

分離核変換技術開発基本計画

(技術報告)

2003年4月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)
2003

分離核変換技術開発基本計画 (技術報告)

池上哲雄*、小澤正基*

要 旨

基礎基盤研究としての分離核変換技術開発の目標、範囲、深さ等分離核変換技術開発の基本的方向性を示すこと、及びその基本的方向性の下に幅広い研究を行い、分離技術、核変換技術の基礎的なデータベースを充実させるとともに、効率的な分離核変換技術を確立し、実用化への反映を目指す開発手法を示すことを目的として平成12年8月の「長寿命核種の分離核変換技術の研究開発」についての研究開発課題評価委員会の事前評価結果を踏まえつつ、開発目標、対象核種、開発計画を中心に具体化、詳細化させた基本計画を立案した。

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、そこを目指しての第1段階目標、及び第2段階目標から成る段階を踏んだ目標設定とした。

上記目標の各段階に対応させ「放射能及び放射性毒性」、「地層処分」、及び「有効利用」の3つの観点から対象核種を選定した。

第1段階としては今後5年間を目安としており、実用化戦略調査研究と連携を取りながら基礎基盤研究についてはTRU一括分離及びMA/Ln高効率分離の見通しを得ると共に、FPについては分離回収法を選定し、ヨウ素/テクネチウムの照射試験計画立案等を行うこととしている。

第2段階としては今後15年程度を目安に、不要元素FPの分離回収、希少元素FP有効利用(水素製造用触媒等)、TRU/LLFPの高回収等のブレイクスルーが必要となる技術開発も含め基礎基盤研究を完成させ、実用化への反映を目指す。

長寿命核種の分離核変換技術については、種々の概念や方法が提唱され研究が進められているが、それらの間には共通課題が多いため、国内外の研究機関、大学等と協力して研究開発を進めていく。特に、「常陽」/PHENIX照射試験をはじめとした情報交換を行っている仏国、最近この分野でも積極的な活動を開始した米国との協力関係を一層推進していく。

* : 大洗工学センター システム技術開発部 分離変換工学グループ

Basic Plan of Partitioning and Transmutation Technology Development

IKEGAMI Tetsuo*, OZAWA Masaki*

Abstract

Basic plan of partitioning and transmutation technology development has been made in more detail and concrete manner in terms of development goal, nuclides to be partitioned and to be transmuted, and development schedule, based on the pre-evaluation results of the Research Evaluation Committee on "Research and development of partitioning and transmutation technology for long life nuclides" held in August 2000.

A step by step approach, consists of three steps, to reach the goal of partitioning and transmutation technology has been adopted under the recognition that the partitioning and transmutation technology development should be progressed steadily as a long term them.

The first step is supposed to be able to attain within about 5 years by the present technology and on the extension of it. Such researches as collective separation of TRU, MA/Ln effective separation, and irradiation experiment of iodine and technetium.

The second step is such a goal that is expected to be able to realize the engineering feasibility, within about 15 years, through the progress of science technology in future, although the engineering feasibility is not sufficiently foreseen at present. It will need revolutionary technology or breakthrough.

Nuclides to be partitioned and to be transmuted have been selected in view points of "radioactivity and radio-toxicity", "geological repository", and "effective utilization", corresponding to the each step of the development goal.

Collaboration with other research organizations and with universities in the world should be pursued. Especially, such collaborations with France, with which information exchange on JOYO/PHENIX irradiation experiments is progressing, and with USA, which has recently developed positive activities in this field, are strongly expected.

* : Partitioning and Transmutation Technology Group, System Engineering
Technology Division, OEC, JNC

分離核変換技術開発基本計画

目 次

はじめに	1
1. 目的	1
2. 分離核変換の意義	1
3. 基本的考え方	2
3.1 実用化戦略調査研究との関係	2
3.2 MA に対する考え方	3
3.3 FP に対する考え方	3
4. 研究開発目標	4
5. 分離核変換対象核種	5
6. 主な研究開発課題と研究開発計画	5
6.1 基本的方向性検討	5
6.2 研究開発課題の整理及び研究開発計画	6
6.3 研究開発スケジュール	9
6.4 第2段階の研究開発の進め方	10
7. 国内外の研究機関との協力	10
8. 体制	10
9. 資金計画	11
10. 期待される成果及び反映先	11
添付資料	49
添付-1 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	
添付-2 放射能及び放射性毒性の観点での目標設定根拠	
添付-3 被曝リスク低減の観点での目標設定根拠	

表リスト

表 4.1	分離核変換技術開発目標	15
表 5.1	分離核変換対象核種	17
表 6.1	分離変換対象核種毎の課題整理	19~25
表 6.2	核データ整備の現状 (MA) —MA 中性子断面積データの現状—	26
表 6.3	核データ整備の現状 (FP) —放射性 FP の中性子捕獲断面積データの現状—	27
表 9.1	分離核変換技術の基礎・基盤研究に関する資金計画	48

図リスト

図 3.1	長寿命核種の分離変換技術研究開発の役割分担	13
図 3.2	FBR サイクルにおける MA 蓄積量	14
図 4.1	分離核変換技術開発目標の海外との比較	16
図 6.1	分離核変換技術の主要課題	18
図 6.2	分離核変換技術開発	28～42
図 6.3	同位体分離への取り組み	43
図 6.4	分離核変換技術開発全体スケジュール	44
図 6.5	原研との統合による相乗効果	45
図 7.1	国内外連携体制	46
図 8.1	分離変換技術開発に係わる推進体制	47

分離核変換技術開発基本計画

平成13年11月
平成14年8月改訂
平成15年3月改訂2
分離変換Gr

はじめに

「長寿命核種の分離核変換技術の研究開発」については、平成12年8月に研究開発課題評価委員会の事前評価において、長期的テーマとして着実に推進することが望ましいとの評価結果を得ている。本基本計画は、平成12年4月に出された原子力委員会決定「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」（添付-1参照）を念頭に、前述の課題評価委員会の事前評価結果を踏まえつつ、開発目標、対象核種、開発計画を中心に具体化、詳細化させたものである。

尚、分離核変換技術開発は発展途上であり、今後も変化と進展が期待される。従って、本基本計画も適宜見直していく必要がある。

1. 目的

本研究の目的は、基礎基盤研究としての分離核変換技術開発の目標、範囲、深さ等分離核変換技術開発の基本的方向性を示すこと、及びその基本的方向性の下に幅広い研究を行い、分離技術、核変換技術の基礎的なデータベースを充実させるとともに、効率的な分離核変換技術を確立し、実用化への反映を目指す開発手法を示すことである。

2. 分離核変換の意義

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。

3. 基本的考え方

以下の基本的考え方の基に進める。

- ・ 研究の進め方としては、以下の手順を踏む。尚、①については2003年までに結果を得る。

①分離核変換技術開発の基本的方向性検討

サイクル機構で進める分離核変換技術開発の目標、範囲、深さ等の検討を行う。

②個別研究開発の実施

上記の基本的方向性の検討結果を受け、選定された対象核種を実際に分離核変換する研究開発を進める。

- ・ 他機関を含めた従来研究との重複を避ける。
- ・ 地層処分研究及び廃棄物処理研究との関係を明確にしつつ、それらとの間を埋める研究にもチャレンジしていく。
- ・ 2次廃棄物低減化を常に念頭に置く。

3.1 実用化戦略調査研究との関係

分離核変換技術研究開発のうち、本基本計画が対象とする基礎基盤研究と実用化戦略調査研究との関係を図3.1に示す。

- ・ 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書（H12年3月）では、“分離変換技術開発は核燃料サイクル検討と連動させ、その一環として検討を進めることが望ましい”とされている。従って、核データ整備や希少元素の分離・有効利用等の各種核燃料サイクルシステム候補概念に共通する技術及び基礎的色彩の強い技術については、基礎・基盤研究の位置づけで研究開発を進める。一方、TRU及びFPの内Tc、I、Sr、Cs、Moを対象とした分離変換技術に関するシステム設計検討及び主要要素技術開発については、実用化戦略調査研究の中で開発を進める。但し、要素技術研究のうち、基礎物性取得や照射試験の検討・準備等には基礎基盤研究としても積極的に関与していく。
- ・ 両者は独立に進められる性格のものではないため、互いに情報を共有し、相互の進捗を常に認識し合い、一体となって進めていくことが肝要である。
- ・ 4 LLFPにおいても、Cs核変換についてはまさに基礎・基盤研究として取り組む性格のものであることが判明しつつあり、基礎・基盤側で分離技術、核データ整備や照射試験等の研究を進めてから実用化戦略調査研究側に戻すことも必要

となりつつある。

- ・ 従って、図 3.1 も適宜見直していく必要がある。

3.2 MA に対する考え方

下記の実用化戦略調査研究における MA に対する考え方を踏まえ、本基本計画では、TRU の一括分離や高回収率、TRU 核データの精度向上等のさらなる高度化に向けて研究開発を進める。

- ・ 核変換対象であると同時に Pu と同様資源の一部と考え、リサイクルすることを基本とする。
- ・ Pu と MA を分けず、TRU として一括で考えることを基本とする。但し、Cm については、燃料製造における発熱や被爆対策から Cm 遅延サイクルを考慮する。
- ・ 発電用高速炉による TRU リサイクルを追求する場合、以下の観点から TRU の炉への装荷は均質装荷を基本とする。但し、ターゲット燃料開発を推進する仏国等の動きをウォッチし、情報収集は行う。

－ターゲット燃料（非均質装荷）は燃料製造上の課題も含めリサイクル上の課題が多い。

－炉心燃料への MA 添加率が 5%以下であれば炉心特性上大きな問題は生じず、また、軽水炉からの MA を受け入れたとしても 5%以下の MA 添加率で軽水炉からの MA を燃やし切ることは可能である（図 3.2 参照）。即ち、均質装荷で特別の問題は生じない。

－MA 含有燃料とすることで核拡散抵抗性が増大する。

3.3 FP に対する考え方

次の 4 種類に分類して研究開発を進める。実用化戦略調査研究が対象とする 4 LLFP(Tc、I、Sr、Cs)+Mo 以外の核種も対象とする。

- i) 分離及び、減衰待ち貯蔵 (Sr90、Cs137 等)
- ii) 分離及び、ターゲット集合体の形で核変換 (Tc99、I129、Zr93、Cs135、Pd107 等)
- iii) 分離及び、有効利用 (Ru、Rh、Tc、Pd、Se、Te 等)
- iv). 炉あるいは処分側にとって不益になるもの (Mo、Nd、Ba 等安定元素) の分離回収

尚、ORIENT サイクルが対象とする FP 核種は本基本計画にも包含されており、本基本計画での分離研究は ORIENT サイクルへの反映も可能である。

また、元素分離を基本とするが、同位体分離の必要なものについては、先ず、同位体分離のフィージビリティ（必要性、分離性、工学的成立性、経済性等の見通し）

を検討した上で、開発リソースを考慮した上で可能なものについて、基礎研究に取りかかる。

4. 研究開発目標

これまで必ずしも明確でなかった分離核変換研究の研究開発目標を以下のように設定する。

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、そこを目指しての第1段階（当面）目標、及び第2段階（中間）目標から成る段階を踏んだ目標設定とする。ここで、3段階の目標のイメージは以下の通りである。

- ・ 第1段階（当面）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。
- ・ 第2段階（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。技術的成立性の観点ではなく、研究開発の方向性を示すものである。

設定した目標を表4.1に示す。また、ここで設定した目標と海外における目標例との相対比較を図4.1に示す。

尚、ここでの目標達成のレベルとしては、研究開発の成熟度を科学的段階、工学的段階、実用化段階と分けるとすれば、科学的段階を終え、工学的段階に入る（実験室レベルを終了する）までとする。

○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）を念頭に置き、そこに向かって「第1段階（当面）目標」→「第2段階（中間）目標」と段階を踏みながら着実に進展させる目標設定とすることが望ましい。当面の目標に向かって進んでいるときも、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。

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、技術的成立性に重点を置き、それ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き、段階を踏んだ目標というより単一の目標設定となろう。また、実用化戦略調査研究はいくつかの候補概念の feasibility を検討することも目的であるから、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上のレベルにいけるかを検討することになる。

よって、ここで設定する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・基盤研究の目標として策定した。

5. 分離核変換対象核種

前章で設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」、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」、「放射性毒性」及び「被曝リスク低減」、「処分場面積等削減」、「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5.1「分離核変換対象核種」に示す。

放射性毒性の観点での主要対象核種は TRU であり、放射能の観点ではさらに LLFP が加わる。第1段階では、回収率として Pu と Am については 99.9%、その他の TRU については 99%が必要であり、第2段階では1桁上の回収率が必要となる。これらの選定根拠を添付-2に示す。被曝リスク低減の観点では、溶解性が高く、地層への低付着性から最も影響の大きいヨウ素等を選定した。これら選定上の考え方を添付-3に示す。

地層処分の観点では、発熱核種である Sr と Cs、及びガラス固化体の耐久性に影響を与える Mo、さらに安定元素であり高レベルガラス固化体でなく、より負担の少ない別の処分法の可能性が有るものを処分場面積等削減の観点で選定した。尚、地層処分の観点の定量目標については、現時点で得られる必ずしも充分でない知見に基づいて設定したものであり、今後得られる新たな知見を反映して見直していく必要がある。

Pd、Tc、Ru 等は触媒等の化学利用の可能性があり、Sr、Cs 等は熱源あるいは放射線源としての利用可能性が有ることから有効利用の観点で選定した。

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と考えられる。

第1段階の対象核種は実用化戦略調査研究あるいは海外諸機関の対象核種とほぼ同じである。一方、有効利用の観点及び第2段階の対象核種まで視野を広げているのは本基本計画の一つの特長である。

6. 主な研究開発課題と研究開発計画

6.1 基本的方向性検討

開発目標策定、対象核種選定、地層処分及び廃棄物処理との関係評価（分離変換技術開発が地層処分の負担軽減に寄与する程度を定量的に評価する試み）等を行うことにより本研究の目標、範囲を定め、並行して革新的概念検討（環境負荷低減の観点で、システム全体として放射性廃棄物を極小化するリサイクルシステムの追求）、発電用高速炉での核変換限界把握等を行うとともに専焼炉／ADS の調査を進める。

6.2 研究開発課題の整理及び研究開発計画

分離核変換技術開発の主要課題を分離核変換のフローと共に図 6.1 に示す。

5章で選定した対象核種毎に図 6.1 の主要課題に対し、現状把握と残る課題の整理を行い、それに基づき研究開発計画を策定した。

第1段階として選定された分離核変換対象核種毎に、図 6.1 に示される高回収、廃棄物低減等の主要課題に対する現状と残る課題を整理したものを表 6.1 に示す。表 6.1 では、基礎・基盤研究と実用化戦略調査研究の両者を含む形で課題がリストアップされているが、実用化戦略調査研究で対応するものは識別して示してある。また、今後ますます厳しくなると予想される研究開発リソース（予算、マンパワー）を考慮して、ある程度のリソースを注いで実施する課題と小規模リソースながら長期的に着実に進める課題を分類して示した。

表 6.1 において、TRU に関する技術開発は、総じて実証のフェーズに入っていると言える。従って、TRU の回収率実績及び MA 含有燃料の製造実績、照射実績を示すこと等は実用化戦略調査研究で実施されるとして、基礎基盤研究としては TRU 一括分離回収、MA/Ln 高効率分離のプロセス成立性の見通しを得ること及び核変換特性評価精度向上等の技術の高度化に繋がる研究開発を中心に進める。

一方、FP に関する技術開発は、多くは研究開発のフェーズ（入り口）にあると言える。分離技術、核変換技術、有効利用技術等 FP を対象とすることで、多くの新技術が開拓されていく余地が残されている。従って、原子力技術の新たな展開に繋がる可能性を秘めた課題（FP 分離技術開発、ターゲット設計・製造・照射試験、希少元素 FP の有効利用）を優先する。特に、Sr、Cs、I、Tc、Mo、Pd の分離回収法を早急に確立し、I、Tc、についてはターゲット照射試験を早期に行い核変換実績を示すことが肝要である。

表 6.1 の内、基礎・基盤研究に関わる課題についてその概要を以下に述べる。

(1) 分離技術

(1.1) TRU 分離技術（共同研究契約が成立し実施に移されつつある。）

①一括分離回収

TRU 分離プロセスの経済性の向上を図るため、全アクチニドの一括抽出剤創生を目指して湿式法の研究開発を進める。新抽出剤及び新分離プロセスは“ソルトフリー”及び“グリーンケミストリー”のコンセプトに合致することを最終的な目標とするが、当面はロシア KRI との連携の下、*CMPO-TBP/Fluoropole* 溶媒による再処理／群分離の融合プロセスの創生を目指す。KRI との共研については、平成 14 年度から 3 カ年計画で進める。プロセス開発の基本要件としては、TRU 回収率 >99.9%、FP 除染係数 >10⁵ とし、希少元素/LLFP の分離ステップを組み込む方向で検討する。

②MA 分離・回収

TRU 核変換における炉特性の改良、燃料製造の負荷を軽減するため、MA/Ln 高効率分離配位子の創生を目指しての研究開発を開始する。新配位子は“ソルトフリー”及び“グリーンケミストリー”のコンセプトに合致することを最終的な目標とし、硫黄化合物 (*Cyanex301*) 及び窒素化合物 (*BTP*、*TPEN*) 等の既存分離剤の調査を経て、分離度 Ln/MA ≤5wt% を可能とするオリジナルな新ソフト化合物（大環状多環 N 化合物を候補とする）及び分離プロセスの創生を目指す。先行基礎研究の枠内での大学との共同研究を前提に、平成 14 年度から開始する。

(1.2) FP 分離技術（以下は予算処置も含め今後新たに実施に移していくものである。）

①元素分離・回収

これまでになされた大環状化合物による模擬 HLLW 中の Sr 及び Cs の単離技術の開発及び触媒的電解採取 (CEE) 法による白金族 (Pd、Ru、Rh)、Tc (Re)、Te 及び Se の群分離技術開発を踏まえながら、これら以外の方法も加えて幅広く技術を調査し、データベース化を図る。その上で“ソルトフリー”及び“グリーンケミストリー”の基本コンセプトの下、溶解液或いは高レベル廃液 (HLW) 中より、長寿命 FP (LLFP) 元素及び希少元素 FP を回収率 99% 以上、純度 99% 以上* (Mo 等安定元素については回収率、純度とも 90% 以上) で回収できる技術の開発を目指す。触媒的電解採取法の技術開発については、ロシア KRI 及び原研との共同研究を進める。

* 目標純度については今後の核変換ならびに有効利用の両面の検討から定める必要がある。

②同位体分離・回収

同位体分離が必要と考えられる核種 (Zr93、Cs135、Pd107 等) については、これまでになされたレーザー法による Pd105 の分離研究や、大学における新抽出剤 (ク

ラウンエーテル等) による Ba、Sr 同位体分離研究を踏まえながら、分離性、工学的成立性、経済性等総合的見地からそのフィージビリティを評価した上で開発を進める。なおロシア支援 ISTC における、「レーザー化学法による Cs 及び Rb の同位体分離研究」プロジェクトについては当該分野 (LLFP の同位体分離) において実体を有する唯一の研究開発プログラムであることから積極的に支援する (平成 14 ~ 平成 16)。また、国内の各種公募研究への応募や、国内の大学を中心に研究協力の相手先の探索を継続する。

(2) 核変換技術

① TRU 燃料製造・照射試験 (実用化戦略調査研究の一環として実施予定)

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、被覆管内面腐蝕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残ることから、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。2003 年度の実用化戦略調査研究中間評価及び 2004 年度に予想される分離核変換研究の課題評価までに、MA 燃料の製造実績と照射試験計画をアウトプットする。

② LLFP ターゲット製造 (基礎データ集積は一部実施に移されている。)

MA については均質装荷が基本であるため、LLFP がターゲット製造の対象となり、ターゲット本体と減速材から成るターゲット集合体の設計及び製造技術開発のための基礎データ集積が課題となる。当面は I、Tc を対象にターゲット材の化合物選定とその設計用物性値整備及びターゲット製造法の調査・研究を進める、また、減速材としての候補材の設計用物性値整備を同時に進める。さらに、長期的には、核変換対象核種を上記 2 核種以外にも広げて整備を行う。

