

【成果公開資料】

令和5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))

2024年度最終報告

Decom.Tech

2025年10月

東双みらいテクノロジー株式会社

目次

1. はじめに
2. 実施概要
3. 実施スケジュール
4. 実施体制図
5. 実施内容
 - ・実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価
 - ・実施項目(2) 非破壊計測技術の適用性評価のための要素試験
 - ・実施項目(3) 現場適用を考慮した非破壊計測装置の概念設計
 - ・実施項目(4) 核燃料物質等の定量または推定方法の適用性評価と当該手法の適用先候補の導出
6. 今後の対応
7. まとめ
8. 本事業の目標と達成度

1. はじめに(1/3)

- 福島第一原子力発電所の廃止措置においては、事故により発生した燃料デブリを取り出し、安全な容器へ収納／保管することが検討されているが、現状では計測対象物（燃料デブリ等）中に含まれる核燃料物質の量を非破壊で計測推定できる技術が確立されていない。
- 当該技術が確立されていない理由は、原子炉格納容器内部から取り出される物質に核燃料物質だけでなく、核燃料溶融物が付着しているグレーチングや支柱のような構造材、さらには制御棒（中性子吸収材）、水分といった計測を阻害する物質も含まれる可能性があるためである。
- そこで阻害物質の影響を受けにくい非破壊計測技術を開発することを目標とした。
- 本事業においては、2022年度までのIRID成果の中で5つに絞られた計測技術※に関して、これまでに抽出された課題を踏まえ、計測技術の性能、装置規模、保守・運用の負荷、計測時間等を明確にし、計測技術及びその組合せも熟慮した当該技術についての適用性を評価した。

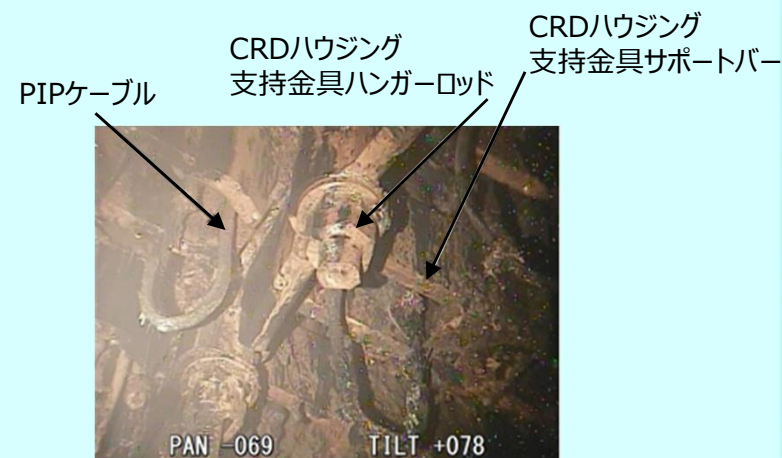
※次頁を参照



(a)砂状



(b)小石状



(c)燃料デブリが付着した構造材

写真：計測対象物の外観例（2号機，3号機ペダスタル内部調査結果）

出典：東京電力ホールディングス株式会社「廃炉・汚染水対策チーム会合 第48回事務局会議（2017年11月）」、
「廃炉・汚染水対策チーム会合 第50回事務局会議（2018年2月）」より一部抜粋

1. はじめに(2/3)

- 以下に本事業で検討した5つの計測技術についてまとめる。

各計測技術の概要

名称	参照 ページ	線源 機器	直接的に計測できるもの	核燃料物質 量を直接評価 可能かどうか	適用先 (例)
① アクティブ 中性子法	109	中性子 発生管	高速中性子を照射した時に 核燃料物質 (U-238他)から新たに発生する中性子の量	評価可能	保障措置
			熱中性子を照射した時に 核分裂性物質 (U-235+Pu-239他)から新たに発生する 中性子の量		保管の 合理化
② パッシブ 中性子法	110	不要	自発核分裂性物質から発生する中性子の量 (Cm-244他)	評価不可 (核燃料物質ではない Cm-244他の量から 評価しているため)	処分方法 の判断
③ ミュオン 散乱法	111	不要	核燃料物質 の量 (重元素)	評価可能	保障措置
④ X線CT法	112	X線発生 装置	形状(体積)及び密度分布	評価可能 (高密度物質の量を 評価)	収納物の 性状把握
⑤ パッシブ ガンマ線法	113	不要	核分裂生成物(Eu-154他)から発生する ガンマ線スペクトル	評価不可 (核燃料物質ではない Eu-154他の量から 評価しているため)	処分方法 の判断

1. はじめに(3/3)

用語の定義

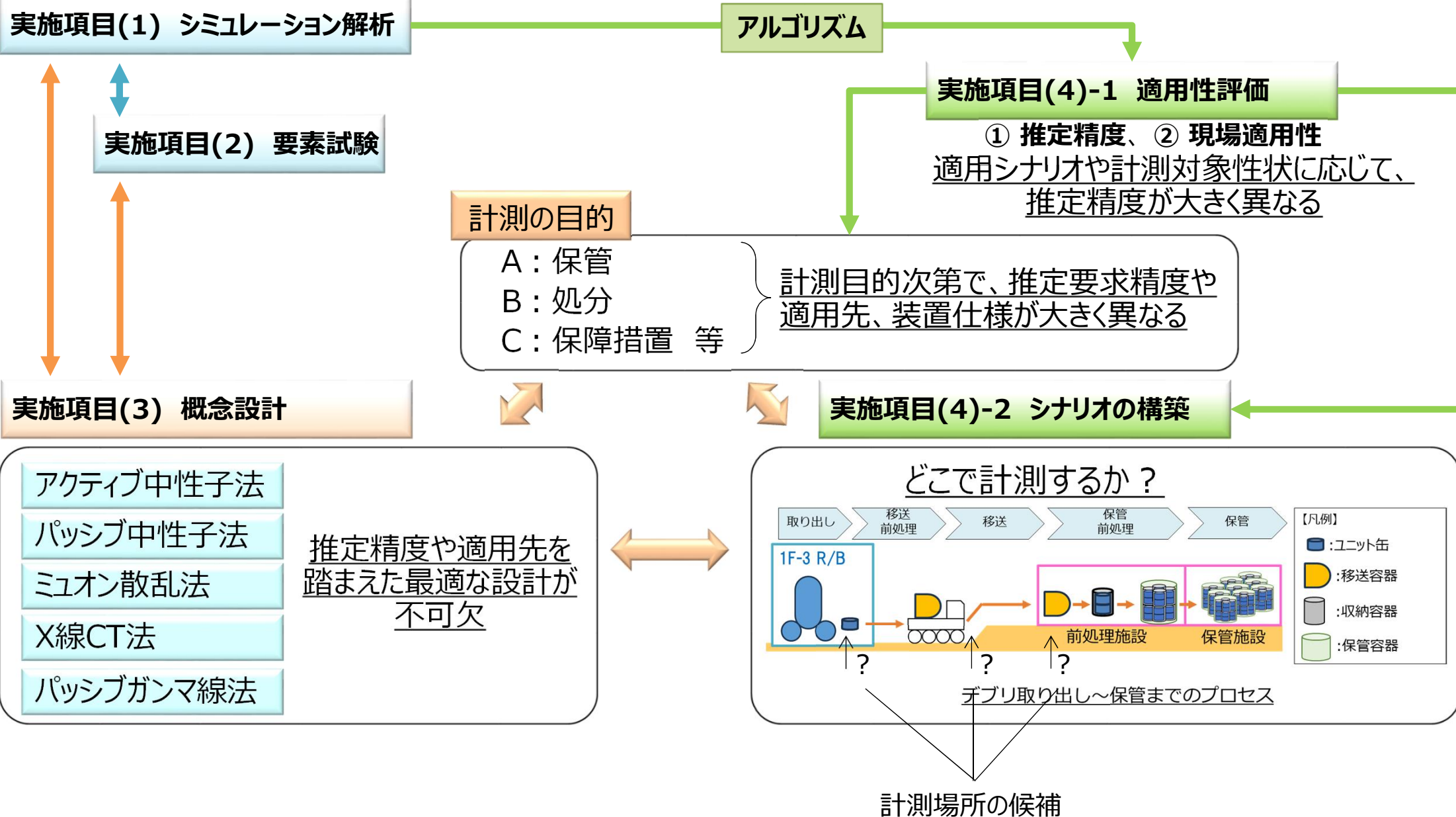
- 核燃料物質質量 : 燃焼後／溶融混合後の 全U重量 + 全Pu重量
- 核分裂性物質質量 : 燃焼後／溶融混合後の
(U-235 + Pu-239 + Pu-241) の総重量

- An : アクティブ中性子法
- Pn : パッシブ中性子法
- μ : ミュオン散乱法
- CT : X線CT法
- Pg : パッシブガンマ線法

2. 実施概要 検討の流れ

Decom.Tech

本事業における検討の流れ



2. 実施概要 事業の背景および本事業の目的

Decom.Tech

これまでの補助事業※¹にて得られたこと

- 核燃料物質の量を推定するために活用できそうな計測技術を抽出した。
- 抽出した5つの計測技術※²についてシミュレーション解析を行い、核燃料物質の量を定量的に推定する際の阻害因子を抽出した。
- 主な阻害因子について、シミュレーション解析の結果から、推定結果に及ぼす影響の大きさを評価した。
- 当該解析の再現性／確からしさや計測装置の概念設計を進めるための要素試験方法を検討した。



本事業で目指すこと

- 核燃料物質の量を推定するアルゴリズム(案)を導出し、同案に基づく**推定精度（性能）を確認し**、当該技術を仕分けに適用できる見通しを得られるか否かを評価する。
- 仕分けに適用できる見通しが得られた場合、当該技術を如何に現場に組み込んでいくかなど“仕分けシナリオ”を導出し、現場適用性を評価する。
- 要素試験を実施して、推定精度の確認に必要な情報を得る。

※1 「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））」に係る補助事業

※2 An：アクティブ中性子法、Pn：パッシブ中性子法、μ：ミュオン散乱法、CT：X線CT法、Pg：パッシブガンマ線法

2. 実施概要

実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価

- ✓ 含有核燃料の定量／推定のための計測に向けた課題抽出、課題解決方法の検討、補正・校正方法の検討、誤差伝播を考慮した計測精度の確認など、各計測技術に共通の評価項目を設定したうえで、各々、計測シミュレーション解析を行い、適用性を評価する。

実施項目(2) 非破壊計測技術の適用性評価のための要素試験

- ✓ 想定される課題や影響因子などを確認するための要素試験を行う。さらに要素試験結果のシミュレーションへのフィードバックを行い、(1)と併せて、影響因子の補正および計測精度を向上するための評価方法を構築する。

実施項目(3) 現場適用を考慮した非破壊計測装置の概念設計

- ✓ 実施項目(1)および(2)の結果を踏まえ、その現場適用性を評価して、適用した場合における非破壊計測装置の概念設計を行い、同概念を導出する。

2. 実施概要

実施項目(4) 核燃料物質等の定量または推定手法の適用性評価と当該手法の適用先候補の導出

ア) 非破壊計測に基づく核燃料物質等の定量または推定手法の評価

- ✓ 非破壊計測手法の評価のうち、検出した信号量から**核燃料物質等の量を定量または推定する方法（アルゴリズム）を考案し、その適用性（推定精度、シナリオ適合性、現場適用性）を評価する。**
 - 燃料デブリを安全かつ効率的に取り出す際に、**1つの工程で取り扱う量の制限値**（未臨界状態の維持、燃料デブリからの発熱量、放射線の遮蔽等の安全上の観点に基づき、1つの工程で取り扱える最大量）を明らかにする。なお、この際には、中性子吸収材の量、同位体組成、空隙率、水分量等の臨界に影響を及ぼす因子についても熟慮する。

イ) 当該手法の適用先候補の導出（仕分けシナリオの検討）

- ✓ ア) の評価結果に基づき、燃料デブリの取り出しから保管までのプロセスにおける適用先候補として、“**仕分けシナリオ**（＝当該非破壊計測技術の適用場所及び適用方法を記した仕分け全体工程のイメージ図）”を検討し、仕分けによる効果を踏まえ、実現の可能性がある**適用先候補（案）**を導出する。
 - 適用先候補の導出にあたり、燃料デブリや放射性廃棄物の取扱いに関する安全対策や保管・管理の方針を踏まえ、適用する**非破壊計測技術の特性や現場適用性**を評価する。
 - 計測技術適用のための**前提条件**や**複数の技術を組み合わせた場合の相互補完**についても考察する。

2. 実施概要

Decom.Tech

■ 実施項目は次の通り。

(1) シミュレーション解析及び実施項目、(2) 要素試験、実施項目 および(3) 概念設計

計測技術		計測仕様		実施項目		
		線源	検出器	(1) 解析	(2) 要素試験	(3) 概念設計
① アクティブ 中性子法	(A')※1	D-D	液体シンチレータ	○	○	○
	(A)※1	D-T、D-D	B-10、He-3	○	○	○
	(B)※1	D-T(、加速器)	B-10	○	—	○
	(C)※1	D-T	He-3	○	—	○
② パッシブ 中性子法	(A)※1	含有Cm-244他	He-3	○	○	—
	(B)※1		B-10	○	—	○
	(C)※1		He-3	○	—	○
③ ミュオン散乱法		宇宙線ミ1μ	ドリフトチューブ	○	○	○
④ X線CT法		2色X線	Si	○	○	○
			GAGG/FPD※2	—	○	—
⑤ パッシブ ガンマ線法	(A)※1	含有Eu-154他	Ge	—	○	—
	(B)※1		CZT(CdZnTe)	○	—	○
	(C)※1		Ge	○	—	○



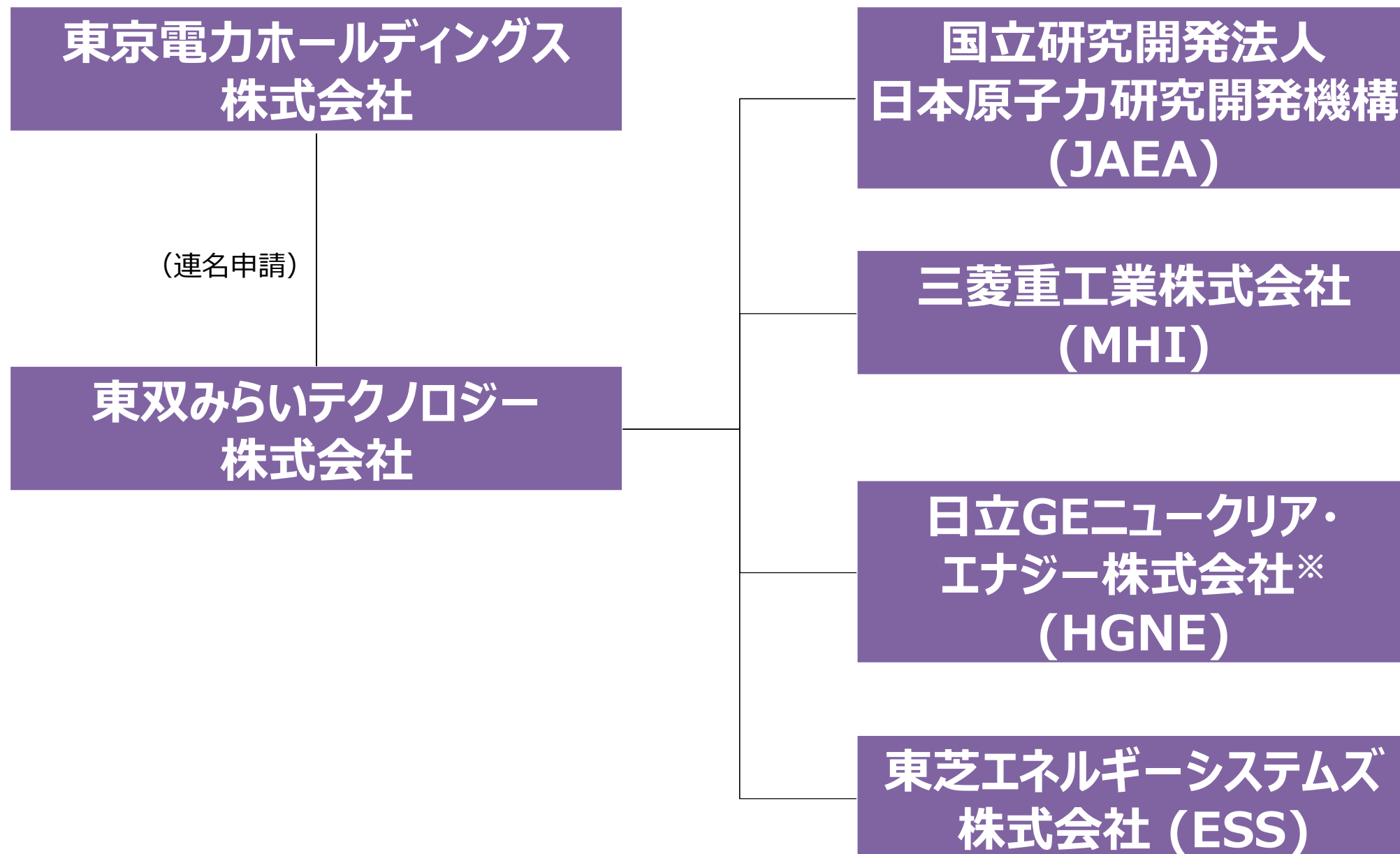
適用候補13手法に対し、委託先および外注先にて分担して実施した。

※1 13頁参照

※2 Ce添加Gd₃(Al,Ga)₅O₁₂単結晶/
平面型検出器

[illegible]

4. 実施体制図



※2025年6月1日付で 日立GEベルノバニュークリアエナジー株式会社に社名が変更された。

5. 実施内容

主な課題と本事業における対応

計測技術 ※1	現時点で認識している主な課題	推定結果 への影響 度	本事業における対応
An	^{10}B など中性子吸収材の存在	大	- 高速中性子を直接対象容器に照射する手法の適用可能性の検討 - PGA※2、CTによる中性子吸収材量推定可能性の検討
	水分の混入	大	減衰時間を利用した補正法の適用
Pn	計測対象核種と核燃料物質の同伴性	甚大	同伴率の評価は現状不能であり、核燃料物質量の推定には適さない。Cm-244の定量等、 <u>他用途への適用に限定して検討</u> 。
	低燃焼成分の混在割合が不明であること	大	
μ	異なる複数の元素が混在	大	物質の混合を補正するアルゴリズムの構築
CT	空間分解能未満で複数の物質が混合	大	2色X線を用いた補正法の検討
Pg	計測対象核種と核燃料物質の同伴性	甚大	同伴率の評価は現状不能であり、核燃料物質量の推定には適さない。Eu-154などの定量等、 <u>他用途への適用に限定して検討</u> 。
	低燃焼成分の混在割合が不明であること	大	

※1 凡例 An：アクティブ中性子法、Pn：パッシブ中性子法、 μ ：ミュオン散乱法、CT：X線CT法、Pg：パッシブガンマ線法

※2 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応により生じる ^7Li が壊変する際に放出する即発ガンマ線束を計測し、 B_4C 量を定量する手法

5. 実施内容

計測技術の識別記号と通称 (1/2)

■ 計測技術単独

計測技術	識別記号	概要	通称
アクティブ中性子法	(A')	<u>高速中性子</u> を照射し、核燃料物質 (U-238他)の量を評価する技術	<u>FFCC法</u>
	(A)	<u>熱中性子</u> を照射し、核分裂性物質 (U-235+Pu-239他)の量を評価する技術 (体系の詳細が(A)～(C)で異なる)。	<u>FNDI法</u>
	(B)		—
	(C)		—
パッシブ法(中性子, ガンマ線)	(A)	計測対象物由来からの放射線を計測する技術 (体系の詳細が(A)～(C)で異なる)。	—
	(B)		—
	(C)		—

5. 実施内容

計測技術の識別記号と通称 (2/2)

■ 複数計測技術の組み合わせ

計測技術	識別記号	概要	通称
アクティブ中性子法を 主軸とした計測技術	(1)	高速中性子 を計測対象容器に照射する計測技術 (上記(A'))を主軸とし、補正のために(A)を組み合わせ	FFCC法、 FNDI法
	(2)	熱中性子 を計測対象容器に照射する計測技術 (実質上記(B))を主軸とし、CT等を組み合わせ	—
	(3)	熱中性子 を計測対象容器に照射する計測技術を 主軸とした計測技術 (実質(C)ベース)。	—

※ 複数の計測手法の組み合わせが考えられるアクティブ中性子法のみ上記の通り識別記号により手法の識別を行う。

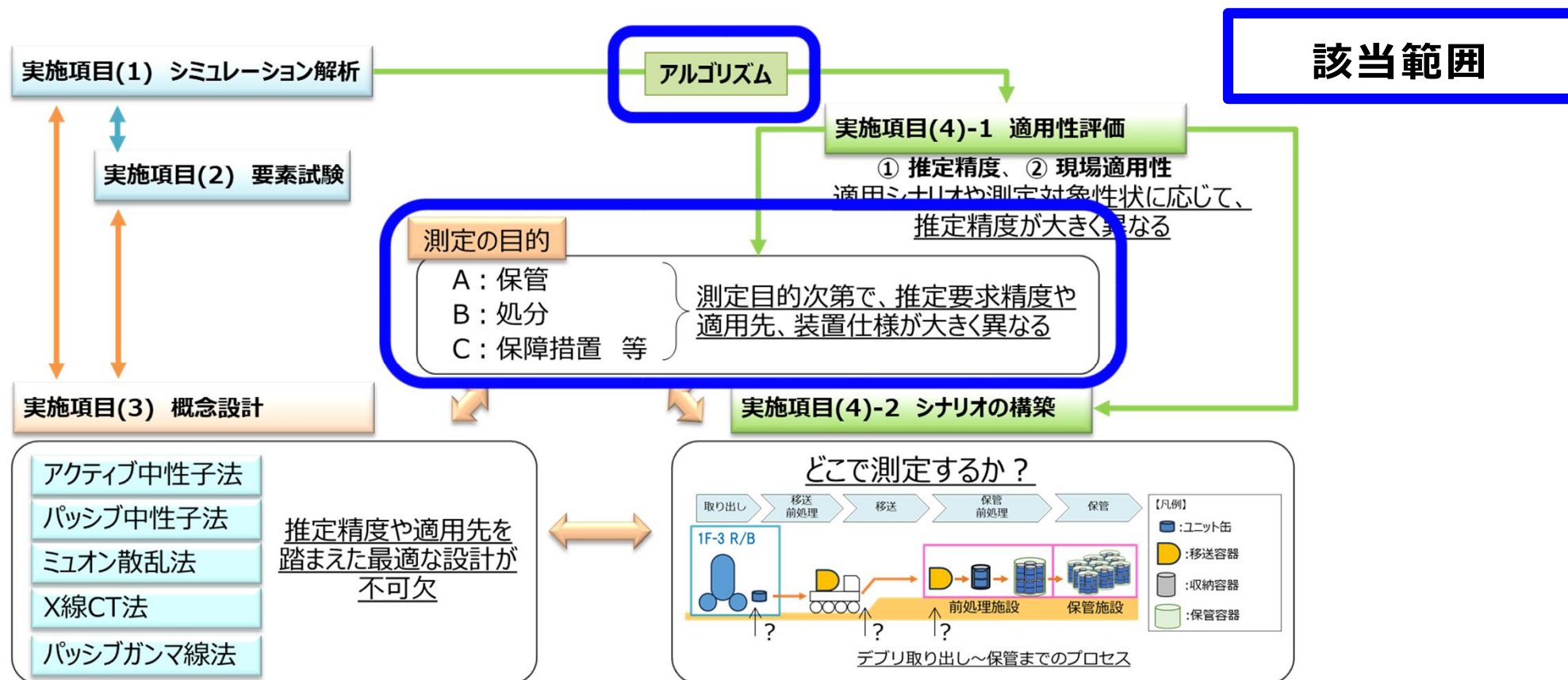
○ 上記組み合わせを検討する理由

識別記号	検討理由
(1)	水分による減速の影響をFNDI法で補正できる見込みがあるため、同技術との組み合わせを検討する。
(2)	- 熱中性子による核分裂を用いる本技術は、計測対象物内の中性子吸収材の影響を強く受ける。 - これに対し、CT等、中性子吸収材量を直接評価する技術の適用性を検討し、適用性がありそうな場合、組み合わせに用いる。
(3)	- 熱中性子による核分裂を用いる本技術は、計測対象物内の中性子吸収材の影響を強く受ける。 - これに対し、(2)とは異なる方法で中性子吸収材量を評価する技術があるかどうか検討する。

5. 実施内容

検討の前提

- ・ 非破壊計測の目的
- ・ 核燃料物質量の推定アルゴリズム 等

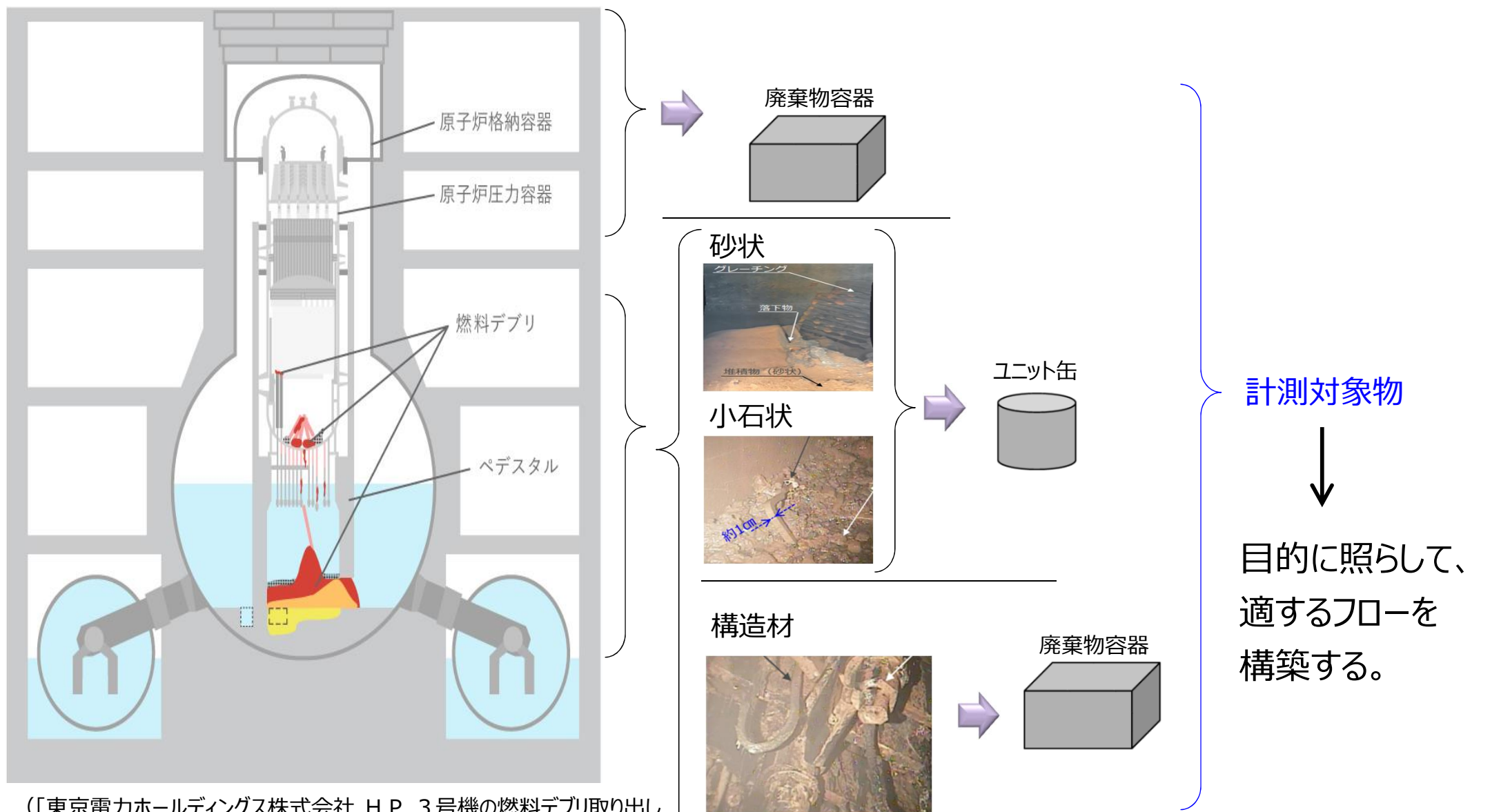


- ・ 検討の前提となる、「非破壊計測の目的」と「核燃料物質量の推定アルゴリズム」等についてまとめた。

5. 実施内容 検討の前提

Decom.Tech

非破壊計測の対象物と取り扱い用具の関係（案）



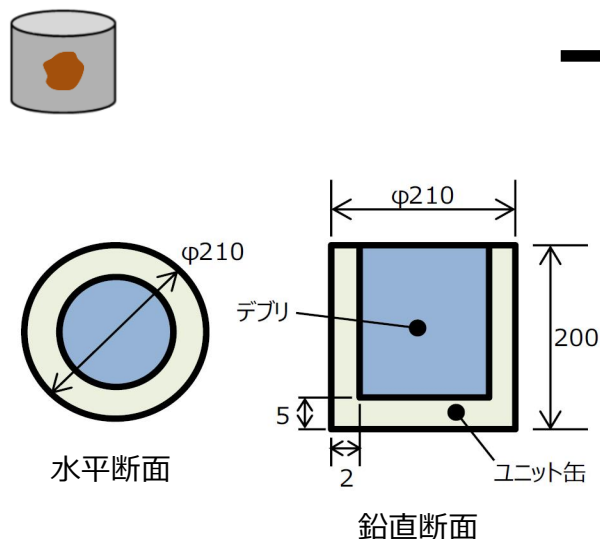
（「東京電力ホールディングス株式会社 HP 3号機の燃料デブリ取り出し
<https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/retrieval/unit3/index-j.html>」より抜粋）

5. 実施内容 検討の前提 容器等の定義

Decom.Tech

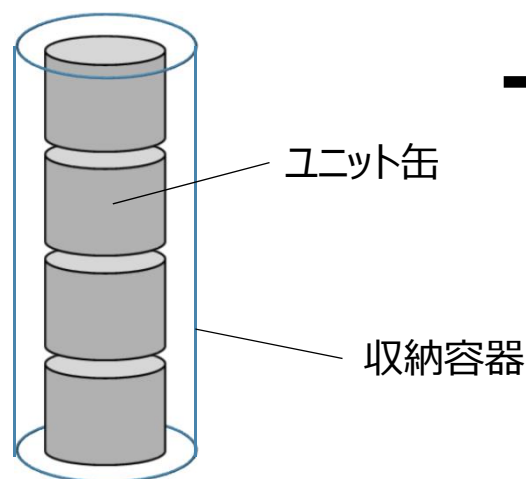
■ 保管への移行作業用具

ユニット缶



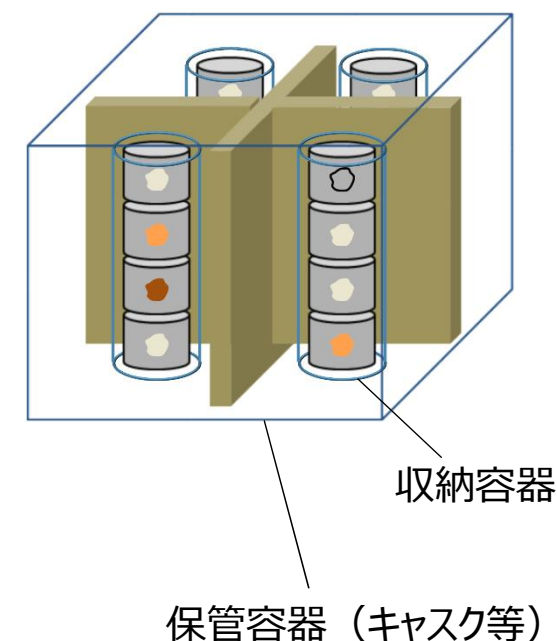
※ 実機向けユニット缶サイズは未だ議論中だが、当面はこれまでの検討内容を踏襲し、シナリオ評価までを実施する
(今後サイズが変わることにより、シナリオが大きく変わることは十分考えられる)

