

令和4年度開始 廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金
「燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発
(仕分けに必要な燃料デブリ等の非破壊計測技術の開発)」

最終報告

2023年10月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

令和4年度報告(中間報告)からの修正/新規
追加頁(R5年度実施分の記載):

No.13 (一部修正)

No.253～257 (新規追加)

No.260 (一部修正)

No.291 (一部修正)

No.301 (新規追加)

No.306 (新規追加)

全体目次

1. まえがき
2. 研究計画
3. 実施スケジュール
4. 研究内容および成果
5. まとめ

添付-1 技術用語の補足説明

添付-2 今後の課題(令和3年度報告分)

1. まえがき

1.1 研究の背景・目的

1.2 目標

【目的】

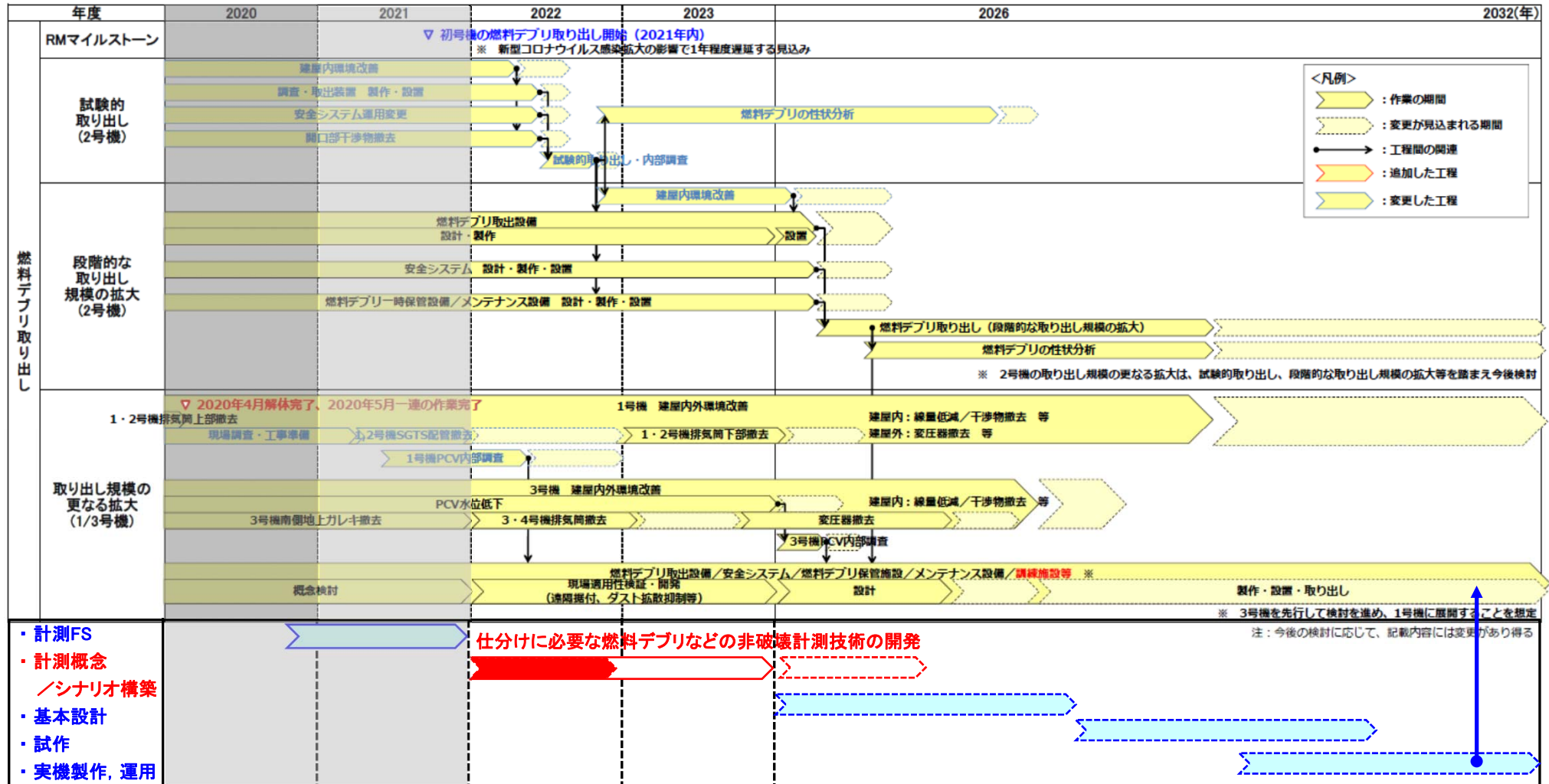
- 福島第一原子力発電所の廃止措置において、原子炉格納容器内部から取り出された物体のすべてを燃料デブリとして取り扱うことは必ずしも合理的ではない。
- 取り出された物体に含まれる核燃料物質の量を計測してその計測結果を基準として**燃料デブリと放射性廃棄物に仕分けすることができれば、燃料デブリの取り出しから保管までの作業の合理化が期待**できる。
- 先行の廃炉・汚染水対策事業において、核燃料物質の量を計測できる可能性のある**計測技術の候補**が選定され、原子炉格納容器内から取り出された物体中に含まれる核燃料物質以外の物質質量や収納缶内の充填状況などに起因する計測誤差の因子類が計測誤差に与える影響をシミュレーションにより分析、評価されている。
- しかし、検出器応答など計測装置の特性が模擬できておらず、計測装置による計測量から核燃料物質質量を推定、評価する手法の検討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(以下の*1)を念頭に、検出器応答解析によって**装置概念を構築**し、計測量に基づく**核燃料物質質量などの評価手法**を検討しておくことは、今後、仕分け技術を確立していくうえで必須である。
 - (*1) **アクティブ中性子法、パッシブ中性子法、ミュオン散乱法、X線CT法、パッシブガンマ線法**
- また、シミュレーションによる分析、評価のみで、計測における全ての現象を再現して、全ての課題を顕在化させることはできないため、実験的に確認することが重要であり、そのための**要素技術確認試験の計画**を検討しておくことも必須である。
- さらに、これらの検討を進めるうえで、研究開発の最終的な目標到達地点や成果適用のあるべき姿を常に念頭においておくことが重要であり、そのために仕分けに必要な**性能目標値および仕分けシナリオ**を最新のニーズおよびシーズの両面から検討しておくことも必須である。
- 以下の項目について、技術開発を実施する。
 - ① 検出器などを模擬した非破壊計測技術の解析的評価と計測装置概念の検討
 - ② 核燃料物質質量などの評価手法と仕分けシナリオの検討
 - ③ 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

【開発全体の目的】 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するために必要な燃料デブリなどの非破壊計測技術の開発**

1.1 研究開発の背景・目的(2/2)

燃料デブリと放射性廃棄物に仕分けるために必要な燃料デブリなどの非破壊計測技術は、燃料デブリの取り出し規模の更なる拡大に向け、以下の工程で開発する。

(廃炉研究開発計画※1の下段に「燃料デブリなどの非破壊計測技術の開発工程」を追加)



※1 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合 第98回事務局会議資料3-4 燃料デブリ取り出し準備より引用

1.2 目標

本事業の実施項目および目標は以下の通り。

(実施項目番号は本資料の章番号で記載。実施項目の概要は、No.8～10に記載。)

4.1 検出器などを模擬した非破壊計測技術の解析的評価と計測装置概念の検討

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討	・燃料デブリと廃棄物の仕分けに適用する非破壊計測装置の性能目標値について、仕分けの成立性に影響する装置性能を整理し、それらの目標値を設定していること。(*1)
4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築	・5種類の候補技術(*2)を利用した非破壊計測装置の概念を設定していること。(終了時目標TRL:レベル3)

4.2 核燃料物質量などの評価手法と仕分けシナリオの検討

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質量などの評価手法の検討	・5種類の候補技術(*2)による計測量(必要に応じた組合せを含む)から、核燃料物質量などを評価する手法の一次案を検討し、当該評価手法案による評価性能を評価していること。(終了時目標TRL:レベル3)
4.2.2 仕分けシナリオの検討	・5種類の候補技術(*2)を利用した(必要に応じた組合せを含む)仕分けシナリオを提案すること。(*1)

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

4.3.1 アクティブ中性子法	・5種類の候補技術(*2)を利用した仕分けの成立性確認に向けて、シミュレーションや簡易試験の結果を踏まえ、今後、実験的に確認する必要がある課題に対して試験方法の計画を立案すること。(終了時目標TRL:レベル2)
4.3.2 パッシブ中性子法	
4.3.3 ミュオン散乱法	
4.3.4 X線CT法	
4.3.5 パッシブガンマ線法	

*1:仕分けに必要な性能目標値の検討、仕分けシナリオの検討は開発項目とは異なるため、技術成熟度(TRL)は設定しないものとする。

*2:アクティブ中性子法, パッシブ中性子法, ミュオン散乱法, X線CT法, パッシブガンマ線法

2. 研究計画

2.1 実施項目とその関連, 他研究との関連

2.2 実施体制

【概要】

原子炉格納容器内部から取り出された物体を燃料デブリと放射性廃棄物に仕分ける技術の開発を目的とし, 廃炉・汚染水対策事業において検討した計測技術を念頭に, 開発課題のうち**重要度・優先度が高い**以下の課題について検討する。

【残された課題】

(廃炉・汚染水対策事業において, 抽出・整理した課題の内, 特に重要度・優先度が高いもの)

- ・仕分けに必要な**性能目標値**の検討
- ・検出器応答解析による**装置概念**の構築
- ・計測量に基づく核燃料物質量などの**評価手法**の検討
- ・**仕分けシナリオ**の再検討
- ・既存装置などを用いた**要素技術確認試験**

【実施内容】

研究開発の最終的な目標到達地点や成果適用のあるべき姿を常に念頭において開発することが重要である。そのため, **装置概念の構築, 評価手法の検討**と並行して, 仕分けに必要な**性能目標値および仕分けシナリオ**を最新のニーズおよびシーズの両面から検討する。シミュレーションで確認できない課題は, 簡易試験で確認し, 今後の**要素技術確認試験の計画**を検討する。実施項目とその位置づけ(検討フロー)は, 次ページ以降に示す。

公開情報・文献を中心とした技術調査により適用性を判断することは困難であり, 開発にあたっては, 計測器, データ解析技術などについて, ベンダーを交えて検討することが重要。

4.1 検出器などを模擬した非破壊計測技術の解析的評価と計測装置概念の検討

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討

仕分け技術の成立性の判断に資する**性能指標を整理**し, それらの指標の**目標値を検討**する。目標性能は, **ニーズを踏まえて検討したうえで, 本事業成果(シーズ)を踏まえ, 適宜, 見直す。**

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

検出器など**計測装置構造を模擬したシミュレーション**を実施することにより, 計測装置概念の検討に利用するための**検出器応答データ**を得て, 仕分けに適用可能な**計測装置概念を構築**する。

4.2 核燃料物質質量などの評価手法と仕分けシナリオの検討

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

検討した計測装置概念における, **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, **計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の試案**を作成する。

4.2.2 仕分けシナリオの検討

燃料デブリおよび廃棄物の管理方針と候補となっている計測技術の特性/実現性を考慮し, **仕分けに利用する物理量, 適用する計測技術の種類(複数の組合せも含む)を検討**する。

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

① アクティブ中性子法

④ X線CT法

② パッシブ中性子法

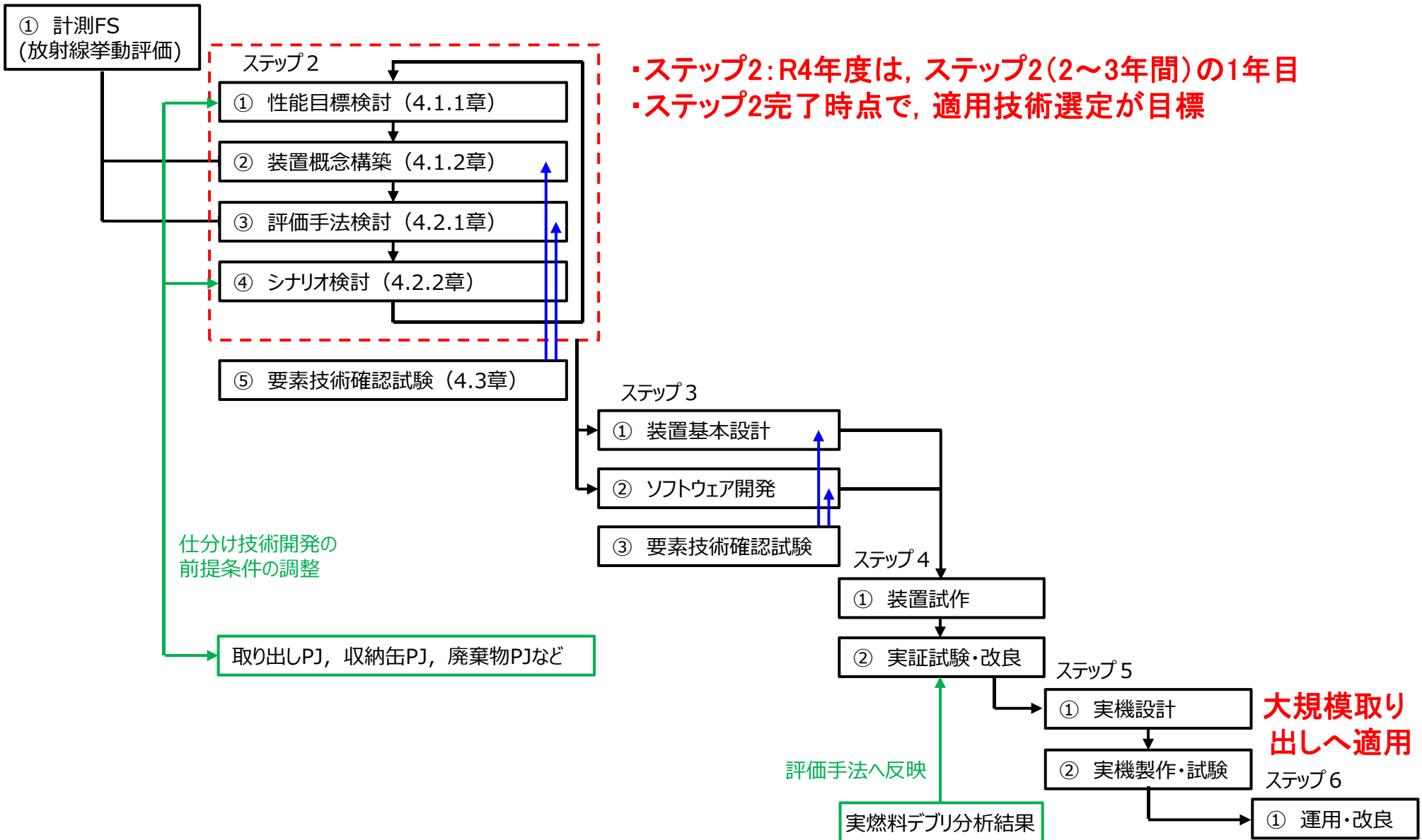
⑤ パッシブガンマ線法

③ ミュオン散乱法

左記①～⑤の計測技術を利用した仕分けの成立性確認に向けて, シミュレーションや簡易試験の結果を踏まえ, 今後, **実験的に確認する必要がある課題に対して試験方法を検討し, 計画を立案**する。

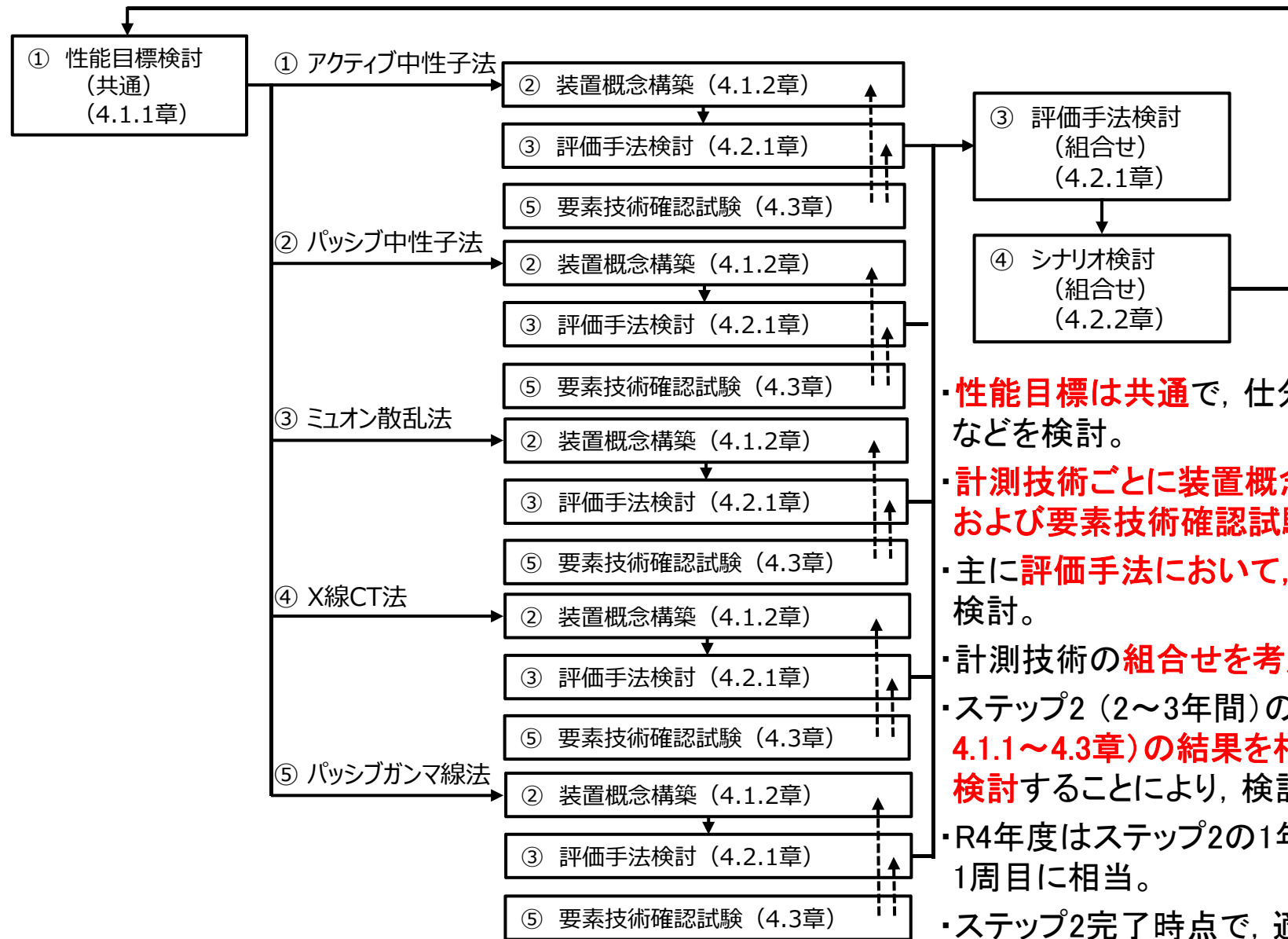
2.1 実施項目とその関連, 他研究との関連(3/4)

ステップ1



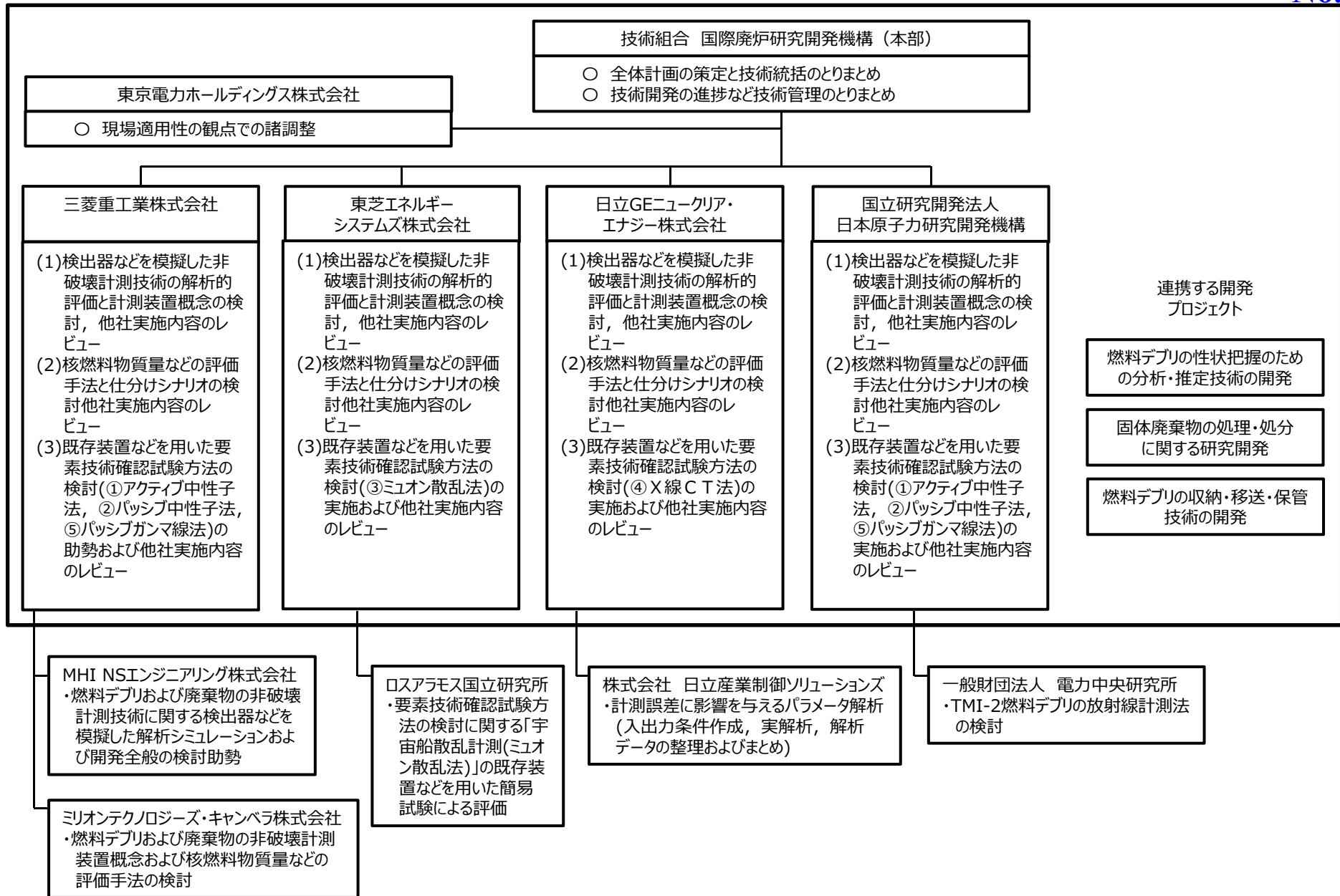
2.1 実施項目とその関連, 他研究との関連(4/4)

No.10



- ・性能目標は共通で, 仕分け基準値や測定時間などを検討。
- ・計測技術ごとに装置概念構築, 評価手法検討および要素技術確認試験を実施。
- ・主に評価手法において, 計測技術の組合せを検討。
- ・計測技術の組合せを考慮したシナリオを検討。
- ・ステップ2 (2~3年間) の中でフロー①~⑤(4.1.1~4.3章)の結果を相互に反映し, 繰り返し検討することにより, 検討精度を向上。
- ・R4年度はステップ2の1年目で, 繰り返し検討の1周目に相当。
- ・ステップ2完了時点で, 適用技術選定が目標。

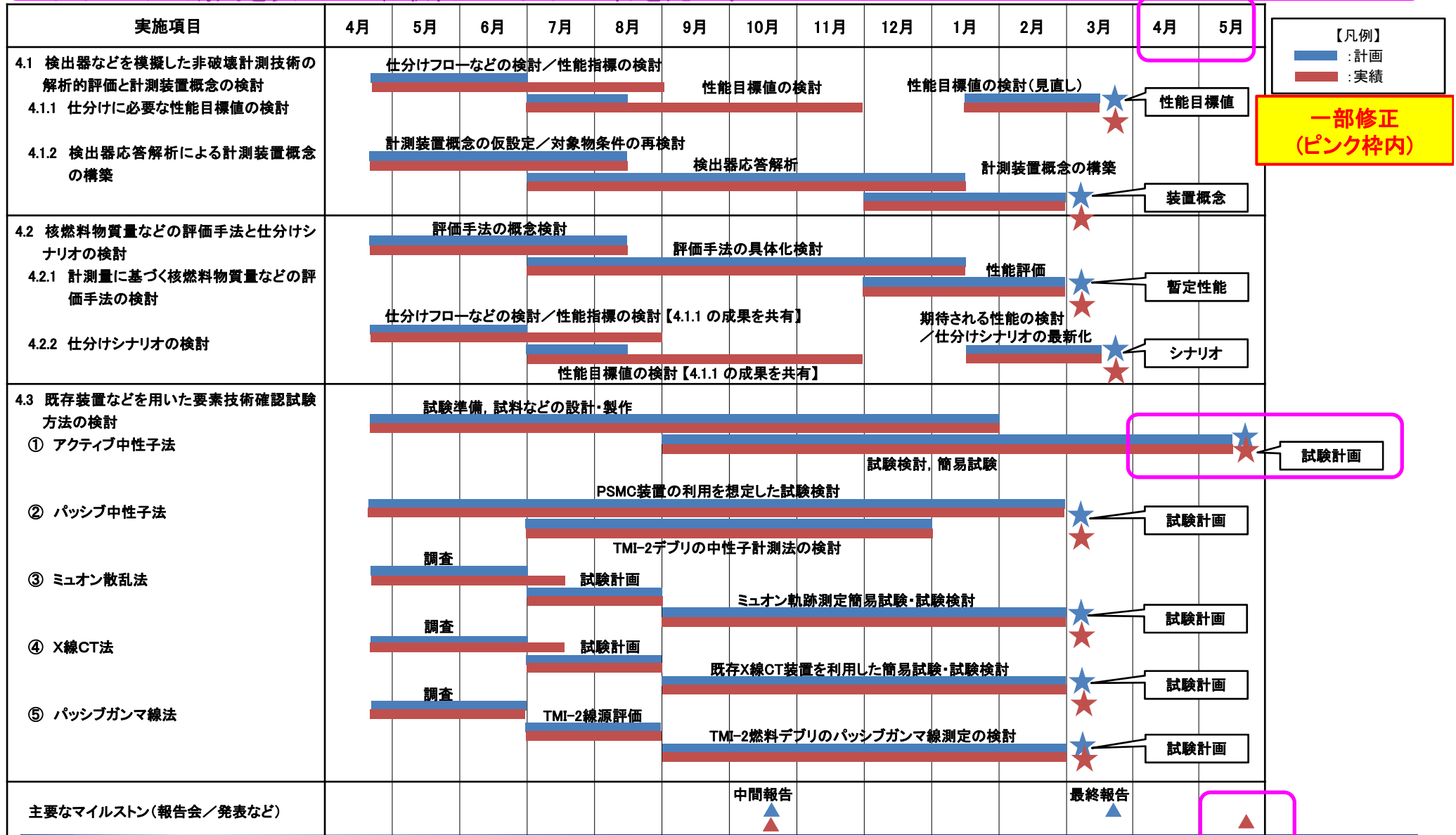
2.2 実施体制



3. 実施スケジュール

3. 実施スケジュール

・性能目標値および仕分けシナリオの検討, 並びにアクティブ中性子法の要素技術確認試験方法の検討に当初の計画よりも期間を要したが, 最終的に計画内容を完了。



【凡例】
■ : 計画
■ : 実績

一部修正
(ピンク枠内)

試験計画

▲

4. 研究内容および成果

- 4.1 検出器などを模擬した非破壊計測技術の解析的評価と計測装置概念の検討
- 4.2 核燃料物質質量などの評価手法と仕分けシナリオの検討
- 4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

4.1 検出器などを模擬した非破壊計測技術の 解析的評価と計測装置概念の検討

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討

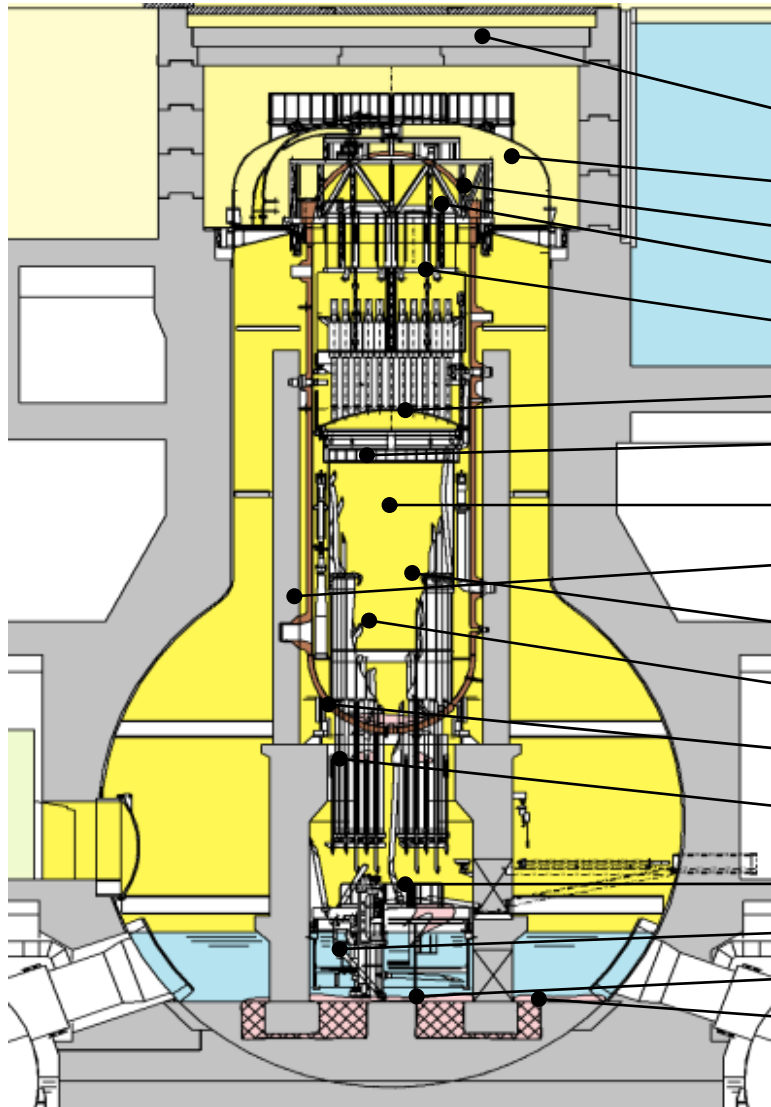
【目標】

- ・燃料デブリと廃棄物の仕分けに適用する非破壊計測装置の性能目標値について、仕分けの成立性に影響する装置性能を整理し、それらの目標値を設定していること。
- ・仕分けに必要な性能目標値の検討は開発項目とは異なるため、技術成熟度(TRL)は設定しないものとする。

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(1/19)

計測対象物

・計測対象物を下図のとおり設定。



対象物	仕分けの想定
シールドプラグ	核燃料の付着のない構造物 ↓ 放射性廃棄物
PCVヘッド	
RPV保温材	
RPVヘッド	
蒸気乾燥器	
シュラウドヘッド	
上部格子板	核燃料の付着が少ない構造物 ↓ 放射性廃棄物
シュラウド	
ジェットポンプ	
炉心支持板	核燃料と混ざった構造物 核燃料の付着が多い構造物 ↓ 燃料デブリ
炉心部燃料デブリ	
RPV底部燃料デブリ	
RPV下部／CRVハウジング付着燃料デブリ	
ペDESTAL内部構造物	
CRD交換機	
ペDESTAL内部燃料デブリ	
ペDESTAL外部燃料デブリ	

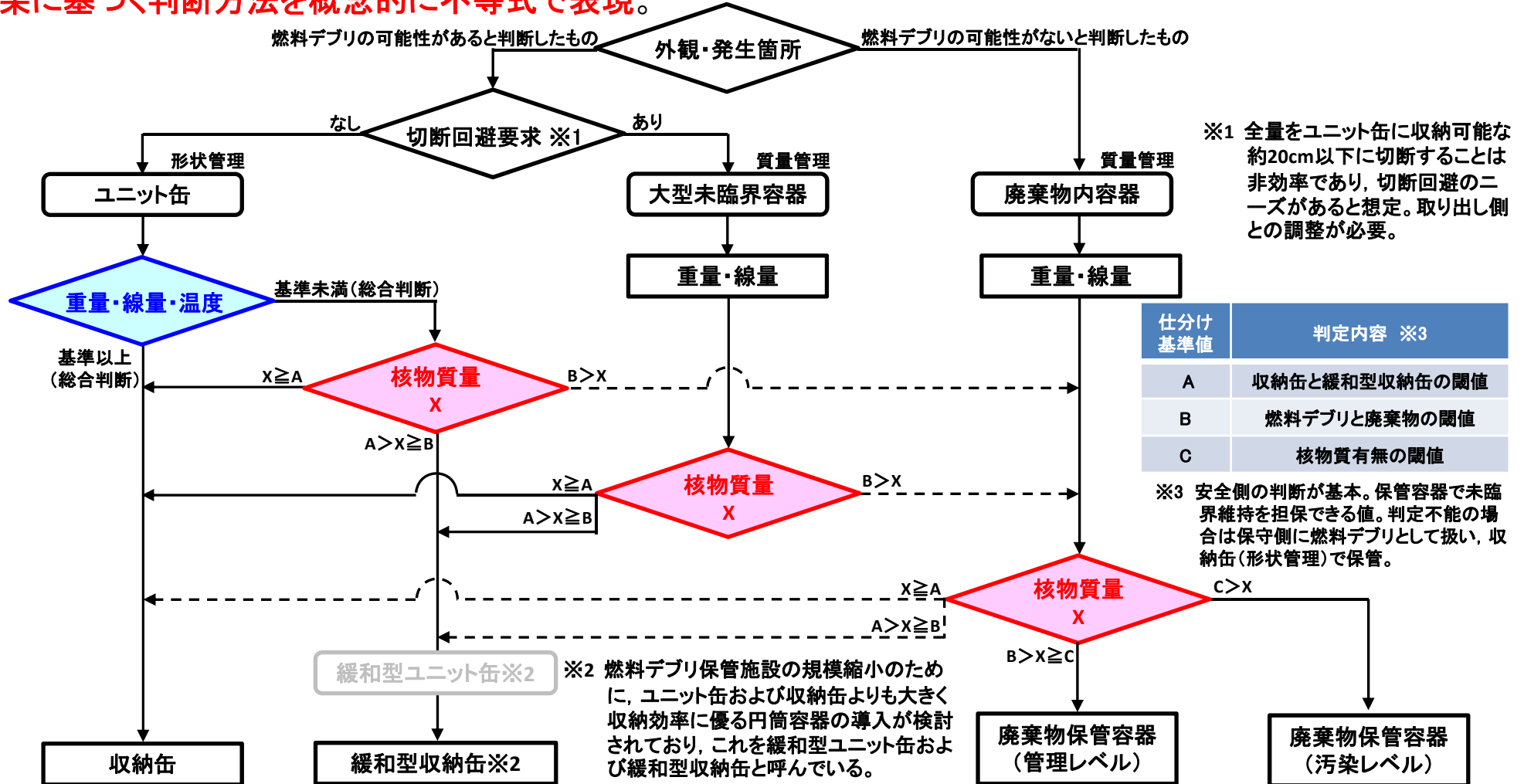
大型構造物のまま
取り出される想定
↓
仕分け装置による
計測対象外

切断して取り
出される想定
↓
仕分け装置に
よる計測対象

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(2/19)

仕分けの考え方(仕分けフロー)

- ・仕分けの考え方を以下のとおり設定。
- ・仕分け基準値AとB, Cは単位が異なり, ユニット缶および収納缶以外の取扱容器の仕様・運用が未確定なため(No.19-20参照), 大小関係を単純比較することは困難であるが, 核物質計測結果に基づく判断方法を概念的に不等式で表現。



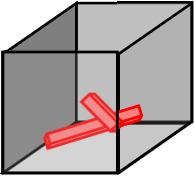
4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(3/19)

取扱容器

- ・取扱容器の仕様を整理(仕様が概ね確定しているのはユニット缶および収納缶の2種類)。
- ・仕様未確定の容器について、**関連PJ(取り出しPJ, 収納缶PJ, 廃棄物PJなど)との調整が必要。**

取り出し容器

保管容器

容器	対象	制限値	管理基準	保管方法	核燃料	濃縮度/反応度	管理基準
 ユニット缶 <Φ210	<ul style="list-style-type: none"> ・砂利などの不定形な燃料デブリ ・細かい構造物 	<ul style="list-style-type: none"> ・<Φ210 	<ul style="list-style-type: none"> ・濃縮度5wt%のUO₂が臨界とならない半径 	 収納缶(Φ210)	<ul style="list-style-type: none"> ・含む可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・高い可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・形状管理 ・どのような燃料デブリを入れても臨界とならない形状
 大型未臨界容器	<ul style="list-style-type: none"> ・制御棒などの現地での切断が難しい構造物 	<ul style="list-style-type: none"> ・<30kg(5wt%) ・<45kg(4wt%) ・<80kg(3wt%) 	<ul style="list-style-type: none"> ・収納物全てがUO₂の時に臨界とならない質量 ・中性子吸収材など 	 緩和型収納缶(Φ400~)	<ul style="list-style-type: none"> ・含む可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・U-235濃縮度1.5wt%(同等の反応度)以下 	<ul style="list-style-type: none"> ・反応度管理 ・均質無限体系で臨界とならない反応度の燃料デブリのみを保管
 廃棄物内容器 500x300H	<ul style="list-style-type: none"> ・核燃料を含まない 	<ul style="list-style-type: none"> ・なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・なし 	 廃棄物保管容器	<ul style="list-style-type: none"> ・なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・核燃料を含まない

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(4/19)

性能目標値(ニーズ):計測精度(1/3)

・核燃料物質質量計測精度の性能目標値は、**下記判定基準を判定可能な精度と仮定。**

仕分け分類と仕分けの判定基準(評価量がU量の場合の考え方を整理した暫定案)

仕分け分類	仕分けの主な目的	判定基準(暫定)			
		(右記のいずれも満足しない)	※1 収納物全体に対する U濃度:1.5wt%以下	※2 U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)		○	—	—	—
b: 緩和型収納缶 (内径400mm)	燃料デブリ保管施設の規模縮小	—	○	—	—
c: 廃棄物保管容器 (管理レベル)	燃料デブリ保管施設の規模縮小 廃棄物の臨界安全確保	—	—	○	—
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	—	—	○	○

判定基準の考え方

※1:【収納缶PJ】収納缶PJの過去の評価で、燃料デブリが濃縮度4.9w/oのU(U-235とU-238で構成と仮定)によるUO₂とH₂Oを仮定した場合に、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。

【仕分けPJ】仕分けPJでは、収納缶PJの検討結果である1.7wt%に余裕を見込んで1.5wt%と設定。さらに、仕分けの現場で確認可能な量を考慮し、収納物全体に対するU-235が1.5wt%以下であることを判断基準として仮定。

※2: 保管時の集積配置・段積みなどを考慮して、濃縮度5wt%のU(UO₂ではない)の最小臨界量(約30kg)を8個の廃棄物保管容器で等分して設定。

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(5/19)

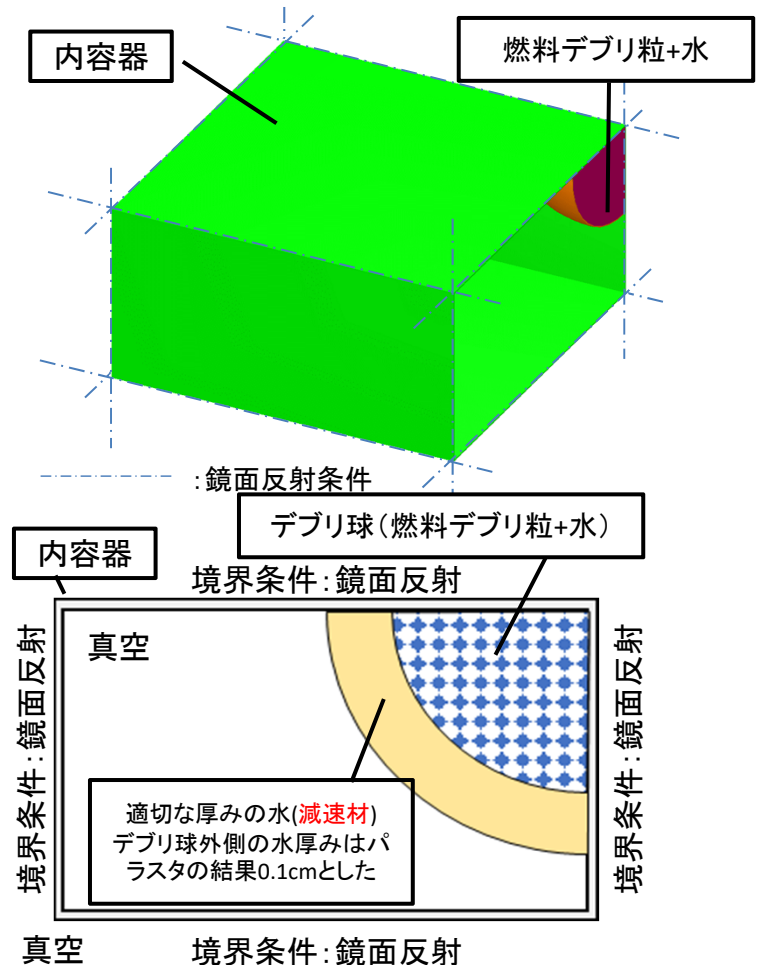
性能目標値(ニーズ):計測精度(2/3)

廃棄物保管エリアを対象として、廃棄物保管容器1個に収納可能な燃料デブリ重量を評価

- 廃棄物保管エリアに廃棄物内容器(□500mm×300mmH, 板厚t6mm, SUS製)を並べて保管する場合, 従来は約3.7kg(臨界安全ハンドブックで示されている最小臨界質量の約30kgを8等分し, 8個の内容器の隅に燃料デブリが偏った場合を想定)とされている。
- ここでは, 約3.7kgの仮設定値の妥当性について確認する。評価モデル図を右図に示す。ここでは廃棄物内容器が無限に配列した体系での評価とする。なお, 燃料デブリ粒+水で構成される「デブリ球」の外側には, 隣接する燃料デブリとの中性子相互作用が最大となるような厚みの水をパラスタして設置する。
- 評価に使用する計算コードは, モンテカルロ計算コードMVP3.0(断面積ライブラリはJENDL-4.0)とする。

	従来の「約30kg」の根拠(*1)	今回の評価
判定基準 (keff:実効増倍率)	0.98	$keff + 3\sigma \leq 0.95$
燃料仕様	5wt% 新燃料	4.9wt% 新燃料
Gd考慮	なし	なし
解析体系	非均質燃料の周りに30cm水反射体を設置	非均質燃料の周りには適切な厚みの中性子減速材(水)を設けて, 隣接する内容器との中性子相互作用を最大化する

(*1) JAEA-Data/Code 2009-010 臨界安全ハンドブック・データ集第2版



保管容器無限配列体系の臨界評価モデル

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(6/19)

No.22

性能目標値(ニーズ):計測精度(3/3)

廃棄物保管エリアを対象として、廃棄物保管容器1個に収納可能な燃料デブリ重量を評価

内容器に収納可能な燃料デブリ重量評価

- 評価結果(右図)より、内容器1個に収納可能な燃料デブリ量は約3.8kg(デブリ球外側の水厚みは0.1cm)となり、従来の設定値(3.7kg)を目標として仕分け装置を開発することは妥当と考えられる。

➤ 留意事項

- 廃棄物内容器の外部環境(水分条件, 中性子反射効果条件, 施設を複数ユニットとして評価する必要があるなど), 容器形状, 板厚, 容器の腐食変形などが予想される場合は, 適切に臨界評価モデルに反映する必要がある。

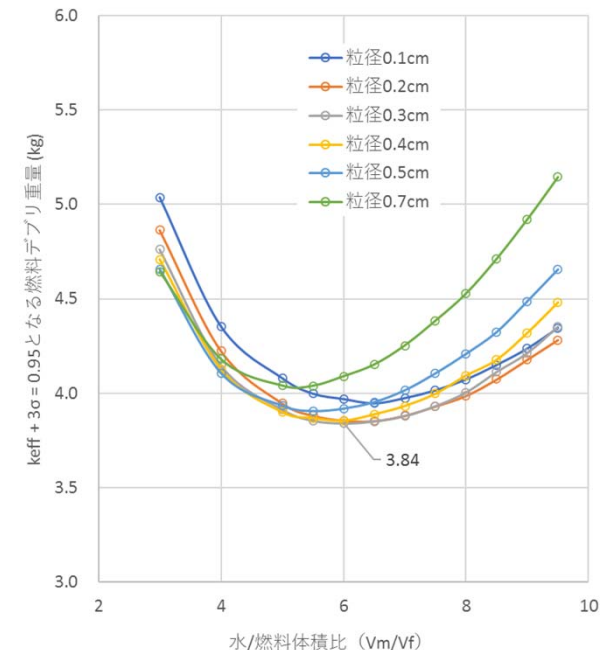


図 内容器1個に収納可能な燃料デブリ重量

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(7/19)

仕分け判定基準の設定に向けた課題(ニーズ明確化が必要な項目)

仕分け判定基準の設定に向けた課題

判定基準(暫定)	課題	内容
※ 収納物全体に対する U濃度:1.5wt%以下	緩和型ユニット缶/収納缶の 仕様 設定	緩和型ユニット缶/収納缶の仕様によって、未臨界維持条件(判定基準)が変化する。 容器形状, 寸法, 材質 などを設定する必要がある。
	緩和型ユニット缶/収納缶の 運用方法 設定	緩和型ユニット缶/収納缶の運用方法によって、未臨界維持条件(判定基準)が変化する。保管時の相互作用を検討するために、緩和型ユニット缶/収納缶の 配置や周囲の条件(中性子の吸収体, 反射体となる構造体の条件) などを設定する必要がある。
	臨界解析	緩和型ユニット缶/収納缶の仕様および運用方法の設定(仮定)に基づいて臨界解析を実施し、 未臨界維持条件(判定基準) を確認する。解析結果に基づき、緩和型ユニット缶/収納缶の 仕様および運用方法について調整する 。
※ U量が3.7kg/容器以下	廃棄物内容器/保管容器の 仕様 設定	廃棄物内容器/保管容器の仕様によって、未臨界維持条件(判定基準)が変化する。 容器形状, 寸法, 材質 などを設定する必要がある。
	廃棄物内容器/保管容器の 運用方法 設定	廃棄物内容器/保管容器の運用方法によって、未臨界維持条件(判定基準)が変化する。保管時の相互作用を検討するために、廃棄物内容器/保管容器の 配置や周囲の条件(中性子の吸収体, 反射体となる構造体の条件) などを設定する必要がある。
	臨界解析	廃棄物内容器/保管容器の仕様および運用の設定(仮定)に基づいて臨界解析を実施し、 未臨界維持条件(判定基準) を確認する。解析結果に基づき、廃棄物内容器/保管容器の 仕様および運用方法について調整する 。

※ 判定基準の考え方は、No.20を参照のこと。

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(8/19)

No.24

性能目標値(ニーズ):計測時間(処理能力)(1/4)

- 燃料デブリを収納した**ユニット缶**1個当たりの計測時間の目標値を試算。(取り出し規模拡大
時段階を対象とする。)
- No.17の「計測対象物」で燃料デブリに分類した物量**すべてを計測する前提**。

項目		1号機	2号機	3号機	備考	
①	ユニット缶収納量	kg/個	10			仮定値
②	燃料デブリ総量	ton	465	613	592	H30年度補助事業成果から引用
③	取出期間	年間	10	10	10	仮定値
④	年間取出量	ton/年	46.5	61.3	59.2	④ = ② ÷ ③
-	<計測装置を号機ごとに設置>	-	-	-	-	
⑤	計測装置運転日数	日/年	200	200	200	メンテナンス期間などを考慮
⑥	1日あたりの計測物量(質量)	kg/日	233	307	296	⑥ = ④ ÷ ⑤
⑦	1日あたりの計測物量(ユニット缶個数)	個/日	24	31	30	⑦ = ⑥ ÷ ①
⑧	1日あたりの運転時間	時間/日	20	20	20	検出器校正時間を4時間と仮定
⑨	ユニット缶あたりの計測時間	分/個	50.0	38.7	40.0	⑨ = ⑧ ÷ ⑦ × 60
-	<計測装置を共通化>	-	-			
⑩	1日あたりの計測物量(質量)	kg/日	835			⑥の和
⑪	1日あたりの計測物量(ユニット缶個数)	個/日	84			⑪ = ⑩ ÷ ①
⑫	1日あたりの運転時間	時間/日	20			検出器校正時間を4時間と仮定
⑬	ユニット缶あたりの計測時間	分/個	14.3			⑬ = ⑫ ÷ ⑪ × 60

シナリオ候補③-1
(No.245参照)

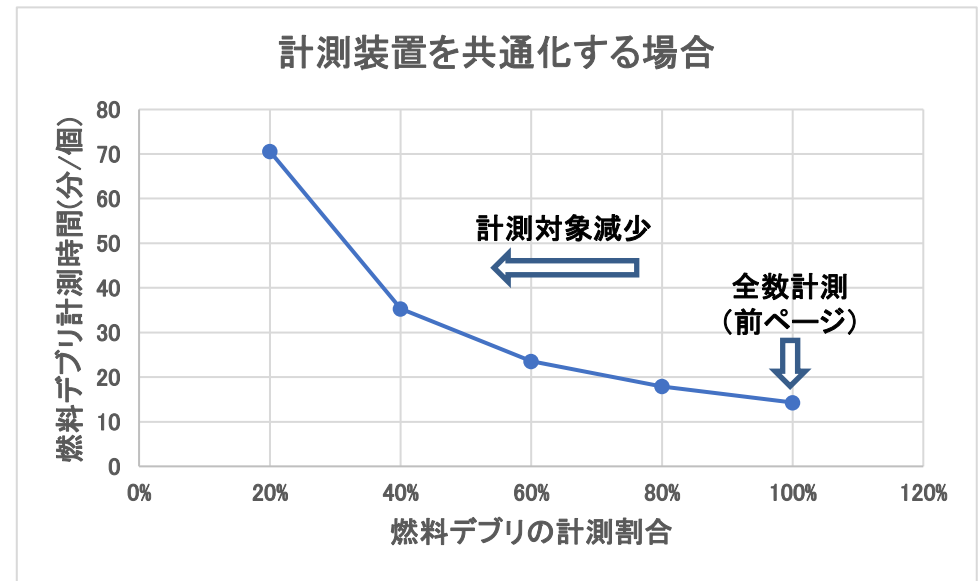
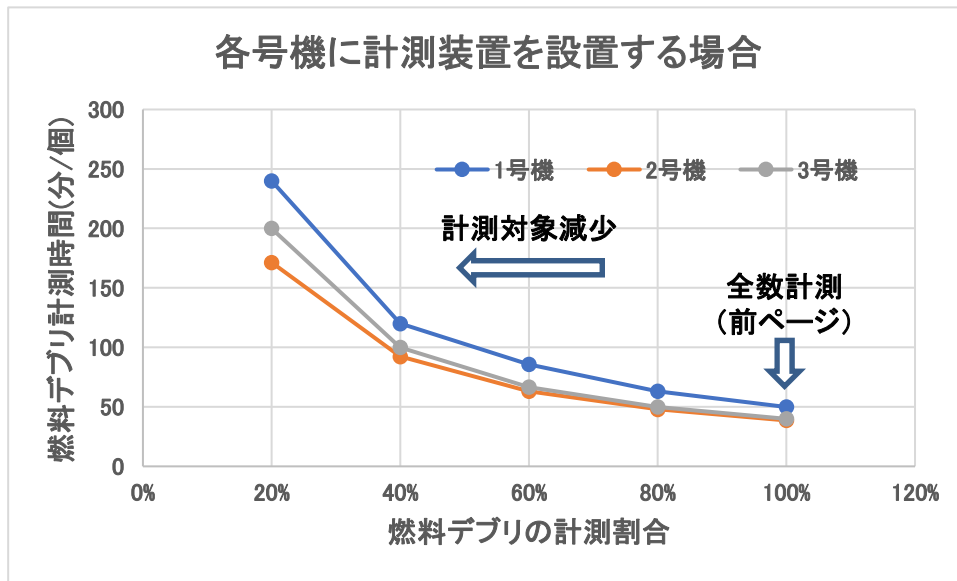
シナリオ候補③-2
(No.246参照)

- ✓ 計測装置の設置数を増やせば、ユニット缶当たりの計測時間は設置数に比例して長くなる。
- ✓ 核物質以外の指標により収納缶に収納するユニット缶の割合が増えれば、ユニット缶当たりの計測時間は長くなる。(次ページにパラメータサーベイ結果を示す。)

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(9/19)

性能目標値(ニーズ):計測時間(処理能力)(2/4)

- 核物質質量以外の指標により収納缶に収納するユニット缶の割合が増える場合について、**燃料デブリの計測割合**(全ユニット缶に対する計測を実施するユニット缶の割合と定義)をパラメータとして仕分けの対象とする燃料デブリ(ユニット缶)の計測時間を試算した結果を以下に示す。



シナリオ候補 ③-1 : 取り出し後期で技術成熟度が高い場合で、増設建屋で仕分ける場合を想定 (No.245参照)

シナリオ候補 ③-2 : 取り出し後期で技術成熟度が高い場合で、保管前処理施設で仕分ける場合を想定 (No.246参照)

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(10/19)

No.26

性能目標値(ニーズ):計測時間(処理能力)(3/4)

- 廃棄物を収納した**廃棄物内容器**1個当たりの計測時間の目標値を試算。(取り出し規模拡大時段階を対象とする。)
- No.17の「計測対象物」で廃棄物に分類した物量すべてを計測する前提。

項目		1号機	2号機	3号機	備考	
①	内容器収納量	kg/個	30		臨界量の質量管理の観点から設定	
②	廃棄物総量	ton	57.3	64.1	64.1	H30年度補助事業成果から引用
③	取出期間	年間	10	10	10	仮定値
④	年間取出量	ton/年	5.73	6.41	6.41	④ = ② ÷ ③
-	<計測装置を号機ごとに設置>	-	-	-	-	
⑤	計測装置運転日数	日/年	200	200	200	メンテナンス期間などを考慮
⑥	1日あたりの計測物量(質量)	kg/日	29	32	32	⑥ = ④ ÷ ⑤
⑦	1日あたりの計測物量(内容器個数)	個/日	1	2	2	⑦ = ⑥ ÷ ①
⑧	1日あたりの運転時間	時間/日	20	20	20	検出器校正時間を4時間と仮定
⑨	内容器あたりの計測時間	分/個	1200	600	600	⑨ = ⑧ ÷ ⑦ × 60
-	<計測装置を共通化>	-	-			
⑩	1日あたりの計測物量(質量)	kg/日	92.8		⑥の和	
⑪	1日あたりの計測物量(内容器個数)	個/日	4		⑪ = ⑩ ÷ ①	
⑫	1日あたりの運転時間	時間/日	20		検出器校正時間を4時間と仮定	
⑬	内容器あたりの計測時間	分/個	300		⑬ = ⑫ ÷ ⑪ × 60	

シナリオ候補③-1
(No.245参照)

シナリオ候補③-2
(No.246参照)

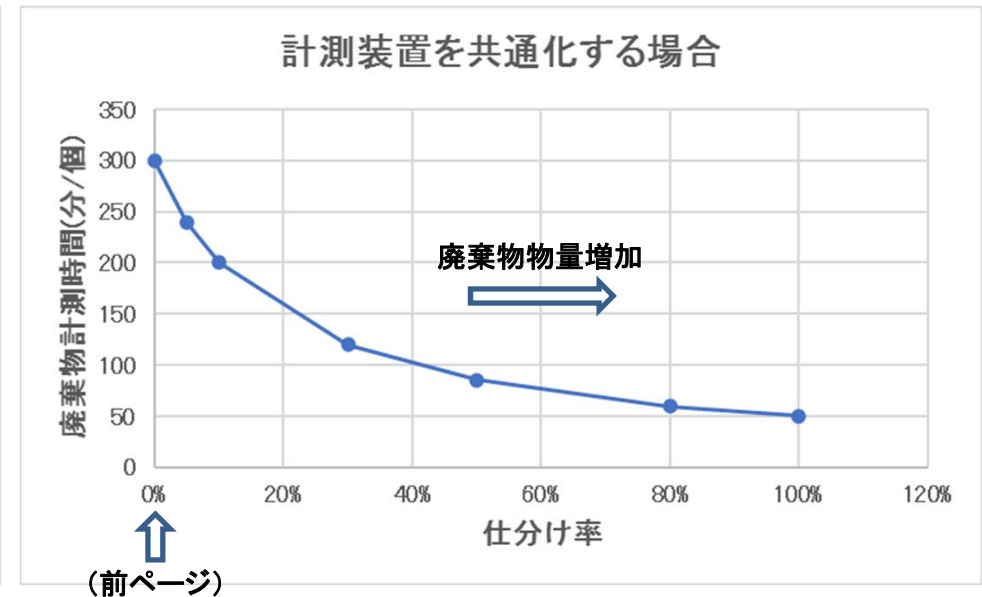
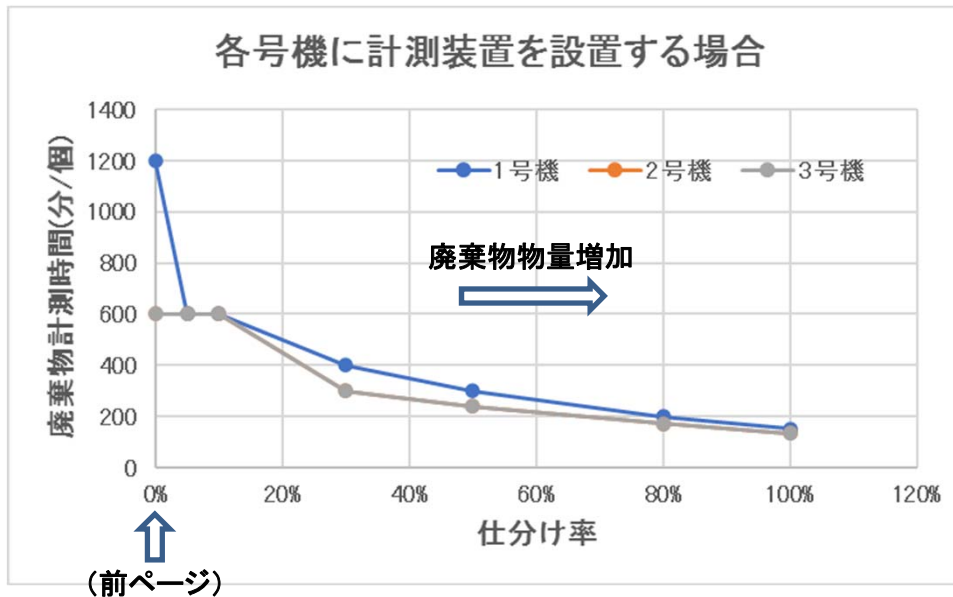
- ✓ 計測装置の設置数を増やせば、内容器当たりの計測時間は設置数に比例して長くなる。
- ✓ 燃料デブリの仕分けを行うと廃棄物の物量は増加し、それにより核物質質量計測を行う内容器は増え、内容器当たりの計測時間は短くなる。(次ページにパラメータサーベイ結果を示す。)

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(11/19)

No.27

性能目標値(ニーズ):計測時間(処理能力)(4/4)

- 前ページの廃棄物計測時間は、放射性廃棄物に分類した仕分け前の廃棄物のみを計測する前提での値であり、燃料デブリの仕分けを行うと廃棄物の物量は増加し、それにより核物質質量計測を行う内容器の数が増え、内容器当たりの計測時間は短くなる。
- 仕分け率**(燃料デブリ中の核燃料以外の物量が廃棄物となる割合と定義)をパラメータとして廃棄物(内容器)の計測時間を試算した結果を以下に示す。



シナリオ候補 ③-1 : 取り出し後期で技術成熟度が高い場合で、増設建屋で仕分ける場合を想定 (No.245参照)

シナリオ候補 ③-2 : 取り出し後期で技術成熟度が高い場合で、保管前処理施設で仕分ける場合を想定 (No.246参照)

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(12/19)

核燃料物質質量以外の判断方法(1/7)

No.28

- ・核燃料物質質量以外に仕分けの判断に使用できる可能性のあるものを検討。

核燃料物質質量以外による仕分け方法の候補

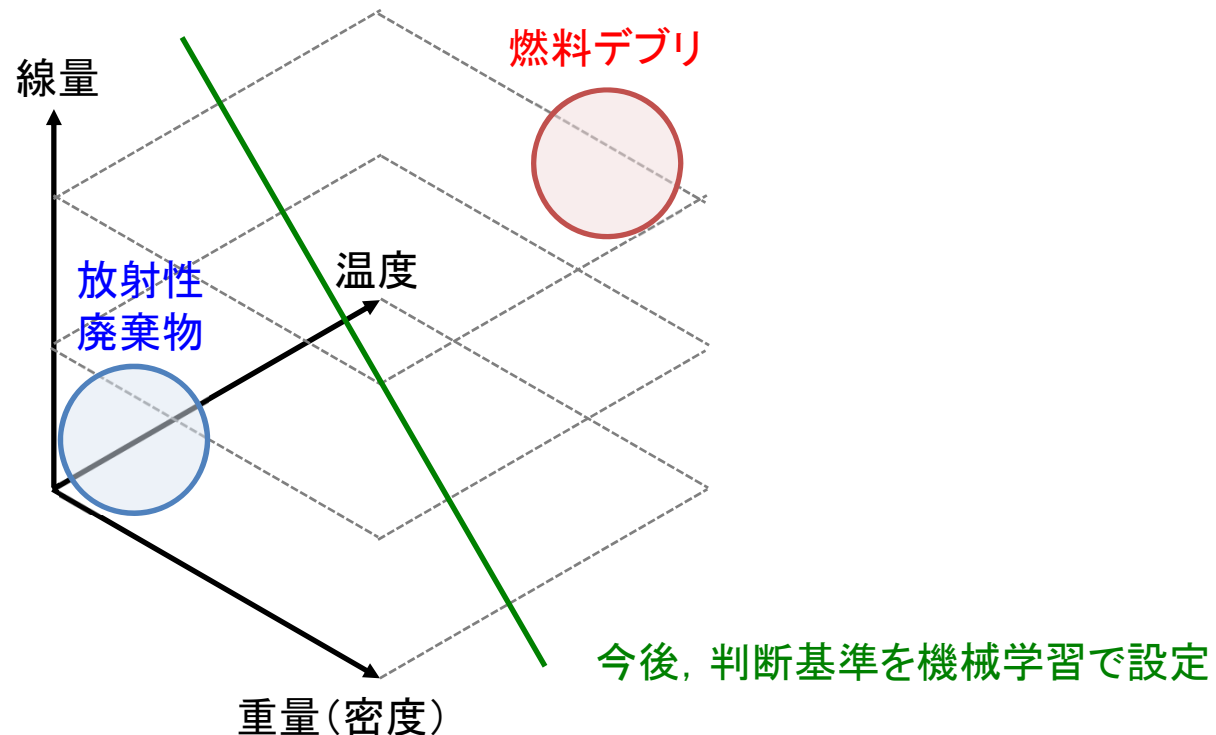
No.	物理量	測定・評価手法	備考
1	重量	・重量計	・明らかに重いものを燃料デブリと判断
2	密度	・重量計＋容器内容積 ・X線CT法	・明らかに高密度のものを燃料デブリと判断
3	温度	・放射温度計	・明らかに熱いものを燃料デブリと判断
4	表面線量	・パッシブ計測法(ガンマ, 中性子)	・明らかに高線量のものを燃料デブリと判断
5	実効増倍率	・中性子検出器, ファインマン α 法による未臨界度測定	・核燃料物質質量計測によらない未臨界維持

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(13/19)

No.29

核燃料物質質量以外の判断方法(2/7)

- ・重量(かさ密度), 温度, 線量は, 核燃料物質質量と関係すると考えられ, **短時間かつ簡便**に計測可能な物理量であるが, **収納状態による変動が大きく**, そのままでは仕分けへの適用は困難である。
- ・重量(かさ密度), 温度, 線量を**組合せる**ことによって, 仕分けの**判断確度の向上**が期待される。
- ・重量(かさ密度), 温度, 線量を組合せた仕分け判断システム構築には, 今後, **収納状態の膨大なケースに対してシミュレーション**を実施し, **核燃料物質質量との関係性を機械学習**させて**判断基準を設定**する方法が考えられる。



4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(14/19)

核燃料物質質量以外の判断方法(3/7)

未臨界度測定による未臨界維持方法の適用性検討

①検討目的, 検討手順案

1. 検討目的

核燃料物質質量以外に仕分けの判断（および保管エリアでの臨界安全担保）に使用できる可能性のある技術として、未臨界度測定法の適用性について検討した。

注) 未臨界度測定結果から核分裂物質重量を推定することは困難。

核計装により得られる核燃料物質質量から未臨界度を推定することは困難。

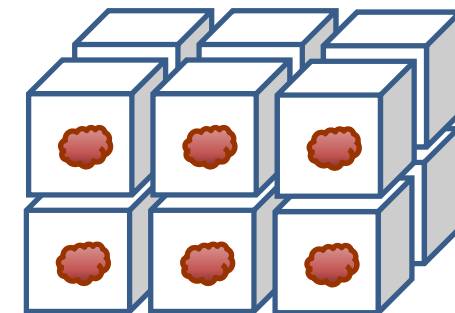
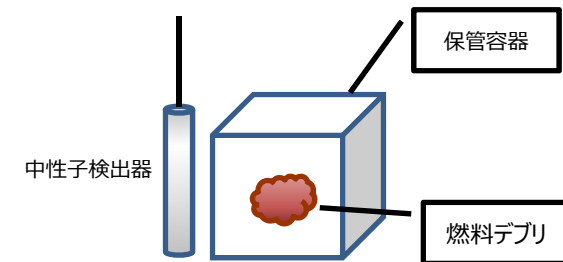
2. 検討手順案

2.1 保管エリア（右下図：容器の無限配列体系）で、実効増倍率(k_{eff})を0.95以下とするため、容器1個当たりの最大核分裂性物質重量を評価する。

2.2 容器1個当たりに最大核分裂性物質重量の燃料デブリが収納された場合に、中性子検出器により未臨界度が測定可能かどうかを検討する。

2.3 保管エリアでの未臨界度監視のために必要となる中性子検出器配置例などを検討する。

2.4 核計装による仕分けのバックアップ（保管エリアでの臨界安全担保）としての未臨界度測定法の適用性および課題を検討する。



容器の無限配列体系の例

評価概念図

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(15/19)

核燃料物質質量以外の判断方法(4/7)

未臨界度測定による未臨界維持方法の適用性検討

②検討条件, 検討内容

1. 計算コード

モンテカルロ計算コード (MVP3コード, 断面積ライブラリ: JENDL-4.0) に内蔵の未臨界度測定法 (ファインマンα法) 検討ツールを使用する。

2. 燃料デブリ仕様

- U-235濃縮度4.9wt%の未照射燃料組成 (Gd/中性子吸収材は考慮しない) とする。
- 燃料デブリは, 燃料と水の非均質体系とし, 燃料/水体积比は最適減速条件とする。
- 燃料デブリの比均質均質領域の外側は, 隣接する燃料との中性子相互作用が最大化されるように減速材 (水) を配置する。

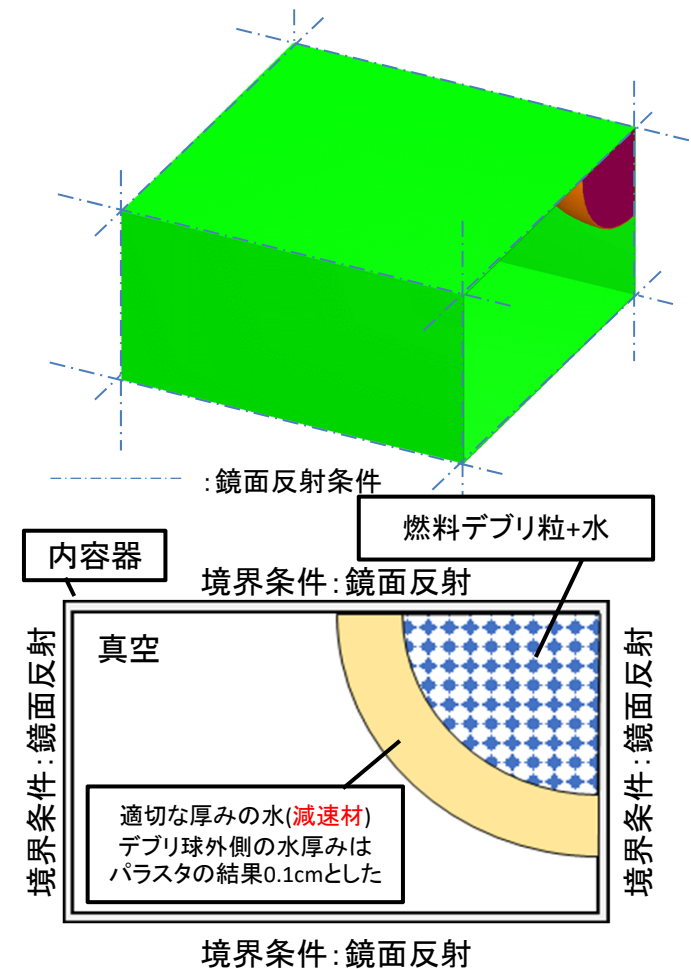
3. 保管容器仕様

保管容器は, □500mm×300mmH, 板厚t6mm, SUS製とする。

4. 中性子検出器仕様

中性子検出器は熱中性子感度の異なる検出器を数種類想定し, 中性子パッシブ方法により体系中の中性子を測定することを想定する。

右図の評価体系 (無限配列体系) にて評価された内容器 1 個に収納可能な燃料デブリ重量を収納した容器の未臨界度測定が可能かどうかを検討する。



保管容器無限配列体系の臨界評価モデル

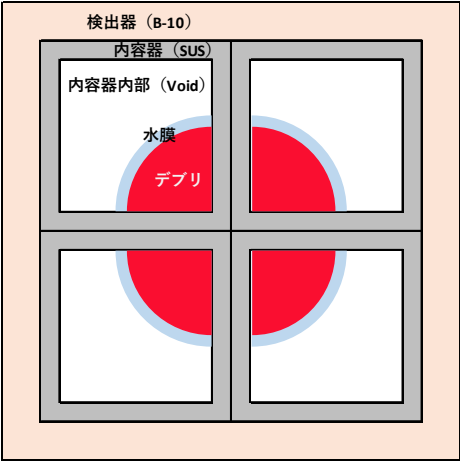
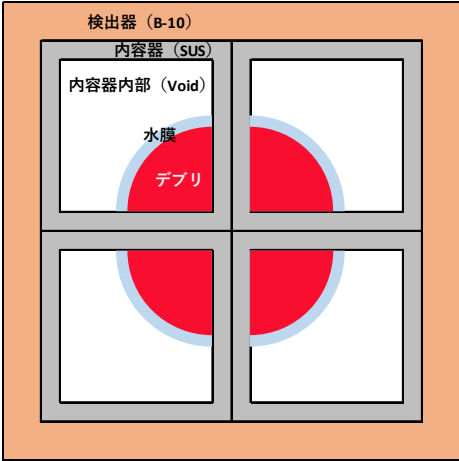
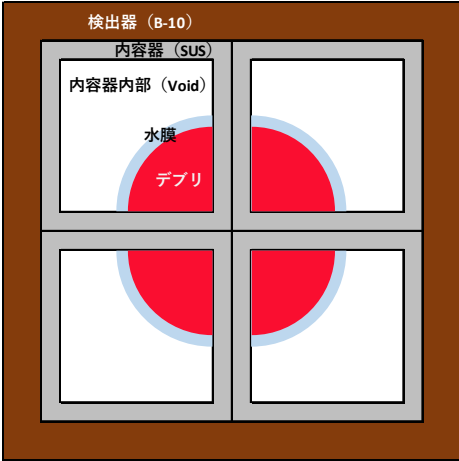
4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(16/19)

核燃料物質質量以外の判断方法(5/7)

未臨界度測定による未臨界維持方法の適用性検討

ファインマンα法シミュレーションモデル

- 内容物の無限配列体系の臨界評価より、内容物 1 個あたりに収納可能な燃料デブリ重量は約3.84kgとなり未臨界度が深くなることが想定されたため、容器8個の体系での未臨界度測定シミュレーションを実施
- 解析モデルでは、8個の容器の外面全体が中性子検出器(B-10検出器)に覆われるモデルとし、容器外部へ漏れる中性子を計測することにより未臨界度測定の可否について検討した。

解析モデル 1	解析モデル 2	解析モデル 3
B-10検出器中のB-10含有量を市販のB-10検出器相当としたモデル	B-10検出器中のB-10含有量を市販品よりも200倍程度増加させたモデル	外部へ漏洩する中性子をすべて計測するモデル
<p style="text-align: center;">真空</p> 	<p style="text-align: center;">真空</p> 	<p style="text-align: center;">真空</p> 

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(17/19)

核燃料物質質量以外の判断方法(6/7)

未臨界度測定による未臨界維持方法の適用性検討

ファインマンα法シミュレーション結果

▶ 各解析モデルでの未臨界度測定シミュレーション結果を下表にまとめる。

	参照解	解析モデル 1	解析モデル 2	解析モデル 3
得られた実効増倍率 (keff)	0.643	0.880	0.781	0.614
参照解との差の絶対値	—	0.237	0.138	0.029
中性子検出効率	—	0.3%	11.6%	100%
解析モデル図				

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(18/19)

No.34

核燃料物質質量以外の判断方法(7/7)

未臨界度測定による未臨界維持方法の適用性検討

▶ まとめ

- ▶ 廃棄物保管施設での未臨界維持のために、容器の未臨界度を監視することによる管理方法についてシミュレーションによる試検討を実施した。
- ▶ **容器を無限配列して $k_{eff} \leq 0.95$ とするためには、8個の容器の体系での k_{eff} を0.643以下とすることが必須**となるが、容器外面をすべて中性子検出器で覆う理想的な検出体系であったとしても、市販のB-10検出器(10cps/nv程度の感度)に比べて検出効率の高い中性子検出器(本試解析では40倍の感度)による計測が必要となる。
- ▶ **検出効率が高い中性子検出器を用いた場合でも**、中性子計測により得られる k_{eff} の誤差(モデル2では $\Delta k_{eff} = 0.138$)を考慮すると、中性子計測による k_{eff} の制限値は $0.505 (= 0.643 - 0.138)$ となり、さらに**検出は困難**となると考えられる。
- ▶ 8個の容器の体系で計測した後に保管施設での未臨界を維持するためには、**計測した環境と同じ環境(水分環境、容器内の燃料デブリ状態など)を維持することが必要**となる。
- ▶ また、これまで燃料などの取扱い・貯蔵施設においては、未臨界度測定によって未臨界を維持する管理方法の実例はない。(質量管理や形状管理といった通常の未臨界維持方法のバックアップであれば適用できる可能性はある)
- ▶ 以上より、**容器の未臨界度を監視することによる管理方法を廃棄物保管施設の未臨界維持に適用することは困難**と考えられる。

4.1.1 仕分けに必要な性能目標値の検討(19/19)

No.35

仕分けに必要な性能目標値の検討に係るまとめ

【成果／開発への寄与】

- ・仕分け対象物を上部格子板よりも下部から取り出されるものと設定した。これにより、開発の**前提条件(対象物の性状や物量)の具体化**が進んだ。
- ・仕分けの考え方として、外観・発生箇所に応じて取り出し容器・(ユニット缶, 大型未臨界容器, 廃棄物内容器)に収納し、**核燃料物質量計測結果に基づいて**保管容器(収納缶, 緩和型収納缶, 廃棄物容器(管理レベル), 廃棄物容器(汚染レベル))に**仕分けるフロー**を設定した。これにより、開発の**前提条件(対象物の寸法, 設定すべき判定基準)の具体化**が進んだ。
- ・性能目標値のうち仕分けの判断基準値は、**収納缶と緩和型収納缶の閾値**(収納物全体質量に対するU-235が1.5wt%), **燃料デブリと廃棄物の閾値**(核燃料物質量3.7kg/容器), **核物質量が核防護対象/保障措置終了となる量**(未定)を仮定した。
- ・性能目標値のうち計測時間は、**号機ごとに計測する場合に40～50分/ユニット缶, 600～1200分/廃棄物内容器**, 1～3号機から取り出したものを**全て装置1台で計測する場合, 14分/ユニット缶, 300分/廃棄物内容器**と試算した。
- ・核燃料物質量の以外の判断方法として、**スクリーニング測定(重量, 線量, 温度などによる総合判断)の導入を提案**した。これにより、非破壊計測装置の計測物量を低減して、計測単位当たりの計測時間を延長できる可能性がある。
- ・**容器の未臨界度を監視することによる管理方法**については、シミュレーションに基づき検討した結果、**適用困難**と考えられるが、**廃棄物保管施設の臨界管理のバックアップとして中性子検出器を設置**することによる臨界近接監視の適用性について今後検討することとした。

【課題】

- ・仕分けの判断基準値は、保管時の臨界安全確保を考慮する必要があるため、**取扱容器の仕様および運用方法を関連PJと調整し、臨界解析を実施して基準値を確定する必要がある**。また、放射性廃棄物の管理レベルと汚染レベルの閾値について、事業者など関係各所と連携して、管理レベルと汚染レベルの考え方から検討する必要がある。
- ・1～3号機から取り出したものを全て装置1台で計測する場合、計測時間の目標値が極めて短時間であり、**装置を複数台導入したり、スクリーニング測定の導入による、装置1台当たりの処理量の低減が必要**である。
- ・**スクリーニング測定(重量, 線量, 温度などによる総合判断)について、方法および判断基準の具体化検討が必要**である。
- ・**廃棄物保管施設の臨界管理のバックアップとして中性子検出器を設置することによる臨界近接監視の適用性について、シミュレーションによる検討が必要**である。

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

【目標】

・アクティブ中性子法, パッシブ中性子法, ミュオン散乱法, X線CT法およびパッシブガンマ線法を利用した非破壊計測装置の概念を設定していること。

(終了時目標TRL:レベル3)

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

(計測技術共通事項)

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築 計測技術共通事項(1/5)

No.38

- 検出器など計測装置構造を模擬したシミュレーションを実施することにより、計測装置概念の構築に利用するための検出器応答データを得て、仕分けに適用可能な計測装置概念を構築する。

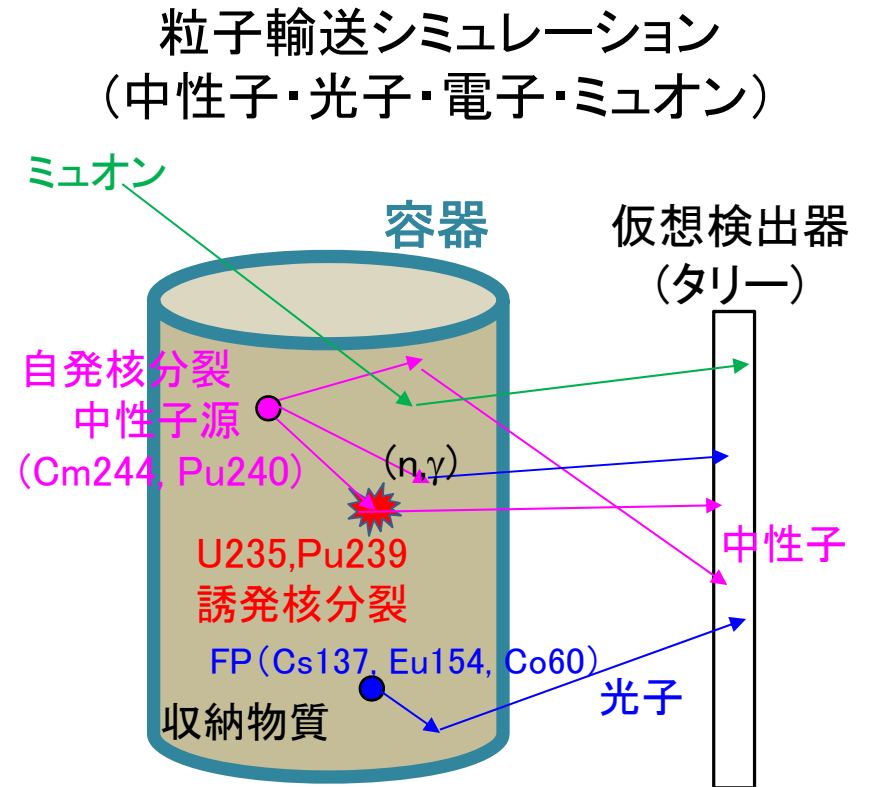
解析シミュレーション(全体の流れ)

燃料デブリ線源モデル
(材料ごとデータ)の作成

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

計測技術ごと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

感度解析ケースごとの 検出器応答を解析する

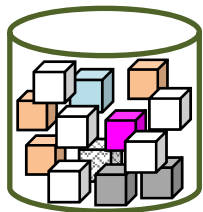


4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

計測技術共通事項(2/5)

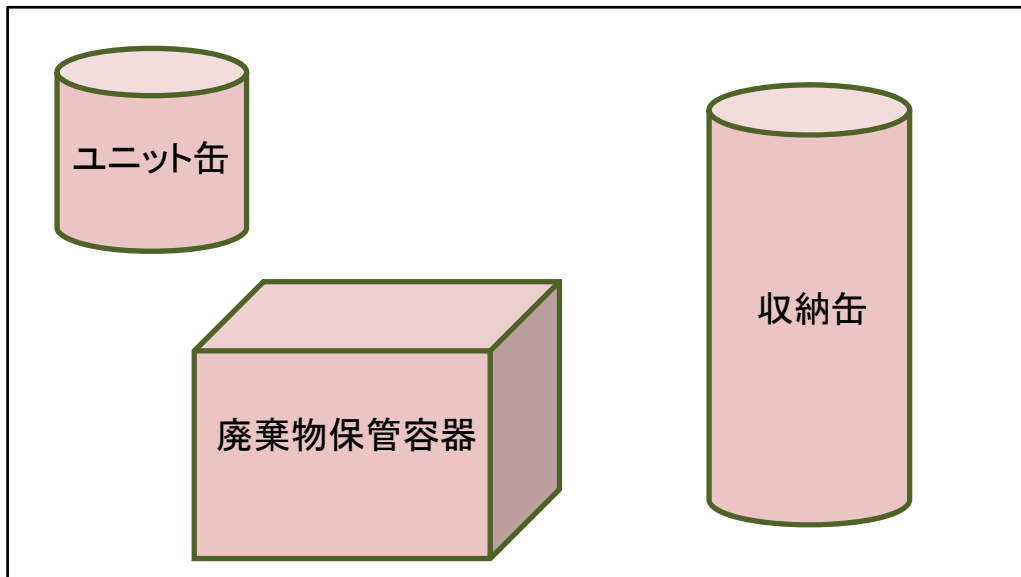
シミュレーション用ボクセル混合燃料デブリモデルの作成

- 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)



燃料デブリ素材(ボクセル)

UO ₂ (BP含有)	MOX(BP含有)
ZrO ₂	B ₄ C 制御棒/臨界防止材
SUS	Gd ₂ O ₃ 臨界防止材
H ₂ O 水分量調整用	Concrete
Empty 充填率・嵩密度調整用	サイズ: 1cm ³ 重量: 素材密度 ★: 線源あり

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

	熔融デブリ:(U _{0.5} Zr _{0.5})O ₂
	ウランリッチデブリ
	MCCIデブリ
	金属デブリ

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.40

計測技術共通事項(3/5)

“燃焼度”に係る補足

福島第一原子力発電所の1～3号機のいずれも事故時に平衡サイクル運転中であったことから、事故直前の原子炉の中には、炉内位置に依存しておよそ1～50 [GWd/t]の燃料が炉内に分布しており、事故によりこれらが熔融混合したと考えられている。しかし、どのような燃焼度の燃料がどのような割合で混合して燃料デブリが形成されたかは不明である。

本事業では、3次元炉心の運転管理データに基づき、燃焼度範囲が最も広い2号機を対象として、以下の3種類を代表的に考えた。

- 1) 炉心領域平均組成
- 2) 炉内最小燃焼度領域の組成
- 3) 炉内最大燃焼度領域の組成

これらの燃焼燃料組成とその組成から算出される線源データを「UO₂」ボクセルに設定した。元の燃焼度と混合割合が不明で熔融混合した燃料デブリに対して、燃焼度を定義することはできないが、本事業では、上記の1), 2), 3)で与えるそれぞれの領域平均組成が、23 [GWd/t], 1.3 [GWd/t], 51 [GWd/t]の燃焼度に相当するものであることから、これらを指して「燃焼度」と呼ぶ。これら3種類の「UO₂」ボクセルは、それぞれ、以下の特徴的な燃料デブリ素材を意味している。

- 1) U-235が多く含まれるもののパッシブガンマ線法やパッシブ中性子法で計測対象とするEu-154やCm-244が少ない燃料
- 2) 炉内全領域が均一に混合した燃料(基準ケース)
- 3) U-235が減損しPu元素が転換により生成し、Eu-154やCm-244は最も多くなっている燃料

ただし、異なる燃焼度を有する燃料が混合した燃料デブリを考える際には、各燃焼度に対応した核種の量は必ずしも燃焼度に対して比例しないという点に留意しておく必要がある。

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築 計測技術共通事項(4/5)

No.41

➤これまでに核物質測定の実現可能性のある技術として選定された赤枠部の技術を適用した計測装置概念を検討する。組合前提で選定された技術も、装置は単独で検討後、評価手法で組合せを検討する。

○: 適用が見込める技術
△: 実現の可能性がある技術
×: 現段階で、実現可能性のある技術なし

No.	判定(測定)技術	適用場所		
		PCV内	増設建屋	保管前処理施設
1	目視(画像)判定	△ 画像判定	△ 画像判定	△ 画像判定
2	PCV内核物質分布推定	△ パッシブα線計測 △ パッシブγ線計測 △ パッシブ中性子計測		
3	核物質測定(核種, 濃度)			
	①核分裂性物質濃度測定用	×	△ X線CT法 △ ミュオン散乱法	△ X線CT法 △ ミュオン散乱法
	②臨界安全管理用	△ パッシブα線計測 △ パッシブγ線計測 △ パッシブ中性子計測	△ パッシブγ線計測 △ パッシブ中性子計測 △ X線CT法 △ ミュオン散乱法 △ アクティブ中性子計測 △ パッシブ中性子計測+γ線計測 △ パッシブ・アクティブ中性子計測+γ線計測	△ パッシブγ線計測 △ パッシブ中性子計測 △ X線CT法 △ ミュオン散乱法 △ アクティブ中性子計測 △ パッシブ中性子計測+γ線計測 △ パッシブ・アクティブ中性子計測+γ線計測
	③核物質防護, 保障措置の終了判断用	—	△ アクティブ中性子計測 △ パッシブ・アクティブ中性子計測+γ線計測	△ アクティブ中性子計測 △ パッシブ・アクティブ中性子計測+γ線計測

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・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」
2020年度実施分最終報告(2021年07月)より, No.700を引用し表現を簡略化

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築 計測技術共通事項(5/5)

No.42

➤計測装置の検討ケースは以下のとおり

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
①-1	アクティブ中性子法 A	He-3	D-T	側方から	核分裂性核種質量	核分裂性核種質量	MHI	43-55 161-179
①-2	同 B	B-10	D-T/ 加速器中性子源	上方から	同上	同上	日立GE	56-69 180-183
①-3	同 C (FNDI法+PGA法)	B-10ストロー/He-3 (試験で決定)	D-T/D-D (試験で決定)	側方から	同上	同上	JAEA	70-80 184-191
②-1	パッシブ中性子法 A	He-3	なし	なし	自発核分裂核種質量 (Cm-244など)	同上	MHI	81-93 192-203
②-2	同 B	B-10	なし	なし	同上	同上	日立GE	94-101 204-207
③	ミュオン散乱法	ミュオン軌跡検出器	なし	なし	原子量	同上	東芝ESS	102-116 208-214
④	X線CT法	X線検出器	加速器X線源	側方から	密度	同上	日立GE	117-127 215-220
⑤-1	パッシブガンマ線法 A	Ge	なし	なし	核分裂生成核種質量 (Eu-154など)	同上	MHI	128-140 221-233
⑤-2	同 B	CZT, LaBr ₃ など	なし	なし	同上	同上	日立GE	141-154 234-237

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

(①-1 アクティブ中性子法A)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
①-1	アクティブ中性子法 A	He-3	D-T	側方から	核分裂性核種質量	核分裂性核種質量	MHI	43-55 161-179
①-2	同 B	B-10	D-T/ 加速器中性子源	上方から	同上	同上	日立GE	56-69 180-183
①-3	同 C (FNDI法+PGA法)	B-10ストロー/He-3 (試験で決定)	D-T/D-D (試験で決定)	側方から	同上	同上	JAEA	70-80 184-191

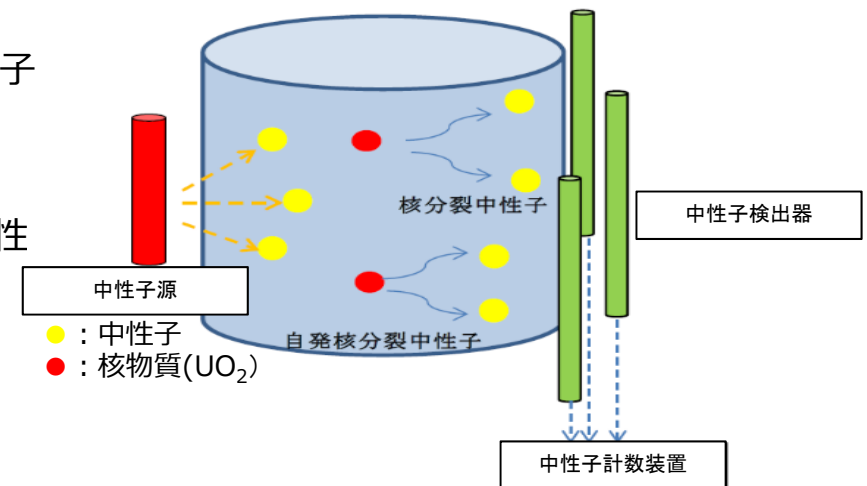
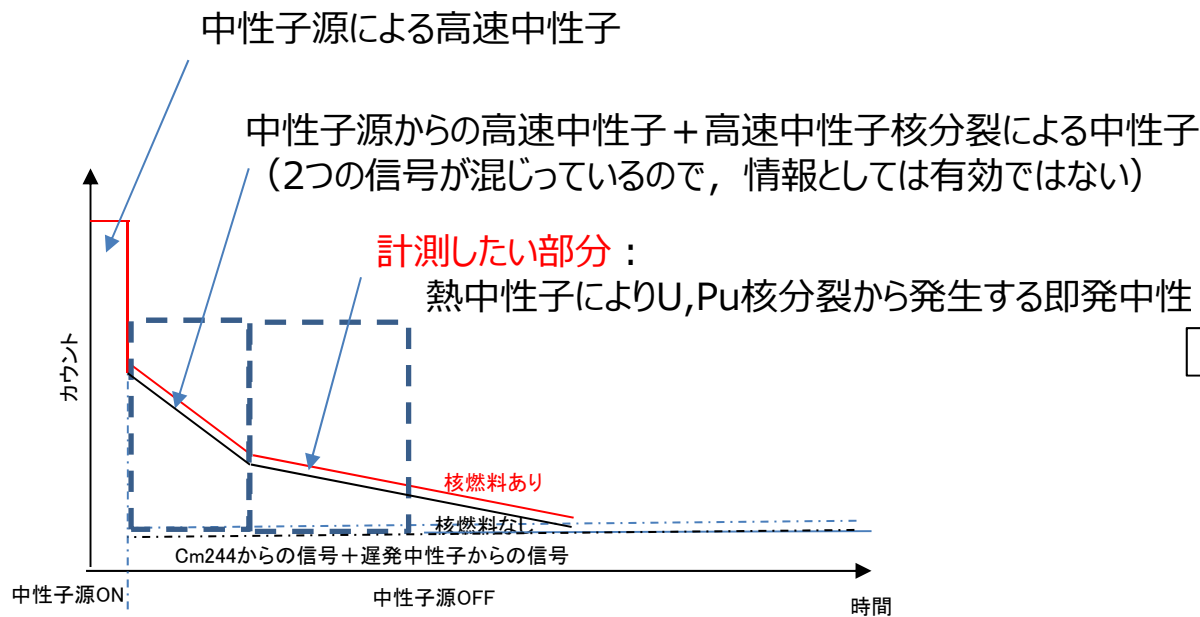
【特長】

- 検出器は、実績を重視してHe-3検出器を選定。
- 照射線源は、中性子発生効率および実績を重視して、D-T中性子源を選定。
- 中性子照射方向は、実績を重視して、対象物側方からの照射を選定。

① アクティブ中性子法共通

計測概念

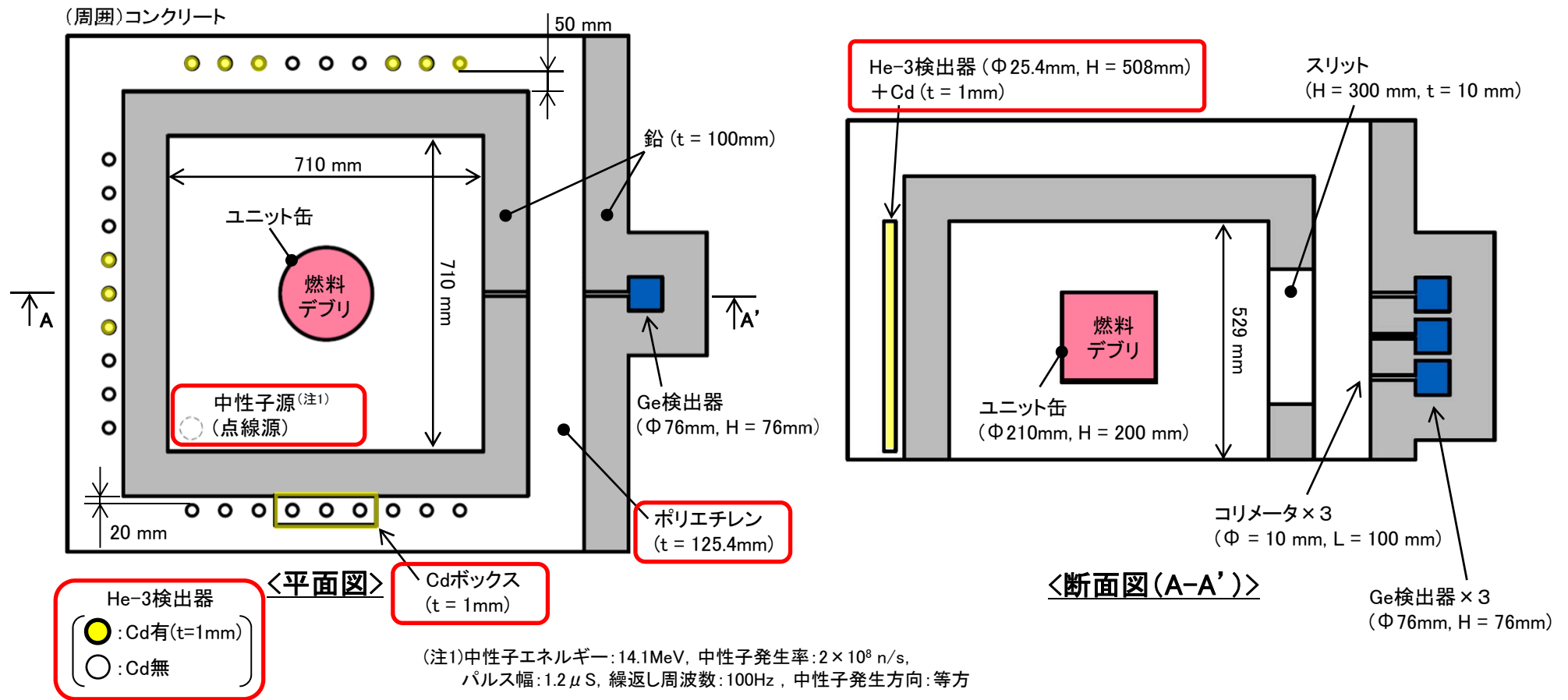
- 中性子源からパルス状の中性子を燃料デブリに繰り返し照射することにより、燃料デブリに含まれる核分裂性核種 (U-235, Pu-239など) から発生する中性子を計測する。



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

①-1 アクティブ中性子法A(1/11)

<計測装置概念の検討>...単一の計測装置により、アクティブn, パッシブn, γ の各計測法に対応可能な装置概念を検討。



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.46

①-1 アクティブ中性子法A(2/11)

<対象物条件の検討>

- 対象物条件:「**溶融デブリ**」「**MCCIデブリ**」「**金属デブリ**」(注1)を計測対象として想定。
- 評価対象とする容器は2021年度評価対象ケースより以下を想定。

デブリ性状	容器／容器形状	備考
溶融デブリ MCCIデブリ	ユニット缶 / φ210mm×H200mm	最小単位容器。線量寄与範囲, 線源量がより少なくなるH200mmで代表。
金属デブリ	廃棄物保管容器 (内容器) / □500mm×300mmH	廃棄物保管容器の遮蔽厚が未確定であるため, 遮蔽無し且つ保管容器よりも小さい内容器で代表。 (複数ある内(回収)容器候補から処理・処分PJでの代表候補を採用)

- 2021年度までの成果として整理した各影響因子より, 技術課題として抽出したパラメータ(**自己遮蔽**(注2)(組成), **燃焼度**, **中性子吸収材の有無**)に着目した検出器応答解析ケースを設定。

【解析ケース数】

A: 溶融デブリ ⇒ 計12ケース

(組成: 2ケース) × (燃焼度: 3ケース) × (中性子吸収材あり/なし)

B: MCCIデブリ ⇒ 計12ケース

(組成: 2ケース) × (燃焼度: 3ケース) × (中性子吸収材あり/なし)

C: 金属デブリ ⇒ 計3ケース

(組成: 3ケース) × (燃焼度: 1ケース) × (中性子吸収材なし)

計27ケース

⇒ 次ページより, 各ケースの条件一覧を示す

(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

(注2) 今後, 自己遮蔽の影響解析として, 偏在ケースも作業進捗に応じて実施する予定。

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

①-1 アクティブ中性子法A(3/11)

解析ケース表(溶融デブリ)

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子吸収材	FP放出率*1	冷却期間	偏在	容器	照射中性子源	
	デブリ性状	充填率内									充填率外
		組成	合計(充填率)								
A-1	溶融デブリ	UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-2		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-3		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-4		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-5		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-6		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-7		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-8		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-9		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-10		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-11		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-12		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)

*1「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

①-1 アクティブ中性子法A(4/11)

解析ケース表(MCCIデブリ)

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子吸収材	FP放出率*1	冷却期間	偏在	容器	照射中性子源	
	デブリ性状	充填率内									充填率外
		組成	合計(充填率)								
B-1	MCCI デブリ	UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 20.7vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-2				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-3				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-4		UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 50.7vol%	60 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-5				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-6				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-7		UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 20.7vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-8				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-9				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-10		UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 50.7vol%	60 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-11				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-12				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)

*1「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.49

①-1 アクティブ中性子法A(5/11)

解析ケース表(金属デブリ)

ケース No.	容器内組成			充填率外	燃焼度	中性子 吸収材	FP 放出率*1	冷却期間	偏在	容器*2	照射 中性子源
	デブリ 性状	充填率内									
		組成	合計(充填率)								
C-1	金属 デブリ	UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 29.85 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器 (内容器)	D-T反応 (14.1MeV)
C-2		UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 44.85 vol%	45 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器 (内容器)	D-T反応 (14.1MeV)
C-3		UO ₂ : 0.48vol% ZrO ₂ : 0vol% SUS: 10 vol%	10.48 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器 (内容器)	D-T反応 (14.1MeV)