③ LLFP の高速炉での核変換

i). 核データ (共同研究契約が成立し実施に移されつつある。)

MA 及び LLFP の核データ整備状況は決して満足のものではない (表 6.2 及び表 6.3 に核データ整備の現状を示す)。 今後は表 6.2 及び表 6.3 において測定値の無いもの、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が、当面は測定データが皆無である Se79、Zr93、Pd107 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る。

ii). 照射試験 (予算処置も含め今後新たに実施に移していくものである。)

炉内条件における化合物の安定性、被覆管との共存性等を確認することが重要であり、核種によっては核変換率の実測データを得ることも重要な目的となる。現時点では試験計画を具体化するには至っていないが、2007年以降「常陽」で Tc、I を対象に照射試験を行うべく計画立案を含めた準備を進める。

尚、仏国 CEA 等照射試験を積極的に展開している機関との情報交換により、効率的に進めるよう留意する。

iii). 核変換効率向上

核変換をより有意なものとするためには、現状の核変換率 (高々10%) では不十分である。ターゲット集合体の構造や装荷方法の検討以外に、より高い中性子束が得られる炉心の検討も進める。

Cs135 については、Cs の元素分離を前提としたときの核変換可能性を必要に応じて照射試験までを視野に入れて検討し、安定、中半減期、長半減期の同位体が混在する Cs の分離変換上の扱いを明確にする。

(3) ターゲットリサイクル技術 (予算処置も含め今後新たに実施に移していくものである。)

LLFP を 90% 以上核変換により消滅させるためには、ターゲットのリサイクルが不可避と考えられる。このため、リサイクル方法の検討、照射済みターゲットからの元素あるいは同位体分離・回収法を含めリサイクルにあたっての課題抽出を行い、それら課題の解決を通してターゲットリサイクル技術の開発戦略を確立する。

(4) 希少元素 FP (白金族等) 利用技術 (実施されつつある。)

使用済み燃料 1 トン当たりキログラムオーダーで生成する Ru、Rh、Pd (白金族元素)、Tc、Se、Te 等の希少元素は、燃料電池の電極材料や水素製造・精製触媒、太陽光発電触媒として、また、医療分野等の特殊用途として将来的にその需要増加が予想される。これら希少元素の化学的利用分野調査を先ず行い、次に微弱放射線場での電解触媒能への影響評価を行い、ソフトエネルギー分野等での適用性確立に向けて研究開発を進める (平成 14~)。また中寿命 FP (Cs137, Sr90) の放射化学的利用についても基礎調査を進める。「化学的」並びに「放射化学的」利用技術研究については、先行基礎研究の枠内での大学との共同研究も盛り込み、平成 14 年度から基礎研究を開始する。

6.3 研究開発スケジュール

表 6.1 で整理した対象核種毎の課題についての研究開発スケジュールを図 6.2 に示す。図 6.2 は表 6.1 において対象核種と課題に対して付した分類番号（例えば、核種 TRU の課題“高回収”の場合は 101-01）で整理して作成している。また、2003 年度の実用化戦略調査研究中間評価及び 2004 年度に予想される分離核変換研究の課題評価までの主要アウトプットも示した。

6.4 第 2 段階の研究開発の進め方

第 2 段階については、現状技術の高度化で対応可能なもの（不要元素 F P の分離回収、希少元素 F P の分離・有効利用、核データ整備等）とブレークスルーが必要なもの（TRU の高回収、F P の同位体分離、核変換率向上等）に分けられる。前者については第 1 段階の延長上で開発を進め、後者については大学等との連携を効果的に生かして革新的概念をさらに追求していく。一例として、同位体分離への取り組み案を図 6.3 に示す。

以上をまとめて、研究開発の全体スケジュールを図 6.4 に示す。

尚、2005 年度から原研との統合を控えているが、FBR を用いた分離変換を進めるサイクル機構と ADS を用いた分離変換を進める原研とで役割分担してきた経緯を踏まえ、その延長上で図 6.5 に示す相乗効果を発揮していく。

7. 国内外の研究機関との協力

長寿命核種の分離核変換技術については、種々の概念や方法が提唱され研究が進められているが、それらの間には共通課題が多いため、国内外の研究機関、大学等と協力して研究開発を進めていく。特に、「常陽」/PHENIX 照射試験をはじめとした情報交換を行っている仏国、最近この分野でも積極的な活動を開始した米国との協力関係を一層推進していく。また、平成 17 年度からの統合が決定している原研とは円滑に統合に入れるよう情報交換や研究協力を密にしていく。更に、東工大を中心に大学等と独創的なアイデアを活かした研究に対する協力も積極的に進めるものとする。図 7.1 に国内外の研究機関との協力関係を示す。

8. 体制

本研究の実施体制を図 8.1 に示す。基礎・基盤研究に関係する人員は現状で 15 名程度である（但し、専従ではない）。

今後も人員増を見込みにくい状況の中、国内外の研究機関、大学等との共同研究、

研究協力を強化し、少ない人員でより効果の上がる効率的な研究を進めていく。

9. 資金計画

分離核変換技術の基礎・基盤研究に関する今後5年間の資金計画を過去2年間の実績と共に表9.1に示す。

原研との統合、独立行政法人化等を控え、資金計画を見通しにくい状況であるが、過去2年間の実績を踏まえ可能な限り実体に即した資金計画とした。平成15年度から5年間の合計で約4億円が見積もられる。

尚、一般会計からの予算充当がますます厳しくなることが予想されるため、各種公募研究への応募や、効率的な資金運用が可能な共同研究を積極的に進めていく。

10. 期待される成果及び反映先

本研究により以下の成果が期待できる。

〔分離技術〕

- ・ TRU分離としてスマートで簡素且つソルトフリー及びグリーンケミストリーのコンセプトに合致する TRU一括分離・回収法の確立
- ・ MA/Ln分離については、高効率分離配位子創生による $Ln/MA \leq 5\%$ の達成
- ・ LLFP 元素、Mo 等安定元素及び希少元素を高回収率、高純度で回収可能な技術の確立
- ・ 同位体分離のフィージビリティ明確化と必要に応じての同位体分離技術開発

〔核変換技術〕

- ・ MA 添加燃料の設計用物性値整備及び照射による燃料健全性確認
- ・ LLFP ターゲットの設計及び製造技術開発のための基礎データ集積
- ・ 測定データが皆無あるいは精度が 50%以上の LLFP 核データ整備
- ・ LLFP ターゲットの照射試験
- ・ 現状の核変換率（高々10%）を上回る核変換率の達成

〔ターゲットリサイクル技術〕

- ・ ターゲットリサイクル技術の確立

〔希少元素利用技術〕

- ・ 各種触媒等ソフトエネルギー分野、医療分野等での希少元素適用性確立

これら研究成果は、逐次 FBR サイクル実用化戦略調査研究に反映する。また、「常陽」、「もんじゅ」の利活用計画の検討にも反映していく。

—— 平成12年8月の課題評価（事前評価）との主な相違点 ——

- ・ 分離核変換の意義の見直し
- ・ 研究開発目標の明確化
- ・ 分離核変換対象核種の明確化
- ・ MA、FP に対する考え方の明確化（例、TRU 一括分離リサイクル、FP の4種類への分類と FP に対する積極的取り組み）
- ・ 研究開発計画のより具体化

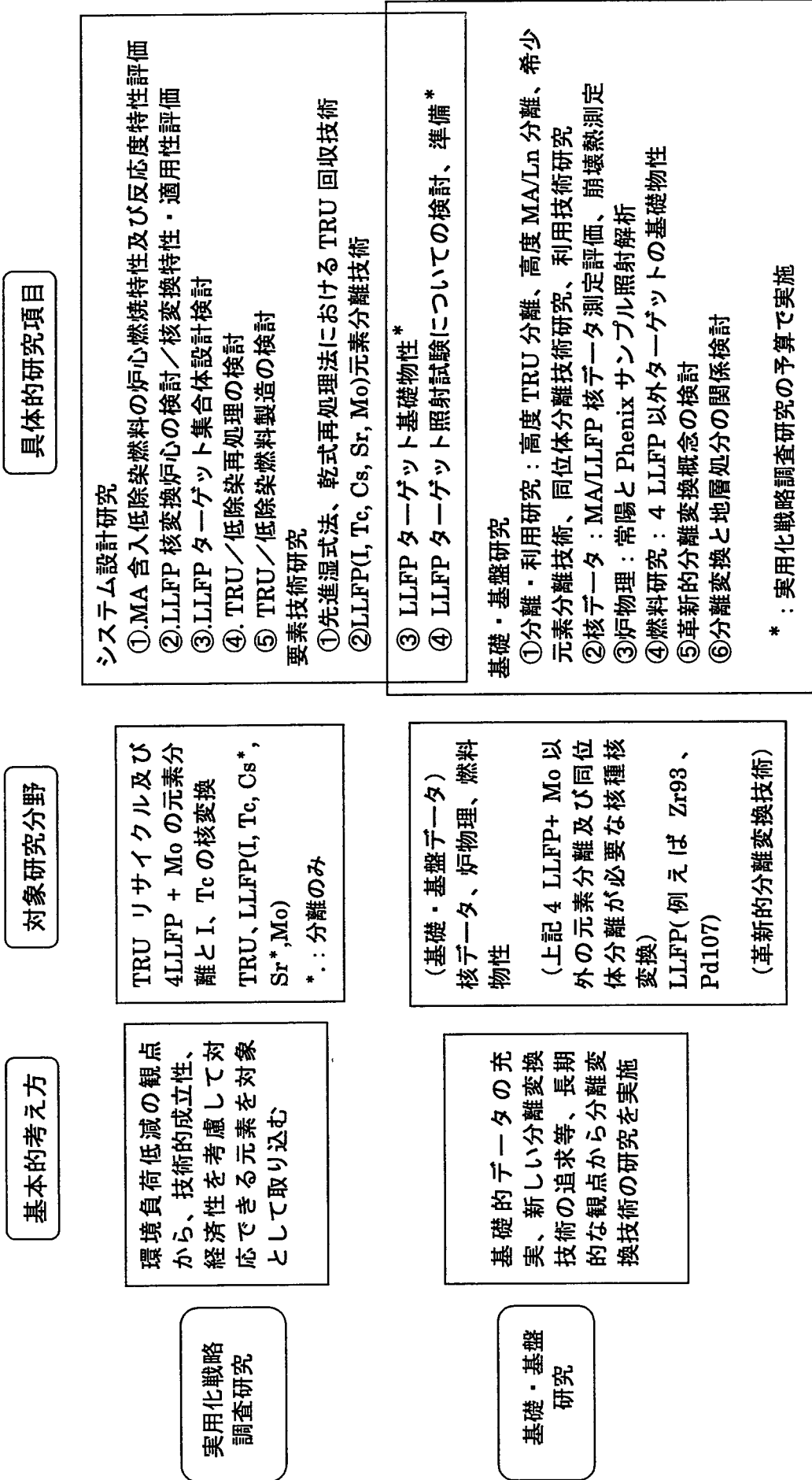


図 3.1 長寿命核種の分離変換技術研究開発の役割分担

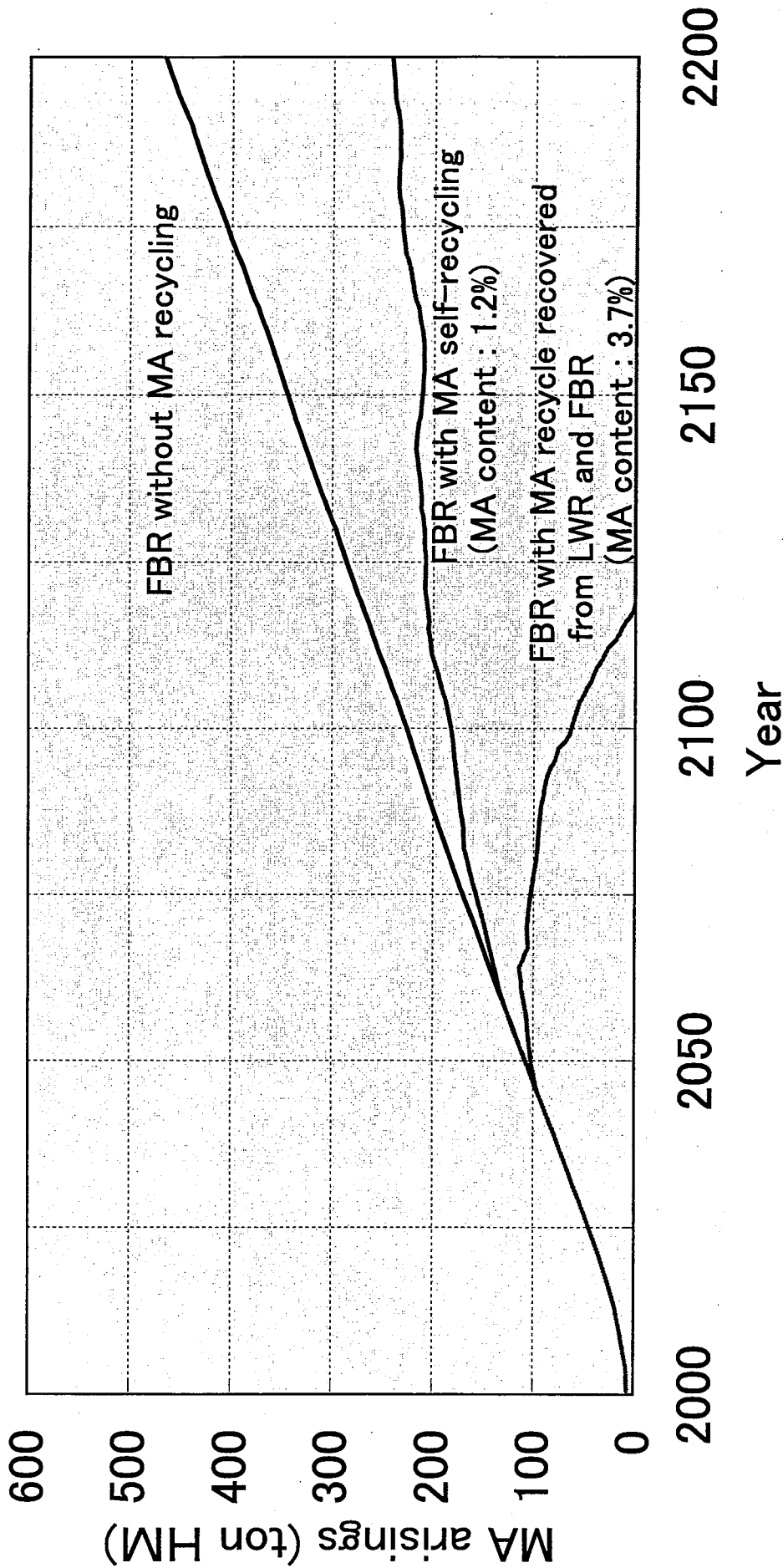


図3.2 FBRサイクルにおけるMA蓄積量

表 4.1 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、地層処分への負担軽減(1/2)*、被爆リスク低減(1/10)に寄与するFPの分離・核変換を進め、さらに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、地層処分への負担軽減(1/5)*、被爆リスク低減(1/100)に寄与するFPの分離・核変換を進め、さらに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)	放射性廃棄物の負担を後世に残さないよう、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一代相当で供給した天然ウラン以下にする。 また、第2処分場を極力不要とするよう地層処分の負担を軽減し、被爆リスクを現実的に問題にならないレベルに低減し、さらに有効利用可能な希少有用元素分離により放射性廃棄物のポジティブ面を助長する。	理想の目標である。 技術的成立性の観点ではなく、研究開発の方向性を示すものである。
------------	---	--

* : 暫定的に設定したものの、今後得られる知見を反映して見直す必要がある。

図4.1 分離核変換技術開発目標の海外との比較
(1000年後の放射性毒性について)

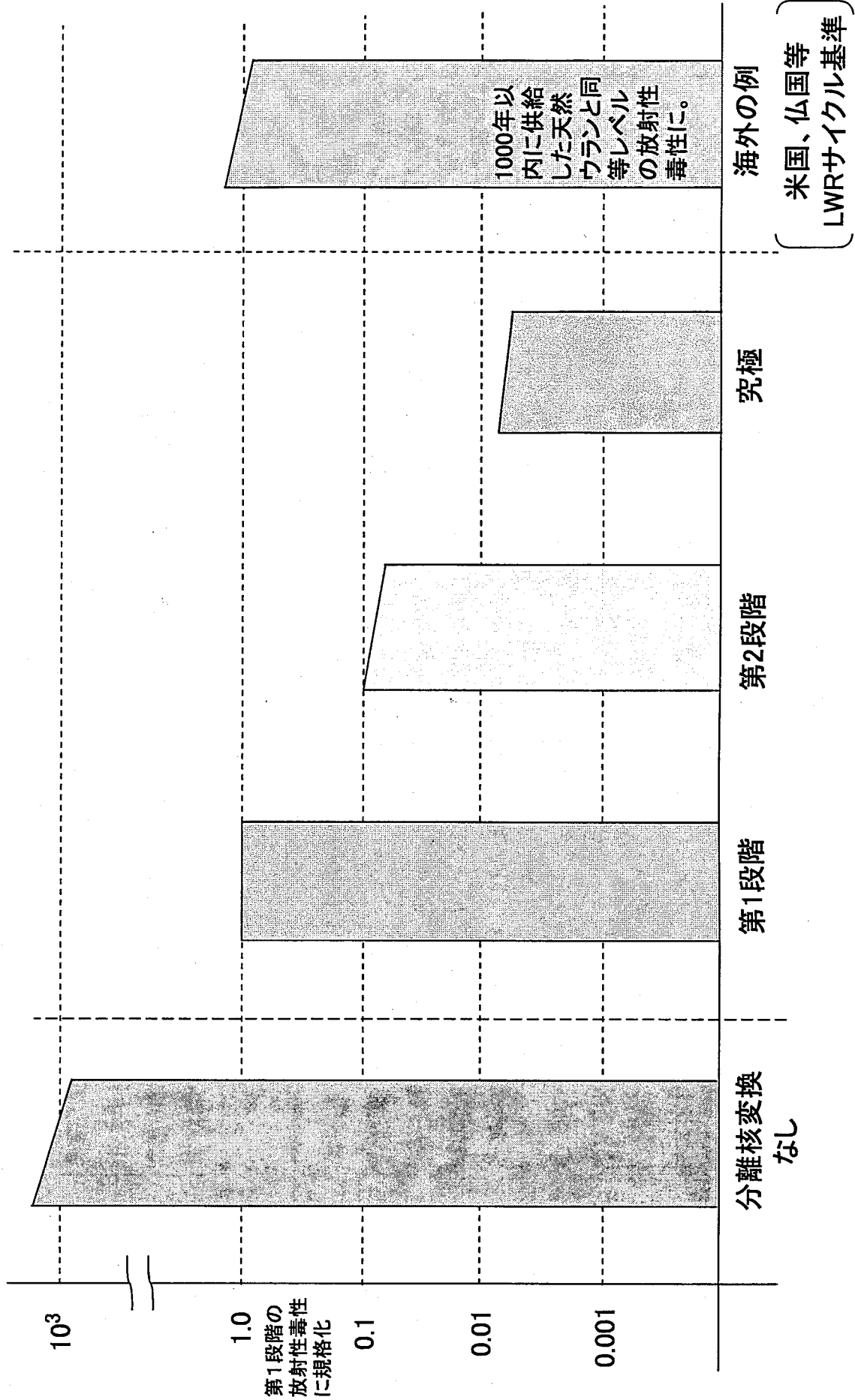


表5.1 分離核変換対象核種

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)		地層処分の観点		有効利用の観点 (基本的に分離のみ)	
	放射能	放射性毒性	被曝リスク低減 (分離&核変換)	処分場面積等削減 (分離のみ)	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%) Pu,Am (99.9%) Tc99 (99%)	U,Np,Am,Cm (99%) Pu (99.9%)	(1/100に低減)* I (90%)	(1/2に低減)* Sr, Cs (<90%) Mo (<80%)	Pd, Tc	熱源: Cs, Sr 放射線源: Cs
第2段階 (中間) 15年程度を目 安に実験室レ 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%)	(1/100に低減)* I (99%) C14, Cl36 (放射化生成物) (1/10)	(1/5に低減)* Sr, Cs, (99%) Mo, Nd, Ru, Rh, Ce, Pr, Ba, La, Te, Gd, Rb, Y, Pd	Pd, Tc, Ru, Rh, Se, Te	Cs, Sr, Ru, Rh, Pd

