地層処分概念
Concepts of Geological Disposal

2003年12月6日

河　村　秀　紀

「地層処分概念」に関する項目

1. 地層処分の歴史
2. さまざまな処分方策
3. 安全概念と処分概念
4. 処分技術の範囲
5. 処分場の設計
6. さまざまな岩種と処分概念
7. まとめ

地層処分の歴史 (1)

第1期：1940年代後半～1970年代前半

原子爆弾製造から発生する廃棄物
陸地での処分の技術的可能性の検討
海洋投棄と貯蔵

第2期：1970年代後半～1980年代後半

地層処分の概念
ロンドン条約による海洋投棄の禁止
地層処分に向けての本格的な取り組み

第3期：1990年代前半～現在

地層処分実現に向けて (サイト選定、設計、建設、操業)
倫理的な議論と段階的な進め方

地層処分の歴史 (2)

第1期：1940年代後半～1970年代前半

世界と日本

1957年：米国National Research Council:NRC
"The Disposal of Radioactive Waste on Land"
原子力エネルギー委員会の要請
・高い放射能レベルの廃棄物の陸地処分 (岩塩層) の可能性を示唆
・様々なレベルの廃棄物の処理、保管、管理方法

1962年：日本原子力委員会廃棄物処理専門部会：中間報告
・堅固な容器に封入して深海に投棄を基本
・人の立ち入らないかつ漏洩の恐れのない土中に埋設
(海外で検討されている地中への処分概念は、地震の多く国土が狭いわが国では困難との判断)

地層処分の歴史 (3)

第1期：1960年代の米国での廃棄物処分の実態

地層処分の歴史 (4)

第2期：1970年代後半～1990年代前半

世界と日本

1972年：International Maritime Organization: IMO ”Convention on the Prevention of Marine Pollution by dumping of Waste and other Matter” December 27, 1972, London（ロンドン条約）
・廃棄物の海洋投棄の禁止
(大陸棚、海洋低下処分については言及せず)

1973年：原子力委員会環境・安全専門部会放射性固化体廃棄物分化会
・高いレベルの放射性廃棄物は、人造施設での保管
・国際的な動き (陸地内処分等) に注目し、研究開発を進める

1976年：原子力委員会、放射性廃棄物対策専門部会
・再処理から発生する高レベル廃棄物は一時貯蔵した後地層処分
・地層処分に関する調査、研究開発を推進

地層処分の歴史（5）

世界と日本

1977年：OECD/NEA “Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programme”（放射性廃棄物の管理に対する目的、概念、方策）

・地層処分が最も信頼性の高い方策であることを示唆
・ある条件が満足されれば全ての岩種が処分の対象になり得る
・多重バリアの概念の提示
・長期性能評価のあり方を提言

1980年：原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会

・日本における地層処分の研究開発手順、責任分担

1981年：IAEA “Underground Disposal of Radioactive Waste, Basic Guidance” Safety Series No.54

・地層処分における安全性評価のあり方
・安全指標、性能評価の概念

地層処分の歴史 (6)

世界の動き

1983年：米国NRC “A study of the Isolation System for Geologic Disposal of Radioactive Wastes: Waste Isolation System Panel Report”
・地層処分 (岩塩、玄武岩、花崗岩、凝灰岩) の成立性比較
・性能評価の基本的考え方と規準

1983年：スウェーデン：SKB、”KBS-3 Report”
1977年の「条件法：原子力発電所の許認可には、HLW処分の安全性の保証を条件とする」に対応した報告書
・結晶質岩を対象に使用済み燃料の地層処分の技術的実現性を明示
・ 処分事業の一連の流れ

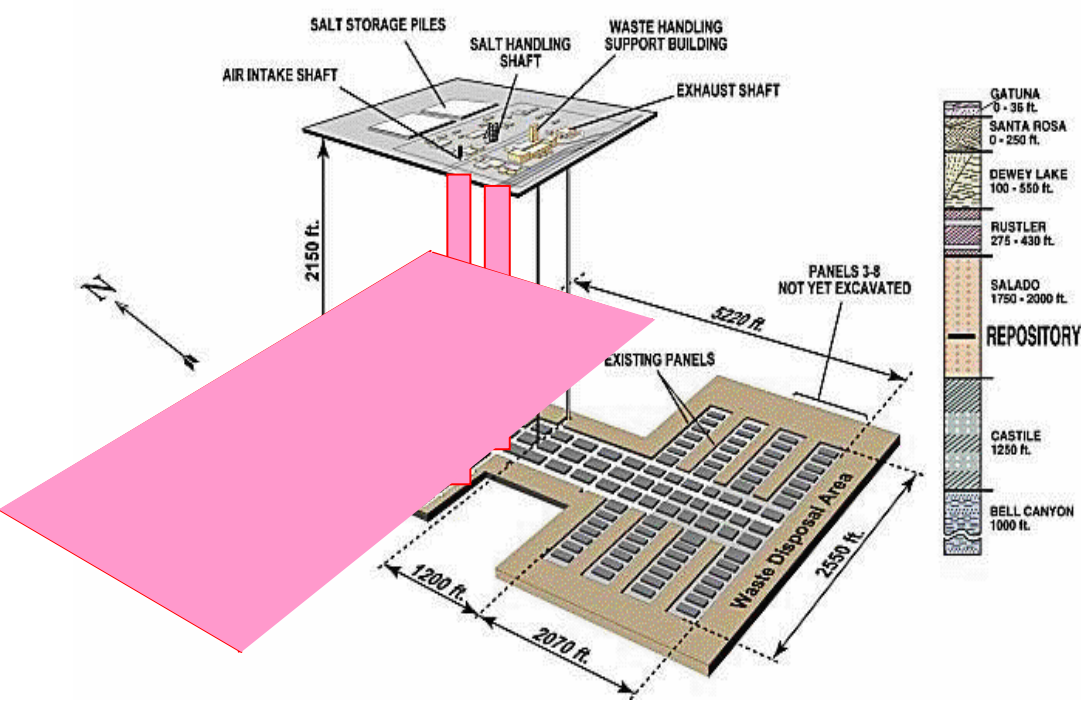
1985年：スイス：Nagra、”Projekt Gewahr 1985”
1977年の連邦政府による「法律：原子力発電所の新規の許認可あるいは延長には、放射性廃棄物の安全な処分の保証を条件とする」
・全ての放射性廃棄物を対象とした処分の技術的実現性
・明確な安全評価手法の提示

1989年：IAEA、”Safety Principles and Technical Criteria, Safety Series No. 99”
・放射性廃棄物処分の安全原則 (倫理的側面と放射線安全性)
・技術基準：サイト選定、設計、品質保証、建設

地層処分の歴史 (7)