*1 「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

*2 SUSが主であり、取り出しの初期段階で内容器に仕分けられることを想定

*3 各ケースの概要は以下のとおり

C-1: ベースケース

C-2: SUS組成に対する感度ケース

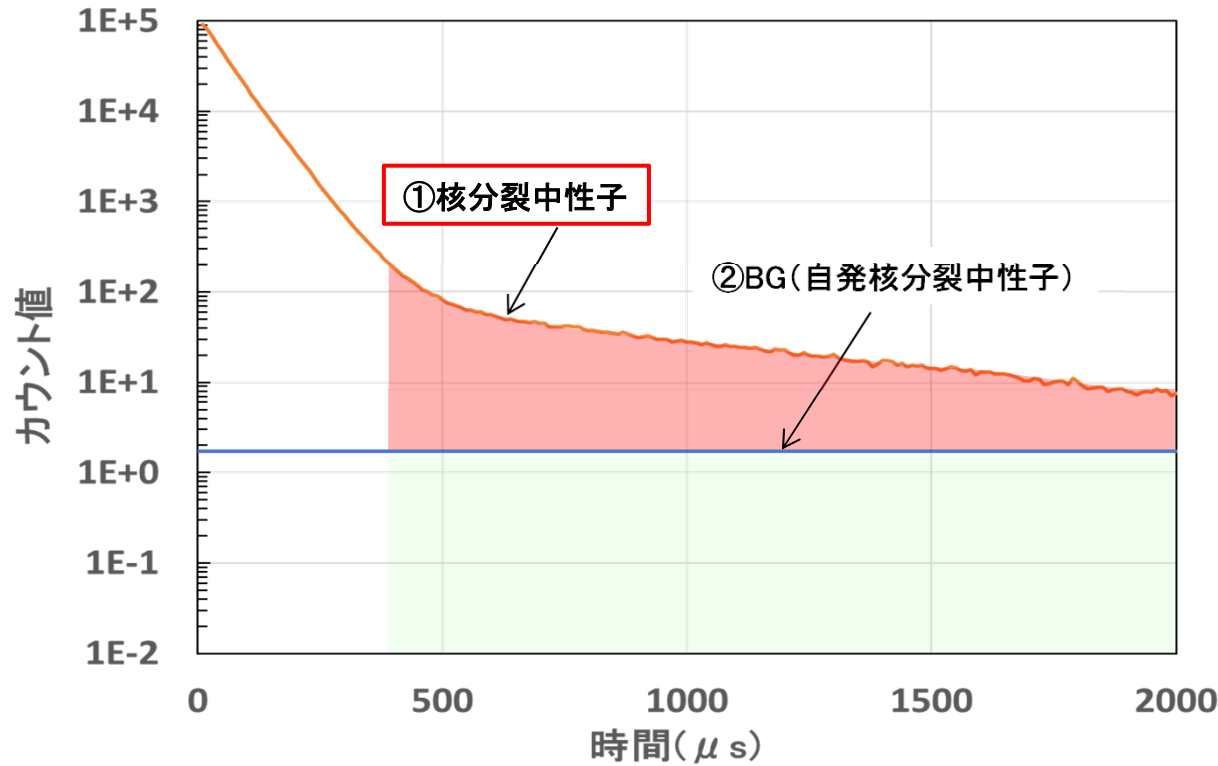
C-3: 未臨界担保の観点より、UO₂を3.7kg相当の体積割合とした感度ケース

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

①-1 アクティブ中性子法A(6/11)

＜溶融デブリ ベースケースの検出器応答＞

ケース No.	容器内組成				燃焼度	中性子吸収材	FP放出率	冷却期間	偏在	容器	照射中性子源
	デブリ性状	充填率内		充填率外							
		組成	合計(充填率)								
A-1	溶融デブリ	UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率) : 1wt% Empty : 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)



✓ 計測装置概念をモデル化した解析にて①の検出性が確認された。

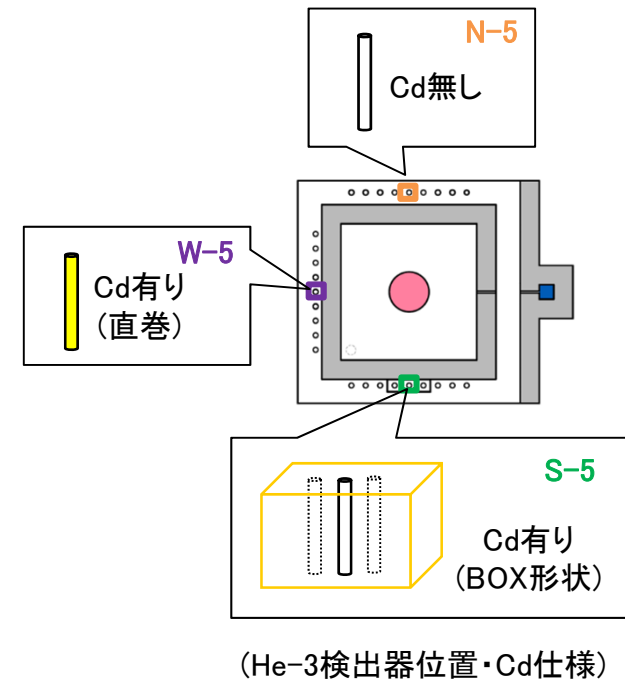
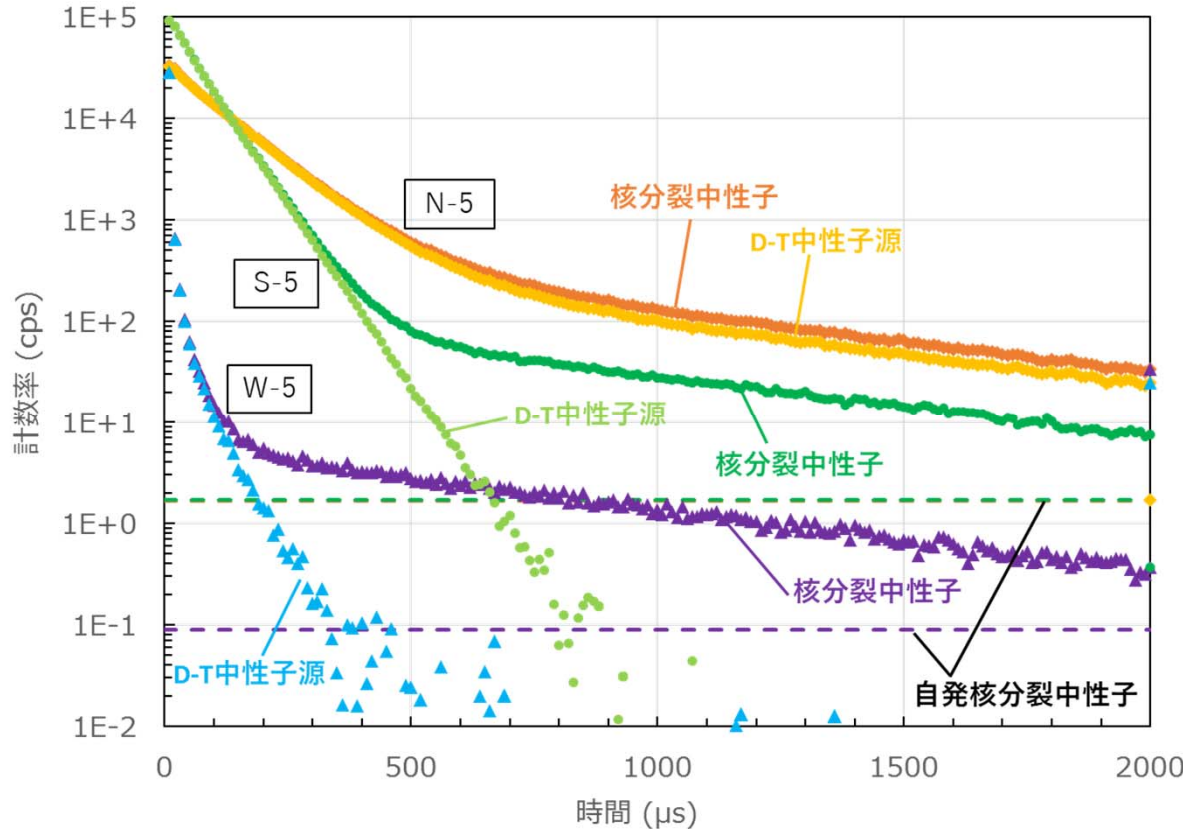


照射中性子により誘発された核分裂中性子の計数率積算値に着目

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

①-1 アクティブ中性子法A(7/11)

＜検出器仕様ごとの応答比較・採用検出器の選定＞



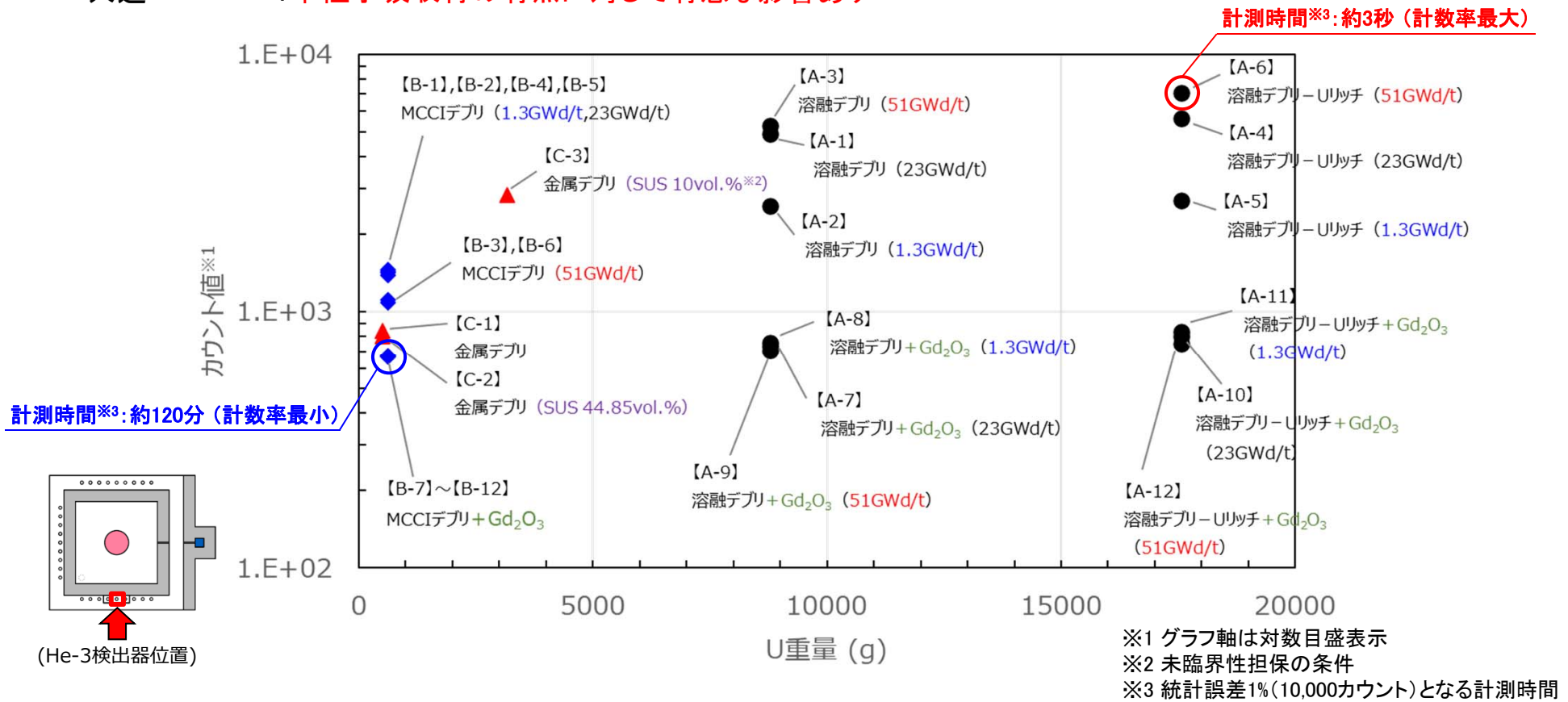
- He-3検出器の各仕様(N-5: Cd無し, W-5: Cd直巻, S-5: Cd BOX形状)での検出性を比較(溶融デブリベースケース)
 - N-5: D-T中性子源由来の中性子と燃料デブリ由来の核分裂中性子との弁別が困難
 - W-5: D-T中性子源由来の中性子のみならず燃料デブリからの核分裂中性子も吸収
 - S-5: D-T中性子源由来の中性子の検出数を効率的に低減することが可能

⇒ 以下, アクティブ中性子法Aでは, He-3検出器位置S-5に着目して結果・考察を整理

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

①-1 アクティブ中性子法A(8/11)

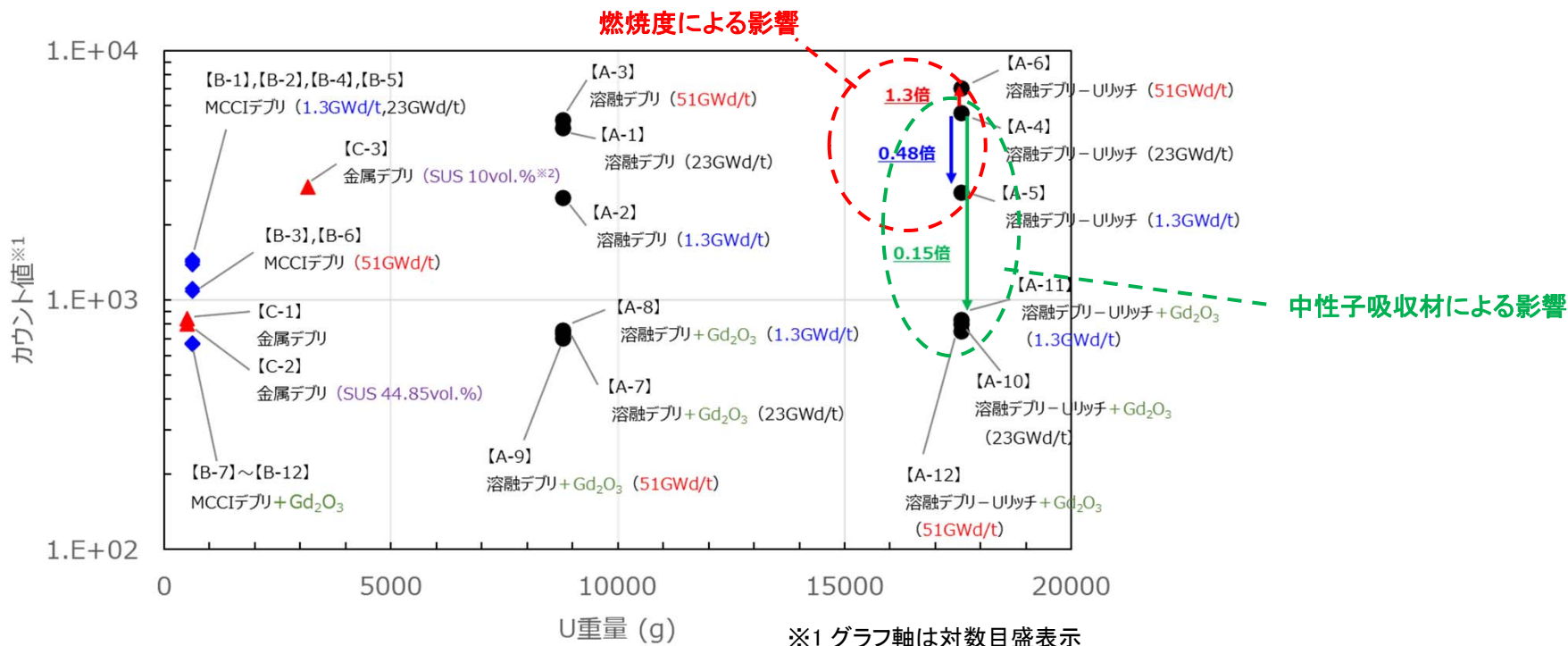
- ✓ 溶融デブリ : 計数率は 高燃焼度 > 平均燃焼度 > 低燃焼度 の順で高い値
(カウント値の大小関係は, UO_2 燃料中に含まれる可燃性毒物のGd量 (Gd-155, 157)に起因すると考えられる。)
- ✓ MCCIデブリ : 溶融デブリと比較し燃焼度の影響を受けにくい
- ✓ 金属デブリ : SUS量に対する感度は比較的小さい
C-3ケースの検知性を確認できたことで, **未臨界性担保に対する本計測手法の適用性を示唆**
- ✓ 共通 : **中性子吸収材の有無に対して有意な影響あり**



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

①-1 アクティブ中性子法A(9/11)

＜着目する影響因子に対する影響度の分析＞



影響度の最も大きいウランリッチの燃料デブリに対して分析

- ✓ 燃焼度による影響: 高燃焼度(51GWd/t)のカウント値はベースケース(燃焼度23GWd/t)の約1.3倍に増加
 低燃焼度(1.3GWd/t)のカウント値はベースケース(燃焼度23GWd/t)の約0.48倍に減少
- ✓ 中性子吸収材による影響: Gd含有率3vol%のカウント値はベースケース(Gd含有率0vol%)の約0.15倍に減少

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

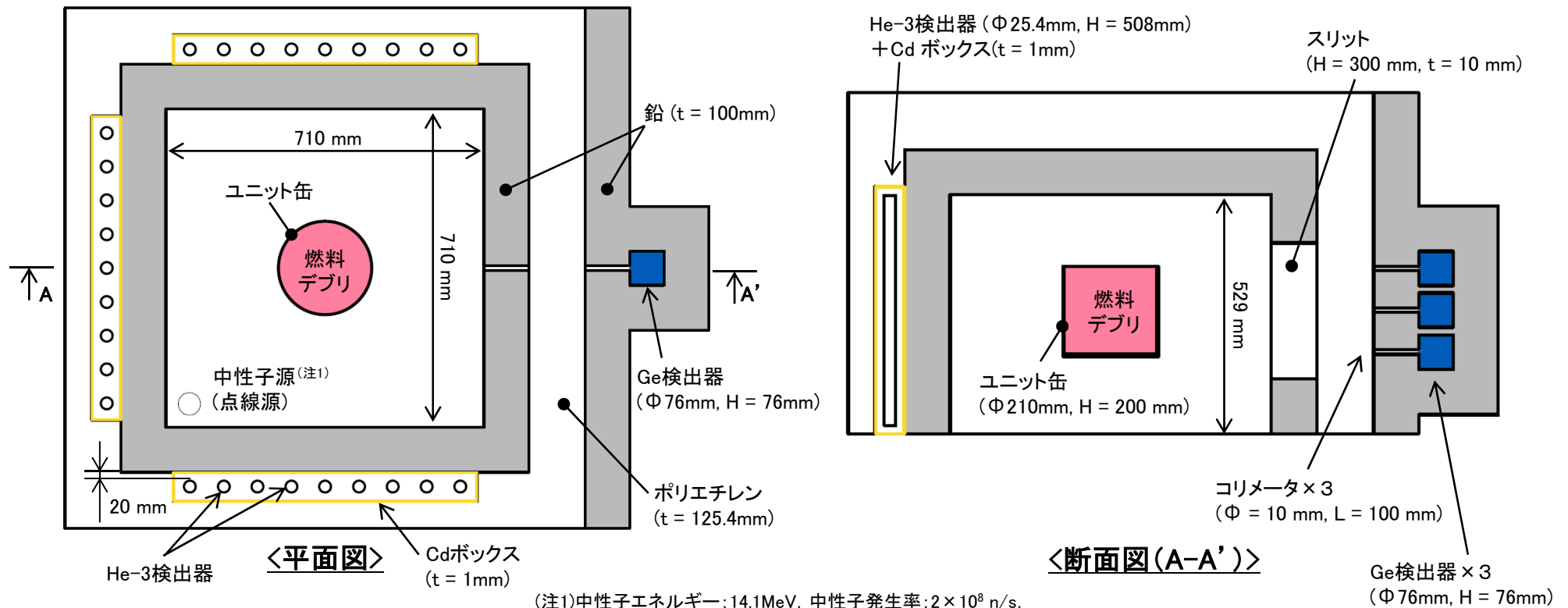
No.54

①-1 アクティブ中性子法A(10/11)

<計測装置概念の一次案>

- ✓ Cd無し : D-T中性子源由来の中性子と燃料デブリ由来の核分裂中性子との弁別が困難
- ✓ Cd有り(直巻) : D-T中性子源由来の中性子のみならず燃料デブリからの核分裂中性子も吸収
- ✓ Cd有り(ボックス形状) : D-T中性子源由来の中性子の検出数を効率的に低減することが可能

⇒ Cd有り(ボックス形状)を用いた計測体系を一次案と設定



(注1)中性子エネルギー:14.1MeV, 中性子発生率: 2×10^8 n/s,
パルス幅:1.2 μ S, 繰返し周波数:100Hz, 中性子発生方向:等方

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.55

①-1 アクティブ中性子法A(11/11)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

- 1) アクティブ中性子法の解析モデルを検討
- 2) 組成, 燃焼度, 中性子吸収材に着目した検出器応答解析を実施
- 3) 燃料デブリ仕分けに用いる計測装置概念を検討

【成果/開発への寄与】

- 1) アクティブ中性子法, パッシブ中性子法, パッシブガンマ線法を組み合わせた解析モデルを作成
- 2) 27ケースの検出器応答解析の結果を取得
 - ・組成の影響 : 廃棄物内容器(金属デブリ)の未臨界性担保に対して, アクティブ中性子計測法の適用性が示唆されることを確認
 - ・燃焼度の影響 : 燃焼度が約2.2倍(23→51GWd/t)で, カウント値は約1.3倍に増加
燃焼度が約0.06倍(23→1.3GWd/t)で, カウント値は約0.48倍に減少
 - ・中性子吸収材の影響: Gd含有率が0vol%から3vol%に増加で, カウント値は約0.15倍に減少
- 3) アクティブ中性子法, パッシブ中性子法, パッシブガンマ線法を組み合わせた計測装置概念を構築
 - ・検出器仕様: Cdボックスに収納したHe-3検出器(D-T中性子源由来の中性子の検出数を効率的に低減)
 - ・装置寸法 : W5m×D4m×H3m程度(ユニット缶および廃棄物内容器に対応)
 - ・計測時間 : 約3秒(溶融デブリ, U量17.6kg, 高燃焼度(51GWd/t), 中性子吸収材なし)
約120分(MCCIデブリ, U量0.6kg, 高燃焼度(51GWd/t), 中性子吸収材あり)

【課題と対応策】

- 1) 課題: 燃焼度, 中性子吸収材による誤差低減
対応策: 中性子消滅時間による補正方法の最適化検討, Cm-244とEu-154の比による補正方法の詳細検討, PGA法などの適用検討
- 2) 課題: 装置構造の最適化に資するデータ不足
対応策: 解析による装置構造に対するパラメータスタディの拡充, 要素技術確認試験結果の反映

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

(①-2 アクティブ中性子法B)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
①-1	アクティブ中性子法 A	He-3	D-T	側方から	核分裂性核種質量	核分裂性核種質量	MHI	43-55 161-179
①-2	同 B	B-10	D-T/ 加速器中性子源	上方から	同上	同上	日立GE	56-69 180-183
①-3	同 C (FNDI法+PGA法)	B-10ストロー/He-3 (試験で決定)	D-T/D-D (試験で決定)	側方から	同上	同上	JAEA	70-80 184-191

【特長】

- 検出器は、高ガンマ線場への対応を重視して、B-10検出器を選定。
- 照射線源は、中性子発生効率を重視して、D-T中性子源または加速器中性子源を選定。
- 中性子照射方向は、対称性の高さを重視して、対象物上方からの照射を選定。

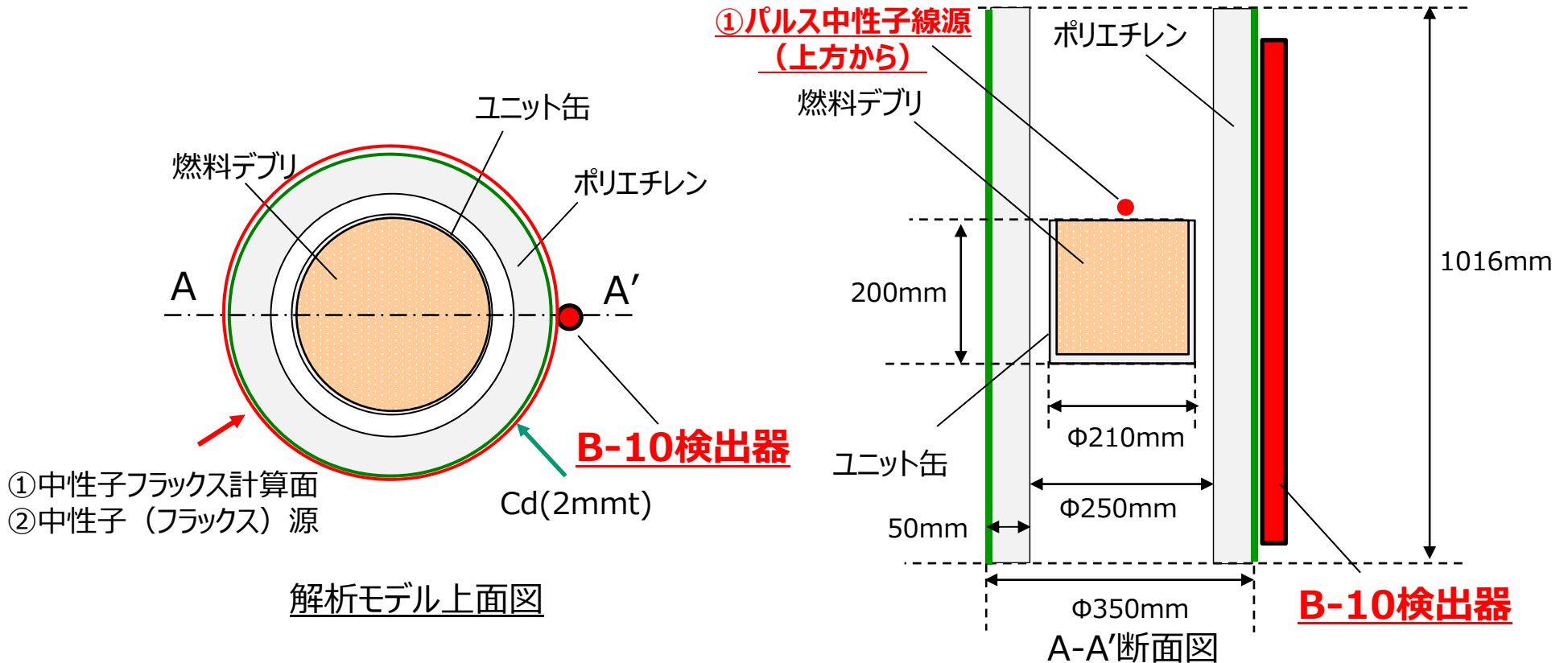
4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.57

①-2 アクティブ中性子法B(1/13)

<検出器応答解析モデル>

- ◆ 体系: 令和3年度と同様の体系 (Cd:2mm厚, ポリエチレン:50mm厚) で, **B-10検出器** 応答を評価
- ◆ 中性子源: (標準的な中性子発生管の条件を参考)
中性子エネルギー: 14.1MeV, 中性子発生率: 2×10^8 n/s, 中性子発生方向: 等方, パルス幅: 1.2 μ s, 繰返し周波数: 100Hz
- ◆ 評価方法
 - ① **中性子を上方から照射**し, 検出器内側の中性子フラックス計算
 - ② ①のフラックスをソースとして検出器内デポジットエネルギーを計算



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.58

①-2 アクティブ中性子法B(2/13)

<検出器応答解析ケース>

◆ 解析条件1 (U量3.7kgのケース)

解析ケース		UO ₂ (vol%)	ZrO ₂ (vol%)	SUS (vol%)	Conc (vol%)	充填率 (vol%)	充填率 以外	燃焼度 (GWd/t)	照射 中性子源	冷却期間 (年)	U量 (kg)	
溶融 デブリ	3-1	ベース	6.3	6.3	0	0	12.6	H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	3.7
	3-2	溶融デブリ (U少)	6.3	19	0	0	25.3	H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	3.7
	3-3	Gd含有率	6.3	6.3	0	0	12.6	Gd ₂ O ₃ :3vol% H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	3.7
	3-4	Gd含有率	6.3	6.3	0	0	12.6	Gd ₂ O ₃ :30vol% H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	3.7
	3-5	B含有率	6.3	6.3	0	0	12.6	B ₄ C:0.51vol% H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	3.7
	3-6	B含有率	6.3	6.3	0	0	12.6	B ₄ C:10vol% H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	3.7
	3-7	含水率	6.3	6.3	0	0	12.6	H ₂ O:0.1wt%	23.0	D-T反応	20	3.7
	3-8	含水率	6.3	6.3	0	0	12.6	H ₂ O:70vol%	23.0	D-T反応	20	3.7
	3-9	燃焼度(低)	6.2	6.2	0	0	12.4	H ₂ O:1wt%	1.3	D-T反応	20	3.7
	3-10	燃焼度(高)	6.5	6.5	0	0	13.0	H ₂ O:1wt%	51.0	D-T反応	20	3.7
3-12	加速器中性子源	6.3	6.3	0	0	12.6	H ₂ O:1wt%	23.0	加速器	20	3.7	
MCCI	3-14	ベース	6.3	6.3	4.5	12.9	30	H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	3.7
	3-15	充填率(高)	6.3	6.3	9.6	27.7	50	H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	3.7

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.59

①-2 アクティブ中性子法B(3/13)

◆ 解析条件2(U量誤差範囲評価ケース)

解析ケース			UO ₂ (vol%)	ZrO ₂ (vol%)	SUS (vol%)	Conc (vol%)	充填率 (vol%)	充填率 以外	燃焼度 (GWd/t)	照射 中性子源	冷却期間 (年)	U量(kg)	
溶融 デブリ	3-18	ベース ケース	充填率(低)	3.00	3.00	0	0	6.00	H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	1.76
	3-19		充填率(中)	10.00	10.00	0	0	20.00	H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	5.86
	3-20		充填率(高)	15.00	15.00	0	0	30.00	H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	8.79
	3-21	Gd 含有率 (低)	充填率(低)	3.00	3.00	0	0	6.00	Gd ₂ O ₃ :3vol% H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	1.76
	3-22		充填率(中)	10.00	10.00	0	0	20.00	Gd ₂ O ₃ :3vol% H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	5.85
	3-23		充填率(高)	15.00	15.00	0	0	30.00	Gd ₂ O ₃ :3vol% H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	8.78
	3-24	B 含有率 (低)	充填率(低)	3.00	3.00	0	0	6.00	B ₄ C:0.51vol% H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	1.76
	3-25		充填率(中)	10.00	10.00	0	0	20.00	B ₄ C:0.51vol% H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	5.86
	3-26		充填率(高)	15.00	15.00	0	0	30.00	B ₄ C:0.51vol% H ₂ O:1wt%	23.0	D-T反応	20	8.79
	3-27	含水率 (高)	充填率(低)	3.00	3.00	0	0	6.00	H ₂ O:70wt%	23.0	D-T反応	20	1.76
	3-28		充填率(中)	10.00	10.00	0	0	20.00	H ₂ O:70wt%	23.0	D-T反応	20	5.86
	3-29		充填率(高)	15.00	15.00	0	0	30.00	H ₂ O:70wt%	23.0	D-T反応	20	8.79
3-30	燃焼度 (低)	充填率(低)	3.00	3.00	0	0	6.00	H ₂ O:1wt%	1.3	D-T反応	20	1.80	
3-31		充填率(中)	10.00	10.00	0	0	20.00	H ₂ O:1wt%	1.3	D-T反応	20	5.99	
3-32		充填率(高)	15.00	15.00	0	0	30.00	H ₂ O:1wt%	1.3	D-T反応	20	8.98	

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.60

①-2 アクティブ中性子法B(4/13)

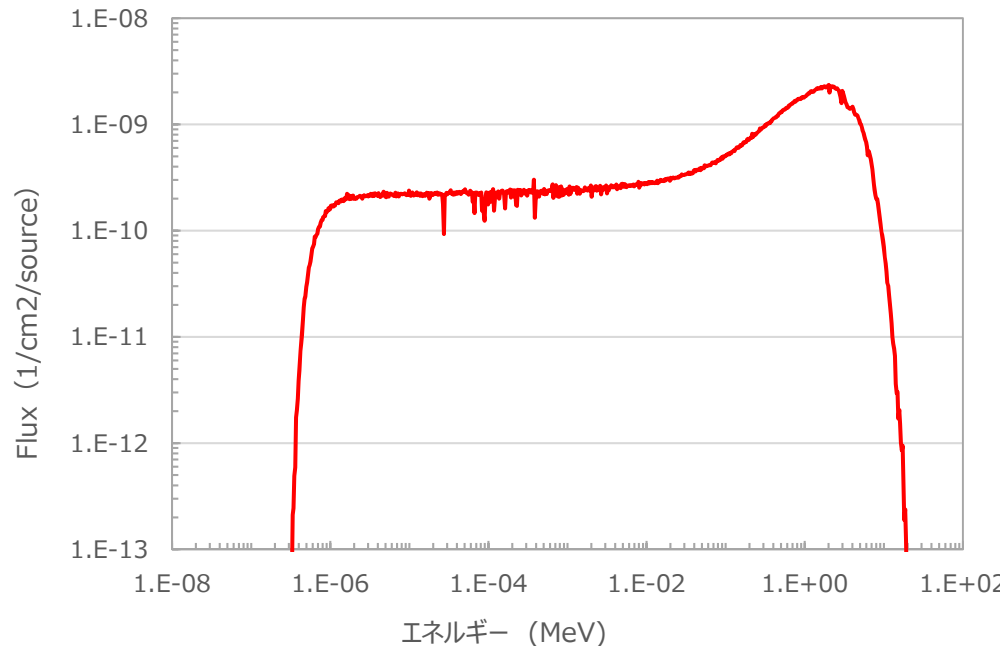
<検出器応答解析結果>

◆ ベースケース【3-1溶融デブリ】での中性子フラックスと検出器応答スペクトル計算結果

➤ 中性子フラックス(Cd外側円柱側面)

・50 μ s~2,000 μ sの積分値

(中性子源：パルス幅1.2 μ s, 繰返し周波数100Hz)

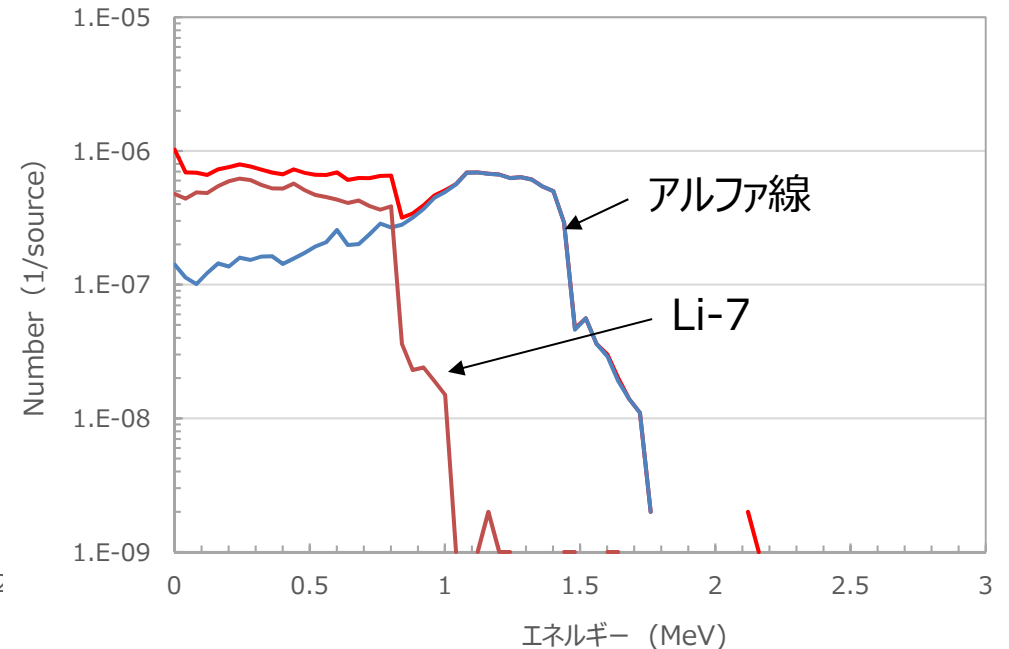


➤ 検出器応答スペクトル(B-10検出器)

・B-10検出器仕様：直径(内径) 25.4mm,

有効長1000mm,ハウジング厚0.5mm(SUS304)

B-10厚0.8547 μ m(=0.2mg/cm²), Arガス圧0.3atm



➤ 計数率

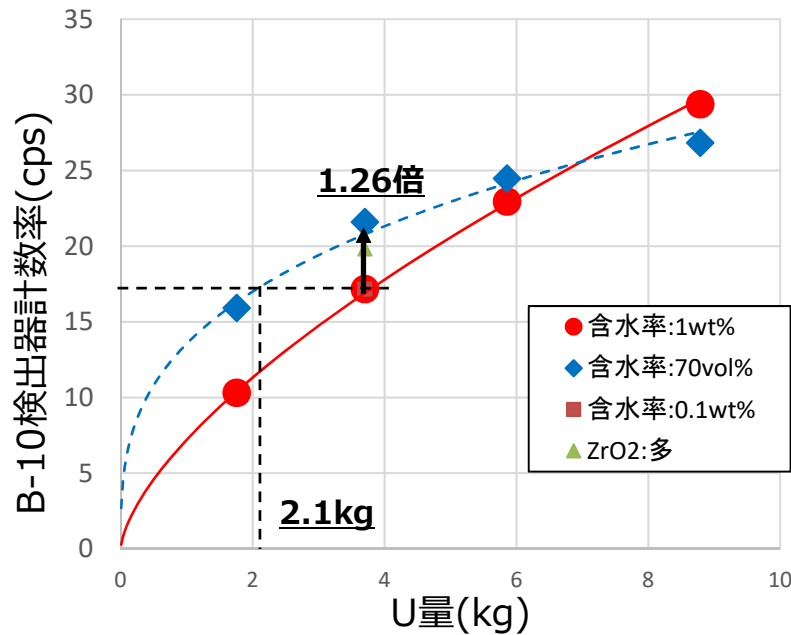
検出器応答において80keV以上のエネルギーを付与するアルファ線およびLi-7をカウント

⇒ **17.2cps (+0.7cps(BG:Cm-244))**

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

①-2 アクティブ中性子法B(5/13)

◆ 溶融デブリ 組成/含水率影響



◆U量依存性

①ベースケース (含水率 : 1wt%)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	H ₂ O 含水率	
			wt%	vol%
3-1	3.70	1.72E+01	1wt%	1.0vol%
3-18	1.76	1.03E+01	1wt%	0.5vol%
3-19	5.86	2.29E+01	1wt%	1.6vol%
3-20	8.79	2.94E+01	1wt%	2.4vol%

②含水率大 (含水率 : 70vol%)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	H ₂ O 含水率	
			wt%	vol%
3-27	1.76	1.59E+01	59wt%	70vol%
3-8	3.70	2.16E+01	41wt%	70vol%
3-28	5.86	2.45E+01	30wt%	70vol%
3-29	8.79	2.68E+01	22wt%	70vol%

◆含水率依存性 (U量3.7kg)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	H ₂ O 含水率	
			wt%	vol%
3-1	3.70	1.72E+01	1wt%	1vol%
3-7	3.70	1.71E+01	0.1wt%	0.1vol%
3-8	3.70	2.16E+01	41wt%	70vol%

◆溶融デブリ組成

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	備考
3-2	3.70	1.98E+01	溶融デブリ, ZrO ₂ 多

- U重量3.7kgの場合, ベースケース(含水率1wt%)の計数率(1.72E+1cps)と比較
 - ・含水率0.1wt%: 計数率(1.71E+1cps)で変化なし
 - ・含水率41wt%: 計数率(2.16E+1cps, 1.26倍)に増加
 - ・組成(ZrO₂増加): 計数率(1.98E+1cps, 1.15倍)に増加
- ベースケース(U重量3.7kg)の計数率(1.72E+1cps)となるU重量
 - ・含水率70vol%: 2.1kg(0.57倍)

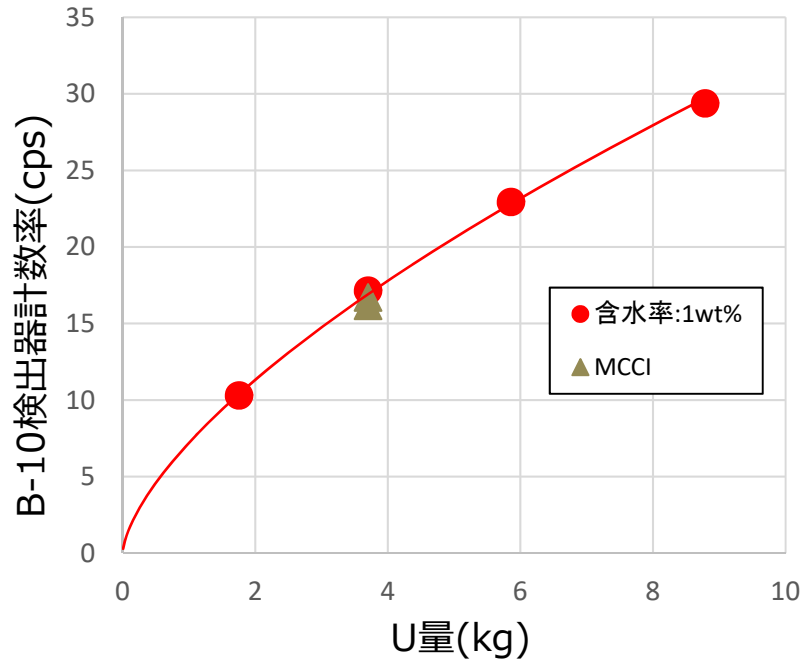
注) 計数率にBG(Cm-244カウント)含まず

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.62

①-2 アクティブ中性子法B(6/13)

◆ MCCIデブリ



◆ U量依存性

①ベースケース (溶融デブリ)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	備考
3-1	3.70	1.72E+01	溶融デブリ
3-18	1.76	1.03E+01	
3-19	5.86	2.29E+01	
3-20	8.79	2.94E+01	

◆ MCCI (U量3.7kg)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	備考
3-14	3.70	1.67E+01	MCCI
3-15	3.70	1.62E+01	

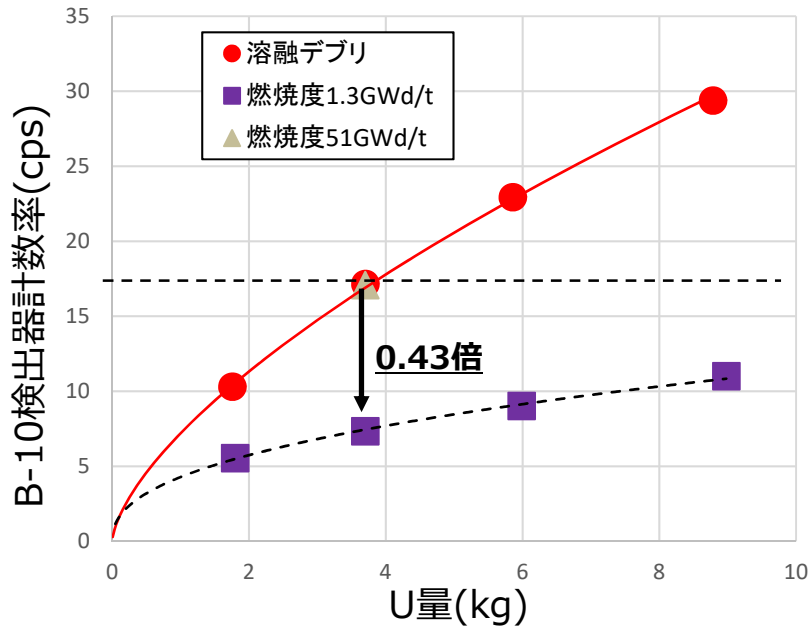
- U重量3.7kgの場合, ベースケース(溶融デブリ)の計数率(1.72E+1cps)と比較
・MCCIの場合: 計数率(1.62E+1cps, 0.94倍)～(1.67E+1cps, 0.97倍)とほぼ同等

注)計数率にBG(Cm-244カウント)含まず

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

①-2 アクティブ中性子法B(7/13)

◆ 燃焼度影響



◆ U量依存性

①ベースケース (燃焼度 : 23GWd/t) ②燃焼度小 (燃焼度 : 1.3GWd/t)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	燃焼度 (GWd/t)
3-1	3.70	1.72E+01	23.0
3-18	1.76	1.03E+01	23.0
3-19	5.86	2.29E+01	23.0
3-20	8.79	2.94E+01	23.0

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	燃焼度 (GWd/t)
3-30	1.80	5.55E+00	1.3
3-9	3.70	7.34E+00	1.3
3-31	5.99	9.02E+00	1.3
3-32	8.98	1.10E+01	1.3

◆ 燃焼度依存性 (U量3.7kg)

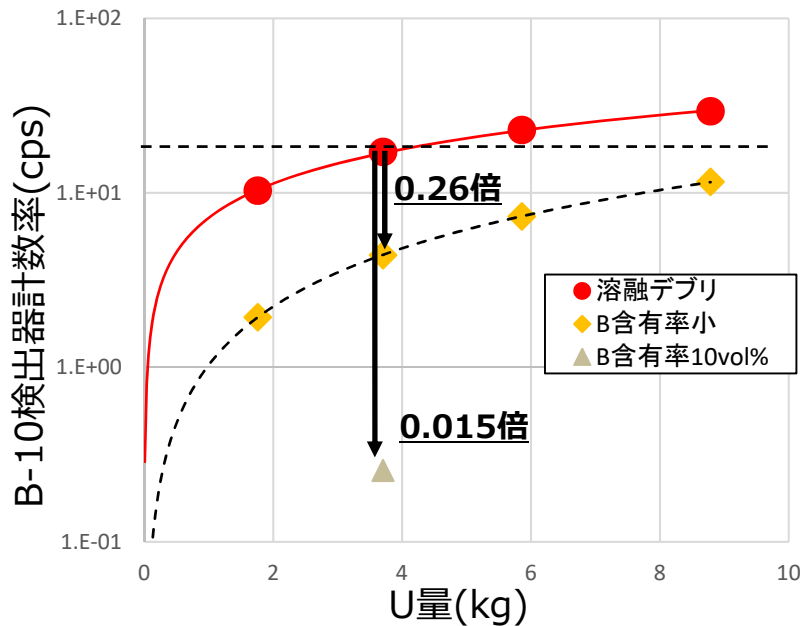
ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	燃焼度 (GWd/t)
3-1	3.70	1.72E+01	23.0
3-9	3.70	7.34E+00	1.3
3-10	3.70	1.71E+01	51.0

- U重量3.7kgの場合, ベースケース(燃焼度23GWd/t)の計数率(1.72E+1cps)と比較
 - ・燃焼度51GWd/t: 計数率(1.71E+1cps)で変化なし(Cm-244計数率4.1cps)
 - ・燃焼度1.3GWd/t: 計数率(7.34E+0cps, 0.43倍)に減少(Cm-244計数率2.6E-4)
- ベースケース(U重量3.7kg)の計数率(1.72E+1cps)となるU重量
 - ・燃焼度1.3GWd/t: 10kg以上

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

①-2 アクティブ中性子法B(8/13)

◆ B含有率影響



◆ U量依存性

① ベースケース (B含有率 : 0vol%)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	B含有率
3-1	3.70	1.72E+01	0vol%
3-18	1.76	1.03E+01	0vol%
3-19	5.86	2.29E+01	0vol%
3-20	8.79	2.94E+01	0vol%

② B含有率小 (B含有率 : 0.51vol%)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	B含有率
3-24	1.76	1.94E+00	0.51vol%
3-5	3.70	4.40E+00	0.51vol%
3-25	5.86	7.33E+00	0.51vol%
3-26	8.79	1.16E+01	0.51vol%

◆ B含有率依存性 (U量3.7kg)

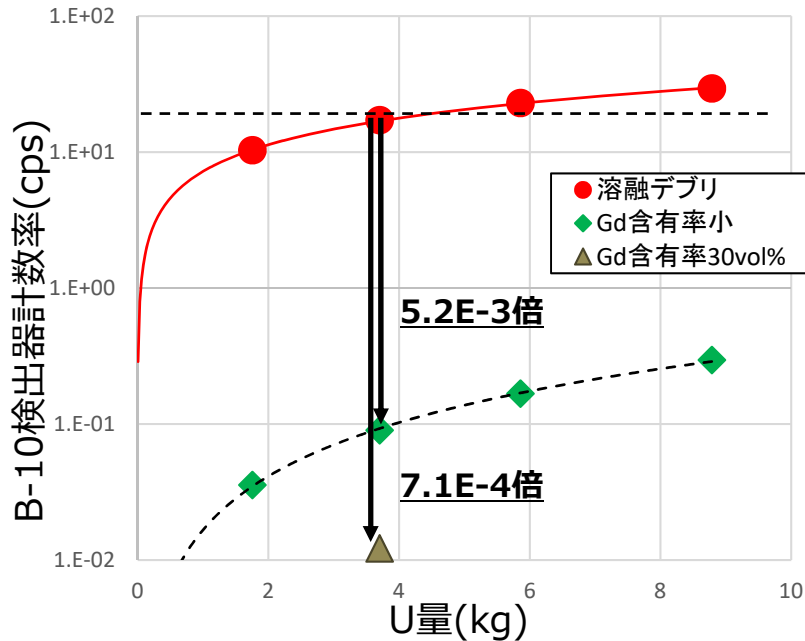
ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	B含有率
3-1	3.70	1.72E+01	0vol%
3-5	3.70	4.40E+00	0.51vol%
3-6	3.70	2.56E-01	10vol%

- U重量3.7kgの場合, ベースケース (B含有率0vol%) の計数率 (1.72E+1cps) と比較
 - ・ B含有率増加 (0.51vol% ~ 10vol%) : 計数率 (4.40E+0cps, 0.26倍) ~ (2.56E-1cps, 1.5E-2倍) に減少
 - ⇒ B含有率が増加するとBG計数率0.7cps (Cm-244計数率) 以下
- ベースケース (U重量3.7kg) の計数率 (1.72E+1cps) となるU重量
 - ・ B含有率0.51vol% : 9kg以上

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

①-2 アクティブ中性子法B(9/13)

◆ Gd含有率影響



◆ U量依存性

①ベースケース(Gd含有率 : 0vol%)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	Gd含有率
3-1	3.70	1.72E+01	0vol%
3-18	1.76	1.03E+01	0vol%
3-19	5.86	2.29E+01	0vol%
3-20	8.79	2.94E+01	0vol%

②Gd含有率小(Gd含有率 : 3vol%)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	Gd含有率
3-21	1.76	3.55E-02	3vol%
3-3	3.70	8.98E-02	3vol%
3-22	5.86	1.67E-01	3vol%
3-23	8.79	2.95E-01	3vol%

◆ Gd含有率依存性 (U量3.7kg)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	Gd含有率
3-1	3.70	1.72E+01	0vol%
3-3	3.70	8.98E-02	3vol%
3-4	3.70	1.22E-02	30vol%

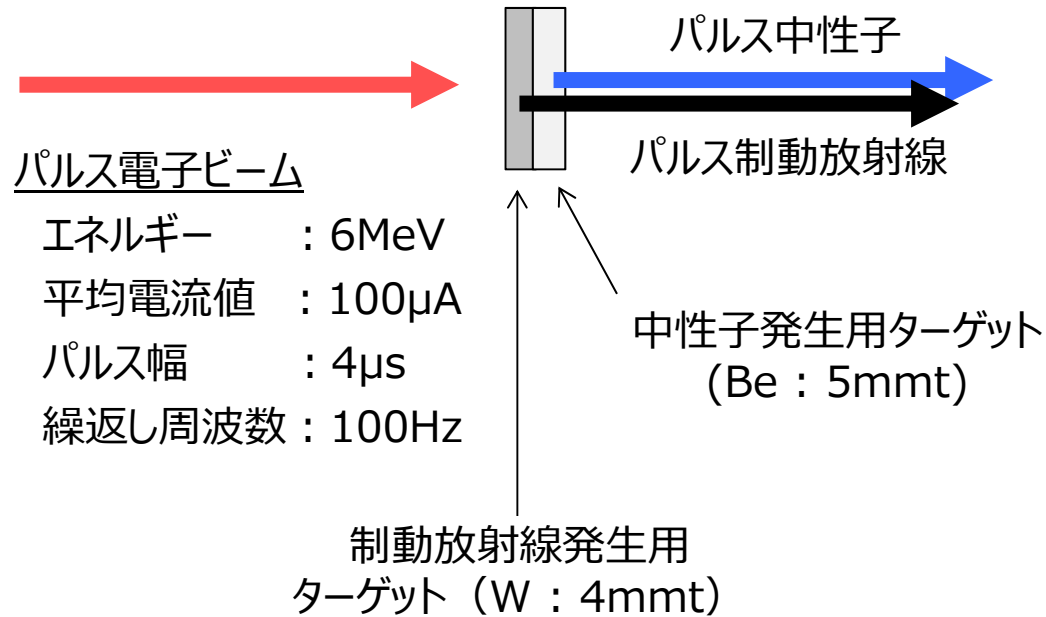
- U重量3.7kgの場合, ベースケース(Gd含有率0vol%)の計数率(1.72E+1cps)と比較
 - ・Gd含有率増加(3vol%~30vol%): 計数率(8.98E-2cps, 5.2E-3倍)~(1.22E-2cps, 7.1E-4倍)に減少
 ⇒Gd含有率3vol%でBG計数率0.7cps(Cm-244計数率)以下
- ベースケース(U重量3.7kg)の計数率(1.72E+1cps)となるU重量
 - ・Gd含有率3vol%: 10kg以上

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

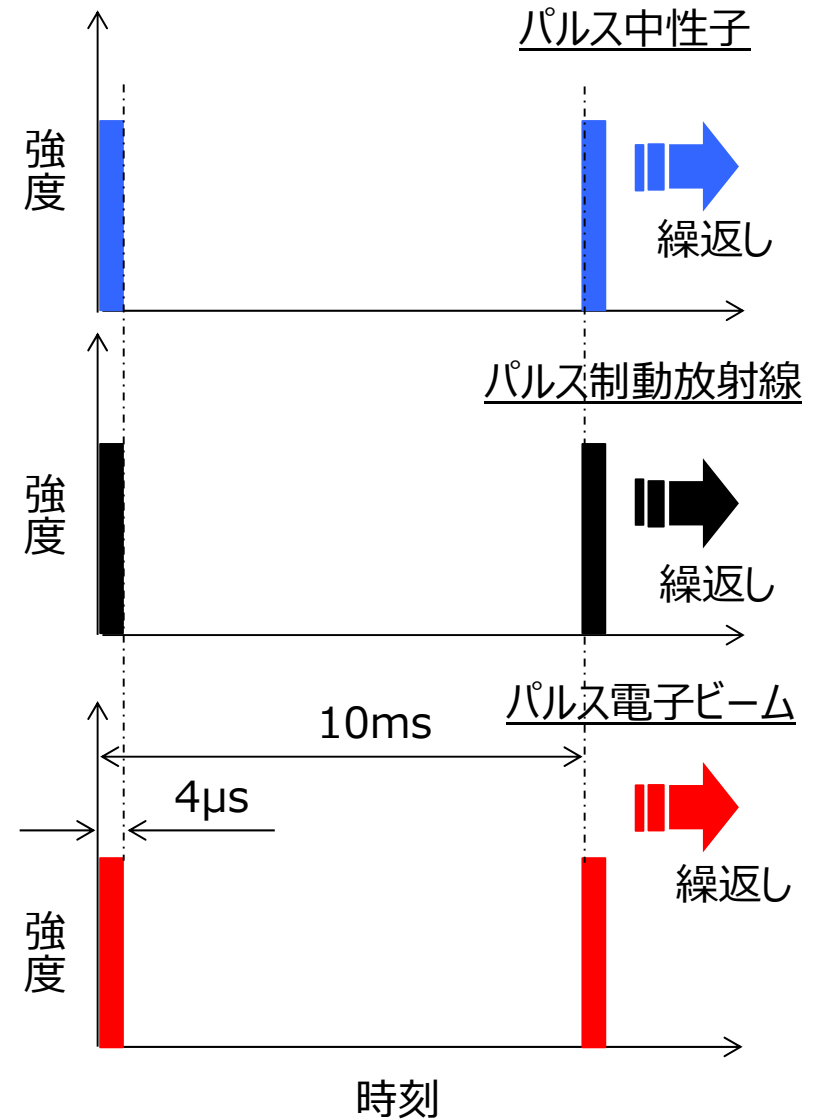
No.66

①-2 アクティブ中性子法B(10/13)

◆ 加速器中性子源【ケースNo.3-12】



中性子発生率 : 4.5×10^8 個/秒
平均中性子エネルギー : 1.13MeV



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

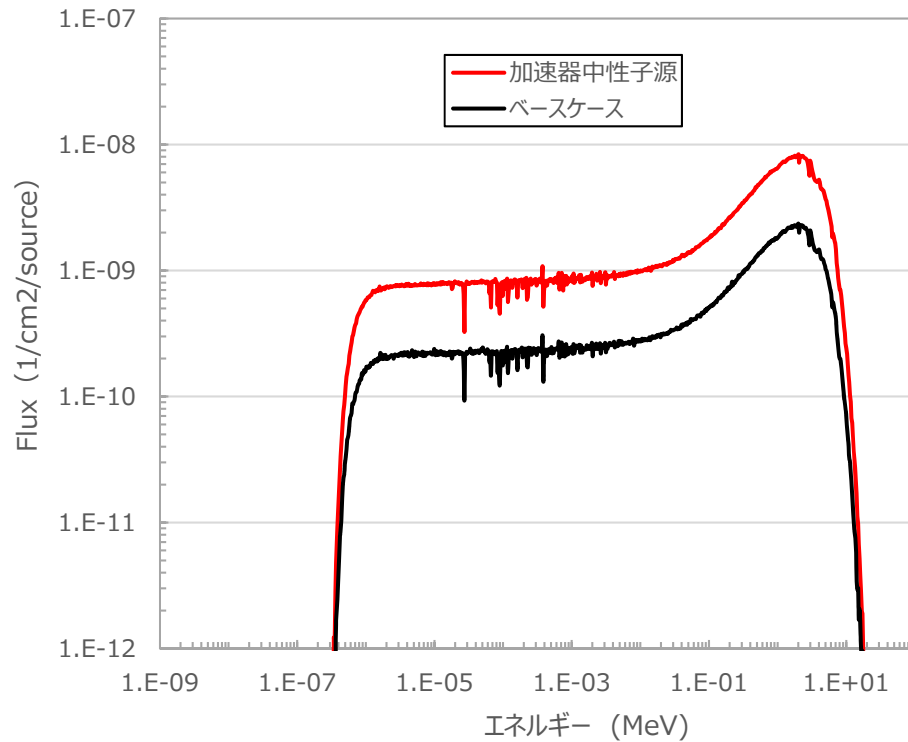
No.67

①-2 アクティブ中性子法B(11/13)

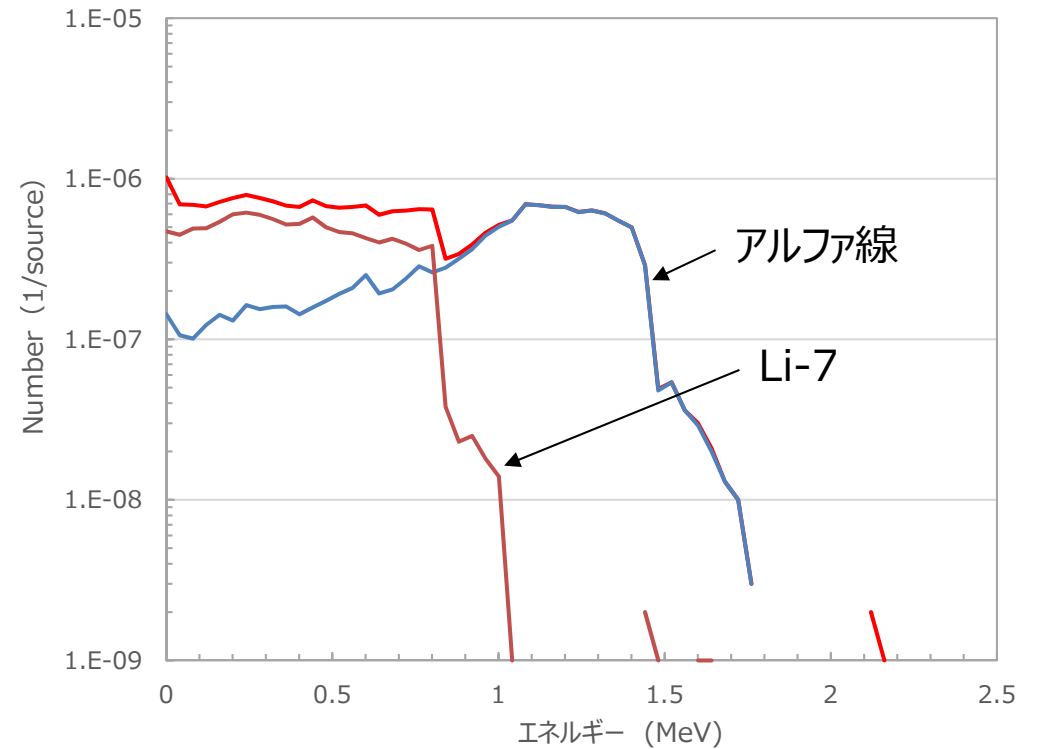
◆ 加速器中性子源【ケースNo.3-12】

➤ 中性子フラックス(Cd外側円柱側面)

・50 μ s~2,000 μ sの積分値



➤ 検出器応答スペクトル(B-10検出器)



➤ 計数率

検出器応答において80keV以上のエネルギーを付与するアルファ線およびLi-7をカウント

⇒ **137cps (ベースケースの8.0倍)**

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

①-2 アクティブ中性子法B(12/13)

<装置概念>

◆ 計測時間

- ・ベースケースでは必要計測時間10分程度であり十分
- ・中性子吸収材含有量が数vol%以上の場合、
BG計数率(0.7cps)以下となる

⇒課題1: 誘発核分裂性中性子の計数率の向上

課題2: 中性子検出効率の向上 (BG 0.7cps程度の計測⇒必要計測時間4時間)

◆ 対策案1(課題1)

①中性子源の中性子束の増大

課題: 中性子源メーカ依存

②照射中性子エネルギーを下げる

- ・ポリエチレンなどによる減速
- ・中性子源: D-T(14.1MeV)⇒ D-D(2.45MeV)⇒ 加速器(1.1MeV)

課題: 中性子減速材配置の最適化, 中性子源の選定(実運用可能な中性子線源の選定)

③加速器中性子源 (感度8倍)

課題: 性能の実証

◆ 対策案2(課題2)

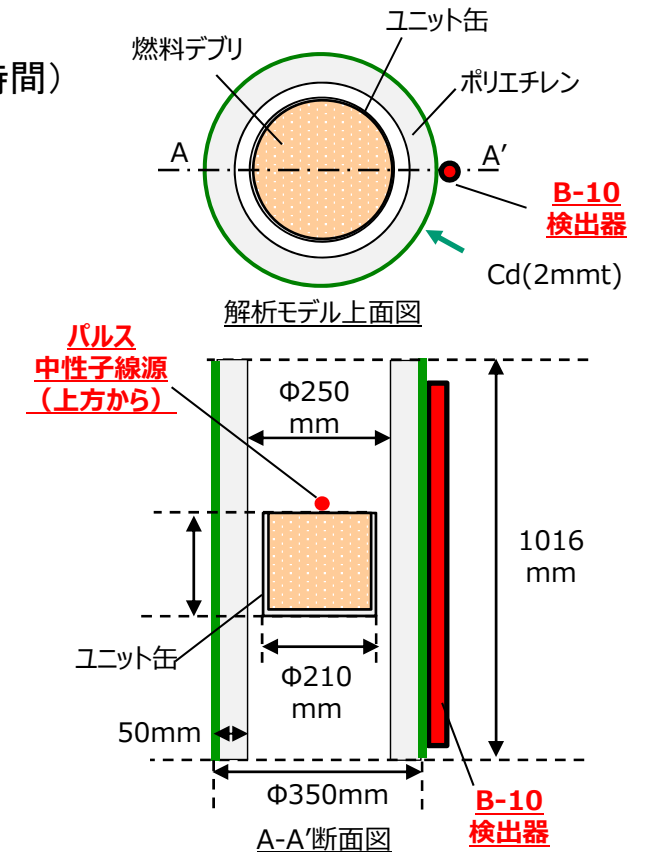
①検出器数増: 1個⇒ 45個程度(1段)⇒ 100個程度(複数段)

課題: 検出器配置の最適化, 検出器コスト

②ポリエチレン減速材配置の最適化

- ・収納缶全方位にポリエチレン設置, 検出器外側にポリエチレン設置

解析ケース	計数率 [cps]	1万カウント必要時間			
		[sec]	[min]	[hour]	
3-1	ベース(ユニット缶)	1.72E+01	5.8E+02	9.7E+00	1.6E-01
3-5	B含有率0.51vol%	4.40E+00	2.3E+03	3.8E+01	6.3E-01
3-6	B含有率(10vol%)	2.56E-01	NG		
3-3	Gd含有率(3vol%)	8.98E-02	NG		
3-4	Gd含有率(30vol%)	1.22E-02	NG		



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.69

①-2 アクティブ中性子法B(13/13)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

- 1) U量を仕分け基準値である3.7kgに設定した検出器応答解析(B-10中性子検出器, D-T中性子源または加速器中性子源)によるU量評価誤差の検討
- 2)上記結果に基づき必要計測時間(10000カウント(1%誤差))を試算し計測装置概念を検討

【成果/開発への寄与】

- 1)ベースケース(溶融デブリ U量3.7kg)の計数率(1.72E+1cps)と比較し以下の結論を得た

①中性子吸収材影響:

- ・B含有率増加(0.51vol%~10vol%): 計数率(4.40E+0cps, 0.26倍)~(2.56E-1cps, 1.5E-2倍)に減少
- ・Gd含有率増加(3vol%~30vol%): 計数率(8.98E-2cps, 5.2E-3倍)~(1.22E-2cps, 7.1E-4倍)に減少

②含水率および燃料デブリ組成影響:

- ・含水率(0.1wt%~41wt%): 計数率(1.71E+1cps, 1.00倍)~(2.16E+1cps, 1.26倍)に増加
- ・組成(ZrO₂増加): 計数率(1.98E+1cps, 1.15倍)に増加
- ・MCCIの場合: 計数率(1.62E+1cps~1.67E+1cps)とほぼ同等

③燃焼度影響(1.3GWd/t ~ 51GWd/t): 計数率(7.34E+0cps, 0.43倍)~(1.71E+1cps, 1.00倍)の変動

④加速器中性子源【仕様:エネルギー6MeV, 平均電流値100μA, パルス幅4μs, 繰返し周波数100Hz, Wターゲット & Beコンバータ】

- ・計数率(1.37E+2cps)でありベースケース(D-T中性子源)の8.0倍に増加

2)必要計測時間:

- ・ベースケース(溶融デブリ U量3.7kg): 約10分
- ・中性子吸収材含有量増加(数vol%)で計数率がBG以下(計測不可)となる

【課題と対応策】

- 1)課題:中性子吸収材影響が大きく補正が必須 ⇒ 対応策:中性子吸収材補正候補のCTやPGA法の有効性評価
- 2)課題:誘発核分裂性中性子計数率の向上 ⇒ 対応策:中性子減速材などにより照射中性子の低エネルギー化, 加速器中性子源の選定
- 3)課題:中性子計測感度(BG計測4時間必要)の向上 ⇒ 対応策:検出器個数増大(複数段配置), 減速材配置の最適化

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

(①-3 アクティブ中性子法C)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
①-1	アクティブ中性子法 A	He-3	D-T	側方から	核分裂性核種質量	核分裂性核種質量	MHI	43-55 161-179
①-2	同 B	B-10	D-T/ 加速器中性子源	上方から	同上	同上	日立GE	56-69 180-183
①-3	同 C (FNDI法+PGA法)	<u>B-10ストロー/He-3</u> (試験で決定)	<u>D-T/D-D</u> (試験で決定)	<u>側方から</u>	同上	同上	JAEA	70-80 184-191

【特長】

- 影響因子による検出器応答のばらつきを排除するため、ウラン廃棄物(JAEA/人形峠)でIAEA認可の実績がある高速中性子直接問いかけ法(FNDI法)を導入。
- 中性子吸収材の影響を補正するため即発ガンマ線分析法(PGA法)を導入。
- 高ガンマ線場に対応するため、B-10ストロー検出器を導入。
- 少量ウラン時などにおける検出器感度を高めるため、高速中性子検出器バンクを導入。

FNDI法とPGA法の組み合わせは、燃料デブリやその他の放射性廃棄物の多様性を考慮し、従来のアクティブ中性子法の課題を補うための改良を加えた手法である

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.71

①-3 アクティブ中性子法C(1/10)

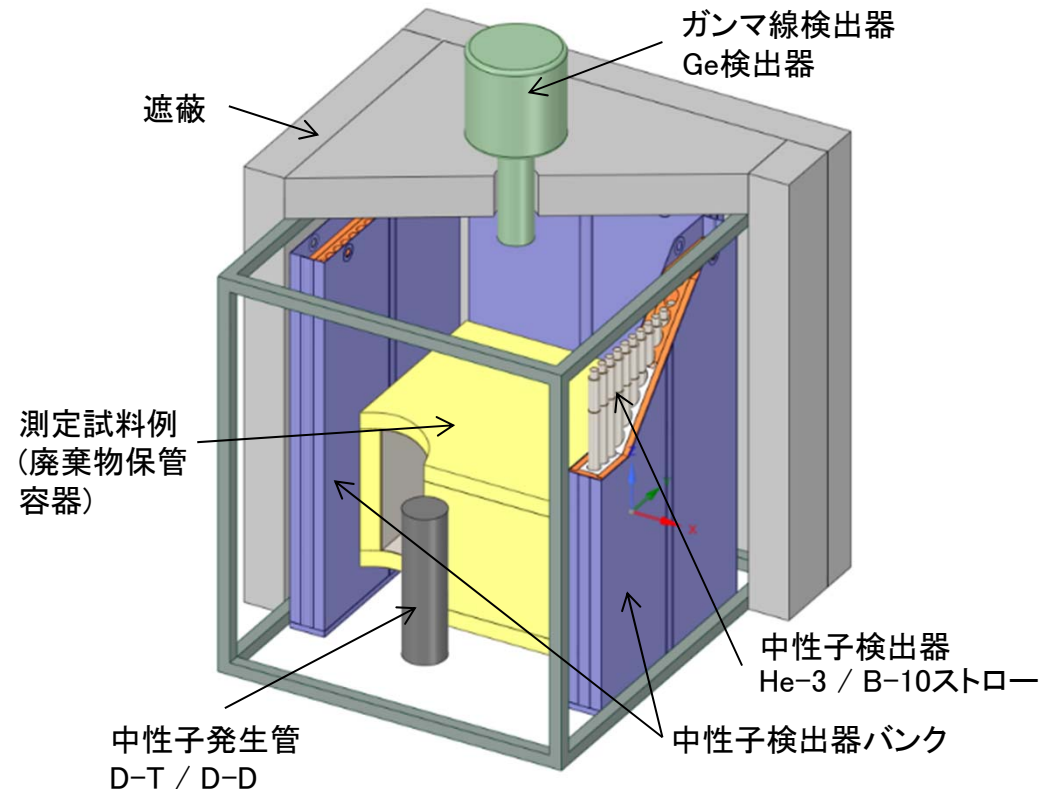
＜計測装置概念の検討＞…単一の計測装置により、アクティブ中性子法(FNDI)と即発ガンマ線分析法(PGA)を実施できる装置概念を検討。

PGA法は、計測試料への中性子照射によって起こる核反応によって発生する核種固有のガンマ線を計測することにより、試料中に含まれる物質を特定・定量する手法である。

FNDI法は測定試料の中身によらず、正確な測定が可能であるが、中性子吸収材(ホウ素やガドリニウム)の影響を受けやすい。(非常に多く含まれる場合には計測できない)

そこで、**PGA法を導入することで中性子吸収材を計測し、FNDI法の精度向上(仕分けの精度向上)を図る。**

また、条件によっては、PGA法により、試料中の水分、鉄、クロムなどの計測も期待できる。



FNDI+PGA法による計測装置概念図
(寸法:1.5 x 1.5 x 2.0 m)

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.72

①-3 アクティブ中性子法C(2/10)

<対象物条件の検討>

- 対象物条件:「**溶融デブリ**」「**MCCIデブリ**」「**金属デブリ**」(注1)を計測対象として想定。
- 評価対象とする容器は2021年度評価対象ケースより以下を想定。

デブリ性状	容器/容器形状	備考
溶融デブリ MCCIデブリ	ユニット缶 / φ210mm×H200mm	最小単位容器。線量寄与範囲, 線源量がより少なくなるH200mmで代表。
金属デブリ	廃棄物保管容器(内容器) / □500mm×300mmH	廃棄物保管容器の遮蔽厚が未確定であるため, 遮蔽無し且つ保管容器よりも小さい内容器で代表。 (複数ある内(回収)容器候補から処理・処分PJでの代表候補を採用)

- 技術課題として抽出されているパラメータ(**組成**, **燃焼度**, **中性子吸収材の有無**)に着目した検出器応答解析ケースを設定。

【解析ケース数】

A: 溶融デブリ ⇒ 計17ケース

(組成:3ケース), (燃焼度:3ケース), (中性子吸収材:5ケース)

B: MCCIデブリ ⇒ 計15ケース

(組成:2ケース), (燃焼度:3ケース), (中性子吸収材:5ケース)

C: 金属デブリ ⇒ 計3ケース

(組成:3ケース), (燃焼度:1ケース), (中性子吸収材なし)

計35ケース

(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」に基づく分類であり、具体的な組成情報は次ページ以降に示す。

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.73

①-3 アクティブ中性子法C(3/10)

ケース No.	デブリ性状	ケース概要	感度解析パラメータ				
			組成	含水率	燃焼度	中性子吸収材	
A-1	溶融デブリ	ベースケース	UO ₂ : 15.0 ZrO ₂ : 15.0	1wt%	23	なし	
A-2		低燃焼度			1.3		
A-3		高燃焼度			51		
A-4		ウランリッチ			23		
A-5		ウランリッチ 低燃焼度	UO ₂ : 30.0		1.3		
A-6		ウランリッチ 高燃焼度	51				
A-7-1		ベースケース 中性子吸収材1	UO ₂ : 15.0 ZrO ₂ : 15.0		23	Gd ₂ O ₃ 3vol%	
A-7-2		ベースケース 中性子吸収材2				Gd ₂ O ₃ 30vol%	
A-7-3		ベースケース 中性子吸収材3				B ₄ C 0.51vol%	
A-7-4		ベースケース 中性子吸収材4				B ₄ C 10vol%	
A-8		低燃焼度 中性子吸収材	UO ₂ : 30.0		1.3	51	Gd ₂ O ₃ 3vol%
A-9		高燃焼度 中性子吸収材					
A-10		A-4 + 中性子吸収材					
A-11		A-5 + 中性子吸収材	1.3				
A-12	A-6 + 中性子吸収材	51					
A-13	ベースケース 含水率低	UO ₂ : 6.3	0.1wt%	23	なし		
A-14	ベースケース 含水率高	ZrO ₂ : 6.3	70vol%				

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.74

①-3 アクティブ中性子法C(4/10)

ケース No.	デブリ性状	ケース概要	感度解析パラメータ				
			組成(vol%)	含水率	燃焼度	中性子吸収材	
B-1	MCCIデブリ	ベースケース	UO ₂ : 1.05	1wt%	23	なし	
B-2		低燃焼度	ZrO ₂ : 1.05 SUS: 7.2		1.3		
B-3		高燃焼度	Conc: 20.7		51		
B-4		Conc組成感度	UO ₂ : 1.05		23		
B-5		Conc組成感度 低燃焼度	ZrO ₂ : 1.05 SUS: 7.2		1.3		
B-6		Conc組成感度 高燃焼度	Conc: 50.7		51		
B-7-1		ベースケース 中性子吸収材1	UO ₂ : 1.05 ZrO ₂ : 1.05 SUS: 7.2 Conc: 20.7		23	Gd ₂ O ₃ 3vol%	
B-7-2		ベースケース 中性子吸収材2				Gd ₂ O ₃ 30vol%	
B-7-3		ベースケース 中性子吸収材3				B ₄ C 0.51vol%	
B-7-4		ベースケース 中性子吸収材4				B ₄ C 10vol%	
B-8		低燃焼度 中性子吸収材	UO ₂ : 1.05 ZrO ₂ : 1.05 SUS: 7.2 Conc: 20.7		23	1.3	Gd ₂ O ₃ 3vol%
B-9		高燃焼度 中性子吸収材				51	
B-10	B-4 + 中性子吸収材	UO ₂ : 1.05	23				
B-11	B-5 + 中性子吸収材	ZrO ₂ : 1.05 SUS: 7.2	1.3				
B-12	B-6 + 中性子吸収材	Conc: 50.7	51				

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.75

①-3 アクティブ中性子法C(5/10)

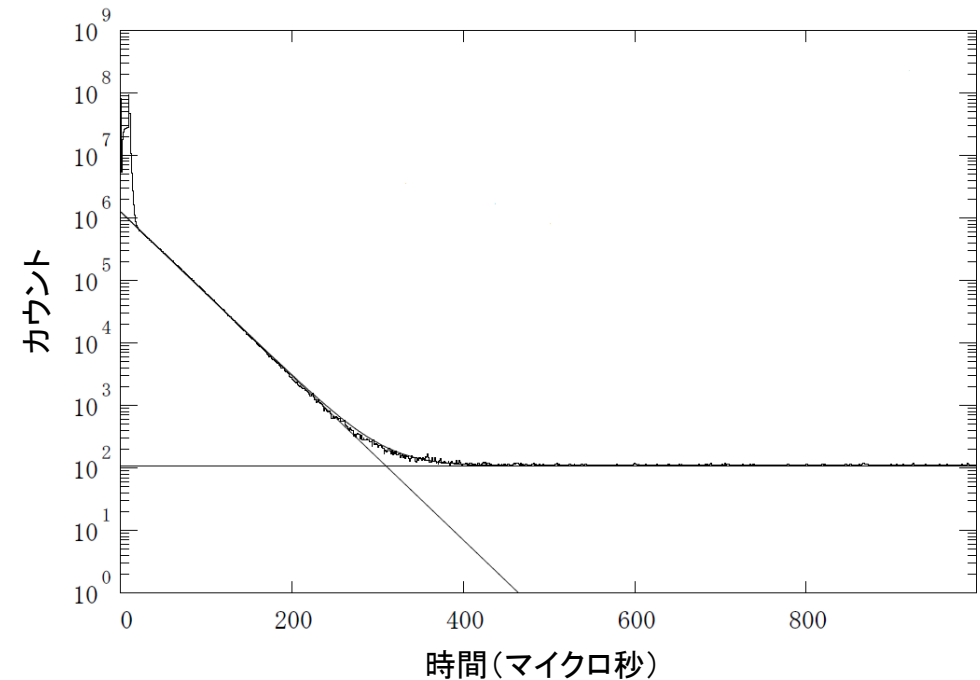
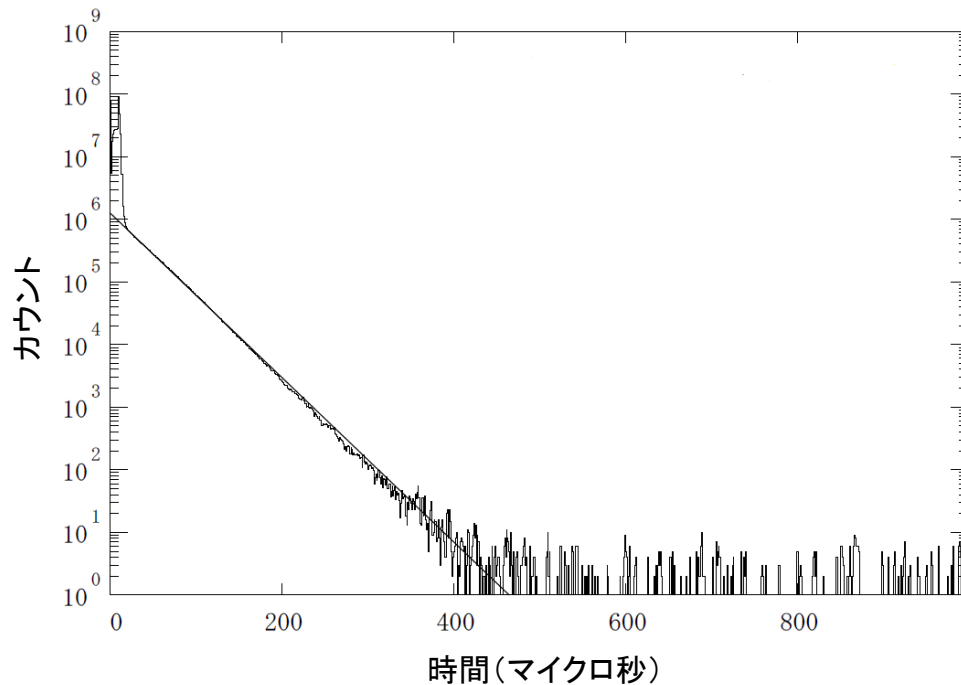
ケース No.	デブリ性状	ケース概要	感度解析パラメータ			
			組成(vol%)	含水率	燃焼度	中性子吸収材
C-1	金属デブリ	ベースケース	UO ₂ : 0.0075 ZrO ₂ : 0.0075 SUS: 29.85	1wt%	23	なし
C-2		組成感度(SUS)	UO ₂ : 0.0075 ZrO ₂ : 0.0075 SUS: 44.85			
C-3		組成感度(UO ₂ ,ZrO ₂)	UO ₂ : 0.48 ZrO ₂ : 0.0 SUS: 10.0			

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.76

①-3 アクティブ中性子法C(6/10)

＜検出器応答の解析例＞



計算結果例(左図:Cm-244無し, 右図:Cm-244有り)
(直線はフィッティングしたもの)

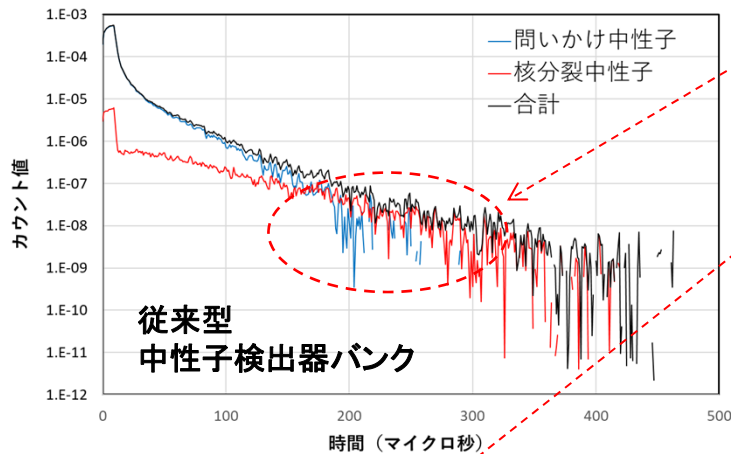
モデル化して得られた解析結果により核物質測定が可能であることを確認した。

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

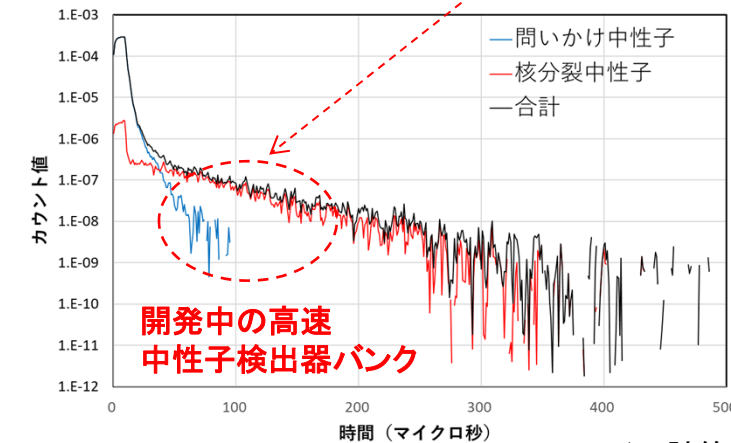
①-3 アクティブ中性子法C(7/10)

中性子検出器バンク開発によって、核燃料物質検出感度を向上
測定の妨害となる問いかけ中性子の減少

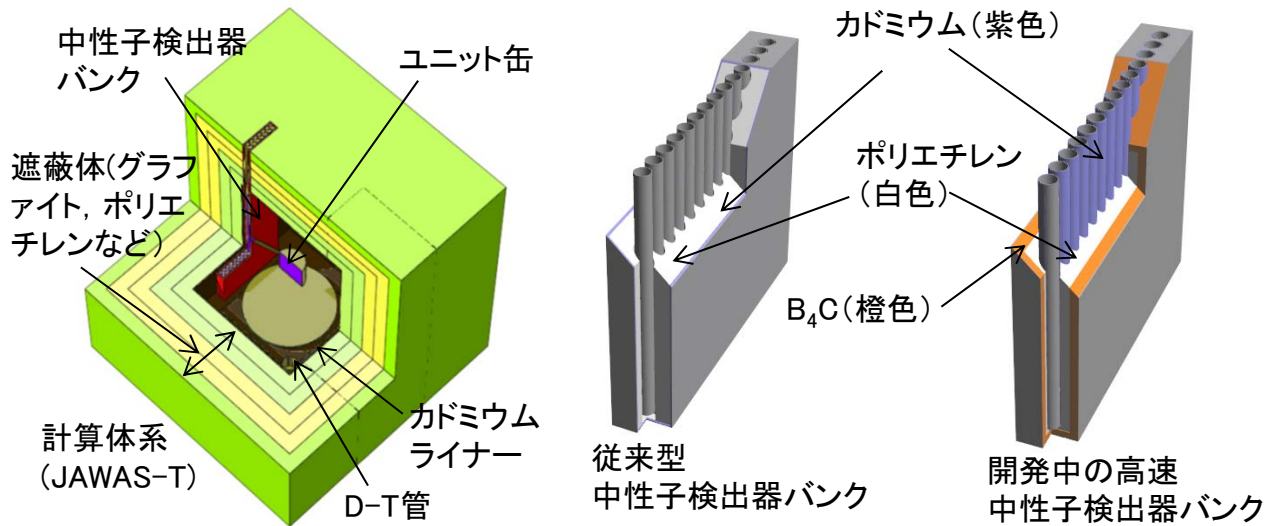
計算結果の一例*



従来型中性子検出器バンク:
問いかけ中性子(青線)と核分裂中性子(赤線)の差が小さい
=核燃料物質の検出感度が悪い



開発中の高速中性子バンク:
問いかけ中性子(青線)と核分裂中性子(赤線)の差が大きい
=核燃料物質の検出感度が良い



(*: 計算体系: JAWAS-T(寸法: 横幅1.9 m, 奥行1.9 m, 高さ2.1 m), 測定対象物: ユニット缶にUO₂を2.8kg, 水を4kg, ホウ素を2.7g入れたもの。)

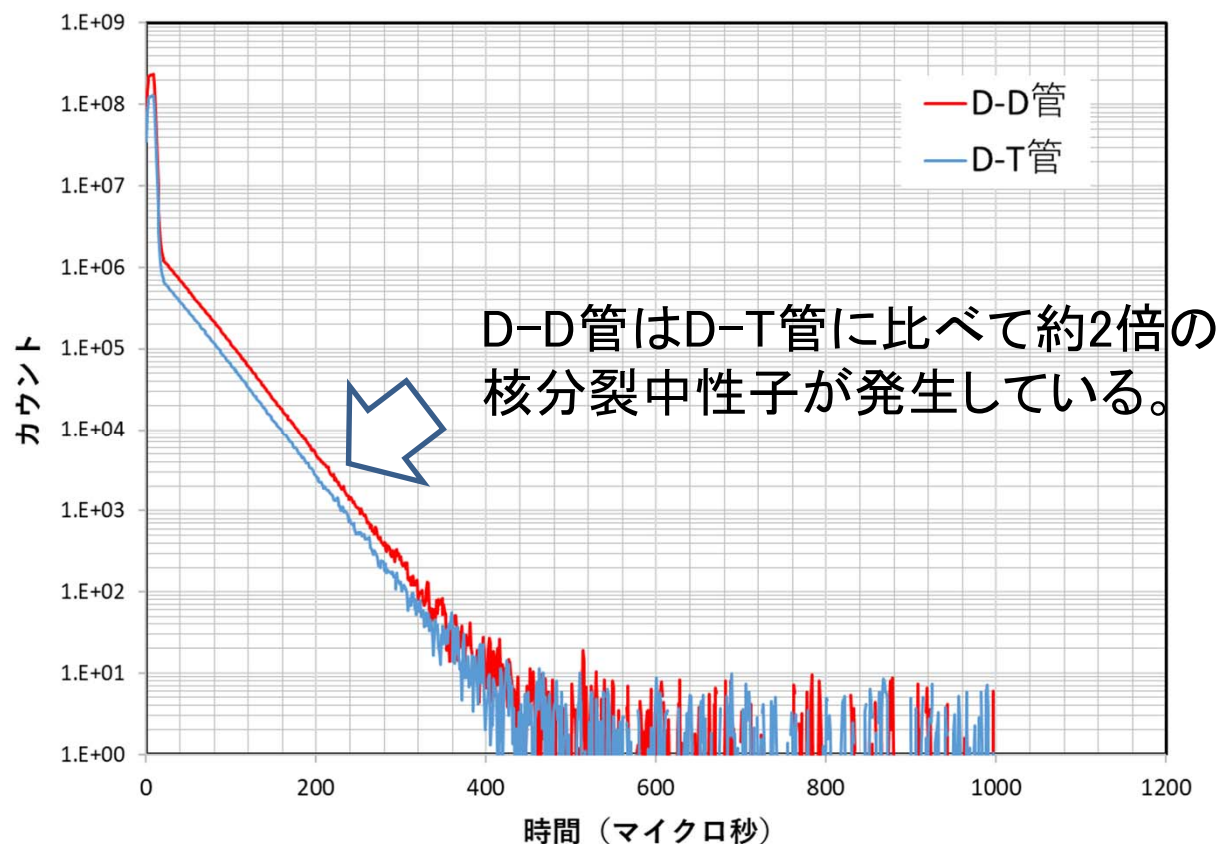
4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.78

①-3 アクティブ中性子法C(8/10)

FNDI法におけるD-D管の使用について

D-T管から発生する中性子(14MeV)より低いエネルギー(2.45MeV)の中性子を用いることで、核分裂反応数が増加し、測定性能の向上が期待できる。



D-T管とD-D管の比較計算例

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

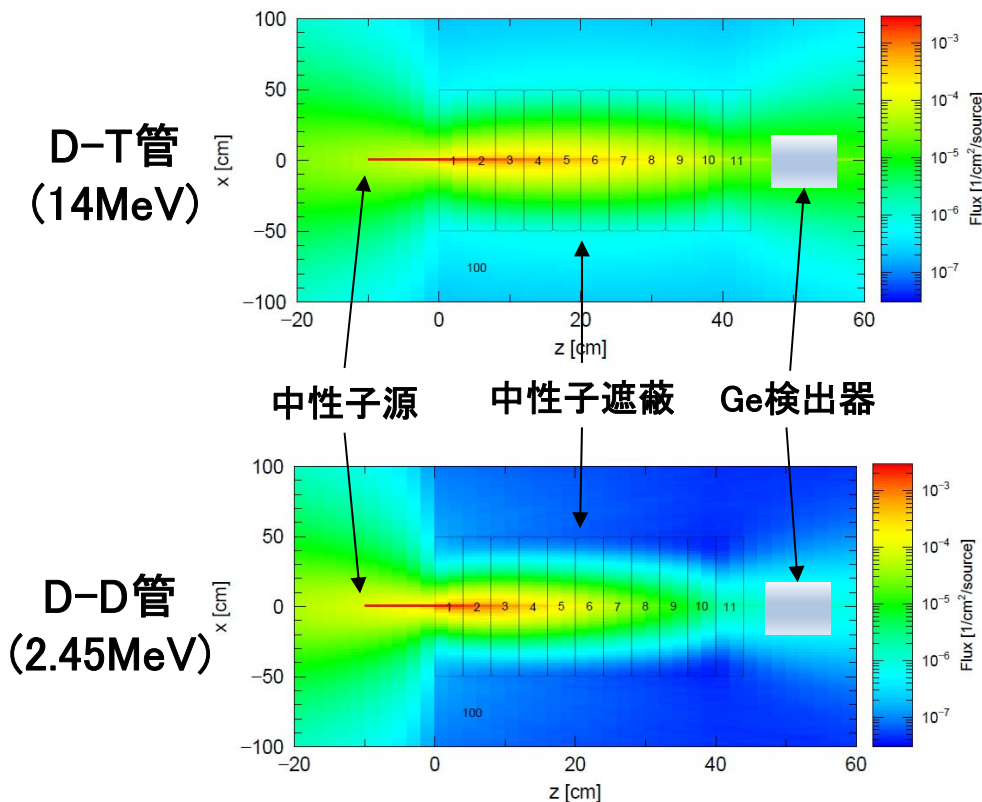
No.79

①-3 アクティブ中性子法C(9/10)

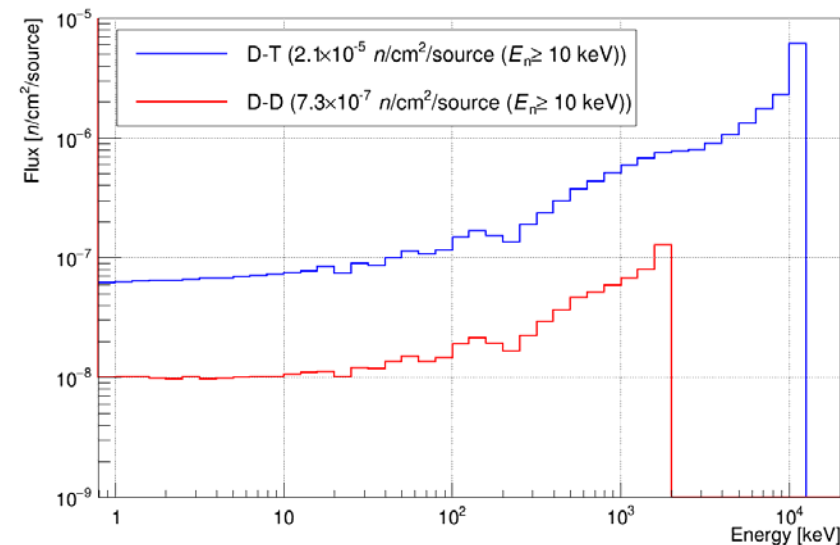
FNDI法とPGA法をひとつの装置で共存させる場合、中性子遮蔽体のスペースが限られていることなどから、問いかげ中性子がガンマ線検出器(Ge検出器)に入り、PGA法の測定精度の悪化やGe検出器の劣化などを引き起こす。

従来のFNDI法で用いられているD-T管(14MeV)の代わりにD-D管(2.45MeV)を用いることで影響を低減できる可能性がある。

中性子遮蔽効果の計算



Ge検出器位置での中性子強度比較



D-D管の採用によって、妨害中性子強度を1桁程度低減することが可能

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.80

①-3 アクティブ中性子法C(10/10)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

- 1) FNDI法(PGA法との組み合わせ)のシミュレーションモデルを作成
- 2) 組成, 燃焼度, 中性子吸収材, 中性子エネルギーに着目した検出器応答解析を実施
- 3) 燃料デブリ仕分けに用いる計測装置概念を検討

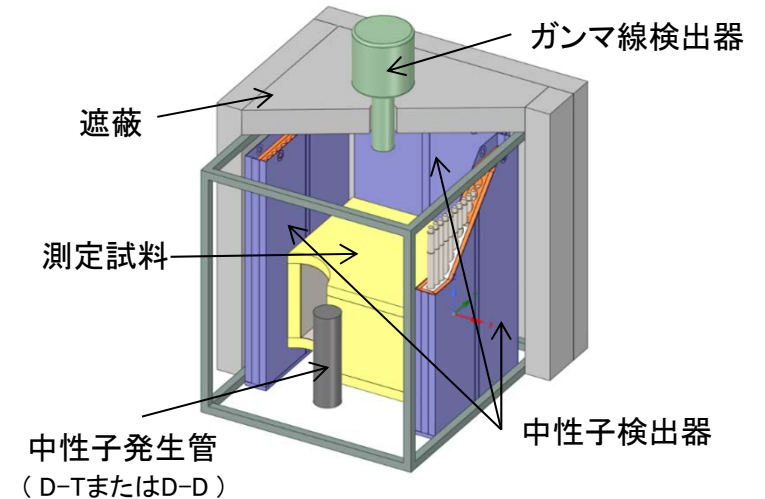
【成果/開発への寄与】

- 1) FNDI法における中性子消滅時間とウラン量との相関関係を得るためのFNDI法測定装置, およびPGA法におけるバックグラウンドを検討するための検出器シミュレーションモデルを作成
- 2)
 - ・ FNDI法による35ケースのシミュレーション計算結果を取得 (結果は, 「核燃料物質質量などの評価手法の検討4.2.1①-3」参照)
 - ・ D-T管の中性子のエネルギーは14MeVと高く, 中遮蔽が困難であるためPGA法で用いるGe検出器などに与える影響が1桁程度大きい
 - ・ D-D管は放射性物質を含まないため取り扱いや管理が容易であり, 中性子のエネルギーも2.45MeVと小さいため遮蔽も容易(1桁程度小さい)であり, FNDI法で2倍程度性能向上を示唆する結果が得られた
- 3) FNDI+PGA法の計測装置概念を構築
 - ・ 装置寸法: 1.5m × 1.5m × 2.0m程度
 - ・ 計測時間: 10~20分程度

【課題と対応策】

- 1) 課題: D-T管とD-D管の中性子のエネルギーの違いがFNDI法およびPGA法の測定精度に影響を与える可能性がある
対応策: D-D管を用いた要素技術確認試験を実施し, 測定精度に対する影響を評価する必要がある
- 2) 課題: 検出器や遮蔽体の構造において基本設計に向けた基礎データが不足している
対応策: シミュレーション計算により検出器や遮蔽体の基礎データを取得する

FNDI+PGA法計測装置概念図



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

(②-1 パッシブ中性子法A)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
②-1	パッシブ中性子法 A	He-3	なし	なし	自発核分裂核種質量 (Cm-244など)	核分裂性核種質量	MHI	81-93 192-203
②-2	同 B	B-10	なし	なし	同上	同上	日立GE	94-101 204-207

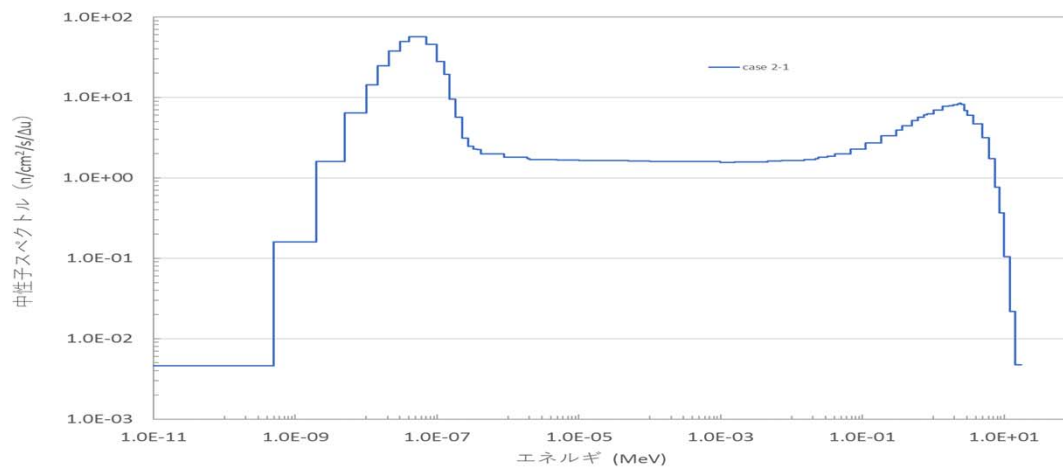
【特長】

- 検出器は、実績を重視してHe-3検出器を選定。

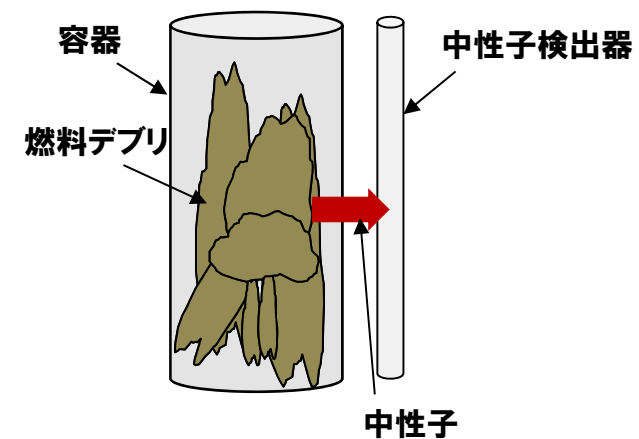
②-1 パッシブ中性子法共通

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など)**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。