注) カッコ内数値はシステム全体としての回収率



* : 暫定的に設定したものの。今後見直す予定。

究極 (理想)	放射性廃棄物の負担を後世に残さないよう、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一代相当で供給した天然ウラン以下にする。 また、第2処分場を極力不要とするよう地層処分の負担軽減し、被曝リスクを実質的に問題にならないレベルに低減し、さらに有効利用可能な希少有用元素分離により放射性廃棄物のポジティブ面を助長する。
------------	--

図6.1 分離核変換技術の主要課題

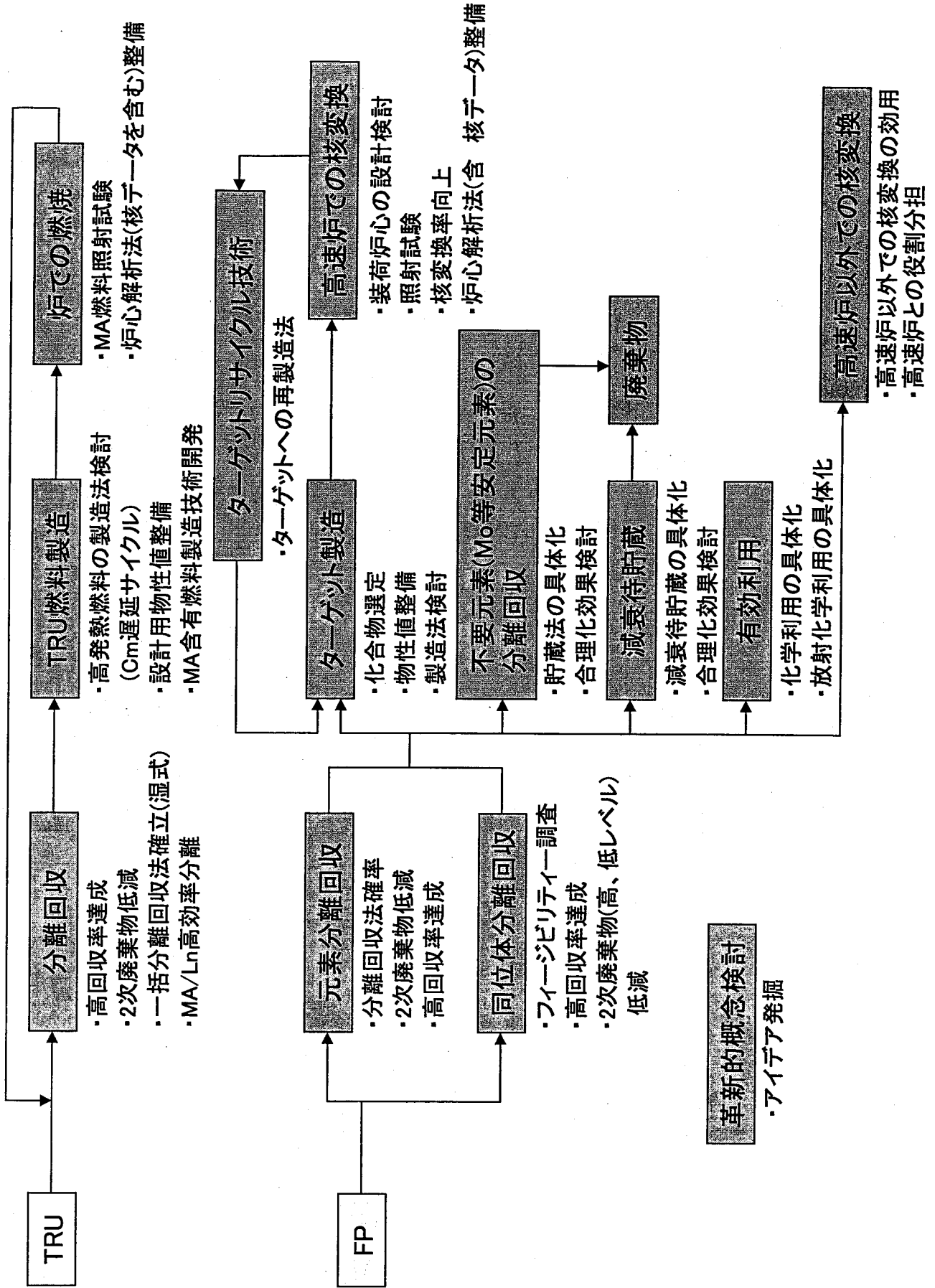


表 6.1 分離変換対象核種毎の課題整理

○第1段階

◇前提条件：実用化戦略調査研究、及び基礎・基盤研究の両者を含む。

Na 冷却炉、燃料形態(MOX 燃料; 主、金属燃料; 従)、TRU 均質装荷、FP 元素分離

分類 I : ある程度のリソース(予算、マンパワー)を注いで実施する課題

分類 II : 小規模リソースながら長期的に着実に進める課題

☆: 実用化戦略調査研究にて対応

核種	分離変換上の扱い	課題	課題に対する現状	残る課題 (5年間に拘らず、課題解決まで)	分類
101		101-01	湿式再処理(SETFICS) -システムで99.7%程度、分離プロセス側は99.995%程度 乾式再処理 -システムで97~99%程度、分離プロセス側は99.8%程度 ペレット燃料製造 -99.9%以上 振動充填燃料製造 -99~99.5%(ペレット法より高い回収率が期待できるが裏付けデータ無し): 湿式再処理対応(ゲル化)振動充填燃料製造プロセスにおいては微粉の発生を抑えることが期待でき、TRUの廃棄物への移行はペレットに比べ低くできる可能性がある。 乾式再処理対応の振動充填燃料製造では微粉取扱い工程がありTRUの廃棄物への移行率はペレットと同等と考えられる。 鑄造燃料製造 -99.5%	湿式再処理 ☆不溶解残さ低減とフロントエンドの高除染・回収性能向上 ☆前工程、機器付着物の徹底回収 ・代替技術開発 乾式再処理 ☆実回収率の明確化が先決 ☆基本プロセスの分離性能向上と、前工程、機器付着物の徹底回収 ☆実験による絞り電解工程の確認 ペレット燃料製造、振動充填燃料製造 ☆製造プロセスにおけるTRU移行挙動の検討評価、粉体のセル内飛散防止機能 を有する機器開発、微粉の回収、サンプリングに伴うロスの低減、廃棄機器からの 除染・回収、回収スクラップのリサイクル 鑄造燃料製造 ☆製造プロセスにおけるTRU移行挙動の検討評価、廃モールドへの付着低減、ド ロスからの回収、サンプリングに伴うロスの低減、廃棄機器からの除染・回収、回収 スクラップのリサイクル☆金型鑄型(再利用可能)の開発、	I

<p>101-02</p> <p>・廃棄物低減</p>	<p>湿式再処理 (SETFICS)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現行との比で高レベル廃棄物が1.4倍、TRU 廃棄物(深地層):1.07本/tHM、(内集合体部材:0.69本/tHM) TRU 廃棄物(余裕深度):0.08本/tHM TRU 廃棄物(浅地層):0.59本/tHM <p>乾式再処理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現行との比で高レベル廃棄物が0.8~3倍 ・TRU 廃棄物は未詳 <p>ペレット燃料製造</p> <ul style="list-style-type: none"> ・TRU 廃棄物(深地層):0.16本/tHM、TRU 廃棄物(浅地層):0.52本/tHM <p>振動充填燃料製造</p> <ul style="list-style-type: none"> ・TRU 廃棄物(深地層):0.02~0.18本/tHM、TRU 廃棄物(浅地層):0.12~0.66本/tHM <p>鑄造燃料製造</p> <ul style="list-style-type: none"> ・TRU 廃棄物(深地層):0.62本/tHM、TRU 廃棄物(浅地層):0.18本/tHM 	<p>湿式再処理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Ln 分離工程のソルトフリー化 ・PUREX のソルトフリー化(有機溶媒、無塩試薬) ・単サイクル共抽出 ・水晶析法の確立 ・代替補充技術(アミン抽出、直接抽出等)による廃棄物発生量低減の見直し <p>乾式再処理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物発生の実態把握(量と形態)が先決 ・機器類廃棄物の低減 ・ペレット燃料製造、振動充填燃料製造 ・TRU の高除染・回収による汚染低下(深地層 TRU 処分体の低減)、廃棄機器の長寿命化 ・溶融減容、機器の長寿命化 <p>鑄造燃料製造</p> <ul style="list-style-type: none"> ・モールドの薄肉化、TRU の高除染・回収による汚染低下(深地層 TRU 処分体の低減)、廃棄機器の溶融減容、機器の長寿命化 ・TRU 付着廃モールドのガラス固化体への利用 	<p>I</p>
<p>101-03</p> <p>・アクチノイド一括分離回収</p>	<p>湿式再処理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・抽出プロセス化学の成立性の確認(ロシア(KR)共研 H14~16) <p>乾式再処理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・金属電解法では Cd 電極 / 生成自由エネルギーの関係から全アクチノイドの同時析出の達成が可能 ・酸化物電解法では電位操作法で達成見通し(コメント:電位操作としては約10段階) 	<p>湿式再処理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・回収率の根拠となる実溶液液を用いた多段向流抽出挙動 ・有機廃棄物処理上、極性希釈剤中のフッ素原子が廃棄物処分上の問題となる可能性有り。→無害の処理法の開発又は、新たな Salt-Free 分子の創製。 <p>乾式再処理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・電位操作条件での TRU/Ln 析出挙動 	<p>II</p>
<p>101-04</p> <p>・MA/Ln 高効率分離</p>	<p>湿式再処理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・C₂H₂O₂N 原子のみで構成するソフト分離配位子創製研究(先行基礎工学研究 H14~16)。当 Am/全 Ln 分離係数=100を目標 <p>乾式再処理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・金属電解法では TRU 抽出とゼオライト吸着法の組み合わせによる高度分離が可能 ・酸化物電解法では MA を絞り電解で回収後、リン酸沈殿とし Ln を回収 ・何れの方法も Ln にはアルカリ土類が同伴 	<p>湿式再処理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・分離係数確認のための、実高レベル廃液を用いた多段向流抽出挙動 ・陽イオン交換、炭酸沈殿 <p>乾式再処理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・重ランタニド核種の分離挙動 	<p>II</p>

		<p>101-05 ・高発熱燃料の製造法検討(Gm分離の必要性)</p>	<p>・横置き自然冷却集合体の被覆管温度 MA1.2%の場合:470°C、MA2%の場合:547°C、 MA5%の場合:802°C、 ・遅延サイクルの概略検討実施</p>	<p>☆遅延サイクルを前提としての製造法確立(冷却期間、冷却貯蔵法、冷却後燃料製造法等) ☆製造工程における取扱い燃料の制限温度の検討 ☆燃料製造におけるGm遅延サイクルのコストメリット検討 ☆保管MAの燃料製造工程への供給プロセスの検討</p>	I
		<p>101-06 ・MA含有燃料製造技術開発</p>	<p>MOX燃料 ・物性値文献調査の段階 ・ペレット作製のウラン、プルトニウム試験 ・振動充填燃料はPSI共研で製造試験</p>	<p>☆実験による物性値確認試験(MA添加効果、低除染効果) ☆Am-MOXペレット作製技術(粉末特性、焼結特性把握)確立 ☆MA-MOX振動充填燃料作製技術確立 ☆品質保証分析、検査技術確立 ☆模擬低除染TRU燃料試作試験(Np-MOX燃料) ☆ショートプロセス技術確認試験 ☆リサイクル燃料製造試験(Am-MOX燃料)</p>	I
		<p>101-07 ・MA燃料照射試験</p>	<p>・「常陽」でMA-MOX燃料照射試験を2005年から開始予定 ・Phenix炉でMA-金属燃料照射試験を数年以内に開始予定 ・オランダのHFRでスフェアパックNp-MOX燃料照射試験を数年以内に開始予定</p>	<p>☆「常陽」での照射試験による照射挙動把握 ☆PIEによる健全性評価及び照射後MA燃料物性値取得</p>	I
		<p>101-08 ・炉心解析法(核子ータを含む)整備</p>	<p>・炉心設計においては高精度を要求しなければ現状でも十分対応可能なレベルにある ・MA核分裂反応子ータの充実 ・一部の核種の核子ータは30~50%の精度</p>	<p>・MAまでを含む核種量解析手法の検証 ・核燃料サイクル設計のための核種評価目標精度の設定(例:崩壊熱の寄与核種の予測精度を20%程度に) ・Phenix炉でのPROFIL-R計画または同計画に替わる検証実験の実施 ・上記目標達成に必要な核子ータの精度向上(高次Pu・MA捕獲反応、Am-241分岐比)</p>	II
<p>102 Sr, Cs</p>	<p>分離・回収後減衰待ち貯蔵浅地層処分又は放射化学利用</p>	<p>102-01 分離回収法確立(90%目標)</p> <p>102-02 減衰待ち貯蔵の具体化</p>	<p>湿式再処理 ・溶媒抽出で最大99%程度(沈殿法で90%程度) 乾式再処理 ・回収率不詳</p> <p>・概略検討実施(FS電共研) Cs,Srの一括分離/一時貯蔵及びCs,Srの個別分離/Csの一時貯蔵</p>	<p>☆有望分離法の選定(SREX法、ChCoDIC法、脱硝沈殿法等) ☆選定された分離法の検証、実証試験 ・溶媒抽出法に関しては、放射化学的、工学的に成立しうる抽出剤分子の開発 ☆回収率確認のための実液を用いた多段階抽出挙動 ☆2次廃棄物低減 ☆貯蔵法(化学形態、容器、場所、冷却の有無、期間等)の検討</p>	I

		<p>102-03 処理・処分の合理化効果評価</p>	<p>・概略検討実施 (FS電共研) 10~40%のコスト削減効果有り ・概略検討実施 (東海処分Gr) 定性的には効果があるが、設計依存のため一般性のある定量評価は難しい ・浅地層処分により処分場面積を約1/2に低減可能 (東海大、大江) ・熱利用の可能性検討 (先行基礎工学研究 H14~16)</p>	<p>☆処理・処分の具体的方策検討 ☆合理化効果については、処理・処分の合理化/高度化の一環として検討評価</p>	<p>II</p>
		<p>102-04 放射化学利用の具体化</p>		<p>・熱利用の具体化 ・放射線源としての利用法検討</p>	<p>II</p>
<p>103 I</p>	<p>分離・回収後核変換</p>	<p>103-01 分離回収法確立 (99%目標)</p>	<p>湿式再処理 ・吸着法で99%程度 (フィルター回収) 乾式再処理 ・回収率不詳 ・金属電解法ではオフガスと塩中でClと置換し廃棄物塩となるものが存在 ・酸化物電解法では塩素ガスを吹き込むためほぼ全量がオフガスへ移行</p>	<p>☆フィルター回収後の処理法 ・溶解工程での PdI₂コロイド、抽出工程での CH₃I など工程内微量ヨウ素の問題? ☆2次廃棄物低減 ☆塩素とヨウ素の混合系からのヨウ素分離方法の確立 (乾式)</p>	<p>I</p>
		<p>103-02 ターゲット製造法検討 (含む化合物選定、物性値整備)</p>	<p>・ターゲットの設計検討中 ・化合物の1次選定終了 ・物性値は文献調査段階 ・減速材物質の1次選定終了。減速材物性値実験データを取得中 ・製造技術開発については no activity</p>	<p>☆化合物の絞り込み ☆実験による物性値確認試験 ☆減速材物質の絞り込み及び実験による物性値確認試験 ☆再処理での回収 (化学) 形態からターゲットへの製造法検討および製造試験 ☆リサイクルを考慮したターゲット材要素と減速材要素の構造検討 ☆減速材リサイクルあるいは減速材廃棄プロセスの検討 (まずは要否を検討)</p>	<p>I</p>
		<p>103-03 照射試験</p>	<p>・試験計画立案に入らうとする段階 ・東電は HFR にて照射試験実施 (NaI, CaI, MgI, CuI)</p>	<p>☆試験計画の具体化 ☆許認可、試験体製作、照射試験、照射後試験 (当面は安定元素で模擬。核変換実証試験を計画する場合は、I-129 の調達方法及び試験体製造施設について検討が必要)</p>	<p>II</p>
		<p>103-04 核変換率向上</p>	<p>・減速材比率、装荷場所をパラメータとした解析評価 ・最大で10%/cycle程度</p>	<p>・核変換率向上方策検討 ・高中性子束炉の研究</p>	<p>II</p>
		<p>103-05 ターゲットリサイクル技術</p>	<p>・no activity</p>	<p>☆長期照射によるリサイクル回数低減 (最適リサイクル数) の検討 ・分離・回収法の検討 (ターゲットへの再製造法)</p>	<p>II</p>

104	Tc 分離・回 収後核変 換又は化 学利用	103-06 炉心解析法(核 データを含む)整 備	<ul style="list-style-type: none"> ・高速炉設計計算法+モンテカルロ計算補正 ・I-129 核データの充実 	<ul style="list-style-type: none"> ・決定論による詳細解析法開発 ・核データの充実 	II
		103-07 装荷炉心の設計 検討	<ul style="list-style-type: none"> ・核熱+熱流+材料健全性の観点から LLFP 集合体及びそれを装荷した炉心の工学的設計検討実施 ・核的成立性に加え、熱的、構造材料的成立性を考慮すると、核変換率 10%を達成することは困難 	<ul style="list-style-type: none"> ☆ターゲットの溶解可否の考え方整理 ☆製造性、健全性、再処理性、変換特性等に配慮した総合的観点からの LLFP 集合体設計 	I
104	Tc 分離・回 収後核変 換又は化 学利用	104-01 分離回収法確立 (99%目標)	<ul style="list-style-type: none"> 湿式再処理 ・多段回収で99%程度 ・触媒的電解採取法で模擬 Re イオンにより析出を確認 ・Tc の単味電気化学挙動及び実溶解液中からの析出挙動の確認(ロシア共研及び原研共研 H14~16) 乾式再処理 ・回収率不詳 	<ul style="list-style-type: none"> ☆有望分離法の選定 ☆選定された分離法の検証、実証試験 ☆触媒的電解採取法による回収率確認のための、実高レベル廃液を用いたシステムティックな試験 ☆2次廃棄物低減 	I
		104-02 ターゲット製造法 検討(含む物性 値整備)	<ul style="list-style-type: none"> ・ターゲットの設計検討中 ・物性値は文献調査段階 ・減速材物質の1次選定終了。減速材物性値実験データを取得中 ・製造技術開発については no activity 	<ul style="list-style-type: none"> ☆実験による物性値確認試験 ☆減速材物質の絞り込み及び実験からターゲットへの物性値確認試験 ☆再処理での回収(化学)形態からターゲットへの製造法検討および製造試験 ☆リサイクルを考慮したターゲット材要素と減速材要素の構造検討 ☆減速材リサイクルあるいは減速材廃棄プロセスの検討(まずは要否を検討) 	I
		104-03 照射試験	<ul style="list-style-type: none"> ・試験計画立案に入ろうとする段階 	<ul style="list-style-type: none"> ☆試験計画の具体化 ☆許可、試験体製作、照射試験、照射後試験 (Tc の調達方法及び試験体製造施設の検討が必要) 	II
		104-04 核変換率向上	<ul style="list-style-type: none"> ・減速材比率、装荷場所をパラメータとした解析評価 ・最大で5%/cycle 程度 	<ul style="list-style-type: none"> ・高中性子束炉の研究 ・高速度炉以外での核変換検討 	II
		104-05 ターゲットリサイ クル技術	<ul style="list-style-type: none"> ・no activity 	<ul style="list-style-type: none"> ☆長期照射によるリサイクル回数低減の検討(最適リサイクル数) ・分離・回収法の検討(ターゲットへの再製造法) 	II

