

# 事故に由来する廃棄物の管理と 放射性核種の汚染ふるまい

---

原子力災害環境影響評価論I  
2020年7月8日

日本原子力研究開発機構  
駒 義和

1. 廃炉と放射性廃棄物
  - 廃炉の状況
  - 放射性廃棄物の発生
2. 放射性廃棄物の管理
  - 廃棄物管理の方法
  - 通常の廃止措置における放射性廃棄物の発生
3. 放射性核種濃度の分析
  - 試料、核種、方法
  - 瓦礫類、汚染水、土壌、植物のデータ
4. 放射性核種の汚染ふるまい
  - 検討の方法
  - 土壌、瓦礫類、汚染水に係る汚染ふるまい
  - 汚染のモデル

# 1. 廃炉と放射性廃棄物



# 福島第一原子力発電所における事故の発生

- 2011年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生し、東京電力(株)福島第一原子力発電所に津波が到来し、原子炉が決定的な被害を受けた。
- 1号機は 12日 15:36、3号機は 14日 11:01、4号機は 15日 6時頃にそれぞれ水素爆発を起こした。2号機は爆発を免れたが、ブローアウトパネルが脱落した。いずれの原子炉からも放射性物質が漏洩、環境に拡散した。
- 5及び6号機は停止に成功した。
- 事故後、放射線量の低減、放射性核種の閉じ込めに関する対策として、汚染水の処理、使用済み燃料の取り出しが行われている。



2011年3月15日の1から4号機

# 1 から 4 号機の状況

#1

今後の燃料取り出しに向け、飛散防止を徹底しながら建屋内のガレキ撤去を実施中。<sup>\*1</sup>

#2

原子炉建屋上部を解体せず、南側に「燃料取り出し用構台」を設け、建屋内へアクセスし、燃料を搬出する工法に見直した。<sup>\*1</sup>

#3

2019年4月に、使用済燃料プールからの燃料取り出し作業を開始。<sup>\*1</sup>

#4

2014年12月に使用済燃料プールにあった全ての燃料を建屋外に取り出し。<sup>\*1</sup>



2020年2月13日の1から4号機

1/2号機共用排気筒

2019年8月より上半分(約60m)の解体を開始し、2020年5月に完了した。<sup>\*2</sup>



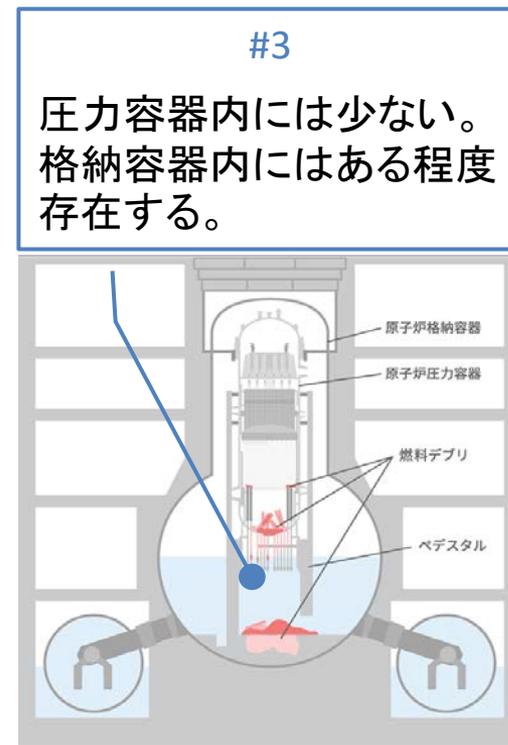
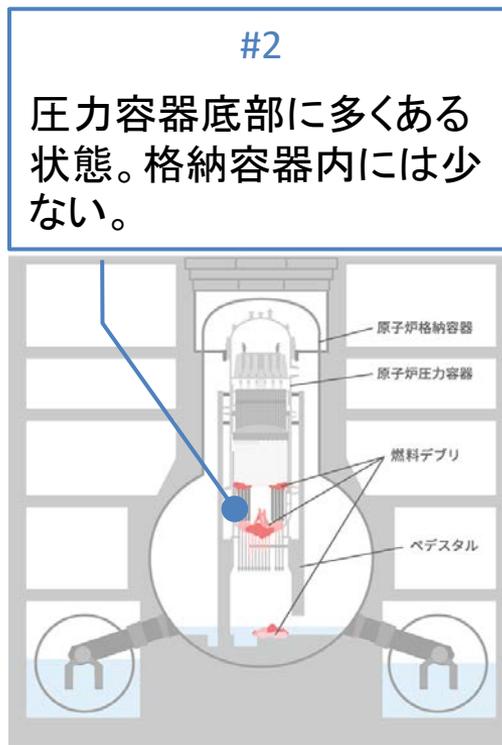
2020年4月7日の1/2号機共用排気筒<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> <https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/about/index-j.html>

<sup>\*2</sup> <https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/safety/>

# 原子炉内部の損傷した燃料の状態

- 2号機での試験的取り出しに向け、研究開発とその成果を現場適用するためのエンジニアリングを進め、燃料デブリ取出設備(アクセス装置、回収装置等)の製作・設置を進める。原子炉格納容器(PCV)内部調査を取り出しと合わせて実施する。<sup>\*1</sup>



炉心・格納容器内の燃料デブリ分布の推定<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup>東京電力ホールディングス株式会社, “廃炉中長期実行プラン2020,” “2020年3月27日.

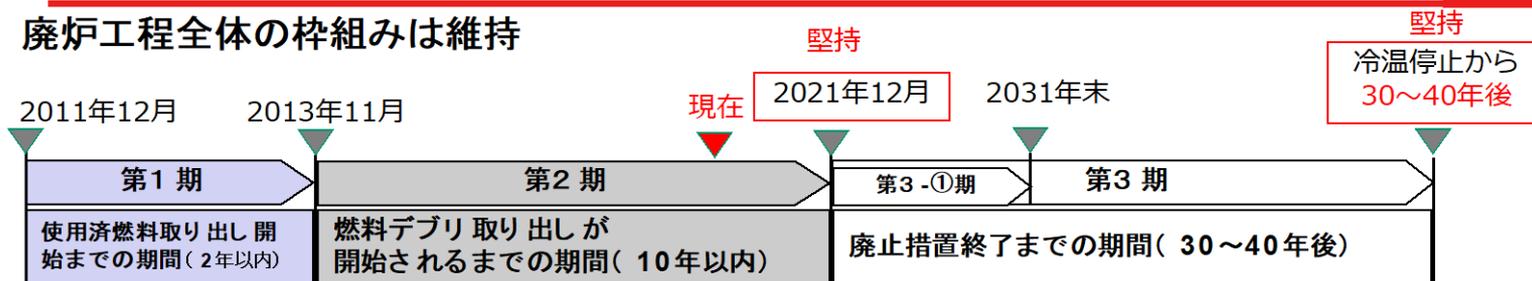
<sup>\*2</sup> <https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/retrieval/index-j.html>

# 廃炉のロードマップ

## 改訂版中長期ロードマップの目標工程(マイルストーン)

27

廃炉工程全体の枠組みは維持



### 主な目標工程

		現行	改訂
汚染水対策	汚染水発生量を150m <sup>3</sup> /日程度に抑制	2020年内	2020年内
	<u>汚染水発生量を100m<sup>3</sup>/日以下に抑制</u>	-	<u>2025年内</u> 新設
滞留水処理	建屋内滞留水処理完了※	2020年内	2020年内(※)
	<u>原子炉建屋滞留水を2020年末の半分程度に低減</u>	-	<u>2022年度~2024年度</u> 新設
燃料取り出し	<u>1~6号機燃料取り出しの完了</u>	-	<u>2031年内</u> 新設
	<u>1号機大型カバーの設置完了</u>	-	<u>2023年度頃</u> 新設
	1号機燃料取り出しの開始	2023年度目処	<u>2027年度~2028年度</u> 見直し
	2号機燃料取り出しの開始	2023年度目処	<u>2024年度~2026年度</u> 見直し
		安全確保・飛散防止対策のため工法変更	
燃料デブリ取り出し	初号機の燃料デブリ取り出しの開始 <u>(2号機から着手。段階的に取り出し規模を拡大)</u>	2021年内	2021年内
廃棄物対策	処理・処分の方策とその安全性に関する技術的な見直し	2021年度頃	2021年度頃
	<u>ガレキ等の屋外一時保管解消</u>	-	<u>2028年度内</u> 新設

※ 1~3号機原子炉建屋、プロセス主建屋、高温焼却屋を除く。

【出所】廃炉・汚染水対策関係関係等会議資料(2019.12.27)



©Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. All Rights Reserved.

# 汚染物・廃棄物の発生

- 東京電力(株)福島第一原子力発電所では、事故とその後の対応に伴い、多種・多量の汚染物・廃棄物が発生した。
- 廃止措置等に向けた取り組みが進むとともに、汚染物・廃棄物は継続して発生し、保管されている。

瓦礫類等の管理状況(4月30日)\*1

廃棄物	分類	保管量
瓦礫類	固体廃棄物貯蔵庫	22,200 m <sup>3</sup>
	覆土式一時保管施設、仮設保管設備、容器 (1-30 mSv/h)	17,900 m <sup>3</sup>
	シート養生 (0.1-1 mSv/h)	42,700 m <sup>3</sup>
	屋外集積 (<0.1mSv/h)	211,000 m <sup>3</sup>
伐採木	屋外集積 (幹・根・枝・葉)	97,000 m <sup>3</sup>
	一時保管槽 (枝・葉)	37,300 m <sup>3</sup>
保護衣	屋外集積 (容器)	44,100 m <sup>3</sup>

水処理二次廃棄物の管理状況(5月7日)\*1

種類	保管量
セシウム吸着装置使用済ベッセル	779
第二セシウム吸着装置使用済ベッセル	230
多核種除去設備等保管容器	3,445
高性能多核種除去設備使用済ベッセル	74
多核種除去設備処理カラム	17
モバイル式処理装置等使用済ベッセル及びフィルタ類	212
廃スラッジ	417 m <sup>3</sup>



\*1 東京電力ホールディングス株式会社, 瓦礫類・伐採木・使用済保護衣等の管理状況, 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第78回), 2020年5月28日.

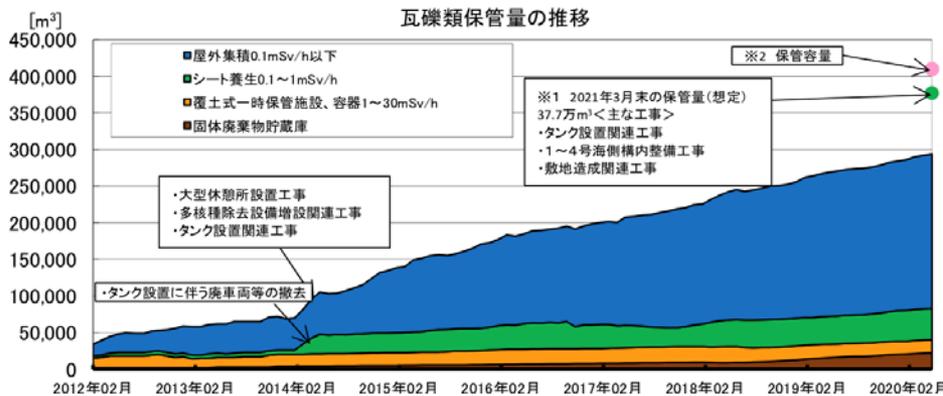
# 瓦礫類と伐採木の発生と保管

## ● 瓦礫類

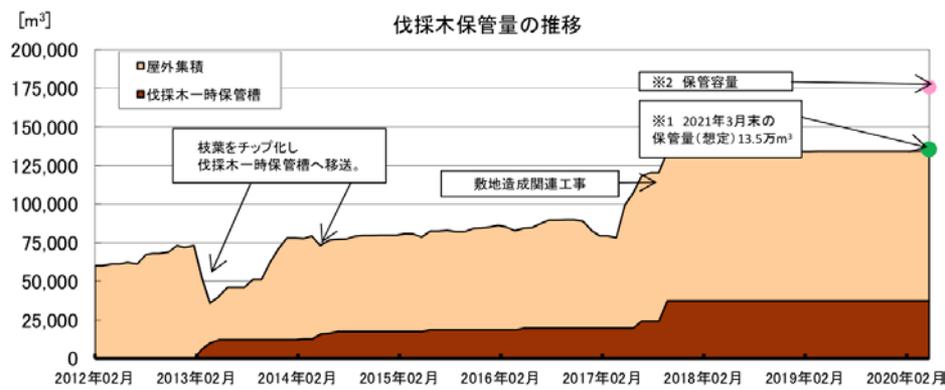
- 大規模な工事が継続して行われており、増大している。線量率により分類、保管されている。
- 低線量率の物が占める割合が大きい。また、屋外集積 ( $\leq 0.1$  mSv/h)、固体廃棄物貯蔵庫 ( $> 30$  mSv/h) の保管量が増大している。

## ● 伐採木

- 設備や施設の設置に伴い、樹木が伐採されている。
- 減容のため枝葉はチップ化され、また、防火を考慮した保管がなされている。



瓦礫類



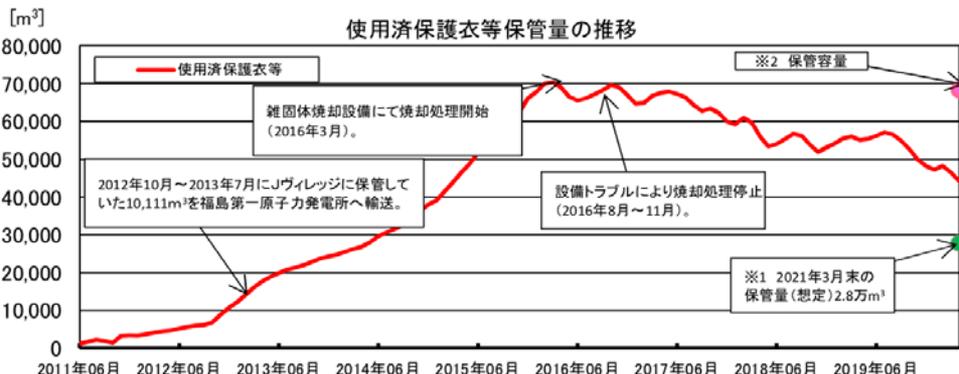
伐採木

保管量の推移\*1

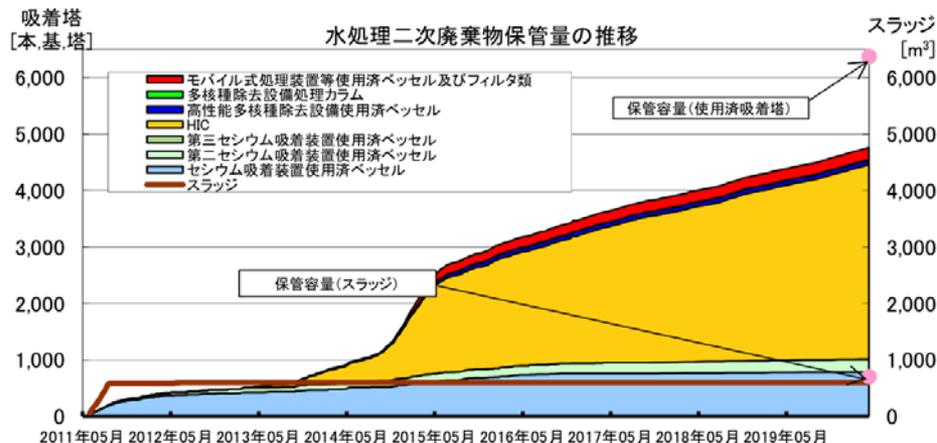
\*1 東京電力ホールディングス株式会社, 瓦礫類・伐採木・使用済保護衣等の管理状況, 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第78回), 2020年5月28日.

# 使用済保護衣と水処理二次廃棄物の発生と保管

- 使用済保護衣
  - 作業者が使用した保護衣は従来保管されていたが、2016年3月より焼却処理が始められた。
  - 処理を継続し、徐々に低減する見込みである。
- 水処理二次廃棄物
  - 滞留水から放射性核種を除去する処理に伴い、二次廃棄物が発生する。セシウム吸着のベッセル(ゼオライト等を内蔵する)、多核種除去設備のスラリー・吸着材(高性能容器 HIC; High integrity container)の寄与が大きい。



使用済保護衣等



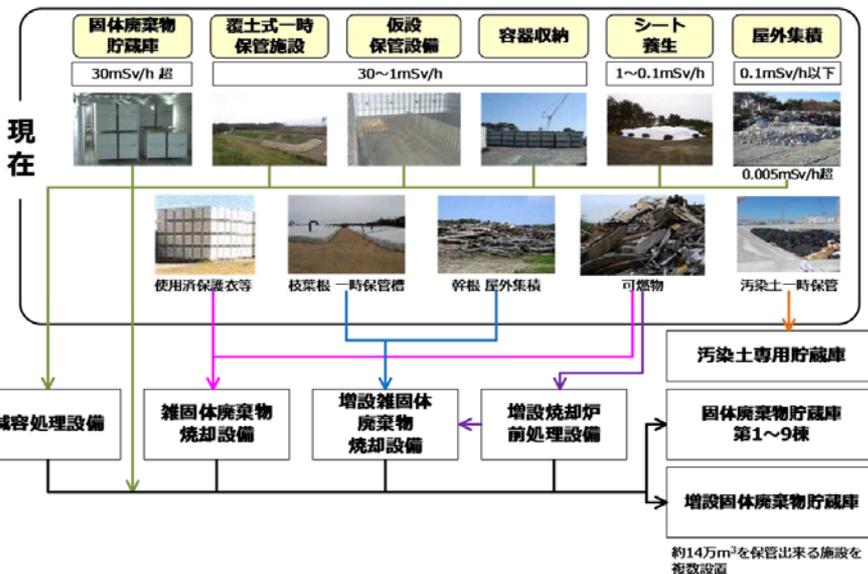
水処理二次廃棄物

保管量の推移\*1

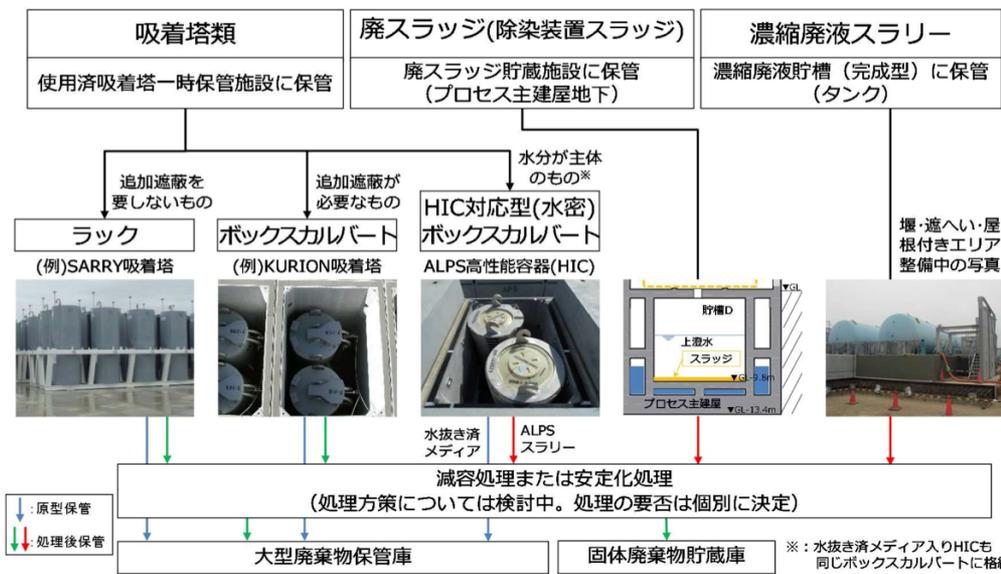
\*1 東京電力ホールディングス株式会社, 瓦礫類・伐採木・使用済保護衣等の管理状況, 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議(第78回), 2020年5月28日.

