

1F瓦礫類・建屋解体物等に対する分析について

2023年12月4日

TEPCO

東京電力ホールディングス株式会社

固体廃棄物の放射能濃度管理への移行に向けた対応の基本方針 **TEPCO**

	運用方法	工事計画段階	工事实施段階	保管管理段階
現在	発生後の表面線量率で区分する運用 瓦礫類	<ul style="list-style-type: none"> 空間線量率測定や、表面線量率測定結果に基づき廃棄物を分類し、工事計画を立案 	<ul style="list-style-type: none"> 発生した廃棄物を材質毎に分別し、表面線量率を測定。容器収納要否を判断 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物自体（野積みの場合）や、容器の表面線量率を測定し、その測定結果に応じて一次保管エリアに保管
将来（目標）	事前に汚染形態を把握し区分した上で解体する運用 建屋解体物等	<ul style="list-style-type: none"> 事前に試料採取を行い、核種分析を実施 分析結果に基づき廃棄物を分類し工事計画に反映 	<ul style="list-style-type: none"> 予め定めた計画に従い、廃棄物の分類、容器収納を実施 	<ul style="list-style-type: none"> 予め計画に定めた場所に、廃棄物を保管

放射能濃度管理への移行に向けた対応の基本方針

瓦礫類

表面線量率により区分・管理が行われている既発生 of 瓦礫類について、放射能濃度に推定・管理ができる手法を構築する。

建屋解体物等

将来の施設解体に伴い発生する建屋解体物等について、施設の汚染状況に応じた合理的な解体方法、廃棄物対策・管理（放射能濃度管理を含む）の方法を整備する。

- 廃棄物の放射能濃度管理への移行の必要性を下表に示した。

表 廃棄物の放射能濃度管理の必要性

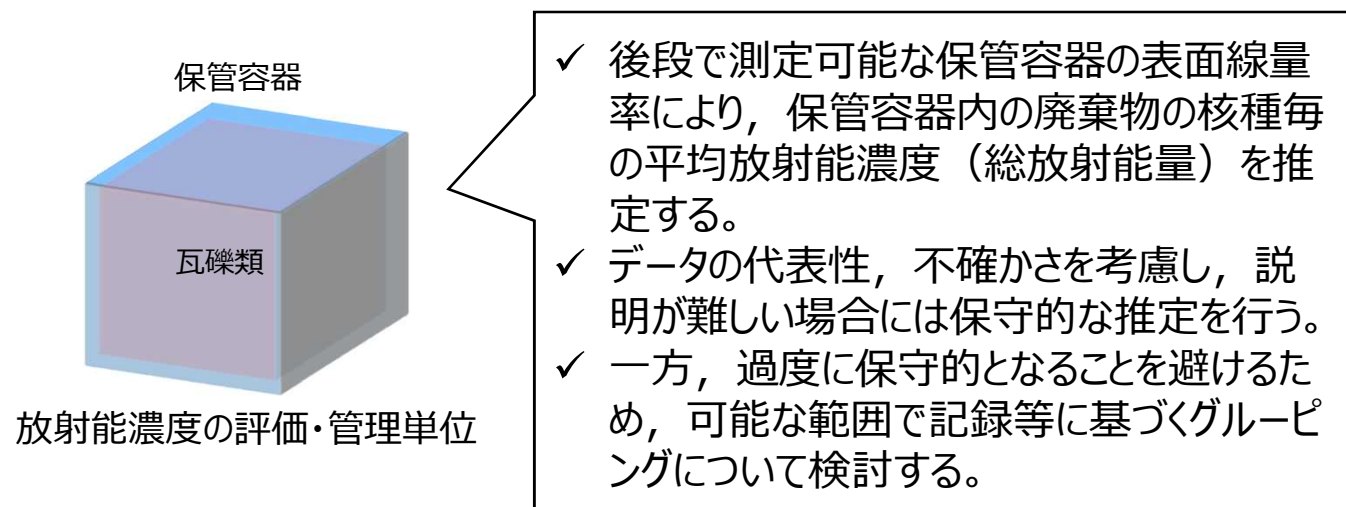
プロセス	瓦礫類（既発生のもの）	建屋解体物等（将来発生するもの）
保管	<ul style="list-style-type: none"> • 処理・詰め替え等のプロセスにおける分別の要否等の検討において放射能濃度の評価が必要となる（「βあり」に分類した廃棄物の混合可否の判断など）。 	<ul style="list-style-type: none"> • 将来、膨大な量の廃棄物の発生が見込まれるため、放射能濃度を踏まえ、再利用による保管対象とする廃棄物量の低減、性状・リスクに応じた合理的な保管方法の検討、保管施設の整備を進めたい。
再利用	<ul style="list-style-type: none"> • 放射能濃度を踏まえた再利用方法の検討を実施する。 • 基準適合性の確認（検認等）への対応において、再利用対象物の放射能濃度の評価が必要となる。 • 既実施の再利用(コンクリートガラ)について、放射能濃度の観点から安全に係わるエビデンスの補強が望ましい。 	<ul style="list-style-type: none"> • 放射能濃度を踏まえた再利用方法の検討を実施する。 • 解体前に汚染状況を把握し、できるだけ再利用対象を増やせるように除染・解体を進めるものとしたい。 • 基準適合性の確認（検認等）への対応において、再利用対象物の放射能濃度の確認が必要となる。
処分	<ul style="list-style-type: none"> • 処理・処分方策の検討，BAT※への対応を含めた施設設計・安全評価において，核種組成，減衰特性等の情報が必要となる。 • 処分に係る許認可や後段規制への対応において，放射能濃度が管理されている必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> • 処理・処分方策の検討，BAT※への対応を含めた施設設計・安全評価において，核種組成，減衰特性等の情報が必要となる。 • 処分に係る許認可や後段規制への対応において，放射能濃度が管理されている必要がある。

※：Best Available Technique（技術的に最善の手段）

(1) 瓦礫類に対する分析方針について

放射能濃度管理に向けた対応方針（瓦礫類）

- 保管容器に収納された状態の廃棄物の平均放射能濃度（総放射エネルギー）の管理を行うことを想定する。保管容器を管理単位とし、放射能濃度を評価・管理する手法の構築を行う。



- 保管容器の表面線量率及び記録による評価・管理を行う手法を構築する。類似の特性を有する廃棄物群を記録に基づき区分できる場合には、評価単位のグルーピングについて検討を行う。
- バラツキの要因を理解し、代表性や不確かさを考慮した評価方法を検討する。これらの検討には、後述の建屋解体物等の検討成果（バラツキ・不均一性に対する要因分析等）も活用する。

概略工程（瓦礫類）

- 2029年度以降は屋外一時保管解消に伴い合理的な試料採取が難しくなる。そのため、瓦礫類の放射能濃度管理・評価手法の構築の目標時期を2028年度に設定し、屋外一時保管解消に向けた作業（減容や容器詰め替え等）と連携させて試料採取・分析を進めていく。
- 試料採取・分析は、減容処理の順番や再利用の安全性に関するエビデンスの補強を早期に進めたいことを踏まえ、低線量のものから優先して対応していく。
- 後述の建屋解体物等を対象とした分析結果も活用する（バラツキ・不均一性に対する要因分析等）。

表 瓦礫類の分析の進め方

		時期										
		2023	2024	2025	2026	2027	2028	▼屋外一時保管解消	2029	2030前半	2030後半	
保管管理		屋外一時保管 → 建屋内保管への移行						保管容器 + 建屋内保管 (BG相当除く)				
				容器収納	詰め替え			分析試料の採取には、保管場所からの取出し、開蓋、保管場所への戻し等の作業が必要となる				
				減容 (破碎・切断)								
分析		BG～低線量瓦礫類 (<1m Sv/hめやす)			低～中線量瓦礫類 (<30m Sv/hめやす)			高線量瓦礫類等 (屋外一時保管を経ずに屋内保管された廃棄物)				
		<ul style="list-style-type: none"> 表面線量率 - 放射能濃度評価 核種濃度比の把握 			<ul style="list-style-type: none"> 表面線量率 - 放射能濃度評価 核種濃度比の把握 							

建屋解体物等をターゲットとした分析・評価結果
 バラツキの原因／不均一性に関するデータ／汚染経路・メカニズムに係る知見

廃棄物管理区分ごとの試料採取のタイミング

- 分析試料は、できるだけ保管容器収納前に採取することを基本とする。
- 屋外一時保管解消に向けた作業と連携させ、屋外一時保管、減容処理、容器詰め替えのタイミングを狙って試料採取を進める。
- 上記のタイミングでの試料採取ができない廃棄物については、廃棄物回収時（容器収納前）に試料採取を行う。
- なお、既に建屋内保管が行われている高線量瓦礫等に関しては将来の詰め替え等のタイミングでの試料採取を想定しているが、別途、非破壊測定技術等の適用についても検討を進める。