105 Mo	分離・回収後浅地层処分	104-06 炉心解析法(核データを含む)整備	<ul style="list-style-type: none"> 高速炉設計計算法+モンテカルロ計算補正 Tc-99 核データの充実 	<ul style="list-style-type: none"> 決定論による詳細解析法開発 核データの充実 	II
		104-07 化学利用の具体化	<ul style="list-style-type: none"> 利用二一ズ調査 Tcナノ粒子の生成メカニズム、FP 吸着特性の検討(先行基礎工学研究 H14~16) 	<ul style="list-style-type: none"> 利用分野の拡大のための、基礎物理化学特性の調査。 マクロ量の Tc を用いた工学試験(例えば新材料開発、新触媒) 	II
		104-08 装荷炉心の設計検討	<ul style="list-style-type: none"> 核熱+熱流力+材料健全性の観点から LLFP 集合体及びそれを装荷した炉心の工学的設計検討実施 核的成立性に加え、熱的、構造材料的成立性を考慮すると、核変換率 10%を達成することは困難 	<ul style="list-style-type: none"> ☆ターゲット材の溶融可否の考え方整理 ☆製造性、健全性、再処理性、変換特性等に配慮した総合的観点からの LLFP 集合体設計 ☆ターゲット材の溶融可否の考え方整理 ☆製造性、健全性、再処理性、変換特性等に配慮した総合的観点からの LLFP 集合体設計 	I
105 Mo	分離・回収後浅地层処分	105-01 分離回収法確立(80%目標)	<ul style="list-style-type: none"> 湿式再処理 触媒的電解採取法では電解過程での硝酸濃度の低下により Mo-Zr の共沈が生ずる(コメント:酸濃度低下に伴う沈殿の発生は以前から知られている)(ただし、沈殿物の物理化学的性状及び回収率の把握には至っていない)。 乾式再処理 回収率不詳 	<ul style="list-style-type: none"> ☆有望分離法の選定 ☆選定された分離法の確証、実証試験 ☆触媒的電解採取法を用いて回収するのであれば、溶液中の沈殿物の性状把握、工学的分離・回収法、除染法等をシステムティックに検討する必要がある。 ☆2次廃棄物低減 	II
		105-02 貯蔵法の具体化	<ul style="list-style-type: none"> no activity 	<ul style="list-style-type: none"> ☆貯蔵法(化学形態、容器、場所、冷却の有無、期間等)の検討 	II
		105-03 処理・処分の合理化効果評価	<ul style="list-style-type: none"> Mo,Pd,Ru の除去によりガラス固化体が約1/2になる 	<ul style="list-style-type: none"> 処理・処分の具体的方策検討 合理化効果については、処理・処分の合理化/高度化の一環として検討評価 	II

106 Pd	分離・回収後触媒等化学利用	106-01 分離回収法確立	<p>湿式再処理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・触媒的電解採取法では高効率(>99%)な析出特性を確保 ・実溶液液からの電解析出特性確認試験(原研共研 H14~16) <p>乾式再処理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・金属電解法では電解槽中の90%程度がCdプールへ移行し、一括して貴金属元素を回収 ・酸化物電解法では電解槽中の80%程度が、白金族FP除去電解により貴金属元素と一括して回収 	<ul style="list-style-type: none"> ・有望分離法の選定 ・選定された分離法の確認、実証試験 ・2次廃棄物低減 ・貴金属元素群からのPdの分離回収方法 	II
		106-02 触媒等化学利用の具体化(放射性物質として)	<ul style="list-style-type: none"> ・利用ニーズ調査 ・水電解による水素生成反応における回収Pdの触媒活性を他FP共存及びγ線照射効果の有無を中心に検討(H14~) 	<ul style="list-style-type: none"> ・水素製造用触媒としての適用性試験 	II

表 6.2 核データ整備の現状 (MA)

—MA の中性子断面積データの現状—

評価済み中性子核断面積データの整備 (JENDL-3.2 に基づく)

	(n, f) thermal	(n, f) fast	(n, γ) thermal	(n, γ) fast	(n, 2n)	(n, n')
²³⁷ Np	B	C	A	A	B	B
²⁴¹ Am	A	B	C	B	B	B
²⁴³ Am	C	B	A	B	C	C
²⁴³ Cm	A	B	C	C	D	D
²⁴⁴ Cm	A	C	B	C	C	C
²⁴⁵ Cm	A	B	A	C	C	C

精度

- A: 10%未満
- B: 30%未満
- C: 50%未満
- D: 50%以上

表 6.3 核データ整備の現状 (FP)
— 放射性 FP の中性子捕獲断面積データの現状 —

	総合評価	thermal	I_0	fast	備考
^{129}I	2	A	B	B	
^{107}Pd	2	N	N	B	
^{135}Cs	2	A	C	N	同位体分離されたサンプル必要
^{93}Zr	2	N	B	B	
^{79}Se	1	N	N	N	
^{126}Sn	1	N	N	N	サンプル入手困難
^{99}Tc	3	B	C	C	
^{14}C	2	C	N	N	
^{151}Sm	2	B	B	N	
^{137}Cs	2	C	C	N	
^{90}Sr	2	C	N	N	
$^{93\text{m}}\text{Nb}$	1	N	N	N	
$^{113\text{m}}\text{Cd}$	1	N	N	N	
^{85}Kr	2	C	B	N	

総合評価
 3 : データあり
 2 : 部分的データののみ
 1 : データ皆無

各データの精度
 S : 3%未満
 A : 10%未満
 B : 50%未満
 C : 50%以上
 N : 測定値なし

図6.2 分離核変換技術開発(1/15) (101-01) TRU -- 高回収

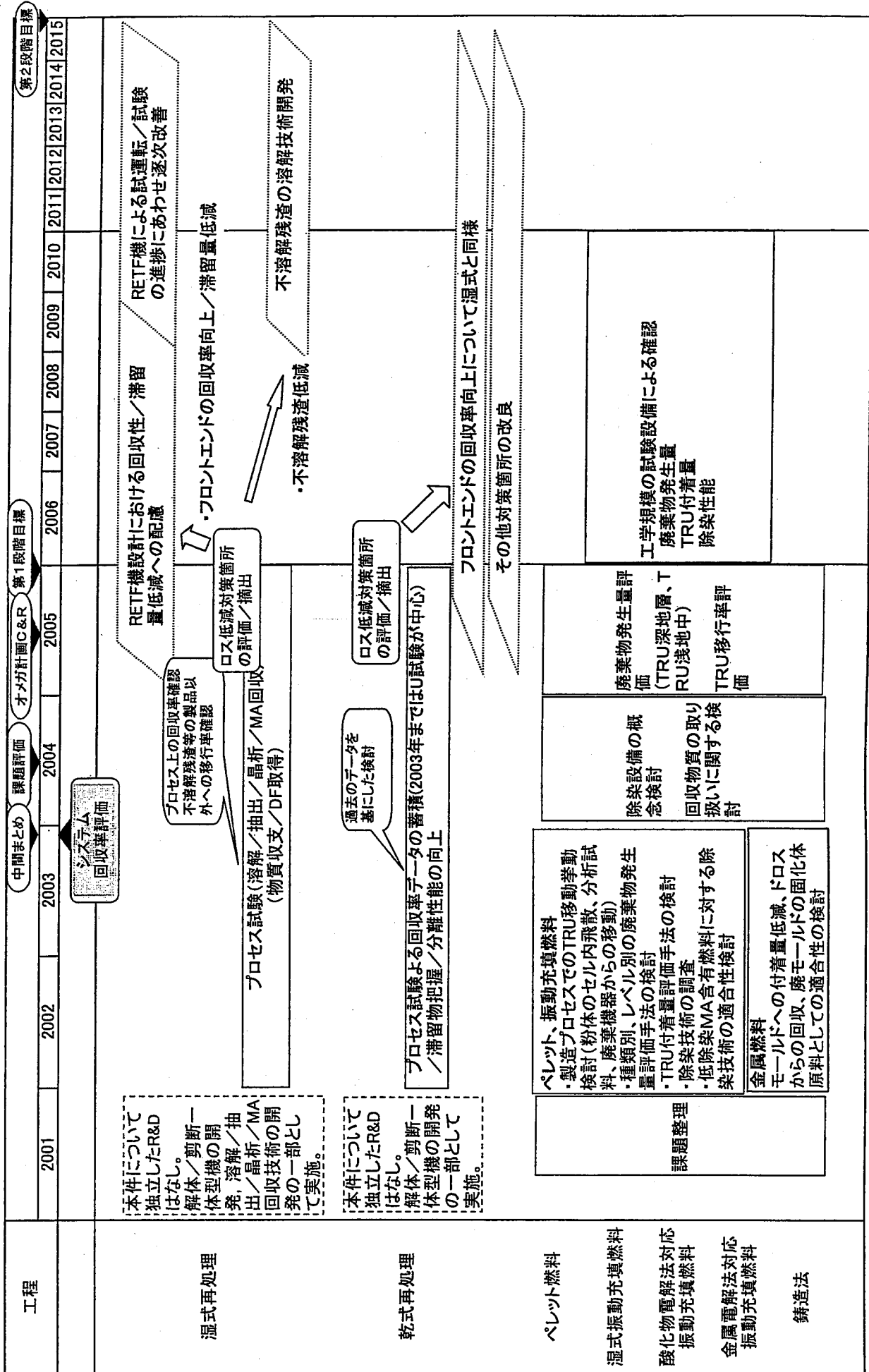


図6.2 分離核変換技術開発(2/15) (101-02) TRU -- 廃棄物低減

工程	中間まとめ			課題評価			オメガ計画C&R			第1段階目標			第2段階目標		
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
湿式再処理	<p>本件について独立したR&Dはなし。MA回収技術開発の中で実施</p> <p>MA回収プロセスの開発</p> <p>改良SETFICS等のMA回収技術のソルトフリー化</p> <p>TRU廃棄物発生量の評価 (以後の開発においても継続)</p> <p>ソルトフリー/MA回収プロセスの確認</p>														
	<p>機器の寿命の長期化による廃棄低減の検討(るつぼ材料の検討/機器の交換頻度の低減)</p> <p>プロセス廃棄物の把握/機器廃棄物の低減の検討(CPFの試験データの蓄積を逐次反映)</p>														
乾式再処理															
・湿式振動充填燃料															
・鑄造法															
システム共通(ペレット、乾式振動充填含む)															

図6.2 分離核変換技術開発(3/15) (101-03 & 101-04 & 101-05)
 TRU --- アクチニド一括分離回収&MA/Ln高効率分離&高発熱燃料の製造方法検討(Cm分離の必要性)

工程	第1段階目標										第2段階目標				
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
アクチニド一括分離															
湿式再処理	調査・予備検討			課題評価	ホット基礎試験(ロシアKRII共研) 抽出プロセス化学の成立性確認 実溶解液を用いた抽出挙動試験 (第1フェーズ研究)	プロセス検討		システム工学 評価							
乾式再処理	ANL、RIAR等の実験データを基にした プロセスの成立性評価			システムとの整合性検討 (OPFの試験結果は逐次反映)				国内外を問わず新しく取得される試験結果を基に、プロセスの分離性能について詳細検討							
MA/Ln高効率分離															
湿式再処理	調査			基礎研究 (H14年度先行基礎工学)											
				シリカ担持ハイポラーラス3級ポリジン樹脂(東工大共研) ・TPE, Calixpyridine, DVBTP(東工大 共研)	プロセス成立性 評価										
乾式再処理	調査/プロセス選定			プロセスの成立性評価 /システムとの整合性検討											
高発熱燃料の製造方法検討 各種燃料製造法 共通	燃料温度 評価	遅延サイクル 検討	保管MAの製造 工程への供給 プロセス検討	遅延サイクル製造法検討 (冷却期間、冷却貯蔵法、冷却後 燃料製造法)	Cm遅延サイク ルのコストメリッ ト検討										

図6.2 分離核変換技術開発(4/15) (101-06 & 101-07) TRU -- MA含有燃料製造技術開発 & MA燃料照射試験

工程	2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015	
	中間まとめ		課題評価		オメガ計画C&R		第1段階目標		第2段階目標																					
101-06	<p>酸素ポテンシャル、融点、相安定性等</p> <p>熱伝導率評価</p> <p>MA燃料製造実績 照射試験計画</p> <p>黒字:AGS 赤字:東海</p>																													
101-06	<p>Am-MOX燃料物性調査</p> <p>Am/低DF-MOX燃料物性調査</p> <p>Am-MOX物性測定装置性能試験</p> <p>Am-MOX物性値確認試験</p> <p>低DF-燃料物性測定技術開発</p> <p>原料粉末の熱特性、融点、相安定性等</p> <p>MA含有燃料物性基礎研究(大学共同研究)</p> <p>Pu原料粉焼結試験、MOX製造試験</p> <p>Am-MOX燃料 焼結試験</p> <p>Am-MOX燃料 照射試験 用試料作 製</p> <p>Am/Np/RE-MOXベ レットの調整</p> <p>低DF-原料粉 性状把握試験</p> <p>低DF-MOX燃料焼結試験</p> <p>品質保証分析 後査技術確立</p> <p>分析装置性能試験</p> <p>MOX及びAm-MOX燃料分析</p> <p>Am-MOX分析QA文書整備</p> <p>低DF-MOX 燃料分析 低DF-MOX分析QA文書 整備</p> <p>(日仏共研)</p>																													
101-07	<p>ホットラポ改造</p> <p>燃料ピン製造 (ペレット、スフェアバック[Np含 有]、バイバック)</p> <p>照射試験1 及UPIE</p> <p>照射試験2 まとめ 及UPIE</p> <p>照射計画立案</p> <p>照射試験準備</p> <p>照射リグ 組立</p> <p>照射</p> <p>照射後試験</p>																													
101-07	<p>Am-MOX「常隣」 照射試験</p>																													

図6.2 分離核変換技術開発(5/15) (101-08) TRU -- 炉心解析法(核データを含む)整備

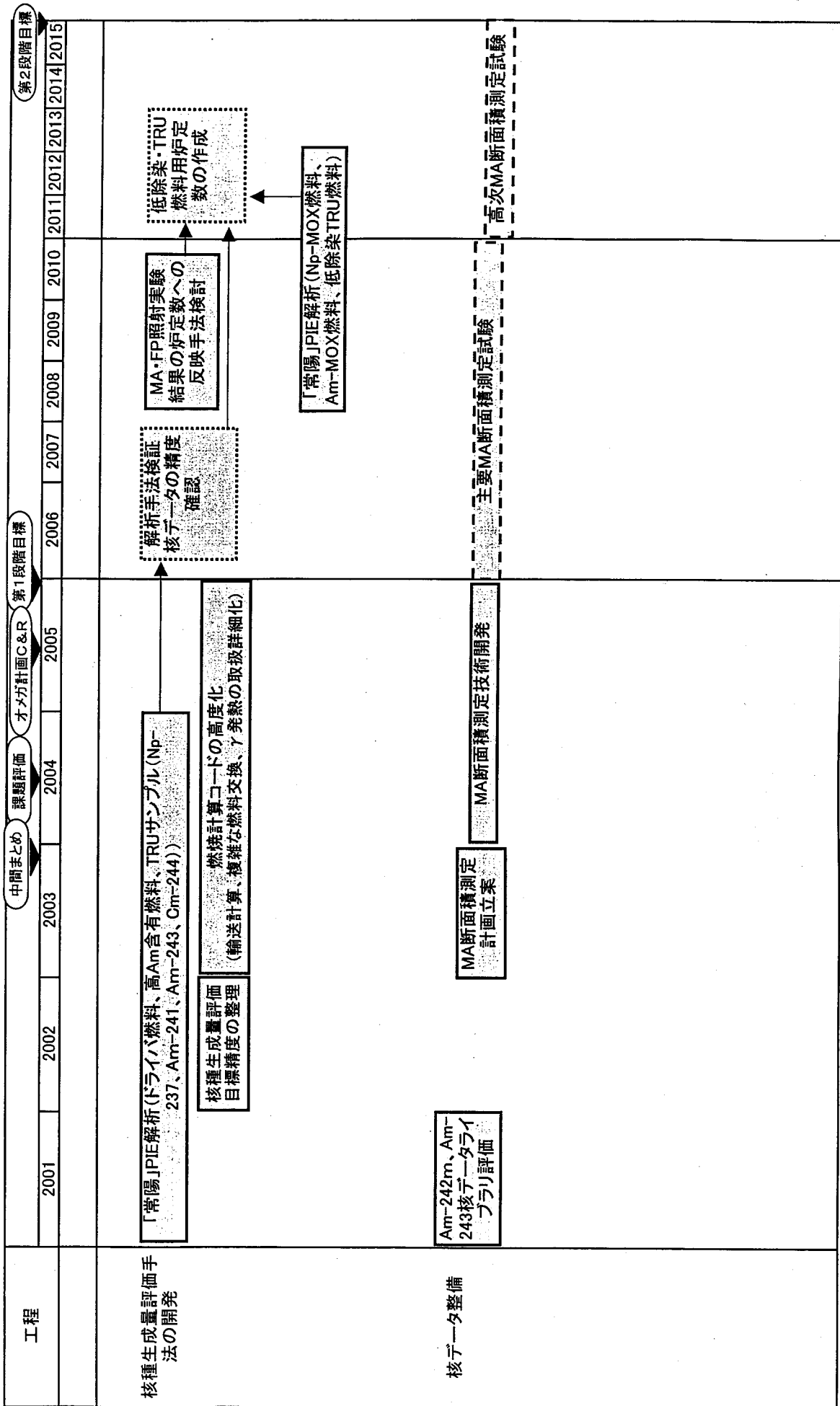


図6.2 分離核変換技術開発(6/15)(102-01 & 102-02 & 102-03 & 102-04) Sr, Cs
 分離回収法の確立 & 減衰待ち貯蔵の具体化 & 処理処分 of 合理化効果評価 & 放射化学利用の具体化

工程	中間まとめ		課題評価		オメガ計画C&R		第1段階目標		第2段階目標						
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
分離回収法の確立															
湿式再処理			分離技術の調査 (4.2M¥) 資金は, Tc, Sr, Cs合計	回収設備の 概略検討 (3.1M¥)	システム評価 (有望技術の選定)	回収法選定 (ただし, 現状の先進部のR&Dには入っていないため調整が必要/公募案)	プロセス試験								
乾式再処理			分離技術の調査と選択 (分離性能の評価)	プロセス評価 (可能性のある分離プロセスとシステムとの整合性検討)	回収設備の概略検討 (2003年度評価に応じ て再調査の可能性有り (先進部))										
減衰待ち貯蔵の 具体化 処理・処分 of 合理化効果評価			概略検討 (一時貯蔵の 経済効果)	貯蔵法(化学形態、容器、場所、 期間等)の検討	処理処分 of 具体 的方策検討	合理化効果検討									
放射化学利用の 具体化			調査	基礎研究 (H14年度先行基礎工学) ・放射性Cs及びSrの放射科学的利用に関する基礎 的研究—ゼオライトによるCs/Sr-セラミックス固体化 の製造, キャラクタリゼーション及び熱電特性の評価 —(H14~16 東北大 共研)	プロセス成 立性評価	C&R 工学的成 立性評価	C&R 新分野創生プ ロジェクト研究 などへ提案								

図6.2 分離核変換技術開発(7/15) (103-01) I -- 分離回収法の確立

工程	2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015	
	第2段階目標																													
中間まとめ 課題評価 オメガ計画C&R 第1段階目標																														
湿式再処理	回収法選定																													
	分離技術の調査 (4.2M¥)	回収設備の 概略検討 (3.1M¥)	システム評価 (有望技術の選定)	プロセス試験 (ただし、現状の先進部のR&Dには入っていないため調整が必要/公募案件?)																										
乾式再処理	資金は, Tg, Sr, Cs合計 (0M¥)																													
	分離技術の調査と選択	回収設備の概略検討	システム評価 (分離性能の評価)	ターゲット材化合物への変換検討 2003年度評価に応じて再調査の可能性有り(先進部) 可能性のある分離プロセスとシステムの整合性検討																										
回収設備の概略検討																														

図6.2 分離核変換技術開発(8/15) (103-02 & 103-03 & 103-05) I --
 ターゲット製造法検討 & 照射試験 & ターゲットリサイクル技術

