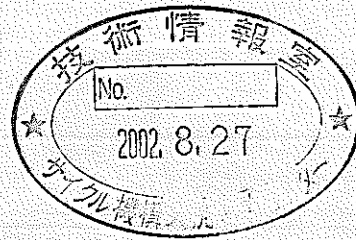


長寿命核種の分離変換技術に関する研究

平成13年度共同研究報告書



2002年3月

東京電力株式会社
核燃料サイクル開発機構

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)
東京電力株式会社
(Tokyo Electric Power Company)
2002

長寿命核種の分離変換技術に関する研究 平成13年度共同研究報告書

東京電力株式会社
核燃料サイクル開発機構

要 旨

効率的かつ環境への負荷を低減させるような放射性廃棄物の分離核変換技術開発推進の必要性が高まっている状況を受け、その技術開発推進の出発点となる「分離核変換の意義・目的」、「分離核変換の技術開発目標」、「分離核変換の対象核種」の検討を進めた。

その結果、これまで広くコンセンサスを得るに至っていなかった「分離核変換の意義・目的」を明確にし、開発目標については、第1段階（現在の技術及びその延長上で可能性が見通せる目標。5年後に実験室レベルを終了。）、第2段階（現時点では工学的成立性は十分に見通せないが、科学技術の進歩により将来的に工学的成立性を有し得る目標。15年後に実験室レベルを終了）、究極（理想の目標）という、段階を踏んだ目標設定を行い、その各段階の目標に対応させ、且つ、分離核変換の意義・目的に照らして、分離核変換すべき対象核種を“放射能及び放射性毒性の観点”、“地層処分合理化の観点”、“有効利用の観点”の3つの観点から選定した。

また、第2段階以降に必要なと考えられる LLFP の同位体分離について、そのフィージビリティを同位体分離の必要性、技術的成立性、経済性等の観点から調査・検討するとともに、今後の方向性を示した。

さらに、分離変換技術に関する情報交換の場として、サイクル機構が実施している海外との共同研究内容の紹介や「常陽」での MA 及び LLFP 照射試験について、現状及び計画の紹介を行い、情報及び認識の共有化を行った。

Study on
Partitioning and Transmutation Technology of Long Life Nuclides

Tokyo Electric Power Company
Japan Nuclear Cycle Development Institute

Abstract

It is widely expected to pursue the radioactive waste partitioning and transmutation technology development which can efficiently decrease the environmental burden. Under these circumstances, following subjects have been discussed and examined.

- significance and objective of the partitioning and transmutation
- technology development targets of the partitioning and transmutation
- nuclides to be partitioned and transmuted

Following results have been obtained.

- The significance and objective of the partitioning and transmutation, which have not been recognized commonly in JNC, have been clearly stated.
- Such stepwise targets as the first step (present), the second step (intermediate), and the ultimate target, have been set.
- Nuclides to be partitioned and transmuted have been selected under the three view points of "radioactivity and radiotoxicity", "efficiency improvement of repository", and "effective use".

As for the isotopic separation, which is considered to be important in the second step, feasibility of the technology has been studied in necessity and technical availability view points.

Furthermore, information exchange between the related sections among JNC has been made through the introduction of collaboration researches with abroad and the irradiation experiments of MA and LLFP at JOYO.

長寿命核種の分離変換技術に関する研究
平成 13 年度共同研究報告書

目 次

| | |
|----------------------------------|----|
| はじめに | 1 |
| 第 1 章 分離核変換技術開発目標の策定 | 2 |
| 第 2 章 分離核変換対象核種の選定 | 6 |
| 第 3 章 同位体分離のフィージビリティ | 8 |
| 第 4 章 海外共同研究内容の紹介 (CEA、ORNL) | 19 |
| 第 5 章 「常陽」での MA 及び LLFP 照射試験について | 25 |
| まとめ | 26 |
| 添付資料 | |

図リスト

| | | |
|-----|------------------|----|
| 図 1 | 分離核変換技術開発目標策定フロー | 2 |
| 図 2 | 理想的な高速炉リサイクルシステム | 3 |
| 図 3 | LLFP 同位体分離手法の区分 | 13 |

表リスト

| | | |
|----|---|----|
| 表1 | 分離核変換技術開発目標 | 4 |
| 表2 | 分離核変換対象核種 | 7 |
| 表3 | LLFPの同位体分離技術(1) -現時点での主要技術のフェージビリティの纏め- | 9 |
| 表4 | LLFPの同位体分離技術(2) -最近の国内研究動向- | 10 |
| 表5 | LLFP同位体分離技術の適用性評価表 | 12 |
| 表6 | TRU/MAサンプル照射試験 | 20 |

はじめに

長寿命核種の分離変換技術は、核燃料リサイクルにおける高レベル放射性廃棄物の減容等処分に係る負担軽減や資源としての有効利用に資するものとして有用な技術となる可能性を有するもので、本技術の研究開発にあたっては、国内外の研究機関が協力し合って進めることが肝要であり、且つ効果的である。

東京電力株式会社は、独自に実施してきた長寿命核種の分離変換関係研究を通じて得た技術情報を蓄積している。特に、長半減期放射性ヨウ素の核変換を目的とした、海外炉を用いての照射試験においては、国内研究機関の中では一歩先んじた技術情報を蓄積している。

核燃料サイクル開発機構は、高速増殖炉及びこれに関連する核燃料サイクルの技術開発の一環として長寿命核種の分離変換技術開発を進めており、今後さらに進展させる計画である。

上記の状況を踏まえ、両者は共同で長寿命核種の分離変換研究を進めることとした。

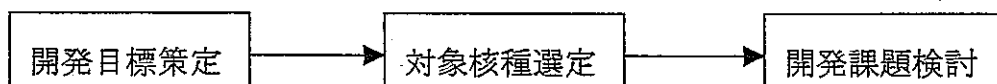
共同研究の内容としては、以下の点を中心に行った。

○分離変換の意義・目標・技術開発課題検討

地層処分との関係も含めた長寿命核種の分離変換の意義、長期／短期における分離変換技術開発が目指すべき目標、目標達成のための技術開発課題を検討する。

○分離変換技術情報交換

分離変換の意義・目標・技術開発課題検討を以下の基本フローで行うこととした。



長寿命核種分離変換の技術開発目標を策定することが最初の大きなマイルストーンとなる。本技術開発目標については、これまでも議論される機会があったが、広くコンセンサスを得るには至っていないのが現状である。

次に、その開発目標を達成するために分離核変換すべき対象核種を選定する。そして、選定された対象核種を分離核変換するために必要な研究開発課題を検討し、開発計画を作成することにより、ひとつの区切りをつけることができる。

尚、時間の関係から、「開発課題検討」については平成13年度内では十分検討できなかった。

第1章 分離核変換技術開発目標の策定

分離核変換技術は比較的新しい技術であることから、その技術開発目標については、これまでも議論される機会があったが、サイクル機構内で広くコンセンサスを得るに至っていないのが現状である。そこで、サイクル機構内関連箇所からの専門家から成る分離変換技術開発目標策定WGを組織して検討・策定を行った。ここにはその検討結果をまとめる。

技術開発目標策定は、以下の図1 検討フローに従って行った。

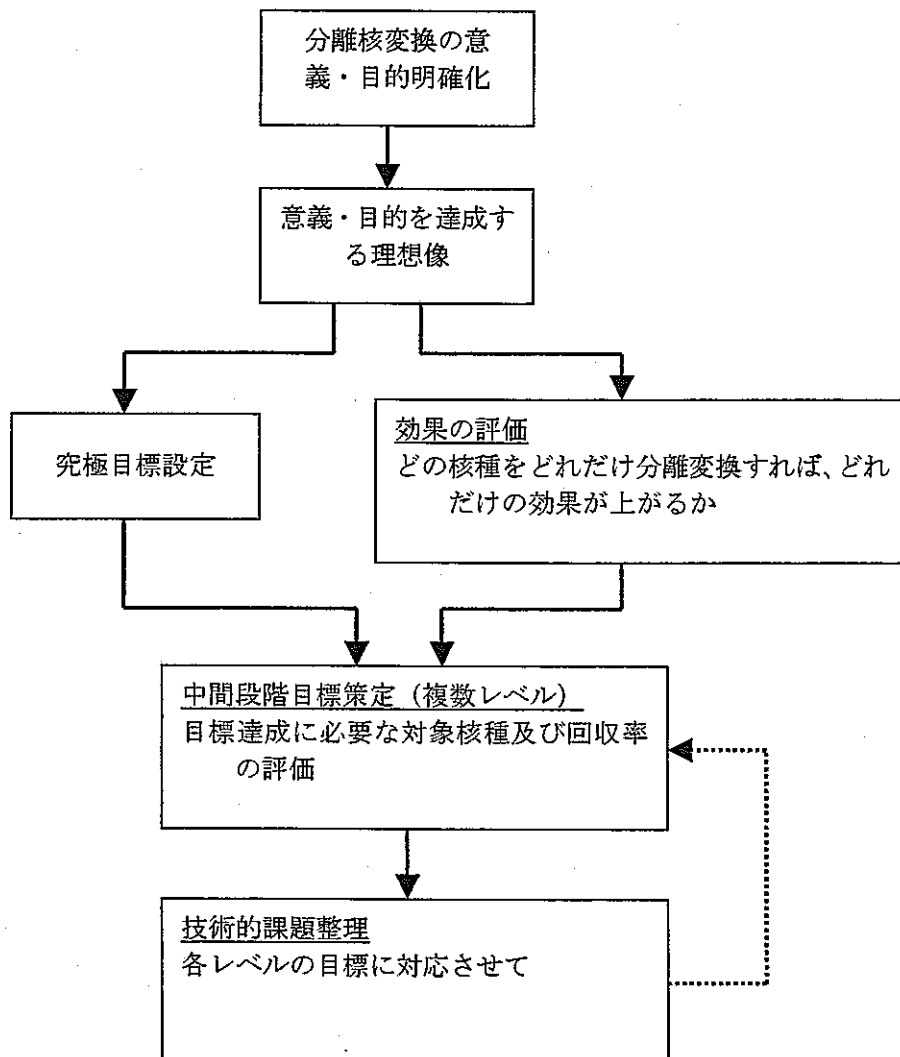


図1 分離核変換技術開発目標策定フロー

1.1 分離核変換の意義・目的

平成12年4月11日に出された「長寿命核種の分離変換技術に関する研究開発の進め方について」の原子力委員会決定（添付-1参照）、及び平成12年8月に答申を受けた「長寿

命核種の分離変換技術の研究開発」の課題評価結果を念頭に、以下とした。

《分離核変換技術は、原子力利用の結果生じる放射性廃棄物の中に存在する長寿命核種を短寿命化あるいは安定核種に変換し、放射能及び潜在毒性が人類の時間スケールをはるかに越える長期間に及ぶことに起因する不安を軽減すると共に、最終処分される廃棄体量低減や処分場の合理化に繋がる可能性を秘めた核燃料リサイクルの高度化技術である。

すなわち分離核変換技術は、長寿命の放射性核種の廃棄量そのものを減ずることにより、能動的に廃棄物の潜在的危険性の低減を目指すものであり、生活環境に潜在的危険性を顕在化させない地層処分技術と相互に補完することにより、一層の環境対策の向上を図るものである。

さらに、アクチニドの回収率を向上すると共に、全アクチニドをリサイクルして燃焼させることによるウラン資源利用率のさらなる向上や、白金族元素等の希少金属の回収、有効利用等の可能性も併せ持つ技術である。

分離核変換技術はこれらの可能性を追求することにより社会の原子力に対する理解と受容度を高めることに寄与するものである。》

1.2 意義・目的を達成する理想像

以下のようなシステムを理想像とした。

《システムに受け入れるのは天然ウランのみで、システムから出ていくものは有用金属と放射能及び放射性毒性が天然ウランレベルの廃棄物のみとなることを目指すシステム。》

理想的リサイクルシステムの一例

U、Pu、MA の分離を行わず、資源として利用価値のある FP (白金族等) 及び炉の運転 (反応度) 維持のために弊害となる希土類及び非放射性核種 (安定核種) のみを採り出し、U、Pu、MA 及び LLFP は、そのままリサイクルする。そして、燃焼した分に相当する U だけを供給するリサイクルシステム。

図 2 にそのシステム概念を示す。

注) U と TRU の分離は必ずしも必須ではない。

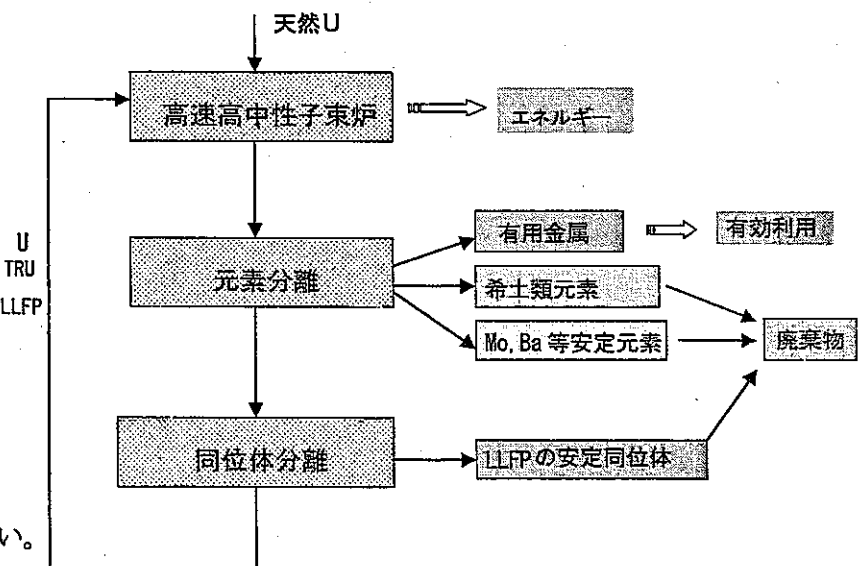


図 2 理想的高速炉リサイクルシステム

1.3 分離核変換の効果の評価

目標策定にあたっての判断材料として、分離核変換の概略効果を既存資料（原子力活性化委員会「整合性ある原子力システムの開発シナリオ」（平成11年7月）、原子力バックエンド対策専門部会報告書（平成12年3月）等）をもとに調査した。

1.4 技術開発目標の策定

分離核変換技術開発は長期的テーマとして着実に進めることが望ましいとの認識のもと、先ず理想像に相当する究極目標を策定し、そこを目指しての当面の目標（第1段階）、及び中間目標（第2段階）から成る、段階を踏んだ目標設定とした。ここで、3段階の目標のイメージは以下の通りである。

- ・ 当面の目標：現在の技術及びその延長上で可能性が見通せる目標。
5年後に実験室レベルを終了。
- ・ 中間目標：現時点では工学的成立性は十分に見通せないが、科学技術の進歩により将来的に工学的成立性を有し得る目標。目標達成のためには、現状技術の延長上では難しく、革新技術（ブレークスルー）も必要。
15年後に実験室レベルを終了。
- ・ 究極目標：理想の目標である。技術的ハードルの高さは度外視し、理想的リサイクルシステムを実現するために必要な目標となる。

策定した目標を表1に示す。

表1 分離核変換技術開発目標

| 段階 | 目標 | 備考 |
|------------------------------------|--|--|
| 第1段階 (当面) 5年後に実験室 レベルを終了 | システム外に放出するものの放射能及び潜在的な放射性毒性を1000年後に軽水炉ワンスルーのその1/100程度に低減する。 また、地層処分の合理化に寄与するFPの分離・核変換、及び希少有用元素分離による有効利用を図る。 | 現在の技術及びその延長上で可能性が見通せる目標。 |
| 第2段階 (中間) 15年後に実験室 レベルを終了 | システム外に放出するものの放射能及び潜在的な放射性毒性を100年以降において軽水炉ワンスルーのその1/1000程度に低減する。 また、地層処分の合理化に寄与するFPの分離・核変換、及び希少有用元素分離による有効利用を図る。 | 現時点では工学的成立性は十分見通せないが、科学技術の進歩により将来的に工学的成立性を有し得る目標。目標達成のためには、現状技術の延長上では難しく、革新技術（ブレークスルー）も必要。 |
| 究極 | 理想的なリサイクルシステムのひとつの姿として、天然ウランのみを供給し、システム外に放出するものの放射能及び潜在的な放射性毒性を100年程度で供給した天然ウラン以下にする。 また、地層処分の合理化に寄与するFPの分離・核変換、及び希少有用元素分離による有効利用を図る。 | 理想の目標である。 技術的ハードルの高さは度外視し、理想的リサイクルシステムを実現するために必要な目標となる。 |

○ここで策定する目標と実用化戦略調査研究での目標の関係

分離核変換技術は全体として見た場合、現状では可能性の段階にある技術である。可能性を追求し、長期的テーマとして地道に進めるべき性格の技術開発である。従って、目標策定にあたっては、本来あるべき姿（理想像）を出発点に、「究極目標」→「中間目標」→「当面の目標」と順次手前側に降ろすアプローチを採ることが望ましい。

一方、実用化戦略調査研究はプロジェクトである。従って、分離核変換技術全体の中で実用化の見えるものが対象となる。もちろん、その先に分離核変換を行うことの意義や効果を見据えておくことは言うまでもない。つまり、技術的成立性を十分考慮した上で、あるべき姿に少しでも近づく点に目標を置くことになろう。また、実用化戦略調査研究はいくつかの候補概念の feasibility を検討するのが目的であるから、最低限満たすべき目標を設定し、あとは、各候補概念の特徴を生かしてプラスアルファでどこまでいけるかを検討することになろう。即ち、現状技術を出発点に、本来あるべき姿に近づけていくアプローチを採ることになる。

その時、本来あるべき姿やその手前の中間目標を明確にしておくと共に、そこに至るに必要な基礎・基盤研究を充実させておき、実用化の見通しが得られたならいつでも実用化戦略調査研究側に反映可能なようにしていくのが基礎・基盤研究としての分離核変換技術の役割であろう。

よって、上記の「当面の目標」は実用化戦略調査研究の目標と必ずしも一致する必然性はない。ここでは、あくまで基礎・基盤研究の当面の目標として策定した。

第2章 分離核変換の対象核種

第1章において策定した目標の各段階に対応させ、且つ、分離核変換の意義・目的に照らして「放射能及び放射性毒性」、「地層処分の合理化」、及び「有効利用」の3つの観点から対象核種を選定した。上記3つの観点はさらにそれぞれ「放射能」及び「放射性毒性」、「処分場面積等削減」及び「被曝リスク低減」、「触媒他科学利用」及び「放射化学的利用」に分けた。選定結果を表2「分離核変換対象核種」に示す。また、選定の根拠を、放射能及び放射性毒性の観点に関して添付-2.1から添付-2.6*に、被曝リスク低減に関して添付-3.1及び添付-3.2に示す。

第1段階（当面）の対象核種としては、Mo及びPd以外は実用化戦略調査研究で対象としている核種と同じである。TRU及びTc99は放射能及び放射性毒性の観点から、Iは被曝リスク低減の観点から、Sr, Csは処分場面積削減の観点で選定されている。

第1段階の対象核種については、実用化戦略調査研究の枠組みの中で技術開発が進められるものが多いため、基礎・基盤研究としては第2段階の対象核種を視野に置いて研究開発を進めていくことになる。

また、第1段階の対象核種はすべて元素分離であるが、第2段階からは一部核種については同位体分離が必要になる。

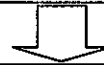
*：添付-2.1から添付-2.6における解析対象は以下の通りである。

FR Core：大型Na冷却MOX燃料炉心、燃焼度15万MWd/t、4年冷却後再処理した場合

基準軽水炉：APWR、燃焼度5万MWd/t、濃縮度4.6%を直接処分した場合
また、基準天然Uは0.15tである。（燃焼度15万MWd/tの高速炉炉心1tonHMから生じるFPは0.15ton（元素）であり、平衡サイクルでは、発生したFPを補う量のUを供給するため、供給ウランは、0.15tonとなる。）

表2 分離核変換対象核種

| 段階 | 放射能及び放射性毒性の観点 (CsとSrは分離のみ、他は分離&核変換) | | 地層処分の合理化の観点 | | 有効利用の観点 ^{*1} (基本的に分離のみ) | |
|------------------------------------|---|---|--|--|-------------------------------------|------------------------|
| | 放射能 | 放射性毒性 | 処分場面積等削減 ^{*1} (分離のみ) | 被曝リスク低減 ^{*2} (分離&核変換) | 触媒他化学利用 | 放射化学的 利用 |
| 第1段階 (当面) 5年後に実験室 レベルを終了 | U,Np,Cm (99%)*6 Pu,Am (99.9%) Tc99 (99%) | U,Np,Am,Cm (99%) Pu (99.9%) | (1/2に低減) ^{*3} Sr, Cs (:90%) Mo (:80%) | (1/10に低減) I (99%) | Pd, Tc | 熱源: Cs, Sr 放射線源: Cs |
| 第2段階 (中間) 15年後に実験 室レベルを終了 | U,Np,Am,Cm (99.9%) Pu (99.99%) Se79, Pd107, Sn126 (99%) Cs135, Zr93, Tc99, Cs137, Sr90, Sm151 (99.9%) | U,Np,Cm (99.9%) Pu, Am (99.99%) Cs137, Sr90 (99%) | (1/5に低減) ^{*4} Sr, Cs, (99%) Mo, Nd, Ru, Rh, Ce, Pr, Ba, La, Te, Gd, Rb, Y, Pd | I(1/100に低減) I (99.9%) C14, Cl36(放射化生 成物) (1/10) | Pd, Tc, Ru, Rh, Se, Te | Cs, Sr, Ru, Rh, Pd |



| | | | | | | |
|----|---|---|--|--|--|------------------------------------|
| 究極 | U,Np (99.9%) Cm (99.999%) Pu,Am (99.9999%) Pd107, Se79, Cd113, Sn121, Sn126, Eu154, Eu152 (99%) Cs135, Zr93, Tc99, Kr85, H3 (99.9%) Cs137, Sr90, Sm151 (99.9999%) | U,Np (99.9%) Cm (99.999%) Pu,Am (99.9999%) I129, Tc99, Sm151, Cd113 (99%) Cs137, Sr90 (99.99%) | ^{*5} (純度&回収率向上に より1/10に低減) Sr90, Cs137, Mo, Nd, Ru, Rh, Ce, Pr, Ba, La, Te, Gd, Rb, Y, Pd | ^{*5} I (1/1000) C14, Cl36 (1/100) Cs135, Se79 (1/10) Zr93, Am, Np | ^{*5} Pd, Tc, Ru, Rh, Se, Te, (＋ランタニド元 素) | ^{*5} Cs, Sr, Am, Cm |
|----|---|---|--|--|--|------------------------------------|

*1: 根拠についてはさらなる検討が必要。

*2: 被曝リスク上のピークを形成する核種を一つずつ下げることから選定。(核種分離・消滅処理技術分科会資料、1999年9月17日)

*3: Sr, Csの除去&浅地層処分により処分場面積は約1/2になる可能性がある。(Ohe, 分離核変換研究会、2001)

*4: Mo, Pd, Ruの除去により約1/2になるとされている。(Yoneya, et al, 動燃技報 No98, 1996)

*5: ここでは究極段階というより第3段階の位置づけである。

*6: カッコ内数値は分離及び核変換される割合を示す。

第3章 同位体分離のフィージビリティ

本章では、LLFP (Long-Lived Fission Product: 長寿命核分裂生成物) に関する同位体分離技術の現状について総括するとともに今後の技術開発の方針について述べる。

3.1 LLFP 同位体分離技術の現状

表3に主要同位体分離手法の概要を、表4には国内大学における研究動向をまとめた。

WGにおける調査の結果、“選択的同位体分離法”では「原子レーザー法」、「光化学法」、「電磁法」が、統計的分離法では「遠心分離法」、「気相吸着法」が主要実施例として摘出された。選択的分離法のグループでは「電磁法」がRI生産法として実用化レベルにあり、統計的分離法のグループでは「遠心法」がU-235の分離濃縮において実績が豊富であり、技術的には成熟している。“統計的分離法”では、現在国内の複数の大学を中心に、イオン交換法や溶媒抽出法を中心とした「化学交換法」の研究が実施されており、主に軽元素の同位体を対象として化学的な同位体分離法の原理実証の追及がなされている。一方、LLFPを対象とした同位体分離手法の研究事例はほとんど皆無である。唯一、旧動燃でLLFP Pd-107を模擬して、「原子レーザー法」による安定核種Pd-105の分離研究事例のみがある。高レベル廃液中の実LLFPを対象とした研究事例は国内外ともない。特徴的には、「電磁法」は多種多様なRI生産のツールとして既に商用ベースで実績のある唯一の方法であるので、スケールアップが克服されるなら(イオン化した)LLFPの同位体分離技術として成立する可能性は高い。「原子レーザー(偏光)法」は偏光レーザーの吸収によって奇数核同位体のみが選択的励起され、電離によって回収をはかる方法で、ターゲットのLLFPの原子核が奇数である場合に選択的分離が生ずる可能性が高い。「光化学」法はレーザー照射による同位体シフトを利用して特定核種を励起し、配位子との化学反応を起こさせるもので、原理的には「レーザー化学」法と類似する。「遠心分離法」は分子状の同位体化合物の微量の質量差を利用して分離する方法で、安定な気体化合物(単味同位体元素のフッ素が望ましい)があれば成立する可能性が高い。溶媒抽出法、気相交換法、イオン交換法など、いずれの化学手法も原理追求の域を出ないが、技術的ブレークスルーがなされた暁には大幅なコストダウンが期待できる。各手法の科学的成立性を実証するために要する装置コストとしては、共通する分析装置及びホット遮蔽セル関連費用を除いて、「電磁法」：数億円、「レーザー法(原子レーザー法、レーザー化学法)」：1億円程度、「遠心法」：数千万円、「化学交換法」：1千万円程度、と見積もられる。

現在計画中のものでは、ロシアの「レーザー化学法」によるアルカリ金属の同位体分離技術の開発計画があるが、目的は原理実証に近いものであり、3年間の研究ではLLFP Cs-135の分離まで研究範囲が及ばない。同位体分離以前に、高レベル廃液中のLLFPイオンの元素分離が必要であるが、その元素分離についても緒についたばかりの実験室レベルの研究に留まっており、元素分離～同位体分離の一貫した研究計画は世界的に見ても存在しない。

