

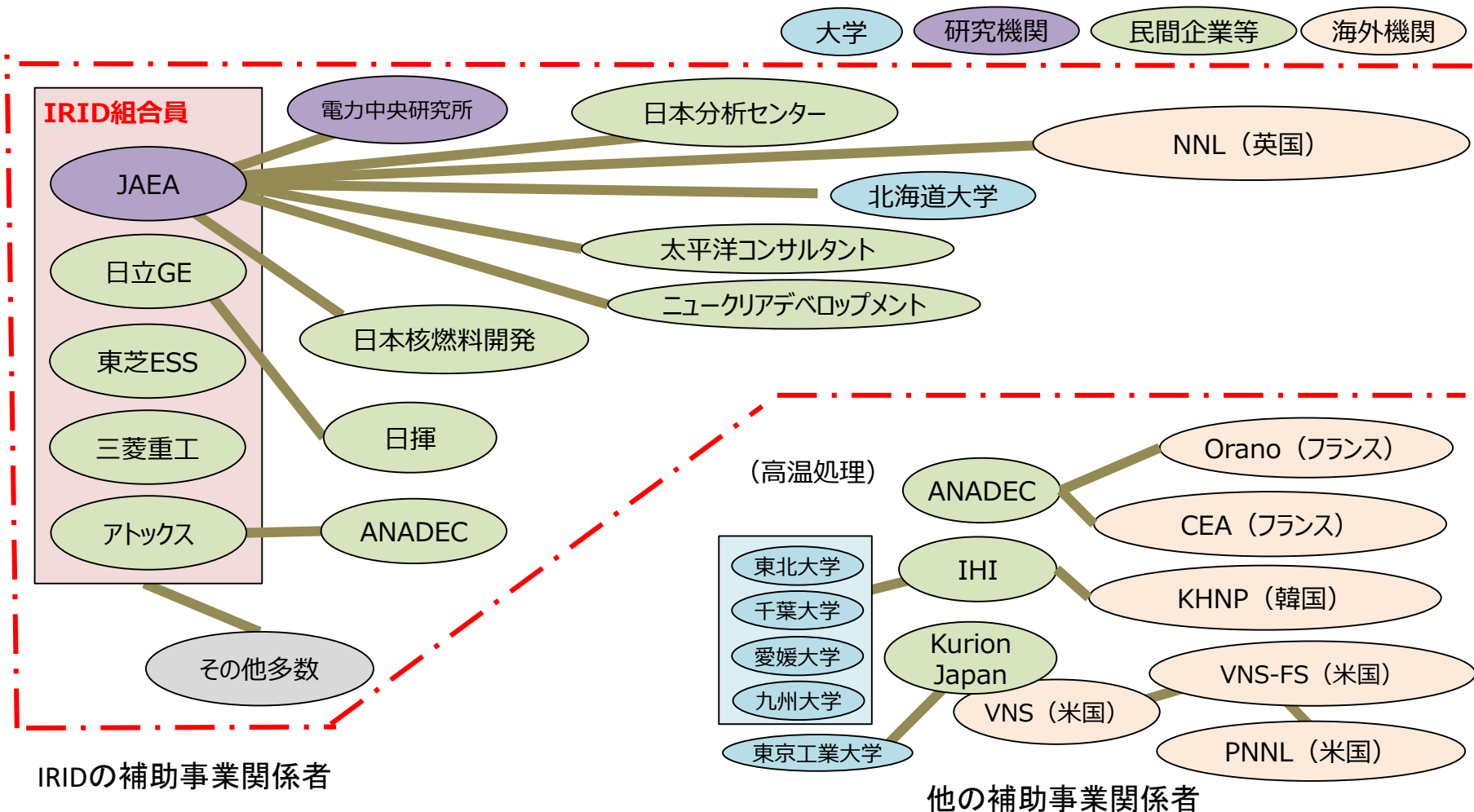
福島第一原子力発電所の廃炉に伴って発生する廃棄物の現状と今後  
～将来を見据えた取り組みと課題発見～

