

トリウム燃料の許認可に係る課題

第二回 軽水炉・高速炉における トリウム燃料の利用ワーキンググループ

平成22年9月10日

三菱重工業株式会社 福田 龍

前 提

- ・軽水炉での利用を対象
- ・既設の軽水炉(設備)への導入の許認可インパクト
----視野が限定されるが、より具体的な考察可能。
- ・ワンスルー?リサイクル?によらず。
- ・対象となる燃料はThの混合酸化物。
----Th-U233MOX、Th-U235MOX、Th-PuMOX
(+U238)
- ・U/Pu MOXでの知見を活用し可能な限り見通す。
⇒以上の前提をもとに、許認可(安全審査)に関連する事項を広くひとつとおり挙げる。

Th燃料導入の安全審査での視点

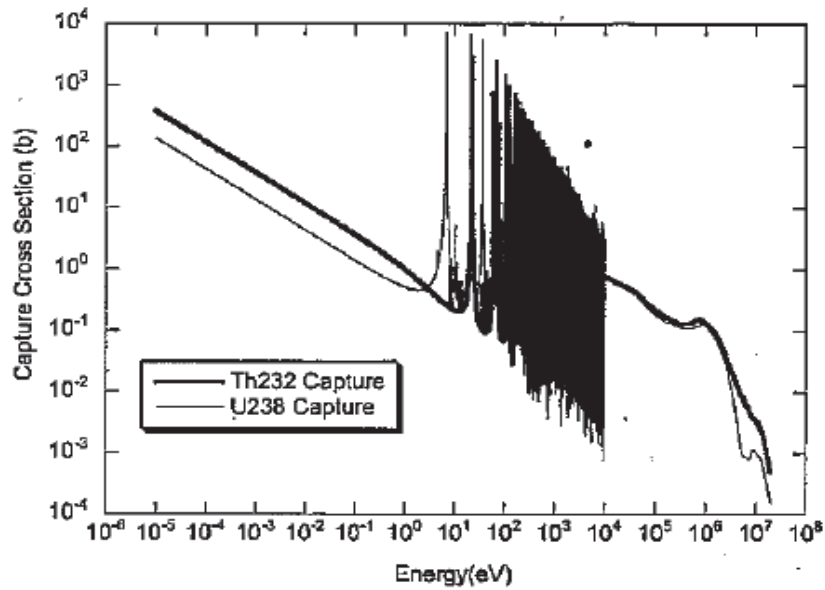
1. 基礎データ : 核データ、ペレット物性データ(熱、機械)
2. 設計(特性):
 - ・炉心特性
 - ・燃料特性(燃料温度、照射挙動全般)
 - ・安全性 ← 炉心特性、燃料特性
3. 評価手法適用性(設計評価の妥当性):
 - ・コード/モデルの適用性(燃料挙動、核設計)
 - ・基準、具体的基準値の適用性

⇒ 許認可データベース: コード/モデル類の作成・検証や具体的基準値類設定のための試験(特に照射材)データの充実がキ。
4. 設備インパクト:
 - ・燃料取り扱い/貯蔵設備(遮へい/冷却/臨界)
 - ・反応度制御(制御棒、ほう酸系)、ECCS

核データの特徴による炉心特性等への影響(1) (U238 → Th232の影響)

- ・共鳴(積分)吸収低下、低エネルギーピーク少、
⇒ ドップラ帰還効果への影響:
U238の低エネルギー(@約7eV)の寄与がない分、効きが低下の方向。
- ・熱中性子捕獲吸収増加
⇒ 反応度制御材(制御棒、ほう酸水)と競合する方向となるが、
 - ・制御材の熱中性子領域での吸収断面積: 大
 - ・U-Pu MOX導入の影響に包含。

Th vs U238 (中性子捕獲断面積)



第3図 ^{232}Th と ^{238}U の捕獲断面積 (JENDL-3.3, 300 K)

出典:トリウム燃料サイクルの研究開発と動向、日本原子力学会誌、Vol47、No12

Th vs U238 主要核定数

第8表 ^{232}Th と ^{238}U の主要核定数 (JENDL-3.3に基づく)

核定数		^{232}Th	^{238}U
捕獲	0.0253 eV 断面積 (b)	7.400	2.717
	Maxwell 分布平均断面積 (b)	6.545	2.414
	共鳴積分 (b)	84.94	278.1
核分裂	核分裂スペクトル平均断面積 (mb)	78.3	308.5