# 汚染物・廃棄物の保管管理方法

- 汚染物・廃棄物を一時的に保管する場所を解消するため、その性状に合わせた減容、焼却、安定化等が施されるとともに、保管設備等が整備される。
- 減容に関し、使用済保護衣、伐採木、その他可燃物等の増設雑固体廃棄物焼却設備、金属・コンクリートの減容処理設備が計画されている。
- 保管に関し、固体廃棄物貯蔵庫(第9棟、増設)、大型保管庫が計画されている。



瓦礫等



水処理二次廃棄物

## 保管管理の計画\*1

\*1 東京電力ホールディングス株式会社, 東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の固体廃棄物の保管管理計画, 2019年6月27日.





# 廃炉に係る経済的負担

## 4. 連結特別損益

5

(単位: 億円)

	2020年3月期	2019年3月期	比較
※1 特別利益	4,149	1,598	2,551
原賠・廃炉等支援機構 資金交付金	1,016	1,598	△581
持分変動利益	1,997	-	1,997
災害損失引当金戻入額	1,135	-	1,135
※2 特別損失	6,093	1,780	4,313
財産偶発損	3	-	3
災害特別損失	3,949	269	3,679
原子力損害賠償費	1,079	1,510	△431
福島第二廃止損失	956	-	956
減損損失	105	-	105
特別損益	△1,943	△182	△1,761

### ※1 特別利益の概要

◆原賠・廃炉等支援機構資金交付金

2020年3月30日に資金援助額変更認定申請

◆持分変動利益

JERAへの事業分割承継によるもの

◆災害損失引当金戻入額

過去に計上した災害損失引当金のうち、福島第二原子力発電所に係る額を廃炉決定により取崩したもの

### ※2 特別損失の概要

◆財産偶発損

台風15、19、21号による滅失資産の簿価相当額を計上したもの

◆災害特別損失(※3)

東北地方太平洋沖地震により被災した資産の復旧等に要する費用の見積り増や、台風15、19、21号により被災した資産の復旧等に要する費用を計上したもの

◆原子力損害賠償費

出荷制限指示等による損害や風評被害等の見積り増など

◆福島第二廃止損失

廃炉決定により、設備や核燃料等を損失処理したもの

◆減損損失(※3)

将来の投資回収が見込めない固定資産について損失を計上したもの

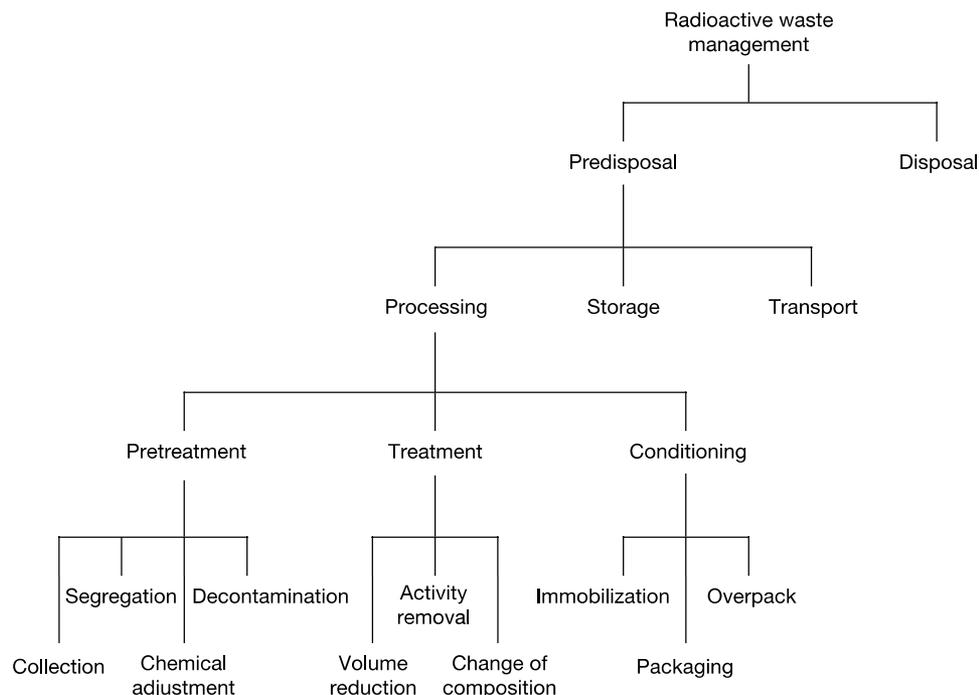
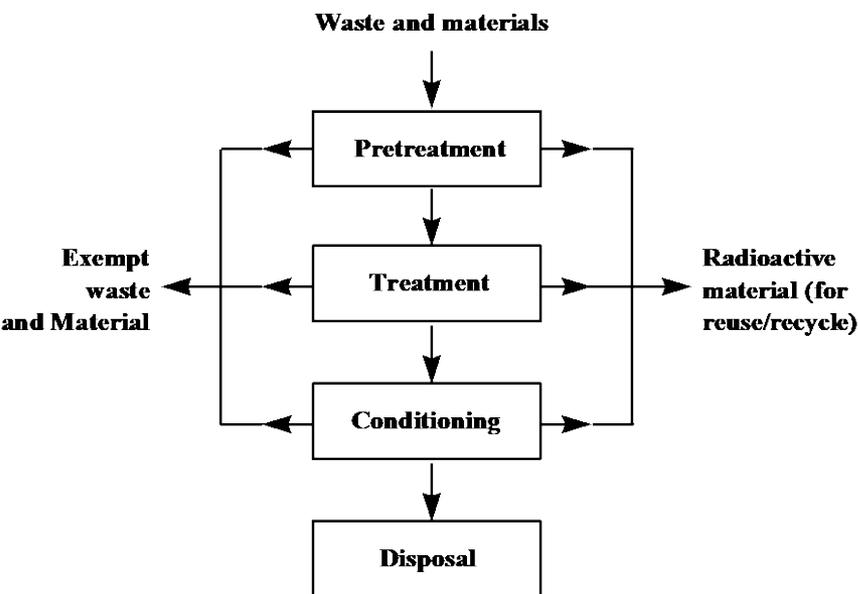
(※3)・・・3月30日公表の「2019年度連結業績予想」から大きな金額の変動があったため、次スライドで説明

## 2. 放射性廃棄物の管理



# 放射性廃棄物の段階的な管理

- 廃棄物管理 (waste management) は、前処理 (pretreatment)、処理 (treatment, conditioning)、処分 (disposal) などを段階的に行う。
- 原子力事故に伴う廃棄物は、種類や性状が通常の場合と異なるために、多くの場合、研究開発の必要がある。



放射性廃棄物管理の段階\*1

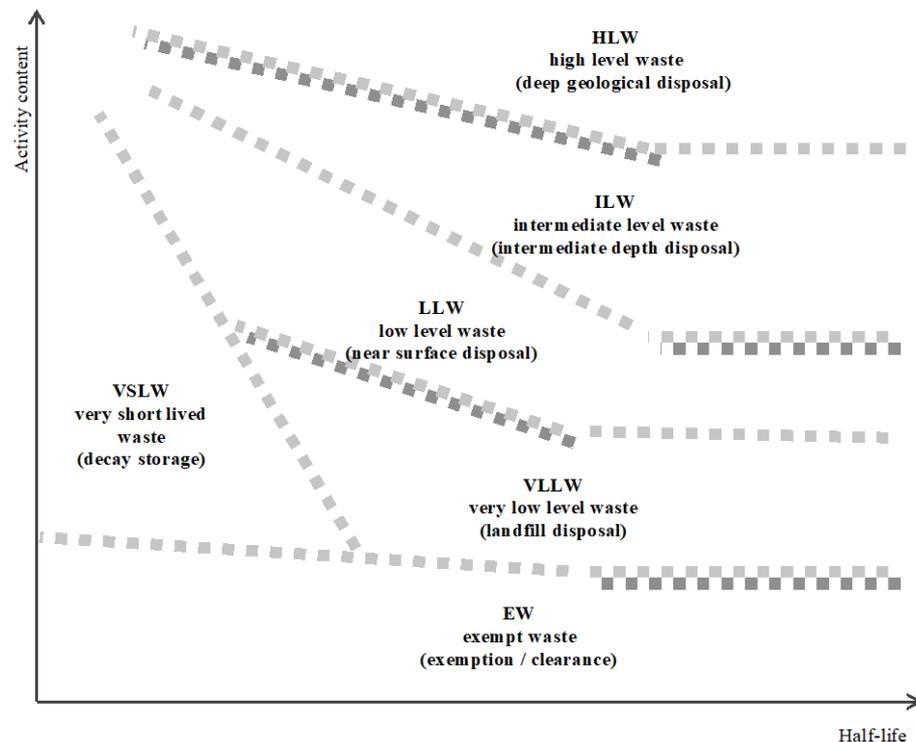
放射性廃棄物管理の構造\*2

\*1 Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals, International Atomic Energy Agency, Safety Series No. 111-F (1995).

\*2 IAEA Safety Glossary 2007 Edition.

# 放射性廃棄物の分類

- 放射性廃棄物の分類において、放射能量 activity content (濃度 activity concentration、比放射能 specific activity、全放射能 total activity) は重要な尺度である。
- 一般に、放射能量の多い順に、高 high、中 intermediate、低 low、極低 very low レベル廃棄物と分類される。
- 放射性核種の半減期により分類の基準は変化する。
  - 長い半減期の核種は潜在的な危険性が大きいとみなされる。

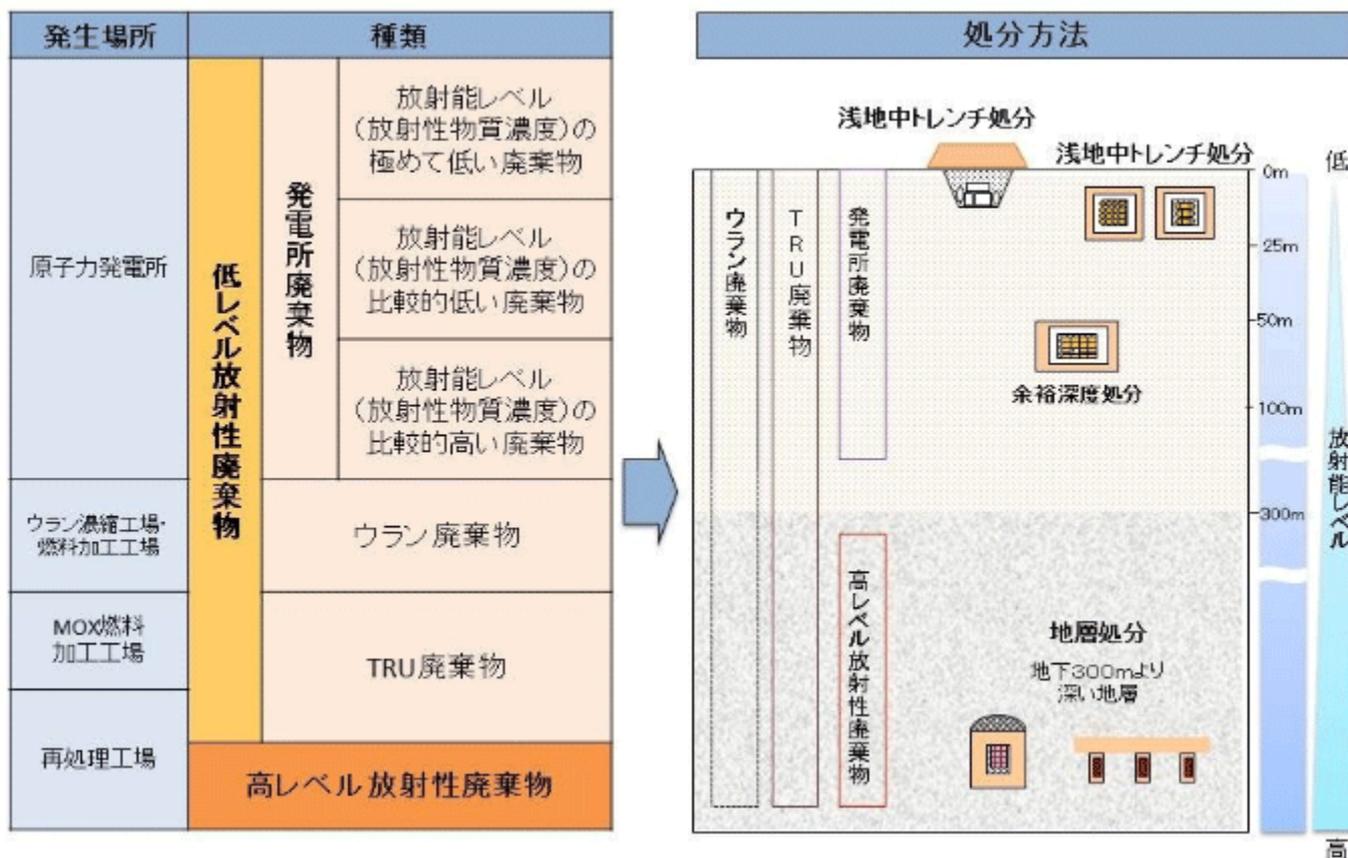


放射性廃棄物を分類する概念\*1

\*1 Classification of Radioactive Waste, IAEA, No. GSG-1 (2009).

# 我が国における放射性廃棄物の区分と処分方法

- 廃棄物の処分方法は、安全を確保するための技術と法制面の整備があいまって実施される。

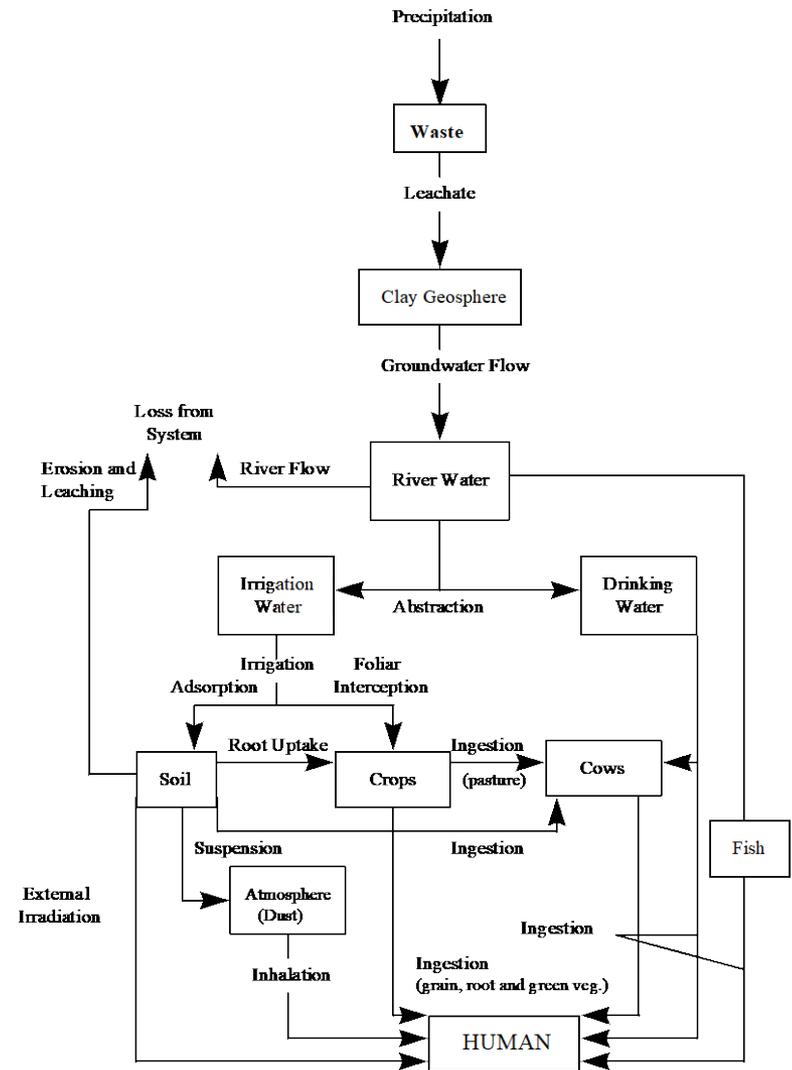


我が国における放射性廃棄物の区分と処分方法\*1

\*1 放射性廃棄物の種類に応じた処分方法, 資源エネルギー庁.

