

# 地層処分システム性能の概括的評価報告書の 初期条件及び境界条件に関する調査研究



平成4年2月28日

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示する  
ものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容  
漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に  
注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

## 地層処分システム性能の概括的評価報告書の初期条件及び境界条件に関する調査研究\*

辻 直志\*\* 今井 恒\*\* 杉原 芳正\*\*

## 要 旨

## 1. 第一次報告書において必要な現状の知見及びその背景の調査・検討

高レベル廃棄物処分に係わる基本的な事項について、現状で得られる知見を整理し、取りまとめた。このなかで、非放射性廃棄物に対する地層処分方式の特異性が示されるとともに、今後は高レベル廃棄物処分問題も地球環境問題の視点から捉えていく必要があることが示唆された。

## 2. 高レベル廃棄物対策に関わる関係者のヒアリング調査

原子力に関連する専門家、環境問題専門家およびマスコミ関係者に対してヒアリング調査を実施し、高レベル廃棄物対策に関連して今どのような情報が求められているか、また安全評価に関してどのような説明が必要か等の視点で解答が得られた。これによると基本的にサイトジェネリックなアプローチは支持できるが、コンピュータシミュレーションのみの安全評価はなかなか信用しにくいといった考えが抽出できた。

## 3. 第一次報告書における初期条件および境界条件に関する調査・検討

第1次報告書においてはサイトジェネリックな手法により、我が国においても地層処分の安全確保が可能であることの見通しを示す必要があるが、単に技術的に安全性を示すだけでなく、地層処分の意志決定者や公衆に安全性を納得してもらうための方法論、安全性を示すための考え方のフレームワークを明らかにしたうえで安全性確保の見通しを示す必要があるものと考えられる。また、なぜ地層処分を実施するのか、地球環境問題的視点からの考えが必要であることが示された。

\* 本報告書は、株式会社 野村総合研究所が、動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

\*\* 株式会社 野村総合研究所 社会システム研究部

地層処分システム性能の概括的評価報告書の初期条件及び境界条件に関する調査研究

(目次)

1. 第一次報告書において必要な現状の知見及びその背景の調査・検討	
1. 1 高レベル廃棄物対策の必要性	1
1) 高レベル廃棄物の概要	1
(1) 高レベル廃棄物	1
(2) 高レベル廃棄物の発生量	7
(3) 多の廃棄物との発生量比較	8
2) 高レベル廃棄物のリスク	11
(1) 高レベル廃棄物の毒性	11
(2) 高レベル廃棄物のリスク	14
3) 高レベル廃棄物の資源性	27
(1) 有用金属資源	27
(2) 放射線源としての資源	28
(3) 熱としての資源	32
(4) 原子燃料としての利用	33
4) 高レベル廃棄物管理の特徴	34
(1) 管理が必要となる時間スケール	34
(2) 廃棄物対策の考え方と方法論	36
(3) 高レベル廃棄物の管理の考え方	43
5) 高レベル廃棄物の管理方策	46
(1) 長期貯蔵	46
(2) 群分離・消滅処理	48
(3) 隔離処分方式	51
①宇宙処分	51
②氷床処分	54
③井戸注入処分	57
④海洋底処分	59
⑤岩石融解処分	62
⑥島内地層処分	64
⑦超深坑処分	66
6) 高レベル廃棄物と地球環境問題	69
(1) 地球環境問題の現状	69
(2) 地球環境問題への対応方策	101
(3) 高レベル廃棄物と地球環境問題の関連	125

1. 2	地層処分の概念	1 2 7
1)	地層処分概念の特徴	1 2 7
2)	地層処分に絡む諸問題	1 3 4
(1)	隔離期間	1 3 4
(2)	制度的管理に関する考え方	1 3 7
(3)	人間侵入	1 3 8
(4)	再取りだし性とモニタリング	1 4 7
1. 3	地層処分技術開発の必要性と特徴	1 5 0
1)	地層処分技術開発の方向	1 5 0
2)	地層処分技術開発の進め方	1 5 4
2.	高レベル廃棄物対策に関わる関係者のヒアリング調査	
1)	ヒアリング結果	1 5 8
2)	まとめ	1 7 5
3.	第一次報告書における初期条件および境界条件に関する調査・検討	
3. 1	第一次報告書における初期条件・境界条件	1 7 6
1)	第一次報告書の役割	1 7 6
(1)	地層処分に係わる問題の難しさ	1 7 6
(2)	地層処分をめぐる最近の論調	1 7 6
(3)	性能評価の役割	1 8 0
(4)	性能評価において超長期性を取り扱う上での問題	1 8 1
3. 2	第一次評価報告書における初期条件・境界条件の捉え方	1 8 4
1)	地層処分の意図	1 8 4
2)	性能評価の意図	1 8 5
3)	議論の視点	1 8 5
3. 3	サイトジェネリックな議論に関する検討	1 8 6
3. 4	安全性の評価／実証に関する検討	1 8 6
1)	モデルのベリファイケーションおよびバリデーション	1 8 7
2)	品質保証	1 8 8
3)	その他	1 8 8
3. 5	地球環境問題とのリンクに関する検討	1 8 9

## 図表目次

- 図1.1.1-1 核燃料サイクル施設および他施設と放射性廃棄物発生図
- 図1.1.1-2 高レベル廃棄物固化体の例
- 図1.1.1-3 放射線レベルの経年変化例
- 図1.1.1-4 発熱量の経年変化例
- 図1.1.1-5 高レベル廃棄物が処分されるまでの過程例
- 図1.1.1-6 高レベル廃棄物発生量の見通し
- 図1.1.2-1 高レベル放射性廃棄物の摂取毒性の時間的变化
- 図1.1.2-2 100万kWの発電所を1年間運転することによる職業人死亡リスク
- 図1.1.2-3 100万kWの発電所を1年間運転することによる公衆死亡リスク
- 図1.1.2-4 核燃料サイクルにおける放射能によるリスクの相対的評価結果を体積で表現した図
- 図1.1.2-5 リスクパーセプションの比較検討例（1）
- 図1.1.2-6 リスクパーセプションの比較検討例（2）
- 図1.1.2-7 不随意リスクと便益とのトレード・オフ
- 図1.1.2-8 「Acceptable」および「Unacceptable」リスクの定義
- 図1.1.2-9 リスク状態1から5に対する個人年間死亡リスクのヒストグラム
- 図1.1.4-1 評価期間に相当する歴史的事実
- 図1.1.4-2 廃棄物の処理に関係するリスク
- 図1.1.4-3 処分コスト、環境リスク、処分方法の関係
- 図1.1.4-4 ウラン鉱石と高レベル廃棄物の放射能の経時変化
- 図1.1.5-1 長半減期核種処分処理方法の比較
- 図1.1.5-2 半減期の長い廃棄物を消滅させる方法
- 図1.1.5-3 専焼炉による消滅処理に関する階層
- 図1.1.5-4 宇宙処分の廃棄物管理システム
- 図1.1.5-5 宇宙軌道上での作業
- 図1.1.5-6 氷床処分の廃棄物管理システム
- 図1.1.5-7 氷床処分システム概念図
- 図1.1.5-8 井戸注入処分の廃棄物管理システム
- 図1.1.5-9 海洋底下処分の廃棄物管理システム
- 図1.1.5-10 岩石溶融処分の廃棄物管理システム
- 図1.1.5-11 島内地層処分の廃棄物管理システム
- 図1.1.5-12 超深孔処分の廃棄物管理システム
- 図1.1.6-1 地球環境問題の相互関係
- 図1.1.6-2 日本のフロンの使用量
- 図1.1.6-3 米国のフロンの使用量
- 図1.1.6-4 西欧のフロンの使用量
- 図1.1.6-5 成層圏オゾンの減少に伴う地上の有害紫外線増加
- 図1.1.6-6 各温室効果気体の増加による地上気温上昇量（1980～2030年）
- 図1.1.6-7 我が国における皮膚がん発生率の地域差
- 図1.1.6-8 大気中二酸化炭素濃度の増加と化石燃料消費量の変化
- 図1.1.6-9 地球温暖化に及ぼす温室効果ガスの寄与
- 図1.1.6-10 化石燃料からの二酸化炭素排出量
- 図1.1.6-11 産業別CO<sub>2</sub>発生量
- 図1.1.6-12 温室効果による気温上昇（2030年代）

- 図1.1.6-13 人為的な気候変化によって引き起こされる降雨の変化
- 図1.1.6-14 二酸化炭素濃度倍増時の土壌水分
- 図1.1.6-15 気温変化と海面上昇の関係
- 図1.1.6-16 アメリカでの森林バイオマスの変化予測
- 図1.1.6-17 世界の二酸化硫黄排出量
- 図1.1.6-18 異常な食料不足に見舞われたアフリカの21か国
- 図1.1.6-19 油による海洋汚染の原因（1980年代前半）
- 図1.1.6-20 最近のヨーロッパからアフリカ諸国への有害廃棄物の移動例
- 図1.2.1-1 地層処分の概念図
- 図1.2.1-2 もっとも考えられうる核種の放出過程（通常シナリオ）
- 図1.2.2-1 軽水炉燃料サイクルからの固形残留物の相対的経口摂取有害度
- 図1.2.2-2 相対的有効度を変化させた場合の相対毒性指数の変化
- 図1.3-1 我が国の地層処分技術開発の考え方
- 図1.3-2 多重バリアシステムの構成とその機能
- 図1.3-3 地層処分技術開発の進め方

- 表1.1.1-1 100万kWe軽水炉の年間廃棄物発生量
- 表1.1.1-2 高レベル廃棄物の組成
- 表1.1.1-3 廃棄物試算例の前提条件
- 表1.1.1-4 使用済み燃料の発生見通し
- 表1.1.1-5 100万kWの発電所が1年間稼働したときの燃料と廃棄物の量
- 表1.1.1-6 全世界の廃棄物量（年間）
- 表1.1.1-7 有害廃棄物の不法投棄の実例
- 表1.1.2-1 原子力発電の死亡リスク（職業人）
- 表1.1.2-2 原子力発電の死亡リスク（公衆）
- 表1.1.2-3 原子力の廃棄処分に伴う職業人の事故と病気による死亡
- 表1.1.2-4 原子力の廃棄処分に伴う住民の病気による死亡
- 表1.1.4-1 歴史的事象と予期する将来事象と核種半減期
- 表1.1.6-1 問題となる主なフロンガスの生産量（1985年時点）の見積り
- 表1.1.6-2 人の健康および植物に対する紫外線の影響のまとめ
- 表1.1.6-3 植物の乾物生産に対するUV-B照射の影響
- 表1.1.6-4 地域・国別CO<sub>2</sub>発生量
- 表1.1.6-5 GCMモデルを用いた二酸化炭素倍増による全球平均の気候変化の予測
- 表1.1.6-6 地域における森林破壊の予測（1981～1985）
- 表1.1.6-7 熱帯雨林の面積および減少量の推計
- 表1.1.6-8 西暦2000年までの動植物種の絶滅予測
- 表1.1.6-9 「絶滅の危機」の要因とその内訳(IUCN)
- 表1.1.6-10 モントリオール議定書
- 表1.1.6-11 モントリオール議定書（1990年6月）の詳細
- 表1.1.6-12 オゾン層保護法の概略
- 表1.1.6-13 各国のオゾン層保護に関する取り組み
- 表1.1.6-14 IPCC報告書（1990年9月）に示された対応策
- 表1.1.6-15 地球環境保全に関する関係閣僚会議
- 表1.1.6-16 地球温暖化防止行動計画

- 表1.1.6-17 各国の二酸化炭素削減目標
- 表1.1.6-18 環境庁による窒素酸化物の総量規制案
- 表1.1.6-19 アメリカでの有害物質対応策
- 表1.1.6-20 廃棄物責任制度に関するEC勧告（提案中）
- 表1.2.2-1 人間侵入のリスクアセスメントの基本事項
- 表1.2.2-2 緩和した場合の侵入リスクに対する技術基準の例
- 表1.2.2-3 緩和した場合の侵入リスクに対する計画基準例
- 表1.2.2-4 処分後のモニタリングに対する一般公衆の考え方
- 表3.1-1 高レベル廃棄物処分のオプションの評価



## 1. 第一次報告書において必要な現状の知見及びその背景の調査・検討

# 1. 1 高レベル廃棄物対策の必要性

## 1) 高レベル廃棄物の概要

### (1) 高レベル廃棄物

原子力発電では、原子炉の中に、ウランから加工した燃料を置き、核分裂反応による熱をエネルギーとして取り出すことで発電している。

核燃料の中のウラン235は、核分裂し、エネルギーを出す。そして核燃料のなかには様々な核分裂生成物や超ウラン元素が蓄積されていく。同時に、ウラン238は、中性子を吸収することにより、核分裂し原子燃料になるプルトニウムに変化する。

このように、一度使用された核燃料のなかには、再び処理を行えばより高度に利用できる物質がある。再処理によって得られたウラン、プルトニウムは準国産のエネルギー資源であり、資源の乏しい日本ではウラン資源の有効利用の観点から特に重要である。

以上のように、原子力発電におけるウラン・プルトニウムのリサイクル利用の一連の過程を核燃料サイクルと呼んでいる。

次に、核燃料サイクルにおけるウランの流れと廃棄物発生の様子が示されている。

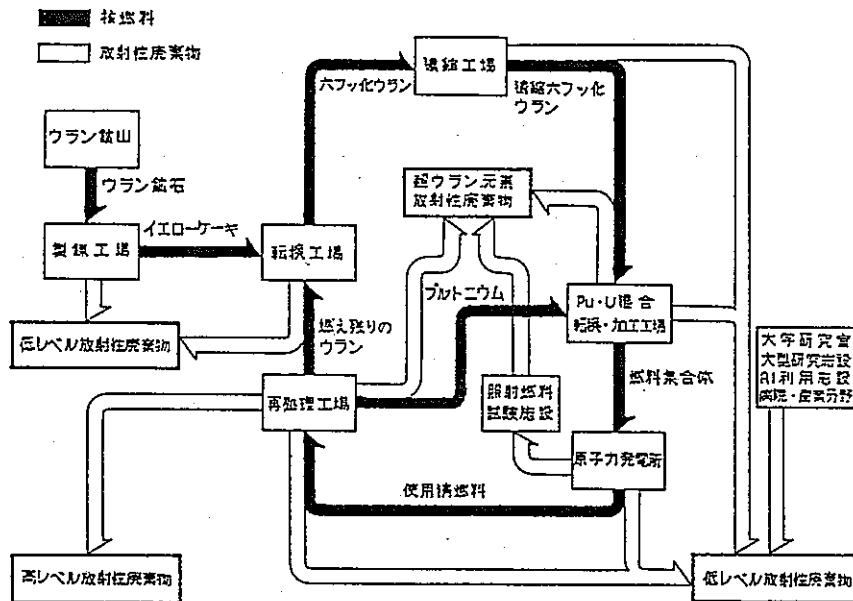


図1.1.1-1 核燃料サイクル施設および他施設と放射性廃棄物発生図

(出所 放射性廃棄物管理ガイドブック／日本原子力産業会議／1988)

原子燃料サイクルの各段階において、廃棄物は発生するが、採掘時、ウラン精練、燃料加工において、発生する廃棄物は天然の放射性物質しか含まれず、放射能レベルが極めて低いので、貯蔵しているのが現状である。

原子炉から取り出された使用済燃料には多量の核分裂生成物が含まれているが、再処理では使用済燃料から、核分裂生成物と分離し、まだ燃料として使用しうるウランとプルトニウムを回収する。その過程で、強い放射性を持つ廃棄物が発生するが、これが高レベル廃棄物である。

(出所 放射性廃棄物管理ガイドブック/日本原子力産業会議/1988)

電気出力100万kWの原子力発電所を1年間運転した場合に発生する廃棄物の総量は次表に示すようなものとなるが、このうち高レベル廃棄物は3m<sup>3</sup>程度と見積られている、

表1.1.1-1 100万kWe軽水炉の年間廃棄物発生量

100万kWe軽水炉の年間廃棄物発生量

発生元及び形態	容量(処理・固化後)(m <sup>3</sup> )	放射能量または重量
1. ウラン採鉱・製錬 — 鉱滓	60,000 (Pu再利用の場合40,000)	0.01Ci/m <sup>3</sup> (3.7×10 <sup>8</sup> Bq/m <sup>3</sup> )
2. 燃料加工 — UO <sub>2</sub> 燃料 — UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub> 燃料(年間再装荷500~700kgPu)	— 10~50	無視可能 5~10kg(Pu)
3. 軽水が — 各種固体廃棄物及び固形化樹脂	100~500 <sup>(注)1</sup>	0.1~10Ci/m <sup>3</sup> (3.7×10 <sup>9</sup> ~3.7×10 <sup>11</sup> Bq/m <sup>3</sup> )
4. 再処理 — 固化済高レベル廃棄物(HLW)  — 圧縮済被覆ハル — 低及び中レベルベータ・ガンマ固体廃棄物 — 固体及び固形化アルファ廃棄物	3 <sup>(注)2</sup>  3 10~100 1~10	<sup>(注)3</sup> 150MCi(55.5×10 <sup>17</sup> Bq),(UO <sub>2</sub> 燃料に対し2kgPu, UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub> 燃料に対し5~10kgPuを含む) 1.5MCi(55.5×10 <sup>15</sup> Bq) 0.01MCi(3.7×10 <sup>14</sup> Bq) 1~5kgPu

- (注) 1. 原子炉タイプと固形化プロセスによる。  
2. もとからの液体廃棄物の容量は15m<sup>3</sup>。  
3. 原子炉から取出し後150日での値。

(出所: OECD-NEA " Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes")

高レベル廃棄物の特徴は、まず発生量が小さいこと、次に非常に寿命の長い放射性核種を含むとともに、高レベルの放射能を有し、大きな発熱量を持つことである。先に示したように高レベル廃棄物は使用済み燃料を再処理した際に発生する放射性廃液をガラス固化し、ステンレス性の容器に封入したものであり、その形態は以下に示すようなものとなる。

容器全体積	0.18 m <sup>3</sup>
容器重量 (空の状態)	75 kg
ガラス容積	0.15 m <sup>3</sup>
ガラス重量	405 kg
放射能インベントリ (固化直後)	
ベータ・ガンマ	2.9・10 <sup>16</sup> Bq
アルファ	1.4・10 <sup>14</sup> Bq
固化時発熱量	3 000 W
30年後の発熱	680 W
100年後の発熱	165 W
発電炉出力換算	51 MWe・a
初期値ヘビーメタル換算	1 360 kg

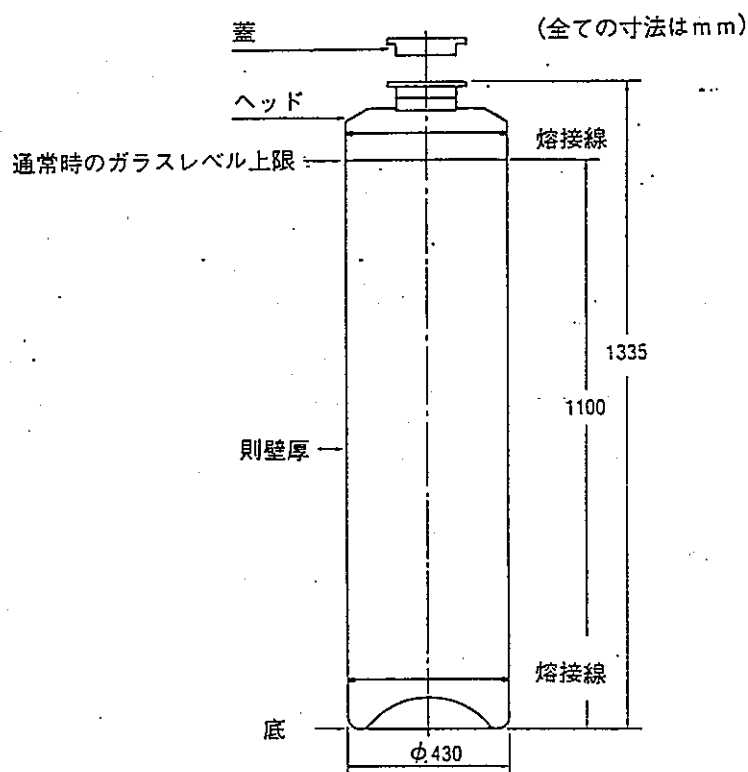


図1.1.1-2 高レベル廃棄物固化体の例 (出所 PAGIS 1988 CEC)

次に高レベル廃棄物の組成を表1.1.1-2に示す。ここに見るように、使用済み核燃料中の核分裂生成物（FP）の99%以上および少量のアクチノイド核種を含む。

表1.1.1-2 高レベル廃棄物の組成

ガラス：	87.9				
	SiO <sub>2</sub>	45.5	CaO	4.0	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.0	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.9	ZrO <sub>2</sub>
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.9	NiO	0.4	Li <sub>2</sub> O
	Na <sub>2</sub> O	9.9	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5	ZnO
廃棄物：	12.1				
			フィッシュンプロダクト酸化物	11.25	
			アクチノイド酸化物	0.85	

(データは全てwt%)

(出所 PAGIS 1988 CEC)

また放射能および発熱量の経年変化を図1.1.1-3および図1.1.1-4に示すが、高レベル廃棄物における放射性核種のうちFPの大部分は、500～600年後には安定元素となる一方、半減期の長いFPおよびアクチノイド核種はさらに長期にわたり放射線と崩壊熱を発生し続けるため、高い放射能レベルおよび発熱は長期にわたるものとなる（100万年程度その危険性が持続すると言われている：原子力委員会 放射成廃棄物対策専門部会 放射性廃棄物対策に関する研究開発計画中間報告）。このため、高レベル廃棄物は最終処分の前に、約数10年の長期冷却を行ったうえで処分することが考えられている（原子力委員会 放射成廃棄物対策専門部会 放射性廃棄物処理処分方策について）。なお、冷却期間は一般には30～50年程度と想定しているが、欧州の研究のように30～300年程度を想定している場合もある（PAGIS 1988 CEC）。

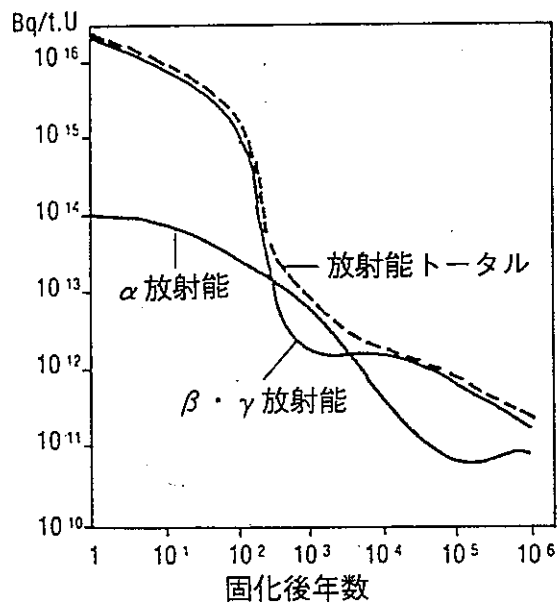


図1.1.1-3 放射線レベルの経年変化例 (出所 PAGIS 1988 CEC)

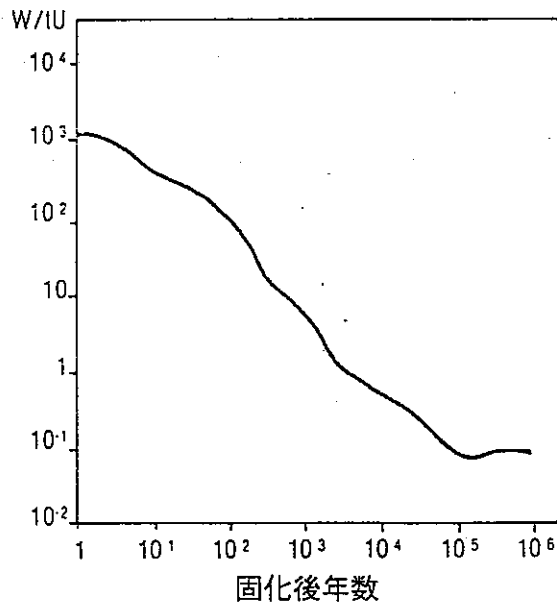


図1.1.1-4 発熱量の経年変化例 (出所 PAGIS 1988 CEC)

上記の試算例の前提条件を表1.1.1-3に示す。

炉型	LWR
公称出力	0.9 to 1 GW(e)
平均出力	33 to 40 MW(th)/tHM
燃料形態	UO <sub>2</sub>
平均初期濃縮度	3.5% U-235
照射時間	1 000 to 1 333 days
バーナップ	33 to 40 GWd (th)/t HM
年間取出し燃料	27 to 33 t HM
再処理前貯蔵期間	3 to 7 years
再処理後・固化前貯蔵期間	1 year
処分前貯蔵期間	30-300 years

表1.1.1-3 廃棄物試算例の前提条件 (出所 PAGIS 1988 CEC)

また、使用済み燃料は原子炉から取り出され、冷却貯蔵された後再処理され、さらに中間貯蔵されて処分されることとなる。この流れのイメージの一例を次図に示す。

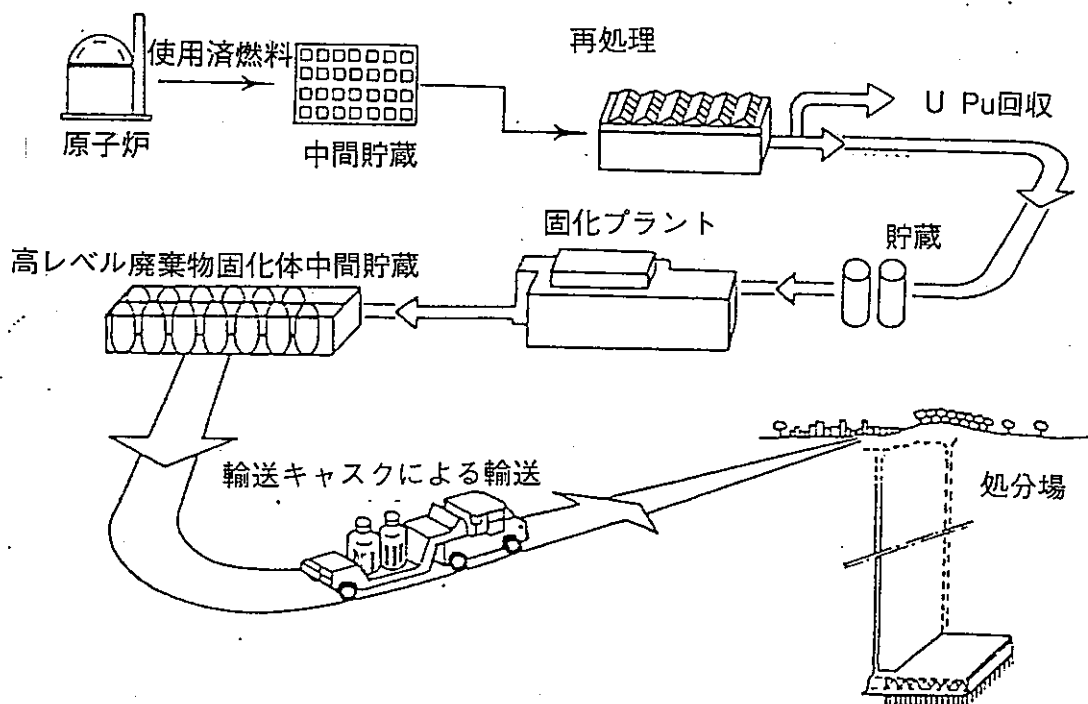


図1.1.1-5 高レベル廃棄物が処分されるまでの過程例 (出所 PAGIS 1988 CEC)

## (2) 高レベル廃棄物の発生量

100万kWの原子力発電所を1年間運転した結果排出される高レベル廃棄物は、高さ1m程度、直径30cm程度の円筒形のステンレス容器30本ほどであると言われている。また、昭和61年度の日本人一人あたり電力消費量をベースとして、電力消費量の半分を原子力で賄ったと仮定すると、一人が一生の間(80年間)に消費する電力に伴い発生する高レベル廃棄物(ガラス固化体)の量は、ほぼゴルフボール2個分と試算されている(出所 原子力ポケットブック/科学技術庁原子力局監修/1991)。

また我が国において、1988年度時点までの累積でおよそ5800tU程度の使用済み燃料が発生しており、さらに今後の原子力発電設備容量の伸びにより使用済み燃料発生量は次表に示すように予測されている。

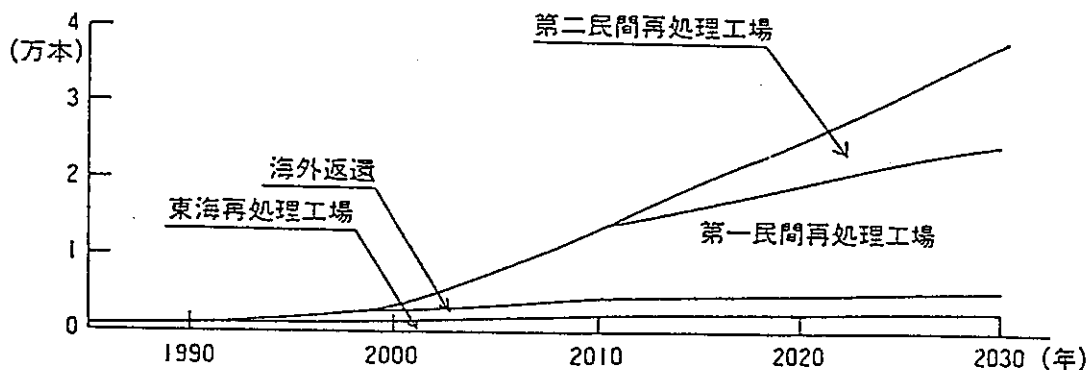
表1.1.1-4 使用済み燃料発生見通し

年度	年間発生量(tU)	累積発生量(tU)
1988	790	5800
1990	730	7300
1995	830	10800
2000	1200	17000

(出所 科学技術庁原子力局核燃料課/原子力ポケットブック1990年版)

現在の我が国では、「再処理は、プルトニウム利用を進める上でのかなめとして重要であるばかりではなく、使用済み燃料に含まれる放射性廃棄物を適切に管理・処分するという観点からも重要である(原子力委員会 原子力開発利用長期計画)」との考え方にに基づき、これらの使用済み燃料を再処理することとなる。従って、上記の使用済み燃料はいずれは再処理され、使用済み燃料発生に応じて高レベル廃棄物が発生することとなる。図1.1.1-6に我が国の再処理計画および高レベル廃棄物発生量の試算例を示す(21世紀 原子力ビジョン)。図に示すように高レベル廃棄物発生量は2030年には約3.6万本程度となる見通しである。





<民間再処理工場の運転開始により、2000年以降の累積量は増大し、2030年には、約 3.6万本となる見通し>

注) 1. 再処理時に高レベル固化体が発生すると仮定。

2. 海外返還固化体は、1990年～2000年に発生すると仮定。

図1.1.1-6 高レベル廃棄物発生量の見通し (出所 21世紀原子力ビジョン)

### (3) 他の廃棄物との発生量比較

表1.1.1-5に100万kWの各種発電所を1年間運転した場合に必要な燃料とそこで発生する廃棄物発生量を比較するための一覧表をしめす。

表1.1.1-5 100万KWの発電所が1年間稼働したときの燃料と廃棄物の量

	燃料所要量 (t)		廃棄物発生量 (t)	
	石油火力	石油	1,400,000	二酸化炭素 硫酸化合物 窒素化合物 塵埃
石炭火力	石炭	2,200,000	二酸化炭素 硫酸化合物 窒素化合物 塵埃	6,000,000 120,000 25,000 300,000
LNG火力	LNG	1,000,000	二酸化炭素 硫酸化合物 窒素化合物	3,000,000 20 13,000
原子力	ウラン	30	ウラン プルトニウム 核分裂生成物	28.8 0.3 0.9

(出所 "原子力の燃料サイクル" 鈴木篤之/電力新報社/1986)

このように高レベル廃棄物の発生量は、重量で見れば、例えば同規模の石炭火力発電所から発生する塵埃の量の10万分の1以下で、石油火力から発生する塵埃の量の1万分の1以下である（原子力発電所から発生するウラン/プルトニウムは有効に再利用することからこれをはずして考えている）。

また高レベル廃棄物の発生量を有害廃棄物量と比較するために、次表に全世界の有害物質の量を示す。各国で発生する一般廃棄物、産業廃棄物の量と我が国で発生する高レベル廃棄物の量（1988年実績で790tU）を比較すると、日本の場合高レベル放射性廃棄物の発生量は一般廃棄物の数万分の1、産業廃棄物の数10万分の1となり、さらに全世界の有害廃棄物の発生量の数10万分の1となる。

表1.1.1-6 全世界の廃棄物量（年間）

国名	一般廃棄物	産業廃棄物	有害廃棄物
カナダ	16,400	61,000	3,300
アメリカ合衆国	20,800	760,000	275,000
日本	48,300	312,000	
フランス	17,300	50,000	3,000
ドイツ(西ドイツ)	20,200	61,400	6,000
イタリア	17,300	43,700	3,800
オランダ	17,700	50,000	4,500
北アメリカ	225,000	821,000	278,000
OECD太平洋諸国	60,000	333,000	
OECDヨーロッパ	136,000	272,000	24,000
OECD	420,000	1,430,000	303,000
東ヨーロッパ		520,000	19,000
その他		180,000	16,000
世界合計		2,100,000	338,000

(単位 1000t)

(注) 日本とその他OECD諸国との有害廃棄物の指定の区分が異なっているため、日本の欄には記載がない。また世界合計値は概算値を掲載している。

(出所 The State Of The Environment / OECD / 1991)

表から読み取れるように、放射性廃棄物は、量的な面で、他のエネルギーと比較しても、また人類全体の経済活動から生じる有害廃棄物と比較しても極めて少ない。

一方、廃棄物の人々の健康や環境に与える影響等の質的な面では、普通の廃棄物の有害性について、

客観的、数量的に論じられていないため、各廃棄物と高レベル廃棄物を単純に比較することは難しい。世界的には、水銀、シアン化物、ダイオキシンなど分解されず永遠に危険であり続ける重金属や化学物質が十分な防護策が執られないまま大量に投棄されることが今日でも行なわれていると伝えられており（次表に幾つかの事例を示す）大きな問題となっている。

表1.1.1-7 有害廃棄物の不法投棄の事例

年	国	事件
1982	フランス	1976年にイタリアのセベン化学工場の事故で発生したダイオキシンによる汚染土が1982年にフランスの郡部で発見された。 (セベン事件)
1988	ナイジェリア	シエラレオネギニアにおいて2000万トンの有毒廃棄物の違法投棄が見つかった。
1988	ギニア	フィラデルフィア市のゴミ焼却灰25万トンがカサ島に廃棄され周囲の植物が枯死した。
1988	ナイジェリア	イタリアよりの有害廃棄物がココ港に放棄されていた。

(出所 朝日新聞 S63/6/16)

## 2) 高レベル廃棄物のリスク

### (1) 高レベル廃棄物の毒性

#### —放射線の人体（健康）への影響

高レベル廃棄物は大量の放射線を長期間に渡って放出する。放射線はエネルギーをもった粒子の流れであり、体の細胞を作っている原子や分子と衝突して、エネルギーを放出し、生体物質の原子や分子をイオン化したり、原子間の結合を切断したりする。これが細胞内のDNAを傷つけ、生体膜を破壊する。

少量の放射線で多数の障害が起こることは少ないが、衝突した放射線粒子が偶然にも重要な部分を破壊することがあり、大きな影響がおこることもある。このように作用に確率的な要素があることが特徴である。

放射線のエネルギーの大きさによっては、直接細胞内で化学変化を引き起こし、細胞を死滅させたり、熱エネルギーに変わって、火傷と同じ症状を引き起こす。

放射線障害は次の3つに分類することができる。

1. 致死性悪性腫瘍（全身）… 遺伝子に障害を受けたためにガン細胞となる。
2. 非確率的变化の誘発 … 人体がある量以上の線量を受けたとき、ほぼ確定的に発生する変化で様々な症状がある。放射性火傷、造血作用の低下がその例に挙げられる。
3. 遺伝的欠陥 … 1と同様に生殖細胞内の遺伝子が傷つけられ、子孫の遺伝的欠陥が現われる。

致死性悪性腫瘍と遺伝的欠陥についてはしきい値（影響が現われる最小の値）が存在せず、被曝線量に対して、影響の発生確率は、保守的に見て比例関係にあると評価している。

（出所 放射線健康管理学／吉沢康雄．東京大学出版会／1984）

高レベル廃棄物は、放射能濃度が極めて高く、熱の発生を伴う。この放射能と熱発生率は、核燃料の燃焼度および炉外経過時間に依存する。

次の図1.1.2-1は高レベル廃棄物の摂取毒性の時間による変化を示している。

摂取毒性とはある放射性核種を含む水を飲んだ場合に体内での被曝線量率が安全基準以下になるのに必要な水の量で示される。従って、値が大きいほど毒性が強いということになる。

(出所 実務講座 放射性廃棄物の処分と安全評価資料/日本原子力情報センター/1991)

この図1.1.2-1では、高レベル廃液の放射能量は、再処理後4~5年で1/10に、100年で1/100に減少している。初期の高い放射能は<sup>90</sup>Sr、<sup>137</sup>Csの半減期で減衰する。β崩壊、γ崩壊が主なため、崩壊熱を発生する。放射性核種のうちFPの大部分は、500~600年後には安定元素となるが、半減期の長いFP(核反応生成物)およびアクチニド核種は、さらに長期にわたり放射線と崩壊熱を発生し続ける。

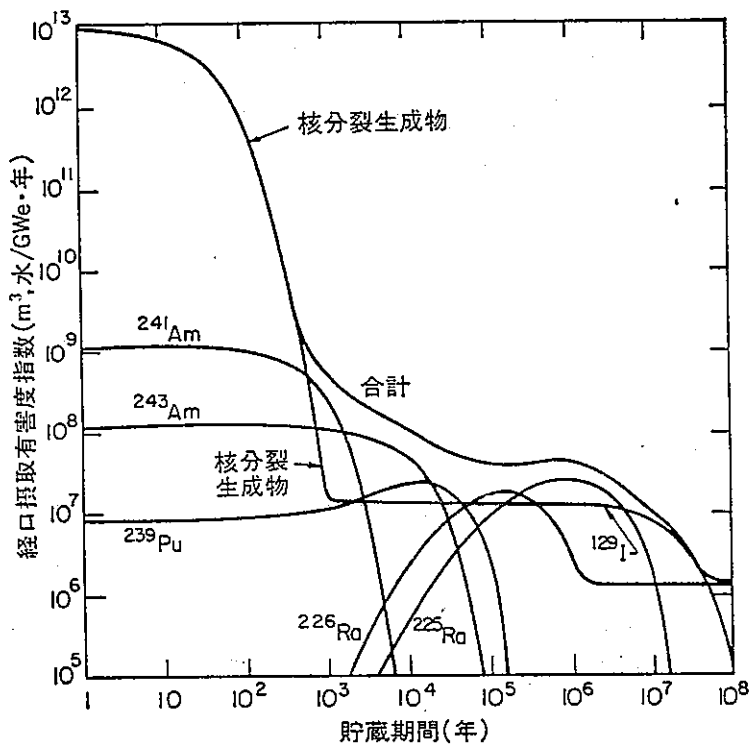


図1.1.2-1 高レベル放射性廃棄物の摂取毒性の時間的变化

PWR燃料、燃焼度33MWday/kg、炉取り出し150日で再処理、99.5%のウランとプルトニウムが回収済みとする

(出所 実務講座 放射性廃棄物の処分と安全評価資料/日本原子力情報センター/1991)

このグラフを見るとときに注意が必要なのは、これは高レベル廃棄物の放射性による潜在的毒性を表

していることである。

縦軸はあくまでも高レベル廃棄物が直接、人間の飲料水に入ったと仮定した時の毒性を示している。

高レベル廃棄物が処分されたときの危険性を考える時には次のような意見がある。

毒性指数はリスクの尺度ではない。リスクの直接的尺度は、最終的にその環境へ到達する放射性各種にさらされる可能性のある将来の人類への最大放射線量である。

(Actinide Burning and Waste Disposal ; UNB-NE-4176 / T.H.Pigford / 1990)

毒性指数は、人間への実際の損害リスクを述べるものではない。これは、保護措置を一切考慮しないからである。

(Project Gewähr / 1985)

より現実的に、高レベル廃棄物との係わりを考えて行くときには、リスクと言う考え方が重要となる。

## (2) 高レベル廃棄物のリスク

—リスクとはどのようなものか

様々な行為や事象に関連して生じ得る危険の大きさと可能性をできる限り客観的に評価するために、リスクという概念を導入して議論されることが多い。

「リスクとは何か望ましくないことが、ある事象によって実現する可能性」

(An Anatomy of Risk/W.D.Rowe/1976)

「リスクとは人間の健康危険に関する障害度と、それが起こる確率に関する測度である。」

(Of Acceptable Risk/W.Lowrance/1976)

最近、人間がある種の必要や利益を得るために、未知の事態に挑戦する時、それに対する情報が不完全な時に起こる情報の不確かさに関係した言葉として使われている。

実用的には、確率的に起こりうる事象に対して

”リスク = 危険をもたらす確率×障害の重篤度”を計算することによって評価する。

(出所 リスク科学入門/松原純子、東京図書/1989)

この値によって、本来ならば比較しえない行為や現象の危険さを比較検討することができる。

リスクの概念は次のように様々な分け方ができる。

### ①客観リスクと主観リスク

同じ状態に直面するすべての人に共通なリスクと客観的リスクに対する個々人の異なる予測

### ②純粹リスクと投機的リスク

損害の機会のみで利得のないリスクと両者がある場合のリスク

### ③靜態的リスクと動態的リスク

天変地異や常態的犯罪によるものと社会や人間の欲求も変化に伴って変わるもの

### ④随意リスク (voluntary risk) と不随意リスク (involuntary risk)

個人が自発的意志に基づいて行動して受けるリスクと個人が自発的でなく、強制されて参加し引受るリスク

リスクを評価する際に、評価する事象に応じて、予想されうる障害の重篤度に何をとるかが問題となる。

理解を助けるために、死亡確率 $10^{-6}$ 、つまり100万人に1人が死ぬ”リスク”の事象を挙げる。

100万人に1人が死ぬリスク 比較

- 650 kmの航空機での旅行
- 100 kmの自動車旅行
- 紙巻タバコ0.75本の喫煙
- 60歳の人間が20分以内に死ぬリスク
- 経口避妊薬を2.5週間飲み続ける
- ワインを0.5本飲む
- 年間10 mremの放射線被曝

(出所 The acceptance of risk / Brit. Med. Bull Pochin.E.E/上述リスク科学入門より引用)

—エネルギー開発に関係したリスク

全く危険のない人間活動はない。一つの行為、現象に関して、生じる不利益はその利益に鑑みて受容すべきかどうか、個人的にも社会的にも比較考慮されなければならない。

(発電システムの健康リスク/A.F.Fritzsche/1988)

高レベル廃棄物が発生し、その放射線から人々が被るリスクは原子力発電全体からのリスクとベネフィットの関係から見る必要がある。また他のエネルギーシステムとのリスクの客観的な比較を行う必要がある。

各エネルギー技術のそれぞれのリスクは様々な研究によって以下のように評価されている。

この比較検討においては、リスクとは平常時、あるいは事故による、従業者もしくは公衆の人的損害の期待値とする。

障害の重篤度として、人的損害は死亡者数とする。

100万KWの発電所を1年間運転することに伴う人的被害は様々な研究を整理すると図1.1.2-2、図



1.1.2-3のようにまとめられる。

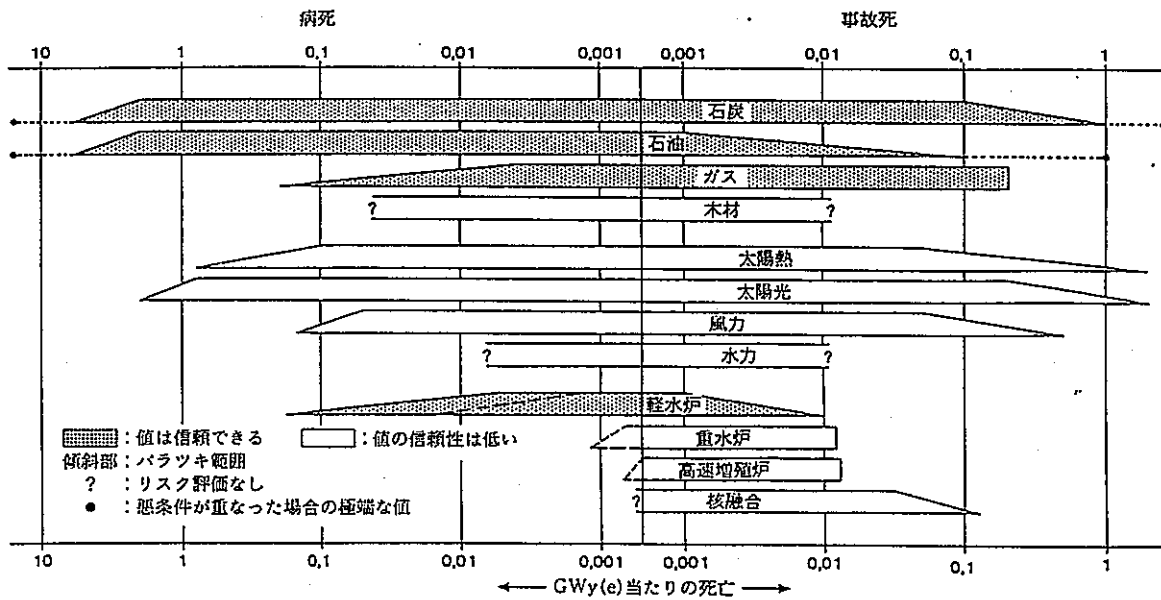


図1.1.2-2 100万KWの発電所を1年間運転することに職業人死亡リスク

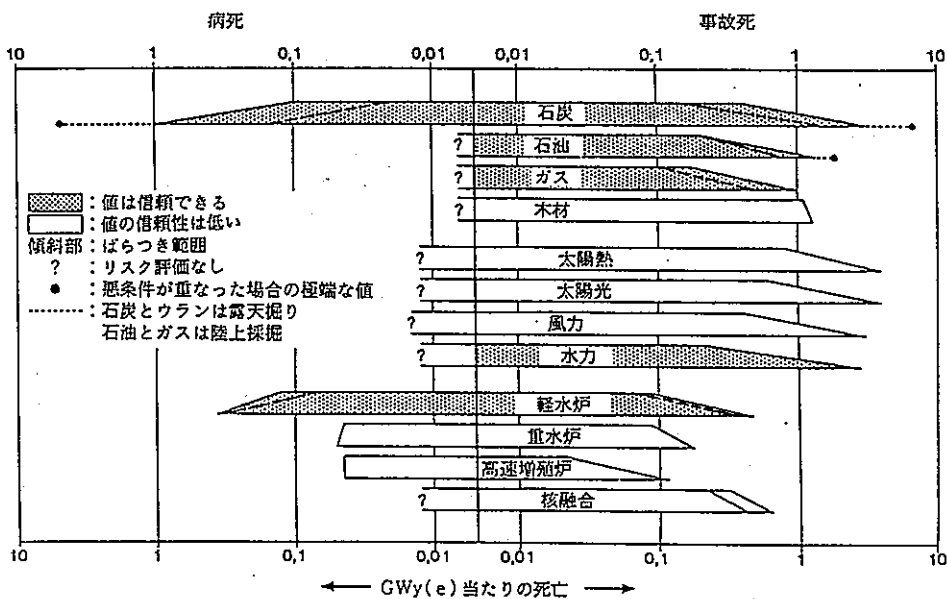


図1.1.2-3 100万KWの発電所を1年間運転することに公衆死亡リスク

2つの図より、原子力発電のリスクは他のエネルギーシステムと比較して、大変小さいことがわかる。

また小さい原子力発電のリスクの内分けは次のようになると概算されている。

表1.1.2-1 原子力発電の死亡リスク（職業人）

プロセス段階	即死（事故）			晩発性（病）			注 釈	
	坑内掘り	露天掘り	リスク源	坑内掘り	露天掘り			
1GWy(e)当たりの職業人死亡								
ウラン鉱採掘	23%	0.02...0.1	0.002...0.02	4%	肺の病 58% 0.1	0.04	40%	最新の鉱山
現地浸出	0.005			ラドン 7% 0.004...0.04	0.00005... 0.008	0.5%		
				他の被ばく 2% 0.0004...0.02	0.0001 ... 0.01	1%		
選鉱	2%	0.002 ...0.01	3%	ラドン 0.0003				発電によるリスク含まず
UF <sub>6</sub> に転換	0.5%	0.0003...0.004	0.7%	他の被ばく 0.0003				
ウラン濃縮	0.7%	0.001 ...0.002	1%					
燃料体製造	1%	0.0006...0.007	1%					
燃料輸送	2%	0.002 ...0.01	3%	0.2%	0.00003...0.004	0.3%	被ばく	被ばく
発電所 建設	50%	0.05 ...0.2	62%					
発電所 運転	16%	0.01 ...0.1	19%	20%	0.015 ...0.08	35%		
燃料再処理	3%	0.002 ...0.02	4%	3%	0.002 ...0.01	5%		
廃棄物処分	0.8%	0.0002...0.01(?)	1%	0.1%	0.00004...0.0005	0.1%		
廃止措置	1%	0.001 ...0.003	1%	2%	0.0015 ...0.005	3%		
合計	100%	0.089...0.466	0.071...0.386	100%	100%	0.126...0.372	0.067...0.330	100%

表1.1.2-2 原子力発電の死亡リスク（公衆）

プロセス段階	即死(事故)	晩発性(病)		注釈
1GWy(e)当たりの公衆死亡				
ウラン鉱採掘 } 選鉱		0.0005 ...0.025	14%	ラドン被ばく
鉱かす		0.001 ...0.01	12%	ラドン被ばく
UF <sub>6</sub> への転換		0.001 ...0.04	25%	発電によるリスク含まず
ウラン濃縮		0.00001	0%	
燃料体製造		0.00004...0.0002	0.3%	
燃料輸送	0.001...0.01	0.00001...0.004	0.6%	
発電所運転		0.001 ...0.02	18%	
燃料再処理		0.001 ...0.05	27%	
廃棄物処分		0.00001...0.04	3%	
廃止措置		0.00001...0.0001	0.1%	
合計	0.001...0.01	100%	0.0046 ...0.189	100%

表1.1.2-3 原子力の廃棄処分に伴う職業人の事故と病気による死亡

年	出典	国	文献	廃棄物処分		廃止措置	
				事故	被ばく	事故	被ばく (～年後)
1975	NASA	米	国 <u>149</u>	0.00020			
1979	UNEP		<u>161</u> (II)		0.00004 <sup>*)</sup>	0.0032	0.0044 ( 0) 0.0029 (10) 0.0016 (30) 0.0015.....0.005
1981	Ferguson	英	国 <u>38</u>				
1983	BEAD	米	国 <u>66</u> (n. <u>75</u> )	0.013			
1984	BEAD	米	国 <u>67</u>		0.00046	0.0008	0.005

\*) n. GESMO (168)

表1.1.2-4 原子力の廃棄処分に伴う住民の病気による死亡

年	出典	国	文献	廃棄物処分	廃止措置*(～年後)
1979	UNEP		<u>161</u> (II)	$6 \times 10^{-7}$ <sup>**) )</sup>	0.00007 ( 0) 0.00003 (10) 0.00001 (30)
1981	Ferguson	英	国 <u>38</u>	0.009...0.04	
1983	Gotchy	米	国 <u>59</u>	0.0040	
1984	BEAD	米	国 <u>67</u>	$8 \times 10^{-6}$	

\*) 輸送による, \*\*) n. GESMO (168)

