IRID

令和2年度開始廃炉・汚染水対策事業費補助金 「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発 (燃料デブリと放射性廃棄物の仕分け技術の開発)」

最終報告

2022年 8月 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

無断複製·転載禁止 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 ©International Research Institute for Nuclear Decommissioning



目 次

1. はじめに

研究の背景・目的、目標、実施項目・他研究との関連、実施スケジュール、実施体制図

- 2. 実施内容
 - (1) 候補となっている計測技術の計測誤差に影響を与える因子の解析的評価
 - 影響因子の選定
 - 影響因子の変動幅の設定
 - ③ 解析シミュレーション(④詳細分析の必要性の検討と技術課題の整理 を含む)
 - (2) 仕分け技術の実機適用を目指した今後の研究開発計画の検討
 - ① 仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出
 - ② 研究開発の計画(内容、期間、条件)の検討
 - 主要工程の到達目標の整理

3. まとめ







1. はじめに

▶ 研究の背景・目的

▶ 目標

- ▶ 実施項目とその関連、他研究との関連
- ▶ 実施スケジュール
- ▶ 実施体制図



研究の背景・目的

(公募要領より抜粋)

【燃料デブリと放射性廃棄物の仕分け技術の開発の目的】

- 福島第一原子力発電所の廃止措置において、原子炉格納容器内部から取り出された物体のすべてを燃料デブリとして取り扱うことは必ずしも合理的ではない。
- 取り出された物体に含まれる核燃料物質の量を計測してその計測結果を基準として燃料デブリと放射性 廃棄物に仕分けすることができれば、燃料デブリの取り出しから保管までの作業の合理化が期待できる。
- 廃炉・汚染水対策事業(「燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発」(2019・2020年度)事業以下同じ。)において、核燃料物質の量を計測できる可能性のある計測技術の候補が挙げられたが、核燃料物質量による仕分け方法を確立するために必要となる計測誤差の評価には着手できていない。
- そのため、廃炉・汚染水対策事業において検討された計測技術*1)を念頭に原子炉格納容器内から取り 出された物体中に含まれる核燃料物質以外の物質量(水分量、金属成分量、制御棒の成分量、MCCIに よるコンクリート成分量等)や収納缶内の充填状況等に起因する計測誤差の因子類を選定して、それらが 計測誤差に与える影響をシミュレーションにより分析、評価しておくことは、今後仕分け技術の確立に向け て必要な計測技術・装置を選定していく上で必須である。

*1)パッシブガンマ線計測、パッシブ中性子計測、アクティブ中性子計測、X線透過計測、宇宙線散乱計測

- 以下の項目について、技術開発を実施する。
 - ① 候補となっている計測技術の計測誤差に影響を与える因子の解析的評価
 - ② 仕分け技術の実機適用を目指した今後の研究開発計画の検討



目標



【開発全体の目標】 燃料デブリの取り出し規模の更なる拡大に向け、燃料デブリの取り出しに伴い原子炉格納容器より取り出される物体を燃料デ ブリと放射性廃棄物に仕分ける技術開発に必要となる<u>各計測技術の課題の洗い出し</u>と将来の実機適用を目指した研究開発 計画の策定

【公募要領を踏まえた開発ステップと本年度研究の位置づけ】

(ステップ0) 仕分けに関わる技術の調査(2019-2020年度)

(ステップ1)計測のフィージビリティスタディ(可能性の分析)← 本年度研究(TRL2)

① 計測目的, 対象(形状, 密度等)設定

② 核物質→検出器への入射放射線挙動の評価

③ 計測概念に資する技術課題の抽出等

(ステップ2) 計測概念の構築および想定シナリオの再評価

(ステップ3) 基本設計・ソフト開発

(ステップ4) 試作・模擬線源等を用いた総合検証試験

(ステップ5)実機製作

(ステップ6)実運用

※上記は、プロジェクト開始にあたり実用化までの開発計画の中で本年度研究での位置づけを検討した成果を参照した。一般的な開発ステップとして、調査→FS→概念→基本→検証試験→実機製作→実運用を定義

IRID

実施項目とその関連、他研究との関連(1/2)



【実施概要】

2019年度の廃炉・汚染水対策事業において候補として挙げた計測技術*1)を念頭に原子炉格納容 器内から取り出された物体中に含まれる核燃料物質以外の物質量や収納缶内の充填状況等に起 因する計測誤差の因子類を選定して、それらが計測誤差に与える影響をシミュレーションにより分 析、評価する。

(1)候補となっている計測技術の計測誤差に影響を与える因子の解析的評価

廃炉・汚染水対策事業において候補として挙げた計測技術*1)の計測誤差への影響が予想される 因子を選定し、計測技術毎に各因子の変動幅について解析シミュレーションを実施し、各因子の 計測誤差に与える影響の大きさを分析評価する。さらに、今後更なる解析評価の継続の必要性及 び計測誤差低減に向けて将来必要となる技術開発課題について検討する。

(2) 仕分け技術の実機適用を目指した今後の研究開発計画の検討

(1)の評価結果や2019年度に検討された技術課題を踏まえて、仕分け技術を実用化することを目 標に、今後解決すべき技術課題の抽出を行う。さらにその技術課題を解決するための中長期の研 究開発計画で必要となる条件の整理を検討する。

*1)パッシブガンマ線計測、パッシブ中性子線計測、アクティブ中性子線計測、アクティブ・パッシブ中性子+パッシブガンマ線計測、 X線透過計測、宇宙線散乱計測



実施項目とその関連、他研究との関連(2/2)

他事業とは以下の情報交換を実施した。

令和2年開始 廃炉・汚染水対策事業費補助金

燃料デブリ ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発(燃料デブリと放射性廃棄物の仕分け技術の開発)

ID	要求側事業	提供側事業	内容(概要)	必要となる時期	情報の用途	備考
1	デブ取 PJ	性状 PJ	燃料デブリの性状	令和2年11月	計測技術の計測誤差に影響を与 えるパラメータの解析的評価の 解析条件の設定	適宜情報交換
2	デブ取 PJ	収納缶 PJ	収納缶の形状	令和2年11月	計測技術の計測誤差に影響を与 えるパラメータの解析的評価の 解析条件の設定	適宜情報交換
3	デブ取 PJ	処理・処分 PJ	廃棄物保管容器の形状	令和2年11月	計測技術の計測誤差に影響を与 えるパラメータの解析的評価の 解析条件の設定	適宜情報交換
4	デブ取 PJ	収納缶 PJ	燃料デブリの収納・移 送・保管のプロセスやそ れらシステムの今後の開 発計画	令和3年4月	仕分け技術の実用化に向けた技 術課題の抽出と仕分け技術開発 の主要工程の到達目標の整理の 前提条件	適宜情報交換

に関するインプット、アウトプット情報

注記)本資料においては、関連する他事業を次の略称で表す。

デブ取 PJ:燃料デブリ ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に向けた技術の開発 性状 PJ:燃料デブリの性状把握・分析技術の開発 収納缶 PJ:燃料デブリの収納・移送・保管技術の開発 処理・処分 PJ:固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発



実施スケジュール

		令和2年度				令和3年度												
		11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
[1]	候補となっている計測技術の計測誤差に影響を与える因子の解析的 評価 ① 影響因子の選定				影響因	子の選ば	定	調: ▼	査•変動	幅の設定	を踏ま	もしていた。	淀					
	② 影響因子の変動幅の設定				↓ 影響因	影響団 子の変動	日子の実 助幅の該	態調査 定					┼──	+	(適宜見ī	直し) *1	
	③ 解析シミュレーション					計測	技術の解 を供の割	析技術	調査/角	¥析手法	の検討		 		※1:解 進	析シミ 基 捗 を 踏	ュレーシ まえ追	ョンの 加検討
									感度角	4析条件	の設定					〔適宜見	直し) ^{※1}	1
							-		解析-	デルの	設定	シンゴー	小工组	<u>≣</u> + 301)	解析完了	(適宜見 7	直し) *1	1
								÷	解析シ	510-	ション(ハ	パッシブ 、	ゴンマ約	計測) 計測)	→解析完了	r i		
									解析シ	ミュレー	ション(ア	クティブ	が中性子:	線計測)	\rightarrow		解 ▼	析完了
								1	解析シミ	エレーシ	ョン(パッ	シブ・ア	ックティブ	中性子約	鼎計測+	γ線計測	則) 解	浙完了
									解	析シミュ	レーショ	ン(X線道	透過計測	(高エネ	ルギX線	CT法))	解 ▼	析完了
						解析	シミュレ	-ション	(宇宙線	散乱計	則(ミュオ	レ散乱法	#))	<u> </u>			解; ▼	析完了
	④ 詳細分析の必要性の検討と技術課題の整理						詳細	分析の』	必要性検	討と技行		理	<u> </u>	<u> </u>				
[2]	仕分け技術の実機適用を目指した今後の研究開発計画の検討 ①仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出								-	技術	課題の排	出						
	②研究開発の計画(内容、期間、条件)の検討											研究開	斜 発計画	jの検討				
	③主要工程の到達目標の整理						_						主要工	程到達目	標の整	理 ↓		
	主要なマイルストン(報告会/発表等)						 	[*] ェクトステ	ア リング会	義				中間報台 ● ●	5 7°C 777	ッェクト リング会議	∎ T	≹終報告



実施体制図





最終報告事項

2. 実施内容

(1) 候補となっている計測技術の計測誤差に影響を与える因子の解析的評価

- ① 影響因子の選定
- ② 影響因子の変動幅の設定
- ③ 解析シミュレーション

2.1 解析条件
2.2 解析結果
2.2.1 パッシブ中性子
2.2.2 パッシブガンマ
2.2.3 アクティブ中性子
2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ
2.2.5 X線透過計測
2.2.6 宇宙線散乱計測





IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2. 実施内容 - (1) ①影響因子の選定(1/2)

各計測技術に対して考えられる変動パラメータを洗い出し、その中から、計測誤差への影響が有意と考えられた影響因子(①~⑪)を抽出。また、当該影響因子が影響する計測法とその根拠を整理。

表 計測技術候補

No.11

記号	計測技術						
Pn	パッシブ 中性子線計測技術						
Ργ	パッシブ ガンマ線計測技術						
An	アクティブ中性子線計測技術						
PAn+Pγ	パッシブ・アクティブ中性子線計測+γ線計測技術						
Х	X線透過計測(高エネルギX線CT法)						
М	宇宙線散乱計測(ミュオン散乱法)						

表 計測誤差への影響因子の選定結果(1/2)

	影響因子	影響する計測法	根拠等
燃	① 燃料デブリ組成	全て	燃料デブリ組成(燃料成分と構造物との混合割合)の違いで、放射線の吸収・散乱効果が異なる
やデ	Gd含有量(率)	Pn、An、PAn+Pγ、M	含有量(率)の違いで、燃料デブリから放出される放射線(特に中性子)の吸収・散乱効果(エネルギー分布)が異なる
リ	B含有量(率)	Pn、An、PAn+Pγ、M	同上
性状	MOX	全て	燃料デブリから放出される放射線がウラン燃料と異なる。また、燃料デブリ組成も変わり、放射線の吸収・散乱効果が異なる
燃料	② 燃焼度	Pn、Pγ、An、 PAn+Pγ、M	燃料デブリを構成する核分裂生成物(FP)やアクチノイド核種組成が変わるため、放出される放射線種や、燃料デブリ中で の放射線の吸収・散乱効果が異なる
料デブリ履	③ FP放出率	Ργ、Χ、Μ	燃料溶融に伴い放出されるFP核種の放出割合のこと。 燃料溶融の際に放出される揮発性FP核種の割合は、燃料デブリ中から放出されるガンマ線の強度やエネルギー分布に影 響する
歴	④ 冷却期間	Pn、Pγ、An、 PAn+Pγ、M	「②燃焼度」に同じ



2. 実施内容 - (1) ①影響因子の選定(2/2)

No.12

表 計測技術候補

記号	計測技術
Pn	パッシブ 中性子線計測技術
Ργ	パッシブ ガンマ線計測技術
An	アクティブ中性子線計測技術
PAn+Pγ	パッシブ・アクティブ中性子線計測+γ線計測技術
Х	X線透過計測(高エネルギX線CT法)
М	宇宙線散乱計測(ミュオン散乱法)

表 計測誤差への影響因子の選定結果(2/2)

	影響因子	影響する計測法	根拠等
容哭	⑤ 水分含有量	Pn、An、PAn+Pγ、M	水分含有量の違いで、燃料デブリから放出される放射線(特に中性子)の吸収・散乱効果(エネルギー分布)が異なる
収	⑥ 充填率	全て	容器内での放射線の吸収・散乱効果が異なる
状態	⑦偏在	全て	同上
恐	⑧ 容器	全て	容器の違いで、検出器に到達する放射線の強さ(線束等)が異なる
計 体測 系生	⑨ 照射放射線源	An、PAn+Pγ、X	照射する放射線源(中性子・X線)エネルギーの違いで、燃料デブリなど物質中の相互作用が異なる
電	⑩ 検出器	全て	計測法ごとの検出器の位置、遮蔽体、減速材の厚みの違いで、検出器に到達する放射線の強さ(線束等)が異なる

2. 実施内容 - (1) ②影響因子の変動幅の設定 (1/2)

抽出された影響因子(①~⑪)に対して、燃料デブリの性状や各計測技術の原理に 照らし、影響因子の変動幅(最小~最大 etc.)を設定(下表)

No.13

影響因子 根拠等 項目 影響因子の変動幅 燃料デ ①燃料デブリ組成 燃料(UO₂)と構造材(ZrO₂・ 燃料デブリは、燃料(UO2)と構造材(ZrO2・SUS・コンクリート)の混合の組み合わせ ブリ件状 SUS・コンクリート)の混合割合で が無限に存在するため、代表的なデブリ状態として、以下を想定
 ·溶融デブリ
 ^(注1)
 変動幅を設定 種類 定義 (解析条件にて詳細を整理。) ・ウランリッチデブリ 溶融デブリ (U,Zr)O₂が主成分の燃料デブリ ・金属デブリ ^(注1) ウランリッチデブリ UOっが主成分の燃料デブリ MCCIデブリ (注1) 金属デブリ 密度差によって底に溜まった金属層 MCCIデブリ コンクリート成分を含む酸化物層 Gd含有量(率) 実機の燃料中に含まれる最小の (1) 燃料に含まれる可燃性Gd、(2) 未臨界性維持として添加されるGd2O3を想定 Gd含有率~取り出し時に追加 する。(1) は燃料デブリに一様に混在する可能性を考え"実機条件"相当、(2) は容 で添加されるGdを加えた最大値 器内に最大量含まれる可能性を考える。 B含有量(率) 0%~取り出し時に追加で添加 (1) 制御棒に含まれるB、(2) 未臨界性維持として添加されるB₄Cを想定する。 ただし、制御棒は燃料棒に先行して溶融するため、燃料デブリに一様に混在せず制御 されるBを加えた最大値 棒を含まない燃料デブリが取り出される可能性を考え、(1)は0%、(2)は容器内に 最大量含まれる可能性を考える。 1,2号機はMOX燃料装荷なし。3号機はMOX燃料装荷あり。 MOX MOX無 or 有 燃料デ 2 燃焼度 約1.3~約51.3GWd/t 1.3GWd/tは天然U領域を除く2号機のノード単位の最低燃焼度であり、1~3号機 ブリ履歴 中最も小さく他号機の最小値を包含する。 51.3GWd/tは2号機のノード単位の最高燃焼度であり、1~3号機中最も大きく他 号機の最大値を包含する。 ③ FP放出率 Cs等の揮発性FP放出無~放出 燃料溶融の際に放出される揮発性FP核種の割合は、燃料デブリ中から放出される 有(99%) ガンマ線の強度やエネルギー分布に影響するため、ゼロ放出から高放出を想定 ④ 冷却期間 事故後20~40年 本格取り出し(2031年)~中長期ロードマップに基づく廃止措置終了まで。

表影響因子の変動幅の設定結果 (1/2)

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning (注1)平成28年度補正予算廃炉・汚染水対策事業費補助金燃料デブリの性状把握・分析技術の開発研究報告書(中間報告)平成30年3月

2. 実施内容 - (1) ②影響因子の変動幅の設定 (2/2)

No.14

表 影響因子の変動幅の設定結果 (2/2)

項目	影響因子		影響因子の変動幅	根拠等			
容器 収納 状態	⑤ 水分含有量		0.1wt% ~70vol%	0.1wt%は計測前の乾燥を前提とし、収納缶PJの乾燥目標値 0.1wt% ^(注2) に基づき設定する。 70vol%は水切り試験データの含水率最大値65.1vol%(誤差 要因を考慮した残水量) ^(注3) を切り上げて設定する。			
	⑥ 充填率		10~50vol%	ユニット缶仕様の充填率30%(<u>デブ取PJ</u> 情報による)から±20% の変動を仮定。			
	⑦ 偏在⑧ 容器		極端な偏在として、 ・容器中心に線源偏在している状態 ・容器表面近傍に線源偏在している状態	燃料デブリを容器に収納した場合、偏在状態は無限に存在するた め、極端な偏在状態を想定し、まずは影響程度を確認			
			各PJで検討中の容器として、 ・ユニット缶 ・収納缶 ・廃棄物保管容器 (又は内容器)	適用性確認の観点から、実施中の <u>デブ取PJ</u> 及び <u>収納缶PJ</u> における 容器を対象とする。 ・ユニット缶 ・収納缶 ^(注2) ・廃棄物保管容器(又は内容器)			
計測 装置 体系	計測 ⑨ 照射 アクティブ 1.13 装置 放射線源 中性子計測 2.45 本系 14M		1.13MeV(平均エネルギー) 2.45MeV 14MeV	1.13MeV : 制動X線による光核反応 2.45MeV : D-D反応 14MeV : D-T反応			
		X線透過計測	最大X線エネルギー 6MeV 9MeV 15MeV	容器内に充填された物に対してX線が透過可能な長さと、製品とし て市場に供給されている非破壊検査用電子線形加速器のX線エネ ルギーから選定。			
⑩ 検出器(検出器位置、遮蔽厚等)		置、遮蔽厚等)	計測技術ごとに設定				
(注2) 平) (注3) 平)	成30年度補正予 成26年度補正予	۶算 廃炉・汚染水対策事 ۶算 廃炉・汚染水対策事	国業費補助金 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発 研究 国業費補助金 燃料デブル収納・移送・保管技術の開発 研究	名報告書(最終報告)令和3年3月 名報告書(最終報告)平成29年3月			



2. 実施内容

- (1) 候補となっている計測技術の計測誤差に影響を与える因子の解析的評価
 - ① 影響因子の選定
 - ② 影響因子の変動幅の設定
 - ③ 解析シミュレーション

2.1 解析条件
2.2 解析結果
2.2.1 パッシブ中性子
2.2.2 パッシブガンマ
2.2.3 アクティブ中性子
2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ
2.2.5 X線透過計測
2.2.6 宇宙線散乱計測



No.16

- 2. 実施内容 (1) ③解析シミュレーション(実施分担)
 - I. 燃料デブリ線源モデルの作成: JAEA
 - II. 各計測法の解析シミュレーション: 下表

No.	計測技術 ^(※1)	解析担当	適用コード(断面積ライフ [・] ラリ) ^(※2)		
1	パッシブ 中性子線計測技術	MHI 日立GE	MCNP5 (JENDL4.0) PHITS 3.20 (JENDL4.0)		
2	パッシブ ガンマ線計測技術	MHI 日立GE	MCNP5 (JENDL4.0) PHITS 3.20 (JENDL4.0)		
3	アクティブ中性子線計測技術	MHI 日立GE	MCNP5 (JENDL4.0) PHITS 3.20 (JENDL4.0)		
4	パッシブ・アクティブ中性子線計測 +ガンマ線計測技術	MHI	MCNP5 (JENDL4.0)		
5	X線透過計測(高エネルギX線CT 法)	日立GE	PHITS 3.20 (JENDL4.0)		
6	宇宙線散乱計測(ミュオン散乱 法)	東芝ESS	MCNP6 (ENDF/B-VII)		

※1:2019年度検討にて仕分け適用可能性のある候補として選定された計測技術

※2:適用するコード、断面積ライブラリは各社異なるが、MHIと日立GEにて分担して解析する計測技術については、同一の計算体系、線源条件での試計算を実施し 結果を比較することで、今回のフィージビリティスタディの目的に適う結果が得られることを確認済。東芝ESSのコード、断面積ライブラリについても、広く使用 されているものであるため適用実績豊富である。





2. 実施内容 - (1) ③解析シミュレーション(全体の流れ)

①影響因子の選定
 ②影響因子変動幅の設定

③解析シミュレーション

燃料デブリ線源モデル (材料毎データ)の作成

影響因子(材料混合条件、容器タイプ等) を考慮した容器収納燃料デブリモデルの作成

計測技術毎の粒子輸送モンテカルロシミュレーション (MCNP, PHITSコード)の実施

感度解析ケース毎の検出器手前における線東評価 (手法やケースによっては検出器応答を含む)

粒子輸送シミュレーション (中性子・光子・電子・ミュオン)





2.1 解析条件 - 燃料デブリ線源モデルの作成(1/2)

多種多様な燃料デブリの解析に使用する基本組成、光子線源、中性子線源モデルを作成





2.1 解析条件 - 燃料デブリ線源モデルの作成(2/2)

シミュレーション用ボクセル混合燃料デブリモデルの作成

●多数の感度解析ケースへの一元的対応
 ●相関があるパラメータによる非現実的モデルの回避
 (相関例:ウラン濃度が大きい燃料デブリは平均密度も大きくなる)



仮想的に容器に収納する材料別ボクセル数 を調整することにより多種多様な燃料デブリ を模擬(線源はボクセル数に比例)

均質混合して各種容器に収納(シミュレーションモデル)







線源モデルの違いを含め18種類のボクセルデータを作成 ➡ 組み合わせにより多種多様な燃料デブリを模擬



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.1 解析条件 - ベースケース解析条件 (1/2)

Unternational κesearch Institute for Nuclear Decommissioning

◆ ベースケースの解析条件を設定

~ 1)

(感度解析:本条件に基づく解析結果(線束等)をベースに個々の影響因子(パラメータ)の最小〜最大の解析結果に対する感度を調査する)

表 ベースケース解析条件

項目	パラメータ		値	条件設定の考え方				
	燃焼度		23GWd/t	直近で調査予定の2号の炉心平均燃焼度(注1)				
線源	FP放出率		標準放出モデル	FP放出試験(Phebus-FPT4)に基づく放出率				
	冷却期間		20年	本格取り出し開始時期(2031年)				
放射線 輸送計算 容器	対象容器		対象容器		対象容器		ユニット缶	容器:最小単位容器 側面及び底部のメッシュ構造はモデル化しない(肉厚を考慮する) 高さ:線量寄与範囲、線源量がより少なくなる200mmで代表 その他容器情報: <u>収納缶PJ、デブ取PJ</u> 情報による
モデル	现的去了始的	アクティブ中性子計測	14MeV	D-T反応				
	線エネルギー X線透過計測		9MeV	測定対象に対して透過力を有し,かつ製品供給されている非破壊検査用電子線 形加速器のX線エネルギにおける中間値				
放 射線 輸送計算 燃料 デブリ	燃料デブリ組成 (体積比)		$UO_2: 50\%$ ZrO_2: 50% SUS: 0% Conc: 0% Gd_2O_3: 0% B_4C: 0% MOX: 0% Empty(気孔率): 0%	 ・溶融デブリ (UO₂とZrO₂の混合物) と想定 混合割合は<u>性状PJ</u>情報による ・燃料に含まれる可燃性GdはUO₂の組成で考慮 (Gd₂O₃^(注2)は無しと設定) ・制御棒は燃料棒に先行して溶融するため、燃料デブリに一様に混在しないものと想 定 (B₄C^(注3)は無しと設定) ・MOX燃料は考慮しない ・気孔率はゼロとする 				
組成モデ ル	水分量(wt%)		1wt%	水素燃焼リスクに基づく設定値。(移送期間(7日間)において, 収納缶内の水 素濃度が4vol%に達する含水率1.5wt%を切り下げ) <u>収納缶PJ</u> 情報による				
	充填率(vol%))	30vol% (Empty : 70vol%)	<u>デブ取PJ</u> 情報による				
	偏在		-	均質モデルを採用(ユニット缶内に、UO2、ZrO2、H2O、Emptyを均一に分布)				
(注1) JAI (注3) 1Fi	(注1) JAEA-Data-Code-2012-018, (注2) 未臨界維持のために添加される臨界防止材を想定 (注3) 1F制御棒内の吸収材を想定							

2.1 解析条件 - ベースケース解析条件 (2/2)

表 前提条件(容器·密度)

項目	条件	値	根拠		
	深さ	200mm	線量に寄与する範囲、線源量がより少なくなる200mmで代表		
	外径	210mm	計画値(<u>デブ取PJ</u> 情報による)		
	内径	206mm			
容器	肉厚	側部:2mm 底部:5mm	側面及び底部のメッシュ構造は考慮しない		
	材質	SUS316L	<u>収納缶PJ</u> 情報による		
	密度	7.98g/cm ³	JIS G 4304より(SUS316L)		
	UO ₂	10.525g/cm ³	実機条件		
百应府	ZrO ₂	5.56g/cm ³	実機条件		
具否反	H ₂ O	1.0g/cm ³	理科年表H30年より(1atm、20℃の密度0.99820g/cm3を丸めて設定)		
	空気	0g/cm ³	Voidとして扱う		



