



JAEA-Review

2006-030



JP0650667

地層処分の安全規制に関する動向

–原則、基準と適合性に関する主な論点を中心に–

A Review of Key Issues for Regulations on Geological Disposal

– Focusing on Principle, Standard and Compliance –

宮原 要 加藤 智子

Kaname MIYAHARA and Tomoko KATO

地層処分研究開発部門
システム性能研究グループ

Performance Assessment Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

JAEA-Review

October 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901

© Japan Atomic Energy Agency, 2006

地層処分の安全規制に関する動向

一 原則、基準と適合性に関する主な論点を中心に 一

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット
宮原 要, 加藤 智子

(2006年9月11日受理)

わが国の高レベル放射性廃棄物の地層処分計画は、現在事業段階にあり、実施主体により「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」に定められた最終処分施設建設地の選定に向けた段階的プロセスに沿った作業が進められているところである。一方、日本原子力研究開発機構でも、事業あるいは規制に反映するための技術・知見を整備するため、深地層の研究施設（瑞浪、幌延）や地層処分基盤研究施設、地層処分放射化学研究施設を活用した研究計画を着実に進めているところである。

このような状況において、事業の進展に応じて地層処分の安全規制が適切に策定されるための情報を、国際機関が提言する原則や諸外国での事例を参考に整理しておくことは重要である。

本報告書では、安全規制に関する国際的な動向を調査・整理した上で、地層処分の長期の安全性について幅広い関係者や公衆の信頼や納得を得られるようにするために、地層処分の安全規制に関する議論がどのように深まってきたかを概観しつつ、国際的な考え方や米国など各国の規制に関するまとめを試みる。今後、わが国において安全規制を策定する上では、このような国際的な考え方や各国の事例をわが国へどのように適用していくかについて検討することが重要と考えられる。

A Review of Key Issues for Regulations on Geological Disposal

- Focusing on Principle, Standard and Compliance -

Kaname MIYAHARA and Tomoko KATO

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 11, 2006)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) rigorously continues to conduct research and development for establishing scientific and technical basis as an advanced knowledge base for implementation and safety regulations of HLW geological disposal. The current main goal of the regulator is to establish the required structure of safety goals and guidelines. In this respect, knowledge is required to provide a guidance to support definition of regulatory guidelines and guidance on demonstration of compliance. These may involve international review of regulations in particular with regard to areas where there is a lack of consensus (e.g. cut-off times, performance measures in the distant future).

This report is to provide an example of an international review of key issues for regulations on geological disposal.

Keywords: HLW Geological Disposal, Regulations

目 次

1. 背景	1
2. 安全規制に関わる基本原則	3
2. 1 倫理的、技術的原則	3
2. 2 放射線防護の原則	5
3. 安全規制の動向	7
3. 1 地層処分で考慮すべき時間スケールと安全基準	7
3. 2 規制への適合性を示すための考え方	16
3. 3 段階的アプローチと回収可能性	19
4. まとめと規制の具体化に向けた課題	21
参考文献	24

Contents

1. Introduction	1
2. Principles of post-closure safety regulations	3
2.1 Ethical and technical principles	3
2.2 Principles of radiological protection	5
3. Recent movement on post-closure safety regulations	7
3.1 Time scale and safety standards for geological disposal	7
3.2 Method to show compliance to post-closure safety regulations	16
3.3 Stepwise approach and retrievability for geological disposal	19
4. Summary and future tasks for putting safety regulations into practice	21
References	24

図目次

図 3.1-1 諸外国の地層処分における放射線防護基準	13
図 3.1-2 生物圏評価の考え方－評価時間との関係－	15

表目次

表 3.1-1 各指標の比較	8
----------------	---

1. 背景

高レベル放射性廃棄物などの地層処分¹⁻¹⁾では、安定な地質環境に適切に工学的対策を施すことにより、長期にわたり地質環境が本来有する隔離性を確保し、地下水への多重の対策（多重バリアシステム）を講ずる。このように構築された地層処分システムは処分後長期において放射性物質を閉じ込め、人間環境への影響は遠い将来において極めてわずかしか見込まれないと考えられる。しかしながら、人工バリアから天然バリアへの放射性物質の移行が将来にわたって全くないということを示すことは困難である。地層処分の安全性の確保に関しては、「閉じ込め（濃縮・保持）」と「希釈・分散」という2つの考え方がある。環境への早期放出による「希釈・分散」によって安全な処分が実施できない地層処分においては、人工バリアによる「閉じ込め（濃縮・保持）」が採用されるものの、長期的には、例えば、腐食によるオーバーパックの閉じ込め機能の喪失に続く放射性物質の人工バリアから天然バリアへの移行により、結果として「希釈・分散」の過程も含まれることになる。なお、このような考え方に基づき、将来の処分システムの挙動を評価する上では、時間とともに増大すると考えられる不確実性に留意しつつ、遠い将来に起こるか起こらないかもしれないという潜在被ばくの状況が考慮され、これが放射線防護上の主な課題となる¹⁾。

