

安全研究成果報告（案）

説明資料

廃棄物埋設に影響する長期自然事象の調査方法及びバリア特性長期変遷の評価方法に関する研究

事後評価 説明資料

令和3年4月

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ

核燃料廃棄物研究部門

目次

1. 研究概要
2. 研究期間を通じた主要成果
3. まとめ
4. 成果の活用について
5. 成果の公表等
6. 成果目標に対する達成状況
7. 今後の展開

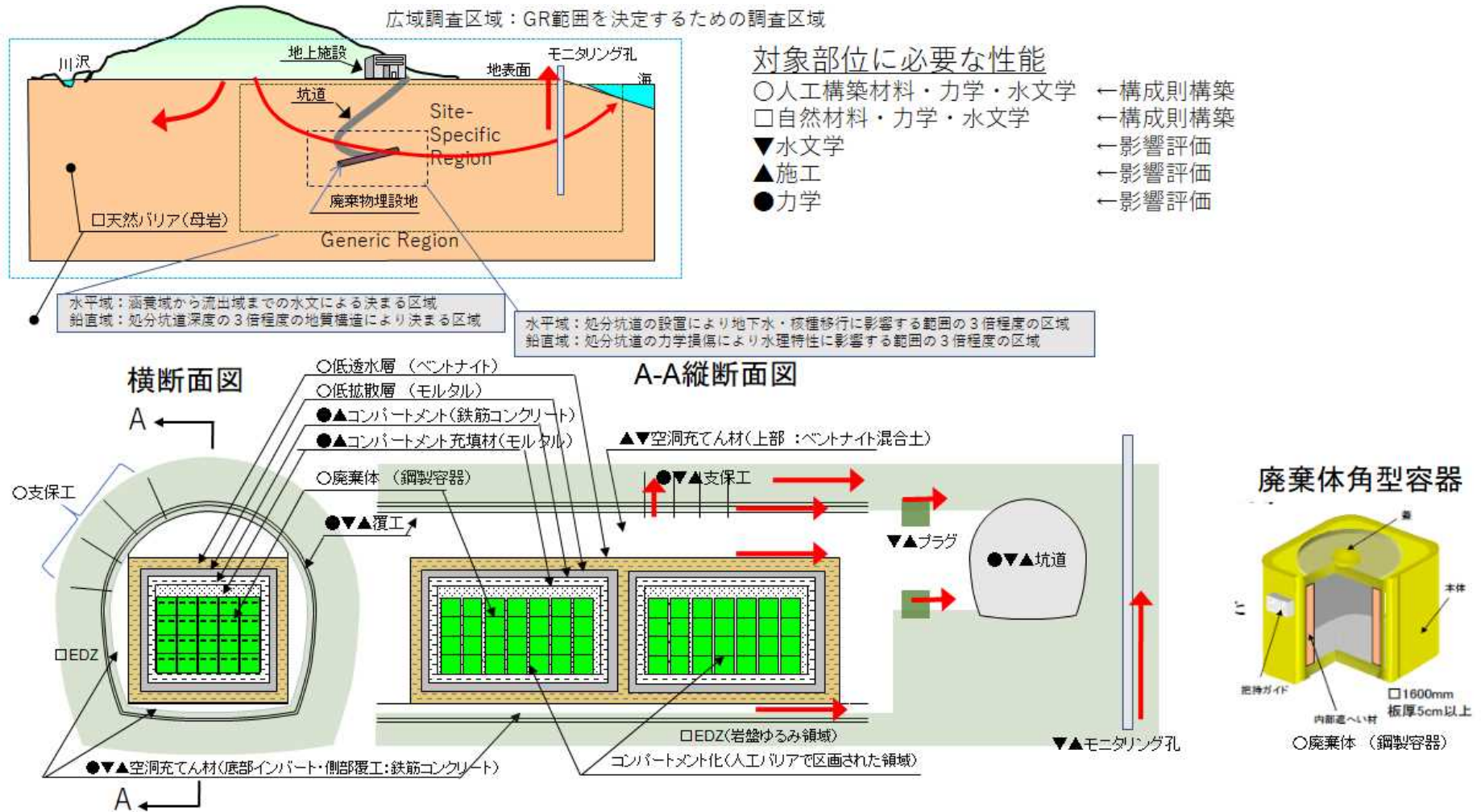
1. 研究概要

- 現在検討されている中深度処分の規則類では、廃棄物埋設施設を火山活動及び断層活動が著しい影響を及ぼすおそれのない区域に設置し、隆起・侵食の影響を考慮しても深度70 mを確保すること、放射性物質の環境への漏えいを抑制する設計とすることとしている。これらを要件とした許可基準規則類及びモニタリング等の基準類整備のため、廃棄物埋設施設に係る自然事象の長期評価、性能評価手法、地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究を行った。
- 自然事象の長期評価では、隆起・侵食、断層、地下水流動に関する評価手法、岩盤の力学・水理学的特性及び核種の収着・移行現象を検討した。性能評価手法では、人工バリアの長期性能及び天然バリアの水理特性の評価手法を検討した。地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究では、モニタリング施設の閉鎖措置及びその確認の手法等を検討した。これらの結果を用いて、これらの手法の一般的な状況に対する留意点を整理した。今後、中深度処分に必要とされる条件をより具体的に考慮した検討が必要である。
- 本研究では、自然事象の長期評価の研究の一部において、サンプリング、ボーリング、試料分析、解析等を行うために(国研)産業技術総合研究所に試験研究を委託した。また、性能評価手法並びに地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究の一部において、バリア材料の変質試験、数値解析、坑道を用いた試験、海外機関の情報調査等を行うために、(国研)日本原子力研究開発機構及び(公財)原子力環境整備促進・資金管理センターに試験及び調査を委託した。
- また、自然事象の長期評価の研究の一部は、埼玉大学、(国研)産業技術総合研究所、(国研)原子力研究開発機構及び東京大学との共同研究として実施した。

研究全体の工程

	H29年度	H30年度	H31年度	H32年度	
(1) 廃棄物埋設に係る自然事象の長期評価に関する研究	・ 隆起・侵食量評価手法の適用性	面的評価の適用性	要件の整理	評価手法の構築	
	・ 断層等の評価手法	広域場への適用性	要件の整理	評価手法の構築	
	・ 地下水流動場評価手法	沿岸域への適用性	地形変化域への適用性	要件の整理	評価手法の構築
			・ 海底地すべり面の滑動可能性 評価手法の検討	要件の整理	評価手法の構築
				・ 掘削影響領域	
(2) 廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究	・ 人工バリアの変質挙動評価、天然バリア中の核種移行評価 課題整理	文献調査	モデル整備	評価手法の構築	
(3) 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究	・ 性能確認及びモニタリング 諸外国の規制の調査	既往の手法の調査	フィールド試験	手法の評価	

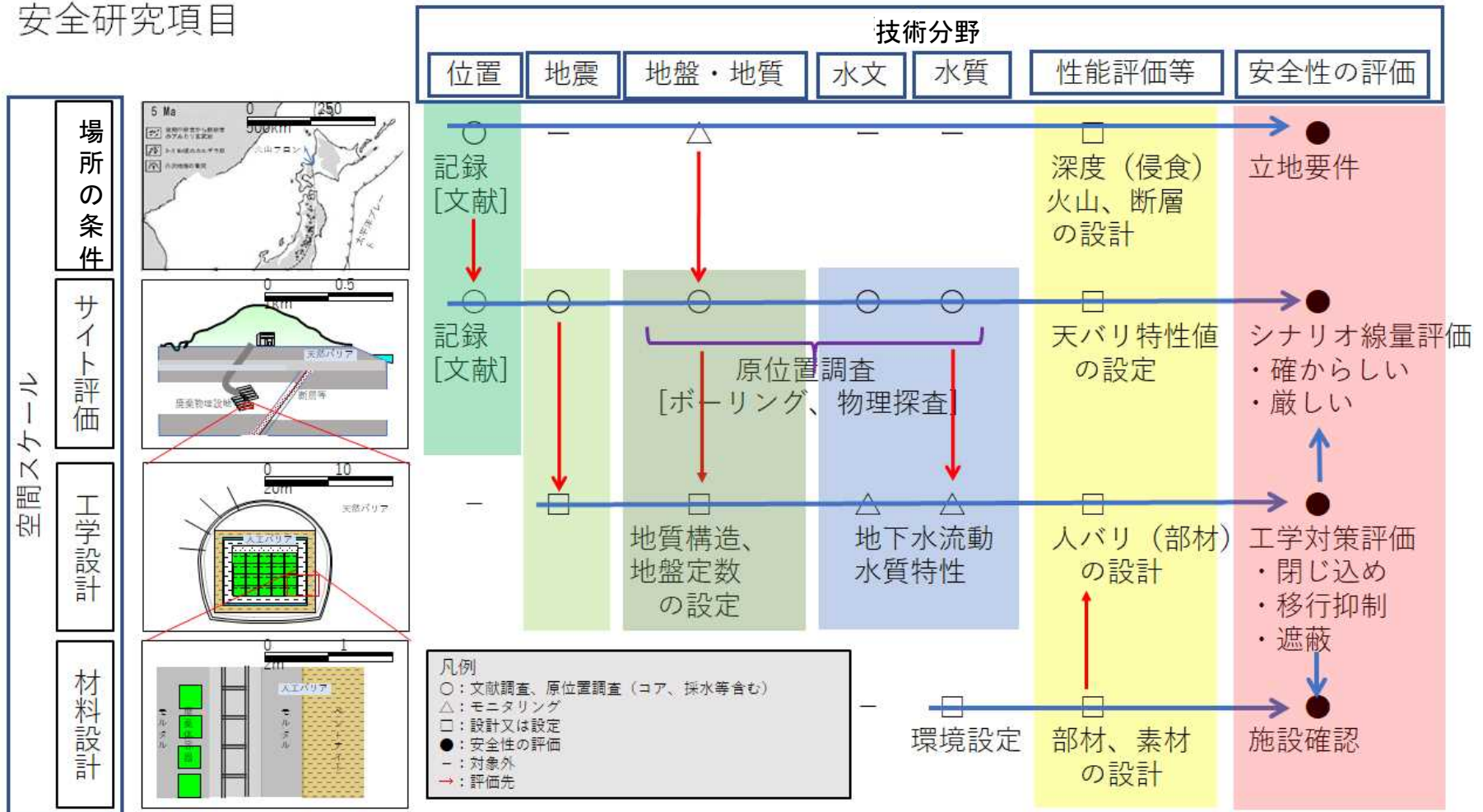
1.研究概要(つづき) 中深度処分の概念と安全研究項目



(電気事業連合会資料〔平成30年度第22回原子力規制委員会〕の図に研究項目等を追記)

1. 研究概要（つづき）中深度処分の空間スケールと対応する技術分野

安全研究項目



2. 研究期間を通じた主要成果

2.1.1 中深度処分における隆起及び侵食に関する評価手法の研究

中深度処分の廃棄物埋設地には、10万年以上、70mの深度確保が求められることから、その間の侵食・隆起の評価が重要となる。そこで、侵食基準指標面の標高とその隆起・侵食開始からの現在までの期間(年代)に基づく評価手法によって、過去数十万年前まで適用可能であるが、その評価手法を確立するための研究に取り組んだ。

(1) 時間スケールの異なる隆起及び侵食量評価手法について

- 対象とする地形・時間スケール・適用地域についてまとめ、放射性廃棄物の埋設処分の 10^5 年オーダーと比較した。
- 隆起については段丘を対象とした手法の適用性が高く、侵食については宇宙線生成核種を用いた手法が適用性があった。

