

もんじゅ廃止措置における 汚染の分布評価の取り扱いについて

2022年〇月〇日

日本原子力研究開発機構

汚染の分布評価は、軽水炉、ふげんの手法をベースとしつつ、もんじゅの特徴を考慮した評価方法を確立するために、軽水炉とは異なるもんじゅの以下の特徴を考慮する。

運転期間は250日と短期間であり、停止後保管期間が長いため、放射化汚染、二次的な汚染の観点から次の特徴がある。

- 原子炉周辺設備の放射化の面では、40EFPD(全出力換算日)の運転を実施し、設計想定約8760EFPD(設計上の設備利用率及びプラント寿命をそれぞれ80%及び30年と仮定した場合)と比較し、放射能レベルが低いこと(L1レベルは中性子しゃへい体のみと推定)。
- 1次系設備内の放射性腐食生成物(CP)の面では、常陽の測定経験を踏まえると考慮すべき対象核種はCo-60のみである。かつ、表面線量率は、NaIサーベイメータの検出下限(0.01 μ Sv/h未満)と想定され低線量であること。
- 1次系、EVST系設備内の放射化ナトリウムの面では、放射能レベルが低い。Na-22の過去の分析値からの推定では、第3段階3年目の2034年には、クリアランス省令のクリアランスレベルの0.1Bq/gを下回ること。

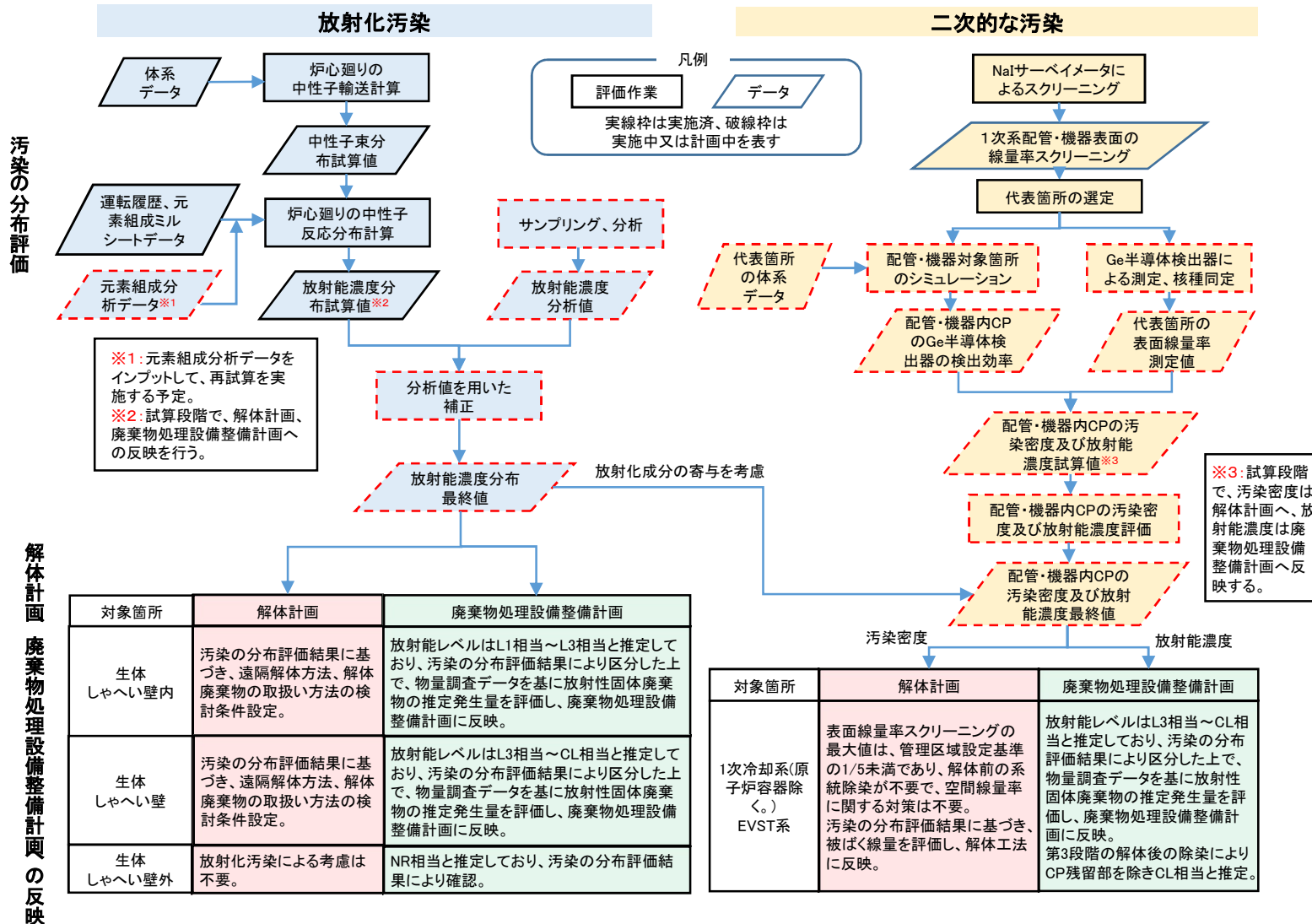
汚染の分布評価結果を解体撤去工法等からなる解体計画の策定、廃棄物処理設備の設計仕様の基となる放射性廃棄物の発生量の把握に反映するため、もんじゅの特徴を考慮した汚染の分布評価の全体像の把握・検証・確認を実施している。

汚染源	大区分	放射化汚染	二次的な汚染(系統からの漏えい等による施設内汚染は現時点ではない)	
	区分	原子炉周辺設備の放射化	1次系設備内の放射性腐食生成物(CP)	1次系、EVST系設備内の放射化ナトリウム
汚染の分布に関するもんじゅの特徴		・運転期間(40EFPD(全出力換算日))が短く、停止後保管期間が長いこと、放射能レベルが低い(L1レベルは中性子しゃへい体のみと推定)	・運転期間(40EFPD)が短く、停止後保管期間が長いこと、放射能レベルが低い(常陽の測定経験を踏まえると、考慮すべき対象核種はCo-60のみ)。	・運転期間(40EFPD)が短く、停止後保管期間が長いこと、放射能レベルが低い(過去の分析値からの推定では、第3段階3年目の2034年にはNa-22の放射能は、クリアランス省令のクリアランスレベルの0.1Bq/gを下回る)
汚染の分布評価結果の反映先	解体計画	・生体しゃへい壁内の構造物(炉内構造物、原子炉容器、炉心上部機構、1次冷却系配管等)の遠隔解体作業の検討条件とする空間線量率及び放射能レベル	・1次系設備の解体計画の検討条件とする作業エリアの空間線量率、解体対象設備の放射能レベル	・1次系、EVST系の残留ナトリウムの回収に関する検討条件とする放射能レベル ・1次系、EVST系残留ナトリウムの安定化処理、除去、洗浄に関する検討条件とする放射能レベル
	発生廃棄物	・生体しゃへい壁内の構造物(炉内構造物、原子炉容器、炉心上部機構、1次冷却系配管等)の解体廃棄物の放射能レベル区分 ・生体しゃへい壁の放射能レベル区分	・1次系の解体廃棄物の放射能レベル区分(洗浄できない場合) ・洗浄廃液の処理設備に関する検討条件とする放射能レベル区分(洗浄できる場合)	・1次系、EVST系から回収した残留ナトリウムの処置に関する検討条件とする放射能レベル区分 ・洗浄廃液の処理設備に関する検討条件とする放射能レベル区分
汚染の分布評価	全体像の把握	①中性子束分布試算(DORT) ②放射能濃度分布計算(SCALE6.2.4のORIGEN)	①配管、機器表面のNaI検出器によるスクリーニング ②Ge半導体検出器による対象核種同定、汚染密度評価	2021年3月1日分析値(1次系の例) H-3 約38Bq/g Na-22 約2.4Bq/g Na-24 <約1.0 Bq/g
	全体像の検証	中性子しゃへい体、中性子計装設備からのサンプリングによる比較検証	放射化汚染分布計算の最終結果を踏まえ、二次的な汚染の放射能濃度の最終評価	2022年に英国認証機関で分析予定
	個別確認(第2段階)	必要に応じて、発生廃棄物の放射能レベル区分、NR確認のための追加確認	特になし	特になし
	個別確認(第3段階)	軸方向、ダクトストリーミング、周辺部の検証の実施。	クリアランスや廃棄体の放射能濃度決定方法の構築、管理区域解除のための評価(試料採取による調査・評価がメインのもの)を実施。	特になし

