



廃炉に向けた放射性固体廃棄物分析の現状と展望

令和8年2月6日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
福島廃炉安全工学研究所 大熊分析・研究センター 分析課

小高 典康

福島第一原子力発電所（1F）事故由来の多様かつ多量な放射性廃棄物

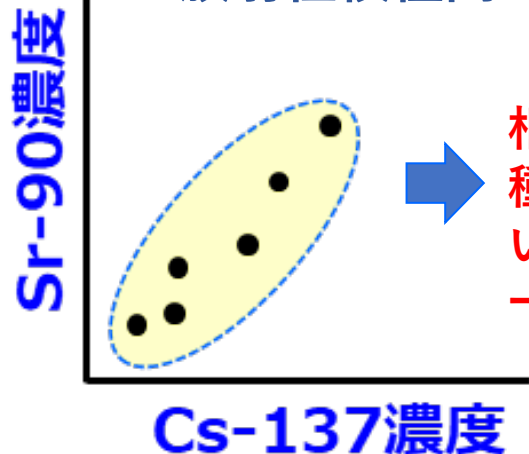


分析結果からの評価に基づき、
廃棄物の**処理・処分**を行う。

放射性物質や化学物質がどれくらい含まれているかを分析
→ 廃棄物の**特徴の把握**と、それに基づく**分析の効率化**が重要

特徴把握の例①

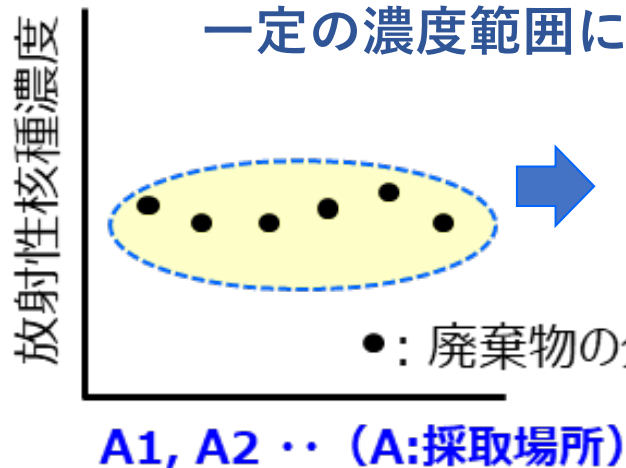
放射性核種間の相関関係がないか？



相関関係が確認された核種は、一方の測定しやすい核種の分析のみでもう一方を評価できる

特徴把握の例②

あるエリアの放射性核種は一定の濃度範囲に存在していないか？



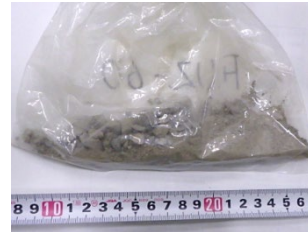
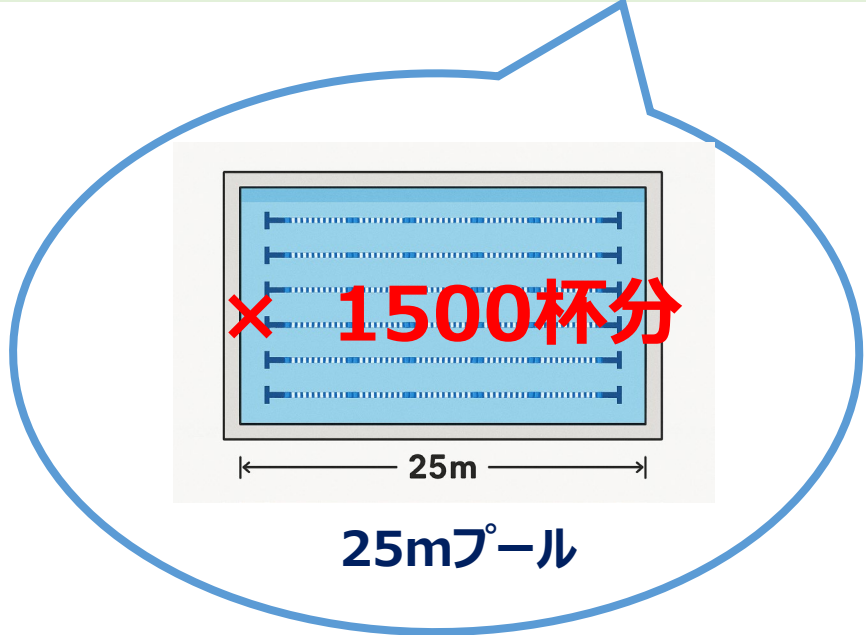
一定の濃度範囲にあることが確認できれば、それ以降の分析が効率化できる

●：廃棄物の分析値

A1, A2 .. (A:採取場所)