表3 LLFPの同位体分離技術(1) ー現時点での主要技術のフイージビリティの纏めー

| LLFPの同位体分離技術(1)ー現時点での主要技術のフイージビリティの纏めー | | | | | | | | | | | |
|--|---|--|---------------------------|---|---|-----------------------------------|--|--|--|---|--|
| 分離技術 | 原理 | 研究機関/研究者 | 開発期間 | 分離試験対象核種(実施例) | 適用可能元素、核種注)下線は長寿命FP元素 | 試験装置 | 分離剤、試薬、他 | 技術レベル*1 | 課題 | R&Dコスト(試験装置費*2)、研究員数 | 出典 |
| 選択的分離法 | (一般的な方法) 原子の同位体による吸収波長の差(同位体シフト)を利用して、選択的に着目している同位体のみを励起、電離して分離する。 | 原研、レーザー濃縮技術研究組合、大阪大学、LLNL、CEAサクレ研究所等 | 1975年～2002年 | U-235 | U、Ti (原理的にはすべての元素に適用可能である) | YAGレーザーまたはエキシマレーザー、色素レーザー、真空チャンバー | 原子蒸気 | 工学レベル 工学規模のレーザーシステム及び分離装置を組み合わせた試験が実施された。 | 金属ウラン蒸気を取り扱う機器の耐久性、機器の寿命、経済性の確認 | ・約7500万円 ・3名 | |
| | (偏光を利用する方法) レーザーの偏光を利用して、奇数核同位体のみを選択的に励起、電離して回収する。角運動量選択則(核スピンの0でない奇数質量の同位体は直線偏光の向きをそろえたり、左旋回の特長波長の円偏光レーザーを使用することで選択的に励起される)を利用 | (直線偏光)大阪大学、レーザー技術総合研究所 (円偏光)旧動燃/山口大 | 1987年～ 1988年4月～1992年3月 | Pd-105, Zr, Gd | (直線偏光) Gd, Zr (円偏光) Mg, Ca, Zn, Sr, Cd, Ba, Hg, Yb, C, Si, Ge, Sn, Sm, Pb, Puの、核スピンの0でない同位体の分離 | YAGレーザーまたはエキシマレーザー、色素レーザー、真空チャンバー | 原子蒸気 | (Gd, Zr) 原理実証レベル; ・Gd-157分離係数:約48(存在比が15.7%から90%に増大) (Pd) 原理実証レベル; ・特定波長(276.3nm)による二光子吸収によるPdイオン化しきい値:約1kw/cm2 ・Pd-105分離係数:約10(存在比が22%から73%に増大) | ・Gd-157/Gd-157の分離効率の向上 ・Pd-105/Pd-107の分離法の検討 | ・約7500万円 ・3名 | レーザー技術総合研究所HP UCID-18837, PNC TN1340 94 004, PNC PN 8410 95-077 |
| | レーザー励起化学反応;ウラン核種の同位体シフトを利用することにより、特定核種を光励起させ、励起核種とウラン錯体の配位子との間でウランの還元反応を起こさせる。 | 大阪大学/横山友旧動燃/佐藤宗一 | 1994年4月～1995年3月 | U-238 | MO2型の酸化物を形成し有機物と錯体を形成するもの。また、酸化還元反応が容易なもの(ex. Pu) | CO2, YAG-dyeレーザー、反応チャンバー | エトキシ酢酸、イオン交換樹脂 | 原理実証レベル | ・分離効率の向上 | ・約500万円 (レーザー及び分光学的装置を除く)/2年間 ・1名 | 特許 06-296828 |
| | レーザー励起化学反応;パリー13大学の知見に基づく方法。ターゲット核種の同位体シフトより狭いバンドのレーザーを照射することにより、特定核種を光励起させ、励起核種と試薬との選択的化学反応(例えば、分解反応、水素化反応)の動力学を向上させる。 Rb*+H2O, H2→Rb*H | アルメニア科学アカデミー物理研究所/M. Mellist | 2002年4月～2004年3月(予定) | Cs-133, Rb-85,87 | Cs, Rb | 低出力ダイオードレーザー | 水素ガス、水、含水素化合物 | 原理実証レベル | ・単光子低強度レーザーによる核種励起メカニズムの解明 ・アルカリ金属の選択的レーザー化学反応メカニズムの検討、モデリング ・レーザー分離装置にまつわる工学技術の取得 | ・約3000万円 (レーザー及び分光学的装置を除く)/3年間 ・18名(ロシア) | ISTC Project: #A-635Work-Plan |
| | ローレンツ力と遠心力により決まるイオンの軌道が質量により異なることを利用した分離法 | LANL/ORNL | | | ・44元素220の同位体(旧ソ連) ・Zn-68, Cd-112, Ti-203, Te-123(不明) ・調査中(ORNL) | 調査中(ORNL) | Hot Cell ・イオン化装置 ・Accelerating Column, Vacuum Pump, Magnet, Isotope Collector, Mass Analyzer | 実用化レベル(商用ベース) | ・大量供給 | ・数億円:分離装置、分析装置 | |
| 分離技術 | 原理 | 研究機関/研究者 | 開発期間 | 分離試験対象核種(実施例) | 適用可能元素、核種注)下線は長寿命FP元素 | 試験装置 | 分離剤、試薬、他 | 技術レベル*1 | 課題 | R&Dコスト(試験装置費*2)、研究員数 | 出典 |
| 統計的分離法 | 不可逆過程 遠心分離法(篠田) | 分子量の差を利用 | 旧動燃 | ・S, Ar, Cr, Zn, Ge, Kr, Te, Mo, Xe, W, Zn-68, U-235 (URENCO) ・Fe, W, Xe, S, Mo(工業規模、旧ソ連) | 理想的には、安定なフッカ物の気体化合物があるもの。ただし、C,Hなどによる有機化合物も要求濃縮度によっては可能。被濃縮同位体はガス状であること。約300℃まで安定であること。ガス分子量は70以上あること。ターゲット同位体が最大あるいは最小質量であることが望ましい | ウラン濃縮用遠心分離機 | なし | ・ウランについては実用化レベル ・元素(化合物)によっては準工学レベル並 | ・安定な気体化合物の選定(化合相手の同位体がないこと;Fは可。Clは不可) ・耐密性の確保、被爆 ・遠心機台数の削減(単機高性能化、カスケード最適化) | ・3000万円/初期+年間1000万円(遠心機系のみ) ・年間設計者3人、実験関連4.5人程度 | |
| | 不可逆過程 気相吸着法(井上) | ・吸着剤への作業物質の吸着速度差あるいは平衡吸着分配量差を利用 | 三菱重工株式会社 | JNCからの業務契約でH8・H11・H12の3回の実験、アイデア公募型研究としてH13・H14に実施 | 現象論的には、同位体種による吸着挙動差が分離操作に利用可能なレベルにあれば適用元素は問わない | 圧カスイング法ガス分離装置 | 作業物質:アンモニア、吸着剤:ゼオライト | 原理実証レベル(現象論的把握レベル) | ・現象として同位体分離を確認した段階にあり、分離メカニズムの解明が必要 ・吸着剤の安定供給も重要(現状は再現性乏しい) | JNC TN9400 2000-072, JNC TN9400 2001-097, JNC TJ9400 2001-019, 原子力学会1997年L39, 原子力学会1997秋L88 | |
| | 可逆過程 その他の方法(熱拡散法、ガス拡散法、掃引拡散法、電気分解法、電気泳動法) | | | | | (別途、調査が必要) | | | | | |
| | 可逆過程 その他の方法(分別蒸留法、化学交換法、溶媒抽出法) | | | | | LLFPの同位体分離技術(2)参照 *N-15(化学交換法:理研) | | | | | |

*1 原理実証レベル(メカニズムの確立、分離の実証)～工学レベル(工学装置による分離率の実証)～実用化レベル(商用ベース)

*2 R&D費(装置費)は、科学的成立性を実証できる、ミニマム規模を想定する。ホットセル費は含まない。

表 4 LLFP の同位体分離技術(2) —最近の国内研究動向—

| LLFPの同位体分離技術—最近の国内研究動向(2)— | | | | | | | | | |
|----------------------------|---|--------------------|---------|-------------------------------------|--|--|---------------------------------------|---|--|
| (M.Ozawa 19/2/2002) | | | | | | | | | |
| 分離技術 | 原理 | 主研究者 | 研究機関 | 対象核種 | 試験装置 | 分離剤、他 | 技術レベル(科学、工学、実用化) | 成果 | 出典 |
| 原子レーザー法 | レーザー共鳴イオン化 | 柴田猛順 | 原研 | Ce,Dy | 電子ビーム加熱 | 電離プラズマ | 実験室 | ・イオン回収時間 ・原子励起温度 | 2000年秋I5, 6 |
| イオン交換法 | イオン交換サイトのサイズ | 大井隆夫 | 上智大 | Li-6,7 | 固液吸着 | ・準安定リン酸チタン(IV) ・含Ti(IV)非晶質イオン交換体 | 原理実証 | ・熱処理(200~600°C)がアルカリカチオン分配係数、同位体分離係数に及ぼす効果 | 2001年春M28 2000年春D3 |
| イオン交換法 | 水和イオンの振動数 | | | | 計算化学(sybyl分子動力学法+Gaussian98W) | イオン交換樹脂、水和Li、メチルスルホン酸イオン | 原理実証 | ・水和Liの構造(第一配位圏の配位数は4) ・分子振動解析、換算分配関数比 | 2001年春M26、M27 |
| イオン吸着 | アモルファス組成、形状 | | | | アモルファスFe ₂ O ₃ -SiO ₂ 二元系複合酸化物 | 実験室 | 焼成温度、鉄含有量と同位体効果の相関 | 2001年春M29 | |
| イオン交換法 | 格子定数依存性 | | | | ・リン酸ジルコニウム(HZr ₂ (PO ₄) ₃) ・HTi _{0.5} Zr _{1.5} (PO ₄) ₃ | 原理実証 | 格子定数と分離係数に正の相関、600°C熱処理 | 2000年秋I11 2000年春D4 1999年秋J18 1998年秋J1 | |
| イオン吸着 | 層間化合物生成時における同位体効果 | 大井隆夫、柳瀬聡 | 上智大、旭化成 | Li-6,7 | 水電解、有機電解 | LiOH(水電解液)、エチレンカーボネート+メチルエチルカーボネート+1MLPF4 | 原理実証 | ・水電解系では効果なし(水電解反応のみ) ・有機電解系ではLi-6が選択的に析出 | 1999年秋J17 |
| 電解析出反応 | 金属格子? | | | | 二元系Li-黒鉛層間化合物 | 原理実証 | ステージ1構造(LiC _{0.84})でS=1.027 | 2000年秋I12 | |
| 同位体交換法 | 気液向流接触下における同位体交換反応 | 竹下健二 | 東工大 | ^{12,13,14} CO ₂ | 気液向流接触塔 | CO ₂ /カルバミン酸溶液 | 解析 | ・同位体分離理論段とエクセルギー(ΔH, ΔS)損失の関係 ・カルバミン酸に ¹⁴ Cが濃縮 | 2001年春M30 2000年秋I16 |
| グロー放電プラズマ | 振動励起分子の反応における同位体効果 | 赤塚洋、鈴木正昭 | | ^{12,13} CO | CO/Arグロー放電プラズマ | CO | 実験室 | ・ ¹³ COの選択的励起性 ・C ₃ O ₂ ポリマーへの ¹³ Cの濃縮 | 2001年春M31 2000年秋I9 |
| 化学吸着 | 錯イオンの分子振動(CO伸縮振動) | 藤井靖彦 | | ^{12,13} CO | Gaussian98A7 Origin2000(SGI) | 銅アンミンカルボニル錯体 [Cu(NH ₃) ₃ CO] ⁺ -CO | 原理実証 | ・分別係数と温度(1/T)に正の相関 | 2000年秋I17 |
| イオン交換法 | 同位体間質量差、核の電荷密度効果 | | | Fe-56,57 | イオン交換樹脂 | 0.01MTiCl ₃ +4MHCl | 原理実証 | ・Fe吸着の界面で重い同位体が濃縮・濃縮係数は鉄の核電荷平均二乗半径の同位体シフトと正の相関 | 2000年秋I19 |
| カラムクロマトグラム法 | 質量効果、核体積の大きさ、歪み、核スピ | | | Ba-134,135,136,137 | クラウンエーテル樹脂(Sr-Resin100~150μm)DC18C6を有機多孔性樹脂に吸着 | バリウム溶液(0.1MBaCO ₃ +2MHCl) | 原理実証 | バンド先端部では重同位体が樹脂側に濃縮 | 2000年秋I20 |
| 分離技術 | 原理 | 主研究者 | 研究機関 | 対象核種 | 試験装置 | 分離剤、他 | 技術レベル(科学、工学、実用化) | 成果 | 出典 |
| レーザーイオン化法 | 奇数同位体のみの選択的イオン化 | 井澤靖和 | 阪大 | Gd-155, 157 | 直線偏光レーザー、磁場 | ? | 実験室 | 磁場による選択性の消失 | 2001年春M34 2000年秋I4 |
| 溶媒抽出法 | 質量効果、核体積の大きさ、歪み、核スピ | 西澤嘉寿成 | | Ba-138, 134 | 単一段液-液抽出 | 0.2MDC18C6/CHCl ₃ (org.), 0.5MBaCl ₂ /H ₂ Oor0.5MHCl(aq.) | 原理実証 | 抽出温度依存性あり(H ₂ O系では313Kで最大の濃縮係数) | 2000年秋I13 |
| クロマトグラフ法 | 質量効果、水相条件(塩、酸)、Field Shift支配 | | | Sr-84,86, 87,88 | 固液吸着 | クリプタンド樹脂(kryptofix222Bpolymer)、溶離剤:H ₂ O又はDMSO(ジメチルスルホキシド) | 原理実証 | ・偶数質量数と濃縮挙動に相関 ・奇数質量数の逸脱 ・溶離液の種類の効果 | 2000年秋I14 |
| 溶媒抽出法 | 質量効果、核体積の大きさ、歪み、核スピ | | | 0.2MDC18C6/0.05M塩化Sr塩酸溶液 | 原理実証 | ・isotope shift(核体積の大きさ及び歪み、核スピ) | 2000年春D6 | | |
| クロマトグラフ法 | Field Shift Effect(核の体積、歪み効果)及びNuclear Spin Effect(核スピ) | | | Cr-50,52, 53,54 | 固液吸着 | クリプタンド樹脂(kryptofix222Bpolymer)、溶離剤:超純水 | | 原理実証 | ・偶数同位体についてはField Shift効果(核の平均二乗半径の差) ・奇数同位体についてはNuclear Spin Effect |
| 溶媒抽出法 | 質量効果、核体積の大きさ、歪み、核スピ | Ti-46,47, 48,49,50 | | 単一段液-液抽出 | 0.2MDC18C6/0.25MTi(III)塩酸溶液 | 原理実証 | ・軌道電子のエネルギー情報が振動エネルギーに反映 ・核スピ効果 | 1998年秋J4 | |
| 溶媒抽出法 | 核の質量効果 | Cr-50,52, 53,54 | | 単一段液-液抽出 | クラウンエーテル(DC18C6,B18C6) | 原理実証 | 分離係数への核質量、大きさ(平均自乗半径)、形の効果 | 2001年春M25 | |
| 溶媒抽出法 | 質量効果、核体積の大きさ、歪み、核スピ | 藤井俊行、森山裕文 | | 阪大・京大 | Hf-177, 178, 179, 180 | 単一段液-液抽出 | DC18C6,TBP in クロロフォルム/0.03MHf,10MHCl | 原理実証 | ・同位体濃縮係数は質量数のみで説明できず。 TBPなど非環状化合物でも同位体効果あり |

* 1:U,H及び希ガスを除く、* 2:1998年~2001年(原子力学会、等)

3.2 核種毎の同位体分離技術の評価

表 5 に各 LLFP 毎に適用可能と判断された同位体分離手法をまとめた。

○Se-79 は核変換性に対する同位体分離効果及び核変換性も有するが、存在量が微量であるうえ、放射能低減効果も小さいので同位体分離する必要性は極低である。Pd-107 も同様な評価。ただし有効利用の観点からの意義はある。

○Sn-126 については放射能低減効果はあるが、核変換性に及ぼす同位体分離効果がなく、核変換性自体もないので同位体分離の必要性はない。

○Tc-99 については同位体分離の必要性はない。Sm-151 については今回評価していない。他に比べ半減期がやや短いので冷却のオプションもある。

○Cs-135 及び Zr-93 については、同位体分離効果及びそれによる核変換性、放射能低減効果のそれぞれが認められ、同位体分離の必要性が認められた。

○同位体分離の優先順位は、Cs-135 > Zr-93 ≫ Pd-107, Se-79 と結論される。

○Se-79 については「電磁法」、「遠心法」及び「原子レーザー法」が、Zr-93、Sn-126 及び Pd-107 については「電磁法」及び「原子レーザー法」が、Cs-137 については「電磁法」及び「レーザー化学法」の適用の可能性が高い。Tc-99 については単味核種元素であり同位体分離の必要はない。Sm-151 については半減期が凡そ 90 年であるので冷却のオプションもあるが同位体分離手法としては「電磁法」及び「原子レーザー法」が考えられる。なお Pd-107 については、廃棄物の放射能及び放射性毒性低減上のニーズは低いが、約 20wt% の LLFP Pd-107 が経済的に分離されるなら有効利用の観点からの意義は大きい。

○分離手法の区分を図 3 に示す。技術的にはいくつかの既往分離技術、即ち、「電磁法」、「遠心法」及び「原子レーザー法」などで適用の可能性が高く、「電磁法」及び「遠心法」は既往技術の応用及び改善が R&D の主眼となる。大学を中心に進められている「化学法」については、先ず LLFP を分離対象とする原理実証のブレークスルーが求められる。各「レーザー法」については基礎データの取得による原理実証及びレーザー技術の改善の双方が必要である。

○いずれの技術も原理実証から科学的成立性の実証にいたるまでの設備投資費が大きいのが特徴である。また、全ての手法に共通して、LLFP に特有の放射能及び放射

表5 LLFP 同位体分離技術の適用性評価表

| 表-2 LLFP同位体分離技術の適用性 評価表 | | | | | | | | | |
|--|--|-----------------------|----------------|---|---|---|----------------------|---|------------------|
| 対象LLFP核種*1 (燃料中の核種、wt%； 太字はLLFP) | 同位体分離の 必要性*2 | 目標 分離 率(純 度) | 分離候補 技術 | 科学的成立性 | 主な技術開発課題 | | 実証性*4 | R&Dコスト | |
| | | | | ○:現時点で成立が見込める △:現時点では不明だが見込みは ある (×:成立性に疑問) | 科学的課題(クリティカ ル・パス) | 工学的課題 | | ○:3~5年で目処 △:5~7年で目処 ×:7~10年以上 必要 | 初期投資 額*5 |
| Se-79 (77, 78, <u>79</u> , 80, 82 ; 0.022, 0.083, <u>0.183</u> , 0.294, 0.417) | 同位体分離効果;有り 核変換性;有り 放射能低減効果;低 総合判定:否 優先順位:極低 | 99% | 電磁分離 (原田) | ○:実施例あり(ORNL調査中) | | ・大電流化が困難 ・分離エネルギー検討要 | ○:実施例あり | 約3億円 | 約1億円 3名 |
| | | | 遠心分離 法(篠田) | ○:常温で安定なガスがある URENCOでは、実際に販売している。 天然Seを用いた原理実証が容易 | ・Se-79のマスが中位であるので、カスケードが複雑化する | 99.9%以上などの高度分離への対応は見通せない。 | ○:実施例あり | 約3000万円 | 約1000万円 7, 8名 |
| | | | 原子レーザー法(山口、渡辺) | △:直線偏光の方向をそろえる方法の利用が考えられる ・励起レベルの測定例あり *6 同位体シフトは小さいが、79Seは奇数核同位体で基底レベルのJ=2であるので偏光で奇数と偶数の分離可能性有り。 | ・実験的実証が必要 ・奇数核Se-77の存在が許容できることが条件(Se-77/Se-79≒12%) | ・原子化手法検討要。 ・光反応特性データ取得要。 ・工学規模となったときの分離効率の低下(回収率を上げるための複数回分離処理プロセス評価試験要) ・電離ポテンシャルが大きい(9.75eV)ため短波長レーザーの検討要。 | ○: | 約7500万円 | 約1000万円 3名 |
| Zr-93 (91, 92, <u>93</u> , 94, 96 ; 0.067, 0.154, <u>0.257</u> , 0.382, 0.140) | 同位体分離効果;有り 核変換性;有り 放射能低減効果;有り 総合判定:合 優先順位:中 | 99% | 電磁分離 法 | ○:ibid | | ・ibid | ○:ibid | ibid | ibid |
| | | | 原子レーザー法 | △天然のZr-91について実験例有り*3 ・同位体シフトは小さいが、93Zrは奇数核同位体で基底レベルのJ=2であるので偏光で奇数と偶数分離可能。 | ・奇数核Zr-91の存在が許容できることが条件(Zr-91/Zr-93≒26%) | ・光反応特性データ取得要 ・合金化による低温融点化検討要 ・工学規模となったときの分離効率の低下(回収率を上げるための複数回分離処理プロセス評価試験が必要) | ○: | ibid | ibid |
| Tc-99 | 不要 | 99% | | | | | | | |
| Sn-126 (115, 116, 117, 118, 119, 120, 121m, 122, 124, <u>126</u> ; 0.002, 0.002, 0.053, 0.104, 0.156, 0.216, 0.003, 0.058, 0.094, <u>0.249</u>) | 同位体分離効果;無し 核変換性;無し 放射能低減効果;有り 総合判定:否 優先順位:極低 | 99% | 電磁分離 法 | ○:ibid | | ・ibid | ○:ibid | ibid | ibid |
| | | | 遠心分離 法 | △:天然Snを用いてSn124の分離実証ができる | ・Sn-126は最重量同位体 ・適したガス状化合物が必要(好ましいフッ化物は存在しない) | 99.9%以上などの高度分離への対応は見通せない。 | △: | 約3000万円 | 約1000万円 7, 8名 |
| 対象LLFP核種 (燃料中の核種、wt%； 太字はLLFP) | 同位体分離の 必要性 | 目標 分離 率(純 度) | 分離候補 技術 | 科学的成立性 | 主な研究課題 | | 実証性 | R&Dコスト | |
| Pd-107 (105, 106, <u>107</u> , 108, 110 ; 0.100, 0.221, <u>0.214</u> , 0.437, 0.028) | 同位体分離効果;有り 核変換性;有り 放射能低減効果;低 総合判定:否 優先順位:極低 | 99% | 電磁分離 法 | ○:ibid | | ・ibid | ○:ibid | ibid | ibid |
| | | | 原子レーザー法 | ○:実施例あり。同位体シフトは小さいが、107Pdは奇数核同位体で基底レベルのJ=0であるので偏光で奇数と偶数分離可能。 | ・奇数核Pd-105の存在が許容できることが条件(Pd-105/Pd-107≒47%) | ・光反応特性データ取得要 ・合金化による低温融点化検討要 ・工学規模となったときの分離効率の低下(回収率を上げるための複数回分離処理プロセス評価試験要) ・電離ポテンシャルが大きい(8.33eV)ため短波長レーザーの検討要。 | ○: | ibid | ibid |
| | | | レーザー化学法(小沢) | △:実施計画あり | ・原理実証が必要 ・Cs-137冷却後のCs-133/135の分離が可能であること | | △:原理実証3年 +ホット試験3年 | 約1億円 (F _{日/露} ≒3) | 1000万円 3名 |
| Cs-135 (133, <u>135</u> , 137 ; 0.325, <u>0.359</u> , 0.316) | 同位体分離効果;有り 核変換性;有り 放射能低減効果;有り 総合判定:合 優先順位:高 | 99% | 電磁分離 法 | ○:ibid | | ・ibid | ○:ibid | ibid | ibid |
| | | | 遠心分離 法 | △(×)適切なガス状化合物が見当たらない | ガス状化合物の調査 | | | | |
| Sm-151 (147, 148, 149, 150, <u>151</u> , 152, 154,) | (評価せず) | 99.9% | 原子レーザー法 | △:同位体シフトが比較的大きいので、円偏光を利用する方法と同位体シフトを利用する方法を組み合わせることが考えられる | ・原理実証が必要 | ・工学規模となったときの分離効率の低下 | ○:ibid | ibid | ibid |
| | | | 電磁分離 法 | ○:ibid | | ・ibid | ○:ibid | ibid | ibid |

*1:分離変換対象核種(開発目標第2段階放射能カテゴリに該当する7核種;Cs137, Sr-90は除く)

*2:別途検討中;結論のみ記入することとする(詳細は別表-2参照)

*3:レーザー法によって同位体比を測定し、90Zr:91Zr=0および92Zr:91Zr=0を確認した実験例。Physical Review A vol.47, No6(1993)

*4:科学的成立性を国内で実証するために要する研究期間(ホットセル製作、改造、装置据付期間等は除く)

*5:科学的成立性を実証する、ミニマムな試験装置費。国内で実施する場合を想定(ホットセル費、改造費は除く)。

*6:励起レベルおよび同位体シフト例。

(Transition Probability Measurements of Se I Spectral Lines by Emission Method, A.P.Ubelis and U.V.Berzinsh, Physica Scripta, Vol.34, 805-806(1986))、

(Measurement of the fine structure splittings of atomic Se and Sn in their ground 3p states, Gillet, D.A.; Diggins, S.J.; Brown, J.M., J.Phys.B, At.Mol.Opt.Phys., vol.27, no.21, p5175-84, 1994)

放射線の封じ込め対策費（ホットセルの改造；除染、装置撤去解体、据付、または新規設置）として億円単位の費用を考慮する必要がある。「化学法」の技術レベルは、現段階では適用性評価の対象とはならないが、机上実験が可能であること、従って追試が容易であること、実験コストが安いことなどから、実用化までの時間的余裕があるなら、いずれかの手法に着手し、その技術の成熟をまって他法と比較することも考えられる。

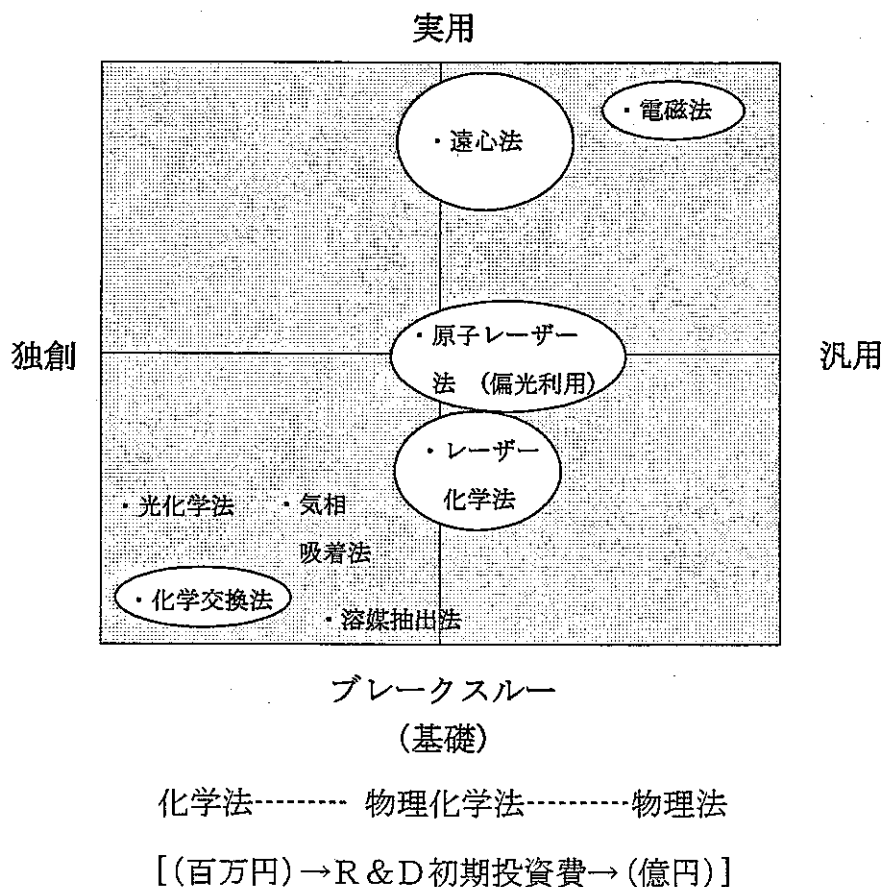


図3 LLFP 同位体分離手法の区分

3.3 LLFP 分離変換技術開発における基本的認識及びスタンス

○LLFP 由来の放射性毒性は、現行地層処分技術上からは安全許容濃度を大幅に下回っており、処分技術からのインセンティブは小さいと考えられる。しかしながら、放射性廃棄物の放射能そのものを同世代(100年)内で「無毒化」するには TRU 元素に加え、LLFP*の分離・核変換が必要と考えられる。これは原子力の開発に携わる研究者・技術者のモラル、あるいは使命として率先して取り組むべき研究課題と考えられる。
*分離変換技術開発 WG で対象核種及び目標分離変換率を検討中。

