



都市大原子力シンポジウム

「核廃棄物を燃やす高速炉燃料」

平成29年7月20日(木)

@東京都市大学・世田谷キャンパス1号館13Q教室

東京都市大学

工学部 原子力安全工学科

佐藤 勇

(原子炉廃止措置工学研究室)



講演内容

1. 核燃料とは？
2. 核廃棄物とは？、放射性廃棄物とは？
3. 核燃料サイクルの戦略
4. マイナーアクチニドの消滅処理
5. まとめ

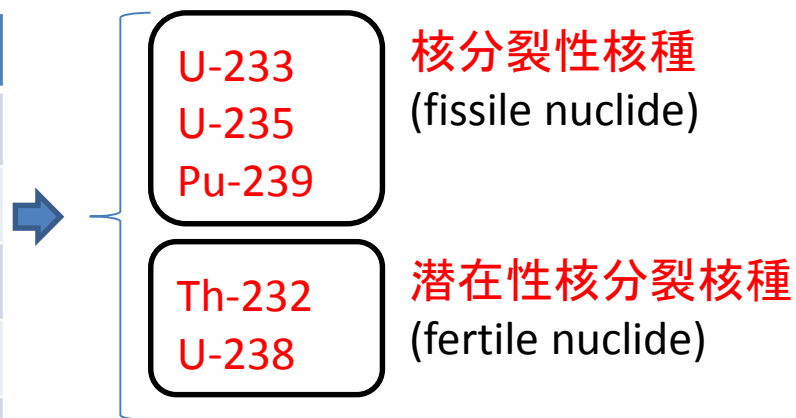


2. 核燃料とは？

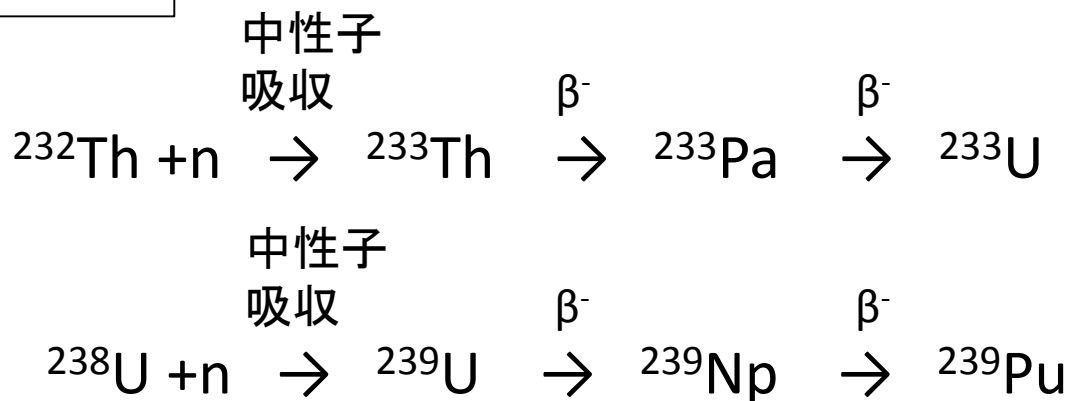
①核燃料として用いられる核種

<核分裂性燃料と潜在性核燃料>

元素	分類
ウラン (U)	劣化ウラン、天然ウラン
トリウム (Th)	すべて
濃縮ウラン (U)	濃縮ウラン
ウラン-233 (U)	ウラン-233
プルトニウム (Pu)	すべて



