



Japan Atomic Energy Agency

環境影響評価研究

廃止措置安全評価コードシステムの開発

日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門
安全研究センター

島田 太郎

平成27年度 安全研究センター報告会
平成28年1月22日
富士ソフト アキバプラザ

廃止措置とは

役割を終了した原子力施設を規制上の管理から解除するための措置

残存する放射性物質の低減:

- ・核燃料の譲渡
- ・放射能汚染の除去(除染)
- ・原子力施設の解体
- ・放射性廃棄物の廃棄

➡ 周辺公衆の被ばくのリスクを安全で合理的な水準に移行させる

廃止措置の現状(原子力発電所)

段階	名称	設置者	電気出力	炉型	期間
廃止措置済み	動力試験炉JPDR	JAEA	12.5MW	BWR	1985～1996年
廃止措置中	東海発電所	日本原電	166MW	黒鉛減速炭酸ガス冷却炉	1999～2026年(予定)
	ふげん	JAEA	165MW	重水減速軽水冷却炉	2008～2033年(予定)
	浜岡発電所1, 2	中部電力	540, 840 MW	BWR	2009～2036年(予定)
認可申請中	玄海発電所1	九州電力	559MW	PWR	2016～2043年(予定)

廃止措置計画認可申請準備中

関西電力・美浜1, 2号機(PWR)

中国電力・島根1号機(BWR)

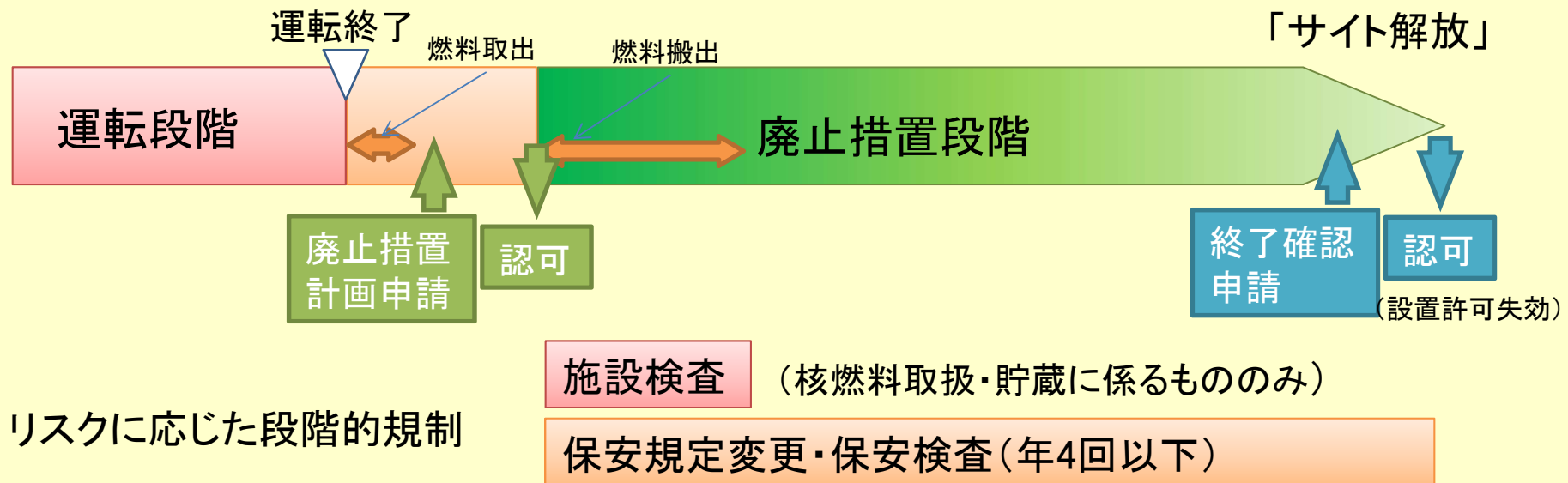
日本原電・敦賀1号機(BWR)

原子力施設の廃止措置の特徴と安全規制

原子力発電所の廃止措置の特徴

- 使用済核燃料が撤去されればリスクは大幅に減少するが、炉心周辺には多くの放射能が残存
- 25～30年程度の長期にわたるプロジェクト（主要な核種である ^{60}Co （半減期5.27年）の減衰を待つため、原子炉本体領域の解体に取り掛かるのは後半）
- 放射能を有する機器を除染・解体する際に放射能の一部が飛散、移行
- 大量に生じる解体物の一時保管

廃止措置の安全規制



廃止措置安全規制に応じた評価コードシステムの開発

廃止措置安全評価コードシステム

廃止措置の流れ



運転終了

申請

廃止措置計画

認可



解体作業

申請

廃止措置
終了確認

認可



動力試験炉
(JPDR)