廃棄物の特徴を明らかにするため、多様かつ多量な廃棄物の分析が必要

1Fの放射性固体廃棄物の
現在の保管量：**約530,000m³※**



コンクリート



土壌



金属ガレキ

・・・etc

分析対象核種：最大30核種（**主要核種※²**は朱字）

H-3	C-14	Cl-36	Ca-41	Co-60	Ni-63
Se-79	Sr-90	Zr-93	Mo93	Nb-94	Tc-99
Ru-106	Pd-107	Ag-108m	Sn-126	I-129	Cs-137
Eu-152	Eu-154	U-234	U-235	U-236	U-238
Np-237	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Am-241	Cm-244

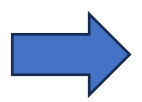
※1 廃炉・汚染水・処理水対策チーム会合 事務局会議（145回）の資料より計算して結果を表記

※2 東京電力HD(株)の分析計画における必須核種

多量の廃棄物

多様かつ多種の測定対象核種

従来法では、時間がかかり、
処理件数を稼げない



**1F廃棄物のための新しい
簡易・迅速な分析手法**の開発が必要

放射性廃棄物

採取・粉砕
(微細化)

γ 線放出核種
(直接測定可)

短半減期核種 (放射線を計測しやすい)

化学分離操作

(測定を妨害するその他
放射性核種を除去)

α 線/ β 線測定

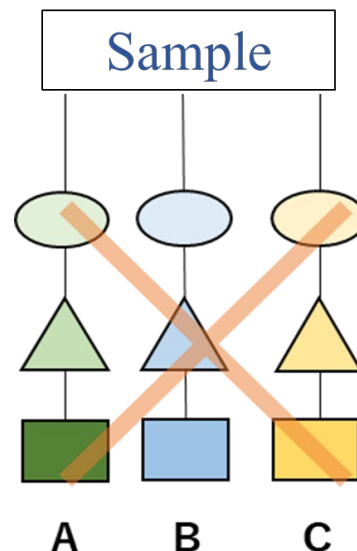
長半減期
(放射線を計測しにくい)

②放射性核種 (元素) の質量数を直接計測

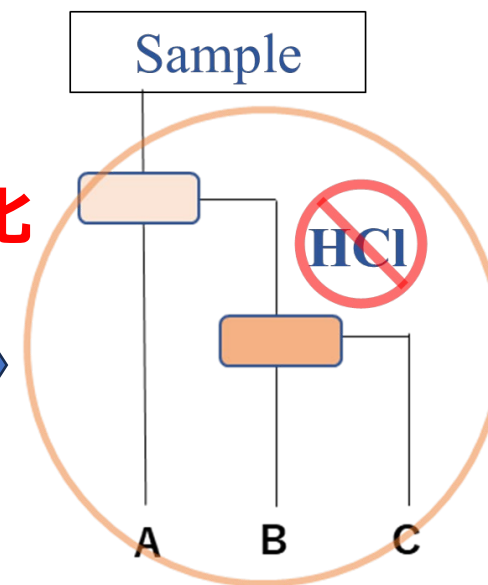
- 特定の質量数の元素を高精度で測定する質量分析装置 (ICP-MS/MS) を適用した新しい分析手法の開発
→複雑な化学分離操作が不要！
→5核種の大幅な迅速化に成功！ (例：数週間→数日)

①化学分離の合理化

従来の化学分離



合理化

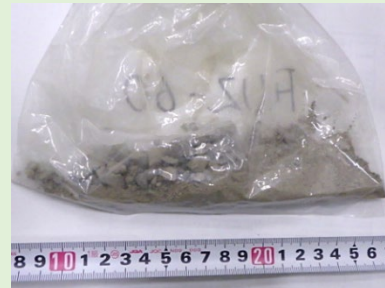


- 逐次的に複数の核種を一度に分離
→16核種の化学分離操作時間を約半分に！
(例：70時間 ⇒ 30時間)
- ステンレス鋼への腐食性の高い塩酸を用いない化学分離法を開発・適用
→分析施設の長期安定操業に貢献！