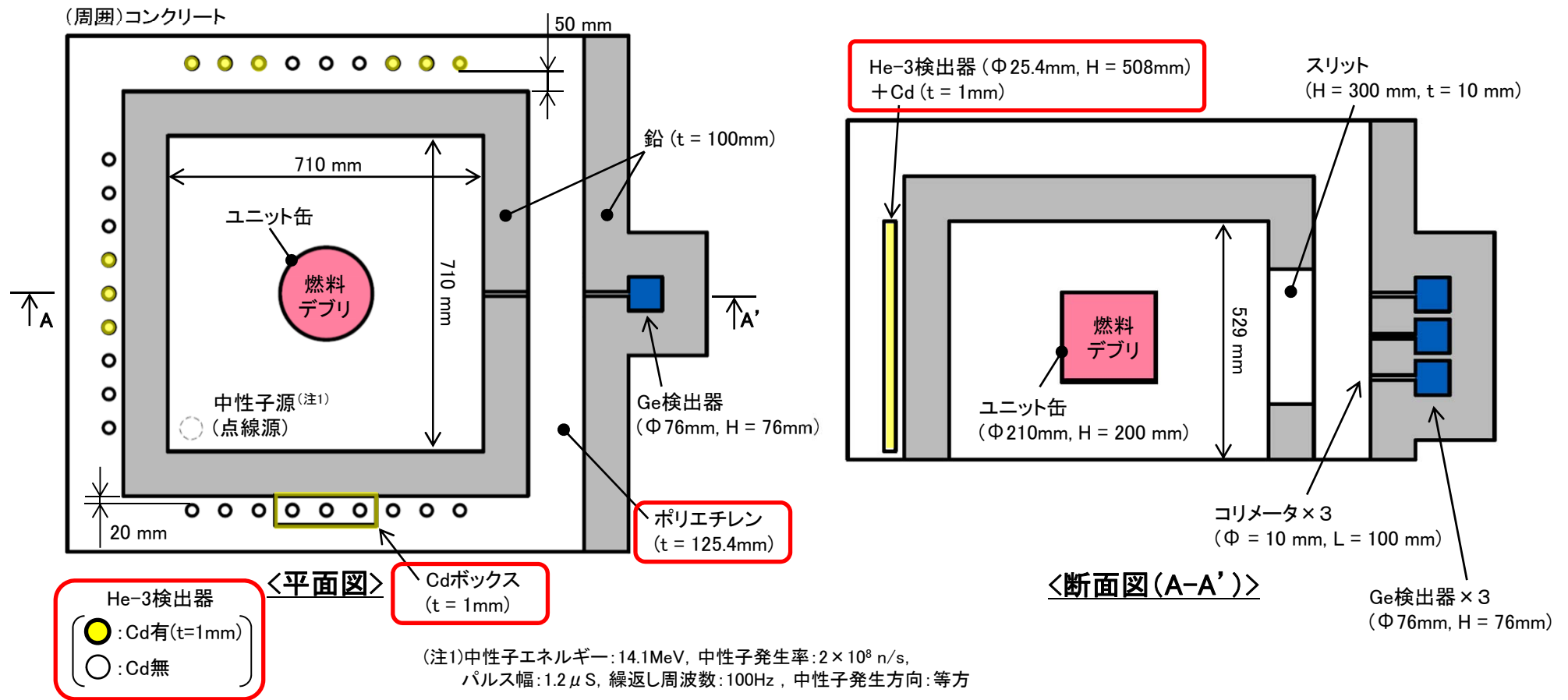
解析アウトプット例(減速材:ポリエチレン)



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

②-1 パッシブ中性子法A(1/11)

＜計測装置概念の検討＞…単一の計測装置により、アクティブn, パッシブn, γ の各計測法に対応可能な装置概念を検討。



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.84

②-1 パッシブ中性子法A(2/11)

<対象物条件の検討>

- 対象物条件:「**溶融デブリ**」「**MCCIデブリ**」「**金属デブリ**」(注1)を計測対象として想定。
- 評価対象とする容器は2021年度評価対象ケースより以下を想定。

デブリ性状	容器/容器形状	備考
溶融デブリ MCCIデブリ	ユニット缶 / φ210mm×H200mm	最小単位容器。線量寄与範囲, 線源量がより少なくなるH200mmで代表。
金属デブリ	廃棄物保管容器 (内容器) / □500mm×300mmH	廃棄物保管容器の遮蔽厚が未確定であるため, 遮蔽無し且つ保管容器よりも小さい内容器で代表。 (複数ある内(回収)容器候補から処理・処分PJでの代表候補を採用)

- 2021年度までの成果として整理した各影響因子より, 技術課題として抽出したパラメータ(**自己遮蔽**(注2)(組成), **燃焼度**, **中性子吸収材の有無**)に着目した検出器応答解析ケースを設定。

【解析ケース数】

A: 溶融デブリ ⇒ 計6ケース
(組成: 2ケース) × (燃焼度: 3ケース)

B: MCCIデブリ ⇒ 計6ケース
(組成: 2ケース) × (燃焼度: 3ケース)

C: 金属デブリ ⇒ 計3ケース
(組成: 3ケース) × (燃焼度: 1ケース)

計15ケース

⇒ 次ページより, 各ケースの条件一覧を示す

(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

(注2) 今後, 自己遮蔽の影響解析として, 偏在ケースも実施する必要がある。

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.85

②-1 パッシブ中性子法A(3/11)

解析ケース表(溶融デブリ)

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子 吸収材	FP 放出率*1	冷却期間	偏在	容器	
	デブリ 性状	充填率内								充填率外
		組成	合計(充填率)							
A-1	溶融 デブリ	UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-2		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-3		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-4		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-5		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-6		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶

*1「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.86

②-1 パッシブ中性子法A(4/11)

解析ケース表(MCCIデブリ)

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子 吸収材	FP 放出率*1	冷却期間	偏在	容器	
	デブリ 性状	充填率内								充填率外
		組成	合計(充填率)							
B-1	MCCI デブリ	UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 20.7vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-2				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-3				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-4		UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 50.7vol%	60 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-5				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-6				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶

*1「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

②-1 パッシブ中性子法A(5/11)

解析ケース表(金属デブリ)

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子吸収材	FP放出率*1	冷却期間	偏在	容器*2	
	デブリ性状	充填率内								充填率外
		組成	合計(充填率)							
C-1	金属デブリ	UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 29.85 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器(内容器)
C-2		UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 44.85 vol%	45 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器(内容器)
C-3		UO ₂ : 0.48vol% ZrO ₂ : 0vol% SUS: 10 vol%	10.48 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器(内容器)

*1 「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

*2 SUSが主であり、取り出しの初期段階で内容器に仕分けられることを想定

*3 各ケースの概要は以下のとおり

C-1: ベースケース

C-2: SUS組成に対する感度ケース

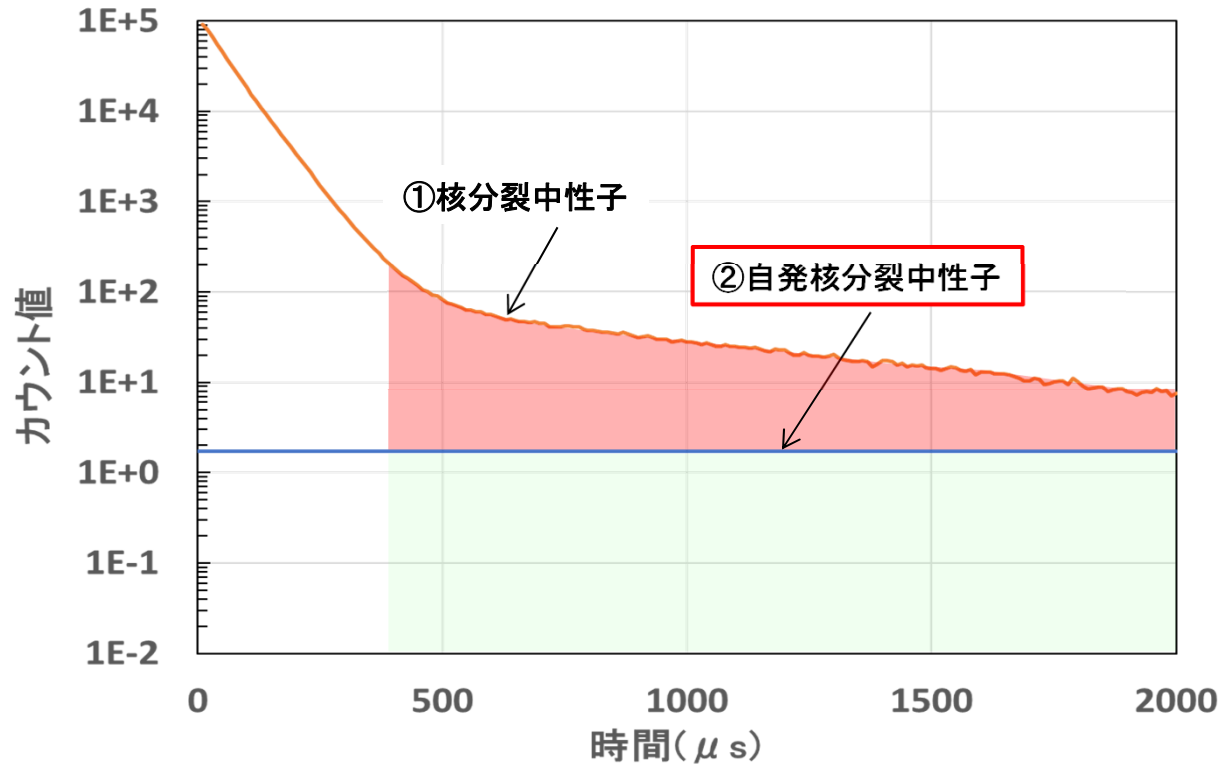
C-3: 未臨界担保の観点より、UO₂を3.7kg相当の体積割合とした感度ケース

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

②-1 パッシブ中性子法A(6/11)

＜溶融デブリ ベースケースの検出器応答＞

ケース No.	容器内組成				燃焼度	中性子吸収材	FP放出率	冷却期間	偏在	容器	照射中性子源
	デブリ性状	充填率内		充填率外							
		組成	合計(充填率)								
A-1	溶融デブリ	UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率) : 1wt% Empty : 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	—



✓ 計測装置概念をモデル化した解析にて②の検出性が確認された。

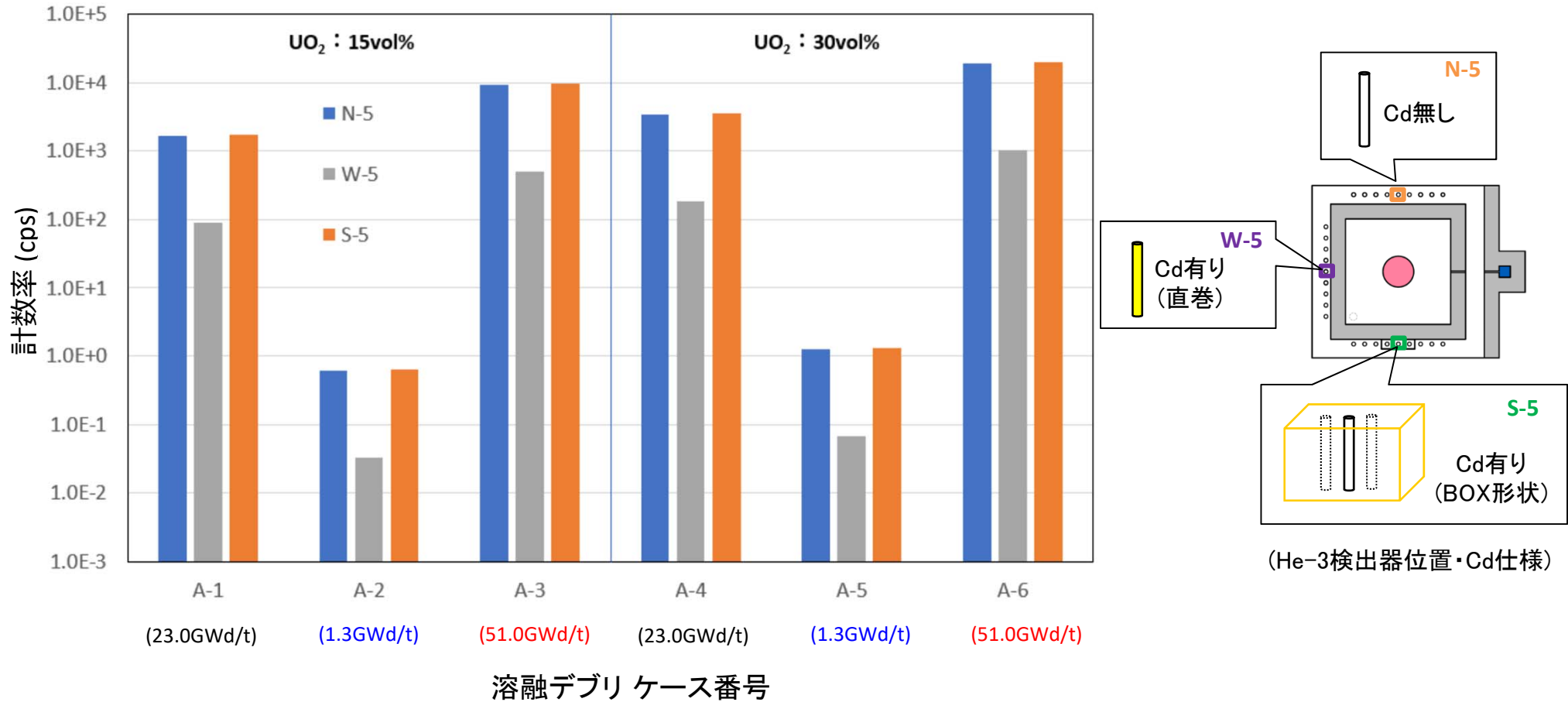


自発核分裂による中性子の計数率に着目

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.89

②-1 パッシブ中性子法A(7/11)

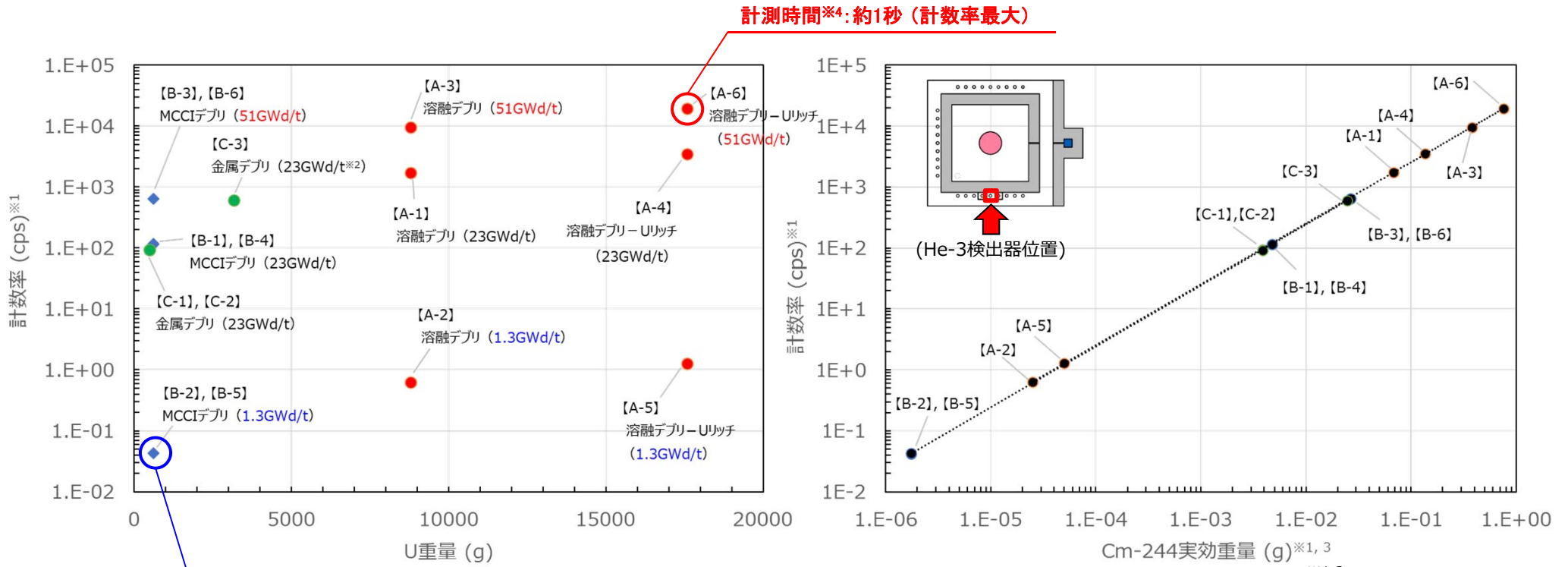


- He-3検出器の各仕様(N-5: Cd無し, W-5: Cd直巻, S-5: Cd BOX形状)での検出性を比較(溶融デブリベースケース)
 - W-5を除き仕様ごとの計数率に有意な差異は無く, W-5については他の仕様に対して計数率が小さいことを確認。
- ⇒ 以下, アクティブ中性子法Aに合わせて, He-3検出器位置S-5に着目して結果・考察を整理

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

②-1 パッシブ中性子法A(8/11)

- ✓ 溶融デブリ・MCCIデブリ: 燃焼度が同じ場合, U重量と計数率は概ね比例関係(燃焼度と計数率の大小関係は一致)
- ✓ 共通: Cm-244重量と計数率は嵩密度・容器形状の影響を受けず相関性を確認
 CmとUの帯同性を証明できれば, パッシブ中性子法によるCm-244質量評価値とパッシブγ線法によるEu-154質量評価値を用いた燃焼度の影響補正方法(2021年度に概念検討済)を適用できる可能性を示唆
 燃焼度の大小により優位な影響あり



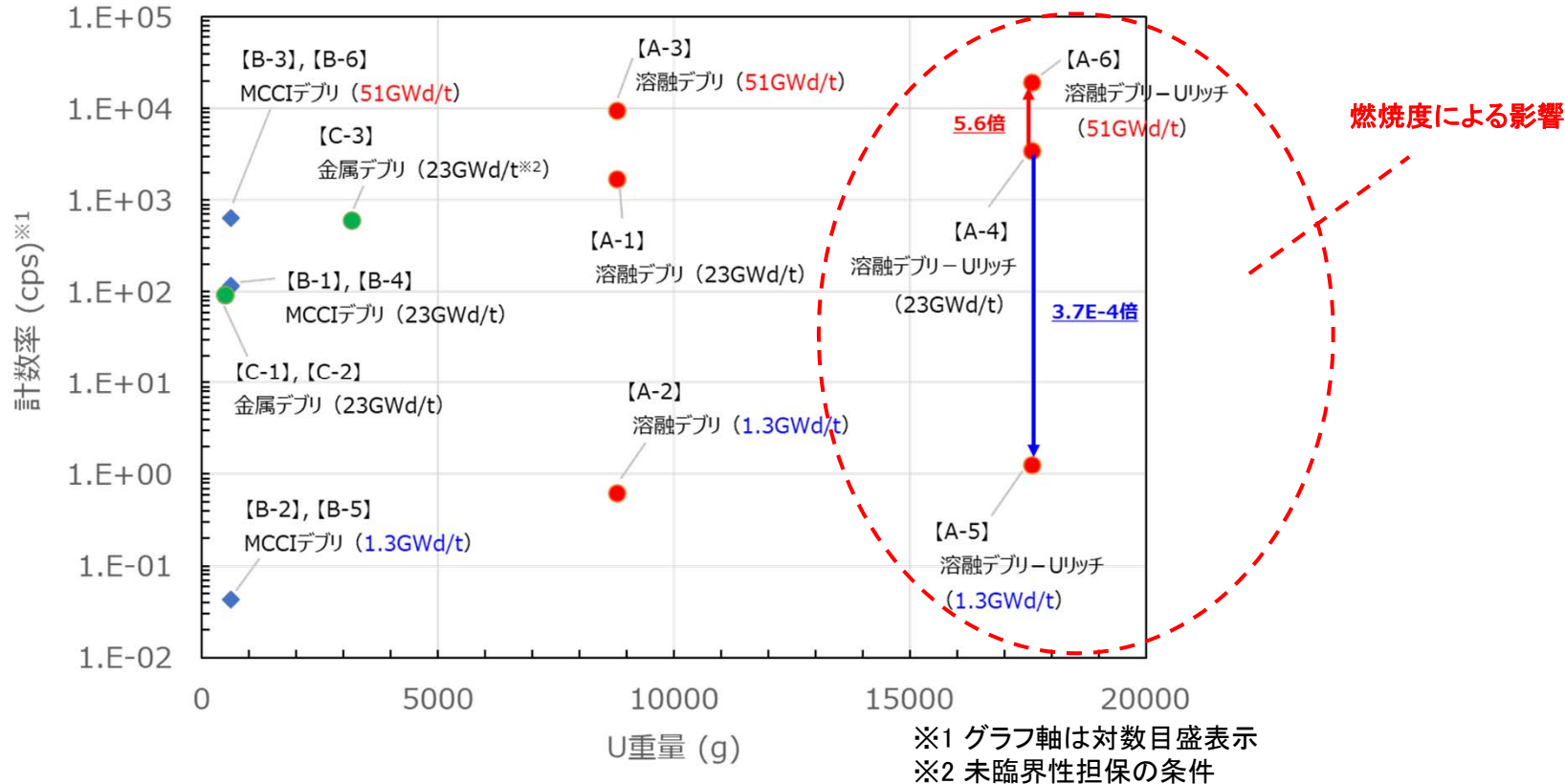
計測時間※4: 約65時間 (計数率最小)

※1 グラフ軸は対数目盛表示
 ※2 未臨界性担保の条件
 ※3 自発核分裂による中性子発生数をCm-244で代表した場合の重量
 ※4 統計誤差1%(10,000カウント)となる計測時間

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

②-1 パッシブ中性子法A(9/11)

＜着目する影響因子に対する影響度の分析＞



影響度の最も大きいウランリッチの燃料デブリに対して分析

- ✓ 燃焼度による影響: 高燃焼度 (51GWd/t) のカウント値はベースケース (燃焼度23GWd/t) の約5.6倍に増加
低燃焼度 (1.3GWd/t) のカウント値はベースケース (燃焼度23GWd/t) の約3.7E-4倍に減少

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

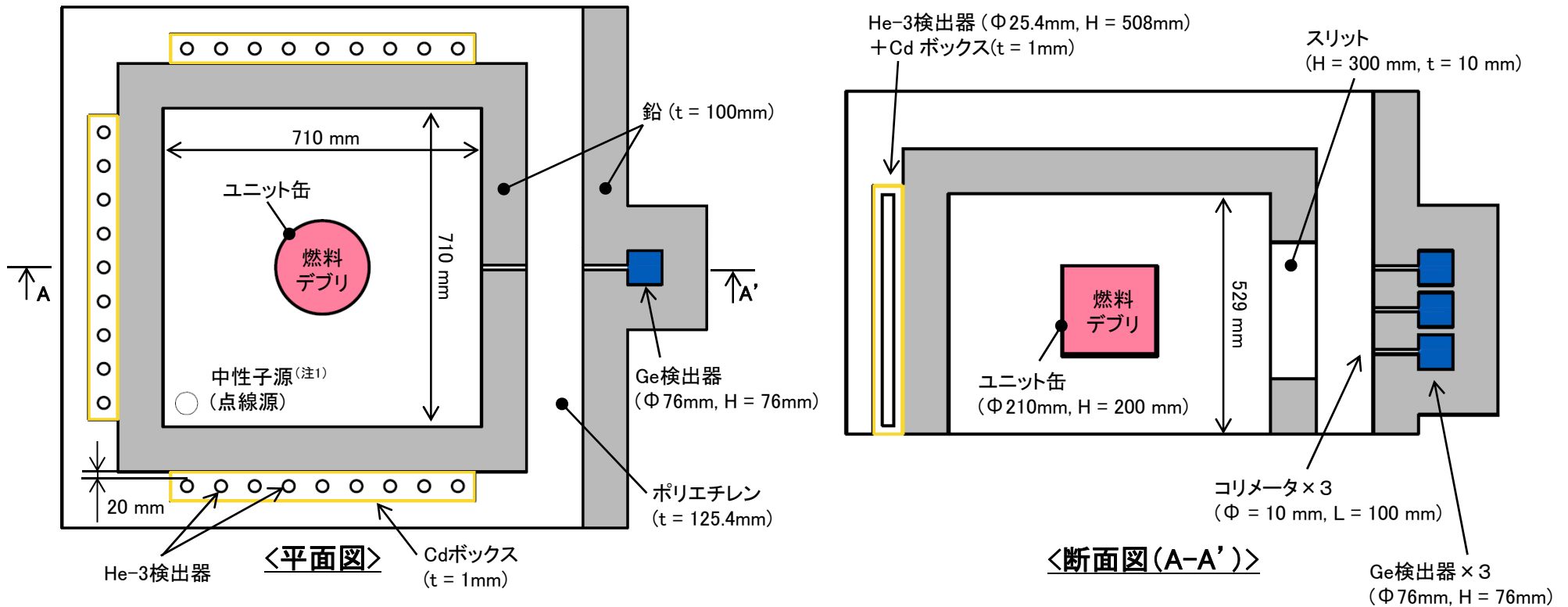
No.92

②-1 パッシブ中性子法A(10/11)

<計測装置概念の一次案>

- ✓ Cd有り(直巻): **ポリエチレンで熱化された中性子がCdで吸収されカウント数が低下**
- ✓ Cd無しおよびCd有り(ボックス形状): **検出器のカウント数は同程度**

⇒ Cd有り(ボックス形状)を用いた計測体系を一次案と設定(アクティブ中性子法Aと同様)



(注1)中性子エネルギー: 14.1MeV, 中性子発生率: 2×10^8 n/s,
パルス幅: 1.2μ S, 繰返し周波数: 100Hz, 中性子発生方向: 等方

②-1 パッシブ中性子法A(11/11)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

- 1) パッシブ中性子法の解析モデルを検討
- 2) 組成, 燃焼度に着目した検出器応答解析を実施
- 3) 燃料デブリ仕分けに用いる計測装置概念を検討

【成果/開発への寄与】

- 1) アクティブ中性子法, パッシブ中性子法, パッシブガンマ線法を組み合わせた解析モデルを作成
- 2) 15ケースの検出器応答解析の結果を取得
 - ・燃焼度の影響: 燃焼度が約2.2倍(23→51GWd/t)で, カウント値は約5.6倍に増加
燃焼度が約0.06倍(23→1.3GWd/t)で, カウント値は約 $3.7E-4$ 倍に減少
 - ・Cm-244重量と計数率に相関性を確認
- 3) アクティブ中性子法, パッシブ中性子法, パッシブガンマ線法を組み合わせた計測装置概念を構築
 - ・検出器仕様: Cdボックスに収納したHe-3検出器(アクティブ中性子法と共通化)
 - ・装置寸法 : W5m × D4m × H3m程度(ユニット缶および廃棄物内容器に対応)
 - ・計測時間 : 約1秒(溶融デブリ, U量17.6kg, 高燃焼度(51GWd/t), 中性子吸収材なし)
約65時間(MCCIデブリ, U量0.6kg, 低燃焼度(1.3GWd/t), 中性子吸収材なし)

【課題と対応策】

- 1) 課題: 燃焼度による誤差低減
対応策: Cm-244とEu-154の比による補正方法の詳細検討
Cm-244とEu-154のUとの帯同性説明ロジック構築も必要
- 2) 課題: 装置構造最適化に資するデータ不足
対応策: 解析による装置構造に対するパラメータスタディの拡充, 要素技術確認試験結果の反映

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

(②-2 パッシブ中性子法B)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
②-1	パッシブ中性子法 A	He-3	なし	なし	自発核分裂核種質量 (Cm-244など)	核分裂性核種質量	MHI	81-93 192-203
②-2	同 B	B-10	なし	なし	同上	同上	日立GE	94-101 204-207

【特長】

- 検出器は、高ガンマ線場への対応を重視して、B-10検出器を選定。

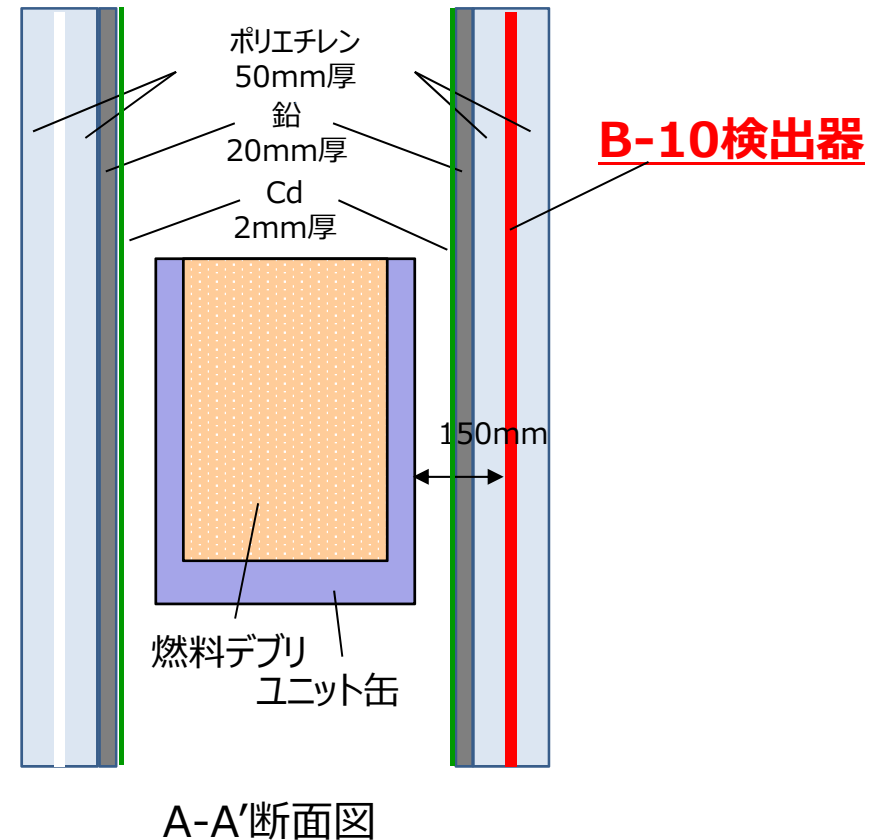
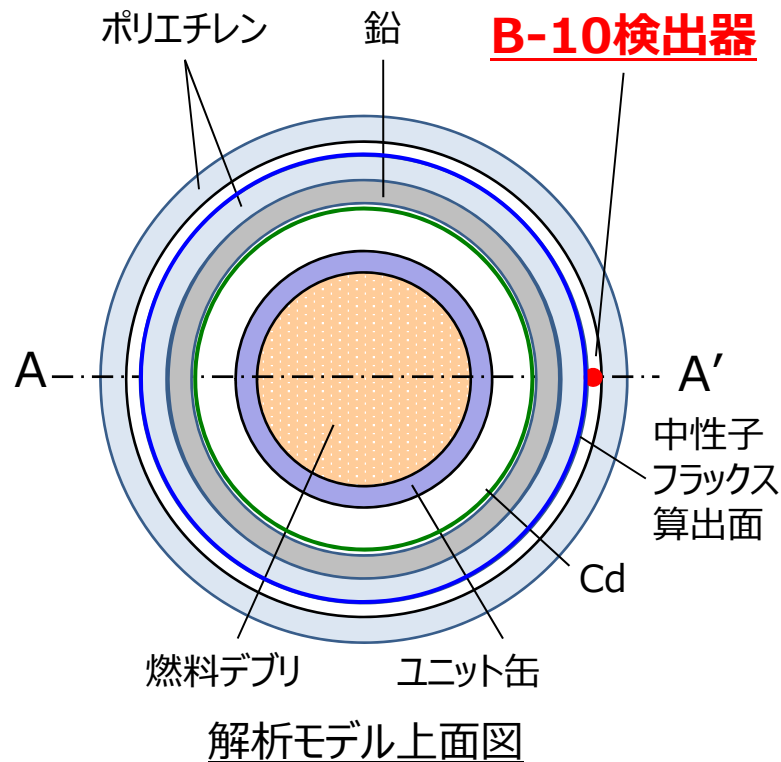
4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.95

②-2 パッシブ中性子法B(1/7)

＜検出器応答解析モデル＞

- ◆ 体系：令和3年度の検討結果（Cd:2mm厚，Pb:20mm厚，ポリエチレン:50mm厚）で，**B-10検出器** 応答評価
- ◆ 評価方法
 - ① 検出器内側の中性子フラックス計算
 - ② ①のフラックスをソースとして検出器内デポジットエネルギーを計算



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.96

②-2 パッシブ中性子法B(2/7)

<検出器応答解析ケース>

◆ 解析条件(U量3.7kgのケース)

解析ケース		UO ₂ (vol%)	ZrO ₂ (vol%)	SUS (vol%)	Conc (vol%)	充填率 (vol%)	充填率 以外	燃焼度 (GWd/t)	冷却期間 (年)	U量 (kg)	
溶融 デブリ	2-1	ベース	6.3	6.3	0	0	12.6	H ₂ O:1wt%	23.0	20	3.7
	2-4	含水率	6.3	6.3	0	0	12.6	H ₂ O:0.1wt%	23.0	20	3.7
	2-5	含水率	6.3	6.3	0	0	12.6	H ₂ O:70vol%	23.0	20	3.7
	2-6	燃焼度(低)	6.2	6.2	0	0	12.4	H ₂ O:1wt%	1.3	20	3.7
	2-7	燃焼度(高)	6.5	6.5	0	0	13.0	H ₂ O:1wt%	51.0	20	3.7
MCCI	2-9	ベース	6.3	6.3	4.5	12.9	30	H ₂ O:1wt%	23.0	20	3.7
	2-10	充填率(高)	6.3	6.3	9.6	27.7	50	H ₂ O:1wt%	23.0	20	3.7

◆ 解析条件(U量誤差範囲評価ケース)

解析ケース		UO ₂ (vol%)	ZrO ₂ (vol%)	SUS (vol%)	Conc (vol%)	充填率 (vol%)	充填率 以外	燃焼度 (GWd/t)	冷却期間 (年)	U量 (kg)	
溶融 デブリ	2-13	ベース(U少)	3.0	3.0	0	0	6.0	H ₂ O:1wt%	23.0	20	1.76
	2-14	ベース(U中)	10.0	10.0	0	0	20.0	H ₂ O:1wt%	23.0	20	5.86
	2-15	ベース(U多)	15.0	15.0	0	0	30.0	H ₂ O:1wt%	23.0	20	8.79
	2-16	燃焼度低(U少)	3.0	3.0	0	0	6.0	H ₂ O:1wt%	1.3	20	1.80
	2-17	燃焼度低(U中)	10.0	10.0	0	0	20.0	H ₂ O:1wt%	1.3	20	5.99
	2-18	燃焼度低(U多)	15.0	15.0	0	0	30.0	H ₂ O:1wt%	1.3	20	8.98
	2-19	燃焼度高(U少)	3.0	3.0	0	0	6.0	H ₂ O:1wt%	51.0	20	1.72
	2-20	燃焼度高(U中)	10.0	10.0	0	0	20.0	H ₂ O:1wt%	51.0	20	5.72
	2-21	燃焼度高(U多)	15.0	15.0	0	0	30.0	H ₂ O:1wt%	51.0	20	8.58

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.97

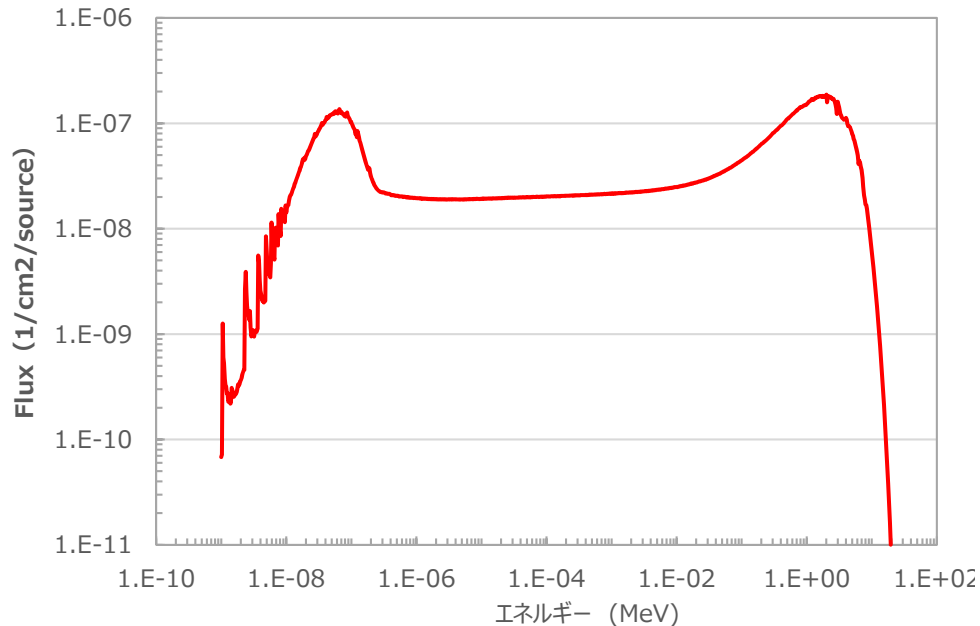
②-2 パッシブ中性子法B(3/7)

<検出器応答解析結果>

◆ ベースケース【2-1溶融デブリ】での中性子フラックスと検出器応答スペクトル計算結果

➤ 中性子フラックス

-検出器内側(内側ポリエチレンの外側)円柱側面

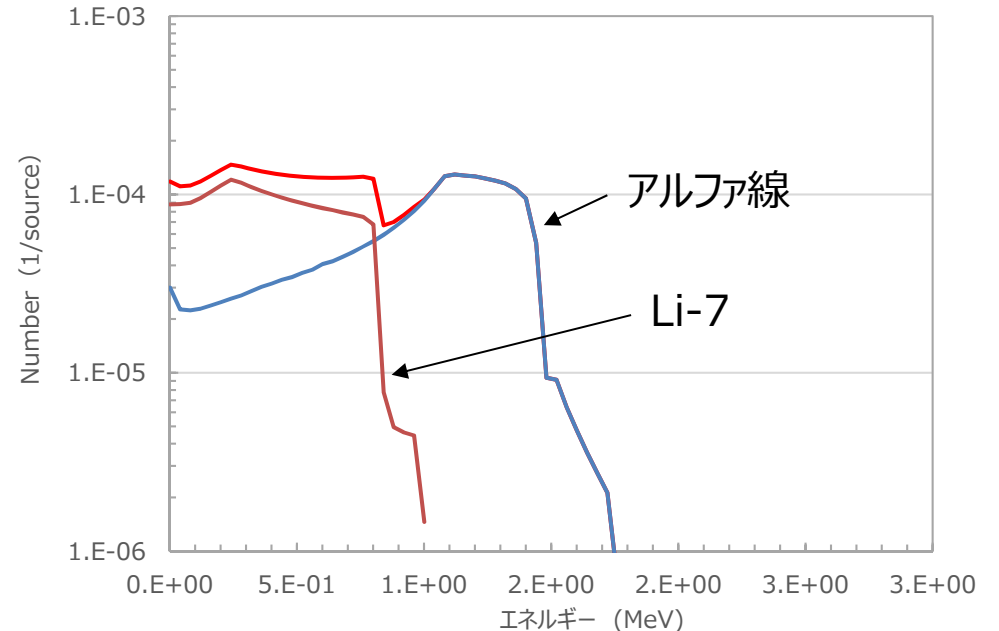


➤ 検出器応答スペクトル(B-10検出器)

・B-10検出器仕様：直径(内径) 25.4mm,

有効長1000mm,ハウジング厚0.5mm(SUS304)

B-10厚0.8547μm(=0.2mg/cm²), Arガス圧0.3atm



➤ 計数率

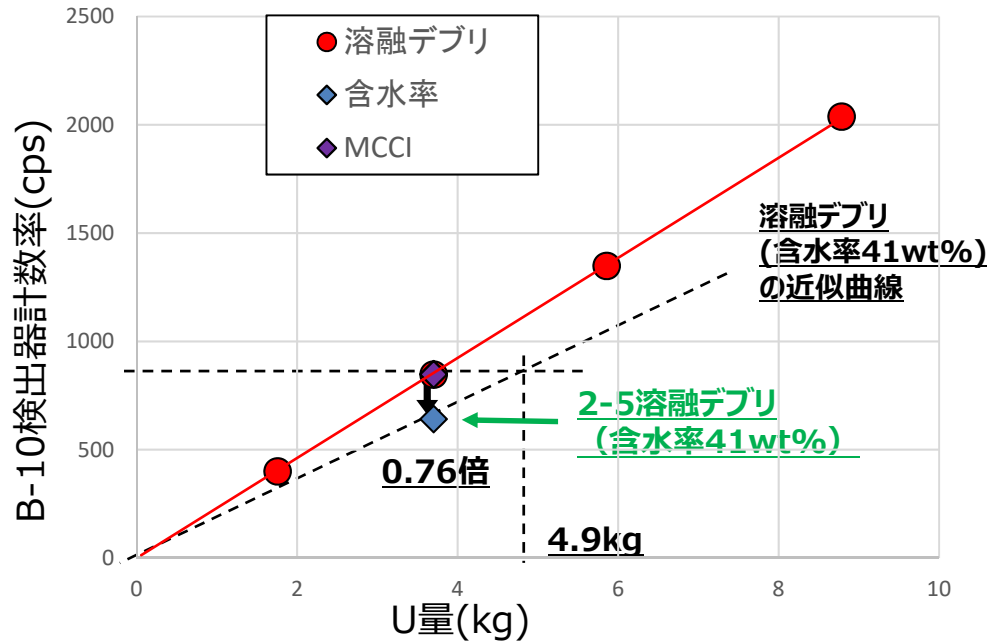
検出器応答において80keV以上のエネルギーを付与するアルファ線およびLi-7をカウント

⇒ **8.47E+2cps**

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

②-2 パッシブ中性子法B(4/7)

◆ 含水率影響, MCCIデブリ



◆ U量依存性 (ベースケース)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	含水率
2-1	3.70	8.47E+02	1wt%
2-13	1.76	3.99E+02	1wt%
2-14	5.86	1.35E+03	1wt%
2-15	8.79	2.04E+03	1wt%

◆ 含水率依存性 (U量3.7kg)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	含水率
2-1	3.70	8.47E+02	1wt%
2-4	3.70	8.47E+02	0.1wt%
2-5	3.70	6.41E+02	41wt%

◆ MCCIデブリ (U量3.7kg)

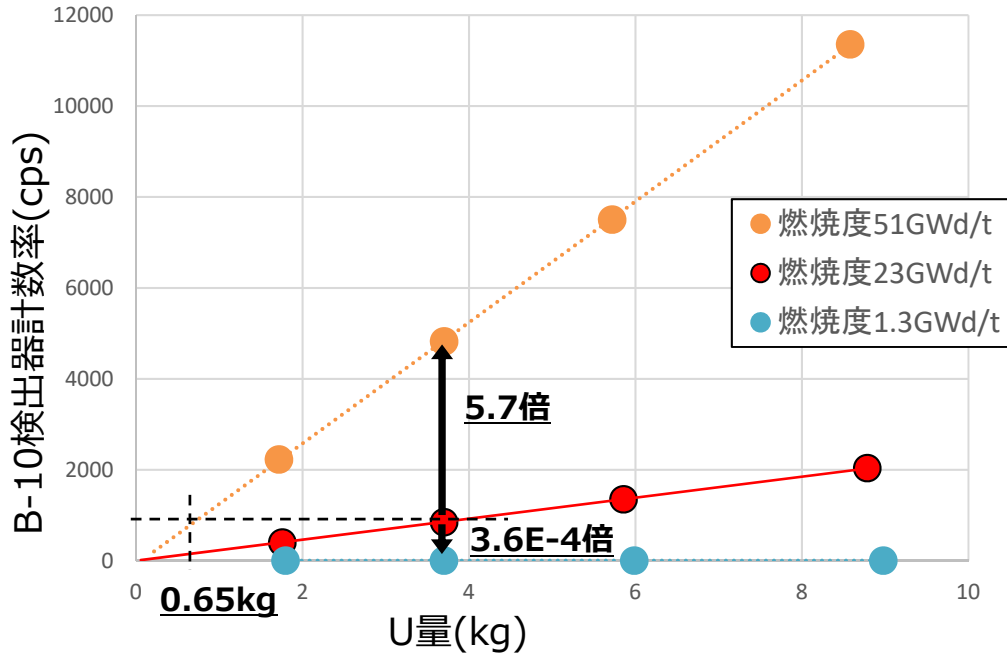
ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	SUS [vol%]	Conc [vol%]	充填率 [vol%]
2-1	3.70	8.47E+02	0	0	12.6
2-9	3.70	8.48E+02	4.5	12.9	30
2-10	3.70	8.47E+02	9.6	27.7	50

- ベースケース(含水率1wt%)において, 計数率はU量(Cm-244量)に正比例
- U重量3.7kgの場合, ベースケース(含水率1wt%)の計数率(8.47E+2cps)と比較
 - ・含水率0.1wt%: 計数率(8.47E+2cps)で変化なし
 - ・含水率41wt%: 計数率(6.41E+2cps, 0.76倍)に減少
 - ・MCCIデブリの場合: 計数率(8.47E+2cps ~ 8.48E+2cps)で変化なし
- ベースケース(U重量3.7kg)の計数率(8.47E+2cps)となるU重量
 - ・含水率41wt%: 4.9kg(1.32倍)

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

②-2 パッシブ中性子法B(5/7)

◆ 燃焼度影響



◆ U量依存性

①ベースケース (23GWd/t)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	燃焼度 [GWd/t]
2-1	3.70	8.47E+02	23.0
2-13	1.76	3.99E+02	23.0
2-14	5.86	1.35E+03	23.0
2-15	8.79	2.04E+03	23.0

②燃焼度低 (1.3GWd/t)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	燃焼度 [GWd/t]
2-16	1.80	1.47E-01	1.3
2-6	3.70	3.04E-01	1.3
2-17	5.99	4.96E-01	1.3
2-18	8.98	7.53E-01	1.3

③燃焼度高 (51GWd/t)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	燃焼度 [GWd/t]
2-19	1.72	2.23E+03	51.0
2-7	3.70	4.82E+03	51.0
2-20	5.72	7.50E+03	51.0
2-21	8.58	1.14E+04	51.0

◆ 燃焼度依存性(U量3.7kg)

ケース No.	U量 [kg]	計数率 [cps]	燃焼度 [GWd/t]
2-1	3.70	8.47E+02	23.0
2-6	3.70	3.04E-01	1.3
2-7	3.70	4.82E+03	51.0

- U重量3.7kgの場合, ベースケース(燃焼度23GWd/t)の計数率(8.47E+2cps)と比較
 - ・燃焼度1.3GWd/t: 計数率(3.04E-1cps, 3.6E-4倍)に減少
 - ・燃焼度51GWd/t: 計数率(4.82E+3cps, 5.7倍)に増加
- 溶融デブリベースケース(U重量3.7kg)の計数率(8.47E+2cps)となるU重量
 - ・燃焼度1.3GWd/t: 10kg以上
 - ・燃焼度51GWd/t: 0.65kg(0.18倍)

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

②-2 パッシブ中性子法B(6/7)

<装置概念>

◆ 計測時間

- ・ベースケースでは必要計測時間10秒程度であり十分
- ・低燃焼度(1.3GWd/t)の場合, 必要計測時間9時間程度

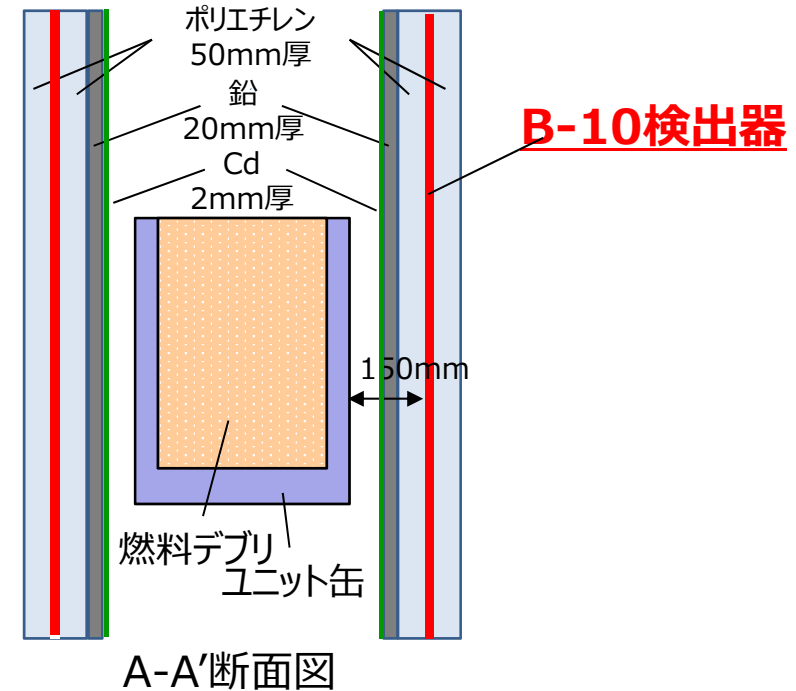
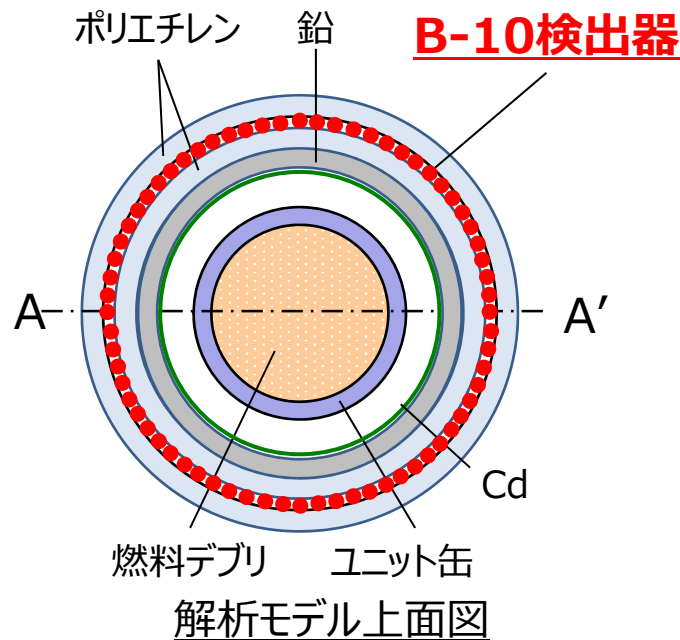
⇒課題: 検出感度の向上

◆ 対策案(感度向上)

①検出器数増: 1個⇒ 60個程度(1段)⇒ 100個程度(複数段)

課題: 検出器個数および配置の最適化, 検出器コスト

解析ケース	計数率 [cps]	1万カウント必要時間		
		[sec]	[min]	[hour]
2-1 ベース(ユニット缶)	8.47E+02	1.18E+01	1.97E-01	3.28E-03
2-6 燃焼度1.3GWd/t	3.04E-01	3.28E+04	5.47E+02	9.12E+00



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.101

②-2 パッシブ中性子法B(7/7)

＜まとめと今後の課題＞

【実施内容】

- 1) U量を仕分け基準値である3.7kgに設定した検出器応答解析(B-10中性子検出器)によるU量評価誤差の検討
- 2)上記結果に基づき計測時間を試算し計測装置概念を検討

【成果/開発への寄与】

- 1)ベースケース(溶融デブリ)の計数率(8.47E+2cps)と比較し以下の結論を得た

① 燃焼度影響:

- ・燃焼度1.3GWd/t: 計数率(3.04E-1cps, 3.6E-4倍)に減少
- ・燃焼度51GWd/t: 計数率(4.82E+3cps, 5.7E+0倍)に増加

② 含水率および燃料デブリ組成影響:

- ・含水率0.1wt%: 計数率(8.47E+2cps)で変化なし
- ・含水率41wt%: 計数率(6.41E+2cps, 0.76倍)に減少
- ・MCCIデブリの場合: 計数率(8.47E+2cps～8.48E+2cps)で変化なし

- 2)必要計測時間:

- ・ベースケース(溶融デブリ U量3.7kg): 約10秒
- ・低燃焼度(1.3GWd/t): 約9時間

【課題と対応策】

- 1)課題: 燃焼度影響が大きく燃焼度補正が必須

⇒ 対応策: PG/PNIによる燃焼度補正方法の有効性評価, 本手法の精度向上にCT法適用の有効性評価

- 2)課題: 中性子計測感度(低燃焼度の場合9時間必要)の向上 ⇒ 対応策: 検出器個数増大(複数段配置), 減速材配置の最適化

- 3)課題: Cm-244の核燃料物質との帯同性 ⇒ 対応策: 他プロジェクトと協力しエビデンスの収集, 説明ロジックの構築

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

(③ ミュオン散乱法)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
③	ミュオン散乱法	ミュオン軌跡検出器	なし	なし	原子量	核分裂性核種質量	東芝ESS	102-116 208-214

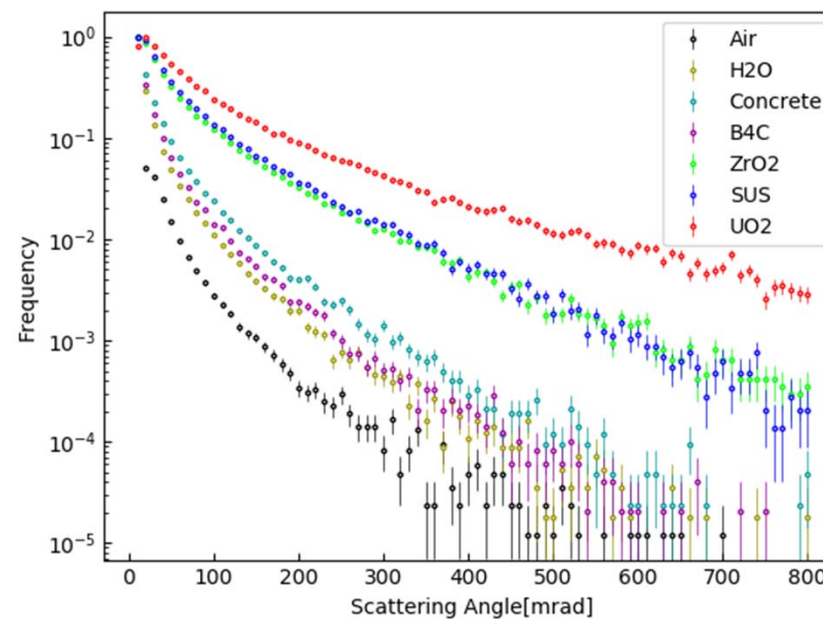
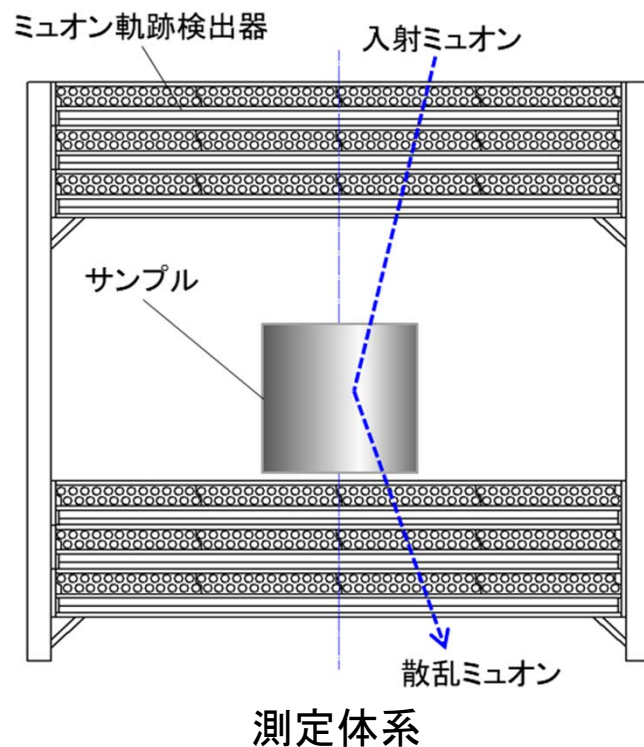
4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.103

③ ミュオン散乱法(1/14)

(1) 検出器応答解析モデル(概要)

- 測定原理: サンプルを通過するミュオンの軌跡変化(散乱)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
- 検出器応答: 物質を通過したミュオンの散乱角スペクトル(角度ごとの頻度分布)
- 測定時間: 1~2時間程度を想定(※仮定値: 検出器仕様, サイズ, 配置などにより異なる)



計測値(ミュオン散乱スペクトル)

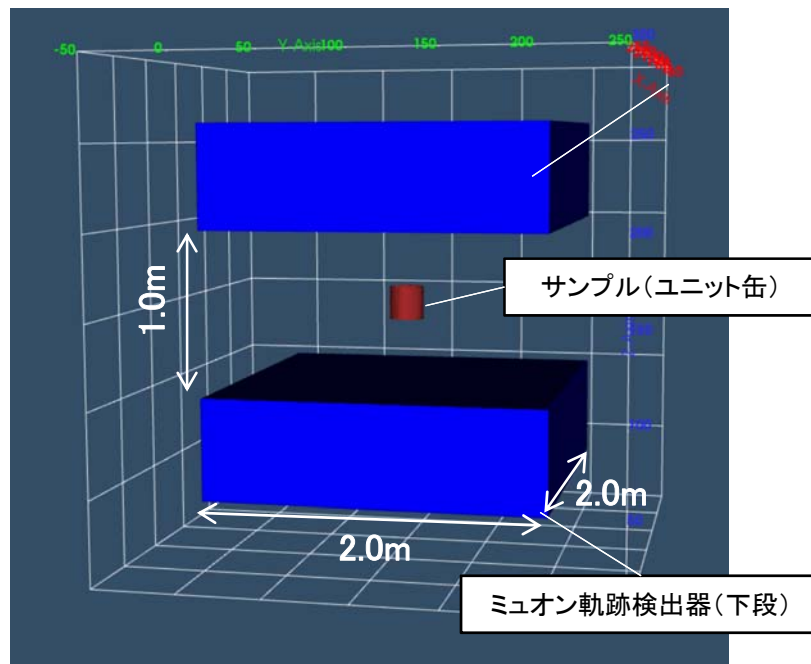
4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.104

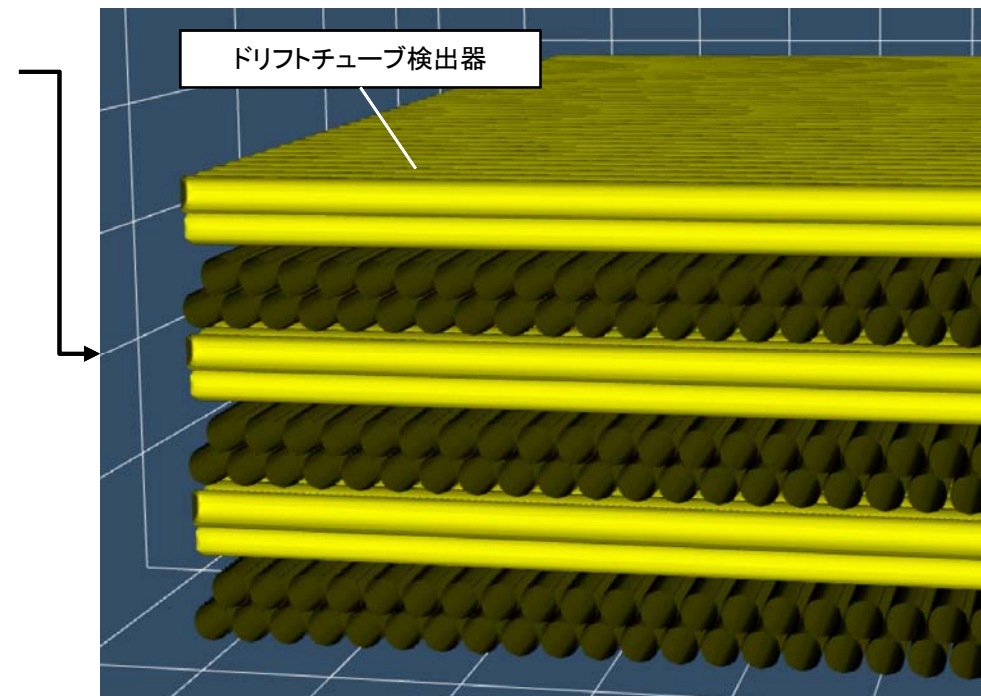
③ ミュオン散乱法(2/14)

(1) 検出器応答解析モデル(測定装置構造の再現)

- 従来モデルでは理想的なミュオン軌跡が測定できる条件で計測値を評価
 - 実測では検出器構造によるミュオン散乱が誤差要因となる
- 改良モデル上に**検出器内部構造(形状・組成)を反映**
 - 検出器を通過する際のミュオン散乱を解析することで実測値に近い値を再現



測定体系モデル



ミュオン軌跡検出器内部構造モデル

③ ミュオン散乱法(3/14)

(2) 検出器応答解析ケース(設定の方針)

- 対象物条件の再検討
 - 2021年度の評価結果から**主要な影響因子を選定**
 - 燃料デブリ種類, 空隙率, 体積, 中性子吸収材(Gd)
- 解析ケースの設定方針
 - 各因子の**全組み合わせ条件**を設定し解析ケースを設定
- 解析ケース
 - 全300ケース = (燃料デブリ組成 × 4) × (空隙率 × 5) × (体積 × 5) × (吸収材 × 3)

No	解析項目	評価内容	評価項目	ケース数
1	デブリ種類	4種類の燃料デブリ組成	溶融デブリ, MCCIデブリ, 金属デブリ, ウランリッチデブリ	4
2	空隙率	組成・体積を一定として密度を変更 (通常密度を空隙率0%とする)	90, 80, 70, 60, 50[vol%]	5
3	体積割合	組成・重量を一定として体積を変更 (容器の最大容積を体積割合100%とする)	60, 70, 80, 90, 100[vol%]	5
4	吸収材含有量	1~3項目で設定した燃料デブリに対して, 0~5%のGd ₂ O ₅ を追加	0, 2.5, 5.0[vol%]	3

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.106

③ ミュオン散乱法(4/14)

(2) 検出器応答解析ケース(溶融デブリ)

デブリ種類	No.	UO ₂ [vol%]	ZrO ₂ [vol%]	SUS [vol%]	Conc [vol%]	空隙率 [%]	体積割合 [%]	Gd ₂ O ₃ [vol%]	デブリ重量 [kg]	U重量 [kg]
溶融デブリ	1-1~1-3	5.0	5.0	0.0	0.0	90	60	0.0, 2.5, 5.0	5.23	2.93
	1-4~1-6	5.0	5.0	0.0	0.0	90	70	0.0, 2.5, 5.0	5.23	2.93
	1-7~1-9	5.0	5.0	0.0	0.0	90	80	0.0, 2.5, 5.0	5.23	2.93
	1-10~1-12	5.0	5.0	0.0	0.0	90	90	0.0, 2.5, 5.0	5.23	2.93
	1-13~1-15	5.0	5.0	0.0	0.0	90	100	0.0, 2.5, 5.0	5.23	2.93
	1-16~1-18	10.0	10.0	0.0	0.0	80	60	0.0, 2.5, 5.0	10.46	5.86
	1-19~1-21	10.0	10.0	0.0	0.0	80	70	0.0, 2.5, 5.0	10.46	5.86
	1-22~1-24	10.0	10.0	0.0	0.0	80	80	0.0, 2.5, 5.0	10.46	5.86
	1-25~1-27	10.0	10.0	0.0	0.0	80	90	0.0, 2.5, 5.0	10.46	5.86
	1-28~1-30	10.0	10.0	0.0	0.0	80	100	0.0, 2.5, 5.0	10.46	5.86
	1-31~1-33	15.0	15.0	0.0	0.0	70	60	0.0, 2.5, 5.0	15.68	8.79
	1-34~1-36	15.0	15.0	0.0	0.0	70	70	0.0, 2.5, 5.0	15.68	8.79
	1-37~1-39	15.0	15.0	0.0	0.0	70	80	0.0, 2.5, 5.0	15.68	8.79
	1-40~1-42	15.0	15.0	0.0	0.0	70	90	0.0, 2.5, 5.0	15.68	8.79
	1-43~1-45	15.0	15.0	0.0	0.0	70	100	0.0, 2.5, 5.0	15.68	8.79
	1-46~1-48	20.0	20.0	0.0	0.0	60	60	0.0, 2.5, 5.0	20.91	11.72
	1-49~1-51	20.0	20.0	0.0	0.0	60	70	0.0, 2.5, 5.0	20.91	11.72
	1-52~1-54	20.0	20.0	0.0	0.0	60	80	0.0, 2.5, 5.0	20.91	11.72
	1-55~1-57	20.0	20.0	0.0	0.0	60	90	0.0, 2.5, 5.0	20.91	11.72
	1-58~1-60	20.0	20.0	0.0	0.0	60	100	0.0, 2.5, 5.0	20.91	11.72
1-61~1-63	25.0	25.0	0.0	0.0	50	60	0.0, 2.5, 5.0	26.14	14.64	
1-64~1-66	25.0	25.0	0.0	0.0	50	70	0.0, 2.5, 5.0	26.14	14.64	
1-67~1-69	25.0	25.0	0.0	0.0	50	80	0.0, 2.5, 5.0	26.14	14.64	
1-70~1-72	25.0	25.0	0.0	0.0	50	90	0.0, 2.5, 5.0	26.14	14.64	
1-73~1-75	25.0	25.0	0.0	0.0	50	100	0.0, 2.5, 5.0	26.14	14.64	

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.107

③ ミュオン散乱法(5/14)

(2) 検出器応答解析ケース(MCCIデブリ)

デブリ種類	No.	UO ₂ [vol%]	ZrO ₂ [vol%]	SUS [vol%]	Conc [vol%]	空隙率 [%]	体積割合 [%]	Gd ₂ O ₃ [vol%]	デブリ重量 [kg]	U重量 [kg]
MCCIデブリ	2-1~2-3	0.35	0.35	2.40	6.90	90	60	0.0, 2.5, 5.0	2.54	0.21
	2-4~2-6	0.35	0.35	2.40	6.90	90	70	0.0, 2.5, 5.0	2.54	0.21
	2-7~2-9	0.35	0.35	2.40	6.90	90	80	0.0, 2.5, 5.0	2.54	0.21
	2-10~2-12	0.35	0.35	2.40	6.90	90	90	0.0, 2.5, 5.0	2.54	0.21
	2-13~2-15	0.35	0.35	2.40	6.90	90	100	0.0, 2.5, 5.0	2.54	0.21
	2-16~2-18	0.70	0.70	4.80	13.80	80	60	0.0, 2.5, 5.0	5.09	0.41
	2-19~2-21	0.70	0.70	4.80	13.80	80	70	0.0, 2.5, 5.0	5.09	0.41
	2-22~2-24	0.70	0.70	4.80	13.80	80	80	0.0, 2.5, 5.0	5.09	0.41
	2-25~2-27	0.70	0.70	4.80	13.80	80	90	0.0, 2.5, 5.0	5.09	0.41
	2-28~2-30	0.70	0.70	4.80	13.80	80	100	0.0, 2.5, 5.0	5.09	0.41
	2-31~2-33	1.05	1.05	7.20	20.70	70	60	0.0, 2.5, 5.0	7.63	0.62
	2-34~2-36	1.05	1.05	7.20	20.70	70	70	0.0, 2.5, 5.0	7.63	0.62
	2-37~2-39	1.05	1.05	7.20	20.70	70	80	0.0, 2.5, 5.0	7.63	0.62
	2-40~2-42	1.05	1.05	7.20	20.70	70	90	0.0, 2.5, 5.0	7.63	0.62
	2-43~2-45	1.05	1.05	7.20	20.70	70	100	0.0, 2.5, 5.0	7.63	0.62
	2-46~2-48	1.40	1.40	9.60	27.60	60	60	0.0, 2.5, 5.0	10.18	0.82
	2-49~2-51	1.40	1.40	9.60	27.60	60	70	0.0, 2.5, 5.0	10.18	0.82
	2-52~2-54	1.40	1.40	9.60	27.60	60	80	0.0, 2.5, 5.0	10.18	0.82
	2-55~2-57	1.40	1.40	9.60	27.60	60	90	0.0, 2.5, 5.0	10.18	0.82
	2-58~2-60	1.40	1.40	9.60	27.60	60	100	0.0, 2.5, 5.0	10.18	0.82
2-61~2-63	1.75	1.75	12.00	34.50	50	60	0.0, 2.5, 5.0	12.72	1.03	
2-64~2-66	1.75	1.75	12.00	34.50	50	70	0.0, 2.5, 5.0	12.72	1.03	
2-67~2-69	1.75	1.75	12.00	34.50	50	80	0.0, 2.5, 5.0	12.72	1.03	
2-70~2-72	1.75	1.75	12.00	34.50	50	90	0.0, 2.5, 5.0	12.72	1.03	
2-73~2-75	1.75	1.75	12.00	34.50	50	100	0.0, 2.5, 5.0	12.72	1.03	

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.108

③ ミュオン散乱法(6/14)

(2) 検出器応答解析ケース(金属デブリ)

デブリ種類	No.	UO ₂ [vol%]	ZrO ₂ [vol%]	SUS [vol%]	Conc [vol%]	空隙率 [%]	体積割合 [%]	Gd ₂ O ₃ [vol%]	デブリ重量 [kg]	U重量 [kg]
金属デブリ	3-1~3-3	0.025	0.025	9.950	0.000	90	60	0.0, 2.5, 5.0	5.15	0.01
	3-4~3-6	0.025	0.025	9.950	0.000	90	70	0.0, 2.5, 5.0	5.15	0.01
	3-7~3-9	0.025	0.025	9.950	0.000	90	80	0.0, 2.5, 5.0	5.15	0.01
	3-10~3-12	0.025	0.025	9.950	0.000	90	90	0.0, 2.5, 5.0	5.15	0.01
	3-13~3-15	0.025	0.025	9.950	0.000	90	100	0.0, 2.5, 5.0	5.15	0.01
	3-16~3-18	0.050	0.050	19.900	0.000	80	60	0.0, 2.5, 5.0	10.31	0.03
	3-19~3-21	0.050	0.050	19.900	0.000	80	70	0.0, 2.5, 5.0	10.31	0.03
	3-22~3-24	0.050	0.050	19.900	0.000	80	80	0.0, 2.5, 5.0	10.31	0.03
	3-25~3-27	0.050	0.050	19.900	0.000	80	90	0.0, 2.5, 5.0	10.31	0.03
	3-28~3-30	0.050	0.050	19.900	0.000	80	100	0.0, 2.5, 5.0	10.31	0.03
	3-31~3-33	0.075	0.075	29.850	0.000	70	60	0.0, 2.5, 5.0	15.46	0.04
	3-34~3-36	0.075	0.075	29.850	0.000	70	70	0.0, 2.5, 5.0	15.46	0.04
	3-37~3-39	0.075	0.075	29.850	0.000	70	80	0.0, 2.5, 5.0	15.46	0.04
	3-40~3-42	0.075	0.075	29.850	0.000	70	90	0.0, 2.5, 5.0	15.46	0.04
	3-43~3-45	0.075	0.075	29.850	0.000	70	100	0.0, 2.5, 5.0	15.46	0.04
	3-46~3-48	0.100	0.100	39.800	0.000	60	60	0.0, 2.5, 5.0	20.62	0.06
	3-49~3-51	0.100	0.100	39.800	0.000	60	70	0.0, 2.5, 5.0	20.62	0.06
	3-52~3-54	0.100	0.100	39.800	0.000	60	80	0.0, 2.5, 5.0	20.62	0.06
	3-55~3-57	0.100	0.100	39.800	0.000	60	90	0.0, 2.5, 5.0	20.62	0.06
	3-58~3-60	0.100	0.100	39.800	0.000	60	100	0.0, 2.5, 5.0	20.62	0.06
3-61~3-63	0.125	0.125	49.750	0.000	50	60	0.0, 2.5, 5.0	25.77	0.07	
3-64~3-66	0.125	0.125	49.750	0.000	50	70	0.0, 2.5, 5.0	25.77	0.07	
3-67~3-69	0.125	0.125	49.750	0.000	50	80	0.0, 2.5, 5.0	25.77	0.07	
3-70~3-72	0.125	0.125	49.750	0.000	50	90	0.0, 2.5, 5.0	25.77	0.07	
3-73~3-75	0.125	0.125	49.750	0.000	50	100	0.0, 2.5, 5.0	25.77	0.07	

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.109

③ ミュオン散乱法(7/14)

(2) 検出器応答解析ケース(ウランリッチデブリ)

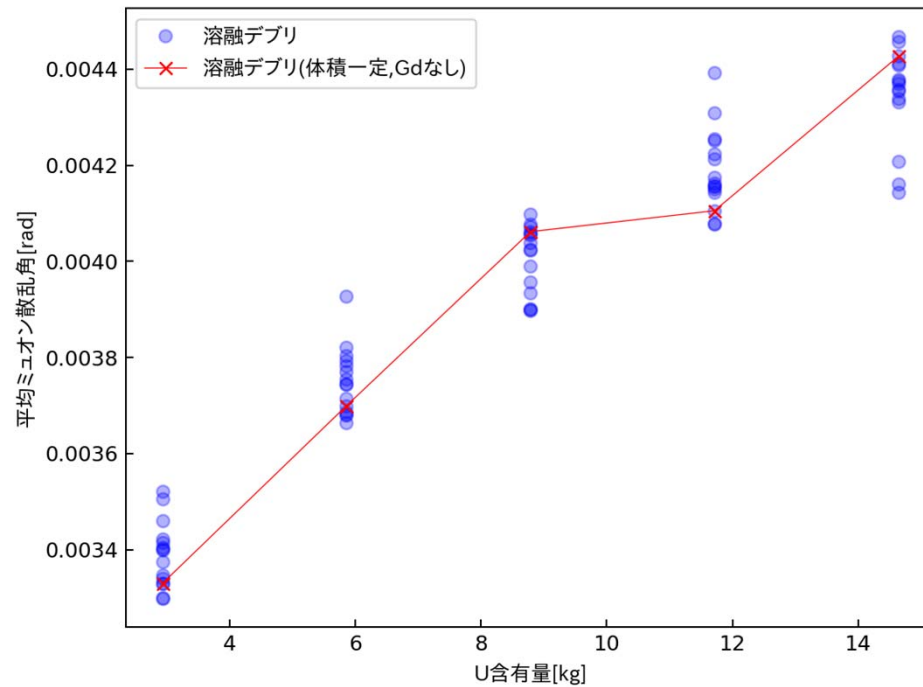
デブリ種類	No.	UO ₂ [vol%]	ZrO ₂ [vol%]	SUS [vol%]	Conc [vol%]	空隙率 [%]	体積割合 [%]	Gd ₂ O ₃ [vol%]	デブリ重量 [kg]	U重量 [kg]
ウランリッチ デブリ	4-1~4-3	10.0	0.0	0.0	0.0	90	60	0.0, 2.5, 5.0	6.84	5.86
	4-4~4-6	10.0	0.0	0.0	0.0	90	70	0.0, 2.5, 5.0	6.84	5.86
	4-7~4-9	10.0	0.0	0.0	0.0	90	80	0.0, 2.5, 5.0	6.84	5.86
	4-10~4-12	10.0	0.0	0.0	0.0	90	90	0.0, 2.5, 5.0	6.84	5.86
	4-13~4-15	10.0	0.0	0.0	0.0	90	100	0.0, 2.5, 5.0	6.84	5.86
	4-16~4-18	20.0	0.0	0.0	0.0	80	60	0.0, 2.5, 5.0	13.68	11.72
	4-19~4-21	20.0	0.0	0.0	0.0	80	70	0.0, 2.5, 5.0	13.68	11.72
	4-22~4-24	20.0	0.0	0.0	0.0	80	80	0.0, 2.5, 5.0	13.68	11.72
	4-25~4-27	20.0	0.0	0.0	0.0	80	90	0.0, 2.5, 5.0	13.68	11.72
	4-28~4-30	20.0	0.0	0.0	0.0	80	100	0.0, 2.5, 5.0	13.68	11.72
	4-31~4-33	30.0	0.0	0.0	0.0	70	60	0.0, 2.5, 5.0	20.52	17.57
	4-34~4-36	30.0	0.0	0.0	0.0	70	70	0.0, 2.5, 5.0	20.52	17.57
	4-37~4-39	30.0	0.0	0.0	0.0	70	80	0.0, 2.5, 5.0	20.52	17.57
	4-40~4-42	30.0	0.0	0.0	0.0	70	90	0.0, 2.5, 5.0	20.52	17.57
	4-43~4-45	30.0	0.0	0.0	0.0	70	100	0.0, 2.5, 5.0	20.52	17.57
	4-46~4-48	40.0	0.0	0.0	0.0	60	60	0.0, 2.5, 5.0	27.37	23.43
	4-49~4-51	40.0	0.0	0.0	0.0	60	70	0.0, 2.5, 5.0	27.37	23.43
	4-52~4-54	40.0	0.0	0.0	0.0	60	80	0.0, 2.5, 5.0	27.37	23.43
	4-55~4-57	40.0	0.0	0.0	0.0	60	90	0.0, 2.5, 5.0	27.37	23.43
	4-58~4-60	40.0	0.0	0.0	0.0	60	100	0.0, 2.5, 5.0	27.37	23.43
4-61~4-63	50.0	0.0	0.0	0.0	50	60	0.0, 2.5, 5.0	34.21	29.29	
4-64~4-66	50.0	0.0	0.0	0.0	50	70	0.0, 2.5, 5.0	34.21	29.29	
4-67~4-69	50.0	0.0	0.0	0.0	50	80	0.0, 2.5, 5.0	34.21	29.29	
4-70~4-72	50.0	0.0	0.0	0.0	50	90	0.0, 2.5, 5.0	34.21	29.29	
4-73~4-75	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50	100	0.0, 2.5, 5.0	34.21	29.29

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

③ ミュオン散乱法(8/14)

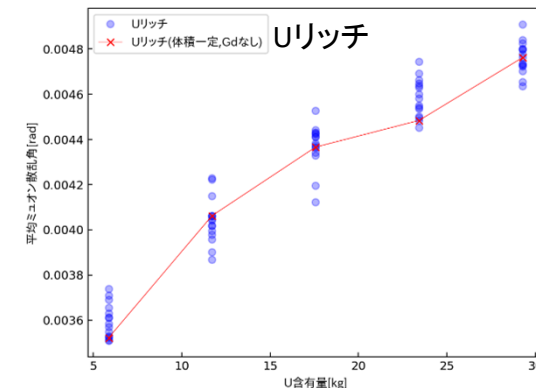
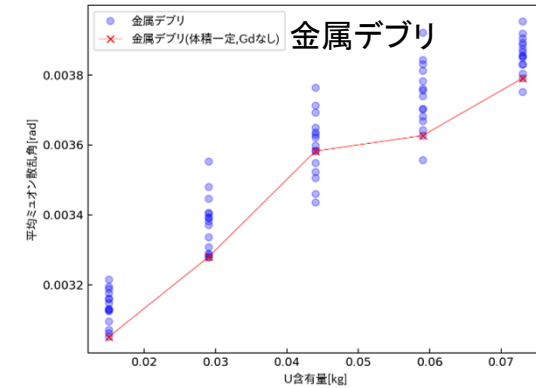
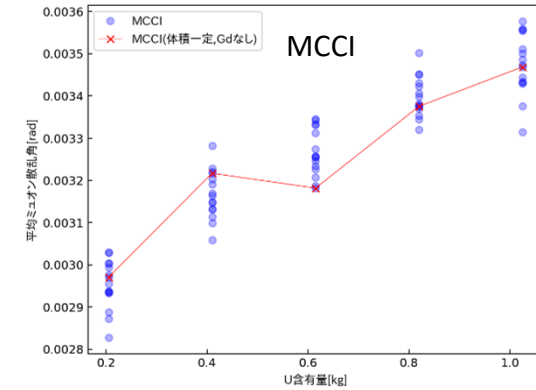
(3) 検出器応答解析結果

- U重量の影響評価
 - 各デブリ条件でU重量に対応して計測値が増加する傾向がみられる



U含有量に対する平均ミュオン散乱角(溶融デブリ)

- 計測値はU含有量の大して明確な相関を持つ
- その他の影響因子により同一U量でも計測値にばらつきを生じる

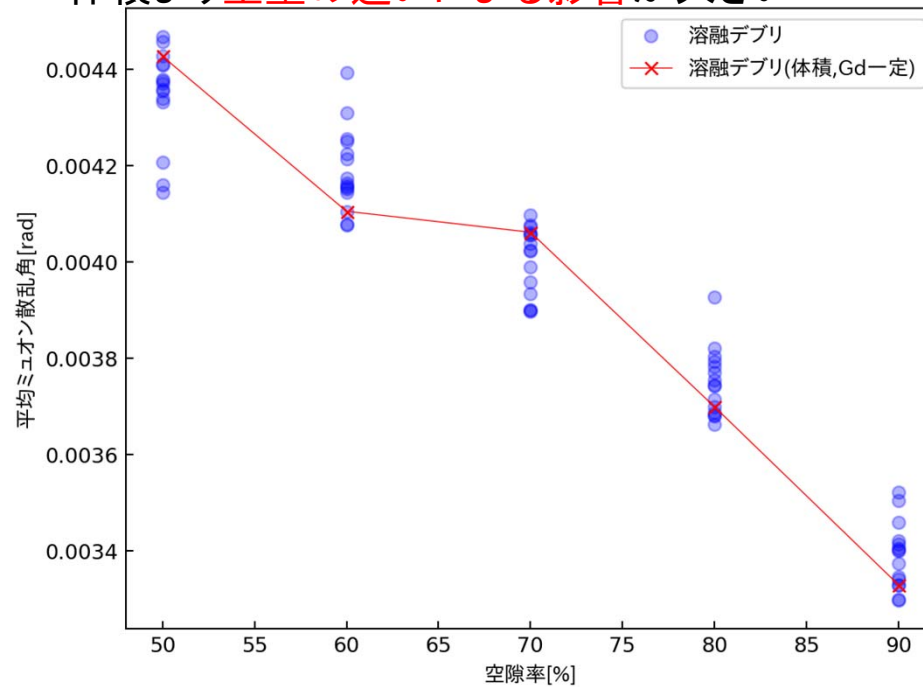


4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

③ ミュオン散乱法(9/14)

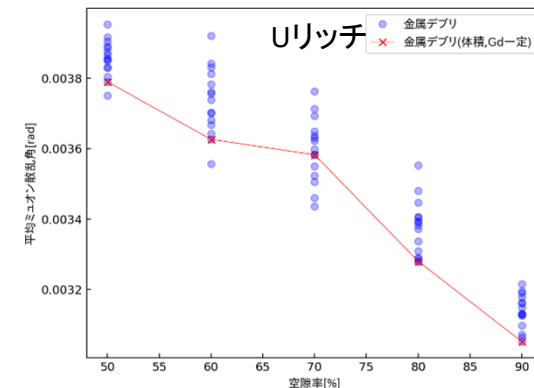
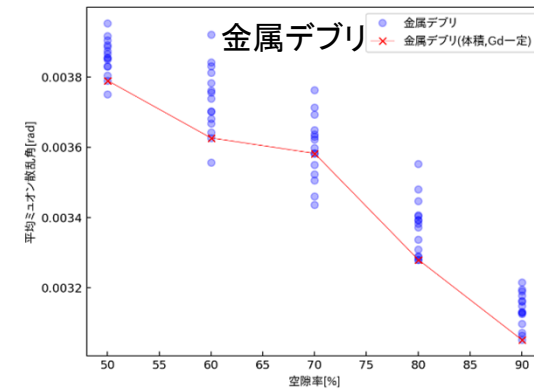
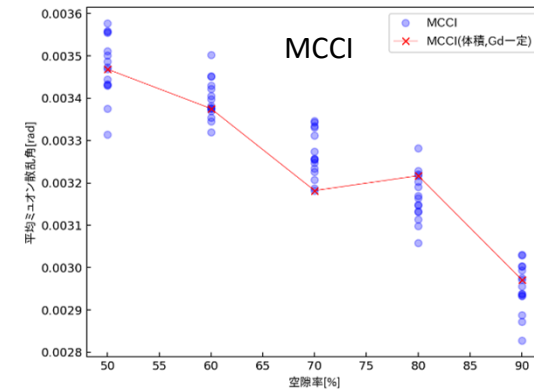
(3) 検出器応答解析結果

- 空隙率の影響評価
 - 同一体積で空隙率の増加により散乱角が低下
 - 体積より**重量の違いによる影響**が大きい



空隙率変化の影響(熔融デブリ条件)

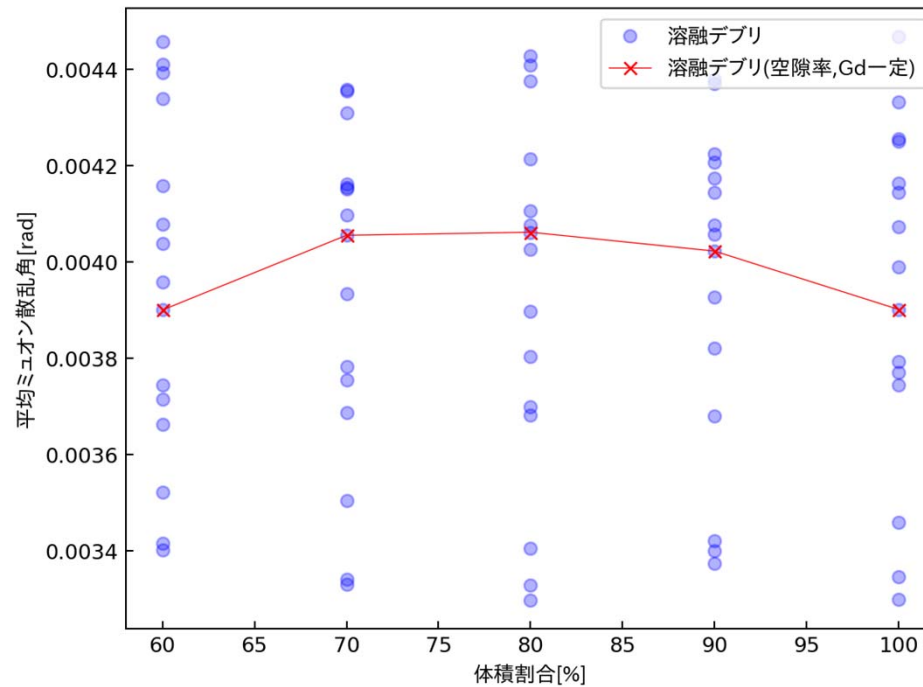
- 同一体積では空隙率増加により重量が低下するため、ミュオン散乱角の値は低下する。



③ ミュオン散乱法(10/14)

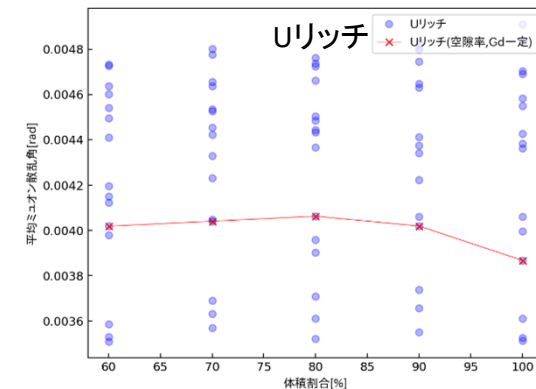
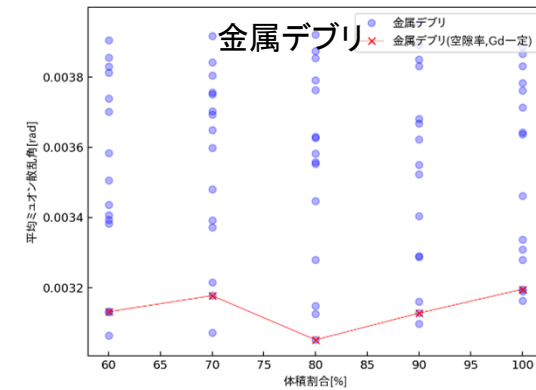
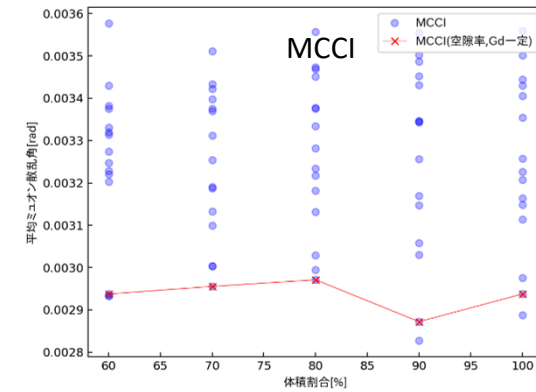
(3) 検出器応答解析結果

- 体積割合の影響評価
 - 同一重量での体積変化の影響度は小さい



体積変化の影響(溶融デブリ)

- 同一重量での体積変化の影響は、他の要因と比較して小さく、計測値に対する明確な相関関係は見られない。



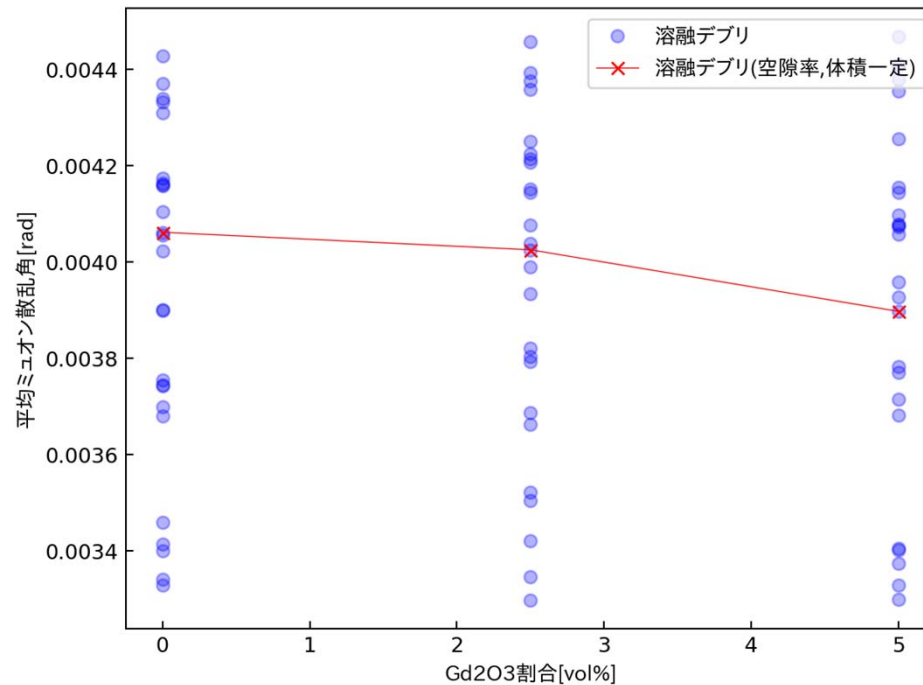
4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.113

③ ミュオン散乱法(11/14)

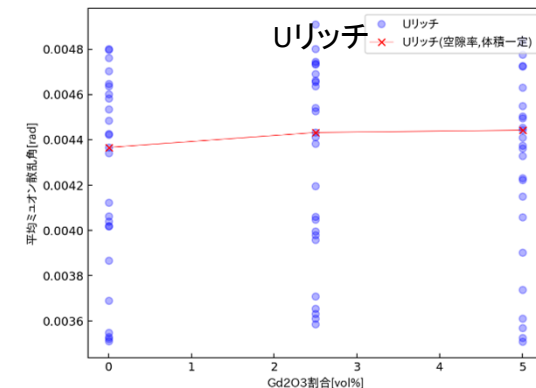
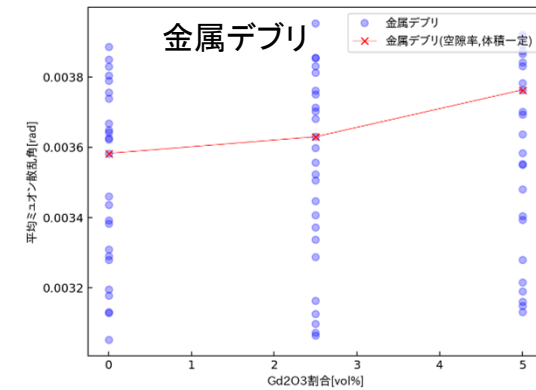
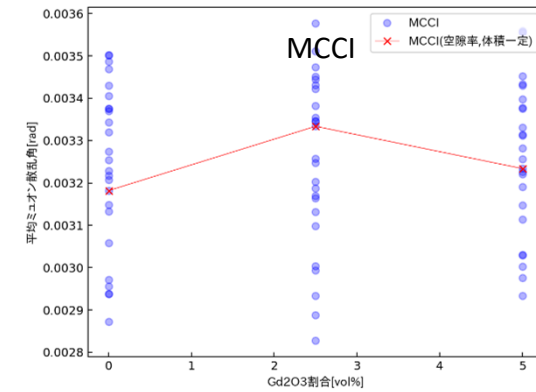
(3) 検出器応答解析結果

- 中性子吸収材割合の影響評価
 - 5%までの含有率で**有意な傾向は見られない**



中性子吸収材含有率の影響(溶融デブリ)

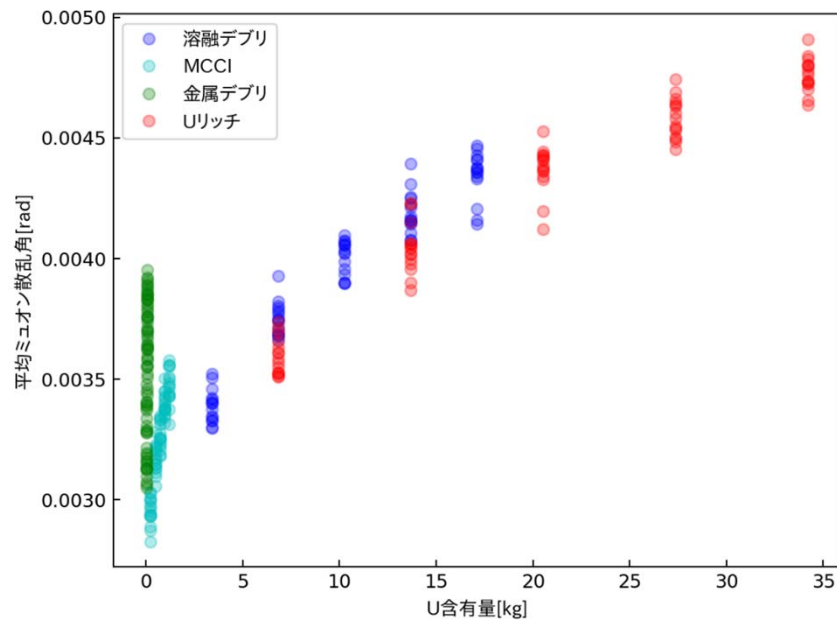
- 中性子吸収材(Gd_2O_3)はミュオン散乱の増加要因だが、燃料に含まれる数%程度では他の要因によるばらつきの影響が大きく、明確な相関関係は現れない。



③ ミュオン散乱法(12/14)

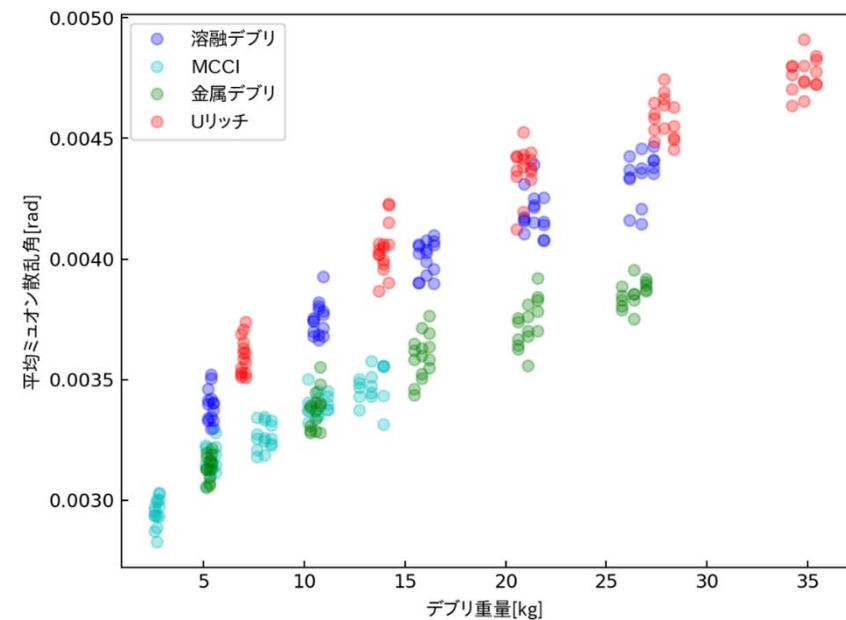
(3) 検出器応答解析結果

- 評価結果
 - U含有量と計測値は大まかに相関関係を持つが、その傾向はデブリ種類により異なる
 - U含有量が低い燃料デブリはデブリ重量当たりの散乱が低くなる傾向
 - デブリ重量などの基礎情報と組み合わせることでデブリ種類の情報が得られる可能性



U含有量に対する平均ミュオン散乱角

- U含有量と計測値に相関関係がみられる
- デブリごとに特性が異なる



デブリ重量に対する平均ミュオン散乱角

- デブリの種類により重量当たりの散乱角が異なる
- デブリ重量情報からデブリ種類が推定できる可能性

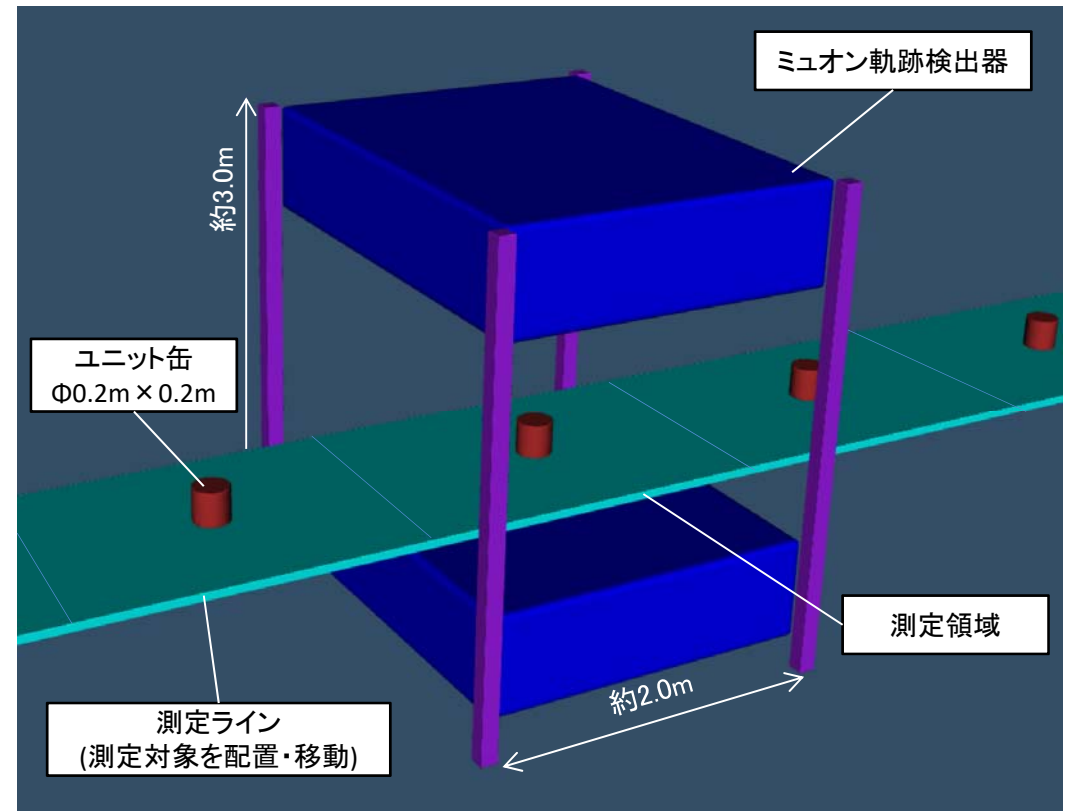
4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.115

③ ミュオン散乱法(13/14)

(4) 計測装置概念の構築

- 想定運用環境
 - 増設建屋または保管前処理施設
- 測定時間
 - 1~2時間/容器
- 装置寸法
 - 幅約2m × 高さ約3m
- 運用方法
 - サンプル(ユニット缶, 廃棄物内容器)を測定ラインに配置
 - 配置したサンプルは順次測定領域に移動され既定の時間測定
 - 測定後は次のサンプル測定が順次行われる



ミュオン測定による計測装置概念

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.116

③ ミュオン散乱法(14/14)

まとめと今後の課題

【実施内容】

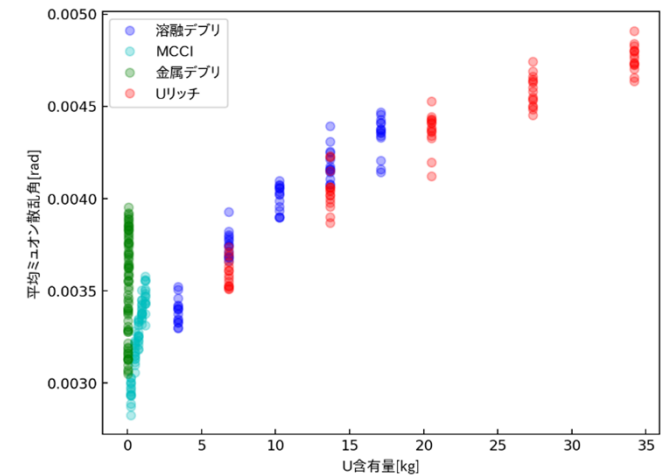
- 1) 測定精度に係る**検出器構造を再現**したシミュレーションモデルを作成
- 2) 過去に抽出した**主要な因子(デブリ種類, 空隙率, 体積, 吸収材)**に対する影響評価
 - 各因子の組み合わせ全300ケースを実施
- 3) 燃料デブリ仕分けに用いる計測装置概念を検討

【成果/開発への寄与】

- 1) 検出器応答解析による計測値のシミュレーション評価結果
 - 燃料デブリ中の**U重量とミュオン散乱値の相関関係**を確認
 - **燃料デブリ種類(4種類)**の違いによる計測値のばらつき: $\pm 20\%$
 - **空隙率(50~90%), 体積(60~100%), 吸収材(0~5%)**の違いによる計測値のばらつき: $\pm 10\%$
- 2) 計測装置概念の検討結果
 - 装置寸法: **W2m × D2m × H3m程度**
 - 測定時間: **1~2時間**

