

ウラン廃棄物の 余裕深度処分概念の検討

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2005年3月

三菱マテリアル株式会社

本資料の全部又は一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

**Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan**

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2005

ウラン廃棄物の余裕深度処分概念の検討
(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

山本正幸、石橋純

要 旨

ウラン廃棄物は、その主要核種が長半減期のウランであり、また、廃棄体からの放射線の影響をほとんど考慮しないでよいという特徴をもっている。これまでも余裕深度処分相当のウラン廃棄物の検討が実施されてきたが、これらの特徴が十分に反映されてこなかった。これらのウラン廃棄物の特徴を踏まえて次の合理的な処分概念を検討した。

岩盤空洞 + コンクリートピット

岩盤空洞 + モノリス

岩盤空洞 + トレンチ

処分概念の操業中及び管理期間終了後の安全性について検討した。廃棄体から受ける作業者の被ばく線量は大きくないことがわかった。また、管理期間終了後、一般公衆が受ける被ばく線量は、人工バリアを軽減しても、大きく変化しないことがわかった。さらに、規制、操業、管理期間対応に関する課題点を抽出した。

本報告書は、三菱マテリアル株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当部課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部

処分材料研究グループ：

三菱マテリアル株式会社 エネルギー事業センター

**Study of subsurface disposal concepts for Uranium Waste
(Document Prepared by Other Organization, Based on the Contract)**

Masayuki Yamamoto*, Makoto Ishibashi*

Abstract

Uranium waste has features that the main nuclide is long-lived uranium and it is not almost necessary to consider radiation influence from waste package. Although the many studies for subsurface disposal concept of uranium waste have been done, the wastes features were not carefully considered in the former studies. The following reasonable disposal concepts have been designed considering the features in this study.

Concrete vault disposal concept in rock cavern

Monolithic disposal concept in rock cavern

Trench disposal concept in rock cavern

The safety of the disposal concepts during operation and after control phase has been investigated in this study. As the result, it has been shown that the exposure dose of workers due to waste package is not high. And it has been shown that the exposure dose of the public does not change so much, even if the engineered barrier has been reduced. Besides, some issues regarding regulation, operation and monitoring have been picked up.

This Work was performed by Mitsubishi Materials Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Materials Research Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works.

*** Energy Project & Technology Center, Mitsubishi Materials Corporation**

目 次

1 はじめに.....	1
2 実施計画.....	2
2.1 余裕深度処分対象のウラン廃棄物の特性整理.....	2
2.2 余裕深度処分の合理的な施設概念の検討.....	2
2.3 安全性の検討.....	2
2.4 課題の整理.....	2
2.5 報告書の作成.....	2
2.6 実施期間.....	2
3 実施結果.....	4
3.1 余裕深度処分対象のウラン廃棄物の特性整理.....	4
3.1.1 ウラン廃棄物以外の余裕深度処分対象廃棄物の特徴整理.....	4
3.1.2 余裕深度処分対象のウラン廃棄物の特徴整理.....	9
3.2 余裕深度処分の合理的な施設概念の検討.....	15
3.2.1 ウラン廃棄物以外の余裕深度処分概念及び廃棄体形態の特徴整理.....	15
3.2.2 ウラン廃棄物の合理的な施設概念検討.....	21
3.3 安全性の検討.....	39
3.3.1 操業時の安全性の検討.....	39
3.3.2 管理終了後の安全性の検討.....	45
3.4 課題の整理.....	58
3.4.1 課題整理の検討方法.....	58
3.4.2 課題整理.....	58
4 おわりに.....	63
参考文献.....	64

図目次

図 1	RI・研究所等廃棄物余裕深度処分相当の発生機関別の廃棄体発生量予測	8
図 2	余裕深度処分対象のウラン廃棄物の廃棄体重量分布	12
図 3	余裕深度処分の処分概念	16
図 4	余裕深度処分の施設概念	16
図 5	廃棄体形態（その 1）	17
図 6	廃棄体形態（その 2）	17
図 7	トンネル型施設	19
図 8	開削サイロ型施設	20
図 9	処分坑道の横断面図（リファレンス処分概念）	23
図 10	処分坑道の水平断面図（リファレンス処分概念）	23
図 11	トラニオン方式（例）	24
図 12	ツイストロック方式（例）	24
図 13	処分坑道の横断面図（合理化処分概念 A）	27
図 14	処分坑道の水平断面図（合理化処分概念 A）	27
図 15	処分坑道の横断面図（合理化処分概念 B）	30
図 16	処分坑道の水平断面図（合理化処分概念 B）	30
図 17	処分坑道の横断面図（合理化処分概念 C）	32
図 18	処分坑道の水平断面図（合理化処分概念 C）	32
図 19	処分坑道の垂直断面図（合理化処分概念 C：操業時のイメージ図）	33
図 20	処分坑道の配置図（リファレンス処分概念）	36
図 21	処分坑道の配置図（合理化処分概念 A）	36
図 22	処分坑道の配置図（合理化処分概念 B）	36
図 23	処分坑道の配置図（合理化処分概念 C）	36
図 24	埋設時の線源モデル（遮へい考慮せず）	42
図 25	埋設時の線源モデル（埋め戻し材等の遮へい考慮）	42
図 26	廃棄体表面線量率評価時の線源モデル	42
図 27	想定した対象廃棄物埋設の環境条件	48

図 28	地下水移行シナリオ	49
図 29	線量の時間変化	55
図 30	ケース 1 の線量の時間変化	56
図 31	ケース 5 の線量の時間変化	57

表目次

表 1	主な余裕深度処分対象の廃棄物の種類	5
表 2	余裕深度処分相当の発電所廃棄物に含まれる放射性核種の濃度	5
表 3	政令で定める余裕深度処分相当の濃度上限値	6
表 4	余裕深度処分相当の発電所廃棄物の 2030 年時点での累積発生量予測.....	6
表 5	主な RI・研究所等廃棄物の発生施設	7
表 6	RI・研究所等廃棄物余裕深度処分相当の廃棄体発生量予測	8
表 7	RI・研究所等廃棄物余裕深度処分相当廃棄物に含まれる放射性核種の濃度....	9
表 8	余裕深度処分相当のウラン廃棄物発生量予測	13
表 9	核種組成	14
表 10	各施設の建設費相对比较.....	37
表 11	鋼製容器を使用した場合の処分坑道の長さ	38
表 12	核種組成	43
表 13	評価条件	43
表 14	線源・遮へい材の物性	44
表 15	評価上の核種組成比.....	47
表 16	処分施設に関するパラメータ.....	50
表 17	天然バリアに関するパラメータ	50
表 18	生物圏に関するパラメータ	50
表 19	処分施設の放出係数と移行経路の分配係数	51
表 20	土壌から農作物への移行係数.....	51
表 21	飼料・飼育水から畜産物への移行係数.....	52
表 22	農耕土壌の分配係数.....	52
表 23	内部及び外部被ばく線量換算係数	53
表 24	解析ケース	53
表 25	試算結果	55
表 26	安全性以外の課題整理	62

1 はじめに

平成 12 年度に原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会にて「ウラン廃棄物処理処分の基本的考え方について」がとりまとめられて以降、ウラン廃棄物関係者においては処分システムの検討が進められているが、安全性に関する検討はウランの特性を考慮している一方で、処分システムの経済性に関する検討は、ウラン廃棄物以外の放射性廃棄物の処分システムの検討結果をベースに検討が進められており、長半減期で外部被ばくにあまり寄与しないウランの特性を十分に考慮していないのが実情である。

ここでは、処分単価が相対的に高い余裕深度処分対象のウラン廃棄物を対象に、廃棄物の物理特性やウランの特性に加えて処分における安全性の評価結果を踏まえ、合理的な処分システム概念の検討を目的とする。

2 実施計画

2.1 余裕深度処分対象のウラン廃棄物の特性整理

原子力安全委員会「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)」等の既存の情報及びサイクル機構が有する情報をもとに、余裕深度処分領域に処分される濃度区分値を想定し、その区分値をもとに、余裕深度処分の対象となるウラン廃棄物の廃棄物種類毎の量、形状、物理特性等を整理する。

2.2 余裕深度処分の合理的な施設概念の検討

原子力安全委員会「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)」等の既存の情報及びサイクル機構が有する情報をもとに、余裕深度処分施設概念及び廃棄体の特性を整理する。次いで、前項で整理された余裕深度処分対象のウラン廃棄物の特性を踏まえ、複数の合理的な施設概念及び合理的な廃棄体形態を比較検討するとともにコストの増減の項目の抽出と定性的な合理化見通しを示す。

2.3 安全性の検討

前項で想定する合理的な処分概念及び廃棄体形態に対し、操業時および管理終了後の被ばく線量に関する安全性の観点からの課題を整理し、必要に応じて概略の被ばく線量評価を実施する。

2.4 課題の整理

想定した処分概念及び廃棄体形態に対し、安全性以外で重要な、廃棄体技術基準、処分場技術基準、廃棄体確認等規制の観点、廃棄物の定置、埋め戻しなど操業の観点、モニタリング等の管理期間対応の観点から課題を整理する。

2.5 報告書の作成

以上の検討の成果を報告書にまとめる。

2.6 実施期間

平成16年10月19日～平成17年3月15日

実施工程

実施項目	平成 16 年度					
	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
1. 余裕深度処分対象の ウラン廃棄物の特性整理		—				
2. 余裕深度処分の合理的な 施設概念の検討		—	—			
3. 安全性の検討				—	—	
4. 課題の整理				—	—	
5. 報告書の作成					—	—

3 実施結果

3.1 余裕深度処分対象のウラン廃棄物の特性整理

原子力安全委員会「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)」等の既存の情報及びサイクル機構が有する情報をもとに、余裕深度処分領域に処分される濃度区分値を想定し、その区分値をもとに、余裕深度処分の対象となるウラン廃棄物の廃棄物種類毎の量、形状、物理特性等を整理する。

発電所廃棄物などの先行する検討事例の成果を整理する。これらの先行事例の情報は、ウラン廃棄物の余裕深度処分相当の処分概念を検討する上での基本情報となる。

3.1.1 ウラン廃棄物以外の余裕深度処分対象廃棄物の特徴整理

すでに、余裕深度処分対象廃棄物の処理処分については、原子力施設の運転・解体に伴い発生する低レベル放射性廃棄物(以下、「発電所廃棄物」)また、研究所、大学、病院等において発生する低レベル放射性廃棄物(以下、「RI・研究所等廃棄物」という)を対象にした検討が進められている。

(1) 発電所廃棄物

平成12年に、原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会によって取りまとめられた報告書「低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)」(以下、「第3次中間報告」という。)の記載内容をもとに、発電所廃棄物のうち余裕深度処分相当の廃棄物の特徴を整理する。

発電所廃棄物のうち余裕深度処分対象の廃棄物の大半は、ステンレス鋼などの金属が燃料近傍で中性子照射されて生じた放射化金属であり、この他、コンクリート、使用済みのイオン交換樹脂などが含まれる(表1)。

主要な放射性核種は、放射化によるものとしてはH-3、C-14、Co-60、Ni-63、Nb-94などであり、二次的な汚染によるものとしてはSr-90、Cs-137などである。余裕深度処分相当の発電所廃棄物に含まれる放射性核種の推定平均濃度と推定最大濃度を表2に示す。また、政令で定める余裕深度処分相当の濃度上限値を表3に示す。

2030年時点での累積発生量を表4に示す。セメントにより十分安定化処理を行ったとし

た場合の重量は約 5 万 ton となり、その容積は約 2 万 m³ と試算されている。

以上より、発電所廃棄物のうち余裕深度処分相当の廃棄物の特徴は以下のとおりである。

- ・ 廃棄物種類は、金属、コンクリート、使用済イオン交換樹脂などである。
- ・ 汚染形態は放射化または二次汚染である。
- ・ 核種の濃度が比較的高い（例えば Co-60 の場合、平均 1E+13 ~ 1E+14Bq/ton オーダー）。一方、核種の濃度は比較的低い（平均 1E+08Bq/ton オーダー）。

表 1 主な余裕深度処分対象の廃棄物の種類

発生場所	発生時期	主な廃棄物
原子炉施設	運転中	・放射化金属 ・使用済樹脂（一次系）
	解体中	・金属類（放射化ノ汚染） ・放射化コンクリート ・付随廃棄物（水中フィルタ等） ・黒鉛
再処理施設	運転中	・放射化金属（CB、BP） ・プロセス廃棄物
	解体中	・金属類（汚染） ・付随廃棄物

（出典）田中雄司：“余裕深度処分の概要”，日本原子力学会バックエンド部会主催 20 回バックエンド夏季セミナー、兵庫県姫路市、2004 年 7 月 29 日～7 月 30 日、講演 10-1（2004）

表 2 余裕深度処分相当の発電所廃棄物に含まれる放射性核種の濃度

（単位：Bq/ton）

	実用発電用 原子炉施設		重水炉 「ふげん」		高速炉 「常陽」	
	平均	最大	平均	最大	平均	最大
H-3	1E+12	3E+13	4E+10	2E+12	3E+10	3E+11
C-14	7E+10	4E+12	5E+10	2E+11	5E+09	1E+11
Cl-36	8E+07	4E+08	1E+08	1E+09	8E+07	2E+09
Ca-41	9E+07	2E+09	1E+06	1E+07	2E+06	2E+07
Co-60	8E+13	6E+15	1E+13	2E+14	5E+14	8E+14
Ni-59	3E+11	2E+13	3E+10	4E+11	4E+10	7E+11
Ni-63	3E+13	2E+15	4E+12	5E+13	6E+12	9E+13
Sr-90	2E+09	9E+09	2E+09	8E+09	3E+08	2E+09
Nb-94	3E+09	6E+11	1E+11	4E+12	3E+09	2E+11
Tc-99	2E+08	4E+10	1E+07	6E+07	4E+08	8E+09
I-129	3E+04	2E+05	3E+03	1E+04	2E+02	2E+03
Cs-137	5E+10	3E+11	5E+09	2E+10	4E+08	3E+09
	2E+08	1E+09	1E+09	3E+10	1E+08	6E+08

（出典）原子力安全委員会：低レベル放射性廃棄物放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第 3 次中間報告）（2000）

表 3 政令で定める余裕深度処分相当の濃度上限値

核種	濃度上限値 (Bq/ton)
C-14	5.2E+14
Cl-36	1.0E+11
Tc-99	8.2E+11
Np-237	1.3E+10

表 4 余裕深度処分相当の発電所廃棄物の 2030 年時点での累積発生量予測

	実用発電用 原子炉施設(ton)	重水炉「ふげん」 (ton)	高速炉「常陽」 (ton)
運転廃棄物	39,000	200	300
解体廃棄物	11,000	400	300
合計	50,000	600	600

(出典) 原子力安全委員会：低レベル放射性廃棄物放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)(2000)

(2) RI・研究所等廃棄物

報告書「RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計」の記載内容をもとに、RI・研究所等廃棄物のうちの余裕深度処分相当の廃棄物の特徴を整理する。

廃棄物は操業廃棄物と解体廃棄物に分類され、廃棄物の種類は次の4種類に分類される。

- ・ 可燃物
- ・ 難燃物
- ・ 不燃物
- ・ その他(解体金属、廃樹脂、解体コンクリートなど)

発生機関としては、核燃料サイクル開発機構、日本原子力研究所、大学、民間施設である。これらを表 5に示す。

廃棄体発生量の集計結果を表 6に示す。廃棄体発生量は、200L ドラム缶相当で合計 16,987 本である。その内訳は、操業廃棄物が 10,018 本、解体廃棄物が 6,969 本である。廃棄物の発生機関別の集計結果を図 1に示す。廃棄物の発生機関別では、日本原子力研究所からの廃棄物が最も多く 9,626 本(約 59%)であり、次に核燃料サイクル開発機構の 6,577 本(約 41%)となっている。両者の合計値は 16,189 本であり、廃棄物全体の約 95%を占めている。

RI・研究所等廃棄物の余裕深度処分相当廃棄物に含まれる放射性核種の濃度を表 7に示す。これに示すとおり 核種の濃度が高い。例えば、Co-60 は 1E+13 ~ 1E+15Bq/ton

オーダーである。したがって、廃棄物の輸送、受入れ、定置などの取扱いのためには、廃棄物容器に遮へいが必要であると考えられている。

以上より、RI・研究所等廃棄物のうち余裕深度処分相当の廃棄物の特徴は以下のとおりである。

- ・ 廃棄物は操業廃棄物（約1万本）、解体廃棄物（約7千本）に分類され、可燃物、難燃物、不燃物、その他（解体金属、廃樹脂、解体コンクリートなど）に分類されている。主な発生機関は日本原子力研究所（約6割）、核燃料開発機構（約4割）である。
- ・ 核種濃度が高い（例えば Co-60 の場合、 $1E+13 \sim 1E+15$ Bq/ton オーダー）ことから廃棄物の取扱いのために廃棄物容器に遮へいが必要であると考えられている。

表 5 主な RI・研究所等廃棄物の発生施設

機 関		事 業 所	施 設
核燃料サイクル開発機構		東海事業所 大洗工学センター 新型転換炉ふげん発電所 高速増殖炉もんじゅ建設所	-
日本原子力研究所		東海研究所 大洗研究所 むつ事業所	-
大学関係	東京大学	大学院工学系研究科附属 原子力工学研究施設	-
	京都大学	原子炉実験所	KUR
民間使用 施設	日本核燃料開発(株)		ホットラボ施設
	ニュークリア・ デベロップメント(株)		燃料ホットラボ 施設
	日立エンジニアリング(株)	王禅寺事業所	HTR
	(株)東芝	研究炉管理センター	ホットラボ施設

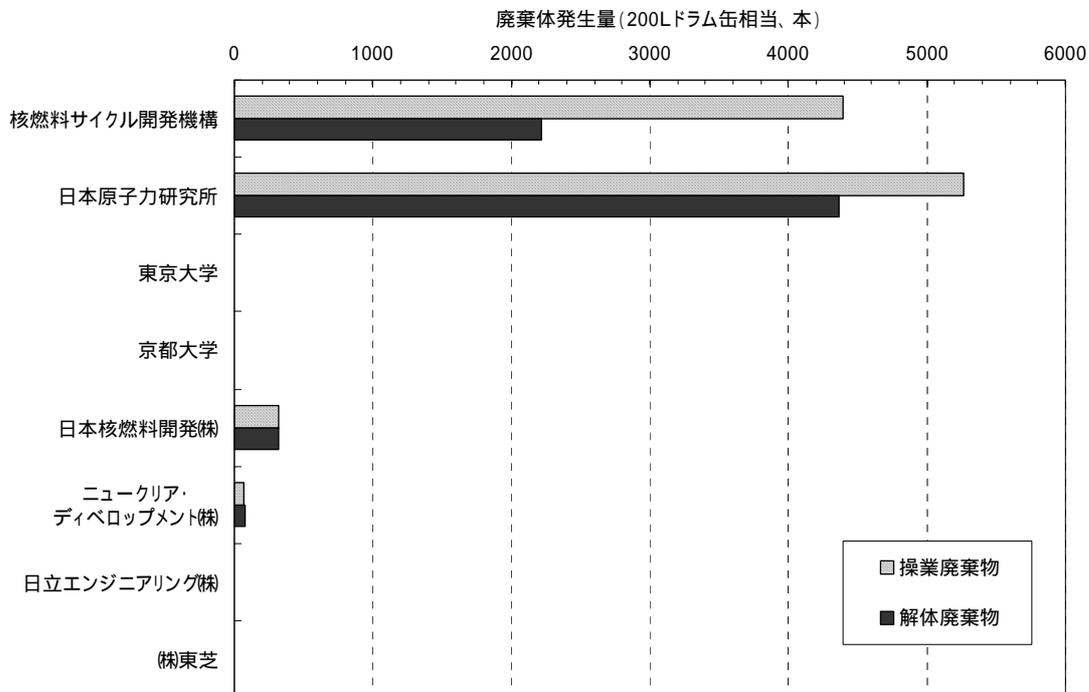
（出典）景山仁志、赤堀邦晃：“RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書）”、JNC TJ8400 2003-084、（2004）

表 6 RI・研究所等廃棄物余裕深度処分相当の廃棄体発生量予測

(単位：本(200Lドラム缶換算本数))

発生機関		操業	解体
核燃料サイクル 開発機構	東海事業所	4	10
	大洗工学センター	4,098	49
	ふげん事業所	231	865
	もんじゅ建設所	37	1,283
日本原子力 研究所	東海研究所	4,690	280
	大洗研究所	576	3,900
	むつ事業所	0	180
大学関係	東京大学	1	0
	京都大学	1	3
民間使用施設	日本核燃料開発(株)	320	320
	ニュークリア・ディベロップメント(株)	60	70
	日立エンジニアリング(株)	0	8
	東芝(株)	0	1
計	小計	10,018	6,969
	合計	16,987	

(出典) 景山仁志、赤堀邦晃：“RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計 (核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)”、JNC TJ8400 2003-084、(2004)



