

# 地層処分概念開発史

---

第33回 バックエンド夏期セミナー

2017.8.26

東京都市大学 3号館311教室

増田純男

[masuda@nsra.or.jp](mailto:masuda@nsra.or.jp)

# 本日お話しすること

---

## □ 地層処分概念の開発経緯

- ターニングポイントとなった出来事と地層処分の考え方について重要なキーワードやコアメッセージを遺すこととなったエポックメイキングな報告書等を回顧

## □ 地層処分に関する多面的な議論

- ✓ 多面的な議論を要する課題
- ✓ 貯蔵と処分の関係
- ✓ 廃棄物回収可能性
- ✓ 安定な地質環境の意味合い
- ✓ 分離変換技術の効果

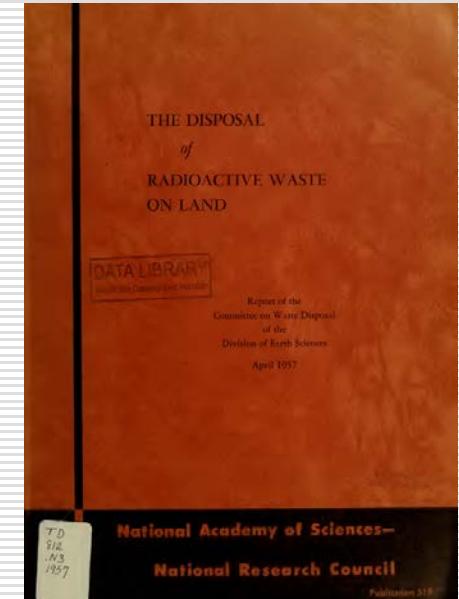
# 地層処分概念開発経緯の温故知新

- 2012年: 日本学術会議「回答 高レベル放射性廃棄物の処分について」
    - “地層処分に対する社会的合意形成が極度に困難である現状の客観的諸要因を明確にし、直視することの重要性”
  - 2012年: 日本学術会議の指摘に対する原子力委員会の「見解」
    - “トイレなきマンションという表現に代表されるように、過去の原子力政策や核燃料サイクル政策において、廃棄物処分の取り組みが原子力発電の取り組みと一体で議論されてこなかったのではないかとの批判があると考える”
  - 2014年: 日本原子力学会「地層処分の学際的評価研究専門委員会報告書」
    - “何故、当該の選択肢を選んだか、議論の道筋と参照された根拠をアーカイブとして残しておき、後でトレースできるようにすることが段階を踏んで社会全体における意思決定のプロセスを着実に進めていく上で不可欠”
- 地層処分問題は他の原子力分野における科学技術的課題や対話に必要な知識・情報との特異性から原子力の専門家にとっても理解が容易ではないという側面もあり、今後の事業推進に当たって関係者の共通認識としておくことは重要

# 米国におけるHLW問題の認知と対策の模索

- 1957年, 全米科学アカデミー(NAS) レポート:  
“The Disposal of Radioactive Waste on Land”

- ハンフォードサイトにおいて、タンク貯蔵中のマンハッタン計画により発生した高レベル放射性廃液の漏出による汚染発覚
- 米国原子力委員会(AEC)はHLW対策の必要性認識
- 1955年, AECが地層処分の技術的可能性を検討する会議(プリンストン会議)をNASに委託
- 会議の成果として岩塩層への定置が有望な方法であるとされ、岩塩に関する研究を開始すべきと提言



- 1965年, ORNLがカンザス州Lyonsの廃坑となつた岩塩鉱山にて原位置試験開始



# 1970年代初めの米国での出来事

## □ 2つの事故

- ハンフォードにおいて1972年にタンク貯蔵の歴史上最大の高レベル廃液漏出事故による広範囲な汚染発生
- ロッキーフラットのPu工場火災事故の処理によってTRUで汚染された大量の放射性廃棄物が発生
- 出来るだけ早い時期に処分場を開設しようとする計画を進める誘因となった

## □ 2つのAEC計画の中止

- 1970年にAECは地層処分場をLyonsの岩塩鉱床に立地する計画を決定したが、地元の強い反対をうけ、1972年には進行中の原位置試験も中止
- 1972年にAECが発表した、HLW固化体を長期貯蔵するというRSSF (Retrievable Surface Storage Facility) 計画は、それを認めた場合、処分の研究開発が進まず、RSSFがなし崩し的に最終処分場になってしまうというEPAの批判と一般公衆の懸念により中止

## □ 廃棄物処分の実施に社会的な合意を得ることの重要性について、関係当事者に全くその認識がなかったと批判され、その後反省と教訓

# 日本の第1期(1960年代～1970年代初期)

- 1962年、原子力委員会廃棄物処理専門部会中間報告書
  - 高レベルの放射性廃棄物の処分方式として、タンク貯蔵等の閉じ込め方式は常に監視を必要とするので最終的な処分とはいえない。
  - 最終処分方式として、次の2方式があげられる。
    - ① 容器に入れて深海に投棄すること
    - ② 天然の堅牢な洞窟あるいは岩石層に入れること
  - “…国土が狭あいで、地震のあるわが国では最も可能性のある最終処分方式としては深海投棄であろう。なお、現状では低及び中レベルの廃棄物に留め、高レベルについては研究により安全性が確認されるまで実施すべきでない。”
- 1973年、原子力委員会環境・安全専門部会報告書
  - 高レベル固体廃棄物の処分方法として、人造の保管施設を用いた保管方法について、国際的な技術の進展に注目しつつ研究開発を進める。
- 第1期において地層処分は検討対象ではなかった。

# 1970年代中頃～：対策オプションとして地層処分に关心

- ローマクラブ「成長の限界」<sup>\*1</sup>⇒国連ストックホルム会議「人間環境宣言」により国際的な環境問題認識の高まり⇒1975年、海洋投棄規制条約(ロンドン条約)発効
- 1977年、OECD/NEA/Polvani レポート<sup>\*2</sup>、「原子力発電計画にともなう放射性廃棄物管理の目標・概念・戦略」による国際的集約意見
  - 貯蔵は人間による制度的・継続的な管理が必要、社会的、倫理的側面を考慮すると制度的管理を必要とせず事後の措置なしに人間環境から隔離できる手段が望ましい。  
⇒最終的な措置は処分
  - 処分オプション(深地層処分、海洋底下の地層処分、海洋底上の処分、氷床処分、地球外処分、消滅処理)のうち安定な地層中への閉じ込めることが最も進歩した解決方法  
⇒地層処分に注目
  - 長寿命廃棄物の処分に適していると考えられている地層として、岩塩層への処分が関心を集めているところであるが、粘土質層と硬岩層も候補
- 1982年、OECD/NEA/Coadyレポート<sup>\*3</sup>、「放射性廃棄物の処分：関連原則の概観」
  - 将来世代に対する責任、受動的(passive)なシステムと永続的介護(perpetual care)  
⇒地層処分に注目