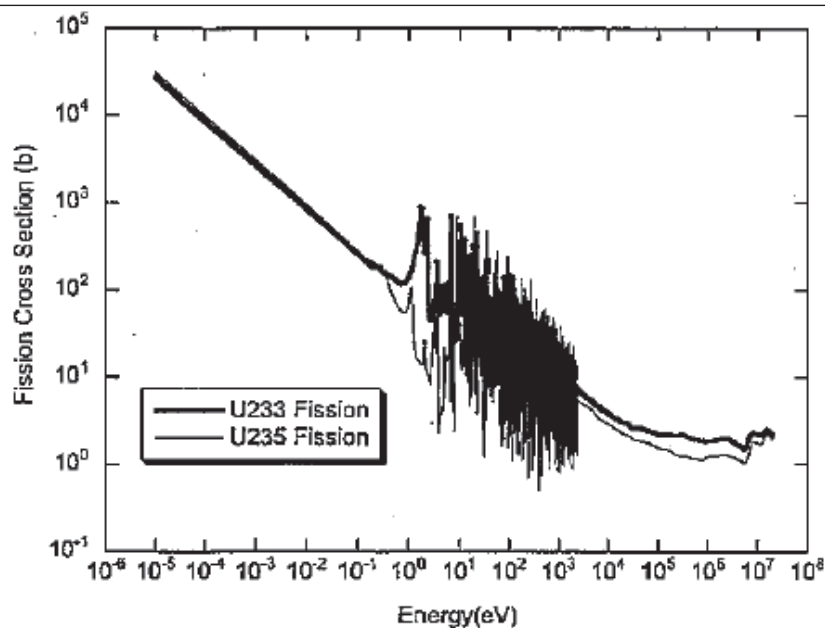
出典:トリウム燃料サイクルの研究開発と動向、日本原子力学会誌、Vol47、No12

核データの特徴による炉心特性等への影響(2) (U235 → U233 の影響)

- η (中性子再生率)大:
 - 軽水炉での増殖または高転換の可能性
 - Fissile(U233)減損は緩やか
 - 燃料間出力分布平坦化に有利、
 - ⇒ 燃料健全性への影響(FPガス、腐食)への考慮要。

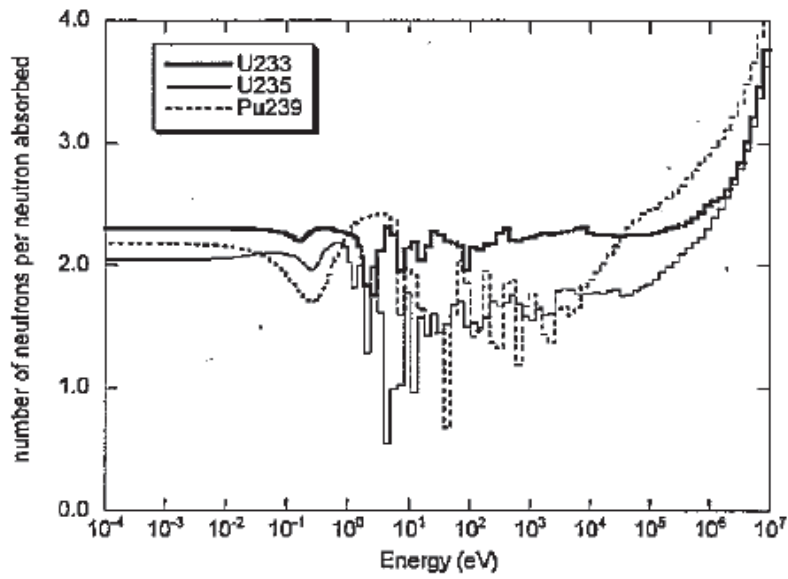
(燃焼が進んでも出力低下度合いが小さいと厳しくなる可能性)
- 熱中性子核分裂断面積:U235と同等。
- β (遅発中性子割合)小:
 - ⇒ 動特性影響(燃焼にともなう変化も少なく小さいまま)

U233 vs U235 核分裂断面積



第5図 ^{233}U と ^{235}U の核分裂断面積 (JENDL-3.3, 300 K)

U233 vs U235、Pu239 中性子再生率 η



第6図 ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu の中性子再生率
 (SRAC用107群 JENDL-3.3ライブラリーを基に作成)
 出典:トリウム燃料サイクルの研究開発と動向、日本原子力学会誌、Vol47、No12

Keffの燃焼に伴う変化の評価例 (Th-Pu MOX vs Th-U233 MOX)

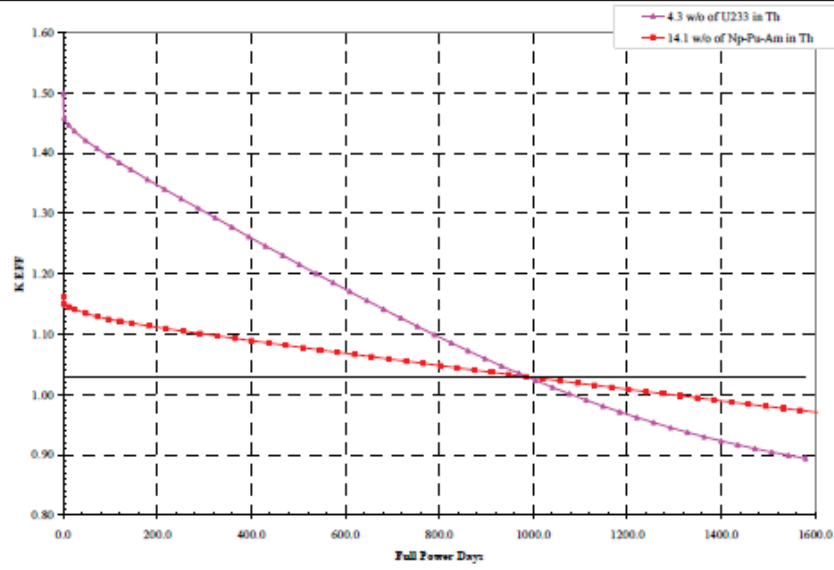


Fig. 1. k-effective as a function of Full Power Days (FPD).
 ⇒ U-Pu MOXの傾向より緩和。現行U燃料と有意な差は認められず。
 出典: Thorium Based Fuel Cycle Options for PWRs, M.Todosow, et al, BNL, ICAPP, 2010