## 固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)  
研究管理部 副部長 吉川 英樹

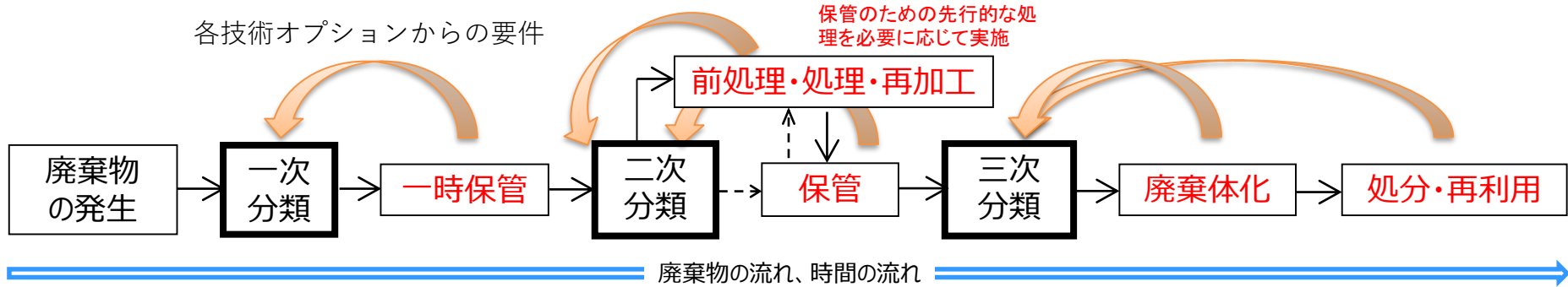
# 現在進行中の固体廃棄物事業に携わる事業者の紹介

- 現時点において固体廃棄物事業は、国内外を含む6大学、50社以上の関係者が参画
- 国内外の叡智を結集しながら、多様な方々が研究開発に取り組んでいる。今後固体廃棄物の性状や物量が判明するにつれ、ますます多様な分野の専門家が必要



# 1F廃棄物の処理処分に係る検討の目指すべきところ

各技術オプションからの要件



一次分類	<ul style="list-style-type: none"> <li>瓦礫類は放射性物質の汚染拡大防止や遮蔽の観点より、線量区分毎に分類。さらに被ばくを考慮し、可能な範囲で減容処理に向けた材質ごとに分類</li> <li>伐採木は火災の発生リスクや線量の観点より、幹・根と枝・葉に分類</li> <li>水処理二次廃棄物はその性状により、吸着塔類、廃スラッジ及び濃縮廃液に分類</li> </ul>
二次分類	<ul style="list-style-type: none"> <li>材質により減容・安定化処理を考慮して分類。また、処理・処分の検討の進捗に応じて見直していく</li> </ul>
三次分類	<ul style="list-style-type: none"> <li>処理・処分の検討の進捗に応じて分類</li> </ul>

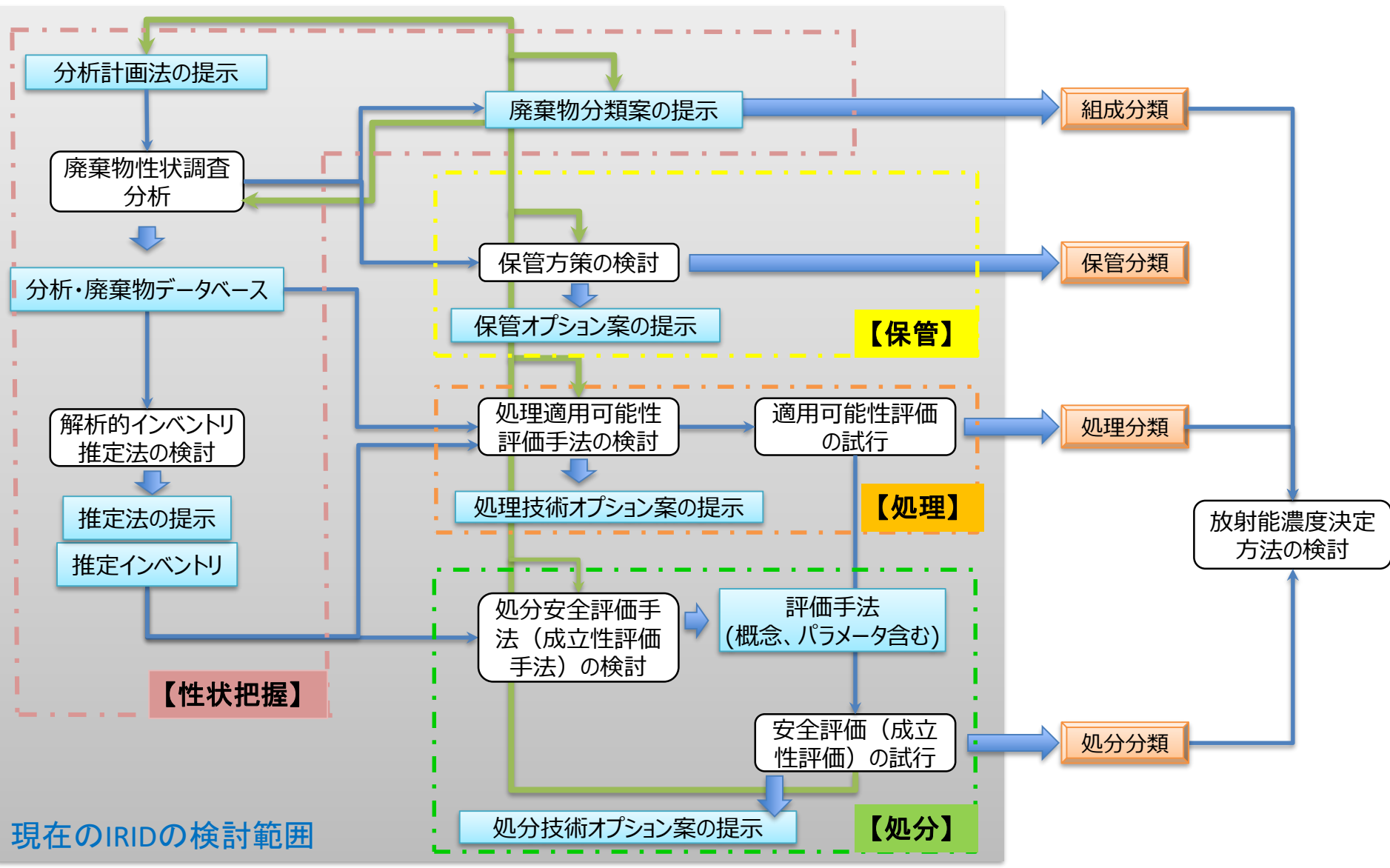
- 研究開発全体の目標は、**廃棄物の特性に応じた処理・処分の方法を見出す方法を構築するとともに、成立し得る保管、処理（前処理・処理・再加工、廃棄体化）、処分・再利用の技術オプションとともに、それに沿った廃棄物分類を指し示すこと。**