注) 集計結果は推定値であり今後変動する可能性がある。

(出典) 景山仁志、赤堀邦晃：“RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計 (核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)”、JNC TJ8400 2003-084、(2004)

図 1 RI・研究所等廃棄物余裕深度処分相当の発生機関別の廃棄体発生量予測

表 7 RI・研究所等廃棄物余剰深度処分相当廃棄物に含まれる放射性核種の濃度

順位	核燃料サイクル開発機構		日本原子力研究所		大学関係・民間使用施設	
	核種	放射能濃度 (Bq/ton)	核種	放射能濃度 (Bq/ton)	核種	放射能濃度 (Bq/ton)
1	Co-60	1.0E+15	H-3	4.3E+14	Ni-63	1.6E+15
2	Fe-55	1.5E+13	Co-60	5.0E+13	Cs-137	1.2E+15
3	Ni-63	1.3E+13	Ni-63	3.9E+12	Pu-242	9.4E+14
4	Mn-54	8.7E+12	Cs-137	1.7E+12	Co-60	1.6E+14
5	C-14	2.7E+12	Sr-90	1.1E+12	Fe-55	7.9E+13
6	H-3	9.2E+11	Eu-154	1.8E+11	Pu-238	6.1E+13
7	Na-22	6.3E+11	Cm-244	6.5E+10	Am-241	2.1E+13
8	Cs-137	3.3E+11	Pu-238	3.8E+10	Sb-125	1.4E+13
9	Sr-90	1.2E+11	Ni-59	2.7E+10	Ru-106	6.6E+12
10	Ni-59	1.0E+11	Pu-240	1.7E+10	Pu-240	5.3E+12

(出典) 景山仁志、赤堀邦晃：“RI・研究所等廃棄物余剰深度処分施設の概念設計（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書）”、JNC TJ8400 2003-084、(2004)

3.1.2 余剰深度処分対象のウラン廃棄物の特徴整理

(1) ウラン廃棄物の特徴

平成12年に、原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会によって取りまとめられた報告書「ウラン廃棄物処理処分の基本的考え方について」の記載内容をもとに、ウラン廃棄物の特徴を整理する。

ウラン廃棄物の種類には以下のものがある。

- ・ 使用済排気フィルタ
- ・ スラッジ
- ・ 可燃性雑固体廃棄物（作業着、手袋、木材など）
- ・ 難燃性雑固体廃棄物（ゴム靴、ビニールホースなど）
- ・ 不燃性雑固体廃棄物（金属、コンクリート、ガラスなど）
- ・ 使用済遠心分離機

また、ウラン廃棄物の特徴として、以下の点が挙げられている。

- ・ ウランが付着したものやウランを含む物質が付着したものなど、含まれる核種が実質的にウランに限定されており、放射化による放射性核種や核分裂による放射性核種が含まれていない。（「対象廃棄物にはごく少量ではあるがウランの子孫核種が含まれる。また、再処理によって回収されたウランは人工放射性核種を伴うため、回収ウランの使用に伴い発生する廃棄物には、ごく少量の人工放射性核種

も含まれる。処分方策の検討に当たっては、これらの核種にも留意する必要がある。」旨の注記あり。)

- ・ 具体的な形態は、金属、プラスチックなどの表面にウランが付着した廃棄物及び焼却灰、スラッジなどのウランが媒体中に分散して含まれる廃棄物に分類される。
- ・ 放射性核種としての半減期が長いウランは、放射線を発生する能力が小さいため、物品に付着するなどしたウランについては、拭き取る、溶液に浸すなどの物理的・化学的な方法を用いて取り除くこと（除染処理）によって、比較的効率よく、廃棄物に残存するウランからの放射線を小さくすることができると考えられている。
- ・ ウラン廃棄物に含まれているウランの濃度は、除染前で 10^{10} Bq/ton オーダーから、自然界に存在するレベルの 10^6 Bq/ton 以下まで幅広く分布している。

また、ウラン核種の特徴として、以下の点が挙げられている。

- ・ ウランは、土中などにも有意に存在する天然起源の放射性核種である。
- ・ 半減期が長く（例えば U-238 の半減期は約 45 億年）時間の経過による放射性物質の低減が期待できない。
- ・ 放射線を発生する能力が小さい。
- ・ 酸化的な環境では溶解度が高い。
- ・ ウランの性状によっては資源価値を持つ。
- ・ 精製されたウランについては子孫核種の生成及び累積によって数十万年間にわたって合計放射性核種濃度が増大する。
- ・ 存在する量によっては放射線以外の因子（例えば重金属としての性質）による影響が問題となる可能性がある。

（２）サイクル機構から発生する余裕深度処分対象のウラン廃棄物

サイクル機構においてウラン廃棄物は、人形峠事業所及び東海事業所から発生する。操業廃棄物、解体廃棄物に分類される。現在、設定されている濃度区分値によれば、余裕深度処分相当のウラン廃棄物の 2048 年時点での廃棄体発生量予測は 25,240 本である(表 8)。事業所別にみると、人形峠事業所が 18,359 本であり全体の 73%となり、東海事業所が 6,881 本であり全体の 27%である。

(i) 人形峠事業所

廃棄物は内容物により次のように分類されている。人形峠事業所の場合は、次のとおりである。

< 操業廃棄物 >

- ・ 不燃物 1 (鉄系金属)
- ・ 不燃物 2 (フィルタ)
- ・ 不燃物 3 (スラッジ・澱物類)
- ・ 不燃物 4 (NaF、その他不燃物)
- ・ 焼却灰
- ・ 不燃性液体

< 解体廃棄物 >

- ・ 難燃物 (塩ビ類、非塩ビ類)
- ・ 不燃物 (金属)
- ・ 可燃物
- ・ 不燃物 2 (フィルタ)
- ・ 不燃物 3 (スラッジ・澱物類)
- ・ 不燃物 4 (その他)

(ii) 東海事業所

東海事業所の場合は、次のとおりである。

< 操業廃棄物 >

- ・ 難燃物
- ・ 不燃物
- ・ 焼却灰
- ・ 廃溶媒
- ・ 金属圧縮体
- ・ フィルタ圧縮体

< 解体廃棄物 >

- ・ 可燃物

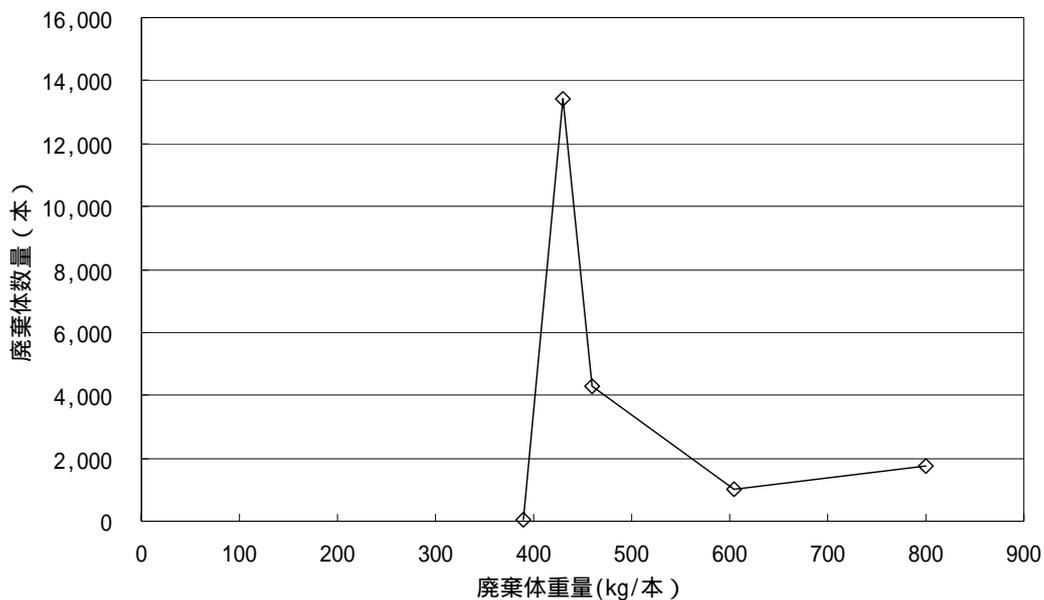
- ・ 難燃物（塩ビ類、非塩ビ類）
- ・ 不燃物（金属、コンクリート、その他）

（iii）廃棄物の処理方法

廃棄物の処理方法としては、セメント混練、セメント充填、プラスチック固化、溶融、焼却後溶融が計画されている。廃棄体重量は約 400kg/本のものから 800kg/本までである。廃棄体重量分布を図 2 に示す。450kg/本前後が最も多く、これは不燃物に分類されるもので、内容物としてはスラッジ・澱物類等であり、処理方法としてセメント混練が考えられている。廃棄体重量が最も大きいのは金属等を溶融処理した場合である。

（iv）核種組成

核種組成は天然ウラン組成と回収ウラン組成の 2 種類ある（表 9）。その物量割合は、天然ウラン組成が約 9 割であり、残りの約 1 割が回収ウラン組成である。



（出典）核燃料サイクル開発機構提供データをもとに作成。

図 2 余裕深度処分対象のウラン廃棄物の廃棄体重量分布

表 8 余裕深度処分相当のウラン廃棄物発生量予測

事業所	操業/解体	廃棄物種類	廃棄体(本)	事業所計(本)
東海	操業	焼却灰	89	6,881
		金属類	1,763	
		フィルタ類	372	
		澱物類(含 NaF)	655	
		土砂・コンクリート類	3,617	
		液体廃棄物	51	
	解体	焼却灰	118	
		金属類	121	
		土砂・コンクリート類	97	
人形峠	操業	焼却灰	371	18,359
		金属類	1	
		フィルタ類	688	
		澱物類(含 NaF)	14,058	
		土砂・コンクリート類	1,819	
		液体廃棄物	798	
	解体	焼却灰	484	
		金属類	1	
		フィルタ類	10	
		澱物類(含 NaF)	55	
		土砂・コンクリート類	74	
合 計				25,240

(注) 廃棄体本数は 200 L ドラム缶換算

(出典) 核燃料サイクル開発機構提供データ

表 9 核種組成

核種	半減期	天然ウラン(Bq/Bq)	回収ウラン(Bq/Bq)
Sr-90	28.8 y	0.0E+00	1.7E-04
Y-90	64.1 h	0.0E+00	1.7E-04
Tc-99	2.11E+5 y	0.0E+00	4.2E-02
Ru-106	371.6 d	0.0E+00	5.7E-04
Rh-106	29.8 s	0.0E+00	4.2E-05
Sb-125	2.73 y	0.0E+00	2.2E-06
Te-125m	58 d	0.0E+00	5.3E-07
Cs-134	2.062 y	0.0E+00	6.9E-06
Cs-137	30 y	0.0E+00	3.3E-03
Ba-137m	2.551 m	0.0E+00	2.2E-04
Ce-144	284.9 d	0.0E+00	1.1E-06
Pr-144	17.28 m	0.0E+00	8.4E-08
Pm-147	2.623 y	0.0E+00	2.0E-05
Sm-151	87 y	0.0E+00	1.0E-06
Eu-154	8.8 y	0.0E+00	9.9E-06
Eu-155	4.68 y	0.0E+00	3.0E-06
Tl-208	3.05 m	0.0E+00	4.2E-03
Bi-212	60.55 m	0.0E+00	1.2E-02
Pa-233	27 d	0.0E+00	8.8E-05
Pa-234m	1.17 m	0.0E+00	1.2E-01
Th-231	25.52 h	0.0E+00	8.4E-03
Th-234	24.1 d	0.0E+00	1.2E-01
U-237	6.75 d	0.0E+00	5.7E-07
Np-239	2.355 d	0.0E+00	4.9E-08
Pu-241	14.4 y	0.0E+00	3.2E-02
Am-242m	152 y	0.0E+00	2.7E-08
Am-242	16.02 h	0.0E+00	2.7E-08
小計		0.0E+00	3.5E-01
U-232	68.9 y	0.0E+00	1.3E-02
U-234	2.45E+05 y	4.9E-01	4.2E-01
U-235	7.04E+08 y	2.3E-02	1.1E-02
U-236	2.34E+07 y	0.0E+00	8.4E-02
U-238	4.47E+09 y	4.9E-01	1.3E-01
Np-237	2.14E+6 y	0.0E+00	1.3E-04
Pu-236	2.851 y	0.0E+00	1.1E-08
Pu-238	87.74 y	0.0E+00	7.6E-04
Pu-239	2.41E+04 y	0.0E+00	1.7E-04
Pu-240	6.57E+03 y	0.0E+00	2.4E-04
Pu-242	3.76E+05 y	0.0E+00	6.1E-07
Am-241	432.2 y	0.0E+00	4.6E-04
Am-243	7370 y	0.0E+00	4.9E-08
Cm-242	162.9 d	0.0E+00	2.3E-08
Cm-243	28.5 y	0.0E+00	3.7E-08
Cm-244	18.1 y	0.0E+00	2.5E-08
Cm-245	8500 y	0.0E+00	2.5E-10
小計		1.0E+00	6.5E-01
合計		1.0E+00	1.0E+00

(注) 核燃料サイクル開発機構提供データ。1E-10 未満は記載せず。

3.2 余裕深度処分の合理的な施設概念の検討

発電所廃棄物等、先行する検討事例の情報を整理したのち、これを踏まえて、ウラン廃棄物についての検討を行う。

3.2.1 ウラン廃棄物以外の余裕深度処分概念及び廃棄体形態の特徴整理

(1) 発電所廃棄物

「第3次中間報告」の記載内容をもとに、発電所廃棄物の余裕深度処分概念及び廃棄体形態の特徴を整理する。

安全かつ合理的に処分するために、次の対策を挙げている。

一般的であると考えられている地下利用に十分余裕を持った深度に処分する（すなわち、高層建築物などの基礎が設置できる支持層上面より深く、これに基礎となる地盤の強度などを損なわないための離間距離を確保した、例えば、地表から50～100m程度の深度に処分する）とともに、地下の天然資源の存在状況についても考慮する。

放射性核種の移行抑制機能の高い地中を選ぶ。

現行の低レベル放射性廃棄物が処分されているコンクリートピットと同等以上の放射性核種閉じ込め機能を持った処分施設を設置する。

放射性物質の濃度の減少を考慮し、数百年間処分場を管理する。

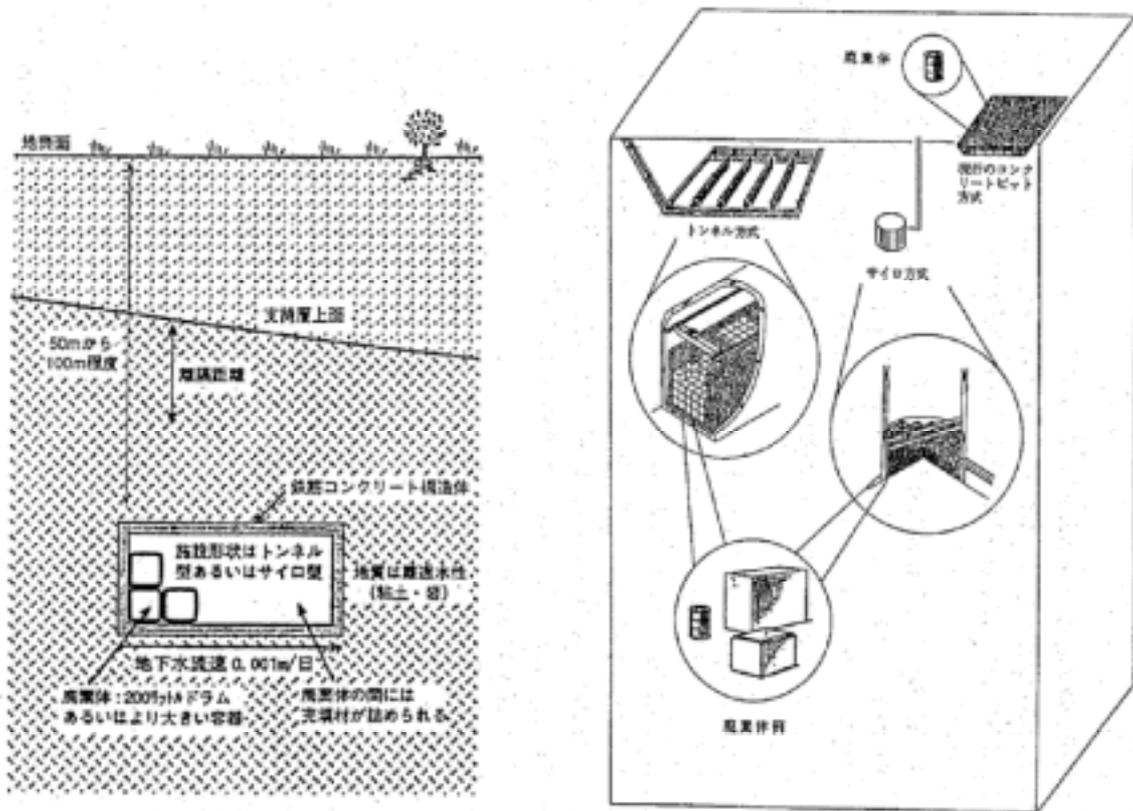
管理期間中においては、放射性物質の減衰に応じた段階的管理を行い、被ばく線量を法令で定める線量限度を超えないことはもとより、合理的に達成できる限り低く抑える。

処分概念を図3に示す。埋設施設としては、海外の処分施設及び我が国の地下施設を参照し、トンネル型あるいはサイロ型のような地下空洞の内部に鉄筋コンクリート構造体を設け、その内部に廃棄体を定置した後、廃棄体の間には充填材を詰めて埋め戻すことが考えられている。

現在想定されている施設概念を図4に示す。中心から廃棄体、充填材、コンクリートピット、ベントナイト、埋め戻し、処分空洞、岩盤という構成となっている。

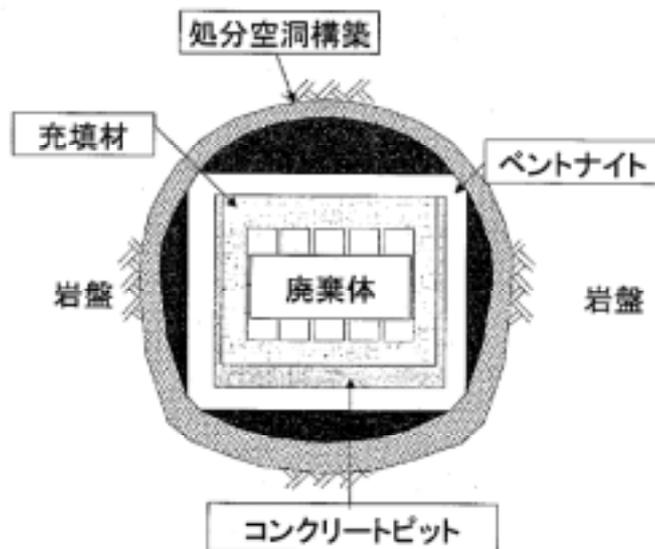
廃棄体形態を図5及び図6に示す。チャンネルボックス、バーナブルポイズンなどは、角形長尺容器（トラニオン付）に収納することが考えられている。炉内計装管、シュラウ

ドなどは切断して角形容器（トラニオン付）に収納することが考えられている。使用済樹脂は処理後にドラム缶あるいは角形容器へ固型化することが考えられている。



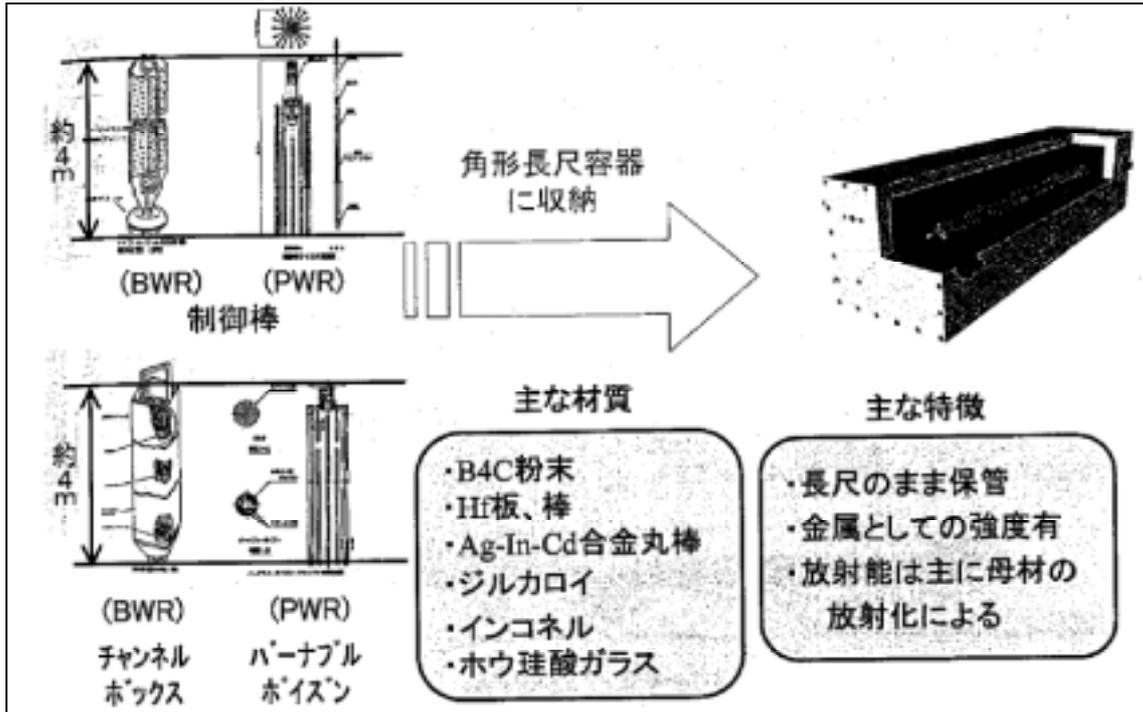
（出典）原子力安全委員会：低レベル放射性廃棄物放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第3次中間報告）（2000）