平成30年度補正予算 廃炉・汚染水対策事業費補助金 燃料デブリ収納・移送 ・保管技術の開発研究報告書(最終報告)令和3年3月より

表 モデル化の方針





- 2.1 解析条件 感度解析の進め方
- 影響因子の変動幅により検出面に到達する線束等のバラツキを以下の手順で確認する。
 - 1. ベースケース条件での結果を基準とし、個別の影響因子を変化させて、バラツキを確認
 - 2. 上記結果から、複数の影響因子が絡み合う場合のバラツキに関して、物理現象を理解

し、網羅的な推察を可能とするため、複数の影響因子を変化させたケースも代表的に





● 以上の解析的評価から、影響因子によるバラツキを低減(又は予測)するため、「④ 詳細分析の必要性の検討と技術課題の整理」し、今後の研究開発計画に繋げる。

IRID

2.1 解析条件 - 各計測法の感度解析対象とする影響因子

No.23

計測法ごとに感度解析(パラスタ)で対象とする影響因子を表中「〇」に示す。また、その根拠等を併記。

見 郷 町 フ			計	測法	相圳等		
影響囚丁	パッシブn	パッシブγ	アクティブn	組合せ (注1)	X線	宇宙線(注2)	·
① 燃料デブリ組成	0	0	0	0	0	0	燃料デブリ組成の違いで、放射線の吸収・散乱効果が異なる
Gd含有量(率)	0	-	0	0	-	0	含有量(率)の違いで、燃料デブリから放出される放射線(特に中性 子)の吸収・散乱効果(エネルギー分布)が異なる
B含有量(率)	0	-	0	-	-	0	同上
MOX	0	0	0	-	0	0	燃料デブリから放出される放射線源が異なる。また、燃料デブリ組成 も変わるため、放射線の吸収・散乱効果が異なる
② 燃焼度	0	0	0	0	-	0	同上
③ FP放出率	-	0	-	_	0	0	同上
④ 冷却期間	0	0	0	_	-	0	同上
⑤ 水分含有量	0	-	Ο	_	-	Ο	水分含有量の違いで、燃料デブリから放出される放射線(特に中性 子)の吸収・散乱効果(エネルギー分布)が異なる
⑥ 充填率	0	0	0	0	0	0	容器内での放射線の吸収・散乱効果が異なる。
⑦偏在	0	0	0	0	0	0	同上
⑧ 容器	0	0	0	_	0	0	容器の違いで、検出器に到達する放射線の強さ(線束等)が異なる
⑨ 照射放射線源	-	-	0	-	0	-	照射する放射線源(中性子・X線)エネルギーの違いで、燃料デブ リなど物質中の相互作用が異なる (※)アクティブn計測、X線透過計測のみ
① 検出器 (検出器位置、遮蔽厚等)	〇(注3)	〇(注3)	〇(注3)	_	〇(注3)	0	計測法ごとの検出器の位置、遮蔽体(減速材)の厚みの違いで、 検出器に到達する放射線の強さ(線束等)が異なる

(注1) パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ

(注2) 宇宙線散乱計測(ミュオン散乱法)とは関係しない⑨を除き、全ての因子に対して影響を調査する。MOX、燃焼度、FP放出率、冷却期間の4ケースは、組成の変化の影響のみを扱う

(注3)代表的な検出器位置、減速材等を設定

2.1 解析条件 - 感度解析条件(1/2)

感度解析(パラスタ)で対象とする各影響因子(①~⑩)に対して、解析条件を設定。

表 感度解析条件(1/2)

項目	影響因子	影響因子の変動幅	解析条件		
燃料デブリ性状	①燃料デブリ組成	燃料(UO ₂)と構造材(ZrO ₂ ・SUS・コンクリート)の 混合割合で変動幅を設定。	 燃料デブリは、燃料(UO₂)と構造材(ZrO₂・SUS・コンクリート)の混合の組み合わせは無限に存在するため、代表的なデブリ状態として、以下を想定。 ・溶融デブリ^(注1) ・ウランリッチデ[*]ブ[*]リ ・金属デブリ^(注1) ・MCCIデブリ^(注1) 合計8ケース。(詳細はNo.26参照) 		
	Gd含有量(率)	実機の燃料中に含まれる最小のGd含有率〜取り 出し時に追加で添加されるGdを加えた最大値	(1) 実機条件 ←ベース (2) 未臨界性維持として添加されるGd ₂ O ₃ を想定し設定		
	B含有量(率)	0%~取り出し時に追加で添加されるBを加えた最大値(なお、制御棒は燃料棒に先行して溶融するため、燃料デブリに一様に混在せず制御棒を含まない燃料デブリが取り出される可能性を考え、最小は0%とする。)	 (1) 0% ←ベース (2) B₄C/UO₂体積比=0.034 (実機条件相当:事故前の炉心平均のB混合量) (3) 未臨界性維持として添加されるB₄Cを想定し設定 		
	MOX	MOX無 or 有	(1) MOX無(1,2号) ←ベース (2) MOX有(3号)		
燃料デブリ履歴 (燃料成分 (UO ₂ 、ZrO ₂) の組成 & 線源強	② 燃焼度	約1.3~約51.3GWd/t	 (1)約1.3GWd/t (ノード単位 最低燃焼度) (2)約23GWd/t (平均) ←ベース (3)約51.3GWd/t (ノード単位 最高燃焼度) 		
の組成 & 線源強 度)	③ FP放出率	揮発性FP放出無~放出有(99%) (詳細はNo.14参照)	 (1) ゼロ放出 (2) FP放出試験(Phebus-FPT4)に基づく放出率 ←ベース (3) 高放出(99%) 		
	④ 冷却期間	事故後20~40年	 (1)事故後20年 ←ベース (2)事故後30年 (3)事故後40年 		
(注1)平成28年度	夏補正予算 廃炉・汚染水落	対策事業費補助金 燃料デブリの性状把握・分析技術の開発	研究報告書(中間報告)平成30年3月		



2.1 解析条件 - 感度解析条件 (2/2)

No.25

表 感度解析条件(2/2)

項目	影響因子		影響因子の変動幅	解析条件				
容器収 納状態	⑤ 水分含有	5量	 0.1wt%~70vol% 0.1wt%は計測前の乾燥を前提とし、収納缶PJの乾燥目標値 0.1wt% ^(注1) に基づき設定する。 70vol%は水切り試験データの含水率最大値65.1vol%(誤差 要因を考慮した残水量) ^(注2)を切り上げて設定する。 	 (1) 0.1wt% (2) 1wt% ←ベース (3) (1)、(2)、(4)の結果を見て要否含め設定 (4) 70vol% 				
	⑥ 充填率		10~50vol% ユニット缶仕様の充填率30%(<u>デブ取PJ</u> 情報による)から ±20%の変動を仮定。	 (1) 10vol% (2) 30vol% ←ベース (3) 50vol% 				
	⑦偏在		極端な偏在として、 ・容器中心に線源偏在している状態 ・容器表面近傍に線源偏在している状態	同左 (詳細は No.27 参照)				
	⑧ 容器		各PJで検討中の容器として、 ・ユニット缶 ・収納缶 ・廃棄物保管容器 (又は内容器)	 (1) ユニット缶 ←ベース (2) 収納缶 (3) 廃棄物保管容器 (詳細はNo.28参照) 				
計測装 置体系	⑨ 照射放 射線源	アクティブ 中性子計測	1.13MeV(平均エネルギー) 2.45MeV 14MeV	(1)1.13MeV : 制動X線による光核反応 (2) 2.45MeV(D-D反応) (3) 14MeV(D-T反応) ←ベース				
		X線透過計測	最大X線エネルギー 6MeV 9MeV 15MeV	 (1) 6MeV (2) 9MeV ←ベース (3) 15MeV 				
	⑩ 検出器 (検出器位語	置、遮蔽厚等)	計測技術ごとに設定	同左 (詳細は2.2項で各計測法でのモデル参照)				
注1) : 平成 注2) : 平成	30年度補正予 26年度補正予	算 廃炉・汚染水対策 算 廃炉・汚染水対策	事業費補助金 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発 研究報告書(最終報) 事業費補助金 燃料デブリ収納・移送・保管技術の開発 研究報告書(最終報)	告)令和3年3月 告)平成29年3月				



2.1 解析条件 - 感度解析条件 - 燃料デブリ組成(詳細)

- ▷ 性状PJ H30年度報告書に基づく燃料デブリ組成(溶融デブリ<ベース>、金属デブリ、MCCIデブリ)+ウランリッチデブリを 想定
- ▶ 燃料デブリ成分の変動は、核燃料成分、SUS、Concについて感度を調査。 (UO₂以外の成分は遮蔽材となるため、検知性が悪くなるケース、計測に影響するケースを実施)

燃料デブリ		燃料デ	ブリ成分			7	その他	理由(根拠)	
	UO ₂	ZrO ₂	SUS	Conc	Gd ₂ O ₃	B ₄ C	H ₂ O	Empty	
溶融デブリ	15% (50%)	15% (50%)	0%	0%		ベース :			性状PJ H30年度報告書に基づく
	7.5% (25%)	22.5% (75%)	0%	0%					核燃料成分の変動による感度調査
Uリッチデブリ	30% (100%)	0% (0%)	0%	0%	ベース:		ベース:	ベース:	核燃料成分の変動による感度調査
金属デブリ	0.075% (0.25%)	0.075% (0.25%)	29.85% (99.5%)	0%	0%	0%	1wt%	が科テフリ +H ₂ O除く体 積	性状PJ H30年度報告書に基づく
MCCI	1.05% (3.5%)	1.05% (3.5%)	7.2% (24%)	20.7% (69%)	感度解析 にて変動を 老盧	感度解析 にて変動を 老盧	感度解析に て変動を考 盧	感度解析にて	性状PJ H30年度報告書に基づく
燃料デブリを構 成するその他材 料成分による感 度調査	15% (25%)	15% (25%)	30% (50%)	0%	, nov		1/Ex	変動考慮	SUSの変動による感度調査
	15% (25%)	15% (25%)	0%	30% (50%)					コンクリート成分の変動による感度調査
	15% (33.3%)	15% (33.3%)	0%	15% (33.3%)					コンクリート成分の変動による感度調査 (中性子計測のみ)

<燃料デブリ組成(ボクセル) 体積比(vol%) 整理表>

(注1) 容器内に対する割合。括弧内は、燃料デブリ成分を100%とした場合の割合。



2.1 解析条件 - 感度解析条件 - 偏在モデル

■偏在ケースの解析体系 核燃料の物質(UO₂とZrO₂)とそれ以外の物質を分け、容器内に偏在 例:パッシブγ, n, アクティブnでのMCCIの偏在ケース:水平方向の中心(#1-24)・水平方向の外面(#1-25) _{単位[cm]}





2.1 解析条件 - 感度解析条件 - 容器形状



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2. 実施内容

(1) 候補となっている計測技術の計測誤差に影響を与える因子の解析的評価

- ① 影響因子の選定
- ② 影響因子の変動幅の設定
- ③ 解析シミュレーション

2.1 解析条件
2.2 解析結果
2.2.1 パッシブ中性子
2.2.2 パッシブガンマ
2.2.3 アクティブ中性子
2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ
2.2.5 X線透過計測
2.2.6 宇宙線散乱計測

	① 燃料デブ リ組成	Gd 含有量	B 含有量	мох	② 燃焼度	③ FP 放出率	④ 冷却 期間	⑤ 水分 含有量	⑥ 充填率	⑦ 偏在	⑧ 容器	⑨ 照射放 射線源	⑪ 検出器
2.2.1 パッシブn	No.37 No.40 No.42 No.45	No.52 ~54	No.52 ~54	No.42	No.38 No.43	-	No.41 No.46	No.39 No.44	No.37 No.40 No.42 No.45	No.58 ~62	No.50	-	No.47 No.48 No.56 No.72 ~75



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.1 パッシブ中性子 -計測概念

- 燃料デブリには、自発核分裂により中性子を放出する燃料由来の核種(Cm-244等)が含まれる。
- 特に、Cm-244は、燃焼が進むほど支配的な中性子発生核種となるため、計測対象核種となること が想定される。
- ただし、燃料デブリに含まれる水分や未臨界維持のための中性子吸収材(Gd, B₄C)により中性子 が吸収されてしまう場合や、低燃焼度の燃料の場合には、中性子線束は相対的に少なくなる。
- よって、燃料デブリの性状により計測面に到達する中性子線束は幅を持つことになる。
- 以上より、<u>解析的評価により計測の幅を見極めることで、計測系に必要な検出器の計測レンジ</u>
 <u>や、計測距離又は中性子減速材体系を工夫する等の課題を抽出する</u>。





2.2.1 パッシブ中性子 -解析モデル

容器からの距離に対する放射線束の変化を検討可能とするため, 容器(ユニット缶など)から一定距離離れた円筒型の検出器空間を多層配置 →放射線束の変化に基づき,検出器の選定や配置,遮蔽等の検討に利用







IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.1 パッシブ中性子 -解析ケース表 (1/3)

- No.2-1の解析条件をベースケースとし、影響因子に変更した解析条件(No.2-2~29)を感度解 析条件とした。
- 感度解析条件において、ベースケースから変更した影響因子を青文字でハイライトしている。
 ここで、上記変更に付随して変更となるパラメータを含め黄色網掛けしている。

ケーマ		容器内組	成 ^{*1}		燃焼度	FP放出率	冷却期間	偏在	容器	変更
No	燃料デブリ	燃料デブリ 充填率内		充填率外	Ī					パラメータ
110,	の種類	組成	合計(充填率)							
2_1	滚融デブロ	UO ₂ : 15vol%(50vol%)	30,01%	H ₂ O (含水率):1wt%	23.0GWd/t	梗淮	20年		ユニット缶	ベーフケーフ
2 1		ZrO ₂ : 15vol%(50vol%)	3000170	Empty:残り	23.001/071		20+	**)	(<i>ф</i> 210mm × H200mm)	
2-2		UO ₂ : 7.5vol% (25vol%)	30vol%	H ₂ 0 (含水率):1wt%	23.0GWd/t	煙進	20年	均—	ユニット缶	燃料デブリ組成
		ZrO ₂ : 22.5vol% (75vol%)	0010170	Empty:残り	20.0011071		201		(¢210mm×H200mm)	(UO_2, ZrO_2)
2-3		MOX : 30vol%	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt%	0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶	мох
				Empty:残り		1001			(¢210mm×H200mm)	
2-4		UO ₂ : 5vol% (50vol%)	10vol%	H ₂ O (含水率):1wt%	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶	充填率
		ZrO_2 : 5vol% (50vol%)		Empty:残り				-	(<i>φ</i> 210mm × H200mm)	
2-5		\bigcup_2 : 25vol% (50vol%)	50vol%	H ₂ O (含水率): 1wt%	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶	充填率
		ZrO_2 : 25vol% (50vol%)		Empty:残り					(<i>ф</i> 210mm × H200mm)	
0.0		UO ₂ : 15vol% (50vol%)	20 10/	Gd_2O_3 : 3vol%	00.0004/1/1		00/5	16	ユニット缶	016+
2-6		ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ U(含水率):Iwt%	23.0GVVd/t	標準	20年	巧—	(GO含有率
27		UO ₂ : 15vol% (50vol%)	20vol%	$U_2 U_3 \cdot 30001\%$	23.0C/M/d /t	栖淮	20年		ユニット缶	にす今年変
2-1		ZrO ₂ :15vol% (50vol%)	3000178	H ₂ O(古水率)・IWt/6 Empty:残り	23.00000/1	标件	204	1-1	(<i>ф</i> 210mm × H200mm)	Gu呂有平
				B C : 0.51vol%						
2-8		UO ₂ : 15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率): 1wt%	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶	B含有率
		ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)		Empty:残り		1001		5	(<i>ф</i> 210mm×H200mm)	
				B.C: 10vol%						
2-9		\bigcup_2 : 15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt%	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶	B含有率
		ZrU_2 : 15vol% (50vol%)		Empty:残り					$(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$	
2 10	1	UO ₂ : 15vol% (50vol%)	20.0010/	H ₂ O(含水率):0.1wt%	22.001/14/1	抽准	20年	+5	ユニット缶	
2-10		ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)	30001%	- Empty:残り	23.0GVV0/t	惊华	20年	13-	(<i>φ</i> 210mm × H200mm)	百小平

IRID

2.2.1 パッシブ中性子 -解析ケース表 (2/3)

ケーマ		容器内組	成 ^{*1}		燃焼度	FP放出率	冷却期間	偏在	容器	変更
No	燃料デブリ	充填率内		充填率外						パラメータ
110,	の種類	組成	合計(充填率)							
2 11	※ 副 デ ブ ロ	UO ₂ :15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O(含水率):70vol%	23 0C/M4 /+	 一 進	20年		ユニット缶	今水葱
2-11	溶融ナノリ	ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)	3000170	Empty: 0vol%	23.00Wu/t	标件	204		(<i>ф</i> 210mm × H200mm)	百八平
2-12		UO ₂ :15vol% (50vol%)	30,00%	H ₂ O (含水率):1wt%	1 2CMd/+	桓淮	20年		ユニット缶	燃咗庉
2-12		ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)	5000170	Empty:残り	1.56W0/1	177-77	204	47)	(<i>ф</i> 210mm × H200mm)	所不死反
2-13		UO ₂ :15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt%	F1CWd/+	桓淮	20年	ち	ユニット缶	燃咗庉
2-13		ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)	5000170	Empty:残り	51GWW/T	际牛	204		(<i>ф</i> 210mm × H200mm)	所不死反
2-1/		UO ₂ : 15vol% (50vol%)	30,00%	H ₂ O (含水率):1wt%	23.0GWd/t	桓淮	20年		ユニット缶	冷却期間
2 14		ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)	5000170	Empty:残り	25.00110/1	175-1-	304	~~)	(<i>ф</i> 210mm × H200mm)	
2_15		UO ₂ :15vol% (50vol%)	30,00%	H ₂ O (含水率):1wt%	23.0C/M4/+	桓淮	40年		ユニット缶	冷 却 期 問
2-13		ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)	5000170	Empty:残り	23.0000071	175-	404	47)	(<i>ф</i> 210mm × H200mm)	נחונאיאנויי
2-16		UO ₂ :15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt%	23.0C/M/d /+	桓淮	20年	水平方向	ユニット缶	佢左
2 10		ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)	5000170	Empty:残り	25.00110/1	175-1-	204	(中心)	$(\phi 210$ mm × H200mm)	NHH . I TT
2-17		UO ₂ : 15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ 0 (含水率):1wt%	23.0GW/d/t	桓淮	20年	水平方向	ユニット缶	偏在
2 17		ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)	5000170	Empty:残り	25.00110/1	175-1-	204	(外面)	(<i>ф</i> 210mm × H200mm)	NHH . I TT
		110_{\circ} : 15vol% (50vol%)		H_O(含水率):1wt%					収納缶	
2-18		ZrO_2 : 15vol% (50vol%)	30vol%	Fmnty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均一	(ø220mm×H840mm、	容器
									板厚10mm)	
2-19		UO ₂ :0.48vol%[3.7kg]	10.48vol%	H ₂ O (含水率):1wt%	23.0GWd/t	標準	20年	均一	廃棄物保管容器(内容器	容器
		SUS:10vol%(95.4vol%)		Empty:残り		100.1		,	□500mm×H300mm)	
2-20	リリッチ	UO2 : 30vol%	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt%	23.0GWd/t	標進	20年	也—	ユニット缶	燃料デブリ組成
	0,,,,		0000000	Empty:残り	20.00110/1		201		(<i>ф</i> 210mm×H200mm)	(種類)



2.2.1 パッシブ中性子 -解析ケース表 (3/3)

<u></u>		容器内組/		燃焼度	FP放出率	冷却期間	偏在	容器	変更	
) – A	燃料デブリ	充填率内	充填率外						パラメータ	
110,	の種類	組成	合計(充填率)							
2-21	金属デブリ	UO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) ZrO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) SUS: 29.85vol% (99.5vol%)	30vol%	H ₂ O(含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (種類)
2-22		UO ₂ : 15vol% (25vol%) ZrO ₂ : 15vol% (25vol%) SUS: 30vol% (50vol%)	60vol%	H ₂ O(含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶 (∮210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (SUS)
2-23	MCCI	UO ₂ : 1.05vol% (3.5vol%) ZrO ₂ : 1.05vol% (3.5vol%) SUS: 7.2vol% (24vol%) Conc: 20.7vol% (69vol%)	30vol%	H ₂ O(含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均—	ユニット缶 (∮210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (種類)
2-24		UO ₂ : 15vol% (33.3vol%) ZrO ₂ : 15vol% (33.3vol%) Conc: 15vol% (33.3vol%)	45vol%	H ₂ O(含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶 (<i>φ</i> 210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (Conc)
2-25		UO ₂ : 15vol% (25vol%) ZrO ₂ : 15vol% (25vol%) Conc: 30vol% (50vol%)	60vol%	H ₂ O(含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶 (<i>φ</i> 210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (Conc)
2-26	金属デブリ	UO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) ZrO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) SUS: 29.85vol% (99.5vol%)	30vol%	H ₂ O(含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	水平方向 (中心)	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (種類) 偏在
2-27		UO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) ZrO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) SUS: 29.85vol% (99.5vol%)	30vol%	H ₂ O(含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	水平方向 (外面)	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (種類) 偏在
2-28	MCCI	UO ₂ : 1.05vol% (3.5vol%) ZrO ₂ : 1.05vol% (3.5vol%) SUS : 7.2vol% (24vol%) Conc : 20.7vol% (69vol%)	30vol%	H ₂ O(含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	水平方向 (中心)	ユニット缶 (∮210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (種類) 偏在
2-29		UO ₂ : 1.05vol% (3.5vol%) ZrO ₂ : 1.05vol% (3.5vol%) SUS: 7.2vol% (24vol%) Conc: 20.7vol% (69vol%)	30vol%	H ₂ O(含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	水平方向 (外面)	ユニット缶 (∮210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (種類) 偏在

*1:容器内に対する割合。括弧内は、充填率内を100%とした場合の割合


2.2.1 パッシブ中性子 -解析ケース

• 以下の解析条件に関する感度解析を実施し、各影響因子に対する傾向を整理。

ケース		UO ₂	ZrO ₂	SUS	Concrete	合計 (充填率)	含水率	燃焼度 (GWd/t)	冷却期間 (年)	<u>備考</u> 解析条件とした U含有量の設定値
2-1	ベース	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	1wt%	23.0	20	8.79kg
2-3	MOX	MOX 30vol%	0vol%	0vol%	-	30vol%	1wt%	0.0	20	17.0kg
2-4	充填率(低)	5vol%	5vol%	0vol%	-	10vol%	1wt%	23.0	20	2.93kg
2-5	充填率(高)	25vol%	25vol%	0vol%	-	50vol%	1wt%	23.0	20	14.6kg
2-10	含水率(低)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	0.1wt%	23.0	20	8.79kg
2-11	含水率(高)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	70vol%	23.0	20	8.79kg
2-12	燃焼度(低)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	1wt%	1.3	20	8.98kg
2-13	燃焼度(高)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	1wt%	51.0	20	8.58kg
2-14	冷却期間	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	1wt%	23.0	30	8.79kg
2-15	冷却期間	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	1wt%	23.0	40	8.79kg
2-21	金属デブリ	0.075vol%	0.075vol%	29.85vol%	-	30vol%	1wt%	23.0	20	0.04kg
2-23	MCCIデブリ	1.05vol%	1.05vol%	7.2vol%	20.7vol%	30vol%	1wt%	23.0	20	0.615kg
2-24	MCCIデブリ	15vol%	15vol%	0vol%	15vol%	45vol%	1wt%	23.0	20	8.79kg
2-25	MCCIデブリ	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	60vol%	1wt%	23.0	20	8.79kg



2.2 解析結果 2.2.1 パッシブ中性子 −解析結果 【燃料デブリ種類】



容器表面1cmの中性子スペクトル

→ 溶融デブリと比較して、MCCI及び金属デブリの 中性子スペクトル形状は、熱中性子線束が増加 している。

IRID



No.37

容器表面15cmの中性子スペクトル

Case No.	燃料デブ リの種類	UO ₂	ZrO ₂	SUS	Conc.	充填率
2-1		15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%
2-4	溶融 デブリ	5vol% (50vol%)	5vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	10vol%
2-5		25vol% 25vol% (50vol%) (50vol%)		0vol%	0vol%	50vol%
2-21	金属 デブリ	0.075vol% (0.25vol%)	0.075vol% (0.25vol%)	29.85vol% (99.5vol%)	0vol%	30vol%
2-23	мссі	1.05vol% (3.5vol%)	1.05vol% (3.5vol%)	7.2vol% (24vol%)	20.7vol% (69vol%)	30vol%

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning



容器表面1cmの中性子スペクトル

容器表面15cmの中性子スペクトル

→ 燃焼度により、中性子線束の強度が変化するが、中性子スペクトル形状は変化しない。

Case No.	燃料 デブリの 種類	UO ₂	ZrO ₂	SUS	Conc.	充填率	燃焼度 (GWd/t)
2-1		15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	23.0
2-12	溶融 デブリ	15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	1.3
2-13		15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	51.0



