3 3 4 4 3 3 3 3 3 3 | 3 3 4 4 3 3 3 3 3 3 | 3 3 4 4 3 3 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 |
| 製造コスト | 資本費(設備投資等) 稼働費(保守費、人件費等) | 3 3 3 3 3.2 3 3 3 3 | 3 3 3 2 2 3 | 2 3 3 3 3.2 3 3 3 3 | 2 3 3 3 3.2 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3.2 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3.2 3 3 3 3 | 3 3 3 3 3.2 3 3 3 3 | 2 2 2 2 3.2 2 3 3 3 | 2 2 2 2 3.2 2 3 3 3 | 2.5 2.5 4 4 3.2 2.5 3 3 3 |
| 廃棄物 | 一次 二次 | 3 2 | 3 2.5 | 3 3 | 3 2 | 3 2 | 3 2.5 | 3 3 | 3 2 | 4 4 | 3 3 |
| 総合評価 | | 24.9 | 24.4 | 21.7 | 24.7 | 24.4 | 26.7 | 23.5 | 25.6 | 24.7 | |

注1；5が最高評価、1が最低評価

注2；評価点に1点の付いた方法は、総合点が特によい場合を除いて今後の検討対象から除外する

表-7 設備・機器の自動化レベルの定義

| 自動化レベル | 自動化レベルの定義 | 作業の定義 |
|--------|---|---|
| 5 | 運転、保守、クリーンナップ等の作業が全て遠隔全自動。 | <p>運転：</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) 設備、機器の立ち上げおよび停止作業。 (2) ペレット、容器等の搬送監視。 |
| 4 | 運転、保守は遠隔全自動。 クリーンナップ作業は遠隔操作。 | <ul style="list-style-type: none"> (3) 設備、機器の異常監視。 (4) 運転データの管理。 (5) 工程進捗管理。 |
| 3 | 運転は遠隔全自動。 保守、クリーンナップは遠隔操作。 | <p>保守：</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) ロット毎またはロット処理中における粉末およびペレット回収作業。 |
| 2 | 運転は遠隔全自動。 保守は遠隔操作。 クリーンナップはグローブでの手作業。 | <ul style="list-style-type: none"> (2) センサーおよび装置駆動部等の保守、補修 (3) 計算機およびシーケンサ等の保守。 |
| 1 | 運転は遠隔全自動。 保守、クリーンナップはグローブでの手作業。 | <p>クリーンナップ：</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) 製造キャンペーンの切替えに伴う残留核物質の回収。 |

表-8 設備・機器の自動化レベルと必要な測定機器

| 自動化レベル | 自動化レベルの定義 | レベルに応じた必要な研究開発 | 作業の定義 |
|--------|----------------------------|--|--|
| 5 | 運転、保守等の作業が全て遠隔全自動。 | <ul style="list-style-type: none"> ・高性能遠隔自動保守装置の開発（ロボット） ・部品のカセット化（センサー等） ・ケーブルレス部品の開発（センサー等） ・予防保全システムの開発 ・設備異常診断システムの開発 | <p>運転：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 設備、機器の立ち上げ及び停止作業。 (2) 燃料要素、搬送パレットの搬送監視。 (3) 設備、機器の異常監視。 (4) 運転データの管理。 (5) 工程進捗管理。 |
| 3 | 運転は遠隔全自動。 保守は遠隔操作。 | <ul style="list-style-type: none"> ・コンタミレス充填方式の開発 ・部材及び資材の自動供給・回収機構の開発 ・ワンタッチ位置決め機構の開発 ・部品のカセット化（センター等） ・自動給油方式の開発 ・遠隔操作型メンテナンス設備の開発 | <p>保守：</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 部材及び資材の供給・回収 (2) センサー及び装置駆動部等の保守、補修。 (3) 計算機及びシーケンサ等の保守。 |
| 1 | 運転は遠隔全自動。 保守はグローブでの手作業。 | <ul style="list-style-type: none"> ・r, n遮蔽材の研究 ・ペレットトラブル解除システムの開発 ・燃料要素解体技術の開発 ・集合体自動溶接技術の開発 | |

表-9 設備・機器の信頼性レベルの定義

| 信頼性レベル | 信頼性レベルの定義 | 必要な研究開発 |
|--------|--|---|
| 4 | 定期点検時期までメンテナンス不要。 ロット毎にメンテナンスが必要。 | (1) 自動集塵機構の開発。 (2) 自動給油機構の開発。 (3) 焼結炉内清掃ロボットの開発。 (4) 機器機能の多重化機構の開発。 |
| 3 | ボックス内清掃。 | (1) センター、運動部のユニット化研究。 (2) 常時集塵機構の開発。 (3) 自動位置調製機構の開発。 |
| 2 | ロット処理途中で数回の保修作業が必要。 センサー、運動部の位置調整。 センサー、部品の劣化。 | (1) 欠け、割れ、短尺ペレット除去機構の開発。 (2) 粉末搬送容器、粉末ホッパ最適形状研究。 (3) 粉末搬送最適機構の開発。 (4) 粉末飛散防止機構の開発。 (5) 耐放射線センサーの開発。 |
| 1 | ロット処理途中で頻繁に保修作業が必要。 センサー、運動部の位置調整。 センサー、部品の劣化。 粉末、ペレットの詰まり。 | (6) ボックス内飛散物集塵機構の開発。 (7) 長寿命運動部部品の開発。 (8) 遠隔位置調整機構の開発。 (9) 粉末強制充填機構の開発。 |

表-10 設備・機器の信頼性レベルと必要な測定機器

| 信頼性レベル | 信頼性レベルの定義 | レベルに応じた必要な研究開発 |
|--------|--|--|
| 4 | 定期点検時期までメンテナンス不要。 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 設備異常診断システムの開発 ▪ 予防保全システムの開発 |
| 3 | 1回／日程度メンテナンスが必要。 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 部材及び資材の位置ずれ ▪ センサー駆動部品の劣化 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 高性能自動位置決め装置の開発（部材及び資材用） ▪ 耐放射線センサーの開発 ▪ メンテナンスフリー駆動部品の開発 |
| 2 | バッチ処理途中で補修 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 部材及び資材の位置ずれ ▪ センサー駆動部品の劣化 | |

表-11 TRU燃料製造工程設備・機器に必要な自動化・信頼性レベル

| 工程設備・機器 | 必要な自動化レベル | 必要な信頼性レベル | 設備機能と実現可能性 |
|--------------------------|-----------|-----------|---|
| 1. 原料工程 | | | |
| (1) PuO ₂ 缶取出 | 3 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・プルトニウム貯蔵庫から供給されるPuO₂貯蔵容器からPuO₂缶を取出し秤量を行う。 ・自動化レベル、信頼性レベル3まで容易に到達可能。 |
| (2) PuO ₂ 缶詰替 | 3 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・PuO₂缶取出設備から搬送されてきたPuO₂缶の蓋を取り外しホッパ内でPuO₂缶を反転させPuO₂を取出す。空缶を秤量し、PuO₂缶取出設備へ戻す。 ・自動化レベル、信頼性レベル3まで容易に到達可能。 |
| (3) 粉末試料採取測定 | 3 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・PuO₂缶詰替設備で詰替られたPuO₂のロットが切替わった場合、その初回品をこの設備で試料を採取して、粉末物性を測るとともに、品管工程に気送する。 ・自動化レベル、信頼性レベル3まで容易に到達可能。 |
| (4) 原料クロス混合 | 3 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・同位体組成比の異なるPuO₂粉末を秤量し組合せを行って所定のPu同位体比に調整する。 ・自動化レベル、信頼性レベル3まで容易に到達可能。 |
| (5) 原料ロット混合 | 3 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・ロット拡大のためにデルタミキサにて混合する。 ・自動化レベル、信頼性レベル3まで容易に到達可能。 |
| 2. 成形工程 | | | |
| (1) 添加混合（1） | 3 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・バインダーを添加しMOX粉末と混合する。 ・自動化レベル、信頼性レベル3まで容易に到達可能。 |
| (2) 造粒・整粒 | 3 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・粉末の流動性を良くするためにロータリープレスで仮成型し粉碎・分級を行う。 ・現在、同設備を導入し開発中。信頼性が確認できれば自動化レベル、信頼性レベル3まで容易に到達可能。 |

表-12 TRU燃料製造工程設備・機器に必要な自動化・信頼性レベル(続き)

| 工程設備・機器 | 必要な自動化レベル | 必要な信頼性レベル | 設備機能と実現可能性 |
|------------------|-----------|-----------|---|
| (3) 添加混合 (2) | 3 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・ルブリカントを添加しMOX粉末と混合する。 ・自動化レベル、信頼性レベル3まで容易に到達可能。 |
| (4) 成形・整列 | 3 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・MOX粉末をペレット状に成型し寸法、重量、密度の測定およびMO皿に整列する。 ・自動化レベル、信頼性レベル3までに到達させるのに相当の開発が必要 MOX粉末の特性変化による細かな調整、粉末飛散防止等表-1、2の開発が必要。H5年に改良型成型機導入。これで信頼性の確認が可能。自動化レベルについては、別途研究開発が必要。 |
| 3. 焼結工程 | | | |
| (1) 予備焼結 | 1 | 4 | <ul style="list-style-type: none"> ・ペレット中の有機添加物を除去する。 ・現在でも信頼性は高い。信頼性レベル4に到達している。 |
| (2) 焼結 | 1 | 4 | <ul style="list-style-type: none"> ・グリーンペレットを約1700°Cで焼結する。 ・現在でも信頼性は高い。信頼性レベル4に到達している。但し連続炉の場合、ヒータ交換、断熱材交換可能な設備開発が必要。 |
| (3) 脱ガス | 1 | 4 | <ul style="list-style-type: none"> ・ペレット中の蒸発性不純物を取り除く。 ・現在でも信頼性は高い。信頼性レベル4に到達している。 |
| 4. 検査工程 | | | |
| (1) 焼結後ペレット採取・測定 | 1 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・焼結後ペレットの外径、密度の測定を行い、ロットの判定を行う。 ・信頼性の向上が最重要課題。表-2の研究開発が必要。 |
| (2) 外径密度選別 | 1 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・脱ガス後ペレットの外径、高さ、重量を測定し、密度を算出し選別する。 ・信頼性の向上が最重要課題。表-2の研究開発が必要。 |
| (3) ペレット外周研削 | 3 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・外径密度選別で密度が合格し径大のペレットの外周を研削する。 ・自動化レベル3、信頼性レベル3の必要な設備。遠隔保守型設備の開発に重点。信頼性レベル向上について現在開発中。 |

表-13 TRU燃料製造工程設備・機器に必要な
自動化・信頼性レベル(続き)

| 工程設備・機器 | 必要な 自動化 レベル | 必要な 信頼性 レベル | 設備機能と実現可能性 |
|----------|-------------------|-------------------|--|
| (4) 外観検査 | 1 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・外径密度選別、外周研削の終了したペレットの外観を検査する。 ・信頼性の向上が最重要課題。表-2の研究開発が必要。 |
| (5) 官庁検査 | 1 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・製品ペレットを官庁検査要領書に基づき科技技術庁の検査を受ける。 ・信頼性の向上が最重要課題。表-2の研究開発が必要。 |

