

福島第一原子力発電所3号機の 長期保管MOX燃料の健全性について

東京電力株式会社
平成22年7月12日

本資料は平成22年5月31日の福島県原子力発電所安全確保技術連絡会で配布した資料に、専門委員及び委員からのコメント等を反映し、加筆・修正したものです。



東京電力

目次

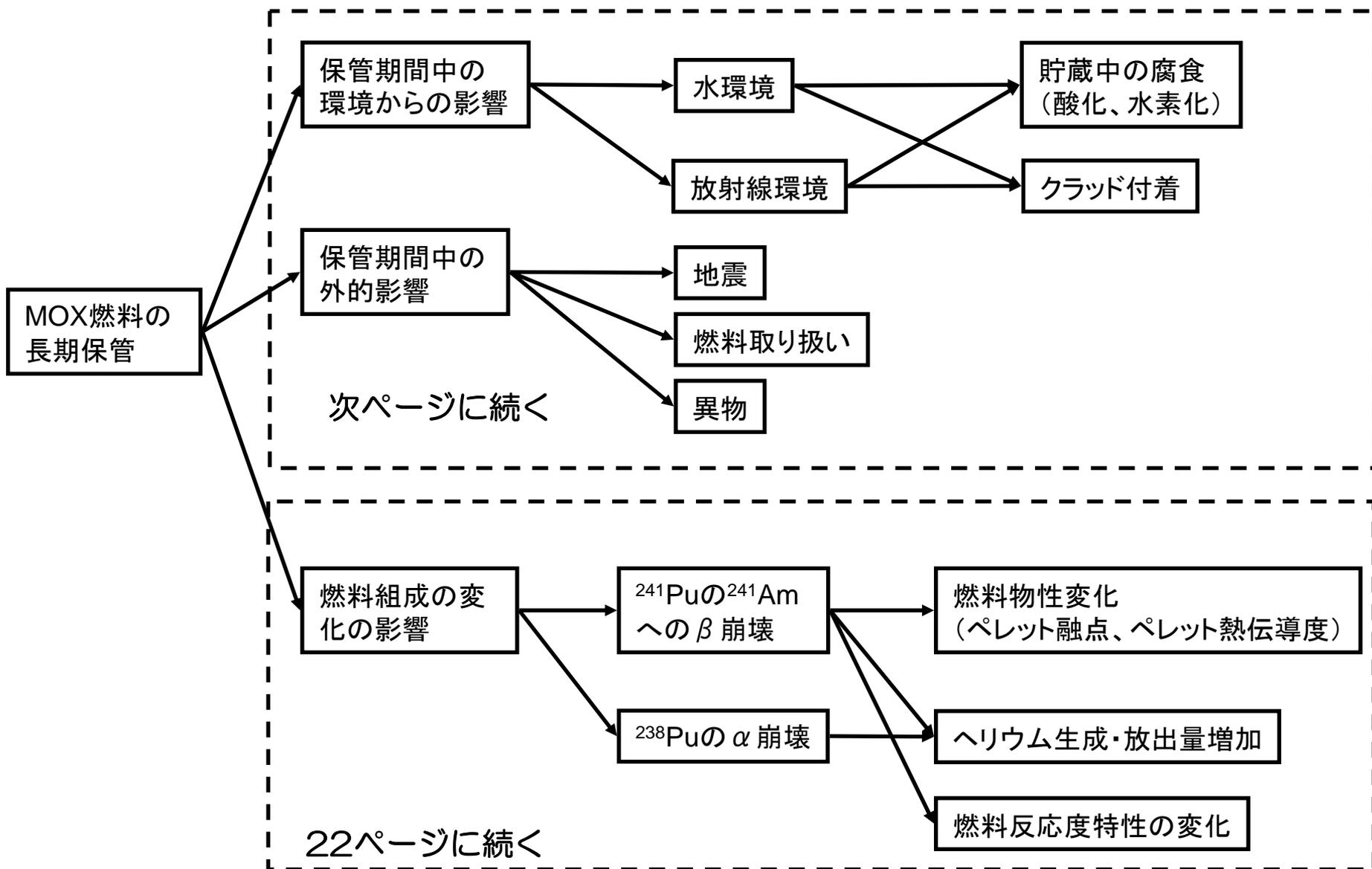
1. 福島第一・3号機MOX新燃料の概要
2. 長期保管したMOX新燃料に想定される影響
3. 環境による影響、その他の影響にかかる確認
4. 燃料組成変化の影響にかかる確認
5. まとめ

1. 福島第一・3号機MOX新燃料の概要

- 福島第一原子力発電所3号機の使用済燃料プールにおいて現在保管しているMOX新燃料は、発電所搬入後、10年以上の長期に亘り水中にて保管されてきた。
- 保管期間中の環境による影響について、外観検査、ファイバースコープ等による燃料集合体内部確認及び保管中のデータ確認によって問題がないことを確認した。
- MOX新燃料には、組成が経時変化するという特徴があることから、その影響について評価した結果、現時点においても問題なく使用できることを確認した。

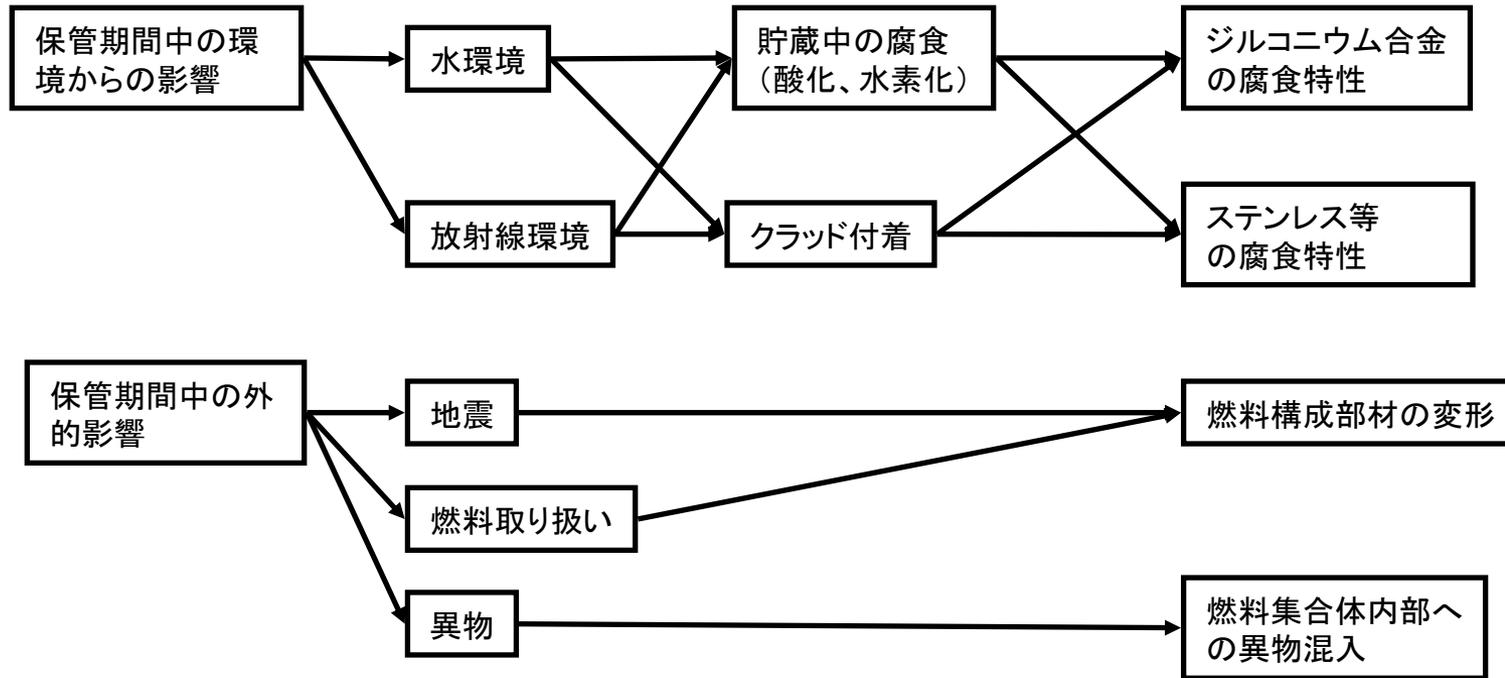
福島第一・3号機 MOX新燃料概要	
搬入時期	平成11年9月27日
体数	32体
製造工場	ベルゴニュークリア社デッセル工場（ペレット・燃料棒製造）／FBFC社デッセル工場（集合体組立）
輸入燃料体検査	平成12年8月10日合格

2. 長期保管したMOX新燃料に想定される影響



3. 環境による影響、その他の影響にかかる確認

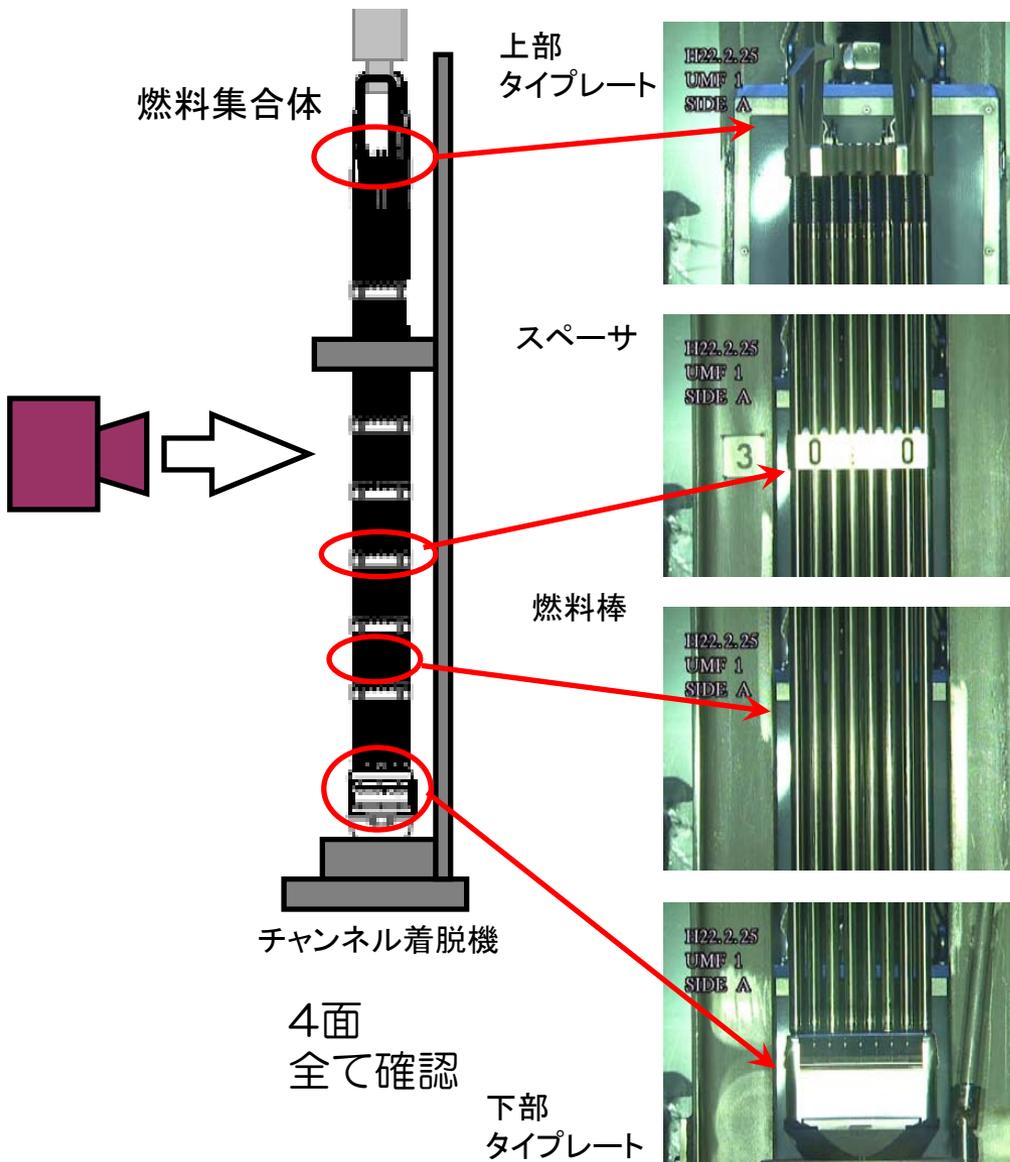
環境による影響およびその他の影響



(燃料健全性への影響の確認方法)

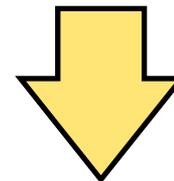
- ・ 燃料集合体外観検査
- ・ ファイバースコープ等による燃料集合体内部確認
- ・ 保管期間中の使用済燃料プールにかかるデータ確認

燃料集合体外観検査



■ 外観検査の判定基準

- 燃料棒の明らかな損傷・つぶれ、燃料棒以外の構成要素の有害な損傷・変形等のないこと。
- 燃料棒間の間げきに狭小な箇所がないこと。
- 燃料棒の明らかな油脂・酸化物等で有害な付着物のないこと。