以上示すように、原子力のリスクのなかでも、廃棄物の処分に係わるリスクは大変小さい。

全リスクの数%の程度である。

(以上、出所 発電システムの健康リスク/A.F.Fritzsche/1988)

また、高レベル廃棄物の処分の方法として、地層処分を採用した場合の、放射能によるリスクの相対的評価結果を体積でしめすと次のようになる研究結果もある。

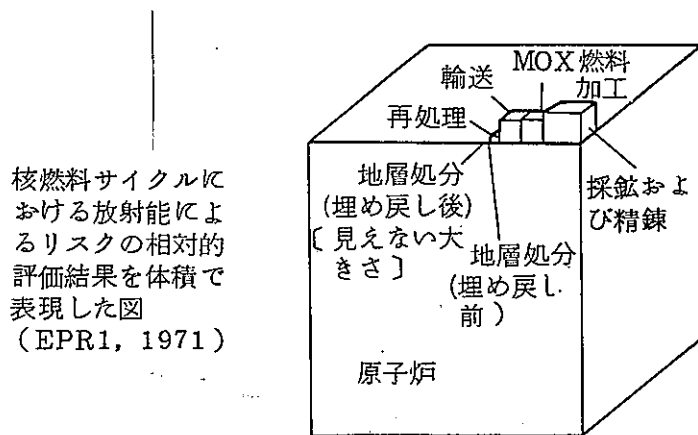


図1.1.2-4 核燃料サイクルにおける放射能によるリスクの相対的評価結果を体積で表現した図

(出所 EPRI/1971)

エネルギーシステムのリスク一覧においても、人々の考えるリスクと、ここで示されたリスクは、一致していない。人々が心理的に抱くリスクの大きさは、過去の統計などに示されている技術的要因とは全く一致していない。人々が心理的に抱くリスクの大きさは、過去の統計などに示された技術的要因とはまったく違った要因から評価されている。

## ーリスクパーセプション

あらゆる科学技術にはリスクが伴うが、リスクそのものよりも、それを人々がどのように知覚するか、すなわち人々の主観に基づく危険性の評価をリスクパーセプション（リスク知覚）という。

一般には

- 身近ではないが、派手な事故などの事象についてはリスクを高いものとみなす。
- 自分の意志の支配下にあるものはリスクを低く見る。
- 発生率は低くても、広範囲に拡がるものは高く見る。

さらに、個人的な傾向としては

●科学技術に好意的にでない人はリスクを高く見るが、対象となる事象に深く関わっている人はリスクを低く見る傾向がある。

（出所 日本原子力学会誌；

原子力に対する日本人のリスク、ベネフィットパーセプション／木下富雄／1988）

ここで、リスクパーセプションを評価するために、リスク=ベネフィットマトリックスを示すと以下のようになる。

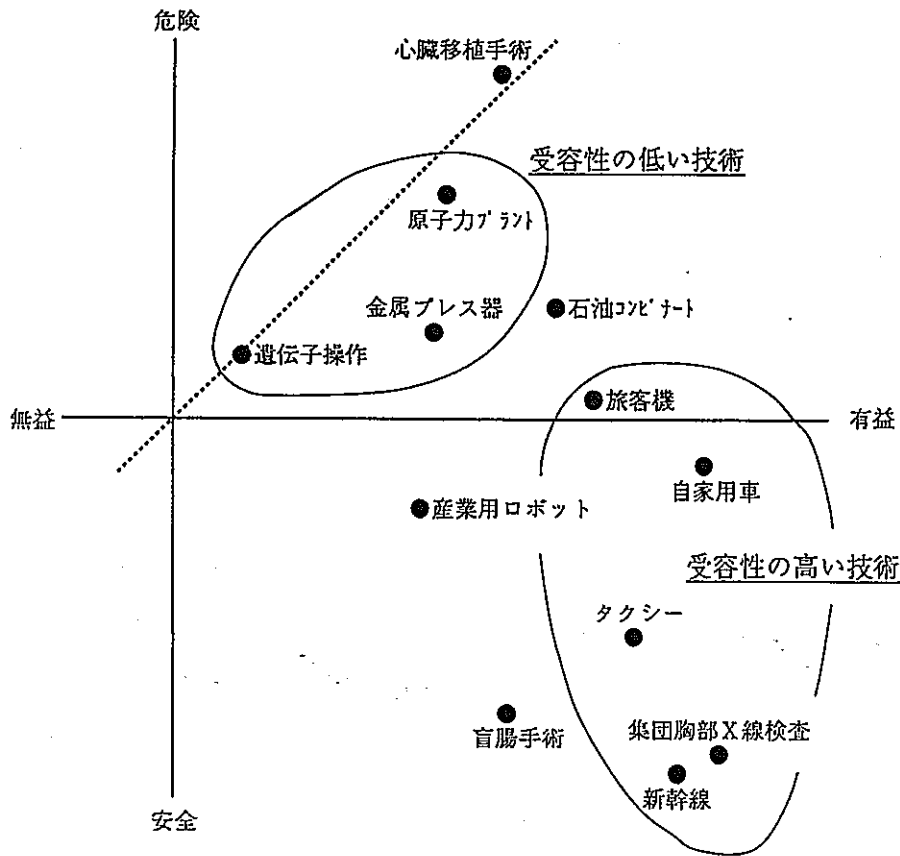


図1.1.2-5 リスクパーセプションの比較研究例 (1)

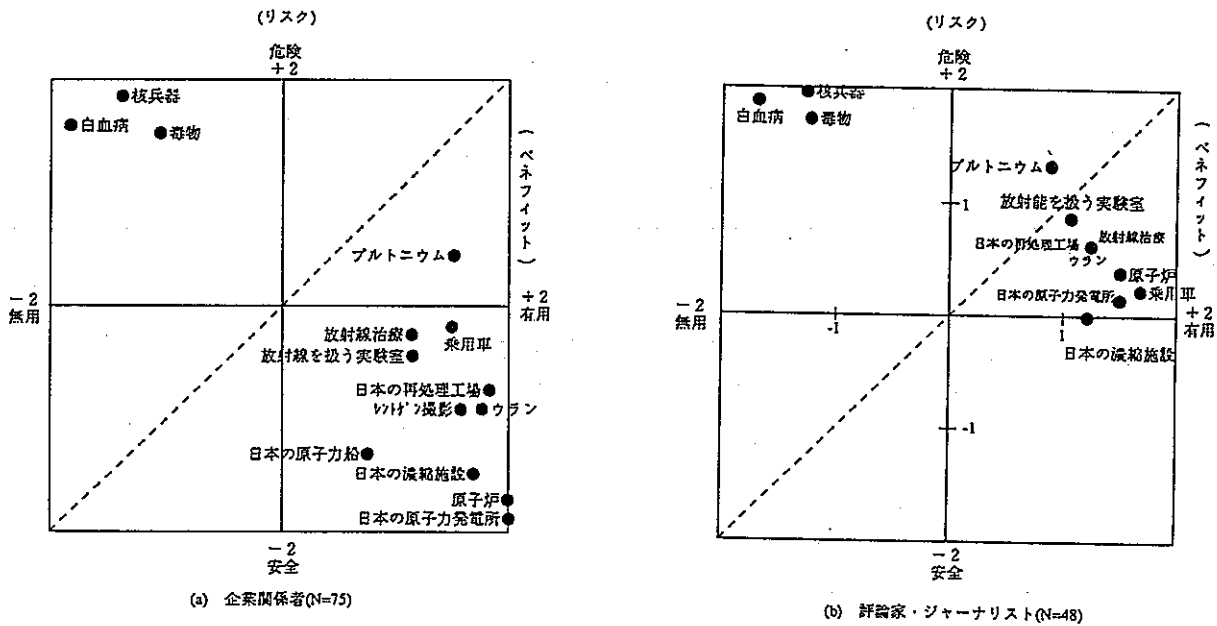


図1.1.2-6 リスクパーセプションの比較研究例 (2)

(以上 出所 日本原子力学会誌；原子力に対する日本人のリスク、ベネフィットパーセプション / 木下富雄 / 1988)

リスクとベネフィットの関係より、リスクパーセプションは、次のように結論付けられている。

● 病気による死亡率が、許容できるリスクの上限である。(10<sup>2</sup>/年)

● 天災 (10<sup>6</sup>/年) と同じレベルの人工リスクはほぼ無視できる。それよりオーダーが低いと全く無視できる。

● リスクの社会的容認度は便益 (ベネフィット) と共に増大する。(指数関数関係)

● 公衆は随意リスクならば、不随意リスクの1000倍の大きさのリスクを容認する。

● 原子力のような特殊な社会的技術システムの定量的リスク分析においては、事故頻度と大きさの連続スペクトルを考慮すべきである。

● 社会的技術システムに関係したリスクの容認度に対する社会的方針は、社会的便益と個人のリスク間のトレードオフによって決められるべきである。

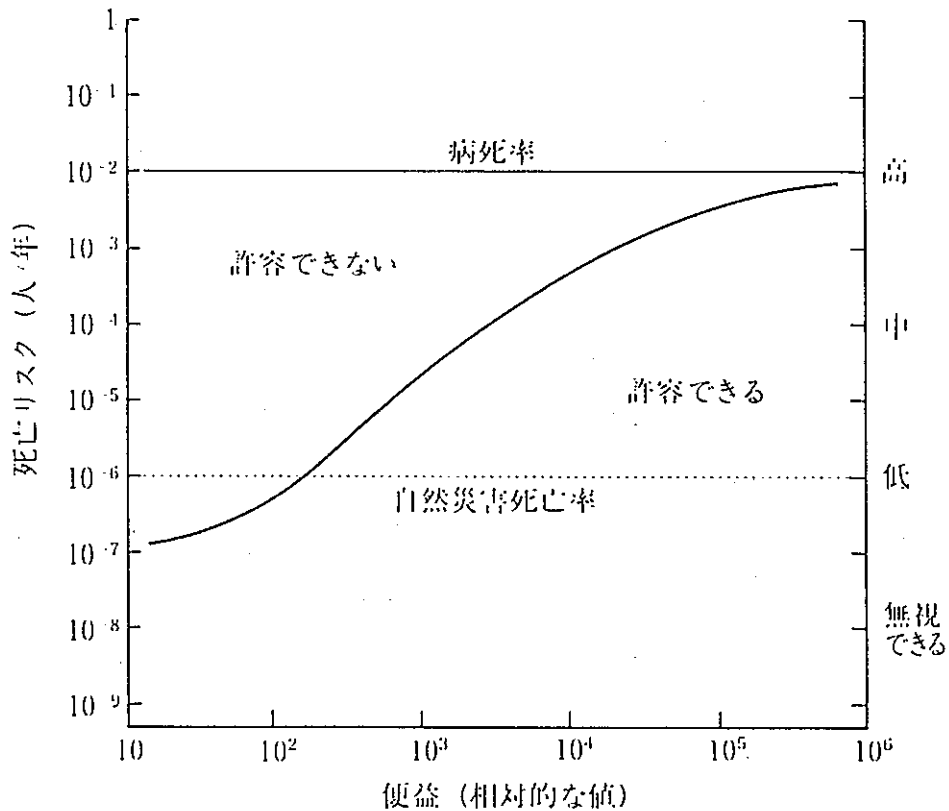


図1.1.2-7 不随意リスクと便益とのトレード・オフ

(Societal Benefit versus technological risk : Science/C.Starr/1969)

## —リスクの受容

このようにリスクパーセプションには、さまざまな形態があるが、高レベル廃棄物に対する方策が、社会に受け入れられていくか、言い換えれば、高レベル廃棄物に対する方策に対するリスクが容認されるかが問題になる。

研究例の一つとしてリスクの受容されるモデルは次の図のように考えられている。

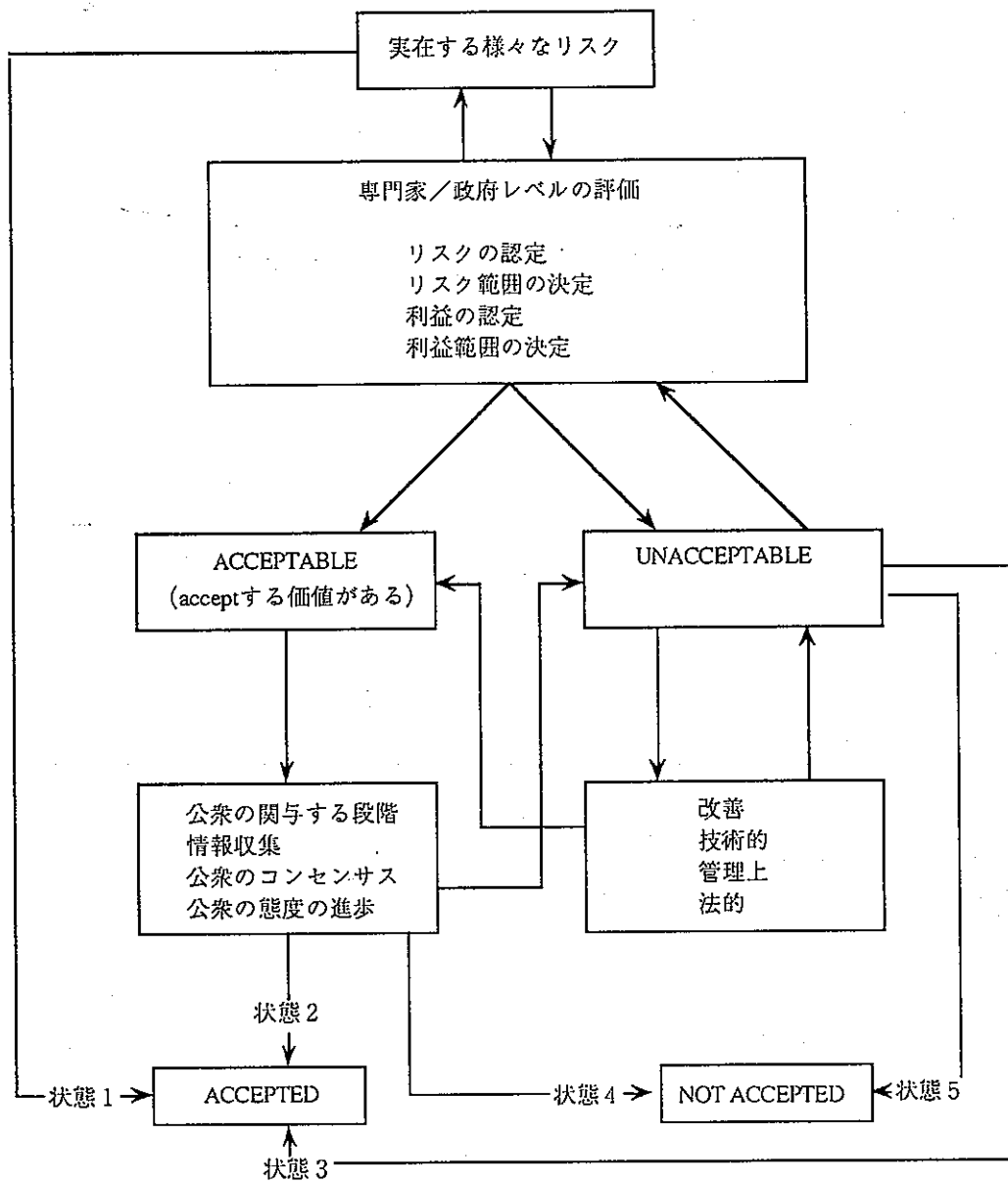


図1.1.2-8 「Acceptable」および「Unacceptable」リスクの定義



それぞれの状態のリスクは以下の通りである。

状態 1

リスク (年間死亡率)

自然放射線	$10^{-5}$ $1.1 \times 10^{-5}$
洪水	$10^{-6}$
竜巻	$10^{-6}$
地震	$10^{-6}$
落雷	$10^{-7}$
宇宙放射線	$10^{-11}$
流星の衝突	$6 \times 10^{-11}$

状態 2 — Acceptableで、かつ Acceptedのリスク

リスク (年間死亡率)

炭坑における職業死*	$2.5 \times 10^{-4}$
鉄道における職業死	$10^{-4}$
産業要因による死亡*	$10^{-4}$
放射能の職業的被曝	$10^{-5}$
コレラによる死亡	$10^{-6}$
百日咳による死亡	$10^{-6}$
鉄道旅行による旅客総死亡率	$10^{-6}$
鉄道運転中の旅客死亡率	$10^{-7}$
鉄道列車事故による旅客死亡率	$10^{-7}$
消耗品の放射線による死亡	$10^{-7}$
蒸気ボイラー爆発 (英国)	$10^{-7}$
英国のダム決壊による全人口のリスク	$10^{-7}$
オランダにおける堤防氾濫*	$10^{-7}$
高層飛行における放射線被曝	$10^{-8}$
全人口に対する職業的放射線被曝	$10^{-8}$
カラーテレビからの放射線による発癌	$10^{-9}$ $8.6 \times 10^{-9}$

状態3—Unacceptableで、かつAcceptedのリスク

リスク (年間死亡率)

ダム決壊による個人的リスク (英国)	$10^{-2}$ $1.8 \times 10^{-2}$
喫煙による肺癌のリスク (1日20本)	$10^{-3}$
抗生物質の治療用使用	$10^{-3}$
路面事故による重大な傷害	$10^{-3}$
抗精神抑圧剤の治療用使用	$10^{-4}$
抗高血圧剤の治療用使用	$10^{-4}$
路面事故における総死亡率	$10^{-4}$
避妊用錠剤による死亡	$10^{-5}$
結核による死亡*	$10^{-8}$
化石燃料燃焼による公衆のリスク*	$10^{-6}$
抗リウマチ沈痛剤の治療用使用	$10^{-6}$
診断用放射線による死亡	$10^{-6}$ $6.2 \times 10^{-6}$

状態4—Acceptableで、かつNot Acceptedのリスク

リスク (年間死亡率)

炭坑における職業死*	$10^{-4}$ $2.5 \times 10^{-4}$
百日咳ワクチン接種による脳傷害	$10^{-4}$
航空機事故による旅客死亡率	$10^{-5}$
航空機による全人口死亡率	$10^{-6}$
オランダにおける堤防氾濫*	$10^{-7}$
米国の原子力発電による総人口あたりのリスク**	$10^{-9}$ $5.2 \times 10^{-9}$ (推定値であって統計的データはない)

状態5—Unacceptableで、かつNot Acceptedのリスク

リスク (年間死亡率)

あらゆる原因による55才時の死亡率	$10^{-3}$ $9.5 \times 10^{-3}$
職業的肺塵症	$10^{-3}$

心臓疾患による死亡率	$10^{-3}$
癌による死亡率	$10^{-3}$
炭坑における重大な職業的傷害	$10^{-3}$
脳卒中による死亡（脳血管疾患）	$10^{-3}$
肺癌による死亡（全人口）	$10^{-3}$
気管支炎による死亡	$10^{-4}$
化学工業における職業死	$10^{-4}$
インフルエンザによる死亡	$10^{-4}$
産業要因による死亡	$10^{-4}$
白血病による死亡	$10^{-5}$
結核による死亡*	$10^{-5}$
化石燃料の燃焼による公衆のリスク*	$10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$

結果として、個人的死亡リスクの絶対的レベルは、専門家または、政府レベル、あるいは公衆レベルにおけるリスクの受容性とは直接の相関はみられない。

しかし、 $10^{-5}$ /年がリスクの受容性の上限値とみることができる。この数字を基に、高レベル放射線防護規準が設定されている。

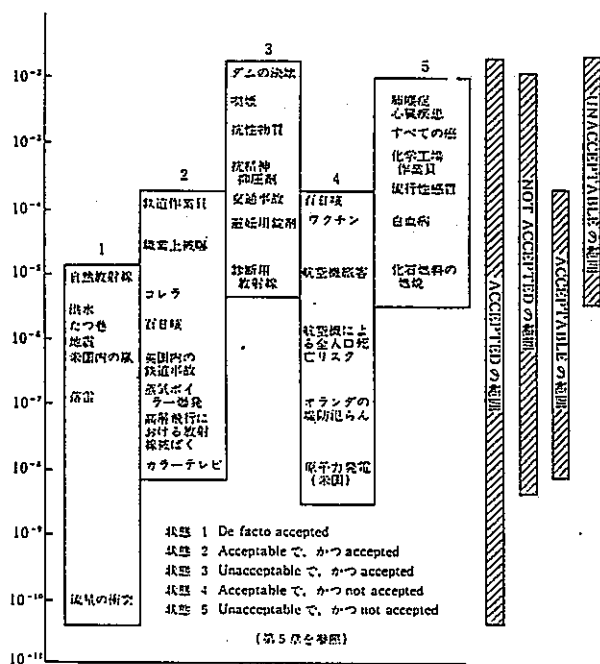


図1.1.2-9 リスク状態1から5に対する個人年間死亡リスクのヒストグラム

### 1. 1 3) 高レベル廃棄物の資源性

#### (1) 有用金属資源

高レベル廃棄物は強い放射能と崩壊熱を放出しており、これは厄介な属性とすることができる。しかし、高レベル廃棄物を単にゴミと考えるのではなく、放射線や熱を利用する、また高レベル廃棄物のなかにある有効な貴金属の回収する研究が進められている。

高レベル廃棄物のなかにある有用な貴金属、および回収する有用な物質は次のものが考えられているのである。

#### ●Am-241

Am-241はPu-238やBk-243,244製造用ターゲットとして用いられている。またCm-242製造用ターゲットとしての利用も研究されている。

#### ●Cm-242

Am-241同様Pu-238製造用ターゲットとして用いられている。

#### ●Cm-244

Cf-252製造用ターゲットとして用いられている。

#### ●Np-237

Pu-238製造用ターゲットとして用いられている。

#### ●Ru,Rh,Pd

使用済燃料に含まれるこれらの白金族元素を分離回収して資源として利用することが検討されている。

#### ●Tc-99

触媒、超伝導材料、腐食防止材としての利用が検討されている。

## ●Xe

Xeには麻酔作用があり、手術で用いられた実例がある。

また白熱電灯の封入ガスや、重金属デポジション用作動ガスとしての利用も検討されている。

## (2) 放射線源としての資源

放射線は医療分野をはじめ、工業分野では、計測、分析、食品分野の放射線照射による長期保存などさかんに導入されるようになってきている。線源と利用する放射線の種類、応用分野は次のように整理できる。

## ●Am-241

### ・ $\alpha$ 線源としての利用

実用化しているものに煙感知器やSF<sub>6</sub>ガス密度測定器がある。

また電池や湿度計、微風速計への応用も研究されている。

### ・ $\gamma$ 線源としての利用

#### ①瘡治療

婦人科の腔内照射の臨床例は多い。

また腔内照射だけでなく外部照射の研究も行なわれている。

#### ②厚さ測定

$\gamma$ 線照射によって厚さを測定する方法には、透過 $\gamma$ 線量を測定する方法、蛍光X線を検出する方法、後方散乱X線を検出する方法の3通りがある。

透過 $\gamma$ 線量を測定する方法は鋼板の厚さ測定に実用化されており、ゴム製品への適用も検討されている。

蛍光X線を検出する方法はめっきの厚さ測定への適用可能性が研究されている。

後方散乱X線を検出する方法はゴム製品の厚さ測定用として商品化されており、ガラスビンの肉厚測定への適用も検討されている。

#### ③蛍光X線分析

蛍光X線分析は、一般廃棄物や化粧クリーム中の有害重金属の分析に適用されており、塗料などの産業廃棄物への適用可能性も検討されている。

このほかにも蛍光X線分析は、希土類元素分析や6価Cr分析、濃度測定などに適用され

ており、医療用として甲状腺分布のイメージングに用いられた臨床例もある。

また後方散乱蛍光X線分析による含有灰分測定の適用可能性も確認されている。

#### ④ $\gamma$ (X)線透過診断

$\gamma$ (X)線透過量によるその他の測定として、鉄鋼の密度測定や石油・石炭の硫黄分測定が行なわれている。

#### ●Am-241/Ba-133

- ・ $\gamma$ 線源としての利用

2線源法によるかつ炭の含有灰分測定が実際に工程管理に利用されている。

#### ●Am-241/Cs-137

- ・ $\gamma$ 線源としての利用

2線源法によるかつ炭の含有灰分測定器が商品化されている。

#### ●Am-241/Pu-238

- ・ $\gamma$ 線源としての利用

2線源-蛍光X線分析による金属鉱石スラリーの粒度測定が研究されている。

#### ●Am-241+Be

- ・中性子線源としての利用

Am-241とBeの反応によって生じる中性子は石油の検層（ロギング）に用いられている。

また硫黄量測定への適用も実用化の段階にある。

#### ●Cd-109/Cs-137

- ・ $\gamma$ 線源としての利用

2線源法による金属鉱石スラリーの密度測定が研究されている。

#### ●Cf-252

- ・中性子線源としての利用

Cf-252は中性子線源として広い分野で利用されている。

①癌治療

Cf-252を中性子線源として癌治療に用いた臨床例は多数ある。

②成分分析

放射化分析法及び、共鳴散乱 $\gamma$ 線測定によるドリルコアの含有金属分析が行なわれている。

また茶葉の含有Mnの定量分析や、石炭、鉍石の成分分析の研究も行なわれている。

③水分測定

鉄鉍業の工程管理用に、中性子によるコークスの水分測定が実用化されている。

またUO<sub>2</sub>粉末の水分測定も研究されている。

④その他の検査

中性子ラジオグラフィによる航空機部品などの検査や、船用機関の無開放磨耗検出が実用化されており、鉍山の検層（ロギング）への適用も検討されている。

●Cm-244

・ $\gamma$ 線源としての利用

蛍光X線分析法による一般廃棄物の有害重金属分析や、かつ炭の含有灰分測定に実際に用いられている。

●Cs-137

・ $\gamma$ 線源としての利用

Cs-137は使用済燃料再処理の副産物として得られる $\gamma$ 線源として注目されている。

①癌治療

Am-241と同様、婦人科の腔内照射の臨床例は多い。

また腔内照射だけでなく外部照射の研究も行なわれている。

② $\gamma$ (X)線透過診断

$\gamma$ (X)線透過診断法は、熱水配管のシリカスケール測定や、石油プラントの設備診断などに用いられている。

また透過 $\gamma$ 線量を測定する方法は鋼板の厚さ測定や、鋳型、高圧水タンクの液位測定、紙パルプの密度測定などにも適用されている。

### ③食品照射

柑橘類、ナッツ類の害虫駆除や、魚貝類、農産物の殺菌の研究が行なわれている。

また豚肉の線毛虫駆除に効果があることも報告されている。

このほかにも柑橘類の品種改良や、反芻動物用飼料の消化性の増大、下水中藻類への照射による飼料化の研究もなされている。

### ④汚泥照射

$\gamma$ 線照射による汚泥のコンポスト化の研究が行なわれている。

### ⑤その他

$\gamma$ - $\gamma$ 法によるかつ炭探鉱の累層密度測定が鉱山で実際に行なわれている。

## ●H-3

### ・ $\beta$ 線源としての利用

H-3は $\beta$ 線源として滑走路の着陸灯に使用された実績がある。

またチャージキャリア型の電池としての利用も研究されている。

## ●Kr-85

### ・ $\beta$ 線源としての利用

Kr-85は $\beta$ 線源として、紙・パルプ等の厚さ測定に用いられている。

またH-3同様、光源としての利用や、電池としての利用も研究されている。

## ●Pm-147

### ・ $\beta$ 線源としての利用

Pm-147は時計などの自発光塗料の原料として広く使用されている。

その他にも標識灯、グロー放電管、大気中の粒状浮遊物質測定などに用いられている。

またプラスチックフォイルの厚さ測定への適用可能性も検討されている。

## ●Pu-238

### ・ $\gamma$ 線源としての利用

娘核UのLX線を利用した蛍光X線分析によるめっき厚さ測定や、後方散乱蛍光X線分析によるかつ炭の含有灰分測定の研究が行なわれている。



●Sr-90

・β線源としての利用

Sr-90はβ線源として、静電気除去装置、煙草の量目計、紙・パルプなどの厚さ計などに用いられている。またガラス瓶の肉厚測定への適用可能性も研究されている。

(3) 熱としての資源

高レベル廃棄物から発生する放射線核種の崩壊熱を利用する研究は以下に示される。

●Am-241

遠隔寒冷地電源の熱エネルギー源としての適用可能性が検討されている。

●Cm-242,Cm-244

人工衛星電源用の熱エネルギー源とする研究がなされている。

●Kr-85

遠隔寒冷地電源の熱エネルギー源としての適用可能性が検討されている。

●Pu-238

Pu-238は遠隔寒冷地電源や、人口衛生用電源の熱エネルギー源として用いられている。また深海油田探査機や、宇宙船用電源の研究開発も行なわれている。

医療用としては内蔵型ペースメーカー用電源に適用され、商品化されている。また人工心臓用電源への適用も研究されている。

●Sr-90

Sr-90を遠隔寒冷地電源の熱エネルギー源として用いる研究がなされており、一部実用化されている。

また水タンクの加熱や、生物処理活性化への適用可能性も検討されている。

#### (4) 原子燃料としての利用

##### ●Am,Cm,Np

使用済み燃料に含まれるAm,Cm,Npなどの超ウラン元素(TRU)を燃料用に用いる研究がなされている。

またエネルギーを直接利用するのではなく、核燃料の増殖に利用する研究も行なわれている。

#### 4) 高レベル廃棄物管理の特徴

##### (1) 管理が必要となる時間スケール

高レベル放射性廃棄物はとても寿命の長い放射性元素を含んでいる。長寿命の放射性元素は放射能の半減期は十万年以上の長期に渡るものがある。十万年という年月は、人間の歴史から見れば、検証可能な歴史学のスケールを越える長きにわたるものになる。

比較のために、管理が必要となる時間スケールと同じ歴史的事実を併記した表1.1.4-1は次のようになる。

表1. 1. 4 - 1 歴史的事象と予期する将来事象と核種半減期

年	歴史的事象	将来事象	核種半減期
10 <sup>2</sup>	放射能の発見	温室効果	
10 <sup>3</sup>	ノルマンジー征服 エジプトピラミッド	大規模な生態系変化 鉱物・エネルギー資源枯渇	C-14
10 <sup>4</sup>	農耕の発見 北欧の氷河期 人間による火・道具の使用	次期氷河期	Pu-239
10 <sup>5</sup>	ネアンデルタール人出現	間氷期	Tc-99
10 <sup>6</sup>	ホモサピエンス出現	安定地層の形成	Np-239
10 <sup>7</sup>	人類と猿の分化	新しい生物種の出現	I-129
10 <sup>8</sup>	恐竜の最盛期	大陸の大規模移動	
10 <sup>9</sup>	多細胞生物の出現	超新星誕生または隕石衝突 の 高い確率	
	地球の年代	太陽光線強度の増加による 地球上生命の消滅	U-238
		太陽の大爆発	

(出所 Radiological Protection Objective for  
the Land-Based Disposal Solid Radioactive Waste/NRPB/1991)

高レベル廃棄物の処分方策である地層処分の評価期間の考え方についてのべたドイツのMertz博士の論文のなかでは、図1.1.4-1を示して、地層処分、高レベル廃棄物の安全評価期間が長期にわたることを説明している。

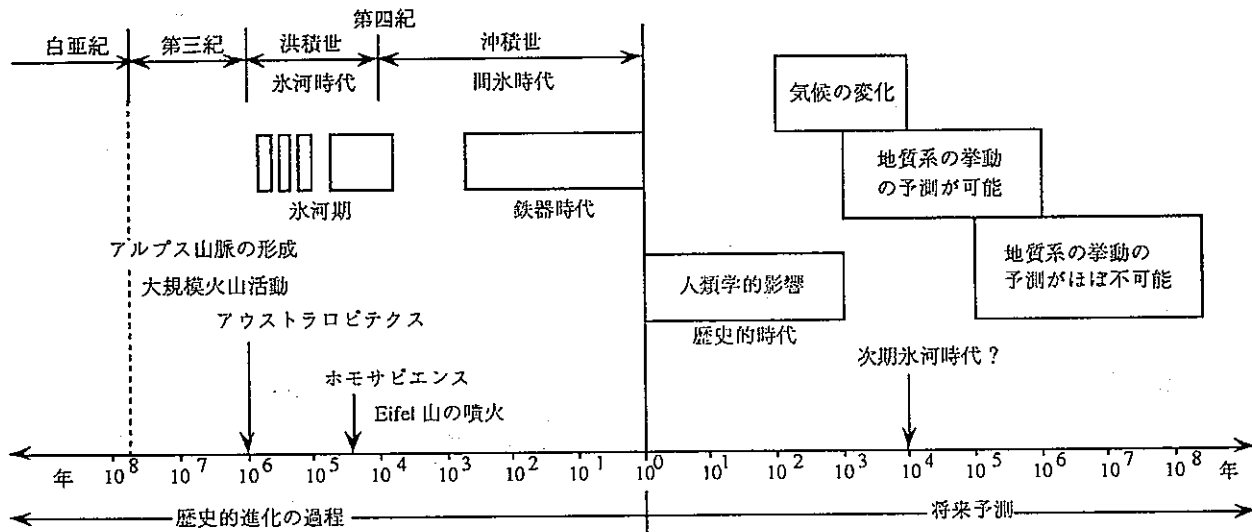


図 1. 1. 4-1 評価期間に相当する歴史的事実

(出所 The period of concern for longterm safety assessment of a geological radioactive waste repository / Mertz / 1990)

人間の寿命はせいぜい百年程度で、この十万年の千分の1に過ぎない。

また企業の歴史はせいぜい2000年、世界最古の王族は日本の天皇家で2000年程度である。現存する最古の建築物は地中海にある巨石寺院で、5000年前に建築されている。これでもさらに、放射線核種の半減期と比較すると小さい。人間の文明の歴史が1万年で、ようやく10分の1と評価できる。

このように考えると、高レベル廃棄物と付き合う時間は人間の歴史に較べると圧倒的に長く、人智の及ぶところではないと思われる。例えば、科学的に歴史が実証できる時間は約2000年前からであり、人類が何か特定の対象を管理し続けたことで、最長の管理をなした機関は、オランダの水防組織で、これでも管理期間は500年程度と言われている。

人間がなんらかの方法で管理をするといっても難しい。

ここで考え方を改めて、人間の手を離れて、“自然の力を借りて、高レベル廃棄物をうまく管理をする”といった発想が特に必要とされてくるだろう。これは地層処分システムのなかの天然バリアの考え方の拠り所となるものである。

## (2) 廃棄物対策の考え方と方法論

高レベル廃棄物について考える上で、単に放射製廃棄物と考えるだけでなく、廃棄物全体のフレームのなかでどのような位置にあるのかについて、分析する必要がある。

そのためにも一般に考えられている廃棄物への対策の考え方を整理し、比較検討することが重要とってくる。

### 一 廃棄物の枠組み

我が国では廃棄物は、「廃棄物の処理および清掃に関する法律」の中で

「ごみ、粗大ごみ、燃えがら、汚でい、ふん尿、廃油、廃酸、廃アルカリ、動物の死体、その他の汚物又は不要物であつて固形状または液状のもの（放射性物質及びこれによって汚染された物を除く）をいう」と定義されている。さらに、事業活動に伴って排出される廃棄物の一部を「産業廃棄物」として定義しており、その他を「一般廃棄物」としている。この区分は、以下の点で重要な意味を持つ。

#### ●処理責任

事業者は、一般廃棄物、産業廃棄物に限らず、事業活動に伴って排出される廃棄物は、自らの責任で適正に処理しなければならないとされているが、一般廃棄物であるか産業廃棄物であるかによって責任の程度が大きく異なる。また、それ以外の一般廃棄物については、市町村が処理責任を負うことになっている。

#### ●処理基準の相違

一般廃棄物、産業廃棄物それぞれに処理基準が設置されているが、特に産業廃棄物に関しては、水銀、カドミウムなどの有害物質を含むものについて処理および処分に制限が加えられている。

#### ●不法投棄に対する罰則

特に、有害物質を含む産業廃棄物を不法投棄した場合は、重罰に課せられる。

なお、1991年の改正では、一般廃棄物、産業廃棄物それぞれのうち、爆発性、感染性、その他人の健康または、生活環境に係わる被害を生ずるおそれがある廃棄物が、「特別管理一般（産業）廃棄物」として新たに定義している（詳細はまだ明らかにされていない）。

## 一 廃棄物の処理・処分の基本的考え方

廃棄物の「処理」とは、「分別」・「保管」・「収集」・「運搬」・「再生」・「処分」をいう。「分別」・「再生」は1991年の改正で新たに加えられた。「処分」には、最終的に自然界に捨てることを意味する「最終処分」と最終処分の前段階で、自然界に捨てても生活環境の保全上問題が生じないものに変化させる「中間処理」とに分けられ、さらに「最終処分」は、「埋立処分」と「海洋投入処分」とがある。

## 一 処理基準

それぞれの処理の関して、次のような観点から基準が決められている。

### ○「収集」、「運搬」

飛散の防止、流出の防止、悪臭漏洩の防止

### ○「埋立処分」

自然の受容力に合致し、公共の水域および地下水の汚染が生じないようにする。

埋立処分場は周囲に囲いが合って、処分場であることが表示されていることが必要。

### ○「中間処理」

適正な処分が可能となるように、廃棄物の種類に応じて処理方法が定められている。

### ○「海洋投入処分」

海洋汚染の防止の観点から、海洋投入処分のできる廃棄物が定められており、それが拡散性・分解性のものか、堆積性のものにより、場所および方法が定められている。

海洋投入できる廃棄物についても、埋立処分に特に支障がない場合は、海洋投入を行わないようにするとされている。

一 危険とされ、規制されている物質

日本で、危険とされ、基準がつけられている物質は次の通りである。

- (1) アルキル水銀化合物
- (2) 水銀又はその化合物
- (3) カドミウムまたはその化合物
- (4) 鉛またはその化合物
- (5) 有機りん化合物
- (6) 六価クロム化合物
- (7) ひ素またはその化合物
- (8) シアン化合物
- (9) PCB
- (10) 有機塩素化合物

これらのうち (1) ～ (9) については、水質汚濁防止法の定める「人の健康に係わる被害を生ずるおそれがある物質」として指定されているものと同じ物質である。

一廃棄物の処理・処分に係わるリスクの考え方

廃棄物の処理に係わるリスクを次のような3つのタイプから検討されている。

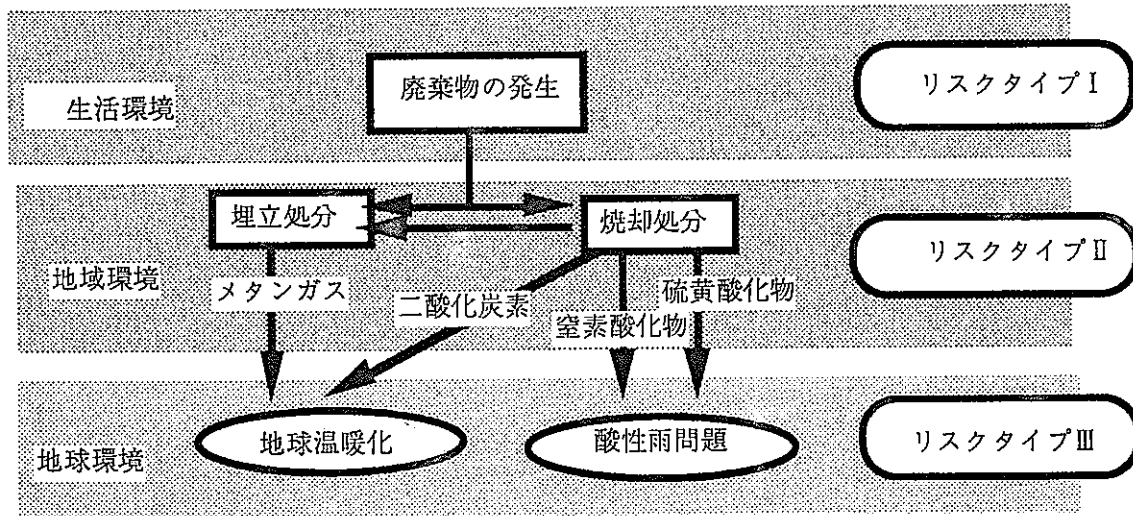


図1. 1. 4-2 廃棄物の処理に関するリスク

(出所 新開発技術による適正処理が困難な廃棄物等の処理基盤整備基本調査/厚生省)

タイプI…廃棄物そのものが生活環境にもたらすリスク。発生段階で生じるリスク。

タイプII…廃棄物を処理・処分することにより新たに生じるリスク

タイプIII…地球環境へのリスク



また環境リスクに応じた処分方法は次のようにまとめられる。

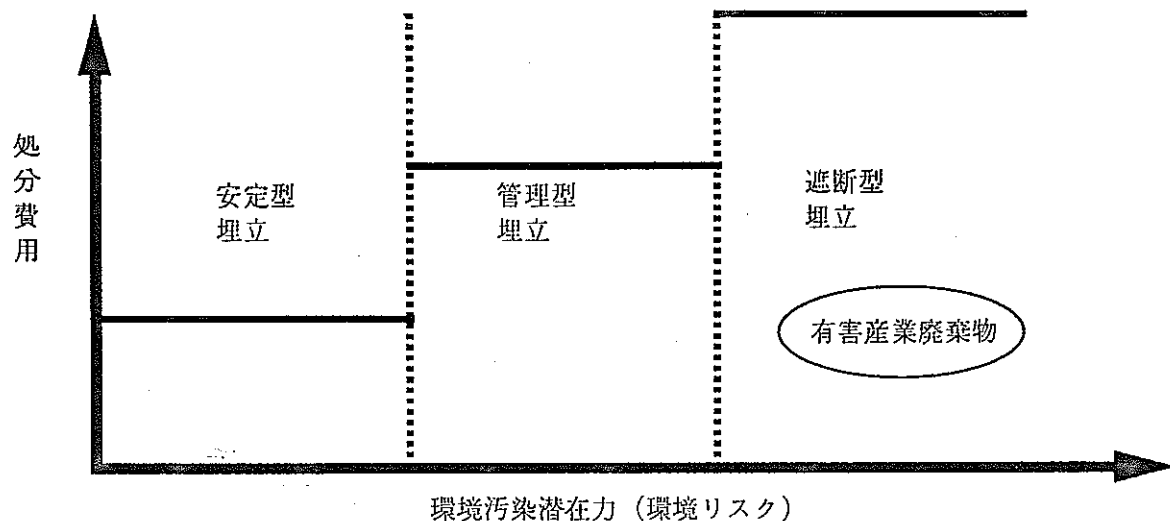


図1. 1. 4-3 処分コスト，環境リスク，処分方法の関係

環境リスクが大きいものは、遮断型埋立がされ、生態圏から隔離される。しかしそれに応じて処分コストは上昇する。

(出所 新開発技術による適正処理が困難な廃棄物等の処理基盤整備基本調査／厚生省)

#### 一例：ダイオキシンの処分の現状

人類が作り出した最強の発癌物質と言われているダイオキシンは、清掃工場からだされる煤煙については、規準が検討されているが、うめたてられる塵灰についてはダイオキシンに関する規準は全く決められていない。

現在、ダイオキシンが含まれた塵灰の処分については、以下の方法が検討され、研究目標がきめられつつある。

##### ① 加熱脱塩素化処理 (有害物質の分解)

還元性雰囲気では、ダイオキシン類に含まれる塩素が水素と置換する反応がおこり、脱塩素化反応が進行する。焼却灰等を低酸素雰囲気下、かつ約400～600℃に保持すると、ダイオキシン類の脱塩素化が加速され、除去されていることが証明されているとの報告があり、一部実用化に向けて実験が行

なわれている。今後、操作条件によるダイオキシン類の分解率、分解生成物の種類と量、再合成の有無、焼却灰等に含まれる重金属等の挙動について研究を進めるとともに、廃棄物処理におけるダイオキシン対策として実用化規模での技術開発を推進する必要がある。

## ② 熔融固化処理（有害物質のCC（濃縮および密閉）処分）

焼却灰等の安定化、減容化をし、最終処分場の延命化を図る一つの方法として灰の熔融処理が実用化されている。

熔融処理には焼却灰等を燃焼室内において、燃料により熔融温度以上に加熱する方法と、電気抵抗熱あるいはアーク熱を利用して熔融する方法等がある。焼却灰等の大部分を占める無機物質は熔融スラグとなり、封じ込まれた重金属は容出が防止されるとともに灰は1/3～1/2に減容化される。灰の熔融処理にあたっては、灰中の未燃分等によりガスが発生し、さらに灰中の重金属類がガス中に揮散することもあるため、排ガスの処理装置を設ける必要がある。

熔融温度まで加熱すればダイオキシン類は分解することが知られているが、ダイオキシン対策と位置付けるためには分解生成物の種類と量、再合成の有無等についてさらに知見を集積する必要がある。

## ⑦海外における考え方の例

海外の例を見ると、放射性廃棄物の管理方策とからめて廃棄物の処分は基本的に次の2つの方式で行なわれるものと整理している例がある。

1つの方式では、廃棄物は大気中や水中に希釈拡散され、人間および環境無害な濃度にされる。文献中にDD（希釈および拡散）として知られるこのプロセスは主に、空気や水に接触しながら廃棄物が生じる場合に用いられる。とりわけ、酸素の供給に依存する焼却プロセスはこのカテゴリーに含まれる。廃棄物排出量が局地的あるいは全世界的に自然の環境再生率を越える場合にはDD処分は適用できない。

廃棄物を濃縮し生物圏から隔離するというもう1つの処分方式はCC（濃縮および密閉）と略称される。これは処分すべき廃棄物の量が制限されており、制御されている場合に実施しうる。この方法はとりわけ、化学工業などから生じる極めて毒性の高い廃棄物の場合に用いられる。

ほとんどの場合、CC法による廃棄物の生物圏からの隔離は特別な廃棄物貯蔵庫における長期貯蔵と監視によって達成される。密閉措置の有効性は廃棄物貯蔵庫の連続的管理・監視によって点検され、必要があれば補正措置が取られる。この種の処分は種々の化学的毒性を持つ廃棄物について実施されている。放射性廃棄物の場合、長期監視を要しない最終処分が一般に目指されている。放射能による初期毒性は高いとはいえ、それは放射性崩壊によって指数的に低下するので、放射性廃棄物の最終処分は可能と考えられ、幾つかの国では議会から要求されている。

（出所 Project Gewähr 1985 NGB85-09 NAGRA）

ただし、我が国の規準では、排気や排水中の汚染物質は「廃棄物」とは定義されていない。従って我が国の場合は希釈および拡散による「廃棄物」の「処分」という考え方は無い。特に炭酸ガスが「廃棄物」であるという認識は残念ながらまだ一般的ではない。ただし、いわゆる排気や排水規準中の汚染物質の濃度規制における濃度規制の考え方は、事実上、上記のDDの考え方と同じであり、また有害物質の管理方策は上記のCCの考え方と同じとなる。ただしこれ以外にも、排気中の有害物質の総量規制の考え方などがあり、上記の考え方を原子力もしくは放射性物質の専門家以外に説明するばあいには注意する必要がある。

### (3) 高レベル廃棄物の管理の考え方

大気中あるいは水中への拡散による放射性廃棄物の生物圏での希釈処分は、極めて低い限界値内にある場合を除き、禁止されている。従ってCC管理による最終処分にとって高レベル廃棄物には有利な側面が幾つかある。

#### 発生源からの密閉

高レベル放射性廃棄物はその発生時点から管理されている。

#### 高毒性廃棄物の量が比較的少ないこと

1000MWeクラスの原子力発電所でも、1年に排出される減容（ガラス固化）された高レベル廃棄物の量はおよそ4m<sup>3</sup>あるいは10tに過ぎない。これらの数字は、かなりコスト（技術的、資金的）がかかる密閉方法でも妥当であることを示している。

（出所 Project Gewaehr 1985 NGB85-09 NAGRA）

こういった特徴があるため、高レベル廃棄物に対しては密閉管理をして人間環境から隔離をする方が基本的な考え方となっている。次に問題となるのが管理期間となるが、これについては次のような特徴がもとになって有限の将来までの評価に基づく管理が可能だとの考えがだされている。

#### 毒性の経時的現象

高レベル廃棄物であっても数万年後には毒性がウラニウム鉱石などの天然に存在する長寿命放射性物質のレベルより低くなる。

#### 許容レベルとしての天然放射線被曝

人類総てが受けている天然放射線被曝は、人為的被曝線量の最大許容値を設定する際に参照とすることができる。これは、天然には存在しない様々な有毒有害物質（合成化学製品など）の許容濃度レベルの設定に不確実性がつきまとうのと対照的である。

（出所 Project Gewaehr 1985 NGB85-09 NAGRA）

例えば、毒性の経時的現象に関しては、単位重量の高レベル廃棄物の発生に対応して採掘された量の天然ウランの経口摂取毒性と高レベル廃棄物の毒性を比較して管理の安全性を評価する期間の目安にしようとの考え方もある（地層処分の場合"An Assessment of Issues Related to Determination of Time Periods Required for Isolation of High Level Waste" Jerry J.Cohen）。

また次図に示すように単にこれを隔離の程度を目安にしようとの考え方もある、この場合もやはり単位重量の高レベル廃棄物の発生に対応して採掘された量の天然ウランの放射能と高レベル廃棄物の放射能を比較している。（"Disposal of Radio Active Waste: Review of Safety Assessment Methods" OECD/NEA P18）

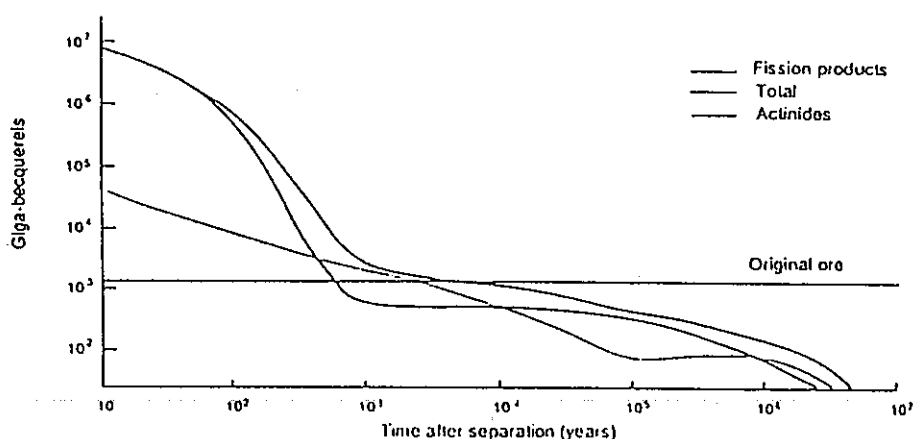


図1.1.4-4 ウラン鉱石と高レベル廃棄物の放射能の経時変化

（出所 "Disposal of Radio Active Waste: Review of Safety Assessment Methods" OECD/NEA P19）

上記の図で、ウラン鉱石と高レベル廃棄物の放射能が交差する点に関しては、比較するウラン鉱石の取り方として、例えば高レベル廃棄物と同体積、同重量等様々な取り方が考えられ、しかもこの指標の取り方により、この交差する点が1万年程度から1000万年以上と1000倍以上も変化し得るため注意する必要がある。

このように高レベル廃棄物の管理の考え方は、基本的には以下の考えに基づくものとなる。

- ①基本的には隔離型の管理もしくは同等の効果が得られる管理を行う
- ②隔離の程度は時間の経過とともに変化し得るが基本的には極めて長期間の管理が必要となる

そこで、この目的にもっとも適した、しかも現実性のある管理方策が必要となる。もちろん1年以上の長きにわたって人間が管理し続けることが難しければ、人間の管理の手が離れても隔離の条件が担保される手段をとる必要がある。一般の廃棄物の場合こういった行為を「処分」と呼んでおり、放射性廃棄物の場合も同様となる。