2.2 解析結果 2.2.1 パッシブ中性子 - 解析結果【含水率】



容器表面1cmの中性子スペクトル

容器表面15cmの中性子スペクトル

→ 含水率が増加すると、高速中性子線束が 減少し熱中性子線束が増加する。

Case No.	燃料 デブリの 種類	UO ₂	ZrO ₂	SUS	Conc.	充填率	含水率
2-1		15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	1wt%
2-10	溶融 デブリ	15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	0.1wt%
2-11		15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	70vol%

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning



容器表面1cmの中性子スペクトル

容器表面15cmの中性子スペクトル

→ コンクリートが増加すると、熱中性子線束が 増加する。

Case No.	燃料 デブリの 種類	UO ₂	ZrO ₂	SUS	Conc.	充填率
2-1	溶融 デブリ	15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%
2-24	MCCI	15vol% (33vol%)	15vol% (33vol%)	0vol%	15vol% (33vol%)	45vol%
2-25	мссі	15vol% (25vol%)	15vol% (25vol%)	0vol%	30vol% (50vol%)	60vol%



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2 解析結果 2.2.1 パッシブ中性子 - 解析結果 【冷却期間】



本解析結果およびパッシブガンマ線解析結果から 求めた線量率に基づき, No.320~3の 検討プロセスを実施予定

→ 冷却期間により、中性子線束強度が変化する

が、中性子スペクトル形状は変化しない。

→以上の結果から高速中性子,熱中性子の線束(積算値)を評価

Case No.	燃料デブ リの種類	UO ₂	ZrO ₂	SUS	Conc.	充填率	冷却期間 [年]
2-1		15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	20
2-14	溶融 デブリ	15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	30
2-15		15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	40

7

F

はキャットニット

2.2.1 パッシブ中性子 -解析結果 【U質量】 高速中性子(0.5MeV~5MeV)

山匠旦

熱中性子(0.4eV以下) ホース U質量 1cm パロ ケース U質量 1cm パロ (kg) (kg) (n/cm²/s) (n

シース	//// / ノリ	U貝里			シース	U貝里		
No.	種類	(kg)	(n/cm²/s)	(n/cm²/s)	No.	(kg)	(n/cm²/s)	(n/cm ² /s)
2-1	溶融デブリ	8.786	1.19E+02	3.83E+01	2-1	8.786	3.20E-04	1.03E-04
2-4	溶融デブリ	2.929	4.21E+01	1.35E+01	2-4	2.929	5.37E-06	1.66E-06
2-5	溶融デブリ	14.643	1.85E+02	5.95E+01	2-5	14.643	4.28E-03	1.38E-03
2-21	金属デブリ	0.044	3.00E-02	6.37E-02	2-21	0.044	3.94E-06	9.53E-07
2-23	MCCI	0.615	8.57E+00	2.75E+00	2-23	0.615	4.28E-05	1.37E-05
2-3	MOX	17.0	4.36E+01	1.40E+01	2-3	17.0	4.78E-05	1.54E-05
	•							

 $1 E_{c}$



IRID

No.42

1 E cm

2.2.1 パッシブ中性子 -解析結果 【燃焼度】

		1 (0.011		/
ケース No.	燃料デブリ 種類	燃焼度 (GWd/t)	1cm (n/cm²/s)	15cm (n/cm²/s)
2-12	溶融デブリ	1.3	4.38E-02	1.41E-02
2-1	溶融デブリ	23.0	1.19E+02	3.83E+01
2-13	溶融デブリ	51.0	6.63E+02	2.13E+02

宫读山性子(05Ma\/~5Ma\/)

熱中性子(0.4eV以下)

ケース No.	燃焼度 (GWd/t)	1cm (n/cm²/s)	15cm (n/cm²/s)
2-12	1.3	9.69E-08	3.09E-08
2-1	23.0	3.20E-04	1.03E-04
2-13	51.0	2.23E-03	7.29E-04

No.43



→ 燃焼度の違いにより、容器からの漏洩する中性子線束は、オーダーレベルで大きく変わる。

IRID

2.2.1 パッシブ中性子 -解析結果 【含水率】

高速中性子(0.5MeV~5MeV) 熱中性子(0.4eV以下) 燃料デブリ 含水率 ケース 含水率 $1 \, \text{cm}$ 15 cmケース $1 \, \text{cm}$ 15 cm種類 No. (vol%) $(n/cm^2/s)$ $(n/cm^2/s)$ No. (vol%) $(n/cm^2/s)$ (n/cm²/s) 溶融デブリ 2 - 100.24 1.22E+02 3.92E+01 2 - 100.24 2.37E-06 8.68E-07 溶融デブリ 2-1 2.44 1.19E+02 3.83E+01 2-1 2.44 3.20E-04 1.03E-04 2 - 11溶融デブリ 70.0 9.64E+00 2-11 3.93E+00 3.01E+01 70.0 1.22E+01



→ 含水率の増加に伴い、高速中性子線束は減少し、 熱中性子線束はオーダーレベルで大きく増加する。

IRID

2.2.1 パッシブ中性子 - 解析結果 【MCCI】

No.45

	高速中性	子(0.5M	$eV\sim$ 5MeV	7	熱中性子	(0.4eV以下	7)	
ケース No.	燃料デブリ 種類	コンクリート率 (vol%)	1cm (n/cm²/s)	15cm (n/cm²/s)	ケース No.	コンクリート率 (vol%)	1cm (n/cm²/s)	15cm (n/cm²/s)
2-1	溶融デブリ	0	1.19E+02	3.83E+01	2-1	0	3.20E-04	1.03E-04
2-24	MCCI	15	1.15E+02	3.72E+01	2-24	15	1.98E-03	6.44E-04
2-25	MCCI	30	1.12E+02	3.59E+01	2-25	30	8.15E-03	2.65E-03



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.1 パッシブ中性子 -解析結果 【冷却期間】

	高速中性	子(0.5M	eV \sim 5MeV		オージ	熟中性子	(0.4eV以下	.)	
ケース No.	燃料デブリ 種類	冷却期間 (年)	1cm (n/cm²/s)	15cm (n/cm²/s)		ケース No.	冷却期間 (年)	1cm (n/cm²/s)	15cm (n/cm²/s)
2-1	溶融デブリ	20	1.19E+02	3.83E+01		2-1	20	3.20E-04	1.03E-04
2-14	溶融デブリ	30	8.26E+01	2.66E+01		2-14	30	2.21E-04	7.15E-05
2-15	溶融デブリ	40	5.77E+01	1.86E+01		2-15	40	1.54E-04	4.98E-05
1.E+03	 ● 溶融デブリ@ ● 溶融デブリ@ 	1cm 15cm		1.E-	-03			 ● 溶融デン ● 溶融デン ● 溶融デン 	ブリ@1cm ブリ@15cm ク)^(ヶ/19 0)



→ 中性子線束の半減期は、主な中性子線源であるCm-244の a崩壊半減期18.1年より僅かに大きい19.1年である。

IRID



2.2.1 パッシブ中性子 - 解析結果



IRID

2.2.1 パッシブ中性子 - 解析結果

代表検出器、測定体系に対する検討(課題抽出用)(2/2)

U含有量と入射線束の関係





<ヘリウム3比例計数管 入射線束>

2.2.1 パッシブ中性子 -その他感度解析 (1/8)



中性子計数率に与える感度を以下の影響因子に対して検討:

- ▶ 中性子吸収材
- ▶ 容器形状
- ▶ 燃料デブリ組成(SUS)の変動に関する解析を実施

ケース No.	UO ₂	ZrO ₂	SUS	合計 (充填率)	その他条件	備考
2-1	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	-	ベース
2-2	7.5vol%	22.5vol%	0vol%	30vol%	-	溶融デブリ
2-6	0vol%	15vol%	0vol%	30vol%	Gd ₂ O ₃ :中	Cd会友家
2-7	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	Gd ₂ O ₃ :高	Gu 占有平
2-8	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	B ₄ C:中	D合右來
2-9	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	B ₄ C:高	D日有平
2-18	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	収納缶(Φ220mm×H840mm)	<u> </u>
2-19	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	廃棄物保管容器	谷岙形仏
2-20	30vol%	0vol%	0vol%	30vol%	-	溶融デブリ
2-21	0.075vol%	0.075vol%	29.85vol%	30vol%	<u> </u>	金属デブリ
2-22	15vol%	15vol%	30vol%	60vol%	-	金属デブリ



2.2.1 パッシブ中性子 -その他感度解析 (2/8)

廃棄物保管容器(内容器)(No.2-19)



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.1 パッシブ中性子 -その他感度解析 (3/8)

No.51

▶ 中性子吸収材(ガドリニウム、ボロン)の含有量による影響

Case No.	燃料デブリの 種類	UO ₂	ZrO ₂	SUS	Conc.	充填率	中性子吸収材	備考
2-1		15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	-	ベース
2-6		15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	Gd ₂ O ₃ : 3vol%	Gd含有量:中
2-7	溶融 デブリ	15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	Gd ₂ O ₃ :30vol%	Gd含有量:高
2-8	,,,,	15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	B ₄ C:0.51vol%	B含有量:中 (実機条件相当:事故前の炉心平均 のB混合量に基づき設定)
2-9		15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	B ₄ C:10vol%	B含有量:高

<u>その他共通条件</u>:

•燃焼度23GWd/t

•FP放出率:標準

- ・含水率1wt%
- ・均一モデル

·容器:ユニット缶



2.2.1 パッシブ中性子 -その他感度解析 (4/8)

中性子吸収材(ガドリニウム、ボロン)含有量と入射線束の関係(1/3)



→・中性子吸収材が入ったケースでは低速中性子(<1eV)が吸収され、スペクトルに現れなくなる ・GdはMeV領域に対しても断面積が大きいため高速~低速の間の中性子束がベースケースよりも高い ・BはkeV領域以下のエネルギーの吸収断面積が大きくなるためベースケースよりも中性子束が低い

IRID

1.0E-01

1.0E+01

2.2.1 パッシブ中性子 -その他感度解析 (5/8)

中性子吸収材(ガドリニウム、ボロン)含有量と入射線束の関係(2/3)



<ヘリウム3比例計数管 入射線束>



→中性子吸収材による影響はスペクトルには有意に表れていない (ユニット缶内の低速中性子は中性子吸収材により吸収されるが、ポリエチレンの ユニット缶側の低速中性子は、吸収材の有無に依らずポリエチレンの減速・吸収効果 により検出器領域まで到達していないため影響しないものと考えられる。)



2.2.1 パッシブ中性子 -その他感度解析(6/8)

中性子吸収材(ガドリニウム、ボロン)含有量と入射線束の関係(3/3)



→・中性子吸収材が追加されても全中性子束はほとんど低下しない。

・He-3検出器で主に検出される熱中性子エネルギー領域のスペクトルはGd、Bの追加量 により変化しないため、中性子カウント数に与える影響は軽微と考えられる。

IRID

2.2.1 パッシブ中性子 -その他感度解析 (7/8)

No.55

<u>代表検出器に対する応答スペクトル</u>

▶ ウラン含有量との相関

ケース		UO ₂	ZrO ₂	SUS	Concrete	合計 (充填率)	U含有量の設定値	
2-1	ベース	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	8.79kg	
2-2	溶融デブリ (U 少 な目)	7.5vol%	22.5vol%	0vol%	-	30vol%	2.93kg	
2-18	収納缶	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	35.1kg	
2-20	溶融デブリ (Uリッチ)	30vol%	0vol%	0vol%	-	30vol%	17.6kg	
2-21	金属デブリ	0.075vol%	0.075vol%	29.85vol%	-	30vol%	0.04kg	
2-22	金属デブリ (SUS多い)	15vol%	15vol%	30vol%	-	60vol%	8.79kg	
				<u>その他</u> ま	共通条件:			

・<mark>燃焼度23GWd/t</mark> ・FP放出率:標準 ・含水率1wt% ・均一モデル



2.2.1 パッシブ中性子 -その他感度解析 (8/8) 代表検出器に対する応答スペクトル

U含有量とヘリウム3比例計数管への入射線束の関係



- →・<u>U量と全入射線束は正の相関を持つ</u>(燃焼度が一定の場合)。
 - ・燃料デブリの密度(充填率)の違いによる自己遮蔽効果の影響は全入射線束に有意に現れない。
 - ・SUSが入っている場合にも影響は軽微(ケース2-22)
 - ・収納缶(Ф220mm×H840mm)では、容器上下端から放出された中性子が系外に漏れやすいため、 ユニット缶の比例直線よりも中性子束は低くなる(ケース2-18)

IRID

2.2.1 パッシブ中性子 – 感度解析 偏在(1/6)

燃料デブリの容器内への充填方法を変化させた解析

■偏在ケースのタリー設定 #<u>水平方向(外面)ケースのみ</u>、タリーを6分割



ユニット缶に対してタリーを配置する位置および寸法は、スライドNo.56に掲載したものと同じ



2.2.1 パッシブ中性子 – 感度解析 偏在(2/6)

溶融デブリ 偏在ケースのスペクトル



→ 燃料デブリが密集すると熱中性子束が増加する。 燃料デブリが偏在している場合でも、センサ位置による中性子スペクトル形状は変化しない。

2.2.1 パッシブ中性子 -感度解析 偏在(3/6) 溶融デブリ

No.59

<u>高速中性子(0.5MeV~5MeV)</u>

<u>熱中性子(0.4eV以下)</u>

ケース	tally	1cm	15cm	
No.	Lany	(n/cm²/s)	(n/cm²/s)	
2-1(溶融ベース)	all	1.19E+02	3.83E+01	
2-16(中心)	all	9.44E+01	3.27E+01	
	all	9.65E+01	3.28E+01	
	1	1.28E+02	3.74E+01	
2-17(外面)	2	1.07E+02	3.47E+01	
	3	8.18E+01	3.05E+01	
	4	7.39E+01	2.88E+01	

ケース No.	tally	1cm (n/cm²/s)	15cm (n/cm²/s)		
2-1(溶融ベース)	all	3.20E-04	1.03E-04		
2-16(中心)	all	8.41E-03	2.84E-03		
	all	8.71E-03	2.90E-03		
	1	1.15E-02	3.38E-03		
2-17(外面)	2	9.61E-03	3.08E-03		
	3	7.47E-03	2.67E-03		
	4	6.71E-03	2.49E-03		





→ ・燃料デブリ偏在時の熱中性子束はベースケースに対して1桁高いが,偏在による計測位置への影響は2倍以下。・高速中性子束は容器表面から離れるほどその変動は小さくなる。

2.2.1 パッシブ中性子 -感度解析 偏在(4/6) MCCI

No.60

ケース 15cm 1cm tally No. $(n/cm^2/s)$ $(n/cm^2/s)$ 2-23(MCCIベース) all 8.57E+00 2.75E+00 2-28(中心) 7.19E+00 2.51E+00 all all 8.16E+00 2.65E+00 1.93E+01 4.42E+00 1 2-29(外面) 3.16E+00 2 8.68E+00 3 4.37E+00 1.83E+00 4 3.57E+00 1.49E+00

高速中性子(0.5MeV~5MeV)

<u>熱中性子(0.4eV以下)</u> ケース 15 cm1cm tallv $(n/cm^2/s)$ No. $(n/cm^2/s)$ 2-23(M 2-28

2-29

CCIベース)	all	4.28E-05	1.37E-05
8(中心)	all	6.57E-05	2.12E-05
	all	5.04E-05	1.62E-05
	1	4.87E-05	1.59E-05
9(外面)	2	5.14E-05	1.58E-05
	3	4.96E-05	1.63E-05
	4	4.87E-05	1.63E-05



1.0E-01 1cm 中性子線束 (n/cm²/s) 1.0E-02 15cm 1.0E-03 1.0E-04 1.0E-05 all all all 1 2 2-29 2-23 2-28 (MCCI (中心) (外面) ベース) ケースNo.

熱中性子 (0.4eV以下積算値)

→ 高速中性子束は容器表面から離れるほど, 燃料デブリ偏在による変動は小さくなる。 熱中性子束の変動は全般的に小さい。



2.2.1 パッシブ中性子 – 感度解析 偏在(5/6)

溶融デブリとMCCIの線束比較



→ ・高速中性子線束は,溶融デブリに対してMCCIの方が,偏在に対する変動が大きい。
・熱中性子線束は,溶融デブリの場合と比較して偏在の影響が小さい。

IRID

2.2.1 パッシブ中性子 – 感度解析 偏在(6/6)

> 金属デブリの偏在

ポリエチレン透過後の線束で影響を確認

→・偏在によりタリーまでの距離が変化するため、入射線束に差が生じる ・パッシブ中性子計測では自己遮蔽効果は現れないため、 パッシブガンマ計測よりも燃料デブリ位置の偏在による差は小さい

Case No.	燃料 デブリの 種類	UO ₂	ZrO ₂	SUS	充填率	偏在
2-21	金属 デブリ	0.075vol%	0.075vol%	29.85vol%	30vol%	均一
2-26 2-27	金属 デブリ	0.075vol%	0.075vol%	29.85vol%	30vol%	偏在



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.1 パッシブ中性子 -追加の感度解析(1/8)

■影響因子の変動を2つ組み合わせるケース

	溶融											全层		MOOL	
	\sim	燃料デブリ組成	мох	充填率	Gd含有率	B含有率	含水率	燃焼度	冷却期間	偏在	容器	亚周		WICCI	
	燃料デブ! 組成	IJ	-	× 充填率に応じてFlux増減	× 各パラメータの線形和で 評価可能	× 各パラメータの線形和で 評価可能	× 各パラメータの線形和で 評価可能	× 各パラメータの線形和で 評価可能	× 各パラメータの線形和で 評価可能	× 各パラメータの線形和で 評価可能	×	-		-	
	мох			× 充填率に応じてFlux増減	× 各パラメータの線形和で 評価可能	× 各パラメータの線形和で 評価可能	× 各パラメータの線形和で 評価可能	-	× 各パラメータの線形和で 評価可能	× 各パラメータの線形和で 評価可能	×	Δ		Δ	
	充填率				× 各パラメータの線形和で 評価可能	× 各パラメータの線形和で 評価可能	× 各パラメータの線形和で 評価	× 各パラメータの線形和で	× 各パラメータの線形和で 評価可能	× 各パラメータの線形和で 評価可能	×	Δ	_	Δ	
溶融	Gd含有率					Δ	。1ケース [°] (Gd高-H ₂	0 50vol%) [×] ±	×	Δ	×	0	1ケース (Gd高)	o	1ケース (Gd高)
	B含有率					1	。1ケース (B高-H₀0	形状 ース 50vol%) ^{推測}	×	Δ	×	0	1ケース (B高)	o	1ケース (B高)
	含水率 燃焼度					の彫郷ナリ			以仕珪本に言		×	<u>о</u> ×	1ケース	<u>0</u> ×	1ケース
	冷却期間			·····································	aとBそれそれ S埴塞30vol%	しの影響をロ 5.水70vol%	5敗9 る/5の トする場合.	、これらを回り GdやBの追り	し14頃平に言 加余地なし	又正して胜忉		× 半	(70vol%)	× 半減元	(/UVOI%)
金属	偏在 容器			·:	れに対し、水	を50vol%と	し, Gd, Bをと	もに10vol%	とした解析家	を検討		×		× -	
MCCI				·5	らに比較のた	cめ,溶融デ	ブリのベース	、ケースに対	して水を50v	ol%とした解	析も実施				
	Gd, B, 含水率による影響の幅を見るため, 各因子の 8+1(水50vol%) = 9ケース ¬														
	取入	、設及	-1但2	と祖み合わ	ってにケー	- 人を追り	山 美池						-		
	(上言	记因-	子の	ベースケ	ースは,量	曼小もしく	は小さい	直)							

No.63

스計

■中性子の計数率が最も少なくなると想定される影響因子を組み合わせたケース:1ケース

充填率	Gd含有率	B含有率		含水率	燃焼度	偏在		- <u>10ケース</u>
10vol% (UO ₂ :ZrO ₂	高 (Gd ₂ O ₃ 20)(al%)	(B ₄ C	高 10vol%)	H ₂ O 50vol%	低 (1.3GWd/t)	水平方向 中心		
-5v0170.5v0170) ※その他の因子は溶	30001%) 『融デブリのベースケ	ース	 ・充填率30 ・パラメーク ・パラメーク ・た填率10 	vol%, 含水率 客案:水を50ve)vol%, 含水率	ጆ70vol%, Gd 30vo ol%とする以下の 変 を 50vol%, Gd 30v	ol%, B 10vol% 条件を検討 ol%, B 10vol%	だと100vol%越え ,合計100vol%	
IDID	この場合	,上の影響因	子を2つ組み合わ	っせるケースもれ	kを50vol%として評	平価する。 mission		

2.2.1 パッシブ中性子 -追加の感度解析(2/8)

	ケース	UO2	ZrO ₂	SUS	Con- crete	合計 (充填率)	含水率	$\mathrm{Gd}_{2}\mathrm{O}_{3}$	B ₄ C	燃焼度 (GWd/t)	冷却 期間 (年)	偏在	<u>備考</u> 解析条件とした U含有量の設定値
2-1	ベース	15 vol%	15 vol%	0 vol%	-	30 vol%	1wt%			23.0	20	均一	8.79kg
St	ep2解析	ケース											
2-30	溶融/Gd高/ 水50vol%	15 vol%	15 vol%	0 vol%	-	30 vol%	50 vol%	10 vol%	0 vol%	23.0	20	均一	8.79kg
2-31	溶融/B高 / 水 50vol%	15 vol%	15 vol%	0 vol%	-	30 vol%	50 vol%	0 vol%	10 vol%	23.0	20	均一	8.79kg
2-32	溶融 / 水 50vol%	15 vol%	15 vol%	0 vol%	-	30 vol%	50 vol%	0 vol%	0 vol%	23.0	20	均一	8.79kg
2-33	金属 /Gd高	0.075 vol%	0.075 vol%	29.85 vol%	-	30 vol%	1wt%	30 vol%	0 vol%	23.0	20	均一	0.0439kg
2-34	金属 /B高	0.075 vol%	0.075 vol%	29.85 vol%	-	30 vol%	1wt%	0 vol%	10 vol%	23.0	20	均一	0.0439kg
2-35	金属 / 水 70%	0.075 vol%	0.075 vol%	29.85 vol%	-	30 vol%	70 vol%	0 vol%	0 vol%	23.0	20	均一	0.0439kg
2-36	MCCI /Gd 高	1.05 vol%	1.05 vol%	7.2 vol%	20.7 vol%	30 vol%	1wt%	30 vol%	0 vol%	23.0	20	均一	0.615kg
2-37	MCCI /B高	1.05 vol%	1.05 vol%	7.2 vol%	20.7 vol%	30 vol%	1wt%	0 vol%	10 vol%	23.0	20	均一	0.615kg
2-38	MCCI / 含水 率高	1.05 vol%	1.05 vol%	7.2 vol%	20.7 vol%	30 vol%	70 vol%	0 vol%	0 vol%	23.0	20	均一	0.615kg
2-39	溶融 複合要因	5 vol%	5 vol%	0 vol%	-	10 vol%	50 vol%	30 vol%	10 vol%	1.3	20	水平方向 (中心)	2.93kg



2.2.1 パッシブ中性子 -追加の感度解析(3/8)

溶融デブリ



容器表面1cmの中性子スペクトル

容器表面15cmの中性子スペクトル

→ 複合要因ケースにおける中性子線束が全般的に低下



2.2.1 パッシブ中性子 -追加の感度解析(4/8) 溶融デブリ

 $(0.5 MeV \sim 5 MeV)$

No.66



高速中性子



ケース No.	1cm (n/cm²/s)	15cm (n/cm²/s)		
2-1 (溶融デブリベース)	3.20E-04	1.03E-04		
2-32(水 50vol%)	3.73E+00	1.21E+00		
2-30(Gd 10vol%)	1.08E-01	3.48E-02		
2-31(B 10vol%)	3.22E-02	1.04E-02		
2-39(複合要因)	6.15E-07	2.01E-07		



高速中性子(0.5MeV~5MeV積算值)



熱中性子(0.4eV以下積算值)

→ ・複合ケースの高速中性子線束は、 ベースケースよりも4~5桁低下

・水50vol%に対して, Gd/B高含有ケースと非含有ケースでは, 高速中性子線束の差が9%程度 ・熱中性子線束はオーダレベルで変動

IRID

2.2.1 パッシブ中性子 -追加の感度解析(5/8)

金属デブリ



容器表面1cmの中性子スペクトル

容器表面15cmの中性子スペクトル

→ 1eV以下でGd 30vol%のスペクトルが急減

2.2.1 パッシブ中性子 -追加の感度解析(6/8) 金属デブリ

ケース 1cm 15cm $(n/cm^2/s)$ No. $(n/cm^2/s)$ 2-21 6.00E-01 1.93E-01 (金属デブリベース) 2-33(Gd 30vol%) 5.27E-01 1.70E-01 2-34(B 10vol%) 5.84E-01 1.88E-01 2-35(水 70vol%) 3.26E-01 1.05E-01

高速中性子(0.5MeV~5MeV)

<u>熱中性子(0.4eV以下)</u>

ケース No.	1cm (n/cm²/s)	15cm (n/cm²/s)
2-21 (金属デブリベース)	4.17E-06	1.36E-06
2-33(Gd 30vol%)	7.69E-08	2.46E-08
2-34(B 10vol%)	1.83E-08	6.00E-09
2-35(水 70vol%)	4.58E-02	1.49E-02



高速中性子(0.5MeV~5MeV積算值)

熱中性子(0.4eV以下積算值)

ケースNo.

