

放射性廃棄物等の 分析に関する 基本的視点

東北大学 多元物質科学研究所 桐島 陽

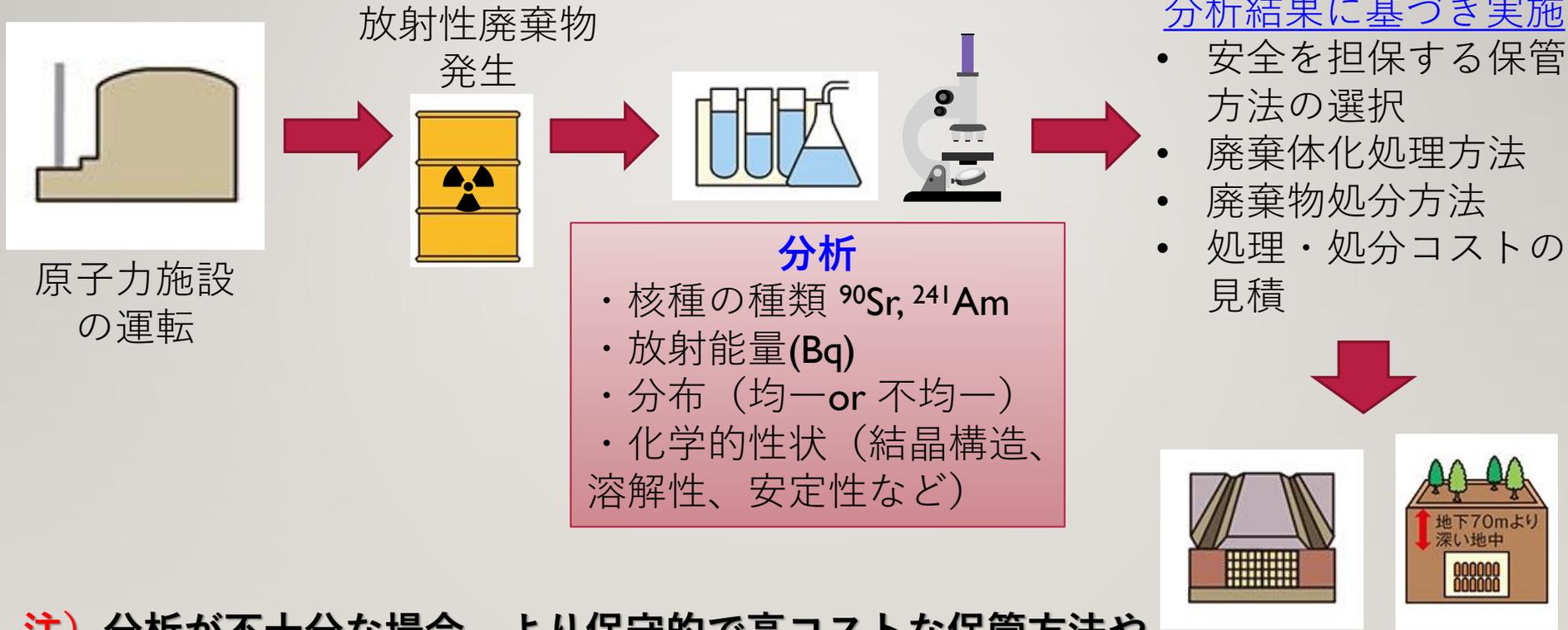


CONTENTS

- 原子力施設における分析とは
- 放射性廃棄物の濃度区分
- 福島第一原子力発電所の廃炉で発生する廃棄物の特徴
- 廃棄物分析の一般的な流れ
- 廃棄物分析に必要な要件
- おわりに