■ 収納容器



※ 現在検討中の収納容器には左図ユニット缶を4個収納可能

■ 保管容器

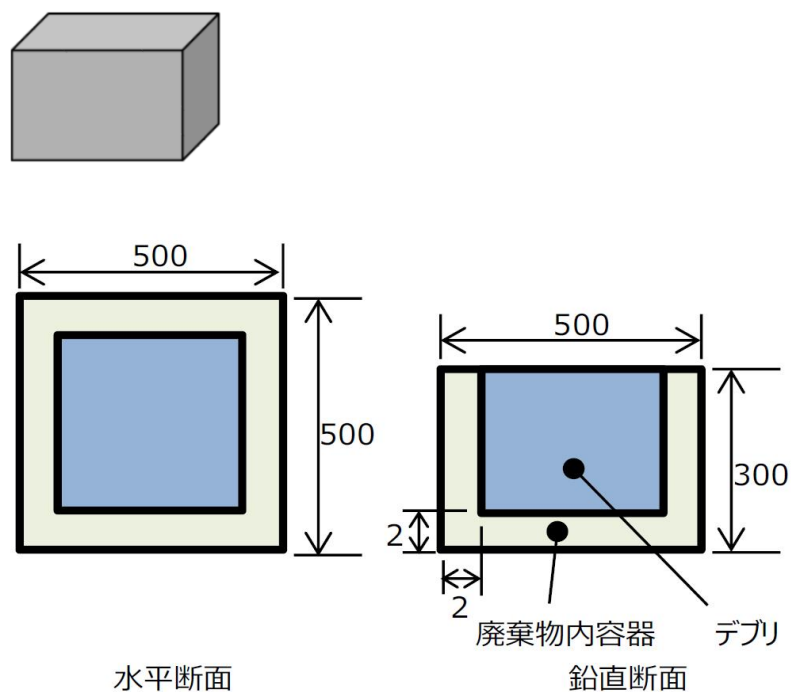


5. 実施内容 検討の前提 容器等の定義

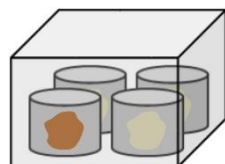
Decom.Tech

■ 保管への移行作業用具

廃棄物内容器

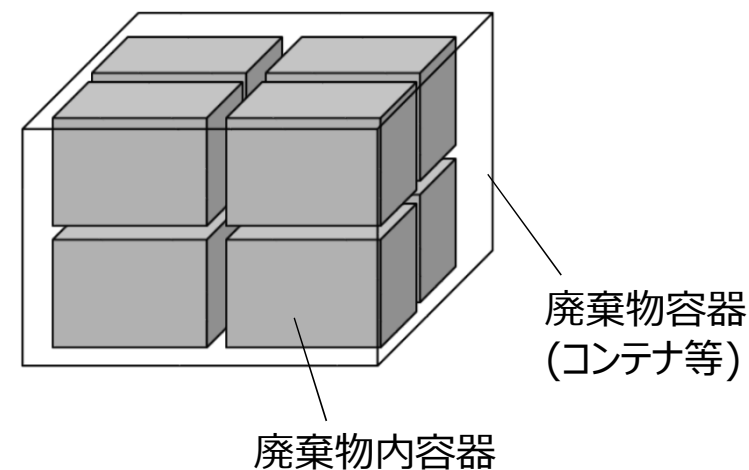


※ なお、現在検討中の廃棄物内容器では
ユニット缶を $2 \times 2 = 4$ 個収納可能。



■ 保管容器

廃棄物容器



※ 廃棄物内容器を $2 \times 2 \times 2 = 8$ 個収納可能
(ユニット缶は $4 \times 8 = 32$ 個収納可能)

5. 実施内容

検討の前提

- 非破壊計測の目的
- 核燃料物質量の推定アルゴリズム

5. 実施内容 検討の前提 非破壊計測の目的

Decom.Tech

核燃料物質量を推定するための非破壊計測の目的（1／2）

- 当初、核燃料物質量推定のための非破壊計測の目的を「臨界管理要否判定」として検討を開始した。
- 一方、「臨界管理要否だけ適用性が分かれば良いのか？」との疑問が当社内で生じた。
- また、核燃料物質量の推定に比較的適していなさそうな計測技術もあり、これらの技術について核燃料物質量の推定以外の用途も含めて検討する方が検討に無駄が少ないのではないかと考えた。
- このことから、非破壊計測として考えられる目的を改めて抽出し直し、計測技術がどのような用途に向いているのか（適性）を調べることにした。

5. 実施内容 検討の前提 非破壊計測の目的

Decom.Tech

核燃料物質量を推定するための非破壊計測の目的（2／2）

- 核燃料物質量を推定するための非破壊計測の目的について、以下のように抽出した。
- 大きく「物量の把握のみ」を目的するものと「基準値超過有無判定」を目的とするものの2種類に分類できる。

物量の把握（仕分けを含まない）

保管管理1 他方法による代替も可能

容器単位で核燃料物質量の情報を紐づけ管理
(対外説明に用いる)

処理処分1 至急必要ではない

保管管理1と同様の紐づけ管理 + 各核種量も含めた
紐づけ (処理処分方法の判断に用いる)

保障措置1 至近では他方法による代替を志向

保管管理1と同様の紐づけ管理 (計量管理に用いる)

基準値超過有無判定（合理化、仕分けを含む）

保管管理2 必須ではなく、費用対効果も不明

臨界管理要否を判定

処理処分2 至急必要ではなく、費用対効果も不明

発熱量制限超過有無を判定

処理処分3 至急必要ではない

ピット処分濃度限度超過有無を判定

保障措置2 必須ではない

封印・査察要否を判定

5. 実施内容

検討の前提

- 非破壊計測の目的
- **核燃料物質量の推定アルゴリズム**
 - (a)アクティブ中性子法を主軸とした計測技術
 - (b)ミュオン散乱法を主軸とした計測技術
 - (c)X線CT法を主軸とした計測技術
 - (d)パッシブ中性子法単独による計測技術
 - (e)パッシブガンマ線法単独による計測技術

5. 実施内容 検討の前提 核燃料物質量の推定アルゴリズム例

Decom.Tech

1-1. アクティブ中性子法を主軸とした計測技術 (1) (1/2)

(高速中性子による核分裂に着目)

①FFCC法(A')装置で計測

核分裂中性子数
(主にU-238)自発核分裂中性子数
(主にCm-244)
(中性子照射無し)中性子
消滅時間全高速
中性子数

← --- 自発核分裂中性子数の寄与を差し引く

← --- (a)高精度が求められる場合： 過大評価補正

← --- (b)高精度が求められる場合： 過小評価補正

← --- 検量線から導出

②核燃料
物質質量 (g)

← --- 燃焼前ウラン同位体比情報

③核分裂性
物質質量(g)← --- (c)中性子消滅時間と熱中性子による核分裂
中性子数から導出 (精度向上)

(a) 水分量が非常に多い場合、熱中性子の増加に伴う誘発核分裂中性子数が増加するため、核物質量を過大評価する傾向になる。その影響を補正する方法の一つとして、中性子消滅時間を利用する。

(b) 対象物組成等の影響で体系内の高速中性子が減少する場合、高速中性子による核反応数に影響する。その影響を補正する方法として、全高速中性子数の計測結果を利用する。

(c) 試料中に中性子吸収材を含まない(若しくは微量の場合)、熱中性子による核分裂反応で放出される核分裂中性子の数から核分裂性物質量を求めることが可能。この場合その計測結果を精度向上に利用できる

5. 実施内容 検討の前提 核燃料物質量の推定アルゴリズム例

Decom.Tech

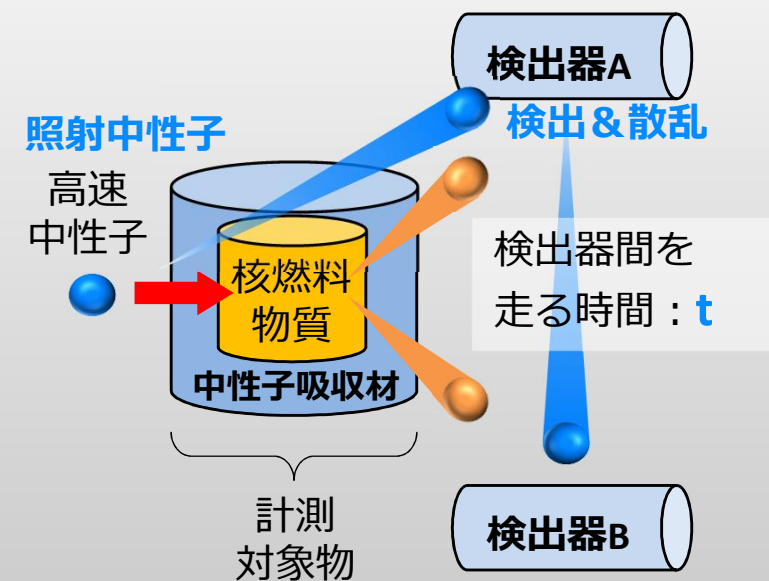
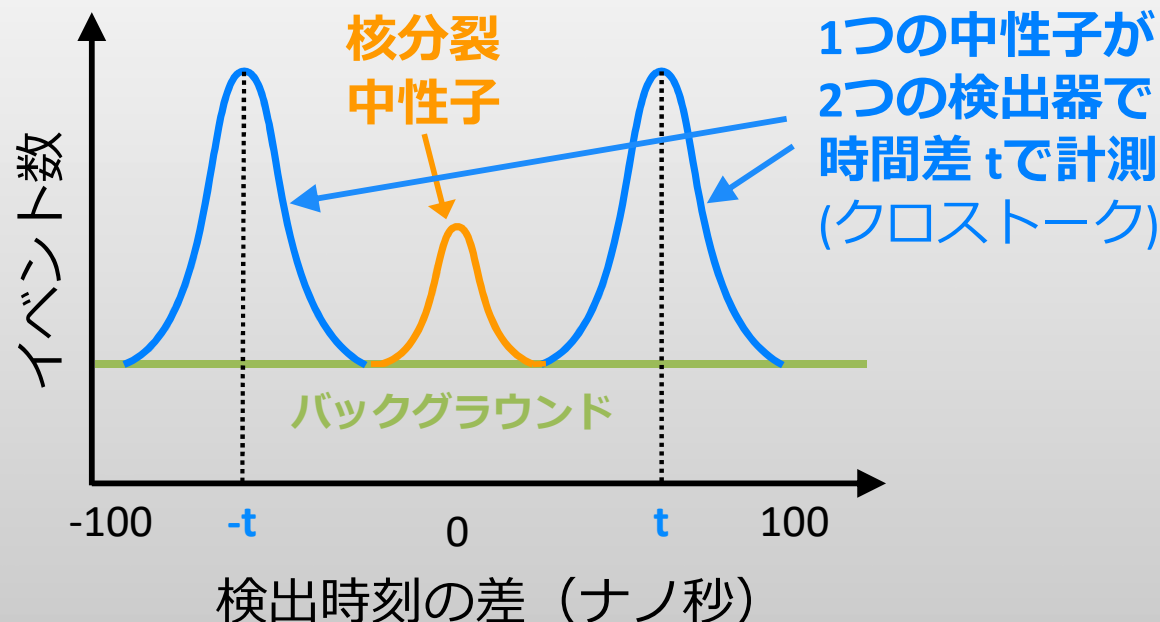
1-1. アクティブ中性子法を主軸とした計測技術 (1) (2/2)

(高速中性子による核分裂に着目)

FFCCの原理

- 対となる2つの検出器（検出器A, 検出器Bとする）それぞれの計測記録を基に、例えば**検出器A**で検出された ある中性子に対し、当該中性子の検出された時刻 (t_n とする) を基準 (0) とした任意の時間における、**検出器B**の計測中性子数（イベント数）を集計する。
- この集計を、検出器Aで検出される全中性子に対して行う。
- この集計の結果、以下のようなスペクトルを得る。

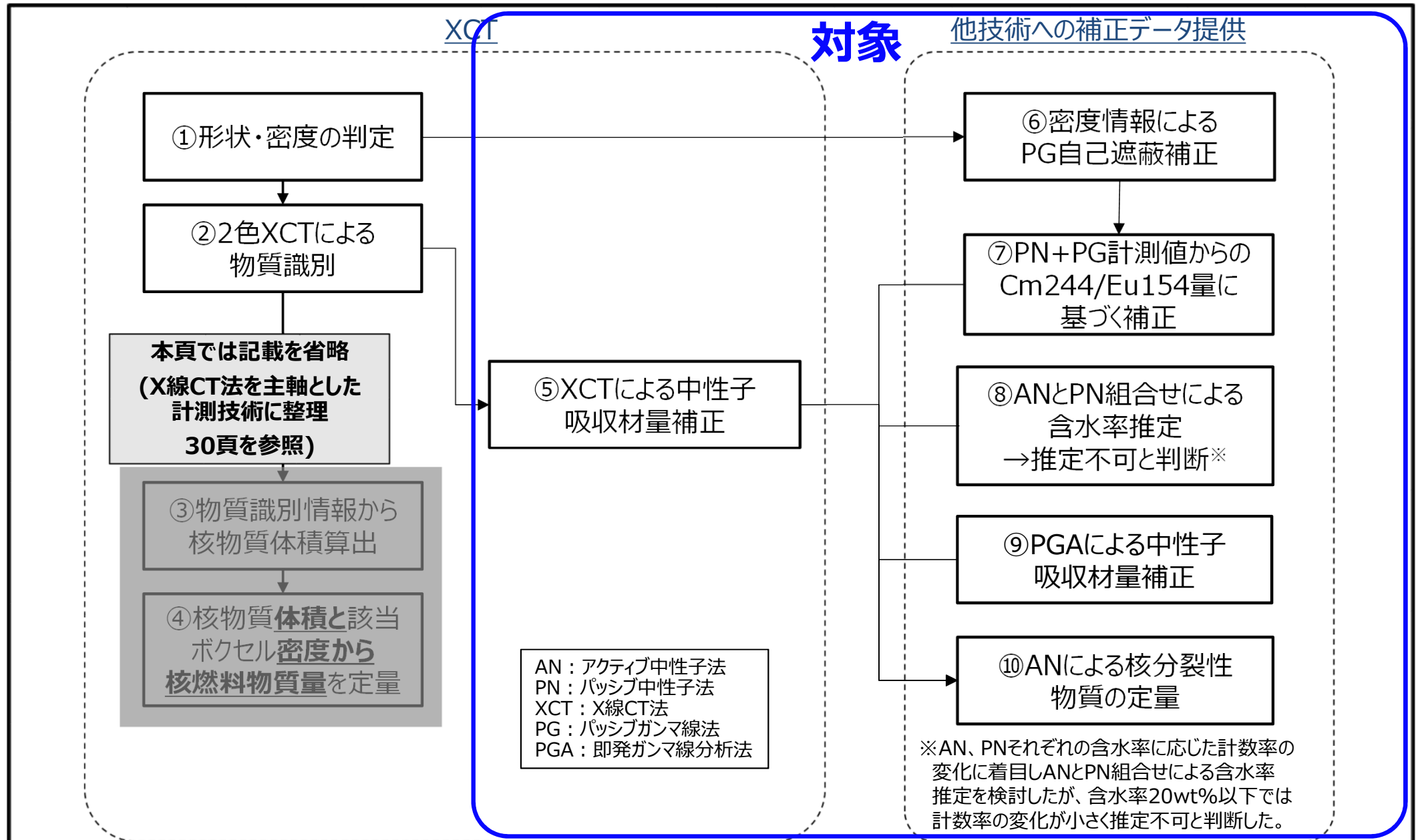
FFCCで得られるスペクトル



5. 実施内容 検討の前提 核燃料物質量の推定アルゴリズム例

Decom.Tech

1-2. アクティブ中性子法を主軸とした計測技術 (2) (熱中性子による核分裂、CTによる補正等)

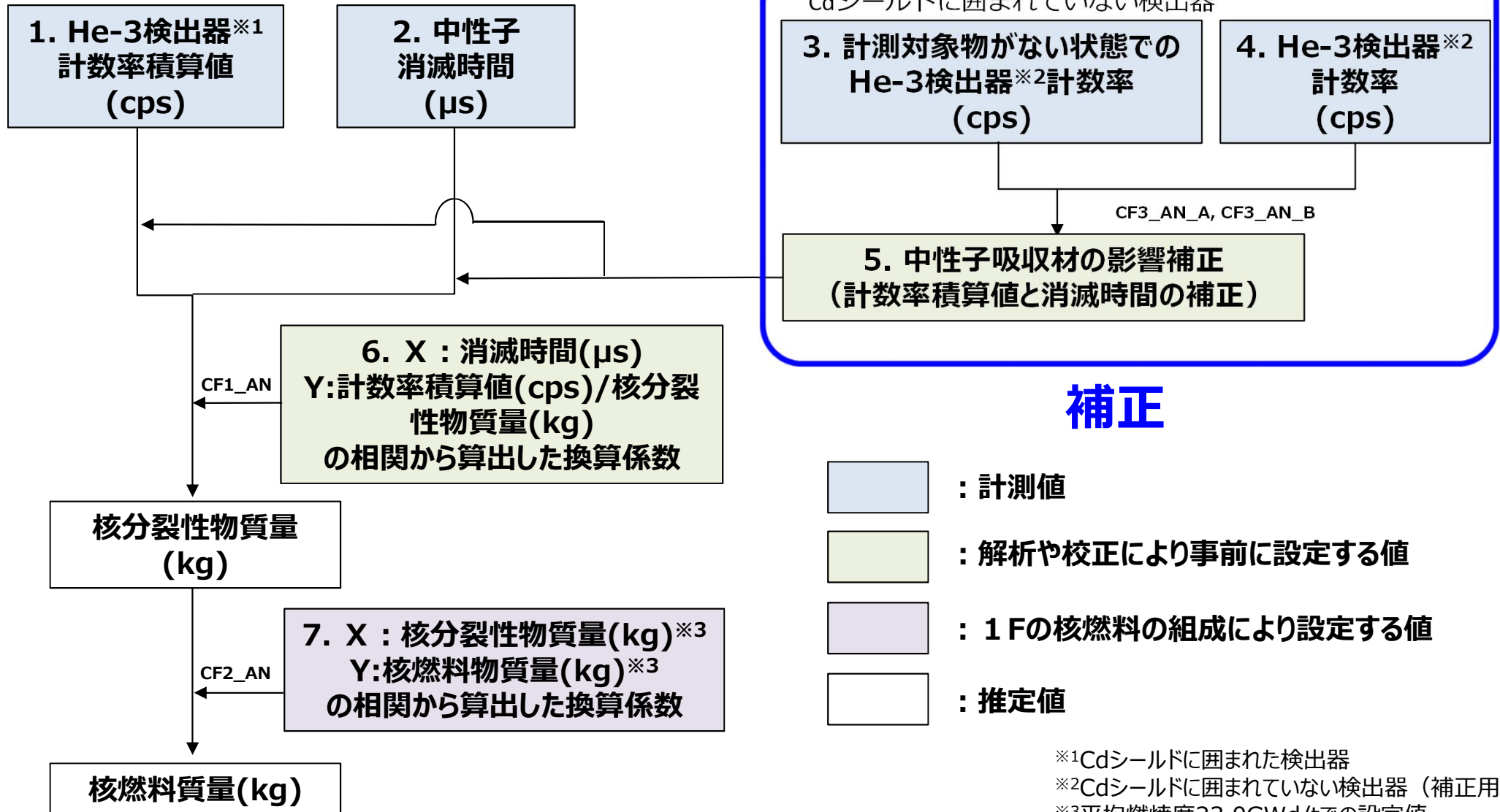


5. 実施内容 検討の前提 核燃料物質量の推定アルゴリズム例

Decom.Tech

1-3. アクティブ中性子法を主軸とした計測技術 (3) (熱中性子による核分裂、Cdシールドに囲まれていない検出器による補正)

[推定フロー]



5. 実施内容

検討の前提

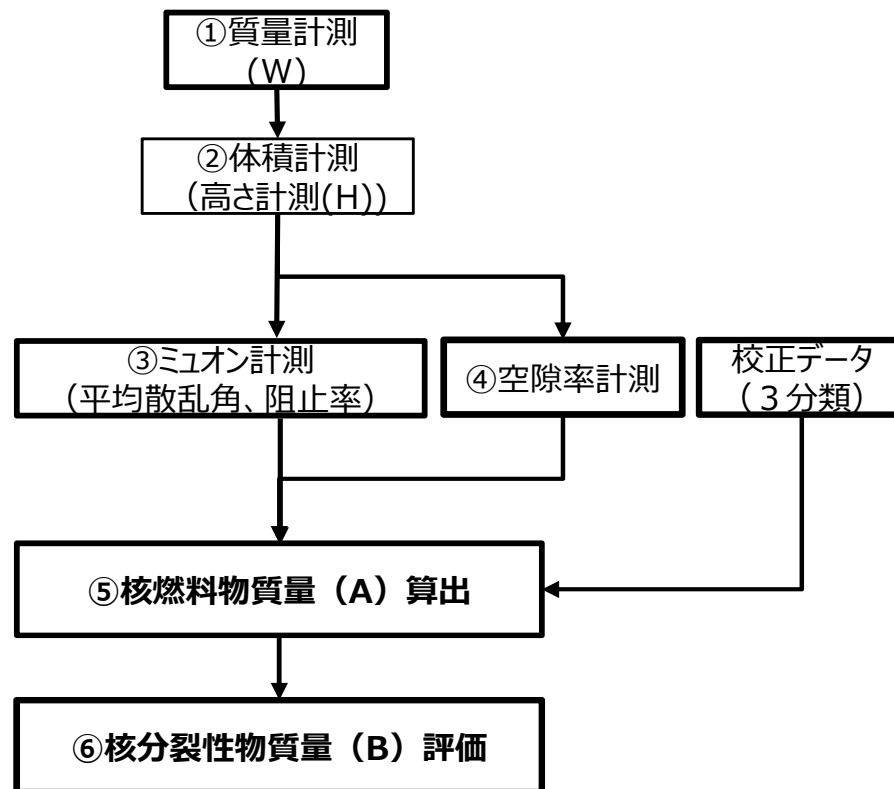
- 非破壊計測の目的
- **核燃料物質量の推定アルゴリズム**
 - (a)アクティブ中性子法を主軸とした計測技術
 - (b)ミュオン散乱法を主軸とした計測技術**
 - (c)X線CT法を主軸とした計測技術
 - (d)パッシブ中性子法単独による計測技術
 - (e)パッシブガンマ線法単独による計測技術

5. 実施内容 検討の前提 核燃料物質量の推定アルゴリズム例

Decom.Tech

2. ミュオン散乱法を主軸とした計測技術

■ 計測フロー案



<フロー概要>

- ①質量計測：計測対象全体の質量を計測
- ②体積計測：容器内の最大高さ×底面積を計測
- ③ミュオン計測：平均散乱角、阻止率を計測
- ④空隙率計測：X線CTや、圧縮による空隙削減など
※具体的な手法は要検討
- ⑤核燃料物質質量算出：質量、体積、平均散乱角から算出
- ⑥核分裂性物質質量評価：
核燃料物質質量×最大濃縮度で評価

5. 実施内容

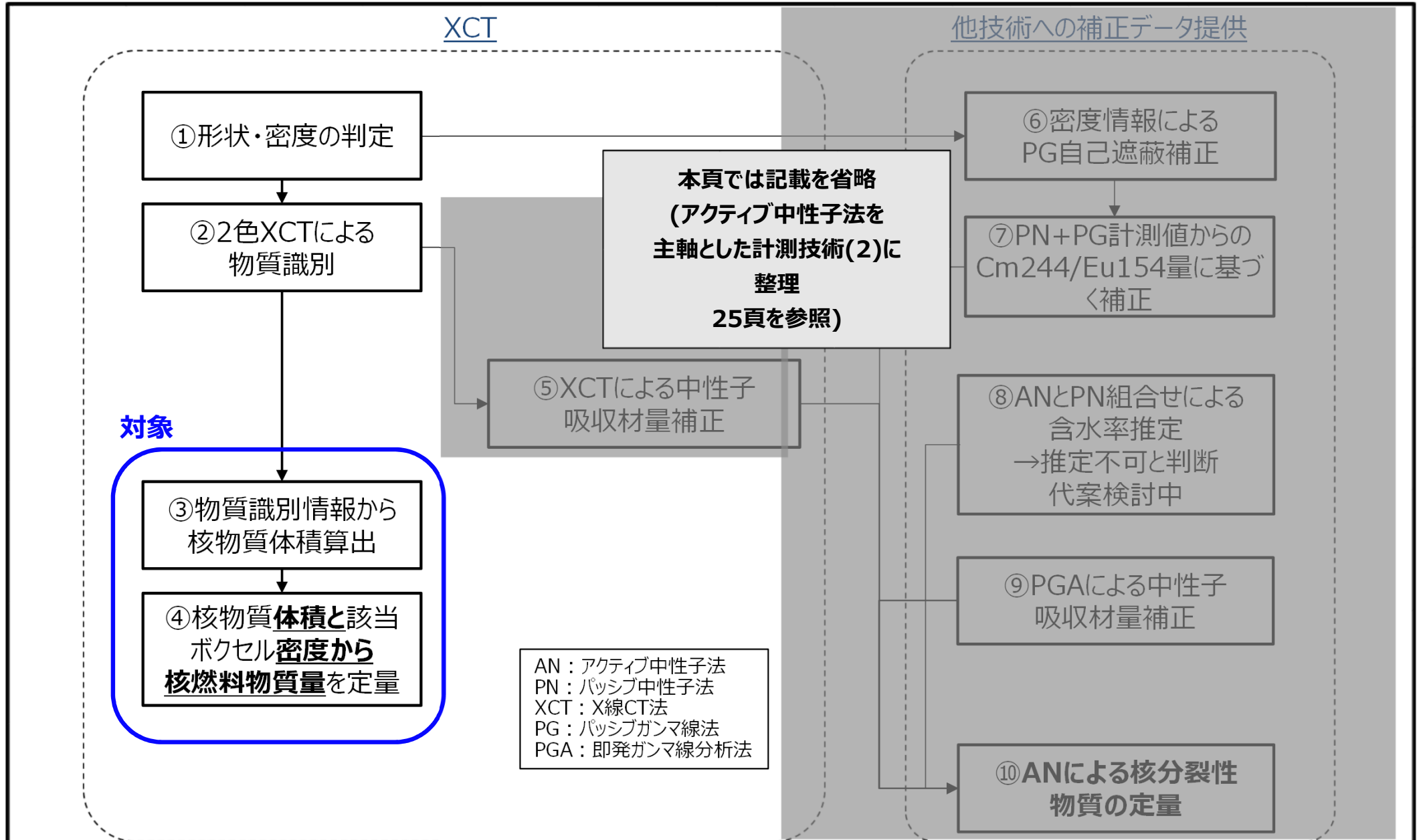
検討の前提

- 非破壊計測の目的
- **核燃料物質量の推定アルゴリズム**
 - (a)アクティブ中性子法を主軸とした計測技術
 - (b)ミュオン散乱法を主軸とした計測技術
 - (c)X線CT法を主軸とした計測技術**
 - (d)パッシブ中性子法単独による計測技術
 - (e)パッシブガンマ線法単独による計測技術

5. 実施内容 検討の前提 核燃料物質量の推定アルゴリズム例

Decom.Tech

3. X線CT法を主軸とした計測技術（1／4）



5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析
実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

3. X線CT法を主軸とした計測技術 (2/4)

(参考) 従来CTとMECTの比較

	従来CT	多色CT (以降MECTと記す)
計測方法	1つのX線エネルギーを照射・計測	2つ以上のX線エネルギーを照射・計測 (本事業では2色)
評価量	CT値 $\mu_m(E) \rho$	CT値 $\mu_m(E_L) \rho$ 、 $\mu_m(E_H) \rho$ CT値の比 $\mu_m(E_L) / \mu_m(E_H)$



従来CT

- 評価量である **CT値** に密度パラメータ (ρ) が含まれるため、同じ物質でもかさ密度が変化するとCT値が変化する。
- ゆえに、**かさ密度が変化すると物質の識別が困難**。



※ $\mu_m(E)$: 質量減弱係数、
 ρ : 密度

MECT

- 評価量である **CT値の比** に密度パラメータが含まれないため、かさ密度が変化してもCT値の比は変化しない。
- ゆえに、**かさ密度が変化しても物質の識別が可能**。
- ただし、**CT値の比単独で識別可能**なのは**単一物質の場合**。質量減弱係数が異なる複数の物質が混合すると、物質の混合割合に応じてCT値の比は変化する。

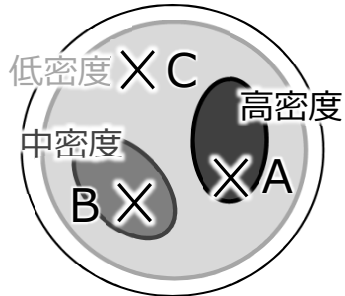
5. 実施内容 検討の前提 核燃料物質量の推定アルゴリズム例

Decom.Tech

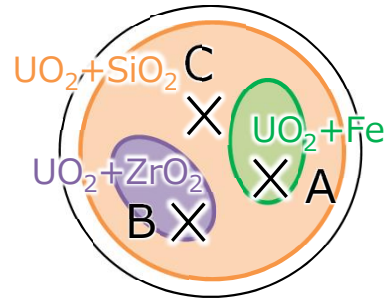
3. X線CT法を主軸とした計測技術 (3/4)

2物質混合かつ物質毎の境界が明確

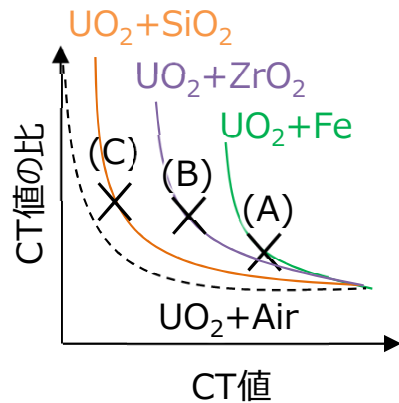
CT値の画像



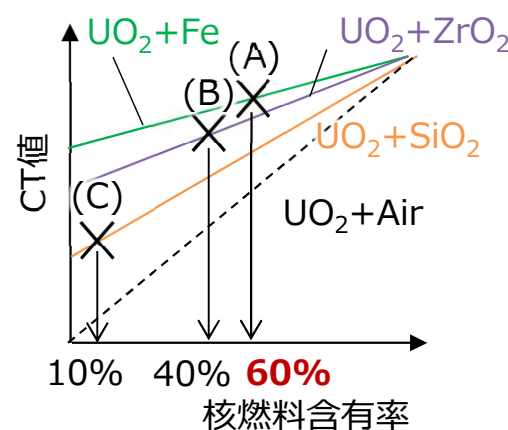
CT値の比の画像



1)物質識別マップ

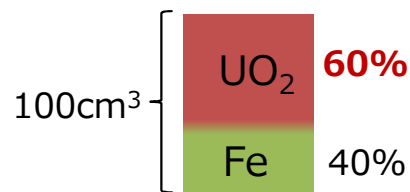


2)検量線※1



※1 各混合物の検量線は、結晶構造などにより多少変動

3)核燃料物質量の算出例 (ボクセルA)



(A)はUO₂とFeの混合物と判定
 ・UO₂の密度は10.525 g/cm³*。
 ・UO₂中のUの割合は88wt%*。
 *未燃焼Uの値を採用。

核燃料物質重量は、
 $0.6 \times 10.525(\text{g/cm}^3) \times 0.88 \times 0.00016(\text{cm}^3)$
 $= 0.9(\text{mg/ボクセル})$

1.計測データの取得：

CT値かCT値の比の3次元CT画像

*ボクセルのサイズは、0.4mm×0.4mm、厚さ1.0mm、
 体積は0.00016cm³。

2. 核物質量の推定：

1) ボクセル毎に物質を識別

ボクセル i ($i=0,1,\dots,N-1$)のCT値とCT値比から、
 二次元の物質識別マップを用いて物質を識別

2) 核燃料含有率 α_i ※2の算出

ボクセル i のCT値から、検量線を用いて核燃料含有率を算出

3) 核燃料物質重量 W の算出

ボクセル i の α_i とボクセル体積 V とUO₂密度 d と
 核燃料物質重量割合 w ※3の積和から、
 核燃料物質重量を算出

※2 核燃料含有率：

核燃料物質と低密度物質の混合物質と仮定した際の、核燃料物質の体積比率
 $\text{核燃料物質体積} / (\text{核燃料物質体積} + \text{低密度物質体積})$