3. 汚染の分布に関する評価の実施状況

(1) 全体の進捗状況

汚染の分布評価の全体像の把握・検証・確認は、下記のプロセスフローに従って実施しており、解体計画、廃棄物区分・処理設備の整備計画への反映を行う。



(2) 工程表

【凡例】

- 実施済み
- 実施中、又は計画中
- ★ 放射化汚染の評価結果
- 放射化汚染の評価結果の反映先
- ★ 二次的な汚染の評価結果
- 二次的な汚染の評価結果の反映先
- ★ 物量調査結果
- 物量調査結果の反映先

	年度	第1段階					第2段階		
		2018	2019	2020	2021	2022	2023-		
汚染の分布評価	(1) 放射化汚染の分布評価	① 中性子輸送計算、放射線濃度分布計算等の解析コードの選定を含む計算手法の検討、測定範囲及び測定箇所の検討						<div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">放射線濃度分布の試算は、中性子束分布試算値に運転履歴データ及びミルシートベースの元素組成データを入力することにより2021年に実施済みである。更に、元素組成分析データをインプットして放射線濃度分布の再試算を行う。</div>	
		② 放射化汚染(中性子束、放射能濃度)の分布計算			試算	★	★		分析値による補正、最終値算出
		③ 元素組成分析							
		④ 放射能濃度測定準備及び測定(サンプリング、分析)				装置設計・製作・サンプリング	測定・分析		
(2) 二次的な汚染の分布評価	① 評価範囲及び手法の検討、放射線測定準備、NaI検出器によるスクリーニング								
	② Ge半導体検出器によるγ線スペクトルの測定								
	③ 核種同定、シミュレーション、配管内CPの汚染密度及び放射能濃度の評価計算				試算	★	放射化成分の寄与を考慮 → 評価、最終値算出		
解体計画への反映	(1) 被ばく評価に基づく解体工法の検討						汚染の分布結果を適時反映		
廃棄物処理設備整備計画への反映	(1) 放射性廃棄物物量調査	① 調査範囲、手法の検討							
		② 物量調査					★		
	(2) 放射性固体廃棄物の推定発生量評価	① 放射化汚染					試算	★	最終評価
		② 二次的な汚染					試算	★	最終評価
(3) 廃棄物処理設備の仕様検討							汚染の分布結果を適時反映		

(3) 汚染の分布評価(放射化汚染)(1/3)

① 評価対象範囲

●もんじゅは設計想定よりも少ない40EFPDの運転と、過去の性能試験時に生体しゃへい壁の外側にある1次主冷却系室で中性子がほとんど検出されなかった実績も踏まえ、評価対象範囲を設定。この範囲で解析を実施し、サンプリングによって妥当性を確認する。

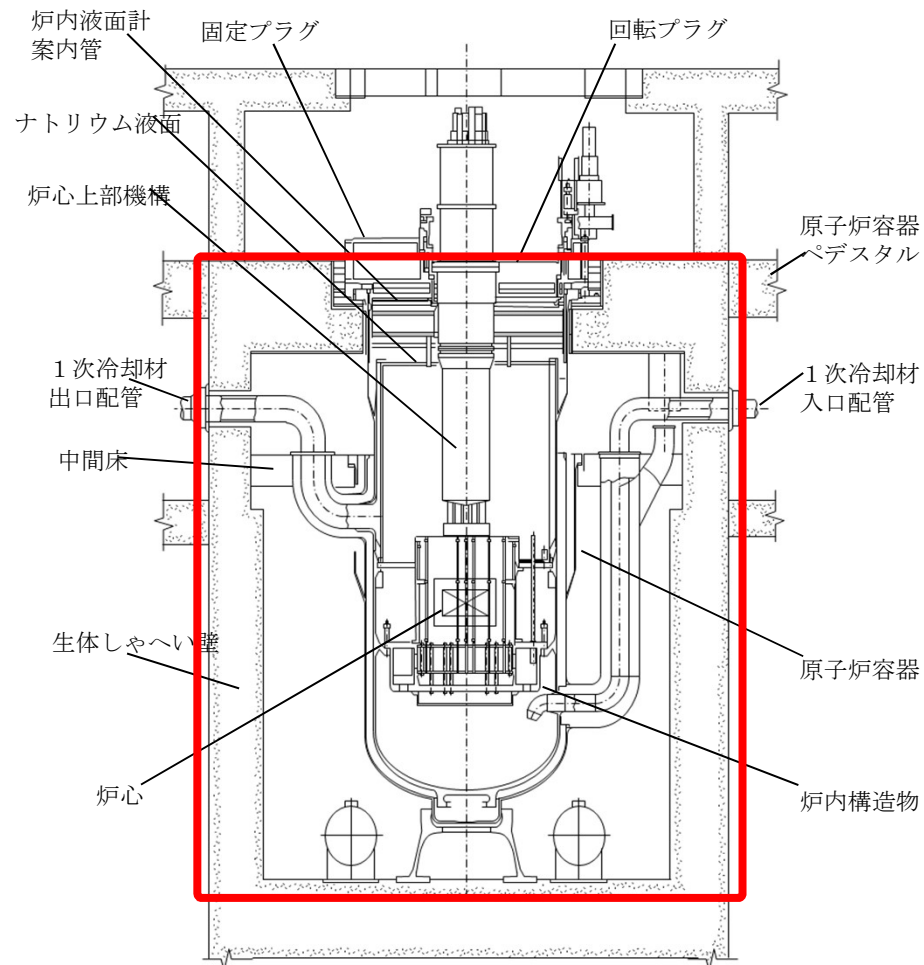


図 放射化汚染の評価対象範囲

(3) 汚染の分布評価(放射化汚染)(2/3)