安全に、実現性/現場適用性があるものを……



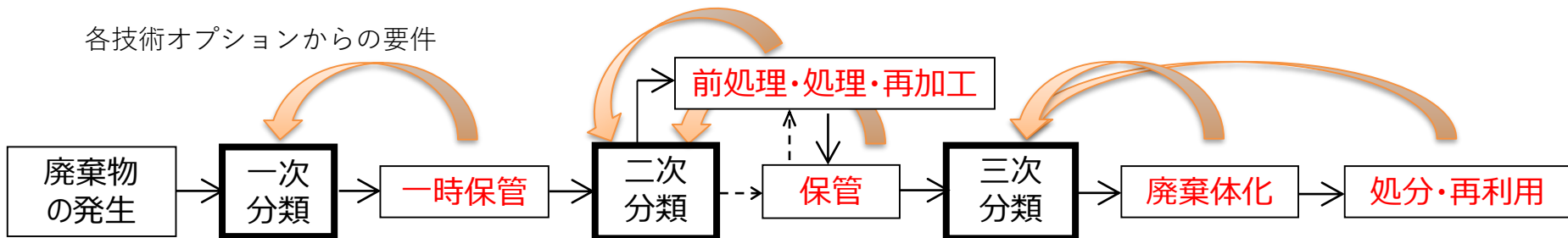
技術的成熟度の高いものをベースに**仮定・推定を置いて同時並行的に検討し、相互検証する。**  
不確かさを包含しても技術的に成立し得る方法を抽出する手法の構築を目指す。

# 廃炉・汚染水対策事業における主たる検討の関係性



# 廃炉・汚染水対策事業の取り組み概要

各技術オプションからの要件



性状把握	保管		処理	処分
初期インベントリ総量 分析対象核種(重要核種) 汚染経路・汚染形態/範囲 廃棄物分類(汚染組成比) 元素ごとの移行率	大部分は設計、ソフト管理で対応可能 安全機能等は共通(遮蔽、水素、閉じ込めなど)	仮定・前提条件	廃棄物区分(種類) 雑固体は既存技術で対応可能 実用レベルの技術 既存廃棄体基準相当はクリア	廃棄物区分(種類) 国内外の処分事例概念 事例に基づくシナリオ、パラメータ等
全廃棄物	デブリ取出し廃棄物	検討対象廃棄物	水処理二次廃棄物等	全廃棄物
合理的な分析技術 解析的インベントリ推算手法 区分・代表性評価手法 サンプリング技術 計画策定・分析	保管方策(容器仕様、保管建屋との取合い条件等)の検討	検討事項	固化可能性検査技術 固化処理適用可能性評価手法	成立し得る処分概念 安全評価手法・パラメータ 有害物質影響評価手法
廃棄物インベントリ【保、理、分】	—	他パートへのフィードバック情報	核種浸出率、仕様【分】 除外すべき物質【性、分】	分析対象核種・検出下限値【性】 核種浸出率【理】 考慮すべき物質【性、理】
廃棄体確認手法案 廃棄物分類案	保管容器の仕様 保管方策の案	導出される技術オプション案など	適用可能な固化処理技術案(前処理、固化化など)	適用可能な種々の処分概念案(共処分、合理化など)