ThO₂ペレット物性データの特徴と設計への着眼点

(1) 熱物性

・融点高、熱伝導率高

⇒ 安全裕度の向上(設計の裕度向上)

-----燃料温度評価、燃料温度→FPガス放出、安全評価(初期条件としての温度、保有熱量等)など。

・熱膨張率:同等以下 & 安定

・比熱(熱容量):

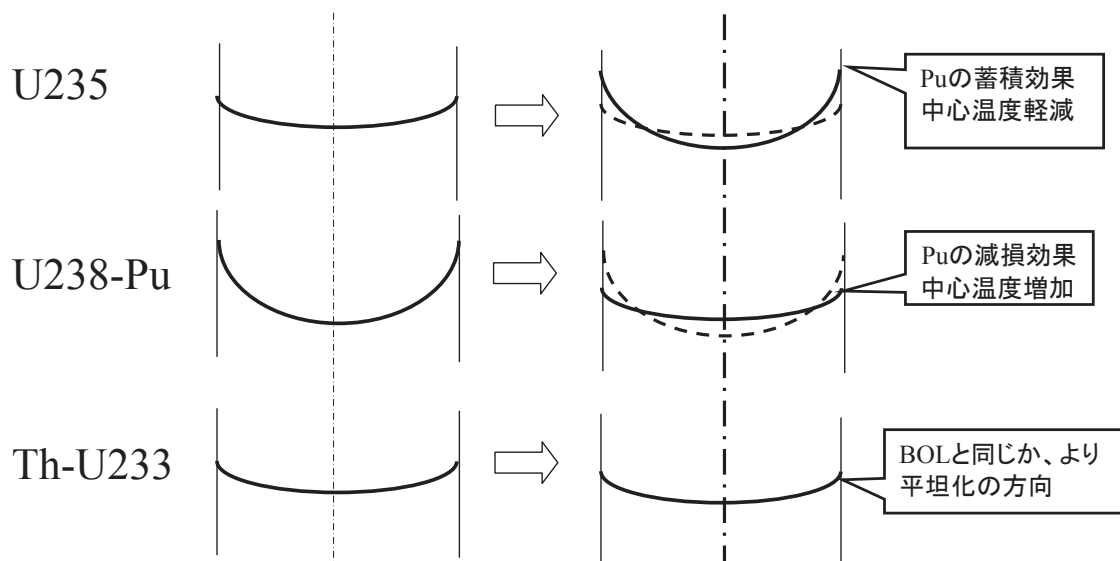
・ペレット半径方向出力分布(デプレッション):

---燃焼を通して比較的平坦(現行U燃料のような燃焼進行に伴うU₂₃₈→Puの外周部の蓄積はなし。Th→U₂₃₃の生成速度も緩やか)
⇒ 燃料温度評価においては必ずしも楽になる訳でないのでチェック要。

ペレット径方向出力分布の燃焼変化と影響

BOL(寿命初期)

EOL(寿命末期)



ThO₂ペレット物性データの特徴と設計への着眼点 (2) 機械特性物性

熱物性とあわせて、以下の機械特性が、応力、歪、PCI(PCMI)の各燃料機械設計に影響する。

- ・ヤング率: 同等
- ・ポアソン比: 同等

- ・クリープ速度: UO₂ペレットより低下?

⇒ PCIデータ取得の合理化(後掲)の点から関心度大。

照射特性

燃料機械設計に関連が深いペレットに係る以下の照射特性について、Th、U233燃料の照射データに基づいた把握が望まれる。

- ・FPガス保持/放出特性:
 - これまでの照射データではThの良好な特性事例あり。
- ・ペレット体積変化特性(焼きしまり、スウェリング)
- ・PCI: 出カランプ試験

燃料健全性への影響(Th,U233特性)

燃料の機械的健全性からの評価項目:

--- 歪/応力、疲労、内圧(クリープアウト)、腐食減肉等

⇒ 以下の点から現行燃料(U,MOX)と比べても同等以上の裕度が見込めると考えられる。

- ・良好な熱的応答(温度、温度変化が低め)
- ・良好なFPガス保持特性
- ・やや懸案な方向となる以下についても、U-Pu MOX導入時の影響よりは緩和される。
 - 燃焼に伴う線出力密度(燃料温度)の低下が緩やか
 - 燃焼に伴うペレット径方向出力分布の変化が穏やか