規制終了
<サイト解放>

廃止措置計画の妥当性評価のための計算コード

RADO

運転履歴に基づき原子炉及びその周囲の放射化量を評価

原子炉周辺の中性子フラックスを解析して、放射化計算を実施

物量データ

作業計画

DecAssess

解体作業時の公衆、作業従事者の被ばく線量を評価

作業内容に応じて気中飛散量、液相移行量、一時保管解体物からの被ばくを評価

廃止措置終了確認の妥当性評価のための計算コード

PASCLR-Release

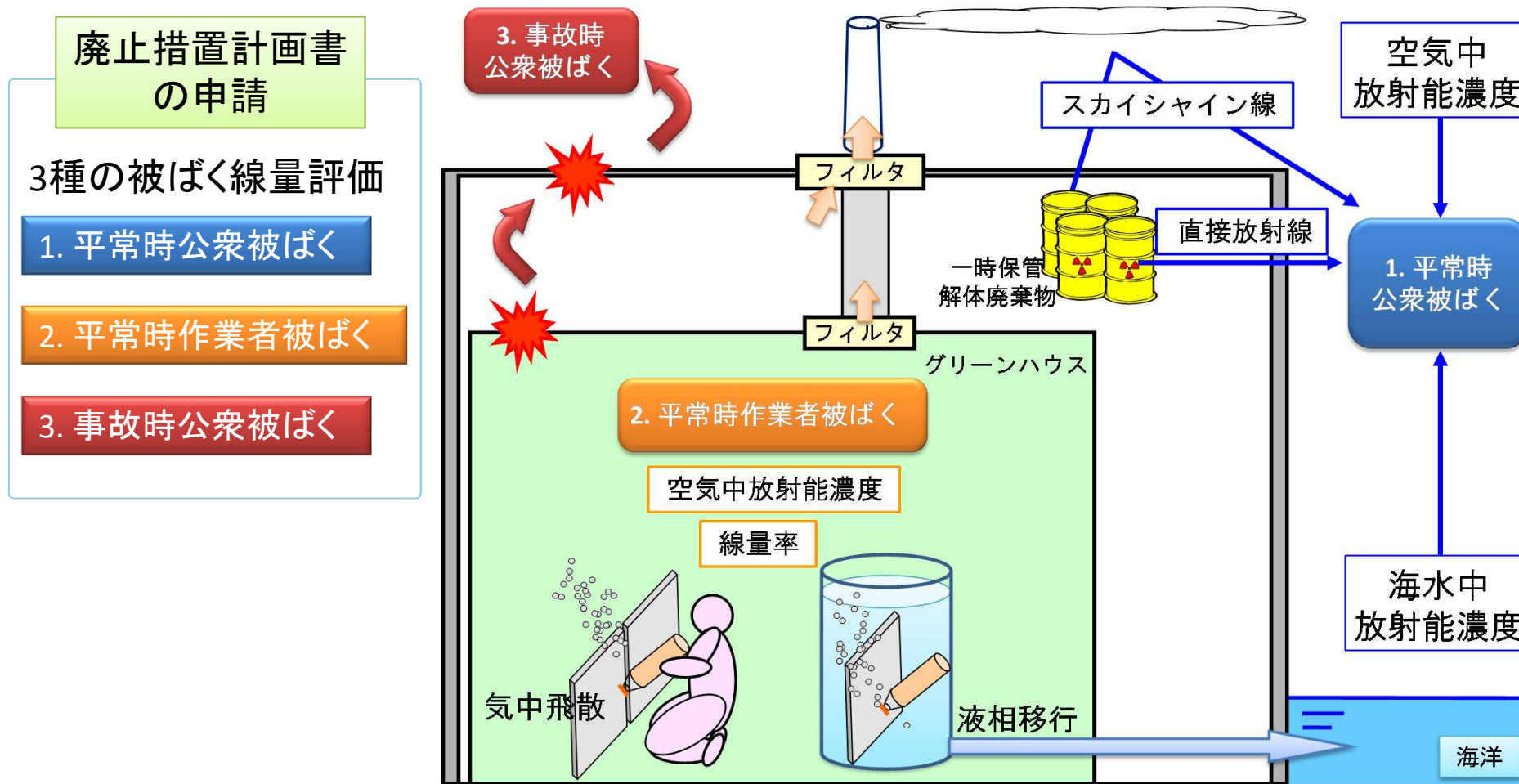
敷地解放後の公衆被ばく評価に基づいて基準濃度を算出

サイト解放後の敷地の放射能分布、利用形態に応じて、核種別の基準濃度を導出

ESRAD

サイト解放検認を支援するための放射能分布を推定

測定値から濃度分布を考慮した平均濃度が基準濃度を満足するか判定



- 廃止措置計画評価のため、3種の被ばく線量を作業内容に応じて評価する必要
- 事業者が申請する多様な廃止措置計画に規制側として幅広く対応できる必要

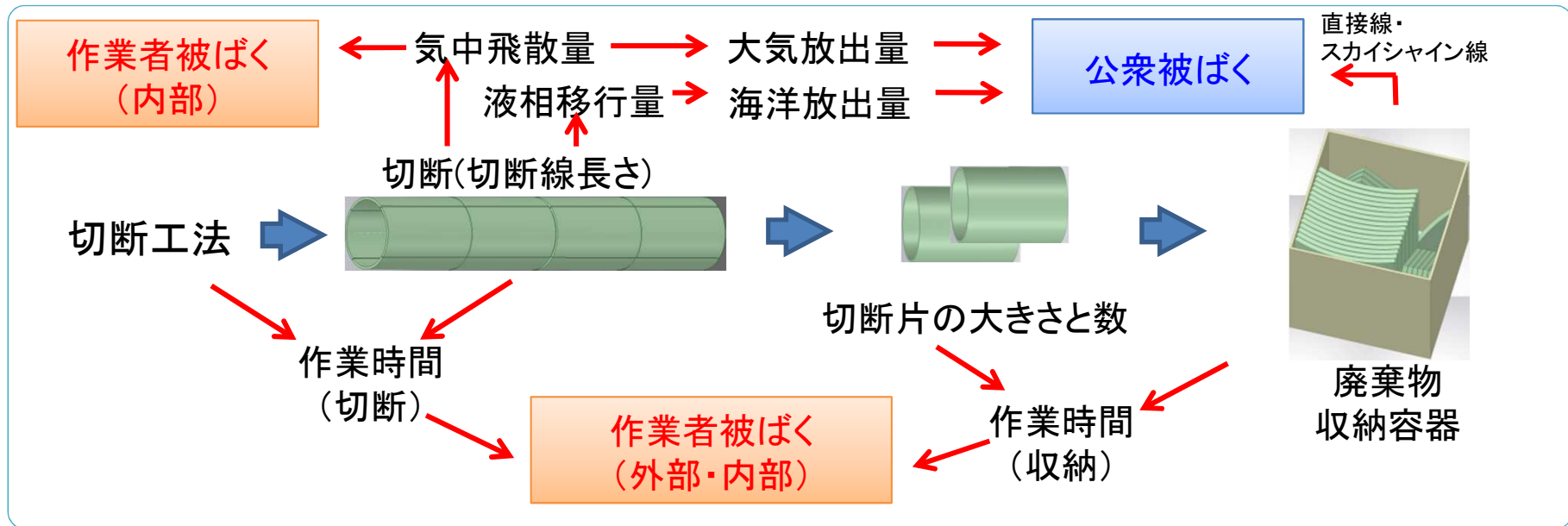
➡ 被ばく線量評価コードDecAssessの開発

従来の被ばく評価:

- ・独立して各被ばく線量を個別に評価
- ・残存放射能の大きい特定の機器を特定条件で評価した被ばく線量で代表

- 実際の解体作業: 解体作業条件の一つが変化すると他の評価パラメータも連動して変化し、各被ばく線量も連動して変化

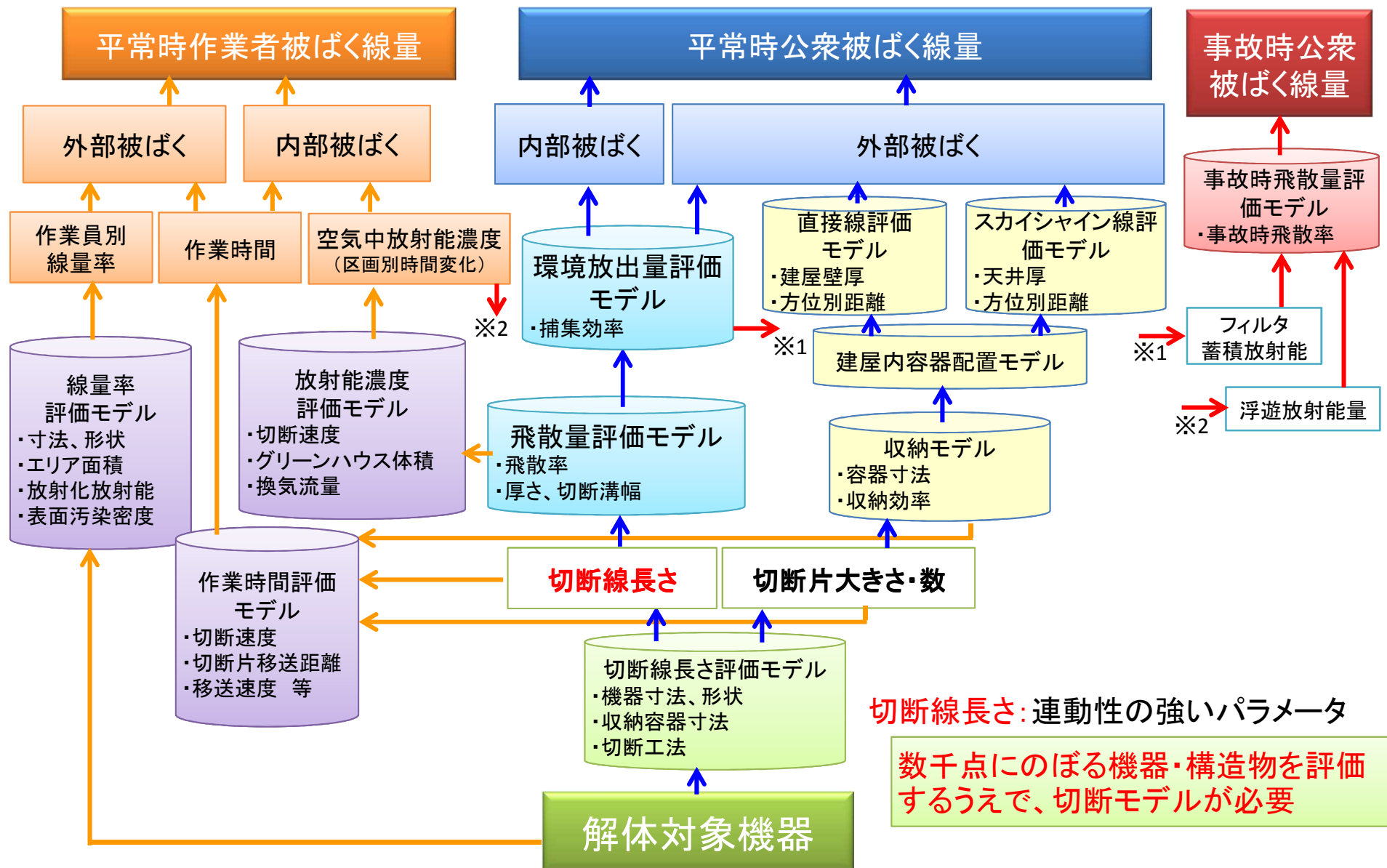
例えば、ある配管の切断を行う場合、



DecAssessの開発: 解体作業の多様性と解体対象機器の多様性に応じて、連動するパラメータの体系化

切断線長さ評価モデルを主軸とした評価体系の構築

DecAssessのモデル構造と評価体系(大気放出の例)



切断線長さ評価モデル

切断線長さ評価モデルの開発

- 切断対象機器を7つの基本形状に分類
- 基本形状ごとに切断線長さを定式化

例) No.3円管状大型機器の切断溝体積評価式

$$V_{11}^{m(3)} = V_0 - \left[S_a - d \cdot w_{1j} \cdot \text{ceil} \left(\frac{\pi D}{b \cdot m_w + w_{1j} + w_{2j} (m_w - 1)} \right) \right] \cdot \left[L - w_{1j} \cdot \text{int} \left(\frac{L}{L_1} \right) \right]$$

↑ 1次切断溝体積

↑ 機器体積

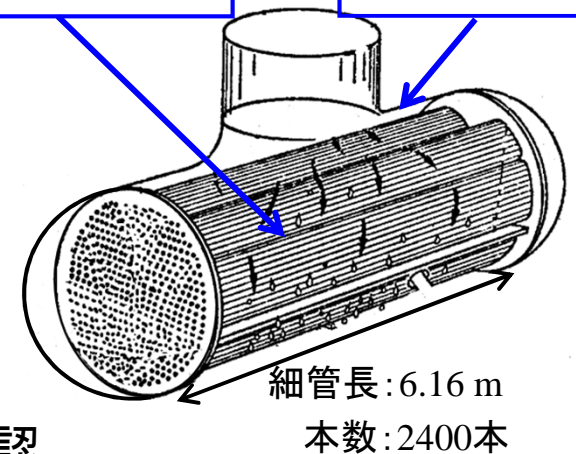
↑ 切断片の円環断面積

↑ 切断片長さ

No	基本形状	主な機器・構造物
1	直方体	ポンプ、コンクリートブロック
2	円管状配管	配管
3	円管状大型機器	炉心シュラウド、原子炉圧力容器胴部
4	円筒	タンク、モーター
5	平板	燃料プールライナー
6	角型配管	換気ダクト、チャンネルボックス
7	半球状球殻	圧力容器上蓋、下鏡