地層処分による安全の確保については、廃棄物が埋設され、制度的な管理の下で一定期間について環境の安全確認が終了するまでの段階（事業段階）と、それ以降制度的な管理によらず多重バリアシステムにより安全が保証される段階（処分段階）とに区分して考えるのが一般的である。地層処分を実施するためには、事業段階において処分段階における安全が実施側・規制側の独立した保証によって予測的に示され、社会的な受容が得られる必要がある。

地層処分の安全評価において長期にわたり地層処分システムの性能を評価するのは、例えば高レベル廃棄物であるガラス固化体¹⁻²⁾の場合、以下の理由による。

- ガラス固化体の放射能は、固化後数百年は比較的半減期の短い核分裂生成物からのものが支配的であるものの、これらの放射性核種の崩壊が進むにつれて放射能は減衰し、ガラス固化されてから1,000年後には、固化時の数千分の1に低下する。それ以降の期間については、半減期の長いアクチニドやいくつかの種類の核分裂生成物による放射能が減衰しつつも長期にわたって残存し、核燃料1 MTUから発生するガラス固化体の放射能は、燃料の製造に必要なウラン鉱石の全量（品位1%の場合、約750 t）がもつ放射能と同レベルになるまでに数万年程度という時間を要する。
- オーバーパックが閉じ込め機能を発揮している間（例えば、地層処分研究開発第2次取りまとめ²⁾（以下、「第2次取りまとめ」という）では、1,000年と評価）は、ガラス固化体と地下水が接触することを完全に防ぐことができ、また、オーバーパックが破損した後も、地下水との相互作用によりガラス固化体から溶解した核種は人工バリアや岩盤中をゆっくりとしか移行しないことから、人間の生活環境に核種が達するまでに極めて長い時間を要する。

このように、事業段階に対し処分段階の時間スケールは指数級数的に長いため、必然的に伴われる多くの不確実性を考慮した対策と評価が必要となる。とくに性能の予測（安全評価）結果について幅広い関係者や公衆の信頼や納得を得ることが求められる。このような背景を踏まえ、地層処分の安全規制に関わる国際的な検討や議論が深まってきた。

1-1) 地層処分は、発熱性廃棄物や長寿命の廃棄物など比較的危険性の高い放射性廃棄物を処分する方法と考えられている³⁾。

1-2) わが国では、高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の最終処分として地層処分を行うことを基本方針としている⁴⁾。

経済協力開発機構原子力機関（以下、「OECD/NEA」という）では1995年に、地層処分に関する環境防護の長期性に鑑み、持続可能な発展の考え方に基づき、将来世代について注意を払うという倫理的原則について意見集約を行った⁵⁾。また、国際原子力機関（以下、「IAEA」という）では、1995年に放射性廃棄物管理の原則を公開した⁶⁾。このような地層処分の原則に関する国際的な検討や議論の進展に照らして、国際放射線防護委員会（以下、「ICRP」という）では、1998年に従来の勧告を補完、改訂したICRP Publication 81¹⁾を出版した。また、IAEAでは、2006年に放射性廃棄物の地層処分に関する安全要件としてWS-R-4³⁾を公表した。一方、各国の規制の動向として特筆すべきは、米国での規制の議論に関する経緯であり、安全規制に関わる基本的な技術的考え方を見直し、さらに訴訟を踏まえ評価期間と基準値について改訂した。わが国では、原子力安全委員会が2004年に「放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について」⁷⁾（以下、「共通的重要事項」という）を公開し、放射性廃棄物処分について安全規制を考えていく上で共通する重要事項を取り上げ、世界的な動向等を参考にしつつ、わが国の安全規制に関する検討の方向性を示した。

本報告書では、処分段階における地層処分の長期の安全性について幅広い関係者や公衆の信頼や納得を得られるようにするために、地層処分の安全規制に関する議論がどのように深まってきたかを概観しつつ、国際的な考え方や米国など各国の規制に関するまとめを試みる。今後、わが国において安全規制を策定する上では、このような国際的な考え方や各国の事例をわが国へどのように適用していくかについて検討することが重要と考えられる。