図 3 余裕深度処分の処分概念



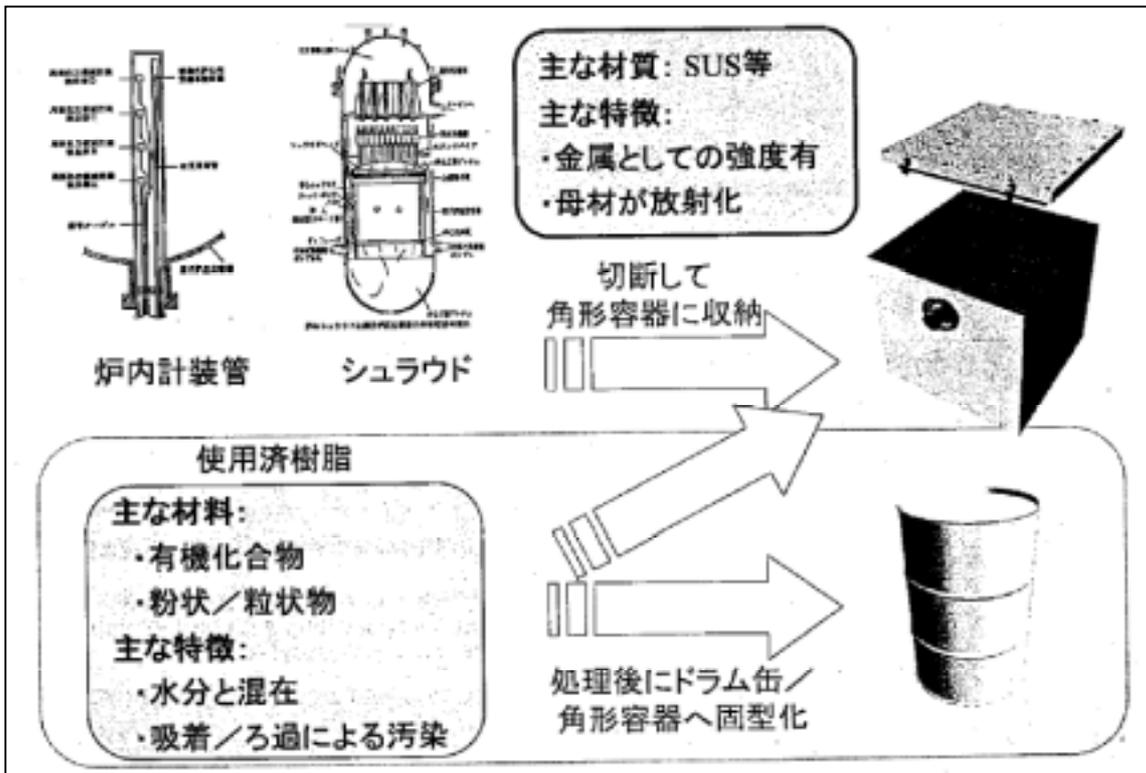
（出典）田中雄司：“余裕深度処分の概要”，日本原子力学会バックエンド部会主催 20 回バックエンド夏季セミナー、兵庫県姫路市、2004 年 7 月 29 日～7 月 30 日、講演 10-1（2004）

図 4 余裕深度処分の施設概念



(出典) 田中雄司：“余剰深度処分の概要”、日本原子力学会バックエンド部会主催 20 回バックエンド夏季セミナー、兵庫県姫路市、2004 年 7 月 29 日～7 月 30 日、講演 10-1 (2004)

図 5 廃棄体形態 (その 1)



(出典) 田中雄司：“余剰深度処分の概要”、日本原子力学会バックエンド部会主催 20 回バックエンド夏季セミナー、兵庫県姫路市、2004 年 7 月 29 日～7 月 30 日、講演 10-1 (2004)

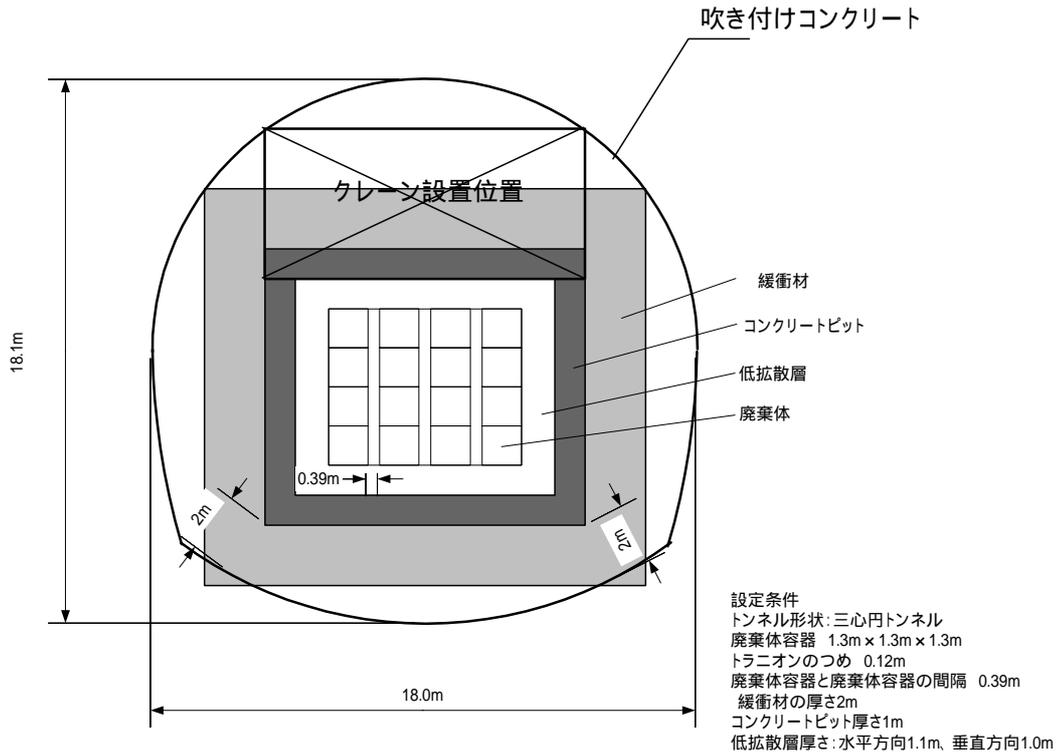
図 6 廃棄体形態 (その 2)

(2) RI・研究所等廃棄物

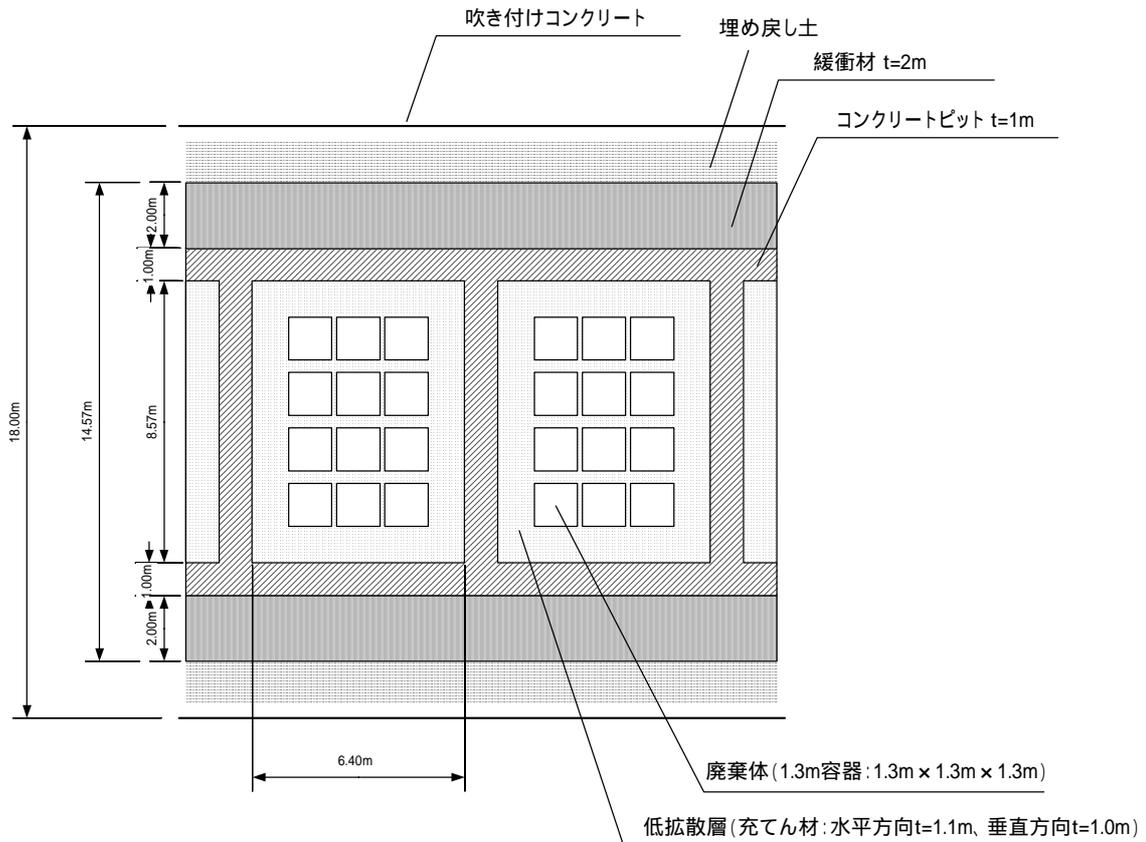
報告書「RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計」の記載内容をもとに、余裕深度処分対象のRI・研究所等廃棄物の処分概念及び廃棄体形態の特徴を整理する。

トンネル型処分施設とサイロ型処分施設が考えられている。処分概念を図 7及び図 8に示す。バリア構成は、いずれも、廃棄体、低拡散層(充填モルタル)、コンクリートピット、緩衝材、埋め戻し土となっている。

廃棄体形態としては、廃棄体容器は 1.3m 容器(遮へい有り、外寸法 1.3m×1.3m×1.3m)と 200L ドラム缶 4 本組ラック(遮へい無し、外寸法 1.3m×1.3m×1.3m)の 2 つの形態が想定されている。

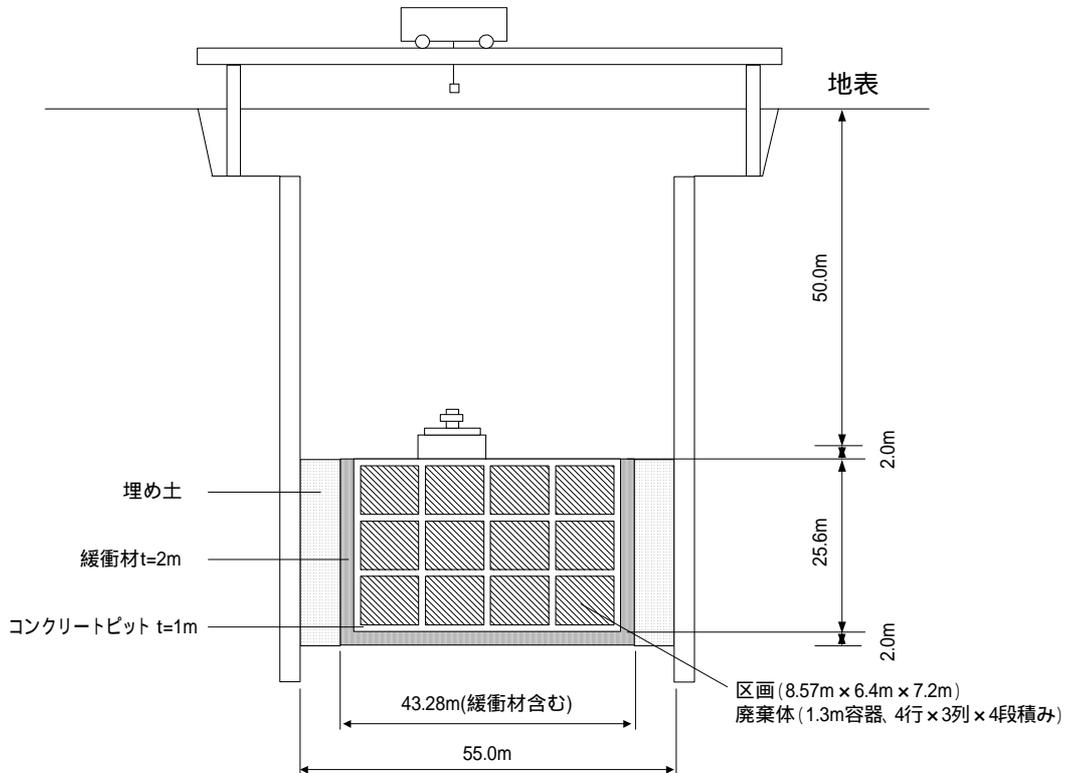
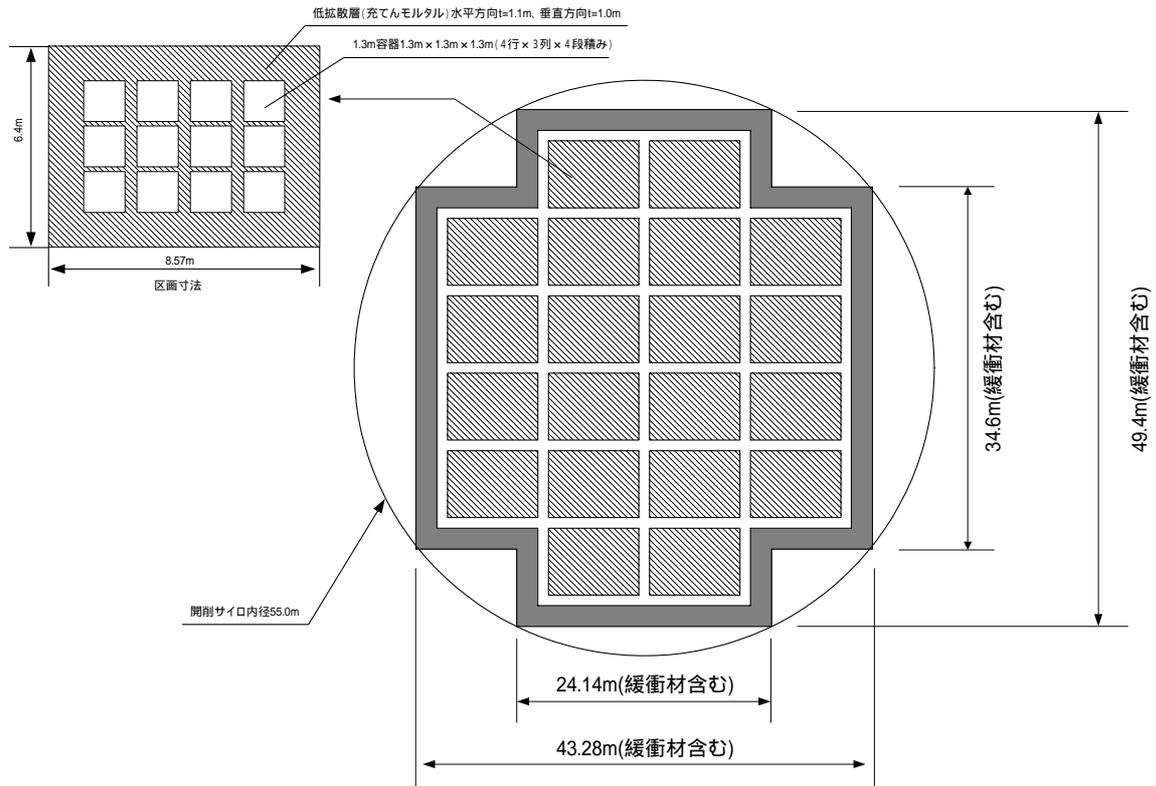


三心円トンネル、スパン18m、廃棄体4行 × 4段積み



(出典) 景山仁志、赤堀邦晃: “RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計 (核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)”, JNC TJ8400 2003-084、(2004)

図7 トンネル型施設



(出典) 景山仁志、赤堀邦晃：“RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計 (核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書) ”、JNC TJ8400 2003-084、(2004)

図 8 開削サイロ型施設

3.2.2 ウラン廃棄物の合理的な施設概念検討

ここでは、施設概念のリファレンスを設定し、ウラン廃棄物の特性等を考慮して、合理化処分概念を設定することとする。

(1) 前提条件

(i) 参考資料

合理的な施設概念の検討にあたって、下記の図書資料を参考にする。

- ・ 景山仁志、赤堀邦晃：“RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書）”、JNC TJ8400 2003-084、(2004)
- ・ 原子力安全委員会：低レベル放射性廃棄物放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第3次中間報告）（2000）

(ii) 施設形態

余裕深度処分施設の施設形態としては、第3次中間報告でも言及されているとおり、トンネル型施設とサイロ型施設の2つのタイプがある。このうち、我が国における地下施設の施工実績、岩盤条件などを鑑みると、トンネル型施設の方が現実的であると考えられる。そのことは、余裕深度処分施設に関する研究事例の多くがトンネル型施設を対象としていることからわかる。また、「RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計」によると、サイロ型施設の方が、線量が低いことから、トンネル型施設を検討することで、サイロ型施設の安全性をある程度、確認することができる。

以上のことから、ここでは、余裕深度処分施設の施設形態としてトンネル型施設を考慮することとする。トンネル断面は、「RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計」と同様、直径18m級とする。なお、これは、過去の道路トンネルの実績を踏まえて検討されたものである。

(iii) 廃棄体形状

廃棄体形状としては、電力会社が計画しているように鋼製容器とドラム缶が考えられる。ウラン廃棄物については、線を放出する放射性核種が主であり廃棄体に大きなしゃへい効果を期待する必要がないこと、鋼製容器を採用するには容器製作のコストが余分にかかる

ることなどから、ここでは、ドラム缶を廃棄体として選択する。また、廃棄体定置時に収納効率を上げるため多段積みとすることが考えられるが、その場合、ドラム缶の強度不足を補い、多段積みの安定性を確保する観点から、ドラム缶を鋼製ラックに入れて定置する方式(ラック型)がよいと考えられる。そこで、廃棄体形状としては、「R I・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計」で想定されているラック型の廃棄体(ドラム缶4本1組)で、その外形寸法も同じく1.3m×1.3m×1.3mとする。これにより、ドラム缶4本1組の廃棄体をそのまま鋼製容器に置き換え可能となる。

(iv) 総廃棄体数

前項で整理したとおり、200Lドラム缶25,240本(5,048m³)で総廃棄体数は6,310体である。

(2) リファレンス処分概念の設定

処分概念の合理化検討にあたりリファレンス処分概念を設定する。「R I・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計」の中で検討されているトンネル型施設を設定する。

このトンネル型施設の主な仕様は以下のとおりである。

施設形態 : トンネル型コンクリートピット施設(トンネル径約18m)

廃棄体形状 : 1.3m鋼製廃棄体(トラニオン方式)

コンクリートピットの区画寸法 : 幅8.57m×高さ7.2m×長さ6.4m(廃棄体4行×4段×3列 48体収納)