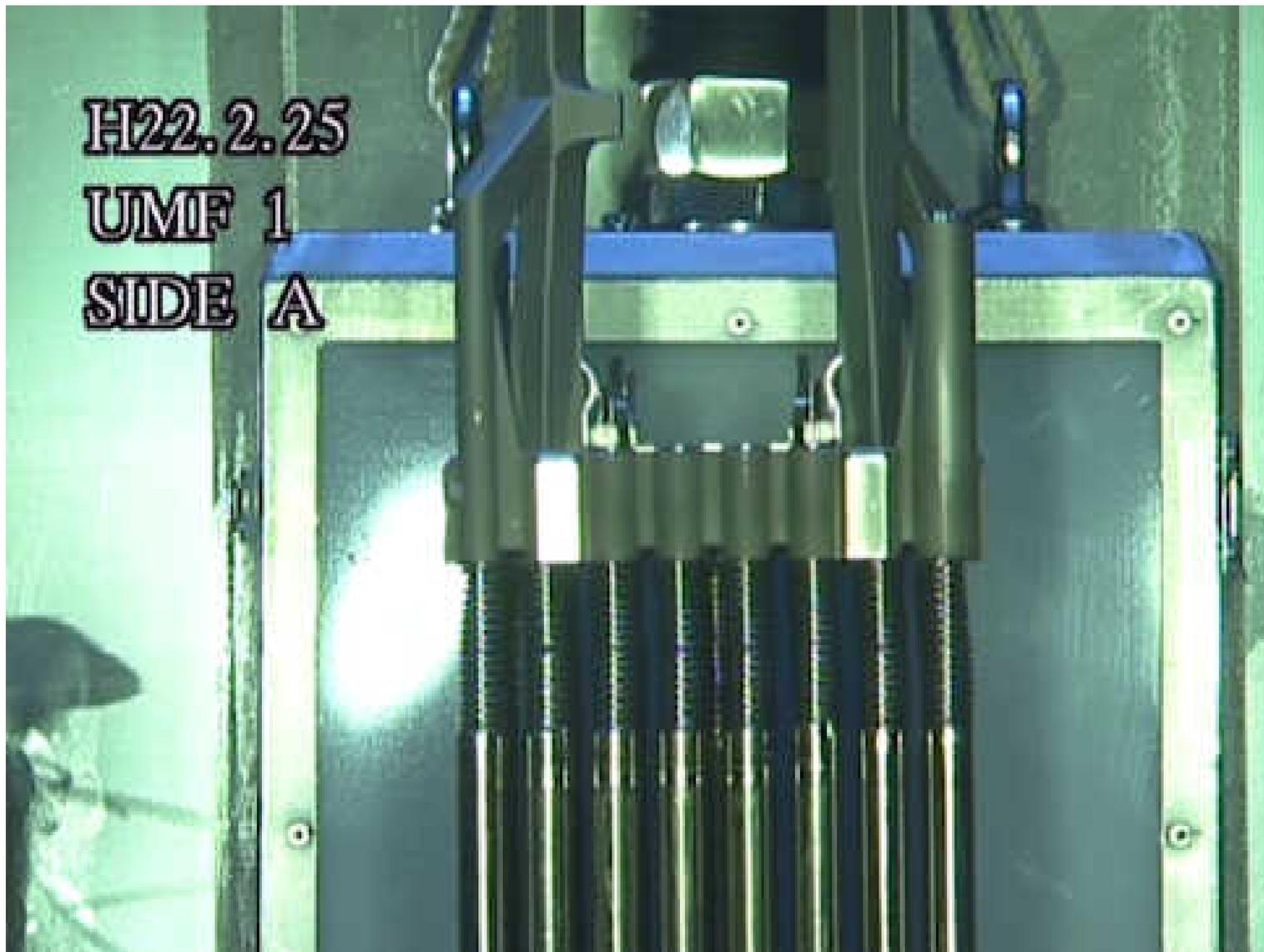


判定基準を満足していることを確認した。

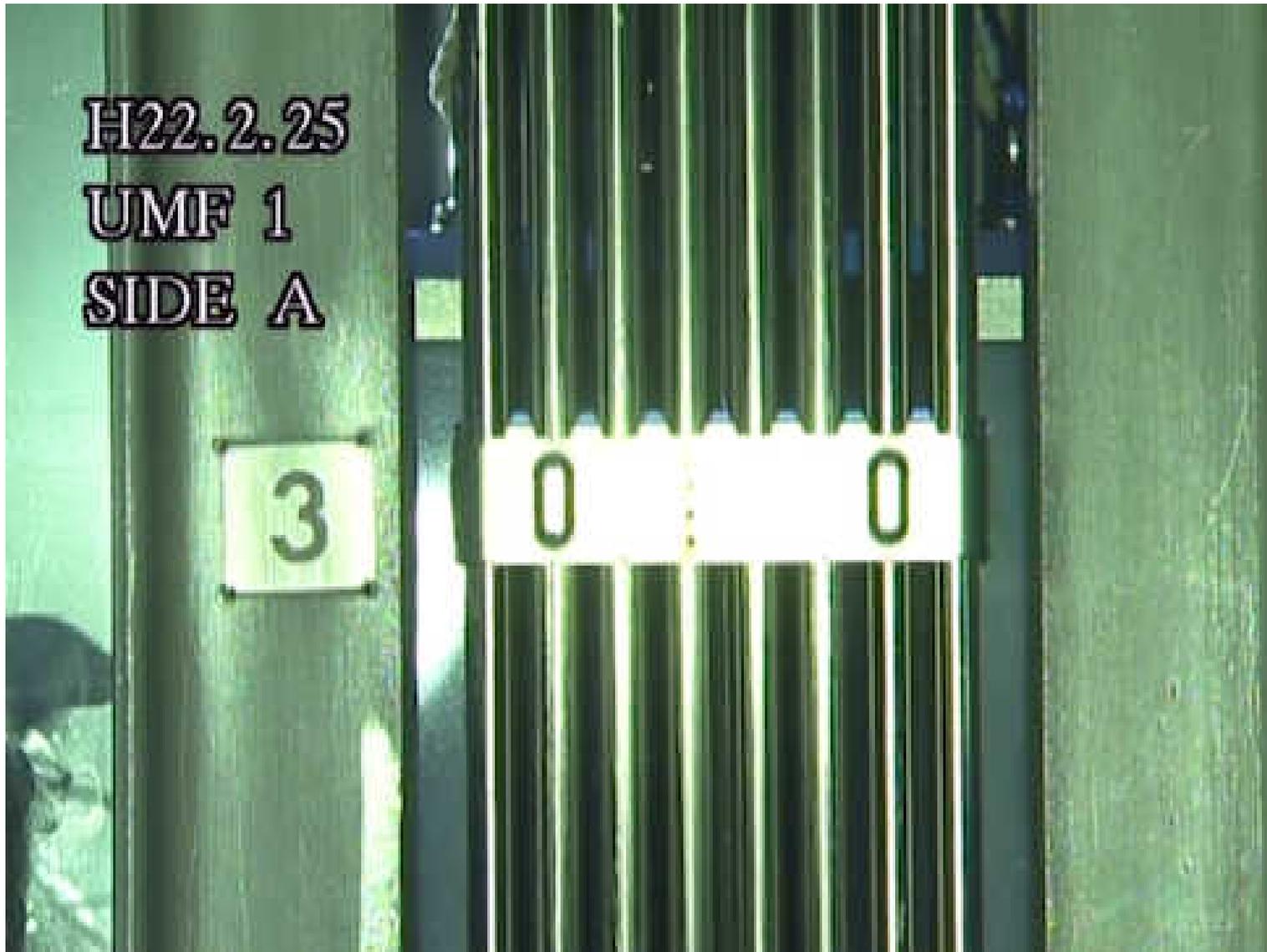
【実施期間】

平成22年2月25日～3月9日

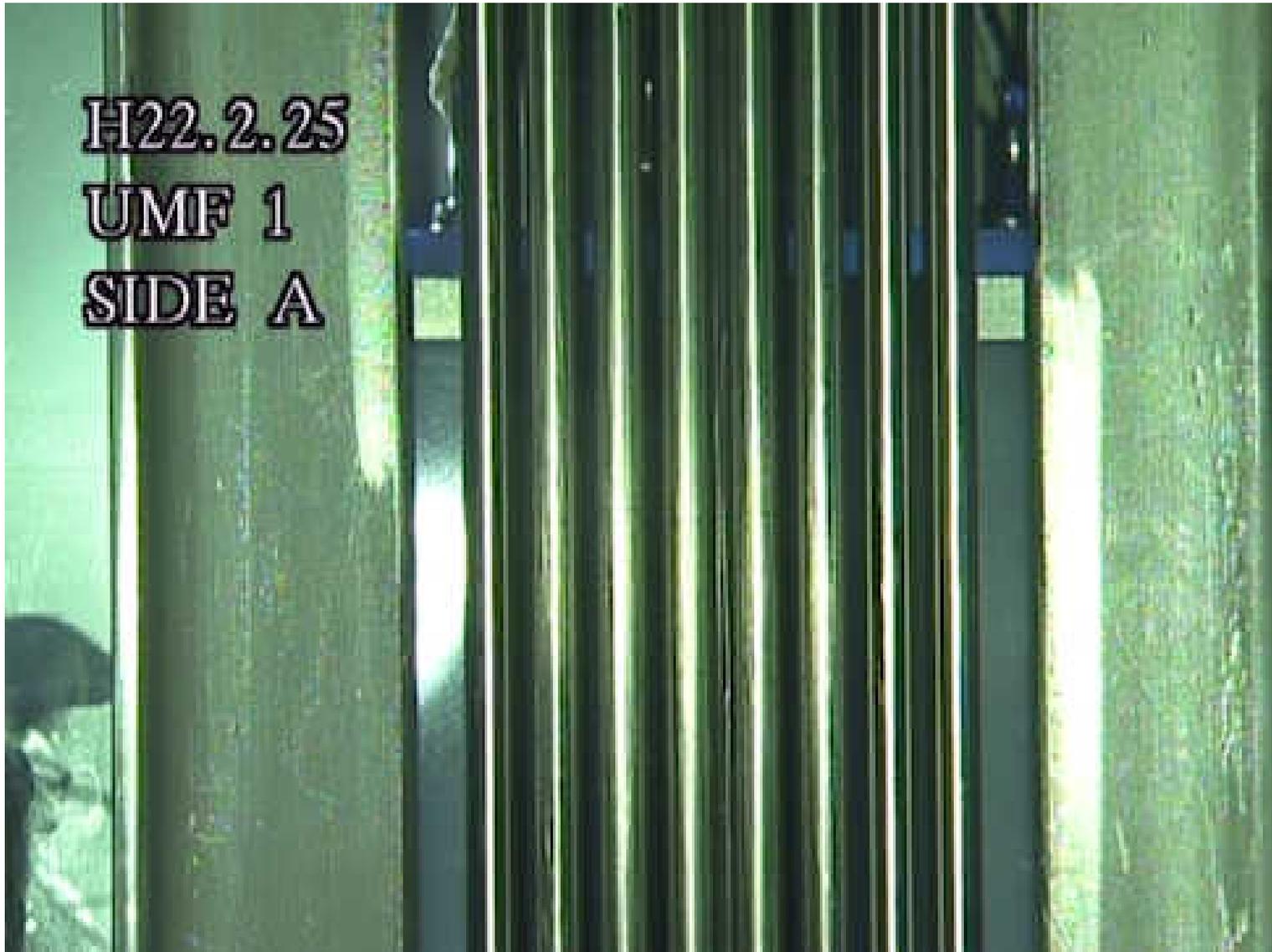
燃料集合体外観検査（上部タイププレート）



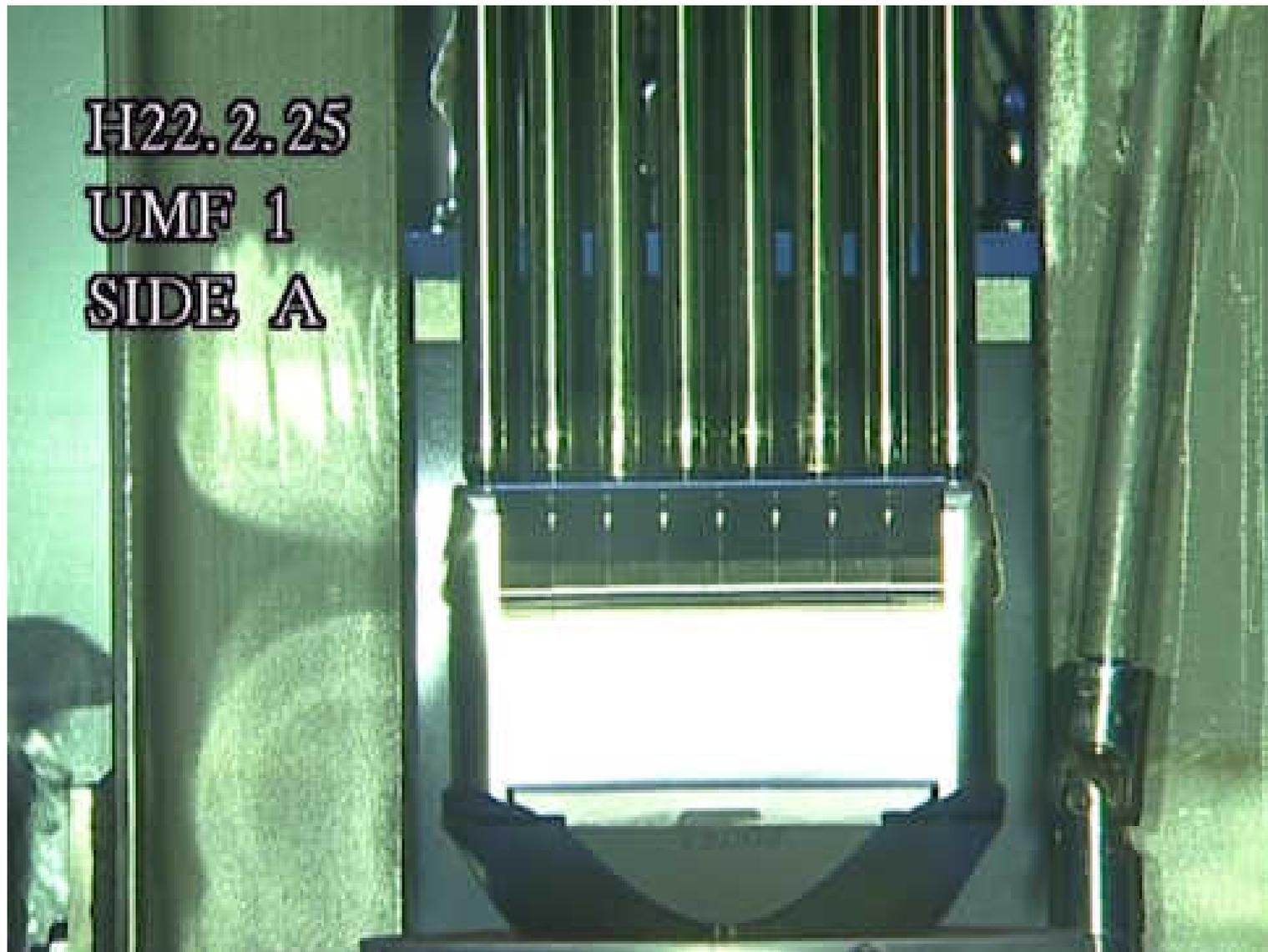
燃料集合体外観検査（スパーサ）



燃料集合体外観検査（燃料棒）

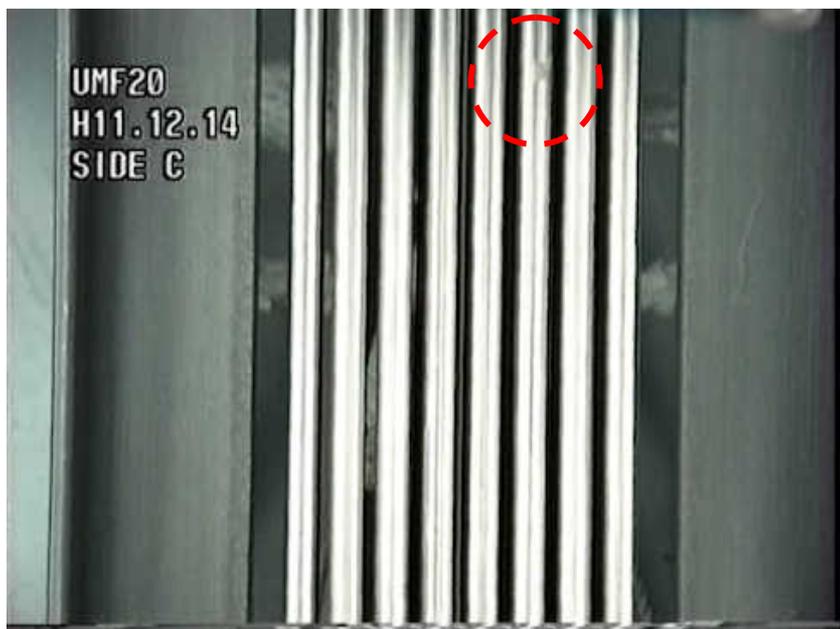


燃料集合体外観検査（下部タイププレート）



燃料集合体外観検査におけるその他の確認事項

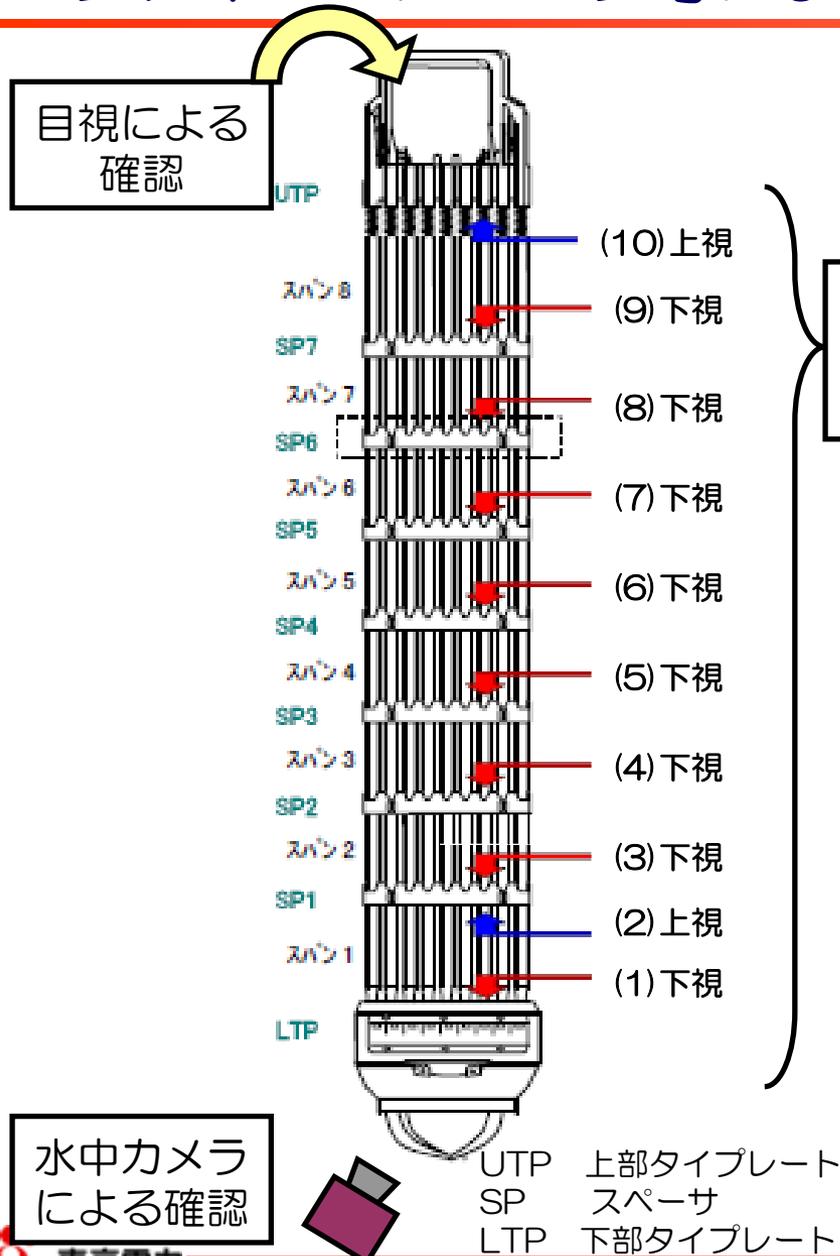
- 一部の燃料棒にローラのスリップ跡（写真）、軸方向および斜め方向の擦れ跡、周方向の擦れ跡が見られた。
- これらは製造時に生じるものであり、平成11年に実施した輸入燃料体検査時においても確認されている。
- 燃料健全性に影響を与えるものではない。