○将来の高レベル廃液の処理に対しては、深地層処分法以外の、幾つかの技術的選択肢を用意すべきである。アクチニド及び LLFP を高度に分離・核変換することによって、放射性廃棄物の低減化及び浅地層処分あるいは地表処分実現の可能性を追求することが必要である。

3.4 JNC における LLFP 同位体分離技術開発の開発方針(案)

○LLFP の分離・核変換は長期的課題であり、ここで拙速な取り組みはすべきでない。「U-235 マンハッタン計画」のような「戦時下の」研究課題でもないので、将来の経済性との整合が見通せるような、分離手法の育成を今から目指すべきである。またその手法は、若い研究者にとって魅力的な、学術的にも新奇性の高い技術であることが望ましい。

○既往技術では、同位体核種あるいは化合物分子の質量差を利用する物理的方法の実現性が最も高いのであるが、コストも高い。技術の成熟度は物理的方法→物理化学的方法→化学的方法となるにつれ下がる傾向にあるが、研究コストも下がる。化学的手法はブレークスルーした時のコストダウンが期待できる。

○分離(化学)は「実証の技術」であるので、机上検討(計算評価)のみでは説得力に欠ける。先ず実際に分離できることを実証すべきである。分離効率はその次の化学工学的な課題である。

○開発 C&R の暫定目標としては、外部の課題評価委員会への報告の節目でもあるので、2004 年度末を目処に、同位体技術の具体的開発計画とある程度の成果とを示せるよう進めることが要求される。

○研究資源としては、JNC の現況から、十分な研究予算及び研究員の確保は難しい。しかしながら、幸い実用化はかなり先と予想されるので、技術レベルが未成熟であつ

ても初期投資の少ない手法、その前提として、分離に際し環境負荷低減性を確保できる、二次的放射性廃棄物の発生の少ない手法を選択する。

○現実的に実現可能と考えられるのは、

(i) 核変換が可能で、かつ分離による放射能低減効果が最も顕著に現れる一ないし二核種*¹をターゲットとして選定した上で、実験室規模の試験が可能な技術*²をリファレンス技術として選択し、自前での分離研究を進める。あるいは、「先行基礎研究」としてテーマを起し、研究意欲の高い研究者、技術を発掘し、共同研究の形で研究を進める。

* 1 Cs-135(あるいは Zr-93)が考えられる。この場合、同位体分離の前に必要となる、FP Cs(Zr)元素の単離技術の開発も並行して進める必要がある。

* 2 各大学で実施中の化学交換法について引き続いて調査し、候補とすることができるか否かを検討する。

*

(ii) 実現性及び革新性が中位の、レーザー技術については、国外の研究能力を活用することを考える。具体的には、ロシア ISTCA-635 計画の支援を行うことにより、情報収集を行う。

(iii) 最も実現性の高い、「電磁法」、「遠心法」など従来技術の応用については、その知見を基に化学工学的な設計研究(机上検討)を行って分離の見通しを示す。

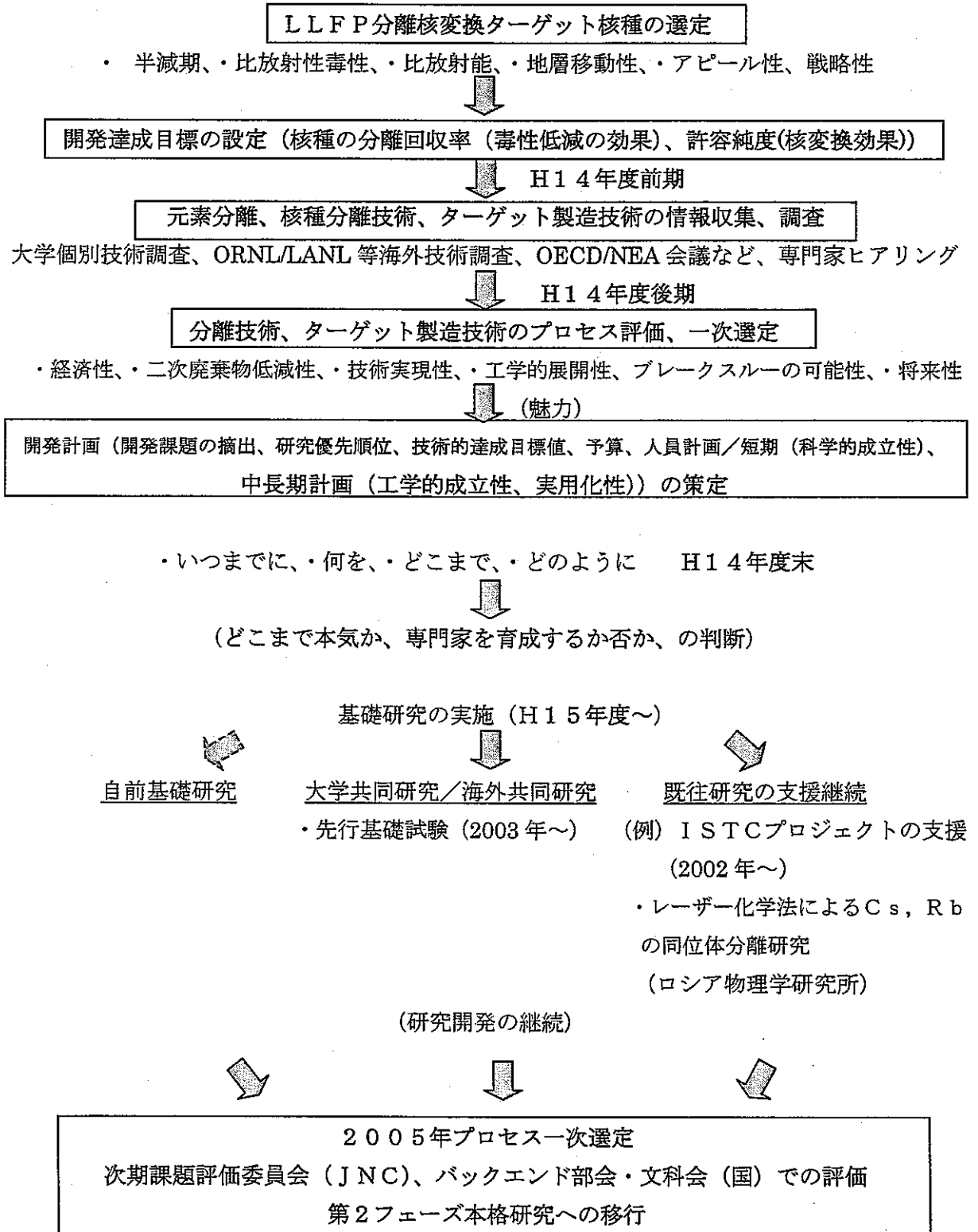
の方策であるが、いずれにせよきちんとした成果を出すためには、特に(i), (iii)を実施するには少なくとも一人の専任研究員の充当を図る必要がある。

以上、基本的開発戦略としては、外部の能力〔人、金〕を Full に活用すること。All Japan としての基礎研究の芽を育てるために、H15 年度先行基礎公募を利用して、有能な研究者の出現を期待する、そのための大学の事前説得が考えられる。また現在唯一、具体的研究計画であるロシア ISTC の、「アルカリ金属のレーザー化学法による同位体分離技術開発」に関する研究を積極的に支援し、2005 年以降の第 2 フェーズ研究では LLFP Cs-135 の分離に向かわせるよう働きかけるのも一策と考えられる。

3.5 研究展開案 (添付-4 ロードマップ参照)

LLFP 分離核変換における開発計画の策定案 (H14年度～)

なにを (対象 LLFP の選定)、どのくらい (達成度)、どのように (何法で)、いつまでに (研究期限)、いくらで (研究投資)、だれが (JNC 内策、大学委託、海外共研)



3.6 レーザー化学法；ISTC 計画

#A-635 Laser-Chemical Separation of Isotopes of Alkali Metals

(レーザー化学分離法によるアルカリ金属の同位体分離)

○ 従来のガス熱拡散法や遠心分離法に基づく同位体分離技術は、通常、高コスト、低効率であり、時として与えられた分離 Requirement を満足させるためには、何千もの「多重サイクル」を必要とする。この欠点を抜本的に解決するために、レーザーによる光励起を利用した同位体分離技術が提案されている。この方法は、レーザー照射により特定核種を光励起させることにより、ターゲットとする化学反応（例えば、レーザー照射による同位体選択的な分解反応）の動力学を向上させることができる、という現象に基づいている。この原理に基づき予備的に行った検討では、従来の多光子イオン化法に比べ、本法は単光子による低強度の励起で選択的な化学反応を引き起こすことができるので、従来欠点とされた高コストのビーム調整や強力なレーザーシステムを不必要とし、高効率で柔軟性に富む技術の確立に寄与する方法であるといえる。

○ 本プロジェクトは分離対象をアルカリ金属（ルビジウム及びセシウム）に限っているが、キーテクノロジーとしてのセル窓への熱化学的に安定な析出層の生成に関する情報やレーザー分離装置の製作にまつわる基本的な技術の習得ができ、これらは本技術を他元素の同位体分離に展開する際にも有益な知見となる。

○ 核燃料サイクルの環境負荷低減に向け、放射性廃棄物中の超長寿命核種を分離し、高速炉などで照射して短半減期あるいは安定核種に核変換する、いわゆる「分離核変換技術」の開発が進められている。当面の対象核種はアクチノイド元素とされているが、さらに環境負荷低減性深めるためには超長寿命核分裂生成物 (LLFP) 核種の分離核変換が必要であり、アルカリ元素 FP であるセシウムはそのターゲット元素のひとつである。セシウムは高レベル廃液に多量に含まれそのガラス固化体の放射性毒性を代表する FP 元素であり、その同位体のうち、Cs-137 は短半減期（約 30 年）ながら高放射性、高発熱性、一方 Cs-135 は 300 万年の半減期の長寿命である。従って後者 Cs-135 を核変換・消滅できれば高レベル廃液の長期にわたる放射性毒性量の低減と期間短縮化に大きく寄与することができる。そのためには高レベル廃液中からまずセシウムを元素分離し、次に Cs-135 を同位体分離しなければならないが、高硝酸酸性、高放射線環境の高レベル廃液からのセシウムの選択的分離は非常に困難であり、工学的に成立している技術は世界的にもほとんどない。また、放射性 FP 核種の同位体分離については基礎レベルの研究すら稀であり、特に放射性セシウムの同位体分離についての研究例は皆無に近い。

○ 本提案にあるレーザー化学法はロシア側の光化学反応、化学物質に関する深い理解とユニークな発想に基づくものであり、基礎並びに応用の両面で大いに発展が期待

できる重要な研究であると評価できる。さらに、今後、本プロジェクト研究で蓄積される知見が、放射性セシウムの同位体分離技術の開発に有効活用されるものとなれば、本研究の遂行は意義深いものとなる。

○ コラボレータは、使用済核燃料中の長寿命マイナーアクチニド及びLLFP/希少元素FPの分離・核変換・利用の研究を通じて、かねてよりLLFPの同位体分離の必要性に着目しており、本プロジェクト技術についてはその科学的、工学的成立性を明らかにさせたうえで、主としてその工学化と放射性核種の同位体分離への展開の観点から、評価及び提言を行うこととしたい。本法の長寿命セシウムの同位体分離への展開の重要性はロシア側も十分認識しており、本プロジェクト研究で基礎的知見を充実させた後、より現実的な、環境負荷低減の視点からのニーズに対応する方向での研究に移行する意図がうかがえる（私信；Dr. Melist Movsesyan）。本プロジェクトでは主として分離化学の立場から検討に加わるが、将来の放射同位体分離化学への展開を含めた、実用化の視点からの評価を重点にして国際共同研究に参画する。

第4章 海外共同研究内容(CEA、ORNL)

4.1 JNC/CEA 共同研究

CEA/JNC 共同研究は、1992年に締結され、先進高速炉技術に関する情報交換及び双方の参画による共同研究が推進されてきた。5年毎に共同研究契約を更新しており、現在は第二期の最終年にあたる。

現在は1998年に見直しの行われた新ワークパッケージ(New Work Package, NWP と略す)のもとで活動が行われている。

(1) JNC/CEA 原子力エネルギーに係る先進技術の研究開発のための協力協定

NWP-4 (炉物理)

○NWPの研究項目として以下のものがあげられている。

Action 1 先進概念のためのデータとメソッドの開発と妥当性確認(Development and Validation of Data and Methods for Innovative Concepts)

Action 2 積分データベースと更なる積分実験(Integral Data Base and Further Integral Experiments)

Action 3 MA及びLLFPのデータと実験的確認(MA and LLFP Data and Experimental Validation)

○各Actionの具体的な項目について、2001年7月3日～5日にCEAカダラッシュ研究センターにおいて開催された「NWP-4炉物理専門家会合」のアジェンダを添付-5に示してある。同会合では、第二期共同研究の進捗を双方で確認し、総括するとともに、第三期共同研究における新しい研究内容の合意が行われた。

○MA及びLLFPの核変換に係るAction3について、専門家会合での主な議論を以下に紹介する。

①COSMO実験

COSMO実験は、1998年7月～1999年12月にMASURCAで実施された減速材付ターゲット集合体模擬実験である。COSMO実験は、減速材種類及びターゲット装荷位置を変えた次の3フェーズから成る。

COSMO-1 減速材： $^{11}\text{B}_4\text{C}$ 装荷位置：炉中心

COSMO-2 減速材： $^{11}\text{B}_4\text{C}$ 装荷位置：径方向ブランケット及び径方向反射体

COSMO-3 減速材： $^{11}\text{B}_4\text{C}$ 、 $\text{ZrH}_{1.6}$ 、 $\text{CaH}_{1.9}$ 装荷位置：炉中心

測定項目は、スペクトルインデックス、減速材付き集合体内の反応率分布、径方向及び軸方向トラバース、臨界性、減速材付き集合体の反応度価値である。

CEA では、COSMO-1 の実験解析までを実施しており、同結果が紹介された。Pu-239 のトラバースは、反射体領域で過小評価となっていること、箔を用いた減速材付き集合体内の反応率分布では、U-238、Au、Mn に 10%以上の測定値と計算値の相違が見られた。Pu-239 トラバースの過小評価は原因不明、U-238 反応率には不純物(U-235)の影響があり、Au、Mn 反応率については核データに問題があるとされている。

水素化物減速材によって、より激しく中性子が減速される COSMO-3 の実験解析は、かなり難しく、測定値と計算値との間に大きな相違が生じているとのこと。中性子スペクトルが短い距離で大きく変化し、厚さ数 mm の燃料端栓の存在ですら大きな影響を解析結果に与えるため、体系のモデル化をかなり緻密に行う必要がある。

②PROFIL 計画

PROFIL-R 共同研究の実実施計画書を添付-6 に示してある。

CEA との共同研究として「Phenix」にて TRU/FP サンプル照射試験を行い(表 6)、TRU 及び FP の核データ評価のための価値ある実験情報(特に捕獲反応)に反映させる。

スケジュール：照射 2002 年～2005 年

解析 2006 年～ (CEA、JNC で共同実施)

表 6 TRU/MA サンプル照射試験

| | | | | |
|-----------|-------------|-----------------|--------|--------|
| ●標準核種 | U-235 | | | |
| | Th-232 | U-233 | U-234 | U-238 |
| ●アクチナイド核種 | Pu-238 | Pu-239 | Pu-240 | Pu-242 |
| | Np-237 | Am-241 + Am-243 | | |
| | Zr-91 | Mo-95 | Mo-97 | Mo-100 |
| | Ru-101 | Ru-102 | Ru-104 | Pd-104 |
| ●不純物 FP | Pd-105 | Pd-106 | Ag-107 | Ag-109 |
| | Cs-133 | Nd-143 | Nd-145 | Nd-146 |
| | Sm-147 | Sm-149 | Sm-150 | |
| ●長寿命 FP | Tc-99 | I-129 | | |
| ●その他 | B (Natural) | | | |

PROFIL-R 計画への共同研究契約の締結において、フェニックスがいつ再稼動するかが問題となっていたが、フェニックスの今後の見通しは次のとおりである。フェニックスは今秋、いったん臨界にするが、すぐシャットダウンする予定であ

る。その後、今年末～来年始めにかけて蒸気熱交換器の修理が行われる。出力運転(第51サイクル)は、来年の中頃の開始を目標としている。尚、フェニックスの出力運転は、あと6サイクル行うことが計画されている。

PROFIL-Rの照射は、フェニックスの再稼動に合わせて、来年中頃より開始され、第51サイクル(2002年中頃～2003年中頃)から第52サイクル(2003年中頃～2004年中頃)までの2サイクル照射(120EFPD)が行われる予定である。現在、PROFIL-R集合体の作成は完了しており、まもなくフェニックスへの輸送が行われる予定である。

PROFIL-M計画については、サンプルを準備しているところであり、PROFIL-Rに入れることができなかった“missing”核種を取り入れることを検討中である。

③FP核変換実験

フェニックスでの減速材付きターゲット集合体(DAC3000、減速材:CaH₂)を用いて行われたCo-60生成実験のJNC解析結果を報告。解析には、モンテカルロコードMVPを使用した。中性子はかなり減速されており、Coの中性子捕獲反応の多くは熱エネルギー領域で起こっている。熱エネルギー領域の中性子スペクトルは減速材の温度に依存するため、減速材の現実的な温度設定が重要であることを示した。最終的な実験地と解析値の相違は、15～20%となった。誤差評価の結果、径方向ブランケット第三層の照射位置は遮蔽体に隣接しており、構造材核種の中性子反射効果によってターゲットの中性子束レベルに不確定さが生じる。最新の共分散によると、鉄の散乱反応の不確定さが最も影響を及ぼしており、Coの反応率に対して20%もの不確定さを引き起こす可能性が示された。

④「弥生」におけるMA崩壊熱測定

弥生炉において実施したU-235とNp-237の崩壊熱測定実験の現状について、CEA側に報告した。γ線崩壊熱測定は、ほぼ終了したものの、β線崩壊熱測定には応答関数が原因と見られる不具合があること、AMやCmについても本実験に用いたシステムでは測定が困難であり測定を断念した。

⑤常陽PIEデータ

MK-I炉心、MK-II炉心におけるPIE対象燃料集合体の装荷位置及び燃焼度のリスト、質量分析例、MK-II炉心で行われたNp-237サンプル照射試験結果等を報告。CEA側は、これらPIEデータに強い関心を示し、JNCはデータの整理・評価が完了した後に、最終的にはCEA側に提供可能であることを示した。

○次期共同研究テーマ

①情報交換

- a. 核データ (JEFF-3/JENDL-3.3、共分散評価及び処理コード (ERRORJ)、データ処理、群定数)
- b. 解析手法及びコード (ERANOS/JNC システム、モンテカルロコードによる妥当性評価)
- c. 炉定数調整手法・調整ライブラリ

②積分実験解析

- a. 積分実験データの交換 (常陽、もんじゅ (将来的)、COSMO、Phenix)
- b. セロ出力実験の共同解析 (SEFOR、JUPITER (ロッド体系、サンプルドuplicator)、CIRANO (反射体効果)、COSMO)
- c. 出力実験の共同解析 (常陽 (炉物理試験、PIE)、PROFIL (PROFIL-R、PROFIL-1, 2))

③PROFIL-R 計画

(2) JNC/CEA 原子力エネルギーに係る先進技術の研究開発のための協力協定
NWP-6a

○ワークパッケージ NWP-6a に関する、Action を添付-7 に示す。

(3) JNC/CEA 原子力エネルギーに係る先進技術の研究開発のための協力協定
NWP-7

○先進技術協定 NWP-7 に係る共同研究に関して、資料を添付-8 に示してある。

○CEA/JNC 先進技術協力のもと、駐在員を派遣し、カダラッシュ研究所で行われている Am 添加燃料照射 CAMIX/COCHIX 計画の開始と同時に燃料設計に直接参画した。共同研究の目的は、仏国側の計画遂行に寄与するとともに、MA 関連研究への関与及び情報収集を行い、JNC における MA 燃料研究に資することである。駐在員は次の 2 業務に直接参画した。

① CAMIX/COCHIX 計画

② SUPERFACT 試験を利用したベンチマーク解析

4.2 JNC/ORNL 共同研究

OMA及びLLFPの核データの整備状況は決して満足のいくものではない。LLFP中性子捕獲断面積の現状を添付—9に示す。今後は、測定データのないもの、あるいは精度が50%以上のものを主体にデータ整備を行う。当面は、測定データが無いSe-79、Zr-93、Pd-107に焦点を当て、ORNLとの共同研究も活用してデータ整備を進めていく。

○本共同研究は、①長寿命核分裂生成核種に対する熱中性子捕獲断面積測定データの解析、②長寿命核分裂生成核種サンプルの整備、及び③オークリッジ研究所の加速器施設を用いたkeV中性子断面積測定の3項目を包括する。以下に、各研究項目の内容を記す。

①長寿命核分裂生成核種に対する熱中性子捕獲断面積測定データの解析

オークリッジ研究所所有の長寿命核分裂生成核種に対する熱中性子捕獲断面積未解析データを共同で解析することにより、熱中性子捕獲断面積の決定に必要な崩壊ガンマ線の部分崩壊図を決定する。解析対象核種は、Zr-93、Tc-99、Pd-107、及びI-129を含むものとする。

②長寿命核分裂生成核種サンプルの整備

オークリッジ研究所は、中性子捕獲断面積測定に十分な量のSe-79、Zr-93、Tc-99、Pd-107、及びI-129を含むサンプルを供給する。中性子捕獲断面積測定の必要に応じて、化学処理、同位体分析を実施する。

特に、Se-79、Zr-93、及びPd-107については、サンプルを定量分析した後、密封線源とする。本密封線源は、京都大学原子炉実験所あるいは東京工業大学原子炉工学研究所に輸送し、測定に使用する。

③オークリッジ研究所の加速器施設を用いたkeV中性子断面積測定

研究項目②で整備されたサンプルSe-79、Zr-93、Tc-99、Pd-107、及びI-129に対し、オークリッジ研究所の中性子断面積測定施設を用いて、keV中性子領域での中性子捕獲断面積を測定する。

○スケジュールは、以下の6年間である。

Year 1

- ① Begin analyses of the thermal-neutron capture gamma-ray data.
- ② Begin acquisition of Tc-99, Zr-93, and Pd-107.

Year 2

- ① Complete analysis of the thermal-neutron capture gamma-ray data.
- ② Reporting on the analysis of the thermal-neutron capture gamma-ray data.

- ③ Begin acquisitions of Se-79 and I-129 samples.
- ④ Prepare the Tc-99 samples.
- ⑤ Begin the Tc-99 capture cross section measurements at ORELA.

Year 3

- ① Complete the Tc-99 measurements at ORELA.
- ② Prepare the Zr-93 samples.
- ③ Begin the Zr-93 capture cross section measurements at ORELA.

Year 4

- ① Complete the Zr-93 measurements at ORELA.
- ② Prepare the Pd-107 samples.
- ③ Begin the Pd-107 capture cross section measurements at ORELA.
- ④ Transport requested Zr-93 and Pd-107 samples to the Kyoto University Reactor.

Year 5

- ① Complete the Pd-107 measurements at ORELA.
- ② Prepare the I-129 and Se-79 samples.
- ③ Begin the Pd-107 capture cross section measurements at ORELA.
- ④ Transport requested I-129 and Se-79 samples to the Kyoto University Reactor.

Year 6

- ① Final reporting.