1. Meadows, D. H. (1972). The Limits to Growth; A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. Universe Pub.

2. OECD/NEA (1977). Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes.

3. OECD/NEA. (1982). Disposal of Radioactive Waste: An Overview of Principles Involved.

# 米国における地層処分の考え方の骨子整理

- NPT未加盟のインドによる核実験、米カーター政権が商業用再処理とプルトニウム利用の無期限延期政策、放射性廃棄物対策の大幅な見直しのため、1979年、関係14省庁によるタスクフォース(IGR : Interagency Review Group)を設置して取りまとめ<sup>\*1</sup>
  - 要求される地質環境条件を満たすものであれば、どのような地層であっても、地層処分の候補として研究対象
  - 長期にわたる隔離性能は自然の条件だけに依存するのではなく、工学的な対策を含む一つのシステム、すなわち地層処分システムにより達成
  - 技術開発において、地質環境、処分サイト、工学バリア、廃棄物形態それぞれの選定にシステムアプローチの手法を採用
  - 地層処分システムの性能が長期にわたり、満足できるものか否かについては合理的、科学的な評価(性能評価)が必要
  - 性能評価は、処分場設計、地層、気候および人間活動の変化の影響に関する解析モデルによってのみ可能
  - 永久処分へのアプローチは技術的に保守的な方法で段階的に進めるべき
  - 回収可能性概念については回収が必要な状況や技術的側面に関してさらなる定義が必要

# 米国における地層処分選択の政策決定

---

- 1980年、大統領が**地層処分**（「現存および将来発生するHLWとTRU廃棄物の地層中の鉱山型処分場への処分」と定義された概念）を行うと政策声明
- アメリカの国家環境政策法(NEPA(National Environment Policy Act)1969)は連邦政府の関わるあらゆるレベルの行為(政策、計画、事業等)に対して環境アセスメント(EIS)を行うことを義務付け
- 政策声明の根拠となったのはDOEがNEPAの定めにしたがって取りまとめた約1800ページに及ぶ「放射性廃棄物の管理に関する環境影響評価報告書」(DOE/EIS-0046F)
- 本EISは地層処分の選択に当たって、**提案措置**(proposed action)としての**地層処分**に対して、代替案(alternative action: (1)**超深孔処分**、(2)**海洋底下処分**、(3)**離島処分**、(4)**岩石溶融処分**、(5)**氷床処分**、(6)**井戸注入処分**、(7)**核変換**、(8)**宇宙処分**および**現状維持(no action alternative)**)を比較・検討
- 現状維持(廃棄物を発生サイトあるいは地表や浅地中の貯蔵施設に無限時間にわたって放置)については大統領声明「…廃棄物対策問題の解決を将来世代に引き延ばしてはならない…」に適合しないとして他のオプションとの詳細な相対評価を行う以前に否定

# 放射性廃棄物の管理に関する環境影響評価 【DOE/EIS-0046F】

## □ 9つの処分概念に対する性能目標への適合性評価結果

	放射線学的基準	千年間の閉じ込め	1万年間の隔離	開発期間	科学的ブレークスルー	予測的可能性	産業規模	燃料サイクル	原子炉の設計	欠陥是正あるいは修復能力	維持管理と監視
地層処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
超深孔処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	No	○
岩石溶融	○	No	No	○	○	○	○	○	○	No	No
離島処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
海洋低下処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
氷床処分	○	○	No	No	○	No	○	○	○	No	○
井戸注入処分	○	No	No	○	○	○	○	○	○	No	○
核変換	○	..	..	No	○	○	No	○	○	○	○
宇宙処分	○	○	○	○	○	○	○	○	○	No	○

○=適合可能性あり No=適合可能性なし

□ 廃棄物処分の性能目標に適合した5つの処分概念、すなわち、**地層処分**、**超深孔処分**、**海洋低下処分**、**離島処分**および**宇宙処分**についてさらに相対的な優劣の評価

# 【DOE/EIS-0046F】(続き)

---

- 5つの処分概念の相対評価
- 評価基準
  - ① 放射線学的影響
  - ② 非放射線学的環境影響
  - ③ 技術開発の見通しと開発可能期間
  - ④ 国内法と国際的な合意への適合性
  - ⑤ 将来の原子力産業の規模や方式の推移からの独立性
  - ⑥ 開発および操業のコスト
  - ⑦ 万一の場合のは是正、修復措置の可能性
  - ⑧ 長期的な維持管理、監視の必要性
  - ⑨ 資源の消費量
  - ⑩ リスクの公平性

# 【DOE/EIS-0046F】(続き)

## □ 処分費用の推計

	研究開発 費 (百万ドル)	処分前管理費 (ドル/トン)		処分施設費			総費用 (0.01ドル /kWh)	
		ワンス ・ス ルー	再処理	建設 (百万ドル)	操業 (百万ドル)	閉鎖 (百万ドル)	ワンス ・ス ルー	再処理
地層処分 (6,000トン/年)	3,700	100	170	2,600	87	25	0.7	1.0
超深孔処分 (5,000トン/年)	900	100	170	2,800	2,100	40	2.5	3.0
離島処分	..	150	190	..	..	..	..	..
海洋底下処分 (5,000トン/年)	..	150	190	760	29	54	0.8	0.9
宇宙処分 (1回あたり)	..	210	170	..	46	4	..	..

# 【DOE/EIS-0046F】（続き）

## □ 処分に要する資源の推計

投入資源	地層処分	超深孔処分	海洋低下処分	宇宙処分
アルミニウム (トン)	220	13,000	13,000	83,000
クロム(トン)	..	14,000	14,000	5,000
ニッケル(トン)	..	7,500	7,500	2,000
水(m <sup>3</sup> )	1,300,000	199,000,000	..	60,000,000
天然ガスまたはプロパン (m <sup>3</sup> )	11,500	10,000,000	10,000,000	10,000,000
電気(kWh)	3,400,000,000	56,000,000,000	20,000,000,000	59,000,000,000
石油由来燃料 (m <sup>3</sup> )	5,300,000	6,000,000	5,100,000	1,500,000
その他燃料(トン)	..	..	..	4,800,000

# 【DOE/EIS-0046F】(続き)

## □ 処分方法の優先順位

放射線学的影響	最高優先度 → 最低優先度
操業中	(MR) ..... (VDH) ..... (IMR) ..... (SS) ..... (S)
閉鎖後	(S) ..... (MR) ..... (VDH) ..... (SS) ..... (IMR)
非放射線学的環境影響	(MR, VDH) ..... (SS, IMR) ..... (S)
開発の見通し	(MR) ..... (SS, IMR) ..... (S, VDH)
法令適合性	(MR, VDH) ..... (IMR) ..... (S) ..... (SS)
原子力産業の将来からの独立性	(MR, VDH, IMR, S) ..... (S)
是正・修復措置の必要性	(MR) ..... (IMR) ..... (SS) ..... (S, VDH)

(注) MR=地層処分 VDH=超深孔処分 IMR=島内処分 SS=海洋低下処分 S=宇宙処分

- 地層処分がもっとも早期に実現可能な最終処分の方法であると結論
- 基礎的な研究開発の対象となり得る候補技術は海洋底下処分と超深孔処分

# 1970年代後半～:地層処分研究開発の取り組み開始

- スウェーデン: 1977年, 原子力条件法制定 ⇒ SKBが地層処分の実現性評価(KBS-3)計画
- スイス: HLW対策の技術的実現可能性提示を要求する国民投票  
→ 1978年, 原子力法改訂 ⇒ NAGRAが「Project Gewahr' 85(保証プロジェクト1985)」
- カナダ: 1978年, 連邦政府とオンタリオ州政府との共同声明  
→ AECLが「地層処分の環境影響評価」取りまとめ
- アメリカ: 1982年, 核廃棄物政策法制定(NWPA' 82)
- 日本: 1976年, 海洋投棄に代わるHLW対策について原子力委員会決定
  - 「当面地層処分に重点をおき, 我が国の社会的, 地理的条件に見合った処分方法の調査研究を進め, 今後3～5年のうちに処分方法の方向付けを行い, 1980年代後半から実証試験を行うことを目標とする」
  - 動燃を地層処分研究開発の中核推進機関に指定

