

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT CENTER TOPICS

1991.12.NO.21

目次

放射性廃棄物処分システムの安全評価 ①

放射性廃棄物処分システムの安全評価

1990年11月にOECD/NEA主催で開催された「高レベル放射性廃棄物処分における放射線防護及び安全規準に関するワークショップ」並びに1991年10月に開催されたIAEAのINWAC(国際廃棄物管理諮問委員会) サブグループに提出された資料を参考に安全評価の基本的な事項について解説する。また、代表的な安全評価報告書等で取り上げられている主要各国の安全評価シナリオを紹介する。

1. 安全評価の基本的問題

(1) 地層処分に關わる時間枠について

安全評価の前提として、人間の生活様式、生態圏の環境及び地圏の環境の長期予測が必要となる。これらの条件の科学的に予測できる期間をどう考えるかが安全評価シナリオを構築していく上で重要となる。

高レベル放射性廃棄物中には ^{239}Pu 、 ^{237}Np 等 10^4 年以上の長半減期の放射性核種が含まれており、特に長期の問題は避けられない。スウェーデン及

びスイスの規制関係者がまとめた報告書(SKI-TR-90:15)にある図1に示されている期間についての大略のイメージが一つの参考になる。

「生態圏の環境変化を考慮すれば、その予測可能な期間は 10^4 年程度と推定される。地圏の環境変化を予測できる期間は 10^6 年オーダー程度。サイトを慎重に選べばそれ以上予測できるかも知れない。」としている。

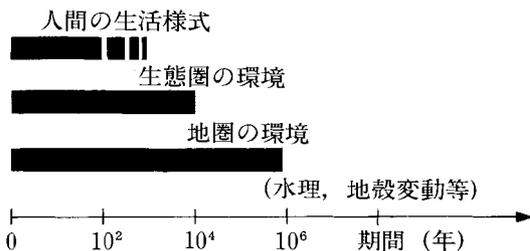


図1 処分システムの安全評価に必要な前提条件が予測できると思われる期間

一方、廃棄物中の放射性核種の量は時間が経過するに従って減衰し、大きな影響が生じる可能性も減るので、地圏での異常事象の発生確率の予測に高い精度は要求されなくなる。

英国NRPB（国立放射線防護局）では期間の経過に伴って次のような尺度で規制することを提案している。

0-10²年：制度的管理が残るので、施設と同じ被ばく線量限度を適用する。

10²-10⁴年：生態圏は変わる可能性があるので、最大被ばくを受ける個人ではなく、クリティカルグループを想定し、リスク限度を適用する。

10⁴-10⁶年：地圏からの放射性核種の定常的漏出を制限することで人類の安全を保つとの考えから、標準生態圏及び人間社会を想定し、リスク限度を適用する。

10⁶年以上：ALARA, 合理的に可能な限り環境への影響が少ないシステムであることを定性的に示す。

この提案のように、処分場を閉鎖した後の制度的管理の有効な期間は数百年程度であり、定量的な安全評価ができる期間は数万年程度が限界であろうとの点では各国の規制関係者の見解がほぼ一致している。また、数百万年以上の定量的評価は、生物の歴史や地殻変動等による物質移動を考えると、ほとんど意味がないとの考えが一般的であるように思われる。

(2) 長期の安全性を示す方法

将来の人間の生活習慣や生態圏環境を正確に予測することはできなく、現在と同じとして評価することが一般に行われている。このことの意味は、将来の人間の被ばく線量を評価するというより、廃棄物から地圏を通過して生態圏に漏出する放射性核種の量を現在の生物圏の環境条件での被ばく線量に換算し、将来の放射線的环境が処分によって現在と変わらないことを示すことにあると理解した方が解りやすい。

北欧5ヶ国の規制関係者がまとめた提案書では10⁴年程度以上の期間については、地表の侵食によって土壌や岩石中の自然のアルファ核種が生態圏に移行する量と廃棄物に起因する漏出量を比較することを提案している。アルファ核種のみをとりあげているのは、自然の放射性核種と廃棄物