## 5) 高レベル廃棄物の管理方策

大半の放射性廃棄物は、ほとんどすべての高レベル廃棄物を含め、現在では中間貯蔵の下に管理されている。使用済燃料要素の中間貯蔵は最初は原子力発電所で行なわれ、一部は再処理プラントの貯蔵庫でも行なわれている。

(出所 PROJECT GEWAEHR 2.3/1988)

### (1) 長期貯蔵

長期の貯蔵をどのように用いるかによって、考慮すべき期間の長さが変わってくる。高レベル廃棄物の隔離のための貯蔵には、つぎの2通りがある。

#### ① 隔離の代替手段として長期貯蔵を考える場合

まず隔離の代替オプションとして長期貯蔵を考える場合には十万年以上の期間にわたる管理が必要となる。現在の建築構造物がこのような長期間にわたって安定であることは考えがたいため次のような問題が発生する。

●管理体制を維持できるか：数十万年にわたって人間が何か特定の対象を管理し続けたことはない。

現在までに特定の構造物の管理機関として最も長く管理を続けている組織はオランダの水防組織で、これでも管理期間は500年程度と言われている。

●エネルギー収支場の問題：施設の建て替えを続けて行くと、超長期的には廃棄物の発生に対応した原子力発電量よりも、廃棄物管理に要する費用が大きくなりえる。

(出所 天国と地獄 / P.Chapman ; みすず書房 / 1970)

#### ② 待ちの方策として貯蔵を考える場合

人間の制度的な管理が可能な期間に限って長期貯蔵を考える場合には上記の問題が発生しない。

しかし、次のような問題がまだ残ることとなる。

●隔離方策が未確立のまま管理し続けることが「安全」を確保することになるか。

●長期貯蔵を終える時点で隔離が可能である保証がない。

監視付中間貯蔵を無期限に延長することが時として主張されていたが、それに反対する種々の考察

により最終処分という方針の方が優勢となっている。原子力利用から生じる廃棄物を処分する責任は現在その利益を享受している社会が負うべきであり、将来の世代は長期中間貯蔵の監視を免れるべきだからである。しかし同様に重要なことは、処分の方が貯蔵より好都合と考えられることである。地中処分場の長期にわたる地質安定性は、長期中間貯蔵を有効に制御管理するための必要条件である社会機構や社会組織の安定性により、遥かに長い期間にわたって遥かに高い信頼性と有効性をもって予測しうるのである。

(出所 PROJECT GEWAEHR 2.3/1988)

このように考えると、長期貯蔵は、何らかの高レベル廃棄物の処分方策が確立される間での、待ちの方策として考えざるを得ない。つまり長期貯蔵を実施したからといって高レベル廃棄物処分技術が不要となる訳ではない。ただ単にどの程度待つ必要があるかの問題である。このように考えた場合、長期貯蔵を実施するか否かは、処分方策をいつ実施するかに関係する問題である。処分方策を確実なものとするという考えと、隔離とは別のものごととして考える必要がある。



(2) 群分離・消滅処理

高レベル廃液をそのままガラス固化し、地層処分を行なうと100万年にも渡る安全性を評価しなければならない。当初の1000年くらいは、<sup>90</sup>Sr、<sup>137</sup>Csを中心とする核分裂生成物が毒性の主体を占めるが、これからはしだいに減衰して10000年を越えるとほとんど消滅してしまふ。ところが、その時点から<sup>237</sup>Np、<sup>243</sup>Am等の超ウラン元素の毒性が台頭し100万年くらいまで残存することになる。これは<sup>237</sup>Npが約200万年という極めて長い半減期をもっていることに特徴がある。そこで超ウラン元素を安定核種もしくは短い半減期の核種に変換してしまえば、地層処分により人間の生活圏への回帰を忌避しなければならない期間は10000年程度でよいことになり、技術開発への負担を格段に軽減することができる。

(放射性廃棄物の消滅処理の研究／エネルギー1989-10：金子義彦／1989)

そこで、高レベル廃液をいくつかの群に分ける。廃液に含まれている長寿命であり発熱量の小さいものは確実に管理する。一方、短寿命であり発熱量の大きいものは他原子に変化させる。原子炉で高速中性子をおつけて、Sr/Csなどの短半減期核種に変換する。または加速器で陽子を衝突させると、質量数の小さい多くの破片に分裂する。これで、長半減期核種は発生しないことになる。この方法が群分離、消滅処理方法である。

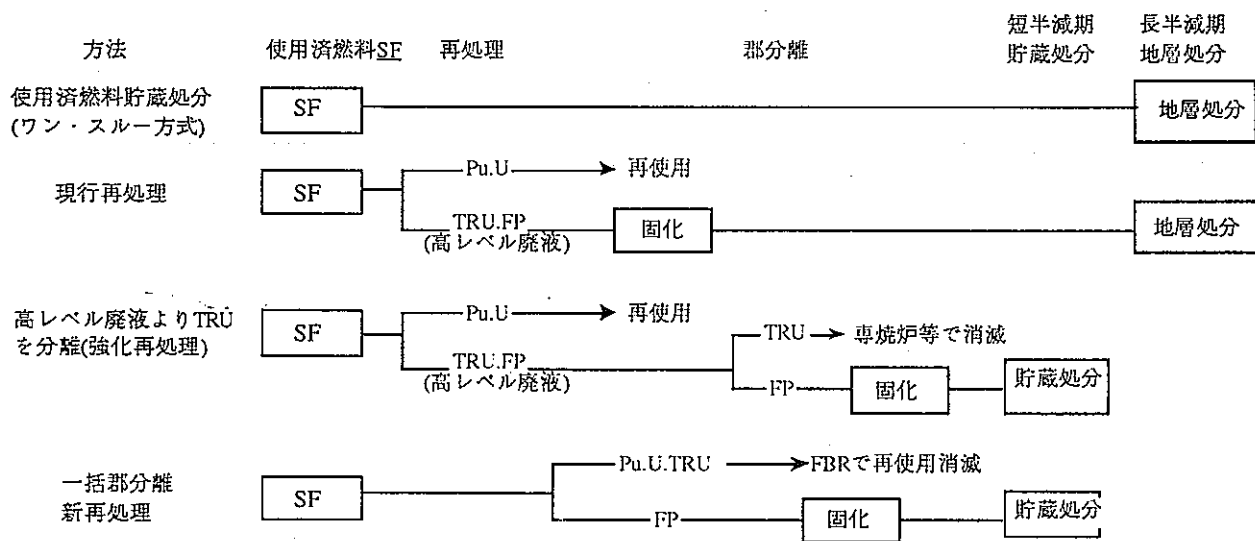


図1. 1. 5-1 長半減期核種処分処理方法の比較

しかし現状では次のような問題がまだ解決されていない。

第一に、実プラントでSr/CsからのTc/Np等の分離効率を十分高く取ることが難しいことである。また分離効率が99%程度にとどまるならば、事実上地層処分の安全性の向上に大きく寄与することがない。

第二は、現状の技術ではTRU元素を含んだ非発熱性のガラス固化体が発生することとなる。

第三は回収したTc/Np/Am/Cm等の消滅処理技術が確立されていないことである。

(アクチニド燃焼と廃棄物処分/Thomas H. Pigford /1990)

従って当面発生する廃棄物に関しては適用が難しく、廃棄物管理方策が確立したと言いきれるまでに極めて長期間を要する可能性がある。

開発進められている消滅処理オプションでも、エネルギー収支的に消滅処理の意味があるかすら明らかになっていない。現在でも技術開発は進んでいるが、現実的には高レベル廃棄物を無くすことはできない。従って、たとえ群分離技術を開発したとしても高レベル廃棄物の処分技術は必要となる。今の技術では現実的に、消滅処理が将来必ず実現可能であると考えるのは難しい。どうもこういった技術が開発されることをあてにして他の手段を考えなくてよいということはない。

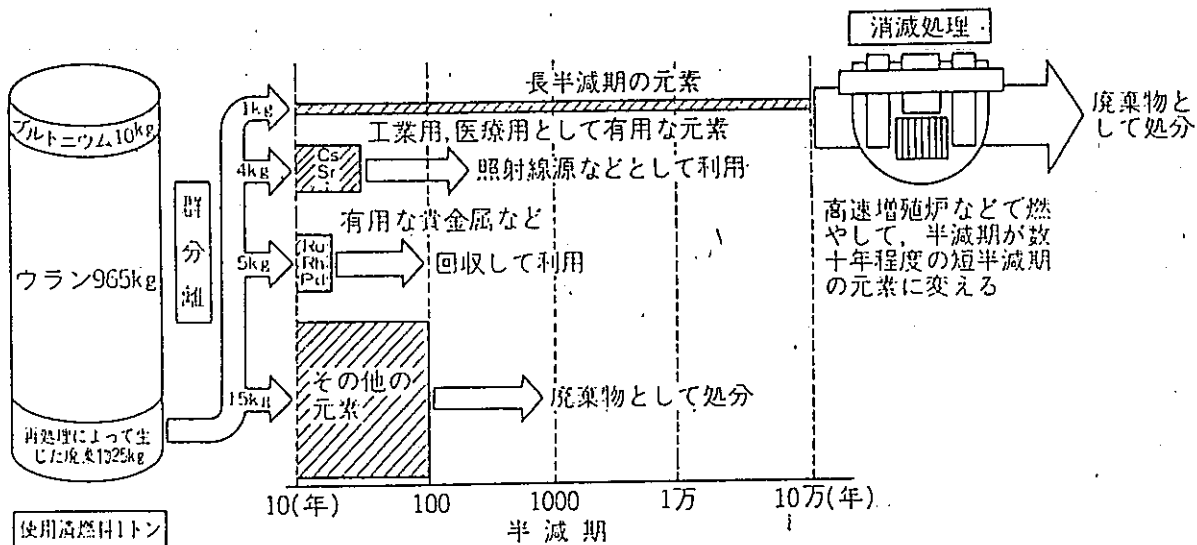


図1. 1. 5-2 半減期の長い廃棄物を消滅させる方法

(出所 長半減期核種消滅のインセンティブ/原子力工業1989 no.8:神山弘章/1989)

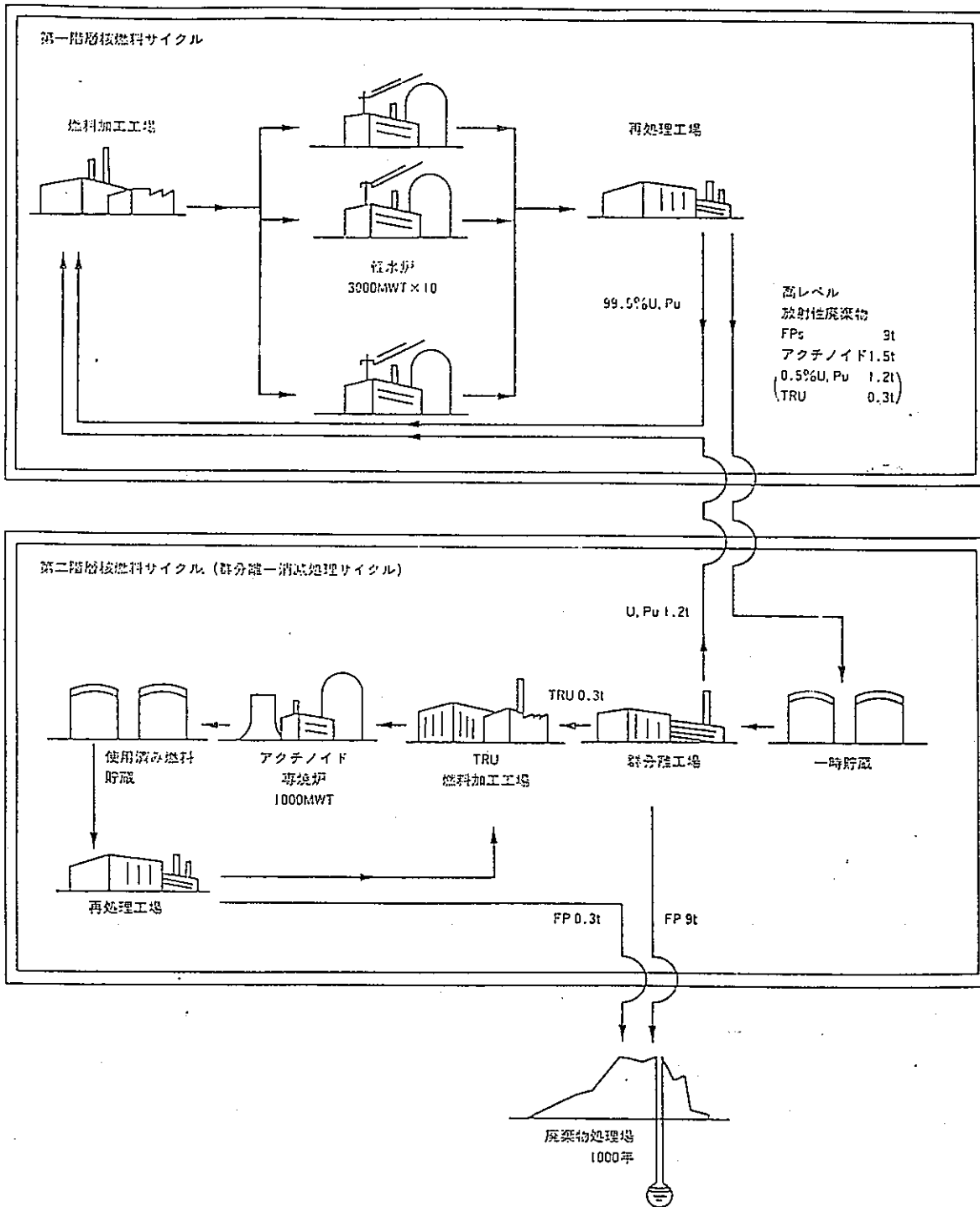


図 1. 1. 5-3 専焼炉による消滅処理に関する階層  
 (出所 放射線廃棄物の消滅処理の研究/エネルギー no.10:金子義彦/1989)

### (3) 隔離処分方式

#### ①宇宙処分

##### (処分概念)

金星と地球の間のような宇宙空間で、高レベル廃棄物を太陽の周りの惑星軌道に乗せることによって、再び地球に高レベル廃棄物が戻ってくることがないように、地球圏外へ高レベル廃棄物を投棄する処分方法である。一旦地球軌道に輸送した後、惑星軌道へ処分を行うことが検討されている。

地球の圏外へ高レベル廃棄物を移動させるには、ロケットなどを用いることが考えられているが、墜落した場合の危険が非常に大きい。

(Management of commercially generated radioactive waste vol.1 /US DOE/1979)

##### (システム概要)

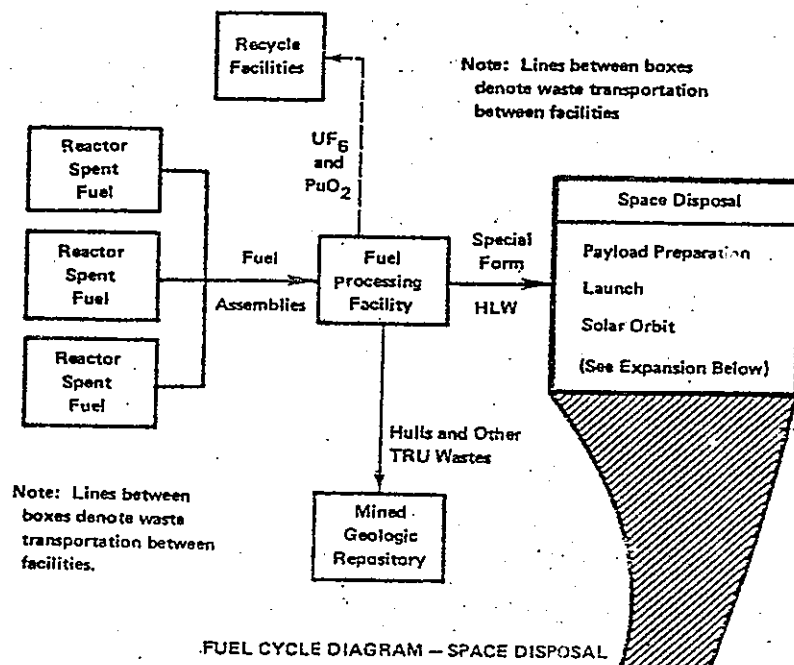
使用済み燃料の宇宙処分をおこなうには大量のロケットが必要となり、コスト、エネルギー消費、環境インパクトの大きさゆえ、適当でないと考えられ、何らかの分離処理が必要になると考えられている。HLWであればスペースシャトルを利用することでフィージビリティがでてくる。

宇宙処分の概念として提案されているものにDOE/NASAのものがある。トータルの廃棄物管理概念を図1.1.5-4に示す。このなかでは地層処分方式がトータルシステムの一部として位置づけられている。

##### (評価)

宇宙処分の基本概念は放射性廃棄物を地球外へ放出することであるが、その際の墜落の危険性は大きい。また、宇宙処分方式であっても実質的には廃棄物貯蔵は必要である。したがって、地上オペレーションを行っている際の潜在的な放射線学的リスクや国際法上の問題、非放射線学的な健康への影響などが含まれる。

これらの条件を考慮した場合、地層処分方式の代替案として宇宙処分を選択することは得策ではない。



HLW From Fuel Processing Facility

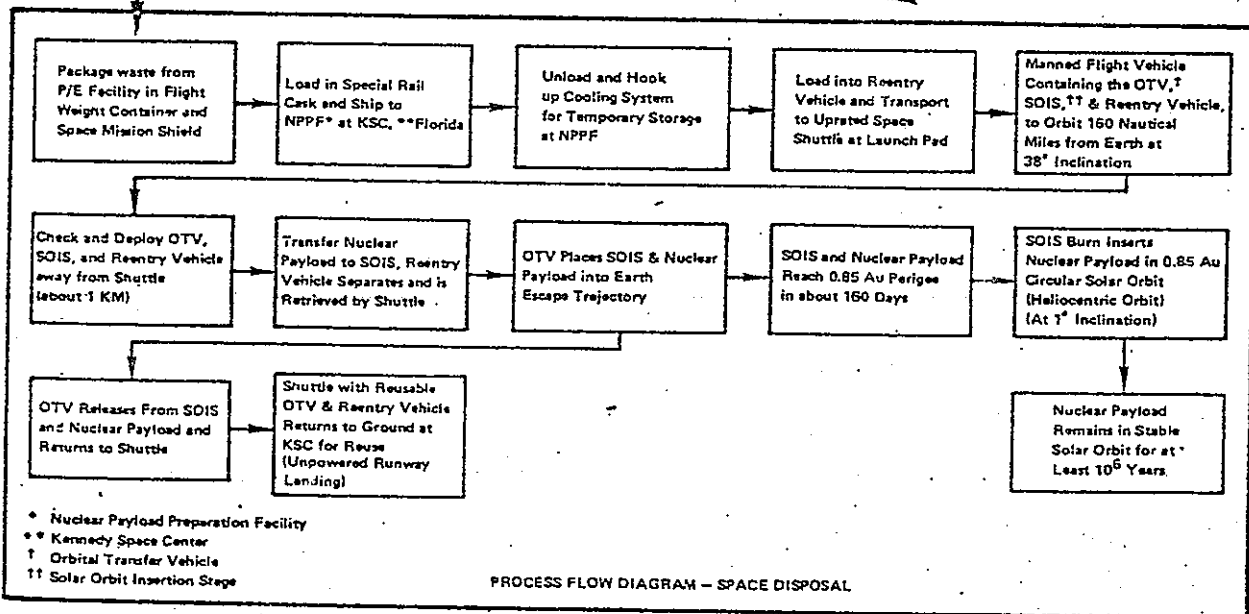


図1.1.5-4 宇宙処分の廃棄物管理システム

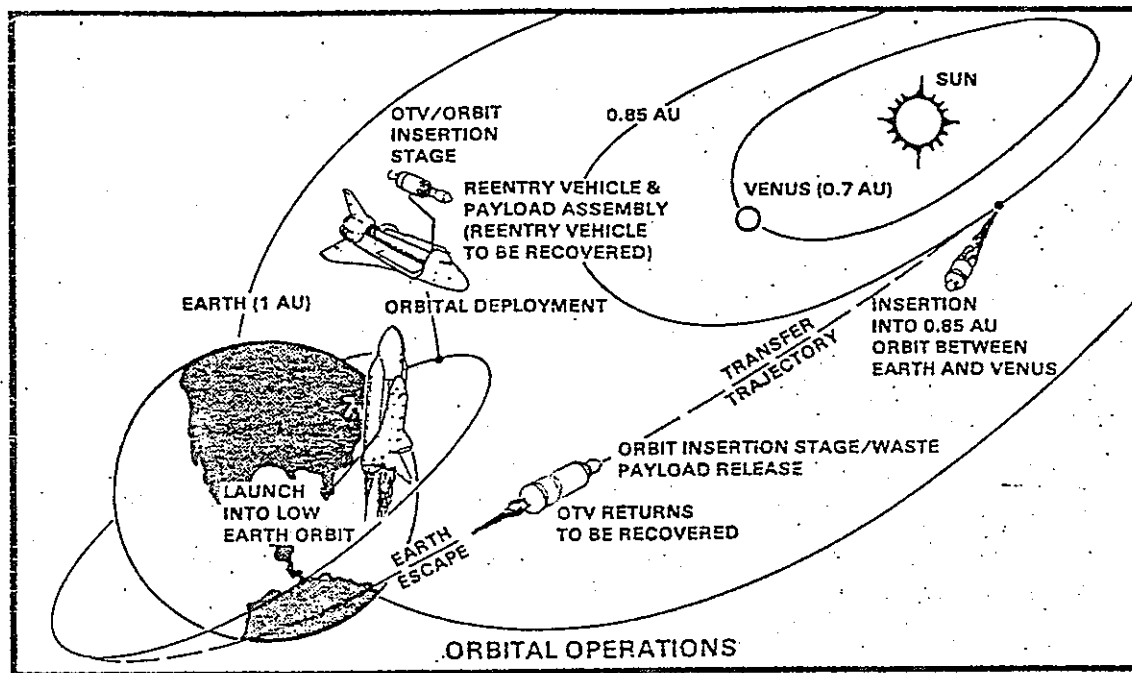


図1.1.5-5 宇宙軌道上での作業

## ②氷床処分

### (処分概念)

南極あるいはグリーンランドのような数千mの厚さの氷床に穴を掘り、高レベル廃棄物を置くと、高レベル廃棄物に含まれる放射性の元素の崩壊による発熱によって氷が溶け、高レベル廃棄物は自然に沈降し、基盤岩まで到達する。

ただし、基盤岩に高レベル廃棄物が到達した場合に衝撃を受けること、氷床が長い期間に移動して、高レベル廃棄物が海まで流されることが考えられる。

南極やグリーンランドの氷床のある場所自体が、人間の住む環境から遠距離であること、氷床の厚みによる放射性の元素に対するバリアが期待できることが、この処分方法の特長である。

しかし、南極やグリーンランドの気象や環境は、処分場へ高レベル廃棄物を輸送するには良好な条件ではなく、輸送には危険が伴うと考えられる。

(Management of commercially generated radioactive waste vol.1 /US DOE/1979)

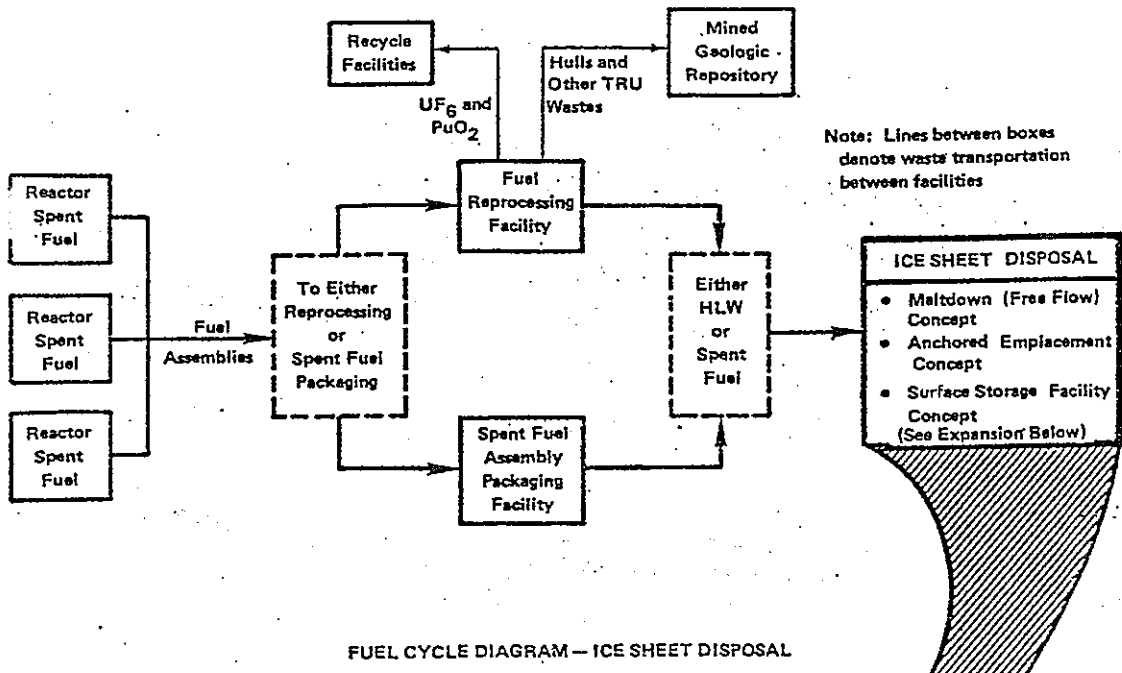
### (システム概要)

氷床処分方式で対象となる放射性廃棄物は、主として、再処理プロセスを経て排出される高レベル廃棄物固化体と考えられている。ワンスルーケースでの使用済み燃料の直接処分も可能性はある。TRU廃棄物については発熱量がHLWの1/1000であるため適用はできないと考えられ、たの処分施設へ送られると推定される。

現在の段階では、氷床処分方式の標準概念はまだ確定していないが、一般的な廃棄物管理上の施設要件が示されている (Battelle 1974)。氷床処分方式の廃棄物管理システム概要を図1.1.5-6にしめす。

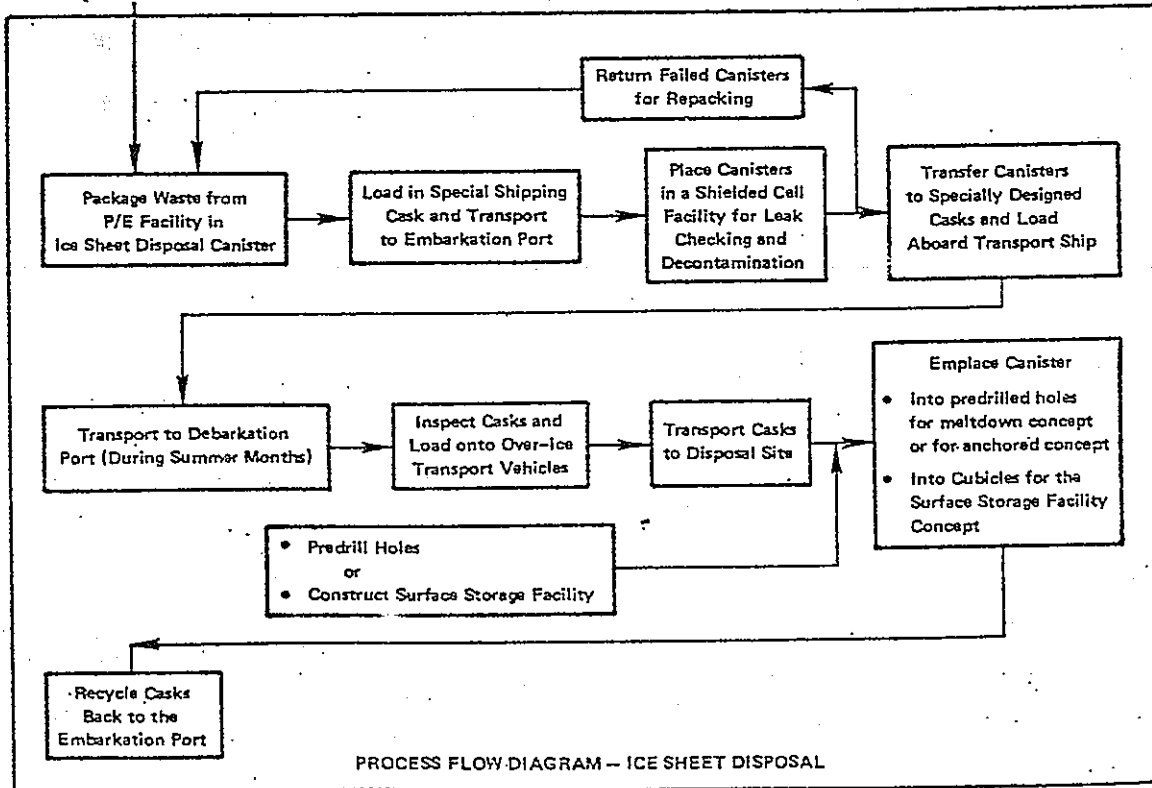
処分施設サイト建設の候補地としては南極かグリーンランドがあげられている。

(Battelle 1974, EPA 1979, ERDA 1976)



FUEL CYCLE DIAGRAM - ICE SHEET DISPOSAL

HLW from Fuel Reprocessing Facility  
or  
Spent Fuel Assemblies



PROCESS FLOW DIAGRAM - ICE SHEET DISPOSAL

図1.1.5-6 氷床処分の廃棄物管理システム



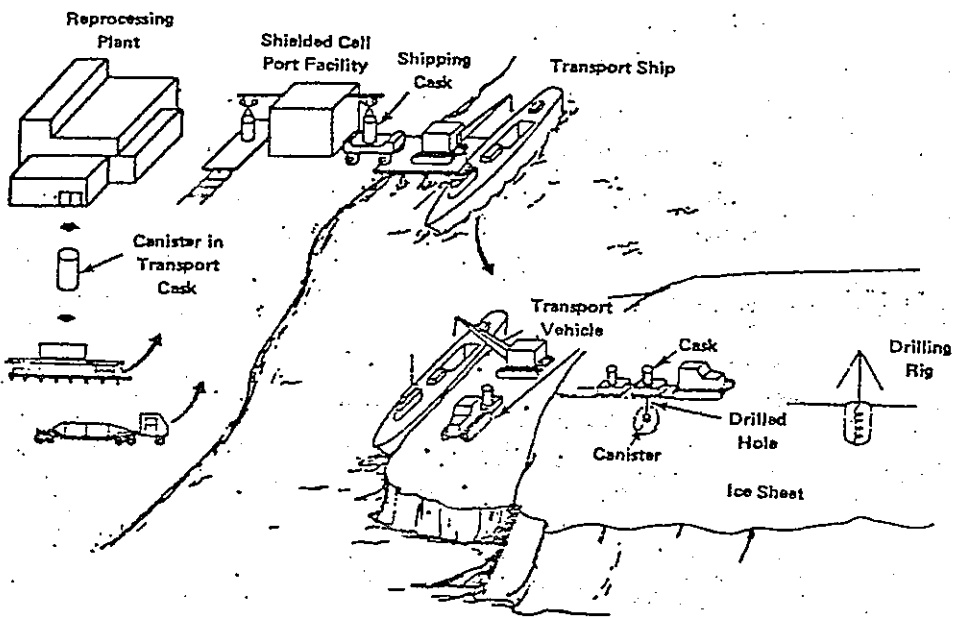


FIGURE 6.1.16. Schematic of Operations in Ice Sheet Disposal Systems for High-Level Radioactive Wastes(18)

図1.1.5-7 氷床処分システム概念図

### ③井戸注入処分

#### (処分概念)

概念的には2種類の井戸注入処分がある。

i) 1000～5000mの深さの割れ目の多い地層あるいは多孔質の地層に液体状の高レベル廃棄物を注入すると、高レベル廃棄物は地下を拡散し、高レベル廃棄物に含まれる放射性の元素は岩石に吸着される。

高レベル廃棄物に含まれる放射性の元素は、深い地下で地下水の移動が小さいこと、拡散した放射性の元素が、多孔質あるいは、割れ目の多い地層に吸着されることで、放射性の元素が、人間の住む環境から隔離されると考えられている。

ただし、この方法では、放射性の元素が移動・蓄積して、臨界に達する危険性がある。

ii) 300～500m地下の頁岩層を高圧水により破碎して頁岩層内に隙間を作った後、セメント・粘土を混合して固化しやすい状態にした液体状の高レベル廃棄物を注入する。

高レベル廃棄物は頁岩層内に層状に広がって固まる。グラウトからは放射性の元素は浸出しにくく、頁岩も透水率が低いため、高レベル廃棄物に含まれる放射性の元素が、人間の住む環境から十分隔離されると考えられている。

井戸注入処分は、直接地層に高レベル廃棄物を処分するため、高レベル廃棄物に含まれる放射性の元素は、固化体や、キャニスタのような人工のバリアによって環境へ広がらないようにされているわけではなく、天然の地層によるバリアだけによって、人間の住む環境との隔離を図る方法である。

(Management of commercially generated radioactive waste vol.1 /US DOE/1979)

#### (システム概要)

二つの方式のどちらの場合も高レベル廃棄物が対象となる。

標準概念設計では、地中の温度勾配は15C/kmとし、注入廃棄体の温度は上限として100Cを想定している。これは高温により生じる地中の副反応を避けるために考えられている措置である。

井戸注入処分の廃棄物管理システム概念を図1.1.5-8に示す。

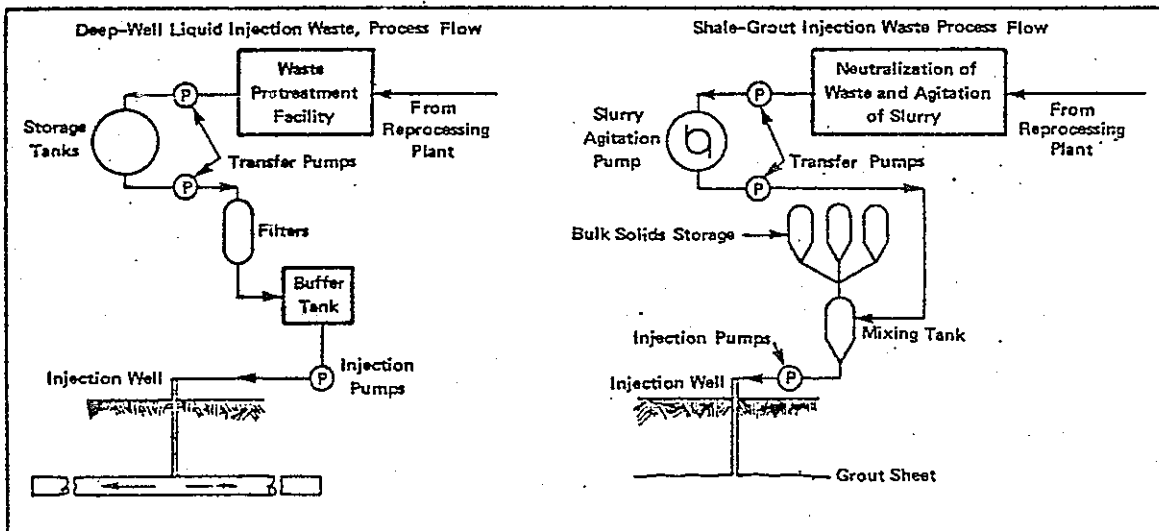
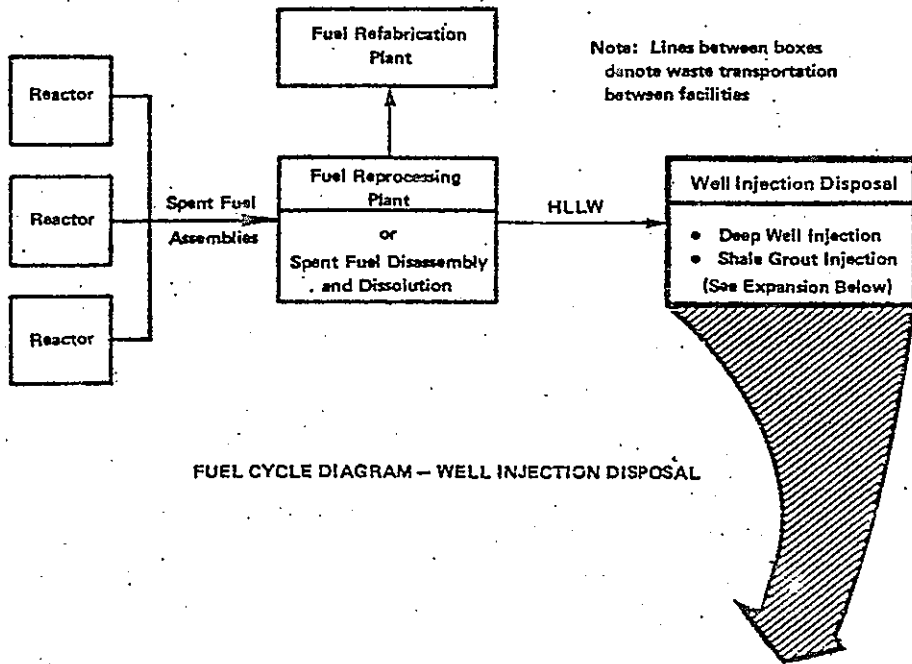


図1.1.5-8 井戸注入処分の廃棄物管理システム

#### ④海洋底下処分

##### (処分概念)

深海底（3,000～6,000m）には広く安定な堆積層が存在しており、堆積層付近の海水も水分の移動が少なく安定している。

人間の住む環境から遠距離にあって、安定した地層の上に存在している堆積層の中に高レベル廃棄物を処分すると、次の様なバリアにより、放射性の元素は人間の住む環境から十分に隔離されることが期待できる。

- i) 高レベル廃棄物から放出された放射性の元素は、堆積層が放射性の元素を吸着する性能に優れていることによって、堆積層のなかで吸着され、海水に到達するまでに時間がかかる。
- ii) 海水中に放射性の元素が浸出した場合も、堆積層付近の海水の移動が少ないため、放射性の元素が流動する海水に到達するまでに時間がかかる。
- iii) 流動する海水中に放射性の元素が移動した場合も、人間の住む環境との間に大量の海水があるので、放射性の元素は希釈される。

ただし、高レベル廃棄物の処分に適した海域まで、高レベル廃棄物を輸送する際には、途中で事故により沈没し、安全でない海域に高レベル廃棄物が沈んでしまう危険性がある。

(Management of commercially generated radioactive waste vol.1 /US DOE/1979)

##### (システム概要)

標準概念では、対象とする放射性廃棄物は、使用済み燃料、HLW、ハルに限られている。たの廃棄物については地層処分施設に送られることになっている。しかしながら、経済的インセンティブがあるならば、原理的には他の廃棄物であっても適用可能である。

廃棄物管理システムの概念図を図1.1.5-9にしめす。

海洋底下処分方式は次のような多重バリアから構成される。

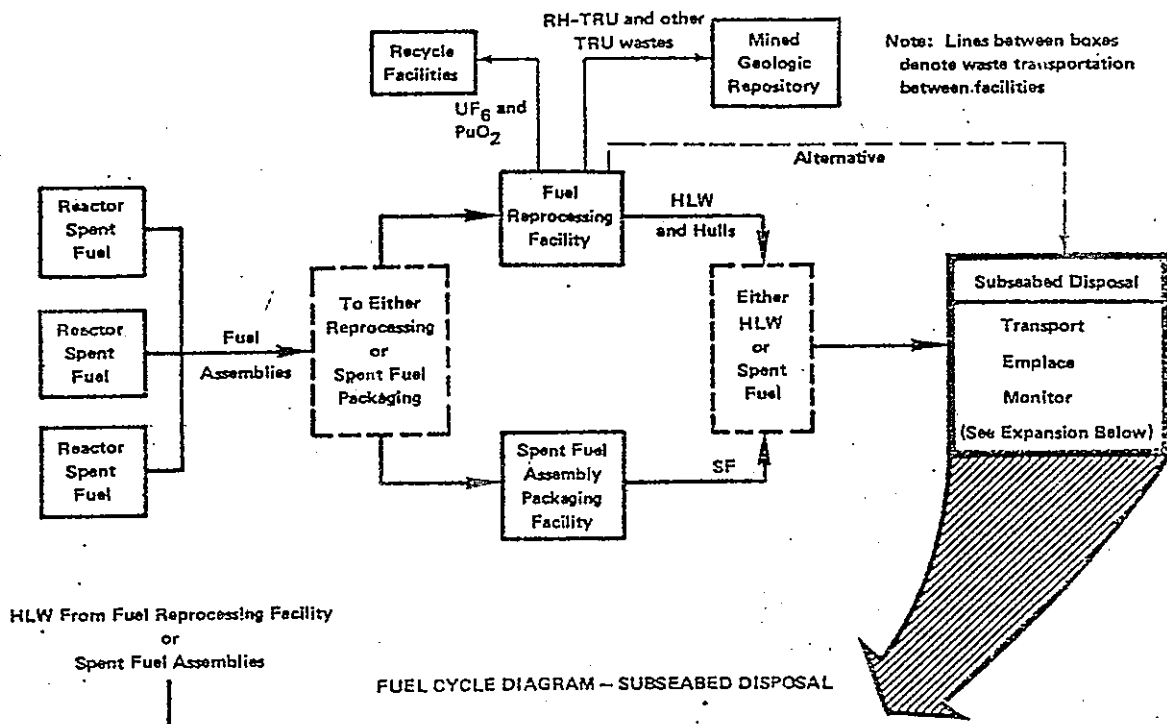
- The waste form
- The waste canister
- The emplacement medium
- The benetic boundary layer
- The water column

waste formとwaste canisterは廃棄体の漏洩を防ぐ人工バリアであり、emplacement mediumは長期保存に対応したバリア、benetic boundary layerは沈殿水から内容物を保護するバリア、water columnは人間侵入を防ぐバリアである。

(評価)

海洋底下処分方式と後述する島内地層処分の明確な違いはない。しかし島内地層処分方式が長期にわたる放射線防護について大きな不確定性を残すのに対し、海洋底下処分方式のそれは地層処分方式と同様であるため優れている。加えて、海洋底下処分方式は純粹に地層処分方式の代替方式と考えられるが、島内地層処分方式は地層処分方式とは基本的に異なるものである。

海洋底下処分方式に残されている不確定要素として、輸送方式の開発、設置・監視技術、潜在的国際摩擦などが考えられる。特に廃棄体の隔離能力の解明についての研究が必要である。



HLW From Fuel Reprocessing Facility  
or  
Spent Fuel Assemblies

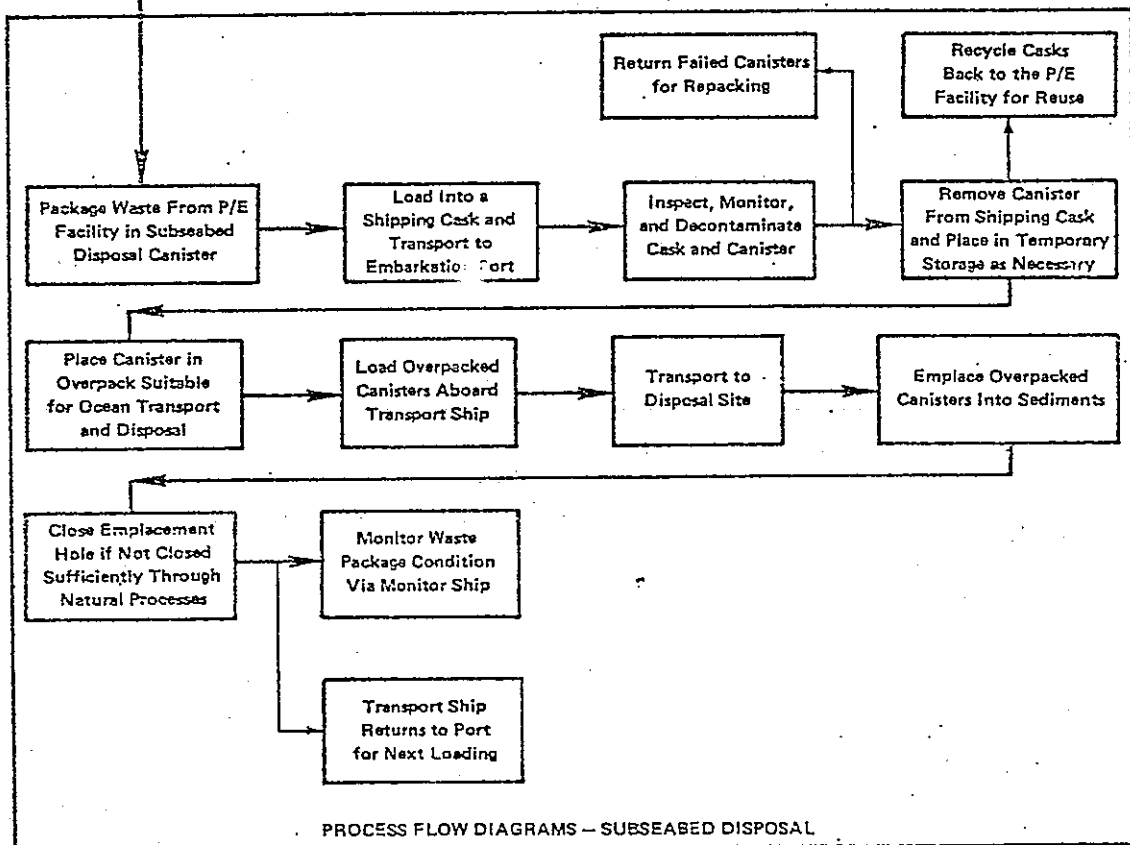


図1.1.5-9 海洋底下処分の廃棄物管理システム

## ⑤岩石溶融処分

### (処分概念)

2000m程度の地下に空洞を掘って、その中に液状の高レベル廃棄物を注入すると、液状の高レベル廃棄物は放射性の元素が崩壊することで発熱する。高レベル廃棄物中の水分が発熱により蒸発した後は、さらに温度が上昇して、周辺岩盤を溶かし、高レベル廃棄物と岩石の溶融体になる。1000年程度時間が経つと、高レベル廃棄物と岩石の溶融体は自然に冷却し固化する。固化するときに放射性の元素は溶融固化体の中に捕捉されるので、放射性の元素は環境に浸出しにくくなる。また、高レベル廃棄物の処分される場所と、人間の住む環境との間には、2,000m程度の地層があり、地層による天然バリアにより、放射性の元素の隔離が行われる。

(Management of commercially generated radioactive waste vol.1 /US DOE/1979)

### (システム概要)

標準概念設計では、対象とする放射性廃棄物は液状高レベル廃棄物と液状RH-TRUのみである。したがって、上記廃棄物以外の廃棄物は地層処分のほうへ送られると想定される。

標準概念設計によるシステムのフローダイアグラムを図1.1.5-10に示す。

標準概念設計では、液状高レベル廃棄物処分量5,000MTHM/yrで25年分を処分する。このため1サイト当たり3つの空洞（空洞1つが6,000m<sup>3</sup>）を地下2,000mに建設する。3つの空洞はそれぞれ2000m離して設置する。（Bechtel 1979a）

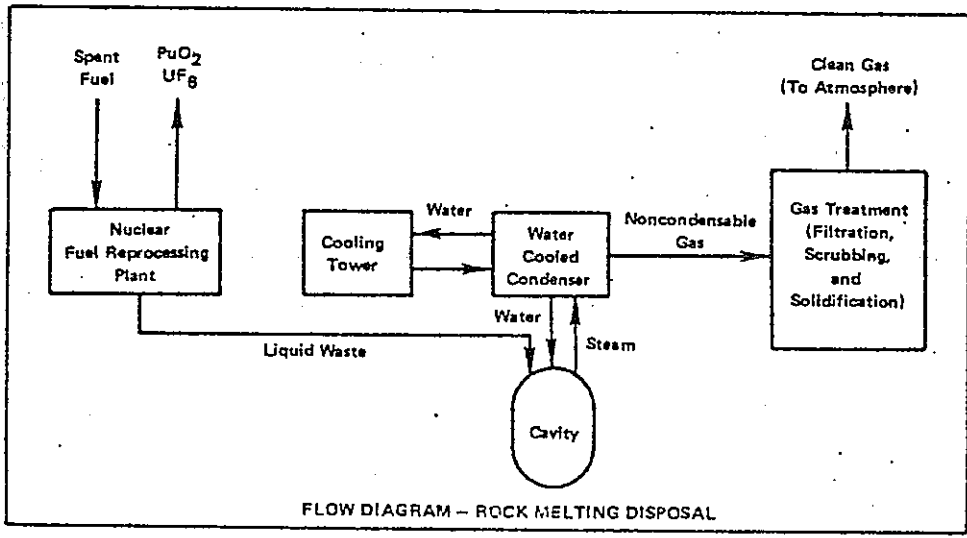
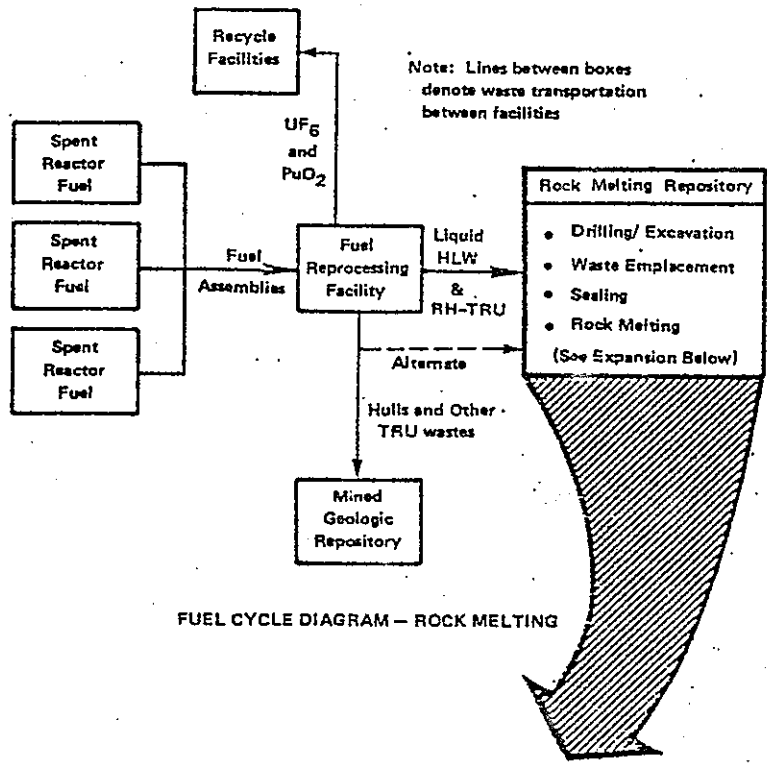


図1.1.5-10 岩石溶融処分の廃棄物管理システム



## ⑥島内地層処分

### (処分概念)

処分方法の概念は地層処分と同じである。処分場を離島に設けることにより、人間の住む環境からの隔離が強まること、離島の地下水理構造は本土から独立していて安定していると考えられること、処分場から放射性の元素が放出された場合も大量の海水による希釈がされることが、バリアとして地層処分に加えて期待できる処分方法である。

(Management of commercially generated radioactive waste vol.1 /US DOE/1979)