モデル化の例

主復水器 = 冷却細管 + シェル



➡ すべての機器の切断線長さが評価可能

JPDR主要機器に対する切断線長さ評価結果と実績値の比較

解体対象機器	基本形状	No	収納容器	評価結果	実績値
圧力容器胴部	円管状大型機器	3	1m ³ 容器	90.3 m	88.8 m
チャンネルボックス	角型配管	6	遮蔽容器	7.6 m	4.1 m
主復水器	円管状配管	2	1m ³ 容器	1673 m	1841 m
	円筒	4		462 m	433 m

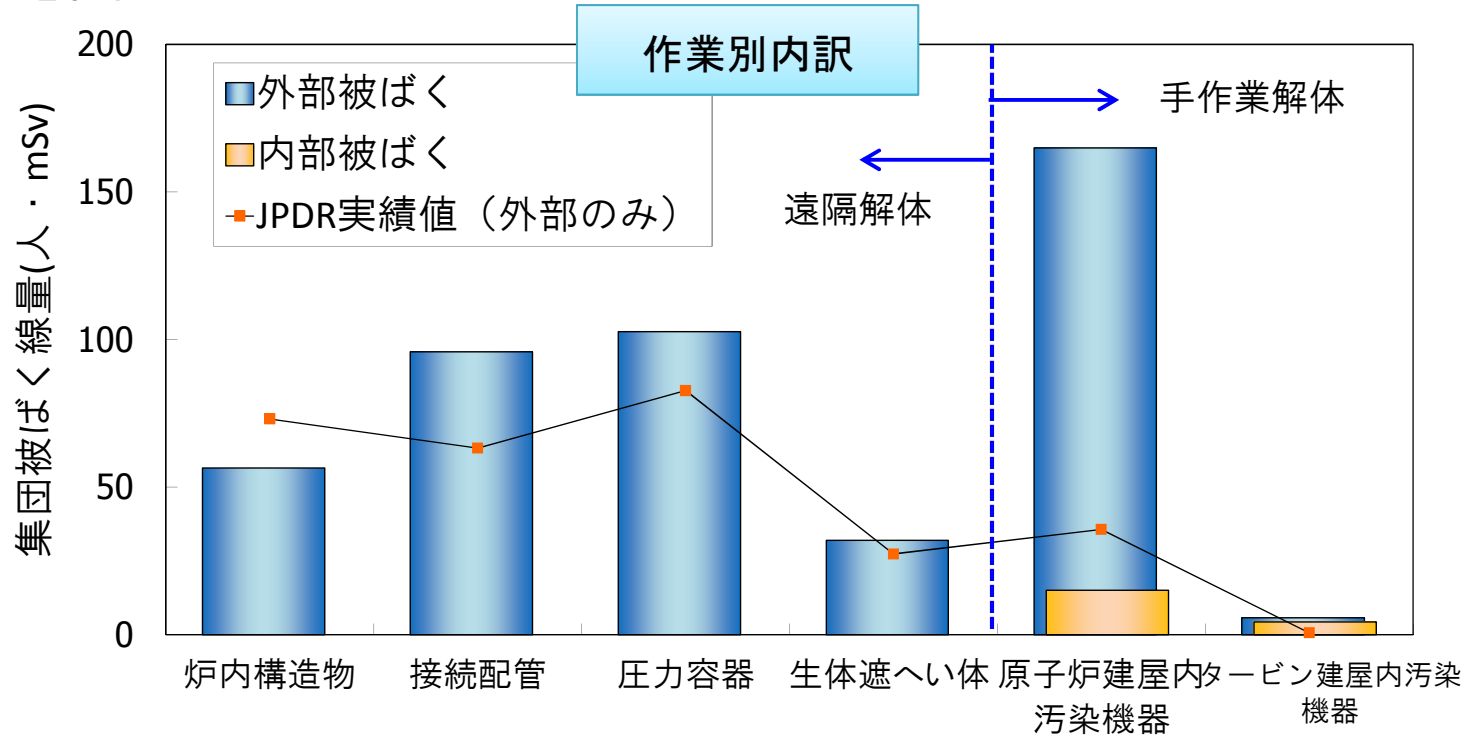
➡ 評価結果と実績値はよく一致し、評価モデルの妥当性を確認

JPDR解体での作業被ばくの計算値と実績値との比較

JPDR解体実地試験における作業被ばく線量の実績値との比較

▶ 評価の妥当性を検証

作業被ばく
集団被ばく線量



DecAssessによる予測値	521人・mSv
JPDR実績値	306人・mSv

- 予測値は実績値の1.7倍程度
- 原子炉建屋汚染機器の手作業による解体(同一配管系統の汚染密度を均一と仮定)を除きほぼ一致

廃止措置における作業被ばく線量を精度良く評価

作業員被ばく及び廃棄物発生量評価への取り組み

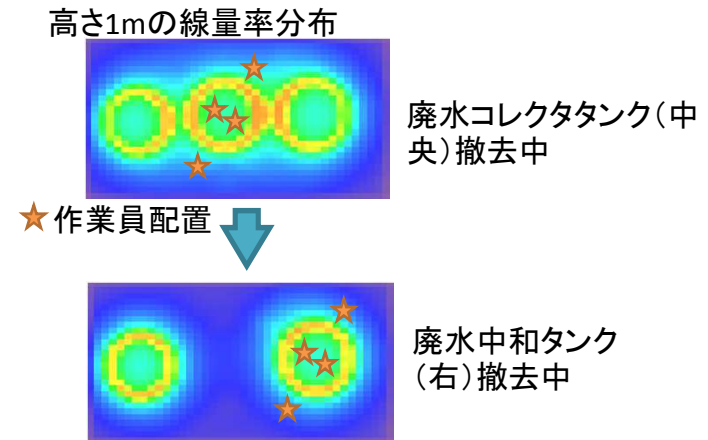
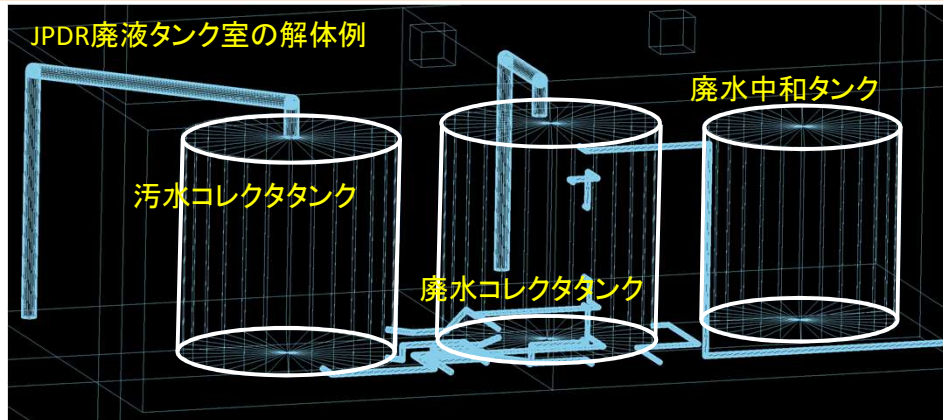
- 作業員被ばくについては基準値はないが、「廃止措置における作業方法、被ばく低減対策の妥当性を検討していること」が求められる
- 「放射性廃棄物の発生量を低減すること」も求められている

定量的な基準はない

解体前除染作業の有無、機器及び作業員の配置、機器の解体撤去順序、解体後除染の有無などを反映した作業員被ばく及びレベル区分別廃棄物発生量(二次廃棄物含む)評価が必要

評価モデルの開発

指定した除染と解体の順序に応じて3次元体系の機器及び線源配置を自動的に作成して、3次元の線量率分布を時系列で評価し、各時点での線量率分布上で各作業員の配置を割り当て



今後の予定

改良したDecAssessを用いて、解体作業の手順に応じた作業員被ばく線量及びレベル区分別放射性廃棄物発生量(二次廃棄物含む)の増減を評価し、妥当性を判断できる手法を整備

作業従事者の集団被ばく線量及び放射性廃棄物発生量低減化の観点から、安全規制上考慮すべき技術的事項を抽出