②解析のインプット

【中性子照射履歴】

- もんじゅは原子炉出力0%~45%で原子炉を250日運転した実績を踏まえ、評価を簡易的かつ保守的にできるように設定する。
- 実際の運転履歴のように、低出力で起動停止を繰り返す長期運転では、初期の運転で生成された放射能は時間と共に減衰するため、最大出力での連続運転とする方が保守的。
- このため、経験した最大出力である45%で運転日数を換算した約89日運転を中性子照射履歴として設定(図1)。

【元素組成データ】

- ミルシートベースの元素組成データをインプットした。

実際の運転履歴

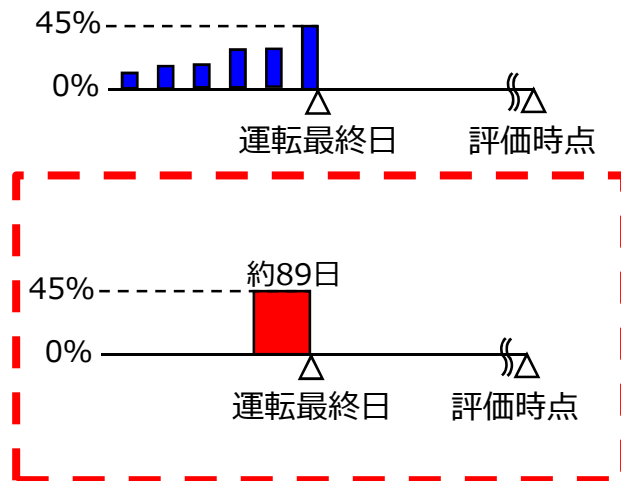
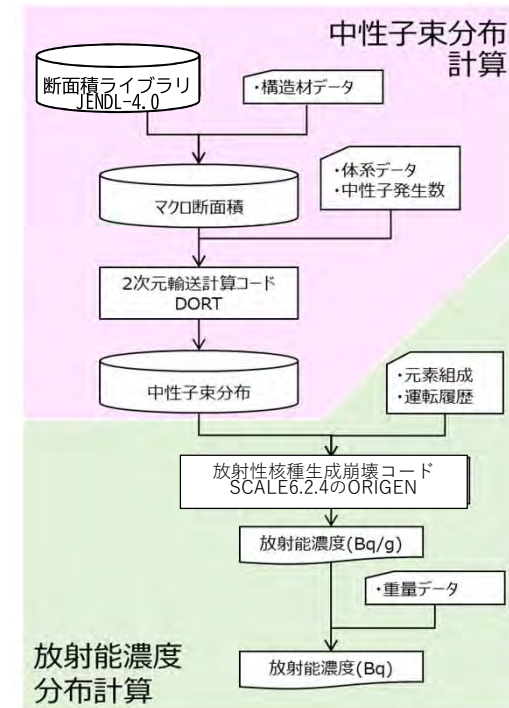


図1 中性子照射履歴

③計算コードの選定

●放射化汚染の分布評価に使用する計算コードは、2次元輸送コードは性能試験時に使用したDOT3.5の改良型のDORTを使用、断面積ライブラリは最新核定数に基づくJENDL-4.0を使用、また放射性核種崩壊計算コードはSCALE6.2.4のORIGENを使用する。



3. 汚染の分布に関する評価の実施状況

(3) 汚染の分布評価(放射化汚染) (3/3)

④ 放射能濃度分布の試算

放射能濃度分布の試算結果については、今後、以下のとおり評価の高度化を図っていく。

- 元素組成分析データを炉心廻りの中性子束分布試算値にインプットし、放射能濃度分布の再試算の実施。
- 解析評価の検証に必要なサンプリングの検討を実施中(中性子しゃへい体からの試料採取や試料採取せずに直接測定する検討。中性子計測設備からの試料採取の検討)。
- サンプリング試料の放射能濃度の分析値を用いて試算値を補正し、放射能濃度分布計算の最終値とする。

