



【個別報告 3】

放射性廃棄物処分の実現に向けた研究開発

電力中央研究所
サステナブルシステム研究本部
研究統括室 原子力（廃棄物処分）分野統括
上席研究員 長谷川琢磨

研究報告会2023
2023年11月16日

RI 電力中央研究所

© CRIEPI 2023



本報告でお伝えしたいこと

- 放射性廃棄物処分は、原子力発電所の運転を継続するうえで喫緊の課題である。発電所内の廃棄物は、増加の一途をたどっている。
- 当所は、放射性廃棄物処分の安全評価において重要となる地下環境（地質・地下水など）の安定性、人工バリア・天然バリアの性能評価に有効な基盤技術を開発してきた。
- 上記の技術を適用し、安全評価の信頼性向上を図ることで、今後の放射性廃棄物処分事業の実現に貢献する。

© CRIEPI 2023

1

報告内容

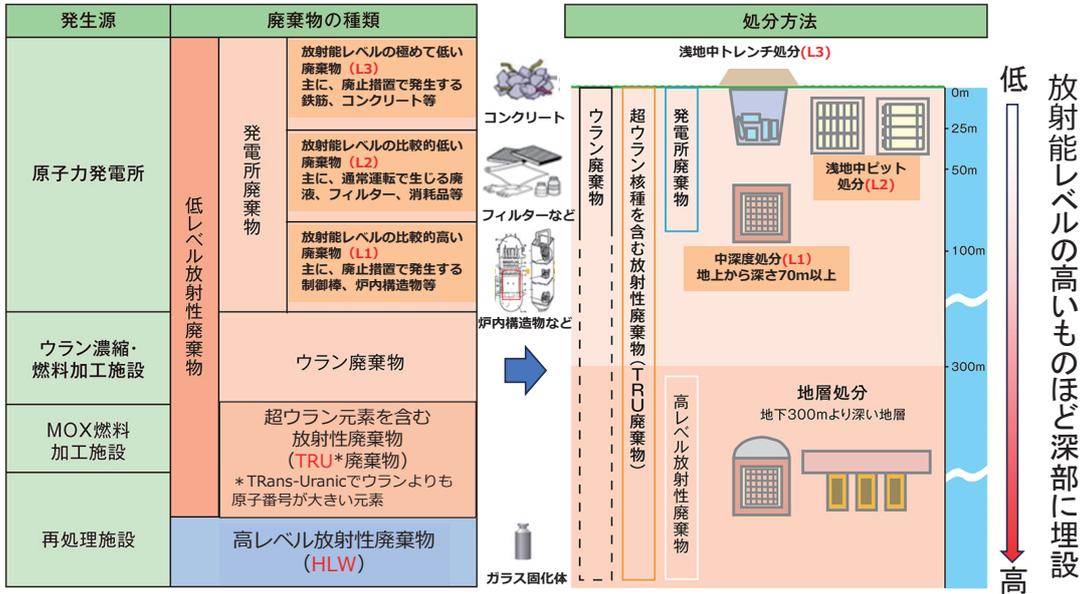
1. 放射性廃棄物の種類と処分の状況
2. 安全確保の考え方
3. 当所の研究開発の取り組み
4. 基盤技術開発事例（地下水年代測定技術）
5. まとめ

報告内容

1. 放射性廃棄物の種類と処分の状況
2. 安全確保の考え方
3. 当所の研究開発の取り組み
4. 基盤技術開発事例（地下水年代測定技術）
5. まとめ

放射性廃棄物の種類と処分方法

- 放射性廃棄物は、発電所、燃料加工施設、再処理施設から発生し、低レベル廃棄物（LLW）と高レベル廃棄物（HLW）に大別される。
- 放射能レベルの高いものほど深部に埋設される。

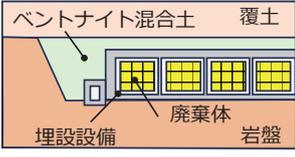
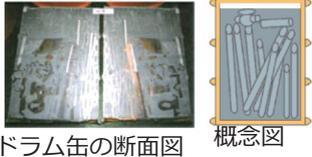
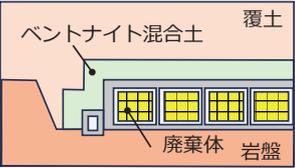
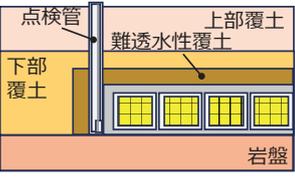