原子力施設における分析とは

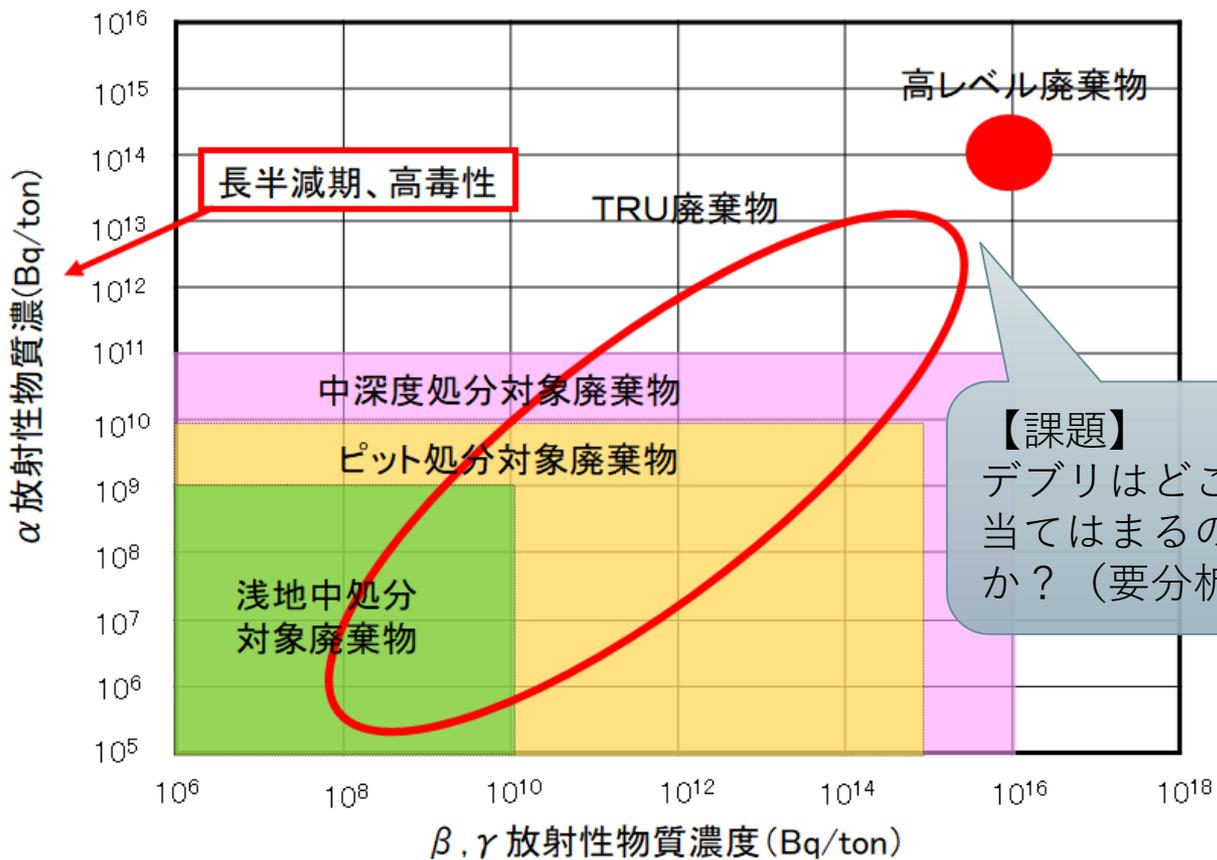
分析：物質の組成を調べ、その成分の種類や量の割合を明らかにすること。（大辞泉）



注）分析が不十分な場合、より保守的で高コストな保管方法や処分方法を選択することになる。廃棄物量が増える事もある。

種々の放射性廃棄物の放射能濃度と処分に係る放射能濃度上限値

(低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について(安全委員会、H19.5))



β, γ 核種については核種ごとに上限値が決められている

- 放射性廃棄物は含まれる放射性物質の濃度や起源によって、処分方法が決まる。
- 健全に処分場を運用するために、廃棄物の物理的・化学的性状に応じて廃棄体化处理を行う。

このために、1F廃棄物についても今後の廃棄物マネジメントのために【分析】が必要。放射性核種濃度のみならず、硬さ・発熱量・化学的性質といった性状の把握が必要となる。

廃止措置に伴って発生する廃棄物の量と種類

110万kW級の沸騰水型原子炉(BWR)の場合、発生する廃棄物の総量は約53.6万トン

通常
の原子炉
の廃止
の例

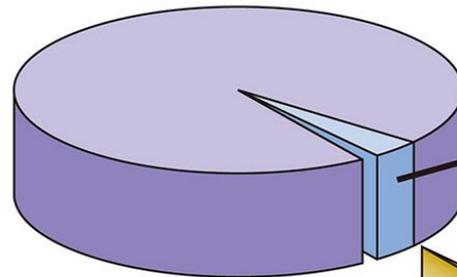
放射性廃棄物でない廃棄物

約93%

(大部分がコンクリート廃棄物:約49.5万トン)

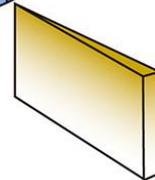


建物のコンクリート、ガラス、金属等



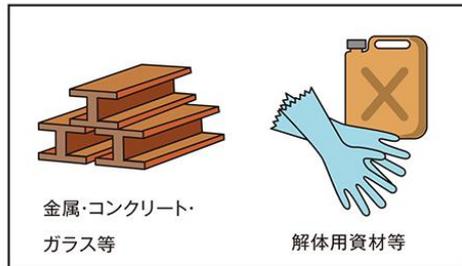
クリアランス物 **約5%**

(金属・コンクリート廃棄物:約2.8万トン)



低レベル放射性廃棄物 **約2%**

(大部分が金属廃棄物:約1.3万トン)



金属・コンクリート・
ガラス等

解体用資材等

適切な分析を行って初めて、このような切り分けが可能となる！！

通常の原子力施設については、施設の特徴や類似性、解体工法等を基に廃止措置費用を簡易に見積もることができる手法が確立されつつある。

出典：原子力機構の研究開発成果 2020-21

バックエンド対策及び再処理技術に係る研究開発

8-1 原子力施設解体費用見積りコードの一般利用に向けて —費用見積りコードの利用マニュアル整備—

表 8-1 DECOST による費用見積りのための入力情報データシートと入力例

費用見積りに必要な入力情報は、人員単価、建屋解体などに係わる建屋情報、作業量を個別に評価する特殊機器情報及業量を計算するための廃棄物関連情報です。マニュアルでは、これらを取得する方法を解説し、情報を記録するためのデータシートを新たに作成しました。下表は、動力試験炉（JPDR）の情報の取得例です。JPDR は、原子力発電を我が国とした施設であり、また原子炉施設の解体撤去が可能であることを実証した施設です。

入力情報		データ	入力情報		データ	入力情報	
評価施設分類		原子炉施設	加速器遮へい設備（金属ブロック）重量	0	t	CL コンクリート解体廃棄物量	
消費税率		3%	加速器遮へいブロック（コンクリート）重量（ワイヤーソー）	0	t	NR コンクリート解体廃棄物量	
人員単価	作業者単価	XXXX 円/人・日	加速器遮へいブロック（コンクリート）重量（一括撤去）	0	t	L0 雑固体解体廃棄物量	
	放射線管理者単価	XXXX 円/人・日	セル内遠隔解体装置	0	円 0 基	L1 雑固体解体廃棄物量	
	作業管理者単価	XXXX 円/人・日	L0 金属解体廃棄物量	0	t	L2 雑固体解体廃棄物量	
建屋情報	除染系統数	0	L1 金属解体廃棄物量	44	t	L3 雑固体解体廃棄物量	
	セル床面積	0	L2 金属解体廃棄物量	118	t	CL 雑固体解体廃棄物量	
	管理区域延床面積	23800	L3 金属解体廃棄物量	78	t	NR 雑固体解体廃棄物量	
	鉄骨スレート構造建屋延床面積	0	CL 金属解体廃棄物量	865	t	キャスク	XXXX
	安全貯蔵期間	0	NR 金属解体廃棄物量	1324	t	鋼製 1 m ³ 容器	XXXX
特殊機器情報	ライニング重量	23	L0 コンクリート解体廃棄物量	0	t	ドラム缶（エポキシ塗装）	XXXX
	遠心分離機重量	0	L1 コンクリート解体廃棄物量	60	t	ドラム缶（溶融亜鉛メッキ）	XXXX
	大型グローブボックス重量	0	L2 コンクリート解体廃棄物量	83	t	ドラム缶（コンクリート内張）	XXXX
	小型グローブボックス重量	0	L3 コンクリート解体廃棄物量	1477	t	フレキシブルコンテナ	XXXX



