

処分技術に関する今後の研究開発の展開

戦略調査セミナー

平成19年4月10日

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門

梅木 博之

内 容

- 高レベル放射性廃棄物地層処分の最適化
～ 現行の軽水炉サイクルに対する地層処分技術の研究開発戦略
- 総合的放射性廃棄物管理システムの開発
～ 将来の燃料サイクルを考慮した種々の放射性廃棄物処分への対応のための拡張
- サイクルシステムの総合的最適化
～ サイクルシステムへのフィードバック

高レベル放射性廃棄物地層処分計画

研究開発の段階（1976 – 1999）

- 幅広い地質環境を対象とした技術的成立性の提示を目的とした研究開発
- 技術的基盤を提供する包括的報告書の段階的な取りまとめ
 - 第1次取りまとめ（H3；1992）
 - 第2次取りまとめ（H12；1999）

事業の段階（2000 - ）

- “特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律”（2000年6月）
 - 段階的なサイト選定（文献調査地区，概要調査地区，精密調査地区）
 - 処分場の操業開始（2033~2037頃）
- 実施主体（原子力発電環境整備機構）の設立（2000年10月）
 - 高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募（2002年12月～）
- 政策指針（原子力委員会）
 - 研究開発：関係機関（国，実施主体，研究開発機関）の役割分担再構
- 安全規制策定のための検討（原子力安全委員会／原子力安全・保安院）

事業段階における研究開発の役割

- 段階的なアプローチと意思決定

- 三段階のサイト選定→許認可→建設→操業→閉鎖…→

- 意思決定における信頼構築

- 地層処分安全性への信頼

- セーフティケース（長期的安全性を確保可能であることの論拠）に対する科学的客観性と技術的信頼性

- 処分事業への信頼

- 政策や規制，事業者の技術的能力と事業運営姿勢に対する信頼など

- 地層処分の特徴を考慮した研究開発戦略

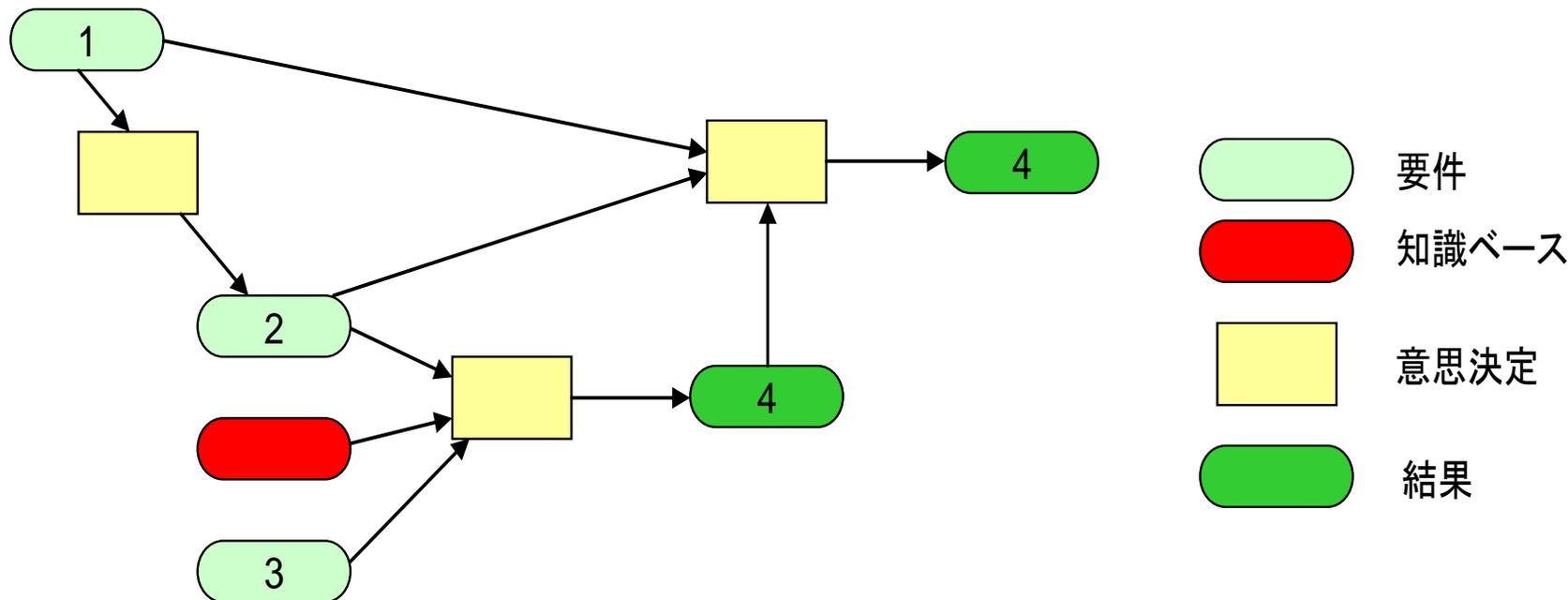
- 安全性確保の長期性と処分事業の長期性

- 事業全体を通じた信頼性の高い科学技術的基盤の構築

- セーフティケース作成支援
- 政策や規制策定における意思決定の技術的支援

意思決定における要件への対応

- 相互に関連する種々の意思決定のネットワーク



- 意思決定における主要な要素：意思決定の対象，要件 (requirements)，知識ベース (knowledge base)
 - 要件：意思決定の枠組みと必要となる知識を特定
 - 知識：意思決定の根拠

地層処分技術の知識基盤化

- **研究開発の役割**
 - 地層処分の超長期的な安全確保と長期間にわたる事業に対する継続的な信頼性向上
- **知識基盤化**
 - 学際的総合技術である地層処分技術を“知識”として体系的に管理
- **知識マネジメントシステムの開発**
 - **概念開発**(e.g., H17レポート, 2005; 梅木, 2006a, b; Kawata et al., 2006; 中野ほか, 2006 ; 大澤ほか, 2006 ; Umeki et al., 2007 ; etc)
 - **プロトタイプ設計・構築** (2006 - 2010)
 - **プロトタイプ公開・試運用**(～2010 -)

知識:地層処分プロジェクトを支える全ての科学技術(社会科学, 経済学, 医学などを暗に内包)を示す広範な意味で使用

知識マネジメントの視点

●基本的考え方

- 知識の網羅性(管理の範囲の設定)
- ユーザーの視点(「要件」への対応)

●セーフティケースの一般概念を視軸とした構造化

- 個々の研究開発成果の有機的な関係を形式化
- 情報の必要十分性の明示(意思決定の材料としての適合性判断)
- 地層処分の安全性に対する信頼性の評価
- 情報の価値の明確化
- 多分野の研究領域の連携促進

(サイクル機構, 2005: H17取りまとめ「知識管理レポート」)

セーフティケースの構成要素 (OECD/NEA, 2004)