### (システム概要)

島内地層処分方式では、燃料のリサイクルケースおよびワンスルーケースどちらの場合でもすべての廃棄物を対象とする。

しかし島内地層処分方式の詳細な研究は現在のところ行われておらず、したがって基本要件はコンベンショナルな地層処分方式を簡略化したものが適用されている。

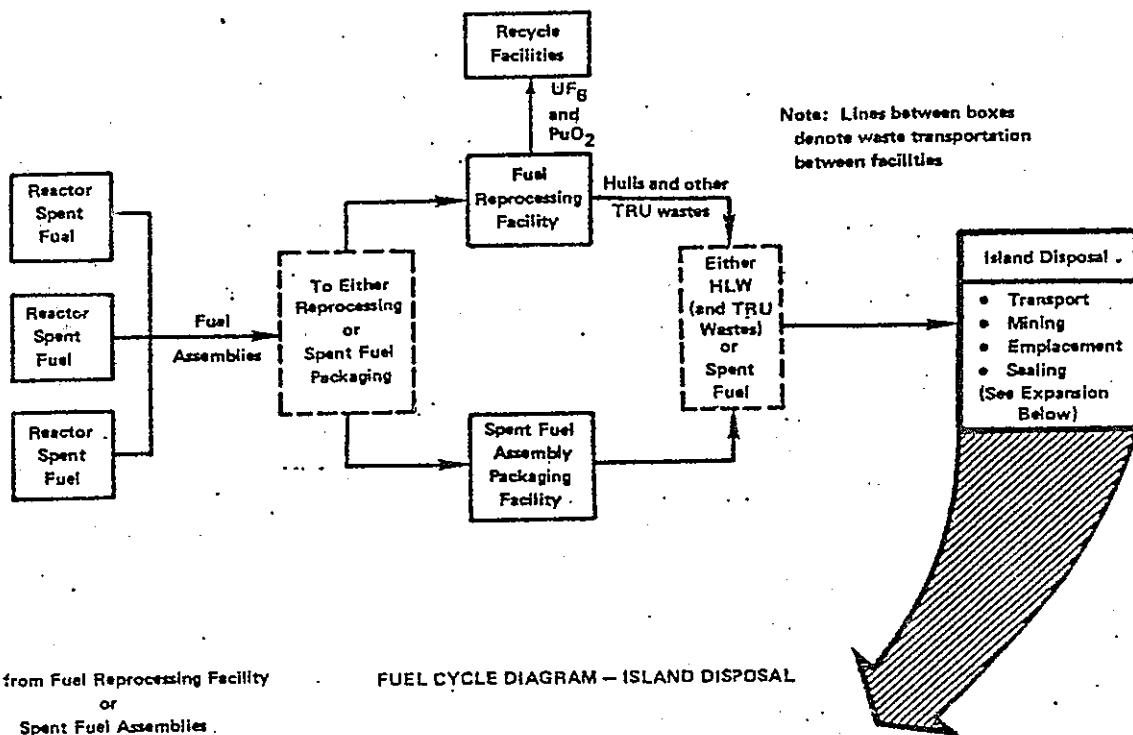
燃料サイクルとプロセスフローを図1.1.5-11に示す。

### (評価)

島内地層処分方式のおもな潜在的アドバンテージは社会政治学的側面にある。すなわち遠隔の離島に処分施設を建設することにより、一般公衆の大きなアクセプタンスが得られる可能性が高いと考えられる点である。

さらに、国際協力による処分施設を自然のサイトに建設する場合には離島が上がってくる公算が高いということもある。

しかし、海洋底下処分においても同様のアドバンテージを有しており、従って島内地層処分のアドバンテージは社会政治学的側面に限られることになる。



HLW from Fuel Reprocessing Facility or Spent Fuel Assemblies

FUEL CYCLE DIAGRAM - ISLAND DISPOSAL

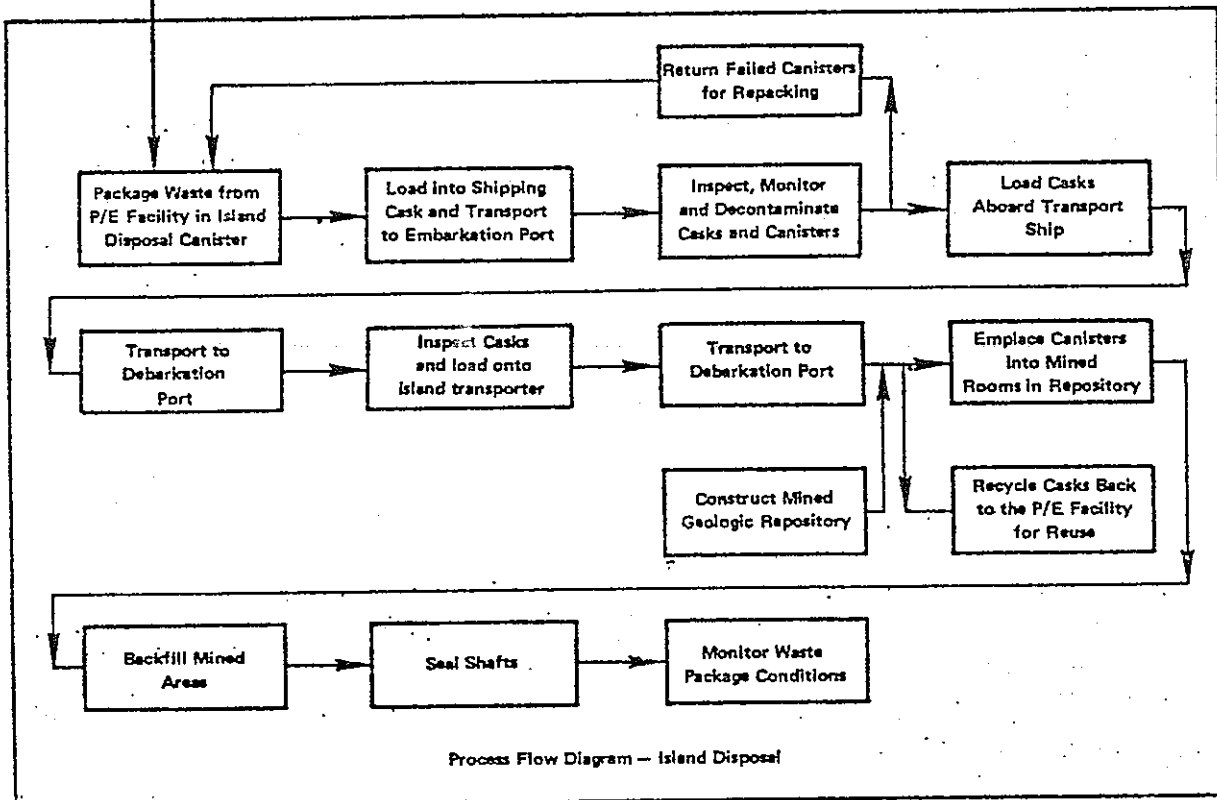


図1.1.5-11 島内地層処分の廃棄物管理システム

## ⑦超深孔処分

### (処分概念)

地層処分よりもさらに深い地下（10,000m程度）に、垂直の縦坑を掘り、高レベル廃棄物のガラス固化体入れたキャニスターを幾つか定置した後、垂直坑を埋め戻して処分を行う。バリアの概念は地層処分と同じ考え方である。地層処分よりもさらに深い地下に高レベル廃棄物を処分するため、放射性の元素に対する天然バリアはより大きなものとなる。

(Management of commercially generated radioactive waste vol.1 /US DOE/1979)

超深孔処分の場合、廃棄物の回収は許さないものとする。また気候的および地表面の変化が廃棄体へ影響しないことが保証されると考えられる。

また超深孔処分の環境影響については、地中深く掘り込むこと、プレ処分施設を地表近くに建設すること、廃棄物の掘付、施設の解体、廃棄体の長期保存を確実にすることといった項目に関して検討されている。

### (システム概要)

超深孔処分の標準設計では使用済み燃料を直接処分することと、HLWの処分が想定されている。これはコスト制約から来るもので、TRUやLLWなどは対象としていない。対象外廃棄物は地層処分設備に送られることになろう。

廃棄物管理システムフローを図1.1.5-12にしめす。

標準設計では、使用済み燃料にして年間10,200キャニスターが、HLWにして年間2,380キャニスターが処分できる設計になっている。40年間の貯蔵期間として、使用済み燃料は1孔あたり150キャニスターを収容し、年間68個の孔を開発する。HLWの場合は1孔あたり375キャニスターを収容し、年間6～7個の孔を開発する。(Bechtel 1979a)

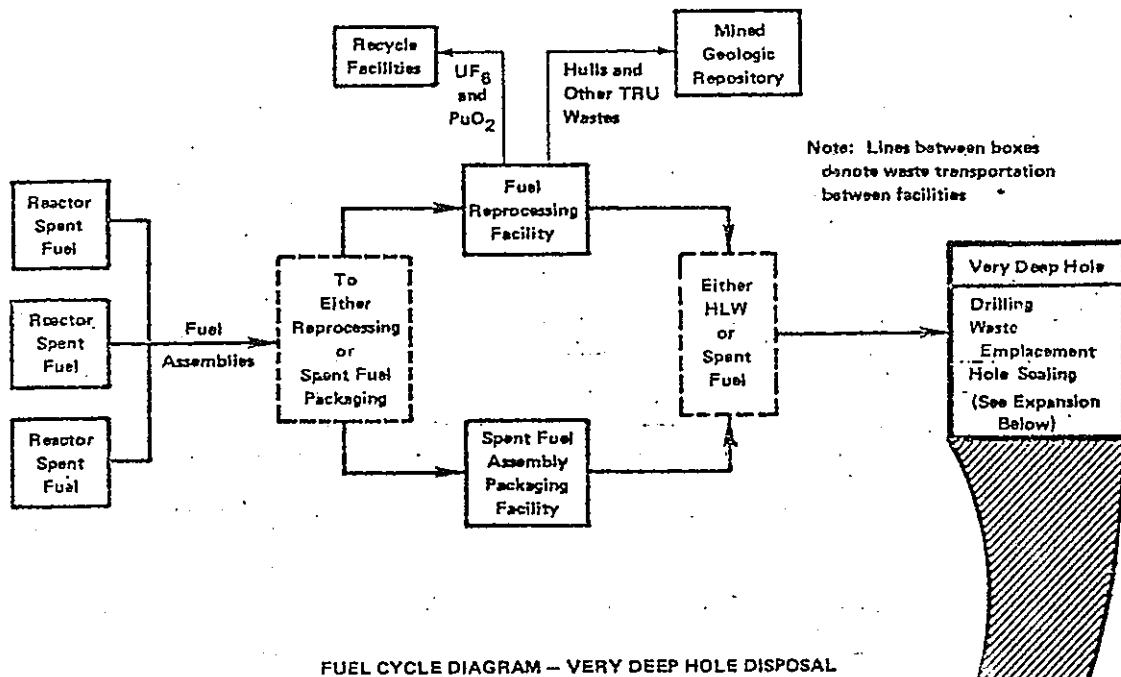
### (評価)

他の地層処分に比べ、特に明確なアドバンテージはないが、一般的に多くのアセスメントにおいて高位にランクされている。

大きな問題点として、掘削技術の大幅な進歩、長深度地下環境のより深い理解、オペレーション後の欠陥のなさの解析的確認、廃棄体パッケージの耐久性確認があげられている。しかし、超深孔技術は地下探査などの他の理由でも次第に進歩・蓄積がなされてきており、これら問題点の不確定要素改

善に寄与している。

したがって超深孔処分は他の地層処分方式に比べ優れた潜在特性を有しているものと考えられる。



HLW from Fuel Reprocessing Facility  
or  
Spent Fuel Assemblies

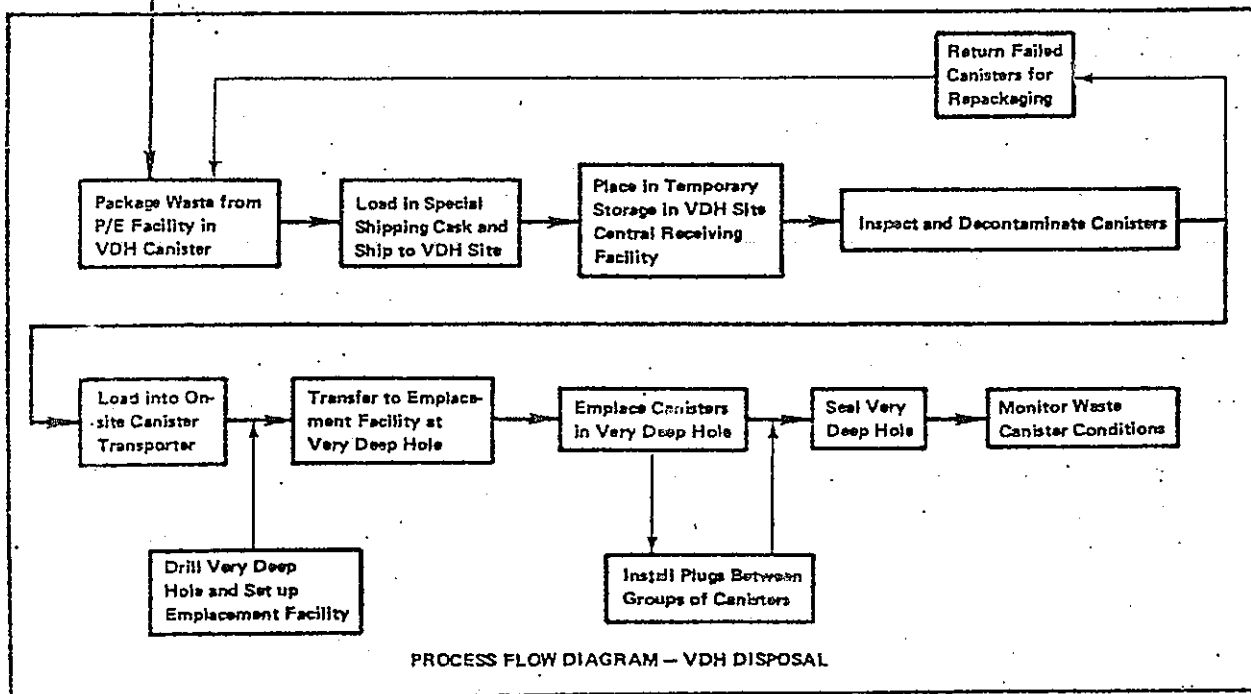


図1.1.5-12 超深孔処分の廃棄物管理システム

## 6) 高レベル廃棄物と地球環境問題

### (1) 地球環境問題の現状

人間の活動があらゆる分野で拡大してきた結果、様々な環境問題が顕在化しつつある。人口は現在約50億人であり、エネルギー消費はこの100年間で約60倍に増加した。人口、エネルギー消費、社会活動に伴う廃棄物が環境破壊の圧力となり、環境を変化させている。その結果、従来の局地的な公害問題に留まらず、国境を越えて、あるいは地球全体といった規模で環境被害を拡大させている。

地球環境問題は一般的には次のように定義されている。

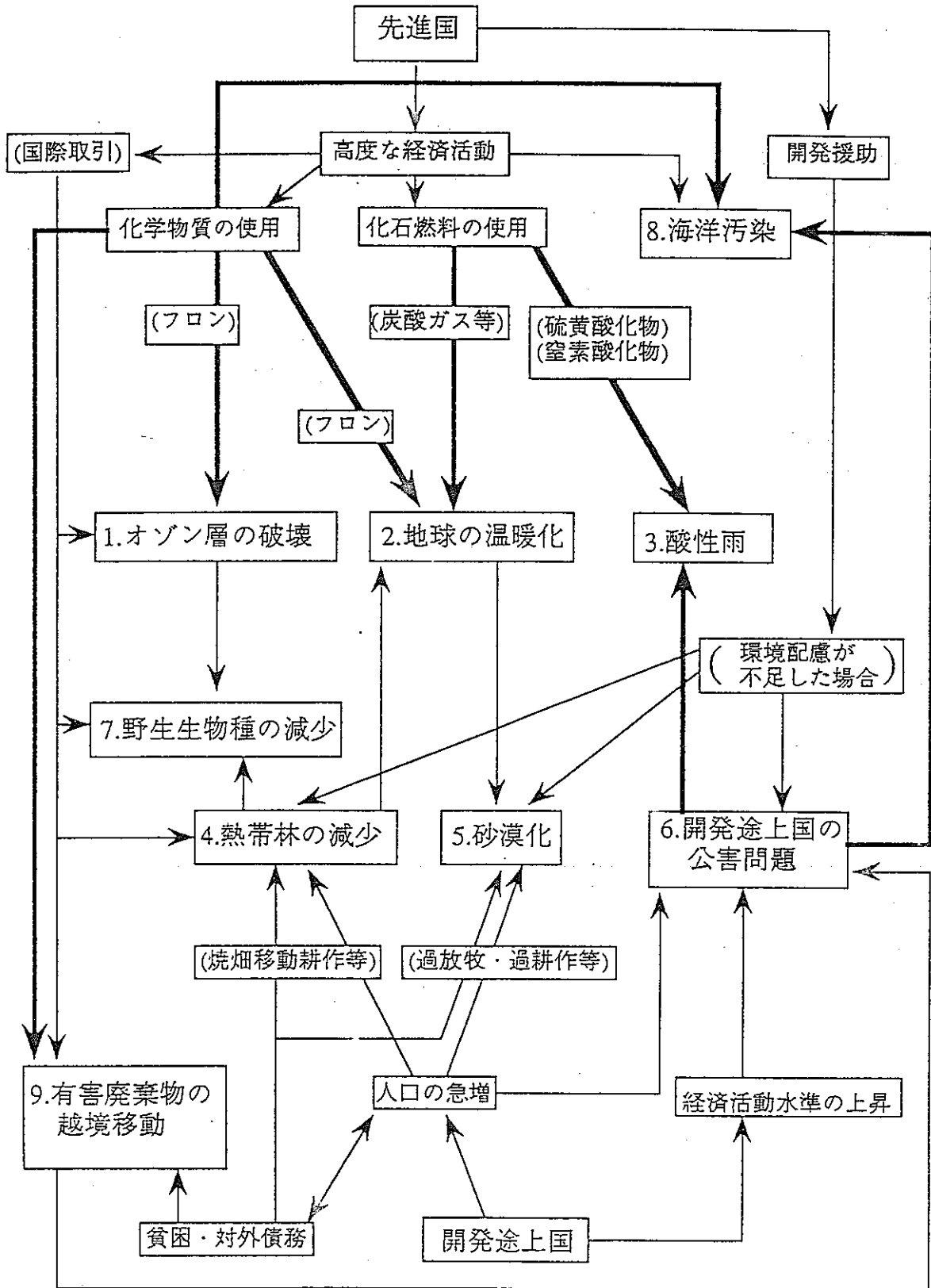
- ① 被害、影響が一国内に留まらず、国境を越え、地球規模で広がる環境問題
- ② 先進国も含めた、国際的な取り組みが必要とされる開発途上国における環境問題

地球環境問題は、その被害の内容により、一般的に次の9項目のカテゴリーに分類されている。

- ① オゾン層の破壊
- ② 地球の温暖化
- ③ 酸性雨
- ④ 熱帯林の減少
- ⑤ 砂漠化
- ⑥ 野生生物の種の減少
- ⑦ 海洋汚染
- ⑧ 有害廃棄物（越境移動問題を含む）
- ⑨ 開発途上国の公害問題

以上の地球環境問題相互の関係を示したものが図1.1.6-1である。

図 1.1.6-1 地球環境問題の相互関係



出所) 環境庁資料

従来型の環境問題との基本的な違いは、次のとおりである。

① 従来型の環境問題

- ・ 先進国を中心とした限られた狭い地域における汚染被害である。
- ・ 排出源対策、汚染物質の回収による環境の回復が可能である。
- ・ 加害者と被害者の区別が割合明解である。

② 地球環境問題

- ・ 先進国のみならず発展途上国も含めた地球全体でシステムとして環境変化を引き起こしている。
- ・ 汎国家的な対策、地球を一つの閉鎖生態系とした対策が必要である。

(注) 従来の「公害問題」も基本的には地球環境問題に含まれている。

1972年にローマクラブが「成長の限界」を発表して以来、地球環境問題は主に専門家レベルで議論されてきた。地球環境問題が国際的に本格的に議論され始めたきっかけは、1987年の「環境と開発に関する世界委員会（WECD）」の報告書“OUR COMMON FUTURE”における持続可能な開発（SUSTAINABLE DEVELOPMENT）の概念の提唱である。その意味は、将来の世代のニーズを損なうことなく現在の世代のニーズを満たすような節度ある開発である。1989年のアルシュサミットでは、環境問題が経済宣言の3分の1以上を占めるまでに取り上げられ、国際的に重要な問題として認識されるに至っている。



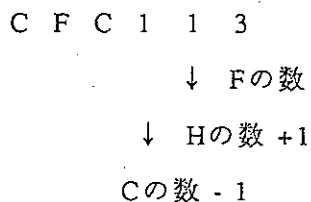
## 1 成層圏オゾン層の破壊

### 1-1 成層圏オゾン層

成層圏大気中の酸素分子が紫外光（波長242nm以下）を吸収・分解し、生成した酸素原子が酸素分子と結合することにより、成層圏中にオゾン分子が存在している。成層圏に存在しているオゾン分子は紫外光を吸収して分解する。成層圏オゾン濃度は複雑な科学反応の平衡で決まっており、大気の流れ、温度、太陽光の強度、反応に関与する化学物質の濃度などの変動によって時間的、空間的に常に変動している。1958年以来、全世界的なオゾン濃度は長期平均値の±4%で変動している。

### 1-2 成層圏オゾンを減少させる物質

オゾン破壊の原因物質は特定のフロン等であると見なされている。フロンとは炭化水素の水素がフッ素、塩素、臭素で置き変わった物質のFluorocarbonを短縮したもので、日本でのみ使用される言葉である。フロンには炭素・水素・塩素・フッ素の原子数により番号が付与されている。例えば、フロン113は、



を意味している。フロンは一般に不燃性で、熱的に安定で、人体に対する直接の毒性が少なく、化学的に安定であることから、冷媒、溶剤として広く用いられている。フロンは安定な物質であり、対流圏では分解せずに長期間の間に成層圏まで拡散移動する。

### 1-3 オゾン分解のメカニズム

フロンは、成層圏中で紫外線により分解し、塩素原子を放出する。この塩素原子とオゾンが連鎖反応を起こし、さらにオゾンを消費することにより、オゾン層の破壊がおこる。

例えば、フロン11は紫外線を吸収・分解し、連鎖反応により塩素原子を生成する。この連鎖反応の阻害物質としてはNO<sub>x</sub>がある。NO<sub>x</sub>の阻害によって成層圏から塩素原子が除去されるまでこの連鎖反応は継続し、塩素1個当たり約10万個のオゾン分子が破壊される。オゾン層破壊の程度はフロンの種類により異なる。

#### 1-4 フロンの排出源

フロンの生産量は、日本が約18万t、世界で約100万tである（表1.1.6-1参照）。

表1.1.6-1 問題となる主なフロンガスの生産量（1985年時点）の見積り

（出典：Hammit et al., Product Uses and Market Trends等）

（単位：千トン）

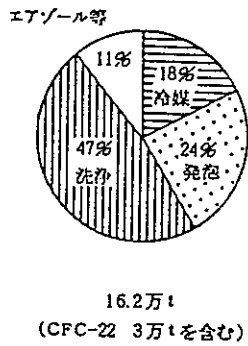
物質	全世界	米国	その他（うち日本）	共産圏
フロン11	341.5	75.0	225.0 (28.9)	41.5
フロン12	443.7	135.0	230.0 (37.7)	78.7
フロン113	163.2	73.2	85.0 (43.9)	5.0
ハロン1301	10.8	5.4	5.4	0.0
ハロン1211	10.8	2.7	8.1	0.0

出所) エネルギーと環境総覧

フロンの消費量は図1.1.6-2～4の通りである。

フロンは先進国において、大部分消費される。日本では特に半導体製造等での洗浄用途での消費が半分を占める。アメリカでは、冷媒用途での使用法が多く、西欧ではエアゾール用途が約50%を占める。

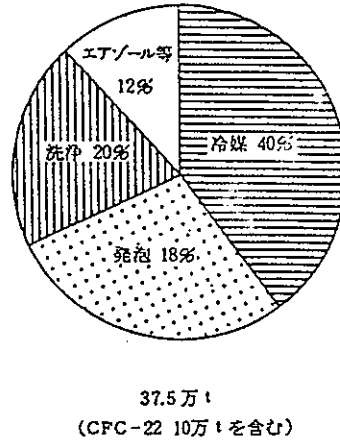
図1.1.6-2 日本のフロンの使用量



注) 1985年調査 (通産省) による  
世界合計は105.8万t

出所) 環境情報科学 (1989.4)

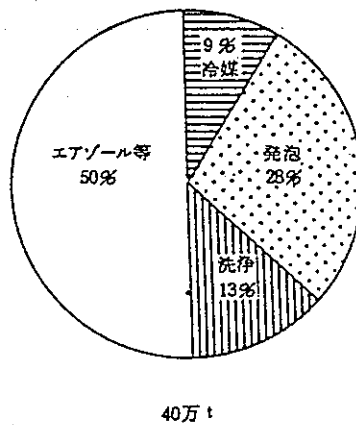
図1.1.6-3 米国のフロンの使用量



注) 1985年調査 (通産省) による  
世界合計は105.8万t

出所) 環境情報科学 (1989.4)

図1.1.6-4 西欧のフロンの使用量



注) 1985年調査 (通産省) による  
世界合計は105.8万t

出所) 環境情報科学 (1989.4)

1-5 フロンの排出による環境への影響

1) オゾン層破壊による影響

① 成層圏オゾン層の効果：

- ・ 有害紫外線を吸収し地上への照射を遮断する。
- ・ 紫外線吸収により成層圏の温度を保持する。

② オゾンの減少は紫外線量の増加につながる（図1.1.6-5参照）。

③ 気候変動への影響

- ・ 成層圏のオゾンが減少により、紫外線として吸収する太陽エネルギーが減少するためオゾンによる加熱効果も減少し、成層圏の気温が低下することになる。実際、地球全オゾン量の減少と共に成層圏上部の気温が、やや減少する傾向にあることが観測されている。

2) 温暖化への影響

フロンは下層大気中で温室効果ガスとして作用する（図1.1.6-6参照）。

フロンの排出量はCO<sub>2</sub>に比べると非常に少ないが、極めて強い温室効果をもつため、温室効果への寄与は全体の約17%程度と推定されている。

図1.1.6-5 成層圏オゾンの減少に伴う地上の有害紫外線増加

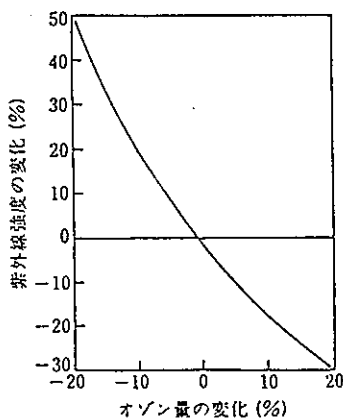
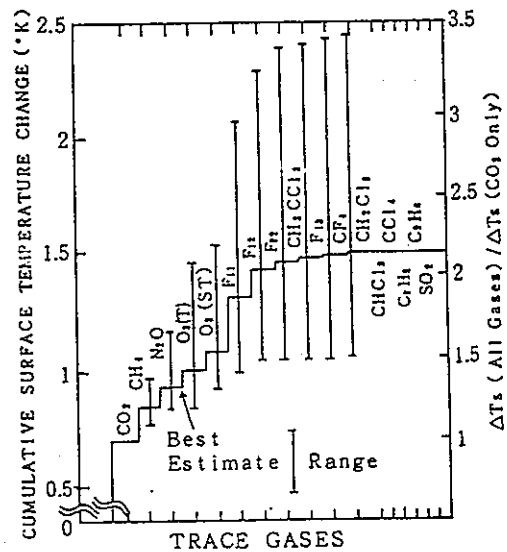


図1.1.6-6 各温室効果気体の増加による地上気温上昇量（1980～2030年）



注) 右側の目盛りはCO<sub>2</sub>のみの増加による昇温を1としたときの割合  
出所) エネルギーと地球環境総覧 第8巻

出所) フロン 地球を蝕む物

### 3) 生物への影響

#### ① 皮膚ガンの増加

- ・ 基底細胞ガン、有棘細胞ガンは、オゾン量1%減少により患者数は3%増加する。

#### ② 白内障等眼の障害の増加

- ・ オゾン量1%の減少につき、白内障の発生は0.6~0.8%増加すると推定されている。また、白内障患者の若年化が進行すると考えられる（図1.1.6-7、表1.1.6-2参照）。

#### ③ 免疫機能の低下

- ・ 動物実験により、ビールス、寄生虫、細菌、かび感染症等が増加することが確認されている。

#### ④ 海棲生物への影響

- ・ 紫外線の増加による、植物プランクトンの減少が観測されている。植物プランクトンは食物連鎖の底辺に位置するので、その減少は水産物の収量減に現われる。また、植物プランクトンの減少は、光合成による二酸化炭素除去プロセスにも影響を与えると考えられている。

#### ⑤ 植物への影響

- ・ 紫外線増加により、植物の収量に影響のあることが知られている。大豆は特に影響を受けやすく、25%のオゾン減少に相当する紫外線の増加で、25%の収量減となることが報告されている（表1.1.6-3参照）。

図1.1.6-7 我が国における皮膚がん発生率の地域差

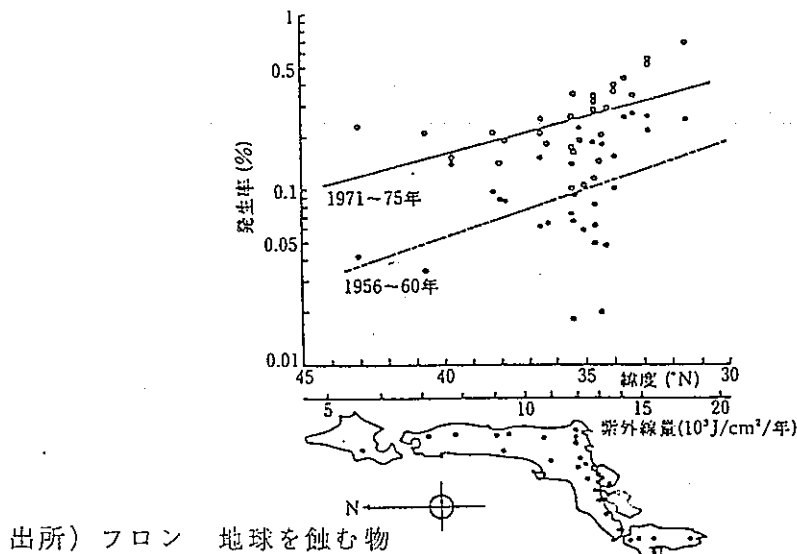


表 1.1.6-2 人の健康および植物に対する紫外線の影響のまとめ

健康への影響	増加症例数
非メラノーマ皮膚腫瘍	
基礎疾患の増加	34,035,000
扁平上皮疾患の増加	25,848,000
死亡の増加	1,067,000
メラノーマ皮膚腫瘍	
疾患の増加	422,000
死亡の増加	94,000
老人性白内障	
疾患の増加	16,869,000
その他の皮膚疾患	(定量化困難)
急性日焼け、皮膚厚化	
慢性の皮膚老化、表皮薄化	
皮膚の感染症 (単純胞疹など)	
その他の眼科疾患	(定量化困難)
網膜損傷	
角膜腫瘍	
急性光因性角膜炎 (雪盲)	
人体の免疫システムの抑圧	(定量化困難)

\* 現存及び2075年までに誕生するアメリカ人を対象とする。CFCの増加率を年2.5%と仮定。

植物の特性	中波長紫外線 (UVB) の被曝が増えた場合
光合成	多くの植物で減少
葉の導通性	多くの植物で無影響
水の利用効率	多くの植物で減少
乾燥物質の生産量及び収率	多くの植物で減少
葉の面積	多くの植物で減少
葉の比重	多くの植物で増加
開花	植物の種類により抑制又は促進
旱魃ストレス	UVBに対する感受性は鈍い。ただし旱魃に対して耐性乏しい。

出典: Environmental Protection Agency, An Assessment of Risks of Stratospheric Modification and Effects of Changes in Stratospheric Ozone and Global Climate, 1986

出所) 地球環境の危機

表1.1.6-3 植物の乾物生産に対するUV-B照射の影響

作物	品種数	生育条件	結論	比較の基準
ダイズ	19	チェンバー	20% 抵抗性	乾燥重量
			60% 中間	
	23	温室	20% 感受性	乾燥重量
			Altona>Bragg	乾燥重量
			8% 抵抗性	乾燥重量
5	野外	33% 影響なし	種子乾燥重量	
		59% 感受性		
インゲンマメ	2	温室・ チェンバー	80% 影響なし	葉面抵抗
			20% 感受性	
	3	温室	B8L 290>Astro	
キャベツ	2	温室・ チェンバー	Saxa, Favorit 抵抗性	光合成・乾燥重量
			Maxidor 感受性	
キュウリ	5	温室	差なし	乾燥重量
			?	
	2	温室	Poinsett 極めて感受性	乾燥重量
コムギ	4	温室	Ashley 僅かに感受性	乾燥重量
			差なし	
	7	チェンバー	差なし	乾燥重量
トウモロコシ	2	野外	差なし	乾燥重量
			差なし	乾燥重量
	4	チェンバー	25% 極めて感受性	乾燥重量
イネ	5	チェンバー	75% 感受性	乾燥重量
			60% 抵抗性	
オオムギ	4	温室	40% 感受性	乾燥重量
			25% 抵抗性	
ハウレンソウ	2	温室	75% 感受性	乾燥重量
			共に感受性	
ワタ	2	温室	差なし	乾燥重量
チカラシバ属	2	チェンバー	差なし	乾燥重量
セイヨウカボチャ	3	チェンバー	差なし	乾燥重量

UV-B照射による乾燥重量の減少が10%以上のものを感受性、10%以下のものを抵抗性とした。抵抗性の品種の中には生長が促進されたものもあった。

出所) 環境研究 1988年No.69

4) その他の影響

- ① 紫外線の照射量の増加により塩化ビニル系のプラスチックの劣化が促進される。
- ② 下層大気まで到達する紫外線量の増加により、スモッグ・対流圏オゾンが増加する。  
対流圏オゾンは光化学スモッグとして環境を悪化させる。

## 2 地球の温暖化

### 2-1 温室効果

地球には温室効果が存在する。温室効果とは、地表面からの赤外線による熱放射を、大気中の特定のガスが吸収し、再度地上へと熱を放射することにより起きる熱の蓄積である。

大気中の二酸化炭素による温室効果が、気候の形成に大きな役割をもっている。地球大気組成の変化による気候変動の可能性のあることは、19世紀から指摘されている。

### 2-2 温室効果ガス

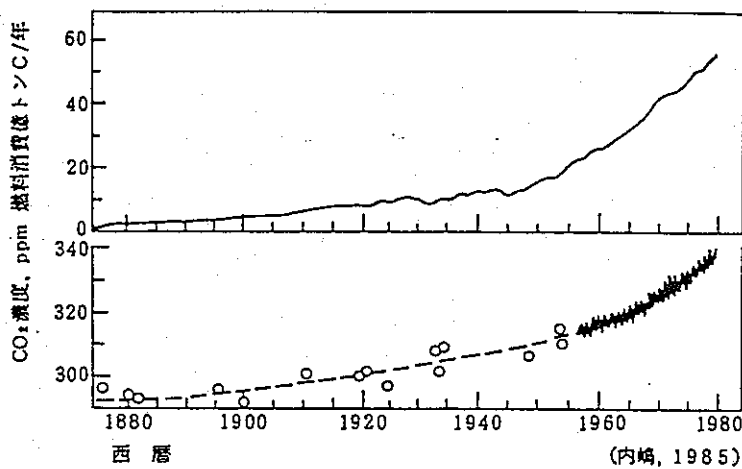
温室効果をもつガスとしては、二酸化炭素以外に、メタン、亜酸化窒素、オゾン、水蒸気、フロン等が知られている。二酸化炭素は温室効果の約半分を占めている。

### 2-3 大気中の二酸化炭素濃度

産業革命以来の化石燃料の使用の増大により、大気中の二酸化炭素濃度は増加している（図1.1.6-8参照）。産業革命以前には、大気中の二酸化炭素濃度は約280ppmであった。しかし、現在、大気中の二酸化炭素濃度は約345ppmまで上昇しているである。

地球の過去の温暖化では、表面温度の上昇に対応して、二酸化炭素濃度が上昇していたことが知られている。しかし、気候変化が二酸化炭素濃度の増加に先だって生じたものか、二酸化炭素の濃度の増加が温暖化に先じたものかという問題については解明されていない。

図1.1.6-8 大気中二酸化炭素濃度の増加と化石燃料消費量の変化



出所) エネルギーと環境総覧 第8巻



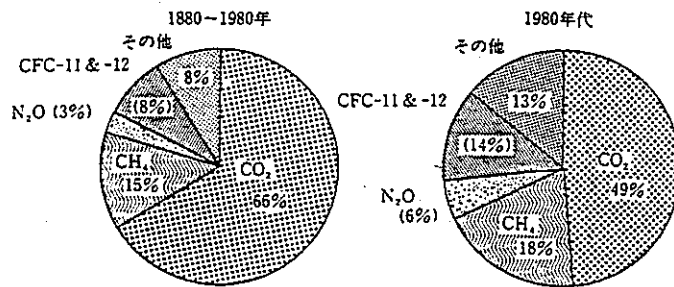
2-4 地球温暖化の原因

温室効果ガスによる地球温暖化のうち、二酸化炭素による効果が約半分を占めている。これに次いで、フロン類、メタンの温室効果が大きい。

地球温暖化の原因となる温室効果ガスの排出寄与率を図1.1.6-9に示す。

1980年代以降、二酸化炭素自体の排出量も増加しているにもかかわらず、CH<sub>4</sub>やフロンによる温室効果への寄与が増大している。

図 1.1.6-9 地球温暖化に及ぼす温室効果ガスの寄与

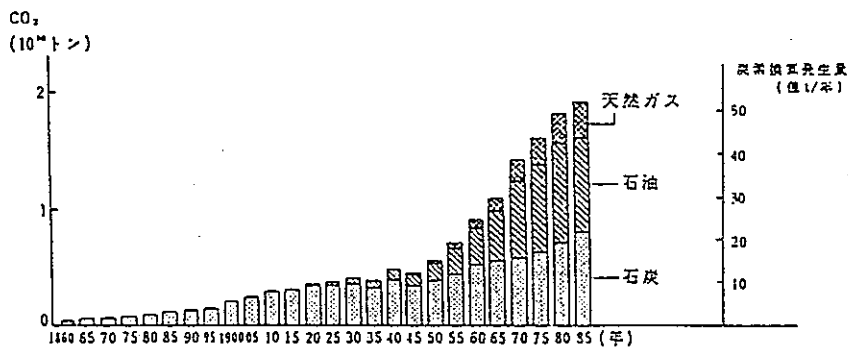


出所) 温室効果ガスと地球温暖化

二酸化炭素排出量の推移を図1.1.6-10に示す。

1990年代以降急激に二酸化炭素の排出量が増大している。特に石油・天然ガスによる排出量が増大している。

図 1.1.6-10 化石燃料からの二酸化炭素排出量



(備考) R. M. Rotty「Distribution and Changes in Industrial Carbon Dioxide Production」(1981)等による。

出所) 燃料協会誌 (1989.3)

二酸化炭素の地域・国別の発生量を表1.1.6-4に示す。

我が国は、アメリカやソ連、中国に次ぐ第3位の排出国であり、第1位のアメリカの約1/5、世界の約5%を排出している。

表1.1.6-4 地域・国別CO<sub>2</sub>発生量

[単位：100万ton-CO<sub>2</sub>；(％)]

地域/国	石炭	液体燃料	ガス	総量	構成比
世界合計	8,134(45)	6,917(38)	3,024(17)	18,075	(100.0)
OECD諸国	3,379	4,390	1,513	9,282	(51.4)
日本	238	608	108	954	(5.3)
アメリカ合衆国	1,798	1,978	891	4,666	(25.8)
カナダ	126	197	104	427	(2.4)
西ドイツ	302	318	87	707	(3.9)
イギリス	226	221	100	547	(3.0)
フランス	92	238	53	383	(2.1)
イタリア	60	232	58	351	(1.9)
発展途上国	829	1,143	306	2,278	(12.6)
アフリカ	270	185	37	492	(2.7)
アジア	486	667	131	1,284	(7.1)
ラテンアメリカ	73	291	138	502	(2.8)
計画経済圏	3,926	1,383	1,206	6,515	(36.0)
中国	1,504	199	25	1,728	(9.6)
ソビエト連邦	1,274	901	994	3,169	(17.5)
東欧諸国	1,010	253	174	1,436	(7.9)

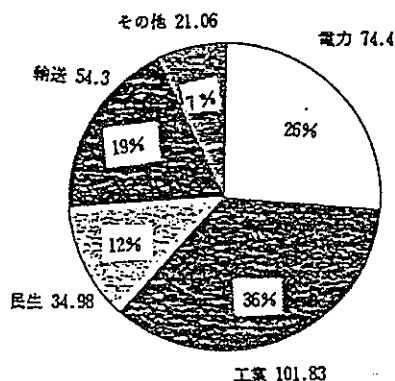
- (注) 1. 国連：1985 Energy statistics yearbook "(1985)；OECD；"energy balances of OECD Countries 1970-1985"；and 日本エネルギー経済研究所："エネルギー・バランス表"(1987)
2. CO<sub>2</sub>の排出係数は、石炭：23.9(100万ton-C/EJ)；液体燃料：19.7(100万ton-C/EJ)；ガス：13.8(100万ton-C/EJ)

出所) エネルギー経済 (1989.5)

産業別二酸化炭素発生量を図1.1.6-11に示す。

日本では、電力および産業でのエネルギー消費で50%以上の二酸化炭素が発生している。また、輸送用燃料消費でも20%程度の寄与をしている。

図 1.1.6-11 産業別CO<sub>2</sub>発生量



出所) 京都大学環境衛生工学研究会

第12回シンポジウム講演論文集

### 1.2.5 地球温暖化の影響

#### 1) 気温上昇

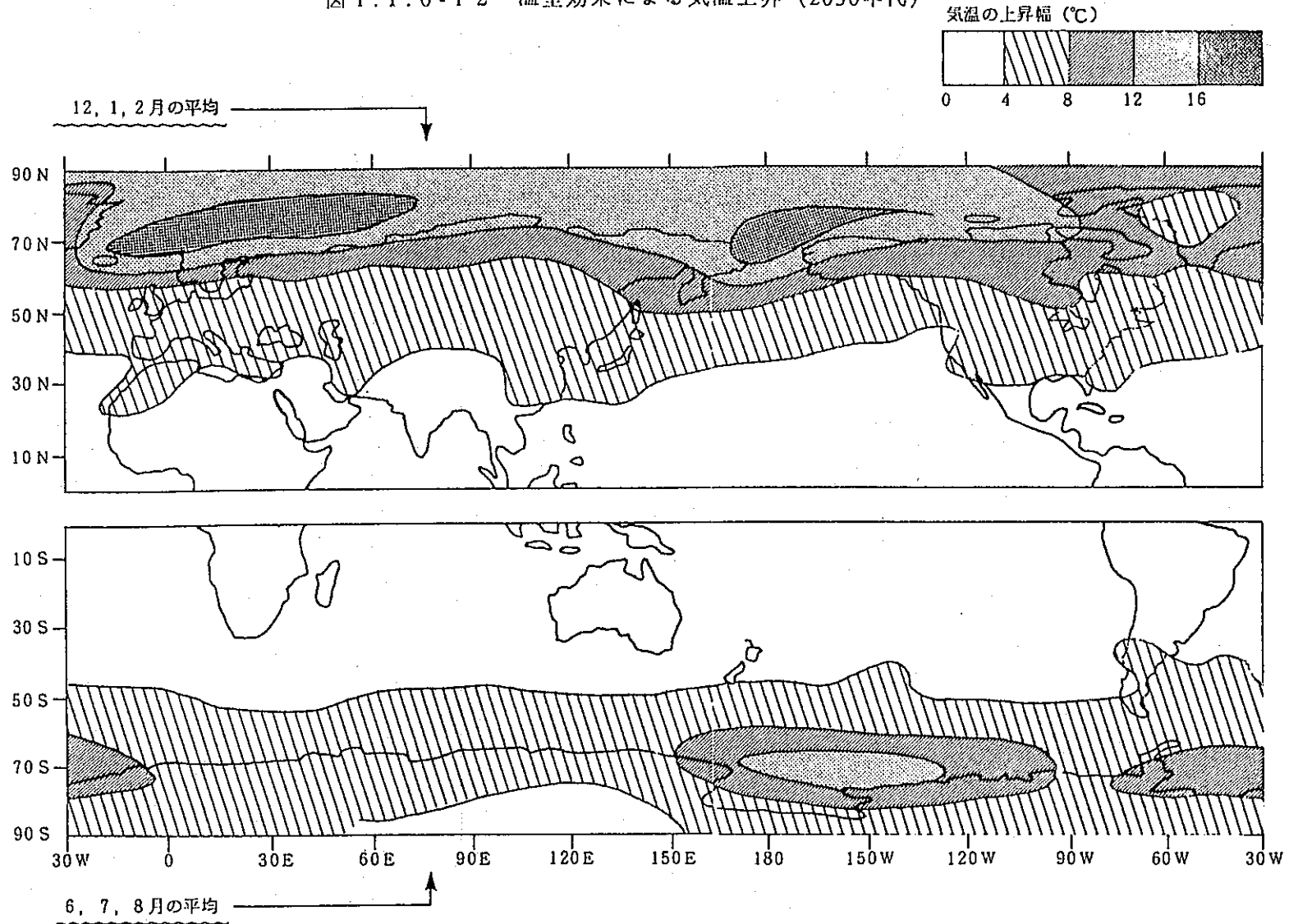
地球温暖化の影響は、一次的には地表面気温の上昇として現われる（表1.1.6-5、図1.1.6-12参照）。これら地表面気温の上昇を予測するモデルとしては、いくつか研究されているが、そのどれも、約3℃程度かそれ以上の温度上昇を予測している。

表 1.1.6-5 GCMモデルを用いた二酸化炭素倍増による全球平均の気候変化の予測

モデル	地表面気温上昇(℃)	降水量増加率(%)
GFDL	4.0	8.7
GISS	4.2	11.0
NCAR	3.5	7.1
OSU	2.8	7.8
UKMO	5.2	15.8

出所) 地球温暖化による社会影響

図 1.1.6-1 2 温室効果による気温上昇 (2030年代)



(備考) 1. 米国海洋大気局 (NOAA) の真鍋博士による。  
2. 二酸化炭素やフロンガス等について、今後何等の対策もとらない場合。

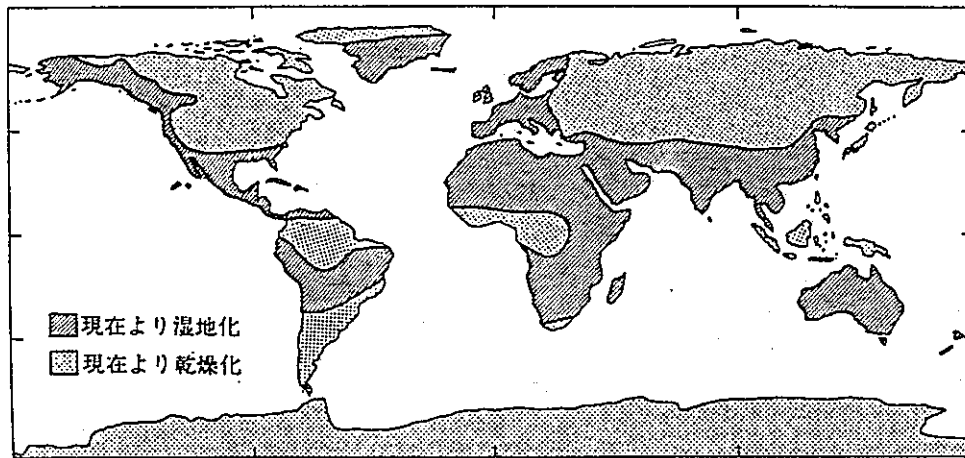
出所) エネルギーと環境総覧 第8巻

## 2) 土壌水分・降雨量の変化

気温変化により土壌水分の変化、降雨量の変化が現われる（図1.1.6-13、図1.1.6-14参照）。

温暖化により、赤道付近の熱帯林地域、温帯の北部より高緯度で乾燥が進むと考えられる。

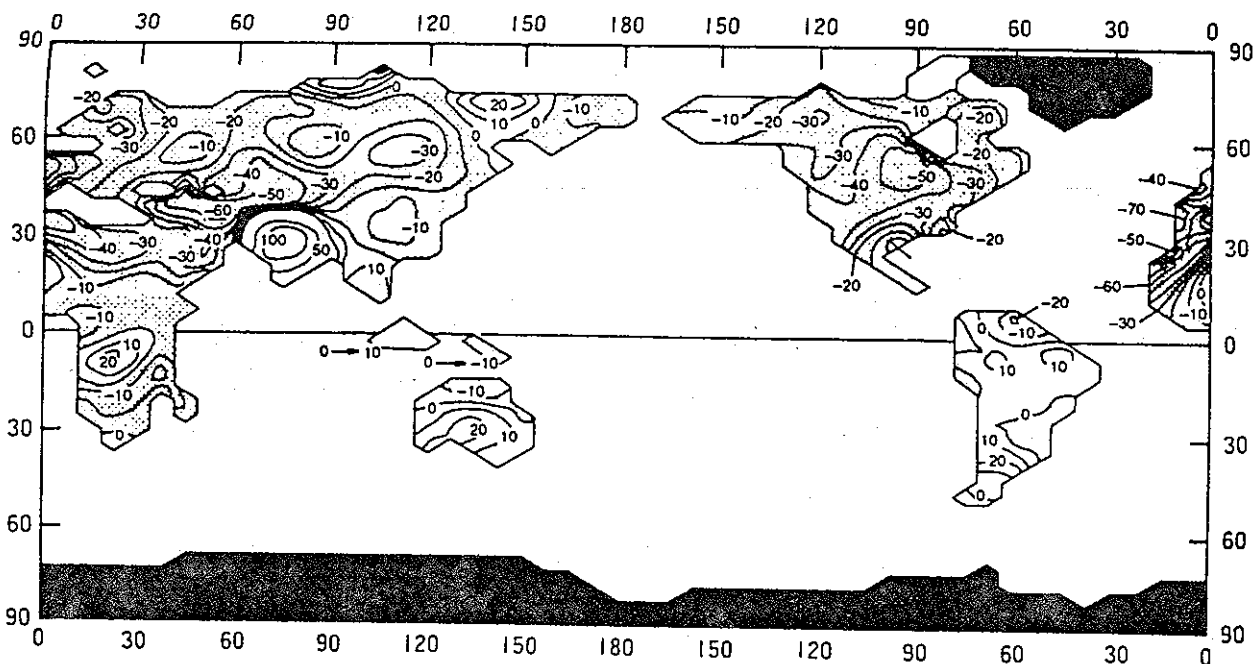
図1.1.6-13 人為的な気候変化によって引き起こされる降雨の変化



(出所) Kellogg, 1987.

出所) エネルギー経済 (1989.4)

図1.1.6-14 二酸化炭素濃度倍増時の土壌水分



註：二酸化炭素の変化に伴う土壌中の水分の変化を、パーセンテージで示した。現在の二酸化炭素濃度の場合と比較し、二酸化炭素が倍増した場合について、コンピュータ・モデルで得られた結果である。二酸化炭素濃度の一様な変化に対して、この生態学的に重要な変数の一様でない反応に注意しよう。

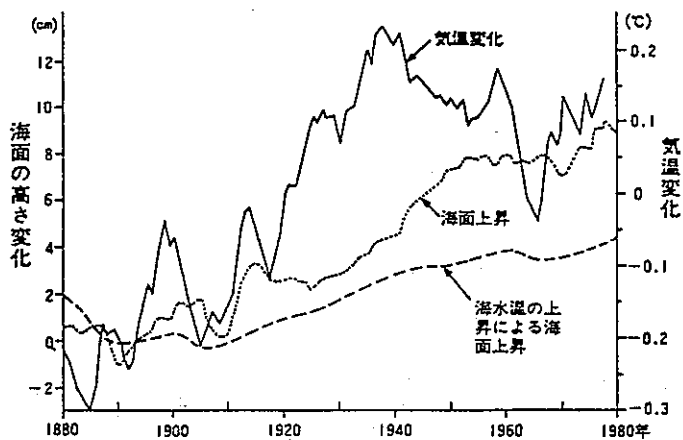
出典：S. Manabe and R. Wetherald, 1986. Reduction in Summer Soil Wetness Induced by an Increase in Atmospheric Carbon Dioxide, *Science* 232: 626-628.