JAEA-Testing
2018-002
DOI:10.11484/jaea-testing-2018-002

原子力施設廃止措置費用簡易評価コード (DECOST) 利用マニュアル

The User Manual of the Simplified Decommissioning Cost Estimation Code for Nuclear Facilities (DECOST)

高橋 信雄 末金 百合花 飯場 亮祐 黒澤 卓也
佐藤 公一 目黒 義弘

Nobuo TAKAHASHI, Yurika SUKANE, Ryosuke SAKABA, Takuya KUROSAWA
Koichi SATO and Yoshihiro MEGURO

核燃料・バックエンド研究開発部門
廃止措置技術開発室

Decommissioning Research and Development Office
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

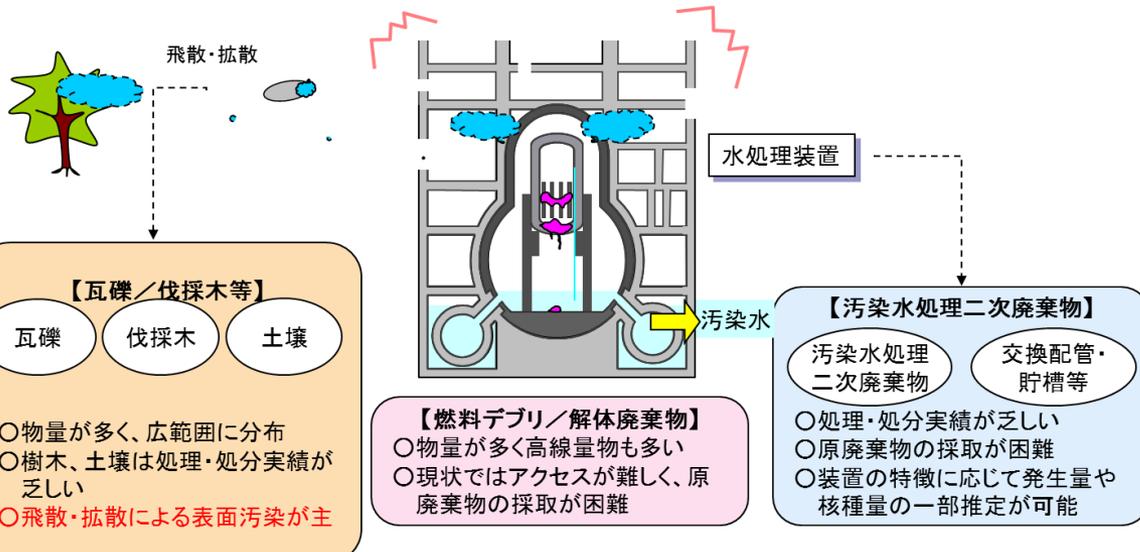
JAEA-Testing

入力情報：管理区域延床面積、解体物の処分区分（放射性、非放射性など）及び種類（コンクリート、金属など）ごとの発生量、など。

一方、福島第一原子力発電所の廃止措置では . . .

【主な特徴】

- 事故によりコントロールできない状態で発生
- 1～3号機の炉心燃料を起源とした汚染*
- 廃止措置作業が状況に応じて変化するため、発生量の想定が困難
- 汚染範囲が広く、高線量箇所もあるため、分析数が少ない現状ではデータが非常に限定的(特に長半減期核種の組成)



出典：東京電力ホールディングス

出典：日本原子力学会「福島第一原子力発電所事故による発生する放射性廃棄物の処理・処分」H25報告書

- 原発運転廃棄物と異なり、発生源から廃棄物の性状や量の推定が困難。(要：性状分析)
- 今後の廃止作業の進め方に依存して、廃棄物の性状や量が変わる可能性。
- ハードおよびソフトの制約により分析可能点数が限定的。

➡ **Challenge:** これらの課題に対応した、分析戦略 (ハード・ソフト) の構築が必要!! 7

福島第一原発敷地内における試料採取

https://www.jaea.go.jp/04/ntokai/fukushima/fukushima_02.html



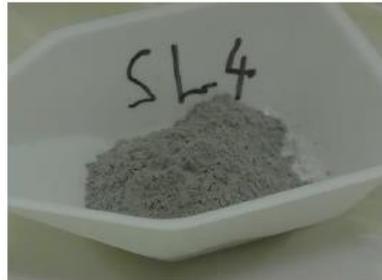
- 分析目標を策定する。（何を**知るための分析**か？）
- 目標に照らして妥当なサンプル採取計画を立てる。（試料数、試料量など。）
- 採取方法の検討。（有人作業、遠隔作業？）
- 現場状況から達成可能な計画か確認。