2-33

(Gd 30vol%)

→ ・高速中性子線束は,水 70vol%のケースで金属デブリベースケースの半分程度に低下 ・熱中性子線束はオーダレベルで変動

1.0E+02

1.0E+01

1.0E+00

1.0E-05 1.0E-06

1.0E-07 1.0E-08 1.0E-09

2-21

(金属デブリベース)

1.0E-01 1.0E-02

€ 1.0E-03

₩ 嘭 1.0E-04

中位子

2-35

(水 70vol%)

1cm

15cm

2-34

(B 10vol%)

2.2.1 パッシブ中性子 -追加の感度解析(7/8)

No.69

MCCI



容器表面1cmの中性子スペクトル

容器表面15cmの中性子スペクトル

→ 1eV以下でGd 30vol%のスペクトルが急減



2.2.1 パッシブ中性子 -追加の感度解析(8/8)

No.70

ケース	1cm	15cm
No.	(n/cm²/s)	(n/cm²/s)
2-23 (MCCIベース)	8.57E+00	2.75E+00
2-36(Gd 30vol%)	7.56E+00	2.43E+00
2-37(B 10vol%)	8.36E+00	2.69E+00
2-38(水 70vol%)	4.80E+00	1.54E+00

<u>高速中性子(0.5MeV~5MeV)</u>

ケース	1cm	15cm
No.	(n/cm²/s)	(n/cm²/s)
2-23 (MCCIベース)	4.28E-05	1.37E-05
2-36(Gd 30vol%)	1.09E-06	3.50E-07
2-37(B 10vol%)	3.18E-07	1.07E-07
2-38(水 70vol%)	9.54E-01	3.11E-01

熱中性子(0.4eV以下)



高速中性子(0.5MeV~5MeV積算值)

(n/cm²/s) 1.0E-01 1.0E-02 1.0E-03 中性子線束 1.0E-04 1.0E-05 1.0E-06 1.0E-07 1.0E-08 1.0E-09 2-23 2-36 2-37 2-38 (Gd 30vol%) (B 10vol%) (MCCIベース) (水 70vol%) ケースNo.

■1cm

■ 15cm

<u>熱中性子(0.4eV以下積算値)</u>

→ ・高速中性子線束は,水 70vol%のケースで金属デブリのベースケースの半分程度に低下 ・熱中性子線束はオーダレベルで変動

1.0E+02

1.0E+01

1.0E+00

2.2.1 パッシブ中性子 - 検出器応答

検討手順

◆ シミュレーション評価 【燃料デブリ条件(溶融デブリ ベースケース No.2-1)】

- ① ポリエチレン厚の最適化
- ② Cd影響、Pb影響
- ◆ 検出器応答(計測時間)評価






2.2 解析結果 2.2.1 パッシブ中性子 -検出器応答①ポリエチレン厚



熱中性子束のポリエチレン厚依存性

→ ·熱中性子線束は, ポリエチレン厚50mm~60mmで最大値 【以降、ポリエチレン厚50mmを採用】



2.2.1 パッシブ中性子 - 検出器応答②Cd影響、Pb影響

➤ Cd影響:ポリエチレン 50mm+Cd 1mm

▶ Pb影響:ポリエチレン 50mm+Pb 20mm

<u>熱中性子(0.4eV以下)</u>

No.73

ケース (2-1ベース)	15cm (n/cm²/s)
PE50mm	8.17
PE50mm+Cd1mm	7.33
PE50mm+Pb20mm	8.52



→ ・Cd1mmで容器表面1cmの熱中性子束が桁で減少 ⇒ 燃料デブリへの熱中性子束入射を抑制
 ・Cd1mm、Pb20mmによる容器表面15cm位置の中性子スペクトル形状の変化小
 【以降、ポリエチレン厚50mm+Pb20mm+Cd1mmを採用】

2.2.1 パッシブ中性子 - 検出器応答(計測時間評価) 【前提条件】

▶ 評価対象燃料デブリ:溶融デブリ ケース2-1 (ベースケース)、金属デブリ ケース2-21 (U量の少ない場合)

	ケース	UO ₂ (vol%)	ZrO ₂ (vol%)	SUS (vol%)	Con- crete	合計 (充填率)	含水率	Gd_2O_3	B ₄ C	燃焼度 (GWd/t)	冷却期間 (年)	偏在	U含有量
2-1	溶融デブリ	15	15	0	-	30vol%	1wt%	-	-	23.0	20	均一	8.79kg
2-21	金属デブリ	0.075	0.075	29.85	-	30vol%	1wt%	-	-	23.0	20	均一	0.04kg

▶ 検出器等配置

検出器は容器表面15cm位置、 検出器の内側及び外側に50mmポリエチレン、 内側ポリエチレンの更に内側に20mm鉛を配置

▶ 検出器 注1)

IRID

① He検出器: Φ25.5mm、有感長500mm、

<u>感度63.7 cps/(n/cm²/s)</u>

② B-10検出器: Φ25.5mm、有感長1,000mm、

<u>感度12.3 cps/(n/cm²/s)</u>

- ▶ 検出器 ガンマ線最大線量率 注2)
 - ① He検出器:約0.1 Gy/h

② B-10検出器:約10 Gy/h

容器表面15cm位置の線量率は約1Gy/h(2.2.2 パッシブガンマ解析結果(2/7及び3/7)より)であり、

鉛20mm設置効果で本体系での検出器位置線量率は約0.1Gy/h

·課題:鉛20mmの場合,He検出器のガンマ線線量率に裕度無し。

検出器の遮蔽や設置位置に関する最適化検討が今後必要。



No.74

注1) https://etd.canon/ja/product/category/proportional/npc.html 注2) Neutron Detectors T.W.Crane, M. Baker (1997)

2.2.1 パッシブ中性子 - 検出器応答(計測時間評価)

- 1. 溶融デブリ(ケース 2-1) 【ベースケース】 (検出器1本)
- 1)熱中性子束:ポリエチレン50mm+Pb20mm体系での検出器位置(容器表面15cm)より:8.52 (n/cm²/s)
- 2)計数率及び計測時間(1σ誤差1%(10,000カウント)に必要な計測時間):

① He検出器: 5.43E+02 cps (= 8.52 x 63.7) ⇒ <u>18秒</u> (= 10,000/5.43E+02)

- ② B-10検出器:1.05E+02 cps (= 8.52 x 12.3) ⇒ <u>95秒</u> (= 10,000/1.05E+02)
- 2. 金属デブリ(ケース 2-21) 【U量の少ない場合】
 - 1)熱中性子束: <u>3.88E-02(= 8.52 x 0.04kg/8.79kg) (n/cm²/s)</u>
 (2.2.2 パッシブ中性子解析結果【U質量】スライドNo.66より、U質量に比例と推定)
 - 2)計数率及び計測時間(10誤差1%(10,000カウント)に必要な計測時間)

a) 検出器 1本の場合

- ① He検出器:2.47 cps(= 3.88E-02 x 63.7) ⇒ <u>約4,000秒</u>(= 10,000/2.47)
- ② B-10検出器: 0.477 cps (= 3.88E-02 x 12.3) ⇒ <u>約21,000秒</u>(= 10,000/0.477)
- b) 検出器 60本の場合(容器表面15cmに並べられる最大数)
 - ① He検出器:約70秒
 - ② B-10検出器: 約350秒
- ·課題:U量が少ない燃料デブリ(例:金属デブリ)の場合、特にB-10検出器において測定時間大

IRID

2.2.1 パッシブ中性子 -まとめ

▶ 解析から得られた主な知見:

影響度	影響因子	得られた知見	
大 ② 燃烟 ⑤ 含水	 た て 率	・ <u>燃焼度の違いにより</u> 、容器から漏洩する中性 子のスペクトル形状は変化しないが、線束は、 オーダーレベルで大きく変わる[No.43参照] ・ <u>含水率が増加すると</u> 、高速中性子線束が減少 し熱中性子線束が増加する。[No.44参照]	 2 燃焼度: 2号炉心平均 3 FP放出率: 試験(Phebus-FPT4)ベース ④ 冷却期間: 20年
小 (中 (③ FP) ④ 冷去 ⑥ 充均 ⑦ 偏ぞ ⑧ 容暑	·デブリ組成: 性子吸収材) 放出率 ^{※1}) ¹ 期間 ¹	 ・中性子吸収材により、熱エネルギー領域の中 性子のスペクトル形状や線束は変化するが、ポリエチレン減速材付き検出器位置ではそれらが 有意に現われない ・冷却期間は、取り出し時期と半減期より補正 可能性がある ・充填率は、影響軽微 ・高速中性子束は容器表面から離れるほどその 影響は小さくなる ・容器は、形状補正できる可能性がある 	 (1) 燃料デブリ組成: UO₂: 50 (vol%) ZrO₂: 50 (vol%) SUS, コンクリート:0 (vol%) B₄C, Gd₂O₃: 0 (vol%) MOX: 0 (vol.%) Empty(気孔率): 0 (vol%) (5) 含水率:1 (wt%) (6) 充填率:30 (vol%) (7) 偏在:なし(=均質) (8) 容器:ユニット缶 (\$\phi 210mm × H200mm))

※1 ③ FP放出率は、 γ線の放出率であり中性子線の計測には影響なし

▶ 詳細分析の必要性の検討と技術課題の整理:

- 非均質による計測面の線束への影響の大きさの分析
- ・ 燃料デブリ中の燃焼度の影響を補正し線束の変化率の補正可能性がある
- 複数の影響因子により線束がオーダーで低下する。また、同じ核物質量でも、燃焼度の違いに より中性子線束がオーダで異なるため、広範なレンジでの測定を実現する方法について検討



図中のパラメータの値はベースケース条件



2. 実施内容

(1) 候補となっている計測技術の計測誤差に影響を与える因子の解析的評価

- ① 影響因子の選定
- ② 影響因子の変動幅の設定
- ③ 解析シミュレーション

2.1 解析条件
2.2 解析結果
2.2.1 パッシブ中性子
2.2.2 パッシブガンマ
2.2.3 アクティブ中性子
2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ
2.2.5 X線透過計測
2.2.6 宇宙線散乱計測

	① 燃料デブ リ組成	Gd 含有量	B 含有量	мох	② 燃焼度	③ FP 放出率	④ 冷却 期間	⑤ 水分 含有量	⑥ 充填率	⑦ 偏在	⑧ 容器	⑨ 照射放 射線源	⑪ 検出器
2.2.2 パッシブγ	No.83 No.85 ~87 No.93	-	-	No.85 No.86 No.88 No.91	No.85 No.86 No.88	No.85 No.86 No.88	No.85 No.86 No.88 No.92	-	No.85 ~87	No.97 No.98	No.94 No.95	-	No.84 No.89 No.100 No.101



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.2 パッシブガンマ -計測概念

- 燃料デブリには、燃料由来のガンマ線放出核種(Am-241, Cs-137, Eu-154等)および、金属中微量不 純物の放射化由来のガンマ線放出核種(Co-60等)が含まれる。
- 故に、燃料由来の核種を識別する必要があり、<u>ガンマ線のエネルギースペクトルを計測</u>する。
- 更に、燃料由来の核種からのガンマ線束は、燃焼度等により幅を持つことや、収納状態によりガンマ線の自己遮蔽効果が異なるために、計測面に到達するガンマ線束は幅を持つ。
- 以上より、解析的評価により計測の幅を見極めることで、計測対象核種の選定、計測系に必要
 な検出器の計測レンジや、計測距離又は遮蔽コリメータを可変とする等の課題を抽出する。



IRID

2.2.2 パッシブガンマ -解析モデル

容器からの距離に対する放射線束の変化を検討可能とするため, 容器(ユニット缶など)から一定距離離れた円筒型の検出器空間を多層配置 →放射線束の変化から換算した線量率を用いて,検出器の選定や遮蔽,コリメータ等の検討に利用







2.2.2 パッシブガンマ -解析ケース表 (1/2)

- No.1-1の解析条件をベースケースとし、影響因子を変更した解析条件(No.1-2~24)を感度解 析条件とした。
- 感度解析条件において、ベースケースから変更した影響因子を青文字でハイライトしている。
 ここで、上記変更に付随して変更となるパラメータを含め黄色網掛けしている。

<i>𝑉</i> − 7		容器内組	式 * ¹		燃焼度	FP放出率	冷却期間	偏在	容器	変更
No	燃料デブリ	充填率内		充填率外						パラメータ
110,	の種類	組成	合計(充填率)							
1-1	溶融デブリ	UO ₂ :15vol%(50vol%) ZrO ₂ :15vol%(50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均—	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	ベースケース
1-2		UO ₂ :7.5vol% (25vol%) ZrO ₂ :22.5vol% (75vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (UO ₂ ,ZrO ₂)
1-3		MOX:30vol%	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	мох
1-4		UO ₂ :5vol% (50vol%) ZrO ₂ :5vol% (50vol%)	10vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	充填率
1-5		UO ₂ :25vol% (50vol%) ZrO ₂ :25vol% (50vol%)	50vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	充填率
1-6		UO ₂ :15vol% (50vol%) ZrO ₂ :15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	1.3GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	燃焼度
1-7		UO ₂ :15vol% (50vol%) ZrO ₂ :15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	51GWd/t	標準	20年	均—	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	燃焼度
1-8		UO ₂ :15vol% (50vol%) ZrO ₂ :15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	ゼロ放出	20年	均一	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	FP放出率
1-9		UO ₂ :15vol% (50vol%) ZrO ₂ :15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	高放出	20年	均—	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	FP放出率
1-10		UO ₂ :15vol% (50vol%) ZrO ₂ :15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	30年	均一	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	冷却期間
1-11	溶融デブリ	UO ₂ :15vol% (50vol%) ZrO ₂ :15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	40年	均一	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	冷却期間
1-12		UO ₂ :15vol% (50vol%) ZrO ₂ :15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	水平方向 (中心)	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	偏在
1-13		UO ₂ :15vol% (50vol%) ZrO ₂ :15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	水平方向 (外面)	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	偏在
1-14		UO ₂ : 15vol% (50vol%) ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均—	収納缶 (ϕ 220mm×H840mm、 板厚10mm)	容器
1-15		UO ₂ :0.48vol%[3.7kg] SUS:10vol%(95.4vol%)	10.48vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均—	廃棄物保管容器(内容器 □500mm×H300mm)	容器



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.2 パッシブガンマ -解析ケース表 (2/2)

4 7		容器内組	或* ¹		燃焼度	FP放出率	冷却期間	偏在	容器	変更
	燃料デブリ	充填率内		充填率外						パラメータ
ΝΟ,	の種類	組成	合計(充填率)							
1-16	リリッチ	UO ₂ : 30vol%	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶 (<i>φ</i> 210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (種類)
1-17	金属デブリ	UO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) ZrO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) SUS: 29.85vol% (99.5vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均—	ユニット缶 (φ210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (種類)
1-18		UO ₂ : 15vol% (25vol%) ZrO ₂ : 15vol% (25vol%) SUS: 30vol% (50vol%)	60vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶 (<i>φ</i> 210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (SUS)
1-19	MCCI	UO ₂ : 1.05vol% (3.5vol%) ZrO ₂ : 1.05vol% (3.5vol%) SUS : 7.2vol% (24vol%) Conc : 20.7vol% (69vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均—	ユニット缶 (∮210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (種類)
1-20		UO ₂ : 15vol% (25vol%) ZrO ₂ : 15vol% (25vol%) Conc: 30vol% (50vol%)	60vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均—	ユニット缶 (<i>φ</i> 210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (Conc)
1-21	金属デブリ	UO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) ZrO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) SUS: 29.85vol% (99.5vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	水平方向 (中心)	ユニット缶 (<i>φ</i> 210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (種類) 偏在
1-22		UO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) ZrO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) SUS: 29.85vol% (99.5vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	水平方向 (外面)	ユニット缶 (<i>φ</i> 210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (種類) 偏在
1-23	MCCI	UO ₂ : 1.05vol% (3.5vol%) ZrO ₂ : 1.05vol% (3.5vol%) SUS : 7.2vol% (24vol%) Conc : 20.7vol% (69vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	水平方向 (中心)	ユニット缶 (<i>φ</i> 210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (種類) 偏在
1-24		UO ₂ : 1.05vol% (3.5vol%) ZrO ₂ : 1.05vol% (3.5vol%) SUS: 7.2vol% (24vol%) Conc: 20.7vol% (69vol%)	30vol%	H ₂ O (含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	水平方向 (外面)	ユニット缶 (∮210mm×H200mm)	燃料デブリ組成 (種類) 偏在

*1:容器内に対する割合。括弧内は、充填率内を100%とした場合の割合



2.2.2 パッシブガンマ -解析ケース

• 以下の解析条件に関する感度解析を実施し、各影響因子に対する傾向を整理。

	ケース	UO ₂	ZrO ₂	SUS	Concrete	合計 (充填率)	燃焼度 (GWd/t)	FP放出率	冷却期間 (年)	<u>備考</u> 解析条件とした U含有量の設定値
1-1	ベース	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23.0	標準	20	8.79kg
1-2	溶融デブリ (U少)	7.5vol%	22.5vol%	0vol%	-	30vol%	23.0	標準	20	4.39kg
1-3	MOX	MOX 30vol%	0vol%	0vol%	-	30vol%	0.0	標準	20	17.0kg
1-4	充填率(低)	5vol%	5vol%	0vol%	-	10vol%	23.0	標準	20	2.93kg
1-5	充填率(高)	25vol%	25vol%	0vol%	-	50vol%	23.0	標準	20	14.6kg
1-6	燃焼度(低)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	1.3	標準	20	8.98kg
1-7	燃焼度(高)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	51.0	標準	20	8.58kg
1-8	FP放出率	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23.0	ゼロ放出	20	8.77kg
1-9	FP放出率	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23.0	高放出	20	8.82kg
1-10	冷却期間	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23.0	標準	30	8.79kg
1-11	冷却期間	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23.0	標準	40	8.79kg
1-16	溶融デブリ (Uリッチ)	30vol%	0vol%	0vol%	-	30vol%	23.0	標準	20	17.6kg
1-17	金属デブリ	0.075vol%	0.075vol%	29.85vol%	-	30vol%	23.0	標準	20	0.04kg
1-19	MCCIデブリ	1.05vol%	1.05vol%	7.2vol%	20.7vol%	30vol%	23.0	標準	20	0.615kg



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.2 パッシブガンマ -解析結果(2/7)

容器中心からの距離による線束変化

線量率に基づき検出器の配置を検討するため, 容器表面からの線束の変化を評価

容器表面からの1, 15, 100cmの線束からフィッティングで評価 →容器中心から距離の二乗に反比例して線束が変化









IRID

2.2.2 パッシブガンマ - 解析結果(4/7) 空気カーマ率の評価

容器表面から100cmの位置における空気カーマ率[mGy/h](再掲)



燃料デブリ組成より、燃料履歴のパラメータを変更した方が空気カーマ率の変動が大きい →特にMOXと燃焼度とFP放出率の影響で線量率が大きく変化する



2.2.2 パッシブガンマ -解析結果(5/7)

U量に対するEu-154(燃料デブリ組成)

パッシブガンマ線の解析結果(①燃料デブリ組成と⑥充填率を変動させた解析)

ケース No.	燃料デブリ 種類	充填率 (vol%)	燃料デブリ 全量(kg)	U量* (kg)	合計線束 [γ/s/cm²]	1.27MeVピーク (Eu-154) [γ/s/cm²]
1-1	溶融デブリ	30	15.8	8.79	5.23×10 ⁶	1.77×10 ⁵
1-2	溶融デブリ	30	13.4	4.39	3.63×10 ⁶	1.01×10 ⁵
1-4	溶融デブリ	10	5.28	2.93	3.40×10 ⁶	1.03×10 ⁵
1-5	溶融デブリ	50	26.4	14.6	5.63×10 ⁶	1.94×10 ⁵
1-16	溶融デブリ	30	20.5	17.6	6.93×10 ⁶	2.77×10⁵
1-17	金属デブリ	30	15.6	0.0439	7.63×10 ⁶	1.50×10 ³
1-19	MCCI	30	7.71	0.615	1.08×10^{6}	7.15×10 ³

*U量=ウラン同位体の全質量





2.2.2 パッシブガンマ -解析結果(6/7)

U量に対するEu-154(燃料履歴)

パッシブガンマ線の解析結果(②燃焼度・③FP放出率・④冷却期間を変動させた解析)

ケース No.	燃焼度 [GWd/t]	FP放出率	冷却期間 [年]	燃料デブリ 全量(kg)	U量*1 (kg)	合計線束 [γ/s/cm²]	1.27MeVピーク (Eu-154) [γ/s/cm ²]
1-1	23	標準	20	15.8	8.79	5.23×10 ⁶	1.75×10 ⁵
1-3	0 *2	標準	20	20.3	17.0	2.80×10 ⁵	1.02×10 ³
1-6	1.3	標準	20	15.8	8.98	3.06×10 ⁵	5.92×10 ²
1-7	51	標準	20	15.8	8.58	1.16×10 ⁶	4.45×10 ⁵
1-8	23	ゼロ放出	20	15.8	8.77	2.81×10 ⁷	1.76×10 ⁵
1-9	23	高放出	20	15.8	8.82	1.15×10^{6}	1.75×10 ⁵
1-10	23	標準	30	15.8	8.79	3.81×10 ⁶	7.84×10 ⁴
1-11	23	標準	40	15.8	8.79	2.89×10 ⁶	3.50×10 ⁴

*1U量=ウラン同位体の全質量、*2ケース#1-3は極低燃焼度のMOX燃料



←U量に対する1.27 MeV (Eu-154) の線束





2.2.2 パッシブガンマ -解析結果(7/7)

<u>代表検出器に対する応答スペクトル(課題抽出用のアウトプット例)</u>



IRID

2.2.2 パッシブガンマ -その他感度解析 (1/6)



入射線束に与える感度を以下の影響因子に対して検討:

- > MOX
- ▶ 冷却期間
- ▶ 容器形状
- ▶ 燃料デブリ組成(SUS)の変動に関する解析を実施

ケース No.	UO ₂	ZrO ₂	SUS	合計 (充填率)	その他条件	備考
1-1	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	-	ベース
1-2	7.5vol%	22.5vol%	0vol%	30vol%	-	溶融デブリ
1-3	0vol%	15vol%	0vol%	30vol%	Pu0 ₂ :15vol%	MOX
1-10	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	冷却期間:30年	☆扣扣問
1-11	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	冷却期間:40年	小山山舟间
1-14	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	収納缶(Φ220mm×H840mm)	分距以生
1-15	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	廃棄物保管容器	谷岙形仏
1-16	30vol%	0vol%	0vol%	30vol%	-	溶融デブリ
1-17	0.075vol%	0.075vol%	29.85vol%	30vol%	-	金属デブリ
1-18	15vol%	15vol%	30vol%	60vol%		金属デブリ





IRID

2.0E+05

1.8E+05

1.6E+05

1.4E+05

1.0E+05

8.0E+04 6.0E+04

4.0E+04

2.0E+04 0.0E+00

🧐 1.2E+05 ž

2.2.2 パッシブガンマ -その他感度解析 (3/6)



冷却期間の差異による影響

 入射線束は核種固有の 半減期に基づき減衰する



⇒20年間で約1/14倍に減衰

IRID

⇒20年間で約1/5倍に減衰

15

2.2.2 パッシブガンマ -その他感度解析 (4/6)

- > SUS含有量の差異による影響
- ・入射線束は、かさ密度が増加すると 自己遮蔽効果により減少する傾向となる

Case No.	燃料 デブリの 種類	UO ₂	ZrO ₂	SUS	Conc	充填率	<u>その他共通条件</u> : ・燃焼度23GWd/t
1-1	溶融 デブリ	15vol% (50vol%)	15vol% (50vol%)	0vol%	0vol%	30vol%	・FP放出率∶標準 ・含水率1wt%
1-18	金属 デブリ	15vol% (25vol%)	15vol% (25vol%)	30vol% (50vol%)	0vol%	60vol%	・均一モデル ・容器∶ユニット缶

容器表面から100cmの線束



U量当たりの燃料デブリ 嵩密度と入射線束

IRID

2.2.2 パッシブガンマ -その他感度解析 (5/6)

廃棄物保管容器(内容器)(No.1-15)

- > 容器形状の差異による影響
- ・ユニット缶よりも容器形状が大きくなるため、
 入射線束は、自己遮蔽効果により減少する



<u> <ユニット缶></u>





©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.2 パッシブガンマ -その他感度解析(6/6)

> 容器形状の差による影響

U含有量と入射線束の関係(容器表面から100cm位置)



- ・U量と全入射線束は正の相関を持つ。
- ・燃料デブリの密度(充填率)の違いによる自己遮蔽効果の影響で入射線束は頭打ちの傾向。
- ・<u>収納缶(Φ220mm×H840mm)では、</u>容器上下端からのガンマ線は検出器までの距離が遠いこと、 及び収納缶の肉厚が10mmと厚いため、<u>入射線束は更に頭打ちの傾向</u>となる



2.2.2 パッシブガンマ -感度解析 偏在(1/3)

燃料デブリの容器内への充填方法を変化させた解析

■偏在ケースのタリー設定 #<u>水平方向(外面)ケースのみ</u>、タリーを6分割



ユニット缶に対してタリーを配置する位置および寸法は、スライドNo.79に掲載したものと同じ



2.2.2 パッシブガンマ -感度解析 偏在(2/3)