セーフティケースの目的と文脈

地層処分計画におけるある段階でのセーフティケースの作成

安全戦略

- 処分場のサイト選定と設計に関する戦略
- 計画管理戦略
- 安全評価戦略

安全評価基盤

- システム概念
- システム安全性に関連する科学技術情報と理解
- システム性能の評価手法やモデル, 計算コード, データベース

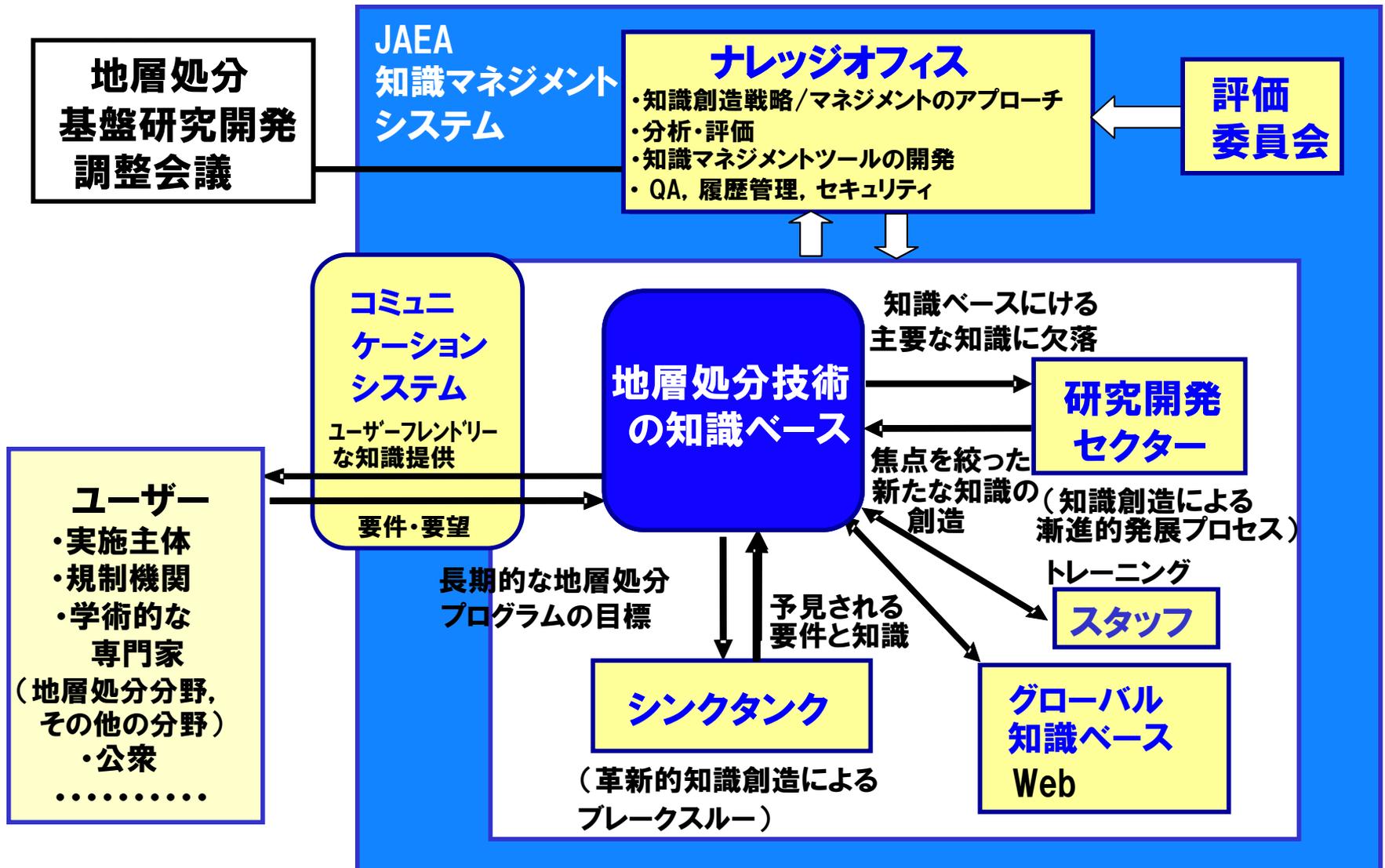
証拠, 解析及び論拠

- 処分システムの固有性能
- 線量およびリスクを指標とする安全基準への適合性
- 線量やリスクを補完する安全指標
- 不確実性や課題への対応に関する戦略の適切性
- 放射性廃棄物対策としての地層処分の優位性

セーフティケースへの統合

セーフティケースの目的と文脈に対応した鍵となる知見や信頼性に関する記述

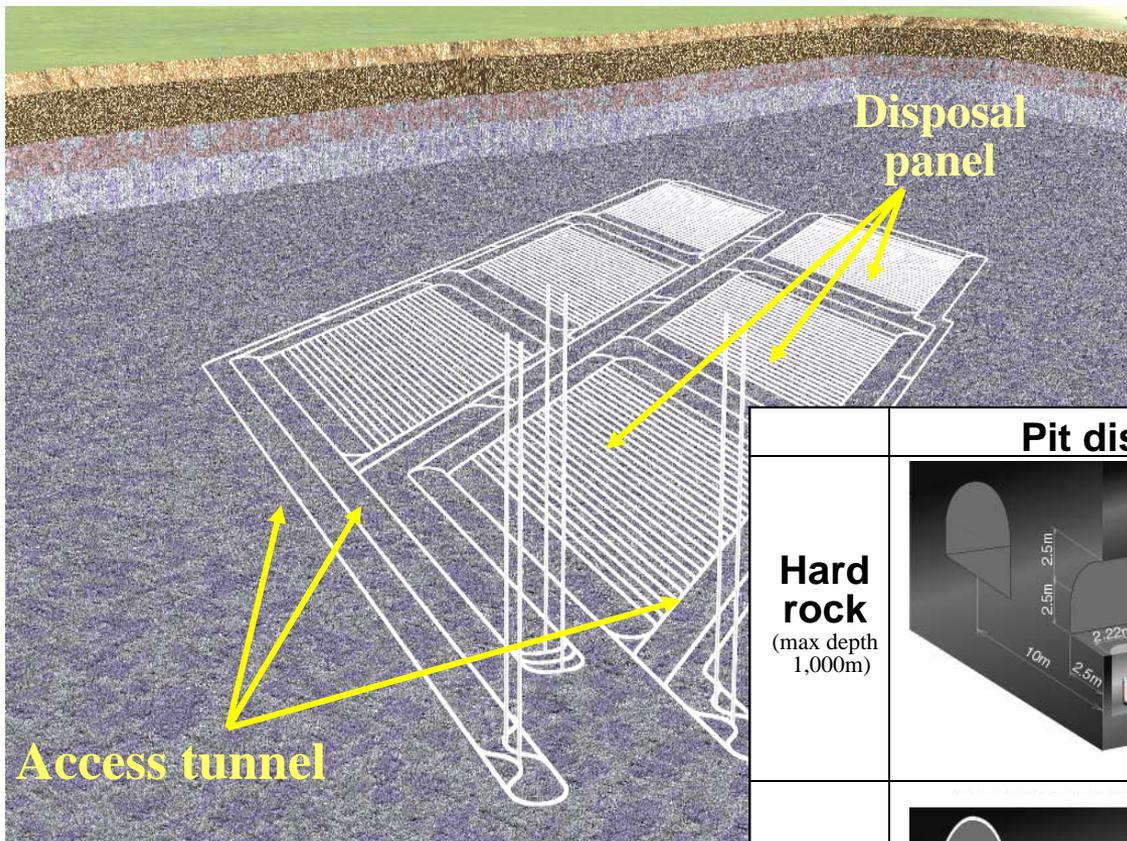
知識マネジメントシステムの基本概念



高レベル放射性廃棄物処分場概念の開発

- 原環機構の高レベル放射性廃棄物事業戦略
 - 公募による地層処分のための候補サイトの選定
- 不確実性を考慮した柔軟性のある処分システム開発
 - 不確実性
 - 候補サイト環境条件（地質，地理， etc）
 - 段階的に整備される地質環境条件
 - 科学技術の進歩
 - 政策変化（TRU廃棄物共処分，燃料サイクルの変更，貯蔵期間の変更， etc）
 - 安全規制の変化
 - 社会経済的变化（地元住民の要請，一般公衆の理解， etc）
 - 処分概念オプションの確保と最適化