第5章 「常陽」でのMA及びLLFP照射試験

○照射試験

MAを添加した燃料については、MAの成分割合が増加すると、融点、熱伝導度等の燃料設計上重要な物性値が変わること、照射燃焼に伴う燃料組織変化、被覆管内面腐食への影響に変化が生じる可能性があること、照射に伴い燃料健全性上予期せぬことが起こる可能性が否めないことから、それらの設計用物性値を整備するとともに、照射試験を行い確認していくことが重要である。

至近の計画としては、Am、Npを対象に最大5%までMAを添加したMA-MOXペレット燃料を「常陽」で10GWd/t及び100GWd/tの燃焼度まで照射する計画を進めている。

○「常陽」でのTRUサンプル照射試験

「常陽」におけるTRU核種サンプル照射試験の本格的な開始を前に、照射後の核種組成及び放射能についての予備解析を行っている。予備解析結果を、添付—10に示してある。ORIGENを用いた予備解析結果に基づき、「常陽」における $^{241,243}\text{Am}$ 、 ^{244}Cm 、 ^{237}Np TRUサンプルの照射試験前予備解析の概要を報告している。

まとめ

長寿命核種の分離変換技術は、核燃料リサイクルにおける高レベル放射性廃棄物の減容等処分に係る負担軽減や資源としての有効利用に資するものとして有用な技術となる可能性を有するもので、本技術の研究開発にあたっては、国内外の研究機関が協力し合って進めることが肝要であり且つ効果的であることから、東京電力株式会社と核燃料サイクル開発機構は、共同で長寿命核種の分離変換研究を進めることとした。

まず、分離変換技術開発の出発点となる「分離核変換の意義・目的」、「分離核変換の技術開発目標」、「分離核変換の対象核種」の検討を進めた。

その結果、これまで広くコンセンサスを得るに至っていなかった「分離核変換の意義・目的」を明確にし、開発目標については、第1段階（現在の技術及びその延長上で可能性が見通せる目標。5年後に実験室レベルを終了。）、第2段階（現時点では工学的成立性は十分に見通せないが、科学技術の進歩により将来的に工学的成立性を有し得る目標。15年後に実験室レベルを終了）、究極（理想の目標）という、段階を踏んだ目標設定を行い、その各段階の目標に対応させ、且つ、分離核変換の意義・目的に照らして、分離核変換すべき対象核種を“放射能及び放射性毒性の観点”、“地層処分合理化の観点”、“有効利用の観点”の3つの観点から選定した。

また、第2段階以降に必要なと考えられる LLFP の同位体分離について、そのフィージビリティを同位体分離の必要性、技術的成立性、経済性等の観点から調査・検討するとともに、今後の方向性を示した。

さらに、分離変換技術に関する情報交換の場として、サイクル機構が実施している海外との共同研究内容の紹介や「常陽」での MA 及び LLFP 照射試験について、現状及び計画の紹介を行い、情報及び認識の共有化を行った

添 付 資 料

長寿命核種の分離変換技術に関する研究開発の進め方について

平成 12 年 4 月 11 日

原子力委員会決定

1. 当委員会は、原子力バックエンド対策専門部会（以下、「専門部会」）から、長寿命核種の分離変換技術に関する研究開発の現状と今後の進め方について、調査審議結果の報告を受けました。

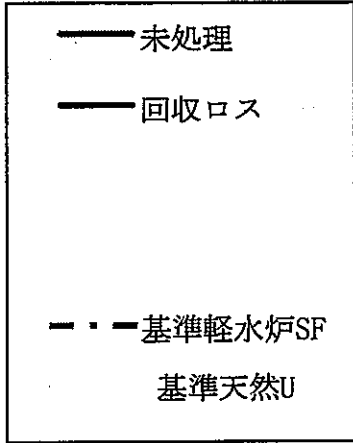
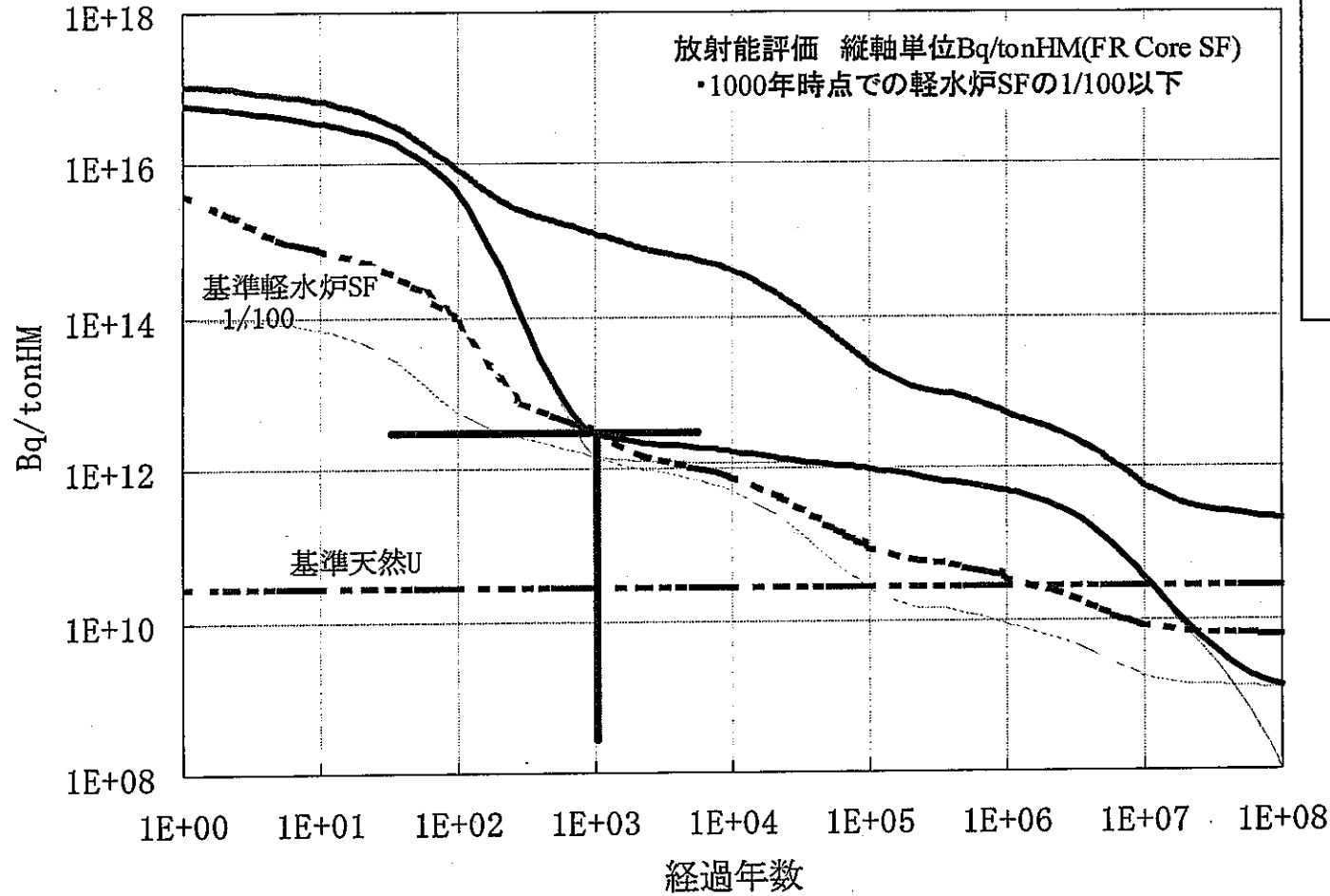
専門部会は、各界各層の有識者で構成され、研究状況の評価及びそれ以降の進め方について、約 1 年にわたり調査審議を行い、報告書の取りまとめに当たっては、報告書案に対し国民の方々から広く意見を募集しました。

2. 本技術は、産業活動に伴う有害廃棄物の発生を極力抑制する観点から、高レベル放射性廃棄物の減容等処分に係る負担軽減や資源としての有効利用に資するものとして有用な技術となる可能性があります。専門部会報告書では、本技術は基礎的な段階にあり、今後を着実に研究開発を進めることが適当であるとして、研究開発の推進に必要な事項が取りまとめられています。

今後は、専門部会報告書にあるとおり、本技術を核燃料サイクルに関する技術にとらえ、核燃料サイクルの他の研究開発との関連を考慮しながら、定期的な評価を行いつつ研究開発を進めることが重要です。また、日本原子力研究所、核燃料サイクル開発機構及び、(財)電力中央研究所においては、国内外の研究機関や大学との協力の下、着実かつ効率的に研究開発を進めるべきと考えます。本技術は、核反応を用いて、長寿命の放射性核種を短寿命核種あるいは安定な核種に変換するものであり、その開発に際しては、既存の技術だけでは解決が困難な課題も含まれており、斬新な発想が求められる分野です。今後、若い技術者にとって魅力ある、十分に能力を発揮できるような環境作りが必要です。このことは原子力研究の活性化にも寄与するものと考えます。

3. 当委員会は、着実かつ効率的な研究開発が行われるよう、今後も、関係者より適宜状況の報告を受け、評価に当たっても適切な役割を果たしていきます。

第一段階目標設定



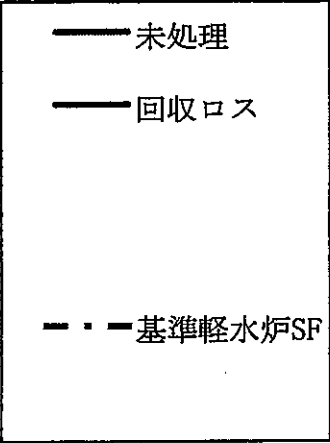
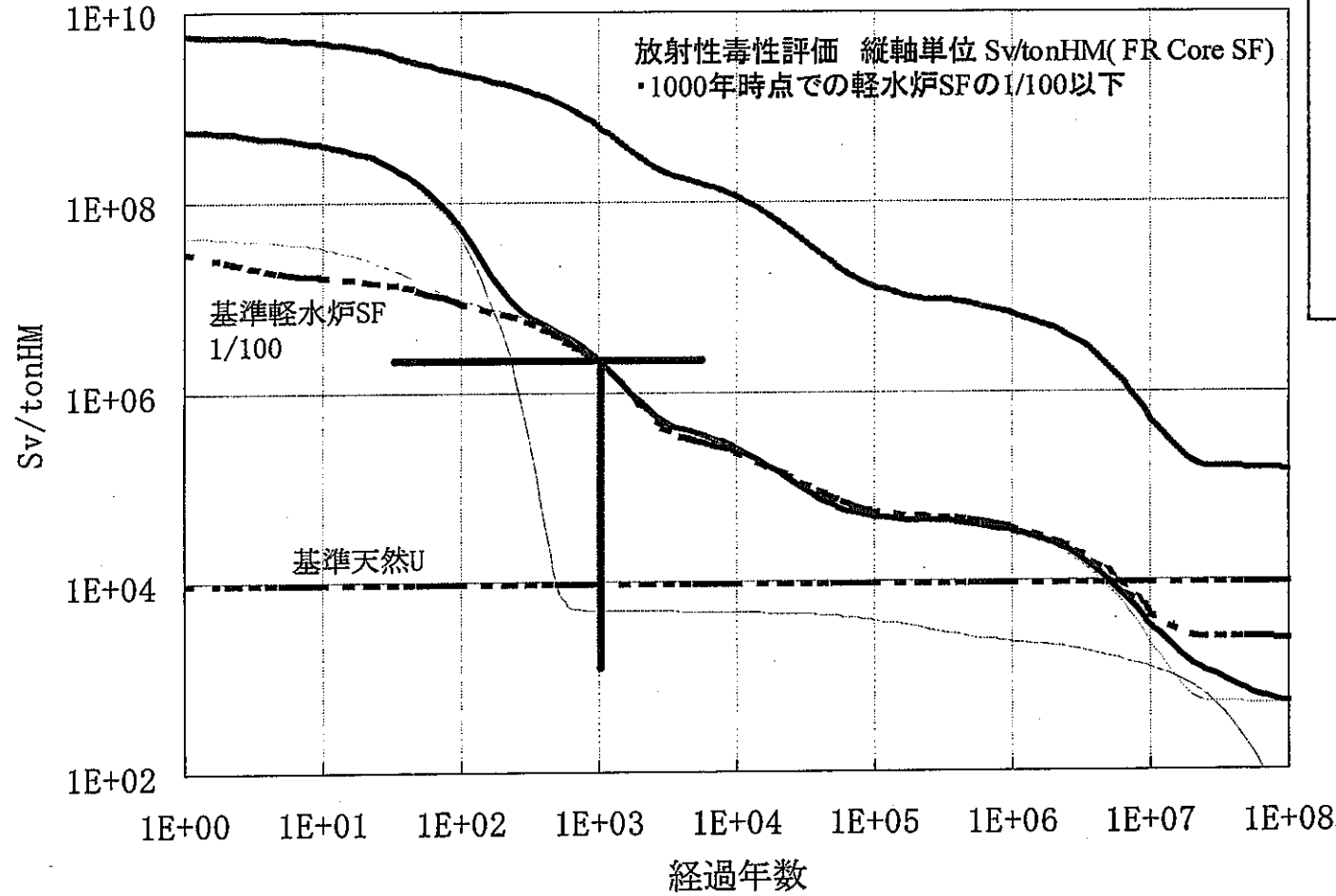
| 要求低減度 | |
|-------|---|
| U | 2 |
| Np | 2 |
| Pu | 3 |
| Am | 3 |
| Cm | 2 |

| | |
|--------|---|
| I 129 | 0 |
| Pd107 | 0 |
| Cs135 | 0 |
| Zr 93 | 0 |
| Tc 99 | 2 |
| Sn126 | 0 |
| Se 79 | 0 |
| Cs137 | 0 |
| Sr 90 | 0 |
| Cd113M | 0 |
| Sm151 | 0 |
| Sn121M | 0 |
| Eu154 | 0 |
| Eu152 | 0 |
| Kr 85 | 0 |
| H 3 | 0 |

添-2

添付-2.1 第一段階 放射能 1000年後時点

第二段階目標設定



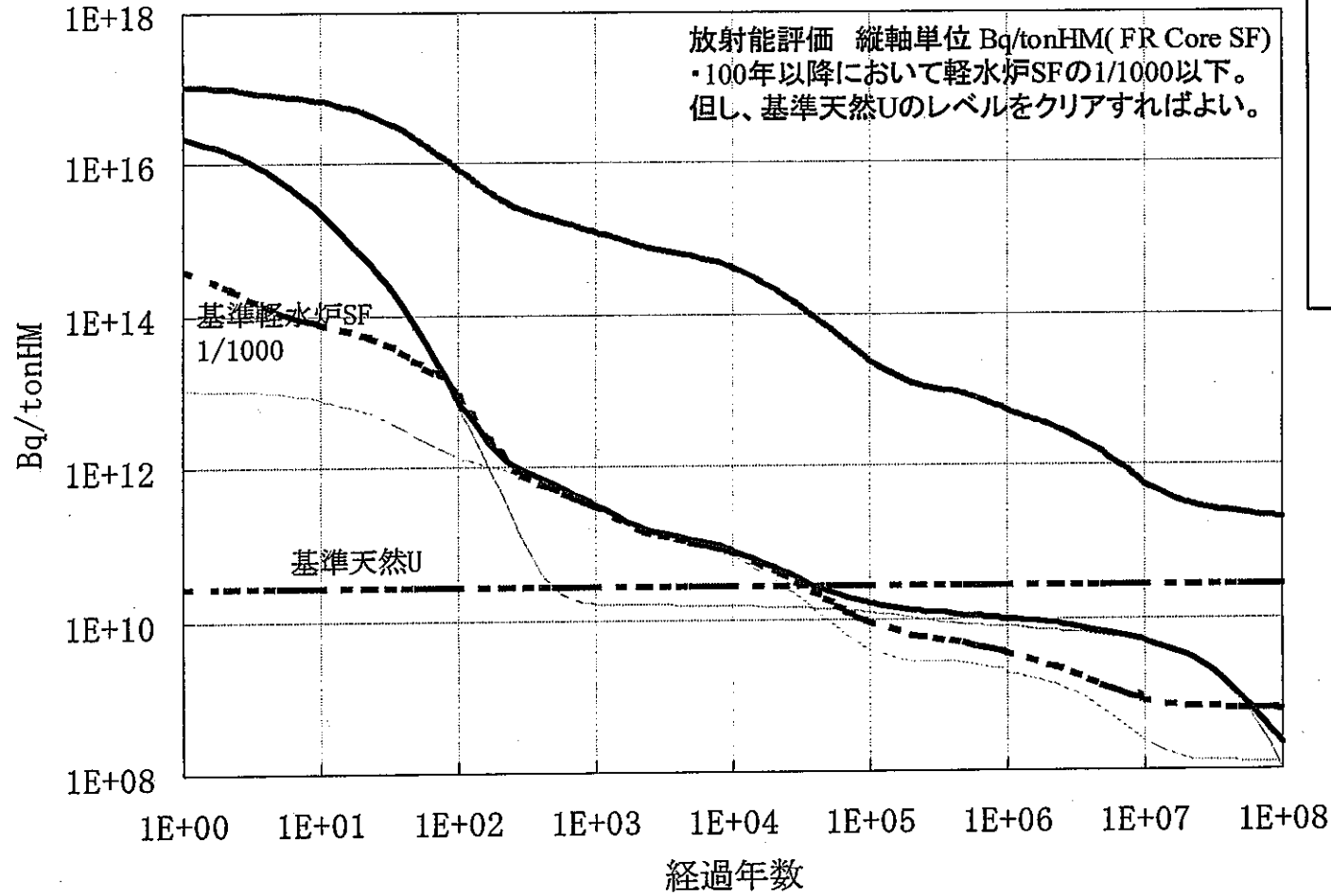
| 要求低減度 | |
|-------|---|
| U | 2 |
| Np | 2 |
| Pu | 3 |
| Am | 2 |
| Cm | 2 |

| | |
|--------|---|
| I 129 | 0 |
| Pd107 | 0 |
| Cs135 | 0 |
| Zr 93 | 0 |
| Tc 99 | 0 |
| Sn126 | 0 |
| Se 79 | 0 |
| Cs137 | 0 |
| Sr 90 | 0 |
| Cd113M | 0 |
| Sm151 | 0 |
| Sn121M | 0 |
| Eu154 | 0 |
| Eu152 | 0 |
| Kr 85 | 0 |
| H 3 | 0 |

添-3

添付-2.2 第一段階 放射性毒性 1000年時点

第二段階目標設定



Legend for the graph:

- 未処理
- 回収ロス
- - - 基準軽水炉SF

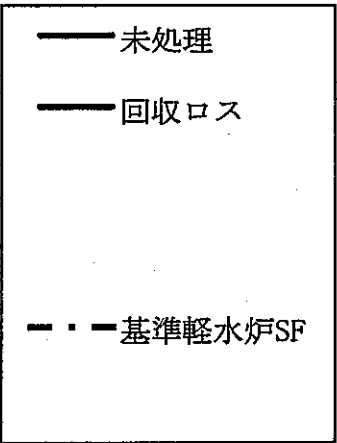
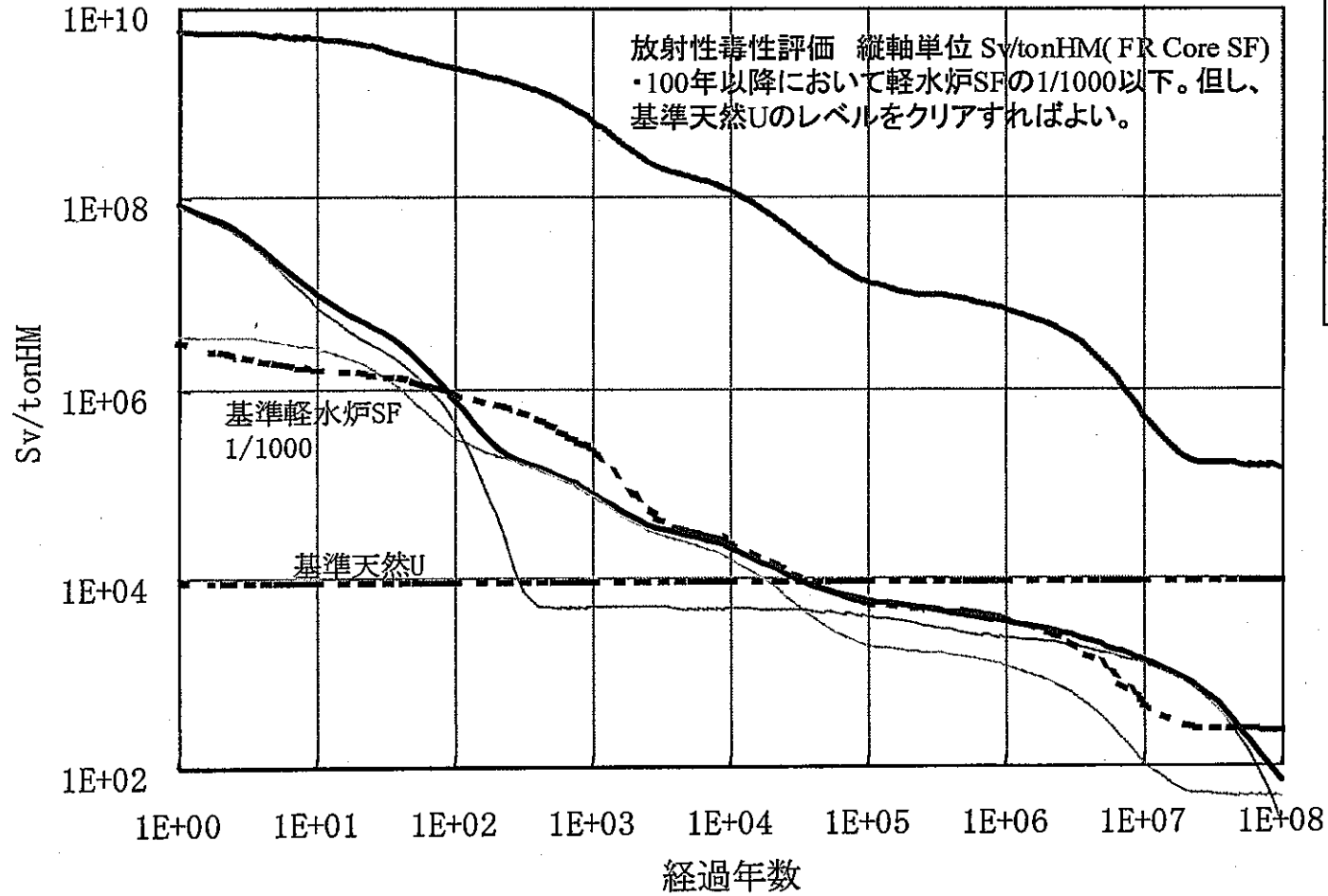
| 要求低減度 | |
|-------|---|
| U | 3 |
| Np | 3 |
| Pu | 4 |
| Am | 3 |
| Cm | 3 |

| | |
|--------|---|
| I 129 | 0 |
| Pd107 | 2 |
| Cs135 | 3 |
| Zr 93 | 3 |
| Tc 99 | 3 |
| Sn126 | 2 |
| Se 79 | 2 |
| Cs137 | 3 |
| Sr 90 | 3 |
| Cd113M | 0 |
| Sm151 | 3 |
| Sn121M | 0 |
| Eu154 | 0 |
| Eu152 | 0 |
| Kr 85 | 0 |
| H 3 | 0 |

添-4

添付-2.3 第二段階 放射能 100年後全時間

第二段階目標設定



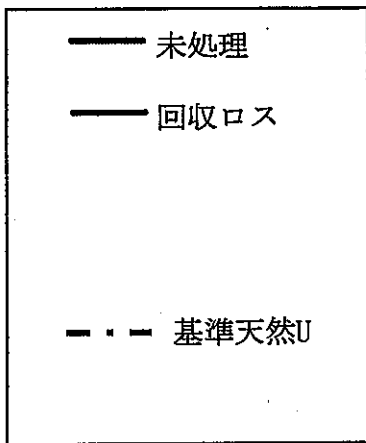
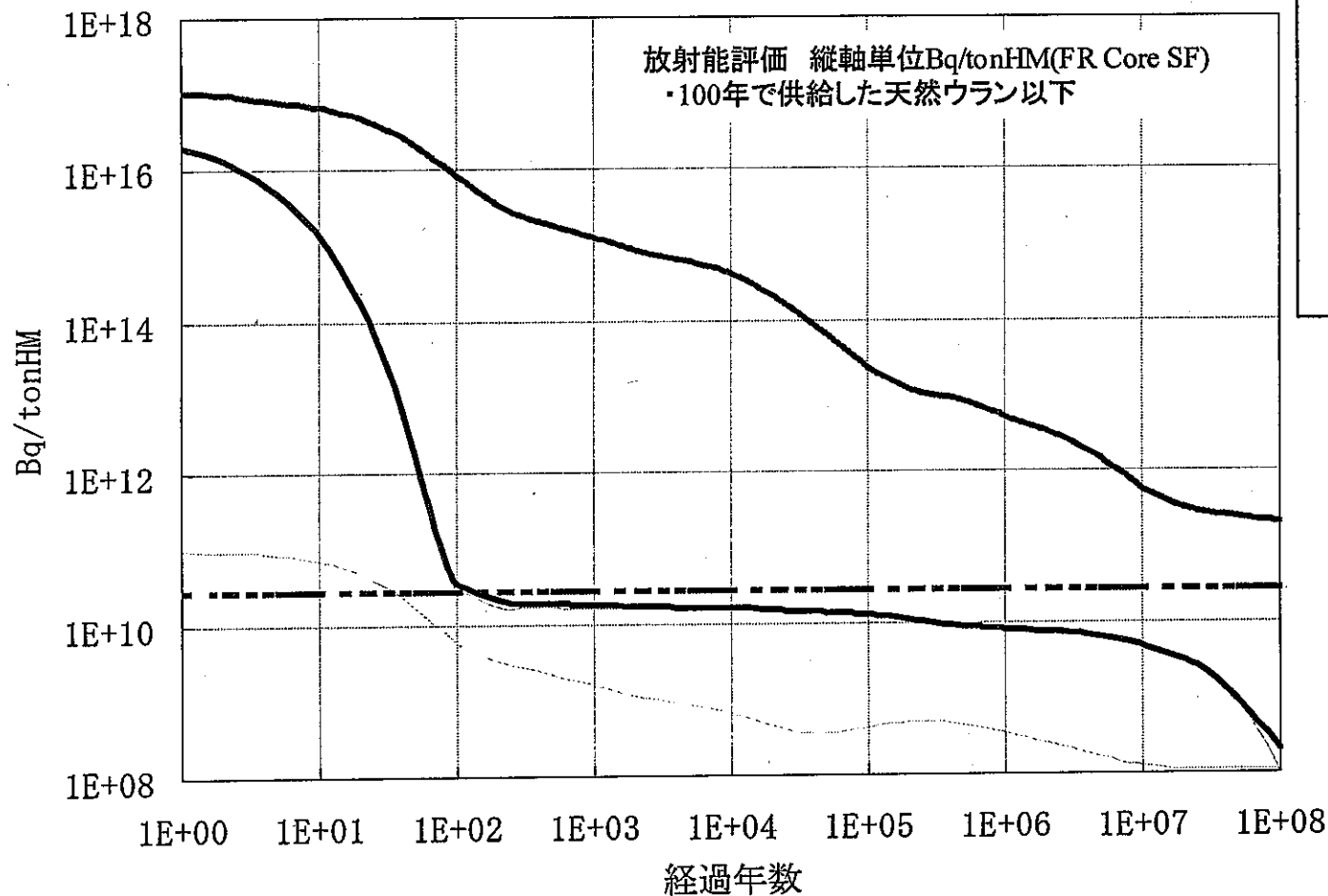
| 要求低減度 | |
|-------|---|
| U | 3 |
| Np | 3 |
| Pu | 4 |
| Am | 4 |
| Cm | 3 |

| | |
|--------|---|
| I 129 | 0 |
| Pd107 | 0 |
| Cs135 | 0 |
| Zr 93 | 0 |
| Tc 99 | 0 |
| Sn126 | 0 |
| Se 79 | 0 |
| Cs137 | 2 |
| Sr 90 | 2 |
| Cd113M | 0 |
| Sm151 | 0 |
| Sn121M | 0 |
| Eu154 | 0 |
| Eu152 | 0 |
| Kr 85 | 0 |
| H 3 | 0 |