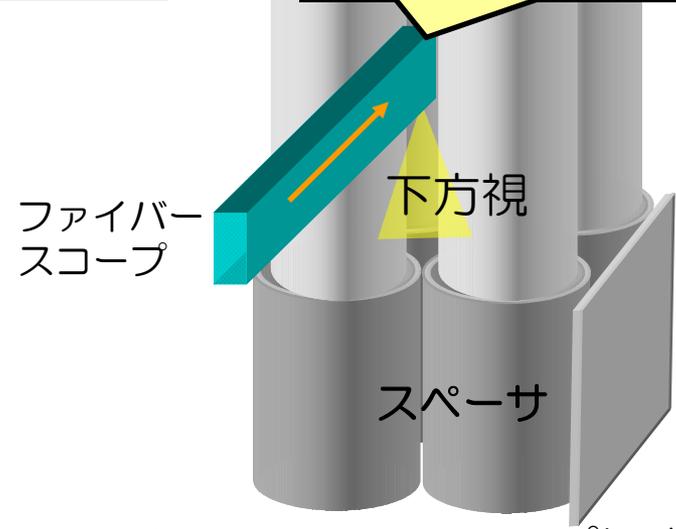
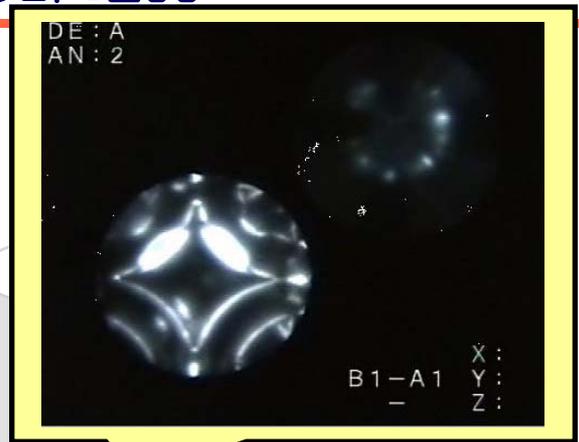
輸入燃料体検査時の観察画像（平成11年12月）

今回の外観検査の観察画像（平成22年3月）

ファイバースコープ等による燃料集合体内部確認



ファイバースコープによる確認



<ファイバースコープ観察例>

燃料集合体内部に燃料健全性に影響を及ぼす異物は確認されなかった。
 【実施期間】平成22年3月23日~4月27日

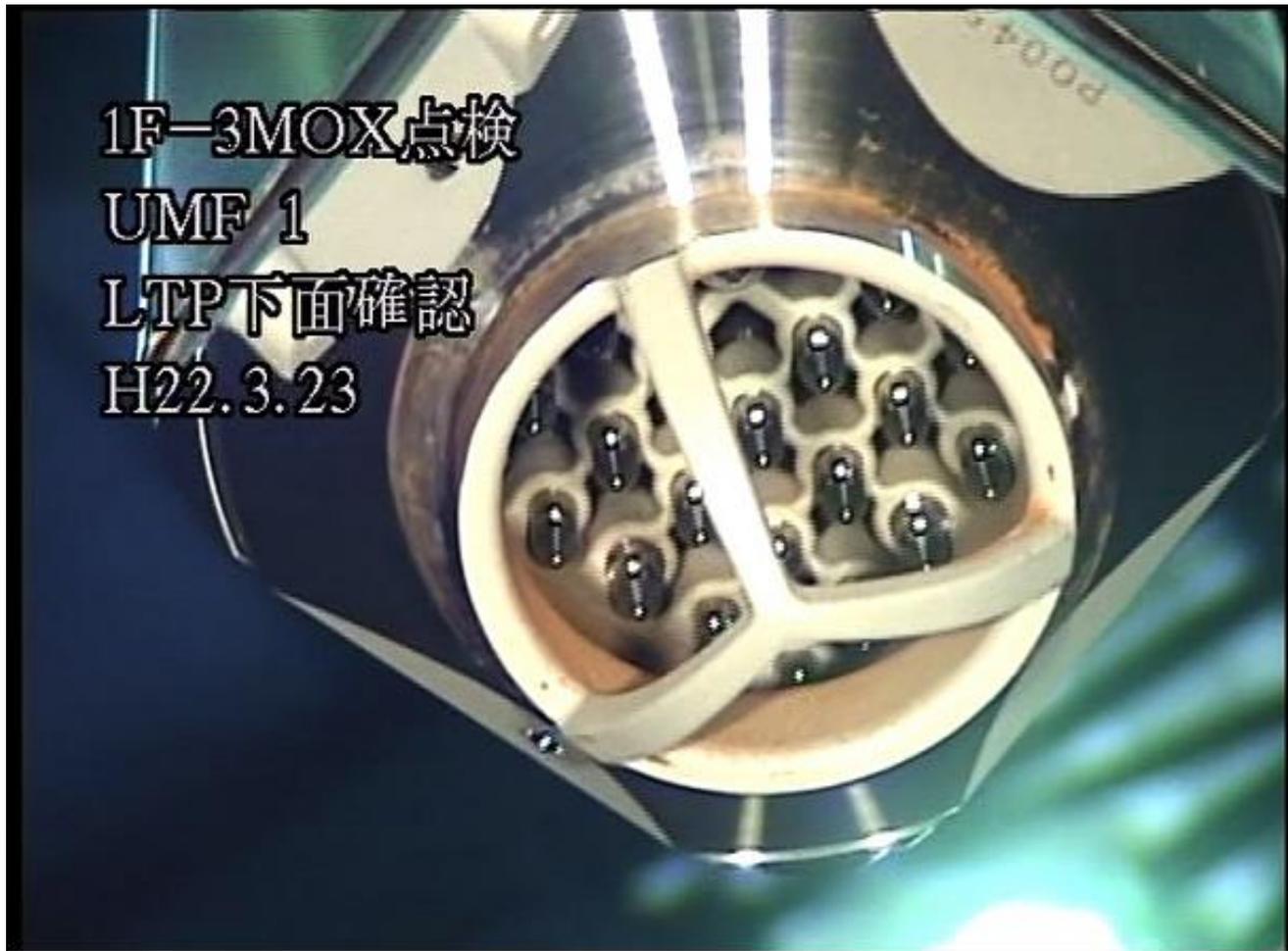
ファイバースコープ等による内部確認（上部タイププレート）

目視による上部タイププレート上面確認



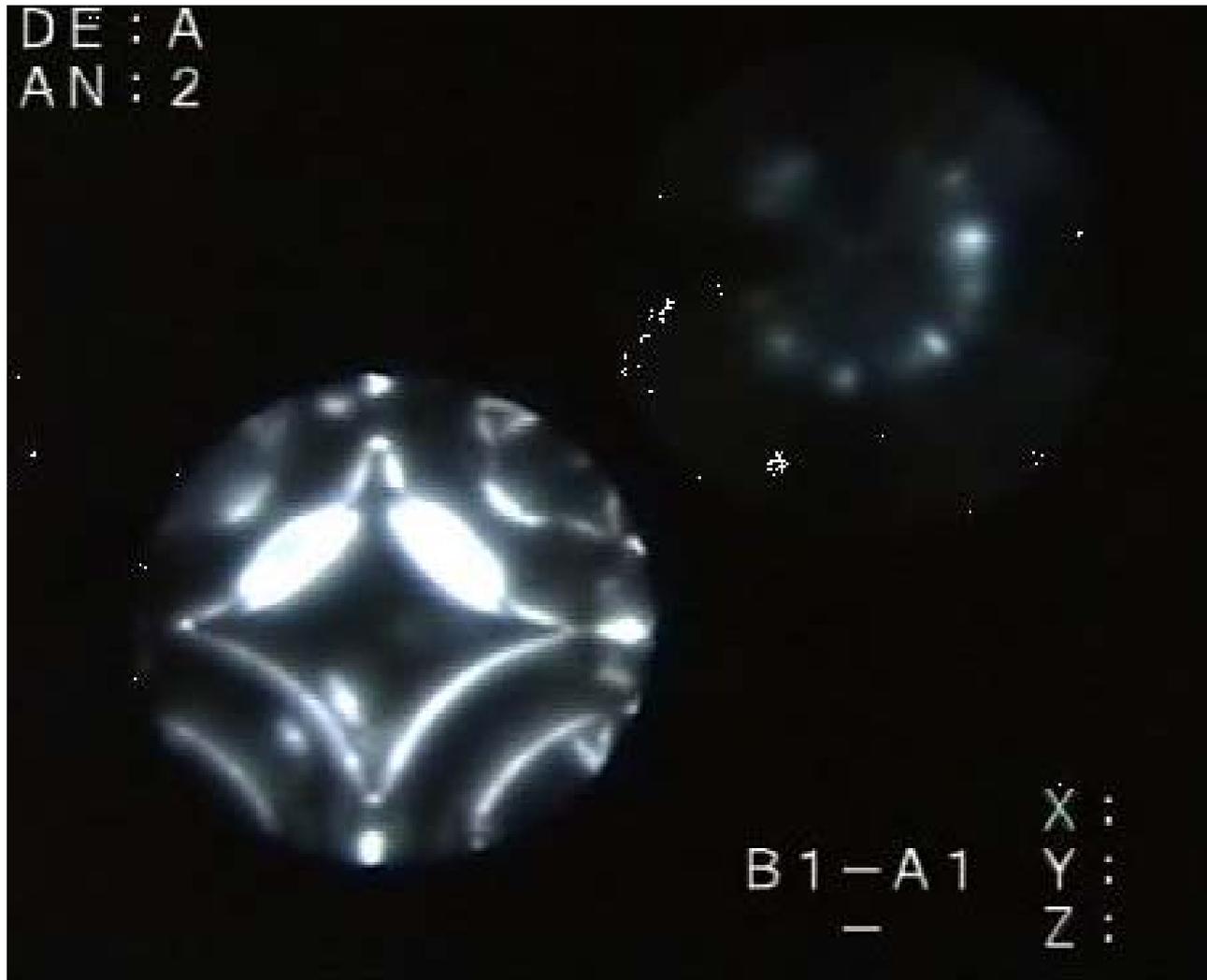
ファイバースコープ等による内部確認（下部タイププレート）

水中カメラによる下部タイププレート下面確認



ファイバースコープ等による内部確認（スパーサ）

ファイバースコープによる集合体内部（スパーサ）確認



燃料集合体内部確認におけるその他の確認事項（１）

- 燃料集合体内部に「薄皮状の切り粉」が確認された。
- 燃料組立時に燃料棒がスペーサを通過する際に発生するものであり、ウラン燃料の製造時にも一般的に見られるもの。
- 厚さは数 μm 程度で剛性はなく、燃料健全性への影響はない。



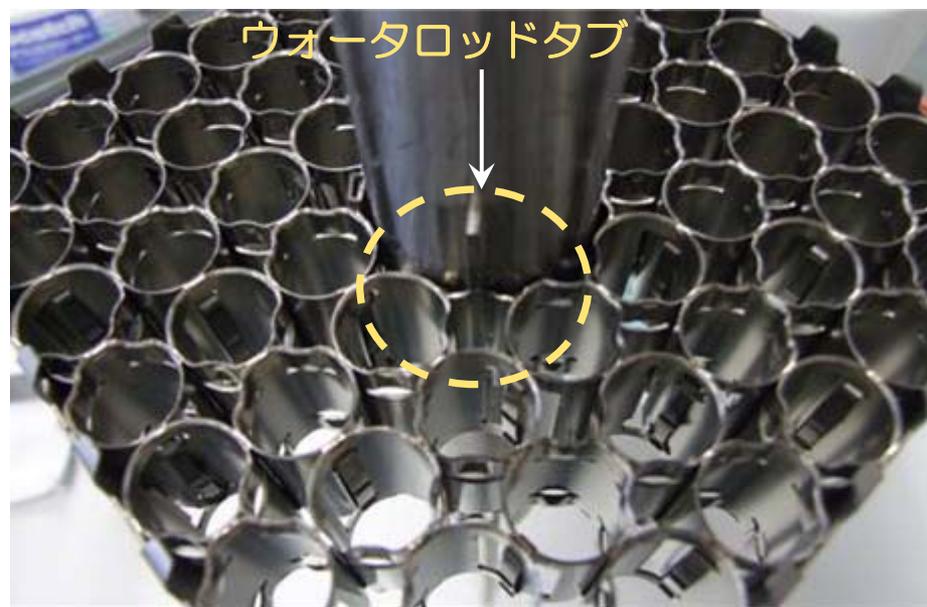
ファイバースコープの観察画像
(平成22年4月)

燃料集合体内部確認におけるその他の確認事項（2）

- 一部のウォータロッドタブ先端エッジ部に「微小な変形（へこみおよび突起）」が確認された。
- 微小な変形はタブの役割（スペーサの位置を固定）に影響を与えるものではなく、燃料健全性への影響はない。
- なお、その他の確認事項として、一部に浮遊物が確認されたが、燃料健全性への影響はない。



ファイバースコープの観察画像
(平成22年4月)



(参考；タブによるスペーサ固定)

保管期間中の使用済燃料プールにかかるデータ確認（１）

■保管期間中の使用済燃料プール水質等

- 水位；オーバーフロー水位付近にあることを確認
- 水温；65℃以下であることを確認
- その他のパラメータ；下表のとおり管理基準内であることを確認

項目	測定データ	社内管理基準※
導電率 最大値	1.36 μ S/cm	$\leq 2 \mu$ S/cm
pH	5.6~6.1	5.6~8.6
塩素濃度 最大値	24ppb	≤ 100 ppb
不溶性鉄濃度 最大値	21.9ppb	≤ 1000 ppb

※水質を一定に保つため、この値を超過した場合に必要な対応をすることを定めている管理上の基準値。



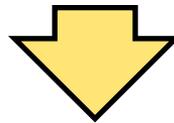
保管期間を通して管理基準等を満足しており、燃料健全性に影響を与えるような水質ではなかった。

保管期間中の使用済燃料プールにかかるデータ確認（2）

■保管期間中に発生した最大の地震

- MOX燃料受入れ以降，福島第一原子力発電所における地震の発生状況（最大の地震動を与えた地震）

年月日	震源	震度	観測点
2003年5月26日	宮城県沖	4	福島県浪江町幾世橋 福島県いわき市小名浜 （発電所に最も近い気象庁の観測点）



- ・地震発生後のパトロールによってプール内に異常のないことを確認した。
- ・なお、MOX新燃料32体について今回外観検査を行った結果、問題がないことを確認している。