第2次取りまとめレファレンスデザイン



廃棄体定置方法

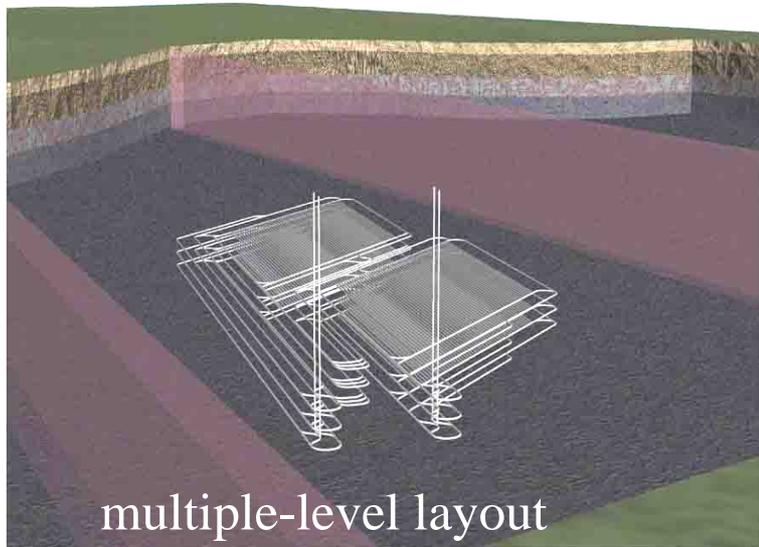
処分場レイアウト

処分場レイアウト

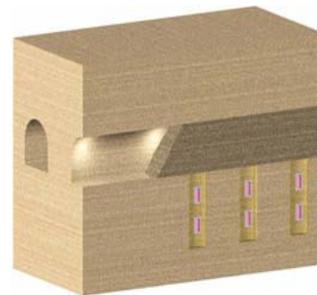
	Pit disposal	Tunnel disposal
Hard rock (max depth 1,000m)	<p>Diagram showing a cross-section of a disposal pit in hard rock. The pit has a depth of 2.5m and a width of 10m. The disposal panels are 2.22m wide and 4.44m long. The distance between the panels is 2.5m. The disposal panels are 4.13m high. The distance between the disposal panels is 4.44m.</p>	<p>Diagram showing a cross-section of a disposal tunnel in hard rock. The tunnel has a diameter of $\phi 2.22\text{m}$ and a length of 13.32m. The disposal panels are 3.13m wide and 3.13m long.</p>
Soft rock (max depth 500m)	<p>Diagram showing a cross-section of a disposal pit in soft rock. The pit has a depth of 4.5m and a width of 13m. The disposal panels are 2.22m wide and 6.66m long. The distance between the panels is 2.5m. The disposal panels are 4.13m high. The distance between the disposal panels is 6.66m.</p>	<p>Diagram showing a cross-section of a disposal tunnel in soft rock. The tunnel has a diameter of $\phi 2.22\text{m}$ and a length of 9.99m. The disposal panels are 3.13m wide and 3.13m long.</p>

第2次取りまとめデザインバリエーション

処分場レイアウト

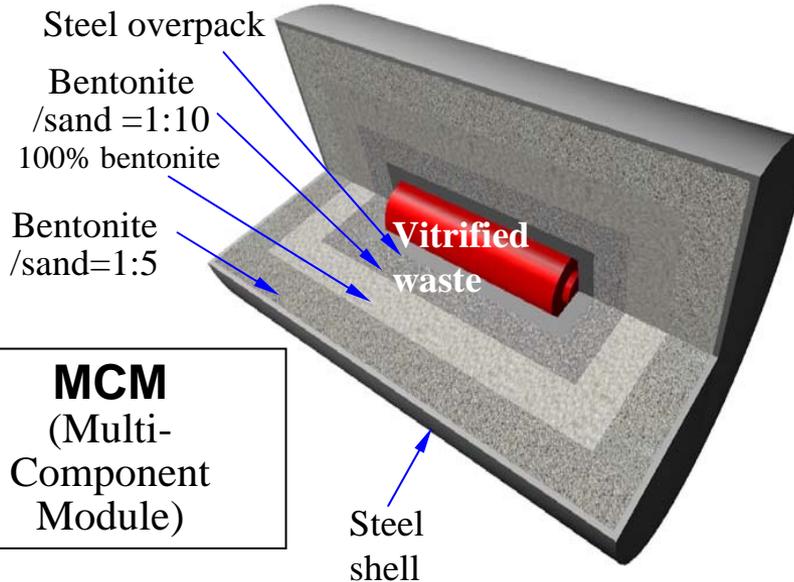
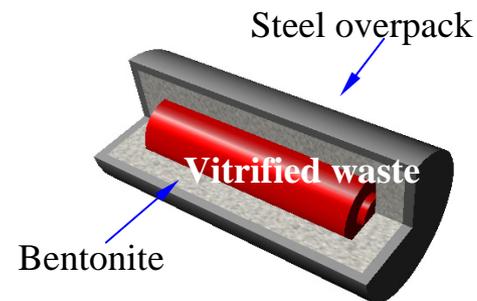


廃棄体定置方法



IWP
(Integrated
Waste
Package)

**Vertical
multiple
emplacement**

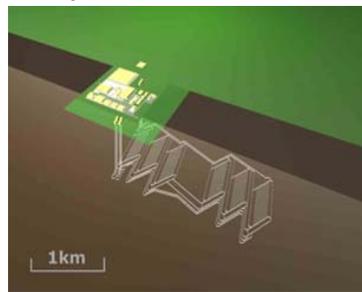


MCM
(Multi-
Component
Module)

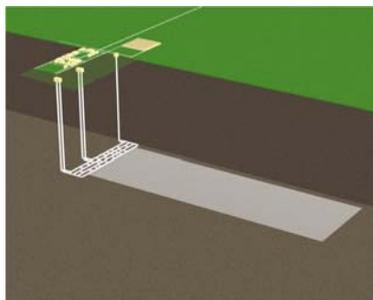
処分場概念オプションの例 (NUMO, 2004)

a) 地下施設レイアウト

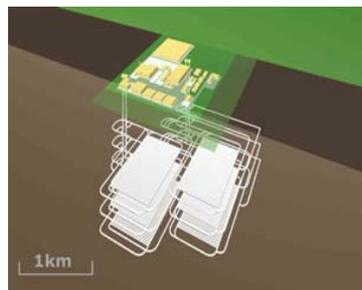
単層パネル方式
(第2次取りまとめ)