添-5

添付-2.4 第二段階 放射性毒性 100年後全時間

第三段階目標設定

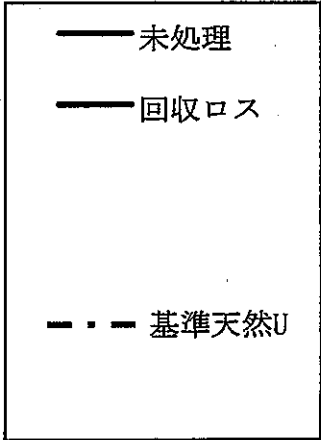
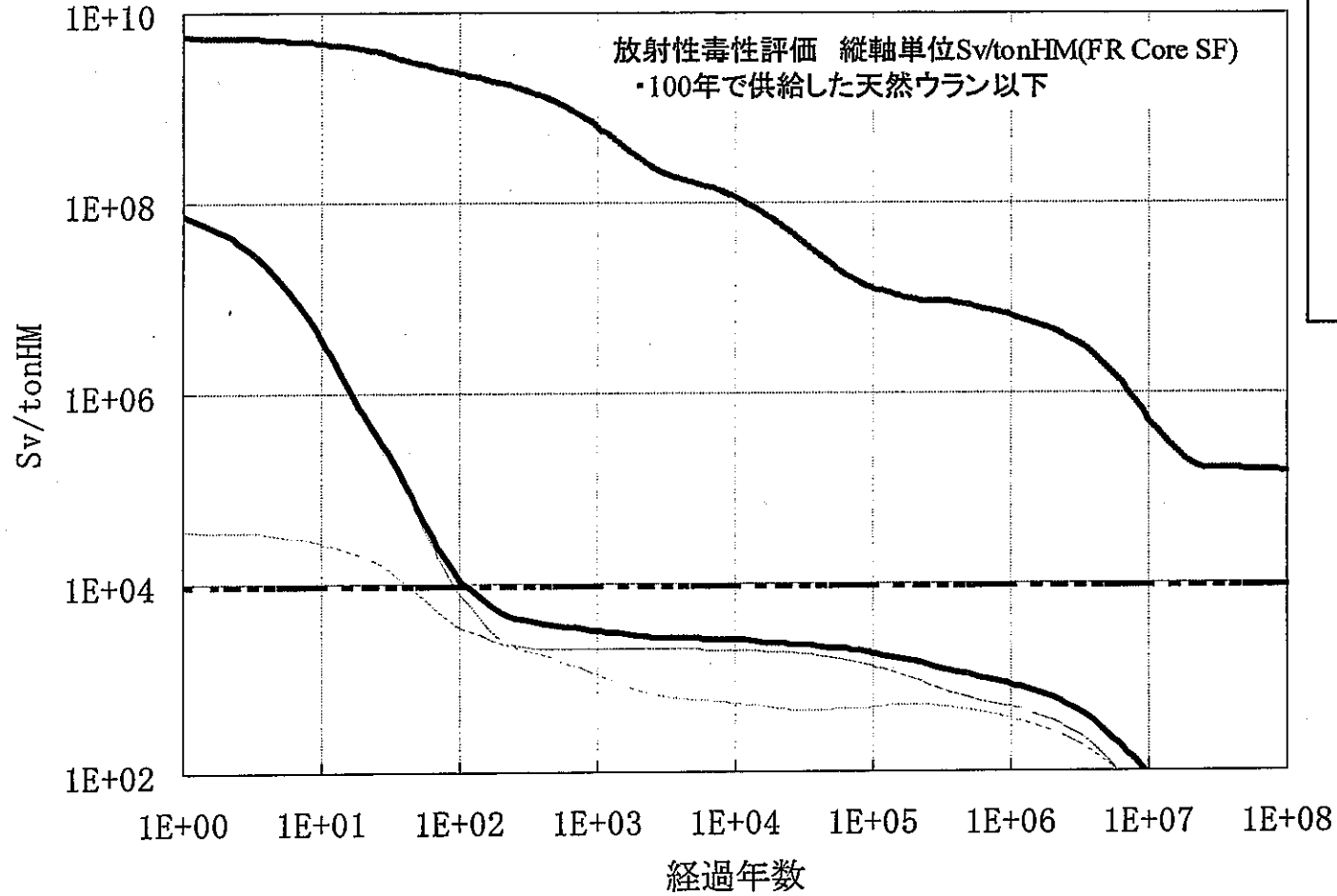


| 要求低減度 | |
|-------|---|
| U | 3 |
| Np | 3 |
| Pu | 6 |
| Am | 6 |
| Cm | 5 |

| | |
|--------|---|
| I 129 | 0 |
| Pd107 | 2 |
| Cs135 | 3 |
| Zr 93 | 3 |
| Tc 99 | 3 |
| Sn126 | 2 |
| Se 79 | 2 |
| Cs137 | 6 |
| Sr 90 | 6 |
| Cd113M | 2 |
| Sm151 | 6 |
| Sn121M | 2 |
| Eu154 | 2 |
| Eu152 | 2 |
| Kr 85 | 3 |
| H 3 | 3 |

添付-2.5 第三段階 放射能 100年後

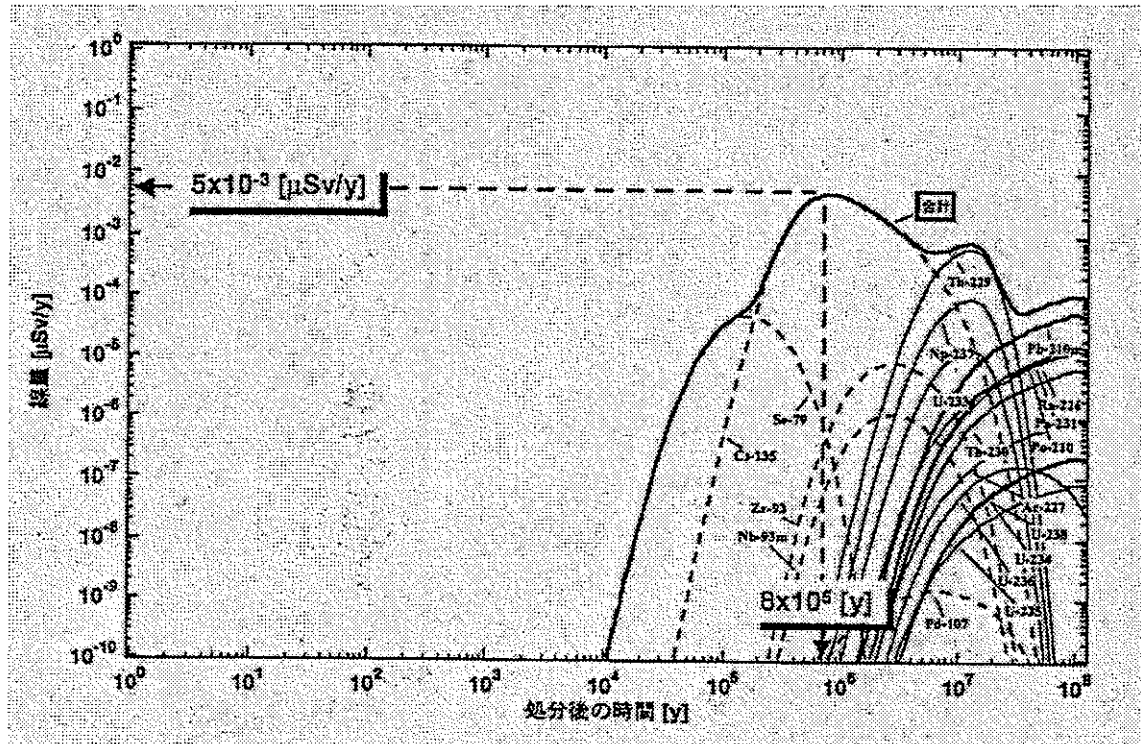
第三段階目標設定



| 要求低減度 | |
|-------|---|
| U | 3 |
| Np | 3 |
| Pu | 6 |
| Am | 6 |
| Cm | 5 |

| | |
|--------|---|
| I 129 | 2 |
| Pd107 | 0 |
| Cs135 | 0 |
| Zr 93 | 0 |
| Tc 99 | 2 |
| Sn126 | 0 |
| Se 79 | 0 |
| Cs137 | 4 |
| Br 90 | 4 |
| Cd113M | 2 |
| Sm151 | 2 |
| Sn121M | 0 |
| Eu154 | 0 |
| Eu152 | 0 |
| Kr 85 | 0 |
| H 3 | 0 |

添付-2.6 第三段階 放射性毒性 100年後



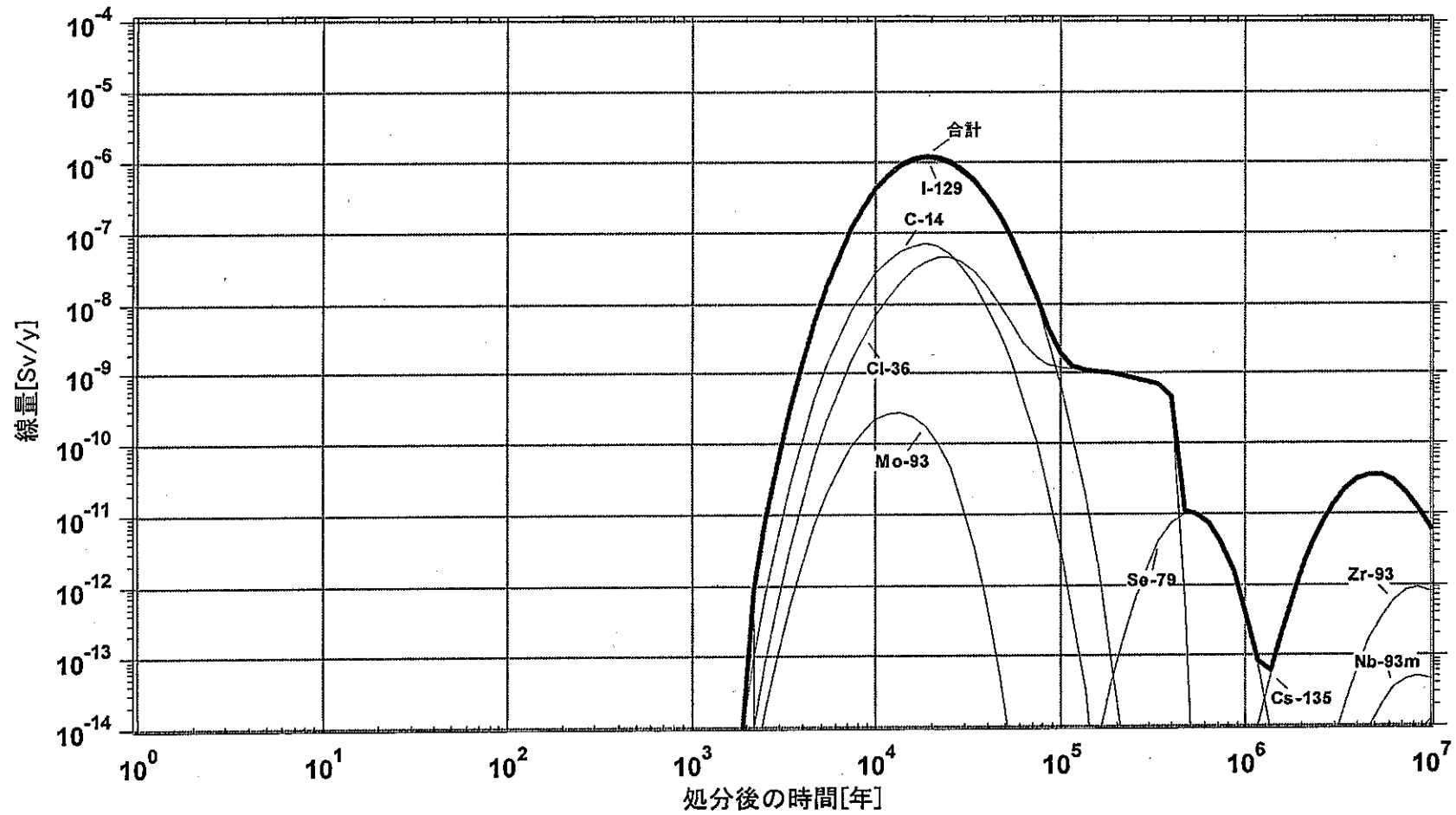
添付-3.1 高レベル放射性廃棄物を地層処分した時の線量評価結果 (例)

地下水シナリオのレファレンスケースについての解析結果 (例)

出典：「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性」

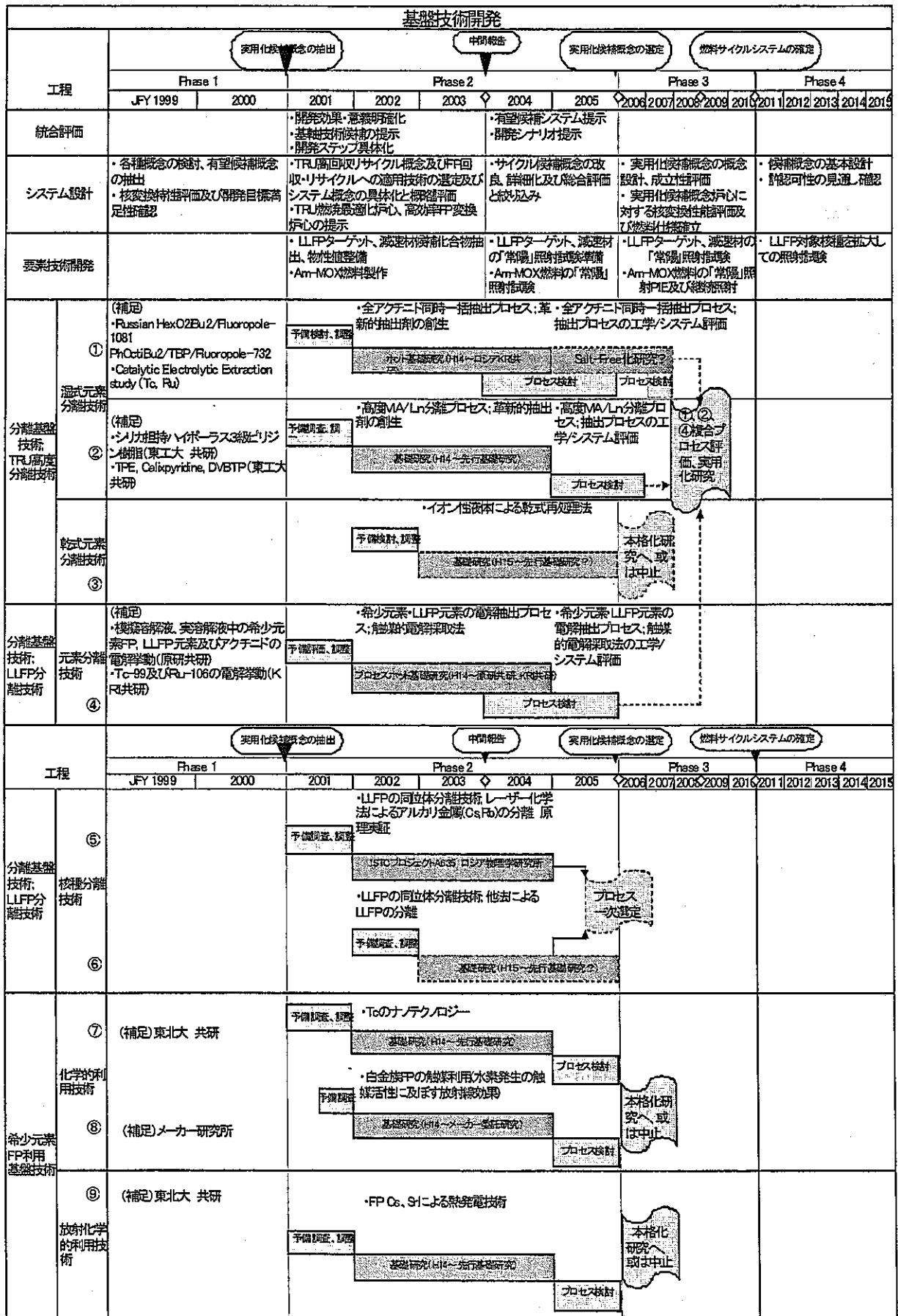
核燃料サイクル開発機構(1999)

添付-3.2 超ウラン核種を含む放射性廃棄物の安全評価例



出典：JNC TY1400 2000-001 TRU廃棄物処分概念検討書

添付-4 分離研究開発ロードマップ



JNC/CEA Cooperation on Reactor Physics
CEA-Cadarache, Building 230
July 3-5, 2001

1. Data and methods (July 3rd)

| Start | Presentation | Speakers | Participants |
|--------------|---|---------------------------------------|------------------|
| 9:30 | Welcome | R. Jacqmin | ... |
| 9:35 | Status of JEF-based ECCO/ERANOS libraries + perspectives | E. Dupont | ... |
| 10:00 | Summary of comparisons between JEF and JENDL | K. Yokoyama | ... |
| 10:30 | Status of the ERANOS software – Features of ERANOS 2.0 | J.M. Ruggieri | D. Honde, ... |
| 11:00 | Status of cell calculation codes and group constant sets | M. Ishikawa | ... |
| 11:30 | Application of a new homogenization method for CR worth analysis | M. Ishikawa | ... |
| 12:00 | Comparison of sensitivity methods between ERANOS and JNC systems + Feedback on the use of ERANOS | K. Yokoyama | ... |
| 12:30 | Lunch | | |
| 14:00 | WPEC sub-group on covariance data | R. Jacqmin E. Dupont O. Bouland | J.C. Sublet, ... |
| 14:30 | Covariance data of JENDL-3.2 | K. Yokoyama | ... |
| 15:00 | Adjustment methodology, AMERATEST procedure, ERALIB libraries | E. Dupont | E. Fort, ... |
| 15:30 | Development of the adjusted cross-section set ADJ2000 | M. Ishikawa | ... |
| 16:00 | ERANOS numerical validation : MASURCA, Super-Phénix, GCFR | R. Jacqmin G. Rimpault | J.C. Bosq, ... |

2. Integral experiments and data base (July 3rd)

| Start | Presentation | Speakers | Participants |
|-------|--|-------------|------------------|
| 16:30 | Analysis of CIRANO experiment by JNC system | S. Ohki | G. Rimpault, ... |
| 17:00 | Discussion : Trends found from the separate analyses of JUPITER and CIRANO experiments | All | ... |
| 18:00 | Status of integral database exchange | K. Yokoyama | ... |

3. MA and LLFP data and validation (July 4th)

| Start | Presentation | Speakers | Participants |
|--------------|--|--|--|
| 9:00 | The COSMO experiments in MASURCA | J. Tommasi | P. Morris J.F. Lebrat G. Rimpault, ... |
| 9:30 | Status of PROFIL-R experiment | P. Marimbeau R. Jacqmin | ... |
| 10:00 | Technical discussion about PROFIL-R experiment | S. Ohki | ... |
| 10:30 | PROFIL-M and variants | P. Marimbeau R. Jacqmin J. Tommasi | C. de Saint Jean F. Varaine, ... |
| 11:00 | Interaction of moderated and fertile S/As in Phénix | F. Mellier | F. Varaine, ... |
| 11:30 | Analysis of Co-60 experiment at Phénix by JNC system | S. Ohki | ... |
| 12:00 | Lunch | | |
| 13:30 | MA decay heat at YAYOI | S. Ohki | F. Storrer, ... |
| 14:00 | JOYO PIE data | M. Ishikawa | ... |

4. Next phase of JNC/CEA cooperation on reactor physics (July 4th)

| Start | Presentation | Speakers | Participants |
|-------|--------------------------------------|---------------------------|--------------|
| 14:30 | CEA proposal for next phase | R. Jacqmin | ... |
| 14:45 | JNC proposal for next phase | M. Ishikawa | ... |
| 15:00 | Discussion on next phase | All | ... |
| 15:30 | Writing and signature of the minutes | R. Jacqmin M. Ishikawa | |

July 5th : Visit of the MASURCA facility (9:30 – 11:00)

フェニックスにおける PROFIL-R 照射実験共同研究

実施計画書

平成 13 年 8 月

核燃料サイクル開発機構

フェニックスにおける PROFIL-R 照射実験共同研究について

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター
システム技術開発部
中性子工学グループ

1. 目的及び概要

PROFIL-R 実験は、高速炉フェニックスにおいて実施予定のアクチナイドおよび核分裂生成物の高純度核種試料の照射実験であり、高精度の積分核データ、特に核種ごとの中性子捕獲断面積の収集を目的としている。本実験より、①炉心燃焼解析コードの直接的な妥当性確認、②感度解析による核データ（主に核種ごとの積分された捕獲、核分裂、 $(n, 2n)$ 断面積および分岐比）の妥当性確認と推定など、他の実験からは容易に導き出すことのできない価値ある実験情報が得られる。炉心燃焼解析コードおよび核データの妥当性確認を介して、低除染・TRU 燃料を使用した炉心設計あるいは長寿命核種の核変換技術開発に本成果を反映することができる。

照射試料はアクチナイド 12 核種、核分裂生成物 32 核種から成り、これらは核種ごとに燃料ペレット大のカプセルに格納され、照射用ピンに充填される。特性の良く知られたフェニックスの高速中性子スペクトル場における照射（2 サイクル）の後、照射後試験施設において詳細な核種質量分析が行われる。

本実験はフランス原子力庁（CEA）と核燃料サイクル開発機構との 5 年間の共同研究として実施する。照射用集合体の製作と照射後試験に係る費用の 50% を、核燃料サイクル開発機構が分担する。

2. 技術仕様

(1) PROFIL-R 照射ピンの概要

PROFIL-R はそれぞれ 55 ヶの試料カプセルの入った二本の同一の専用ピンからなる。これら専用ピンは標準的なフェニックスの燃料ピンと同一の形状をしている。それらは新燃料集合体の中心近くに二本の燃料ピンと置き換えで配置される（図 1 参照）。カプセル充填高さは約 55cm である。ステンレス鋼のロッドが炉心高さ 80cm まで上下端を埋める。

各試料は、10mm 高さの厳重に密封されたステンレス鋼の二重カプセル内に収められる。非常に少量（数ミリグラム程度）のほぼ純粋の同位体が、粉末の形態でそれぞれカプセル内に収納される。品質保障とリスクの軽減のため、各核

種につき少なくとも二つの試料カプセルが用意される。

試料カプセルの製作はカダラッシュ研究所において行われる。照射ピン、照射集合体の製作はカダラッシュ研究所内の COGEMA 工場において行われる。

(2) 核種試料

本照射実験で用いる核種試料の一覧を表 1 に示す。高純度のアクチナイド 12 核種、核分裂生成物 32 核種が用意されている。高純度試料が得られない核種については、最も近い親核種による置き換えを検討するものとする。

(3) フェニックス炉装荷位置

PROFIL-R 集合体はフェニックス炉の内側炉心燃料領域（図 1 参照）に装荷される。照射は、フェニックス炉の第 51 サイクルと第 52 サイクルの 2 サイクルに渡って行う予定である。

(4) 中性子束規格化方法

中性子束の軸方向分布を測定するために、4 ないし 5 本の U-235 カプセルが各照射ピンの軸方向位置に設置される。二本の PROFIL-R ピン間の通常燃料ピンが、中性子フルエンスモニターとして用いられる。同燃料ピンの照射前後の燃料組成が高い精度で測定され、PROFIL-R ピンにおける中性子束を規格化することが可能となる。

(5) 照射後試験

照射後、PROFIL-R ピンと中性子フルエンスモニター用燃料ピンが取り出され、カダラッシュ研究所の照射後試験施設において、ピンの解体、切断、溶解が行われる。未照射試料及び燃料についても同様の処理が行われる。得られた溶液の核種質量分析をサクレ研究所の化学ラボにおいて行う。

(6) 実験解析

サクレ研究所での核種質量分析結果、フェニックス炉の運転データ（炉心体系図、出力履歴、等）が、カダラッシュ研究所及び核燃料サイクル開発機構の炉物理研究者が行う実験解析のために提供される。炉心燃焼解析コードを用いて照射試料の組成が求められ、測定値と比較される。これより、①炉心燃焼解析コードの直接的な妥当性確認、②感度解析による核データ（核種ごとの積分された捕獲、核分裂、 $(n, 2n)$ 断面積および分岐比）の妥当性確認と推定が行われる。

以上

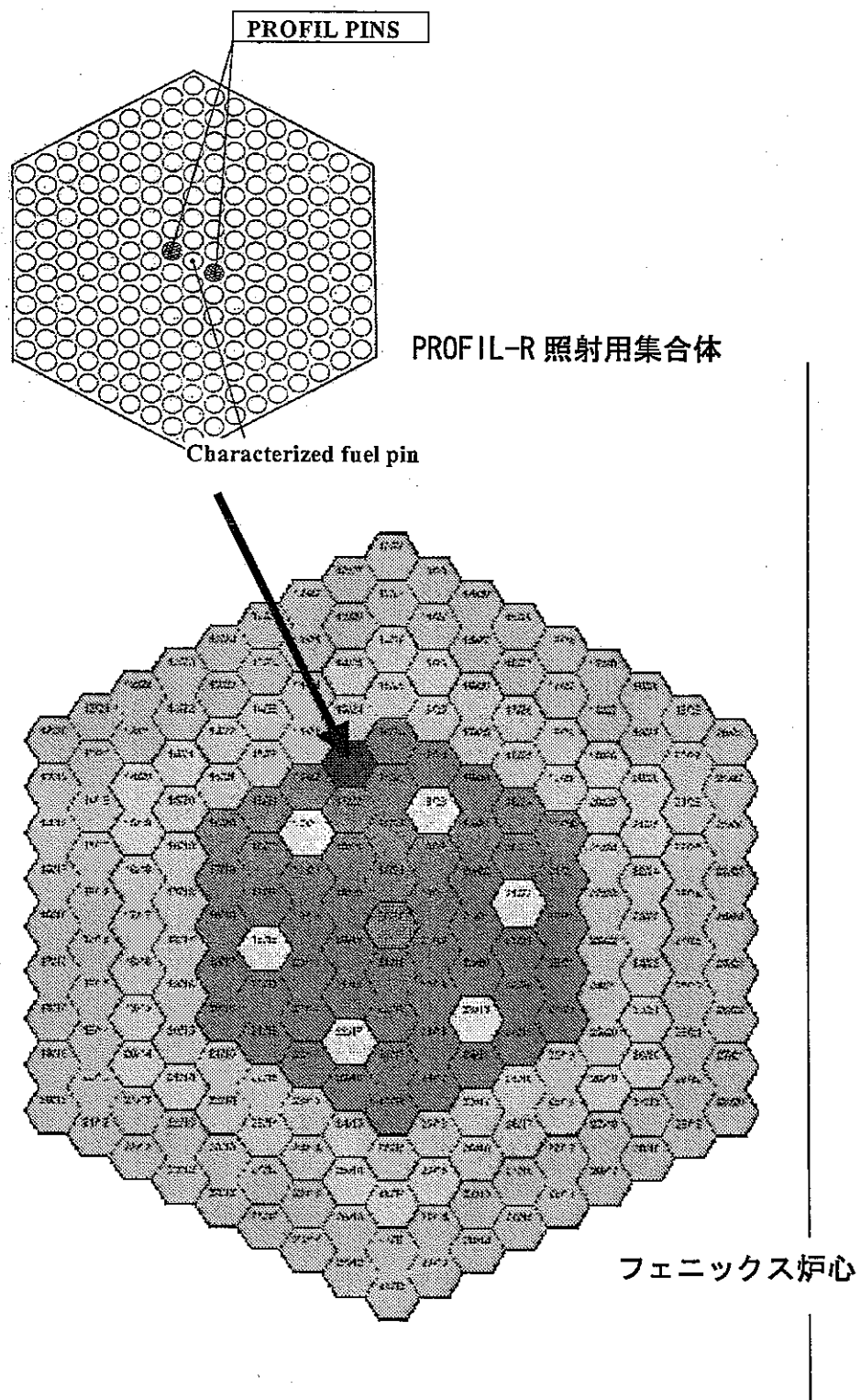


図1 PROFIL-R 照射ピンのフェニックス炉心装荷位置

表 1 PROFIL-R 照射核種試料一覧

| アクチナイド核種 | 核分裂生成物等 |
|--------------|-----------------|
| Th232 | B nat |
| U233 | |
| U234 | Rb87 |
| U235 | Zr91 |
| | Zr91 > Zr93** |
| U238 | Mo95 |
| Np237 | Mo97 |
| Pu238 | Mo100 |
| Pu239 | Tc99 |
| Pu240 | Ru101 |
| | Ru102 |
| Pu242 | Ru104 |
| Am241+Am243* | Rh103 |
| Am241+Am243* | Pd104 |
| | Pd105 |
| | Pd106 |
| | >Pd107** |
| | Ag107 |
| | Ag109 |
| | Il29 |
| | Cs133 |
| | Ce140 |
| | Pr141 |
| | Nd143 |
| | Nd145 |
| | Nd146 |
| | > Pm147** |
| | Sm147 |
| | Sm149 |
| | Sm150 |
| | > Sm151** |
| | Sm152 |
| | Eu153 > Eu154** |
| | Gd154 |
| | Gd155 |
| | Gd156 |
| | Gd157 |