fertile → fissile



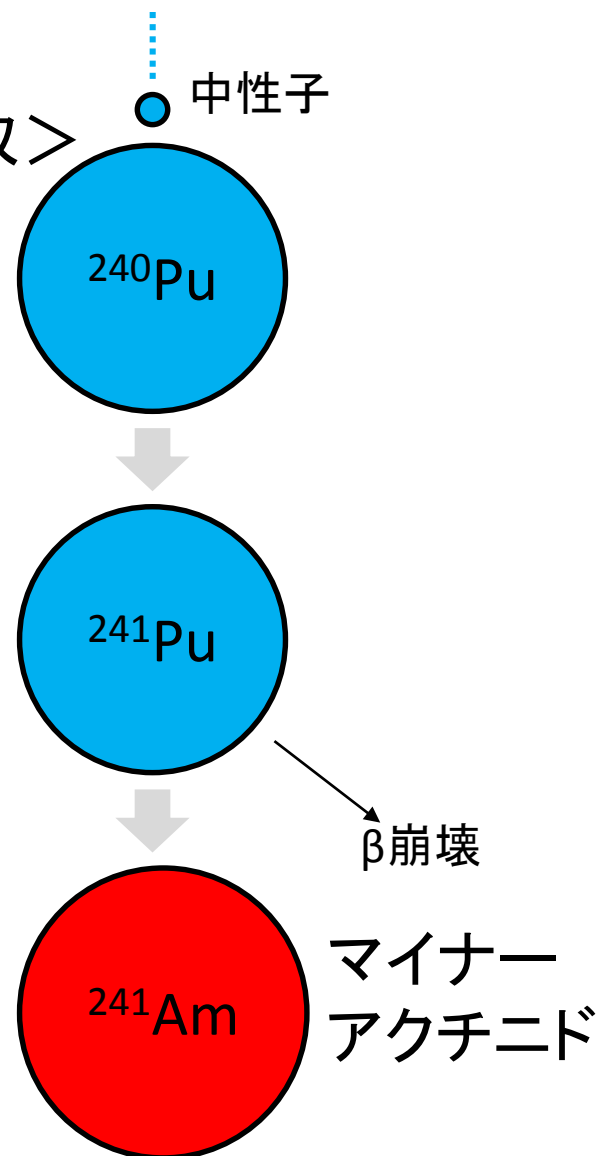
2. 核燃料とは？

①核燃料の特徴

<核分裂>



<中性子の吸収>

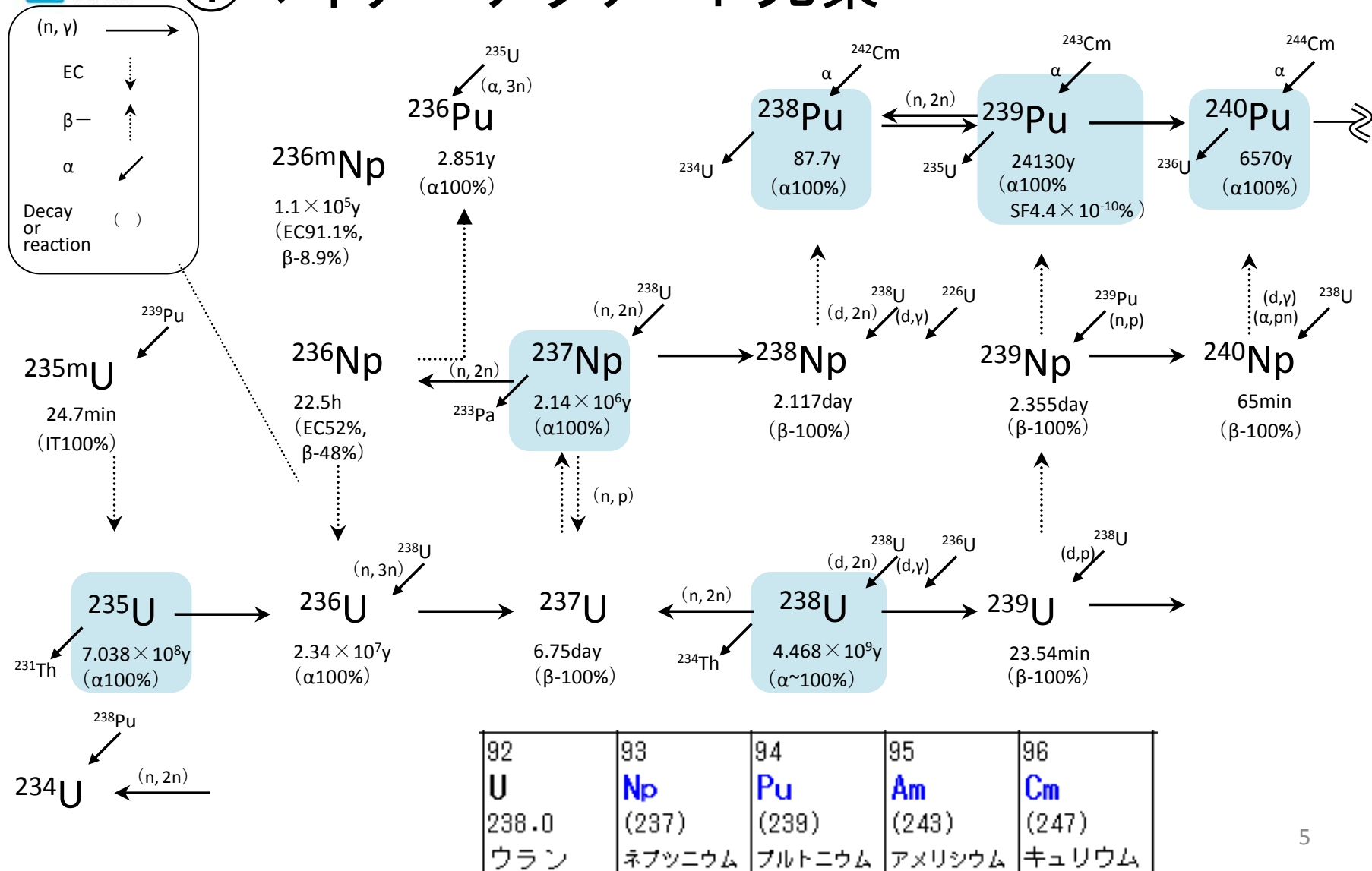


核分裂生成物



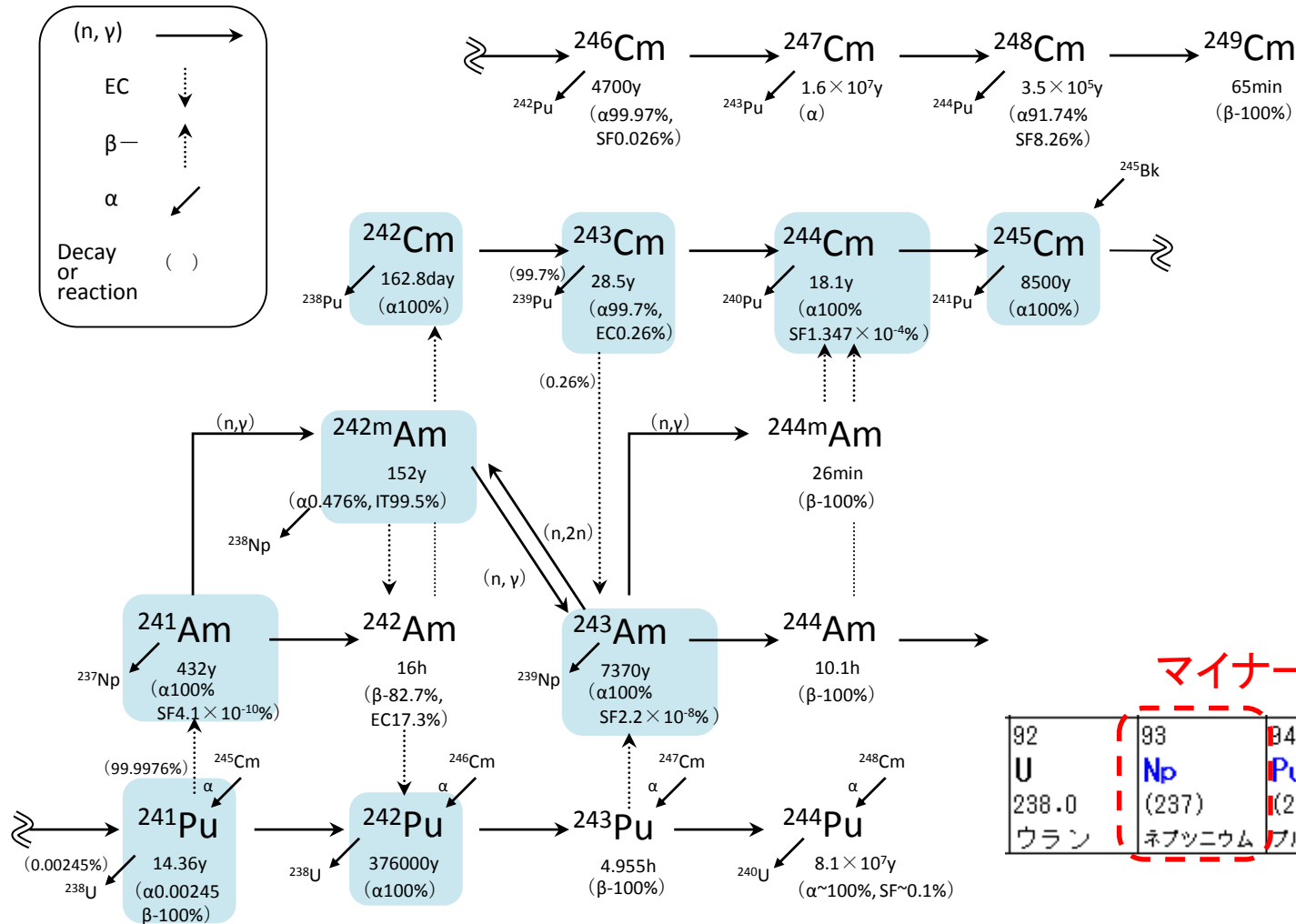
2. 核廃棄物とは？、放射性廃棄物とは？

① マイナーアクチノイド元素