2章では、地層処分の倫理的原則と技術的原則、さらには放射線防護の原則の地層処分への適用について国際的な考え方をまとめる。3章では、2章での原則を踏まえて、安全規制の国際的な考え方や米国など各国の規制に基づき、地層処分で考慮すべき時間スケールと安全基準、規制への適合性を示すための考え方についてまとめるとともに、事業段階において処分段階の安全性についてどのように意思決定を進めるべきかという観点から安全規制との関連に留意しつつ段階的アプローチと回収可能性の考え方についてまとめる。4章では、まとめと規制の具体化に向け課題について述べる。

なお、これまでにも、わが国における放射性廃棄物処分の原則とその適用性の考え方について報告されている^{8),9),10)}。本報ではこれらを参考に、昨今の国際的な考え方などをまとめつつ、わが国における規制の具体化に向けた課題について述べることとする。

一方、ICRP Publication 91¹¹⁾では、人間以外の生物種に対する放射線影響について評価するための枠組みが検討されており、IAEAでも欧州の動向に基づいた動きがある¹²⁾。しかし、本報告書での取り扱いは、IAEA WS-R-4³⁾と同様に、人間以外の生物種を含む環境の防護および非放射線影響（例えば、化学毒性など）については検討の範囲外とし、人間の放射線防護にのみ着目することとする。

2. 安全規制に関する基本原則

2. 1 倫理的・技術的原則

地層処分の安全規制を検討する上では、実現可能な方法により達成できることへ適用するための規制の枠組みを導くことが重要である。倫理的、技術的原則は、規制の枠組みを導くための基本的考え方を与えるものであり、安全基準の策定に先立ち理解しておくべきものである。意思決定プロセスにおける理解の不足などに伴う不必要的負担を招かないよう、公衆を含むステークホルダーが原則について理解を共有しておくことが重要である。

(1) 倫理的原則

原子力発電により恩恵を蒙る現世代は、廃棄物を安全に処分し、後世代に廃棄物の管理に関する負担を残さないようにすべきである⁵⁾とする倫理的な視点がある。その一方で、現世代の行為によって将来世代の意思決定の自由を妨げるべきではないとする見方¹³⁾がある。すなわち、世代間の公平を重視する観点からは、将来世代に最少の負担と最大の選択肢を残すことが同時に求められることになる。地層処分は、人間の関与を必要としない受動的システムにより、処分事業終了後の長期安全性を確保する。一方、処分場の閉鎖後も一定期間は廃棄物の回収が可能であり、地層処分は将来世代による選択の余地を狭める処分方法ではない⁶⁾。

安全評価上、有為な問題点を残したまま処分事業を急に進めることは避けなければならない。世代内の公平の観点からは、原子力発電による恩恵は国民すべてが受けるのに対し、処分場の受入れは限られた地域の自治体や住民が担う^{2.1-1)}ものであるため、現世代における資源を有効に活用し社会の意見を取り入れつつ、公明正大に意思決定を進めていくことが極めて重要となる¹⁴⁾。世代間、世代内の公平に鑑み、地層処分は、長寿命放射性廃棄物の安全かつ倫理にかなった長期的対策であるとの専門家による国際的意見の一一致が得られている⁵⁾。

これらの倫理的原則と整合がとれるよう IAEA は放射性廃棄物管理に関する原則として以下のものを定めている⁶⁾。

- 原則 4 将来世代の防護

放射性廃棄物は、将来世代の健康に対して予想される影響が、現在受け入れられている影響のレベルを超えないような方法で管理されなければならない。

- 原則 5 将来世代への負担

放射性廃棄物は、将来世代へ過度の負担を強いることのないような方法で管理されなければならない。

ここで留意しておくべきは、多重バリアシステムの性能により長期の時間スケールにおける人間環境への影響は極めて小さいと考えられるものの、放射性物質はゆっくりと人工バリアから天然バリアへと移行することから、現世代が被る影響よりも小さくはならないと考えられることである。

(2) 技術的原則

次に、上記の倫理的原則を踏まえ、技術的な原則として理解しておくべきこととして、受動的な安全システム、合理的な保証、深層防護と多重バリアシステムの関係、システムズアプローチ

2.1-1) わが国では、概要調査地区の選定にあたり「高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域」を、全国の市町村から公募することとしている¹⁵⁾。