## 研究開発の統合

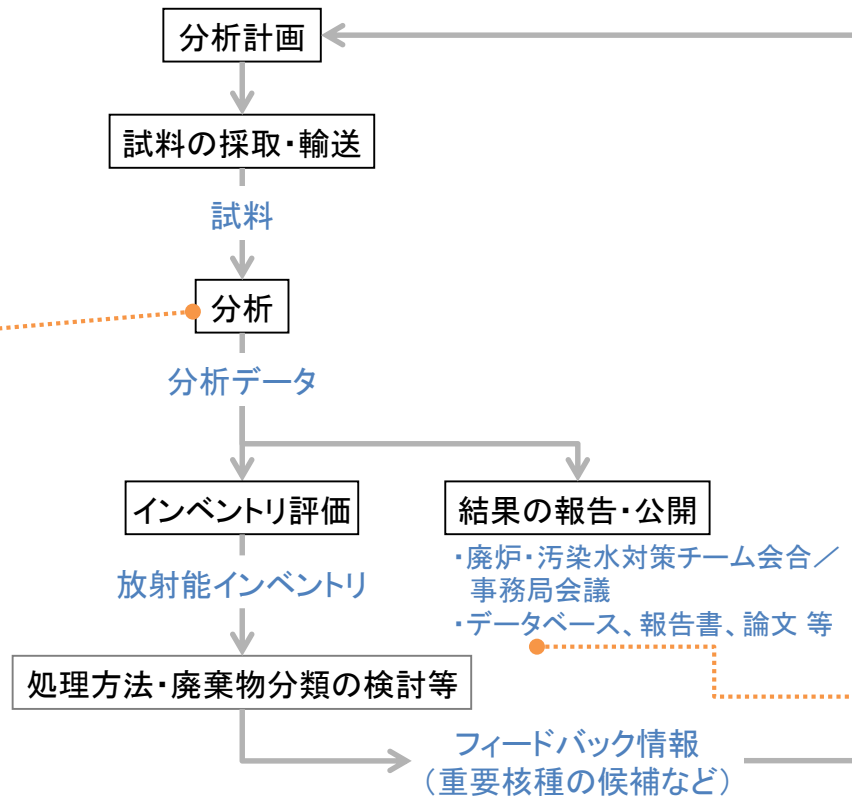
- 廃棄物分類ごとに適用可能な処理・処分技術オプションの提示
- 成立条件、課題の抽出

# 主たる検討の概要(性状把握)①

- 廃棄物管理(保管、処理、処分)の技術を検討するため、性状(特に放射性核種の濃度、組成)の情報が不可欠である。
- 2011年度から廃棄物・汚染物の分析に着手し、分析データを継続して蓄積している。分析の試料を福島第一原子力発電所から分析施設へ輸送し、得られたデータを検索、閲覧できるように公開している。
- 分析のために、高線量率試料採取の方法、より効率的な分析方法の開発を進めるとともに、分析データを利用して、統計的な処理方法や、廃棄物が含有する放射エネルギーを推定する解析的なモデルを開発している。



茨城地区施設での分析

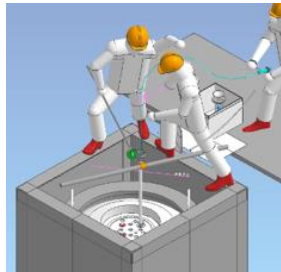
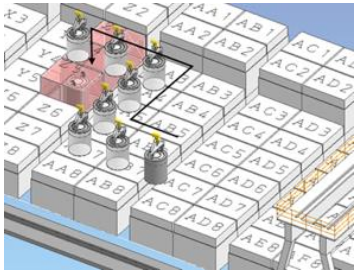


公開している分析データベース  
“FRAnDL”

分析とそのデータを利用する流れ



# 主たる検討の概要(性状把握)②



水処理二次廃棄物(スラリー、吸着材)試料の保管容器(HIC)からの採取

試料の採取・輸送

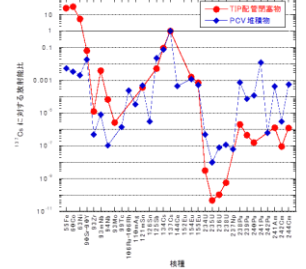
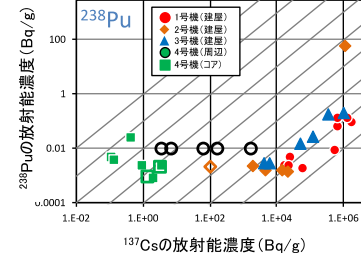
試料

分析

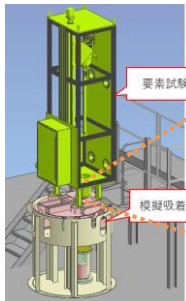
分析データ

インベントリ評価

放射能インベントリ



分析データの例(左: 瓦礫類のPu濃度、右: 格納容器(PCV)内試料の<sup>137</sup>Csに対する放射能濃度比)