安全性への影響

以下の各因子から、現行の安全評価への影響は問題ないと考えられる。

- 熱的裕度大:燃料設計同様、熱物性に優れ、現行評価(U燃料、U-Pu MOX燃料)に対して大きな余裕。
 - 初期熱点(温度、保有熱)も低下。
- 核的パラメータ:安全解析入力値に有意な変更はないと考えられる。---- Thの共鳴積分小、U233の β 小より、Th-U233燃料・炉心での反応度投入事象への影響、全数装荷時の過冷却事象の反応度投入事象の該当の有無など、事前にチェックできると望ましい。
- 事故時燃料挙動モデル:ペレット固有モデルは特になし(被覆管モデル(LOCA)が主)
- 判断基準:基本的に現行基準から変更なしと考える(後掲)

被ばく評価(事故時公衆)への影響

■ 基本特性:

- ・核分裂収率: U233 vs U235 (Xe, Kr, Iに着目)

----- 大差なし。

----- 全く同一ではないが、U235 vs Pu239* の差と比べても小さい。(次頁図) *同一の収率で被ばく評価

- ・被覆管-ペレットギャップ放射エネルギー:

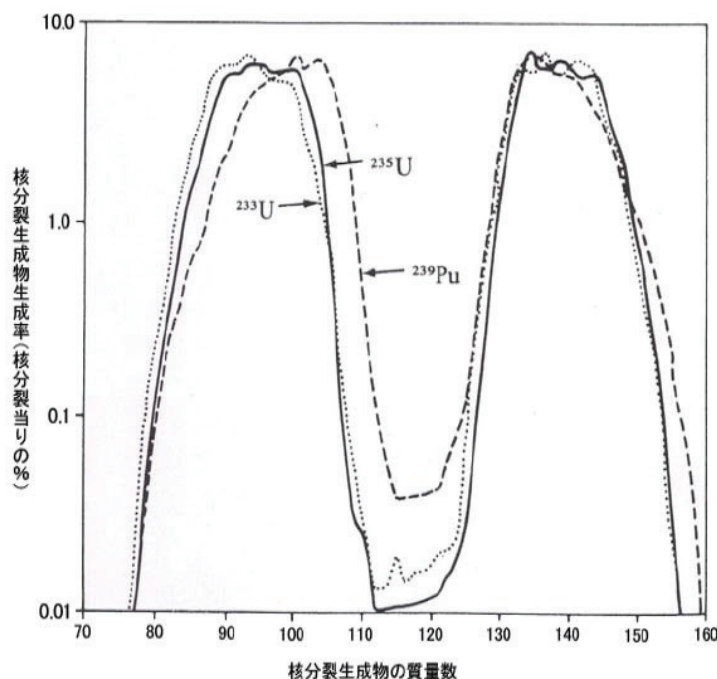
---- 現行より緩和(Th燃料温度の低下)

■ 安全評価結果(事故時の燃料破損規模)

- ・大差ないと考えられる。

⇒事故時の放出放射能/線量評価において、Th-U233燃料に対して特に厳しくなる要因は考えにくい。

核分裂収率の比較



出典:「原子炉技術の発展(上)」, W.Marshall編、裳華房

評価手法の妥当性のためのデータベース(1)

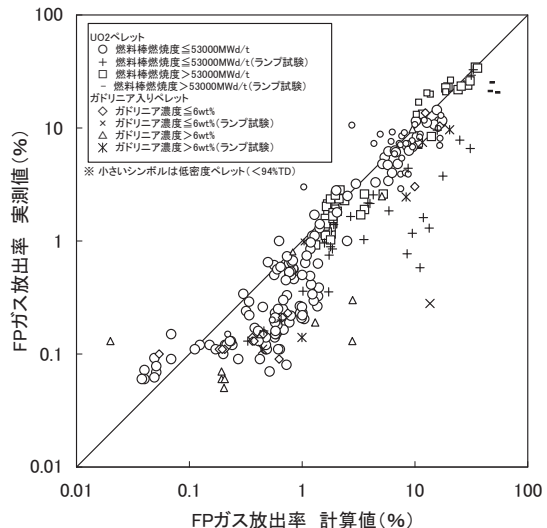
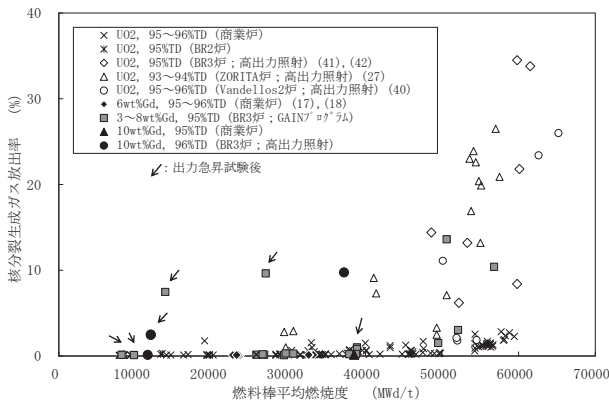
解析コード/モデル類(1/2)