■溶融デブリの偏在ケース:1.27MeV線束の解析結果 (偏在ケースは、容器表面から1cm、15cm、100cmにタリーを配置して計算を実施)



a) 偏在する場合(#1-12, 1-13)より, 容器全体に均質に存在する場合(1-1)の方が線束が高い。 b) 容器表面からの距離が大きくなるほど, 線束に対する偏在の影響は小さくなる。

IRID

2.2.2 パッシブガンマ -感度解析 偏在(3/3)

■溶融デブリ・金属デブリ・MCCIの偏在ケースの比較:1.27MeV線束の解析結果



溶融デブリと比べて、金属デブリとMCCIは核燃料以外の物質(SUS, Concrete等)の割合が 多いため、核燃料が偏在する場合に線束が大きく変化する



2.2.2 パッシブガンマ -検出器応答(1/3)

<u>検出器候補の選定および解析条件</u>

■検出器候補の一覧

検出器候補	材料•形状	(参考)エネルギー分解能	備考
Ge	円筒形 (直径・厚さ7.62cm)	0.15%FWHM	ミリオンテクノロジーズ・ キャンベラ
CZT	円筒形(直径7.62cm・厚さ1cm)	0.8%FWHM	H3D(ミシガン大学)
LaBr ₃	円筒形 (直径・厚さ7.62cm)	3.5%FWHM	ORTEC

■解析体系 実際の装置はコリメータを設置することを想定し、検出器面に対して<u>ガンマ線を垂直に入射</u> (コリメータ厚さや散乱線の影響などは今後、評価・検討の予定)

例)Ge検出器





2.2.2 パッシブガンマ -検出器応答(2/3)

<u>検出器候補の応答スペクトルの比較</u>

■各検出器候補におけるベースケースに対する応答

容器表面から100cmの位置を想定した 各検出器でのエネルギースペクトル



GeやCZTでは1.27MeV(Eu-154)と1.33MeV
 (Co-60)を識別が可能、LaBr₃では識別が困難

No.100

全計数率および1.27MeVピークの計数率

検出器 候補	全計数率 [cps]	1.27MeV計数率 [※] [cps](割合%)
Ge	2.2 × 10 ⁸	2.2 × 10 ⁶ (1.0%)
CZT	9.1 × 10 ⁷	3.8 × 10 ⁵ (0.4%)
LaBr ₃	2.2 × 10 ⁸	

※1.27MeVのγ線によるピーク領域から、散乱線によるベース領域を減算

▶ 1.27MeVピークの計数率から、計測時間を 試算

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.2 パッシブガンマ -検出器応答(3/3)

<u>検出器候補に対する計測時間の試算</u>

■各検出器候補の設置検討(容器表面から100cmの距離に設置すると仮定)



- Ge検出器の最大計数率が25kcps^{※1,3}の場合、
 直径約0.1cmのコリメータが必要(2.2×10⁸→2.5×10⁴cps)
- CZT検出器の最大計数率が450kcps^{※2,3}の場合、
 直径約0.5cmのコリメータが必要(9.1×10⁷→4.5×10⁵cps)

※1 同メーカの γ スペクトロスコピーソフトウェアの使用を想定。
 ※2 同メーカのHシリーズ検出器における計数率限界。
 ※3 パイルアップ等による不感時間などは無考慮。

■各検出器候補の計算時間の試算(例:コリメータ厚さ20cmを仮定)

検出器 候補	コリメータ 直径[cm]	最大計数率 [cps]	1.27MeV 計数率の割合	計測時間[秒/回] (1.27MeVピークでの 10⁴カウント取得時間)	計測回数 [回/容器] (並進走査のみ)	1容器当りの 計算時間
Ge	0.1	2.5 × 10 ^{4 × 1,3}	1.0%	40	500	5.5 時間
CZT	0.5	4.5 × 10 ^{5 %2,3}	0.4%	6	20	2 分

▶ 検出器に入射するガンマ線を低減するコリメータを設置するため、容器を走査しながら計測する必要があり、計測回数の増加により時間がかかる。コリメータの設置や計測方法に工夫が必要。

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.2 パッシブガンマ -追加の感度解析(1/4)

<u>Step2解析(1/4)</u> 複数の影響因子を考慮し、1.27MeVのピーク計数率が少ない5ケースを解析 ■影響因子の変動を2つ組み合わせるケース

					溶融				本屋	MOOL	
		燃料デブリ組成 MOX	充填率	燃焼度	FP放出率	冷却期間	偏在	容器	立周	MCCI	
	燃料デブリ 組成	-	△ U量増減でFlux増減 (自己遮蔽影響あり)	△ U量増減でFlux増減 (自己遮蔽影響あり)	× Eu-154ピーク変わらず	× 半減期に応じて減衰	ム U量増減でFlux増減 (自己遮蔽影響あり)	×	-	-	
	мох		△ MOX量増減でFlux増減 (自己遮蔽影響あり)	-	× Eu-154ピーク変わらず	× 半減期に応じて減衰	ム MOX量増減でFlux増減 (自己遮蔽影響あり)	×	Δ	Δ	
	充填率			△ U量増減でFlux増減 (自己遮蔽影響あり)	× Eu-154ピーク変わらず	× 半減期に応じて減衰	△ U量増減でFlux増減 (自己遮蔽影響あり)	×	△ U量増減でFlux増減 (自己遮蔽影響あり)	△ U量増減でFlux増減 (自己遮蔽影響あり)	
溶融	燃焼度				× Eu-154ピーク変わらず	× 半減期に応じて減衰	△ 偏在用線源形態による 自己遮蔽の影響あり	×	0	0	
	FP放出率					× 半減期に応じて減衰	× Step1の偏在と 変わらないと予想	×	× Eu-154ピーク変わらず	× Eu-154ピーク変わらず	
	冷却期間						× 半減期に応じて減衰	×	× 半減期に応じて減衰	× 半減期に応じて減衰	
	偏在							x	0	0	
	容器								x	x	
金属										-	
MCCI											

金属デブリとMCCIに対して燃焼度と偏在を変化させたケースを選定

						ר
		金属デブリ	MCCI			
	燃焼度	小:1.3GWd/t	小:1.3GWd/t		$\frac{4\tau-\chi}{(\pi^2\tau-\chi)}$	
	偏在	水平方向中心	水平方向中心	※その他の因子はべ-	-スケース <u>重複)</u>	<u>合計</u>
1.27	アMeVのピーク	計数率が最少	と想定されるな	<u> </u>		<u>5ケース</u>
	充:	填率	燃焼度	偏在		
	10vol% (UO ₂ : 5vol%•ZrO ₂ : 5vol%)		小:1.3GWd/t	水平方向中心		J



2.2.2 パッシブガンマ -追加の感度解析(2/4)

<u>Step2解析(2/4)</u> 複数の影響因子を考慮し、1.27MeVのピーク計数率が少ない5ケースを解析 ■Step2での解析ケース

	ケース	UO ₂	ZrO ₂	SUS	Concrete	充填率	燃焼度 (GWd/t)	FP 放出率	冷却 期間	偏在	<u>備考</u> 解析条件とした U含有量の設定値	
1-21	金属デブリ 偏在(中心)	25vol%	25vol%	-	-	30vol%	23.0	標準	20年	偏在 (中心)	0.0439kg	(再揭)
1-25	金属デブリ 燃焼度(低)	0.075vol%	0.075vol%	29.85vol%	-	30vol%	1.3	標準	20年	均一	0.0449kg	
1-23	MCCI 偏在(中心)	1.05vol%	1.05vol%	7.2vol%	20.7vol%	30vol%	23.0	標準	20年	偏在 (中心)	0.615kg	(再揭)
1-26	MCCI 燃焼度(低)	1.05vol%	1.05vol%	7.2vol%	20.7vol%	30vol%	1.3	標準	20年	均一	0.615kg	
1-27	溶融デブリ ワーストケース	5vol%	5vol%	-	-	10vol%	1.3	標準	20年	偏在 (中心)	2.93kg	



IRID

2.2.2 パッシブガンマ -追加の感度解析(3/4)

Step2解析(3/4) 複数の影響因子を考慮し、1.27MeVのピーク計数率が少ない5ケースを解析

■MCCIと金属デブリに対して燃焼度と偏在を変化させたケース	<u>(赤枠:Step2解析ケース)</u>
--------------------------------	------------------------

ケース	燃料デブリ	変動	U量*	合計線束	1.27MeVピーク	各燃料デブリ種類の標準ケースと	供 去
No.	種類	パラメータ	(kg)	[γ/s/cm²]	[γ/s/cm²]	比較した1.27MeVピーク比(%)	浦方
1-1	溶融デブリ	標準	8.79	5.23 × 10 ⁶	1.75 × 10⁵		
1-6	溶融デブリ	燃焼度(低)	8.97	3.06 × 10 ⁶	5.37 × 10 ⁰	0.0030%	1-1との比較
1-12	溶融デブリ	偏在(中心)	8.79	2.61 × 10 ⁶	9.08 × 10 ⁴	52%	1-1との比較
1-19	MCCI	標準	0.615	2.90 × 10 ⁶	1.92 × 10 ⁴		
1-26	MCCI	燃焼度(低)	0.629	2.11 × 10 ⁶	2.01 × 10 ²	1.0%	1-19との比較
1-23	MCCI	偏在(中心)	0.615	2.54 × 10 ⁶	8.67 × 10 ³	45%	1-19との比較
1-17	金属デブリ	標準	0.0439	7.53 × 10 ⁶	1.52 × 10 ³		
1-25	金属デブリ	燃焼度(低)	0.0449	7.48 × 10 ⁶	5.81 × 10 ²	38%	1-17との比較
1-21	金属デブリ	偏在(中心)	0.0439	7.54 × 10 ⁶	1.05 × 10 ³	69%	1-17との比較

*U量=ウラン同位体の全質量

No.104



- 燃焼度に関して、溶融デブリと比べてMCCIと金属デブリで は影響が小さい
 →MCCIと金属デブリでは含有されるU量が少ないため
 - 偏在に関して、燃料デブリの種類に依らず、同程度の影響 (40~70%前後)

→組成の偏りではなく、容器内での偏りの方が影響が高い



2.2.2 パッシブガンマ -追加の感度解析(4/4)

Step2解析(4/4) 複数の影響因子を考慮し、1.27MeVのピーク計数率が少ない5ケースを解析 ■溶融デブリに対する充填率・燃焼度・偏在の感度解析

<u>(赤枠: Step2解析ケース)</u>

ケース No.	燃料デブリ 種類	変動 パラメータ	デブリ 全量(kg)	U量* (kg)	合計線束 [<i>γ</i> /s/cm²]	1.27MeVピーク [γ/s/cm²]	1-1と比較した 1.27MeVピーク比(-)		
1-1	溶融デブリ	標準	15.8	8.79	5.23 × 10 ⁶	1.75 × 10⁵	—		
1-4	溶融デブリ	充填率(低)	5.28	2.93	3.40×10^{6}	1.03 × 10 ⁵	5.90 × 10 ^{−1}		
1-6	溶融デブリ	燃焼度(低)	15.8	8.97	3.06×10^5 5.92×10^2		3.38×10^{-3} $1.03 \times 10^{-3} **$		
1-12	溶融デブリ	偏在(中心)	15.8	8.79	2.61 × 10 ⁶	9.08 × 104	5.18 × 10⁻¹		
1-27	溶融デブリ	充填率(低)• 燃焼度(低)• 偏在(中心)	5.28	2.99	7.28 × 10 ⁴	1.42 × 10 ²	8.12	× 10 ⁻⁴	



**1-1と1-4と1-6の積



ベースケースに対し、1.27MeVピーク計数率は約3桁減少
 充填率と燃焼度と偏在の各ケースの積と同程度であり、
 各影響因子は線形で寄与していることを確認

→ベースケースに対する検出器応答の解析から、 計測時間が非常に長くなると想定される。



2.2.2 パッシブガンマーまとめ

▶ 解析から得られた主な知見:

影響度	影響因子	得られた知見	
大	 燃料デブリ 組成 燃焼度 充填率 偏在 容器 	・燃料デブリ組成,充填率のみが変化しても、燃 焼度が一定なら、Eu-154からのU量の定量評価 ができる可能性があるが、 <u>燃焼度が変化すると</u> Eu-154とU量の相関が崩れる[No.88参照] ・容器形状やかさ密度による自己遮蔽の影響で、 検出器への入射線束は変化する[No.93-95参照] ・核燃料以外の物質が多く含まれ,さらに核燃料 が容器内に偏在する場合,検出器への入射線束 は変化する	 2 燃焼度: 2号炉心平均 3 FP放出率:試験(Phebus-FPT4)ベース ④ 冷却期間: 20年 ① 燃料デブリ組成: UO₂: 50 (vol%) ZrO₂: 50 (vol%) SUS, コンクリート:0 (vol%)
小	 ③ FP放出率 ④ 冷却期間 (⑤ 含水率 ^{※1}) 	・Eu−154 は、FP放出率の影響は軽微 ・冷却期間は取り出し時期と半減期より補正でき る可能性がある	B ₄ C, Gd ₂ O ₃ : 0 (vol%) MOX: 0 (vol.%) Empty(気孔率): 0 (vol%) ⑤ 充填率: 30 (vol%) ⑦ 偏在:なし(=均質) ⑧ 容器:ユニット缶 (¢210mm×H200mm)
	※1 γ線透過力により	水分率の変化による自己遮蔽への影響軽微で解析対象外	タの値はベースケース条件

> 詳細分析の必要性の検討と技術課題の整理:

- 非均質による計測面の線束への影響の大きさの分析
- 燃料デブリ中の燃焼度による影響を補正し線束の変化率の補正可能性がある
- 容器内に核燃料が偏在する場合、容器を回転させて計測する、あるいは容器内に混在する物 質の分布をX線透過計測等で計測して補正する等が有効と推測。次年度以降に検討予定。



2. 実施内容

- (1) 候補となっている計測技術の計測誤差に影響を与える因子の解析的評価
 - ① 影響因子の選定
 - ② 影響因子の変動幅の設定
 - ③ 解析シミュレーション

2.1 解析条件
2.2 解析結果
2.2.1 パッシブ中性子
2.2.2 パッシブガンマ
2.2.3 アクティブ中性子
2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ
2.2.5 X線透過計測
2.2.6 宇宙線散乱計測

	① 燃料デブ リ組成	Gd 含有量	B 含有量	мох	② 燃焼度	③ FP 放出率	④ 冷却 期間	5 水分 含有量	⑥ 充填率	⑦ 偏在	⑧ 容器	⑨ 照射放 射線源	⑪ 検出器
2.2.3 <i>アク</i> ティブn	No.114 No.128 ~130 No.143 No.144	No.145	No.145	No.115	No.122 ~124	-	No.125 ~127	No.119 ~121	No.116 ~118 No.144	No.133 ~135	No.146	No.138 No.147	No.140 ~142



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning
2.2.3 アクティブ中性子 -計測概念

- 中性子発生装置からパルス状の中性子を燃料デブリに照射することにより、燃料デブリに含まれる <u>核分裂性核種(U-235, Pu-239等)から発生する中性子を計測</u>する。
- ただし、発生する中性子束は、燃料デブリ中の核物質量や燃焼度に起因した核分裂性核種の存在 割合、中性子吸収材(B, Gd等)等に影響を受けるため、計測面に到達する中性子線束も幅を持つ。
- 以上より、<u>解析的評価により計測の幅を見極めることで、計測系に必要な検出器の計測レンジ</u>
 や計測配置等の課題を抽出する。





2.2.3 アクティブ中性子 -解析モデル



中性子エネルギー: 14.1MeV、中性子発生率: 2×10⁸n/s、中性子発生方向: 等方、

パルス幅:1.2µs、繰返し周波数:100Hz

パルス中性子の散乱・減速用に、パルス中性子線源及びユニット缶の周囲にポリエチレンを設置

→ 中性子束(全エネルギー及び0.4eV以上(Cdによる熱中性子吸収を想定))の時刻変化に基づき、 検出器の選定や配置の検討に利用 50mm ポリエチレン



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.3 アクティブ中性子 -解析ケース表 (1/3)

- No.3-1の解析条件をベースケースとし、影響因子に変更した解析条件(No.3-2~27)を感度解 析条件とした。
- 感度解析条件において、ベースケースから変更した影響因子を青文字でハイライトしている。
 ここで、上記変更に付随して変更となるパラメータを含め黄色網掛けしている。

ケーマ	容器内組成*1				燃焼度	FP放出率	冷却期間	偏在	容器	照射	変更
No	燃料デブリ	充填率内		充填率外						中性子源	パラメータ
110,	の種類	組成	合計(充填率)								
3-1	溶融デブリ	UO ₂ :15vol%(50vol%)	30vol%	H ₂ 0(含水率):1wt%	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応	ベースケース
		ZrO ₂ : 15vol%(50vol%)		Empty:残り					(<i>ф</i> 210mm × H200mm)	(14.1MeV)	
3-2		UO ₂ : 7.5vol% (25vol%)	30vol%	H ₂ O(含水率):1wt%	23.0GWd/t	標進	20年	均一	ユニット缶	D-T反応	燃料デブリ組成
	-	ZrO ₂ : 22.5vol% (75vol%)		Empty:残り	2010 0.11 0, 1				(¢210mm×H200mm)	(14.1MeV)	(UO_2, ZrO_2)
3-3	_	MOX : 30vol%	30vol%	H ₂ O(含水率):1wt%	0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応	мох
				Empty:残り					(<i>ф</i> 210mm × H200mm)	(14.1MeV)	
3-4		UO ₂ : 5vol% (50vol%)	10vol%	H ₂ O(含水率):1wt%	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応	充填率
		ZrO ₂ : 5vol% (50vol%)		Empty:残り					(<i>ф</i> 210mm × H200mm)	(14.1MeV)	
3-5		UO ₂ 25vol% (50vol%)	50vol%	H ₂ O(含水率):1wt%	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応	充填率
		ZrO ₂ : 25vol% (50vol%)		Empty:残り					(¢210mm×H200mm)	(14.1MeV)	
3-6		UO ₂ : 15vol% (50vol%)	30vol%	Gd_2O_3 : 3vol%	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応	Gd含有率
		ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)		H ₂ U(含水率):Iwt%					(<i>φ</i> 210mm×H200mm)	(14.1MeV)	
				Empty:残り							
3-7		UO ₂ :15vol% (50vol%) ZrO ₂ :15vol% (50vol%)	30vol%	GC ₂ O ₃ · 30V0I% 日 〇(合水索) · 1,,,+9/	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応	
				H2O(古水率)・IWL/a					(¢210mm×H200mm)	(14.1MeV)	Gu占有平
	-			B.C:051vol%							
3-8		UO ₂ : 15vol% (50vol%) ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O(含水率):1wt%	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応	B含有率
				- Empty:残り					(¢210mm×H200mm)	(14.1MeV)	
				B ₄ C: 10vol%							
3-9		UO ₂ : 15vol% (50vol%)	30vol%	H ₂ O(含水率):1wt%	23.0GWd/t	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応	B含有率
		$2rO_2$: 15vol% (50vol%)		Empty:残り					(<i>ф</i> 210mm×H200mm)	(14.1MeV)	
0.10		UO ₂ : 15vol% (50vol%)	00 10/	H ₂ O(含水率):0.1wt%		177.24	00 F	14-	ユニット缶	D-T反応	A 1 +
3-10		ZrO ₂ : 15vol% (50vol%)	30vol%	- Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均一	(<i>ф</i> 210mm×H200mm)	(14.1MeV)	含水率



2.2.3 アクティブ中性子 -解析ケース表 (2/3)

容器内組成*1 冷却期間 容器 燃焼度 FP放出率 偏在 照射 変更 ケース 然料デブリ 充填率内 パラメータ 充填率外 中性子源 No, の種類 組成 合計(充填率) UO_2 : 15vol% (50vol%) H₂O(含水率):70vol% ユニット缶 D-T反応 溶融デブリ 30vol% 23.0GWd/t 標準 20年 含水率 3-11 均一 ZrO_2 : 15vol% (50vol%) Empty: 0vol% $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$ (14.1MeV) H₂O(含水率):1wt% UO_2 : 15vol% (50vol%) ユニット缶 D-T反応 3-12 30vol% **1.3GWd/t** 標進 20年 均一 燃焼度 ZrO₂: 15vol% (50vol%) Empty:残り $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$ (14.1MeV) H₂O(含水率):1wt% UO₂: 15vol% (50vol%) ユニット缶 D-T反応 3-13 標準 燃焼度 30vol% 51GWd/t 20年 均一 ZrO₂: 15vol% (50vol%) Empty:残り $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$ (14.1MeV) H₂O(含水率):1wt% ユニット缶 UO_2 : 15vol% (50vol%) D-T反応 23.0GWd/t 標進 冷却期間 3-14 30vol% 30年 均一 ZrO₂: 15vol% (50vol%) (14.1MeV) Empty:残り $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$ UO₂: 15vol% (50vol%) H₂O(含水率):1wt% ユニット缶 D-T反応 23.0GWd/t 3-15 冷却期間 30vol% 標準 40年 均一 ZrO_2 : 15vol% (50vol%) $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$ Empty:残り (14.1MeV) UO₂: 15vol% (50vol%) H₂O(含水率):1wt% ユニット缶 水平方向 D-T反応 3-16 30vol% 23.0GWd/t 標準 20年 偏在 ZrO₂: 15vol% (50vol%) (中心) $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$ (14.1MeV) Empty:残り H₂O(含水率):1wt% ユニット缶 D-T反応 UO₂: 15vol% (50vol%) 水平方向 3-17 30vol% 23.0GWd/t 標準 20年 偏在 ZrO₂: 15vol% (50vol%) Empty:残り (外面) $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$ (14.1MeV) 収納缶 UO_2 : 15vol% (50vol%) H₂O(含水率):1wt% D-T反応 3-18 23.0GWd/t 標準 20年 容器 30vol% 均一 $(\phi 220 \text{mm} \times \text{H840mm})$ ZrO₂: 15vol% (50vol%) Empty:残り (14.1MeV) 板厚10mm) UO_2 : 0.48vol%[3.7kg] H₂O(含水率):1wt% 廃棄物保管容器(内容器 D-T反応 3-19 10.48vol% 23.0GWd/t 標進 20年 均一 容器 SUS: 10vol%(95.4vol%) Empty:残り (14.1MeV) \Box 500mm \times H300mm) H₂O(含水率):1wt% UO₂: 15vol% (50vol%) ユニット缶 D-D反応 3-20 30vol% 23.0GWd/t 標準 20年 均一 照射放射線源 ZrO₂: 15vol% (50vol%) $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$ Empty:残り (2.45MeV)

IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -解析ケース表 (3/3)

容器内組成*1 燃焼度 FP放出率 冷却期間 偏在 容器 変更 照射 ケース 燃料デブリ 充填率内 充填率外 中性子源 パラメータ No, の種類 組成 合計(充填率) H₂O(含水率):1wt% ユニット缶 UO₂: 15vol% (50vol%) 加速器 23.0GWd/t 照射放射線源 3-21 溶融デブリ 30vol% 標準 20年 均一 ZrO₂: 15vol% (50vol%) Empty:残り $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H} 200 \text{mm})$ 中性子源 H₂O(含水率):1wt% ユニット缶 D-T反応 燃料デブリ組成 リリッチ 標準 3-22 UO_2 : 30vol% 30vol% 23.0GWd/t 20年 均一 Empty:残り $(\phi 210 \text{ mm} \times \text{H} 200 \text{ mm})$ (14.1MeV) (種類) UO₂: 0.075vol% (0.25vol%) H₂O(含水率):1wt% ユニット缶 D-T反応 燃料デブリ組成 金属デブリ 3-23 ZrO₂: 0.075vol% (0.25vol%) 30vol% 23.0GWd/t 標準 20年 均一 Empty:残り $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$ (14.1MeV) (種類) SUS: 29.85vol% (99.5vol%) UO_2 : 15vol% (25vol%) 燃料デブリ組成 H₂O(含水率):1wt% ユニット缶 D-T反応 標準 3-24 ZrO₂: 15vol% (25vol%) 60vol% 23.0GWd/t 20年 均一 Empty:残り $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$ (14.1MeV) (種類) SUS: 30vol% (50vol%) UO₂: 1.05vol% (3.5vol%) H₂O(含水率):1wt% ユニット缶 燃料デブリ組成 ZrO₂: 1.05vol% (3.5vol%) D-T反応 3-25 MCCI 23.0GWd/t 20年 30vol% 標進 均— $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$ SUS: 7.2vol% (24vol%) Empty:残り (14.1MeV) (種類) Conc: 20.7vol% (69vol%) UO₂: 15vol% (33.3vol%) 燃料デブリ組成 H₂O(含水率):1wt% ユニット缶 D-T反応 標準 3-26 ZrO₂: 15vol% (33.3vol%) 45vol% 23.0GWd/t 20年 均一 $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$ Empty:残り (14.1MeV) (Conc) Conc: 15vol% (33.3vol%) UO_2 : 15vol% (25vol%) H₂O(含水率):1wt% 燃料デブリ組成 ユニット缶 D-T反応 3-27 ZrO₂: 15vol% (25vol%) 23.0GWd/t 標進 20年 均一 60vol% $(\phi 210 \text{mm} \times \text{H}200 \text{mm})$ Empty:残り (14.1MeV) (Conc) Conc: 30vol% (50vol%)