表：隆起・削剥評価手法の手法・対象・時間スケール・適用性のまとめ

手法・指標	対象	時間スケール*1	適用性*2							
			沿岸域				内陸部			
			低地	台地	丘陵	山地	盆地	山地		
隆起	測地	GPS測位	標高	$\leq 10^1$ 年	◎	◎	◎	◎	◎	◎
		水準測量		$\leq 10^2$ 年	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	段丘面高度	海成段丘	$10^3 \sim 10^5$ 年	◎	◎	◎	×	—	—	
		河成段丘*3	$10^3 \sim 10^6$ 年	○	◎	◎	◎	◎	◎	
		侵食小起伏面高度	侵食小起伏面	$\geq 10^6$ 年	—	—	—	○	—	○
		堆積深度十年代	海成堆積物(露頭)	$10^6 \sim 10^8$ 年	△~○	○	○	○	○	○
埋没深度十年代	海成堆積物(コア)	$10^6 \sim 10^8$ 年	○	○	○	×	○	×		
固化深度十年代	火成岩(露頭)	$10^6 \sim 10^8$ 年	×	×	×	○	×	○		
削剥	ダム堆砂量	ダム集水域	$10^1 \sim 10^2$ 年	×	△	△	○	△	○	
	堆積物量	扇状地	$\geq 10^4$ 年	—	△	△~○	△~○	△~○	△~○	
		三角洲	$\geq 10^4$ 年	△~○	—	—	—	—	—	
		堆積盆	$\geq 10^4 \sim 10^6$ 年	△~○	×	×	—	△~○	—	
	宇宙線生成核種	集水域	$10^2 \sim 10^4$ 年	△~○	△~○	○	○	△~○	○	
		侵食面	$10^3 \sim 10^6$ 年	△	△	○	○	△	○	
熱年代	露頭orコアの削剥史	$10^6 \sim 10^8$ 年	×	×	×	○	×	○		

*1 時間スケールは 10^x 年オーダーで表示する。

*2 適用性の区分 ◎=適用性高い, ○=適用性あり, △=適用性低いor一定条件下で適用可, ×=適用性極めて低いor適用不可, —=存在しない

*3 河成段丘による隆起評価手法の適用地域は中部地方以北に限られる。

2.1.1 中深度処分における隆起及び侵食に関する評価手法の研究

(2) 隆起量の空間スケールについて

- 段丘を対象とした精度の異なる幾つかの手法を用いて青森県の太平洋側(上北平野・下北半島)の隆起量を比較したところ、おおむね各手法で同程度の結果となった。
- 広範囲に連続的に段丘面が発達している地域においても、地域により異なる隆起速度の傾向が確認された。

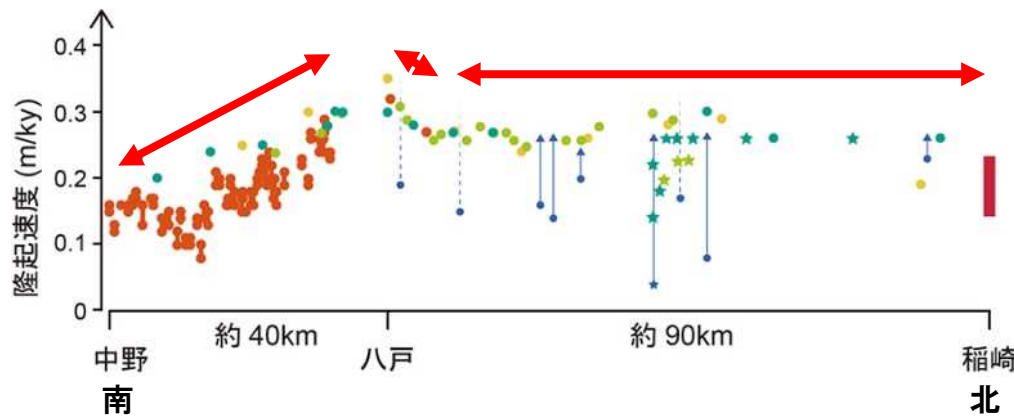


図:青森県上北平野・下北半島における隆起速度

- Matsu'ura *et al.* (2014)
 - 宮崎・石村 (2018)
 - 田中ほか (1997)
 - 宮内 (1985), 太平洋側
 - ★ 宮内 (1985), 陸奥湾側
 - 小池・町田 (2001), 太平洋側
 - ★ 小池・町田 (2001), 陸奥湾側
 - 本課題, 太平洋側
 - ★ 本課題, 陸奥湾側
 - 本課題, 太平洋側
- MISSEのみ

- 委託研究で提案した手法は、原理的には従来よりも厳密に隆起量を見積もることが可能
- 現状では、場所(露頭)の制約があるため、精度は低い

2.1.2 中深度処分における断層等に関する評価手法の研究

中深度処分における断層の要求事項においては、後期更新世以降(約12~13万年前以降)の活動が否定できない断層だけでなく、規模の大きい断層等を規制対象とするための検討が規制委員会で行われている。断層は地形、地質・地質構造、応力場等を総合的に検討した上で評価を行うことが必要である。断層の調査においては、埋設地が位置する深度70m以深での位置が必要であり、この深度においては、直接観察による評価が難しいケースもあり、物理探査等による評価手法が確立していないケースもあるため、この深度における、物理探査的手法の妥当性について科学的・技術的知見の蓄積が必要である。以上のことから、次の研究に取り組んだ。

(1) 物理探査を使った断層の長さの評価手法

- 各探査段階別に、その特徴や適用可能な物理探査手法の有効度等について取りまとめ、反射法地震探査が断層や地下構造の評価に最も有効度が高いことが示された。

調査段階	手法	有効度	得られる情報	データ属性	活用場面	コメント
広域空中探査	電磁法探査	○	地下の比抵抗構造・状態	2D (3D)	地下の比抵抗構造の境界による断層の推定	ヘリコプターを用いた稠密な空中電磁探査が実用化されている
	磁気探査(磁力探査)	○	地下の磁性体分布・構造	2D (3D)	地下の磁性体分布の境界による断層・岩相境界の推定	ドローンを用いた稠密な磁気探査が実用化されている
	重力探査	○	ブーゲー異常値(勾配)の平面分布	2D (3D)	断層・岩相境界の有無を推定するための事前検討	ヘリコプターを用いた稠密な空中重力偏差法探査が実用化されている
広域地表調査	反射法地震探査(2D)	◎	弾性速度境界(地層境界)の構造	2D	探査測線上の断層の存在の有無	陸上においてはP波およびS波地震探査の記録が良好な方を選択
	音波探査(2D)	◎	弾性速度境界(地層境界)の構造	2D	探査測線上の断層の存在の有無	海域におけるP波反射法地震探査
	三次元反射法地震探査	◎	弾性速度境界(地層境界)の構造	3D	広域(面的)の断層の存在の有無を調べる概査	P波反射法のみ適用可
	屈折法地震探査	△	地下の弾性波速度構造・分布	2D	弾性波速度の境界による断層存在の推定	探査深度の5~10倍の測線長が必要
	電気探査・電磁法探査	△	地下の比抵抗構造・状態	2D	地下の比抵抗構造の境界による断層の推定	比抵抗構造と断層位置が一致しない場合がある
	精密重力探査	○	ブーゲー異常値(勾配)の面的・線的分布	2D 1D	探査位置or探査測線上の断層存在の推定	重力値の異常から地下構造を推定する
	三次元反射法地震探査	◎	弾性速度境界(地層境界)の構造	3D	断層の有無・連続性を確認するための精査	・P波反射法のみ適用可 ・海域においては超高分解能3Dの手法あり
精密地表探査	地中レーダー	○	表層付近のレーダー波による反射構造	2D	地下の断層が表層まで達しているかどうかの判断	表層付近の情報に限られる
	三次元電気探査	○	地下の比抵抗構造・状態	3D	電磁気的特性の境界による断層存在の推定	比抵抗構造と断層位置が一致しない場合がある
	三次元電磁法探査	○	地下の比抵抗構造・状態	3D	地下の比抵抗構造の境界による断層の推定	ヘリコプターを用いた稠密な空中電磁探査が実用化されている
	磁気探査(磁力探査)	○	地下の磁性体分布・構造	2D (3D)	地下の磁性体分布の境界による断層・岩相境界の推定	ドローンを用いた稠密な磁気探査が実用化されている
	精密重力探査	○	ブーゲー異常値(勾配)の平面分布	2D 平面	探査位置or探査測線上の断層存在の推定	・重力値の異常から地下構造を推定する ・絶対重力計の使用を推奨

[注] ◎:重要な情報となる、○:補完的な情報となる、△:間接的な情報となる

表:地表からの調査段階における各種物理探査手法の適用性のまとめ

2.1.2 中深度処分における断層等に関する評価手法の研究

(1) 物理探査を使った断層の長さの評価手法(つづき)

- 深度70m以深の廃棄物埋設候補地周辺に断層が存在する場合に、反射法地震探査を使ってどのようにその長さを判定するかを認定フロー(案)にまとめた。

埋設地周辺に存在する断層の長さを適切に判断するための反射法地震探査を使った認定フローを作成した。この認定フローに従って、断層の存在を判断することが可能となる。

しかし、この認定フローの利用者には、ある一定以上の専門的知識が必要である点に注意が必要である。

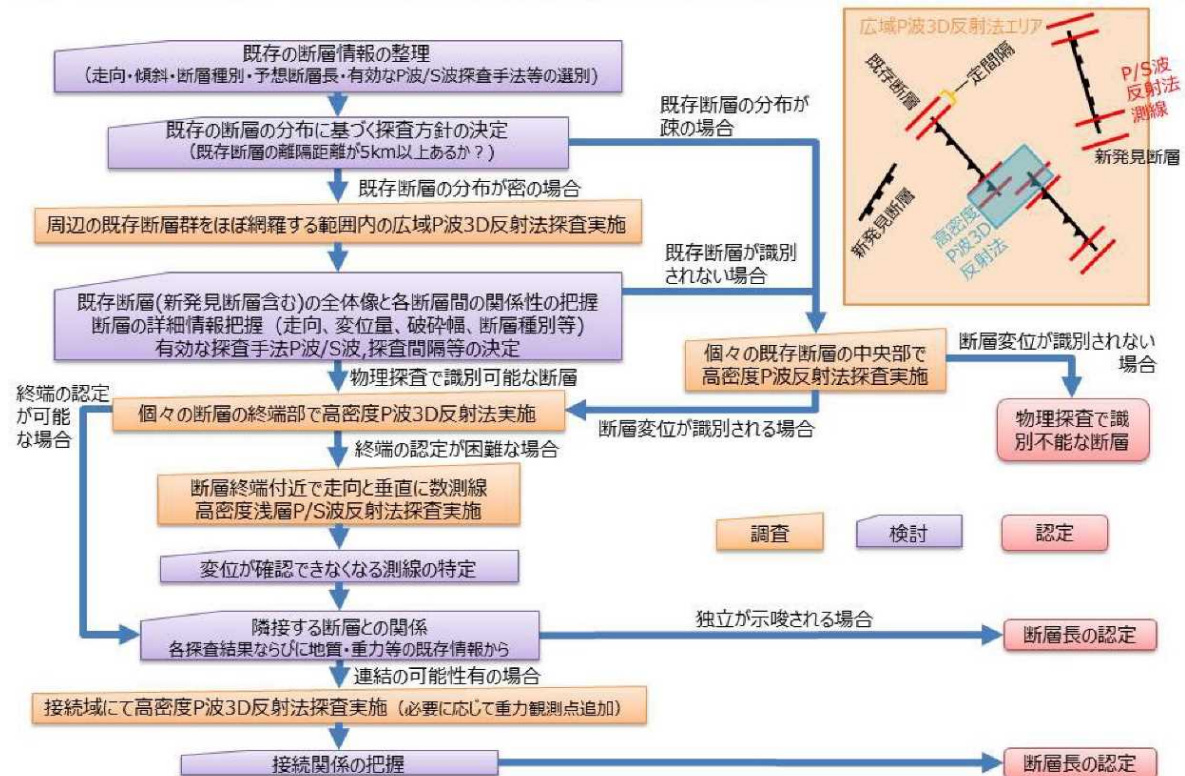
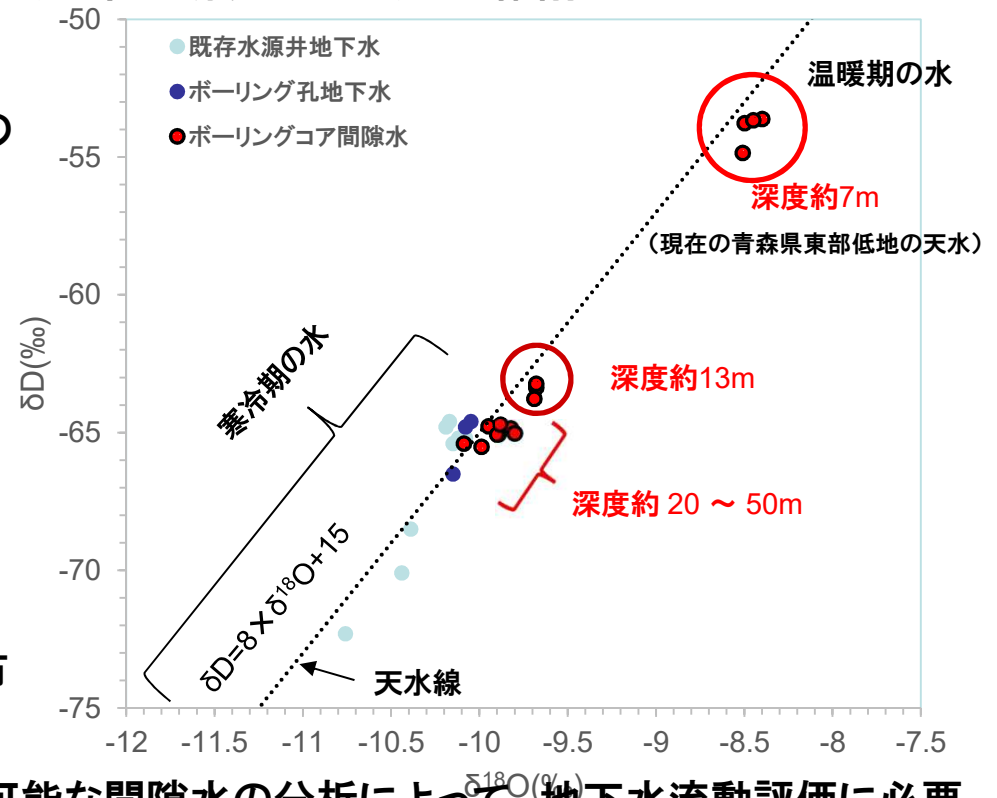