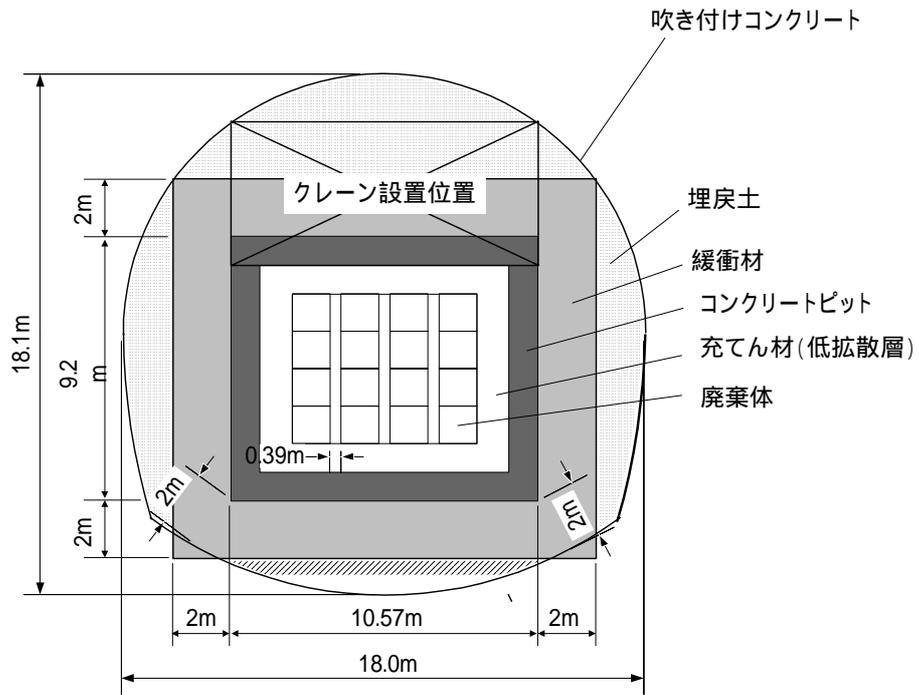
コンクリートピットの部材厚 : 底版1.0m、側壁1.0m、内部仕切設備1.0m、覆い及び仮蓋1.0m

人工バリア構成 : 緩衝材厚さ2.0m、低拡散層厚さ1.0m(ただし側壁部は1.1m)

本検討では、廃棄体を上記トンネル型施設と同じドラム缶4本収納のラック型廃棄体としているため、施設の仕様も上記トンネル型施設と同等とする。

リファレンス処分概念の概念図を図9及び図10に示す。

また、廃棄体ハンドリング時の吊り具として、トラニオン方式(例)を図11に、後述(p.25)するツイストロック方式(例)を図12に示す。



処分空洞: 三心円トンネル、スパン18m
 廃棄体 4行×4段×3列

図 9 処分坑道の横断面図 (リファレンス処分概念)

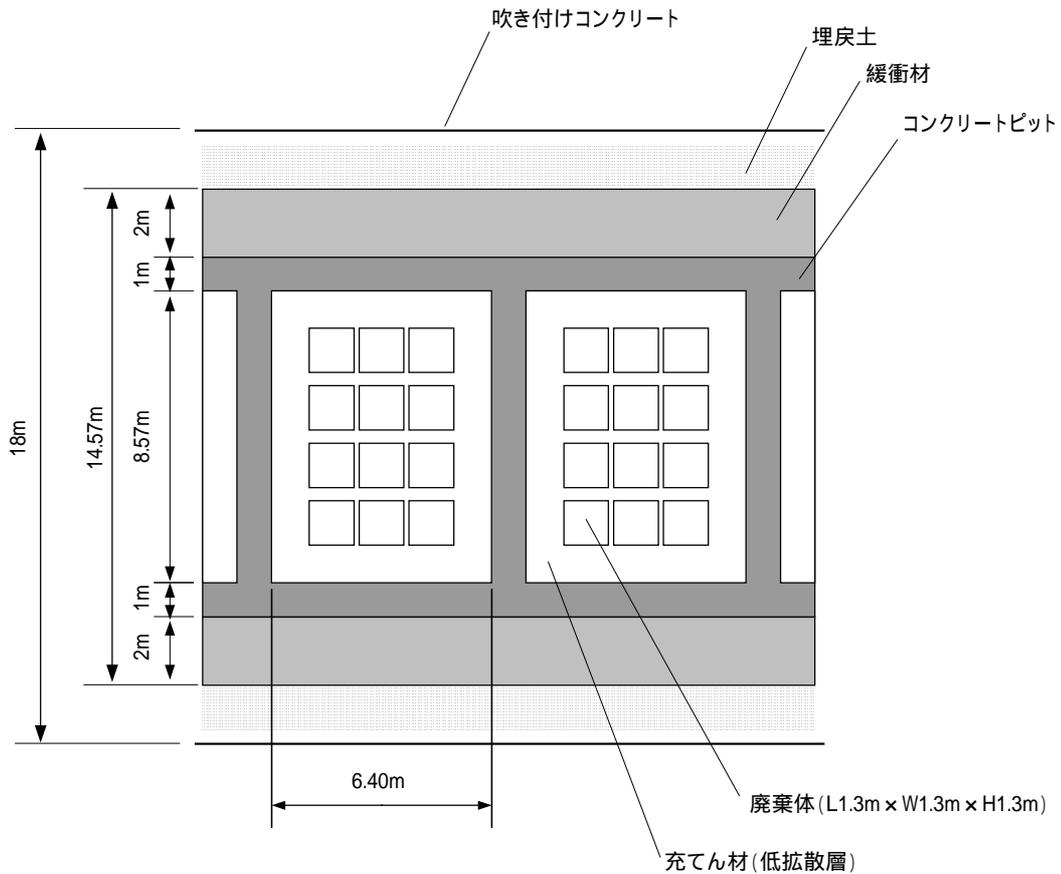
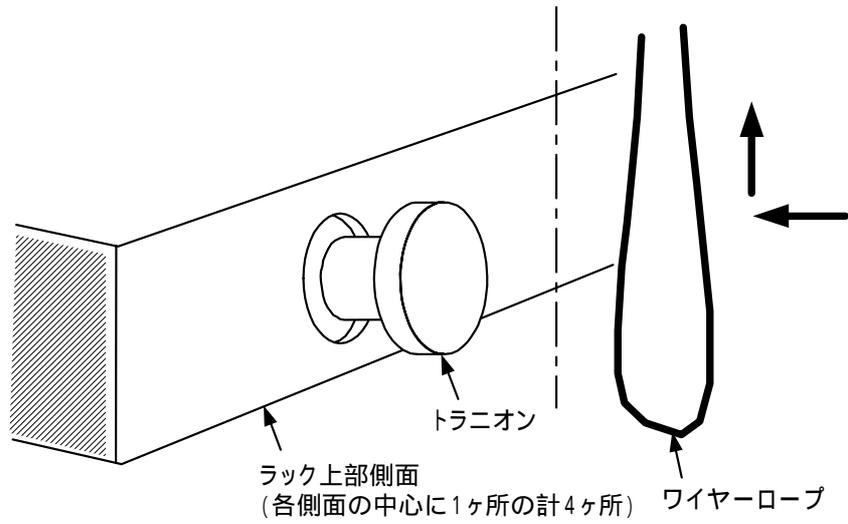


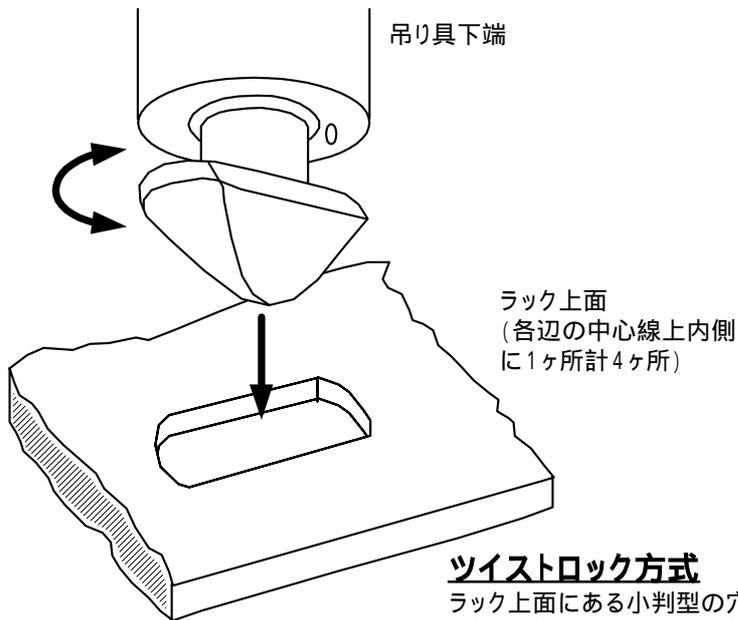
図 10 処分坑道の水平断面図 (リファレンス処分概念)



トラニオン方式

ラック上部側面に釘の頭部形状のロッドを取り付け、ワイヤーロープで吊る方式

図 11 トラニオン方式 (例)



ツイストロック方式

ラック上面にある小判型の穴に吊り具下端に取り付けられている小判型の投影断面をもつ軸を挿入し回転してロックする方式

図 12 ツイストロック方式 (例)

(3) 合理化処分概念 A の検討

リファレンス処分概念は RI・研究所等廃棄物の検討事例を参考に設定している。ウラン廃棄物は RI・研究所等廃棄物と比較して、長半減期の核種が多いこと、及びしゃへいの必要がほとんどないことが特徴として挙げられる。

ウラン廃棄物は、長半減期の核種が多いため、人工バリアの長期健全性が保証されない。このため、安全評価上、人工バリアは期待できない。RI・研究所等廃棄物の検討例でも、低拡散層の機能は劣化を考慮してほとんど考慮されておらず、緩衝材の厚さが 2.0m から 1.0m になっても、また、その機能維持期間が 1,000 年～100 万年で変化しても、線量評価結果に大きな差異はなく、 $10 \mu\text{Sv/y}$ まではまだ余裕がある結果となっている。そのため、ウラン廃棄物の処分施設を考える上では、人工バリアを設置しなくてもよいと考えられる。

また、しゃへいの必要がほとんどないということは、廃棄体容器の重さが小さくて済み、ハンドリング上の制約が少ないことを意味している。RI・研究所等廃棄物では廃棄体容器にしゃへいを考慮しており廃棄体重量が大きいため、トラニオンを利用して廃棄体のハンドリングを行う概念となっているが、ウラン廃棄物ではその必要がなくツイストロックなどの採用も考えられることから、廃棄体の定置間隔を見直すこととする。

以上より、合理化項目は以下のとおりとなる。

- ・ 緩衝材をなくす。 コスト低減、定置効率向上
- ・ 充てん材（低拡散層）をなくす。 コスト低減、定置効率向上
- ・ トラニオンをツイストロックに換える。 定置効率向上

以上より、合理化処分概念 A として、人工バリア（緩衝材、低拡散層）を設置しない施設とし、廃棄体の定置間隔を以下のように設定する。

- ・ 廃棄物の定置誤差 : 60mm
- ・ 廃棄体どうしのクリアランス : 30mm
- ・ 廃棄体と壁のクリアランス : 20mm
- ・ 壁の施工精度 : 20mm
- ・ 廃棄体どうしの距離 = クリアランス + 定置誤差 = $30 + 60 \times 2 = 150\text{mm}$
- ・ 廃棄体と壁の距離 = クリアランス + 定置誤差 + 施工精度
= $20 + 60 + 20 = 100\text{mm}$

上記の廃棄体定置間隔を採用し、緩衝材の分だけコンクリートピットの寸法を大きくし

て、充てん材（低拡散層）をなくすことができるものとすれば、合理化処分概念Aの仕様は以下のとおりとなる。ただし、コンクリートピットの最大寸法は、埋設クレーンにて定置作業が可能な大きさまでとする。

施設形態 : リファレンス処分概念と同じコンクリートピット型施設

廃棄体形状 : 1.3m ラック型廃棄体（ツイストロック方式）

コンクリートピットの区画寸法 : 幅 10.2m × 高さ 8.0m × 長さ 7.3m

（廃棄体 7行 × 6段 × 5列 210体収納）

$$\text{幅} = 1.3 \times 7 + 0.15 \times 6 + 0.1 \times 2 = 10.2\text{m}$$

$$\text{高さ} = 1.3 \times 6 + 0.1 \times 2 = 8.0\text{m}$$

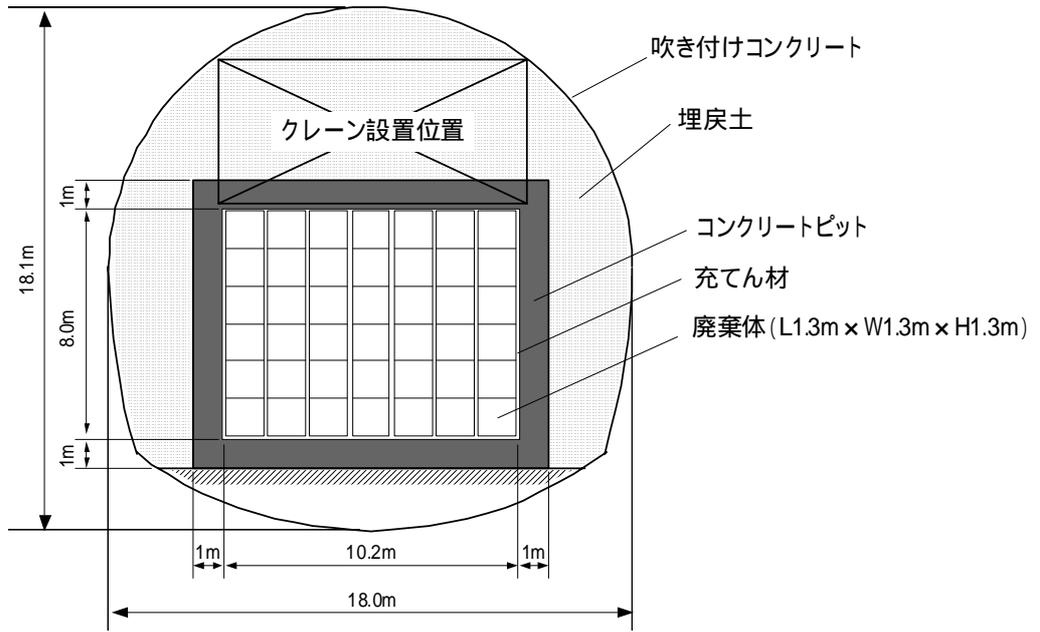
$$\text{長さ} = 1.3 \times 5 + 0.15 \times 4 + 0.1 \times 2 = 7.3\text{m}$$

（長さは、リファレンスケースと同程度で、収納効率が大きくなる寸法を採用）

コンクリートピットの部材厚 : リファレンス処分概念と同じ

人工バリア（緩衝材、低拡散層）構成 : なし

合理化処分概念Aの概念図を図 13及び図 14に示す。



処分空洞: 三心円トンネル, スパン18m
 廃棄体 7行×6段×5列

図 13 処分坑道の横断面図 (合理化処分概念 A)

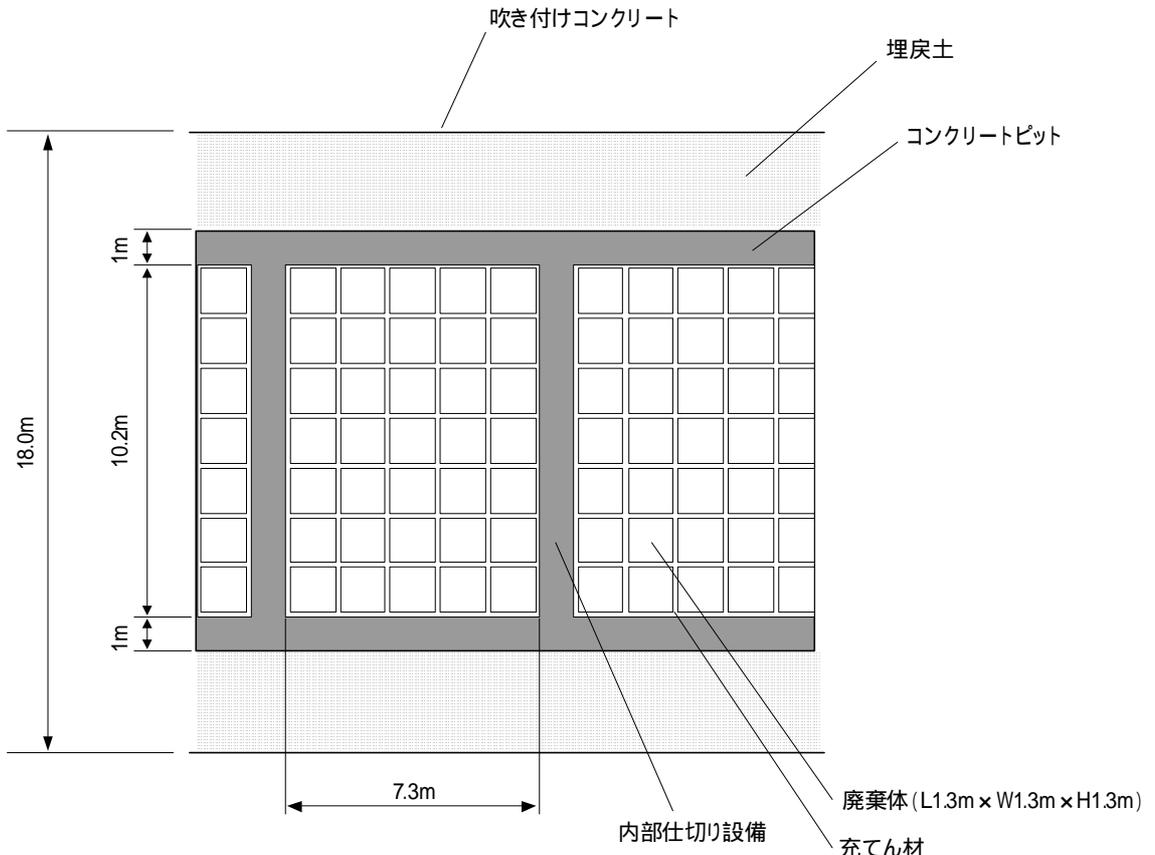


図 14 処分坑道の水平断面図 (合理化処分概念 A)

(4) 合理化処分概念Bの検討

コンクリートピット型の埋設施設は、空間線量が高くなることを意識して、廃棄体定置、充てん材充てん、覆いの施工などについては、人間が廃棄体近傍に近づかなくてもよいように考えられている。しかし、上述したように、ウラン廃棄物ではしゃへいの必要がほとんどないため、廃棄体定置後に人間が接近して型枠を組み、廃棄体を一体に固形化することが可能になる。すなわちモノリス方式が可能と考えられる。モノリス方式では、固形化のための型枠を組むことによりコンクリートピットのような厚い壁厚とする必要がないため、廃棄体の定置効率が大きくなり、合理的になる。ただし、ひび割れ等に配慮して、ひび割れ用心鉄筋の配置等は考慮する必要がある。また、底版は廃棄体重量を受け持つ部材であり、廃棄体運搬等にも必要となることから、底版はコンクリートピットと同様 1.0m の厚さとする。側面及び上面は、廃棄体から厚さ 0.2m で型枠を組むこととし、その中間にひび割れ用心鉄筋を配置する。この条件で廃棄体を定置すると7段の廃棄体定置が可能となるが、高さが9mを超えるため、1回でコンクリートを打設することが困難となる。そこで、4段目まで廃棄体定置を行ったら、一度コンクリートを打設し、3日程度養生を行ってからその上に3段の廃棄体を定置する概念とする。そのため、4段目と5段目の間には、厚さ 0.2m のコンクリートが充てんされるものとする。

コンクリートピット型では、コンクリートピットを先行して施工するため、移動式クレーンやフォークリフトなどにより廃棄体定置を行うことが困難であることから、埋設クレーンにより廃棄体定置を行うことを考えている。しかし、モノリス型では廃棄体を定置しながら順次モノリスを施工するため、通常の移動式クレーンやフォークリフトなどが廃棄体定置位置の傍まで近づくことが可能となる。そこで、クレーン基礎が不要で経済性に勝る通常の移動式クレーンやフォークリフトなどにより廃棄体定置を行うものとする。そのため、廃棄体定置時には人間が介在して定置作業を行うことが可能となり、定置精度はさらに上がるものと考えられるが、ここでは他の合理化施設概念との比較をするため、廃棄体定置間隔は同様として扱う。

また、モノリスの大きさは、各施設形態の比較も考慮して、リファレンスケースと同程度で、収納効率が大きくなる寸法を採用することとする。

合理化処分概念Bでは、合理化処分概念Aから以下の点の合理化を考慮する。

- ・ コンクリートピットではなく、モノリスとする
- ・ 廃棄体定置は移動式クレーン等を使用する

したがって、モノリス寸法は以下のようになる。

施設形態 : トンネル型モノリス施設(トンネル径約 18m)

廃棄体形状 : 1.3m ラック型廃棄体(ツイストロック方式)

モノリスの外形寸法 : 幅 11.85m×高さ 10.5m×長さ 7.5m

(廃棄体 8行×7段×5列 280体収納)

$$\text{幅} = 1.3 \times 8 + 0.15 \times 7 + 0.2 \times 2 = 11.85\text{m}$$

$$\text{高さ} = 1.0 + 1.3 \times 7 + 0.2 \times 2 = 10.5\text{m}$$

$$\text{長さ} = 1.3 \times 5 + 0.15 \times 4 + 0.2 \times 2 = 7.5\text{m}$$

モノリスの部材厚 : 底版 1.0m、その他は 0.2m(ひび割れ用心鉄筋有り)