*1:容器内に対する割合。括弧内は、充填率内を100%とした場合の割合



2.2.3 アクティブ中性子 –解析結果 【ベースケース】

▶ 燃料デブリに中性子を照射し、<u>核分裂性核種(U-235等)からの核分裂で発生する中性子束の時間</u>
 <u>変化が解析で得られることを確認</u>。ここでは、計測面での中性子束(ポリエチレン透過後)を評価。
 ▶ なお、計測ノイズとなる燃料デブリ中の自発核分裂性核種(Cm-244等)からの線束も評価。



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.3 アクティブ中性子 -解析内容 【ベースケース】



IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【MOX】

MOX燃料の場合、早い時刻(100µs以下)では、②の成分が大きく違っているが、500µs以降では、 ほぼ同じ値となっている。



IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【充填率】

③の定常成分(Cm-244)は、充填率(U質量)を変えても、ほとんど変化しない。

早い時刻(100µs以下)では、②の成分が大きく違うが、500µs以降では、違いがほぼ一定となっている。



IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【充填率】

③の定常成分(Cm-244)は、充填率(U質量)を変えても、ほとんど変化しない。 早い時刻(100µs以下)では、②の成分が大きく違うが、500µs以降では、違いがほぼ一定となっている。



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【充填率】

③の定常成分(Cm-244)は、充填率(U質量)を変えても、ほとんど変化しない。 充填率(=U質量)に対して、②の積分値は、線形ではないが、単調増加する。



IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【含水率】

ベースケース (1wt%)と0.1wt%では、②、③の成分ともに、ほぼ等しい値となっている。



IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【含水率】

含水率が70vol%の場合、80µs以下の時刻において、ベースケースと比較して②の成分が高いが、

80µs以降では、ベースケースの方が高くなる。

30~2,000µsの積分値で比較すると、②の成分は、ベースケースと含水率70vol%で、ほぼ同じ値となる。



IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【含水率】

積分範囲50~2,000µsの場合、含水率が70vol%になると、中性子束が低くなるが、 積分範囲を30~2,000µsにすることで、含水率の影響を受けない計測の可能性がある。



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【燃焼度】

1.3GWd/tにおける③の定常成分(Cm-244)は、②と比較して4桁程度小さい。



2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【燃焼度】

51GWd/tにおける③の定常成分(Cm-244)は、ベースケースと比較して5倍以上になるが、

②の成分と比較すると、1/4程度である。





2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【燃焼度】

燃焼度が高くなると中性子束の②の成分の積分値が単調増加するが、増加の割合は、燃焼度が高くなるほど小さい。 ③の成分の積分値は、燃焼度が高くなると、急激に増加するが、51GWd/tにおいても、②の1/4程度である。



2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【冷却期間】

冷却期間は、②の成分及び③の成分の時刻変化に、ほとんど影響を与えない。



IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【冷却期間】

冷却期間は、②の成分及び③の成分の時刻変化に、ほとんど影響を与えない。



2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【冷却期間】

冷却期間は、②の成分及び③の成分の積分値に、ほとんど影響を与えない。



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【MCCI】

MCCIと溶融デブリで、②及び③の成分の時刻変化に、ほとんど違いが無い。



IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【MCCI】

UO2及びZrO2量が同じ場合、コンクリート量が変わっても、②及び③の成分の時刻変化に、ほとんど違いが無い。 UO2及びZrO2量が異なる場合、③の成分の時刻変化に、ほとんど違いが無いが、②の成分は、UO2及びZrO2量が約1/15に対して、中性子束の積分値が約1/7であった。



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【MCCI】

MCCIと溶融デブリで、②及び③の成分の積分値に、ほとんど違いが無い。



IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -感度解析 【偏在モデル(A)】



2.2.3 アクティブ中性子 -感度解析 【偏在モデル(B)】





2.2.3 アクティブ中性子 -感度解析 【偏在モデル(A)】



IRID



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2 解析結果 2.2.3 アクティブ中性子 -感度解析【偏在モデル】

②の成分の積分値の平均値は、偏在モデル(A)と(B)で、5%以内の違いだが、 ベースケースは、偏在モデル(A)及び(B)の約2倍になっている。



2.2 解析結果
 2.2.3 アクティブ中性子 -その他感度解析結果



IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -その他感度解析結果

加速器中性子源



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.3 アクティブ中性子 -その他感度解析結果



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.3 アクティブ中性子 -その他感度解析結果

代表検出器に対する応答スペクトル(体系)





IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -その他感度解析結果

代表検出器に対する応答スペクトル(B-10検出器)





2.2.3 アクティブ中性子 -その他感度解析結果

代表検出器に対する応答スペクトル(He-3検出器)

He-3検出器:直径(内径) 25.4mm、有効長1000mm

He-3圧力4atm



ハウジング: 0.5mm厚SUS304

80keV以上のエネルギーを付与する 陽子及びトリチウムを測定

 \rightarrow 326.7cps

10,000カウント収集時間:31秒



2.2.3 アクティブ中性子 –解析結果 【感度解析】

- ✓ ウラン量に対する感度(影響因子①)
 - ・ウラン量と中性子束には比例関係あり
 - ・金属デブリ等、溶融デブリと組成が大きくことなる場合には

パルス中性子源からの中性子の減速、熱化の度合いが異なるため傾向が異なる。




2.2.3 アクティブ中性子 –解析結果 【感度解析】





2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【感度解析】

- ✓ 中性子吸収材に対する感度(影響因子①)
 - ・Gd、B等の中性子吸収材によって、検出器面に到達する中性子線束は低下する
 - ・中性子吸収材の投入量が多いほど、中性子束は低下する。 (定常成分(Cm-244等)による中性子束(③)が殆どとなる。特にGdの場合。)



IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【感度解析】

✓ 容器形状に対する感度(影響因子⑧)

・容器形状が異なる場合には、測定体系の影響のためウラン量と中性子束は比例しない (ユニット缶以外では、パルス中性子源からの中性子が系外に漏れる効果が大)



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.3 アクティブ中性子 -解析結果 【感度解析】

✓ 加速器中性子源からの中性子エネルギーに対する感度(影響因子⑨)



IRID

2.2.3 アクティブ中性子 -まとめ

▶ 解析から得られた主な知見:

影響度	影響因子	得られた知見	
大	 ①燃料デブリ組成: (中性子吸収材) ②燃焼度 ⑦偏在 ③照射放射線源 	 ・中性子吸収剤が増加すると、ユニット缶内の熱中性子束が低下し核分裂が抑制される。 [No.145参照] ・燃焼度が増加すると、核燃料中のU-235量が低下し、またノイズ源となるCm-244等が増加するため感度が低下する。[No.122-124参照] ・デブリの大きさが同程度である場合、偏在の影響は小さいが、デブリの大きさが小さい場合、感度が低下する。 ・照射する中性子エネルギーによる感度影響は体系の最適化により補正できる可能性がある 	 ② 燃焼度: 2号炉心平均 ③ FP放出率:試験(Phebus-FPT4)ベース ④ 冷却期間: 20年 ① 燃料デブリ組成: UO₂: 50 (vol%) ZrO₂: 50 (vol%) SUS, コンクリート:0 (vol%)
/]v	 (③ FP放出率 ^{*1}) ④ 冷却期間 ⑤ 含水率 ⑥ 充填率 ⑧ 容器 	 ・冷却期間は、影響軽微 ・含水率は、影響軽微にできる可能性がある ・充填率(かさ密度)は、影響軽微 ・容器は、形状補正できる可能性がある 	B ₄ C, Gd ₂ O ₃ : 0 (vol%) MOX: 0 (vol.%) Empty(気孔率): 0 (vol%) ⑤ 含水率:1 (wt%) ⑥ 充填率: 30 (vol%) ⑦ 偏在: なし (=均質) ⑧ 容器:ユニット缶 (<i>d</i> 210mm × H200mm)
	※1 ③ FP放出 ^콜	≊は、γ線の放出率であり中性子線の計測には影響なし	(単210mm)/ ベースケース条件

- > 詳細分析の必要性の検討と技術課題の整理
 - 燃料デブリ中の中性子吸収材の影響を補正するため異なる計測法(即発ガンマ線 分析等)の組み合わせについて検討する必要がある
 - ・ 燃料デブリ中の燃焼度の影響を補正し線束の変化率の補正可能性がある



2. 実施内容

- (1) 候補となっている計測技術の計測誤差に影響を与える因子の解析的評価
 - ① 影響因子の選定
 - ② 影響因子の変動幅の設定
 - ③ 解析シミュレーション

2.1 解析条件
2.2 解析結果
2.2.1 パッシブ中性子
2.2.2 パッシブガンマ
2.2.3 アクティブ中性子
2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ
2.2.5 X線透過計測

2.2.6 宇宙線散乱計測

	① 燃料デブ リ組成	Gd 含有量	B 含有量	мох	② 燃焼度	③ FP 放出率	④ 冷却 期間	⑤ 水分 含有量	⑥ 充填率	⑦ 偏在	⑧ 容器	⑨ 照射放 射線源	⑪ 検出器
2.2.4 組合せ	No.156 No.157	No.157	-	-	No.153 No.157	-	-	-	No.157	No.156 No.157	-	-	-



2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ -計測概念

- 燃料デブリには、燃料由来のガンマ線放出核種(Eu-154等)および、自発核分裂により中性子を放出する燃料由来の核種(Cm-244等)が含まれるため、パッシブで燃料由来の中性子線やガンマ線を計測できる。また、中性子を照射することにより、燃料デブリに含まれる核分裂性核種(U-235等)から中性子が放出されるため、アクティブで燃料由来の中性子線を計測できる。
- しかし、各計測の解析的評価(2.2.1, 2.2.2, 2.2.3)により、影響因子により計測値が幅を持ち、
 計測困難な条件(影響因子とその変動幅)が確認された。
- 以上より、<u>計測法の組合せで、計測困難な条件が補完されるか、計測可能性を分析する。</u>



[©]International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ –解析方針

<目的>

個別の計測法における既往解析結果から、影響因子による計測値のバラつきが大きくなる要因として「燃焼度」、「自己遮蔽」、「中性子吸収材」に着目。これらに対して、計測法を組合わせることで、影響因子による計測値のバラつきの補完の可能性を確認する。

単独の計測技術の解析結果に基づく知見:

計測法	得られた知見	影響度0	の大きい要因	計測値のバラつきが大きくなると 推定される燃料デブリ状態		
		項目	影響因子	計測値:低	計測値:高	
		燃焼度	②燃焼度	低燃烧度(5154.小)上白	高燃焼度 (Eu154:多)	
パッシブγ	・ <u>燃焼度が変化する</u> とEu-154とU量の相関が崩れる ・ <u>自己遮蔽の影響</u> で、検出器への入射線束は変化す る	ガンマ線の 自己遮蔽	①燃料デブリ組成 ⑥充填率 ⑦偏在 ⑧容器	低		
パッシブn	・ <u>燃焼度が変化する</u> とCm-244とU量の相関が崩れる (線束がオーダーレベルで変化) (・含水率の影響軽微 ^(注1))	燃焼度	②燃焼度	低燃焼度 (Cm244 : 少)	高燃焼度 (Cm244:多)	
アクティブn	・燃焼産が増加すると咸産が低下する	燃焼度	②燃焼度	吉姆萨英国古姓之西加士		
	・ <u>中性子吸収材</u> により核分裂が抑制される	中性子吸収材	 ①燃料デブリ組成 (Gd、B含有量) 	高窯焼度土中性子吸収入 (GdやB:多)	-	

(注1)アクティブ中性子の含水率に対する感度解析より、ポリエチレンを設置した体系において定常成分(パッシブ中性子のCm-244)のバラつきが少ないことから 影響軽微とした



2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ-既解析結果に基づく知見

既解析結果に基づき、個別の影響因子によるバラつきに対しては、3つの計測法の組合せにより、
 バラつきの補完可能性が推定された(下表)

	影響度の大きい	因子として考	慮する条	件 (注1)		影響因子のバラツキの大きさ ^(注2) と補完可能性 ^(注3) の概略比較						
444 July 100	ガンマ線	の自己遮蔽		中性子吸収材	解析ケース	パッ	シブγ	パッシブn		アクティブn		
 	燃料デブリ組成	充填率	偏在	Gd•B含有量		パラつき	補完可能性	パラつき	補完可能性	パラつき	補完可能性	
中	溶融	中	-	-	ベースケース	-	0	-	0	-	0	
低	溶融	中	-	-	感度解析 (燃焼度) ^(注4)	大	×	大	×	中	〇 (BG成分が 小さいため)	
高	溶融	中	-	-			*		*		Δ	
中	金属	中	-	-		中	Δ	小	0	小	0	
中	MCCI	中	-	-	歌度解析(燃料ナノリ組成) ^(注4)	中	Δ	小	0	小	0	
中	溶融	最小	-	-	感度解析 (充填率) ^(注5)	小	0	小	0	小	0	
中	溶融	中	中央	-	感度解析 (偏在) ^(注5)	小	0	小	0	小	0	
中	溶融	中	-	最大	感度解析 (Gd、B含有量) ^(注5)	小 (未評価 定性的	〇 āであるが iに判断)	小	0	×	×	

(注1)黒字はベースケースの条件。青字はベースケースから変更する条件。なお、ここでの因子以外の条件は全てベースケースの条件とする。

(注2) U量あたりの線束の線束の変化が、倍半分程度まで:バラつき小、1桁未満程度:バラつき中、1桁以上:バラつき大

(注3)〇:十分な線束が計測面に到達しバラつきが少なく計測可能、△:線束が1桁未満程度変化するが補正等が可能、×:線束が極端に低下し計測困難、

☆:十分な線束が計測面に到達するが核物質量の推定にはパッシブγ·n計測法で得られた情報をもとに互いに補完する必要あり

(注4)計測法によってバラツキが大きくなる条件が異なるため、複数の条件を設定。

(燃料デブリ組成:金属デブリ、MCCIデブリ、燃焼度:低、高)

(注5)バラツキが大きくなる且つ線束が下がる条件のみ整理。(充填率:最小、偏在:中央、Gd·B含有量:最大)



2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ-既解析結果に基づく知見

▶ 燃焼度によるバラつきへの対応策

Cm-244(パッシブ中性子)とEu-154(パッシブガンマ)の増加傾向が異なることに着目 →Cm-244/Eu-154の比から、燃焼度による計測誤差を補正可能





2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ -解析ケース

● 既解析結果に基づく影響度の大きい因子の組合せ検討より、パッシブ・アクティブ中性子+パ ッシブガンマとして、以下3ケース(青枠)の解析により補完可能性を確認する方針とした

	影	響度の大きし	い因子として	「考慮する	条件 ^(注1)					
		ガンマ	て線の自己遮	蔽	中性子吸収材	解析条件の設定方針				
	燃焼度	燃料デブリ 組成	充填率	偏在	Gd•B含有量					
	中	金属	中	中央	-	「自己遮蔽」の因子(パッシブγ計測法でバラつき大/線束低)に対するパッシブn計測法での補完可 能性の確認。				
	低	金属	中	中央	-	「燃焼度」及び「自己遮蔽」の因子(パッシブγ・n計測法でバラつき大/線東低)に対するアクティブn 計測法での補完可能性の確認。				
	高	溶融	中	-	最大	「中性子吸収材」及び「燃焼度」の因子(アクティブn計測法でバラつき大/線束低)に対するパッシブ γ and パッシブn計測法での補完可能性の確認。				
	低	金属	最小	中央	最大	「燃焼度」、「自己遮蔽」、「中性子吸収材」の因子(3つの計測法でバラつき大/線東低)に対する パッシブγ・n、アクティブn計測法の組み合わせでの補完可能性の確認。				
	(注1) 黒字 (注1) 黒字 はベースケースの条件。青字はベースケースから変更する条件。なお、ここでの因子以外の条件は全てベースケースの条件とする。								
ı I										

└-▶ 本ケースは高燃焼度の条件であり、パッシブγ、n計測法での補完性可能を有すると推察し解析ケースからは除外



2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ -解析ケース

- 解析モデルは個別の計測法での解析シミュレーションモデルを採用
- No.4-1の解析条件をベースケースとし、前頁の方針に基づき影響因子を変更した解析条件 (No.4-2~4)を感度解析条件とした。全3ケース (ベースケースについては個別の計測法の解析シミュレーションで実施済)

ケーマ			容器内組	成 ^{*2}		燃焼度	FP放出率	冷却期間	偏在	容器	照射	変更
No	計測法 ^{*1}	燃料デブリ	充填率内		充填率外						中性子源	パラメータ
110,		の種類	組成	合計(充填率)								
4-1	パッシブγ パッシブn アクティブn	溶融デブリ	UO ₂ : 15vol%(50vol%) ZrO ₂ : 15vol%(50vol%)	30vol%	H ₂ O(含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	均—	ユニット缶 (∮210mm×H200mm)	D-T反応 (14.1MeV)	ベースケース
4-2	パッシブγ パッシブn		UO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) ZrO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) SUS: 29.85vol% (99.5vol%)	30vol%	H ₂ O(含水率):1wt% Empty:残り	23.0GWd/t	標準	20年	水平方向 (中心)	ユニット缶 (<i>ф</i> 210mm×H200mm)	_	燃料デブリ組成 (種類) 偏在
4-3	パッシブγ パッシブn アクティブn	今尾デブリ	UO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) ZrO ₂ : 0.075vol% (0.25vol%) SUS: 29.85vol% (99.5vol%)	30vol%	H ₂ O(含水率):1wt% Empty:残り	1.3GWd/t *3 23.0GWd/t	標準	20年	水平方向 (中心)	ユニット缶 (<i>ф</i> 210mm×H200mm)	D-T反応 (14.1MeV)	燃料デブリ組成 (種類) 燃焼度、偏在
4-4	アクティブn	亚 凋 ア ノ リ	UO ₂ : 0.025vol% (0.25vol%) ZrO ₂ : 0.025vol% (0.25vol%) SUS : 9.95vol% (99.5vol%)	10vol%	Gd₂O₃:30vol% H ₂ O(含水率):1wt% Empty:残り	1.3GWd/t ^{*3} 23.0GWd/t	標準	20年	水平方向 (中心)	ユニット缶 (<i>ф</i> 210mm × H200mm)	D-T反応 (14.1MeV)	燃料デブリ組成 (種類) 充填率、Gd含 有率、含水 率、燃焼度、 偏在

*1:各計測法の感度解析結果より、他計測法で測定が可能な見込みある場合や、定性的に測定が困難と考えられる場合については、ここでは解析を実施しない

*2: 容器内に対する割合。括弧内は、充填率内を100%とした場合の割合

*3:UO₂及びZrO₂は低燃焼度(1.3GWdt/t)、SUSはベース燃焼度(23.0GWd/t)とする



2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ –解析結果

No.156

<中心偏在の金属デブリ(パッシブγで計測される線束が低くなるケース)【解析No.4-2】>

<パッシブ γ >



(注)パッシブnで計測の可能性が確認できたため、アクティブnの解析を省略

<パッシブn>

パッシブγ計測で核物質の計測が難しいと予想される状態(自己遮蔽効果:大) に対して、パッシブn計測での燃料由来の計測による補完の可能性を確認。



2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ -解析結果

No.157

<低燃焼度且つ中心偏在の金属デブリ(パッシブγ・nで計測される線束が低くなるケース)【解析No.4-3】> <低燃焼度且つ中心偏在の金属デブリ(Gd量多)

(パッシブγ・パッシブn・アクティブnで計測される線束が低くなるケース)【解析No.4-4】>



核物質量が少量且つ中性子吸収材による核分裂の抑制により、計測値が大幅に低下する。



2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ -まとめ

- ▶ 解析から得られた主な知見:
 - 個別計測技術を単独で用いた場合には、「燃焼度」、「自己遮蔽」、「中性子吸収材」 の影響因子が計測誤差の原因となる
 - 3つの計測技術の組合せにより、計測誤差低減(計測値のバラつきの低減)の可能 性を確認。

計測困難となる (影響度の大きし	o条件 \要因)	計測法						
項目	影響因子	パッシブn	パッシブγ	アクティブn	組み合わせ			
燃焼産	燃焼度(低)	×	×	0	\circ			
<u> </u>	燃焼度(高)	☆	☆	Δ	U			
ガンマ線の自己遮蔽	燃料デブリ組成, 充填率, 偏在,等	0	Δ	0	0			
中性子吸収材	Gd,B含有量	0	0	×	0			

○:十分な線束が計測面に到達しバラつきが少なく計測可能、△:線束が1桁未満程度変化するが補正等が可能、×:線束が極端に低下し計測困難
 ☆:十分な線束が計測面に到達するが核物質量の推定にはパッシブγ・n計測法で得られた情報をもとに互いに補完する必要あり



2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ -まとめ

- > 詳細分析の必要性の検討と技術課題の整理
 - 影響度の大きい要因に対しては影響補正の手法検討が必要 (以下は代表例)

燃焼度:Eu-154(パッシブ γ)、Cm-244(パッシブn)の増加傾向の差異による補正

中性子吸収材:異なる計測法(即発ガンマ線分析等)の組み合わせ検討

本年度の解析結果を踏まえ、検出器モデルを含めた解析シミュレーションを行い、
 装置概念の構築に繋げる

2. 実施内容

- (1) 候補となっている計測技術の計測誤差に影響を与える因子の解析的評価
 - ① 影響因子の選定
 - ② 影響因子の変動幅の設定
 - ③ 解析シミュレーション

2.1 解析条件
2.2 解析結果
2.2.1 パッシブ中性子
2.2.2 パッシブガンマ
2.2.3 アクティブ中性子
2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ
2.2.5 X線透過計測
2.2.6 宇宙線散乱計測

	① 燃料デブ リ組成	Gd 含有量	B 含有量	мох	② 燃焼度	③ FP 放出率	④ 冷却 期間	⑤ 水分 含有量	⑥ 充填率	⑦ 偏在	⑧ 容器	⑨ 照射放 射線源	⑪ 検出器
2.2.5 X線	No.166 No.167	-	-	No.166 No.167	-	No.166 No.167	-	-	No.166 No.167	No.166 No.167	No.166 No.167	No.166 No.167	No.169 ~172



2.2.5 X線透過計測 -計測概念

No.161

- 測定原理: 燃料デブリを回転させながら照射したX線のうち, デブリを透過する量を測定し, 360度方向の測定データを用いた画像再構成演算により, 断層像を生成
- 測定体系:加速器X線源と検出器タリーの間にデブリを設置
- 線源条件: EGS*により算出したX線スペクトル
- 検出器応答:加速器X線源の1パルス照射当りのX線エネルギーの合計量
- 測定時間:1画像当り10~15秒



X線透過計測装置では、回転テーブル上に配置した測定対象物を、加速器X線源とX線検出器で挟むように対向配置し、回転テーブルを1回転させながらX線を照射することで、測定対象物に対して360度方向のX線透過データを取得する。これらのX線透過データを用いて、画像再構成演算を実施することにより、測定対象物の内部を含む断層像を生成する。

X線透過計測(高エネルギーX線CT)装置構成

*粒子輸送コード:Electron Gamma Shower



2.2.5 X線透過計測 -解析条件

<u>解析条件(1/3) 解析モデル</u>

X線透過計測(高エネルギーX線CT法)における線東評価の体系



※検出器の前にコリメータの設置を想定し、Z軸方向の空間幅を、走査ピッチ(1mm)に合わせて設定



2.2.5 X線透過計測 -解析条件



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.5 X線透過計測 -解析条件

<u>解析条件(3/3) 解析ケース</u>

パッシブガンマの20ケースから燃焼度と冷却期間を除き、X線エネルギーを追加した18ケースを解析

	ケース	UO ₂	ZrO ₂	SUS	Concrete	充填率	FP放出率	偏在	容器	X線エネルギ
5-1	ベース	15vol%	15vol%	-	-	30vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-2	UO₂少	7.5vol%	22.5vol%	-	-	30vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-3	MOX	30vol%	-	-	-	30vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-4	古博变	5vol%	5vol%	-	-	10vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-5	兀埧쑤	25vol%	25vol%	-	-	50vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-8	口井山交	15vol%	15vol%	-	-	30vol%	ゼロ放出	均一	ユニット缶	9MeV
5-9	FP放出平	15vol%	15vol%	-	-	30vol%	高放出	均一	ユニット缶	9MeV
5-12	后去	15vol%	15vol%	-	-	30vol%	標準	水平中心	ユニット缶	9MeV
5-13	1/冊 1土	15vol%	15vol%	-	-	30vol%	標準	水平外面	ユニット缶	9MeV
5-14	索聖	15vol%	15vol%	-	-	30vol%	標準	均一	収納缶	9MeV
5-15	谷岙	0.5vol%	10vol%	-	-	10.5vol%	標準	均一	廃棄物内容器	9MeV
5-16	リリッチ	30vol%	-	-	-	30vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-17	全屋デブロ	0.075vol%	0.075vol%	29.85vol%	-	30vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-18	並属ノノリ	15vol%	15vol%	30vol%	-	60vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-19	мооцニゴル	1.05vol%	1.05vol%	7.2vol%	20.7vol%	30vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-20	MUULTフリ	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	60vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-21	X線照射	15vol%	15vol%	-	-	30vol%	標準	均一	ユニット缶	6MeV
5-22	エネルギ	15vol%	15vol%	-	-	30vol%	標準	均一	ユニット缶	15MeV

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.5 X線透過計測 -解析結果

<u>解析結果(1/3) ベースケースの線束評価</u>

ケースNo.	燃料デブリ 種類	UO ₂	ZrO ₂	H ₂ O	充填率*	燃料デブリ 全量	U量**
5-1	溶融デブリ	15vol%	15vol%	1wt%	30vol%	15.8kg	8.79kg