福島第一原子力発電所(1F)の廃止措置に向け、環境放出量及び作業員被ばくの観点から、DecAssessを適用した予察的解析を実施し、安全評価にあたっての課題を抽出予定

- 燃料デブリ取出し時
- 燃料デブリ取出し後の機器・構造物解体作業時

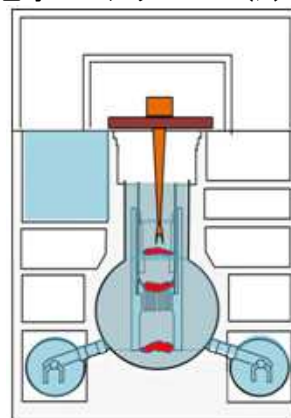
燃料デブリ取出し時

以下の評価パラメータを変動させた解析

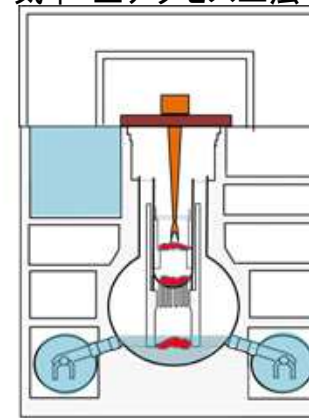
- 燃料デブリの散乱状況(インベントリ分布)
- 燃料デブリ破碎・把持時の飛散率、水中移行率、水中捕捉効果
- 建屋などの閉じ込め能力(漏えい率)

検討されている燃料デブリ取り出しの方法

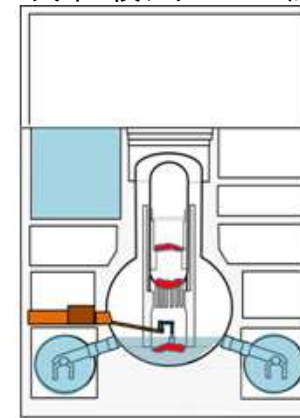
冠水-上アクセス工法



気中-上アクセス工法



気中-横アクセス工法



環境放出量及び作業員の被ばく線量に対する

- 評価パラメータの重要度分類
- 評価パラメータの不確かさ影響評価

ご清聴ありがとうございました

参考文献

- (1) Shimada, T. et al., Journal of Power and Energy System, Vol. 4, No.1, pp.40–53, 2010.
- (2) Shimada, T. and Sukegawa, T., Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 52, No.3, pp.396–415, 2015.

以下、補足資料

DecDoseとDecAssessの比較

		DecDose	DecAssess
要素モデル	切断モデル		高度化(接続機器の切断線考慮可能) 生体遮蔽体の切断溝体積を適切に評価
	放出量モデル		同じ
	公衆被ばく		同じ
	直接線スカイシャイン		高度化(収納容器配置方法)
	作業時間モデル		高度化(Cosmardモデル+不確かさ解析、)
	線量率モデル	作業員配置機器表面 30cm固定+エリア平均	高度化(機器配置を考慮した線量率3次元分布評価(モンテカルロ計算))
コードの構造	物量データ		高度化(物量データ管理システム)
	入出力		高度化(入出力の一体化)
	インターフェイス		高度化()