2. 核廃棄物とは？、放射性廃棄物とは？

①マイナーアクチニド元素



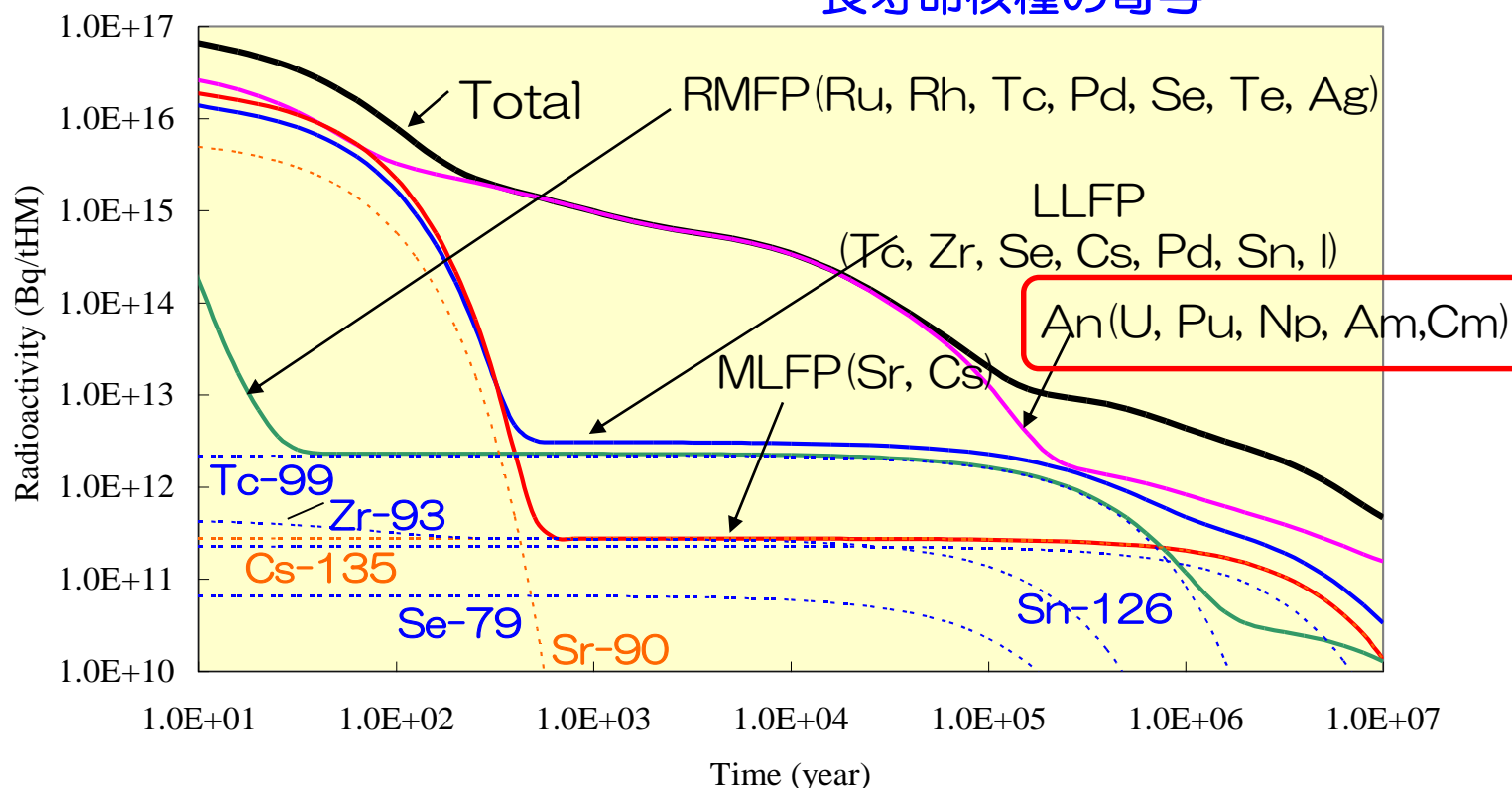
92 U 238.0 ウラン	93 Np (237) ネプツニウム	94 Pu (239) プルトニウム	95 Am (243) アメリシウム	96 Cm (247) キュリウム
--------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------