- 燃料解析コード: ペレット照射挙動関連モデルの作成
 - ・ペレット体積変化(焼きしまり、スウェリング)モデル
 - ・FP(ガス)放出モデル
 - ・燃料温度評価モデル
 - (含、ギャップコンダクタンスモデル、ペレット熱伝導率変化モデル)
 - ・その他 ペレット径方向燃焼度分布
 - (半径方向出力係数の積算データ(μ ガンマスキャン))
- 視点:
 - 実施済み照射後試験(PIE)データを極力活用。
 - 燃料中心温度は別途オンラインデータの取得が望ましい
 - 燃焼度/線出力、仕様を包含するデータが審査側から望まれる最近の傾向を念頭に。

FPガス放出挙動データ(現行UO2データ)

燃焼変化の把握:

解析コード/モデルの予測性:

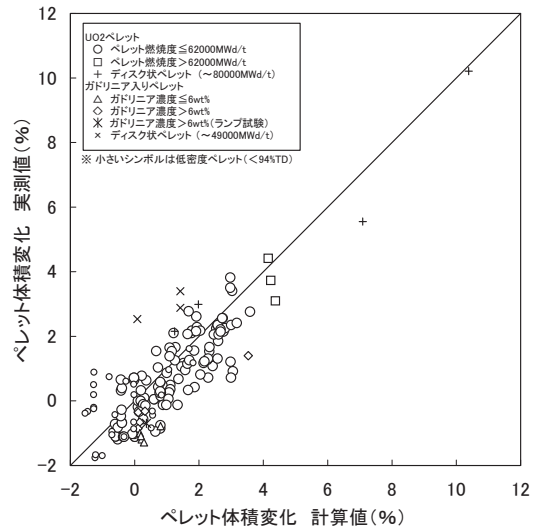
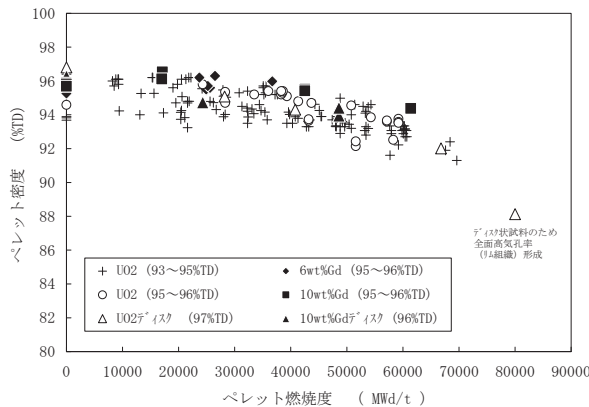


出典:「三菱PWR高燃焼度化ステップ2燃料の機械設計」、MHI-NES-1021改10、三菱重工業

ペレット体積変化データ(現行UO2データ)

燃焼変化の把握:

解析コード/モデルの予測性:



出典:「三菱PWR高燃焼度化ステップ2燃料の機械設計」、MHI-NES-1021改10、三菱重工業

評価手法の妥当性のためのデータベース(2) 解析コード/モデル類(2/2)

■ 核設計コード: 望ましい取得データ

- ・核定数計算: 臨界実験データによる検証*

- ・炉心拡散計算:

臨界実験データ、炉心測定データによる検証*

----- * U-Pu MOX許認可の際に取得

- ・Th関連の核データライブラリの整備も必要?:

「-----高濃縮U・Th混合炉心臨界実験(7炉心)を解析した結果、解析に用いる断面積ライブラリーの違いによる実効増倍率の計算値対実験値比(C/E)の差は、Thを含まない炉心のそれに比べて顕著であり、評価済み核データライブラリ中のTh断面積の改善が必要であることが指摘されている。」

(出典:トリウム燃料サイクルの研究開発と動向、日本原子力学界誌,Vol.47,No.12)

評価手法の妥当性のためのデータベース(3) 具体的判断基準値類の設定

ペレット材変更で具体的基準値類の設定(現行基準値の適用の確認を含む)で、試験データが必要となる項目は以下。

- 燃料設計：
 - ・ペレット温度評価：溶融点
 - ・PCI破損しきい値
- 安全評価：
 - ・RIE PCMI破損目安値(過渡)
 - ・RIE ペレット溶融・蒸発制限値(事故)

いずれも燃焼度依存のため、照射サンプルの試験が要。

基準類の適用性(1) 燃料健全性 (安全設計審査指針12相当: 損傷劣化モードからの整理)

アンダラインは具体的判断基準値の設定でペレット関連の試験が必要と考えられる項目

健全性評価項目	損傷劣化モード	
	ペレットに着目	被覆管に着目
中心温度	<u>ペレット溶融</u>	-----
被覆管応力/歪	-----	過大歪(過大応力)
被覆管疲労	-----	繰り返し疲労
燃料棒内圧	-----	クリープ変形
被覆管腐食	-----	化学反応 (腐食、水素脆化)
PCI	<u>SCC</u>	<u>SCC</u>