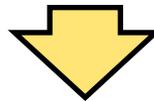
保管期間中の使用済燃料プールにかかるデータ確認（3）

■保管期間中におけるMOX燃料取扱い

- MOX燃料取扱い時に燃料健全性に影響を与えるような不適合が発生していないことを確認

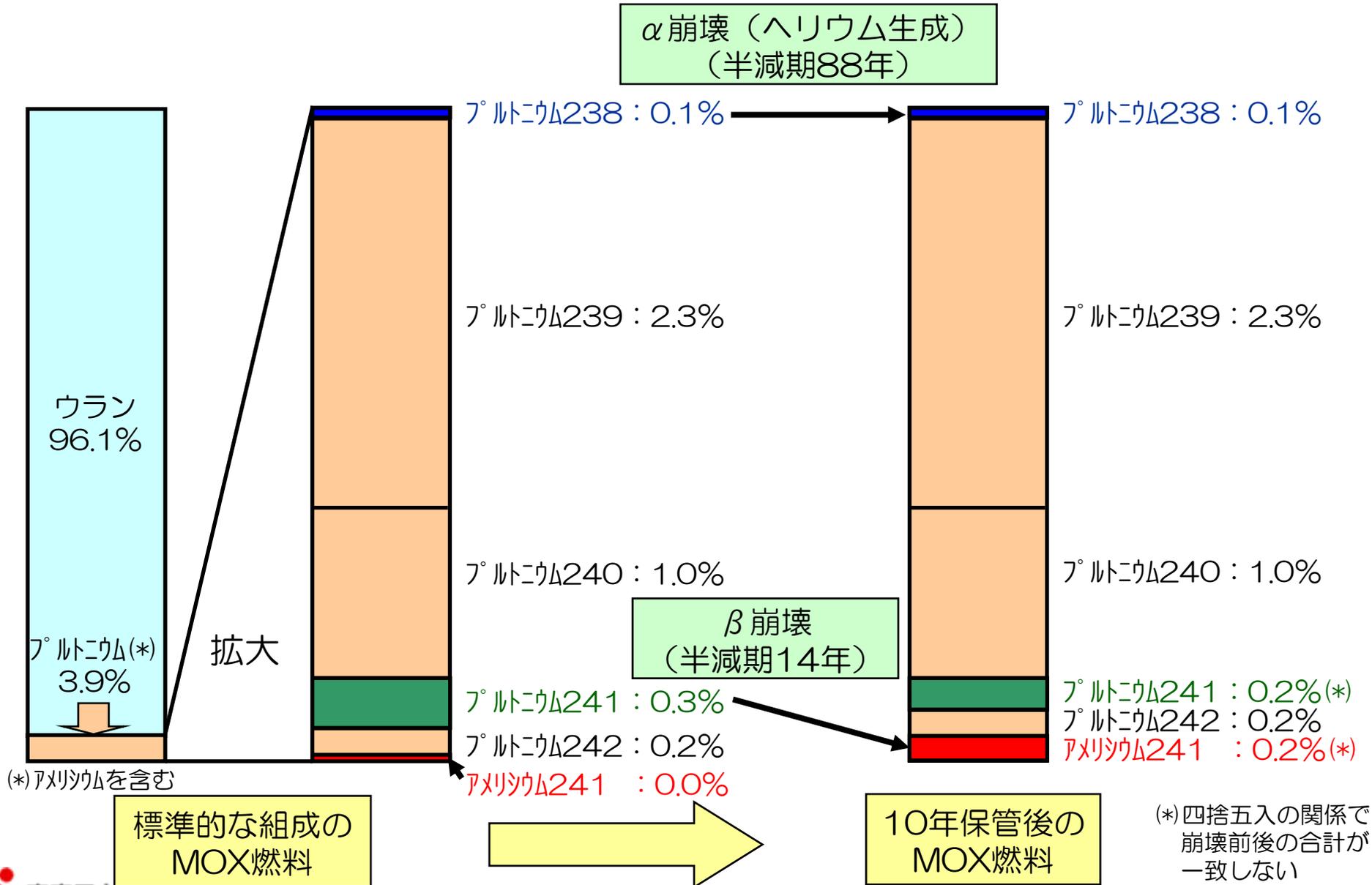
【MOX燃料取扱い実績】

- 輸入燃料体検査のための燃料移動
- 保管場所の変更
- IAEAによる非破壊検査のための燃料移動
- 燃料集合体外観検査のための燃料移動
- ファイバースコープ等による燃料集合体内部確認のための燃料移動



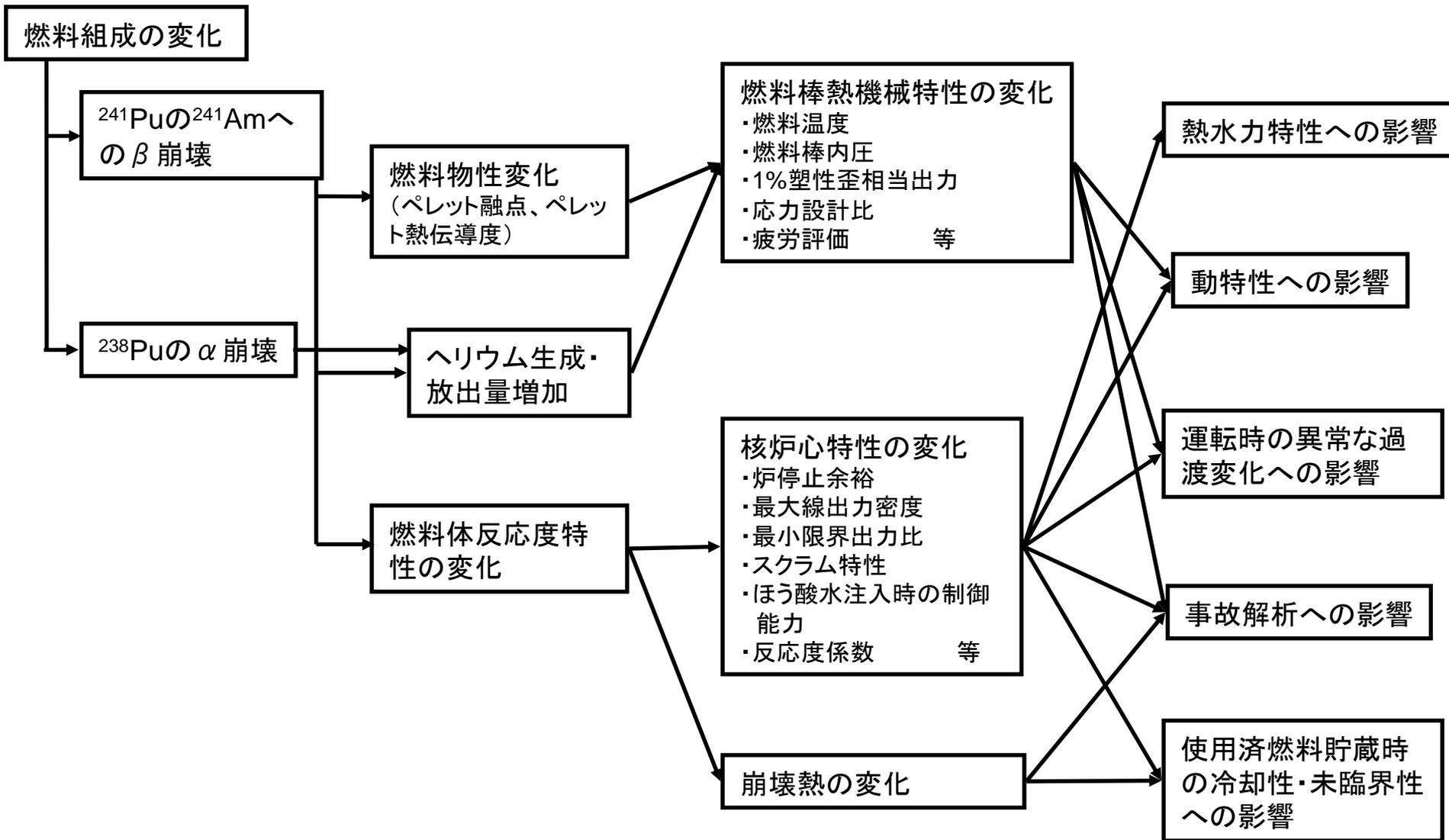
- ・燃料取扱い時に燃料健全性に影響を与えるような不適合の発生はなかった。
- ・なお、MOX新燃料32体について今回外観検査を行った結果、問題がないことを確認している。

4. 燃料組成変化の影響にかかる確認



4. 燃料組成変化の影響にかかる確認

燃料組成の経時変化による影響



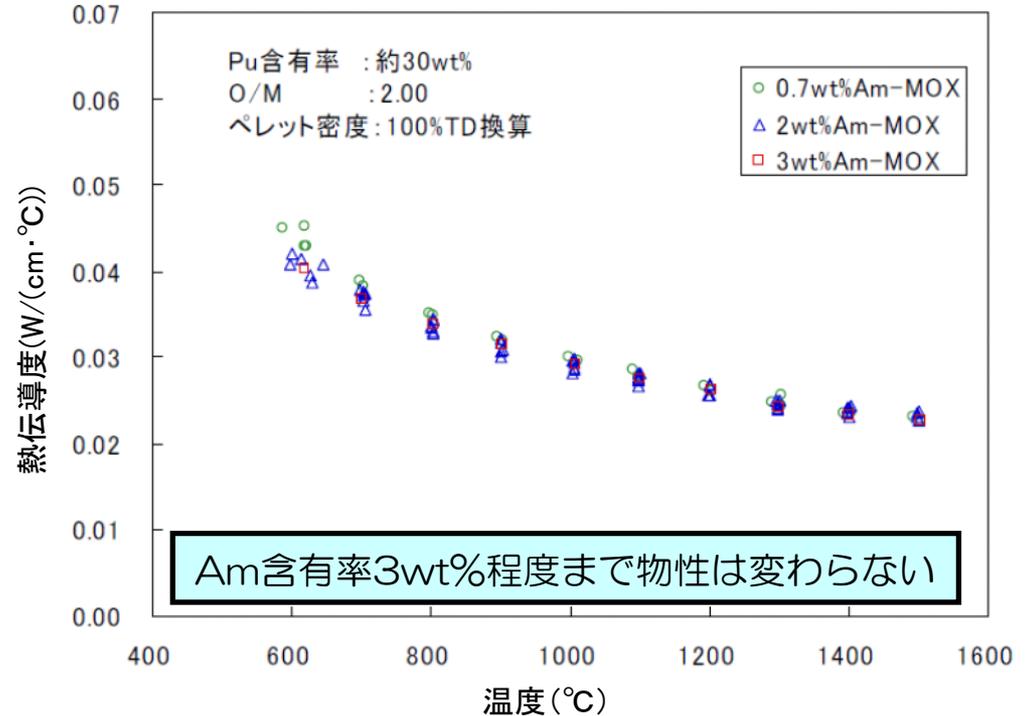
影響評価（1）燃料物性の変化 評価結果

二酸化プルトニウム (PuO_2) と二酸化アメリシウム (AmO_2) の結晶構造等は同等

	PuO_2	AmO_2
結晶構造	蛍石型	
格子定数	0.5396nm	0.5374nm
密度	11.46g/cm ³	11.77g/cm ³



結晶構造等の影響を受ける燃料物性（融点、熱伝導度等）は同等



MOX燃料の熱伝導度へのアメリシウム濃度の影響（実測値）

長期保管MOX燃料のAm含有率は0.5wt%以下と小さい

アメリシウム蓄積による燃料物性への影響は極めて小さい

影響評価（２）燃料棒熱機械特性の変化 評価結果

長期保管による影響を考慮し、燃料棒熱機械特性の解析を行った
燃料棒熱機械特性評価結果(主なものを掲載)

項目	長期保管MOX燃料の 評価値	設置許可解析条件での 評価値	参考値
ペレット最高温度	約1,620℃	約1,660℃	(融点(寿命中期)) 約2,640℃
寿命末期燃料棒内圧	約6.3MPa[abs]	約5.8MPa[abs]	(燃料棒外圧) 約7.1MPa[abs]
被覆管に1%塑性歪を与える出力	約75kW/m	約75kW/m	(過渡変化時の 最大過出力) 約53kW/m
ペレット中心溶融を起こす出力	約69kW/m	約69kW/m	
被覆管応力設計比の最大値 (21%過出力時)	0.56	0.56	(判断基準) 1以下

「ペレット最高温度」、「寿命末期燃料棒内圧」は判断基準項目ではないため公称値の結果を示している。これらに関連した判断基準項目である応力設計比評価や1%塑性歪出力評価では、評価精度等を考慮した統計的評価を実施している。

「被覆管に1%塑性歪を与える出力」、「ペレット中心溶融を起こす出力」、「被覆管応力設計比の最大値」では評価精度等を考慮した統計的評価を実施し、95%確率下限値または95%確率上限値を示している。

長期保管の影響は小さく、燃料棒熱機械特性は
安全設計審査指針の要求を満足する

影響評価（3）核炉心特性の変化

長期保管により ^{241}Pu （核分裂性）が ^{241}Am （非核分裂性）に変化

⇒ 反応度（無限増倍率）の低下

単位：barn(10^{-24}cm^2)

	^{241}Pu	^{241}Am
熱中性子に対する核分裂断面積	約1,000	約3
熱中性子に対する捕獲断面積	約370	約600

出典：沸騰水型原子力発電所 混合酸化物燃料装荷炉心の設計解析手法について
(TLR-058 改訂1 株式会社 東芝 平成11年2月)

⇒ 反応度係数（減速材ボイド、ドップラ係数等）の変化

(影響評価方法)

福島第一3号機で保管中の長期保管MOX燃料（全32体）を次サイクル（25サイクル）から装荷すると仮定して炉心を設計し、その特性を評価（25、26、27サイクルについて評価を実施）

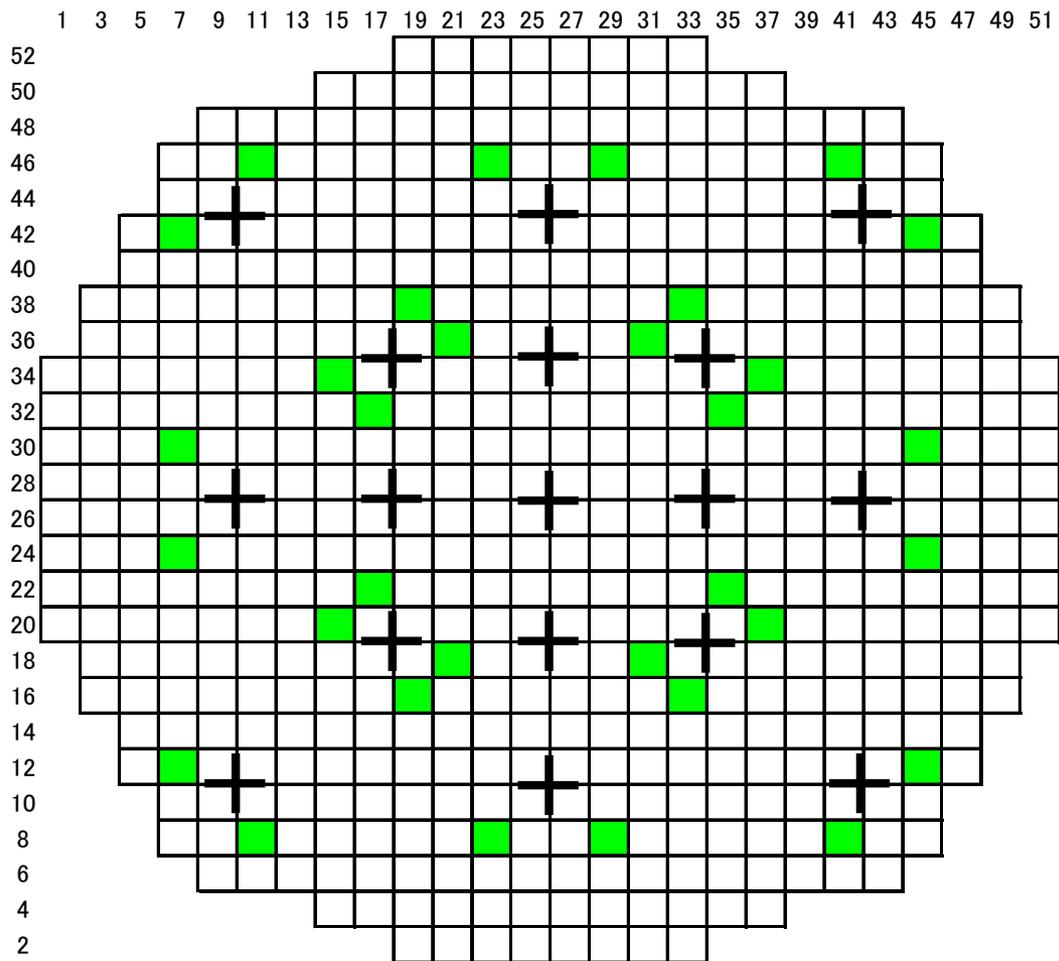
影響評価（４）核炉心特性の変化

各サイクルに装荷されるMOX燃料体数を以下の通りと仮定
（考えられる最大の装荷体数を想定）

運転サイクル数	MOX燃料装荷体数※		新燃料体数の設定根拠
	新燃料	炉内全燃料	
第25サイクル	32体	32体	福島第一3号機の使用済燃料プールで保管中のMOX燃料の体数
第26サイクル	32体	64体	輸入燃料体検査申請中（平成12年11月14日付）のMOX燃料の体数
第27サイクル	80体	144体	設置許可解析の平衡炉心における1取替当たりのMOX燃料装荷体数