2. 核廃棄物とは？、放射性廃棄物とは？

①マイナーアクチニド(MA)元素

マイナーアクチニド(MA、Am/Np/Cm)は長い半減期のため、長期にわたって放射能を有し、様々な核燃料サイクル戦略に影響を及ぼす。

長寿命核種の寄与

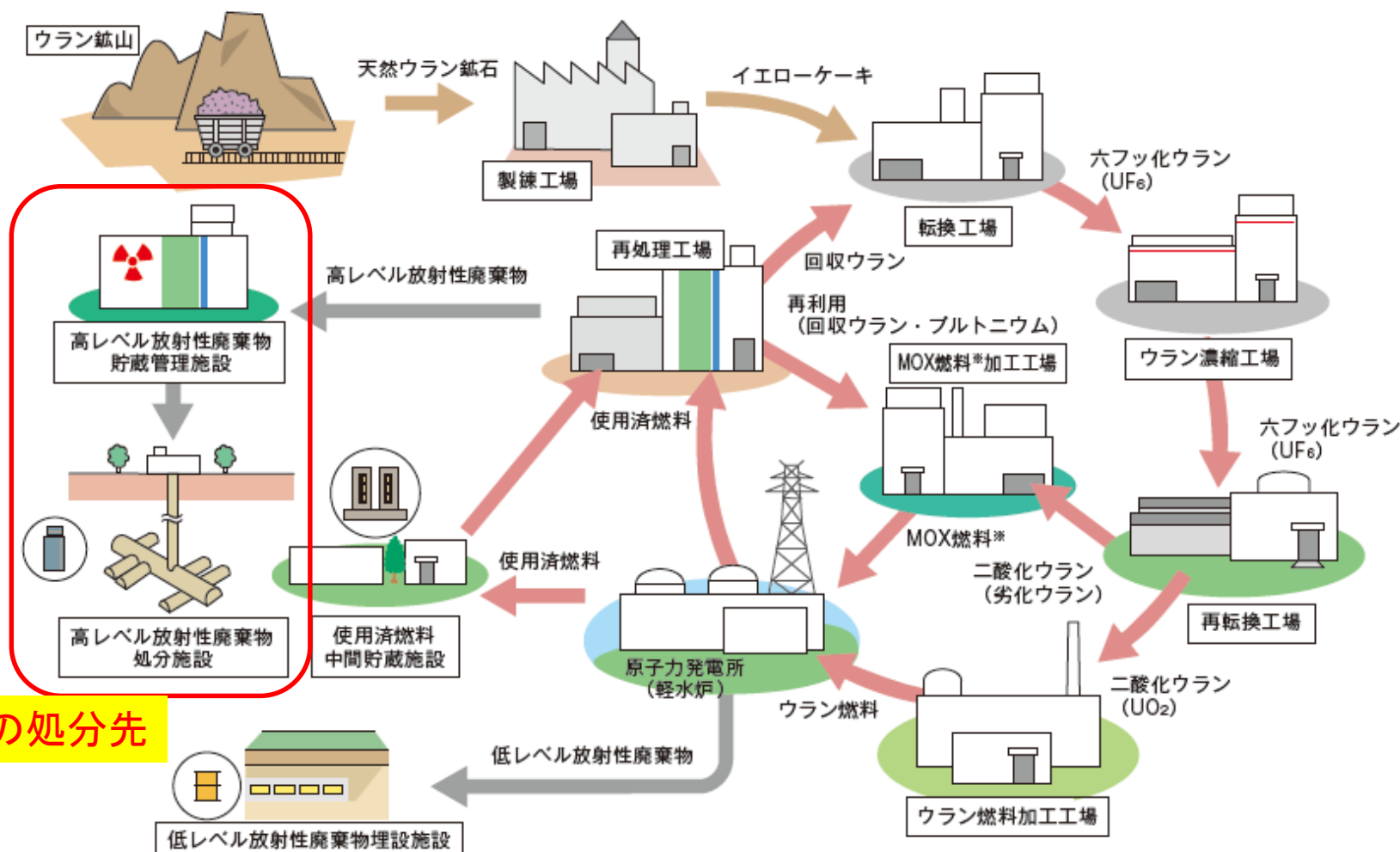


マイナーアクチニドを廃棄物として、処分すれば、「厄介な」核廃棄物(放射性廃棄物)となる



3. 核燃料サイクルの戦略

①核燃料サイクル





3. 核燃料サイクルの戦略

②国策

- 高レベル放射性廃棄物の取扱いに関して、1987年「原子力開発利用長期計画」に基づき、1988年に「群分離・消滅処理技術研究開発長期計画」が示された。

①「群分離」に関する技術開発計画

-HLWの群分離、再処理不溶解残渣中の有用金属回収及びその有効利用

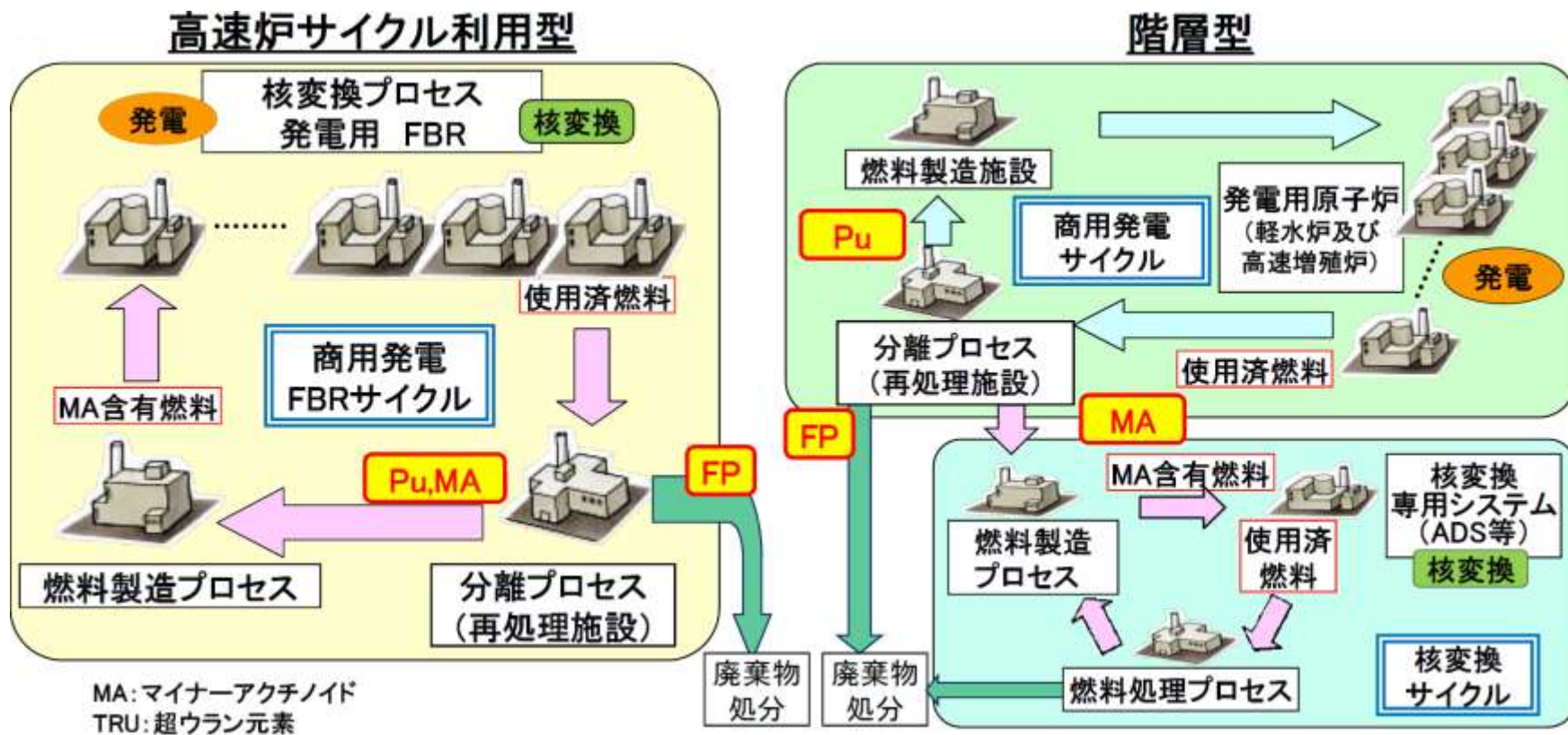
②「消滅処理」に関する技術開発計画

-長寿命放射性核種の原子炉による消滅処理及び加速器による消滅処理



3. マイナーアクチノイドの消滅処理

③新しい核燃料サイクル1



PuやMAをUと同等に扱う