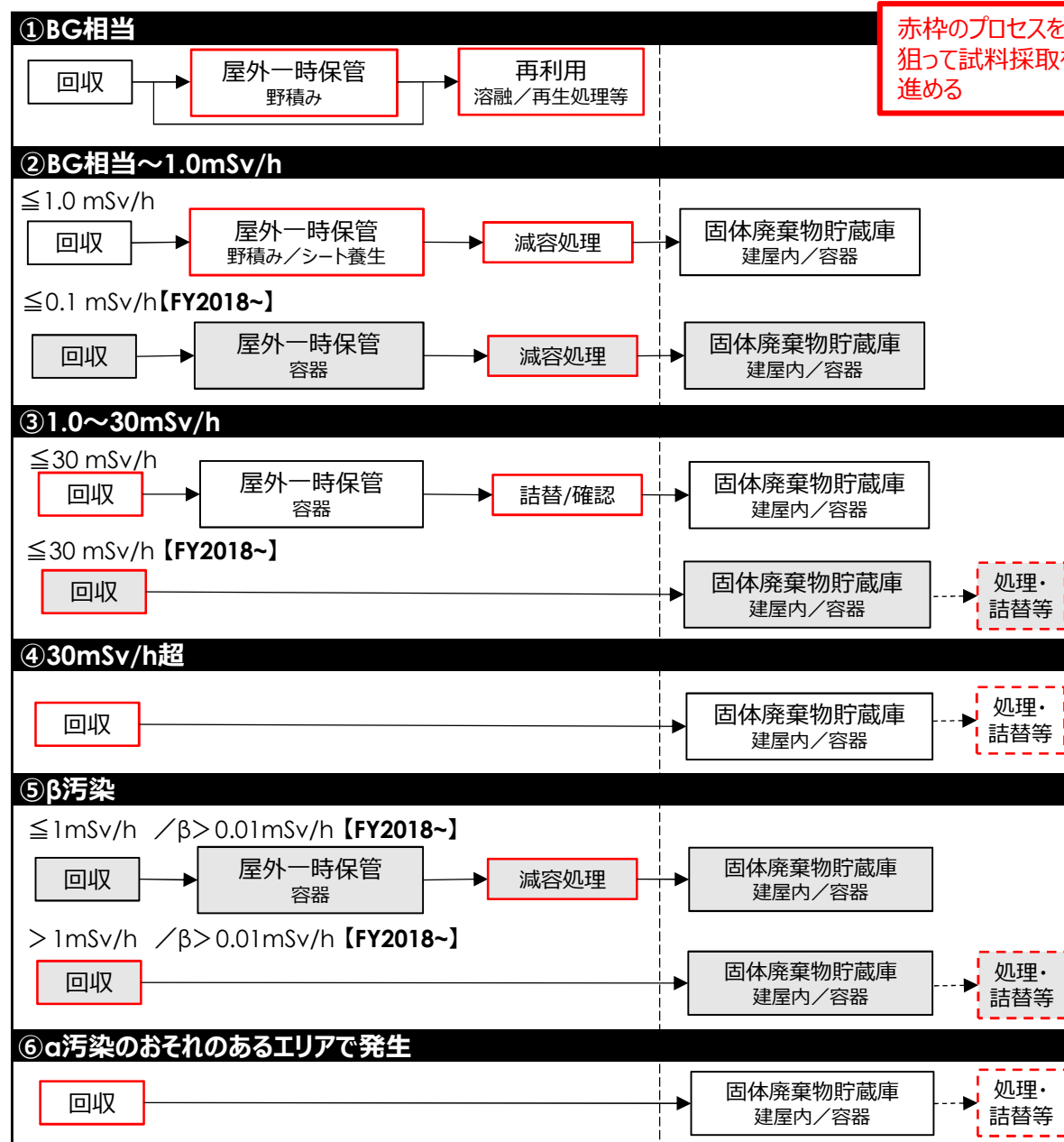


図 試料採取のタイミング

- 後段において測定可能な保管容器の表面線量率を管理指標とする。
- フォールアウト起源の汚染が支配的であること、保管容器の表面線量率を測定することを想定し、保管容器の表面線量率 – Cs-137濃度の相関性及びCs-137濃度をキー核種とした核種濃度比を定量化することで、保管容器内の廃棄物の放射能濃度を管理する方法を構築する。
- 表面線量率 – Cs-137濃度の相関性について、収納状態・汚染の不均一性によって多様な状態が想定されるため、数値解析による評価も組み合わせて検討を進める。

表面線量率 – Cs-137濃度の評価

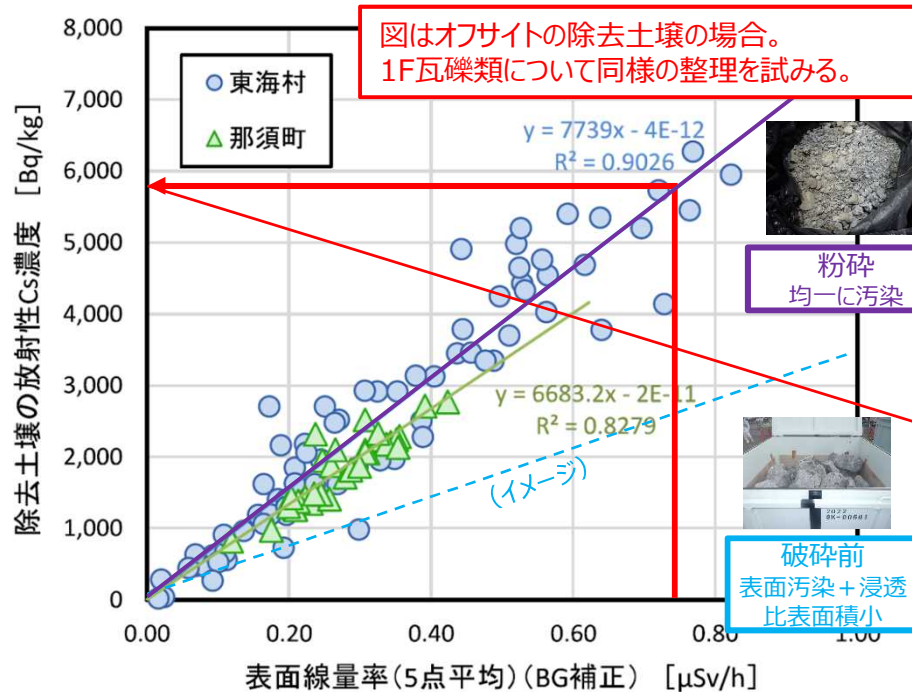


図 表面線量率 – Cs-137濃度の関係(イメージ)

Cs-137をキー核種とした核種濃度比の評価

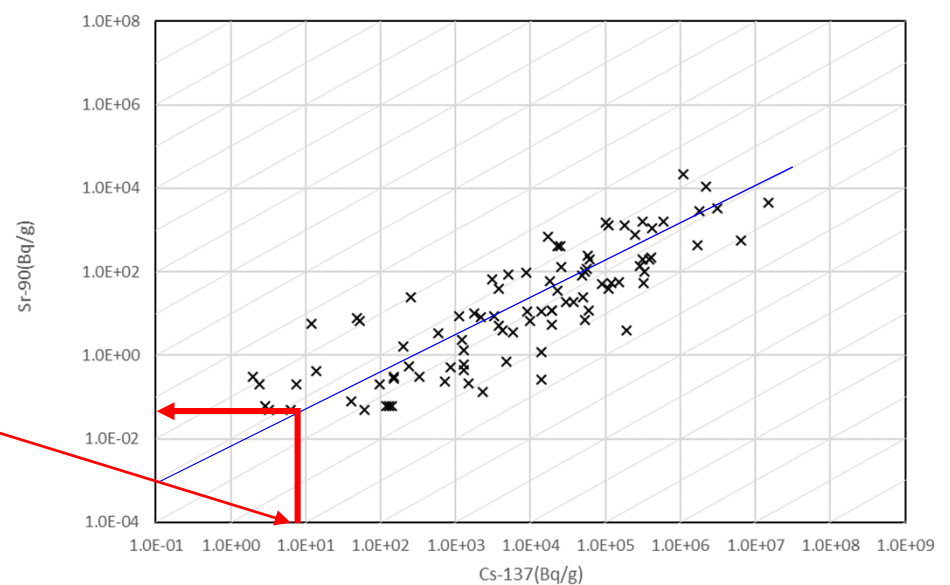


図 Cs-137濃度 – Sr-90濃度の関係 (イメージ)

瓦礫類のグルーピングについて

- 汚染傾向が類似の廃棄物を区分（分離）することで、核種濃度比の相関性の改善を進める。
- 記録等に基づく実廃棄物管理上のグルーピングの可否，分離したグループの評価方法等について検討を行い，合理的に実施可能であり且つ有効なグループの設定について検討を行う。
- 下記はFRAnDLi※のデータを用いた評価例による検討イメージ。

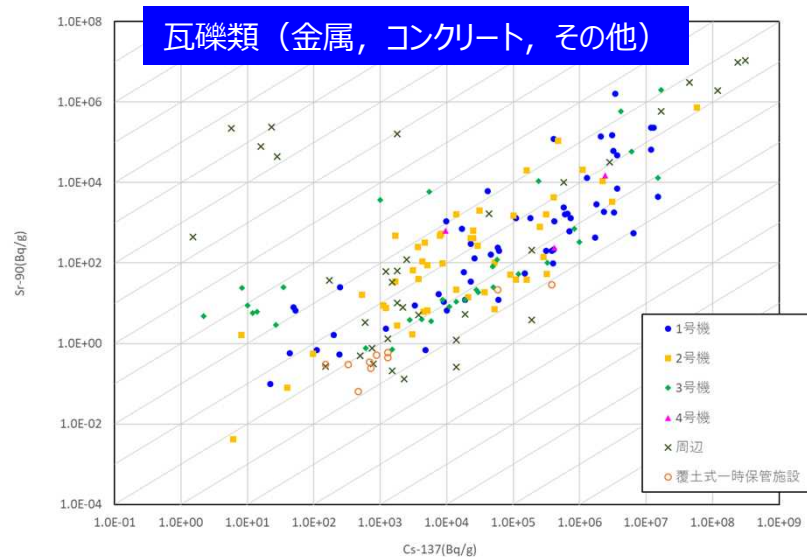
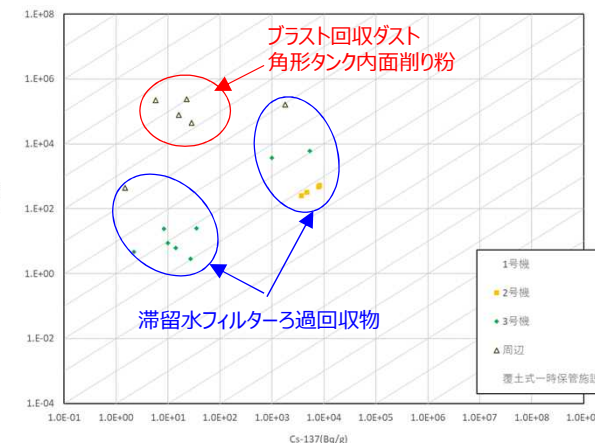
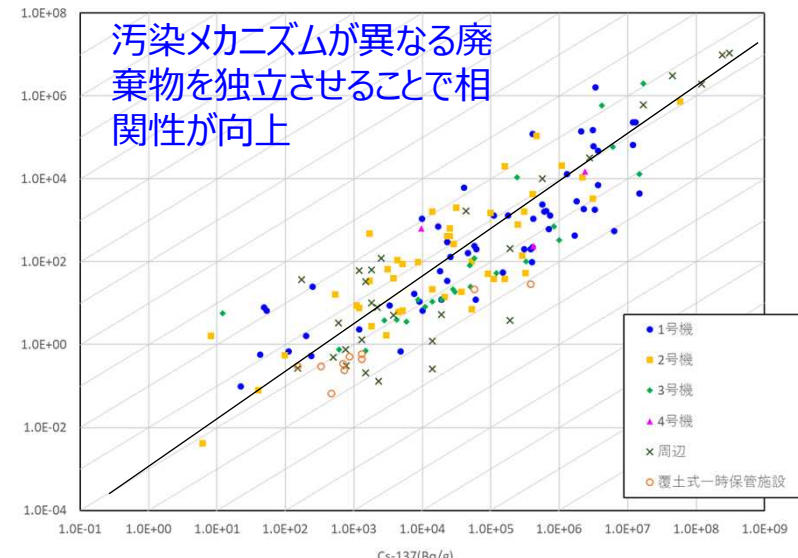


図 1F瓦礫類（金属，コンクリート，その他）の分析データ（Cs-137 vs Sr-90）



※FRAnDLi 分析データについて

- FRAnDLi(Fukushima Daiichi Radwaste Analytical Data Library)に登録されている分析データのうち、瓦礫類（金属，コンクリート，その他），土壤に区分されているもの（2023年10月時点）
- 分析データの単位についてBq/cm³のものが混在していたが，暫定的に未補正でグラフにプロットしている（単位に係らず核種濃度比は評価可能であるため）。
- 以下，本資料中に掲載した分析データについては同様とする。