- 米国ニューメキシコ州南東部
- 世界で初めて操業開始された地層処分場
- 深度約655m、岩塩層
- 軍事活動から生じたTRU廃棄物の処分

WIPP Facility and Stratigraphic Sequence



Waste Isolation Pilot Plant 全景

：日本建設会社建設箇所　1983-1985

- 立坑(650m)2本
- 実験エリア水平坑道

地層処分の歴史（8）

第３期：1990年代～現在

日　本　（世界の動きは別途紹介される）

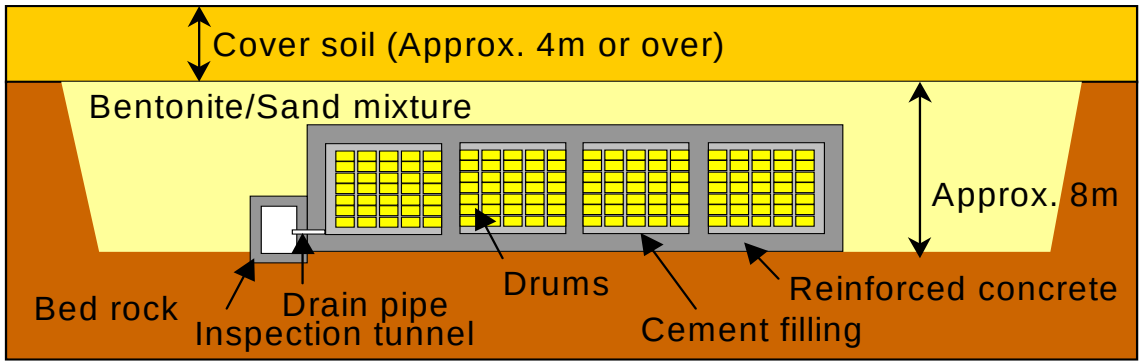
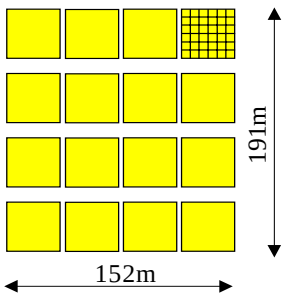
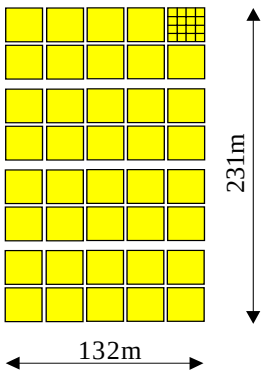
1992年：動燃事業団、「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書：第１次取りまとめ」
- 地層処分の技術的実現性の見通し
- これまでの研究開発成果のとりまとめと今後の方向性

1994年：原子力委員会「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」
- 30年から50年間冷却のための貯蔵
- 地下の深い地層中に処分
- 2000年を目処に実施主体の設立

1999年：サイクル機構、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性：第２次取りまとめ」
- 地層処分に係わる基盤的技術の確立
- サイト選定および基準策定への拠り所の明示

地層処分の歴史 (9)

日本の六ヶ所におけるてLLW埋設処分概念

	2nd phase facility (R2)	1st phase facility (R1)
Vertical section of block		
Plan	 16 blocks	 40 blocks
Capacity	ca.13,000 drums / block (200,000 drums)	ca.5,000 drums / block (200,000 drums)

さまざまな処分方策 (1)

放射性廃棄物の対策オプション

放射性廃棄物をどのように取り扱うかについては多くの議論がなされてきた。その中で国際的にコンセンサスが得られている考え方は以下にまとめることができる。

放射性廃棄物の処分は、原子力エネルギーを利用した世代の責任で、長期にわたり人間の健康とその環境を保護し、同時に将来世代への負担を最小限にする方法を選び、社会的および経済的要件を考慮して実施しなければならない。OECD/NEA (1982): Disposal of Radioactive Waste

①長期貯蔵管理

②核分離・変換処理 (＋処分)

③処分

さまざまな処分方策 (2)

放射性廃棄物の処分オプション

①宇宙空間への放出処分

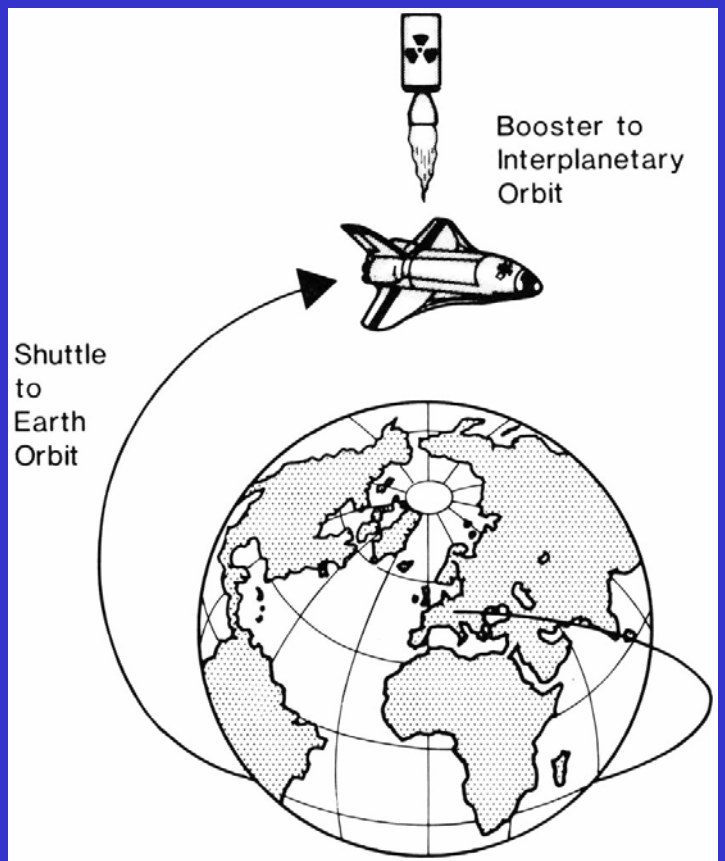
②大陸氷床下への埋設処分

③海洋底下への埋設処分

④地層処分

さまざまな処分方策 (3)

①宇宙空間への放出



米国NASAで検討

地球と金星の空間軌道に放出、太陽熱等で無害化

・打ち上げ時の事故の確率：6/100：1986年のNASAチャレンジャー事故のイメージ

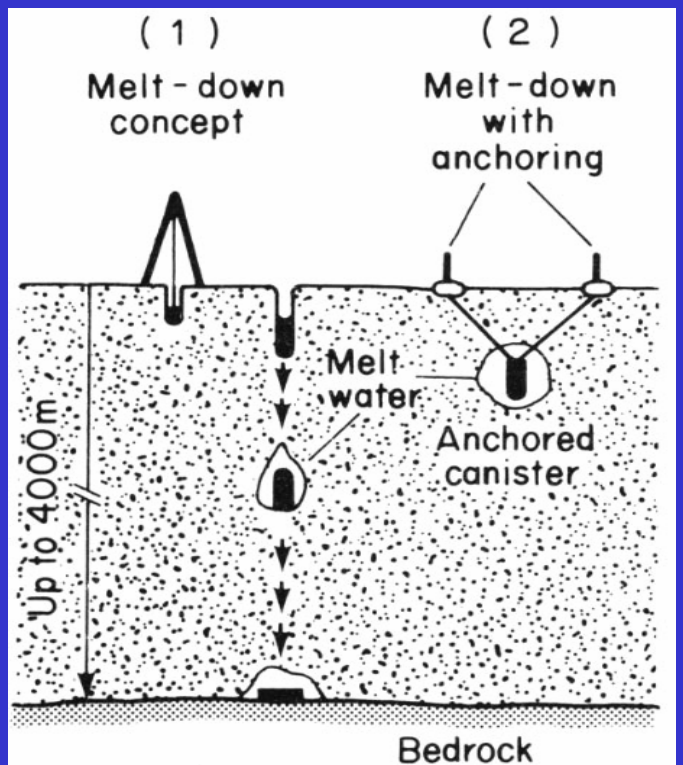
・コスト高

・特定の国の宇宙利用に対する社会的・政治的な制約

N. Chapman, I.McKinley,"The Geological Disposal of Nuclear Waste" 1987

さまざまな処分方策 (4)