中に含まれる放射性核種の種類は必ずしも同じではなく、直接比較できないので、放射線学的及び化学的特性が似かよった自然のアルファ核種と比較することにしたものである。これも一つの提案であるが、まだ国際的なコンセンサスとは言い難い。

(3) 発生頻度の小さい事象の影響評価

慎重に処分サイトの選定を行っても、断層、火山等の急激な地殻変動を完全に否定することはできない。発生頻度が小さくても影響の大きい事象は評価する必要がある。しかし、一般的に起こり得る事象と同じ規準で規制する必要はない。被ばく線量をガン発生確率でリスクに換算し、被ばくの原因となる事象の発生確率を乗じてリスクで規制しようという考え方と、事象の起こり得る程度をランクづけして、それに応じた線量規準を設ける方法がある。先に述べたSKI-TR-90:15では次の提案をしている。

発生頻度 1~10⁻³/年：通常事象として、被ばく線量規準で規制

10⁻³~10⁻⁷/年：リスク規準で規制

10⁻⁷/年以下：評価免除

この提案は、次のように解釈することができる。数千年以内でも普通に起きるような事象は一般的に起きる事象として被ばく線量規準で規制する。それより低い発生頻度と思われる事象については発生頻度の少なさに応じ緩やかな線量規準にしようとの考え方である。線量の規準を1 mSv/年とすると、数千年間ではほとんど発生しないような事象に対しては1 Sv/年の被ばく線量でもよいことになる。数万年間経過すればガラス固化体の放射能濃度は非常に低くなるので、リスク限度を超えるような事象はほとんど考えられない。地層の安定性についての予測も時間の経過に比例して詳しい予測でなくてよくなる。

ボーリング調査等で廃棄物の一部を知らないで取り出してしまう危険性がしばしば問題となる。SKI-TR-90:15では、「地下資源のない場所を処分場にすることで、ボーリング調査等によるリスクを少なくする。」また、「制度的管理に関する全ての資料が失われた後のことを考えた場合でも、将来、ボーリング調査をするような人は、そのことにより、どのような影響があるかを判断する能力

表1 生態圏漏出主要核種の被ばく線量換算係数

核種	半減期(年)	漏出核種の平均 被ばく線量 Sv/Bq/年 (SKB-TR-90:35)	廃棄物中の含有量 Bq/キャニスター (Project Gewähr'85)	
			10 ² 年後	10 ⁴ 年後
C-14	5.73E 03	1.3 E-14	4.68E 07	1.41E 07
Se-79	6.50E 04	6.3 E-14	2.02E 10	1.82E 10
Sr-90	2.80E 01	2.2 E-13	3.41E 14	0
Zr-93	1.50E 06	2.5 E-15	9.06E 10	9.02E 10
Tc-99	2.10E 05	1.7 E-15	6.51E 11	6.31E 11
Sn-126	1.00E 05	3.7 E-14	4.62E 10	4.31E 10
I-129	1.60E 07	5.4 E-13	1.53E 06	1.53E 06
Cs-135	3.00E 06	3.9 E-14	1.83E 10	1.83E 10
Cs-137	3.00E 01	2.4 E-13	5.09E 14	0
Ra-226	1.60E 03	1.8 E-12	1.33E 05	4.72E 07
Th-229	7.3 E 03	4.4 E-12	3.54E 04	3.51E 08
Th-230	8.0 E 04	7.5 E-13	3.25E 06	5.99E 07
Pa-231	3.28E 04	1.0 E-10	8.23E 05	1.13E 06
U-233	1.59E 05	1.6 E-12	6.86E 06	1.00E 09
U-234	2.45E 05	1.6 E-12	3.17E 08	6.62E 08
U-235	7.04E 08	1.5 E-12	1.58E 06	3.39E 06
U-236	2.34E 07	1.5 E-12	2.10E 07	8.34E 07
U-238	4.47E 09	1.4 E-12	2.36E 07	2.36E 07
Np-237	2.10E 06	2.2 E-12	1.67E 10	2.38E 10
Pu-239	2.41E 04	4.3 E-12	1.19E 11	2.22E 11
Pu-240	6.56E 03	4.3 E-12	3.39E 11	1.20E 11
Pu-241	1.41E 01	7.9 E-14	4.84E 11	2.59E 09
Pu-242	3.80E 05	3.9 E-12	7.51E 08	7.66E 08
Am-241	4.32E 02	4.2 E-12	3.51E 13	2.59E 09
Am-243	7.37E 03		8.41E 11	3.32E 11