放射性廃棄物処分の状況

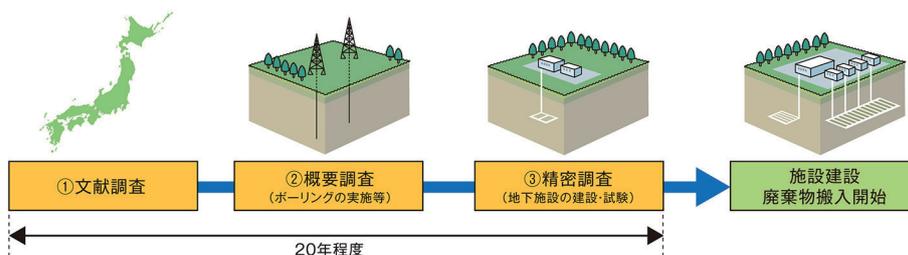
種類	実施主体など	時間			
		1986-1996	1990	2000	2021
L3	電気事業者 (敷地内など) 管理期間：50年程度	日本原子力研究所 動力試験炉解体 (埋設実地試験中)		計画 日本原子力発電 (株) 東海発電所	
L2	日本原燃 六ヶ所低レベル放射性 廃棄物埋設センター 管理期間：300年程度	1990 事業許可取得 (1号：容量 約20万本*)	2000 事業変更許可 (2号増設： 容量約21万本*)	2021 事業変更許可 (3号増設他： 容量約21万本*)	2023/9時点 約35万本受入済 *運転廃棄物 200Lドラム缶換算
L1	電気事業者 場所：未定 管理期間：300~ 400年程度		2002-2006 六ヶ所の試験空 洞で調査・研究	2021 原子力規制委員会 許可基準規則の改定 (断層、火山、侵食など追加)	
HLW TRU	原子力発電環境整 備機構 (NUMO) 場所：未定	2000 特定放射性廃棄物の 最終処分に関する法 律 (最終処分法) NUMO設立 2008 最終処分法の改正 (TRU廃棄物追加)	2017 科学的特性 マップ公表	2020/11~ 文献調査開始 寿都町 (北海道) 神恵内村 (北海道)	2023 資源エネルギー庁 「文献調査段階の 評価の考え方」 2022 原子力規制委員会 「概要調査地区等の選定時 に安全確保上少なくとも 考慮されるべき事項」 (断層、火山、侵食など)

低レベル放射性廃棄物処分の状況

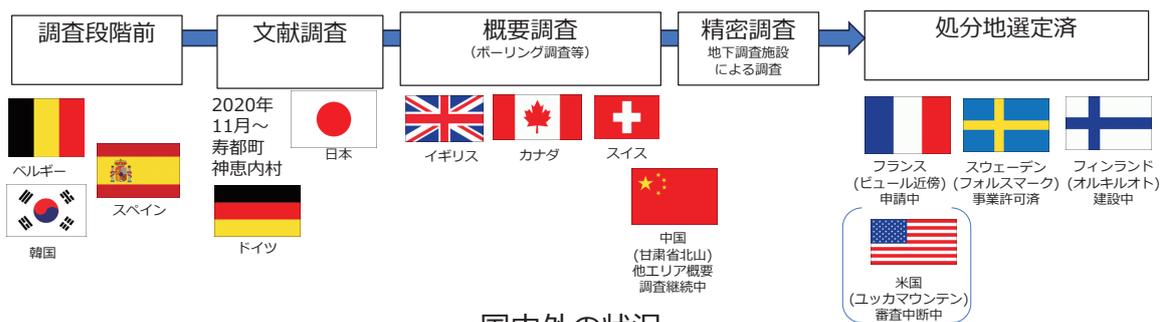
六ヶ所低レベル埋設センターでの運転廃棄物（L2）の処分のみ進行中

	廃棄体	施設概念図(申請時)	当所の主な協力 <ul style="list-style-type: none"> ● 標準・基準などへの協力 <ul style="list-style-type: none"> ・日本原子力学会標準 ・土木学会エネルギー委員会 ・地盤工学会基準など ● 許可申請・安全審査への技術的支援 ● 個別技術課題への協力 <ul style="list-style-type: none"> ・セメント材料の核種吸着性 ・粘土系材料の変質 ・廃棄体の金属腐食膨張など
1990年 1号埋設 均質・均一 固化体	 <p>モルタルで固化 概念図</p>	 <p>ベントナイト混合土 覆土 埋設設備 廃棄体 岩盤</p>	
2000年 2号埋設 充填 固化体	 <p>ドラム缶の断面図 概念図</p>	 <p>ベントナイト混合土 覆土 廃棄体 岩盤</p>	
2021年 3号埋設 充填 固化体	<p>事業変更内容 1号埋設施設にも充填固化体を埋設及び埋設数量最大値変更 2号埋設数量の最大値変更 3号埋設の増設 (1&2号も覆土を2層構造から3層構造に変更)</p>	 <p>点検管 上部覆土 下部覆土 難透水性覆土 廃棄体 岩盤</p>	