②大陸氷床下への埋設



米国DOE等で検討

廃棄物自信の放熱を利用して氷床を貫通し、大陸上部に定置

・氷床の長期安定性の保証

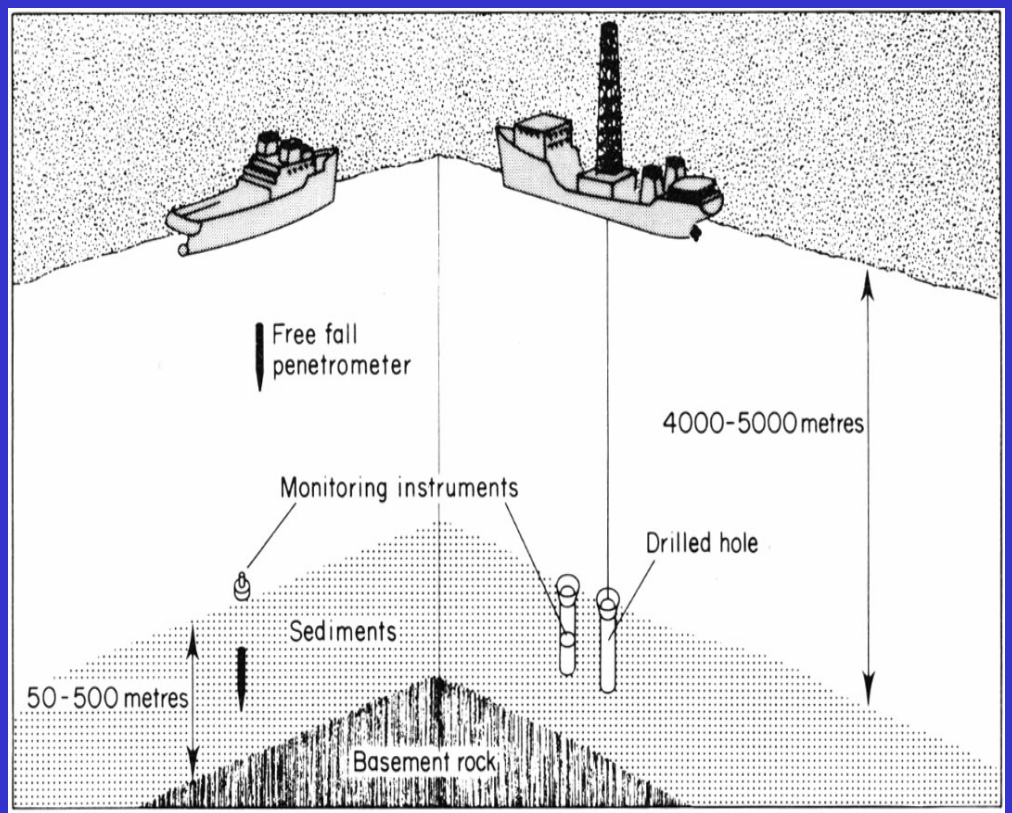
・南極を利用する場合、国際条約に違反

・埋設状態の確認が困難

N. Chapman, I.McKinley,"The Geological Disposal of Nuclear Waste" 1987

さまざまな処分方策 (4)

③海洋底下への埋設



N. Chapman, I.McKinley,"The Geological Disposal of Nuclear Waste" 1987

各国で検討

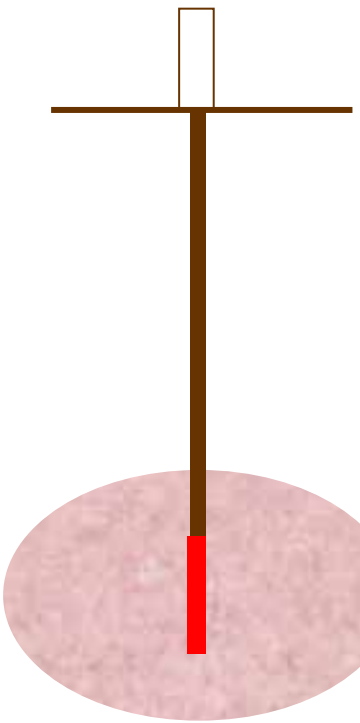
深海および大陸棚等の海洋底下に堆積する層の中に廃棄体を埋設処分

- ロンドン条約への対応
- 各国での大陸棚利用への制約
- 埋設状態の確認の困難さ
- 海を汚すというイメージへの対応

さまざまな処分方策 (5)

④地層処分

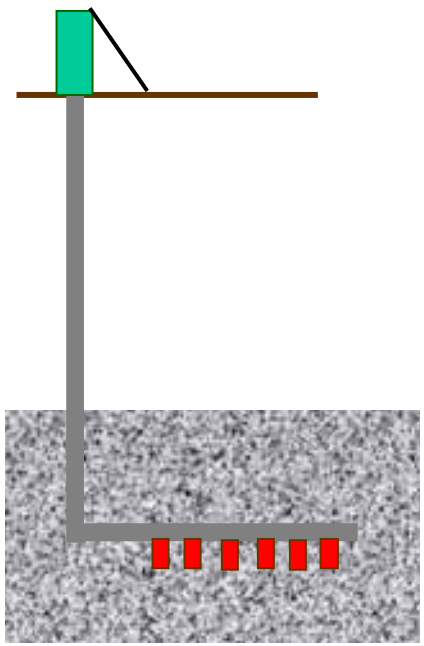
深孔処分概念



地下深部(数Km)の処分に適した地層までボーリングを施工し、廃棄物を定置

- ボーリング技術
- 地層の安定性
- 定置方法
- 品質確認方法
- 再取りだし性

処分坑道処分概念



地下深部 (数百m以深) の処分に適した地層中に坑道を掘削して廃棄物を処分

- 坑道掘削技術
- 地層の安定性
- 操業・閉鎖技術
- 閉鎖の時期

安全概念と処分概念 (1)

処分の基本的考え方

長期に毒性が持続する放射性廃棄物の取り扱い

A:長期の封じ込め (閉じ込め)：containment, confinement

廃棄物を閉じ込めて、許容されるレベルまで核種の自然崩壊を期待→数十万年以上の期間の確実な閉じ込めの可能性

B:希釈と分散による毒性低減：dilution, dispersion

廃棄物を少しずつ放出し、希釈と分散で許容されるレベルまで低減→放出の制限および希釈・分散効果の信頼性

廃棄物の特性に対応し、AとBを組合せるシステムが概念として望ましい

安全概念と処分概念（2）

放射性廃棄物の種類と特性に対応した処分概念

低レベル放射性廃棄物と高レベル放射性廃棄物

管理型処分：institutional control

短寿命でレベルの低い廃棄物はその毒性が受け入れられるレベルに減衰するまで、制度的管理で安全性を担保し、その間安全性を損なう事象が発生した場合は修復等を施す→低レベル放射性廃棄物の埋設処分概念

隔離型処分：isolation

長期に毒性を有する廃棄物は、制度的管理に依存せず、例えば深部地層中に処分することで、人間とその環境から隔離することで安全性を担保する。→高レベル放射性廃棄物の概念

安全概念と処分概念（3）

処分概念構築の「本質的な要件：倫理的、技術的、＋受け入れ」

a. 極めて長期にわたり（制度的管理に依存せず）、人間環境からの隔離（人工的、自然界）が可能であること

b. 完全な封じ込め、少量の放出と希釈・分散が期待できるシステム、あるいはその組み合わせが構築できること

c. 人間活動あるいは自然界の破壊的な災害から隔離できること

d. 方策が技術的に実現可能であり、経済的にも合理的に実現できること

e. 取られた方策がモデル化でき定量的に評価できること

f. 将来世代への負担を最小限とすることができること（倫理的）

g. 我々の世代で解決できること（倫理的）

h. 取られた方策が社会的・政治的にも受け入れられること（社会的）

安全概念と処分概念 (4)

地層処分概念の選択

各概念の「基本的要件」への対応

	a.	b.	c.	d.	e.	f.	g.	h.
長期貯蔵 (半永久)								
核分離・消滅 (＋処分)								
宇宙への放出								
氷床への埋設								
海洋底下処分								
地層処分								

安全概念と処分概念 (5)

安全概念→多重バリアシステム概念

多重バリアシステム

Multi Barrier System

人工バリアシステム

Engineered Barrier System: EBS

＋

天然バリア

Natural Barrier

- 廃棄物の閉じ込め
- 地下水浸入抑制
- 核種の放出抑制

- 長期の安定性
- 核種の移行抑制
- 分散・希釈

安全概念と処分概念（6）

地層処分における安全概念構成要素

- 地下水浸透の抑制
- 核種の緩慢な溶出
- 廃棄体容器からの緩慢な放出
- 地下水の長い移動時間
- 岩盤の吸着による核種移行の遅延
- 岩盤内での分散
- 希釈