サイト解放検認支援のための放射能分布推定プログラム

サイト解放時には敷地の平均濃度が基準濃度以下であることを確認する必要がある

その測定・評価については、米国においてマニュアル(MARSSIM)が整備

統計的な手法を駆使して、サイト解放の濃度基準を満足することを確認

放射能濃度分布など空間的な相関は考慮せず、等間隔に区画した測定点での値のみで評価

しかし、敷地内の放射能濃度分布には空間的な相関が認められる

比較的濃度の高い部分が見つかり重点的に測定した場合、従来の方法では平均濃度が押し上げられてしまう

敷地内の放射能濃度分布を把握して、平均濃度を適切に評価できる手法が必要



クリギングの手法を用いた放射能分布推定プログラムESRADの開発

クリギングとは

少ない地点での測定濃度を基に非測定点での濃度を補間法で推定
→ 非測定点の濃度を測定濃度の1次結合で近似する

$$Z^*(\mathbf{X}_i) = \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} Z(\mathbf{X}_{\alpha})$$

測定濃度を基に2点間の相関を考慮して重み係数を決定する

$\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} = 1$ の条件下で真値と推定値の差の分散 $\text{var}(Z^*(\mathbf{x}_i))$ を最小化

$$\sum_{\beta=1}^n w_{\beta} \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) + \mu = \gamma(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_i) \quad (\alpha=1, 2, \dots, n) \quad (\mu: \text{ラグランジュの未定乗数})$$

特徴

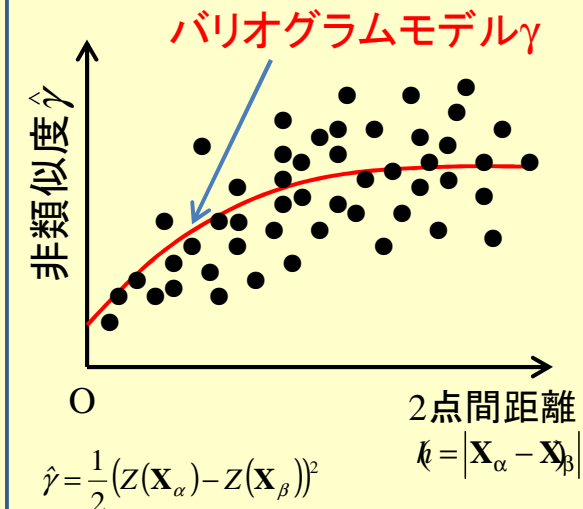
測定データを再現(一致)

推定結果の推定分散 σ_i^2 を算出



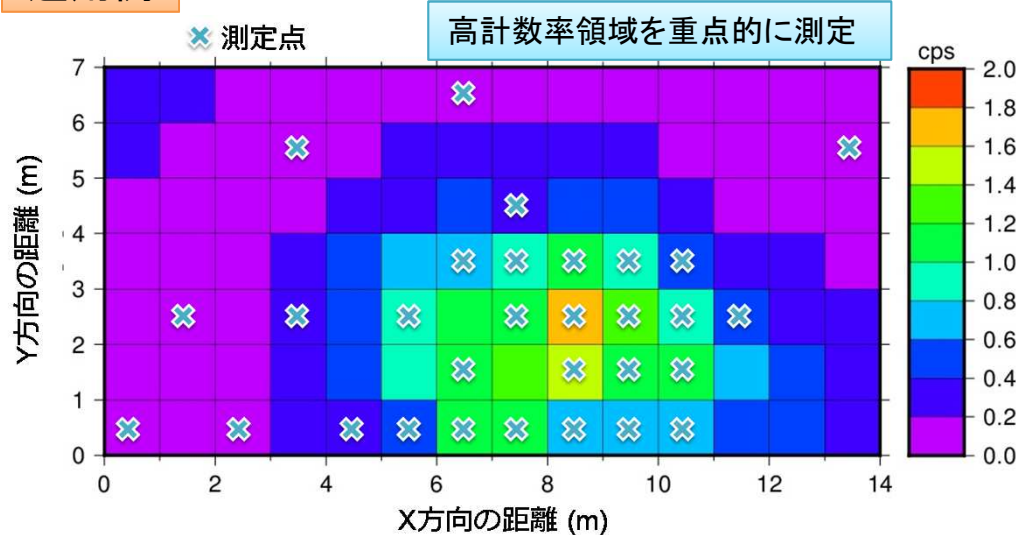
不確かさに基づく検討が可能

相関を示す概念図



適用例と必要最低限の測定点数算出手法

適用例 30点の測定データから他の68点の計数率を推定 (敷地表面にGe検出器を近づけCs-137ピーク計数率を取得)