高レベル放射性廃棄物処分の状況



サイト選定プロセス



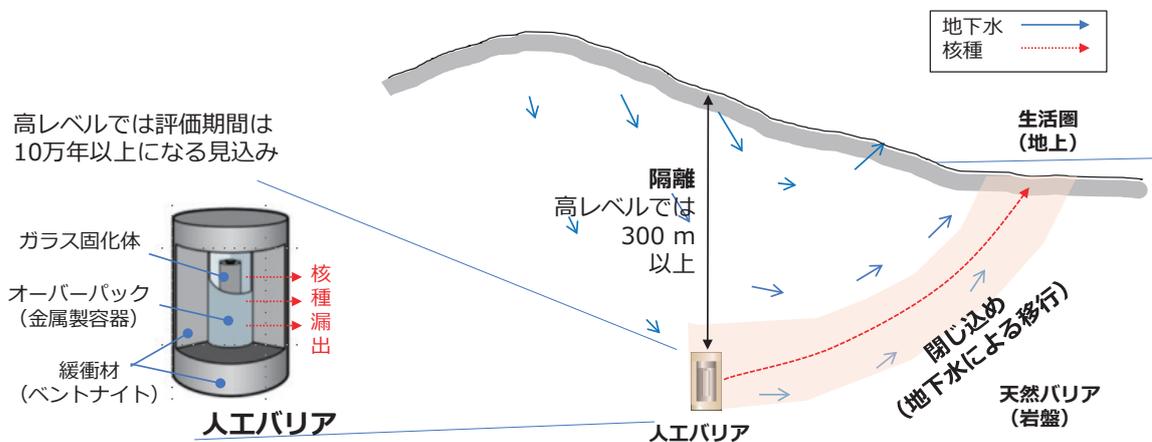
国内外の状況

報告内容

1. 放射性廃棄物の種類と処分の状況
2. 安全確保の考え方
3. 当所の研究開発の取り組み
4. 基盤技術開発事例（地下水年代測定技術）
5. まとめ

安全確保の考え方

- 放射性物質の放射能レベルが放射壊変で下がるまで、地中に**隔離・閉じ込め**
- **隔離（接近シナリオ）**：生活圏から物理的に離すこと。断層、火山、侵食などの地質事象によって、放射性物質が生活圏に接近する可能性を評価
- **閉じ込め（地下水シナリオ）**：放射性物質の移行を抑制すること。廃棄体から、人工バリア、天然バリア、生活圏への地下水による移行を評価



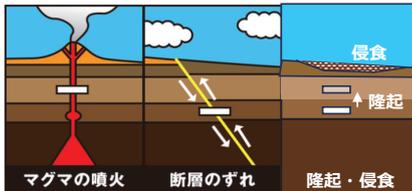
高レベル放射性廃棄物処分の人工バリア・天然バリアの概念図

日本特有の課題

高レベル放射性廃棄物処分のサイト選定に向けて、科学的特性マップが公表された。

好ましくない条件

火山・火成活動、断層活動、隆起・侵食、地熱活動、火山性熱水・深部流体など



⇒変動帯に位置するため、地質の安定性が課題

高レベル廃棄物処分「概要調査地区等の選定時に安全確保上少なくとも考慮されるべき事項」（原子力規制委員会、2022）では、低レベル廃棄物処分（L1）の許可基準規則（原子力規制委員会、2021）と同様の基準を踏襲



科学的特性マップ (2017)