MAを特別な扱いを行う。
(取扱いリスクを集中させる)

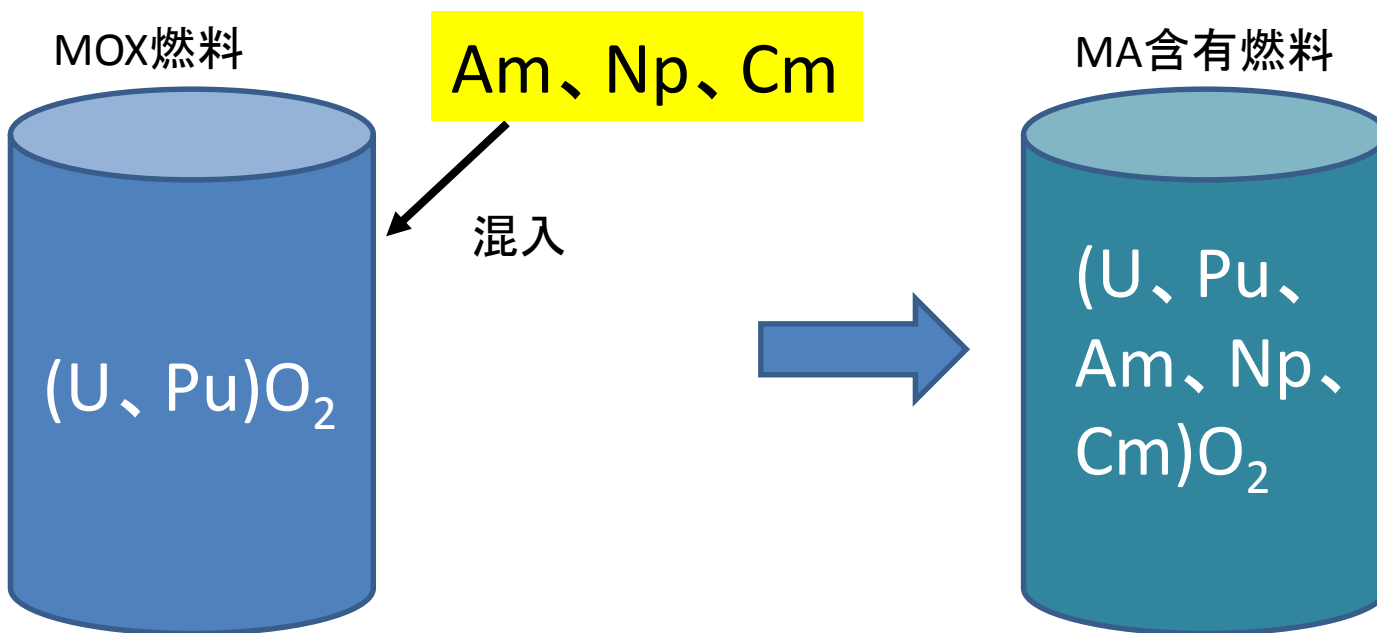
3. マイナーアクチニドの消滅処理

④核燃料に求められる一般的な要件

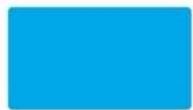
- ① 燃料ペレットの製造が容易なこと
(放射線などの影響が少ない)
- ② 燃料が溶融しないこと (→ 熱伝導が良いこと)
- ③ 密度が高いこと
- ④ 被覆管にひずみを与えないこと

3. マイナーアクチニドの消滅処理

⑤実用化に耐えうるMA含有燃料における開発課題



MAを含有させることで、どんな性質の変化起こり、原子炉で燃やすためには何が必要となってくるか

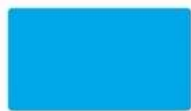


3. マイナーアクチニドの消滅処理

⑥実用化に耐えうるMA燃料における開発課題

- ① MAの放射線が強いので、遠隔製造が必要
- ② 密度の高いペレットをつくることが難しくなる
- ③ 熱伝導率が低くなる、燃料融点が低くなる
- ④ α 線を多く出すので、Heガスが多く出て燃料ピンの内圧が上昇する