タービン建屋内スラッジの採取

出典：JAEA-IRID 廃炉・汚染水対策チーム会合／事務局会議（第28回），平成28年3月31日



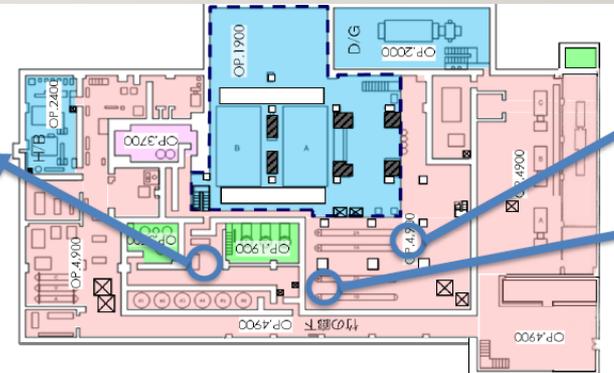
1TB-MI-SL3



1TB-MI-SL4

復水ポンプ室脇

- 1TB-MI-SL3
- 1TB-MI-SL4



1号機タービン建屋地下1階 ※1

廃棄物分析の一般的な流れ

2. 試料前処理

高放射線量

操作性：難

低放射線量

操作性：良



コンクリートセル
+ マニピレーター



図6 アルゴン循環型グローブボックス
[出典] (独) 日本原子力研究開発機構: パンフレット「燃料サイクル安全工学研究施設NUCEF」、
原子力科学研究所 安全試験施設管理部(2006)、p.10

グローブボックス



フード
(ドラフトチャンバー)

- 採取したサンプルを分析に適した量や性状に調整する。
- 対象の放射線量等に応じて前処理に使う設備を選択。一般に遮蔽性と操作性のトレードオフとなる。

©東北大学多元物質科学研究所/桐島研究室



廃棄物分析の一般的な流れ 2. 試料前処理 (イメージ)



懸濁物を含む液体サンプル



フィルターでろ過し、固体成分と液体成分を分離

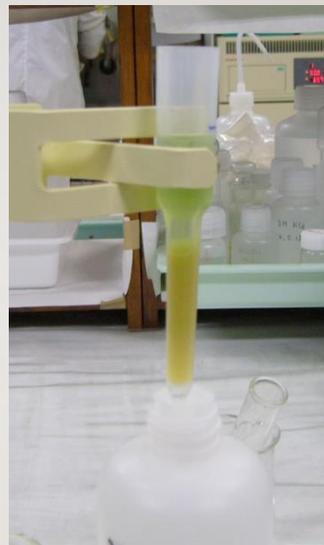
固体成分
溶解

液体成分
希釈

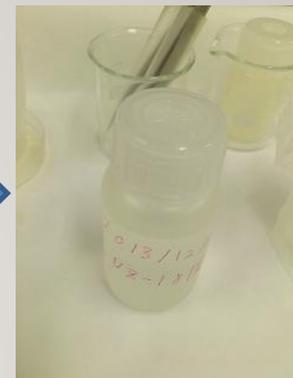
熱濃硝酸で固体成分を溶解処理



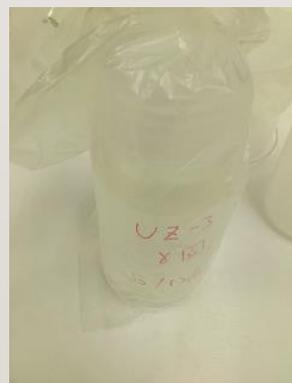
イオン交換樹脂により脱塩処理



希釈



液体試料



液体試料



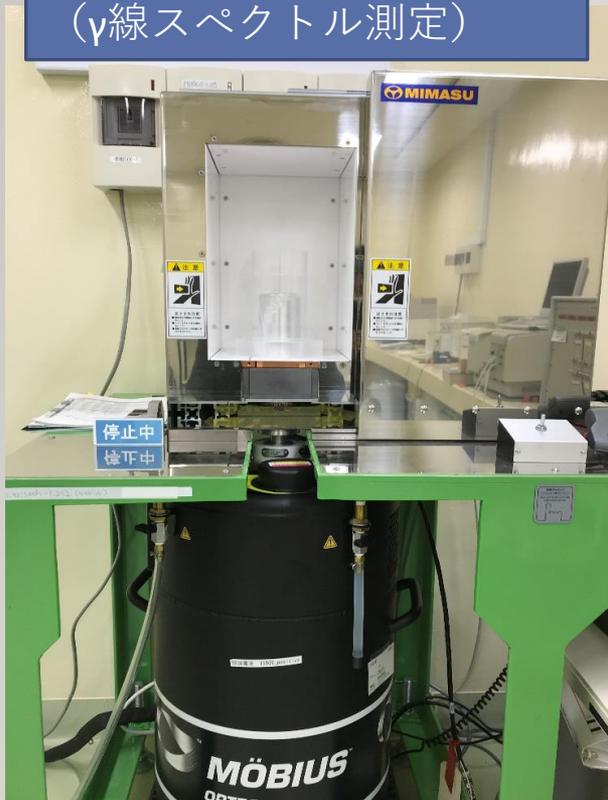
放射線計測へ
・ γ 線スペクトロメトリ
・ α 線スペクトロメトリ



廃棄物分析の一般的な流れ

3. 放射線計測 (放射エネルギー測定)