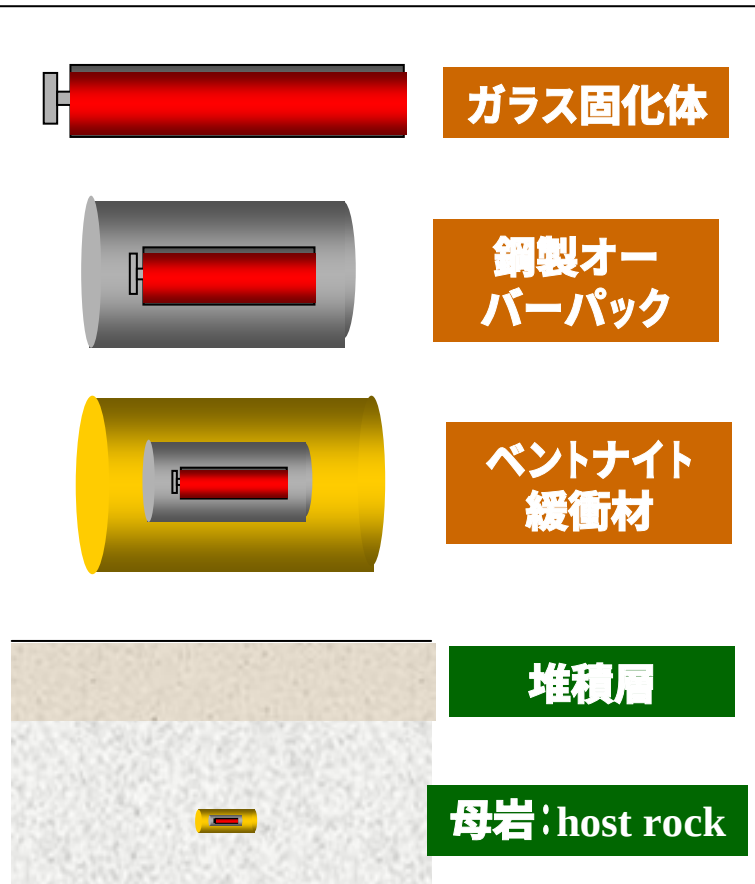
USA NRC “A Study of the Isolation System for Geologic Disposal of Radioactive Wastes” 1983

安全概念と処分概念 (7)

多重バリアシステム概念の具現化

人工バリア

天然バリア



スイスNagraの多重バリア概念：Projekt Gewahr 1985

溶出の抑制

地下水浸入の抑制

好ましい化学環境の維持

地下水の浸入の抑制

核種移行の遅延 (拡散支配)

コロイドフィルター

長期の安定した地質環境

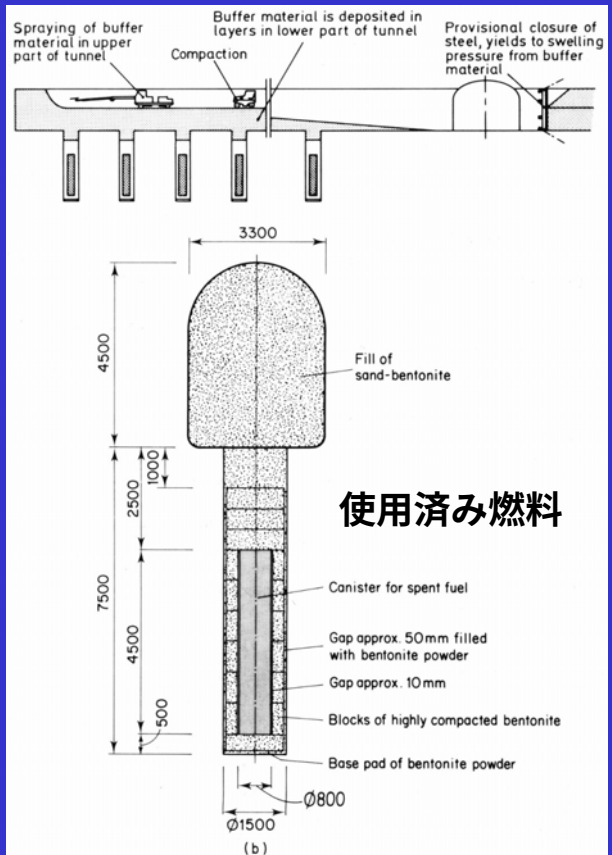
地下水の移行時間

核種の移行遅延 (吸着、拡散)

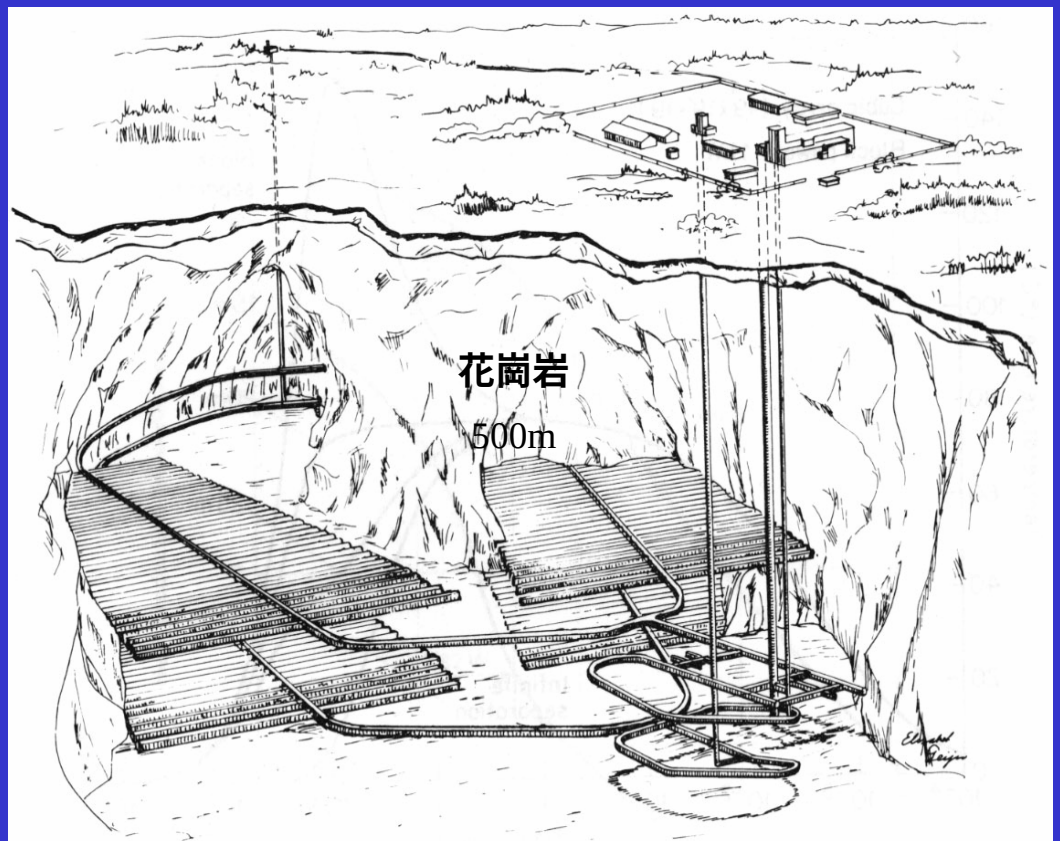
希釈・分散

安全概念と処分概念 (8)

処分場の概念 (スウェーデンKBS-3)