これらの課題に対して、製造プロセス改善・設計対応が必要



3. マイナーアクチニドの消滅処理

⑦燃料融点

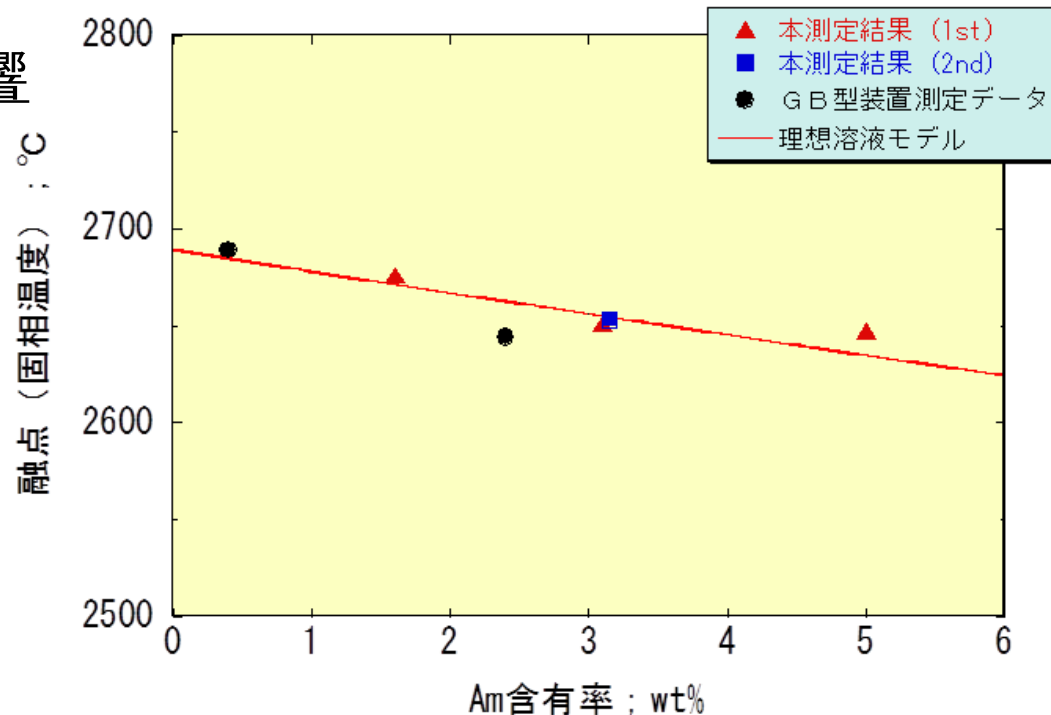
燃料融点におよぼすAm添加の影響



サーマルアレスト法による評価



廣沢孝志ら、日本原子力学会 2004年秋の学会、G35.



Am1%あたり、10°C程度融点が低下。

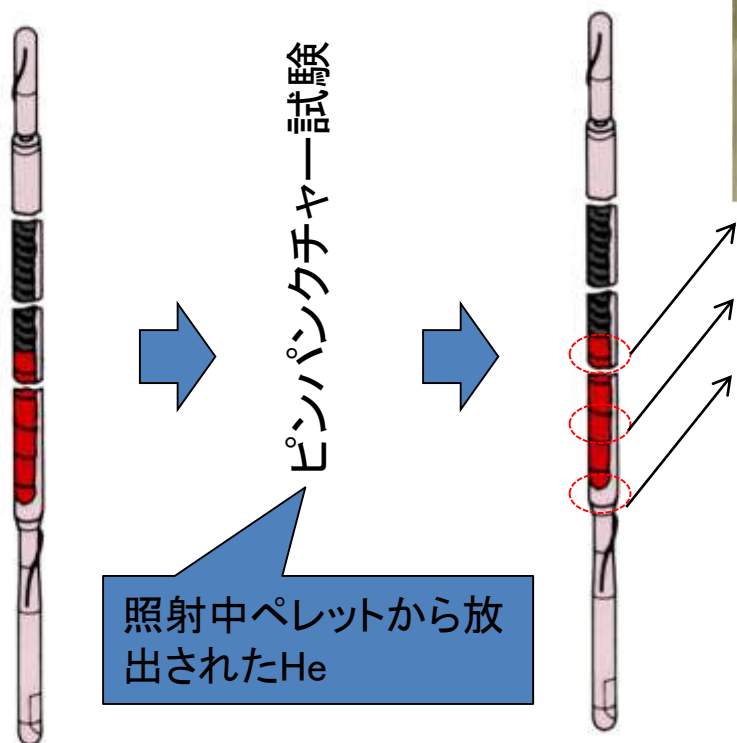
⇒低下する熱伝導率を勘案した設計
対応が必要



3. マイナーアクチニドの消滅処理

⑧Heガス放出挙動1

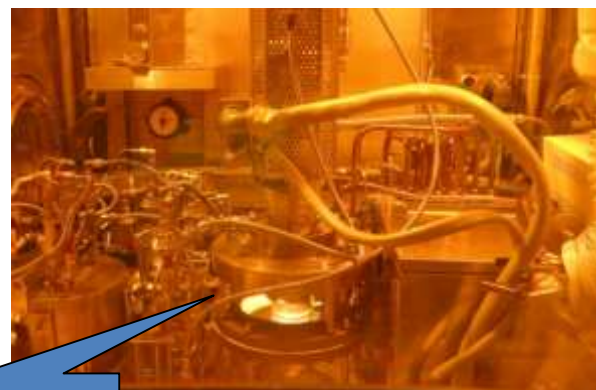
照射中におけるHe放出挙動



分取したペレット



加熱して、
放出するHeの分析



ペレット残留He

FP放出挙動試験装置

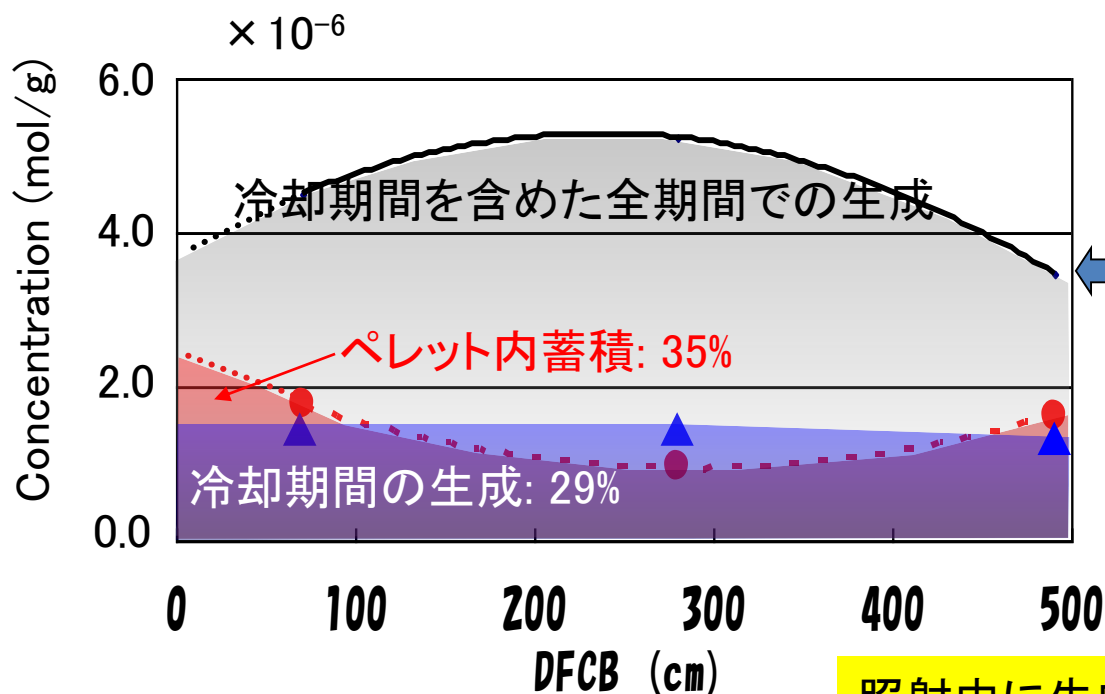


3. マイナーアクチニドの消滅処理

⑨Heガス放出挙動2

照射中におけるHe放出挙動

＜ピン内でのHeのマスバランス＞



ピンパンクチャー試験

≒ 100% 放出

良い一致！

照射中に生成したHeのほとんどが、
ペレット外に放出されている

→ He100%放出を想定した設計対応

3. マイナーアクチニドの消滅処理

⑩MAの再分布

Amの再分布挙動(10分照射)