について述べる。

地層処分は、安定な環境として深地層を利用し、そこに適切に工学的対策を施すことにより、長期にわたる受動的な安全システムの構築が可能となる。安全評価の目的は、処分システムの将来挙動を正確に予測し将来の人間への影響を言い当てるというものではなく、想定される様々な状況に基づく影響の大きさを把握できるように示し、地層処分システムの性能を現在適用できる安全指標と対比して、地層処分の技術的信頼性を判断するための材料を提供することである。安全評価において取り扱う不確実性には、知識・情報を整えることによりある程度減らすことのできるものと、知見の蓄積とは無関係に存在するものがある。前者の例として地質環境の不均質性があり、これはある程度の定量化は可能であるものの、過剰な調査による安全性への影響を考慮すれば自ずと限界があり、不確実性をなくすことはできない。後者の例としては将来の人間活動に関する予測の不確実性などがある。これらの不確実性を安全評価において適切に取扱うことなどを判断材料として意思決定を進めていくこととなる。地層処分に関わる不確実性の存在により、処分システムの長期性能を完全に理解し、安全性を実証すること（安全性の絶対的な保証）は不可能であり、安全性の提示や判断は、合理的な保証（reasonable assurance）の範囲内で行われるべきとする国際認識がある（例えば、IAEA WS-R-4³⁾やTECDOC-975¹⁶⁾）。

地層処分の技術的原則である受動的な安全システムを規制の観点から適切に捉えるため、深層防護と多重バリアシステムの関係について理解しておくことが重要である。深層防護の考え方は、バリアの信頼性に関する定量的評価を高い信頼性をもって行えない場合にも、個々のバリアの独立性と複数バリアの機能の重複性に頼ることにより安全性を保証できるようにするために用いられてきた。この考え方は、従来原子炉施設のように能動的な制御が可能な安全システムを有する施設において適用可能である。一方、地層処分の多重バリアシステムは受動的なシステムであり個々のバリアの機能が時間とともに変化しうることから、完全なバリアの独立性や機能の重複性を求めるものではなく、個々のバリアの機能低下などが全体のシステム性能に重大な影響を及ぼさないことを期待する。すなわち、従来の深層防護の考え方では、例えば人工バリアやその構成要素といったサブシステム単位での要件が重要となる一方、地層処分の多重バリアシステムでは、システム全体の性能に対する要件が重要となる。

1983年のNRCが作成した規則では、原子炉施設に適用してきた深層防護の考え方に基づき、サブシステム単位で性能要件を設定した¹⁷⁾。しかしながら、サブシステムの性能要件を満たしてもシステム全体の性能要件への適合が保証できず、逆にシステム全体の性能要件に適合しても、サブシステム要件への適合が保証できないと述べている。システムズアプローチは、システム全体の性能に対する評価基準により適合性を判断するものであり、上記の多重バリアシステムの特徴と整合がとれる。このアプローチでは、どのバリアが重要な役割を果たすべきかという要件を求めないことから、実施側がサイト選定や設計において柔軟に選択できるようすることを規制側も適切と認める考え方である。システムズアプローチについては、NRCの1999年の規則見直しの際に取り入れられた¹⁸⁾。

規制の枠組みを検討する上で重要な原則である合理的保証については、例えば科学的に信頼できること、システム挙動の適切な理解、適切な保守的仮定や様式化の採用、専門家によるピアレビューなどに基づくとともに、1つのアプローチだけではなく、複数のアプローチからの論証（multiple lines of reasoning）によって、システムが適切な防護機能を発揮することを裏づけ、十分な信頼を与えることが求められる（複数のアプローチからの論証については、3.2でさらに述べる）。規制側は、実施側や公衆に合理的保証の意味を明らかにすることが重要である¹⁶⁾。

2. 2 放射線防護の原則

地層処分に対する現在の放射線防護の考え方は、ICRP Publication 60¹⁹⁾が基本となっている。超長期にわたる放射線影響を考慮しなければならない地層処分に、現存の、あるいは将来生じることが確実である放射線源にあてはめられる従来の放射線防護原則を適用するにあたっては、放射線影響を実測により検証することができないという地層処分の特徴を考慮しつつ、ICRP が示す原則との整合性に留意する必要がある。これまで ICRP では、4つの出版物^{1),20)-22)}において、放射性廃棄物に対する放射線防護の考え方について勧告した。本項では、ICRP が示す放射線防護原則と地層処分での取扱いについて整理する。

(1) 放射線防護の基本原則

ICRP が示す放射線防護の目標は、放射線・原子力の適正な利用に伴う環境の保全を図り、個人あるいは集団の被ばく線量をできるだけ少なく抑えることである。このために、さまざまな防護方策が講じられる。放射線による被ばくは、行為によって生じるものと、介入によって生じるものがあり、それぞれに対する防護方策体系は以下のとおりである^{19),23)}。