# 日本の計画の変更

□ 1980年、放射性廃棄物対策専門部会報告書

「高レベル放射性廃棄物処理処分に関する研究開発の推進について」

◆ 5段階の手順を経て行う地層処分計画

## 第1段階:可能性ある地層の調査

地層(岩種)及び自然的、社会的要因の調査を行い、地層処分の研究対象となりうる「可能性ある地層」を抽出するとともに、地層の特性の調査研究、工学バリアの研究等を行い、これらの成果を踏まえてわが国における「有効な地層」を選定する。

## 第2段階:有効な地層の調査

第1段階で選定された有効な地層について、試錐を含む広域調査及び精密調査を行うと共に工学バリアの原位置試験を行い、それらの総合評価により試験地を選定する。

## 第3段階:模擬固化体現地試験

第2段階で選定された試験地において模擬固化体を使用して試験を行い、コールドでの処分システムを確立する。

## 第4段階:実固化体現地試験

実固化体による試験を行い、ホットでの処分システムを確立する。

## 第5段階:試験的処分

固化体を試験的処分場に搬入し、試験的処分を行う。

地層処分の安全評価に関する研究

環境影響評価基準を検討し、  
安全評価手法を開発して  
地層処分システムの安全評価を行う

長期モニタリングシステムの開発

# 日本の計画の進展と挫折

---

## □ 1984年、放射性廃棄物対策専門部会報告書

### 「放射性廃棄物処理処分方策について(中間報告)」

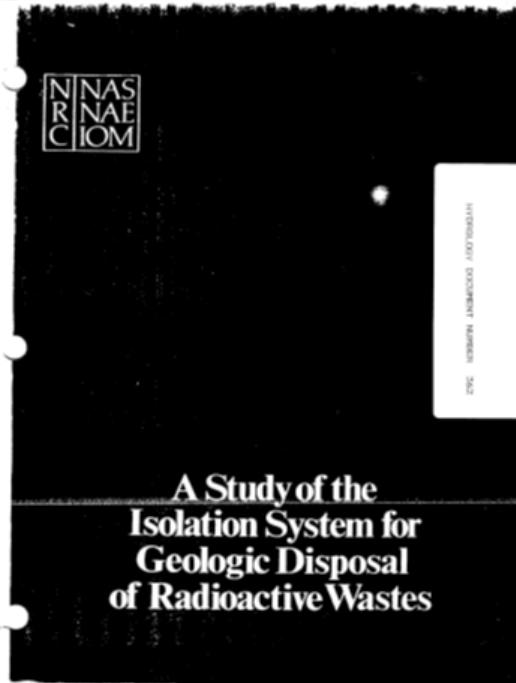
- わが国における「有効な地層」としては未固結岩等の明らかに適性の劣るものの以外は岩石の種類を特定せずに可能性
- 同一種類の岩石でもそれが賦存する地質条件によって適性に差異
- 地質条件に対応して必要な人工バリアで安全確保可能
- 処分予定地の選定にあたっては自然的条件と社会的条件等に柔軟に対応する余地あり
- 処分予定地の選定は動力炉・核燃料開発事業団が電気事業者等の協力を得て行い、選定の結果については、国が所要に評価等を行って、その妥当性を確認
- 処分の実施主体については適切な時期に具体化

## □ しかし、この後次の段階には進展せず、計画は隘路に

# 地層処分概念の骨格形成

□1983年、全米科学アカデミー(NAS)レポート

“A Study of the Isolation System for Geological Disposal of Radioactive Wastes”



- ▶ 本報告書は公開と同時に月刊誌「エネルギーレビュー」に10回に分けて東京大学鈴木篤之助教授（当時）による詳細な解説記事<sup>\*1</sup>掲載

1. 鈴木篤之 (1983). ピグフォード報告 高レベル廃棄物の地層処分について、エネルギーレビュー, 1983.10~1984.7.

## NASレポート：“A Study of the Isolation System for Geological Disposal of Radioactive Wastes”

---

- 対象廃棄物：HLW固化体，使用済核燃料，TRU廃棄物
- 生活圏への2つの移行経路
  - 人間侵入や自然事象による廃棄物への接近
  - 地下水による放射性核種の溶解と人間環境への運搬
- 廃棄物を地上に置く場合は放射能インベントリーの大きさが安全性の支配的要因の一つであるが、地下に置く場合は放射能の地下水への移行量が支配要因

# NASレポート(続き)

## 多重バリアシステム概念を解説

### □ 廃棄物パッケージの役割

1. 貯蔵中の健全性・安全性
2. 輸送・取り扱いの容易性・安全性
3. 処分後の放射性物質隔離機能
  - HLW固化体特性として重要な要素は地下水への浸出率

### □ 工学バリア(Engineered Barrier)への期待

- 期待する機能を工学的に構成
  - 地下水と固化体の接触抑制
  - 地下水侵入後の放射性物質の浸出・逸散の抑制

### □ 地下深部の地質環境特性と自然のバリア機能(Natural Barrier)に注目

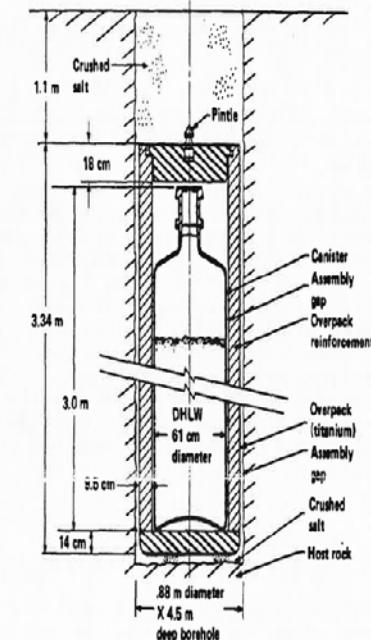


FIGURE 5-6 Defense high-level waste borehole waste package conceptual design. Source: Westinghouse Electric Corporation (1981).

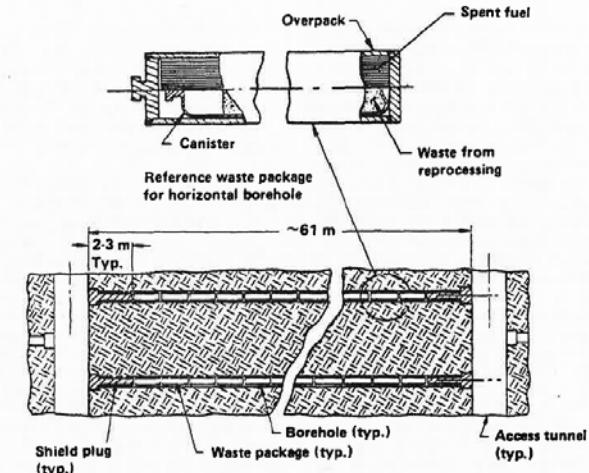


FIGURE 5-8 Borehole type package for horizontal emplacement in basalt. Source: Westinghouse (1981).