# 廃棄物の処分における安全の確保

- 廃棄物の処分に係る安全は、一般公衆の被ばくを所定の値以下にし、かつ合理的に可能な限り低く保つことにより確保する\*1。
- 処分場は、人工バリアと天然バリアにより構成されるので、そのシステムからの影響を評価する。



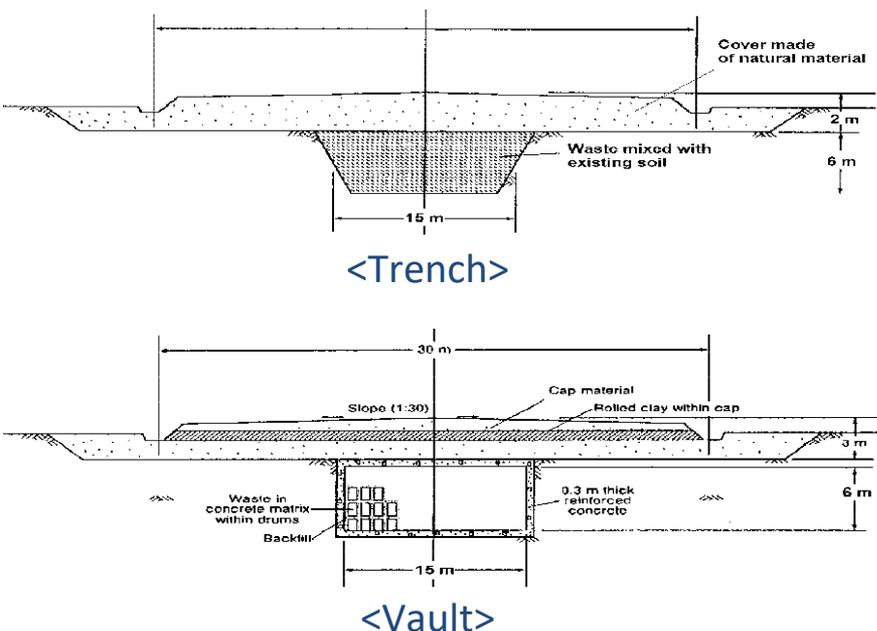
廃棄物処分後の被ばく評価モデルの例\*2

\*1 放射性廃棄物の工学, 長崎晋也, 中山 真一(共編), オーム社 (2011)

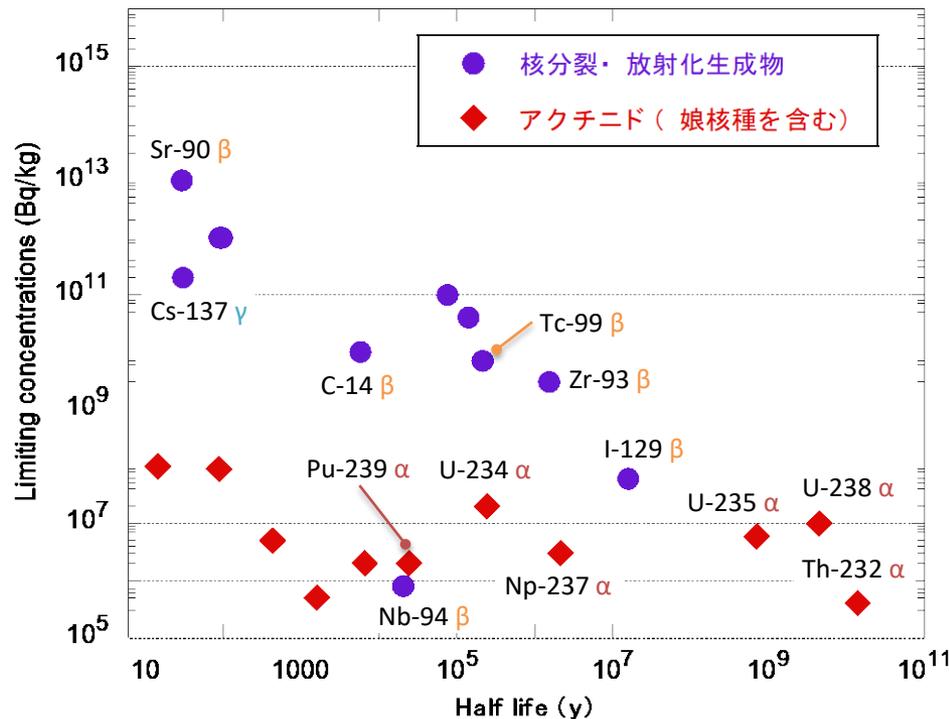
\*2 Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities, IAEA, IAEA-TECDOC-1380, Fig. 22 (2003).

# 処分における廃棄物の濃度限度を評価した例

- 処分場の設計や核種により、核種の濃度限度は異なる。
- 核種の半減期や放出する放射線の種類とエネルギー、化学的性質が影響する。
  - 長半減期の $\alpha$ 放射体は濃度限度が小さくなる。アクチニドであるTh、U、Np、Puの同位体には $\alpha$ 核種が多いが、濃度限度はいずれも低い。UとThの同位体は天然にも存在する。
  - 核分裂生成物では、Zr-93、Nb-94、Tc-99、I-129の濃度が、放射化生成物ではC-14がそれぞれ低い。



浅地中処分方法の例\*1

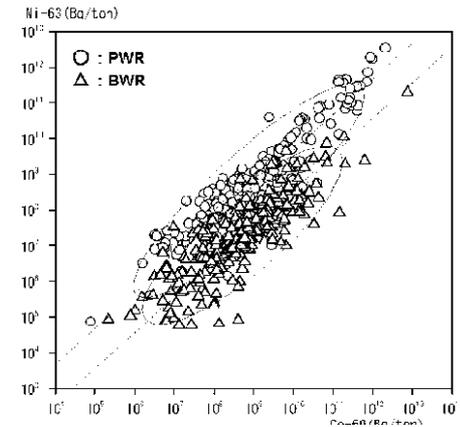


浅地中処分での濃度限度と半減期の相関\*1  
(Vault方式の例。一部の核種を表示した。)

\*1 Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities, IAEA, IAEA-TECDOC-1380, Fig. 5, Fig. 7, Tbl. XVIII (2003).

# 処分の際に確認しておくべき事項

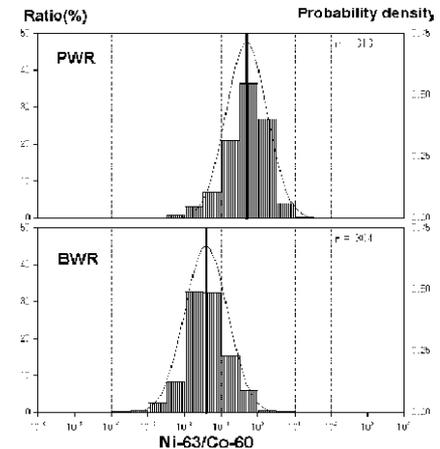
- 放射性廃棄物を処分する前に含有する放射能量などをあらかじめ確認する。
- 測定が難しい核種の量を決定するため、想定しやすい核種との相関をあらかじめ求め、これを用いる。
  - － 濃度の頻度はしばしば対数正規分布をとる。



濃度の相関

## 廃棄体の確認方法\*1

確認項目	確認方法
1 著しい破損がないこと	目視確認
2 放射性廃棄物を示す標識、整理番号の表示	〃
3 最大放射能濃度を超えないこと	記録確認(測定記録等)
4 一軸圧縮強度が1470 kPa以上	〃(測定記録)
5 有害な空げきが残っていないこと	〃(測定記録)
6 表面密度限度	〃(測定記録)
7 固型化材料	〃(証明書等)
8 容器	〃(証明書等)
9 埋設時耐埋設荷重	〃(証明書等)
10 配合比	〃(運転記録等)
11 練り混ぜ・混合	〃(運転記録等又は測定記録)
12 硬さ値	〃(運転記録等又は測定記録)
13 健全性を損なうおそれのある物質が含まれていないこと	〃(製作方法)
14 固型化後の期間が6ヶ月以上経過	〃(運転記録)
15 表面線量当量率が10 mSv/hを超えないこと	〃(測定記録)



濃度比の分布

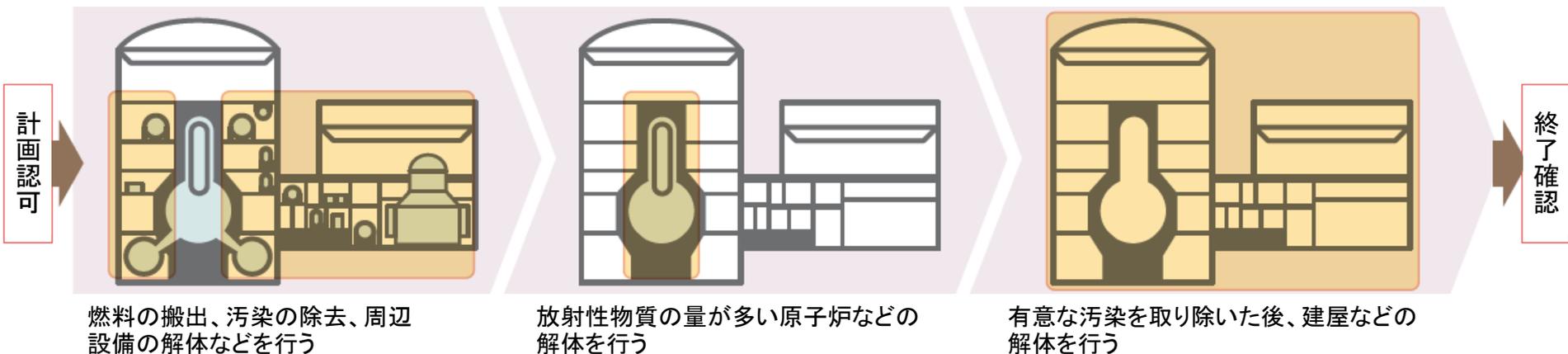
原子炉廃棄物を対象とした放射濃度決定方法の例\*2  
(スケーリングファクタ法における<sup>60</sup>Coと<sup>63</sup>Niの相関)

\*1 原子力安全基盤機構 規格基準部, “均質・均一固化体及び充填固化体の廃棄のための確認方法について(一部改正),” JNES-SS-0801 (2008).

\*2 International Atomic Energy Agency, NW-T-1.18 (2009).

# 原子炉の廃止措置に伴う廃棄物

- 原子炉施設の廃止措置の方法はおおよそ定型化されている。放射性廃棄物は全体の4-5%程度である。
- 福島第一原子力発電所では、原子炉建屋、タービン建屋のみならず広範囲に汚染しており、汚染状況の把握と推定が基礎情報として必要である。



## 廃止措置の主な手順<sup>\*1</sup>

### 廃止措置対象施設の推定発生量<sup>\*2</sup>

放射能レベル区分	発生量 (t)	割合
放射性廃棄物 (L1)	約 100	0.02%
放射性廃棄物 (L2)	約 1,000	0.2%
放射性廃棄物 (L3)	約 18,900	4%
放射性物質として扱う必要のないもの (CL)	約 77,700	17%
放射性廃棄物でないもの (NR)	約 353,700	78%
合計	約 451,200	100%

<sup>\*1</sup> 原子力発電所の廃止措置, 電気事業連合会, パンフレット (2016).

<sup>\*2</sup> 浜岡原子力発電所1,2号機 廃止措置計画全体概要, 中部電力株式会社.

### 3. 放射性核種濃度の分析



分析・研究施設第1棟の建設状況, 2020年5月.

# 分析の概要

- 事故廃棄物の管理方法は確立されておらず、研究開発が必要である。廃棄物の性状、殊に放射エネルギーのデータは基礎情報として不可欠であり、分析により求めている。
  - 2021年度頃に「処理・処分の方策とその安全に関する技術的な見通し」を取りまとめる予定としている\*1。
- 汚染水、水処理二次廃棄物、瓦礫、植物、土壌の試料を採取、分析を行っている。
  - 廃棄物の処分安全において重要な核種を選定し、分析の対象とした。
  - 東京電力から提供された試料や機構等が採取した試料を茨城県の施設へ輸送して分析している。

## 分析の対象としている核種

γ線核種	$^{60}\text{Co}$ , $^{94}\text{Nb}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{152}\text{Eu}$ , $^{154}\text{Eu}$
β線核種	$^3\text{H}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{36}\text{Cl}$ , $^{41}\text{Ca}$ , $^{59}\text{Ni}$ , $^{63}\text{Ni}$ , $^{79}\text{Se}$ , $^{90}\text{Sr}$ , $^{99}\text{Tc}$ , $^{129}\text{I}$
α線核種	$^{233}\text{U}$ , $^{234}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{236}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{237}\text{Np}$ , $^{238}\text{Pu}$ , $^{239}\text{Pu}$ , $^{240}\text{Pu}$ , $^{242}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{243}\text{Am}$ , $^{244}\text{Cm}$ , 全α

\*1 東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ, 平成29年9月26日.

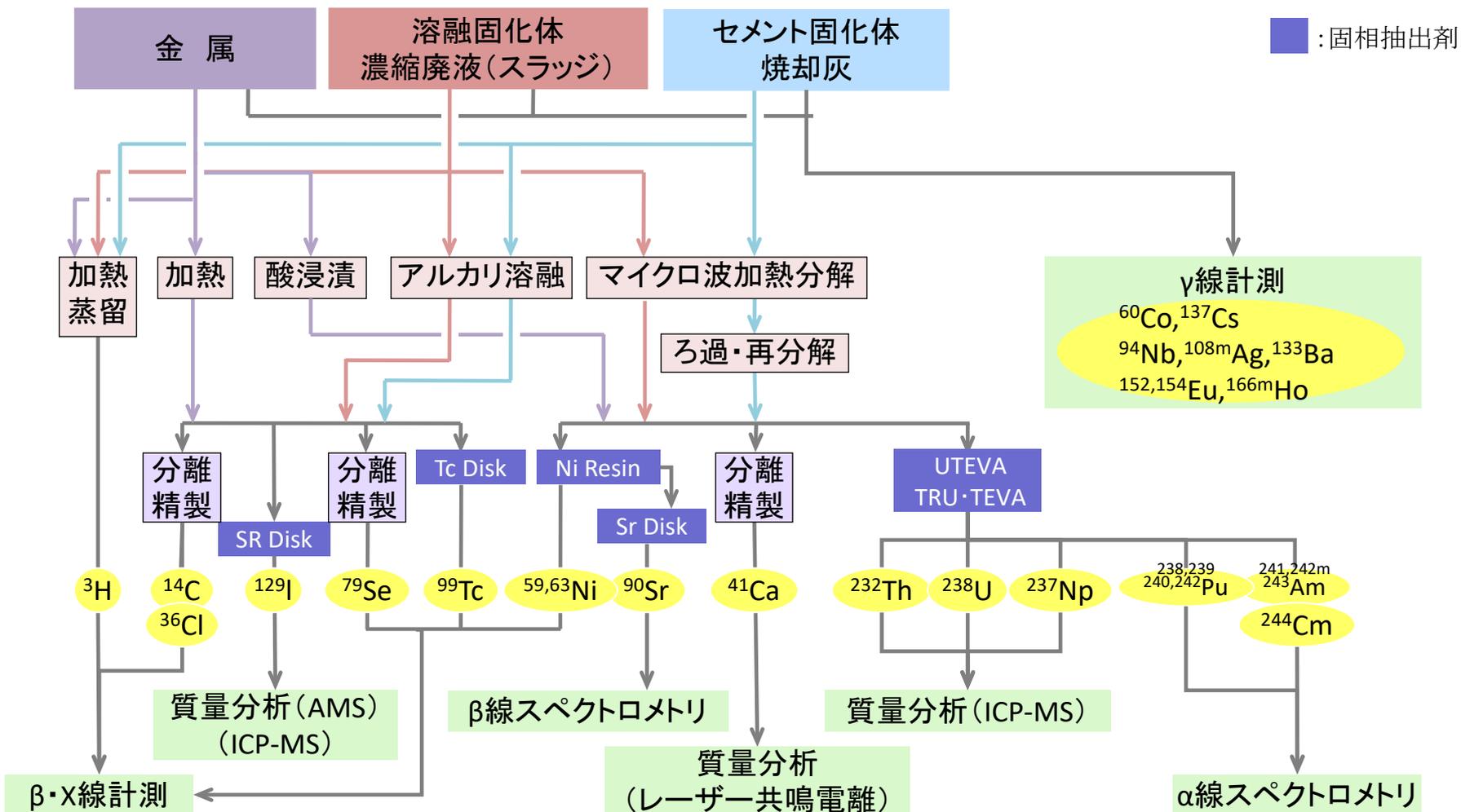
# 分析した試料

－ 2017年3月31日時点 －

分類	試料			試料点数
瓦礫類	原子炉建屋内	1号機 1・5階	瓦礫等	29
		2号機 1・5階	瓦礫等	7
		3号機 1階	瓦礫等	11
		4号機使用済燃料プール	瓦礫	2
	タービン建屋内	1号機	スラッジ・砂	7
	原子炉建屋周辺	1・3・4号機周辺	瓦礫	15
	覆土式一時保管施設	第1・2槽	瓦礫	10
汚染水	原子炉建屋内	2・3号機格納容器内	滞留水	4
	タービン建屋内	1号機	スラッジ・滞留水	6
	集中廃棄物処理建屋内	地下	滞留水	12
	処理装置	セシウム吸着装置(第二含む)	処理水	27
		除染装置	処理水	3
		淡水化装置(RO)	処理水	2
		蒸発濃縮装置	処理水	3
		多核種除去設備(増設含む)	処理水	18
汚染水処理二次廃棄物	多核種除去設備(増設含む)	スラリー	6	
可燃物	保護衣等焼却灰			5
土壌	土壌			6
植物	伐採木	枝葉		5
	立木	枝葉、落葉、表土		123

## 分析方法

- 原子力機構の廃棄物(研究施設等廃棄物)を対象として分析指針\*1を作成しており、これを基盤にして分析している。



\*1 研究施設等廃棄物に含まれる放射性核種の簡易・迅速分析法(分析指針), 亀尾ら, JAEA-Technology 2009-051 (2009).