X線透過計測体系におけるベースケースの解析条件

*充填率はH2Oを含有しない, **U量=ウラン同位体の全質量

X線透過計測体系におけるX線とγ線のエネルギー別フラックス



X線透過計測体系におけるベースケース解析結果

	X線	γ線
合計線束 [photon/cm²/s]	3.5×10^{4}	8.5 × 10 ²
平均エネルギー [MeV]	3.3	0.63

 X線に対してγ線は、合計線束が低く(<3%)、かつ 平均エネルギーが低いため、γ線によるCT画像への ノイズ影響は低いと想定される。



2.2.5 X線透過計測 -解析結果

|解析結果(2/3) 全ケースの線束評価

全18ケースに関してX線とγ線の線束を計算(γ線はパッシブガンマと同じ解析であるため,記載を省略)。 X線の線束は、燃料デブリのかさ密度に対して指数関数に従い減少することを確認。

■解析条件:燃料デブリのかさ密度および γ線強度 ■解析結果:燃料デブリのかさ密度に対するX線の線束

No.166



RID

2.2.5 X線透過計測 -解析結果

<u>解析結果(3/3) 全ケースの線束評価</u>

γ線によるCT画像へのノイズ影響を検討するため,γ線とX線のエネルギー線束(エネルギー毎の 線束とエネルギーの積を合計した値)をそれぞれ求め,X線に対するγ線の割合を算出。



γ線·X線のエネルギー線束(左縦軸)とγ線/X線エネルギー線束比(右縦軸)

- γ/Xのエネルギー線束比は最大約6%。偏在(5-12,13)と金属デブリ(5-18)でγ線の割合が大きい。
- CT画像評価では、ベースケースに加え、偏在と金属デブリを代表ケースに追加し、解析を実施。

RD

2.2.5 X線透過計測 -解析条件

解析条件 CT画像評価を行う代表ケースの選定

ベースケース(5-1)及びCT画像への γ線ノイズが大きいと想定されるケース(5-12,13,18)の全4ケースを選定

	ケース	UO ₂	ZrO ₂	SUS	Concrete	充填率	FP放出率	偏在	容器	X線エネルギ
5-1	溶融デブリ(ベース)	15vol%	15vol%	-	-	30vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-2	UO2少	7.5vol%	22.5vol%	_	_	30vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-3	MOX	30vol%	-	-	—	30vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-4	大店交	5vol%	5vol%	_	_	10vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-5	工具半	25vol%	25vol%	_	—	50vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-8	rp th 山 変	15vol%	15vol%	-	_	30vol%	ゼロ放出	均一	ユニット缶	9MeV
5-9	FP放伍平	15vol%	15vol%	_	—	30vol%	高放出	均一	ユニット缶	9MeV
5-12	后去	15vol%	15vol%	-	-	30vol%	標準	水平中心	ユニット缶	9MeV
5-13	ᆘᆐᅟᆂ	15vol%	15vol%	-	-	30vol%	標準	水平外面	ユニット缶	9MeV
5-14	<u> </u>	15vol%	15vol%	-	_	30vol%	標準	均一	収納缶	9MeV
5-15	台谷	0.5vol%	10vol%	-	-	10.5vol%	標準	均一	廃棄物内容器	9MeV
5-16	リリッチ	30vol%	-	-	_	30vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-17	金属デブリ	0.075vol%	0.075vol%	29.85vol%	-	30vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-18	金属デブリ(充填率高)	15vol%	15vol%	30vol%	-	60vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-19	MCCI	1.05vol%	1.05vol%	7.2vol%	20.7vol%	30vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-20	MCCI(充填率高)	15vol%	15vol%	0vol%	30vol%	60vol%	標準	均一	ユニット缶	9MeV
5-21	X線照射	15vol%	15vol%	-	-	30vol%	標準	均一	ユニット缶	6MeV
5-22	エネルギ	15vol%	15vol%	-	-	30vol%	標準	均一	ユニット缶	15MeV



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning



[1] So Kitazawa, et al., Simulations of MeV energy computed tomography, NDT & E International, Volume .38 Issue 4 (2005)

RID

2.2.5 X線透過計測 -解析結果

<u>解析結果(2/5)代表ケースのCT画像評価</u>



IRID

2.2.5 X線透過計測 -解析結果

<u>解析結果(3/5)代表ケースのCT画像評価</u>



IRID

2.2.5 X線透過計測 -解析結果

<u>解析結果(4/5) 代表ケースのCT画像評価</u>



2.2.5 X線透過計測 -解析結果

<u>解析結果(5/5)代表ケースのCT画像評価</u>

CT値による物質識別性を評価するため、各物質ボクセルに対応するCT値の平均値と誤差を評価 (物質間の境界を除いた各物質ボクセルのCT値を抽出し、誤差を3σで算出)



各物質に対応するCT値の平均と誤差

▶ UO₂は他の物質とCT値が大きく異なるため、識別が可能

▶ 今回の条件下ではSUSやZrO₂も識別可能だが、複数の影響因子が重なると識別不可となる可能性有り

IRID

2.2.5 X線透過計測

No.174

<u>まとめ</u>

■解析から得られた主な知見

- ▶ 全ケースに対する線束評価:
 - CT画像の γ 線ノイズの指標となる γ / Xのエネルギー線束比は最大約6%。 <u>偏在と金属デブリ</u> (<u>充填率高)のケースで γ 線の割合が高くなる</u>ことを確認。
- ▶ 代表ケースに対するCT画像評価:
 - 1cm角のボクセルで構成された非均質モデルを想定し、実機相当の検出器パラメータ等を組み込んだCTシミュレータによる計算結果を基に再構成したCT画像の評価から、核燃料(UO2) とそれ以外の物質が識別可能であることを確認。
- ■詳細分析の必要性の検討と技術課題の整理
- ▶ 全ケースに対する線束評価:
 - 今回,感度解析を実施したγ/Xのエネルギー線束比は最大約6%と少ない。
 →複数の影響因子が変化したケースの追加解析を実施し、γ線遮蔽の必要性を検討。
- ▶ 代表ケースに対するCT画像評価:
 - 物質のかさ密度が変化(空間分解能未満のサイズで空気が混入)する場合,物質識別が困難。
 →かさ密度が変化するケースを想定し,異なるX線エネルギーを用いたCT計測の適用性を検討。
 - 複数の物質が空間分解能未満のサイズで混在する場合、物質識別が困難。
 →空間分解能未満のサイズとなる核燃料等の混入量を評価する方法を検討。



2. 実施内容

- (1) 候補となっている計測技術の計測誤差に影響を与える因子の解析的評価
 - ① 影響因子の選定
 - ② 影響因子の変動幅の設定
 - ③ 解析シミュレーション

2.1 解析条件
2.2 解析結果
2.2.1 パッシブ中性子
2.2.2 パッシブガンマ
2.2.3 アクティブ中性子
2.2.4 パッシブ・アクティブ中性子+パッシブガンマ
2.2.5 X線透過計測
2.2.6 宇宙線散乱計測

	① 燃料デブ リ組成	Gd 含有量	B 含有量	мох	② 燃焼度	③ FP 放出率	④ 冷却 期間	⑤ 水分 含有量	⑥ 充填率	⑦ 偏在	⑧ 容器	9 照射放 射線源	⑩ 検出器
2.2.6 宇宙線	No.179 No.184	No.180	No.180	No.179	No.181	No.181	No.181	No.180	No.179	No.182	No.183	-	全て



IRID

2.2.6 宇宙線散乱計測 -計測概念

- 測定原理: 燃料デブリを通過するミュオンの軌跡変化を測定
- **測定体系**: サンプルの上下にミュオン軌跡検出器を配置
- 線源条件: EXPACS[※]からミュオンエネルギー、角度スペクトルを設定
- 検出器応答: ミュオン散乱角分布(上下の軌跡変化から算出)
- 測定時間:1時間(有効イベント数10,000以上を取得可能と想定される条件)



2.2.6 宇宙線散乱計測 -解析モデル

- シミュレーション範囲:上下の検出器間のミュオン軌跡をシミュレーションにより再現
- データ解析範囲: サンプル周辺で発生したミュオン散乱データを抽出
- データ解析手法: 一次評価としてミュオン散乱角の平均値(解析範囲の散乱の合計値/解析 範囲を通過した全ミュオン数)を比較



シミュレーション体系



シミュレーション結果(ミュオン散乱分布)



2.2.6 宇宙線散乱計測 -解析ケース

No.178

	ケース	UO ₂	ZrO ₂	SUS	Concrete	合計 (充填率)	燃焼度 (GWd/t)	FP放出率	冷却期間(年)
6-1	溶融デブリ	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-2	溶融デブリ(U少)	7.5vol%	22.5vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-3	MOX	15vol%(MOX)	15vol%	0vol%	-	30vol%	0	標準	20
6-4	充填率(低)	5vol%	5vol%	0vol%	-	10vol%	23	標準	20
6-5	充填率(高)	25vol%	25vol%	0vol%	-	50vol%	23	標準	20
6-6	Gd(低)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-7	Gd(高)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-8	B(低)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-9	B(高)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-10	含水率(低)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-11	含水率(高)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-12	燃焼度(低)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	1.3	標準	20
6-13	燃焼度(高)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	51	標準	20
6-14	FP放出率(ゼロ放出)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	ゼロ放出	20
6-15	FP放出率(高放出)	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	高放出	20
6-16	冷却期間	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	30
6-17	冷却期間	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	40
6-18	偏在1	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-19	偏在2	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-20	容器1	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-21	容器2	15vol%	15vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-22	UIJッチ	30vol%	0vol%	0vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-23	金属デブリ	0.075vol%	0.075vol%	29.85vol%	-	30vol%	23	標準	20
6-24	金属デブリ	15vol%	15vol%	30vol%	-	60vol%	23	標準	20
6-25	MCCIデブリ	1.05vol%	1.05vol%	7.2vol%	20.7vol%	30vol%	23	標準	20



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.2.6 宇宙線散乱計測 一解析結果:(1)U重量、充填率

- ・ 燃料デブリ中に含まれるU+TRU量とミュオン散乱の関係評価
- ▶ パラメータ:U含有率、MOX燃料、充填率



- ・ 燃料デブリ中のU+TRU重量の増加に伴いミュオン散乱値が増加
- 同一組成の場合は充填率に伴い散乱値が増加
- UO₂燃料とMOX燃料の差は小さい

IRID
2.2.6 宇宙線散乱計測 -解析結果(2):Gd、B、含水率

- 燃料デブリ中に含まれる各組成の割合による影響評価
- ▶ パラメータ: Gd₂O₃、B₄C、含水率



- ・ 比較的密度の高い Gd₂O₃の割合による影響が大きい
- ・ 密度の低いB₄C、含水率による影響は小さい

IRID

2.2.6 宇宙線散乱計測 -解析結果(3):燃焼度、FP、冷却期間

- 運転条件および冷却条件等による影響評価
- ▶ パラメータ:燃焼度、FP放出率、冷却期間



- 燃焼度、FP放出率、冷却期間の影響は小さい
- 同一元素の同位体の違いによるミュオン散乱への影響は小さい

IRID

2.2.6 宇宙線散乱計測 -解析結果(4):燃料デブリ体積・偏在

- 燃料デブリ体積および位置の偏在による影響評価
- ベースケースと同一組成・重量の条件で異なる体積、密度、位置の影響を評価
- ▶ パラメータ:体積および密度、位置



- 同一重量で体積が異なる場合にミュオン散乱の値が異なる
- 同一体積の場合には位置の違いによる影響は小さい

IRID

2.2.6 宇宙線散乱計測 -解析結果(5):収納容器

- 燃料デブリを収納する容器の違いによる影響評価
- ・ 燃料デブリの組成はベースケースと同条件、充填率は各容器の容積の30%と設定
- ▶ パラメータ:容器形状



ユニット缶、収納缶、廃棄物内容器 (6-1,6-20,6-21)

- 容器の種類が異なる場合でもミュオン散乱角とU+TRU重量に対応して散乱値が増加
- 詳細評価のためには容器ごとのパラメータサーベイが必要

IRID

2.2.6 宇宙線散乱計測 -解析結果(6):燃料デブリの種類

- ・ 燃料デブリの種類(溶融デブリ、Uリッチ、金属デブリ、MCCI)による影響評価
- ▶ パラメータ:燃料デブリ組成



- (6-1, 6-22, 6-23, 6-25)
- 燃料デブリ組成が異なる条件でもU+TRU重量に対応してミュオン散乱値が増加



2.2.6 宇宙線散乱計測 -解析結果(7):参照データの作成

No.185

- ・ 参照データ
 - U重量に対するミュオン散乱角を参照データとして評価
 - UO2のみの均質組成でシミュレーションを実施
- ①体積一定(密度変化によりU量調整):
 - ・ 体積一定(ユニット缶容積)、密度0~10.525[g/cm³]
- ②密度一定(体積変化によりU量調整):
 - 密度一定(10.525[g/cm³])、球形状(半径1~10[cm])



燃料デブリ体積・密度の違いによりU重量に対応するミュオン散乱角が異なる

IRID

2.2.6 宇宙線散乱計測 一解析結果(8):参照データとの比較

• 参照データと解析ケースを比較し全体的な傾向について評価



- UO2単体から評価した参照データと解析ケースの傾向は概ね一致
- Gd、SUSの含有量により散乱値が増加する
- 偏在(体積小、密度大)条件で散乱値が低下する

IRID

2.2.6 宇宙線散乱計測 -まとめ

- 解析から得られた主な知見:
 - ・ 燃料デブリ中の重元素(U+TRU)重量とミュオン散乱値には概ね相関関係が見られる
 - 密度の高いSUSやGd₂O₃により散乱値が増加する
 - 燃料の体積により散乱値が変動する
 - ・ 燃焼度、FP放出率、冷却期間による影響は少ない
- 測定精度の概算(散乱角平均値による一次評価)
 - 計測値のばらつき : ±30%(同一重量の燃料に対して条件により変動)
 - 識別下限 : 2.5kg~5.0kg(Uなし・微小条件でも一定以上の散乱が発生)
- 詳細分析の必要性の検討と技術課題の整理
 - ミュオン散乱角の詳細分析
 - ▶ U、Pu等による散乱と他の物質による散乱の識別方法の検討
 - > ミュオン散乱角分布の解析手法の検討
 - 燃料体積・密度の影響評価
 - ▶ 画像解析による体積評価とデータ解析の組み合わせ等の検討
 - 燃料デブリからの放射線によるセンサーへの影響
 - > センサーの耐放射線性の検証および改善策の検討



No.188

2. 実施内容

(2) 仕分け技術の実機適用を目指した今後の研究開発計画の検討

- ① 仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出
- ② 研究開発の計画(内容、期間、条件)の検討
- ③ 主要工程の到達目標の整理



2.(2)① 仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出(1/9)

【作業手順】

計測法ごとに課題を抽出するため、共通フォーマットを作成。

	✓ 2.(2)②項のどのステップで アクションするかを記載							
燃料	デブリと	:放射性	廃棄物の	の仕分け技術の開発	実用化に向けた技術課題抽出	<u>対象計測技術:1.</u>		注)
No.	原理, 条件等	分類 精度, 効率等	装置, 設備等	項目	内容	対処方針	対応開発 ステップ	備考
1-1								
1-2								
 ✓ 原理, 条件等:計測原理や適用条件などに起因する課題 ✓ 精度, 効率等:解析シミュレーションで判明するような計測精度などの課題 ✓ 特度, 設備等:機器構造、配置、ハンドリングなどに関する課題 ✓ 装置, 設備等:機器構造、配置、ハンドリングなどに関する課題 						た らだけ		

注)対応開発ステップは、このステップで課題解決に着手し、見通しを得ることを表す。



2.(2)① 仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出(2/9)

【作業分担】

- ・計測法ごとに主担当を以下の通り設定(解析の分担に従う)
- ・全体レビューに関してはJAEA含め、各社で実施。

No.	候補となっている計測技術	分担
1	パッシブ中性子線計測技術	日立GE、MHI
2	パッシブガンマ線計測技術	日立GE、MHI
3	アクティブ中性子線計測技術	日立GE、MHI
4	パッシブ・アクティブ中性子・パッシブガンマ線計測技術	MHI
5	X線透過計測(高エネルギX線CT法)	日立GE
6	宇宙線散乱計測(ミュオン散乱法)	東芝ESS



2.(2)① 仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出(3/9)

【抽出結果の整理】

・抽出した課題のうち、「重要な課題」を以下の3つの視点でマーキングした。

(以降の【抽出結果の概要】では、抽出した重要な課題を赤枠 _____ で示している。)

分類	重要課題とした視点	抽出例
A	原理的な課題 一世界に前例がない	計測値から核物質量を推定するアルゴリ ズムの構築
В	解決に時間を要する課題	試験まで実施しないと解決できない課題
С	仕分け技術開発の範囲を超える 課題	燃料デブリ性状が不明であり、開発の前 提条件の不確定性が大きい。これらが判 明した際の新知見により発生しうる課題



2.(2)① 仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出(4/9)

No.192

【抽出結果の概要】

[対象計測法]: 1.~4. パッシブ・アクティブ中性子・パッシブガンマ

- 2.(1)解析的評価により、影響因子によっては、計測法を組合わせることで仕分け計測の可能性を確認
- 1~3の計測技術を組合せた計測概念を想定し、解決が必要となる個々の計測法(1, 2, 3)の課題に加えて、
 組合せ計測法(4)の技術課題を整理
 - 1. パッシブ中性子線計測技術
 - 2. パッシブガンマ線計測技術
 - 3. アクティブ中性子線計測技術
 - 4. パッシブ・アクティブ中性子・パッシブγ線計測技術



IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.(2)① 仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出(5/9)

No.193

注)

【抽出結果の概要】

[対象計測法]: 1.~4. パッシブ・アクティブ 中性子・パッシブ ガンマ

個々の計測法(1,2,3)で抽出された技術課題の中から重要な課題を整理

No.	項目	内容	対応方針	対応開発 ステップ	
1-3	測定値から評価値 への換算法	Cm244とUの帯同性が不明	燃料デブリのサンプリング分析による 帯同性の確認を分析者に依頼	2-① _C	
1-10	アルゴリズム (核物質量の推定)	燃焼度が異なる燃料が混合して いる場合に、Cm244実効質量から U/Pu量へ変換方法は未確立	3次元核種インベントリデータの燃料デブリ組 成の混合シミュレーションで、自発核分裂中 性子の発生数とU/Pu量の相関を検討	2-③ А, в	
1-13 3-11	シミュレーションの 精度確認	シミュレーションの課題や予測精 度が把握できていない	模擬デブリ試験による予測精度確認、 キャリブレーションの実施	2-⑤ B	
1-14 2-15 3-14	校正試験	実際の体系、内容物、線源強度 を模擬した校正試験の実施は困 難	模擬的な校正試験を実施し、シミュレー ションによる校正曲線の妥当性を評価	2-(5) В	
2-2	測定値から評価値 への換算法	Eu154とUの帯同性が不明	燃料デブリのサンプリング分析による 帯同性の確認を分析者に依頼	2-① _C	
2-12	自己遮蔽効果の 補正	ガンマ線の自己遮蔽効果は燃料 デブリ(密度、U量、偏在等)に依存 し多様	Eu154等から放出される複数のγ線エネル ギの全吸収ピークを利用し、シミュレーション で自己遮蔽補正の方法を検討	2-③ А, в	
3-1	計測誤差の低減 (中性子吸収材)	DDA(FNDI)法は、一定以上の中性 子吸収材が含まれていると核分 裂成分が観測できなくなる	GdとBを用いた模擬試験による適用範 囲の確認または即発ガンマ線法等の導 入検討	2-① 2-⑤ А, в	
ステップ2(計測概念/シナリオ構築) ステップ3(基本設計・ソフト開発) ステップ4(試作・総合検証試験) ①性能目標値の検討 ④仕分けシナリオの再検討 ①装置の基本設計 ①計測装置試作 ②解析による装置概念構築 ⑤要素技術確認試験 ②ソフトウェア開発 ②実証試験(ホット等)、改良 ③核燃料物資等の評価手法検討 ③要素技術確認試験(継続実施) ③					

▶ 注)対応開発ステップは、このステップで課題解決に着手し、見通しを得ることを表す。 ^{©Internation}

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.(2)① 仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出(6/9)

No.194

【抽出結果の概要】

[対象計測法]: 1.~4. パッシフ・アクティフ・中性子・パッシフ・ガンマ

No.	項目	内容	対応方針	対応開発 ステップ	
4-1	計測セル	中性子計測とパッシブγ計測での セル統合又はセル分割	統合による配置合理化/分割による処 理時間短縮の比較評価	2-2	
4-2	検出器配置の最適 化	中性子発生装置、検出器、遮蔽 体、減速材などの合理的配置	計測対象側を動かして、順番に計測す るプロセスで装置を構成	2-② (2-⑤)	
4-3	耐放射線性	検出器、電子機器、ケーブル等の ・耐放射線性の高い部材、機器の使用 ・遮蔽体の設置		2-② (2-①、2-⑤)	
4-4	性能評価解析	有効信号/妨害信号の最も厳しい 条件での性能評価	性能評価解析により計測範囲と性能 (精度、計測時間等)を評価	2-② (2-①、2-⑤)	
4-5	アルゴリズム	汎用的、万能なアルゴリズム構築 が困難	測定対象のカテゴライズにより、専用ア ルゴリズムを適用	2-③ А, В	
4-6	DDA法以外の計測 手法検討	本年度検討したDDA法以外の手 法による計測精度向上の可能性	PGA法の導入を検討	2-③ А, В	
4-7	中性子の核反応に より発生するγ線	中性子の核反応により発生するγ 線に配慮した設計が必要	シミュレーションと試験の比較による現 象の把握	2-②、2-③、 2-⑤ в	
4-8	汚染蓄積	漏洩した燃料デブリの蓄積による 検知感度の低下	・密閉容器による計測 ・装置内の除染が可能な設計	3-①以降	
4-9	保守性	多数となる検出器の保守性向上	セル外から直接保守が出来る構造	3-①以降	
ステップ2(計測概念/シナリオ構築) ステップ3(基本設計・ソフト開発) ステップ4(試作・総合検証試験) ①性能目標値の検討 ④仕分けシナリオの再検討 ①装置の基本設計 ①計測装置試作 ②解析による装置概念構築 ⑤要素技術確認試験 ②ソフトウェア開発 ②実証試験(ホット等)、改良 ③核燃料物資等の評価手法検討 ③要素技術確認試験(継続実施) ●					

1RID 注)対応開発ステップは、このステップで課題解決に着手し、見通しを得ることを表す。 ©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.(2)① 仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出(7/9)

No.195

【抽出結果の概要】

[対象計測法]: 5. X線透過計測(高エネルギX線CT法) 1/2

No.	項目内容		対応方針	対応開発 ステップ
5-1	計測原理	・従来のX線透過計測では密度情報 しか得られないため、核燃料と構造 物(鉄, コンクリート)等の物体を識別 し, 核燃料物質量を評価可能な計測 方法の検討が必要。	・異なるX線エネルギーを用いたX線透 過計測により、核燃料と構造物(鉄,コ ンクリート)等の物体を識別できる可能 性があるため,同計測方法について検 討する。	2-1) 2-2) 2-3) 2-5)
5-2	空間分解能等の 影響	・空間分解能未満のサイズの核燃料 はCT値から識別が困難である。	・鉄あるいはコンクリートのみの場合に おけるCT値からの上昇分をもとに、核 燃料の混入量を算出する方法を検討 する。	2-(1) 2-(2) 2-(3) 2-(5) _{А, В}
5–3	高線量率ガンマ線 ノイズ影響	・燃料デブリの線量率は幅広く変化 するため、画像のS/Nが劣化し計測 精度が悪化する可能性がある。	・ガンマ線の線量率を低減するために 検出器前に設置する遮蔽体の必要性 を検討する。	2-(1) 2-(2)
5–4	核物質量の推定 アルゴリズム	・異なるX線エネルギーを用いたX線 透過計測値から核物質を推定する アルゴリズムが必要。 ・他計測手法との組合せによる推定 アルゴリズムが必要。	 ・各物質とCT値の関係を事前評価しておき、CT値から核物質を識別する。 ・他計測手法による核物質量の推定において、阻害因子となる鉄、コンクリート、中性子吸収剤等の分布情報をCT計測値により提供し、評価する方法を検討する。 	2—③ 3—② А, в

注)対応開発ステップは、このステップで課題解決に着手し、見通しを得ることを表す。



2.(2)① 仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出(8/9)

No.196

【抽出結果の概要】

[対象計測法]: 5. X線透過計測(高エネルギX線CT法) 2/2

No.	項目	項目 内容 対応方針		対応開発 ステップ
5-5	バックグラウンド 放射線の低減	・バックグラウンドが大きいほど、目 的核種の検出時間を要し、また検出 下限値が悪化する可能性がある。	・加速器X線はバックグラウンドの線量 率より高いため、X線の外部漏洩を防 止する既存装置の遮蔽体を併用する ことを検討する。	2-(1) 3-(1) 4-(1)
5-6	汚染蓄積	・測定した際に容器から漏れた燃料 デブリが装置内に蓄積する可能性が ある。	・密閉された容器を使用する。 ・装置内で除染が可能な設計とする。	4-①
5-7	耐放性(γ線)	・計測セル近傍の検出器、電子機器、 ケーブルには照射劣化を生じること が予想される。	・加速器X線は燃料デブリの線量率よ り高いため、遮蔽体等は既存装置の 設計を使用可能である。	3-1) 4-1)
5-8	耐放性(中性子)	・自発核分裂中性子により検出器の 劣化が促進することが予想される。	・遮蔽体の設置の必要性を検討する。	3-1 4-1
5–9	保守性	・保守時を想定し、装置周辺の遮蔽 体のハンドリングが必要である。	・セル外からの直接保守ができるよう にする等の可能性を検討する。 ・線源,検出器等の保守性を確保する 等の対応が必要である。	3-(1) 4-(1)
5-10	日常点検	・経年劣化や偶発故障の監視、及び 正確な計測のために、日常的に校正 が必要である。	・平常運転時で、燃料デブリを設置せ ずに10~15秒間計測し、装置状態を 監視する実績がある。	4-(1)

