

# 使用済燃料の直接処分場概念に関する検討

1. 直接処分固有の課題
2. 直接処分の設計検討
3. 予備的な核種移行評価
4. 不確定要素に関する感度解析

平成16年8月24日

# 1.直接処分固有の課題

- (1) ガラス固化体処分との違いによる課題
- (2) 直接処分固有の課題を踏まえたコスト試算の考え方
- (3) 直接処分固有の課題(ガラス固化体処分との違い)と対応

# (1) ガラス固化体処分との違いによる課題

## 直接処分はプルトニウムを環境中に廃棄する

- プルトニウム等に対する未臨界を確保する必要がある
- プルトニウムを含む使用済燃料が、数百年で人間のアクセスが可能な放射線レベルになる  
(直接処分場の管理期間については、有限から無限まで国際的な議論がある)

## 長期間安定な物質として選択されたガラス固化体と違い、直接処分は使用済燃料の形態で処分する

- 使用済燃料の長期的な挙動などが十分把握されていない
- 国内で認められる安全性の評価のための核種移行等のデータがない
- Pu等から放出される 線が核種移行を促進する可能性がある

## 使用済燃料の廃棄体はガラス固化体に比べて発熱量が大きく、寸法も大きく重い

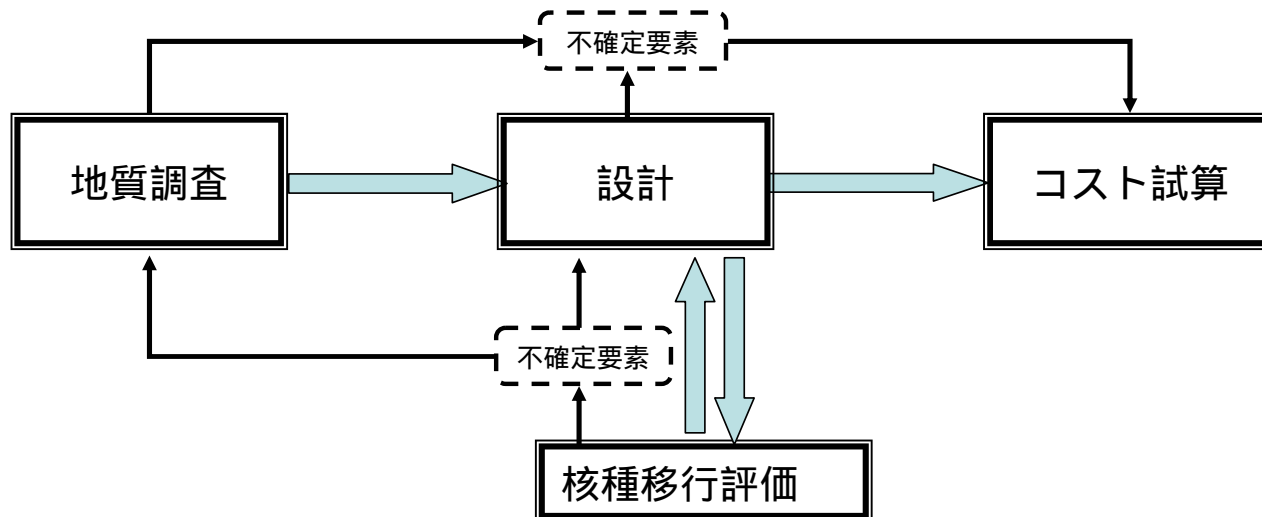
- 発熱量が単位重量あたり6割ほど大きくなる
- 取り扱うための大きな空間が必要になる
- 大重量によるハンドリング設備への負担が増大する

## (2) 直接処分固有の課題を踏まえたコスト試算の考え方

ガラス固化体の処分場の検討では、以下に示す手順で検討を進めたが、使用済燃料の直接処分場概念に関する本検討では、前述のように、固有の課題があり、その課題の多くは、現時点では決められない不確定要素を含んでいる。

そのため、本検討では、その目的がガラス固化体処分の場合との比較を行うことにあることを念頭に置き、使用済燃料の直接処分概念に関する不確定要素を各段階で整理し、ガラス固化体で適用した保守性と同等の結果を得るべく、工学的判断を交えて数値化を図る。

さらに、確定できないものについては変数を設けるなどする。



### (3) 直接処分固有の課題(ガラス固化体処分との違い)と対応

【設計・工学的技術】

課題	概要	対応
容器の大型化による坑道・処分孔の寸法増、容器重量の増大	<ul style="list-style-type: none"> <li>・空洞安定性の検討</li> <li>・力学的観点からの岩盤物性の制限等の検討</li> <li>・掘削影響評価に基づくプラグ設計，処分孔設計の検討</li> <li>・容器の搬送・定置方法の検討</li> </ul>	設計に織り込む
(ガラス固化体に比べて 寸法：約3倍 重量：約7倍)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緩衝材長期変形挙動への影響評価(廃棄体沈下，腐食膨張等)</li> </ul>	不確定要素 変数 (キャニスター当たりのSF収納体数：2体/4体)

### (3) 直接処分固有の課題(ガラス固化体処分との違い)と対応

【設計・工学的技術】

課題	概要	対応
発熱量が大きい (約1.6倍)	<ul style="list-style-type: none"> <li>緩衝材への熱影響の検討</li> </ul>	不確定要素 変数 (キャニスター当たりのSF収納体数：2体/4体)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>処分深度に関わる設計上の制約が生じる可能性の検討 (例えば、ある深さで地下水流動が小さくなることがわかっているにもかかわらず、熱設計の観点から十分な深度がとれないことが考えられる)</li> </ul>	地質調査段階での対応となる
使用済燃料を個別に収納することによる発熱特性の不均質性	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料単体の燃焼度の違いによるキャニスターあたりの発熱量の幅や燃料集合体の軸方向の発熱分布に対する対策 (緩衝材制限温度に対する裕度の検討)</li> </ul>	設計に織り込む
放射線量が高い	<ul style="list-style-type: none"> <li>ハンドリングにおける遮へい・遠隔装置の検討</li> </ul>	設計に織り込む

### (3) 直接処分固有の課題(ガラス固化体処分との違い)と対応

【設計・工学的技術】

課題	概要	対応
臨界を避けるための検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>海外事例によると燃焼度による封入施設の受け入れ基準等を設けることでキャニスター内での臨界防止対策を施す例もある</li> </ul>	設計に織り込む
	<ul style="list-style-type: none"> <li>将来、腐食などの為にキャニスター内の燃料の間隔を維持できない場合の臨界防止対策の検討 (キャニスター外での臨界可能性を定量的に否定することは困難)</li> </ul>	不確定要素 変数 (キャニスター当たりのSF収納体数：2体/4体)
50年中間貯蔵後の燃料集合体の健全性に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>漏洩燃料等の不具合があった場合の施設・設備の検討</li> </ul>	設計に織り込む
保障措置やテロ対策 (操業中及び閉鎖後管理段階)	<ul style="list-style-type: none"> <li>保障措置やテロ対策のシステム、装置等についての検討</li> </ul>	設計に織り込む

### (3) 直接処分固有の課題(ガラス固化体処分との違い)と対応

【核種移行評価】

課題	概要	対応
核種保持・移行遅延が働きにくい核種が含まれる (I-129, C-14)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・分配係数，拡散係数や溶解度制限固相の設定 (C-14の分配係数等では有機・無機の区別が必要)</li> <li>・わが国特有の地質環境<sup>1</sup>に対する強固なバリア性能を持った処分場概念の構築 又は</li> <li>・地下水流動が極めて緩慢な地質環境の選定 <small>1 亀裂の多い岩盤</small></li> </ul>	核種移行評価に織り込む  地質調査段階での対応となる
使用済燃料からの核種溶出の取り扱いの課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・燃料や構造材からの核種の瞬時放出割合の設定</li> <li>・UO<sub>2</sub>マトリクス溶解速度</li> <li>・UO<sub>2</sub>マトリクス溶解に伴う核種放出挙動</li> </ul>	核種移行評価に織り込む



### (3) 直接処分固有の課題(ガラス固化体処分との違い)と対応

【核種移行評価】

課題	概要	対応
放射線分解による酸化状態の生起	<ul style="list-style-type: none"> <li>・酸化還元フロントの進展による酸化還元 に鋭敏な核種の移行率の増大に関する検討</li> <li>・対策として還元剤を人工バリアに添加 あるいは配置することも考えられるが 臨界防止上好ましくない</li> </ul>	不確定要素 変数 (キャニスター当たりの SF収納体数：2体/4体)
隆起・侵食による処分場の地表への到達を想定した評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・放射能レベルが高いことを踏まえた地質 環境の長期安定性等に関する検討 (評価期間と期待する安定の程度など)</li> </ul>	地質調査段階での対応となる

### (3) 直接処分固有の課題(ガラス固化体処分との違い)と対応

【立地】(波及的対策)

課題	概 要	対 応
処分場の面積に応じた立地対策	・立地の観点から、処分場概念検討で算出される、処分場の大きさに応じて、処分場の複数化を考慮する可能性がある。	不確定要素 変数 (1サイト/2サイト)

## 2. 直接処分の設計検討

### (1) 地下施設

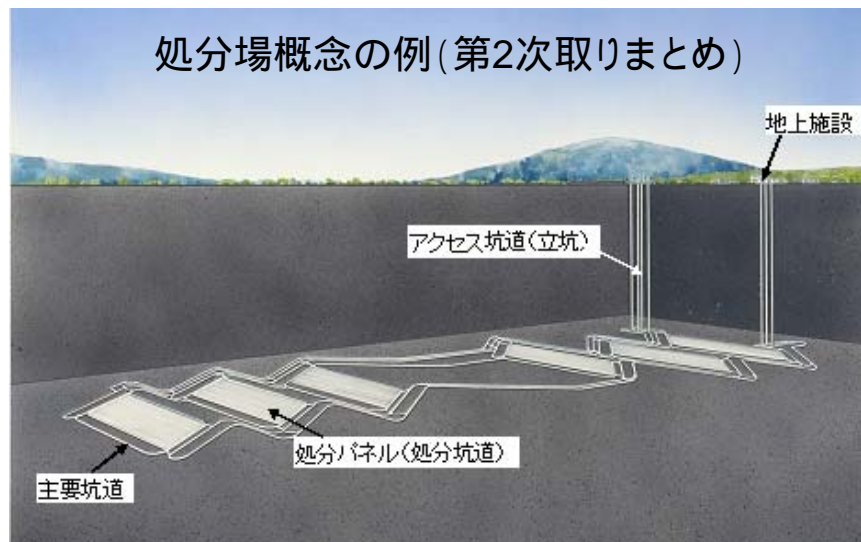
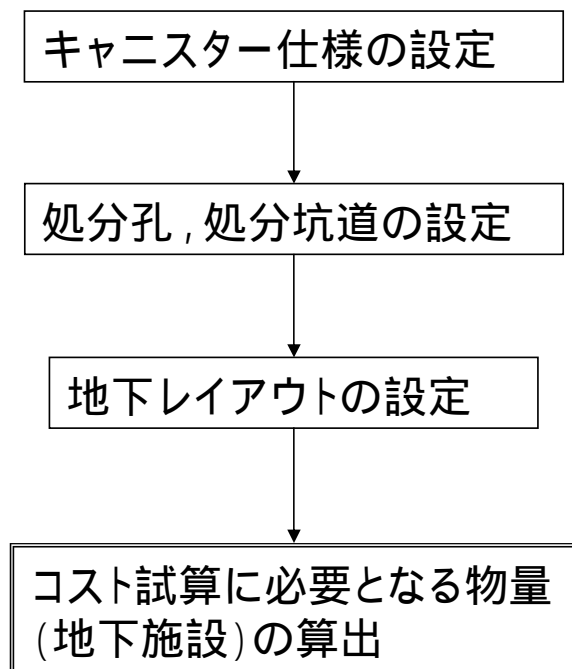
キャニスター仕様の設定  
処分坑道, 処分孔仕様の設定  
地下施設の設定