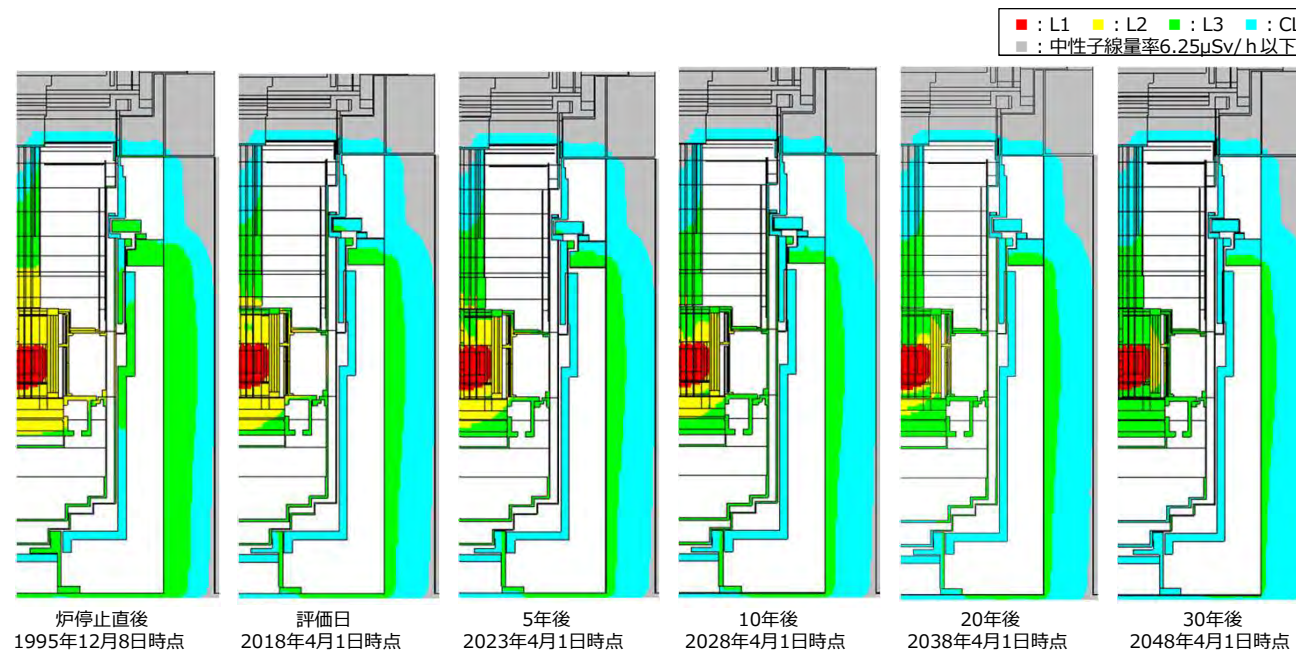
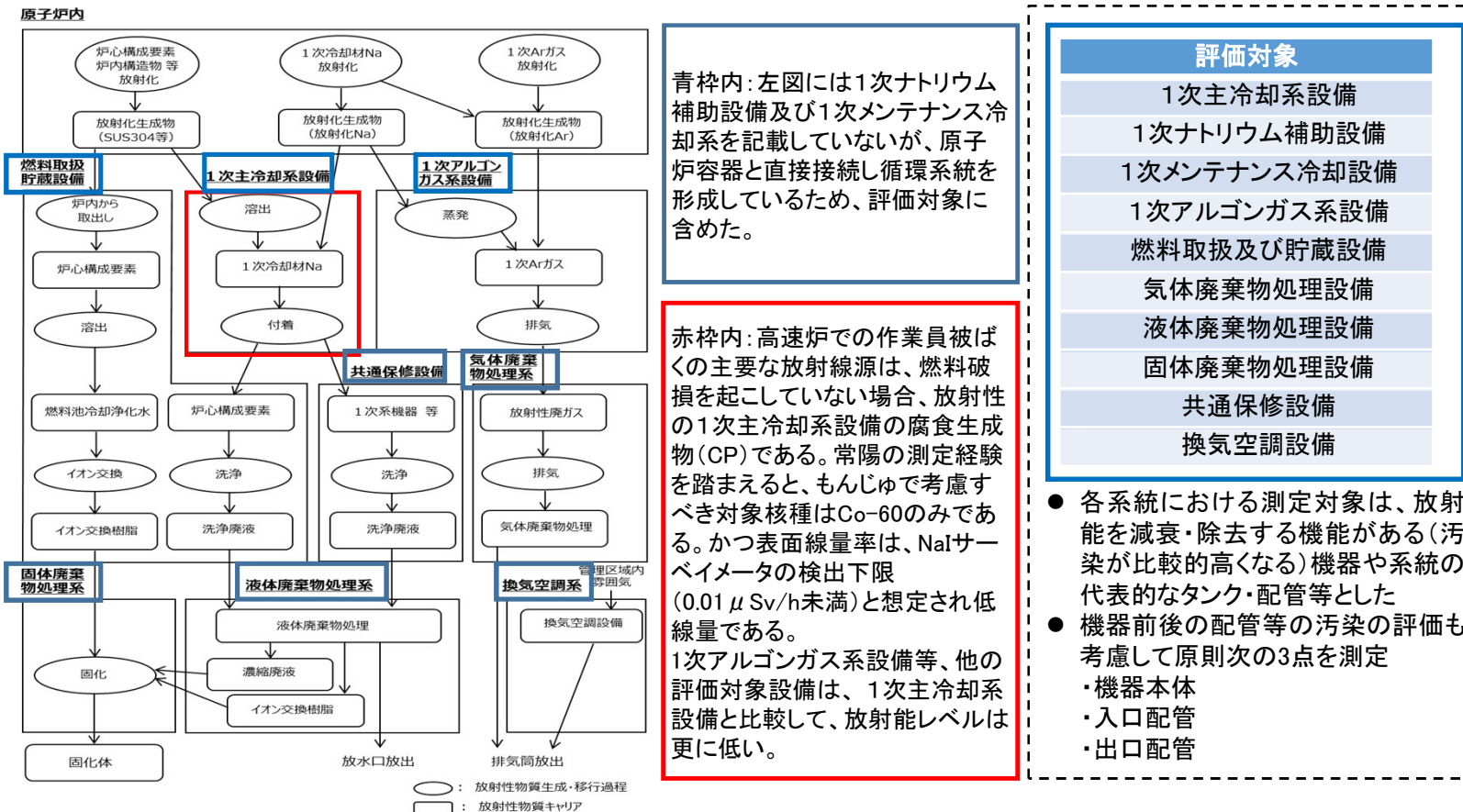


図 放射能濃度分布の試算結果

(4) 汚染の分布評価(二次的な汚染)(1/4)

① 評価対象範囲

二次的な汚染が想定される設備を整理し測定点を決めるために、放射性物質の生成・移行の過程を想定した上で、二次的な汚染の評価・測定対象を決定した。



青枠内: 左図には1次ナトリウム補助設備及び1次メンテナンス冷却系を記載していないが、原子炉容器と直接接続し循環系統を形成しているため、評価対象に含めた。

赤枠内: 高速炉での作業員被ばくの主要な放射線源は、燃料破損を起こしていない場合、放射性の1次主冷却系設備の腐食生成物(CP)である。常陽の測定経験を踏まえると、もんじゅで考慮すべき対象核種はCo-60のみである。かつ表面線量率は、NaIサーベイメータの検出下限(0.01 μ Sv/h未満)と想定され低線量である。1次アルゴンガス系設備等、他の評価対象設備は、1次主冷却系設備と比較して、放射能レベルは更に低い。

評価対象
1次主冷却系設備
1次ナトリウム補助設備
1次メンテナンス冷却設備
1次アルゴンガス系設備
燃料取扱及び貯蔵設備
気体廃棄物処理設備
液体廃棄物処理設備
固体廃棄物処理設備
共通保修設備
換気空調設備

- 各系統における測定対象は、放射能を減衰・除去する機能がある(汚染が比較的高くなる)機器や系統の代表的なタンク・配管等とした
- 機器前後の配管等の汚染の評価も考慮して原則次の3点を測定
 - ・機器本体
 - ・入口配管
 - ・出口配管

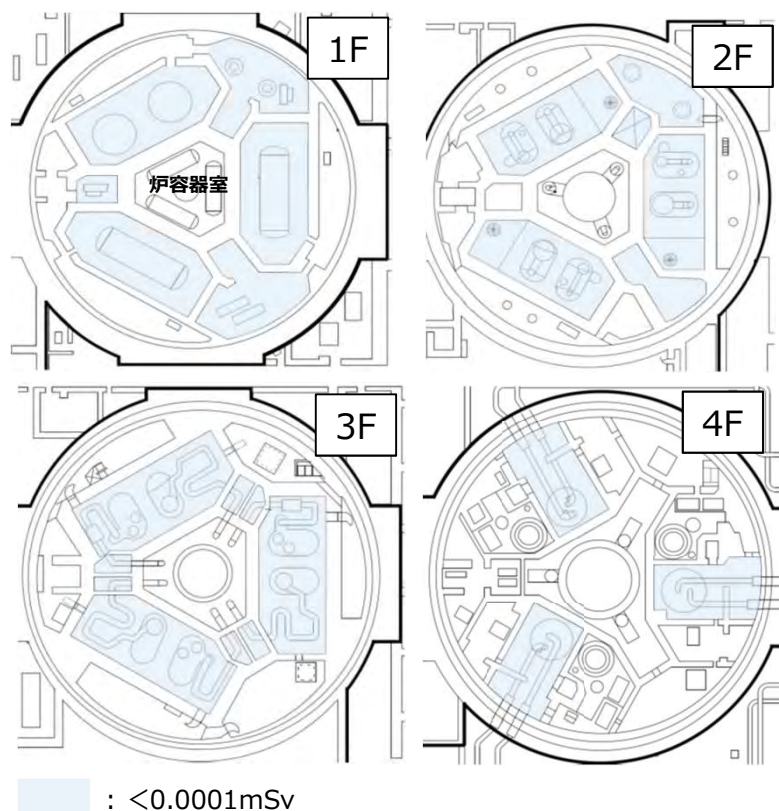
図 放射性物質の生成・移行の過程の概要

3. 汚染の分布に関する評価の実施状況

(4) 汚染の分布評価(二次的な汚染)(2/4)