注)対応開発ステップは、このステップで課題解決に着手し、見通しを得ることを表す。

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.(2)① 仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出(9/9)

No.197

【抽出結果の概要】

[対象計測法]: 6. 宇宙線散乱計測(ミュオン散乱法)

No.	項目	内容	対応方針	対応開発 ステップ			
6-1	U量の推定	ミュオン散乱分布からU量を評価する 手法の開発。	・ミュオン散乱分布からU量との相関性の強い統計値、関数等を選定。 ・他の計測値との組み合わせによるU 量推定精度の向上方法の検討。	2-③ 2-⑤ 3-① A			
6-2	燃 料 デブリ由 来 バックグラウンド	燃料デブリから発生する放射線(主 にガンマ線)が検出器中のセンサー に入射し、ミュオンに対する不感時間 を生じる。	・測定条件によるガンマ、中性子の線 束を評価し、バックグラウンド低減効果 を評価。	2-(1) 2-(2) 2-(5) _В			
6-3	検出器配置	燃料デブリ由来のバックグラウンドを 低減するためにはサンプルと検出器 の間の距離を大きくする必要がある が、検出器間距離が大きくなるほど ミュオン計数率が低下する。	・検出器配置とバックグラウンドの計数 率およびミュオン計数率の関係を評価。 ・バックグラウンドを十分に低減できる 測定体系の検討。	2-(2) 2-(4) 3-(1)			
6-4	遮蔽	燃料デブリ由来のバックグラウンドを 低減するためにはサンプルを遮蔽で 覆う必要があるが、遮蔽が大きいほ どミュオン散乱角の測定精度が低下 する。	・遮蔽量とバックグラウンドの計数率お よびミュオン散乱角の測定精度の関係 を評価。 ・バックグラウンドを十分に低減できる 遮蔽厚の検討。	2-2) 2-4) 3-1)			
6-5	検出器仕様	検出器は多数のセンサーで構成され、 個々のセンサーはガンマ線入射後一 定時間が不感時間となる。個々のセンサーを小型化することでガンマ線 計数率を下げることが可能だが、コ ストが増加する。	・バックグラウンド条件に対応したセン サーサイズおよび性能の検討。	2-2 2-5 3-1 3-2			
6-6	燃料デブリ形状に よる計測値の変動	組成および重量が同じ燃料デブリで も形状の違いにより計測値が変動す る	・ミュオン散乱角の空間分布から燃料 デブリ形状を推定し、計測値を補正す る手法を検討。	2-3 3-2 A			
	注)対応開発ステップは、このステップで課題解決に着手し、見通しを得ることを表す。						

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

No.198

2. 実施内容

(2) 仕分け技術の実機適用を目指した今後の研究開発計画の検討

- ① 仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出
- ② 研究開発の計画(内容、期間、条件)の検討
- ③ 主要工程の到達目標の整理



2.(2)② 研究開発の計画(内容, 期間, 条件) (1/11)	No.19
【開発ステップと研究開発項目】 [対象計測法]: 1.~4. パッシブ・アク	ティブ中性子・パッシブガン
 (ステップ1) 計測のフィージビリティスタディ(可能性の分析) ← 本年度研究 ① 計測目的、対象(形状,密度等)設定 ② 核物質→検出器への入射放射線挙動の評価 ③ 計測概念に資する技術課題の抽出等 	
(ステップ2)計測概念の構築および想定シナリオの再評価	抽出した課題との対応
① 仕分けに必要な性能目標値の検討 計測装置の性能目標値(計測時間、装置サイズ、検出下限、誤差、耐放性等を設定	1-3、2-2、3-1、4-3、4-4
② 検出器応答解析による装置概念の構築 (2年程度) 検出器モデルを含めた解析シミュレーションを行い、装置概念の構築、性能を評価	4-1、4-2、4-3、4-4、4-7
③ 計測量に基づく核燃料物資等の評価手法の検討 (2年程度) 計測値から核燃料物質量等を算定する評価手法を構築(計測技術の組合せを含む)	1-10、2-12、4-5、4-6、4-7
④ 仕分けシナリオの再検討 (2年程度で仮設定+①~③後にアップデート) 適用可能性のある仕分け/分別のシナリオ・計測装置の適用場所等を検討	
⑤ 既存装置等を用いた要素技術確認試験 (3年程度:許認可除く) 既存の非破壊計測装置等を用いた要素技術確認試験による適用可能性の確認	1-13、1-14、2-15、3-1、3-11、 3-14、4-2、4-3、4-4、4-7
(ステップ3)基本設計・ソフト開発	
 ① 装置の基本設計 	
② 核物質量推定のためのソフトウェア開発	4-8,4-9
③ 要素技術確認試験(継続実施)	
(ステップ4)試作・模擬線源等を用いた総合検証試験(ホットラボ等を用いた実証試験)	
① 計測装置試作	
 ② 組成が既知の使用済み燃料または実燃料デブリを使用した実証試験 ⇒ 核物質量の推定ソフトウェアの改良 ⇒ 検出器配置の改良, 誤差評価 	

(ステップ5)実機製作 ⇒ 実運用 IRID



2.(2)② 研究開発の計画(内容,期間,条件)(2/11)	No.200
【開発ステップと研究開発項目】 [対象計測法]: 5. X線透過計測(「高エネルギX線CT法)
(ステップ1) 計測のフィージビリティスタディ (可能性の分析) ← 本年度研究	
① 計測目的、对象(形状, 密度等)設定 ② 核物質→検出器への入射放射線挙動の評価	
③計測概念に資する技術課題の抽出等	
(ステップ2)計測概念の構築および想定シナリオの再評価	抽出した課題との対応
 仕分けに必要な性能目標値の検討 計測装置の性能目標値(計測時間、装置サイズ、検出下限、誤差、耐放性等を設定 	5-1, 5-2, 5-3, 5-5
② 検出器応答解析による装置概念の構築 (2年程度) 検出器モデルを含めた解析シミュレーションを行い、装置概念の構築、性能を評価	5-1, 5-2, 5-3
③ 計測量に基づく核燃料物資等の評価手法の検討 (2年程度) 計測値から核燃料物質量等を算定する評価手法を構築(計測技術の組合せを含む)	5-1, 5-3, 5-4
④ 仕分けシナリオの再検討 (2年程度で仮設定+①~③後にアップデート) 適用可能性のある仕分け/分別のシナリオ・計測装置の適用場所等を検討	
⑤ 既存装置等を用いた要素技術確認試験 (3年程度:許認可除く) 既存の非破壊計測装置等を用いた要素技術確認試験による適用可能性の確認	5-1, 5-3
(ステップ3)基本設計・ソフト開発	
 (1) 装置の基本設計 	5-5, 5-7, 5-8, 5-9
② 核物質量推定のためのソフトウェア開発	5-4
③ 要素技術確認試験(継続実施)	
(ステップ4)試作・模擬線源等を用いた総合検証試験(ホットラボ等を用いた実証試験)	
① 計測装置試作	5-5, 5-6, 5-7, 5-8, 5-9, 5-10
 ② 組成が既知の使用済み燃料または実燃料デブリを使用した実証試験 ⇒ 核物質量の推定ソフトウェアの改良 ⇒ 検出器配置の改良, 誤差評価 	

(ステップ5)実機製作 ⇒ 実運用



2.(2)②研究開発の計画(内容,期間,条件)(3/11)	
【開発ステッノと研究開発項日】 【対家計測法】: 6. 宇宙線散乱計 (ステップ1)計測のフィージビリティスタディ(可能性の分析) ← 本年度研究 ① 計測目的、対象(形状,密度等)設定 ② 核物質→検出器への入射放射線挙動の評価 ③ 計測概念に資する技術課題の抽出等	測(ミュオン散乱法)
(ステップ2)計測概念の構築および想定シナリオの再評価	抽出した課題との対応
 仕分けに必要な性能目標値の検討 計測装置の性能目標値(計測時間、装置サイズ、検出下限、誤差、耐放性等を設定 	6-2
② 検出器応答解析による装置概念の構築 (2年程度) 検出器モデルを含めた解析シミュレーションを行い、装置概念の構築、性能を評価	6-2, 6-3, 6-5
③ 計測量に基づく核燃料物資等の評価手法の検討 (2年程度) 計測値から核燃料物質量等を算定する評価手法を構築(計測技術の組合せを含む)	6-1, 6-6
④ 仕分けシナリオの再検討 適用可能性のある仕分け/分別のシナリオ・計測装置の適用場所等を検討	6-3, 6-4
⑤ 既存装置等を用いた要素技術確認試験 (3年程度:許認可除く) 既存の非破壊計測装置等を用いた要素技術確認試験による適用可能性の確認	6-1, 6-2, 6-5
(ステップ3)基本設計・ソフト開発	
 装置の基本設計 	6-1, 6-3, 6-4, 6-5
② 核物質量推定のためのソフトウェア開発	6-5, 6-6
(ステップ4)試作・模擬線源等を用いた総合検証試験(ホットラボ等を用いた実証試験)	
①計測装置試作	
 ② 組成が既知の使用済み燃料または実燃料デブリを使用した実証試験 ⇒ 核物質量の推定ソフトウェアの改良 ⇒ 検出器配置の改良, 誤差評価 	

(ステップ5)実機製作 ⇒ 実運用



2.(2)②研究開発の計画(内容,期間,条件)(4/11)

【仕分け判定基準の考え方】

●仕分け分類と判定基準(現状の考え方を整理した暫定案)

		判定基準(暫定)				
仕分け分類	仕分けの主な目的	(右記のい ずれも満 足しない)	*1 燃料デブリ中の U-235濃度: 1.5wt%相当の 反応度以下	*2 核物質量が 3.7kg/容器 以下	核物質量が、 核物質防護対 象、保障措置 終了となる量 (未定)以下	
a:収納缶 (内径220mm、高さ約1m)		0	_	_	_	
b:緩和型収納缶 (内径400mm)	 ● 取り出しスループットの向上 ● 燃料デブリ保管規模の縮小 	_	0	_	_	
c:廃棄物保管容器 (管理レベル)	臨界安全の確保	_	_	0	_	
d:廃棄物保管容器 (汚染レベル)	廃棄物の保管・管理の合理化	_	_	0	0	
	*1: 収#	納缶PJの過去の言	評価で、燃料デブリが全てし	J-235とU-238で構成	式されると仮定した場合に	

*1:収納缶PJの過去の評価で、燃料テフリが全てU-235とU-238で構成されると仮定した場合に、 燃料デブリに占めるU-235の重量割合が1.7wt%程度以下であれば、内径400mmの収納缶が 適用できるという結果が得られていることから、この1.7wt%に余裕を見込んで1.5wt%と設定 *2:保管時の配置・段積み等を考慮して、最小臨界量(約30kg)を8個の廃棄物保管容器で等分 して設定

```
ステップ2でアップデートしていく
```



2.(2)②研究開発の計画(内容,期間,条件)(5/11)

(ステップ2) 計測概念の構築および想定シナリオの再評価

① 仕分けに必要な性能目標値の検討(1年程度で仮設定+②~④後にアップデート)
 仕分けのための計測概念、仕分けシナリオの検討を進めるため、計測装置の性能
 目標値を設定

- >仕分けのための計測概念、仕分けシナリオの検討を進めるため、燃料デブリ取り出し工程に おける計測場所(前処理建屋、貯蔵施設など)や対象容器に応じて、計測装置の性能目標値 を仮設定する。
- ▶設定する性能目標の例は以下の通りである。
 - 計測量、評価量
 - 検出下限、誤差、計測時間
 - 耐放性、装置サイズなど
- ▶この性能目標(仮)は、1年程度で1次案を仮設定し、②~④の検討後に検討成果を反映して④ とともにアップデートする。



2.(2)②研究開発の計画(内容,期間,条件)(6/11)

(ステップ2) 計測概念の構築および想定シナリオの再評価

② 検出器応答解析による装置概念の構築(2年程度)

検出器モデルを含めた解析シミュレーションを行い、装置概念の構築、性能を評価

- ▶2021年度で検討した単独の計測技術に対し、①の目標値(仮)と2021年度で抽出された各技術の課題を踏まえて、検出器モデルを含めたモンテカルロシミュレーションを行い、装置概念の試案を提案する。
- ➤ここの検出器モデルは、実機想定体系とし、合理的な検出器、中性子減速材、γ線遮蔽材などの配置、耐放射線性などを考慮する。
- ▶この装置概念に対し、代表的な燃料デブリの共通ケースの他、各計測技術毎に2021年度抽出 課題に基づく燃料デブリ条件を中心に、装置概念の性能評価を行う。
- ▶ここの性能評価は、評価量ではなく各手法の直接的測定量(例えばパッシブ中性子法の場合のCm244実効質量など)とする。



2.(2)②研究開発の計画(内容,期間,条件)(7/11)

(ステップ2) 計測概念の構築および想定シナリオの再評価

③ 計測量に基づく核燃料物質量等の評価手法の検討(2年程度) 計測量から評価したい量(核燃料物質量等)を評価する手法を検討

- ▶②で検討した装置概念について、計測量から評価したい量または特性を導出する手法の検討 を行い、試案を作成する。
- ▶評価したい量または特性とは、U量を基本とするが、各計測技術の幅広い可能性(仕分けシナ リオの幅広い可能性)を見い出すため、Pu量、Fissile量、同位体組成、水分量、臨界リスクに 関わる指標などとし、相対値を含む仕分けや核燃料物質管理に応用可能と考えられる評価量 を検討するものとする。
- ▶導出する手法とは、計測対象物の条件による計測量の変化特性や計測量と評価量の関係性に基づく、評価量推定のための専用アルゴリズムやパラメータ設定のことで、必要に応じて複数の計測技術を組合せることとする。
- ▶本検討においては、必要な場合には試解析や調査などを行う。



2.(2)②研究開発の計画(内容,期間,条件)(8/11)

(ステップ2) 計測概念の構築および想定シナリオの再評価

④ 仕分けシナリオの再検討 (2年程度で仮設定+①~③後にアップデート) 適用可能性のある仕分け/分別のシナリオを検討し、候補案を提案

- ▶ 燃料デブリの取り出しから保管までのプロセスにおいて、①~③の検討結果を踏まえて可能 性のある仕分け/分別のシナリオを検討し、候補案を提案する。
- ▶本検討においては燃料デブリや廃棄物の福島第一原子力発電所での管理の現実性/合理性と、提案する技術の実現性の双方を考慮し、計測場所、計測技術(複数の組み合わせも可)、計測量、管理への利用法等についてまとめるものとする。
- ▶2年程度で1次案を仮設定し、①~③の検討後に検討成果を反映して①とともにアップデートする



2.(2)②研究開発の計画(内容,期間,条件)(9/11)

(ステップ2) 計測概念の構築および想定シナリオの再評価

- ⑤ 既存装置等を用いた要素技術確認試験(3年程度:許認可除く) 既存の非破壊計測装置等を用いた要素技術確認試験による適用可能性の確認
 - >シシミュレーション及び予備的な試験の実施(候補となる既存装置は次頁参照)により、今後の実 核燃料物質の測定を想定し、既存の非破壊計測装置または小型の新設装置の使用を想定し た要素技術確認のための試験を実施する。
 - ▶ 2022年度は上記の試験計画を策定する(TMI-2デブリ測定の検討を含む)。また、要素技術確認試験の実施に向けて必要な許認可の検討を行う。



2.(2)②研究開発の計画(内容,期間,条件)(10/11)

No.208

- (ステップ2)計測概念の構築および想定シナリオの再評価 [対象計測法]: 5. X線透過計測(高エネルギX線CT法)
 - ①仕分けに必要な性能目標値の検討

(1年程度で仮設定+②~④後にアップデート)

- 計測装置の性能目標値
- -計測時間
- -装置サイズ
- 検出下限、誤差、耐放性等を設定
- ② 検出器応答解析による装置概念の構築 (2年程度) 検出器モデルを含めた解析シミュレーションを行い、装置概念の構築、性能を評価 -異なるX線エネルギーを用いたX線透過計測方法について、解析による評価を実施し、適用可能性を検討 -燃料デブリ由来のガンマ線を低減する遮蔽等について、解析による評価を実施し、必要性を検討 -空間分解能未満のサイズとなる核燃料等の混入量を評価する方法を、解析により検討
- ③ 計測量に基づく核燃料物資等の評価手法の検討(2年程度) 計測値から核燃料物質量を算定する評価手法を構築 -X線透過計測単体および他の計測方法との組み合わせ等を,解析により検討 -②および計測方法組合せ等の検討結果を踏まえ,核燃料物質量を推定・評価するアルゴリズムを検討
- ④ 仕分けシナリオの再検討 (2年程度で仮設定+①~③後にアップデート) 適用可能性のある仕分け/分別のシナリオ・計測装置の適用場所等を検討
 -燃料デブリや廃棄物の福島第一原子力発電所での管理の現実性/合理性と、提案する技術の実現性の双方を 考慮し、計測場所、計測技術(複数の組み合わせも可)、計測量、管理への利用方法等についてまとめ、 仕分けシナリオを再構築
- ⑤ 既存装置等を用いた要素技術確認試験 (3年程度:許認可除く) 既存の非破壊計測装置等を用いた要素技術確認試験による適用可能性の確認 -異なるX線エネルギーの照射が可能な既存のX線透過計測装置により、模擬燃料デブリ(コールド) 試験体を用いた試験を実施し、燃料デブリへの適用性を確認



2.(2)②研究開発の計画(内容,期間,条件)(11/11)

No.209

- (ステップ2) 計測概念の構築および想定シナリオの再評価 [対象計測法]: 6. 宇宙線散乱計測(ミュオン散乱法)
 - ①仕分けに必要な性能目標値の検討

(1年程度で仮設定+②~④後にアップデート)

計測装置の性能目標値

-計測時間

-装置サイズ

- ー検出下限、誤差、耐放性等を設定
- ② 検出器応答解析による装置概念の構築 (2年程度) 検出器モデルを含めた解析シミュレーションを行い、装置概念の構築、性能を評価
- 検出器モデルを含めたシミュレーションモデル作成
- 検出器配置、遮蔽等によるバックグラウンド計数率とミュオン計数効率の関係を評価
- 測定条件に対応した検出器要求仕様の検討
- ③ 計測量に基づく核燃料物資等の評価手法の検討(2年程度) 計測値から核燃料物質量を算定する評価手法を構築
- ミュオン散乱分布および他の計測値の組み合わせ等によるU量評価手法の検討
- ミュオン散乱角の空間分布解析による画像化および燃料デブリ形状に応じた補正手法の開発

④ 仕分けシナリオの再検討 適用可能性のある仕分け/分別のシナリオ・計測装置の適用場所等を検

- 他の手法との組み合わせ・分担等の検討
- 燃料デブリ仕分けシナリオ全体での本手法の最適化・立ち位置の検討
- ⑤ 既存装置等を用いた要素技術確認試験 (3年程度:許認可除く) 既存の非破壊計測装置等を用いた要素技術確認試験による適用可能性の確認
- 既存のミュオン測定施設を用いたサンプル測定試験
- 回路等の要素技術の開発および既存施設との組み合わせ試験



No.210

2. 実施内容

(2) 仕分け技術の実機適用を目指した今後の研究開発計画の検討

- ① 仕分け技術の実用化に向けた技術課題の抽出
- ② 研究開発の計画(内容、期間、条件)の検討
- ③ 主要工程の到達目標の整理



2.(2/3) 土安工性の判定日	「示しノ	正壮		
【開発工程案】			[対象計測法]: 1.~4. /	ペッシブ・アクティブ中性子・パッシブガンマ
項目	2020	2021	短期(~2024)	中長期(2025~)
キーデート			シナリオ設定と中長期 計画のアップデート	規模を拡大した取り出し ▽
ステップ1(計測FS)			∇ ∇	1
ステップ2(計測概念/シナリオ構築) ①性能目標値の検討 ②解析による装置概念構築 ③核燃料物資等の評価手法検討 ④仕分けシナリオの再検討 ⑤要素技術確認試験				
ステップ3(基本設計・ソフト開発) ①装置の基本設計 ②ソフトウェア開発 ③要素技術確認試験(継続実施)				
ステップ4(試作・総合検証試験) ①計測装置試作 ②実証試験(ホット等)、改良			ステップ2での見通しが 得られた段階で、ステッ プ3に着手	
ステップ5(実機製作) ①実機設計 ②実機製作・据付・試験			評価手法改良に反映	運用開始 実燃料デブリ
ステップ2の到達目標				│ 分析結果 ////////////////////////////////////
は、2.(2)(2)を参照		ディ	Л ЯХРЈ	立 机設備
IRID				©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2(2)③ 主亜工程の到達日煙の敷理 (1/2)

No.211

2.(2)③ 主要工程の到達目標の整理(2/3)

【開発工程案】

[対象計測法]: 5. X線透過計測(高エネルギX線CT法)

項目	2020	2021	短期(~2024)	中長期(2025~)
キーデート			シナリオ設定と中 計画のアップデ	□長期 [•] ート	規模を拡大した取り出し ▽
ステップ1(計測FS)			∇ ∇	7	Ť
ステップ2(計測概念/シナリオ構築) ①性能目標値の検討 ②解析による装置概念構築 ③核燃料物資等の評価手法検討 ④仕分けシナリオの再検討 ⑤要素技術確認試験					
ステップ3(基本設計・ソフト開発) ①装置の基本設計 ②ソフトウェア開発 ③要素技術確認試験(継続実施)					
ステップ4(試作・総合検証試験) ①計測装置試作 ②実証試験(ホット等)、改良			ステップ2での見通しが 得られた段階で、ステッ プ3に着手		
ステップ5(実機製作) ①実機設計 ②実機製作・据付・試験			取り出し条件	平価手法 :良に反映 実燃料デブリ	運用開始 運用(改良)
ステッノ2の到達日標 は、2.(2)②を参照		デフ	↓等の調整 ブ取PJ	│ ^{分朳結朱} 分析設備	



©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

2.(2)③ 主要工程の到達目	隆理(3/3)		No.213	
【開発工程案】		[対象計測	J法]: 6. 宇宙線散乱計	測(ミュオン散乱法)
項目	2020	2021 短期(~20	024) 中長	:期(2025~)
キーデート		シナリオ 計画の	設定と中長期 アップデート	規模を拡大した取り出し ▽
ステップ1(計測FS)			∇	
 ステップ2(計測概念/シナリオ構築) ①性能目標値の検討 ②解析による装置概念構築 ③核燃料物資等の評価手法検討 ④仕分けシナリオの再検討 ⑤要素技術確認試験 				
ステップ3(基本設計・ソフト開発) ①装置の基本設計 ②ソフトウェア開発				
ステップ4(試作・総合検証試験) ①計測装置試作 ②実証試験(ホット等)、改良		ステップ2での 得られた段階 プ31-美手	9見通しがで、ステッ	
ステップ5(実機製作) ①実機設計 ②実機製作・据付・試験		取り出し条件等の調整	評価手法改良に反映	運用開始 運用(改良)
ステップ2の到達目標 は、2.(2)②を参照		↓ デブ取PJ	分析設備	実燃料デブリ 分析結果

IRID

©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

3. まとめ

本事業の達成度:

既存技術を適用できない領域において、解析シミュレーションにより、今後の研究開発計画に 資する要求仕様を設定するための課題を抽出した。

1) 候補となっている計測技術の計測誤差に影響を与えるパラメータの解析的評価

①解析シミュレーション	・各因子の変動幅に対する計測面に向かう計測線束等の変化の関係から、 計測技術毎に各因子の計測誤差に与える影響の強さ等を分析評価し、影響の大小を整理した(TRL:レベル2)			
②詳細分析の必要性の検討と 技術開発課題の整理 ^{※1}	解析結果を踏まえ、更なる詳細解析の必要性と計測誤差の低減に向けた 課題を抽出した			
2)実機適用を目指した今後の研究開発計画の検討				
①仕分け技術の実用化に向 けた技術課題の抽出 ^{※1}	・2019年度に実施した仕分けのための計測技術調査及び計測誤差に影響を 与えるパラメータの解析的評価により抽出される技術課題を踏まえ、仕分け に必要な計測技術の検討課題を抽出した。			
②仕分け技術開発の主要エ 程の到達目標の整理 ^{※1}	 ・前項で抽出した技術課題解決のための研究開発内容、開発手順、開発期間を検討するとともに、研究開発計画の検討において必要となる前提条件や判定基準の考え方を整理した。 ・採用技術の絞り込みを踏まえ、仕分け技術の構築を目指した主要工程の到達目標を整理した。 			

※1:技術開発課題の抽出・整理、到達目標の整理等は開発項目とは異なるため、技術成熟度(TRL)は設定していない。