図: 反射法地震探査による断層の長さの認定フロー(案)

2.1.3. 中深度処分における地下水流動に関する評価手法の研究

放射性核種は地下水流動によって移行させられることから、地下水流動の評価は廃棄物埋設にとってきわめて重要である。また、地下水の流速等は、約10万年周期で起きる氷期、間氷期サイクルは海水準変動を引き起こし、地下水流動系の変動に影響する。そこで、同位体水文学的評価手法^{*)}を使った地下水流動系変動の評価手法の妥当性について、既存水源井とボーリング掘削の二つのアプローチから青森県上北地域において検討した。

- 水の水素同位体比 δD と酸素同位体比 $\delta^{18}O$ の値が、全て天水線上にプロットされた。既存水源井及びボーリング孔から採取した地下水は δD が -65% 以下と寒冷期に涵養した古い地下水である。
- 地下水の ^{14}C 年代も10000～16000年と、最終氷期の年代値を示した。
- 深度約7mの間隙水は現代の天水の値であったが、深度約13m以深では、寒冷期の地下水の影響が大であった。ボーリングコアの間隙水試料から氷期の地下水が比較的浅層まで分布していることが明らかとなった。



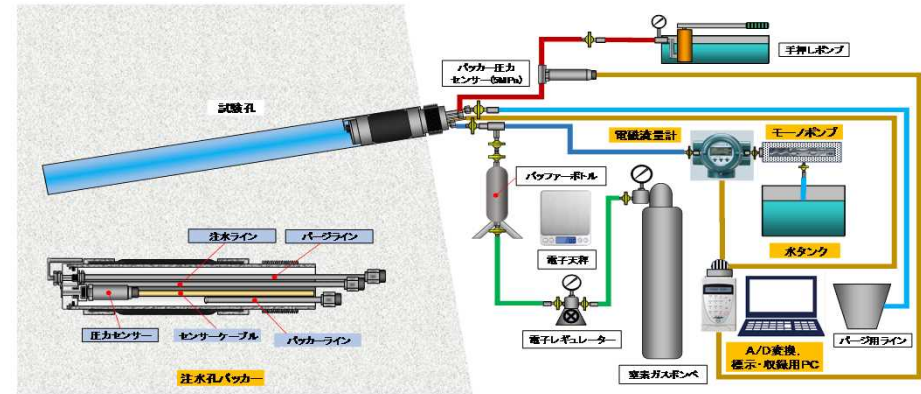
帯水層のない地下水の乏しい地下空間で採取可能な間隙水の分析によって、地下水流動評価に必要な地下水年代を推定可能であることが明らかとなった。

^{*)} 重い同位体の方が水蒸気になりにくく、蒸発時の気温等によって同位体比が変化する効果を利用した手法。通常、平均海水中の同位体比とのずれを千分率で表現する。降水については、水素同位体比と酸素同位体比の分布が傾き約8となることが知られている。深部流体などでは異なる同位体比を示すことから、水の起源や複数の起源の水の混合状態が分析できる。

2.1.4. 中深度処分における岩盤の力学的状態と水理学的特性に関する研究

JAEAの瑞浪深地層研究所の300mアクセス坑道を使って、亀裂性媒体におけるEDZ^注の判定のため、コア観察、透水試験、弾性波探査試験を実施し、手法の適切性について検討したところ以下のことが分かった。

- ボーリング孔掘削、観察によって、開口割れ目を確認
- 透水試験結果より坑壁に近い部分に高透水量係数領域を確認
- 屈折法弾性波探査試験より、坑壁に低弾性波速度領域が存在



図：透水試験装置の模式図

透水試験結果から得られた高透水量係数領域と弾性波探査試験から得られた低弾性波速度領域はおおむね一致した。しかし、これらは、コア観察による開口割れ目の位置とは一致しなかった。EDZの水みちとしての機能を評価するために、コア観察等の一つの手法に依存するべきでないことが確認できた。

2.1.5. 中深度処分における岩盤への収着・移行現象に関する研究

岩石中の微小な空隙での特異的な収着反応のメカニズムを明らかにするため、メソポーラスシリカに対する収着試験を実施したところ、空隙が小さくなるほど収着量が増加することが示唆された。

注) Escavative disturbed zone 掘削影響領域

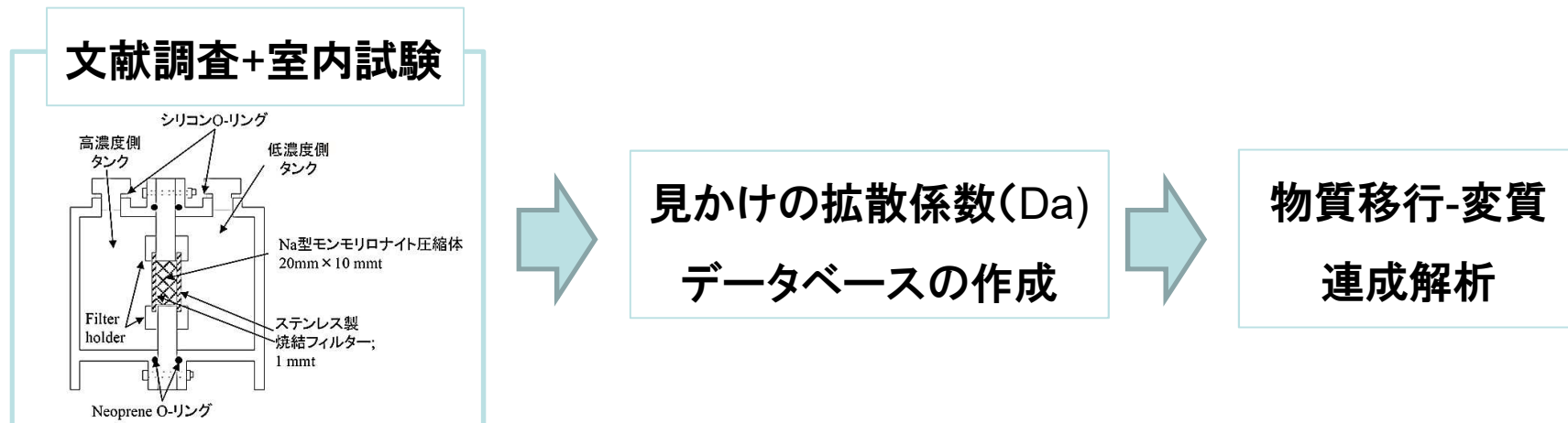
2.2.1 人工バリアの長期性能評価手法の研究

(1) ベントナイト系人工バリアの長期性能評価手法の研究

ベントナイト系人工バリアの長期的な移行抑制性能及び低透水性能を評価するために必要となる①物質移行に係る検討、②変質に係る検討を行った。

① 淡水—塩水混合系地下水環境下における室内試験とモデル解析を中心として、ベントナイト系人工バリアの変質挙動に関する評価手法の構築（拡散係数の取得）

- ・ 文献調査により、様々なイオン種に対するベントナイト系人工バリア中の見かけの拡散係数(Da)を整理し、データセットを作成
- ・ データが不足しているイオンに対して室内試験を実施し、見かけの拡散係数(Da)のデータを取得
- ・ 見かけの拡散係数(Da)のデータセットを用いた物質移行-変質連成解析を行うためには、当該データセットのほか、電気化学的な影響を考慮する必要があるという課題を抽出



② ベントナイト系人工バリアの溶解に伴い生成する二次鉱物に関する文献調査及び二次鉱物生成の物質移行性能に及ぼす影響の試算の実施（二次鉱物の設定）

- ・ 室内試験、天然事例での生成事例を踏まえて、中深度処分で生成する可能性のある二次鉱物を抽出し、地球化学計算において「設定する鉱物」及び「設定しない鉱物」に分類
- ・ 「設定する鉱物」のうち、熱力学的な平衡計算のみによって一意に生成種を決定できない鉱物は、「影響検討鉱物」に分類

抽出した二次鉱物(青字:設定しない鉱物、赤字:設定する鉱物、緑字:影響検討鉱物)

分類	鉱物名	分類	鉱物名	分類	鉱物名	分類	鉱物名
ケイ酸塩	Illite	C-A-S-H型	Katoite	ゼオライト	Phillipsite	水和物	C4AH13
	Kaolinite		Stratlingite		Heulandite		C4AH19
	Pyrophyllite		C-A-S-Hゲル		Clinoptilolite		Ettringite
長石	K-feldspar	C-S-Hゲル	Analcime		Hydrotalcite		
水酸化物	Brucite	C-S-H型	Tobermorite		Laumontite		Friedel's Salt
	Gibbsite		Jennite		Chabazite		Monocarboaluminate
炭酸塩	Dolomite		Afwillite		Merlinoite		Hydrogarnet
Mgケイ酸塩	Clinochlore		Gyrolite	硫酸塩	Gypsum		Monosulfate
	Sepiolite						
	M-S-H						

ベントナイト系人工バリアとセメント系人工バリアの相互作用では、ゼオライトのヒューランドイトとチャバサイト及びC-(A-)S-H型鉱物(トバモライト又はC-A-S-Hゲル)の3鉱物がベントナイト中の間隙水組成をコントロールしていることが示唆された。

(2) セメント系人工バリアの長期性能評価手法の研究

- 中深度処分の廃棄物埋設地の設計におけるセメント系人工バリアについて、300年を超える長期の漏出抑制性能を評価するために、①細孔構造の変遷と物質移行性、②セメント結晶(非晶質含む)の変遷による物質移行性、③体積変化による物質移行性、④空隙や材料特性に寄与する収着性と物質移行性の四視点に着目して行うことが求められる。本研究においては、①②について予備的研究を行った。