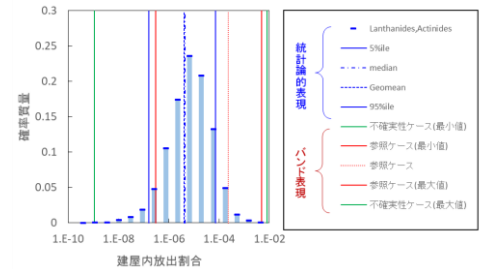


要素試験装置の構想

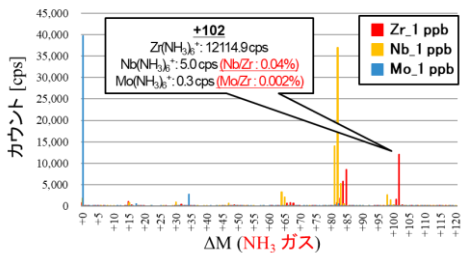


ゼオライトの採取試験

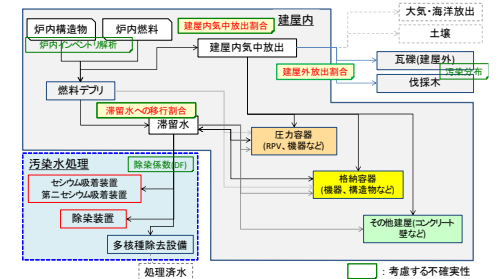
セシウム吸着塔からのサンプリング設備の検討



廃棄物の含有放射エネルギーを推定する統計手法の開発



より効率的な分析のための分析技術開発(放射線検出に代えてICP-質量分析の導入)



廃棄物の含有放射エネルギーを推定するための解析モデル

# 主たる検討の概要(処理技術)①～これまでの検討の流れ～

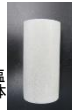
既存の様々な処理技術の調査、情報整理

◆ 処理技術カタログを整備

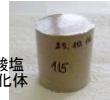
対象技術抽出

対象技術絞り込み

チタン酸塩 OPC 固化体



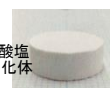
チタン酸塩 AAM 固化体



炭酸塩スラリー ガラス固化体



チタン酸塩 焼結固化体



固化した小規模固化体例

安定化、固型化技術の固化基礎試験

◆ 各水処理二次廃棄物に対する OPC、AAM、溶融、ガラス固化、焼結/ペレット化に係る 固化可能性情報を取得

先行的処理方法の選定手法の構築 (継続中)

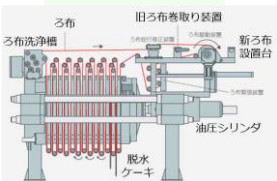
- ◆ 水処理二次廃棄物を対象とした処理技術の適用性評価アプローチの検討
  - ・ 適用性評価に係る廃棄物/プロセス特性項目 (評価軸) の抽出
  - ・ 各評価軸に対する各処理技術における適用範囲の考案
- ◆ 低温固化処理技術 (セメント、AAM) の適用範囲導出に係るデータ取得
- ◆ 一部の高温処理技術では実規模レベルでの試験実施

廃棄物	減容・前処理技術	固化技術					
		セメント固化	ジオポリマー固化	ガラス固化	溶融固化	焼結固化	ペレット成型固化
				モルタル充填固化と併用			
スラッジ	脱水または乾燥 + 熱処理または溶融	○	○	○	×	○	○
炭酸塩スラリー	脱水または乾燥	○	○	○	×	○	○
鉄汚洗スラリー		○	○	○	×	○	○
ゼオライト	なし (減容・前処理不要)	○	○	○	○	○	○
クイチタン液		○	○	○	×	○	○
チタン酸塩		○	○	○	×	○	○
酸化チタン	なし (減容・前処理不要)	○	○	○	×	○	○
Sb 吸着材		○	○	○	×	○	○
キレート樹脂	焼却またはガス化	○	○	○	×	×	×
樹脂系吸着材		○	○	○	×	○	○
Caコロイドフィルタ		○	○	○	×	○	○
Srコロイドフィルタ	焼却またはガス化	○	○	○	○	×	×
フェロシアン化合物		○	○	○	×	○	○
位課本 および 可燃性焼結体	焼却または粉砕 + 焼却またはガス化	○	○	○	○	-	-
焼却灰	なし (減容・前処理不要)	○	○	○	○	-	-
瓦礫	切屑または粉砕 + 圧縮または溶融	モルタル充填固化					
解体コンクリート	切屑または粉砕	モルタル充填固化					
解体金属	切屑 + 圧縮または溶融	モルタル充填固化					