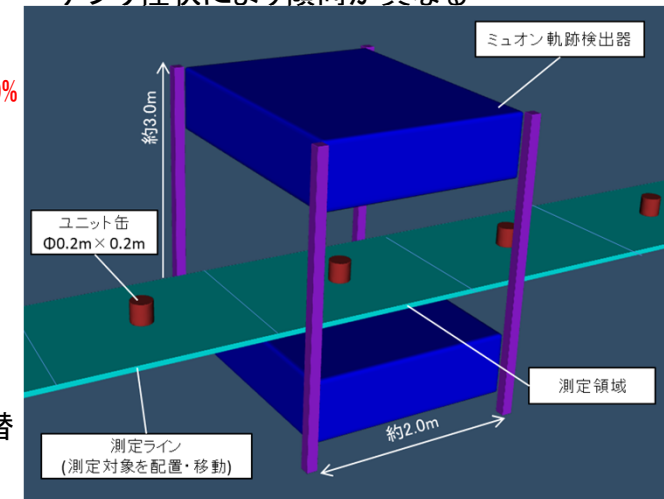
【課題と対応策】

- 1) 課題: 燃料デブリ種類による散乱傾向の差
対応策: 燃料デブリの主成分, 取り出し位置などによる**既知情報**を利用した評価方法の切り替え
- 2) 課題: 計測装置概念の最適化
対応策: **測定環境の詳細化**および環境に対応した装置仕様の検討



U含有量と計測値(ミュオン散乱)の関係

- U含有量に対応してミュオン散乱値が増加
- デブリ性状により傾向が異なる



ミュオン散乱法による計測装置概念

- Uユニット缶・内容物をミュオン検出器で測定
- 線源を使用せずにサンプルの測定が可能

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

(④ X線CT法)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
④	X線CT法	X線検出器	加速器X線源	側方から	密度	核分裂性核種質量	日立GE	117-127 215-220

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

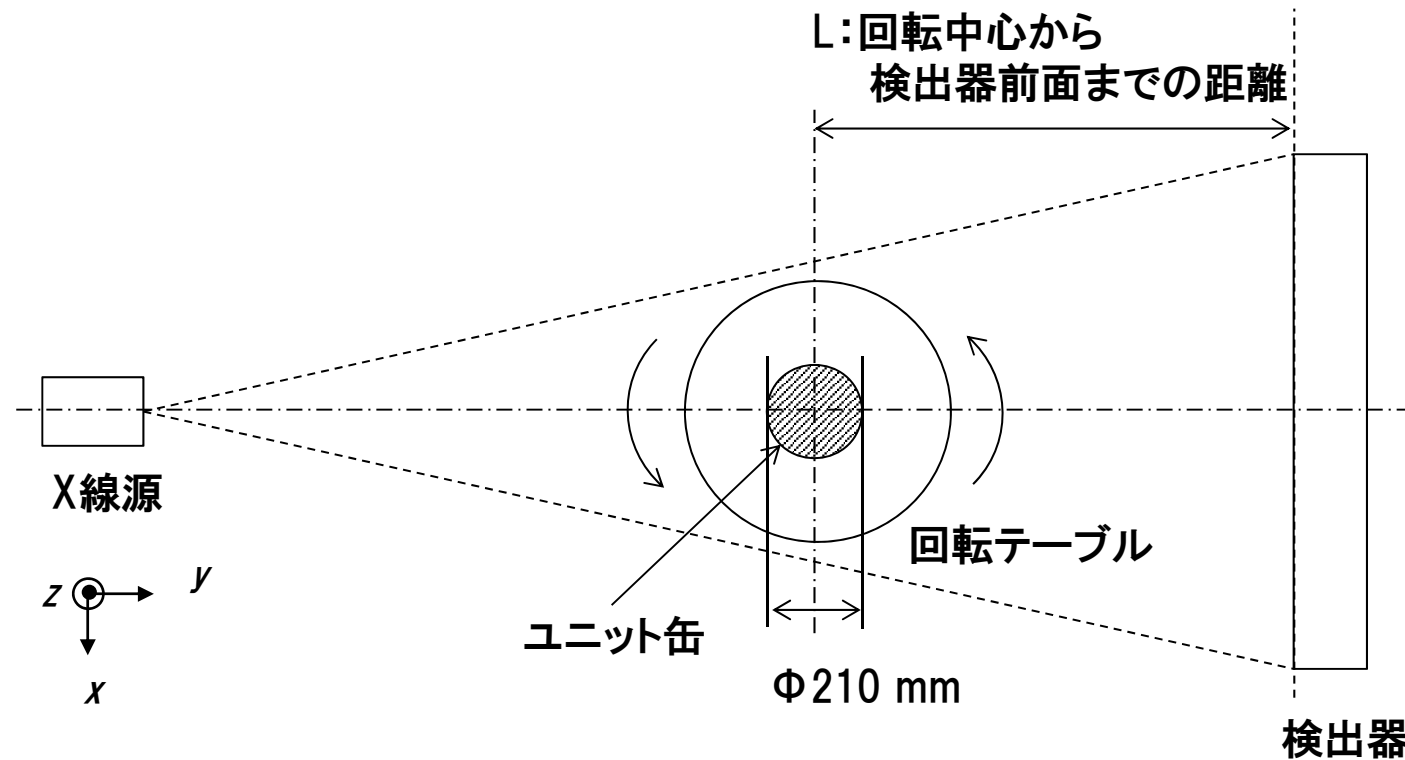
No.118

④ X線CT法(1/10)

<解析体系>

実機相当の体系で、検出器パラメータなどを組み込んだCTシミュレータ^[1]を用いて、X線の透過計算を実施

高エネルギーX線CTにおける解析体系



※Z方向の走査は1mmを想定

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

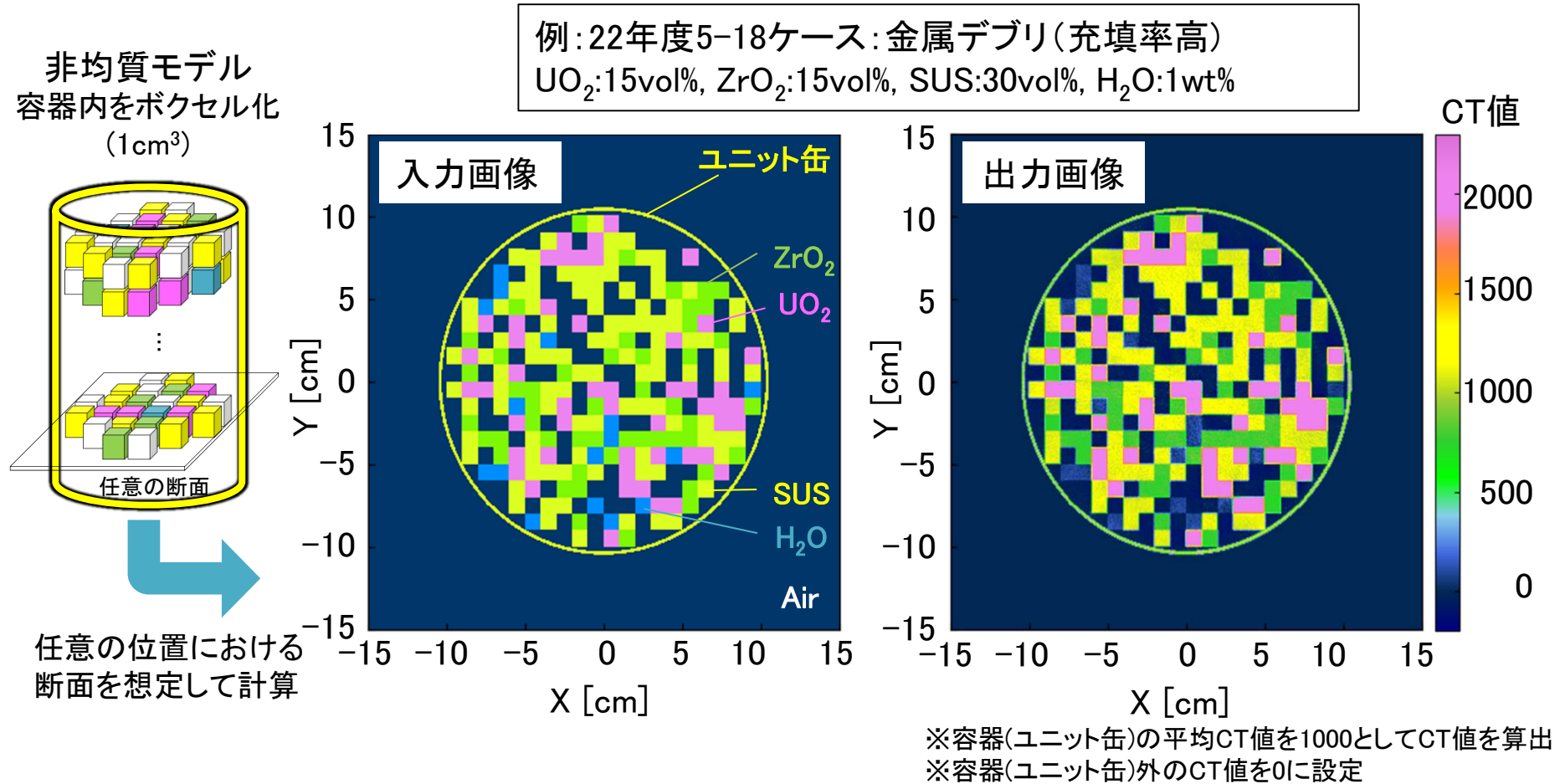
4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.119

④ X線CT法(2/10)

<解析方法>

容器内の任意断面における非均質な組成分布をインプットしてX線透過計算を実施し、CT画像を再構成



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

④ X線CT法(3/10)

<解析ケース>

評価項目3点に関する全14ケースの解析を実施

X線CT解析ケース表

#	評価項目	燃料デブリ種類	ケースNo.	UO ₂ (UO2-01)	ZrO ₂ (ZrO2-01)	SUS (SUS-01)	Conc	充填率	H ₂ O	Gd ₂ O ₃	B ₄ C	容器	U量	X線エネルギー
1	測定性能	熔融デブリ	5-1	6.3vol%	6.3vol%	—	—	12.6vol%	1wt%	—	—	ユニット缶	3.7kg	6MeV
			5-2											9MeV
		MCCIデブリ	5-3	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	—	—	ユニット缶		6MeV
			5-4											9MeV
		金属デブリ	5-5	0.56vol%	0.56vol%	28.9vol%	—	30vol%	1wt%	—	—	廃棄物 内容器		6MeV
			5-6											9MeV
2	物質かさ密度 UO ₂ の 密度を変化	MCCIデブリ (水・吸収材 含む)	5-7	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	5vol%	5vol%	ユニット缶	6MeV	
			5-8										9MeV	
3	核燃料混入量 UO ₂ と他物質 を混合	MCCIデブリ (水・吸収材 含む)	5-9	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	5vol%	5vol%	ユニット缶	6MeV	
			5-10										9MeV	
			5-11	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	5vol%	5vol%	ユニット缶	6MeV	
			5-12										9MeV	
			5-13	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	5vol%	5vol%	ユニット缶	6MeV	
			5-14										9MeV	

青色枠: 各評価項目に対する解析パラメータ

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

④ X線CT法(4/10)

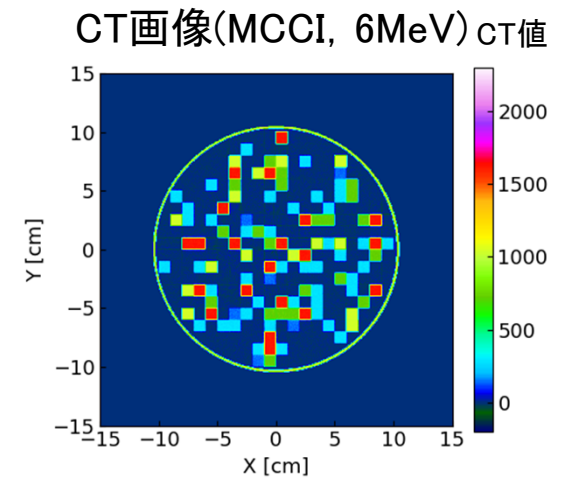
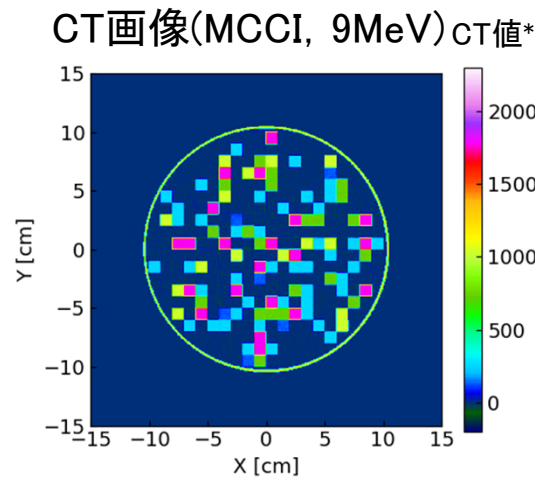
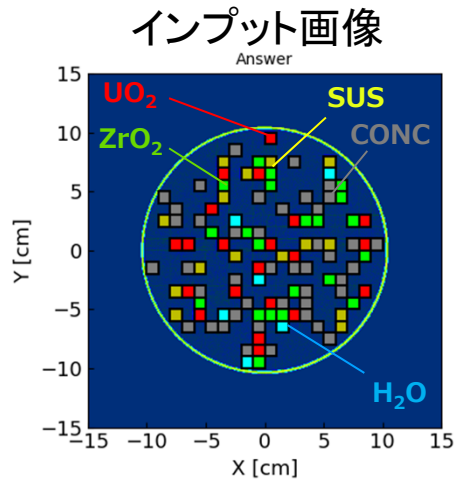
<評価項目1:測定性能(1/2)> 燃料デブリ3種類のケースに対して、核物質量の推定精度を評価

評価対象の解析ケース

評価項目	燃料デブリ種類	ケース No.	UO ₂ (UO2-01)	ZrO ₂ (ZrO2-01)	SUS (SUS-01)	Conc	充填率	H ₂ O	Gd ₂ O ₃	B ₄ C	容器	U量	最大X線エネルギー
測定性能	溶融デブリ	5-1	6.3vol%	6.3vol%	—	—	12.6vol%	1wt%	—	—	ユニット缶	3.7kg	6MeV
		5-2											9MeV
	MCCIデブリ	5-3	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	—	—	ユニット缶	3.7kg	6MeV
		5-4											9MeV
	金属デブリ	5-5	0.56vol%	0.56vol%	28.9vol%	—	30vol%	1wt%	—	—	廃棄物 内容器	3.7kg	6MeV
		5-6											9MeV

No.5-3&5-4の計算結果

* CT値:ユニット缶のCT値を1000として規格化



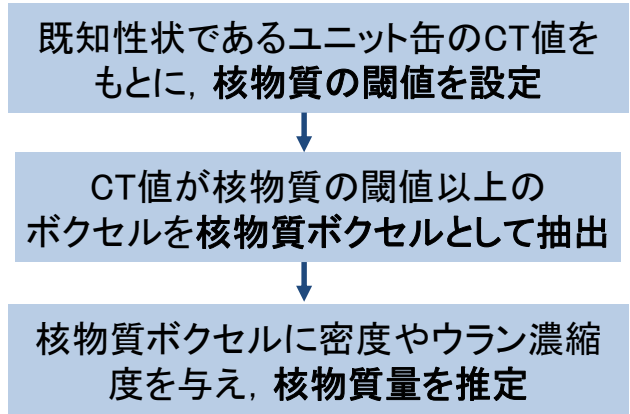
➤ 核燃料(UO₂)と、他の物質(SUSやCONC)が画像上で識別可能

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

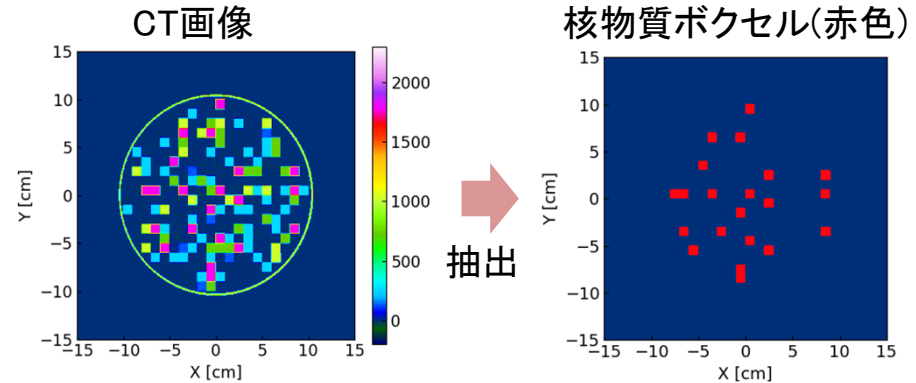
④ X線CT法(5/10)

<評価項目1:測定性能(2/2)> デブリ3種類のケースに対して,核物質量の推定精度を評価

測定性能評価の手順



例:No.5-3 (MCCI, 9MeV)



測定性能評価の結果

ケースNo.	燃料デブリ種類 (容器)	最大X線 エネルギー	核物質量(各ケースに対し, 10パターンの組成で評価) 5-1~5-4:ユニット缶高さに対し組成が同一と仮定し, 195枚撮像 5-5~5-6:ユニット缶高さに対し組成が同一と仮定し, 298枚撮像		
			a: 入力U量 (kg)	b: 推定U量* (kg)	推定精度 (b/a)
5-1	溶融デブリ (ユニット缶)	9MeV	3.638	3.619	0.995
5-2		6MeV		3.484	0.958
5-3	MCCIデブリ (ユニット缶)	9MeV		3.642	1.001
5-4		6MeV		3.494	0.960
5-5	金属デブリ (廃棄物内容器)	9MeV	3.684	3.548	0.963
5-6		6MeV		3.466	0.941

*U量:ウラン同位体の質量の総和。UO₂体積に対し, 密度10.525g/cm³, U-235濃縮度5%で換算。

➤ 核物質が他の物質と混ざり合わない燃料デブリに対して, 最大6%程度の誤差で核物質量を推定可能

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

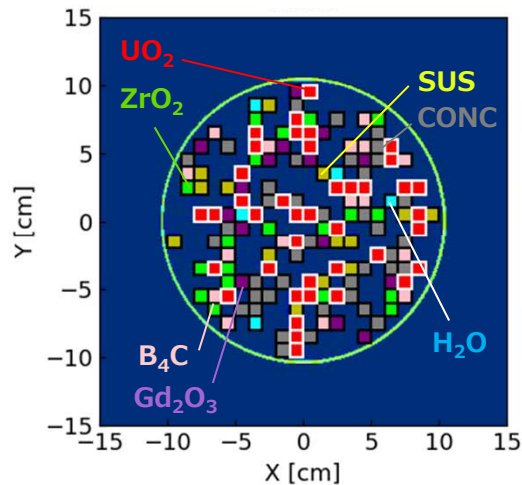
④ X線CT法(6/10)

<評価項目2:物質かさ密度(1/2)>

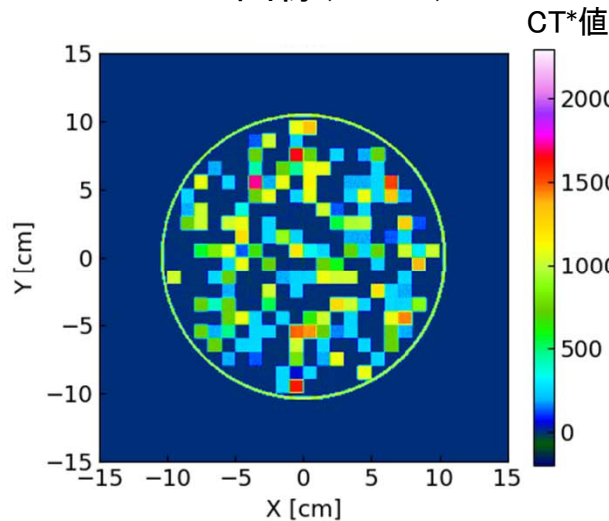
核物質に空間分解能未満サイズの気孔が混入し、 UO_2 のかさ密度が1~99%に変化したCT画像を評価

評価項目	燃料デブリ種類	ケース No.	UO_2 (UO2-01)	ZrO_2 (ZrO2-01)	SUS (SUS-01)	Conc	充填率	H_2O	Gd_2O_3	B_4C	容器	U量	X線エネルギー
物質かさ密度	MCCIデブリ (吸収材含む)	5-7	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	5vol%	5vol%	ユニット缶	3.7kg	6MeV
		5-8											9MeV

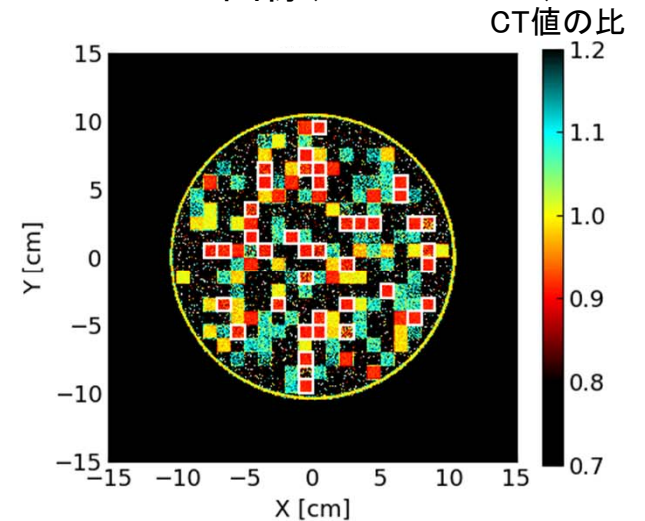
入力画像



CT画像(9MeV)



MECT**画像(6MeV/9MeV)



- CT画像(9MeV)のCT値から、密度が変化した UO_2 と他物質の識別が困難だが、MECT画像のCT値の比から、Gd以外の他物質との識別が可能

* CT値: ユニット缶のCT値を1000として規格化, ** MECT: マルチエネルギーX線CT(Multiple Energy X-ray CT)

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.124

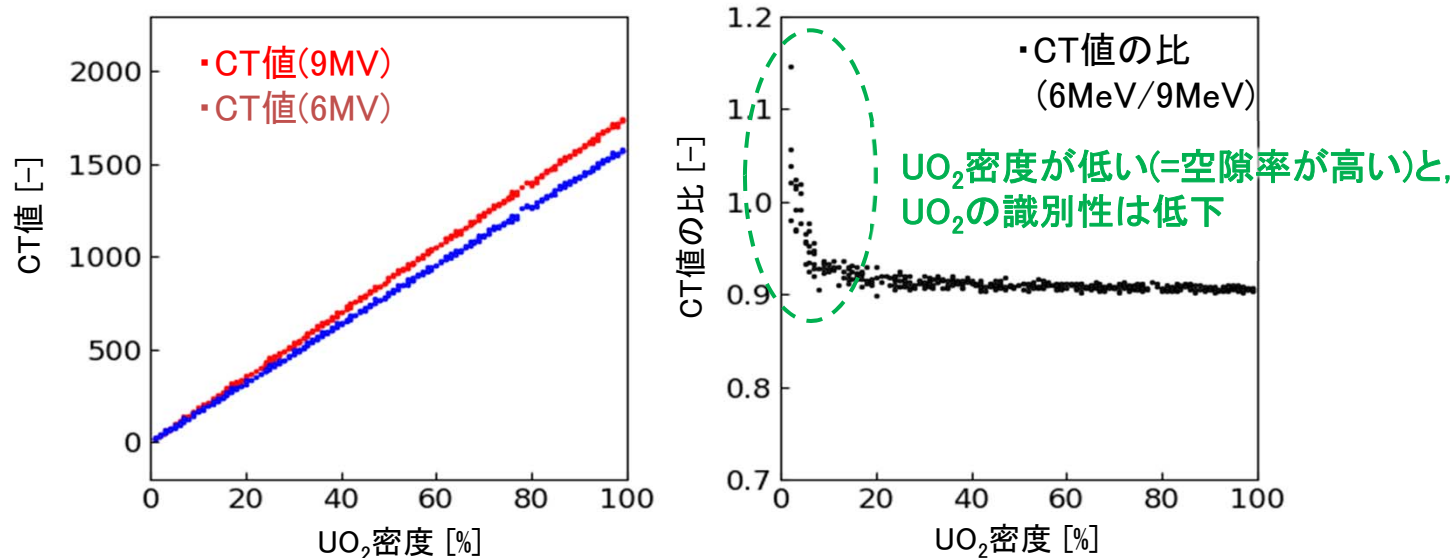
④ X線CT法(7/10)

<評価項目2:物質かさ密度(2/2)>

核物質に空間分解能未満サイズの気孔が混入し, UO_2 のかさ密度が1~99%に変化したCT画像を評価

評価項目	燃料デブリ種類	ケース No.	UO_2 (UO2-01)	ZrO_2 (ZrO2-01)	SUS (SUS-01)	Conc	充填率	H_2O	Gd_2O_3	B_4C	容器	U量	X線エネルギー
物質かさ密度	MCCIデブリ (吸収材含む)	5-7	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	5vol%	5vol%	ユニット缶	3.7kg	6MeV
		5-8											9MeV

UO_2 の密度変化に対する UO_2 のCT値およびCT値の比に関するプロット



➤ MECT画像では, UO_2 の物質かさ密度が約20%以下になると, 物質の識別性は低下

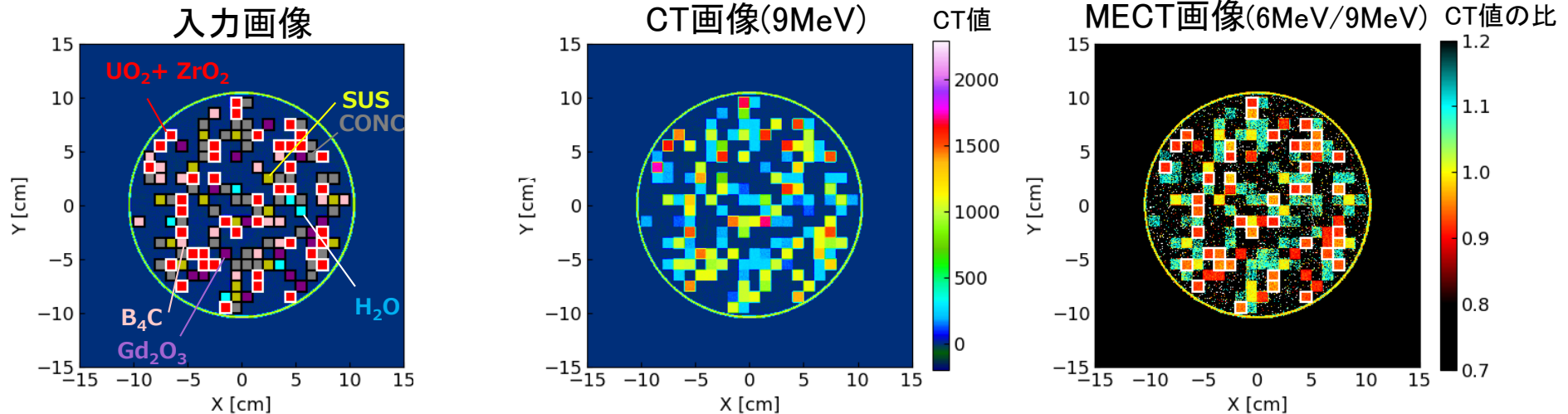
④ X線CT法(8/10)

<評価項目3:核物質混入量(1/2)>

他物質(ZrO_2 , 鉄, コンクリート)に核物質(UO_2) が1~99%混入した場合のCT画像を評価

評価項目	燃料デブリ種類	ケース No.	UO_2 (UO2-01)	ZrO_2 (ZrO2-01)	SUS (SUS-01)	Conc	充填率	H_2O	Gd_2O_3	B_4C	容器	U量	最大X線エネルギー
核物質混入量	MCCIデブリ (吸収材含む)	5-9	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	5vol%	5vol%	ユニット缶	3.7kg	6MeV
		5-10											9MeV
		5-11	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	5vol%	5vol%	ユニット缶	3.7kg	6MeV
		5-12											9MeV
		5-13	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	5vol%	5vol%	ユニット缶	3.7kg	6MeV
		5-14											9MeV

No.5-9&5-10(UO_2+ZrO_2)



➤ 9MVおよびMECTの画像単体からは、全ての核物質が混入したボクセル(UO_2+ZrO_2)の識別は困難

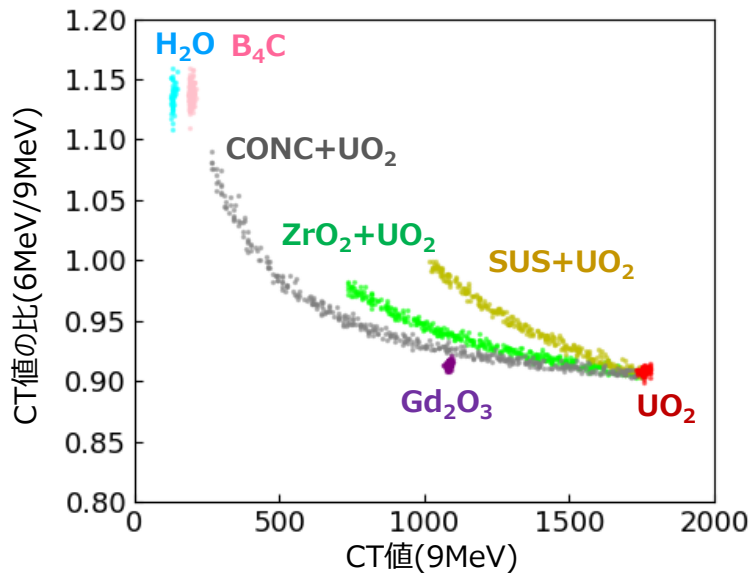
4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

④ X線CT法(9/10)

<評価項目3:核物質混入量(2/2)>

他物質(ZrO₂, 鉄, コンクリート)に核物質(UO₂) が1~99%混入した場合のCT画像を評価

評価項目	燃料デブリ種類	ケースNo.	UO ₂ (UO2-01)	ZrO ₂ (ZrO2-01)	SUS (SUS-01)	Conc	充填率	H ₂ O	Gd ₂ O ₃	B ₄ C	容器	U量	最大X線エネルギー
核物質混入量	MCCIデブリ (吸収材含む)	5-9	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	5vol%	5vol%	ユニット缶	3.7kg	6MeV
		5-10											9MeV
		5-11	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	5vol%	5vol%	ユニット缶	3.7kg	6MeV
		5-12											9MeV
		5-13	6.3vol%	6.3vol%	4.5vol%	12.9vol%	30vol%	1wt%	5vol%	5vol%	ユニット缶	3.7kg	6MeV
		5-14											9MeV



左図:CT値(9MeV)とCT値の比(MECT)のプロット

- CT値とCT比の関係性から、核物質が他の物質と混合しても識別できる可能性あり
- 今後、確認に向けた試験などを予定

④ X線CT法(10/10)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

X線CTでは、既存装置の計測装置の仕様に基づき、実機相当のパラメータを組み込んだCTシミュレータを用いてX線透過量を計算し、再構成したCT画像をもとに、測定性能・物質かさ密度・核物質混入量の評価を実施。

- 1) 測定性能(No.4-1～6)では、熔融デブリ、MCCIデブリ、金属デブリなどの代表的な燃料デブリ組成に対する**核燃料物質量の計測精度**を評価した。
- 2) 物質かさ密度(No.4-7～8)では、気孔などの混入により**核燃料のかさ密度が変化**した場合の識別性を評価した。
- 3) 核燃料混入量(No.4-9～14)では、1～99%の割合で**核燃料が他物質に混入**した場合の識別性を評価した。

【成果/開発への寄与】

- 1) 測定性能評価では、核物質が他の物質と混ざり合わない場合、ユニット缶に充填した熔融デブリやMCCIデブリ、廃棄物内容器に充填した金属デブリに対する従来CTの**計測精度は最大6%程度**となった。このとき、最大X線エネルギーが9MeVより6MeV、容器がユニット缶より廃棄物内容器の方が、計測精度が低下する傾向が見られた。
- 2) 物質かさ密度評価では、かさ密度の変化によってCT値は変動するが、MECT(マルチエネルギーX線CT)により計測したCT値の比は、核燃料の**かさ密度が約20%以上**の場合に一定となり、かさ密度の影響を受けないことを確認し、核燃料が識別可能な見通しが得られた。
- 3) 核燃料混入量評価では、核燃料が**ZrO₂, SUS, コンクリートに混入**した場合のCT値とCT値の比が混入した物質と核燃料混入量に依存して固有の値になることを確認し、核燃料が識別可能な見通しが得られた。
- 4) 装置寸法:4m×4m ※フットプリント、メンテナンスエリア含む(2019年度仕分けPJ報告書を参照)
- 5) 計測時間:(※実機での撮像時間)
 - ・ユニット缶:13～50分/容器(MECTでは25～100分/容器) ※1～4容器ずつ計測することを想定
 - ・廃棄物内容器:75分/容器(MECTでは150分/容器) ※1容器ずつ計測することを想定

【課題と対応策】

- 1) 課題:物質かさ密度および核燃料混入量の評価結果は解析によるものであり、試験での確認が必要
対応策:**MECTの物質識別性を試験により評価**。
 - 2) 課題:ユニット缶に関して4容器ずつ計測することで短時間評価が可能だが、何本ずつ計測できるかは計測条件と要求精度により判断が必要。
対応策:**計測時間と計測精度の関係を定量的に評価**する必要がある。
- 1)～2)の評価を通じて、検出器や最大X線エネルギーの具体的な仕様を検討する。

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

(⑤-1 パッシブガンマ線法A)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
⑤-1	パッシブガンマ線法 A	Ge	なし	なし	核分裂生成核種質量 (Eu-154など)	核分裂性核種質量	MHI	128-140 221-233
⑤-2	同 B	CZT, LaBr ₃ など	なし	なし	同上	同上	日立GE	141-154 234-237

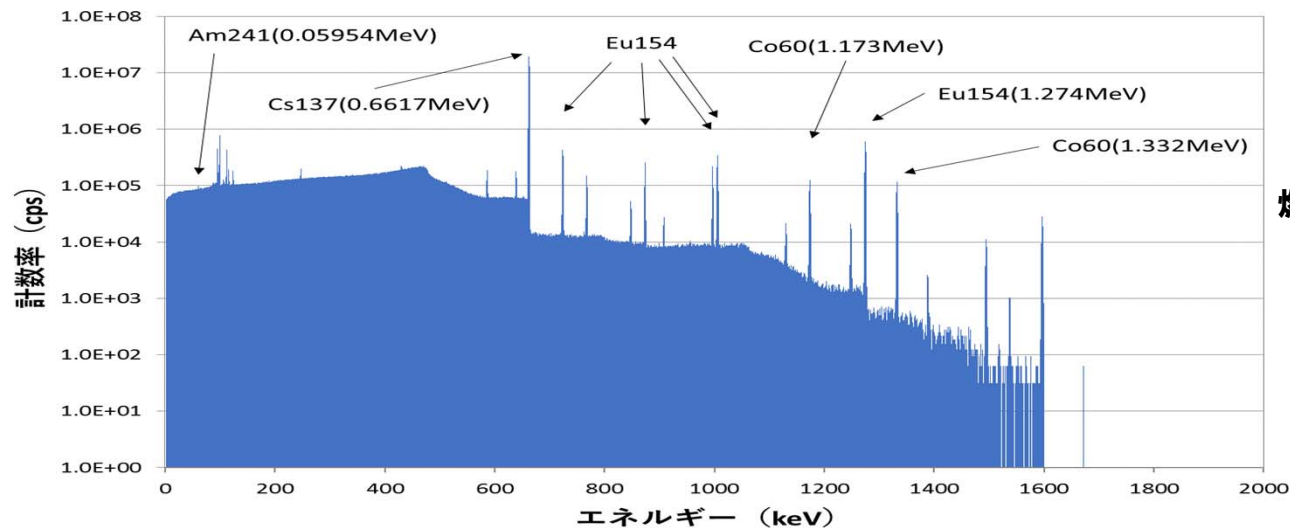
【特長】

- 検出器は、エネルギー分解能および実績を重視して、Ge検出器を選定。

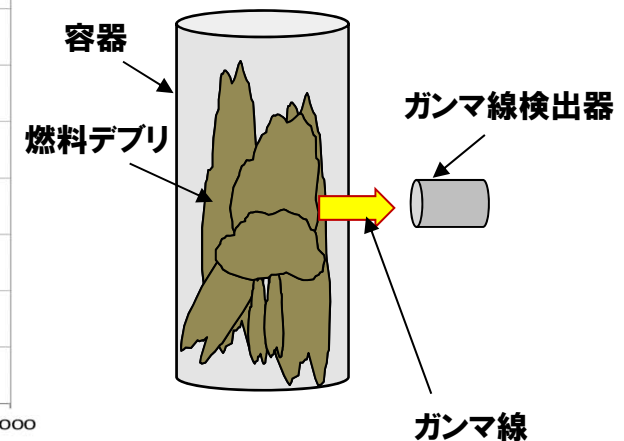
⑤-1 パッシブガンマ線法共通

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など)** 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など)** が含まれる。
- 故に、燃料由来の核種を識別する必要があり、**ガンマ線のエネルギースペクトルを計測**する。
- さらに、燃料由来の核種からのガンマ線束は、燃焼度など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。



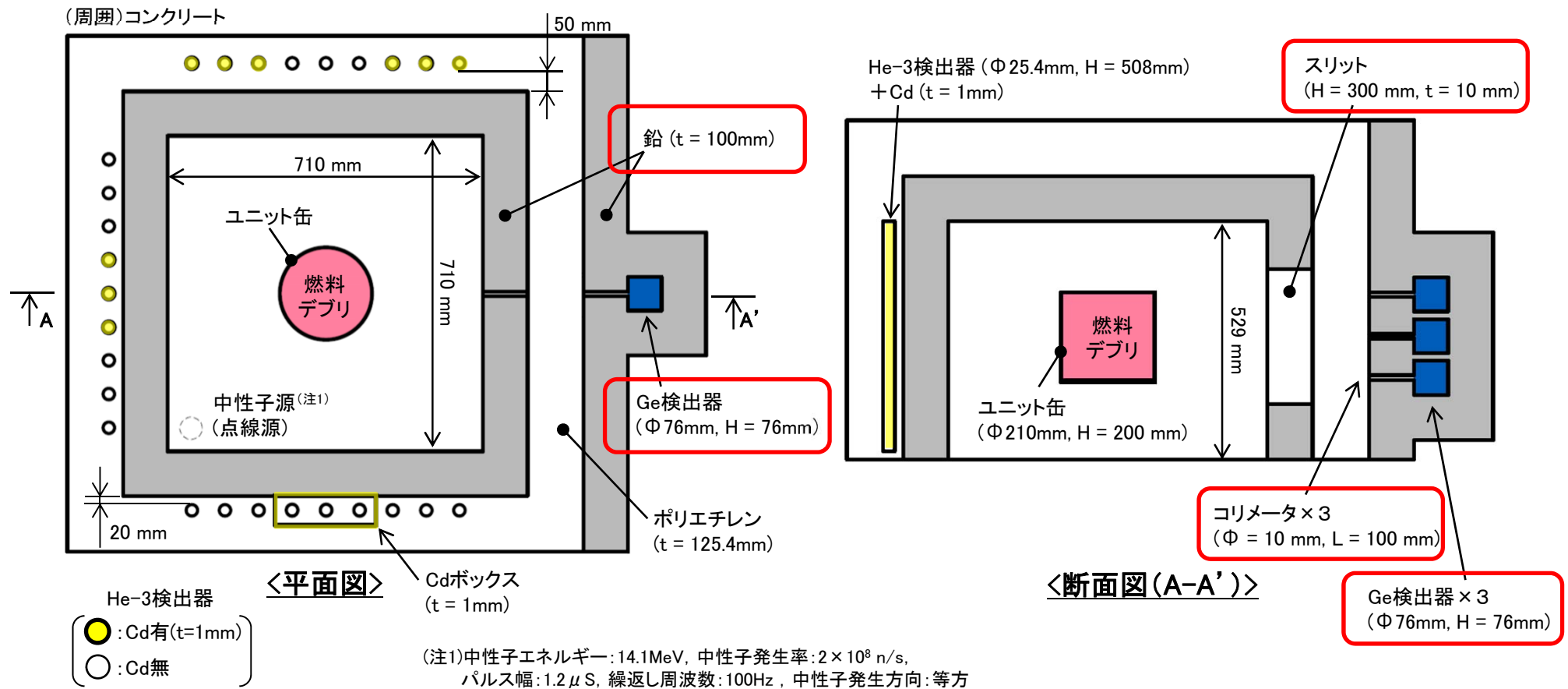
解析アウトプット例 (Ge検出器)



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

⑤-1 パッシブガンマ線法A(1/11)

＜計測装置概念の検討＞…単一の計測装置により、アクティブn, パッシブn, γ の各計測法に対応可能な装置概念を検討。



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.131

⑤-1 パッシブガンマ線法A(2/11)

<対象物条件の検討>

- 対象物条件:「**溶融デブリ**」「**MCCIデブリ**」「**金属デブリ**」(注1)を計測対象として想定。
- 評価対象とする容器は2021年度評価対象ケースより以下を想定。

デブリ性状	容器／容器形状	備考
溶融デブリ MCCIデブリ	ユニット缶 / φ210mm×H200mm	最小単位容器。線量寄与範囲, 線源量がより少なくなるH200mmで代表。
金属デブリ	廃棄物保管容器 (内容器) / □500mm×300mmH	廃棄物保管容器の遮蔽厚が未確定であるため, 遮蔽無し且つ保管容器よりも小さい内容器で代表。 (複数ある内(回収)容器候補から処理・処分PJでの代表候補を採用)

- 2021年度までの成果として整理した各影響因子より, 技術課題として抽出したパラメータ(**自己遮蔽**(注2)(組成), **燃焼度**, **中性子吸収材の有無**)に着目した検出器応答解析ケースを設定。

【解析ケース数】

A: 溶融デブリ ⇒ 計6ケース
(組成: 2ケース) × (燃焼度: 3ケース)

B: MCCIデブリ ⇒ 計6ケース
(組成: 2ケース) × (燃焼度: 3ケース)

C: 金属デブリ ⇒ 計3ケース
(組成: 3ケース) × (燃焼度: 1ケース)

計15ケース

⇒ 次ページより, 各ケースの条件一覧を示す

(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

(注2) 今後, 自己遮蔽の影響解析として, 偏在ケースも実施する必要がある。

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.132

⑤-1 パッシブガンマ線法A(3/11)

解析ケース表(溶融デブリ)

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子 吸収材	FP 放出率*1	冷却期間	偏在	容器	
	デブリ 性状	充填率内								充填率外
		組成	合計(充填率)							
A-1	溶融 デブリ	UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-2		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-3		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-4		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-5		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-6		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶

*1「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.133

⑤-1 パッシブガンマ線法A(4/11)

解析ケース表(MCCIデブリ)

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子 吸収材	FP 放出率*1	冷却期間	偏在	容器	
	デブリ 性状	充填率内								充填率外
		組成	合計(充填率)							
B-1	MCCI デブリ	UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 20.7vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-2				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-3				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-4		UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 50.7vol%	60 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-5				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-6				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶

*1「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.134

⑤-1 パッシブガンマ線法A(5/11)

解析ケース表(金属デブリ)

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子 吸収材	FP 放出率*1	冷却期間	偏在	容器*2	
	デブリ 性状	充填率内								充填率外
		組成	合計(充填率)							
C-1	金属 デブリ	UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 29.85 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器 (内容器)
C-2		UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 44.85 vol%	45 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器 (内容器)
C-3		UO ₂ : 0.48vol% ZrO ₂ : 0vol% SUS: 10 vol%	10.48 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器 (内容器)

*1 「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

*2 SUSが主であり、取り出しの初期段階で内容器に仕分けられることを想定

*3 各ケースの概要は以下のとおり

C-1: ベースケース

C-2: SUS組成に対する感度ケース

C-3: 未臨界担保の観点より、UO₂を3.7kg相当の体積割合とした感度ケース

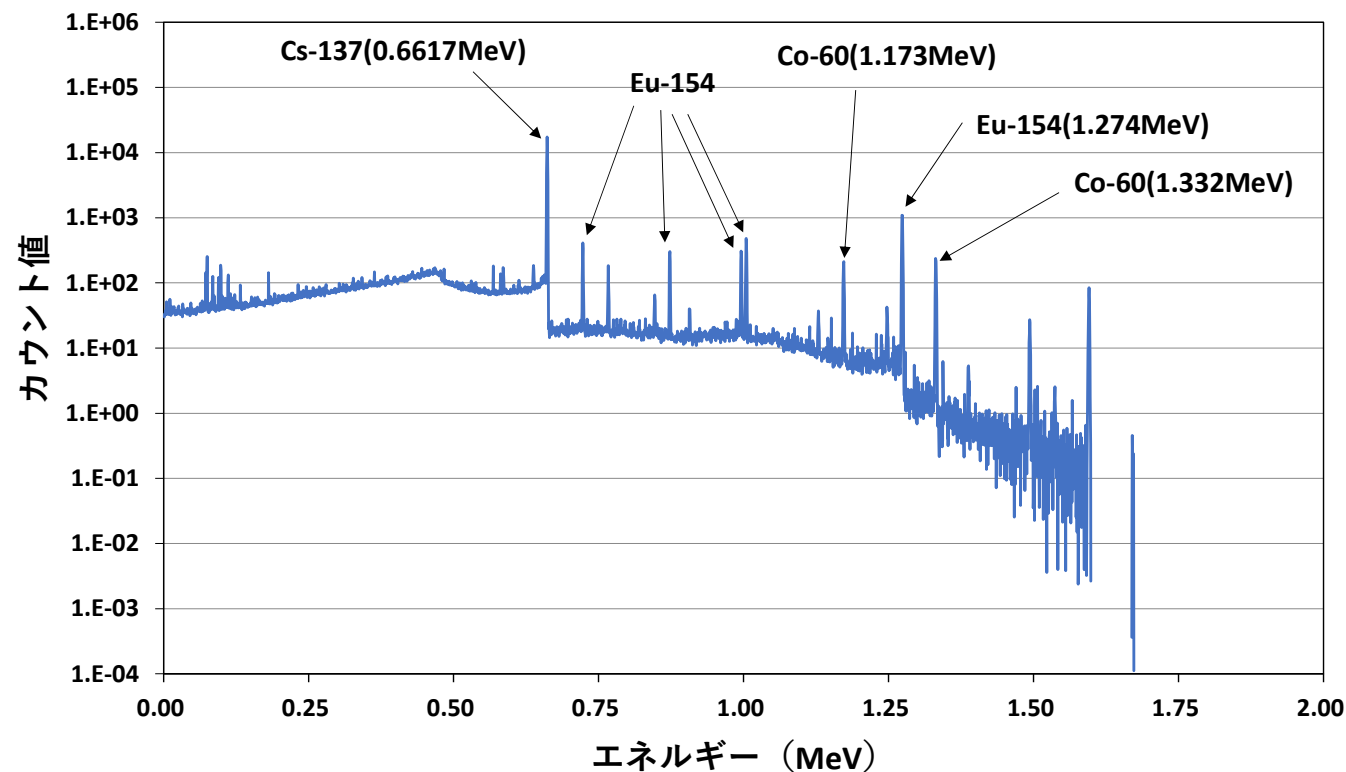
4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.135

⑤-1 パッシブガンマ線法A(6/11)

＜溶融デブリ ベースケースの検出器応答＞

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子吸収材	FP放出率	冷却期間	偏在	容器	照射中性子源	
	デブリ性状	充填率内									充填率外
		組成	合計(充填率)								
A-1	溶融デブリ	UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率) : 1wt% Empty : 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	—



✓ 計測装置概念をモデル化した解析にて、Eu-154などの主要なピークに対する検出性を確認した。

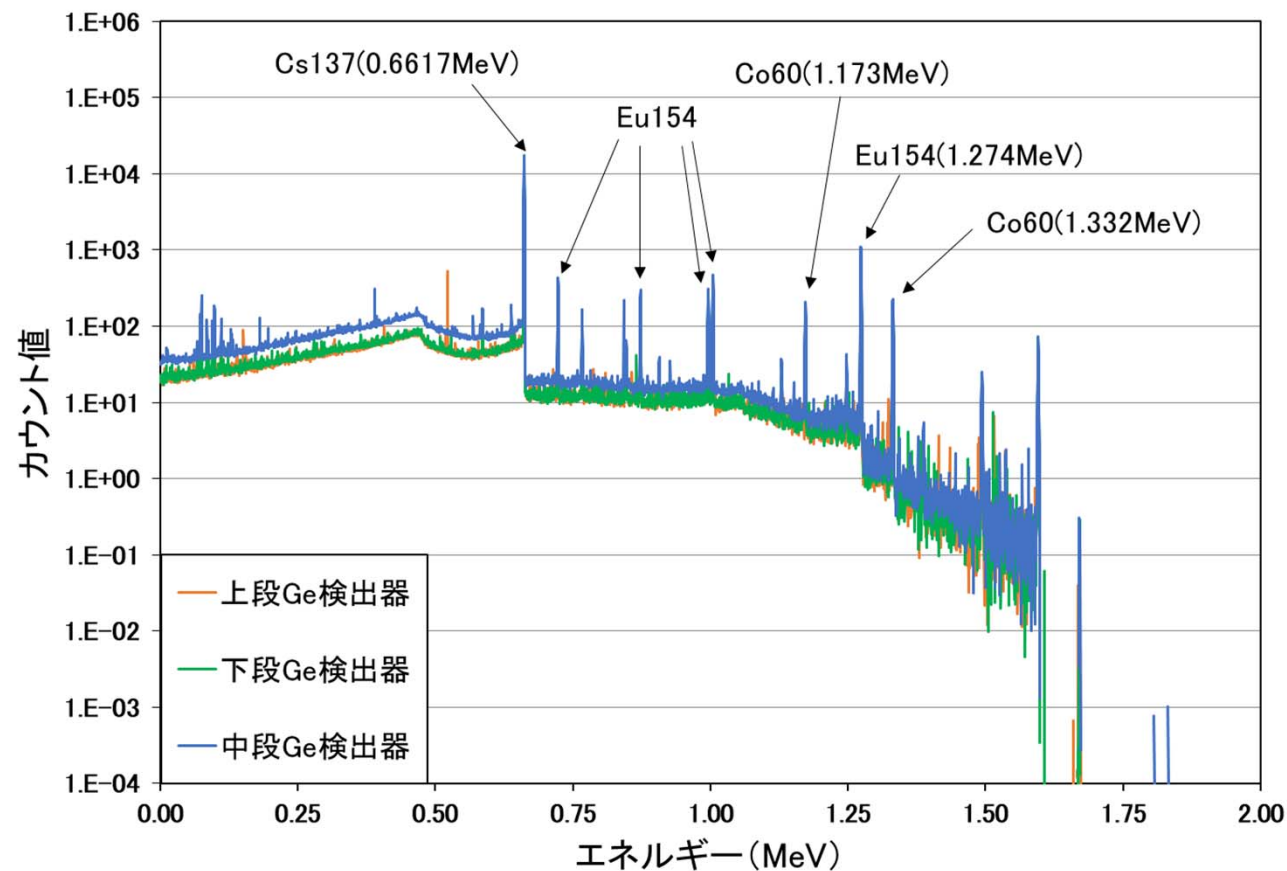


Eu-154の1.274MeV
ピークに着目

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.136

⑤-1 パッシブガンマ線法A(7/11)



• 上・中・下段のGe検出器での検出性を比較(溶融デブリベースケース)

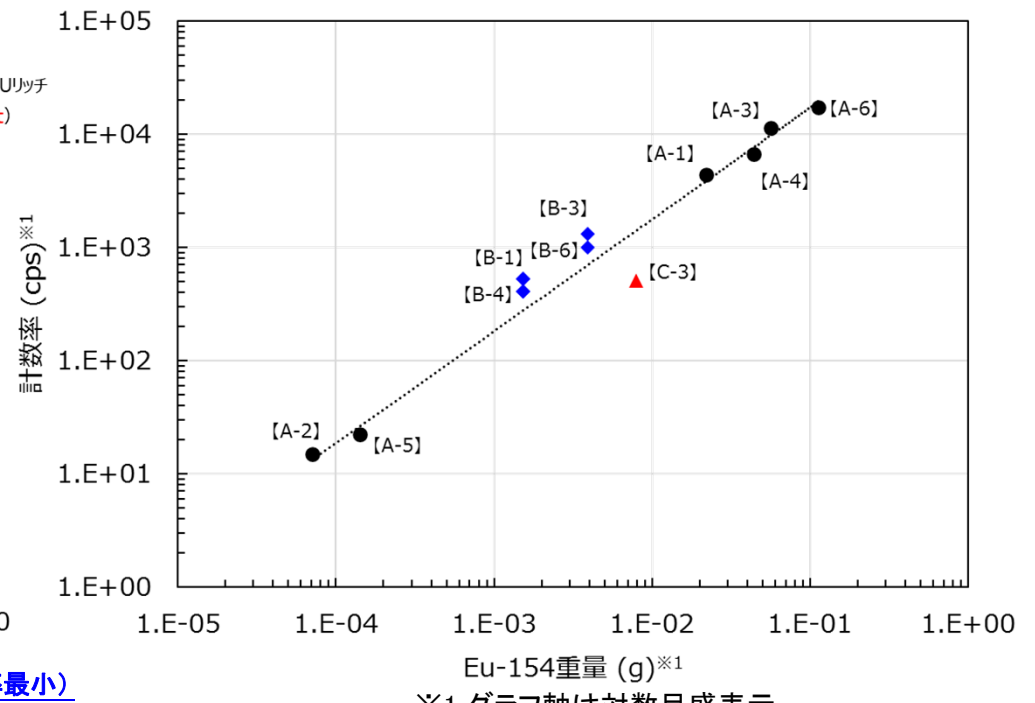
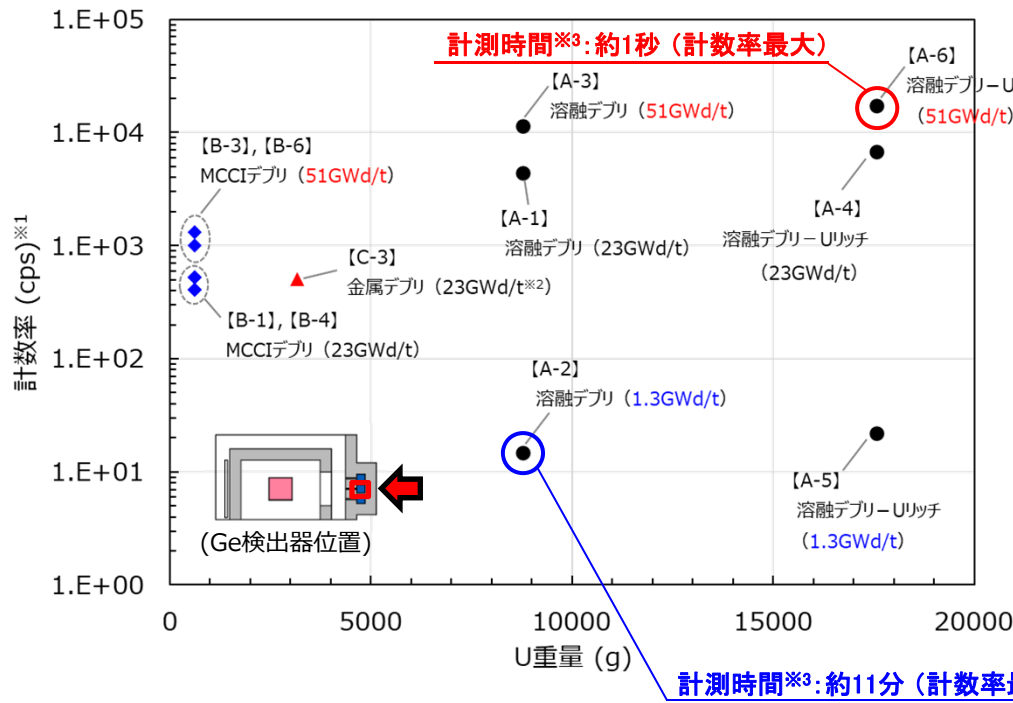
➤ 中段のGe検出器が最もカウント数が多いことを確認。(上段, 下段は測定対象の偏在を検出するためのバックアップの位置づけ)

⇒ 以下, パッシブガンマ線法Aでは中段のGe検出器に着目して結果・考察を整理

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

⑤-1 パッシブガンマ線法A(8/11)

- ✓ 溶融デブリ : 燃焼度と計数率の大小関係の一致を確認
- ✓ MCCIデブリ : 溶融デブリほど燃焼度の影響を受けないことを確認。ただし、低燃焼度ではピーク未検出
嵩密度が小さいため相対的に計数率が高くなる傾向
- ✓ 金属デブリ : 容器形状と充填率の違いにより線源濃度が小さく相対的に計数率が低くなる傾向
なお、U量の少ないケースではピーク未検出
- ✓ 共通 : Eu-154重量と計数率の間で相関性を確認。また、EuとUの帯同性を証明できれば、
パッシブ中性子法によるCm-244質量評価値とパッシブγ線法によるEu-154質量評価値を用いた燃焼度の影響補正方法(2021年度に概念検討済)を適用できる可能性を示唆
燃焼度、嵩密度の大小により優位な影響あり



※1 グラフ軸は対数目盛表示

※2 未臨界性担保の条件

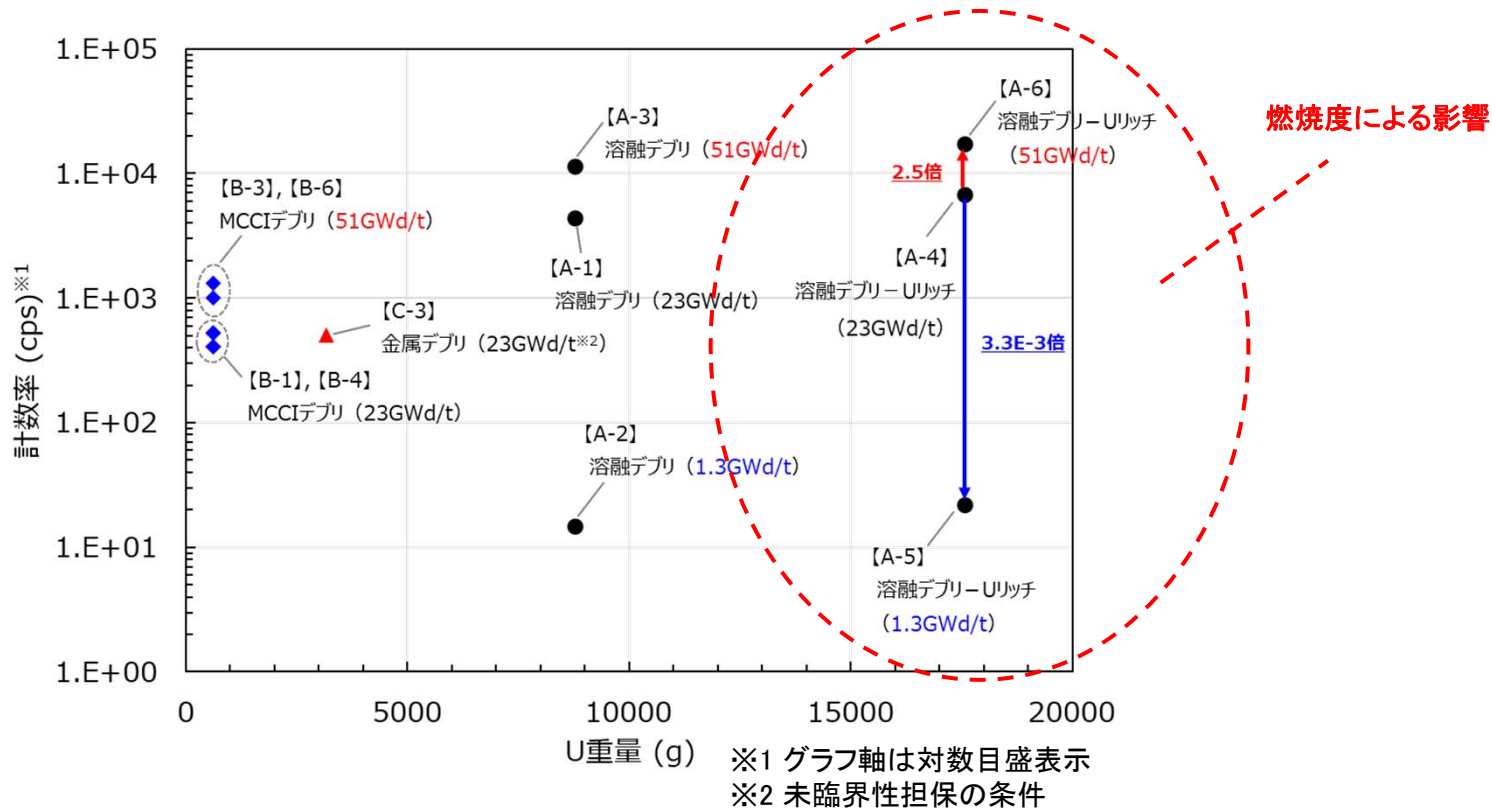
※3 統計誤差1%(10,000カウント)となる計測時間

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.138

⑤-1 パッシブガンマ線法A(9/11)

＜着目する影響因子に対する影響度の分析＞



影響度の最も大きいウランリッチの燃料デブリに対して分析

- ✓ 燃焼度による影響: 高燃焼度 (51GWd/t) のカウント値はベースケース (燃焼度23GWd/t) の約2.5倍に増加
低燃焼度 (1.3GWd/t) のカウント値はベースケース (燃焼度23GWd/t) の約3.3E-3倍に減少

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

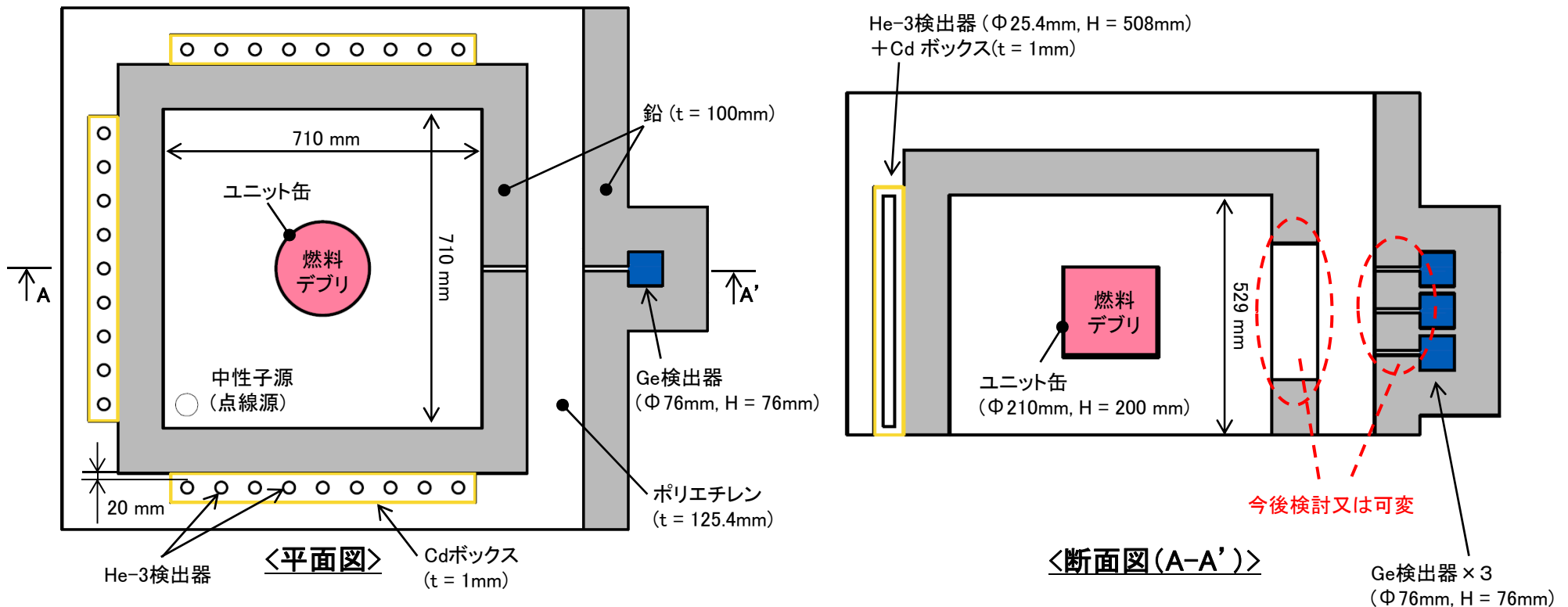
No.139

⑤-1 パッシブガンマ線法A(10/11)

<計測装置概念の一次案>

- ✓ 検出器応答解析用の計測装置概念にて多くの燃料デブリのケースで検知性を確認
- ✓ ピーク未検出のケースも存在し, 検出器仕様(コリメータ・スリットなど)の継続検討が望ましい

⇒以下の計測体系を一次案と設定(アクティブ中性子法A, パッシブ中性子法Aと同様)



⑤-1 パッシブガンマ線法A(11/11)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

- 1) パッシブガンマ線法の解析モデルを検討
- 2) **組成, 燃焼度に着目**した検出器応答解析を実施
- 3) 燃料デブリ仕分けに用いる計測装置概念を検討

【成果/開発への寄与】

- 1) アクティブ中性子法, パッシブ中性子法, パッシブガンマ線法を組み合わせた解析モデルを作成
- 2) 15ケースの検出器応答解析の結果を取得
 - ・溶融デブリ : 燃焼度と計数率の大小関係が一致
 - ・MCCIデブリ : 溶融デブリほど燃焼度の影響を受けない。ただし, 低燃焼度ではピーク未検出
嵩密度が小さいため相対的に計数率が高くなる傾向
 - ・金属デブリ : **容器形状と充填率の違いにより線源濃度が小さく相対的に計数率が低くなる傾向**
U量の少ないケースではピーク未検出
 - ・共通 : **Eu-154重量と計数率に相関性を確認。燃焼度, 嵩密度の大小により優位な影響あり**
- 3) **アクティブ中性子法, パッシブ中性子法, パッシブガンマ線法を組み合わせた計測装置概念を構築**
 - ・検出器仕様: 高純度Ge半導体検出器(今回は相対効率25%としたが, 小型化が可能)
 - ・装置寸法: W5m×D4m×H3m程度(ユニット缶および廃棄物内容器に対応)
 - ・計測時間: 約1秒(溶融デブリ, U量17.6kg, 高燃焼度(51GWd/t), 中性子吸収材なし)
約11分(溶融デブリ, U量8.8kg, 低燃焼度(1.3GWd/t), 中性子吸収材なし)

【課題と対応策】

- 1) 課 題: 燃焼度による誤差低減
対応策: **Cm-244とEu-154の比**による補正方法の詳細検討, Cm-244とEu-154のUとの**帯同性**説明ロジック構築も必要
- 2) 課 題: 容器仕様, 嵩密度による誤差低減
対応策: **容器仕様ごとの換算係数**設定, エネルギーの異なる**複数ピーク比**による補正方法の詳細検討
- 3) 課 題: 装置構造最適化に資するデータ不足
対応策: 解析による装置構造に対するパラメータスタディの拡充, 要素技術確認試験結果の反映

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

(⑤-2 パッシブガンマ線法B)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
⑤-1	パッシブガンマ線法 A	Ge	なし	なし	核分裂生成核種質量 (Eu-154など)	核分裂性核種質量	MHI	128-140 221-233
⑤-2	同 B	<u>CZT, LaBr₃など</u>	なし	なし	同上	同上	日立GE	141-154 234-237

【特長】

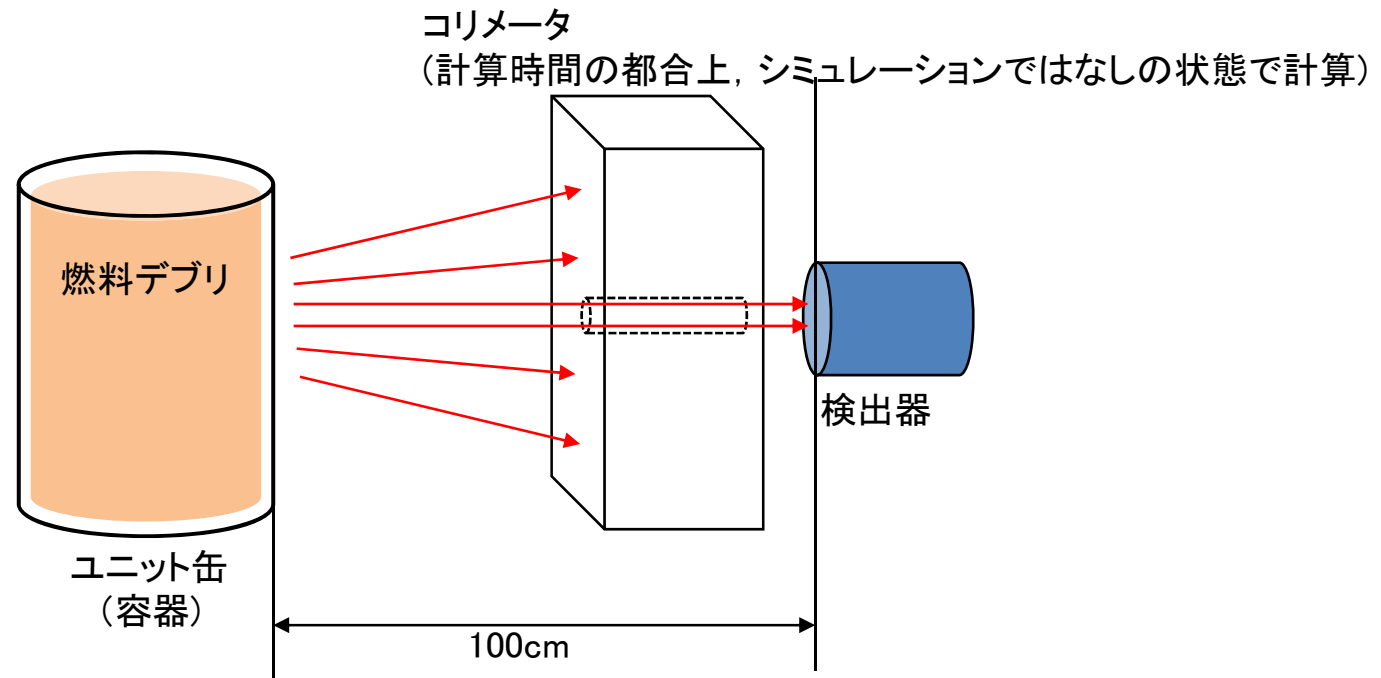
- 検出器は、冷凍機が不要で高計数率測定が可能な検出器(CZT, LaBr₃など)を検討。

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.142

⑤-2 パッシブガンマ線法B(1/13)

■解析体系: 令和3年度に実施した検出器応答解析と同様の体系で評価



■検出器候補

検出器	材料・形状	(参考)エネルギー分解能	備考
CZT※1 (全ケース)	円筒形 (直径7.62cm・厚さ1cm)	0.8%FWHM	H3D (ミシガン大学)
LaBr ₃ ※2 (ベースケースのみ)	円筒形 (直径・厚さ7.62cm)	3.5%FWHM	ORTEC

※1 CZT: テルル化亜鉛カドミウム半導体検出器

※2 LaBr₃: 臭化ランタンシンチレーション検出器

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

⑤-2 パッシブガンマ線法B(2/13)

➤ 検出器応答解析ケース

■解析条件: U量3.7kgのケース, U-235濃度1.5wt%のケース

◆U量3.7kgの解析ケース

解析ケース		UO ₂ (vol%)	ZrO ₂ (vol%)	SUS (vol%)	Conc (vol%)	充填率 (vol%)	燃焼度 (GWd/t)	FP 放出率	冷却期間 (年)	U量 (kg)	検出器	
溶融 デブリ	1-1	ベース (ユニット缶)	6.3	6.3	0	0	12.6	23.0	標準	20	3.7	CZT LaBr ₃
	1-2	溶融デブリ (U少)	6.3	19	0	0	25.3	23.0	標準	20	3.7	CZT
	1-3	燃焼度(低)	6.2	6.2	0	0	12.4	1.3	標準	20	3.7	CZT
	1-4	燃焼度(高)	6.5	6.5	0	0	13.0	51.0	標準	20	3.7	CZT
金属 デブリ	1-5	ベース (廃棄物内容器)	0.56	0.56	28.9	0	30	23.0	標準	20	3.7	CZT LaBr ₃
MCCI デブリ	1-6	ベース (ユニット缶)	6.3	6.3	4.5	12.9	30	23.0	標準	20	3.7	CZT LaBr ₃
	1-7	充填率(高)	6.3	6.3	9.6	27.7	50	23.0	標準	20	3.7	CZT

◆U-235濃度1.5wt%の解析ケース

解析ケース		UO ₂ (vol%)	ZrO ₂ (vol%)	SUS (vol%)	Conc (vol%)	充填率 (vol%)	燃焼度 (GWd/t)	FP 放出率	冷却期間 (年)	U量(kg) [U-235wt%]	検出器	
溶融 デブリ	1-8	燃焼度(低)	6.2	14.0	0	0	20.2	1.3	標準	20	3.7 [1.5]	CZT
	1-9	溶融デブリ (Uリッチ)	6.3	1.4	0	0	7.75	23.0	標準	20	3.7 [1.5]	CZT

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.144

⑤-2 パッシブガンマ線法B(3/13)

➤ 検出器応答解析ケース

◆U量誤差範囲評価用追加解析ケース

解析ケース				UO ₂ (vol%)	ZrO ₂ (vol%)	SUS (vol%)	Conc (vol%)	充填率 (vol%)	燃焼度 (GWd/t)	FP 放出率	冷却期間 (年)	U量(kg)	検出器
溶融 デブリ	1-10	燃焼度中	充填率(低)	3	3	0	0	6	23.0	標準	20	1.76	CZT
	1-11		充填率(中)	10	10	0	0	20	23.0	標準	20	5.86	CZT
	1-12		充填率(高)	15	15	0	0	30	23.0	標準	20	8.79	CZT
	1-13	燃焼度低	充填率(低)	3	3	0	0	6	1.3	標準	20	1.80	CZT
	1-14		充填率(中)	10	10	0	0	20	1.3	標準	20	5.99	CZT
	1-15		充填率(高)	15	15	0	0	30	1.3	標準	20	8.98	CZT
	1-16	燃焼度高	充填率(低)	3	3	0	0	6	51.0	標準	20	1.72	CZT
	1-17		充填率(中)	10	10	0	0	20	51.0	標準	20	5.72	CZT
	1-18		充填率(高)	15	15	0	0	30	51.0	標準	20	8.58	CZT

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

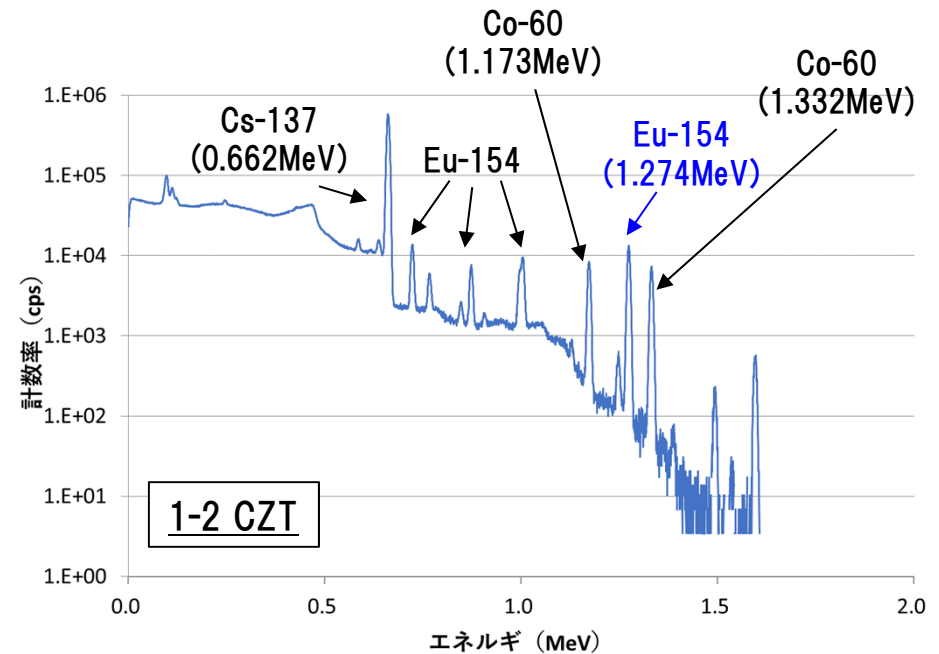
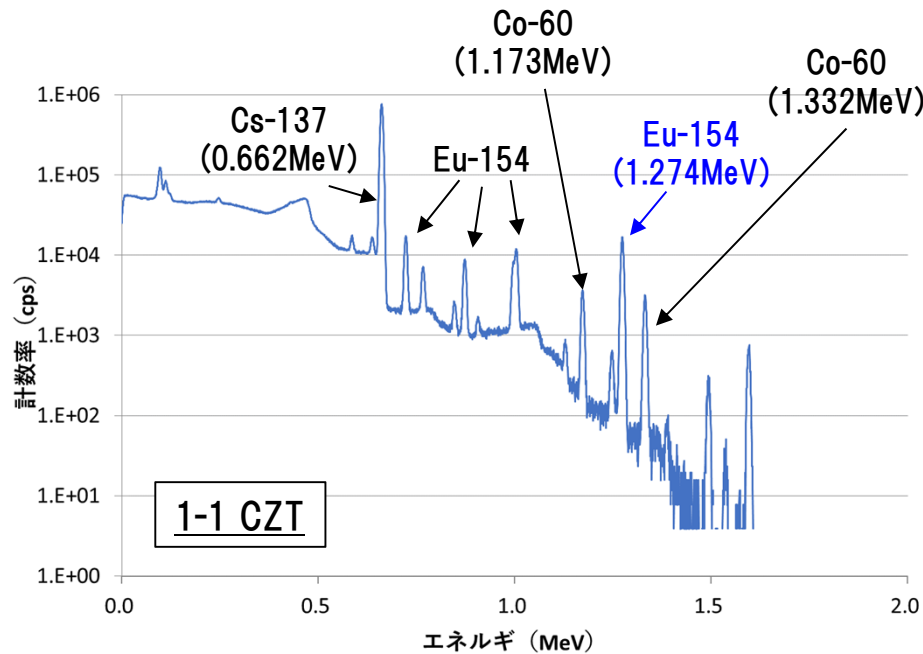
No.145

⑤-2 パッシブガンマ線法B(4/13)

- CZT全解析ケースを実施し、Eu-154の1.274MeVピークを確認。
- 本ピーク計数率に基づきデータを整理。

✓検出器応答解析結果の一例

解析ケース			UO ₂ (vol%)	ZrO ₂ (vol%)	SUS (vol%)	Conc (vol%)	充填率 (vol%)	燃焼度 (GWd/t)	FP 放出率	冷却期間 (年)	U量 (kg)	検出器
溶融 デブリ	1-1	ベース (ユニット缶)	6.3	6.3	0	0	12.6	23.0	標準	20	3.7	CZT
	1-2	溶融デブリ (U少)	6.3	19	0	0	25.3	23.0	標準	20	3.7	CZT

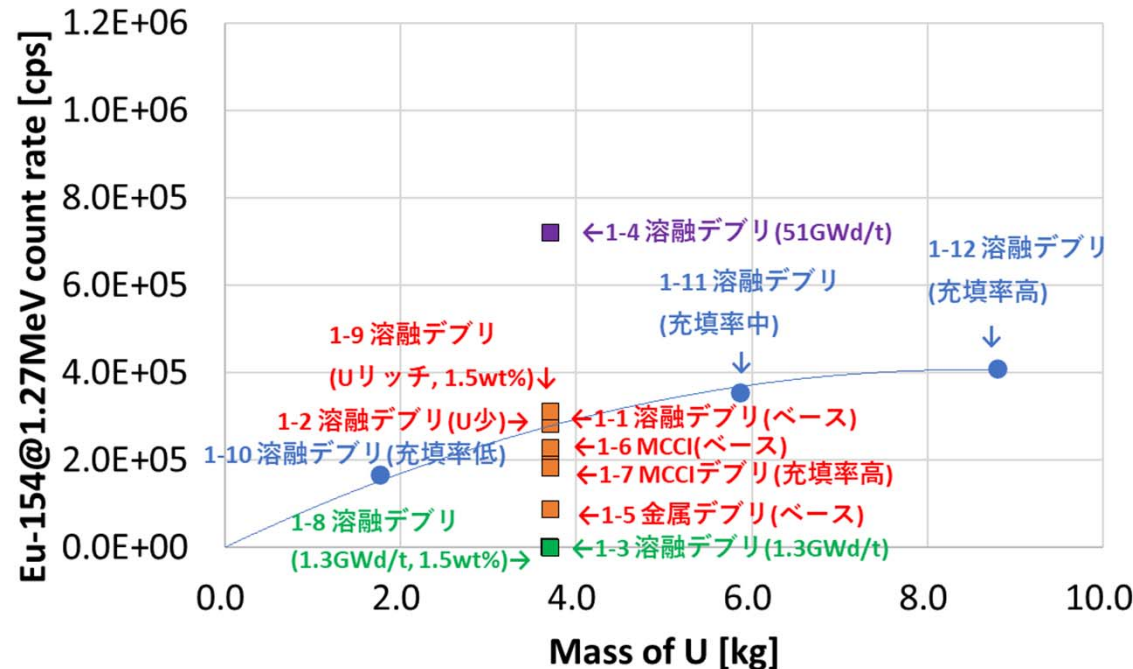


4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.146

⑤-2 パッシブガンマ線法B(5/13)

- ✓ CZT検出器応答解析によるEu-154(1.274MeV)のガンマ線ピーク計数率をプロット。
- ✓ 今回の解析ケースにおいては、同一のU量(3.7kg)であっても、計数率が数倍～数桁異なる。
- ✓ そのため、計数率から評価したU量に誤差が発生する。
- ✓ 熔融デブリ(23GWd/t)の充填率を変え(6, 20, 30vol%), U量を変化させた検出器応答解析により近似曲線を作成(青1-10~1-12)し比較評価。



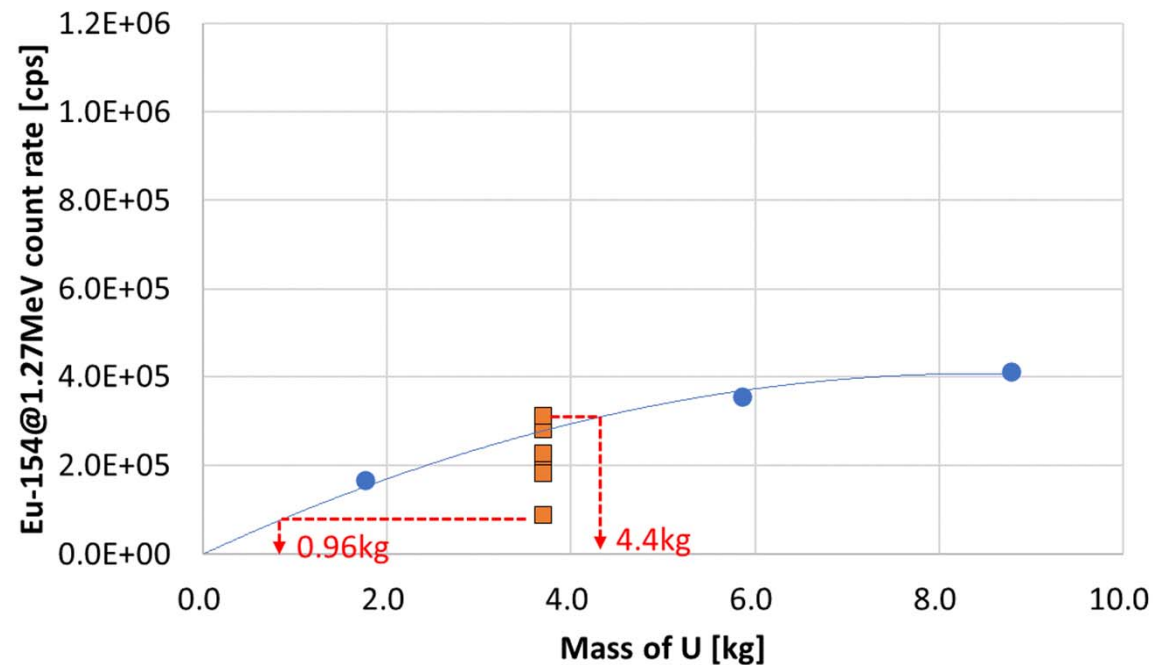
U量に対するEu-154(1.274MeV)ガンマ線ピーク
計数率(CZT解析全ケース)

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.147

⑤-2 パッシブガンマ線法B(6/13)

- ✓ CZTでの解析ケースのうち、燃焼度が標準の23GWd/tの結果を抽出。
- ✓ 同一燃焼度，同一U量設定の場合でも，組成やかさ密度により評価U量に誤差発生。
- ✓ 計数率から評価した結果，0.96～4.4kgの誤差範囲。



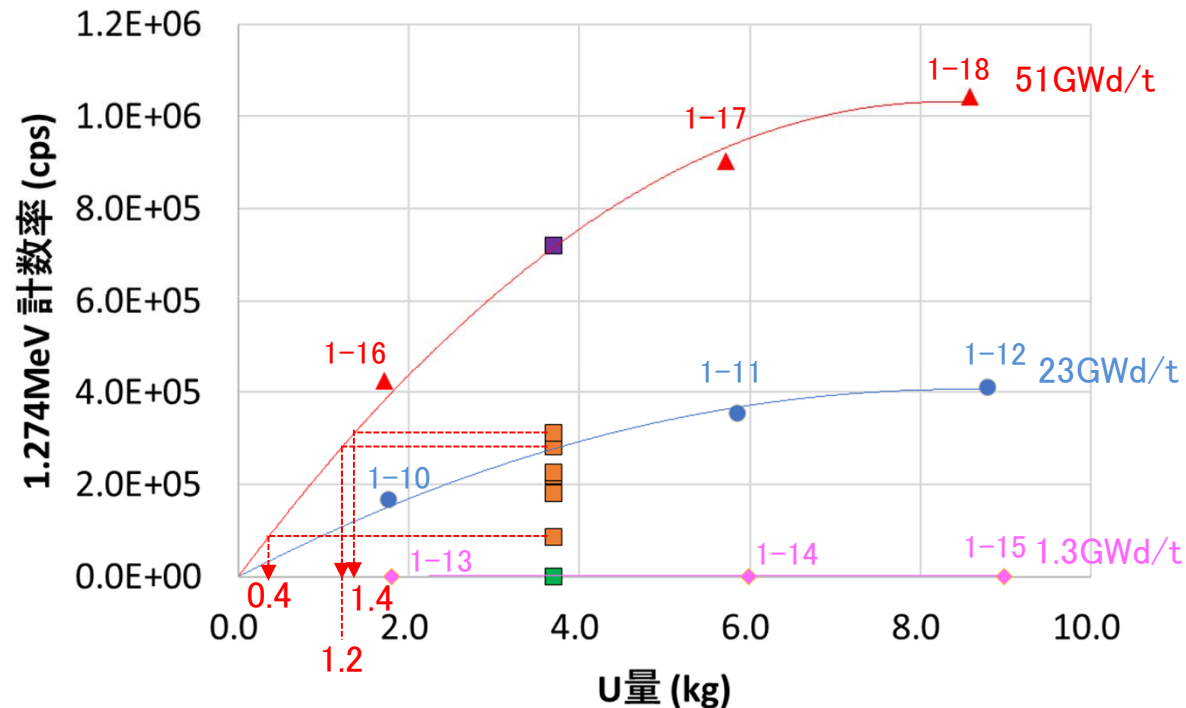
U量に対するEu-154(1.274MeV)ガンマ線ピーク計数率
(燃焼度23GWd/tの解析ケース)

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.148

⑤-2 パッシブガンマ線法B(7/13)

- ✓ 燃焼度が23GWd/tのケースを燃焼度51GWd/tの条件であるとして評価した場合、U量は0.4~1.4kgと過小評価。このことを考慮して評価することが課題。
- ✓ 同様に1.3GWd/tの条件であるとして評価した場合、U量評価不可。



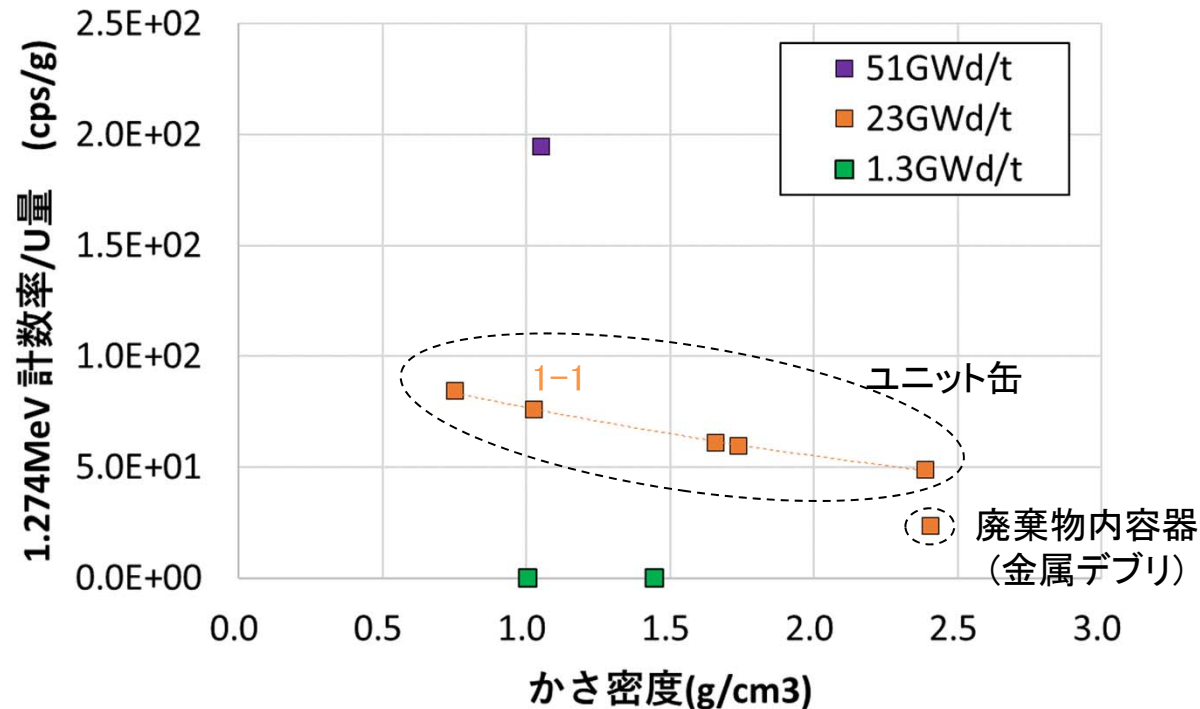
U量に対するEu-154(1.274MeV)ガンマ線ピーク計数率
(CZT全解析ケース)

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.149

⑤-2 パッシブガンマ線法B(8/13)

- ✓ かさ密度で整理した場合、一定の燃焼度であれば組成などの違いを補正でき、U量誤差範囲を低減できる可能性が考えられる。
- ✓ さらに誤差範囲を低減するためには、他の計測データを利用するなど、何らかの方法により燃焼度について補正が必要。



かさ密度に対するEu-154(1.274MeV)ガンマ線ピーク計数率
(CZT全解析ケース)

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.150

⑤-2 パッシブガンマ線法B(9/13)

➤ コリメータ検討および測定時間試算(1)

解析ケース		U量 (kg)	U-235濃度 (wt%)	全計数率 ① (cps)	Eu-154 1.274MeV 計数率 ② (cps)	②/① (%)	
溶融 デブリ	1-1	ベース (ユニット缶)	3.7	1.1	6.61×10^7	2.81×10^5	0.426
	1-2	溶融デブリ (U少)	3.7	0.6	5.87×10^7	2.20×10^5	0.375
	1-3	燃焼度(低)	3.7	2.1	3.68×10^6	9.22×10^2	0.025
	1-4	燃焼度(高)	3.7	0.3	1.47×10^8	7.21×10^5	0.489
金属 デブリ	1-5	ベース (廃棄物内容器)	3.7	0.04	6.16×10^8	8.73×10^4	0.014
MCCIデブリ	1-6	ベース (ユニット缶)	3.7	0.7	7.31×10^7	2.26×10^5	0.310
	1-7	充填率(高)	3.7	0.5	7.98×10^7	1.81×10^5	0.227
溶融 デブリ	1-8	燃焼度(低)	3.7	1.5	3.92×10^6	8.05×10^2	0.021
	1-9	溶融デブリ (Uリッチ)	3.7	1.5	6.95×10^7	3.12×10^5	0.449

⇒全計数率が最大である1-5(金属デブリ)のケースを対象にコリメータ厚さ, コリメータ径を検討

- ・コリメータ材質:鉛
- ・コリメータ厚さ:エネルギースペクトルビンごとにガンマ線減弱係数を考慮し, 検出器に入射する全計数率をCZT最大計数率(450kcps)の約1%(4.5kcps)に低減する厚さに設定 ⇒15cm
- ・コリメータ穴径:コリメータ穴を通過する計数率をCZT最大計数率の99% ⇒ Φ0.2cm
- ・上記の想定の下で各ケースに対する測定時間を試算。

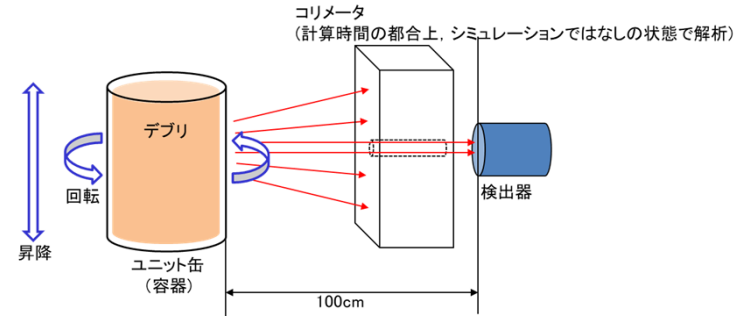
4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

⑤-2 パッシブガンマ線法B(10/13)

➤ コリメータ検討および測定時間試算(3)

■測定時間試算における仮定

- ・容器が1回転する間に必要カウントが計測されるものとする
- ・容器表面におけるコリメータの視野は約φ2.5cm
- ・ユニット缶鉛直方向の測定回数は21cm/2.5cm≒9回
- ・廃棄物内容器鉛直方向の測定回数は30cm/2.5cm≒12回



解析ケース			U量 (kg)	U-235濃度 (wt%)	全計数率 ① (cps)	Eu-154 1.274MeV 計数率 ② (cps)	②/① (%)	試算測定時間(sec/容器)		
								統計誤差1% (10 ⁴ カウント)	統計誤差5% (400カウント)	統計誤差10% (100カウント)
溶融デブリ	1-1	ベース (ユニット缶)	3.7	1.1	6.61×10 ⁷	2.81×10 ⁵	0.426	4.68×10 ²	1.87×10 ¹	4.68×10 ⁰
	1-2	溶融デブリ (U少)	3.7	0.6	5.87×10 ⁷	2.20×10 ⁵	0.375	6.00×10 ²	2.40×10 ¹	6.00×10 ⁰
	1-3	燃焼度(低)	3.7	2.1	3.68×10 ⁶	9.22×10 ²	0.025	1.43×10 ⁵ (約40時間)	5.72×10 ³ (約1.6時間)	1.43×10 ³ (約0.4時間)
	1-4	燃焼度(高)	3.7	0.3	1.47×10 ⁸	7.21×10 ⁵	0.489	1.83×10 ²	7.32×10 ⁰	1.83×10 ⁰
金属デブリ	1-5	ベース (廃棄物内容器)	3.7	0.04	6.16×10 ⁸	8.73×10 ⁴	0.014	2.02×10 ³	8.06×10 ¹	2.02×10 ¹
MCCIデブリ	1-6	ベース (ユニット缶)	3.7	0.7	7.31×10 ⁷	2.26×10 ⁵	0.310	5.83×10 ²	2.33×10 ¹	5.83×10 ⁰
	1-7	充填率(高)	3.7	0.5	7.98×10 ⁷	1.81×10 ⁵	0.227	7.28×10 ²	2.91×10 ¹	7.28×10 ⁰
溶融デブリ	1-8	燃焼度(低)	3.7	1.5	3.92×10 ⁶	8.05×10 ²	0.021	1.64×10 ⁵ (約46時間)	6.56×10 ³ (約1.8時間)	1.64×10 ³ (約0.5時間)
	1-9	溶融デブリ (Uリッチ)	3.7	1.5	6.95×10 ⁷	3.12×10 ⁵	0.449	4.23×10 ²	1.69×10 ¹	4.23×10 ⁰

高計数率と低計数率で測定時間が桁で異なるため、コリメータ径や容器-検出器間の距離を可変にするなどの検討が必要

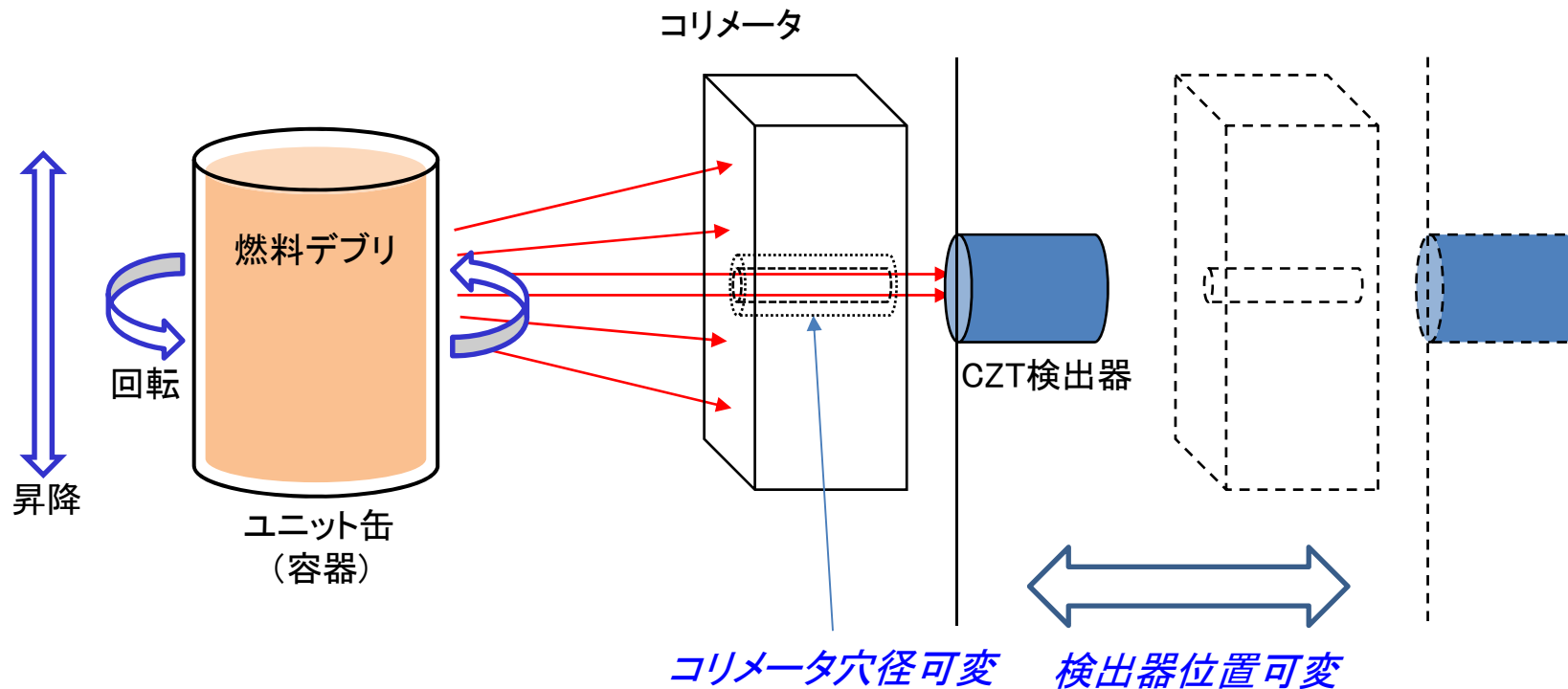
4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.152

⑤-2 パッシブガンマ線法B(11/13)