②もんじゅの二次的な汚染状況に係る測定方針の事前検討

1次主冷却系室等の雰囲気線量当量率、配管表面線量率、ともに放射線測定器のBGレベル以下であるが、二次的な汚染の分布の評価結果は、解体時の被ばく評価、放射性固体廃棄物の発生量評価に必要なため、1次冷却系(原子炉容器除く。)及びEVST系全域をスクリーニング測定した上で、核種の特定のためGe半導体検出器による測定を行う方針とした。



- 電離箱での測定による、現状のもんじゅの1次主冷却系室等の雰囲気線量当量率は、全域において $<1 \mu\text{Sv}$ 以下(原子炉容器室は除く。)
- 1997年の性能試験時等から現在の1次系ホットレグ配管内表面のCo-60の汚染密度を推定すると、約 $0.5\text{Bq}/\text{cm}^2$ 程度。配管表面線量率に換算すると、 $0.02 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 程度。NaIサーベイメータ(BG: $0.1 \mu\text{SV}/\text{h}$ 程度)を用いても、バックグラウンドに埋もれてしまう。

図 現状の1次主冷却系等の雰囲気線量当量率

(4) 汚染の分布評価(二次的な汚染)(3/4)

③測定・評価方法の検討

解体計画検討時の被ばく評価、放射性固体廃棄物の推定発生量評価(特にL3とCLとの識別)を精度よく実施するため、Ge半導体検出器を用いて、**配管内面の汚染密度の推定値約0.5Bq/cm²**よりも十分に低い汚染密度が検出できるように測定・評価方法を検討した。

課題

- 全域においてBGLレベルであり、表面線量率から汚染密度(Bq/cm²)を換算するのは、困難。
- 系統の性能は維持されているため、サンプリング分析も困難。
- BG(0.1 μSV/h)程度で汚染密度を換算するとしても、測定により裏付けを取る必要がある。
- 配管及び機器の外部からγ線測定し、評価する方法を検討。

γ線測定方法の検討

- 測定器:可搬型Ge半導体検出器
- 標準体積線源を使用せずに、シミュレーションによって検出効率算出が可能なキャンベラ社製の効率校正ソフトウェアISOCSを用いて、測定可能な汚染密度の評価を実施。
- 1次主冷却系配管の汚染密度を測定した場合、Co-60が検出可能と想定。
- ISOCSを使用することによって、標準体積線源が用意できないような大きさの配管やタンクの検出効率が作成することが可能であり、1次主冷却系配管だけでなく、二次的な汚染が想定される機器等の汚染密度も測定評価することができる。

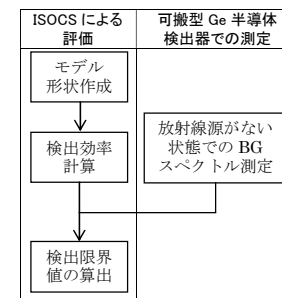


図 検出限界値の算出フロー

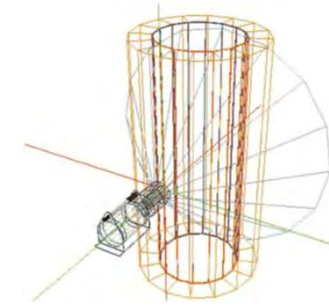


図 1次主冷却系配管の測定モデル

表 1次主冷却系配管を測定した場合の検出限界値

項目	Co-60	備考
ISOCSによる検出下限の評価値	約0.03Bq/cm ²	30分間測定した場合
	約0.004Bq/cm ²	1日測定した場合
配管内面の汚染密度の推定値	約0.5Bq/cm²	

(4) 汚染の分布評価(二次的な汚染)(4/4)

④ 実施状況

NaIサーベイメータによるスクリーニング結果

- ・配管・機器等の399箇所について、NaIサーベイメータによるスクリーニングを実施した。
- ・最大線量は $0.44 \mu\text{Sv/h}$ であり、管理区域設定基準 1.3mSv/3カ月 ($\approx 2.6 \mu\text{Sv/h}$)と比較して十分に小さいことを確認した。



第1段階の汚染の分布結果を踏まえて、原子炉容器室等の放射化汚染が高い区域を除いては、合理的に達成可能な限り放射線業務従事者の被ばくを低減するために講じる安全対策を目的とした解体工事前の汚染の除去は必要がないことを確認した。このことを**廃止措置計画認可申請書「本文九 核燃料物質による汚染の除去」**に反映する。

可搬型Ge半導体検出器による測定

【2021年度実施済】

外部線量から内表面汚染密度への換算するには、核種の同定が必要のため、399か所のうち表面線量率が有意に上昇した配管・機器等25点及びシステムを代表する箇所、計60箇所について測定を実施。