# NASレポート(続き)

## ● 地層への閉じ込め技術には2種類のシステム

- ✓ 1つは廃棄物と接触する地下水が長期間存在しないことによる完全な閉じ込め性能(岩塩のケース)
- ✓ 第2のものは地質環境が本来的に備えている隔離性能

### □ 地質特性:

岩盤による隔離性

### □ 水理特性:

透水係数, 間隙率, 動水勾配

### □ 地球化学特性:

➤ 核種の地下水への溶解度限界

➤ 放射性核種の岩石への収着特性

地質環境が本来的に有する物質移動論に基づく包蔵性と多重バリア概念による処分システムの信頼性を示唆

Table 3 . Solubilities and Retardation Factors <sup>a</sup>

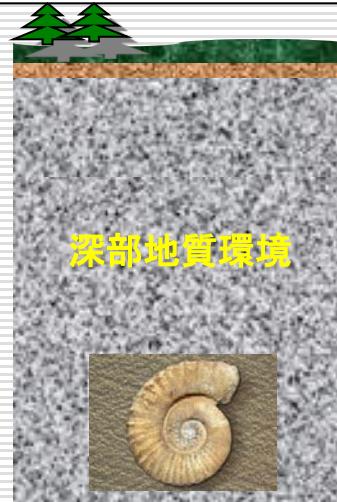
Element	Most Probable	Solubility log ppm				Retardation Factor <sup>b</sup>				
		Reducing: Eh=-0.2		Oxidizing: Eh=+0.2		Granite	Basalt	Tuff	Clay, Soil, Shale	Salt <sup>c</sup>
		pH=9	pH=6	pH=9	pH=6					
Se	-3(?)	---	---	---	---	5 50 200	5 50 200	5 50 200	5 50 200	20 200 1,000
Sr	High	-0.2	High	-0.2	High	10 200 2,000	50 200 2,000	20 200 10,000	50 200 5,000	1 10 100
Zr	-4	-4	-6	-4	-6	500 5,000 30,000	500 5,000 10,000	500 5,000 10,000	500 5,000 50,000	300 1,000 5,000
Tc	-3	-10	High	High	High	1 5 40	1 5 100	1 5 100	1 5 20	1 5 20
U	-3	-3	-5	High	High	10 50 500	20 50 200	5 40 5,000	50 200 5,000	10 20 60
Np	-3	-4	-4	-2	-1	100 500	100 500	100 500	100 400	10 50 300
Pu	-3	-5	-4	-5	-3	10 200 5,000	100 500 5,000	50 200 5,000	500 1,000 20,000	10 200 10,000
Am	-4	-8	-5	-8	-5	500 3,000 50,000	60 500 50,000	300 1,000 50,000	200 800 50,000	300 1,000 5,000
Cm	-3(?)	---	---	---	---	200 2,000 10,000	100 500 10,000	100 500 10,000	200 2,000 20,000	200 1,000 3,000

# 地層処分概念の考え方<sup>\*1</sup>

深部地質環境が本來的に有する包蔵性

廃棄物と人間の接触を困難にする受動的な隔離性能

- 地表における自然現象による擾乱を受けない
- 厚い岩盤により接近が抑制される

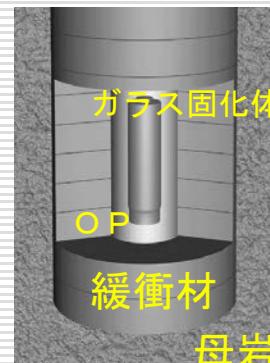


廃棄物中の放射性核種が地下水を介して人に影響を及ぼさないように働く受動的な閉じ込め性能

- 深部の地下水は動かない
- 深部地下水の還元性
- 溶解度限界により核種の溶出が抑制される

地層処分システムの構築による安全の保証

接近シナリオに対する隔離性能をさらに確実にするために、適切な条件を持つ地質環境を処分の場所として選定する。



地下水シナリオに対する閉じ込め性能をさらに確実にするために多重バリアシステムを構築する

# 日本の研究開発方針の転換

□ 1989年、放射性廃棄物対策専門部会報告書：

「高レベル放射性廃棄物の地層処分の重点項目とその進め方」

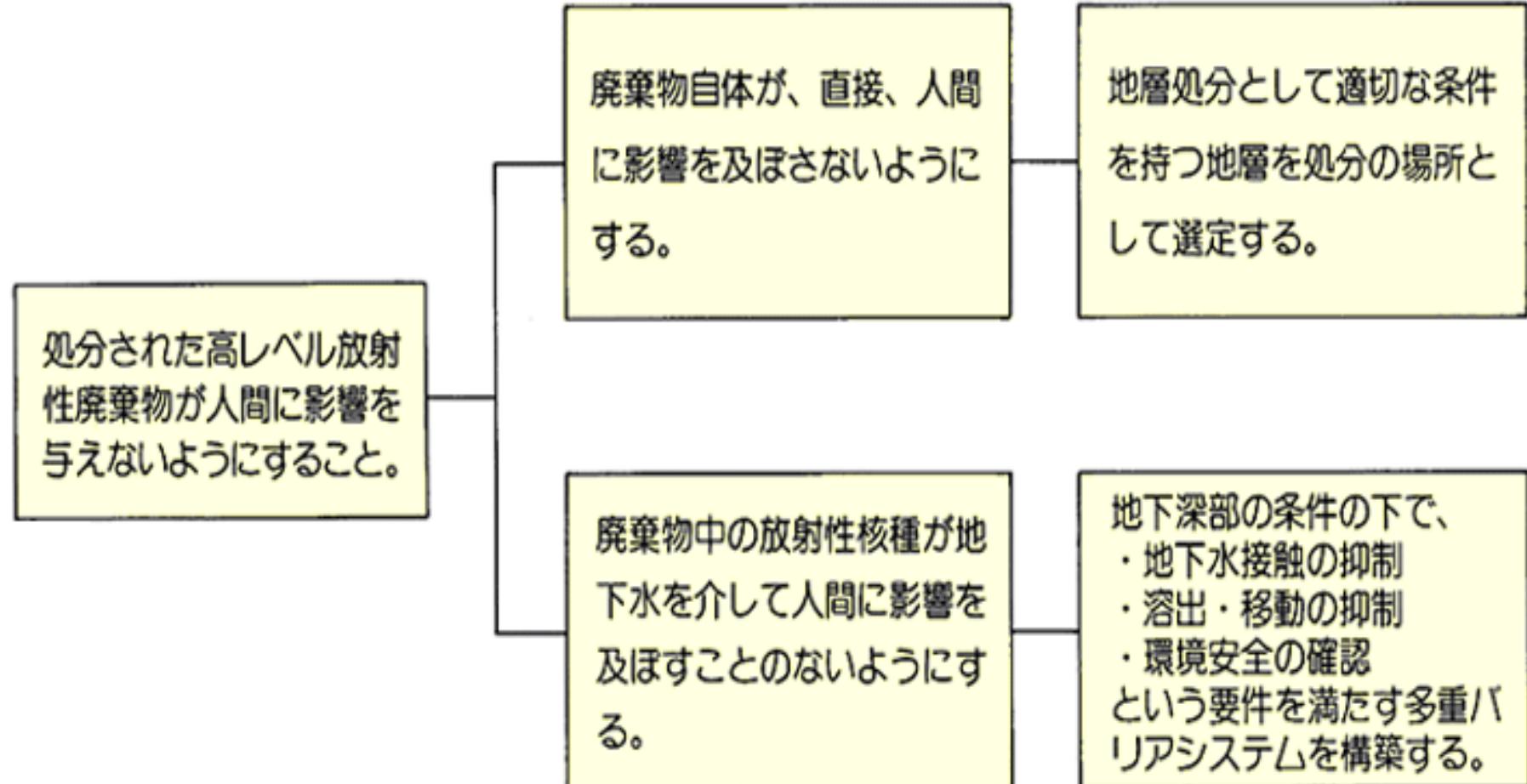
- 5段階立地方式の難航から計画推進に当たって地層処分についての国民的理解の重要性を再認識
- 国民の理解を得る重要性に鑑み、多重バリアシステムの性能を明らかにし、これに基づき長期間にわたり安全性が確保できる技術的方法を具体化
- 地層処分の技術的信頼性に関する研究開発成果を報告書にとりまとめ国が評価するにあたっての重点項目とその進め方を提示