➤ 計測装置概念

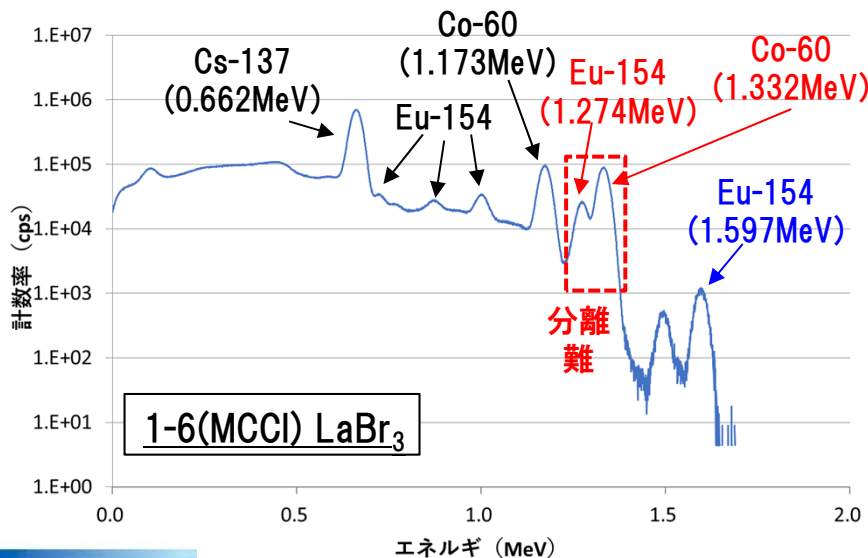
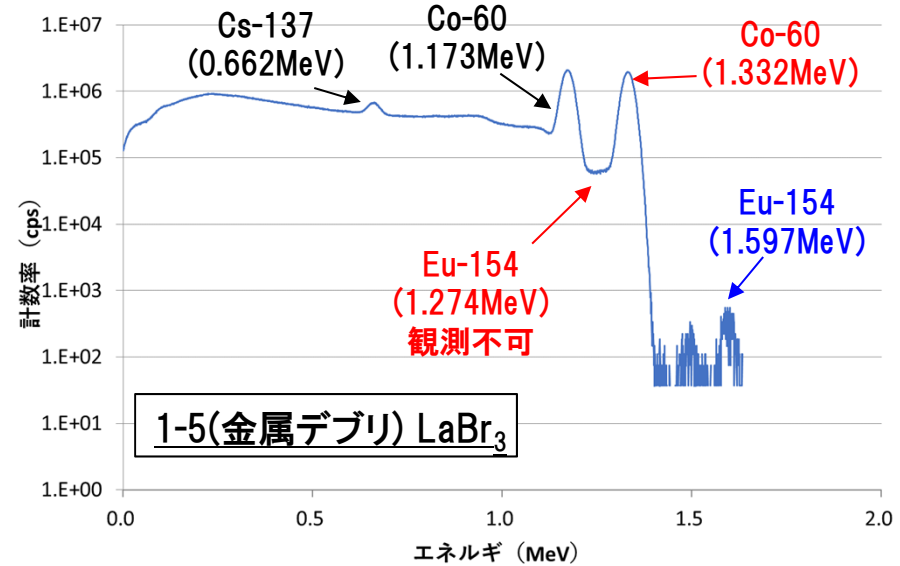
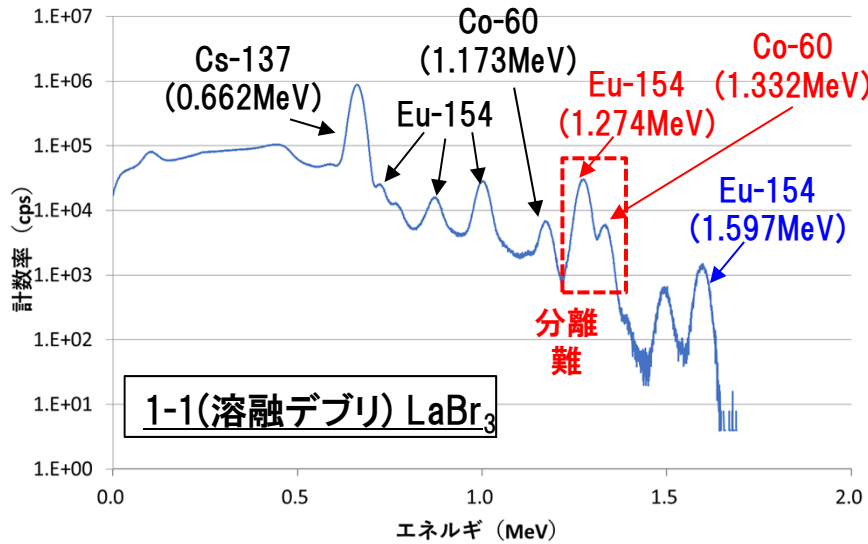
- ✓ 測定対象に合わせて、コリメータ穴径や検出器位置を可変とする装置構成概念案を検討



4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

⑤-2 パッシブガンマ線法B(12/13)

➤ LaBr₃解析結果(全3ケース)



- ・溶融デブリ, MCCIデブリのケースでは, 着目するEu-154の1.274MeVピークとCo-60の1.332MeVピークとの分離難。
- ・金属デブリのケースでは, 1.274MeVピークの観測不可。
- ・以上の通り, LaBr₃では, 1.274MeVピークでの評価が難しくなるケースあり。
- ・一方, Eu-154の1.597MeVピークについては観測可能なため, このピークに基づき評価可能と考えられる。ただし, 1.274MeVピークと比較して2桁程度計数率が小さいため, 測定時間は長くなると予想。
- ・以上より, CZT検出器の方が優位性あり。

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

No.154

⑤-2 パッシブガンマ線法B(13/13)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

- 1) U量を仕分け基準値である3.7kgに設定した検出器応答解析(CZT検出器, LaBr₃検出器)によるU量評価誤差の検討
- 2) コリメータの検討および測定時間試算
- 3) 上記結果に基づく計測装置概念の構築

【成果/開発への寄与】

- 1) ✓ CZT検出器による検出器応答解析
 - ・検出器応答解析結果に基づき評価した結果, 同一U量(3.7kg)でも, 燃焼度や組成, かさ密度により評価U量に誤差発生。燃焼度が21GWd/tの場合, U量3.7kgの設定に対して約1.0~4.4kgの範囲で評価。同一燃焼度であれば組成やかさ密度の影響を補正でき, U量評価誤差の低減可能性あり。
 - ・一方, 燃焼度が1.3GWd/t~51GWd/tと異なることで, 計数率が最大~最小で3桁程度異なり, 上記の方法では補正不可。
- ✓ LaBr₃検出器による検出器応答解析
 - ・着目するEu-154の1.274MeVピークとCo-60の1.332MeVピークの分離が難しいケースや, 1.274MeVピークの観測が不可のケースがあり, LaBr₃では, 1.274MeVピークでの評価が難。
 - ・一方, Eu-154の1.597MeVピークについては観測可能なため, このピークに基づき評価可能。ただし, 1.274MeVピークと比較して2桁程度計数率が小さいため, 測定時間は長くなる予想。
- 2) 統計誤差1%とする測定時間が, 計数率の違いにより約3分~40時間/容器と大きく異なる結果。
- 3) 計数率に応じてコリメータ径や容器-検出器間距離を可変とする装置構成概念案を創出。

【課題と対応策】

- 1) 課題: 燃焼度が異なることで計数率が最大~最小で3桁程度異なることから, 組成やかさ密度に対する補正以外の補正方法を検討する必要がある。
対応策: 他の計測データを利用するなどの補正方法を検討する。
- 2) 課題: 測定時間が数分~数十時間/容器と大きく異なる結果となる。
対応策: 計数率に応じてコリメータ径や容器-検出器間距離を可変とする装置構成の具体化を検討する。
- 3) 課題: Eu-154の核燃料物質との帯同性について説明ロジックの構築が必要である。
対応策: 他プロジェクトと協力しエビデンスの収集, 説明ロジックの構築を検討する。

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

(検出器応答解析による計測装置概念の構築に係るまとめ)

4.1.2 検出器応答解析による計測装置概念の構築

検出器応答解析による計測装置概念の構築に係るまとめ

No.156

【成果／開発への寄与】(詳細は計測技術ごとの報告内容を参照)

- ・5種類の計測技術(①アクティブ中性子法, ②パッシブ中性子法, ③ミュオン散乱法, ④X線CT法, ⑤パッシブガンマ線法)について, 装置概念を仮定した検出器応答解析モデルを作成した。
- ・計測技術ごとに着目すべき影響因子※を考慮して, 検出器応答解析における対象物(容器, 収納物)条件を設定した。
 ※令和2, 3年度補助事業における計測精度に影響がある因子の確認結果を反映。
- ・上記の解析モデルおよび対象物条件において検出器応答解析を実施した。
- ・検出器応答解析の結果に基づき, **計測値のバラツキの要因を分析し, 対応策を検討した。**
- ・検出器応答解析の結果に基づき, **計測装置概念の一次案を設定した。**
- ・検出器応答解析データは, 核燃料物質量などの評価手法の検討のためのデータとしても活用した。

【課題と対応策】(詳細は計測技術ごとの報告内容を参照)

- 1) 課 題: 計測技術ごとに影響因子による補正方法の確立が必要である。
 対応策: **計測技術ごとに提案している補正方法の詳細検討を実施する。**
- 2) 課 題: 補正方法に係る課題のうち, **Cm-244とEu-154のUとの帯同性説明ロジック構築の構築は仕分けPJ単独では困難**である。
 対応策: **関連PJ(性状把握PJ)と連携して検討を進める。**また, Cm-244とEu-154以外の核種でクロスチェックに利用可能なものがないか検討する。
- 3) 課 題: 装置構造の最適化に資するデータ不足している。
 対応策: **解析による装置構造に対するパラメータスタディを拡充する。**また, **要素技術確認試験の結果を反映していく。**

4.2 核燃料物質質量などの評価手法と 仕分けシナリオの検討

- 4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討
- 4.2.2 仕分けシナリオの検討

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

【目標】

・アクティブ中性子法, パッシブ中性子法, ミュオン散乱法, X線CT法, パッシブガンマ線法による計測量(必要に応じた組合せを含む)から, 核燃料物質質量などを評価する手法の一次案を検討し, 当該評価手法案による評価性能を評価していること。

(終了時目標TRL:レベル3)

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

(計測技術共通事項)

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討 計測技術共通事項(1/1)

No.160

➤計測装置の検討ケースは以下のとおり

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
①-1	アクティブ中性子法 A	He-3	D-T	側方から	核分裂性核種質量	核分裂性核種質量	MHI	43-55 161-179
①-2	同 B	B-10	D-T/ 加速器中性子源	上方から	同上	同上	日立GE	56-69 180-183
①-3	同 C (FNDI法+PGA法)	B-10ストロー/He-3 (試験で決定)	D-T/D-D (試験で決定)	側方から	同上	同上	JAEA	70-80 184-191
②-1	パッシブ中性子法 A	He-3	なし	なし	自発核分裂核種質量 (Cm-244など)	同上	MHI	81-93 192-203
②-2	同 B	B-10	なし	なし	同上	同上	日立GE	94-101 204-207
③	ミュオン散乱法	ミュオン軌跡検出器	なし	なし	原子量	同上	東芝ESS	102-116 208-214
④	X線CT法	X線検出器	加速器X線源	側方から	密度	同上	日立GE	117-127 215-220
⑤-1	パッシブガンマ線法 A	Ge	なし	なし	核分裂生成核種質量 (Eu-154など)	同上	MHI	128-140 221-233
⑤-2	同 B	CZT, LaBr ₃ など	なし	なし	同上	同上	日立GE	141-154 234-237

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

(①-1 アクティブ中性子法A)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
①-1	アクティブ中性子法 A	He-3	D-T	側方から	核分裂性核種質量	核分裂性核種質量	MHI	43-55 161-179
①-2	同 B	B-10	D-T/ 加速器中性子源	上方から	同上	同上	日立GE	56-69 180-183
①-3	同 C (FNDI法+PGA法)	B-10ストロー/He-3 (試験で決定)	D-T/D-D (試験で決定)	側方から	同上	同上	JAEA	70-80 184-191

【特長】

- 検出器は、実績を重視してHe-3検出器を選定。
- 照射線源は、中性子発生効率および実績を重視して、D-T中性子源を選定。
- 中性子照射方向は、実績を重視して、対象物側方からの照射を選定。

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.162

①-1 アクティブ中性子法A(1/18)

評価方法概要:

照射中性子により誘発されたU-235の核分裂反応で発生した中性子の計測結果から、核物質質量を推定評価する。

評価No	説明
アクティブ 中性子法A-1	照射中性子により誘発された核分裂による中性子の計数率積算値とU-235重量設定値の相関関数によりU-235重量を評価し、平均燃焼度※を仮定してU重量を評価する。
同 A-2	中性子消滅時間とU-235単位重量当たりの計数率積算値の相関関数(ユニット缶と廃棄物内容器で共通)によりU-235重量を評価し、平均燃焼度※を仮定してU重量を評価する。
同 A-2'	中性子消滅時間とU-235単位重量当たりの計数率積算値の相関関数(ユニット缶のみ)によりU-235重量を評価し、平均燃焼度※を仮定してU重量を評価する。

* 平均燃焼度…23.0GWd/t

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

①-1 アクティブ中性子法A(2/18)

溶融デブリの評価対象ケース

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子吸収材	FP放出率*1	冷却期間	偏在	容器	照射中性子源	
	デブリ性状	充填率内									充填率外
		組成	合計(充填率)								
A-1	溶融デブリ	UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-2		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-3		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-4		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-5		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-6		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-7		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-8		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-9		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-10		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-11		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
A-12		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)

*1「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

①-1 アクティブ中性子法A(3/18)

MCCIデブリの評価対象ケース

ケース No.	デブリ 性状	容器内組成		充填率外	燃焼度	中性子 吸収材	FP 放出率*1	冷却期間	偏在	容器	照射 中性子源
		充填率内									
		組成	合計(充填率)								
B-1	MCCI デブリ	UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 20.7vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-2				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-3				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-4		UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 50.7vol%	60 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-5				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-6				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-7		UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 20.7vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-8				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-9				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-10		UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 50.7vol%	60 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-11				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)
B-12				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	Gd ₂ O ₃ 3 vol%	標準	20年	均一	ユニット缶	D-T反応 (14.1MeV)

*1「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.165

①-1 アクティブ中性子法A(4/18)

金属デブリの評価対象ケース

ケース No.	容器内組成			充填率外	燃焼度	中性子 吸収材	FP 放出率*1	冷却期間	偏在	容器*2	照射 中性子源
	デブリ 性状	充填率内									
		組成	合計(充填率)								
C-1	金属 デブリ	UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 29.85 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器 (内容器)	D-T反応 (14.1MeV)
C-2		UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 44.85 vol%	45 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器 (内容器)	D-T反応 (14.1MeV)
C-3		UO ₂ : 0.48vol% ZrO ₂ : 0vol% SUS: 10 vol%	10.48 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器 (内容器)	D-T反応 (14.1MeV)

*1 「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

*2 SUSが主であり、取り出しの初期段階で内容器に仕分けられることを想定

*3 各ケースの概要は以下のとおり

C-1: ベースケース

C-2: SUS組成に対する感度ケース

C-3: 未臨界担保の観点より、UO₂を3.7kg相当の体積割合とした感度ケース

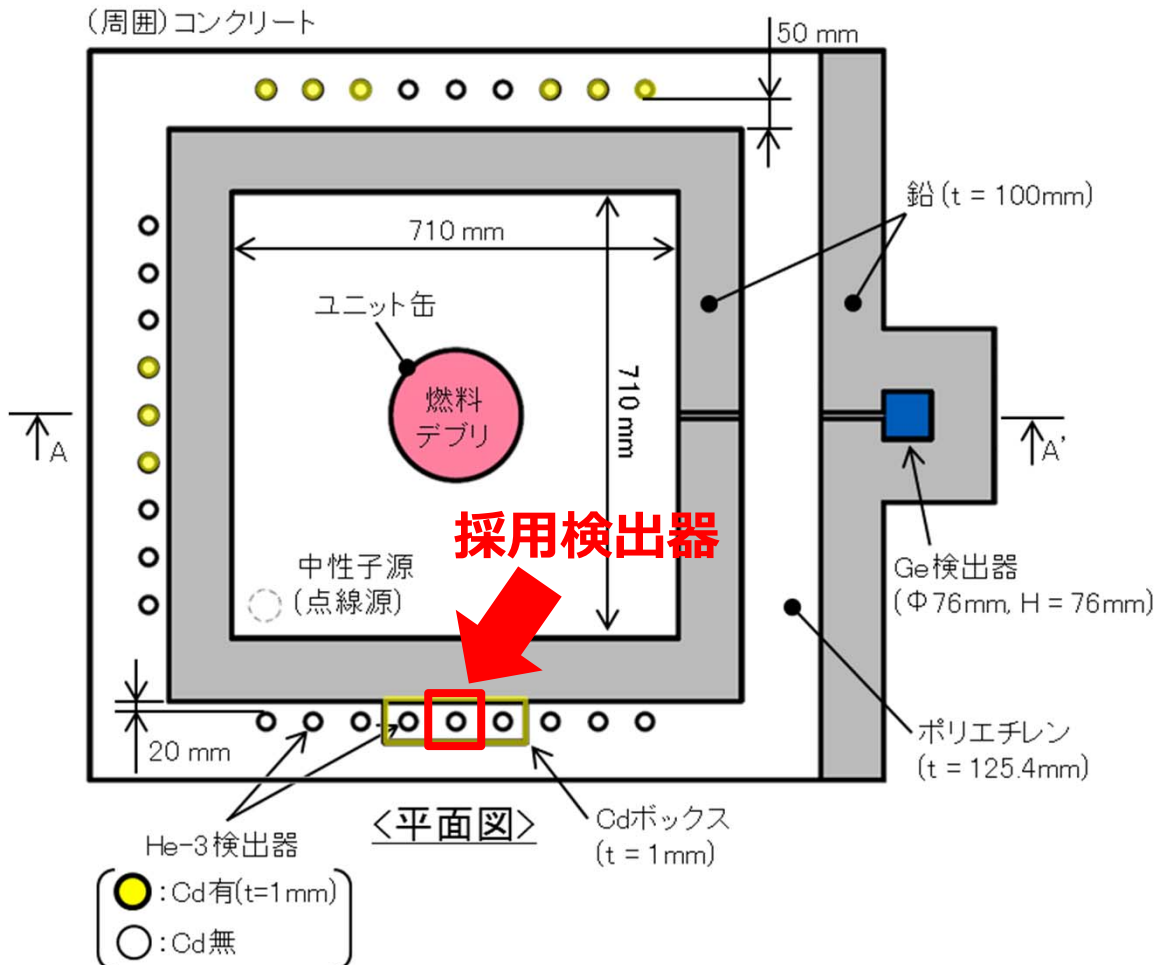
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.166

①-1 アクティブ中性子法A(5/18)

採用検出器:

熱中性子の影響を受けにくく、U-235からの即発中性子を選択的に測定可能な Cdボックス中のHe-3検出器を採用。



[解析条件]

- ・中性子源から1秒間に100回 (100Hz)の中性子を照射
- ・100回分のデータを積算
- ・時間分解能は $10 \mu s$

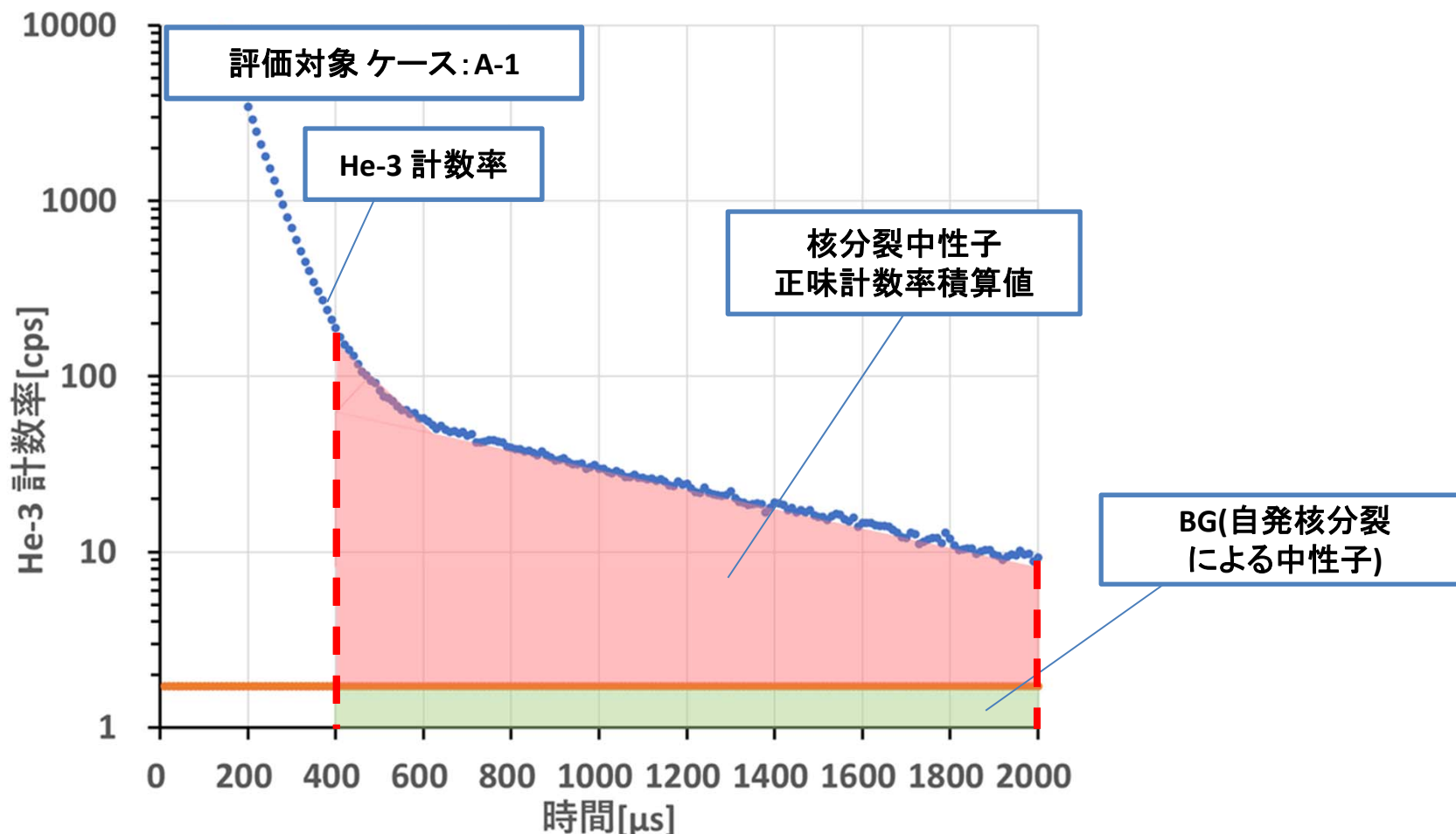
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.167

①-1 アクティブ中性子法A(6/18)

アクティブ中性子法A-1:概要

照射中性子により誘発された核分裂による中性子の正味計数率積算値とU-235重量設定値の相関関数により、U-235重量を評価し、平均燃焼度を仮定してU重量を評価。

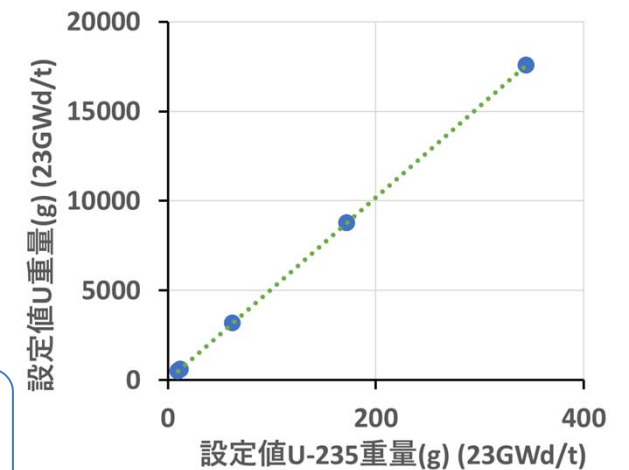
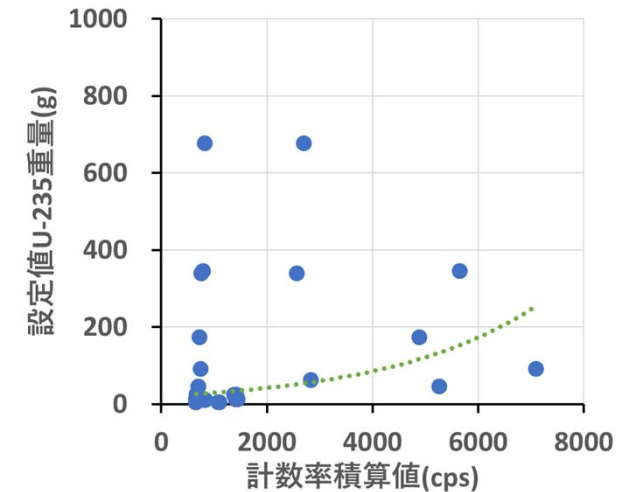
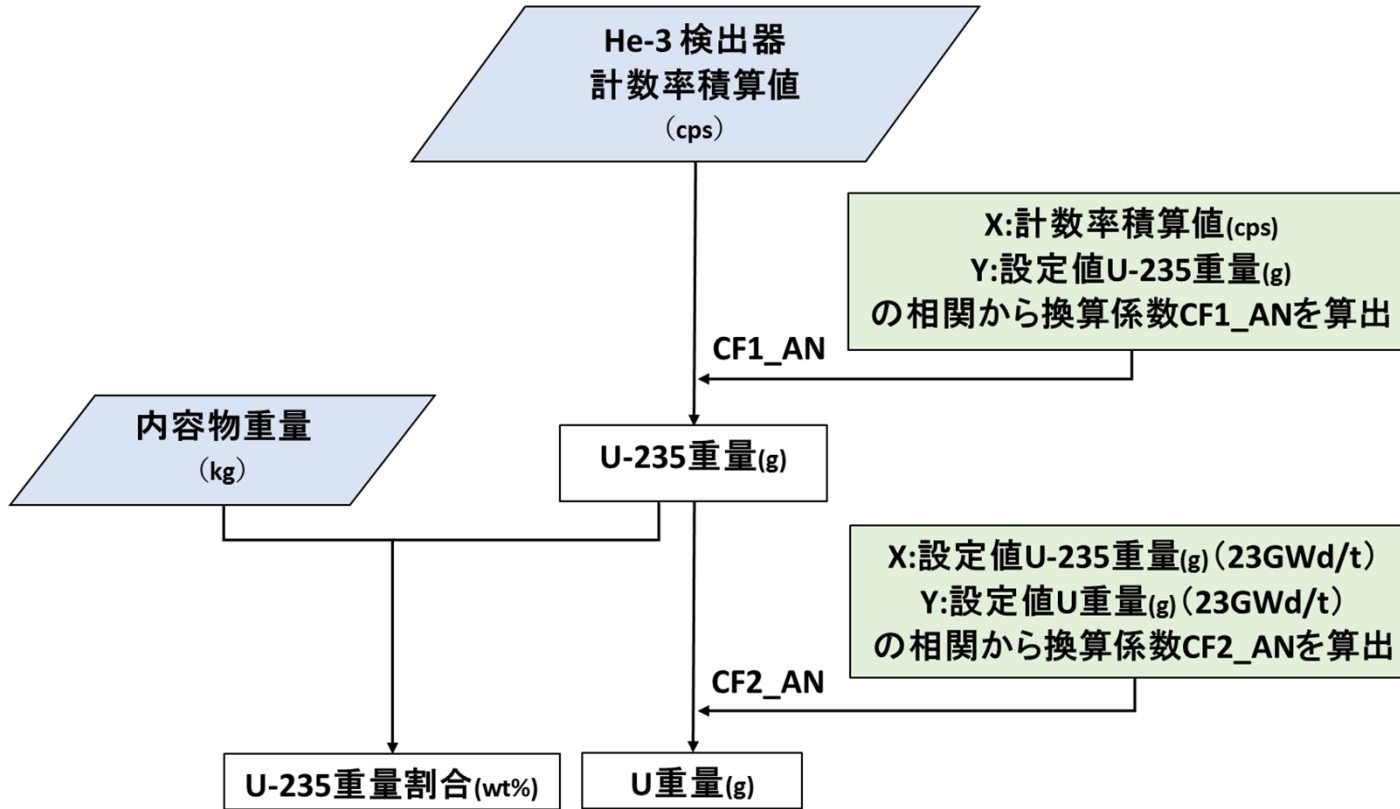


4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

①-1 アクティブ中性子法A(7/18)

アクティブ中性子法A-1: 推定評価フロー

アクティブ中性子法A-1単独による核物質質量の推定評価フローを作成。



検出下限値は同じフローに、以下の式で求めた検出下限計数率を代入する。

$$n_n > \frac{K}{2} \left(\left(\frac{K}{t_s} \right) + 4n_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b} \right) \right)$$

標準偏差の倍数: $K=3$, 対象物測定計数: N_s ,
 対象物測定時間: $t_s=200$ (s), 対象物測定計数率: $n_s=N_s/t_s$,
 BG測定計数: N_b , BG測定時間: $t_b=200$ (s), BG測定計数率: $n_b=N_b/t_b$,
 対象物の正味計数率: $n_n=n_s-n_b$

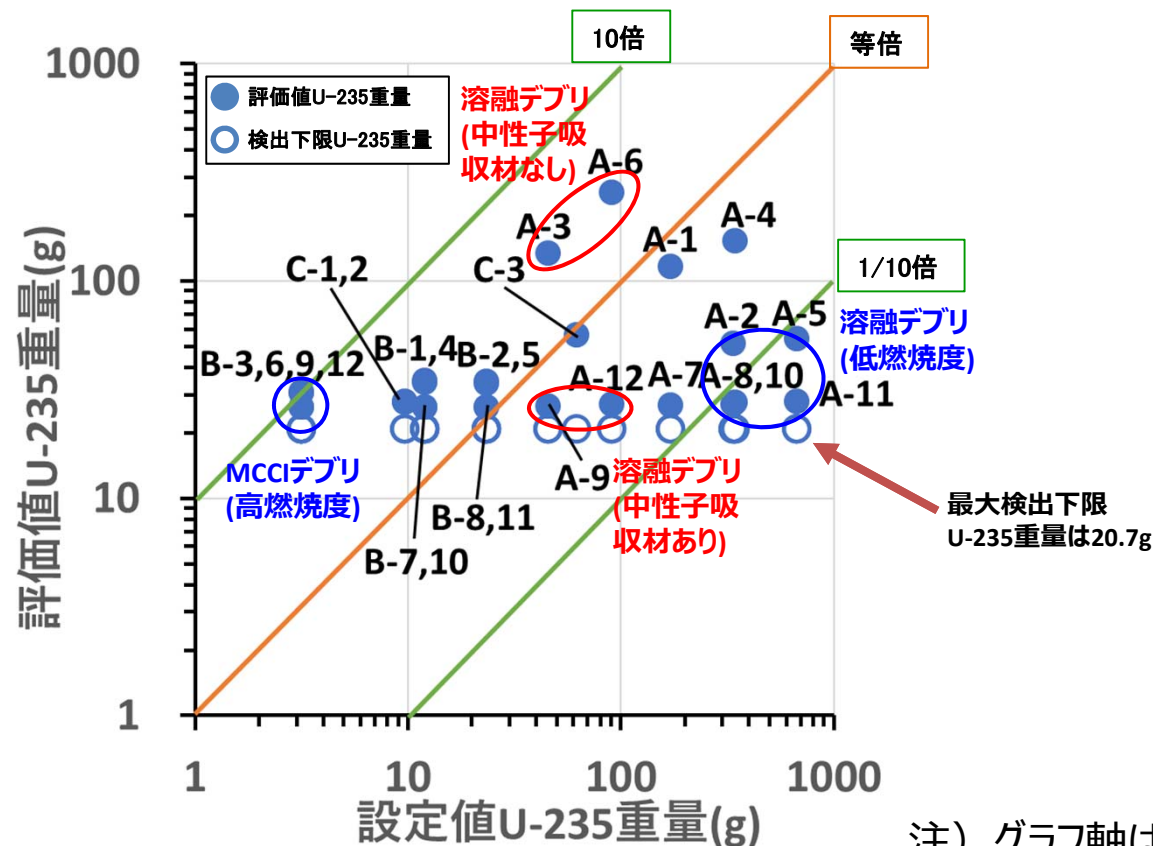
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.169

①-1 アクティブ中性子法A(8/18)

アクティブ中性子法A-1: 評価結果_U-235重量(g)

- U-235重量評価値はU-235重量設定値と比較し最大で10倍程度, 最小で1/10倍以下。
- U-235重量の設定値が異なっても計数率が同程度となるケースが多く, 評価値も同程度の結果が多くなった。
- 低～高燃焼度を含むすべてのケースから換算係数を算出しているため, 今回の評価では, 高燃焼度のMCCIデブリ, 低燃焼度の溶融デブリで誤差が大きくなった。
- 評価値は中性子吸収材ありのケースでは中性子吸収材がない場合と比較して評価値が小さく, 中性子吸収材の影響の補正が必要。



注) グラフ軸は対数目盛表示

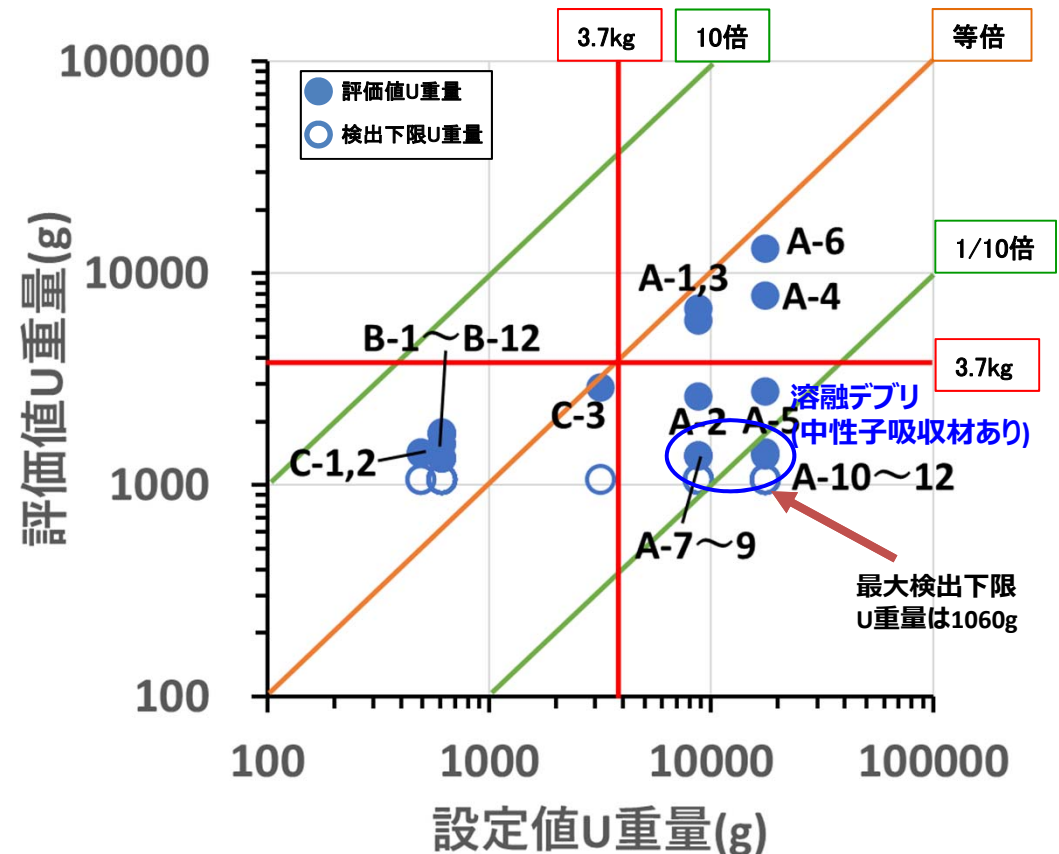
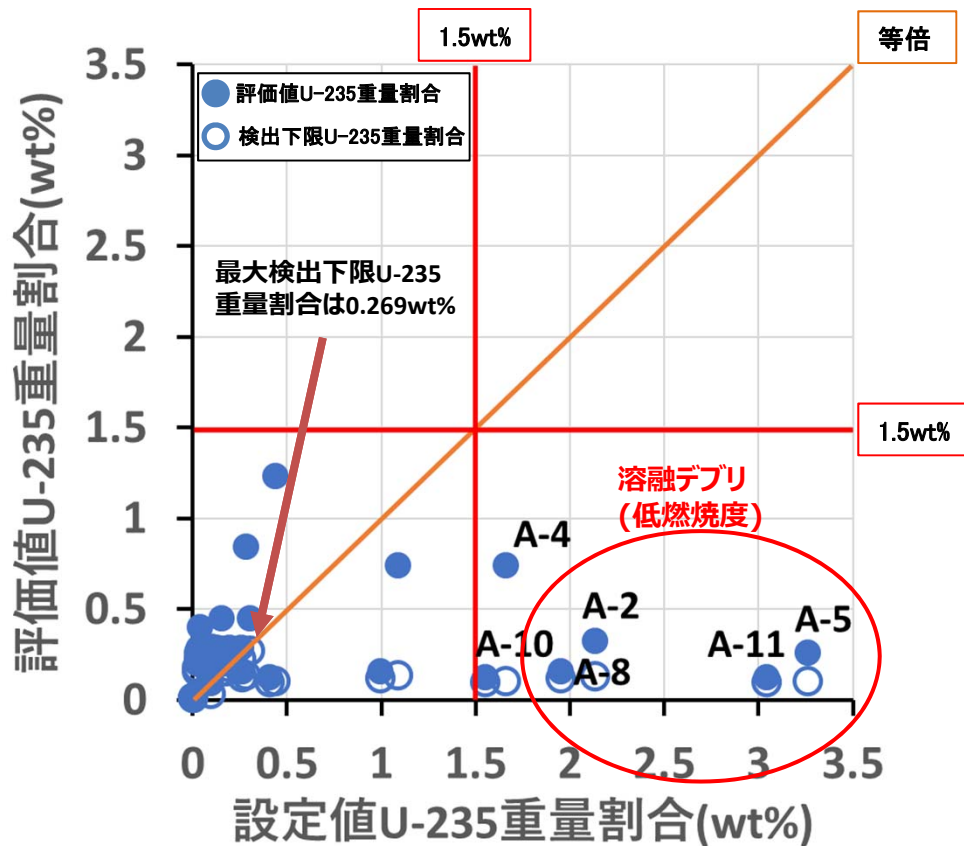
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.170

①-1 アクティブ中性子法A(9/18)

アクティブ中性子法A-1: 評価結果_U-235重量割合(wt%)およびU量(g)

- ・溶融デブリの低燃焼度では過小評価。溶融デブリの低燃焼度では、U-235重量割合が高いが、初期充填時の燃料棒に入っている中性子吸収材(Gd)の影響が大きいと推察される。
- ・溶融デブリ（中性子吸収材あり）では過小評価しており、中性子吸収材の影響補正が必要。
- ・U-235重量からU量への評価は平均燃焼度を仮定しており、燃焼度による影響補正が課題。



注) グラフ軸は対数目盛表示

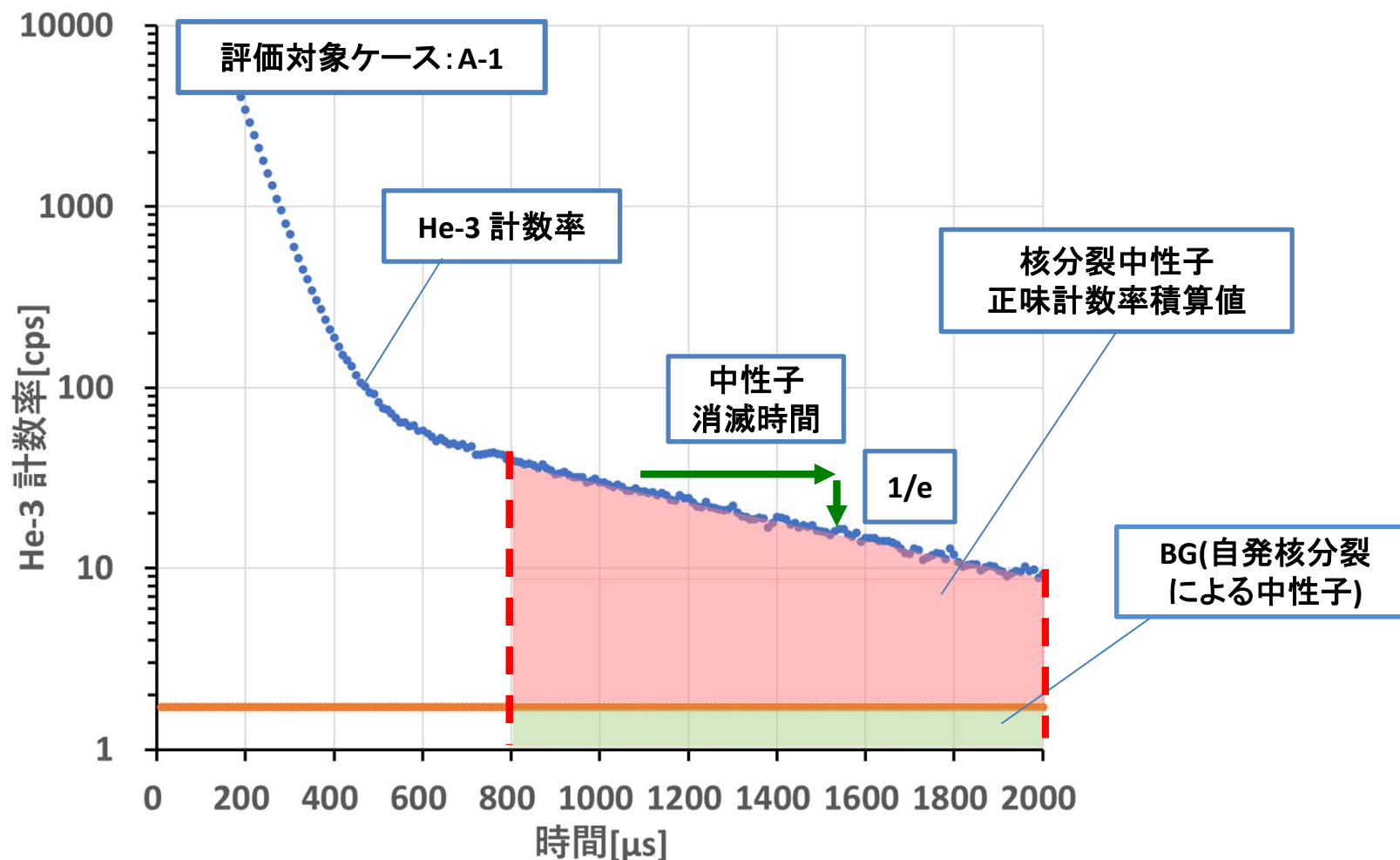
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.171

①-1 アクティブ中性子法A(10/18)

アクティブ中性子法A-2: 概要

中性子消滅時間とU-235単位重量当たりの正味計数率積算値の相関関数により、核物質量を推定評価。



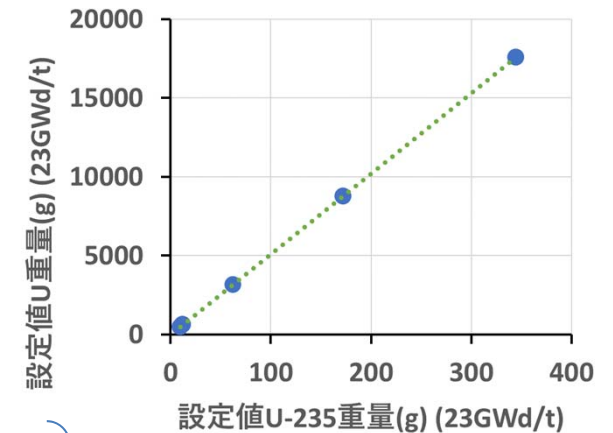
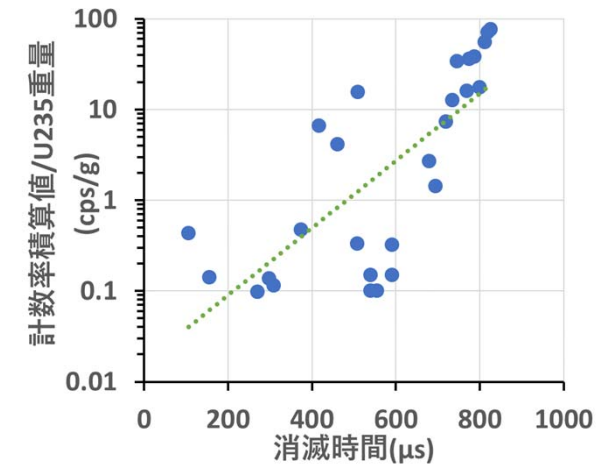
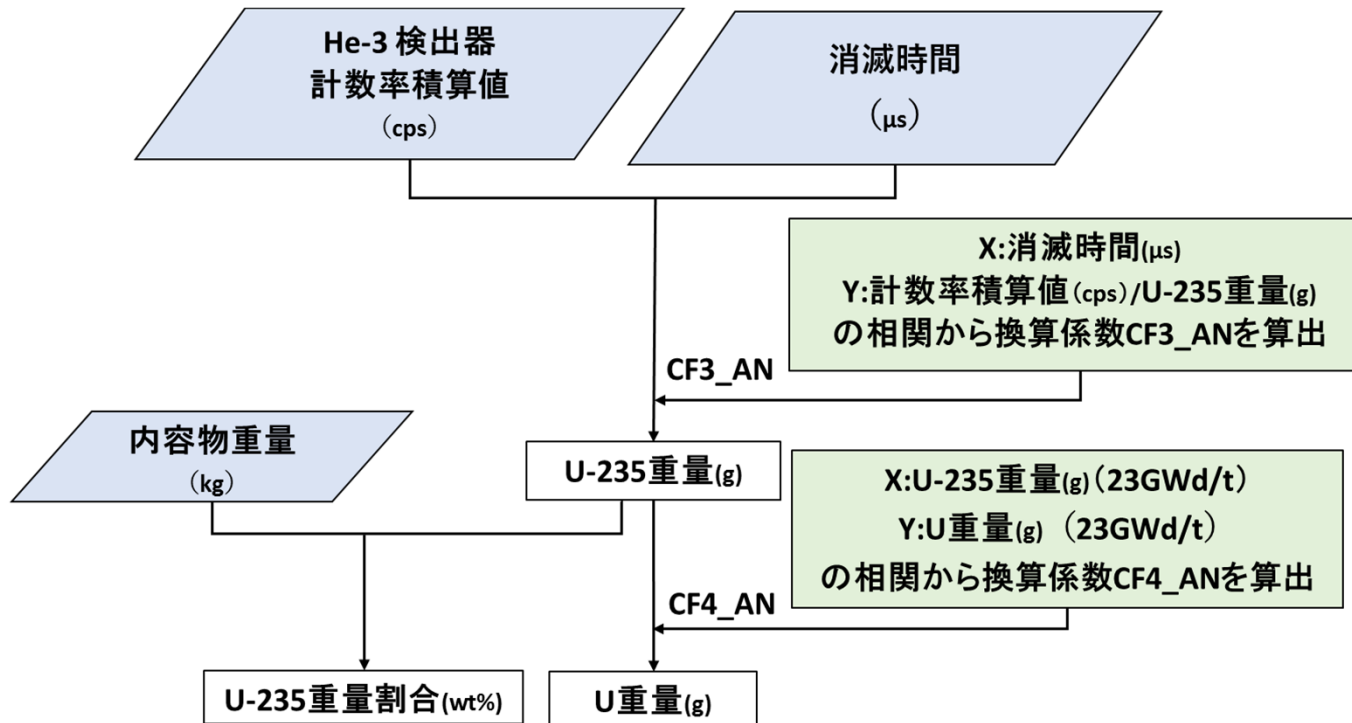
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

①-1 アクティブ中性子法A(11/18)

アクティブ中性子法A-2: 推定評価フロー

アクティブ中性子法A-2単独による核物質質量の推定評価フローを作成。

対象: 溶融/MCCI/金属デブリ(ケースA,B,C全て)



検出下限値は同じフローに、以下の式で求めた検出下限計数率を代入する。

$$n_n > \frac{K}{2} \left(\left(\frac{K}{t_s} \right) + 4n_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b} \right) \right)$$

標準偏差の倍数: $K=3$, 対象物測定計数: N_s ,
 対象物測定時間: $t_s=200(s)$, 対象物測定計数率: $n_s=N_s/t_s$,
 BG測定計数: N_b , BG測定時間: $t_b=200(s)$, BG測定計数率: $n_b=N_b/t_b$,
 対象物の正味計数率: $n_n=n_s-n_b$

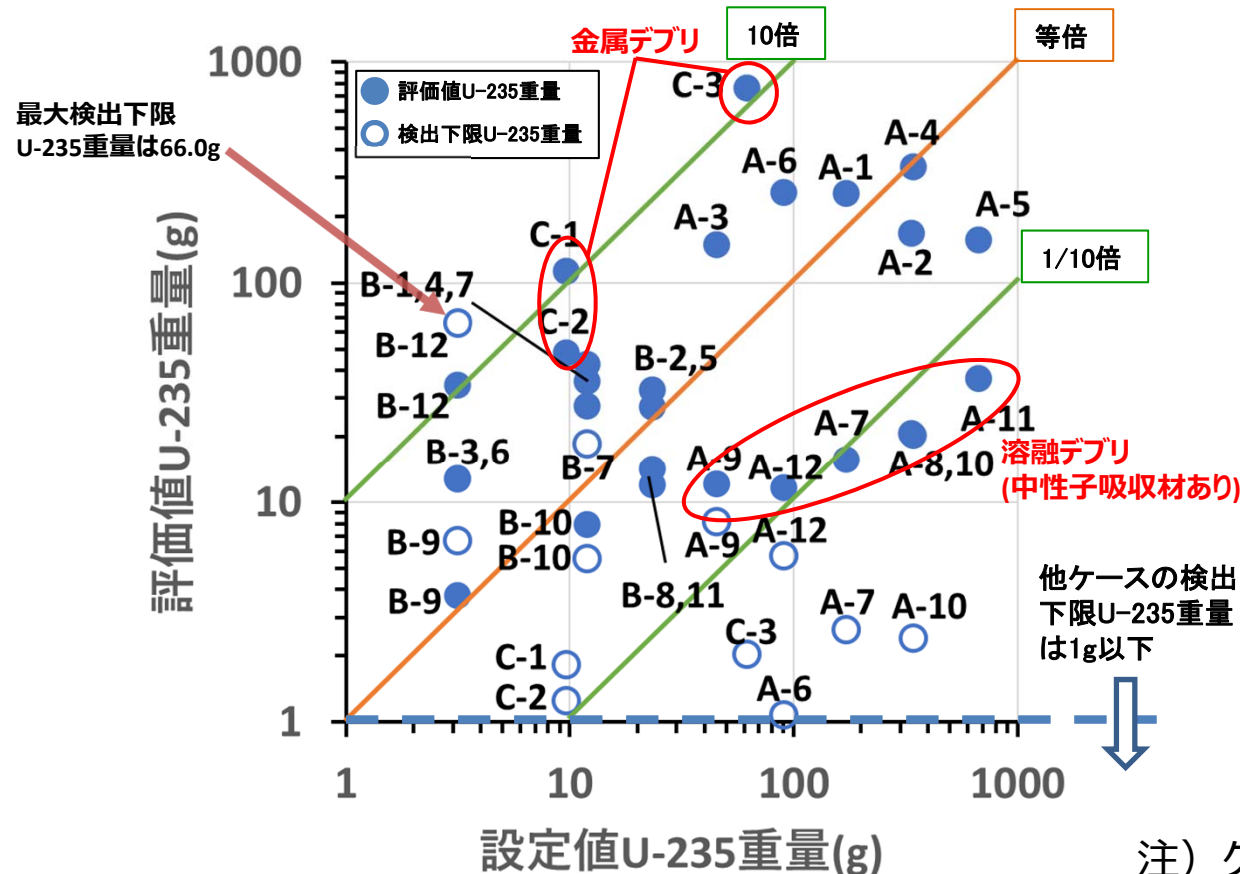
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.173

①-1 アクティブ中性子法A(12/18)

アクティブ中性子法A-2: 評価結果_U-235重量(g)

- ・U-235重量評価値はU-235重量設定値と比較し最大で10倍以上，最小で1/10倍以下。
- ・ユニット缶と廃棄物保管容器のすべての解析ケースを対象とし，近似曲線を引き，換算係数を算出しているため，その近似曲線から離れるケースでは誤差が大きくなった。今回の評価では，**熔融デブリ（中性子吸収材あり）**では過小評価，**容器が異なる金属デブリ**では過大評価となった。



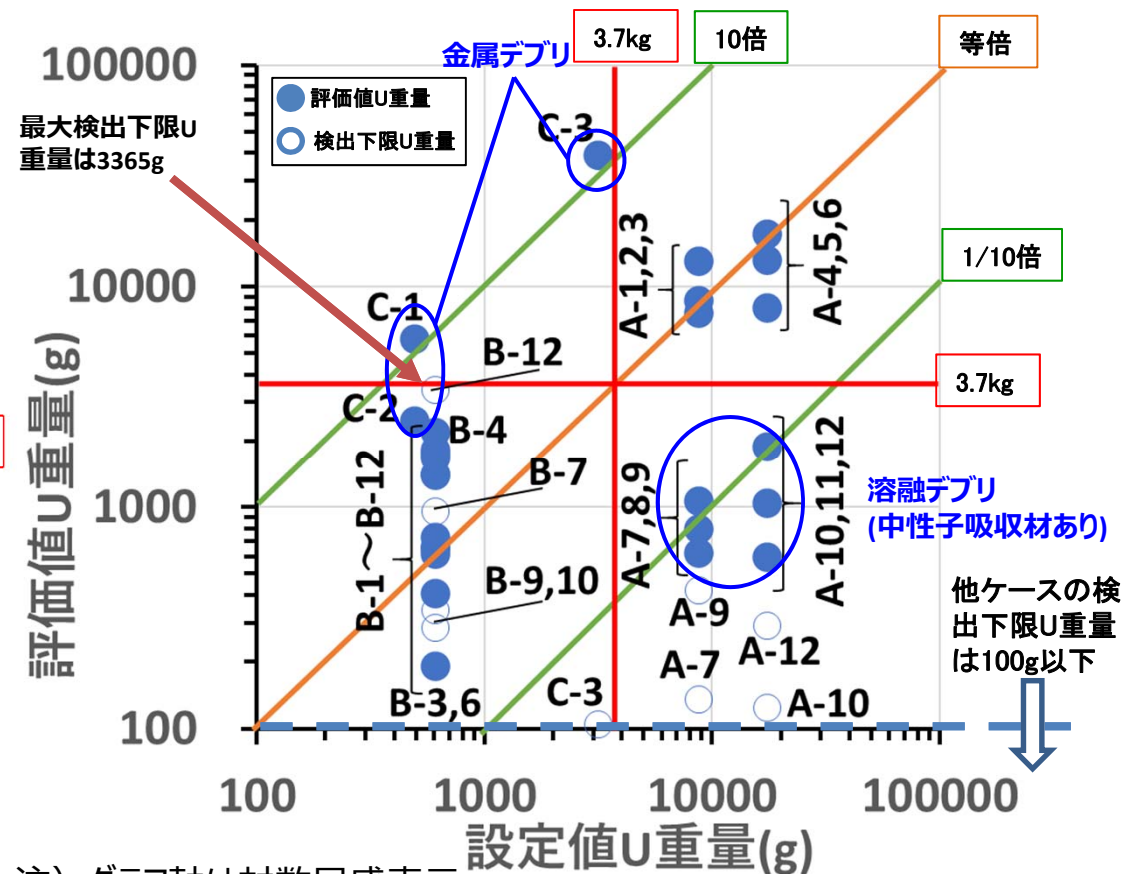
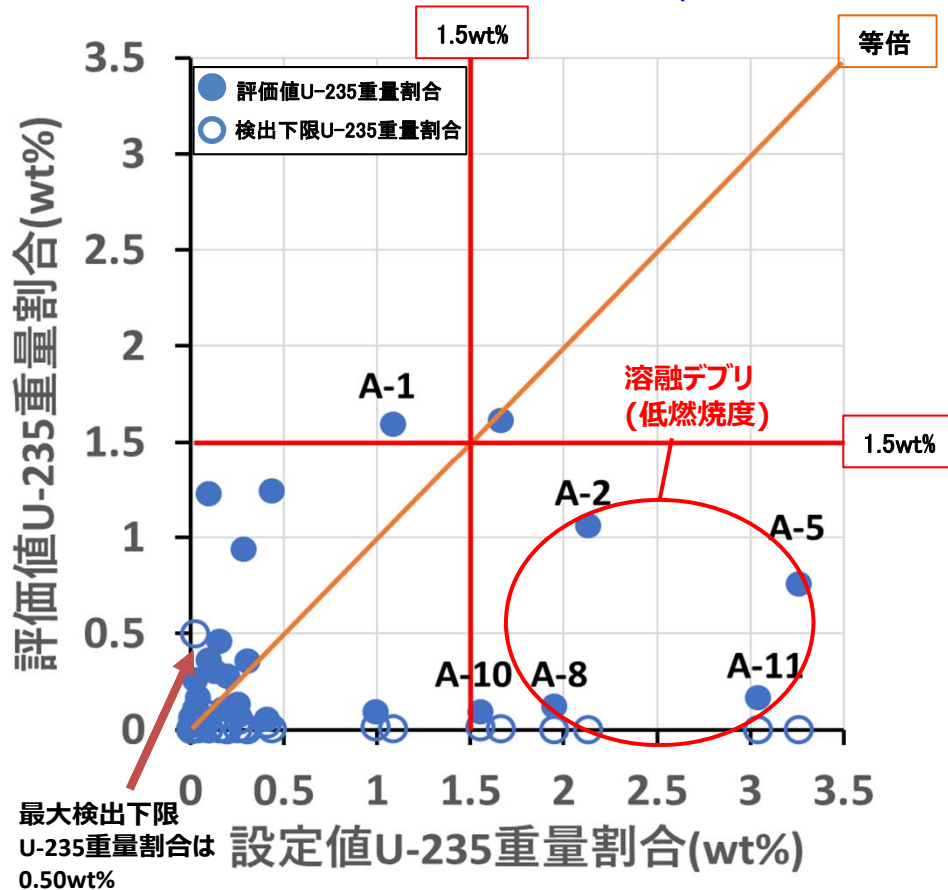
注) グラフ軸は対数目盛表示

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

①-1 アクティブ中性子法A(13/18)

アクティブ中性子法A-2: 評価結果_U-235重量割合(wt%)およびU量(g)

- ・溶融デブリの低燃焼度では過小評価。溶融デブリの低燃焼度では、U-235重量割合が高いが、初期充填時の燃料棒に入っている中性子吸収材(Gd)の影響が大きいと推察される。
- ・U-235重量からU重量に平均燃焼度を仮定して変換しているため、U重量も溶融デブリ（中性子吸収材あり）では過小評価、容器が異なる金属デブリでは過大評価となった。



注) グラフ軸は対数目盛表示

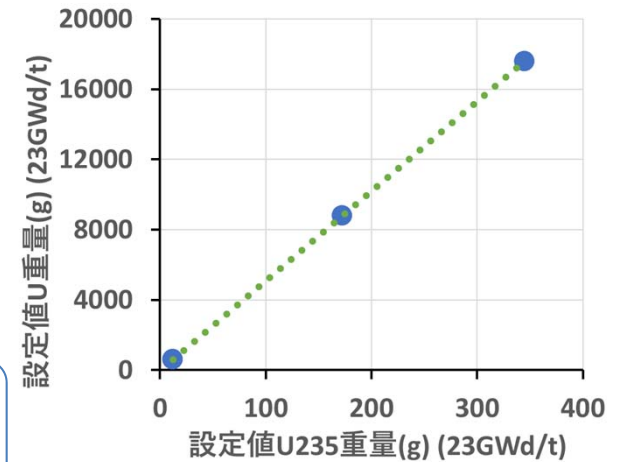
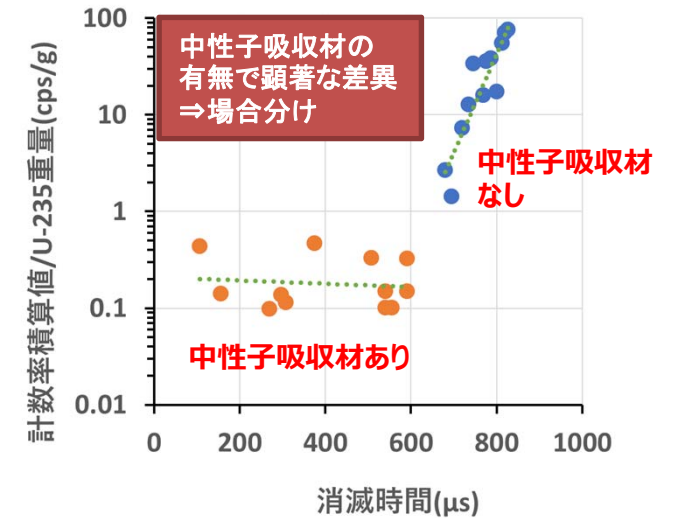
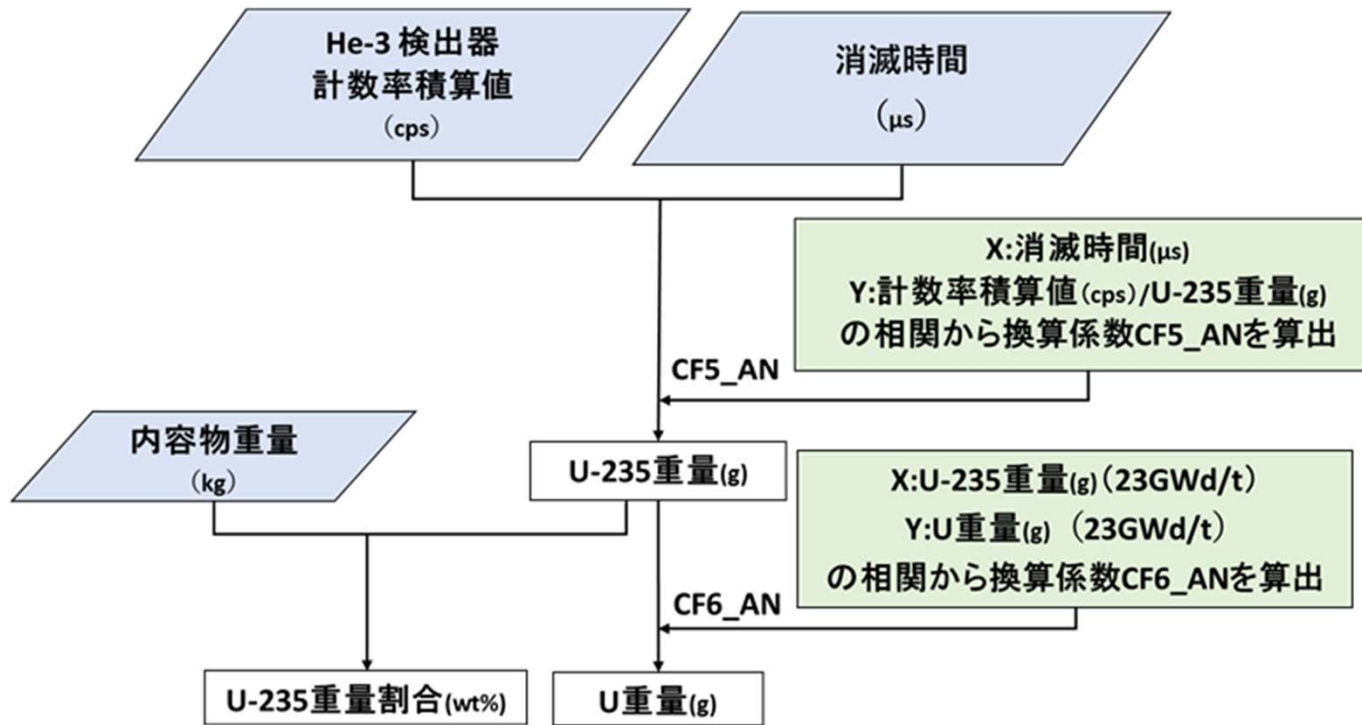
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

①-1 アクティブ中性子法A(14/18)

アクティブ中性子法A-2' : 推定評価フロー

アクティブ中性子法A-2' 単独による核物質質量の推定評価フローを作成。

対象: ユニット缶の溶融/MCCIデブリ(ケースA, Bのみ)



検出下限値は同じフローに、以下の式で求めた検出下限計数率を代入する。

$$n_n > \frac{K}{2} \left(\left(\frac{K}{t_s} \right) + 4n_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b} \right) \right)$$

標準偏差の倍数: $K=3$, 対象物測定計数: N_s ,
 対象物測定時間: $t_s=200(s)$, 対象物測定計数率: $n_s=N_s/t_s$,
 BG測定計数: N_b , BG測定時間: $t_b=200(s)$, BG測定計数率: $n_b=N_b/t_b$,
 対象物の正味計数率: $n_n=n_s-n_b$

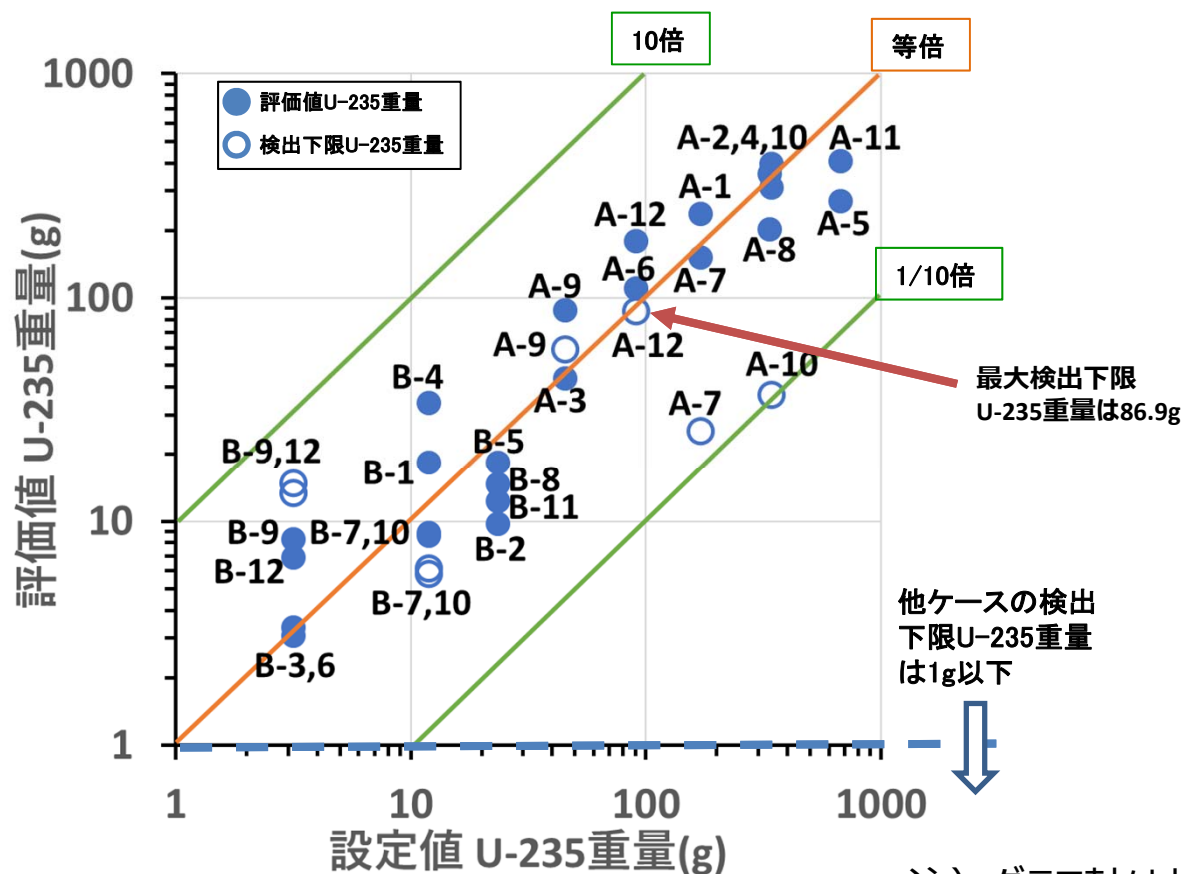
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.176

①-1 アクティブ中性子法A(15/18)

アクティブ中性子法A-2' : 評価結果_U-235重量(g)

- 解析ケースをユニット缶に絞り、消滅時間で場合分けし、換算係数を算出しているためU-235評価値はU-235設定値と比較し最大で**2倍程度の値**となり、**計測精度の向上が期待できる**結果となった。



注) グラフ軸は対数目盛表示

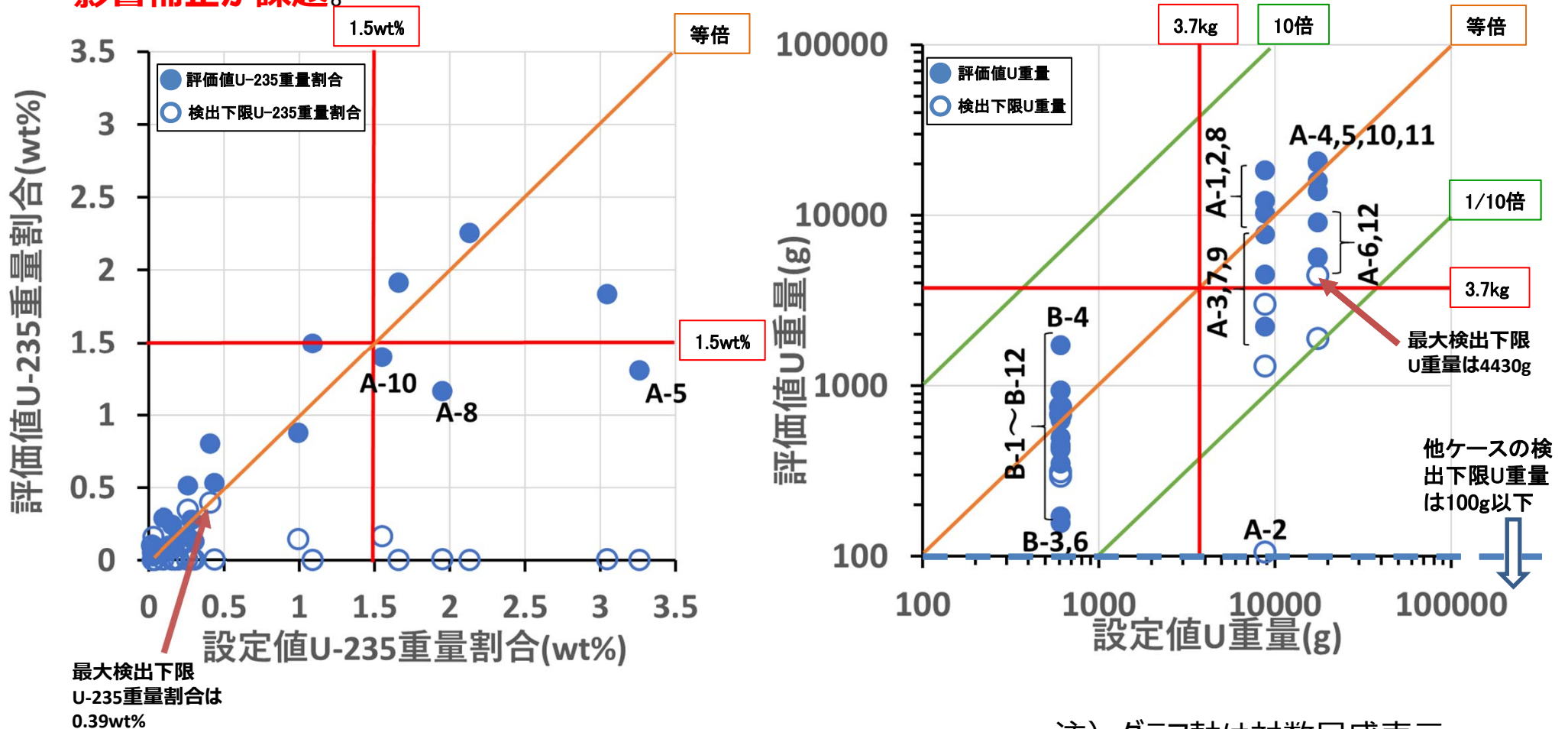
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.177

①-1 アクティブ中性子法A(16/18)

アクティブ中性子法A-2' : 評価結果_U-235重量割合(wt%)およびU量(g)

- ・U重量評価値はU重量設定値と比較し最大で4倍程度の値を示した。
- ・U-235重量からU量への評価は平均燃焼度を仮定しているため、**燃焼度の変動による影響補正が課題**。



注) グラフ軸は対数目盛表示

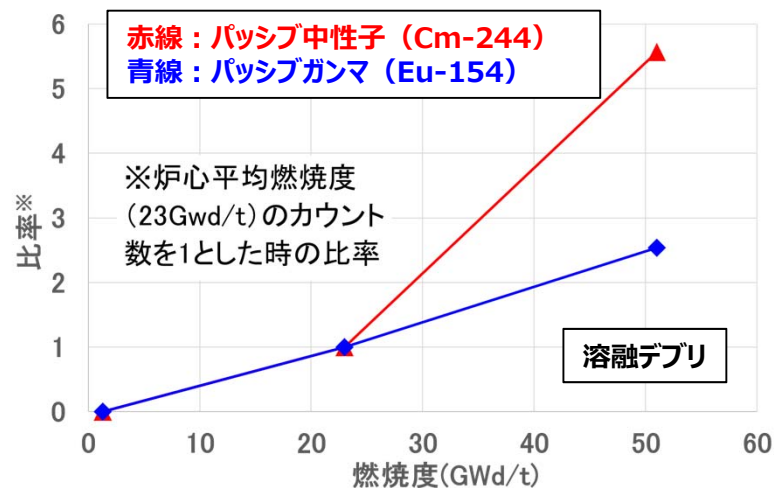
①-1 アクティブ中性子法A(17/18)

A-1, A-2, A-2' の比較結果

- ・時間積分値データのみ使用したA-1よりも、中性子消滅時間に着目したA-2, A-2'の方が、計測精度の向上が期待できる。
- ・解析ケースA, Bの容器はユニット缶, 解析ケースCの容器は廃棄物保管容器（内容器）をモデルとしており、全てのケースを対象としたA-2よりも、対象をユニット缶のみとしたA-2'の方が計測精度が向上した。
⇒容器の形状ごとに換算係数を分ける必要あり。

性能向上方策案

- ・燃焼度とCm-244およびEu-154計数率の相関関数の差異による燃焼度の影響補正
(パッシブ中性子法 + パッシブガンマ線法)



Cm-244およびEu-154計数率の比から燃焼度の影響を補正できる可能性を示唆

①-1 アクティブ中性子法A(18/18)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

- 1) アクティブ中性子法の評価フローを検討
- 2) 核燃料物質質量などの評価精度を検討
- 3) 核燃料物質質量などの検出下限値を検討

【成果/開発への寄与】

- 1) アクティブ中性子法の評価フローを設定
- 2) 検出器応答解析データを用いて核燃料物質質量などの**評価精度を試算**
(容器仕様別の評価とし、中性子消滅時間を利用した場合(アクティブ中性子法A-2')で比較的良好な結果)
 - ・U-235重量 :最大で約2倍
 - ・U-235重量割合:最大で約2倍
 - ・U重量 :最大で約4倍
- 3) 検出器応答解析データを用いて**検出下限値を試算**
 - ・U-235重量割合:最大で0.39wt%となり、仕分け判定基準1.5wt%よりも小さい
 - ・U重量 :最大で4.43kgとなり、仕分け判定基準3.7kgよりも大きい、U重量設定値17.6kgよりも小さい

【課題と対応策】

- 1) 課 題: 燃焼度による誤差低減
対応策: **中性子消滅時間**による補正方法の最適化検討, **Cm-244とEu-154の比**による補正方法の詳細検討
- 2) 課 題: 中性子吸収材による誤差低減
対応策: PGA法などの適用検討
- 3) 課 題: その他燃料デブリの多様性の影響確認
対応策: 不均一体系を含む収納物条件に対するパラメータスタディの拡充

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

(①-2 アクティブ中性子法B)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
①-1	アクティブ中性子法 A	He-3	D-T	側方から	核分裂性核種質量	核分裂性核種質量	MHI	43-55 161-179
①-2	同 B	B-10	D-T/ 加速器中性子源	上方から	同上	同上	日立GE	56-69 180-183
①-3	同 C (FNDI法+PGA法)	B-10ストロー/He-3 (試験で決定)	D-T/D-D (試験で決定)	側方から	同上	同上	JAEA	70-80 184-191

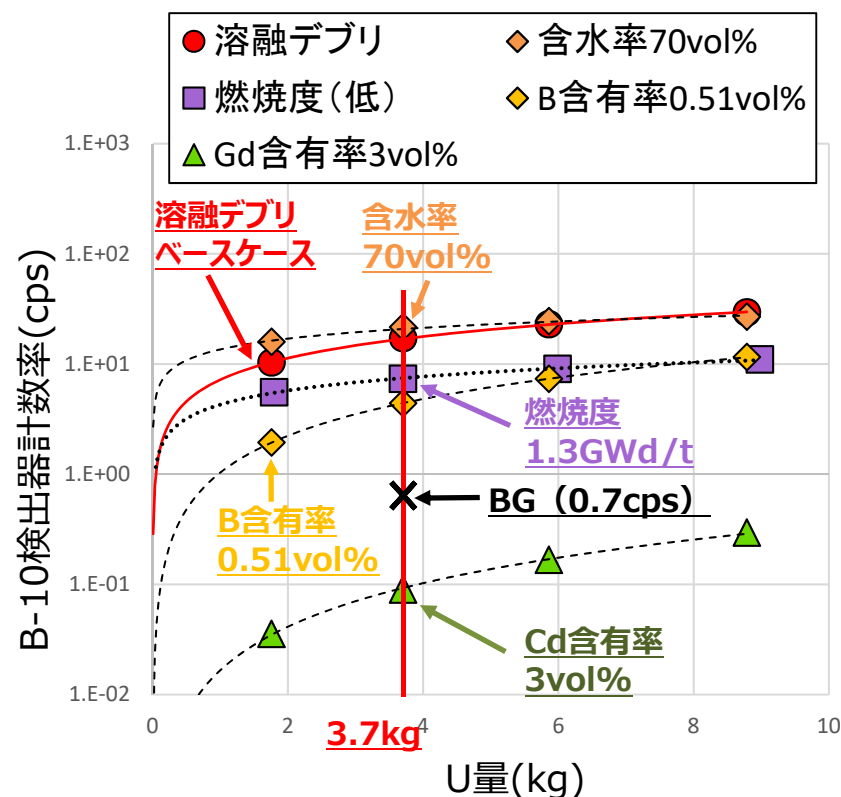
【特長】

- 検出器は、高ガンマ線場への対応を重視して、B-10検出器を選定。
- 照射線源は、中性子発生効率を重視して、D-T中性子源または加速器中性子源を選定。
- 中性子照射方向は、対称性の高さを重視して、対象物上方からの照射を選定。

①-2 アクティブ中性子法B(1/3)

＜核燃料物質評価の課題＞

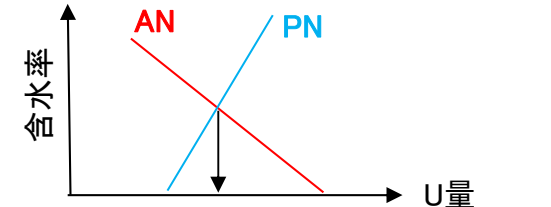
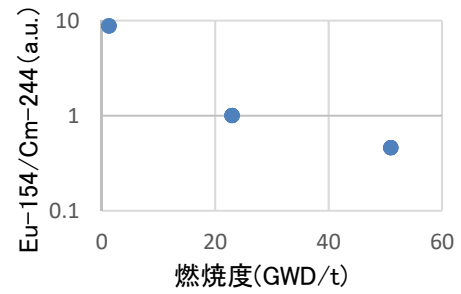
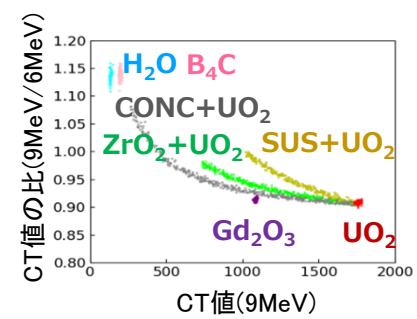
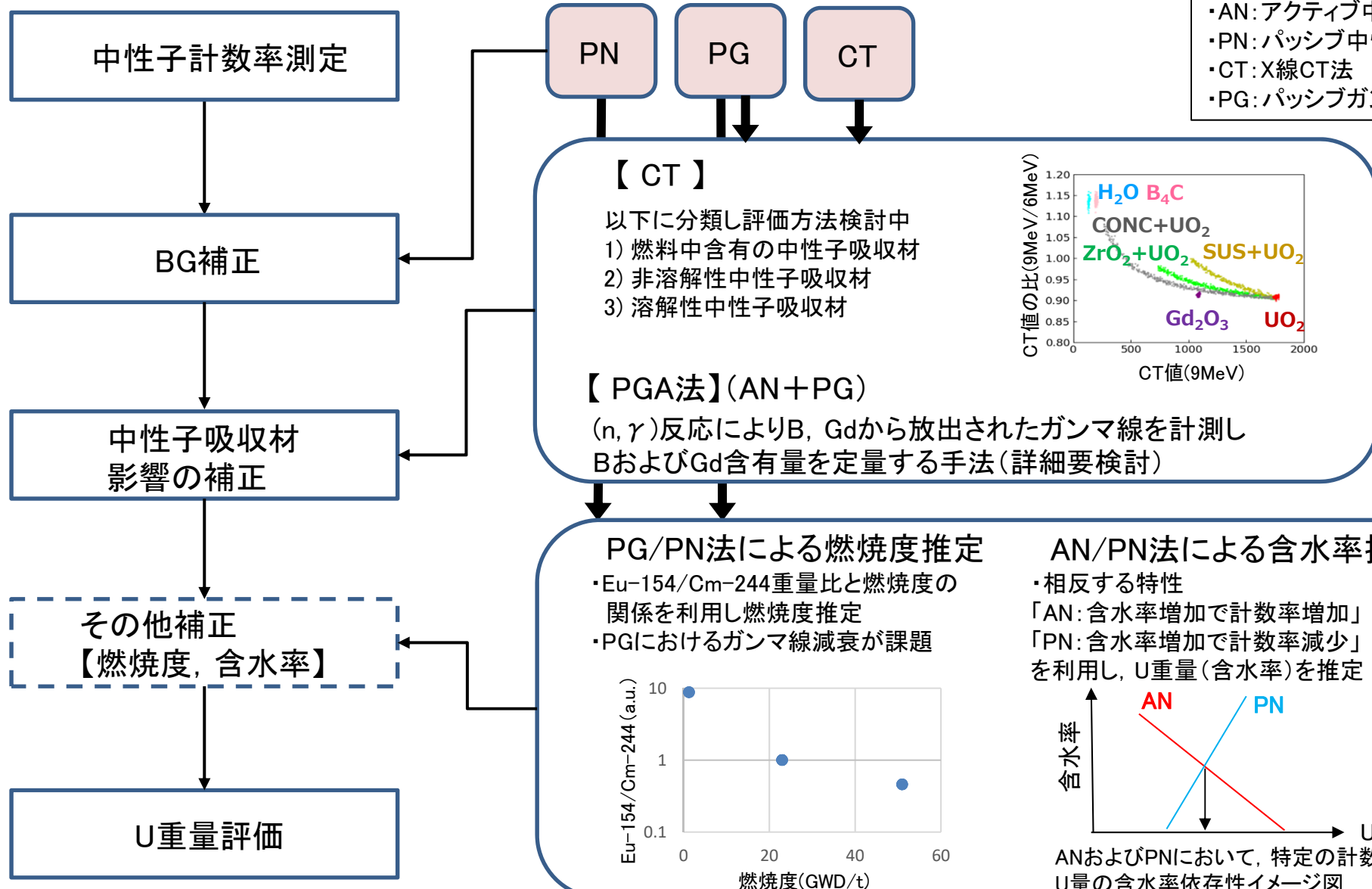
- 1) 中性子吸収材影響が大きく中性子吸収材補正が必須
- 2) 燃焼度と含水率の影響は数割程度であり、精度向上(定量評価)のために補正が必要
- 3) 中性子吸収材により計数率が低下するのでBG補正が必要



4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

①-2 アクティブ中性子法B(2/3)

計測技術の略称
 ・AN: アクティブ中性子法
 ・PN: パッシブ中性子法
 ・CT: X線CT法
 ・PG: パッシブガンマ線法



4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

①-2 アクティブ中性子法B(3/3)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

1) アクティブ中性子法Bの検出器応答解析
結果をもとに評価手法を検討

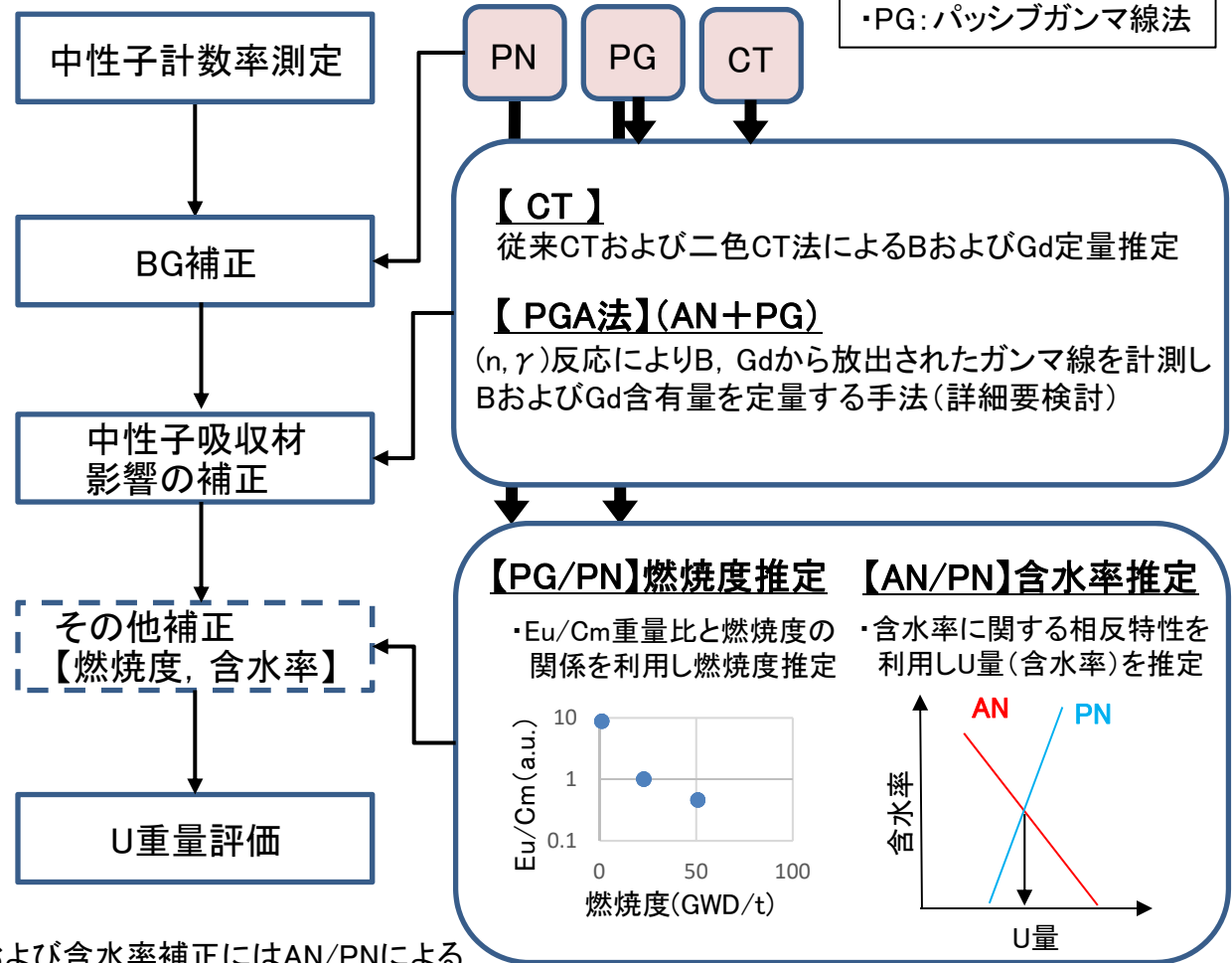
【成果/開発への寄与】

- 1) 評価手法検討結果を以下に記す
- ・PN, PG法, さらにはCTやPGA法などを総合的に組みこんだ核燃料物質評価手法案を考案
 - ・中性子吸収材補正にはCTやPGA法, 燃焼度補正はEu量(PG)とCm量(PN)の比と燃焼度の特性, 含水率補正はANとPNで相反する含水率特性などの利用が有効

【課題と対応策】

- 1) 課題: 中性子吸収材補正, 燃焼度補正および含水率補正方法の有効性確認
- 対応策: 中性子吸収材補正にはCTやPGA法など, 燃焼度補正にはPG/PNIによる方法など, および含水率補正にはAN/PNIによる方法などのシミュレーションなどによる評価

計測技術の略称
 ・AN: アクティブ中性子法
 ・PN: パッシブ中性子法
 ・CT: X線CT法
 ・PG: パッシブガンマ線法



4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

(①-3 アクティブ中性子法C)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
①-1	アクティブ中性子法 A	He-3	D-T	側方から	核分裂性核種質量	核分裂性核種質量	MHI	43-55 161-179
①-2	同 B	B-10	D-T/ 加速器中性子源	上方から	同上	同上	日立GE	56-69 180-183
①-3	同 C (FNDI法+PGA法)	B-10ストロー/He-3 (試験で決定)	D-T/D-D (試験で決定)	側方から	同上	同上	JAEA	70-80 184-191

【特長】

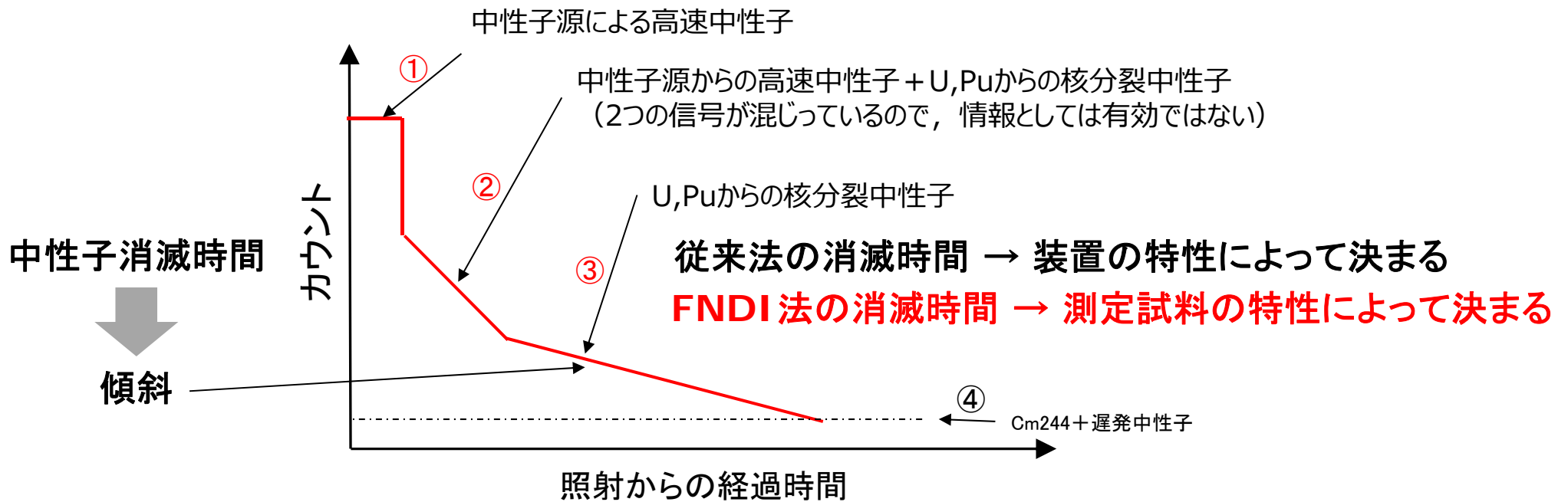
- 影響因子による検出器応答のばらつきを排除するため、ウラン廃棄物(JAEA/人形峠)でIAEA認可の実績がある高速中性子直接問いかけ法(FNDI法)を導入。
- 中性子吸収材の影響を補正するため即発ガンマ線分析法(PGA法)を導入。
- 高ガンマ線場に対応するため、B-10ストロー検出器を導入。
- 少量ウラン時などにおける検出器感度を高めるため、高速中性子検出器バンクを導入。

FNDI法とPGA法の組み合わせは、燃料デブリやその他の放射性廃棄物の多様性を考慮し、従来のアクティブ中性子法の課題を補うための改良を加えた手法である(添付-1参照)

①-3 アクティブ中性子法C(1/7)

目的: 高速中性子直接問いかけ法(FNDI法)において得られる
中性子消滅時間を用いた分析精度の向上を目指す

アクティブ中性子法で得られるスペクトル



FNDI法の特長: ③での中性子消滅時間が測定試料の情報を持つ → 補正に利用可能

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

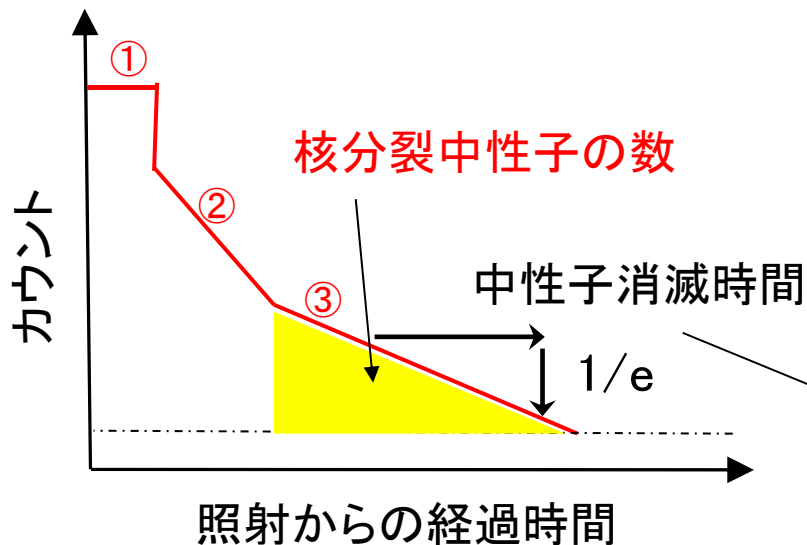
No.186

①-3 アクティブ中性子法C(2/7)

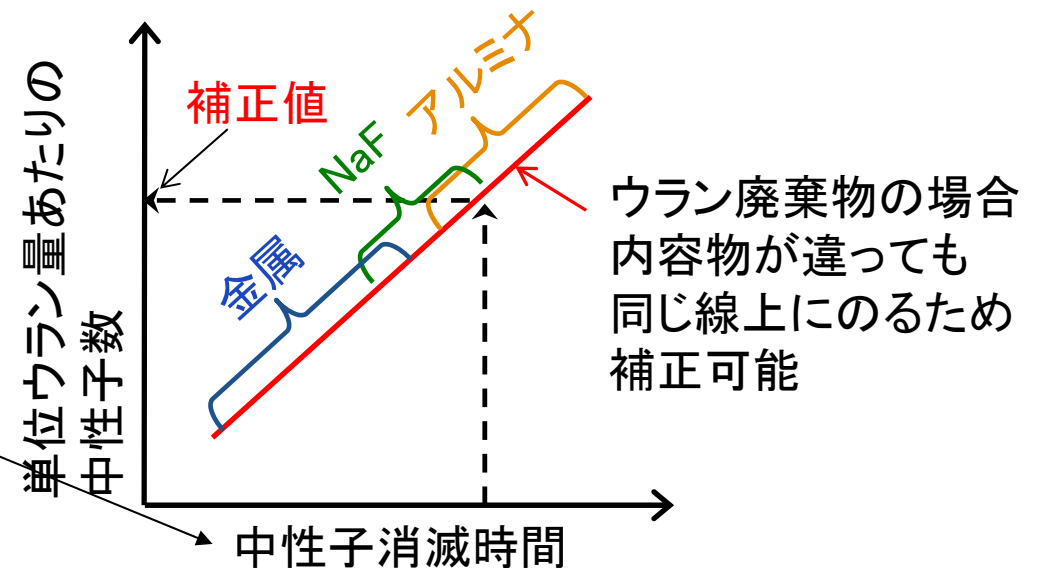
ウラン廃棄物の場合，中性子消滅時間から求められる補正值によって，正確にウラン量を求められることが分かっている

核分裂中性子の数 ÷ 補正值 \propto 正確なウラン量

FNDI法で得られるスペクトル



中性子消滅時間と中性子数の関係



燃料デブリに適用した場合でも補正可能か検討する必要がある

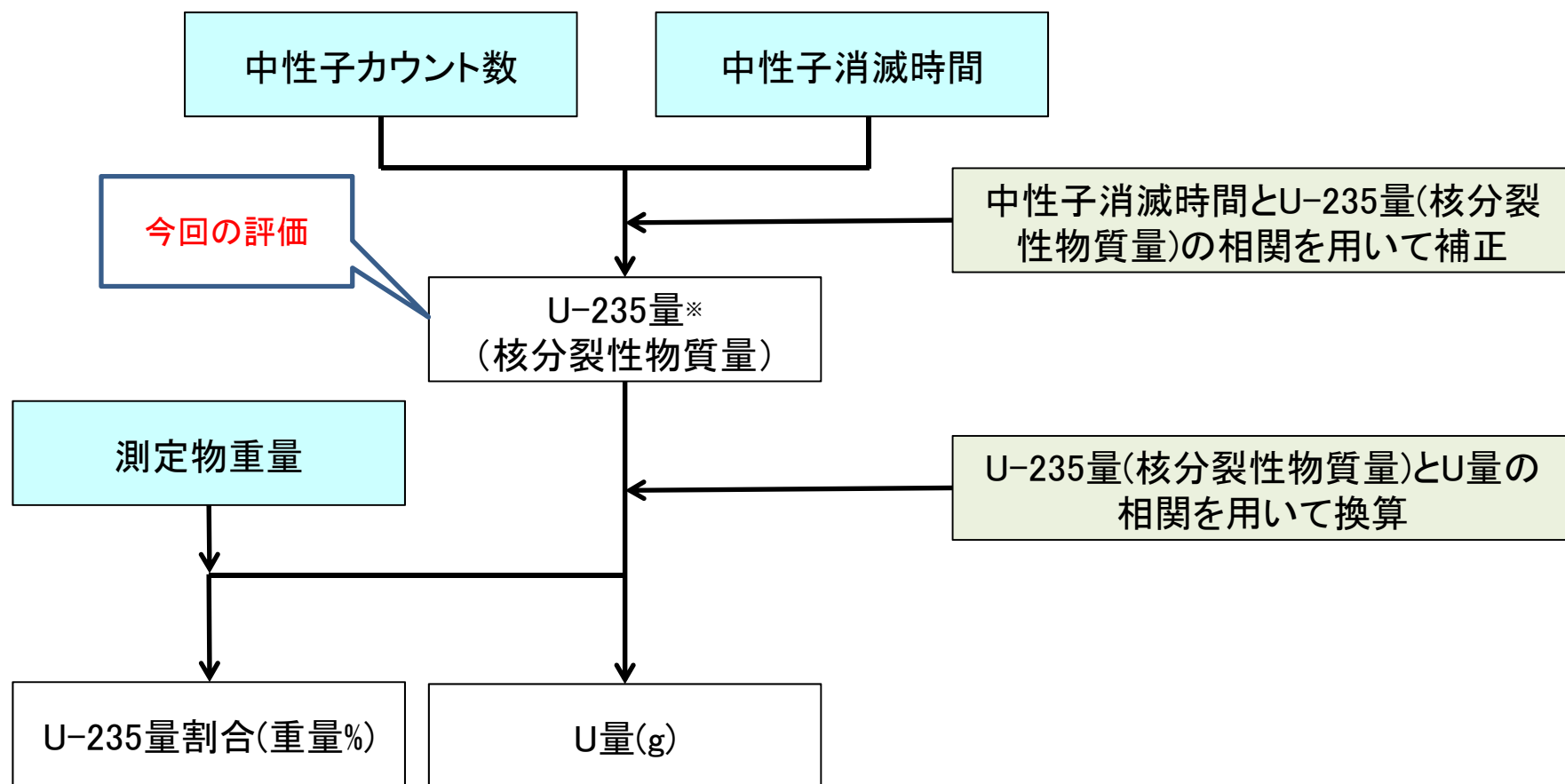
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.187

①-3 アクティブ中性子法C(3/7)