これまでに
性能評価と現場への実装

- ① 開発した分析法をコンクリート試料に適応して **分析性能を評価**
- ② 第1棟で分析するための **現場実装** を完了

分析性能評価



コンクリート

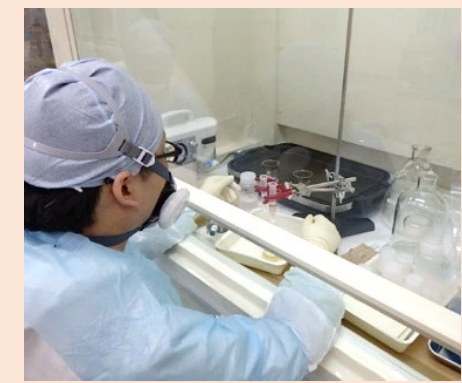


- 処理処分の評価に必要な低濃度まで測れるか
- 繰り返した際にばらつきはないか
- 妨害核種を十分に除去できているか

現場実装



分析装置の調整



分析環境の整備

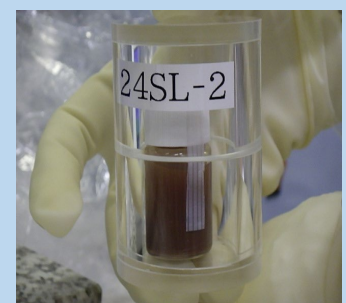
現在は
試料性状が多岐にわたる1F廃棄物への適応性評価



土壌



金属ガレキ



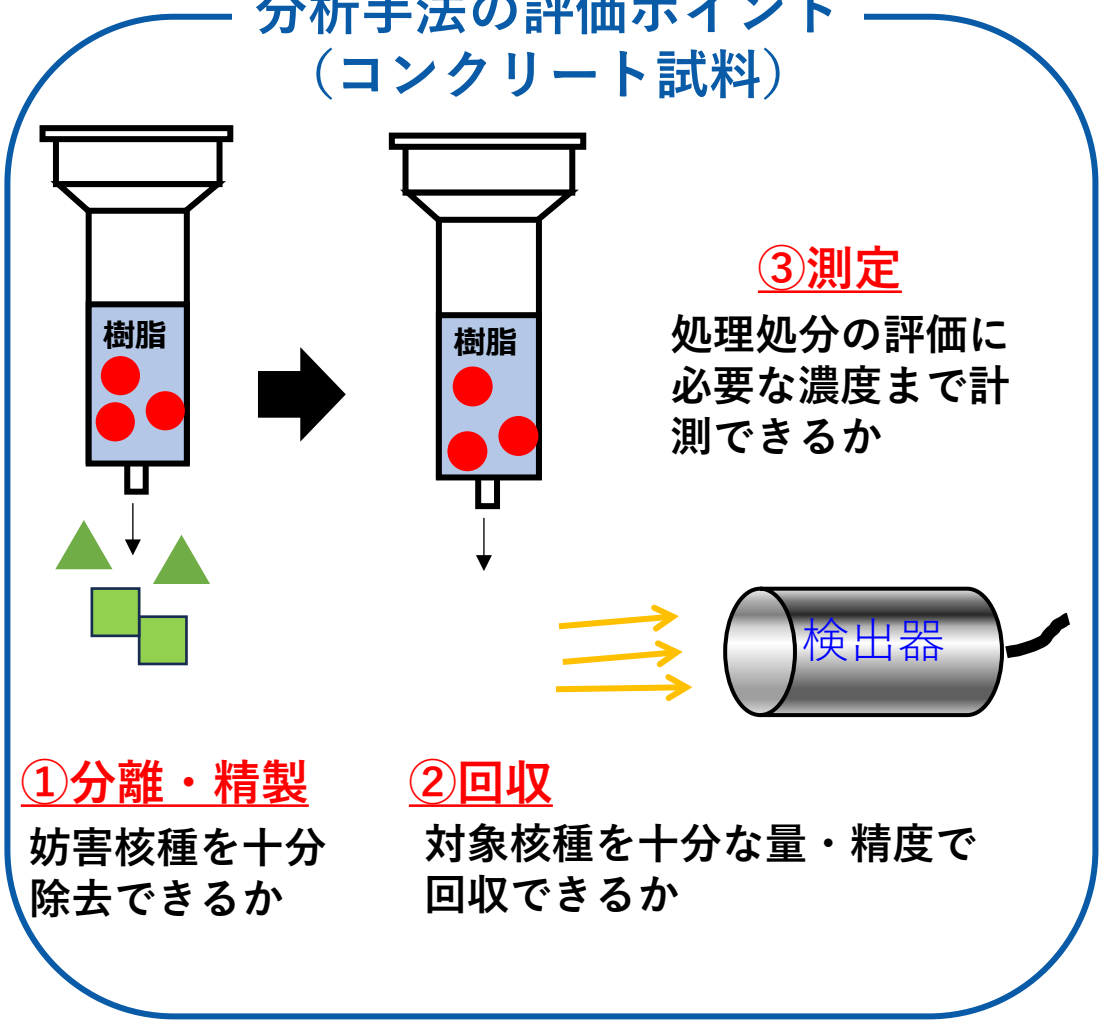
水処理二次廃棄物



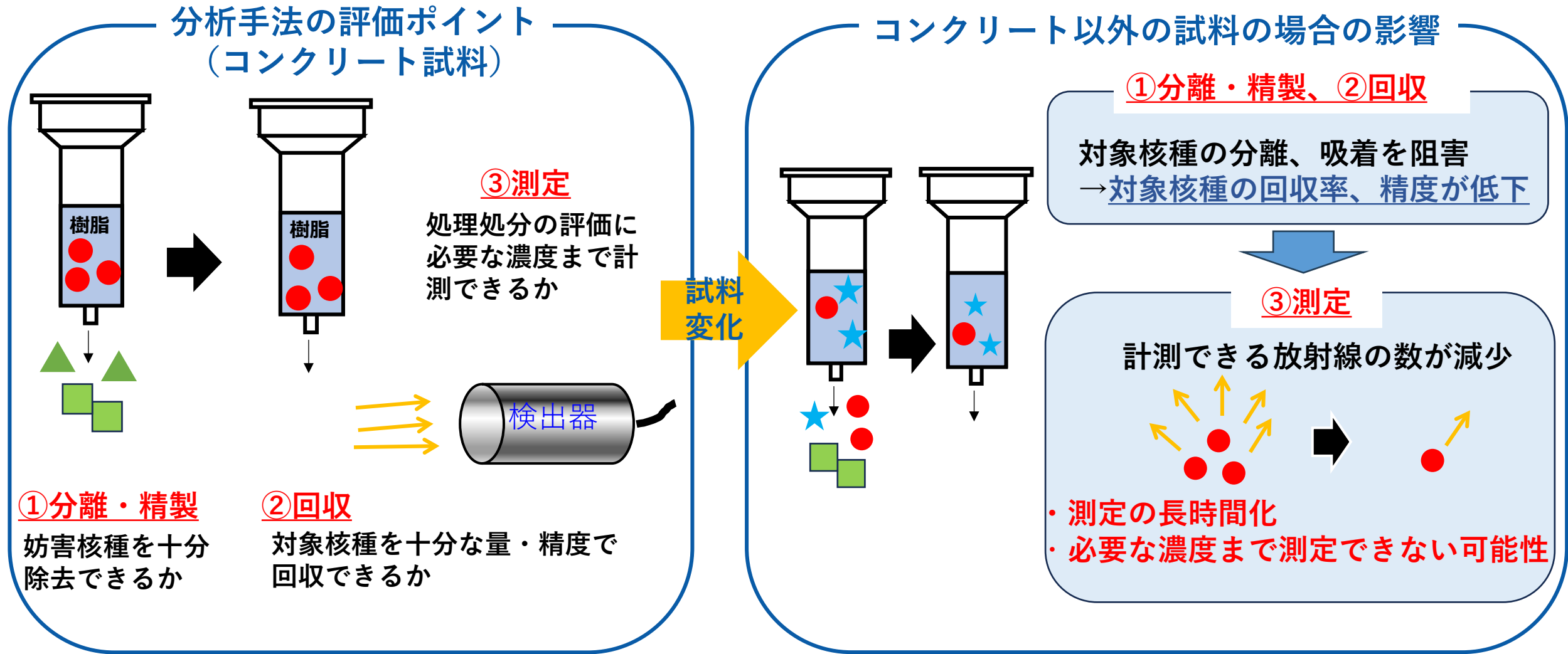
- 開発した分析手法が **コンクリート以外の試料性状へも十分適応できるか** 性能を評価 (適応性評価)
- 適用性評価に基づく、**分析手法の改善検討**

○性状変化に対する適用性評価の考え方 ●：対象核種 ▲★：試料構成元素 ■：測定妨害核種

分析手法の評価ポイント
(コンクリート試料)



○性状変化に対する適用性評価の考え方 ●：対象核種 ▲★：試料構成元素 ■：測定妨害核種



試料性状の変化による分析手法の適用性評価を分離操作における回収率より評価する