表-14 TRU燃料加工工程設備・機器に必要な自動化・信頼性レベル

| 工程設備・機器 | 必要な自動化レベル | 必要な信頼性レベル | 設備機能と実現可能性 |
|-----------------|-----------|-----------|--|
| 1. 充填・溶接工程 | 3 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・下部端栓付被覆管にプレナム部材と燃料ペレットを充填し、上部端栓を溶接し密封する。 ・充填時の詰まり防止、汚染防止および部材、資材の自動供給・回収等の表-3、4の開発が必要。 |
| 2. ヘリウムリーク検査工程 | 1 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・燃料要素のリーク試験をバッチ単位で行う。 ・現在でも信頼性は高い。信頼性レベル4に到達している。 |
| 3. タグガスカプセル開封工程 | 3 | 2 | <ul style="list-style-type: none"> ・プレナム部に充填したタグガスカプセルを電磁力で開封する。 ・自動化レベルは現在でも2に到達している。 |
| 4. X線検査工程 | 1 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・プレナム部および溶接部の欠陥検査を行う。 ・信頼性レベル3は容易に到達可能。 |
| 5. ワイヤ巻付工程 | 3 | 2 | <ul style="list-style-type: none"> ・燃料要素全長に亘り、スパイラルにワイヤを巻付け両端を溶接固定する。 ・自動化レベル3は容易に到達可能。信頼性レベルは現在でも2に到達している。 |
| 6. 燃料要素総合検査工程 | 3 | 2 | <ul style="list-style-type: none"> ・全長、曲がり、外観、γスキャンなどの検査を行い合否判定する。 ・自動化レベル3は容易に到達可能。信頼性レベルは現在でも2に到達している。 |
| 7. 燃料要素洗浄工程 | 1 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・収納パレットごと有機剤を用いて洗浄する。 ・現在でも信頼性は高い。すでに信頼性レベル4に到達している。 |
| 8. 燃料要素解体工程 | 3 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> ・燃料要素を切断・解体しペレット、部材を回収する。 ・自動化レベル、信頼性レベル達成のために設備設計からの研究開発が必要。 |

表-15 TRU燃料加工工程設備・機器に必要な
自動化・信頼性レベル(続き)

| 工程設備・機器 | 必要な自動化レベル | 必要な信頼性レベル | 設備機能と実現可能性 |
|-------------|-----------|-----------|--|
| 9. 集合体組立工程 | 3 | 2 | <ul style="list-style-type: none"> ・燃料要素を束ねてノズルに固定しラッパ管をかぶせて溶接する。 ・自動化レベル 3 は容易に達成可能。信頼性レベルはすでに 2 に到達している。 |
| 10. 集合体検査工程 | 1 | 2 | <ul style="list-style-type: none"> ・集合体の全長、曲がり、ねじれおよび外観を検査し合否判定する。 ・現在でも信頼性レベル 2 に到達している。 |

表-16 再処理施設における廃棄物発生量

ドラム貯蔵本数
(H. 1~H. 3年度) (単位: ドラム本)

| | 区分 分類 | 非TRU ^{*1)} | TRU ^{*1)} |
|------|----------|---------------------|--------------------|
| H. 1 | 可燃 | 84 | 338 |
| | 難燃 | 462 | 56 |
| | 不燃 | 786 | 132 |
| H. 2 | 可燃 | 40 | 270 |
| | 難燃 | 383 | 66 |
| | 不燃 | 486 | 70 |
| H. 3 | 可燃 | 53 | 170 |
| | 難燃 | 381 | 43 |
| | 不燃 | 528 | 124 |
| 合計 | | 3,203 | 1,269 |

*1)暫定的な区別であり明確でない。

濃縮液発生量 (単位: m³)

| | 低放射性濃縮液 | 極低放射性濃縮液 |
|---------------------|---------|----------|
| H. 1 | 244 | 407 |
| H. 2 | 313 | 393 |
| H. 3 ^{*2)} | 327 | 167 |

*2) 減塩対策を実施した為、極低レベルの発生量は大幅に減り、低レベルは若干増加した。

Asp固化体発生率：低放射性系 4.1本/m³
極低放射性系 3.6本/m³

表-17 TRUEXから発生する廃棄物の組成及び量の推定

| 廃棄物 | 組成 | 量(m ³ /D) | 備考 |
|--------------|--|----------------------|---|
| 液体廃棄物 | | | |
| 高レベルFP濃縮廃液 | FPs(Zr, Ru, Cs, etc) H ⁺ :2~3M | ca. 0.5 | 15倍濃縮を仮定 脱硝濃縮の場合 |
| 蒸発凝縮液 | 微量FPs, H ⁺ :2~3M 微量FPs, H ⁺ :<0.1M | ca. 5 <ca. 5 | 酸回収を行なう場合の 酸回収凝縮液 |
| 廃溶媒 | CMPO, TBP, n-dodecane | 未検討 | サイクル数、溶媒照射 量、溶媒洗浄効率、廃 希釈剤の取扱法等、或 は廃溶媒分解プロセス 採用の有無(R&D中)に より異なる |
| 廃希釈剤 | n-dodecane | 未検討 | 洗浄方法(流量、抽出 器、洗浄効率目標値 等(R&D中))、或は設 計の考え方により異 なる |
| 分析廃液 | 種々 | 未検討 | |
| 気体廃棄物 | | | |
| 分解オフガス | CO ₂ , N ₂ , O ₂ , H ₂ 等 | 未検討 | プロセスでSalt-free試 薬を使用し、分解を行 なう場合(R&D中) |
| 廃溶媒分解オフガス | CO ₂ , H ₂ O, O ₂ 等 (H ₃ PO ₄ 等) | 未検討 | 電気化学的燃焼法を採 用した場合(R&D中) |
| 固体廃棄物 | | | |
| 廃活性アルミナ | Al ₂ O ₃ | 未検討 | 採用の場合 |
| 工程機器 | 遠心抽出器 分解槽等 | 未検討 | 採用の場合 |

表-18 TRU燃料製造工程に於ける予測発生廃棄物形態の問題点と対策案

| 製造・加工フロー | 発生が予想される廃棄物の形態とその量 | 問題点 | 対策案 |
|--------------|---|---|--|
| 転換工程（液滴ゲル化法） | <p>原液 → 溶液調整 → 液滴 → ゲル化 → 洗浄 → 乾燥 → ばい焼・還元 → 混晶顆粒</p> <ul style="list-style-type: none"> 器具洗浄用廃液 硝酸アンモニウム廃液（約500l） シリコンオイルの廃油（約50～100l） 四塩化炭素等の廃溶媒（約1000～2000l） 滤布 焼結皿 転換不良品 | <ul style="list-style-type: none"> ・線量の高い廃液が発生する ・硝酸アンモニウムの処理法が確立していない ・廃油処理法が確立していない ・処理法が確立していない ・線量の高い廃棄物が発生する ・不燃物として定常的に発生する ・溶解性が悪い（湿式回収の場合） | <ul style="list-style-type: none"> ・廃液処理法の確立（例えば、CMP含浸吸着剤、イオン交換樹脂等による処理） ・硝酸アンモニウムの処理法の確立（例えば、硝酸イオンとアンモニアイオンを分離する） ・廃油固化技術の開発（放射性物質を取り扱う真空装置等でも要求がある） ・脱塩技術の確立（可燃物と共に燃やしてしまう場合） ・高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 ・金属廃棄物の減容化処理 ・電解溶解あるいは加圧溶解技術の確立 |
| 焼結工程 | 焼成 → 脱ガス | 不良品顆粒 | ・溶解性が悪い（湿式回収の場合） |
| 検査、加工工程 | 粒配合 → バイパック → 密度分布検査 | <ul style="list-style-type: none"> 除染用布等 不良品 | <ul style="list-style-type: none"> ・線量の高い廃棄物が発生する ・不良品顆粒及びビンが発生する |
| | | | <ul style="list-style-type: none"> ・電解溶解あるいは加圧溶解技術の確立 ・高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 ・電解溶解あるいは加圧溶解技術の確立 ・金属廃棄物の減容化処理 |

■ : リサイクルできるもの

表-19 TRU燃料製造工程に於ける予測発生廃棄物形態の問題点と対策案

| 製造・加工フロー | 発生が予想される廃棄物の形態とその量 | 問題点 | 対策案 |
|---|---|--|---|
| 転換工程（液滴ゲル化法） 原液 溶液調整 液滴 ゲル化 洗浄 乾燥 ばい焼・還元 混晶颗粒 | <ul style="list-style-type: none"> 器具洗浄用廃液 硝酸アンモニウム廃液（約500l） シリコンオイルの廃油（約50～100l） 四塩化炭素等の廃溶媒（約1000～2000l） 滤布 焼結皿 難燃不燃物 | <ul style="list-style-type: none"> 線量の高い廃棄物が発生する 爆発性を有する、処理法が確立していない 廃油処理法が確立していない 処理法が確立していない 線量の高い廃棄物が発生する 不燃物として定常的に発生する 溶解性が悪い（湿式回収の場合） | <ul style="list-style-type: none"> 廃液処理法の確立（例えば、CMP含浸吸着剤、イオン交換樹脂等による処理） 硝酸アンモニウムの処理法の確立（例えば、硝酸イオンとアンモニアイオンを分離する） 廃油固化技術の開発（放射性物質を取り扱う真空装置等でも要求がある） 脱塩技術の確立（可燃物と共に燃やしてしまう場合） 高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 金属廃棄物の減容化処理 電解溶解あるいは加圧溶解技術の確立 |
| 成型工程（金型成型法） Binder添加混合 金型成形 | クリーンナップ用ウエス、紙等 | 線量の高い廃棄物が発生する | 高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 |
| 焼結工程 脱脂 焼成 脱ガス | | | 高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 |
| 検査、加工工程 検査 ペレット充填 | <ul style="list-style-type: none"> 不良パレット 除染用布等 | <ul style="list-style-type: none"> 溶解性が悪い（湿式回収の場合） 線量の高い廃棄物が発生する | <ul style="list-style-type: none"> 電解溶解あるいは加圧溶解技術の確立 高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 |

: リサイクルできるもの

表-20 TRU燃料製造工程に於ける予測発生廃棄物形態の問題点と対策案

| 製造・加工フロー | 発生が予想される廃棄物の形態とその量 | 問題点 | 対策案 |
|-------------|--|---|---|
| 転換工程（化学沈殿法） | <ul style="list-style-type: none"> 器具洗浄用廃液 クリーンナップ用ウエス、紙等 硝酸アンモニウム廃液（約1760l） 滤液 滤布 <p>・製品洗浄廃液</p> <p>■不良品</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・廃液処理法が確立していない ・硝酸アンモニウムの処理法が確立していない ・線量の高い廃棄物が発生する <p>・廃液処理法が確立していない</p> <p>・溶解性が悪い（湿式回収の場合）</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・廃液処理法の確立（例えば、CMP含浸吸着剤、イオン交換樹脂等による処理） ・硝酸アンモニウムの処理法の確立 ・高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 <p>・廃液処理法の確立（例えば、CMP含浸吸着剤、イオン交換樹脂等による処理）</p> <p>・電解溶解あるいは加圧溶解技術の確立</p> |
| 成型工程（押出成型法） | <ul style="list-style-type: none"> クリーンナップ用ウエス、紙等 <p>■不良品</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・線量の高い廃棄物が発生する ・溶解性が悪い（湿式回収の場合） | <ul style="list-style-type: none"> ・高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 ・電解溶解あるいは加圧溶解技術の確立 |
| 焼結工程 | <ul style="list-style-type: none"> ・焼結皿 | <ul style="list-style-type: none"> ・不燃物として定常的に発生する | <p>金属廃棄物の減容化処理</p> <p>・高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立</p> |
| 検査・加工工程 | <p>■不良ベレット or 長尺燃料</p> <ul style="list-style-type: none"> ・除染用布等 | <ul style="list-style-type: none"> ・溶解性が悪い（湿式回収の場合） ・線量の高い廃棄物が発生する | <ul style="list-style-type: none"> ・電解溶解あるいは加圧溶解技術の確立 ・高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 |