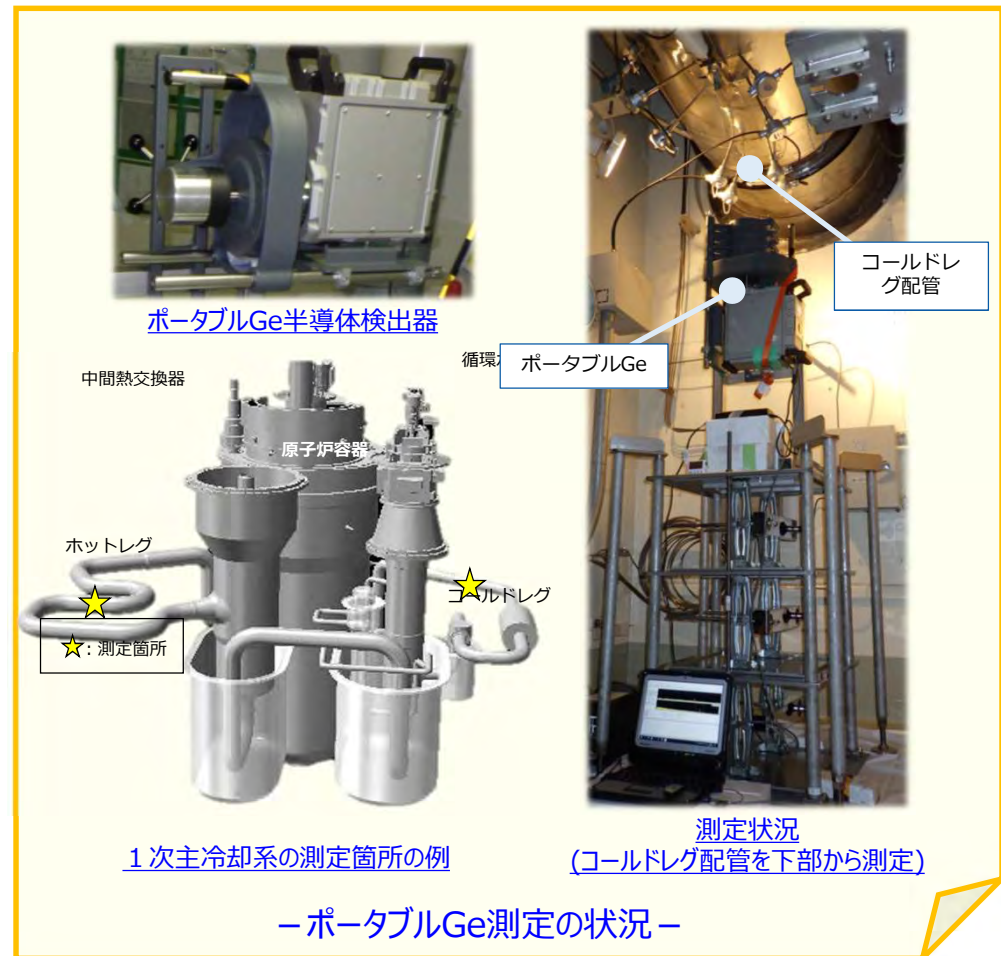


【今後実施】

シミュレーション計算にて検出効率を評価し、測定結果を汚染密度に換算する業務を実施。
二次的な汚染の汚染密度及び放射能濃度評価(試算)の実施。

【今後実施】

放射化汚染の放射能濃度分布計算(最終評価)の結果を踏まえて、汚染密度及び放射能濃度の最終評価の実施。



(5) 現在のもんじゅ内の汚染の分布状況

放射性ナトリウム機器(原子炉容器除く。)の表面線量率は、管理区域設定基準1.3mSv/3カ月(≒2.6 μSv/h)と比較して十分に小さく、生活空間の空間線量率と同程度である。

生活空間の空間線量率：0.01~1μSv/h

出典：環境省「放射線による健康影響等に関する統一
的な基礎資料(平成26年度版)」第1章 放射線の
基礎知識と健康影響

燃料取扱及び貯蔵設備(2020年度測定)表面線量率：0.03~0.44μSv/h

放射化汚染
・炉心から生体しゃへい壁までを解析評価中。2021年度から炉内構造物からのサンプリングの検討に着手。
・生体しゃへい壁をポータブルGeで2021年度測定、2022年度評価予定。