① 行為

- ・ 行為の正当化

「行為の正当化」は、放射線被ばくを伴う行為の導入に際して最初に行うべき判断である。放射線被ばくを伴うどんな行為も、その行為によって、被ばくする個人または社会に対して、それが引き起こす放射線損害を相殺するのに十分な便益を生むのでなければ、採用すべきではない。さらに、放射線被ばくを伴わない代替手段の便益および費用についても検討し、その導入の可能性についても考慮しておく必要がある。

- ・ 防護の最適化

正当化された行為に対して具体的な防護対策を講じる場合には、「防護の最適化」が図られなければならない。放射線被ばく源からの影響をできるだけ少なくするために、社会的、経済的な要因を合理的に達成できる限り低く保つべき (as low as reasonably achievable; ALARA) である。また、防護の最適化を判断する際の制限条件として、線量／リスク拘束値が適用されている。なお、地層処分における防護の最適化の考え方については、次項および3.1節においても述べることとする。

- ・ 個人線量限度及び個人リスク限度

正当化されたすべての行為（あるいは線源）から一個人が受けける線量の上限値を指す。これは1つの線源から受けける個人の線量の上限値である拘束値とは異なるものである。

② 介入

放射線被ばくを低減させる人間活動と定義され、特に既に存在している放射線源からの被ばくを低減させるために実施する活動を介入という。介入措置を採るか否かの判断は、害（介入措置に伴う費用、不便、不利益）よりも益（介入によって低減される放射線被ばく）のほうが大きいものであるかどうかによってなされる。また、線量限度は適用されず、介入のための参考レベルを採用する。

(2) 地層処分における扱い —放射線防護の原則との整合—

地層処分では、超長期の評価期間を対象とするため、人間が受けける放射線影響を実測によって検証することができず、モデルを用いた影響解析によって判断することとなる。将来の地表・地質環境や人間の生活様式など前提条件に関する不確実性により、モデルを用いた影響解析の結果

にも不確実性が存在する。ICRP の放射線防護の原則の適用にあたっては、上記のこと考慮し、適切にその概念を取り入れる必要がある。以下、(1) で述べた放射線防護の基本原則の各項目に關して、地層処分に関わる ICRP 勧告の具体的な記述に基づき、地層処分における放射線被ばくの取扱いの留意点をまとめた。

ICRP Publication 77 では、廃棄物処分は行為の一部であり、地層処分のような超長期を対象とする事業においては、行為と介入の区別があいまいになっていくことが明記されている²¹⁾。したがって、地層処分においては、事業段階において行為に関する防護体系の適用が適切であるものの、処分段階においては介入を適用する状況が発生しうることを考慮しておく必要がある。

「行為の正当化」に関しては、ICRP Publication 81 に「廃棄物の管理と処分の事業は、廃棄物を発生する行為の正当化の評価に含まれるべき」といった記述がある¹⁾。廃棄物を発生する行為とは原子力発電そのものであることから、廃棄物処分の政策の変更等があった場合には適切に取り入れつつ、必要に応じて再評価することも考えられる。

「防護の最適化」に関しては、より安全な放射線防護を達成するため、線量を低減する義務があることが明白であり、その責任は事業者や国にあるとされている²⁴⁾。また、ICRP では、拘束値を導入した最適化によって、公衆の防護のために必要な対策を正当化することを推奨しており¹⁹⁾、放射性廃棄物処分においても、この考え方に基づいた放射線防護の方策について言及している²¹⁾。なお、ICRP Publication 81 では、自然過程^{2.2-1)}について 0.3mSv y⁻¹ の線量拘束値¹⁾を勧告している^{2.2-2)}。

ICRP が示した地層処分における放射線防護の最適化 (constrained optimization^{2.2-3)}) は、定量的情報を活用しつつも基本的に定性的なやり方に基づく手法で実施されるべきであり、地層処分に対し社会的な正当性が得られるよう、経済的、社会的要因も考慮して、達成可能な範囲で、線量を低減するために資源を投入し、対策を講じていくことが適切であると考えられている¹⁾。これは地層処分に関わる上記の倫理的な原則や合理的な保証の考え方とも整合するものである。

最適化のための対策としては、安全確保の考え方（「安定な地質環境に性能に余裕をもたせた人工バリアを構築する」など）に基づき、サイト選定、処分場の設計などが講じられる。これらの対策は、処分場構築の進展に応じて段階的に講じられるため、最適化は段階を踏んで進められる意思決定のプロセスと考えられている³⁾。このような進め方では、将来世代が計画を完了するために多大な資源を投入する必要のないようなやり方が選ばるべきと考えられる。なお、最適化と BAT (利用できる最善の技術的手段；Best Available Techniques) の適用については、3.1(2) で述べることとする。