■ : リサイクルできるもの

表-21 TRU燃料製造工程に於ける予測発生廃棄物形態の問題点と対策案

| 製造・加工フロー | 発生が予想される廃棄物の形態とその量 | 問題点 | 対策案 |
|-----------------|--|--|---|
| 転換工程（ドラムドライヤー法） | <ul style="list-style-type: none"> 器具洗浄用廃液 クリーンナップ用ウエス、紙等 (硝酸：約420l) 製品洗浄廃液 不良品 | <ul style="list-style-type: none"> 廃液処理法が確立していない 線量の高い廃棄物が発生する 廃液処理法が確立していない 溶解性が悪い（湿式回収の場合） | <ul style="list-style-type: none"> 廃液処理法の確立（例えば、CMP含浸吸着剤、イオン交換樹脂等による処理） 高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 廃液処理法の確立（例えば、CMP含浸吸着剤、イオン交換樹脂等による処理） 電解溶解あるいは加圧溶解技術の確立 |
| 成型工程（押出成型法） | <ul style="list-style-type: none"> クリーンナップ用ウエス、紙等 不良好品 | 線量の高い廃棄物が発生する | 高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 |
| 焼結工程 | <ul style="list-style-type: none"> 焼結皿 | 不燃物として定常に発生する | <ul style="list-style-type: none"> 金属廃棄物の減容化処理 高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 |
| 検査・加工工程 | <ul style="list-style-type: none"> 不良ペレットor長尺燃料 除染用布等 | <ul style="list-style-type: none"> 溶解性が悪い（湿式回収の場合） 線量の高い廃棄物が発生する | <ul style="list-style-type: none"> 電解溶解あるいは加圧溶解技術の確立 高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 |

■ : リサイクルできるもの

表-22 TRU燃料製造工程に於ける予測発生廃棄物形態の問題点と対策案

| 製造・加工フロー | 発生が予想される廃棄物の形態とその量 | 問題点 | 対策案 |
|---------------------|---|--|---|
| 転換工程（噴霧熱分解法） | <ul style="list-style-type: none"> 器具洗浄用廃液 クリーンナップ用ウエス、紙等 (硝酸；約420l) <p style="color: #ccc;">■ 不良品</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・廃液処理法が確立していない ・線量の高い廃棄物が発生する <ul style="list-style-type: none"> ・廃液処理法が確立していない | <ul style="list-style-type: none"> ・廃液処理法の確立（例えば、CMP含浸吸着剤、イオン交換樹脂等による処理） ・高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 <ul style="list-style-type: none"> ・廃液処理法の確立（例えば、CMP含浸吸着剤、イオン交換樹脂等による処理） |
| 成型工程 (押出成型法) | <ul style="list-style-type: none"> クリーンナップ用ウエス、紙等 | <ul style="list-style-type: none"> ・線量の高い廃棄物が発生する | <ul style="list-style-type: none"> ・高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 |
| 焼結工程 | <ul style="list-style-type: none"> 焼結皿 | <ul style="list-style-type: none"> ・不燃物として定常的に発生する ・線量の高い濾布等の廃棄物が発生する | <ul style="list-style-type: none"> ・金属廃棄物の減容化処理 ・高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 |
| 検査 、 加工 工程 | <ul style="list-style-type: none"> 不良ペレットの長尺燃料 除染用布等 | <ul style="list-style-type: none"> ・溶解性が悪い（湿式回収の場合） ・線量の高い廃棄物が発生する | <ul style="list-style-type: none"> ・電解溶解あるいは加圧溶解技術の確立 ・高放射性可燃、難燃廃棄物の処理技術の確立 |

■ : リサイクルできるもの

表-23 各元素の同位体組成比
(PWR燃料、55,000MWd/t、3年冷却)

| 核種 | 組成比(%) |
|---------|--------|
| U-235 | 0.7 |
| U-236 | 0.7 |
| U-238 | 98.6 |
| Pu-238 | 3.2 |
| Pu-239 | 50.7 |
| Pu-240 | 24.5 |
| Pu-241 | 13.4 |
| Pu-242 | 8.2 |
| Np-237 | 100 |
| Am-241 | 53.6 |
| Am-242m | 0.2 |
| Am-234 | 46.2 |
| Cm-243 | 1.2 |
| Cm-244 | 92.7 |
| Cm-245 | 6.1 |

表-24 Pu低除染溶液、U精製溶液、TRU溶液の混合による
TRU燃料組成の計算例

| 項目 | Case-1 TRU：約1.5% 希土類：約4.8% | Case-2 TRU：約2.0% 希土類：約9.6% | Case-3 TRU：約2.8% 希土類：約19% | Case-3 TRU：約1.5% (Npのみ) 希土類：なし |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---|
| Pu低除染溶液 (係数a) * | 5.01 | 2.873 | 1.566 | 1 |
| U精製溶液 (係数b) * | 0.304(24.3/80) | 0.137(11/80) | 0.057(4.6/80) | 0.063(5/80) |
| TRU溶液 (係数c) * | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Pu(%) | 16.0 | 18.3 | 20 | 16.4 |
| Np(%) | 1.46 | 1.67 | 1.82 | 1.5 |
| U(%) | 77.54 | 70.0 | 58.18 | 82.1 |
| Am(%) | 0.144 | 0.29 | 0.58 | - |
| Cm(%) | 0.023 | 0.048 | 0.095 | - |
| Tc(%) | 0.016 | 0.032 | 0.065 | - |
| RE(%) | 4.79 | 9.58 | 19.16 | - |
| Ru(%) | 0.027 | 0.054 | 0.11 | - |

*係数a, b, cは式 $T_{TRU}=af(Pu)+bf(U)+cf(TRU)$ の値

表-25 100万kWe基準FBRの主要炉心仕様

| 項目 | 仕様 |
|--|---|
| 1. プラント基準仕様 ・原子炉熱出力 ・冷却材温度（原子炉出口/入口） ・冷却材流量 ・運転サイクルの長さ ・プラント寿命 | 2517MWt 530/375°C 1.27×10^4 kg/s 456日 40年 |
| 2. 炉心 ・炉心型式 ・炉心構成 ・炉心燃料集合体（内側/外側） ・径ブランケット集合体 ・制御棒（主/後備） ・遮蔽体（SUS/B ₄ C） ・炉心寸法（等価直徑/高さ） ・軸ブランケット厚さ（上/下） | 2領域均質炉心 図1参照 175/180体 72体 18/6体 78/270体 3.68/1.00m 0.20/0.20m |
| 3. 炉心燃料 ・材質 ・Pu組成比（238/239/240/241/242） ・Pu富化度（内側/外側） ・燃料交換方式 | PuO ₂ ・UO ₂ 3.2/50.7/24.5/13.4/8.2 (PWR、55GWd/t、冷却3年) 15.3/19.4wt% 3バッチ分散 |
| 4. ブランケット ・材質 ・U組成比（235/238） ・径ブランケット交換方式 | UO ₂ 0.3/99.7 4バッチ分散 |

表-26 炉心特性の比較（平衡サイクル）

| | TRUなし (基準炉心) | TRU: 5% 希土類なし | Case-1 TRU: 約1.5% 希土類: 約4.8% | Case-2 TRU: 約2.8% 希土類: 約19% | Case-3 TRU: 約1.5% (Npのみ) 希土類なし |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---|
| Pu富化度 (IC/OC) | 15.3/19.4 | 14.9/18.7 | 16.2/20.7 | 18.3/23.3 | 15.2/19.2 |
| k_{eff} (BOEC/EOEC) | 1.0286/1.0027 | 1.0138/1.0030 | 1.0353/1.0029 | 1.0602/1.0044 | 1.0242/1.0025 |
| 燃焼反応 | 2.51% $\Delta k/kk'$ | 1.06% $\Delta k/kk'$ | 3.12% $\Delta k/kk'$ | 5.25% $\Delta k/kk'$ | 2.1% Dk/kk' |
| 増殖比 (BOEC/EOEC) | 1.25/1.21 | 1.24/1.21 | 1.15/1.15 | 0.95/0.99 | 1.24/1.20 |
| 最大線出力 (w/cm, RZ計算) (BOEC/EOEC) | 376/375 | 382/379 | 382/346 | 384/338 | 381/368 |
| TRU消滅量* (サイクル) | -65.4kg | 158kg | 19.4kg | 45.4kg | 17.7kg |
| TRU消滅率** (サイクル) | - | 10.0% | 3.5% | 5.5% | 3.5% |

*初期インベントリと末期インベントリの差

**TRU消滅量/初期インベントリ

表-27 各TRU組成及び混入率での燃料溶融線出力、
燃料融点

| TRU混入率(%) | TRU-1(Np+Am+Cm) | TRU-2(Np) |
|-----------|--------------------|--------------------|
| 0 | 497 W/cm 2750°C | 497 W/cm 2750°C |
| 5 | 482 W/cm 2733°C | 489 W/cm 2741°C |
| 10 | 468 W/cm 2715°C | 481 W/cm 2731°C |
| 30 | 410 W/cm 2645°C | 454 W/cm 2693°C |
| 50 | 350 W/cm 2575°C | 432 W/cm 2655°C |

表-28 炉心特性の比較(平衡サイクル、ブランケット装荷)

| | TRUなし (基準炉心) | TRU: 5% 希土類なし | Case-4 径ブランケット にTRU装荷 TRU: 約5% 希土類: なし | Case-5 径ブランケット にTRU装荷 TRU: 約2.8% 希土類: 約19% |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|--|--|
| Pu富化度 (IC/OC) | 15.3/19.4 | 14.9/18.7 | 15.3/19.4 | 15.3/19.4 |
| k_{eff} (BOEC/EOEC) | 1.0286/1.0027 | 1.0138/1.0030 | 1.0286/1.0027 | 1.0329/1.0074 |
| 燃焼反応度 | 2.51% $\Delta k/kk'$ | 1.06% $\Delta k/kk'$ | 2.51% $\Delta k/kk'$ | 2.45% $\Delta k/kk'$ |
| 増殖比 (BOEC/EOEC) | 1.25/1.21 | 1.24/1.21 | 1.24/1.20 | 1.25/1.22 |
| 最大線出力 (w/cm, RZ計算) (BOEC/EOEC) | 376/375 | 382/379 | 377/372 | 370/343 |
| TRU消滅量* (炉心全体) | -65.4kg | 158kg | -41.6kg | -51kg |
| TRU消滅率** (炉心全体) | - | 10.0% | -7.7% | -16.8% |
| TRU消滅量* (ブランケット 部のみ) | - | - | 23.6kg | 14.2kg |
| TRU消滅率** (ブランケット 部のみ) | - | - | 5.1% | 6.3% |

*初期インベントリと末期インベントリの差

**TRU消滅量/初期インベントリ

表-29 TRU元素のインベントリ、消滅率(炉心全体)
(Case-4、TRUブランケット装荷、TRU:5%、希土類なし)

| | インベントリ(kg) BOEC/EOEC | 消滅量 (kg) |
|---------|-------------------------|--------------|
| Np-237 | 273/266.2 | 6.8 |
| Am-241 | 115.4/134 | -18.6 |
| Am-242m | 2.8/4.8 | -2.0 |
| Am-243 | 96/111.8 | -15.8 |
| Cm-242 | 3.6/5.8 | -2.2 |
| Cm-243 | 0.6/0.6 | 0 |
| Cm-244 | 44.4/53 | -8.6 |
| Cm-245 | 3.8/5 | -1.2 |
| 合計 | 539.6/581.2 | -41.6(-7.7%) |