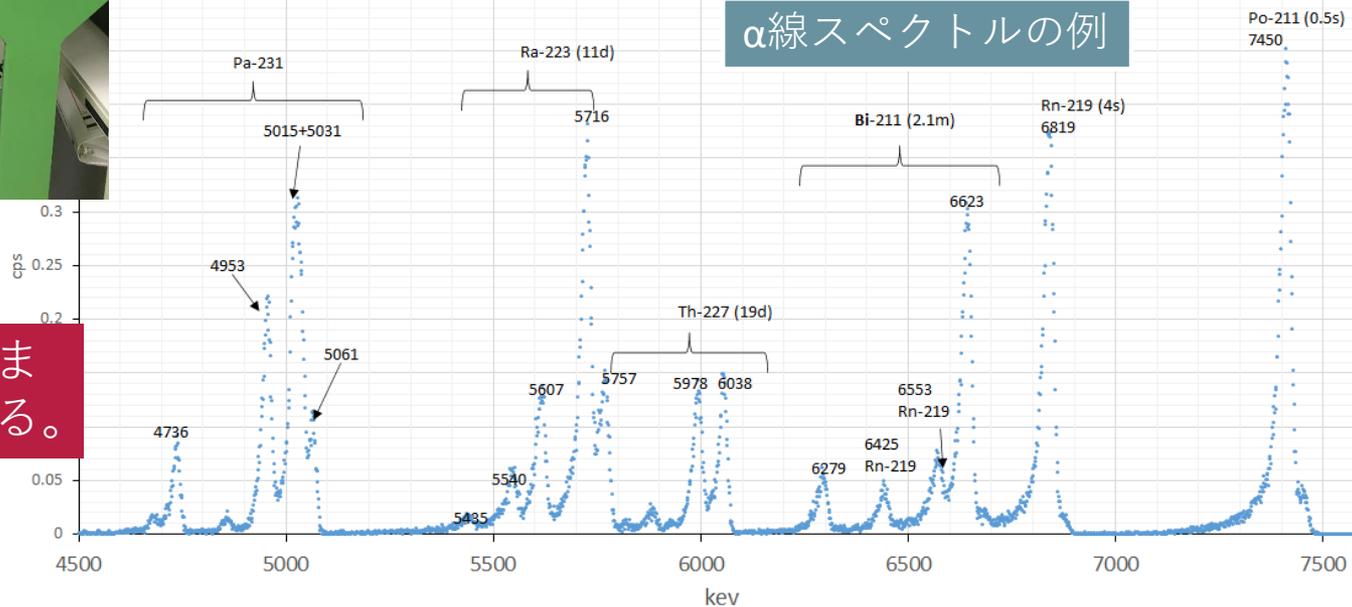
ゲルマニウム半導体検出器
(γ 線スペクトル測定)



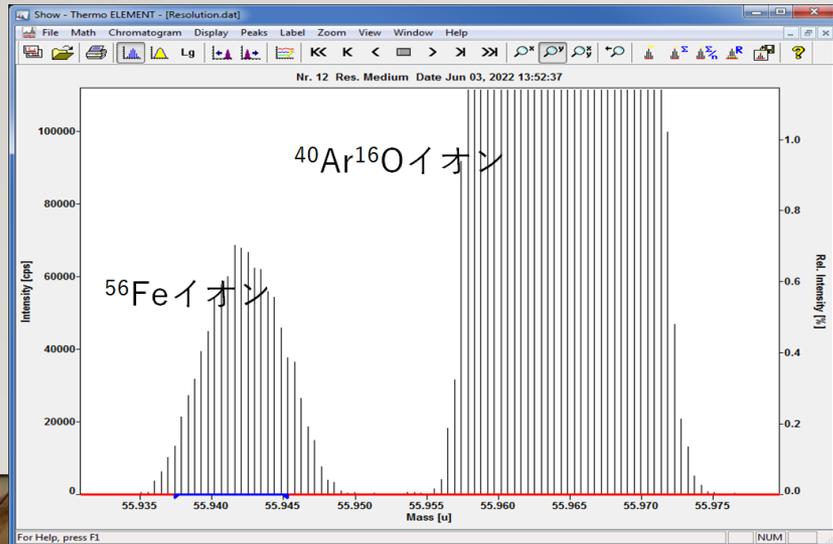
表面障壁型Si半導体検出器
(α 線スペクトル測定)



どの核種がどれだけ含まれるのか、明らかにする。



写真：二重収束型高分解能ICP質量分析計”Thermo Fisher Scientific ELEMENT 2” @東北大学多元物質科学研究所（例として放射能測定には使用していない装置を撮影）



溶液試料中の各元素をプラズマによってイオン化し、質量分析計 (MS) によって検出する方法。核種によっては、放射線計測より有利な定量分析法。

廃棄物分析の一般的な流れ 5. 機器分析（性状把握）



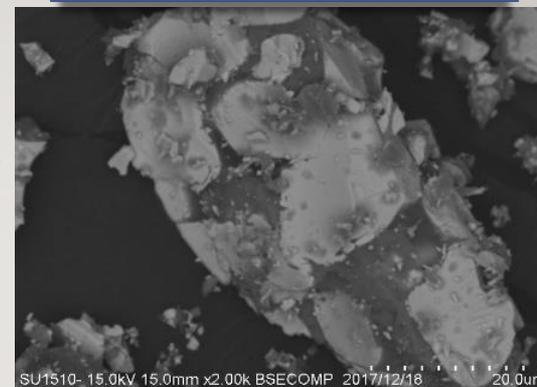
サンプル
(模擬デブリ)

対象がどのような性質を持つのかを、明らかにする。

走査型電子顕微鏡(SEM)