※3 核燃料物質重量割合：

核燃料物質(UO₂)中のU重量の割合。燃焼後U重量/燃焼後UO₂重量

$$(\text{偏在の場合}) \quad W [\text{kg}] = wdV \sum \alpha_i \quad \cdots (1)$$

$$(\text{均質の場合}) \quad W [\text{kg}] = wdV \alpha \quad \cdots (2)$$

計測結果(シミュレーション結果)から推定

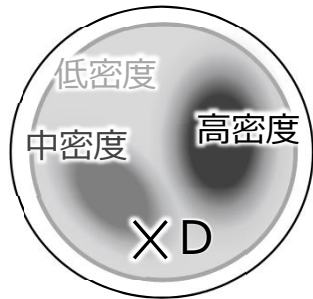
5. 実施内容 検討の前提 核燃料物質量の推定アルゴリズム例

Decom.Tech

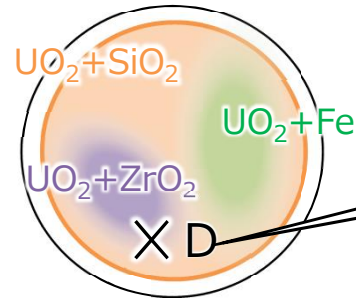
3. X線CT法を主軸とした計測技術 (4/4)

2物質混合かつ物質毎の境界が曖昧

CT値の画像

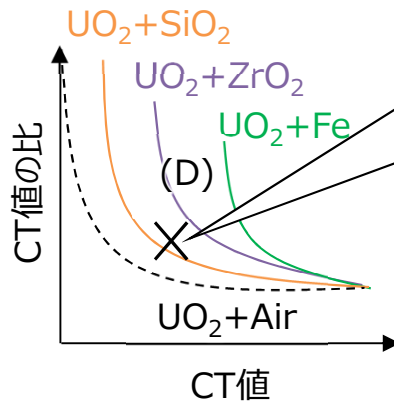


CT値の比の画像



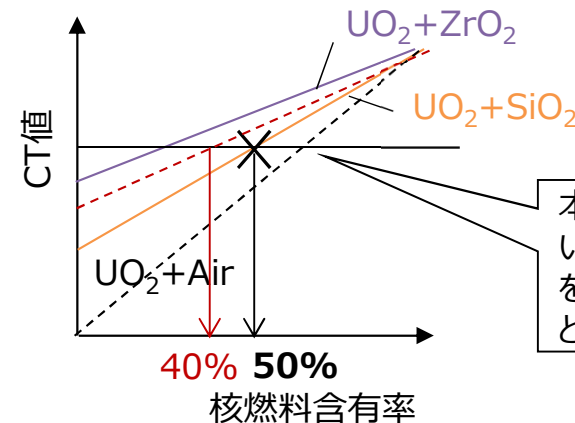
ボクセルDでは、3つの物質
($\text{UO}_2 + \text{SiO}_2 + \text{ZrO}_2$)が混合

1) 物質識別マップ



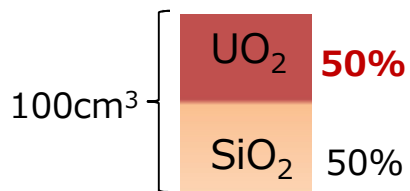
ボクセルDは、2物質の
曲線の外にプロットされ
るため、最近傍の曲線に
該当する物質と識別
→ $\text{UO}_2 + \text{SiO}_2$ と識別

2) 検量線



本来と異なる検量線を用
いるため、核燃料含有率
を真値40%ではなく50%
と推定(誤差10%)

3) 核燃料物質量の算出例 (ボクセルD)



(D)は UO_2 と SiO_2 の混合物と判定

・ UO_2 の密度は 10.525 g/cm^3 (未燃焼Uの値を採用)。

・ UO_2 中のUの割合は88wt% (未燃焼Uの値を採用)。

核燃料物質重量は、

$$0.5 \times 10.525 (\text{g/cm}^3) \times 0.88 \times 0.00016 (\text{cm}^3)$$

$$= 0.75 (\text{mg/ボクセル}) \quad \text{真値は} 0.60 \text{mg/ボクセル}。 \text{差は} +0.15 (\text{mg/ボクセル})$$

5. 実施内容

検討の前提

- 非破壊計測の目的
- **核燃料物質量の推定アルゴリズム**
 - (a)アクティブ中性子法を主軸とした計測技術
 - (b)ミュオン散乱法を主軸とした計測技術
 - (c)X線CT法を主軸とした計測技術
 - (d)パッシブ中性子法単独による計測技術**
 - (e)パッシブガンマ線法単独による計測技術**

5. 実施内容 検討の前提 核燃料物質量の推定アルゴリズム例

Decom.Tech

パッシブ2手法による計測技術（1／1）

■ 同伴性の課題

- パッシブ法にて核燃料物質量を推定する場合、計測対象核種（Cm-244, Eu-154 等）が核燃料物質に同伴していることが前提となる。
- 一方、これまでに実施した破壊分析から、計測対象核種量の核燃料物質量に対する比が通常の核燃料の燃焼において想定される値よりも 3桁 近く大きい結果を得ているなど、燃料デブリの溶融～凝固の過程において、計測対象核種が核燃料物質から分離し局所的に寄り集まっている可能性も想定される。
- このことから、同伴率については現状保守的に 0 と仮定して評価せざるを得ない。
- このことから、核燃料物質量の推定結果は **最小値：0**、**最大値：内容物総重量** となる。

■ 低燃焼度由来の核燃料物質の混合

- また、低燃焼度の核燃料物質からはEu-154やCm-244がごく微量しか検知されないことから、このような核燃料物質が混合している場合、高燃焼度成分に埋もれて低燃焼度成分が検知できない。
- よって、保守的な評価が求められる用途においては、内容物全てが核燃料物質であるものと仮定せざるを得ない。
- このことから、核燃料物質量の推定結果は **最大値：内容物総重量** となる。

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価 実施項目(2) 要素試験

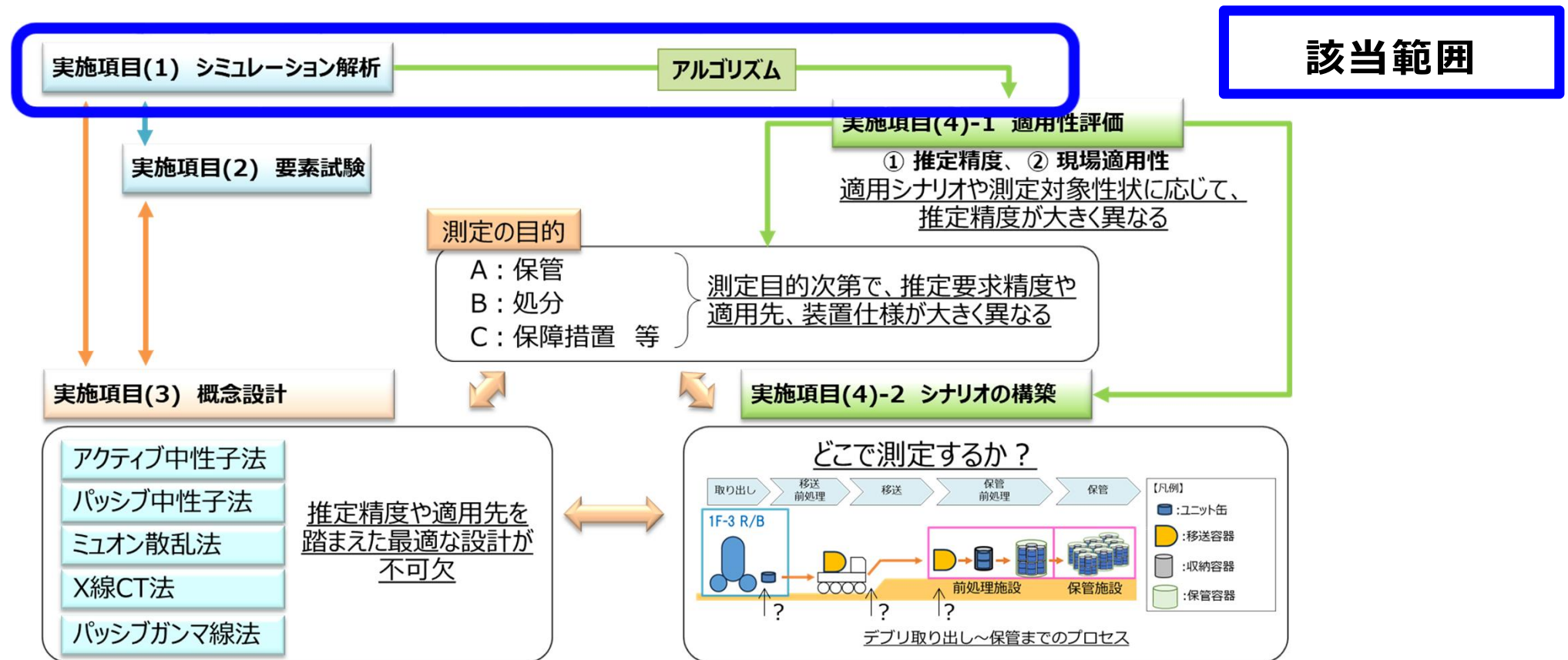
- (a)アクティブ中性子法
- (b)パッシブ中性子法
- (c)ミュオン散乱法
- (d)X線CT法
- (e)パッシブガンマ線法

- 各技術における核燃料物質量の推定精度を解析により評価した。
- 要素試験を実施するとともに要素試験の再現解析を行い、再現性（同解析により評価した核燃料物質量の推定精度の確からしさ）を確認した。
- パッシブ中性子法、およびパッシブガンマ線法は、核燃料物質量推定への適用が可能となる目的・条件が限定的である一方、計測対象核種量の推定など、多用途への適用可能性があることから、ここでは計測対象核種量の推定に着目した要素試験および再現解析を行った。

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価

- 核燃料物質量の推定精度の確認
- 要素試験の再現性解析



- 計測対象物の組成を変化させた条件に基づきシミュレーション解析により計測結果を評価した。
- 評価した計測結果から、アルゴリズムを用いて核燃料物質量を推定し、真値からのズレ(推定誤差)を評価した。

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

核燃料物質量の
推定精度の確認

実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

評価対象の核燃料物質質量（オーダー感）

- 用途ごとに計測対象物内の核燃料物質質量のオーダー感を見積もると、5kg付近が多い。
- よって、**まずは 核燃料物質質量 5kg に対して推定精度を評価**するものとした。

物量小

物量大

本事業に
おける
推定精度
評価の
対象

5kg

評価対象外

処理処分3(ピット処分濃度限度
超過有無を判定)

保障措置2(封印・査察要否を
判定)

- 燃料デブリの処分方法や封印・査察が不要対象物の定義については、現状決まっていないことから、本事業では検討対象外とし、今後ニーズが明確となったタイミングで検討の俎上に乗せることとする。

保管管理1(容器単位で核燃料
物質質量の情報を紐づけ管理)

処理処分1(保管管理1と同様の
紐づけ管理 + 各核種量も含めた
紐づけ)

保障措置1(保管管理1と同様の
紐づけ管理)

- ユニット缶に燃料デブリが30vol%入っている場合に、核燃料物質の含有割合が3号機の燃料デブリの推定組成と同じであると仮定すると中に含まれている核燃料物質質量は約2kg（このとき燃料デブリ内のU-235重量割合は1.2wt%）

処理処分2(発熱量制限超過
有無を判定)

- 現状処分にて想定する発熱量制限値の一案（約10～20 W/処分容器）に相当する核燃料物質質量：約2～5kg。

保管管理2(臨界管理要否を
判定)

- これまでの検討にて3.7kgをユニット缶を臨界管理不要と判断する一つの指標として用いてきた。
- これまでの検討にて径の大きいユニット缶に収納可能であると判断する一つの指標として用いてきた濃縮度1.5wt%もオーダー感が近い。

大体同じくらいのオーダー感

凡例

- : 物量の把握のみ（仕分けと関係なし）
- : 基準値超過有無判定（仕分けと関係）

参考

解析・評価等による燃料デブリ分布の推定について 平成28年10月4日
技術研究組合 国際廃炉研究開発機構（IRID）、一般財団法人 エネルギー総合工学研究所（IAE）
<https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2016/10/20161004.pdf>

要求推定精度

● 物量の把握に用いる場合 ()

- 推定精度に対する要求は基準値超過有無判定より低い
(「意味のある計測結果が得られる精度があればよい」)。

保管管理1(容器単位で核燃料物質量の情報を紐づけ管理)

処理処分1(保管管理1と同様の紐づけ管理 + 各核種量も含めた紐づけ) 等

● 基準値超過有無判定に用いる場合 () ← 仕分けを含む

- 推定精度が良いほど費用対効果が高まる可能性はある。
- 一方、たとえ推定精度が良くても 燃料デブリの溶融混合状態によっては費用対効果が得られない可能性もある (例えば、燃料デブリが一様に溶融混合し、大部分が基準値を超過して仕分けられない場合など)。
- また、取り出し～保管～処分のシナリオによっては判定する行為に意味がない可能性もある (例えば、対象物を全て同じ形態で処分する、すなわち処分にあたり仕分けを行わない場合など)。
- よって、まずは各推定手法の性能 (推定精度) を確認し、その結果を基に、有力な手法、およびその適用先を絞り込んだタイミングで適宜要求精度を定めて評価していくこととした (すなわち、本事業では要求推定精度を決め打ちして評価を行うフェーズに達していないものと考え、要求推定精度を設定しなかった) 。

保管管理2(臨界管理要否を判定)

処理処分2(発熱量制限超過有無を判定) 等

推定精度評価のための準備 (1/2)

1. **核燃料物質質量設定値 5kg**に対して、推定値が検量線に対して大きく外れる結果になると想定する複数のケース（アクティブ中性子法であれば中性子吸収材の存在ケース等）※1に対してシミュレーション解析により計測値を評価し、計測値に対してアルゴリズムを用いて、計測誤差も考慮しながら※2 各ケースに対する核燃料物質質量※3を推定する（最小値 ～ 最大値をそれぞれ推定）。

核燃料物質質量設定値 : **5kg**

推定値 :

ケース1 : 最小値 ～ 最大値

ケース2 : 最小値 ～ 最大値

⋮

ケースN : 最小値 ～ 最大値

2. **全ケース**の推定値から**最小値**、および**最大値を抽出**し、これを**核燃料物質質量設定値 5kgに対する推定値**とする。

核燃料物質質量設定値 : **5kg**

推定値 : 最小値 ～ 最大値

※1 解析条件の詳細については、p116～124を参照。

※2 計測誤差評価にあたっては 3σ を考慮した（「核燃料物質の物量の把握」を目的とする場合など、目的によっては 1σ でも十分であると考えるが、今回は便宜上「基準値超過有無判定」に対する条件設定に統一し、一律 3σ を用いて評価した）。

※3 計測手法の特性に応じて、先に**核分裂性物質質量**を推定したうえで核燃料物質質量に換算する場合もある。

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析
実施項目(2) 要素試験

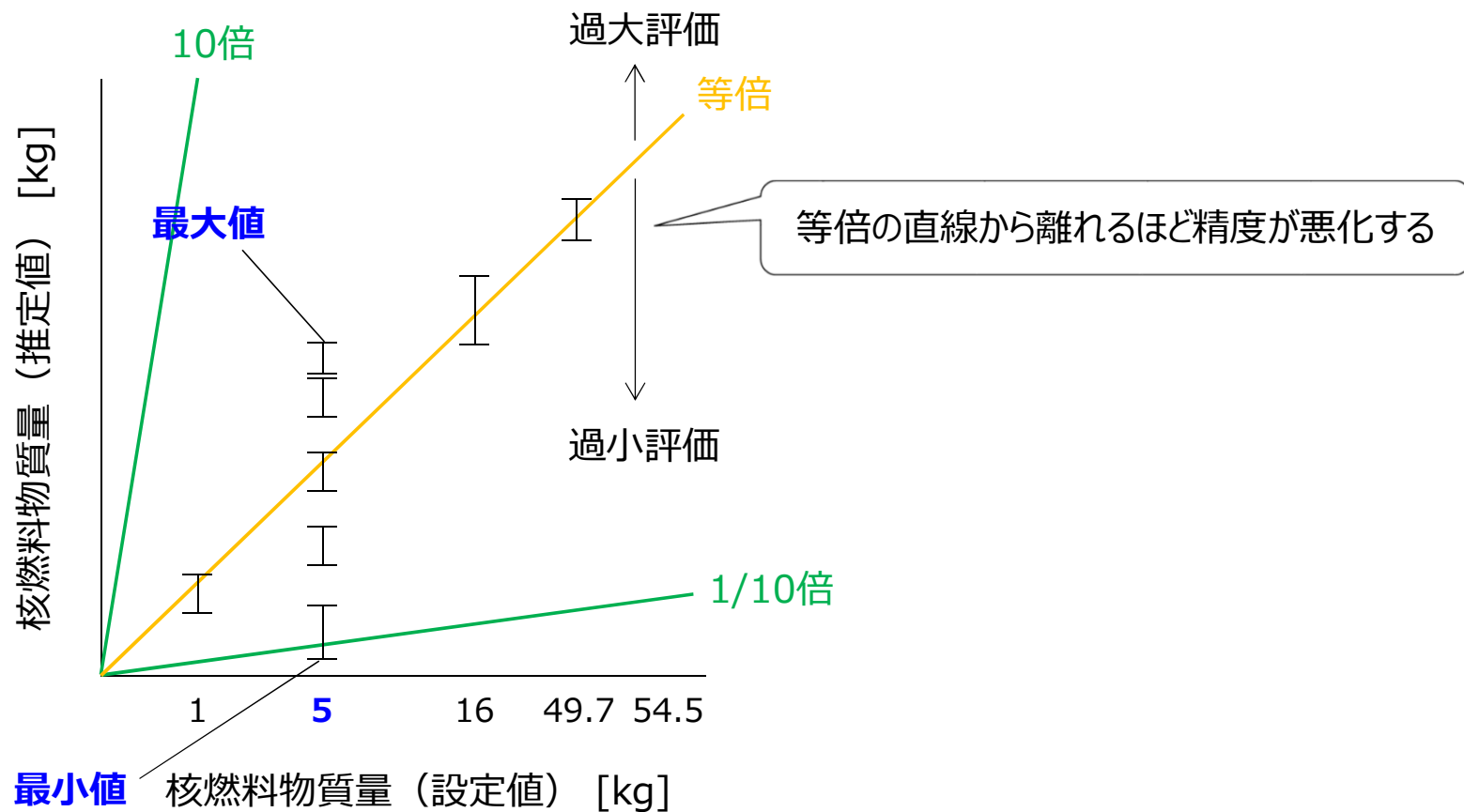
核燃料物質量の
推定精度の確認

Decom.Tech

41

推定精度評価のための準備 (2/2)

3. 結果をグラフに描画する。



5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価

- ・ 核燃料物質量の推定精度の確認

(a)アクティブ中性子法

(b)パッシブ中性子法

(c)ミュオン散乱法

(d)X線CT法

(e)パッシブガンマ線法

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

核燃料物質量の
推定精度の確認

実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

1. アクティブ中性子法 まとめ

アクティブ中性子法 解析概要（推定精度の確認）

No.	検討が必要な 事項	本事業		今後の展開
		主な実施事項	主な結果・考察	
1	これまでの事業にて検討してきた熱中性子を計測対象に照射する技術では、中性子吸収材や水分の存在により計数率が大きく影響を受ける（核燃料物質量の推定精度が悪化する）。	熱中性子を計測対象容器に照射する技術（An(A), An(B) および An(C)）について、推定精度を評価した（適用可否を評価するため）。	中性子吸収材が含まれる体系では核分裂中性子を検知できず、核燃料物質量の推定精度が著しく悪化する（p44参照）。	検討対象としての優先度低（他の検討を優先）
2		高速中性子 を計測対象容器に 照射 する技術について、推定精度を評価した。	中性子吸収材や水分の存在による影響は小さく、 核燃料物質量 5kgを検知可能 である見込み（p45参照）。	引き続き検討 する。
3		X線CT法やPGAにより中性子吸収材の量を評価できるかどうか検討した（Anを主軸とした計測技術(2)）。	中性子吸収材を見逃すことなく検知できると保証できない。	検討対象としての優先度低（他の検討を優先）
4		計測対象物内に中性子吸収材が存在する場合、検出器体系の違いにより中性子計数の挙動が異なることを利用して中性子吸収材の影響を補正できるかどうか検討した（Anを主軸とした計測技術(3)）。	含有中性子吸収材量が少量かつ、核燃料物質量が比較的多い場合でなければ補正の効果は限定的。	検討対象としての優先度低（他の検討を優先）

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析
実施項目(2) 要素試験

核燃料物質量の
推定精度の確認

Decom.Tech

44

1. アクティブ中性子法(A)

概要

FNDI法は中性子吸収材の影響を受けやすい

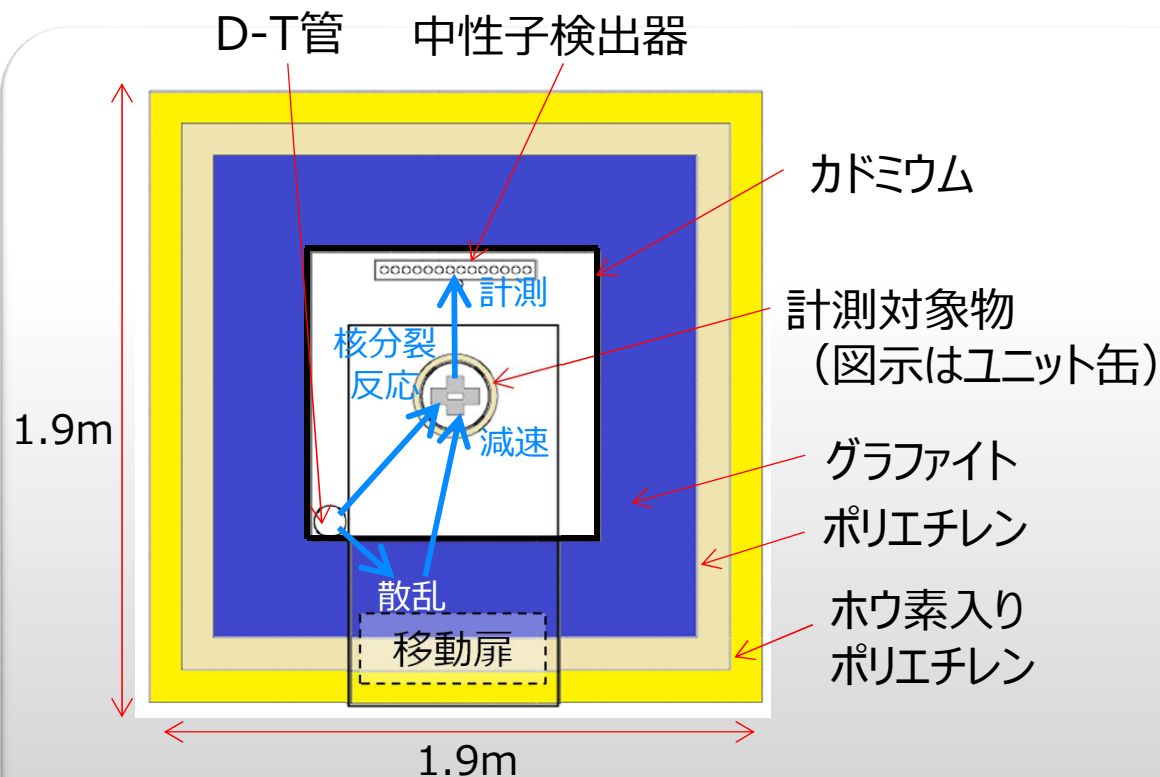


図 シミュレーション体系：
JAWAS-T 水平断面図

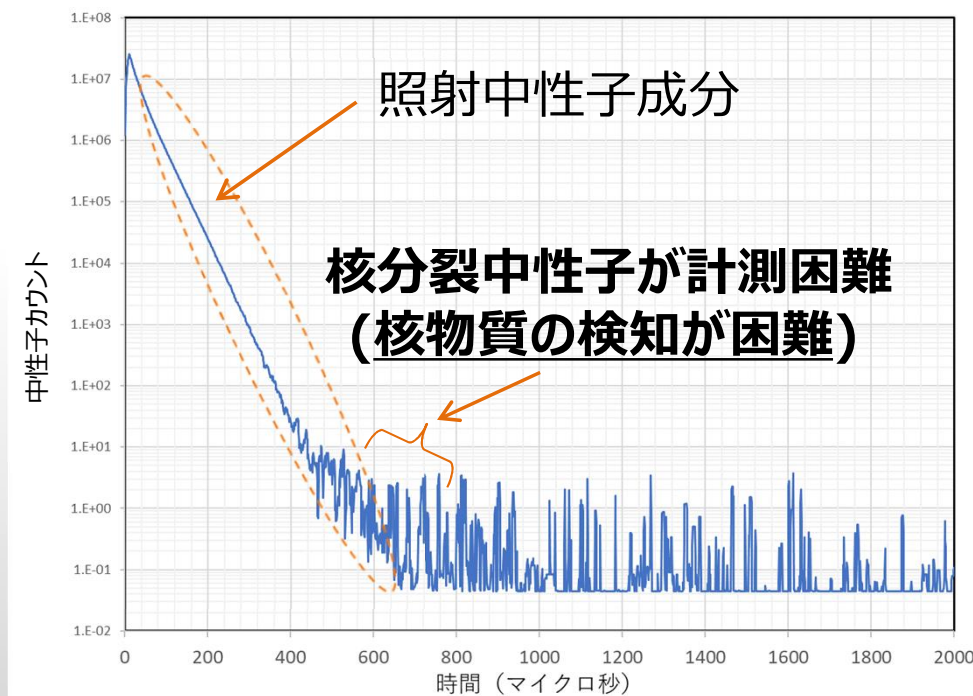


図 パルス照射後の中性子カウントの時間推移,
ケースB-7-3 (中性子吸収材(B_4C) 0.51vol%)

少量の中性子吸収材 (B_4C :約0.5vol%) が混在した場合でも核物質の検知が困難

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析
実施項目(2) 要素試験

核燃料物質量の
推定精度の確認

Decom.Tech

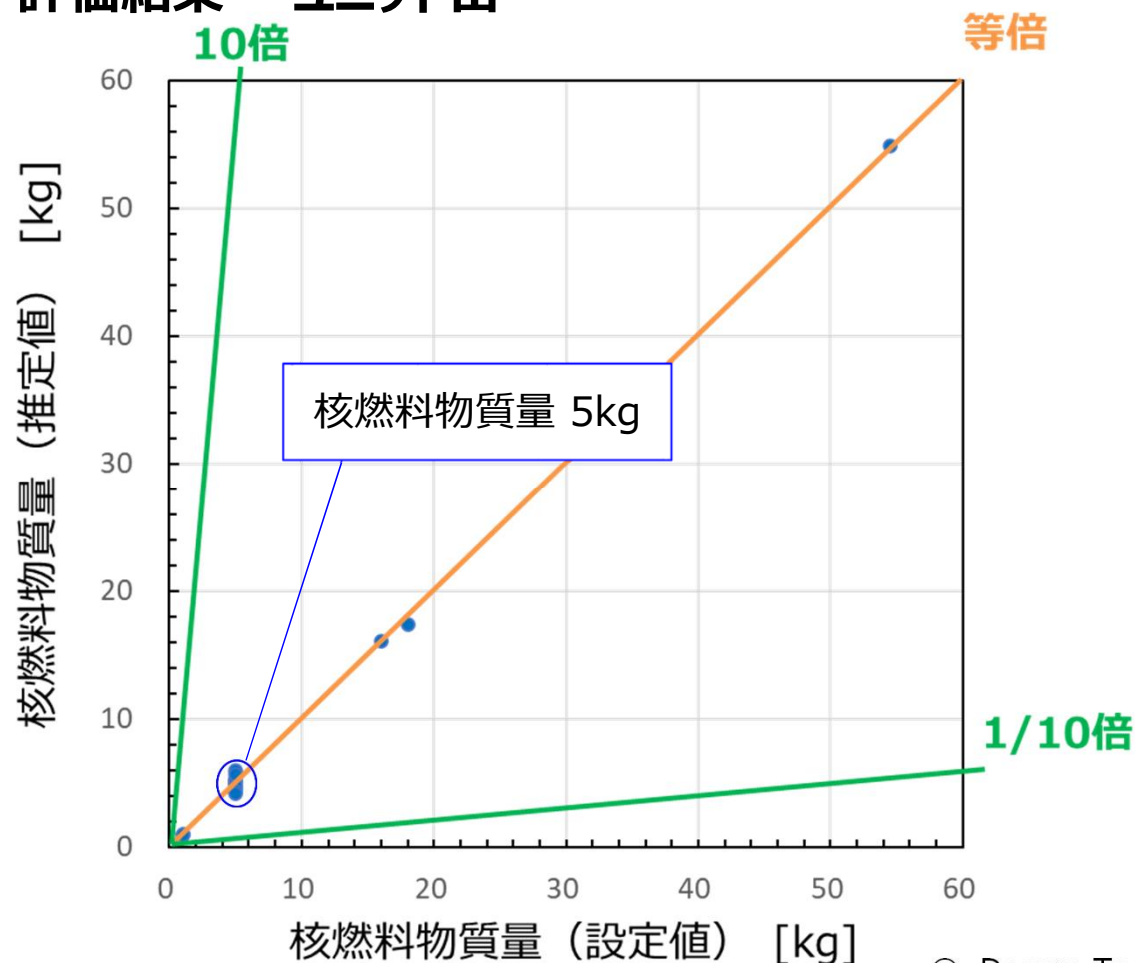
45

1. アクティブ中性子法(A')

- 条件
 - ・ 計測時間：10分
 - ・ 中性子発生管：D-D管 (10^8 [n/s]) (D-T管と異なり、トリチウムの交換が不要 ⇒ 現場負荷軽減)

基準値：5kg (仮)
→計測時間**10分**でも検知可能

■ 評価結果 ユニット缶



核燃料5kgの評価結果

<最大値>

01-14-02
核燃 + SUS(27kg) :
5.93kg (+19%程度)

<最小値>

01-13-02
核燃 + B₄C(1kg)+水(20vol%) :
4.18kg (-16%程度)

※ 現状の評価結果であり、今後さらなる検証により確認が必要。

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価

- ・ 核燃料物質量の推定精度の確認

(a)アクティブ中性子法

(b)パッシブ中性子法

(c)ミュオン散乱法

(d)X線CT法

(e)パッシブガンマ線法

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

核燃料物質量の
推定精度の確認

実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

3. ミュオン散乱法 まとめ

ミュオン散乱法 解析概要（推定精度の確認）

No.	検討が必要な事項	本事業		今後の展開
		主な実施事項	主な結果・考察	
1	異なる複数の元素が混在 平均散乱角のみを用いて核燃料物質量を推定する場合、核燃料物質以外の物質が混在すると推定精度が悪化する。	複数元素の混在に影響を受けにくいアルゴリズム を構築した （複数元素各々の重量をパラメータとした連立方程式）。	1時間計測 では、 核燃料物質質量5kgを検知不可 である見込み。 8時間計測 では、 核燃料物質質量5kgを検知可能 である見込み（次頁以降参照）。	引き続き検討 する。
2	空隙 計測対象物が空隙を多く有している場合、推定精度が悪化する。	空隙に影響を受けにくいアルゴリズム を構築した （体積を用いないアルゴリズム）。		
3	現実的な評価 これまでは理想的な検出器として、 <u>ミュオン以外の放射線影響</u> （ノイズ、遮蔽体）や、 <u>検出器の応答</u> を考慮できていない。	より現実的な核燃料物質質量評価を行うため、以下を考慮した解析を実施した。 ・ <u>ミュオン以外の放射線として燃料デブリからのγ線を考慮</u> 。 ・ <u>遮蔽体を設置</u> した体系とし、計測精度に与える影響を確認。 ・ <u>検出器応答を考慮</u> 。		