①細孔構造の変遷と物質移行性

- 材料に起因し社会基盤分野ではほとんど研究が進んでいないCSHゲルの層間空隙及びゲル空隙に着目した。水銀圧入ポロシメーター及び水蒸気吸着装置の測定装置を選定し比較検討した。水銀圧入ポロシメーターは、セメントマトリックスの強度に依存することから、空隙を破壊することで空隙径を換算する手法であること、かつ、層間空隙等の微小な空隙は計測できないことが明らかとなった。一方、水蒸気吸着装置は、層間空隙及びゲル空隙の測定には十分に適していることと吸着特性も同時に計測できることから廃棄物処分での空隙等の計測に適していることが分かった。

②セメント結晶(非晶質含む)の変遷による物質移行性

- CSHゲルの結晶安定性に関する機構解明を行うため、トリメチルシリル誘導体化法によるケイ酸鎖長構造の測定及び核磁気共鳴装置によるケイ素及びアルミニウム等の化学結合形態の変化(化学シフト)を用いて同一試料による測定を行い、CSHゲルの結晶形態の評価を行った。その結果、それぞれの手法は、直接的に測定対象が異なり、単独又は組み合わせることでCSHゲルの結晶安定性を評価するに十分であることが分かった。

2.2.2 天然バリアの自然事象を考慮した水理特性の評価手法の研究＊

- ▶ 我が国で想定される長期の自然現象である**隆起・侵食及び海水準変動による地形変化が、地下水流動・地下環境の変化や埋設深度の減少**を引き起こし、処分システムにおける**機能の喪失や核種移行抑制等の性能を低下させることが懸念される。**
- ▶ このため、天然バリアの性能評価においては隆起・侵食及び海水準変動に伴う**将来の地形変化についてその変動幅を含め適切に評価**することが重要と考え、**これら性能評価の妥当性判断における留意点を抽出・整理した。**

○ 地形変化評価

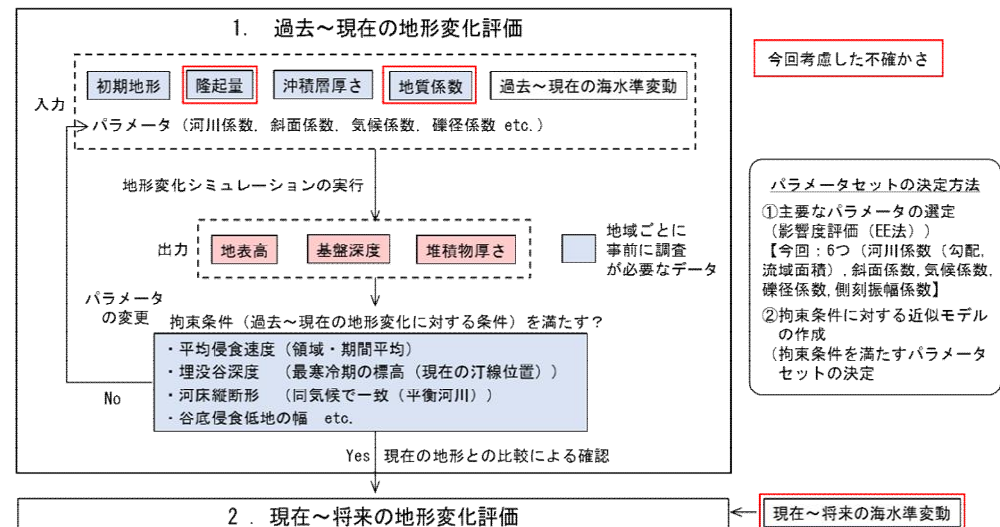
- ▶ 変動が比較的小さく安定な地域を対象とし、過去から現在までの地形・地質のデータを活用して過去から現在の地形変化を説明しつつ、将来への外挿における不確かさ(将来の隆起量、海水準変動等)を考慮した**地形変化評価の方法論を整理した。**
- ▶ 整理した方法論に基づき、我が国の典型的な集水域を対象に不確かさを考慮した**過去～現在～将来の地形変化の評価**を行った。

⇒評価結果の比較から、対象地域において海水準変動等の不確かさが将来の地形変化に与える影響を整理し、**地形変化評価の妥当性判断における留意点を整理した。**

《評価結果から整理した留意点の一例》
埋没谷が形成されている海域・下流域周辺では海水準変動に伴い地形勾配が有意に変動

埋設地がこの周辺に計画される場合、埋設深度の減少及び地形変化が地下水流動に与える影響を確認することが重要

⇒離隔距離の空間的・時間的な変動量や汀線位置の変動範囲を統計的に分析し、埋設地の位置の選定の妥当性判断のための1つの技術情報として利用可能であることを確認した。



今回考慮した不確かさ

パラメータセットの決定方法
①主要なパラメータの選定 (影響度評価 (EE法))
【今回：6つ (河川係数 (勾配, 流域面積), 斜面係数, 気候係数, 礫径係数, 側刻振幅係数)】
②拘束条件に対する近似モデルの作成 (拘束条件を満たすパラメータセットの決定)

現在～将来の海水準変動

不確かさを考慮した過去～現在～将来の地形変化評価の流れ

○地下水流動・核種移行評価

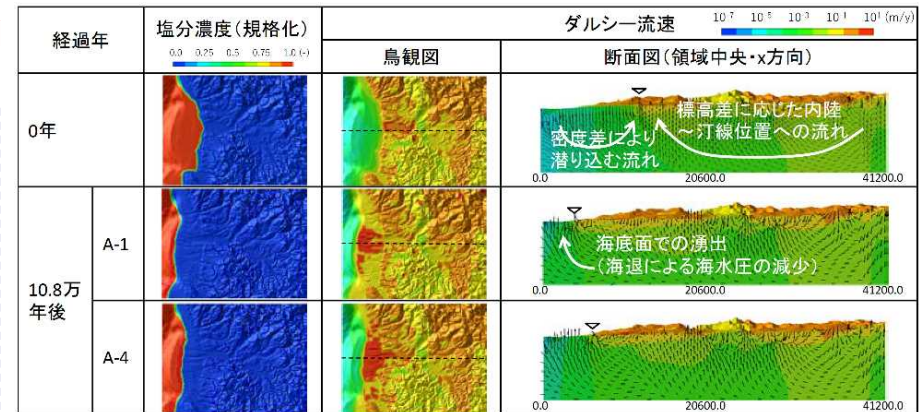
- 現在～将来の地形変化の評価結果に基づき、非定常の三次元地下水流動評価を実施した。
- 評価結果より、対象地域における地形変化の不確かさが将来の地下水流動に与える影響を整理し、**地下水流動評価の妥当性判断における留意点を整理した。**

《評価結果から整理した留意点の一例》

沿岸域では、埋設深度における流速の変化は海水準変動及び地形勾配の変化と連動する傾向にあり、流速は海水準の低下の程度が大きいほど増加する傾向



埋設地が現汀線に近い場合、寒冷化の時期や海水準の低下の程度を考慮し、早期に放出される核種への影響がないか確認することが重要



地下水流動評価結果の一例(各時刻の流速・塩分濃度分布)

(A-1: 過去と同じ海水準変動ケース及びA-4: 海水準変動小ケース)

- また、同集水域を対象に核種移行評価を実施した。
- 評価結果より、対象地域における地形変化の不確かさに伴う地下水流動の変化が、将来の核種移行に与える影響を整理し、**核種移行評価の妥当性判断における留意点を整理した。**

《評価結果から整理した留意点の一例》

核種の移行経路は複数の地質区分を通過するが、移行経路が変化し通過する各地質区分の距離が変化すると、核種移行への影響が大きくなり得る。



地質の受食性とその不確かさの検討が十分になされているかを確認するとともに、それが地下水流動場、特に移行経路の時間変化に与える影響と被ばく線量への影響を地質の調査データとともに適切に評価されているかを確認する必要がある。

2.3 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究

2.3.1 性能確認及び地下水モニタリングに関する諸外国の規制について

- 諸外国(フィンランド、米国、仏国及び英国の規制機関及び国際機関)における埋設施設の地下水等モニタリングに関する考え方や規制制度、事業者の対応を調査した結果、事業開始前の廃棄物埋設地のベースラインモニタリングや事業中の定期的なモニタリング計画の見直しを事業者に求めている国がほとんどであり、我が国でも既に定期的なモニタリング計画の見直しは事業規則に盛り込まれていることを確認した。

2.3.2 地下水モニタリングに関する研究

(1) 地下水モニタリング技術に関する既往事例

- 中深度処分等の放射性廃棄物処分の地下水モニタリングに関して、廃棄物埋設地周辺と地表との短絡を回避するために、廃棄物埋設地周辺を対象とした地表からのモニタリング孔掘削には制限が存在するため、廃棄物埋設地を含む地下構造物建設範囲の外側を中心とした地表からのモニタリングと地下構造物からの間隙水圧測定が必要。ただし、想定されるモニタリング期間が長い場合、モニタリング装置の選択等が課題である。
- 国内の大規模地下空間利用の実績は長くても30年程度であるため、300年以上の期間が要求される中深度処分の地下水モニタリングに適用する際には、測定装置及びモニタリング孔そのものの耐久性や交換可能性を検討すべき。また、モニタリング孔の配置はサイト特性を考慮した計画が必要である。

2.3.2 地下水モニタリングに関する研究

(2) 掘削制限区域設定に関する地下水モニタリング

- 地下水流動解析により、仮想した廃棄物埋設施設の建設前と建設後の地下水の状態変化について比較
 - 地下水の水位の影響範囲は、仮想した廃棄物埋設施設(図2.3-2の白枠部分。)の直上を中心とする半径約2kmの同心円状の領域で、埋設後は完全には元の水位に戻らず、幾分低め(-1mから-2mまで)の値で落ち着くことが判明した。
 - ただし、今回の地下水モデルでは、格子の切り方やパラメータの設定による擾乱の評価への影響が認められた。
- 国内の大規模地下空間利用の実績は長くても30年程度であるため、300年以上の期間が要求される中深度処分地下水モニタリングに適用する際には、測定装置及びモニタリング孔そのものの耐久性や交換可能性を検討すべき。また、モニタリング孔の配置はサイト特性を考慮した計画が必要である。

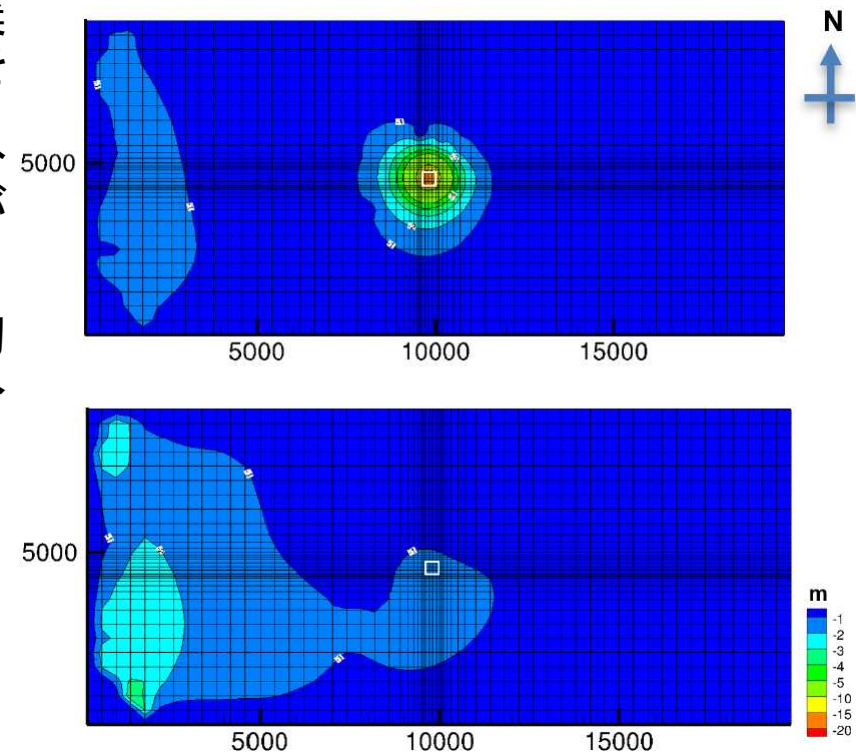


図2.3-2 サイト周辺モデルでの施設建設前の地下水水位を基準とした場合の地下水水位の差(上: 操業時までの場合、下: 閉鎖後までの場合)