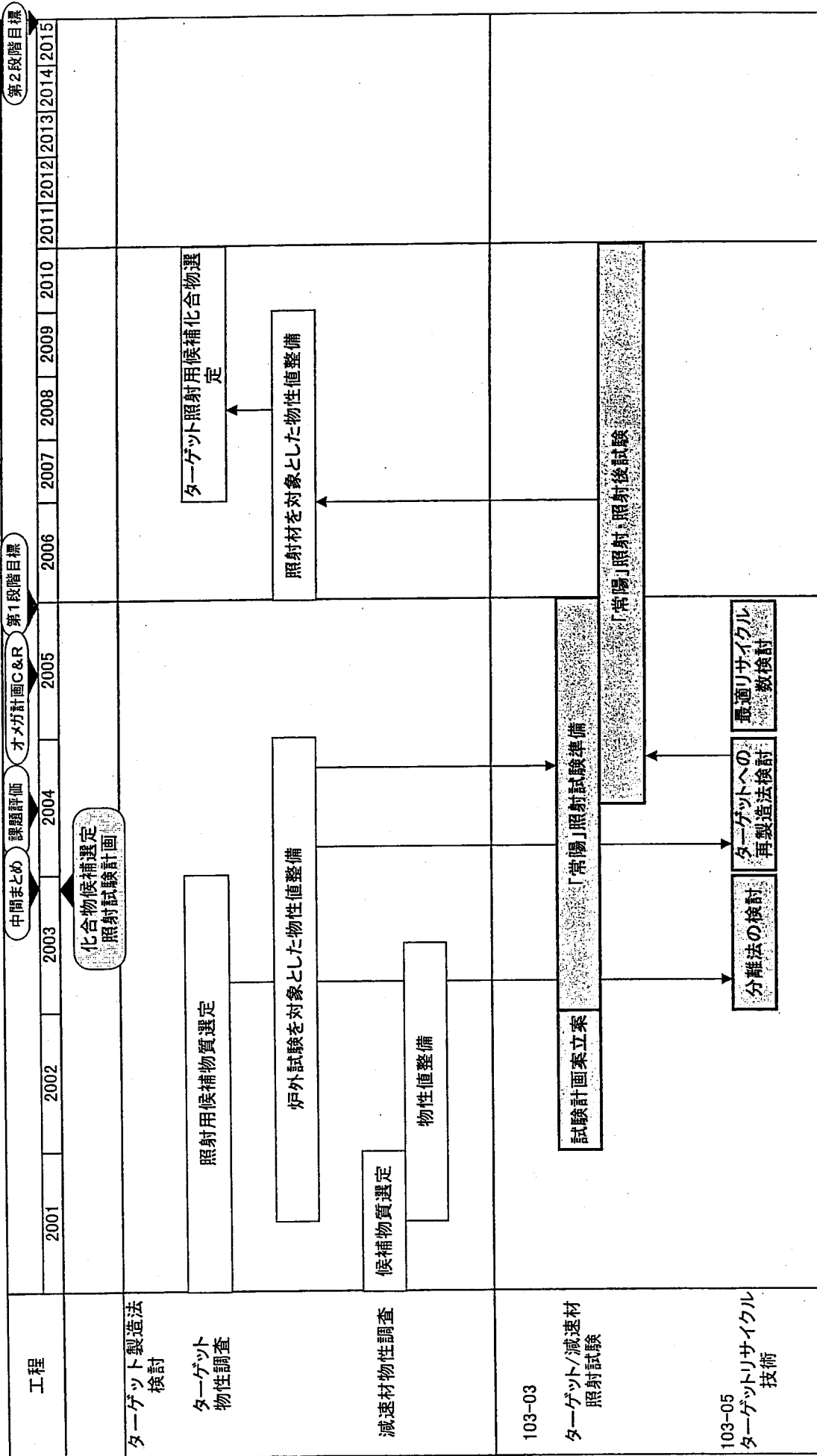


図6.2 分離核変換技術開発(9/15) (103-04 & 103-06 & 103-07) I
核変換率向上 & 炉心解析法(核データを含む)整備 & 装荷炉心の設計検討

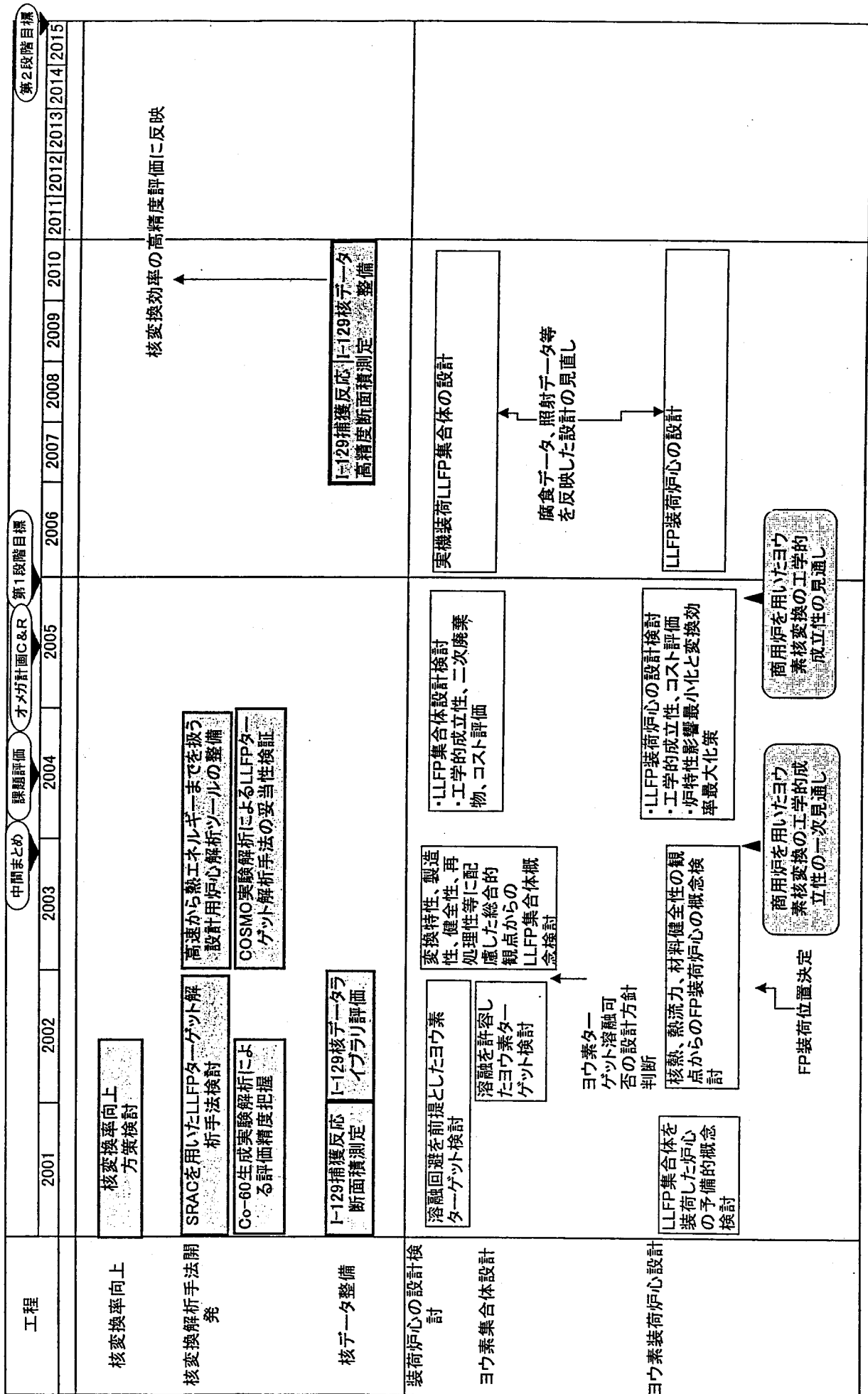


図6.2 分離核変換技術開発(10/15) (104-01) Tc - 分離回収法の確立

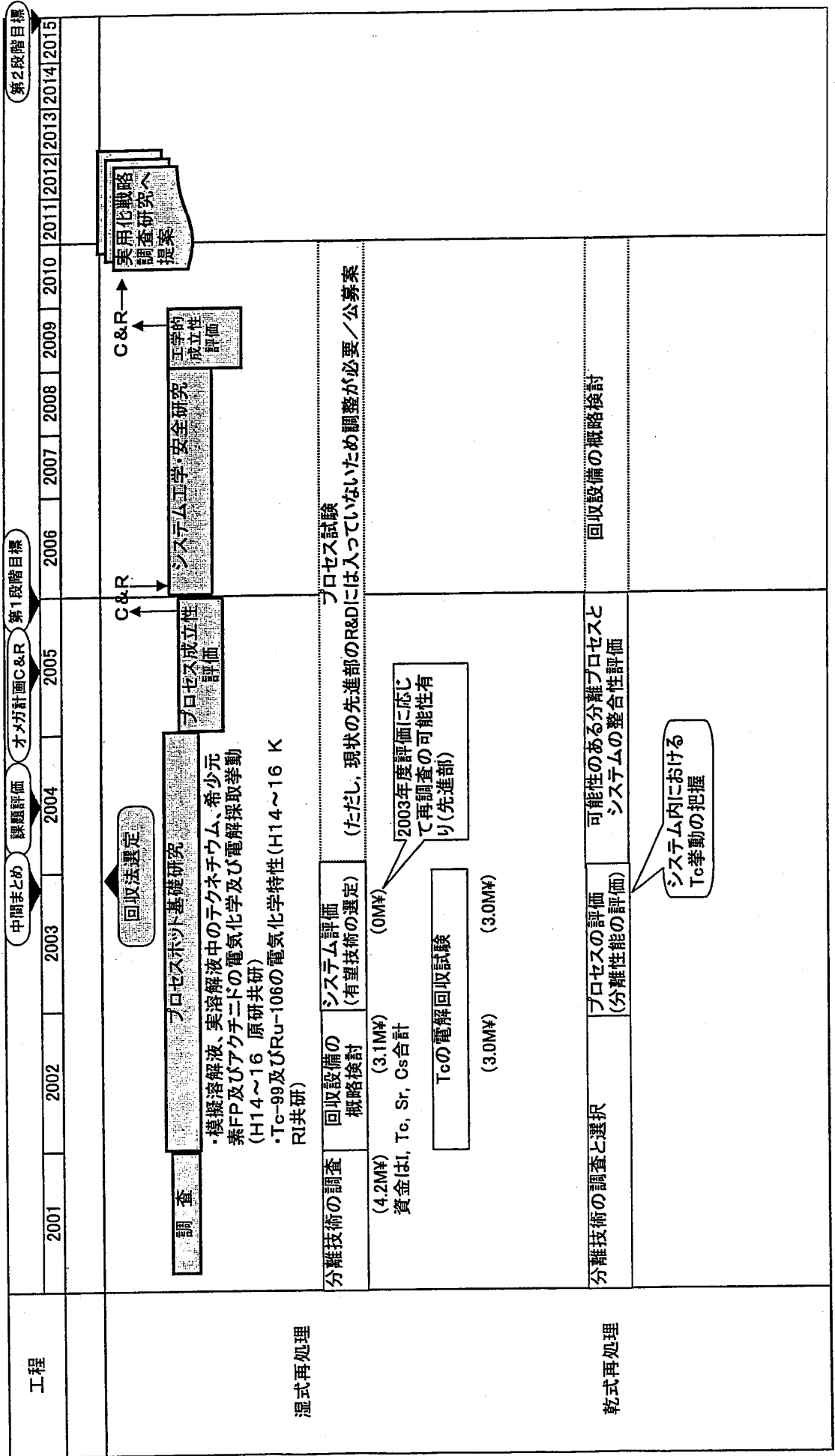


図6.2 分離核変換技術開発(11/15) (104-02 & 104-03 & 104-05) Tc -- ターゲット製造法検討 & 照射試験 & ターゲットリサイクル技術

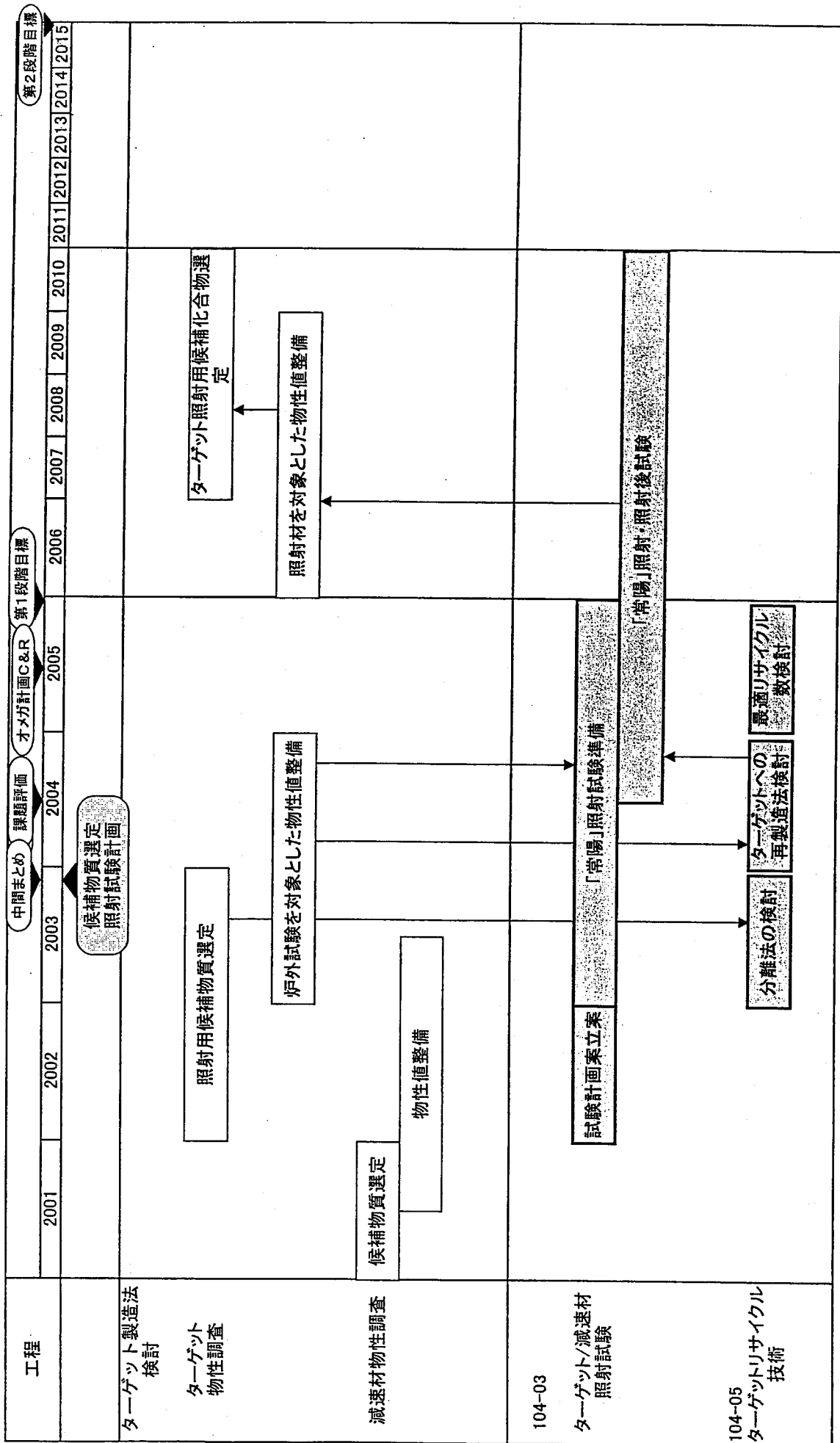


図6.2 分離核変換技術開発(12/15) (104-04 & 104-06 & 104-07) Tc --
核変換率向上 & 炉心解析法(核データを含む)整備 & 化学利用の具体化