出所) 地球温暖化の時代

### 3) 海面上昇

過去の気温変化と海面変動の関係から、海水温の上昇と、海面の高さの上昇には相関があることが示されており（図1.1.6-15）、地球温暖化により海面上昇がおこると考えられている。

図 1.1.6-15 気温変化と海面上昇の関係



19世紀末から最近までの海面の高さの変化(点線)。破線と実線はそれぞれ、海水の温度上昇による海面上昇への寄与と全地球平均気温の変化(ロビン、1987年による)。

出所) 気象異常

海面上昇による影響は次の項目が考えられる。

- ① 水没
- ② 氾濫
- ③ 塩水の侵入
- ④ 沿岸の湿地帯の消失

海面上昇による被害に対する、道路、家屋の対策は、海岸線へ砂を補給することによる養浜、堤防による防護、かさ上げによる。都市部では堤防により、都市間の道路はかさ上げにより対策がとられる。結果として100cmの海面上昇に対して、米国では730~1,100億ドルの費用が必要と見積られている。

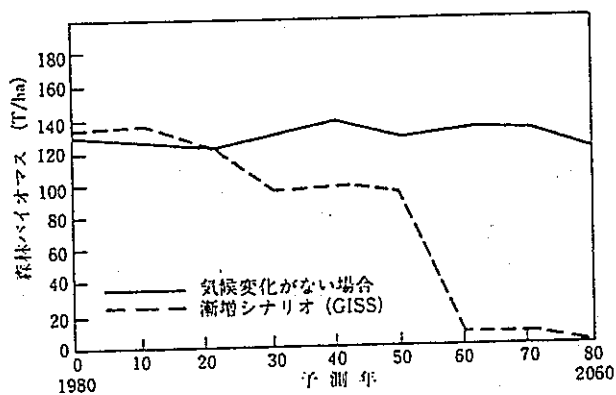
#### 4) 植生への影響

森林の植生は樹種の分布域の移動により影響を受ける。

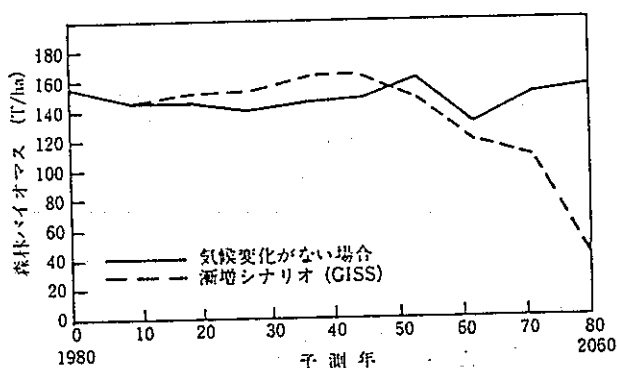
アメリカでの森林バイオマスの変化についての予測を図1.1.6-16に示す。

これらはGCMによる気温変化予測地値に基づいている。このモデルでの予測では、森林の分布域が北上し、南部・西部では森林が衰退することを示している。その他植生の変化により、害虫の発生、山火事のおこる可能性が高くなる。

図1.1.6-16 アメリカでの森林バイオマスの変化予測



(a) ミシシッピの森林



(b) サウスカロライナの森林

GISSトランジェントシナリオのもとで、ミシシッピ(a)とサウスカロライナ(b)での成熟した森林のバイオマスの変化予測。乾燥状態への変化と草原の東部への進出。おそらく、西部の森林の変化は同様の機構により生じる。ひでりによる森林の衰退は、CO<sub>2</sub>による水利用効率の増加が実現すれば一部が補償される。

出所) 地球温暖化による社会影響

## 5) その他の影響

温度上昇によって、蒸発量の増加による降水の増加、夏期の水不足が予測され、長期的には地下水への水の補給量が減ると考えられる。また、乾燥地域で高水量変化が顕著に現われ、洪水や干ばつの頻度が増加する地域が現われると考えられている。

気候変化による健康影響も指摘されている。心血管系、脳血管系、呼吸器系の疾患による夏場の死亡が気温上昇により増加する一方で、冬場の死亡は減少すると考えられる。また、動物媒介性の感染症（マラリア等）の恐れのある地域も広域化すると考えられる。出生率にも影響を与え、夏期にマイナスの効果があらわれる。

また、下層大気中のオゾン濃度は増加すると考えられている。このため、光化学スモッグが増加し、健康への悪影響が増加すると考えられる。



### 3 酸性雨

#### 3-1 酸性雨の定義

酸性雨は、石炭、石油等の化石燃料の燃焼に伴って放出された硫黄酸化物・窒素酸化物が大気中で化学変化を起こし、硫酸、硝酸となり、強い酸性を示す物質となって降下する現象である。

酸性雨は湿性の降下物だけでなく、乾性の降下物も含んでいる。大気中の二酸化炭素が雨水中で大気と平衡状態を保っている場合のpHは5.6であることから、一般にpH5.6以下の雨水が酸性雨とされている。米国の全国酸性降下物調査計画の報告書ではpH5.0以下を酸性雨としている。

#### 3-2 酸性雨被害の現状

北米、欧州で酸性雨の被害が顕著である。その理由としては、石炭の使用と、発生源対策を行っていないことが挙げられる。

また、大気中に排出された硫黄酸化物、窒素酸化物が長距離輸送され、排出地域から離れた地域に酸性雨を降下させる現象は、国境を接している国家間の外交問題にまで発展している。

酸性雨による被害としては、次の項目が挙げられる。

##### ① 湖沼の酸性化

- ・ 湖沼の酸性化は、湖沼の生物種の減少、死滅を引き起こす。

##### ② 森林被害

- ・ 酸性雨は森林への降水により直接的に被害をもたらす。また森林に降下した酸性雨は、土壌から栄養塩の流出・アルミニウムの溶出をおこし、植物の発育阻害、枯死を引き起こす。

##### ③ 金属、大理石等の人工構築物の腐食

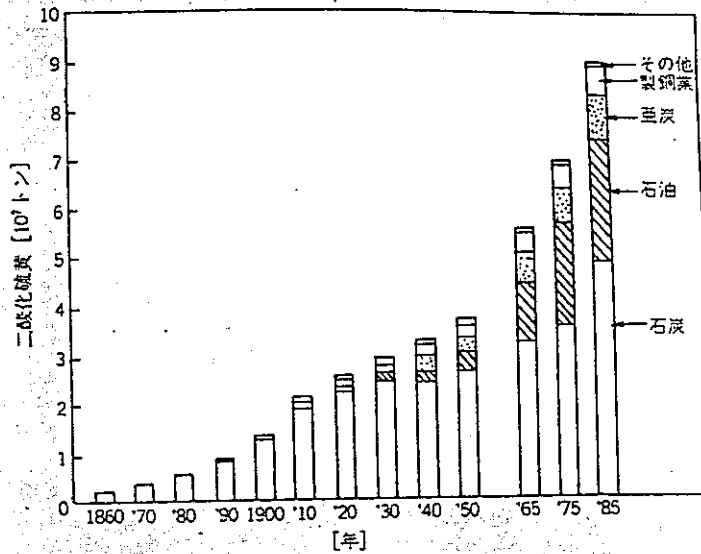
- ・ 歴史的な遺跡、建物、石像などに影響を与えている。

### 3-3 酸性雨の原因物質の排出量

酸性雨の主な要因である二酸化硫黄の排出量原因別内訳を図1.1.6-17に示す。

石炭からの発生量が最も多く約半分を占めており、次いで石炭からの発生量が多い。石油と石炭から発生する二酸化硫黄が全体の大部分を占める。

図 1.1.6-17 世界の二酸化硫黄排出量



(備考) (1) D.Möller: 「Estimation of Grobal Man-made Sulpher Emission」(1984) による。

(2) 1985年の値は予測値。

出所) 地球環境問題と保全対策

#### 4 熱帯林の減少

##### 4-1 熱帯林減少の現状

FAO、UNEPの調査により、熱帯林面積は1980年時点で19億3500万haと推計されている。また、1981年から1985年の間に熱帯林は、毎年1130万haが減少したと概算されている(表1.1.6-16、表1.1.6-17参照)。即ち、1年間に0.5~6%が減少している。減少率が特に大きいのは南米地域であり、減少率は年0.63%程度で量的にも減少量の約半分を占める。減少の原因は、移動過放牧、耕作、入植等である。

表 1.1.6- 6 地域における森林破壊の予測 (1981~1985)

地域	熱帯林の面積(1984年末)(千ha)			①森林消失面積				移動耕作により減少した割合(%)	その他の主要因	②植林面積 千ha/年	①:②
	閉鎖林	開放林	計	年平均減少量(1981-85)千ha/年			%年				
熱帯アメリカ	678,655	216,977	895,652	4,339	1,272	5,611	0.63	35	過放牧、入植計画	535	11:1
熱帯アフリカ	216,634	486,445	703,079	1,331	2,345	3,676	0.52	70	永久農業	126	29:1
熱帯アジア	305,510	30,948	336,458	1,826	190	2,016	0.60	49	自然発生的移住、入植	438	5:1
計	1,200,799	734,390	1,935,189	7,496	3,807	11,303	0.58	49		1,099	10:1

(備考) 1. 「熱帯林資源評価プロジェクト報告書」(FAO/UNEP,1982年)  
2. 表中の森林の減少は森林から他の用途への完全な転換のみを指し、薪炭材の採取、材木の切出し等による森林の劣化は含まれていない。

出所) 地球環境キーワード辞典

表 1.1.6- 7 熱帯雨林の面積および減少量の推計

地 域	熱帯林の面積 ( 1984 年末 )			年平均減少量 ( 1981 - 85 )		
	閉鎖林	開放林	計	閉鎖林	開放林	計
熱帯アメリカ	678,655	216,977	895,652	4,339	1,272	5,611
熱帯アフリカ	216,634	486,445	703,079	1,331	2,345	3,676
熱帯ア ジ ア	305,510	30,948	336,458	1,826	190	2,016
(計)	1,200,799	734,390	1,935,189	7,496	3,807	11,303

(備考) 1. 「熱帯林資源評価プロジェクト報告書」(FAO/UNEP, 1981年)  
2. 表中の森林の減少は森林から他の用途への完全な転換のみを指し、薪炭材の採取、材木の切出し等による森林の劣化は含まれていない。

出所) 地球化時代の環境ビジョン

## 4-2 熱帯林減少の要因

次の項目が熱帯林減少の要因とされている。

- ① 商業材の不適切な伐採
- ② 過度な焼畑耕作
- ③ 農地への転用
- ④ 過放牧
- ⑤ 薪炭材の過剰採取
- ⑥ 森林火災

直接原因としては焼畑耕作が高い割合を占めている。商業目的の用材の伐採に伴う林道の開発には、森林への焼畑進出を促進する面もある。

森林破壊の背景としては次の項目があげられる。

- ① 開発途上国の貧困
- ② 急激な人口増加

## 4-3 熱帯林の減少の影響

影響の主なものとしては、以下が挙げられている。

- ① 燃料の不足
- ② 洪水の発生
- ③ 遺伝子資源の喪失
- ④ 気候緩和機能の低下
- ⑤ 二酸化炭素の放出と固定作用の低下

熱帯林における養分の90%は植物中に蓄えられている。このため、熱帯林を破壊すると、土壌は有機物を保持していないため、熱帯林の回復は非常に困難となる。

## 5 砂漠化

### 5-1 砂漠化の現状

砂漠化の現状は次の通りである。

- ① 砂漠化または砂漠のような荒廃した土地の面積は毎年600万haの割合で増加し続けている。
- ② ネットの経済的生産性がゼロないしはマイナスとなった土地の面積は毎年2,100万haの割合で増加している。
- ③ 放牧地の84%、降雨依存農地の59%、灌漑農地の31%が既に中程度の砂漠化により影響を受けている。
- ④ 砂漠化した土地の合計面積34.75億haは、乾燥地域における全生産地域面積の79%を占めている。
- ⑤ 深刻な砂漠化による被災農村人口は1983年で1億3,500万人である。(国連(1984)の調査)

### 5-2 砂漠化の要因

砂漠化の要因には大きく次の2つが挙げられる。

- ① 気候的要因
  - ・ 長期的あるいは短期的な気候の乾燥化
- ② 人為的要因
  - ・ 草地の再生能力を越えた家畜の過放牧
  - ・ 休耕期間の短縮等の過耕作による地力の低下
  - ・ 薪炭材の過剰な採取
  - ・ 不適切な灌漑による塩害
  - ・ 裸地状態となった農耕地の土壌の侵食による肥沃な表土の流出

一般に、人為的要因に気候的要因が加わることにより著しい砂漠化が進行する。また、現在の砂漠化は人為的な要因により引き起こされている部分が大きい。

さらに、人為的要因の背景には次の要因がある。

- ① 砂漠化地域での地域住民の貧困
- ② 砂漠化地域での人口の増加

### 5-3 砂漠化の影響

現在砂漠化の進行している地域での影響は次の項目が挙げられる。

- ・ 食料生産へ影響
- ・ 薪炭材の不足

FAOによれば、1980年時点で約2,930万人がこのような影響を受けている。

図 1.1.6-18 異常な食料不足に見舞われたアフリカの21か国



(出典：F A O, 1985年)

出所) 地球化時代の環境ビジョン

## 6 野生生物種の減少

### 6-1 野生生物種の減少の現状

米国政府の調査では、300万～1,000万種と推定された種のうち約15%程度の野生生物が、2000年までに熱帯林の減少により絶滅すると予測されている（表1.1.6-8参照）。

また、国際自然保護連合（IUCN）の報告によれば、野生生物の種の減少は、熱帯林、珊瑚礁、湿地、島嶼部等の環境破壊による影響が大きい。ちなみに、熱帯雨林は、地上の7%の面積を占めるに過ぎないが、地球上の生物種の約40%以上が存在すると推定されている。

表1.1.6-8 西暦2000年までの動植物種の絶滅予測

(単位: 1,000種, %)

地 域	種の総数	種の消滅率	消 滅 量
熱 帯 林			
ラテンアメリカ	300 ~ 1,000	33	100 ~ 333
アフリカ	150 ~ 500	13	20 ~ 65
南アジア, 東南アジア	300 ~ 1,000	43	129 ~ 430
小 計	750 ~ 2,500	33	249 ~ 828 ( 57%)
他のせい息環境			
海洋, 河川, 非熱帯林, 島等	2,250 ~ 7,500	8	188 ~ 625 ( 43%)
合 計	3,000 ~ 10,000	15	437 ~ 1,453 ( 100%)

(備考) 1. 米国政府特別調査報告「西暦2000年の地球」(昭和55年)による。  
2. 森林減少率最低位のケース

出所) 地球化時代の環境ビジョン

絶滅の原因としては、次のものが挙げられる(表1.1.6-9)。

- ① 成育環境の悪化
- ② 乱獲
- ③ 侵入種の影響
- ④ 食物不足
- ⑤ 害獣としての駆除
- ⑥ 偶発的な捕獲等

表 1.1.6-9 「絶滅の危機」の要因とその内訳 (IUCN)

綱	要因	生息環境の破壊悪化		乱 獲		侵入種の影響		食物不足		作物、資源の加害者としての被害		偶発的な捕 獲	
		種類	%	種類	%	種類	%	種類	%	種類	%	種類	%
魚	類	127		19		64		2		—		1	
両 生	類	27		10		5		1		—		—	
爬 虫	類	40		47		13		1		2		4	
鳥	類	102		53		49		1		2		—	
哺 乳	類	153		121		14		20		17		7	
合 計		449	67	250	37	127	19	25	4	21	3	12	2

備考：1. IUCN調べ

2. 合計欄の%は  $\frac{\text{当該要因により「絶滅の危機」にある種数}}{\text{「絶滅の危機」にある全種数}} \times 100$ であり、1つの種について複数の要因があるため合計は100%にならない。

出所) 地球環境キーワード事典

## 6.2 野生生物の種の減少の影響

生物資源の価値を評価することにより、生物資源の減少の影響を評価できると考えられる。生物資源の価値は直接的価値と間接的価値に分類されている (ECONOMICS AND BIOLOGICAL DIVERSITY Jeffrey A. McNeely 1988)。

### 直接的価値

生物資源から消費者が直接受け取る喜び、満足感と関係して評価され、一般に価格を付けることで評価される。

### 間接的利用価値

生態系の機能関するもので社会全体に対する生物学的多様性の価値を反映するものである。



## 7 海洋汚染

### 7.1 海洋汚染の現状

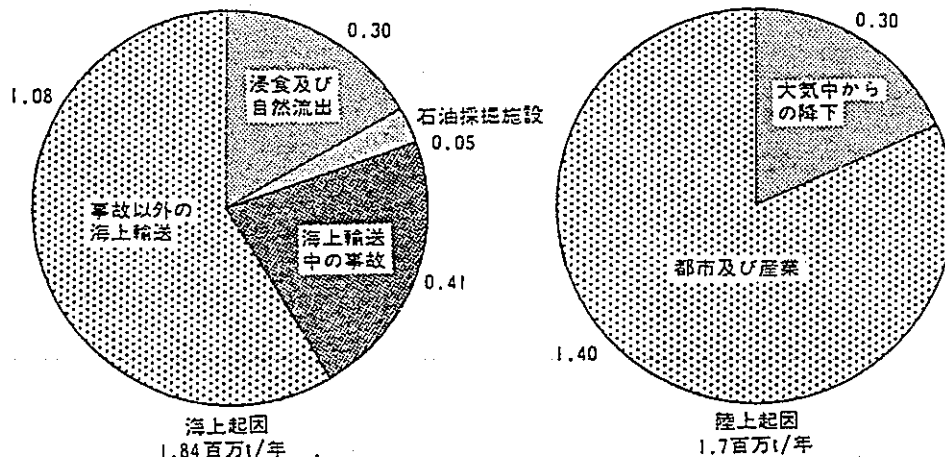
局所的に工業化、人口集中が進んだ、閉鎖的な水域における汚染、例えば赤潮、水銀汚染などが従来知られていたが、新たに広域的な海洋の汚染の世界的な拡大進行が問題となっている。

#### 1) 油汚染

座礁事故・海底油田の開発に伴う油の流出、陸域からの流入により油汚染が進行している（図1.1.6-19）。

油汚染は主にタンカーの航路上で発見されている。油排出の原因としては、海上輸送に関するものが陸上起源、海上起源全体の40%程度を占める。また、事故以外の海上輸送による原因としては、タンカーのバランス用に使用した海水の排出による汚染が大部分と考えられる。

図 1.1.6-19 油による海洋汚染の原因（1980年代前半）



出所) OECD環境の状況報告書'86 出典: US National Academy of Science

## 2) 富栄養化・赤潮

1980年代以降、赤潮の発生の大規模化、赤潮発生海域の世界的な拡大が認められる。陸域に添った世界の多くの部分での赤潮が報告されている。北海においてはアザラシの大量死の発生が発生し、その他魚類の大量死等も報告されている。

## 3) 有機塩素化合物

DDT、PCB、ディルドリン等の難分解性の有機塩素化合物が微量ながら検出されている。先進国では1970年代早期からその危険性が認識され、使用禁止を含む規制措置が取られたが、発展途上国では一部の農薬は現在でもマラリア対策等に用いられており、低緯度地域では海洋中の濃度が高いとの報告もされている。

## 4) その他

プラスチック類については、密度は低いが広く海洋で存在している。プラスチック類は美観を損なうのみならず、スクルー、舵経の絡まり、エンジン冷却水系での閉塞を起こす等、船舶の推進機関関係に影響を及ぼしたり、海獣、海鳥の摂食による障害を引き起こす等、の被害を与えている。

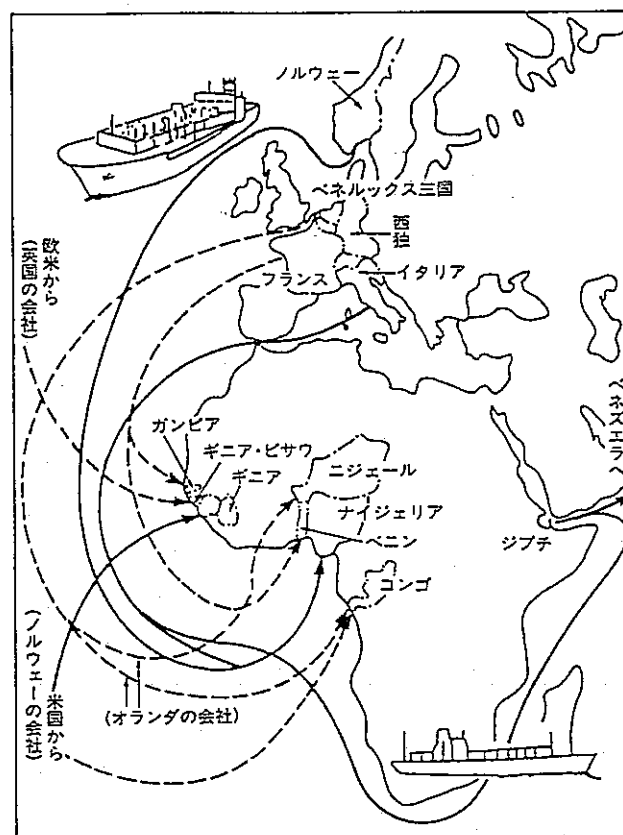
## 8 有害廃棄物問題（越境移動問題を含む）

### 8.1 有害廃棄物の越境移動問題

#### 1) 現状

先進諸国で発生した有害廃棄物が国境を越えて発展途上国へ輸出され、処分地に汚染被害をもたらす事例が問題となっている（図1.1.6-20参照）。

図1.1.6-20 最近のヨーロッパからアフリカ諸国への有害廃棄物の移動例



(実線は実際に輸送、点線は計画)

出典：朝日新聞 (S 63.6.16)

出所) 地球環境キーワード事典

#### 2) 原因

有害廃棄物の越境移動が生じる原因としては以下が挙げられる。

- ① 有害物質の発生国においてその処理費用が値上がりする。
- ② 発生国において特定の廃棄物の処分容量が減少する。
- ③ 発生国において陸上処分して、将来環境汚染が生じた場合に多額の被害保障が必要な可能性がある。

- ④ 発生国において有機溶剤など特定の廃棄物の処理に関する規制が強化される
- ⑤ 発生国において排出事業者による廃棄物の発生場所での処理に関する規制が強化される。
- ⑥ 発生国において経済成長により廃棄物の発生量が増大する。
- ⑦ 受け入れ国において複数の国が利用できる処理施設が存在する。
- ⑧ 発生国においては最終処分されてしまう廃棄物から、有価物を回収するための国際市場が存在する。
- ⑨ 発生国よりも他国の処理施設の方が近くにある。

## 9 開発途上国の公害問題

### 9-1 現状

ASEAN、東アジア、中南米などのNIES諸国や比較的経済の発展した開発途上国での公害が問題となっている。

現象としては次の項目が顕著である。

- ① 硫黄酸化物、煤じん、一酸化炭素等による大気汚染
- ② 産業排水中の有毒物質（重金属等）による水質汚濁
- ③ 生活排水による水質汚濁
- ④ 不適切な廃棄物処理処分による地下水汚染、河川の汚濁
- ⑤ 騒音・振動
- ⑥ 強残留性の農薬による土壌、河川、食物の汚染
- ⑦ 都市内での衛生状態の悪化

### 9-2 要因

開発途上国の公害問題の要因としては以下が挙げられる。

#### ① 工業化に代表される経済活動の拡大

工業化に伴い汚染物質の排出量は増大するが、開発途上国では、一般に公害防止対策が不十分なため、汚染物質は未処理のまま環境中へ放出され、先進国が経験したような周辺的环境汚染が発生する。

#### ② 都市への人口の集中

都市人口の急激な増加に対し、交通、下水道、廃棄物処理体制等、都市のインフラストラクチャーの整備は遅れている。

#### ③ 人口の増大

開発途上国での人口の増加率は年2.5%であり、世界平均の約3倍である。

## (2) 地球環境問題への対応方策

### 1 オゾン層の破壊

#### 1-1 国際的な取り決め

1990年6月のモントリオール議定書締約国会議では、2000年までのフロン全廃が決定しており1992年の規制の見直し会合では規制の前倒しとなる公算が強く、国内での規制にも影響を及ぼすと見られる。モントリオール議定書の内容(表1.1.6-10、表1.1.6-11)を以下にまとめる。

表 1.1.6-10 モントリオール議定書

- 
- ① ウィーン条約に基づき、オゾン層保護のための具体的な取り決めとして1987年に採択された。
  - ② 議定書では5種類のフロンと3種類のハロンを規制対象として、その生産量と消費量について規制を取り決めた。
  - ③ 1990年に議定書の内容が改正され、規制対象物質の項目が増え、規制が強化された。
  - ④ 1992年に議定書の再見直しが行われ、規制がさらに強化される見通しである。
  - ⑤ 途上国に対する資金援助のための基金を創設することが決められている
  - ⑥ 議定書への加盟国は56カ国とECである。
  - ⑦ インドと中国が加盟しておらず、未加入途上国の議定書への加盟を促すことは重要な課題となっている。
  - ⑧ 議定書で規定した義務を果たす方法は各国に委ねられている。
  - ⑨ 日本は88年9月にウィーン条約およびモントリオール議定書の締結を行った。
- 

出所) 野村総合研究所

表 1.1.6-11 モントリオール議定書（1990年6月）の詳細

---

① 現行規制の強化案

i) 特定フロン

93年1月から86年水準の20%削減

97年1月から86年水準の85%削減

2000年1月から全廃

ii) 規制対象ハロン

95年1月から86年水準の50%削減

2000年1月から必要不可欠な用途を除き全廃

② 新規規制物質

i) 四塩化炭素

95年1月から89年水準の85%削減

2000年1月から全廃

ii) メチルクロロホルム

93年1月から89年水準に凍結

95年1月から89年水準の30%削減

2000年1月から89年水準の70%削減

2005年から全廃

---

出所) 野村総合研究所作成

## 1-2 日本の取り組み

日本はモントリオール議定書に加盟しており、モントリオール議定書にそった日本国内での法律としてオゾン層保護法が制定されており、1989年7月1日より規制が開始している。オゾン層保護法の概要を以下に示す（表1.1.6-12）。

表1.1.6-12 オゾン層保護法の概略

特定フロン等の製造等の規制	フロン11、フロン12、フロン113、フロン114、フロン115、ハロン1211、ハロン1301、ハロン2402の生産量および消費量を、モントリオール議定書の削減スケジュールに即して段階的に削減する。特定フロン製造等の規制を1989.7から実施する。 <ul style="list-style-type: none"><li>・ 1989年7月以降は凍結。</li><li>・ 1993年7月以降は20%の削減。</li><li>・ 1998年7月以降は50%の削減。</li></ul>
特定フロンの排出抑制・使用合理化	指針の告示にともない、排出抑制、回収設備の導入を図ろうとしている事業者に対し法人税、所得税の特別償却、固定資産税の課税標準の特例といった税制上の措置や、日本開発銀行、公害防止事業団等に寄る定理融資等の金融上の措置を実施している。

出所) 野村総合研究所作成

今後のオゾン層保護に関する、現在の国内機関のスタンスは以下の通り。

- ① 通産省は業界に削減強化として、2000年以前の特定フロンの全廃、新規規制物質の使用合理化を要請している。
- ② 環境庁は1992年の規制の再見直しを踏まえ、欧州の提案する1997年の全廃が可能かどうかを検討している。現状の対応ではオゾン層保護には不十分との科学的見解が一般的であるため、規制の前倒しがされると考えられる。



### 1-3 各国の取り組み

各国のオゾン層保護に関する取り組みは次の通りである（表1.1.6-13）。

表1.1.6-13 各国のオゾン層保護に関する取り組み

アメリカ	1976	エアロゾル製品の噴射材としてのフロンガスの使用を段階的に禁止するとの措置を発表1978年から実施
	1978	Clean Air Act の中に成層圏オゾン層の保護に関する章を追加
	1987	EPAがプロトコールに基づくフロン規制の提案規則公表
	1990	Clean Air Actの改正
スウェーデン	1979	完全にハロゲン化されたCFCを使用したエアロゾル製品（医薬品を除く）の製造または輸入禁止実施
オランダ	1979	CFC-11およびCFC-12を含むエアロゾル製品に「大気上層部のオゾンを減少させることによって公衆の健康を害する恐れのある製品」という警告表示を実施
ノルウェー	1981	CFC を噴射材の噴射材に使用したエアロゾル製品（医薬品は除く）の製造または輸入を禁止する規則を告示
カナダ	1980	完全にハロゲン化されたCFCを噴射材とするヘアスプレー、人体消臭剤、制汗剤の製造禁止を実施
EC		EC管理理事会が1980年にフロン-11およびフロン-12の生産能力は今後増強しないこと、さらに1981年度末までにエアロゾル用フロンガスの使用を1976年の水準から少なくとも30%削減することを決定し、域内の各国に対して勧告した。

出所) 野村総合研究所

## 2 地球温暖化

### 2-1 国際的な対応

「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」はUNEP・WMOの共催により1988年11月に設立された。各国が政府の資格で参加し、地球の温暖化問題について議論を行う場である。

1990年秋にその報告がまとめられ、政治・政策レベルでの地球温暖化への対策の指針が示された。そこで示された対応策を以下に示す（表1.1.6-14）。

表 1.1.6-14 IPCC報告書（1990年9月）で示された対応策

温室効果ガス削減の必要量：

- ・ 温室効果ガスを現在の濃度に安定化するのに必要な排出削減量

二酸化炭素	>60%
メタン	15-20%
亜酸化窒素	70-80%

対応戦略

- ① 対応戦略は10年間に0.3度の温度上昇を10年間に0.1度の温度上昇に抑制する排出管理政策を示している。
- ② 単一で速効性のある技術的対策はない。
- ② 化石燃料の使用過程における熱効率の向上が最優先の対策である。
- ③ 各国政府が二酸化炭素その他の温室効果ガスの排出抑制の目標を設定する。
- ④ 市場経済あるいは規制の方策を用いて排出量を削減する方策を策定すべきである。
- ⑤ 地球的気候変化の影響を提言する方策の検討を早急に始めるべきである。
- ⑥ 開発途上国をIPCCに参加させるための措置が必要である。

出所) 野村総合研究所

## 2-2 我が国での取り組み

日本では、1990年6月に地球環境保全に関する関係閣僚会議が開かれ、日本としての地球温暖化防止行動の基本的な方向性が示された（表1.1.6-15）。関係閣僚会議を受けて、より具体的な二酸化炭素削減目標を含んだ計画として、地球温暖化防止行動計画が1990年10月に策定された（表1.1.6-16）。この中で、日本は2000年までに一人当たりの二酸化炭素排出量を1990年レベルで安定化させることを目標としている。この目標は、ヨーロッパ諸国と同様の内容であるが、従来日本が行ってきたエネルギー使用効率の向上を考慮するとかなり厳しい目標といえる。

表1.1.6-15 地球環境保全に関する関係閣僚会議

- 
- ① 2000年までに温室効果ガスを極力低いレベルで安定させる。
  - ② 1991年から2010年までを適切な計画期間に区分して、段階的に目標を実現する方針。
  - ③ 直接的に温室効果ガスの排出を抑制する対策として次の項目が挙げられる。
    - ・ 省エネルギーの推進
    - ・ 低炭酸ガス排出、炭酸ガスを排出しないエネルギーの導入・普及
    - ・ メタンその他の温室効果ガスの排出抑制対策
  - ④ この会議の内容は地球温暖化防止行動計画として1990年秋に策定された。
- 

出所) 野村総合研究所

表1.1.6-16 地球温暖化防止行動計画

1) 行動計画の目標

- ① 二酸化炭素の排出量を一人当たりにつき2000年までに1990年レベルで安定化させる。
- ② メタンの排出量を現状程度に抑える。

2) 行動計画の期間： 1991年から2010年

3) 二酸化炭素排出抑制対策として、次の項目を広く見直し対策を推進する。

都市地域構造：	都市緑化 燃料電池の導入 住宅建築物の省エネ化
交通体系：	単体対策 輸送システムの効率化 交通管制システムの高度化
生産構造：	産業分野において、エネルギー利用の効率化、自然エネルギー、バイオマスエネルギー利用の推進
エネルギー供給構造：	原子力の推進 コンバインドサイクル発電の開発導入の促進 燃料電池・太陽電池の導入
ライフスタイル：	リサイクルシステム構築の推進 流通サービスの見直し（自動販売機・ダイレクトメール・過剰包装）

4) メタン排出抑制対策

- ① 一般廃棄物の資源化を推進する。
- ② 産業廃棄物については汚泥・木くず等の資源化・再利用や適正処理を推進する。
- ③ 有機物の処分に準好気性埋立を推進する。

出所) 野村総合研究所

2-3 各国での取り組み

各国での二酸化炭素排出量削減の目標を以下に示す（表1.1.6-17）。

表1.1.6-17 各国の二酸化炭素削減目標

国名	対象ガス	目標		基準年次	特記事項
		安定化	削減		
全 E C (仏、独、伊、 ベネルクス3国、 英、デンマーク、 アイルランド、 ギリシャ、スペイン、 ポルトガル)	CO2	2000年	-----	1990年	・ E C 環境エネルギー合同理事会 (90/10) にて決定 ・ 英国は目標期限を2005年とした国家計画を維持 ・ 独、デンマーク、蘭、仏等は各国の努力をさらに強化している
英 国	CO2	2005年	-----	1990年	・ 環境白書 (90/9) で表明
ドイ ツ	CO2	-----	2005年迄に 25%削減	1987年	・ 閣議決定 (90/6)
フ ラ ンス	CO2	2000年迄に一人 当たり排出量を 2トン/年以下へ	-----	-----	・ 閣議了解 (90/6)
オランダ	CO2	1995年	2000年迄に 3~5%削減	1989年と19 90年の平均	・ 新国家環境政策計画 (90/6) で位置づけ
イタリ ア	CO2	2000年	2005年迄に 20%削減	1990年	・ E C E 環境大臣ベルゲン会合 (90/5) にて表明
デンマーク	CO2	-----	2005年迄に 20%削減	1988年	
カ ナ ダ	CO2と他の 温室効果ガス	2000年	-----	1990年	・ グリーンプラン (環境問題に関する行動計画) で位置づけ (90/11)
スウェーデン	CO2	2000年	-----	1988年	・ 国会決議 (88/6)
ノルウェー	CO2	2000年	-----	1989年	・ E C E 環境大臣ベルゲン会合 (90/5) にて表明
オーストラリア	全温室効果ガス (モントリオール 議定書で規制さ れるガスを除く)	-----	2005年迄に 20%削減	1988年	・ 閣議決定 (90/10)
ニュージーランド	CO2	-----	2000年迄に 20%削減	1990	・ 首相発表 (90/8)
米 国	排出抑制目標は設定していない				・ ライリー環境保護庁長官が、全温室効果ガス排出と吸収 (森林等) を考慮した場合、2000年において25%削減可能 (1987年レベル以下相当) との試算を発表

・ EFTA (スウェーデン、ノルウェー、スイス、オーストリア、フィンランド、アイスランド) 内での統一目標は、未だ設定されていない。

出所) 野村総合研究所

またオランダ及びスウェーデンは二酸化炭素税を導入しており、その概要は以下のとおりである。

### オランダの炭素課税

#### ① 導入時期

- ・ 1990年2月1日

#### ② 課税の仕組み

- ・ 既存の燃料税を増額し、更に燃料種類ごとに二酸化炭素発生の度合いに応じ課税
- ・ 税率は、約0.001ギルダー（約0.08円）／CO<sub>2</sub> 1kg（推定）

#### ③ 増税額

- ・ 1億5000万ギルダー（約120億円）

#### ④ 使途

- ・ 環境汚染低減対策
- ・ 低公害技術の導入促進
- ・ 地方公共団体の廃棄物処理経費への拠出 など

#### ⑤ その他

- ・ 炭素課税の導入と併せて所得税減税を実施
- ・ ディーゼルおよびLPG車に対し、別途増税（1990年1月1日）、低公害車○低騒音エンジンの開発および普及促進、交通インフラの整備などに充当
- ・ ガソリン税を増税の予定（1991年2月1日）、公共交通機関の整備に充当

〈参考〉オランダ 二酸化炭素排出総量5200万トン、一人当た排出量3.53トン  
（1987年）

## スウェーデンの炭素課税

### ① 導入時期

- ・ 1991年1月1日

### ② 課税の仕組み

- ・ 燃料種類ごとに二酸化炭素発生の度合いに応じ課税
- ・ 税率は、0.25クローネ（約5.5円）／CO<sub>2</sub> 1kg
- ・ エネルギー部門
- ・ 石油、石炭、天然ガス、LPGに課税（従来の燃料課税を半減、ただし炭素課税と総合すれば増税
- ・ 電気事業およびエネルギー集約産業（エネルギーコストが売上高の1.7%を越える産業）に対しては非課税
- ・ 運輸部門
- ・ ガソリン、動力燃料（ディーゼル）および国内航空に課税

### ③ 増税効果

- ・ 90年代末に二酸化炭素で毎年135～270万トンの減少と推定

### ④ その他

- ・ 付加価値税、硫黄税（30クローネ／硫黄1kg）を併せて導入
- ・ NO<sub>2</sub>税（40クローネ／NO<sub>2</sub> 1kg）を1992年1月1日までに導入予定

(参考)スウェーデン 二酸化炭素排出総量1500万トン、一人当た排出量1.74トン  
(1987年)

### 3 酸性雨

#### 3-1 国際的な取り決め

これまでに取り交わされた国際協定の内容は、以下の通りである。

##### 長距離越境大気汚染条約（ウィーン条約）

- 
- ・ 1979年に締結
  - ・ 1983年3月発効
  - ・ 32国家・機関が加入。
  - ・ 越境大気汚染の防止のための技術開発、酸性雨の影響の研究、国際協力の推進等を規定。
  - ・ 条約には、英、米、加、西独、仏、EC等32の国家および機関が加盟。
  - ・ 国際的な硫黄酸化物、窒素酸化物の排出の削減量を規定。
- 

##### ヘルシンキ議定書

- 
- ・ 二酸化硫黄の排出量を93年までに80年時点の最低限30%を削減することを規定。
  - ・ 1987年9月に発効。
  - ・ 21か国が合意。
  - ・ 18か国が批准。
  - ・ 英、米、ポーランドは署名せず。
- 

##### ソフィア議定書

- 
- ・ 窒素酸化物の排出量の削減について規定。
  - ・ 1994年までに87年時点の排出量に凍結することを規定。
  - ・ 欧州25カ国は88年に署名。
  - ・ 今後16カ国が批准した段階で発効。
  - ・ スイスを含む欧州12カ国は、89年からの10年間で窒素酸化物の排出量を30%削減することを宣言。
-



### 3-2 我が国での取り組み

#### 1) 大気汚染防止法による硫黄酸化物・窒素酸化物の排出規制

1983年に環境庁が酸性雨対策検討会を設置し、降水中のpHや湖沼の調査を始めた。現在、国内での酸性雨およびその影響の状況の調査が進められている。

中央公害審議会が、1989年12月にディーゼル車からの窒素酸化物排出規制強化を打ち出しのに続き、さらに環境庁は、1990年11月、以下の内容で自動車排気ガスからの窒素酸化物の総量規制案（表1.1.6-18）を発表し、さらにこれを次期国会に法案提出をする見込である。

表1.1.6-18 環境庁による窒素酸化物の総量規制案

- 
- 1) 規制方法： 次の2方向から検討。
    - ・ 事業所ごとの窒素酸化物排出量の上限を設定
    - ・ 窒素酸化物排出量の多い車種の利用制限
  - 2) 規制へ方法：
    - ・ 自動車の台数制限
    - ・ 走行距離の低減
    - ・ 低公害車種への転換
  - 3) 達成目標：総量規制により窒素酸化物濃度を20%程度削減し、窒素酸化物の環境基準（0.06PPM）を達成する。
  - 4) 規制対象地域：
    - 東京都23区と周辺5市
    - 横浜市、川崎市、横須賀市
    - 大阪市・周辺17市
  - 5) 具体的施策：
    - ① 総量規制の具体案 規制地域内の工場・事業所の所有する自動車に対し
      - ・ 窒素酸化物の許容排出量を割り当てる
      - ・ より低公害の車種への代替を義務付ける

（注）2.5トン以下のディーゼル車を禁止。

2.5トンから5トンの直噴式を禁止。副室式のディーゼル車のみ認可。

5トン以上の直噴式ディーゼルは最新規制に適合したものに限定。
    - ② 規制地域内で規制地域内で基準に適合した自動車にステッカーを貼付して走行を許可し、違反車を取り締まる
- 

出所) 野村総合研究所

### 3-3 各国の取り組み

#### 1) アメリカ

アメリカは、1990年11月15日に1990年クリーン・エアー・アクト改正が正式に発効したことで、酸性雨対策として1980年排出量を基準として二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）を1,000万t/年、二酸化窒素（NO<sub>2</sub>）を200万t/年削減することを決めた。

#### 2) ヨーロッパ

我が国およびアメリカに比べ具体的規制の制定は遅れている。また、各国で規制のレベルが異なるため、今後1992年のEC統合に向けて規制の共通化が進められるが、これを具体化するにはまだ各国間の調整に時間を要する。欧州での固定発生源（火力発電所）に対するNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>規制値を例として示す。

##### (1) イギリス

現在、法定の規制値はない。

BPM (British Practicable Means notes) ノートで企業の達成すべき目標値（プラントの出力に応じて単位体積当たり重量濃度で規制されている）を示しているが、BPMには法的義務はない。今後BPMは、IPC (Integrates Pollution Control) による基準値へと引きつけられる。

##### (2) フランス

新規施設の場合、50MW以上の発電所ではEEC基準に準じて要求されている。現存のプラントは特別な地域内のプラントを除き、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>に関しては特に規制値はない。

##### (3) ドイツ

NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>はTIAQC (Technical Instructions on Air Quality Control) によって、排出規制されている。

NO<sub>x</sub>…プラントの出力に応じて、プラントの脱硫効果および単位体積あたり重量濃度が規制されている。

SO<sub>x</sub>…プラントの出力に応じて、また、燃料の種類に応じて単位体積あたり重量濃度が規制されている。

## 4 有害廃棄物

### 4-1 有害廃棄物の越境移動に関するバーゼル条約

1989年に「有害廃棄物の越境移動およびその処分の規制に関するバーゼル条約」が採択された。現在のバーゼル条約への参加国は116であり、条約は20カ国の批准を得た後発効する。

我が国は、条約の署名も批准もしていないが、現在批准に向けて、通産・厚生・環境・外務の4省庁で検討している。また国内法の整備も検討している。

条約での規定項目は次の通りである。

- ① 有害廃棄物の越境移動の原則禁止
- ② 自国内処分の原則
- ③ 越境移動の際の事前通報義務
- ④ 違法な越境移動に対する発生国の再輸入措置
- ⑤ 開発途上国への技術協力

### 4-2 日本での廃棄物対策

廃棄物の処理に関する新たな法規制の動きについては、通商産業省の「再生資源の利用の促進に関する法律案」と、厚生省の「廃棄物の処理および清掃に関する法律の改正」がある。いずれの法律についても、事業者に対する責務を明記し、より具体的な廃棄物対策として、廃棄物発生量の削減、分別／回収／再生によるリサイクリングを社会システムとして構築することを目的に、関連業界に相当の役割を求めていることがポイントである。

#### 1) 通商産業省「再生資源の利用の促進に関する法律案」

法案の基本方針は、使用後の物品または工場等で発生する副産物のうち有用な資源として利用できるものを「再生資源」と定義し、再生資源の利用について総合的促進を図ろうとするものである。ここでは、再生資源の利用を図るため、特定の業種、製品について

- ① 再生資源を利用する業種
- ② 再生利用する製品
- ③ 分別回収のための表示
- ④ 工場等で発生する副産物

を分類し、各々についてリサイクル促進のための基準を示すこととしている。さらに、企業にこの基準を守らせるため、指導・助言、勧告、公表、命令等の行政措置の行使を盛り込んでいる。

この法律の狙いは、行政措置（最も厳しい場合は命令）を通して、事業者に対し、製品製造段階での再生資源の利用と製品が廃棄物となった後のリサイクルのためのマーキング制度の導入を強力に推し進めようとするものである。

## 2) 厚生省「廃棄物の処理及び清掃に関する法律の改正」

この法律改正は、廃棄物の発生量の増大とその質の多様化に伴い、廃棄物処理の適正な処理が困難となっている状況を解決するため、既存の「「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」の強化を図るものである。改正に当たっての特に重要なポイントは次のとおりである。

- ① 廃棄物の計画処理を進めるため、多量の一般廃棄物を排出する事業者に減量化計画の作成を求める。
- ② 廃棄物の減量化、分別・再生を法律の目的として明確化する。
- ③ 粗大ごみや事業系廃棄物に対し、適切な手数料の徴収を求める。
- ④ これまで取り扱いが明確ではなかった適正処理困難物の範疇として、特別管理廃棄物の区分を設ける。
- ⑤ 各都道府県ごとに、特別管理廃棄物の処理と処理施設の建設等を業務とする廃棄物処理センターを設置する。

また、この法律改正により、事業者にとっては、以下の点でその責任が求められることになる。

- ① これまでは、規制を受けなかったオフィスごみのような事業系一般廃棄物に対して、規制が加えられる。
- ② 事業系廃棄物の処理に対し、処理手数料の徴収が求められる。
- ③ 廃棄物となる前の製品の製造業者に対して、廃棄物処理の協力が求められる。
- ④ これまで取り扱いが明確でなかった医療廃棄物のような適正処理困難物が特別管理産業廃棄物として区分され、排出事業者に対する責任制度が明確化される。

#### 4-3 アメリカでの廃棄物対策

アメリカには有害廃棄物に係わる法律として資源保全再生法（RCRA）と包括的環境対処補償責任法（CERCLA: the Comprehensive Environmental, Response, Compensation and Liability Act）、通称スーパーファンド法（Superfund）がある。

資源保全再生法は有害廃棄物を「ゆりかごから墓場まで」管理することを目的としている。将来の有害廃棄物管理を適正に行うものである。したがって、規制以前の有害廃棄物には対応していない。

一方、スーパーファンド法は全ての環境関連法で定める有害物質による汚染を対象とする法である。さらに、スーパーファンド法には遡及性があり、責任当事者の規定も広範囲である。また、無過失責任と連帯責任が追及される。

スーパーファンド法では、政府が浄化活動を行う場合に必要となる基金（スーパーファンド）を設けている。政府は、汚染責任企業に肩代わりして汚染サイトの浄化を行い、その後、掛かったコストの支払を訴訟請求することができる。また、政府は、訴訟を通して、民間に対して浄化活動を強制することができる。この法律の厳しい点は、現在の土地施設所有者のみならず、廃棄当時の土地施設所有者、有害廃棄物の輸送を行った者に対しても責任を追及できることにある。さらに、条件によっては、当該企業の親会社に対しても責任が追及される場合がある。

スーパーファンド法の一部として緊急時計画法がある。緊急時計画法では、事故等、緊急時の化学物質の逸出を対象としている。また、緊急時の通報義務、情報の公開を規定している。

資源保全再生法とスーパーファンド法の概要と比較を示したものが表1.1.6-19である。

表 1.1.6-19 アメリカでの有害物質対策

名称及び 制定の経緯	資源保全再生法 RCRA (The Resources Conservation and Recovery Act) 1976年10月制定 1984年11月改正	スーパーファンド法 CERCLA (the Comprehensive Environmental Response, Compensation, And Liability Act) 1980年12月制定 SARA (the Superfund Amendments and Reauthorization Act of 1986) CERCLAを改正して1986年10月に制定	(緊急時計画法) the Emergency Planning and Community Right-to-know Act  SARAの第3編として1986年10月に制定
対象物質	一般廃棄物及び有害廃棄物	有害物質 他の環境関連法で指定された有害物質すべてを含む (RCRAで定める有害廃棄物を含む)	特別危険物質として402物質を指定
規制の範囲	制定後に排出、処分される廃棄物が対象となる	波及性がある 規制以前の有害物質排出により現在影響を受けている場合にも適用される  無過失責任、連帯責任を追究できる	事故等、緊急時の化学物質の逸出  特別危険物質を扱う施設で、定める計画基準量を超える施設が規制対象
責任者		責任当事者: 汚染物質の発生者 処分手業の計画者 有害物質を処分場まで輸送した業者 現在の施設の所有者、操業者 過去の施設の所有者、操業者  潜在的責任当事者: 有害物質を逸出させた企業に株式の形で投資していた親会社 有害物質の逸出を起こした企業の株式を取得した企業	
特色		浄化作業のための基金(スーパーファンド)を創設 1980-85年: 8.6%を特定の化学物質及び 石油の製造業者や輸入業者に対する賦課税により調達 1986-1991: 8.5億\$を確保 (石油消費税、化学原料物質消費税、 輸入化学誘導体に対する税金、環境税等)  浄化措置のために全国優先順位(NPL)を定める  NPLの定めるサイトについて浄化措置を適用する  継続期間を12ヶ月、費用限度額200万\$と定めている  購入した土地の汚染に関して、 土地の所有者は汚染を知りえなかったことを抗弁することが可能である	緊急時の通報義務を規定 情報公開について規定
相互関係	RCRAの対象となる汚染サイトは、その所有者が 浄化作業を行わない場合はスーパーファンド法 による全国優先順位表(NPL)に記載できる	RCRAの適用が妥当な場合はCERCLAによる浄化基準は適用されない	緊急時計画法は、スーパーファンド法による財政的措置の範疇外である
費用負担		責任者自らの自主的な浄化措置を講じることが求められている 上記の措置がとられない場合EPAが浄化作業を代行し、 浄化費用の償還請求を行うことができる	
浄化費用の範囲		次の費用を責任者に請求できる 有害物質の除去措置にかかる全ての費用 自然資源の減失 破壊に対する損害賠償 健康評価及び健康影響調査費用	

#### 4-4 ヨーロッパ

ヨーロッパにおける産業の廃棄物管理に関する規制の考え方は、次の通りである。

- ① 産業から出る廃棄物については、企業は公に認可された廃棄物処理施設で処理されたことを証明せねばならない。
- ② ECは、環境基準の設定に関する勧告を通して、廃棄物処理施設の基準作りを考えている。都市廃棄物については、既に基準ができています。

現状では、各国毎に廃棄物処理施設の基準や認可の厳しさが異なる。規制の方向としては、認可基準を厳しくしようとしており、その範囲を企業内の処理施設や焼却設備にまで広げようとしている。

##### 1) 製品処理および廃棄物処理による環境破壊に対する責任

ヨーロッパでの政府の政策決定の考え方や大企業の行動は、アメリカのスーパーファンド法に大きく影響を受けている。各国政府およびECは、汚染土壌の浄化の責任を現在の土地所有企業あるいは歴史的に何らかの関連がある企業に対して求めるという点で、スーパーファンド法を意識している。

一般には、アメリカのシステムは産業に対し余りにも厳しく、懲罰的であり、形式的であると信じられているが、各国政府は、浄化の責任に以下のような動きで対応しつつある。

- ① ECは、現在、廃棄物による環境汚染の責任に関する勧告について、メンバー各国との間で交渉を行っている（表1.1.6-20参照）。現状の勧告案では、廃棄物が認可された処理施設に持ち込まれるまでは、廃棄物によって生じた環境汚染の責任を廃棄物を出した者に求めようとしている。
- ② ドイツ、デンマーク、オランダおよびフランスでは、汚染地域（土地）に関する調査が終了している。イギリス政府は、汚染地域の登録制度を導入するつもりであると発表している。もし、特定の地域が汚染地区と認定されれば、政治的および世論の関心は、汚染の浄化に向けられることになる。
- ③ 一般的にヨーロッパの環境汚染に対する責任制度はそれほど厳しくはない。以下の国においては、産業に対して土壌汚染の浄化の責任が追及される。