2.3.3 閉鎖措置確認に関する研究

(1) モニタリング孔の閉塞材に関する研究

- 孔掘削時に水頭の異なる複数の地下水帯水層を孔が貫通した場合、高水頭の帯水層の地下水が低水頭の帯水層へ流入することにより、水質が乱されて長期にその影響が残留する場合がある。
- さらに、モニタリング設備の抜管・再設置に際しては、孔の安定性が問題となり、モニタリング孔の孔内の一部が崩れていた場合、モニタリングシステムの抜管は容易ではなくモニタリング孔より一回り大きい孔径でモニタリング孔をオーバーコアリングして、処分システムを損傷させながら回収することになることとなるため、それらに対する対策が採られていることが必要である。

(2) モニタリング孔等の閉鎖時に係る技術的知見の整理

- 閉塞材料の選定に関する知見を取得するため、小型のアクリルセル内に円柱状に成形したベントサイトの閉塞材の室内試験で、閉塞材が膨潤することにより閉塞できることを確認した。
- 原位置試験による注水圧、水圧等の計測結果から、今回行ったボーリング孔の経路閉鎖手法ではサンドイッチ工法を施したボーリング孔が周辺岩盤と同程度以下の透水性を発揮することが確認できたが、ボーリング孔周辺のゆるみ域等の移行経路通じた透水の影響を確認する方法を検討することが課題である。

3. まとめ

- 2.1.1 隆起・侵食量評価手法の廃棄物処分への適用性について整理し、青森県東部地域において、適用し、傾向を確認した。
- 2.1.2 物理探査を使った断層の長さの評価手法を比較、検討し、適切な断層長判定のための認定フロー(案)を作成した。
- 2.1.3 地下水流動評価のために必要となる地下水年代をボーリングコアの間隙水試料から把握する手法について明らかにした。
- 2.1.4 EDZにおける透水性の判定において、孔観察、透水試験結、弾性波探査試験等の手法の組み合わせの重要性が明らかとなった。
- 2.1.5 岩石中の空隙が微少なほど収着量が増加することが示唆された。

- 2.2.1 ベントナイト系人工バリアの物質移行-変質連成解析のため、見かけの拡散係数 (Da) データベースの作成及び設定すべき二次鉱物を抽出した。また、セメント系人工バリアの長期の漏出抑制性能を評価するために、①細孔構造の変遷と物質移行性、②セメント結晶(非晶質含む)の変遷による物質移行性についての試験法の整理を行った。
- 2.2.2 地形変化評価手法を整理し、我が国の典型的な集水域を対象とした過去～将来の地形変化の評価を行うとともに、非定常三次元地下水流動・核種移行評価を行い、評価の妥当性判断における留意点を抽出・整理した。

3. まとめ

- 2.3.1 性能確認及び地下水モニタリングに関する諸外国の規制について諸外国における埋設施設の地下水等モニタリングに関する考え方、規制制度等を整理した。
- 2.3.2 天然バリアの地質構造を考慮した地下水流動や水質の変動を把握するための効率的なモニタリング装置及びその配置や必要とされるモニタリング項目・期間といった適切なモニタリング計画を設定するための関連事項及び掘削制限範囲の設定のための知見を取得した。
- 2.3.3 モニタリング孔の周辺岩盤、閉塞材及びストレーナー等の界面等が水経となり得ることが懸念されていることから、これらのモニタリング孔の閉鎖確認に資する科学的・技術的視点を取得した。

4. 成果の活用について

・プロジェクト期間内

- ・日本原子力発電(株)東海低レベル放射性廃棄物埋設事業所事業許可申請の審査及び日本原燃(株)六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター事業許可変更申請の審査に係る知見として活用した。

・プロジェクト終了後

- ・現在検討中である中深度処分の規則、解釈及び関連するガイド等の整備に活用される。
- ・今後事業の具体化がされることが予想される、中深度処分の事業許可申請の審査に係る知見として活用されることが想定される。

5. 成果の公表等

- 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表
 - NRA技術報告 なし
 - 論文(査読付) なし
 - 国際会議のプロシーディング(査読付) なし
 - 表彰・受賞 なし
- 委託先による公表
 - 論文(査読付)
 - M. Takada、M. Manaka、K. Ito、A Method for Estimating Geologic Pressure in Argillaceous Formations Based on the State of Dynamic Equilibrium between Chemical Osmosis and Advection、Journal of Hydrology、Vol., 579, (2019)
 - 村上裕晃、岩月輝希、竹内竜史、西山成哲、放射性廃棄物の処分分野における地下水モニタリングの方法、原子力バックエンド研究、27、1、pp.22-33、令和2年
 - 国際会議のプロシーディング(査読付) なし
 - その他
 - 村上裕晃、岩月輝希、竹内竜史、前田敏克、放射性廃棄物の中深度処分におけるボーリング孔の閉鎖に関する現状と課題、日本原子力学会バックエンド部会夏期セミナー、平成30年8月
 - 戸崎裕貴、森川徳敏、風早康平、塚本斉、佐藤努、高橋浩、高橋正明、稲村明彦、青森県上北平野における地下水の水質・同位体組成と地下水流動系、日本地球化学会第65回年会、平成30年9月

- 核種移行へ影響を及ぼす隆起・侵食・海水準変動による地形変化評価の検討、日本原子力学会バックエンド部会夏期セミナー、令和元年8月
- 村上裕晃、西山成哲、岩月輝希、竹内竜史、ボーリング孔の閉塞材としてのベントナイトの膨潤挙動と透水性、日本地下水学会2019年秋季講演会、令和元年10月
- 伊藤一充、田村亨、山口県宇部市周辺の段丘堆積物のpIRIR年代測定、ESR応用計測研究会・ルミネッセンス年代測定研究会・フィッシュトラック研究会2019年度合同研究会、令和元年11月
- K. Ito、Strategies and problems of groundwater monitoring in radioactive waste disposals、International Symposium on Earth Science and Technology 2019、令和元年12月
- S. Maeda、T. Matsuzawa、T. Okada、T. Yoshida、H. Kosuga、H. Katao、M. Otsubo、Stress field estimated from microseismicity in the northeastern edge of the Honshu around the junction between the northeastern Japan arc and the Kurile arc、JpGU-AGU Joint Meeting 2020、令和2年5月
- 高井静霞、島田太郎、打越絵美子、武田聖司、将来の海水準変動の不確かさを考慮した長期的な地形変化評価、日本原子力学会2020秋の大会、令和2年9月
- 笹川剛、木嶋達也、澤口拓磨、飯田芳久、ベントナイトーセメント界面で生成する二次鉱物の設定に係る検討(1)二次鉱物設定についての考え方の整理、日本原子力学会2020秋の大会、令和2年9月
- 木嶋達也、笹川剛、澤口拓磨、飯田芳久、ベントナイトーセメント界面で生成する二次鉱物の設定に係る検討(2)ベントナイト透水性に対する二次鉱物設定の感度解析、日本原子力学会2020秋の大会、令和2年9月
- 高井静霞、島田太郎、打越絵美子、武田聖司、将来長期の地形変化・海水準変動に伴う地下水流動への影響の解析的検討、日本地下水学会2020年秋季講演会、令和2年11月

6. 成果目標に対する達成状況

- 廃棄物埋設地の位置に係る自然事象の長期評価に関する研究については、隆起及び侵食、断層、地下水流動、岩盤の力学・水理特性、岩盤の収着・移行現象における評価の視点に関する科学的・技術的知見を抽出し、当初の目的を達成した。
- 廃棄物埋設における性能評価手法に関する研究については、ベントナイト系人工バリアの長期性能評価手法の研究では、長期変質挙動に関しては、淡水—塩水混合系地下水環境の廃棄物埋設地が位置する環境における評価手法の妥当性について科学的・技術的知見の取得を行い、当初の目的を達成した。また、セメント系人工バリアの長期性能評価手法の研究では、物質移行に寄与するセメント硬化体の特徴を4つの分類に整理し、なかでも長期性能評価に必要なCSHゲルに着目して細孔構造の計測法及び結晶安定性評価の手法に関する科学的・技術的妥当性を抽出し、当初の目的を達成した。
- 地質環境及び水理環境モニタリングに関する研究では、諸外国の規制機関でのモニタリング手法及び制度について整理した。また、国内における地下水モニタリング技術の現状及び問題点について整理した。一方、閉鎖確認に関する研究では、ボーリング孔について、原位置試験において漏えい確認試験、室内試験においてはベントナイト閉塞材における漏えい等の試験により漏えい等の確認における問題点の抽出を行い、当初の目的を達成した。
-

7. 今後の展開

本研究において、自然事象の長期評価、廃棄物埋設における性能評価手法、地質環境及び水理環境モニタリングに関して、中深度処分の規則類の策定等に活用される検討を行った。

中深度処分は、埋設される廃棄物の特性、廃棄物埋設地が設置される環境条件に応じて廃棄物埋設地を設計したものになるが、これが成立するためには、極めて地下水流速が小さく安定した地質水理環境条件の位置で廃棄物からの放射性物質の漏出及び移行を長期間抑制されるものとするのが求められると考えられる。

今後、このような条件をより具体的に設定し、審査における判断に適用できる検討を進める必要がある。特に、極めて遅い地下水流動の場であることを証明する手法に関する検討は、引き続き重要である。また、高透水性の経路を形成してこうした処分システムの性能を減じる可能性のある坑道周辺のEDZ、ボーリング孔等についての特性把握すること、適切な閉鎖及びその確認をすることに関する検討、さらにそのような高透水経路を形成する要因の理解に係る岩盤の力学的状態と水理学的特性に関する研究等を進める必要がある。

安全研究プロジェクト 放射性廃棄物等の 放射能濃度評価技術に関する研究

事後評価 説明資料

令和3年4月
原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
核燃料廃棄物研究部門

目 次

1. 研究概要
2. 研究期間を通じた主要成果
3. まとめ
4. 成果の活用について
5. 成果の公表等
6. 成果目標に対する達成状況
7. 今後の展開

1. 研究概要

種々の放射性廃棄物等の放射能濃度評価において事業者の申請の妥当性を判断するための以下の4テーマについての技術的知見を蓄積

- ① 廃棄物確認：今後埋設処分が想定される廃棄体等について、非破壊測定 of 精度に影響を与える因子及びその影響の度合いの定量的評価
- ② クリアランスの確認：従来の放射能濃度確認対象物以外の対象物の極めて低い放射能を性状に応じて適切に測定・評価する技術、及び、複数の材料から構成される対象物中の放射能を適切に評価する技術
- ③ 廃止措置終了確認：公衆の被ばく線量評価に及ぼすサイト固有の条件による影響の定量的検討、並びに、サイト解放後の公衆の被ばく線量の評価コードを整備及び評価条件の具体的設定方法
- ④ 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保：物理化学的に性状が様々な試料の分析について、複雑な多段階処理等を考慮しても、十分な信頼性が確保された結果であることを確認する技術

1. 研究概要

全体行程

年度	平成29	平成30	平成31	令和2
①廃棄物確認	トレンチ処分対象コンクリート等廃棄物の検討			
	中深度処分対象廃棄物の検討			
②クリアランスの確認	新規クリアランス対象物の 濃度上限値の計算		新規クリアランス対象物の 測定能力の検証	
	放射線測定の不確かさの 検討			
③廃止措置終了確認	被ばく評価方法の検討・コード改良			
	廃止措置終了確認手法手順の検討			
④長半減期放射性核 種等の分析における 信頼性確保	実験装置の選定・導入			
	分析実験			

2. 研究期間を通じた主要成果

2.1 廃棄物確認

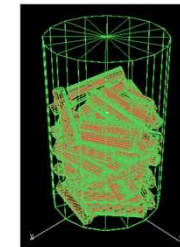
2.1.1 トレンチ処分対象廃棄物の放射能濃度評価に係る検討

今後発生が想定される新たな廃棄体等に対する具体的な確認方法を整備することが重要である。したがって、現実的な廃棄体モデルを用いた非破壊測定による放射能濃度評価に係る検討を行い、新たな廃棄体等の放射能濃度評価の妥当性確認に当たって留意すべき事項について整理した。