推定評価フロー

- ✓ アクティブ中性子法CのFNDI法単独による核物質質量の推定評価フローを作成。



※FNDI法で得られるのは核分裂性物質質量であるため、U-235量に換算する

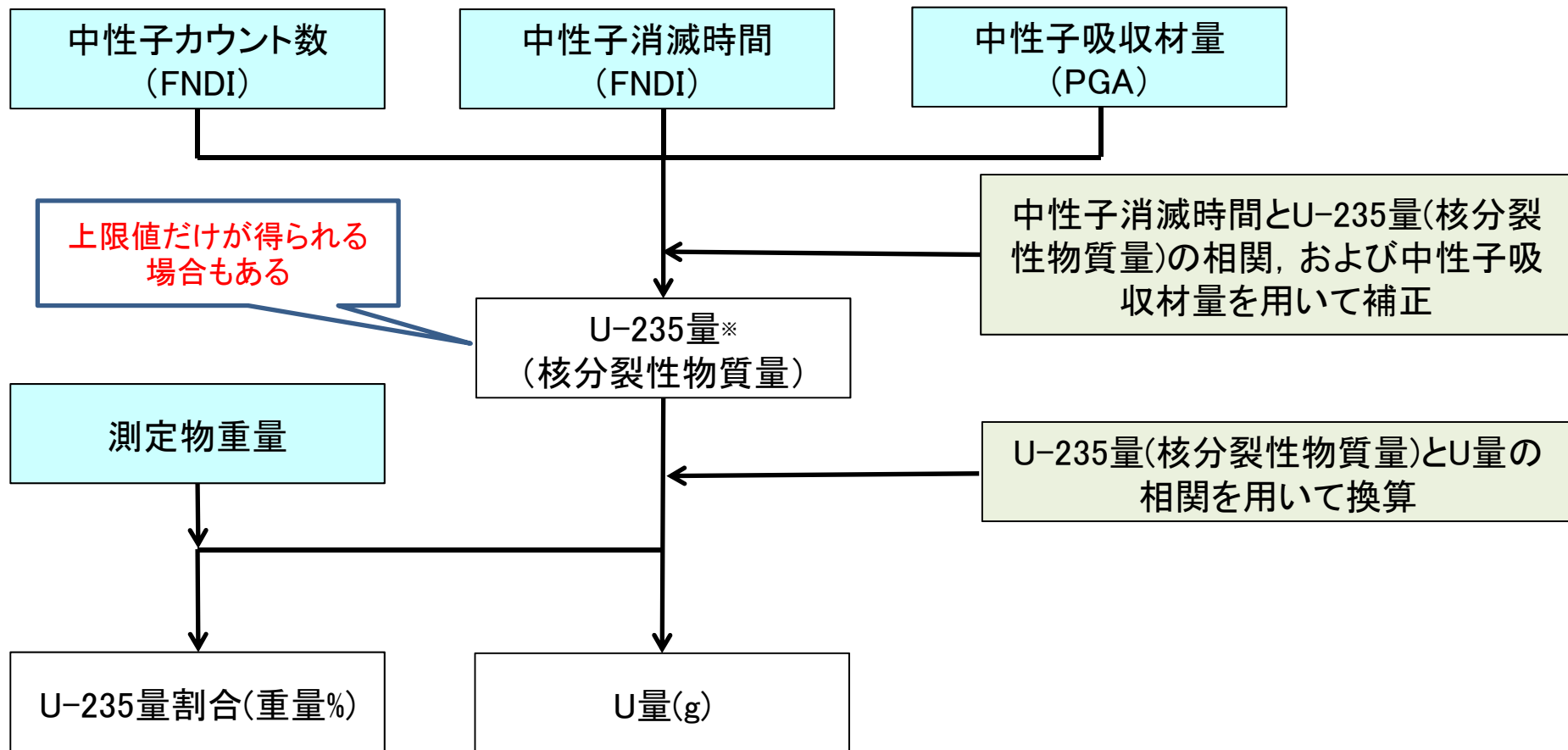
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.188

①-3 アクティブ中性子法C(4/7)

推定評価フロー 今回の評価はFNDI単独のみ

✓ アクティブ中性子法CのFNDI法+PGA法による核物質質量の推定評価フローを作成。



※FNDI法で得られるのは核分裂性物質質量であるため、U-235量に換算する

①-3 アクティブ中性子法C(5/7)

検討結果

ほぼ一直線上にあり、補正可能であることを示唆

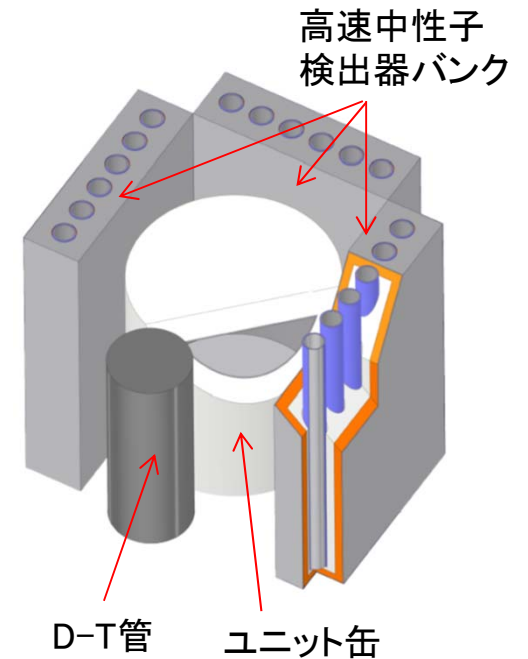
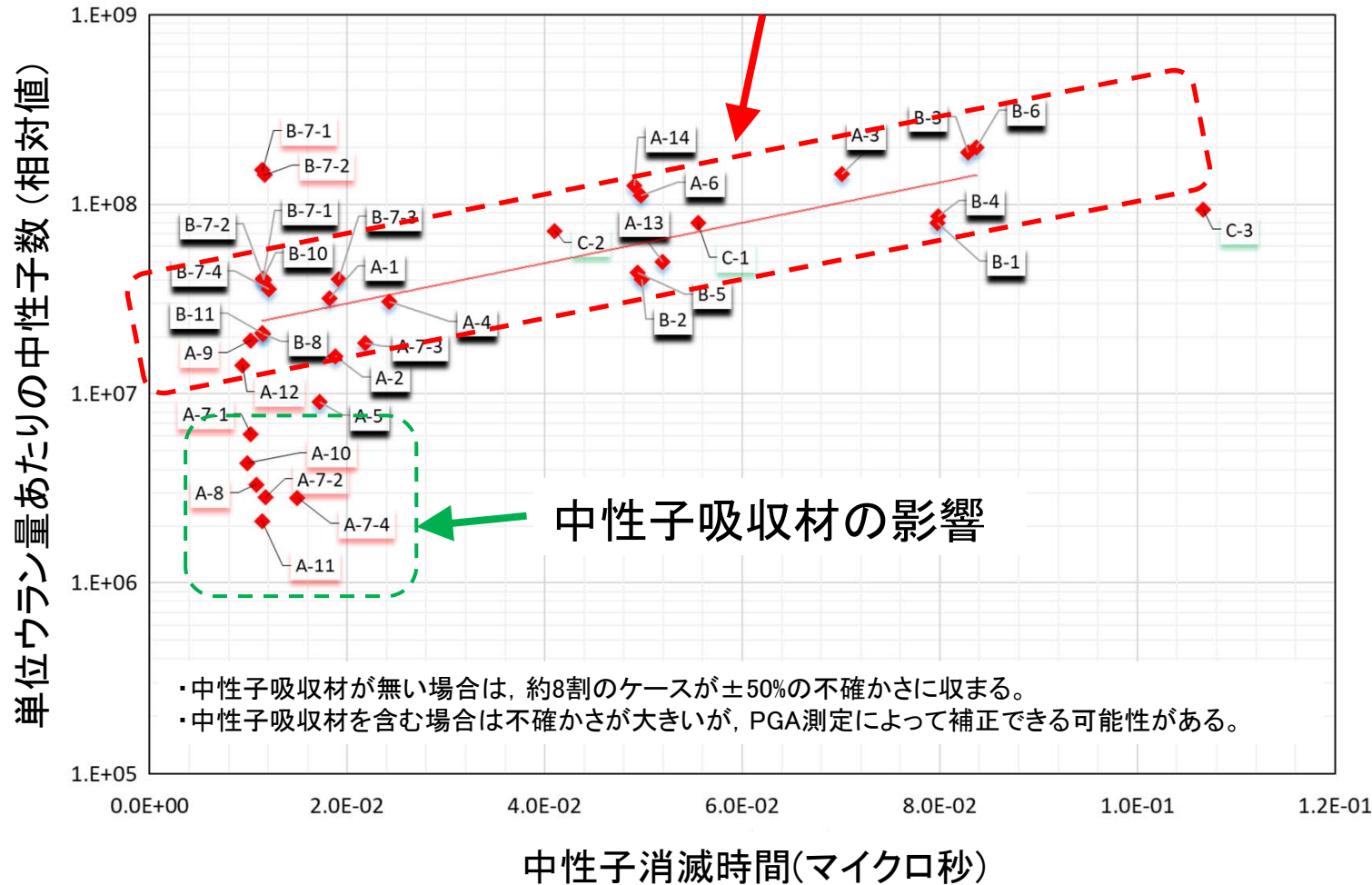


図 装置例

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.190

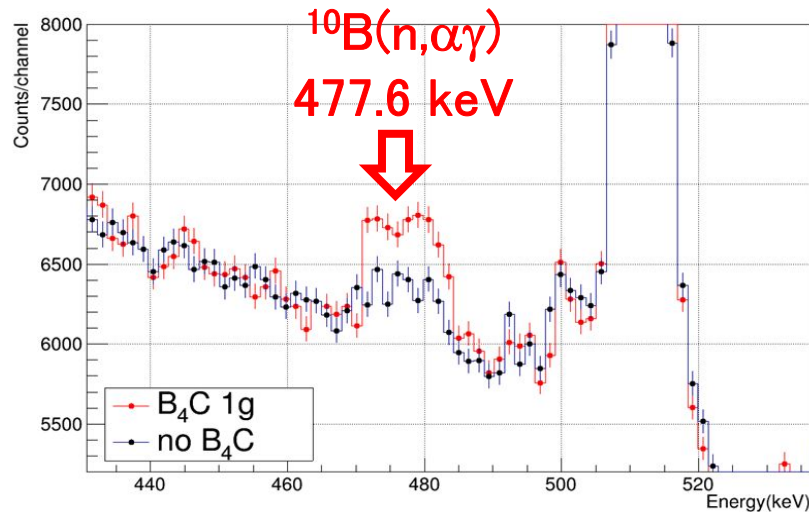
①-3 アクティブ中性子法C(6/7)

FNDI法は測定試料の中身によらず、正確な測定が可能であるが、中性子吸収材(B, Gd)の影響を受けやすい。(非常に多く含まれる場合には計測できない)

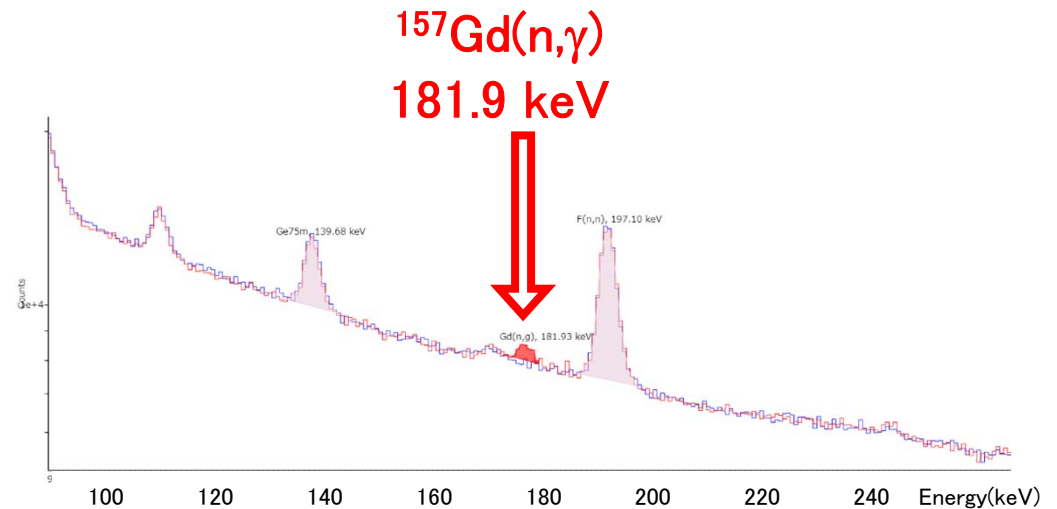
PGA法を導入することで中性子吸収材を計測し、FNDI法への影響を見積もることで、FNDI法の精度向上(仕分けの精度向上)が期待できる。

PGA法による測定結果の一例

・1gの B_4C を検知



・100gのGdを検知



FNDI法とPGA法を実施できるNDA装置において、中性子吸収材が検知できることを確認

①-3 アクティブ中性子法C(7/7)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

- 1) FNDI法における中性子消滅時間と単位ウラン量当たりの核分裂中性子数との相関を取得
- 2) シミュレーション計算で得られた35ケースについて、中性子消滅時間を用いた補正によりU-235量を取得
- 3) 中性子照射による核反応で発生する中性子吸収材(B, Gd)からのガンマ線を測定

【成果/開発への寄与】

- 1) シミュレーション計算で得られた殆どのケースは、中性子消滅時間と単位ウラン量当たりの核分裂中性子との関係において、一直線上にあり、中性子消滅時間を用いた補正が可能であることを示唆している。一方、中性子吸収材が入った試料の一部は、中性子吸収材の影響によって直線にのっておらず、補正が有効に機能しない可能性がある。
- 2)
 - ・ U-235量を評価した結果、中性子吸収材が無い場合において、燃料デブリの種類や燃焼度の影響は顕著ではなく、約8割のケースが±50%の不確かさに収まる。
 - ・ 中性子吸収を含む場合、±50%程度の不確かさで定量出来ているケースもあるが、中性子吸収材を含まない場合に比べて不確かさが大きくなる傾向がある。(PGA法で得られる中性子吸収材の量を用いて補正できる可能性がある)
- 3) 中性子吸収材を用いたPGA法試験によって、1gの B_4C 及び100gのGdを検知することに成功した。

【課題と対応策】

- 1) 課題: 中性子吸収材を含まないケースは多くの場合において不確かさの小さい評価値が得られると示唆されたが、中性子吸収材を含むケースは含まないケースに比べて不確かさが大きくなる傾向にあることが分かった。

対応策: 核燃料物質使用施設とアクティブ中性子法用の試験装置を用いて試料の多様性(特に中性子吸収材)を模擬した要素技術確認試験を行うことで多様性の影響低減効果を実験的に検証するとともに、影響低減法の高度化を試みる。

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

(②-1 パッシブ中性子法A)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
②-1	パッシブ中性子法 A	He-3	なし	なし	自発核分裂核種質量 (Cm-244など)	核分裂性核種質量	MHI	81-93 192-203
②-2	同 B	B-10	なし	なし	同上	同上	日立GE	94-101 204-207

【特長】

- 検出器は、実績を重視してHe-3検出器を選定。

②-1 パッシブ中性子法A(1/11)

評価方法概要:

自発核分裂核種を含む燃料デブリから常時放出される中性子の計測結果から核物質質量を推定評価する。

計測法	説明
パッシブ 中性子法A	自発核分裂核種(Cm-244)から放出される中性子の計数率とCm-244重量設定値の相関関数によりCm-244重量を評価し、平均燃焼度※を仮定してU-235重量およびU重量を評価する。

* 平均燃焼度…23.0GWd/t

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

②-1 パッシブ中性子法A(2/11)

溶融デブリの評価対象ケース

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子吸収材	FP放出率*1	冷却期間	偏在	容器	
	デブリ性状	充填率内								充填率外
		組成	合計(充填率)							
A-1	溶融デブリ	UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-2		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-3		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-4		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-5		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-6		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶

*1「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

②-1 パッシブ中性子法A(3/11)

MCCIデブリの評価対象ケース

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子吸収材	FP放出率*1	冷却期間	偏在	容器	
	デブリ性状	充填率内								充填率外
		組成	合計(充填率)							
B-1	MCCI デブリ	UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 20.7vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-2				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-3				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-4		UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 50.7vol%	60 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-5				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-6				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶

*1「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

②-1 パッシブ中性子法A(4/11)

金属デブリの評価対象ケース

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子吸収材	FP放出率*1	冷却期間	偏在	容器*2	
	デブリ性状	充填率内								充填率外
		組成	合計(充填率)							
C-1	金属デブリ	UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 29.85 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器(内容器)
C-2		UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 44.85 vol%	45 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器(内容器)
C-3		UO ₂ : 0.48vol% ZrO ₂ : 0vol% SUS: 10 vol%	10.48 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器(内容器)

*1 「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

*2 SUSが主であり、取り出しの初期段階で内容器に仕分けられることを想定

*3 各ケースの概要は以下のとおり

C-1: ベースケース

C-2: SUS組成に対する感度ケース

C-3: 未臨界担保の観点より、UO₂を3.7kg相当の体積割合とした感度ケース

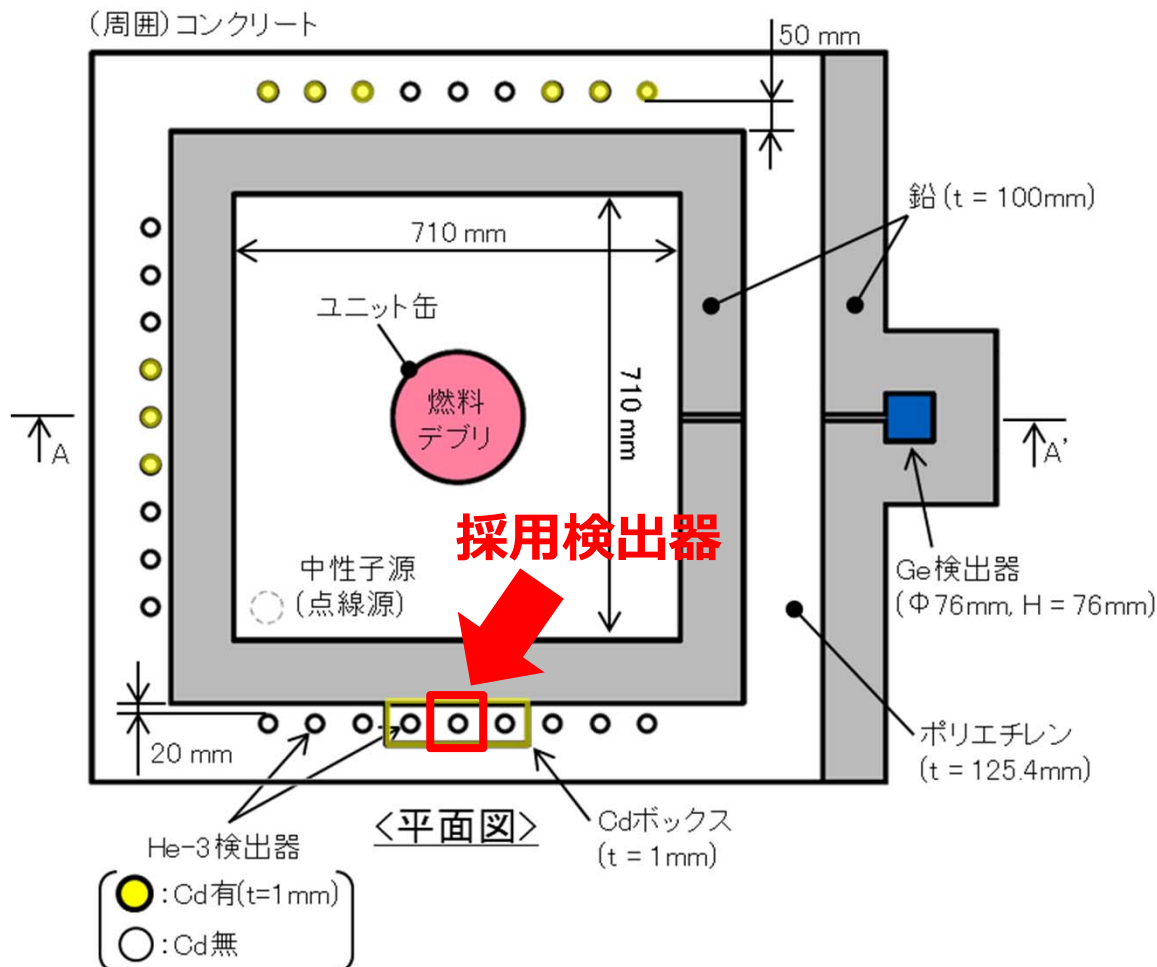
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.197

②-1 パッシブ中性子法A(5/11)

採用検出器:

アクティブ中性子法Aと共通の Cdボックス中のHe-3検出器を採用



[解析条件]

・時間分解能は $10 \mu s$

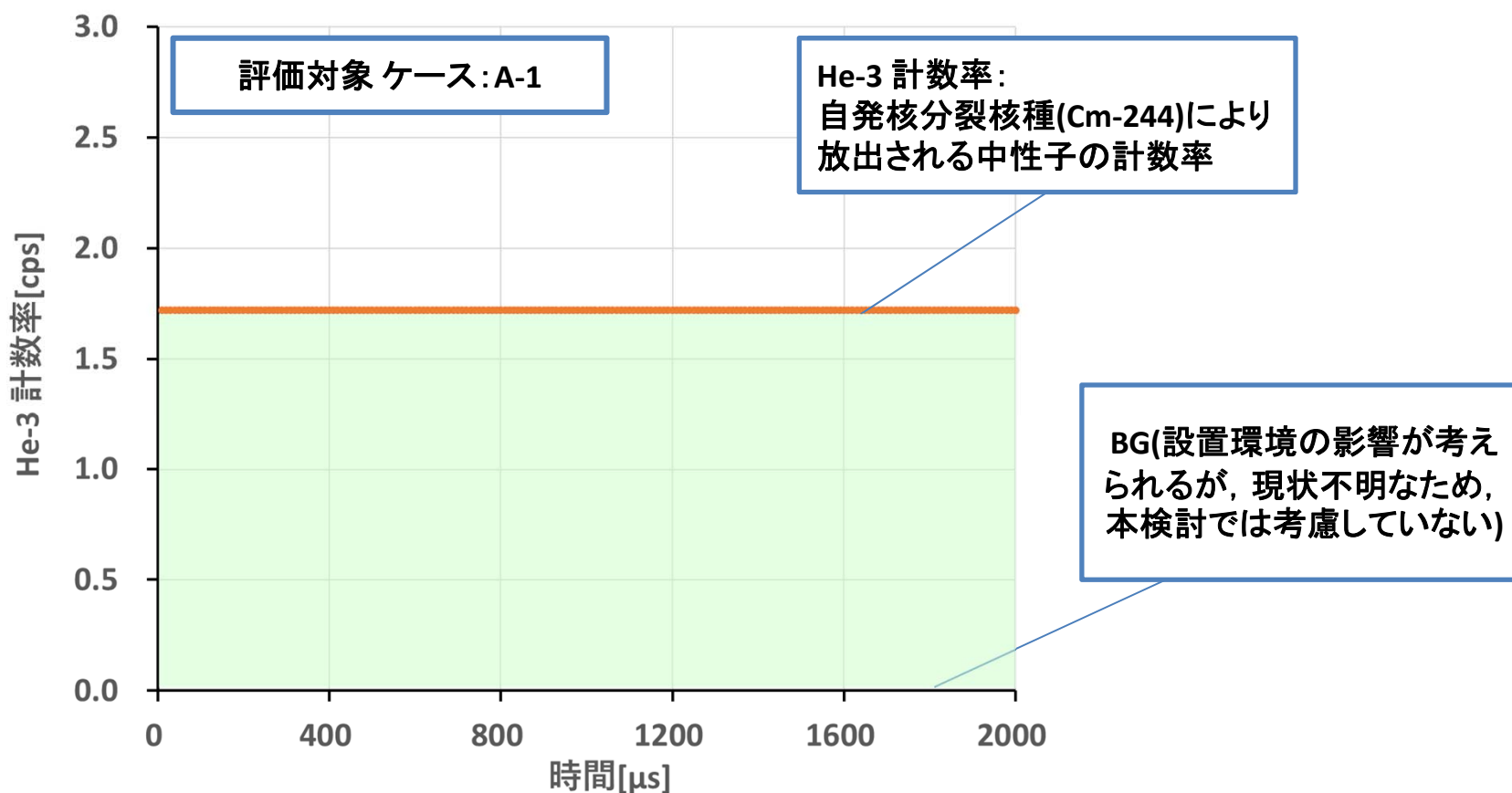
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.198

②-1 パッシブ中性子法A(6/11)

概要:

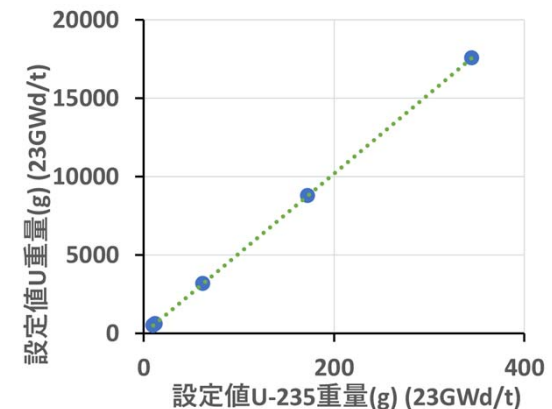
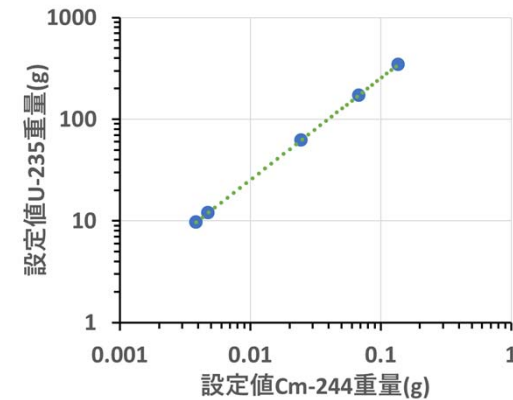
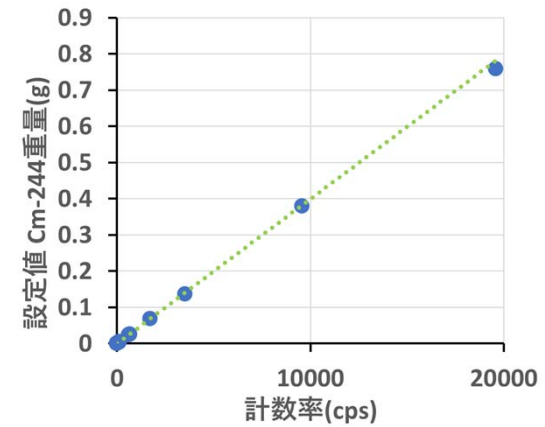
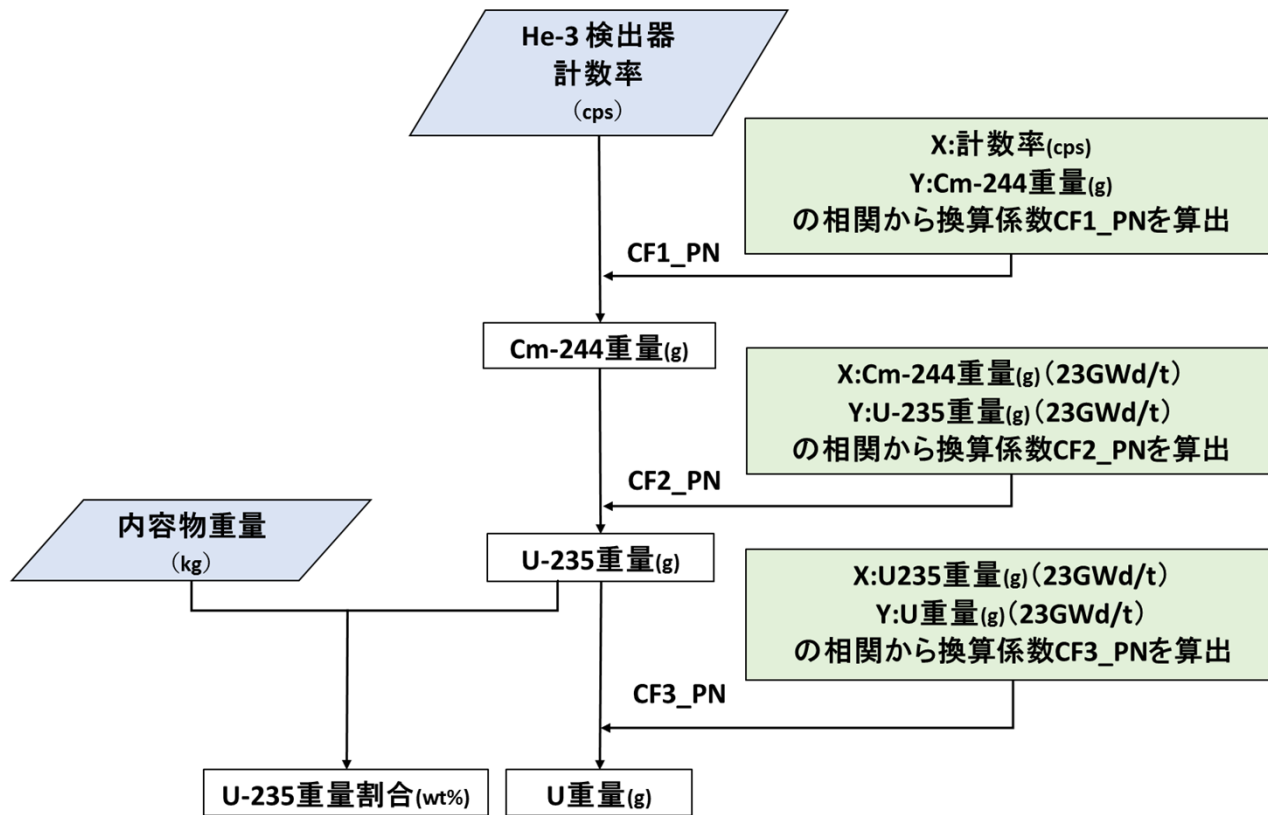
自発核分裂核種(Cm-244)により放出される中性子の計数率とU-235重量設定値の相関関数により、核物質量を推定評価。



4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

②-1 パッシブ中性子法A(7/11)

推定評価フロー：
パッシブ中性子法A単独による核物質質量の推定評価フローを作成。

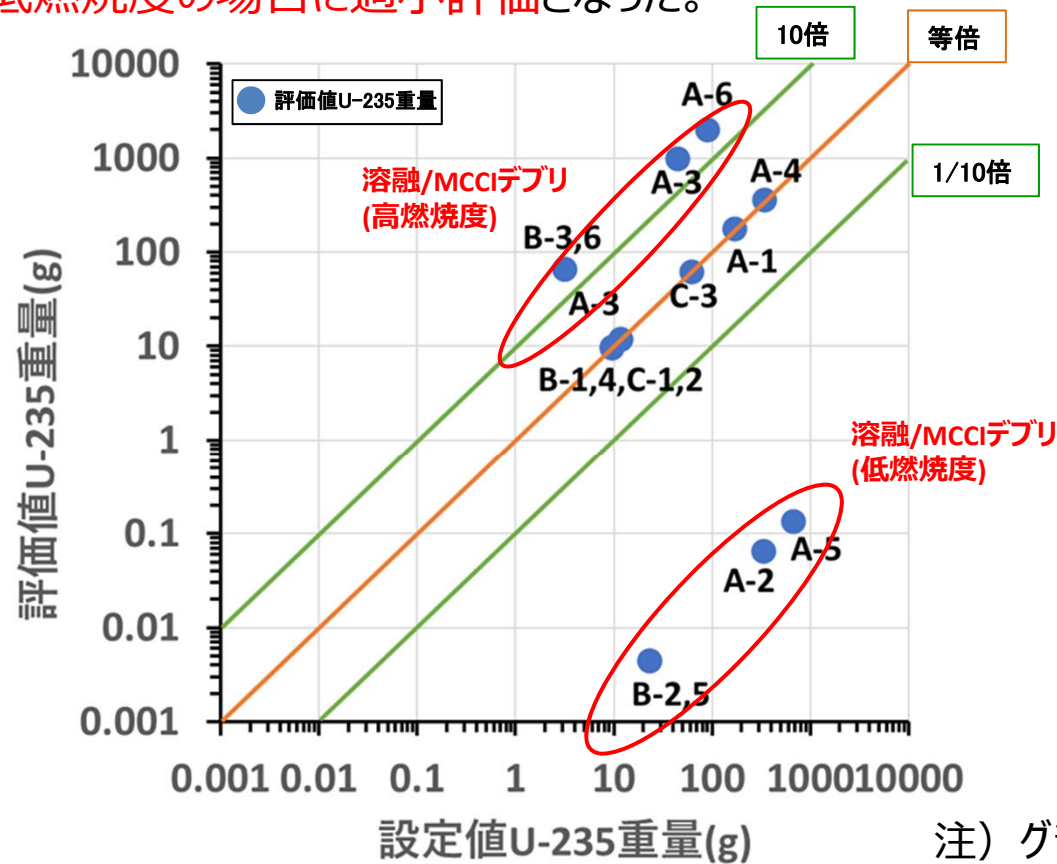


本検討ではBGを考慮していない, 検出限界値は評価対象外。

②-1 パッシブ中性子法A(8/11)

評価結果_U-235重量(g)

- ・今回設定したケースでは、U-235評価値はU-235設定値と比較し、高燃焼度および低燃焼度の場合に、評価値は設定値から大きく外れた値を示した。
- ・Cm-244重量からU-235重量の評価に平均的な燃焼度を用いているため、**高燃焼度の場合に過大評価となり、低燃焼度の場合に過小評価**となった。

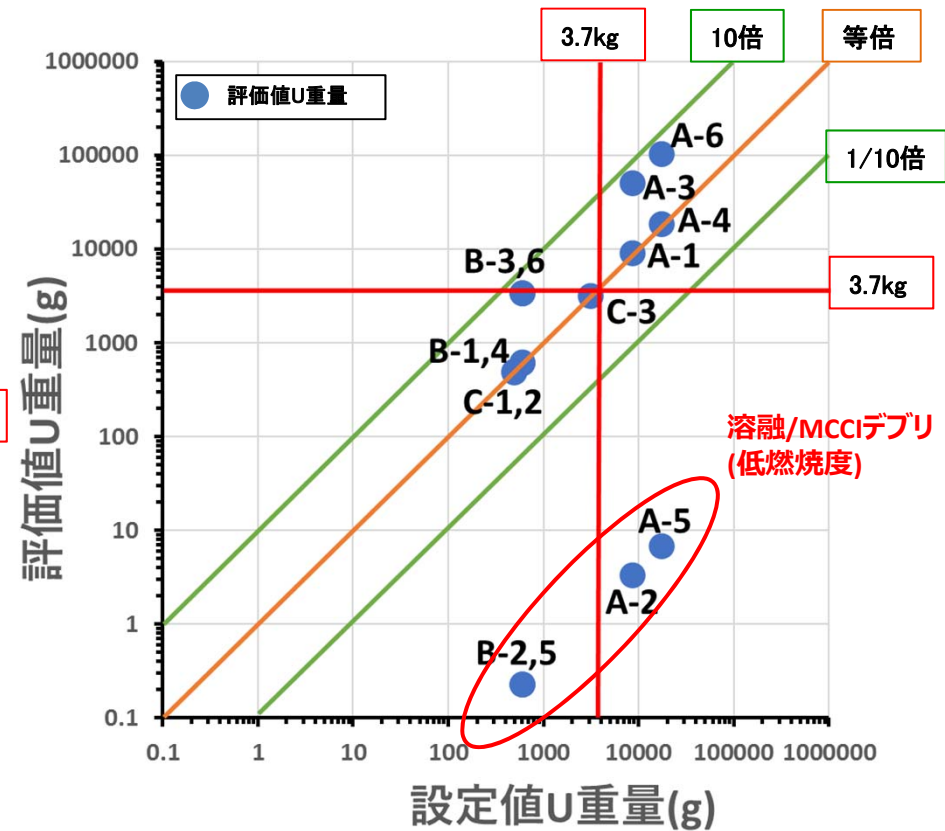
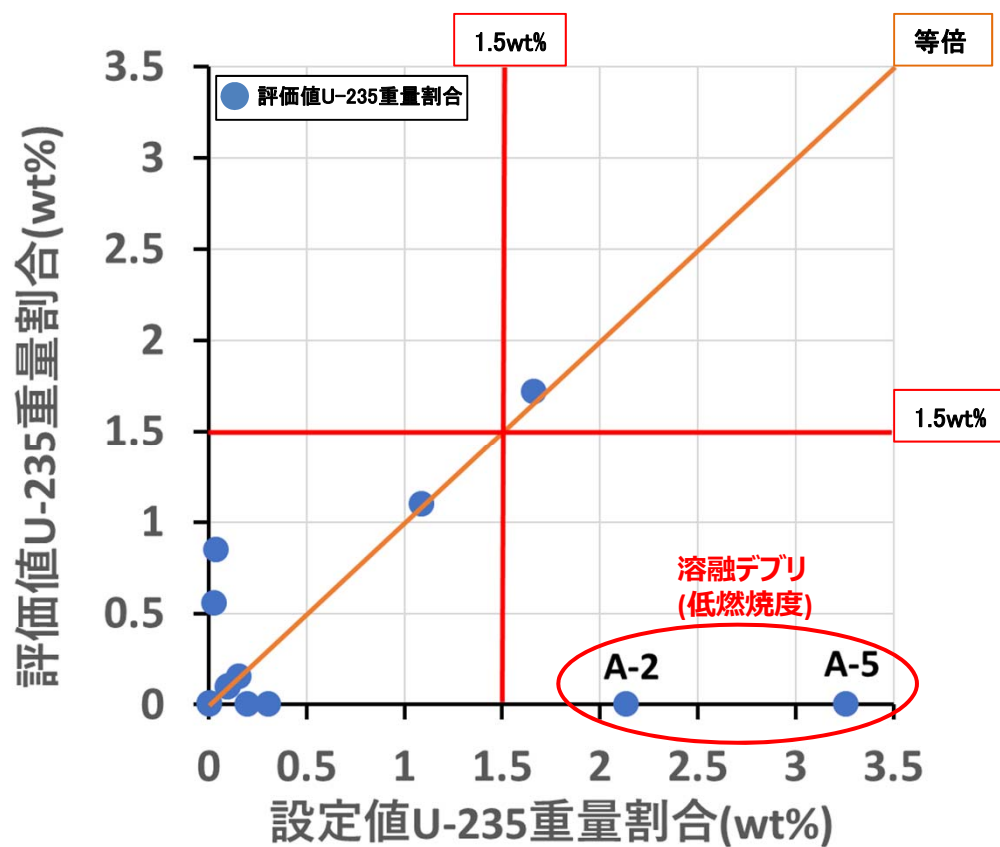


4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

②-1 パッシブ中性子法A(9/11)

評価結果_U-235重量割合(wt%)およびU量(g)

・U-235重量からU重量の評価に平均的な燃焼度を用いているため、**低燃焼度の場合に過小評価**となった。

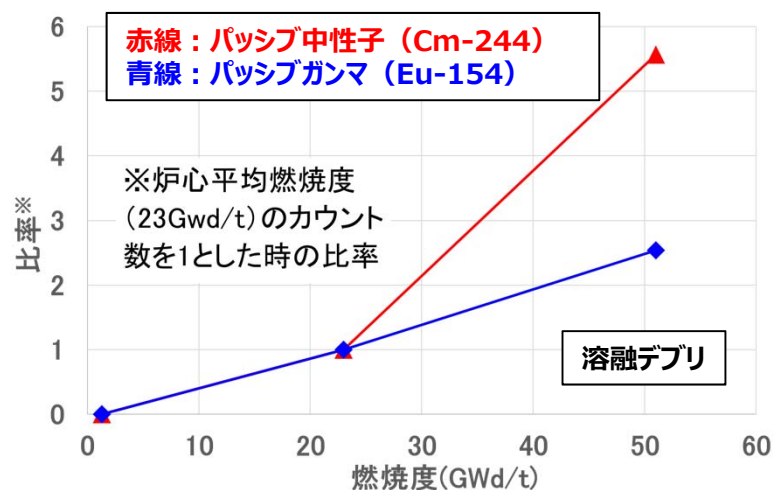


注) グラフ軸は対数目盛表示

②-1 パッシブ中性子法A(10/11)

性能向上方策案

- ・ 燃焼度とCm-244およびEu-154計数率の相関関数の差異による燃焼度の影響補正 (No.178同様)
(パッシブ中性子法 + パッシブガンマ線法)



Cm-244およびEu-154計数率の比から燃焼度の影響を補正できる可能性を示唆

②-1 パッシブ中性子法A(11/11)

＜まとめと今後の課題＞

【実施内容】

- 1) パッシブ中性子法の評価フローを検討
- 2) 核燃料物質質量などの評価精度を検討

【成果/開発への寄与】

- 1) パッシブ中性子法の評価フローを設定
- 2) 検出器応答解析データを用いて核燃料物質質量などの評価精度を試算
 - ・U-235重量 :最大で数100～数1000倍(溶融デブリ/MCCIデブリ, 低燃焼度(1.3GWd/t))
 - ・U-235重量割合:最大で数100～数1000倍(溶融デブリ/MCCIデブリ, 低燃焼度(1.3GWd/t))
 - ・U重量 :最大で数100～数1000倍(溶融デブリ/MCCIデブリ, 低燃焼度(1.3GWd/t))

【課題と対応策】

- 1) 課題: 燃焼度による誤差低減
対応策: Cm-244とEu-154の比による補正方法の詳細検討
Cm-244とEu-154のUとの帯同性説明ロジック構築も必要
- 3) 課題: その他燃料デブリの多様性の影響確認
対応策: 不均一体系を含む収納物条件に対するパラメータスタディの拡充

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

(②-2 パッシブ中性子法B)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
②-1	パッシブ中性子法 A	He-3	なし	なし	自発核分裂核種質量 (Cm-244など)	核分裂性核種質量	MHI	81-93 192-203
②-2	同 B	B-10	なし	なし	同上	同上	日立GE	94-101 204-207

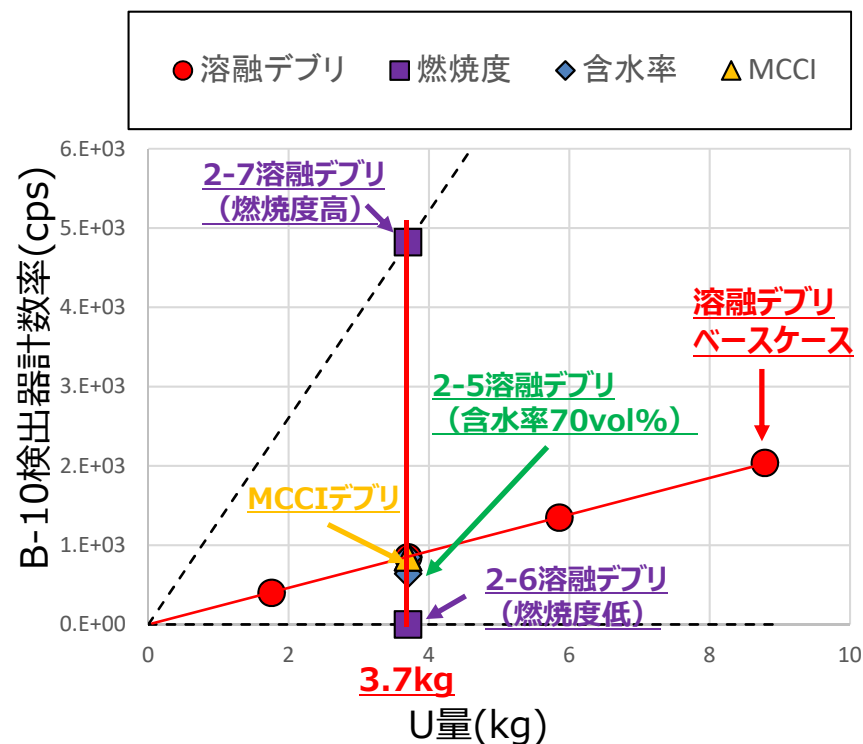
【特長】

- 検出器は、高ガンマ線場への対応を重視して、B-10検出器を選定。

②-2 パッシブ中性子法B(1/3)

＜核燃料物質評価の課題＞

- 1) 燃焼度影響が大きく燃焼度補正が必須
- 2) 含水率の影響は数割程度であり, 精度向上(定量評価)のために補正が必要



4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

②-2 パッシブ中性子法B(2/3)

計測技術の略称
・AN: アクティブ中性子法
・PN: パッシブ中性子法
・CT: X線CT法
・PG: パッシブガンマ線法

中性子計数率測定

AN PG CT

PG/PN法による燃焼度推定

- ・Eu-154量/Cm-244量と燃焼度の相関(図1)を利用し燃焼度推定
- ・PGにおけるガンマ線減衰が課題(図2)
⇒ CTによりかさ密度などを計測し、ガンマ線減衰率補正を実施(詳細検討要)

図1 Eu/Cm(重量比)の燃焼度依存性

図2 Eu/Cm(計数率比)の燃焼度依存性

燃焼度影響の補正

その他【含水率】補正

U重量評価

AN/PN法による含水率推定

- ・相反する特性
「AN: 含水率増加で計数率増加」
「PN: 含水率増加で計数率減少」
を利用し、U重量(含水率)を推定

ANおよびPNにおいて、特定の計数率時のU量の含水率依存性イメージ図

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

②-2 パッシブ中性子法B(3/3)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

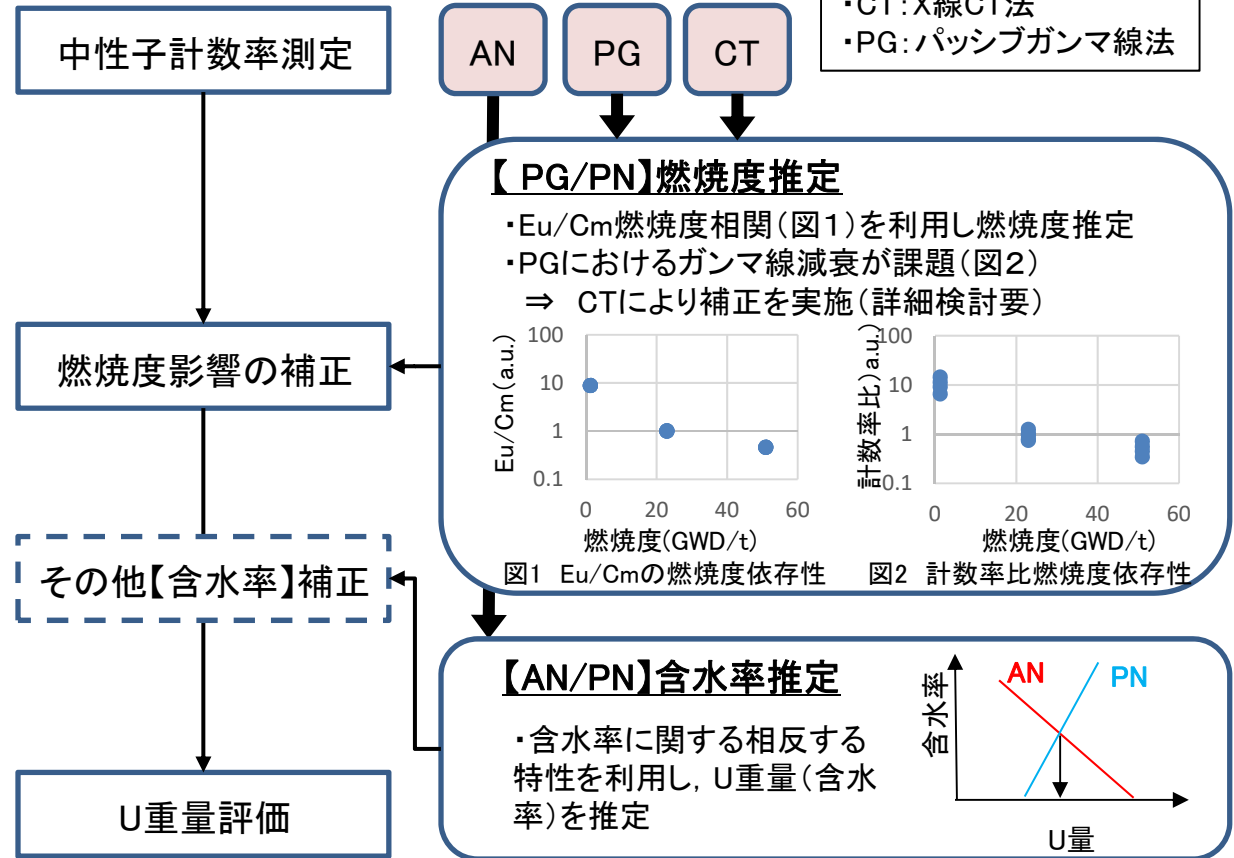
1)パッシブ中性子法Bの検出器応答解析
結果をもとに評価手法を検討

【成果/開発への寄与】

- 1) 評価手法検討結果を以下に記す
- ・AN, PG法, さらにはCT法などを総合的に組みこんだ核燃料物質評価手法案を考案
 - ・燃焼度補正はEu量(PG)とCm量(PN)の比と燃焼度の特性にCT補正, 含水率補正はANとPNで相反する含水率特性などの利用が有効

【課題と対応策】

- 1) 課題: 燃焼度補正および含水率補正方法の有効性確認
- 対応策: 燃焼度補正にはPG/PNIによる方法など, および含水率補正にはAN/PNIによる方法などのシミュレーションなどによる評価



計測技術の略称

- ・AN: アクティブ中性子法
- ・PN: パッシブ中性子法
- ・CT: X線CT法
- ・PG: パッシブガンマ線法

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

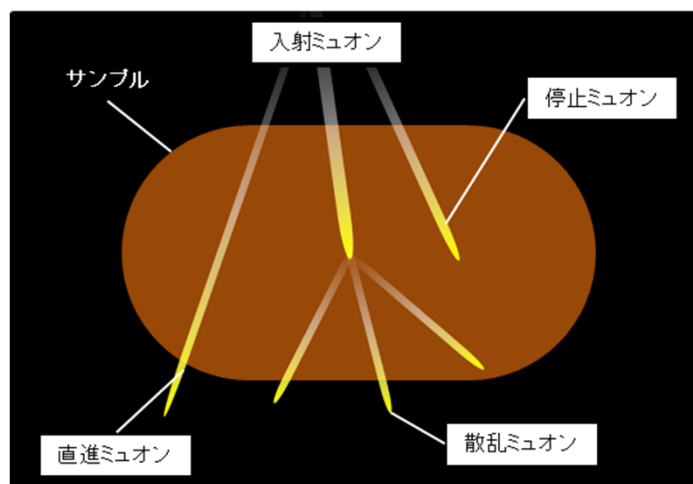
(③ ミュオン散乱法)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
③	ミュオン散乱法	ミュオン軌跡検出器	なし	なし	原子量	核分裂性核種質量	東芝ESS	102-116 208-214

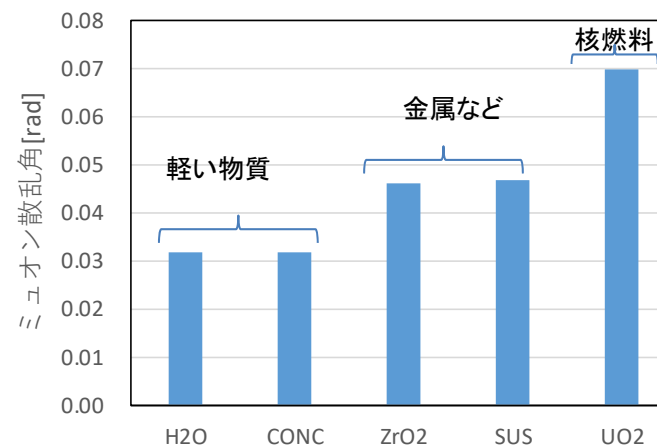
③ ミュオン散乱法(1/6)

(1) 評価手法の設定

- 物質ごとに異なるミュオン計測値から燃料デブリ中の核燃料重量を評価する手法を検討
 - 物質中のミュオンの挙動
 - ミュオン直進率 : 物質を通過するミュオンの割合
 - ミュオン散乱率 : 物質中で散乱されるミュオンの割合
 - ミュオン停止率 : 物質中で停止するミュオンの割合
 - ミュオン散乱スペクトル : 物質中で散乱したミュオンの散乱角の頻度分布



主要なミュオンイベントの整理

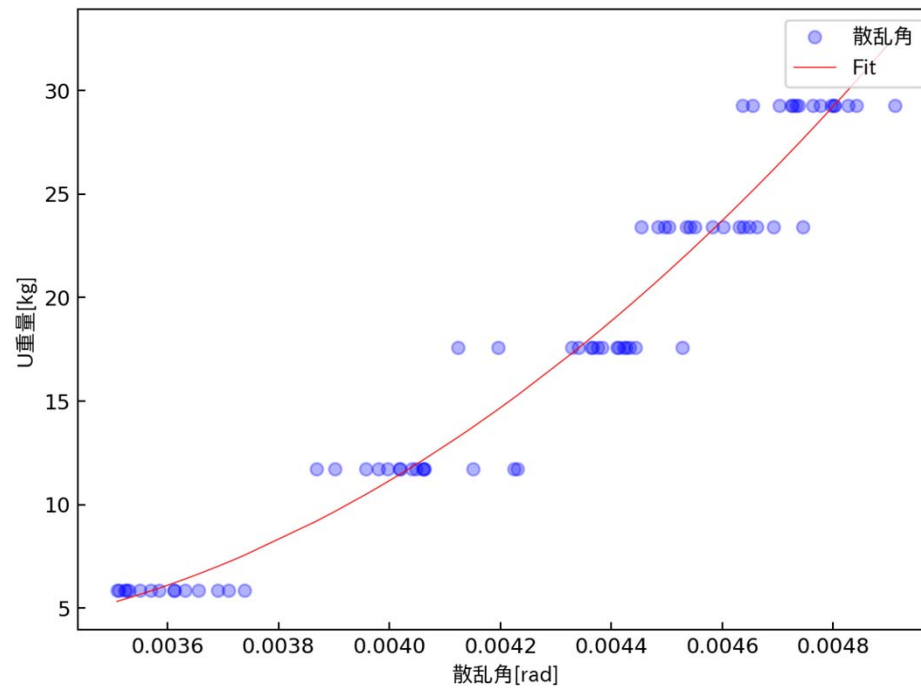


物質ごとの平均ミュオン散乱の比較

③ ミュオン散乱法(2/6)

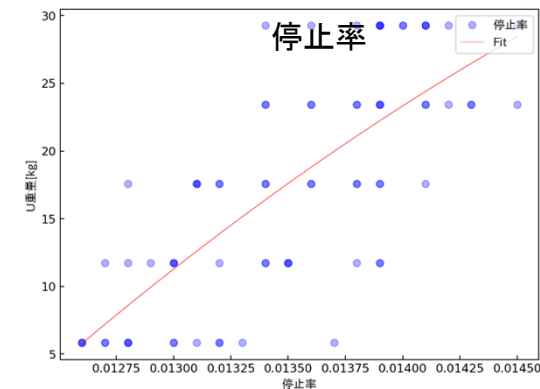
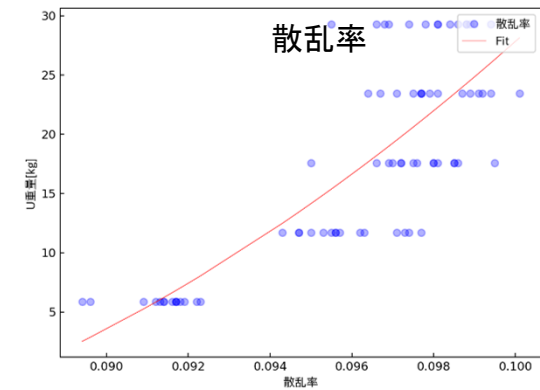
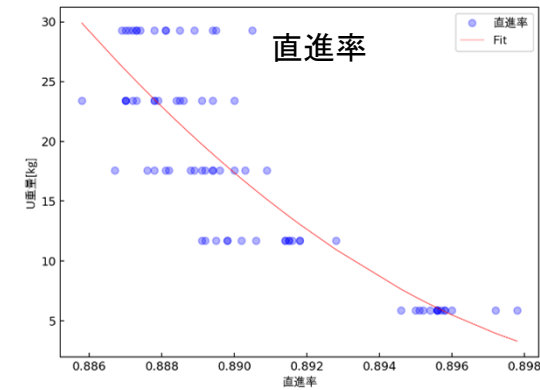
(1) 評価手法の設定

- ウランリッチ条件を基準に計測値と核物質質量との対応を関数化
- 各関数からU重量を推定する方法を検討



ウランリッチ条件でのミュオン散乱角に対するU重量

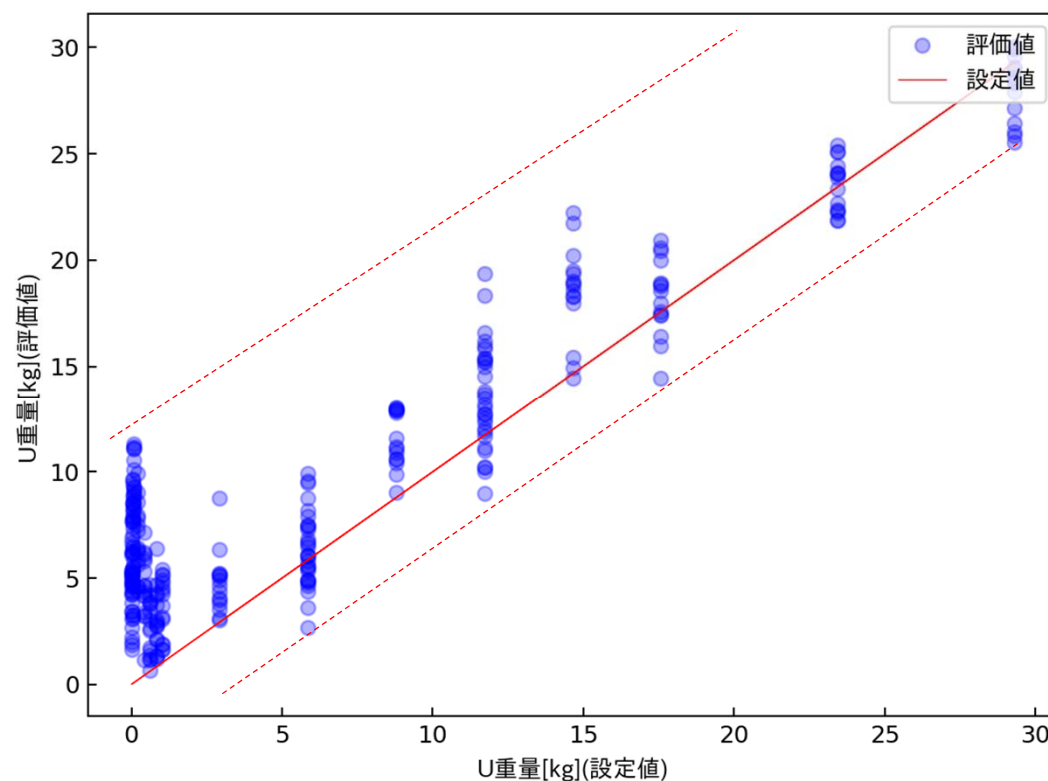
- ミュオン散乱角に対するU重量は明確な相関を持ち2次式で近似可能
- 直進率・散乱率・停止率はゆるやかな相関関係を持つ



③ ミュオン散乱法(3/6)

(2) 評価結果

- ウランリッチ条件から作成した**評価関数による燃料デブリ中のU重量推定**
 - ウランリッチ(UO_2 :100%)条件を想定した関数のため、**比較的安全側の予測**となる
→測定結果から燃料デブリ中に含まれ得るU重量の下限値が推定できる可能性



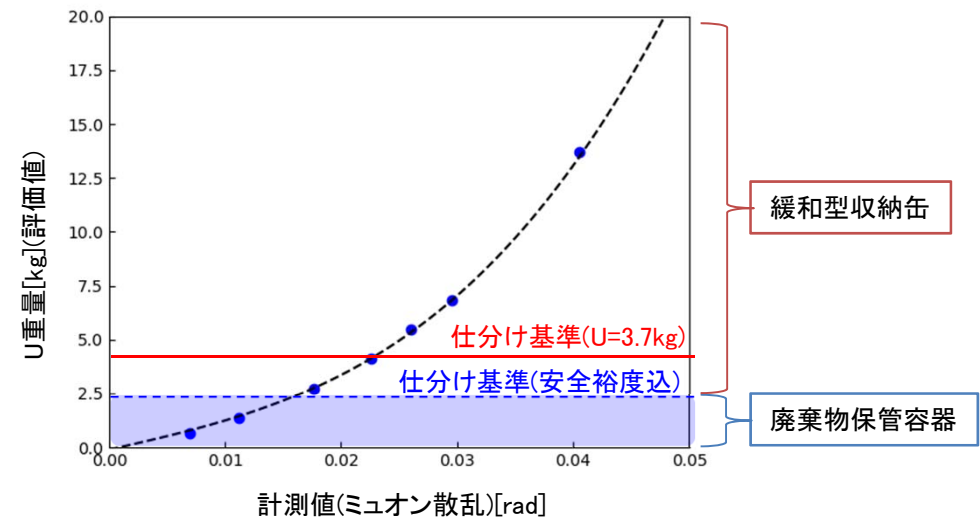
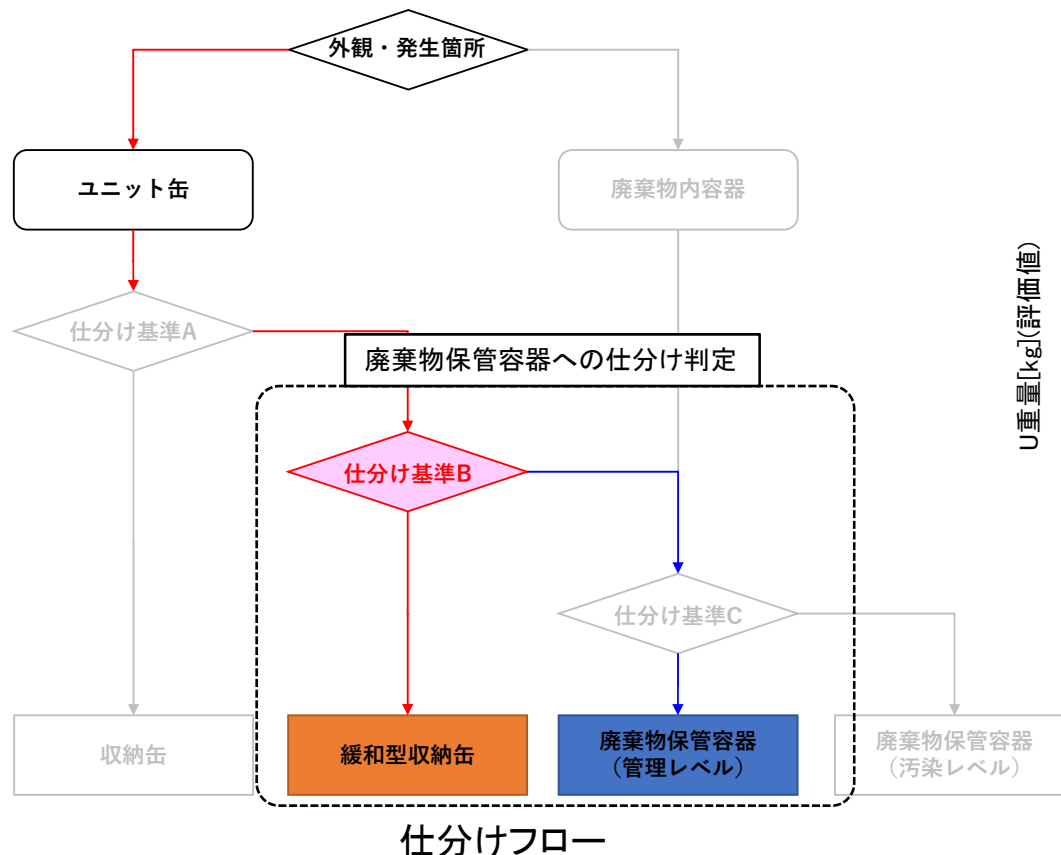
評価関数によるU重量の推定結果

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

③ ミュオン散乱法(4/6)

(3) 燃料デブリ仕分けへの適用条件検討

- 廃棄物保管容器への仕分け可否判定
 - 目標値:U含有量3.7kg未満
 - U重量と計測値の対応からU含有量を評価



U重量評価値による仕分けイメージ

- 誤差を考慮した仕分け基準を下回る場合に廃棄物保管容器へ収納可能と判定

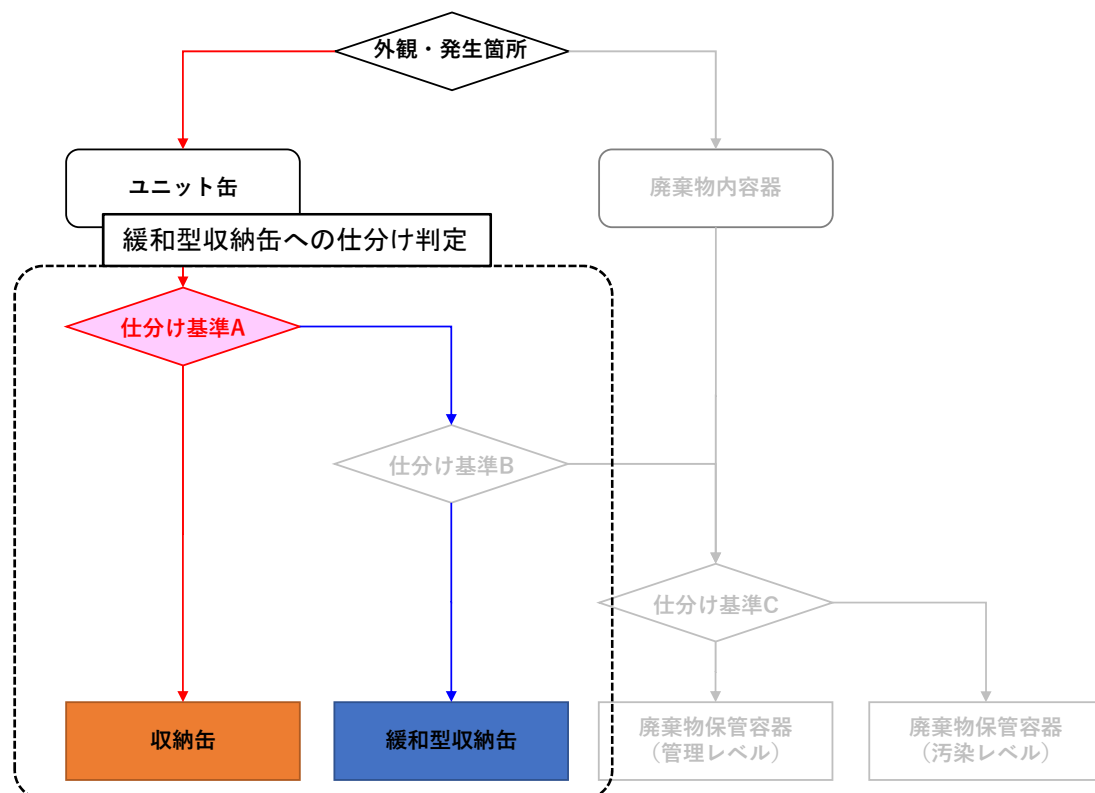
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.213

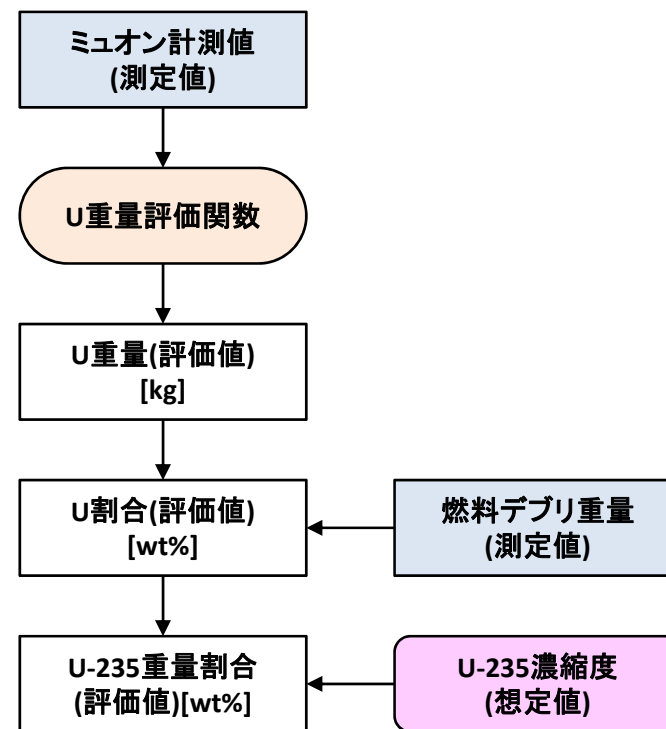
③ ミュオン散乱法(5/6)

(3) 燃料デブリ仕分けへの適用条件検討

- 緩和型収納缶への仕分け可否判定
 - 目標値:U-235含有割合1.5wt%未満(緩和型収納缶)
 - 燃料デブリ重量およびU重量からU含有率を判定
 - **U-235含有割合を推定**することで仕分け基準値との比較が可能



仕分けフロー(廃棄物保管容器への仕分け条件)



U-235重量割合の評価フロー

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

③ ミュオン散乱法(6/6)

＜まとめと今後の課題＞

【実施内容】

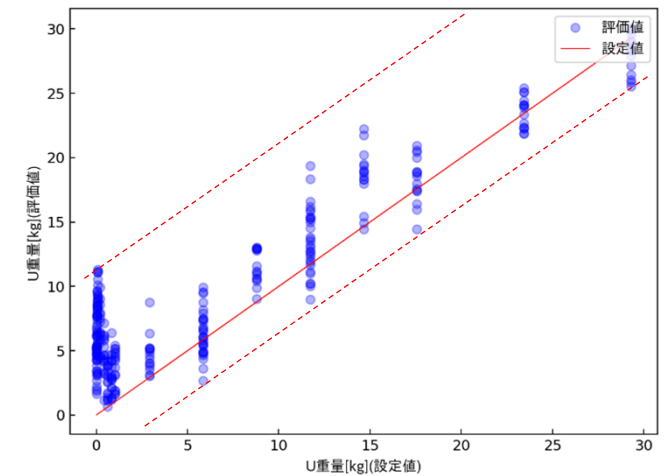
- 1) ウランリッチ条件をもとにミュオン計測値から燃料デブリ中のU重量を推定する評価関数を作成
- 2) 溶融デブリ, MCCI, 金属デブリに対して評価関数を適用しU重量を推定
- 3) 評価関数によるデブリ仕分けへの適用条件の検討

【成果/開発への寄与】

- 1) 評価関数のU重量推定精度評価
 - ・ 約10kgのばらつきでU重量を推定
 - ・ 安全裕度を設定することで燃料デブリ仕分けに応用できる可能性を確認
- 2) 他の計測結果との組み合わせによる仕分け判定手法の検討
 - ・ 燃料デブリ重量の計測値とU重量の推定値からU-235割合を評価

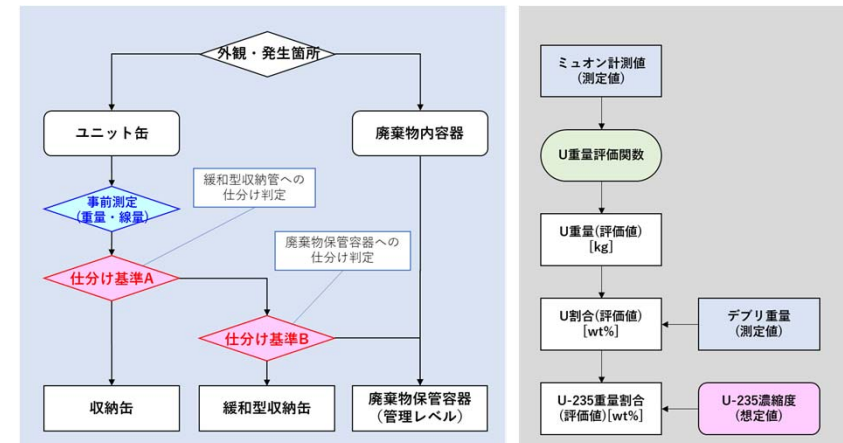
【課題と対応策】

- 1) 課題: 評価関数の誤差低減
対応策: 解析ケースの増加による評価関数の詳細化
対応策: 燃料デブリ重量などの基礎情報との組み合わせによる精度向上
- 2) 課題: 実測での評価方法の適用性検討
対応策: 既知組成のサンプルを利用した物質重量推定試験の実施



U重量の設定値と評価値

- ・ 計測値からU重量を評価する関数を作成
- ・ 評価関数の適用によるU重量の概算



仕分けシナリオへの適用

U-235含有割合の評価

- ・ 収納缶または廃棄物収納容器への収納判定への適用
- ・ U含有量およびU-235含有割合の評価

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

(④ X線CT法)

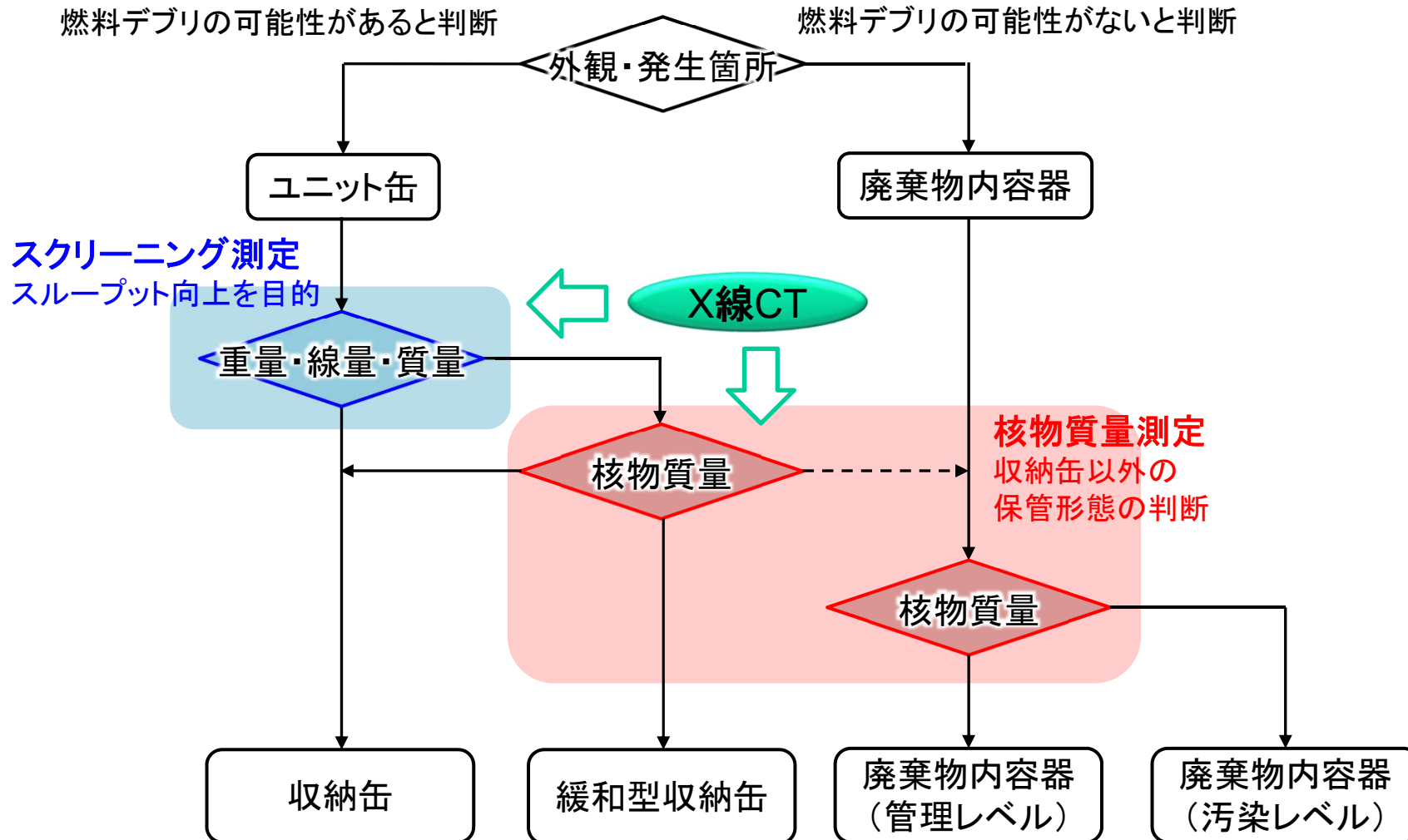
No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
④	X線CT法	X線検出器	加速器X線源	側方から	密度	核分裂性核種質量	日立GE	117-127 215-220

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.216

④ X線CT法(1/5)

＜評価フロー内の位置づけ＞ スクリーニング測定と核物質質量測定への適用を想定



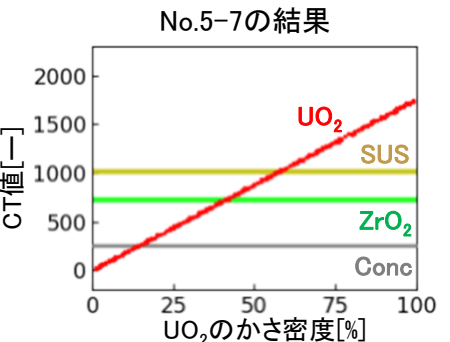
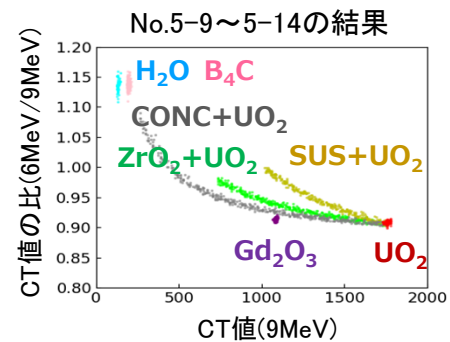
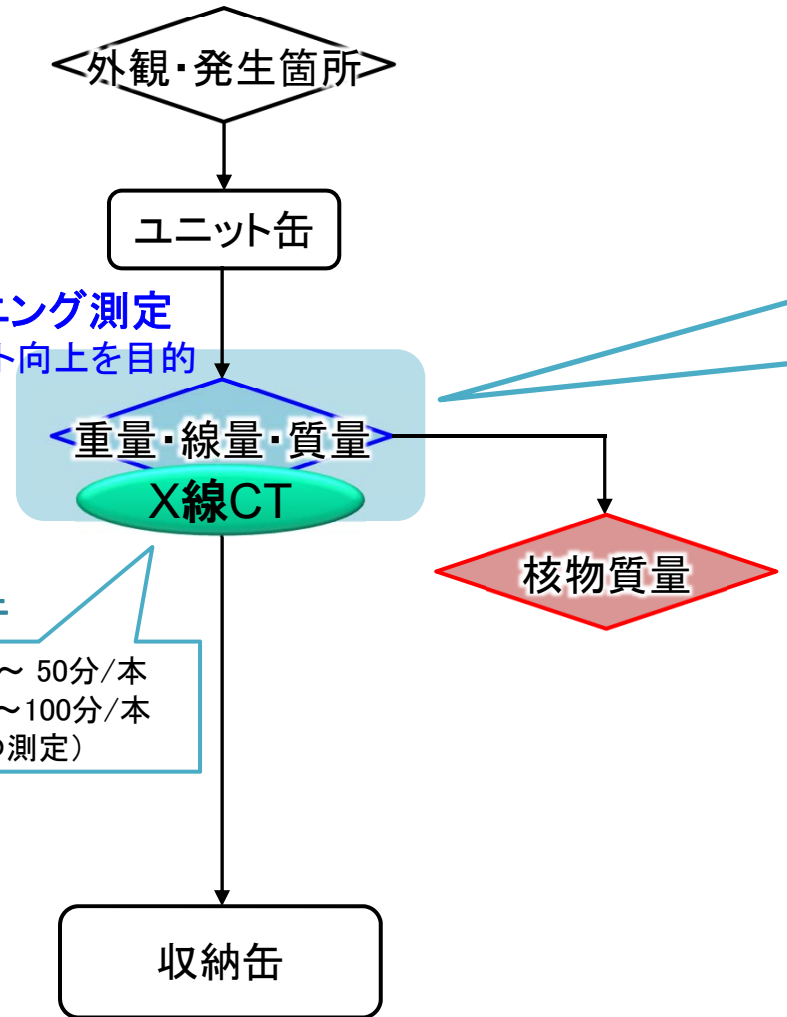
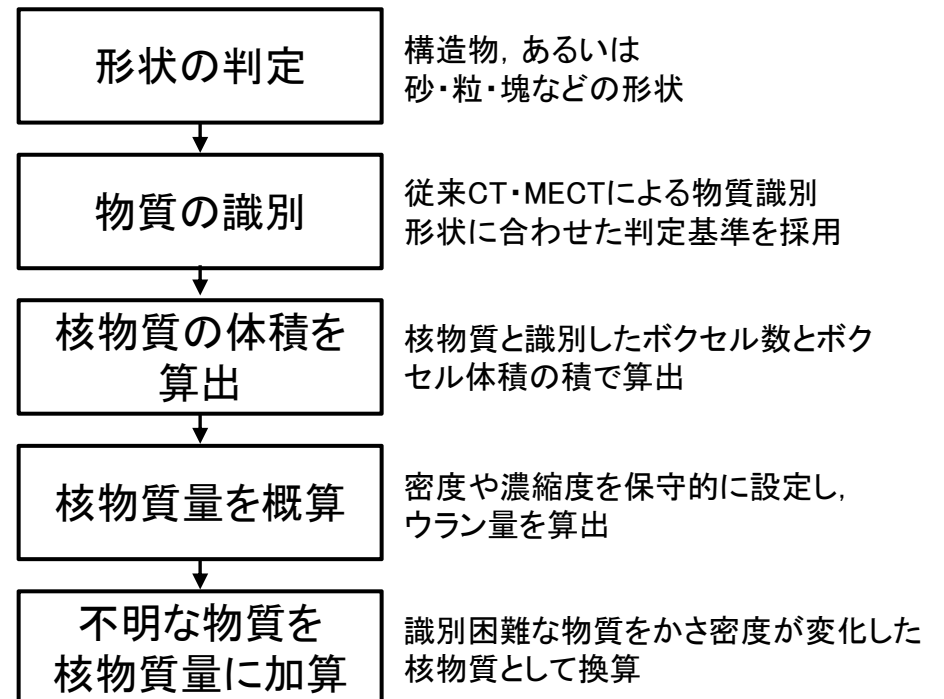
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

④ X線CT法(2/5)

<スクリーニング測定の場合>

X線CT単体で、核物質量を保守的に概算

測定方法



4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

④ X線CT法(3/5)

<核物質質量測定の場合>

X線CTと他測定を組み合わせ、核物質質量を評価

測定方法

X線CT+アクティブ中性子による高速な核物質質量測定

計測技術の組合せ検討

計測技術同士の補完関係の検討表

計測技術(制約)	計測技術の補完情報
X線CT (核燃料サイズ)	・中性子吸収材に依らず核燃料を評価 ・ 中性子吸収材量を評価し、補正に適用
アクティブ中性子 (中性子吸収材)	・核燃料サイズに依らず核燃料を評価可

中性子吸収材量の評価方法を検討

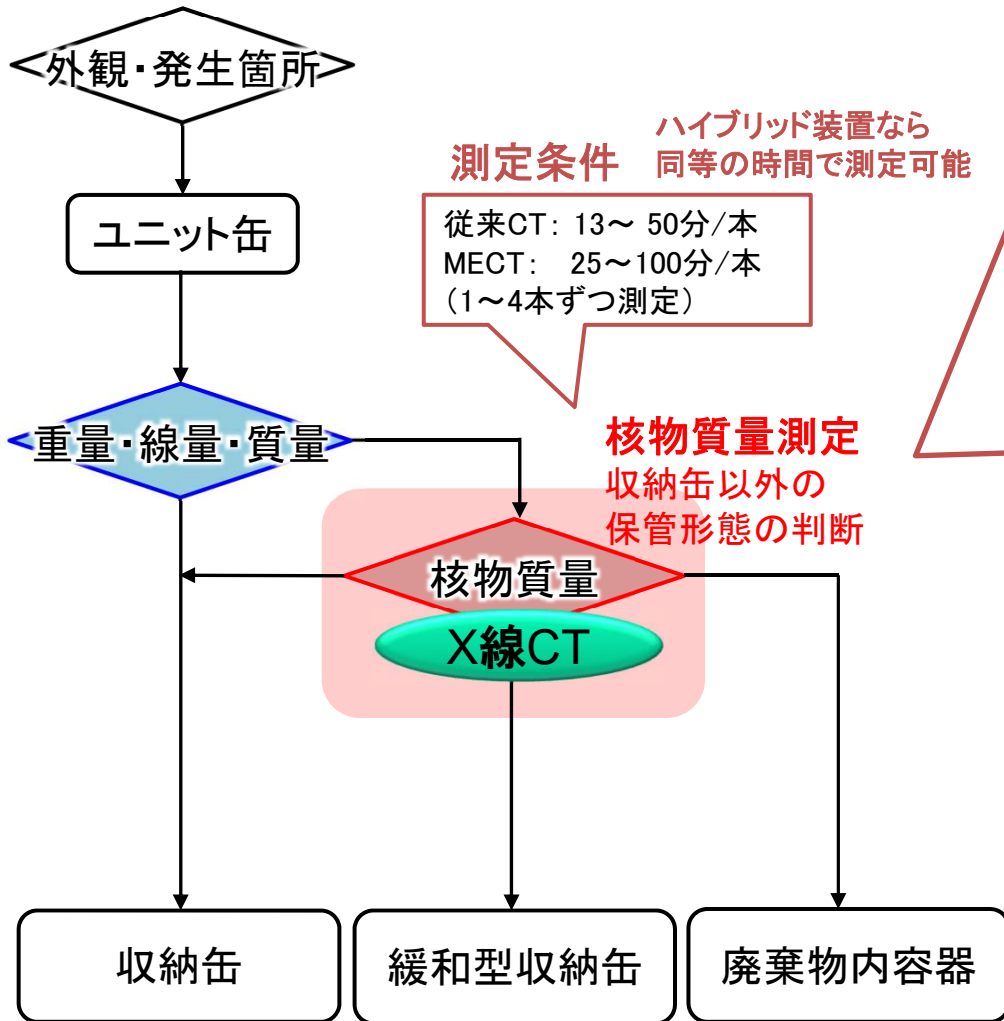
1) 燃料中に含有される中性子吸収材
X線CTにより核燃料と識別された物質に対し、**実機の核燃料中に含まれる最大のGd含有率**を与えて概算

2) 非溶解性中性子吸収材^[1,2]

候補材	物質の状態	密度[g/cm ³]	サイズ
B・Gd入りガラス材	固体	3.3~4.4	1mm程度
Gd ₂ O ₃ 粒子		4.3	0.5mm程度
水ガラス/Gd ₂ O ₃ 造粒粉材	固化体	2.1	-

3) 溶解性中性子吸収材(例:ホウ酸水)
X線CTにより水と識別した物質に対し、**ホウ酸水のB含有率**を与えて概算

水ガラス/Gd₂O₃造粒粉材のイメージ



4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.219

④ X線CT法(4/5)

<核物質質量測定における組合せ検討の詳細>

核物質質量測定におけるX線CTと他計測技術の組合せ例

	測定量	核燃料物質質量の過大/過小評価の要因 (核物質質量測定は、R3補助事業の検討から整理)	X線CTによる補正方法
スクリーニング測定	重量	・核物質以外が混在	・核物質とそれ以外を識別
	温度	・熱源となる核物質が偏在	・物質の分布情報から補正
	線量	・FP放出率が低い ・金属を多く含有 ・物質が偏在	— ・金属含有量による補正 ・物質の分布情報から補正
核物質質量測定	パッシブガンマ線 (Eu-154)	・自己遮蔽が大きい場合 ・燃焼度が小さい場合 ・偏在する場合	・自己遮蔽係数の補正 — ・物質の分布情報から補正
	パッシブ中性子 (Cm-244)	・燃焼度が小さい場合 ・含水率が高い場合	— ・水分を検知して補正
	アクティブ中性子 (U-235,Pu-239)	・中性子吸収材が多い場合 ・偏在する場合	・中性子吸収材の補正 ・物質の分布情報から補正

➤ 今後、試験や解析などによる詳細検討を実施予定

④ X線CT法(5/5)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

- 1) X線単独技術による核燃料物質質量のと計測精度を評価
- 2) 複数の計測技術の組合せ評価手法における補正データを検討
- 3) アクティブ中性子法との組合せにおける中性子吸収材の評価手法を検討

【成果/開発への寄与】

- 1) 検出器応答解析より、核物質が他の物質と混ざり合わない場合、ユニット缶に充填した熔融デブリやMCCIデブリ、廃棄物容器に充填した金属デブリに対する**従来CTの計測精度は最大6%程度**となった。
- 2) 計測技術で影響度が高い項目のうち、**燃焼度やFP放出率以外の項目(中性子吸収材の含有量、水分、偏在、金属やコンクリート量、自己遮蔽効果)に対する補正データの候補**を整理した。
- 3) 中性子吸収材の種類別の評価手法として、燃料に含有される吸収材に対しては、X線CTにより**核燃料を検知**してGd含有率から換算、溶解性中性子吸収材に対してはX線CTにより**水を検知**してB含有率を与えて換算、非溶解性中性子吸収材に対してはX線CTにより**0.5~1.0mm粒径の吸収材を直接検知**する手法が適用できる見込みがあるとの検討結果を得た。

<以下、項目として整理>

- ・計測精度:最大6%(核燃料が他物質と混ざり合わない場合)
- ・影響因子:核物質のサイズ、かさ密度、他物質への混入
- ・他の計測技術に対する補正データ候補:中性子吸収材の含有量、水分、偏在、金属やコンクリート量、自己遮蔽効果

【課題と対応策】

- 1) 課題:X線CT法単独技術では、かさ密度が変化、あるいは他物質に混入した核燃料の識別性を検出器応答解析で確認したが、具体的な評価手法が未構築である。

対応策: **MECTによる核燃料物質質量の評価アルゴリズムを構築**し、多様な性状に対する核燃料物質の計測精度を評価する。

- 2) 課題:他の計測技術に対する補正データの具体的な提供方法が未検討である
(例:偏在の場合、何の物質に対してどのような情報を提供すればよいか不明瞭)。

対応策:他の計測技術に対する**補正データの具体的な提供方法や精度**を検討する。

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

(⑤-1 パッシブガンマ線法A)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
⑤-1	パッシブガンマ線法 A	Ge	なし	なし	核分裂生成核種質量 (Eu-154など)	核分裂性核種質量	MHI	128-140 221-233
⑤-2	同 B	CZT, LaBr ₃ など	なし	なし	同上	同上	日立GE	141-154 234-237

【特長】

- 検出器は、エネルギー分解能および実績を重視して、Ge検出器を選定。

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質量などの評価手法の検討

No.222

⑤-1 パッシブガンマ線法A(1/12)

評価方法概要:

燃料デブリから常時放出されるガンマ線の計測結果から、核物質量を推定評価する。

計測法	説明
パッシブ ガンマ線法A	核分裂生成物(Eu-154)から放出されるガンマ線の計数率とEu-154の相関関数によりEu-154重量を評価し、平均燃焼度※を仮定してU-235重量およびU重量を評価する。

* 平均燃焼度…23.0GWd/t

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.223

⑤-1 パッシブガンマ線法A(2/12)

溶融デブリの評価対象ケース

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子 吸収材	FP 放出率*1	冷却期間	偏在	容器	
	デブリ 性状	充填率内								充填率外
		組成	合計(充填率)							
A-1	溶融 デブリ	UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-2		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-3		UO ₂ : 15 vol% ZrO ₂ : 15 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-4		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-5		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
A-6		UO ₂ : 30 vol% ZrO ₂ : 0 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶

*1「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.224

⑤-1 パッシブガンマ線法A(3/12)

MCCIデブリの評価対象ケース

ケース No.	容器内組成			燃焼度	中性子 吸収材	FP 放出率*1	冷却期間	偏在	容器	
	デブリ 性状	充填率内								充填率外
		組成	合計(充填率)							
B-1	MCCI デブリ	UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 20.7vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-2				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-3				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-4		UO ₂ : 1.05vol% ZrO ₂ : 1.05vol% SUS: 7.2 vol% Conc: 50.7vol%	60 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-5				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	1.3GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶
B-6				H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	51GWd/t	なし	標準	20年	均一	ユニット缶

*1「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

⑤-1 パッシブガンマ線法A(4/12)

金属デブリの評価対象ケース

ケース No.	容器内組成			充填率外	燃焼度	中性子吸収材	FP放出率*1	冷却期間	偏在	容器*2
	デブリ性状	充填率内								
		組成	合計(充填率)							
C-1	金属デブリ	UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 29.85 vol%	30 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器(内容器)
C-2		UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 44.85 vol%	45 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器(内容器)
C-3		UO ₂ : 0.48vol% ZrO ₂ : 0vol% SUS: 10 vol%	10.48 vol%	H ₂ O(含水率): 1wt% Empty: 残り	23.0GWd/t	なし	標準	20年	均一	廃棄物保管容器(内容器)

*1 「標準」…FP放出試験(Phebus-FPT4)の基づく放出率

*2 SUSが主であり、取り出しの初期段階で内容器に仕分けられることを想定

*3 各ケースの概要は以下のとおり

C-1: ベースケース

C-2: SUS組成に対する感度ケース

C-3: 未臨界担保の観点より、UO₂を3.7kg相当の体積割合とした感度ケース

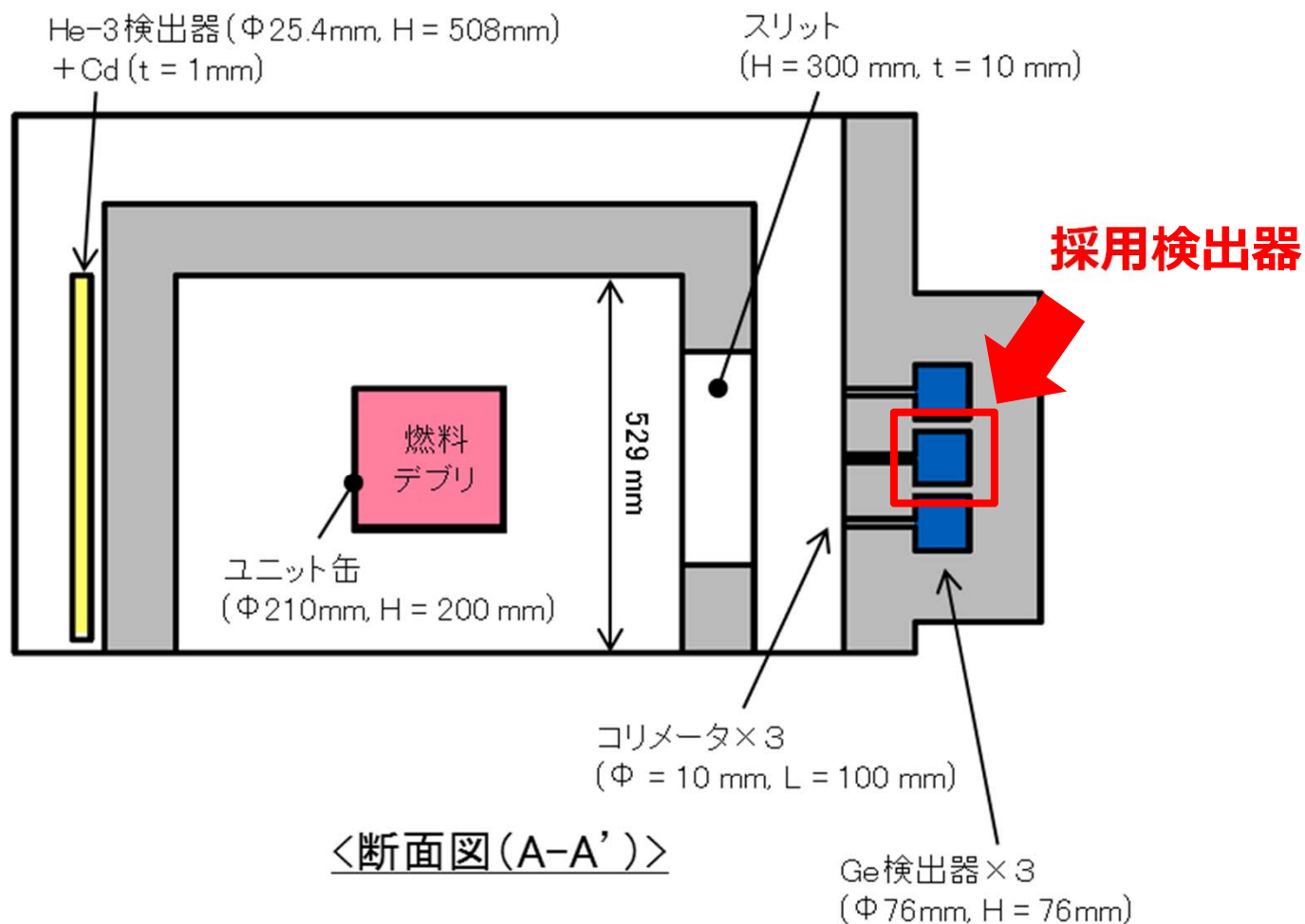
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.226

⑤-1 パッシブガンマ線法A(5/12)

採用検出器:

対象物が偏在を考慮しない均一モデルのため、
中心に位置し計数率が最も大きいGe検出器を採用。



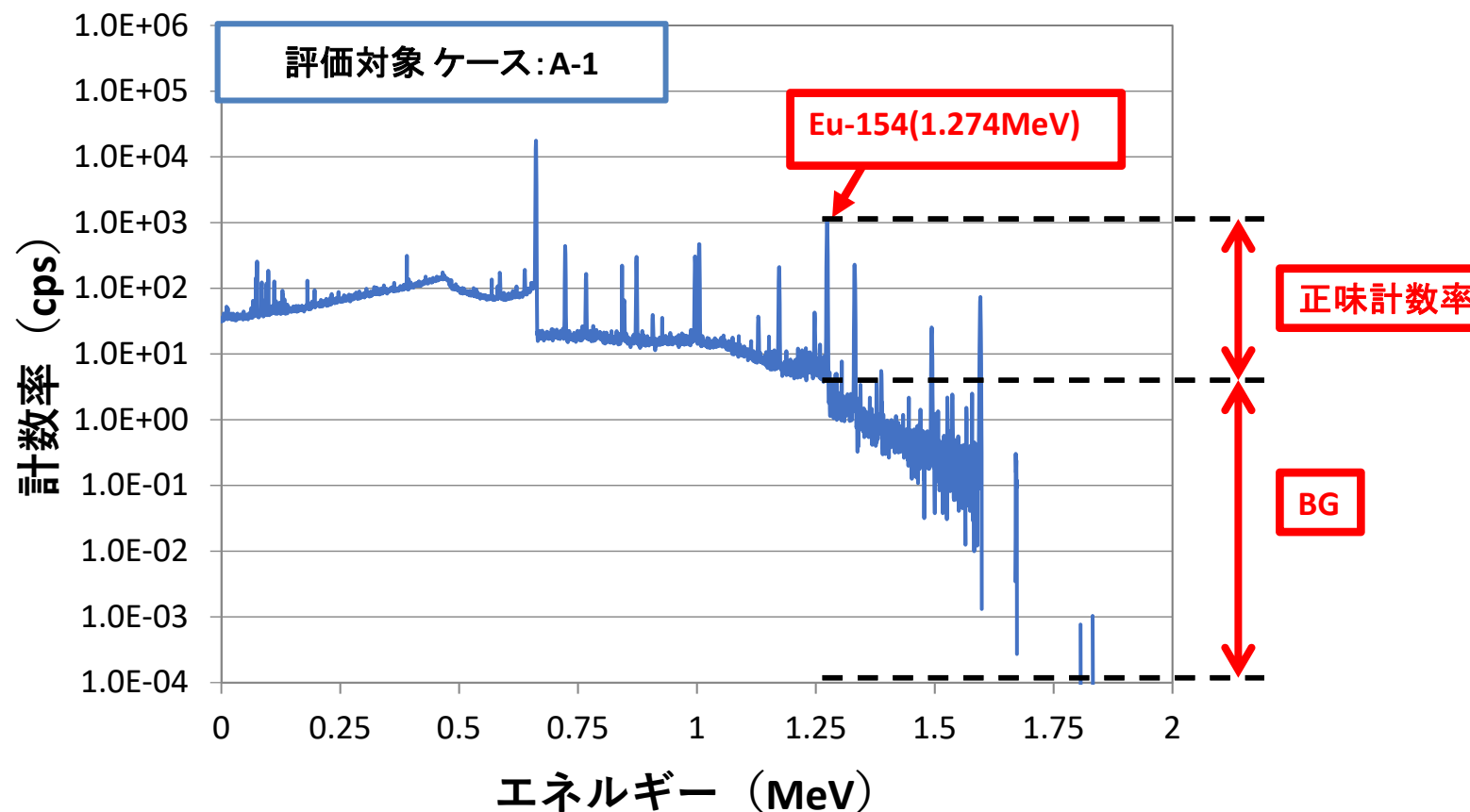
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.227

⑤-1 パッシブガンマ線法A(6/12)

概要:

ガンマ線のエネルギーは物質の反応(崩壊)ごとに固有であることを利用し、Eu-154の1.274MeVの計数率とU-235量の相関から核物質量を推定する。



4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.228

⑤-1 パッシブガンマ線法A(7/12)

評価データ:

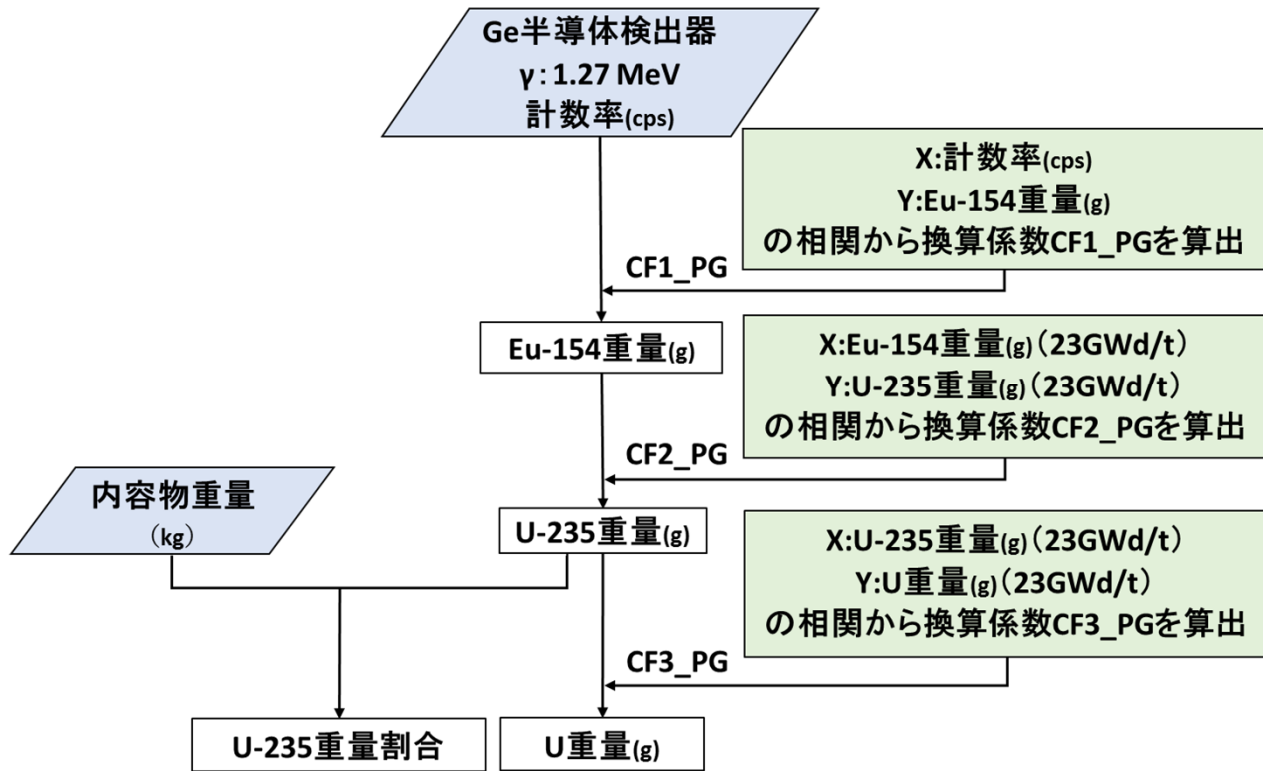
主なガンマ線放出核種を比較検討し、Eu-154の1.274MeVのデータを採用。

評価データ	説明	総評
Am-241 計数率	・0.05954 MeVに現れるガンマ線を計数する。他核種の散乱線の妨害を受けるため、検出が困難と推察される。	×
Cs-137 計数率	・厳密には娘核種であるBa-137mが出すガンマ線(0.6617 MeV)を計測する。 ・Cs-137は揮発性があり、事故後のU量とCs-137量の組成比の説明が困難であるため、実燃料デブリで使用できない可能性がある。	△
Eu-154 (1.27MeV) 計数率	・核燃料(U燃料)の燃焼によって生成される核分裂生成物。中～高燃焼度の燃料デブリで検出される可能性があり、仕分けに有用な核種と推察される。	○
Co-60 計数率	・核燃料由来ではなく、金属中微量不純物の放射化が由来のガンマ線放出核種。U量を評価するためには、U量とCo-60量の組成比を導く必要がある。	△

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

⑤-1 パッシブガンマ線法A(8/12)

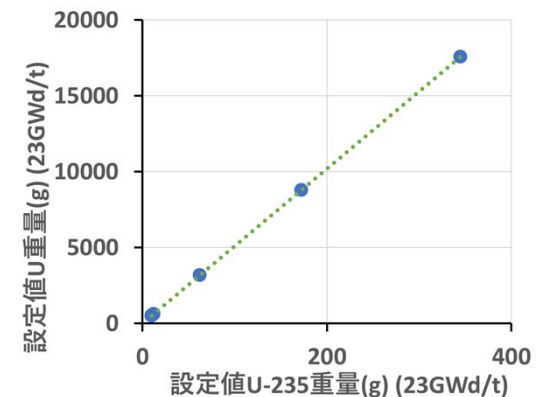
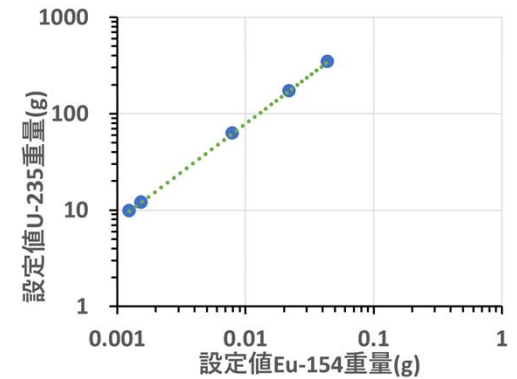
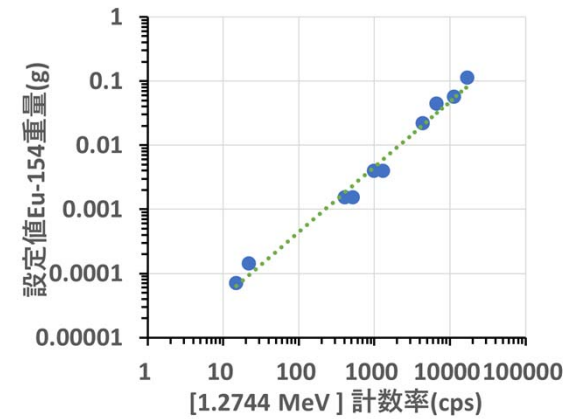
推定評価フロー：
パッシブガンマ線法A単独による核物質質量の推定
評価フローを作成。



検出下限値は同じフローに、以下の式で求めた検出下限計数率を代入する。

$$n_n > \frac{K}{2} \left(\left(\frac{K}{t_s} \right) + 4n_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b} \right) \right)$$

標準偏差の倍数: $K=3$, 対象物測定計数: N_s ,
 対象物測定時間: $t_s=200$ (s), 対象物測定計数率: $n_s=N_s/t_s$,
 BG測定計数: N_b , BG測定時間: $t_b=200$ (s), BG測定計数率: $n_b=N_b/t_b$,
 対象物の正味計数率: $n_n=n_s-n_b$



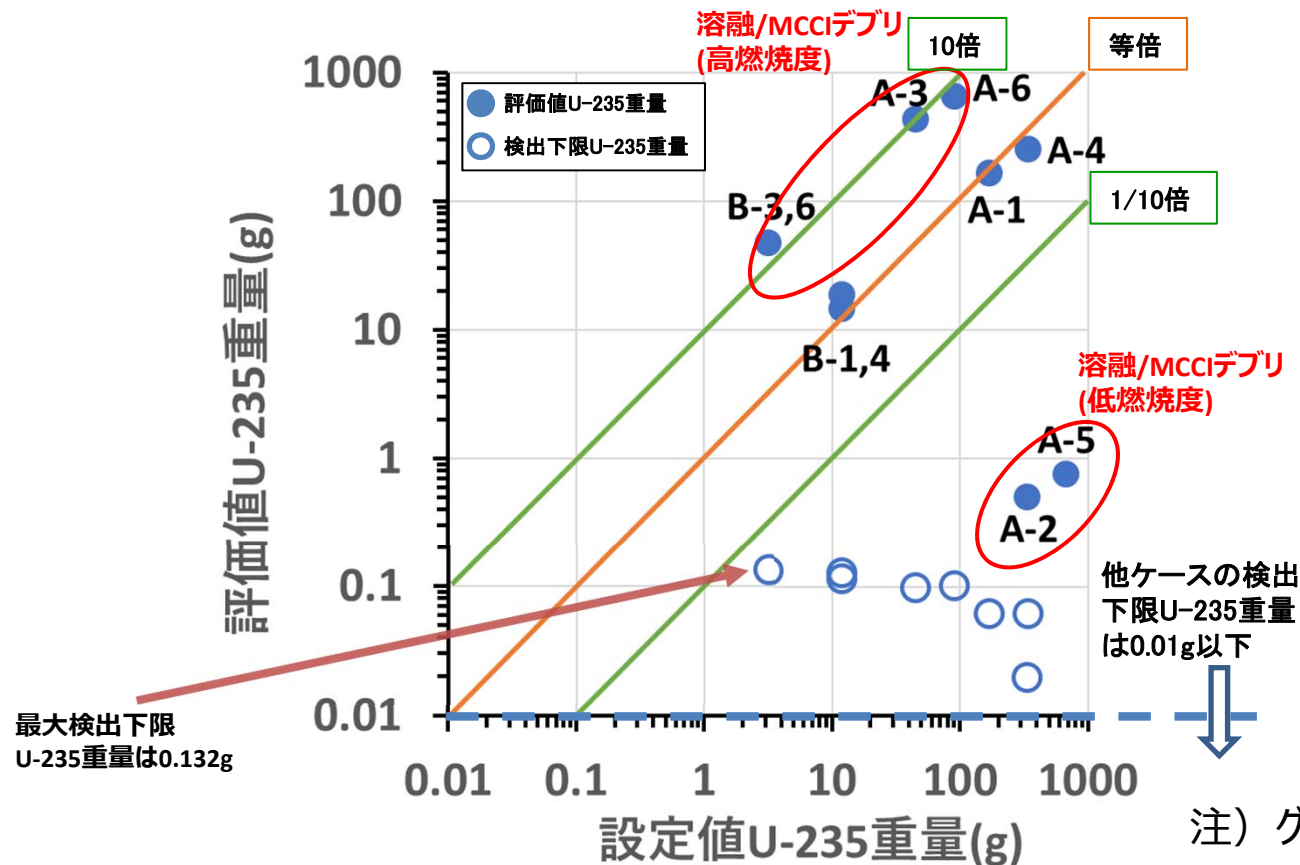
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.230

⑤-1 パッシブガンマ線法A(9/12)

評価結果_U-235重量(g)

- ・低燃焼度B-2,5, C-1,2,3ではEu-154(1.2744MeV)のピークが検出されず評価不可。
- ・Eu-154重量からU-235重量の評価に平均的な燃焼度を用いているため、**高燃焼度の場合に過大評価となり、低燃焼度の場合に過小評価**となった。

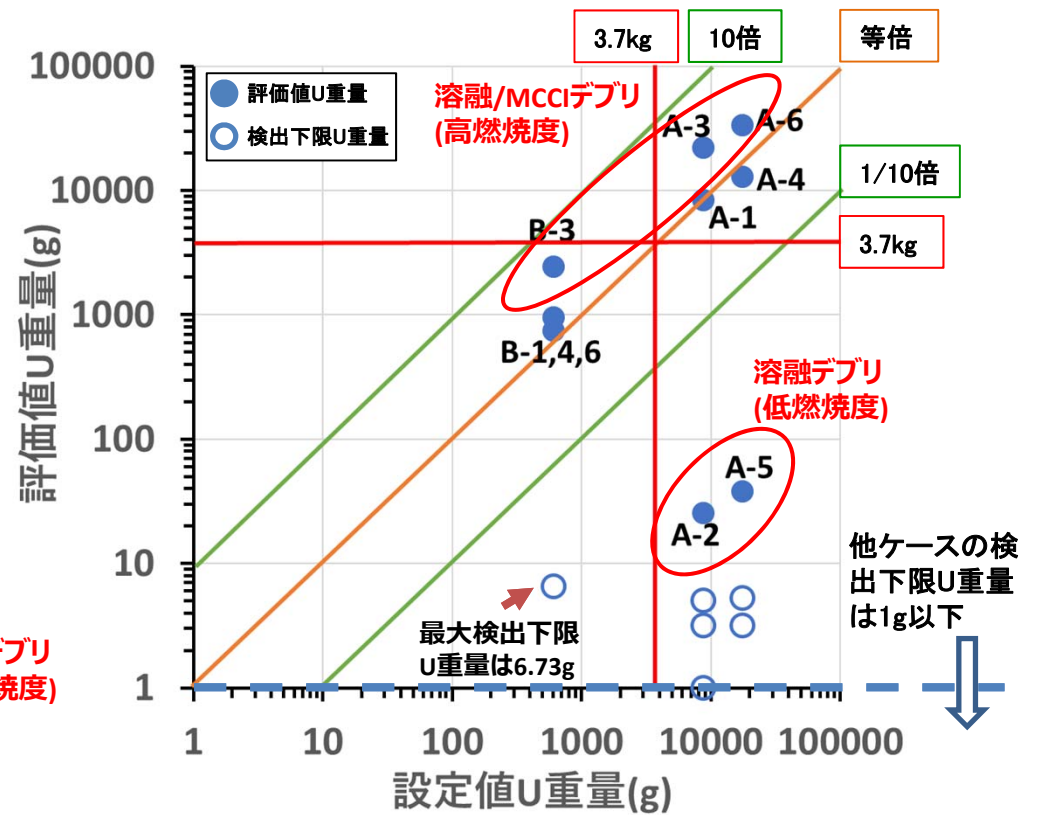
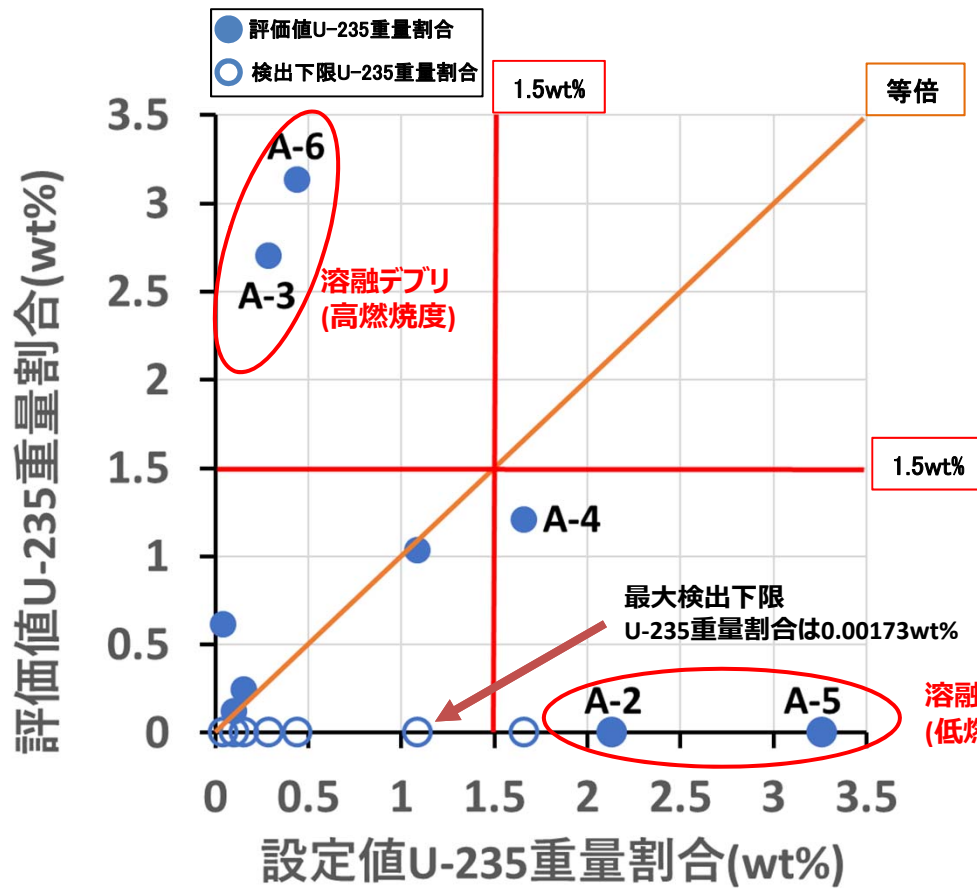


4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

⑤-1 パッシブガンマ線法A(10/12)

評価結果_U-235重量割合(wt%)およびU量(g)

- ・設定値U重量と評価値U重量に正の相関が小さく燃焼度による影響補正が課題。
- ・U-235重量からU重量の評価に平均的な燃焼度を用いているため、**高燃焼度の場合に過大評価となり、低燃焼度の場合に過小評価**となった。



注) グラフ軸は対数目盛表示

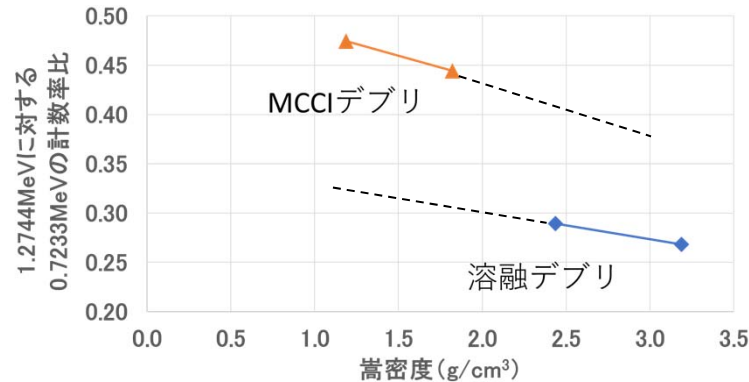
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.232

⑤-1 パッシブガンマ線法A(11/12)

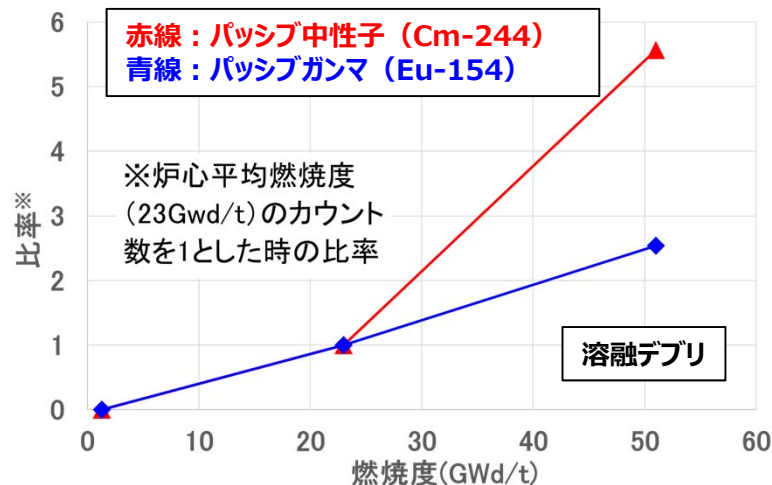
性能向上方策案

- ・Eu-154複数ピーク比による自己遮蔽の影響補正



燃料デブリ組成によりピーク比が異なる傾向を示しており、自己遮蔽の影響補正に活用できる可能性を示唆

- ・燃焼度とCm-244およびEu-154計数率の相関関数の差異による燃焼度の影響補正 (No.178同様) (パッシブガンマ線法+パッシブ中性子法)



Cm-244およびEu-154計数率の比から燃焼度の影響を補正できる可能性を示唆

⑤-1 パッシブガンマ線法A(12/12)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

- 1) パッシブガンマ線法の評価フローを検討
- 2) 核燃料物質質量などの評価精度を検討
- 3) 核燃料物質質量などの検出下限値を検討

【成果/開発への寄与】

- 1) パッシブガンマ線法の評価フローを設定
- 2) 検出器応答解析データを用いて核燃料物質質量などの評価精度を試算
 - ・U-235重量 :最大で数100倍(熔融デブリ, 低燃焼度(1.3GWd/t))
 - ・U-235重量割合:最大で数100倍(熔融デブリ, 低燃焼度(1.3GWd/t))
 - ・U重量 :最大で数100倍(熔融デブリ, 低燃焼度(1.3GWd/t))
- 3) 検出器応答解析データを用いて検出下限値を試算
 - ・U-235重量割合:最大で0.00173wt%となり, 仕分け判定基準1.5wt%よりも小さい
 - ・U重量 :最大で6.73gとなり, 仕分け判定基準3.7kgよりも小さい

【課題と対応策】

- 1) 課題: 燃焼度による誤差低減
対応策: Cm-244とEu-154の比による補正方法の詳細検討
Cm-244とEu-154のUとの帯同性説明ロジック構築も必要
- 2) 課題: 容器仕様, 嵩密度による誤差低減
対応策: 容器仕様ごとの換算係数設定, エネルギーの異なる複数ピーク比による補正方法の詳細検討
X線CT法との組合せ方法の検討
- 3) 課題: その他燃料デブリの多様性の影響確認
対応策: 不均一体系を含む収納物条件に対するパラメータスタディの拡充

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

(⑤-2 パッシブガンマ線法B)

No.	計測技術	検出器	照射線源	照射方向	測定量	評価量	分担	シートNo.
⑤-1	パッシブガンマ線法 A	Ge	なし	なし	核分裂生成核種質量 (Eu-154など)	核分裂性核種質量	MHI	128-140 221-233
⑤-2	同 B	<u>CZT, LaBr₃など</u>	なし	なし	同上	同上	日立GE	141-154 234-237

【特長】

- 検出器は、冷凍機が不要で高計数率測定が可能な検出器(CZT, LaBr₃など)を検討。

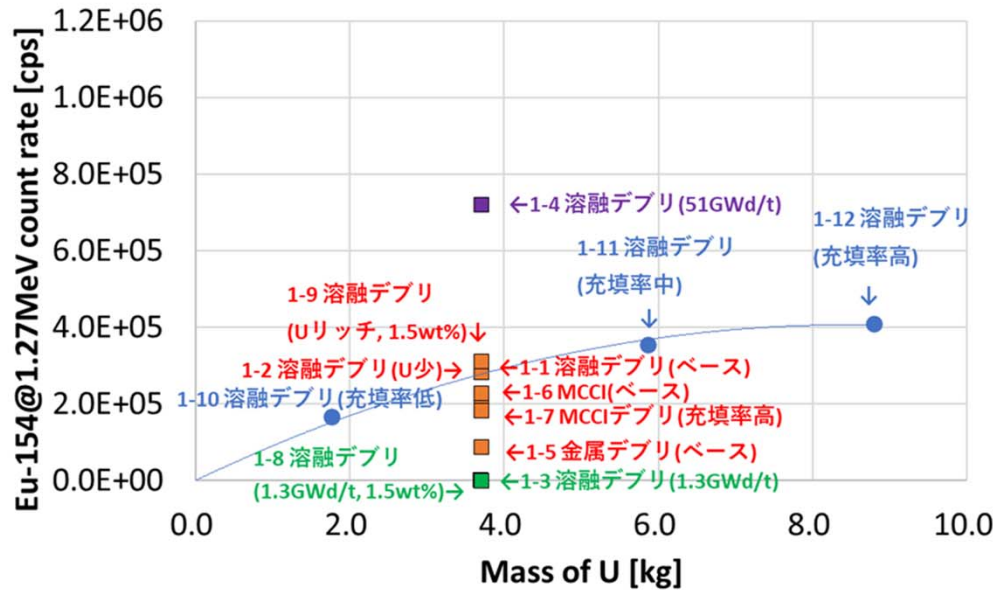
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

No.235

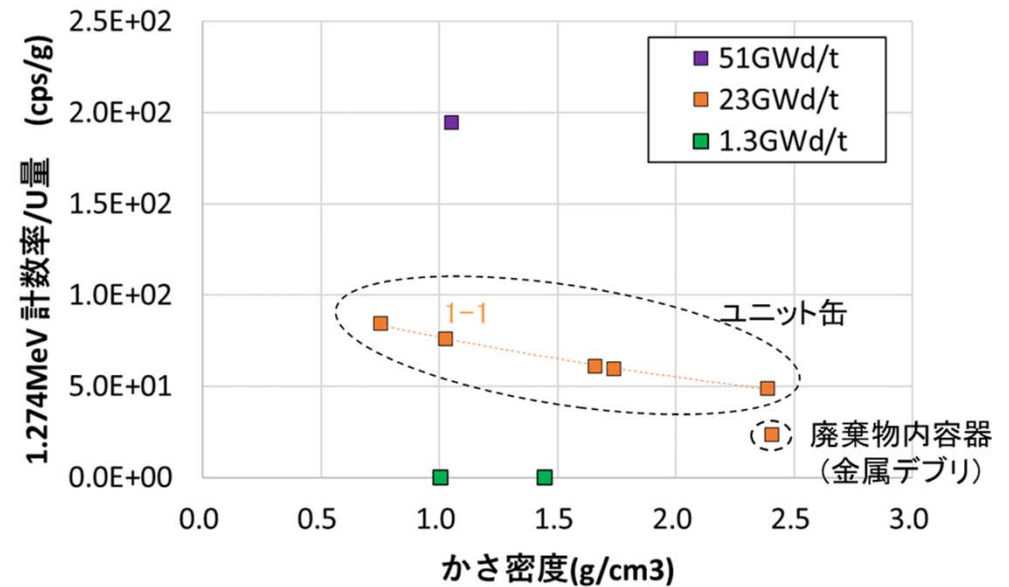
⑤-2 パッシブガンマ線法B(1/3)

➤ パッシブガンマ線法Bによる核物質質量推定評価方法案の検討

- ✓ 組成やかさ密度, 燃焼度の影響によりU量が同一(3.7kg)であってもEu-154 1.274MeVのピーク計数率が異なるため, U量評価値に誤差が発生し, 単体での評価難。
- ✓ 他の測定情報などと組み合わせた評価が必要。



U量に対するEu-154(1.274MeV)ガンマ線ピーク
計数率(CZT解析全ケース)



かさ密度に対するEu-154(1.274MeV)ガンマ線ピーク計数率
(CZT全解析ケース)

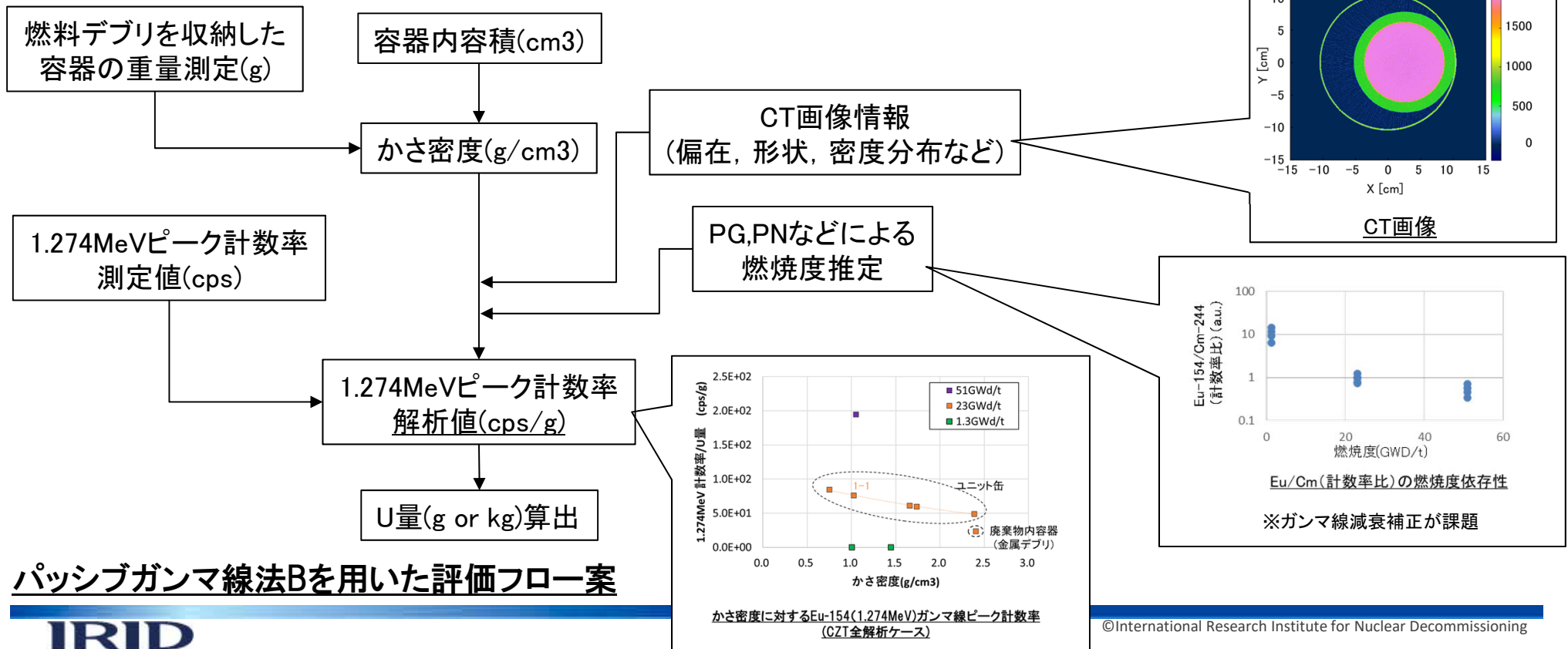
4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

⑤-2 パッシブガンマ線法B(2/3)

➤ パッシブガンマ線法Bを用いた核物質質量推定評価方法案の検討

パッシブガンマ線の測定情報のみでの評価難→他の測定情報との組合せによる補正/性能向上方法案を検討

影響因子	補正/性能向上方法案
組成, かさ密度	重量測定情報の利用により影響を補正
容器内偏在	パッシブガンマ線単体測定での影響補正難 →CT画像情報に基づき影響を補正
燃焼度	パッシブガンマ線単体測定での影響補正難 →PG,PNなどによる燃焼度推定



パッシブガンマ線法Bを用いた評価フロー案

⑤-2 パッシブガンマ線法B(3/3)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

- 1) 他の測定情報との組合せによる, 組成やかさ密度の影響に対する補正方法案の検討。
- 2) 他の測定情報との組合せによる, 容器内偏在の影響に対する補正方法案の検討。
- 3) 他の測定情報との組合せによる, 燃焼度の影響に対する補正方法案の検討。

【成果/開発への寄与】

- 1) 組成, かさ密度の影響に対して, 重量測定情報による補正案を考案。
- 2) 容器内偏在の影響に対して, CT画像情報に基づく補正案を考案。
- 3) 燃焼度の影響に対して, C_m と E_u の重量比と燃焼度との相関を利用し, パッシブガンマ線法とパッシブ中性子法の測定値を利用した燃焼度推定方法案を考案。

【課題と対応策】

- 1) 課題: 重量測定情報やCT画像データ情報の利用方法や, 燃焼度推定方法における誤差低減方法の具体的化が必要。
対応策: 各方法の具体化を検討し, 解析や試験などにより適用性を評価する。

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

(計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討に係るまとめ)

4.2.1 計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討

計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討に係るまとめ

No.239

【成果／開発への寄与】(詳細は計測技術ごとの報告内容を参照)

- ・5種類の計測技術(①アクティブ中性子法, ②パッシブ中性子法, ③ミュオン散乱法, ④X線CT法, ⑤パッシブガンマ線法)について, 核燃料物質質量などの評価方法の一次案を設定した。
- ・検出器応答解析データを用いて, **核燃料物質質量などの評価精度などを試算した。**
- ・評価結果から, **評価精度を低下させる要因を分析し, 対応策を検討した。**

【課題と対応策】(詳細は計測技術ごとの報告内容を参照)

- 1) 課 題: 計測技術ごとに影響因子による補正方法の確立が必要である。
対応策: **計測技術ごとに提案している補正方法の詳細検討を実施する。**
- 2) 課 題: 補正方法に係る課題のうち, Cm-244とEu-154のUとの帯同性説明ロジック構築の構築は仕分けPJ単独では困難である。
対応策: **関連PJ(性状把握PJ)と連携して検討を進める。**
- 3) 課 題: その他燃料デブリの多様性の影響確認が必要である。
対応策: **不均一体系を含む収納物条件に対するパラメータスタディを拡充する。**
- 4) 課 題: 計測技術の組合せを具体化して, 性能を評価する必要がある。
対応策: **対象物条件を揃えた解析や検証試験を実施して, 5種類の計測技術の適用範囲や提供可能な情報を比較することにより, 組合せによる核燃料物質質量などの評価手法を検討し, 推定評価性能を評価する。**

4.2.2 仕分けシナリオの検討

【目標】

- ・アクティブ中性子法, パッシブ中性子法, ミュオン散乱法, X線CT法およびパッシブガンマ線法(必要に応じた組合せを含む)を利用した仕分けシナリオを提案すること。
- ・仕分けに必要な仕分けシナリオの検討は開発項目とは異なるため, 技術成熟度(TRL)は設定しないものとする。

4.2.2 仕分けシナリオの検討(1/8)

No.241

シナリオ候補一覧表

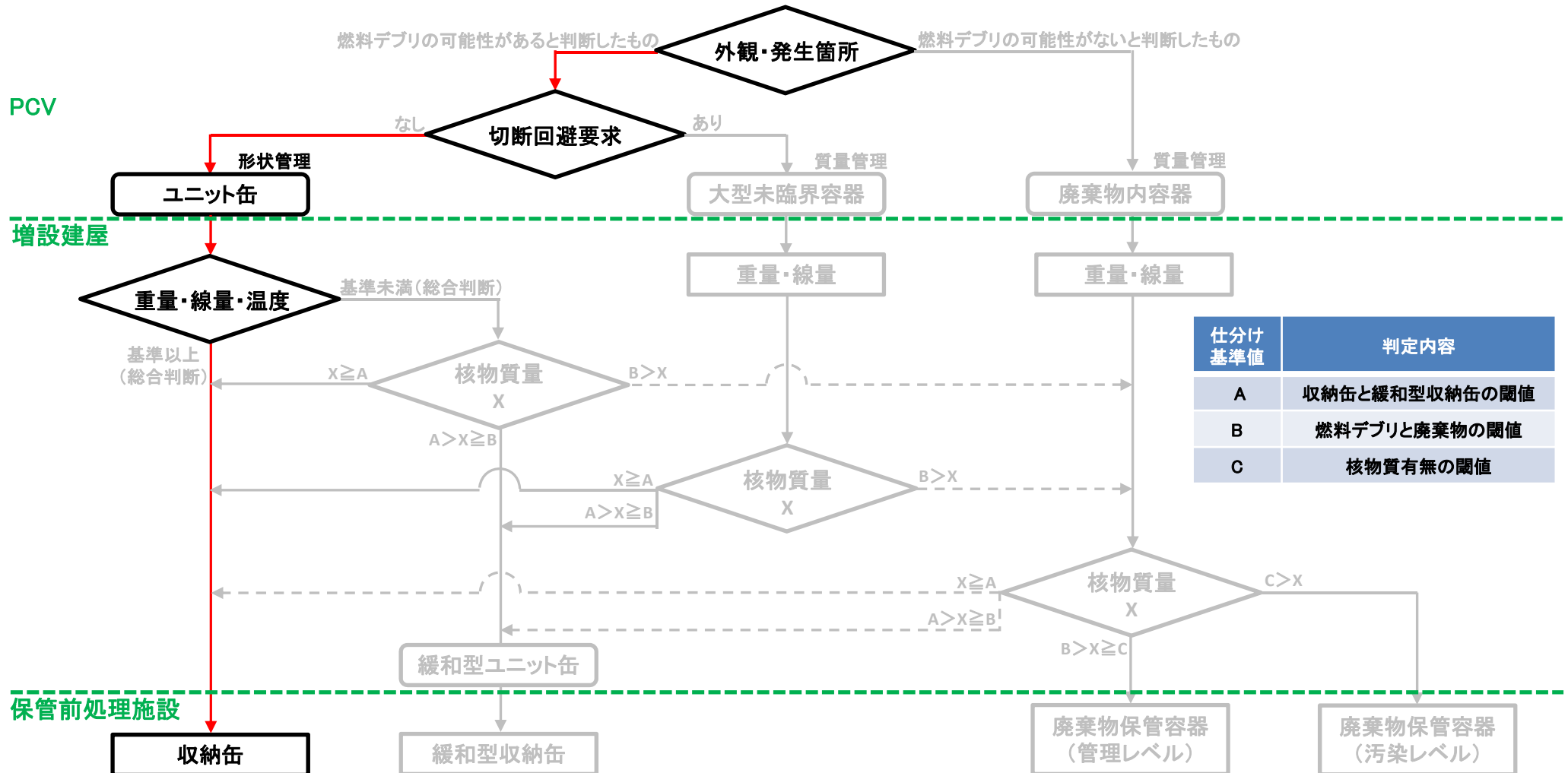
- ・取り出し初期は、取り出し時の容器はユニット缶であり、取り出しが進むにつれ大型未臨界容器や廃棄物内容器による取り出しのニーズが拡大すると想定。
- ・ユニット缶は取扱容器の中でも小型であり、計測の難易度が比較的低いと想定。
- ・仕分けポイントは、増設建屋と保管前処理施設のいずれかと想定。

No.	シナリオ	概要	メリット	デメリット
①	仕分けを 実施しない 場合	仕分けを一切行わず、全量をユニット缶で取り出し、全量を収納缶で保管。	仕分け作業が不要で、取り出しから保管までのルートが単純。	PCV内で全量を20cm以下に細断する必要あり。保管に必要な収納缶本数が膨大。
②-1	取り出し初期 で技術 成熟度が低い 場合で、 増設建屋 で仕分ける場合	増設建屋でユニット缶の核物質量を計測し、基準値未満のものは廃棄物保管容器で保管。	収納缶本数の低減を期待できる。	増設建屋内の配置成立性が課題。
②-2	取り出し初期 で技術 成熟度が低い 場合で、 保管前処理施設 で仕分ける場合	保管前処理施設でユニット缶の核物質量を計測し、基準値未満のものは廃棄物保管容器へ収納。	収納缶本数の低減を期待できる。	保管前処理施設で建屋間移送容器からの取り出し・詰替作業が発生。
③-1	取り出し後期 で技術 成熟度が高い 場合で、 増設建屋 で仕分ける場合	PCVで外観・発生場所、切断回避要求有無によってユニット缶、大型未臨界容器、廃棄物内容器に分けて取り出し、増設建屋で計測した核物質量に応じて、保管前処理施設で収納缶、緩和型収納缶、廃棄物保管容器(管理レベル)、廃棄物保管容器(汚染レベル)に分けて収納。	収納缶本数の大幅な低減を期待できる。	取り出しから保管までのルートが複雑。増設建屋内の配置成立性が課題。
③-2	取り出し後期 で技術 成熟度が高い 場合で、 保管前処理施設 で仕分ける場合	PCVで外観・発生場所、切断回避要求有無によってユニット缶、大型未臨界容器、廃棄物内容器に分けて取り出し、保管前処理施設で計測した核物質量に応じて、収納缶、緩和型収納缶、廃棄物保管容器(管理レベル)、廃棄物保管容器(汚染レベル)に分けて収納。	収納缶本数の大幅な低減を期待できる。	取り出しから保管までのルートが複雑。保管前処理施設で建屋間移送容器からの取り出し・詰替作業が発生。

4.2.2 仕分けシナリオの検討(2/8)

シナリオ候補①: 仕分けを実施しない場合

- ・概要: 仕分けを一切行わず, 全量をユニット缶で取り出し, 全量を収納缶で保管。
- ・メリット: 仕分け作業が不要で, 取り出しから保管までのルートが単純。
- ・デメリット: PCV内で全量を20cm以下に細断する必要あり。保管に必要な収納缶本数が膨大。

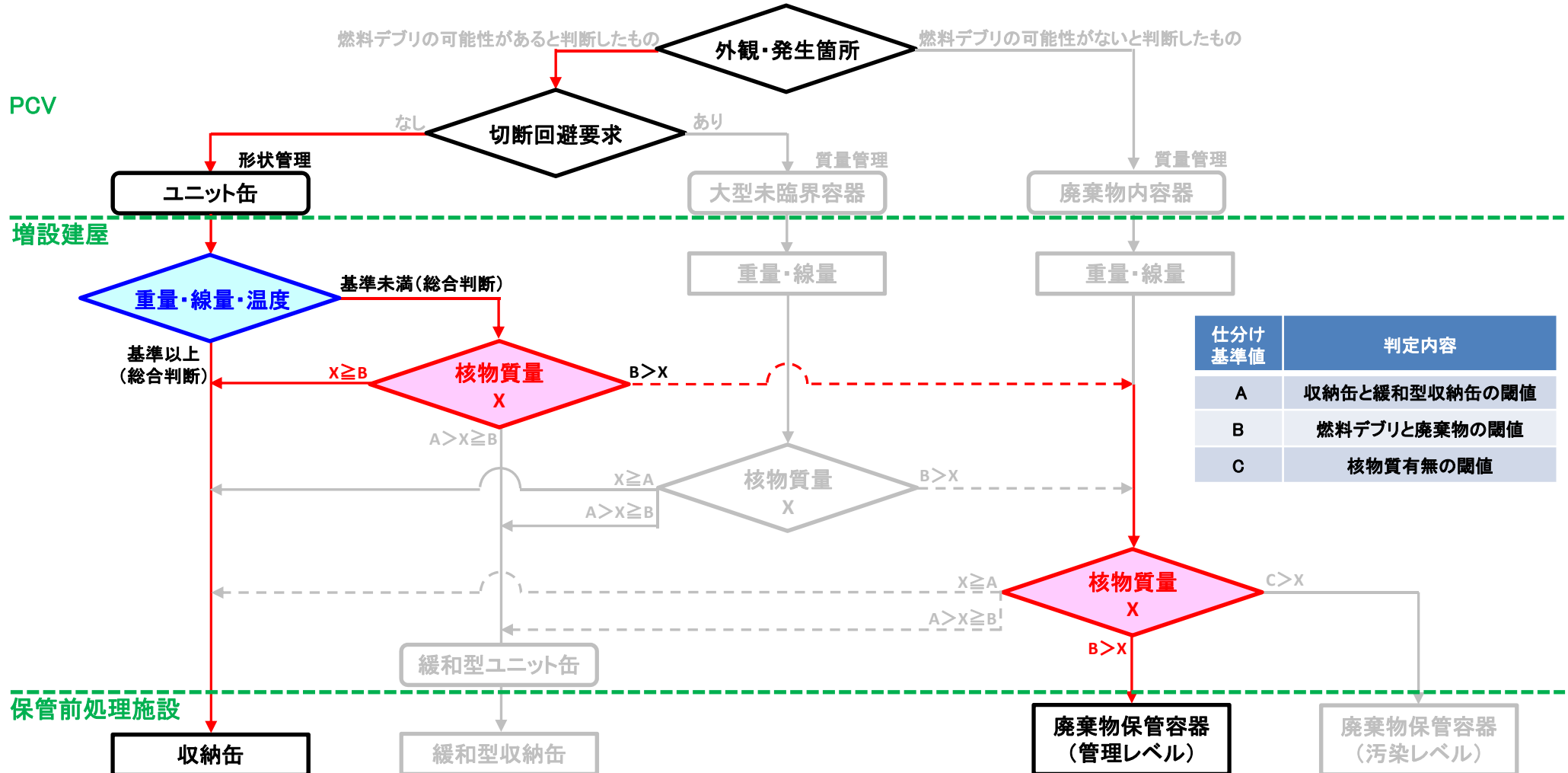


増設建屋

4.2.2 仕分けシナリオの検討(3/8)

シナリオ候補②-1: 取り出し初期で技術成熟度が低い場合で、増設建屋で仕分ける場合

- ・概要: 増設建屋でユニット缶の核物質量を計測し、基準値未満のものは廃棄物保管容器で保管。
- ・メリット: 収納缶本数の低減を期待できる。
- ・デメリット: 増設建屋内の配置成立性が課題。

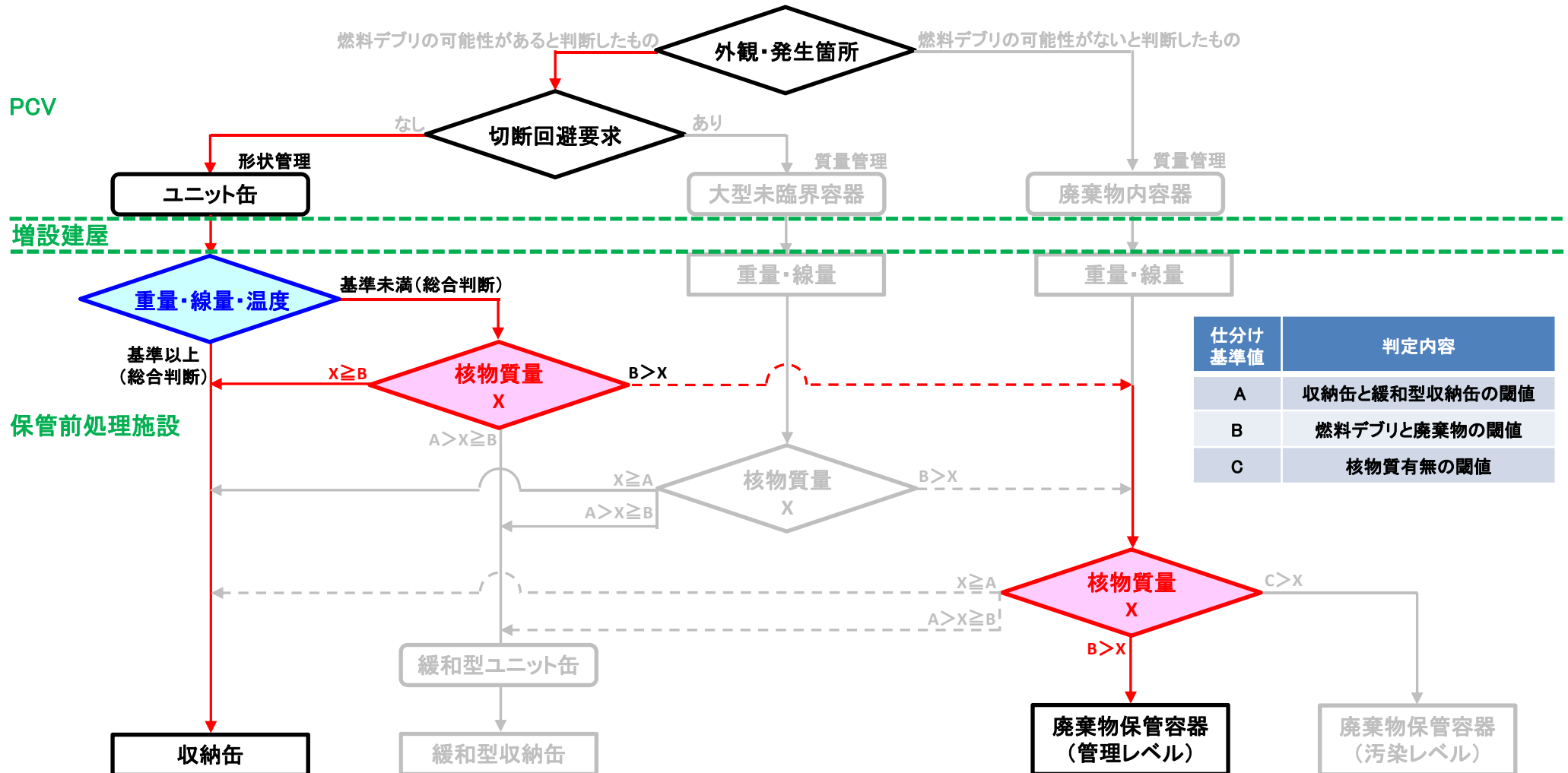


保管前処理施設

4.2.2 仕分けシナリオの検討(4/8)

シナリオ候補②-2: 取り出し初期で技術成熟度が低い場合で、 保管前処理施設で仕分ける場合

- ・概要: 保管前処理施設で**ユニット缶**の核物質量を計測し、**基準値未満のもの**は廃棄物保管容器へ収納。
- ・メリット: **収納缶本数の低減**を期待できる。
- ・デメリット: 保管前処理施設で**建屋間移送容器からの取り出し・詰替作業**が発生。



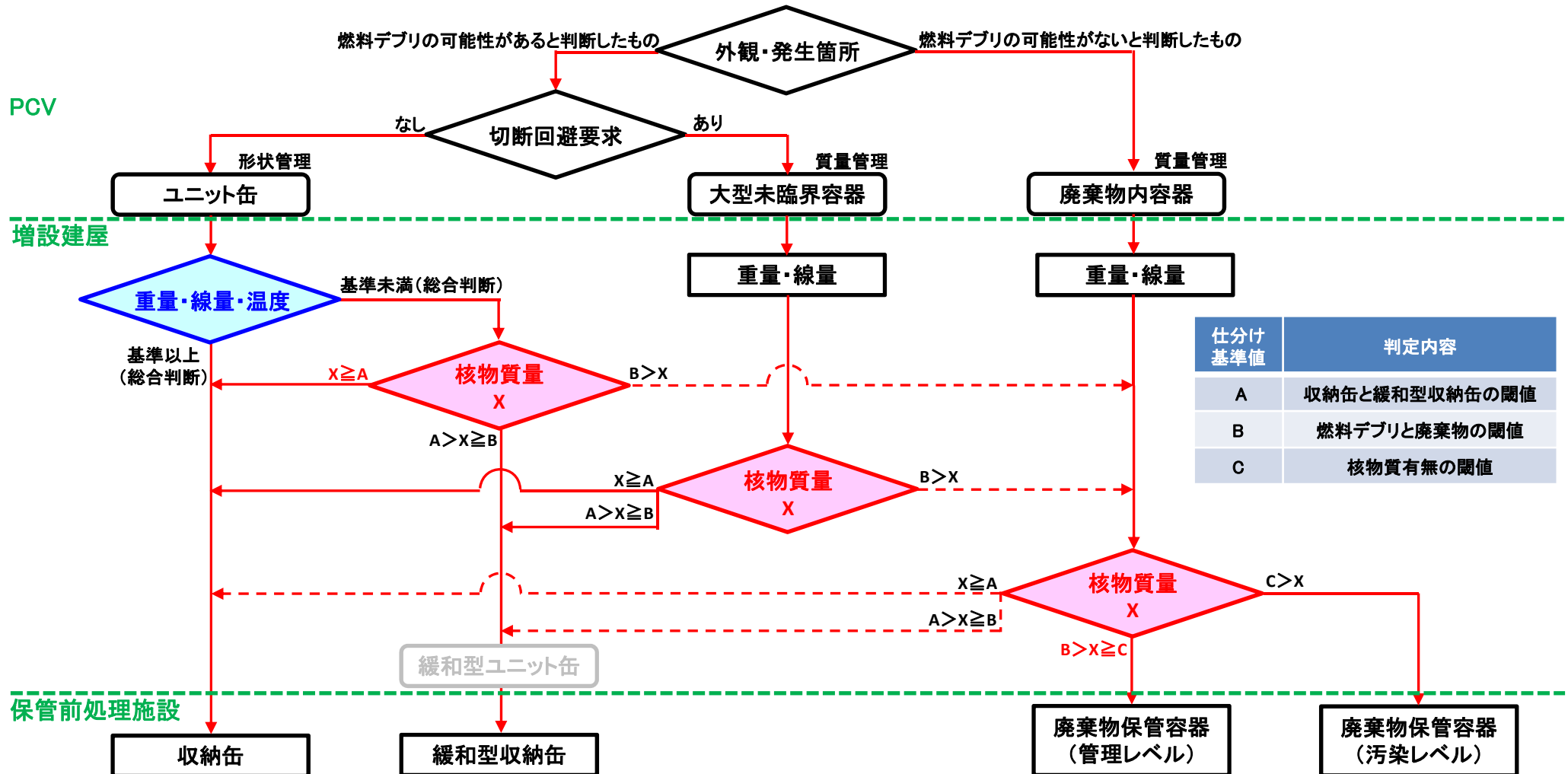
仕分け基準値	判定内容
A	収納缶と緩和型収納缶の閾値
B	燃料デブリと廃棄物の閾値
C	核物質有無の閾値

4.2.2 仕分けシナリオの検討(5/8)

No.245

シナリオ候補③-1: 取り出し後期で技術成熟度が高い場合で、増設建屋で仕分ける場合

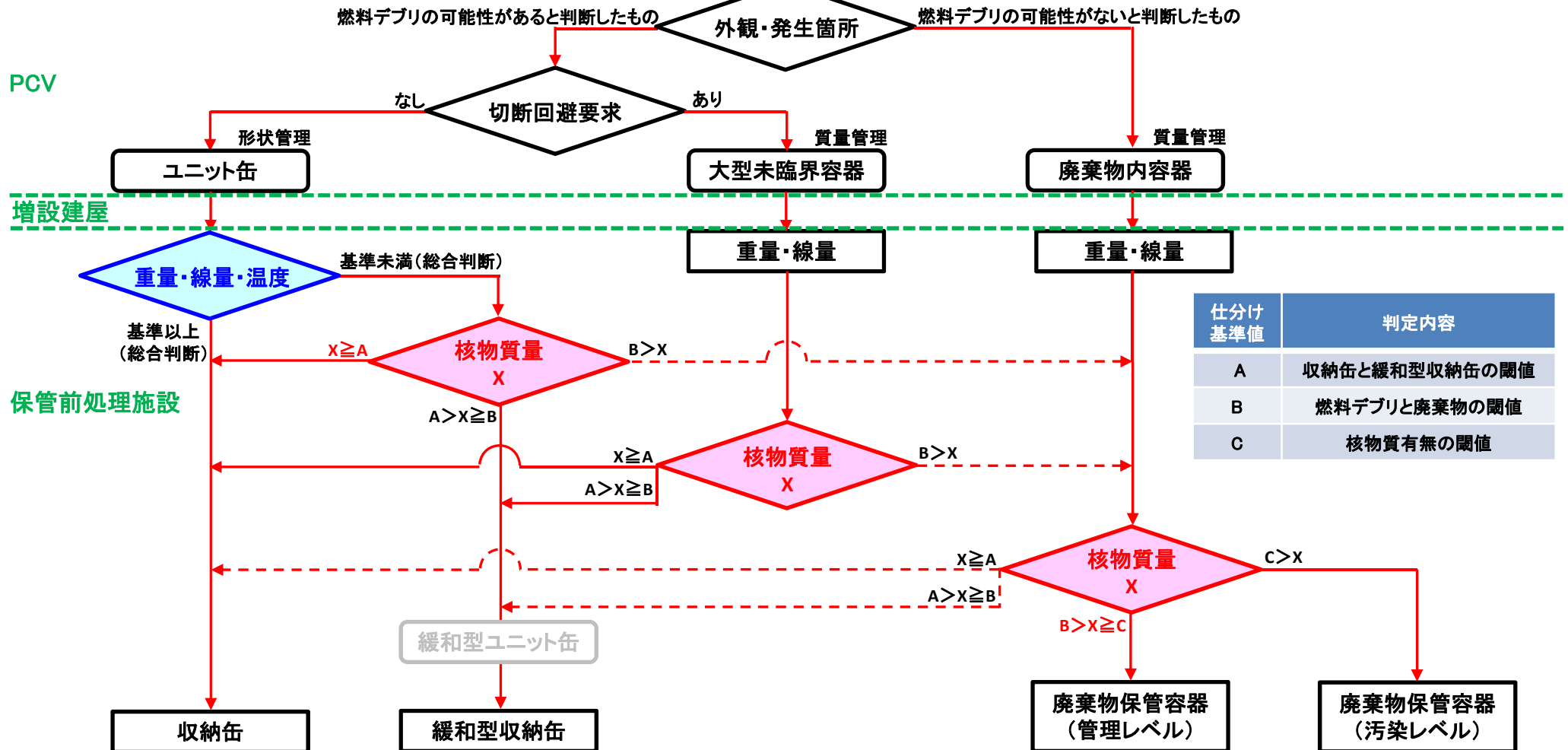
- 概要: PCVで外観・発生場所, 切断回避要求有無によって**ユニット缶**, **大型未臨界容器**, **廃棄物内容器**に分けて取り出し, 増設建屋で計測した**核物質質量**に応じて, 保管前処理施設で**収納缶**, **緩和型収納缶**, **廃棄物保管容器(管理レベル)**, **廃棄物保管容器(汚染レベル)**に分けて収納。
- メリット: **収納缶本数の大幅な低減**を期待できる。
- デメリット: 取り出しから保管までの**ルートが複雑**。増設建屋内の**配置成立性**が課題。



4.2.2 仕分けシナリオの検討(6/8)

シナリオ候補③-2: 取り出し後期で技術成熟度が高い場合で、 保管前処理施設で仕分ける場合

- ・概要: PCVで外観・発生場所, 切断回避要求有無によって**ユニット缶**, **大型未臨界容器**, **廃棄物内容器**に分けて取り出し, 保管前処理施設で計測した核物質質量に応じて, **収納缶**, **緩和型収納缶**, **廃棄物保管容器(管理レベル)**, **廃棄物保管容器(汚染レベル)**に分けて収納。
- ・メリット: **収納缶本数の大幅な低減**を期待できる。
- ・デメリット: 取り出しから保管までの**ルートが複雑**。保管前処理施設で**建屋間移送容器からの取り出し・詰替作業**が発生。



4.2.2 仕分けシナリオの検討(7/8)

No.247

関連PJとの調整事項

- ・仕分けシナリオの策定に向け、関連PJ（取り出しPJ, 収納缶PJ, 廃棄物PJ）と調整が必要な項目を抽出。
- ・**開発の前提となるニーズ(計測対象物条件, 性能目標値)明確化**のために**優先度の高いもの**を選定。
- ・関連PJとの合同会議で最新知見を共有した結果、**いずれも未確定**であり課題であることを確認した。
今後も検討進捗を共有して知見を反映する。

プロセス	調整項目	課題
取り出し	燃料デブリと廃棄物の判断方法・基準	仕分け装置が受け入れる容器および収納物の前提条件の共有が必要。 容器仕様は、ユニット缶以外は未定。
	取り出し容器仕様・運用	
	取り出し後の含水率	
建屋間 移送	移送容器仕様	取り出し時の判断精度および保管時の仕分け精度のニーズによるが、移送容器で計測(ユニット缶を取り出さずに計測)するニーズがあるか要確認。なお、移送容器仕様が未定。
容器 詰替	容器詰替ポイント	容器詰替と仕分けの前後関係および詰替内容によって、仕分けで前提とする容器仕様および収納物条件が変化。また、詰替前の計測データの引継ぎ内容および詰替後に再計測するか否か検討が必要。
	容器詰替の内容	
	データ引継ぎ内容, 再測定の要否	
水切り ／乾燥	燃料デブリ／廃棄物の処理内容	燃料デブリ／廃棄物に対する水切り／乾燥の処理内容, 処理後の含水率および水切り／乾燥と仕分けの前後関係によって、仕分け装置の計測精度に影響が出る可能性がある。
	水切り／乾燥ポイント	
	水切り／乾燥後の含水率	
仕分け	他プロセスとの前後関係	他プロセスとの前後関係や計測条件によって、仕分け装置の計測精度および仕分けシナリオが変化。
	計測時の容器仕様	
	計測時の含水率	
	仕分け基準値	
保管	保管容器仕様・配置	保管容器仕様および配置によって、仕分け基準値が変化。

4.2.2 仕分けシナリオの検討(8/8)

仕分けシナリオの検討に係るまとめ

No.248

【成果／開発への寄与】

- ・以下の5ケースの仕分けシナリオを想定し、それぞれ仕分けフローを具体化して比較することにより、**適用時期と適用場所の観点によるシナリオ候補の叩き台を提示**した。
 - ①仕分けを実施しない場合
 - ②取り出し初期で技術成熟度が低い場合で、増設建屋で仕分ける場合
 - ③取り出し初期で技術成熟度が低い場合で、保管前処理施設で仕分ける場合
 - ④取り出し後期で技術成熟度が高い場合で、増設建屋で仕分ける場合
 - ⑤取り出し後期で技術成熟度が高い場合で、保管前処理施設で仕分ける場合
- ・核燃料物質量計測に適用する技術(組合せを含む)は未確定であるが、重量・温度・線量などによる**スクリーニング測定との組合せにより、核燃料物質量計測の処理量を低減することを設定**した。
- ・仕分けシナリオの策定に向け、**関連PJ(取り出しPJ, 収納缶PJ, 廃棄物PJ)との調整事項を抽出**した。特に**優先度が高い**項目として、「**取り出し容器仕様・運用**」、「**含水量低減に係る燃料デブリ／廃棄物の処理内容**」、「**仕分け基準値**」および「**保管容器仕様・配置**」を選定した。
- ・関連PJとの合同会議を開催して最新知見を共有した結果、**いずれも未確定**であり課題であることを確認した。

【課題と対応策】

- 1) 課 題: 仕分けシナリオ策定のために必要な情報が未確定である。
対応策: 確定した段階で確実に反映できるよう**関連PJとの情報横通しの仕組みを構築**する。(例. 合同会議の定期開催など)
- 2) 課 題: 採用する仕分けシナリオを判断するためには、仕分けによる取り出しから保管までの作業合理化の効果を評価する必要がある。
対応策: 計測対象物の条件に仮定が必要ではあるが、**仕分けシナリオごとに収納缶本数や保管建屋面積の低減などの合理化の効果を評価**する。

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

【目標】

・下記計測技術を利用した仕分けの成立性確認に向けて、シミュレーションや簡易試験の結果を踏まえ、今後、実験的に確認する必要がある課題に対して試験方法の計画を立案すること。
(終了時目標TRL:レベル2)

- ① アクティブ中性子法…今後、確認結果はアクティブ中性子法A, B, Cに共通で適用可能
- ② パッシブ中性子法…今後、確認結果はパッシブ中性子法A, Bに共通で適用可能
- ③ ミュオン散乱法
- ④ X線CT法
- ⑤ パッシブガンマ線法…今後、確認結果はパッシブガンマ線法A, Bに共通で適用可能

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

(① アクティブ中性子法)

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

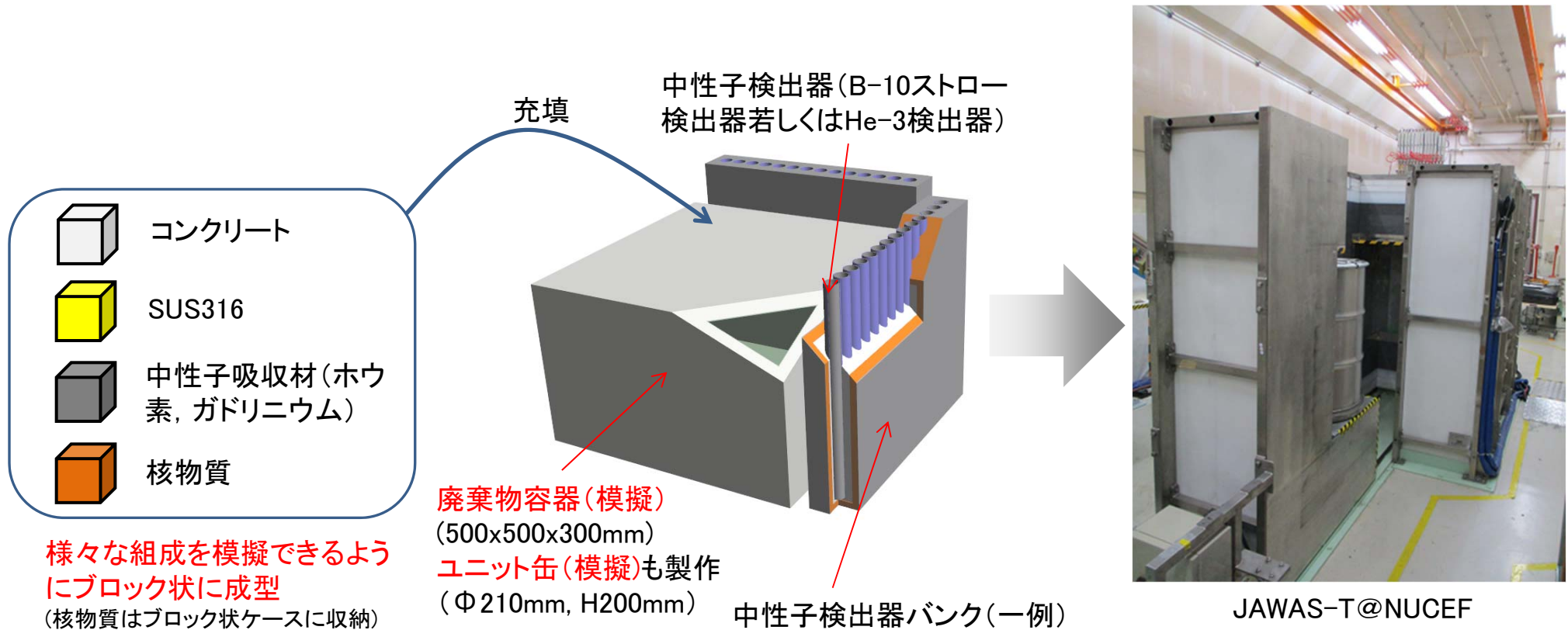
No.251

① アクティブ中性子法(1/10)

(a) 中性子吸収材などの影響評価に関する試験

【試験内容】

アクティブ中性子法は測定対象物に含まれる中性子吸収材(ホウ素やガドリニウム)の影響を受ける。それらを含む代表的な模擬試料を作成し、JAEAのアクティブ中性子法装置JAWAS-Tを用いた試験を行うことで、中性子吸収材の影響を評価するための方法を検討した。



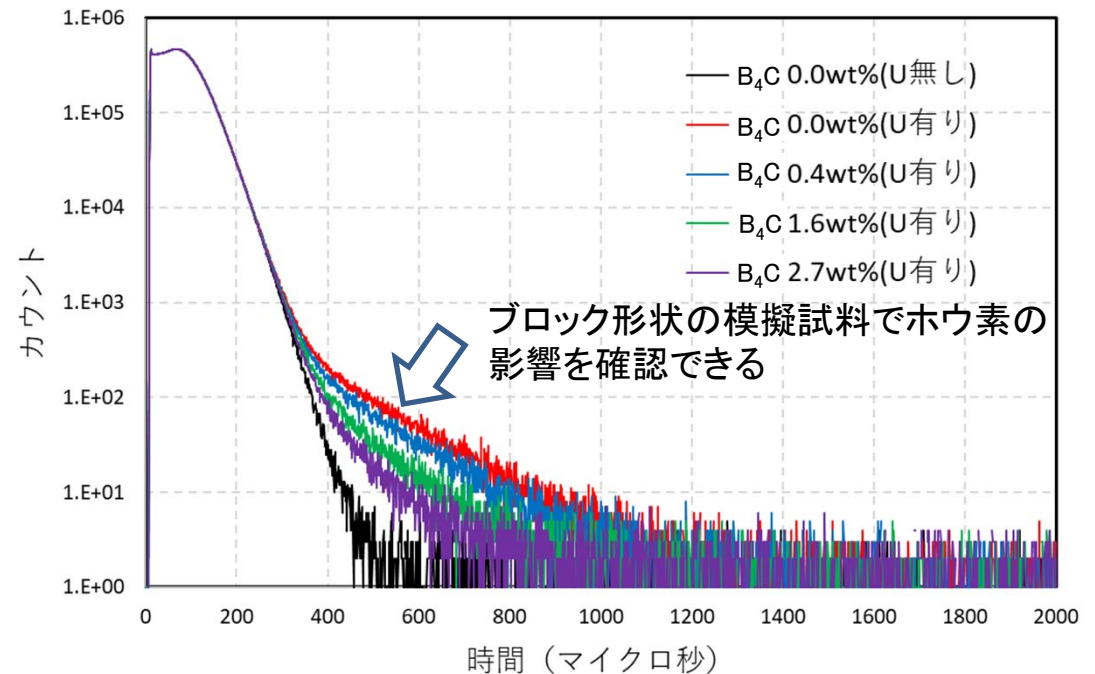
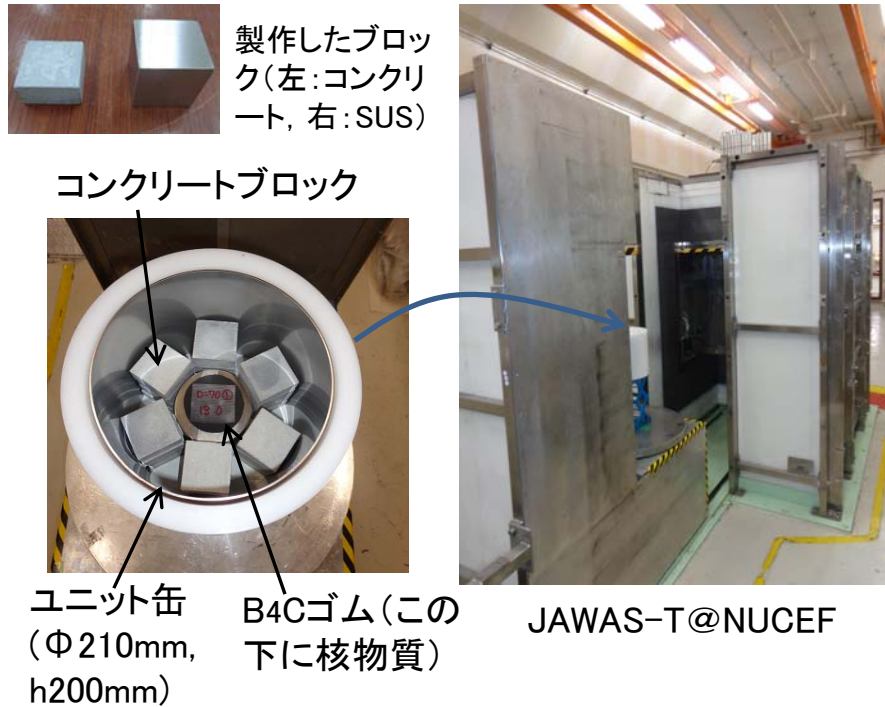
4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.252

① アクティブ中性子法(2/10)

(a) 中性子吸収材などの影響評価に関する試験

JAEA NUCEFにあるJAWAS-T装置を用いて中性子吸収材などの影響評価に関する試験を実施した。



FNDI法による測定結果例(測定時間15分)

- 多様な燃料デブリを再現するためにブロック形状の模擬試料を作製した。
- ブロック形状の模擬試料を用いた試験を行うことで中性子吸収材の影響を評価できることが分かった。

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.253

修正(新規追加,
R5年度実施分)

① アクティブ中性子法(3/10)

(b) DDA用中性子検出器の性能試験

【背景】

- DDA法(ダイアウェイ時間差分析法)やFNDI法は, 測定試料に中性子を照射し, 核分裂反応で放出される核分裂中性子を検出することで核燃料物質を求めるため, 中性子検出器の性能が分析の精度に大きく影響する。
- He-3は長期的には供給不足の懸念があり, またガンマ線にもある程度の感度がある。
- B-10(ライナー)検出器は, He-3検出器に比べてガンマ線に対する感度が低く, 燃料デブリが放出するガンマ線の影響を受けにくい, 中性子に対する検出感度が低くなる問題がある。
- 近年, 従来のB-10ライナー検出器に比べて中性子に対する検出感度を大幅に高めたB-10ストロー検出器が開発されたが, DDA法やFNDI法での利用実績はほとんどない。

【試験内容】

- B-10ストロー検出器をJAWAS-T装置に組み込み, 時間分布スペクトルを取得することにより, DDA法やFNDI法への基本的な適用性を確認する。
- B-10ストロー検出器の中性子およびガンマ線に対する感度を, 従来のHe-3検出器およびB-10ライナー検出器と比較する。
- 中性子イメージングによる容器内状況把握の可能性を確認する。

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.254

修正(新規追加,
R5年度実施分)

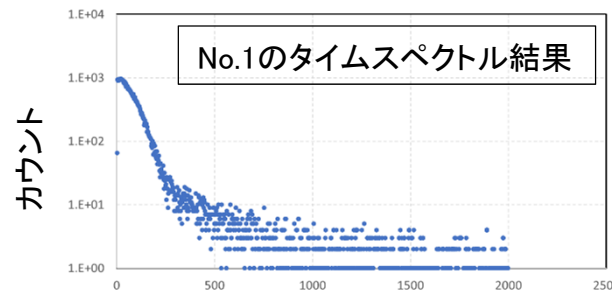
① アクティブ中性子法(4/10)

(b) DDA用中性子検出器の性能試験 - JAWAS-Tにおける時間特性試験 -

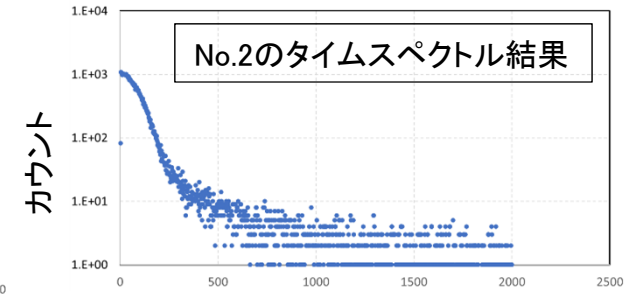
JAWAS-Tを用い, D-T中性子(100 Hz)を照射した時の測定結果例



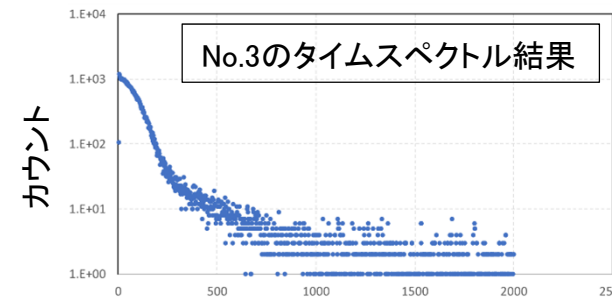
B-10ストロー検出器
(合計4体:左からNo.1,
No.2, No.3, No.4,
1体は7本のB-10スト
ロー検出器を横に並
べたもの)



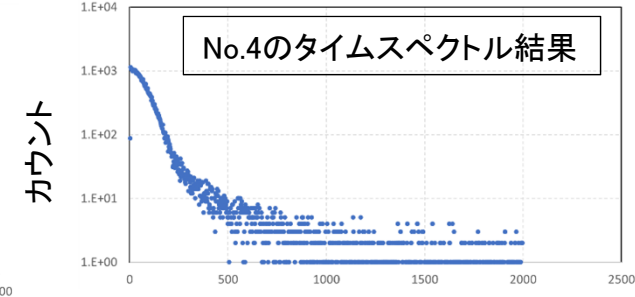
No.1のタイムスペクトル結果



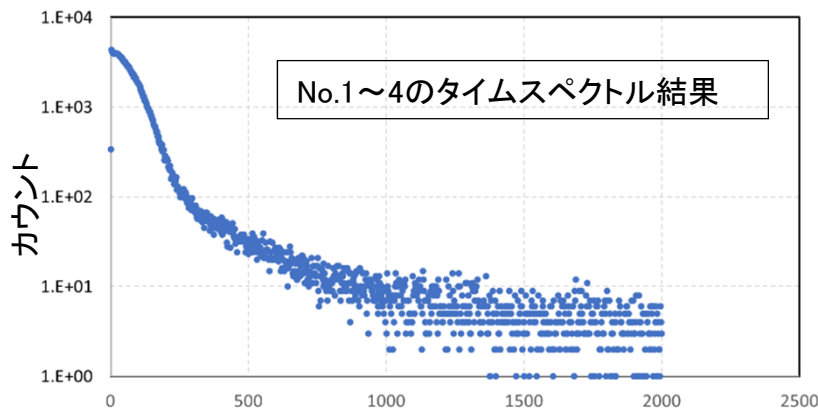
No.2のタイムスペクトル結果



No.3のタイムスペクトル結果



No.4のタイムスペクトル結果



No.1~4のタイムスペクトル結果

パルス後の経過時間(マイクロ秒)

- 4体の検出器のスペクトル結果は, 相互干渉などの影響が無く, ほぼ均一であり, 良好な測定体系であることが分かった。
- パルス後の中性子カウントの時間推移を測定できており, DDA法およびFNFI法で使用できる(十分な時間特性を有する)ことが分かった。

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.255

修正(新規追加,
R5年度実施分)

① アクティブ中性子法(5/10)

(b) DDA用中性子検出器の性能試験 - 中性子およびガンマ線の感度 -

B-10ストロー検出器と、従来型の中性子検出器であるB-10ライナー検出器との基本性能を比較するための試験を実施した。

検出器	中性子 感度比※	ガンマ線 感度比※
B-10ライナー	1.0	1.0
B-10ストロー	1.8	0.8

※B-10ライナーを1.0とした場合の比(中性子: ^{252}Cf , ガンマ線: ^{60}Co , ^{137}Cs)

- 中性子感度は、B-10ライナーより高く、蒸着面積から期待される値(2倍)とほぼ同じ。
- ガンマ線感度は、B-10ライナーとほぼ同じ。

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.256

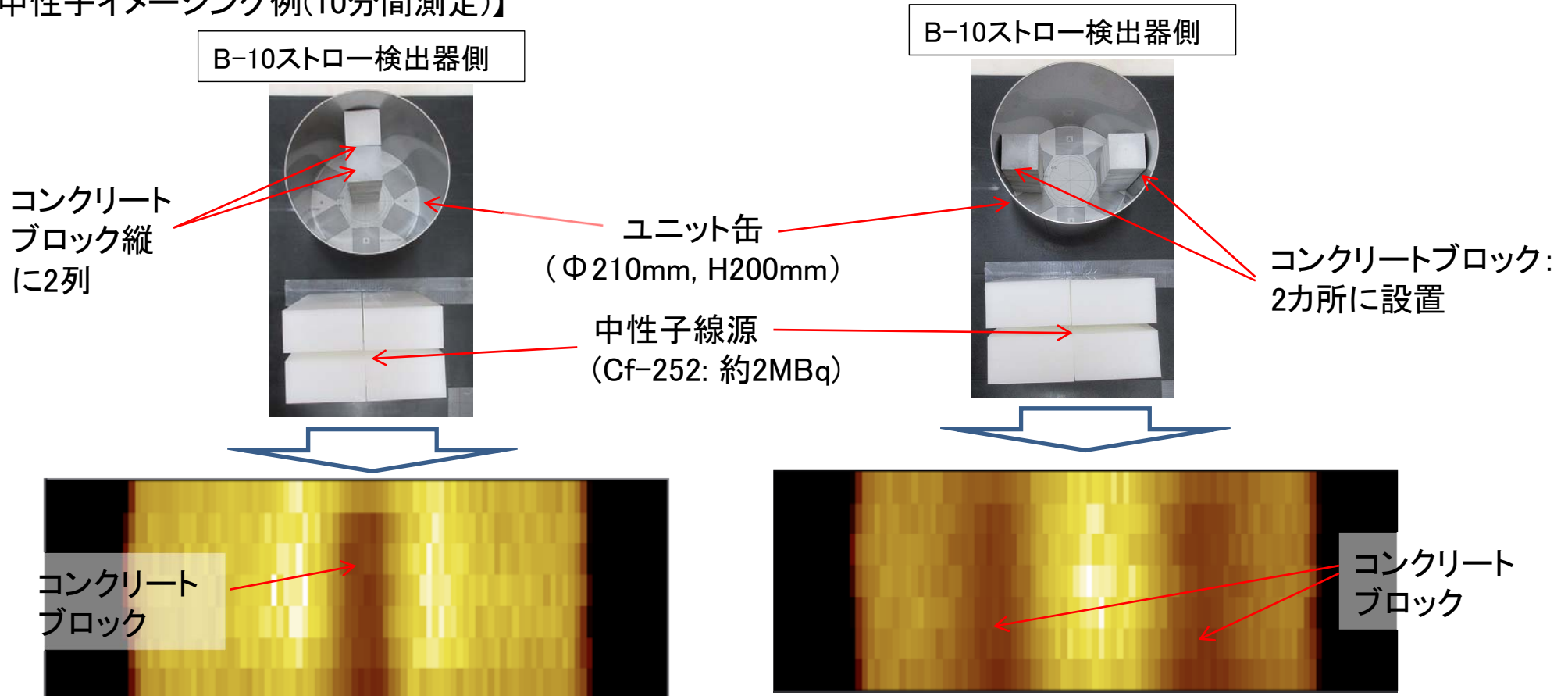
修正(新規追加,
R5年度実施分)

① アクティブ中性子法(6/10)

(b) DDA用中性子検出器の性能試験 - 中性子イメージング -

検出器の両端で波高を計測することで、中性子の検出位置を測定することができる。

【中性子イメージング例(10分間測定)】



- 測定対象物の基本的な形状を把握することができた。
- 測定対象物の偏在等による測定誤差を低減できる可能性がある。

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.257

修正(新規追加,
R5年度実施分)

① アクティブ中性子法(7/10)

(b) DDA用中性子検出器の性能試験 - まとめ -

今後のアクティブ中性子法の概念設計検討等に必要な中性子検出器の基本性能および基礎データを取得できた。

- JAWAS-T装置におけるB-10ストロー検出器の時間特性試験の結果、中性子時間分布スペクトルが取得でき、DDAやFNDI測定に使用できることが分かった。
- B-10ストロー検出器の中性子感度は、従来のB-10ライナー検出器の2倍程度であり、B-10の蒸着面積から期待される感度と同程度であった。
- B-10ストロー検出器のガンマ線感度は、B-10ライナー検出器と同程度であった。
- B-10ストロー検出器によるイメージングは、測定対象物の偏在による測定精度の悪化を低減できる可能性がある。

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.258

① アクティブ中性子法(8/10)

(c) 高計数率ガンマ線測定試験

【試験内容】

ホウ素やガドリニウムなどの測定が期待できるPGA(即発ガンマ線分析法)によって中性子吸収材の量が分かれば, DDA測定で得られたデータを補正することで, 定量や仕分け判定精度の向上などが期待できる。PGAの性能評価の一環として, 計数率がガンマ線のエネルギー分解能に与える影響を検討した。

- ✓ Cs-137線源をGe検出器を用いて測定
- ✓ 様々な計数率の下でのスペクトルを取得
- ✓ 2種類の機器で測定(デジタルは2種類の波形整形設定)

- ・アナログ
- ・デジタル(高分解能測定用の波形設定)
- ・デジタル(耐計数率測定用の波形設定)

● アナログの測定結果

- ✓ 分解能は計数率とともに徐々に悪化
- ✓ 1×10^4 cpsでデジタル(耐計数率設定)と同程度となる

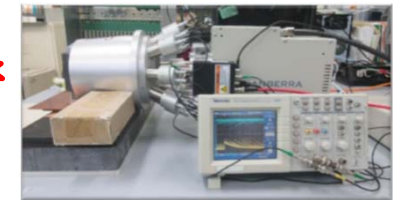
● デジタル(高分解能設定)の測定結果

- ✓ 2×10^4 cpsまでは分解能の大きな変動なし
- ✓ 2×10^4 cps以上で分解能が急激に悪化する
- ✓ 3.5×10^4 cpsでデジタル(耐計数率設定)と同程度となる
- ✓ 3.5×10^4 cps以上でさらに悪化する

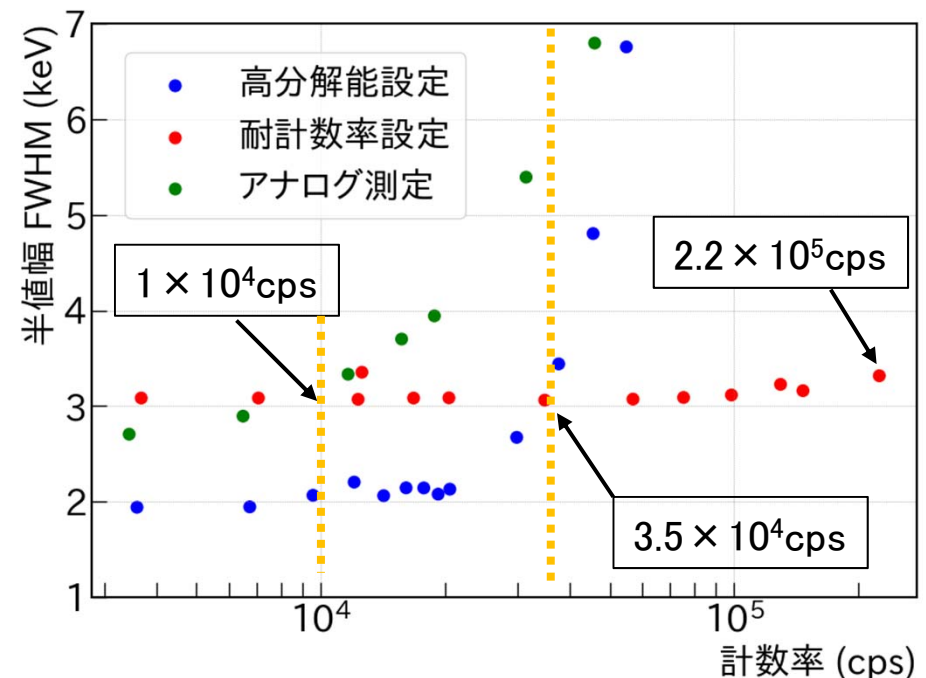
● デジタル(耐計数率設定)の測定結果

- ✓ 2.2×10^5 cpsまで分解能の大きな変動なし
- ✓ 2.2×10^5 cps以上は, 測定困難である

線源の位置・数を変更



ガンマ線ピークの半値幅の計数率依存性



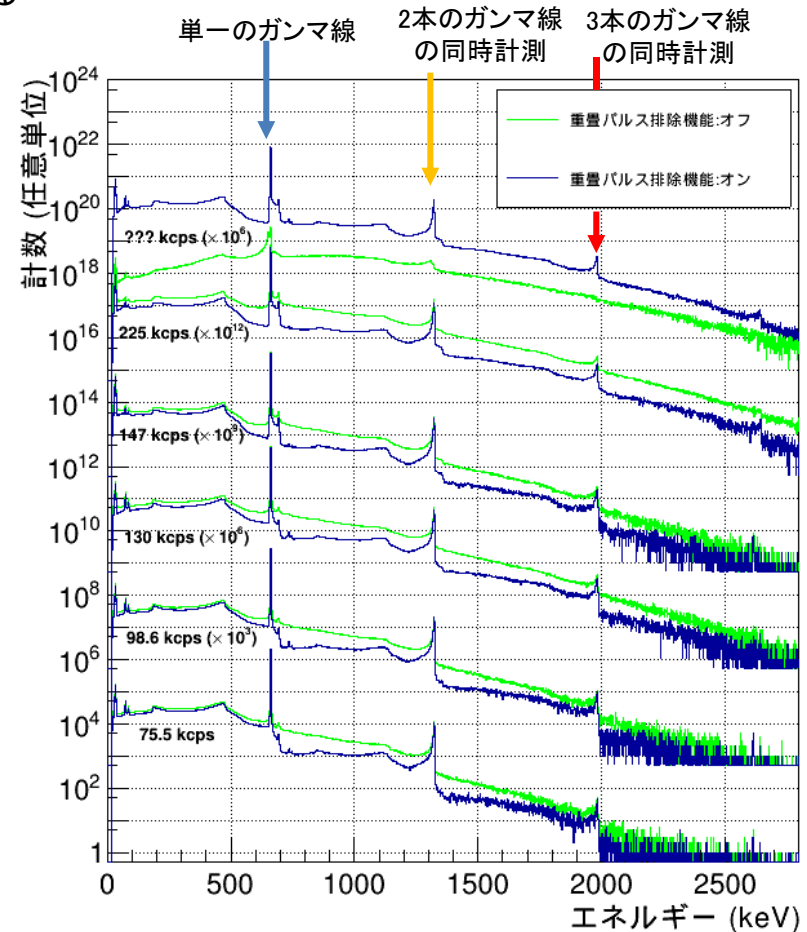
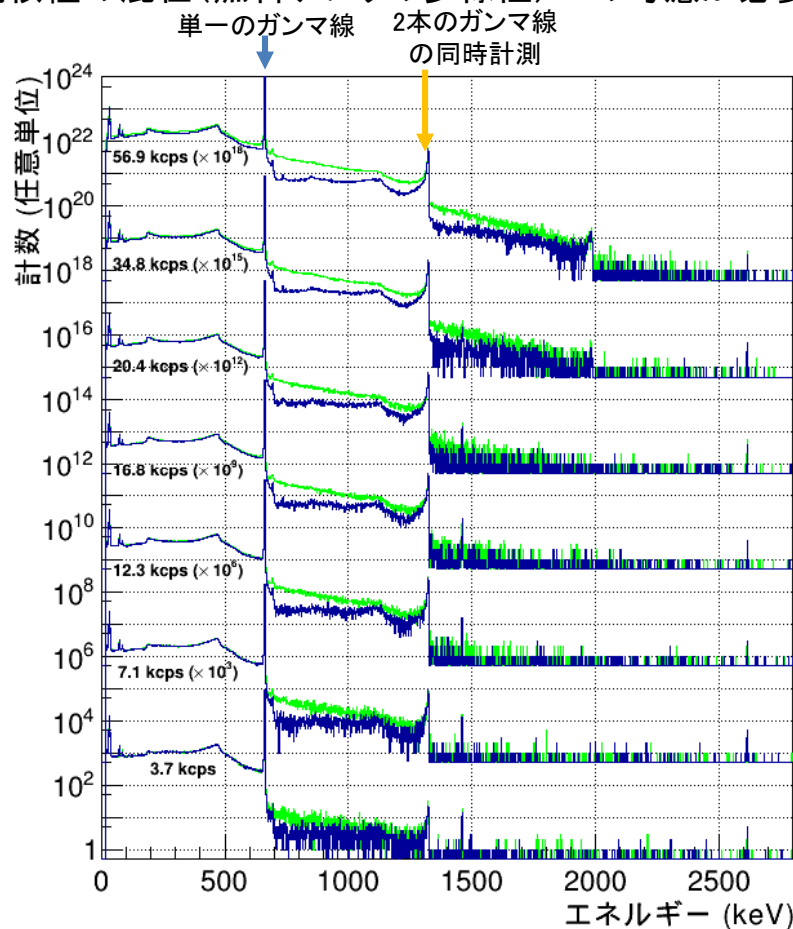
4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

① アクティブ中性子法(9/10)

(c) 高計数率ガンマ線測定試験

Cs137ガンマ線スペクトルの計数率依存性(耐計数率設定)

- ✓ 高計数率において、ガンマ線が複数個同時に検出される事象(パイルアップ)が増える
- ✓ パイルアップにより、微弱なガンマ線の検出が困難になる
- ✓ 高放射能核種の混在(燃料デブリの多様性)への考慮が必要である



4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.260

① アクティブ中性子法(10/10)

まとめ

一部追加
(ピンク枠内,
R5年度実施分)

(a) 中性子吸収材などの影響評価に関する試験において、ブロック形状の模擬試料を用いることで中性子吸収材の影響を評価できることが分かった。

(b) DDA用中性子検出器の性能試験により、He-3検出器に比べてガンマ線影響が少ないB-10ストロー検出器がDDA計測に利用可能であることが分かった。また、今後のアクティブ中性子法の要素技術確認試験や装置の概念設計検討等に必要となる中性子検出器の基本性能および基礎データを取得できた。

(c) 高計数率ガンマ線測定試験において、PGAの性能評価に資する、計数率がGe検出器によって得られるガンマ線のエネルギー分解能に与える影響に関する知見が得られた。

【課題】

デブリの多様性を再現できるブロック形状の模擬試料などを用いた要素技術確認試験を行うことで多様性(特に中性子吸収材)の影響低減効果を実験的に検証するとともに、影響低減法の高度化を試みる必要がある。

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

(② パッシブ中性子法)

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.262

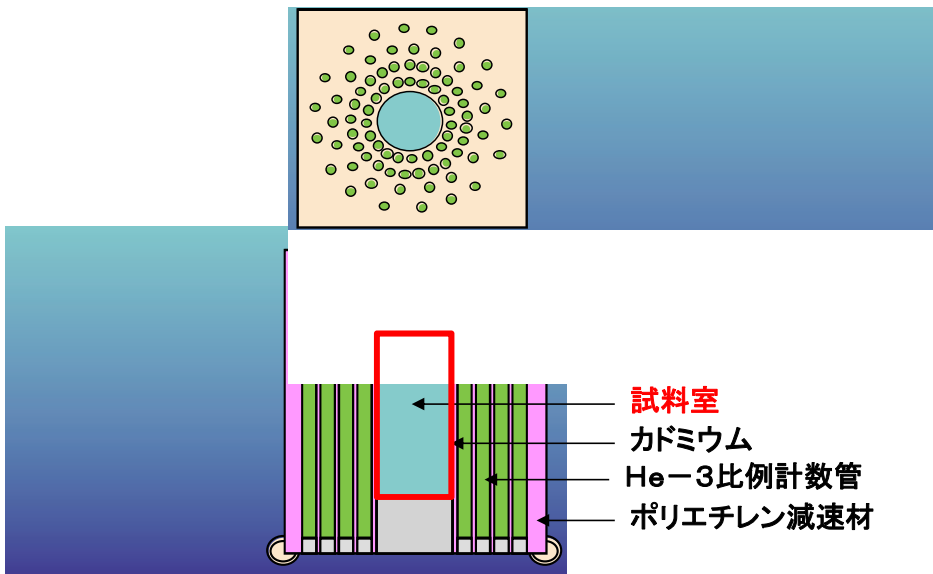
② パッシブ中性子法(1/10)

(a) パッシブ中性子法装置の利用を想定した試験検討

【要素技術確認試験のねらい】

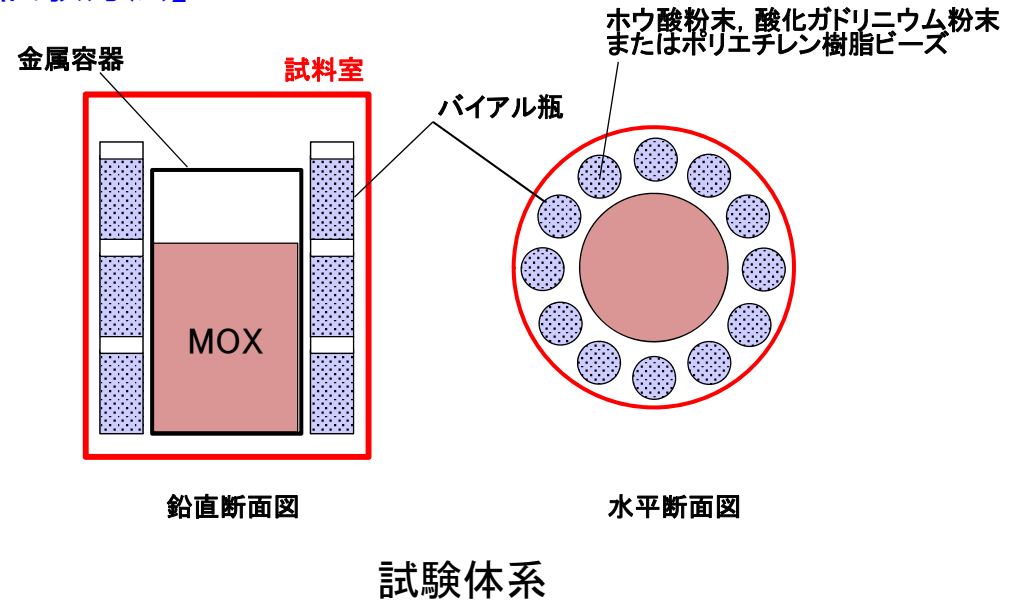
- 主な影響因子(中性子吸収材量や水分量)が計測精度へ与える影響を実測により確認する。
- 計測精度への影響を低減させる手法を実測およびシミュレーションにより検討する。
- シミュレーションの予測精度を確認するとともに、必要に応じて精度向上策を検討する。

【試験装置】



試験装置: PSMC
(プルトニウムスクラップ測定装置)

【試験方法】



- PSMC装置の試料室に金属容器に封入したMOX燃料を設置し、周囲に中性子吸収材または中性子減速材を入れた複数のバイアル瓶を配置する。
- MOX組成, バイアル瓶内の材料, バイアル瓶の数を変更して多様性を模擬する。

※PSMC装置の詳細は添付-1参照

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

② パッシブ中性子法(2/10)

模擬燃料デブリ試料の仕様

- 廃炉・汚染水対策事業(2020・2021年度)で実施したシミュレーションにおいて、燃料デブリを計測する際の影響因子として抽出された中性子吸収材(B, Gd), 中性子減速材(水)を考慮した模擬燃料デブリ試料の仕様を検討(臨界安全の観点から水の使用は困難なためポリエチレンで代替)

基本モデル(MOX燃料)

モデル区分	核燃料物質ID
MOX単体	MOX-1
	MOX-2
	MOX-3

基本モデル+B

1.3~9.8vol% B₄C相当量

モデル区分	核燃料物質ID	B-10(g)	B-10/Fissile 重量比
MOX+B1	MOX-1	9	0.01
	MOX-2		0.01
	MOX-3		0.01
MOX+B2	MOX-1	18	0.03
	MOX-2		0.02
	MOX-3		0.01
MOX+B3	MOX-1	36	0.05
	MOX-2		0.03
	MOX-3		0.03

基本モデル+Gd

13.0~54.5vol% Gd₂O₃相当量

モデル区分	核燃料物質ID	Gd(g)	Gd/Fissile 重量比
MOX+Gd1	MOX-1	95	0.13
	MOX-2		0.09
	MOX-3		0.07
MOX+Gd2	MOX-1	190	0.27
	MOX-2		0.18
	MOX-3		0.13
MOX+Gd3	MOX-1	381	0.54
	MOX-2		0.36
	MOX-3		0.27

基本モデル+ポリエチレン

8.4~42.5vol% H₂O相当量

モデル区分	核燃料物質ID	Poly(g)
MOX+poly1	MOX-1	132
	MOX-2	
	MOX-3	
MOX+Poly2	MOX-1	263
	MOX-2	
	MOX-3	
MOX+poly3	MOX-1	527
	MOX-2	
	MOX-3	

燃料重量, 中性子吸収材, 減速材の組み合わせで30ケースの模擬試験を検討

※模擬燃料デブリ試料の仕様については実測定上の課題などに応じて変更が生じる可能性がある。

事故後10年経過時の1F1の燃料および制御棒の平均組成から求めたB-10/Fissile重量比は0.08

事故後10年経過時の1F1の最低燃焼度5.23GWd/tの燃料に含まれるGd量および燃料の平均組成から求めたGd/Fissile重量比は0.04

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.264

② パッシブ中性子法(3/10)

模擬燃料デブリ試料の仕様

MOX燃料試料

核燃料物質の情報

核燃料物質ID	MOX (g)	Pu (g)	U (g)	Pu240eff. (g)	Fissile (g)	Fissile/Pu240eff.
MOX-1	2,748	1,094	1,242	452	709	1.6
MOX-2	4,122	1,641	1,863	678	1,063	1.6
MOX-3	5,497	2,188	2,484	903	1,418	1.6

核燃料物質の同位体組成比(重量%)

核燃料物質ID	Pu-238 (%)	Pu-239 (%)	Pu-240 (%)	Pu-241 (%)	Pu-242 (%)	Am-241 (%)	U-233 (%)	U-234 (%)	U-235 (%)	U-236 (%)	U-238 (%)
MOX-1~3	1.261	62.135	28.479	2.396	5.729	7.996	0.000	0.004	0.220	0.001	99.775

※核燃料物質の重量については、端数処理をした値を記載。

模擬燃料デブリ試料の調整のために選定されたこれらの核燃料物質については、施設の操業に伴い重量及び組成に変更が生じる可能性がある。

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

② パッシブ中性子法(4/10)

試験で想定するケースモデル

- 試験で想定するケースモデルとケースモデルごとの測定体系を検討(核燃料物質と部材(B, Gd, ポリエチレン)を混合して模擬燃料デブリ試料を調整することは許認可上不可能なため、核燃料物質近傍に部材を配置することにより燃料デブリを模擬)

モデル区分	MOX単体	MOX+B1~MOX+B3	MOX+Gd1~MOX+Gd3	MOX+Poly1~MOX+Poly3
試料の調整に用いる主要な部材	MOX粉末	MOX粉末 ホウ酸粉末	MOX粉末 酸化ガドリニウム粉末	MOX粉末 ポリエチレン樹脂ビーズ(水代替)
測定体系 (鉛直断面図)	<p>試料室 金属容器 核燃料物質</p>	<p>バイアル瓶 (25mL)</p> <p>ホウ酸粉末、酸化ガドリニウム粉末またはポリエチレン樹脂ビーズ</p>	<p>バイアル瓶に封入する部材</p> <p>ホウ酸粉末 酸化ガドリニウム粉末 ポリエチレン樹脂ビーズ</p> <p>ホウ酸粉末、酸化ガドリニウム粉末またはポリエチレン樹脂ビーズ</p>	<p>バイアル瓶に封入する部材</p> <p>ホウ酸粉末 酸化ガドリニウム粉末 ポリエチレン樹脂ビーズ</p> <p>ホウ酸粉末、酸化ガドリニウム粉末またはポリエチレン樹脂ビーズ</p>
測定体系 (水平断面図)	<p>金属容器 核燃料物質 試料室</p>	<p>バイアル瓶</p> <p>ホウ酸粉末、酸化ガドリニウム粉末またはポリエチレン樹脂ビーズ</p>	<p>バイアル瓶</p> <p>ホウ酸粉末、酸化ガドリニウム粉末またはポリエチレン樹脂ビーズ</p>	<p>バイアル瓶</p> <p>ホウ酸粉末、酸化ガドリニウム粉末またはポリエチレン樹脂ビーズ</p>