人工バリア構成 : なし

合理化処分概念Bの概念図を図 15および図 16に示す。

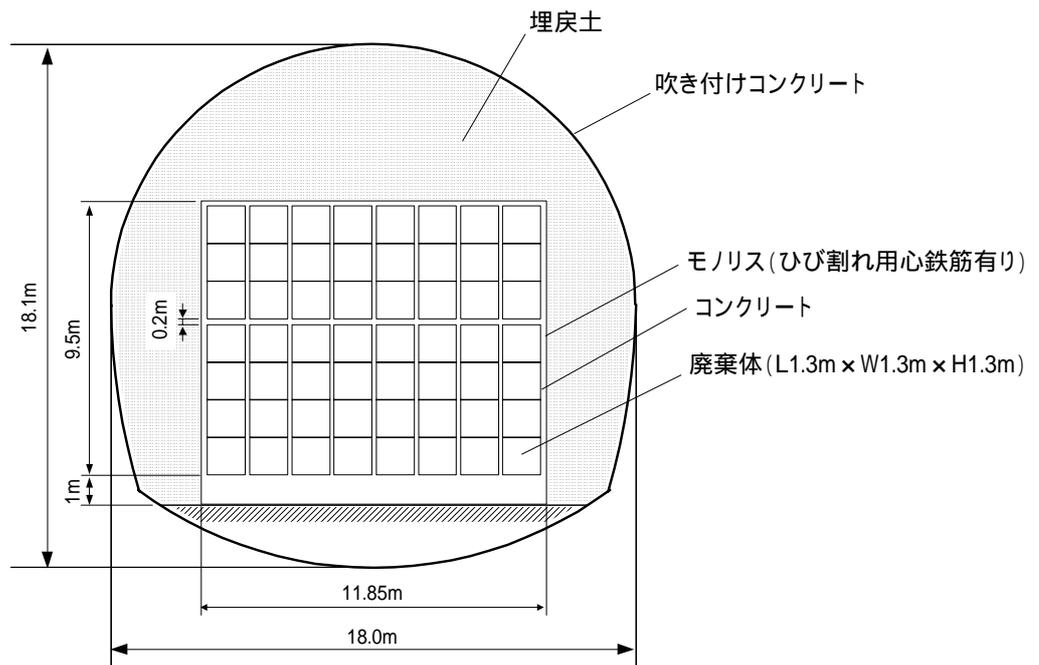


図 15 処分坑道の横断面図（合理化処分概念 B）

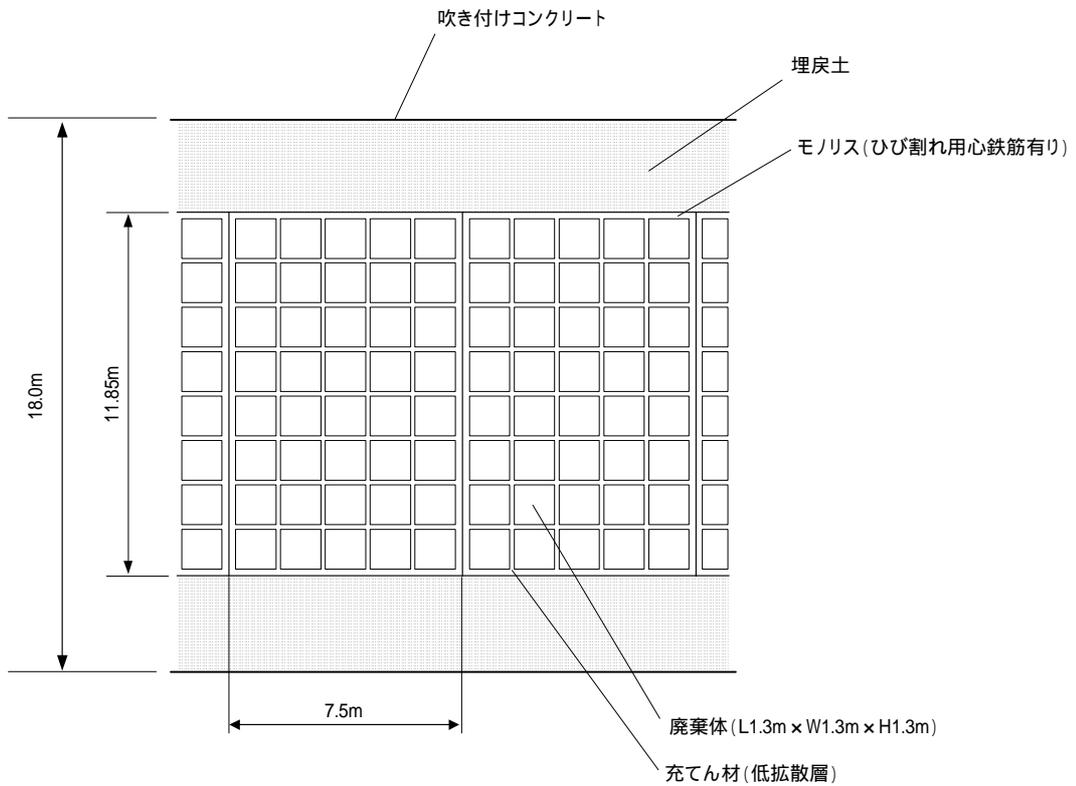


図 16 処分坑道の水平断面図（合理化処分概念 B）

(5) 合理化処分概念Cの検討

合理化処分概念Bまでの施設概念は、セメント系材料を使用する施設概念であるが、ウラン廃棄物の処分施設が人工バリア機能を期待しないのであれば、必ずしもセメント系材料を使用する必要はなく、安価な土砂等を使用することも考えられる。そこで、合理化処分概念Cでは、極低レベル放射性廃棄物の処分概念であるトレンチ処分の概念をトンネル型施設に当てはめるものとして検討する。

この概念は、コンクリート等の構造物は不要で、トンネル内に廃棄体を定置した後、その隙間に土砂等を充てんするものである。すなわち、一般廃棄物や産業廃棄物の処分場と同じ概念をトンネル型施設に適用するものである。そのため、平面的に1段定置したら隙間に土砂充てんを行い、1段目と2段目の間に0.25mの中間覆土を設置する。廃棄体輸送車両は中間覆土の上を走行して定置位置まで廃棄体を運搬し、簡易なクレーンで廃棄体定置を行う。このように順次廃棄体を積み上げ、最上段の廃棄体上は、クレーンによる廃棄体定置や中間覆土等の施工を考慮し、トンネル内壁面まで3.0m程度の空間を確保できるようにする。ここでも、廃棄体定置には人間が介在するため廃棄体の定置間隔はかなり小さくできると考えられるが、比較のため他の合理化施設概念と同じとする。なお、処分坑道における中間覆土の崩壊防止と廃棄体輸送車両等の走行路を確保する目的で、処分坑道の片側に土留め壁を設置する。

合理化処分概念Cでは、合理化処分概念Bから以下の点の合理化を考慮する。

- ・ セメント系材料を使用せず、土砂で廃棄体間を充てんする
- ・ 処分坑道の片側に土留め壁を設置する

以上を考慮して、合理化処分概念Cの概念を以下のように設定する。

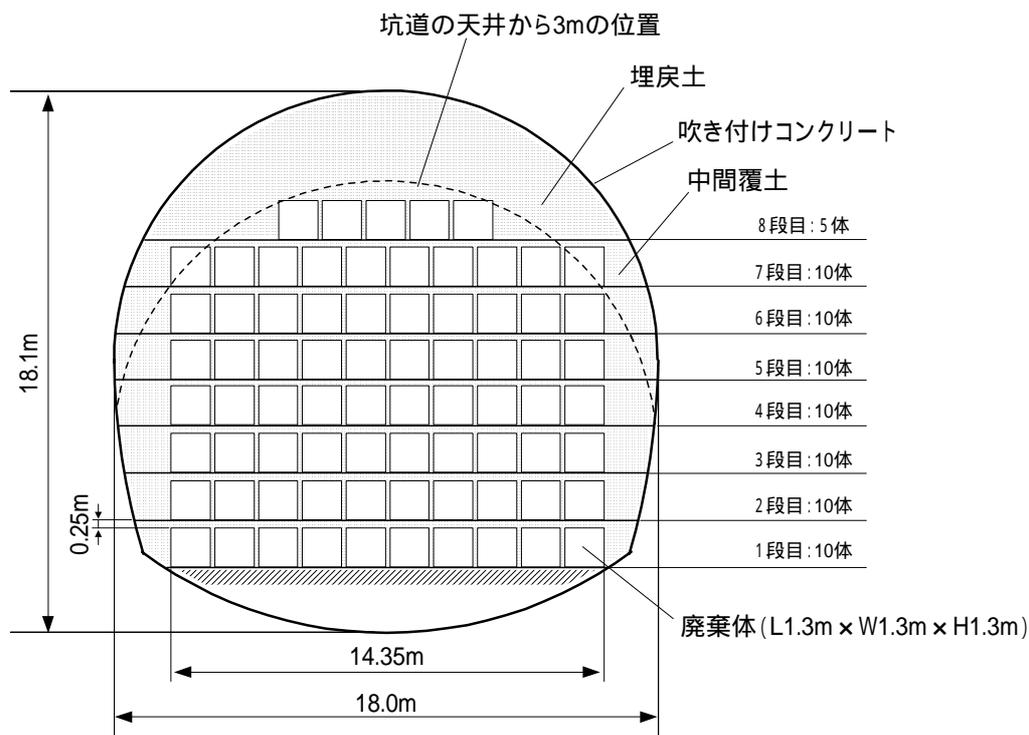
施設形態 : トンネル型トレンチ施設(トンネル径約18m)

廃棄体形状 : 1.3m ラック型廃棄体(ツイストロック方式)

1断面当たりの定置廃棄体数 : 75体

人工バリア構成 : なし

合理化処分概念Cの概念図を図17、図18及び図19に示す。



処分空洞: 三心円トンネル、スパン18m
 廃棄体 1断面あたり75体 (8段積み)

図 17 処分坑道の横断面図 (合理化処分概念 C)

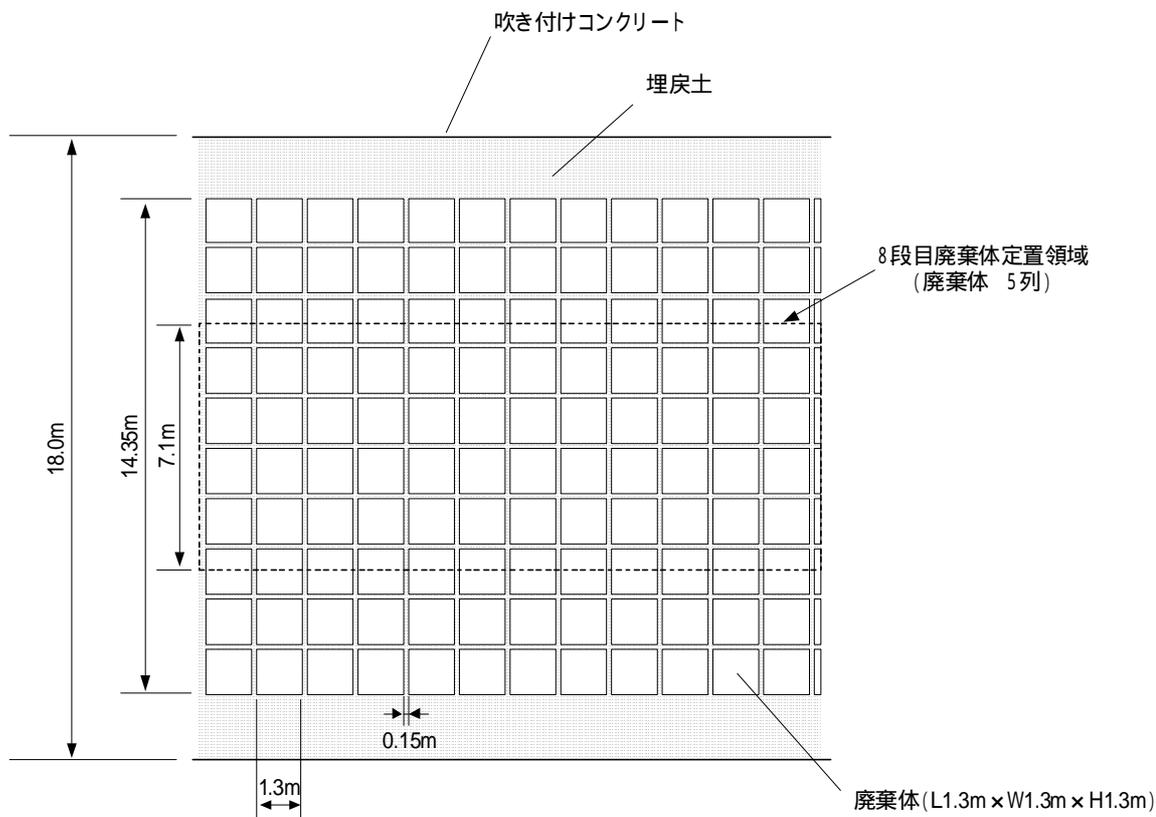


図 18 処分坑道の水平断面図 (合理化処分概念 C)

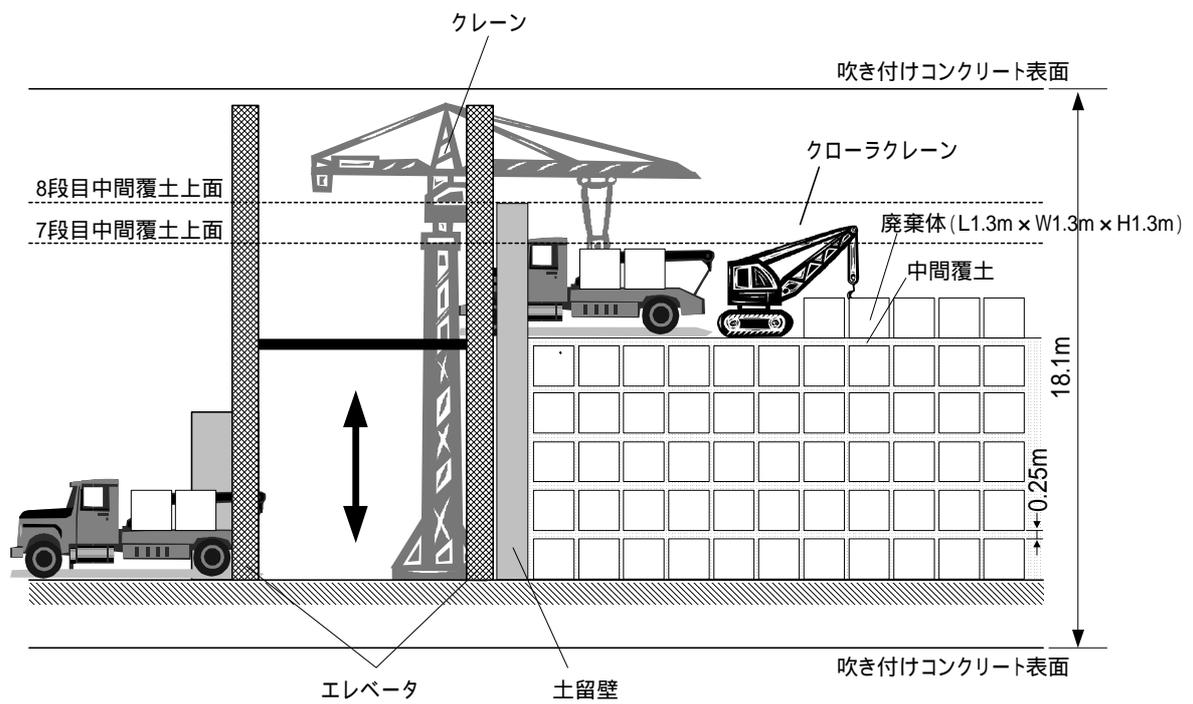


図 19 処分坑道の垂直断面図（合理化処分概念C：作業時のイメージ図）

(6) 余裕深度処分施設の配置検討

ここでは、リファレンス処分概念及び合理化処分概念の配置検討を行う。配置条件は「RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計」と同様とする。

主要な配置条件を以下に示す。

- ・ 処分坑道の設置深度は、GL-50mとし、地上から斜路（アクセス坑道）でアクセスするものとする（全施設のアクセス坑道の延長は同じ）。
- ・ 異常事態（落盤等）を想定し、作業坑道は避難経路を確保できる配置とする。
- ・ トンネルの離間距離は、「岩盤タンクに係る屋外タンク貯蔵所の規制に関する運用基準等について」に準じて、28.0mとする。
- ・ 処分坑道の長さは、1本300m程度を目安とする。
- ・ 処分坑道にコンクリート構造物を設置する場合は、コンクリート構造物の両側に30mの作業エリアを設置する。ただし、合理化処分概念Cについては、コンクリート構造物が片側にしかないため、片側にだけ作業エリアを設置する。

(i) リファレンス処分概念の配置検討

施設レイアウトに関する諸条件を以下に示す。

- ・ 1区画当たりの定置廃棄体数：48体/区画(4行×4段×3列)
- ・ 必要総区画数：132区画(=6,310/48)
- ・ 処分トンネル延長：1,041.8m(=6.4m(区画内寸法)×132区画+133m(内部仕切り設備寸法)+4m(緩衝材寸法)+60m(施工のために必要な寸法))

この総延長では1本の処分トンネルとしては長すぎるので、「RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計」と同様、1本300m程度とし、3本の処分トンネルとする。

1本の処分トンネルには44区画必要となり、延長は以下ようになる。

- ・ 必要延長(処分トンネル1本の長さ)：390.6m(=6.4m×44区画+45m+4m+60m)

(ii) 合理化処分概念Aの配置検討

施設レイアウトに関する諸条件を以下に示す。

- ・ 1区画当たりの定置廃棄体数：210体/区画(=7行×6段×5列)
- ・ 必要総区画数：31区画(=6,310/210)
- ・ 処分トンネル延長：318.3m(=7.3m(区画内寸法)×31区画+32m(内部仕切り

設備寸法) + 60m (施工のために必要な寸法))

処分トンネル延長が 318.3m であるため、1 本の処分トンネルで十分であると考えられる。

(iii) 合理化処分概念 B の配置検討

施設レイアウトに関する諸条件を以下に示す。

- ・ 1 モノリス当たりの定置廃棄体数 : 280 体 / モノリス (8 行 × 7 段 × 5 列)
- ・ 必要総モノリス数 : 23 (=6,310 / 280)
- ・ 必要総延長 : 232.5m (=7.5m (モノリス寸法) × 23 (モノリス数) + 60m (施工のために必要な寸法))

必要延長が 232.5m であるため、1 本の処分トンネルで十分である。

(iv) 合理化処分概念 C の配置検討

施設レイアウトに関する諸条件を以下に示す。

- ・ 1 列 (断面) 当たりの定置廃棄体数 : 75 体
- ・ 必要総列数 : 85 列 (=6,310 / 75)
- ・ 必要総延長 : 153.4m (=1.3m (廃棄体寸法) × 85 列 + 0.15m × 86 (廃棄体間隔) + 30m (施工のために必要な寸法))

必要延長が 153.4m であるため、1 本の処分トンネルで十分である。

図 20 から図 23 に各処分概念の配置図を示す。

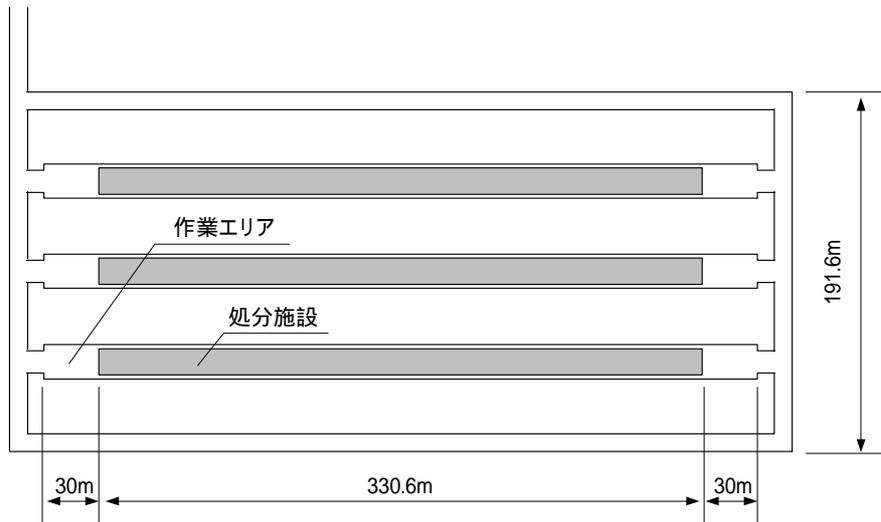


図 20 処分坑道の配置図 (リファレンス処分概念)

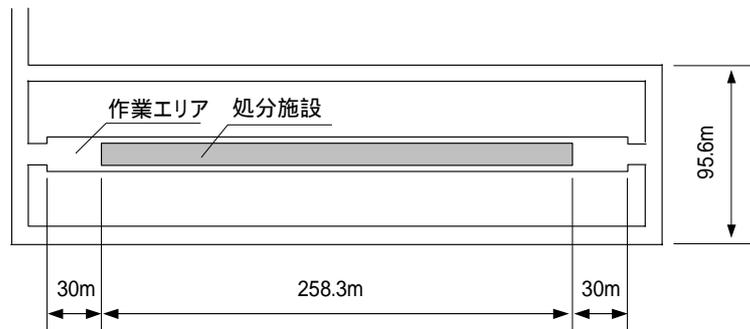


図 21 処分坑道の配置図 (合理化処分概念 A)