### (2) インフラ施設及び地上施設

使用済燃料の物流  
使用済燃料の輸送  
物量条件の設定  
地上施設の構成

## (1) 地下施設

地下施設の設定を行う。  
検討の手順を以下に示す。



廃棄体定置概念例 (NUMO-TR-04-01より)

\* 以降の設定において用いた値や考え方等については、第2次取りまとめ、または事業化報告書で用いられている値や考え方等を参考とした。

## キャニスター仕様の設定

使用済燃料を収納するキャニスター(処分容器)の仕様について検討する。

設定項目を以下に示す。

設定項目	仕様
形状・寸法	SKBのKBS-3( <u>PWR type</u> ) 概念
材質	ガラス固化体のレファレンスである炭素鋼*
燃料集合体収納数	SKBの設定である4本と臨界などの不確定要素を考慮した2本

\* 銅 + 炭素鋼については、地質環境が特定されておらず長寿命を保証できる段階ではないため今回は検討外とする。

## a. 形状・寸法

### ・基本概念:

SKBのKBS-3 (PWR type) の概念を参考とする(右図)。

### ・高さ:

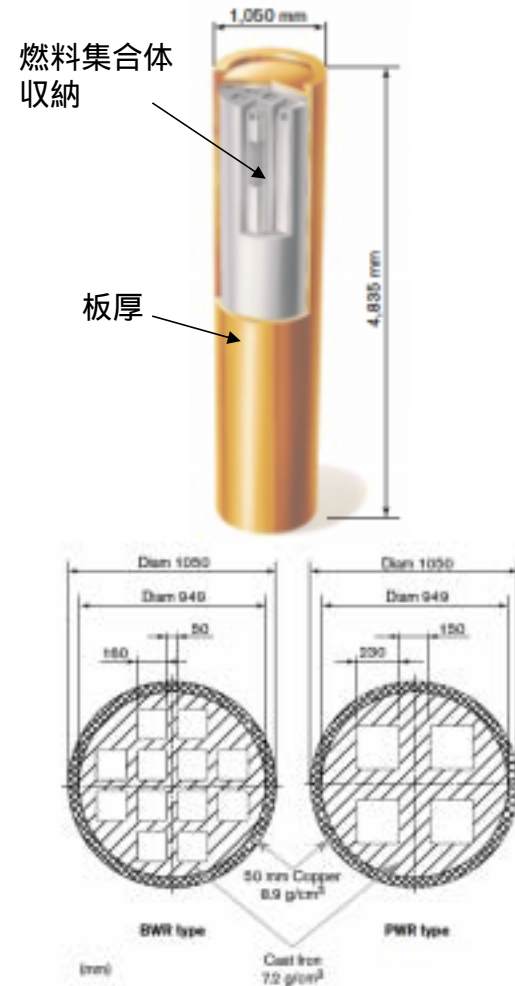
板厚(蓋) + 燃料集合体寸法より設定

### ・外径

板厚(胴部) + 燃料集合体収納部寸法より設定

### ・板厚(蓋及び胴部) 設定において考慮する項目

- 耐圧性(軟岩, 硬岩)
- 腐食への放射線影響
- 腐食代<sub>しろ</sub>



SKB(スウェーデン)の処分容器(KBS-3)概念  
(SKB Technical Report TR-02-07より抜粋)

## ・板厚設定

キャニスター仕様を設定するために、最小限必要となる板厚を設定する。設定では、処分場環境での耐圧性の観点及び腐食への放射線の影響の観点を考慮した値に腐食代を足し合わせる(ガラス固化体処分での考え方に準拠)。

[設定]

軟岩 / 硬岩のそれぞれについて、耐圧性の検討、腐食の放射線の影響の検討結果の大きい方の値に炭素鋼の腐食代40mmを足し合わせると次のような値となる。

軟岩: 蓋部・150mm(耐圧, 放射線) + 40mm(腐食代) = 190mm

胴部・150mm(放射線) + 40mm(腐食代) = 190mm

硬岩: 蓋部・190mm(耐圧) + 40mm(腐食代) = 230mm

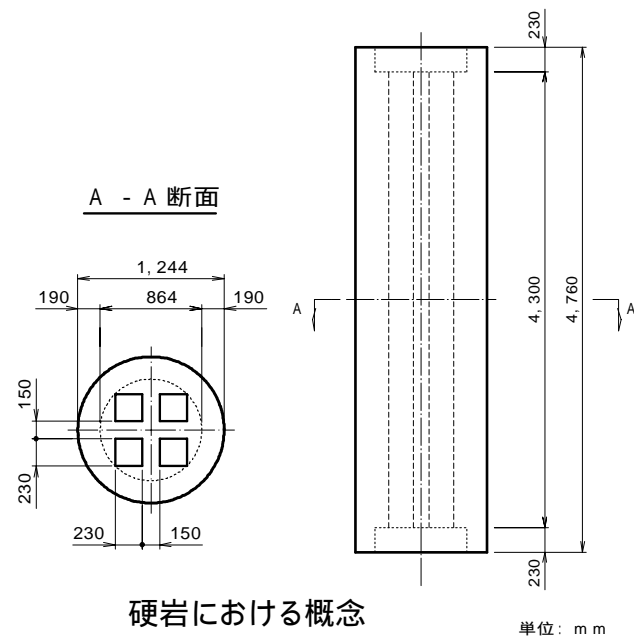
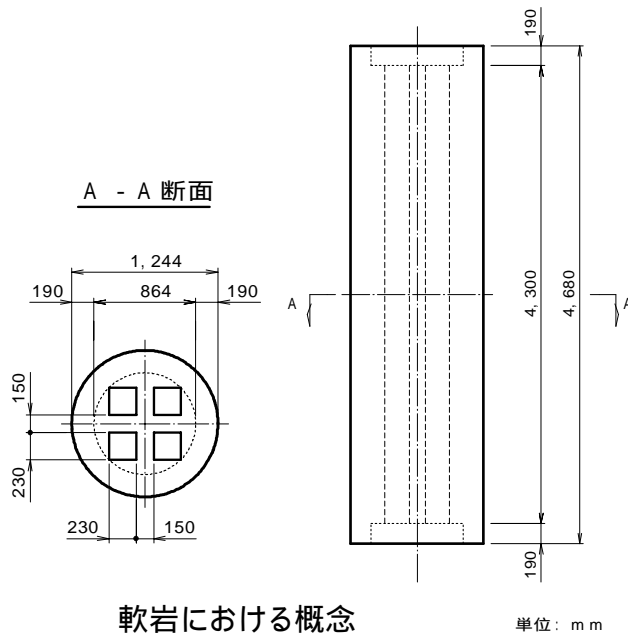
胴部・150mm(放射線) + 40mm(腐食代) = 190mm

## b. 燃料集合体収納数

収納数を2体と4体の場合について検討する。

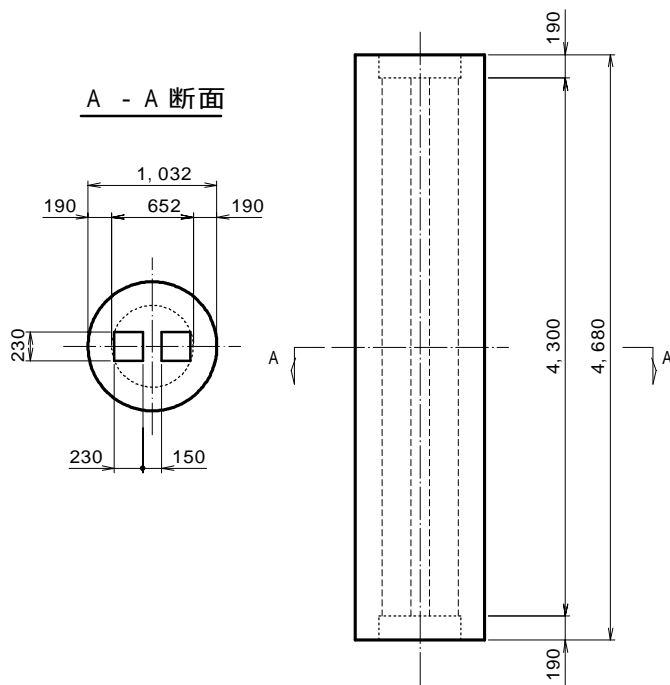
(0.46tU/燃料集合体, 2体の場合: 0.92tU/キャニスター, 4体の場合: 1.84tU/キャニスター)

下に, a,bの設定に基づいたキャニスターの概念(4体の場合)を示す。



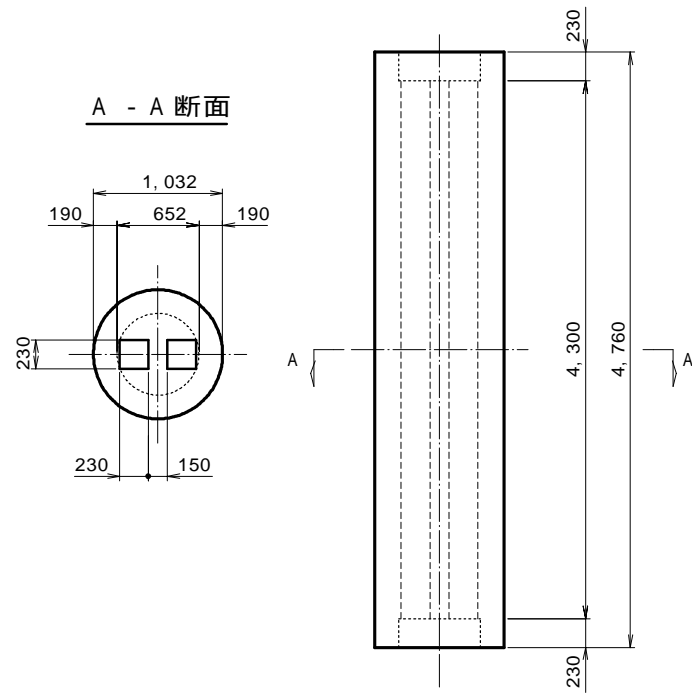


# (2体の場合)



単位：mm

軟岩における概念



単位：mm

硬岩における概念

## 処分坑道，処分孔仕様の設定

キャニスターを搬送・定置する処分坑道および処分孔の仕様を検討する。

### a. 処分坑道

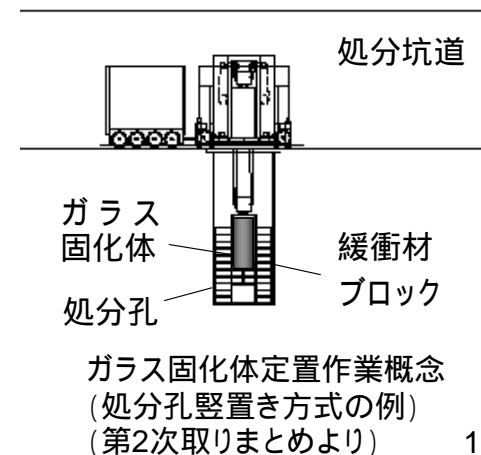
ここでは，4体/キャニスター，縦置き定置方式における寸法設定について示す。

坑道形状 : 軟岩では，トンネルボーリングマシン(TBM)による掘削を想定して，円形断面形状。支保工を設置。硬岩では，掘削量の小さい幌型断面形状。

寸法 : 人工バリア定置装置が移動可能な空間，安全上必要な空間を確保する。ただし，キャニスターの定置装置の設計を行っていないため，ガラス固化体処分の定置装置寸法に基づき，キャニスターの重量・寸法等を考慮した余裕を足し合わせて装置寸法を想定する。