表-30 TRU元素のインベントリ、消滅率(ブランケット部)
(Case-4、TRUブランケット装荷、TRU:5%、希土類なし)

| | インベントリ(kg) BOEC/EOEC | 消滅量 (kg) |
|---------|-------------------------|-------------|
| Np-237 | 259.8/241.8 | 18 |
| Am-241 | 82/76 | 6 |
| Am-242m | 1.8/2.6 | -0.8 |
| Am-243 | 72/67.4 | 4.6 |
| Cm-242 | 1.6/2.2 | -0.6 |
| Cm-243 | 0.4/0.4 | 0.0 |
| Cm-244 | 40.6/43.4 | -2.8 |
| Cm-245 | 3.6/4.4 | -0.8 |
| 合計 | 461.8/438.2 | 23.6(5.1%) |

表-31 TRU元素のインベントリ、消滅率(炉心全体)
(Case-5、TRUブランケット装荷、TRU:2.8%、希土類:19%)

| | インベントリ(kg) BOEC/EOEC | 消滅量 (kg) |
|---------|-------------------------|-------------|
| Np-237 | 173.4/172.4 | 1.0 |
| Am-241 | 61/83.6 | -22.6 |
| Am-242m | 1.6/3.0 | -1.4 |
| Am-243 | 47.8/66.4 | -18.6 |
| Cm-242 | 2.6/4.4 | -1.8 |
| Cm-243 | 0.2/0.4 | -0.2 |
| Cm-244 | 15/21.8 | -6.8 |
| Cm-245 | 1.2/1.8 | -0.6 |
| 合計 | 302.8/353.8 | -51(-16.8%) |

表-32 TRU元素のインベントリ、消滅率(ブランケット部)
(Case-5、TRUブランケット装荷、TRU:2.8%、希土類:19%)

| | インベントリ(kg) BOEC/EOEC | 消滅量 (kg) |
|---------|-------------------------|-------------|
| Np-237 | 160.4/148.4 | 12 |
| Am-241 | 27.6/25.4 | 2.2 |
| Am-242m | 0.6/1.0 | -0.4 |
| Am-243 | 24.2/22.4 | 1.8 |
| Cm-242 | 0.6/0.8 | -0.2 |
| Cm-243 | 0.2/0.2 | 0 |
| Cm-244 | 11.4/12.4 | -1.0 |
| Cm-245 | 1.0/1.2 | -0.2 |
| 合計 | 226/211.8 | 14.2(6.3%) |

表-33 中性子発生量及び発熱量の計算結果 (ORIGEN2)

| | TRUなし (基準炉心) | TRU: 約5% 希土類なし | Case-1 TRU: 約1.5% 希土類: 約4.8% | Case-2 TRU: 約2.8% 希土類: 約19% | Case-3 TRU: 約1.5% (Npのみ) 希土類: なし |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---|
| 中性子発生量 (新燃料) | 1.8×10^7 n/sec | 4.0×10^9 n/sec | 2.6×10^8 n/sec | 1.1×10^9 n/sec | 1.8×10^7 n/sec |
| 中性子発生量 (使用済燃料 、取り出し後 2年冷却) | 4.3×10^8 n/sec | 4.2×10^9 n/sec | 7.3×10^8 n/sec | 1.6×10^9 n/sec | 4.2×10^8 n/sec |
| 発熱量 (新燃料) | 0.4kw | 1.3kw | 0.4kw | 0.7kw | 0.4kw |
| 発熱量 (使用済燃料 、取り出し後 2年冷却) | 0.45kw | 2.2kw | 0.8kw | 1.2kw | 0.7kw |

中性子発生量及び発熱量とも集合体当りの値である。

表-34 新燃料と使用済燃料の線量当量率比較

| 燃料タイプ | 新燃料時 | | | 燃焼後2年冷却時 | | |
|---------------------|--------|------------|--------|----------|------------|------|
| | 中性子 | γ 線 | 合計 | 中性子 | γ 線 | 合計 |
| 基準 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 均質装荷 TRU 5% | 213.62 | 326.94 | 256.62 | 9.95 | 0.95 | 0.96 |
| TRU 1.5% 希土類 5% | 41.41 | 22.51 | 17.46 | 1.62 | 0.99 | 0.99 |
| TRU 2.8% 希土類 19% | 57.96 | 102.13 | 74.56 | 3.74 | 0.99 | 0.99 |
| Npのみ 1.5% | 1.53 | 1.09 | 1.37 | 0.98 | 1.0 | 1.0 |

表-35 もんじゅ燃料とTRU燃料の仕様比較

| 燃料 | もんじゅ燃料 | TRU燃料 (TRU約 5%、希土類無し) | TRU燃料 (TRU約 1.5%、希土類約 4.8%) | バイパック燃料 (TRU約 5%、希土類無し) |
|-------------------|--|--|--|--|
| 検査項目 | 規格値 | 想定される仕様 | 想定される仕様 | 想定される仕様 |
| 1.材料検査 | | | | |
| (1) 等価フィッサイル富化度 | プルトニウム-ウラン混合酸化物 内側 0.153±0.005 外側 0.223±0.006 | (Pu富化度) 内側 0.149 外側 0.187 士の公差を大きくする必要がある | (Pu富化度) 内側 0.162 外側 0.207 士の公差を大きくする必要がある | (Pu富化度) 内側 0.152 外側 0.192 士の公差を大きくする必要がある |
| (2) U-235濃縮度 | 0.2±0.05wt% | TRU約5wt% 士の公差を大きくする必要がある | TRU約1.5wt%,RE4.8wt% 士の公差を大きくする必要がある | TRU約5wt% 士の公差を大きくする必要がある |
| (3) Pu+U含有率 | ≥ 86.7wt% | | | |
| (4) O/M比 | 1.97± ^{0.02} _{0.03} | MOX燃料より公差が大きくなる | MOX燃料より公差が大きくなる | MOX燃料より公差が大きくなる |
| (5) 蒸発性不純物(水分を含む) | ≤ 180/g(PuO ₂ -UO ₂) | MOX燃料より公差が大きくなる | MOX燃料より士の公差が大きくなる | MOX燃料より士の公差が大きくなる |
| (6) 金属不純物 | 不純物合計 ≤4000(ppm) | MOX燃料より変動が大きくなる | MOX燃料より変動が大きくなる | MOX燃料より変動が大きくなる |
| 2.外観検査 | ・表面に割れ、きず等で有害なものがないこと。 ・表面に油脂、酸化物等で有害な付着物がないこと。 | MOX燃料より悪くなる | MOX燃料より悪くなる | 関係なし |
| 3.寸法検査 外径 | 5.40±0.05mm | 寸法精度は落ちる | 寸法精度は落ちる | 関係なし |
| 4.密度検査 | 85.0±2.0%T.D | 平均密度95%より低下 | 平均密度95%より低下 | 平均密度95%より低下、ペレットより偏差大 |
| 5.プルトニウム均一度検査 | プルトニウムスポット径 (100%PuO ₂) ≤100 μm | Np,Am,Cmスポットの発生する可能性あり | Np,Am,Cm,希土類スポットの発生する可能性あり | ペレットより軸方向均一度低下 |
| ペレットの物性指標 | (規格として定められていない) | | | |
| 1.融点 | <2650°C (制限値) | | | |
| 2.熱伝導度(W/cm°C) | $k=0.01169 + \frac{0.02226 \cdot (1-\rho)}{0.06717 + \frac{\rho}{O/M-1.90}} + 0.721 \times 10^{-12} T^3$ | 下がる 悪くなる | 下がる 悪くなる | 下がる 悪くなる |
| 3.被覆管との反応性 | | | | |
| 4.クリープ特性 | } 所定燃焼度まで問題なし | } 全体的に悪くなる | } 全体的に悪くなる | } 全体的に悪くなる |
| 5.Naとの反応性 | | | | |

*: GEAP-13967(1973)

表-36 希土類元素の核的評価

LMFBRスペクトルとPWRスペクトルで縮約した1群吸收断面積

| Elements | Isotope | Thermal Cross Section (barn) | Fast Cross Section (barn) | $\sigma(\text{Fast})/\sigma(\text{Thermal})$ |
|----------|---------|------------------------------|---------------------------|--|
| Y | Y-89 | 0.1332 | 0.0220 | 1.652e-1 |
| La | La-139 | 1.0430 | 0.0378 | 3.624e-2 |
| Ce | Ce-140 | 0.0631 | 0.0171 | 2.710e-1 |
| | Ce-142 | 0.1061 | 0.0318 | 2.997e-1 |
| | Ce-144* | 0.1491 | 0.0492 | 3.300e-1 |
| Pr | Pr-141 | 1.9166 | 0.1541 | 8.040e-2 |
| Nd | Nd-142 | 1.7100 | 0.0373 | 2.181e-2 |
| | Nd-143 | 28.669 | 0.2918 | 1.018e-2 |
| | Nd-144* | 0.4715 | 0.0913 | 1.936e-1 |
| | Nd-145 | 9.3817 | 0.3269 | 3.484e-2 |
| | Nd-146 | 0.2425 | 0.1211 | 4.994e-1 |
| | Nd-148 | 0.8678 | 0.1748 | 2.014e-1 |
| | Nd-150 | 0.6467 | 0.2151 | 3.326e-1 |
| Pm | Pm-147* | 93.923 | 2.7870 | 2.967e-2 |
| Sm | Sm-147* | 23.917 | 0.7703 | 3.221e-2 |
| | Sm-148 | 1.1370 | 0.3267 | 2.873e-1 |
| | Sm-149 | 727.60 | 1.3555 | 1.863e-3 |
| | Sm-150 | 15.290 | 0.3885 | 2.541e-2 |
| | Sm-151* | 726.02 | 2.0973 | 2.889e-3 |
| | Sm-152 | 75.632 | 0.3907 | 5.166e-3 |
| | Sm-154 | 1.5180 | 0.2018 | 1.329e-1 |
| Eu | Eu-153 | 71.772 | 2.1636 | 3.015e-2 |
| | Eu-154* | 128.60 | 2.5780 | 2.005e-2 |
| | Eu-155* | 365.50 | 2.4047 | 6.579e-3 |
| Gd | Gd-154 | 13.487 | 0.9304 | 6.898e-2 |
| | Gd-155 | 2757.0 | 1.8570 | 6.736e-4 |
| | Gd-156 | 3.7700 | 0.4280 | 1.135e-1 |
| | Gd-158 | 1.7950 | 0.2677 | 1.491e-1 |
| | Gd-160 | 0.3705 | 0.1931 | 5.212e-1 |
| Tb | Tb-159 | 16.689 | 1.3348 | 7.998e-2 |
| Dy | Dy-160 | 49.380 | 1.8510 | 3.748e-2 |
| | Dy-161 | 76.190 | 2.0300 | 2.664e-2 |
| | Dy-162 | 74.540 | 0.8019 | 1.076e-2 |
| | Dy-163 | 48.200 | 0.8936 | 1.854e-2 |
| | Dy-164 | 334.00 | 0.6008 | 1.799e-3 |

表-37 希土類元素の核的評価

LMFBRスペクトルとPWRスペクトルで縮約した核分裂性ウラニウム及び
プルトニウムの核分裂断面積

| Elements | Isotope | Thermal Cross Section (barn) | Fast Cross Section (barn) | σ (Fast) / σ (Thermal) |
|----------|---------|------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| U | U-235 | 46.71 | 1.865 | 3.993e-2 |
| Pu | Pu-239 | 106.2 | 1.822 | 1.716e-2 |
| | Pu-241 | 118.1 | 2.439 | 2.065e-2 |