固化可能性検討結果

HICスラリーの安定化技術開発

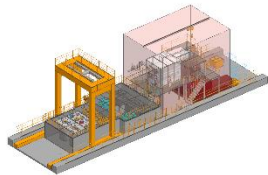
◆ フィルタプレスによる圧搾処理を選定



選定したフィルタプレス (無端ろ布走行式) 概念図

HICスラリー取出し技術開発 プロセス概念検討

- ◆ HICからのスラリー取出し手法考案
- ◆ 処理プロセス概念構築



HICスラリー処理プロセス概念図

2021年度運用開始に向けて 東電で設計・製作中

当面のgoal (処理方策の技術的見通し)

先行的処理選定手法策定

分類	固化処理技術方式		
	ガラス固化	溶融固化	低温処理
高温処理	ガラス固化	流下式	ジュール加熱 (LFCM)
			誘導加熱 (AVM, AVH)
	In-Can式	誘導加熱 (CCIM)	ジュール加熱 (ICV)
			外部加熱 (Dem&Melt)
溶融固化	流下式	誘導加熱	
	In-Can式	プラズマ加熱	
低温処理	セメント固化	アウトドラム式	誘導加熱
		インドラム式	誘導加熱
	AAM 固化	アウトドラム式	誘導加熱
		インドラム式	誘導加熱

赤字: 部分提案者による実規模試験対象

検討対象技術

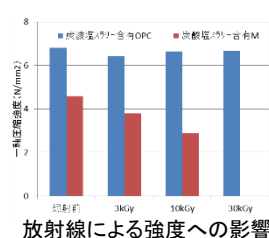
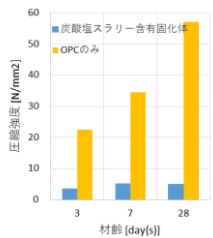


# 主たる検討の概要(処理技術)②

- 発生する廃棄物の特性から技術的に適用可能な技術を選定する手法（アプローチ手法）を検討
- 主に国内外で実績のある低温固化処理（セメント、AAM）の評価軸と範囲に係るデータを取得

## 低温固化特性データの取得

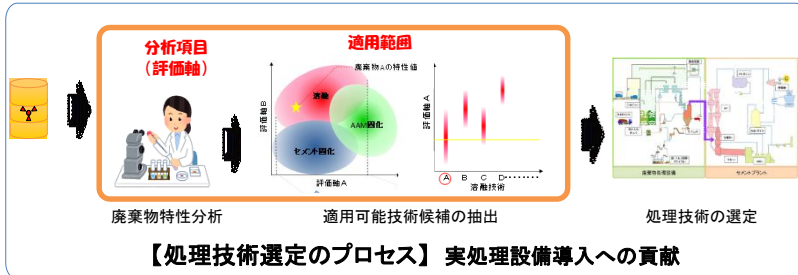
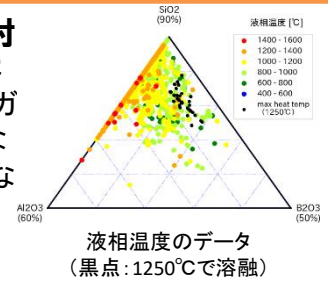
- 流動性、固化特性、圧縮強度などの基準から適切な配合比並びに充填可能上限を導出
- スラリー廃棄物混合固化体の溶出特性、耐放射線性に加え構成する相を同定
- 固化に影響する廃棄物に適用可能な特殊セメントの代替適用性評価



廃棄物混合による発現強度の比較 (OPC-炭酸塩スラリー)

## 熔融可能廃棄物混合範囲の検討

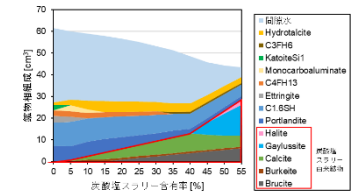
- これまでの様々な廃棄物等の熔融試験や実規模試験データと、ガラスデータベースを組合せ、主な水処理二次廃棄物の熔融可能な廃棄物混合範囲を推定



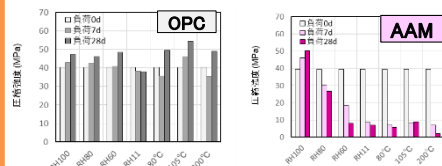
## 適用性評価アプローチのイメージ図

## 固化体の中長期安定性確認

- 含有放射能による到達温度解析手法を整備
- 熱、乾燥による中期的な固化体変質の確認
- 長期的な固化体構成相の変化の推定



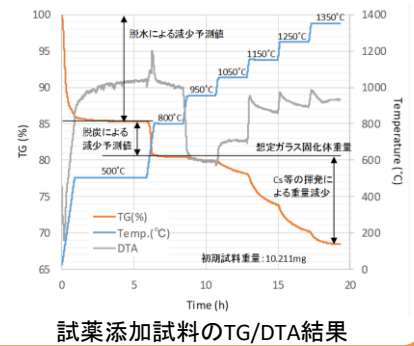
炭酸塩スラリー含有量に対するセメント固化体の鉱物相体積変化



熱・乾燥による圧縮強度の変化

## Cs揮発抑制等に係る検討

- ゼオライトからのCs揮発温度などの基本挙動に係るデータ取得
- 処理工程上の個別の処置(コールドキャップ、トップオフリット、ホウ素添加手順等)によるCs揮発抑制効果に係るデータ取得中