以上を考慮して設定した寸法は次のようになる。

	断面形状	寸法
軟岩	円形	9.1m
硬岩	幌型	高さ:7.8m，幅:6.5m



## b. 処分孔仕様

$$\begin{aligned} \text{処分孔径} &= \text{キャニスター外径} + \text{緩衝材厚さ} + \text{定置作業のためのクリアランス} \\ &= 1,244\text{mm} + 700\text{mm} \times 2 + 50\text{mm} \times 2 = 2,744\text{mm} \end{aligned}$$

\* 軟岩については、空洞安定性の観点から支保工(片側225mm)の設置を想定。

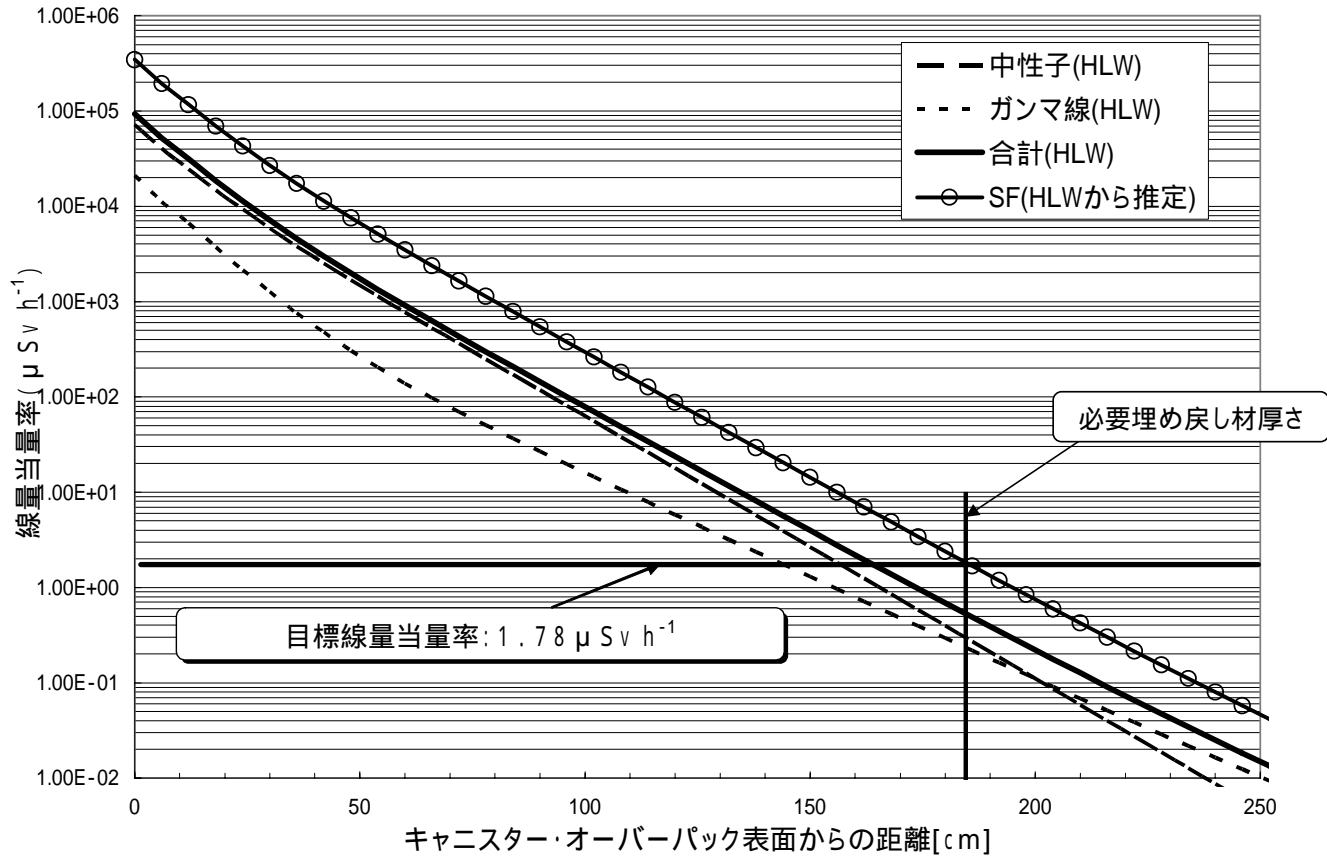
$$\begin{aligned} \text{処分孔深さ} &= \text{キャニスター高さ} + \text{緩衝材厚さ} + (\text{緩衝材と岩盤, 緩衝材とキャニスター上部のクリアランス}) \\ &= (\text{軟岩}4,680\text{mm}, \text{硬岩}4,760\text{mm}) + 700\text{mm} \times 2 + 50\text{mm} + 20\text{mm} \\ &= (\text{軟岩}6,150\text{mm}, \text{硬岩}6,230\text{mm}) \end{aligned}$$

\* 軟岩、硬岩ともに、処分坑道における空間線量率が管理区域以下(埋め戻し材厚さ1.2mを設定)となること、掘削影響領域(1mを想定)と緩衝材が接触しないことを考慮した。

以上をまとめると次のようになる。

	処分孔径	処分孔深さ
軟岩	3.2m	7.2m
硬岩	2.7m	7.4m

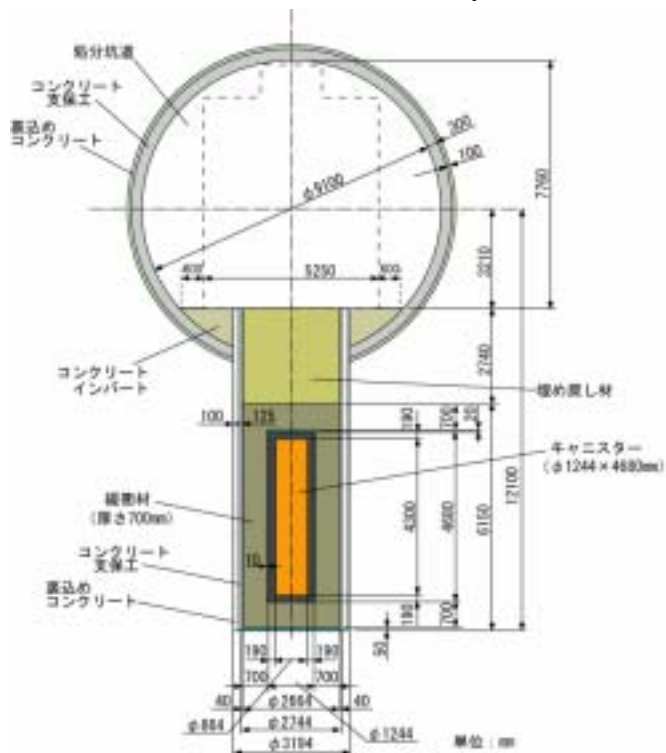
# 処分孔深さ設定における処分坑道の空間線量率 (処分孔上部の埋め戻し材厚さの設定)



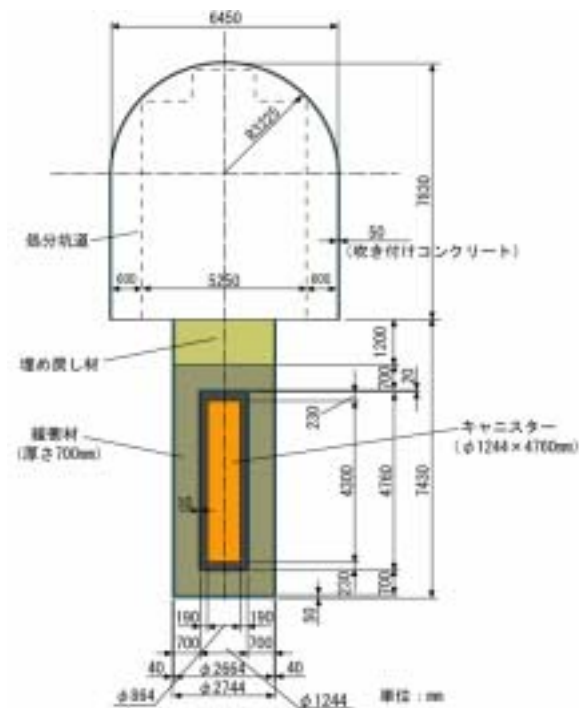
処分孔上部埋め戻し材厚さと表面線量当量率

### c. 処分坑道および処分孔仕様の設定まとめ

aおよびbにおいて設定した寸法に基づいた処分坑道および処分孔概念を下図に示す。



軟岩における処分坑道, 処分孔概念



硬岩における処分坑道, 処分孔概念

## 地下施設の設定

地下処分施設を設定するために必要となるキャニスターの埋設密度(専有面積)を設定するためには、キャニスターの発熱による緩衝材の温度が制限温度以下になることと掘削する坑道や処分孔が隣接する坑道、処分孔の掘削による構造的な影響を受けない距離を取る必要がある。

そのための熱解析及び空洞安定性評価方法を示す。

### a.熱解析

[設定項目]