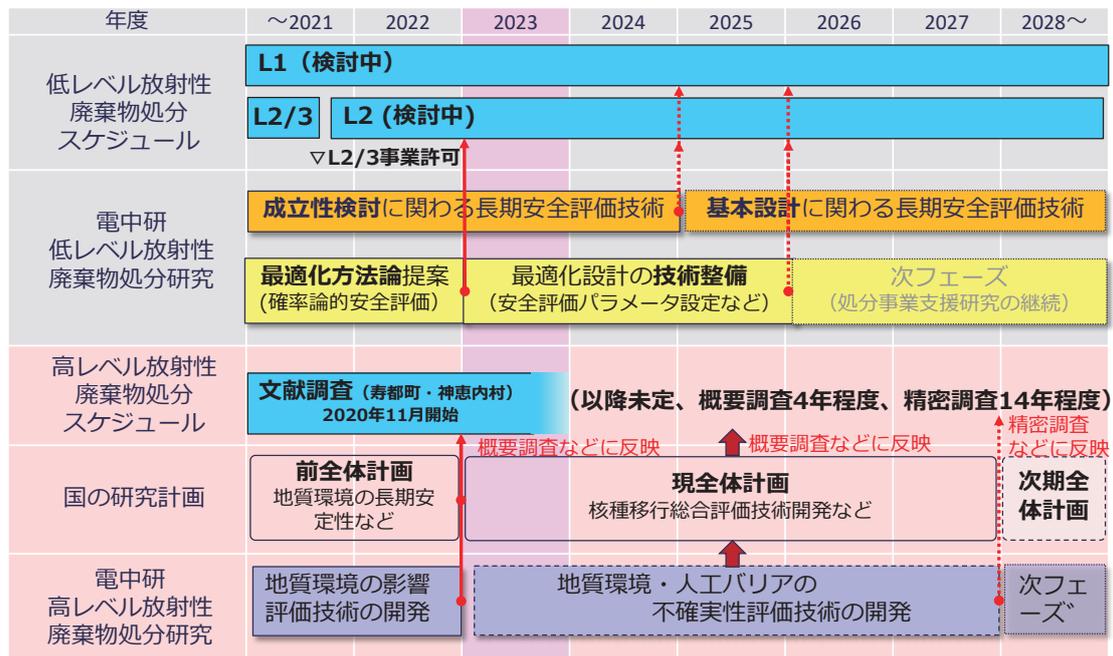
© CRIEPI 2023

科学的特性マップなどの図面は経済産業省資源エネルギー庁ウェブサイト⁵⁾から引用 10

報告内容

1. 放射性廃棄物処分の基本的考え方
2. 放射性廃棄物処分の進捗状況
3. 当所の研究開発の取り組み
4. 基盤技術開発事例（地下水年代測定技術）
5. まとめ

処分スケジュールと電中研研究



電中研研究は事業スケジュールや国の研究計画⁴⁾ (地層処分研究開発調整会議, 2023) を考慮して実施

隔離 (接近シナリオ) : 地質事象

(主にHLW)

○放射性廃棄物の地表接近を避けるため、火山・火成活動、断層活動、**隆起・侵食**、地熱活動、**火山性熱水・深部流体**などが隔離性能に与える影響を示す。

- 過去の**隆起量**を用いて**侵食量**を評価するために、隆起量の指標となる段丘地形 (台地) の形成年代の評価手法を高度化
- 深部流体**の性質と影響範囲を評価するために、全国の深部流体湧出地点を調査し、特徴を明らかにするとともに、データを蓄積中



レキの断面：風化に伴い、未風化部分 (青色部分) が減少
 低位段丘 (約5万年) 中位段丘 (約14万年) 高位段丘 (約25万年)

段丘レキの風化と時間の関係 (濱田、2023) ⁶⁾
段丘形成年代評価技術

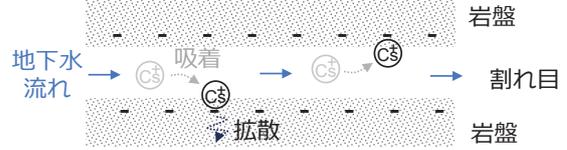


深部流体 (スラブ起源水) 発生メカニズム
 西南日本弧の例 (富岡ほか, 2022) ⁷⁾

火山性熱水・深部流体移行経路調査・評価技術

閉じ込め（地下水シナリオ）：天然バリア (主にHLW)

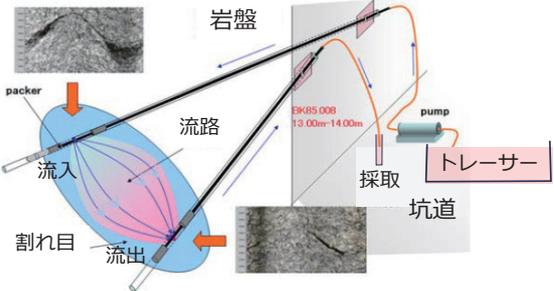
○地下深部では、放射性物質は地下水に溶解しにくく、岩盤に吸着することで移行が遅くなる（遅延効果）。さらに、地下水流速が遅いことも期待される。