基準類の適用性(2) 燃料の許容設計限界

----安全設計審査指針11、安全評価判断基準関連

アンダラインは具体的判断基準値の設定でペレット関連の試験が必要と考えられる項目

分類	判断基準(燃料関連)	判断基準 補足
異常な過渡変化: ---被覆管破損の防止	被覆管1%塑性歪み (被覆管機械的破損防止)	
	最小DNBR(MCPR) (被覆管熱的破損防止)	
	反応度投入事象(RIE)時 被覆管破損防止	溶融・脆化型(170cal/g)、 または高温破裂型 <u>PCMI破損</u>
事故 --- 炉心の著しい 損傷の防止、 冷却形状の確保	LOCA ECCS性能	PCT/ECR
	RIA 制限値	<u>ペレット溶融/機械的エネルギー発生</u> (230cal/g)

基準類・具体的基準値

■ 基準の適用:

ペレット材の変更に対して現行の基準の適用に問題はないと考える。

■ 具体的基準値の設定:

試験(照射サンプル)により具体値を設定してきている以下が実用化の工程においてクリティカルとなる。

- ・燃料設計: PCI破損しきい値(出カランプ試験)
- ・安全評価: RIE時の基準類(NSRR実験等)

- ・PCMI破損のめやす値

(・事故時ペレット溶融・蒸気爆発び制限値)*

* 未照射ペレット実験が主。

出カランプ試験データとPCI破損しきいライン (現行ウラン燃料対象)

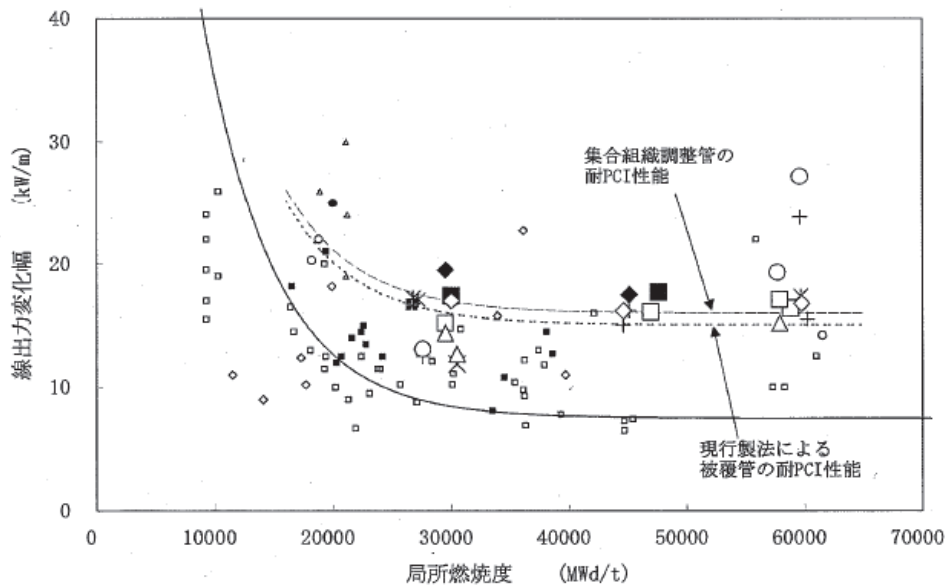


図3.1.1-13 被覆管の出カランプ試験結果^{(9),(19),(20),(22)}

出典:「三菱PWR高燃焼度化ステップ2燃料の機械設計」、MHI-NES-1021改10、三菱重工業

PCI破損しきい値設定の合理化アプローチ

■ 過去～現在:

- ・昔: Zry4管として国際的なランプ試験を重ねメーカ共通のしきい値設定が可能。(オーバランプ、スーパランプ、Pgr等)
- ・現在: メーカごとに耐食性改良管を競い開発。これに伴いしきい値も別途に設定が必要。さらに製造パラメータの違いもしきい値に反映。⇒ 経済・工程的負担が急増。

■ 合理的な検討:

- ・産業界、JNES等でも代替試験等の検討が謳われている。(ただし照射サンプルの試験は必要の方向。)
- ・従来までの試験データ、現行燃料の試験データを有効活用し、Th燃料の試験データの取得を必要最小限に抑える手立てがないか？

例: しきい値設定目的 ⇒ 性能向上の実証目的
& 現行しきい値適用

従来のPCIしきい値の適用の可能性(検討例)

UO₂ vs ThO₂ 比較 (○:UO₂より優、△:UO₂より厳)

■ PCCI 関連:

- FPガス放出量(率): 低 ---○
- ペレット温度 : 低(熱伝導率大) ---○

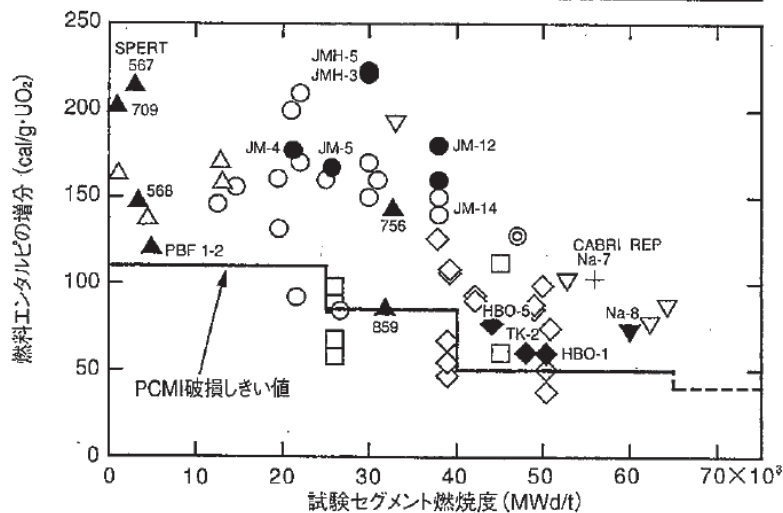
■ PCMI 関連:

- 熱膨張量 : 小 ---○
(温度: 低、熱膨張率: 同等)
- ペレットクリーフ速度 : 小 ---△

■ 相対比較を目的とした応力(緩和)解析 等

RIE PCMI破損しきい値の設定とデータベース (JAEA NSRRを中心とした反応度投入実験)

実験シリーズ		破損せず	破 損	実験シリーズ		破損せず	破 損
NSRR	PWR	◇	◆	SPERT, PBF	△	▲	
	BWR	□	■	CABRI (UO ₂)	▽	▼	
	JMTR	○	●	CABRI (MOX)	◎	+	



Th燃料の設計・許認可データベース分類

	燃料関連データ (燃料設計、燃料安全)	炉心設計関連データ
炉外試験	物性(含、照射サンプル)	臨界実験(臨界、ロットワイ ス出力分布、他)
試験炉 照射 (& PIE)	通常時(高出力/高燃焼) 照射 & PIE---モデル オンライン温度測定、 <u>ランプ(PCI)、NSRR(RIE)</u>	-----
実機照射 (& PIE)	<u>実機照射後PIE</u> (含、先行照射、海外炉実績)	実機運転データ (出力分布、臨界濃度、他)

ランプ試験データ等の取得合理化、既存データの極力有効活用、海外軽水炉でのTh燃料データの限定、対象燃料の多様さ(Thのペア:233, 235、Pu, +238)、ونسル-の場合の高燃焼度要求への対応データ、等々

設備影響(1):新燃料取扱い・貯蔵設備

- ・新燃料(Th-U233)遮へい (取扱い時)
 - U-Pu MOX新燃料と比べて:
 - ・Am、Cmからの寄与は無視できる。
 - ・U232からのBi,Tlからのガンマ線に対する考慮要。
 - ・線量評価に基づき適切な気中扱い&遮へいを検討
 - ・U-Pu MOXのように受け入れ直後から、水中での扱い ⇒ 部分装荷のMOXと異なり容量の検討要。
- ・新燃料の冷却 (貯蔵時)
 - ・U232起因の発熱に対する考慮。水中保管では解決。
- ・新燃料の未臨界性確保 (貯蔵時)
 - 基本的に同等の反応度のU235燃料と同程度と予想。

設備影響(2):使用済み燃料貯蔵設備

- ・現行燃料と同様、当然水中での取り扱い。
- ・貯蔵時の遮へい、冷却については、以下の特性を踏まえ、現状の設備で対応できることを確認する必要がある。
- ・U233照射燃料の特性:(超長期は発電所設備検討の対象外)
 - ・短期:FP寄与----U235と大差なし。
 - ・長期:TRU寄与---U235,U-PuMOXより軽減
 - ・超長期:U232Daughterの寄与増加。要考慮。
- ・特性比較:次頁図(線量)、次々頁図(発熱)

使用済み燃料の線源強度 計算例 (U233 vs U235)

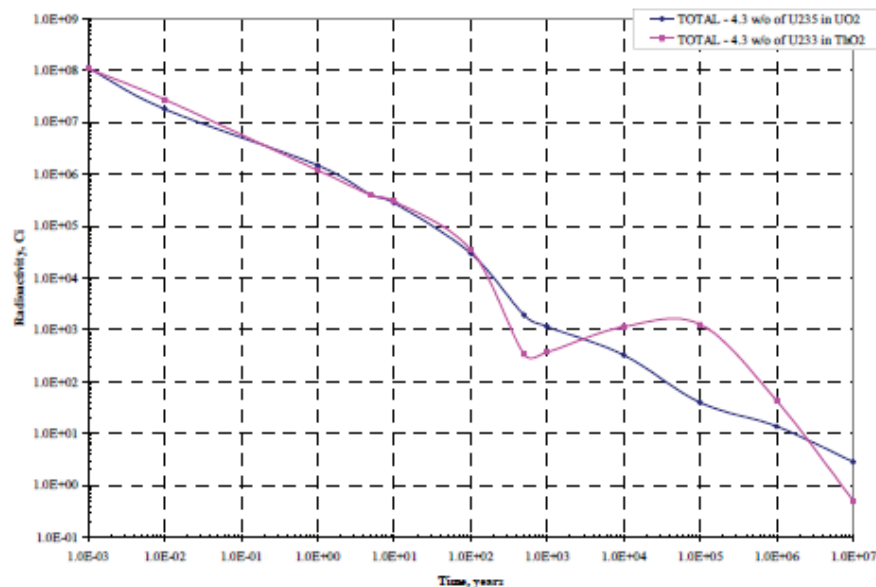


Fig. 2. Radioactivity of the spent fuel for U233-Th and U235-U fuel cycles (Curies per assembly).