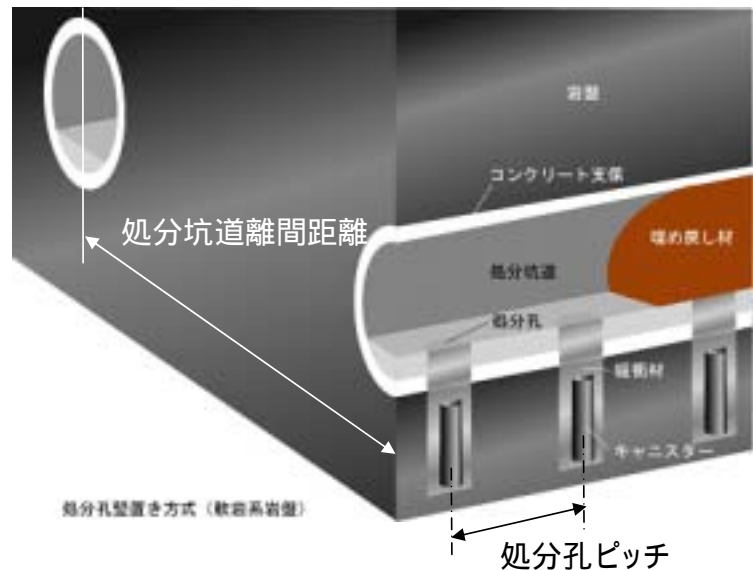
- ・処分孔ピッチ
- ・処分坑道離間距離

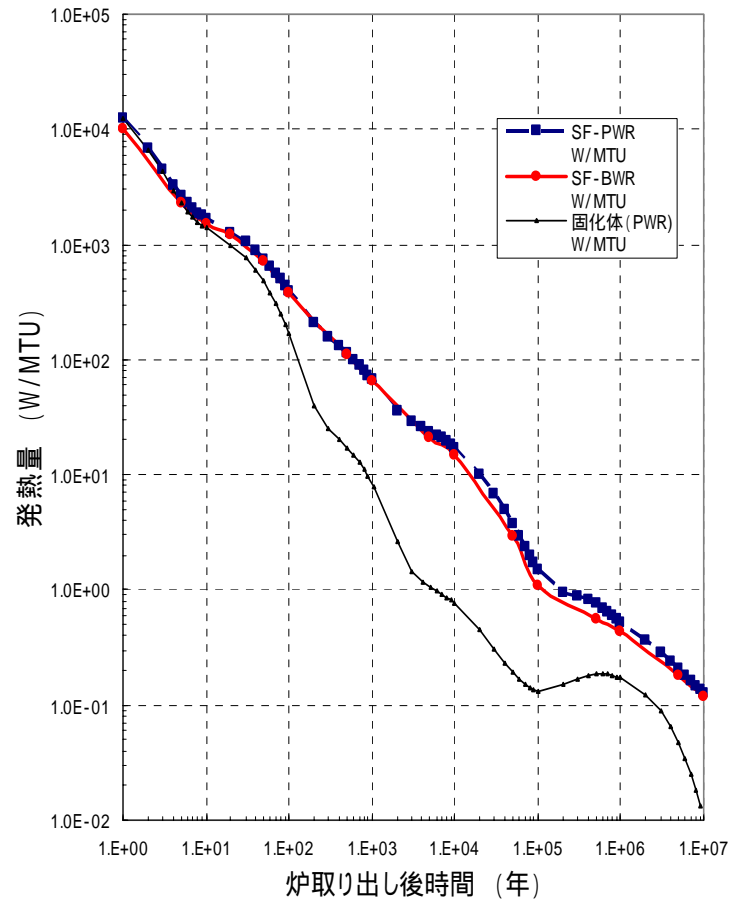
[条件]

- ・キャニスター発熱量及び経時変化
- ・岩盤、緩衝材、キャニスター等の熱物性値は、第2次取りまとめを参考
- ・地温:軟岩・30 , 硬岩・45

[判定基準]

・本検討では、多くの不確実性を設計等に含んでいること、集合体単位での燃焼度の違いや軸方向の発熱量分布を考慮し、緩衝材の性能を担保するための温度として90 を目標とする。





使用済燃料(PWR)とガラス固化体の発熱量の経時変化

## b. 空洞安定性評価

熱解析結果に対して、建設、操業の安全を確保する観点より、岩盤の空洞安定性について検討する。

空洞安定性については、ガラス固化体処分での検討(第2次とりまとめ)において、隣接する処分孔または処分坑道どうしが有意な力学的影響を受けない処分孔間隔または処分坑道離間距離について、処分孔径、処分坑道径に基づく制限を設定している。

[空洞安定性に関する制限](第2次とりまとめ)

(軟岩) 処分孔ピッチ : 処分孔径の3倍

処分坑道離間距離 : 処分坑道径の2.6倍

(硬岩) 処分孔ピッチ : 処分孔径の2倍

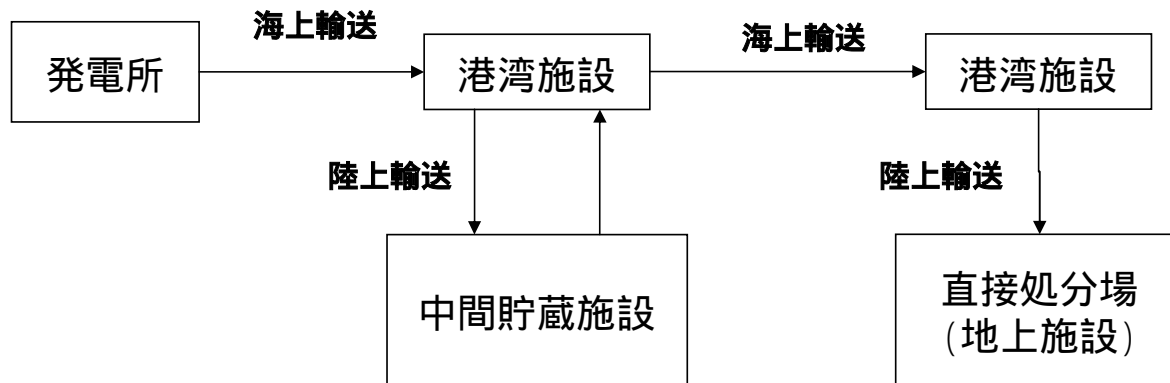
処分坑道離間距離 : 処分坑道径の2倍

これらの値を、熱解析により設定される値と比較し、両解析の制限条件を満足する処分孔ピッチ、処分坑道離間距離を確保する。



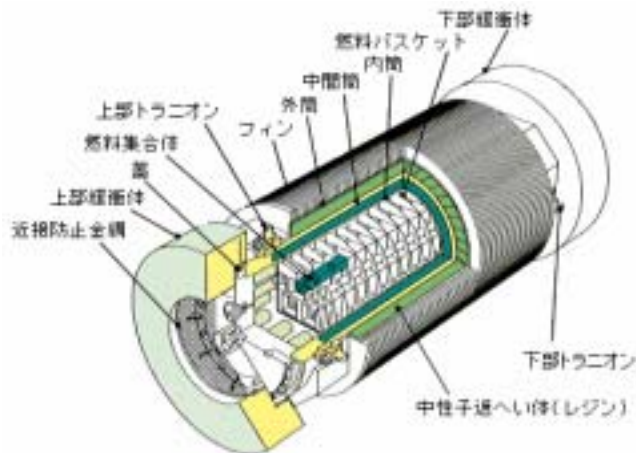
## (2) インフラ施設及び地上施設 使用済燃料の物流

直接処分では、原子力発電所で発生した使用済燃料が、中間貯蔵のために中間貯蔵施設で所定期間保管され、その後最終処分のために処分場に運ばれるものと想定した。

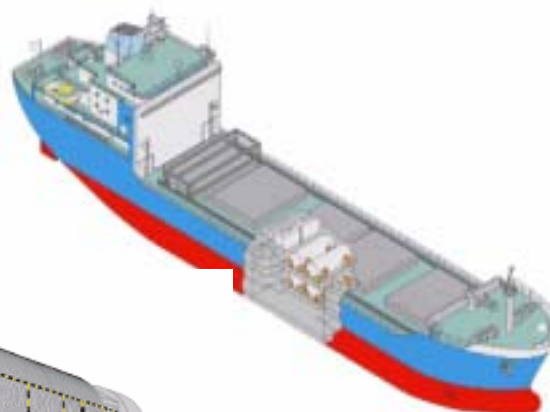


## 使用済燃料の輸送

使用済燃料は、様々な試験によって安全性を確認した使用済燃料輸送専用の輸送容器(貯蔵容器)に入れて、中間貯蔵施設から中間貯蔵施設港あるいは一般港まで陸上輸送を行い、港から処分場の最寄りの港までは海上輸送、港から処分場までは陸上輸送を行う。



NFT型輸送容器



使用済燃料輸送船



使用済燃料輸送車両

図は原燃輸送株式会社ホームページ(<http://www.nft.co.jp/>)より

## 物量条件の設定

### a. 受け入れ使用済燃料量

ガラス固化体処分で設定されている800tU/年に相当する使用済燃料を受け入れ可能な施設を想定する。受入れ形態は、輸送・貯蔵容器。

### b. 処分量

上記と同様に800tU/年の使用済燃料を処分可能な施設を想定する。

キャニスター仕様	800tU/年とした場合			総キャニスター数 <sup>3)</sup>
	受入れ燃料 集合体数 <sup>1)</sup>	必要 キャニスター数 <sup>1)</sup>	キャニスター 処分数/日 <sup>2)</sup>	
2体/キャニスター	約1,740体/年	約870本/年	4～5本/日	34,783本
4体/キャニスター		約435本/年	2～3本/日	17,392本

1)燃料集合体0.46tU/体，2体/キャニスター：0.92tU/本，4体/キャニスター：1.84tU/本で算出

2)操業日数200日/年を想定した場合

3)総量32,000tUの場合

## 地上施設の構成

地上施設としては、ガラス固化体処分と同様の施設、直接処分固有の施設に分けられる。以下にこれらの例を示す。

### a. ガラス固化体処分と同様の施設：

- ・ 緩衝材や埋め戻し材等の製作施設
- ・ 管理施設
- ・ 電源等のユーティリティ施設
- ・ 掘削ズリ置き場 等

### b. 直接処分固有の施設：

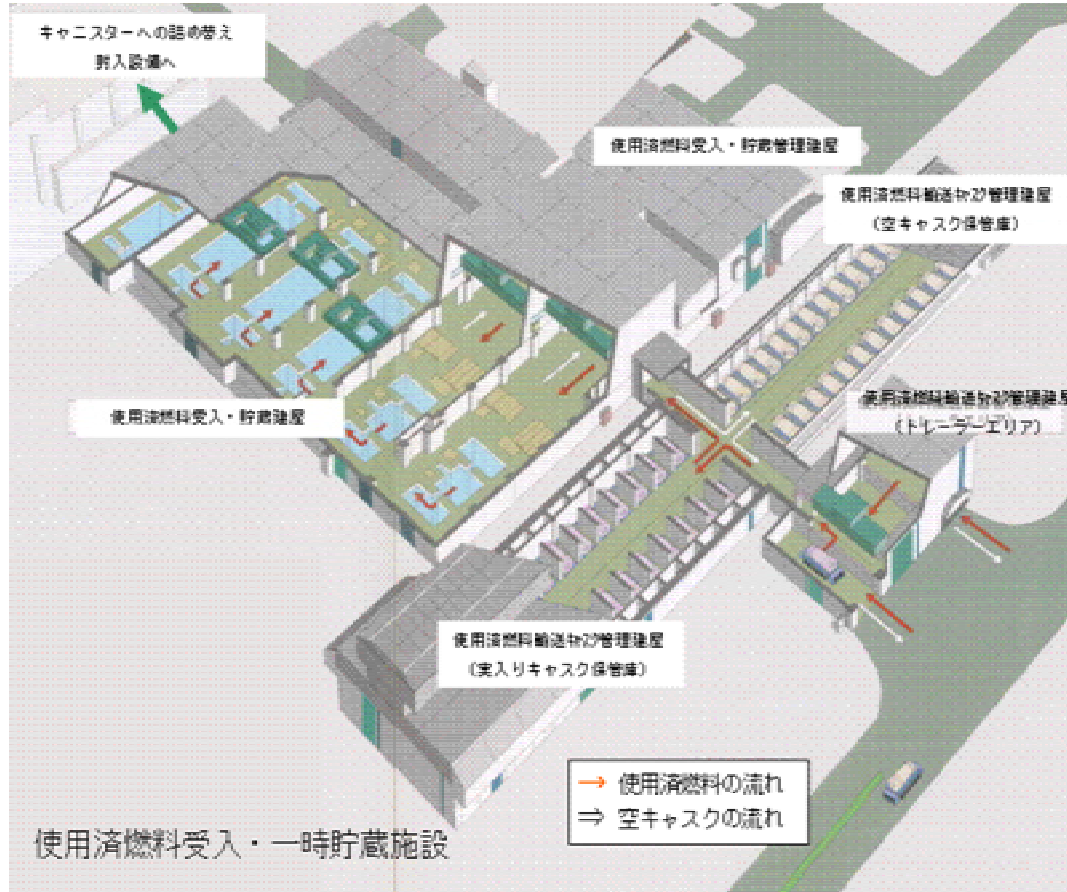
#### ・ 使用済燃料受入・貯蔵施設

使用済燃料輸送・貯蔵容器を受入れ、使用済み燃料を取り出してプールに一旦保管する施設 (3,000tU相当プール：約3～4年分)