核種毎の評価

- Cs-137をキー核種とした核種濃度比の整理は、核種毎に検討を行う必要がある。
- 下記は、コンクリートのCs-137濃度とSr-90,C-14,I-129,Pu-239+240濃度の関係をグラフにしたもの（例示として処分で支配的となる核種をピックアップ）。
- それぞれの傾向・課題等を評価し、その結果を分析計画に反映し、分析データ蓄積を進めていく。

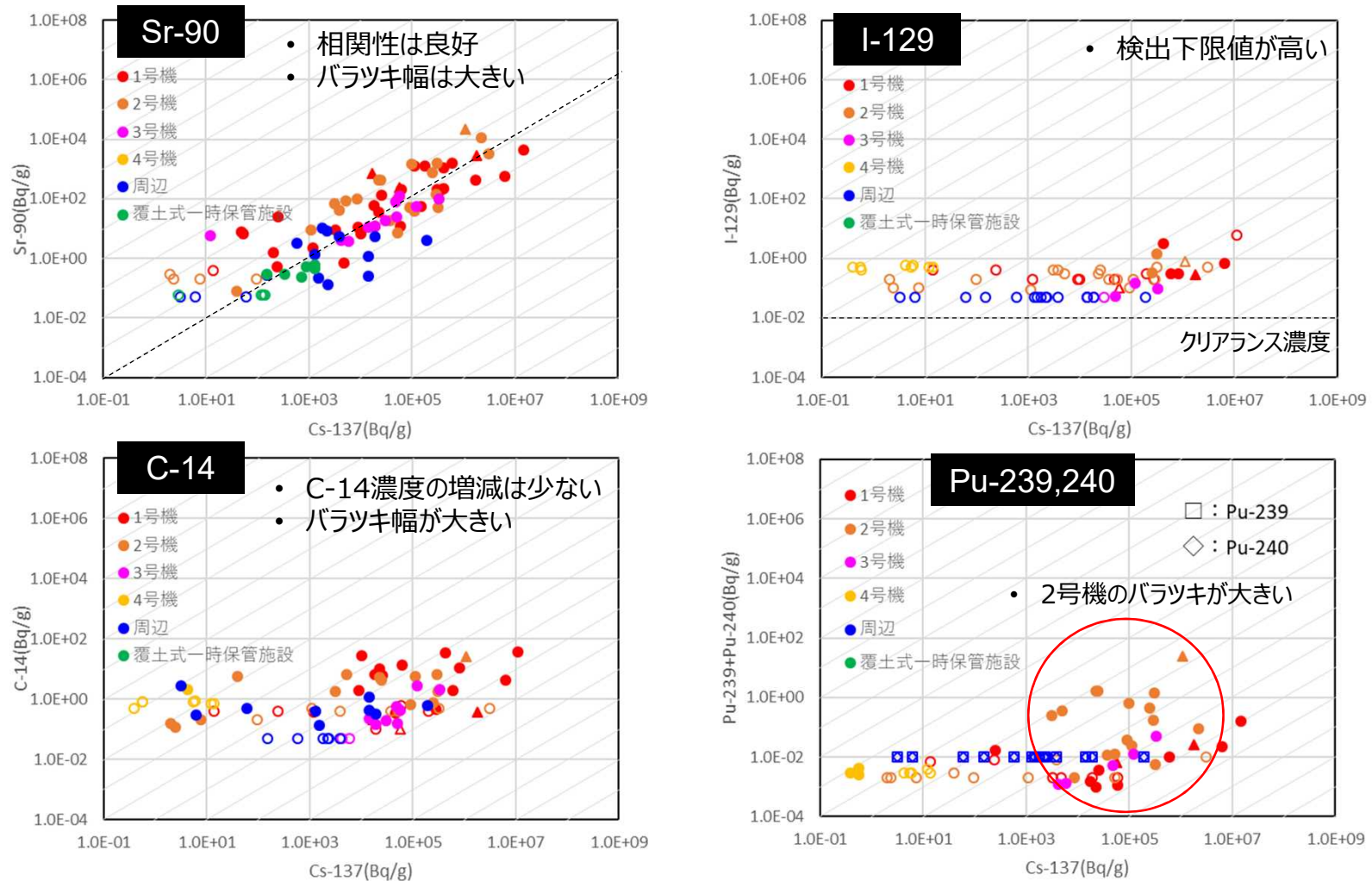


図 Cs-137をキー核種とする核種濃度比の整理の例

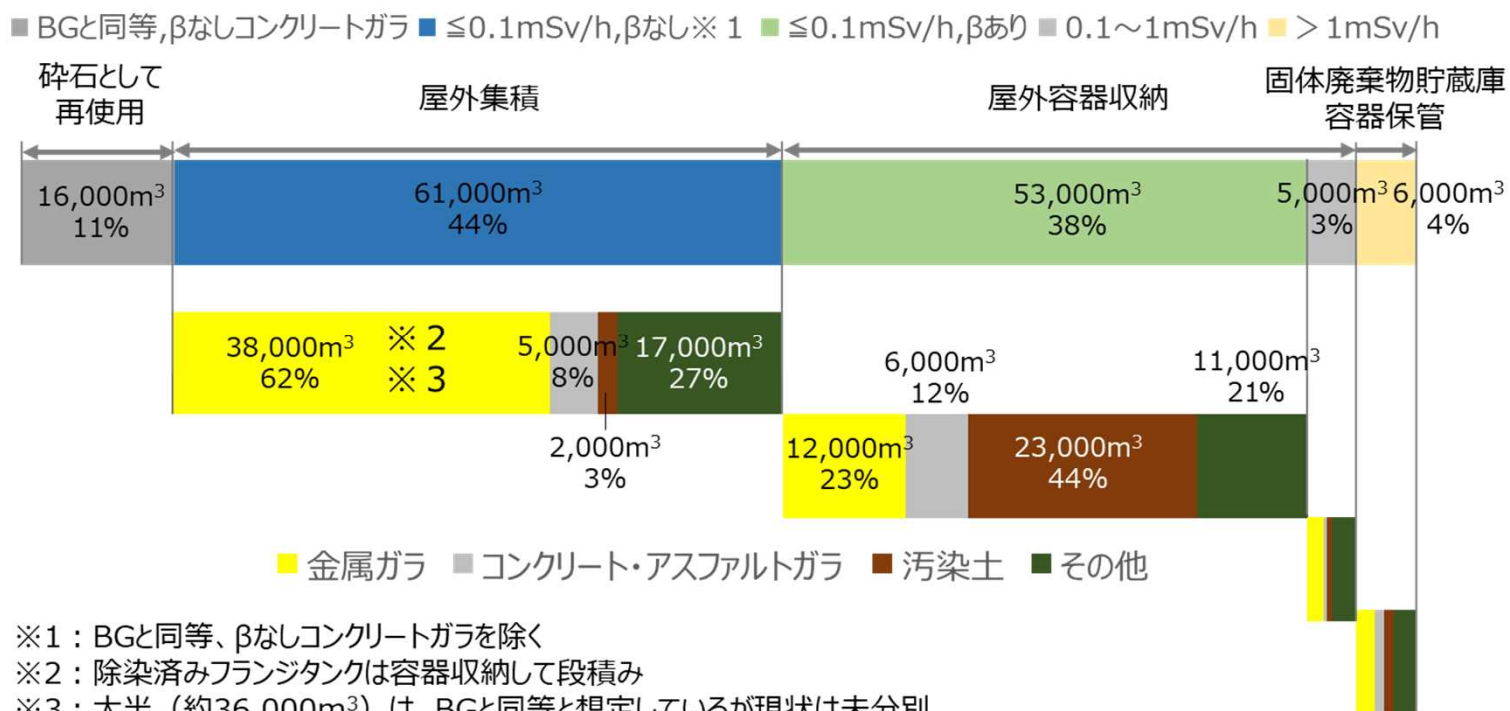
材質別の評価

- 2023年10月時点でFRAnDLiに登録されている瓦礫類の種類（材質）別の分析データ数は右表のとおり。
- 金属は発生量に対して分析データ数が少ない。その他は不燃物・可燃物・スラッジ等で構成されており、各々の分析数は少ない。これらは優先的に分析データの蓄積を進める必要があると考える。
- 瓦礫類（2018年度以降）については5万m³強がβありに分類されているが、既存の分析データでその傾向は確認できない。βありに区分した廃棄物の核種濃度比の確認を進める。

表 瓦礫類の分析数

材質	分析データ数
金属	20
コンクリート	128
土壌	380
その他	101

(2023年10月時点)



※1 : BGと同等、βなしコンクリートガラを除く
 ※2 : 除染済みフランジタンクは容器収納して段積み
 ※3 : 大半（約36,000m³）は、BGと同等と想定しているが現状は未分別

瓦礫類の分析実績及び課題について

- FRAnDLiに登録されている「金属」「コンクリート」「その他」「土壌」の分析データの例として、Cs-137とC-14,Sr-90,I-129,Pu-239+240の放射能濃度の関係のグラフを参考（p.21～24）に整理した。
- それぞれのグラフより抽出される主な課題、今後の検討の着目点等を下表に整理した。

表 今後の分析の主な課題・着目点

種類	今後の分析の主な課題・着目点
共通 (全体)	<ul style="list-style-type: none">• 処分等における重要核種の分析データ拡充（C-14,I-129等）• 検出下限値の改善（C-14,I-129等）• βありに区分された瓦礫類の核種濃度比の確認
金属	<ul style="list-style-type: none">• 分析数の確保• 腐食生成物，曝露環境等の影響の確認
コンクリート	<ul style="list-style-type: none">• 放射能濃度のバラツキの原因理解（C-14，Pu-239+240等）• 劣化状態，曝露環境等の影響の確認• 浸透などによる汚染の不均一性の確認
その他	<ul style="list-style-type: none">• 汚染傾向の類似性を考慮したグルーピングの実施• 不燃物等の放射能濃度評価
土壌	<ul style="list-style-type: none">• 高線量側の土壌の分析データの拡充• 汚染傾向が異なる個体の把握

(2) 建屋解体物等に対する分析方針について

放射能濃度管理に向けた対応方針（建屋解体物等）

- これまでは、廃棄物発生後に表面線量率により区分・管理を実施し、放射能濃度の管理は未実施であった（瓦礫類として対応）。
- 今後は、予め施設の汚染状況を把握し、汚染状況に応じた除染・解体及び解体物の保管管理を行う方法に移行させていく。特定の施設を対象に一連の試検討を実施することで、汚染調査・評価方法、施設の解体方法・除染方法、廃棄物区分・保管方法、放射能濃度管理方法などの具体化を進める（解体モデルケース検討）。
- 検討対象とする施設は、3・4号廃棄物処理建屋（Rw/B）とする。
- 解体モデルケース検討では、施設の状態や曝露環境等と汚染分布の傾向、汚染メカニズム等を体系的にとりまとめ、将来の他の施設の解体に展開できる形で整理する。また、前述の瓦礫類の検討に対しても、不均一性やバラツキの程度・原因の理解を進める知見として活用する。