を持ち合わせているだろう。従って、現在の人間活動を前提にした評価は疑いなく安全側である。」との考え方をとっている。

2. 生態圏に漏出した放射性核種の線量換算

遠い将来の放射線的環境を現在と比較する場合、将来、環境条件が変化することを考えると、サイト固有の環境条件そのものであることは必ずしも必要ではなく、その地域に類似する類型化した標準的な環境条件を使う方がよいと考えられる。

スウェーデンで、標準的な生態圏の環境条件を設定し、主な放射性核種について、年間1Bqが生態圏に漏出したときの被ばく線量を計算した例がある。

ここでは標準的生態圏として、湖及び井戸とそれに隣接する農場を想定し、99%が湖に、1%が井戸に漏出したとしている。

表1に示す計算結果からアルファ核種は他の核種よりほぼ百倍影響が大きいことがわかる。先に述べたアルファ核種のみで自然放射能と比較する方法は賢明な方法であることがわかる。なお、

高レベル廃棄物中の放射性核種の量は表1の最右欄に示した。

同報告書では、自然放射能との比較のために、土壌及び水中の自然放射能による被ばくを同一条件で計算しており、その結果を表2に示す。

表2 自然放射性核種からの被ばく線量

放射性核種	土壌中平均 濃度(Bq/kg)	自然水中平均 濃度(mBq/l)	放射線被ばく 線量(Sv/年)
U-238	50	10	7.3E-05
U-234	50	10	8.4E-05
Th-230	50	10	8.4E-06
Ra-226	80	10	1.3E-04
Po-210	100	10	2.8E-05
Pb-210	100	10	5.3E-04
U-235	2	0.5	3.3E-06
Pa-231	2	0.5	4.3E-05
Ac-227	2	0.5	2.6E-05
Ra-223	2	0.5	1.7E-06

SKB-TR-90:35(1990)

3. 地層処分の安全評価シナリオ

地層処分は多重バリアの全体システムの働きによって廃棄物中の放射能が充分減衰するまでバリア中に閉じ込めておくことが前提となっている。廃棄物中の放射性核種が生態圏に漏出する経路は地下水に溶けて移動するのが主と考えられ、火山の噴火、断層活動等による直接的な露出による被ばくの可能性は極めて少ないと想定される。

前者は通常起こり得るシナリオとして被ばく線量を定量的に評価し、後者の直接的な露出については異常シナリオと考え、発生確率が極めて低いことに着目した評価方法（例えばリスク評価）が導入される。

通常シナリオである地下水移行シナリオは多くの場合次の事象系列が基本となっている。

- ①地下水が処分場に浸入し、緩衝材中を移行し廃棄物容器と接触する。
- ②廃棄物容器が腐食する。
- ③廃棄物容器の密封が破られる。
- ④廃棄物から放射性核種が浸出する。
- ⑤浸出した核種が緩衝材中に拡散する。
- ⑥周辺の岩盤へ拡散・移流により移行する。
- ⑦岩盤の断層、割れ目または水を通しやすい地層中を移流・拡散により移行する。⑤～⑦の過程で核種によっては沈殿・再溶解あるいは吸脱着を繰り返す。
- ⑧表層に貫通する断層あるいは水を通しやすい層を通過して表層の地下水流、川、湖等に漏出し、生態圏に広がる。
- ⑨飲料水、食物等の摂取及び塵埃等の吸収により体内へ取り込む。