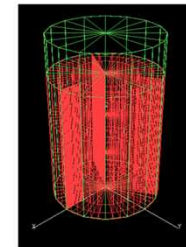
- ドラム缶及び角型容器を対象に、現実的な廃棄物封入モデルを個別要素法による粒状体挙動解析コードPFC3D^[1]により作成し、点減衰核積分コードQAD^[2]により放射能濃度評価に影響を与える要因を評価
- 容器封入後にかさ密度が把握できない条件で、実際よりも低いかさ密度で評価した場合であっても、最大汚染モデル法^[3]を用いることで放射能濃度を十分な保守的に評価できることを確認



PFC3D 配置モデル

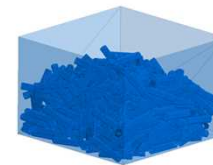


QAD 入力モデル

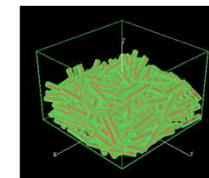


QAD 均質モデル

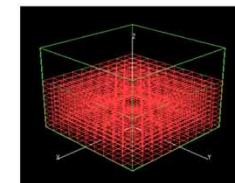
(a) ドラム缶への廃棄物封入モデル



PFC3D 配置モデル



QAD 入力モデル



QAD 均質モデル

(b) 角型容器への廃棄物封入モデル

現実的な廃棄物封入モデル

[1] 米国ITASCA Consulting Group, Inc.製 個別要素法による粒状体挙動解析コードPFC3D Suite Ver.5.0

[2] 点減衰核積分コードQAD-CGGP2R

[3] 吉居、他 γ線によるウランクリアランス対象物中のウラン量測定方法に関する検討, 日本原子力学会2016年春の年会

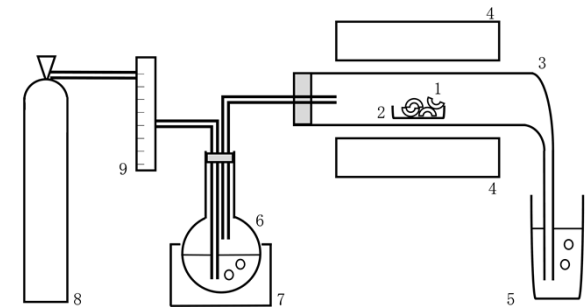
2. 研究期間を通じた主要成果

2.1 廃棄物確認

2.1.2 中深度処分対象廃棄体の放射能濃度評価に係る検討

ピット処分において評価されていた二次的な汚染に加えて、放射化汚染を含んだ放射性廃棄物が含まれることが想定されている。そこで、諸外国における廃棄体等の放射能濃度評価方法及び放射能濃度評価に関する放射性物質、放射化前の微量な親元素等の分析方法に係る情報を整理した。

- イギリス及びドイツの放射性廃棄物埋施設又は管理施設を対象として調査を実施。それぞれの施設において実施されている放射能濃度評価に関する知見を取得
- 中深度処分対象廃棄物として想定されるジルカロイ-4中の塩素及びホルミウムを対象として、模擬試料を用いた微量元素分析試験を実施し、当該元素の検出限界値を評価
- 中深度処分対象廃棄物における放射化計算を用いた放射能濃度評価について想定される核種のうち ^{36}Cl 、 ^{93}Zr 及び ^{126}Sn に関する回収率の測定法並びに核種測定法について整理



1 試料 (ジルカロイ-4)	6 丸底フラスコ
2 石英ボート	7 マントルヒーター
3 燃焼石英管	8 酸素ガス
4 管状電気炉	9 酸素ガス流量計
5 吸収液	

ジルカロイ-4中の微量元素分析試験
(試料燃焼装置による塩素の回収)

2. 研究期間を通じた主要成果

2.2 クリアランスの確認

2.2.1 新規クリアランス対象物の濃度上限値の計算

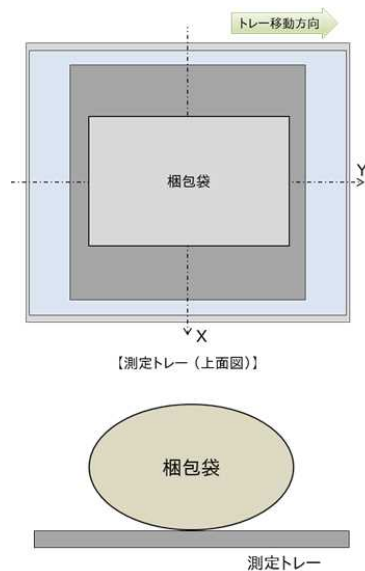
- クリアランス対象物は、金属くず、コンクリートの破片及びガラスくず（ロックウール及びグラスウールに限る。）が対象となっていた。令和2年に放射能濃度確認規則が制定されたことに伴い、クリアランス対象物の、限定が撤廃された。
- 今後、廃止措置の進展に伴い上述の金属くず、コンクリートの破片及びガラスくずといった対象物以外にもクリアランス対象物が発生することが予想されており、特にアスベスト、PCB使用安定器、ケーブル及び配電盤の発生が想定されることから、これらに対してクリアランス制度を適用することを想定し、その被ばく経路について検討した。
- アスベスト及びPCB使用安定器については、濃度上限値を試算し、クリアランスレベルと比較した。
- ケーブル及び配電盤については、令和2年に放射能濃度確認規則が制定されたことに伴い、クリアランス対象物が固体状のものとなったことから濃度上限値の計算は実施しなかった。

2. 研究期間を通じた主要成果

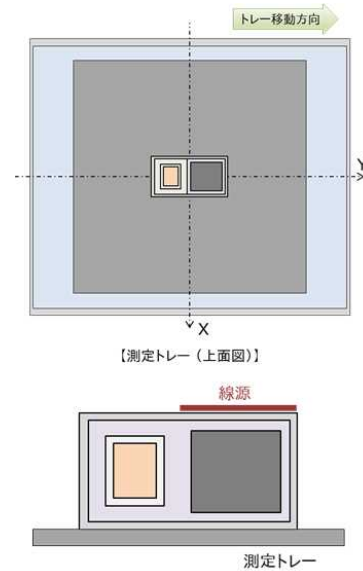
2.2 クリアランスの確認

2.2.2 新規クリアランス対象物の測定性能評価

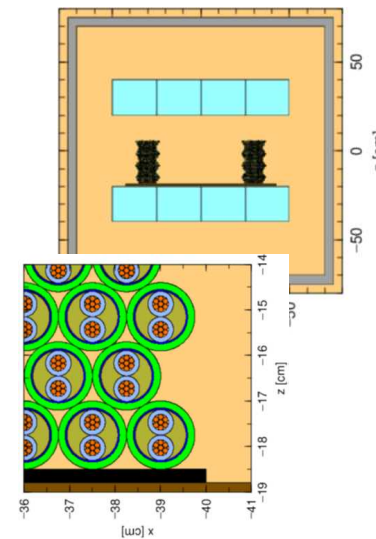
- アスベスト、PCB使用安定器、ケーブル及び配電盤のGe半導体検出器及びプラスチックシンチレーション検出器(PS検出器)による放射線測定をシミュレーション
- 得られた結果から、検出限界放射能濃度と測定時間の関係を整理した結果、いずれの対象物もGe半導体検出器及びPS検出器により 30秒～600秒程度でクリアランスレベルの1/3程度までの測定が可能であることを確認



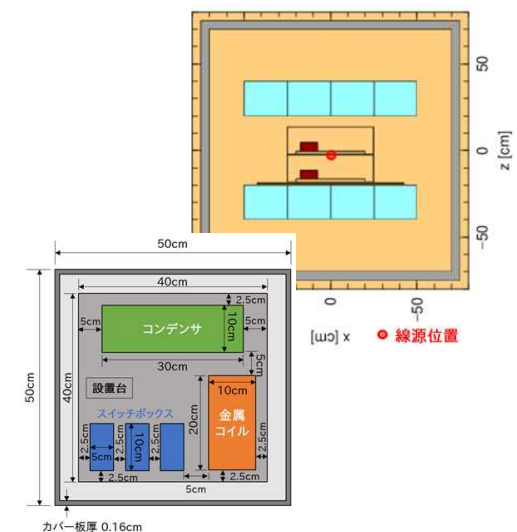
PS検出器によるアスベストの測定シミュレーション



PS検出器によるPCB使用安定器の測定シミュレーション



PS検出器によるケーブルの測定シミュレーション



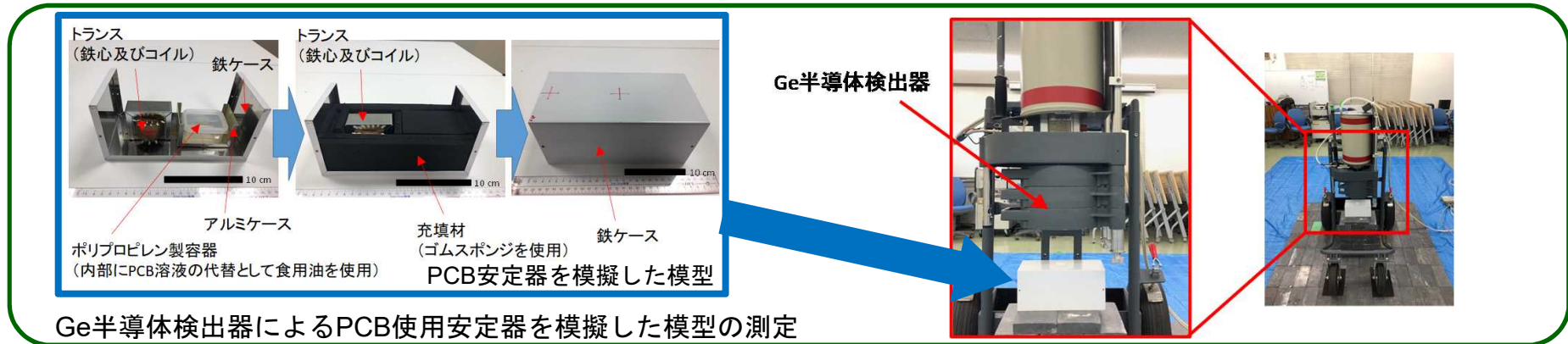
PS検出器による配電盤の測定シミュレーション

2. 研究期間を通じた主要成果

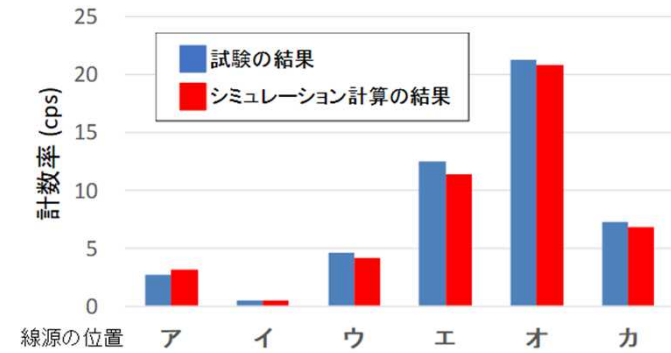
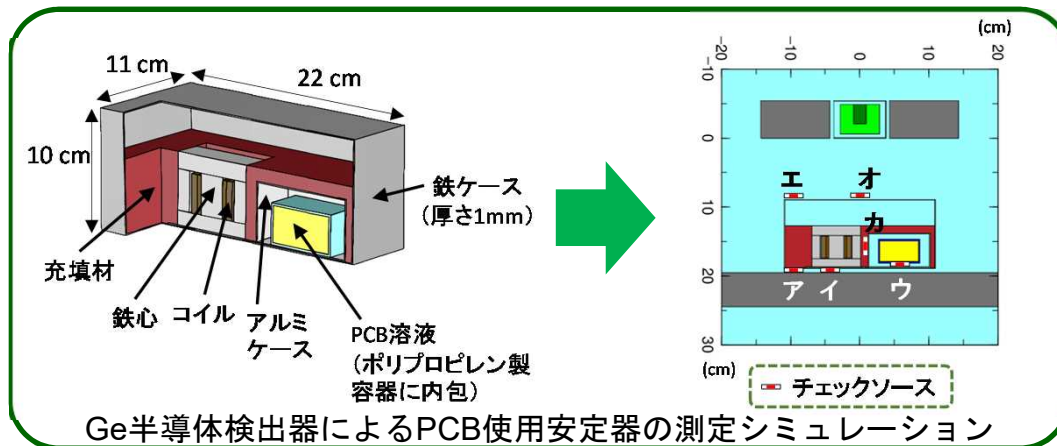
2.2 クリアランスの確認