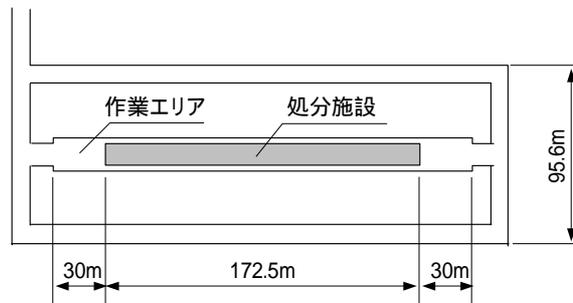


図 22 処分坑道の配置図 (合理化処分概念 B)

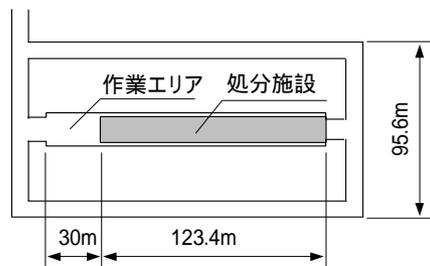


図 23 処分坑道の配置図 (合理化処分概念 C)

(7) 各施設の経済性の検討

ここでは、これまで検討した各施設形態の概略の建設費について検討する。

各施設について施工数量を算出し、建設費（工事単価）については、「RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計」を参考とする。具体的には、以下の項目について各施設形態の建設費を算出し、その相対比較を行う。

- ・ アクセス坑道建設費及び埋め戻し費
- ・ 作業坑道建設費及び埋め戻し費
- ・ 処分坑道建設費及び埋め戻し費
- ・ コンクリートピット構築費
- ・ 充てん材充てん費
- ・ 緩衝材（ベントナイト）設置費

なお、操業費については、具体的な操業形態が未検討であり、今回は対象外とする。検討結果を表 10に示す。

表 10 各施設の建設費相対比較

項目	リファレンス ケース	合理化処分 概念 A	合理化処分 概念 B	合理化処分 概念 C
施設建設費 (指数)	100	18	16	12

(8) 鋼製容器を使用した場合の配置検討

以上の検討では、ドラム缶4本収納するラック型廃棄体を想定したが、廃棄体仕様は、まだ決定していない。ここでは、参考として、鋼製容器を使用した場合の配置検討を行い、必要となる処分坑道の長さを検討する。その結果を表 11に示す。ここで、鋼製容器の外形寸法はラック型と同じ 1.3m×1.3m×1.3m とし、内容積は「RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計」の最大内容積と同様、1.728m³(1.2m×1.2m×1.2m)とする。

ただし、この鋼製容器の金属厚さ 0.05m は、しゃへいを考慮した寸法であり、しゃへいを考慮する必要のないウラン廃棄物では、実際に鋼製容器に作用する荷重を想定した金属厚さとするだけでよい。このように、ウラン廃棄物の特性を考慮して鋼製容器の設計条件を見直すことにより、鋼製容器の金属厚さを低減でき、収納する廃棄物量を増やすことができるため、収納効率はさらに向上するものと考えられる。

表 11 鋼製容器を使用した場合の処分坑道の長さ

処分概念	鋼製容器	ラック型廃棄体
リファレンス	294.4m+287m = 581.4m	390.6m×3本 = 1,171.8m
A	177.2m	318.3m
B	142.5m	232.5m
C	86.7m	153.4m

3.3 安全性の検討

前項で想定した合理的な処分概念及び廃棄体形態に対し、操業時および管理終了後の被ばく線量に関する安全性の観点からの課題を整理し、必要に応じて概略の被ばく線量評価を実施する。

3.3.1 操業時の安全性の検討

ウラン廃棄物については、主要核種がウラン核種であることから放射線の影響については、発電所廃棄物や RI・研究所等廃棄物のそれと比べると、さほど大きくないと考えられている。前項の検討においては、放射線の影響は小さいというウラン廃棄物の特徴に着目し、処分概念の合理化を図った。しかしながら、ここで対象とするウラン廃棄物は余裕深度処分相当であり、その濃度は浅地中処分対象のものとは高い。また、ウラン廃棄物には回収ウランも含まれており、ウラン核種以外の影響が考えられる。これまでの検討の中で、廃棄体等への遮へい機能の必要性について定量的な検討を実施していない。そこで、操業時の安全性の確認の観点から、簡易な線源モデルを想定し、埋設時の線量率（廃棄物層表面から 1 m）及び廃棄体の表面線量率を試算する。

(1) 埋設時の線量率の評価

操業中の安全性は、特に、処分坑道内で埋設作業者が廃棄体から受ける被ばく線量が問題となる。埋設作業者は、定置中の廃棄体及びすでに埋設された廃棄体（以下、「廃棄物層」という。）から被ばくすることになる。簡易な線源モデルを想定し、埋設時の線量率を評価することとする。廃棄物層を厚さ 8 m の無限平板と設定する。まず、はじめに、全く遮へい機能を考慮しない条件での評価を行う。次に、遮へい効果が大きい、埋め戻し材料である「土砂」、あるいは、施設構成材料である「コンクリート」を、それぞれ線源モデルに加えた条件での評価を行う。これらの厚さについては、施工途中段階の状況等を考慮に入れ、それぞれ 10cm とする。線源モデルの概念図を図 24 及び図 25 に示す。

余裕深度処分区分値を参考に、廃棄体の初期濃度を 1,000Bq/g とする。核種組成は、天然ウランと回収ウランの 2 種類を想定する（表 12）。子孫核種の影響を考慮し、天然ウランでは子孫核種の成長期間を 100 年、回収ウランでは 10 年とする。天然ウランについては、子孫核種の影響は時間の経過とともに増加傾向を示すが、操業期間を現実的に考え 100 年後までに成長する子孫核種の影響を考慮に入れることとする。また、回収ウランについ

JNC TJ8440 2005-001

では、U-232 が支配的となり 10 年後に線源強度が最も高くなる。以上のようにインベントリ条件は保守側の設定となっている。評価条件をまとめて表 13に示す。また、廃棄体（線源）及び遮へい材の物性を表 14に示す。

ANISN コードを用いて、埋設時の線量率（廃棄物層表面から 1 m）の評価を実施した結果を以下に示す。

遮へい無し（廃棄物層表面から 1 m）

天然ウラン 9.23 μ Sv/h

回収ウラン 5.98 μ Sv/h（F P、T R U分 0.56 μ Sv/h）

土砂による遮へい考慮（土砂表面から 1 m）

天然ウラン 2.47 μ Sv/h

回収ウラン 2.33 μ Sv/h（F P、T R U分 0.18 μ Sv/h）

コンクリートによる遮へい考慮（コンクリート表面から 1 m）

天然ウラン 1.23 μ Sv/h

回収ウラン 1.43 μ Sv/h（F P、T R U分 0.095 μ Sv/h）

年間の被ばく時間を 2000 時間と設定し、法令基準を参考に、ここでの目安の目標線量率を 10 μ Sv/h*（廃棄体表面から 1 m）と設定した。なお、この値は、実際の操業条件（定置時間、作業方法など）と比較して保守側に設定されているものと考えられる。

遮へいを全く考慮しない条件においても、目標線量率を下回る計算結果が得られた。さらに、遮へい効果が大きい、土砂、コンクリートを考慮に入れた場合には、数 μ Sv/h の値まで低下した。

インベントリ条件及び被ばく時間の設定が保守側であること、また、埋設時の作業者と廃棄体との距離、重機の遮へい機能等を鑑みると、操業（埋設）時に作業者が実際に受ける被ばく線量の大きさは、試算結果よりも十分低くなると予想される。以上より、操業中の安全性は、廃棄体に特別な遮へい機能を設けなくても確保できると考えられる。

（2） 廃棄体の表面線量率の評価

以上のとおり、操業中の安全性確保のために、廃棄体に特別な遮へい機能を設ける必要がないという結論に至ったが、確認のために廃棄体の表面線量率を評価する。特別な遮へい機能を持たせない廃棄体容器として 200L ドラム缶を想定する。線源モデルを図 26に示

*電離放射線障害防止規則第 4 条に放射線業務従事者の被ばく限度（5 年間につき 100mSv かつ 1 年間につき 50mSv）が定められている。1 日 8 時間、週 5 日、年間 50 週、作業すると仮定。20mSv/2000h=10 μ Sv/h。

JNC TJ8440 2005-001

す。また、評価条件を表 13に示す。

QADコードを用いてドラム缶の表面線量率の評価を行った結果を以下に示す。

- ・ 天然ウラン：7.51 $\mu\text{Sv/h}$
- ・ 回収ウラン：5.04 $\mu\text{Sv/h}$ (FP,TRU 分 0.50 $\mu\text{Sv/h}$)

ここでの試算結果は、表面線量率なので直接比較することはできないが、(1)項で設定した目安の目標線量率と比較しても低い値である。

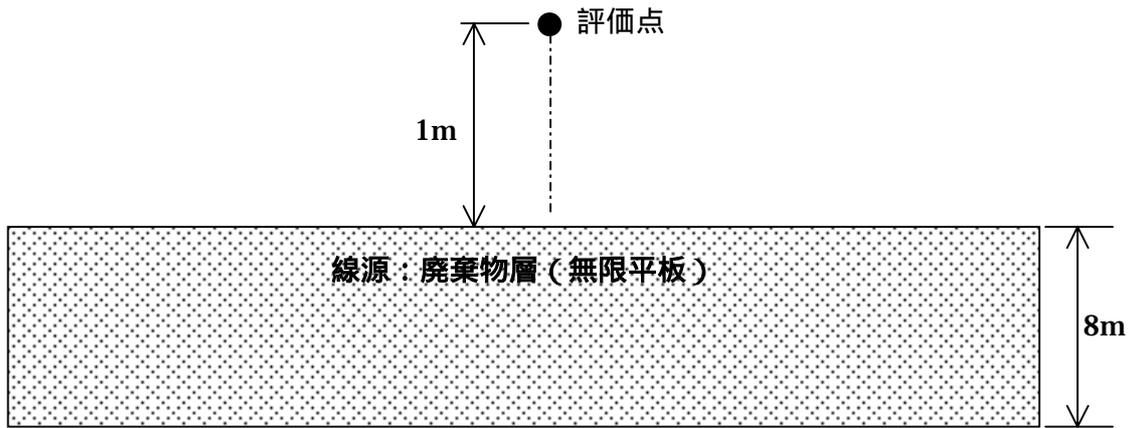
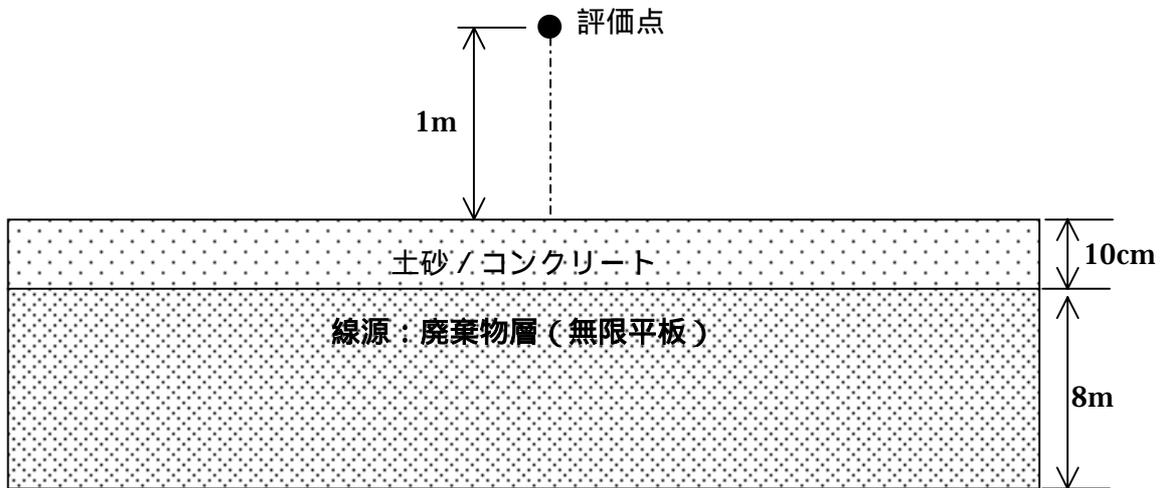


図 24 埋設時の線源モデル（遮へい考慮せず）



（注）土砂は合理化処分概念Cに相当。コンクリートはリファレンス処分概念、合理化処分概念A及びBに相当。

図 25 埋設時の線源モデル（埋め戻し材等の遮へい考慮）

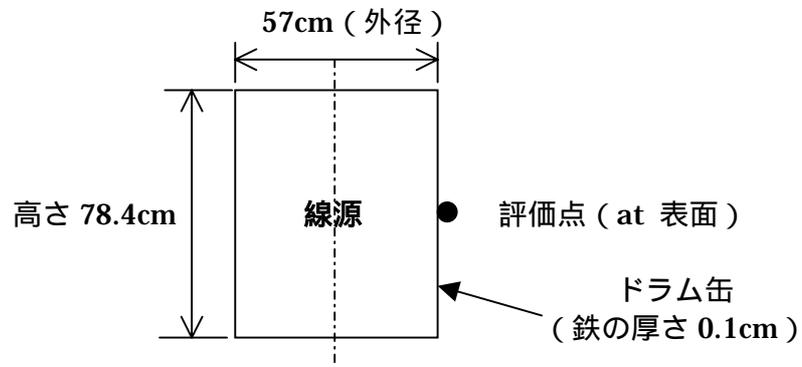


図 26 廃棄体表面線量率評価時の線源モデル

表 12 核種組成

核種	天然ウラン	回収ウラン
Tc-99	0.0%	4.2%
Ru-106	0.0%	0.1%
Cs-137	0.0%	0.3%
Tl-208	0.0%	0.4%
Bi-212	0.0%	1.2%
Pa-234m	0.0%	12.2%
Th-231	0.0%	0.8%
Th-234	0.0%	12.2%
Pu-241	0.0%	3.2%
U-232	0.0%	1.3%
U-234	49.1%	41.9%
U-235	2.3%	1.1%
U-236	0.0%	8.4%
U-238	48.6%	12.6%
Pu-238	0.0%	0.1%

表 13 評価条件

	埋設時線量率	廃棄体表面線量率
線源	無限平板、密度 2.0g/cm ³ 、セメント固化体	円柱(直径 57.0cm、高 78.4cm) 密度 2.0g/cm ³ 、セメント固化体
遮へい	<ul style="list-style-type: none"> ・遮へいなし ・土(厚さ 10cm、密度 1.3g/cm³) ・コンクリート(厚さ 10cm、2.1g/cm³) 	鉄(厚さ 0.1cm、密度 7.8g/cm ³)
インベントリ	<ul style="list-style-type: none"> ・天然ウラン 初期濃度 1000Bq/g (U-234 5.41E-03wt%, U-235 7.31E-01wt%, U-238 99.3wt%) 子孫核種の成長期間 100 年 (現実的な操業期間を考え設定) ・回収ウラン 初期濃度 1000Bq/g ウラン(親のみ)653Bq/g(U-232 1.52ppb, U-234 1.76E-02wt%, U-235 1.33%, U-236 3.40E-01%, U-238 98.3%) 子孫核種の成長期間 10 年 (10 年後に線源強度が最大となる) 	
計算コード	ANISN コード	QAD コード

表 14 線源・遮へい材の物性

元素	組成比 (重量%)			
	線源	遮へい材		
		鉄	コンクリート	土
H	0.6	-	0.416	0.6
O	49.9	-	50.74	49.9
Na	1.7	-	-	1.7
Mg	0.3	-	0.115	0.3
Al	4.6	-	0.446	4.6
K	1.9	-	-	1.9
Si	31.6	-	38.606	31.6
S	-	-	0.07	-
Ca	8.3	-	6.869	8.3
Fe	1.2	100	2.738	1.2

3.3.2 管理終了後の安全性の検討

前項の処分施設の合理化検討において、施設形態を最も簡易なものとした処分概念として、処分坑道内に人工構築物を設置せず、岩盤空洞内にそのまま廃棄体を定置し土砂等で埋戻すものを考えている。

コンクリートピット、人工バリアを設置しないことから、施設への浸入水量が、これらを設置する処分概念と比べ、大きくなることが予想される。施設の合理化によって、管理期間終了後の安全性が損なわれないか、すなわち、生物圏へもたらす影響が大きくなるかを概略検討することとする。

(1) 検討方法

(i) 廃棄物インベントリ及び対象核種

初期濃度 1,000Bq/g のウラン廃棄物が処分施設内に 2 万 5 千本 (200 L ドラム缶) 処分されると仮定する。前述したとおり、核種組成は、天然ウラン組成と回収ウラン組成の 2 種類に分けられる。物量割合で見ると、天然ウラン組成が約 9 割とほとんどを占める。そこで、以下の検討では、天然ウラン組成を基本に検討を進める。回収ウラン組成について、過去の検討成果を踏まえ、評価対象核種を選定した後、1 ケース行う。評価上の核種組成比を表 15 に示す。

(ii) 評価シナリオ

第 3 次中間報告で想定された環境条件を参考とする (図 27)。第 3 次中間報告で想定された地下水移行シナリオを図 28 に示す。地下水シナリオには、「河川水利用経路」、「河川岸建設作業経路」、「河川岸居住経路」、「河川岸農耕経路」の 4 つの評価経路がある。

「RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計」によれば、このうち、「河川岸農耕経路」が決定経路となっている。ここでは、管理期間終了後の処分施設が周辺環境へ与える影響として、「河川岸農耕経路」に係る線量を評価する。

(iii) 評価パラメータ

評価パラメータは、第 3 次中間報告を参考に設定する。但し、線量換算係数については ICRP の最新の勧告値 (ICRP Publ.72) を用いる。

処分施設に関するパラメータを表 16、天然バリアに関するパラメータを表 17、生物圏

に関するパラメータを表 18、処分施設の放出係数と移行経路の分配係数を表 19、土壌から農作物への移行係数を表 20、飼料・飼育水から畜産物への移行係数を表 21、農耕土壌の分配係数を表 22、線量換算係数を表 23に示す。

(iv) 解析ケース

空洞内にコンクリートピットを構築し、その周りにベントナイト層を設ける施設概念をリファレンスとした。一般的に、人工バリア設置の効果には、核種閉じ込め性能の向上と、施設への浸入水量の低減が挙げられる。ここでは、処分施設の合理化による安全性の変化を検討するために、この二つの施設性能に着目した。

まず、第3次中間報告と同様な施設性能を想定した条件での評価を実施する。すなわち、施設からの核種の放出係数及び浸入水量を第3次中間報告と同じ条件として評価を行う。これを基本の施設性能として、ケース1と設定する。