この基本的なシナリオに影響を与える要因による変動を評価しなければならない。特に、長期の評価を行う上で変動シナリオの取扱いが重要な位置付けとなっている。変動シナリオの選定には専門家の判断に頼るところが多い。既に、多くの国で変動シナリオが選定され国家的組織による安全評価が行われているので、今後わが国における変動シナリオを考える場合、これら報告書で採用している処分概念及び地質環境の違いを十分考慮に入れて評価シナリオを作成していくのが実際的であると考えられる。

表3に主要各国が検討している処分概念と評価

表3 深地層処分による被ばく評価シナリオ

国名 評価報告書等	米国 NUREG/CR1667(1988) ^(注)	カナダ 2nd Post-Closure Assessment Report(1985)	スウェーデン KBS-3(1983)	スイス Project Gewähr 85	ベルギー SAFIR(1989)
1. 処分の対象	使用済燃料、ガラス固化体	使用済燃料	使用済燃料	ガラス固化体、使用済燃料	ガラス固化体
2. 処分概念	ネバダの凝灰岩の地層(ユッカマウンテン)の不飽和層に処分	カナディアンシールド花崗岩地帯の地下500～1,000mの地層に処分。 チタン製容器に封入し、坑道の床に掘削した処分孔に定置し、周囲に緩衝材(ペントナイト)を充填する。	結晶質岩(花崗岩)地帯の地下約500mに処分。 銅製キャニスターに入れ、坑道の床に掘削した処分孔に1本ずつ定置し周囲に緩衝材を充填する。	スイス北部の花崗岩層地下1,200mに処分。 厚さ25cmの鋼製容器に封入し、横坑道内に定置し、坑道内空間に緩衝材を充填する。	ベルギーの北東部モルの地下約230mの粘土層(ブームクレイ)に処分。 高レベル廃棄物を単独で処分する方法と中レベル廃棄物を一緒に処分する方法を検討中
1. 通常シナリオ	地下水移行シナリオ	地下水移行シナリオ	地下水移行シナリオ	地下水移行シナリオ	地下水移行シナリオ
2. 変動シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・気象変化の伴う水理条件の変動 ・新しい断層の形成、地震 ・不飽和層における地球化学特性の変化、流入水の変化 ・コロイドの形成 ・ボーリング調査 他	<ul style="list-style-type: none"> ・基本シナリオのパラメータの変動 ・容器の早期破壊 ・緩衝材の性能劣化 ・グラウティングの性能劣化 ・氷河期来襲による気候変化 ・生活様式の変化 	<ul style="list-style-type: none"> ・スカンジナビアの隆起 ・初期キャニスター破損 ・酸化雰囲気の変化 ・コロイドの形成 	<ul style="list-style-type: none"> ・基本シナリオのパラメータ変動 ・上部地層への井戸の掘削 ・気候変動 ・定性的評価：氷河、火山、隕石、地震、岩盤弱部変動、キャニスター移動、シーリング破損、その他 	<ul style="list-style-type: none"> ・処分場直近の井戸掘削 ・気候が変化及び降水量変化 ・氷河来襲による粘土層上部の地下水流変化 ・断層の生成 ・粘土層下部に到達するボーリング掘削

注) Sandia N.L. の研究レポートで評価報告書ではない。

レポートで採用されている評価シナリオの概要を示す。評価結果は通常シナリオに関する限り、線量限度を何桁も下回っている。また、影響が最大となるのは10⁴年以後の遠い将来であるとの報告が多い。評価の1例を図2に示す。