#### ・ キャニスター装荷・封入施設

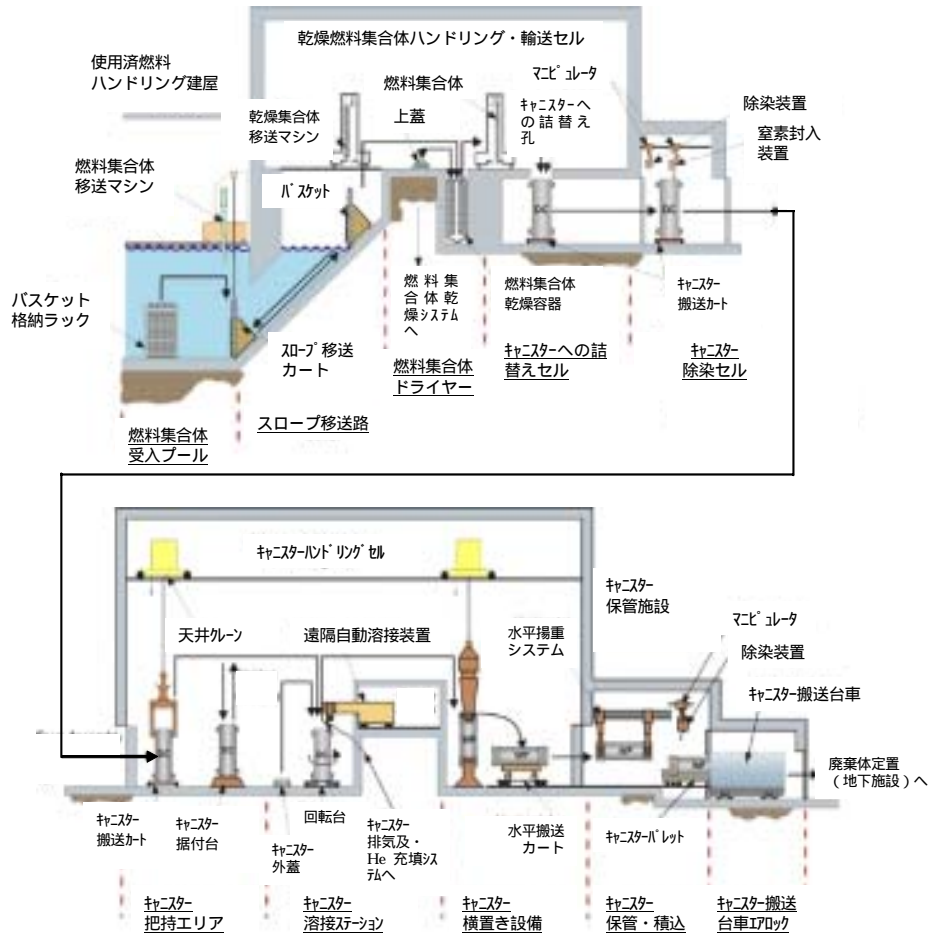
使用済燃料をキャニスターに装荷し、処分のためにキャニスターを最終封入 (遠隔溶接等) する施設

## 使用済燃料受入・貯蔵施設の概念



使用済燃料受入・一時貯蔵施設概念図  
(JNFLパンフレットの使用済燃料受入れ・貯蔵施設図を用いて作成)

# キャニスター装荷・封入施設における作業工程概念



【原典 : Yucca Mountain Science and Engineering Report Rev 1 DOE/RW-0539-1】

## 3. 予備的な核種移行評価

(1) 評価の目的と前提

(2) 概念モデル

(3) 評価内容

(4) 評価結果と考察

# (1) 評価の目的と前提

## 評価の目的

本評価は、使用済燃料の直接処分を想定した場合について、人工バリアなどのシステム性能の成立性を核種移行評価(含む線量評価)の観点から予備的に検討することを目的とする。

なお、使用済燃料の直接処分における固有の課題については、設計、核種移行評価等において、現段階で可能な範囲で対応する。



# (1) 評価の目的と前提

## 評価の前提

- 予備的な核種移行評価においては、基本的にガラス固化体に関する安全評価(地層処分研究開発第2次取りまとめ)に準拠した上で、使用済燃料の直接処分における固有の課題に関しては、
  - わが国におけるTRU廃棄物に関する研究(TRU廃棄物概念検討書[1])
  - 諸外国の使用済燃料の直接処分に関する安全評価書(スイスのEN2002[2]、フィンランドのTILA99[3]、スウェーデンのSR97[4]とSITE94 [5])

における条件の設定例などを直接引用することにより、現段階で可能な範囲で対応することとする。

[1]JNC TN1400 99-020

[2]Nagra TR 02-05

[3]POSIVA 99-07

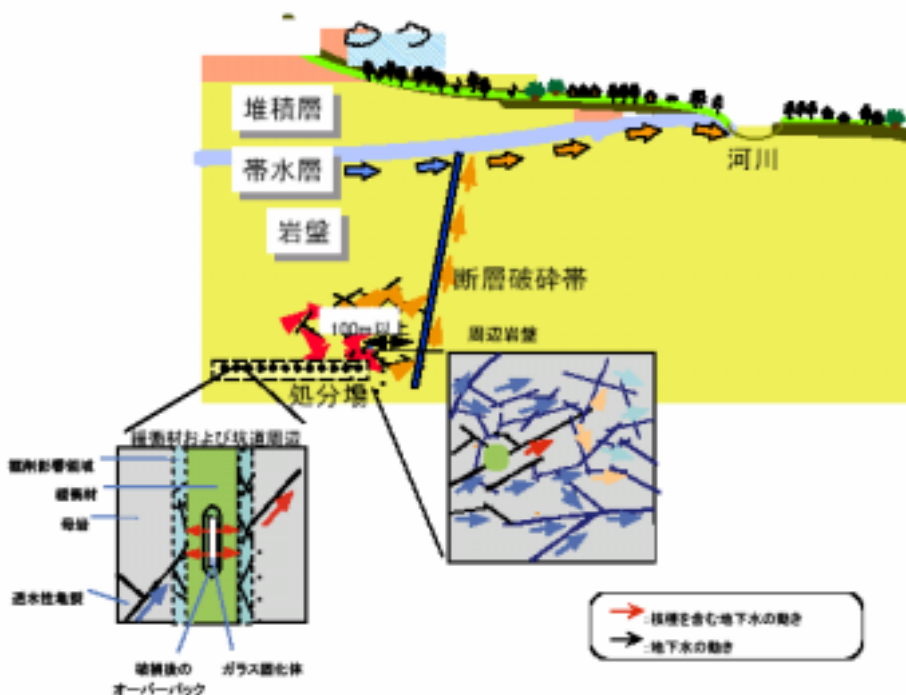
[4]SKB TR-99-06

[5]SKI Report 96:36

## (2)概念モデル

### 核種移行評価の概念 (移行経路等)

核種移行評価の概念  
(ガラス固化体の場合に準拠)



ガラス固化体からの核種溶出  
(本検討では使用済燃料からの核種溶出を考慮:次頁参照)

緩衝材中の核種移行

周辺岩盤(母岩)中の核種移行  
(処分場下流から断層までの100m)

断層破碎体中の核種移行

(処分場深度から帯水層までの距離:  
硬岩(結晶質岩)の場合800m  
軟岩(堆積岩)の場合300m )

核種の河川への流入, 地表環境での核種移行および被ばく

## (2)概念モデル

### 使用済燃料からの核種溶出の概念

使用済燃料の模式図(スイスEN2002より)

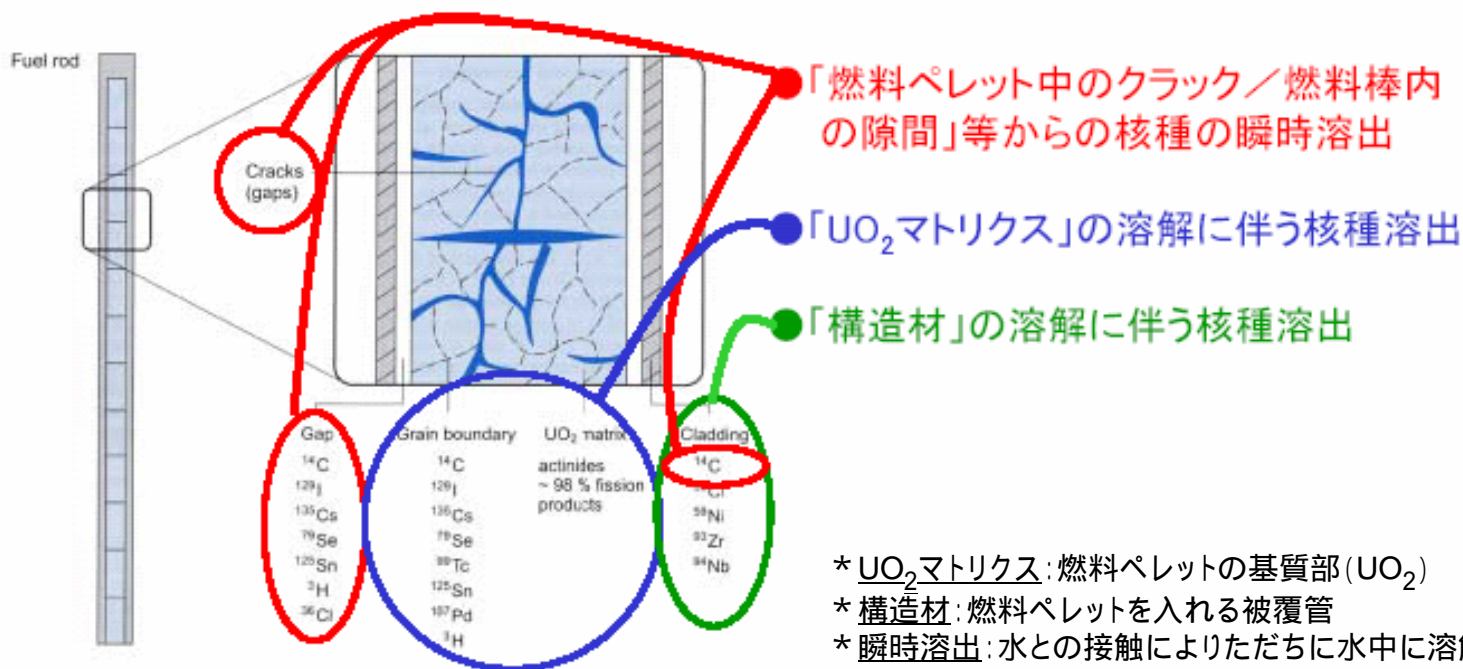


Fig. 4.5-2: Schematic illustration of the distribution of radionuclides within a fuel rod (based on Johnson & Tait 1997)