* Am-241 と Am-243 の混合試料

** 記号「>」は対象核種の純度が低いことを意味する。

| Action | Schedule | Status | Future plan |
|---|---|---|--|
| <p>1 Homogeneous recycling (JNC) - IE fabrication, characterisation and irradiation programme on MA-bearing MOX fuel (CEA) -IE on SUPERFACT experiment</p> | <p>Report transmission to JNC: end of 2000</p> | <p>In progress for fabrication and characterisation work at Tokai Works and OEC/AGF</p> | <p>Continuation of IE</p> |
| <p>(JNC/CEA) - Benchmark on SUPERFACT experiment pins with low Am content</p> | <p>Calculations results exchange: mid of 2001 Synthesis report: end of 2001</p> | <p>Complete in June 2001</p> <p>Complete in June 2001</p> <p>In progress</p> | <p>None</p> <p>Results of Benchmark will be discussed at next specialist meeting</p> |
| <p>2 High Pu content fuels (JNC) -IE on high Pu content fuel program <i>2.4.2.3 GTR</i></p> | | <p>In progress for fabrication and characterisation work at Tokai Works</p> | <p>Continuation of IE</p> |
| <p>(CEA) -IE on BORA-BORA, CAPRIX1, TRABANT experiments</p> | | <p>In progress</p> | <p>Continuation of IE</p> |
| <p>(JNC/CEA) - CAPRIX1 benchmark with design study</p> | <p>Report drawing-up: Mid 2001</p> | <p>In progress</p> | <p>CAPRIX1 benchmark with irradiation in Phenix is planned</p> |

NWP- (6-a) Title **Fuels and Target Materials (MA or LLFP based) (2/2)**

[Progress]

| Action | Schedule | Status | Future plan |
|--|----------------------------------|---|--|
| 3 MA transmutation : matrices and targets (JNC) -CAMIX/COCHIX design (Masahiko OSAKA assignee work at Cadarache, see also NWP7) -Realisation and interpretation of Na compatibility tests on French matrices -Definition of matrices irradiation in GANIL facility wished by JNC -Realisation and interpretation of a matrices irradiation in JOYO (CEA) -IE on MATINA, ECRIX, GANIL, including properties measurements and irradiation experiments - Definition of Na compatibility tests grid wished by CEA -Realisation and interpretation of irradiation tests of Japanese matrices in GANIL facility - Definition of material and irradiation conditions for a matrices irradiation in JOYO -IE on CEA moderators programme -IE on CEA LLFP transmutation programme | First report: mid of 2001 | In progress | Continuation of design work |
| | Mid of 2001 | Under consideration for Na compatibility test program proposed by CEA | Na compatibility test on French matrices to be provided by CEA |
| | 2002-2004 | Under consideration | Definition on matrices for GANIL irradiation |
| | | No progress at present | |
| | | In progress | Continuation of IE |
| | End of 2000 | Proposed Na compatibility tests grid to JNC in October 2000 | None |
| | Report: mid of 2002 | No progress at present | |
| | End of 2000 | No progress at present | |
| | In progress | Continuation of IE | |
| | In progress | Continuation of IE | |

01/12/27 分離交換技術開発 W/G AGS

CEA/JNC 先進技術協力協定に基づく共同研究について

件名 : CEA/JNC 先進技術協定 (NWP-7) に係る共同研究
 駐在者 : AGS 小山真一
 駐在先 : 仏国 CEA カダラッシュ研究所
 期間 : 平成 11 年 11 月 21 日～平成 13 年 6 月 20 日

1. 共同研究の目的

CEA/JNC 先進技術協力協定のもと、AGS より駐在員を派遣し、Cadarache 研究所で行われているアメリカウム (Am) 添加燃料照射 CAMIX/COCHIX 計画の開始と同時に燃料設計に直接参画した。共同研究の目的は、仏国側の計画遂行に寄与するとともに MA 関連研究への関与及び情報収集を行い、JNC における MA 燃料研究に資することである。駐在員は次の 2 業務に直接参画した。

(1) CAMIX/COCHIX 計画

(2) SUPERFACT 試験を利用したコードベンチマーク解析

2. CAMIX/COCHIX 計画への参画

(1) 概要

CAMIX/COCHIX 計画とは、炉内において核的に不活性な物質であるジルコニウム酸化物 (ZrO_2) を母材としてアメリカウム (Am) 酸化物を添加し、Phenix において照射することにより Am 消滅を行う試験である。計画された燃料仕様を以下に示す。燃料ピン外径 6.55mm、ピン長は 1200mm で、このうち燃料カラム長は 100mm である。また被覆管は AIM1(15-15Ti) が用いられ、照射損傷 (dose) は最高で 12dpa と設定した。

CAMIX 計画

- ① アメリカウム酸化物を、イットリア (Y_2O_3) で安定化処理したジルコニア (ZrO_2) へ固溶させた燃料。
 $(Am_{0.06} Zr_{0.54} Y_{0.4})O_{1.8}$
- ② アメリカウム・ジルコニウム酸化物をマグネシア (MgO) へ微細粒子 (粒径 $50 \mu m$ 以下) として分散させた燃料
 $Am_2Zr_2O_7-MgO$

COCHIX 計画

- ③ アメリカウム・ジルコニウム酸化物をマグネシア (MgO) へ大径粒子 (粒径 $150 \mu m$ 程度) として分散させた燃料
 $Am_2Zr_2O_7-MgO$
- ④ アメリカウム・ジルコニウム酸化物を大径粒子 (粒径 $150 \mu m$ 程度) として、イットリア (Y_2O_3) で安定化処理したジルコニア (ZrO_2) へ分散させた燃料
 $Am_2Zr_2O_7-(Zr_{0.6} Y_{0.4})O_{1.8}$

(2) 計算条件及び設計手法

炉出力は 350MWth、Am 含有量 19vol%、照射位置は Phenix 炉ブランケット領域 1 列目である。照射目的が Am の消滅であるため、単位体積あたりの Am 量を 0.7g と設定し、そこから計算条件を設定した。

本燃料の概念設計を行う場合、各照射条件は出来るだけ保守的かつ合理的に定めていく必要がある。駐在員は、過去の Phenix 炉照射経験、類似の照射試験データをもとに計算条件を設定した。この中で最重要かつ考慮すべきポイントがあった。ひとつはジルコニア系材料の物性値である。純粋なジルコニアは 2700℃ という高融点を示すが、そこに至る温度において 2 回の相変化による体積変化を起こすため、通常はイットリウム酸化物を不純物として混合し、その体積変化を防止している。これを安定化ジルコニアというが、この物性値、照射特性データが十分ではない。特に燃料仕様とする組成値での熱伝導度、熱膨張率データは存在しない。従って、駐在員は文献調査を実施し保守的な値を予測した。次に Am 酸化物から母材への熱移動、熱伝導度差から生じるクラックの影響、母材そのものの照射損傷が明らかでない上、燃料製造時の公差、Am 酸化物と母材の空隙などを考慮する必要がある。この点については同じく文献調査を行い、考えられ得る補正係数を用いることとした。

熱、機械的特性の計算には有限要素法計算コード CASTEM2000 を使用した。この計算コードには、固溶体燃料を均質燃料、Am 酸化物粒子を母材に分散させた燃料を非均質燃料としてモデル化された理論で構築されている。

(3) まとめ

計算の結果、CAMIX 計画の①($\text{Am}_{0.06}\text{Zr}_{0.54}\text{Y}_{0.4}$) $\text{O}_{1.8}$ 固溶体燃料の最高温度が 4210℃ となり、燃料融点として設定した値 2670℃ を超え不適格となった。本燃料については直ちに仕様見直しが行われることとなった。このように、消滅処理を前提とした燃料に関する概念設計の考え方、計算方法などを修得しつつ、CEA 側業務へ寄与することができた。最終的には、燃料製造及び R&D を行う施設（独国：超ウラン研究所）の施設改造工事による物理的制限や計算上の温度制限などにより、最終燃料仕様は以下のように決定した。

CAMIX 計画 (Am : 30vol%)

①固溶体 : ($\text{Am}_{0.06}\text{Zr}_{0.77}\text{Y}_{0.17}$) O_2

②微細分散) : $\text{Am}_{0.2}\text{Zr}_{0.68}\text{Y}_{0.12}$) O_2 - MgO、Am 粒径 : 20~43 μm (80%)、>43 μm (20%)

COCHIX 計画用燃料 (Am : 30vol%)

③大径粒子分散 : $\text{Am}_{0.2}\text{Zr}_{0.68}\text{Y}_{0.12}$) O_2 - MgO、Am 粒径 : 80~120 μm

④大径粒子分散 : ($\text{Am}_{0.2}\text{Zr}_{0.68}\text{Y}_{0.12}$) O_2 - ($\text{Zr}_{0.85}\text{Y}_{0.15}$) O_2 、Am 粒径 : 80~120 μm

(4) 進捗状況

現在、最終燃料仕様をもとに超ウラン研究所において燃料製造 R&D が行われている。今後、R&D 結果を基に詳細設計及び許認可の作業が予定されており、次期駐在員が引き続

き参画する。

3.SUPERFACT 試験を利用したコードベンチマーク解析

2%の Am を MOX 燃料へ添加した燃料(燃焼度約 55GWd/t)の照射試験(SUPERFACT 計画)結果をもとに、JNC/CEA 双方の燃料挙動解析コードを用いたコードベンチマーク解析を行った。本試験は CEA 及び ITU のジョイントプログラムにより、高速炉 Phenix において MOX 燃料及び UO_2 燃料に混入した MA 核種 ^{241}Am と ^{237}Np の消滅に関する試験であり 99 年に終了している。照射日数は 382EFPD である。特筆すべき結果として高い He 生成があげられる。Am の存在が関与しており、燃料の構造的変化のみならず、燃料要素の熱機械的特性、即ち内圧上昇、FCMI 及び燃料温度の上昇を引き起こしていると考えられる。MOX への MA 核種混入による効果、特性評価に資することを目的として、SUPERFACT 試験で He 放出挙動評価に用いられた計算コード「GERMINAL」と、JNC が開発した燃料挙動解析コード「CEDAR」に関し、CEA とコードベンチマーク解析を行うことで合意した。駐在員は本試験に CEA 側要員として直接参画した。SUPERFACT 計画の燃料 (2%Am 含有燃料) に関して、JNC 大洗で実施した「CEDAR」計算結果と CEA 側コード「GERMINAL」による計算結果及び測定値との比較・検討結果を以下に示す。

(1) SUPERFACT 計画燃料仕様及び照射条件

- ・組成： $(U_{0.74}Pu_{0.24}Am_{0.02}) O_2$
- ・被覆管及びペレット径：ペレット外径 5.417mm、被覆管外径 6.555mm、内径 5.65mm
- ・理論密度及び O/M 比：97.13%TD、1.957
- ・線出力：BOL378W/cm、EOL346W/cm

(2) 検討結果のまとめ

ベンチマークでは、SUPERFACT1 照射試験に加え、燃焼度の異なる幾つかの試験燃料ピンについても計算し、両者の結果を比較した。比較した主な照射挙動は、燃料温度、組織変化(中心空孔など)、ヘリウム(He)を含む核分裂性ガスの放出、O/M 比分布、プルトニウム(Pu)分布などである。主な比較結果は次のとおりである。

- ①燃料温度については、「CEDAR-3」は出力とともに漸減傾向にあり、「GERMINAL1.4」と比べ燃焼中期でかなり低めの計算結果となった。「GERMINAL1.4」では、燃焼早期にギャップが閉じており、それが温度差を生じた原因ではない。
- ②中心空孔に関して、「GERMINAL1.4」は燃焼初期の形成速度が遅いこと、燃焼が進んでからさらに増大するなど、「CEDAR-3」と幾つか異なる結果を示した。全体的には「CEDAR-3」の方が照射後試験結果との一致はよい。
- ③He の生成量について、両コードでモデルの違いから差が生じた。FP ガス放出率については、「GERMINAL1.4」が若干低め、「CEDAR-3」がかなり高めの結果となった。

・「GERMINAL」計算結果：55.14%、「CEDAR」計算結果：88.62%

(3)まとめ

本ベンチマーク解析報告書の作成及び査読は郵送等により双方で調整を行うこととなった。

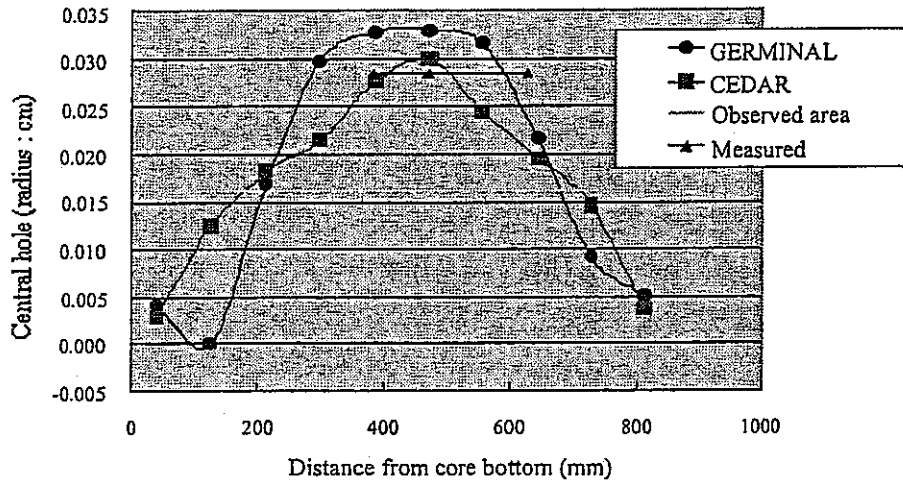


Fig. 1 Profile of Central hole radius (EOL)

LLFP 中性子捕獲断面積の現状

Neutron capture cross sections for seven long-lived fission products cited in EXFOR data library

| Nucleus | Half-life (y) | Fission Yield (%) | Energy range | Uncertainty (%) | Date | First author | Institute | Reference | Cross sections |
|---------|----------------------|-------------------|----------------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-------------------------------|---------------------------|
| I-129 | 1.57×10^7 | 1.5 | thermal | 8 | 1958 | J. Roy | CRC | J, CJC, 36, 1424, 58 | $\sigma_0=26.7 \pm 2.0$ b |
| I-129 | 1.57×10^7 | 1.5 | RI | 11 | 1958 | J. Roy | CRC | J, CJC, 36, 1424, 58 | RI=36 \pm 4 b |
| I-129 | 1.57×10^7 | 1.5 | thermal | 7 | 1963 | N.J. Pattenden | ORNL | J, NSE, 17, 371, 63 | $\sigma_0=28 \pm 2$ b |
| I-129 | 1.57×10^7 | 1.5 | 3~400 keV | 11 | 1983 | R.L. Macklin | ORNL | J, NSE, 85, 350, 8312 | |
| Pd-107 | 6.50×10^6 | 3.1 | RI(0.01-115eV) | 23 | 1980 | V.A. Anufriev | NIR | C, 80Kief, 2, 159, 8009 | RI=78 \pm 18 b |
| Pd-107 | 6.50×10^6 | 3.1 | 3~600 keV | 5 | 1985 | R.L. Macklin | ORNL | J, NSE, 89, 79, 8501 | |
| Cs-135 | 2.30×10^6 | 7.4 | thermal | 28 | 1949 | N. Sugarman | LAS | J, PR, 75, 1473, 4905 | $\sigma_0=14.5 \pm 4.0$ b |
| Cs-135 | 2.30×10^6 | 7.4 | thermal | 6 | 1958 | A.P. Baerg | CRC | J, CJP, 36, 863, 58 | $\sigma_0=8.7 \pm 0.5$ b |
| Cs-135 | 2.30×10^6 | 7.4 | RI | 4 | 1958 | A.P. Baerg | CRC | J, CJP, 36, 863, 58 | RI=61.7 \pm 2.3 b |
| Cs-135 | 2.30×10^6 | 7.4 | thermal | 4 | 1996 | T. Katoh | PNC | S, INDC(JPN)-179/U, 222, 9611 | $\sigma_0=8.3 \pm 0.3$ b |
| Cs-135 | 2.30×10^6 | 7.4 | RI | 7 | 1996 | T. Katoh | PNC | S, INDC(JPN)-179/U, 222, 9611 | RI=38.1 \pm 2.6 b |
| Cs-135 | 2.30×10^6 | 7.4 | 30 keV | 9 | 1997 | S. Jaag | KFK | J, NP/A, 621, 247, 1997 | |
| Zr-93 | 1.53×10^6 | 3.7 | 3~300 keV | 2~19 | 1985 | R.L. Macklin | ORNL | J, ASP, 115, 71, 85 | |
| Zr-93 | 1.53×10^6 | 3.7 | RI | 3 | 1985 | R.L. Macklin | ORNL | J, ASP, 115, 71, 85 | RI=15.0 \pm 0.5 b |
| Se-79 | 4.80×10^5 a | 0.06 | | | No Data | | | a:Karlsruhe Nuklidkarte 1998 | |
| Sn-126 | 2.35×10^5 a | 0.3 | | | No Data | | | a:Karlsruhe Nuklidkarte 1998 | |
| Tc-99 | 2.11×10^5 | 6 | thermal | 11 | 1955 | H. Pomerance | ORNL | R, ORNL-1975, 31, 5509 | $\sigma_0=19 \pm 2$ b |
| Tc-99 | 2.11×10^5 | 6 | thermal | 8 | 1958 | N.J. Pattenden | HAR | R, NRDC-103, 58 | $\sigma_0=24.8 \pm 2.0$ b |
| Tc-99 | 2.11×10^5 | 6 | thermal | 44 | 1960 | R.B. Tattersall | HAR | J, NSE/A, 12, 32, 6005 | $\sigma_0=16 \pm 7$ b |
| Tc-99 | 2.11×10^5 | 6 | RI | 33 | 1960 | R.B. Tattersall | HAR | J, NSE/A, 12, 32, 6005 | RI=60 \pm 20 b |
| Tc-99 | 2.11×10^5 | 6 | 1 eV~50keV | 3~11 | 1973 | J.C. Chou | KFK | J, NSE, 27, 811, 7311 | |
| Tc-99 | 2.11×10^5 | 6 | thermal | 17 | 1974 | V.V.Obekhin | CCP | J, NSE, 27, 811, 7311 | $\sigma_0=24 \pm 4$ b |
| Tc-99 | 2.11×10^5 | 6 | 4~80 keV | 9 | 1977 | R.C. Little | RPI | J, ANS, 26 574, 770612 | |
| Tc-99 | 2.11×10^5 | 6 | thermal | 10 | 1977 | M. Lucas | SAC | C, 77Paris, 1, 431, 771219 | $\sigma_0=20 \pm 2$ b |
| Tc-99 | 2.11×10^5 | 6 | RI | 9 | 1977 | M. Lucas | SAC | C, 77Paris, 1, 431, 771219 | RI=186 \pm 16 b |
| Tc-99 | 2.11×10^5 | 6 | 3~2,000 keV | 4~7 | 1982 | R.L. Macklin | ORNL | J, NSE, 81, 520, 8208 | |
| Tc-99 | 2.11×10^5 | 6 | thermal | 6 | 1995 | H. Harada | PNC | J, NST, 32, 395, 9505 | $\sigma_0=22.9 \pm 1.3$ b |
| Tc-99 | 2.11×10^5 | 6 | RI | 10 | 1995 | H. Harada | PNC | J, NST, 32, 395, 9505 | RI=398 \pm 38 |

 σ_0 : thermal neutron capture cross section

RI: resonance integral

TRU サンプル照射後の核種組成及び
放射能についての予備解析結果

1.はじめに

「常陽」におけるTRU核種サンプル照射試験の本格的な開始を前に、照射後の核種組成および放射能についての予備解析を行った。本メモは解析条件および結果をまとめたものである。

2.照射試験概要

TRU核種サンプル(^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm :各約0.1mg, ^{237}Np :約0.2mg)をB9(炉内アドレス第3列)およびSMIR-26(第5列)に装填する。 ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm サンプルはB9およびSMIR-26の軸心方向炉心中心位置および軸心方向炉心中心から約350mm上部それぞれに装填し、 ^{237}Np サンプルはB9およびSMIR-26の軸心方向炉心中心に装填する。B9に関しては第29~32サイクルで照射を行い、SMIR-26は第30~34サイクルの間照射を行う予定である。

3.解析項目

TRU核種サンプル(^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm)および標準試料(^{235}U :約0.1mg)について以下の項目の解析を行った。

①照射による核種の消滅・生成量

(照射直後、照射後100、200、300、400日後)

各サンプルについての解析対象核種は以下のものとした。

^{237}Np サンプル: ^{232}U , ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{236}Np , ^{237}Np ,
 ^{236}Pu , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{244}Pu ,
 ^{241}Am , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am ,
 ^{243}Cm , ^{244}Cm , ^{245}Cm , ^{246}Cm , ^{247}Cm , ^{248}Cm

^{241}Am サンプル: ^{236}U , ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{244}Pu ,
 ^{241}Am , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{243}Am ,
 ^{243}Cm , ^{244}Cm , ^{245}Cm , ^{246}Cm , ^{247}Cm , ^{248}Cm

^{243}Am サンプル: 同上

^{244}Cm サンプル: 同上

^{235}U サンプル: ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U
(標準試料)

②照射後の放射能

(照射直後、照射後100、200、300、400日後)

4.解析条件

①使用計算コード

ORIGEN2 (FFTFの断面積セットを使用)

②TRU核種サンプルの重量

[表1]

照射課より提供を受けた「試験検査成績書」に記載されたTRU核種サンプルの重量を表1に示す。不純物はどのサンプルにおいても検出限界以下であった。

照射後の核種組成の解析には平均重量を用いた。放射能の解析には、安全側に立った評価をするために、測定誤差も含めて最大となる重量を用いた。

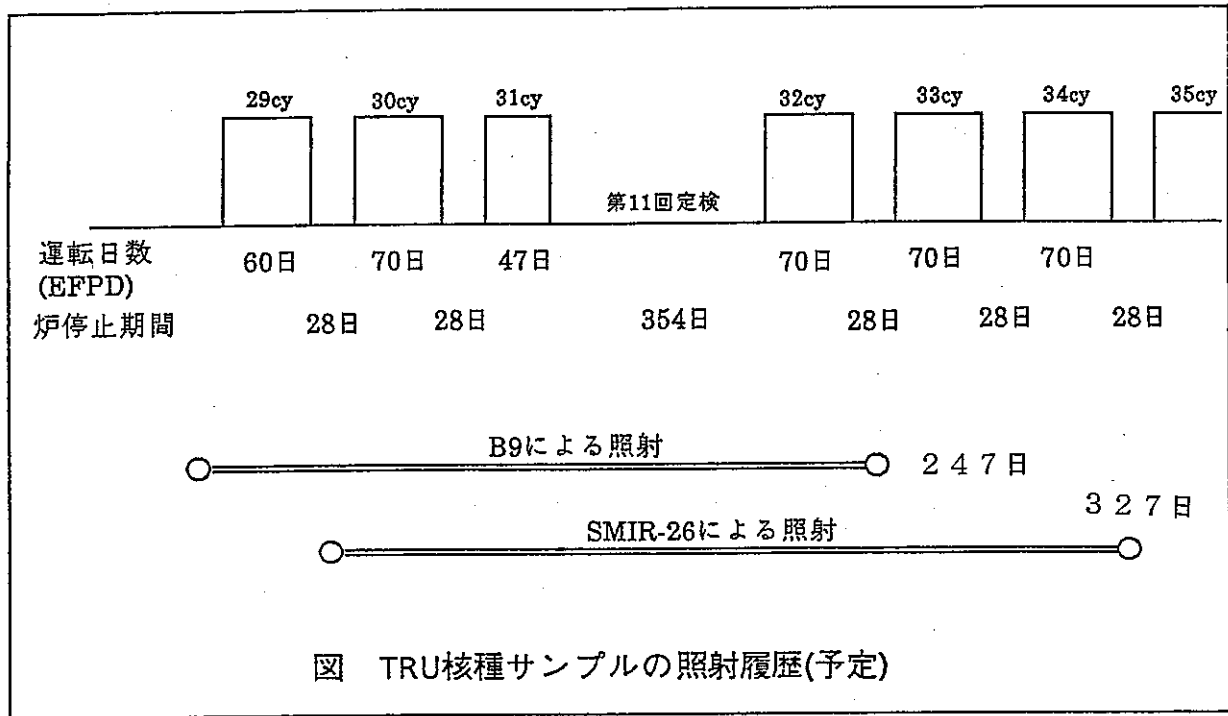
表1 TRU核種サンプルの重量

| TRU核種 サンプル | ^{237}Np | ^{241}Am | ^{243}Am | ^{244}Cm | ^{235}U (標準試料) |
|---------------------------|---|---|--|--|--|
| 同位体組成 (atom%) | ^{237}Np : 99.9 | ^{241}Am : 99.9 | ^{243}Am : 85.4 ^{241}Am : 14.6 | ^{244}Cm : 94.042 ^{243}Cm : 0.164 ^{245}Cm : 2.212 ^{246}Cm : 3.539 ^{247}Cm : 0.044 | (濃縮度 93%) |
| 重量(μg)* | ^{237}Np 204 \pm 42 204 \pm 42 204 \pm 42 | ^{241}Am 97.8 \pm 6.8 103.5 \pm 7.4 115.3 \pm 9.7 103.2 \pm 7.6 106.4 \pm 6.8 103.1 \pm 7.1 108.4 \pm 7.9 98.9 \pm 6.4 | ^{243}Am 101.6 \pm 8.7 101.9 \pm 6.7 100.9 \pm 6.7 98.6 \pm 9.3 95.85 \pm 5.9 99.6 \pm 6.9 91.9 \pm 6.2 93.75 \pm 6.3 | ^{244}Cm 96.3 \pm 9.8 95.1 \pm 10.2 93.9 \pm 8.8 105.4 \pm 10.4 100.1 \pm 7.9 96.5 \pm 9.4 | ^{235}U 106 \pm 13 106 \pm 13 106 \pm 13 |
| 平均重量 (μg) | ^{237}Np 204 | ^{241}Am 104.6 | ^{243}Am 98.0 ^{241}Am 16.6 | ^{244}Cm 97.9 ^{243}Cm 0.17 ^{245}Cm 2.31 ^{246}Cm 3.71 ^{247}Cm 0.046 | ^{235}U 106 ^{238}U 8 |
| 最大重量 (μg) | ^{237}Np 246 | ^{241}Am 125.0 | ^{243}Am 110.3 ^{241}Am 18.7 | ^{244}Cm 115.8 ^{243}Cm 0.20 ^{245}Cm 2.74 ^{246}Cm 4.39 ^{247}Cm 0.055 | ^{235}U 119 ^{238}U 9 |

* 複数のサンプルについての検査結果をすべて示してある。

| | | | | | |
|------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 平均誤差 | \pm 42 | \pm 7.5 | \pm 7.1 | \pm 9.4 | \pm 13 |
| | (20.6%) | (7.2%) | (7.2%) | (9.6%) | (12.3%) |