- これまでに瓦礫コンクリート試料に加え、水処理二次廃棄物（炭酸塩または鉄が沈殿した溶液）
土壌、焼却灰に開発した分析法を適用
- 主要核種であるC-14, Cl-36, Ni-63, Sr-90, Tc-99, I-129, Pu-238, Am-241を評価

表 各分析の回収率

	C-14	Cl-36	Ni-63	Sr-90	Tc-99	I-129	Pu-238※1	Am-241※1
瓦礫コンクリート	81%	74%	93%	93%	98%	82%	100%	100%
炭酸塩が沈殿した溶液	78%	70%	87%	100%	94%	93%	100%	100%
鉄が沈殿した溶液	78%	70%	88%	100%	94%	93%	100%	100%
土壌	86%	53%	92%	93%	95%	88%	100%	100%
焼却灰	80%	36%	92%	88%	100%	81%	100%	100%

コンクリート試料と比較して、ほとんど核種、試料性状の組み合わせで
同様の回収率を確認

※1 類似した試料性状の標準物質において、回収率測定値が認証値±不確かさの範囲（k=2）で一致したため、100%として評価した。

- これまでに瓦礫コンクリート試料に加え、水処理二次廃棄物（炭酸塩または鉄が沈殿した溶液）
土壌、焼却灰に開発した分析法を適用
- 主要核種であるC-14, Cl-36, Ni-63, Sr-90, Tc-99, I-129, Pu-238, Am-241を評価