- \* UO<sub>2</sub>マトリクス: 燃料ペレットの基質部 (UO<sub>2</sub>)
- \* 構造材: 燃料ペレットを入れる被覆管
- \* 瞬時溶出: 水との接触によりただちに水中に溶解すること

### (3) 評価内容

#### 処分システム仕様

「直接処分の設計検討」と同じ仕様を考慮

キャニスター(使用済燃料) :

- ・本数 : 約17,400本  
(32,000 tU相当, 1.84 tU/本(燃料集合体4体収納))
- ・寸法 : (硬岩)外形 1.244 m, 高さ4.76 m  
(軟岩)外形 1.244 m, 高さ4.68 m

人工バリア(緩衝材) < ガラス固化体と同じ仕様 > :

- ・材料 : ベントナイト 70 wt% + ケイ砂 30 wt%
- ・厚さ : 0.7 m
- ・密度 : 1.6 Mg/m<sup>3</sup>

岩種・深度 < ガラス固化体と同じ仕様 > :

- ・硬岩(結晶質岩) : 1000 m
- ・軟岩(堆積岩) : 500 m

# (3) 評価内容

## シナリオ ガラス固化体の評価における「地下水シナリオ\*」のうち 「基本シナリオ\*\*」に準拠

\*: 地下水により放射性物質が処分場から人間環境に運ばれる可能性に関するシナリオ

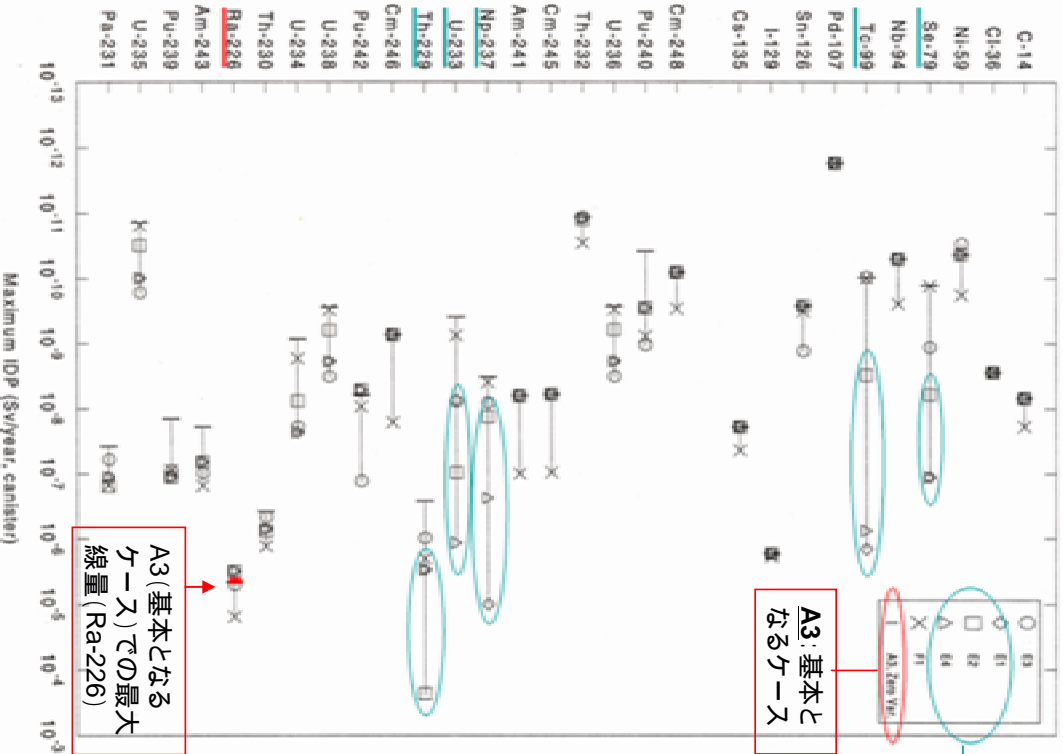
\*\*: 「現在の地質環境の条件が安定に将来まで継続する」

「人工バリアは期待する安全機能を発揮する」

「現在の地表環境が将来まで継続する」ということを前提とする

	ガラス固化体処分の評価	直接処分の評価における主な変更点
使用済燃料からの核種溶出	<ul style="list-style-type: none"> <li>・処分後1,000年時点でオーバーパックが全数破損し、核種溶出が開始。</li> <li>・核種の溶出は、ガラス固化体との調和溶解により規定される。</li> <li>・濃度が溶解度を超える場合には、沈殿の生成による濃度制限が生ずる。</li> <li>・人工バリアおよび天然バリア中は還元状態。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ &lt; 同左 &gt;</li> <li>・核種の溶出は、燃料からの瞬時溶出、UO<sub>2</sub>マトリクス溶解との調和的な溶出、構造材からの瞬時溶出、構造材溶解との調和的な溶出により規定される。</li> <li>・ &lt; 同左 &gt;</li> <li>・不確定要素である放射線分解による酸化還元フロントの進展については、設計において燃料集合体収納数を2本にする場合を考慮することで対応することとする。このため、本評価ではその影響がないものと想定し、人工バリアおよび天然バリア中は還元状態と仮定(参考として、放射線分解による酸化還元フロントの進展を評価したスウェーデンSITE94の例を次頁に示す)。</li> <li>・燃料起源のC-14は有機、構造材起源のC-14は無機を仮定。</li> </ul>
人工バリア中核種移行	<ul style="list-style-type: none"> <li>・拡散による移行。</li> <li>・収着による移行遅延。</li> <li>・濃度が溶解度を超える場合には、沈殿の生成による濃度制限。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ &lt; 同左 : I-129やC-14等を追加 &gt;</li> <li>・ &lt; 同左 : I-129やC-14等を追加 &gt;</li> <li>・ &lt; 同左 &gt;</li> </ul>
天然バリア(母岩、断層)中核種移行	<ul style="list-style-type: none"> <li>・亀裂が卓越し、亀裂中の移流・分散による移行。</li> <li>・マトリクス拡散、収着による移行遅延。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ &lt; 同左 : I-129やC-14等を追加 &gt;</li> <li>・ &lt; 同左 : I-129やC-14等を追加 &gt;</li> </ul>
その他		<ul style="list-style-type: none"> <li>・臨界、大きな坑道の掘削、地質環境の長期安定性に係わる影響については、設計あるいは地質調査段階での対応とし、本評価ではその影響がないものと想定した。</li> </ul>

## 放射線分解による酸化還元フロントの進展の 影響に関する評価例 (スウェーデンSITE-94)



### 放射線分解等の影響に ついたのケース:

**E1 ( ):** ニアフェールド領域(ベントナイト+数mの岩盤)の全域が酸化状態。ニアフェールド(ニアフェールド外側の100m程度の岩盤)は還元状態。

**E4 ( ):** ニアフェールド領域のうち岩盤の最後の0.1mを除く部分が酸化状態、ニアフェールドの岩盤の最後の0.1mとニアフェールドは還元状態。

**E2 ( ):** 酸化還元フロントの時間的な進展(オーバーパック破壊後400年程度でベントナイトが酸化状態、さらに数百万年でニアフェールド岩盤の1m程度が酸化状態。それ以外は還元状態)。

### 結果の概要:

酸化還元に鋭敏な核種 (Se79, Tc99, Np237, U233など), およびそれ自身は酸化還元に鋭敏ではないが酸化還元に鋭敏な親核種の影響を受ける核種 (Th229など) について, 2~4桁の増加が見られる。

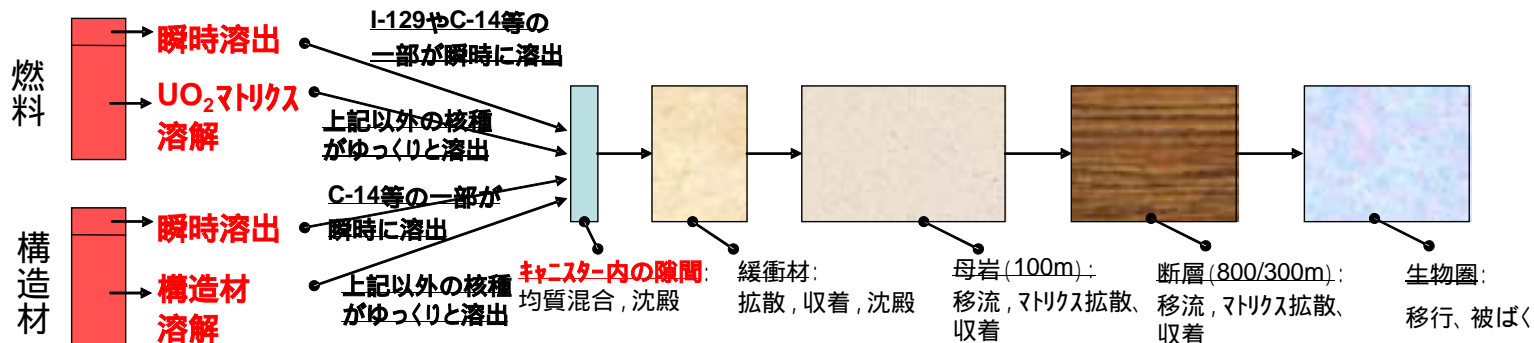
[特に変化の大きい核種に対して, 図中に枠線を追加]

### ニアフェールド外側での各核種の最大線量の比較

: 酸化還元状態の影響 (E1, E2, E4) 等に関する結果

[SITE94, SKI Report 96:36のp.569 Figure 16.2.9に加筆]

# (3) 評価内容 モデル



モデル上の取り扱いの主な特徴	
使用済燃料からの核種溶出	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料および構造材中の核種の一定割合が瞬時溶出, それ以外はUO<sub>2</sub>マトリクスおよび構造材の溶解と調和的に溶出</li> <li>溶出した核種は、キャニスター内の隙間において均質に混合。</li> <li>濃度が溶解度を超える場合には、溶解度による濃度制限(瞬時・可逆)。</li> </ul>
人工バリア中核種移行	<ul style="list-style-type: none"> <li>一次元円筒座標系モデル</li> <li>人工バリア中での濃度勾配に基づく拡散, 緩衝材への収着(瞬時・線形・可逆)、溶解度による濃度制限(瞬時・可逆)。</li> </ul>
天然バリア(母岩、断層)中核種移行	<ul style="list-style-type: none"> <li>一次元平行平板モデルの重ね合わせ(母岩)</li> <li>一次元平行平板モデル(断層)。</li> <li>移流・分散, マトリクス拡散、岩石基質中での収着(瞬時・線形・可逆)。</li> </ul>
生物圏	<ul style="list-style-type: none"> <li>地表環境での核種移行, 複数の被ばく経路を考慮</li> <li>&lt;本評価では、わが国でのTRU廃棄物概念検討書での「河川水シナリオ」の結果を直接引用&gt;</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>核種移行評価は、上記モデルを用いて廃棄体1本あたりの解析(核種溶出人工バリア 天然バリア 生物圏)を行ったあと、その結果を総廃棄体本数倍する。</li> </ul>