表-38 希土類元素の核的評価結果

LMFBRスペクトルとPWRスペクトルで縮約した1群吸収断面積と
核分裂性ウラニウム及びプルトニウムの核分裂断面積

| Elements | Isotope | Neutron Absorption Cross Section of Rear Earth Isotopes to Fission Cross Section of Fissiles(Thermal) | | | Neutron Absorption Cross Section of Rear Earth Isotopes to Fission Cross Section of Fissiles(Fast) | | |
|----------|---------|---|--------|--------|--|--------|--------|
| | | U-235 | Pu-239 | Pu-241 | U-235 | Pu-239 | Pu-241 |
| Y | Y-89 | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.012 | 0.012 | 0.009 |
| La | La-139 | 0.022 | 0.010 | 0.009 | 0.020 | 0.021 | 0.015 |
| Ce | Ce-140 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.009 | 0.009 | 0.007 |
| | Ce-142 | 0.002 | 0.001 | 0.001 | 0.017 | 0.017 | 0.013 |
| | Ce-144* | 0.003 | 0.001 | 0.001 | 0.026 | 0.027 | 0.020 |
| Pr | Pr-141 | 0.041 | 0.018 | 0.016 | 0.083 | 0.085 | 0.063 |
| Nd | Nd-142 | 0.037 | 0.016 | 0.014 | 0.020 | 0.020 | 0.015 |
| | Nd-143 | 0.614 | 0.270 | 0.243 | 0.156 | 0.160 | 0.120 |
| | Nd-144* | 0.010 | 0.004 | 0.004 | 0.049 | 0.050 | 0.037 |
| | Nd-145 | 0.201 | 0.088 | 0.079 | 0.175 | 0.179 | 0.134 |
| | Nd-146 | 0.005 | 0.002 | 0.002 | 0.065 | 0.066 | 0.050 |
| | Nd-148 | 0.019 | 0.008 | 0.007 | 0.094 | 0.096 | 0.072 |
| | Nd-150 | 0.014 | 0.006 | 0.005 | 0.115 | 0.118 | 0.088 |
| Pm | Pm-147* | 2.011 | 0.884 | 0.795 | 1.494 | 1.530 | 1.143 |
| Sm | Sm-147* | 0.512 | 0.225 | 0.203 | 0.413 | 0.423 | 0.316 |
| | Sm-148 | 0.024 | 0.011 | 0.010 | 0.175 | 0.179 | 0.134 |
| | Sm-149 | 15.577 | 6.851 | 6.161 | 0.727 | 0.744 | 0.556 |
| | Sm-150 | 0.327 | 0.144 | 0.129 | 0.208 | 0.213 | 0.159 |
| | Sm-151* | 15.543 | 6.836 | 6.148 | 1.125 | 1.151 | 0.860 |
| | Sm-152 | 1.619 | 0.712 | 0.640 | 0.209 | 0.214 | 0.160 |
| | Sm-154 | 0.032 | 0.014 | 0.013 | 0.108 | 0.111 | 0.083 |
| Eu | Eu-153 | 1.537 | 0.676 | 0.608 | 1.160 | 1.187 | 0.887 |
| | Eu-154* | 2.753 | 1.211 | 1.089 | 1.382 | 1.415 | 1.057 |
| | Eu-155* | 7.825 | 3.442 | 3.095 | 1.289 | 1.320 | 0.986 |
| Gd | Gd-154 | 0.289 | 0.127 | 0.114 | 0.499 | 0.511 | 0.381 |
| | Gd-155 | 59.024 | 25.960 | 23.345 | 0.996 | 1.019 | 0.761 |
| | Gd-156 | 0.081 | 0.035 | 0.032 | 0.229 | 0.235 | 0.175 |
| | Gd-158 | 0.038 | 0.017 | 0.015 | 0.144 | 0.147 | 0.110 |
| | Gd-160 | 0.008 | 0.003 | 0.003 | 0.104 | 0.106 | 0.079 |
| Tb | Tb-159 | 0.357 | 0.157 | 0.141 | 0.716 | 0.733 | 0.547 |
| Dy | Dy-160 | 1.057 | 0.465 | 0.418 | 0.992 | 1.061 | 0.759 |
| | Dy-161 | 1.631 | 0.717 | 0.645 | 1.088 | 1.114 | 0.832 |
| | Dy-162 | 1.596 | 0.702 | 0.631 | 0.430 | 0.440 | 0.329 |
| | Dy-163 | 1.032 | 0.454 | 0.408 | 0.479 | 0.490 | 0.366 |
| | Dy-164 | 7.151 | 3.145 | 2.828 | 0.322 | 0.330 | 0.246 |

表-39 核拡散抵抗性評価

| 核拡散防止強化手段 | TRUリサイクルについての評価 |
|--|---|
| (1) 技術的手段（代替技術を含む） <ol style="list-style-type: none"> 1. 転用防止のためにスパイクを添加 2. 混合転換技術の採用など | スパイク添加の一種と考えられる <input type="radio"/> Sub-nationalな盗難には有効 <input type="radio"/> 核拡散抵抗性に対しては限定的效果 (原子力先進国はPu抽出可能…転換時間が長くなるだけ) |
| (2) 保障措置の改善、強化 <ol style="list-style-type: none"> 1. 施設設計段階での保障措置戦略 2. 封じ込め・監視技術の向上 3. 計量管理の改良 (NRTA等) | 保障措置性（計量管理、査察） 有意量……不变(8kg Pu) 転換時間…[月のオーダー]/[週のオーダー] 接近困難…高度の遠隔保障措置システム |
| (3) 核物質防護の改善、強化 <ol style="list-style-type: none"> 1. 施設 2. 輸送（方法、頻度） | 核物質防護性 区分…[区分Ⅰ]/[区分Ⅱ] 輸送…頻度減少(共同立地の場合) |
| (4) 制度的手段 例えばINFCE(国際核燃料サイクル評価)で提案された構想 <ol style="list-style-type: none"> 1. ISFM (国際使用済燃料管理) 2. RFCC (地域核燃料サイクルセンター) 3. IPS (国際プルトニウム貯蔵) 他にロンドンガイドライン(機微技術・物質の輸出入規制)など | 制度的対応 <input type="radio"/> 新RFCC (透明性向上) …センターの国際共同運営 |

表-40 完成したプルトニウム又はウラン金属構成要素
への推定物質転換時間

| 最初の物質の形態 | 転換時間 |
|---|--------------------------------|
| プルトニウム、高濃縮ウラン、又はウラン233金属 | 日のオーダー (7~10日) |
| 二酸化プルトニウム、硝酸プルトニウム又はプルトニウム純化合物； 高濃縮ウラン又はウラン233の酸化物、その他の純化合物； 混合酸化物又は、プルトニウム及びウラン ((ウラン233+ウラン235)≥20%) を含有するその他の未照射純混合物； スクラップその他の種々の不純化合物中のプルトニウム、高濃縮ウラン及び/又はウラン233 | 週のオーダー (1~3週間) ^a |
| 照射済燃料中のプルトニウム、高濃縮ウラン又はウラン233 | 月のオーダー (1~3ヶ月) |
| ウラン235及び233で20%未満含有のウラン、トリウム | 1年のオーダー |

a：この範囲は1つの因子だけでは決らないが、プルトニウム及びウランの純化合物は当該範囲の下端の方に、又、混合物及びスクラップは上端の方に位置する傾向にある。

表-41 核物質防護の区分

| 物質 | 形態 | 区分 | | |
|---------------|-----------------------------------|----------|--|---------------------|
| | | I | II | III(注c) |
| 1. プルトニウム(注a) | 未照射(注b) | 2キログラム以上 | 500グラムを超える2キログラム未満 | 15グラムを超える500グラム以下 |
| 2. ウラン-235 | 未照射(注b) ウラン-235の濃縮度が20%以上のウラン | 5キログラム以上 | 1キログラムを超える5キログラム未満 | 15グラムを超える1キログラム以下 |
| | ウラン-235の濃縮度が20%未満のウラン | | 10キログラム以上 | 1キログラムを超える10キログラム未満 |
| | ウラン-235の濃縮度が天然ウランのそれを超える10%未満のウラン | | | 10キログラム以上 |
| 3. ウラン-233 | 未照射(注b) | 2キログラム以上 | 500グラムを超える2キログラム未満 | 15グラムを超える500グラム以下 |
| 4. 照射済燃料 | | | 劣化ウラン、天然ウラン、トリウム又は低濃縮燃料(核分裂性成分10%未満)(注d) | |

注a プルトニウム-238の同位体濃度が80%を超えない全てのプルトニウム

注b 原子炉内で照射されていない物質、又は原子炉内で照射された物質であって遮蔽がない場合に1m離れた地点で1時間当たり100rad以下の放射線量率を有するもの

注c 区分IIIに掲げる量未満のもの及び天然ウラン、劣化ウラン、トリウムは慣行による慎重な管理に従って防護するものとする

注d 他の燃料であって、当初の核分裂性物質含有量により、照射前に区分I、又は区分IIに分類されているものについては、遮蔽がない場合にその燃料からの放射線量率が1m離れた地点で1時間当たり100radを超える間は防護の区分を1ランク下げることができる

表-42 再処理において実施すべきR&D項目

| 再処理工程フロー | 実施すべき研究開発課題 | |
|--|---|------------------------|
| | 方法 | 装置 |
| <pre> graph TD A[せん断] --> B[溶解] B --> C[清澄・調整] C --> D[抽出工程] D --> E[Pu濃縮工程] D --> F[U濃縮工程] E --> G[U脱硝工程] F --> G </pre> | <p>NpのPu製品側への回収 ・ビーカ試験によるNp抽出条件の把握 ・OTLにおける小型試験装置を使用した、抽出条件(温度、酸濃度、流量等)の把握試験 ・東海工場による実試験</p> | 抽出器の加温装置 (分離第2サイクル) |

表-43 主なアクチニド/ランタニド分離法（溶媒抽出法）

| 抽出溶媒 | 溶液、錯化剤 | 実施機関 | |
|-------------------------------|--|-----------------|------|
| トリイソオクチルアミン -キシレン | 塩酸-塩化リチウム | ORNL | ~'60 |
| HDEHP | カルボン酸 ¹⁾ 溶液 -アミノポリ酢酸 ²⁾ | ORNL(TALSPEAK法) | ~'60 |
| HDNNS ³⁾ -四塩化炭素 | 硝酸-TPTZ ³⁾ | 仏(CEA) | ~'80 |
| DMDBTPD ⁴⁾ | チオシアノ酸溶液 | 仏(CEA) | ~'90 |
| DIDPA ⁵⁾ -TBP-ドデカン | DTPA-乳酸 | 原研 | ~'90 |

1) 乳酸、グリコール酸、クエン酸等

2) DTPA、NTA、HEDTA、DCTA、TTA

3) TPTZ: tris(2, 4, 6-(2-pyridyl))1, 3, 5-triazine, HDNNS: dinonylnaphthalene acid

4) DMDBTPD: N, N-dimethylbutyl 2-tetradecane propane 1, 3-diamide

5) DIDPA: diisodecylphosphoric acid

表-44 主なアクチニド/ランタニド分離法（イオン交換法）

陽イオン交換法

| 主な樹脂 | 溶出剤 | 開発時期 |
|----------|----------|--------|
| Dowex-50 | アミノポリ酢酸* | 1940年代 |

* クエン酸アンモニウム、乳酸アンモニウム、 α -ヒドロキシイソ酪酸アンモニウム

陰イオン交換法

| 主な樹脂 | 溶出剤 | 実施機関 | 開発時期 |
|---------|--------------|-----------|--------|
| Dowex-1 | チオシアノ酸アンモニウム | カリフォルニア大学 | 1950年代 |