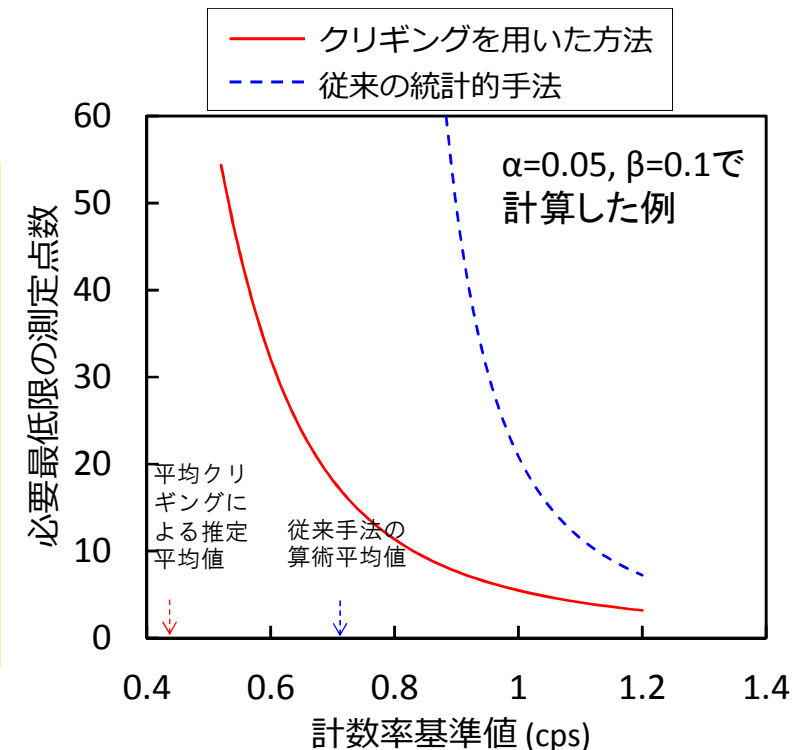


敷地全体の平均放射能濃度

手法	平均値 (cps)
従来の統計的手法	0.71
クリギングによる手法	0.41

必要最低限の測定点数の算出

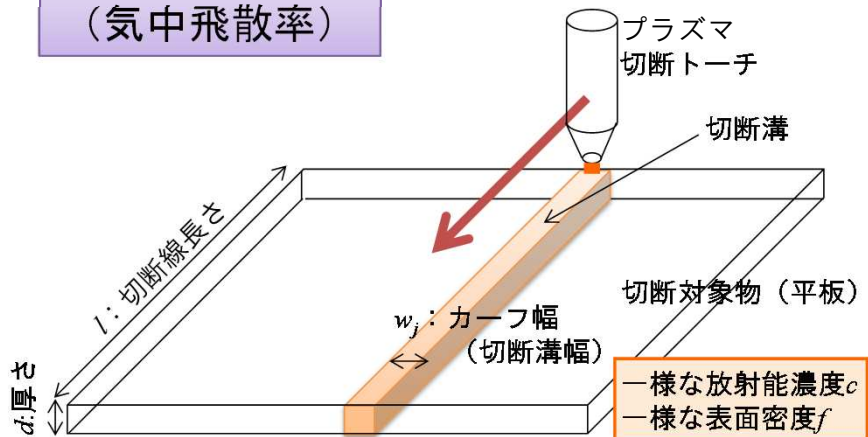
- 推定平均濃度には不確かさが含まれており、この不確かさにより、第 I 種の過誤 (基準濃度を超えているのに超えてないと判定すること: 過誤率 α) が発生しうる。
- この不確かさを測定点数の関数とした計算式を導出。
- 計数率基準値と推定平均値との差が小さくなると、基準値以下であることを満足させるためには、必要最低限の測定点数は増加する。
- 従来手法より必要測定点数が低減。



➡ 分布を反映した平均濃度を適切に評価可能

必要最低限の測定点数により、結果の妥当性判断に活用可能

飛散モデル (気中飛散率)



$$A = l \cdot d \cdot w_j \cdot c_i \cdot a_{ij} + l \cdot w_j \cdot f_i \cdot b_{ij}$$

↑ 気中飛散量 ↑ 放射化飛散率 ↑ 表面汚染飛散率

$$a_{ij} = \frac{\text{飛散した放射エネルギー}}{\text{切断溝中に含まれる放射エネルギー}}$$

$$b_{ij} = \frac{\text{飛散した放射エネルギー}}{\text{切断溝表面に含まれる放射エネルギー}}$$

放射性エアロゾルの飛散率が被ばく線量に大きな影響を及ぼす

課題

- 放射性エアロゾル飛散量評価のための信頼性ある飛散率データがない
- ➡ 実機配管を対象に実際の作業環境条件でプラズマ切断を行い、実態に即した飛散率を取得
- ➡ 排気フィルタに蓄積した全放射性エアロゾル量に基づき飛散率を評価して測定信頼性を確保