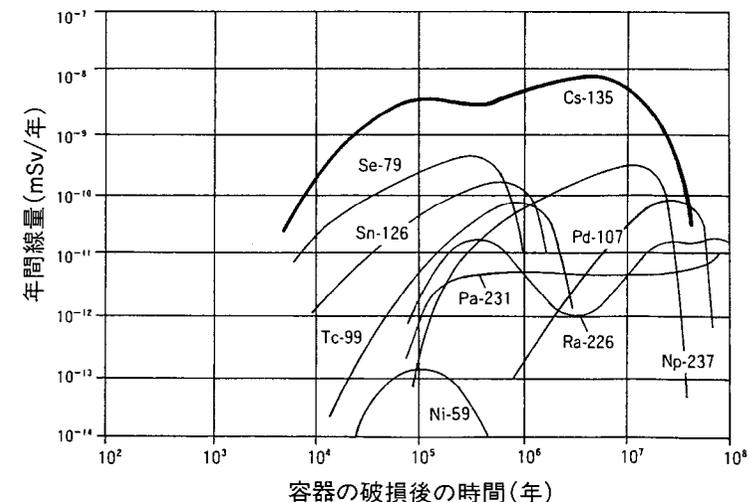


図2 スイスにおける被ばく線量評価例 (Project Gewähr'85)

4. 浅地中処分の安全評価シナリオ

浅地中処分では管理に信頼がおけると考えられる期間内に廃棄物中の放射能が減衰して充分低い濃度になる廃棄物のみが対象となる。放射能の減衰や人工バリアの信頼性に応じ、管理の仕方を変えることがあるので、評価シナリオ設定の前提条件が変わる。しかし、管理の継続期間の安全評価は再処理施設等の核燃料施設の安全評価と原則的な点は同じである。ここでは管理終了後について述べる。

浅地中処分では期間が短いので、生態圏及び地圏は変化しないことを前提とするのが普通である。生態圏の環境データについては、サイト固有のデータであることが重要となる。また、評価シナリオの設定に当たっては人間の行為を中心に組み立てられる。

被ばくが生じる発端から、次の2つのシナリオに大別される。

人間侵入：建設工事、井戸掘削等により、処分施設あるいは周辺の地下の構造を変化させ、放射性物質で汚染した水や土壌を介して被ばくする。

地下水移行：処分施設から放射性核種が漏出し、地中を地下水によって移動し、人間の生活環境に入ることに伴って被ばくする。

このようなシナリオを基本にして、処分施設の構造や自然環境条件の違いに応じ、被ばく経路の重要度が変わるとともに評価パラメータが変わる。表4に各国の安全評価事例にみられる被ばくシナリオを一覧表にまとめた。表にはシナリオのみを記載したが、実際の評価に当たってはそれぞれの発生確率を考慮して、ランクづけして異なる線量限度やリスク限度を使っている。このやり方は国によってまちまちである。

わが国では一般的に起こり得る場合と発生頻度の小さい場合に分けて評価し、発生頻度の小さい場合については、目安被ばく線量0.01m Sv/年を著しく超えなければよいとしている。

(中村治人)