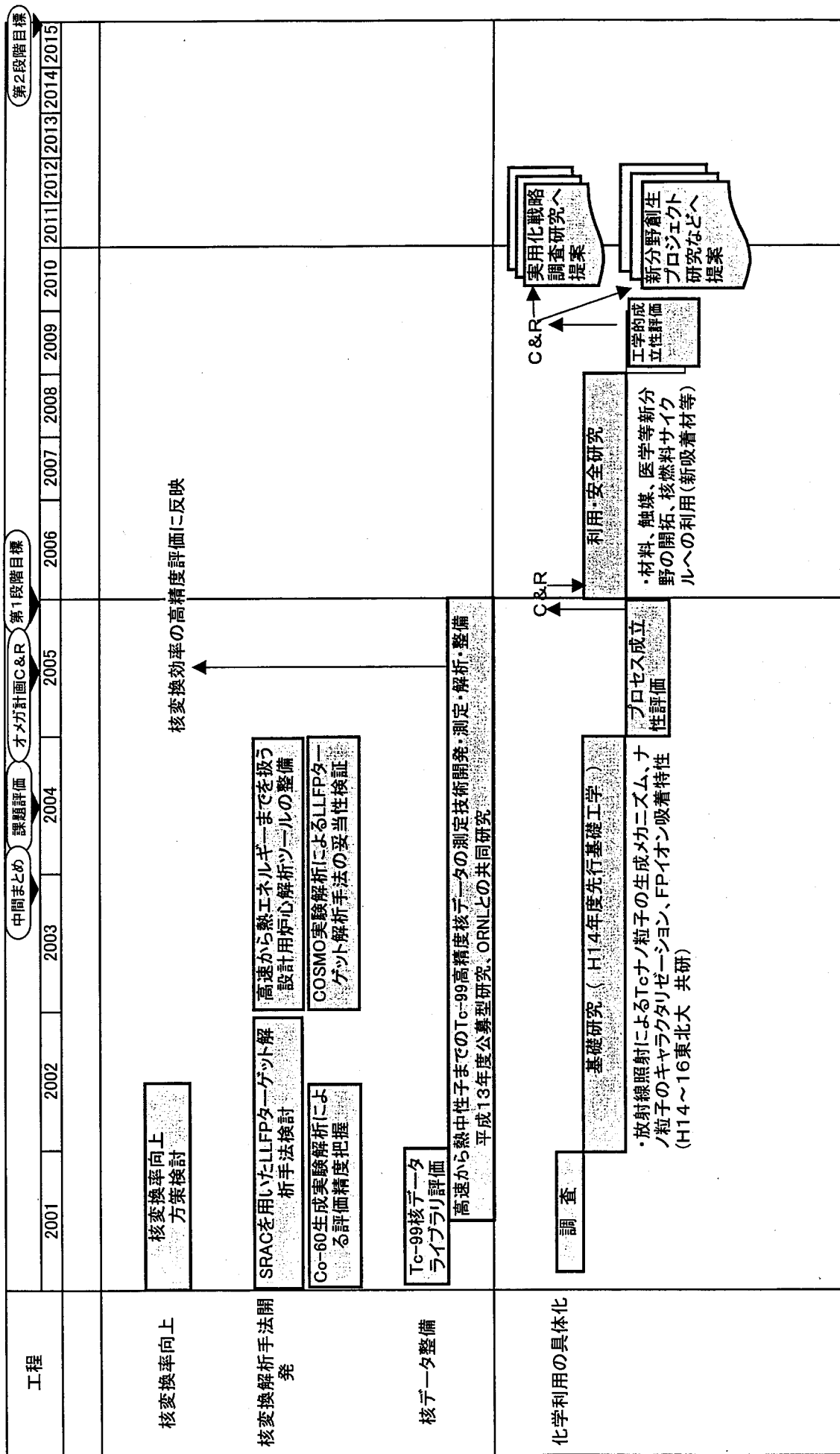


図6.2 分離核変換技術開発(13/15) (104-08) Tc -- 装荷炉心の設計検討

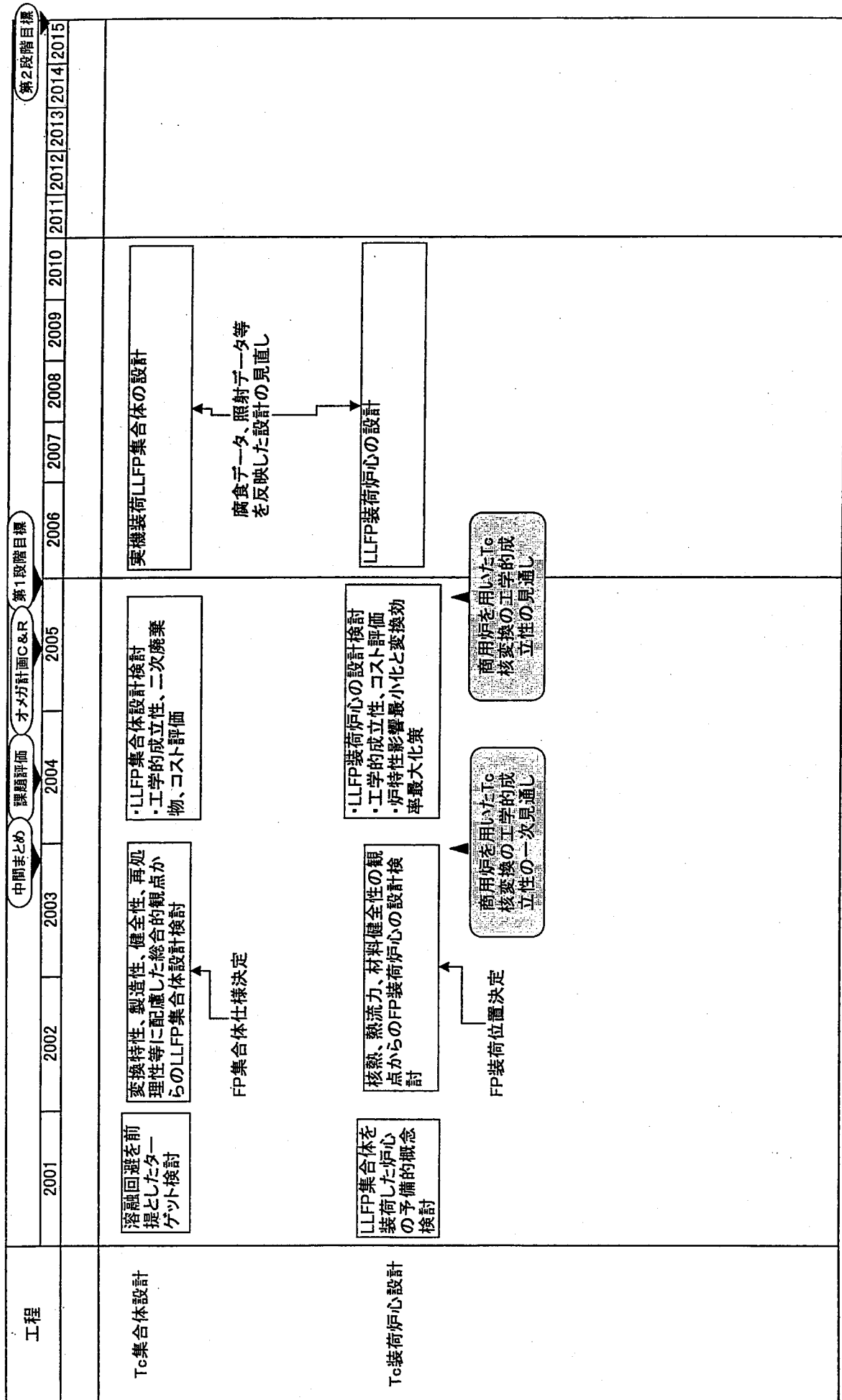


図6.2 分離核変換技術開発(14/15) (105-01 & 105-02 & 105-03) Mo
 分離回収法の確立 & 貯蔵法の具体化 & 処理処分の合理化効果評価

工程	中間まとめ				オメガ計画C&R				第2段階目標						
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
分離回収法の確立															
湿式再処理					調査・ロールド試験	プロセスホット基礎研究	プロセス成立性評価								
乾式再処理					触媒的電解採取法による希少元素FP回収試験の 一環としての挙動評価	システム評価 (有望技術の選 (OMV)	プロセス試験 (ただし、現状の先進部のR&Dには入っていないため調整が必要/公募案件?)								
貯蔵法の具体化															
処理・処分の 合理化効果評価															

2003年度評価に応じ
 て再調査の可能性有
 り(先進部)