冷却材中(EVST：2020年7月測定)
FP：燃料破損実績なし
Na-22：検出限界未満
H-3：検出限界未満

冷却材中(1次系：2020年2月測定)
FP：燃料破損実績なし
Na-22：約3.0Bq/g
H-3：約4.0×10¹Bq/g

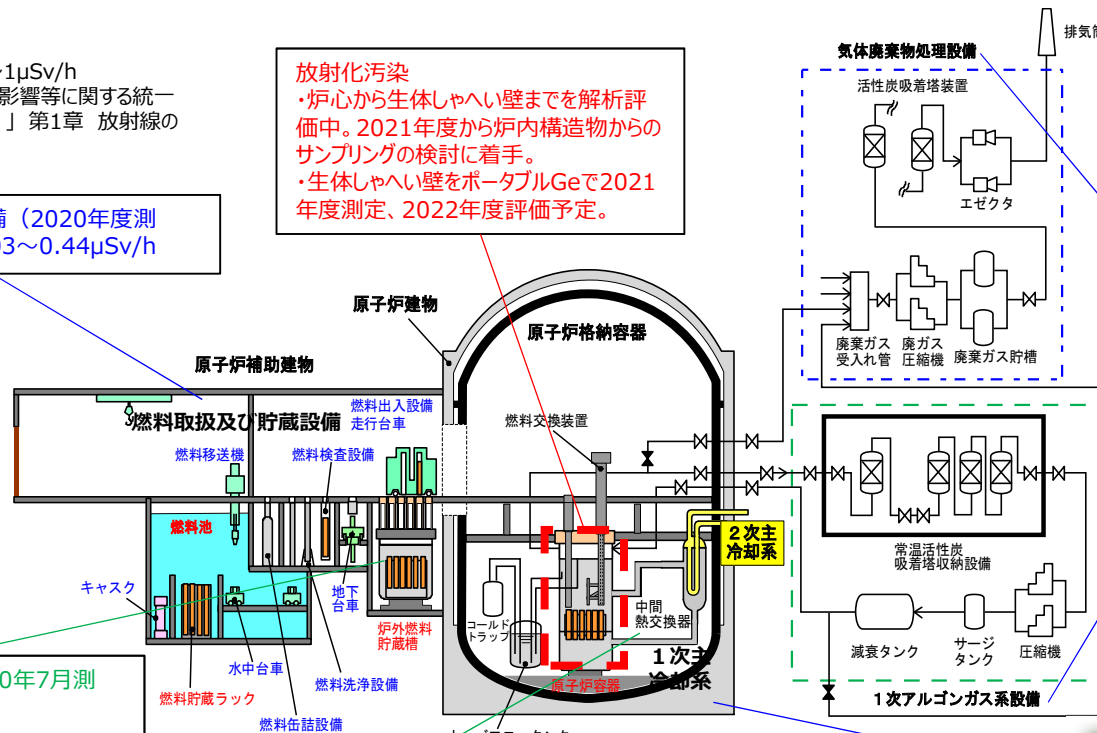
1次主冷却系(2020年度測定)表面線量率：0.01~0.24μSv/h

気体廃棄物処理系(2020年度測定)表面線量率：0.02~0.09μSv/h

1次アルゴンガス系減衰タンク

1次アルゴンガス系(2020年度測定)表面線量率：0.03~0.13μSv/h

1次主冷却系配管

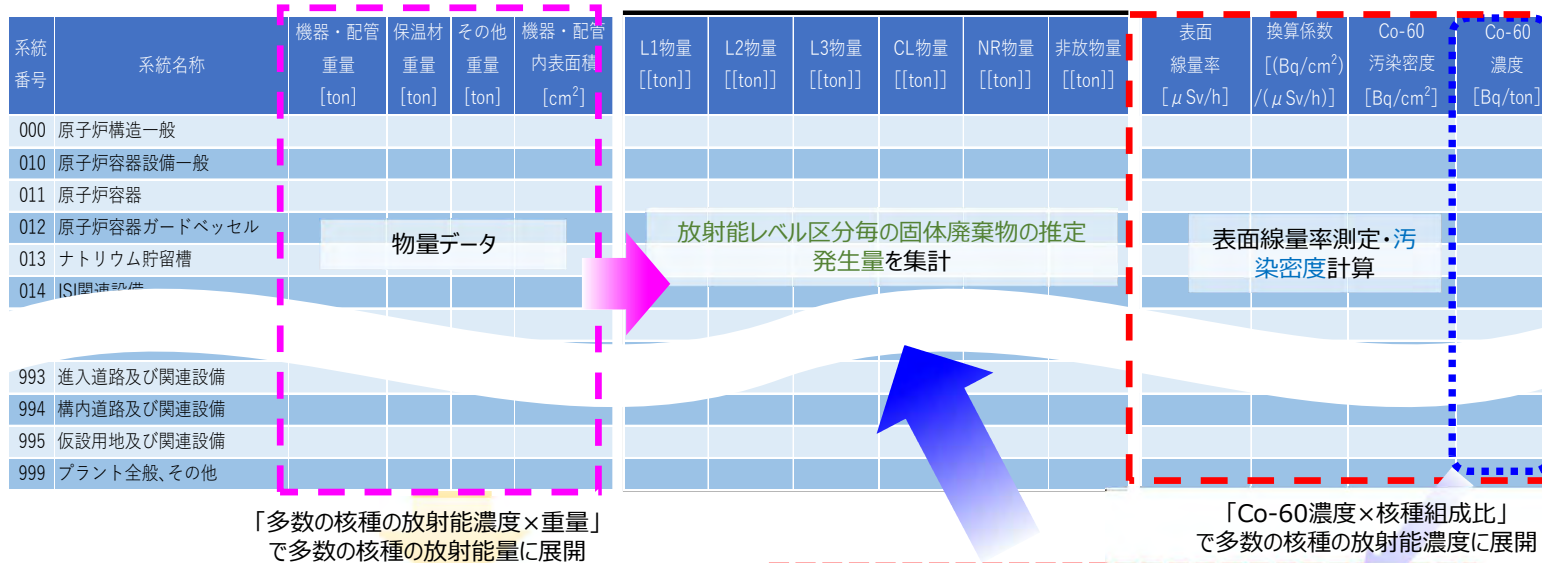


(6) 解体計画、廃棄物処理設備の整備計画への反映(1/3)

① 反映先へのインプットデータ(例)

放射化汚染、2次的な汚染とともに、放射能レベル区分毎の固体廃棄物の推定発生量が、廃棄物処理設備の仕様を検討するためのインプットデータとなる。

2次的な汚染の場合、系統別の汚染密度が、放射性ナトリウムの機器の解体工法を検討し解体計画を作成するにあたり被ばく評価を行うためのインプットデータとなる。



系統番号	系統名称	放射能 [Bq]					
		H-3	Be-10	C-14	...	Cm-242	Cm-244
010	原子炉容器設備一般	○×10 ⁰	○×10 ⁰	○×10 ⁰	...	○×10 ⁰	○×10 ⁰
011	原子炉容器	○×10 ⁰	○×10 ⁰	○×10 ⁰	...	○×10 ⁰	○×10 ⁰
012	原子炉容器ガードベッセル	○×10 ⁰	○×10 ⁰	○×10 ⁰	...	○×10 ⁰	○×10 ⁰
013	ナトリウム貯留槽	○×10 ⁰	○×10 ⁰	○×10 ⁰	...	○×10 ⁰	○×10 ⁰
994	構内道路及び関連設備	-	-	-	...	-	-
995	仮設用地及び関連設備	-	-	-	...	-	-
999	プラント全般、その他	-	-	-	...	-	-

系統別の放射能 (Bq)

系統番号	系統名称	放射能レベル区分	放射能濃度 [Bq/ton]					
			H-3	Be-10	C-14	...	Cm-242	Cm-244
010	原子炉容器設備一般	L3	○×10 ⁰	○×10 ⁰	○×10 ⁰	...	○×10 ⁰	○×10 ⁰
011	原子炉容器	L2	○×10 ⁰	○×10 ⁰	○×10 ⁰	...	○×10 ⁰	○×10 ⁰
012	原子炉容器ガードベッセル	L2	○×10 ⁰	○×10 ⁰	○×10 ⁰	...	○×10 ⁰	○×10 ⁰
013	ナトリウム貯留槽	L3	○×10 ⁰	○×10 ⁰	○×10 ⁰	...	○×10 ⁰	○×10 ⁰
994	構内道路及び関連設備	CL	○×10 ⁰	○×10 ⁰	○×10 ⁰	...	○×10 ⁰	○×10 ⁰
995	仮設用地及び関連設備	非放	-	-	-	...	-	-
999	プラント全般、その他	非放	-	-	-	...	-	-

系統別の放射能濃度 (Bq/ton)

放射化汚染、2次的な汚染、とともに、系統別の放射能濃度を算出する。このうち、放射化汚染の系統別の放射能濃度は、放射性ナトリウムの機器の解体工法を検討し解体計画を作成するにあたり被ばく評価を行うためのインプットデータとなる。

(6) 解体計画、廃棄物処理設備の整備計画への反映(2/3)

② 解体計画への反映

汚染の分布評価結果のうち、系統別の汚染密度及び放射能濃度のデータに基づいて、放射性ナトリウム機器の工事の手順及び状態の設定を含む解体工法を検討するために、被ばく評価を実施する。

設備解体に伴う被ばく評価項目(平常時)

1. 放射性気体廃棄物に起因する線量評価
 - (1) 放射性希ガス及び放射性ヨウ素の評価
 - (2) トリチウムの評価
 - (3) 汚染金属 (例; ナトリウムが付着した構造物) 切断時の放射性粉塵の評価
→ 全ての解体対象物についてそれぞれ計算を実施する。
2. 放射性液体廃棄物に起因する線量評価
 - (1) トリチウム以外の評価
 - (2) トリチウムの評価
3. スカイシャイン評価
固体廃棄物貯蔵庫からの線量評価

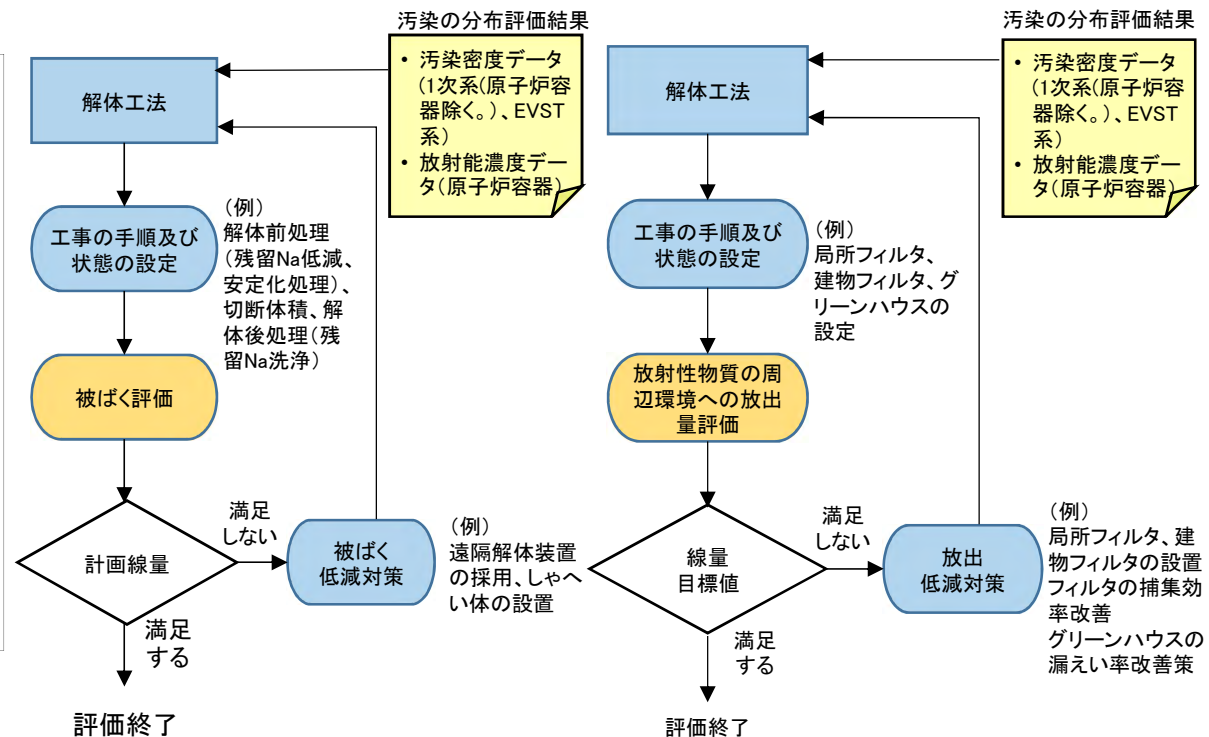
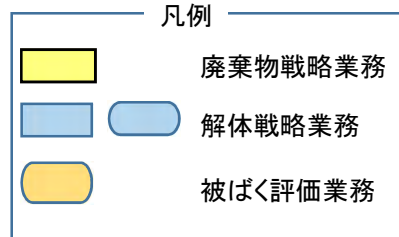