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析
実施項目(2) 要素試験

核燃料物質量の
推定精度の確認

Decom.Tech

48

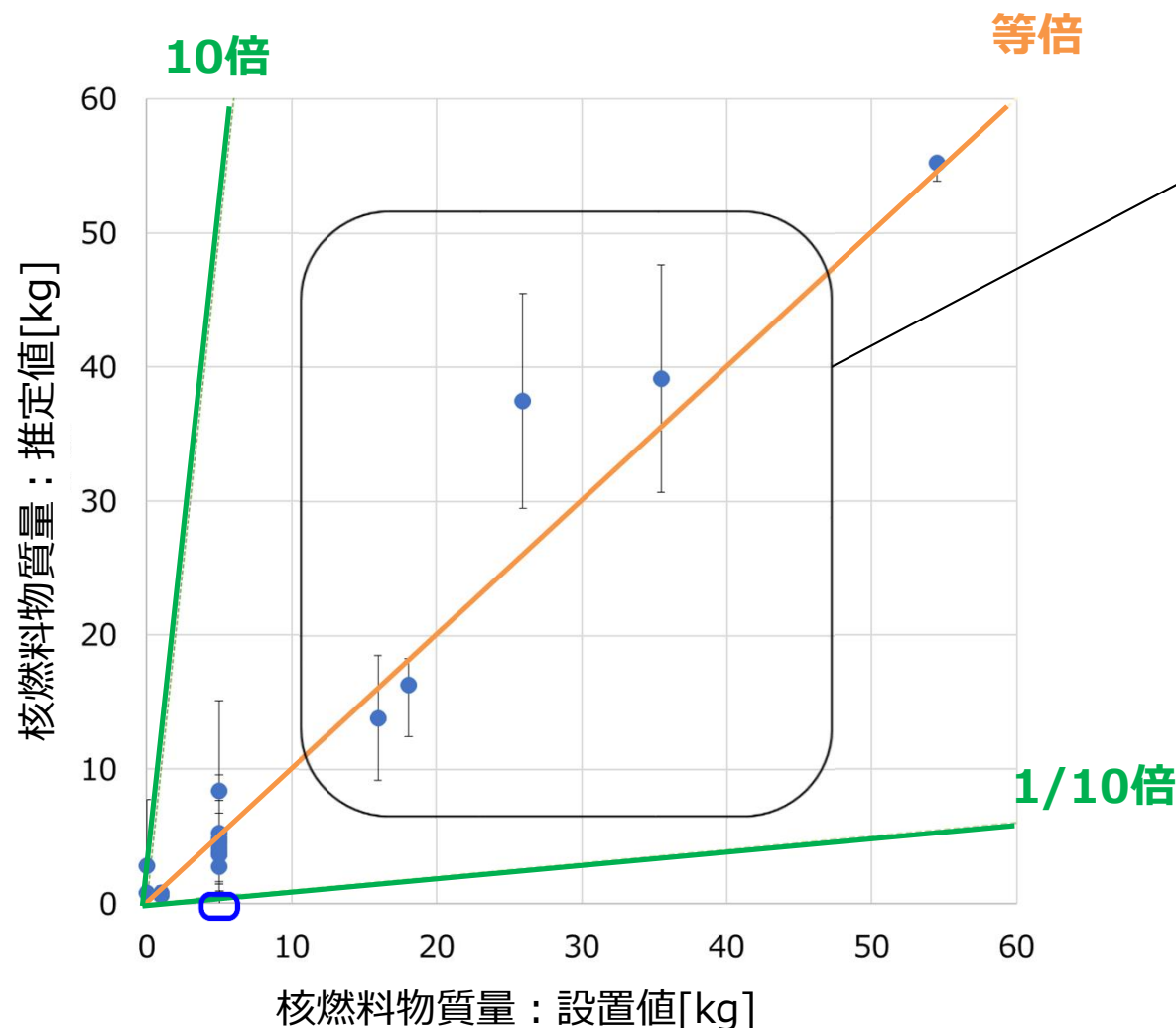
3. ミュオン散乱法

■ 評価結果 1時間計測 (精度悪) ユニット缶

- 計測時間：1時間
- 遮蔽体：有り

基準値：5kg (仮)
→ 計測時間1時間では検知可能
と言い切れない (現時点)

[参考] 基準値が大きい場合には、計測時間1時間でも
適用性がある見込み (詳細要検討)



核燃料5kgの評価結果

<最大値>

01-05-01

核燃+SUS(9kg)：

16.21kg (+224%程度)

<最小値>

01-06-01

核燃+コンクリート(2kg)：

0kg (-100%)

※ 現状の評価結果であり、今後さらなる検証により
確認が必要。

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析
実施項目(2) 要素試験

核燃料物質量の
推定精度の確認

Decom.Tech

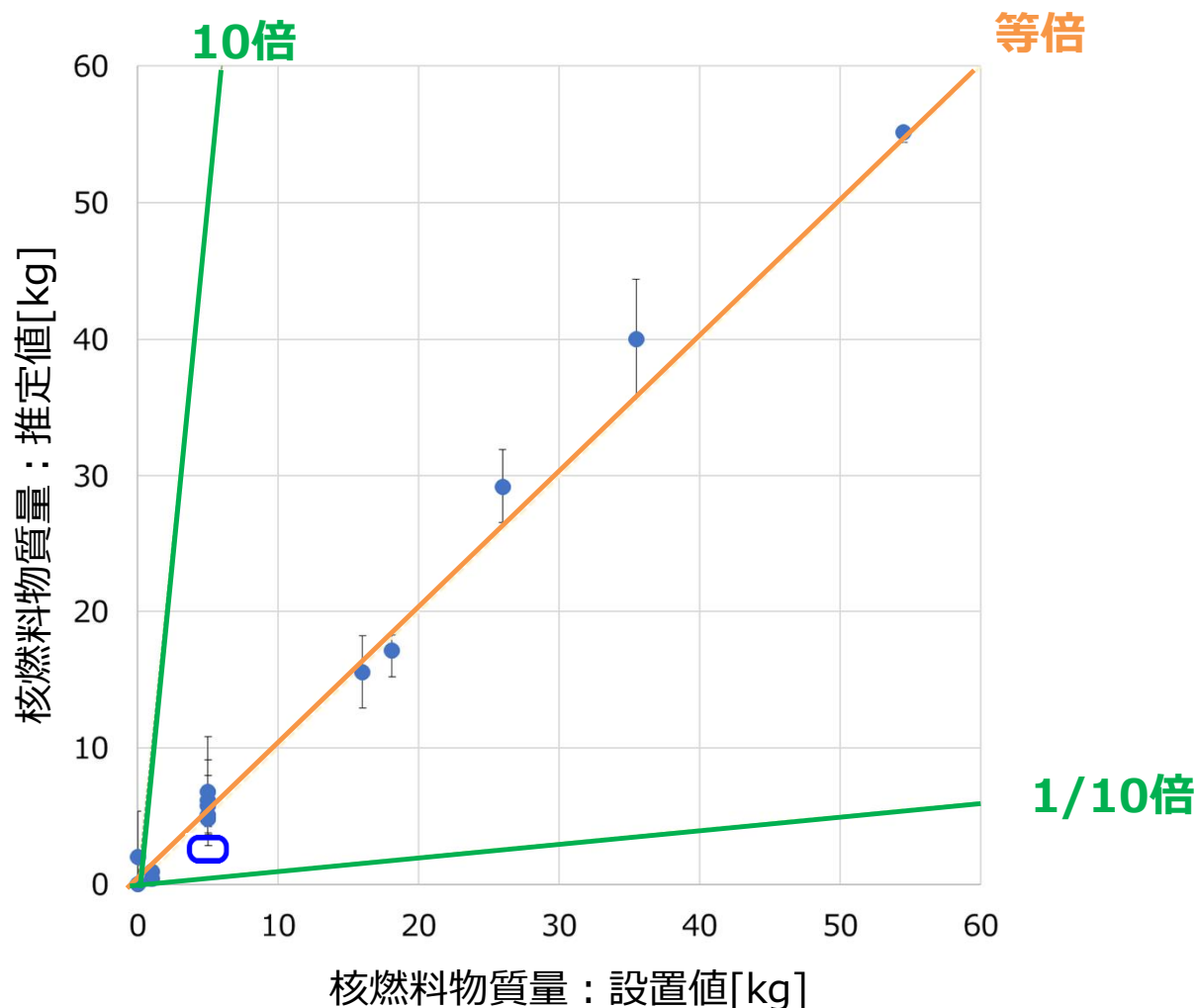
49

3. ミュオン散乱法

■ 評価結果 8時間計測 (精度良) ユニット缶

- 計測時間：8時間
- 遮蔽体：有り

基準値：5kg (仮)
→計測時間8時間の場合には
検知可能 (現時点)



核燃料5kgの評価結果

<最大値>

01-14-1
核燃+SUS(18kg) :
10.8kg (+116%程度)

<最小値>

01-14-01
核燃+SUS(18kg) :
2.8kg (-44%程度)

※ 現状の評価結果であり、今後さらなる検証により
確認が必要。

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価

- ・ 核燃料物質量の推定精度の確認

(a)アクティブ中性子法

(b)パッシブ中性子法

(c)ミュオン散乱法

(d)X線CT法

(e)パッシブガンマ線法

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析
実施項目(2) 要素試験

核燃料物質量の
推定精度の確認

Decom.Tech

4. X線CT法 まとめ

X線CT法 解析概要（推定精度の確認）				
No.	検討が必要な事項	本事業		今後の展開
		主な実施事項	主な結果・考察	
1	空間分解能未満で複数の物質が混合	空間分解能未満で複数の物質が混合している場合にも 影響を受けにくいアルゴリズムを構築 した(2色を用いたアルゴリズム)。	単色の場合、核燃料物質以外の物質が多く含まれる計測対象では推定精度が悪い(重量計と同等)。一方、2色の場合、ある程度の物質の混合状態の識別ができるため、単色の場合よりも推定精度が向上する。 ただし、アルゴリズム内の物質の混合状態を識別するプロセスにおいて物質を誤認する可能性がある。誤認により非保守側の推定結果となることを回避するには、核燃料物質がより多く含まれるとの結果が導き出される混合状態を保守的に仮定せざる得なくなり、単色に近い結果となるものとする。	検討が必要な事項は検討完了。後は必要に応じて実機設計のフェーズに対応。

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析
実施項目(2) 要素試験

核燃料物質量の
推定精度の確認

Decom.Tech

52

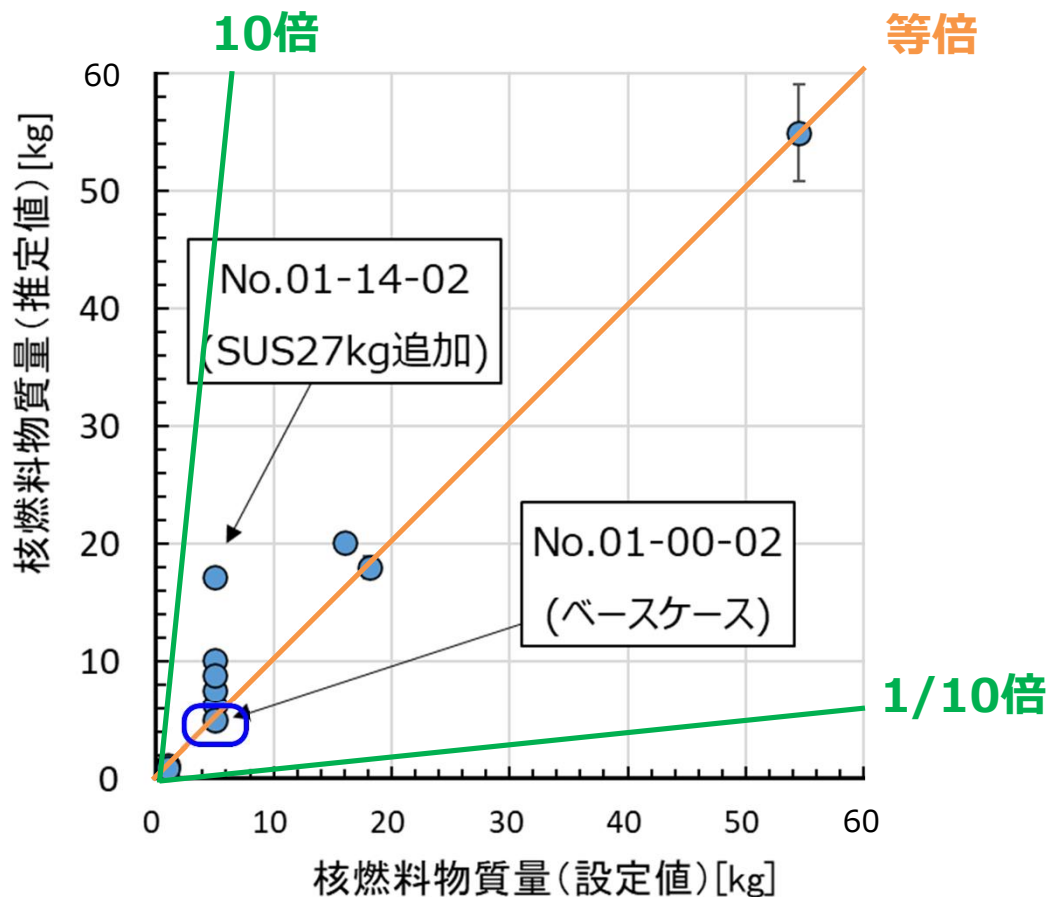
4. X線CT法

■ 評価結果 単色CT (精度悪) ユニット缶

- 計測時間：3.4時間

基準値：5kg (仮)
→検知可能 (現時点)

※ ただし重量計と同等。



核燃料5kgの評価結果

<最大値>

01-14-02

核燃+SUS(27kg) :

17.2kg (+240%程度)

<最小値>

01-00-02

核燃のみ :

5.0 kg (±0%程度)

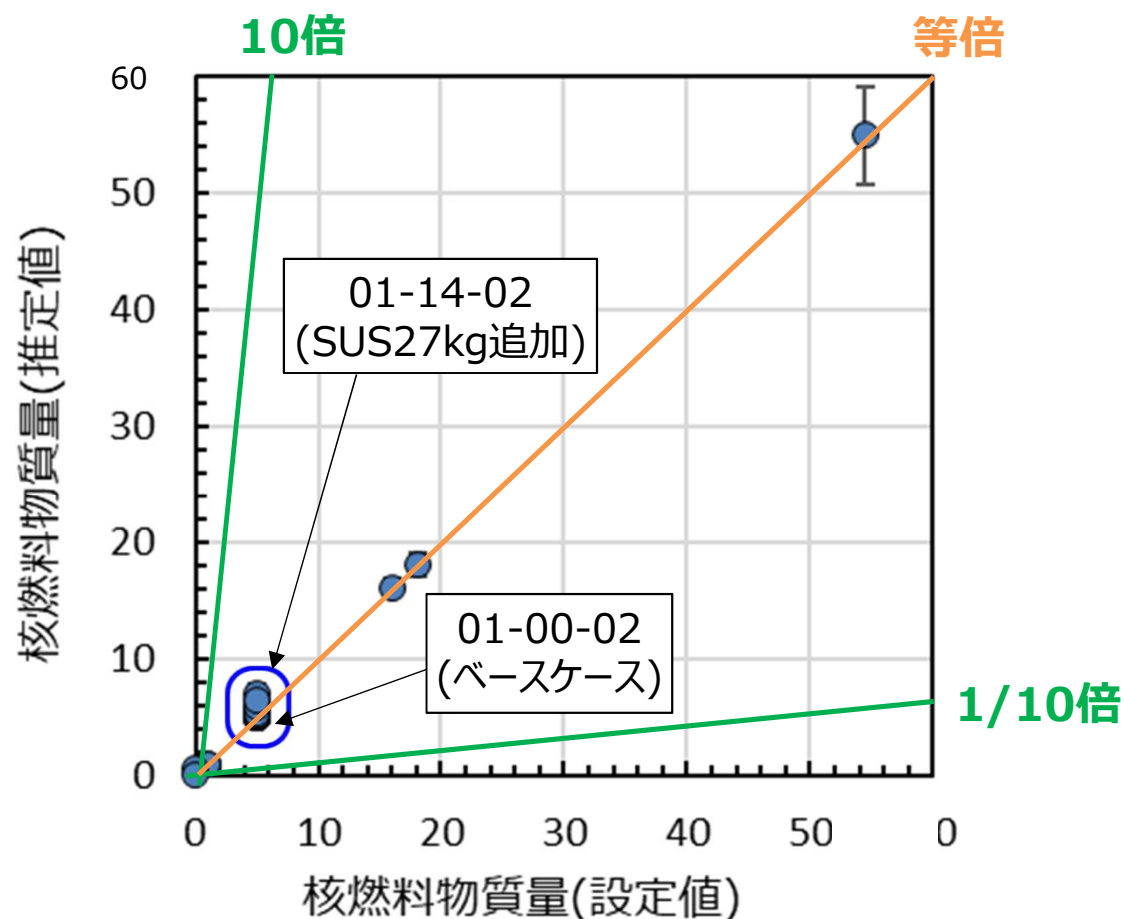
4. X線CT法

■ 評価結果 **MECT (精度良)** ユニット缶

- 計測時間：6.7時間（単色の2倍）

基準値：5kg (仮)
→**検知可能** (現時点)

※ 単色よりも精度向上



核燃料5kgの評価結果

<最大値>

01-14-02
核燃+SUS(27kg) :
6.9kg (**+37%程度**)

<最小値>

01-00-02
核燃のみ :
5.0 kg (**±0%程度**)

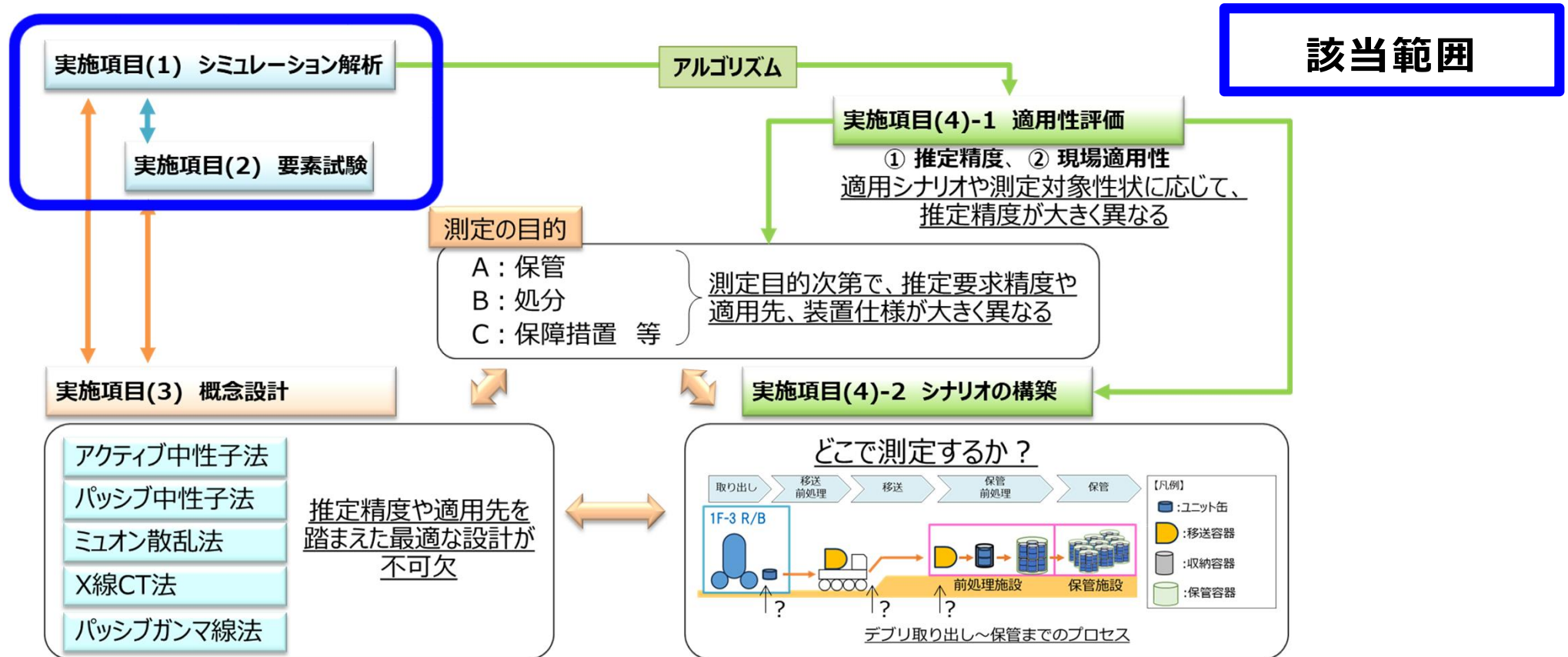
※ 現状の評価結果であり、今後さらなる検証により
確認が必要。

5. 実施内容

実施項目(2) 要素試験

実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価

・ 要素試験の再現性解析 等



5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

- **今回の事業で初めて要素試験を実施した。**計測精度を確認するとともに、同条件における再現解析結果と比較し、当該解析結果等の確からしさを評価した。

方式	目的	試験概要
①アクティブ 中性子法(A') および(A)	シミュレーション解析の精度 (以降C/E※ ¹)の確認	核燃料物質を用いた計測 (計測下限値)
		核燃料物質 + 中性子吸収材・水分模擬材を用いた計測 (中性子吸収材、水(水素)の影響を確認)
②パッシブ 中性子法(A)	PSMC※ ² を用いた計測精度確認、 C/Eの確認	自発核分裂中性子の選択的計測試験
		中性子吸収材および中性子減速材の影響確認試験 ・中性子吸収材、含水率(水素)の影響の推定 ・DDSI法※ ³ の適用性確認試験
		DTM法※ ⁴ の適用性確認試験
③ミュオン散乱法	C/Eの確認	核燃料物質を用いた計測
	計測装置の現場適用性確認	耐放射線性ドリフトガスを用いたドリフトチューブの耐放射線試験
④X線CT法	C/Eの確認	かさ密度の影響確認 ・かさ密度が変化した核燃料模擬材の計測
		複数物質混合の確認 ・粉末混合物に含まれる核物質模擬材の計測 ・MCCIを模擬した熔融混合物の識別性評価
⑤パッシブ ガンマ線法(A)	C/Eの確認	核燃料物質を用いた計測 (TMI-2からの燃料デブリ試料、軽水炉使用済燃料試料)

※1 C:計算値、E:実験値であり、シミュレーション解析の精度を表す比を示す。

※2 p64参照。

※3 誘起核分裂中性子が自発核分裂中性子よりもより遅い時間まで寄与することを利用して、時間的に早い成分と遅い成分に分離することで中性子増倍、吸収の効果を評価する手法。

※4 短半減期核種 (Cm-244など) と長半減期核種 (Puなど) の半減期の違いを利用して、中性子計測を複数回実施することで各々を定量する手法。

5. 実施内容

実施項目(2) 要素試験

実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価

- 要素試験の再現性解析 等
 - (a)アクティブ中性子法
 - (b)パッシブ中性子法
 - (c)ミュオン散乱法
 - (d)X線CT法
 - (e)パッシブガンマ線法

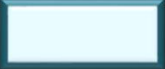
5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

1. アクティブ中性子法(A') (1/3)

アクティブ中性子法(A') 試験・解析概要			
No.	本事業		今後の展開
	主な実施事項	主な結果・考察	
1	中性子吸収材を配置した体系を含む試験体系にて計測を行い、再現計算結果と比較した（試験A'1）。	- 中性子吸収材の影響を受けずに内部の核燃料物質を検知できる見通しを得た。 - 計測結果が再現計算結果と誤差の範囲内で合致していることを確認した。	現場適用へ向けた装置概念の改良等
2	計測下限値に関する知見を拡充した（解析A'2）。	のウランであれば、10分で検出可能。 - 計測時間の増加や装置体系の最適化により、検出下限値の向上も可能。	計測上限値に関する知見の拡充



: 知的財産保護のため非公開

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

実施項目(2) 要素試験

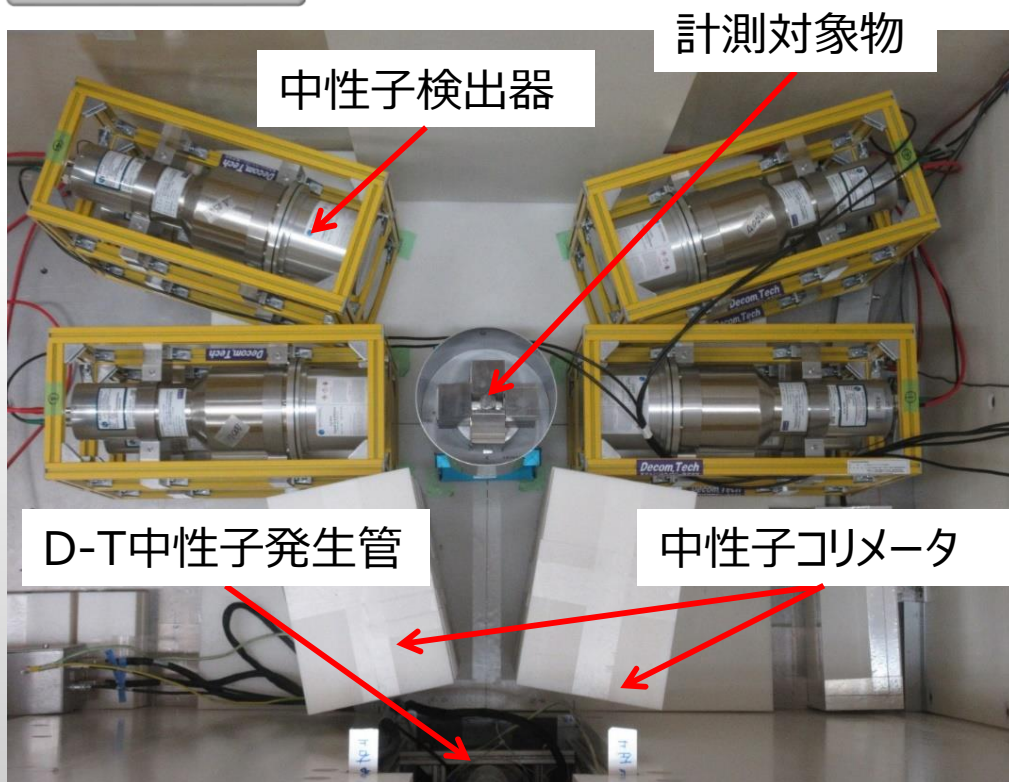
Decom.Tech

1. アクティブ中性子法(A') (2/3)

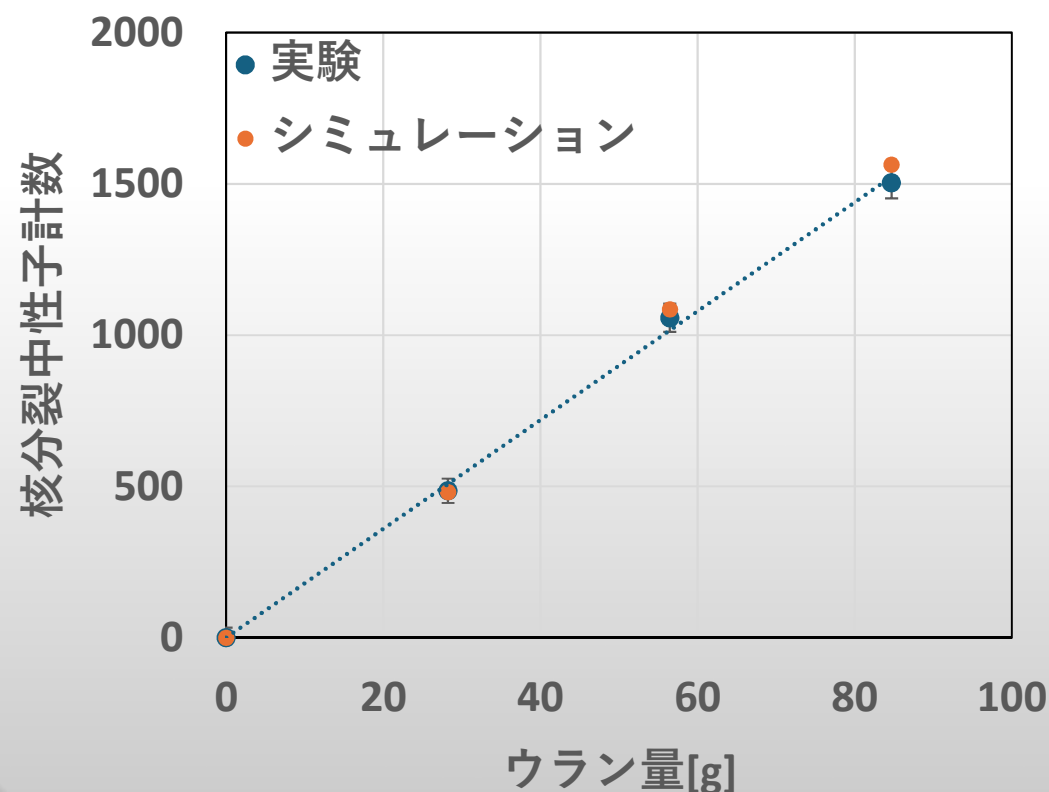
試験A'1. 要素試験 + 再現解析

FFCC法による要素試験を行うとともに、再現解析結果と比較した。

試験体系



実験とシミュレーションの比較



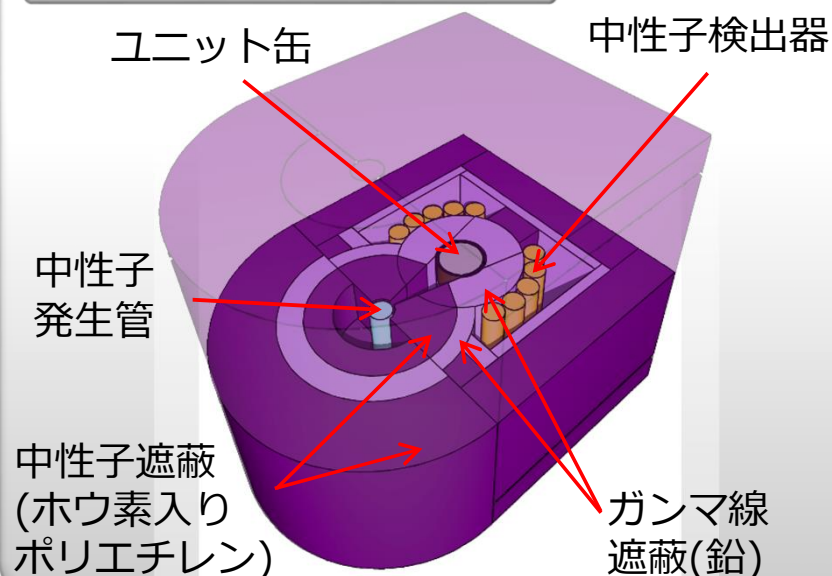
両者は誤差の範囲内で一致し、シミュレーションが高い正確性で実験を再現することを確認した。

⇒ これまでに得られたシミュレーション結果も妥当であることを意味する。

1. アクティブ中性子法(A') (3/3) 解析A'2. 検出下限値の推定

- 概念設計した計測装置の検出下限値を推定
- バックグラウンド計数とウランの核分裂中性子計数から検出下限値を算出

シミュレーション体系



推定結果

計測時間	検出下限値	
	ウラン	ウラン-235
知的財産保護のため非公開		

- 計測時間を増加させることで検出下限値を向上させることができる
- 装置体系を最適化することで検出下限値をさらに向上させることができる
 - D-D管から検出器へ直接入射する中性子に対する遮蔽強化
 - Cs-137の放出などを考慮したガンマ線遮蔽の削減 など

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

1. アクティブ中性子法(A) (1/3)

アクティブ中性子法(A) 試験・解析概要			
No.	本事業		今後の展開
	主な実施事項	主な結果・考察	
1	アクティブ中性子法(A')の補正に用いる中性子消滅時間の計測を行い、再現解析結果と比較した（試験A1）。	計算と実験は良く一致し、シミュレーションの正確性が高いことを確認した。	現場適用へ向けた装置概念の改良

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

1. アクティブ中性子法(A) (2/3)

試験A1. 要素試験+再現解析(1/2)

(中性子消滅時間の計測)