- ・フランス：さらなる汚染を防ぐために、浄化が必要な場合。
- ・ドイツ：被害が生じ、企業が環境規制を守らなかった場合。
- ・イタリア：汚染を防ぐために可能な限りの技術を適用したことを実証しなければ、責任が追及される。
- ・オランダ：土地が法規制に適合していない場合。

現在、ECにおいては、廃棄物が原因で被害を受けた場合の責任を厳しく求めることを内容とする勧告について議論が行われている。もし、これが通った場合には、ビジネスに与える影響は大きい。提案の内容は次の通りである。



表1.1.6-20 廃棄物責任制度に関するEC勧告（提案中）

- 
- ・ 個人および環境に対して、廃棄物が原因で被害を与えた場合の責任は、当該廃棄物が認可を受けた処理場に運び込まれるまでは、廃棄物を出した者の責任である。廃棄物を出した者の定義には、以下を含む。
    - ・ ・ 廃棄物輸入者
    - ・ ・ 廃棄物の加工あるいは混合により、その特性や組成を変えた者
    - ・ ・ もし、本来の廃棄物を出したものが不明な場合には、損傷が発生した時に実際に廃棄物を管理していた者
  - ・ 責任は厳格に求める。
  - ・ 提案は、「危険」廃棄物によって生じた被害に限らず、一般廃棄物による被害に対しても適用される（ただし、原子力廃棄物や一般消費者の廃棄物は例外して取り扱う）。EC委員会は、廃棄物が「危険」か否かに係わらず、廃棄物により生じた被害は被害として見做している。
  - ・ 廃棄物を出した複数の者が関与すると見做された場合には、それぞれは連帯して厳しく責任が求められる。被害者は、全ての者を訴えなくとも、任意の関与者に対して全ての被害保証を求めることができる。
  - ・ 環境に対する被害は、通常不法行為に対する法的追及に加えて、別途責任が追及される。個人に対する被害保証には金額に上限がないが、環境に対する被害保証は現状を維持するのに必要な保証金額にとどめられる。
  - ・ 提案中の勧告には、発行以前に遡って適用されることはないと明記してある。
  - ・ 提案書では、時効は、被害が起きてから三年間あるいは被害が生じるような原因が作られてから30年間としている。
- 

出所) Environmental Resources Limited (1990.11)

## 5 海洋汚染

### 5-1 ロンドンダンプング条約

ロンドンダンプング条約は1973年にロンドンで採択され、1975年に発効した。条約では、重金属、有機塩素化合物等の有害物質を含む廃棄物の投棄を禁止または許可の対象としている。その後、1978年に改正され、洋上焼却の規制が加えられた。我が国は、1980年に条約を批准した。

### 5-2 マルポール73/78条約

マルポール73/78条約は、1978年に発効した。条約では、船舶からの油、有害液体物質および廃棄物の排出を規制している。我が国は1983年に加入した。

### 5-3 海洋法に関する国際連合条約（国連海洋法条約）

海国連海洋法条約は、1982年に採択された。条約では、海洋汚染の原因を発生源別に6類型（陸上起因、海底活動、深海底活動、投棄、船舶、大気経由）に分類し、各類型毎に汚染防止のための規定を定めている。また、沿岸200海里における管轄権および責務が規定されている。

1989年で批准国は42であり、条約は、加入国あるいは批准国が60に達した1年後に発効する。

### 5-4 油汚染に対する準備、対応及び協力に関する国際条約

油汚染に対する準備、対応及び協力に関する国際条約は、国際海事機関（94か国）の会議で1990年12月に採択された。新条約の発行は、15か国以上が批准した1年後に発効する。

条約の概要は次の通りである。

- ① 油流出事故が起きた場合沿岸国に迅速に通報する。
- ② 各国は前もって事故への対応体制を整備する。
- ③ 油汚染防除のための国際協力の促進

## 6 野生生物種の減少

野生生物の保護については、以下の条約がある。

### 1) 二国間渡り鳥保護条約

二国間渡り鳥保護条約は、渡り鳥とその卵の捕獲、採取、あるいはその販売を各国がその国の法令で規制することを内容としている。

### 2) ラムサール条約

ラムサール条約は、多国間条約として、各国がその領域内に国際的に重要な湿地を指定・保護する事を定めている。目的は、湿地を保護することによる水鳥の保護である。日本では釧路湿原、宮城県伊豆沼・内沼、クッチャロ湖が指定されている。

### 3) ワシントン条約

ワシントン条約には I、II、IIIの付属書があり、規制の度合いによる条約の対象生物種が分類されている。条約の目的は、野生動植物の国際取引を輸出国と輸入国が協力して規制し、絶滅の恐れのある野生動物の保護を図ろうとするものである。しかし、野生動物の直接的な保護に関しては規定がない。また、条約の非締約国に対しては効力をもたない。

### 4) 生物的多様性保護条約

生物的多様性保護条約は、地球上に存在する生物種の保護を目的とする条約であり、現在条約の作成段階にある。条約作成の交渉では生命工学の技術移転問題が焦点となっており、現在、バイオテクノロジー技術を保有する先進国と、生物種を保有する発展途上国との間での調整が行なわれている。

## 7 熱帯林の減少

### 1) 国際熱帯木材機関 (ITTO)

国際熱帯木材機関は、国際熱帯木材協定に基づき、森林の保全・開発を、生産国と消費国の協力のもとに推進することを目的としている。現在までに生産国19カ国、消費国25カ国が加盟している。

1990年には持続的熱天然林管理基準が検討されており、その内容の概略を以下に示す。

#### (1) 政策・法令の整備

- ① 森林に関する法令・制度を整備し、各層の意見を政策に反映
- ② 森林情報の整備

#### (2) 森林管理制度

- ① 国家経営、個別経営各レベルでの森林計画の策定
- ③ 伐採方法への配慮
- ④ 恒久林の保全体制

#### (3) 地域住民・経済面への配慮

## 8 砂漠化

1968～73年におきたサヘル地域の干魃により、砂漠化防止の機運が高まり、UNEP内に砂漠化防止計画行動センター (DCPAC) が設立され、砂漠化防止対策を進めている。また、1992年には国連環境開発会議の開催が予定されており、テーマの一つとして検討される模様である。

日本の農水省はODAを中心に1兆6,500億円を投じてサハラ砂漠のサヘル地域での砂漠化防止計画をまとめ、これを発表している。計画期間は30年で、総延長3,500kmの植林事業などを内容としている。

## 9 開発途上国の公害問題

### 1) ODA

OECDの開発援助委員会加盟国では、ODA資金により二国間援助ベースで、開発途上国の水質管理プロジェクト、大気汚染対策プロジェクト、土壌管理プロジェクトなどの環境管

理に係わる資金的、技術的援助が行われている。ここでは、開発援助プロジェクトを行う際の環境アセスメントの整備も進められている。

## 2) 地球環境監視システム

国連環境計画による国際協力事業である。この中で途上国の水質汚濁状況を監視している。

## 3) 広域海域汚染調査プログラム

複数の国にまたがった海域の汚染状況を関係する国が共同で調査するプログラムである。現在、世界中の10カ所ほどの海域で汚染状況を調査中である。

### (3) 高レベル廃棄物と地球問題の関連

地球環境問題は地球全体という極めて広域にわたる問題であり、これに対する対策を実行するためには、一国の枠を越えた多くの国、人種による合意を必要とするものとなる。しかも特徴的なのは多くの地球環境問題が相互に関連を持っていることである。

高レベル廃棄物と地球環境問題の関連を考えると重要な視点として次の3点をあげることができる。

①高レベル廃棄物処分自体が地球環境問題であること、すなわち高レベル廃棄物処分が遠い将来の地球の環境を問題とする超長期かつ広域的な問題であること

●現在の高レベル廃棄物問題は国際的な技術協力の枠組みはあるものの、基本的には国内問題の自主的解決という視点で問題が取り上げられがちであるが、超長期の問題としては地球全体の環境に留意した問題の捉え方が必要となるものと考えられる。

②高レベル廃棄物処分は原子力の利用と言う意味から、現在問題となっている地球環境問題の緩和に寄与すること

●原子力の利用により二酸化炭素の発生を抑制することが可能である。高レベル廃棄物の発生および処分の実施は捉え方によっては二酸化炭素という極めて管理が難しい地球表面の環境問題を、地下を有効に利用することによって、管理可能な問題に変えていくという意味をもっているものと言える。

③高レベル廃棄物処分問題に関する国際協調活動、技術開発、安全評価研究等は地球環境問題の解決策の先行事例と成りえること

●現在の地球環境問題は非常にさしせまった問題を取り扱っており、遠い将来の問題にまで研究や議論が及んでいるわけではない。従って、高レベル廃棄物の超長期の安全評価技術等はより長期的な問題解決への議論の先駆けとなるとともに、地球環境問題にも新たな評価手法を与えるものと言える。

- 高レベル放射性廃棄物で開発される処分技術は現在問題となっている有害廃棄物の処分技術に利用可能である。
- 高レベル廃棄物の第3国移転の禁止、技術開発の国際協力体制の構築、各国の自主性の尊重等の視点で高レベル廃棄物問題は先進事例となりえる。

このように高レベル廃棄物は地球環境問題と捉え分析をしていく必要があるものと言える。

## 1. 2 地層処分

地層処分では、地下深く、地下水の移動が遅く、環境が安定した状態にあると考えられる地層中に高レベル廃棄物処分場を設置する。

大陸地層への処分は、地下水循環は存在しないかもしくは非常に緩慢であるならば、非常に長期にわたる隔離を可能にする。深地層処分施設の隔離能力は、放射性核種の移動に対する多数の相互に関連する障害の総合的な機能に依存するだろう。岩塩層、花こう岩、玄武岩、火山性の凝灰岩はすべて、適切な地層であろうと注目されている。処分しうる廃棄物の量は、施設によって大きく変わる。大陸地層処分またはこれに類似した処分の選択肢は高レベル廃棄物、使用済み燃料および長寿命放射線核種の含有量の多いある種の廃棄物にのみ必要である。

(ICRP Pub.46 放射線固体廃棄物処分に関する放射線防護の諸原則/1985)

地層処分は、次のような概念設計がされている。

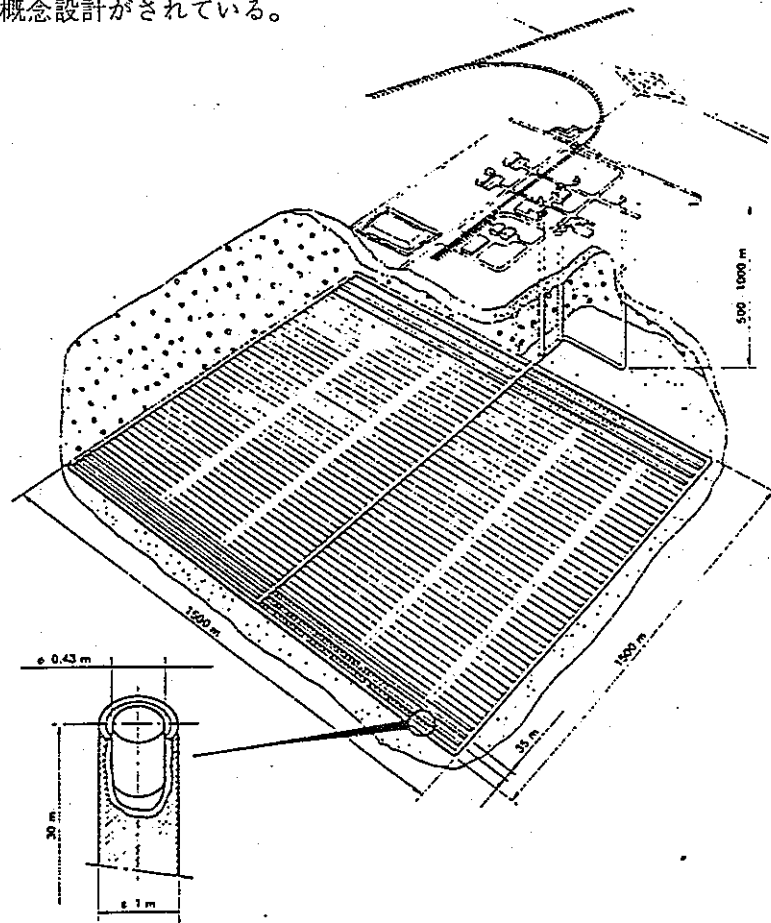


図 1. 2. 1-1 地層処分の概念図

(出所 PAGIS/1988)



高レベル廃棄物を地層処分するに当たっては多重バリアシステム概念が取り入れられている。

高レベル廃棄物は使用済み核燃料の再処理工程から液体状で発生するが、より安全な形態に固化するために、ガラスが廃棄物中に含まれる種々の放射性核種を安定に保持する性質を利用して、ガラス固化される。ガラス固化体をキャニスタと呼ばれるステンレス製の容器に封入して固められる。さらに、地層中に処分する際は、キャニスタをオーバーパックと呼ばれる容器に入れる。廃棄体、キャニスタを入れたオーバーパックを地層中に埋設する際に、地層との間に粘土質材等の緩衝材を充填する。これらの人工的に設けられる多層の安全防護系を人工バリアと呼ぶ。

人工バリアに対し、地下水を浄化するなどの安全防護機能を本来的に有している地層を天然バリアと呼ぶ。

地層処分においては、これらの人工バリアと天然バリアがもつ種々の機能を多重に組み合わせたバリアシステムを多重バリアシステムと呼んでいる。

多重バリアシステムとして以下の機能が期待できる。

- 透水性の低い緩衝材は地下水接触の抑制のために有効に機能する。
- オーバーパックは透水性の低い緩衝材に包まれることで、容器材料の腐食が生じにくく、放射性核種を長期間容器内に、閉じ込めておく機能を有する。
- 容器が壊れた場合でも、ガラス質に放射性核種が閉じ込められているために地下水への放射性核種の溶出が制限される。
- 緩衝材中では地下水の動きが少なく、かつ緩衝材が放射性核種を吸着する性質を有している。
- 地層中では、地下水の動きは緩慢で、岩石による放射性各種の吸着により、移動期間中の放射能が減衰する。
- 地層を移動する間に放射性核種が分散し希釈される。

(高レベル放射性廃棄物の地層処分重点項目とその進め方

/原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会/平成元年)

濃縮と密閉法によって、処分される廃棄物は処分場から生物圏への還流を様々な密閉措置によって防止される。多重安全バリアシステムが効果的であるのは、1つの保持メカニズムの有効性が低下しても他のメカニズムが作動することによって補償されるからである。

(出所 PROJCT GEWAEHR 1985)

化学的毒性をもつ廃棄物に関して、生物圏へのは廃棄物の放出率を安全なレベルに抑えること、そしていかなる時点においても安全な濃度であることを保証することがなにより重要である。

放射性廃棄物ではもうひとつ要素が加わる。放出時間の遅延である。放射性廃棄物の毒性は時間とともに低下するから、同じ量の廃棄物が放出されても、それが遅ければ、遅れるほど影響は小さくなる、

従って次のような特性を持つ安全バリアが用いられる。

○処分場からの放射線物質の放出量を効果的に制限する（放出バリア）

○放射性物質の生物圏への還流を効果的に遅延する（時間バリア）

(出所 PROJCT GEWAEHR 1985)

地層処分では、核種が放出されていくのは、図のような過程を経て行われる蓋然性が高いと考えられている。

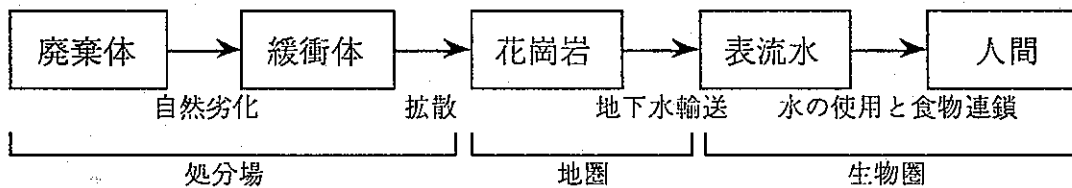


図 1. 2. 1-2 もっとも考えられうる核種の放出過程（通常シナリオ）

(出所 PAGIS/1988)

地層は天然バリアの中心となるものである。地層処分システムに関連して考慮の障壁に影響を与える要因は次のように整理できる。

●サイトの空間的広がり

サイトは、処分システムを十分に包含できる大きさの地層を有する必要がある。また、処分場周辺に適切な大きさの地下緩衝域と適切な広さの地表制限区域をとりうる広がりが必要ならぬ。

(要因) …母岩の分布、母岩のタイプ

### ●地質

処分場は、処分対象の廃棄物に対応した適切な岩質と深さを有する地質媒)中に設置されなければならない。

(要因) …分布、岩石特性、地質構造

### ●水理地質

処分場内の地下水流動を制限できる水理地質特性を有する地質環境でなければならない。

(要因) …透水性、間隔率、動水勾配、割れ目

### ●核種移行性

放射性核種の移行を制限できる物理化学的特性及び地球化学的特性を有する地質環境でなければならない。

(要因) …母岩の遅延特性、地下水流動

### ●地殻変動・地震活動

処分場は、地殻変動及び地震活動の小さい地域に立地されなければならない。処分場の健全性が損なわれないと確信できる程に、主要な地殻変動地域から十分に離れた地域でなければならない。

(要因) …隆起・沈降、火山活動、温泉、地震

### ●人工構造物及び自然的形成物

処分場の立地に際しては、構造的不安定性を生じる恐れのある人工構造物及び自然形成物の存在を考慮しなければならない。

(要因) …ボーリング孔、ダム、鉱山坑道、空洞、大湛水池、有害物質、処理施設

### ●地下資源

有用な資源あるいは将来開発可能性のある資源の存在を考慮しなければならない。処分場の必要性を地下資源の価値と必要性に対して比較検討しなければならない。

(要因) …有用鉱物、石油、ガス、石炭、地熱

## ●地表条件

地表に影響を及ぼし得る不安定な地形環境や苛酷な気候条件などの発生が、処分場の性能に有為な影響を及ぼさないことを明確にしなければならない。

(出所 IAEA safety series no60 / 1983)

地層処分においては、これらの自然変動要因による人間とその環境に与えられる長期の放射線影響の可能性を的確に評価する手法がすでに存在するといった認識が国際的に合意されている。

(Can long term safety be evaluated ? /OECD/NEA,IAEA)

処分予定地が決まり、そこで十分な調査を行えば、現在および将来の世代に対して十分な安全性を提供するためにどのような手段を講ずればよいか判断する技術的な根拠を得ることができる。

(Can long term safety be evaluated ? /OECD/NEA,IAEA)

地層処分に関して、特に、4つの点に関して、考えを整理する必要がある。

### ① 隔離期間

高レベル廃棄物が危険なものである期間は、隔離をする必要がある。この期間をどれくらいの長さ考えておくべきなのかには様々な考え方がある。高レベル廃棄物の放射能レベルが、ウラン鉱石と同程度になるまでの期間とする意見がある。

### ② 制度的管理

「管理」によって放射性の元素の閉じ込めを行うことは、人間による社会的な仕組みを利用するものである。「管理」を高レベル廃棄物が危険である期間続けるには、維持費用や、建屋の建設費用が必要であり、将来世代に維持費用の負担をかけることになる。

また、「管理」により、高レベル廃棄物に含まれる放射性の元素を、我々の住む環境へ出てくることを防ぐことは、将来世代に、高レベル廃棄物の管理体制の維持を期待することである。

人間の歴史上の事例で、何らかの管理が行われた期間は、高レベル廃棄物が、「危険なもの」ではなくなるまでの期間に比べ非常に短い事例しかなく、例えば、正倉院の宝物の管理は、非常に長期間続いているが、それでも1000年程度に過ぎず、また、すべての期間管理がなされていた訳ではない。しかし、高レベル廃棄物が「危険」でなくなるまでには、10万年程度の期間を必要とすると考

えられている。これだけの期間、人間による管理が確実に行われることを期待するのは困難である。

将来世代に高レベル廃棄物の管理による費用負担をかけず、高レベル廃棄物の管理を維持することを期待しない方法を考えることが必要である。

### ③ 人間侵入

将来の世代が、隔離した廃棄物を意図的に回収しようとした場合をどのように考えるか。また、隔離された高レベル廃棄物に関する情報が将来失われた場合に、将来の世代が意図せずに隔離された廃棄物に近づいた場合をどのように考えるかが問題となる。

隔離された高レベル廃棄物への、将来世代の意図的な接近に対しては、将来世代の責任であり、現在の世代はこれを考慮する必要はないとする意見がある。

### ④ 再取り出し性

将来の世代が、高レベル廃棄物に有用性を見いだしたり、新たな処分方法が開発されることによって、将来、隔離した高レベル廃棄物を回収する必要性が生じた場合をどのように考えるべきか。

少なくとも上記の4点を考慮したうえで、将来の人間に何の期待もせず、しかも極めて長期にわたって安全を確保するために次のようなことが守られるような手段を考え出す必要がある。

①高レベル廃棄物が「危険」である期間全体にわたって、人間が高レベル廃棄物に近づけないようにする必要がある。

②高レベル廃棄物が「危険」である期間全体にわたって、人間や環境に悪影響を与えるような量の高レベル廃棄物中の物質（放射性の元素）が人間が住んでいる環境に放出されないようにする必要がある。

③高レベル廃棄物が「危険」である期間全体にわたって、①、②の機能が、将来の世代が何もしなくても確実に働き続ける必要がある。

④高レベル廃棄物が「危険」である期間全体にわたって、①、②の機能が、将来の人間が何もしなくても確実に働き続けることを、現在の我々全てが確信もしくは納得できるものである必要がある。

これらの全ての条件が完全に満たされて初めて「将来世代に何も期待しなくても安全」な手段となる。

## 2) 地層処分に絡む諸問題

### (1) 隔離期間

高レベル廃棄物が危険なものである期間は、隔離をする必要がある。地層処分と言う方策をとる際に安全を考えなければいけない期間をどれくらいの長さと考えておくべきなのか。考え方には現在で様々な考え方がなされている。

大きく分けると

- ①地層処分の安全評価を実施する期間
  - ②危険性を考慮すべき期間と考え、高レベル廃棄物の毒性を評価する期間
- の2つがある。

#### —地層処分の安全評価を実施する期間

核種放出シナリオを設定し、地層処分が持つバリア機能も考慮にいて、モデルを構築し、被曝量、もしくはリスクの形で評価する方法である。この方法では、評価に使用するデータは処分場固有のため、結果について他の施設にそのまま応用することができない。また取得するデータに関する問題が生じる。

安全評価においては、放射線影響評価モデルに基づく影響評価を実施することとなる。しかし放射線影響評価に利用する地質学的モデル、生物圏モデル、被ばくモデル等は現在の地質/生物圏/人間活動に対する現在の知見を基に作成されるものであり、数千年/数万年の遠い将来の影響を予測する目的で構成されているが、将来における様々な現象の不確実性等の影響により、その影響評価にも不確実性を含むものとなる。

評価期間の定め方に関してはいくつかの異なった考えがある。

IAEAではおよそ1万年後に氷河期が訪れると予測されることから、大幅な環境変化や人間活動の変化があり、数千年以上の期間にわたる人間の活動をモデル化することは無意味なことになりかねないといった考え方を示している。

ドイツにおいては同様に評価期間を1万年程度とする考え方がだされている。

イギリスやスイス等では評価期間を100万年を越える期間に定めている。これは、放射線影響が事実上極めて小さくなり影響評価が必要なくなる期間にあたる。これらの国がこのような評価期間を採用しているのは、不確実性の増大が緩やかで、どのような期間をとれば合理的な評価が可能となる

のかに関する判断がつきかねることによるものと考えられる。

#### 一高レベル廃棄物の毒性を評価する期間

他方、高レベル廃棄物の毒性を評価する期間の決定に関しては、天然ウランとの毒性比較によって決定する方法が考えられているが、このとき ①地層処分によるバリア効果を考慮しない方法 ②地層処分によるバリア効果を考慮しない方法 の2通りが考えられる。

天然ウランを比較対象とする理由は次のように列挙できる。

- 1 天然ウランはすでに人類と共存してきている。
  - 2 天然ウランも高レベル廃棄物のほぼ同様な化学的物性をもっている。
  - 3 廃棄物処分場が有するバリアーは天然ウラン鉱床の持つバリアーと同等以上であればよい。
- ここで比較する天然ウランの量が問題となる。考えられている比較量としては3つ考えられる。

#### 1 採掘天然ウラン量

再処理される重金属を生産するために採掘された天然ウランの量

#### 2 イエローケーキ量

重金属 1 MTUの再処理からの廃棄物固化体の体積と等しい天然の $U_3O_8$ を考える。

#### 3 処分施設等ウラン鉱石量

重金属 1 MTUの再処理からの発生する廃棄物が占有する処分施設の体積

地層処分によるバリア効果を考慮しない方法では、

摂取毒性で比較すると危険性を考慮すべき期間は10000年程度としている。

地層処分によるバリア効果を考慮しない方法

J.J.Cohenは、"An Assessment of Issues Related to Determination of Time"のなかで、有効度の概念の概念が導入されている。ウラン鉱床に比較して、生物圏に対する核種の移動の容易性を評価する。

良好に設計された処分場ならば、相対的有效度は1より小さくなる。



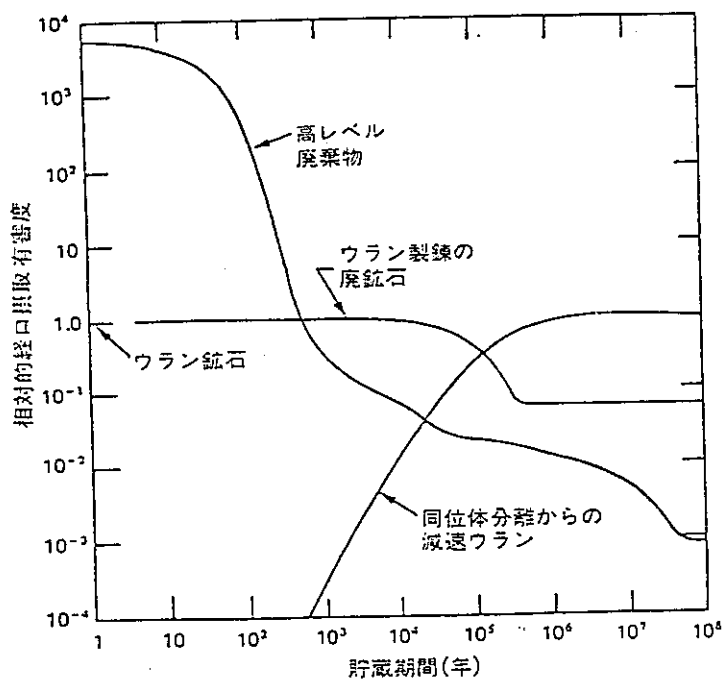


図 1. 2. 2-1 軽水炉燃料サイクルからの固形残留物の相対的経口摂取有害度

(Nuclear Chemical Engineering / T.Pigford 共著 / 1957)

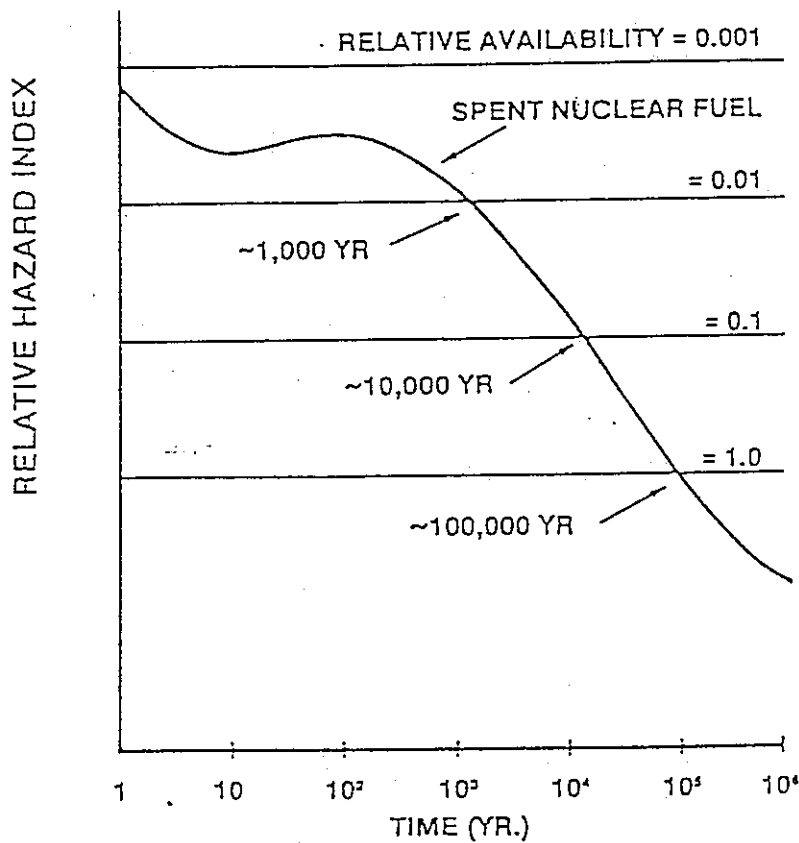


図 1. 2. 2-2 相対的有効度を変化させた場合の相対毒性指数の変化

J.J.Cohen (出所 An Assessment of Issues Related to Determination of Time / J.J.Cohen)

## (2) 制度的管理に関する考え方

施設に実際廃棄物が運び込まれている時には、当然作業上厳重な管理がなされているが、施設閉鎖後はどうすべきかには安全性を担保するのに将来世代に負担をかけるかどうかという大きな問題が関わる。

OECD/NEAの1982年の報告書では「処分施設の位置が忘れられるとリスクが増大するから、処分後についても土地管理は行なうべきだ。」と結論付けている。

(Disposal of Radioactive Waste , An Overview of the Principles Involved / OECD/NEA / 1982)

1989年のIAEAの報告書では「封鎖後の高レベル放射性処分場の安全性は、処分の管理が放棄された後、モニタリング、監視あるいはその他の制度的管理や修復活動の必要性にたよるものではあってはならない。」として制度的管理（土地管理も含めて）に頼ることを強く戒めている。

また”制度的管理をする”ということは将来世代に”管理”という負担を負わせることになり、廃棄物処分の理念に反する。現在は管理をしないで済む処分システムの構築を目指すことが重要であるとの指摘がなされている。

(Safety Principles and Technical Criteria

for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes / IAEA Safety Series 99 / 1989)

### (3)人間侵入

人間侵入に関する安全性研究成果はこの10年で顕著に増加している。人間侵入に関する研究は安全性研究の全体像に関わる分野を形成していると考えられることもできよう。

人間侵入の研究を進めていくうえでは、前提となっている基本仮定とアセスメント結果の明確な提示が非常に重要である。これは人間侵入アセスメントにおいては主観の入り込む余地が大きいため、相互に基本仮定と結果の情報を交換しながら進めていく必要があるためである。

処分コンセプトやサイトは安全性の面から非常に良い条件にあるので、処分においては潜在的な人間行動がリスク全体に影響をあたえる可能性がある。特に浅層処分においてはほぼ確定的な事柄であるが、深層処分においても、サイト内あるいはサイト近辺での人間侵入行為を考慮しなければならない。

過去の人間侵入アセスメントにおいて、主観的判断が行われたケースが多くあるが、主観性が入り込むがゆえ国際レベルでの情報交換や議論は重要なものとなってこざるを得ないといえる。

(P.D.Grimwood, C.Thegerstrom, Assessment of the Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites-Some Observations from an NEA Workshop, OECD, Paris, 1989)

#### ①人間侵入アセスメントの一般的視点

人間侵入シナリオでは、処分施設の存在の知識は将来失われていることが前提となっている。すなわち我々は将来において人間行動により引き起こされる事象を考察しなければならないことになる。

(P.D.Grimwood, G.M.Smith, Human Intrusion: Issues Concerning its Assessment, OECD, Paris, 1989)

しかし、人間自身がその予測対象のなかに巻き込まれている以上、将来の人間行動を予測しようとするならば、おのずから主観的判断が入り込まざるを得ないことになる。

シナリオ開発やモデル構築、影響計算、リスク計算用データの取得などのためには、次のような項目の検討がベースとなる。

- 将来の人間の生活の方向性
- 将来の人間の技術レベル
- 将来の人間の社会組織
- 将来の人間の情報理解力 etc.

まず、シナリオ開発や影響計算といった内容に立ち入る前に、人間侵入について何らかのシステムティックな思考法を組み上げておく試みが必要である。このような思考法はアセスメントへむけてどのように、合理的にアプローチするかを与えるものである。

(P.D.Grimwood, C.Thegerstrom, Assesment of th Risks Associated with Human Intrusion at Radioactove Waste Disposal Sites-Some Observation from an NEA Workshop: , OECD, Paris, 1989)

人間侵入のリスクアセスメントをおこなう上で、将来の人間と社会について考えなければならない基本的項目は下記のように考えられる。

表1. 2. 2-1 人間侵入のリスクアセスメントの基本事項

- 
- ①制度による侵入のコントロールはどのぐらいに効果的なのか。またどのぐらいの期間コントロールしなければならないのか。
  - ②処分設備および廃棄物に関する情報を守り理解する能力とは何になるのか（何が将来それを担保してくれるのか）
  - ③我々は将来の社会や個人が自らの意思で決定する意図的侵入に対して、どのような態度で臨むのか。
  - ④侵入者が廃棄物について無知であるとした場合、そしてひとたび処分施設に侵入し廃棄物を発見したとき、我々は彼の理解力や、また施設改善の行為を起こすことについて何が推定できるのか。
  - ⑤将来における技術レベルと社会組織の関係や、それに伴う侵入の起こりやすさや侵入後のなりゆきなどについて何が推定できるのか。
  - ⑥廃棄物の隔離に加えて、処分システムの中に回収性や補修性を組み込むべきなのか。もしそうなら、隔離と回収性・補修性というそれぞれの目的間のバランスは考慮されるべきなのか。
- 

(Disposal of Radioactive Waste: Review of Safty Assesment Methods, OECD/NEA, 1990)

実際これらの疑問に対して科学的回答はないといえよう。得られる回答は将来世代に対してどのような見通しを持つかに依存することになる。

アセスメントの遂行者はオープンに議論できるようにするため、彼ら自身の判断を提示し、将来世代に対してどのような見通しを持っているのかを提示しなければならない。

(Disposal of Radioactive Waste: Review of Safty Assesment Methods, OECD/NEA, 1990)

上記の問に対して、現在どのように考えられているかを以下にまとめる。

ーどのぐらいの期間情報を保持し、コントロールしなければならないのか

#### EPA

処分後100年をこえた場合、制度的コントロールに対する処分施設の性能アセスメントについては補償しないとしている。

(Environmental Standards for the Management and Disposal of Spent Nuclear Fuel, High-Level and Transuranic Radioactive Waste: Final Rule, Sep. 19, 1985, 40 CFR Part 191)

#### フランス

低レベル廃棄物処分では、侵入コントロール無しでサイトが300年間安全であることを示さねばならない。

(P.D.Grimwood, C.Thegerstrom, Assesment of th Risks Associated with Human Intrusion at Radioactove Waste Disposal Sites-Some Observation from an NEA Workshop: , OECD, Paris, 1989)

#### 一意図的侵入

意図的侵入は多くの理由から起こりうると考えられる。例えば、以下のような例が考えられる。

---

廃棄物が潜在的に持つ資源の回収

処分施設の修理、何らかの設備変更

---

サボタージュ

意図的侵入は社会的合意に基づく侵入と、個人レベルで生じる侵入がある。

#### (社会的意図的侵入)

最も一般的に適用されている原則は、将来世代は彼ら自身の考えに基づく行動に対し責任を持たねばならない、というものである。

仮に、将来の社会がいつの日か廃棄物を取り出すと決定したとしても、我々の世代はそれに対して何もできない。(但し、将来世代に処分施設の存在を知らせないとか、廃棄物を見つけたり取り出したりしにくくするという事は除いての話である。このような行為は民主主義的価値観との対立を招くかもしれない。)

## (個人的意図的侵入)

個人的な意図的侵入を考慮する際に、少なくとも想定すべきことは以下の2点である。

- ・すでに制度的コントロールはなくなっている
- ・個人（個人的グループ）が不注意かサボタージュ目的で侵入すること

(P.D.Grimwood, C.Thegerstrom, Assesment of th Risks Associated with Human Intrusion at Radioactove Waste Disposal Sites-Some Observation from an NEA Workshop: , OECD, Paris, 1989)

## 一意図的でない侵入

多くの意図的でない人間侵入のシナリオは、ある場所における処分場の存在を示す情報が失われるという前提に基づいている。但し、これは社会が処分場についてのすべての情報を喪失することを意味するわけではない。

その際、侵入者は以下のような状況にあると考えられる。

---

処分施設に関する情報を得ること、もしくは保持することができなかった。

サイトや廃棄物の発見ができなかった。従って危険を知ることはできない。

処分施設で作業することを、たまたま避け得なかった。

---

適正な行動がとれなかった。

意図的でない侵入を考えるうえで、上記のような状況がどの程度起こりやすいものなのか定量的に検討すべきことである。

ひとつの考え方として、次のような社会全体の方向性を考えてみることである。

- a)技術・科学が継続的に進歩した社会
- b)社会のレベルが低落し、そのときの技術・科学レベル

侵入の起こりやすさに対する、aとbそれぞれのpositive/negative効果は表1.2.2.のように示されている。

進歩の継続ケースでは、侵入する能力は上がっていくであろうが、処分施設に対する理解力は保たれ、不注意による侵入に対して効果的なカウンターアクションが取れるであろう。

社会の低落ケースでは理解の欠如を生じはするが、侵入する能力はなくなりsubsurface環境の利用が行われなくなり、従って侵入の起こりやすさは減少する。

---

a) Continued social/technical/ scientific development:	b) Social/technical/ scientific degradation:
+ Easier to keep and make information available	+ Less use of the subsurface environment
+ Ability to detect and understand risks associated with the waste	+ Difficult/expensive to go deep into the bedrock
+ Ability to take effective counteraction in case of inadvertent intrusion	- Loss of information and knowledge likely
- Increased use of surface soils and the bedrock	- Loss of ability to detect the waste and take effective counter- actions in case of inadvertent intrusion
- Easier/cheaper to go deep into the bedrock	

---

#### — 隔離と補修性

放射性廃棄物処分の指導原理は隔離である。

これは人間と環境を守り、処分施設の監視とコントロールの負担を将来世代に負わせることを避けるためである。

しかし、一方で、処分施設に関する知識を持つことによって、将来世代が廃棄物を扱えるようになる可能性がでてくるというアドバンテージがある。廃棄物扱いの方策を将来世代が持っていることは安全性を増し、廃棄物に混在する資源を利用する可能性をもたらしことになる。

このようなオプションを取っておくためには、何らかのレベルの施設の補修性か、廃棄物の回収性を処分システムの中に持つ必要がある。

こう考えると次のような結論に達する。

処分場は、コントロール可能で修正方策 (corrective measures) は不要なように建設しなければならない。すなわち、仮に我々は将来世代が処分施設をコントロールする可能性を拒むものではないとしても、我々の世代は処分施設のメンテナンス責任を将来世代に任せるべきではない、ということになる。

補修性・回収性の必要性が増大すれば、隔離の程度は通常下がってきてしまう。が、この2つ

の要請がどのように、同時に折り合えるか、という技術的問いかけに対し十分検討されていない。

(Ethical Aspects on Nuclear Waste: Some points discussed at a seminar of Ethical Action in the Face of Uncertainty in Stockholm, Sweden, Sep. 8-9, 1987. National Board for Spent Nuclear Fuel. SKN Report 29, April 1988)

## ②人間侵入シナリオ定義

シナリオ定義においてコアになる情報は過去および現在の経験である。これは例えば過去の深層岩盤とか表土の利用といったものや、土地の制度的コントロールが施行できるような社会システムの形成能力といったものである。

このようなコア情報をもとに、データを時間的に外挿することで将来の人間侵入シナリオの作成に利用できるため、定量的リスクアセスメントは行うのに適当なデータとなる。例えば深いボーリングや道路工事で地下を掘り起こすときのばい塵濃度などである。

こういった、定量的コアデータに加えて、判断や想像といったものもシナリオ定義に用いることができる。例えば、将来いつの日か人間は、地熱エネルギー探査のために、廃棄物の存在を知らずに処分場を利用してしまふ。そのために地下水の化学反応や熱水力学的条件の変化を引き起こし、処分の安全性を犯してしまふ、とか、遠い将来処分に関する知識が失われてしまったとき、将来世代の考古学者が処分場を見つけて廃棄物を掘り出してしまうかも知れない、などといった想定ができよう。

ただ、いずれにせよ人間の将来は、人間は将来起こりうる事象をすべて想像することはできないので、人間がシナリオを特定できない可能性がある。これは認識しておくべき事項である。

(P.D.Grimwood, C.Thegerstrom, Assesment of th Risks Associated with Human Intrusion at Radioactove Waste Disposal Sites-Some Observation from an NEA Workshop: , OECD, Paris, 1989)

シナリオ研究のなかで、最も良く研究されている侵入シナリオは、間接的で意識的でない侵入に関するものである。これは、例えば、農夫が処分施設近くに穴を掘るような場合である。この場合も水理学的、化学的条件が乱され処分施設の性能に影響を与える可能性がある。

このタイプのシナリオの定量的取扱は、通常過去と現在のデータの外挿に基づいて行われる。



人間侵入の被爆の面からの影響は浅層処分設備のアセスメントの場合よく考察される。この場合のシナリオは幅広く、サイト再開発調査のための施設に向けての掘削とか、サイトを横切る道路建設とか新しいビルの建設といった不注意による掘削などが考慮される。

人間侵入シナリオは非常に変化の幅が大きいことがバリ会議でのワークショップで明らかになった。

NEAが引き続き情報交換を国際レベルで推進することが望まれる。その際、構造化されたアプローチを用いることが安全性研究をより助けるものとなり、同時に、透明性、確信度を高めることになるだろう。

(P.D.Grimwood, C.Thegerstrom, Assesment of th Risks Associated with Human Intrusion at Radioactove Waste Disposal Sites-Some Observation from an NEA Workshop: , OECD, Paris, 1989)

### ③確率推定

確率推定には非常に難しい面がある。これはデータの外挿によりトレンドをのばすという手法に派生して生じる。これについていくつかの手法が検討されている。

- ー影響ダイアグラム
- ーイベントツリーの利用
- ーダイナミックアナリシス

たとえ確率推定が純粹に客観的に出せなかったとしても、システムティックで定量的手法により、重要因子の特定、緩和する方向の示唆が可能であろう。

確率という用語には混乱がしばしば見受けられる。常に明確な定義が示されることが望まれる。

(P.D.Grimwood, C.Thegerstrom, Assesment of th Risks Associated with Human Intrusion at Radioactove Waste Disposal Sites-Some Observation from an NEA Workshop: , OECD, Paris, 1989)

### ④規制基準

EPA 1985

スコープとなる期間は10,000年とする。

制度的コントロールの補償が与えられるべき期間としては100年間とする。

シナリオのタイプと、不注意な掘削の発生割合といったシナリオ変数の提示

カナダ/英国

一般リスク基準 (general risk criterion) のみを定めておき、アセスメント推進者はこの基準をもってどのような方法論やシナリオを人間侵入アセスメントに反映させてアプローチすべきかを自ら決定しなければならない。

(P.D.Grimwood, C.Thegerstrom, Assessment of the Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites-Some Observations from an NEA Workshop, OECD, Paris, 1989)

#### ⑤人間侵入規制の緩和

人間侵入リスク研究のシステマティックアプローチを用いる重要な理由の一つに、それが緩和基準を特製できるかもしれないという点にある。そのような基準は、技術的マターか、処分施設開発計画やサイト選定プログラムにかかわるものと考えられる。

表1. 2. 2-2 緩和した場合の侵入リスクに対する技術基準の例

---

— 廃棄物形状および activity concentration 基準

低溶解性、大気開放時のダスト化傾向の低さ、強固なキャニスターなどである。これらは廃棄物パッケージの品質に関わるもので、直接侵入の発生を低減させる効果がある。

— 侵入バリア

処分廃棄物上の厚いコンクリートカバーなどがよく用いられるたり、考慮されてたりしている。これを用いることで不注意ではない直接侵入の確率を低下させる。

— 処分施設の一般的詳細設計やロケーション

新入レベルを適正なレベルまで低下させるため用いられる。例としてスウェーデンの低レベル放射性廃棄物 (SFR) がある。これはバルト海下の岩盤中に作られる。これにより、将来だれかが処分施設に穴をあけるリスクは低減される。

---

表 1. 2. 2-3 緩和した場合の侵入リスクに対する計画基準例

---

—制度的コントロール

原理的にこれは廃棄物が潜在的危険を持つかぎり、できるだけ長く継続する必要がある。  
その際、土地のオーナーシップが問題となる。

—金属鉱床など将来的に探査の可能性のあるようなサイトは避ける。

—そのサイトを物理的にマークし、処分施設として記録する。

米国ではマーカーのサイズ、建築物の材料、サインの使用、多国語でのテキスト表示などが検討されている。

(M.F.Kaplan, Mankinds Future: Using the past to protect the future. Interdisciplinary Science Reviews 11(3), 1986.)

例えば地下マーカーの適用、多数の永続性のある警告盤などがある。

が、最近では、このようなものは注目度が低く、懐疑的、不必要ともいわれている。

(W.B.Mann, Identification of nuclear waste sites over ten millenia. Nuclear and Chemical Waste Management, 6, 95-100, 1986.)