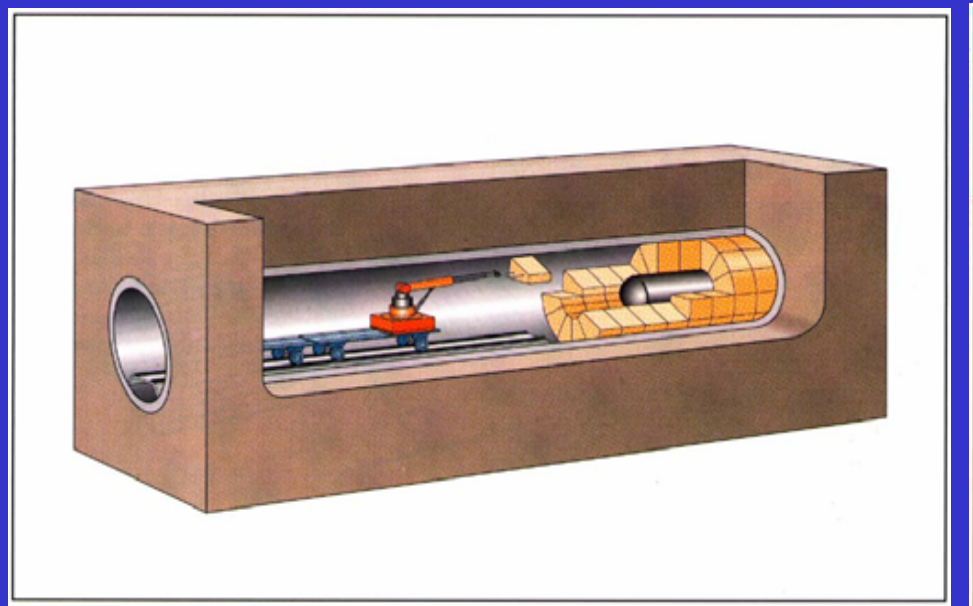
処分坑道縦置きタイプ



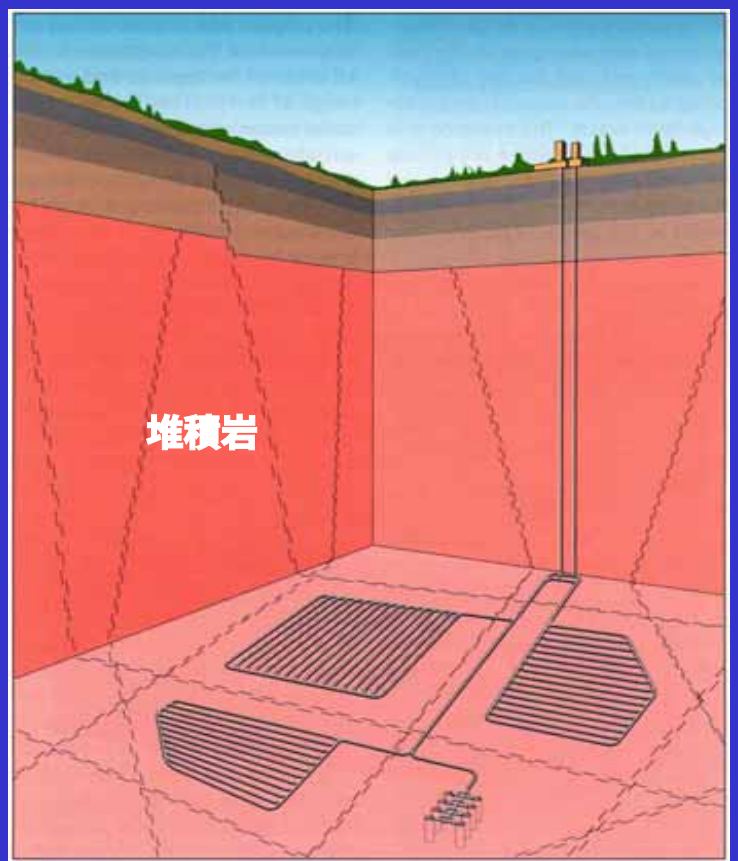
処分場：多層パネル配置

安全概念と処分概念 (9)

処分場の概念 (スイス：堆積岩　1987)



処分坑道横置きタイプ



処分場：パネル平面配置

処分技術とその範囲（1）

地層処分：人間とその環境からの長期の隔離、将来世代への負担の最小化、現状技術での実現性

安全概念：初期の確実な閉じ込め、長期間の少量の放出と自然界の分散と希釈

多重バリアシステム：人工バリアシステム＋天然バリア

①地質環境の調査・評価技術

②処分場の設計・建設・操業・閉鎖技術

③環境影響評価・確認技術

④処分に係わる技術の性能確認・実証技術

⑤品質保証・検査技術

⑥安全管理・検査技術

処分技術とその範囲（2）

①地質環境の調査・評価技術

処分での「地質環境」とは
「地質・地質構造」、「水理地質」
「地球化学」、「力学」特性をいう

調査の対象：処分地選定のための考慮事項（原環機構）
避けるべき法定要件（火山、断層、隆起・侵食等）
地質環境特性（場の理解）、将来予測へのデータ、
設計・安全評価のためのデータ

文献調査	地表からの調査	地下での調査
・過去の記録	・物理探査	・ボーリング調査
・GPSデータ	・ボーリング調査	・各種原位置試験（熱、水理、物質移動、岩盤力学等）
・研究調査資料	・トレンチ調査	
・空中写真等	・室内試験	

調　査 → 分　析 → 評　価

処分技術とその範囲（3）

②処分場の設計・建設・操業・閉鎖

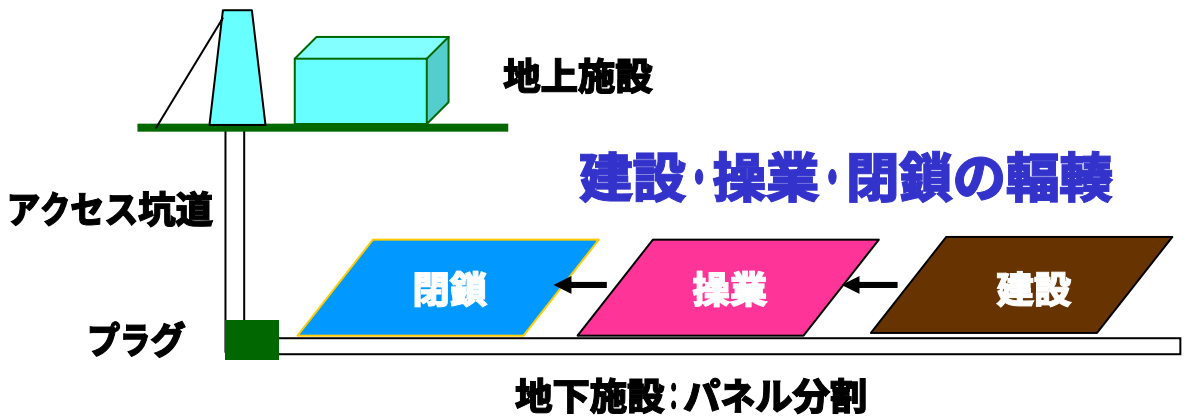
設　計
- 人工バリアの設計
- 地上施設の設計
- 地下施設の設計
- ハンドリング設備設計
- 建設設備設計