使用済み燃料の発熱 計算例 (U233 vs U235)

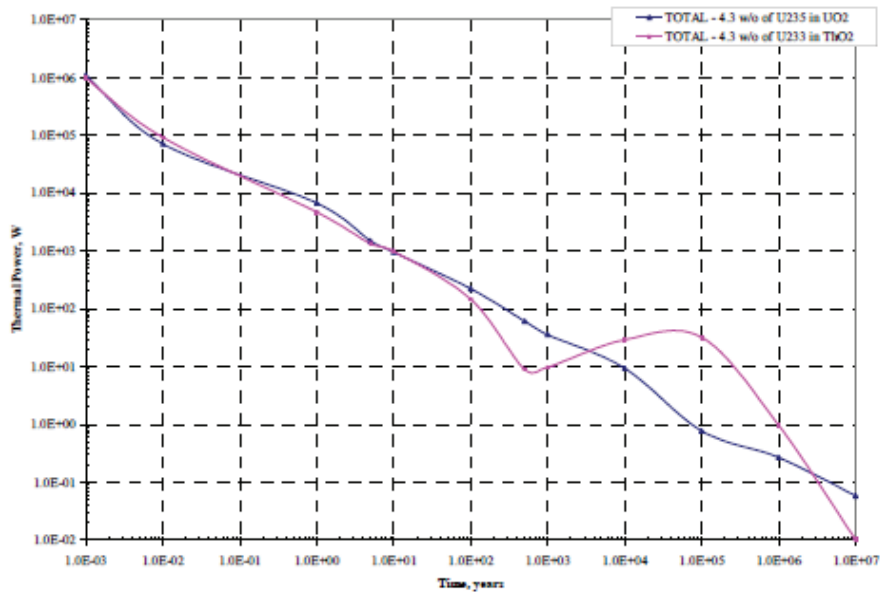


Fig. 3. Decay Heat of the spent fuel for U233-Th and U235-U fuel cycles (Watts per assembly).

出典: Thorium Based Fuel Cycle Options for PWRs, M. Todosow, et al, BNL, ICAPP, 2010

設備影響(3): 反応度制御/原子炉停止系設備

制御棒(高温停止)、ほう酸タンク系(低温停止)

- ・母材変更(U238→Th232)による熱中性子吸収、共鳴吸収の変化、
- ・核分裂性物質変更(U235→U233)による熱中性子核分裂、共鳴核分裂等の変化

⇒ 上記による、熱中性子束、中性子スペクトルへの影響は、U-Pu MOX(~1/4)導入時と比べると小さく、炉心内へのTh-U233全数装荷においても、制御材の価値に大きな影響は与えないと考えられる。

設備影響(4): ECCS(工学的安全施設)

- ・冷却能力:
 - 主にLOCA解析で性能を確認。
 - 炉心ピッキング、燃料保有熱、崩壊熱、等のキパラメ-タにおいてTh-U233燃料が現行燃料・炉心から厳しくなる要因は特に見当たらず。(短期の崩壊熱の変化は詳細確認要)
 - ・負の反応度添加(ほう酸注入)能力:
 - 主に過冷却事象解析で性能を確認。
 - トップラ反応度帰還効果低下、 β 小の影響の把握は必要であるが、ほう素価値は同等と考えられ、ほう酸濃度増加等のU-Pu MOXでの対応の範囲に留まると予想。
- ⇒ ECCS設備への影響も問題とならないと考える。

Th-Pu MOX燃料について

■ 諸特性/設計の特徴、設備影響

基本的に、ベースがU238からThへ変わる影響は小さく、Puの影響は、U→U/Pu MOXでの特徴を踏まえた対応に包含されると考えられる。

- 燃料挙動・設計
 - ・Pu均一度向上のための製法(Puスポット影響軽減)
 - ・燃料設計(FP放出、内圧、腐食、増加)への考慮
 - ← Pu物性、燃焼に伴う穏やかな出力低下、旧製法、等
- 制御能力低下への対応:
 - ・装荷規模(～1/3炉心)、MOX装荷位置工夫
 - ・ほう酸設備の濃度増加、
- 新燃料の線量増加等への対応:水中保管

まとめ：Th燃料の許認可対応

- ・設計の成立性、安全性の確保、設備影響の点から、Th-U233ベースの燃料の既設炉への導入に、問題となる点は特に考えにくい。
- ・キーとなるのは、海外軽水炉でも限られた照射実績を踏まえ、必要な照射データの取得を以下に効率的に、段階的に計画・実施していくか、にあると考える。