---

#### (4) 再取り出し性とモニタリング

現在処分した廃棄物について再び取り出せるようにするかという問題に関しては、大きな問題となっている。

再取り出しが起こりうる場合は次の3つが考えられる。

- 1 地層処分システムが当初の機能を満足しないことが明らかとなった場合
- 2 より安全な処分方法が開発された場合に、処分方策を変更する場合
- 3 将来の社会的、技術的変化により、地下の廃棄物に資源的価値が発生した場合

再取り出しという行為には、処分体回収にともなう便益（ベネフィット）と同時に、処分システムを破壊する危険（リスク）が発生する。将来の再取り出しにともなうベネフィットは予測不可能である。またこの時、発生するリスクが、どの程度の大きさになるか明確な分析は行われていない。

処分システムの設計段階において、将来の取りうる選択肢を多くする再取りだし性を確保するという考え方と、技術的安全評価上再取り出しは認めない考え方が2つ存在する

現在の技術からみれば、現実には再取り出しは不可能ではない。しかし再取り出しのためには、閉じ込めを破壊しなければならない。このように閉じ込め、隔離性と再取り出し性は相反する理念であり、技術である。

再取り出しは、作業者の被曝、環境汚染を引き起こす可能性があり、将来世代の負担を最小にする第1原則にも反する。

「処分の定義の重要な点は、廃棄物の回収の意図がないことである。したがって、封じ込め施設の場合、再取り出し性は施設の閉鎖後の段階に関しては必要条件ではない。しかし、回収の意図がないことは必ずしも再取り出し性を除外することにはならない。現在の技術をもってすれば、分散処分された廃棄物以外はほとんどすべての廃棄物を回収することが言える。技術的な理由以外の理由によって、処分施設に廃棄物の回収を容易にする機構を含めることが決定された場合には、封じ込めシステムの健全性に悪影響を与えないように配慮しなければならない。」（OECD/NEA /1982）

人間の意図的な侵入が起こらないように配慮する必要がある。しかしより高い安全性を確保するための危険を承知した意図的な侵入を排除してはいけないというのが現在の考え方である。

モニタリングに関しても、安全性の確信をより強めるために、また一般公衆にわかりやすくするための方法論としてモニタリングを考えることはあっても、モニタリングにより安全性を確保するといった考え方を取るべきではない。

委員会では、処分場は、その安全性が閉鎖以後長期に渡って行われる制度的管理に依存しないように設計、建設しなければならないと言う原則を支持しているが、実際問題としてモニタリングと管理が処分閉鎖後かなりの期間はおそらく維持されるだろうことは認識している。その理由はおもに特定の社会的、政策的要件を満たす必要性のためである。 (ICRP Pub.46/1985)

封鎖後の高レベル放射性廃棄物処分場の安全性は、処分場の管理が放棄された後、モニタリング、監視あるいはその他の精度的管理や修復活動の必要性に頼るものではあってはならない。国家機関等の要請により、記録は維持されるかもしれないが、処分場の安全性はこうした措置にたよるものであってはいけない。 (IAEA safety series no 99/1989)

カナダでAECLが実施した高レベル廃棄物に関する社会調査において、モニタリングおよび再取りだし性に関する問題が公衆にとって極めて重要な要因となることが示された。この調査は1684人の成人に対する電話インタビューとこれに続くフォーカスグループ分析の二段階の調査で、1989年の9月21日から10月4日にかけてカナダギャラップ社がヒアリングに当たった。

この調査では一般公衆が処分後もモニタリングが必要と感じており、さらにそのモニタリング期間においては再取りだし性があることを望んでいるとの結果が出ている。またその時のモニタリングの程度に関しても次のような結果が出ている。

表1. 2. 2-4 処分後のモニタリングに対する一般公衆の考え方

選択肢	回答者比率
1) 地下の地層処分場そのもののモニタリングを行うことが必要	52%
2) 地下水および処分場近くの試錐孔のモニタリングが必要	31%
3) 地表のモニタリングが必要	6%
4) 浅い地下のモニタリングが必要	4%

ただし、フォーカスグループ分析において地層処分の永久性に関する説明を対象者行った後においては、処分場周辺のモニタリングがより望ましく、快適と感じられるとの結果に代わっている。

しかし、いずれにしても公衆はモニタリングと再取りだし性の確保をより望ましいと受け取っているものと考えられる。

(出所 "Sociological Research for the Canadian Nuclear Fuel Waste Management Program

" M.A.Greber AECL)

## 1. 3 地層処分技術開発の必要性と特徴

### 1) 地層処分技術開発の方向

我が国の原子力開発利用長期計画（昭和62年6月22日 原子力委員会）では高レベル放射性廃棄物に関して次のように述べられている。

”再処理施設において使用済み燃料から分離される高レベル放射性廃棄物は、安定な形態に固化した後、30年間から50年間程度冷却のための貯蔵を行い、その後、地下数百メートルより深い地層中に処分する（以下「地層処分」と言う。）ことを基本的な方針とする。”

このように我が国でも、海外各国と同様に地層処分を最も有望な高レベル廃棄物処分方策と考え、この実現を国の原子力計画の基本的な方針としている。

さて、この地層処分技術開発の特徴については「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の重点項目とその進め方（平成元年12月19日 原子力委員会 放射性廃棄物対策専門部会）」にその考え方が示されている。この考え方の流れを図3-1に示す。このなかで多重バリアシステム全体についての長期的性能の評価が地層処分の最重要課題であり、その長期的な安全確保上の性能を化学的に明らかにしていくことが必要であると述べられている。

この考えの基本は、地層処分においては地下水による放射性核種の生活圏への移行に最も留意する必要がある、このため地層処分においては①「地下水接触の抑制」すなわち廃棄物が地下水と接触することを妨げる②「溶出・移動の抑制」すなわち廃棄物が地下水と接触した後も放射性核種が地下水に溶出し生活圏は移行することを妨げる③「環境安全の確認」すなわち廃棄物中の放射性核種が地下水を介して人間環境に有意な影響を及ぼさないことを確認することが安全確保に必要な要件とする点にある。

なお、多重バリアシステムに関しては我が国では次のように考えている。（同報告書）

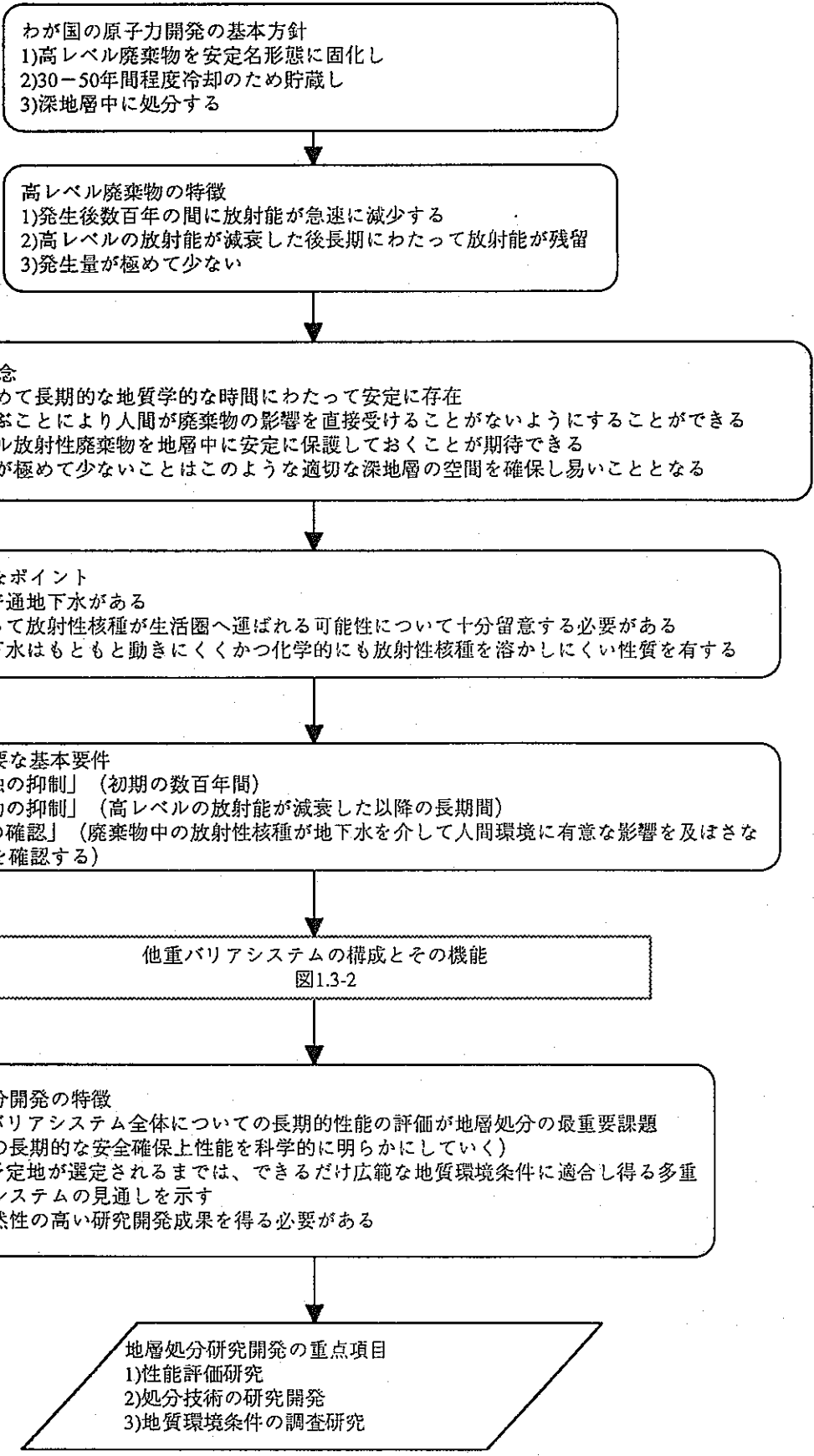


図1.3-1 我が国の地層処分技術開発の考え方

(出所 平成元年12月19日原子力委員会 放射性廃棄物対策専門部会)



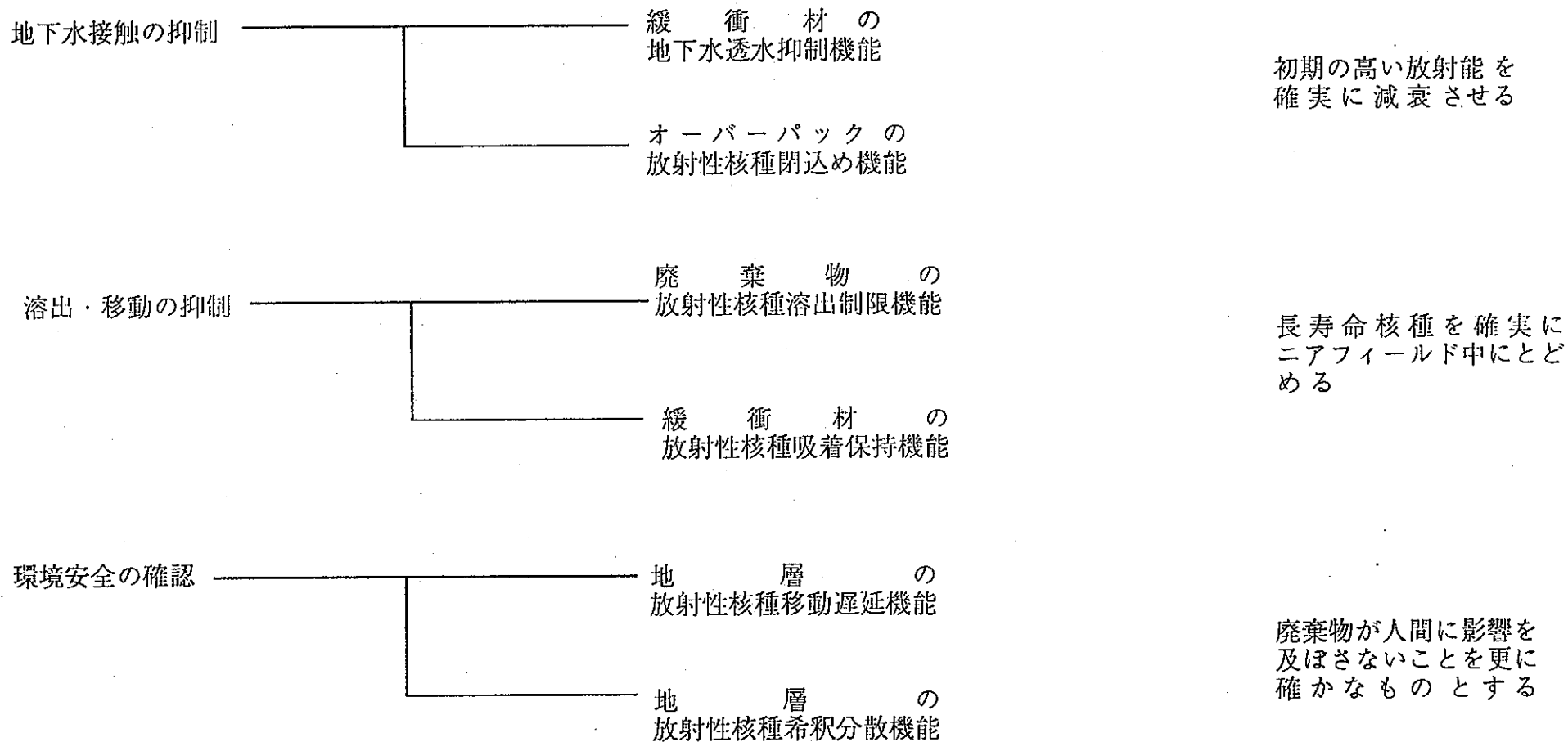


図1.3-2 多重バリアシステムの構成とその機能

### 多重バリアの構成

- ①高レベル廃棄物をガラス固化しステンレス製の容器に封入したうえでオーバーバックと呼ばれる容器に入れて（これを「埋設廃棄体」という。）地層中に埋設する
- ②埋設廃棄体と地層の間には粘土質材等の緩衝材を充填する
- ③周囲の地層は地下水を浄化する等の安全防護機能を本来的に有している
- ④上記の①②を合わせて人工バリアを呼び、③を天然バリアと呼ぶ。さらにこれらのバリアが以下に示すような種々の機能を多重に組み合わせて持つことから、これらのバリア・機能の組み合わせを多重バリアシステムと呼ぶ。

### 多重バリアの機能

- ①緩衝材は埋設廃棄体の周囲からの地下水の浸透を制限し、その中で地下水の動きを極めて遅くする効果がある（地下水接触の抑制のために有効に機能する）
- ②オーバーバックは透水性の緩衝材に包まれていて容器材料の腐食が生じにくく、廃棄物を長期間閉じ込めておく機能を有する（地下水接触の抑制のために有効に機能する）
- ③放射性核種をガラス質の形態に固化してあり、地下水が廃棄物と接触しても地下水中への溶出が抑制される
- ④緩衝材中では地下水の動きが制限され、さらに緩衝材の放射性核種吸着により拡散による移動も抑制される
- ⑤放射性核種の地層中の移動は、まず地下水の動きが緩慢であり、さらに岩石による放射性核種の吸着効果により放射性核種の移行速度は地下水の移行速度よりも大幅に遅くなり、放射性核種の移行の抑制効果を持つ
- ⑥地層中では放射性核種は分散し希釈される。

このような認識のもとで、地層処分研究開発の重点項目を我が国では次の3つに定めている。

- ①性能評価研究
- ②処分技術の研究開発
- ③地質環境条件の研究

## 2) 地層処分技術開発の進め方

地層処分技術開発の進め方に関しても、「高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の重点項目とその進め方（平成元年12月19日 原子力委員会 放射性廃棄物対策専門部会）」にその考え方が示されている。この考え方の概要を図1.3. にまとめる。

ここで重要な考え方は、①高レベル廃棄物は処分前に30-50年間程度冷却貯蔵するため処分技術開発にはある程度時間をかけることができる、②性能評価研究は将来予測のための科学的方法の開発等長期的研究開発課題が含まれるため地層処分技術開発には長期間を要する、③地層処分の研究開発に当たっては地層処分に関する国民の理解を得るよう努めることが重要、④地層処分技術開発においては動力炉・核燃料開発事業団が中心的役割を果たし、情報提供等を積極的に行う、といった点である。

このように、原子力委員会においても、地層処分技術開発においては、システムの性能評価やこれに含まれる将来予測といった課題が極めて重要な役割を果たすこととなるとの認識が示されている。

そこで動力炉・核燃料開発事業団では、地層処分技術開発の主要課題のうち「処分技術の研究開発」として人工バリアに関する技術開発を進めるとともに、「地質環境条件の研究」として我が国で利用可能な天然バリアの特性調査を進める一方、特に「性能評価研究」に注力して技術開発を進め、性能評価研究の成果を先行的に報告書として取りまとめ情報提供を推進する計画である。

## 3) 動力炉・核燃料開発事業団における地層処分技術開発

現在、我が国における地層処分の技術開発は、主に動力炉・核燃料開発事業団と日本原子力研究所において推進されている。

原子力委員会によれば、動力炉・核燃料開発事業団は地層処分の実施を目指した技術開発を進め、日本原子力研究所は、処分の安全性を評価するための技術開発を進めるとの役割分担がなされている。

(原子力委員会報告書)

地層処分研究開発の進め方

研究開発期間

- 1)高レベル廃棄物は処分に至るまで冷却が必要
- 2)冷却のために30-50年程度貯蔵
- 3)30-50年程度することは技術的に比較的容易に対応可能
- 4)この貯蔵期間に十分研究開発等を進めていき最も適切な地層処分の方法を慎重に構築していくことができる

性能評価研究の特徴

- 1)性能評価研究においては将来予測のための科学的な方法の開発等の長期的研究開発課題が含まれる
- 2)このことを考えると地層処分研究開発には今後10数年以上はかかることが想定される (平成元年12月)

その他の研究開発の特徴

- 1)長期的研究開発の効率的かつ着実な進展のための計画性と柔軟性の確保
- 2)地層処分の観点から見た我が国の地質環境条件の的確な把握とその特性に応じた処分概念と処分技術の開発

「地層処分の研究開発を進めていくに当たっては、地層処分について国民の理解を得るよう努めることが重要」

動力炉・核燃料開発事業団の役割

- 1)研究開発の中心的推進機関
- 2)研究開発成果を適切な時期に報告書として取りまとめ、情報提供を積極的に行なう
- 3)動力炉・核燃料開発事業団を中核として国立研究機関/民間研究機関の技術力を結集していく

国の役割

- 1)動力炉・核燃料開発事業団の提供する報告書等を評価する
- 2)この評価等を通じて地層処分についての国民的理解を得つつ、地層処分の円滑な実施を目指す

図1.3-3 地層処分技術開発の進め方

(出所 平成元年12月19日原子力委員会 放射性廃棄物対策専門部会)

このような役割分担のなかで、動力炉・核燃料開発事業団では次のような認識で技術開発を進めている。

- ①多重バリアによる安全確保の仕組みを構築することを目標に基礎的な研究開発を進めてきた。
- ②その結果、多重バリアシステムに諸機能についての各種の知見と研究成果が蓄積された。
- ③地層処分の考え方が技術的に実現可能であるとの見通しを得つつある。

また、地層処分の研究開発の特性に関する認識も次のようにまとめられている。

地層処分の研究開発は、「核種と人工バリア、並びに地質環境が相互の影響しあう複雑な系の挙動が、未来にむけて極めて長期に渡るため、処分の安全性を経験的に確認することは不可能である」

このため

- ①研究開発の進め方の確かさ
- ②評価手法の科学的確かさ

この2つをもって成果の確かさを示さざるを得ない。

当面の研究開発の方向としては、

- ・地下深部の地層の性状
- ・地下水の動き
- ・人工バリアと地下水の科学反応

等の現象に関する基本法則を明らかにするとともに

- ・解析モデルの開発
- ・信頼性の高いデータの収集

を行うことで多重バリアシステムによる長期的安全確保の仕組みを明らかにする「性能評価」を中心とした研究を進める。

特に、日本の地質環境に適合するように、できるだけ広範囲な地質環境に適合し得るよう、堆積岩系と結晶岩系にそれぞれ適合した多重バリアシステムのモデルを示し、ニアフィールドにおける核種と人工バリアの挙動を正確に評価する。

以上の研究開発の方向より、地質環境の条件、あるいは人工バリアの仕様に対する技術的選択の幅を拓げていくことが目指されている。

## 2. 高レベル廃棄物対策に関わる関係者のヒアリング調査

## 2. 高レベル廃棄物に関わる関係者のヒアリング調査

### 1) ヒアリング結果

ヒアリング対象者は以下の通りである。(敬称略、専門分野および肩書は1992年2月現在、順不同)

#### 原子力関係者

東京大学工学部講師	安 俊弘	地層処分
京都大学工学部助教授	森山 裕丈	低レベル廃棄物処分
金沢工業大学教授	若林 宏明	経営工学

#### その他の専門家

大阪大学助教授	盛岡 通	環境リスク論
群馬大学助教授	早川由紀夫	地質学
日本経済新聞社論説委員	栗原 宣彦	マスコミ

ヒアリング時における質問事項は大きく3つにわけて行った。地層処分の考え方の前提となる地層の安定性についてを含めた技術論と、それぞれの立場から見た地層処分に対する関心の持ち方、一般公衆への情報伝達の方法である。ただし、解答者の専門分野との関連もあり、すべての解答者から、全ての質問の解答をえられたわけではない。

質問事項は以下の通りである。

#### ●技術的な観点

- 地層に関連する問題で地層の安定性を前提にする場合にどのような点に気をつける必要があるか
- 「どこ何処の地層は100万年は安定である」という説明もしくは「100万年間安定であろうと考えられる地層が存在する」といった説明は成立するか。
- 重大な、しかし発生確率が低い事象を考慮した場合、どのように安全性/安定性を言うか
- 地層の安定性でサイトジェネリックな議論は可能か



- 地層処分のような技術の場合、一体どの様なところが心配か
- 地層処分についてどのようなことが情報として示されると興味を持つか
- コンピュータシミュレーションによる評価での安全確保をどのように考えるか
- コンピュータシミュレーションにたよらないとすればどのような安全性に関する説明が必要か

●それぞれの立場から見た地層処分に対する関心の持ち方

- 地層処分に関してどのような視点から興味を感じるか  
(社会問題、地層に関連するから、環境問題、未来問題、その他)

●一般公衆への情報伝達の方法 (H3 レポートの基本的な態度)

- 何故地層処分か？貯蔵はできないか？他の処分方法はないのか？といった点は大きな問題となるか
- 様々な人に地層処分に関する合理的な議論をするように情報提供する際ににどのような点に留意すべきか  
(議論の内容、議論のしかた、情報提供のしかた、興味を持ってもらえる点等)

インタビュー日時；1991-02-03

場所； ；東京大学原子力工学科12号館 5階

面会者； ；安講師

※技術的な観点

●80年代にヨーロッパで築かれた安全性のロジックは何か整理することが重要である。

●70年代は予測に対する努力が行われていた。80年代を通して評価という概念が固まってきた。

●評価とはある基準に適合するか、しないか判断することで、評価の基準は、専門家がつくる。公衆はその基準を信頼することで、一連の評価と言う行為が成立する。

●地層処分に関する基準の大きな特徴は、「経験を基にした基準になりえない」ことである。そこで今埋めた廃棄物が考えられうるシナリオを経て、そのまま現在の生態圏、社会に出てきたと仮定して、放射線防護基準とてらし合わせて、安全と評価できることを基準としている。

この考え方は公理である。この考え方に合意されるにあたって、様々な議論がなされた経緯を追う必要はある。しかし、公理とする以上、疑うことは意味がない。

●ヨーロッパで合意されている安全評価の考え方も今までの様々な議論を下敷きになされているものである。OECDやICRPの文献の淡々とした表記には、このような長い議論の過程が既に理解されているという暗黙の前提がある。

●近年の研究の進歩より、人工バリアの長期健全性が保証されるようになり、相対的な天然バリアの重要度は低下しつつある。自然バリアにあたえられた機能は、人工バリアのバックアップとしての遅延効果が主である。この点で特に関係するのが、地下雰囲気中の還元性である。話を推し進めれば、超長期に渡って、地下雰囲気中の還元性を保証できる方策を考えることは有効である。

※それぞれの立場から見た地層処分に対する関心の持ち方（関心を持っている点）

●色々な機関が研究を進める。そのことでお互いにチェック機構となることが重要である。その点で、日本の現状は、正しい方向とは言えない。

また同様に、研究機関と評価機関、実施機関と規制機関は各々独立が必要である。このことが、地層処分を実施するにあたって客観性、中立性が確保される鍵と言えよう。

●地層処分に関する安全評価基準に、最初からPAを考慮に入れることが必要であるかはただ疑問である。

例えば、航空機の安全性の評価基準を決める時に、一般の人の科学的合理性に基づかない意見を反映させることは無意味である。そのような安全基準の決め方はなされていない。

地層処分に関する研究の現実には、PAを意識するあまり、研究のコア、技術のコアとなるものがゆらいでいるのではないか。得体の知れない怪物を恐れるがあまり、身動きが取れなくなり、いつの間にか本当の怪物に出会うということになりかねない。

●本来ならば、シナリオに大きく反映するのは、地層の安定性である。評価においては、地層の安定性というものは、前提条件となるものである。そして、地層の安定性とはサイトジェネリックなものである。それならば、評価という行為を行うには、サイト候補地を決定して論じることが必要なのに、現状では、サイトに適した場所があるのかどうなのかの明らかにされていない。このロジックがまもられていないのは日本における地層処分研究のゆがみである。

●地層処分はあくまでの一つのオプションと考えている。研究者、科学者は科学的事実を中立的に述べるのが、大切であり、ここにPAを意識することは研究をゆがめる要素になりかねない。PAや実施に関する意志決定は政治家の仕事である。厳密に言えば、研究者が関わることではない。

●日本では本当の意味の議論が行われていない。これは地層処分の研究者のなかでもいえる。このなかで議論し、問題解決の糸口を見つけることがPAについて「練習問題を解く」ことになる。

※一般公衆に対する情報伝達の方法論（動燃が、H3 レポートを出す意味）

- H3 レポートのイメージとしては、OECDが先ほど作成したパンフレットの日本語版をつくれればいいのではないかと思われる。
- このような研究レポートの基本的な姿勢は、AAをどう言い換えるか、AAの多面性や多様性を整理することが特に望まれる。
- 動燃は地層処分の実施機関ではない。あくまでも地層処分の技術開発を行う研究機関である。その点で、原時点でのレポートでは、科学的事実を中立的に記述することが、結果的にPA獲得につながると思われる。
- 動燃はあくまでも、地層処分技術の研究を請け負う立場であるから、廃棄物処分の方法として、地層処分を選んだ理由、核廃棄物の量、核廃棄物を資源と見なすかどうかなどの上流部分のことは、H3 レポートに表記する必要はないと思われる。
- 地層処分の性能評価の技術開発の状況が、このレポートの基礎になるものであり、そこについて、事実を中立的に記述することが大切である。  
ただし、研究のアプローチ法の正しさを確認するためには、より多くの、関係した分野の科学者や技術者を巻き込む必要がある。そのためには、技術開発の現状について、解かりやすく、整理された形で表記されることが必要だと思う。

インタビュー日時；1992年2月13日

場所； ；京都大学原子核工学科

面会者； ；京都大学原子核工学科助教授 森山裕丈

※技術的な観点

- 地層の安定性を前提にする場合に気をつける点は、発生確率の大小と影響の大小の双方ともにも考慮したうえで議論をする必要がある。
- 地層の安定性でサイトジェネリックな議論は可能かどうかの問題に関しては、科学的にはサイトジェネリックな議論は意味のないものである。しかし、地層処分の概念を科学的に議論するうえでは、このようなアプローチは仕方のないことである。これは、受け入れ側の反応が大きな問題となるからである。最終的には、サイトスペシフィックな議論を再度行う必要があるだろう。
- 地層処分の技術で心配なことは操業中の事故、行動の埋め戻しのエラーなどヒューマンエラーに関する点である。操業中に事故で接近ができないような事態が起きないかどうか。その際、どう対策するか、検討することが重要である。
- コンピュータシミュレーションによる性能評価での安全確保はナチュラルアナログによる補強や過去の地層の経緯による安全評価によって補強される必要があると思われる。
- 貯蔵との比較が考えられるが、隔離性能において地層処分は貯蔵よりも優れていると考えられる。
- 処分場モニタリングについては、処分場の安全性能にかかわらず、モニタリングは続けるべきであると考えられる。というのは、・現在の安全評価が不完全である点・将来予測が不完全である点、この2つの点からチェックを行うためにその必要性とされる。

- モニタリングと共に記録の保存も管理として必要な点である。
- 現在の日本では、数百～千m程度の地下から地下水をくみあげることは、ごく当たり前のことであるので、処分場の設置によって、少なくとも周囲の地下水の汚染が起こることは想像ができる。地上に影響があるかどうかは別として、地下水を汚染することには問題があると考えられる。
- 将来世代に対する負担の考え方について、様々な考え方があるが、私は、社会が原子力発電を行うことを受け入れた時点で、将来世代に負担をかけることを前提としていると考えられる。

※一般公衆に対する情報伝達の方法論（その伝えるべき内容）

- 地層処分の必要性処分の必要性が十分に専門家の間で議論されたものであるかどうかは難しく重要な点である。専門家と言われている人々の間でも必要性の納得が得られているかどうか。そして公衆の間に必要性の納得が得られるかどうか。
- 地層処分についての情報公開は処分する放射性核種インベントリー（元素、アクティビティ）が明示されていることが必要である。
- 将来世代に対する負担の考え方について、様々な考え方があるが、私は、社会が原子力発電を行うことを受け入れた時点で、将来世代に負担をかけることを前提としていると考えられる。

インタビュー日時；1992年2月14日

場所； ；金沢工業大学経営工学科

面会者； ；金沢工業大学経営工学科教授 若林 宏明

※技術的な観点

●地層処分のような技術の場合、一体どの様なところが心配かについて

地層処分の問題は技術を検討する以前にあるのではないか。本当に我々は、現状で高レベル廃棄物を処分できるのか、例えば、摂取毒性のグラフも軸の表記は対数軸にすべきではない。正確に表記して、どの程度の毒性が続くか実感すれば、我々が今行おうとする意味も解かるかも知れない。

技術をどう言うよりも、この問題についても社会的問題をはらんでいられると思われる。そして、大体的場合、その手の問題のほうが、解決は難しい。人工バリアがどう働くかというよりも、少なくとも廃棄物の再取り出しや管理をする期間の百年の間でも、そういった機能を持った機関が組織として、長期間機能するかが問題になると思われる。

●コンピュータシミュレーションによる評価での安全確保をどのように考えるかについて

シミュレーションの結果は前提をどう考えるかで大きく変化する。自然に関する知見がいくら増加したからといって、本当に正確な予測ができるわけではない。将来いくら技術が進歩したからといって予測精度から言って信用できない。

●コンピュータシミュレーションによる安全評価で安全が担保されると考えるべきかどうかについて

安全は担保できるとは思えない。シナリオ解析によって、起こりうる事象をすべて数え上げているとは思えない。

●コンピュータシミュレーションにたよらないとすればどのような安全性に関する説明が必要かについて

詳しいシナリオ解析は難しいのではないか。日本のような地質条件、気候条件では、外国の考え方をそのまま導入するには無理がある。そもそも地下が安定と一方的に考えることには、無理がある。まず地層処分ありきでは、進む計画も進行しない。むしろ、廃棄物の長期貯蔵のほうが実行が簡単で

はないか。貯蔵する一方で技術開発を進め、技術的課題が解決した時には、資源として有効に使う。原子力の考え方にもリサイクルの考え方を導入することが必要ではないのか。

※それぞれの立場から見た地層処分に対する関心の持ち方（関心を持っている点）

●地層処分の問題は本質か、考える必要がある。公衆に訴えることについても、地球環境問題と言う視点を落としては、この方法が支持されたり、受容されることは難しいだろう。この状況のなかで、地層処分と言う概念には、リサイクルという発想が欠けている。このことは地層処分の事業の進展におおきな障害となると考える。事業として成立するのは大変先になるのではないか。

むしろ、貯蔵施設から出発し、研究を進めながら、安全を証明し、結果、処分に移行することが現実的、敢て言うなら、地層処分と言う方法を実現するにはこの手順を踏むしかないと思われる。

※一般公衆に対する情報伝達の方法論（動燃が、H3レポートを出す意味）

●動燃は研究機関として、研究の実際、結果については、数字も含めて、正確に公表すべきと考える。

●何故地層処分か？貯蔵はできないか？他の処分方法はないのか？といった点は大きな問題と思われる。

繰り返して言うが、まず最初に地層処分ありきとの態度は問題ではないのか。まず、高レベル廃棄物の問題はスペントフェューエルのとの関連の中で考えることが必要である。

●公衆は直観できるものしか認知しない。今のエネルギーシステムで、自分の家のコンセントの先に原子力発電所が繋がっていることを実感している公衆がいるだろうか。高レベル廃棄物の存在は原子力発電の存在からの問題であり、原子力発電は、社会がどのエネルギーを選択するかと言う問題であり、つきつめて言うと、どのような社会をめざすかと言った問題である。この連関を切り離して人々に語っても、地層処分という方策は容認されないだろう。リスクを容認させるには、ベネフィットを実感させることが重要である。

将来は、エネルギー供給システムも分散化が進み、中小の電源がミックスされて、それぞれのエネルギー供給システムの強みを発揮する時代がくると予想する。公衆が自分の所属するコミュニティのエネルギー源を選択することになる。この選択枝の中に原子力発電も加わるし、エネルギー源同志の競争も起こるだろう。これがコストの点だけでなく、技術の点でも言える。この段階では、高レベ



ル廃棄物の問題も実感できる問題として、地層処分も容認されるかもしれない。

今の段階では、地球環境問題、リサイクル問題、エネルギー問題との関連を実感させることが難しく、単に「地層処分ありき」では公衆は容認しないのではないか。

インタビュー日時；1992年2月13日

場所； ；大阪大学 工学部

面会者； ；大阪大学 工学部助教授 盛岡 通

※技術的な観点

- 地層の安定性でサイトジェネリックな議論は可能かについては、サイトジェネリックなアプローチのほうが、地層処分の概念を一般に浸透させるうえでは有効であると考えられる。つまり、地層処分が必要かどうかを議論するうえでは、サイトジェネリックな議論のほうが科学的に議論を進めるうえで有効ではないかと考えられる。
  
- 地層処分を行った場合にもっとも気がかりであると考えられる点は、処分後の地下の状況の変化が監視できているかどうかである。地層処分の概念では、処分後の対応が必要であってはならないはずであるが、
  - ・地下の変化の状況の確認ができるかどうか
  - ・何らかの対応が可能であるかどうか、処分場の強化ができるかどうか
  - ・必要とあらば再取り出しができるかどうかといった点は必要と考えられる。
  
- このような措置は、地層処分のすべての期間を通じて必要というわけではないが、初期に必要であると考えられる。その理由としては、現在の地層処分の技術や、地層の変化や気候変動など自然現象に関する認識が不完全であると思われるからである。つまり、時間が経過し、地層処分に関する概念の認識が一般公衆の間で広がり、地層処分の安全性に関する認識が広まった時点で、このような措置を徐々に弛めて最終的になくすことはありえる。
  
- また、貯蔵・管理から処分へと移行していくような概念も受け入れられ易いのではないかと考えられる。つまり、地下に廃棄物をおいてはいるけれども、目を放したわけではなく、誰かがおもりをしている、様子を見ているということで了解が得られ易いと考えられる。その後科学技術的な知見の高まりによって、管理の必要性が低くなることによって管理の体制は弛められ、処分へと移行するようなステップが必要だと思う。

●地層処分のような技術で不安を抱かせる点では、地層処分の概念は、個人的には従来のローテクの集大成のような印象をもっており、直感的に脆いものを感じさせる。石油コンビナートなどのように、大規模ではあるが安全面からあまり信頼できるものではないような印象を受けるものである。つまりそれは、ハイテクの先端では、まだまだ解明されない現象を抱えていて、人間は謙虚である部分をもっているが、既成の技術に対してはいわば完全に安全であると言うように語られることが多く、傲慢な部分を感じさせる。

自然のメカニズムが完全には知られていない点も不安を感じさせる点である。

●コンピューターシミュレーションによる安全評価については、現在、一般的に科学技術観のような認識は高くなってきており、例えばメディアによる情報を現実のものとして受け入れるような傾向は現われているので、シミュレーションモデルによる性能評価による安全担保の概念は、受け入れられる素地は少しあるが、この方法だけでは十分ではないと考えられる。

#### ※一般公衆に対する情報伝達の方法論

●地層処分の概念が受け入れられるようになるには、地層処分が社会全体として共有すべきリスクであるとの認識が一般的になることが必要である。

また、一般大衆としては、自己決定のチャンスが提供されているかどうかで、抵抗感に変化するものである。何らかのレスポンスが行われる必要があると考えられる。これには、情報公開も含まれる。

●地層処分について処分する廃棄物がこれ以上削減できないものかどうか、つまり突き詰められたうえで処分するしかないものなのかどうかについて、十分に議論がされるべきである。

●情報公開に関しては、小出しをするべきではなく、議論を行う素地を広げるためにも情報を大出ししていくべきである。それが地層処分に関する議論を深めるためには寄与すると考えられる。

インタビュー日時；1992年2月7日

場所； ；群馬大学 教育学部 早川研究室

面会者； ；群馬大学 教育学部助教授 早川先生

インタビューの状況は以下の通り

#### ※技術論的な観点

##### ●地質の安定性について

何を基準として安定とするのかは大きな問題であるが、例えば、100万年間と言う期間に、ある特定の地域について、地層が安定であろうということは、地層学者ならば予想することが可能である。それは過去数千万年間地層が安定であったことは、観測でも明らかであり、かつ地層を動かすおおきな支配法則は既に解明され尽くしている。例えば、阿武隈山地は第三紀の地層で安定である。日本には、各地に第三紀の地層が分布しており、これは安定であろう地層の候補である。これを火山が貫いている。火山の発生に関して、火山帯から離れた地域では発生していない。火山帯の発生はプレートテクトニクスで説明できる。日本において、仮に百万年間安定な土地は、第三紀に地層で、かつ火山帯から離れた場所との条件が出せる。将来の火山帯の位置の変化というものはない。プレートテクトニクスは既に公理と見なされている。疑いようがない。逆に地球物理学者によって発見されたプレートテクトニクスが、地層学を死せる学問にしてしまったのかもしれない。

##### ●サイトジェネリックな議論について

反対する側から様々なアプローチができる以上、サイトジェネリックに地層は安定であると議論するのは難しいような気がする。

##### ●地層処分の技術について、心配する点

人工バリアの性能については、個人的には信用している。優秀な人が、一生懸命に研究をしていてくれる以上、設計通りの閉じ込め性能を発揮してくれると思し、最善のものになると思う。

自然バリアについて、何か、シナリオで想定出来なかったことが起こることが、最も心配である。例えば、処分場にマグマだまりが接近することも考えなければならない。

私個人としては、シナリオの検討の際に、急速に何かが進むという場合よりも、ゆっくりしたプロセスについて、正確な検討ができるか心配である。

●コンピューターシュミレーションによる安全評価について

個人的には、信用する。というのは、それ以外定量的には評価できない理由からである。

しかし、何が有用かという観点から見れば数値シュミレーションよりも、定性的に起こりうることをすべて数え上げたうえでの綿密な考え方の方が有用であると考えている。

※それぞれの立場から見た地層処分の関心の持ち方（関心をもっている点）

●私は地層学が世の中に役立つ数少ない分野ということで興味を持っている。地層学は、近年、かつての分野を地球科学の”プレートテクトニクス”論に制覇されて、日陰の学問になってしまった。特に、日本では研究の層があまりにも薄くなっている。

地層処分では、日頃、社会にあまり貢献することのない地質学が、大いに社会に貢献できる良い機会である。また地層処分の問題が顕在化することによって、心ある若い世代の人々が地質学に注目してくれることも期待している。

●通常では考えることのあまりないような長い期間を予測することは興味深い。

地層処分の安全評価として考慮する期間の長さの一例で、百万年と言う数字がだされていたが、私、個人としては百万年は、”人類の限界”に達しているのではないかと思っている。評価する期間としては、”生物種としての限界”を考慮する必要があるのではないか。

地学が地学として存続している所以の一つは、地学者は長い時間（時代）を語ることにある。その点で、地層処分に対して、地層学、地層学者は貢献できると思う。

## ※一般公衆に対する情報伝達の方法論

### ●公衆に対する問題の投げ掛け方の注意すべき点について

地質の専門家としての立場から見れば、詳細なデータは隠さずに出して欲しい。特に、サイトの選定基準とその考え方については特に興味がある。

### ●公衆に対しては、わかりやすい言葉で、正直に、疑いを持たれることなく、研究のすべてを明らかにすることが、重要である。人々に理解を得るには王道はない。また時間をかけることが重要である。新しい考え方を公衆に誤解なく伝えるということは、それ自身本当に難しいことだが、必ず必要だと思う。

### ●重要なのが、マスコミへの対応である。私見ではあるが、雲仙噴火の際のNHK報道の横暴さは、考えさせられるものがある。今や、れっきとした火山学者が”NHK流火山学解釈”に影響されてしまっている。このようにマスコミの影響は大きい。

地層処分の場合にも、公衆への広報は、マスコミを通じて行われる。マスコミといっても、センセーショナリズムや、盲目的批判主義に毒されていないマスコミもある。いかにその人々に働き掛けていくかが問題だ。

発表、報道の仕方が大変難しい問題なのは、雲仙噴火の際の同様だった。火砕流発生の予測は十分可能だったのに、”火砕流”という言葉の使用をめぐって当局で意見が割れ、実際火砕流発生の後も”これを火砕流と呼ぶか”と言う点で、問題になった。このようなくだらないことで尊い人命が失われた。

地層処分をめぐる状況も似ている。廃棄物の処分問題が避けられないならば、できるだけクリアにすることが先決だ。正直に、公衆に隠し事なく、語りかける必要がある。今回は幸いにも時間がある。

### ●何故、地層処分か？他に方法がないのか？どうしてこんな状況になったのか？このことは原子力発電を始めた時、起こりえることが予想できたのか？といった素朴風問はは、公衆の側から見れば大きな問題になるし、議論も必要と考える。解かりやすく納得できる説明が必要である。

インタビュー日時；1992年2月20日

場所；；日本経済新聞社

面会者；；栗原 宣彦 論説委員

インタビューの状況は以下の通り

※それぞれの立場から見た地層処分の関心の持ち方（関心をもっている点）

- 迷惑施設の典型という感じがする。しかし今は、研究の実態自身はあまり人々の関心を引く問題にならないのではないか。本格的に世論に係わる問題になるのは建設地域が決定された時である。逆に、それまでは人々はあまり関心を祓わないのではないか。

※情報の提供のしかた

- “何故地層処分か？” “貯蔵はできないか？” “他の処分方法はないのか？” の問題は本来なら問題になる所だし、この点を人々に理解してもらう必要があるわけだが、人々はサイトが立地する地点はどこかに興味が集中することだろう。
- 研究をしていることは隠す必要はない。十分に明らかにすべきである。明らかにできない結果しかでない研究が、実行できるわけがない。
- 原子力の立地問題は今日、現状の状況に膠着しているのは、推進側はやはり、反対側に破れたと言わざるおえない。情報提供と言う点においても反対側はマスコミに対してのアプローチも誠実であった。それで、報道に影響があったというわけではないが、情報をいかに提供するかと言うことは大きい。

高レベルという問題の提起の仕方としては、有識者を集めて、シンポジウムを開催することが一般的ではないか。特に、急に議論を投げ掛けるわけではなく、次第に情報を提供する。また情報の提供依頼には応じる姿勢が大事であろう。

こういった問題では、学者も二手に解かれる。これでは人々が戸惑う訳だが、必ず（えてして、反対側だが）ヒーロー的な存在が現われる。人々はそういった形で感情に訴えられると弱い。

今回の地層処分の問題も、十分な理論武装をするか、説明がうまいスポークスマンを準備しておくことがよいのではないか。



## 2) まとめ

ヒアリングの結果から以下のような考えを抽出することができた。

### ●技術的な観点

- サイトジェネリックな議論の場合、安定な地層を発見できるということは言えるが、どこでも処分が可能だということはいえない。
- 日本においても100万年程度安定な地層を見いだすことは十分可能であると考えられる。
- 地層の安定性でサイトジェネリックな議論はそれだけで完結することは出来ないが、地層処分というものを社会に認知してもらうためには効果的な考え方と思われる。
- 地層処分においては自然の現象について十分知り尽くしているという認識が得にくいところが問題ではないか
- コンピュータシミュレーションによる評価を社会が受け入れる素地は出来てきているが、これのみでは説明は難しい
- 安全を「評価する」方法論の確認が必要なのではないか。予測の問題と評価を混同してはいけないのではないか。

### ●それぞれの立場から見た地層処分に対する関心の持ち方

- マスコミから見ると立地問題にならなければ興味がない。
- 超長期の問題として地質学的に興味を持てる対象である

### ●一般公衆への情報伝達の方法 (H3レポートの基本的な態度)

- 何故地層処分か？貯蔵はできないか？他の処分方法はないのか？といった点は本来重要であるが、必ずしも必要というわけではない。
- 今はシンポジウムの開催等により次第に議論をする人々の輪を広げていく手法が必要なのではないか
- やはり研究したことを全て公開していくことが基本。例えば反対派の情報公開の方が少なくともマスコミからは好印象を持たれている。

### 3. 第一次報告書における初期条件および境界条件に関する調査・検討

### 3. 1 第一次報告書における初期条件・境界条件の捉え方

#### 1) 第一次報告書の役割

##### (1) 地層処分に係わる問題の難しさ

高レベル放射性廃棄物処分の安全評価は、これまでに我々が経験してきた安全評価問題に対して、以下に示すような特長的な難しさを持つ問題である。

- ①何千年、何万年にもおよぶ長期間にわたって安全性を評価する必要がある
- ②将来の事象に関して確信を持つことが求められる
- ③安全評価の対象が将来世代となる

まず、安全評価期間が極めて長期にわたることは、それ自体技術的意味から問題の難しさの根源となっている。近代的な科学の歴史はおよそ200年と言われ、この期間を越える長期にわたる事象に関する知識は、過去の自然現象および歴史的事象の調査により得られるもののみである。したがって安全評価に科学的方法を導入するにしても、その程度には自ら限界があるものと考えなければならない。次に難しい点は、将来の事象に関して確信を持つという問題である。さらに確信を形成するためには将来の事象を予測することになるのか、評価するのかといった基本的な問題点がある。さらには安全評価が将来の世代、しかも数千年から数万年にいたる遠い将来の世代をも対象としなくてはならないこともたいへん難しい点である。例えば「将来世代が自ら決定する権利」をどのように保証すればよいのかといった難しい問題がある。これらの問題は全て純粋に技術的な議論のもとに答えを出せるものではない。またいかに慎重に議論をしても、真の答えというものがみつかるといった種類の議論でもない。むしろ、我々の世代が様々な難しい問題に対して十分な議論を行ったうえでどのような判断をくだすかといった性格の問題であるものと言える。

(出所 “放射性廃棄物処分の原則とその適用の考え方” 日本原子力学会誌 Vol.32 No.11)

##### (2) 地層処分をめぐる最近の論調

## ① 米国における地層処分計画の見直しと安全性議論

米国における放射性廃棄物管理委員会意見書において性能評価の視点から見た放射性廃棄物管理委員会意見書の考え方のポイントは次のようにまとめることができる。

### 安全性の保証：

- ・地層処分は高レベル廃棄物の隔離方策として最も安全かつ最良の方策であるという強い国際的なコンセンサスがある
- ・しかし、処分場の将来にわたってEPAの環境基準やNRCの技術基準に規定されているような安全性が確保されることを科学的に証明することは不可能である

### 安全確保の進め方に関するポイント：

- ・多重バリアシステムを構成するひとつひとつの構成要素についてあらかじめ詳細に技術的目標を定めることは、予想されていなかった地質学的特長の出現に対応してコンセプトやデザインを適宜変更するような融通性を失うことにつながり、適当ではない。
- ・あらかじめ安全性確保方策を詳細に定めることは、計画の遅延によって公衆の信用あるいは科学的な信用を失墜させる危険をはらんでいる。

### 安全性評価の方法論に関するポイント

- ・安全性は技術的評価だけでなく、社会的な評価によっても判断される
- ・安全性の究極的答えは民主社会の大衆の選択によるものである
- ・性能評価の中心的課題は処分場の性能を考えるうえで重要な不確実性・リスクとそうでないものを選別することにある。
- ・モデルは公衆にリスクや不確実性について説明する手段としては不向きである

(出所 RETHINKING HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL / A Position Statement of Board on Radioactive Waste Mngement National Research Council 1990)

## ② OECD/NEAおよびIAEAにおける検討

OECD/NEAおよびIAEAの「長期的安全性は評価できるか」では超長期の安全性評価の必要性や安全性の判断の仕方など、地層処分における安全性の考え方を構築する上での基本的な考え方

がまとめられている。そして、これらの考え方はおよそ次のようにまとめることができる。

#### 安全性評価の方法論に関するポイント：

- ・地層処分の超長期安全性については、処分に先立って確信を持って示されねばならない。

このとき以下の3点が課題となる。

- ①専門家（テクニカルコミュニティー\*<sup>1</sup>のメンバー）は処分システムの挙動と、それがもたらす人間と環境に対する潜在的な放射線影響について1000年以上の超長期にわたって十分満足するまで理解することができるか
- ②専門家や管理者（地層処分の実施主体／国）は予測された挙動が本当に将来発生するものであると確信できるか
- ③潜在的な放射線の影響とその影響を推定する手段について広範な聴衆に分かりやすく説明することができるか。

#### 安全評価の現状と役割：

- ・地層処分システムの挙動は、人間環境への放射性物質の有害な放出が将来起こることがないと十分確信を持って言えるように理解されていなければならない。安全評価はこのような理解を得るための主要な手段となる。
- ・データの取得、モデルの開発と運用、安全評価の実施と検証を含む安全評価に関しては、すでに国際的な合意が得られた一般的な方法\*<sup>2</sup>がある。

#### 安全評価の目的：

- ・安全性の絶対的証明は不可能でありこれは安全性の評価に求められることではない
- ・達成すべきことは、地層処分システムが今日と将来の両方の世代に対して十分なレベルの安全性を提供するものであることを間接的に実証し、確信すること
- ・このために安全性の評価には以下の2点が要求される
  - ①安全性に重大な影響を及ぼすと考えられる因子について適切に考慮できる科学的で確立された方法を構築すること
  - ②地層処分システムが超長期にわたり十分な安全性が考慮されてものであると確信するための根拠が提供されること

安全性を判断するための課題：

- ・安全性を確信するために必要十分な総合的な安全評価手法の確立
- ・意思決定の基盤としての評価結果の不確実性の十分な把握
- ・評価結果の確信を形成するための手法

共通認識：

- ・まず第一に、慎重に設計された放射性廃棄物処分システムが、人間とその環境に与える長期の放射線影響の可能性を的確に評価するための安全評価手法が今日存在すると考えてよい。
- ・次に、処分サイトにおける十分な情報と安全評価手法の適切な利用により、どのような処分システムが今日および将来世代に対して満足できるレベルの安全性を提供することができるかを判断する技術的な基盤を形成することができるものと考えられる。

(出所 "Can Long Term Safety Be Evaluated ?" 1990 OECD/NEA)

---

(注) \*<sup>1</sup>：科学／工学分野に関する専門的知識・経験・理解力を持ち、地層処分の安全性に関する議論の前提条件が十分に与えられればこれを理解し合理的な判断を下すことのできる専門家集団

\*<sup>2</sup>：安全評価の一般的方法とは以下の相互に関連する項目からなる

- － 選択された処分システムにおいて将来発生する可能性の有る核種放出を幅広く捕える（シナリオ展開）
- － 適切なモデルを開発し適用する
- － 総合的評価により潜在的放射線被ばく影響を評価する
- － 不確実性評価と感度解析
- － 評価の各構成要素の確認と最吟味
- － 結果を基準と比較
- － 評価報告書の作成

### (3) 性能評価の役割

以上に見られる安全評価に関する最近の議論は、近年、海外各国が直面している地層処分計画の推進上の障害に対する反省が色濃く出たものとなっている。これらの障害は、地層処分の安全性はどのように評価され得るのかに関する根本的な問い掛けを含むものであり、我が国において地層処分の安全性を議論する上においても十分に考慮することが必要なものである。

このような背景のもとに、現在動燃事業団が進めているサイトジェネリックなアプローチに基づく性能評価結果の持つ意味や、期待される役割についても整理する必要があるものと言える。

まず、地層処分の性能評価や安全評価は以下のような役割を持つものと言える。

- ①規制の定式化を助け、規制への対応を評価する
- ②サイトの特性評価や研究開発の方向を示す
- ③処分場や廃棄物パッケージの設計にフィードバックする
- ④処分場閉鎖後の性能やその他インパクトとコストのトレードオフを評価する
- ⑤サイト選定を助ける
- ⑥規制者・開発者・専門家が安全性を確信するための根拠を提供する
- ⑦規制者・開発者・専門家と意思決定者や公衆とのコミュニケーションを助ける

これらの役割のうち、従来は①～⑤の役割が中心であったが、次第に⑥⑦の役割の重要性が高まってきているものと考えられる。これは地層処分の意志決定者や公衆に、いわゆる「インフォームドジャッジメント」をしてもらうための土台として「性能評価」が極めて重要な役割を果たすことを意味している。そしてこのようななかで、性能評価には以下のような情報を提供することが期待されている。

- ①安全性を確信する上で重要な現象／事象とその影響の同定
- ②処分場の長期的安全性に関する予測もしくは評価
- ③長期的安全性の予測に含まれる不確かさの明確化

しかも、これらの情報についてはテクニカルコミュニティーにおいて確信を持つとともに

に、テクニカルコミュニティのメンバー以外の人々に対しても、これらの人々が十分に咀嚼して理解できる形で情報を提供する必要がある。

そこで、第一次報告書においては、その論理構成、提供情報、提供方法について以下のような課題を、一歩でも解決していく工夫が必要となる。

－テクニカルコミュニティにおいて安全性を確信する方法

(安全評価の一般的な方法が存在することは国際的に合意されているが、テクニカルコミュニティが安全性を確信するためには、どのようなステップを踏むことが必要となるかが明かとなっていない)

－規制者・開発者・専門家と意思決定者や公衆とのコミュニケーション手段

－安全性に関する合意形成方法

これらの問題を一気に解決することは極めて難しいと言わざるを得ない。そこでまず目指す必要があるのは、地層処分問題を取り扱う場合にはサイト選定等にからむ機微な問題を除いて、基本的には、技術成果の公開を積極化し、技術開発者の開かれたコミュニティを形成していくことが重要となるものと考えられる。

この場合には、例えば部門外の人々を交えたシンポジウム等を通してコミュニティの輪を広げる方法や、さらには高レベル廃棄物を地球環境問題の一環と考えて、次のような視点からの情報提供、研究のアプローチを取る方法等があるものと言える。

- ①原子力利用／高レベル廃棄物処分が現在の地球環境問題に与えるインパクトのプラス面とマイナス面の評価
- ②高レベル廃棄物の技術開発成果、概念検討成果、推進体制整備の成果を現在の地球環境問題解決に適用する方策研究

(4) 性能評価において超長期性を取り扱う上での問題

- 1) 超長期安全評価に伴う不確実性/確率の取り扱い



ICRPでは「不確実性は、将来の状況について、現在の知識が完全でないため、緩慢なプロセス、確率的事象すべてに存在する」として、放射線影響評価にリスクの概念を取り入れた基準の利用を勧告している。この他にも確立事象に関して統計的な取り扱いをすることから、超長期の安全評価に関しては多くの不確実性が導入されることとなる。現在知られている主な不確実性の要因は以下のようなものである。

#### ①知識の不完全さによる不確実性

将来について知ることができないもの：線量に影響する人口統計学的なパターン、将来世代の持つ価値観など

→ 仮説を設定し、その仮説が将来の評価にとって妥当かどうかを検討する。仮説の設定は、将来世代の防護レベルが、現在適用されるものと同程度であることが重要

不完全な知識：移行経路（例えば、岩盤の亀裂の分布など）

→ パラメータの分布を与える

#### ②統計的取扱いを行っていることに起因する不確実性：確率事象から期待される結果に伴う不確実性

例えば、不完全な知識や統計的な扱いに起因する不確実性に関しては、基本的にモデルの精緻化や不確実性分析/感度解析、さらにはこれらの結果としての本質的な特性抽出といった試みにより対応が可能と考えられる。従って、このうち特に超長期安全性評価で問題となるのは将来について知ることができないリスクである。この点に関しては、いずれにしろ完全に不確実性をなくしたり、明確に不確実性の幅を示すことは極めて難しい問題となる。むしろ、様々な検討を可能なかぎり幅広い視野でとらえ、納得のいくまで分析し、不確実性が安全性に大きな影響を与えないことを確信していくといった過程を踏む必要があるものと考えられる。このように、知ることができない不確実性が存在することは性能評価を考えるうえでの大きな前提条件・境界条件となる。

特に将来予測に含まれる不確実性の性質と意味が、政治家、計画の管理者、関係者に理解されねばならないが、どのようにこれを実現していくか、超長期に関しては通常の人間の理解の範囲を越える面もあり、コミュニケーションの方法に関しても検討を進める必要がある。

## 2) 超長期の評価の考え方

不確実性の取り扱いに関する議論で明確になったように、超長期の安全性評価において問題となるのは知ることの出来ないことである。例えばIAEA (Safety Series 99) によれば以下のように、合理的評価期間を越えた

期間に関しては、放射線影響評価モデルの重要な部分となる被ばく線量評価が意味を持ちえないためになんらかのあらたな手段によって安全性を確証する必要が有るとの考えが示されている。