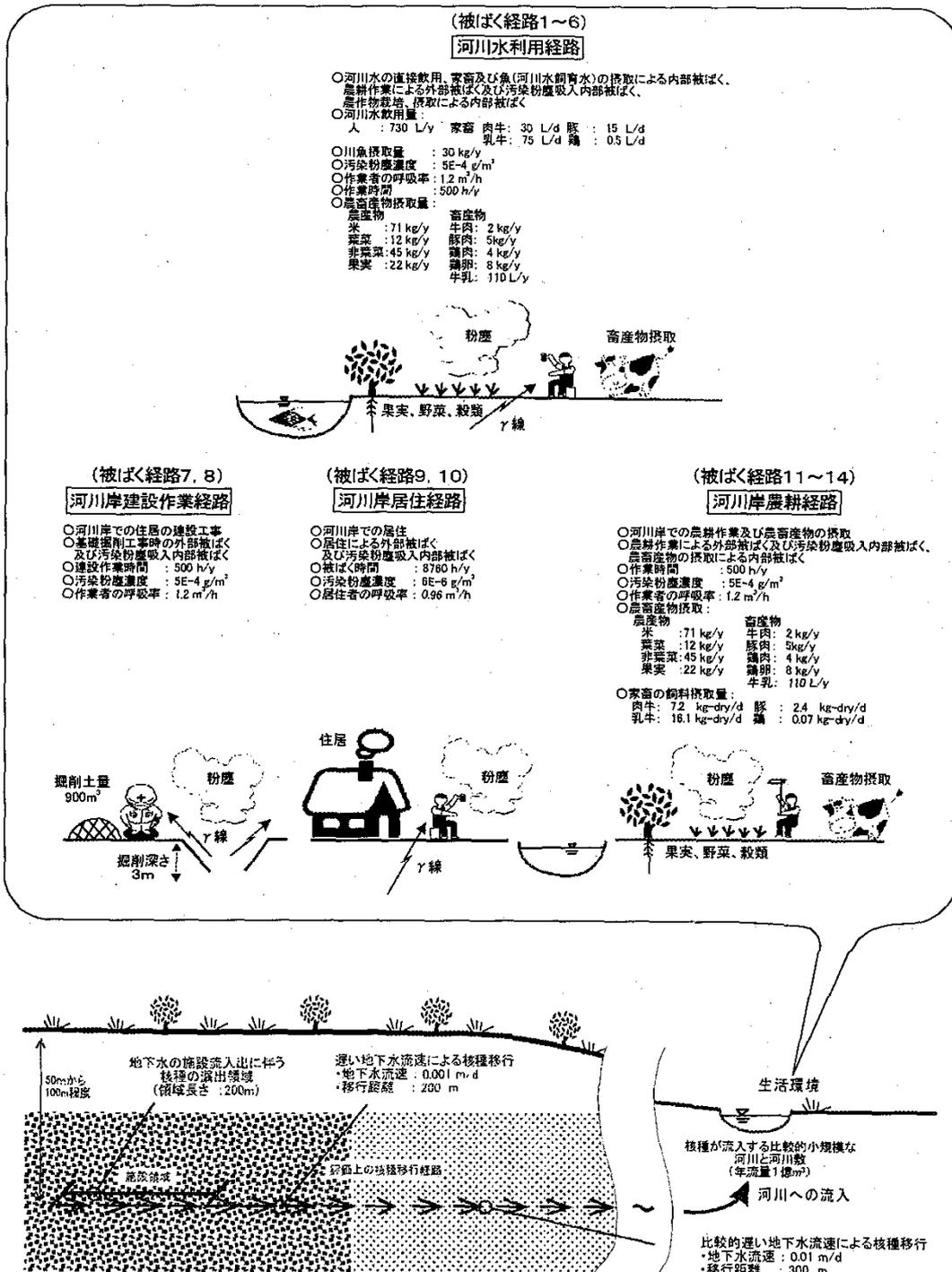
次に、人工バリアの軽減による影響を把握するため、この条件よりも、放出係数及び浸入水量が大きい条件の施設性能を設定し評価を行う。人工バリアを軽減することによって、放出係数、浸入水量が、基本の施設性能と比べ10倍に増大すると仮定する。

さらに、天然ウランに比べると物量的に少ないものの回収ウラン組成のウラン廃棄物が存在することから、核種組成の違いを確認するために、回収ウラン組成のケースを実施する。解析ケースを整理して表 24に示す。

なお、天然バリア、人工バリアともに具体的な条件は定まっていない。これらの条件が定まらない限り、放出係数や施設への浸入水量を具体的に設定することはできない。したがって、ここで設定した10倍という値は、あくまでも本検討での仮定に過ぎない。

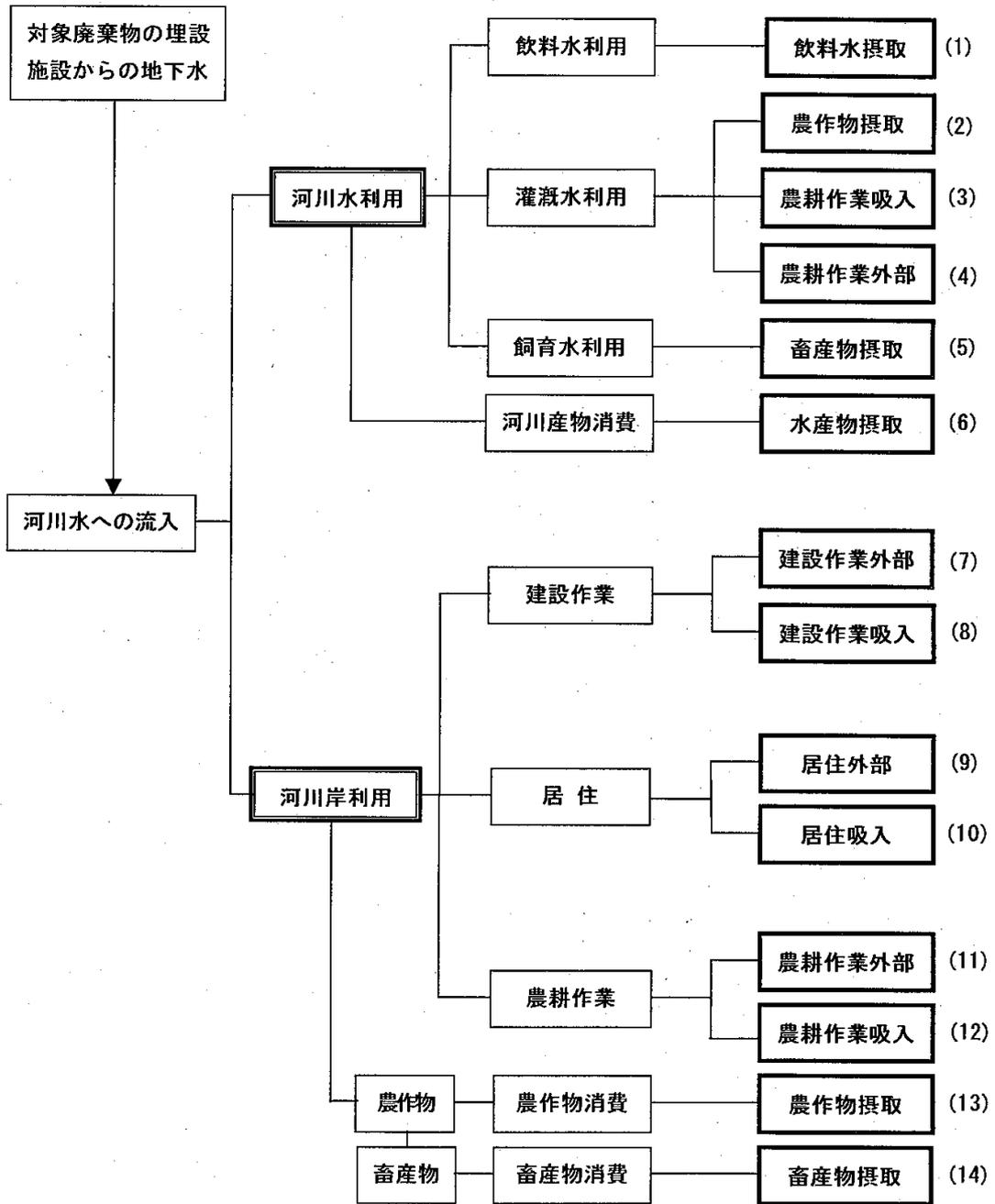
表 15 評価上の核種組成比

核種	半減期 (y)	天然ウラン (Bq%)	回収ウラン (Bq%)
Sr-90	2.9E+01	-	1.7E-04
Tc-99	2.1E+05	-	4.2E-02
Cs-137	3.0E+01	-	3.3E-03
Sm-151	9.0E+01	-	1.0E-06
U-232	7.2E+01	-	1.3E-02
U-234	2.5E+05	4.9E-01	4.2E-01
U-235	7.0E+08	2.3E-02	1.1E-02
U-236	2.3E+07	-	8.4E-02
U-238	4.5E+09	4.9E-01	1.3E-01
Np-237	2.1E+06	-	1.3E-04
Pu-238	8.8E+01	-	7.6E-04
Pu-239	2.4E+04	-	1.7E-04
Pu-240	6.6E+03	-	2.4E-04
Pu-241	1.4E+01	-	3.2E-02
Pu-242	3.8E+05	-	6.1E-07
Am-241	4.3E+02	-	4.6E-04
Am-242m	1.5E+02	-	2.7E-08
Am-243	7.4E+03	-	4.9E-08
Cm-243	2.9E+01	-	3.7E-08
Cm-244	1.8E+01	-	2.5E-08
Cm-245	8.5E+03	-	2.5E-10



(出典)原子力安全委員会:低レベル放射性廃棄物放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)(2000)

図 27 想定した対象廃棄物埋設の環境条件



括弧内の数字は被ばく経路番号を示す。

(出典)原子力安全委員会：低レベル放射性廃棄物放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について(第3次中間報告)(2000)

図 28 地下水移行シナリオ

表 16 処分施設に関するパラメータ

パラメータ	単位	設定値	備考
放出係数	-	核種ごとに 第3次報告の値～10倍	第3次中間報告の値から10倍まで変動
施設浸入水量	m ³ /m ² /y	0.073～0.73	第3次中間報告の値から10倍まで変動
廃棄体容量	m ³ /本	0.2	200Lドラム
処分量	本	2.5×10 ⁴	
処分施設	m×m×m×本	120×10×10×1	合理化処分概念Cのレイアウト
廃棄体見かけ密度 (施設見かけ密度)	g/cm ³	2.5	第3次中間報告
空隙率	-	0.2	第3次中間報告

表 17 天然バリアに関するパラメータ

パラメータ	単位	設定値	備考
河川までの距離	m	500	第3次中間報告
地下水実流速(施設近傍)	m/d	0.001	第3次中間報告
実流速が0.001m/dである移行距離	m	200	第3次中間報告
地下水実流速(施設近傍以外)	m/d	0.01	第3次中間報告
実流速が0.01m/dである移行距離	m	300	第3次中間報告
土壌空隙率	-	0.2	第3次中間報告
土壌密度	g/cm ³	2.6	第3次中間報告

表 18 生物圏に関するパラメータ

パラメータ	単位	設定値	備考
河川水量	m ³ /y	1×10 ⁸	第3次中間報告
農耕作業の年間作業時間	h/y	500	第3次中間報告
農耕作業時の粉塵濃度	g/m ³	5×10 ⁻⁴	第3次中間報告
農耕作業者の呼吸量	m ³ /h	1.2	第3次中間報告
農作物の年間摂取量			第3次中間報告
米	kg/y	71	
葉菜		12	
非葉菜		45	
果実		22	
畜産物の年間摂取量			第3次中間報告
牛肉	kg/y	2	
豚肉	kg/y	5	
鶏肉	kg/y	4	
鶏卵	kg/y	8	
牛乳	L/y	110	
家畜の飼料摂取量			第3次中間報告
肉牛	kg-dry/d	7.2	
乳牛		16.1	
豚		2.4	
鶏		0.07	

表 19 処分施設の放出係数と移行経路の分配係数

元素	処分施設の 放出係数(-)	移行経路の 分配係数(mL/g)
Sr	3.0E-02	5.0E+01
Tc	1.0E-01	1.0E+01
Cs	1.0E-02	1.0E+03
Sm	3.0E-02	1.0E+02
Ra	3.0E-04	5.0E+01
Po	3.0E-04	1.0E+02
Pb	3.0E-04	1.0E+02
Pa	3.0E-04	1.0E+03
Ac	3.0E-04	1.0E+03
Th	3.0E-04	1.0E+03
U	3.0E-04	1.0E+02
Np	3.0E-04	1.0E+02
Pu	3.0E-04	1.0E+03
Am	3.0E-04	1.0E+03
Cm	3.0E-04	1.0E+03

(注1) 第3次中間報告に基づき設定。

(注2) ケース2及び4では放出係数を10倍とした。

表 20 土壌から農作物への移行係数

元素	移行係数(Bq/g-wet)/(Bq/g-dry soil)		
	農作物 (米)	農作物 (葉菜,非葉菜,果実)	農作物 (飼料)
Sr	1.8E-01	5.5E-01	1.7E+00
Tc	6.3E-01	2.1E+02	7.6E+01
Cs	7.1E-02	5.7E-02	5.3E-01
Sm	2.0E-03	2.0E-03	4.0E-02
Ra	6.6E-04	1.2E-02	8.0E-02
Po	2.0E-03	1.5E-03	9.0E-02
Pb	4.0E-03	7.6E-03	1.1E-03
Pa	4.0E-02	4.0E-02	1.0E-01
Ac	1.0E-03	1.0E-03	4.0E-03
Th	1.9E-05	2.2E-04	1.1E-02
U	1.1E-03	2.4E-03	2.3E-02
Np	2.3E-03	1.2E-02	6.9E-02
Pu	7.4E-06	7.0E-04	8.0E-04
Am	1.9E-05	3.5E-04	1.2E-03
Cm	1.8E-05	2.2E-04	1.1E-03

(注) 第3次中間報告に基づき設定。

表 21 飼料・飼育水から畜産物への移行係数

元素	鶏卵 (d/kg)	牛乳 (d/L)	牛肉 (d/kg)	豚肉 (d/kg)	鶏肉 (d/kg)
Sr	2.2E-01	1.0E-03	6.0E-04	3.9E-02	3.5E-02
Tc	1.9E+00	1.0E-02	1.0E-02	9.9E-04	6.3E-02
Cs	4.9E-01	8.0E-03	2.0E-02	2.5E-01	4.4E+00
Sm	7.0E-03	2.0E-05	2.0E-03	5.0E-03	4.0E-03
Ra	2.5E-01	1.3E-03	9.0E-04	3.5E-02	4.8E-01
Po	2.5E-01	3.4E-04	5.0E-03	3.5E-02	4.8E-01
Pb	1.2E+00	3.0E-04	4.0E-04	3.1E-02	1.2E+00
Pa	4.1E-03	5.0E-06	1.0E-03	1.1E-04	4.1E-03
Ac	1.6E-02	2.0E-05	2.0E-05	1.7E-04	6.6E-03
Th	1.8E-01	5.0E-06	1.0E-04	4.6E-03	1.8E-01
U	9.9E-01	6.0E-04	3.0E-02	4.0E-02	1.2E+00
Np	2.0E-03	5.0E-06	1.0E-03	1.0E-02	4.0E-03
Pu	7.6E-03	1.0E-07	1.0E-05	1.0E-02	1.6E-04
Am	8.5E-03	4.0E-07	2.0E-05	1.0E-02	1.8E-04
Cm	2.0E-03	2.0E-05	2.0E-05	1.0E-02	4.0E-03

(注) 第3次中間報告に基づき設定。

表 22 農耕土壌の分配係数

元素	農耕土壌の分配係数 (mL/g)
Sr	1.5E+02
Tc	1.5E+00
Cs	2.7E+02
Sm	3.0E+03
Ra	2.4E+03
Po	6.6E+03
Pb	2.2E+04
Pa	6.6E+03
Ac	5.4E+03
Th	8.9E+04
U	4.0E+02
Np	1.2E+03
Pu	1.8E+03
Am	1.1E+05
Cm	1.2E+04

(注) 第3次中間報告に基づき設定。

表 23 内部及び外部被ばく線量換算係数

核種	経口 ¹⁾ (Sv/Bq)	吸入 ¹⁾ (Sv/Bq)	外部 ²⁾ (Sv/y)/(Bq/kg)
Sr-90	2.8E-08	1.6E-07	1.1E-08
Tc-99	6.4E-10	1.3E-08	1.8E-09
Cs-137	1.3E-08	3.9E-08	1.7E-06
Sm-151	9.8E-11	4.0E-09	5.0E-11
Pb-210	6.9E-07	5.7E-06	4.4E-08
Po-210	1.2E-06	4.3E-06	2.3E-11
Ra-226	2.8E-07	9.5E-06	5.1E-06
Ac-227	1.1E-06	5.5E-04	1.3E-06
Th-229	4.9E-07	2.4E-04	9.6E-07
Th-230	2.1E-07	1.0E-04	1.3E-09
Th-232	2.3E-07	1.1E-04	7.7E-10
Pa-231	7.1E-07	1.4E-04	1.0E-07
U-232	3.3E-07	3.7E-05	1.5E-09
U-233	5.1E-08	9.6E-06	1.2E-09
U-234	4.9E-08	9.4E-06	1.0E-09
U-235	4.7E-08	8.5E-06	4.7E-07
U-236	4.7E-08	8.7E-06	7.1E-11
U-238	4.5E-08	8.0E-06	2.2E-07
Np-237	1.1E-07	5.0E-05	1.1E-07
Pu-238	2.3E-07	1.1E-04	1.6E-10
Pu-239	2.5E-07	1.2E-04	4.7E-10
Pu-240	2.5E-07	1.2E-04	9.0E-10
Pu-241	4.8E-09	2.3E-06	2.1E-12
Pu-242	2.4E-07	1.1E-04	8.9E-10
Am-241	2.0E-07	9.6E-05	3.4E-08
Am-242m	1.9E-07	9.2E-05	2.6E-08
Am-243	2.0E-07	9.6E-05	7.5E-07
Cm-243	1.5E-07	6.9E-05	2.0E-07
Cm-244	1.2E-07	5.7E-05	8.9E-10
Cm-245	2.1E-07	9.9E-05	2.5E-07

(注1) ICRP Publication 72

(注2) ANISN コードを用いて計算

表 24 解析ケース

ケース	施設性能	核種組成	放出係数	浸入水量 (m ³ /m ² /y)
1	基本	天然	第3次中間報告	0.073
2	合理化	天然	10倍	0.073
3		天然	第3次中間報告	0.73
4		天然	10倍	0.73
5	基本	回収	第3次中間報告	0.073

(注1) ケース1と異なる条件に下線を入れた。

(注2) 施設性能の「基本」と、第3次中間報告における施設条件と同じであることを示す。「合理化」とは放出係数、浸入水量の両方、または、いずれかが「基本」の10倍であることを示す。

(2) 検討結果

ケースごとの最大線量、ピーク時刻及び決定核種を表 25に示す。また、線量の時間変化のグラフを図 29に示す。ケース1（天然ウラン）及びケース5（回収ウラン）の核種ごとの線量の時間変化グラフを図 30及び図 31に示す。線量ピーク時期は、いずれも、約 100 万年後で決定核種は Pb-210 であった。

合理化処分概念の施設性能として想定したケース2、3及び4は、基本施設性能のケース1と比べ、大きな差異はなく、全てのケースで $10 \mu\text{Sv}/\text{年}$ を下回る結果が得られた。また、回収ウラン（ケース5）についても、Tc 等の不純物の影響は小さく、これについても $10 \mu\text{Sv}/\text{y}$ を下回る値が得られた。以上のことから、基本の施設性能から $1/10$ の施設性能の範囲については、管理期間終了後の安全性に大きな問題はないことがわかった。

なお、ここで想定した天然バリア条件よりも厳しい条件下においては、処分施設の核種保持能力、浸入水バリア性能等の違いによる線量の差が顕著に現れることが予想される。よって、今回とは異なるサイト条件での合理化処分概念の安全性評価が今後の課題として考えられる。また、各合理化処分概念の構成材料を考慮に入れてニアフィールドの化学環境を吟味したうえで安全性評価を行うことも考えられる。また、処分レイアウトや処分場内のウラン濃度の違いに着目した検討なども考えられる。

表 25 試算結果

ケース	最大線量 [Sv/y]	ピーク時間 [y]	決定核種
1	1.8E-06	1.1E+06	Pb-210
2	3.6E-06	8.9E+05	Pb-210
3	3.6E-06	8.9E+05	Pb-210
4	3.8E-06	8.9E+05	Pb-210
5	5.5E-07	1.0E+06	Pb-210