## 原子炉・タービン建屋の分析状況（実績）\*

- 今後も継続して瓦礫等の分析を進める予定である。
- 特に、格納容器内の固体試料については、内部の調査に合わせて採取できた場合に、入手、分析する予定である。原子炉建屋内の試料については、高線量環境下における採取方法を検討している。

## 圧力容器内

- 実績なし。

## 格納容器内

- 2号機及び3号機の滞留水を採取して分析した。(4点)

## 使用済燃料プール

- 4号機の砂礫を分析した。(2点)

## 原子炉建屋の周辺・一時保管場所

- 1、3及び4号機周辺に散乱した瓦礫、覆土保管の瓦礫を分析した。(25点)

## 原子炉建屋地下

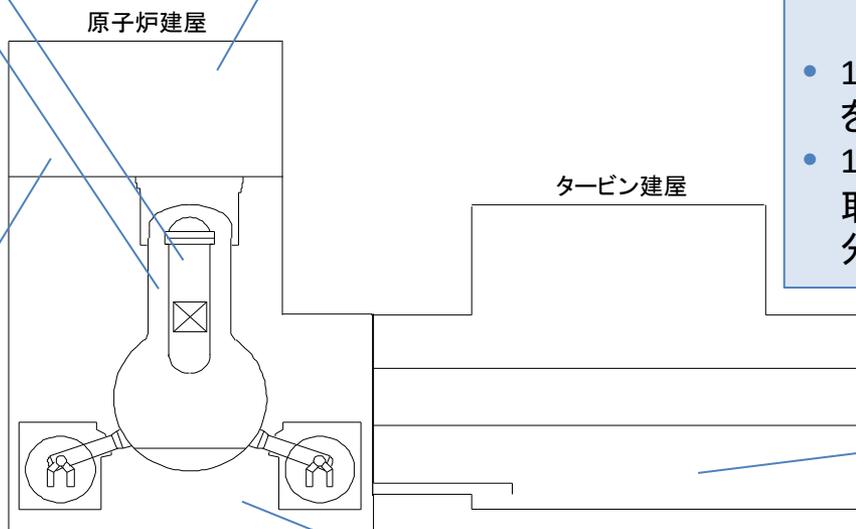
- 実績なし。

## 原子炉建屋内

- 1号機及び2号機の1階と5階、3号機1階の瓦礫とボーリングコアを分析した。(47点)

## タービン建屋地下

- 1号機地下1階の砂とスラッジを分析した。(5点)
- 1号機の地下滞留水中から採取されたスラッジと滞留水を分析した。(8点)



## 原子炉・タービン建屋の汚染の傾向\*

■ 汚染の傾向を分析結果に基づいて推定した。今後、試料採取・分析を通じて検証を進めていくことが必要。

## 圧力容器内

—  
(燃料デブリと放射化生成物による高汚染が考えられるが、実績なし。)

## 格納容器内

- 2号機及び3号機の滞留水では、下流(集中廃棄物処理建屋)の滞留水に比べて、Co や  $\alpha$ 核種の  $^{137}\text{Cs}$  に対する放射能濃度比が高い傾向にある。

## 使用済燃料プール

- 4号機では、放射化生成物である  $^{60}\text{Co}$  の  $^{137}\text{Cs}$  に対する放射能濃度比が原子炉建屋の他の試料と比べて大きい傾向にある。

## 原子炉建屋の周辺

- 1及び3号機周辺の瓦礫は、汚染の核種組成が原子炉建屋内と似た傾向にある。

## 原子炉建屋内

- 1号機及び2号機の1階と5階、3号機1階で、 $^{137}\text{Cs}$  のほか、Sr 等の核分裂生成物、Pu等の $\alpha$ 核種、Co 等の放射化生成物を検出した。

## タービン建屋地下

- 原子炉建屋内に比べて、 $^{90}\text{Sr}$  の  $^{137}\text{Cs}$  に対する放射能濃度比が高い傾向にある。
- 沈降したスラッジは、Cs、Sr や $\alpha$ 核種を含む傾向にある。

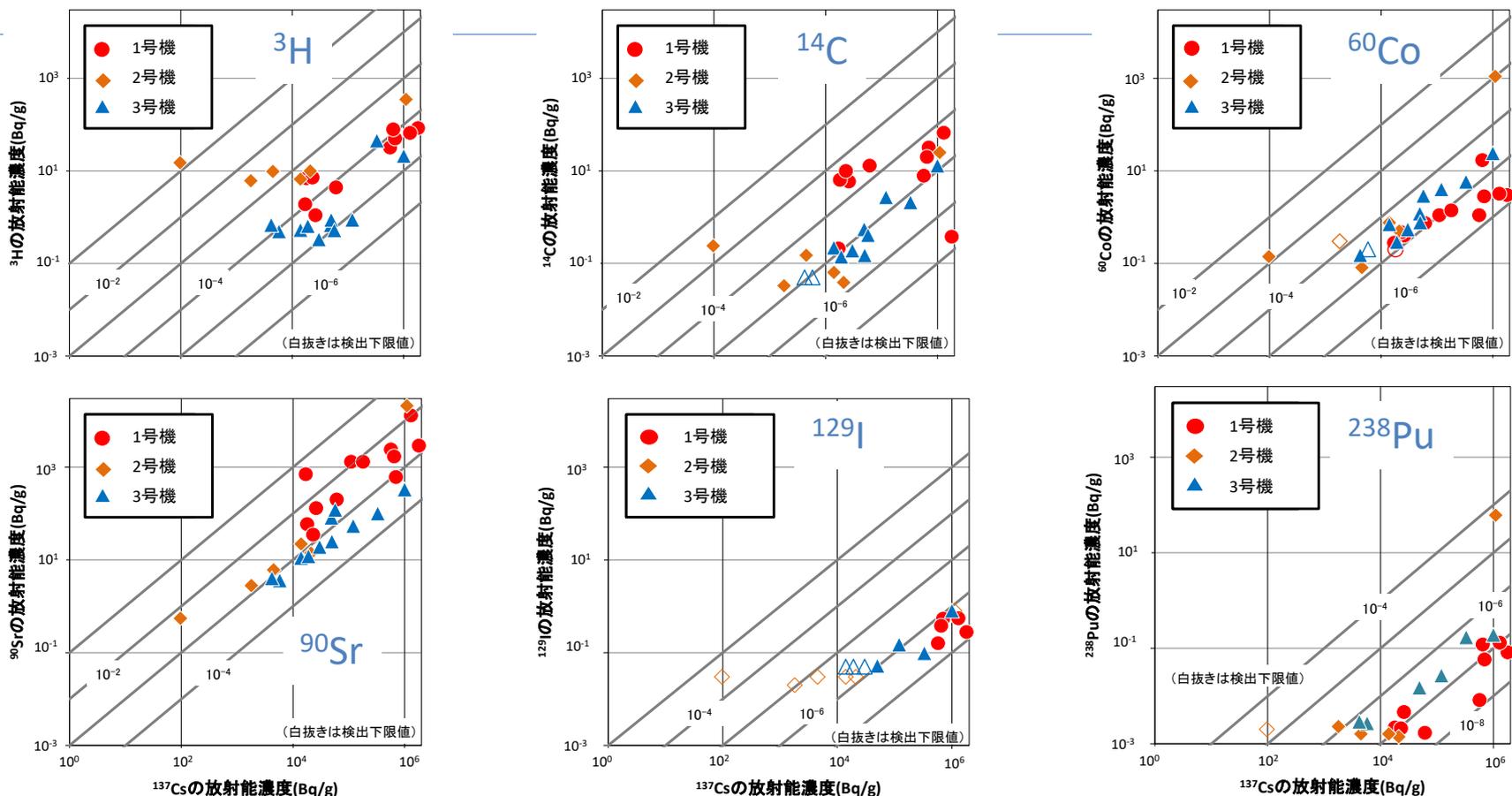
原子炉建屋

タービン建屋

## 原子炉建屋地下

—  
(滞留水による汚染が考えられるが、実績なし。)

## 原子炉建屋内の瓦礫試料の分析データ\*



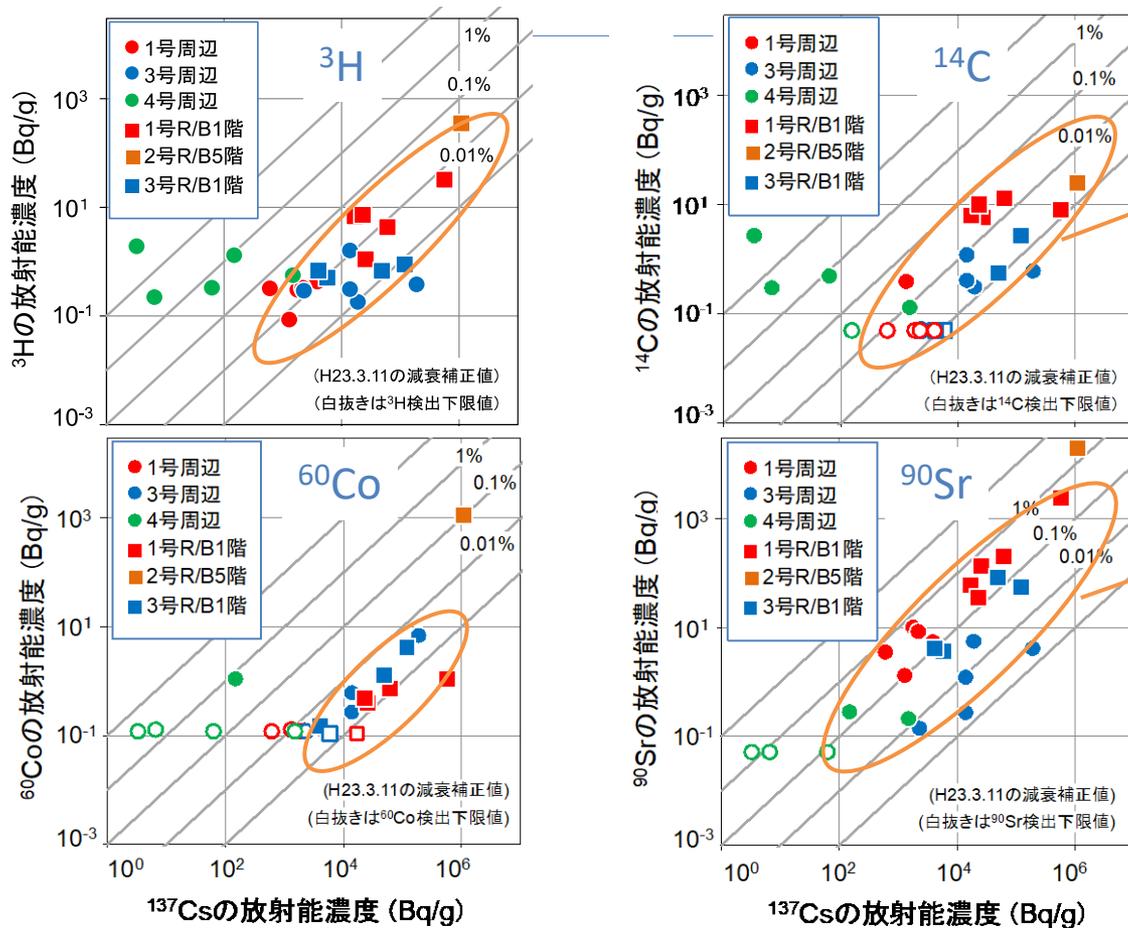
☒ 原子炉建屋内で採取された瓦礫試料に検出された核種の濃度 ( $^{137}\text{Cs}$ に対するプロット) \*1

核種の濃度は、 $^{137}\text{Cs}$  との関係(相関)を見るために  $^{137}\text{Cs}$  濃度に対してプロットし、直線を加えた。(以後の参考資料においても同様。)

- 1号機及び2号機の1階と5階、3号機1階で、 $^{137}\text{Cs}$ のほか、 $^3\text{H}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{129}\text{I}$  等の核分裂生成物、 $^{238}\text{Pu}$  等の $\alpha$ 核種、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{60}\text{Co}$  等の放射化生成物を検出した。

\*1 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第29回)資料から引用。

## 原子炉建屋周辺瓦礫試料の分析データ\*



核種の濃度は、 $^{137}\text{Cs}$ と一定の割合を示す場合がある。1と3号機の $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ は幅広い $^{137}\text{Cs}$ 濃度に対して相関する傾向がある。4号機は、 $^{90}\text{Sr}$ が1及び3号機に近いが、 $^3\text{H}$ と $^{14}\text{C}$ は違う傾向を示す。2号機はデータが少ない。

図 建屋周辺の瓦礫試料に検出された核種の濃度 ( $^{137}\text{Cs}$ に対するプロット) \*1

■ 1及び3号機周辺の瓦礫は、汚染の核種組成が原子炉建屋内と似た傾向にある。4号機周辺の瓦礫は、 $^{90}\text{Sr}$ が似た傾向にある。

\*1 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第16回)資料から引用。

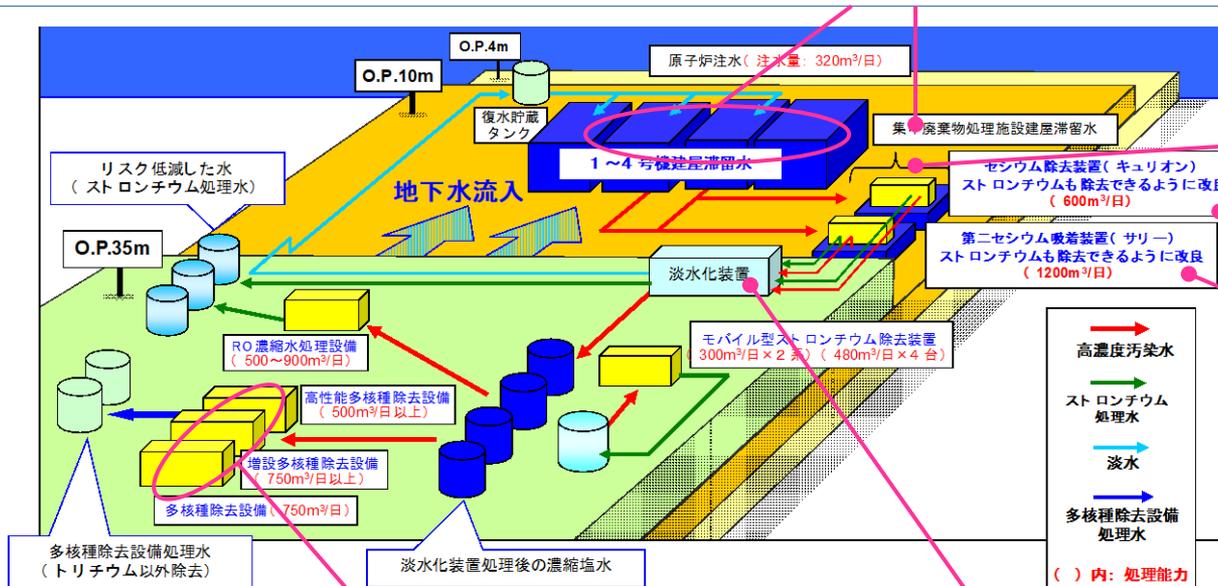


# 滞留水・処理水・水処理二次廃棄物の汚染の傾向\*

■ 汚染の特徴を分析結果に基づいて推定した。今後、試料採取・分析を通じて検証を進めていくことが必要。

## 滞留水

- 集中廃棄物処理建屋滞留水では、 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{90}\text{Sr}$  濃度が高く同程度であり、 $^3\text{H}$  がこれらに次ぐ傾向にある。他の $\beta$ 、 $\alpha$ 核種濃度はより低い。 $\text{Cs}$  と  $\text{Sr}$  核種の濃度は時間とともに減少しているものの、減少の割合が小さくなっている。
- タービン建屋滞留水は、汚染の度合いが号機により異なる傾向にある。
- 2及び3号機の格納容器内滞留水では、下流(タービン建屋、集中廃棄物処理建屋)の滞留水に比べ、 $\alpha$ 核種の $^{137}\text{Cs}$  に対する放射能濃度比が高い傾向にある。



### 除染装置(アレバ)スラッジ※

- $\text{Sr}$  と  $\text{Cs}$  核種を含む一方で、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{63}\text{Ni}$ 、 $^{79}\text{Se}$ 、 $^{129}\text{I}$  濃度は  $^{137}\text{Cs}$  や  $^{90}\text{Sr}$  に比べて低い傾向にある。

### セシウム吸着装置吸着材 (KURION, SARRY)※

- $\text{Cs}$  核種を含む一方で、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{63}\text{Ni}$ 、 $^{79}\text{Se}$ 、 $^{129}\text{I}$  濃度は  $^{137}\text{Cs}$  に比べて低い傾向にある。

### 多核種除去設備

スラリー	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>^{90}\text{Sr}</math> が主要核種であり、<math>^{238}\text{Pu}</math> と <math>^{239+240}\text{Pu}</math> 濃度は <math>1 \text{ Bq/cm}^3</math> 未満である。</li> </ul>
吸着材※	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\text{Sr}</math> と <math>\text{Cs}</math> 核種を含む一方で、<math>^{60}\text{Co}</math> と <math>^{99}\text{Tc}</math> 濃度は <math>^{137}\text{Cs}</math> に比べて低い傾向にある。</li> </ul>

### 淡水化装置 (RO, 蒸発濃縮)

RO	- (汚染の特徴を推定する実績なし。)
濃縮廃液	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>^{79}\text{Se}</math> と <math>^{129}\text{I}</math> 濃度が滞留水よりも高い傾向にある。</li> </ul>

※ 関連する水の分析結果から推定した水処理二次廃棄物の傾向

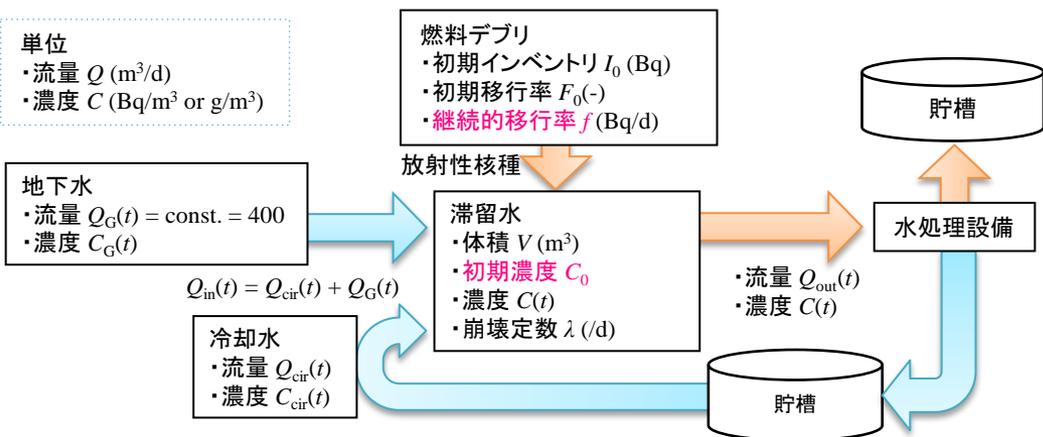
\*1 図の出典: 東京電力, 福島第一原子力発電所水処理設備について, 2015年1月15日. 4/13の原子炉注水量は3機合計で  $212 \text{ m}^3/\text{日}$ .