## 固化可能性簡易検査手法の開発

- 廃棄物の吸水性、膨潤性などの特性、固化材との反応性(ガス発生、発熱など)、固化特性(強度、流動性など)を指標として、遠沈管を用いた簡易な検査手法を開発
- 指標の間接的定量判定方法を検討中

Step	1	2	3	4	5
詳細性状	形状・大きさ、かさ密度	膨脹性、吸水性、発熱性、ガス発生	分散性、流動性、粒度分布	セメント懸濁液の沈降(発熱、ガス発生)	粘性 (g/10)
操作状況	試料 5g	試料 8g	試料 8g	試料 8g	試料 8g
条件・操作など	試料 5g	試料 8g	試料 8g	試料 8g	試料 8g
評定	形状粉砕状	基礎なし	基礎なし	基礎なし	基礎なし
次のStep	移行可能	移行可能	移行可能	移行可能	移行可能

開発した簡易検査ステップ検証例

# 主たる研究開発の概要(処分技術)①

## 性状把握

性状把握  
研究成果

廃棄物分類の提示

廃棄物の仮推定

廃棄物の特徴評価

処分施設・処理方法をふまえたパラメータ設定、線量評価

## 処理に関する検討

処理技術  
研究成果

成立可能性のある  
処理技術の抽出

廃棄物の特徴を考慮した  
処理の選定

## 処分にに関する検討

国内外事例調査

1F適用性をふまえた良好事例の抽出

処分施設の提示

処分概念の選定

処理・処分施設の  
特性を考慮した  
安全評価手法の選定

廃棄体要件の抽出、処分概念案の提示、安全評価手法の有効性検証、

# 主たる研究開発の概要(処分技術)②

## 検討成果概要

- ✓ 処分概念検討から、処分深度に応じた3区分のオプションを設定。浸透水量を低減するための人工バリア設置や、1F廃棄物に適した制度的管理期間を設けるなど、従来の国内処分場とは異なる概念を取り入れている。(図1)
- ✓ 処理の検討から廃棄物毎に複数のオプションを設定。核種移行に係るパラメータを設定し、処理方法ごとに線量評価に実施し、想定される処分深度を推定した。(表1)

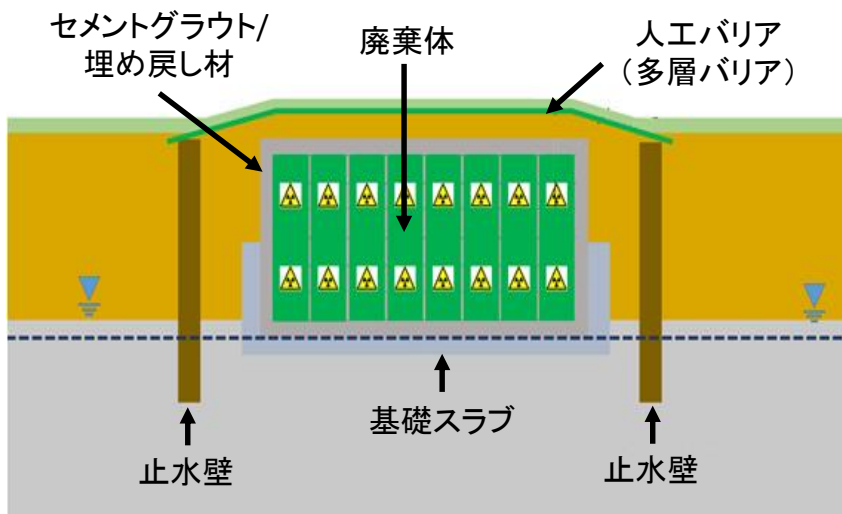


図1 処分施設検討の例  
(英国の処分場を参考にしたイメージ)

表1 線量評価の例  
廃棄物Aに関する処理 / 処分マトリクス※注

処分概念 オプション	処理オプション(a~e)				
	a	b	c	d	e
地表処分 相当	×	×	×	×	×
浅地中処分 相当	×	×	×	×	×
中深度処分 相当	×	×	○	×	×

※注 廃棄物A: 想定される廃棄体の一つ  
○.....全てのシナリオにて線量拘束値を満足  
×.....1つ以上のシナリオにて線量拘束値超過

- ✓ 処分の適合性を考慮した処理方法を選定するための評価方法の確立を目的とし、1F廃棄物に適した処理・処分方法案を提示するとともに、安全評価へ反映させ処分可能性評価を試みた。
- ✓ 本検討成果を性状把握・処理技術へのフィードバックし、かつ、処分施設・処分概念案の検討に反映し、今後は線量評価の高精度化を目指す。