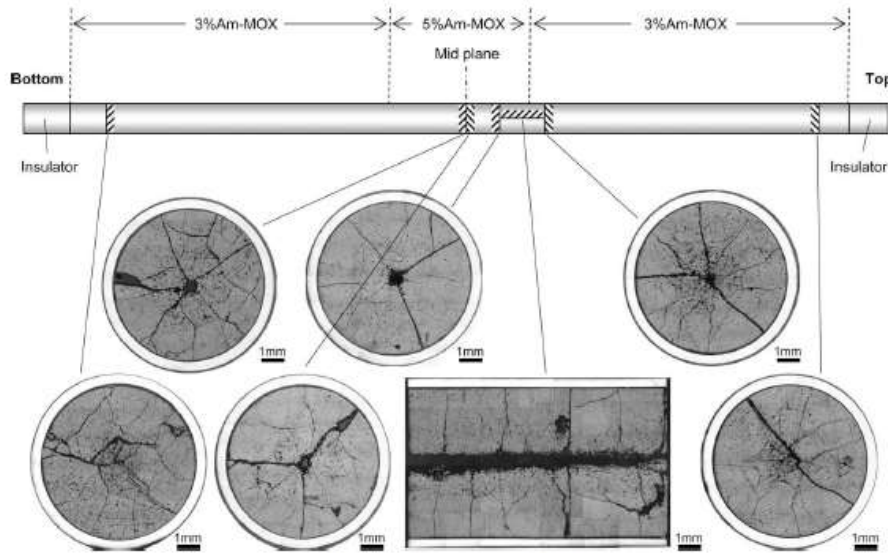


Fig. 3. Ceramographs of Am-MOX fuel pellets.

K. Tanaka, S. Miwa, I. Sato et al, J. Nucl. Mater., 385 (2009) 407.

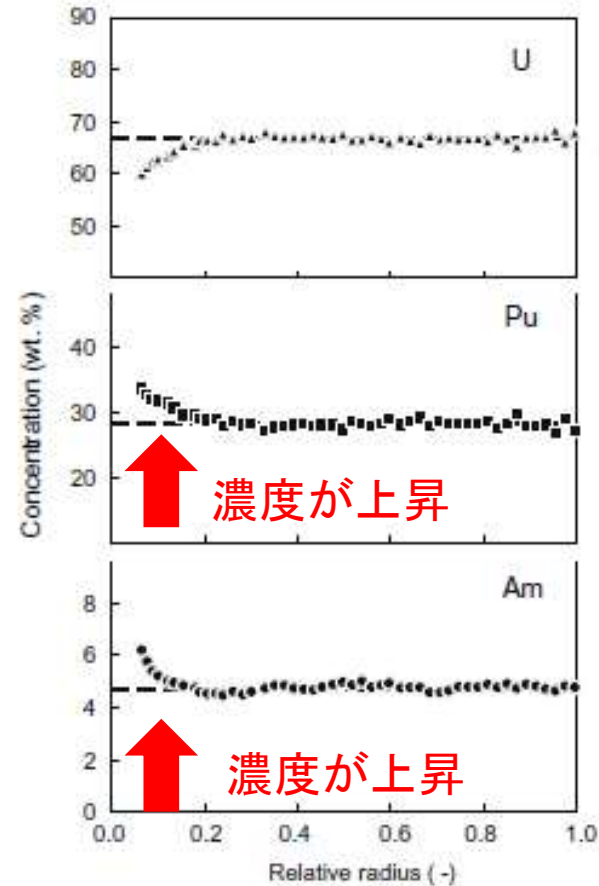
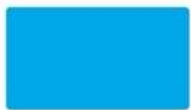


Fig. 6. Radial distributions of U, Pu and Am.

・Amは、Puと同様に中心空孔付近で濃度上昇
→ Am、Pu濃度上昇で低下する融点を
設計に用いる必要



3. マイナーアクチニドの消滅処理

⑪ 実用化に耐えうるMA燃料における開発課題(再)

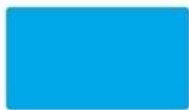
① MAの放射線が強いので、遠隔製造が必要

② 密度の高いペレットをつくることが難しくなる

遠隔製造技術開発の推進、焼結方法の改善で対応

③ 熱伝導率が低くなる、燃料融点が低くなる

④ α 線を多く出すので、Heガスが多く出て燃料ピンの内圧が上昇する



3. マイナーアクチニドの消滅処理

⑫照射挙動・物性変化を通じ設計対応1

【燃料の熱設計】

- **熱伝導率**をMA濃度、O/M比の依存性として整理した評価式①
- **燃料融点**をMA濃度、**燃焼度**の依存性として整理した評価式②
- 中心付近の**Am、Pu濃度**を**燃焼度**(出力)依存性として整理した評価式③
- ②を考える際、③を勘案し、燃焼燃料の融点を評価