一方、人間侵入がサイト周辺の住民に、現在の基準では介入がほとんどいつも正当化されるほど十分に高い線量をもたらす可能性があるような場合には、人間侵入の確率を減らすか、あるいはその影響を制限するために、処分場の開発段階で合理的な努力を払うべきである¹⁾と明記されている。また、人間侵入の確率を減らすための合理的な措置の例としては、

- ・ 侵入をより難しくする深いところへの処分施設の設置
 - ・ 強固な設計特徴の採用
 - ・ 能動的な制度的管理（立入制限または放出に対するモニタリングなど）
 - ・ 受動的な制度的管理（記録およびマーキングなど）
- などが挙げられている¹⁾。

2.2-1) 自然過程とは、個人の被ばくに至る人間侵入以外のすべての過程を指す。

2.2-2) IAEA WS-R-4 では、放射線防護に関して、閉鎖前（操業時）1 mSv y⁻¹（線量限度）、閉鎖後 0.3 mSv y⁻¹（線量拘束値）の範囲内に維持されることを求めている³⁾。

2.2-3) ICRP Publication 81 の和訳版では、「拘束値を組み込んだ最適化」という用語が当てられている²⁵⁾。

3. 安全規制の動向

3. 1 地層処分で考慮すべき時間スケールと安全基準

地層処分の安全評価において対象とする時間スケールは超長期におよぶことから、評価結果には、時間の経過に伴って増大する不確実性が存在する。特に、人間が受ける放射線量を主な指標とする評価では、生物圏評価における人間の生活環境や様式のモデル化の際に、将来予測の不確実性を伴うことが不可避である。

本項では、地層処分で考慮すべき時間スケールと安全指標に着目し、まず、廃棄物処分の安全性を示す指標について述べるとともに、ICRP 等が言及している廃棄物処分に対する放射線防護に関する記述（例えば、ICRP Publication 81¹⁾）のうち、最適化とおよび潜在被ばくの考え方について整理する。また、時間スケールごとの安全指標や基準について IAEA や諸外国での考え方をまとめる。次に、安全指標のひとつとして多くの国で採用されている放射線量（以下、「線量」という）に着目し、地層処分によって人間が受ける線量を推定するための方法のひとつである生物圏評価について、国際的な考え方とわが国における検討事例を紹介する。さらに、地層処分における時間スケールとの関連で、人間侵入の確率を減らすための合理的措置として考えられている「制度的管理」について言及する。

（1）廃棄物処分の安全性を示す指標

廃棄物処分に起因して人間が受ける放射線影響を表す尺度として、線量とリスクが用いられる。廃棄物処分の放射線防護において頻出する、線量に関わる用語は以下のとおりである。

- ・ 線量限度：管理された行為から一個人が受ける実効線量あるいは等価線量の、超えてはならない値
- ・ 線量拘束値：あるひとつの行為に關係する特定の線源（例えば廃棄物処分場）からの被ばく線量をできる限り低く（最適化）するための目標となる制限値、将来世代の防護の観点から採用
- ・ 集団線量：一般に集団を対象にした線量評価のために、評価対象とする集団における一人当たりの個人被ばく線量をすべて加算したもの（単位：人・Sv）

また、リスクとは一般的に「ある技術の採用とそれに付隨する人間の行為や活動によって、人間の生命の安全や健康・資産並びにその環境（システム）に対して望ましくない結果をもたらす可能性」と定義されている²⁶⁾。

一方、地層処分システムの安全評価において生じる生物圏評価の不確実性に対処するために、しばしば線量やリスクを補完するための指標（以下、「補完的指標」という）が用いられる。線量やリスクと、補完的指標の特長を比較したものを表3.1-1に示す。