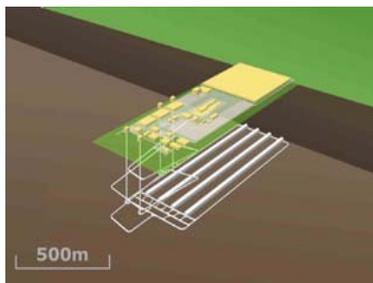
長坑道処分方式



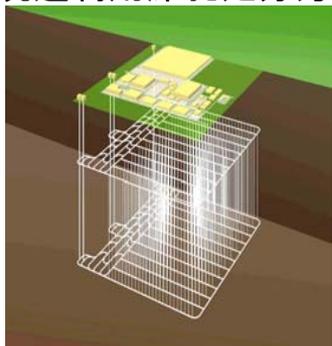
多層パネル方式



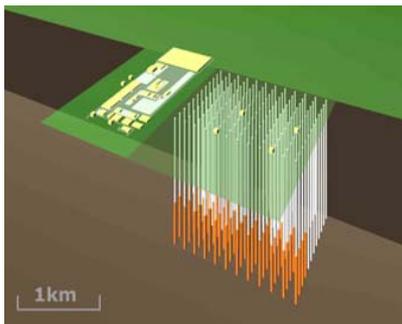
サイロ型処分方式



坑道利用深孔処分方式

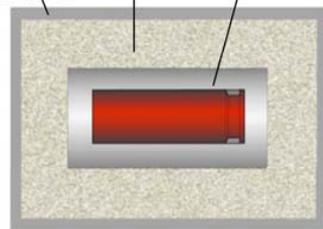


深孔処分方式

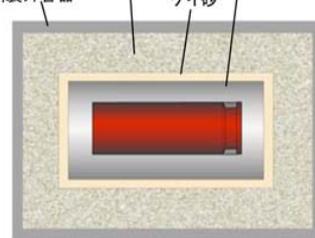


b) モジュール型人工バリア

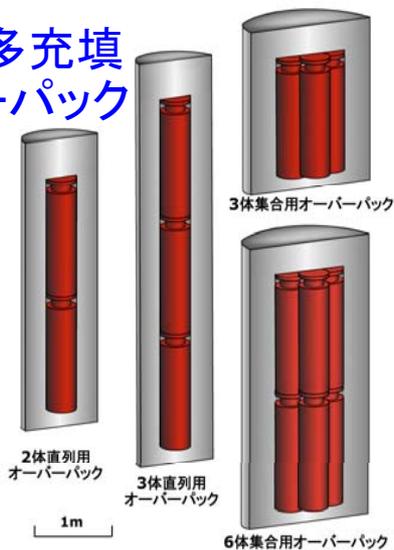
ベントナイト/ケイ砂混合
オーバーバック
鋼製外容器



ベントナイト
オーバーバック
ケイ砂
鋼製外容器

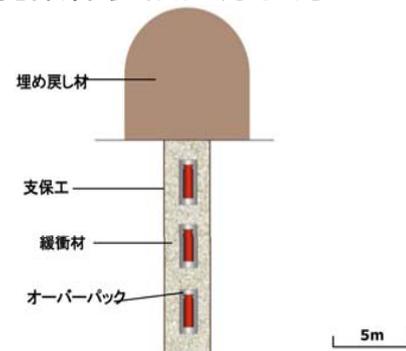


c) 廃棄体多充填 オーバーバック

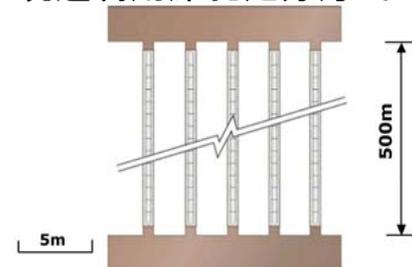


d) 廃棄体定置方式

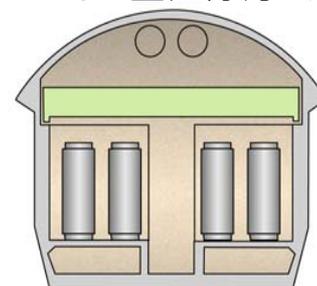
廃棄体多段処分孔方式



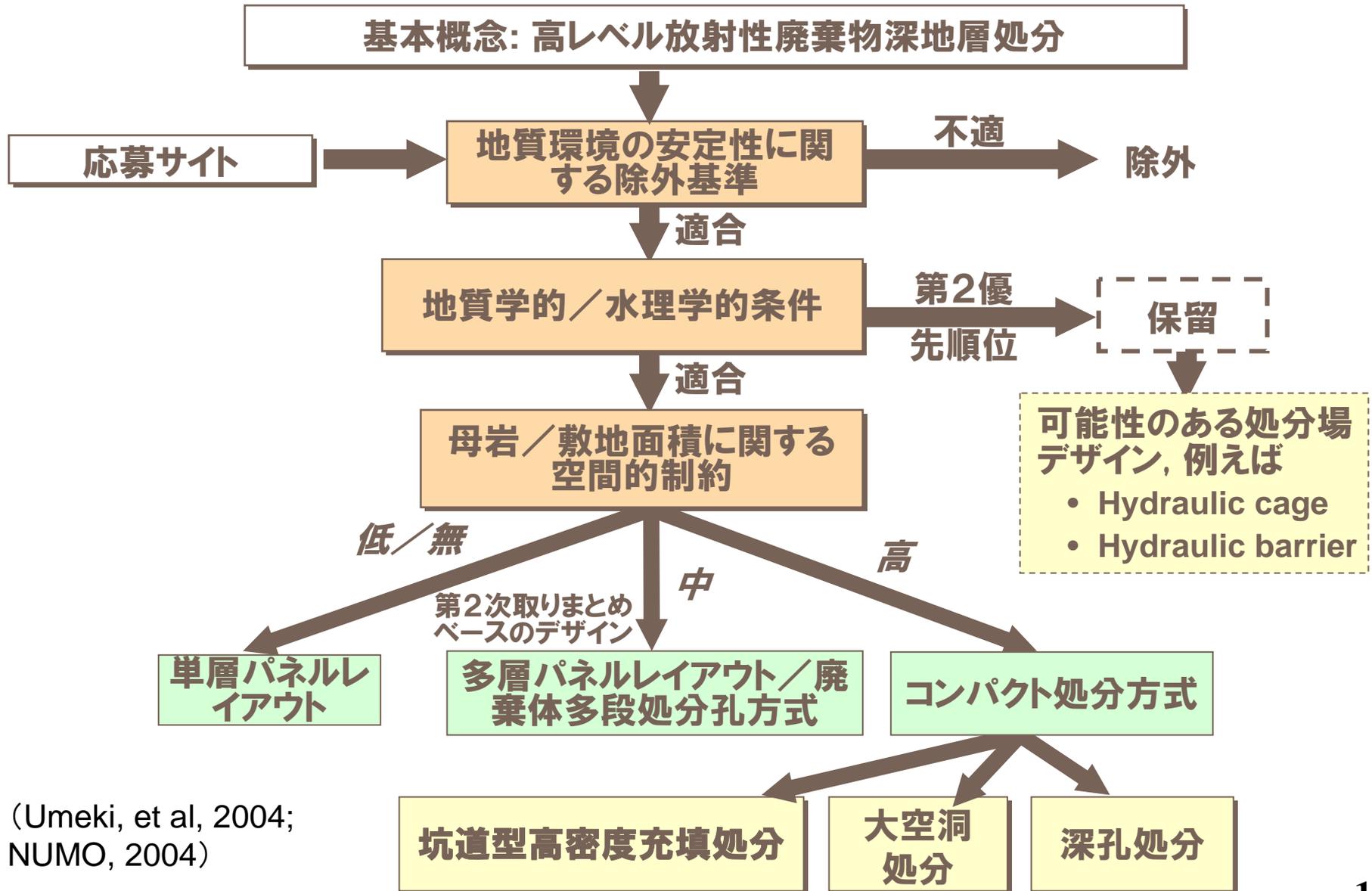
坑道利用深孔処分方式



サイロ型処分方式



処分場概念の最適化： オプション選択のフロー

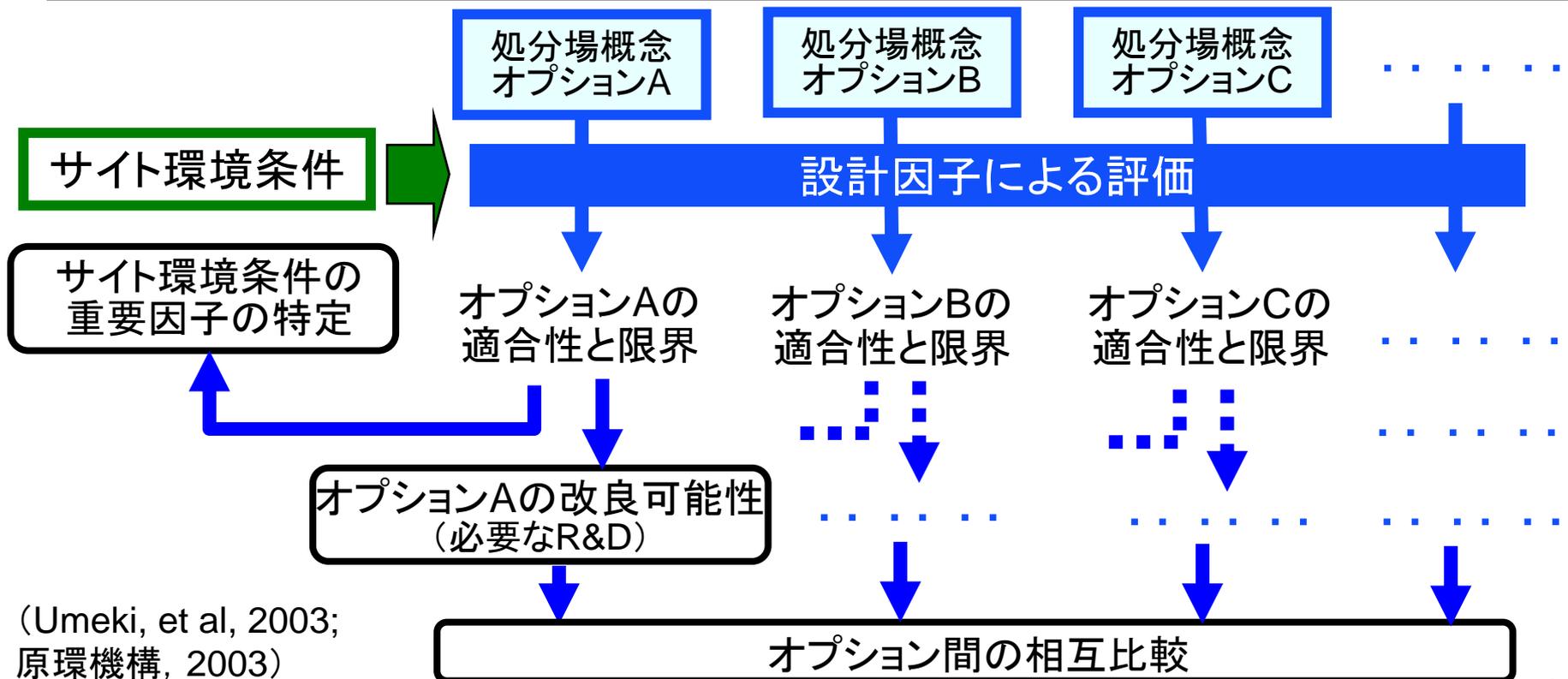


(Umeki, et al, 2004;
NUMO, 2004)