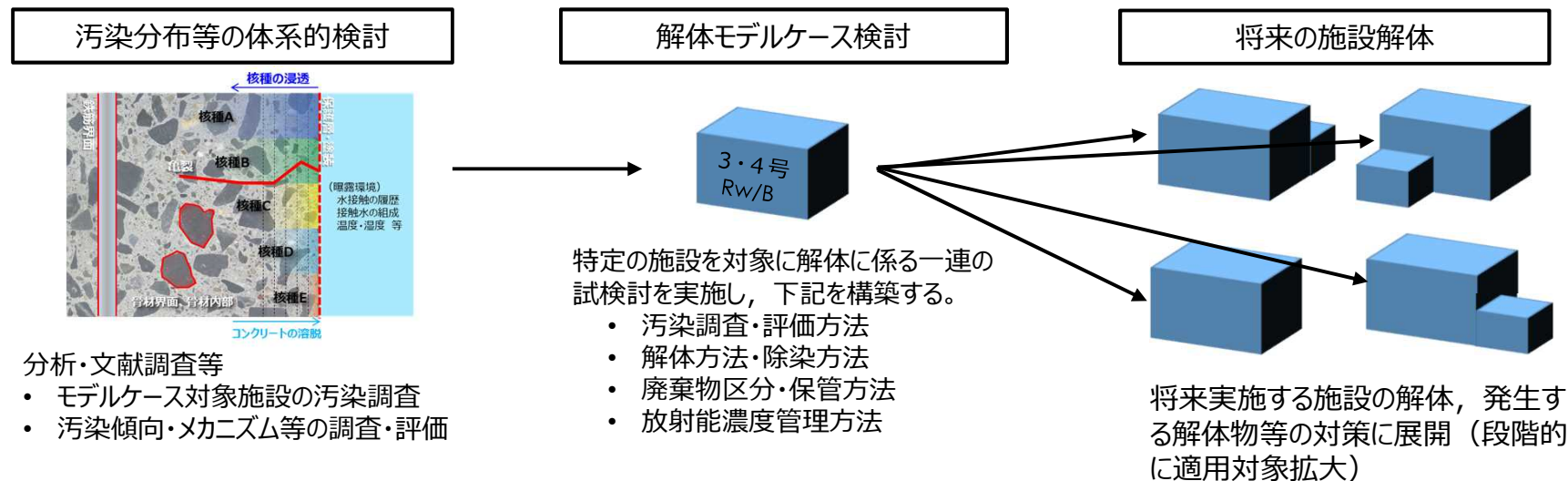


図 建屋解体物等の検討の流れ

概略工程（建屋解体物等）

- 解体モデルケース検討による解体等手法整備の目標時期を2028年度に設定する。目標時期の考え方は下記のとおり。
 - ✓ 2029年度以降の廃棄物の処理・保管管理等の計画の検討に展開する
 - ✓ 検討成果を瓦礫類の放射能濃度管理手法の検討に展開すること
 - ✓ 3・4号Rw/Bの解体時期（具体の工程は未定であるが2029年度以降と仮定）
- 建屋汚染に係る分析データは徐々に蓄積されていくため、まずは文献調査で汚染に係る基礎的知見を収集し、汚染状況を仮定してモデルケース検討を進める。分析データの蓄積に伴い、実際のRw/Bの汚染状態を想定した検討に移行させていく。
- 構築した各手法は、試験的な適用も含め段階的に適用対象を拡げていく。

表 建屋解体物等の検討の進め方

	時期								
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030前半	2030後半
解体・保管管理						試験的な適用も含め段階的に適用対象を拡大			建屋解体物等の保管管理 (合理的に区分された廃棄物管理)
モデルケース検討						↑ 解体方法・除染方法、保管・管理方法、放射能濃度管理方法			
						↓ 汚染調査・評価方法			
分析									解体対象施設の汚染調査

瓦礫類の放射能濃度管理手法検討に展開

バラツキの原因／不均一性に関するデータ
／汚染経路・メカニズムに係る知見

解体モデルケース検討について（案）

- 下図に解体モデルケース検討の流れを示す。
- 核種浸透状況の評価に関する評価手法及び対象施設の汚染分布調査結果から検討対象とする建屋の汚染状況を推定し、その結果に基づき、合理的な施設の汚染調査・評価方法、施設の解体方法・除染方法、解体物等の保管・管理方法、放射能濃度管理方法について試験等を実施する。

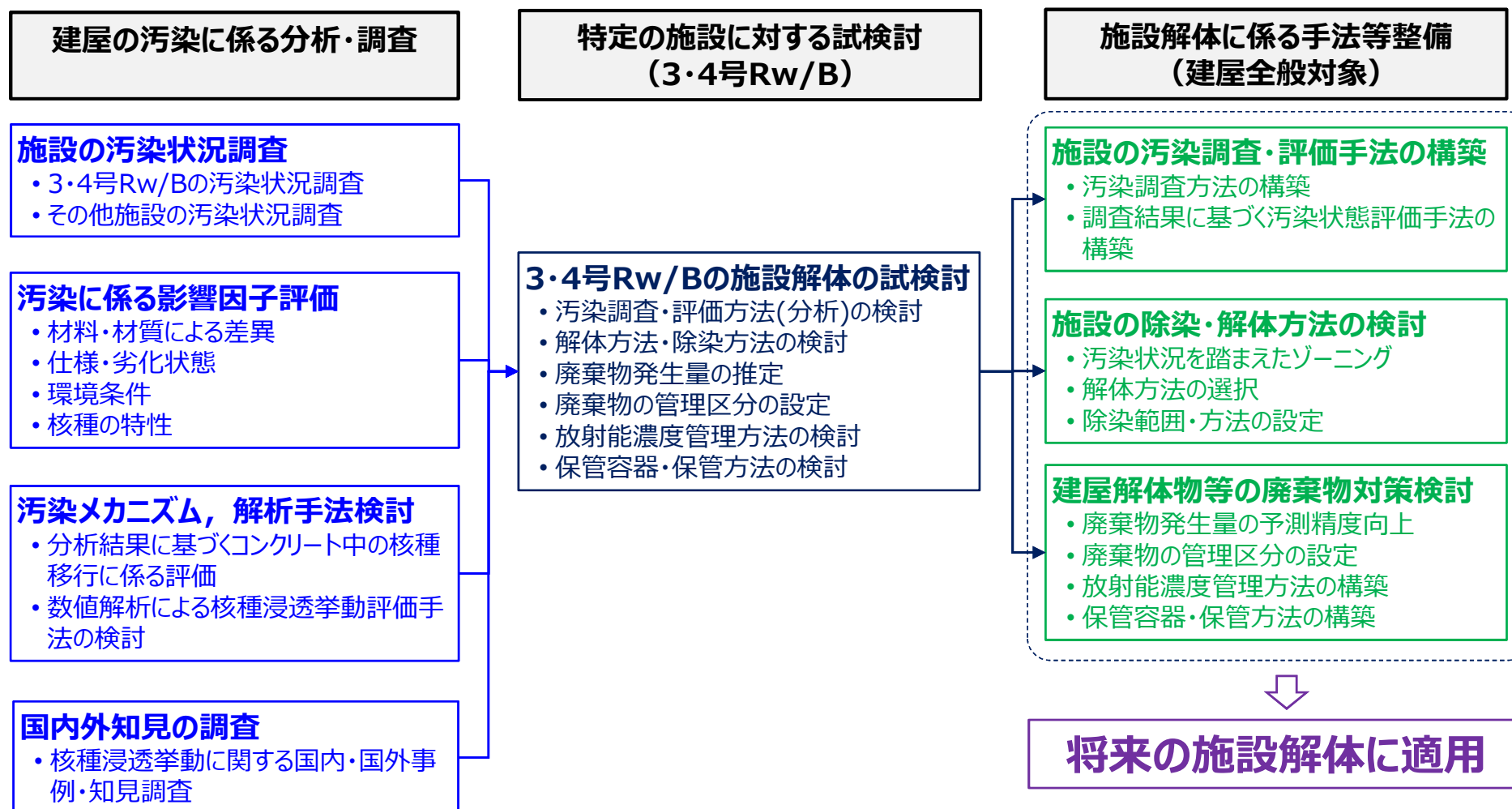


図 解体モデルケース検討の流れ

解体モデルケースの対象施設について

- 解体モデルケース検討の対象施設として、**3・4号Rw/B（廃棄物処理建屋）**を選定した。
- 当該施設を選定した理由は下記のとおり。
 - ✓ デブリ取り出しに向けた準備工事として比較的早期に解体に着手する可能性があること（具体的な工程は検討中）。
 - ✓ 事故炉に近接していること、滞留水と接触していることなどから、R/B,T/Bも含めた幅広い施設に適用できる成果取得が期待できること。