目的

FFCC法の補正に消滅時間を使えることが明らかとなってきたため、消滅時間に関するシミュレーションの正確性を確認する

体系図

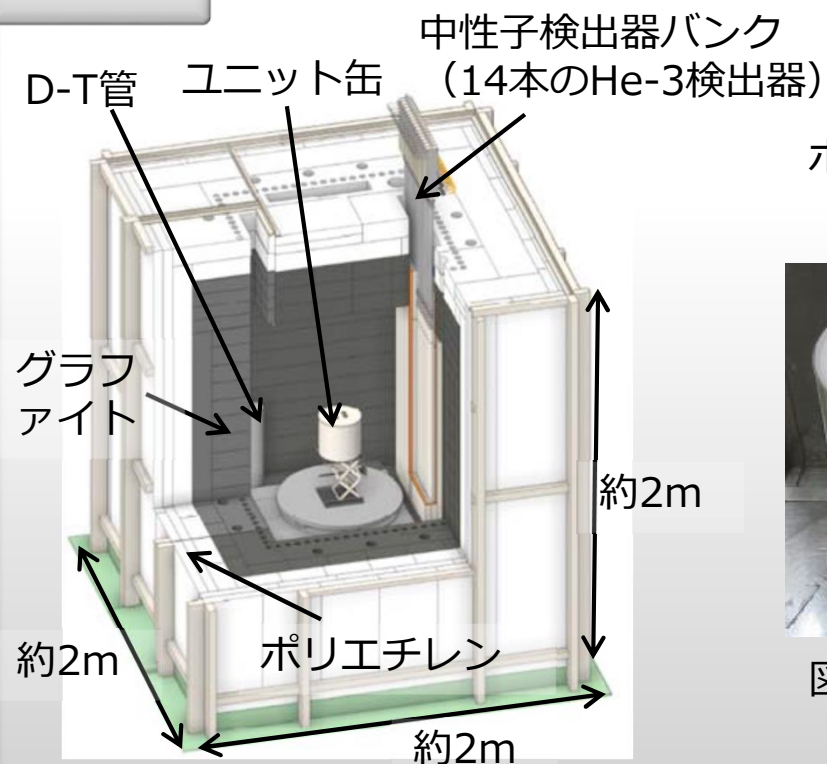


図 アクティブ中性子法非破壊計測装置
JAWAS-T ; 内部イメージ

試験条件

- ✓ ポリエチレン量 : 5260g (88 vol%)
⇒ これは水分に換算すると約100vol%
となり、水が最大量充填した条件に相当
- ✓ 核物質質量 : ウラン 56g (U-235: 1.9g)
- ✓ 計測時間 : 10分間

ポリエチレン



図 ユニット缶
(Φ21cm, h20cm)

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

実施項目(2) 要素試験

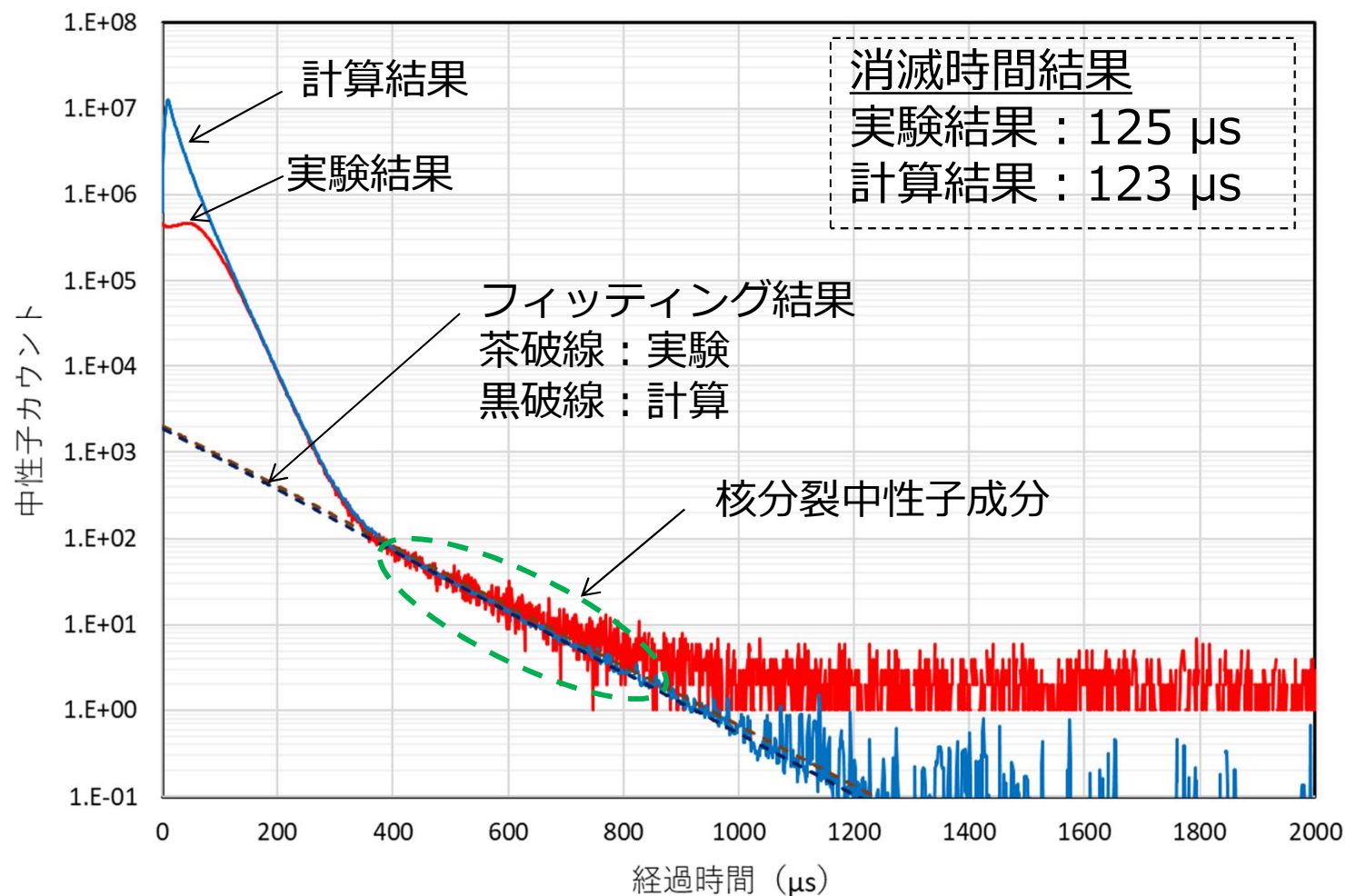
Decom.Tech

1. アクティブ中性子法(A) (3/3)

試験A1. 要素試験+再現解析(2/2)

(中性子消滅時間の計測)

試験結果及び再現解析結果



✓ 計算と実験は良く一致し、シミュレーションの正確性が高いことを確認

5. 実施内容

実施項目(2) 要素試験

実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価

- 要素試験の再現性解析 等
 - (a)アクティブ中性子法
 - (b)パッシブ中性子法
 - (c)ミュオン散乱法
 - (d)X線CT法
 - (e)パッシブガンマ線法

5. 実施内容

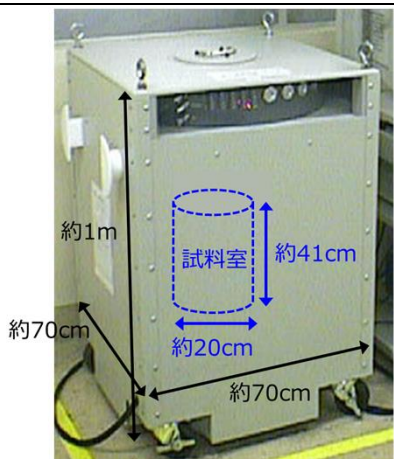
実施項目(1) シミュレーション解析
実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

2. パッシブ中性子法(A) (1/1)

- JAEA核燃料サイクル工学研究所に設置のプルトニウムスクラップ測定装置(PSMC)にて、MOX燃料試料等中性子吸収材や減速材を混在させて同時計数による計測を行い、**DDSI法**により**漏れ増倍**の影響を補正可能かどうか確認した。
- **α 値※が小さく、なおかつ減速材を含まない計測対象物**についてはDDSI法により核燃料物質量の**推定精度を向上**できる見込みを得た。
- 一方、 α 値が大きい、または、減速材が含まれる計測対象物については、推定精度の向上は見られなかった。
- α 値を求めることが出来れば補正可能であるが、それは困難であるため、基本的には対処不能。一方、**1F燃料デブリは α 値による影響は小さい**ものと見込むことから、 **α 値は大きな問題にならないもの**と考える。
- 減速材が含まれる計測対象物については、減速材含有量に応じた補正が必要になるものとする。現状燃料デブリに含まれる減速材の量を評価することは困難であるため、**減速材が一定量含まれ得る燃料デブリ**に対して**DDSI法を適用することは現状困難**であるものとする。
- 今後これを解消する策が見つかった場合には、適宜検討する。

- Cf-252線源とPuを混在させた計測対象を2ヶ月おきに計測し、その結果を基に**DTM法**を用いてCf-252と**Pu**それぞれの物量を**分離定量する見込み**も得られた。ただし、本手法は**運用上負荷が大きい**ため、**適用が困難**と見られる。



プルトニウムスクラップ測定装置 (PSMC)

- **シミュレーション解析と要素試験**は概ね似たような傾向を示し、シミュレーション解析の確からしさを確認できた。

※ α 値: (α, n) 反応中性子放出率/自発核分裂中性子放出率 © Decom.Tech

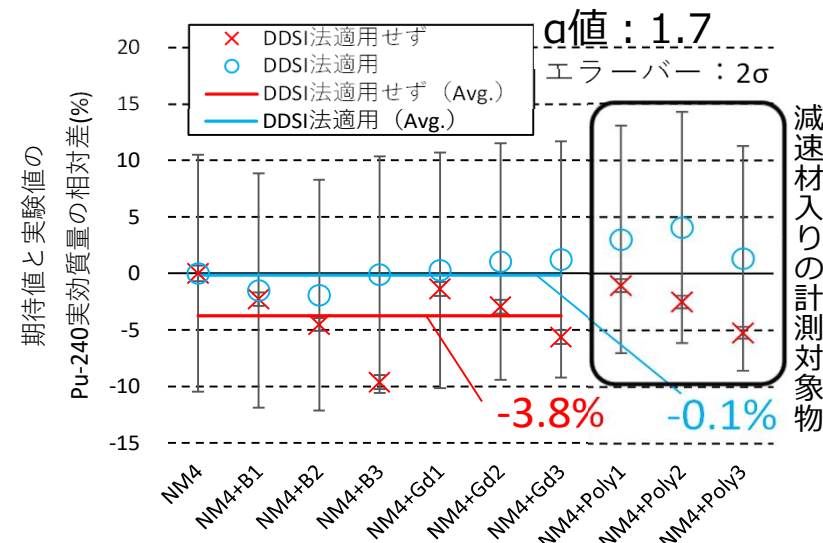


図 DDSI法適用による補正の効果

相対差(%) = (実験値 - 期待値) / 期待値 × 100
【期待値】 本試験用の核物質をPSMCで計測することで値付けしたPu-240実効質量のこと。

5. 実施内容

実施項目(2) 要素試験

実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価

- 要素試験の再現性解析 等
 - (a)アクティブ中性子法
 - (b)パッシブ中性子法
 - (c)ミュオン散乱法
 - (d)X線CT法
 - (e)パッシブガンマ線法

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

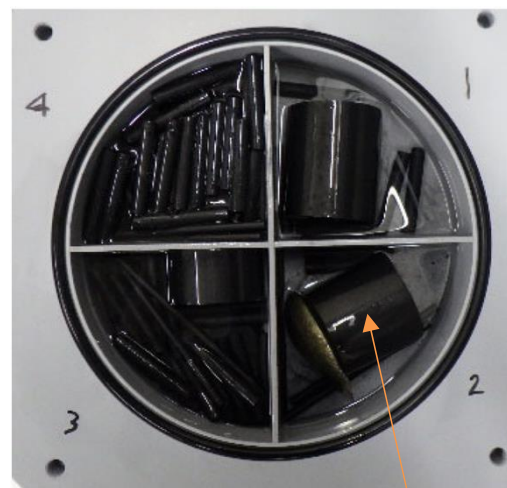
66

3. ミュオン散乱法 (1/1)

- 鉛とウラン両方を計測し、検量線を比較した。その結果、**校正を鉛で代替可能な見込み**を得た。
- ウラン量を変化させ (1kg～15kg)、適宜SUSやコンクリートを混在させて計測し、その結果から推定精度を評価した。誤差の範囲内で**核燃料物質量を推定可能**。
- **再現解析**を実施し、両者の結果を比較した。**試験結果をほぼ再現可能**。
- **遮蔽体ありの体系では未検証**のため、今後遮蔽体ありの体系による検証を計画する。

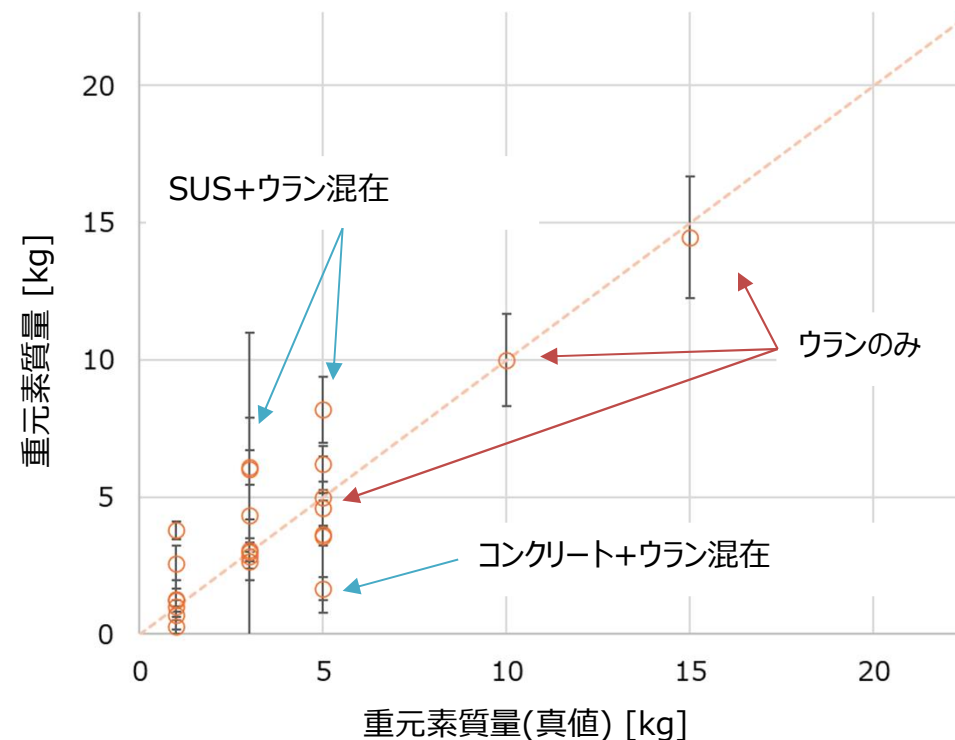


装置外観



試料外観

ウラン



推定精度評価結果

※ 遮蔽体なし

5. 実施内容

実施項目(2) 要素試験

実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価

- 要素試験の再現性解析 等
 - (a)アクティブ中性子法
 - (b)パッシブ中性子法
 - (c)ミュオン散乱法
 - (d)X線CT法
 - (e)パッシブガンマ線法

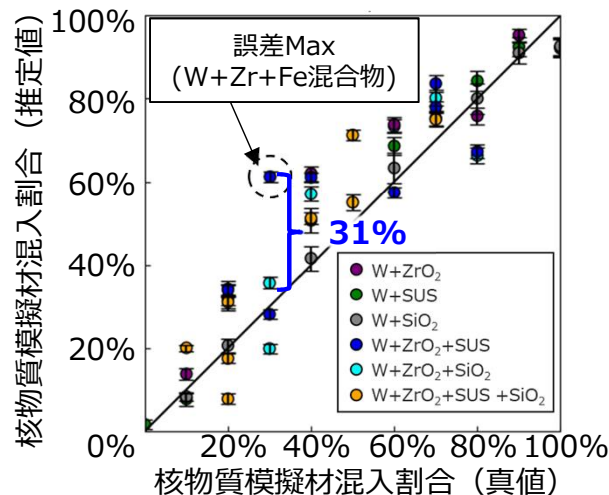
5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析
実施項目(2) 要素試験

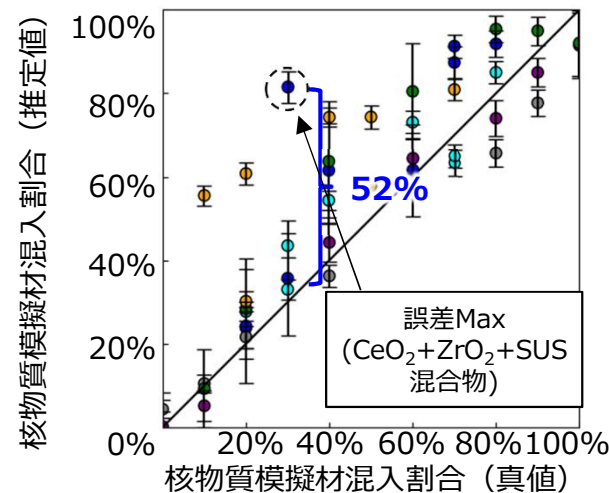
Decom.Tech

4. X線CT法 (1/1)

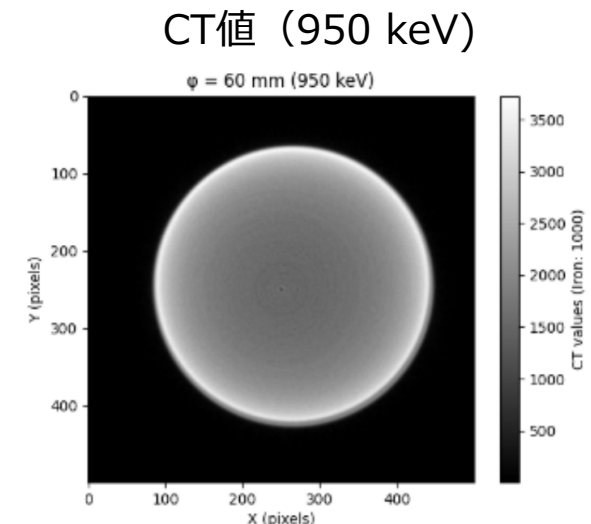
- まず、かさ密度の変化により (CT値は変化するが) CT値の比が変化しないことを検証により確認した。これにより、CT値の比を基にある程度物質を識別可能。なお、単一物質が他物質と混合せず存在する領域である場合には理論上識別が可能であるが、複数物質が混合している場合には混合組成を誤認する可能性が考えられ、これが推定誤差要因となる。
- 複数物質(粉末)を様々な混合比率にて混合した試料を計測し、核燃料物質量の推定を行った。核燃料物質模擬材として、WとCeO₂の2種類をそれぞれ用いた。MECTによる推定誤差は、Wの場合最大+31%、CeO₂の場合最大+52%程度となった。質量減弱係数等の関係性から、UO₂の結果はWとCeO₂の間に位置するものと考える。
- 各試験において、シミュレーションによる再現解析結果は要素試験結果と良く一致した。
- 低エネルギーX線CTによる計測の結果、一定サイズ以上の計測対象物にビームハードニングの影響が見られた。これは推定精度に影響するため、導入する場合 設計時などに推定精度への影響を定量的に把握することが必要。



核物質模擬材量の推定(W, MECT)



核物質模擬材量の推定(CeO₂, MECT)



ビームハードニングの影響(低エネルギーCT)

5. 実施内容

実施項目(2) 要素試験

実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価

- 要素試験の再現性解析 等
 - (a)アクティブ中性子法
 - (b)パッシブ中性子法
 - (c)ミュオン散乱法
 - (d)X線CT法
 - (e)パッシブガンマ線法

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

5-1. パッシブガンマ線法(A) (1/4)

これまでの課題と本事業における実施事項

課題

計測対象核種はEu-154等の低揮発性核種であるが、

- 燃焼が少ない場合はこれらの核種の存在量が少ない。
- 核種の中には、例えばEu-154のように、半減期が短く、事故後10年以上経過した現在では減衰して少量になっている。
- 福島第一原子力発電所の燃料デブリは溶融前の燃焼度が約1～51GWd/tと広範囲であることが大きな特徴である。

→ 計測対象核種が少量である場合に核燃料物質量の推定に与える影響を確認する必要がある。

本事業における実施事項

- 2024年度に①TMI-2燃料デブリ、および、②軽水炉使用済み燃料試料に対する計測試験を実施する。
- 2023年度に実施するシミュレーション解析と計測結果を比較し、必要があれば、シミュレーション手法を改良する。

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

5-1. パッシブガンマ線法(A) (2/4)

対象試料

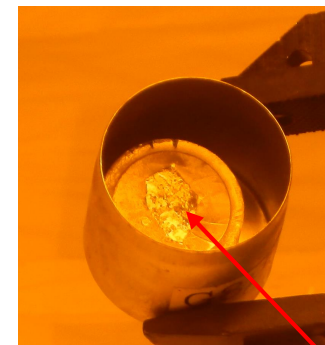
TMI-2燃料デブリ

組成	TMI-2燃料デブリ (UO ₂ 、ZrO ₂ などの溶融物)
濃縮度	1.98～2.96 wt.% 約2.5 wt.% (炉平均)
燃焼度	0.91～6.21 GWd/t 約3.25 GWd/t (炉平均)
冷却期間	約46年
密度	約6.18 g/cm ³
形態	金相試料

軽水炉使用済み燃料

組成	軽水炉(PWR)使用済み燃料 (UO ₂)
濃縮度	4.5 wt.%
燃焼度	約59 GWd/t (ペレット)(運転履歴ベース推定値)
冷却期間	約23年
密度	約10.6 g/cm ³
形態	ペレット切断片

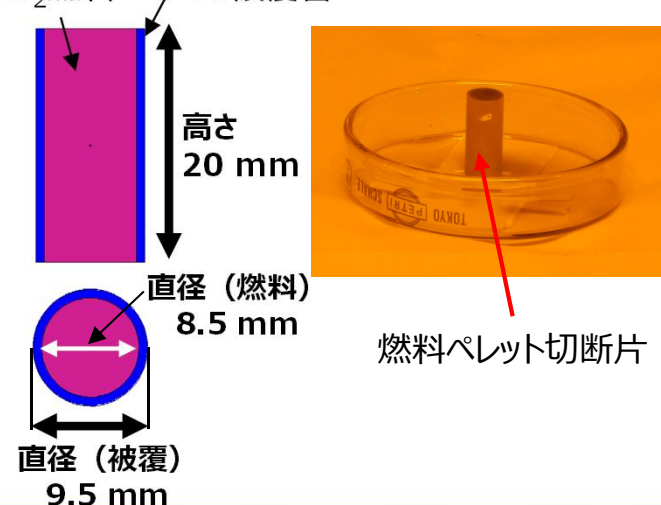
TMI-2燃料デブリ試料



金相試験加工 (樹脂固め)

軽水炉使用済み燃料試料

UO₂燃料 Zr被覆管



5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

実施項目(2) 要素試験

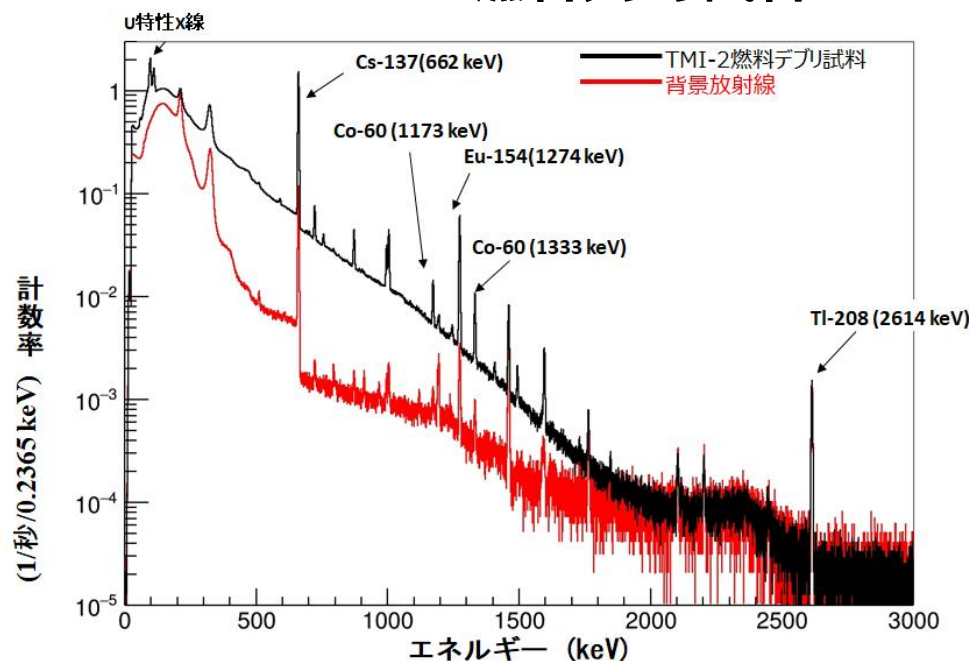
Decom.Tech

72

5-1. パッシブガンマ線法(A) (3/4)

試験結果

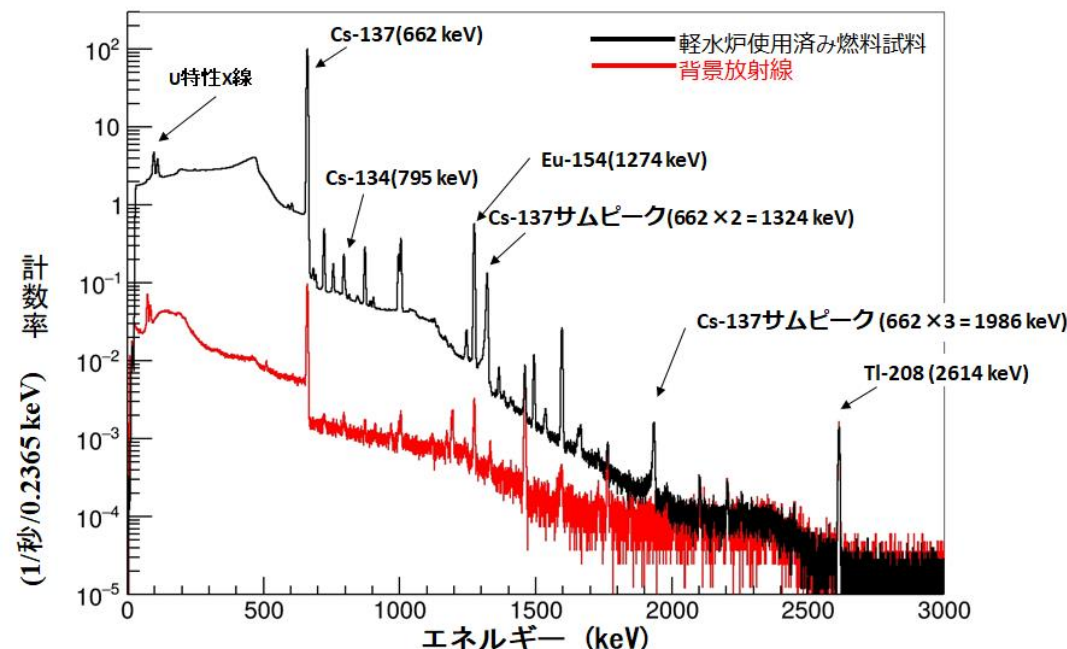
TMI-2燃料デブリ試料



1. 事前解析で予測したピークの実測における確認

- Cs-137、Co-60、Eu-154の主要なピーク
- Uの特性X線

軽水炉使用済み燃料



1. 事前解析で予測したピークの実測における確認

- Cs-137、Cs-134、Eu-154の主要なピーク
- Uの特性X線

2. 事前解析で予測できないピークの確認

- Cs-137のサムピーク

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析

実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

5-1. パッシブガンマ線法(A) (4/4)

再現解析結果

各ピークの強度（ネット計数率）により評価

□ TMI-2燃料デブリ試料

評価した核種とエネルギーピーク：

Cs-137(662keV)、Eu-154(1274keV)、Co-60(1173keV)

ピーク強度比	計測	シミュレーション	計測/シミュレーション
Eu-154/Cs-137	0.0416	0.00240	17.3
Co-60/Cs-137	0.0066	0.00301	2.19
Co-60/Eu-154	0.158	0.126	1.26

□ 軽水炉使用済み燃料

評価した核種とエネルギーピーク：

Cs-134(795 keV)、Cs-137(662 keV)、Eu-154(1274 keV)

ピーク強度比	計測	シミュレーション	計測/シミュレーション
Eu-154/Cs-137	0.00590	0.00673	0.88
Cs-134/Cs-137	0.0164	0.0150	1.09
Cs-134/Eu-154	0.278	0.222	1.25

TMI-2燃料デブリ試料

- Cs-137に対するEu-154のピーク強度比は、シミュレーション解析より計測は**17.3倍**大きい。
- Cs-137に対するCo-60のピーク強度比は、シミュレーション解析より計測は2.19倍大きい。
- Eu-154に対するCo-60の強度比は、計測とシミュレーション解析の相違が、26%程度である。これは、両者の不確定性から鑑みるに十分な精度と考える。
- 計測とシミュレーションの相違理由として、シミュレーション解析において想定しているCs-137の揮発率（95%）の不確定性が挙げられる。

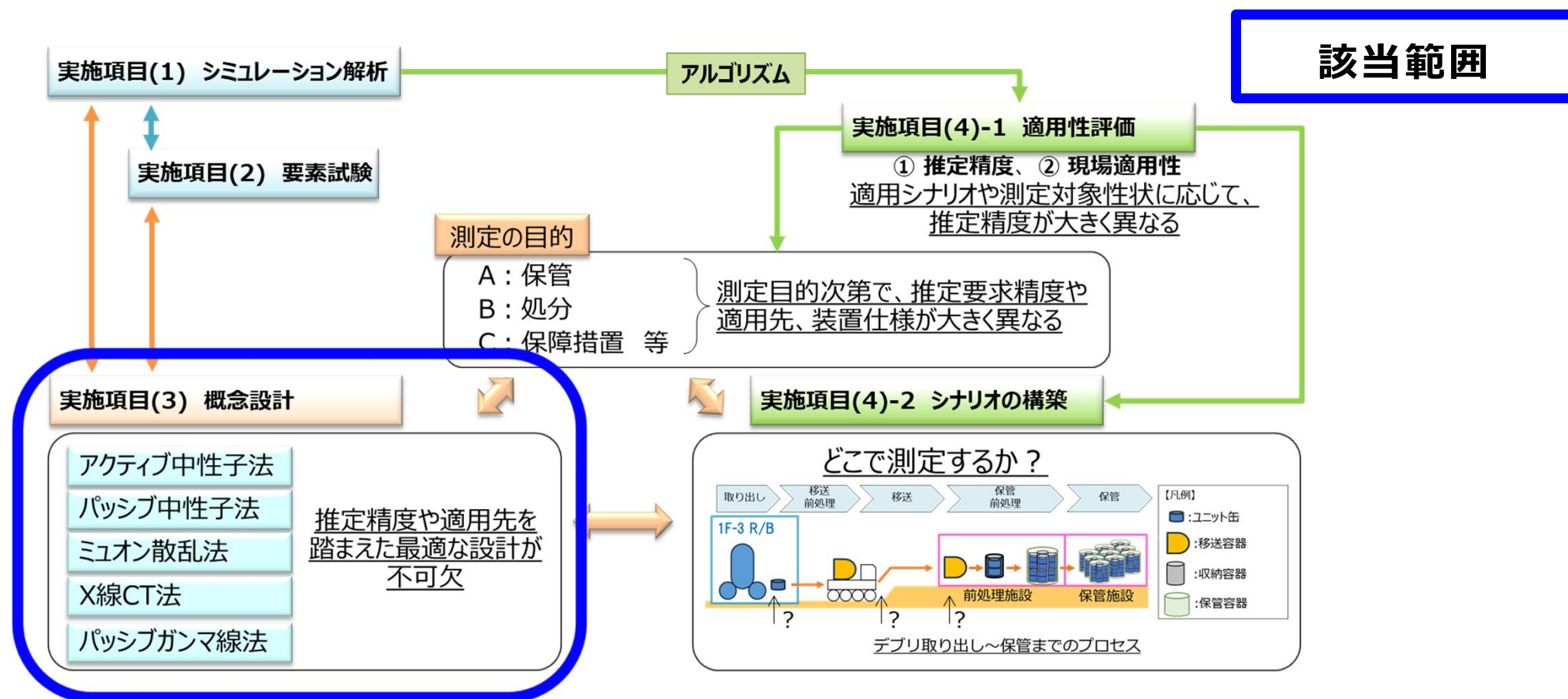
軽水炉使用済み燃料

- 各ピーク強度比について、計測とシミュレーション解析の相違は、25%以内の誤差である。
- 健全な軽水炉使用済み燃料を利用した検証から、シミュレーション解析手法の妥当性を示した。