処分場概念の最適化: オプションの適合性確認

設計因子

- ✓ 閉鎖後安全性
- ✓ 操業安全性
- ✓ 工学的成立性/品質保証
- ✓ 工学的信頼性
- ✓ サイト特性調査とモニタリング
- ✓ 回収可能性
- ✓ 環境影響
- ✓ 社会経済的側面



(Umeki, et al, 2003;
原環機構, 2003)

処分場概念の最適化：研究開発課題

例：高レベル放射性廃棄物の発熱量の影響

H12における発熱対策

- 処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定の考え方
- 離間距離と廃棄体ピッチの組み合わせの設定手順

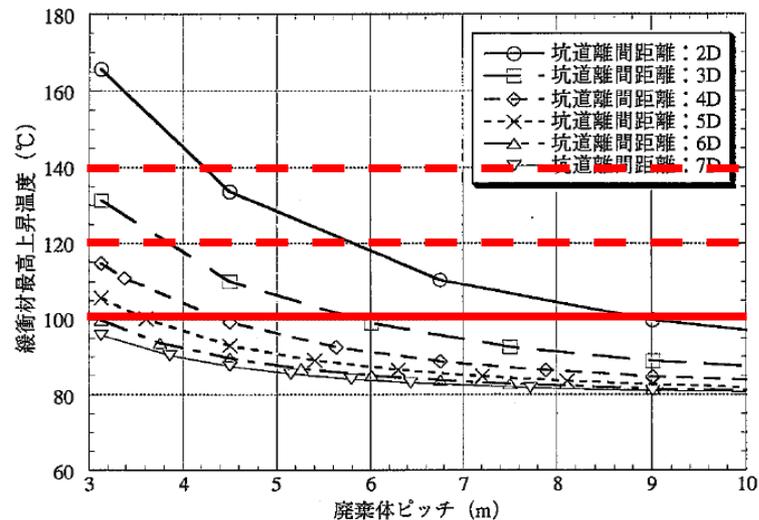
処分場面積の設定に影響を及ぼし得る研究開発課題

- 緩衝材の熱的変質に関する設計要件と科学的知見
- 人工バリア設計オプション
- 処分場操業モード（閉鎖時期の延長, etc)

処分場面積の設定に影響を及ぼし得る研究開発課題

研究開発の進展により緩衝材の制限温度を緩和できる場合(100℃以上), 温度からの制限を満たす「離間距離」と「廃棄体ピッチ」の条件の幅が広がる

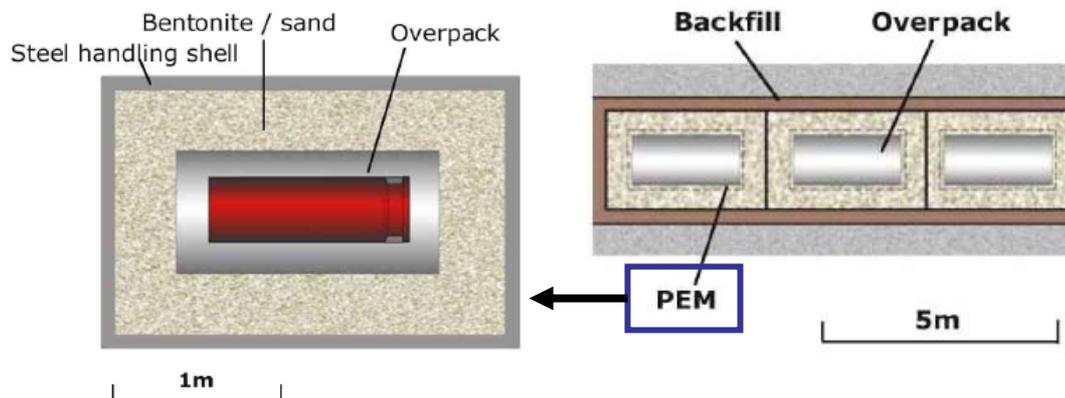
→発熱量の違いに対する, 処分場面積及び処分坑道総延長の最適化の裕度が高まる



人工バリアのオプションとして Prefabricated EBS module (PEM) などを考えた場合, 外部の容器が健全である期間は, 緩衝材の制限温度を大幅に緩和できる可能性あり

→発熱量の違いに対する, 処分場面積および処分坑道総延長の最適化の裕度が高まる

PEM designs

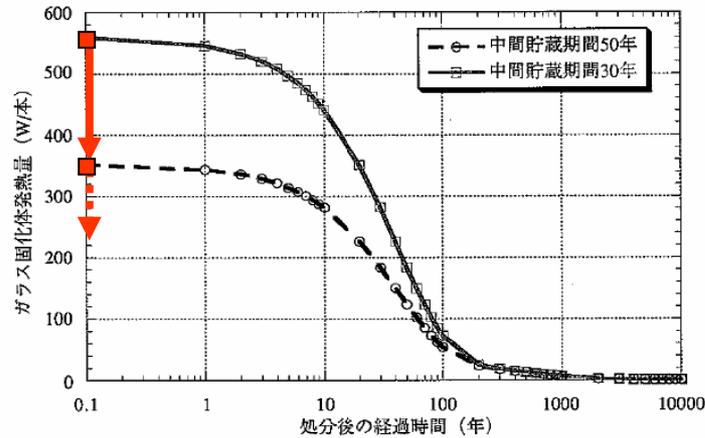


緩衝材の変質と温度に関する知見

- 緩衝材変質抑制の観点での制限温度 100°C は過度に保守的であり、処分場デザインに検討において非経済的という見解がある。
- 緩衝材内部が比較的高温になるのは
 - ・ 局所的（ガラス固化体との接触部近傍），かつ，
 - ・ 処分の時間スケールに比べ極めて短い（処分後100年以内で 100°C 以下）
- 諸外国の安全評価では，緩衝材内部の最高温度が処分後数十年程度 100°C を超える条件で評価が行われている例がある（スイスNagra）
 - ・ キャニスターから25cm以上の領域（温度は約 110°C or それ以下）では，緩衝材は未変質のままと期待している
 - ・ 評価は，緩衝材の外側半分は常に 100°C 以下であるが，内側半分は数十年程度 100°C を超える（キャニスター接触部で最高約 140°C ）条件で実施
- 温度履歴や科学環境を明らかにしたナチュラルアナログ研究によると，以下の条件でイライト化は起きなかったことを示している
 - ・ ベントナイト鉱床でベントナイトが $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ で数百万年間存在した条件
 - ・ 海水類似環境で， 160°C から 100°C まで200万年かかって冷却した条件
- イライト化に関する反応速度式を用いて評価した結果も， 100°C を超える期間が数十年に及び，かつ最高温度が 130°C 程度になる場合でも，著しいイライト化は生じないことを示している。