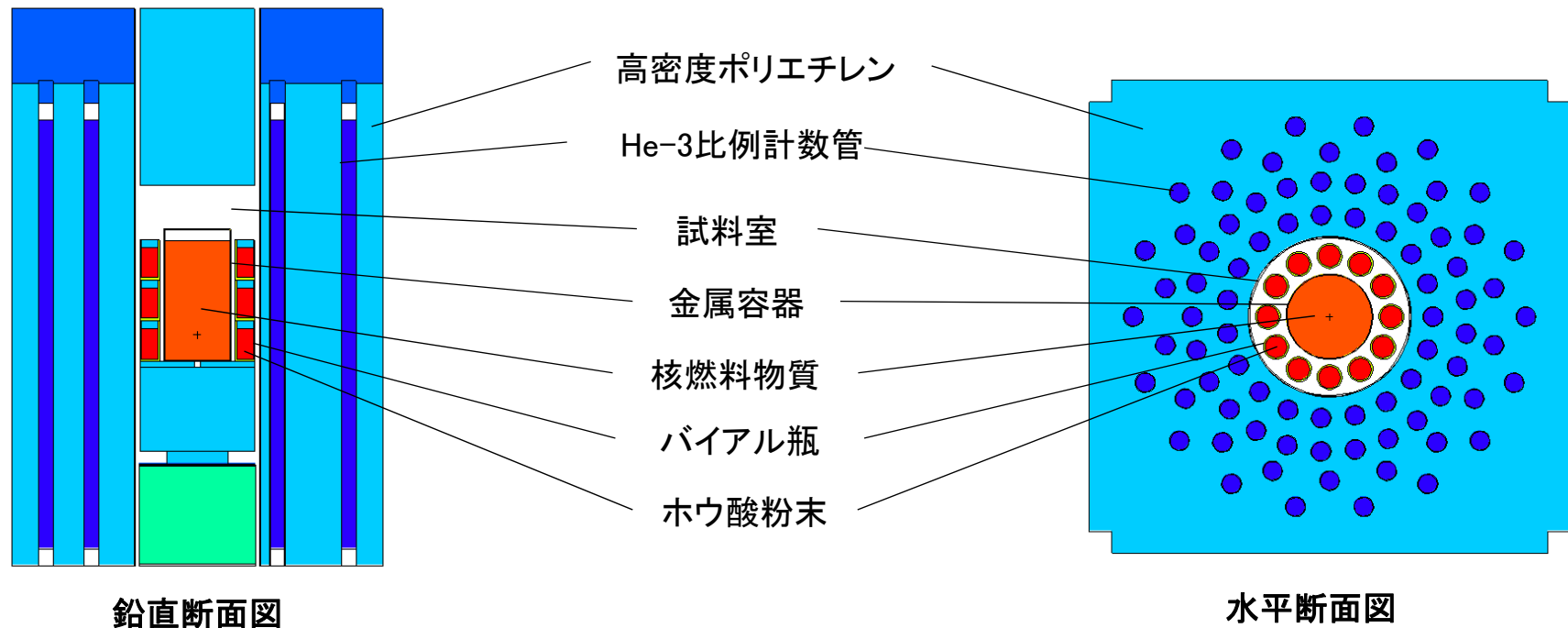
4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.266

② パッシブ中性子法(5/10)

シミュレーション手法

- 計算コード: MCNPX2.7.0
- 核データライブラリ: JENDL-4.0 (Ace形式)



PSMC装置による中性子吸収材(B)を考慮した
模擬燃料デブリ試料測定シミュレーションモデル

② パッシブ中性子法(6/10)

多様性影響低減手法の原理

① 中性子同時計数法

中性子同時計数法は、核分裂により、同時に複数個放出される中性子を選択的に計数することにより、 (α, n) 反応などによる同時性の無い中性子計数の影響を排除し、自発核分裂源核種を定量する手法である。

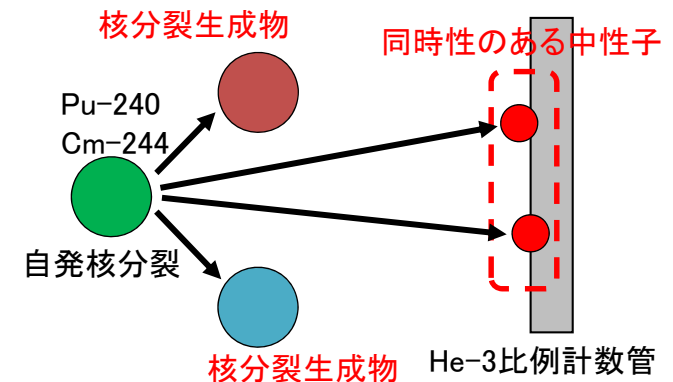


図 自発核分裂により放出された中性子の同時性の概念

② 中性子消滅時間差自己問いかけ(Differential Delayed Self-Interrogation (DDSI))法

DDSI法は、自発核分裂中性子と誘発核分裂中性子の検出時間分布の違いに着目することにより、自発核分裂中性子に比べて減速により遅れて計測される誘発核分裂による中性子数の増加や、中性子吸収による中性子数の減少の程度を評価する手法である。

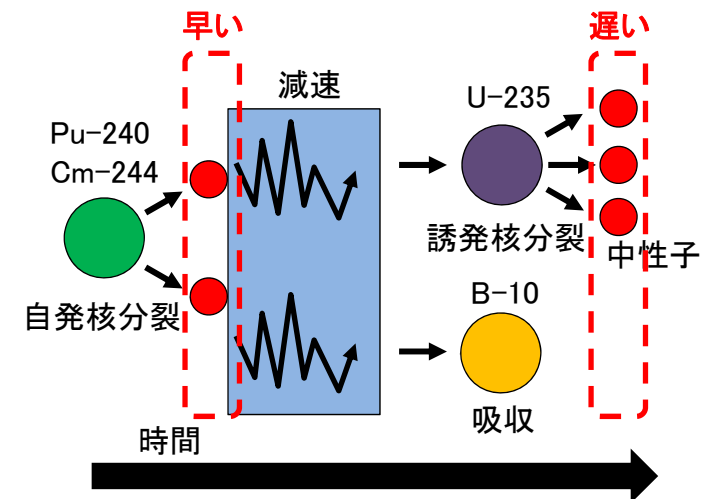


図 自発核分裂中性子と誘発核分裂中性子の検出時間の違い

これらの手法の採用により、容器内容物の多様性に起因する計測誤差をより小さくできることが期待される。これを試験検討体系に対するシミュレーションで確認した。

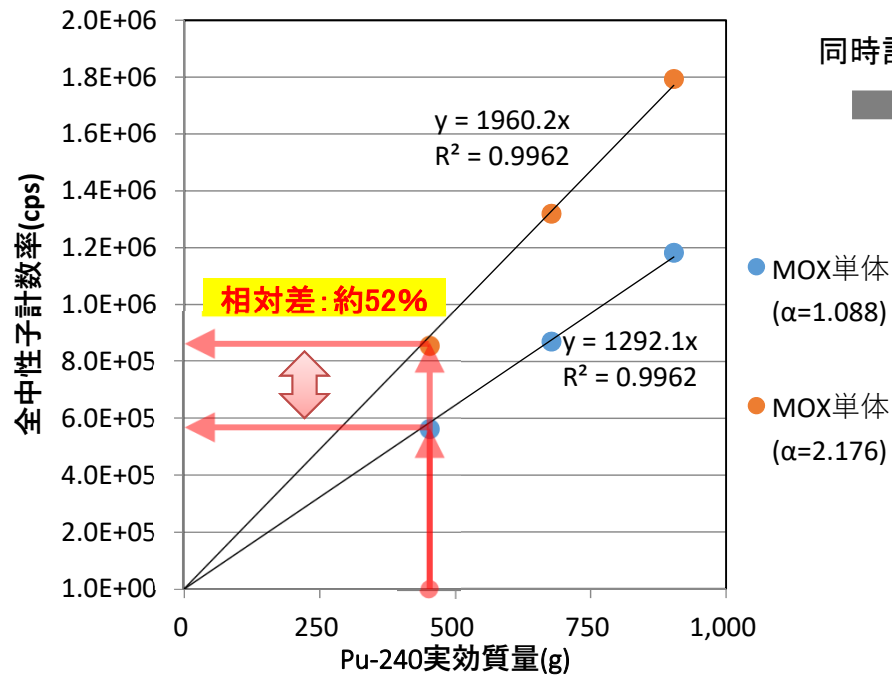
4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

② パッシブ中性子法(7/10)

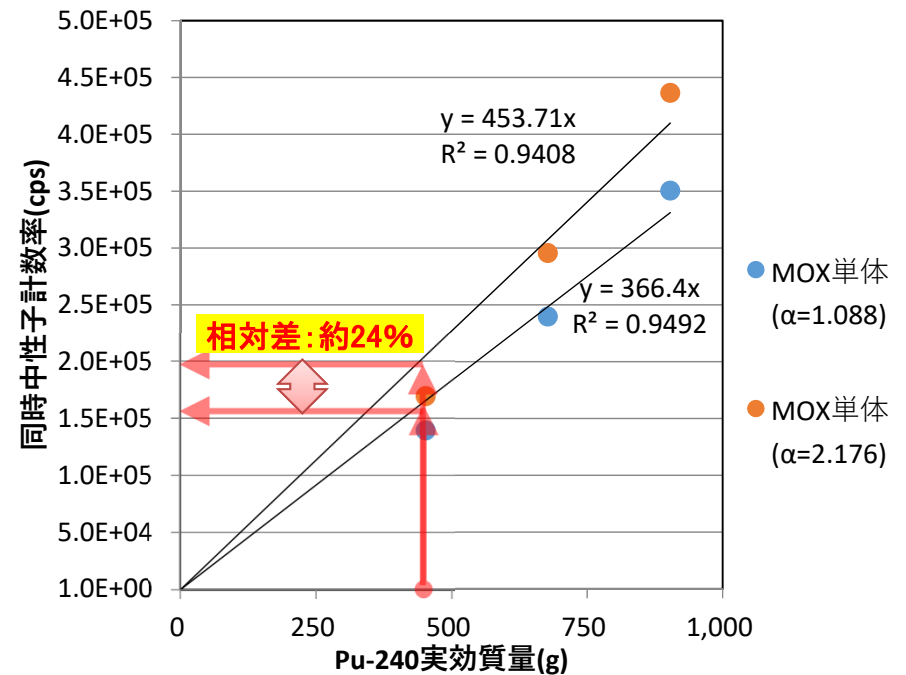
多様性影響低減手法の試験検討結果

【中性子同時計数法試験】

- (α, n)反応中性子と自発核分裂中性子の比(α 値)が異なるMOX試料に対するPSMC測定を想定したシミュレーションを行い, α 値が測定値(全中性子計数率および同時中性子計数率)に与える影響を評価
- 測定対象ごとに α 値が異なると予想される燃料デブリに対し, 中性子同時計数法が有効であることを確認



全中性子計数率とPu-240実効質量の相関



同時中性子計数率とPu-240実効質量の相関

注: 実際の燃料デブリの α 値が無視できるほど小さい場合は, 全中性子計数率と同時中性子計数率の相対差は大きく変わらない値になると予想される。実際の燃料デブリで計測されるのは主にCm-244実効質量であるため, Cm-244実効質量からU/Pu量などへ換算する評価手法が必要となる。

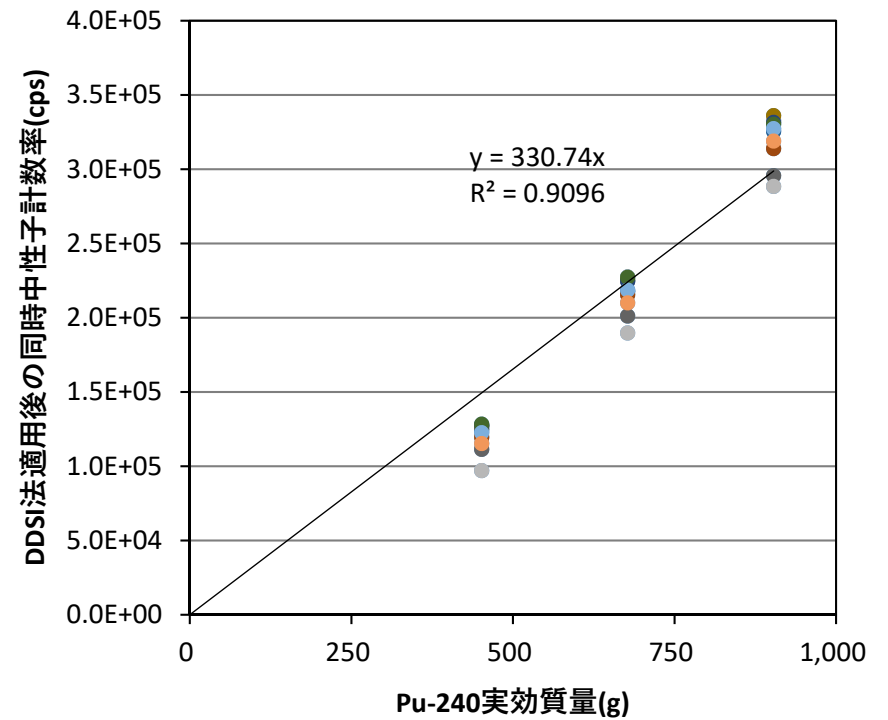
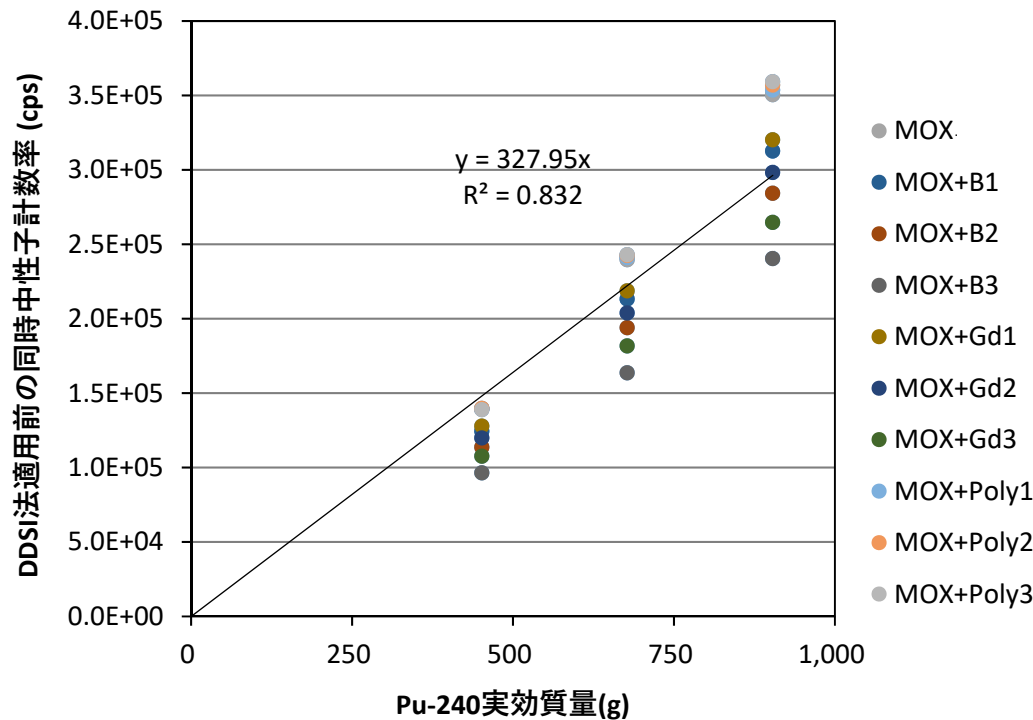
4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

② パッシブ中性子法(8/10)

多様性影響低減手法の試験検討結果

【DDSI法適用性評価試験】

- 模擬燃料デブリ試料を対象にDDSI法を適用したPSMC測定を想定したシミュレーションを実施した。
- DDSI法を用いて補正した同時中性子計数率を用いることにより、補正しない同時中性子計数率よりもPu-240実効質量との相関精度が向上することを確認し、DDSI法適用性評価試験が実現可能である見通しを得た。



同時中性子計数率(DDSI法適用前)とPu-240実効質量の相関

同時中性子計数率(DDSI法適用後)とPu-240実効質量の相関

注: 実際の燃料デブリで計測されるのは主にCm-244実効質量であるため、Cm-244実効質量からU/Pu量などへ換算する評価手法が必要となる。

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

② パッシブ中性子法(9/10)

(b) TMI-2燃料デブリの中性子計測法の検討

平均燃焼度:約3GWd/t, 事故後40年以上経過したTMI-2燃料デブリの極微量中性子線源の評価

TMI-2燃料デブリの計算モデル(仮定)

形状:球体(半径1cm) MCNP6.2 計算
燃焼度:3.25 (GWd/t)
組成:(U_{0.5}Zr_{0.5})O₂, かさ密度6.18 (g/cm³)
評価日:2024年12月

バブルディテクターの外観と特長



【検討結果】

ガンマ線量率評価

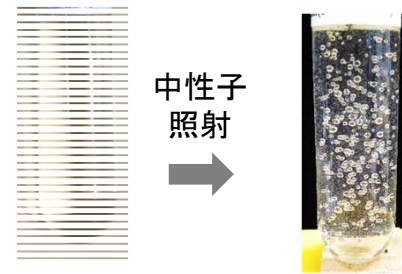
表面からの距離 (cm)	0	1	5	10
線量率 (mSv/h)	253.6	42.9	4.5	1.3

中性子フルエンス率評価

エネルギー範囲	フルエンス率(n/cm ² /s)
5 (eV)未満	0.00E+00
5 (eV)以上, 100 (keV)未満	1.02E-05
100 (keV)以上	5.49E-01

中性子検出器の要件

上記のガンマ線環境下において,
0.55 (n/cm²/s)程度の中性子束を検出可能



用途:PCV内の高ガンマ線環境狭隘空間での中性子検知や試験的取り出し試料の現場計測による事前仕分け(取り出し場所による判定基準作成)

- ・積算中性子線量計(高速中性子用)
- ・小型・軽量(19mmΦ×145mm, 58g), 減速材不要
- ・電源・ケーブル不要
- ・耐ガンマ線:Co60照射試験で約10(kGy)まで確認済
- ・気中で検出下限中性子束:10 (n/cm²/s)までは確認済
- ・MOX(1kg)で計測実績

- ・ガンマ線への耐放性は十分
- ・0.55 (n/cm²/s)の中性子を検出するのは困難

② パッシブ中性子法(10/10)

まとめ

- 既存のパッシブ中性子法装置(PSMC)とMOX試料の利用を想定し、MOX試料の周囲に中性子吸収材または中性子減速材を配置することにより燃料デブリの多様性を模擬した試験体系を構築
- パッシブ中性子法の適用性を確認するための手法を検討するため、試験体系についてシミュレーションモデルを構築
- α 値変動の影響低減策として中性子同時計数法を取り上げ、その適用性試験の有効性をシミュレーションにより確認
- 容器内での中性子吸収や中性子増倍の影響低減策としてDDSI法を取り上げ、その適用性試験の有効性をシミュレーションにより確認
- TMI-2燃料デブリ(約 3GWd/t, 44年経過)のパッシブ中性子を検出するための要件を確認

【課題】

- 実際の燃料デブリで計測されるのは主にCm-244実効質量であるため、Cm-244実効質量からU/Pu量などへ換算する評価手法が必要であり、評価手法に由来する不確かさが付随
- 数GWd/tの低燃焼度で40年以上経過した場合の燃料デブリに対するパッシブ中性子法の有効性確認

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

(③ ミュオン散乱法)

③ ミュオン散乱法(1/6)

(1) 開発方針

- 開発の目標
 - 燃料デブリ測定に適用可能な装置(ミュオン軌跡検出器)の開発
 - 開発した装置を使用した模擬デブリ測定による技術の実証
- 現状の課題
 - シミュレーション条件設定のための基本的なミュオン特性の取得
 - 燃料デブリ測定向けの装置仕様の策定
- 2022年度試験計画
 - 既存装置を用いたミュオン測定試験
 - 基礎的なミュオン特性の取得
 - 複数の物質に対するミュオン散乱データの取得
 - センサーの試作
 - ミュオン軌跡検出器を構成するセンサーの一部を試作
- 今後の計画
 - 1F向け試験装置の開発(センサーを組み合わせた測定システム開発)
 - 燃料デブリ測定条件を想定した燃料測定(ホット試験)の実施

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.274

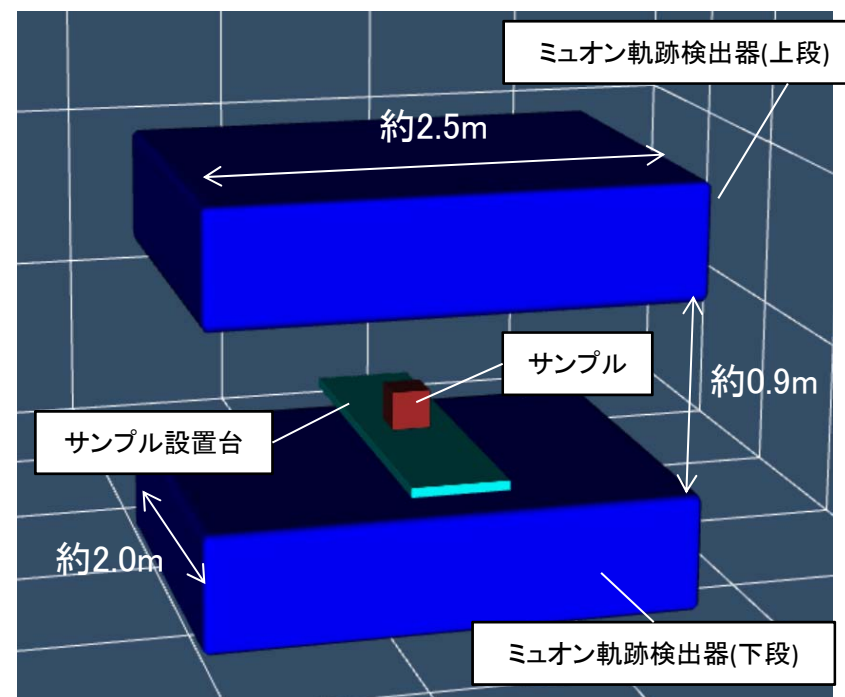
③ ミュオン散乱法(2/6)

(2) 要素技術確認試験

- ロスアラモス国立研究所保有のミュオン軌跡検出器を用いた測定試験を実施
 - ミュオン測定における**基本的な特性の取得**
 - 複数の物質サンプルを測定し、**物質ごとのミュオン散乱データを取得**



ミュオン軌跡検出器(ロスアラモス国立研究所)

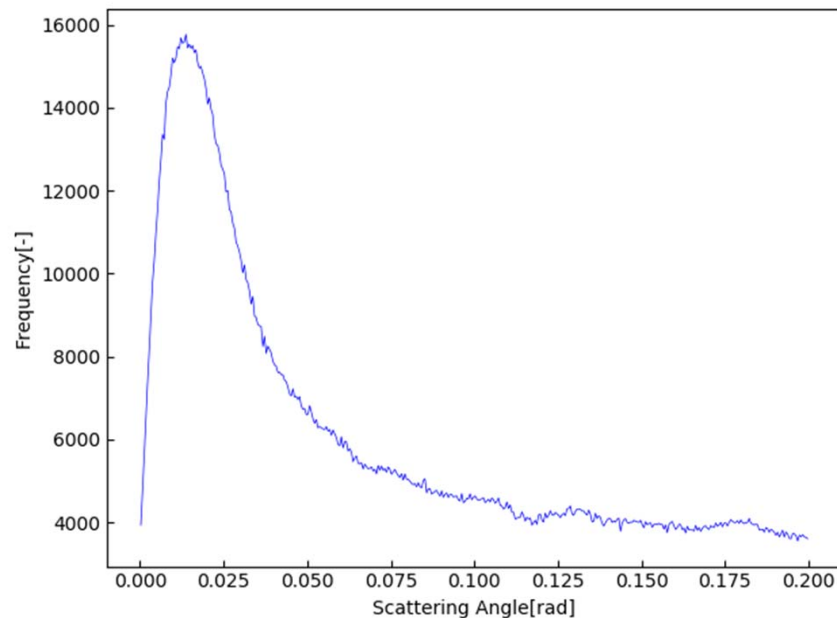


測定体系

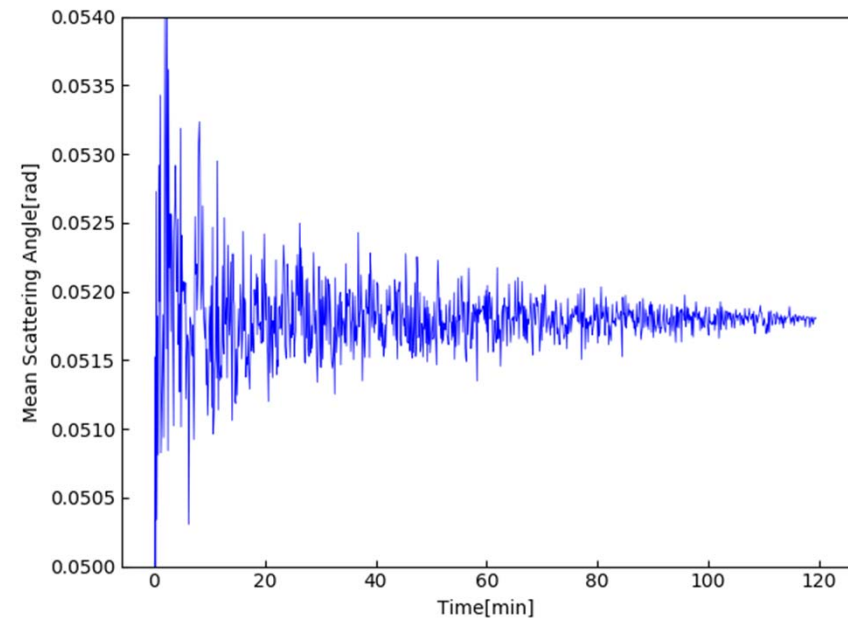
③ ミュオン散乱法(3/6)

(2) 要素技術確認試験

- ミュオン散乱角スペクトル
 - サンプルを設置しない条件でのミュオン散乱スペクトル(解析の基準値)の取得
- 測定時間に対する平均散乱角の推移
 - 測定時間に対するミュオン散乱角のばらつきを評価



ミュオン散乱スペクトル(サンプルなし条件)



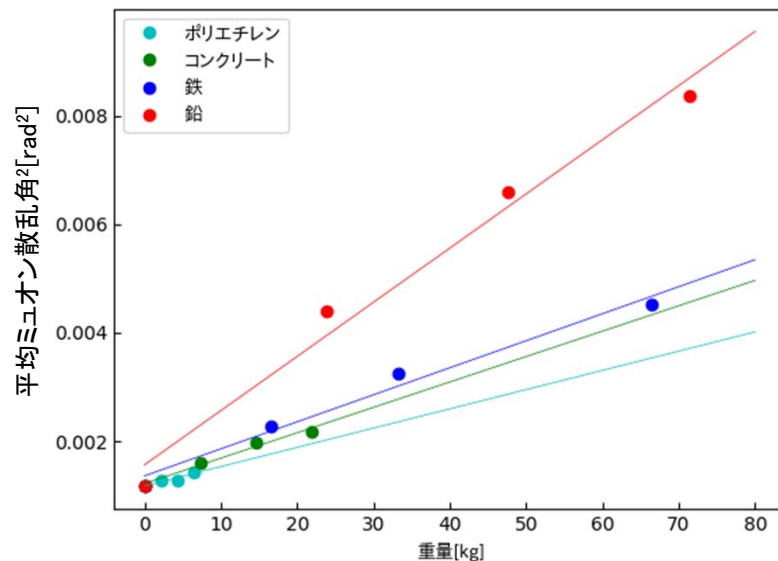
測定時間に対する平均ミュオン散乱角のばらつき

- 散乱スペクトル基準値としてシミュレーション評価に反映
- **統計誤差低減のために測定時間を2時間に設定**

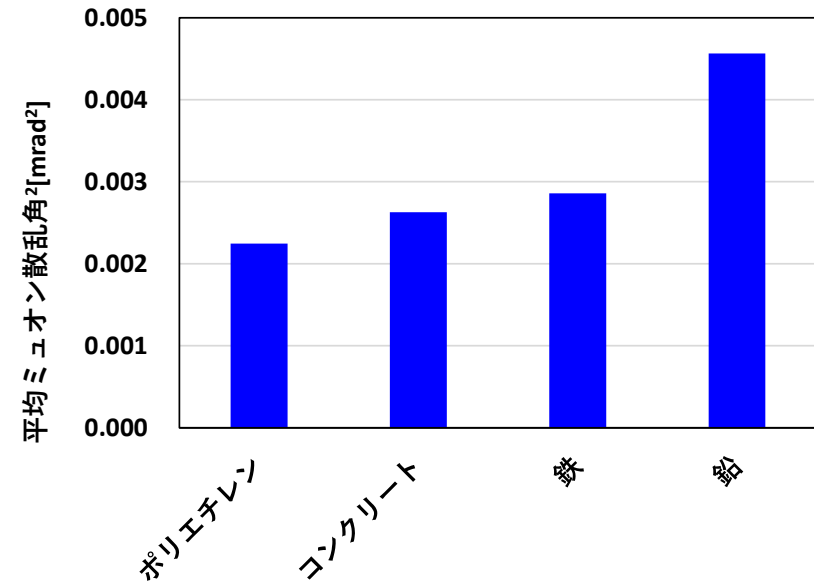
③ ミュオン散乱法(4/6)

(2) 要素技術確認試験

- 物質サンプルに対するミュオン散乱測定
 - 対象サンプル: ポリエチレン, コンクリート, 鉄, 鉛
- 測定結果
 - サンプル物質の種類および重量に対するミュオン散乱実測値を取得
 - 実測値を反映したシミュレーション条件のキャリブレーションなどに反映



各サンプルの平均ミュオン散乱角



各サンプル30kg換算値での平均ミュオン散乱角

- 重量の違いによるミュオン散乱角の特性を評価

- 物質ごとにミュオン散乱角が異なる事を確認

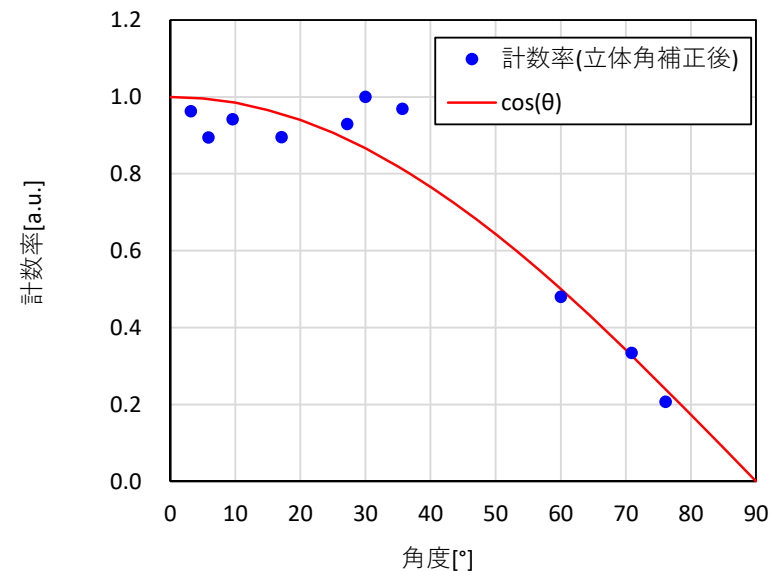
③ ミュオン散乱法(5/6)

(2) 要素技術確認試験

- センサーの試作
 - ミュオン軌跡検出器を構成するセンサー(ドリフトチューブ検出器)を試作・動作を確認
- ミュオン入射角度分布
 - ミュオン計数率の入射角度依存性を測定



ドリフトチューブ検出器



ミュオン入射角度分布評価結果

- 燃料デブリ測定用装置開発の要素技術として利用

- 今後のシミュレーションの設定条件として反映

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.278

③ ミュオン散乱法(6/6)

まとめと今後の課題

【実施内容】

- 1) 既設装置などを用いた基本的なミュオン特性取得
- 2) 複数種類の物質サンプルに対するミュオン散乱を測定
- 3) ミュオン軌跡検出器開発用のセンサー試作
- 4) 試験計画の検討

【成果/開発への寄与】

- 1) 基本的なミュオン特性データの取得
 - ・ ミュオン散乱スペクトル, ミュオンの入射角度分布, 測定時間による統計誤差
- 2) 複数の物質に対するミュオン散乱データを取得
 - ・ 物質の種類によりミュオン散乱値が異なることを確認
- 3) 1F測定装置用の試作センサーの動作確認を完了
- 4) 試験計画の作成
 - ・ 核燃料を含むサンプルのミュオン散乱測定試験
 - ・ 実測データをもとにした核燃料重量評価関数の作成

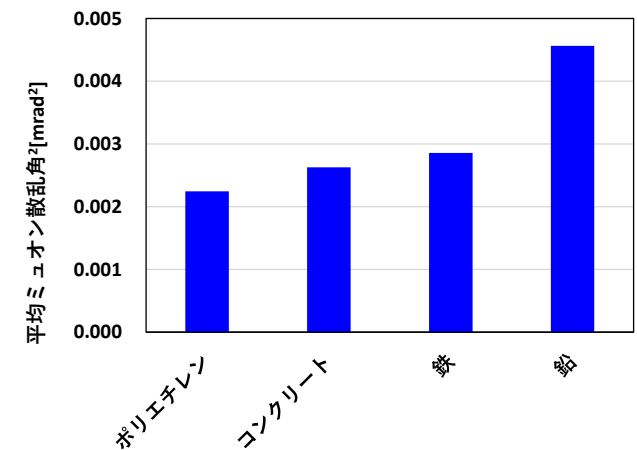
【課題】

- 1) 課題: 複数物質が混合した条件での核燃料重量の推定
- 2) 課題: 1F測定環境で動作可能なセンサーおよび測定システムの構築



ミュオン軌跡検出器(ロスアラモス国立研究所)

- ・ 既存の測定装置を利用し, ミュオン特定およびサンプルからの散乱を取得



同一重量サンプルに対する計測値

- ・ 複数サンプルに対してミュオン散乱を測定
- ・ 物質の違いにより散乱が異なる

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

(④ X線CT法)

④ X線CT法(1/4)

試験概要

本年度は試験計画を立案し、今後、試験および追加解析を実施予定

■試験目的:

仕分けシナリオや核燃料物質質量などの評価手法に関する詳細検討に向けて、以下の目的で試験を実施予定

- 本年度までの解析結果の傾向を、試験により確認
- 燃料デブリの模擬体を製作・測定し、燃料デブリの性状に関する知見を拡充し、他の計測技術の補正に提供できる測定データを検討

■試験項目:

- 1: 物質かさ密度の影響評価試験
- 2: 非放射性MCCI模擬試験体の撮像試験

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

④ X線CT法(2/4)

試験項目1: 物質かさ密度の影響評価試験

＜試験内容＞ 気孔などが混入してかさ密度が変化した燃料デブリ組成に対するMECT*の適用性を確認

* MECT: Multiple-Energy X-ray CT

課題

- 燃料デブリに空間分解能より小さい気孔が混入した場合、燃料デブリに含有される各物質のかさ密度が変化するため、従来CTでは核燃料などの物質が識別できない可能性がある。(R2-R3年度補助事業により抽出された課題)

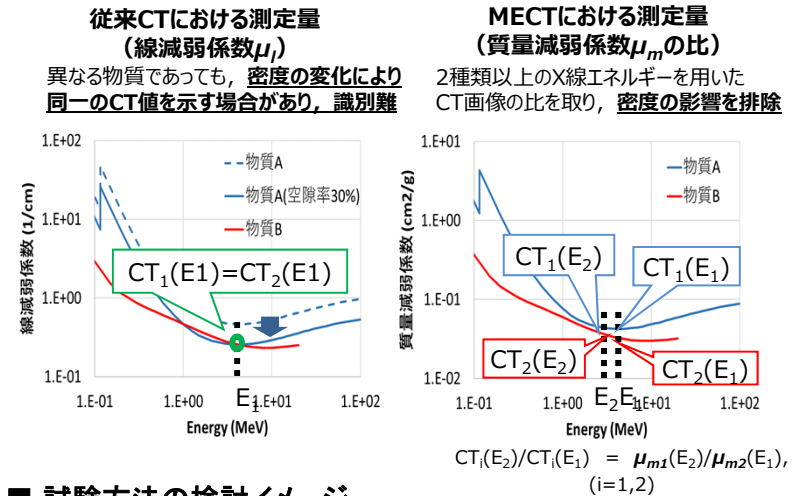
試験目的

- 複数のX線エネルギーを照射する方式(MECT)により、原子番号に対応した物理量を計測し、物質のかさ密度が変化した場合を想定した物質識別性を評価。

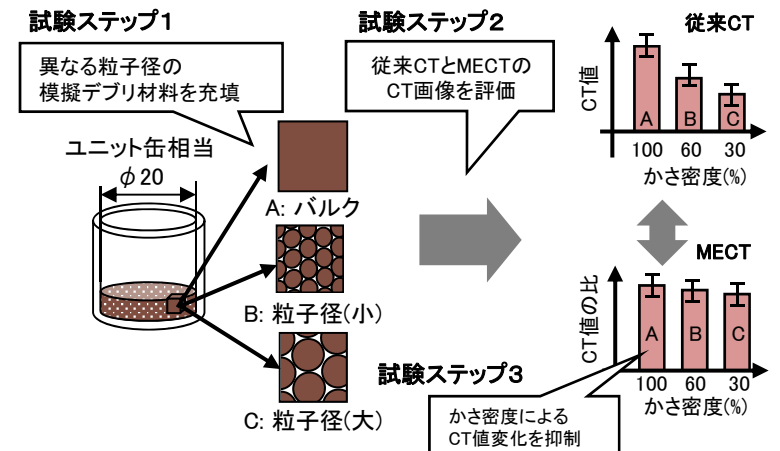
試験項目

- 物質かさ密度に関するMECTによる物質識別性の評価
異なる粒子径の非放射性物質をユニット缶相当の容器に充填して物質のかさ密度を変化させた試験体を用意し、従来CTとMECTの撮像により得られる物理量を比較。

従来CTとMECTの物質識別の違い



試験方法の検討イメージ



4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

④ X線CT法(3/4)

試験項目2: 非放射性MCCI模擬試験体の撮像試験

＜試験内容＞ 非放射性MCCI模擬試験体を撮像し、デブリ性状データを取得・分析

課題

- 各計測技術に対する影響が比較的大きい燃料デブリの組成や偏在に関する情報が少なく、複数の計測技術の組合せに関する検討が困難。

試験目的

- 非放射性MCCI模擬試験体に対する組成や偏在に関する情報を取得。

試験項目

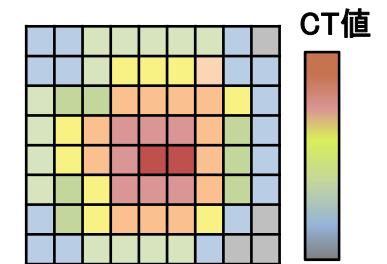
- ① 模擬デブリ全体の性状評価**
試験体全体の形状・かさ密度・組成の偏在を評価し、性状が異なる層ごとに分類。
- ② 加工した模擬デブリの性状評価**
上/中間/下層から加工してUC相当に充填した試験体の形状・かさ密度・組成の偏在を評価。
※別計測による照合評価は今後実施

試験項目①のイメージ

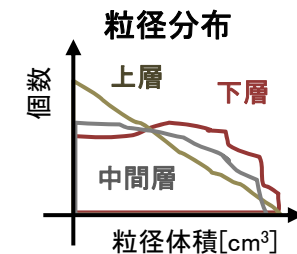
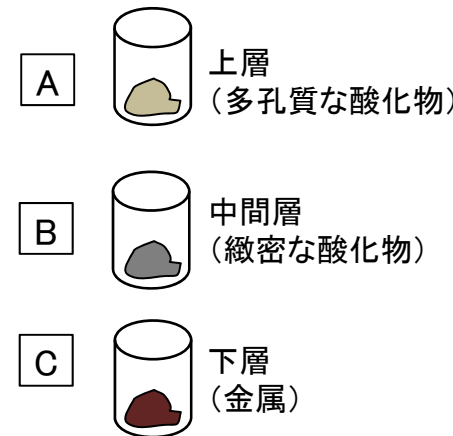


燃料デブリ・炉内構造物の取り出し基盤技術の高度化_平成30年度研究成果報告

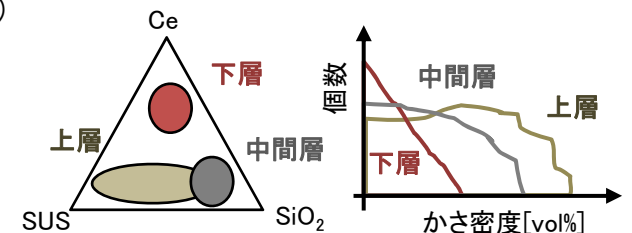
任意断面での密度分布



試験項目②のイメージ



組成分布(>1cm³) かさ密度分布(>1cm³)



④ X線CT法(4/4)

<まとめと今後の課題>

【実施内容】

- ・検出器応答解析や核燃料物質質量評価手法の検討結果を受けて、ふたつの試験方法を検討した。

【成果/開発への寄与】

- ・試験1: 物質かさ密度の影響評価試験
異なる粒子径の非放射性物質をユニット缶相当の容器に充填して物質のかさ密度を変化させた試験体を用意し、従来CTとMECTの撮像により得られる物理量を比較する。
- ・試験2: 非放射性MCCI模擬試験体の撮像試験
 - 模擬デブリ全体の性状評価
試験体全体の形状・かさ密度・組成の偏在を評価し、性状が異なる層ごとに分類する。
 - 容器に充填した模擬デブリの性状評価
上/中間/下層から加工してUC相当に充填した試験体の形状・かさ密度・組成の偏在を評価する。

【課題】

- ・試験体製作および試験(今後実施を検討)
 - 試験1: 粒子径および材質の選定
 - 試験2: 組成の別試験による評価手法の検討

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

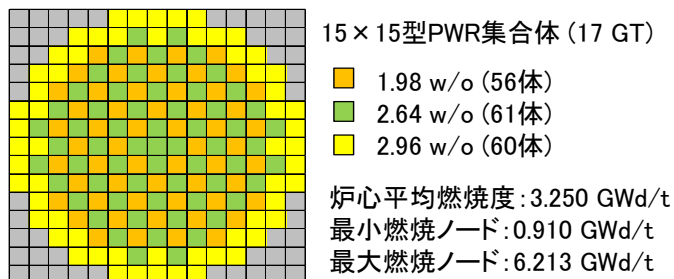
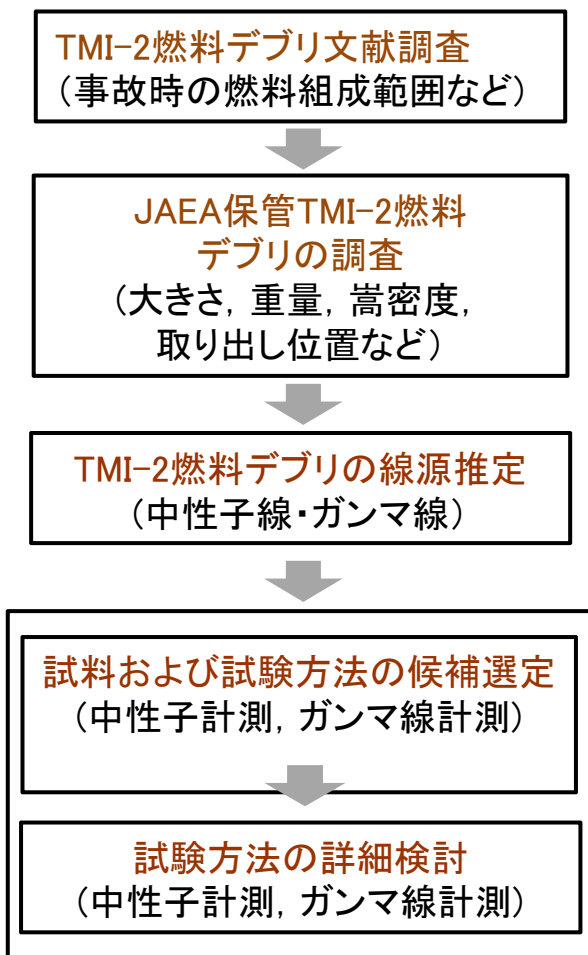
(⑤ パッシングガンマ線法)

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

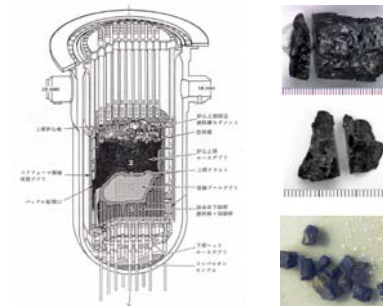
⑤ パッシブガンマ線法(1/5)

TMI-2燃料デブリのパッシブガンマ線スペクトル測定 の 検討

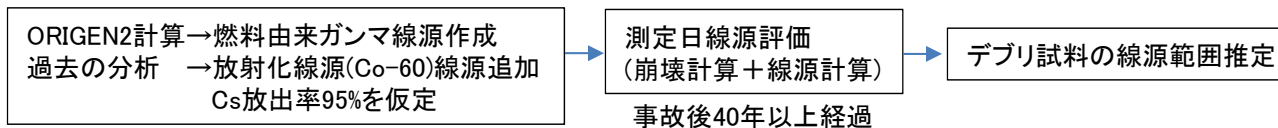
【検討手順】



TMI-2炉心仕様調査



JAEA保管燃料デブリ調査



ホットラボ施設(RFEF)との調整
(許認可/保安全管理規定範囲,
施設および導入可能装置の制
限, マシントイム, 費用など)



【要素技術確認試験で期待する計測値】

- コリメート遮蔽した高分解能ゲルマニウム検出器 (HPGe) によるガンマ線スペクトルデータの取得
- 小型・軽量ガンマ線検出器(CeBr₃など)によるスペクトルデータの取得(コリメート遮蔽無し)

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.286

⑤ パッシブガンマ線法(2/5)

TMI-2燃料デブリのパッシブガンマ線スペクトル測定 の 検討 【線源および線量率評価結果】

計算モデル(仮定)

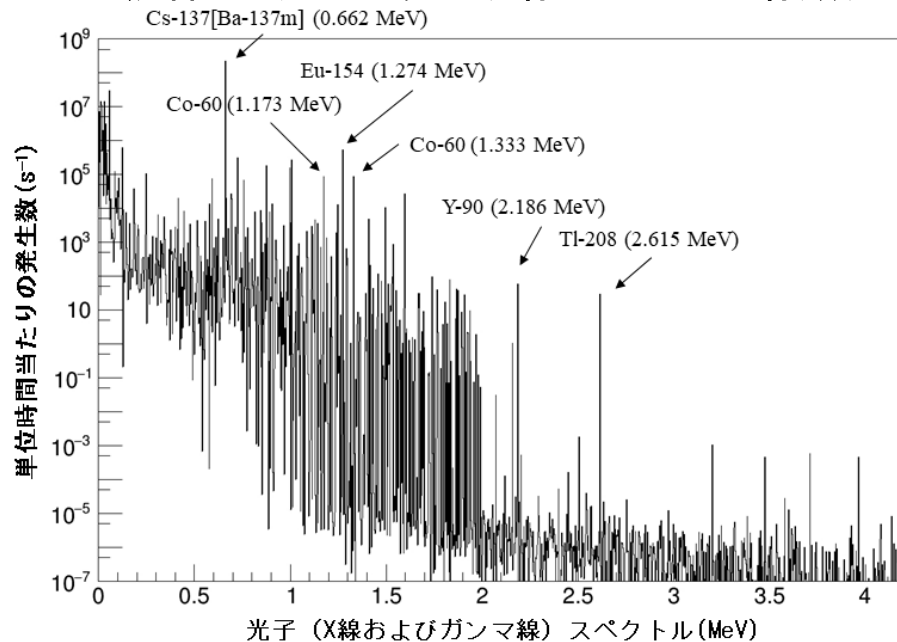
燃焼度 3.25 GWd/t(TMI-2燃料デブリ平均)

形状:球状(半径1cm)

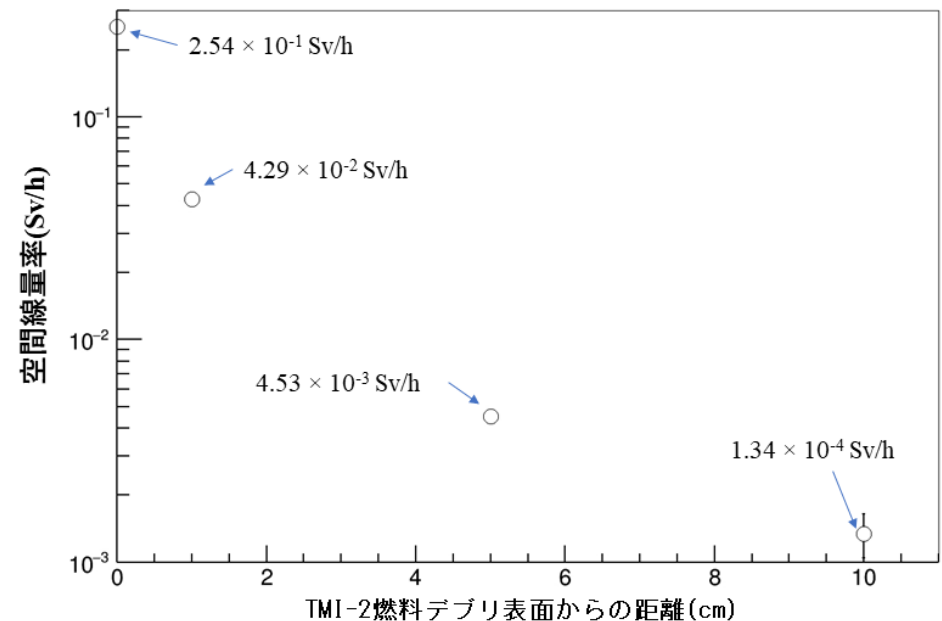
主要組成: $(U_{0.5}, Zr_{0.5})O_2$ (かさ密度6.18 g/cm³)

期日:2024年12月(46年経過)

TMI-2燃料デブリからの光子(X線およびガンマ線)放出率



TMI-2燃料デブリ近傍の空間線量率



以下のガンマ線ピークが観測できる可能性を確認

- Cs-137 (Ba-137m)の662keVとEu-154 (1.274MeV)
- Pu-236などの子孫核種であるTl-208の2.615MeV
- Y-90 (半減期64.1h)の2.186MeV

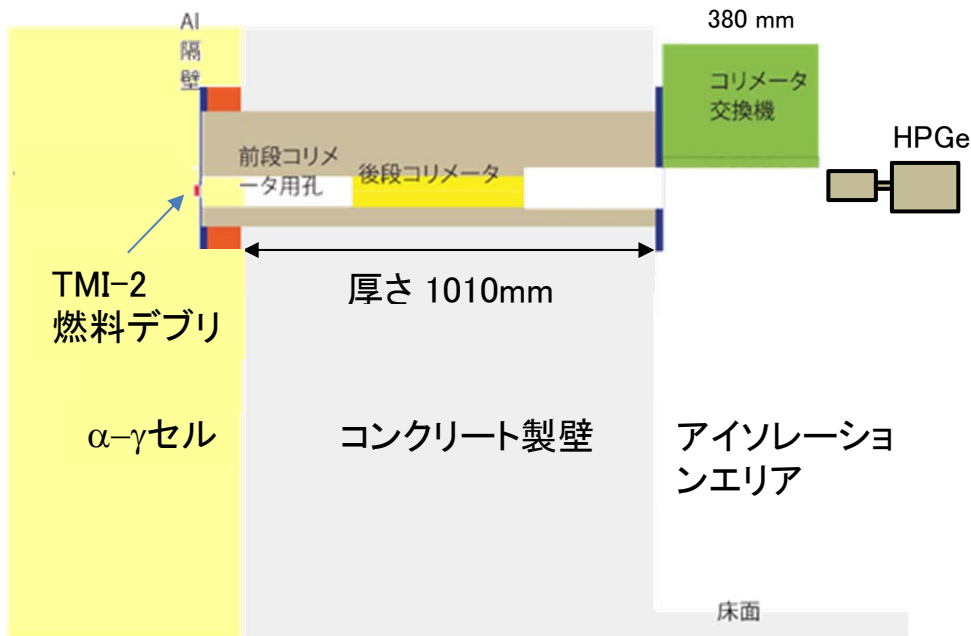
- 表面線量率は、約250mSv/h以下と推定
- 表面から10cmまでの範囲の線量率推定:約0.13~250mSv/h

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

⑤ パッシブガンマ線法(3/5)

TMI-2燃料デブリのパッシブガンマ線スペクトル測定の実験

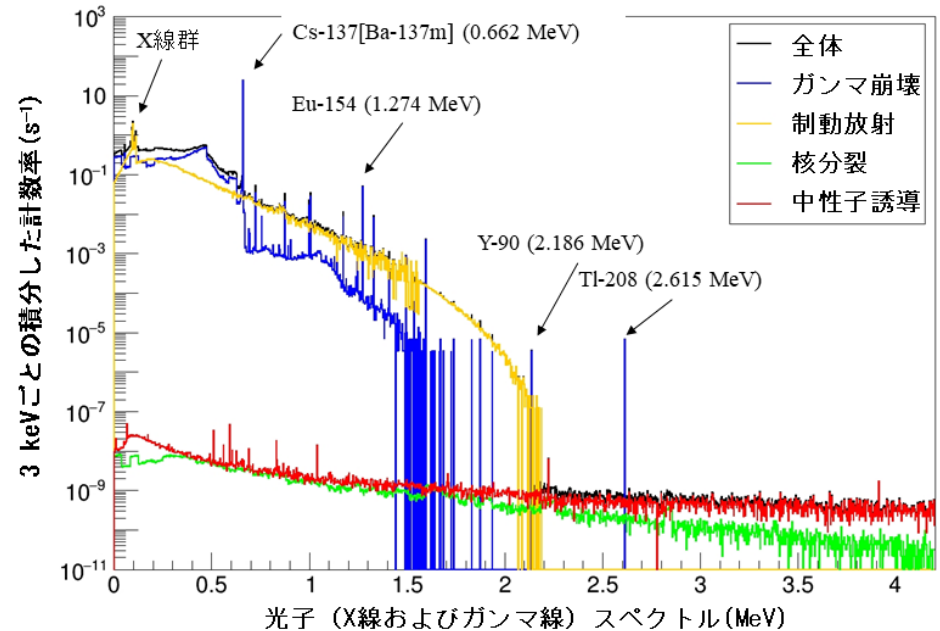
【シミュレーションモデル】



HPGe検出器(効率30%)

【シミュレーション結果】

HPGeの検出器応答



【計数率予測】

- ❑ Cs-137(Ba-137m)の0.662MeVが1秒間に1カウント以上
- ❑ X線群とEu-154の1.274 MeVは1分間に数カウント
- ❑ Tl-208(U-232, Pu-236子孫核種)の2.615MeVは1時間に数カウント

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

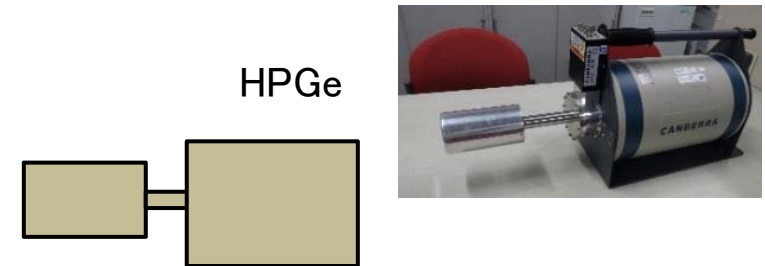
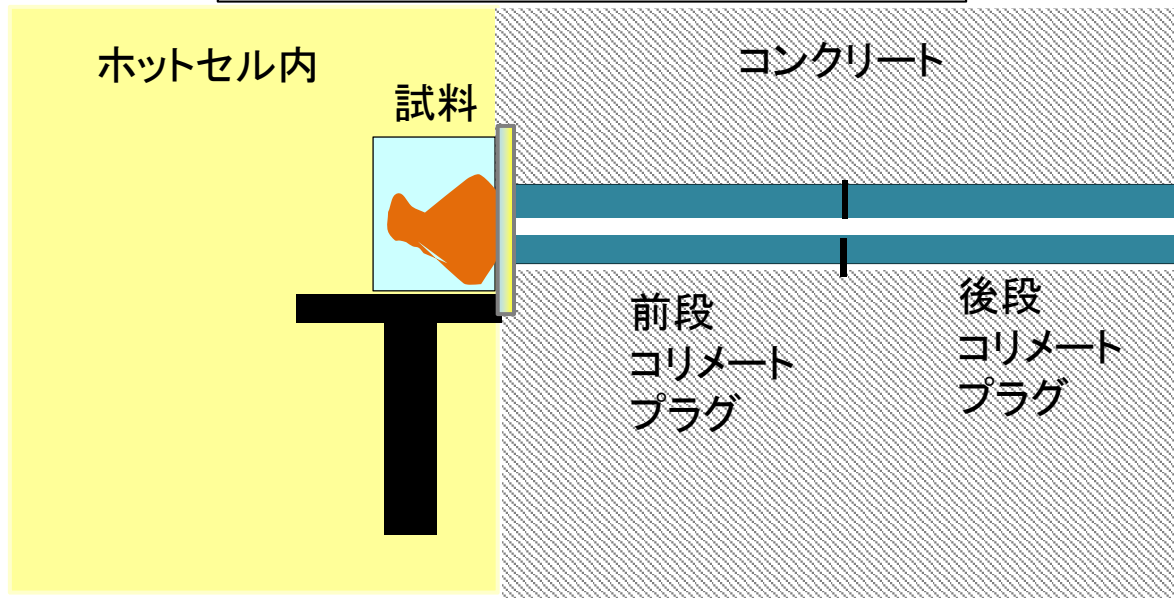
No.288

⑤ パッシブガンマ線法(4/5)

TMI-2燃料デブリのパッシブガンマ線スペクトル測定 の検討

【検討結果に基づく要素技術試験方法】

コリメート遮蔽HPGe計測

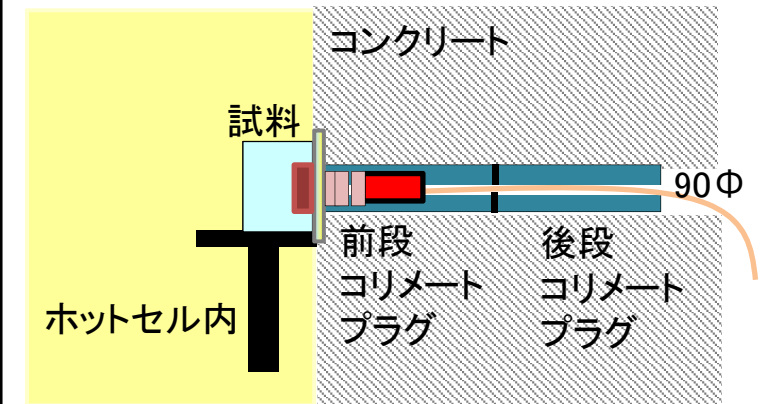


- 試料: ① TMI-2燃料デブリ(約3GWd/t)
② 軽水炉使用済み燃料切断片(約50~60GWd/t)

→ 広範囲な燃焼度範囲の1F燃料デブリの

- ❑ コリメート遮蔽方法の検討に資するデータ取得
- ❑ シミュレーションでは予測できない実測定課題の抽出 (BG影響, パイルアップ, サムピーク, デッドタイム影響など)の把握
- ❑ TI-208やX線など, Uとの帯同性確認が不要な放射線計測の可能性検討

小型ガンマ線検出器による計測



- ❑ 試料表面の線量率は約250mSv/hと評価
- ❑ 想定している小型検出器のガンマ線耐性は数Sv/h以上であり, 適用可能

⑤ パッシブガンマ線法(5/5)

【まとめ】

- 燃焼度約3GWd/t, 事故後46年以上経過したTMI-2燃料デブリに対し, HPGeによる計測試験の検討をシミュレーションにより実施した
- 測定が期待されるものとして以下2点が挙げられた
 - ・Cs-137(Ba-137m)の0.662MeVが1秒間に1カウント以上
 - ・X線群とEu-154の1.274 MeVは1分間に数カウント
- 小型ガンマ線検出器の適用性について検討し, 耐放性の観点から適用可能
- Eu-154から放出される1.27MeVのガンマ線を検出できる見通しを得た
- Tl-208が放出する2.614 MeVのガンマ線は, 以下が重要であると考えられる
 - ・環境バックグラウンドからの遮蔽
 - ・高エネルギーのガンマ線測定に適した検出器を用いること

【課題】

- 理想的な条件によるシミュレーション結果とホットセル内試料に対する実測値を比較し, 実測ならではの課題を抽出するとともに, これらの比較によりシミュレーションの精度向上策を検討する

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

(既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討に係るまとめ)

4.3 既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討

No.291

既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討に係るまとめ

【成果／開発への寄与】(詳細は計測技術ごとの報告内容を参照)

一部追加
(ピンク枠内,
R5年度実施分)

アクティブ中性子法

- ・ブロック形状の模擬試料を用いることで中性子吸収材の影響を評価できることが分かった。PGA法で用いるGe検出器において、計数率がエネルギー分解能に与える影響に関する知見が得られた。今後の装置概念の設計検討等に必要となる中性子検出器の選定に係る基礎データを取得した。

パッシブ中性子法

- ・パッシブ中性子法シミュレーションの精度検証が可能な燃料デブリ模擬試験方法を立案した。中性子同時計数法のシミュレーションにより、多様な燃料デブリで予想される(α, n)反応の変動による計測値への影響を低減できることを確認した。DDSI法の適用性試験の有効性をシミュレーションにより確認した。

ミュオン散乱法

- ・ミュオン散乱スペクトル, ミュオンの入射角度分布, 測定時間による統計誤差の変化などの基本的な特性データを取得。サンプルの物質種類および重量の異なるミュオン散乱データを取得。1F測定装置用の試作センサーの動作確認を完了。

X線CT法

- ・仕分けシナリオや核燃料物質質量などの評価手法に関する詳細検討に向けて、物質かさ密度の影響評価試験および非放射性MCCI模擬試験体の撮像試験を計画した。

パッシブガンマ線法

- ・パッシブガンマ線法のシミュレーション精度検証と実測課題を抽出するための実燃料デブリを用いた試験方法を立案した。低燃焼度かつ長期経年後の過酷な条件で計測が期待できるガンマ線ピークを同定した。コリメータ先端部を使った小型ガンマ線検出器の適用性試験方法を立案した。

【課題】(詳細は計測技術ごとの報告内容を参照)

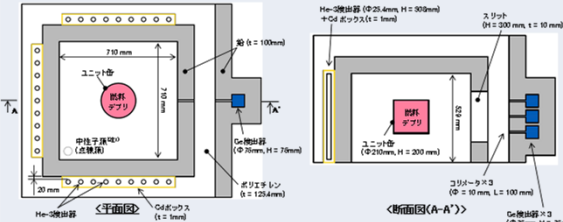
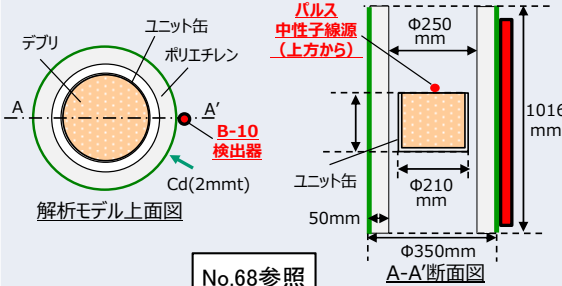
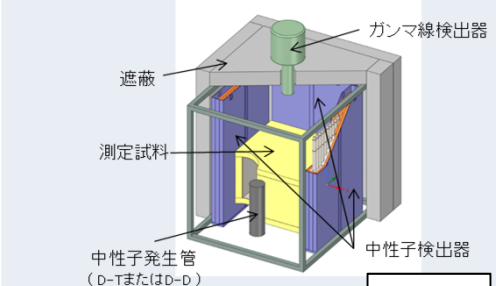
- ・今後、上記のとおり準備した要素技術確認試験を実施する。
- ・要素技術確認試験の成果は、シミュレーションの精度検証、核燃料物質質量などの評価手法の精度向上策の確認、仕分けシナリオの詳細検討などに反映する。
- ・既存の施設や装置の許認可および保安管理上の制限などにより、模擬が困難な燃料デブリ(例: 燃焼燃料を含む混合物)に対しては、将来実施する実証試験により精度検証されたシミュレーションによって核燃料物質質量の予測精度データを補完する。

5. まとめ

5. まとめ

計測技術ごとの成果まとめ(① アクティブ中性子法)

① アクティブ中性子法

計測技術	① アクティブ中性子法		
	A	B	C
装置概念図	 <p>・アクティブ中性子法, パッシブ中性子法およびパッシブガンマ線法を組み合わせた装置概念</p>	 <p>解析モデル上面図 No.68参照</p>	 <p>No.80参照</p>
検出器	・He-3 No.54参照	・B-10	・B-10ストロー/He-3 No.80参照
照射線源	・D-T	・D-T/加速器中性子源	・D-T/D-D
照射方向	・側方から	・上方から	・側方から
寸法	・W 5m × D 4m × H 3m (ユニット缶および廃棄物内容器に対応)	・未定	・W 1.5m × D 1.5m × H 2m
測定時間	<ul style="list-style-type: none"> ・約3秒(溶融デブリ, U量17.6kg, 高燃焼度(51GWd/t), 中性子吸収材なし) ・約120分(MCCIデブリ, U量0.6kg, 高燃焼度(51GWd/t), 中性子吸収材あり) 	<ul style="list-style-type: none"> ・約10分(U量3.7kg) ・中性子吸収材含有量増加(数vol%)で計数率がBG以下(計測不可) 	・10~20分程度
評価精度	<ul style="list-style-type: none"> ・U-235量 : 最大で約2倍 ・U-235重量割合 : 最大で約2倍 ・U量 : 最大で約4倍 	・計数率: 数割(U量3.7kg)	・U-235量: ±50%(中性子吸収材のない場合の約8割)
課題と対応策	<ul style="list-style-type: none"> ・燃焼度による誤差低減 ⇒ 中性子消滅時間による補正(A, Bのみ), パッシブ中性子法とパッシブガンマ線法の組合せ(Cm-244とEu-154の比による補正) ・中性子吸収材による誤差低減 ⇒ PGA法による補正, X線CT法との組合せ ・含水率による誤差低減 ⇒ アクティブ中性子法とパッシブ中性子法の組合せ ・誘発核分裂の効率および均一性の最適化 ⇒ 中性子源仕様(D-T, D-D, 加速器中性子源), 減速材配置の検討, 要素技術確認試験 ・中性子計測感度の向上 ⇒ 検出器仕様(He-3, B-10, B-10ストロー)や検出器配置, 減速材配置の検討, 要素技術確認試験 ・デブリの多様性の影響確認 ⇒ 不均一体系を含む収納物条件に対するパラメータスタディの拡充 		

- ・課題と対応策は, アクティブ中性子法A, BおよびCで得た知見を共有し, アクティブ中性子法の装置開発に活用。
- ・表中の記載は本事業成果に基づく内容であり, 今後の研究開発により変化する予定。将来の装置仕様, 性能を保証するものではないことに注意。

5. まとめ

計測技術ごとの成果まとめ(② パッシブ中性子法)

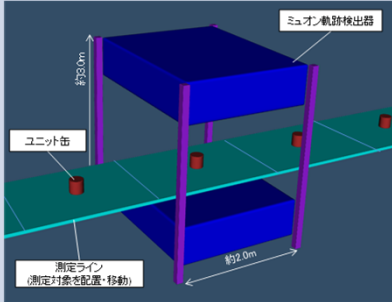
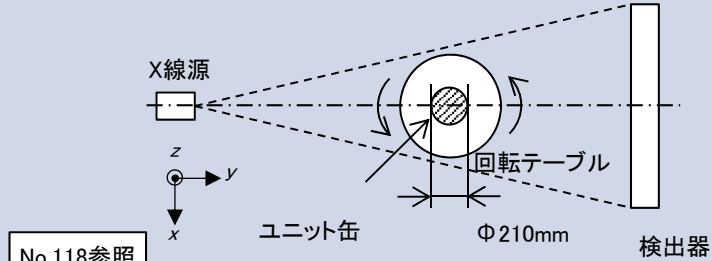
計測技術	② パッシブ中性子法	
	A	B
装置概念図	<p>・アクティブ中性子法, パッシブ中性子法およびパッシブガンマ線法を組み合わせた装置概念</p> <p>No.92参照</p>	<p>No.100参照</p>
検出器	・He-3	・B-10
照射線源	・なし	・なし
照射方向	・なし	・なし
寸法	・W 5m × D 4m × H 3m	・未定
測定時間	<ul style="list-style-type: none"> ・約1秒(熔融デブリ, U量17.6kg, 高燃焼度(51GWd/t), 中性子吸収材なし) ・約65時間(MCCIデブリ, U量0.6kg, 低燃焼度(1.3GWd/t), 中性子吸収材なし) 	<ul style="list-style-type: none"> ・約10秒(熔融デブリ, U量3.7kg) ・約9時間(低燃焼度(1.3GWd/t))
評価精度	<ul style="list-style-type: none"> ・U-235量 : 最大で数100~数1000倍(熔融デブリ/MCCIデブリ, 低燃焼度(1.3GWd/t)) ・U-235重量割合: 最大で数100~数1000倍(熔融デブリ/MCCIデブリ, 低燃焼度(1.3GWd/t)) ・U量 : 最大で数100~数1000倍(熔融デブリ/MCCIデブリ, 低燃焼度(1.3GWd/t)) 	<ul style="list-style-type: none"> ・計数率: 3.6E-4~5.7E+0倍(燃焼度23GWd/tに対して1.3~51GWd/t) ・計数率: 1~0.76倍(含水率1wt%に対して0.1~41wt%)
課題と対応策	<ul style="list-style-type: none"> ・燃焼度による誤差低減 ⇒ パッシブ中性子法とパッシブガンマ線法の組合せ(Cm-244とEu-154の比による補正) Cm-244とEu-154のUとの帯同性説明ロジック構築も必要 ・含水率による誤差低減 ⇒ アクティブ中性子法とパッシブ中性子法の組合せ ・中性子計測感度の向上 ⇒ 検出器仕様(He-3, B-10, B-10ストロー)や検出器配置, 減速材配置の検討, 要素技術確認試験 ・燃料デブリの多様性の影響確認 ⇒ 不均一体系を含む収納物条件に対するパラメータスタディの拡充 	

・課題と対応策は, パッシブ中性子法AおよびBで得た知見を共有し, パッシブ中性子法の装置開発に活用。
 ・表中の記載は本事業成果に基づく内容であり, 今後の研究開発により変化する予定。将来の装置仕様, 性能を保証するものではないことに注意。

5. まとめ

計測技術ごとの成果まとめ(③ ミュオン散乱法 / ④ X線CT法)

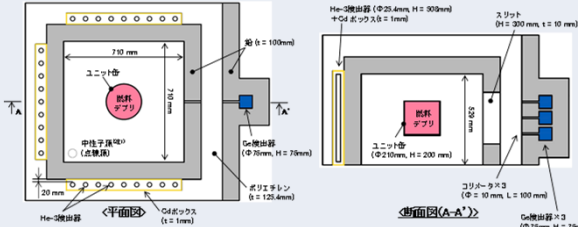
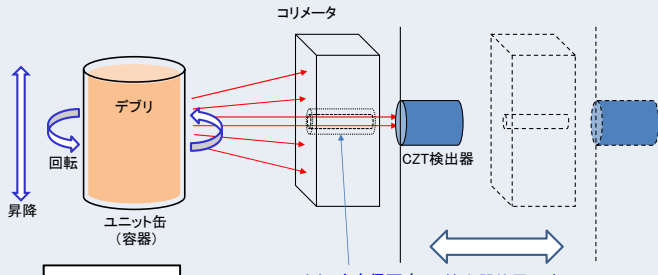
No.295

計測技術	③ ミュオン散乱法	④ X線CT法
装置概念図	 <p>No.115参照</p>	 <p>No.118参照</p>
検出器	・ミュオン軌跡検出器	・X線検出器
照射線源	・なし	・加速器X線源
照射方向	・なし	・側方から
寸法	・全長2m	・4m × 4m (フットプリント, メンテナンスエリア含む)
測定時間	・1~2時間	・ユニット缶: 13~50分/1~4容器 (MECTでは25~100分/容器) ・廃棄物内容器: 75分/容器 (MECTでは150分/容器)
評価精度	・U量: 比較的安全側評価	・ UO_2 量: 最大6% (核燃料が他物質と混ざり合わない場合)
課題と計測技術の組合せ案	・評価関数の誤差低減方法の検討 ⇒ 他の手法との組み合わせ検討	・アクティブ中性子法における中性子吸収材による誤差低減 ・パッシブ中性子法における含水率による誤差低減 ・パッシブガンマ線法における自己遮蔽影響, 偏在による誤差低減
その他課題と対応策	<ul style="list-style-type: none"> ・検出器応答解析 ⇒ デブリ種類による散乱傾向の違いへの対応, 詳細な検出器性能の確認およびシミュレーション上への反映 ・計測装置概念の構築 ⇒ 測定環境・動作条件の確認, 測定環境に対応した計測装置仕様の検討 ・評価関数の誤差低減方法の検討 ⇒ デブリ種類に応じた評価関数の切り替え方法の検討 ・実測値を利用した物質重量の推定 ⇒ 既知組成のサンプルを利用した物質重量推定試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・かさ密度変化, 他物質に混入した核燃料の識別性の評価手法が未構築 ⇒ MECTによる核燃料物質量の評価アルゴリズムを構築, 要素技術確認試験 ・他の計測技術に対する補正データの具体的な提供方法が未検討 ⇒ 補正データの具体的な提供方法や精度の検討 ・測定時間短縮のための複数ユニット缶同時計測の詳細条件が未検討 ⇒ 計測時間と計測精度の関係を定量的に評価 ・上記を通じた検出器や最大X線エネルギーの仕様検討

・表中の記載は本事業成果に基づく内容であり, 今後の研究開発により変化する予定。将来の装置仕様, 性能を保証するものではないことに注意。

5. まとめ

計測技術ごとの成果まとめ(⑤ パッシブガンマ線法)

計測技術	⑤ パッシブガンマ線法	
装置概念図	 <p>・アクティブ中性子法, パッシブ中性子法およびパッシブガンマ線法を組み合わせた装置概念</p> <p>No.139参照</p>	 <p>No.152参照</p>
検出器	・Ge	・CZT, LaBr ₃ など
照射線源	・なし	・なし
照射方向	・なし	・なし
寸法	・W 5m × D 4m × H 3m	・未定
測定時間	<ul style="list-style-type: none"> ・約1秒(溶融デブリ, U量17.6kg, 高燃焼度(51GWd/t), 中性子吸収材なし) ・約11分(溶融デブリ, U量8.8kg, 低燃焼度(1.3GWd/t), 中性子吸収材なし) 	<ul style="list-style-type: none"> ・約3分~40時間/容器(・CZT検出器(1.274MeVピーク), 統計誤差1%) ・LaBr₃検出器は1.274MeVピークがCo-60の1.332MeVピークとの分離が難しいケースや, 1.274MeVピークの観測が不可のケースがある ⇒ 1.597MeVピークは観測可能だが, 1.274MeVピークと比較して2桁程度計数率が小さく, 測定時間は長くなる予想
評価精度	<ul style="list-style-type: none"> ・U-235量 : 最大で数100倍(溶融デブリ, 低燃焼度(1.3GWd/t)) ・U-235重量割合: 最大で数100倍(溶融デブリ, 低燃焼度(1.3GWd/t)) ・U量 : 最大で数100倍(溶融デブリ, 低燃焼度(1.3GWd/t)) 	<ul style="list-style-type: none"> ・U量: 約1.0~4.4kg (U量3.7kg, 燃焼度23GWd/t, CZT検出器(1.274MeVピーク)) (燃焼度が異なると計数率が最大~最小で3桁程度異なる)
課題と対応策	<ul style="list-style-type: none"> ・燃焼度による誤差低減 ⇒ パッシブ中性子法とパッシブガンマ線法の組合せ(Cm-244とEu-154の比による補正) Cm-244とEu-154のUとの帯同性説明ロジック構築も必要 ・容器仕様, 嵩密度による誤差低減 ⇒ 容器仕様ごとの換算係数設定, エネルギーの異なる複数ピーク比による補正方法の詳細検討, 重量測定との組合せ, X線CT法との組合せ ・測定時間が数分~数十時間/容器と大きく異なる ⇒ コリメータ径や容器-検出器間距離を可変とする装置構成の具体化検討 ・燃料デブリの多様性の影響確認 ⇒ 不均一体系を含む収納物条件に対するパラメータスタディの拡充 	

・課題と対応策は, パッシブガンマ線法AおよびBで得た知見を共有し, パッシブガンマ線法の装置開発に活用。
 ・表中の記載は本事業成果に基づく内容であり, 今後の研究開発により変化する予定。将来の装置仕様, 性能を保証するものではないことに注意。

5. まとめ

No.297

【成果／開発への寄与】

・5種類の候補計測(*1) について、以下のとおり成果を得て、仕分けのための非破壊計測技術の開発が進んだ。

*1 ①アクティブ中性子法, ②パッシブ中性子法, ③ミュオン散乱法, ④X線CT法, ⑤パッシブガンマ線法

仕分けに必要な性能目標値の検討(目標TRL:設定なし)

・非破壊計測装置の性能目標値について、仕分けの成立性に影響する装置性能として、仕分け基準値および計測時間を設定し、それらの目標値を設定した。

検出器応答解析による計測装置概念の構築(目標TRL:レベル3 ⇒ 到達TRL:レベル3)

・非破壊計測装置について、検出器応答解析により装置概念を設定した。

計測量に基づく核燃料物質質量などの評価手法の検討(目標TRL:レベル3 ⇒ 到達TRL:レベル3)

・計測量(必要に応じた組合せを含む)から、核燃料物質質量などを推定評価する手法の一次案を検討し、評価性能を評価した。

仕分けシナリオの検討(目標TRL:設定なし)

・非破壊計測装置の適用時期、技術成熟度および適用場所が異なる複数の仕分けシナリオを提案した。

既存装置などを用いた要素技術確認試験方法の検討(目標TRL:レベル2 ⇒ 到達TRL:レベル2)

・シミュレーションや簡易試験の結果を踏まえ、今後、実験的に確認する必要がある課題に対して試験方法の計画を立案した。

【課題と対応策】

1) 課題:各実施項目は、各実施項目の成果を相互に反映してアップデートする必要がある。

対応策:今後、各実施項目の成果を相互に反映することを繰り返していく。

添付-1 技術用語の補足説明

アクティブ中性子法

本事業においては、計測対象物の外部から中性子を照射し、計測対象物を破壊することなく、計測対象物内部の物理量を把握する非破壊計測手法を「**アクティブ中性子法**」と総称する。

「アクティブ中性子法」には、計測の方法や原理(何を計測して、どうやって目的量を評価するか?)などの違いにより、以下のような方法がある。

- **ダイアウェイ時間差分析法(DDA法)**

中性子を照射し、計測される核分裂中性子の時間応答を分析することにより核分裂性物質(例: $^{235}\text{U}+^{239}\text{Pu}+^{241}\text{Pu}$)を検知または定量をする方法。
高速中性子直接問いかけ法(FNDI法)は、DDA法的一种である。

- **即発ガンマ線分析法(PGA法)**

中性子を照射し、 (n, γ) 反応などの核反応により放出される即発ガンマ線のエネルギースペクトルを計測して、計測対象物質中に含まれる同位体の検知や定量をする方法。

- **中性子共鳴透過分析法(NRTA法)※**

中性子を照射し、計測対象物を透過した中性子の時間スペクトルをエネルギースペクトルに変換することにより、計測対象物中に含まれる核種固有の共鳴エネルギーから核種の検知や定量をする方法。

※NRTA法は本事業の検討対象外

アクティブ中性子法 (FNDI法+PGA法)

高速中性子直接問いかけ法(FNDI法)

従来のアクティブ中性子法は高速中性子を装置全体で減速させ、熱中性子を測定試料に照射する。このため、試料の多様性の影響を受けやすい。

一方、FNDI法は高速中性子を測定試料に照射し、試料中の核分裂反応で放出される中性子を選択的に測定して核物質量を求める改良手法であり、燃料デブリのような多種多様な廃棄物への適用性が高い。



図 JAWAS-N装置



図 FNDI法の試験に用いた多様なウラン廃棄物模擬体

FNDI法は、日本独自開発の技術であり、JAEA/人形峠環境技術センター200Lドラム缶測定用非破壊測定装置 (JAWAS-N)に初めて採用された。

1本約10分、典型的な計測不確かさは20%以下、天然ウラン数グラムまで測ることができる計量管理装置として実用化され、IAEAの認可を受けて1802本のドラム缶測定を完了した実績を有する。

添付-1 技術用語の補足説明(3/9)

No.301

JAWAS-T (FNDI法に基づく非破壊計測実験装置)

修正
(新規追加)

JAWAS-Tは、日本原子力研究開発機構(JAEA)の燃料サイクル安全工学研究施設(NUCEF)の実験棟B(BECKY)に設置してあるアクティブ中性子法による核燃料物質の非破壊計測実験装置である。この装置は、保障措置に資する高精度な核燃料物質定量用の非破壊測定技術開発のために用いられていることから、機能特化された市販の非破壊測定装置に比べ、柔軟で多様な試験の実施に適している。具体的には、強力なD-T中性子発生管と高感度なHe-3中性子検出器を用いて、ダイアウェイ時間差分分析(DDA)法を改良した高速中性子直接問いかけ法(FNDI法)による、容器中のウランおよびプルトニウム燃料の定量が可能である。

JAEAの人形峠環境技術センターで実用化されたJAWAS-Nは、先行して開発されたこの装置を使った試験により開発された。



D-T中性子
発生管

図 JAWAS-T装置

【参考文献】 Masao Komeda, Yosuke Toh, New data processing method for nuclear material measurement using pulsed neutrons, Applied Radiation and Isotopes, 188, 110391 (2022).

アクティブ中性子法 (FNDI法+PGA法)

FNDI法と即発ガンマ線分析法(PGA法)との組み合わせ

PGA法は、計測試料への中性子照射によって起こる核反応によって発生する物質固有のガンマ線を計測することにより、試料中に含まれる物質を特定・定量する手法である。

FNDI法は測定試料の中身によらず、正確な測定が可能であるが、中性子吸収材(B, Gd)の影響を受けやすい。(非常に多く含まれる場合には計測できない)

そこで、PGA法を導入することで中性子吸収材を計測し、FNDI法の精度向上(仕分けの精度向上)を図る。

また、条件によっては、PGA法により、試料中の水分、鉄、クロムなどの計測も期待できる。

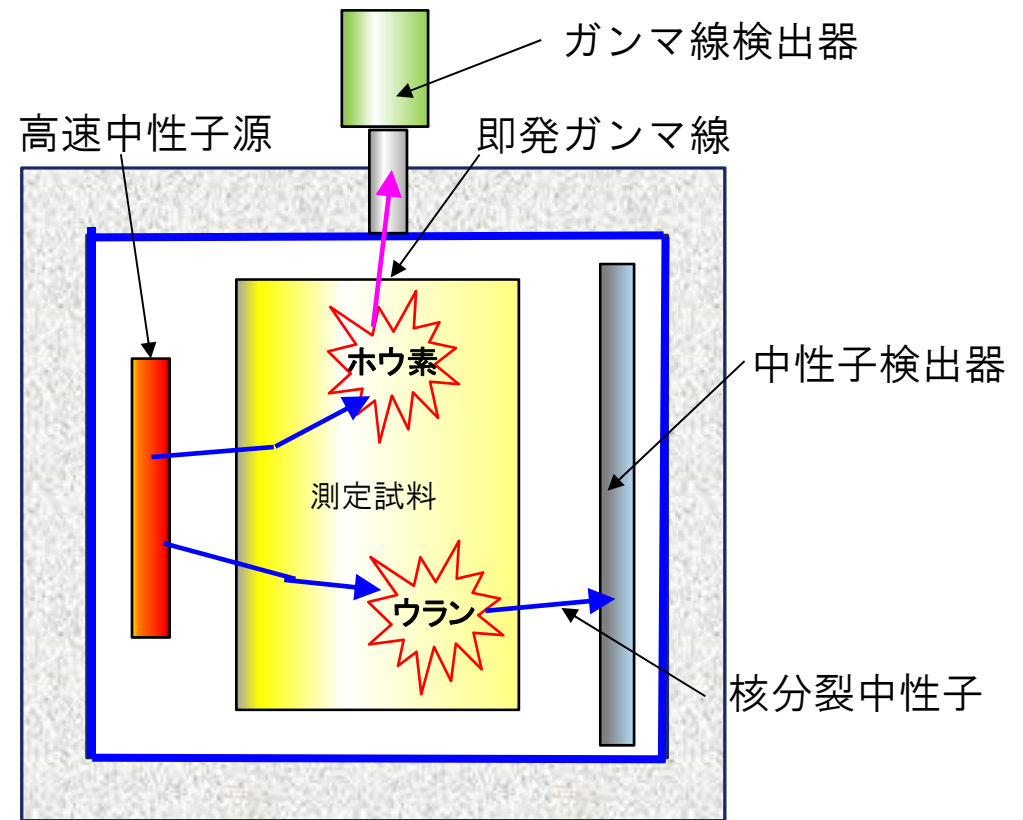


図 FNDI法+PGA法の概念図

要素技術確認試験で想定しているパッシブ中性子法装置

プルトニウムスクラップ測定装置(PSMC)

PSMCは、不純物を含む核燃料物質中のPu量を測定するための中性子非破壊測定装置である。中心に試料室があり、その周囲を中性子減速材(ポリエチレン)や中性子検出器(He-3比例計数管)などが取り囲む構造となっている。

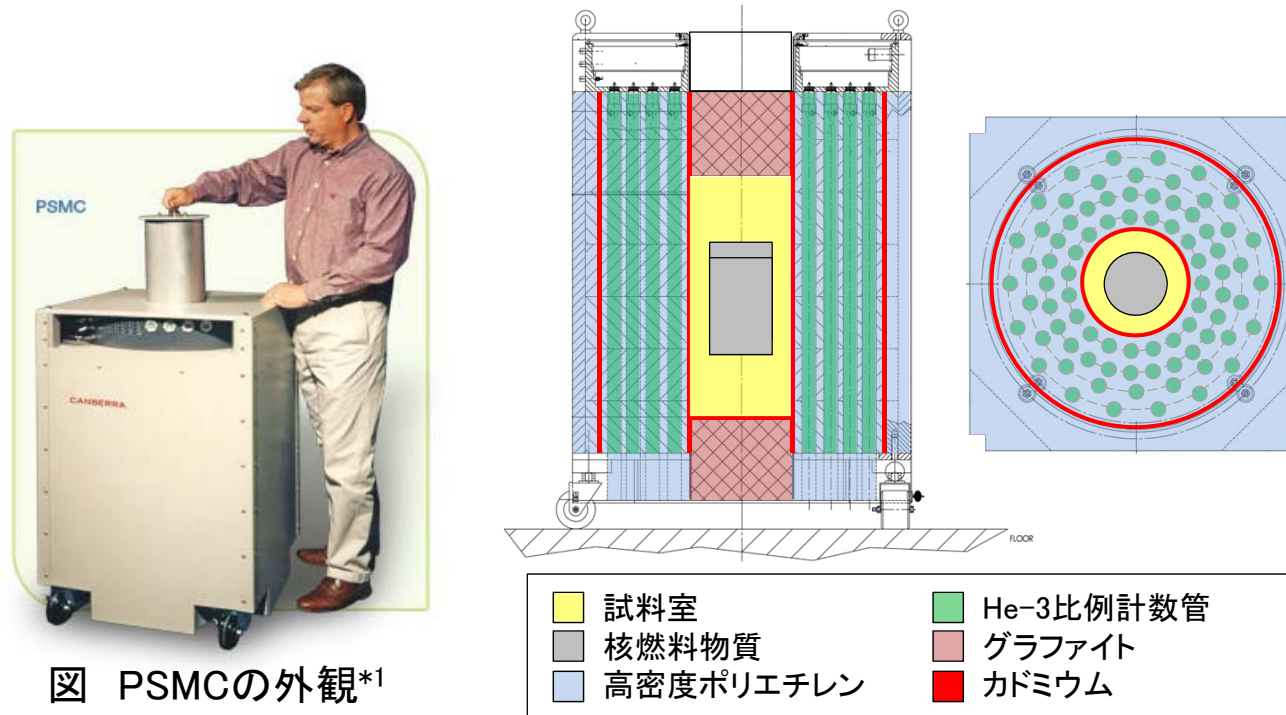


図 PSMCの外観*1

図 PSMCの断面図

測定試料から放出される中性子の約55%を検出することが可能な装置である。

世界中のプルトニウム取扱い施設で、計量管理・保障措置のために利用されている。

*1 ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ株式会社 製品ラインアップ PSMCプルトニウムスクラップマルチプリシティカウンタ
https://www.canberra.com/jp/products/wm_psmc.html

要素技術確認試験で想定しているパッシブ中性子法装置

中性子同時計数法

中性子同時計数法は、プルトニウム核種の核分裂により、同時に複数個放出される中性子を選択的に計数することにより、 (α, n) 反応などによる同時性の無い中性子計数の影響を排除し、自発核分裂源核種を定量する手法である。

中性子消滅時間差自己問いかけ(Differential Die-away Self-Interrogation(DDSI))法

DDSI法は、自発核分裂中性子と誘発核分裂中性子の検出時間分布の違いに着目することにより、自発核分裂中性子に比べて減速により遅れて計測される誘発核分裂による中性子数の増加や、中性子吸収による中性子数の減少の程度を評価する手法である。

これらの手法の採用により、容器内容物の多様性に起因する計測誤差をより小さくすることができる。

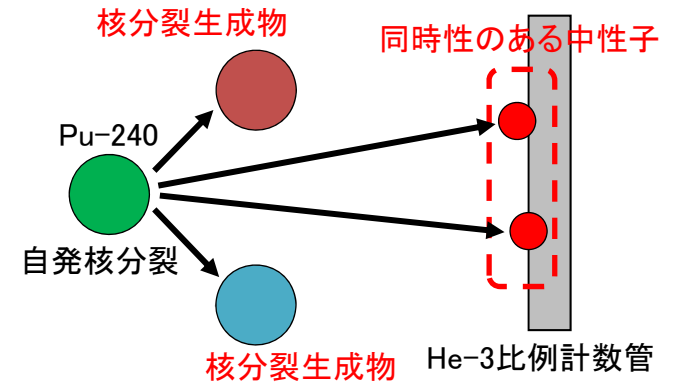


図 自発核分裂により放出された中性子の同時性の概念

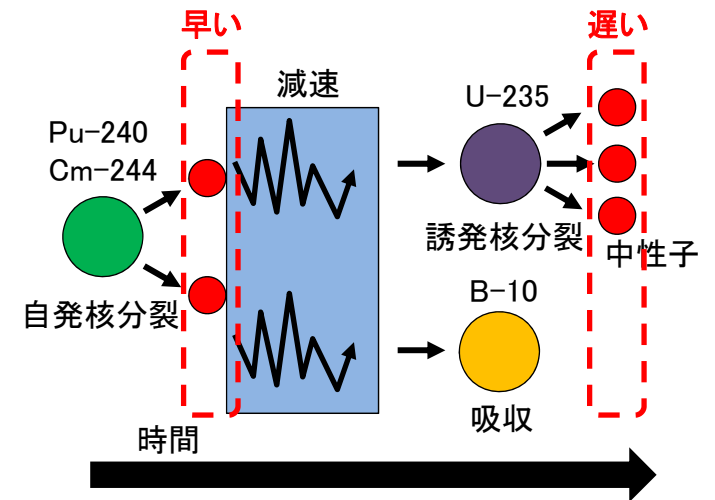


図 自発核分裂中性子と誘発核分裂中性子の検出時間の違い

中性子検出器の比較

【He-3検出器】

中性子の検出感度が高いため、保障措置用のアクティブ中性子法装置やパッシブ中性子法装置での採用実績が多い。ただし、高ガンマ線場では鉛などにより遮蔽し、ガンマ線ノイズを低減させる必要がある。

【B-10検出器】

中性子検出器としては多くの実績があるが、He-3検出器に比べて中性子の検出感度は劣る。中性子とガンマ線が混在する放射線場では、He-3検出器に比べてガンマ線に対する感度が相対的に小さく、計測したい中性子とノイズとなるガンマ線の比(S/N)の観点から有利となる可能性がある。

【B-10ストロー検出器】

近年、高効率化を目指して開発された新しいB-10検出器である。細いB-10検出器を複数束ねた構造を有し、中性子に対する高い感度と高S/Nとの両立が期待される。

B-10ストロー検出器の補足説明

B-10ストロー検出器は、He-3の供給不足の懸念などから、He-3代替検出器として米国のProportional Technologies, Inc. (PTI)によって開発・製造されている。

- 従来のB-10ライナー検出器と同じく $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応によって中性子が検出されるため、検出効率はB-10の蒸着面積に大きく依存する。
- 検出器の内部にストローと呼ぶ細管があり、そのストローの内側にB-10を蒸着して蒸着面積を増やすことで検出効率の向上を図ったもの。
- スタンダードな円筒ストローの他、より蒸着面積を向上させることで検出効率を向上させた星形ストローなども存在する。

ガンマ線検出器の比較

【HPGe】

- ・非常に高いエネルギー分解能。
- ・液体窒素などによる冷却が必要。
- ・高計数率に耐えられない。

【CZT】

- ・高いエネルギー分解能(HPGeよりは劣る)。
- ・室温での使用が可能。
- ・HPGeよりも高計数率測定が可能。

【LaBr₃】

- ・高いエネルギー分解能。
- ・高計数率測定が可能。
- ・放射性物質を含むためバックグラウンドが高い。

【CeBr₃】

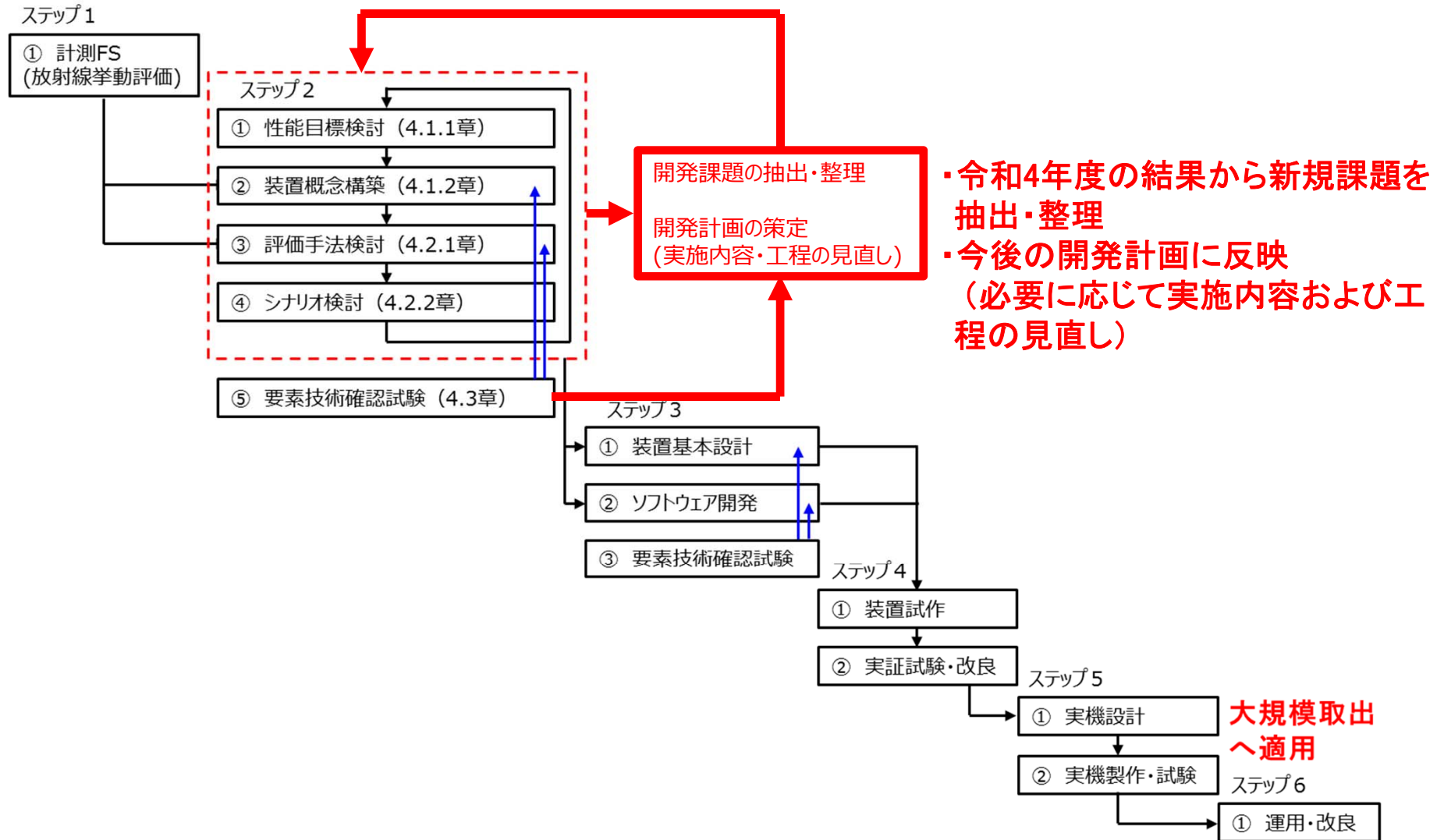
- ・高いエネルギー分解能(LaBr₃よりは劣る)。
- ・高計数率測定が可能。
- ・放射性物質を含まない。

【BGO】

- ・検出効率が非常に高い。(主にHPGeの補助検出器として利用)
- ・高計数率測定が可能。
- ・エネルギー分解能が悪い。

添付-2 今後の課題(令和3年度報告分)

添付-2 今後の課題 開発ステップ



課題の重要度

分類	重要課題とした視点	抽出例
A	原理的な課題 —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
B	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
C	仕分け技術開発の範囲を超える課題	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

添付-2 今後の課題

令和3年度抽出結果(①アクティブ中性子法, ②パッシブ中性子法, ⑤パッシブガンマ線法(1/2)) No.311

令和3年度に個々の計測法で抽出された技術課題の中から**重要課題**を整理。**令和4年度の進捗状況**を追記。

No.	項目	内容	対応方針	対応開発ステップ ^{注)}	令和4年度進捗状況
1	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	関連PJと課題を共有
2	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 A, B	核物質量推定評価方法の一次案を設定
3	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	要素技術確認試験を計画
4	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 B	要素技術確認試験を計画
5	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	関連PJと課題を共有
6	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, 偏在など)に依存し多様	Eu154などから放出される複数のγ線エネルギー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 A, B	核物質量推定評価方法の一次案を設定
7	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などの導入検討	2-① 2-⑤ A, B	PGA法で中性子吸収材を検知できることを実験的に確認

添付-2 今後の課題

令和3年度抽出結果(①アクティブ中性子法, ②パッシブ中性子法, ⑤パッシブガンマ線法(2/2)) No.312

令和3年度に個々の計測法で抽出された技術課題の中から**重要課題**を整理。令和4年度進捗を追記。

No.	項目	内容	対応方針	対応開発ステップ ^{注)}	令和4年度進捗
8	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	計測装置概念の一次案を設定
9	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)	計測装置概念の一次案を設定
10	耐放射線性	検出器, 電子機器, ケーブルなどの照射劣化	・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)	—
11	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, 計測時間など)を評価	2-② (2-①, 2-⑤)	計測装置概念の一次案を設定
12	アルゴリズム	汎用的, 万能なアルゴリズム構築が困難	測定対象のカテゴリズにより, 専用アルゴリズムを適用	2-③ A, B	核物質質量推定評価方法の一次案を設定
13	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 A, B	PGA法で中性子吸収材を検知できることを実験的に確認
14	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 B	要素技術確認試験を計画
15	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	—
16	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	—

添付-2 今後の課題

令和3年度抽出(③ミュオン散乱法)

令和3年度に個々の計測法で抽出された技術課題の中から**重要課題**を整理。**令和4年度進捗**を追記。

No.	項目	内容	対応方針	対応開発ステップ ^{注)}	令和4年度進捗
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, 関数などを選定。 ・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 核物質質量推定評価方法の一次案を設定
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	B -
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	計測装置概念の一次案を設定
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	-
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のが可能だが, 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	計測装置概念の一次案を設定 要素技術確認試験を計画
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 シミュレーションで空隙率の影響を評価

添付-2 今後の課題

令和3年度抽出(④X線CT法(1/2))

令和3年度に個々の計測法で抽出された技術課題の中から**重要課題**を整理。**令和4年度進捗**を追記。

No.	項目	内容	対応方針	対応開発 ^{注)} ステップ	令和4年度進捗
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)などの物体を識別し、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)など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 B	シミュレーションによってMECTによる物質識別性の向上を確認
2	空間分解能などの影響	・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 A, B	要素技術確認試験を計画
3	高線量率ガン線ノイズ影響	・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	—
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, 中性子吸収材などの分布情報を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 A, B	核物質量推定評価方法の一次案を設定

添付-2 今後の課題

No.315

令和3年度抽出(④X線CT法(2/2))

令和3年度に個々の計測法で抽出された技術課題の中から**重要課題**を整理。**令和4年度進捗**を追記。

No.	項目	内容	対応方針	対応開発 ^{注)} ステップ	令和4年度進捗
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	—
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	—
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、遮蔽体などは既存装置の設計を使用可能である。	3-① 4-①	—
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	—
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などの可能性を検討する。 ・線源、検出器などの保守性を確保するなどの対応が必要である。	3-① 4-①	—
10	日常点検	・経年劣化や偶発故障の監視、およ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	—

添付-2 今後の課題 開発計画

No.316