高レベル放射性廃棄物の  
地層処分研究開発の  
重点項目とその進め方

平成元年12月19日

原 子 力 委 員 会  
放射性廃棄物対策専門部会

# 地層処分の重点項目とその進め方



## 地層処分の基本概念

## 地層処分の重点項目とその進め方(続き)

---

- 地層処分の安全性を決定づける重要な要素は人工バリアとその近傍の地層(「ニアフィールド」という。)における安全性能であり、その外の広い地層(「ファーフィールド」という。)における性能はその安全性をさらに確かなものとするという役割
  - このため、今後はファーフィールドの地層に関する研究を着実に推進しつつ、ニアフィールドの人工バリアとその近傍の地層の研究に重点的に取り組む
  - 多重バリアシステムの性能評価研究に地質環境の研究成果と人工バリア等の工学技術の開発成果を集約する研究開発アプローチ

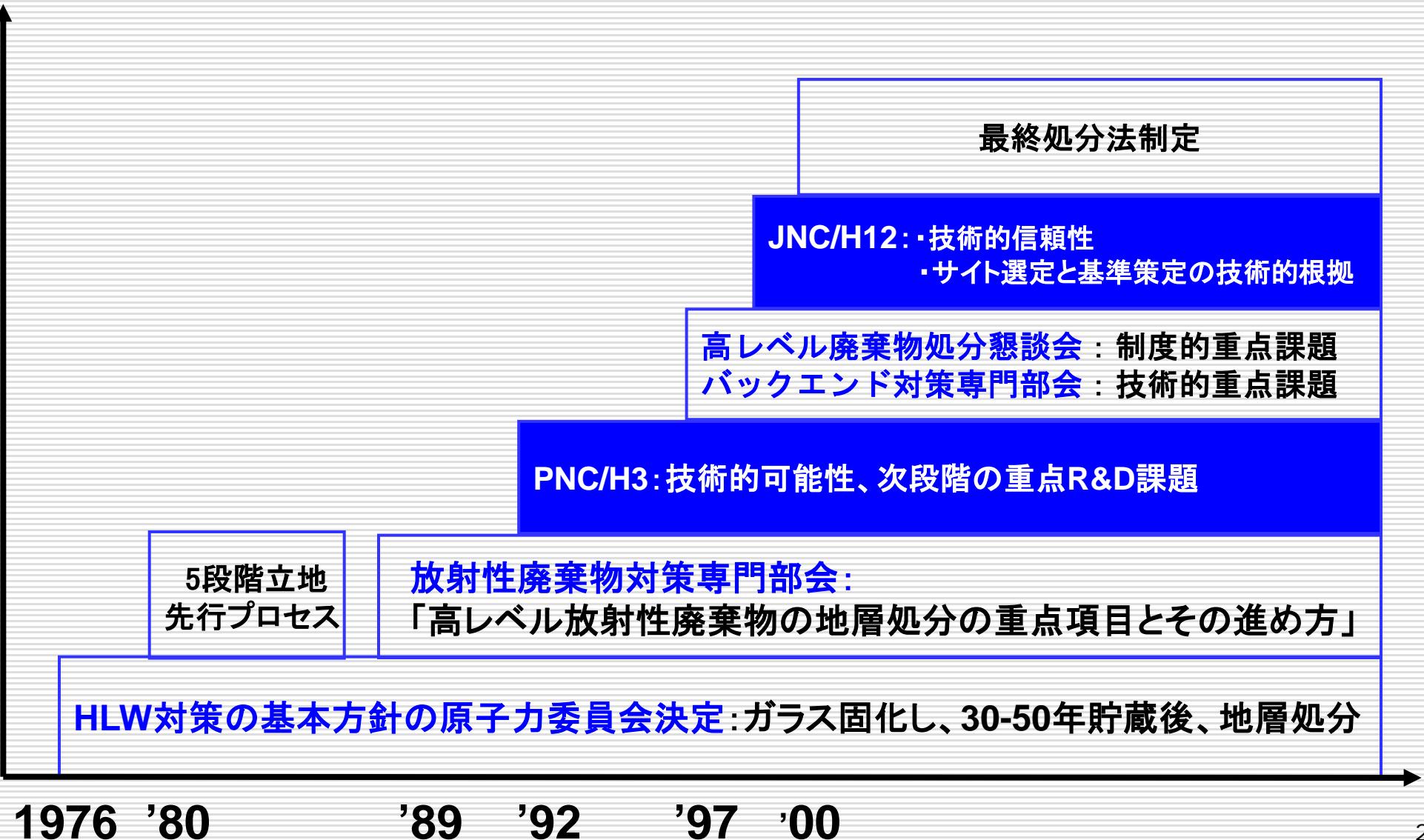
# ニアフィールド(NF)アプローチ

## □ NFアプローチ採用の背景

- 國際的に共通する地層処分計画のアプローチ
  - ✓ 地層処分サイトを選定する。(サイト選定)
  - ✓ サイトに適合する地層処分システムを開発する。(工学技術開発)
  - ✓ 地層処分システムの安全性を確認する。(性能評価)
- 日本より先行していた国は、上記三つの課題のいくつかが具体的に想定されており、それを境界条件に他の課題に取り組むというアプローチ
- いずれも決めていない日本では、サイト条件に依存する天然のバリア性能を概括的に想定しつつ、普遍性のあるシステム要素となりうる人工バリアに多くの性能をもたせる処分システムを開発目標として、NFの地質環境特性や閉じ込め機能に着目する研究アプローチを採用

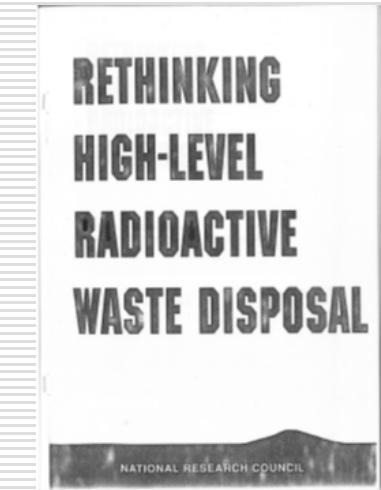
- NF性能評価研究を「管制塔」として、各課題の過不足を明らかにしつつ課題間の相互フィードバックを図ることにより、合理性の高い研究管理が可能になると期待
- NFアプローチの採用を日本が発表、各国も相次いで同調、1990年、マドリッドにてOECD/NEA協賛のNF性能評価ワークショップ開催、一躍世界の研究開発方針のトレンドに