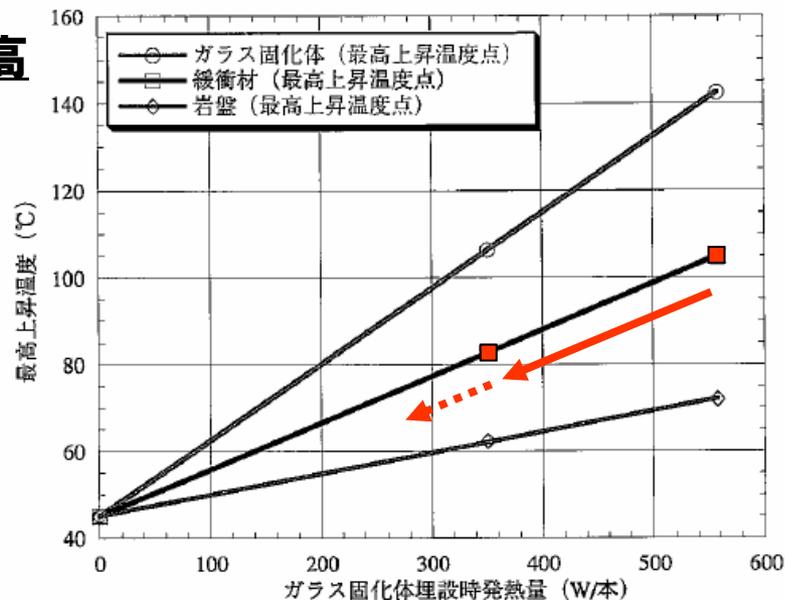
貯蔵期間の長期化による熱問題の緩和の可能性

発熱量の経時変化の例



貯蔵期間の長期化による
ガラス固化体発熱量低下

発熱量と緩衝材最高温度の関係の例



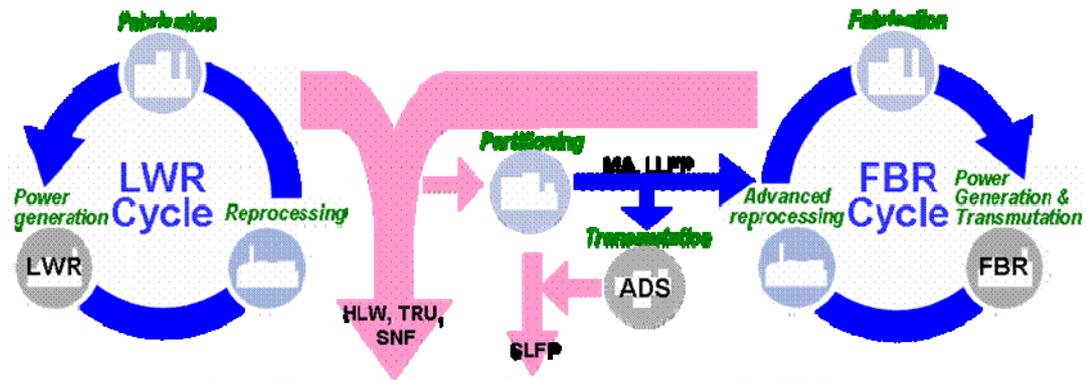
緩衝材の最高温度低下による
占有面積の低減

(谷口他, 1999)

総合的放射性廃棄物管理システムの開発

- ・放射性廃棄物管理と燃料サイクルとの調和
- ・軽水炉サイクル～先進的サイクルシステムを対象とした先進的技術開発

- 廃棄物特性評価
- 処分概念オプション
開発
- 処分概念最適化
- 放射性廃棄物管理
システム最適化



総合的放射性廃棄物管理システム：開発のアプローチ

軽水炉サイクル

① 先進的な地層処分概念の開発

- ・最新の処分概念の調査・整備
- ・先進的な処分概念の創出
- ・処分概念オプションの拡充・高度化

② 最適化技術の開発

- ・処分概念オプション等に柔軟かつ整合的に
対応可能な統合性能評価体系の開発
- ・課題探索的な性能評価技術の開発
- ・最適化技術の開発

将来のサイクルシステム

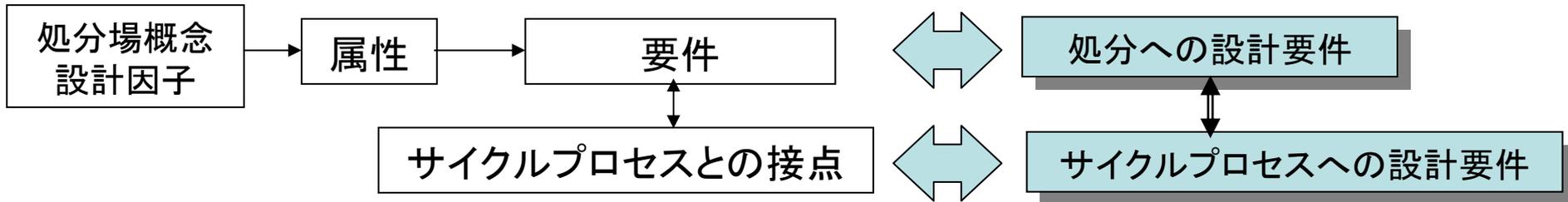
③ 先進的サイクルシステムに 対する処分概念開発

- ・サイクルシステムオプションや導入
シナリオに対応した廃棄物特性
(マスフロー, 形態, インベントリ等)
の評価技術の開発
- ・性能評価技術と最適化技術の,
将来的なサイクルシステムにも
対応可能な技術への改良・高度化

統合

④ 総合的放射性廃棄物管理システム

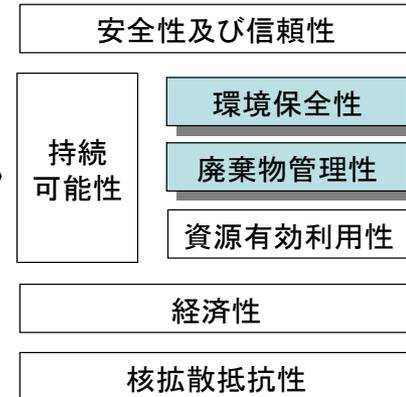
最適化の検討フレームの一例



設計因子*	属性*	要件(例)	接点(例)
閉鎖後安全性	・閉鎖後のセーフティケースの頑健性	・規制:線量, リスク, 移行率 ・補完的指標: - 移行率 - 濃度 - 毒性指数	・廃棄物の発生量 ・廃棄物の性質 - 核種組成, 濃度 - 固化体の閉じこめ性能
操業安全性	・建設, 操業, 閉鎖, デコミッションingの通常および放射線の安全性	・管理区域設定 ・作業者被ばく ・力学的安定性	・廃棄物の発生量 ・廃棄物の性質 - 核種組成, 濃度 - 遮蔽性能 ・廃棄体形態
工学的成立性 ／品質保証	・設定された品質レベルでの建設と操業の実現可能性	・技術基準 ・QAプロセス, QA基準	・新サイクルの導入スケジュール (処分関係の技術開発が可能な期間と関係)
工学的信頼性	・境界条件 (e.g. 埋設速度) を考慮した実施の実行性 ・操業への擾乱に関する頑健性	・事故時対策	・廃棄物の発生速度 ・処理, 貯蔵施設の容量 ・上流側スペックの不確実性
サイト特性調査 ／モニタリング	・サイト特性調査とモニタリングのデータに関する技術要求を満たすために求められる活動	・岩盤力学特性 ・水理特性	
回収可能性	・埋設後の廃棄物容器回収の容易性 ・回収維持期間	・技術基準 ・環境回復 ・破損検出 (+「操業時安全性」の要求)	・廃棄物の発生量 ・廃棄物の性質 - 核種組成, 濃度 - 固化体の閉じこめ性能
環境影響	・処分場実施と関連する全ての環境影響の範囲	・環境基準 ・排水／地下水品質, 地下水擾乱	
社会経済的側面	・コストに寄与するファクター ・鍵となるステークホルダーの受容性に寄与するファクター	・コスト ・処分場面積 ・ステークホルダー(住民等)の要求	・廃棄物の発生量 ・廃棄物の性質 - 核種組成, 濃度 - 発熱量