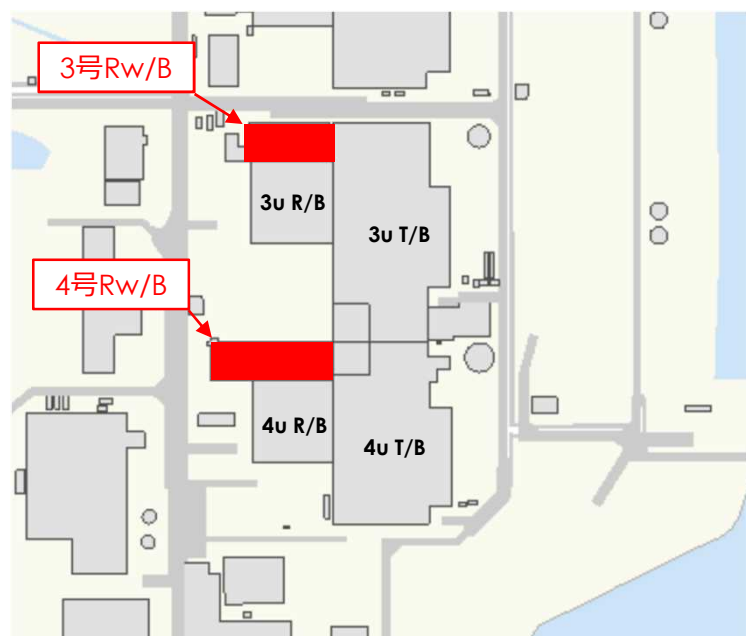


図 3・4号Rw/B 位置

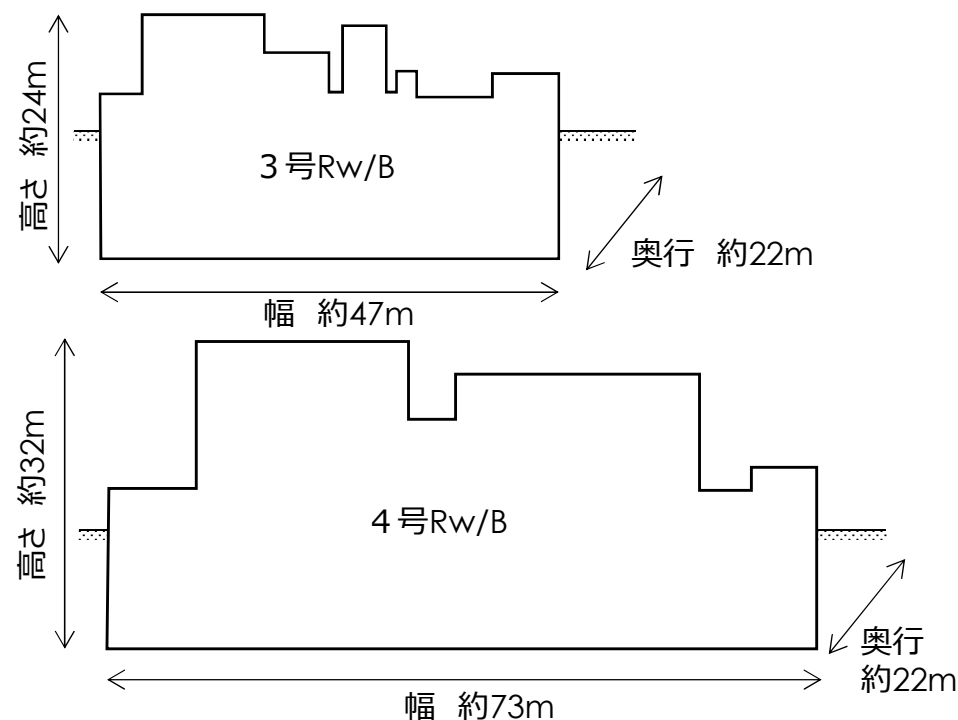


図 3・4号Rw/B 断面・寸法

建屋解体物等に対する分析方針

- 建屋解体物等については、特に建屋コンクリートに注目して検討を進める。理由は下記のとおり。
 - ✓ 発生量が膨大であること
 - ✓ 汚染形態・分布が複雑であること
 - ✓ 解体・除染方法により発生廃棄物の性状が大きく変化すること →工夫の余地が大きい
- 施設の汚染状況を踏まえた廃棄物対策に配慮した解体方法や廃棄物対策を検討し、再利用対象範囲の拡大、要求される処分区分の緩和を図っていく。
- 将来の他施設の解体への展開を念頭に、材料状態・曝露環境等と汚染状態の傾向、汚染メカニズムの傾向の把握を進める。
- 汚染状態の傾向、汚染メカニズムは、瓦礫類の核種濃度比のバラツキの要因の理解においても参考となるものであり、成果は適宜展開していく。

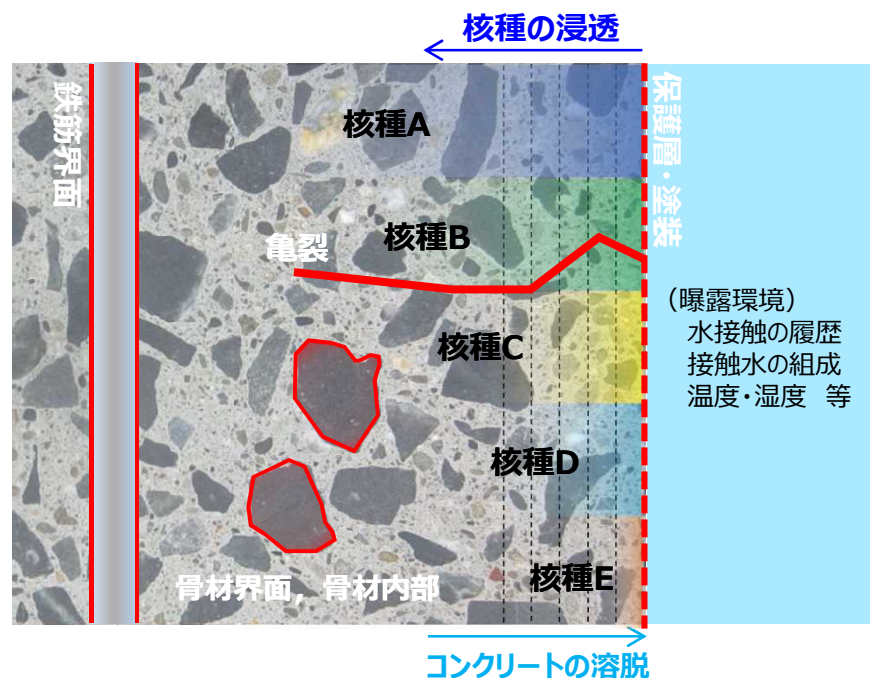


表 核種浸透評価における考慮事項 (例)

分類	核種浸透に関する影響因子
コンクリートの状態	基質部の空隙構造, 中性化・溶脱状態
	亀裂, マイクロクラック
	コンクリート配合 (骨材比, 水セメント比等)
	表面状態 (塗装, 保護層有無, 状態)
曝露環境	配筋, 鉄筋の状態 (腐食生成物等)
	温度・湿度の履歴
	水接触の履歴 (接触時間・時期, 接触状況等)
核種の特性	接触水の化学組成
	核種の移行特性

参考：コンクリート亀裂部の汚染状態の例

- 1F構内の建屋の汚染状況は通常炉と異なる。汚染範囲を特定し、適切に切り分け・除染することで保管管理，再利用，処分を踏まえて合理的な廃棄物の区分・管理を実施する。
- 下記はコンクリート汚染分布の例（オフサイト）

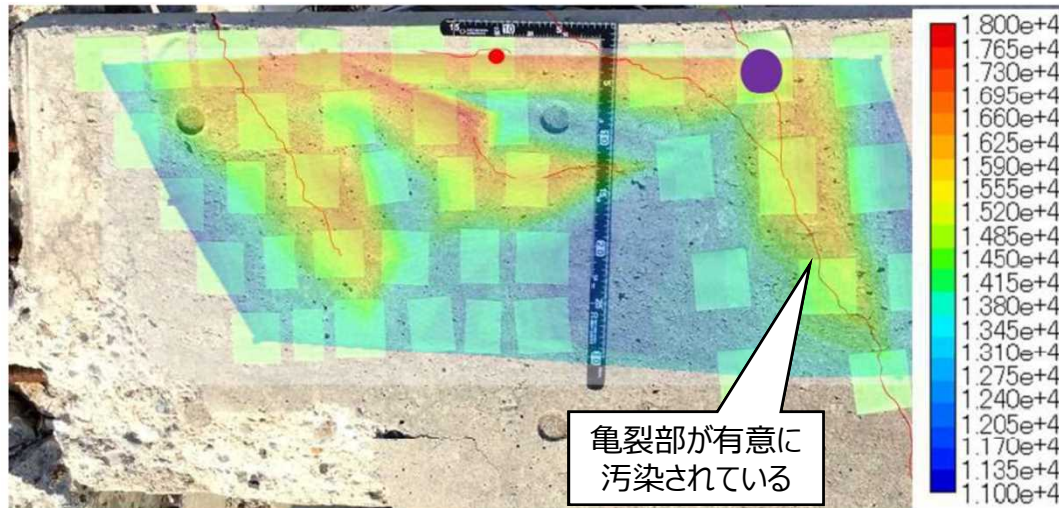


図 コンクリート表面（亀裂部）のβ線分布の例

- 汚染領域の特定・切り分け
- 解体方法・技術の具体化
- 除染範囲の具体化
- 除染方法・技術の具体化
- 発生廃棄物の放射能濃度の評価・管理方法の具体化，グルーピング
- 合理的な廃棄物保管方法の検討 等

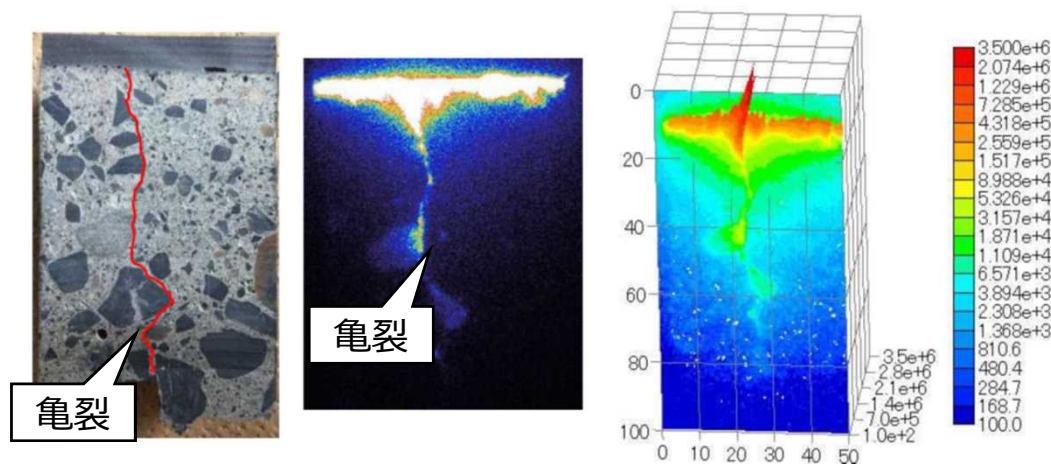


図 コンクリート内部（亀裂部）のCs-137濃度分布の例

Field Survey of Radioactive Cesium Contamination in Concrete After the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station Accident (Kazuo Yamada etc, Journal of Advanced Concrete technology, Japan Concrete Institute, 2019)より抜粋・加工