# 研究開発段階から実施段階への進展



# 地層処分の特異的側面への配慮

- 1990年 全米科学アカデミー(NAS)「HLW処分の再考」レポート  
“Rethinking High-Level Radioactive Waste Disposal: A position Statement of the Board of Radioactive Waste Management”
- 地層処分と鉱山開発の間の重要な相違の認識
  - 鉱山開発は作業を進めながらの試行錯誤による安全確保可能、地層処分の数万年に及ぶ長期安全性は科学を適切に活用して解決すべき問題
- 将来予測に含まれる不確実性を残存させつつも安全性を保証できるような計画管理
  - 技術的な確信(Confidence)とは工学設計、地質現象のモデル化、性能評価、ナチュラルアナログ、予期されない事象への対応可能性等の組み合わせ
- 地層処分に関する公平性、信頼性についての道義的、倫理的な要求は地層処分の本質的な要素の一つ
  - 技術的な予測の限界から究極的な答えは民主社会の大衆の選択



# 超長期の安全性評価の可能性

---

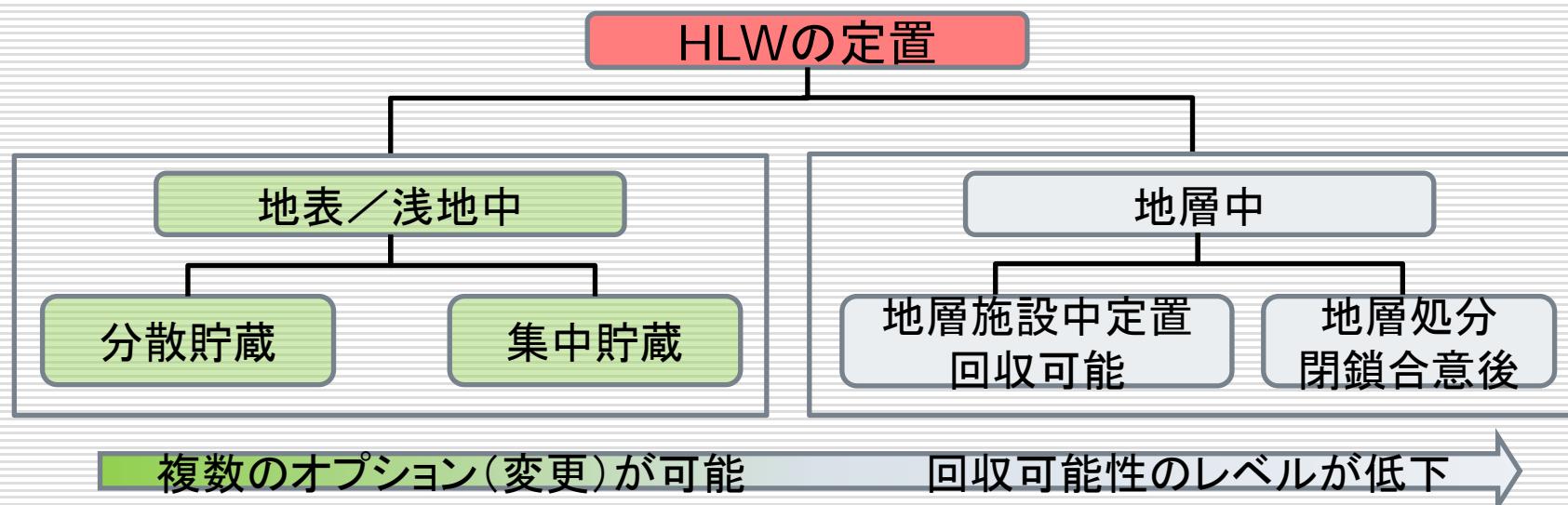
- 1991年, OECD/NEA, IAEA, CECの共同報告書：“Disposal of Radioactive Waste, Can Long-term Safety be Evaluated?”
  - 安全評価に用いられる科学的手法に関する専門家の共通認識を国際的集約意見としてとりまとめ
  - 注意深く設計された処分システムが人間及び環境に与える長期の放射線学的影響を評価する安全評価の手法は、今日得られていることを確認
  - 地層処分の場として提案された場所から得られる情報と併せて、安全評価の手法を用いることで、特定の処分システムが現在と将来の世代にとって、満足すべきレベルの安全を社会に提供できるか否かを決定する技術的な基礎を用意し得るものと考察

# 地層処分の環境・倫理的側面

- 1995年、OECD/NEA「地層処分の環境・倫理的基礎に関する集約意見」“The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes”
  - 受動的な安全確保：社会構造が遠い将来まで変わらないという想定や技術は進展し続けるという想定を置かず、制度的管理に依存しない対策を目指すべき
  - 計画の段階的実施：科学的進歩と社会的受容性を考えて、後の段階で他の選択肢が考慮される可能性を排除しない
  - 回収可能性：地層処分は将来の政策変更の可能性を完全に閉ざした非可逆的なプロセスではない
  - 世代間の負担の公平性
    - 汚染者負担原則(PPP)
    - 不当に将来世代の選択の自由を奪わない
    - 将来世代に過度の負担を課さない
    - “Rolling Present”的考え方：将来世代に選択肢を残す観点から一見倫理的とみえるが、結局、現世代はこの問題に対して何も行動を起こさないという理由で非倫理的
  - 世代内における負担の公平性
    - 政策決定プロセスへの公衆参加
    - 適切な資源配分

# 地層処分の代替オプション

- 2001年、全米科学アカデミー(NAS)レポート；  
“Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel - The Continuing Social and Technical Challenge”
  - 予期しない事態のバックアップとして、代替オプションを策定・維持すべきである。
  - 地層処分の代替オプションとなり得るものは今のところ貯蔵期間の長期化しかない。
  - 必要な経費やリスク、倫理上の問題及び両オプションが有する不確実性などを考慮して、地上貯蔵施設での貯蔵を継続するか、あるいは地層処分を段階的に実施するかを判断することになる。



# 地層処分計画の段階的開発

---

- 2003年、全米科学アカデミー(NAS)レポート；  
“ONE STEP AT A TIME”
- ユッカマウンテン計画は部分的には段階化の原則に沿うとしても、全体的アプローチとしては直線的であり、適応性があるとは言えないと指摘し、以下を提言
  - ✓ 適応性のある段階化(adaptive staging)は地層処分場開発の成功のために最も有望な手法であるとの再認識
  - ✓ 段階間の各決定ポイントにおけるアクション手順
    1. 前段階から収集した知識の分析
    2. 可逆性の明示的考慮を含む次段階の全関連オプションの考察
    3. セーフティケースの評価、更新
    4. 上記の一連のアクションに基づく次段階の決定

# 貯蔵と処分の関係

---

- 2006年, OECD/NEA「長寿命放射性廃棄物の管理における貯蔵の役割」: The Roles of Storage in the Management of Long-lived Radioactive Waste"(ROST 報告書)
- 貯蔵の役割拡大
  - 最終処分決定前に貯蔵を当面の終結点とする廃棄物管理戦略
    - オランダ/HABOG施設
  - 廃棄物管理戦略の選択肢の一つとして長期貯蔵概念を位置付け
    - フランス/バタイユ法 (核種分離・消滅処理, 回収可能性付地層処分, 地表貯蔵)
    - カナダ/核燃料廃棄物法
    - 英国/CoRWM
  - 小規模原子力国は多国間地域共同処分場を待つまでの貯蔵に关心
    - チェコ, ハンガリー, スロバニア, スイス