燃料デブリを対象としたパッシブガンマ線法の精度向上には、破壊分析による**計測核種の同伴性ならびに揮発性**の検証が必要である。

5. 実施内容

実施項目(3) 現場適用を考慮した非破壊計測装置の概念設計



5. 実施内容

実施項目(3) 現場適用を考慮した非破壊計測装置の概念設計

(a)アクティブ中性子法を主軸とした装置

(b)ミュオン散乱法を主軸とした装置

(c)X線CT法を主軸とした装置

5. 実施内容 実施項目(3) 概念設計

Decom.Tech

1. アクティブ中性子法を主軸とした装置の例

FFCC法を主軸とした装置

核燃料物質質量推定に影響を与える事象・因子

機能要求

ガンマ線が中性子検出器のバックグラウンドを増加させる。

ガンマ線のバックグラウンドを低減する機能

中性子検出器の検出効率が統計精度に影響を与える。

高速中性子の高い検出効率

中性子検出器の応答速度が照射中性子と核分裂中性子の弁別性能に影響を与える。

ナノ秒レベルの高速応答

中性子検出器間の距離が短い場合、クロストークによって核分裂中性子数に影響を与え、長い場合には検出効率を保つために検出器の個数を増やす必要がある。

中性子検出器間の距離および検出器の個数を最適化

5. 実施内容

実施項目(3) 現場適用を考慮した非破壊計測装置の概念設計

(a)アクティブ中性子法を主軸とした装置

(b)ミュオン散乱法を主軸とした装置

(c)X線CT法を主軸とした装置

5. 実施内容 実施項目(3) 概念設計

Decom.Tech

2. ミュオン散乱法を主軸とした装置

核燃料物質質量推定に影響を与える事象・因子

(1) 計測対象物に含まれる高線量核種からのバックグラウンド放射線をミュオン信号と誤認識する

(2) 入射ミュオン量が場所によって異なる場合、計測値※は、入射量が少ない場所の、物質情報が薄まる。

そのため、核燃料物質が偏在している場合の推定結果に誤差が生じる

※計測値は、計測対象に入射したミュオン散乱角の平均値

機能要求

計測対象物からのバックグラウンド放射線を低減する遮蔽機能

計測対象物からのバックグラウンド放射線によるノイズを排除する機能

計測対象を通過するミュオン数が、場所によらず、一定となる計測体系

5. 実施内容

実施項目(3) 現場適用を考慮した非破壊計測装置の概念設計

- (a)アクティブ中性子法を主軸とした装置
- (b)ミュオン散乱法を主軸とした装置
- (c)X線CT法を主軸とした装置**

5. 実施内容 実施項目(3) 概念設計

Decom.Tech

3. X線CT法を主軸とした装置

核燃料物質質量推定に影響を与える事象・因子

- (1) 核燃料物質に、軽元素(空気含む)がCT解像度以下で**混合**
→ 正しく計測対象物の密度を評価できなくなる。
- (2) 3種類以上の物質が混合している場合に混合割合の同定が出来ない。
- (3) 計測対象物に含まれる高線量核種からの**バックグラウンド中性子線**により検出器性能が劣化し、CT画像の画質が低下する。
- (4) 核燃料物質に含まれる核分裂性物質質量を精度良く評価できない。

機能要求

- 軽元素の混合による影響を低減する機能
- 3種類以上の混合物から核燃料物質を識別する機能
- 検出器性能の劣化を低減する中性子の遮蔽機能
- 核分裂性物質質量を精度良く評価する機能

5. 実施内容 実施項目(3) 概念設計

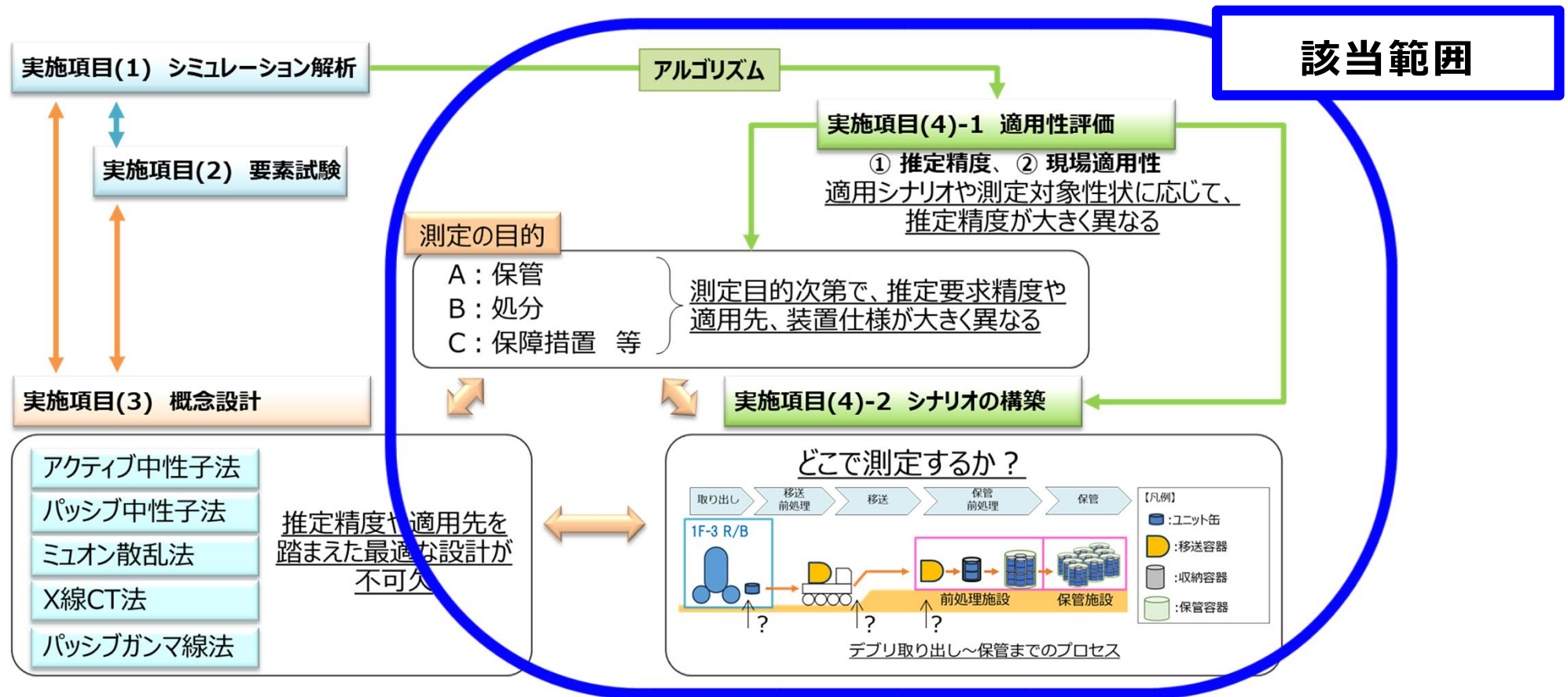
Decom.Tech

まとめ、および今後の展開

- 機能要求整理のうえ、これを満足するよう、装置概念を構築した。
- 今後、適宜更なる改良を行っていく。

5. 実施内容

実施項目(4) 核燃料物質等の定量または推定方法の適用性評価 と当該手法の適用先候補の導出

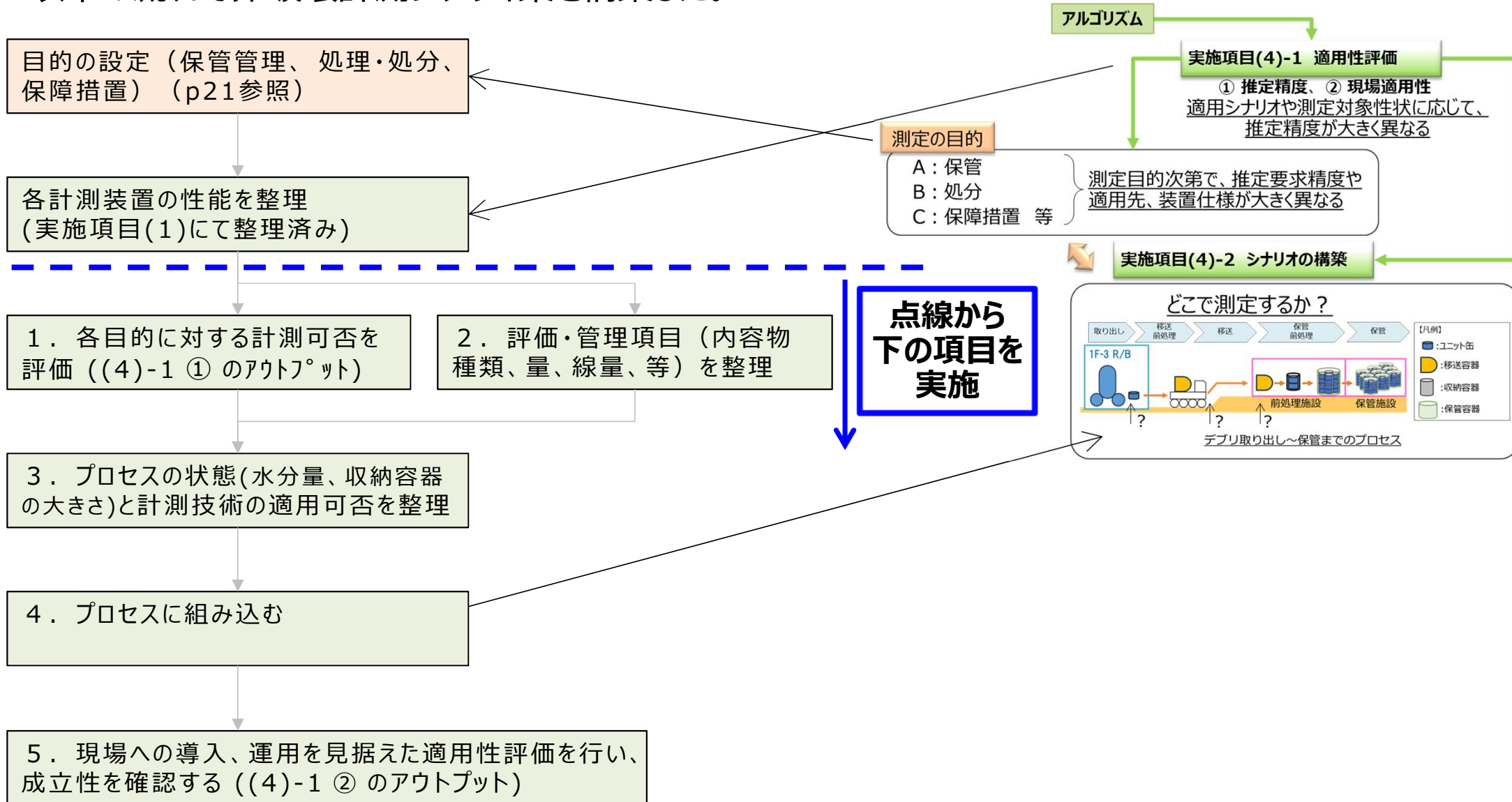


- 本事業では、該当非破壊計測技術に基づく推定精度を評価すると共に、同技術を1F現場に適用する場合の適用先候補（シナリオ）を検討し、同適用時の課題等適用性を評価した。

5. 実施内容 実施項目(4)

検討方針と検討の流れ

- 目的に応じた要求精度があり、適用性評価結果が変わってくる。
- 以下の流れで非破壊計測シナリオ案を構築した。



5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

1. 各目的に対する計測可否を評価

推定精度評価結果 サマリ

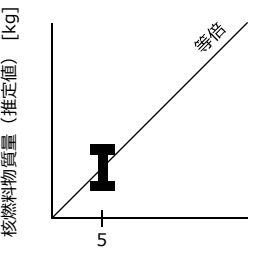
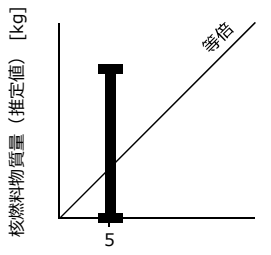
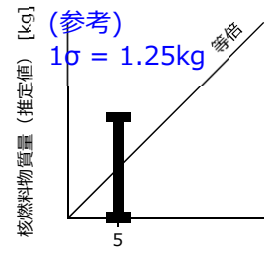
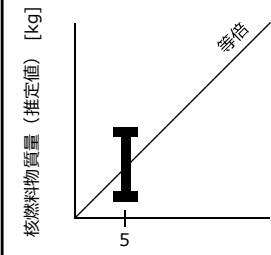
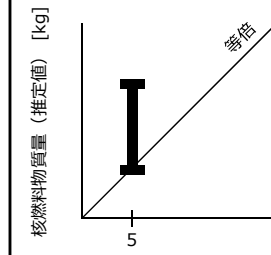
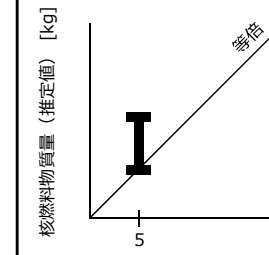
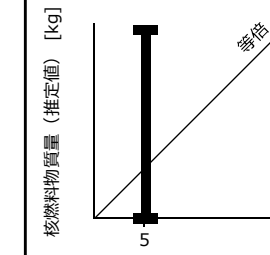
用途：物量の把握 (1/1)

保管管理1(容器単位で核燃料物質量の情報を紐づけ管理)

処理処分1(保管管理1と同様の紐づけ管理＋各核種量も含めた紐づけ) 等

- 推定精度算出にあたっては、**3 σ** を仮定 (1 σ でも十分であると考えるが、今回は便宜上後述の「基準値超過有無判定」と同じ条件にて評価した)。

計測対象：ユニット缶 (廃棄物内容器も傾向は同じ)

An(A')	An(A)～(C)	μ (1時間計測)	μ (8時間計測)	CT (単色)	CT (2色)	Pn, Pg
 核燃料物質量 (推定値) [kg] 核燃料物質量 (設定値) [kg]	 核燃料物質量 (推定値) [kg] 核燃料物質量 (設定値) [kg]	 核燃料物質量 (推定値) [kg] 核燃料物質量 (設定値) [kg]	 核燃料物質量 (推定値) [kg] 核燃料物質量 (設定値) [kg]	 核燃料物質量 (推定値) [kg] 核燃料物質量 (設定値) [kg]	 核燃料物質量 (推定値) [kg] 核燃料物質量 (設定値) [kg]	 核燃料物質量 (推定値) [kg] 核燃料物質量 (設定値) [kg]
[評価指標] 核燃料物質量真値 5kg を把握できるか？						
◎	△	○	○	△	○	△
特記事項： ・精度も良い。	特記事項： ・計測対象物や計測容器材料に中性子吸収材が含まれる場合、推定結果の信頼性が低い。	特記事項： ・統計誤差が支配的。よって、計測結果は統計的な分布に従う (稀に真値からのズレが大きくなる結果もあるが、大部分は一定の範囲内に収まる)。	特記事項： ・同左。	特記事項： ・核燃料物質以外の物質が多く含まれると精度が悪い (重量計と同等であり、導入のメリットに乏しい)。	特記事項： ・組成を誤認する可能性があり、誤差要因となる。	特記事項： ・計測対象核種と核燃料物質がほとんど同伴していない場合、結果の信頼性が低い。 ・低燃焼成分を多く含む場合等にも、結果の信頼性が低い。

5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

1. 各目的に対する計測可否を評価

推定精度評価結果 サマリ

用途：基準値超過有無判定 (1/2)

保管管理2(臨界管理要否を判定)

処理処分2(発熱量制限超過有無を判定) 等

- 推定精度算出にあたっては、**3 σ** を仮定。
- 安全に関わるため、アルゴリズムによっては保守的に仮定を置いて補正しないといけないパラメータがある可能性もあるが、今回特別な補正は行っていない。

計測対象：ユニット缶（廃棄物内容器も傾向は同じ）

An(A')	An(A)~(C)	μ (1時間計測)	μ (8時間計測)	CT (単色)	CT (2色)	Pn, Pg
核燃料物質質量 (推定値) [kg]	核燃料物質質量 (推定値) [kg]	核燃料物質質量 (推定値) [kg]	核燃料物質質量 (推定値) [kg]	核燃料物質質量 (推定値) [kg]	核燃料物質質量 (推定値) [kg]	核燃料物質質量 (推定値) [kg]
核燃料物質質量 (設定値) [kg]	核燃料物質質量 (設定値) [kg]	核燃料物質質量 (設定値) [kg]	核燃料物質質量 (設定値) [kg]	核燃料物質質量 (設定値) [kg]	核燃料物質質量 (設定値) [kg]	核燃料物質質量 (設定値) [kg]
[評価指標1] 仮に核燃料物質質量真値 5kg を基準値超過有無判定基準とする場合、基準値を超過しているものを確実に判別できるか？ → 「×」以外の場合、次頁の [評価指標2] へ						
安全(必須条件)						
◎	×	×	○	○	×	×
特記事項： ・精度も良い。	特記事項： ・前述のとおり中性子吸収材の混在により結果の信頼性が低くなるため、安全に関わる本目的には適用困難。	特記事項： ・推定値の最小値が0であるので、真値が5kgを超過しているものも5kg未満と判別。	特記事項： ・最小値を検知できるが精度は真値を基準として倍半分程度。	特記事項： ・前述のとおり重量計と変わらず導入するメリットが薄い、本指標に機械的に従えば○となる。	特記事項： ・物質の誤認を未考慮のため、安全に関わる本目的には適用不可(考慮すると左記単色と同様の評価)。	特記事項： ・前述のとおり最小値・最大値を保守的に想定せざるを得ないため、安全に関わる本目的には適用不可。

5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

1. 各目的に対する計測可否を評価

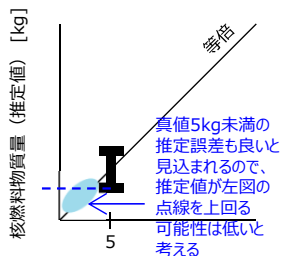
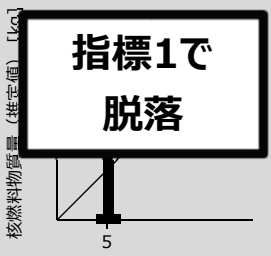
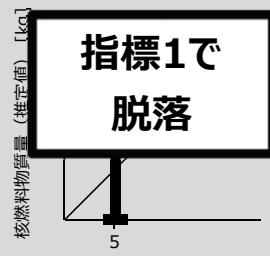
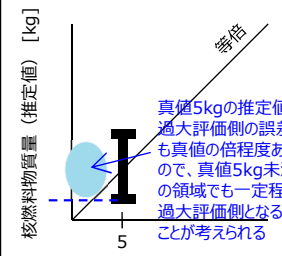
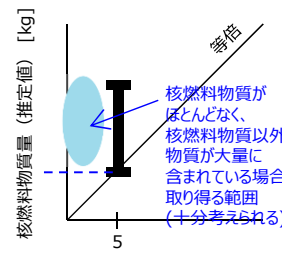
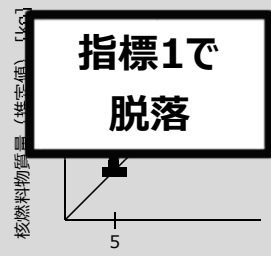
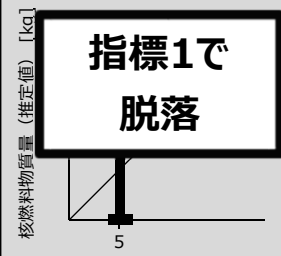
推定精度評価結果 サマリ

用途：基準値超過有無判定 (2/2)

保管管理2(臨界管理要否を判定)

処理処分2(発熱量制限超過有無を判定) 等

計測対象：ユニット缶（廃棄物内容器も傾向は同じ）

An(A')	An(A)~(C)	μ (1時間計測)	μ (8時間計測)	CT (単色)	CT (2色)	Pn, Pg
 核燃料物質質量 (推定値) [kg] 核燃料物質質量 (設定値) [kg]	 指標1で脱落 核燃料物質質量 (推定値) [kg] 核燃料物質質量 (設定値) [kg]	 指標1で脱落 核燃料物質質量 (推定値) [kg] 核燃料物質質量 (設定値) [kg]	 核燃料物質質量 (推定値) [kg] 核燃料物質質量 (設定値) [kg] 真値5kgの推定値の過大評価側の誤差も真値の倍程度あるので、真値5kg未満の領域でも一定程度過大評価側となる可能性がある	 核燃料物質質量 (推定値) [kg] 核燃料物質質量 (設定値) [kg] 核燃料物質がほとんどなく、核燃料物質以外の物質が大量に含まれている場合に取得可能な範囲 (十分考えられる)	 指標1で脱落 核燃料物質質量 (推定値) [kg] 核燃料物質質量 (設定値) [kg]	 指標1で脱落 核燃料物質質量 (推定値) [kg] 核燃料物質質量 (設定値) [kg]

【評価指標2】 仮に核燃料物質質量真値 5kg を基準値超過有無判定基準とする場合、基準値を超過していないものを超過して

費用対効果 (必須ではない)

いないと言いきれず 仕分けられない可能性がどの程度あるか？
(「大」に近いほど、仕分けられない物量が増え、費用対効果が少なくなる可能性がある)

◎(小)			○(比較的大)	×(極めて大)		
特記事項： 上図の通り、真値 5kg 未満の領域で精度が良いと見込まれ、真値 5kg の推定値の最小値 (図中の青い点線) を上回る可能性は低いと考える。			特記事項： 上図の通り、真値 5kg の過大評価側は真値の倍程度となる。これより、真値 5kg 未満の領域においても一定割合は推定結果が図中の円形で囲った領域(●)となり「基準値超過」と判断されるものと想定。	特記事項： 上図の通り、核燃料物質がほとんどなく、その他の物質が大量に含まれている場合に推定結果が図中の円形で囲った領域(●)となり「基準値超過」と判断される(仕分けできない)状況も十分想定される。		

5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

1. 各目的に対する計測可否を評価

推定精度評価結果 サマリ まとめ

計測対象：ユニット缶（廃棄物内容器も傾向は同じ）

An(A')	An(A)～(C)	μ (1時間計測)	μ (8時間計測)	CT (単色)	CT (2色)	Pn, Pg
「物量の把握」に使えるか？		保管管理1(容器単位で核燃料物質量の情報を紐づけ管理) 処理処分1(保管管理1と同様の紐づけ管理＋各核種量も含めた紐づけ)等				
◎	△	○②	○	△	○②	△③
「基準値超過有無判定（≡ 仕分け）」に使えるか？		保管管理2(臨界管理要否を判定) 処理処分2(発熱量制限超過有無を判定)等				
①			①			
◎	×	×	○	×	×	×

- ① 仕分けに適用見込みがあるのは、**An(A')** と **μ (8時間計測)**。
- ② 目的を「物量の把握」に限定すれば、 **μ (1時間計測)** や **CT(2色)** も適用可能となる。
- ③ さらに、例えば破壊分析の結果が十分に得られ、ペDESTAL内部の燃料デブリはほぼ炉心平均組成であることが分かってきたとし、なおかつ平均からの上振れ・下振れがあったとしてもこれを許容するとの方針とする場合には、現在△との評価となっている技術の中で適用可能となる技術もある(Pnなど)。ただし、破壊分析の結果が十分に得られるのは相当先の将来であることから、設計の現実的な工程感に乗るとは言えず、実質見込みはないものとする。

→ ◎または○の評価が付かなかった技術はここで脱落とした (**An(A)～(C)**、**CT(単色)**)。ただし、**Pn, Pg**は「計測対象核種量の推定」(処理処分1に関連)という別の目的を有するため、ここで完全に脱落すると検討から漏れてしまうことから、例外的に当該目的に着目する形で後段の適性評価に進むものとした (脱落しない)。

5. 実施内容 実施項目(4)

2. 評価・管理項目を整理

- 適用場所や適用状態の適性を評価するための評価・管理項目を以下のように整理した。

No.	分類	評価・管理項目
1	内容物関連	内容物に含有する核燃料物質質量
2		内容物の線量
3	計測対象容器関連	計測対象容器の種類
4		計測対象容器の材料
5	処理関連	燃料デブリ取り出しにおける中性子吸収材の添加有無
6		容器内部の水切り・乾燥 有無

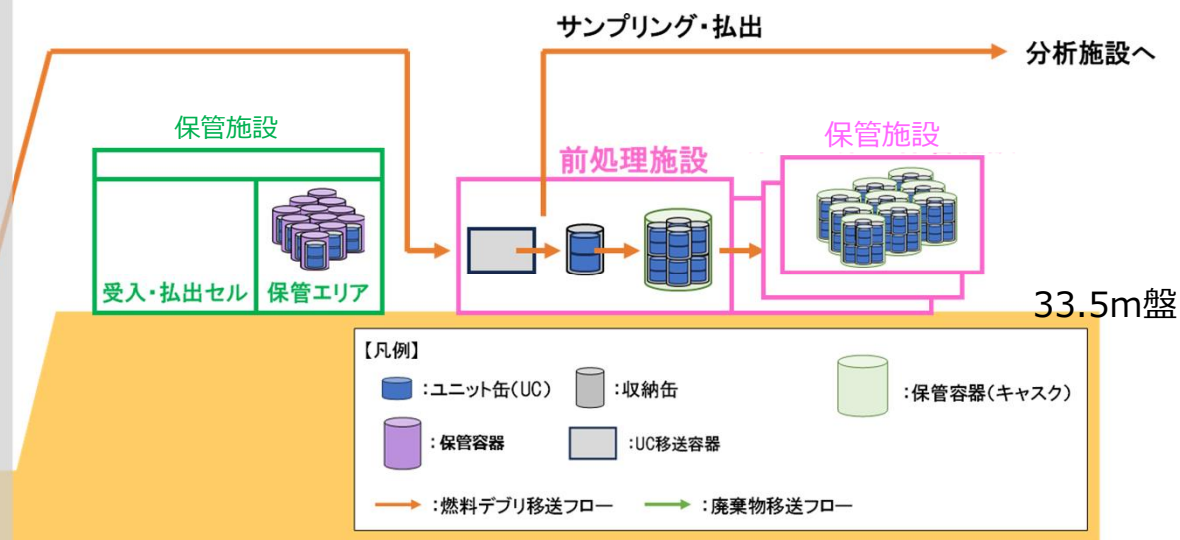
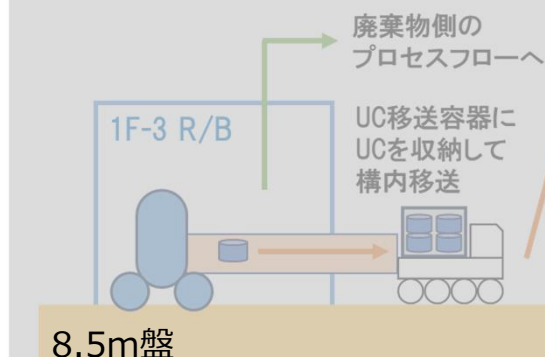
5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

3. プロセスの状態と計測技術の適用可否を整理 (1/4) はじめに (8.5m盤への設置)

- 設置場所の環境に関し、8.5m盤に設置のエンクロージャは高線量環境であるため、本事業で検討中の非破壊計測装置を設置する場合、検出器の外側にも遮蔽を設けることが必要 (装置サイズが大きくなる)。
- 一方、エンクロージャ内の体積上の制約は大きく、むやみやたらに機器を設置できるほど余裕はない。
- これに加え、汚染管理上も制約が厳しく、機器を多く設置すればするほどメンテナンスの負荷も大きくなる。
- これらの状況を鑑み、8.5m盤には基本的にそこで計測を実施することが必須の計測機器に絞って設置することを前提として検討した。
- この前提を踏まえ、本事業にて検討中の核燃料物質量を推定するための非破壊計測装置を8.5m盤に設置しないことを前提として検討した (すなわち、設置する場合は、33.5m盤の前処理施設内)。

本事業にて検討中の
核燃料物質量を推定するための
非破壊計測装置の設置は不適



5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

3. プロセスの状態と計測技術の適用可否を整理 (2/4) 評価・管理項目の選別

- 評価・管理項目No.4～6 については、大きな影響を受けるのはAn(A)～(C)のみ ※ と考える (中性子吸収材が添加されるような設計や、水切りのないシナリオとなると精度が悪化する)。
- An(A)～(C)は前段の「1. 計測可否評価」で脱落しており (p87参照)、No.4～6 は実質意味を持たないため、ここでは残る **No.1～3 に限定**して適用可否を整理した。

No.	分類	評価・管理項目
1	内容物関連	内容物に含有する核燃料物質質量
2		内容物の線量
3	計測対象容器関連	計測対象容器の種類
4		計測対象容器の材料
5	処理関連	燃料デブリ取り出しにおける中性子吸収材の添加有無
6		容器内部の水切り・乾燥 有無

※ μ も容器厚さに影響を受けることが想定され、No.3, 4 あたりに関係はするものの、評価結果が受ける影響により評価結果が覆るほどの甚大な影響はないものと仮定し、今後の検討課題と整理することとした。

※ 充填固化材の投入有無については、全技術とも評価結果に大きく影響しない（ほぼ横並び）との評価結果を得ることが予想されるため、評価項目に含めなかった。今後必要に応じて解析含めて評価を実施する。

5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

3. プロセスの状態と計測技術の適用可否を整理 (3/4)

適用状態・適用場所適性評価結果 サマリ

計測対象核種量の推定に限定する
(核燃料物質量の推定への適用は推定精度上見込み薄)

シナリオが他と異なるため個別に評価

評価項目		計測技術	③ μ		①	③	Pn, Pg
		An(A')	③ ユニット缶計測 1h	③ ユニット缶計測 8h	① 保管容器計測	③ CT(2色)	Pn, Pg
内容物に含有する核燃料物質質量※1	多	○※2	○※3		○※4	○※2	○※2
	中	○※2	○※3		○※4	○※2	○※2
	少	○	② ×		×	○	○
内容物の線量	高	○※2	① △※5		○※4	○	○
	低～中	○	○		○※4	○	○
計測対象容器の種類	保管容器(■)	×	—		○※4	×	×
	ユニット缶～収納容器	○※6	○※6		—	○※6	○※6

目的 ■ : 物量の把握 ■ : 基準値超過有無判定

※1 計測対象：ユニット缶。核燃料物質質量5kgに着目。目的に依らず一律3 σ を仮定

④ ※2 未検証 ※3 遮蔽体込みの体系等に対しては未検証 ※4 詳細未検討
※5 遮蔽を厚くするなどした別装置との併用が必要となる可能性あり（未検証） ※6 収納容器については詳細未検討

- ① μ は高線量の計測対象物を計測する場合、線量の低い対象物を計測する装置とは別に遮蔽体を厚くするなどした別装置との併用が必要となる可能性がある。なお、重量や線量の計測結果を活用した値付けにより補完する方法も考えられる。また、 μ は保管容器を対象として計測することが出来る見込みもあり、これを適用する場合も、(シナリオは大きく変わるものの) 当該課題を解消可能と考える。
- ② μ は内容物に含有する核燃料物質質量が少ない場合には計測が困難。よって、少量の核燃料物質量を識別することを要求する目的に適用する場合、 μ 単独での適用は不可。
- ③ 目的を「物量の把握(■)」に限定すると、CT(2色)も内容物の状態によらず適用が見込める。また、 μ も適用可能と考える(ただし、高線量の計測対象物については①に記載のとおり別途対応が必要)。
- ④ 全般的に「未検証」、「詳細未検討」の項目が多く、今後の検証・検討の結果により、評価結果が変わり得ることに注意(見込みによる評価が多い)。

5. 実施内容 実施項目(4)