\* 福島第一原子力発電所の固体廃棄物試料分析(現状までの成果報告), 廃炉・汚染水対策チーム会合/事務局会議, 第42回, 平成29年5月25日.



## 濃度変化を表現するモデルと物質収支の試算

- ソースターム(燃料デブリ)から滞留水への放射性核種の物質移動に関して、燃料損傷時の移行と、その後の継続した移行を考慮したモデルが濃度変化を再現する。
- 燃料損傷時に滞留水へ移行した核種は、すでに除染・回収され、二次廃棄物として管理されている。
- 現在検出される核種は、ソースタームから一定した割合で溶出する成分とみられる。
- フィッティングにより求めたパラメータから、核種の物質収支が求められる。



$$\frac{dC(t)}{dt} \cdot V = f + C_G(t) \cdot Q_G(t) + C_{cir}(t) \cdot Q_{cir}(t) - C(t) \{ Q_{out}(t) + \lambda V \}$$

水の循環・再利用のモデル

モデルによる物質収支の試算 (%)

核種	原子炉内 残留	水処理二 次廃棄物	環境放出 (気体)	滞留水等
<sup>137</sup> Cs	60	35	5	0.3
<sup>134</sup> Cs	55	39	6	0.3
<sup>90</sup> Sr	75	24	~0	0.3
<sup>125</sup> Sb	98	0.2	1.6	~0
<sup>238</sup> Pu	>99	~0	~0	~0

## 汚染水試料の分析データ (2)\*

タービン建屋滞留水は、汚染の度合いが号機により異なる傾向にあり、15年9月以降では、1,2,4号機と比較し、3号機で $^{137}\text{Cs}$ 濃度が高い。

タービン建屋滞留水は、上流の格納容器滞留水と濃度が異なる傾向がみられる。

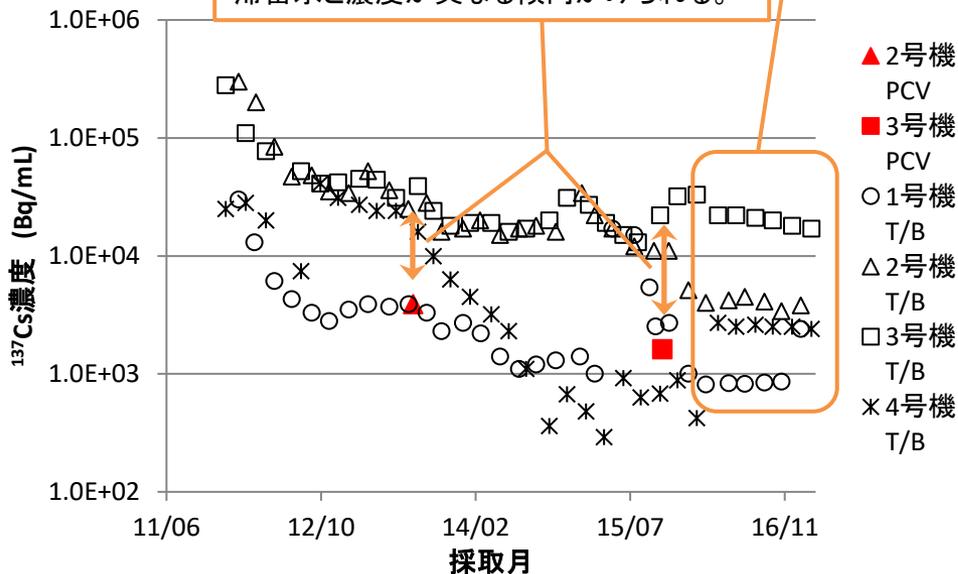


図1 格納容器及びタービン建屋滞留水試料中の $^{137}\text{Cs}$ 濃度の変化\*1

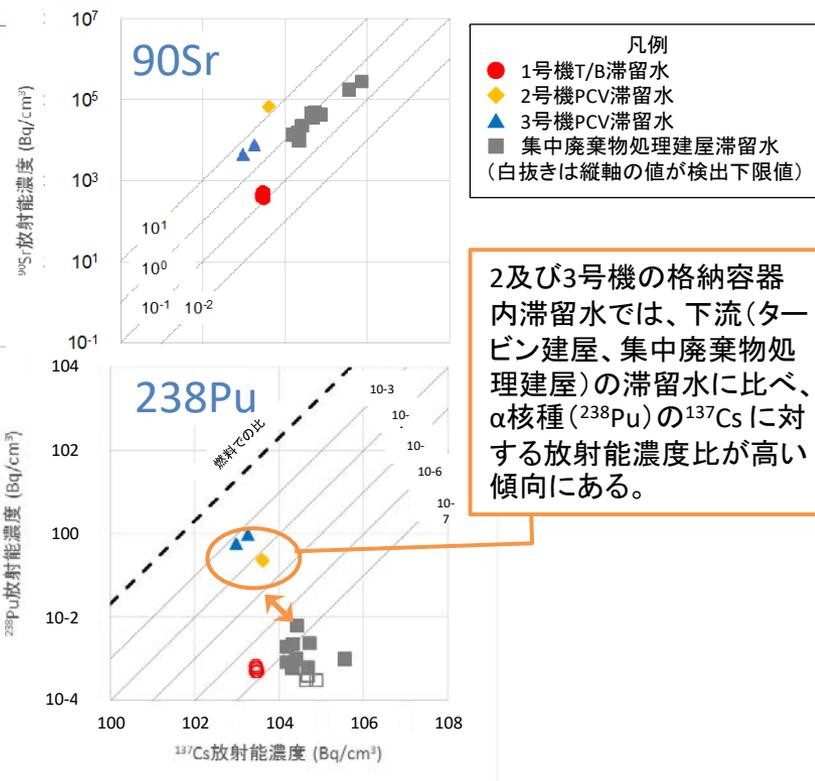


図2 滞留水試料に検出された $^{90}\text{Sr}$ と $^{238}\text{Pu}$ の濃度( $^{137}\text{Cs}$ に対するプロット)\*1

- タービン建屋滞留水は、汚染の度合いが号機により異なる傾向にある。15年9月以降では、1、2、3号機と比較し、3号機で $^{137}\text{Cs}$ 濃度が高い。また、上流の格納容器滞留水と濃度が異なる傾向がみられる。(図1)
- 2及び3号機の格納容器内滞留水では、下流(タービン建屋、集中廃棄物処理建屋)の滞留水に比べ、 $\alpha$ 核種( $^{238}\text{Pu}$ )の $^{137}\text{Cs}$ に対する放射能濃度比が高い傾向にある。(図2)

\*1 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第39回)資料から引用して作成。

# 土壌と植物の分析状況(実績)\*

- 今後土壌については、採取済みの試料を順次分析し、植物については、焼却処理後の焼却灰を分析する予定である。

表 土壌と植物の分析試料数

エリア	土壌*	植物(立木)		
		枝葉	落葉	表土
A	0	3	2	3
B	—	—	—	—
C	—	3(草)	—	3
D	1	3	3	6
E	—	1	1	1
F	1	5	3	6
G	0	1	1	1
H	0	3	1	3
I	1	3	2	6
J	0	1	1	1
K	1	1	1	1
L	1	1	1	4
M	—	1	1	1
N	0	3	3	6
O	0	3	3	6
P	1	2	2	2
Q	0	1	1	1
R	0	1	1	1
S	0	1	1	3
T	0	1	1	1

\*1 エリア B、C、E、M はフェーシングなどの工事に伴い採取対象がない。

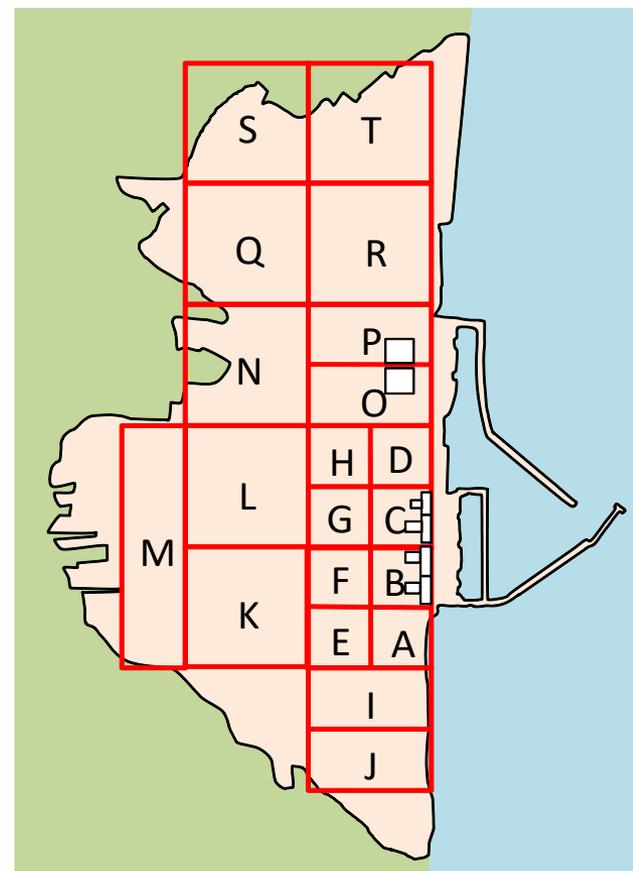


図 土壌、植物試料の採取位置

# 土壌・植物の汚染の傾向\*

■ 汚染の特徴を分析結果に基づいて推定した。今後、試料採取・分析を通じて検証を進めていく。

## 構内土壌(地表から0-5 cmの表土)\*1

- $^{137}\text{Cs}$ が主な核種であり、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$ が全ての試料で検出された。(図1)
- Uはその同位体組成から天然由来の影響が大きく、事故による影響は確認されていない。(図1)
- $^{238}\text{Pu}$ 濃度はほとんどが検出下限値未満あるいは $10^{-3}$  Bq/g程度のごく低い濃度であった(環境のフォールアウト相当)。

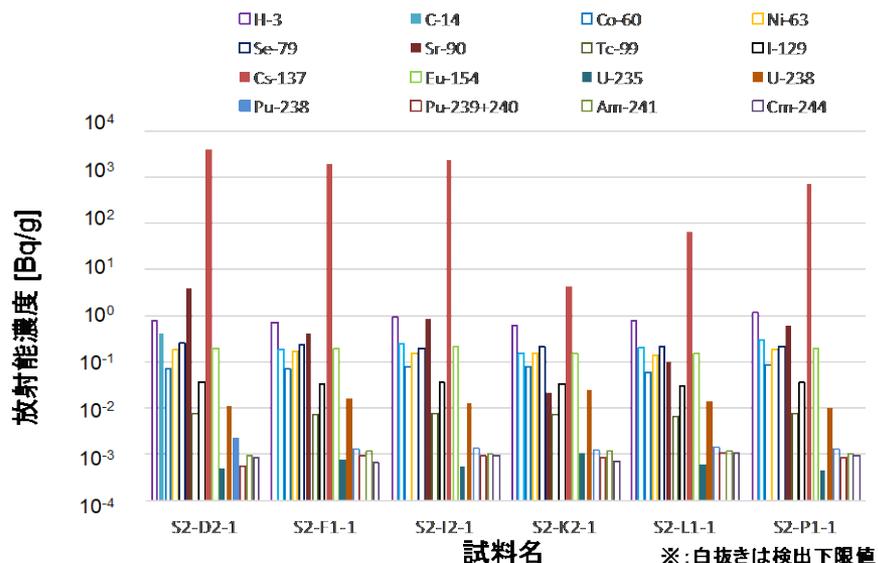


図1 土壌の放射性核種濃度\*1

## 立木(枝葉、落葉、表土・腐葉土)\*2

- $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ の他に、原子炉建屋の近傍では $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{79}\text{Se}$ が検出された(図2)。
- Dエリアの落葉とEエリアの表土からPu核種が検出された( $10^{-3}$  Bq/g程度であり環境のフォールアウト相当)。
- Cs核種濃度は、枝葉に比べて落葉や表土(腐葉土を含む場合がある)で高い傾向にある。

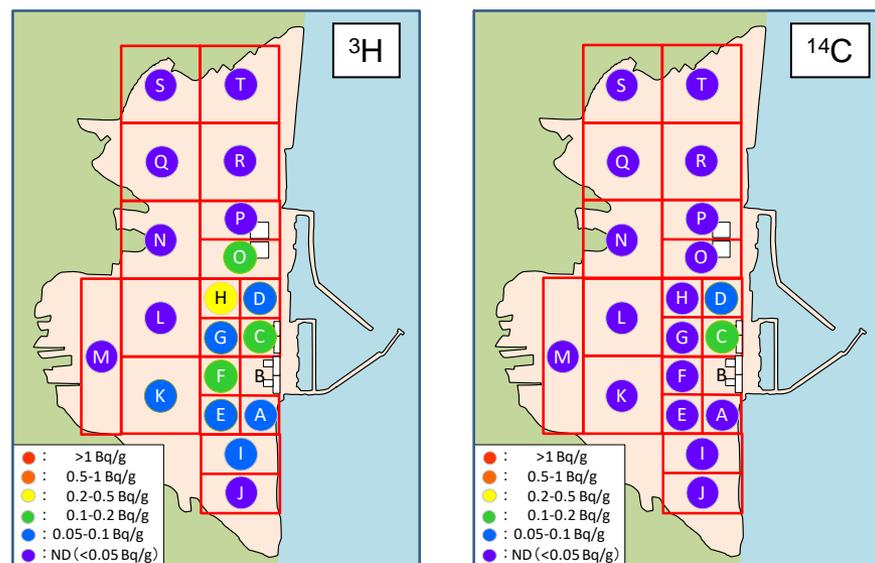


図2 構内における立木(枝葉)中の放射能濃度分布\*2

\*1 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第40回)資料から引用。

\*2 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議(第16回)資料から引用。

## 分析データ集“FRAnDLi”

- 公開されている分析データを集約したデータベースを作成、昨年度末より運用を開始した。
  - 汚染水、水処理二次廃棄物、瓦礫、土壌、植物のデータを収録、適宜データを追加している。
  - <https://frandli-db.jaea.go.jp/FRAnDLi/>



国立研究開発法人  
日本原子力研究開発機構



廃炉国際共同研究センター

### 福島第一原子力発電所事故廃棄物に関する分析データ集 - 試行版 -

Fukushima Daiichi Radwaste Analytical Data Library  
(FRAnDLi)

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴う津波により、東京電力株式会社(当時、現在は東京電力ホールディングス株式会社、以下、「東京電力」という。)の福島第一原子力発電所の1号機から4号機は著しい損傷を被りました。この事故により、使用中の燃料に含まれる放射性核種が放出し、発電所のみならず周辺の環境に重大な汚染をもたらしました。また、事故直後に開始された安全確保のための措置や、使用済み燃料のプールからの取り出しによって廃棄物は継続的に発生し、その種類も多様化していくことが予想されます。廃炉に向けた活動や学術的な研究開発を促進するため、廃棄物の情報を得ることは非常に重要です。東京電力および日本原子力研究開発機構(JAEA)と国際廃炉研究開発機構は、発電所構内から廃棄物(汚染水、汚染水処理二次廃棄物、瓦礫、土壌、植物等)を採取し、放射能濃度、元素濃度、物性等の分析を実施しています。得られた結果は順次公開されてきましたが、その公開資料はインターネット上に散在しています。JAEAでは、これらを集約し、「東京電力福島第一原子力発電所において採取された汚染水および瓦礫等の分析データ集 (JAEA-Data-Code-2017-001.pdf)」として2017年に公開しました。廃棄物の分析は継続的に行われ、そのデータは増大・多様化します。FRAnDLiは、分析データをデータベース化することにより、新しい情報を利用者へ提供し、分析に係る情報の有効的な活用を目的としています。