切断時の様子



切断後の汚染配管の例

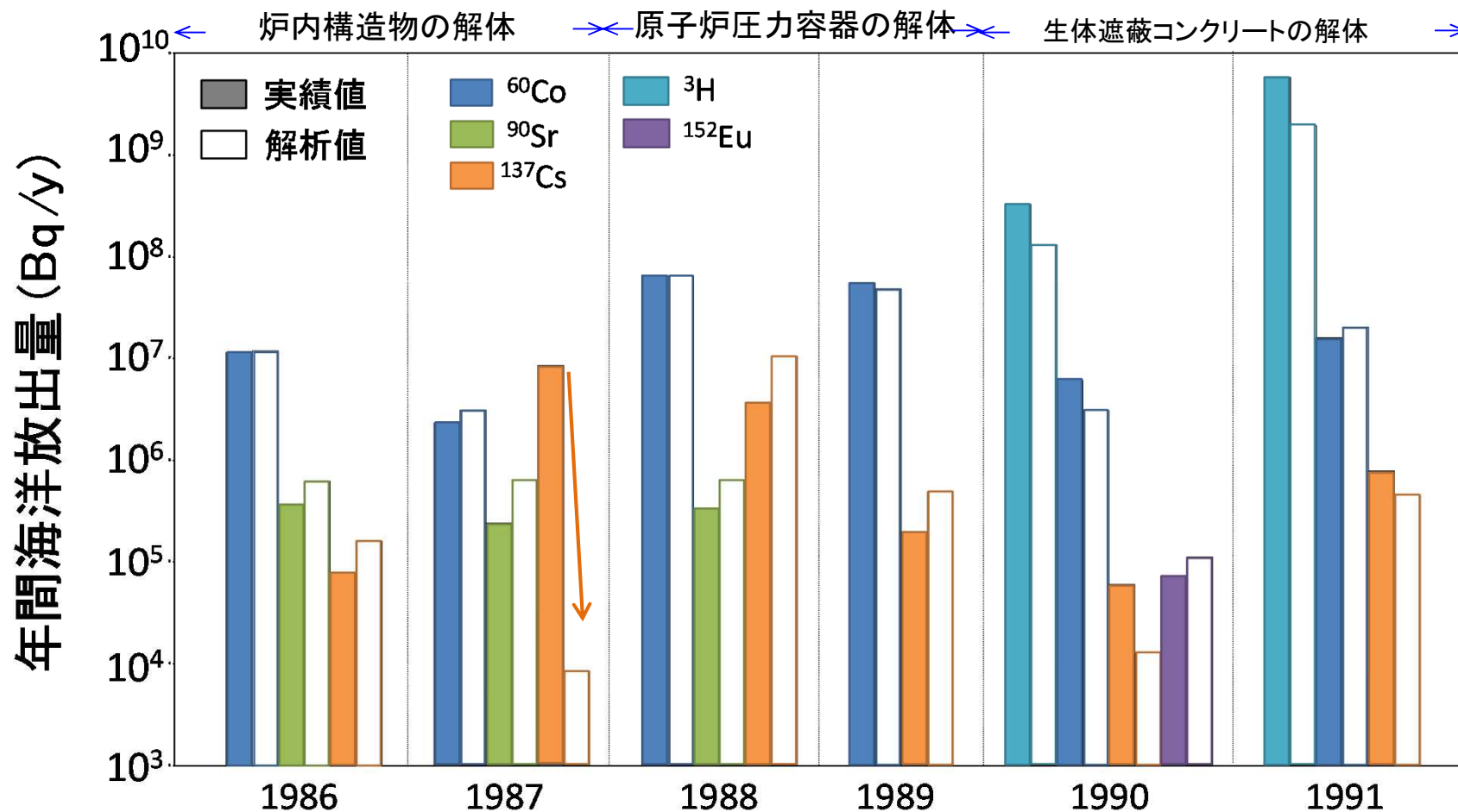


- プラズマ切断(100A)
- 切断溝幅を測定できるように5cm間隔で切断
- 粒子径20μm以下のエアロゾルは全量回収

試験結果: ⁶⁰Co飛散率(エアプラズマ切断)

	飛散率	対象配管
放射化飛散率 a	0.7%	JPDR強制循環系配管
表面汚染飛散率 b	18.2%	ふげん液体廃棄物処理系配管

JPDR解体における海洋放出量の計算値と実績値との比較



一部を除き、海洋への放射性物質放出量の計算値と実績値がほぼ一致

➡ 廃止措置時の被ばく線量評価を精度良く実施することが可能

廃止措置の各段階に必要な安全評価コードシステムを整備

・ 廃止措置計画段階

- ・解体作業時の公衆、作業従事者の被ばく線量評価コードDecAssess
多様な作業内容を反映して被ばく線量などを評価
- ・原子炉運転に伴う放射化量計算コードRADO
運転履歴に沿って中性子照射による放射化量を算出

今後、作業従事者の集団被ばく線量及び放射性廃棄物発生量低減化の観点から、安全規制上考慮すべき技術的事項を抽出

・ 廃止措置終了段階

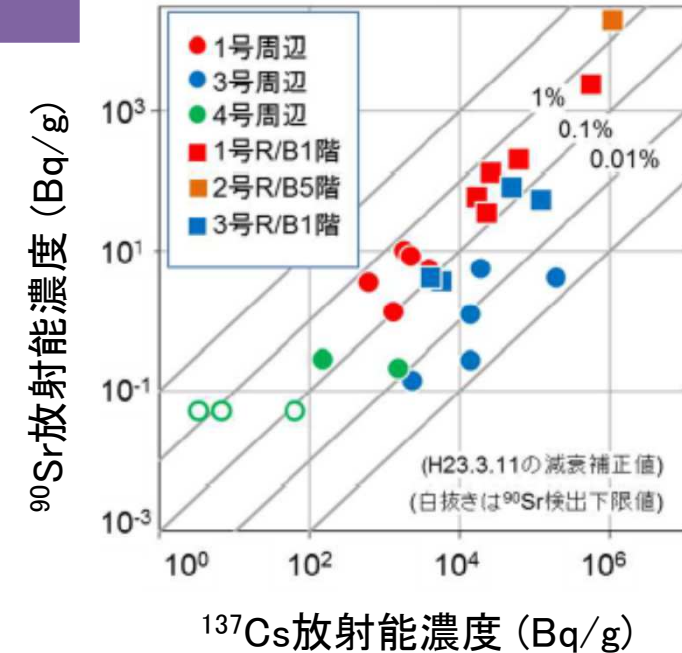
- ・敷地解放後の公衆被ばく評価に基づく基準濃度算出コード PASCLR-Release
サイト解放後の利用形態に応じて、核種別の基準濃度を導出
- ・サイト解放検認を支援するための放射能分布推定コード ESRAD
測定値から濃度分布を考慮した平均濃度が基準濃度を満足するか判定

廃止措置終了確認の濃度基準、及び、検認手法の技術的基準の整備に貢献するものと期待

2. 燃料デブリ取出し後の機器・構造物解体作業時

- 建屋内の機器・構造物は高度に汚染 (^{137}Cs は 10^6Bq/g 以上)
- ^{137}Cs は揮発性のため高い飛散率を持つとされるが、事故により表面に付着した機器・構造物の切断における飛散率データを取得した例はない
- 燃料デブリは100%すべてを回収することはできず、格納容器内の機器・構造物に付着 (燃料デブリが圧力容器内にとどまった TMI-2でのデブリ回収率99%)

がれきの放射能分析結果



第1回特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会 資料3-4より

Cs-137, Sr-90, 燃料デブリで汚染された機器を切断する際に飛散する核種の割合(飛散率)を工法別に系統的に取得する必要がある

- 1Fの廃止措置に向けた取り組みに対して、DecAssessは基本的な評価機能は有しているが、上記の評価パラメータについて、実際の作業条件に沿って系統的にデータを取得して、評価に反映させる必要がある

原子力発電所の廃止措置の特徴

- 核燃料は撤去され大幅にリスクは減少するが、炉心周辺にはいまだ多くの放射能が残存
- 25～30年程度の長期にわたるプロジェクト(主要な核種である ^{60}Co の減衰を待つため、原子炉本体領域の解体に取り掛かるのは20年後)
- 放射能を有する機器を除染・解体する際に放射能の一部が飛散、移行
- 大量に生じる解体物の一時保管

廃止措置計画申請時に求められる安全評価

- 三 廃止措置に伴う放射線被ばくの管理に関する説明書
- 四 廃止措置中の過失、機械又は装置の故障、地震、火災等があった場合に発生すると想定される事故の種類、程度、影響等に関する説明書
- 五 核燃料物質による汚染の分布とその評価方法に関する説明書
- 六 廃止措置期間中に機能を維持すべき原子炉施設及びその性能並びにその機能を維持すべき期間に関する説明書

廃止措置終了確認の認可基準

- ・廃止措置対象施設の敷地に係る土壌及び当該敷地に残存する施設について放射線による障害の防止の措置を必要としない状況にあること。