表 3.1-1 各指標の比較^{27), 28)}

指標		長所	短所
人間	線量	<ul style="list-style-type: none"> 人間が受けける影響を直接的に表す 人間への被ばく経路をすべて合算できる 被ばくの蓋然性を考慮できる 他の指標と直接比較できる 	<ul style="list-style-type: none"> コミュニケーションの問題 不確実性の定量化に関する問題 遠い将来に対する適用性の問題 算出の際の複雑性
	リスク	<ul style="list-style-type: none"> 十分に確立され理解されている 人間が受けける影響の直接的な指標 人間への被ばく経路をすべて合算できる 	<ul style="list-style-type: none"> 被ばくの可能性を考慮しない 遠い将来における適用性の問題
環境	濃度	<ul style="list-style-type: none"> 概念的に単純 人間の状態に依存しない 局所的な環境影響を算出 	<ul style="list-style-type: none"> 人工の核種を直接比較できる天然核種がない 一般的な参照レベルの定義に関する問題 人間の健康影響を直接示さない
	フックス	<ul style="list-style-type: none"> 局所的な生物圏や人間の変遷に比較的依存しない 地域的あるいは地球規模の環境影響を算出 	<ul style="list-style-type: none"> 概念的に難しい（適切な領域、境界条件の定義に関する問題） 一般的な参照レベルの定義に関する問題 人工の核種を直接比較できる天然核種がない 人間の健康影響を直接示さない
	時間	<ul style="list-style-type: none"> 理解しやすい バリア性能の直接的な指標 	<ul style="list-style-type: none"> 安全性（人間への健康影響）と直接的に関連がない
廃棄物	毒性	<ul style="list-style-type: none"> 概念的に単純 対象とする期間の指標 	<ul style="list-style-type: none"> 確立されておらず、仮定に対して感度が高い

(2) 最適化とBAT

地層処分では、超長期の評価に伴う不確実性が存在することから、集団線量の適用に問題があるため、費用対効果の観点からの防護の最適化は原理的に困難である。したがって、2.2で述べたように、定量的情報を活用しつつも基本的に定性的なやり方に基づく手法や、過大な費用を伴わないBATによる頑健なシステム構築に基づく、系統立てた方法による判断のプロセスを採用する必要がある¹⁾。これらのこと考慮した上で、地層処分に対し社会的な正当性が得られるよう、経済的・社会的要因も考慮して、達成可能な範囲で、線量を低減するために資源を投入し、対策を講じていくことが適切である。なお、防護の最適化のゴールは、将来受ける線量の低減とそれに必要とされる資源が釣り合う範囲で、線量を低減させるために合理的な处置がとられていることを確実にすることであり¹⁾、これは過大な費用を伴わないBATの考え方と類似している。

また、最適化に関する意思決定においては、安全評価の結果が所定の線量やリスクの値を超えないこと、あるいは、超えるような事象の発生可能性が対策により合理的に達成可能な範囲で低減されていることを確認するだけでなく、対策そのものの信頼性についても確認することが考えられる³⁾。

一方、ICRP の放射線防護の基本原則における防護の最適化と BAT について、共通的重要事項には以下のような記述がある。BAT については、費用対効果の観点からの最適化による放射線防護を実行することが原理的に難しい行為に対して、最適化に変わる方法として導入されたものとした上で、「現時点及び予測可能な将来を考えたときにその限りで最善の手段を技術的に講じておくことが、遠い将来の人々及び環境を防護する上でもっとも合理的との考え方」であるとしている。さらに、「具体的には、できるだけ頑健な処分システムにしておくことを要求しており、いわゆる放射線防護における、合理的に達成可能な限り低く（ALARA; as low as reasonably achievable）や広義な意味での多重防護の精神と同質のものと考えられる」と述べている。

スウェーデン放射線防護機関（以下、「SSI」という）は、最終処分への BAT の適用について、合理的に可能と考えられる限り、人工バリアと天然バリアからの核種の放出を抑制、制限、遅延させるようにサイト選定、設計、建設、操業、閉鎖を実施することにより、処分場とそのシステム要素を構築することを意味するとしている²⁹⁾。さらに、最適化と BAT について、処分場の防護能力を改善するための観点から両者を同等に扱うべきとしつつも、例えば、閉鎖後長期間経過した後の処分場性能の解析や処分場システムの開発行為の初期段階でなされる解析のように、算出されたリスクに大きな不確実性を伴う場合には BAT に重点を置くべきであり、最適化と BAT の適用が対立する場合には、BAT を優先させるべきとしている。

（3）ICPR 効告における潜在被ばくの扱いの変遷

「潜在被ばく」という概念が初めて採用されたのはICRP Publication 60¹⁹⁾であり、それに先行した形で、ICRP Publication 46においては、次のことが明記されている²⁰⁾。

- ・ 個人の線量限度については、「医療線源と自然線源を除いたすべての線源及び行為から受ける放射線被ばくの合計」として表され、“通常”的なシナリオに適用される。
- ・ リスク限度は、「被ばくを受ける確率と被ばくに伴う健康影響の大きさの積」として表され、確率事象を含むすべてのシナリオに適用される。潜在被ばくが複数ある場合、全体的な健康上の影響は、これらの積の和（確率論的放射線リスク値）として表記される。