# まとめ 1

## 【性状把握に関するまとめと課題等】

- 廃棄物の放射能インベントリや性状のデータを得るために、福島第一原子力発電所で試料を採取し、茨城地区施設において分析、取得したデータの蓄積と公開を継続中
- 分析データは、保管や処理技術の検討に利用。瓦礫や水処理二次廃棄物の汚染の特徴を明らかにするとともに、種々の廃棄物のインベントリを推定し、処分の検討に利用
- 廃棄物は継続して発生しているものの、種類や量が明らかでないことが課題。不確実性を考慮し、インベントリ推定や分析計画の手法を確立するのが必要。また、線量率の高い廃棄物（セシウム吸着塔）からの採取方法の確立も必要

## 【保管に関するまとめと課題等】

- 燃料デブリ取り出しにより発生する高線量廃棄物を対象に、発生する廃棄物の情報整理と、発生から保管までのプロセスを検討中
- 発生から保管までのプロセスの課題として抽出した、廃棄物容器、水素ガス対策、乾燥方法および測定項目・方法について、具体化を実施中
- 保管中の固化体毎の水素ガス発生 of 安全対策が必要、例えば評価に用いるG値やフィルタメント付き保管容器の長期保管の場合の長期健全性評価が課題
- 水処理二次廃棄物の保管・管理対策が必要

## まとめ 2

### 【処理に関するまとめと課題等】

- 様々な廃棄物の特性から、適用可能な固化処理技術の抽出方法と、低温固化処理（セメント固化、AAM固化）の適用性を判定する方法を提言
- 選定された処理技術の現場適用に向け、廃棄物の取出し、固型化の前処理、放射性物質の遮蔽・閉じ込め、基準に対する検認などへの対応方法の検討が必要
- 固型化物、特にAAMの長期的な安定性に係るデータの拡充が課題
- 廃棄物含有率向上、放射線分解によるガス発生防止を図る新材料開発が課題
- 廃棄物の分類管理を適切に行うために、非接触な測定技術の開発などが必要

### 【処分に関するまとめと課題等】

- 性状把握、保管、処理方策の研究開発状況を踏まえ1F廃棄物の処分分類の提言と安全評価の研究開発の実施
- 廃棄物のインベントリは、処分における重要核種を考慮し、現実的な（過度に保守的でない）評価となるように整備していく必要がある。例えば、インベントリの不確実性への対応方法が課題である。
- 処理に係るパラメータ（ガス発生等）は、1Fの廃棄物の特性を考慮して整備していく必要がある
- 処分場に係るパラメータは、国内外の知見を参考に、不確実性を包含しながらも現実的な評価となるように考慮して整備していく必要がある

上記の廃棄物性状の推定、保管、処理および処分に係る技術オプション案の提示は、処分線量評価の結果を各検討にフィードバックして見直しを図り、見直されたオプション案を再度線量評価により検証することで、種々の適用可能な技術オプション案を提示していく。



# 原子力学会2020年秋の大会における 「固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発」(IRID)関連発表

講演番号	発表タイトル	主な発表者
2B08	福島第一廃炉汚染水処理で発生する廃棄物の先行的処理に係る研究開発 (8)低温処理固化可能性検査手法の検討処理に係る課題の検討	JAEA 谷口 ほか
2B09	福島第一廃炉汚染水処理で発生する廃棄物の先行的処理に係る研究開発 (9)模擬炭酸塩スラリーの合成	ATOX 中塩 ほか
2B10	福島第一廃炉汚染水処理で発生する廃棄物の先行的処理に係る研究開発 (10)炭酸塩スラリーを含有する低温固化処理材料の特性評価	電中研 菊地 ほか
2B11	福島第一廃炉汚染水処理で発生する廃棄物の先行的処理に係る研究開発 (11)低温処理材料の溶解試験	太平洋コンサルタント 金田 ほか
2B12	福島第一廃炉汚染水処理で発生する廃棄物の先行的処理に係る研究開発 (12)低温処理材料の溶解挙動のモデル化	太平洋コンサルタント 小林 ほか
2B13	福島第一廃炉汚染水処理で発生する廃棄物の先行的処理に係る研究開発 (13)炭酸塩スラリー含有固化体の照射特性	JAEA 加藤 ほか
2B14	福島第一廃炉汚染水処理で発生する廃棄物の先行的処理に係る研究開発 (14)高温処理時における無機吸着剤からのCs揮発挙動	電中研 宇留賀 ほか
2B15	福島第一廃炉汚染水処理で発生する廃棄物の先行的処理に係る研究開発 (15)廃棄物固化処理技術抽出に向けた処理技術調査 その2	電中研 菊地 ほか

ご清聴ありがとうございました。