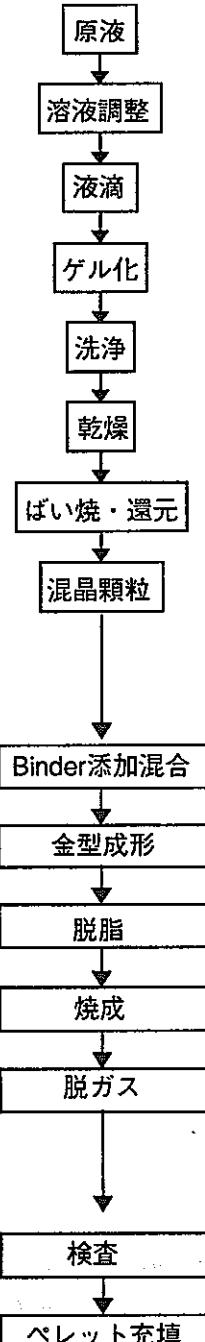
表-45 TRUEXプロセスの基本的課題とPNCにおける解決方針

| 基本的課題 | プロセス等の現状 | 今後の研究方針 |
|--|---|---|
| 清澄 ・高レベル廃液中の不溶解残さ の除去 | ・文献に記載なし | ・F再技術(遠心清澄技術)の適用を図る |
| 抽出 洗浄 ・FPs/TRU分離効率の向上 ・Np、Tc抽出性能の向上 ・第三相生成 | ・カルボン酸等の錯化イオンを添加、それにより FPs(Zr等)と非抽出性錯体形成せしめ分離効率を向 上させる。 ・Npのシュウ酸による不均化及び還元、それによる 易抽出化 ・第三相生成条件の50%での操作を奨励 (第三相の生成条件等に関し、系統的データなし) | ・易分解性錯化イオン(カルボン酸)の探求 ・TBP/CMPO混合率、温度、酸濃度、希釀剤 の選定 |
| 逆抽出 ・TRU逆抽出性の向上 | ・還元剤、錯化剤、(HAN、HF、H ₂ C ₂ O ₄)等の添加 | ・より高効率の還元剤、錯化剤の探求 |
| 溶媒洗浄 ・高レベル廃液との接触による 劣化、逆抽出効率の低下 ・CMPO劣化物の除去法 | ・陰イオン交換樹脂 | ・F再技術(ソルトフリー法、活性アルミナ法) の適用を検討 ・溶媒劣化メカニズムの解明 ・分析技術 ・品質管理技術 |
| ラフィネット洗浄 ・水相中のTBP/CMPOの除去 | ・洗浄法について文献に記載なし | ・F再技術(希釀剤洗浄法、スチームストリッ プ法)の適用を検討 |
| 有機物分解法 ・ガラス固化工程直前でのシュー ウ酸等の分解 | ・文献に記載なし | ・分解必要性の調査 ・F再技術(電解法)或は熱硝酸分解法等の適用 性を検討 |

表-46 TRUEXプロセスの基本的課題とPNCにおける解決方針

| 基本的課題 | プロセス等の現状 | 今後の研究方針 |
|--|--|--|
| TRU/RE分離プロセス ・TRUに同伴するRE核種の除去法 | | <ul style="list-style-type: none"> ・必要性或は分離目標値の設定 ・核種技術の適用性の検討 ・基礎試験の実施 |
| 抽出装置の選定 ・高抽出効率 ・小インベントリー(抽出コスト低減化) | <ul style="list-style-type: none"> ・ミキサ・セトラ及び遠心抽出器 (文献では遠心抽出器を推奨) | <ul style="list-style-type: none"> ・F再技術(遠心抽出器)の適用を図る |
| プロセス制御法 | <ul style="list-style-type: none"> ・文献に記載なし | <ul style="list-style-type: none"> ・遠心抽出技術の一環として検討 |
| 溶媒コスト | <ul style="list-style-type: none"> ・100万円/kg [PNC(購入時)] | <ul style="list-style-type: none"> ・小インベントリー抽出プロセス(遠心抽出器)の選定 ・国産化、オリジナル抽出剤の開発 |

表-47 TRU燃料製造プロセスにおいて実施すべきR&D項目

| 製造工程フロー | 実施すべき研究開発課題 | |
|--|---|---|
| | 方法 | 装置 |
| (ゲル化法) | | |
|  | <p>原液 溶液調整 液滴 ゲル化 洗浄 乾燥 ばい焼・還元 混晶顆粒 Binder添加混合 金型成形 脱脂 焼成 脱ガス 検査 ペレット充填</p> <p>溶液調整法 (HMTA,尿素／原液比等) 液滴調整法 (液滴速度、オイル温度等) 硝酸系廃液処理法 硝酸アンモニウム処理法 可燃・難燃廃棄物処理法 シリコンオイル処理法 ゲル洗浄条件把握 最適ばい焼条件還元条件の把握 顆粒の強度評価 バインダーの選択 成型法検討 脱脂条件の把握 焼結条件の把握 脱ガス条件の把握 熔接法の技術開発 不良品の湿式回収技術 その他 臨界管理技術開発 保障措置技術開発</p> | <p>遠隔操作用顆粒製造装置 硝酸系廃液処理装置 硝酸アンモニウム処理装置 可燃・難燃廃棄物処理装置 シリコンオイル処理装置 遠隔操作用乾燥装置 遠隔操作用ばい焼・還元装置 遠隔操作用顆粒物性試験装置 遠隔操作用成型装置 遠隔操作用焼結炉 遠隔操作用脱ガス炉 遠隔操作用熔接装置 遠隔操作用検査装置（化学分析、非破壊装置等） 遠隔操作用ペレット充填装置 湿式回収処理装置</p> |

■ : 難易度の高いもの

表-48 TRU燃料製造プロセスにおいて実施すべきR&D項目

| 製造工程フロー | 実施すべき研究開発課題 | |
|---------------|--|---|
| | 方法 | 装置 |
| <p>(ゲル化法)</p> | <p>原液混合調整法</p> <p>溶液調整法 (HMTA,尿素／原液比等)</p> <p>液滴調整法 (液滴速度、オイル温度等)</p> <p>硝酸系廃液処理法 硝酸アンモニウム処理法 可燃・難燃廃棄物処理法 シリコンオイル処理法</p> <p>ゲル洗浄条件把握</p> <p>最適ばい焼条件還元条件の把握</p> <p>顆粒の強度評価</p> <p>焼結条件の把握</p> <p>脱ガス条件の把握</p> <p>粒配合法の検討</p> <p>熔接法の技術開発</p> <p>不良品の混式回収技術</p> <p>その他 臨界管理技術開発 保障措置技術開発</p> | <p>遠隔操作用顆粒製造装置</p> <p>硝酸系廃液処理装置 硝酸アンモニウム処理装置 可燃・難燃廃棄物処理装置 シリコンオイル処理装置</p> <p>遠隔操作用乾燥装置</p> <p>遠隔操作用ばい焼・還元装置</p> <p>遠隔操作用顆粒物性試験装置</p> <p>遠隔操作用焼結炉</p> <p>遠隔操作用脱ガス炉</p> <p>遠隔操作用粒配合装置</p> <p>遠隔操作用熔接装置 遠隔操作用検査装置（化学分析、非破壊装置等）</p> <p>遠隔操作用粒充填装置</p> <p>混式回収処理装置</p> |

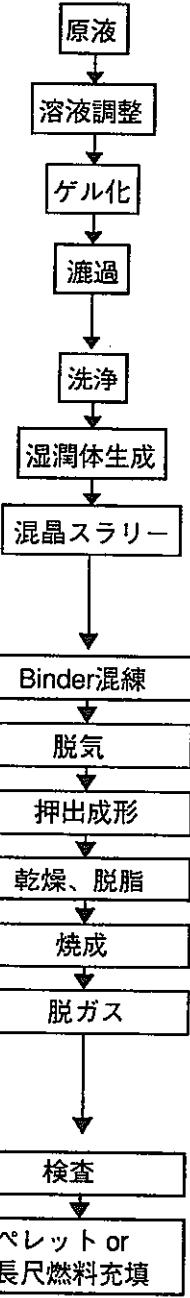
■ : 難易度の高いもの

表-49 TRU燃料製造プロセスにおいて実施すべきR&D項目

| 製造工程フロー | 実施すべき研究開発課題 | |
|----------|---|---|
| | 方法 | 装置 |
| (噴霧熱分解法) | | |
| | 原液混合調整法 颗粒形状の調整条件 硝酸系廃液物理法 可燃・難燃廃棄物処理法 装置内クリーンナップ法 最適ばい焼条件還元条件の把握 颗粒の強度評価 バインダーの選択 最適脱気条件 成型法検討 脱脂条件の把握 焼結条件の把握 脱ガス条件の把握 熔接法の技術開発 不良品の湿式回収技術 その他 臨界管理技術開発 保障措置技術開発 | 遠隔操作用噴霧熱分解顆粒製造装置 硝酸系廃液処理装置 可燃・難燃廃棄物処理装置 遠隔操作用ばい焼・還元装置 遠隔操作用顆粒物性試験装置 遠隔操作用原料混練装置 遠隔操作用脱気装置 遠隔操作用成型装置 遠隔操作用焼結炉 遠隔操作用脱ガス炉 遠隔操作用熔接装置 遠隔操作用検査装置（化学分析・非破壊装置等） 遠隔操作用ペレット充填装置 湿式回収処理装置 |

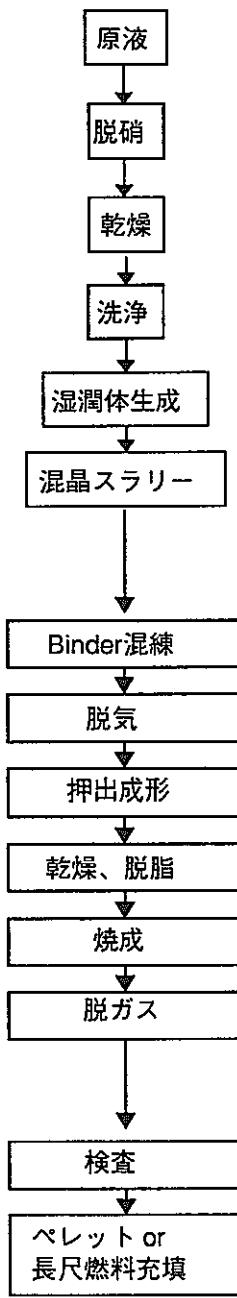
■ : 難易度の高いもの

表-50 TRU燃料製造プロセスにおいて実施すべきR&D項目

| 製造工程フロー | 実施すべき研究開発課題 | |
|--|--|---|
| | 方法 | 装置 |
| (化学沈殿法) | 原液混合調整法 | |
|  | 溶液調整法（最適沈殿生成条件） 硝酸系廃液処理法 硝酸アンモニウム処理法 可燃・難燃廃棄物処理法 ゲル洗浄条件把握 洗浄廃液処理法 スラリー製造条件 バインダーの選択 最適脱気条件 成型法検討 脱脂条件の把握 焼結条件の把握 脱ガス条件の把握 熔接法の技術開発 不良品の湿式回収技術 その他 臨界管理技術開発 保障措置技術開発 | 遠隔操作湯化学沈殿装置 硝酸系廃液処理装置 硝酸アンモニウム処理装置 可燃・難燃廃棄物処理装置 遠隔操作用ゲル洗浄装置 遠隔操作用廃液処理装置 遠隔操作用スラリー製造装置 遠隔操作用原料混練装置 遠隔操作用脱気装置 遠隔操作用成型装置 遠隔操作用焼結炉 遠隔操作用脱ガス炉 遠隔操作用熔接装置 遠隔操作用検査装置（化学分析 非破壊装置等） 遠隔操作用ペレット充填装置 遠隔操作用湿式回収装置 |