利用規約

利用方法

**分析データ試料カテゴリ**

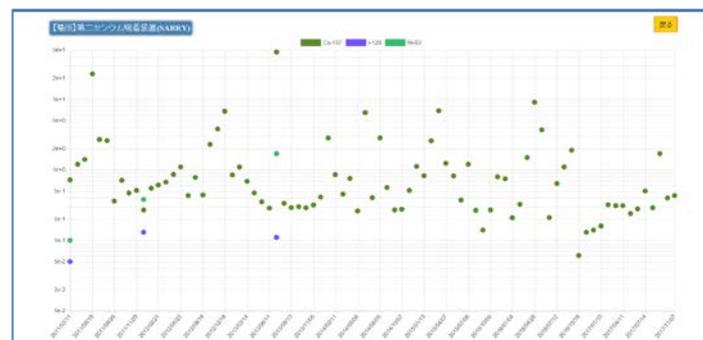
- 汚染水
- 汚染水処理二次廃棄物
- 瓦礫
- 土壌
- 植物

News

2018年4月23日  
本サイト(試行版)は、現状Internet Explorer環境でのみ正常に動作します。

2018年3月29日  
FRAnDLiの公開を開始しました。

トップ画面



グラフ表示の例

試料ID	試料名	分析項目	測定値	単位	検出限	測定日	測定場所	備考
20110311	汚染水	放射性セシウム	2,700	Bq/L	100	20110311	汚染水	
20110311	汚染水	放射性ヨウ素	1,000	Bq/L	100	20110311	汚染水	
20110311	汚染水	放射性ストロンチウム	100	Bq/L	10	20110311	汚染水	
20110311	汚染水	放射性セシウム	2,700	Bq/L	100	20110311	汚染水	
20110311	汚染水	放射性ヨウ素	1,000	Bq/L	100	20110311	汚染水	
20110311	汚染水	放射性ストロンチウム	100	Bq/L	10	20110311	汚染水	
20110311	汚染水	放射性セシウム	2,700	Bq/L	100	20110311	汚染水	
20110311	汚染水	放射性ヨウ素	1,000	Bq/L	100	20110311	汚染水	
20110311	汚染水	放射性ストロンチウム	100	Bq/L	10	20110311	汚染水	

テーブル表示の例

## 4. 放射性核種の汚染ふるまい



大川原のヒマワリ畑が満開に(2018年8月17日撮影)  
<https://www.town.okuma.fukushima.jp/site/shashinkan/8031.html>

## 核種の移行ふるまいの検討とその指標

- 分析において、定量の困難（核種の濃度が低いため）、あるいは、試料採取の困難（現場の線量率が高いため）により、核種の移行ふるまいを推定する方法が必要である。
- 濃度比を規格化した値（輸送比）を用いる方法により、元素の化学的なふるまいを相対的に表す。
  - － 元素Xがソースターム（核燃料; fuel）から汚染物（試料; sample）へと移行した割合を、基準とする核種に対する比として求める。

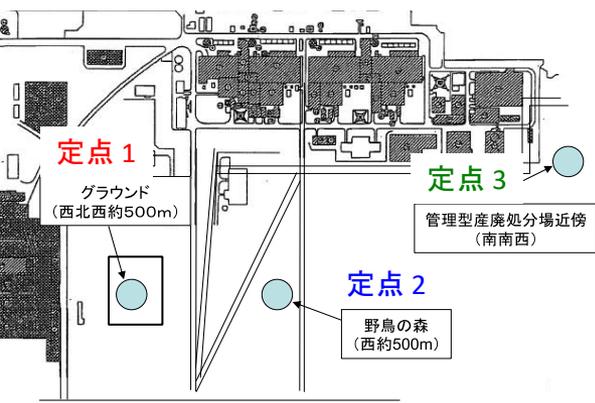
$$T_X = \frac{N_{X,\text{sample}} / N_{X,\text{fuel}}}{N_{\text{std},\text{sample}} / N_{\text{std},\text{fuel}}} = \frac{c_{X,\text{sample}} / A_{X,\text{fuel}}}{c_{\text{std},\text{sample}} / A_{\text{std},\text{fuel}}}$$

- ◇  $N$  は原子数、 $c$  は濃度 (Bq/kg, Bq/cm<sup>2</sup> ...)、 $A$  は放射能<sup>\*1</sup> (Bq)、 $X$  は対象とする核種、std は基準とする核種 (<sup>137</sup>Cs) である。 $A$  は半減期補正して適用する。
- － 廃棄物の放射能濃度を決定する方法の一つである、スケーリングファクタ法は Key 核種濃度との相関に基づく。

\*1 西原 健司, 岩元 大樹, 須山 賢也, “福島第一原子力発電所の燃料組成評価,” JAEA-Data/Code 2012-018 (2012).

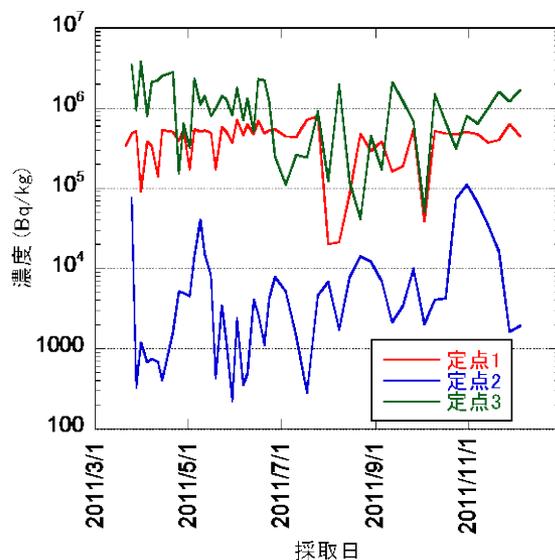
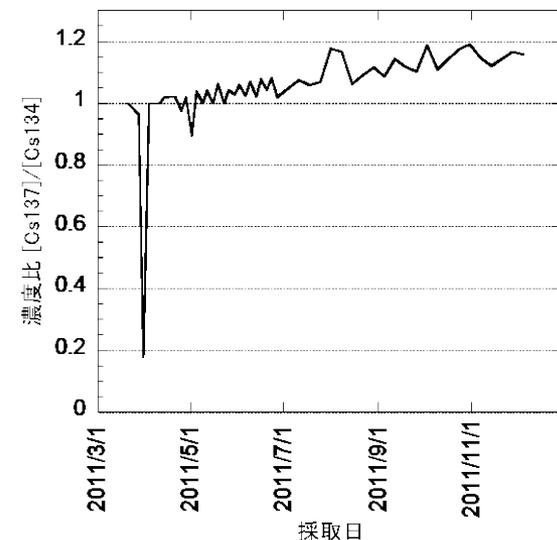
## 東京電力による汚染土壌の分析

- 2011年3月に東京電力は構内の3か所を定め、継続的に試料を採取、分析し、 $\gamma$ 線放出核種、Sr、U、TRU核種の濃度が報告されている。
  - $^{238}\text{Pu}$  と  $^{239+240}\text{Pu}$  の濃度比から、Pu は事故由来と考えられた。
- 採取の場所により濃度が異なり、定点2(野鳥の森)で低い。
- 濃度はばらつきが大きいですが、比を取るとばらつきは軽減される。



土壌サンプリングの位置

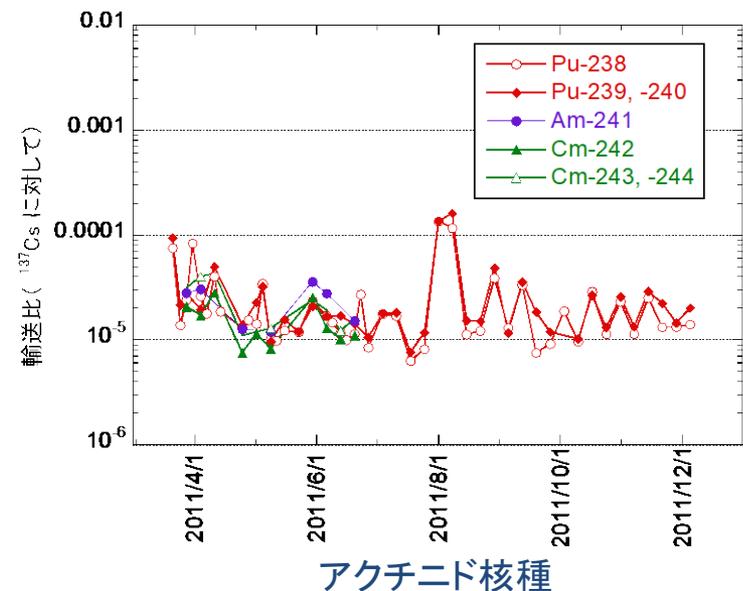
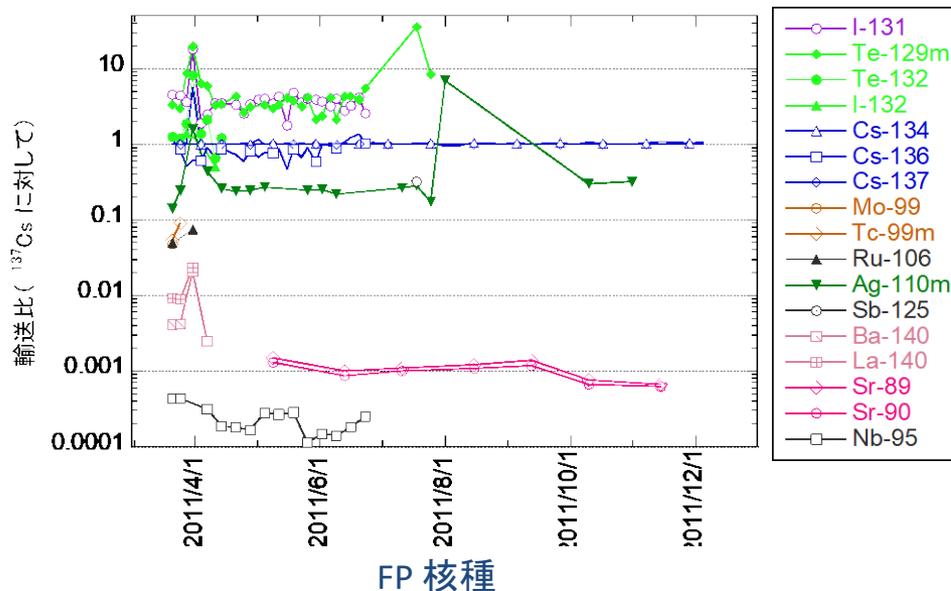
\* 方角と距離は1-2号機スタックからのもの。

各定点における  $^{137}\text{Cs}$  濃度定点1における  $^{134,137}\text{Cs}$  濃度比

\*1 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所構内における土壌中の放射性物質の検出状況について,” プレスリリース, 平成23年3月28日, <http://www.tepco.co.jp/cc/press/11032806-j.html> (2011). 並びにこの続報.

# 土壌への輸送比の時間依存性

- 輸送比は、それぞれの核種について、時間に対しておおむね一定である。
  - $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  や  $^{140}\text{Ba}/^{140}\text{La}$  の壊変系列では、娘核種は親核種の移行した結果を表す。
  - 事故の初期段階の寄与が支配的であることと整合する。
  - ばらついている値は、分析値の誤りを示唆する。
- Am と Cm も同様の輸送比であり、TRU のふるまいは同様であったと言える。



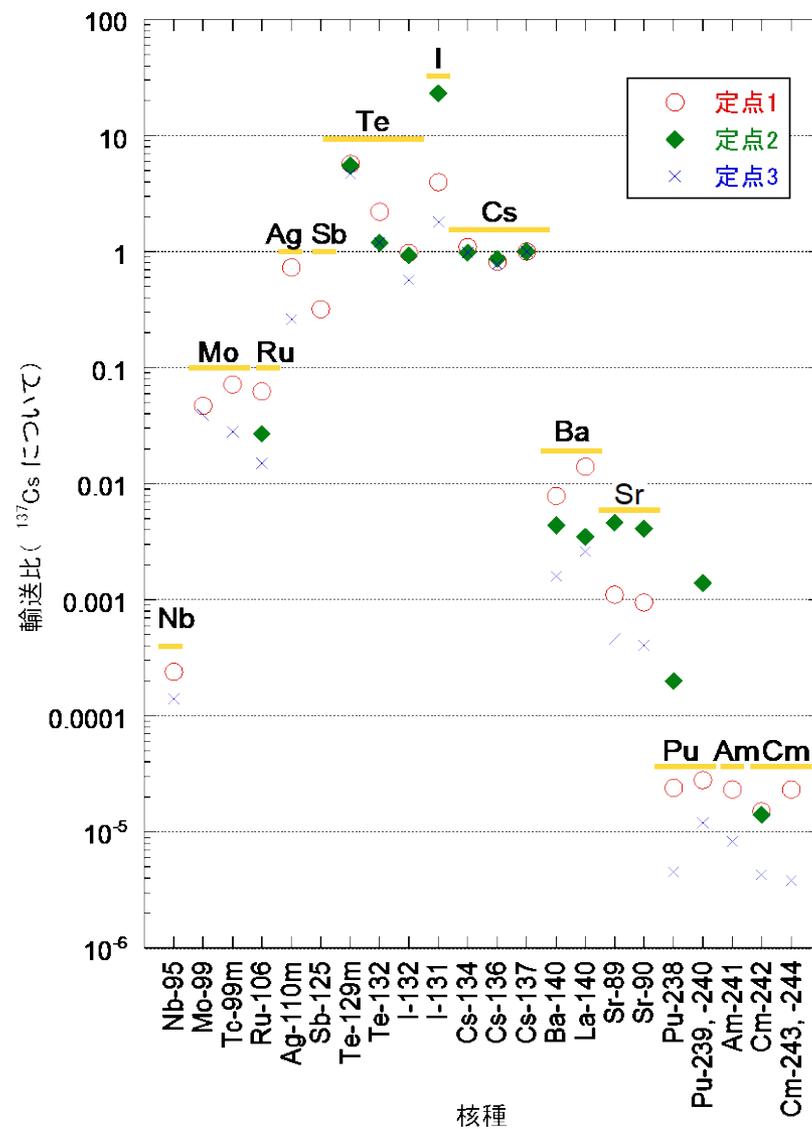
定点1で採取した試料に検出された核種の輸送比の時間依存性

# 種々の元素の土壌への輸送比

- 検出された核種の輸送比（燃料から土壌への移行割合）は次の順序であった。

$I > Te > Cs > Ag > Mo \sim Ru > Ba > Sr > Nb > Pu \sim Am \sim Cm$
- アクチニド (TRU) とアルカリ土類 (Sr, Ba) の値は相互に近く、拡散過程への化学的な性質の寄与が示唆される。
- 場所(方角)による値のばらつきが見られる。

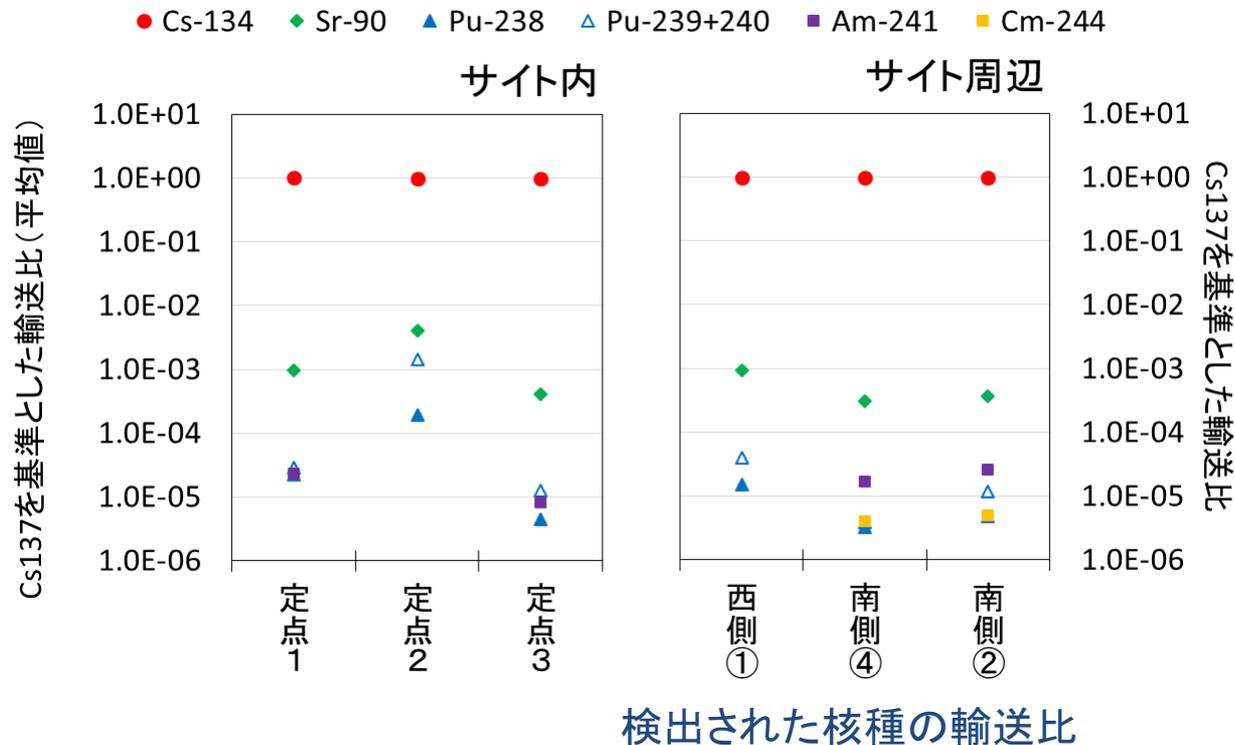
  - SrとIの定点間のばらつきは1桁程度であり、定点2で相対的に値が大きい。



検出された核種の輸送比

# サイト内と周辺土壌への輸送比の比較

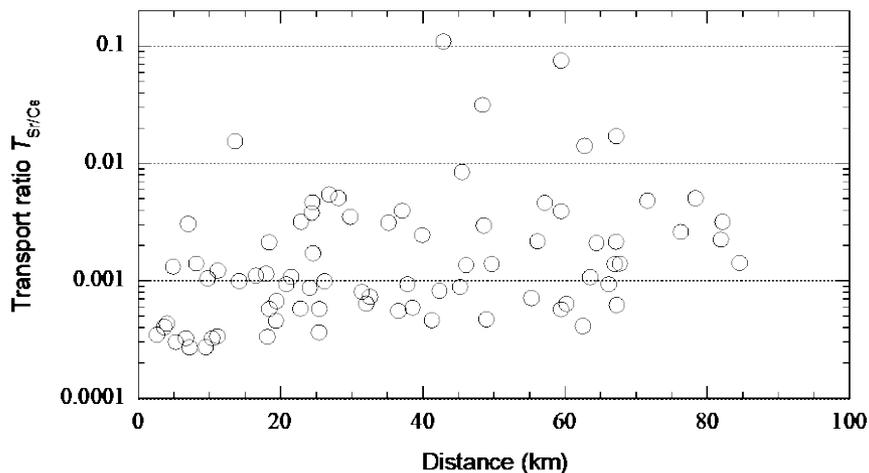
- 不揮発性の核種について、汚染の核種組成に対する距離の依存性、また、方角についてプルームの軌跡との相関が興味深い。
- サイトの周辺の土壌を分析し、Sr やアクチニド核種の輸送比を求めた。
- サイトの周辺であっても、Sr 等核種の輸送比は同様であり、距離の依存性は小さい。また、方向により輸送比が異なる傾向があり、プルームの軌跡との関係を詳しく調べることが望まれる。