※炉心内の全燃料集合体の体数は548体

影響評価（5）炉心特性の変化 評価結果（炉内配置）

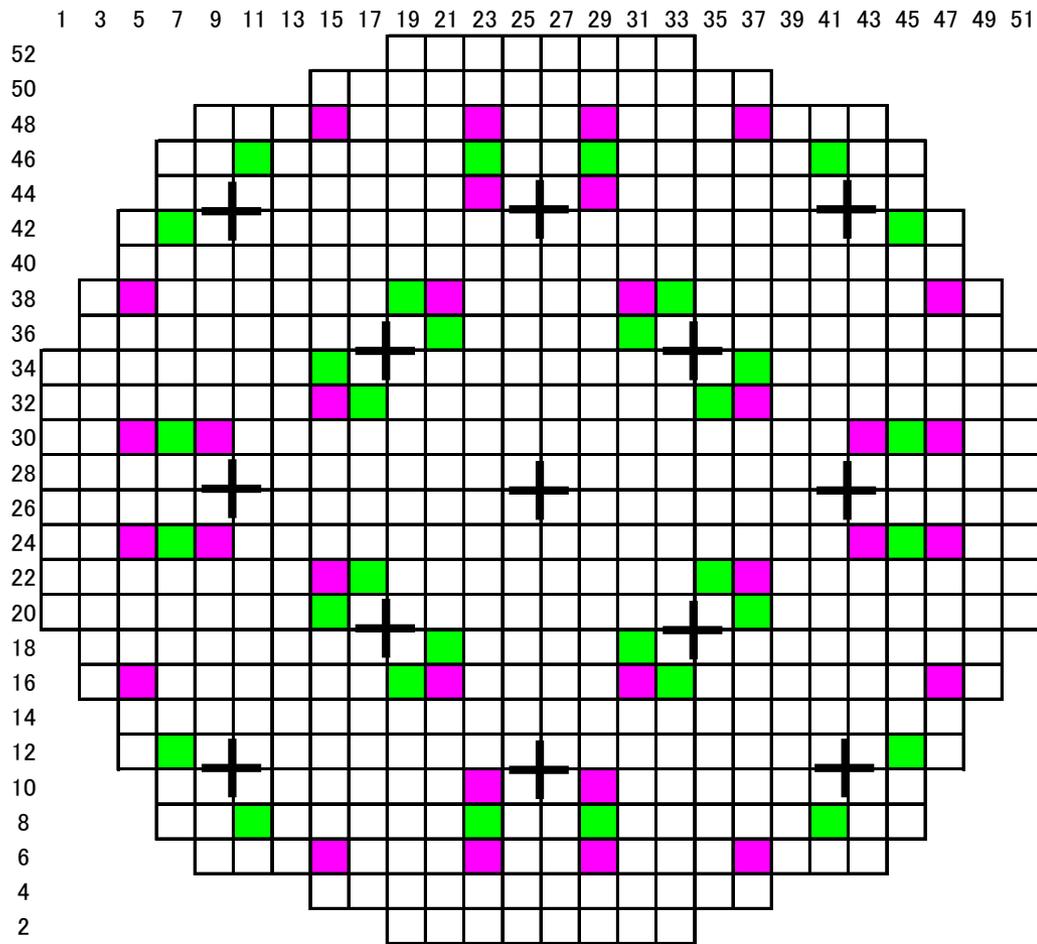


■ : 第25サイクルに装荷するMOX新燃料(32体)

⊕ : 運転中に出力調整用の制御棒を挿入する場所

燃料配置図（第25サイクル）

影響評価（6）炉心特性の変化 評価結果（炉内配置）

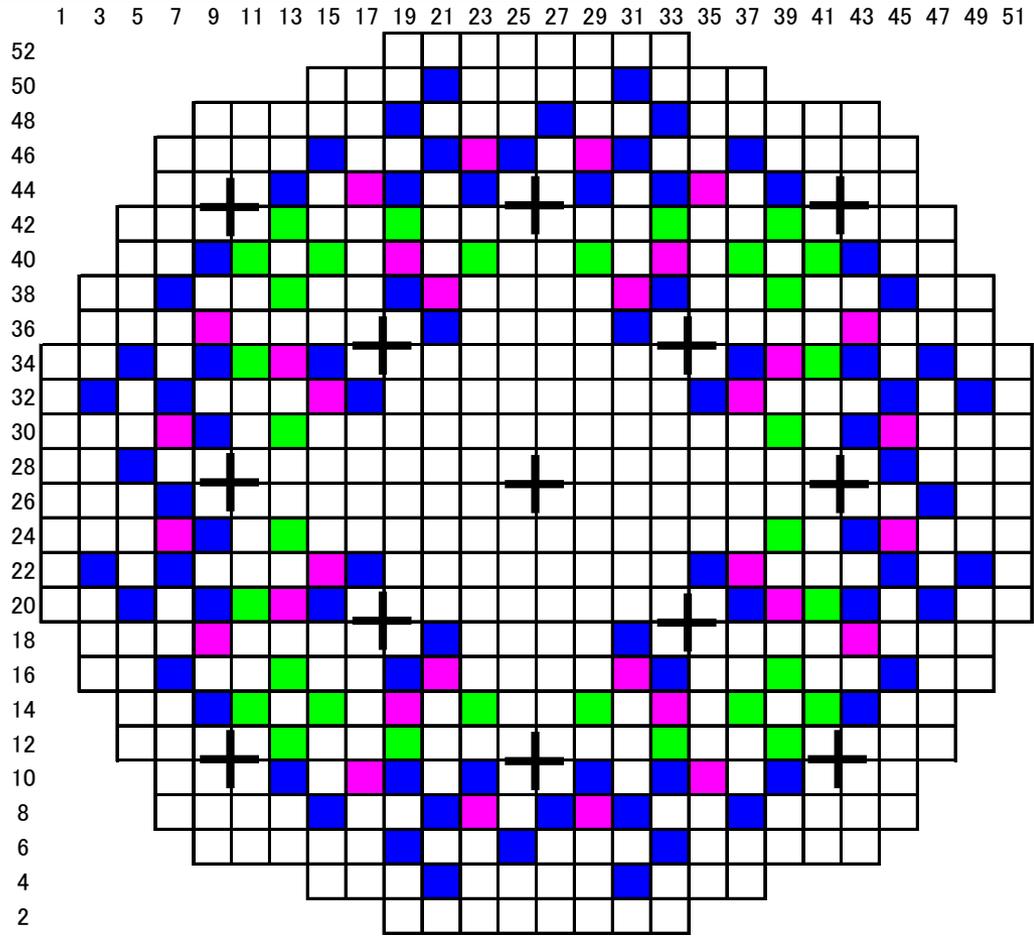


■ : 第25サイクルから装荷したMOX燃料(32体)
■ : 第26サイクルに装荷するMOX新燃料(32体)

+ : 運転中に出力調整用の制御棒を挿入する場所

燃料配置図（第26サイクル）

影響評価 (7) 炉心特性の変化 評価結果 (炉内配置)

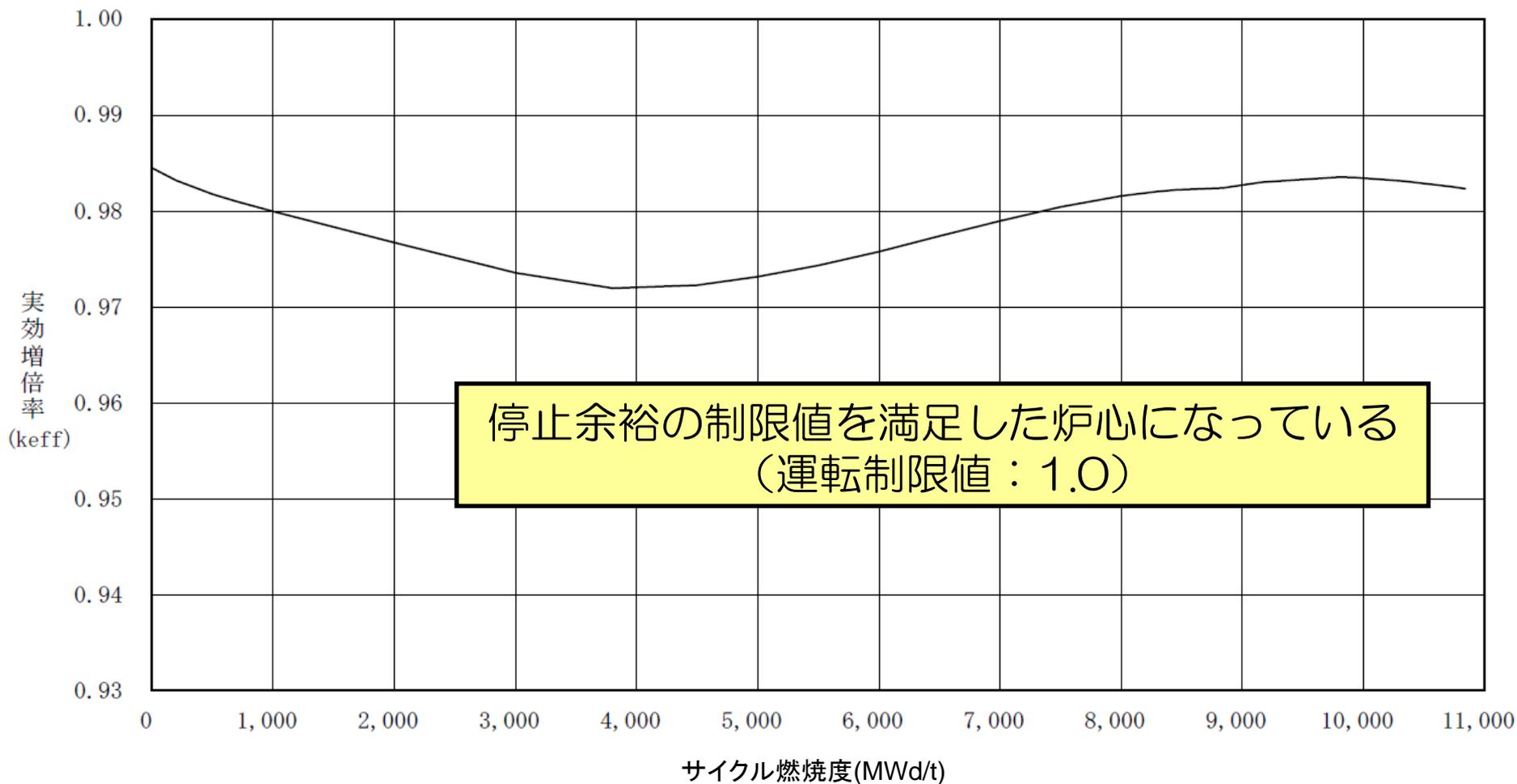


- : 第25サイクルから装荷したMOX燃料(32体)
- : 第26サイクルから装荷したMOX燃料(32体)
- : 第27サイクルに装荷するMOX新燃料(80体)

+ : 運転中に出力調整用の制御棒を挿入する場所

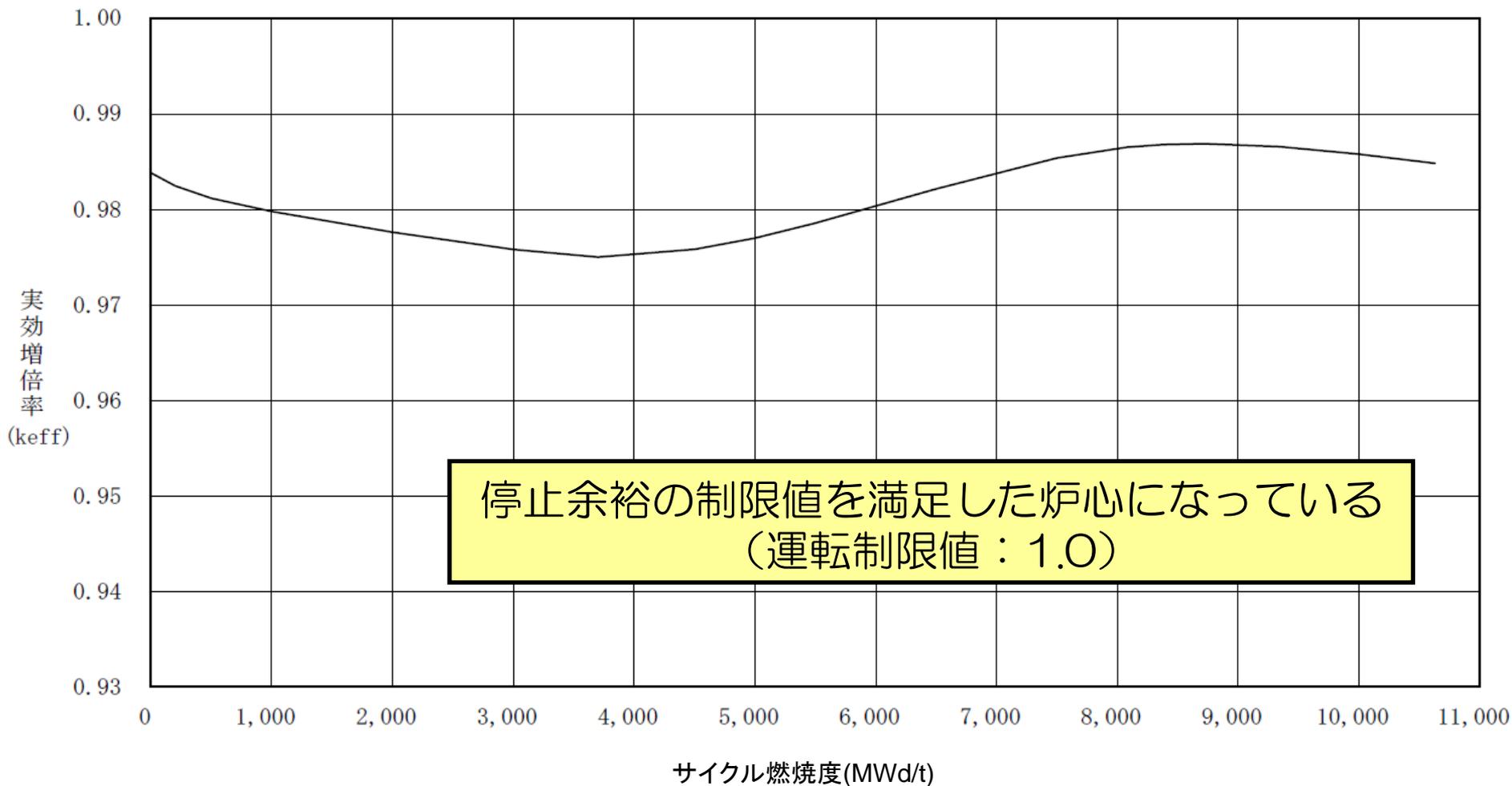
燃料配置図 (第27サイクル)

影響評価（8）炉心特性の変化 評価結果(停止余裕)