2.2.2 新規クリアランス対象物の測定性能評価

- PCB使用安定器は実際に模型を製作し、チェックソースを用いた測定試験を行い計算の妥当性を確認



Ge半導体検出器によるPCB使用安定器を模擬した模型の測定



実験結果とシミュレーション計算の結果

2. 研究期間を通じた主要成果

2.2 クリアランスの確認

2.2.3放射線測定の不確かさの考慮

- 測定を通じて得られる評価値の取扱い：測定に伴う不確かさが必ず伴う
 - 不確かさ<<評価値：日常の測定（長さ、重さ等）
→不確かさの影響は無視し得る
 - 不確かさ≒測定値の数+%程度：低濃度放射能測定
→不確かさの影響は無視し得ない
 - 一方、低濃度放射能は被ばくによるリスクが低いので不確かさの考慮が不要という意見もある^[1]。
- 国際的な動向調査：
 - 不確かさの計量・計測全般分野のISO等での規定(JCGM100/JCGM106)
 - 放射能測定分野での不確かさの規定(ISO 11929)
 - 諸外国の実例：ドイツSSKの勧告、スウェーデン、イギリスの産業界のクリアランス測定への不確かさ適用
- クリアランス評価のモデル化^[2]、不確かさの考え方の有効性の実測定による確認

測定を通じて得られる評価値は不確かさを考慮した上で基準値への適合性評価を行うことが標準的な手法であることを確認

[1] Hattori, T., Trend of strengthening clearance regulation in Japan and concerns about its worldwide effects on regulations for natural and artificial radionuclides, Annals of the ICRP, Vol. 49, 98-112, 2020.

[2] Sakai, H. et al., Derivation of uncertainty propagation for clearance measurement, Applied Radiation and Isotopes, 170, 109530, 2021.

2. 研究期間を通じた主要成果

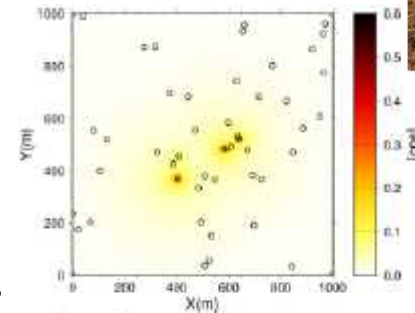
2.3 廃止措置終了確認

- バックグラウンドの設定に係る1F起源のフォールアウトの評価方法について、低濃度領域で適用可能な統計検定による評価方法及び高濃度領域で適用可能なセシウム同位体比による評価方法をそれぞれ検討し、具体的評価手順を取りまとめた。
- 土壌表層の初期汚染分布の評価方法について、事前サーベイと代表点測定を組み合わせた外生ドリフトクリギングによる評価方法の敷地全体への適用性を確認し、交差検証法による妥当性確認を含めた具体的評価手順を取りまとめた。
- 地下汚染の評価方法について、ボーリングデータから地質情報を用いた逆解析により汚染源からの放射性物質の放出量を推定する手法を整備し、産業廃棄物処分場等の実際の地下汚染事例について試解析することで、適用性を確認し、具体的評価手順を取りまとめた。
- 線量評価コードについて、従来の地下水による放射性物質の移行に加えて、地表面流及び土砂移動による放射性物質の移行を評価できるような改良を行い、被ばく線量評価コードシステムCDecomとして整備した。
- 以上の検討を踏まえ、廃止措置終了確認における一連の手順を取りまとめ、マニュアルとして整備した。

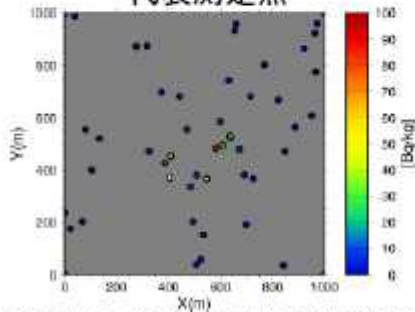
2. 研究期間を通じた主要成果

2.3 廃止措置終了確認

- 代表点測定で求めたサンプルの放射能濃度を主変数、1mメッシュで測定した計数率分布を外生変数として、外生ドリフトクリギングにより評価対象エリアの汚染分布を評価（右図）
- BG参照エリアの評価で求めた1F起源のCsを除外
- 評価対象エリアの初期放射能濃度分布から地下水移行、表流水移行及び土砂移動による放射性物質の移行を評価し、廃止措置終了後の公衆の被ばく線量を評価

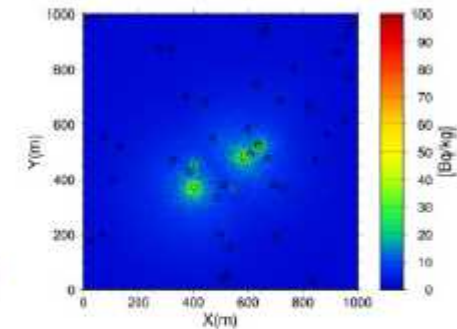


計数率分布と選定した代表測定点



代表点の放射能濃度測定結果

外生ドリフトクリギング



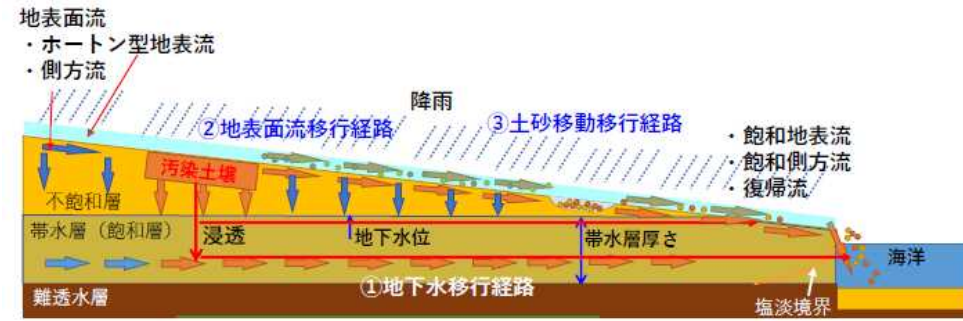
評価値の分布



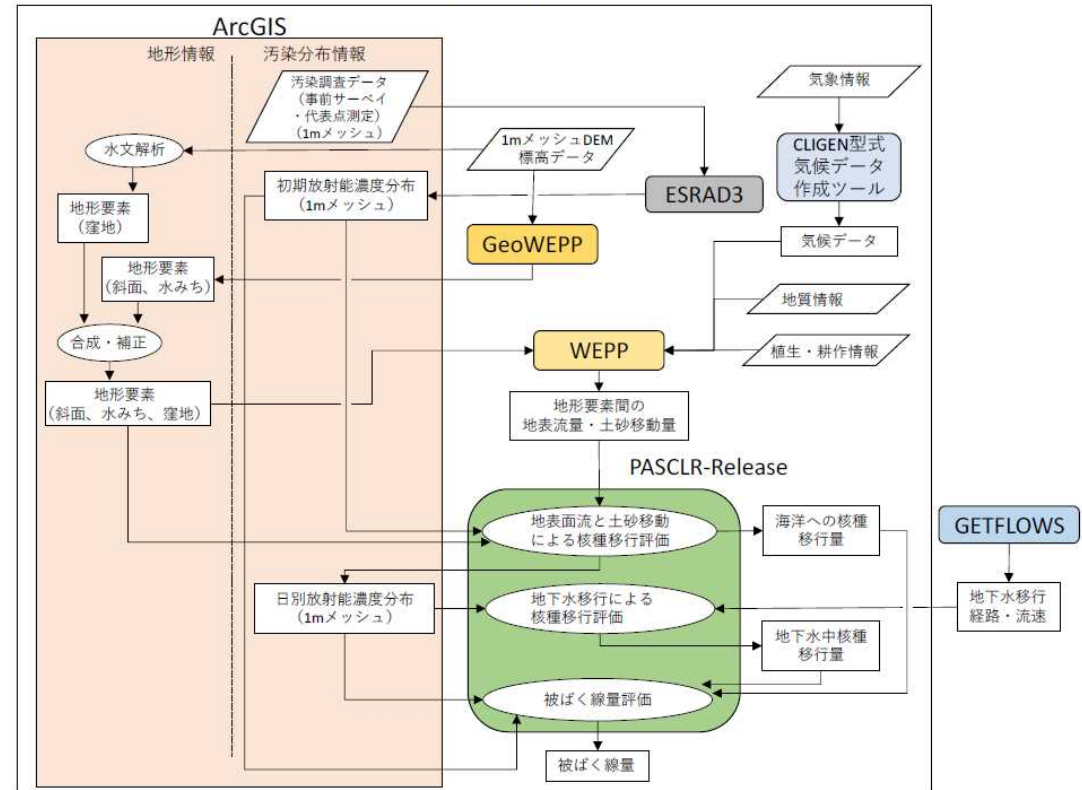
2. 研究期間を通じた主要成果

2.3 廃止措置終了確認

- 既存のコードを活用しつつ、廃止措置終了確認後の評価に必要な事象な現象（右上図）を評価できるようモデルを室内試験等に基づき追加
- 各コードの入出力情報をArcGIS上で統合し、被ばく線量評価コードシステムCDecomとして整備（右下図）