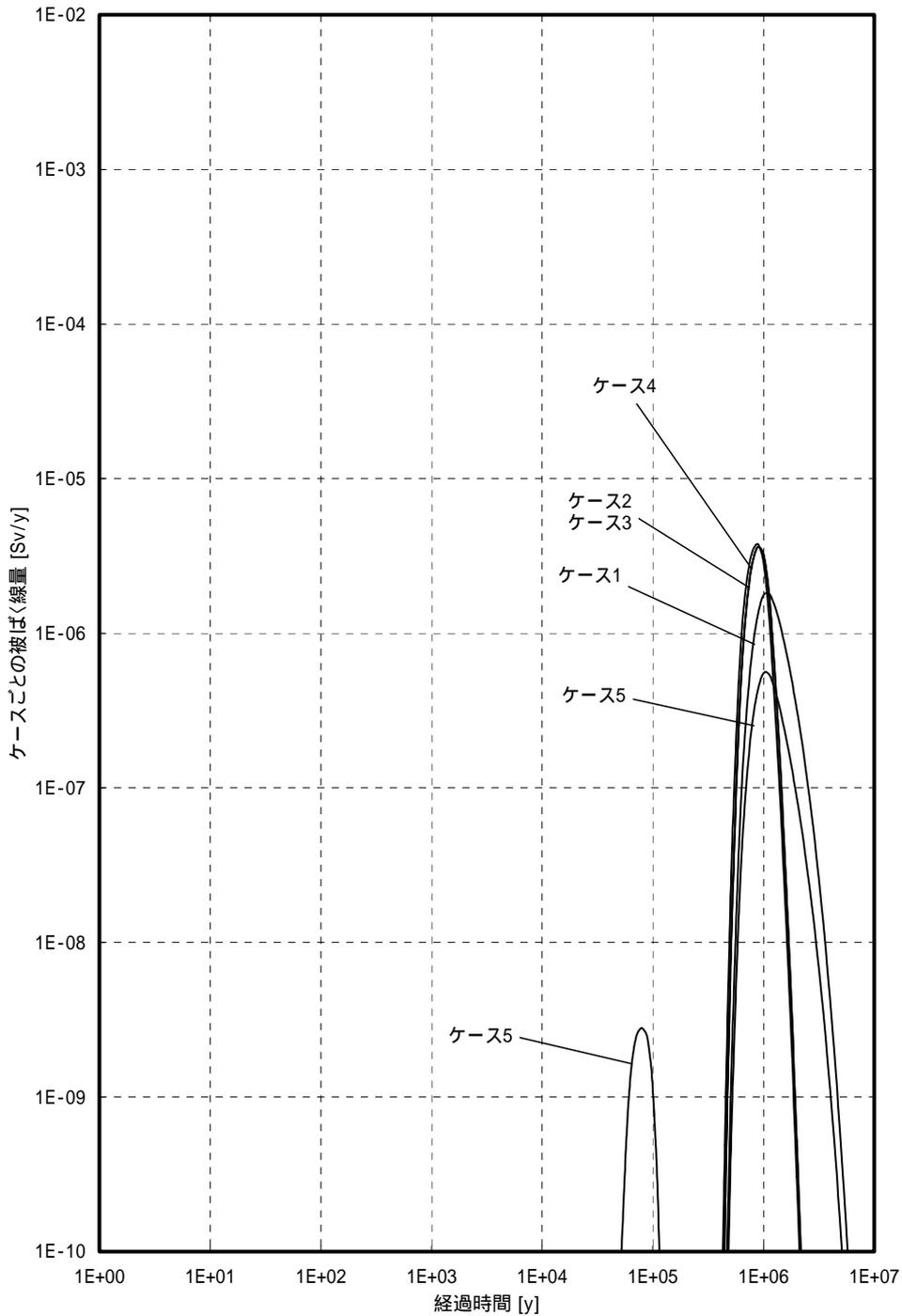


図 29 線量の時間変化

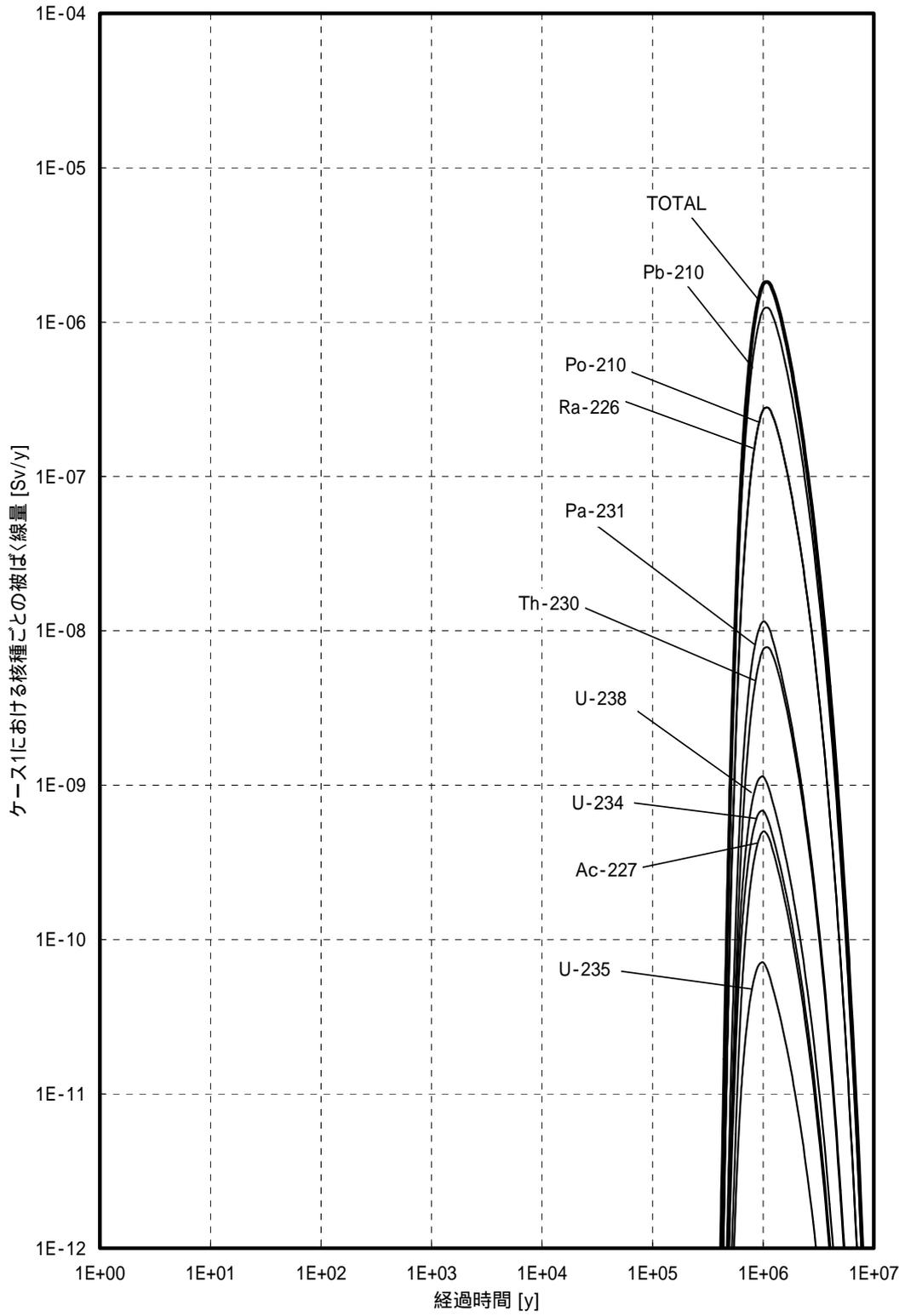


図 30 ケース 1 の線量の時間変化

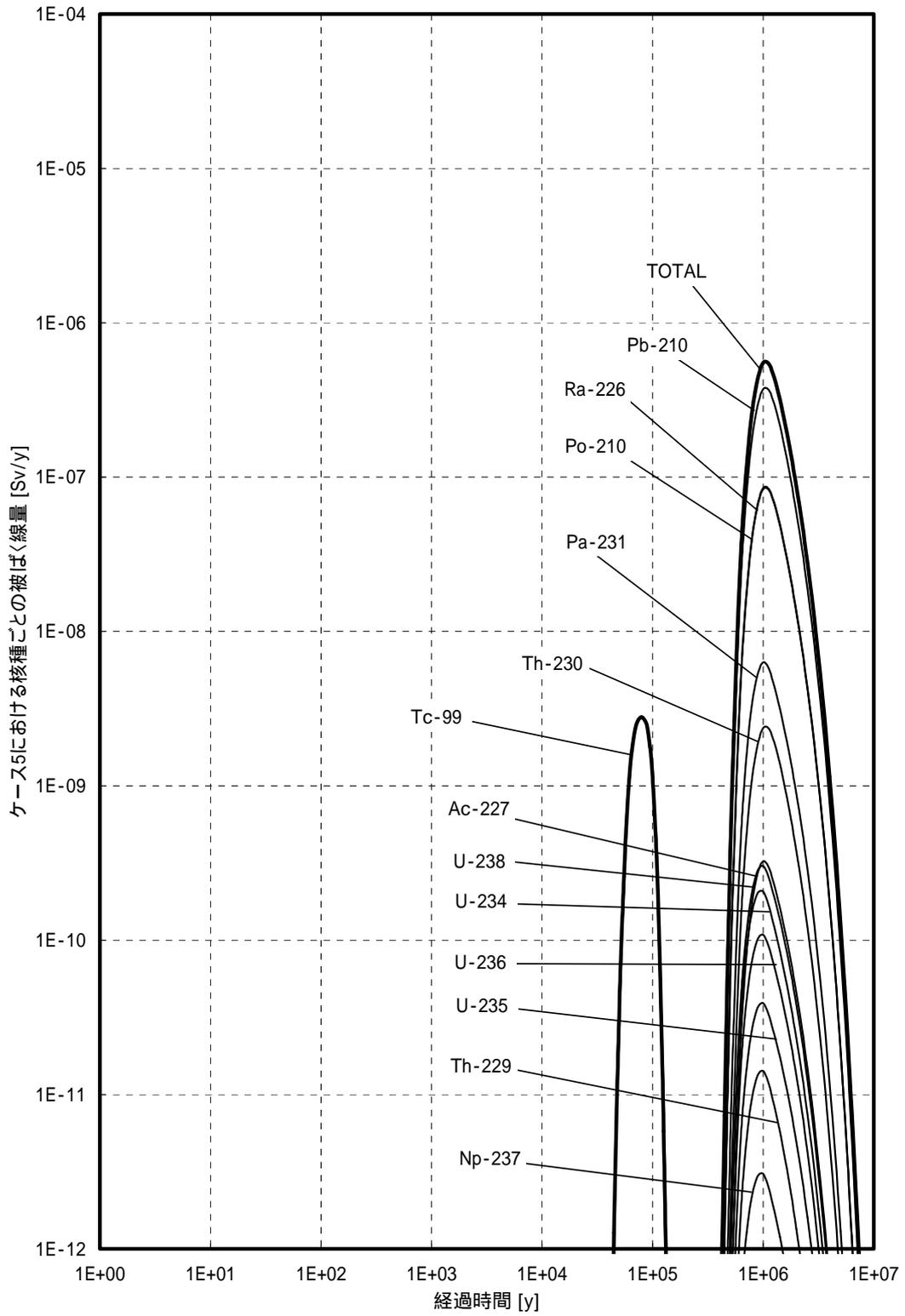


図 31 ケース 5 の線量の時間変化

3.4 課題の整理

想定した処分概念及び廃棄体形態に対し、安全性以外で重要な、廃棄体技術基準、処分場技術基準、廃棄体確認等規制の観点、廃棄物の定置、埋め戻しなど操業の観点、モニタリング等の管理期間対応の観点から課題を整理する。

3.4.1 課題整理の検討方法

規制の観点については、次のとおり対応することとする。現在、ウラン廃棄物の処分は制度化されていない。また、発電所廃棄物についての浅地中処分に係る基準は整備されているものの、余裕深度処分に関してはこれから検討される状況である。したがって、規制の観点からの課題を検討するにあたっての拠り所とする基準は今のところ存在しない。しかしながら、余裕深度処分に係る諸基準は、現行の浅地中処分をベースにして整備されると予想されることから、現行浅地中処分に係る基準との比較で考えることとする。

操業の観点については、定置時、埋め戻し時の作業者の処分エリアへの立入りの頻度等を考察する。管理期間対応の観点については、排水・排水監視への対応等を考察する。

3.4.2 課題整理

(1) 合理化処分概念A

合理化処分概念Aは、岩盤空洞内にコンクリートピット施設を構築、その施設内に廃棄体を定置、施設内をセメント系充てん材で埋め戻したのち、空洞上部等を土砂等で埋め戻す処分概念である。廃棄体の定置は、コンクリートピット上に設置する専用の定置クレーンで遠隔操作によって行う。

(i) 規制の観点

区画が設けてあるので、施設確認等の対応は比較的しやすい。また、コンクリートピット施設については、すでに浅地中処分での国内事例があり、確認事項等が具体化されている。

浅地中処分に係る現行基準によれば、廃棄物埋設地はその周辺に比して透水性が大きくない土砂等で埋め戻すことが要求されている。空洞内は転圧が困難な部分もあり、また、埋め戻し材の低透水性確保には限界がある。現行基準が適用される場合には、施工方法及び使用材料の選定（ベントナイト等を混合するなど）の措置によって低透水性を確保する必要がありコストが上昇する可能性がある。

(ii) 操業の観点

遠隔操作による定置であることから、作業者が処分トンネルへ出入りする頻度は他の概念と比べて少なく放射線防護の観点から有利である。ただし、操業期間が長くなる場合には定置クレーンの維持補修、設備更新に要するコストが負担となる可能性がある。

廃棄体の受入計画や操業の年度展開を踏まえた具体的な操業方法を検討し、操業能力を確認するなど事前に操業計画を立案する必要がある。

(iii) 管理期間対応の観点

コンクリートピットで区画されているので、廃棄物種類毎に定置するエリアを区別する必要がある場合、また、排水・排水監視が必要となる場合には、比較的対応がしやすい。

モニタリングの目的（核種移行、バリア性能等）を明確にし、サイト特性を考慮に入れた具体的なモニタリング計画を検討する必要がある。

(2) 合理化処分概念B

合理化処分概念Bは、岩盤空洞内に廃棄体を移動式クレーンで定置したのち、セメント系材料で一体的に固型化し、空洞上部等を土砂等で埋め戻す処分概念である。現行法令で定められている浅地中処分におけるモノリス処分概念を岩盤空洞内で実施するものである。

(i) 規制の観点

浅地中処分におけるモノリスは現行法令で規定されているものの、国内ではまだ実施例がなく、施設確認等を具体的にどのようにするかを検討する必要がある。

廃棄体定置後のコンクリート打設に伴い、核種が漏出しないよう、廃棄体の水密性を高めるか、コンクリートをノンブリーディングにする必要がある。

合理化処分概念Aと同様に、周辺に比して透水性が大きい土砂等で埋め戻すことが要求される場合には埋め戻し材の低透水性を確保する措置が必要になりコストが上昇する可能性がある。

(ii) 操業の観点

廃棄体の定置は移動式クレーンを操作するなど現場での作業があり、合理化処分概念Aと比べ作業者が処分トンネルへ出入りする頻度が多くなる。放射線防護、作業安全衛生等の管理が合理化処分概念Aより一層求められる。なお、3.3.1項の検討結果に示すとおり作業者の被ばく線量は大きくない。

合理化処分概念Aと同様に、廃棄体の受入計画等を考慮して、操業計画を立案する必要

がある。

(iii) 管理期間対応の観点

区画がないので、モノリスからの排水及び排水監視が必要とされる場合にはコンクリートピット施設と比べ対応が難しい。

合理化処分概念Aと同様に、モニタリングの目的（核種移行、バリア性能等）を明確にし、サイト特性を考慮に入れた具体的なモニタリング計画を検討する必要がある。

(3) 合理化処分概念C

合理化処分概念Cは、人工構築物を構築せず、岩盤空洞内に直接廃棄体を定置し土砂等で埋め戻す処分概念である。すなわち、岩盤空洞内でトレンチ処分するイメージである。

(i) 規制の観点

トレンチ処分については国内事例があり、施設確認等の対応は具体化されている。

合理化処分概念A及びBと同様に、周辺に比して透水性が大きい土砂等で埋め戻すことが要求される場合には埋め戻し材の低透水性を確保する措置が必要になりコストが上昇する可能性がある。ただし、合理化処分概念A及びBでは、コンクリート構造物の上で転圧作業を行うのに対し、合理化処分概念Cは、それらと違い、ドラム缶の上及び周囲で転圧作業を行うことが想定されるので、人力施工になる可能性が大きく、締め固めがさらに困難になるものと考えられる。

(ii) 操業の観点

合理化処分概念A及びBと比べ、建設・操業中に処分トンネルに作業者が出入りする頻度が高い。放射線防護、作業安全衛生等の管理が合理化処分概念A及びB以上に求められる。なお、前述の検討結果に示すとおり作業者の被ばく線量は大きくない。

最大8段積みであること、重機で転圧等を行うことから、廃棄体重量、土砂重量、操業時の車両重量等に耐える廃棄体強度が要求される。

合理化処分概念A及びBと同様に、廃棄体の受入計画等を考慮して、操業計画を立案する必要がある。

(iii) 管理期間対応の観点

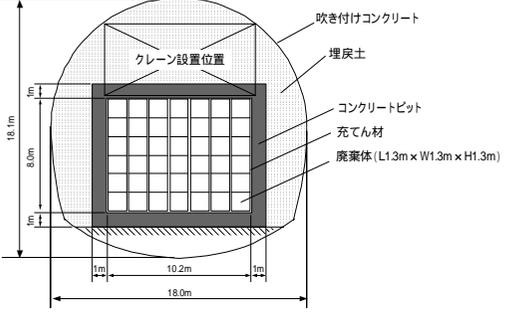
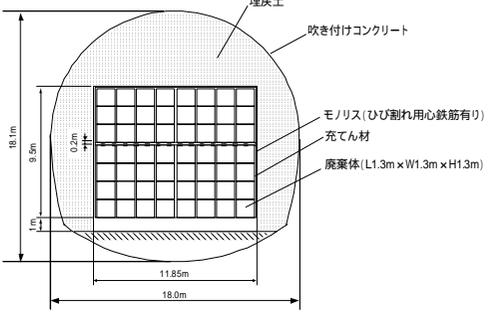
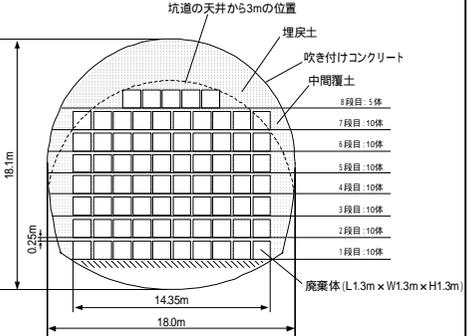
排水及び排水監視が要求される場合には対応が非常に難しい。

合理化処分概念A及びBと同様に、モニタリングの目的（核種移行、バリア性能等）を明確にし、サイト特性を考慮に入れた具体的なモニタリング計画を検討する必要がある。

JNC TJ8440 2005-001

以上を整理して、表 26に示す。

表 26 安全性以外の課題整理

	合理化処分概念 A	合理化処分概念 B	合理化処分概念 C	
処分概念	<p>岩盤空洞内にコンクリートピットを構築し、その施設内に廃棄物を定置する。施設内をセメント系充てん材で埋め戻したのち、空洞上部等を土砂等で埋め戻す。</p>  <p>処分空洞・三心円トンネル、スパン18m 廃棄体 7行 x 6段 x 5列</p>	<p>岩盤空洞内において廃棄物をセメント系材料で一体的に固型化する。空洞上部等を土砂等で埋め戻す。</p>  <p>処分空洞・三心円トンネル、スパン18m 廃棄体 8行 x 7段 x 5列</p>	<p>人工構築物を構築せず、岩盤空洞内に直接廃棄物を定置し土砂等で埋め戻す。</p>  <p>処分空洞・三心円トンネル、スパン18m 廃棄体 1断面あたり75体(8段積み)</p>	
課題点	<p>規制 (廃棄体基準、施設基準等)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・周辺に比して透水性が大きくない土砂等で埋め戻すことが要求される場合、施工方法や使用材料を選定(ベントナイトを混合するなど)し、低透水性を確保する措置が必要になり、コストアップになる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左 ・浅地中でもモノリスの実施例がない。 ・廃棄体定置後のコンクリート打設に伴い、核種が漏出しないよう、廃棄体の水密性を高めるか、コンクリートをノンブリーディングにする必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左
	<p>操業 (定置、埋め戻し等)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・操業方法を検討し、操業能力を確認するなど、事前に操業計画を立案する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左 ・操業中の作業者の出入りが多く、安全衛生等の管理が他の概念以上に要求される。 ・廃棄体重量、土砂重量、操業時の車両重量等に耐える廃棄体強度が要求される。
	<p>管理対応 (モニタリング等)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリングの目的を明確にし、サイト特性を考慮した具体的なモニタリング計画を検討する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左 	<ul style="list-style-type: none"> ・同左 ・廃棄体定置区域からの排水・排水監視の対応が難しい。

4 おわりに

核燃料サイクル開発機構から発生する余裕深度処分相当のウラン廃棄物量は、2048年時点で25,240本(200Lドラム換算)と予想されている。特に、余裕深度処分相当のウラン廃棄物の場合、浅地中処分相当のものに比べ処分施設の建設に要する費用が大きいことから、安全でかつ合理的な処分概念を早急に検討していくことが大切である。

ウラン核種は半減期が非常に長いことから天然バリアによって安全性を確保する必要がある。また、ウラン核種は発電所廃棄物やRI・研究所等廃棄物と比べ放射線の影響が小さい。これらの特徴を踏まえ、余裕深度処分の合理化を検討し、次の3つの処分概念を考えた。

岩盤空洞+コンクリートピット

岩盤空洞+モノリス(廃棄体を空洞で一体的に固型化)

岩盤空洞+トレンチ(廃棄体を空洞内に土砂等で埋め戻す)

これらは原子炉等規制法で定められている浅地中処分における概念を地下の岩盤空洞内で展開したものである。それぞれの概念には、メリット、デメリットがある。本検討は概略的な検討である。今後は、各処分概念について、より詳細な廃棄物条件、サイト条件、操業条件等に基づいた検討が考えられる。

JNC TJ8440 2005-001

参考文献

田中雄司：“余裕深度処分の概要”、日本原子力学会バックエンド部会主催 20 回バックエンド夏季セミナー、兵庫県姫路市、2004 年 7 月 29 日～7 月 30 日、講演 10-1（2004）

景山仁志、赤堀邦晃：“RI・研究所等廃棄物余裕深度処分施設の概念設計（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書）”、JNC TJ8400 2003-084、（2004）

原子力安全委員会：低レベル放射性廃棄物放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について（第 3 次中間報告）（2000）