⇒出力の制限

【機械設計】

- 高い濃度のMA燃料から燃焼中生成される**He**が**燃焼度と直線的に100%放出**するとして、被覆管クリープ損傷和(CDF)を計算

⇒プレナムの伸長、被覆管肉厚の増加

3. マイナーアクチニドの消滅処理

⑬照射挙動・物性変化を通じ設計対応2

【核熱設計(均質サイクル)】

- MA核種の核変換により影響される出力履歴に注目

⇒末期でも出力が低下しない性質
⇒履歴を通じた燃料の熱設計を実施

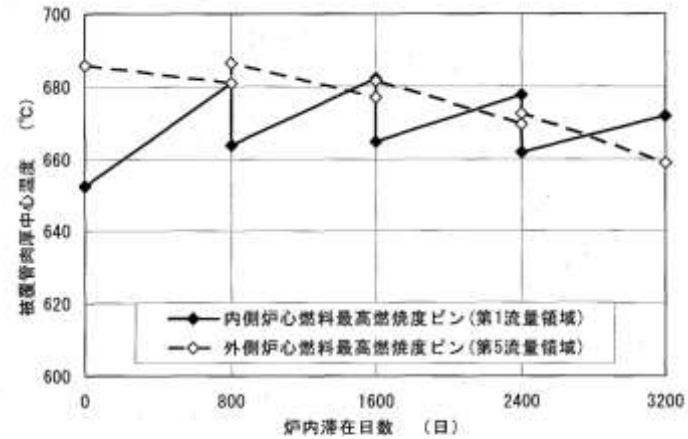
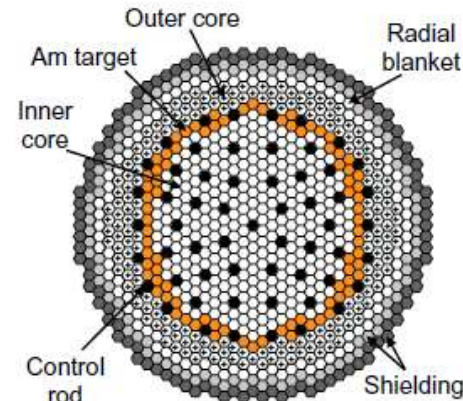


図 2.1-4 大型 MOX 燃料高内部転換型炉心の被覆管最高温度履歴
(ALWR 使用済燃料回収 TRU 適用)

小川 隆、佐藤 勇、他、JAEA-Research 2006-061.

【核熱設計(高濃度MAターゲット)】

- 出力の平坦化のために、
内側と炉心燃料と外側炉心燃料
の間に配置



S. Ohki, I. Sato et al,
Global 2007, Boise, Idaho,
September 9-13, 2007

Fig. 8. Core configuration of the Am-target loading case
(Am content: 20 wt%; Loading position: around the 10th
assembly layer)

4. まとめ

- MAを処分せず、燃料とともに核燃料サイクル内に閉じ込める戦略を考えた
- MAを含有した燃料に生じる課題を研究し、その性質を整理した
- 核燃料として実用に耐えうるために、必要な設計対応について提示し、一定の成立性を示した

(参考)本報告で材料とした種々の研究

① MA燃料遠隔製造技術開発・照射試験：1990年代～

- JAEA全社的に取り組んでいる研究プログラム。
- 遠隔製造技術開発を照射燃料試験施設(AGF)で実施。
- 「常陽」での短期照射(10分、24時間)後の照射後試験をAGFで実施。

② 「次世代核燃料サイクル技術開発計画」：2004年～2005年

- JAEA全社的な「MA燃焼技術開発検討会(総括：永田敬)」のもと、
「MA燃焼技術開発作業会」が取り組んだ研究プログラム。
- 核燃料サイクル技術を、「早く」、「多量」に、「低コスト」で、段階的に実現する研究
開発計画を検討(JNCLレポート JNC-TN9440-2005-004)。

③ 「効果的環境負荷低減策創出の為の高性能Am 含有酸化 物燃料の研究」：2005年～2009年

- 文部科学省・原子力システム研究開発事業として、JAEA・AGS(研究代表：田中健
哉)が主体として実施。
- 高性能Am含有燃料製造・物性評価及びサイクルコンセプト・コスト評価を実施。

(参考)本報告で材料とした種々の研究

④ MAリサイクルのための燃料挙動評価に関する共通基盤 技術開発：2007年～2009年

- 文部科学省・原子力システム研究開発事業として、基礎工部門(研究代表：荒井康夫)が主体として実施。
- 燃料健全性評価上重要な燃料中のHe挙動、Cm、Amを含有した燃料の物性を解明する研究を実施。

参考文献

① MA燃料遠隔製造技術開発・照射試験：1990年代～

- 廣沢孝志ら、日本原子力学会 2004年秋の学会、G35.
- H. Yoshimochi et al, J. Nucl. Sci. Technol., 41(2004) 850.
- M. Osaka, I. Sato et al, J. Alloys & Compounds 397 (2005) 110.
- 佐藤 勇ら、日本原子力学会 2006年春の学会、E40
- 佐藤 勇ら、日本原子力学会 2006年秋の学会、H31.
- 門藤 健司、佐藤 勇ら、日本原子力学会 2006年春の学会、E41
- K. Tanaka, I. Sato et al., Global 2007, Boise, Idaho, September 9-13, 2007.
- 佐藤 勇ら、JAEA-Research-2007-013 (2007).
- K. Tanaka, S. Miwa, I. Sato et al, J. Nucl. Mater., 385 (2009) 407.

② 「次世代核燃料サイクル技術開発計画」：2004年～2005年

- JNCLレポート JNC-TN9440-2005-004

参考文献

③ 「効果的環境負荷低減策創出の為の高性能Am 含有酸化 物燃料の研究」: 2005年～2009年

- 田中 健哉、佐藤 勇 他、日本原子力学会 2006年秋の学会 H27
- 廣沢孝志、佐藤勇ら、日本原子力学会 2006年秋の学会、H28.
- S. Ohki, I. Sato et al, Global 2007, Boise, Idaho, September 9-13, 2007
- K. Tanaka, I. Sato et al, Global 2007, Boise, Idaho, September 9-13, 2007
- 廣沢孝志、佐藤勇ら、日本原子力学会 2009年秋の学会、O46.
- H21 年度文部科学省原子力システム研究開発事業「効果的環境負荷低減策創出
の為の高性能Am含有酸化物燃料の研究
究」成果報告書，日本原子力研究開発機構(2010).

参考文献

④ MAリサイクルのための燃料挙動評価に関する共通基盤

技術開発：2007年～2009年

- 勝山幸三、佐藤勇ら、日本原子力学会 2009年秋の学会、O29.
- 佐藤勇ら、日本原子力学会 2011年春の学会、B40.
- I. Sato et al, J. Nucl. Mater., 416 (2011) 151.

⑤ その他(FS、照射後試験技術開発)

- 小川 隆、佐藤 勇、他、JAEA-Research 2006-061.
- JAEA-Evaluation 2006-002, 2006/07
- T. Hirose, I. Sato, J. Nucl. Mater., 418 (2011) 207.
- T. Hirose, I. Sato, GLOBAL 2011Makuhari, Japan, Dec. 11-16.