図 解体工事時における作業員被ばく評価のイメージ

図 解体工事時における周辺環境への放出量評価のイメージ

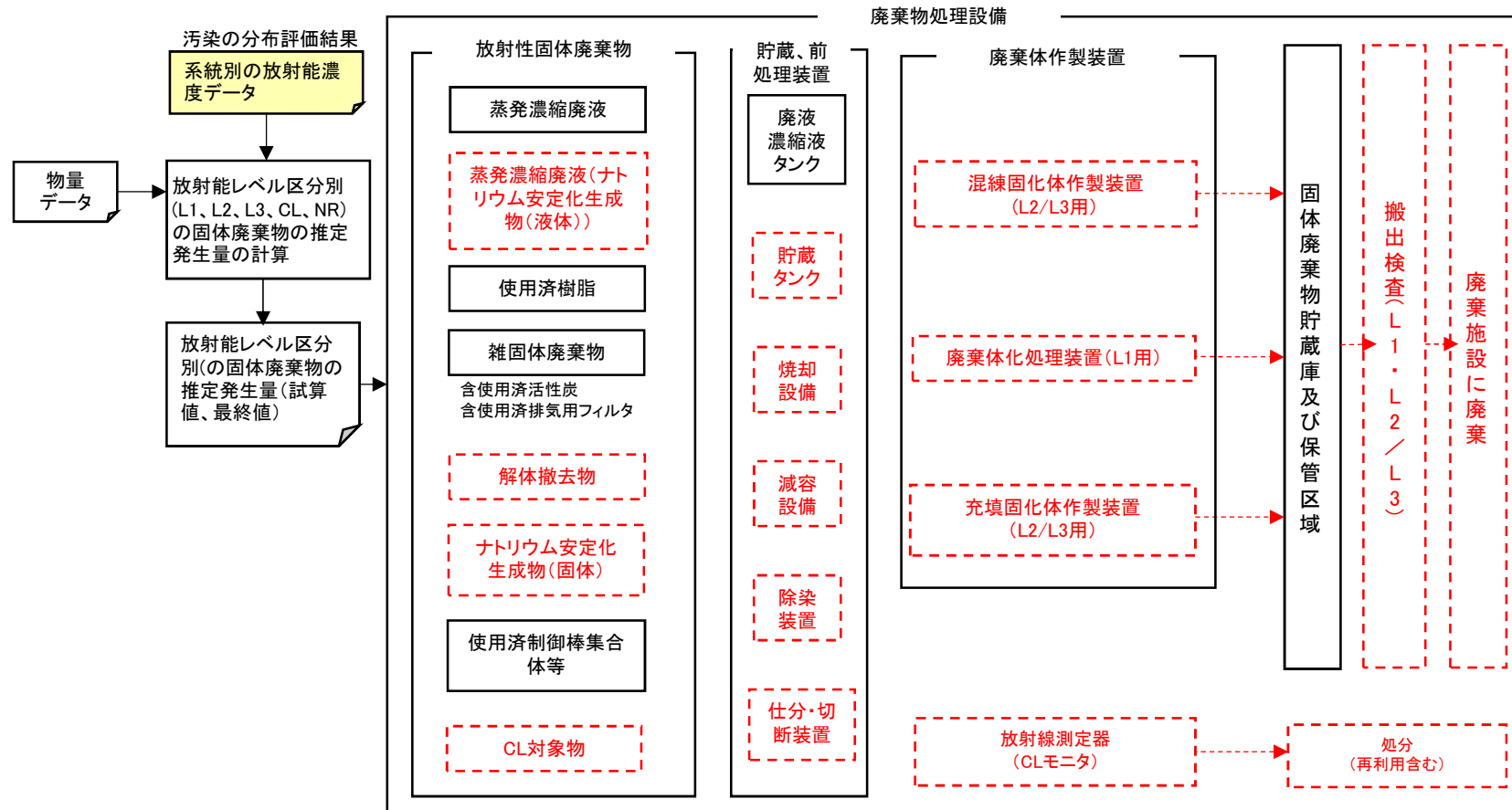
(6) 解体計画、廃棄物処理設備の整備計画への反映(3/3)

③ 廃棄物処理設備整備計画への反映

第3段階以降は解体に伴う放射性廃棄物が発生するため、廃棄物処理設備を適切に組み合わせて新設する必要がある。汚染の分布評価結果の系統別の放射能濃度のデータ、物量データに基づいて、放射能レベル区別の固体廃棄物の推定発生量を算出し、廃棄物処理設備の設計仕様の最適化を図る。

【凡例】

 第3段階で発生する廃棄物、新設する設備



- 汚染の分布評価におけるもんじゅの特徴(運転期間は250日と短期間であり、停止後保管期間が長いこと)を踏まえて、第3段階から実施する放射性ナトリウム機器の解体、解体に伴い発生する放射性廃棄物の処理・搬出の前までに、計画的に汚染の分布評価業務を実施し、解体計画への反映、廃棄物処理設備の整備計画への反映、互いに最適化するべく進めている。
- 第1段階の二次的な汚染の評価業務において、1次冷却系(原子炉容器除く。)及びEVST系全域をスクリーニング測定した結果、表面線量率は最大値で $0.44 \mu\text{Sv/h}$ であり、放射線管理区域の設定基準である $1.3\text{mSv}/3\text{カ月}$ ($\approx 2.6 \mu\text{Sv/h}$)と比較して十分に低い値である。この結果から機器・配管等の内面に残存している汚染による放射線量が十分に低いことを確認した。
- したがって、第1段階の汚染の分布結果を踏まえて、原子炉容器室等の放射化汚染が高い区域を除いては、合理的に達成可能な限り放射線業務従事者の被ばくを低減するために講じる安全対策を目的とした解体工事前の汚染の除去は必要がないことを確認した。このことを廃止措置計画認可申請書「本文九 核燃料物質による汚染の除去」に反映する。