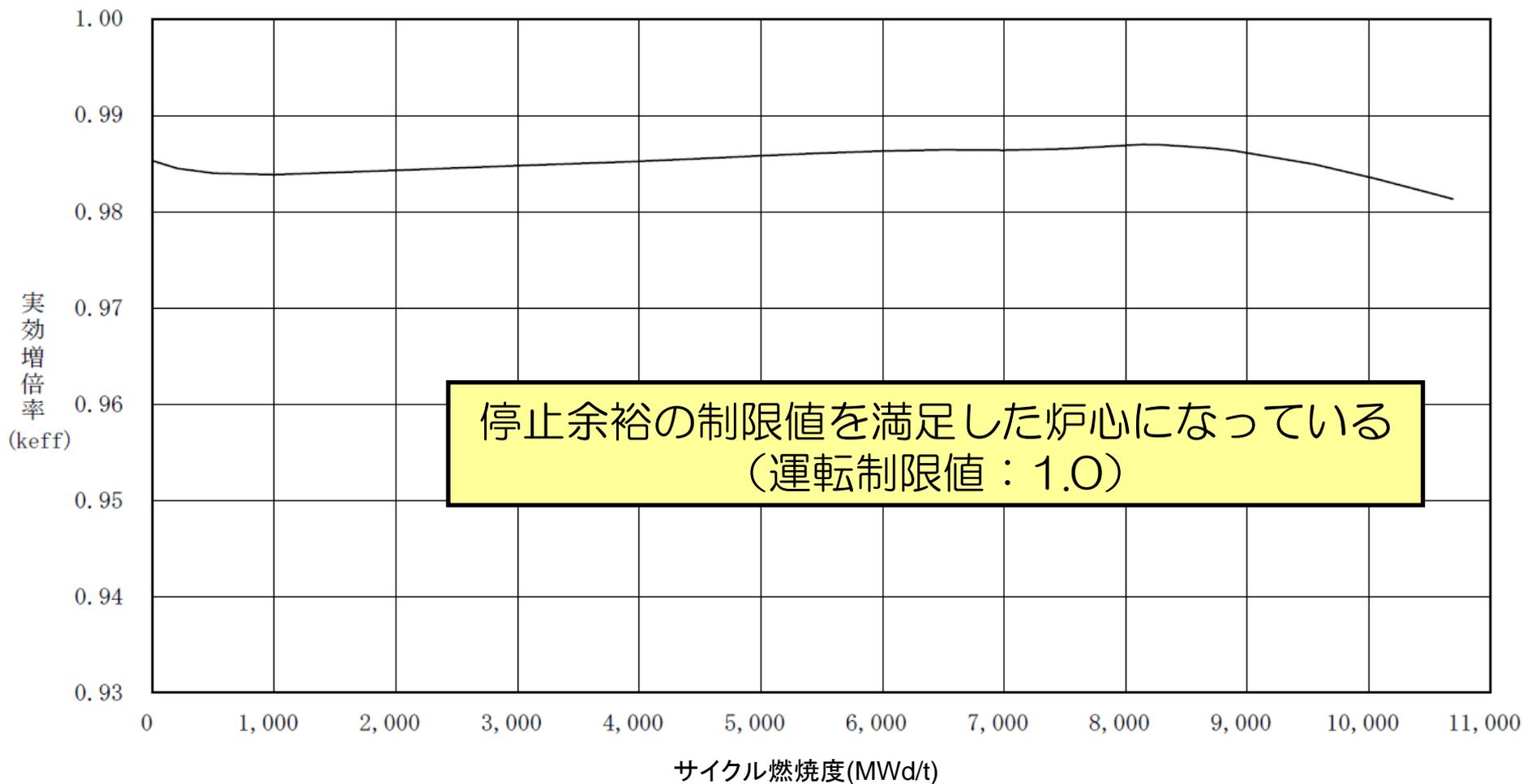
停止余裕（最大価値制御棒1本引き抜き時の実効増倍率）の燃焼変化（第25サイクル）

影響評価（9）炉心特性の変化 評価結果(停止余裕)



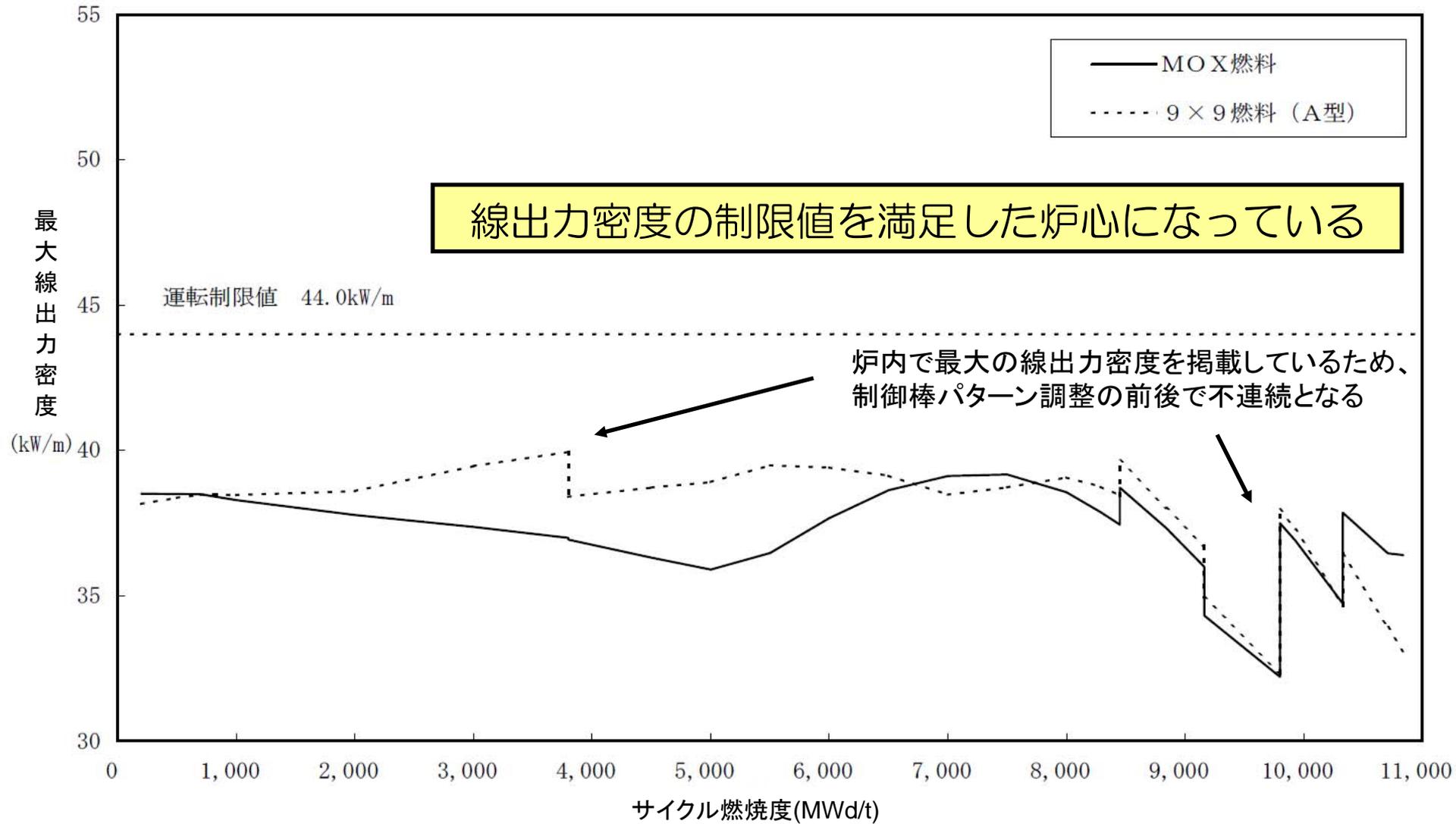
停止余裕（最大価値制御棒1本引き抜き時の実効増倍率）の燃焼変化（第26サイクル）

影響評価 (10) 炉心特性の変化 評価結果(停止余裕)



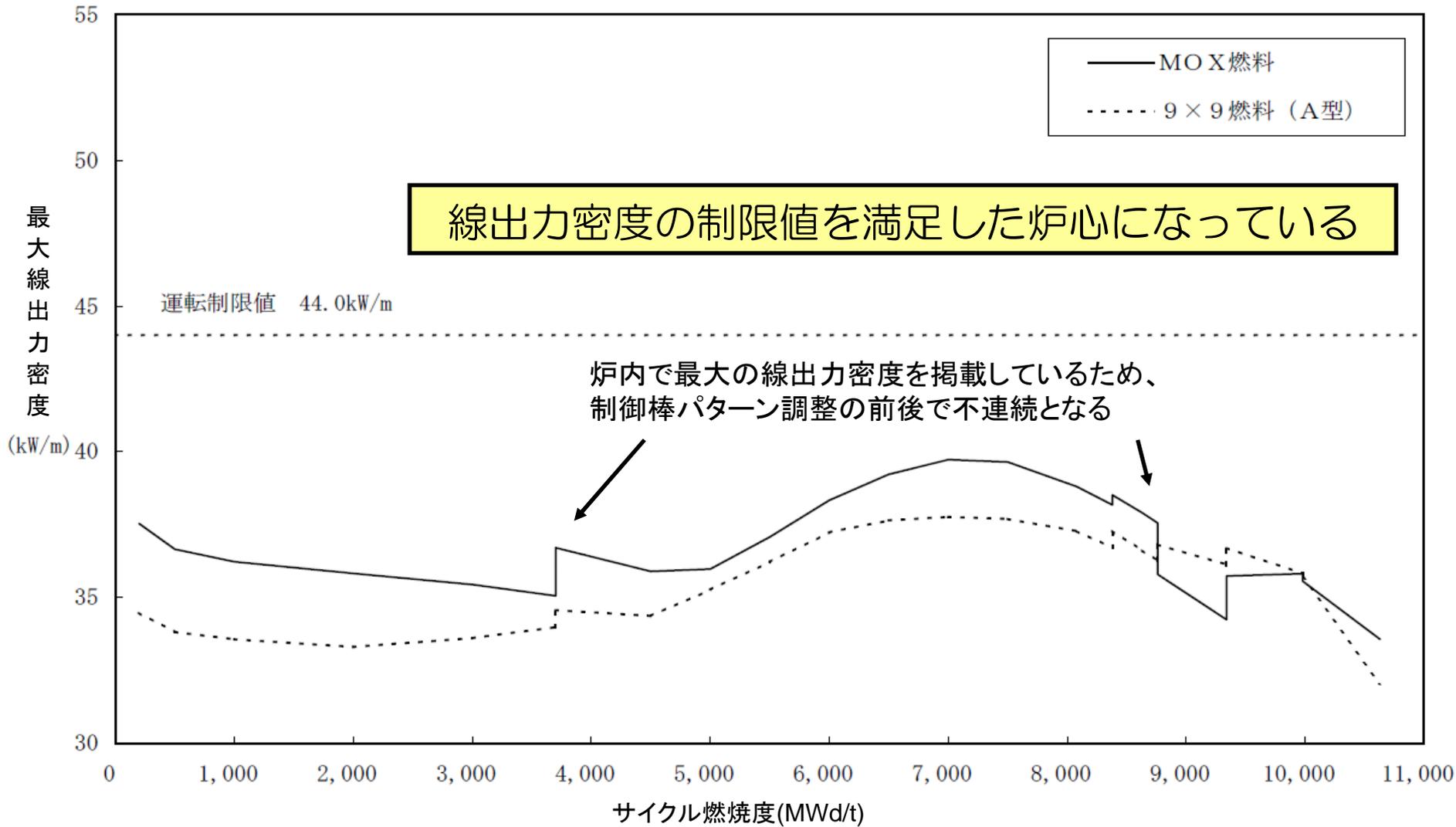
停止余裕 (最大価値制御棒1本引き抜き時の実効増倍率) の燃焼変化 (第27サイクル)

影響評価 (11) 炉心特性の変化 評価結果(最大線出力密度)



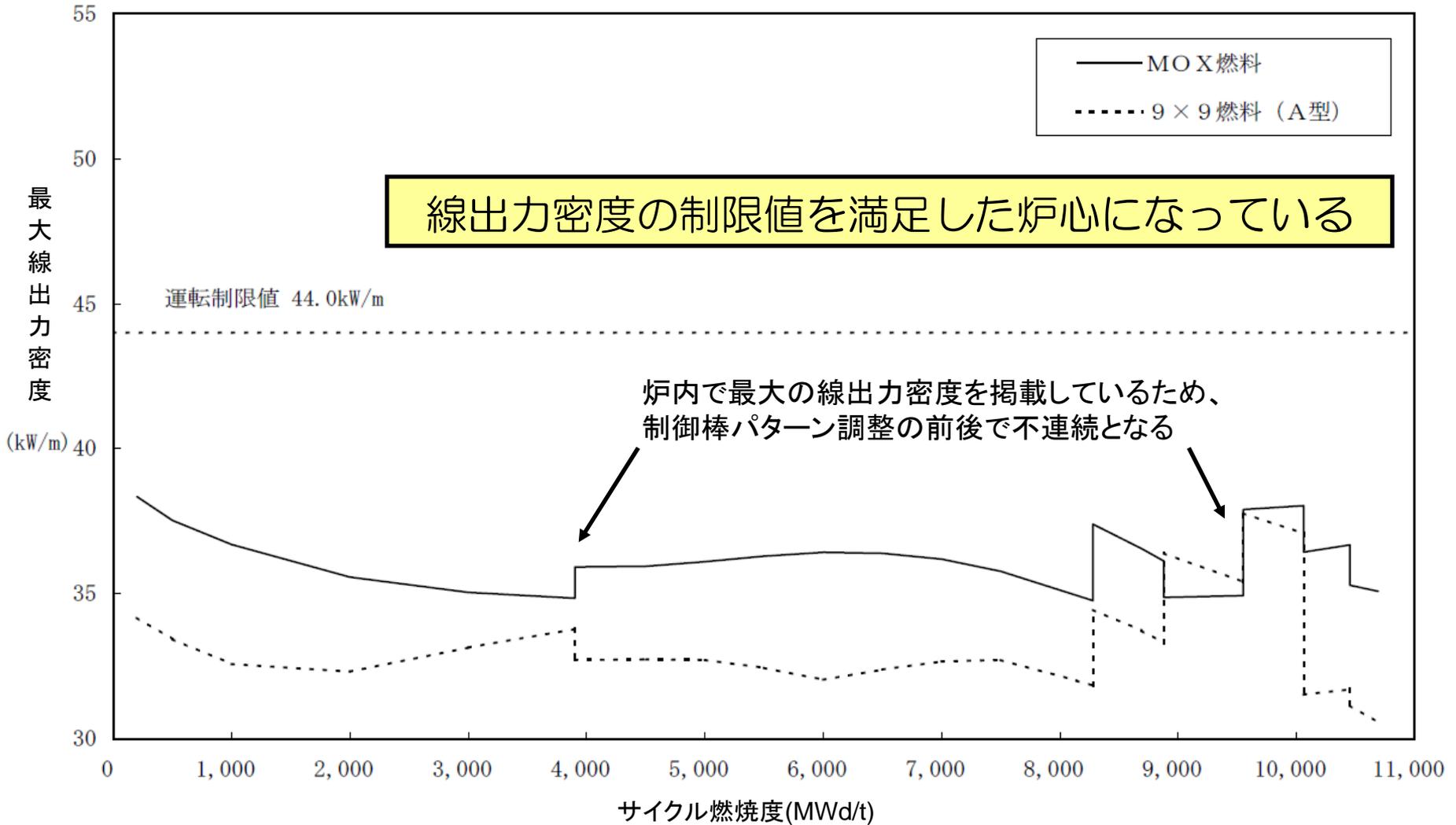
最大線出力密度の燃焼変化 (第25サイクル)

影響評価 (12) 炉心特性の変化 評価結果(最大線出力密度)



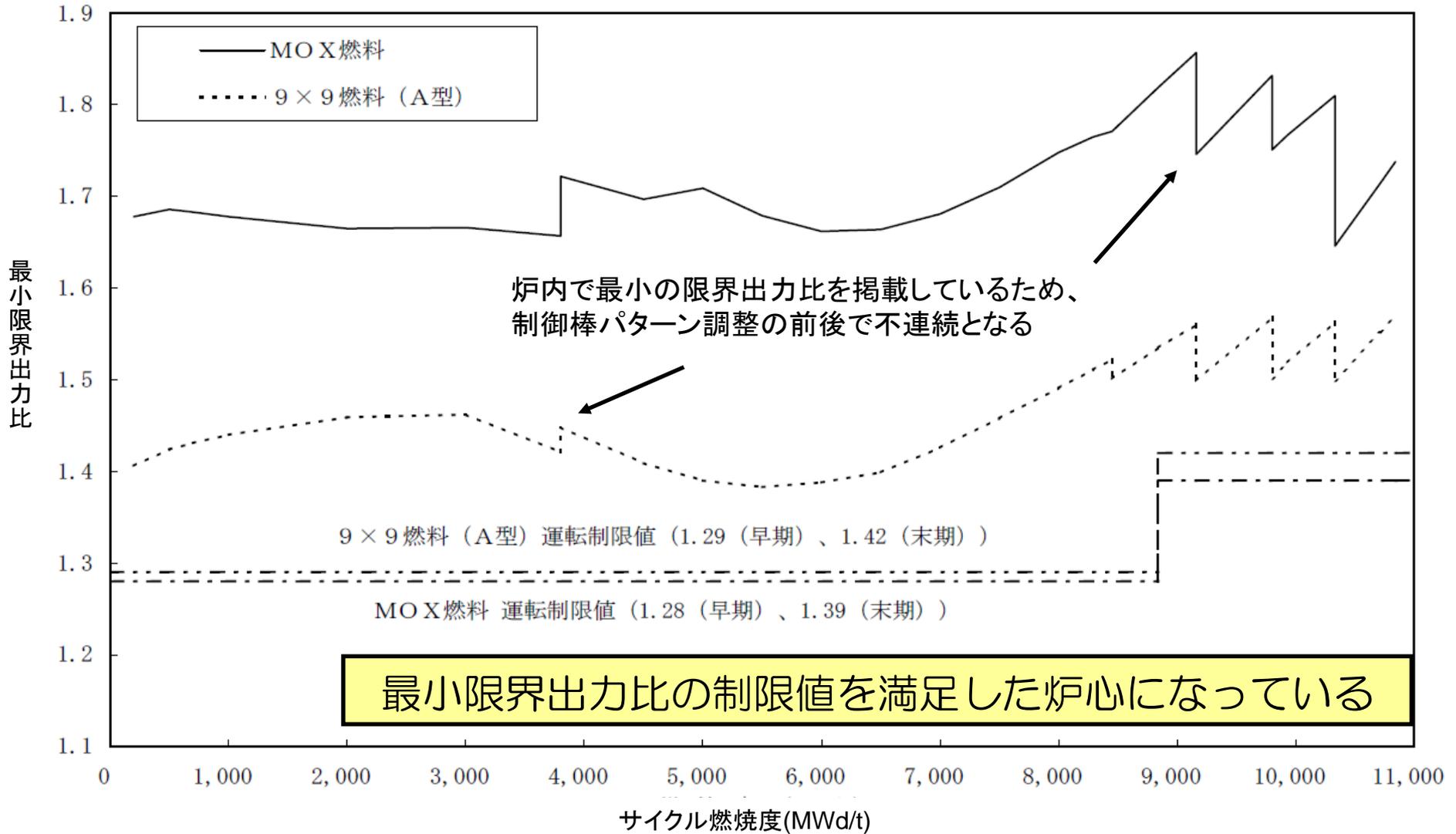
最大線出力密度の燃焼変化 (第26サイクル)