放射性物質の吸着現象
岩盤表面は負に帯電(-)しており、核種（主に陽イオン）は吸着される。この結果、地下水よりも移行が遅くなる。

◆ 遅延効果

- ・ トレーサー試験装置を開発し、割れ目で遅延効果を評価
(田中ほか、投稿中¹⁰⁾；岡本ほか、2023¹¹⁾)
- ・ 簡便なトレーサー試験方法を開発中



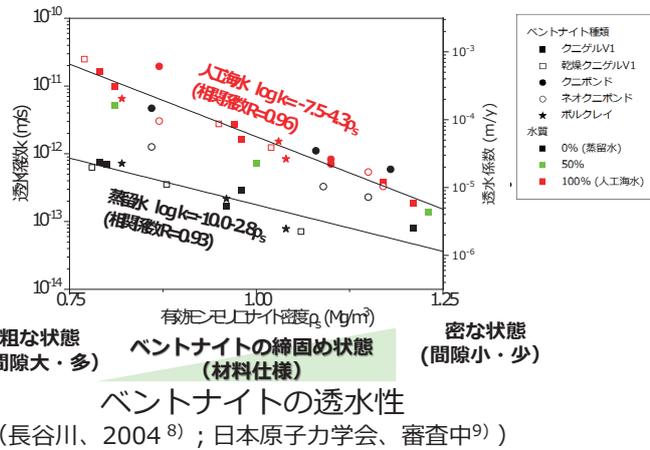
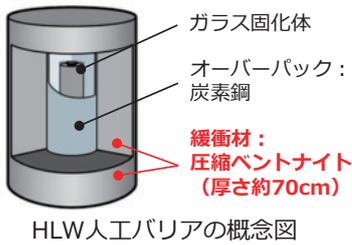
原位置トレーサー試験の概念図
岩盤への吸着による遅延効果の評価

◆ 地下水流速

- ・ 地下水流速を評価するための地下水年代測定法を開発
- ・ 地下水年代などを用いた地下水解析モデルの検証技術を開発中

閉じ込め（地下水シナリオ）：人工バリア (LLW・HLW共通)

○緩衝材としてベントナイト（膨潤性粘土）が用いられる。ベントナイトは、①低透水性、②膨潤性、③低拡散性、④吸着性、⑤環境の保持などが期待される。



- 低透水性、膨潤性（力学特性）などについて、種々の密度・水質で試験を実施し、要求性能に応じた、緩衝材（ベントナイト密度）の設計に貢献
(地盤工学会基準、日本原子力学会標準など)
- 熱影響・熱-水理-力学連成現象、変質などを研究中

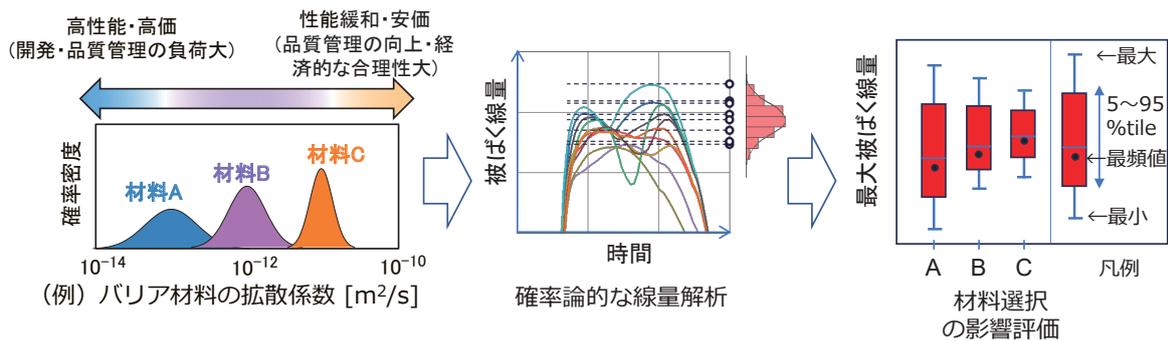
閉じ込め（地下水シナリオ）：安全評価 (LLW)

○漏洩した放射性物質が、人工バリアと天然バリアを通過する過程をモデル化し、**被ばく線量**を評価する。被ばく線量が十分に小さいことを示す必要がある。

●バリア性能等の**パラメータの保守性**を考慮し、より合理的な安全評価となる**確率論的アプローチ**を開発し、学会標準に反映

(Nakabayashi et al., 2018¹²⁾; 中林ほか、2019¹³⁾; 日本原子力学会標準、2023制定承認¹⁴⁾)