(1)瓦礫類

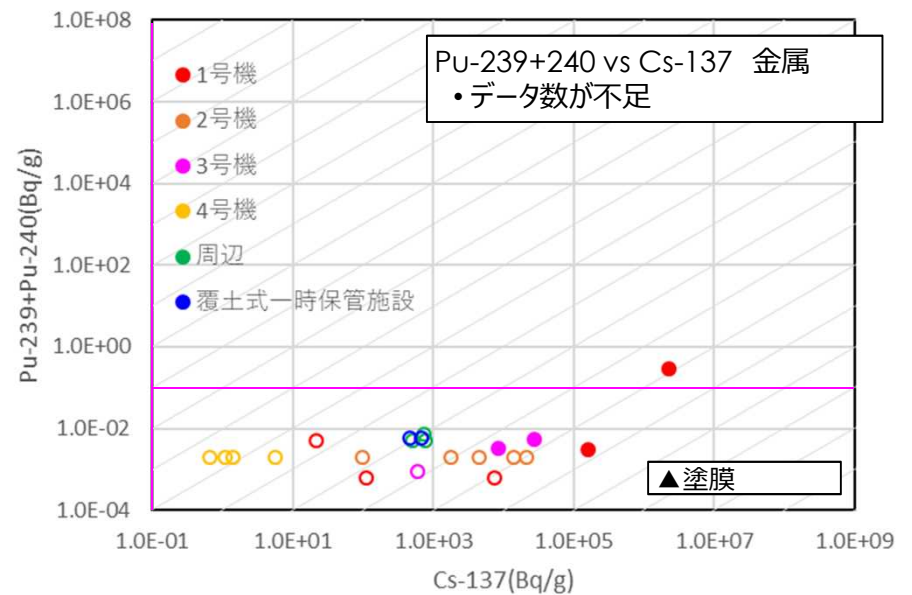
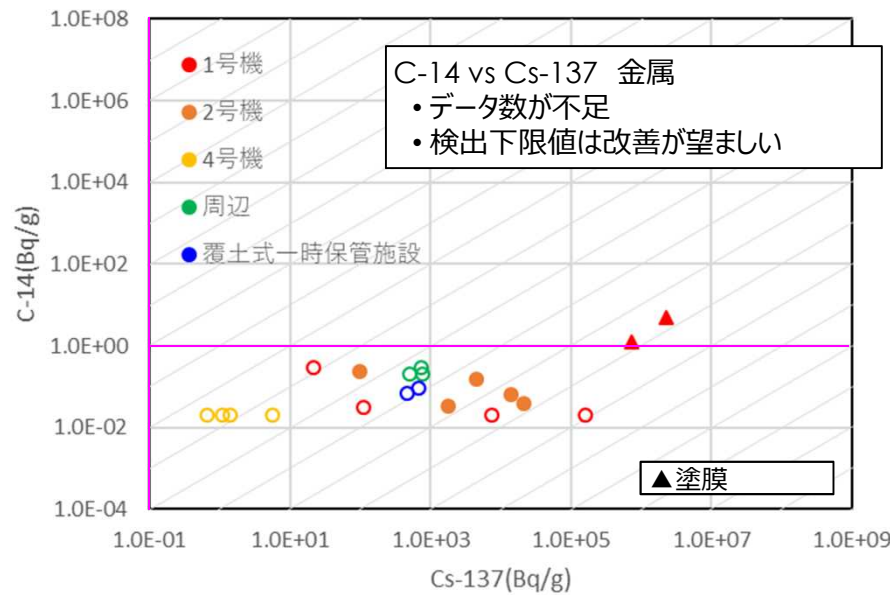
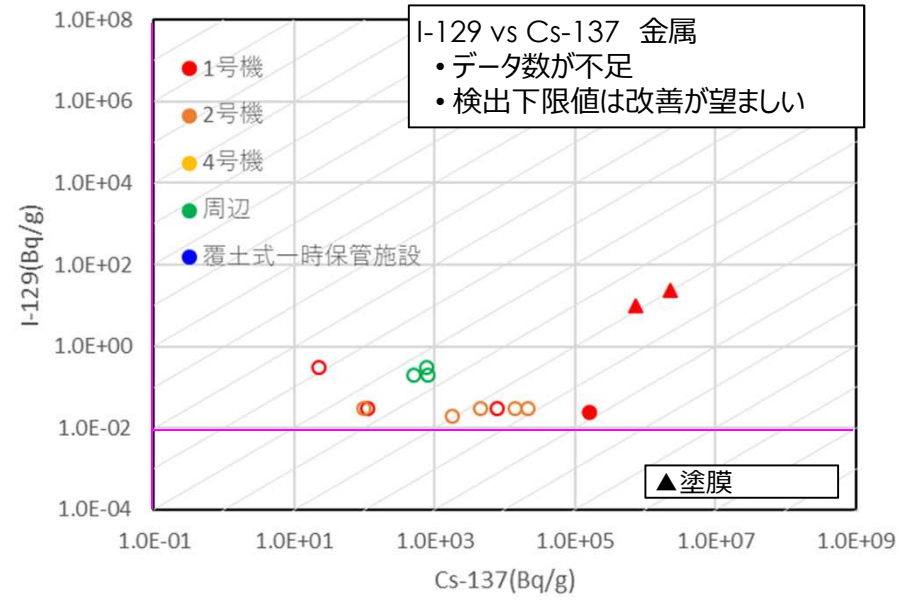
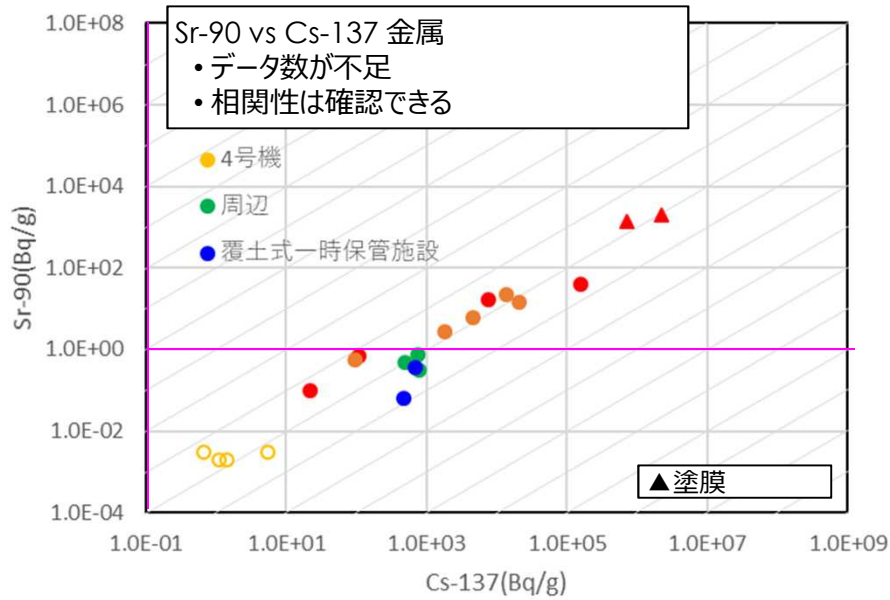
- 検討の進め方
 - ✓ 保管容器中の廃棄物の平均放射能濃度を容器の表面線量率により管理する手法を構築する。
 - ✓ 合理的な放射能濃度の推定ができるように記録に基づくグルーピングについて検討を行う。
 - ✓ 2028年度中の放射能濃度評価手法の構築を目標とする。低線量のものから優先して対応していく。
- 分析の主な着目点
 - ✓ 分析数の拡充（特に金属，不燃物等）
 - ✓ 処分等における重要核種の検出下限の改善と分析データ拡充（C-14,I-129等）
 - ✓ βありに区分した廃棄物の核種濃度比の確認
 - ✓ バラツキの要因の理解とグルーピング

(2)建屋解体物等

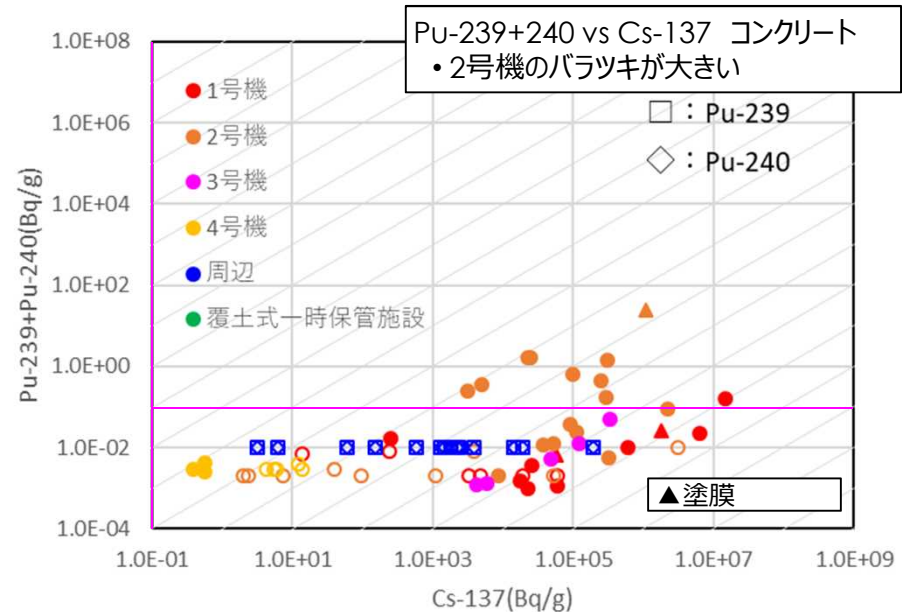
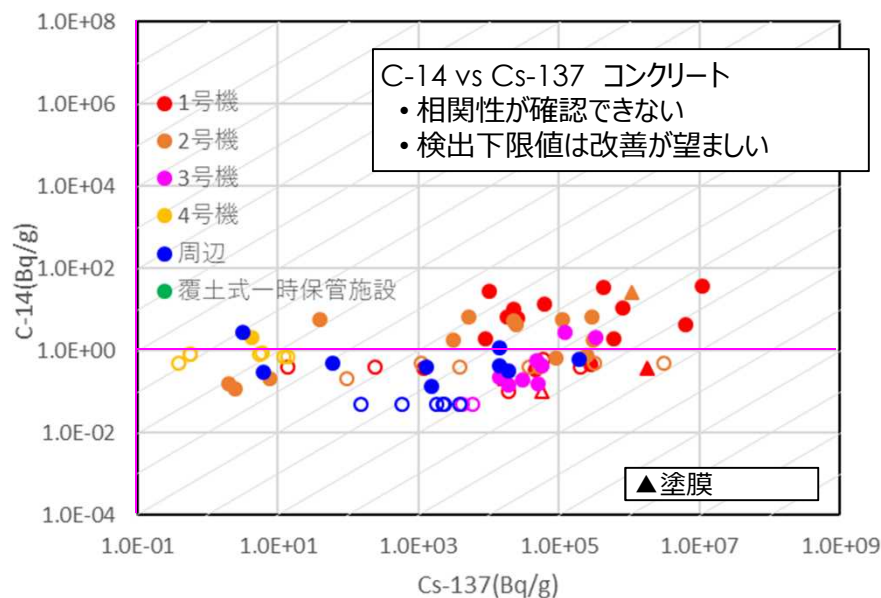
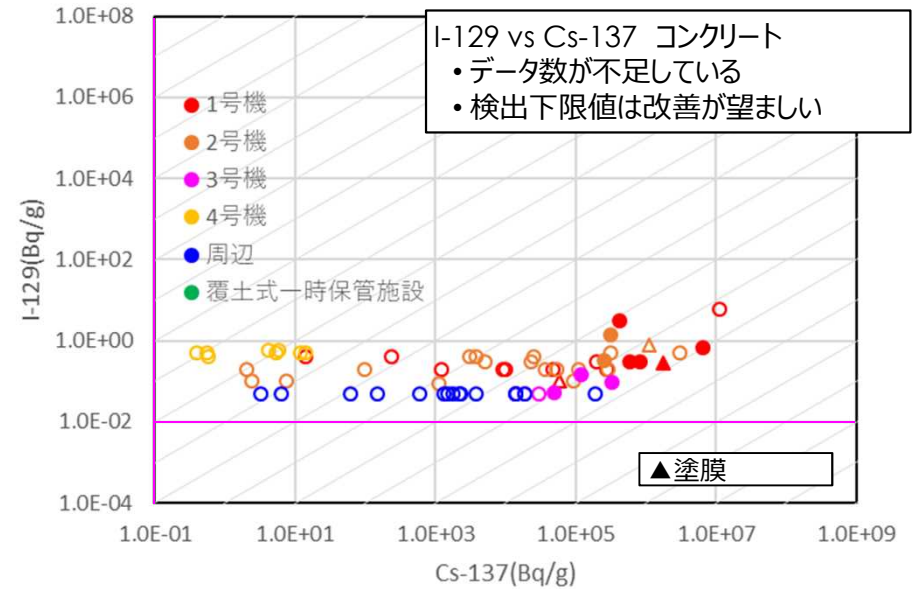
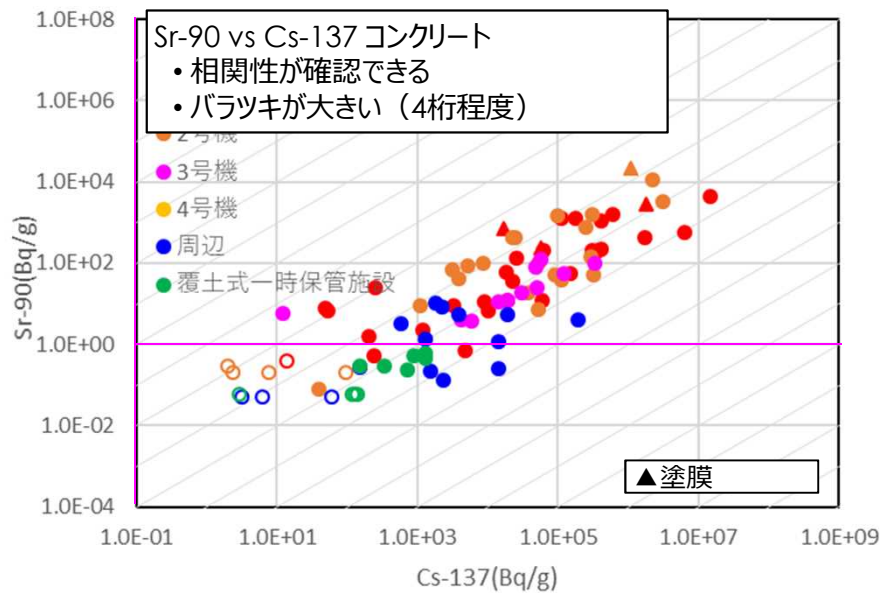
- 検討の進め方
 - ✓ 3・4号Rw/Bを対象に，汚染調査，施設解体，廃棄物対策までの一連の試検討を実施する。
 - ✓ 試検討を通じて，汚染調査，解体・除染，廃棄物保管，濃度管理等の手法を構築し，将来の施設解体に展開する。特に工夫の余地が大きいコンクリートを中心に検討を進める。
 - ✓ 汚染傾向，汚染メカニズムと施設状態，曝露環境等との関係を体系的に整理する。それらの知見に基づき建屋の汚染状態を推定し，解体方法等を検討する。
 - ✓ 解体モデルケース検討及び各手法構築の目標時期を2028年度中に設定する。
- 分析の主な着目点
 - ✓ 3・4号Rw/Bの汚染状況
 - ✓ コンクリート中の汚染分布・不均一性（基質部への浸透，亀裂部への浸入等）
 - ✓ 影響因子の評価（材質，仕様，劣化状況，曝露環境等）