表 各分析の回収率

	C-14	Cl-36	Ni-63	Sr-90	Tc-99	I-129	Pu-238※1	Am-241※1
瓦礫コンクリート	81%	74%	93%	93%	98%	82%	100%	100%
炭酸塩が沈殿した溶液	78%	70%	87%	100%	94%	93%	100%	100%
鉄が沈殿した溶液	78%	70%	88%	100%	94%	93%	100%	100%
土壌	86%	53%	92%	93%	95%	88%	100%	100%
焼却灰	80%	36%	92%	88%	100%	81%	100%	100%

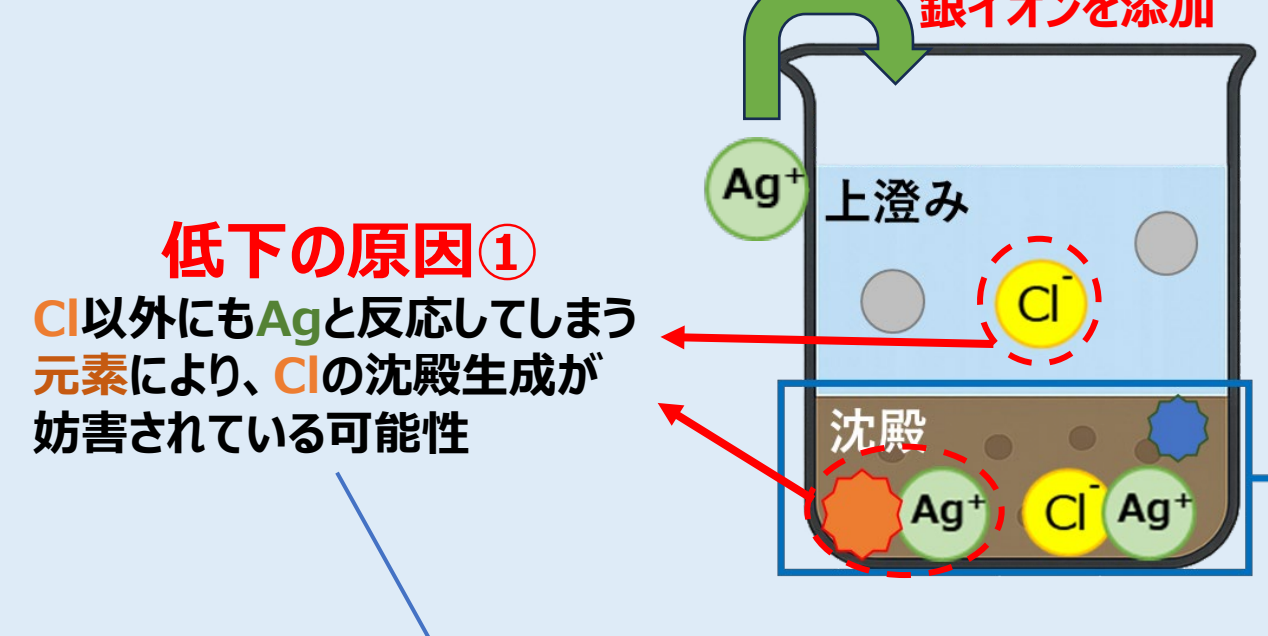
適用性評価で見えてきた課題

- Cl-36は、土壌と焼却灰で回収率が低下し、試料性状による影響が確認された。
 - 必要な放射能濃度を測定できるように測定時間を500分から1400分とした
 - **ただし、分析時間が長くなることに加えて、さらに低い濃度までの分析要求への対応が難しい**