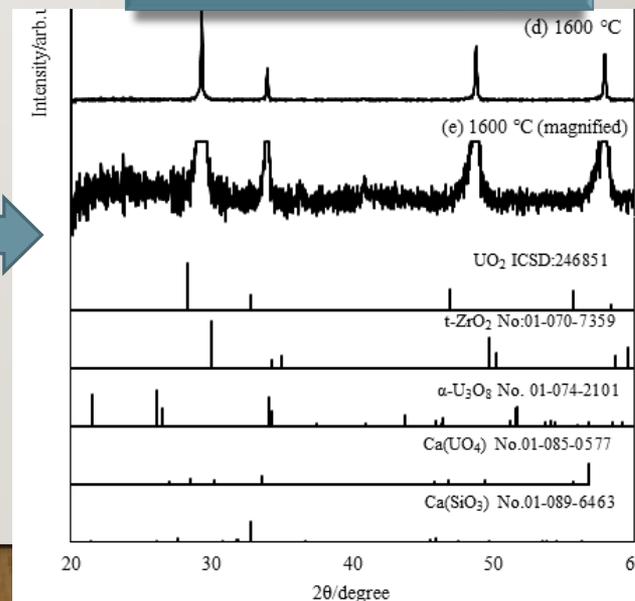
微細構造を調べる



粉末X線回折装置



結晶構造を調べる

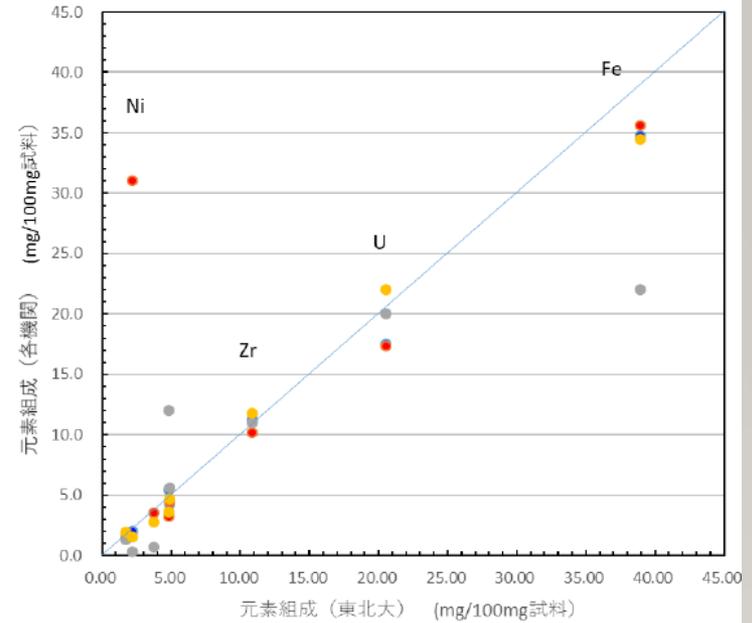


廃棄物分析の一般的な流れ 6. 分析結果の整理・解釈

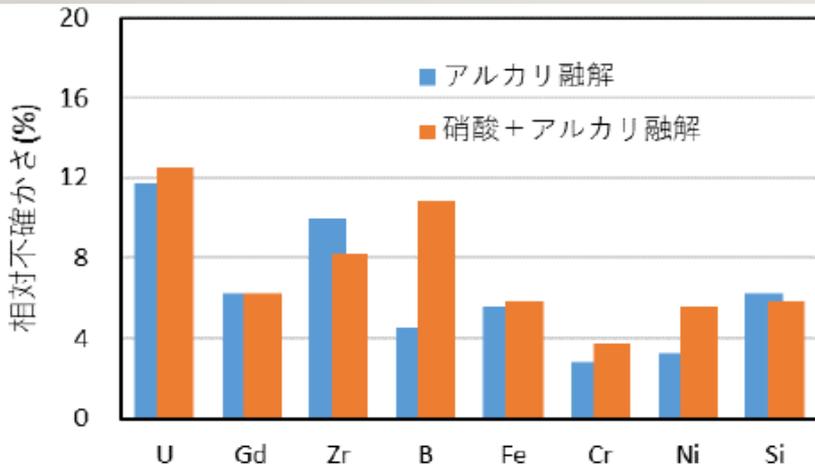
不溶解性残渣成分を合算*した評価値 (U模擬燃料デブリ試料)

元素名	含有量 (mg/100mg)					
	東北大	NDC	JAEA大洗研	NFD	JAEA原科研	
	【基準値】	硝酸溶解	硝酸溶解	王水・フッ酸溶解	硝酸溶解+残渣アルカリ融解	全量アルカリ融解
U	20.5 ±0.1	20.0 ±0.6	21.9 ±1.0	17.5 ±0.2	16.5 ±0.8	17.3 ±2.0
Gd	1.7	1.3 ±0.2	1.9 ±0.1	1.5 ±0.2	1.56 ±0.11	1.59 ±0.08
Zr	10.8	11 ±1.4	12 ±1.7	11.3 ±1.1	8.48 ±0.71	10.2 ±0.5
B	4.9	5.6 ±0.5	4.7 ±0.2	4.3 ±0.2	4.63 ±0.50	4.44 ±0.20
Fe	39.0	22.0 ±4.8	34.6 ±3.9	34.7 ±0.4	33.8 ±1.6	35.6 ±1.6
Cr	3.7	0.7 ±0.9	2.8 ±0.6	3.5 ±0.1	2.75 ±0.10	3.57 ±0.15
Ni	2.2	0.3 ±0.4	1.6 ±0.3	2.0 ±0.1	180 ±10	31.0 ±1.4
Si	4.9	12.0 ±2.4	3.6 ±4.5	5.4 ±0.4	3.40 ±0.17	3.22 ±0.16
O	12.2 ±0.1	-	-	-	-	-
不溶解性残渣	-	あり (溶解率60%)	あり (溶解率91%)	あり (溶解率98%)	なし	なし

注) 不溶解性残渣が生じた場合は、溶解成分に残渣成分のEDS半定量値を加えた評価値を示す。



元素組成 (最終評価値) の比較 (0~45mg/100mg範囲)



- 各分析から導出された結果の妥当性や不確かさ (信頼性) を評価。
- 多面的な結果を総合的に解釈し、試料の組成や性状に関する「fact」として示せる事項を整理する。

廃棄物分析に必要な要件（ソフト面）

【分析フロー例】

1. 分析計画策定＋サンプル採取

2. 試料前処理

3. 放射線計測（放射エネルギー測定）

4. 質量分析（放射エネルギー等測定）

5. 機器分析（性状把握）

6. 分析結果の整理・解釈

【各分析担当者】

- 担当する操作や測定に習熟し、測定時の異常の有無を判断でき、結果を他者に説明できる人材。

(Skilled Technician)