# ROST 報告書：長期貯蔵/貯蔵の長期化に関する動機\*(1)

---

## 1. 実際的な理由(適用可能な方策の欠如)

- 地層処分場が利用可能になるまでに長期間

## 2. 将来技術への期待

- 例えば「核種分離・変換(P&T)」技術

## 3. 将来、資源となる可能性(特に使用済燃料の場合)

## 4. 倫理・社会的配慮

- 将来世代による選択肢の排除は必ずしも倫理的とはいえない
- 取り消し不能な決定を避ける社会的・政治的傾向
- 処分概念に対するパブリック・アクセプタンス未成立

## 5. 技術及び信頼面での理由

- 地層処分システムの長期安全性、処分技術の立証に必要とされる時間確保の可能性

\* 様々なステークホルダーはそれぞれ異なった理由により長期貯蔵を支持あるいは不支持

# ROST 報告書：長期貯蔵/貯蔵の長期化に関する動機(2)

---

## 6. 経済的及びそれに関連する技術的な理由

- 支出の発生を遅らせることによる費用節減可能性
- 短期間で処分場を建設し、廃棄物の収容作業を行う方が経済的（処分場の建設前に廃棄物の蓄積が進んでいる方が有利）
- 放射性崩壊により、廃棄物をより高密度で定置可能

## 7. 政治的理由

- 立地地域の政治的な反対や一般市民の反対によって国の政策の実施に遅れが生じたり、妨げられたりする可能性

## 8. イデオロギー的な理由

- 期限を定めない貯蔵を支持することにより原子力に反対する可能性

## 9. 國際的・多国間での解決策実現を待つこと

- 廃棄物の量が比較的小ない国々の場合、他の国と共同出資して一ヵ所の処分施設を開発することにより、経済面で重要な利益が得られる可能性

## ROST 報告書：処分の代替となる永続的貯蔵の可能性

---

- 期限が設定されない貯蔵に関する計画は終結点を定義することができず、その責任を将来の世代に引き渡すことになる。
  - 1940年代後半以来提案されている、永続的な貯蔵(perpetual storage)と保護(guardianship)の概念(例えば、靈廟タイプ施設の利用)は、保護や監視が一定の期間を超えて実効性を維持できると想定することはできない。
  - 必要な決定を先延ばしにすることによって廃棄物を際限なく貯蔵し続けることは、安全性の観点から、最も多くの不確実性を伴う最悪のオプションである。
- 
- したがって貯蔵は、決して、放射性廃棄物管理にとっての終結点となることはできない。

# 回収可能性に関する議論

- 多くの国 地層処分計画が実施段階に近づくにつれ、廃棄物の回収可能性に関する見通しがステークホルダーの関心事に
- 廃棄物管理の意思決定と措置に可逆性を持たせることを法定要件とする国、あるいは処分計画に取り入れ社会的・政治的・経済的な自由度を確保しようとする国など
- 国際的にも様々なフォーラムや報告書で議論
  - 廃棄物管理戦略に組み込むべきか否か ; 例えば, The Management of Long-Lived Radioactive Waste -The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal. (OECD/NEA, 1995)
  - どの程度組み入れるべきか ; 例えば, Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste: Reflections at the International Level. (OECD/NEA, 2001).
  - 政策や安全規制に取り入れるべきか ; 例えば, RWMC Reversibility and Retrievability Project: Phase-2 (OECD/NEA, 2009).
  - 回収の技術的意味合いは ; 例えば, Geological Disposal of Radioactive Waste: Technological Implications for Retrievability. (IAEA, 2009)
  - 回収可能性のスケールは ; 例えば, Reversibility of Decisions and Retrievability of Radioactive Waste -Considerations for National Geological Disposal Program- (OECD/NEA, 2012).

# 回収可能性の賛否両側面

---

- 2001年, OECD/NEA;「回収可能性国際レベルでの反省」報告書  
“Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste: Reflections at the International Level”
- 廃棄物の回収可能性の備えを有利とする要因
  - 処分システムが予期する性能を発揮しない場合の対策
  - 資源としての利用可能性
  - 将来開発されるかも知れない新技術による廃棄物管理の利用への願望
  - 社会的な受容とリスク認識あるいは政治的要求の変化への対応
- 廃棄物の回収可能性の備えに対して考えられる反対要因
  - 操業安全性、長期的安全性に対するマイナス効果の不確実性
  - 最終的な閉鎖と密閉に関する不確実性
  - 処分場への無責任な立ち入りまたは干渉の機会の増大
  - 保障措置を強化する必要がある可能性

# 地層処分における「安定な地質環境」の意味合い\*1

## □ 日本学術会議、2012年9月報告書から

- 「…処分場の実現性を検討するにあたっては長期に安定した地層が日本に存在するかどうかについて科学的根拠の厳密な検証が必要…」
- 「日本は火山活動が活発な地域であるとともに活断層の存在など地層の安定性には不安要素…」
- 「…地質環境の安定性の評価については、こうした見解とは異なる認識を示す専門家が国内外に存在することもまた事実…」

## □ 根拠として引用されている文献の論考例(石橋ら、岩波「科学」、2001)

- 「将来10万年程度安定で地層処分に適した地質環境が広く存在ということは地震現象の科学からは疑問」
- 「地質環境の長期安定性という言葉は地震の影響を曖昧に」
- 「地質環境の安定性」に関する論点は地層処分による放射性核種の隔離と閉じ込め性能という地層処分の安全性に関する本質的課題と結びつけられてはいけなければならないが、このような論考は本質から外れていないか?

# 地層処分における「安定な地質環境」の意味合い(続き)

## □ 地層処分の要件となる安定な地質環境とは何か？

- 地下深部の地質環境(岩石と地下水から成る環境)の特性として、人間とHLWの直接接触可能性に對しては深部に至る厚い岩盤の**隔離機能**が、地下水によって放射性核種が溶かし出され地表に運ばれる可能性に對しては、還元性と低透水性を基本とする**閉じ込め機能**が自然にはたらく。
- これらは日本列島が変動帯に位置するか否かに関わりなく、**地下深部の地質環境が本来的に有する固有の特性**であり、地震現象の影響はほとんど受けない。

## □ 安定な地質環境特性を乱す要因は何か？

- **隔離性を乱す要因**は隆起浸食による緩慢な深度の減少プロセスと火山の噴火に伴う放射性核種の噴出、及び鉱物資源探査等による人間の掘削行為
- **閉じ込め性を乱す要因**として断層による地下水移行経路の短絡、熱水や深部流体の流入、海水準変動による酸化性地下水の流入があるが、これらの擾乱因子が突発する可能性のある位置は限定期的、あるいはそもそも変化が緩慢

## □ 安定な地質環境の選定とはどういうことか？

- 変動帯に位置する日本列島には限られた「安定な地質環境」と広範な「安定でない地質環境」が存在すると捉え、その中から「安定な地質環境」をサイト選定によって探し出す、ということではない。
- 本来的に安定な地下深部の地質環境に対して擾乱を与える自然事象や人間の行為の影響が小さい地域を**より好ましいとすることがサイト選定**行為である。