 : 難易度の高いもの

表-51 TRU燃料製造プロセスにおいて実施すべきR&D項目

| 製造工程フロー | 実施すべき研究開発課題 | |
|--|-----------------------------|---|
| | 方法 | 装置 |
| (ドラムドライヤ法) | | |
|  | | |
| 原液 | 原液混合調整法 | 遠隔操作用ドラムドライヤー装置 |
| 脱硝 | 硝酸系廃液処理法 可燃・難燃廃棄物処理法 | 硝酸系廃液処理装置 可燃・難燃廃棄物処理装置 |
| 乾燥 | | 遠隔操作用乾燥装置 |
| 洗净 | ゲル洗净条件把握 洗净廃液処理法 | 遠隔操作用ゲル洗净装置 遠隔操作用廃液処理装置 |
| 湿潤体生成 | | |
| 混晶スラリー | スラリー製造条件 | 遠隔操作用スラリー製造装置 |
| Binder混練 | バインダーの選択 | 遠隔操作用原料混練装置 |
| 脱気 | 最適脱気条件 | 遠隔操作用脱気装置 |
| 押出成形 | 成型法検討 | 遠隔操作用成型装置 |
| 乾燥、脱脂 | 脱脂条件の把握 | 遠隔操作用焼結炉 |
| 焼成 | 焼結条件の把握 | 遠隔操作用脱ガス炉 |
| 脱ガス | 脱ガス条件の把握 熔接法の技術開発 | 遠隔操作用熔接装置 |
| 検査 | 不良品の湿式回収技術 | 遠隔操作用検査装置(化学分析 ・非破壊装置等) 遠隔操作用ペレット充填装置 |
| ペレット or 長尺燃料充填 | その他 臨界管理技術開発 保障措置技術開発 | 湿式回収処理装置 |

■ : 難易度の高いもの

付録1

TRUリサイクル検討ワーキンググループメンバー一覧
TRUリサイクル検討ワーキンググループ活動記録

付録2

TRU燃料の元素構成比率について

付録3

TRU 核種含有燃料取扱いに係わる線量当量率評価 (I)

付録1

TRUリサイクル検討ワーキンググループメンバー一覧

| | | |
|------|-------|------------------------|
| リーダー | 岸本洋一郎 | 核燃料技術開発部長 |
| メンバー | 杉山 俊英 | 再処理工場管理課長 |
| | 槙 彰 | 再処理工場化学処理二課主査 |
| | 沢山 武夫 | プルトニウム燃料工場製造加工部加工課長代理 |
| | 山口 俊弘 | プルトニウム燃料工場製造加工部製造課長代理 |
| | 細馬 隆 | プルトニウム燃料工場転換課運転第一係長 |
| | 小沢 正基 | 再処理技術開発部プロセス・分析開発室担当役 |
| | 根本 慎一 | 再処理技術開発部プロセス・分析開発室主査 |
| | 平井 健一 | 技術開発推進部核物質管理室担当役 |
| | 中江 延男 | 技術開発推進部炉心・燃料設計室長代理 |
| | 小沢 隆之 | 技術開発推進部炉心・燃料設計室 |
| | 都所 昭雄 | 核燃料技術開発部転換技術開発室長 |
| | 田中 泉 | 核燃料技術開発部転換技術開発室主査 |
| | 上村勝一郎 | 核燃料技術開発部プルトニウム燃料開発室長 |
| | 山本 純太 | 核燃料技術開発部プルトニウム燃料開発室長代理 |
| | 遠藤 秀男 | 核燃料技術開発部プルトニウム燃料開発室主査 |
| | 檜山 敏明 | 核燃料技術開発部プルトニウム燃料開発室主査 |
| 事務局 | 上村勝一郎 | 核燃料技術開発部プルトニウム燃料開発室長 |
| | 檜山 敏明 | 核燃料技術開発部プルトニウム燃料開発室主査 |

TRUリサイクル検討ワーキンググループ活動記録

第一回 平成4年9月17日 9:00~10:00

- 議題；1.岸本核開部長からの主旨説明
2.理事長へ提出した資料の説明
3.TRUリサイクル検討W/G（仮称）の設置について

第二回 平成4年9月28日 13:30~15:30

- 議題；1.TRU燃料について
2.新再処理検討対象燃料について
3.新プロセスについて（転換、加工以降）

第三回 平成4年10月9日 14:00~17:30

- 議題；1.自動化レベルの検討について（ペレット工程、加工工程）
2.転換（現）工程のセル内設置について
3.γ線線量当量率計算
4.高速炉燃料から取り出される希土類元素について
5.再処理ラフィネートからのTRU分離フローシート概念
6.新プロセスから生産されるTRU燃料

第四回 平成4年10月20日 10:00~12:30

- 議題；1.再処理工場のドラム貯蔵本数
2.PFPP工程別放射性廃棄物発生量
3.TRU物質収支
4.軽水炉燃料から取り出される希土類元素
5.TRU燃料製造における設備の自動化
6.TRU燃料転換、製造工程の選定
7.TRU燃料製造のための転換、燃料加工工程（案）
8.長期計画改訂に当つての重要課題について
9.物質収支CASE-1, 2
10.希土類元素の酸化物

第五回 平成4年11月5日 13:15~15:30

- 議題；1.転換・貯蔵施設の廃棄物発生量
2.希土類元素の核的評価
3.TRU燃料製造工程に於ける予想発生廃棄物の問題点と対策案
4.燃料としての成立性及び定量的なTRU燃料の形態について
5.TRUリサイクルW/G報告書の目次案
6.TRU燃料転換工程及び燃料加工工程の選定

第六回 平成4年11月18日 13：15～16：20

- 議題；1.核不拡散のトータル評価について
2.再処理に於けるR&Dの実施内容について
3.TRUEX工程に於けるR&Dの実施内容について
4.燃料製造工程に於けるR&Dの実施内容について
5.TRU燃料製造工程に於ける廃棄物の発生推定量
6.TRU燃料工程に於ける予想発生廃棄物形態の問題点と対策

第七回 平成4年12月3日 13：15～15：40

- 議題；1.TRUEX工程での廃棄物発生量
2.核不拡散のトータル評価についての改訂版
3.R&D施設の概念
4.W/G報告書 ドラフト
5.プルトニウム転換施設に於ける廃棄物の流れ
6.TRU燃料製造、転換・加工に於ける物質収支

付録2

TRU燃料の元素構成比率について

平成4年10月12日
東海・核開部プル開室

炉に装荷して価値があり、そして支障のないTRU燃料の元素構成比率を炉心設計側に検討してもらうために、新再処理プロセスから生産される製品組成等について、計算を行なった。

1. 計算の前提条件

(1) 基準となる使用済み燃料の条件

表-1 基準となる使用済み燃料の条件

| | |
|-------------|--------|
| 初期濃縮度 (%) | 4.5 |
| 燃焼度 (MWD/T) | 55,000 |
| 比出力 (MW/T) | 46 |
| 冷却期間 (年) | 3 |
| 炉形式 | PWR |

(2) 再処理の条件

- ・NpはPuと共に回収する (Puの低除染)。
- ・Am、Cm等のTRUは全量TRUEXプロセスで回収。
- ・希土類元素はⅢ価のTRUに100%随伴する。

(3) 燃料製造上の条件

燃料製造工程に於て、燃料の元素構成比率に変化はないものとする。

2. 再処理及びTRUEXプロセスからの製品

再処理及びTRUEXプロセスからの製品は、次の3種類である。

- (1) Puの低除染溶液 (Pu、Np混合)
- (2) U精製溶液 (Uのみ)

(3) TRU溶液 (Am, Cm, Tc, R.E*, Ru混合)

R.E^{*}：Y, La, Ce, Pr, Nd, Smが主要核種であり、その他にPm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Luが含まれる。

3.再処理及びTRUEXプロセスからの製品の組成

Puの重量を1とすると、各々の核種の相対金属重量比は、

$$R_w(P_u) = 1 \quad R_w(T_c) = 4.9 \times 10^{-3}$$

$$R_w(N_p) = 9.1 \times 10^{-2} \quad R_w(R.E) = 1.5$$

$$R_w(U) = 80 \quad R_w(R_u) = 8.6 \times 10^{-3}$$

$$R_w(\text{Am}) = 4.5 \times 10^{-2}$$

$$R_w(Cm) = 7.4 \times 10^{-3}$$

である。

4.想定されるTRU燃料

(1) 再処理及びTRUEXプロセスからの製品全てを混合し、燃料とした場合

Case1 ; (Pu+Np+Am+Cm+R.E+U) 酸化物

(2) 再処理からのPu低除染溶液及びTRUEXプロセスからの製品にU精製溶液をPu:U=1:2の割合で混合し、燃料とした場合

Case2 ; (Pu+Np+Am+Cm+R.E+U(U/Pu=2)) 酸化物

(3) TRUEXプロセスからの製品を燃料とした場合（消滅用の照射燃料）

Case3 : (Am+Cm+R.E) 酸化物

(4) Pu低除染溶液にPu:U=1:2の割合でU精製溶液を混合し、燃料とした場合

Case4 ; (Pu+Np+U) 酸化物

5. 計算式の説明

再処理からのPu低除染溶液及びU精製溶液をそれぞれ $f(Pu)$, $f(U)$, TRUEXプロセスからのTRU溶液を $f(TRU)$ とすると、TRU燃料の一般式は

(ここで、 a_1, a_2, a_3 は、それぞれの係数とする。)

ただし、3.の相対重量比を用いて現すと

$$f(P_u) = R_w(P_u) + R_w(N_p) = 1 + 9.1 \times 10^{-2} = 1.091 \dots \dots \quad (2)$$

$$f(U) = R_w(U) = 80 \quad \cdots \cdots (3)$$

$$\begin{aligned} f(TRU) &= R_w(Am) + R_w(Cm) + R_w(Tc) + R_w(R.E) + R_w(Ru) \\ &= 4.5 \times 10^{-2} + 7.4 \times 10^{-3} + 4.9 \times 10^{-3} + 1.5 + 8.6 \times 10^{-3} \\ &= 1.5659 \end{aligned}$$

であり、 $f(Pu)$, $f(U)$, $f(TRU)$ は独立。ただし、係数 a_1 , a_2 , a_3 は任意に値を変えることができる。

6.TRU燃料組成比の計算

6-1 Case1の場合

(1) 式に於て、 $a_1=a_2=a_3=1$ とした場合であり、(1)式は

$$T_{TRU} = 1 \times 1.091 + 1 \times 80 + 1 \times 1.5659 = 82.6569 \text{ となる。}$$

従って、各核種の金属組成百分率は、3.の相対金属重量比を用いて、

$$Pu; R_w(Pu)/T_{TRU} \times 100 = 1.21\%$$

$$Tc; R_w(Tc)/T_{TRU} \times 100 = 0.01\%$$

$$Np; R_w(Np)/T_{TRU} \times 100 = 0.11\%$$

$$R.E; R_w(R.E)/T_{TRU} \times 100 = 1.81\%$$

$$U; R_w(U)/T_{TRU} \times 100 = 96.8\%$$

$$Ru; R_w(Ru)/T_{TRU} \times 100 = 0.01\%$$

$$Am; R_w(Am)/T_{TRU} \times 100 = 0.05\%$$

$$Cm; R_w(Cm)/T_{TRU} \times 100 = 0.01\%$$

6-2 Case1の場合

(1) 式に於て、 $a_1=1$, $a_2=2/80$, $a_3=1$ とした場合であり、(1)式は

$$T_{TRU} = 1 \times 1.091 + (2/80) \times 80 + 1 \times 1.5659 = 4.6579 \text{ となる。}$$