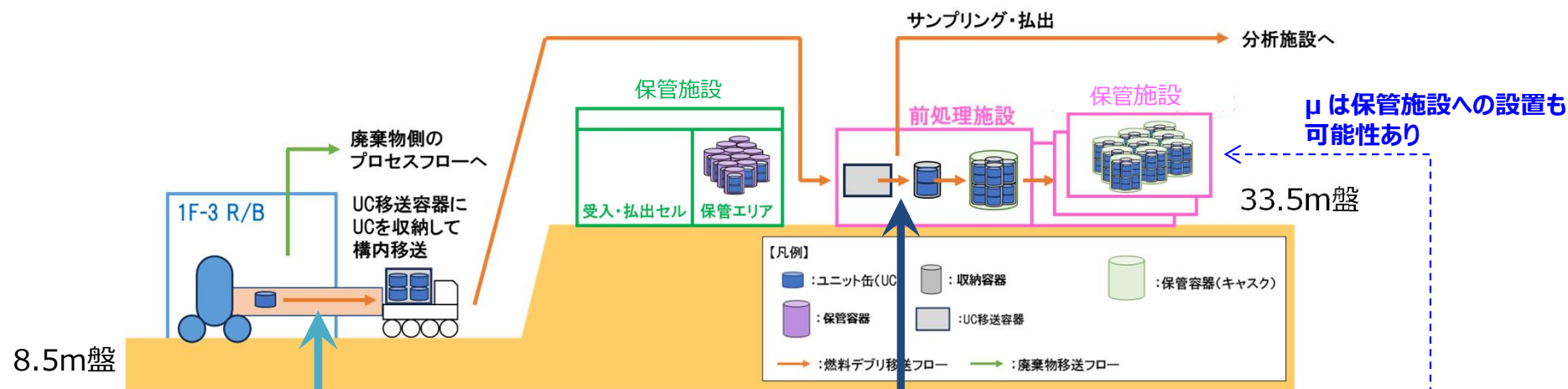
3. プロセスの状態と計測技術の適用可否を整理 (4/4) まとめ

- 現状、全てのプロセスの状態において問題なく適用できると言い切れる単独の計測技術は存在しない。このため、状況に応じて 別仕様の装置を併用したり、目的を限定したりするなど、ニーズを踏まえて妥協点を探りながら、許容できる範囲内でニーズに最も近い計測技術の組み合わせを選定することが必要。
- このように、技術の選定には東京電力のニーズが大きく影響するため、東京電力のニーズを遅滞なく把握のうえ、シナリオ検討にフィードバックしていく必要がある。引き続き東京電力と情報共有を進めていく。
- 現状未検証、あるいは詳細未検討につき、見込みの評価となっている項目も多い。このため、本評価結果は相当の不確かさを持っている。これを解消するべく、今後の技術開発において適宜検証等を進めていく。

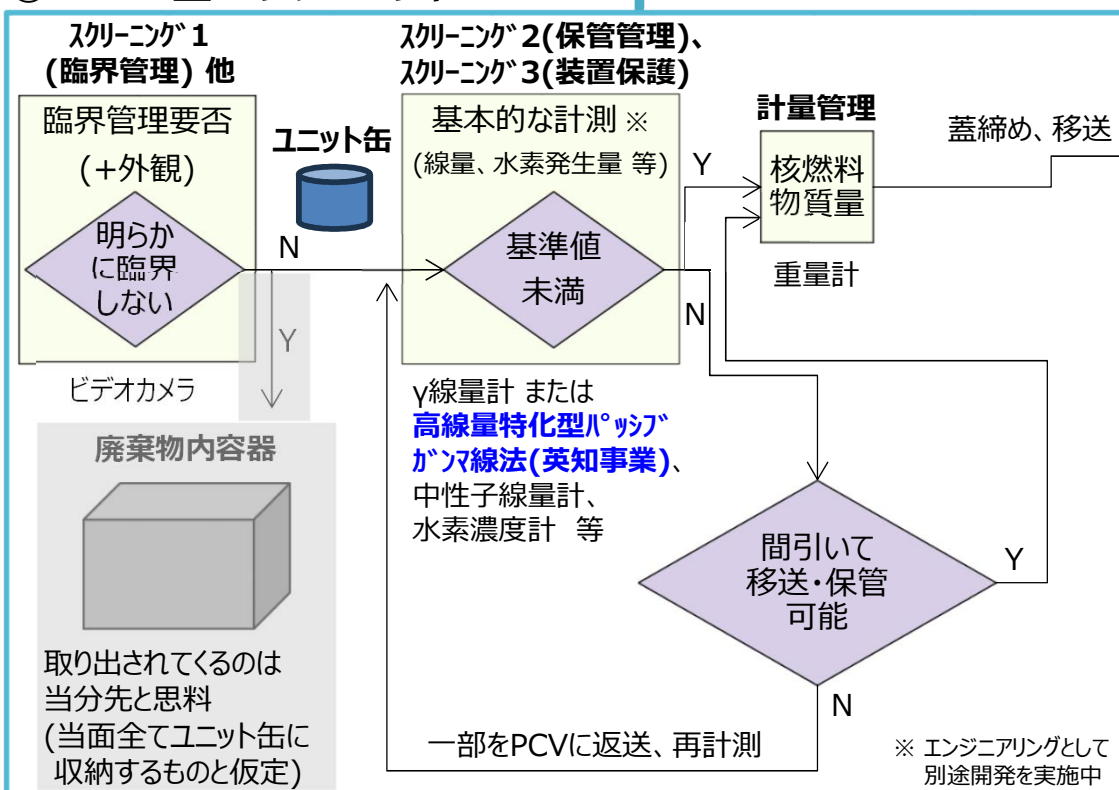
5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

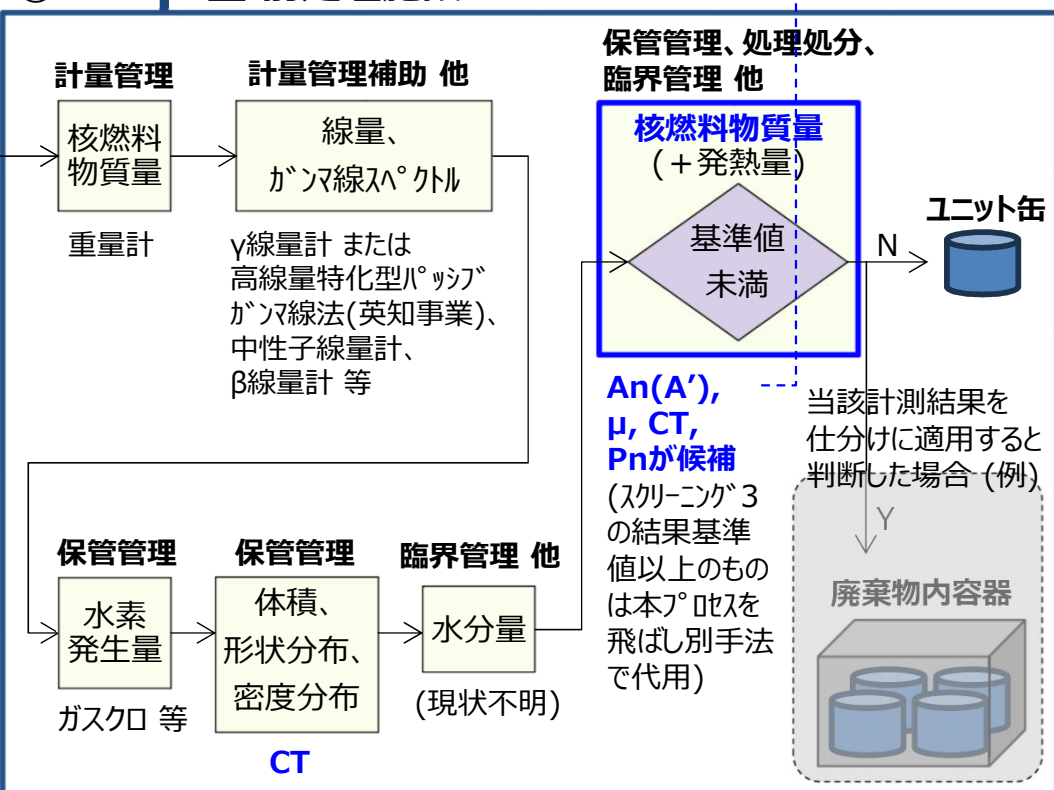
4. プロセスに組み込む 燃料デブリ 非破壊計測 等 フロー案



① 8.5m盤 エンクロージャ



② 33.5m盤 前処理施設

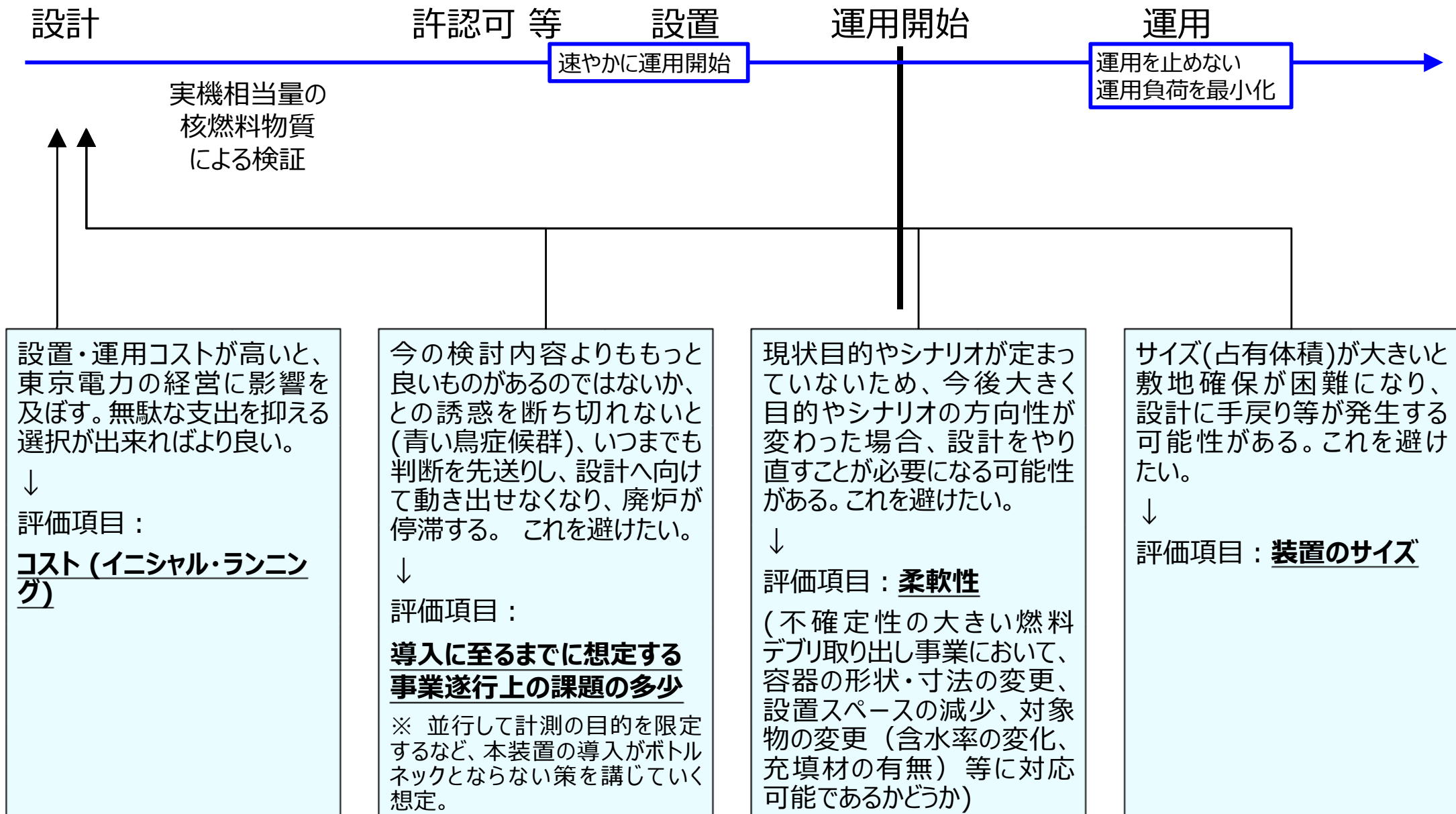


5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

5. 現場への導入、運用を見据えた適用性評価を行い、成立性を確認する (1/4)

運用までの各フェーズにおける課題と評価項目の関係 (1/3)

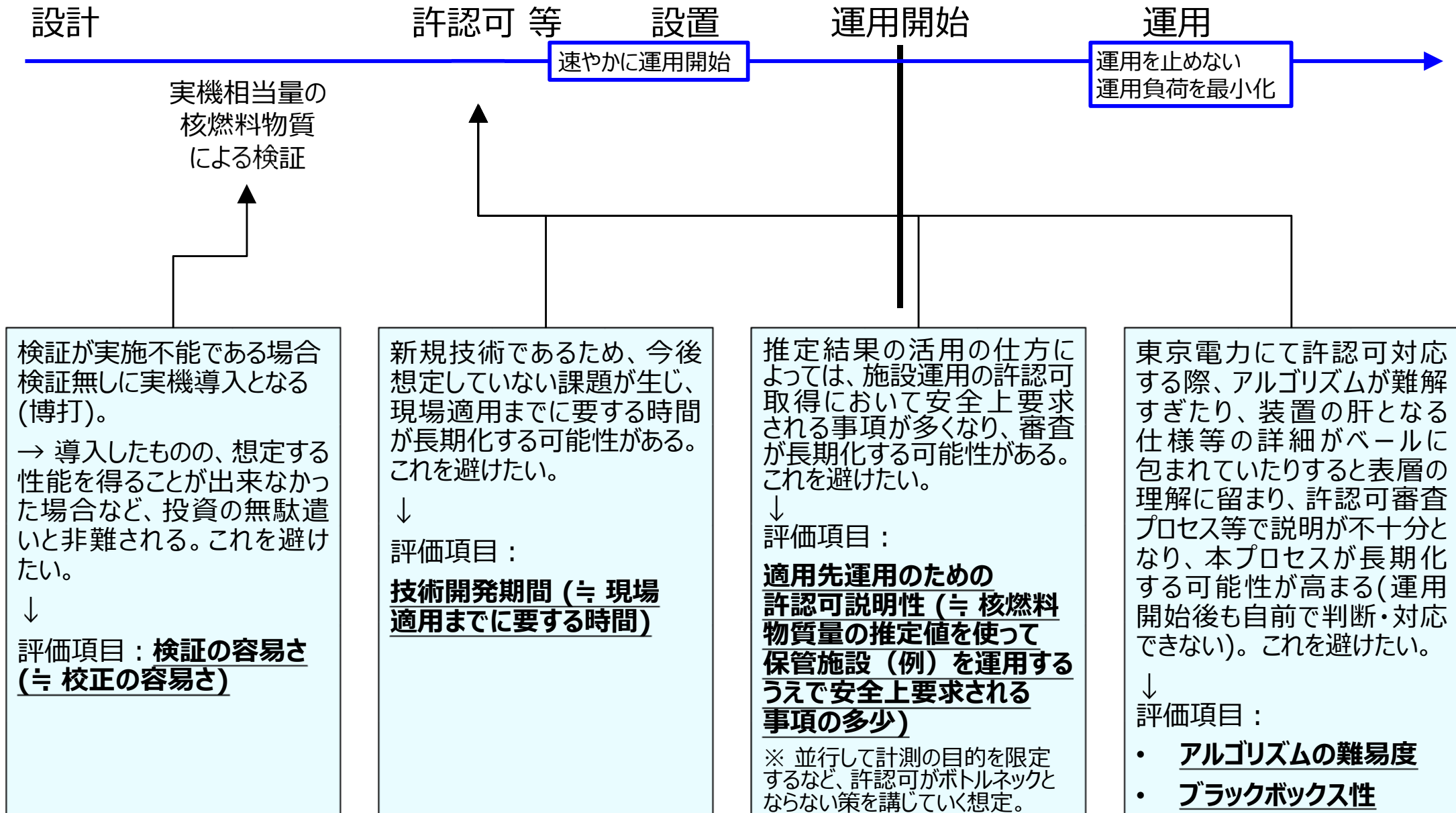


5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

5. 現場への導入、運用を見据えた適用性評価を行い、成立性を確認する (2/4)

運用までの各フェーズにおける課題と評価項目の関係 (2/3)

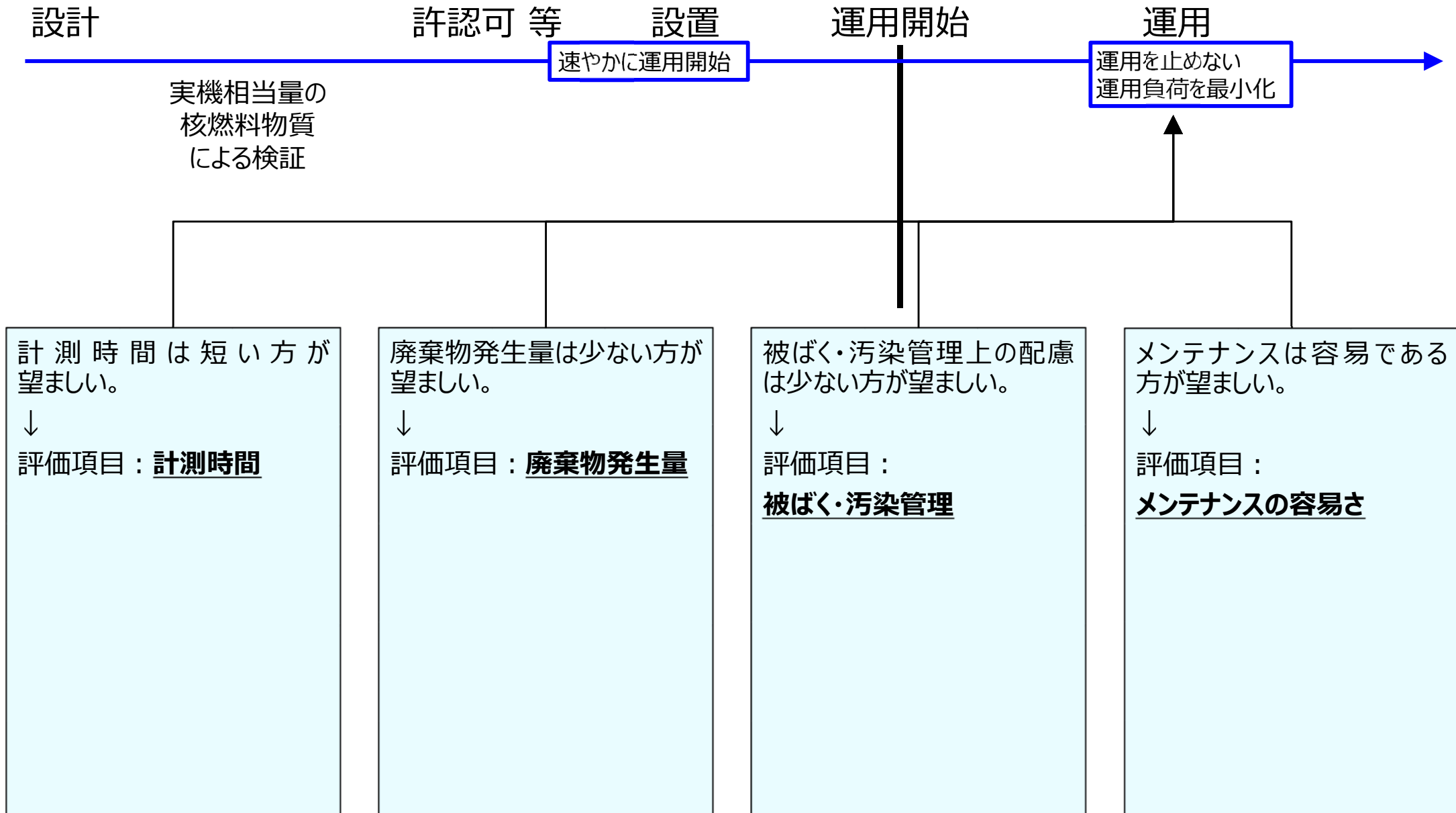


5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

5. 現場への導入、運用を見据えた適用性評価を行い、成立性を確認する (3/4)

運用までの各フェーズにおける課題と評価項目の関係 (3/3)



5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

5. 現場への導入、運用を見据えた適用性評価を行い、成立性を確認する (4/4)

現場適用性評価結果 サマリ (主な評価結果 まとめ)

計測対象核種量の推定に限定する(核燃料物質量の推定への適用は推定精度上見込み薄)

計測技術 評価項目	An(A')	μ			CT(2色)	Pn	Pg
		ユニット缶計測 1h	8h	保管容器 計測			
実証の容易さ (≒ 校正の容易さ)	○ (特記事項なし)	◎ (鉛で代用可)			○ (特記事項なし)	○ (特記事項なし)	○ (特記事項なし)
技術開発期間 (≒ 現場適用までに要する時間)	△ (実績なしのため、 体制構築・調整 含む円滑な遂行に 特段の配慮要)	○ (遮蔽体の設置などの新規技術はあるものの、類似実績を有するため製品化までの開発工程に不確定要素は少ないものと評価)		△ (類似実績は有するものの、本事業で詳細未検討)	○ (特記事項なし)	○ (特記事項なし)	○ (特記事項なし。 ただし英知事業 関連は新規性が 強いいため要注視)
計測時間 (ユニット缶あたり、核燃料 物質 5kg 目安) (改善なし/改善あり)	◎ (10分)	○ (1時間 /30分)	△ (8時間 /4時間)	○ (長時間となるが、 保管後のため 支障なし)	△ (7時間 /2時間)	○ (1時間)	○ (1時間)
ランニングコスト	○ (高頻度の交換は 不要と想定)	△ (ドリフトチューブ検出器が放射線により劣化するため5年に一度交換が必要、相当高額と想定)		○ (放射線劣化なし、 交換不要)	△ (1年ごとに 高額機器の 交換要)	○ (高頻度の交換は 不要と想定)	○ (高頻度の交換は 不要と想定)

目的 ■ : 物量の把握
■ : 基準値超過有無判定

- 評価項目により、評価結果の良し悪しの傾向が大きく異なる。 優先する評価項目が定まれば、選定の判断に活用可能と考える。

5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

まとめ (1/2)

推定精度

- 仕分けに適用見込みがあるのは $An(A')$ と μ (8時間計測)。
- 目的を「物量の把握」に限定すれば、 μ (1時間計測) や $CT(2色)$ 等も 適用可能。
- $An(A) \sim (C)$ や Pn, Pg は核燃料物質量の推定には現状難あり（他技術の補正や核種類の推定等には活用可能）。

適用状態・適用場所適性

- 上記にて仕分けに適用見込みありと評価された $An(A')$ と μ (8時間計測) のうち、 μ は高線量の計測対象物に対する何らかの対応が必要 (対応は可)。
- μ は核燃料物質量の含有量が少量の場合適用困難。 目的を限定し、少量の含有量を気にしない場合には適用可能。
- 同じく目的を限定すれば、 $CT(2色)$ 等も適用可能。

現場適用性

- 評価項目により、評価結果の良し悪しの傾向が大きく異なる。 優先する評価項目が定まれば、技術の選定の判断に活用可能。

5. 実施内容 実施項目(4)

Decom.Tech

まとめ (2/2)

計測技術		適性のある 目的・用途	
		核燃料物質量の推定	左記以外
An	(A')	基準値超過有無判定(仕分け等)、 物量の把握	特になし
	(A)～(C)	不適	An(A')の補正(水分等の存在による誤差影響の低減)
μ	ユニット缶または収納容器を計測	基準値超過有無判定(仕分け等)、 物量の把握	SUS量、コンクリート量の 大まかな把握
	保管容器を計測		
CT	単色	不適	体積の大まかな把握
	2色	物量の大まかな把握	水分量の大まかな把握
Pn		不適	計測対象核種(Cm-244)量の 推定
Pg		不適	計測対象核種(Eu-154等)量の 推定

5. 実施内容 実施項目(4)

課題の抽出

- 核燃料物質の含有量が多い計測対象物を用いた検証を実施できていない。
- ミュオン散乱法については、遮蔽体を組み込んだ実機に近い体系による検証を実施できていない。
- さらに様々な計測対象物の状態（複数物質の混合、密度変化、偏在 等）を考慮した評価を実施できていない。

6. 今後の対応

開発継続要否

- 5つの計測技術のうち、アクティブ中性子法では新たな手法が提案されたが、核燃料物質質量が大きいケースでは解析上での評価に留まっており、実機適用に向けて開発要素が残る。
- また、ミュオン散乱法は、放射線を放出する対象物ではノイズによる影響が分かっていることから、遮蔽体を組み込んで試験を実施する必要がある。遮蔽体を組み込んだ場合は、遮蔽体によるミュオンの散乱が計測に影響を与えるため、遮蔽体の素材と厚みの最適化を検討する必要あり。
- これらの2技術について、組成が既知で、なおかつ含有核燃料物質質量の多い試料を用いた試験モックアップを行い、実機としての適用性を評価したい。
- 残りの3技術は現時点での課題は見受けられず、現状では開発要素がないものとする（詳細は次頁参照）。
- ただし、核燃料物質質量の推定以外に用いる場合には開発要素がある可能性がある。用途を踏まえ、必要が生じた場合には別途評価していく。

6. 今後の対応

Decom.Tech

開発継続要否

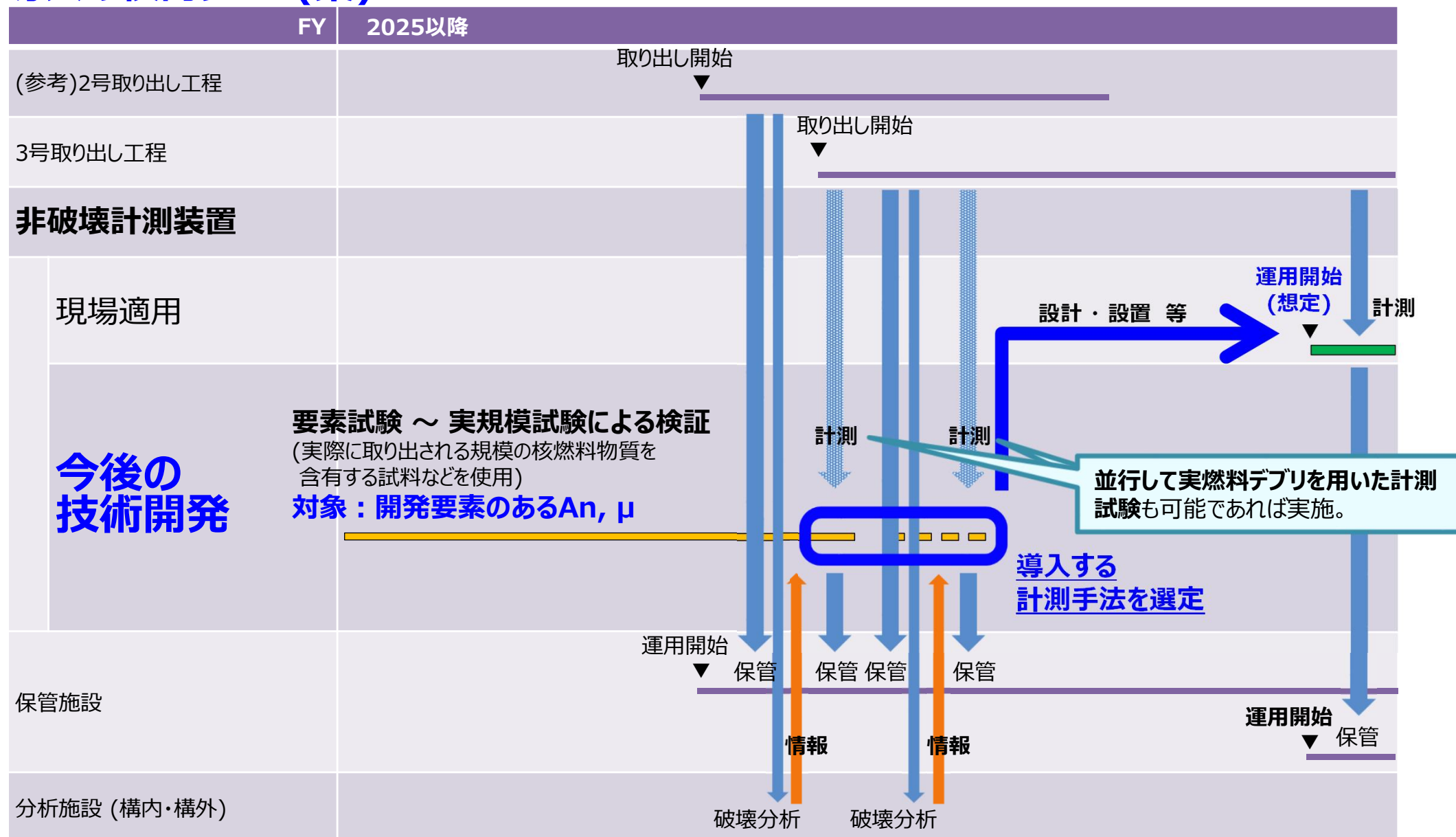
計測技術	開発要素有無		開発継続要否
Pg	無し	ガンマ線放出核種量によるスクリーニングへの適用など、今後必要が生じた場合には適宜検討を行う。	否 ※
Pn	無し	DDSI法を用いたアクティブ中性子法に対する 漏れ増倍の補正 は、適用の可能性があるため、今後必要が生じた場合には、適宜検討を行う。	否 ※
CT	無し	既に開発済みの技術にて、ある程度の精度で核燃料物質の定量も可能との結果を得ていることから、現状 更なる技術開発要素はない 。 また、元々高強度のX線を用いるシステムであるため、 計測対象物からの放射線の影響はほばないもの と考えることから、遮蔽の観点で 燃料デブリに特化した新しい設計も不要 。 今後必要が生じた場合には、適宜検討を行う。	否 ※
μ	有り	現状本手法で実績のある計測対象物は放射線を放出しないものであったため、 これまでは遮蔽材を有さないシステム となっていた。一方、 燃料デブリ を計測対象とする場合には、 遮蔽体を組み込んだ装置概念 を構築し、その 適用性を確認 する必要がある。	要
An	有り	特にFFCC法は 実用化の実績がない ため、適用性検討が必要。また、FNDI法等FFCC法以外の技術も、FFCC法との 組み合わせ による補正などの検討要素が残るため、併せて 継続検討が必要 。	要

※ 今後必要が生じた場合には、適宜検討を行う。

6. 今後の対応

Decom.Tech

導入の検討フロー(案)



※ 本工程は現時点の暫定であり、今後大幅に変更となる可能性がある。

7. まとめ

- 5つの計測技術に対し、核燃料物質量を推定するアルゴリズムを構築した。
- 要素試験を行い、再現解析との比較により、解析の確からしさを確認した。
- 推定精度、現場適用の観点から比較評価を行った。
- 仕分けに適用見込みがあるのは $An(A')$ と μ (8時間計測)。
- 目的を物量の把握に限定するなどにより、他技術も適用の見込みがある。
- よって、目的次第で、**本事業で検討した5技術は全て活用の可能性がある。**
- シミュレーション解析による推定精度評価は行ったが、**全般的に検証が不足**している。
- 現在開発要素が残るのは $An(A')$ と μ 。
- これらの2技術について、組成が既知で、なおかつ含有核燃料物質量の多い試料を用いた試験モックアップを行い、実機としての適用性を評価したい。
- さらなる評価を進め、現場への適用を実現できるよう引き続き必要な技術開発を進めていく。

8. 本事業の目標と達成度

本事業開始時に定めた目標すべてについて、目標を達成しているものとする。

2023/2024年度事業完了時の達成目標	目標 技術成熟度 [TRL]	目標達成の有無
【実施項目(1)】シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価 ▶ シミュレーション解析により、各計測技術の適用性を評価できること。	3	達成 ▶ これまでに積み重ねた検討内容を基に、各計測技術に共通の条件にてシミュレーション解析を実施した。 ▶ 解析の結果から核燃料物質量を推定するアルゴリズムを構築し、これらのアルゴリズムに基づいて核燃料物質量の推定精度を評価した。 ▶ 要素試験を行い、シミュレーション解析の再現性を確認した。 ▶ 現場への適用を見据えた装置概念を導出した。 ▶ 各計測技術の適用性を評価し、現時点で最良と考える 非破壊計測シナリオ を導出した。
【実施項目(2)】非破壊計測技術の適用性評価のための要素試験 ▶ 要素試験を行い、想定される課題や影響因子などを確認できること。	3	
【実施項目(3)】現場適用を考慮した非破壊計測装置の概念設計 ▶ 各計測技術による非破壊計測装置の現場適用性を評価し、適用した場合における非破壊計測装置の概念を導出できること。	3	
【実施項目(4)】核燃料物質等の定量または推定手法の適用性評価と当該手法の適用先候補の導出 ▶ 上記(1)～(3)の結果を基に、核燃料物質等の定量または推定する技術の適用性を評価できること。加えて、燃料デブリの取り出しから保管までのプロセスにおける適用先候補として“仕分けシナリオ（＝当該非破壊計測技術の適用場所及び適用方法を記した仕分け工程イメージ図）”を検討し、実現可能性がある適用先候補（案）を導出できること。	3	