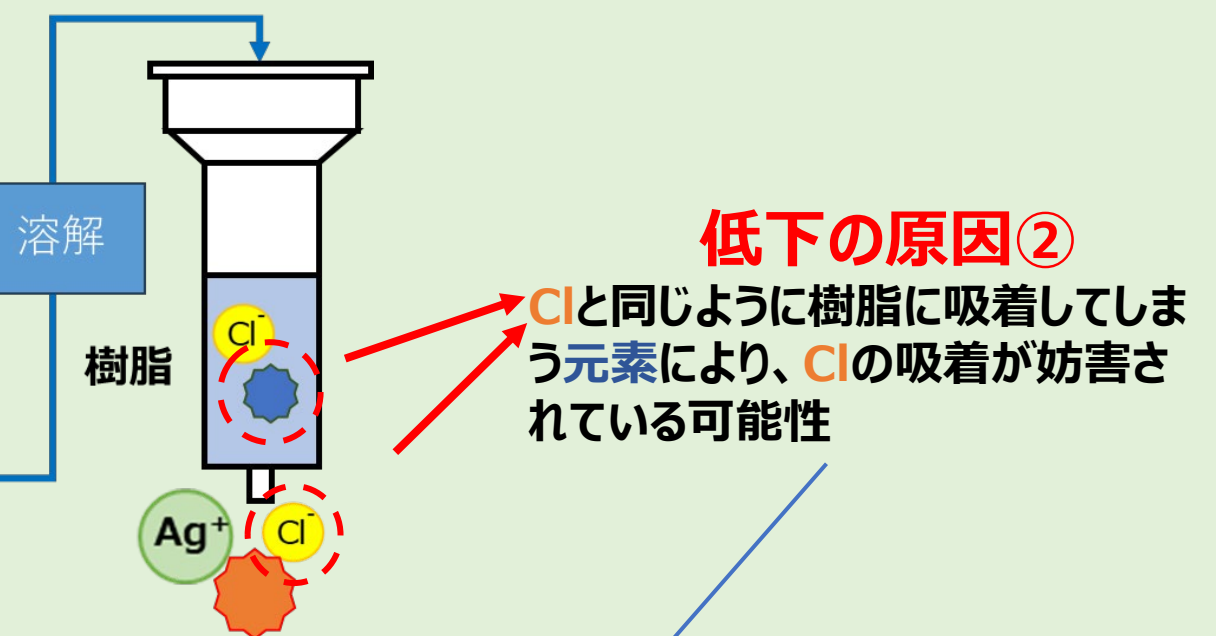
※1 類似した試料性状の標準物質において、回収率測定値が認証値±不確かさの範囲（k=2）で一致したため、100%として評価した。