●新許可基準規則に対応するため、バリア性能、品質管理、経済性をバランスさせる**最適化設計方法**を開発中

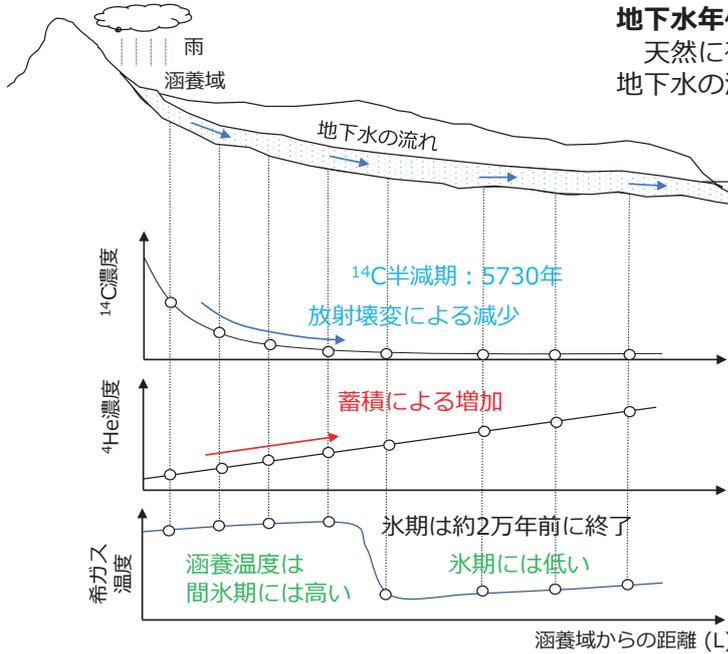


確率論的アプローチの概念図

報告内容

1. 放射性廃棄物の種類と処分の状況
2. 安全確保の考え方
3. 当所の研究開発の取り組み
4. 基盤技術開発事例（地下水年代測定技術）
5. まとめ

地下水年代測定の方法



地下水年代：降水が地下に涵養してからの時間
天然に存在する物質の増減などに着目して、地下水の滞留時間を評価する方法

- 地下水流動
流下に伴い滞留時間が増加
- 放射壊変に着目
14Cの放射壊変による濃度の減少に着目して地下水年代を推定
- 蓄積に着目
岩石から発生する4Heの濃度の増加から地下水年代を推定
- 気候変動に着目
涵養温度に着目し、間氷期と氷期(2万年前より新しいor古い)を推定

滞留時間の増加に伴う濃度変化の概念図

地下水年代測定技術

○地下水年代（滞留時間）が長ければ、核種が漏出して、壊変による減衰が期待できる。

- 長い滞留時間が評価可能な方法、14C、36Cl、4Heを用いた方法を開発してきた。
- 放射性希ガス(85Kr, 81Kr, 39Ar)を用いた方法の有効性・適用性を検討中

	対象物質 (半減期：年)	時間スケール（年）									
		10 ⁻¹	10 ⁰	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	
放射壊変	222Rn (0.01)	~0.03									既存技術
	85Kr (10.72)			1~40							放射性廃棄物 処分で重要な 評価時間
	3H (12.43)			1~60							
	(3H+ 3He)			1~100							
	39Ar (269)					50~2000					
	無機14C (5730)						500~20,000				
	有機14C (5730)							500~20,000			
	81Kr (2.1x10 ⁵)					10 ⁴ ~	10 ⁶				
	36Cl (3.0x10 ⁵)					5x10 ⁴ ~	2x10 ⁶				
129I (1.6x10 ⁷)						5x10 ⁹ ~	5x10 ⁸				
蓄積	4He									蓄積性物質 1,000~10 ⁷	
気候変動	CFCs, SF ₆									温暖化ガス 1~60	
	Ne, Ar, Kr, Xe									涵養温度 (氷期or間氷期)	
	δ ² H, δ ¹⁸ O									涵養温度 (氷期or間氷期)	