影響評価 (13) 炉心特性の変化 評価結果(最大線出力密度)



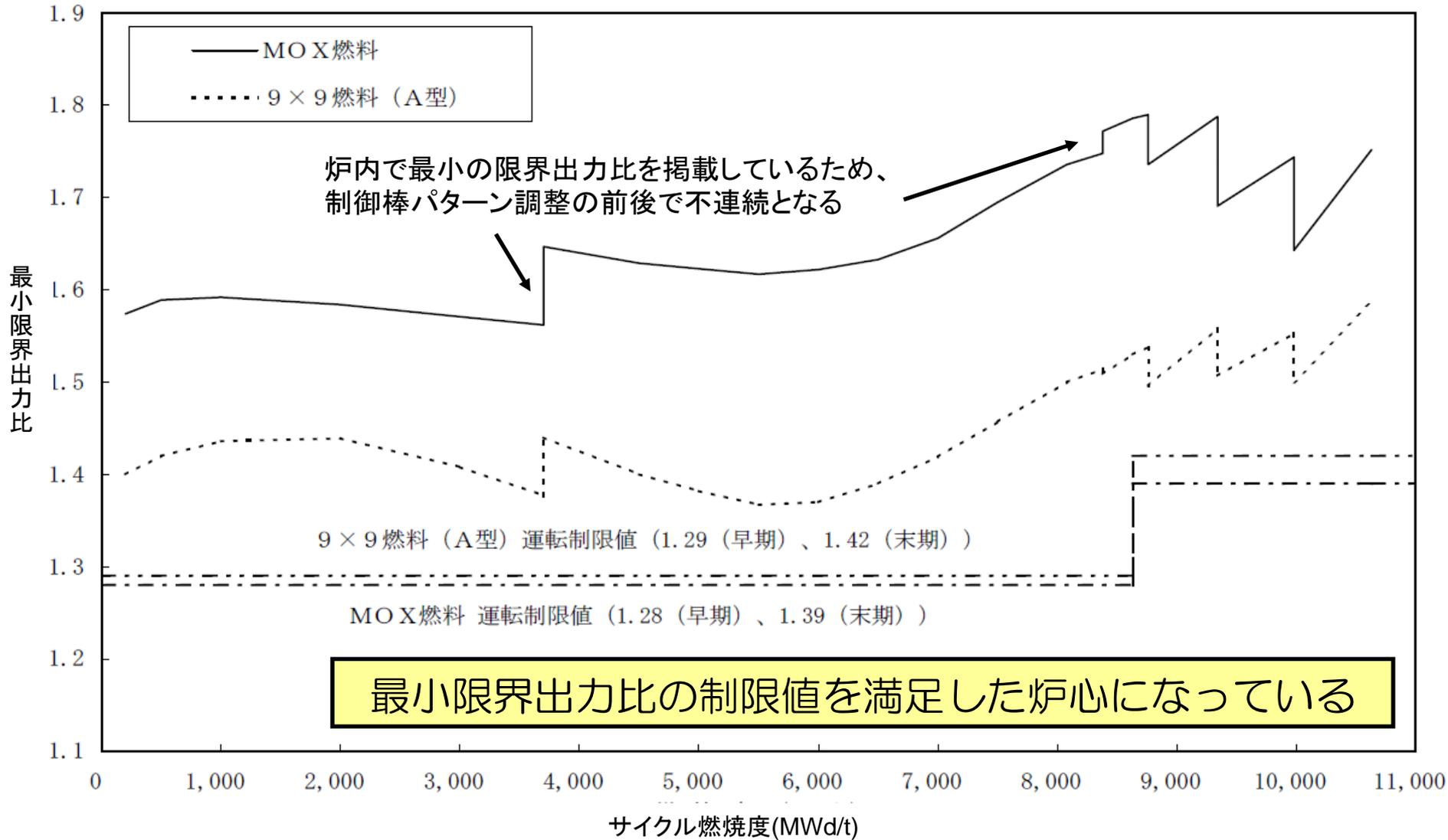
最大線出力密度の燃焼変化 (第27サイクル)

影響評価 (14) 炉心特性の変化 評価結果(最小限界出力比)



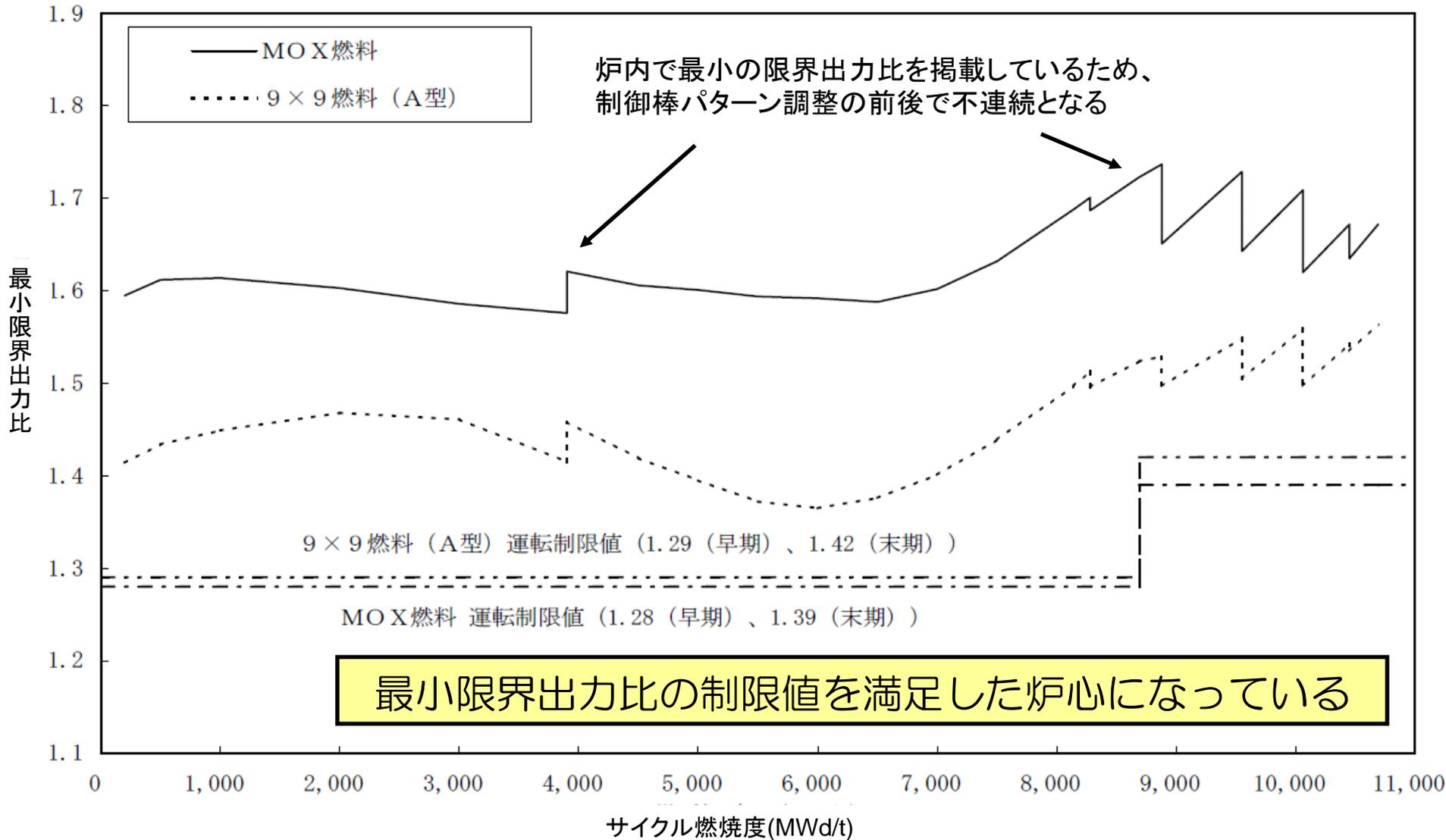
最小限界出力比の燃焼変化 (第25サイクル)

影響評価 (15) 炉心特性の変化 評価結果(最小限界出力比)



最小限界出力比の燃焼変化 (第26サイクル)

影響評価 (16) 炉心特性の変化 評価結果(最小限界出力比)



最小限界出力比の燃焼変化 (第27サイクル)

影響評価（17）炉心特性の変化 ほう酸水注入系の制御能力

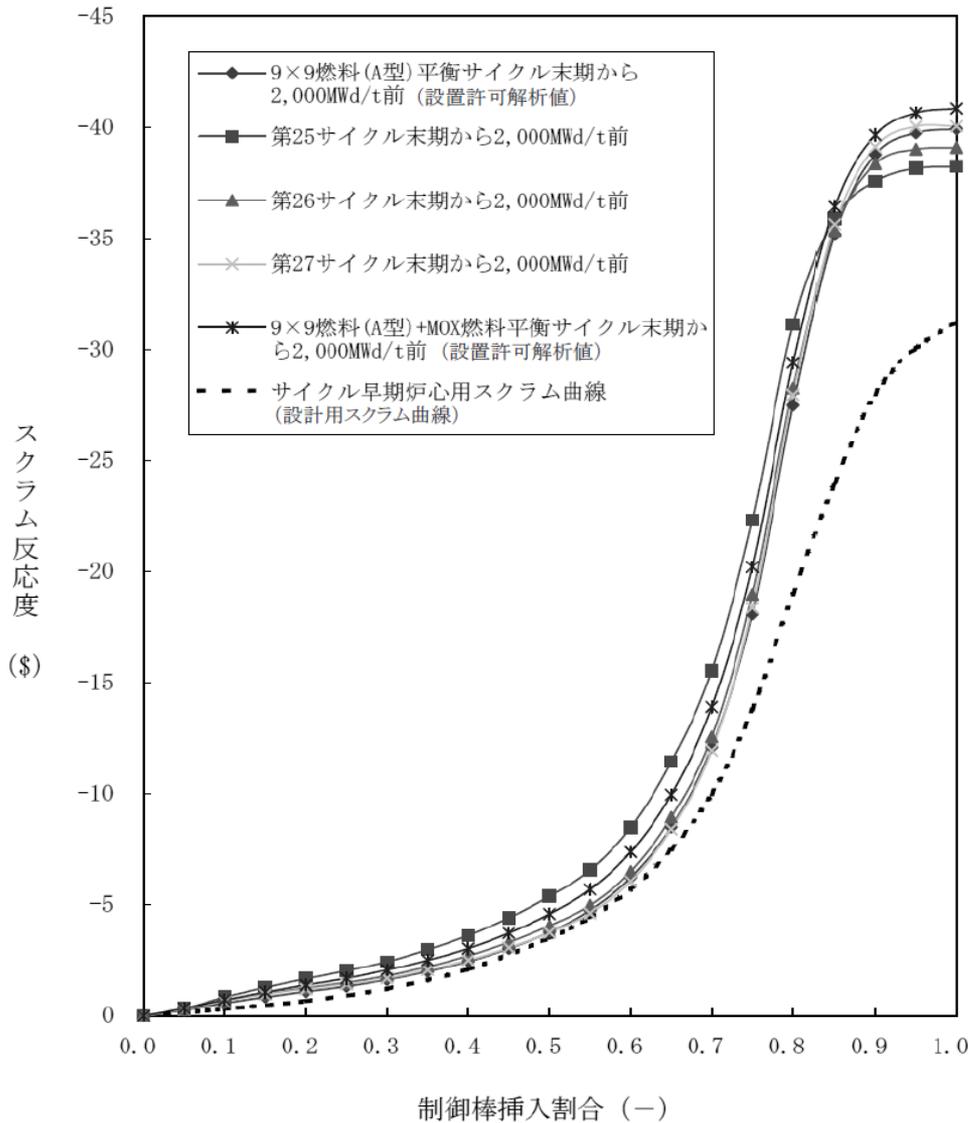
ほう酸水注入時の実効増倍率評価結果

	今回の評価			設置許可解析値 (1/3MOX炉心)	判断基準
	25サイクル	26サイクル	27サイクル		
ほう酸水注入時 実効増倍率	0.924	0.927	0.938	0.945	0.95以下

臨界（実効増倍率が1）に対する余裕を大きくとり、実効増倍率0.95以下を判断基準としている。

ほう酸水注入時の未臨界性は確保される

影響評価 (18) 炉心特性の変化 評価結果(スクラム反応度)

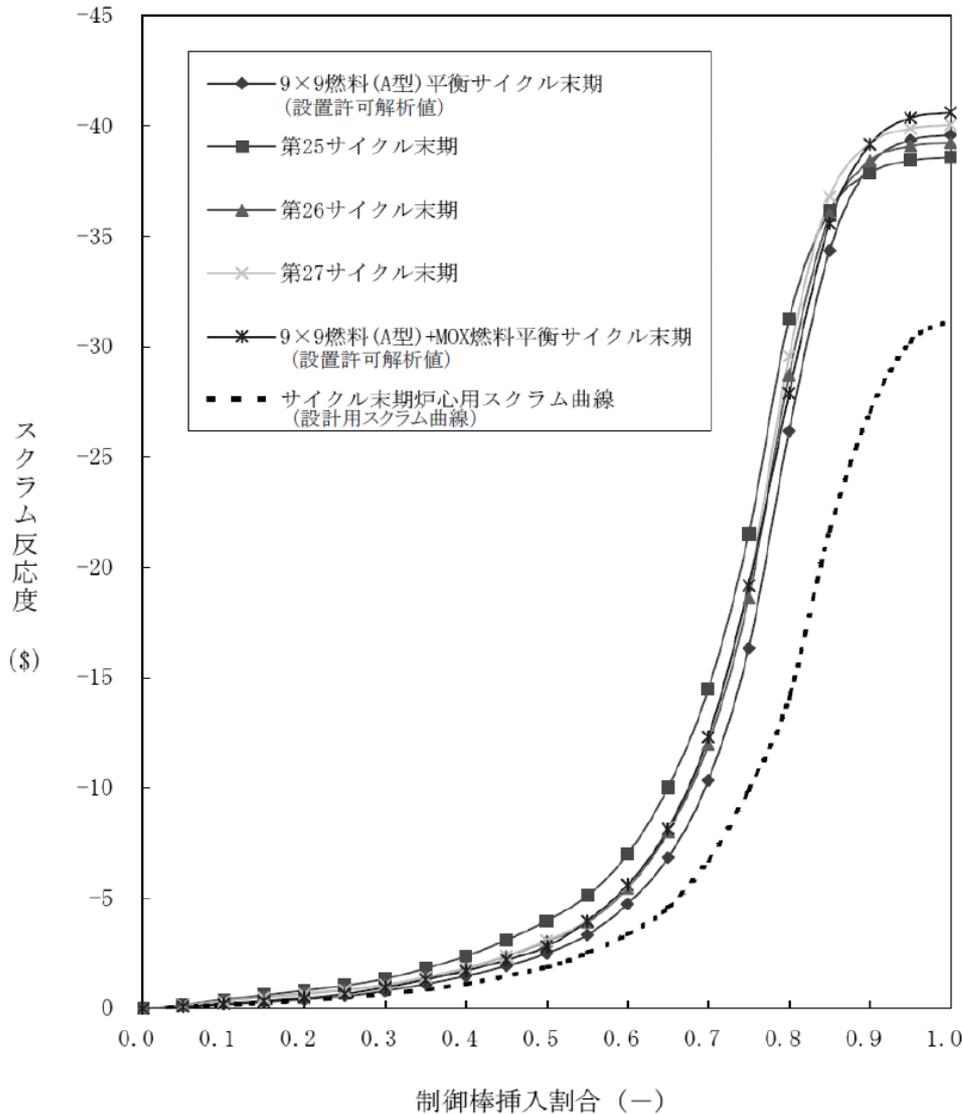


長期保管MOX燃料を装荷しても、安全解析で前提となるスクラム曲線 (設計用スクラム曲線) を十分上回るスクラム特性

サイクル早期炉心用スクラム曲線：
サイクル末期から遡って2,000MWd/t手前まで適用されるスクラム曲線の制限

スクラム反応度特性 (第25~27サイクル、サイクル早期炉心用スクラム曲線)