建　設
- 造成
- 地上施設
- 地下施設
- ハンドリング設備
- 排水・換気設備

操　業
- 廃棄体検査・封入
- 地下への搬送
- 地下での搬送
- 定置
- モニタリング

閉　鎖
- 坑道埋め戻し
- プラグ設置
- アクセス坑道埋め戻し
- 地表施設の廃止

日本での前提
- ガラス固化体
- 4万本
- 5本／日



処分技術とその範囲（4）

③環境影響評価・確認技術

・事前対策
・モニタリング
・修復・復元

環境保全対策

処分事業の展開が周辺の環境に及ぼす影響への対策

・大気
・水（地表水、地下水）
・土壌
・動物・植物生態系
・景観・社会環境
・産業・一般廃棄物
・現状回復・環境修復

放射線安全対策

ガラス固化体の定置までのハンドリング時の放射線影響の防護

（主として操業時）

・ガラス固化体からの放射線被曝・遮蔽

・搬送時ガラス固化体の転倒・落下

・初期欠陥による早期の漏出

作業安全対策

自然事象や人的要因などにより、作業従事者の危険への対策

（建設・操業・閉鎖時）

・酸欠
・落盤
・停電
・火災
・出水・水没

処分技術とその範囲（5）

その他処分事業に係わる技術

輸送技術

ガラス固化体のほか処分に必要な材料の処分場までの安全輸送に係わる技術

品質保証技術

調査・評価・設計・建設・操業・閉鎖までの一連の活動に対する品質管理・保証技術

再取り出し技術

必要に応じて埋設した廃棄物を取り出すための技術（発想は使用済み燃料の再利用から）

処分技術実証技術

処分に用いられる技術を対象に、性能・品質・安全確認のための実証試験技術（判断指標）

モニタリング技術

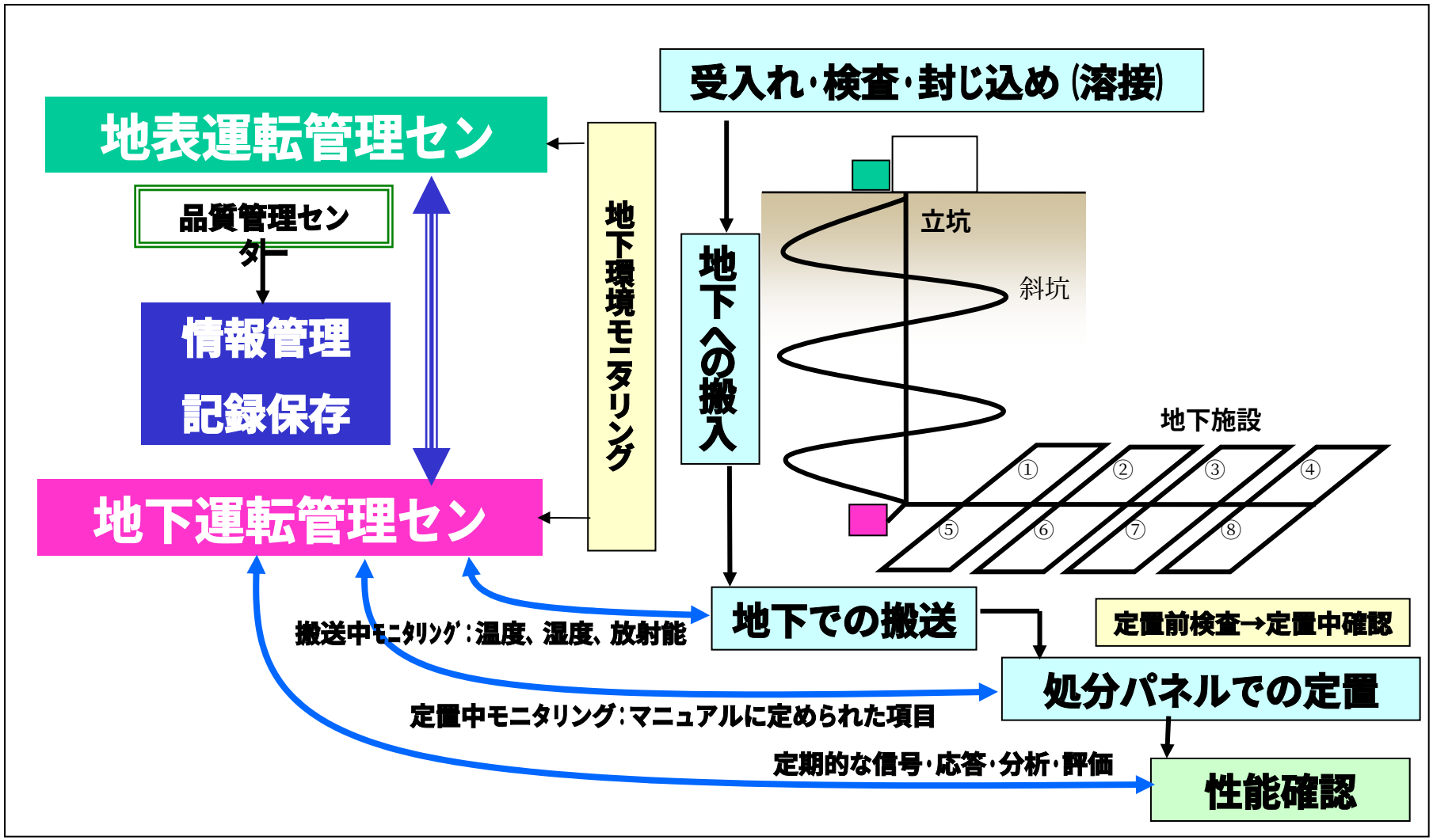
環境影響、性能確認、安全確認のための監視、検査する技術。対応、修復技術も含む

記録保存技術