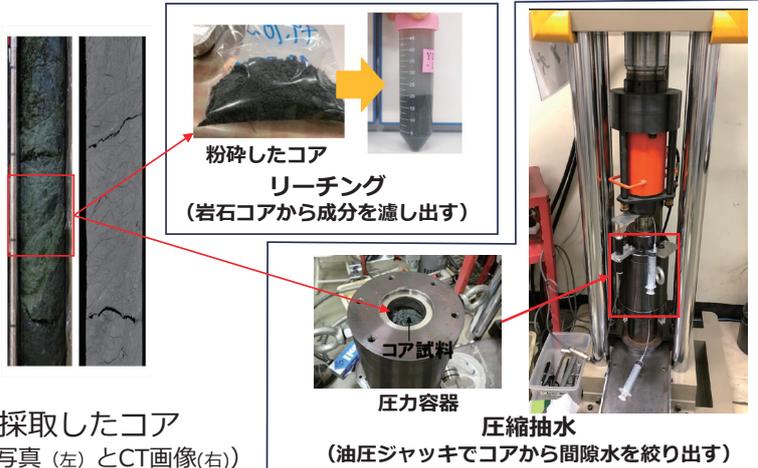
地下水年代測定技術と開発状況

ボーリング孔での適用事例



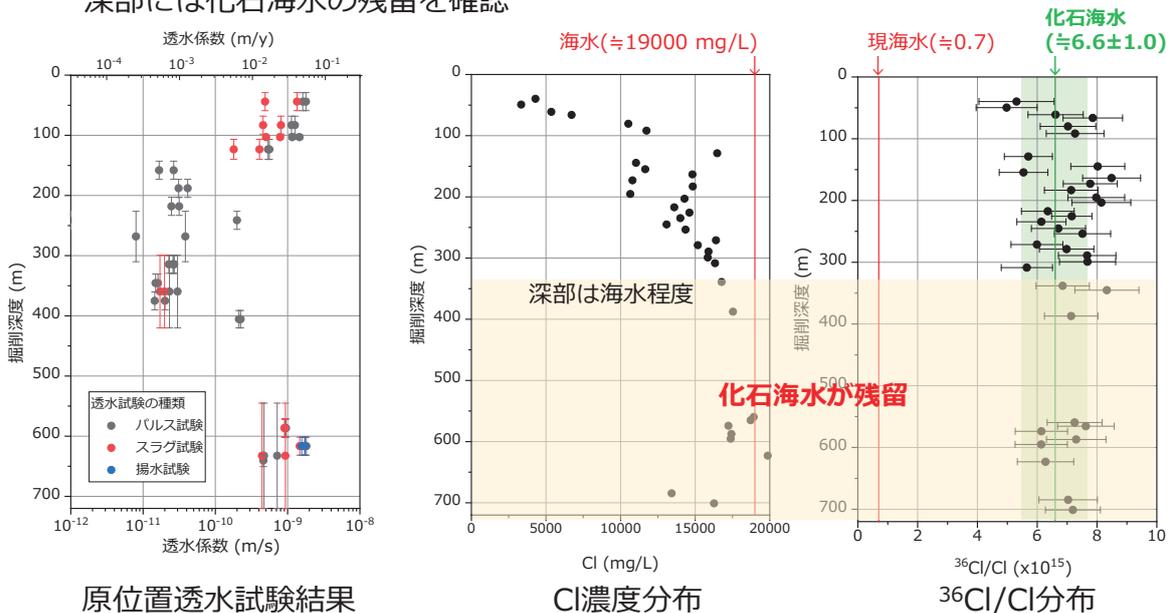
ボーリング孔の掘削機写真 (YDP-4孔) (コア写真 (左) とCT画像(右))

- 概要調査で実施するボーリング調査技術の実証を横須賀地区で実施した。
- 透水性が小さく、地下水の揚水が困難なため、コアからリーチング、圧縮抽水などで試料を採取し、地下水年代測定を実施した。



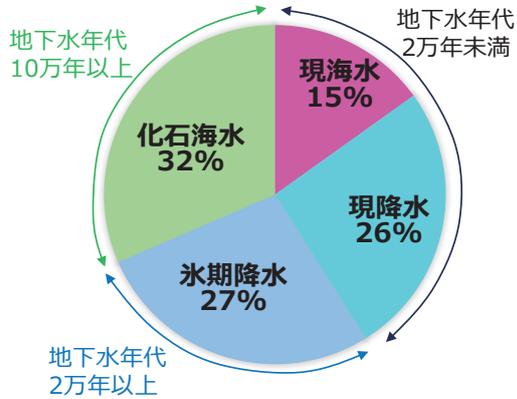
ボーリング孔での調査結果(YDP-4)

- 粘土層で透水性が低く、揚水が困難なため、コアから試料を採取
- Cl濃度が海水程度、 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ が化石海水（非常に古い海水）程度のことから、深部には化石海水の残留を確認



地下水年代測定結果

- 大深度の温泉・井戸などでは、地下水年代2万年以上が60%程度
- 大深度ボーリングでは、泥岩、頁岩（堆積岩）で、地下水年代が100万年以上



大深度の温泉・井戸などでの調査結果
 深度300m以上の73カ所から地下水を採取・分析
 (工ネ庁受託：沿岸部処分システム評価確認技術開発)