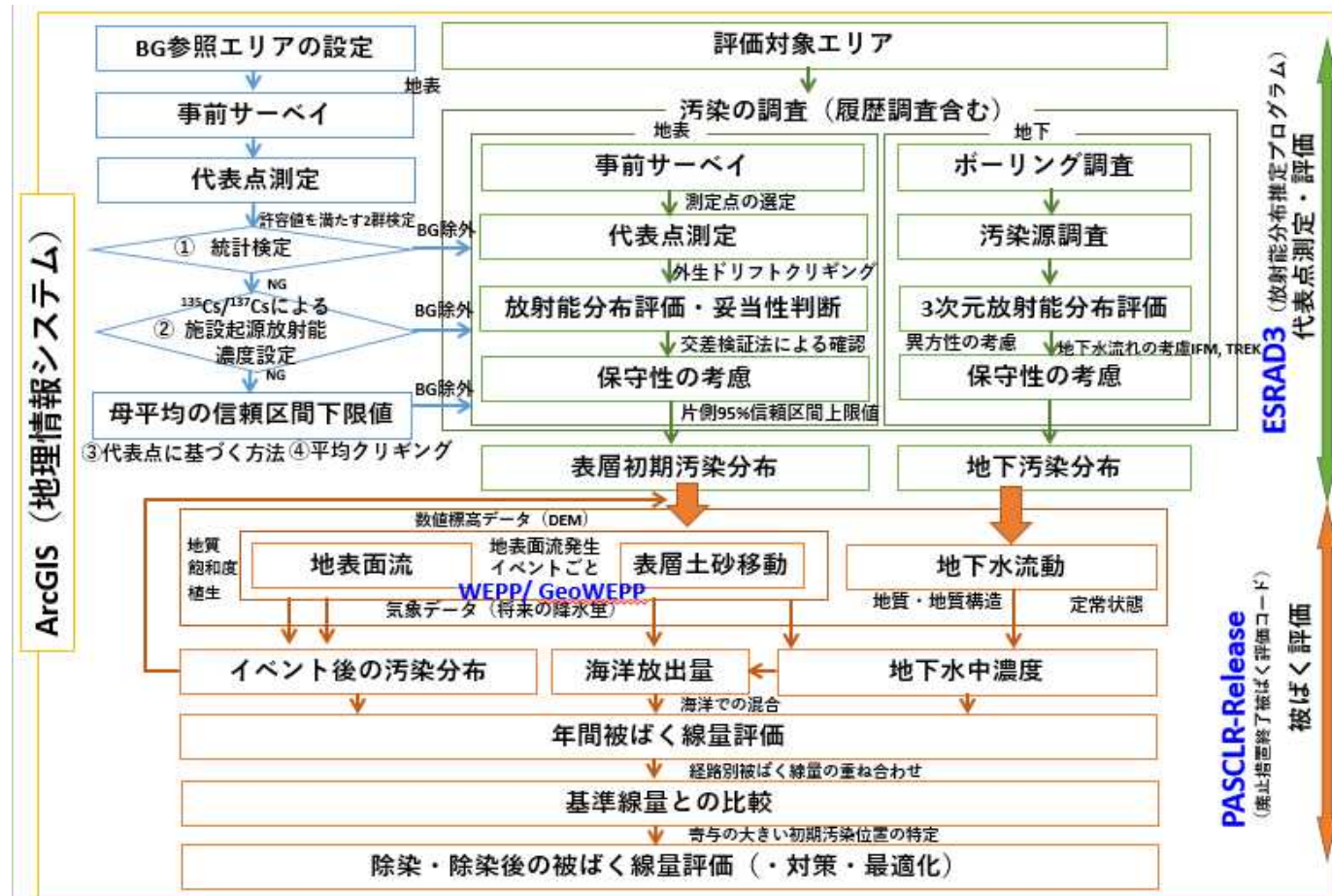
CDecom



2. 研究期間を通じた主要成果

2.3 廃止措置終了確認

- BGの設定から被ばく線量のまでの一連の評価方法を取りまとめ、手順を整備（下図評価の全体の流れを示す）



2. 研究期間を通じた主要成果

2.4 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保

- 放射性核種分析方法の妥当性を確認するためには、多様な測定・分析方法が持つ不確かさの把握が重要
- 必要な分析精度を確保した放射性核種分析のためには、広範な要素技術※1に係る基礎データを取得し、各要素技術における留意点を明らかにする必要

※1：試料の採取、試料からの対象核種の抽出、溶解等の前処理、化学分離、測定等



長半減期放射性核種等※2の分析方法検討

※2： ^{93}Zr 、 ^{129}I 、 ^{135}Cs 、ウラン同位体など

【使用した試料】

- ^{93}Zr ：天然同位体のジルコニウムを含有した模擬試料
- ウラン同位体：ジルコン、チタナイト及びガラス標準試料
- それ以外の核種：当該核種を含む環境試料

今後、核燃料物質によって汚染された試料を分析するために必要な科学的・技術的知見を取得

2. 研究期間を通じた主要成果

2.4 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保

(1) 試料の採取・前処理方法の検討

- 環境試料として、長半減期核種である ^{135}Cs 等が含まれている放射性セシウムマイクロ粒子（以下「CsMP」という。）が付着した樹皮を採取、当該樹皮からCsMPを抽出するための実験的検討を実施した。今後、分析に必要な個数を確保するための抽出作業の継続及びCsMPに含まれる元素組成及びセシウム同位体比分析に係る実験を実施する計画である。
- 模擬コンクリート試料の溶解試験を行い、溶解条件と難溶解性元素であるジルコニウムの回収率との関係を把握した。
- JAEAにおいて、ジルコニウムの濃度が既知の標準海底土試料を王水中でマイクロ波加熱分解装置により加熱し、ジルコニウムの回収率に及ぼす保持温度の影響を検討した。今回の条件においてはジルコニウムの回収率が極めて低く、回収率に及ぼす温度の影響は見られなかった。

2. 研究期間を通じた主要成果

2.4 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保

(2) 化学分離方法の検討

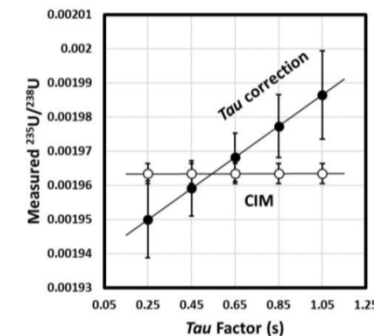
- JAEAにおいて、試料をフッ化水素酸を含む溶媒で溶解した溶液について、溶液中に残留するフッ化水素酸が残留する可能性があるため、フッ化水素酸がその後の化学分離に与える影響を評価した。
- その結果、化学分離に用いた抽出クロマト樹脂におけるジルコニウムの吸着性は、フッ化水素酸の影響により低下することが確認された。
- 同時に評価したニオブにおいても同様の傾向が観測されたが、モリブデン、スズ及びアンチモンについては、その影響は観測されなかった。

2. 研究期間を通じた主要成果

2.4 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保

(3) 分析方法の検討

- コンクリート試料を溶解した溶液中のジルコニウム濃度をICP-MSにより測定した。また、東京大学において、同一コンクリート試料を圧縮形成した後、高速多点レーザーアブレーションICP-MSを用いて固体試料を直接測定した。その結果、(1)に記載した前処理方法の検討において回収率が最も良好であったフッ化水素酸、過塩素酸及び硝酸の混合液を用いたホットプレート加熱分解法で得られたジルコニウム濃度と固体試料を直接測定して得られたジルコニウム濃度は良い一致を示した。
- 東京大学において、固相中のウランの同位体比をレーザーアブレーションMC-ICP-MSを用いた新しいデータ取得方法を提案し、ウラン同位体比のばらつき及び正確性を向上させることに成功した^[1]。



データ取得方法によるウラン同位体比測定結果の違い

[1] Yamamoto, K. *et al.*, *In situ* isotopic analysis of uranium using a new data acquisition protocol for 10^{13} ohm Faraday amplifiers, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2021.

3. まとめ

本研究では、以下の4つの課題について知見の拡充を行った。

① 廃棄物確認

- トレンチ処分対象廃棄物については、今後発生が見込まれる新たな廃棄体等を対象に、非破壊測定による放射能濃度評価に対して、現実的な廃棄物配置モデルを作成し、QADを用いたシミュレーション計算により放射能濃度評価に影響を与える要因を整理した。
- 中深度処分対象廃棄体については、放射化計算等に基づく放射能濃度評価手法の適用が想定されることから、放射化前の微量な親元素濃度の評価方法について検討するとともに、放射化計算の妥当性を確認するための放射化核種の分析において留意すべき事項を整理した。

3. まとめ

② クリアランスの確認

- 新規クリアランス対象物の放射能濃度設定の妥当性及びその測定可能性の評価を行った。
- 低濃度の放射能測定において考慮が必要な測定の不確かさをを用いた適合性評価の導入の妥当性の評価を行った。

③ 廃止措置終了確認

- 廃止措置終了後の公衆の被ばく線量を評価するために必要となる、フォールアウトを考慮したBGの設定方法、評価対象エリアの放射能濃度分布に基づくサイト固有条件を考慮した被ばく線量評価方法を検討し、廃止措置被ばく評価コードシステムCDecomを整備した。
- 廃止措置終了確認の一連の手順を整備した。

3. まとめ

- ④ 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に関する研究
- 放射性核種分析方法の妥当性を確認するために必要な、広範な要素技術、すなわち試料の採取、試料からの対象核種の抽出、溶解等の前処理、化学分離、測定等に係る基礎データを取得するために⁹³Zr、¹²⁹I、¹³⁵Cs、ウラン同位体などの長半減期放射性核種等の分析方法に関する科学的・技術的知見を蓄積した。

4. 成果の活用について

4.1 プロジェクト期間内

② クリアランスの確認

- 新規クリアランス対象物に関する検討結果については、放射能濃度確認規則の制定において、クリアランス対象物を拡充することの理論的背景となった。
- 放射線測定の不確かさの考慮に係る調査結果については、審査基準における不確かさをを用いた適合性評価の考え方に反映された。

4. 成果の活用について

4.2 今後の見通し

① 廃棄物確認

- 廃棄体等における放射能濃度に係る評価方法の妥当性を確認するとき並びに今後のトレンチ処分及び中深度処分に関連した保安規定（変更）認可申請の審査時に、事業者が定めたWACの妥当性を確認するときに活用されることが期待される。

② クリアランスの確認

- 既に申請済みの認可申請に係る審査において事業者の採用したクリアランス測定に係る手段の妥当性評価に用いられているとともに、今後の審査においても活用され続けることが期待される。

③ 廃止措置終了確認

- 原子力規制委員会が行う廃止措置終了確認において活用されることが期待される。

④ 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に関する研究

- 特に、燃料破損が生じた又は1F事故のような事象を経験した原子力施設等における廃棄物確認、クリアランス確認及び廃止措置終了確認における規制に関する安全の確保に資するために必要な技術基盤・維持に活用されることが期待される。

5. 成果の公表等

以下の3報を論文として外部に公表した。

- Sakai, H., Yoshii, T., Takasaki, F., Kawarabayashi, J., Evaluation of the detection limit of net count in peak for the energy spectrum of CZT detector, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 169, 109569, 2020.
- Sakai, H., Yoshii, T., Kawasaki, S., Derivation of uncertainty propagation for clearance measurement, Applied Radiation and Isotopes , Vol. 170, 106930, 2021.
- Yamamoto, K., Asanuma, H., Takahashi, H., Hirata, T., *In situ* isotopic analysis of uranium using a new data acquisition protocol for 10^{13} ohm Faraday amplifiers, Journal of Analytical Atomic Spectrometry, Vol. 36, pp. 668-675, 2021.

6. 成果目標に対する達成状況

① 廃棄物確認

- トレンチ処分対象廃棄物の放射能濃度評価に係る検討については、現実的な廃棄体モデルを用いたシミュレーション計算により、廃棄体等の非破壊測定等による放射能濃度評価精度に影響する要因を整理するという当初の目的を予定どおり達成した。
- 中深度処分対象廃棄体の放射能濃度評価に係る検討についても、放射化核種の親元素濃度を評価する方法を検討するとともに、核種分析の留意事項を抽出するという当初の目的を予定どおり達成した。

② クリアランスの確認

- 極めて低い放射能を対象物の性状に応じて適切に測定・評価する技術について整理し、クリアランス確認に関する科学的・技術的知見を整備するとともに、複数の材料から構成される新規クリアランス対象物中の放射能を適切に評価する技術についても整理するという当初の目的を予定どおり達成した。

6. 成果目標に対する達成状況

- ③ 廃止措置終了確認
 - 廃止措置終了確認の具体的な方法を整備するという当初の目的を予定どおり達成した。

- ④ 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保に関する研究
 - 試料の前処理方法、化学分離方法及び分析方法を検討し、検討結果に基づいて課題を抽出するという当初の実施計画を予定どおり達成した。

7. 今後の展開

① 廃棄物確認

- 新規の廃棄体等が発生するため、それらの放射能濃度の評価方法の妥当性の確認に課題がある。
- 中深度処分及び研究施設等廃棄物等の事業許可においては、廃棄体のインベントリ及び核種の放出率並びに処分システムにおける物理化学的環境変化による核種の化学種の変化に基づく移行挙動変化の考慮が行われると考えられ、その妥当性の確認に課題がある。

② クリアランスの確認

- 新規クリアランス対象物の放射能濃度の測定において定量評価結果の信頼性が確保されていることの妥当性の確認に課題がある。

7. 今後の展開

③ 廃止措置

- 原子力規制検査の開始により、リスクの高い活動に着目した検査が行われるようになったことから、廃止措置工程全体のリスク評価手法に課題がある。

④ 長半減期放射性核種等の分析における信頼性確保

- 長半減期放射性核種等の分析について、複雑な多段階処理等を考慮しても十分な信頼性が確保された結果であることを確認するための技術的知見を蓄積する。そのために、これまでに整備した実験装置及び分析結果を活用して、試料形態による分析方法の違い、元素組成比及び同位体比の精密分析等の実験的検討を実施する必要がある。

これら課題へは、本研究の後継プロジェクトで知見の蓄積を行い対応する。