処分事業に係わる記録を長期にわたり確実に保存する技術（1000年以上）

処分技術とその範囲（6）

遠隔操作をイメージした品質管理システム

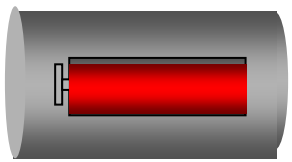


5．処分場の設計（1）

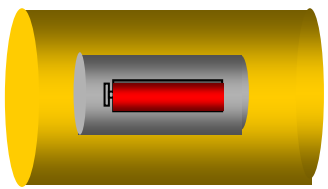
人工バリアシステムの設計

人工バリアに求められる機能

- 廃棄物の閉じ込め
- 地下水浸入抑制
- 核種の放出抑制



鋼製オーバーパック



ベントナイト緩衝材

- 銅＋鋼
- チタン＋鋼
- セラミック

- 配合
100％
70％
50％

材料選定 → 仕様の設計 → 初期性能確認

長期の健全性評価

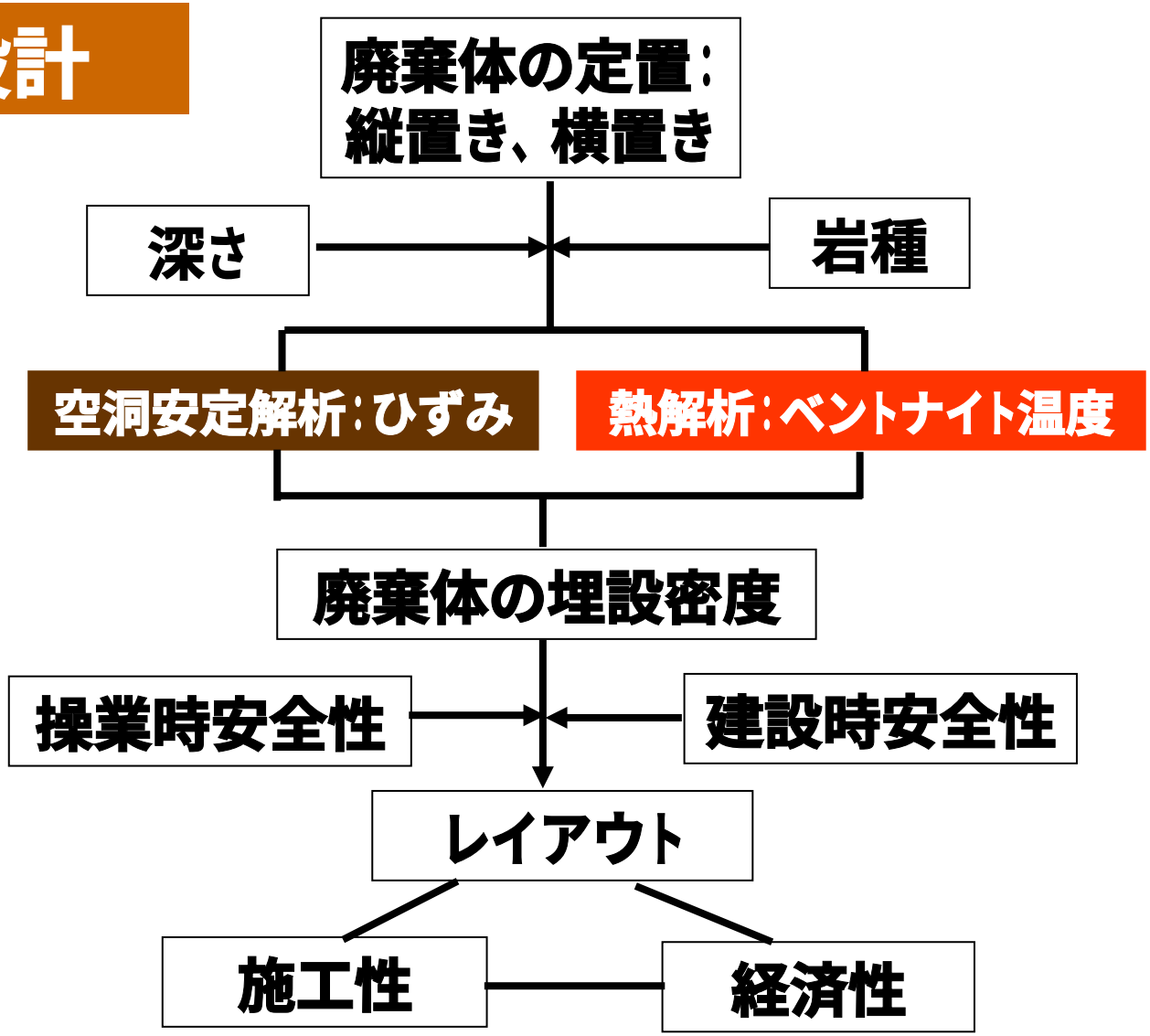
何年間閉じ込めを期待するか：1000年、1万年、10万年？

5．処分場の設計（2）

処分場の設計

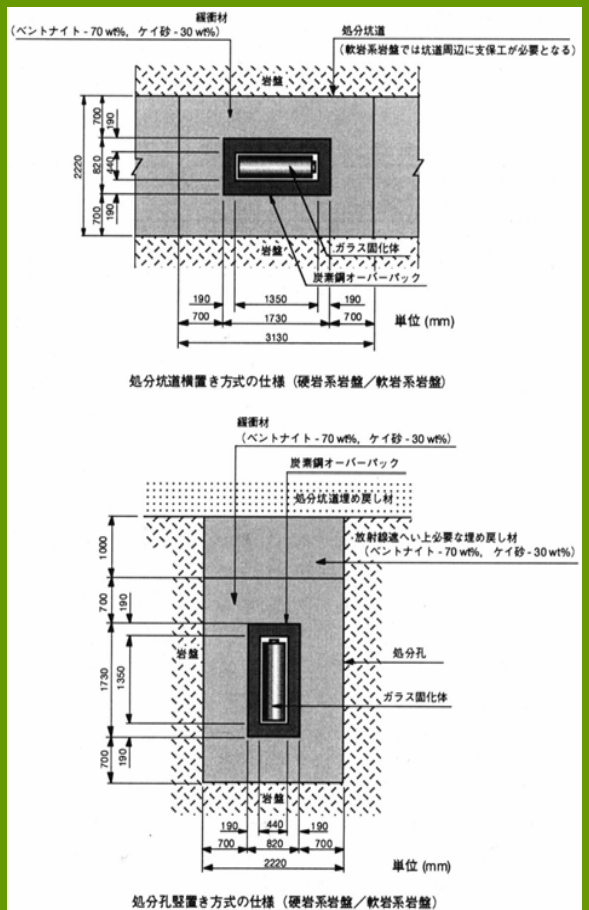
処分場設計に求められる要件

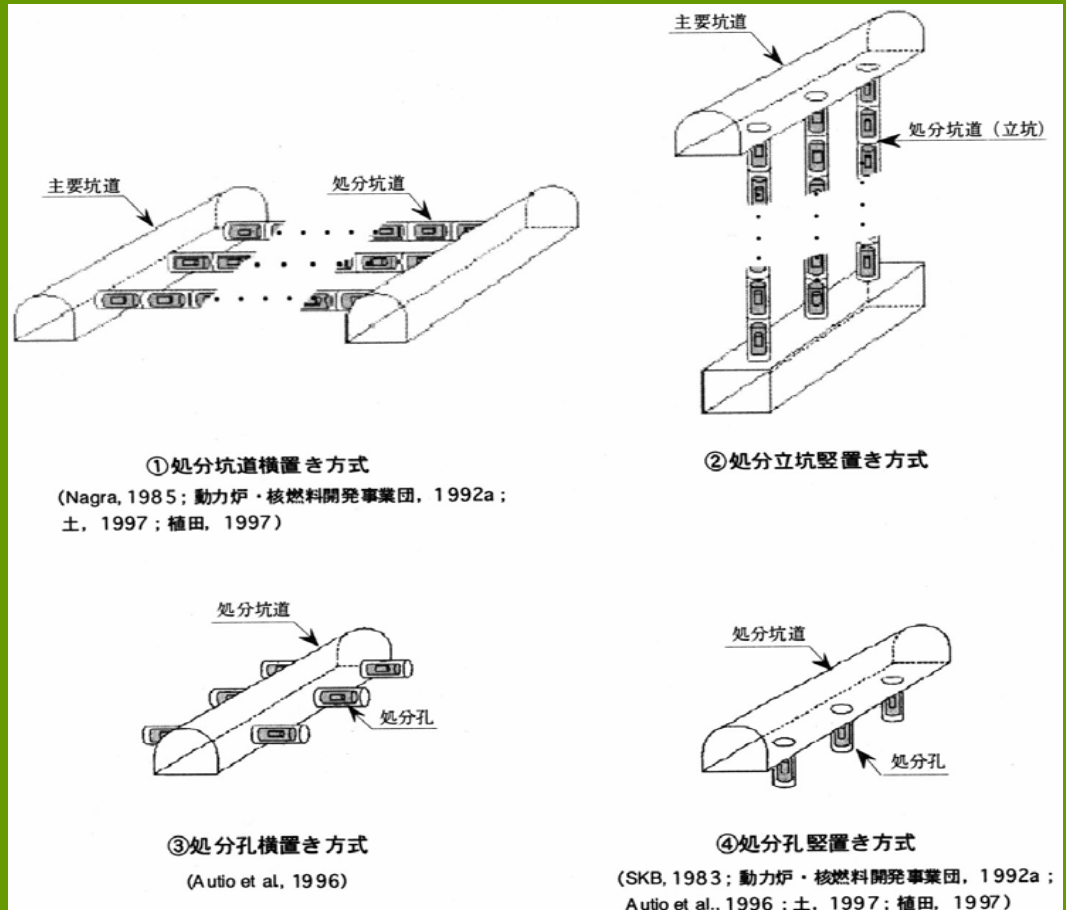
- 作業安全性と品質
- 合理的な費用
- 現状技術での実現性



5．処分場の設計（3）

廃棄体定置方式：横置き、縦置き

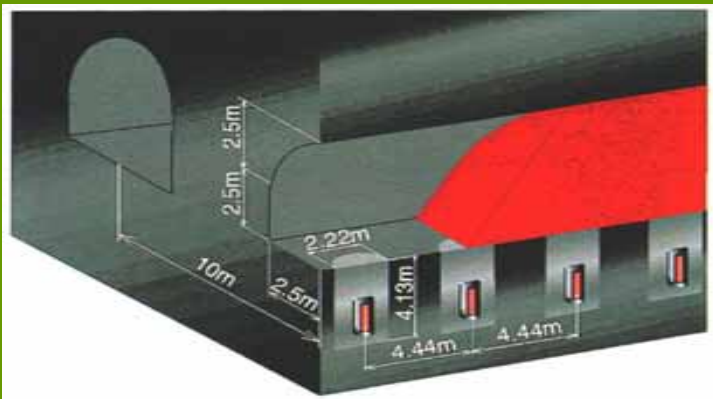




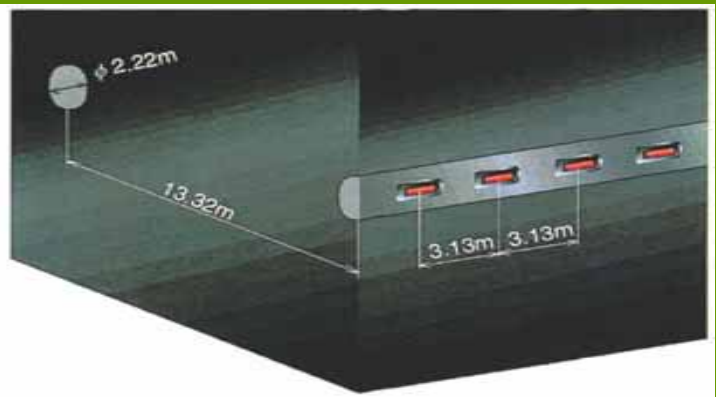
サイクル機構、「第2次取りまとめ　第II分冊」、1999年

5．処分場の設計（4）

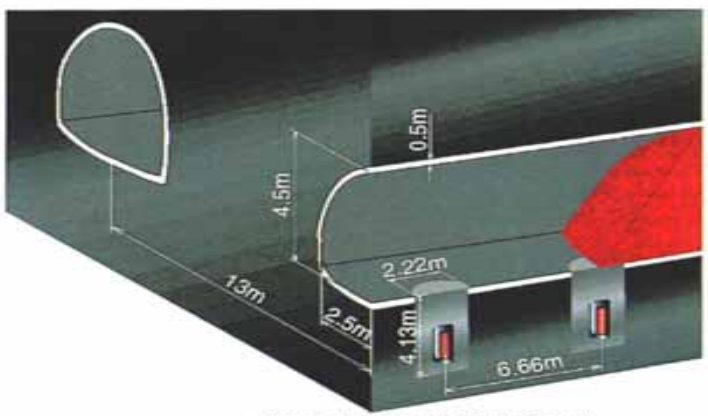
廃棄体埋設密度→坑道配置設計



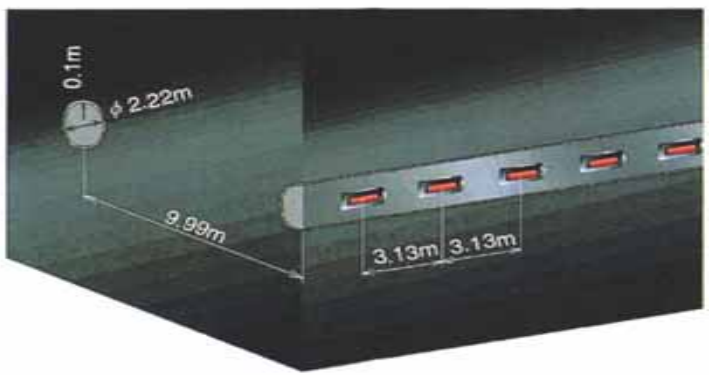
(a)処分孔竪置き方式（硬岩系岩盤）