参考

参考：瓦礫類の分析データの例（金属）

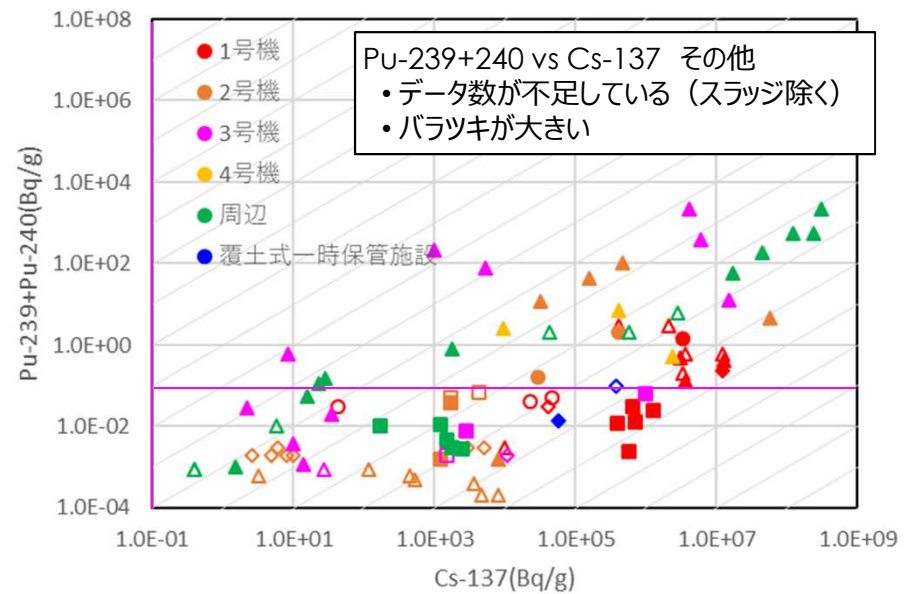
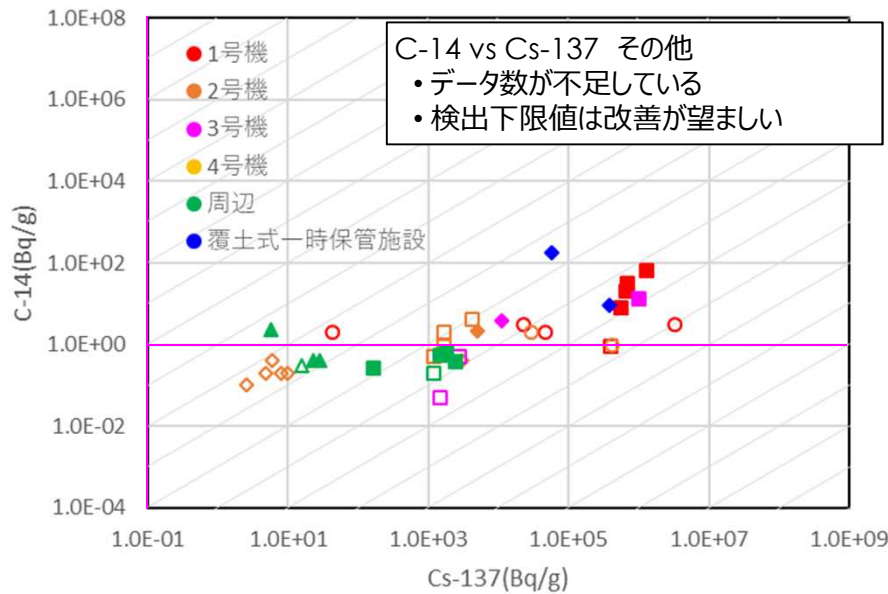
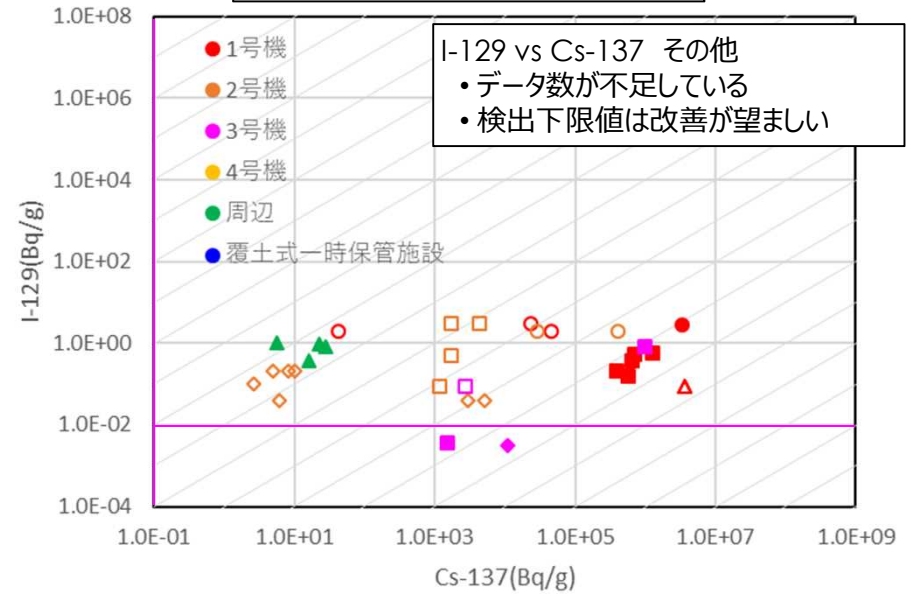
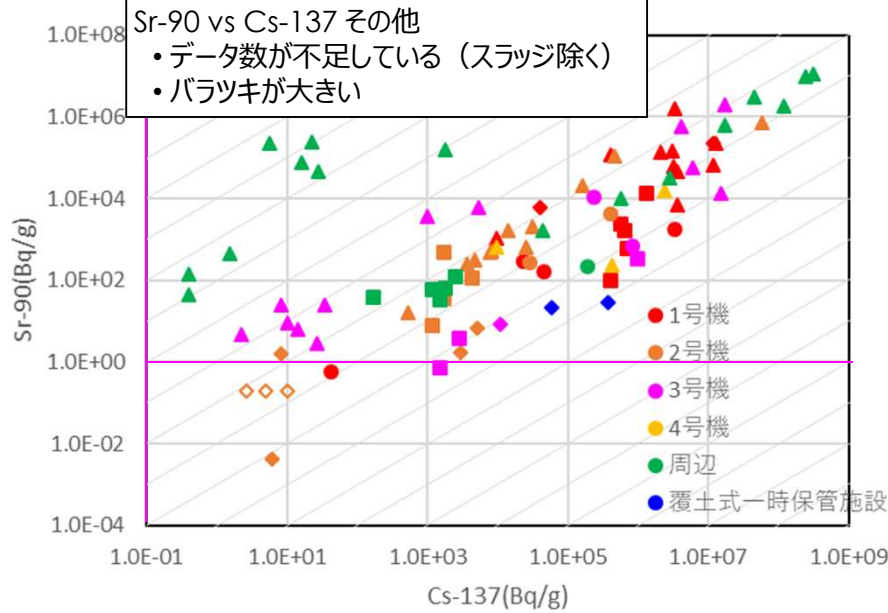