②照射履歴(下図に示す)



③照射位置における中性子束

[表2]

「Mk-II炉心 中性子スペクトルデータ」(技術課メモ 技-4-162)より引用したサンプル照射位置における全中性子束を表2に示す。

表2 照射中性子束(1群) [n/cm²/sec]

| | B9照射位置 | SMIR-26照射位置 |
|----------|---------|-------------|
| 350mm上部 | 1.3E+15 | 9.5E+14 |
| 軸方向炉中心位置 | 3.4E+15 | 1.9E+15 |

炉中心 4.45E+15

5.解析結果

以下の項目について結果を示す。

①照射による核種の消滅・生成量

(照射直後、照射後100、200、300、400日後)

^{237}Np サンプル [表3-1~表3-2]

^{241}Am サンプル [表4-1~表4-4]

^{243}Am サンプル [表5-1~表5-4]

^{244}Cm サンプル [表6-1~表6-4]

^{235}U サンプル [表7-1~表7-4]

(標準試料)

②照射後の放射能

(照射直後、照射後100、200、300、400日後)

[表8-1~表7-4]

表3-1 Np-237サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : B9 (軸方向炉中心位置)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U-232 | | 5.96E-10 | 7.33E-10 | 8.60E-10 | 9.79E-10 | 1.09E-09 |
| U-233 | | 1.09E-10 | 1.25E-10 | 1.41E-10 | 1.57E-10 | 1.73E-10 |
| U-234 | | 1.34E-07 | 1.67E-07 | 2.00E-07 | 2.33E-07 | 2.66E-07 |
| U-235 | | 1.55E-09 | 1.56E-09 | 1.56E-09 | 1.57E-09 | 1.57E-09 |
| U-236 | | 3.16E-09 | 3.18E-09 | 3.18E-09 | 3.18E-09 | 3.18E-09 |
| Np-236 | | 2.04E-09 | 2.04E-09 | 2.04E-09 | 2.04E-09 | 2.04E-09 |
| Np-237 | 2.04E-04 | 1.81E-04 | 1.81E-04 | 1.81E-04 | 1.81E-04 | 1.81E-04 |
| Pu-236 | | 2.17E-09 | 2.05E-09 | 1.91E-09 | 1.79E-09 | 1.68E-09 |
| Pu-238 | | 1.54E-05 | 1.55E-05 | 1.55E-05 | 1.54E-05 | 1.54E-05 |
| Pu-239 | | 3.30E-07 | 3.30E-07 | 3.30E-07 | 3.30E-07 | 3.30E-07 |
| Pu-240 | | 3.16E-09 | 3.16E-09 | 3.16E-09 | 3.16E-09 | 3.16E-09 |
| Pu-241 | | 2.49E-11 | 2.45E-11 | 2.42E-11 | 2.39E-11 | 2.36E-11 |
| Pu-242 | | 1.39E-13 | 1.39E-13 | 1.39E-13 | 1.39E-13 | 1.39E-13 |
| Pu-244 | | 1.88E-20 | 1.88E-20 | 1.88E-20 | 1.88E-20 | 1.88E-20 |
| Am-241 | | 4.69E-13 | 7.94E-13 | 1.12E-12 | 1.43E-12 | 1.74E-12 |
| Am-242m | | 2.35E-15 | 2.34E-15 | 2.34E-15 | 2.34E-15 | 2.34E-15 |
| Am-243 | | 6.35E-16 | 6.40E-16 | 6.40E-16 | 6.40E-16 | 6.40E-16 |
| Cm-243 | | 1.67E-17 | 1.66E-17 | 1.65E-17 | 1.64E-17 | 1.63E-17 |
| Cm-244 | | 5.44E-18 | 5.39E-18 | 5.34E-18 | 5.28E-18 | 5.23E-18 |
| Cm-245 | | 3.36E-20 | 3.36E-20 | 3.36E-20 | 3.36E-20 | 3.36E-20 |
| Cm-246 | | 5.37E-50 | 5.37E-50 | 5.37E-50 | 5.37E-50 | 5.37E-50 |
| Cm-247 | | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| Cm-248 | | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |

表3-2 Np-237サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : SMIR-26 (軸方向炉中心位置)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U-232 | | 3.77E-10 | 4.86E-10 | 5.88E-10 | 6.83E-10 | 7.71E-10 |
| U-233 | | 1.27E-10 | 1.43E-10 | 1.59E-10 | 1.75E-10 | 1.92E-10 |
| U-234 | | 8.55E-08 | 1.11E-07 | 1.36E-07 | 1.61E-07 | 1.86E-07 |
| U-235 | | 1.05E-09 | 1.06E-09 | 1.06E-09 | 1.07E-09 | 1.07E-09 |
| U-236 | | 2.38E-09 | 2.39E-09 | 2.39E-09 | 2.39E-09 | 2.39E-09 |
| Np-236 | | 1.55E-09 | 1.55E-09 | 1.55E-09 | 1.55E-09 | 1.55E-09 |
| Np-237 | 2.04E-04 | 1.87E-04 | 1.87E-04 | 1.87E-04 | 1.87E-04 | 1.87E-04 |
| Pu-236 | | 1.73E-09 | 1.63E-09 | 1.52E-09 | 1.43E-09 | 1.33E-09 |
| Pu-238 | | 1.17E-05 | 1.18E-05 | 1.18E-05 | 1.18E-05 | 1.17E-05 |
| Pu-239 | | 1.86E-07 | 1.86E-07 | 1.86E-07 | 1.86E-07 | 1.86E-07 |
| Pu-240 | | 1.30E-09 | 1.30E-09 | 1.30E-09 | 1.30E-09 | 1.30E-09 |
| Pu-241 | | 7.64E-12 | 7.54E-12 | 7.44E-12 | 7.34E-12 | 7.25E-12 |
| Pu-242 | | 3.13E-14 | 3.13E-14 | 3.13E-14 | 3.13E-14 | 3.13E-14 |
| Pu-244 | | 1.70E-21 | 1.70E-21 | 1.70E-21 | 1.70E-21 | 1.70E-21 |
| Am-241 | | 8.51E-14 | 1.85E-13 | 2.84E-13 | 3.81E-13 | 4.77E-13 |
| Am-242m | | 2.72E-16 | 2.72E-16 | 2.71E-16 | 2.71E-16 | 2.71E-16 |
| Am-243 | | 1.05E-16 | 1.06E-16 | 1.06E-16 | 1.06E-16 | 1.06E-16 |
| Cm-243 | | 1.62E-18 | 1.61E-18 | 1.60E-18 | 1.59E-18 | 1.58E-18 |
| Cm-244 | | 6.62E-19 | 6.56E-19 | 6.49E-19 | 6.42E-19 | 6.36E-19 |
| Cm-245 | | 2.98E-21 | 2.98E-21 | 2.98E-21 | 2.98E-21 | 2.98E-21 |
| Cm-246 | | 4.59E-59 | 2.30E-53 | 4.59E-53 | 6.89E-53 | 9.19E-53 |
| Cm-247 | | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| Cm-248 | | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |

表4-1 Am-241サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : B9 (軸方向炉中心位置)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U-236 | | 3.66E-12 | 3.74E-12 | 3.80E-12 | 3.86E-12 | 3.91E-12 |
| Np-237 | | 2.61E-07 | 3.01E-07 | 3.40E-07 | 3.80E-07 | 4.19E-07 |
| Pu-238 | | 4.29E-06 | 4.98E-06 | 5.43E-06 | 5.72E-06 | 5.90E-06 |
| Pu-239 | | 6.89E-08 | 6.91E-08 | 6.93E-08 | 6.94E-08 | 6.96E-08 |
| Pu-240 | | 2.00E-09 | 2.02E-09 | 2.03E-09 | 2.03E-09 | 2.04E-09 |
| Pu-241 | | 7.99E-11 | 7.88E-11 | 7.78E-11 | 7.68E-11 | 7.58E-11 |
| Pu-242 | | 1.36E-06 | 1.37E-06 | 1.37E-06 | 1.37E-06 | 1.37E-06 |
| Pu-244 | | 6.43E-13 | 6.43E-13 | 6.43E-13 | 6.43E-13 | 6.43E-13 |
| Am-241 | 1.046E-04 | 9.14E-05 | 9.14E-05 | 9.14E-05 | 9.13E-05 | 9.13E-05 |
| Am-242 _m | | 1.76E-06 | 1.76E-06 | 1.75E-06 | 1.75E-06 | 1.75E-06 |
| Am-243 | | 1.88E-08 | 1.89E-08 | 1.89E-08 | 1.89E-08 | 1.89E-08 |
| Cm-243 | | 2.61E-08 | 2.59E-08 | 2.58E-08 | 2.56E-08 | 2.54E-08 |
| Cm-244 | | 5.25E-10 | 5.20E-10 | 5.15E-10 | 5.09E-10 | 5.04E-10 |
| Cm-245 | | 6.75E-12 | 6.75E-12 | 6.75E-12 | 6.75E-12 | 6.75E-12 |
| Cm-246 | | 2.64E-14 | 2.64E-14 | 2.64E-14 | 2.64E-14 | 2.64E-14 |
| Cm-247 | | 6.07E-17 | 6.07E-17 | 6.07E-17 | 6.07E-17 | 6.07E-17 |
| Cm-248 | | 1.64E-19 | 1.64E-19 | 1.64E-19 | 1.64E-19 | 1.64E-19 |

表4-2 Am-241サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : B9 (軸方向炉中心より350mm上部)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U-236 | | 9.15E-13 | 9.44E-13 | 9.64E-13 | 9.83E-13 | 1.00E-12 |
| Np-237 | | 2.82E-07 | 3.25E-07 | 3.68E-07 | 4.10E-07 | 4.53E-07 |
| Pu-238 | | 1.79E-06 | 2.08E-06 | 2.27E-06 | 2.39E-06 | 2.47E-06 |
| Pu-239 | | 1.14E-08 | 1.14E-08 | 1.14E-08 | 1.15E-08 | 1.15E-08 |
| Pu-240 | | 6.66E-10 | 6.75E-10 | 6.75E-10 | 6.75E-10 | 6.76E-10 |
| Pu-241 | | 1.29E-11 | 1.27E-11 | 1.25E-11 | 1.24E-11 | 1.22E-11 |
| Pu-242 | | 5.66E-07 | 5.68E-07 | 5.68E-07 | 5.68E-07 | 5.68E-07 |
| Pu-244 | | 4.06E-14 | 4.06E-14 | 4.06E-14 | 4.06E-14 | 4.06E-14 |
| Am-241 | 1.046E-04 | 9.91E-05 | 9.90E-05 | 9.90E-05 | 9.89E-05 | 9.89E-05 |
| Am-242 _m | | 7.80E-07 | 7.79E-07 | 7.78E-07 | 7.77E-07 | 7.76E-07 |
| Am-243 | | 3.06E-09 | 3.07E-09 | 3.07E-09 | 3.07E-09 | 3.06E-09 |
| Cm-243 | | 4.36E-09 | 4.33E-09 | 4.31E-09 | 4.28E-09 | 4.25E-09 |
| Cm-244 | | 3.36E-11 | 3.33E-11 | 3.29E-11 | 3.26E-11 | 3.23E-11 |
| Cm-245 | | 1.71E-13 | 1.71E-13 | 1.71E-13 | 1.71E-13 | 1.71E-13 |
| Cm-246 | | 2.61E-16 | 2.61E-16 | 2.61E-16 | 2.61E-16 | 2.61E-16 |
| Cm-247 | | 2.37E-19 | 2.37E-19 | 2.37E-19 | 2.37E-19 | 2.37E-19 |
| Cm-248 | | 2.00E-22 | 2.00E-22 | 2.00E-22 | 2.00E-22 | 2.00E-22 |

表4-3 Am-241サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : SMIR-26 (軸方向炉中心位置)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U-236 | | 3.96E-12 | 4.01E-12 | 4.05E-12 | 4.10E-12 | 4.14E-12 |
| Np-237 | | 3.15E-07 | 3.56E-07 | 3.96E-07 | 4.37E-07 | 4.78E-07 |
| Pu-238 | | 2.82E-06 | 3.49E-06 | 3.93E-06 | 4.21E-06 | 4.39E-06 |
| Pu-239 | | 4.26E-08 | 4.26E-08 | 4.27E-08 | 4.28E-08 | 4.29E-08 |
| Pu-240 | | 1.43E-09 | 1.44E-09 | 1.44E-09 | 1.45E-09 | 1.45E-09 |
| Pu-241 | | 4.52E-11 | 4.46E-11 | 4.40E-11 | 4.34E-11 | 4.29E-11 |
| Pu-242 | | 1.03E-06 | 1.03E-06 | 1.03E-06 | 1.03E-06 | 1.03E-06 |
| Pu-244 | | 2.13E-13 | 2.13E-13 | 2.13E-13 | 2.13E-13 | 2.13E-13 |
| Am-241 | 1.046E-04 | 9.46E-05 | 9.46E-05 | 9.45E-05 | 9.45E-05 | 9.45E-05 |
| Am-242m | | 1.37E-06 | 1.36E-06 | 1.36E-06 | 1.36E-06 | 1.36E-06 |
| Am-243 | | 1.05E-08 | 1.05E-08 | 1.05E-08 | 1.05E-08 | 1.05E-08 |
| Cm-243 | | 1.31E-08 | 1.30E-08 | 1.29E-08 | 1.28E-08 | 1.27E-08 |
| Cm-244 | | 2.01E-10 | 1.99E-10 | 1.97E-10 | 1.95E-10 | 1.93E-10 |
| Cm-245 | | 1.89E-12 | 1.89E-12 | 1.89E-12 | 1.89E-12 | 1.89E-12 |
| Cm-246 | | 5.42E-15 | 5.42E-15 | 5.42E-15 | 5.42E-15 | 5.42E-15 |
| Cm-247 | | 9.26E-18 | 9.26E-18 | 9.26E-18 | 9.26E-18 | 9.26E-18 |
| Cm-248 | | 1.85E-20 | 1.85E-20 | 1.85E-20 | 1.85E-20 | 1.85E-20 |

表4-4 Am-241サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : SMIR-26 (軸方向炉中心より350mm上部)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| U-236 | | 1.43E-12 | 1.46E-12 | 1.48E-12 | 1.49E-12 | 1.51E-12 |
| Np-237 | | 3.29E-07 | 3.72E-07 | 4.15E-07 | 4.58E-07 | 5.00E-07 |
| Pu-238 | | 1.48E-06 | 1.83E-06 | 2.05E-06 | 2.20E-06 | 2.29E-06 |
| Pu-239 | | 1.12E-08 | 1.13E-08 | 1.13E-08 | 1.13E-08 | 1.13E-08 |
| Pu-240 | | 6.38E-10 | 6.44E-10 | 6.45E-10 | 6.45E-10 | 6.45E-10 |
| Pu-241 | | 1.17E-11 | 1.15E-11 | 1.14E-11 | 1.12E-11 | 1.10E-11 |
| Pu-242 | | 5.34E-07 | 5.36E-07 | 5.36E-07 | 5.36E-07 | 5.36E-07 |
| Pu-244 | | 2.77E-14 | 2.77E-14 | 2.77E-14 | 2.77E-14 | 2.767E-14 |
| Am-241 | 1.046E-04 | 9.93E-05 | 9.93E-05 | 9.92E-05 | 9.92E-05 | 9.912E-05 |
| Am-242m | | 7.39E-07 | 7.38E-07 | 7.37E-07 | 7.36E-07 | 7.352E-07 |
| Am-243 | | 2.72E-09 | 2.73E-09 | 2.73E-09 | 2.73E-09 | 2.727E-09 |
| Cm-243 | | 3.47E-09 | 3.44E-09 | 3.42E-09 | 3.40E-09 | 3.374E-09 |
| Cm-244 | | 2.64E-11 | 2.61E-11 | 2.58E-11 | 2.56E-11 | 2.531E-11 |
| Cm-245 | | 1.25E-13 | 1.25E-13 | 1.25E-13 | 1.25E-13 | 1.253E-13 |
| Cm-246 | | 1.80E-16 | 1.80E-16 | 1.80E-16 | 1.80E-16 | 1.798E-16 |
| Cm-247 | | 1.55E-19 | 1.55E-19 | 1.55E-19 | 1.55E-19 | 1.546E-19 |
| Cm-248 | | 9.98E-23 | 9.98E-23 | 9.98E-23 | 9.98E-23 | 9.979E-23 |

表5-1 Am-243サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : B9 (軸方向炉中心位置)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U-236 | | 1.75E-11 | 2.45E-11 | 3.29E-11 | 4.28E-11 | 5.43E-11 |
| Np-237 | | 4.14E-08 | 4.77E-08 | 5.40E-08 | 6.02E-08 | 6.65E-08 |
| Pu-238 | | 6.81E-07 | 7.91E-07 | 8.62E-07 | 9.08E-07 | 9.37E-07 |
| Pu-239 | | 2.54E-08 | 2.78E-08 | 3.01E-08 | 3.24E-08 | 3.47E-08 |
| Pu-240 | | 2.17E-07 | 2.70E-07 | 3.22E-07 | 3.74E-07 | 4.25E-07 |
| Pu-241 | | 2.17E-09 | 2.14E-09 | 2.12E-09 | 2.09E-09 | 2.07E-09 |
| Pu-242 | | 2.17E-07 | 2.18E-07 | 2.18E-07 | 2.18E-07 | 2.18E-07 |
| Pu-244 | | 2.16E-09 | 2.16E-09 | 2.16E-09 | 2.16E-09 | 2.16E-09 |
| Am-241 | 1.66E-05 | 1.45E-05 | 1.45E-05 | 1.45E-05 | 1.45E-05 | 1.45E-05 |
| Am-242m | | 2.79E-07 | 2.79E-07 | 2.78E-07 | 2.78E-07 | 2.78E-07 |
| Am-243 | 9.80E-05 | 9.03E-05 | 9.03E-05 | 9.03E-05 | 9.03E-05 | 9.03E-05 |
| Cm-243 | | 4.27E-09 | 4.25E-09 | 4.22E-09 | 4.19E-09 | 4.16E-09 |
| Cm-244 | | 5.16E-06 | 5.11E-06 | 5.06E-06 | 5.00E-06 | 4.95E-06 |
| Cm-245 | | 1.27E-07 | 1.27E-07 | 1.27E-07 | 1.27E-07 | 1.27E-07 |
| Cm-246 | | 8.16E-10 | 8.16E-10 | 8.16E-10 | 8.16E-10 | 8.16E-10 |
| Cm-247 | | 2.76E-12 | 2.76E-12 | 2.76E-12 | 2.76E-12 | 2.76E-12 |
| Cm-248 | | 1.03E-14 | 1.03E-14 | 1.03E-14 | 1.03E-14 | 1.03E-14 |

表5-2 Am-243サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : B9 (軸方向炉中心より350mm上部)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U-236 | | 7.09E-12 | 9.95E-12 | 1.34E-11 | 1.75E-11 | 2.22E-11 |
| Np-237 | | 4.48E-08 | 5.15E-08 | 5.83E-08 | 6.51E-08 | 7.19E-08 |
| Pu-238 | | 2.85E-07 | 3.31E-07 | 3.61E-07 | 3.80E-07 | 3.92E-07 |
| Pu-239 | | 1.73E-08 | 1.97E-08 | 2.21E-08 | 2.45E-08 | 2.69E-08 |
| Pu-240 | | 8.92E-08 | 1.11E-07 | 1.33E-07 | 1.54E-07 | 1.75E-07 |
| Pu-241 | | 3.55E-10 | 3.51E-10 | 3.47E-10 | 3.42E-10 | 3.38E-10 |
| Pu-242 | | 8.98E-08 | 9.02E-08 | 9.02E-08 | 9.03E-08 | 9.03E-08 |
| Pu-244 | | 8.76E-10 | 8.76E-10 | 8.76E-10 | 8.76E-10 | 8.76E-10 |
| Am-241 | 1.66E-05 | 1.57E-05 | 1.57E-05 | 1.57E-05 | 1.57E-05 | 1.57E-05 |
| Am-242m | | 1.24E-07 | 1.24E-07 | 1.24E-07 | 1.23E-07 | 1.23E-07 |
| Am-243 | 9.80E-05 | 9.49E-05 | 9.49E-05 | 9.49E-05 | 9.49E-05 | 9.49E-05 |
| Cm-243 | | 7.14E-10 | 7.09E-10 | 7.04E-10 | 7.00E-10 | 6.95E-10 |
| Cm-244 | | 2.13E-06 | 2.11E-06 | 2.09E-06 | 2.07E-06 | 2.05E-06 |
| Cm-245 | | 2.10E-08 | 2.10E-08 | 2.10E-08 | 2.10E-08 | 2.10E-08 |
| Cm-246 | | 5.24E-11 | 5.24E-11 | 5.23E-11 | 5.23E-11 | 5.23E-11 |
| Cm-247 | | 6.99E-14 | 6.99E-14 | 6.99E-14 | 6.99E-14 | 6.99E-14 |
| Cm-248 | | 1.02E-16 | 1.02E-16 | 1.02E-16 | 1.02E-16 | 1.02E-16 |

表5-3 Am-243サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : SMIR-26 (軸方向炉中心位置)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U-236 | | 1.19E-11 | 1.63E-11 | 2.20E-11 | 2.87E-11 | 3.66E-11 |
| Np-237 | | 5.00E-08 | 5.64E-08 | 6.29E-08 | 6.94E-08 | 7.59E-08 |
| Pu-238 | | 4.48E-07 | 5.54E-07 | 6.24E-07 | 6.69E-07 | 6.97E-07 |
| Pu-239 | | 2.40E-08 | 2.63E-08 | 2.87E-08 | 3.10E-08 | 3.34E-08 |
| Pu-240 | | 1.37E-07 | 1.77E-07 | 2.17E-07 | 2.56E-07 | 2.95E-07 |
| Pu-241 | | 1.45E-09 | 1.43E-09 | 1.41E-09 | 1.40E-09 | 1.38E-09 |
| Pu-242 | | 1.63E-07 | 1.64E-07 | 1.64E-07 | 1.64E-07 | 1.64E-07 |
| Pu-244 | | 1.61E-09 | 1.61E-09 | 1.61E-09 | 1.61E-09 | 1.61E-09 |
| Am-241 | 1.66E-05 | 1.50E-05 | 1.50E-05 | 1.50E-05 | 1.50E-05 | 1.50E-05 |
| Am-242 _m | | 2.17E-07 | 2.17E-07 | 2.16E-07 | 2.16E-07 | 2.16E-07 |
| Am-243 | 9.80E-05 | 9.22E-05 | 9.22E-05 | 9.22E-05 | 9.22E-05 | 9.22E-05 |
| Cm-243 | | 2.15E-09 | 2.13E-09 | 2.12E-09 | 2.11E-09 | 2.09E-09 |
| Cm-244 | | 3.92E-06 | 3.88E-06 | 3.83E-06 | 3.79E-06 | 3.76E-06 |
| Cm-245 | | 7.06E-08 | 7.06E-08 | 7.06E-08 | 7.06E-08 | 7.06E-08 |
| Cm-246 | | 3.31E-10 | 3.31E-10 | 3.31E-10 | 3.31E-10 | 3.31E-10 |
| Cm-247 | | 8.26E-13 | 8.26E-13 | 8.26E-13 | 8.26E-13 | 8.26E-13 |
| Cm-248 | | 2.27E-15 | 2.27E-15 | 2.27E-15 | 2.27E-15 | 2.27E-15 |

表5-4 Am-243サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : SMIR-26 (軸方向炉中心より350mm上部)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U-236 | | 6.00E-12 | 8.32E-12 | 1.12E-11 | 1.47E-11 | 1.88E-11 |
| Np-237 | | 5.23E-08 | 5.91E-08 | 6.59E-08 | 7.27E-08 | 7.95E-08 |
| Pu-238 | | 2.35E-07 | 2.90E-07 | 3.26E-07 | 3.50E-07 | 3.65E-07 |
| Pu-239 | | 1.93E-08 | 2.22E-08 | 2.46E-08 | 2.70E-08 | 2.94E-08 |
| Pu-240 | | 7.07E-08 | 9.15E-08 | 1.12E-07 | 1.32E-07 | 1.53E-07 |
| Pu-241 | | 3.80E-10 | 3.76E-10 | 3.71E-10 | 3.67E-10 | 3.62E-10 |
| Pu-242 | | 8.49E-08 | 8.51E-08 | 8.52E-08 | 8.52E-08 | 8.52E-08 |
| Pu-244 | | 8.27E-10 | 8.27E-10 | 8.27E-10 | 8.27E-10 | 8.27E-10 |
| Am-241 | 1.66E-05 | 1.53E-05 | 1.53E-05 | 1.57E-05 | 1.57E-05 | 1.57E-05 |
| Am-242 _m | | 1.17E-07 | 1.17E-07 | 1.17E-07 | 1.17E-07 | 1.17E-07 |
| Am-243 | 9.80E-05 | 9.51E-05 | 9.51E-05 | 9.50E-05 | 9.50E-05 | 9.50E-05 |
| Cm-243 | | 5.69E-10 | 5.65E-10 | 5.62E-10 | 5.58E-10 | 5.54E-10 |
| Cm-244 | | 2.03E-06 | 2.01E-06 | 1.99E-06 | 1.97E-06 | 1.95E-06 |
| Cm-245 | | 1.86E-08 | 1.86E-08 | 1.86E-08 | 1.86E-08 | 1.86E-08 |
| Cm-246 | | 4.35E-11 | 4.35E-11 | 4.35E-11 | 4.35E-11 | 4.35E-11 |
| Cm-247 | | 5.47E-14 | 5.47E-14 | 5.47E-14 | 5.47E-14 | 5.47E-14 |
| Cm-248 | | 7.52E-17 | 7.52E-17 | 7.52E-17 | 7.52E-17 | 7.52E-17 |

表6-1 Cm-244サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : B9 (軸方向炉中心位置)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U-236 | | 5.66E-10 | 7.47E-10 | 9.52E-10 | 1.18E-09 | 1.44E-09 |
| Np-237 | | 6.47E-12 | 8.21E-12 | 9.61E-12 | 1.14E-11 | 1.36E-11 |
| Pu-238 | | 9.22E-11 | 1.15E-10 | 1.29E-10 | 1.39E-10 | 1.45E-10 |
| Pu-239 | | 6.14E-09 | 7.04E-09 | 7.94E-09 | 8.83E-09 | 9.71E-09 |
| Pu-240 | | 5.91E-06 | 6.77E-06 | 7.62E-06 | 8.45E-06 | 9.28E-06 |
| Pu-241 | | 7.33E-08 | 7.24E-08 | 7.16E-08 | 7.08E-08 | 7.00E-08 |
| Pu-242 | | 1.47E-09 | 1.61E-09 | 1.75E-09 | 1.90E-09 | 2.04E-09 |
| Pu-244 | | 2.60E-15 | 3.20E-15 | 3.81E-15 | 4.41E-15 | 5.02E-15 |
| Am-241 | | 1.76E-09 | 2.72E-09 | 3.67E-09 | 4.60E-09 | 5.53E-09 |
| Am-242m | | 9.47E-12 | 9.46E-12 | 9.45E-12 | 9.44E-12 | 9.43E-12 |
| Am-243 | | 1.30E-11 | 1.31E-11 | 1.31E-11 | 1.31E-11 | 1.31E-11 |
| Cm-243 | 1.7E-07 | 1.39E-07 | 1.38E-07 | 1.37E-07 | 1.36E-07 | 1.35E-07 |
| Cm-244 | 9.79E-05 | 8.36E-05 | 8.27E-05 | 8.18E-05 | 8.10E-05 | 8.01E-05 |
| Cm-245 | 2.31E-06 | 6.04E-06 | 6.03E-06 | 6.03E-06 | 6.03E-06 | 6.03E-06 |
| Cm-246 | 3.71E-06 | 3.64E-06 | 3.64E-06 | 3.64E-06 | 3.64E-06 | 3.64E-06 |
| Cm-247 | 4.6E-08 | 8.53E-08 | 8.53E-08 | 8.53E-08 | 8.53E-08 | 8.53E-08 |
| Cm-248 | | 1.20E-09 | 1.20E-09 | 1.20E-09 | 1.20E-09 | 1.20E-09 |