■ 土壌・焼却灰の場合（試料性状の変化による回収率低下の原因）

分離手順①：塩化銀沈殿



分離手順②：固相抽出による塩素精製

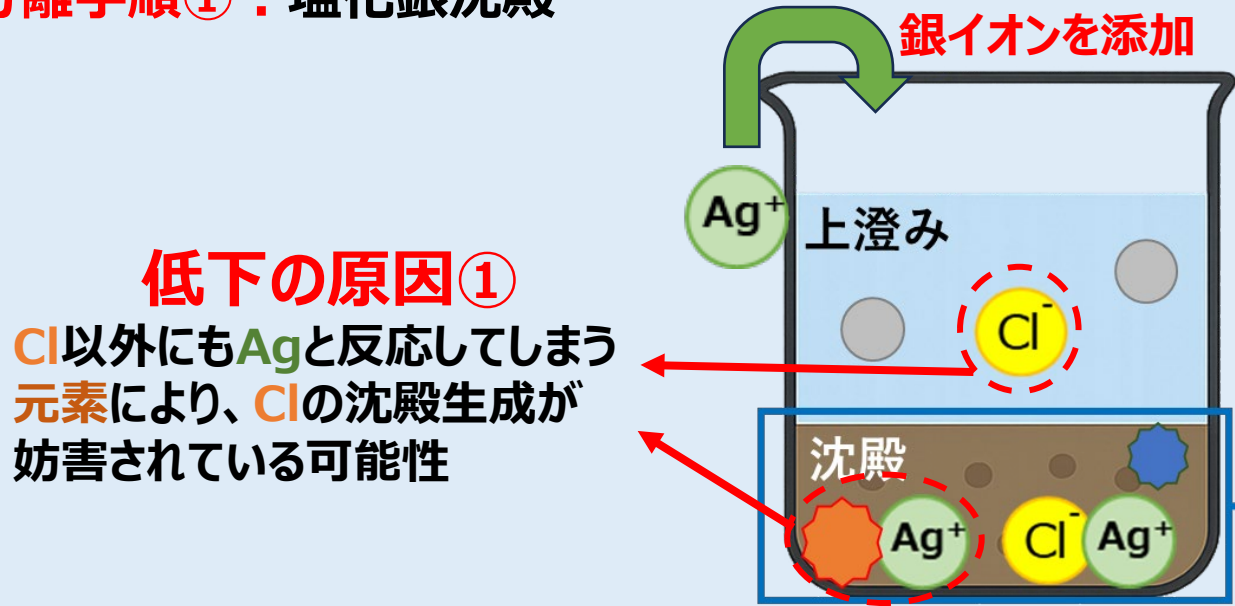


試料性状の変化によって、土壌、焼却灰の構成元素が対象核種の分離または吸着を阻害

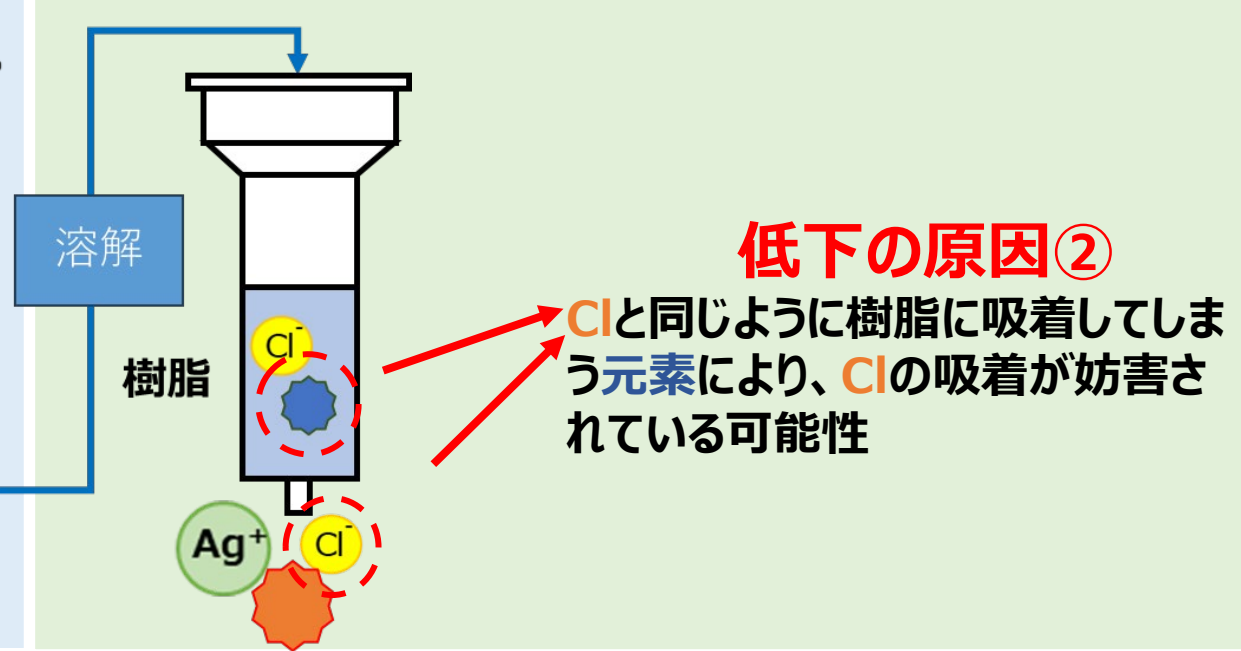
その結果、Cl-36の回収率が低下したと考えられる

■ 土壌・焼却灰の場合（試料性状の変化による回収率低下の原因）

分離手順①：塩化銀沈殿



分離手順②：固相抽出による塩素精製



■ Cl-36の分析手法の改善方針

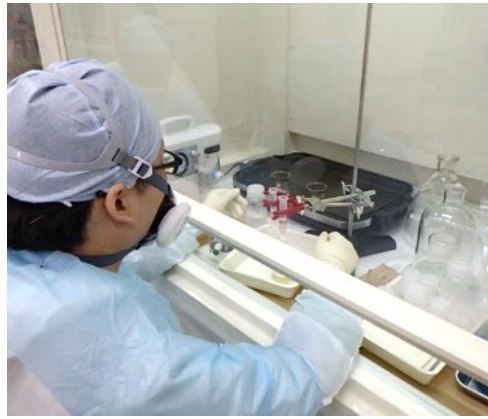
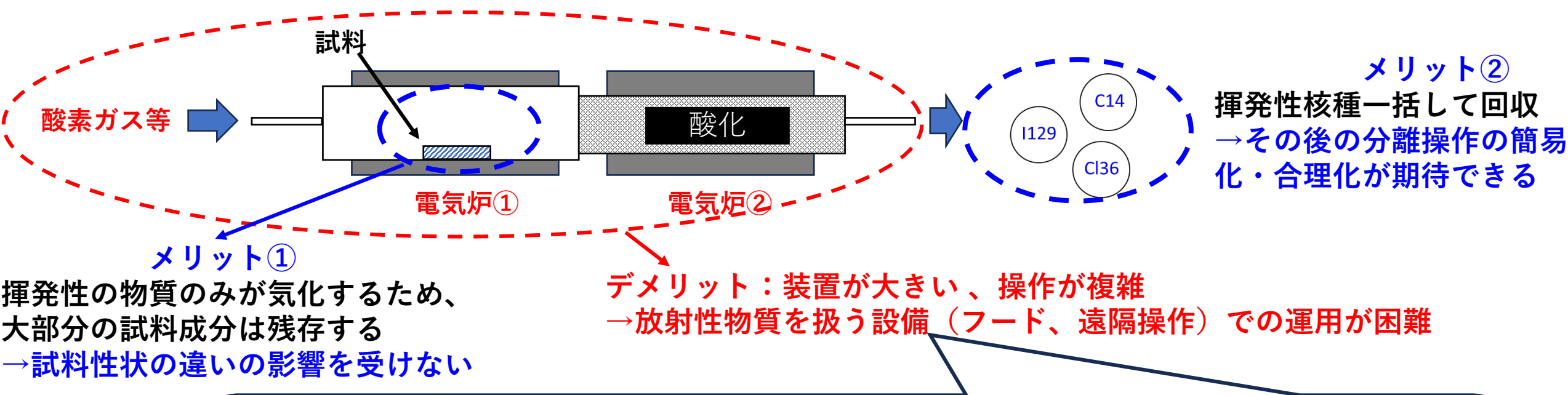
案①：妨害成分を特定し、事前除去する分離手順を加える手法改善
→土壌、焼却灰に限定的。手法が複雑化