地点	滞留時間 (年)					地質
	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	
岐阜 瑞浪他	土岐花崗岩 Hasegawa et al.(2016) ¹⁵⁾					花崗岩
北海道 幌延	更別層					砂礫
	勇知層 Hasegawa et al.(投稿中) ¹⁶⁾					泥岩
	声間層					泥岩
	稚内層 Nakata et al.(2018) ¹⁷⁾					頁岩
神奈川 横須賀	三浦層群					砂岩
	葉山層群 Hasegawa et al.(2023) ¹⁸⁾					泥岩

大深度ボーリングでの調査結果

報告内容

1. 放射性廃棄物の種類と処分の状況
2. 安全確保の考え方
3. 当所の研究開発の取り組み
4. 基盤技術開発事例（地下水年代測定技術）
5. まとめ

まとめ

- 低レベル・高レベル放射性廃棄物処分では、隔離と閉じ込めが安全確保の基本であり、それらを調査・評価する技術が重要である。
- 当所は、隔離や閉じ込めの評価に有効な調査・評価技術（地質事象、人工バリア・天然バリア、安全評価など）について、基盤となる技術を開発・実証してきた。
- 今後の放射性廃棄物処分事業の実現に向けて、当所が開発してきた技術を適用し、安全評価の信頼性・説明性向上を図ることで、事業の推進に貢献する。

ご清聴ありがとうございました

R 電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry

参考文献

1. 日本原子力文化財団ウェブサイト, 原子力・エネルギー図面集、第8章 放射性廃棄物。 <https://www.ene100.jp/zumen/8-1-5>
2. 日本原燃ウェブサイトに、埋設事業の概要。 <https://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/llw/summary/>
3. 経済産業省資源エネルギー庁ウェブサイト, 放射性廃棄物処分について 高レベル放射性廃棄物。
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/hlw/hlw01.html
4. 地層処分研究開発調整会議, 地層処分研究開発に関する全体計画 (令和5年度～令和9年度), 2023。
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chiso_shobun/20230324_report.html
5. 経済産業省資源エネルギー庁, 科学的特性マップ, 2017。
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/
6. 濱田崇臣, 放射性廃棄物処分の現状と技術開発 ②地質長期安定性・地質環境特性, 電力土木, 2023.11月予定
7. 富岡祐一ほか, 地下水溶存物質に着目した深部流体の起源と影響領域の評価手法の検討, 原子力バックエンド研究, 29(2), 82-100, 2022.
8. 長谷川琢磨, ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響, 電力中央研究所報告, N04005, 2004.
9. 日本原子力学会, 低レベル放射性廃棄物処分施設の施設検査方法－浅地中処分編：20XX, AESJ-SC-F00○: 20XX (パブコメ済)。
10. 田中靖治ほか, 花崗岩を対象とした原位置トレーサー試験と溶質移行特性評価, 地下水学会誌, 投稿中。
11. 岡本 駿一ほか, 割れ目を対象にしたトレーサー試験から評価される収着特性の流速依存性と妥当性, 土木学会論文集, 79, 6, 論文ID: 22-00277, 2023. DOI <https://doi.org/10.2208/jscej.22-00277>
12. Nakabayashi, R. et al., Methodology to optimize radiation protection in radioactive waste disposal after closure of a disposal facility based on probabilistic approach", Journal of Nuclear Science Technology, vol. 55, issue.3, 335-347, 2018.
13. 中林亮ほか, 確率論的アプローチによる放射性廃棄物処分施設設計の最適化手法の具体化に向けた検討：核種移行評価パラメータの設定方法, 日本原子力学会和文論文誌, 18(1), 6-20, 2019.
14. 日本原子力学会, 低レベル放射性廃棄物処分施設の安全評価の実施方法－中深度処分編：20XX, AESJ-SC-F00○: 20XX (承認済)。
15. Hasegawa, T. et al., Cross-checking groundwater age by ⁴He and ¹⁴C dating in a granite, Tono area, central Japan, Geochimica et Cosmochimica Acta, 192, 166-185, 2016.
16. Hasegawa, T. et al., Identification of glacial meteoric water and fossil seawater in a deep borehole in the coastal area of Horonobe, north Japan, using groundwater dating method, Chemical Geology (Under Review).
17. Nakata, K. et al., An Evaluation of the Long-Term Stagnancy of Porewater in the Neogene Sedimentary Rocks in Northern Japan, Geofluids, Article ID 7823195, 21 pages, 2018.
18. Hasegawa, T. et al., Modern and fossil seawater identification using groundwater dating from the western coast of the Miura Peninsula, Japan, Chemical Geology, 121299, 2023.