表6-2 Cm-244サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : B9 (軸方向炉中心より350mm上部)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U-236 | | 5.91E-10 | 7.81E-10 | 9.97E-10 | 1.24E-09 | 1.50E-09 |
| Np-237 | | 2.69E-12 | 3.42E-12 | 4.02E-12 | 4.78E-12 | 5.72E-12 |
| Pu-238 | | 3.68E-11 | 4.38E-11 | 4.89E-11 | 5.19E-11 | 5.31E-11 |
| Pu-239 | | 6.73E-09 | 7.72E-09 | 8.71E-09 | 9.69E-09 | 1.07E-08 |
| Pu-240 | | 6.21E-06 | 7.11E-06 | 8.01E-06 | 8.89E-06 | 9.77E-06 |
| Pu-241 | | 3.09E-08 | 3.06E-08 | 3.03E-08 | 3.00E-08 | 2.96E-08 |
| Pu-242 | | 1.04E-09 | 1.18E-09 | 1.33E-09 | 1.47E-09 | 1.62E-09 |
| Pu-244 | | 7.98E-16 | 9.95E-16 | 1.19E-15 | 1.39E-15 | 1.58E-15 |
| Am-241 | | 7.49E-10 | 1.15E-09 | 1.55E-09 | 1.95E-09 | 2.34E-09 |
| Am-242m | | 1.61E-12 | 1.61E-12 | 1.60E-12 | 1.60E-12 | 1.60E-12 |
| Am-243 | | 4.19E-12 | 4.20E-12 | 4.20E-12 | 4.20E-12 | 4.20E-12 |
| Cm-243 | 1.7E-07 | 1.53E-07 | 1.52E-07 | 1.51E-07 | 1.50E-07 | 1.49E-07 |
| Cm-244 | 9.79E-05 | 8.82E-05 | 8.73E-05 | 8.64E-05 | 8.55E-05 | 8.46E-05 |
| Cm-245 | 2.31E-06 | 3.91E-06 | 3.91E-06 | 3.91E-06 | 3.91E-06 | 3.91E-06 |
| Cm-246 | 3.71E-06 | 3.67E-06 | 3.67E-06 | 3.67E-06 | 3.67E-06 | 3.67E-06 |
| Cm-247 | 4.6E-08 | 6.23E-08 | 6.23E-08 | 6.23E-08 | 6.23E-08 | 6.23E-08 |
| Cm-248 | | 3.89E-10 | 3.89E-10 | 3.89E-10 | 3.89E-10 | 3.89E-10 |

表6-3 Cm-244サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : SMIR-26 (軸方向炉中心位置)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U-236 | | 7.83E-10 | 9.96E-10 | 1.23E-09 | 1.49E-09 | 1.78E-09 |
| Np-237 | | 9.50E-12 | 1.12E-11 | 1.28E-11 | 1.49E-11 | 1.75E-11 |
| Pu-238 | | 6.39E-11 | 8.37E-11 | 9.66E-11 | 1.05E-10 | 1.10E-10 |
| Pu-239 | | 7.43E-09 | 8.36E-09 | 9.29E-09 | 1.02E-08 | 1.11E-08 |
| Pu-240 | | 7.01E-06 | 7.88E-06 | 8.74E-06 | 9.59E-06 | 1.04E-05 |
| Pu-241 | | 9.17E-08 | 9.06E-08 | 8.95E-08 | 8.85E-08 | 8.74E-08 |
| Pu-242 | | 1.71E-09 | 1.85E-09 | 1.99E-09 | 2.14E-09 | 2.28E-09 |
| Pu-244 | | 1.52E-15 | 1.93E-15 | 2.35E-15 | 2.76E-15 | 3.17E-15 |
| Am-241 | | 1.88E-09 | 3.08E-09 | 4.27E-09 | 5.44E-09 | 6.59E-09 |
| Am-242m | | 8.37E-12 | 8.36E-12 | 8.35E-12 | 8.33E-12 | 8.32E-12 |
| Am-243 | | 1.51E-11 | 1.51E-11 | 1.52E-11 | 1.52E-11 | 1.52E-11 |
| Cm-243 | 1.7E-07 | 1.44E-07 | 1.43E-07 | 1.42E-07 | 1.41E-07 | 1.40E-07 |
| Cm-244 | 9.79E-05 | 8.46E-05 | 8.37E-05 | 8.28E-05 | 8.20E-05 | 8.11E-05 |
| Cm-245 | 2.31E-06 | 5.11E-06 | 5.11E-06 | 5.11E-06 | 5.11E-06 | 5.11E-06 |
| Cm-246 | 3.71E-06 | 3.65E-06 | 3.65E-06 | 3.65E-06 | 3.65E-06 | 3.65E-06 |
| Cm-247 | 4.6E-08 | 7.56E-08 | 7.56E-08 | 7.56E-08 | 7.56E-08 | 7.56E-08 |
| Cm-248 | | 8.18E-10 | 8.18E-10 | 8.18E-10 | 8.18E-10 | 8.18E-10 |

表6-4 Cm-244サンプルの核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : SMIR-26 (軸方向炉中心より350mm上部)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U-236 | | 8.02E-10 | 1.02E-09 | 1.26E-09 | 1.53E-09 | 1.83E-09 |
| Np-237 | | 4.94E-12 | 5.81E-12 | 6.67E-12 | 7.79E-12 | 9.17E-12 |
| Pu-238 | | 3.19E-11 | 3.98E-11 | 4.59E-11 | 4.88E-11 | 5.11E-11 |
| Pu-239 | | 7.84E-09 | 8.83E-09 | 9.82E-09 | 1.08E-08 | 1.18E-08 |
| Pu-240 | | 7.21E-06 | 8.11E-06 | 8.99E-06 | 9.87E-06 | 1.07E-05 |
| Pu-241 | | 4.82E-08 | 4.77E-08 | 4.71E-08 | 4.66E-08 | 4.61E-08 |
| Pu-242 | | 1.27E-09 | 1.41E-09 | 1.56E-09 | 1.70E-09 | 1.85E-09 |
| Pu-244 | | 6.39E-16 | 8.23E-16 | 1.01E-15 | 1.19E-15 | 1.37E-15 |
| Am-241 | | 9.95E-10 | 1.63E-09 | 2.25E-09 | 2.87E-09 | 3.48E-09 |
| Am-242m | | 2.26E-12 | 2.26E-12 | 2.26E-12 | 2.25E-12 | 2.25E-12 |
| Am-243 | | 6.64E-12 | 6.66E-12 | 6.66E-12 | 6.66E-12 | 6.66E-12 |
| Cm-243 | 1.7E-07 | 1.52E-07 | 1.51E-07 | 1.50E-07 | 1.49E-07 | 1.48E-07 |
| Cm-244 | 9.79E-05 | 8.74E-05 | 8.65E-05 | 8.56E-05 | 8.47E-05 | 8.38E-05 |
| Cm-245 | 2.31E-06 | 3.79E-06 | 3.79E-06 | 3.79E-06 | 3.79E-06 | 3.79E-06 |
| Cm-246 | 3.71E-06 | 3.68E-06 | 3.68E-06 | 3.68E-06 | 3.68E-06 | 3.68E-06 |
| Cm-247 | 4.6E-08 | 6.14E-08 | 6.14E-08 | 6.14E-08 | 6.14E-08 | 6.14E-08 |
| Cm-248 | | 3.64E-10 | 3.64E-10 | 3.64E-10 | 3.64E-10 | 3.64E-10 |

表7-1 U-235標準試料の核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : B9 (軸方向炉中心位置)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| U-233 | | 1.01E-11 | 1.01E-11 | 1.01E-11 | 1.01E-11 | 1.010E-11 |
| U-234 | | 9.13E-09 | 9.13E-09 | 9.13E-09 | 9.14E-09 | 9.138E-09 |
| U-235 | 1.06E-04 | 9.05E-05 | 9.05E-05 | 9.05E-05 | 9.05E-05 | 9.051E-05 |
| U-236 | | 3.17E-06 | 3.17E-06 | 3.17E-06 | 3.17E-06 | 3.171E-06 |
| U-238 | 8.0E-06 | 7.78E-06 | 7.78E-06 | 7.78E-06 | 7.78E-06 | 7.775E-06 |

表7-2 U-235標準試料の核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : B9 (軸方向炉中心より350mm上部)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| U-233 | | 4.38E-12 | 4.38E-12 | 4.38E-12 | 4.38E-12 | 4.381E-12 |
| U-234 | | 3.83E-09 | 3.83E-09 | 3.83E-09 | 3.83E-09 | 3.830E-09 |
| U-235 | 1.06E-04 | 9.96E-05 | 9.96E-05 | 9.96E-05 | 9.96E-05 | 9.963E-05 |
| U-236 | | 1.32E-06 | 1.32E-06 | 1.32E-06 | 1.32E-06 | 1.322E-06 |
| U-238 | 8.0E-06 | 7.90E-06 | 7.90E-06 | 7.90E-06 | 7.90E-06 | 7.899E-06 |

表7-3 U-235標準試料の核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : SMIR-26 (軸方向炉中心位置)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| U-233 | | 7.76E-12 | 7.76E-12 | 7.76E-12 | 7.77E-12 | 7.767E-12 |
| U-234 | | 6.92E-09 | 6.92E-09 | 6.92E-09 | 6.92E-09 | 6.924E-09 |
| U-235 | 1.06E-04 | 9.44E-05 | 9.44E-05 | 9.44E-05 | 9.44E-05 | 9.436E-05 |
| U-236 | | 2.40E-06 | 2.40E-06 | 2.40E-06 | 2.40E-06 | 2.398E-06 |
| U-238 | 8.0E-06 | 7.83E-06 | 7.83E-06 | 7.83E-06 | 7.83E-06 | 7.828E-06 |

表7-4 U-235標準試料の核種消滅・生成量 [g]

照射位置 : SMIR-26 (軸方向炉中心より350mm上部)

| | 照射前 | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| U-233 | | 4.14E-12 | 4.14E-12 | 4.14E-12 | 4.14E-12 | 4.145E-12 |
| U-234 | | 3.62E-09 | 3.62E-09 | 3.62E-09 | 3.62E-09 | 3.620E-09 |
| U-235 | 1.06E-04 | 1.00E-04 | 1.00E-04 | 1.00E-04 | 1.00E-04 | 9.998E-05 |
| U-236 | | 1.25E-06 | 1.25E-06 | 1.25E-06 | 1.25E-06 | 1.249E-06 |
| U-238 | 8.0E-06 | 7.90E-06 | 7.90E-06 | 7.90E-06 | 7.90E-06 | 7.904E-06 |

表8-1 照射後の放射能 [Bq]

照射位置 : B9 (軸方向炉中心位置)

| TRU核種サンプル | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Np-237 (FP) | 1.24E+09 | 1.59E+07 | 7.69E+06 | 4.69E+06 | 3.98E+06 |
| (TOTAL) | 3.51E+09 | 2.78E+07 | 1.95E+07 | 1.65E+07 | 1.52E+07 |
| Am-241 (FP) | 3.38E+09 | 4.80E+07 | 2.61E+07 | 1.82E+07 | 1.41E+07 |
| (TOTAL) | 4.76E+09 | 2.65E+08 | 1.75E+08 | 1.23E+08 | 8.97E+07 |
| Am-243 (FP) | 2.66E+09 | 3.85E+07 | 1.93E+07 | 1.27E+07 | 9.65E+06 |
| (TOTAL) | 3.59E+09 | 8.97E+07 | 6.01E+07 | 4.68E+07 | 3.92E+07 |
| Cm-244 (FP) | 3.63E+09 | 5.72E+07 | 2.95E+07 | 1.99E+07 | 1.52E+07 |
| (TOTAL) | 3.92E+09 | 3.51E+08 | 3.20E+08 | 3.08E+08 | 3.00E+08 |
| U-235 (FP) | 8.65E+09 | 1.46E+08 | 7.12E+07 | 4.45E+07 | 3.27E+07 |
| 標準試料 (TOTAL) | 8.71E+09 | 1.46E+08 | 7.12E+07 | 4.45E+07 | 3.27E+07 |

表8-2 照射後の放射能 [Bq]

照射位置 : B9 (軸方向炉中心より350mm上部)

| TRU核種サンプル | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Am-241 (FP) | 1.13E+09 | 1.65E+07 | 9.21E+06 | 6.50E+06 | 5.09E+06 |
| (TOTAL) | 1.72E+09 | 1.17E+08 | 8.08E+07 | 5.96E+07 | 4.60E+07 |
| Am-243 (FP) | 8.34E+08 | 1.35E+07 | 6.87E+06 | 4.59E+06 | 3.51E+06 |
| (TOTAL) | 1.22E+09 | 3.71E+07 | 2.62E+07 | 2.11E+07 | 1.81E+07 |
| Cm-244 (FP) | 1.37E+09 | 2.19E+07 | 1.12E+07 | 7.54E+06 | 5.77E+06 |
| (TOTAL) | 1.68E+09 | 3.32E+08 | 3.18E+08 | 3.11E+08 | 3.06E+08 |
| U-235 (FP) | 3.71E+09 | 6.16E+07 | 2.99E+07 | 1.86E+07 | 1.36E+07 |
| 標準試料 (TOTAL) | 3.73E+09 | 6.16E+07 | 2.99E+07 | 1.86E+07 | 1.36E+07 |

表8-3 照射後の放射能 [Bq]

照射位置 : SMIR-26 (軸方向炉中心位置)

| TRU核種サンプル | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Np-237 (FP) | 5.11E+09 | 6.05E+07 | 2.55E+07 | 1.39E+07 | 9.18E+06 |
| (TOTAL) | 6.42E+09 | 6.96E+07 | 3.46E+07 | 2.29E+07 | 1.82E+07 |
| Am-241 (FP) | 1.60E+09 | 3.42E+07 | 1.98E+07 | 1.41E+07 | 1.11E+07 |
| (TOTAL) | 2.52E+09 | 2.43E+08 | 1.63E+08 | 1.15E+08 | 8.36E+07 |
| Am-243 (FP) | 1.19E+09 | 2.66E+07 | 1.39E+07 | 9.34E+06 | 7.12E+06 |
| (TOTAL) | 1.74E+09 | 7.24E+07 | 4.98E+07 | 3.87E+07 | 3.22E+07 |
| Cm-244 (FP) | 1.99E+09 | 4.45E+07 | 2.37E+07 | 1.61E+07 | 1.24E+07 |
| (TOTAL) | 2.29E+09 | 3.42E+08 | 3.18E+08 | 3.07E+08 | 3.01E+08 |
| U-235 (FP) | 5.09E+09 | 1.21E+08 | 6.03E+07 | 3.80E+07 | 2.79E+07 |
| 標準試料 (TOTAL) | 5.13E+09 | 1.21E+08 | 6.03E+07 | 3.80E+07 | 2.79E+07 |

表8-4 照射後の放射能 [Bq]

照射位置 : SMIR-26 (軸方向炉中心より350mm上部)

| TRU核種サンプル | 照射直後 | 照射後100日 | 照射後200日 | 照射後300日 | 照射後400日 |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Am-241 (FP) | 7.54E+08 | 1.62E+07 | 9.46E+06 | 6.79E+06 | 5.34E+06 |
| (TOTAL) | 1.24E+09 | 1.33E+08 | 9.19E+07 | 6.69E+07 | 5.08E+07 |
| Am-243 (FP) | 5.71E+08 | 1.31E+07 | 6.89E+06 | 4.64E+06 | 3.54E+06 |
| (TOTAL) | 8.60E+08 | 3.89E+07 | 2.75E+07 | 2.18E+07 | 1.85E+07 |
| Cm-244 (FP) | 9.74E+08 | 2.20E+07 | 1.17E+07 | 7.92E+06 | 6.06E+06 |
| (TOTAL) | 1.28E+09 | 3.29E+08 | 3.16E+08 | 3.09E+08 | 3.04E+08 |
| U-235 (FP) | 2.70E+09 | 6.35E+07 | 3.15E+07 | 1.98E+07 | 1.45E+07 |
| 標準試料 (TOTAL) | 2.72E+09 | 6.35E+07 | 3.15E+07 | 1.98E+07 | 1.45E+07 |

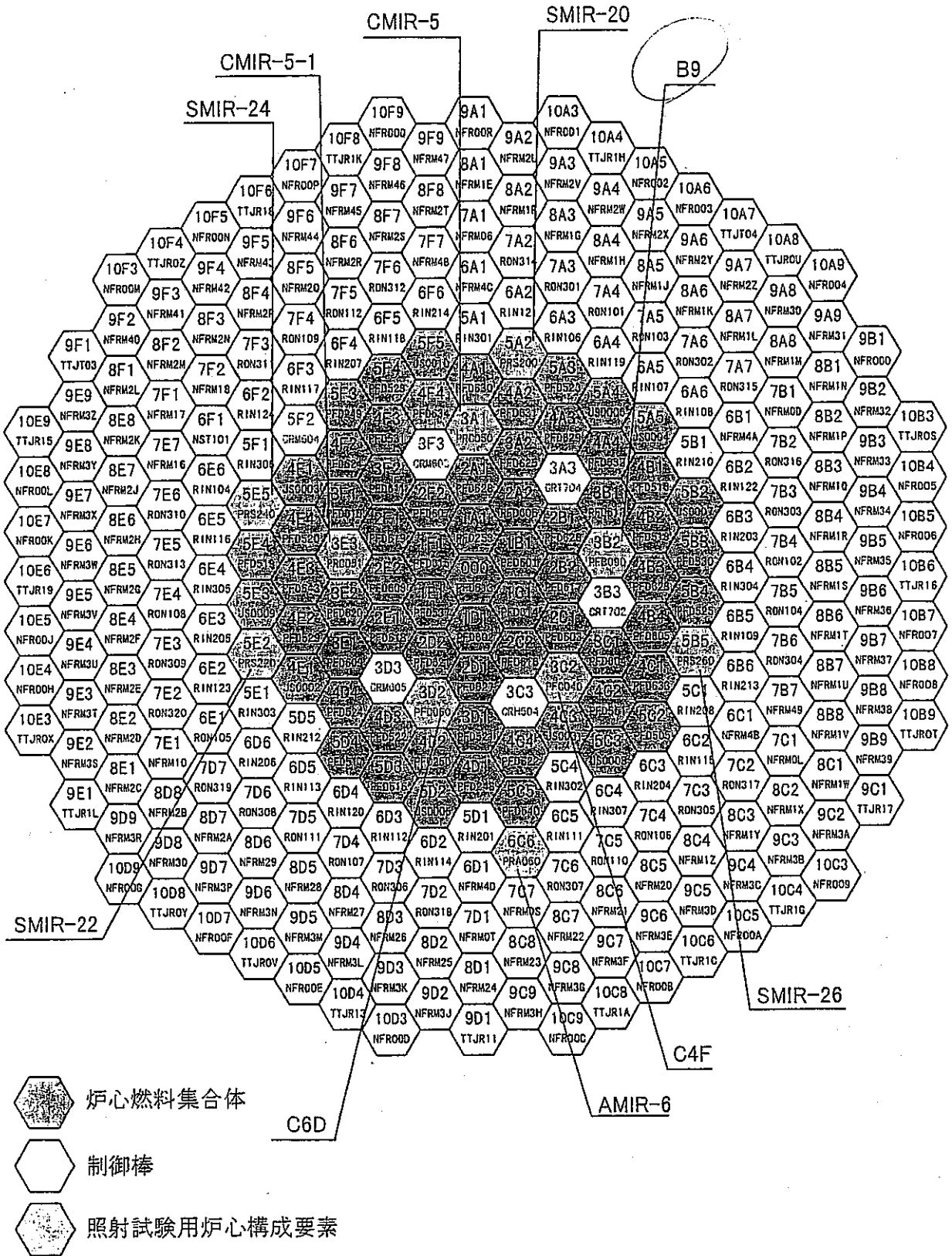


図2-1 第33サイクルの炉心構成

特殊燃料集合体の照射実績 (1/2)

| 集合体番号 | 炉心装荷日 | 炉心取出日 | EFPD [日] | 照射サイクル (装荷位置) | 燃焼度[MWd/t] | | 照射量*1 [n/cm ³] E≥0.1MeV | 備考 |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---|-----|
| | | | | | 集合体平均 | 最高 | | |
| PFA010M (A1M) | S59. 8. 26 | S61. 2. 4 | 177.361 | 5~7,8(2E2) | ^{*3} 34300 | ^{*3} 41200 | 4.67×10 ²² | PIE |
| PFA020 (A2D) | S62. 11. 21 | H 1. 11. 15 | 365.912 | 14~19(2B2) | ^{*3} 50200 | ^{*3} 69600 | 9.50×10 ²² | PIE |
| PFB000J (B0J) | S57. 12. 18 | S58. 7. 8 | 27.811 | 0(1A1) | 4800 | 5800 | 0.71×10 ²² | PIE |
| PFB001J (F3B) | H 4. 11. 5 | H 4. 12. 8 | 3.328 | 25'(000) | 670 | 780 | 8.84×10 ²⁰ | PIE |
| PFB010J (B1J) | S57. 12. 17 | S58. 12. 20 | 115.971 | 0(1E1), 1~2(2B1) | 18200 | 22300 | 2.81×10 ²² | PIE |
| PFB011J (F1B) | S60. 4. 10 | S60. 4. 23 | 2.100 | 7'(1D1) | 510 | 620 | 5.38×10 ²⁰ | PIE |
| PFB020M (B2M) | S59. 4. 8 | S61. 6. 27 | 350.697 | 3~7(3C2), 8~10(3C2) | 45800 | 56500 | 7.58×10 ²² | PIE |
| PFB030M (B3) | S63. 2. 18 | S63. 9. 12 | 101.015 | 15~16(3F2) | 13500 | 16800 | 2.06×10 ²² | PIE |
| PFB031M (B4M) | S61. 11. 8 | S61. 11. 18 | 0.379 | 12'(1A1) | I型(2)65 | 76 | 9.30×10 ¹⁹ | PIE |
| | | | | | II型(5)64 | 75 | 9.65×10 ¹⁹ | |
| PFB051 (B5D-1) | H 3. 6. 7 | H 3. 6. 23 | 0.241 | 23'(000) | 40 | 47 | 6.08×10 ¹⁹ | PIE |
| PFB052 (B5D-2) | H 4. 6. 9 | H 4. 7. 3 | 0.166 | 24'(000) | 30 | 36 | 4.66×10 ¹⁹ | PIE |
| PFB060 (B6) | S63. 11. 22 | H 2. 1. 8 | 245.395 | 17~20(3F2) | ^{*2} 44400 | ^{*2} 55300 | 7.17×10 ²² | PIE |
| PFB070 (B7) | H 2. 7. 7 | H 3. 6. 7 | 190.392 | 21~23(3F2) | ^{*2} 54500 | ^{*2} 81900 | 11.03×10 ²² | PIE |
| PFB080 (B8) | H 4. 7. 17 | H 5. 4. 5 | 134.447 | 25(3F2), 26~27(3F2) | ^{*2} 49100 | ^{*2} 98900 | 13.48×10 ²² | PIE |
| PFB090 (B9) | H 6. 7. 28 | | 207.944 | 29~ (3B2) 32 | ^{*2} 49000 | ^{*2} 122900 | 17.52×10 ²² | |

注) 表中における燃焼度および照射量のデータは、冷却期間(ラック内)の値を含む。

- *1 集合体の最大中性子照射量
*2 B3からの累積値
*3 試料部の値

材料照射用反射体の照射実績 (3/3)

| 集合体番号 | 炉心装荷日 | 炉心取出日 | EFPD [日] | 照射サイクル (装荷位置) | 最高燃焼度 [cap/cc] | 照射量 [n/cm ²] E≥0.1MeV | 備考 |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|-------------------|---|-----|
| PRS130 (SMIR-13) | S63. 9. 22 | H 1. 11. 1 | 205.406 | 17~19(6D4) | — | 1.55 × 10 ²² | PIE |
| PRS140 (SMIR-14) | H 1. 4. 18 | H 3. 10. 10 | 378.580 | 18~23'''(5C4) | — | 4.20 × 10 ²² | PIE |
| PRS150 (SMIR-15) | H 1. 4. 18 | H 5. 4. 5 | 558.043 | 18~27(5C5) | — | 5.44 × 10 ²² | PIE |
| PRS160 (SMIR-16) | H 1. 8. 7 | H 1. 10. 31 | 68.698 | 19(5F5) | — | 0.71 × 10 ²² | PIE |
| PRS170 (SMIR-17) | H 1. 8. 6 | H 9. 9. 22 | 636.428 | 19~31(6B3) | — | 4.67 × 10 ²² | |
| PRS180 (SMIR-18) | H 1. 11. 14 | H 9. 9. 22 | 567.730 | 20~31(6E3) | — | 4.05 × 10 ²² | |
| PRS019 (SMIR-19) | H 2. 7. 17 | H 3. 10. 4 | 197.837 | 21~23'''(6F4) | — | 1.43 × 10 ²² | PIE |
| PRS200 (SMIR-20) | H 4. 12. 8 | | 353.112 | 26~30(5C4), 31~33(5A2) | — | 3.67 × 10 ²² | |
| PRS021 (SMIR-21) | H 2. 7. 17 | H 2. 11. 22 | 68.837 | 21(5B5) | — | 0.75 × 10 ²² | PIE |
| PRS220 (SMIR-22) | H 4. 12. 4 | | 353.112 | 26~(5E2) | — | 4.02 × 10 ²² | |
| PRS230 (SMIR-23) | H 4. 2. 28 | H 4. 12. 4 | 109.865 | 24~25'(5E5) | — | 1.12 × 10 ²² | PIE |
| PRS240 (SMIR-24) | H 4. 12. 4 | | 353.112 | 26~33(5E5) | — | 3.98 × 10 ²² | |
| PRS250 (SMIR-25) | H 4. 7. 20 | H 4. 10. 26 | 64.849 | 25(5A2) | — | 0.72 × 10 ²² | PIE |
| PRS260 (SMIR-26) | H 8. 11. 20 | | 251.420 | 30~33(5B5) | — | 2.84 × 10 ²² | |
| PFI011 (INTA-S) | S62. 8. 22 | H 3. 7. 29 | 654.434 | 13~23'(5F2) | — | 7.04 × 10 ²² | PIE |

→