## □ 本来「地質環境(geological environment)」という語はPolvani報告書やNAS報告書等において、地層処分分野で意図をもって明示的に用いられるようになったもの

# 分離変換技術への期待

---

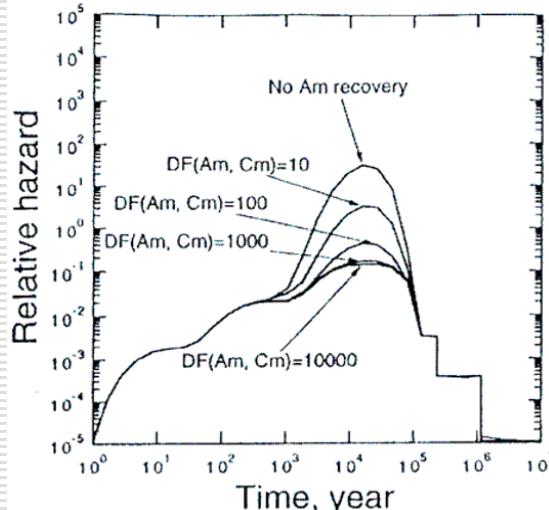
- 2008年、特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針（改訂）
  - 「国及び関係研究機関は、最終処分の負担軽減等を図るため、長寿命核種の分離変換技術の研究開発について、国際協力、国際貢献の視点等も加味するとともに、定期的な評価を行いつつ、着実に推進することが必要である。」
- 2009年、原子力委員会「分離変換技術検討会」報告書
  - 「この技術を含む将来の原子力発電技術体系に要求される性能目標を満たして実用化できれば、原子力発電に伴って発生する放射性廃棄物の処分体系を一層合理的に設計できる自由度の増大が期待される。」
- 2012年、日本学術会議：
  - 「…長寿命核種の核反応による半減期の短縮技術（核変換技術）といった、放射性廃棄物処分の安全性における確実性を向上させる研究開発を進め、処分方式に反映させることができる可能性がある。「核変換技術」を高レベル放射性廃棄物に適用して、短寿命核種に変えてから保管すれば、およそ千年間で、自然界と同じ程度の放射線レベルにまで下がり、さらに確実な管理ができるとされている。」

# 分離変換に関する伝統的議論

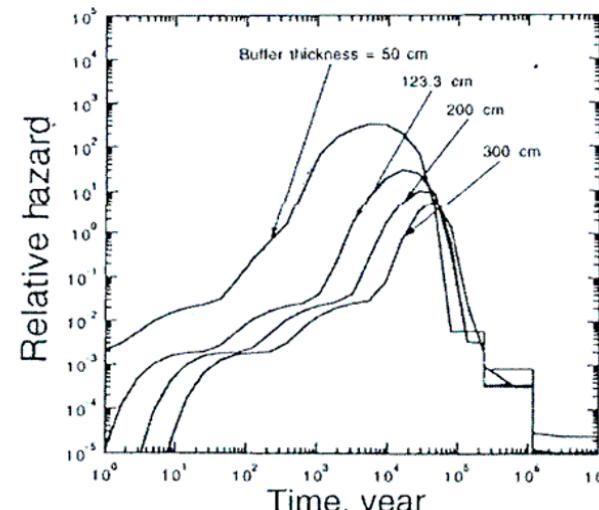
- 四半世紀前に下記見解<sup>\*1</sup>が示されているが、現在なお有効な論考
  - 安全性の支配要因は、廃棄物を地上におく場合は放射能量となり得るが、地下におく場合は、地下水への移行量（溶解度）である。
  - 放射能毒性がリスクの支配的要因ではなく放射能が生態系に達するプロセスとその確率が考慮されるべき
  - 地層処分の安全解析では、Tc-99, I-129, Cs-135等FPによる放射線量が懸念されるが、アクチニドの分離変換によっては解決不能
  - 分離変換に伴う顕在リスクと遠い将来の潜在リスクのバランスをどうみるのか
  - 新たに分離施設と変換施設が必要になり、さらに廃棄物が増加
  - 地層処分の安全性が国民レベルまで理解されていないのは、まだ、十分に伝わっていないためであり、不安全なためではない。
  - 分離変換と地層処分のトレードオフは純技術的には成り立たない。技術的に成り立たないものは結局国民を裏切ることになり、社会的受容に有利とはなりえない。

# 分離変換による地層処分の合理性向上の程度

- 地層処分による毒性は核種分離・変換によってだけでなく、地層処分システムの設計パラメータの変更によって低減され、例えば緩衝材の厚みをより厚くするだけで毒性低減が可能である<sup>\*1</sup>。
- 現在の処分場設計の冗長性は大きく、処分場設計の最適化によって合理化できる余地がある。
- このようなシステムの変更に必要なコストは、分離変更プロセスの導入に比べて極めてわずかである。



(a) Am,Cmの分離効果



(b) 緩衝材厚みの効果

# まとめ

---

- 1950年代にアメリカにおいて初めて検討されて以来、HLWあるいはSNFの最終処分の方法に関する実現性の最も高いオプションとして、世界各国において地層処分が採用されている。
- 現在までに実績のあるHLW対策技術は地表における貯蔵と岩塩層中の地層処分(米国 WIPP; 現在は貯蔵状態)である。
- 海洋底下処分と分離変換技術は、ある程度の規模で研究開発が行われた(ている)が、代替オプションとはなっていない。
- 1983年のNASレポートが、現在日本を含め各国で採用されている地層処分概念具体化に輪郭を示すこととなった。
- 日本の地層処分概念は1989年の「重点項目とその進め方」による研究開発方針に基づき具体化してきた。
- 地層処分に関する多くの公開文献にもとづけば、地層処分を放棄するような決定的(あるいは、致命的)欠陥が見いだされていることはない。
- 地下に定置した貯蔵状態から施設を閉鎖する最終的な合意が得られるまでは、回収可能性を残す、という考え方方が国際的なトレンドになりつつある。
- 結局、地層処分事業とは地下貯蔵事業であり、処分事業が終了して初めて地層処分概念が成立することになる。

## (参考)

### 地層処分に係るキーワードやコアメッセージ(抜粋)およびその原典

---

- 岩塩層への処分: NAS/プリンストン会議報告書, 1957
- 「地層による封じ込めの安定性が最も重要なバリア」: OECD/NEA/Polvani レポート, 1977
- 鉱山型地層処分概念, 工学バリア, システムアプローチ, 性能評価: IRGレポート, 1979
- 「Passive Safety と Perpetual Care」, Retrievability, 汚染者支払い原則(PPP), 将来世代への責任: OECD/NEA/Coadyレポート, 1982
- 「溶解度限界, 水理特性と地球化学特性に注目」: NAS/Pigfordレポート, 1983
- NFアプローチ: 「重点項目とその進め方」報告書, 1989
- 「責任と透明さと民主主義, この3つの言葉が廃棄物処分に関するあらゆる措置を導くものでなければならない。」: Christian Bataillie, 1990
- 「分離変換と地層処分のトレードオフは技術的に成り立たず社会的受容に有利とはなりえない。」  
T.H.Pigford, 1990
- 「放射性廃棄物処分の長期にわたる安全性は評価できるのか?」: OECD/NEA, IAEA, CECの共同報告書, 1991
- 「地層処分システムと通常の工学システムの差異, 長期安全性の一部は社会的な判断, 公平性, 信頼性に対する道義的, 倫理的な要求は地層処分の本質的要素」: NAS「地層処分の再考」レポート, 1991
- 「頑健性とは, データや仮定に含まれる不確実性に敏感であってはならないということ」:  
C.McCombie, 1991
- 世代間・世代内責任, rolling present : OECD/NEA「地層処分の環境・倫理的基礎」, 1995
- 貯蔵と処分の関係: OECD/NEA「ROST報告書」, 2006