処分場の最適化:
- ALARA
- BAT

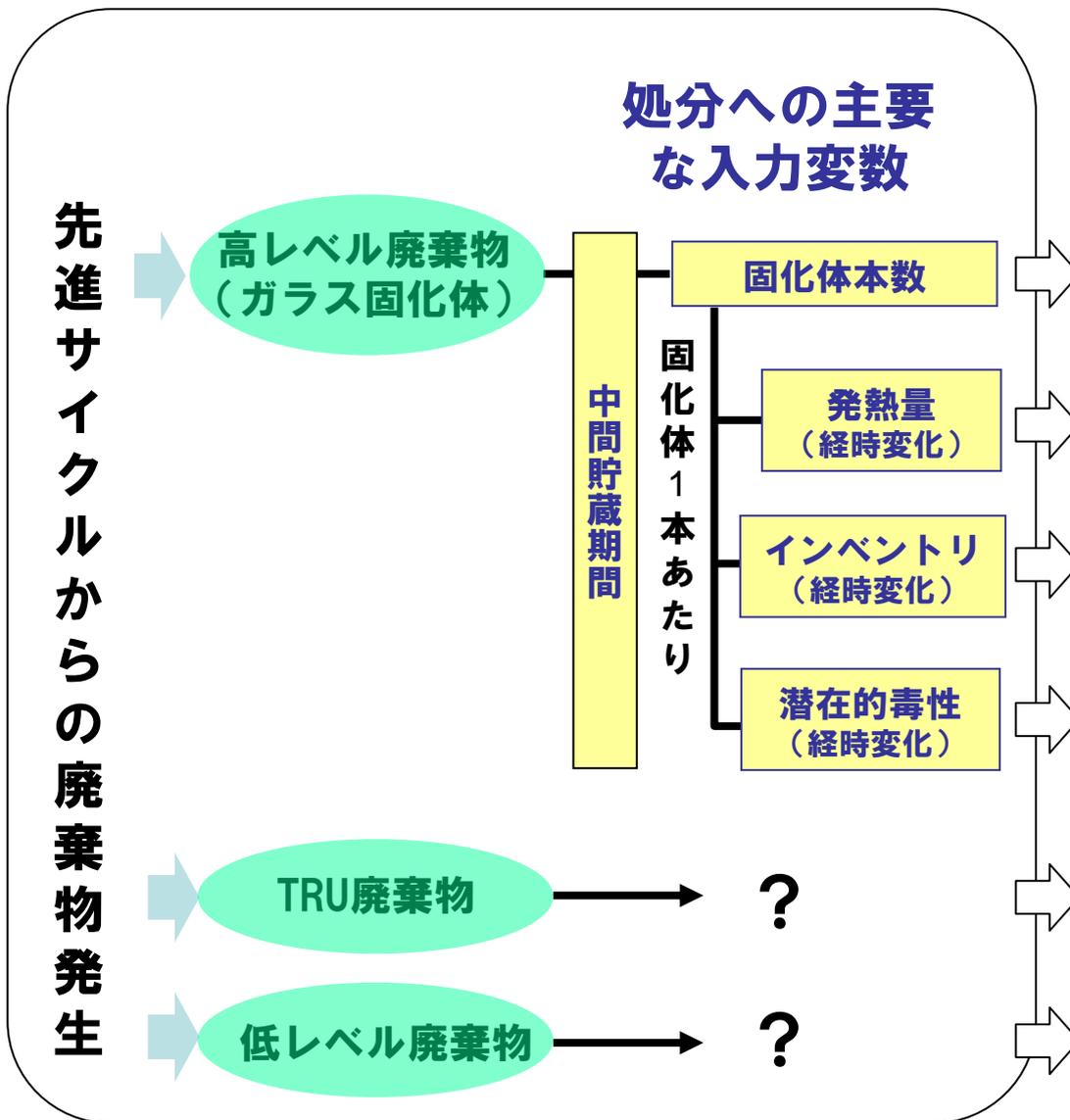
サイクルプロセス設計指標の例



環境安全性:
・主として, (平常時の)放射線による影響を評価

廃棄物管理性:
・廃棄物発生量を評価
・潜在的有害度, LLFP管理

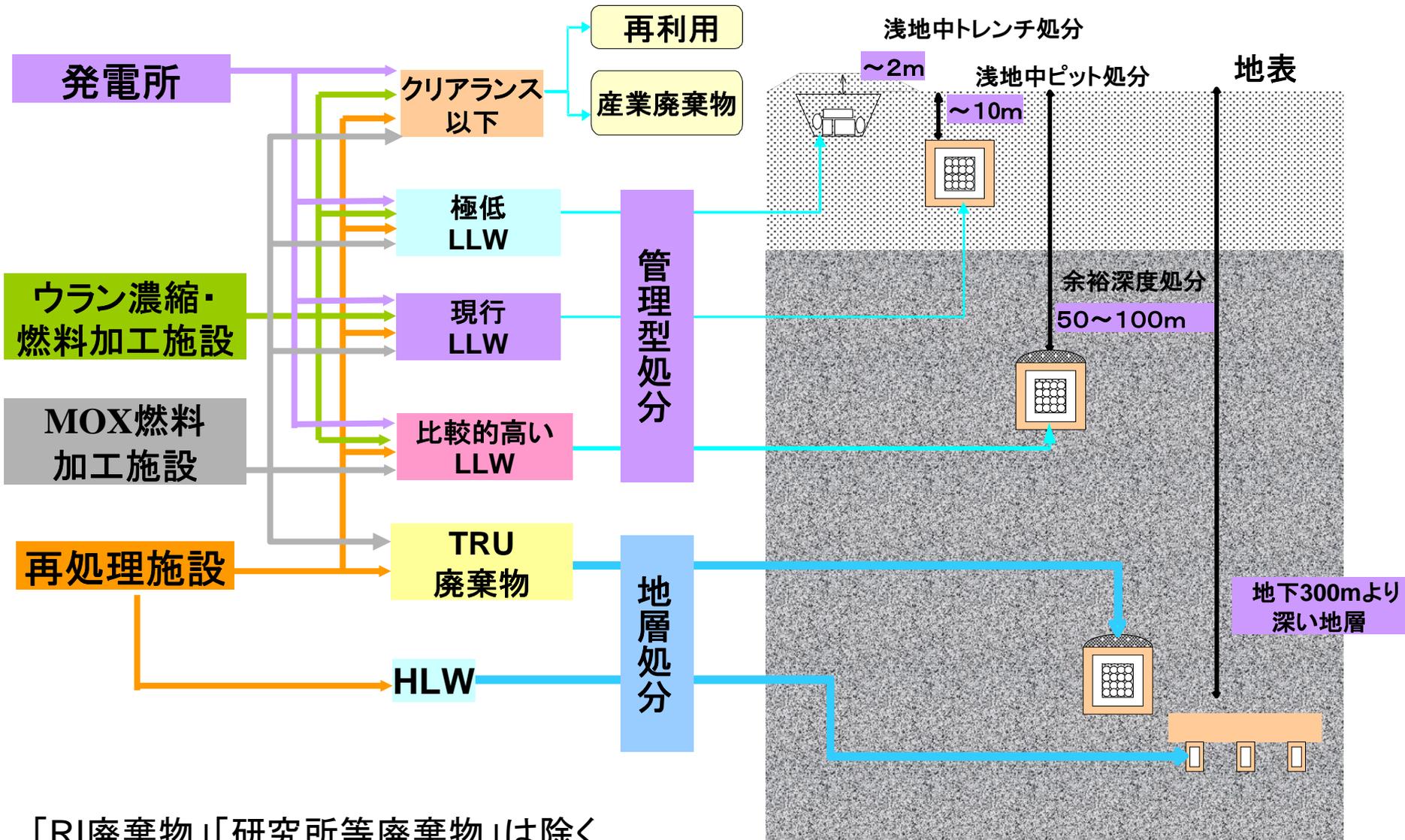
先進サイクル廃棄物の処分への影響



入力に対する感度
(H12処分概念)

処分場面積	線量評価	潜在的危険性
+	+	+
+	~0	~0
~0	+ / ~0	~0
~0	~0	+

放射性廃棄物の処分概念



「RI廃棄物」「研究所等廃棄物」は除く

サイクルシステムの総合的な最適化

■ 処分の柔軟性向上のためのサイクルシステム設計要件

- 廃棄物の性状の単純化
- 廃棄物の発生量の最小化，分類間の量的バランスの柔軟性（e.g. ガラス固化体の発熱量やインベントリに対する再処理でのMA回収率，ガラス固化体の廃棄物含有率，中間貯蔵期間などによる管理裕度への効果）
- 廃棄体の高性能化（e.g. I-129，C-14の固定化）
- マスフローの透明性向上（廃棄物管理が容易なサイクル：主要な廃棄物の発生源，量，組成等のレファレンスと変動幅，時間的推移の明確化）