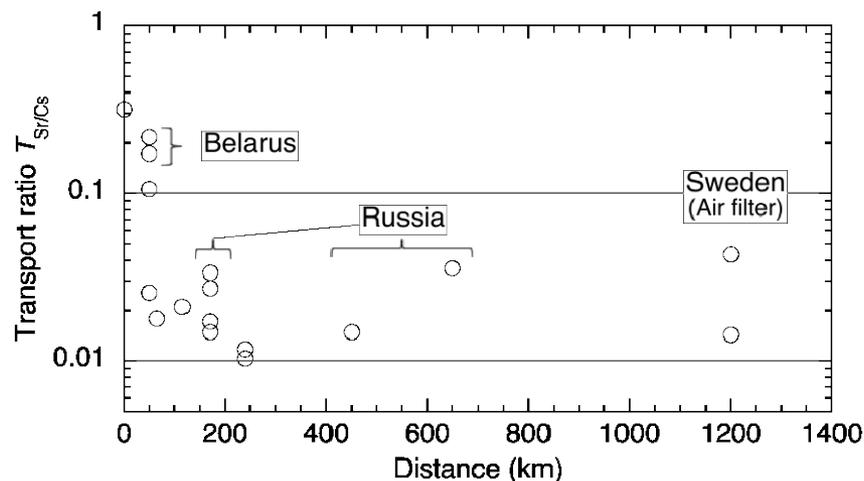
試料の採取場所

# 広域への拡散における距離の効果

- 原子炉建屋から環境への放出に関し、より広域での輸送比の変化を Sr について検討した。
  - 福島第一の事故では、Sr の輸送比は平均が約 0.001 である。これは、サイト内や近隣での値に近い。
  - チェルノブイリでは、事故の進展が異なるので輸送比が  $> 0.01$  と高いが、100 から 1,000 km まで一定である。
- 空気中での拡散に関して、組成の変化は小さいとみられる。



福島第一原子力発電所事故

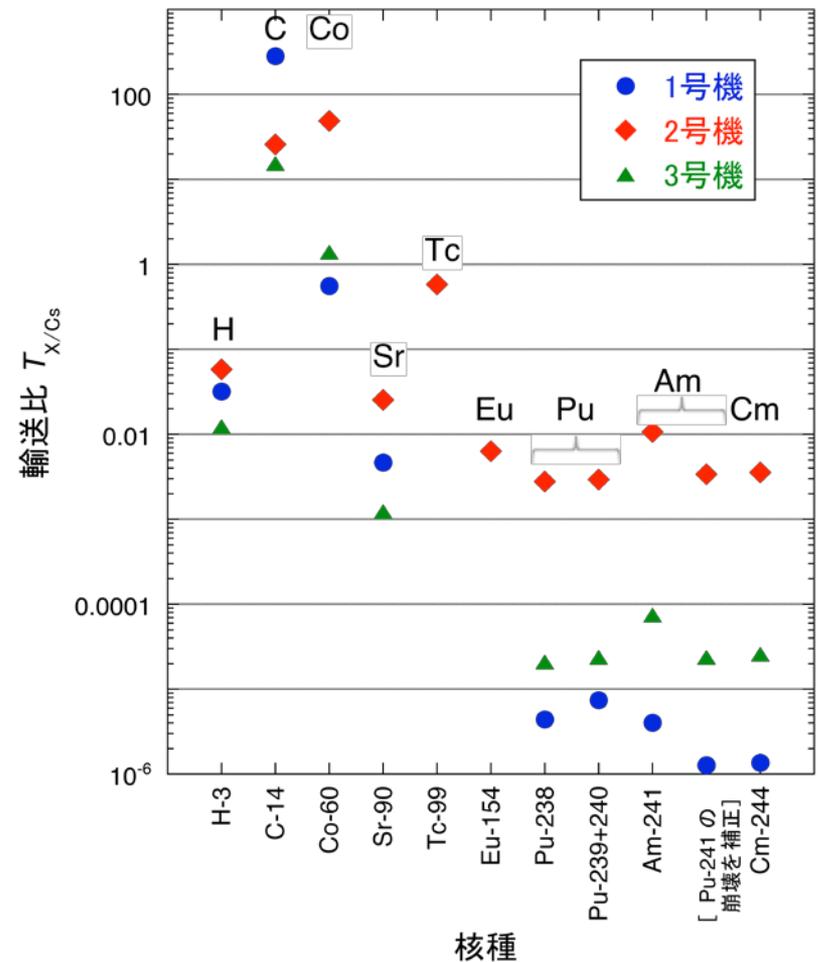


チェルノブイリ発電所事故

Sr 輸送比の距離依存性

# 原子炉建屋内部で採取された瓦礫への輸送比

- 輸送比は、おおよそ次の順序であった。
  - $C > Co \geq Cs > Tc > H > Sr > Eu \sim Pu \sim Am \sim Cm$
- Co は不揮発性であり、燃料要素の他からの寄与（冷却水、クラッド）を考慮すべきである。
- ランタニドとアクチニドは同様の輸送比であった。
- 2号機の値が大きく、原子炉の依存性が認められた。



建屋内にて採取した瓦礫(1と3号機の1階)、床塗膜(2号機の5階)への輸送比

# 種々の瓦礫類の汚染

- ❖ 1号機原子炉・タービン建屋の固体試料への放射性核種の移行ふるまいを検討した。(図1)
  - 損傷燃料からの移行しやすさは、C、I~Se、Cs、Sr~H-3、Tc、Eu~Pu~Am~Cmの順である。
  - 原子炉建屋最上階では、他に比べて大きな輸送比が見られる場合があり、局所的な分布がうかがわれる。
  - CoとNiは輸送比が見かけ上大きいですが、不揮発性であるので燃料以外からの寄与が大きいといえる。
  - 汚染水を経由した汚染が重なる場合、Srの輸送比が増大する。
  - タービン建屋からの試料でUが検出された。U同位体間で輸送比は一致せず、天然由来であることを示す。
- ❖ 輸送比は対数正規分布を示しており(図2)、今後分類や統計的取り扱いを検討する上で考慮すべきである。

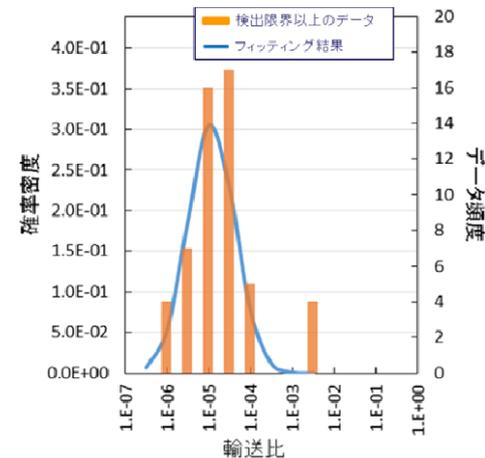
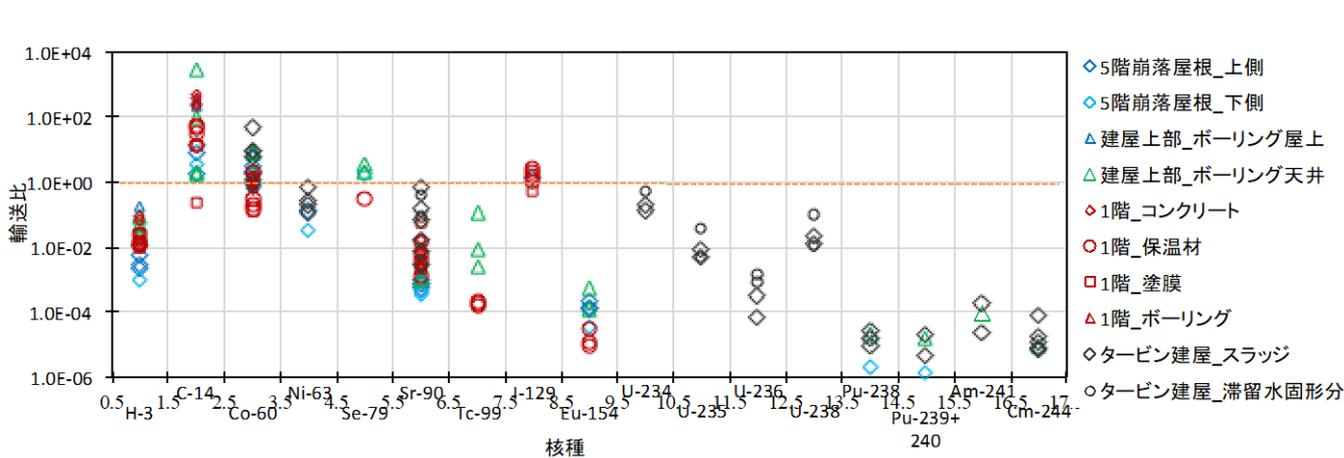
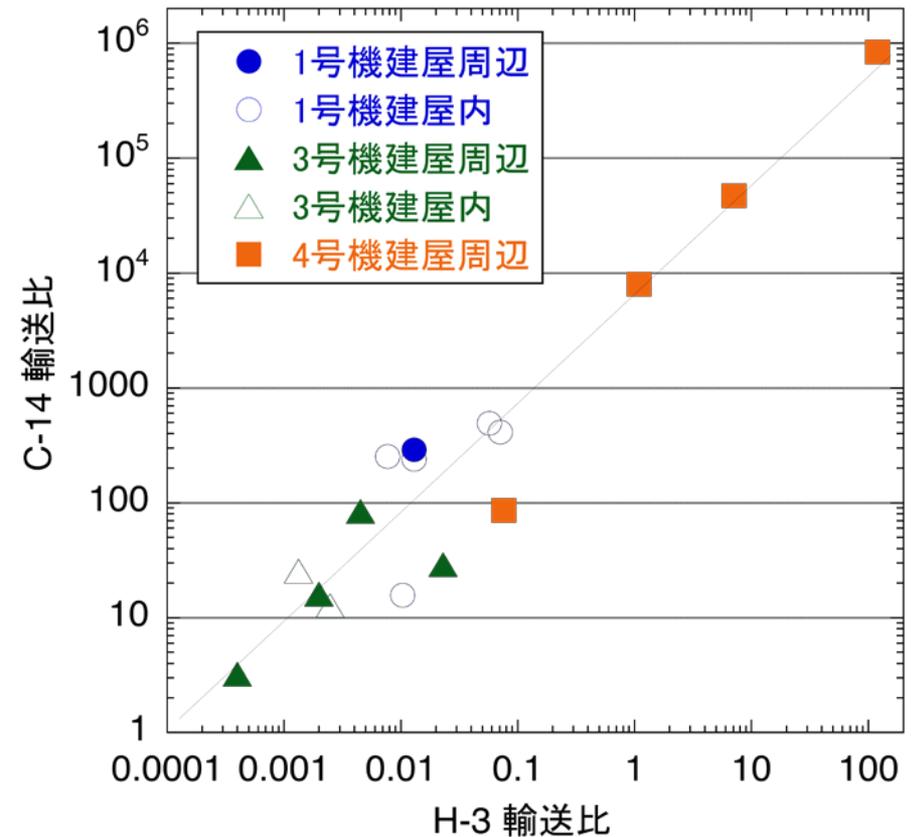


図1 1号機原子炉建屋及びタービン建屋内で採取された瓦礫に係る輸送比

図2 Puなど核種の移行分布 (対数正規分布によるフィッティング)

瓦礫への移行における水素 ( $^3\text{H}$ ) と炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) の相関

- $^3\text{H}$ と $^{14}\text{C}$ の輸送比は幅広い値を取る。また、相関するように見受けられる。これは、 $\text{Cs}$ と $^3\text{H}$ - $^{14}\text{C}$ の間で輸送の過程が異なる事を示す。
- 4号機試料で相対的に輸送比が大きい。4号機は3号機から放射性核種が流れ込んだが、 $^3\text{H}$ と $^{14}\text{C}$ の輸送が $^{137}\text{Cs}$ に対して優先的である事を示唆する。



原子炉建屋の内外で採取された瓦礫の  
 $^3\text{H}$ と $^{14}\text{C}$ 輸送比の相関

## (つづき)

-  $^3\text{H}$ と $^{14}\text{C}$ の生成量との比較 -

- 核燃料中で、 $^3\text{H}$ と $^{14}\text{C}$ の生成はそれぞれ核分裂と放射化の寄与が大きい。
- $^{14}\text{C}$ の輸送比はCsより大きいことから、被覆管の損傷に伴う放出が示唆される。
  - 燃料から放出された過程が $^{137}\text{Cs}$ など揮発性の核分裂生成物と異なった可能性がある。
- $^3\text{H}$ と $^{14}\text{C}$ の輸送比は放射化による生成量の比と異なるので、 $^3\text{H}$ はFPの寄与が示唆される。
  - $^3\text{H}$ は、燃料に生成したうちの約半分が被覆管のジルカロイに取り込まれる\*1。事故の過程でジルカロイは酸化され水素を放出したものである。

核燃料に由来する $^3\text{H}$ と $^{14}\text{C}$ の放射能\*2

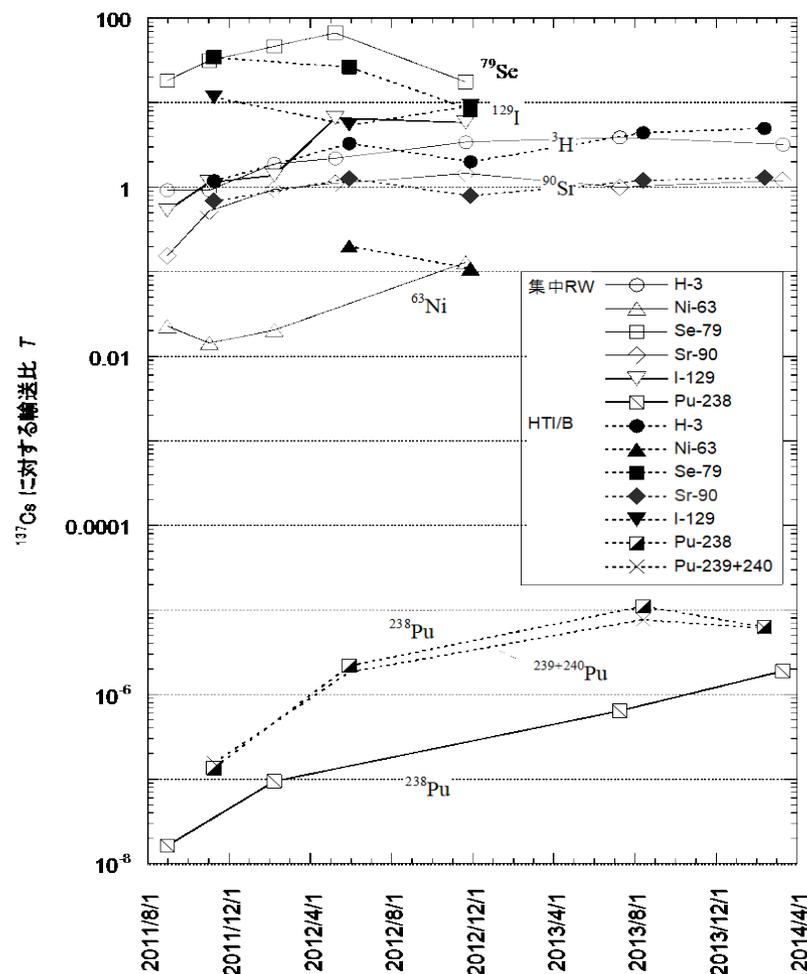
核種	放射化生成物	核分裂生成物	合計
$^3\text{H}$	$1.04 \times 10^5$	$3.37 \times 10^{15}$	$3.37 \times 10^{15}$
$^{14}\text{C}$	$6.76 \times 10^{11}$	$7.89 \times 10^8$	$6.77 \times 10^{11}$

\*1 Manson Benedict et al., 清瀬量平訳, “原子力化学工学,” 第11章, 4.1トリチウム, 日刊工業新聞社 (1983).

\*2 西原 健司, 岩元 大樹, 須山 賢也, “福島第一原子力発電所の燃料組成評価,” JAEA-Data/Code 2012-018 (2012).