(b)処分坑道横置き方式（硬岩系岩盤）



(c)処分孔竪置き方式（軟岩系岩盤）



(d)処分坑道横置き方式（軟岩系岩盤）

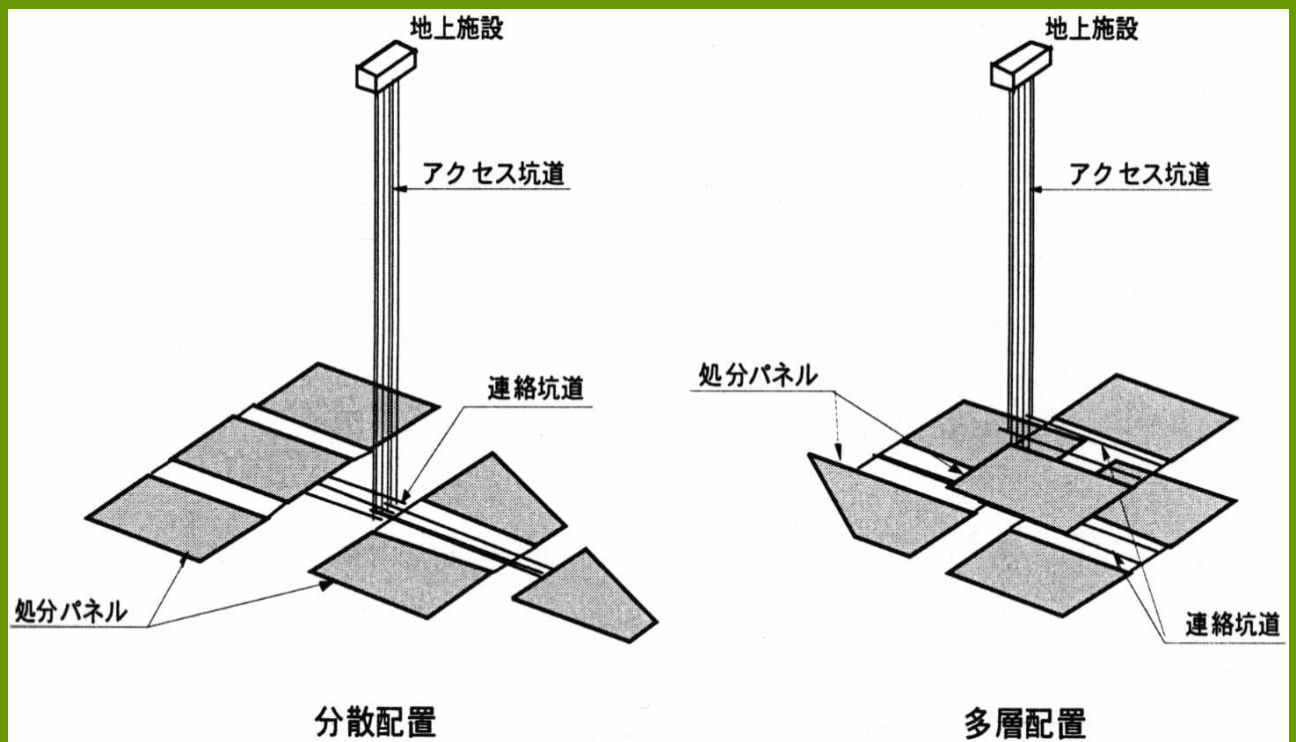
サイクル機構、「第2次取りまとめ　第II分冊」、1999年

5．処分場の設計（5）

レイアウト設計

→必要面積

①岩体の大きさ
②避けるべき断層・破砕帯
③地下水の流れの方向
④操業等の手順



5. ま と め (1)

わが国の放射性廃棄物処分計画の現状

LLW (発電所) :日本原燃が六ヶ所で埋設処分事業を実施中

高βγ (廃炉等) :日本原燃が六ヶ所で埋設処分計画中

TRU (再処理等) :電力で概念を含めて検討中

HLW (再処理) :原環機構が概要調査地区の公募中

MRI (医療、研究、産業) :LANDECで計画中

5. まとめ (2)

HLW:研究段階から実践、合意形成段階へ

1999年

サイクル機構第2次取りまとめ

地下研究施設の建設

2002年～

研究開発

処分技術の実証

2000年

原環機構の設立

2006年？「調査地区の公募」

文献調査

概要調査地区の選定

現地調査

2012年？精密調査地区の選定

現地調査

2025年？最終処分地の選定

5. ま と め (3)

HLW:合意形成へのアプローチ

段階的な進め方：Adaptive Staging Approach

我々の世代が全てを決定するのではなく、将来世代意思決定できる機会を処分計画の中に準備しておく

具体的な対応策例

- 各段階における関係者による意思決定の機会
- 処分事業での対応：管理期間の設置
- 処分概念オプションでの対応：性能確認スペース
- 処分計画中での後戻りの可能性：Reversibility
- 処分段階での再取り出し性：Retrievability