■ 放射性廃棄物処分システムの高度化

- 廃棄物の分類に応じた処分の柔軟性：新概念の検討（e.g. 廃棄物の量，質，性状に対する処分の要件の感度および裕度の提示）
- 廃棄物全体としての処分の最適化（e.g. 処分の要件のHLWでの裕度の増加とLLWでの低下）

研究開発における検討課題

課題	わかっていること	今後さらに検討すべきこと
貯蔵期間	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵期間の長期化により発熱が低下し、熱問題が緩和される可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ・熱問題の緩和に関する効果の具体化と対応 ・貯蔵期間の長期化に関する政策的、技術的な問題の具体化と対応
回収可能性	<ul style="list-style-type: none"> ・処分坑道の開放の長期化により、閉鎖後の還元環境への回復時間が遅れる負の影響の可能性 ・放熱による熱問題の緩和の正の影響の可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ・処分坑道の開放の長期化による正負両方の影響の具体化と対応 ・処分坑道の開放の長期化に関する政策的、技術的な問題の具体化と対応
サイクルオプション (MA回収の効果等)	<ul style="list-style-type: none"> ・MA回収(アクチニドのインベントリの低減)による潜在的毒性の低減—ただし、核種の溶解度による濃度制限などにより、線量の低減には直結しない ・MA回収は、FPIによる発熱が減衰する処分後約50年以降の発熱の低減に寄与し、熱問題が緩和される可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ・MA回収による熱問題の緩和に関する効果の具体化と対応 ・高レベル廃棄物以外の廃棄物の発生量、特性等の具体化と対応
将来のシナリオ (FBRへの移行シナリオ、 直接処分の可能性等)	<ul style="list-style-type: none"> ・シナリオに応じて、複数のサイクルオプションが考えられ、また上記の諸課題も関係 ・これらは、個々に検討するのみではなく、組合せを考えつつ、最適となる可能性を見出すことが必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・種々の指標を考慮した最適化問題としてとらえ、指標、入力変数、目的関数の設定、それらの解法等に取り組む必要

まとめ

- 将来構想に対する柔軟な政策と継続的研究開発
- ステークホルダーの要件を支援する知識マネジメント
 - 長期間にわたる処分事業を通じたセーフティケースの信頼性向上
 - 焦点を絞った研究開発と地層処分技術の知識基盤としての体系化
- 放射性廃棄物処分システムの最適化及びサイクルシステムとの調和
 - サイト環境条件に応じた処分システムの最適化（種々の設計因子の包括的な検討, etc）
 - 総合的放射性廃棄物管理システムの開発
 - サイクルシステムへのフィードバック：最適化問題の明確化
 - －熱負荷の低減（MAの除去による処分場面積の低減）
 - －処理技術の開発（I-129, C-14の固定化）
 - －etc.
 - 繰り返し過程による最適化（燃料サイクルー処分システム）

参考

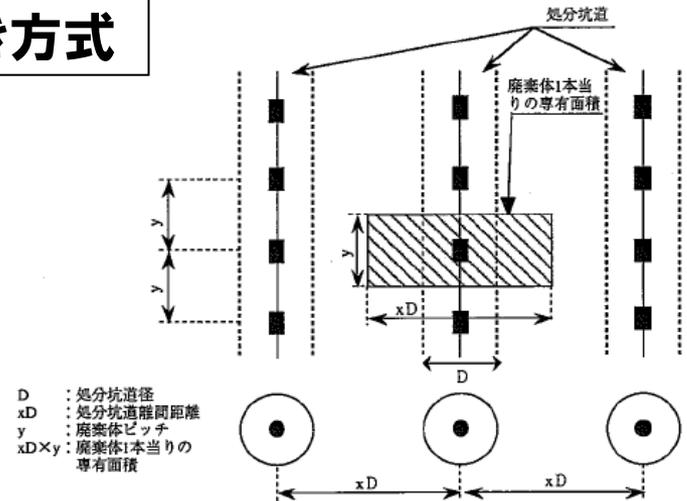
処分坑道離間距離と廃棄体ピッチの設定の考え方

- 地下施設の規模を小さくする
(処分場面積を小さく)
- 経済的にも有利にする
(処分坑道総延長を小さく)

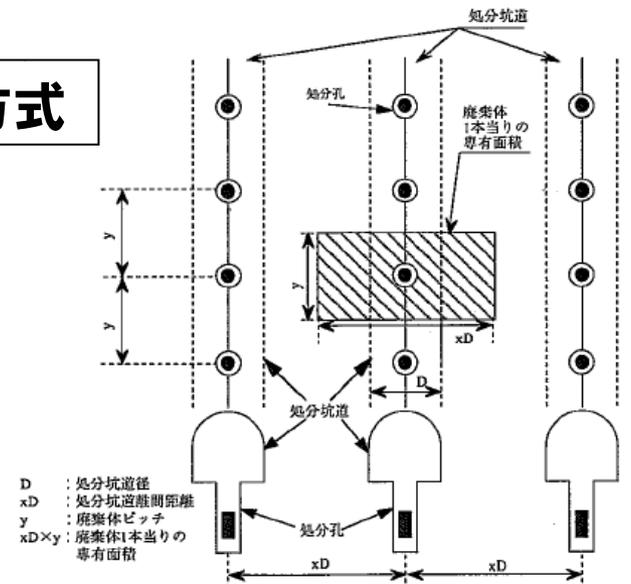
$$\text{処分場面積} = \text{処分坑道離間距離} \times \text{廃棄体ピッチ} \times \text{廃棄体本数}$$

$$\text{処分坑道総延長} = \text{廃棄体ピッチ} \times \text{廃棄体本数}$$

横置き方式



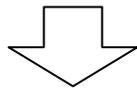
縦置き方式



離間距離と廃棄体ピッチの組み合わせの設定手順

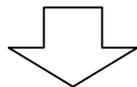
空洞安定性からの制限

- ・処分坑道または処分孔が力学的安定性を満足
- ・処分坑道または処分孔により周辺岩盤が影響を受けない



温度からの制限

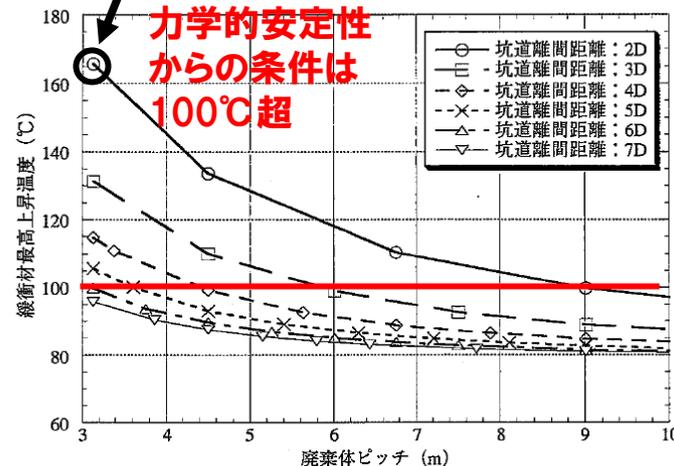
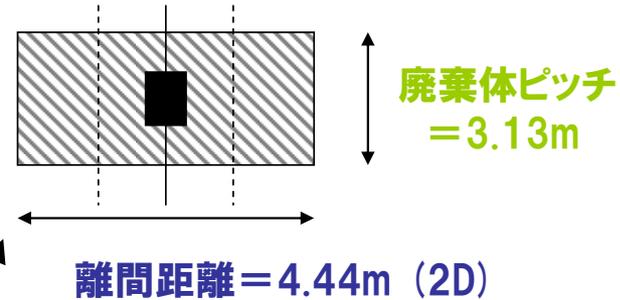
- ・ガラス固化体の発熱に対して緩衝材の温度が制限温度以下
(変質抑制のため100°C以下)



総合的判断

- ・上記を満足したうえで、地質環境の特性、安全性、経済的合理性等を考慮し、総合的に判断

硬岩系岩盤+横置方式の検討例



処分坑道離間距離 [m]	廢棄体ピッチ [m]	廢棄体専有面積 [m ² /本]
4.44(2D)	9.0	39.96
6.66(3D)	5.8	38.63
8.88(4D)	4.4	39.07
11.10(5D)	3.6	39.96
13.32(6D)*	3.13	41.69
15.54(7D)*	3.13	48.64

掘削量が最小
→設定値