表4 浅地中処分による被ばく評価シナリオ

	米国 (NUREG-0782)	英国 (NRPB-R161)	仏国 (Chapuis & Guetat 1984)	日本 (六ヶ所申請書)	
施設形態	<ul style="list-style-type: none"> ・素掘りトレンチ ・5 m覆土あるいは侵入バリア (class C) ・地下水位以浅への処分 ・制度的管理期間100年 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート被覆トレンチ ・地下水位以深への処分 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートモノリス ・監視期間300年 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートピット, モルタル充填 ・地下水位以深への処分 ・管理期間300年 	
地下水シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・降雨の浸透により核種が地下水に混入して被ばく ・井戸水や地表水の飲用 ・灌漑土からの放射線やダストの吸入 ・栽培飼育された農畜産物の摂取 	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水の浸透により核種が河川水に混入して被ばく ・河川水の飲用 ・魚の摂取 ・飼育された畜産物の摂取 	<ul style="list-style-type: none"> ・洪水や灌漑で核種が跡地の表土に移行して被ばく ・表土からの放射線 ・表土からのダスト吸入 ・魚の摂取 ・牛乳, 肉, 野菜の摂取 	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水の浸透により核種が地表水に移行して被ばく ・魚類の摂取 ・沢水の飲用 ・灌漑土からの放射線やダストの吸入 ・栽培飼育された農畜産物の摂取 	
管理期間以後の人間侵入に伴う被ばくシナリオ	建設シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・家屋の建設で廃棄物を掘削して被ばく (500年後) ・掘削土からの放射線 ・掘削土からのダスト吸入 ・ダストの沈着した農作物の摂取 	<ul style="list-style-type: none"> ・種々構造物の建設で施設を掘削して被ばく ・掘削土からの放射線 ・掘削土からのダスト吸入 	<ul style="list-style-type: none"> ・道路の建設工事で施設を掘削して被ばく (300年後) ・掘削土からの放射線 ・掘削土からのダスト吸入 	<ul style="list-style-type: none"> ・住宅の建設で跡地を掘削して被ばく (一般的, 300年後) ・地下数階建物の建設で施設を掘削して被ばく (頻度小, 300年後) ・掘削土からの放射線 ・掘削土からのダスト吸入
	居住シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・上記の住宅に居住して被ばく ・掘削土からの放射線 ・掘削土からのダスト吸入 		<ul style="list-style-type: none"> ・廃棄物が露出した跡地に居住して被ばく (300年後) ・跡地からの放射線 ・跡地からのダスト吸入 <p>施設が劣化した砂を使った家屋に居住して被ばく (1000年後)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・家屋壁からの放射線 	<ul style="list-style-type: none"> ・上記の住宅に居住して被ばく ・掘削土からの放射線 ・掘削土からのダスト吸入
	農地シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・上記の住宅に居住し, 農耕して被ばく ・掘削土からの放射線 ・掘削土からのダスト吸入 ・栽培飼育された農畜産物の摂取 	<ul style="list-style-type: none"> ・核種が移行した跡地の表土で農耕して被ばく ・栽培飼育された農畜産物の摂取 	<ul style="list-style-type: none"> ・施設が劣化した砂で酪農して被ばく (1000年後) ・牛乳の摂取 	
	侵入井戸シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・処分区域下流端に掘った井戸を利用して被ばく (500年後) ・井戸水の飲用 ・灌漑土からの放射線やダストの吸入 ・栽培飼育された農畜産物の摂取 			<ul style="list-style-type: none"> ・処分区域下流端に掘った井戸を利用して被ばく (頻度小, 300年後) ・井戸水の飲用

センターのうごき

平成3年度調査研究受託状況

平成3年度の事業として、平成3年9月1日以降11月末までの間に、次の受託契約が行われました。

委託元	調査研究課題	契約年月日
科学技術庁	・天然バリア安全性実証試験	3. 9. 20
	・放射性廃棄物の処理処分に関する広報	3. 9. 26
	・アルファ廃棄物処分基準整備調査	3. 10. 1
	・放射性廃棄物の情報管理に関する調査研究	3. 10. 23
	・高レベル放射性廃棄物の処理処分に関する広報	3. 11. 22
通商産業省	・低レベル放射性廃棄物施設貯蔵安全性実証試験	3. 9. 3
電力各社等	・低レベル放射性廃棄物の基準整備に関する研究	3. 9. 1
	・放射能濃度に応じた合理的処分技術の研究	3. 9. 12
	・低レベル放射性廃棄物の輸送に関する研究	3. 10. 7
	・金属等廃棄物の再利用方策の検討	3. 10. 16
	・廃棄体の埋設処分への適合性評価	3. 11. 25
日本原子力研究所	・高レベル放射性廃棄物等の海洋底下処分における安全評価に係る調査	3. 9. 2
動力炉・核燃料開発事業団	・高レベル放射性廃棄物処理処分に対する高度基盤技術の適用に関する調査研究	3. 10. 1

編集発行

財団法人 原子力環境整備センター
〒105 東京都港区虎ノ門2丁目8番10号 第15森ビル
TEL 03-3504-1081(代表) FAX 03-3504-1297