従って、各核種の金属組成百分率は、6-1と同様に

$$Pu; R_w(Pu)/T_{TRU} \times 100 = 21.47\%$$

$$Tc; R_w(Tc)/T_{TRU} \times 100 = 0.11\%$$

$$Np; R_w(Np)/T_{TRU} \times 100 = 1.95\%$$

$$R.E; R_w(R.E)/T_{TRU} \times 100 = 32.20\%$$

$$U; R_w(U)/T_{TRU} \times 100 = 42.94\%$$

$$Ru; R_w(Ru)/T_{TRU} \times 100 = 0.18\%$$

$$Am; R_w(Am)/T_{TRU} \times 100 = 0.97\%$$

$$Cm; R_w(Cm)/T_{TRU} \times 100 = 0.16\%$$

6-3 Case3の場合

(1) 式に於て、 $a_1=0$, $a_2=0$, $a_3=1$ とした場合であり、(1)式は

$$T_{TRU} = 1 \times 1.5659 = 1.5659 \text{ となる。}$$

従って、各核種の金属組成百分率は、

$$Am; R_w(Am)/T_{TRU} \times 100 = 2.87\% \quad R.E; R_w(R.E)/T_{TRU} \times 100 = 95.79\%$$

$$\begin{aligned} \text{Cm; } & \text{Rw(Cm)}/T_{\text{TRU}} \times 100 = 0.47\% & \text{Ru; } & \text{Rw(Ru)}/T_{\text{TRU}} \times 100 = 0.55\% \\ \text{Tc; } & \text{Rw(Tc)}/T_{\text{TRU}} \times 100 = 0.31\% \end{aligned}$$

6-4 Case4の場合

(1) 式に於て、 $a_1=1$, $a_2=2/80$, $a_3=0$ とした場合であり、(1)式は
 $T_{\text{TRU}}=1 \times 1.091 + (2/80) \times 80 = 3.091$ となる。

従って、各核種の金属組成百分率は、

$$\begin{aligned} \text{Pu; } & \text{Rw(Pu)}/T_{\text{TRU}} \times 100 = 32.35\% \\ \text{Np; } & \text{Rw(Np)}/T_{\text{TRU}} \times 100 = 2.94\% \\ \text{U; } & \text{Rw(U)}/T_{\text{TRU}} \times 100 = 64.70\% \end{aligned}$$

尚、Case1～Case4に於て、酸化物重量組成百分率を求める場合、TRU燃料を MO_2 とし、 $M=240$ とすると

$$M/\text{MO}_2 = 240/(240+32) = 0.882$$

であるから、各々の核種の金属組成百分率に0.882を掛けた値が、酸化物重量組成百分率の目安となる。(厳密には、Am等の3価の酸化物はO/Mを下げる役割をもつためO/M=2.00とはならない。)

付録3

プルトニウム燃料開発室 エンジニアリングシート

(全 3 枚)

| 宛先 | プルトニウム燃料開発室長 屋久 | | | | 文書内 容 | 報告 連絡 指示 依頼 議事録 確認 検討 質問 回答 その他 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---------------------------------------|---|-----------|-----------------|---|------------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--|----------|--|--|----|-----|------------|----|-----|------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|----------------|--------|--------|--------|-------|-----|-----|-----|--------------------|-------|-------|-------|------|------|------|--|---------------------|-------|--------|-------|------|------|------|------|-----------|------|------|------|------|------|------|--|
| 件名 | 新再処理プロセスから生産されるTRU燃料の線量当量率評価について(改訂版) | | | | 発信番号: プル開-04-217 業務No.: 4100 発信年月日: 5年1月19日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 部数 | 宛て先 (配布先) | (目的) 新再処理プロセスから生産されるTRU燃料について、新燃料時及び燃焼後2年冷却時における線量当量率の評価を行ったので報告する。 | | | | 回答期限: 年月日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ○印は、回覧先 *印は、戻り先 | | (結論) (1) MOX燃料を基準とした時のTRU、希土類添加燃料の評価結果は以下に示すようになった。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">燃料タイプ</th> <th colspan="3">新燃料時</th> <th colspan="3">燃焼後2年冷却時</th> <th rowspan="2">合計</th> </tr> <tr> <th>中性子</th> <th>γ線</th> <th>合計</th> <th>中性子</th> <th>γ線</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>基準</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>均質装荷 TRU 5%</td> <td>223.14</td> <td>341.42</td> <td>267.68</td> <td>10.40</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>TRU 1.5% 希土類 5%</td> <td>15.16</td> <td>23.66</td> <td>18.35</td> <td>1.71</td> <td>1.04</td> <td>1.04</td> <td></td> </tr> <tr> <td>TRU 2.8% 希土類 19%</td> <td>71.72</td> <td>126.36</td> <td>92.29</td> <td>4.63</td> <td>1.22</td> <td>1.22</td> <td>1.22</td> </tr> <tr> <td>Npのみ 1.5%</td> <td>1.53</td> <td>1.09</td> <td>1.37</td> <td>0.98</td> <td>0.99</td> <td>0.99</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> | | | | | | | 燃料タイプ | 新燃料時 | | | 燃焼後2年冷却時 | | | 合計 | 中性子 | γ 線 | 合計 | 中性子 | γ 線 | 基準 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | | 均質装荷 TRU 5% | 223.14 | 341.42 | 267.68 | 10.40 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | TRU 1.5% 希土類 5% | 15.16 | 23.66 | 18.35 | 1.71 | 1.04 | 1.04 | | TRU 2.8% 希土類 19% | 71.72 | 126.36 | 92.29 | 4.63 | 1.22 | 1.22 | 1.22 | Npのみ 1.5% | 1.53 | 1.09 | 1.37 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | |
| 燃料タイプ | 新燃料時 | | | 燃焼後2年冷却時 | | | 合計 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 中性子 | γ 線 | 合計 | 中性子 | γ 線 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 基準 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 均質装荷 TRU 5% | 223.14 | 341.42 | 267.68 | 10.40 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TRU 1.5% 希土類 5% | 15.16 | 23.66 | 18.35 | 1.71 | 1.04 | 1.04 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TRU 2.8% 希土類 19% | 71.72 | 126.36 | 92.29 | 4.63 | 1.22 | 1.22 | 1.22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Npのみ 1.5% | 1.53 | 1.09 | 1.37 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 宛先 | | (2) 上記の表より、新燃料時は、TRU・希土類添加燃料の線量当量率は、最大で260倍(TRU 5%添加時)になるが、燃焼後2年冷却時ではFPからの γ 線が線量当量率の大部分を占めるため、基準燃料と同等になる。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 技開推部長 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| QA室長 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 炉燃室長 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 炉燃室代 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 核技開部長 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 転換開室長 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| プル開室長 | | (本シートに関連する資料) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| プル開室代 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| セミナ GL | | 部 | 核燃サイクル技開部 | 核 燃 料 技 術 開 発 部 | | | 原子力技術開発部 | | 作成 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 物性研究GL | | 室 | プル燃開室 | 確 認 | 発信元 | プルトニウム燃料開発室 | 技術開発部 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 燃料技開GL | | | | 部 長 | 室 長 | 室 長 代 理 | 主 査 | 担 当 | 作 成 者 | 責 任 者 | 作 成 者 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 燃料化学GL | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 作成者 | | | | 上 木 | | 信 木 | 信 木 | 信 木 | 中 木 | 中 木 | 中 木 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

1. 適用

本解析は、新再処理検討用における外部放射線に係る線量当量率について実施したものである。

2. 解析条件

(1) 計算方法

線源強度評価にORIGIN-2コード、線量当量率計算にANISNコード、断面積ライブラリにPSL-50を使用した。

(2) 線源条件

① 線源の種類

(a) 線源；燃料ペレット

② 核燃料物質の組成

(a) 基準

(b) 均質荷物 (TRU 5 %)

(c) TRU 1.5 % + 希土類 5 %

(d) TRU 2.8 % + 希土類 19 %

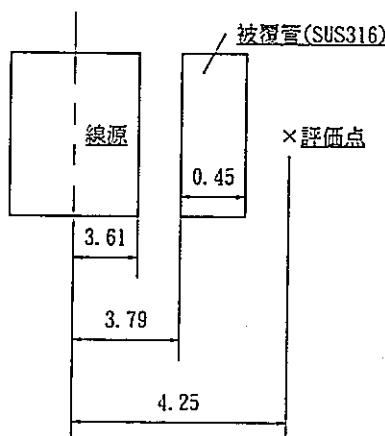
(e) Npのみ 1.5 %

③ 燃料ペレット密度

(a) 10.2 g/cc

(3) 解析のモデル

本解析に用いた解析モデルを以下に示す。(単位: mm)



3. 解析結果

解析結果を以下に示す。

| 燃料タイプ | 新燃料時 | | | 燃焼後2年冷却時 | | |
|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 線量当量率 (mSv/hr) | | | 線量当量率 (mSv/hr) | | |
| | 中性子 | γ 線 | 合計 | 中性子 | γ 線 | 合計 |
| 基 準 | 2.921×10^{-1} | 1.760×10^{-1} | 4.681×10^{-1} | 6.652×10^0 | 3.934×10^5 | 3.934×10^5 |
| 均質装荷 TRU 5% | 6.518×10^1 | 6.009×10^1 | 1.253×10^2 | 6.918×10^1 | 3.926×10^5 | 3.926×10^5 |
| TRU 1.5% 希土類 5% | 4.427×10^0 | 4.164×10^0 | 8.591×10^0 | 1.137×10^1 | 4.103×10^5 | 4.103×10^5 |
| TRU 2.8% 希土類 19% | 2.095×10^1 | 2.224×10^1 | 4.320×10^1 | 3.083×10^1 | 4.802×10^5 | 4.802×10^5 |
| Npのみ 1.5% | 4.481×10^{-1} | 1.923×10^{-1} | 6.403×10^{-1} | 6.491×10^0 | 3.914×10^5 | 3.914×10^5 |

4. 考察

(1) 以下に示す表より、通常のMOX燃料を基準とした場合、TRU、希土類を含む燃料の線量当量率の比は、

- ① TRU 5%添加； 新燃料で約2.68倍、燃焼後2年冷却で約1倍
- ② TRU 1.5%， 希土類 5% 添加； 新燃料で約1.8倍、燃焼後2年冷却で約1倍
- ③ TRU 2.8%， 希土類 19% 添加； 新燃料で約9.2倍、燃焼後2年冷却で約1.2倍
- ④ Npのみ 1.5% 添加； 新燃料で約1.4倍、燃焼後2年冷却で約1倍

となる。

| 燃料タイプ | 新燃料時 | | | 燃焼後2年冷却時 | | |
|---------------------|--------|------------|--------|----------|------------|------|
| | 中性子 | γ 線 | 合計 | 中性子 | γ 線 | 合計 |
| 基 準 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 均質装荷 TRU 5% | 223.14 | 341.42 | 267.68 | 10.40 | 1.0 | 1.0 |
| TRU 1.5% 希土類 5% | 15.16 | 23.66 | 18.35 | 1.71 | 1.04 | 1.04 |
| TRU 2.8% 希土類 19% | 71.72 | 126.36 | 92.29 | 4.63 | 1.22 | 1.22 |
| Npのみ 1.5% | 1.53 | 1.09 | 1.37 | 0.98 | 0.99 | 0.99 |

(2) 上記の表より、新燃料時は、TRU・希土類添加燃料の線量当量率は、最大で2.60倍 (TRU 5%添加時)

になるが、燃焼後2年冷却時ではFPからの γ 線が線量当量率の大部分を占めるため、基準燃料と同等になる。