参考：瓦礫類の分析データの例（コンクリート）

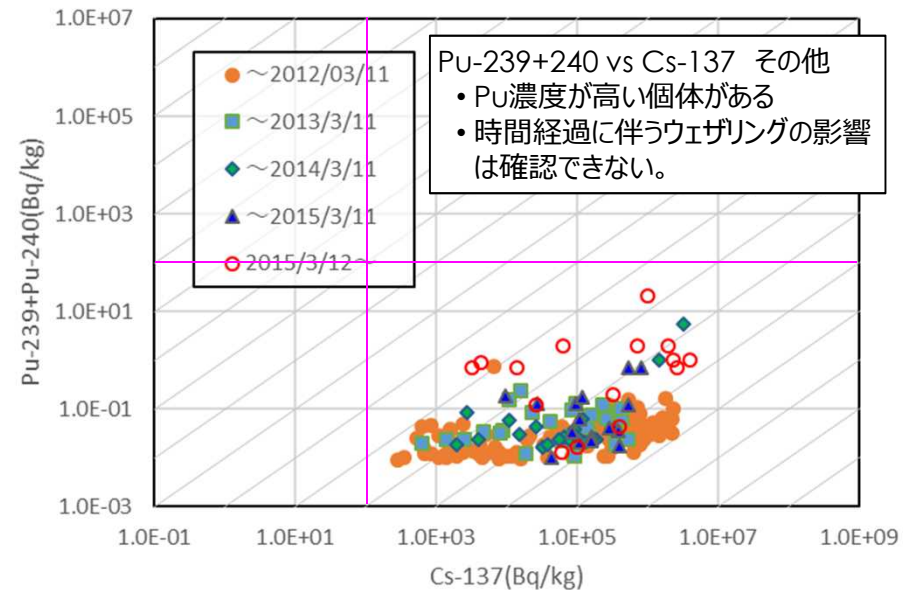
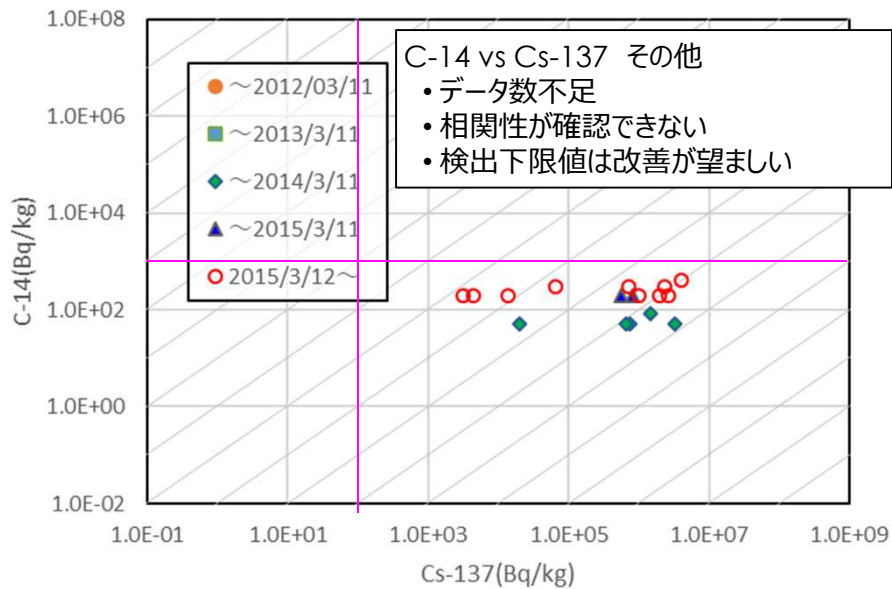
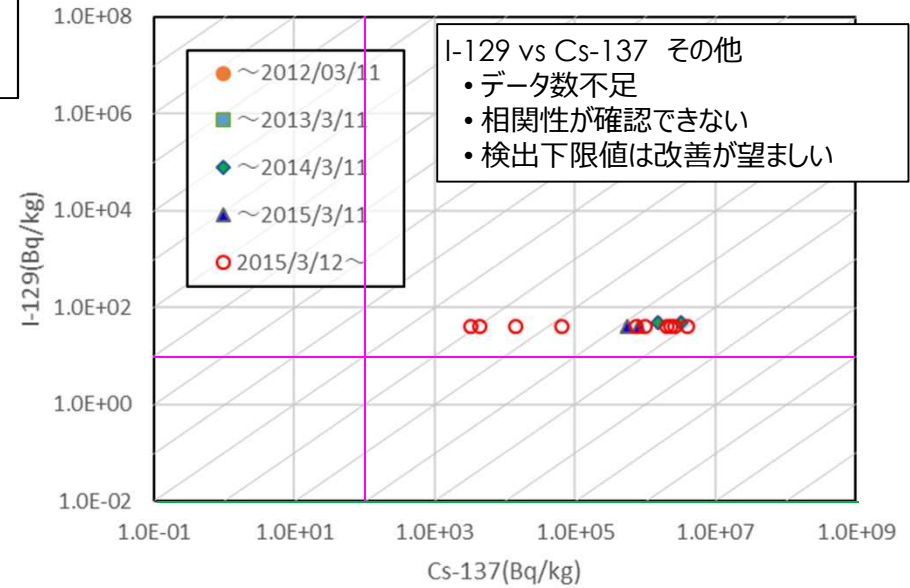
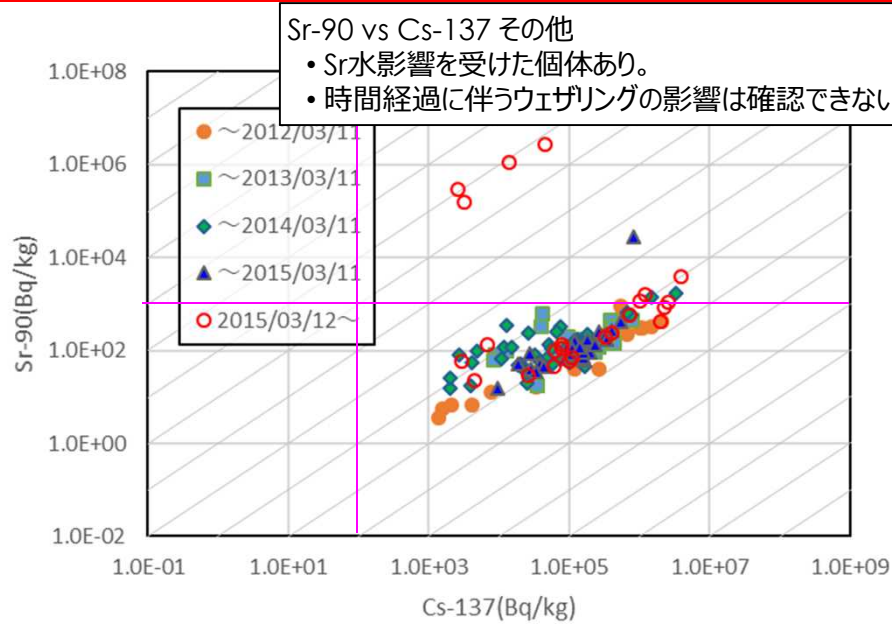


参考：瓦礫類の分析データの例（その他）

- 可燃物（スミアろ紙）
- ◆砂・小石・コンクリートがれき
- ▲スラッジ（スラッジ、ろ過回収物など）
- 不燃物（塗装片、保温材料、灰など）



参考：瓦礫類の分析データの例（土壌）



参考：核種別分析数 (FRAnDLi)

表 核種別分析数

	核種	分析数 (核種別)				
		金属	コンクリ	その他	土壌	水処理二次
1	H-3	20	76	31	11	6
2	C-14	20	76	40	17	0
3	Cl-36	5	26	5	2	0
4	Ca-41	0	0	0	0	0
5	Co-60	20	100	99	53	43
6	Ni-63	14	29	69	12	10
7	Se-79	14	53	26	11	0
8	Sr-90	20	92	93	143	43
9	Zr-93	0	0	0	0	0
10	Mo-93	0	0	0	0	0
11	Nb-94	7	88	67	41	37
12	Tc-99	14	72	53	17	4
13	Ru-106	7	4	41	314	14
14	Pd-107	0	0	0	0	0
15	Ag-108m	0	0	0	0	0
16	Sb-125	16	11	71	231	39
17	Sn-126	2	18	16	0	0
18	I-129	17	69	27	14	5
19	Cs-137	23	113	91	373	43
20	Eu-154	17	105	89	53	26
21	U-234	15	25	51	30	8
22	U-235	15	13	54	36	12
23	U-236	15	13	51	6	12
24	U-238	15	25	54	36	12
25	Np-237	15	7	29	0	8
26	Pu-238	22	74	89	271	43
27	Pu-239	0	15	8	0	2
-	Pu-239+240	22	59	81	271	42
28	Pu-240	0	15	8	0	2
29	Am-241	18	66	85	39	42
30	Cm-244	18	66	85	14	42

■ : <10個 ■ : <40個

参考：コンクリートの汚染状況に対する影響因子の例

表 コンクリートの汚染状況に対する影響因子の例

影響因子	考え方	関連する知見	
環境	(1)ウェザリング影響	<ul style="list-style-type: none"> 雨水接触等の影響により、核種濃度比等が変わっている可能性がある。 雨水等との接触部位・非接触部位、曝露時間の違いなどについて、分析結果の比較を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 短期間であればCs-137に顕著な変化無し
	(2)地下水接触	<ul style="list-style-type: none"> 解体前の地下水接触等の影響により、核種濃度比等が変わっている可能性がある。地下水、周辺土壌の分析も併せて実施し、地下における核種挙動の評価を実施する。 	
	(3)滞留水接触	<ul style="list-style-type: none"> 滞留水との接触による汚染、核種の浸透挙動について確認を行う。核種毎の浸透範囲は異なる。 滞留水組成、接触時間によって変動する。それらの履歴が明確である部位を選択し、試料採取を行う。 	
コンクリート状態	(4)塗装	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート表面の塗装有無による影響を確認する。 塗装面がコンクリートへの核種浸透を阻害する一方、塗装自体への核種収着も想定される。 塗装面の汚染、塗装下のコンクリート汚染、塗装劣化部の汚染状況等を確認する。 	
	(5)保護層	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート表面の保護層有無による影響を確認する。 保護面がコンクリートへの核種浸透を阻害する一方、保護層自体への核種収着も想定される。 保護層面の汚染、保護層下のコンクリート汚染、保護層劣化部の汚染状況等を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 表面保護層（エポキシ）に対するSr90収着
	(6)コンクリート種類	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート種類・配合により核種収着性や空隙構造・空隙の連続性が変化し、核種浸透挙動が変化すると予想される。 コンクリートの種類・配合による影響の程度とメカニズムを把握する。 	<ul style="list-style-type: none"> スラグ、フライアッシュの配合による核種浸透挙動の変化
	(7)骨材種類	<ul style="list-style-type: none"> 使用する骨材の鉱物組成により骨材部への核種収着性が変化し、核種浸透挙動が変化すると予想される。 骨材の鉱物組成による影響の程度とメカニズムを把握する。 	<ul style="list-style-type: none"> 細骨材産地による核種浸透挙動の変化 特定粗骨材に対するCs-137収着
	(8)亀裂	<ul style="list-style-type: none"> 透水係数、拡散係数が上昇する亀裂部を核種が選択的に移行する可能性がある。 亀裂部の核種移行挙動等について把握する。 	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂中のCs-137, Sr-90浸透挙動
	(9)炭酸化・溶脱	<ul style="list-style-type: none"> 炭酸化、溶脱等のコンクリートの経年劣化により、表層部付近の化学組成、空隙量に変化し、核種浸透挙動に影響を及ぼすものと予想される。 コンクリートの経年劣化による影響の程度とメカニズムを把握する。 	<ul style="list-style-type: none"> CaCO₃生成に伴うセメント水和物の変化による核種浸透挙動変化

以上