* トレーニングセンターなどで効率的に育成。

【分析指揮・評価者（仮称）】

- 分析目的を理解したうえで効果的な分析計画およびサンプリング計画を立てられる人材。
- 各分析結果を統合し、妥当性の検証や解釈を行い、結論を導く人材。

(Expert) * どう育成するか？時間もコストもかかる。戦略が必要。

おわりに

【廃止措置に伴い発生する放射性廃棄物の分析】

目的：今後の廃棄物の処理・処分方策検討に必須の情報の取得。

特徴：発生源から廃棄物の性状や量の推定が困難。

課題：ハード・ソフトの制約により分析可能点数が限定的。
「分析指揮・評価者（仮称）」の育成。

【燃料デブリの分析】

目的①（廃炉）

取り出し後のデブリの保管方法や、その後の処理・処分方策検討のための基礎情報取得。（放射能組成、発熱量、水素発生量、マトリクス性状等）

目的②（事故進展解析）

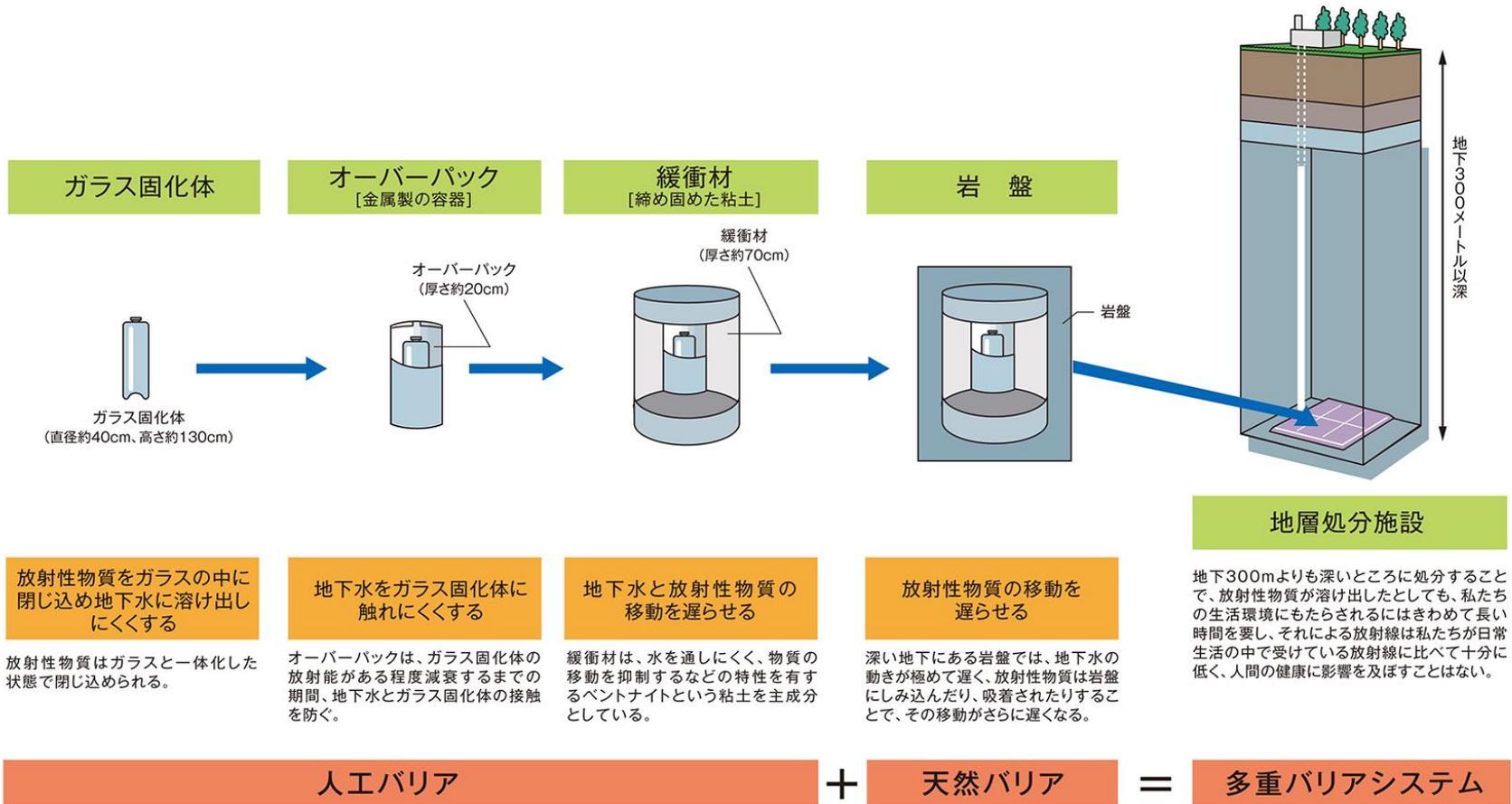
事故時に何がどのように起こったかを解明するための情報取得。事故原因究明や原子炉安全性向上に資する。（上記に加え、マイナー相の組成や構造、熱履歴等の幅広い情報）