適用可能な分離技術の調査

貯蔵法(化学形態、容器、場所、
 期間等)の検討

処理処分の具体
 的方策検討

合理化効果検討

図6.2 分離核変換技術開発(15/15) (106-01 & 106-02) Pd --- 分離回収法確立 & 触媒等化学利用の具体化

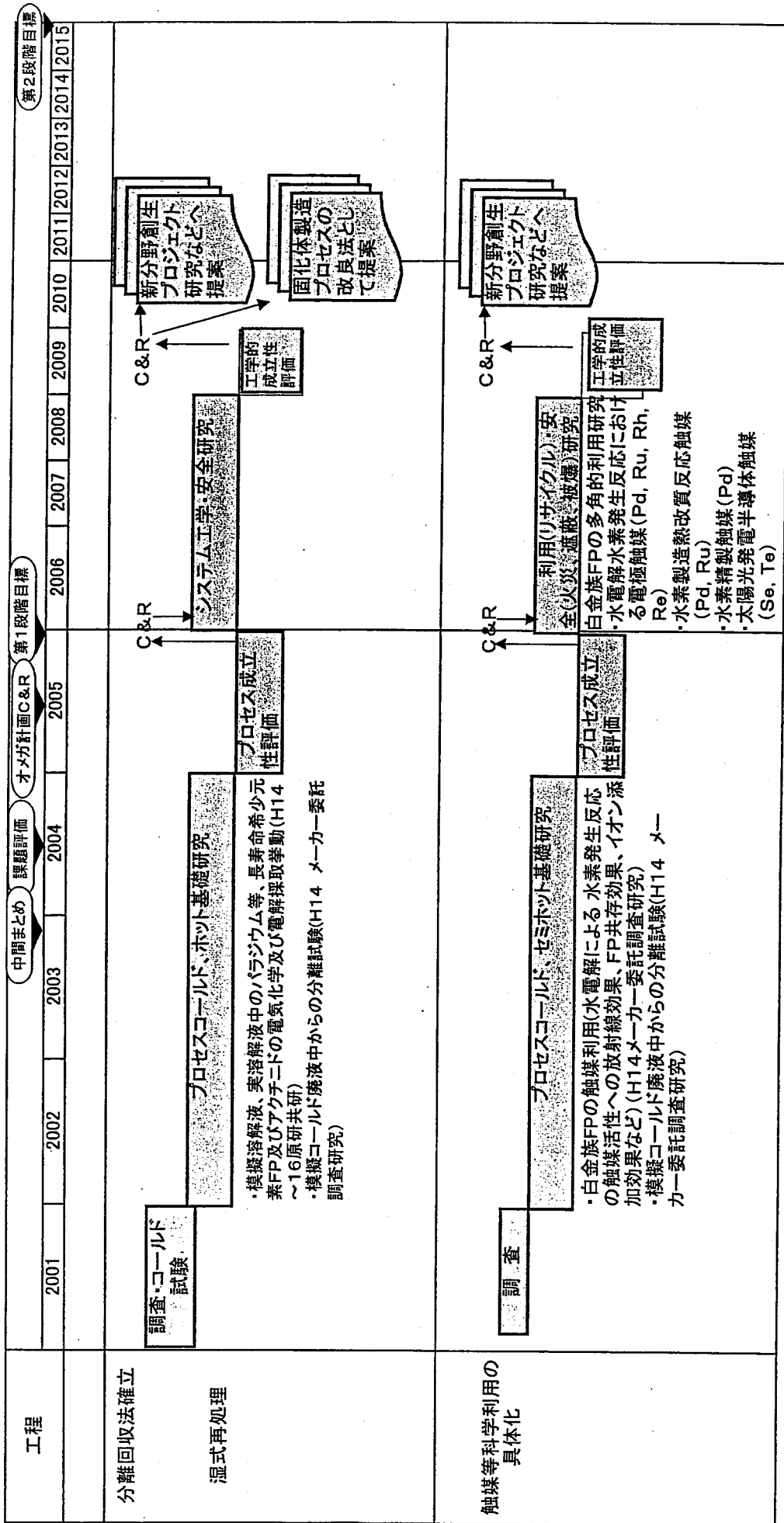


図 6.3 同位体分離への取り組み

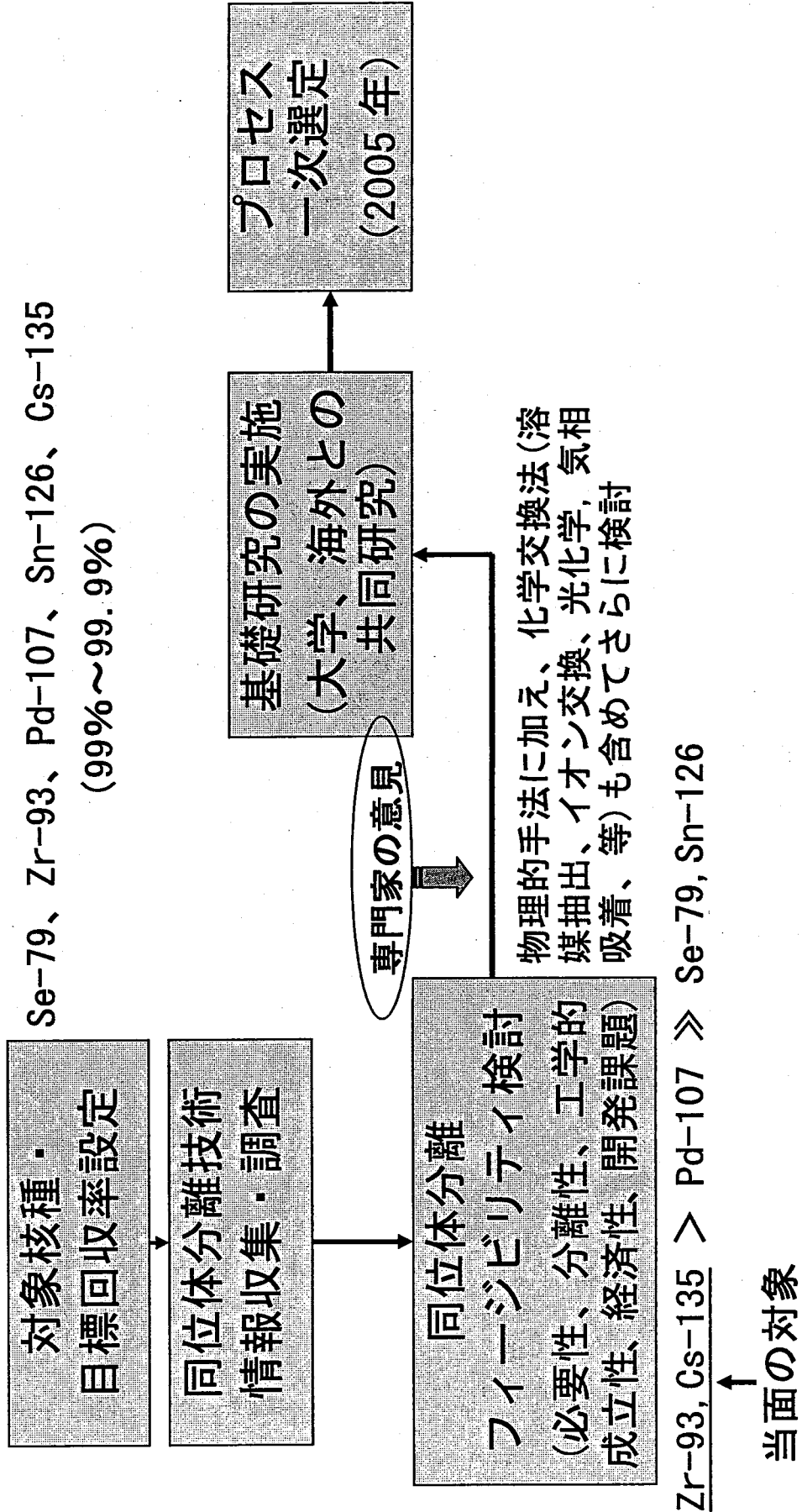


図6.4 分離核変換技術開発全体スケジュール

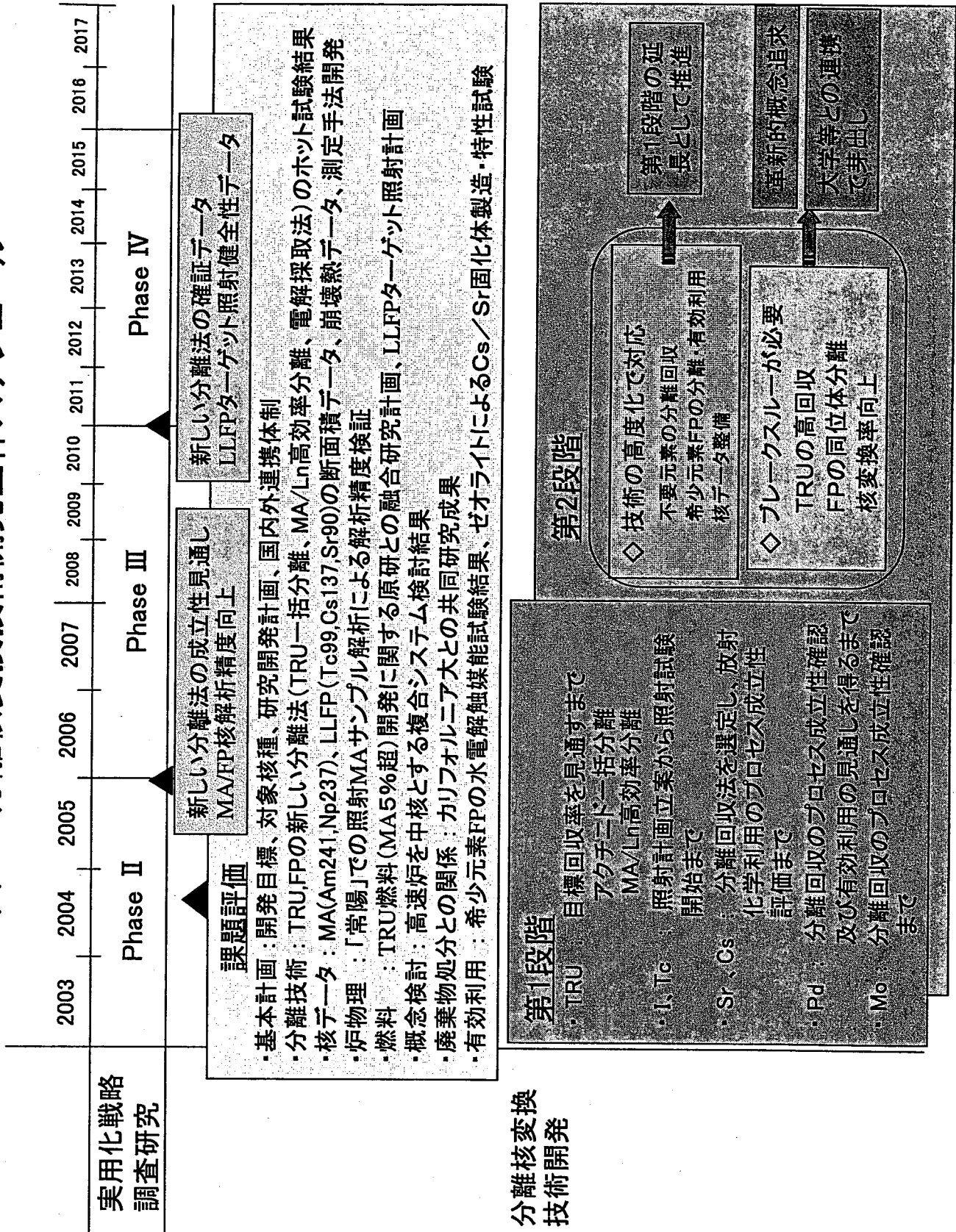


図6.5 原研との統合による相乗効果

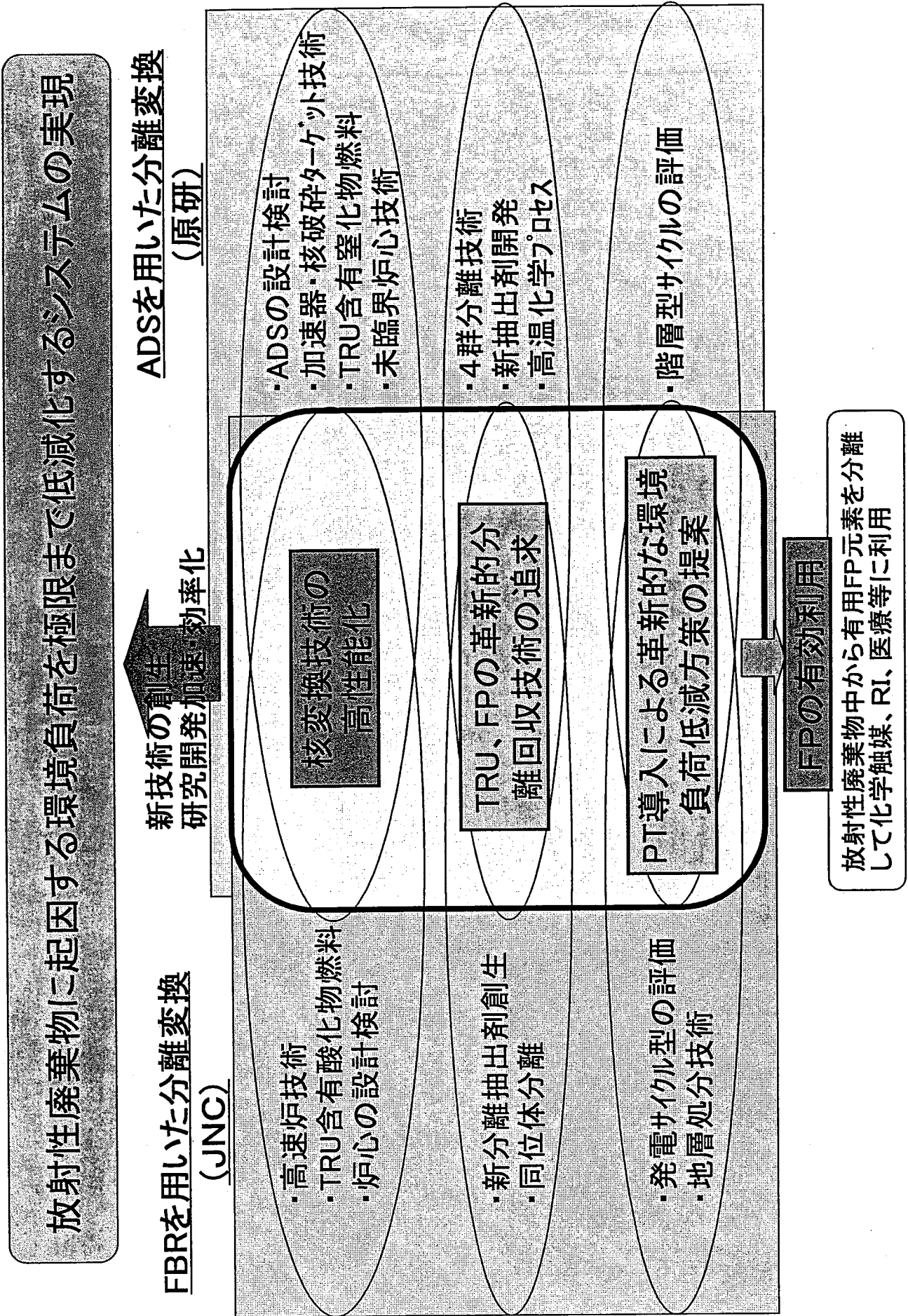


図7.1 国内外連携体制

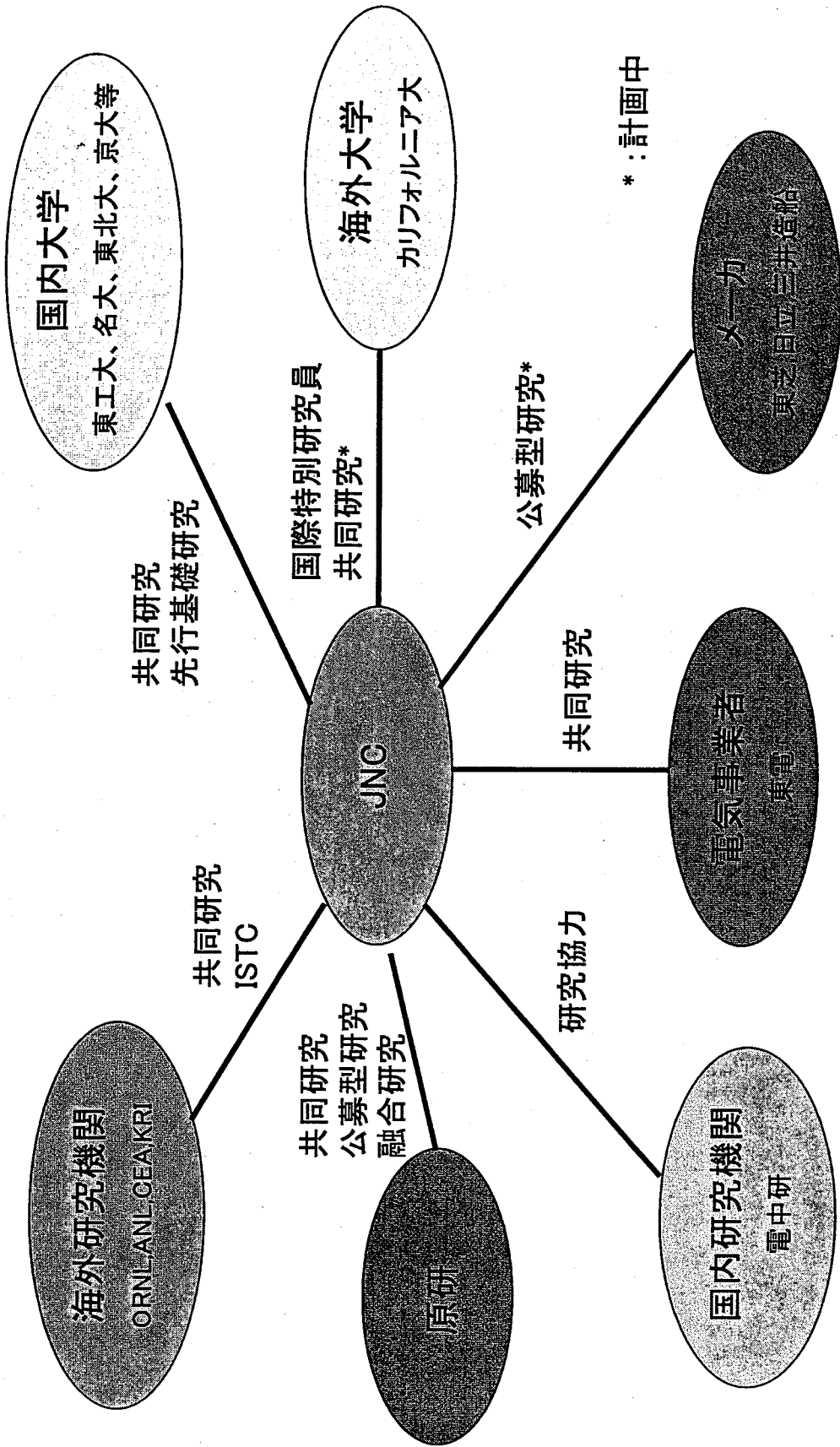


図 8.1 分離変換技術開発に係わる推進体制

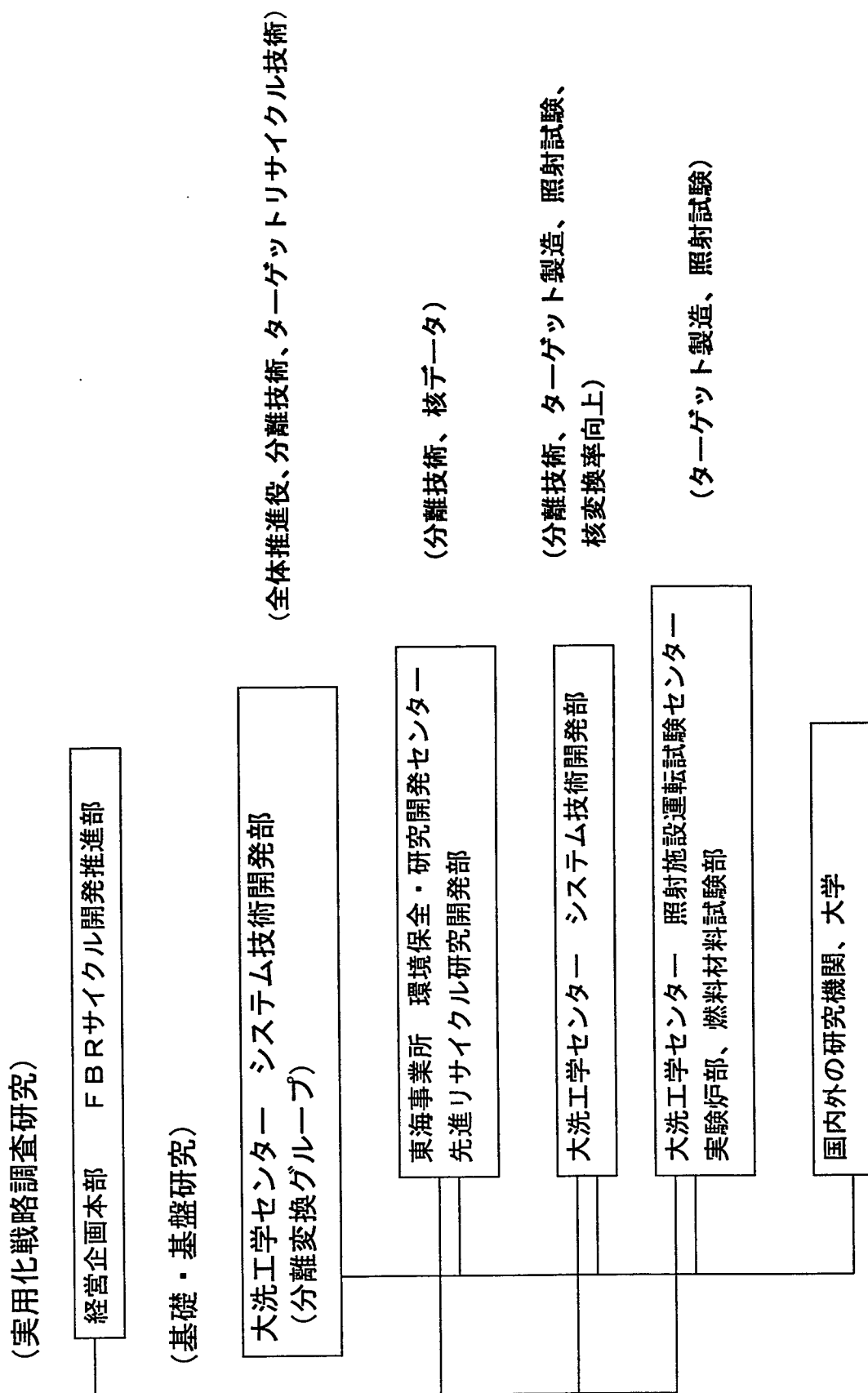


表9.1 分離核変換技術の基礎・基盤研究に関する資金計画

(単位 100万円)

研究項目	年	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
基礎・基盤研究								
① 基本的方向性検討 (革新的概念等)		2	2	8	3	0	0	0
② 分離技術		19	26	20	24	25	25	25
③ 核変換技術		40	40	29	30	30	30	30
④ ターゲットリサイクル技術		0	0	0	5	7	7	7
⑤ 有効利用		0	14	17	17	18	18	18
合計		61	82	74	79	80	80	80
実用化戦略調査研究								
				フェーズ1			フェーズ2	

添 付 資 料

添付－1 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

添付－2 放射能及び放射性毒性の観点での目標設定根拠

添付－3 被曝リスク低減の観点での目標設定根拠

添付－1

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、今後も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ととらえ、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。

添付－ 2

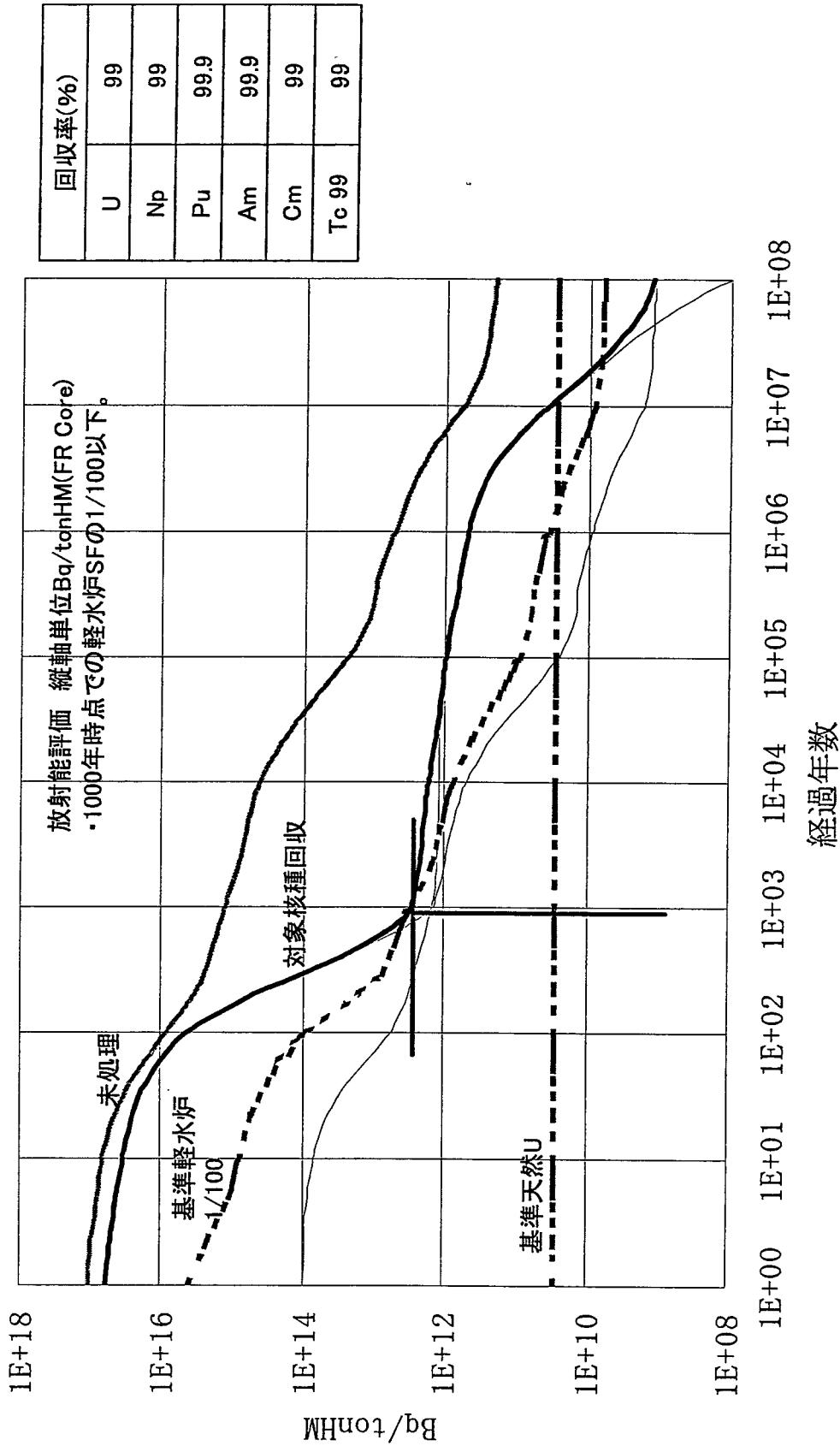
放射能及び放射性毒性の観点での目標設定根拠

放射能の観点での目標設定根拠を示す図を添付 2.1～添付 2.3 に、放射性毒性の観点での目標設定根拠を示す図を添付 2.4～添付 2.6 に示す。

これらの図において、“未処理”の曲線は高速炉から取り出した燃料中の放射能あるいは放射性毒性の時間変化を表し、“対象核種回収”はそこから右上の表に示される核種をその表の回収率で回収した後の放射能あるいは放射性毒性の時間変化を表す。また、“基準軽水炉 1/100 あるいは 1/1000”は目標となる軽水炉ワンスルーの場合の 1/100 あるいは 1/1000 の放射能あるいは放射性毒性の時間変化を、“基準天然 U”は供給した天然 U の放射能強度を表す。

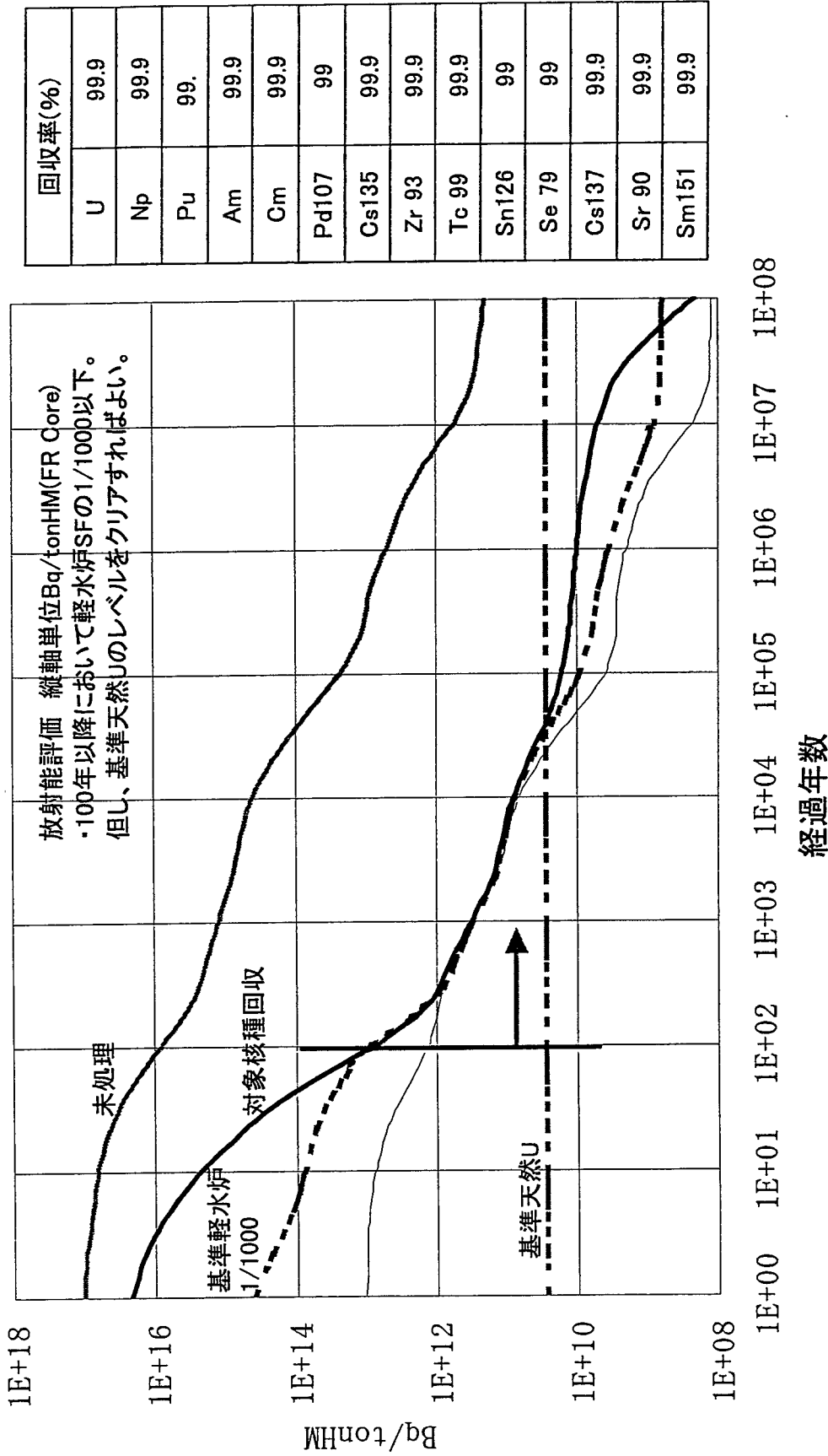
第 1 段階の場合は、1000 年後の時点で軽水炉ワンスルーの 1/100 を満たせばよいので、添付 2.1 あるいは添付-2.4 に示される対象核種回収で目標を達成している。また、第 2 段階については、100 年以降において軽水炉ワンスルーの 1/1000 を満たせばよいので、添付 2.2 あるいは添付-2.5 に示される対象核種回収で目標を達成している。この場合、“基準天然 U”の線を下回った後は“基準軽水炉”を下回る必要はない。

第1段階目標設定



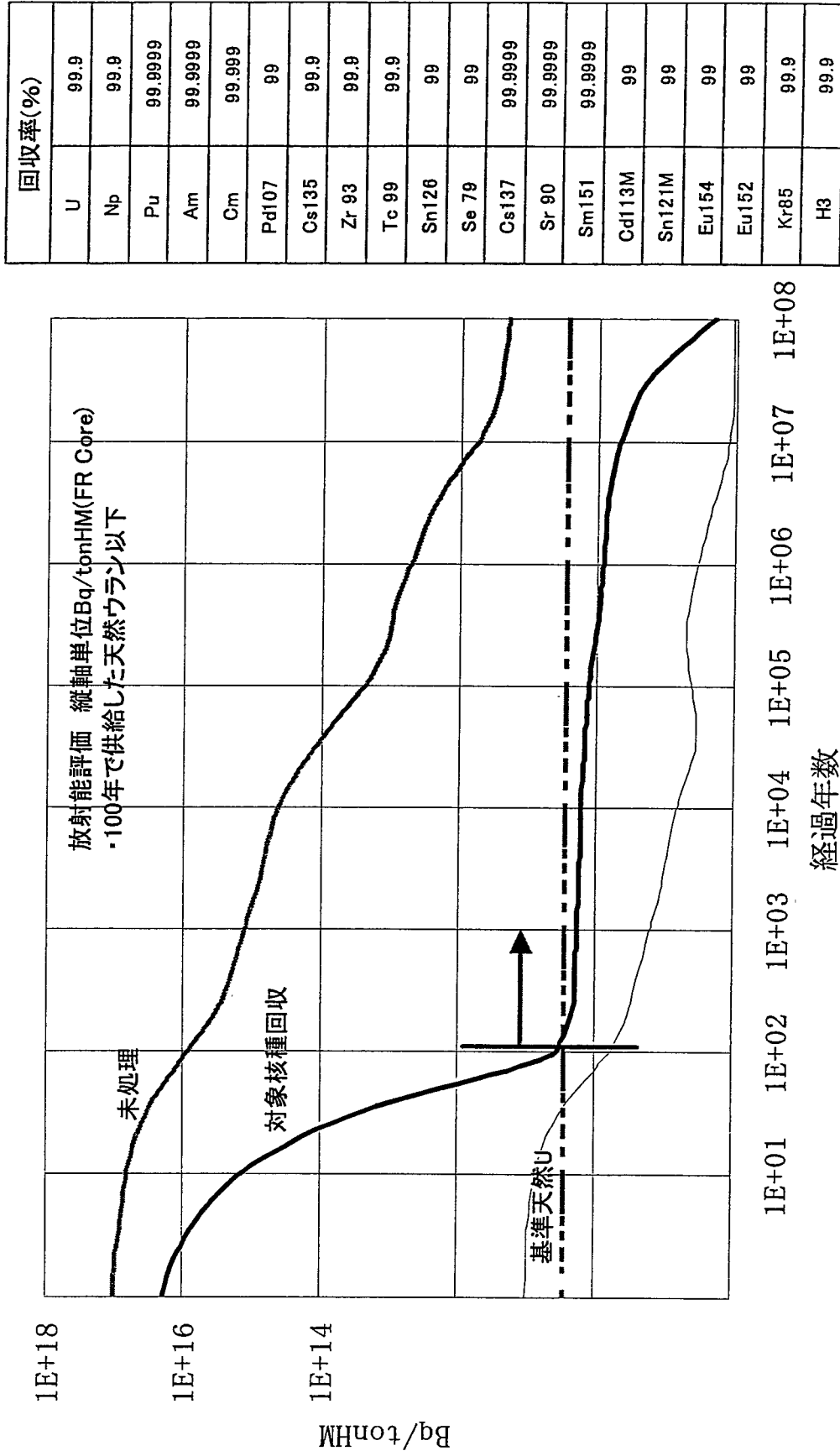
添付-2.1 対象核種回収後の放射能と目標放射能との関係(1/3)