# 滞留水への輸送比の時間依存性

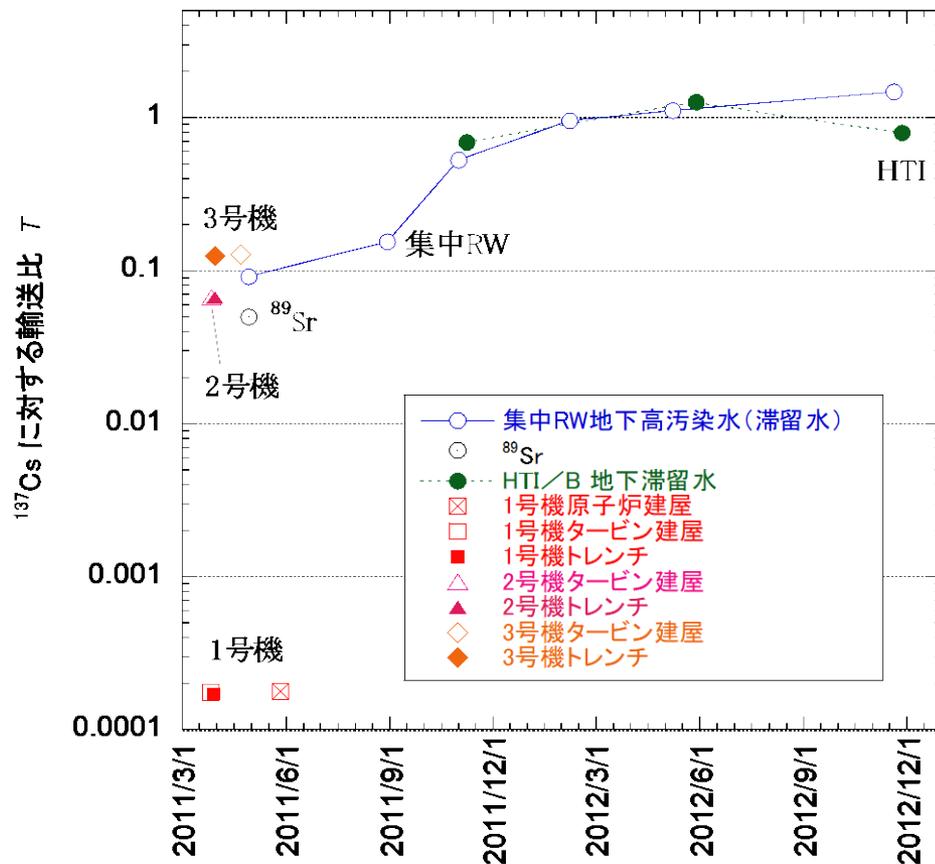
- $^3\text{H}$ 、 $^{63}\text{Ni}$ 、 $^{79}\text{Se}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ と $^{129}\text{I}$ はいずれの滞留水試料からも定量され、輸送比はおよそ次の順序であった。
  - $\text{Se} > \text{I} > \text{H} > \text{Cs} \sim \text{Sr} > \text{Ni} \gg \text{Pu}$
- 変動は1桁ほどに収まる。滞留する場所の影響は伺えない。
- Srは漸増する傾向を示し、平成24年からCsと同様となった。事故の初期においては、Srの寄与はCsに比べて小さい。
- $^{238}\text{Pu}$ は $10^{-6}$ 程度以下であり、滞留水への移行は小さい。希土類元素も同様であると思われる。



プロセス主建屋(集中RW)及び高温焼却処理建屋(HTI/B)滞留水への放射性核種の輸送比

# Srの滞留水への移行 - 移行プロセスの変化 -

- Srの輸送比は、事故から間もない初期において原子炉ごとに値が異なる。
- 2011年10月頃まで徐々に増加することから、損傷した燃料から冷却水への移行がCsに比べて見かけ上ゆっくりと進んだ。
- Srは燃料に固溶し、不揮発性であるから、燃料の外周部やクラックに近い場所から優先して汚染水へ移行したと考えられる。
- 1号機の値は他に比べて小さく、5月末頃まで低い。
  - 1号機の汚染水は、2号機を経由して3号機や集中廃棄物処理建屋へ移送される。
  - 汚染水の処理が開始されるまでは他から隔離されており、また、事故の初期過程での放出が支配的であった。
  - 1号機炉心の損傷において水の損失が速やかであり、Srの溶出がごく小さかったことを示唆する。



平成23年8月以後に採取された滞留水に含まれる核種の輸送比

# 汚染ふるまいを推定するための元素分類

- 分析により求められない場合、核種の化学的な性質を元にして推定することとなる。
- 核種の分類について、米国NRCが TMI 事故の経験を元にした分類を報告している。
- 福島第一原子力発電所の汚染に関しては、事故進展の様子が TMI と異なるので、汚染のふるまいを適切に表現するように検討する必要がある。

## Element groups in NUREG-1465\*1

Group	Title	Elements in group
1	Noble gases	Xe, Kr
2	Halogens	I, Br
3	Alkali metals	Cs, Rb
4	Tellurium group	Te, Sb, Se
5	Barium, strontium	Ba, Sr
6	Noble metals	Ru, Rh, Pd, Mo, Tc, Co
7	Lanthanides	La, Zr, Nd, Eu, Nb, Pm, Pr, Sm, Y, Cm, Am
8	Cerium group	Ce, Pu, Np

\*1 L. Soffer et al., "Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants," NUREG-1465 (1995).

# 分析データに基づく元素の分類

- 分析データと輸送比による検討を元にして元素の分類をすると、米国 NRC による分類に対して次の違いがある。
  - H、C を 1 つのグループとして加えた。
  - 遷移金属は、Ni や Ag などに加えた。
  - 多価のアクチニドとランタニドをまとめた。
- また、複数のソースタームの寄与を考慮する必要がある。
- 今後は、分析データの蓄積に伴い、改訂を検討する。

Group	Title	Element <sup>*1</sup>	
		Fuel	Activation
1	Light elements	H	C
2	Alkaline metals	Rb, Cs	
3	Alkaline earths	Sr, Ba	Ca
4	Transition metals	Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Sn, Sb	Mn, Fe, Co, Ni
5	Chalcogens	Se, Te	
6	Rare earths, actinides	Y, Zr, Nb, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, U, Np, Pu, Am, Cm	
7	Halogens	Br, I	Cl
8	Noble gases <sup>*2</sup>	Kr, Xe	

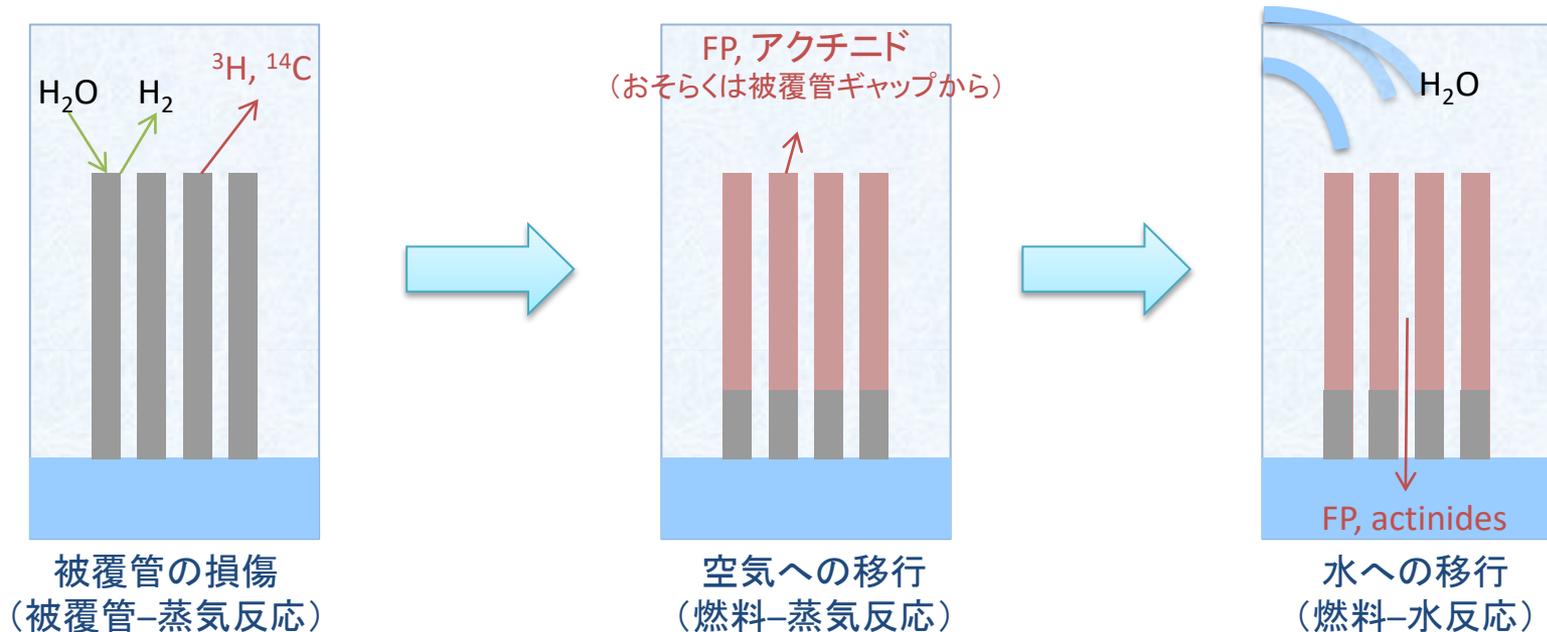
\*1 *Element in Italic* was not detected and grouped by chemical similarity.

\*2 No consideration on solid waste management.

## 汚染のモデル

## － 燃料損傷の段階における核種の放出に関する仮定 －

- 汚染のふるまいを推定する上で、事故進展過程のモデルは有用であり、燃料損傷段階は次のような過程が考えられる。
  - 冷却水の欠乏、被覆管の酸化
    - 水蒸気を含む気相への移行
    - 被覆管中の $^3\text{H}/^{14}\text{C}$ の酸化と放出、水蒸気に吸収されての移動
  - 被覆管の損傷、燃料から空気への放出
    - 被覆管ギャップのCs等揮発性核種の放出
    - 燃料粒界からの不揮発性の核種を含めた放出
  - 水冷却に伴う燃料から水への放出
    - 水溶性物質の放出

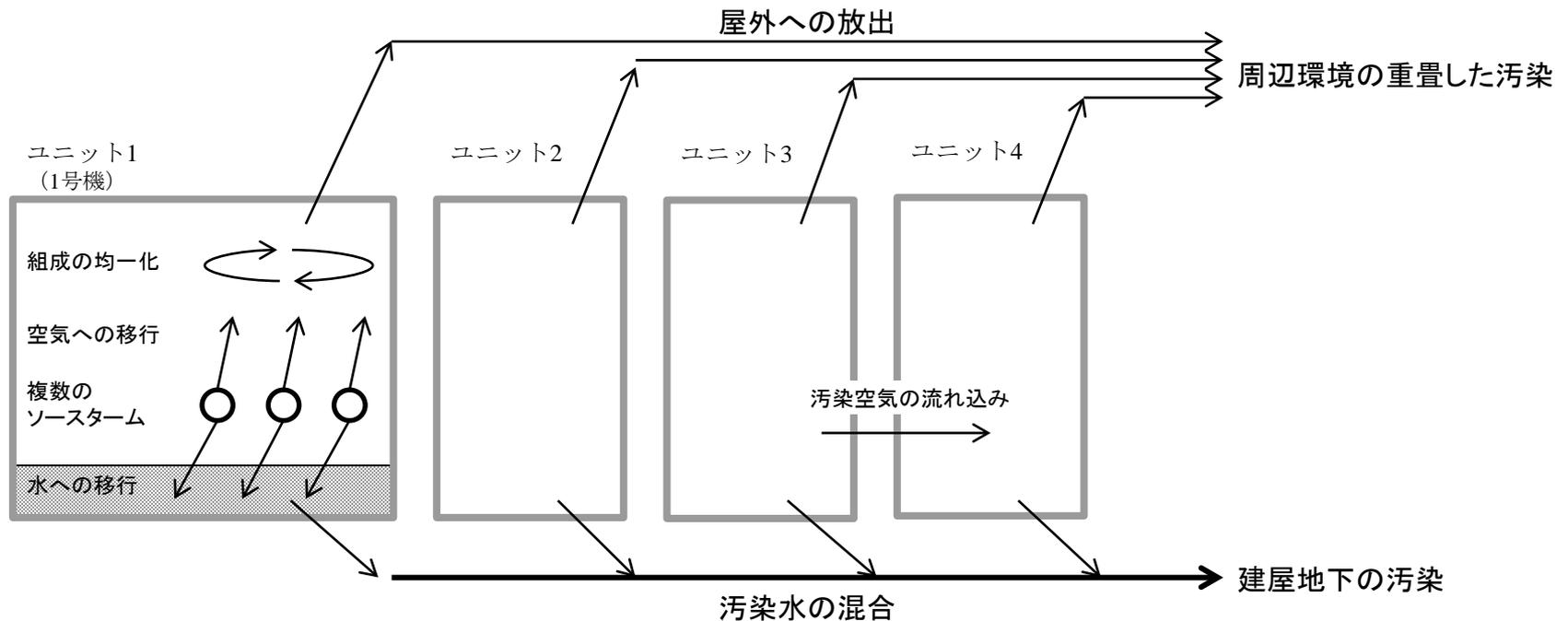


空気と水を経由する段階的な放射性核種の輸送モデル

# 汚染のモデル

## － 原子炉建屋からの放出に関する仮定 －

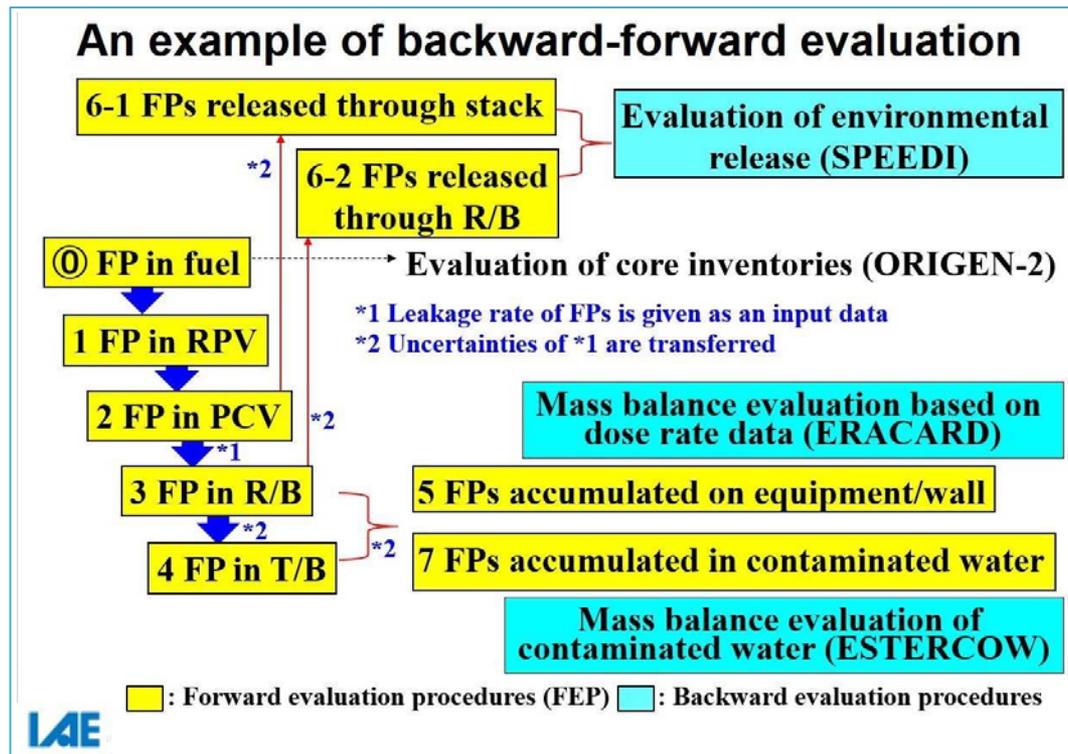
- 独立したソースターム
  - － 損傷した1、2及び3号機の燃料は独立したソースタームであり、汚染の核種組成は異なる。
  - － 他に、冷却水・クラッドによる寄与が認められる。
- 核種の移行過程
  - － 媒質(空気と水)により核種の移行が異なる。
  - －  $^{137}\text{Cs}$ – $^{90}\text{Sr}$ 、 $^3\text{H}$ – $^{14}\text{C}$ と $^{60}\text{Co}$ は、移行の過程が異なると考えられる。
- 原子炉閉じ込め機能の喪失に伴う汚染の拡大
  - － 建屋の外にあっては、汚染は重畳した。
  - － 3号機から4号機へ核種は移行した。



空気と水を経由した汚染モデル

# 分析データの蓄積、データに基づくモデル、その検証へ - おわりにかえて -

- 汚染物・廃棄物の分析データは放射性核種の移行ふるまいを検討する重要なデータである。
- 移行ふるまいを理解するためには、要素反応を考慮した検討と比較対照する「双方向」の取り組みが不可欠である。



## 正と逆方向の評価\*

\* “An approach toward evaluation of FP behavior in NPPs under Severe Accidents,” S. Uchida et al., Proceeding of NURETH-16. 3993 (2016).

# 参考資料

- 事故に由来する廃棄物
  - ガレキ・伐採木等の管理状況, 東京電力ホールディングス(株), 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議, 月例.
  - 東京電力(株)福島第一原子力発電所 固体廃棄物 保管管理計画, 東京電力株式会社, 2019年6月版, 2019年6月27日.
- 通常の放射性廃棄物
  - Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals, IAEA, Safety Series No. 111-F (1995).
  - Classification of Radioactive Waste, IAEA, No. GSG-1 (2009).
  - Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities, IAEA, IAEA-TECDOC-1380 (2003).
  - 放射性廃棄物の種類に応じた処分方法, 資源エネルギー庁.  
[http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo02.html](http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo02.html)
  - 原子力発電所の廃止措置, 電気事業連合会, パンフレット (2016).
  - 放射性廃棄物の工学, 長崎晋也, 中山 真一(共編), オーム社 (2011).
- 分析データ
  - 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議, 随時報告.
    - ◇ 福島第一原子力発電所の固体廃棄物試料分析(現状までの成果報告), ibid., 第42回, 平成29年5月25日.
  - 東京電力福島第一原子力発電所において採取された汚染水および瓦礫等の分析データ集, 浅見 誠 ほか, JAEA-Data/Code 2017-001 (2017).
  - 福島第一原子力発電所事故廃棄物に関する分析データ集 FRAnDLi. <https://frandli-db.jaea.go.jp/FRAnDLi/>
- 汚染ふるまい
  - Contamination of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station with actinide elements, Y. Koma et al., Radiochimica Acta, 107(9-11), 965–977 (2019).
  - Management of Radioactive Waste after a Nuclear Power Plant Accident, OECD NEA (2016).
  - Estimation of the Inventory of the Radioactive Wastes in Fukushima Daiichi NPS with a Radionuclide Transport Model in the Contaminated Water, A. Shibata et al., J. Nucl. Sci. Technol., 53(12), 1933–1942 (2016).
- 一覧
  - 福島第一原子力発電所の廃棄物・汚染物に関する情報. <https://clads.jaea.go.jp/jp/rd/tech-info.html>