# (3) 評価内容

## 諸外国の安全評価書での条件設定の例と 本評価での設定の比較

		スイス : EN2002 <Nagra TR 02-05 >	フィンランド : TILA99 < POSIVA 99-07 >	スウェーデン : SR97 < SKB TR-99-06 >	スウェーデン : SITE94 < SKI Report 96:36 >	日本 : 第2次取りまとめ <JNC TN1400 99-020>	日本 : TRU報告書 <JNC TY1400 2000-001>	本検討で設定した 条件	本検討での設定の 考え方
燃料 (UO2マトリクス) 溶解時間		約1億年	約100万年 (1万年のケースも 設定)	1億年	1万5千年	-	-	100万年 (1万5千年のケース も設定)	諸外国の安全評価書での条 件の中間的な値である TILA99の条件を引用、また、 SITE94の条件を、本検討の 追加ケースの設定において 引用。
構造材 <sup>*)</sup> 溶解時間		約3万年	1万年	40万年	1万年	-	7600年	7600年	TRU概念検討書の条件を利用
C-14 の特性	形態 (無機として取 り扱うか、有機 として取り扱う か)	燃料起源:無機 (有機のケースも 設定) 構造材起源:有機	分配係数等の設定に よれば、無機としての 取り扱いと考えられる	分配係数等の設定に よれば、無機としての 取り扱いと考えられる	無機	-	無機	燃料起源:無機 (有機のケースも 設定) 構造材起源:有機	EN2002の条件を引用。 また、EN2002における、燃料 起源のC-14を有機として扱う 考え方を、本検討の追加ケー スの設定において引用。
	瞬時溶解割合 (IRF)	燃料中のC-14量の 10% 構造材中のC-14量の 20%	燃料中のC-14量の 10%	全C-14量の15% (構造材等を含めた場 合。燃料中のみでは 5%)	燃料中のC-14量の 10%	-	グループ2(ハル エンドピース)の C-14量の20%	燃料中のC-14量の 10% 構造材中のC-14量の 20%	TRU概念検討書、EN2002の 条件を引用
	分配係数 [m3/kg]	<無機> 緩衝材:6E-5 岩盤:1E-3 <有機> 緩衝材:0 岩盤:0	緩衝材:0 岩盤:1E-4	緩衝材:0 岩盤:1E-3	<無機> 緩衝材:1E-2 岩盤:1E-3	-	<無機> 緩衝材:0 岩盤:1E-4	<無機> 緩衝材:6E-5 岩盤:1E-4 <有機> 緩衝材:0 岩盤:0	TRU概念検討書、EN2002の 条件を引用
I-129 の特性	瞬時溶解割合	UO2中のI-129量の 4%	UO2中のI-129量の 6%	UO2中のI-129量の 3% (6%のケースも設定)	UO2中のI-129量の 10%	-	グループ1(廃銀吸 着材)中のI-129量 の100%	UO2中のI-129量の 4%	EN2002の条件を利用
	分配係数 [m3/kg]	緩衝材:5E-4 岩盤:3E-5	緩衝材:0 岩盤:0	緩衝材:0 岩盤:0	緩衝材:1E-3 岩盤:5E-4	-	緩衝材:0 岩盤:1E-4	緩衝材:0 岩盤:1E-4	TRU概念検討書の条件を引 用
溶解開始時刻		処分1万年後	処分1万年後	処分20万年後	処分1000年後	処分1000年後	処分直後	処分1000年後	第2次取りまとめの条件を引 用
最大線量の支配核種		I-129	I-129	I-129	Ra-226	-	I-129	<本評価で検討>	

\*1: シルカロイやアッセンプリ(注:ただし、安全評価書毎に定義は微妙に異なる)



### (3) 評価内容

#### 評価ケースとデータ: 評価ケースの設定

		データ変更の組合せ			
燃料溶解時間[y]		$1 \times 10^6$	<u><math>1.5 \times 10^4</math></u>	$1 \times 10^6$	<u><math>1.5 \times 10^4</math></u>
C-14の形態	燃料起源	無機	無機	<b>有機</b>	<b>有機</b>
	構造材起源	有機	有機	有機	有機
		↓	↓	↓	↓
硬岩(結晶質岩)ケース		Case1-1	Case1-2	Case1-3	Case1-4
軟岩(堆積岩)ケース		Case2-1	Case2-2	Case2-3	Case2-4

# (3) 評価内容

## 評価ケースとデータ: ガラス固化体の評価と異なる主なデータ

### 硬岩(結晶質岩)ケース

### 軟岩(堆積岩)ケース

パラメータ		単位	Case1-1	Case1-2	Case1-3	Case1-4	
ソースターム	30年~100年の経過時間(処分後)	[y]	1.00E+03				
	廃棄体本数	[can]	1.74E+04				
	インベントリ	燃料中のC-14	[Bq/can]	3.82E+10			
		燃料中のI-129	[Bq/can]	2.83E+09			
		燃料中のCl-36	[Bq/can]	8.05E+08			
		燃料中のSe-79	[Bq/can]	3.77E+10			
		燃料中のCs-135	[Bq/can]	4.22E+10			
	瞬時溶解係数(ERF)	構造材中のC-14	[Bq/can]	6.44E+10			
		燃料中のC	[%]	10			
		燃料中のI	[%]	4			
		燃料中のCl	[%]	10			
		燃料中のSe	[%]	4			
	溶解時間	燃料	[y]	100万年で全量溶解	15000年で全量溶解		15000年で全量溶解
		構造材	[y]	7600年で全量溶解			
	C-14の形態	燃料中のC	[-]	無機	有機	有機	
構造材中のC		[-]	有機				
埋蔵材中の核種移行パラメータ	C(有機)	[m3/kg]	0				
	C(無機)	[m3/kg]	0.00006	0	0	0	
	I	[m3/kg]	0				
	Cl	[m3/kg]	0				
	Se	[m3/kg]	0				
	Cs	[m3/kg]	0.01				
	その他の元素	[m3/kg]	第2次取りまとめと同じ				
	実効拡散係数	I, Se, C(無機)	[m2/s]	2E-10			
		Cs	[m2/s]	6E-10			
		その他の元素	[m2/s]	第2次取りまとめと同じ			
		C(有機)	[mol/l]	可溶性	可溶性	可溶性	
		C(無機)	[mol/l]	2E-04			
	溶解度	I	[mol/l]	可溶性			
		Cl	[mol/l]	可溶性			
		Se	[mol/l]	3E-09			
Cs		[mol/l]	可溶性				
その他の元素		[mol/l]	第2次取りまとめと同じ				
C(有機)		[m3/kg]	0	0	0		
C(無機)		[m3/kg]	0.0001				
天然バリア中の核種移行パラメータ	Cl	[m3/kg]	0.0001				
	Cl	[m3/kg]	0.0001				
	Se	[m3/kg]	0.01				
	Cs	[m3/kg]	0.05				
	その他の元素	[m3/kg]	第2次取りまとめと同じ				
	実効拡散係数	全元素(C,Cl含む)	[m2/s]	第2次取りまとめと同じ			
		浸水量係数分布マトリクス拡散係数マトリクス浸透率と面積率マトリクス浸透率移行距離等		第2次取りまとめと同じ			
	標準係数	C-14	[mSv/Bq]	1.65E-13			
		I-129	[mSv/Bq]	7.50E-13			
		Cl-36	[mSv/Bq]	8.19E-14			
		Se-79	[mSv/Bq]	7.76E-12			
		Cs-135	[mSv/Bq]	2.26E-13			

パラメータ		単位	Case2-1	Case2-2	Case2-3	Case2-4	
ソースターム	30年~100年の経過時間(処分後)	[y]	1.00E+03				
	廃棄体本数	[can]	1.74E+04				
	インベントリ	燃料中のC-14	[Bq/can]	3.82E+10			
		燃料中のI-129	[Bq/can]	2.83E+09			
		燃料中のCl-36	[Bq/can]	8.05E+08			
		燃料中のSe-79	[Bq/can]	3.77E+10			
		燃料中のCs-135	[Bq/can]	4.22E+10			
	瞬時溶解係数(ERF)	構造材中のC-14	[Bq/can]	6.44E+10			
		燃料中のC	[%]	10			
		燃料中のI	[%]	4			
		燃料中のCl	[%]	10			
		燃料中のSe	[%]	4			
	溶解時間	燃料	[y]	100万年で全量溶解	15000年で全量溶解		15000年で全量溶解
		構造材	[y]	7600年で全量溶解			
	C-14の形態	燃料中のC	[-]	無機	有機	有機	
構造材中のC		[-]	有機				
埋蔵材中の核種移行パラメータ	C(有機)	[m3/kg]	0				
	C(無機)	[m3/kg]	0.00006	0	0	0	
	I	[m3/kg]	0				
	Cl	[m3/kg]	0				
	Se	[m3/kg]	0				
	Cs	[m3/kg]	0.01				
	その他の元素	[m3/kg]	第2次取りまとめと同じ				
	実効拡散係数	I, Se, C(無機)	[m2/s]	2E-10			
		Cs	[m2/s]	6E-10			
		その他の元素	[m2/s]	第2次取りまとめと同じ			
		C(有機)	[mol/l]	可溶性		可溶性	可溶性
		C(無機)	[mol/l]	2E-04			
	溶解度	I	[mol/l]	可溶性			
		Cl	[mol/l]	可溶性			
		Se	[mol/l]	3E-09			
Cs		[mol/l]	可溶性				
その他の元素		[mol/l]	第2次取りまとめと同じ				
C(有機)		[m3/kg]	0	0	0	0	
C(無機)		[m3/kg]	0.0001				
天然バリア中の核種移行パラメータ	Cl	[m3/kg]	0.0001				
	Cl	[m3/kg]	0.0001				
	Se	[m3/kg]	0.01				
	Cs	[m3/kg]	0.1				
	その他の元素	[m3/kg]	第2次取りまとめと同じ				
	実効拡散係数	全元素(C,Cl含む)	[m2/s]	第2次取りまとめと同じ			
		浸水量係数分布マトリクス拡散係数マトリクス浸透率と面積率マトリクス浸透率移行距離等		第2次取りまとめと同じ			
	標準係数	C-14	[mSv/Bq]	1.65E-13			
		I-129	[mSv/Bq]	7.50E-13			
		Cl-36	[mSv/Bq]	8.19E-14			
		Se-79	[mSv/Bq]	7.76E-12			
		Cs-135	[mSv/Bq]	2.26E-13			