第2段階目標設定



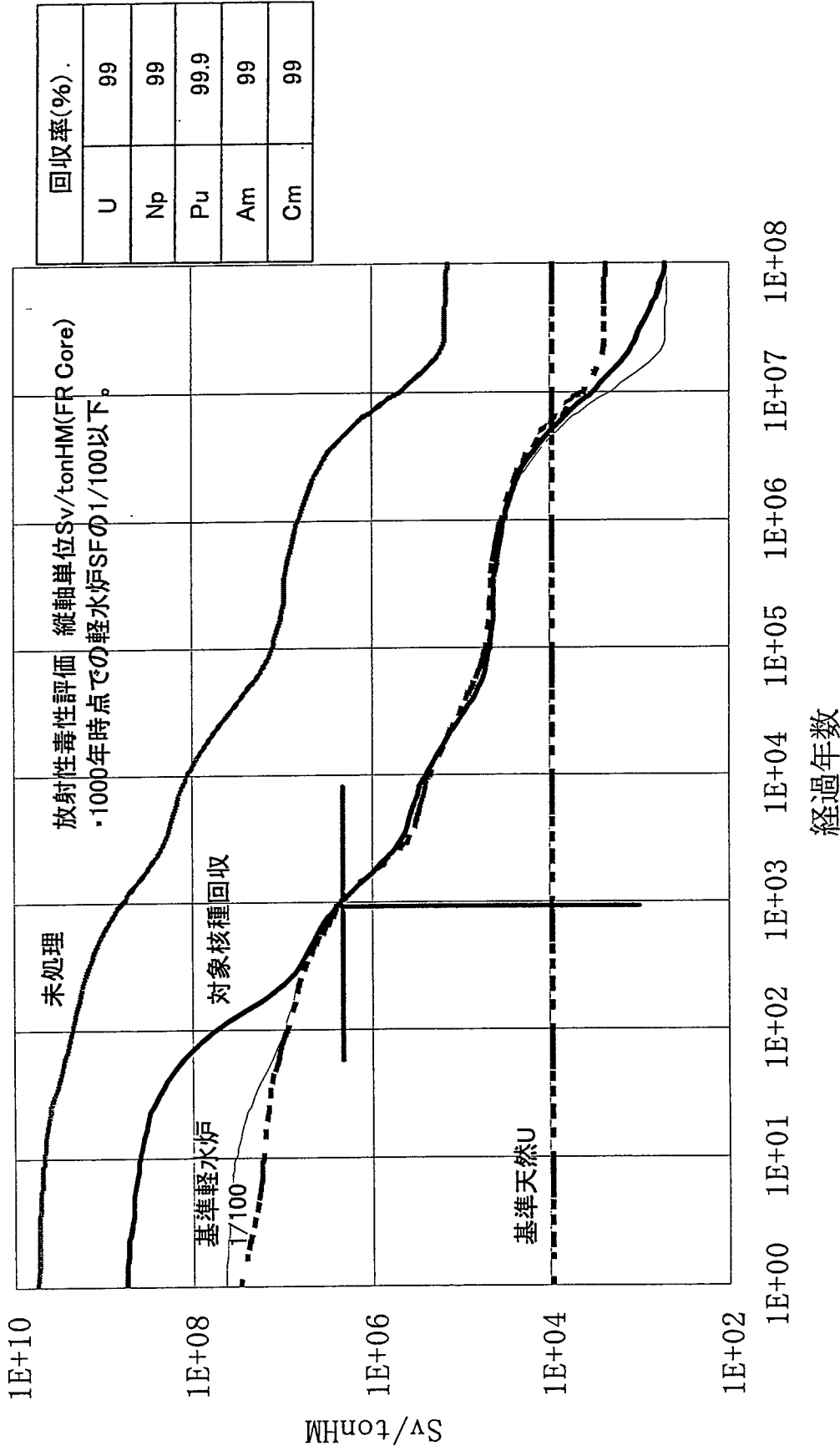
添付-2.2 対象核種回収後の放射能と目標放射能との関係(2/3)

第3段階目標設定



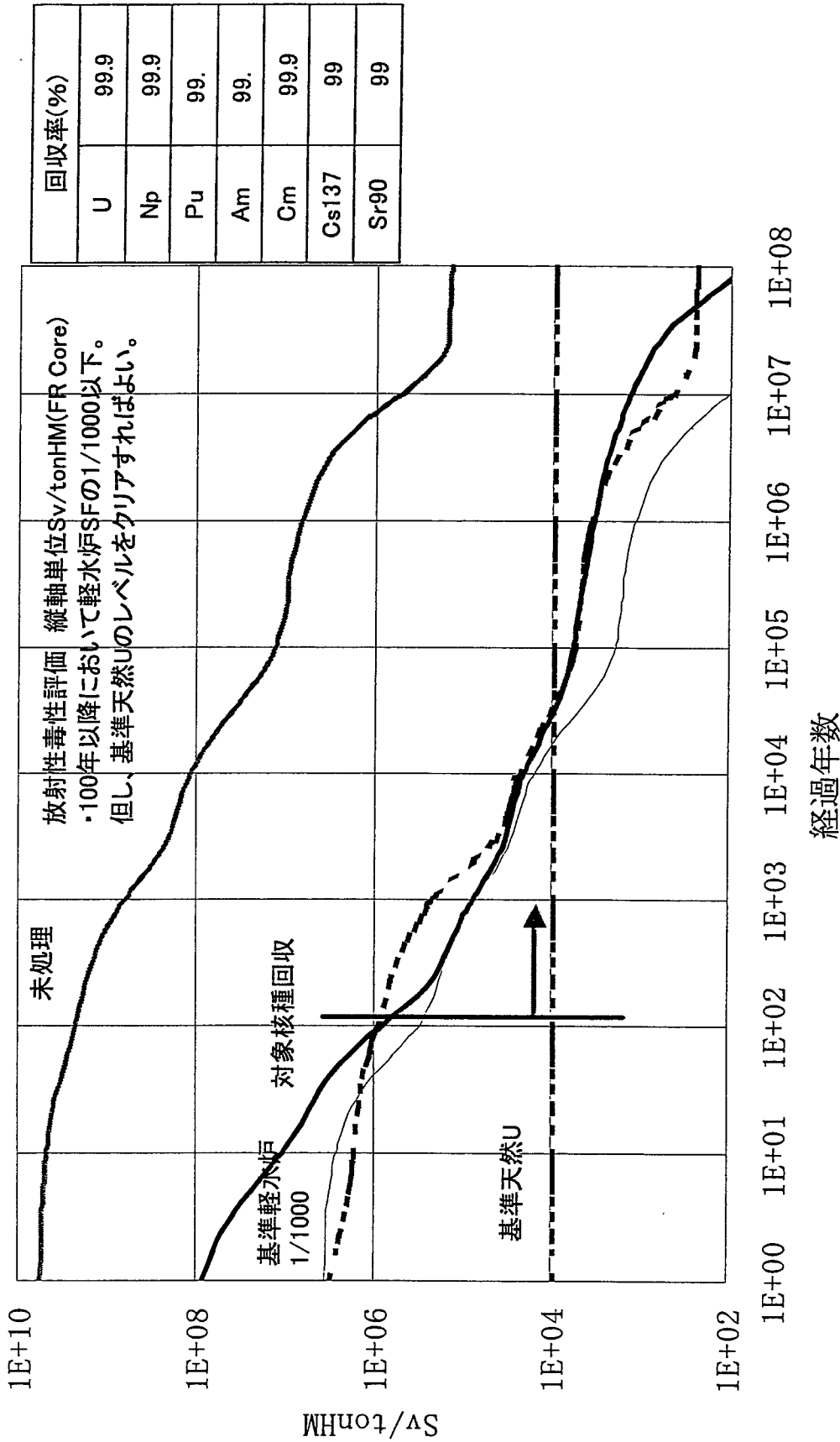
添付-2.3 対象核種回収後の放射能と目標放射能との関係(3/3)

第1段階目標設定



添付-2.4 対象核種回収後の放射性毒性と目標放射性毒性との関係(1/3)

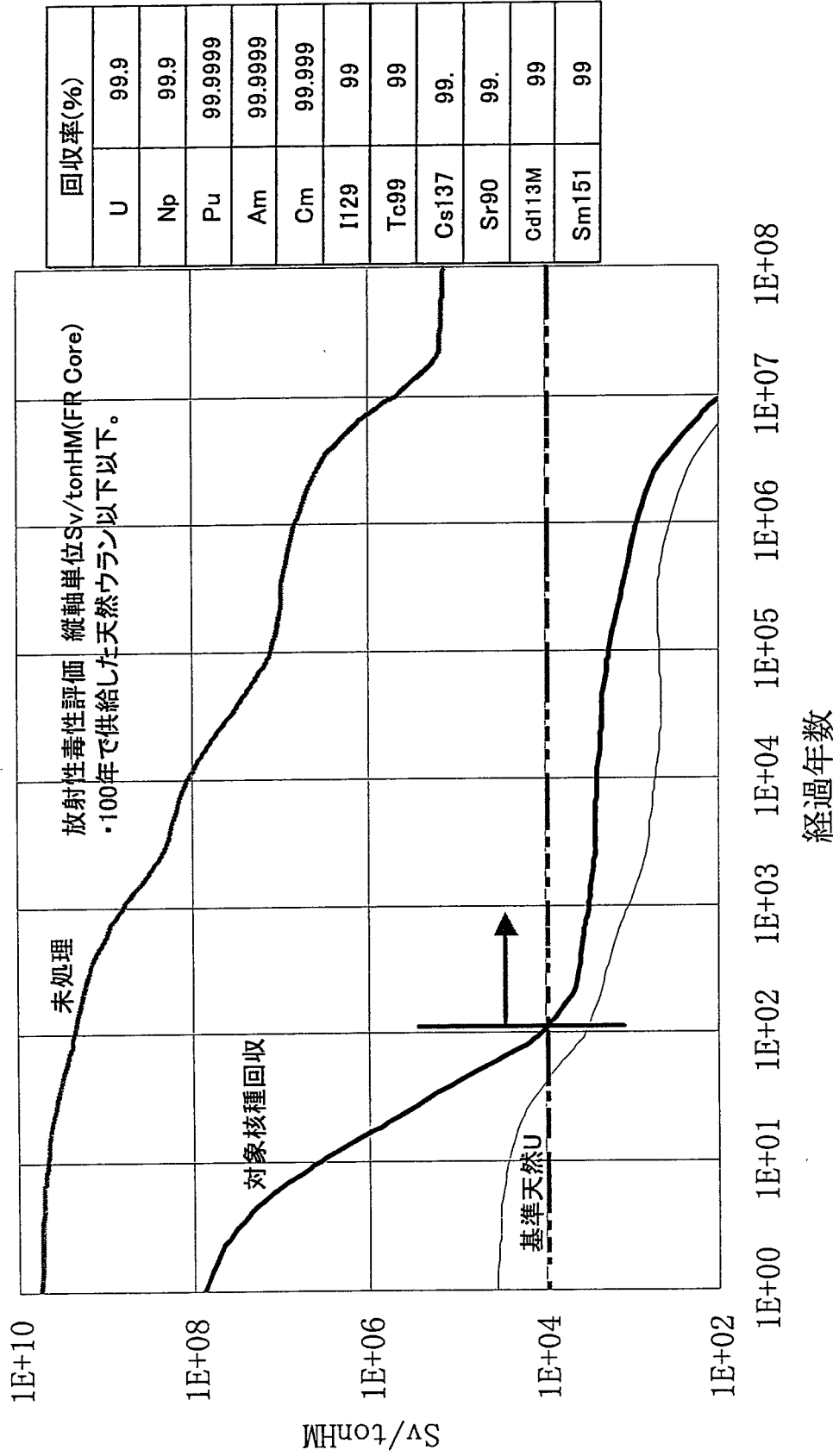
第2段階目標設定



回収率(%)	
U	99.9
Np	99.9
Pu	99.
Am	99.
Cm	99.9
Cs137	99
Sr90	99

添付-2.5 対象核種回収後の放射性毒性と目標放射性毒性との関係(2/3)

第3段階目標設定



添付-2.6 対象核種回収後の放射性毒性と目標放射性毒性との関係(3/3)

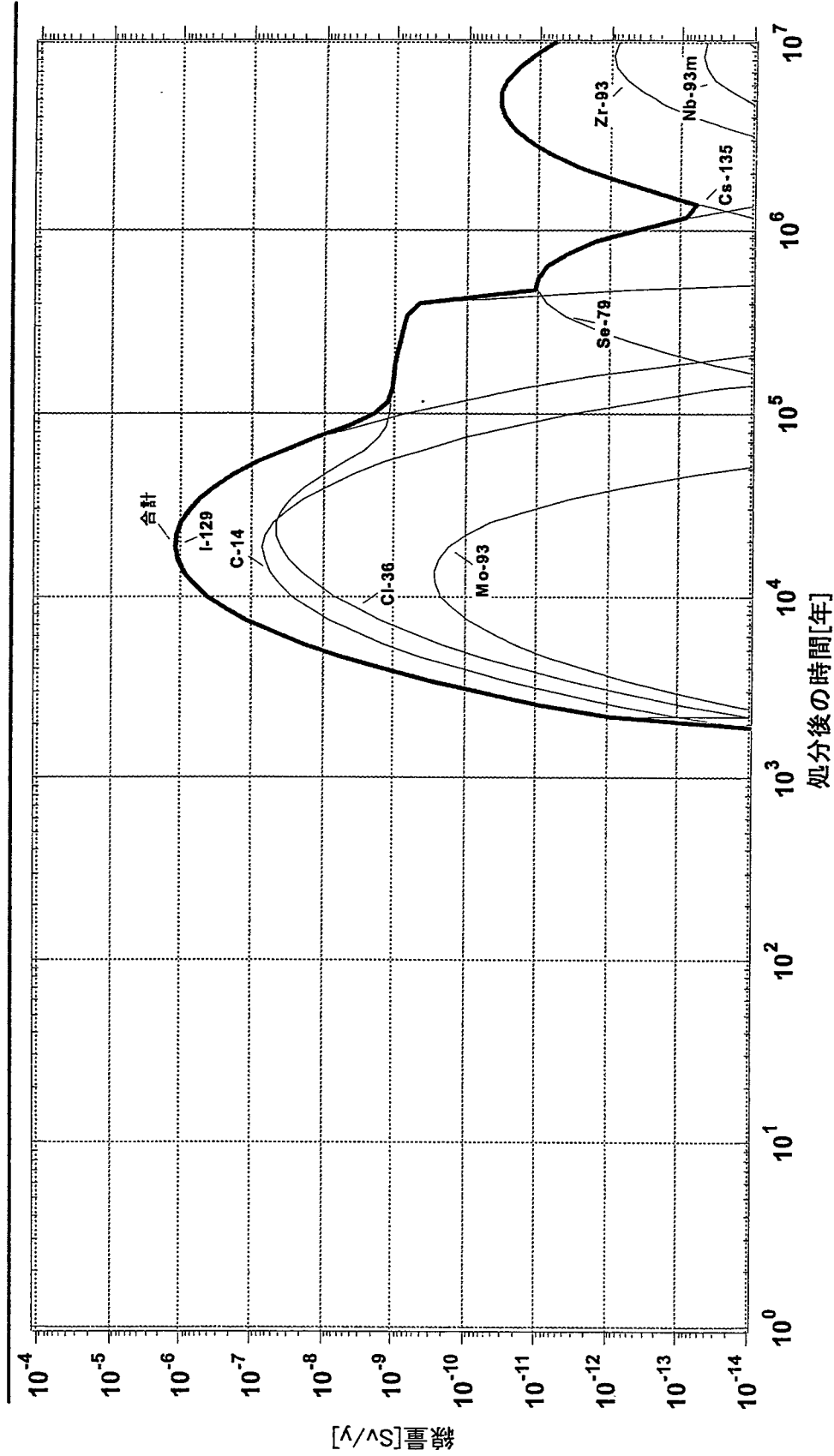
添付－3

被曝リスク低減の観点での目標設定根拠

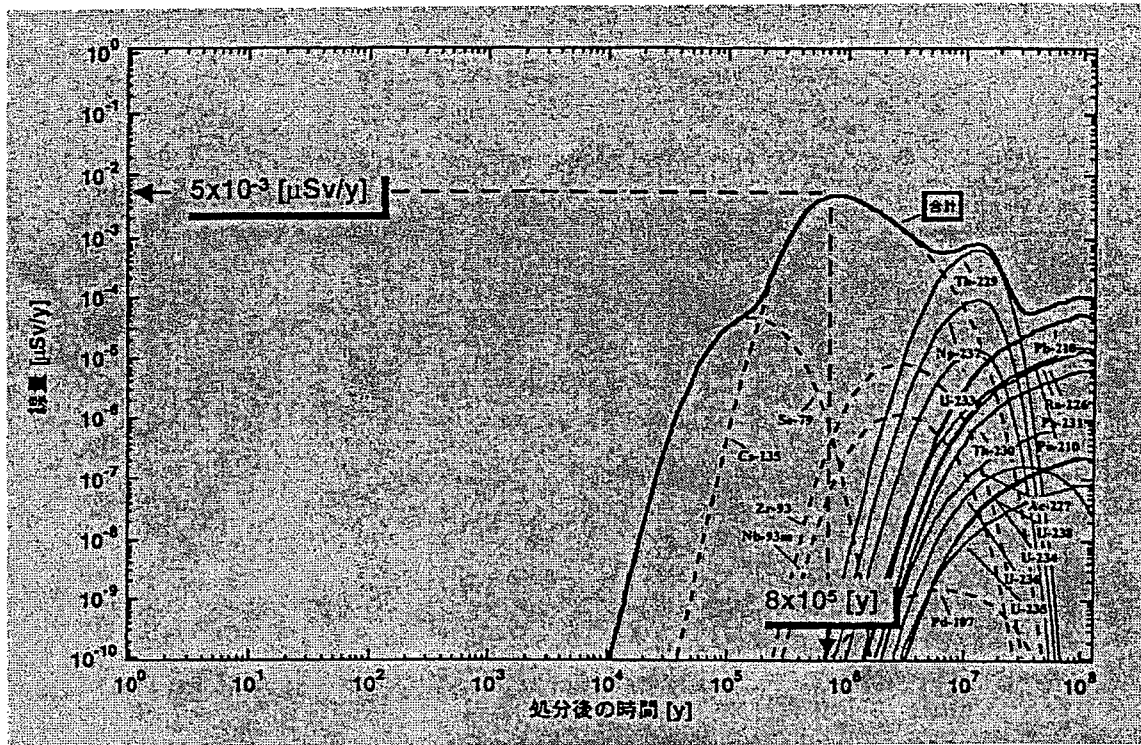
被曝リスクの観点では、溶解性が高く、地層への低付着性から最も影響の大きいのがヨウ素といわれており安全評価例を添付-3.1に示す。従って、被曝リスク低減のために先ずヨウ素を分離核変換により一桁低減する。ヨウ素を一桁低減すると、添付-3.1に示されるように、次の核種としてC14及びC136がピークを形成する。従って、第2段階としては、ヨウ素をさらに一桁低減すると同時に、C14及びC136を一桁低減することが目標となる。

一方、添付-3.2は高レベル放射性廃棄物を地層処分したときの地下水シナリオでの線量評価結果である。この図でピークを形成するのはCs135であるが、その線量は 5×10^{-9} Sv/yであり、添付-3.1におけるC14及びC136のピークより約一桁小さい。従って、Cs135は第2段階の目標とはならない。

添付-3.1 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-3.2 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)