影響評価 (19) 炉心特性の変化 評価結果(スクラム反応度)

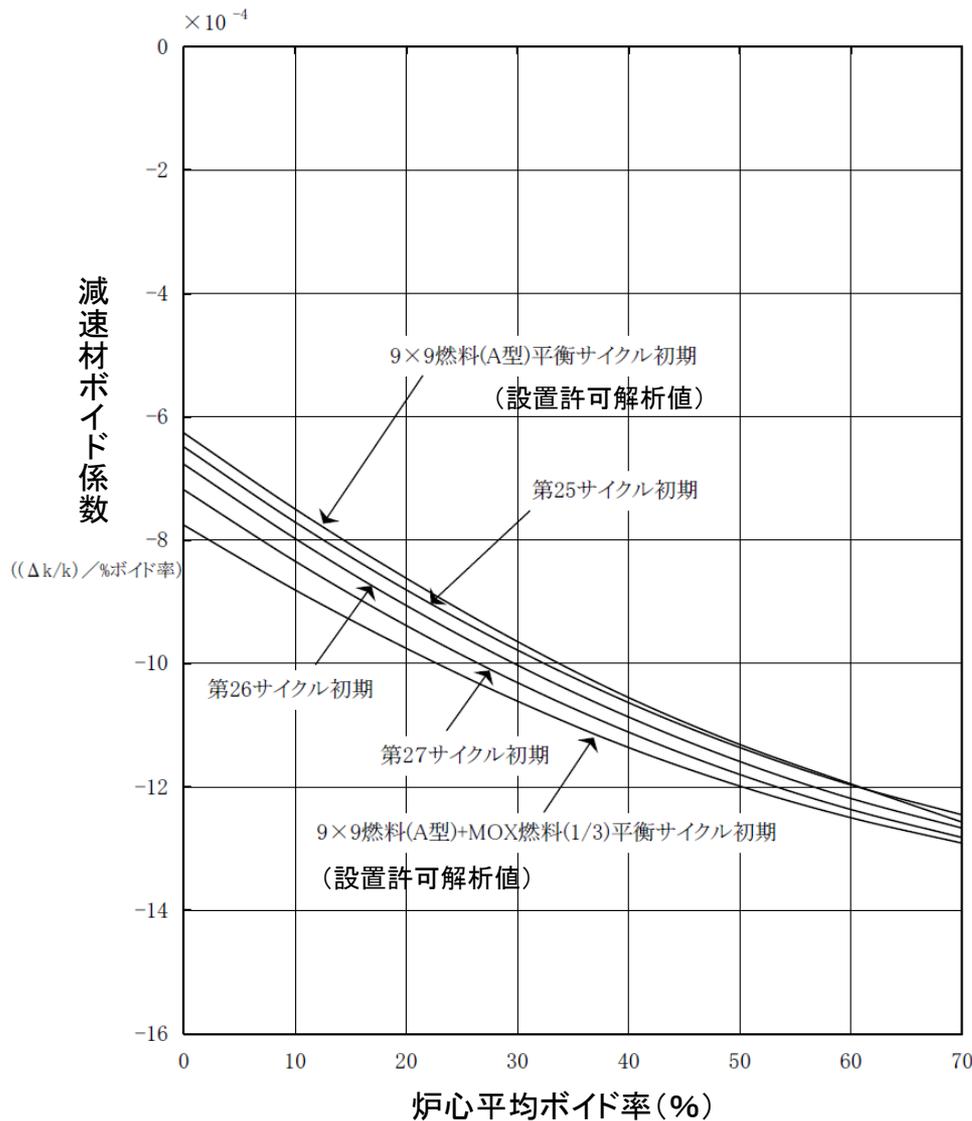


長期保管MOX燃料を装荷しても、安全解析で前提となるスクラム曲線（設計用スクラム曲線）を十分上回るスクラム特性

サイクル末期炉心用スクラム曲線：
サイクル末期から遡って2,000MWd/t以降に適用されるスクラム曲線の制限

スクラム反応度特性 (第25~27サイクル、サイクル末期炉心用スクラム曲線)

影響評価 (20) 反応度係数の変化 評価結果(反応度係数)

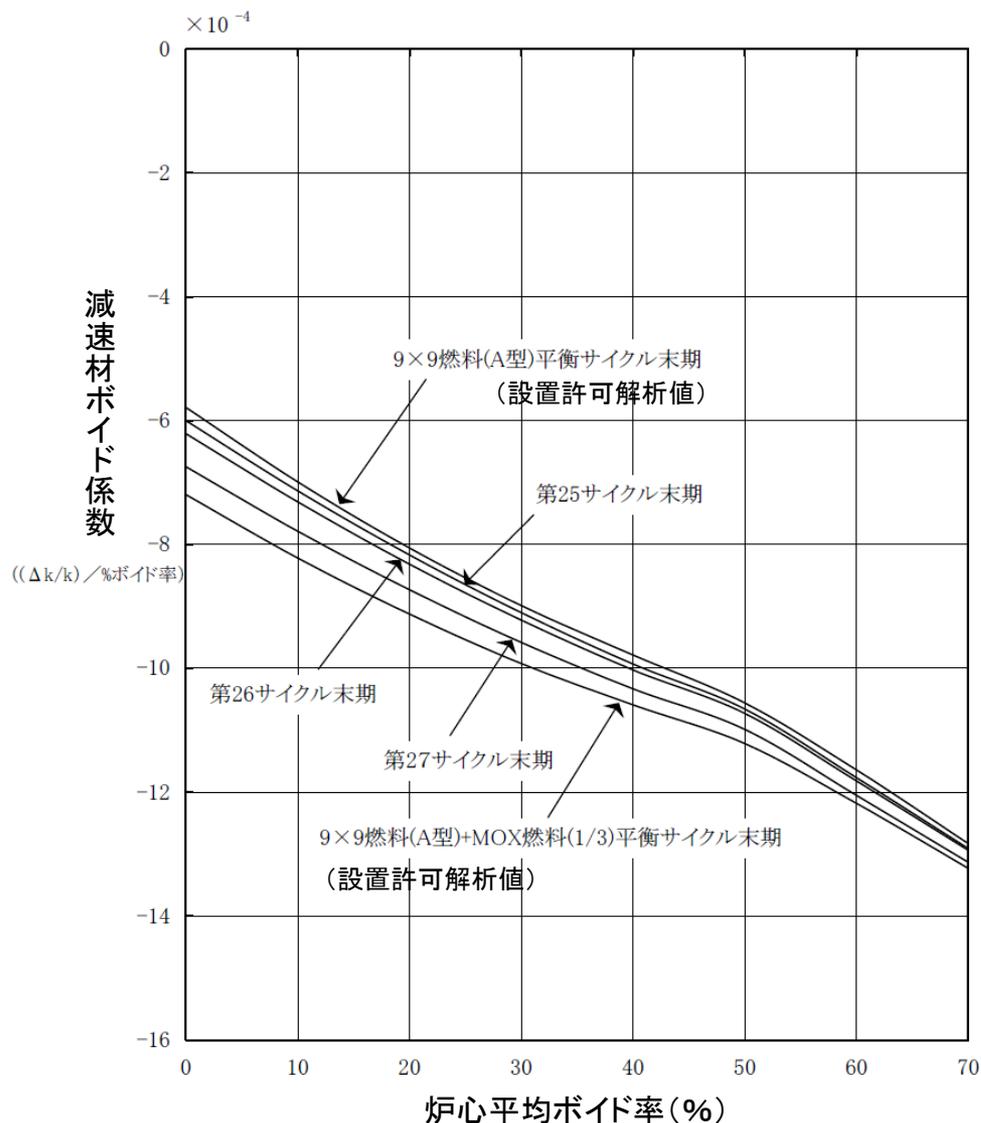


ウラン炉心(9×9燃料(A型)のみを装荷した炉心)と1/3MOX炉心の中間的な減速材ボイド係数

設置許可の安全解析では評価精度等を考慮し、保守ファクタ(1.25もしくは0.9)を乗じた減速材ボイド係数を用いている。

減速材ボイド係数の評価結果 (第25~27サイクル初期)

影響評価 (21) 反応度係数の変化 評価結果(反応度係数)



ウラン炉心(9×9燃料(A型)のみを装荷した炉心)と1/3MOX炉心の中間的な減速材ボイド係数

設置許可の安全解析では評価精度等を考慮し、保守ファクタ(1.25もしくは0.9)を乗じた減速材ボイド係数を用いている。

減速材ボイド係数の評価結果 (第25~27サイクル末期)

影響評価 (22) 反応度係数の変化 評価結果(反応度係数)

ドップラ係数の評価結果

	今回の評価			設置許可解析値	
	25サイクル	26サイクル	27サイクル	9×9(A型) 炉心	1/3MOX 炉心
サイクル初期	-1.95	-1.97	-1.99	-1.95	-1.99
サイクル末期	-2.13	-2.13	-2.13	-2.13	-2.13

原子炉定格出力時，単位： $\times 10^{-5}(\Delta k/k)/^{\circ}\text{C}$

設置許可の安全解析では評価精度等を考慮し、保守ファクタ (0.9) を乗じたドップラ係数を用いている。

ウラン炉心(9×9燃料(A型)のみを装荷した炉心)と1/3MOX炉心の中間的なドップラ係数

炉心特性（最大線出力密度、スクラム特性 等）



運転制限値を満足した炉心特性

反応度特性（減速材ボイド係数、ドップラ係数 等）



ウラン炉心と1/3MOX炉心の中間的な特性

影響評価（24）動特性への影響

核熱水力学的安定性（解析により評価）

核熱水力学的安定性 評価結果 (減幅比)	今回の評価値			設置許可 解析値	判断基準
	第25 サイクル	第26 サイクル	第27 サイクル		
チャンネル安定性 (MOX燃料)	0.31	0.30	0.31	0.51	< 1
炉心安定性	0.61	0.67	0.72	0.77	< 1
領域安定性	0.35	0.30	0.32	0.60	< 1

評価コードは、実炉での試験結果に対し、ばらつきを有するものの概ね保守側の傾向を示している。
設置許可解析では、反応度係数等の解析条件を保守側に設定することとあわせ、本解析コードを用いて安定性評価（判断基準；減幅比<1.0）を行うことが妥当とされている。

安定性は、安全設計審査指針で要求されている
判断基準を満足する

影響評価（25）運転時の異常な過渡変化、事故解析

プラント過渡、事故（原子炉冷却材流量の喪失、原子炉冷却材ポンプの軸固着）

長期保管がプラント過渡、事故に影響することが想定される因子	今回評価	設置許可解析における入力
減速材ボイド係数	ウラン炉心と1/3MOX炉心の中間的な特性	ウラン炉心と1/3MOX炉心のうち、解析結果を厳しくするものを選定し、保守ファクタを乗じたものを使用
燃料棒からの伝熱に関する係数 ・炉心平均ギャップ熱伝達係数 ・ホットチャンネルギャップ熱伝達係数	設置許可解析の入力値に包絡	解析結果が安全側になるよう保守的な値を使用

プラント過渡・事故への長期保管の影響は、安全側に条件設定され評価された設置許可解析結果の範囲に留まる

影響評価（26）運転時の異常な過渡変化、事故解析

制御棒過渡・事故

(a) 原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き、制御棒落下

長期保管が影響することが想定される因子	今回評価	設置許可解析における入力
制御棒価値	1%Δkを下回る	制限値の1.0%Δkに余裕を見て、1.3%Δkとしている

	今回の評価			設置許可解析値 (1/3MOX炉心)	判断基準
	25サイクル	26サイクル	27サイクル		
サイクル初期	0.84	0.89	0.92	0.98	1.0以下
サイクル末期	0.84	0.97	0.85	0.87	

制御棒価値を入力とする反応度投入事象解析では、判断基準である1.0%Δkに対し、保守的に制御棒価値1.3%Δkを解析の入力条件としている。

単位：%Δk

制御棒価値が1%Δkを下回ることから、長期保管の影響は、安全側に条件設定され評価された設置許可解析結果の範囲に留まる

影響評価（27）運転時の異常な過渡変化、事故解析

制御棒過渡・事故

(b) 出力運転中の制御棒の異常な引き抜き

	今回の評価値			設置許可解析値 (1/3MOX炉心)	判断基準
	25サイクル	26サイクル	27サイクル		
表面熱流束の 最大値	約106%	約107%	約105%	約121%	165%以下
最小限界出力比の 最小値	1.25	1.27	1.28	1.16	1.07以上

今回の評価値は、判断基準に対して十分余裕のある値となっている。

今回の解析結果は安全側に条件設定され評価された
設置許可解析結果の範囲に留まる

その他事故

(a) 崩壊熱の時間変化（原子炉冷却材喪失、主蒸気管破断、可燃性ガスの発生）

- ・ 解析結果のピーク値が現れる期間（～1日）においては、MOX燃料の崩壊熱は、ウラン燃料の崩壊熱よりも小さい
⇒ 設置許可では、より厳しいウラン燃料の崩壊熱を考慮
- ・ 長期保管MOX燃料の崩壊熱もウラン燃料の崩壊熱より小さい

(b) 燃料棒内圧の変化（原子炉冷却材喪失時の燃料棒破裂判定）

長期保管による内圧の上昇を考慮しても、燃料破裂は発生しない

その他事故への長期保管の影響も、安全側に条件設定され評価された設置許可解析結果の範囲に留まる

影響評価（29）使用済燃料貯蔵時の冷却性・未臨界性

(a) 使用済長期保管MOX燃料貯蔵時の冷却性

使用済の長期保管MOX燃料32体が、至近の2サイクルに続けて取り出された場合の使用済燃料プール水温を評価（他の条件は設置許可の解析と同様）

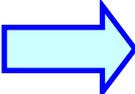
使用済燃料プールの冷却性評価結果

	今回の評価	設置許可の評価	判断基準
通常最大熱負荷時 (通常の燃料取替の熱負荷を考慮)	48.5℃	47.9℃	52℃以下
非常時最大熱負荷時 (全燃料取出しの熱負荷を考慮)	62.8℃	62.3℃	65℃以下

今回の評価は、MOX燃料の体数等について保守的な条件を設定している。
プール水温の判断基準は、規定された水温を満足する運用を行うことによって遵守可能である。

使用済燃料プール水温は判断基準を満足

(b) 使用済燃料プールでの長期保管MOX燃料貯蔵時の未臨界性

長期保管の影響  燃料の反応度低下

使用期間を通じて、長期保管MOX燃料貯蔵時の未臨界性は確保される

影響評価 まとめ

長期保管MOX燃料の組成変化（ ^{241}Pu の ^{241}Am への壊変等）による影響を評価し、長期保管MOX燃料の使用に問題がないことを確認した。

●燃料棒熱機械特性

ペレット温度や燃料被覆管応力等に問題はなく、使用中の燃料健全性は確保される。

●核炉心特性

各種運転制限値を満足した炉心特性。

反応度特性(減速材ボイド係数等)は、ウラン炉心と1/3MOX炉心の中間的な特性。

●動特性（安定性）・安全解析（過渡解析、事故解析）

反応度係数等から、長期保管の影響は、安全側に条件設定され評価された設置許可解析結果の範囲に留まる。

●使用済燃料貯蔵時の冷却性・未臨界性

長期保管MOX燃料の貯蔵に問題はない。

5. まとめ

- 点検・評価の結果、燃料プールに保管中のMOX新燃料は、原子炉内で問題なく使用できる健全性を有していることを確認した。
 - 燃料集合体外観検査および保管中のデータ確認により、燃料健全性に影響を及ぼすような損傷や変形、酸化物の付着等がないことを確認した。
 - ファイバースコープ等による燃料集合体内部確認により、燃料健全性に影響を及ぼす異物がないことを確認した。
 - MOX燃料の組成変化の影響について評価した結果、保管による影響はわずかであり、原子炉内で使用することに問題がないことを確認した。