案②：試料を燃焼し、揮発性の高いClを回収する分離法（**燃焼法**）による手法改善

→どんな試料性状でも試料成分の影響を受けない汎用性が高い分離法

→同様の揮発性の高いC-14とI-129を同時に分離できる可能性（更なる合理化の可能性）

■ 燃焼法による揮発性核種（ ^{36}Cl , ^{14}C , ^{129}I ）の分離のメリットとデメリット



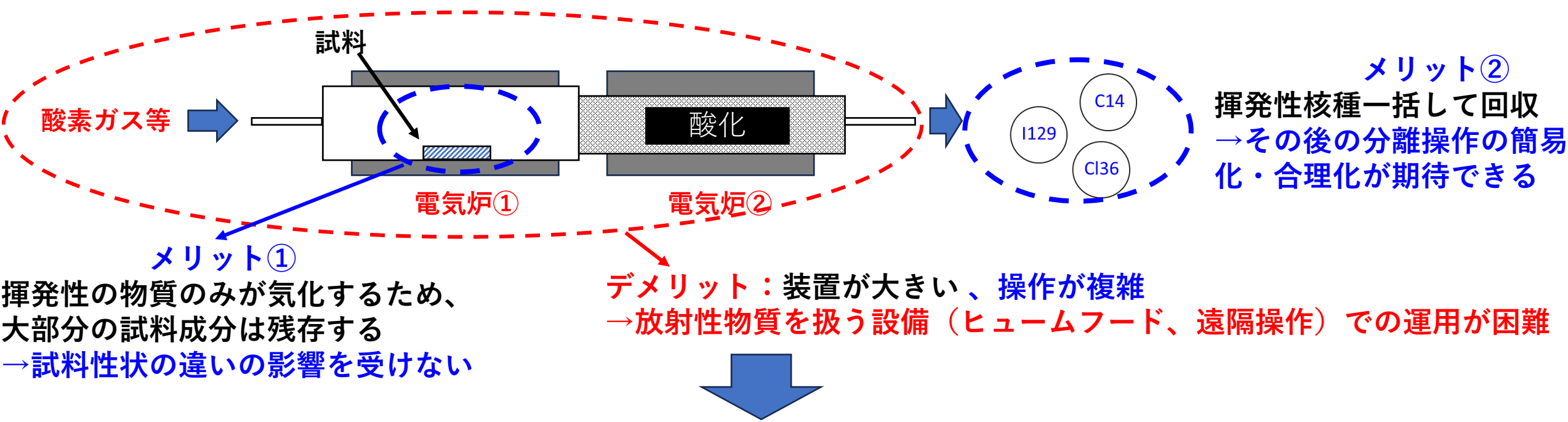
フード



鉄セル（遠隔操作）

- フード内での分析毎の部品交換、メンテナンス作業が困難
- 遠隔操作では、マニピュレータによる分析自体が困難、メンテナンス作業などはさらに難しい

■ 燃焼法による揮発性核種（ ^{36}Cl , ^{14}C , ^{129}I ）の分離のメリットとデメリット



■ コンパクトな揮発性核種用燃焼装置の開発

- ・ 現在、国内、海外の企業と協議しながら **コンパクトな燃焼装置を製作中**
- ・ 来年度以降は
- ・ フード内で製作した装置を用いたモックアップ試験を予定
- ・ モックアップの結果を踏まえ、鉄セルでのマニプレータによる操作のための更なる改造を検討予定



これまでに

1F廃棄物のための新しい簡易・迅速な分析手法を開発

- 化学分離の合理化によって、**16核種**の分析時間を半分にすることに成功！（例：70時間⇒30時間）
- ICP-MS/MSの適用によって、**5核種**の大幅な迅速化に成功！（例：数週間⇒数日）
- 当該方法をコンクリート試料に適応することができた。

現在は

分析手法の様々な性状への適用性評価を実施

- コンクリート試料に加え、**土壌、焼却灰、水処理二次廃棄物**に開発した分析法を適用した。
- Cl-36は、土壌と焼却灰で回収率が低下し、試料性状による影響が確認された。
- 燃焼法によるCl-36回収を検討→**コンパクトな揮発性核種用燃焼装置の開発**
⇒来年度はモックアップ試験や改造検討も行う



「分析」を通じて、1F廃炉及び福島復興への
貢献を引き続き行います