  第2次取りまとめの条件を本検討用に修正  
  第2次取りまとめの条件を引用  
  TRU報告書の条件を引用  
  EN2002の条件を引用  
  TILA-99の条件を引用  
  SITE-94の条件を引用

  \* 第2次取りまとめの条件を本検討用に修正  
  \* 新第三紀泥質凝灰質に対する設定を引用  
  第2次取りまとめの条件を本検討用に修正  
  第2次取りまとめの条件を引用  
  TRU報告書の条件を引用  
  EN2002の条件を引用  
  TILA-99の条件を引用  
  SITE-94の条件を引用

## (4) 評価結果と考察

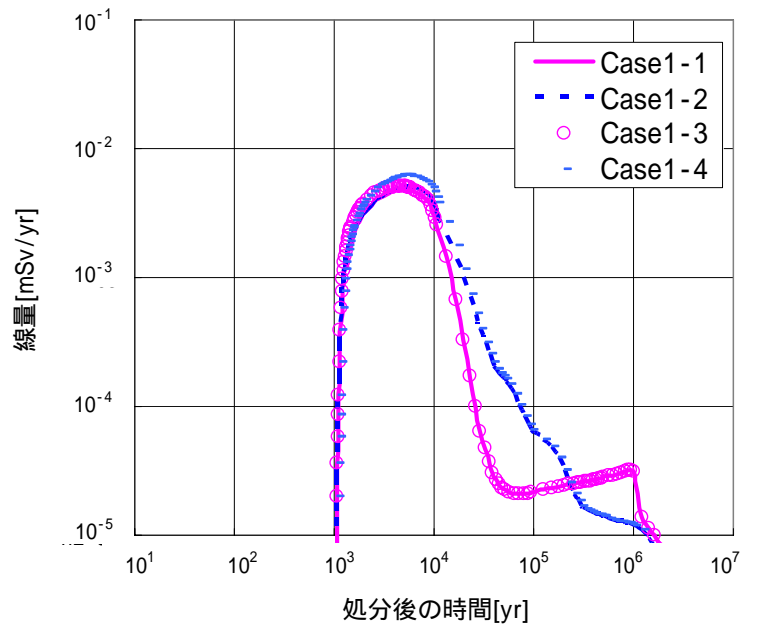
項目	結果の概要
総線量の最大値 [mSv/y]	(いずれのケースも) $10^{-3}$ mSv/yのオーダー*
最大値の発生時間[y]	(いずれのケースも) 処分後5000～8000年
支配核種	(いずれのケースも) C-14(有機)
結果の特徴	<ul style="list-style-type: none"><li>・遅延効果が小さいC-14(有機)が支配的となるため、オーバーパック破損(処分後1000年)以降に早期に最大値が生ずる。</li><li>・諸外国の安全基準(0.1～0.3mSv/y)を下回る結果となっている。</li></ul>

\*: なお、この総線量の最大値は、1キャニスターあたりの燃料集合体の収納体数を4体とした場合の結果であるが、収納体数を2体とした場合でも総線量の最大値は変化しないと考えられる。

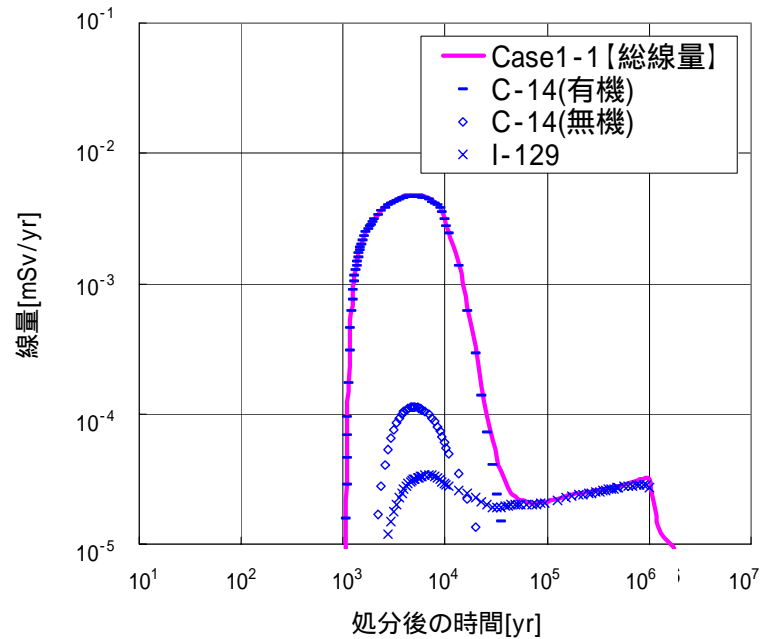
# (4) 評価結果と考察

## 硬岩 (結晶質岩) の結果

Case1-1 ~ Case1-4の総線量の比較



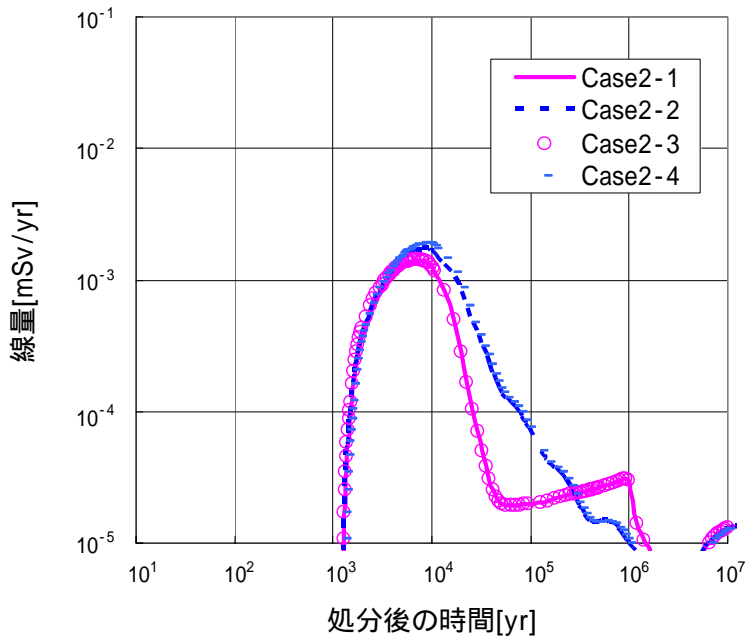
Case1-1における主要な核種



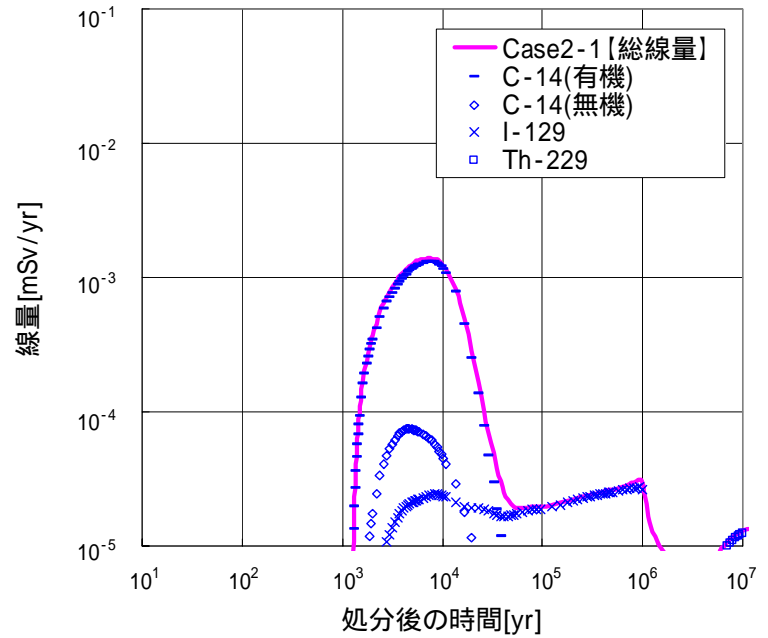
# (4) 評価結果と考察

## 軟岩(堆積岩)の結果

Case2-1 ~ Case2-4の総線量の比較



Case2-1における主要な核種



## (4) 評価結果と考察

- 諸外国の安全評価と本予備的評価での支配核種の相違

各評価での支配核種の相違は、「C-14の取り扱いの違い（無機，有機）」と「岩盤性能の違い」により生じている。

	無機のC-14のみを考慮 (燃料起源と構造材起源で特に 区別せず)	有機のC-14を考慮 (燃料起源を無機，構造材起 源を有機と区別)
岩盤性能： 特に良好	支配核種：I-129 (TILA99, SR97)	支配核種：I-129 (EN2002)
岩盤性能： 特に良好ではない		支配核種：C-14(有機) (本評価)

- 使用済燃料の直接処分に関する予備的な核種移行評価の結果は，諸外国の安全基準を下回る結果となっている。従って，「2. 直接処分の設計検討」で想定した直接処分場概念は，放射性物質による環境影響に関して大きな齟齬はきたさない程度の妥当性はあると考えられる。

## 4 . 不確定要素に関する感度解析

(1)不確定要素の整理と取り扱い

(2)コスト試算のための感度解析のケース分け(案)

## (1) 不確定要素の整理と取り扱い

第1章で述べたとおり、数値化できない不確定要素としては以下の項目が挙げられる。これらについては以下に示すとおり変数として扱い、コスト試算のための感度解析を実施する。

不確定要素	変数	ケース
長期的な緩衝材の変形対策	重量(収納体数)	キャニスター当たり 2体 / 4体
キャニスター内での臨界に対する対策	核分裂性核種の総量	キャニスター当たり 2体 / 4体
放射線分解対策	崩壊核種の総量	キャニスター当たり 2体 / 4体
熱影響や上記不確定要素対応による波及効果 (面積に応じた立地対策)		処分場分割 1サイト / 2サイト

この他に前回委員会で提案のあった横置き方式についても参考ケースとして、コスト試算のための感度解析を実施する。

ただし、横置き定置方法については、ガラス固化体に比べて非常に重いものを横方向に扱うことの工学的な困難さ、一旦定置したものに対して操業中何らかのトラブルが生じた際の対応や再取り出しが非常に困難なことなど縦置き方式に比べて技術の成立性の点で不確実性が大きい。



## (2) コスト試算のための感度解析のケース分け(案)

コスト試算する際に影響を及ぼす不確定要素を確認するために以下のケースの感度解析を行い、その中から最終的に現実的かつ技術的に成立する直接処分場概念のコストを幅を含めて試算する。

	ケース設定	燃料集合体数	サイト数	定置方式
軟岩	ケース1(縦・収納体数)	2本	1サイト	縦置き
	ケース2(縦・収納体数)	4本	1サイト	縦置き
	ケース3(縦・サイト数)	2本又は4本	2サイト	縦置き
	参考ケース1(横・収納体数)	2本	1サイト	横置き
	参考ケース2(横・収納体数)	4本	1サイト	横置き
硬岩	ケース1(縦・収納体数)	2本	1サイト	縦置き
	ケース2(縦・収納体数)	4本	1サイト	縦置き
	ケース3(縦・サイト数)	2本又は4本	2サイト	縦置き
	参考ケース1(横・収納体数)	2本	1サイト	横置き
	参考ケース2(横・収納体数)	4本	1サイト	横置き