課題

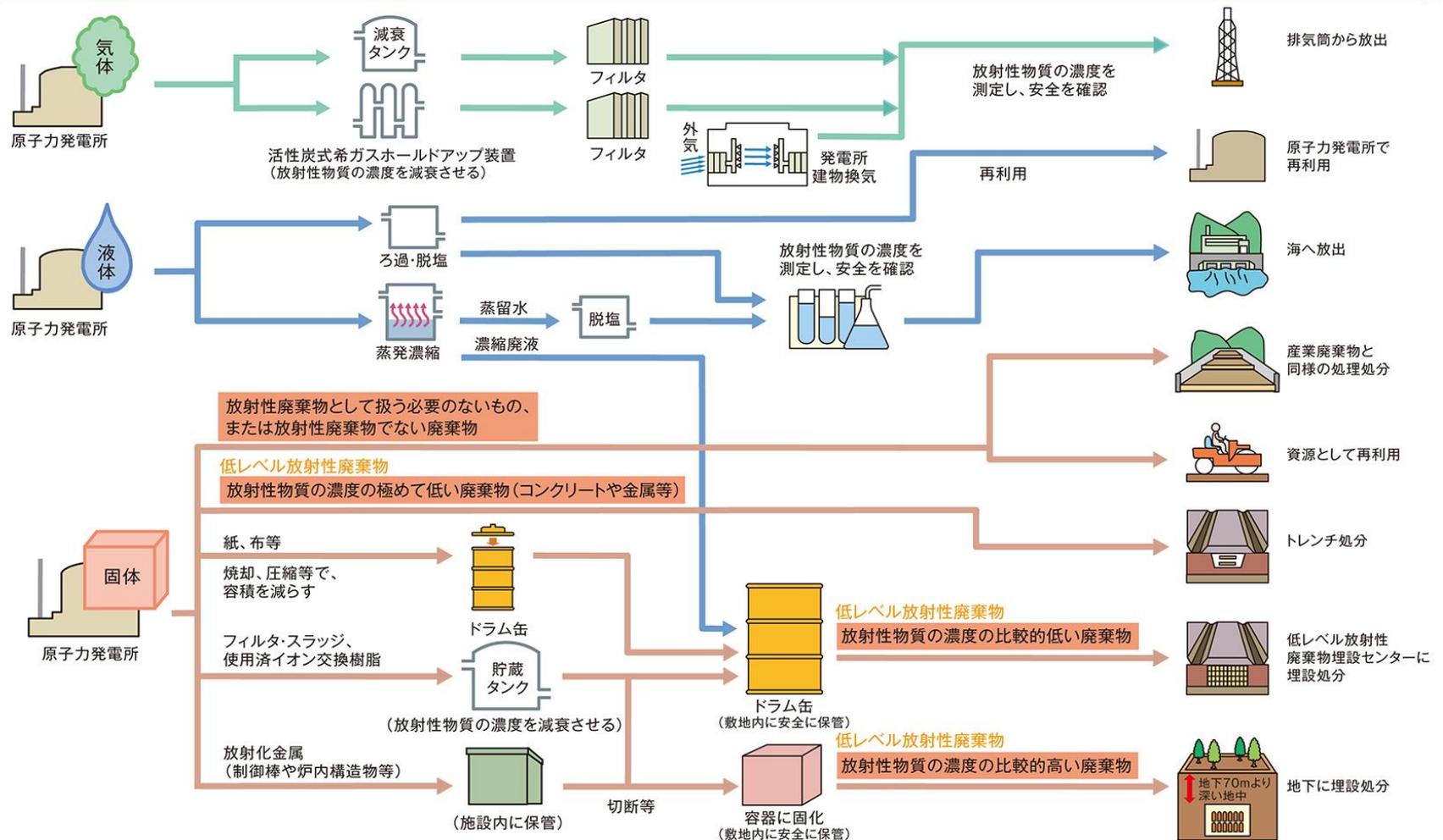
上記と同じ課題。加えて、目的に依って必要な分析項目が変わる。当然、目的②は多くの時間とコストを要する。目的①と②の切り分けをどのように行うか？

以下、予備資料

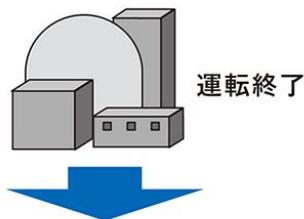
高レベル放射性廃棄物多重バリアシステム



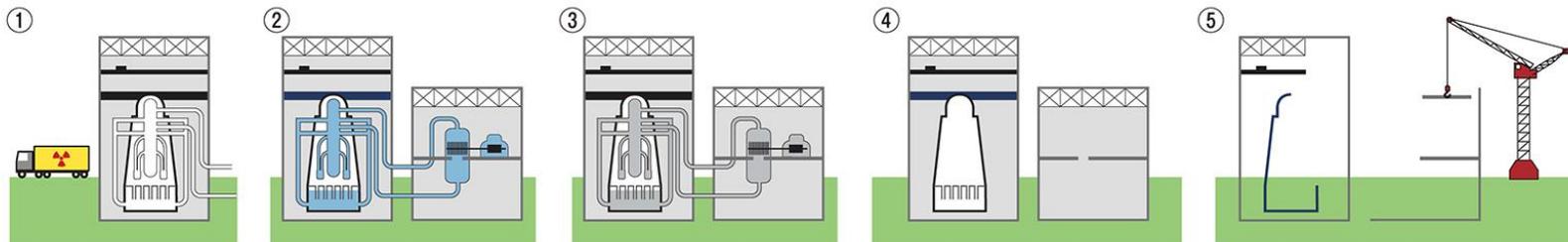
原子力発電所の廃棄物処理方法



原子力発電所の廃止措置プロセス



●廃止措置の標準工程^(注):沸騰水型原子炉(BWR)



① 使用済燃料の搬出

使用済燃料や未使用の燃料等を、再処理工場や貯蔵施設等に搬出。搬出先において、使用済燃料等は適切に管理・処理。

② 系統除染「洗う」

後の解体撤去作業等を行いやすくするために、施設の配管・容器内に残存する放射性物質を、化学薬品等を使って可能な限り除去。

③ 安全貯蔵「待つ」

適切な管理のもと施設を必要に応じた期間、安全に貯蔵し、放射能の減衰を待ち、後の解体撤去作業等を行いやすくする。

④ 解体撤去(1)「解体する(内部)」

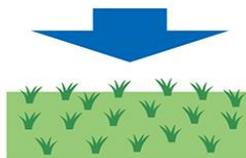
放射性物質を外部に飛散させないように、まず建屋内部の配管・容器等を解体撤去。その後、建屋内の床や壁面等の放射性物質の除去作業を行う。

⑤ 解体撤去(2)「解体する(建屋)」

建屋内の放射性物質を目標どおり除去したことを確認したうえで、その後は通常のビル等と同様に建屋の解体作業を行う。

廃棄物処理・処分

廃棄物は、放射能のレベルにより区分し、それぞれ適切に処理・処分。



跡地利用

跡地は、法的な手続きを経て用途に活用できる。
また現在一つの案として、地き原子力発電用地として有効に

分析（検認）による放射能量および性状の確認

(注) 具体的な方法については、状況に応じて事業者が決定し、原子力規制委員会が安全性を確認