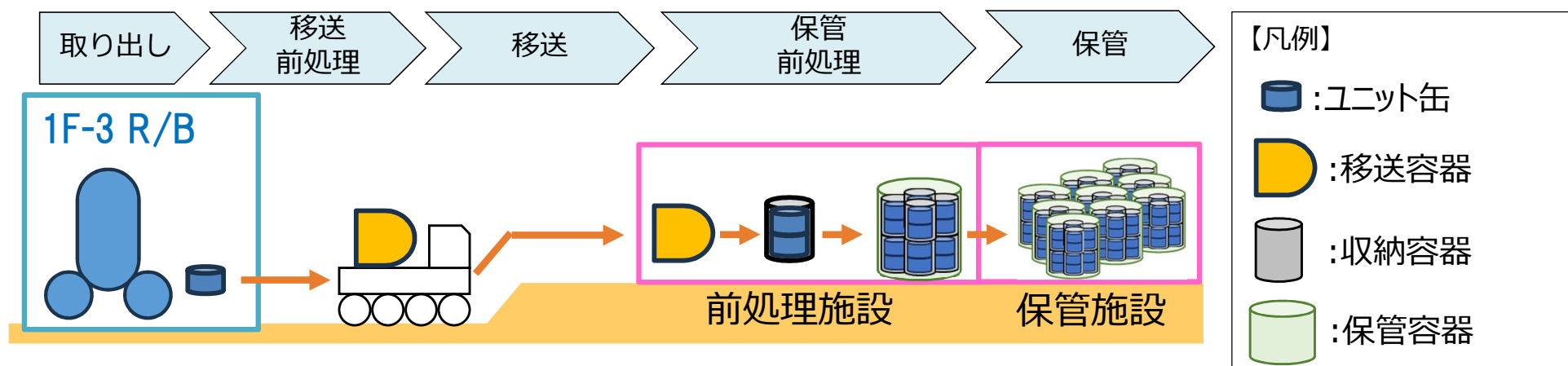
TRL3：「応用研究」従来の経験を応用、組合せによる開発、エンジニアリングを進めている段階。または、従来経験のほとんど無い領域で基礎データに基づき開発、エンジニアリングを進めている段階

以下参考

Decom.Tech

1. はじめに

取り出し～保管までのフロー図（一案）



燃料デブリ取り出し～保管までのプロセス

1. アクティブ中性子法

アクティブ中性子法の原理

アクティブ中性子法では、計測対象に高速／熱中性子を照射して、計測対象物中の核分裂性物質や核燃料物質に核分裂を起こさせ、新たに発生した中性子量を計測することにより、含有核分裂性物質質量や核燃料物質質量を求める計測技術。

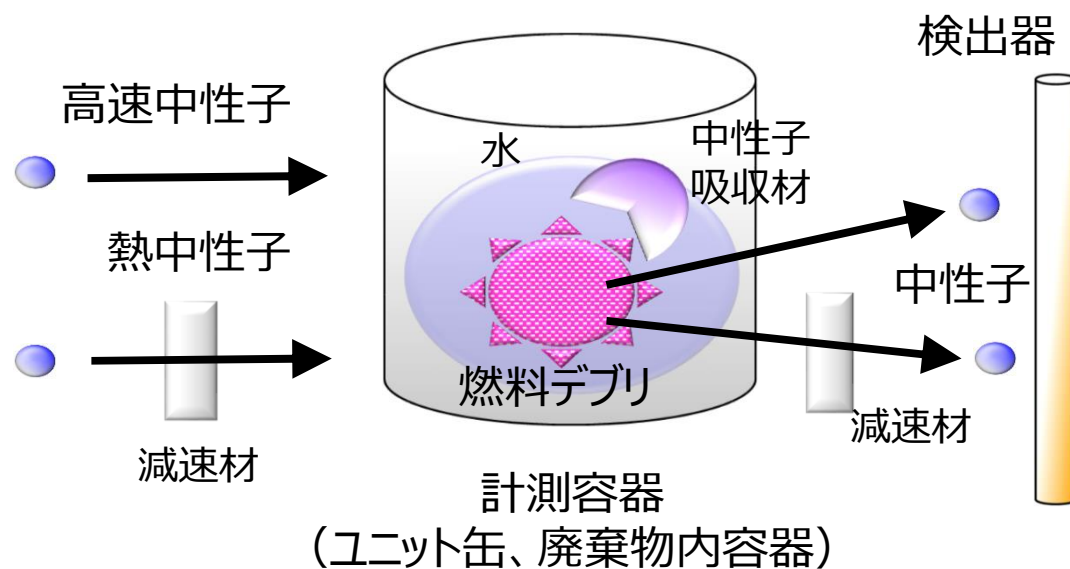


図 計測体系 (イメージ)

長所	・熱中性子を照射し、新たに発生した中性子量を計測することにより少量の核分裂性物質(U-235他)量を直接計測できる。 ・高速中性子を照射した場合には、核燃料物質質量を直接計測できる。
短所	・含有する中性子吸収材(B,Gd,Fe等)や水(減速材)は、阻害・影響要因となりやすい。

➡ 検出器計測値への阻害・影響要因による影響度合いを評価し、計測対象物に含まれる核分裂性物質質量や核燃料物質質量への逆推定における精度向上が必要。

2. パッシブ中性子法

Decom.Tech

パッシブ中性子法の原理

パッシブ中性子法では、計測対象物中に含まれる核分裂性物質の自発核分裂で発生した中性子量を計測することにより、含有核分裂性物質量を求める計測技術。

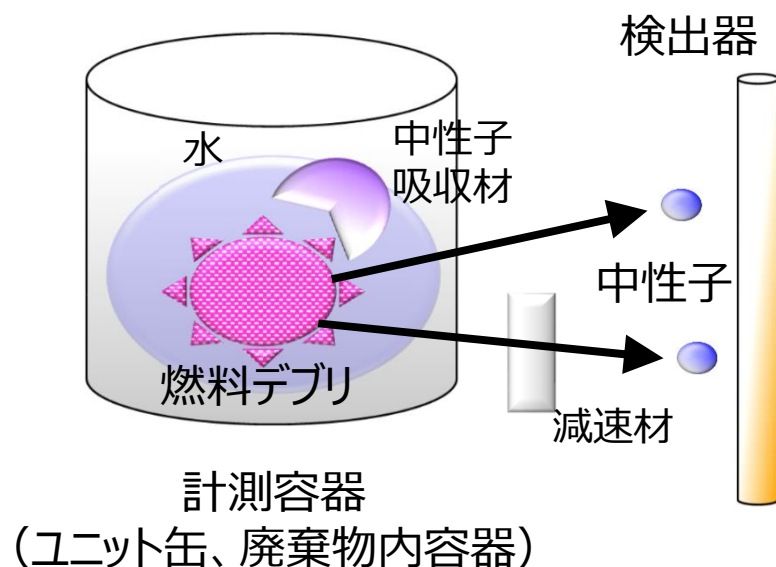


図 計測体系（イメージ）

長所	・発生した中性子量を計測することにより少量の核分裂性物質 (Cm-244+Pu-238+Pu-240)量を直接計測できる。
短所	・含有する中性子吸収材(B,Gd,Fe等)や水(減速材)は、阻害・影響因子となりやすい。

➡ 検出器計測値への阻害・影響因子による影響度合いを評価し、計測対象物に含まれる核分裂性物質質量や核燃料物質質量への逆推定時の誤差軽減に活用する。

3. ミュオン散乱法

Decom.Tech

ミュオン散乱法の原理

ミュオン散乱法では、宇宙から計測対象物に降り注ぐミュオンの散乱角を計測することにより、含有核燃料物質（重元素）量を求める計測技術。

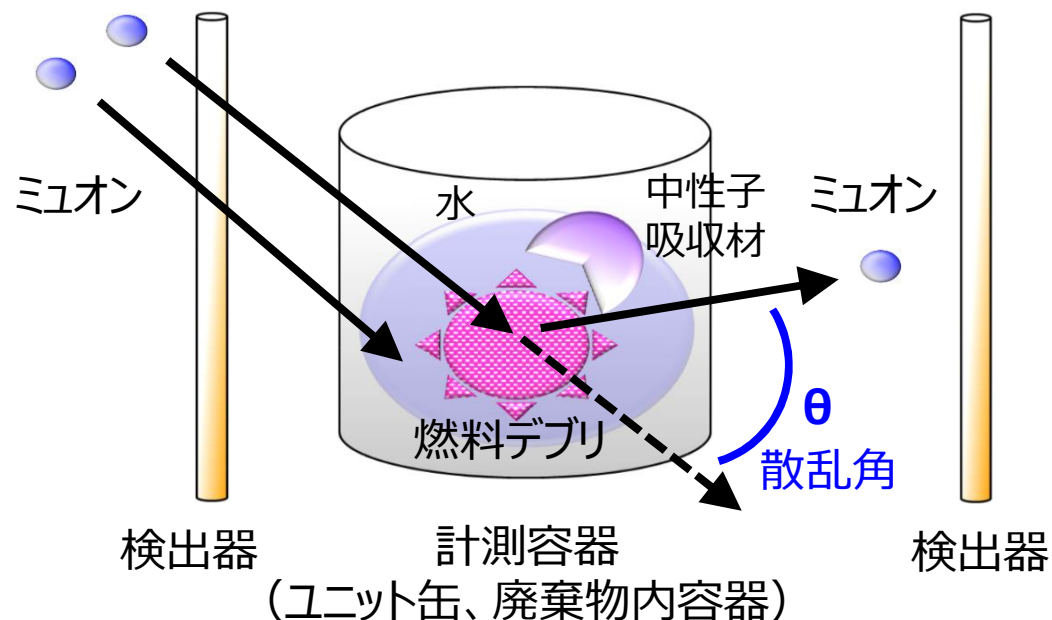


図 計測体系（イメージ）

長所	・ミュオン散乱角は原子番号に依存することから軽元素（水、中性子吸収材等）の影響を受けることなく、重元素（核燃料物質等）量を直接計測できる。
短所	・原子番号が近い元素は区別できない。 ・軽元素と重元素が混合すると、中元素と誤認する場合がある。

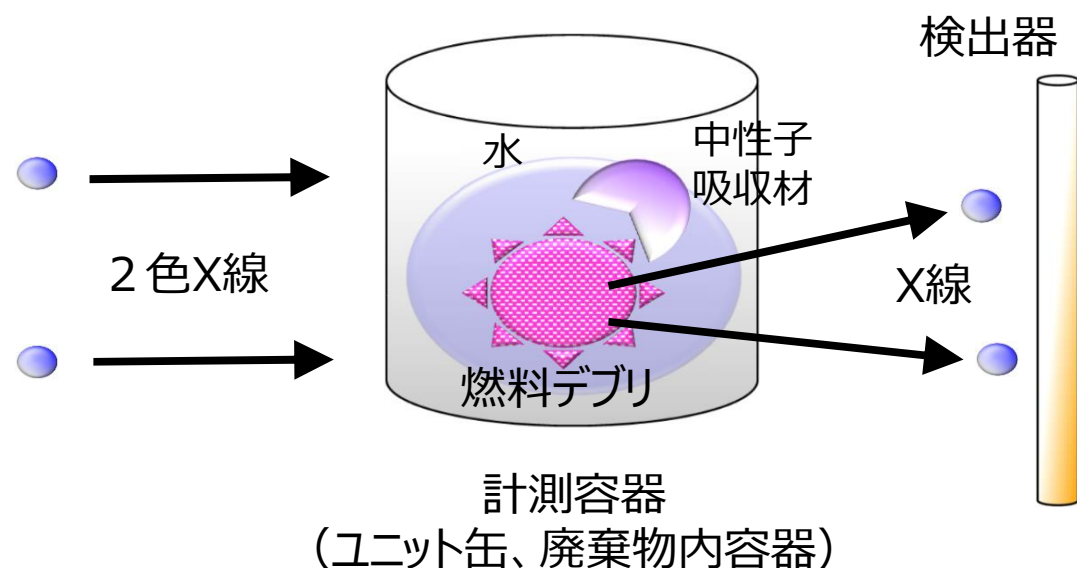
➡ 検出器計測値への障害・影響要因による影響度合いを評価し、計測対象物に含まれる核燃料物質量への逆推定における精度向上が必要。

4. X線CT法

Decom.Tech

X線CT法の原理

X線CT法では、計測対象物にX線を照射し、断層撮影を行うことにより、含有物質の密度差から判別する計測技術。



長所	・容器内の充填状況が確認できる。 ・複数の物質が分散し、混ざり合った場合でも密度差から、その分散状態・位置を判別できる。
短所	・解像度（数mmφ）以下の分散混合状態では判別できない。

図 計測体系（イメージ）

➡ 検出器計測値への障害・影響要因による影響度合いを評価し、計測対象物に含まれる核燃料物質量への逆推定の誤差軽減に活用する。

5. パッシブガンマ線法

Decom.Tech

パッシブガンマ線法の原理

パッシブガンマ線法では、計測対象物中に含まれる核分裂生成物等からで発生したガンマ線スペクトルを計測することにより、含有 γ 線放出核種量を求める計測技術。

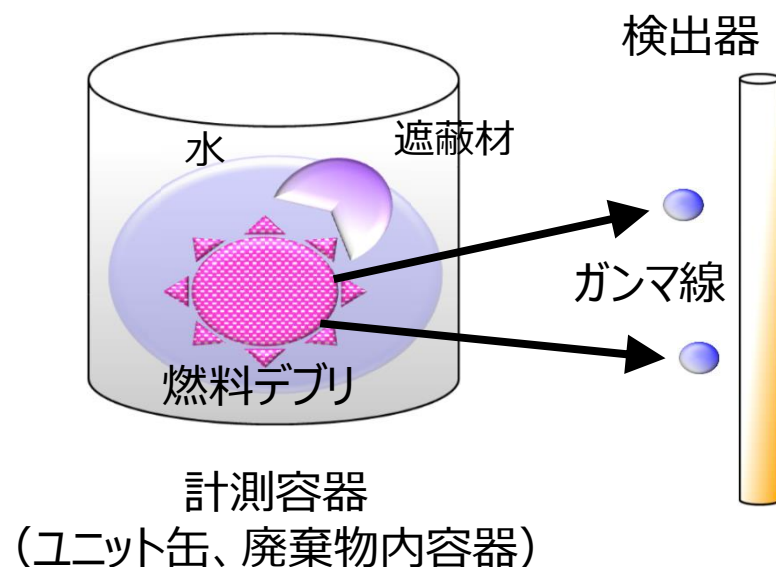


図 計測体系 (イメージ)

長所	・発生したガンマ線スペクトルを計測することにより少量の γ 線放出核種(Eu-154等)量を直接計測できる。
短所	・含有する放射化生成物(Co-60等)や高密度物質(自己吸収)は、阻害・影響因子となりやすい。

➡ 検出器計測値への阻害・影響因子による影響度合いを評価し、計測対象物に含まれる核分裂性物質質量や核燃料物質質量への逆推定時の誤差軽減に活用する。

2. 実施概要

Decom.Tech

◎ 実施・検討項目

実施項目(4)

- 1) 前提条件の設定
- 2) 前提条件に対する課題抽出
- 3) 仕分けシナリオの検討
- 4) 計測技術の適用性評価方針
- 5) 計測技術の適用性評価項目の作成
- 6) 計測技術の適用性評価 ※
 - ・ 核燃料物質量の推定精度
 - ・ 現場適用性
- 7) 仕分けシナリオの再構築
- 8) 適用性のある計測技術
(複数技術の組合せ含む)案の選定
- 9) 課題整理

(4)-2

(4)-1

実施項目(1)(2)(3)との
イタレーションあり

(4)-2

実施項目(1) シミュレーション解析

- 解析モデルの作成
- 解析の実施
- 解析結果の考察

実施項目(2) 要素試験

- 試験条件の構築
- 試験の実施
- 試験結果の考察

結果の反映

実施項目(3) 概念設計

- 計測阻害因子の核燃料物質量の推定に影響を与える事象・因子の抽出
- 機能要求の整備
- 機能要求に基づく仕様の具現化
- 現場適用に向けた考察・評価

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析による非破壊計測技術の適用性評価

- ・ 核燃料物質量の推定精度の確認

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析 解析条件
実施項目(2) 要素試験

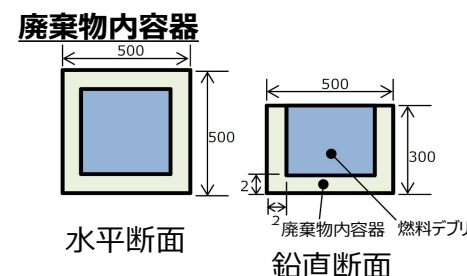
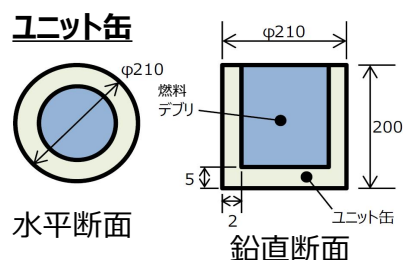
Decom.Tech

115

解析条件 (1/9) ベースケース(1/1)

- 組成：核燃料物質のみ（水分は1wt%含むものとする）
 - 核燃料物質質量
 - ✓ ユニット缶： **1kg, 5kg, 18kg※, 54.5kg** （4ケース） 01-00-01~04
 - ✓ 廃棄物内容器： **1kg, 5kg, 67.7kg, 204kg** （4ケース） 11-00-01~04
 - 燃焼度：23GWd/t 複数の核燃料物質質量に対してアルゴリズムの性能を評価し、その結果を基に、本技術の活用先を検討する
 - 容器：ユニット缶
 - 最大計測時間：1時間, 4時間, 8時間
- 体系：均質
 - 容器内全体に原子がまんべんなく分布している体系を設定する。

※ 一部の偏在体系にて、18kgでは体系が成立しないケースが生じたため、当該ケースのみ16kgにて実施。



凡例 (p116~124)

XX-XX-XX : 各ケース番号

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析 解析条件

実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

116

解析条件 (2/9) 感度ケース(1/8)

- 組成 :
 - 核燃料物質質量 : **5kg (固定)**
 - その他の物質については、**下表のパラメータを各々単独で変化**させたケースを実施する（アクティブ中性子法では B_4C 変化ケース、 H_2O 変化ケース、…のように合計4ケース）。

	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	
B ₄ C [kg]	01-03-01	1	01-03-01	1	—		—		—	
H ₂ O [vol%]	01-01-01	70	01-01-01	70	—		—		—	
SUS [kg]	01-05-01	9	01-05-01	9	01-05-01	9	—		01-05-01	9
コンクリート [kg]	—		—		—		01-06-01	2	—	
燃焼度 [GWd/t]	01-08-01	01-08-01	51		—		01-08-01		51	
	51	01-08-02	1.3				01-08-02		1.3	
	01-08-03~05 混在(3ケース)※			01-08-03~05 混在(3ケース)※						
ケース数	4ケース		8ケース		1ケース		1ケース		6ケース	

※ 燃焼度混在は、1.3GWd/tと51GWd/tの混合割合をそれぞれ1:5、1:1、5:1と設定した3ケースを実施する。

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析 解析条件

実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

117

解析条件 (3/9) 感度ケース(2/8)

- **核燃料物質質量5kg**で以下のパラメータを変化させたケースを実施する。
- 他ケースと同様、下表のパラメータを各々単独で変化させる。

	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
ZrO ₂ [kg]	—	—	01-04-01 3	—	—
B ₄ C [kg]	01-03-02 0.1	01-03-02 0.1	—	—	—
Gd ₂ O ₃ [kg]	01-02-01, 02 0.24, 0.034	01-02-01, 02 0.24, 0.034	—	—	—
H ₂ O [vol%]	01-01-02, 03 20, 4	01-01-02, 03 20, 4	—	—	—
SUS [kg]	01-14-01, 02 18, 27	01-14-01, 02 18, 27	01-14-01, 02 18, 27	01-14-01, 02 18, 27	01-14-01, 02 18, 27
Conc [kg]	—	—	—	01-15-01, 02 4, 6	—
偏在	次頁参照 中央, 水平 垂直, 中心	次頁参照 中央, 水平 垂直, 中心	次頁参照 中央, 水平 垂直, 中心	次頁参照 中央, 水平 垂直, 中心	次頁参照 中央, 水平 垂直, 中心
含有組成 [GWd/t]	—	01-08-06~08 混在※	—	—	01-08-06~08 混在※
粒径	—	—	—	—	—

※ 燃焼度混在は、1.3GWd/t と **23GWd/t** の混合割合を それぞれ 1 : 5、1 : 1、5 : 1 と設定した3ケースを実施する。

➤ 最大計測時間

◆ 1時間, 4時間, 8時間

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析 解析条件

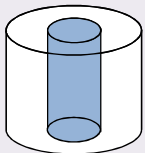
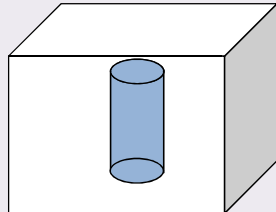
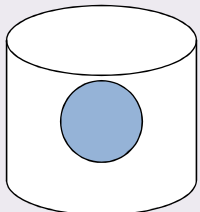
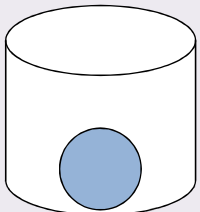
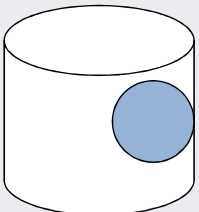
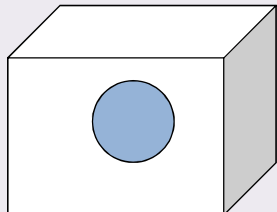
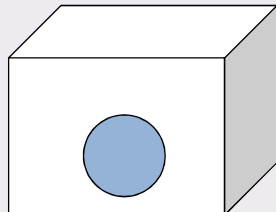
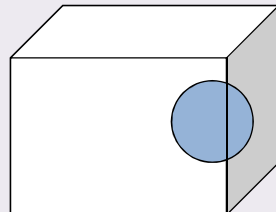
実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

118

解析条件 (4 / 9)

感度ケース(3/8)

ユニット缶			廃棄物容器		
中央 01-07-01			中央 11-07-01		
					
中心 01-07-04	水平・垂直 01-07-02	01-07-03	中心 11-07-04	水平・垂直 11-07-02	11-07-03
					

- ※ ユニット缶容量の30vol%を占める領域内において、内容物（水と空隙を含む）が均質に分布するものとする。
例えば、ユニット缶・中心ケースであれば、内容物（球）の体積がユニット缶容量（約6,500cm³）の30vol%（約1,950cm³）であるものとする（球の半径：約8cm）。
- ※ 中央ケース：円柱形状とし、内容物の高さをユニット缶容器の内高19.5cmとする（廃棄物容器の場合も同じ設定）。
- ※ 中心・水平・垂直 ケース：球状とする。
- ※ 水平ケース・垂直ケース：「中心から垂直下部方向に移動させ、底面に接している状態」、または、「中心から水平方向（底面に平行な方向）に移動させ、壁面に接している状態」。中性子・ミュオン・X線を照射源から容器を見た方向と平行な方向に移動させるケースを「水平」、垂直な方向に移動させるケースを「垂直」と定義する。

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析 解析条件

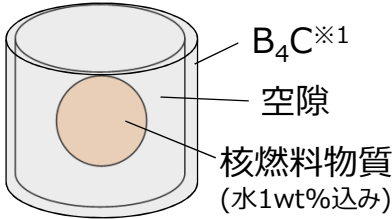
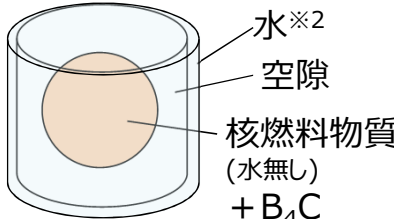
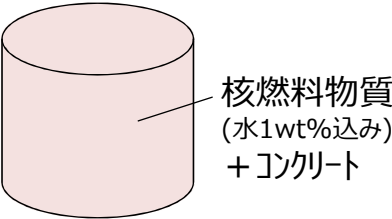
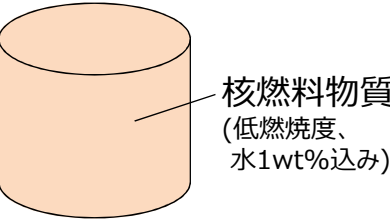
実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

解析条件 (5/9)

感度ケース(4/8)

◎ ユニット缶

計測技術		アクティブ中性子法 (A),(B),(C)		アクティブ中性子法(A')		ミュオン散乱法、 X線CT法		パッシブ中性子法、 パッシブガンマ線法	
ケース概要		中性子吸収材偏在(周囲) + 核燃料物質 理論密度		水偏在(周囲) + 核燃料物質 + 中性子 吸収材 理論密度		核燃料物質 + コンクリート (均質)		低燃焼度	
									
容器	核燃料物質量[kg]	B ₄ C[kg]		水[vol%]	B ₄ C[kg]	コンクリート[kg]		燃焼度[GWd/t]	
ユニット缶	1	01-12-01	1.0	01-13-01	0.2	01-16-01	0.4	01-19-01	1.3
	5	01-12-02		01-13-02	1.0	01-06-01	2.0	01-08-02	
	16 ※3	01-12-03		01-13-03	3.2	01-16-02	6.4	01-19-02	
	49.7 ※4	01-12-04		体系が成立しないため実施不能				不実施	
	54.5	空隙がないため実施不能						01-19-03	

※1, ※2 それぞれ厚み一定で容器内側全面を覆うように配置(制御棒由来の中性子吸収材や水がこのように収納される可能性を否定できないため)。

※3 核燃料物質量が18kgの場合アクティブ中性子法(A')の体系が成立しないため、核燃料物質量を若干減少させた値を設定(ベースケースは内挿で概算評価する)。

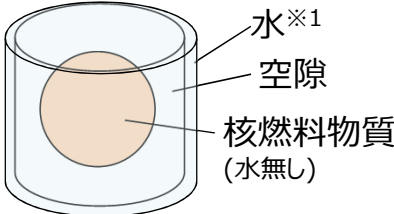
※4 核燃料物質量が54.5kgの場合、空隙がないため、アクティブ中性子法(A)(B)(C)の体系を設定可能な核燃料物質量の最大値を設定。
なお、核燃料物質の形状は球ではなく、空隙を含む空間に原子が均質分布している体系を想定する。

※5 最大計測時間：1時間、4時間、8時間

解析条件 (6 / 9)

感度ケース(5/8)

◎ ユニット缶

計測技術		アクティブ中性子法 (A),(B),(C)	アクティブ中性子法(A')
ケース概要		水偏在(周囲) + 核燃料物質 理論密度	
			
容器	核燃料物質質量[kg]	水[vol%]	
ユニット缶	5	01-11-01	20

※1 厚み一定で容器内側全面を覆うように配置（水がこのような収納される可能性を否定できないため）。

※2 最大計測時間： 1時間、 4時間、 8時間

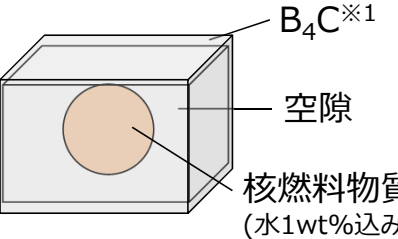
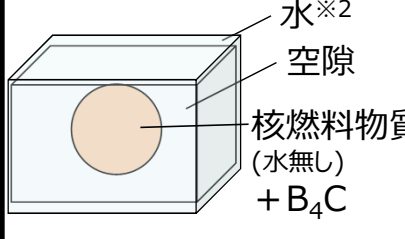
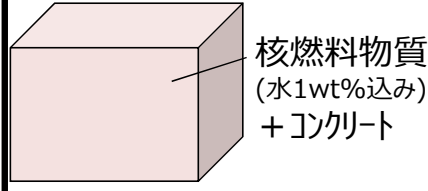
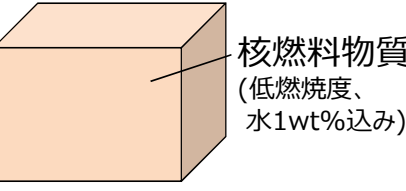
5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析 解析条件
実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

解析条件 (7/9) 感度ケース(6/8)

◎ 廃棄物内容器

計測技術		アクティブ中性子法 (A),(B),(C)		アクティブ中性子法(A')		ミュオン散乱法、 X線CT法		パッシブ中性子法、 パッシブガンマ線法	
ケース概要		中性子吸収材偏在(周囲) + 核燃料物質 理論密度		水偏在(周囲) + 核燃料物質 + 中性子 吸収材 理論密度		核燃料物質 + コンクリート (均質)		低燃焼度	
		 B₄C※1 空隙 核燃料物質 (水1wt%込み)		 水※2 空隙 核燃料物質 (水無し) + B₄C		 核燃料物質 (水1wt%込み) + コンクリート		 核燃料物質 (低燃焼度、 水1wt%込み)	
容器	核燃料物質質量[kg]	B ₄ C[kg]		水[vol%]	B ₄ C[kg]	コンクリート[kg]		燃焼度[GWd/t]	
廃棄物 内容器	1	11-12-01	11-13-01	10.3	0.2	11-16-01	0.4	11-19-01	1.3
	5	11-12-02	11-13-02		1.0	11-16-04	2.0	11-19-02	
	67.7	11-12-03	11-13-03		13.5	11-16-02	27.1	11-19-03	
	204※3	11-12-04	11-13-04		40.8	11-16-03	81.6	11-19-04	

※1, ※2 それぞれ厚み一定で容器内側全面を覆うように配置(制御棒由来の中性子吸収材や水がこのように収納される可能性を否定できないため)。

※3 核燃料物質の形状は球ではなく、空隙を含む空間に原子が均質分布している体系を想定する。

※4 最大計測時間： 1時間、 4時間、 8時間

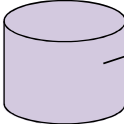
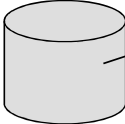
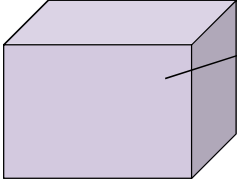
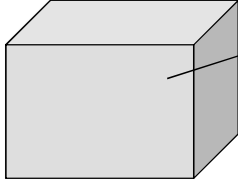
5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析 解析条件
 実施項目(2) 要素試験

Decom.Tech

解析条件 (8 / 9) 感度ケース(7/8)

◎ユニット缶, 廃棄物内容器

計測技術		ミュオン散乱法、X線CT法			
ケース概要		中性子吸収材偏在(周囲) +核燃料物質 理論密度	水偏在(周囲) + 核燃料物質 + 中性子 吸収材 理論密度	SUS (均質)	コンクリート (均質)
		 SUS	 コンクリート	 SUS	 コンクリート
容器	核燃料物質質量[kg]	SUS[kg]	コンクリート[kg]	SUS[kg]	コンクリート[kg]
ユニット缶, 廃棄物 内容器	0 (無し)	01-17-01 27	01-18-01 6	11-17-01 300	11-18-01 75

5. 実施内容

実施項目(1) シミュレーション解析 解析条件

実施項目(2) 要素試験

解析条件 (9 / 9) 感度ケース(8/8)

- **核燃料物質質量5kg**で以下のパラメータを変化させたケースを実施する。
- 他ケースと同様、下表のパラメータを各々単独で変化させる。

	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	
ZrO ₂ [kg]	01-04-01	3	01-04-01	3	—	01-04-01	3	01-04-01	3
SUS [kg]	—		—		—	01-05-01	9	—	
Conc [kg]	01-06-01	2	01-06-01	2	—	—		01-06-01	2
偏在	—		—		—	—		—	
粒径	—		—		—	01-09-01 ~03	粉状, 粒子径小, 粒子径大 ※1	—	

※1 X線CT法固有のケース（粉状：φ0.4mm、粒子径小：φ2.0mm、粒子径大：φ10.0mm）。

➤ 最大計測時間

◆ 1時間, 4時間, 8時間

人を大切にし、新しい技術を創造し、地域と共に成長する

Decom.Tech