価値観、環境条件、生活習慣などの変化は、予測不可能。人間の住む環境や生活態様が著しく変化すると考えられ、不確かさが大きくなって処分による人間の被曝線量評価の意味がなくなる。

↓

超長期の線量、リスクの評価は、十分に有意とはいえない（しかし、評価すべきではないことにはならない）

↓

現在の被曝線量による評価とは別の独立した方法が必要（次の氷河期が来る時期はおよそ1万年後であり、それ以降は別の考え方で評価すべき）

このとき考えられる「別の独立した方法」としては、以下のような方法が提示されている。

- ①将来の人々を取り巻く放射線環境が、処分場設置によってほとんど変化しないであろうということを保証する。
- ②処分場に起因する放射性核種の濃度または放出が、遠い将来どうなるかを、放射性物質の自然界の放出源である地殻上層部に起因する放射性核種の濃度または放出と比較する。

しかし、これらの方法により、専門家／開発者／規制者／公衆が安全性に関する合意を得るためにどのような方法があるのかに関しては未だ十分な検討がなされているわけではない。また、これらの考え方が日本人の心情に適したものであるのか否かについても十分な検討をする必要がある。また、性能評価において超長期の数字をだし議論する場合には「これらの遠い将来にはわからないことがある」、といった自明の議論を忘れないように留意する必要がある。

### 3. 2 第一次評価報告書における初期条件・境界条件の捉え方

第一次評価報告書では地層処分がどのようなものであるか、そして安全確保に関してどのような見通しを立てればよいのかが示されることとなる。このときに地層処分の意図等に関して再度整理しておく必要がある。

#### 1) 地層処分の意図

1980年にDOEが高レベル放射性廃棄物処分方策の開発対象として地層処分を最も好ましい候補として選択した際の評価軸は以下の7つの軸であった。

- ①放射線影響（操業期間中）
- ②放射線影響（操業期間後）
- ③放射線以外の環境影響
- ④開発状況
- ⑤法規制への追従性
- ⑥将来における原子力開発の進展との独立性
- ⑦修正／緩和行為の実施可能性

この時の評価結果の概要を以下に示す。

表3.1-1 高レベル廃棄物処分オプションの評価

	最も好ましい	← ----- →	好ましくない
①放射線影響（操業期間中）	(MR) (VDH)	(IMR) (SS)	(S)
②放射線影響（操業期間後）	(S) (MR)	(VDH) (SS)	(IMR)
③放射線以外の環境影響	(MR,VDH)	(SS,IMR)	(S)
④開発状況	(MR)	(SS,IMR)	(S,VDH)
⑤法規制への追従性	(MR,VDH)	(IMR) (S)	(SS)
⑥将来における原子力開発の進展との独立性	(MR,VDH,IMR,SS)		(S)
⑦修正／緩和行為の実施可能性	(MR)	(IMR) (SS)	(S,VDH)

(注) MR = 地層処分 / VDH = 超深孔処分 / IMR = 島嶼処分 / SS = 海洋低下 / S = 宇宙処分

(出所 Final Environmental Impact Statement DOE October 1980)

ここで見るように、地層処分は全ての軸で好ましい側に位置づけられている。しかし、他のオプションに比べて単独で最も好ましいとの評価を受けている点は④開発状況と⑦修正／緩和行為の実現可能性に関する点である。もちろん当時の評価と現在の評価の考え方には異なる点がいくつかあるものと考えられる。しかし、上記の評価当時の認識として、⑦修正／緩和行為の実現可能性が地層処分の大きな長所であったと考えられることは重要なポイントと考えられる。もちろんその後、地層処分に対する再取りだし性の確保に関する議論や、IAEAにおける処分実施後の管理行為／補修行為等への依存を否定する議論（IAEA Safety Series No.99）等の流れの中で、この評価のポイントについては必ずしも重要視されなくなってきている傾向はある。しかし、現在においても、例え再取り出しに関する技術的裏付けが無い状態でも、もし何かあった場合には対応措置が取れる（例えば周囲の岩盤ごと掘り出して隔離する）可能性が残されているといった点は、地層処分というコンセプトを考えるうえで重要な視点だと言えるのではないかと。

## 2) 性能評価の意図

地層処分の性能評価において重要な視点は先に示したように、性能評価の基本的考え方、作業の過程、結果の意味について様々な議論を行うことにより、性能評価を通して地層処分の実現性をテクニカルコミュニティにおいて確認することにある。従って、現段階の性能評価では品質保証の厳しい手順よりも、「メイキング・オブ・性能評価」すなわち性能評価の構築過程を明確に示していくことが重要と考えられる。

また性能評価に関する議論をさらにテクニカルコミュニティの外側の人々に広げていく場合には、他の問題との関連、例えば地球環境問題との関連を探っていく必要があり、これを巻き込んだ問題意識で議論を進めることが重要と考えられる。

## 3) 議論の視点

このように考えてくると、地層処分の性能評価を考えるうえで以下のような視点で議論を進める必要があるものと言える。

### ① サイトジェネリックな議論に関する検討

②全性の評価／実証に関する検討

③地球環境問題とのリンクに関する検討

### 3. 3 サイトジェネリックな議論に関する検討

サイトジェネリックアプローチは特定のサイトにおけるデータと独立な評価であり、常に地層処分を実施するに足る安定な地層が存在することを前提とした議論となる。しかし、現実にはこの前提の保証を現時点で得ることは難しい。そこで、当面サイトジェネリックアプローチは以下の視点から議論する

①サイトジェネリックアプローチは以下の問題に有用

- －サイト調査および研究計画の絞り込みの助けになる
- －特定のコンセプトの成立性の実証に利用可能でありさらにこのコンセプトのもとに開発を進めることの合意を得ることに役立つ。
- －サイト選定や許認可において利用される性能評価手法の実証のために実施される

②サイトジェネリックアプローチは各国および国際的に実施され以下の点が明らかになった

- －高レベル廃棄物処分は実現可能であることがすでに示され、これを基礎として各国が地層処分の詳細なコンセプトを開発している
- －一部の国はこれを基にサイト選定や処分場建設準備にとりかかっている

今後サイトジェネリックアプローチはサイトスペシフィックに置きかわっていき、サイト選定の一連の流れの一部になっていくこととなるが、この部分の進め方、考え方のフレームワークを示していく必要がある。

(出所 Disposal of Radioactive Wastes: Review of Safety Assessment Methods OECD/NEA Paris, 1990 P28)

### 3. 4 安全性の評価／実証に関する検討

安全評価の目的はしっかりとした意志決定をするための基礎を築くことにある。そこでは科学者、安全評価者、規制者、その他意志決定に関わる人々全てが、安全評価で得られる情報、洞察、結果に対して確

信を持つことが必要。そしてそこでは確信を持つ手段として次のような点が重要となる。

## 1) モデルのベリフィケーションおよびバリデーション

(1) バリデーション：開発対象となっているプロセス／システムを正確にシミュレートしているか  
ーモデルの背景にあるリアリティーとしての天然のシステムの正しい（あるがままの）理解に関する問題

ーモデルには2つのタイプがある

①システムの構造の特性を限定的なデータや観察結果から組み上げる構造モデル  
(例えば地質環境中の断層や地層の位置や特性、シャフト埋め戻し材の不均一性)

\*母岩の特性を少ないプライマリーデータから明確化する／サンプリングや  
わずかな大規模試験結果から人工バリアの代表値を明確にする

\*構造モデルの場合、構造のモデル化が十分でなければその分計測を増やす  
ことによってモデルを正確にするといった方式を取れる。ただしサイトに  
おけるデータ取得には明確な限界があり、どこかでモデル精度とデータ取  
得のバランスが取られることとなる。また、母岩の構造は時間の経過とと  
もに変化することも問題と成りえる。

②システム内の相互作用や物理的、化学的なプロセスの進行のプロセスモデル  
(地下水流動、コロイド輸送、崩壊、沈殿等)

\*プロセスモデルは多くの場合構造モデルよりもジェネリックなものとなる。

幾つかのものは構造モデルの影響を僅かに受けるに過ぎない。しばしばプ  
ロセスモデルは必要以上のレベルまでバリデーションが成されている。

しかし、廃棄物管理に要する極めて長期間を考える場合、従来の問題とは  
異なる点に考慮する必要がある。すなわち通常は無視できる緩やかなプロ  
セスについても考慮する必要がある。

\*地層中の核種移行については、実験室における計測、様々なスケールのフ  
ィールド試験、イン・スィテュ試験、ナチュラルアナログにおける検証に  
よりバリデーションがなされる。その作業の一部はINTRAVALプロジェクト  
で進められている。

\*もう一つの問題は、研究で数学モデルと実際の複雑なシステムの評価に利  
用する際のモデルが異なるという点である。後者ではより単純化されたモ

デルを利用する必要がある。

## (2) ベリフィケーション

(コンピュータコードはモデルを構成する数式を正確に解くことができるか)

- －モデルのベリフィケーションのために設計されて試験問題のセットによって実施可能
- －この点はすでに手の中にあるとってよい

## (3) ナチュラルアナログ

(この他に以下の面からナチュラルアナログが寄与しえる)

- －モデルで利用しているものと同じプロセスが観測できれば実験室試験からの外挿を超長期の時間軸へ、地質学的スケールへ拡大することができる
- －パラメータの数値範囲を明らかにすることができる
- －処分システムにおいていずれの現象やプロセスが発生することとなるか定量的に評価することができる。
- －現実的な視点から処分場サイトにおける様々なプロセスの結果を統合することができる。

## 2) 品質保証

- －安全評価において適切な信頼性を得るために、評価のあらゆる面において品質保証の考え方を適用することが必要となる。品質保証の適用範囲はデータの取得、モデリング、コンピュータコードによる計算、統合的評価の全てとなる。
- －そのためには適切な考え方の基で、全ての評価プロセスが記録され追跡可能なものとなる、手順のフレームワークが必要となる。
- －品質保証に関しては様々な手法が良く発達しており、現在の課題はこれらの手法をシステムティックにバランス良く実際の安全評価に適用していくことである。
- －例えばNRCでは次のような項目に対して品質保証を要求している。

(出所 Disposal of Radioactive Wastes:Review of Safety Assessment Methods OECD/NEA Paris, 1990)

## 3) その他

クリティカルレビュー／国際協力等は極めて重要だが、特に性能評価の作業過程、結果を理解されやすいものとするためには、専門家だけではない、アプローチ法や目的意識の異なる複数のコミュニティにおける議論を多重に重ねる方式を採用することが極めて重要だと言える。

今後は、安全評価の結果をどのようにして明確かつ包括的に意志決定者や公衆に伝えることができるかについて十分な検討を進める必要があるが、第一次報告書はこの試験ケースとなる位置づけにあるものと考えられる。

### 3. 5 地球環境問題とのリンクに関する検討

さきに述べたように高レベル廃棄物処分と地球環境問題は密接に関連する問題である、しかも問題の特性として次のような相似点も指摘できる。

\*地層処分問題は原子力がかつて経験したどの問題よりも解決が難しい問題と考えるとよいのではないか。

\*特に難しい点は、地層処分の技術開発の推進や処分の実施において社会的受容を得ていくことが必要である点である。

\*特に技術開発の段階で、例えば地下研究施設立地のためのサイトが必要な点や、技術開発で得た知見を地層処分実施の意志決定者や公衆に伝え、信頼を得る必要がある点等が大きな困難の原因となるものと考えられる。

\*ここで言う社会的受容は言い換えれば以下のような点における社会的な合意の問題である。すなわち様々な価値感や利害関係を持つ人々が、以下の事項について関心を示すかもしくは積極的、消極的にかかわらずサイレントな状態を保つかしてもらう必要がある。

- ①地層処分の実現性に関する合意
- ②地層処分の安全性に関する合意
- ③地層処分サイト選定に関する合意
- ④地層処分の実施に関する合意



\*実はこれと同様な問題が環境問題分野で持ち上がっている。例えば一般公衆の生活自身を省資源的なものに変え、廃棄物の発生を抑制するシステムを実現しようとする場合（例えば家庭のゴミの分別処理や、ゴミ処分費の値上げなど）、また産業廃棄物や有害廃棄物を処分する処分場を確保しようとする場合、さらに炭素税のように地球環境を守るための制度を導入使用とする場合。いずれの場合にも社会的な合意が必要となる。

\*これらのシステムに関する合意がどのように取られていくかが地層処分実現の実現にも大きく関連してくる。

\*この時の考え方は2つある。一つは環境問題の経験の蓄積をじっと待って、これをもとに地層処分の方策を議論する方式である。もう一つは、今環境問題および地球環境問題と地層処分をリンクさせて議論を始める方式である。

\*現在は後者の方式が重要ではないかと思える状況にある。

ただし地層処分と地球環境問題をリンクさせると言うことは、原子力の利用問題と地球環境問題をリンクさせるということと同じであり、今の時点でPNCがこの点について声高に議論を始めることが得策と言えるかどうかには疑問がある。ただし、地球環境問題と地層処分問題をリンクさせて議論するための下準備は十分に必要がある。例えば次のような視点がありえるのではないか。

#### (1) 地層処分において得られた技術を有害廃棄物の処分問題に適用する

例えば、地層処分場においてダイオキシンや重金属を同時に処分するコンセプトの提案をし、蓄積してきた性能評価手法を利用して安全性を評価する。この場合、地層処分場からの放射性廃棄物に起因するリスクと非放射性廃棄物に起因するリスクを比較し、性能評価の指標の1つとする等の方策が考えられる。

#### (2) 原子力の利用により現在発生しているリスクを遠い将来に分散させる可能性の分析

例えば、現在化石燃料を利用して地球環境破壊を進めるリスクを算定し、これらを放射性廃棄物の処分リスクと比較して、現在のリスクを小さくして将来へシフトする効果を算定することにより、これを性能評価の指標の1つとする等の方策が考えられる。

附表

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-1 石炭採掘における職業病 (気管支炎・被ばく)

年	出典	国	文献	坑内		露天	根拠
				肺の病気	被ばく	肺の病気	
1975	NASA	米	国	149	0.....9.3 0.059		1970年頃の状況 1975年の規則維持
1976	Battelle	西ドイツ		124	2.8	0*)	1973年統計
1979	UNEP			161(I)	0...0.21...1.41	多数	1975年までの米国統計
1981	CEPN	フランス		84	0.....0.8	0.15	
1981	Ferguson	英	国	38	0.....3 0.07...0.3 0.002...0.008**)		2010年への外そう
1983	Morris	米	国	114	0.25 0.49	0.05...0.12 0.12	1980年についての数値 2000年についての数値
1984	BEAD	米	国	67	0.61...1.46 0.25 0.2		1965-79年の統計 1980年についての評価 1980年の統計
1986	Bromley	英	国	14		0.31	現在

\*) 褐炭

\*\*) X線検査による (現在値)

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-2 石炭処理時の職業事故

年	出典	国	文献		
1974	WASH-1224	米	国	164	0.027
1975	NASA	米	国	149	0.021...0.035*)
1977	EPA	米	国	11	0.032
1979	UNEP			161(I)	0.08
1981	CEPN	フランス		84	0.04
1983	Morris	米	国	114	0.06
1984	BEAD	米	国	67	0.034...0.116

\*) 石炭の3分の2しか処理されない。

付表1-3 炭鉱労働者の個人死亡リスク

国	出典	文献	個人死亡リスク (10 <sup>-3</sup> /年)					注釈	
			1850	1900	1950	1960	1970		1980
西ドイツ	GRS-A-1000	71			1.29	0.85	0.59	0.47	換算値
英 国	Gibson	54	~4.7	~2.0	~0.80	~0.55	~0.25	~0.13	内そう値
フランス	Amoudru	3	3.8	1.4	0.8	0.8	0.6	0.2	換算値

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-4 石炭採掘における事故

年	出典	国	文献	坑内掘り	露天掘り	根拠
1975	NASA	米 国	<u>149</u>	0.8.....2.2	0.22..... 0.41	1970年代の知見
1976	Battelle	西ドイツ	<u>124</u>	2.95		1973年の統計
1977	EPA	米 国	<u>11</u>	2.23	0.41	
1979	UNEP		<u>161(1)</u>	1.20	0.3	1971-75年の米国統計
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>	0.22..... 1.2 <sup>*)</sup>	0.09	
1981	Ferguson	英 国	<u>38</u>	0.3 ..... 1.7		1975-80年の統計
1983	Morris	米 国	<u>114</u>	0.67..... 1.4	0.05..... 0.12	1980年についての評価
				1.3 ..... 2.7	0.12	2000年についての評価
1983	BEAD	米 国	<u>66(n.75)</u>		0.085	
1984	BEAD	米 国	<u>67</u>	1.2 ..... 1.5	0.15..... 0.17	1965-79年の統計
				1.4	0.12	1980年についての評価
				1.1	0.16	1980年の統計
1986	Bromley	英 国	<u>14</u>	0.43..... 1.33		1979-85年の統計

\*) 浅い.....深い炭鉱

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-5 石炭火力発電所の建設と運転における職業事故

年	出典	国	文献	建設	運転
1974	WASH-1224	米 国	<u>164</u>		0.04
1975	NASA	米 国	<u>149</u>		0.013...0.09
1976	Battelle	西ドイツ	<u>124</u>	0.12	0.045
1976	EPA	米 国	<u>11</u>		0.016
1980	IAEA		<u>10</u>	0.055	0.016
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>		0.023
1981	Ferguson	英 国	<u>38</u>	0.10...0.22	0.13...0.26
1983	Morris	米 国	<u>114</u>		0.13
1984	BEAD	米 国	<u>67</u>		0.09...0.20

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-6 石炭輸送時の職業事故

年	出典	国	文献	鉄道	船/はしけ	道路	パイプライン**)	注釈
1976	Battelle	西ドイツ	<u>124</u>	0.84	1.1			石炭
				0.09	0.13	0.31		灰
1979	UNEP		<u>161(1)</u>	0.03	0.12		0.01	各500km
1980	IAEA		<u>10</u>	(65%)	(13%)	(21%)		0.36混合値(500km)
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>	0.00015 <sup>*)</sup>	0.06 <sup>*)</sup>		0	
1983	Morris <sup>*)</sup>	米 国	<u>114</u>	0.014...0.06(480)	0.46(770)	1.2(320)	0.16(1.100)	
1983	BEAD	米 国	<u>66(n.75)</u>	0.10				
1984	BEAD	米 国	<u>67</u>	0.005...0.022	0.25...1.0	0.6...2.4	0.16	Morris氏による

\*) カッコ内は想定輸送距離 km

\*\*\*) スラリ

\*) Fagnani氏, 1980年 (37) によれば0.045.

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-7 石炭輸送事故時の公衆の犠牲者\*

年	出典	国	文献	鉄道	船/はしけ	道路	パイプライン**)	注釈
1975	NASA	米	国 149	0.73				
1976	Miettinen	フィンランド	109	0.17(400)	0.008	1.7(400)		
1980	IAEA		10	(65%)	(13%)	(21%)		0.57...1.38 混合値(500 km)
1981	CEPN	フランス	37	0.71				
1981	Ferguson	英	国 38	0...0.3(100)				
1983	Morris	米	国 114	0.41...1.8(480)	0.14(770)	1.2(320)	0	
1983	Holdren	米	国 79					0.54...3.2 スベックなし
1984	BEAD	米	国 67	0.37...0.54	0.07...0.28	0.6...2.4	0	Morris氏による

\*) かつこ内は想定輸送距離 km

\*\*) スラリ

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-8 石炭火力発電所運転による公衆の病氣死亡

年	出典	国	文献	死亡/GWy NO <sub>x</sub> 被ばく	硫黄 (%)	煙中のSO <sub>2</sub> (t/GWy)	煙突高 (m)	人口密度 半径(km)/人口	線量-効果関係
1975	NASA	米	国 149	0.17...3.4 1.6...12		11000 38000		辺地立地	166
				0.5...10 1.8...36		11000 38000		都市立地	
1977	Gotchy	米	国 58	4...125	0.4...3.0		305 80	3.8×10 <sup>4</sup>	102, 166, 172
1979	UNEP		161(I)	20		110000	300 80	3×10 <sup>4</sup>	112
1980	IAEA		10	3.2...22	0.5	31000	305 80	2.2×10 <sup>4</sup>	102, 172
1981	CEPN	フランス	84	0.65...2.6 <sup>o)</sup> 3.4...14 <sup>o)</sup>	1.0 1.0		85 20 85 100	163,500 908,100	12(?)
1981	Ferguson	英	国 38	0...0.3**)	0.05...0.2				
1981	Lautkaski	南フランス	101	0.9...3.2	0.03	0.85	150 100	1.16×10 <sup>4</sup>	103
1981	BEAD	米	国 65	0...3...15	0...0.29	0.33	305 80	3×10 <sup>4</sup>	112
1983	Morris	米	国 114	0...21...60**) 0...10...30**)	0.0001...0.29			指定なし	112

\*) 排煙脱硫に相当する硫黄濃度。

o) 被ばくを含む。

\*\*\*) しきい値(塵あいを含む)50μg/m<sup>3</sup>SO<sub>2</sub>を仮定した場合の全体的評価

\*\*\*) しきい値10μg/m<sup>3</sup>SO<sub>2</sub>を仮定する、あるいは仮定しない場合。

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-9 原油採掘時の職業事故

年	出典	国	文献	陸地	洋上プラットフォーム 建設	洋上プラットフォーム 運転	海外 (タンカーで輸入)	未指定
1974	WASH-1224	米	国 164					0.085
1975	NASA	米	国 149			0.0033	0.08	
1976	Battelle	西ドイツ	124					0.035
1977	EPA	米	国 11					0.28
1979	UNEP		161(I)	0.50		0.50		
1980	IAEA*)		10			0.387		
1981	Ferguson**)	英	国 38		0.023...0.17	0.1...0.5		
1981	BEAD	米	国 65	0.16				
1981	BEAD	米	国 39					0.003...0.10
1983	BEAD	米	国 66					0.12...2.8(?)

\*) 北海油田に対する1966-78年のノルウェーの統計による。

\*\*\*) 北海油田に対する1974-78年の統計による。

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-10 石油精製における職業事故

年	出典	国	文献	
1974	WASH-1224	米 国	<u>164</u>	0.056
1975	NASA	米 国	<u>149</u>	0.037 ... 0.056
1976	Battelle	西ドイツ	<u>124</u>	0.009
1977	EPA	米 国	<u>11</u>	0.11
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>	0.010
1981	Ferguson	英 国	<u>38</u>	0 .....
1981	BEAD	米 国	<u>39</u>	0.01 .....
1983	BEAD	米 国	<u>66</u>	0.044 .....

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-11 石油輸送事故の職業人および公衆の犠牲者数

年	出典	国	文献	鉄道	タンカー	道路	パイプライン	未指定
<b>職業人</b>								
1974	WASH-1224	米 国	<u>164</u>					0.04*
1975	NASA	米 国	<u>149</u>					0.055...0.071
1976	Battelle	西ドイツ	<u>124</u>	0.58	0.77		0	
1977	EPA	米 国	<u>11</u>					0.07
1980	IAEA		<u>10</u>		0.068			
1981	CEPN <sup>o)</sup>	フランス	<u>84</u>		0.0029			
1981	Ferguson	英 国	<u>38</u>		小 (2重船底)		0.0024...0.027**)	
1981	BEAD	米 国	<u>39</u>					0.05 ... 0.07
<b>公衆</b>								
1976	Miettinen <sup>*)</sup>	フィンランド	<u>109</u>	0.10(400)	~0.005	1.0(400)		
1980	IAEA		<u>10</u>		0.0008...0.0019			

\*) 輸送+貯蔵

o) タンカー事故: Fagnani 氏, 1980年 (37)

\*\*\*) 1974-78年の英国統計による潜水事故

\*) かつこ内は想定輸送距離 (km)

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-12 石油火力発電所の建設および運転における職業事故

年	出典	国	文献	建設	運転
1974	WASH-1224	米 国	<u>164</u>		0.05
1974	Bertolett	米 国	<u>9</u>		0.017
1975	NASA	米 国	<u>149</u>		0.013...0.05
1976	Battelle	西ドイツ	<u>124</u>	0.09	0.035
1980	IAEA		<u>10</u>	0.054	0.013
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>		0.023
1981	Ferguson	英 国	<u>38</u>	0.092...0.21	0.001...0.2*)
1981	BEAD	米 国	<u>39</u>		0.013...0.02
1983	BEAD	米 国	<u>66</u>		0.031

\*) 1970-80年の英国石油火力発電所における1件の死亡による。

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数  
付表1-13 石油火力発電所の運転による公衆の病気死亡

年	出典	国	文献	死亡/GWy	硫黄 <sup>*)</sup> (%)	排煙中のSO <sub>2</sub> 量 (t/GWy)	煙突高 (m)	人口密度 範囲(km)/人口
1975	NASA	米 国	149	0.04...36.5				辺地 ..... 近郊
1979	UNEP		161(I)	6		37,000	300 80	3×10 <sup>4</sup>
1980	IAEA		10	1.1.....7.5	0.2		305 80	2.2×10 <sup>4</sup>
1981	CEPN	フランス	84	1.2.....5.9	3.0		85 20	163,500
				6.0...24	3.0		85 100	908,100
1981	Ferguson	英 国	38	0...0.3 <sup>**)</sup>				

\*) 排煙脱硫等価濃度

\*\*\*) 石炭火力と同じ

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-14 ガス採掘時の職業事故

年	出典	国	文献	陸地	洋上プラットフォーム	未指定	注釈
1974	WASH-1224	米 国	164			0.028	探鉱, ボーリングと生産
1976	Battelle	西ドイツ	124			0.035	石油と同じ
1977	EPA	米 国	11			0.21	
1979	UNEP		161(I)	0.40	0.40		n. EPA, 1978年
1980	IAEA		10	0.22	約1		
1981	BEAD	米 国	39			0.10.....0.16	
1983	BEAD	米 国	66			0.12.....2.8	石油と同じ

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-15 ガス加工時の職業事故

年	出典	国	文献	
1974	WASH-1224	米 国	164	0.008
1975	NASA	米 国	149	0.021...0.035
1977	EPA	米 国	11	0.013
1981	BEAD	米 国	39	0.0004...0.004
1983	BEAD	米 国	66	0.0027...0.011

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-16 ガス輸送事故による職業人と公衆の犠牲者数\*

年	出典	国	文献	職業人	公衆
1974	WASH-1224	米 国	164	0.032	
1977	EPA	米 国	11	0.03	0.2 <sup>o)</sup>
1978	NOU	ノルウェー	123	0.013	
1980	IAEA		10	0.02	0.20 <sup>**)</sup>
1981	BEAD	米 国	39	0.01	

\*) バイプラインと全く同じ仮定。

o) 集合一および遠方配管網(分配管除く)。

\*\*\*) バイプライン事故を含む。

各種研究による発電1GWy (100万kW<sub>y</sub>) 当たりの死亡数  
付表1-17 天然ガス発電所の建設と運転における職業事故

年	出典	国	文献	建設	運転
1974	WASH-1224	米 国	<u>164</u>		0.050
1974	Bertolett	米 国	<u>9</u>		0.009
1976	Battelle	西ドイツ	<u>124</u>	0.09 <sup>*</sup> )	0.035 <sup>*</sup> )
1977	EPA	米 国	<u>11</u>		0.013
1980	IAEA		<u>10</u>	0.049	0.012
1981	BEAD	米 国	<u>39</u>		0.009 ... 0.02
1983	BEAD	米 国	<u>66</u>		0.036

\*) 石油火力と同じ仮定。

各種研究による発電1GWy (100万kW<sub>y</sub>) 当たりの死亡数  
付表1-18 天然ガス発電所の運転による公衆の病氣死亡

年	出典	国	文献	死亡/GWy	排煙中の SO <sub>2</sub> 量(t/GWy)	煙突高(m)	人口密度 範囲(km) / 人口	
1979	UNEP		<u>161(I)</u>	0.004	20	300	80	3×10 <sup>6</sup>
1980	IAEA		<u>10</u>	0.0025...0.017	24	305 <sup>*</sup> )	80 <sup>*</sup> )	2.2×10 <sup>6,*)</sup>

\*) 石炭、石油火力と全く同じ仮定。

各種研究による発電1GWy (100万kW<sub>y</sub>) 当たりの死亡数  
付表1-19 ウラン採掘に伴う職業事故

年	出典	国	文献	坑内	露天	現地浸出	注釈
1974	WASH-1224	米 国	<u>164</u>	0.12			50%坑内, 50%露天
1975	NASA	米 国	<u>149</u>	0.27	0.12		Pu リサイクルなし
				0.22	0.10		Pu リサイクルあり
1979	UNEP		<u>161(I)</u>	0.17			n. Pochin, 1976( <u>132</u> )
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>	0.045			
1981	Ferguson	英 国	<u>38</u>	0.02.....0.1	“無視できる”		オンタリオ鉱山 1970-74年の統計
1983	BEAD	米 国	<u>66(n.75)</u>		0.11		
1984	BEAD	米 国	<u>67</u>	0.36	0.11		60年代遅くの統計
1986	Bromley		<u>14</u>	0.015 <sup>1)</sup> 0.078 <sup>2)</sup>	0.0019 <sup>3)</sup> 0.019 <sup>3)</sup>	0.0050	80年代のある鉱山の統計
					0.0116 <sup>3)</sup>		

1) 米国の鉱山, 2) オーストラリア, 3) カナダ, 4) フランスの14鉱山, 5) フランスの4鉱山



各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-20 ウラン採掘に伴う職業人の病気

年	出典	国	文献	肺の病気	肺の内部被ばく(ラドン)	他の被ばく	注釈
1974	WASH-1224	米	国 <u>164</u>		0.007		
1975	NASA	米	国 <u>149</u>		0.034...0.006		Puリサイクルなし 50%・坑内
					0.003...0.005		Puリサイクルあり 50%・露天
1979	UNEP		<u>161(I)</u>	0.055*)	0.027**)	0.037**)	*)n.Pochin, 1976( <u>132</u> ) **) n.GESMO ( <u>168</u> )
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>	*病気のみ*		0.04	内部+外部被ばく
1981	Ferguson	英	国 <u>38</u>	*無視できる*	0.007...0.04	0.002...0.009	坑内:n. UNS- CEAR 1977 ( <u>162</u> )
1981	BEAD	米	国 <u>65</u>	0.1 0.04	0.006 0.0007	0.02 0.005	坑内 露天
1982	UNSCEAR		<u>163</u>		0.009 0.0035	0.007	坑内・70年代遅く 露天(米, 加, 仏)
1986	Bromley		<u>14</u>		0.0042 <sup>1)</sup> ...0.022 <sup>4)</sup> 0.00005 <sup>2)</sup> ...0.0082 <sup>3)</sup> 0.039 <sup>5)</sup> 0.0003	0.00035 <sup>1)</sup> ... 0.0054 <sup>4)</sup> 0.00010 <sup>2)</sup> ...0.011 <sup>3)</sup> 0.0007 <sup>5)</sup> 0.0003	坑内 } 露天 } 1980年 } 代のあ } る鉱山 } 現地浸出 } の統計

1) 米国の鉱山, 2) オーストラリア, 3) カナダ, 4) フランスの14鉱山, 5) フランスの4鉱山

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-21 ウラン鉱採掘と選鉱におけるラドン被ばくによる公衆の病気死亡

年	出典	国	文献	ウラン鉱採掘	選鉱	露天	鉱滓	注釈
1979	UNEP		<u>161(II)</u>	0.02*)	0.027**)	0.04**)	0.04**)	*)n.GESMO ( <u>168</u> ): UNSCEAR 1977( <u>162</u> ) 5x 低い値 **) 防護処置なし
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>	0.0005...0.025				
1981	Ferguson	英	国 <u>38</u>			0.01...0.06 0.....0.01		なし } 防護措置 あり }
1982	UNSCEAR		<u>163</u>	0.005	0.0004		0.0025	局地(100年間全体積 算) 世界
1983	Gotchy	米	国 <u>59</u>	0.063			0.033	百年積算
1984	BEAD	米	国 <u>67</u>	0.05				全米積算
1986	Bromley		<u>14</u>	-	0.001			残さいを含む全体

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-22 ウラン加工時の職業事故

年	出典	国	文献	鉱石加工	UF <sub>6</sub> に転換	濃縮	燃料製造	計
1974	WASH-1224	米	164	0.004	0.00035	0.0013	0.0006	0.0062
1981	CEPN	フランス	84	0.007	0.003	0.002	0.004	0.016
1981	Ferguson	英	38					0.004...0.1 <sup>*)</sup>
1983	Gotchy	米	59					0.001
1983	BEAD	米	66(n.75)	0.013	0.004	(0.060 <sup>**</sup> )	0.0066	0.024
1984	BEAD	米	67					0.006
1986	Bromley		14	0.0023				

\*) 再処理含む。

\*\*) 高い値は発電リスクに大きく寄与する。

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-23 ウラン加工時の職業人の病気

年	出典	国	文献	ウラン鉱採掘	選鉱	濃縮 <sup>*)</sup>	燃料製造	計	注釈
1974	WASH-1224	米	164					0.002	
1979	UNEP		161(II)	0.036	0.0004	0.0005	0.01	0.047	n.GESMO(168)
1981	CEPN	フランス	84	0.0030	0.0013	0.0009	0.0021	0.0073	
1981	Ferguson	英	38					0.01...0.05	再処理
1982	UNSCEAR		163	<0.001			0.0025...0.01	0.0035...0.011	
1983	Gotchy	米	59	0.076	0.0005	0.0013	0.027	0.105	n.10 CFR 51, Table S-3(169)
1984	BEAD	米	67					0.05	
1986	Bromley		14	0.0005					

\*) 必要な発電に伴う健康影響を除く。

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-24 ウラン選鉱に伴う公衆の病気死亡<sup>\*)</sup>

年	出典	国	文献	UF <sub>6</sub> に転換	濃縮 <sup>**)</sup>	燃料製造	計	注釈
1979	UNEP		161(II)	0.001	6×10 <sup>-6</sup>	0.0002	0.0012	n.GESMO (168)
1981	CEPN	フランス	84	—	3×10 <sup>-6</sup>	0.00004	0.000043	
1981	Ferguson	英	38				0.005...0.02	気体および液体廃棄物による
1982	UNSCEAR		163	—			0.00002	
1983	Gotchy	米	59	0.038 <sup>1)</sup>			0.071 <sup>2)</sup>	1) 液体廃棄物による 2) 選鉱を含む
1984	BEAD	米	67				0.013	

\*) 選鉱時には公衆はラドンのみに被ばくする (表 A/U-3 参照)。

\*\*) 必要な発電に伴う健康影響を除く。

各種研究による発電1GWy (100万kW<sub>y</sub>) 当たりの死亡数  
付表1-25 原子力物質輸送における事故・病気による職業人死亡

年	出典	国	文献	事故	被ばく	注釈
1974	WASH-1224	米	国 <u>164</u>	0.002		Hub氏(83)による
1975	NASA	米	国 <u>149</u>	0.0027 ... 0.012	0.00003 ... 0.0040	
1979	UNEP		<u>161</u> (II)		0.00004	
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>	0.012	0.001	
1983	Gotchy	米	国 <u>59</u>	0.01	0.0001	
1984	BEAD	米	国	0.01	0.00045	通常時
					0.001	事故時

各種研究による発電1GWy (100万kW<sub>y</sub>) 当たりの死亡数  
付表1-26 原子力物質輸送における事故・病気による公衆の死亡

年	出典	国	文献	事故	被ばく	注釈
1975	NASA	米	国 <u>149</u>	0.012	0.00022	
1976	Miettinen	南フランス	<u>109</u>	0.003		鉄道, 400 km 自動車, 400 km 船
				0.002		
				0.001		
1979	UNEP		<u>161</u> (II)		0.00001	n.GESMO (168)
1980	IAEA		<u>10</u>	0.003...0.006	0.0006	
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>		0.004	
1981	Ferguson	英	国 <u>38</u>		0...0.0009	
1982	UNSCEAR		<u>163</u>		0.00003	
1984	BEAD	米	国 <u>67</u>		0.00045	

各種研究による発電1GWy (100万kW<sub>y</sub>) 当たりの死亡数  
付表1-27 原子力発電所の建設・運転に伴う職業事故

年	出典	国	文献	材料製造	建設	運転
1974	WASH-1224	米	国 <u>164</u>			0.015
1980	IAEA	フランス	<u>10</u>		0.055	0.014
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>			0.023
1981	Ferguson	英	国 <u>38</u>	0.0016...0.012	0.1...0.2	0.01...0.3
1983	Gotchy	米	国 <u>59</u>			0.01
1984	BEAD	米	国 <u>67</u>			0.013

各種研究による発電1GWy(100万kW)当たりの死亡数

付表1-28 原子力発電所の運転に伴う職業人の病気

年	出典	国	文献	
1974	WASH-1224	米 国	<u>164</u>	0.04
1975	NASA	米 国	<u>149</u>	0.030...0.110
1979	UNEP		<u>161(II)</u>	0.09
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>	0.075
1981	Ferguson	英 国	<u>38</u>	0.02...0.08
1981	Halbritter	西ドイツ	<u>62</u>	0.05
1982	UNSCEAR		<u>163</u>	0.1
1983	Gotchy	米 国	<u>59</u>	0.046
1984	BEAD	米 国	<u>67</u>	0.13
1986	HSK	スイス		0.09...0.125** 0.014...0.022**

\*) 古い発電所, \*\*) 新しい発電所

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-29 原子力発電所運転に伴う公衆の病気死亡

年	出典	国	文献	PWR	BWR	排気塔高 (m)	人口密度		注釈
							範囲(km)	人口	
1974	WASH-1224	米 国	<u>164</u>	0.0056	0.041		80	高	
				0.00056	0.0033		80	中	
1975	NASA	米 国	<u>149</u>	0.00033...0.0130					n. UNSCEAR, 1977( <u>162</u> ) n. GESMO ( <u>168</u> )
1979	UNEP		<u>161(II)</u>	0.0010	0.061	30	100	100人/km <sup>2</sup>	
					0.013				
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>	0.0008		85	20	132,000	AGRに対して
1981	Ferguson	英 国	<u>38</u>	(0.001...0.005)					
1981	Halbritter	西ドイツ	<u>62</u>	0.016					
1982	UNSCEAR		<u>163</u>		0.041				
1984	BEAD	米 国	<u>67</u>		0.02				

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-30 原子燃料再処理における職業人の事故と病気による死亡

年	出典	国	文献	事故	被ばく	注釈
1974	WASH-1224	米 国	<u>164</u>	1)	0.004	1) 輸送事故含む
1975	NASA	米 国	<u>149</u>		0.074	Puリサイクルなし
					0.0019	Puリサイクルあり
1976	Battelle	西ドイツ	<u>124</u>	0.002		
1979	UNEP		<u>161(II)</u>		0.0025	n. GESMO( <u>168</u> ), 最新施設
1981	CEPN	フランス	<u>84</u>	0.020	0.005	
1981	Ferguson	英 国	<u>38</u>	2)		2) ウラン加工を含む
1981	Halbritter	西ドイツ	<u>62</u>		0.01	
1982	UNSCEAR		<u>163</u>		0.10	新しい施設はかなり低い
1983	Gotchy	米 国	<u>59</u>		0.0023	
1983	BEAD	米 国	<u>66(n.75)</u>	0.005		

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-31 原子燃料再処理に伴う公衆の病気死亡

年	出典	国	文献	地方*)	全体**)	注釈
1974	WASH-1224	米	国 164	0.0011	0.020	無時間積算
1975	NASA	米	国 149	0.00080...0.0019		前提不明
1979	UNEP		161 (II)		0.035	THORP施設に対し100年積算
1981	CEPN	フランス	84	0.060	0.085	500年積算
1981	Ferguson	英	国 38	0.005...0.02		50年積算
1981	Halbritter	西ドイツ	62	0.04		100 km に対し 500 年の積算
1982	UNSCEAR		163	0.003	0.12	100年積算
1983	Gotcy	米	国 59	0.050	0.16	100年積算

\*) 国内積算, \*\*) 全世界積算

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-32 原子力の廃棄物処分に伴う職業人の事故と病気による死亡

年	出典	国	文献	廃棄物処分		廃止措置	
				事故	被ばく	事故	被ばく (~年後)
1975	NASA	米	国 149	0.00020			
1979	UNEP		161 (II)		0.00004**)	0.0032	0.0044 (0) 0.0029 (10) 0.0016 (30)
1981	Ferguson	英	国 38				0.0015.....0.005
1983	BEAD	米	国 66(n.75)	0.013			
1984	BEAD	米	国 67		0.00046	0.0008	0.005

\*) n. GESMO (168)

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-33 原子力の廃棄物処分に伴う住民の病気による死亡

年	出典	国	文献	廃棄物処分	廃止措置*(~年後)
1979	UNEP		161 (II)	$6 \times 10^{-7}$ **)	0.00007 (0) 0.00003 (10) 0.00001 (30)
1981	Ferguson	英	国 38	0.009...0.04	
1983	Gotcy	米	国 59	0.0040	
1984	BEAD	米	国 67	$8 \times 10^{-6}$	

\*) 輸送による, \*\*) n. GESMO (168)

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数  
付表1-34 大型太陽熱発電所についてのいくつかのデータ

名	ピーク出力 (MWe)	場所	運転開始	ヘリオスタット			熱運搬体			蓄熱器	
				数	面積	全体	仕様	最大温度(°C)	最大圧力(b)	媒体	容量(h)
					(m <sup>2</sup> )	(m <sup>2</sup> )					
SOLAR ONE	10	Kalifornien, 米国	1982	1818	39.3	71,447	H <sub>2</sub> O/蒸気	516°	105	岩/油	4
THEMIS	2-2.5	Pyrenäen, フランス	1982	201	53.7	10,740	溶融塩	450°	1...2	溶融塩	5
EURELIOS	1.0	Sizilien, イタリア	1981	70/112	52/23	6,216	H <sub>2</sub> O/蒸気	512°	62	溶融塩, H <sub>2</sub> O	0.5
IEA	0.5	Almeria, スペイン	1981	93	39.3	3,655	ナトリウム	530°	2.7	ナトリウム	2
SUNSHINE	1.0	四国, 日本	1981	807	16	12,912	H <sub>2</sub> O	250°		加圧水	3
CESA-1	1.0	Almeria, スペイン	1983	300	39.6	11,880	H <sub>2</sub> O/蒸気	525°	108	溶融塩	3.5
	100	米国	計画中	15,400			ナトリウム	600°	3	ナトリウム	3
SOTEL	5	Bergell, スイス	研究中	1,346	95	128,000	空気	550°			

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数  
付表1-35 太陽熱発電の職業事故リスク

年	出典	国	文献	資材製造+加工* 発電所 蓄熱器*	資材輸送	建設 発電所 蓄熱器*	運転保守	計	根拠/注釈	
1980	IAEA	米 国	<u>10</u>	0.055	0.021	1.07	0.012	0.96	2.12	100MWe, SW USA (*)6h, 岩
1980	Holdren	米 国	<u>77</u>						0.47...0.76	詳細データなし
1980	CEPN	フランス	<u>84</u>						1.13	70 MWe, Themi 平面鏡と塔つき
									2.25	10 MWe, Typ Thek パラボラ鏡つき
1982	Inhaber	カナダ	<u>89</u>	0.25...0.017	0.14...0.45	2.45	0.38	0.83	4.07...4.38	Caputo 計画(27) f. SW USA (*)6h
1983	Holdren	米 国	<u>79</u>						0.50...1.3	詳細データなし

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数  
付表1-36 太陽熱発電に伴う公衆の事故と病気による死亡

年	出典	国	文献	輸送事故 (即死)	資材製造に伴う吸入 (晩発性死)
1980	IAEA	米 国	<u>10</u>	0.03 ..... 0.08	0.07 ..... 0.47
1982	Inhaber	カナダ	<u>89</u>	0.07 ..... 0.17	0.14 ..... 0.40
1983	Holdren	米 国	<u>79</u>	0.16 ..... 3.15	

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数  
付表1-37 表 A/S-1 の値のスイスの状況への換算

年	出典	国	文献	原典値	換算ファクター (本文参照)	換算値
1GWy (e) 当たり職業人事故死数						
1980	IAEA	米 国	<u>10</u>	2.12	1.67	3.5
1980	Holdren	米 国	<u>77</u>	0.47 ... 0.76	1.67	0.8 ... 1.3
1980	CEPN	フランス	<u>84</u>	1.13	1.5	1.7
				2.25	1.5	3.4
1982	Inhaber	カナダ	<u>89</u>	4.07 ... 4.38	1	4.1 ... 4.4
1983	Holdren	米 国	<u>79</u>	0.50 ... 1.3	1.67	0.85 ... 2.2

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-38 大型太陽光発電所のいくつかのデータ

国	場所	名称/運転者	ピーク出力	運開	製造者
米 国	Carissa Plain, Cal.		6,500 kWe	1985	ARCO Solar
米 国	Hesperia, Cal.	Lugo Station	1,000 kWe	1983	ARCO Solar
米 国	Sacramento	Municipal Utility	1,000 kWe		
米 国	Austen, Texas		300 kWe		ARCO Solar
西ドイツ	Kobern/Mosel	RWE	300 kWe	建設中	
西ドイツ	Pellworm/Hamburg	EG	300 kWe	1983	AEG
米 国	Phoenix, Arizona		194 kWe		
ス イ ス	?	Phalk 500	500 kWe	計画中	Elektrowatt, Alpha Real

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-39 太陽光発電の職業事故リスク

年	出典	国	文献	資材製造 発電所	蓄電池	セル製造	輸送	発電所 建設/掘付	運転	廃止	計	注釈	
1980	BEAD/M	米 国	116	0.33...0.45	—	0.06...0.07	—	2.0 ... 2.9	0.9 ... 1.25	0.03	3.32 ... 4.70	多分 Si, CdS 電池蓄電池なし	
				0.36	—	0.09	—	0.37	0.17	0.004	1.00	GaAs 電池, 蓄 電池なし	
1980	Holdren	米 国	77								0.35 ... 0.66	詳細不明	
1980	CEPN	フランス	84								0.63	1,000 kW 施 設 (10400 m <sup>2</sup> )	
1981	Halygger	米 国	61	0.31 ... 0.55 (建設含む)						0.12...0.18		0.43 ... 0.73	蓄電池なし
1981	BEAD/M	米 国	117								0.15 ... 2.45	多分 Si, CdS 電池蓄電池なし	
1981	BEAD/H	米 国	64								0.69	n. Rowe(139)	
1982	Inhaber	カナダ	89	0.43...0.75	0.21		0.32...1.0	0.78	0.83		2.57 ... 3.57	6h の鋼製蓄 電池	
1983	Holdren	米 国	79								0.38 ... 0.98	詳細不明	

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-40 太陽光発電に伴う公衆の事故および病気による死亡

年	出典	国	文献	輸送事故 (即死)	資材製造と廃止に伴う吸入(晩発死亡) SO <sub>2</sub> + 粉塵	特殊材料 <sup>*)</sup>	注釈
1980	BEAD/M	米 国	116	—		2.7 ... 14×10 <sup>-6</sup>	<sup>*)</sup> Si, Cd, As
1981	BEAD/M	米 国	117		<sup>**)</sup>	0 ... 0.03	<sup>*</sup> Cdによる前立腺がん (廃止時に0.07まで)
1981	BEAD/M	米 国	118			0.3 ... 0.3	<sup>*</sup> Asによる肺がん(全米)
1982	Inhaber	カナダ	89	0.16 ... 0.38	0.75 ... 2.2		
1983	Holdren	米 国	79	0 ... 1.9			

<sup>\*\*)</sup> 石炭火力に対する値とくらべると分かるように、ここに引用した文献(117)の表9はまちがっているにちがいない。

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-41 いくつかの新型風車のデータ

国	場所	運開	ピーク出力	高さ	プロペラ数	直径 (m)
米 国	Clayton, Neu Mexiko	1978	約 200 kWe	60	2	40
英 国	Carmarthen Bay, S. Wales	1982	200 kWe	24	3	25
英 国	Burgar Hill, Orkney	1983	250 kWe		2	20
西ドイツ	Elbemündung("Growian")	1983	3,000 kWe	100	2	100
英 国	Burgar Hill (Projekt)	1985	3,000 kWe			60
スイス	Fahy, Jura	1985	160 kWe	27	2	17 <sup>*)</sup>
スイス	Martigny <sup>**)</sup>	1987	160 kWe			
カナダ	Cap-Chat	?	4,000 kWe		2	110 <sup>*)</sup>
西ドイツ	Kaiser-Wilhelm-Kroog	1987	全体で約 1,000 kWe <sup>**)</sup>			

\*) グリウス型垂直軸

\*\*) 30基の風車のある風力パーク

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-42 表 A/P-1 の値のスイスの状況への換算

年	出典	国	文献	原典値	換算ファクター (本文参照)	換算値
1 GWy(e) 当たりの職業人事故死数						
1980	BEAD/M	米 国	<u>116</u>	3.32 ... 4.70	1.67	5.5 ... 8.0
				1.00	1.67	1.7
1980	Holdren	米 国	<u>77</u>	0.35 ... 0.66	1.67	0.6 ... 1.1
1980	CEPN	フランス	<u>84</u>	0.63	1.5	1.0
1981	Habegger	米 国	<u>61</u>	0.43 ... 0.73	1.67	0.7 ... 1.2
1981	BEAD/M	米 国	<u>117</u>	0.15 ... 2.45	1.67	0.25 ... 4.0
1981	BEAD/H	米 国	<u>64</u>	0.69	1.67	1.2
1982	Inhaber	カナダ	<u>89</u>	2.57 ... 3.57	1	2.6 ... 3.6
1983	Holdren	米 国	<u>79</u>	0.38 ... 0.98	1.67	0.65 ... 1.6

各種研究による発電1GWy (100万kW) 当たりの死亡数

付表1-43 風力発電の死亡リスク

年	出典	国	文献	資材製造と建設 発電所 蓄電池	輸送	運転と保守	合計	注 施設 負荷率 寿命
				事故 GWy(e) 当たり職業人事故死数				
1980	BEAD	米 国	<u>63</u>	0.57		0.082	0.652	1.5MWe 0.38 30年
1980	Holdren	米 国	<u>77</u>				0.28...0.44	データなし
1982	Inhaber	米 国	<u>89</u>	0.37..0.74	0.38	0.08...0.26	3.43...3.98	0.20 20年
1983	BEAD	米 国	<u>66</u>				0.54	多分BEAD(1980)
1983	Holdren	米 国	<u>79</u>				0.091...0.38	0.5...0.2
				事故 GWy(e) 当たり公衆事故死数				
1982	Inhaber	米 国	<u>89</u>			0.04...0.10		
1983	Holdren	米 国	<u>79</u>			0.03...0.25		
1982	Inhaber	米 国	<u>89</u>	病気	0.035..0.11			



各研究による発電 1 GWy (100 万 kWy) 当たりの死亡数

付表1-44 水力発電の職業事故

プロセス段階	年	出典	国	文献	GWy(e) 当たりの死亡			注釈
					鉄	岩/土	コンクリート	
資材製造*)	1930年代	Hoover Dam	米	国 89			0.0065	
	1975	OERP	米	国 89(n.127)	0.004...0.13		0.0007...0.04	
	1977	Inhaber	カナダ	89	0.006	0.055	0.003	
ダム建設*)	1930年代	Hoover Dam	米	国 89		0.27		n. Inhaber(89). 米国事故統計 スイスの事故統計で計算 1953-1966年のフランスの 経験
						0.48		
	1969	Potier	フランス	133		1.9		
	1976	Battelle	西ドイツ	124		0.07		
	1977	Inhaber	カナダ	89		0.83		
	1987		スイス		1.3		1949-1969のスイスの経験	
輸送	1982	Inhaber	カナダ	89		0.0016... 0.005		重い輸送なし
運転	1969	Potier	フランス	133		0.63		1953-1966年のフランスの経験
	1976	Battelle	ドイツ	124		0.035		

\*) 負荷率 60%の寿命 50 年と仮定した。