なお、事象の発生可能性が対策により合理的に低減されているかどうかを示すため、将来発生する可能性を否定できないシナリオ（「潜在被ばく」そのものではないが、類似した概念に相当）に対して、確率を設定してリスクを評価するという考え方を採用し、以下の留意点があることを示している。

- ・ 取り扱うべきすべてのシナリオに生起確率を設定して（全シナリオの発生確率の総和は 1）包括的に評価を行うことが求められる（リスク統合アプローチ）。
- ・ 取り扱うシナリオの追加や、不確実性を考慮してパラメータの幅を広くとることにより、個々のシナリオに対するリスクが小さくなる（リスク希釈）。

一方、ICRP Publication 81¹¹⁾の中では、上記のような潜在被ばくのリスク評価を否定していないものの、併せてシナリオの半定量的な発生可能性と、影響の大きさを勘案して総合的に判断するという手法（線量-確率分解アプローチ）を示した。この手法では、個々のシナリオの発生確率の設定を厳密に求めていない。これは、全シナリオの発生確率の総和を 1 とすることを前提とせず、代表的と考えられるシナリオ各々に半定量的発生可能性を与えるものであり、安全性の判断に必要な情報がより多く得られると考えられる。

なお、リスク統合アプローチおよび線量一確率分解アプローチはそれぞれ、自然過程（通常シナリオおよび人間侵入以外の発生の可能性が低いシナリオ）に適用されるものであり、線量／リスク拘束値が適用されている。一方、人間侵入を考慮したシナリオにおいては、将来の人間の行動の種類または確率を予測することには科学的な根拠が存在せず、処分施設に対する防護の最適化において考慮されたバリアをバイパスするため、線量／リスク拘束値が適用できない。したがって、様式化されたシナリオを採用するとともに、10～100mSv程度の一般介入レベルで判断した上で、合理的な対策を取るための検討を求めることが必要とされている。

（4）地層処分で考慮すべき時間スケールと評価指標

共通的重要事項では、わが国における地層処分の時間スケールに関する検討は十分に行われていないとしながらも、「長寿命の放射性物質を有意に含む放射性廃棄物処分に関する規制の検討の緊要性が増してきており、この点についても、諸外国の例を参考にしつつ、安全規制の観点から必要な検討を開始すべき時期にきている」と述べている。例えば、1000年間オーバーパックによって核種と地下水との接触を完全に阻止する、一定期間の完全な閉じ込めを考慮できる期間と、地質環境の長期安定性が信頼性をもって期待できる10万年程度の時間スケールまでの、多重バリアシステムにより地下水による核種移行を抑制できる期間に区別できる。なお、更に長期においては、処分場にあった放射性核種は減衰し、かつ地質環境中をゆっくりと移動、分散・希釈することから、天然に存在するウラン鉱床などと同等の水準とみなせるようになるという考え方もある³⁰⁾。

また ICRP Publication 81 では、長い時間スケールにわたる廃棄物処分システムの性能を評価するためのアプローチとして、以下の2つを挙げている¹⁾。

- 1,000～1万年のオーダで線量またはリスクの定量的評価値を考察

このアプローチは、線量の計算が最も直接的に健康損害に関連する期間に焦点を当て、またもっと長い時間スケールにわたって、氷河作用や地殻構造上の移動のような大規模な地殻変動と関連したリスクが廃棄物処分システムに関連したリスクをあいまいにするかもしれないという可能性を認識させてくれる。

- 様式化アプローチの使用を増やし、計算結果を判断する際に対象とする期間を考慮することにより、さらに将来に向けた定量的な計算を考慮^{3.1-1)}

定性的な議論によって、この判断に頼る過程に追加の情報を提供することができるかもしれない。

さらに、IAEA TECDOC-767²⁷⁾では、安全指標との関連で時間スケールとして、①1万年まで、②1万年～100万年、③100万年以降に分け、1万年までは、地質学的な変化が小さく、生物圏も現在と同様と仮定できる期間、100万年までは気候変動は生じるが大きな地殻構造上の変化がない期間、さらに100万年以降は、人類が出現してから現在までの期間と比較して、さらに変化が顕著になる期間としている。

一方、共通的重要事項では、「超長期の放射線防護基準については、天然の放射能濃度との相対的比較などの補完的指標（本章（1）参照）を考慮することも考えられる」とされている。また、IAEA TECDOC-767²⁷⁾では、「汚染物質の濃度とフラックスの予測と、天然起源の放射性核種の濃度とフラックスとの比較のような、付加的指標との比較も、人の習慣についての仮定とは独立している長期的環境防護の全体的レベルを示すために有効であることになるかもしれない」

3.1-1) 様式化アプローチの使用により、線量またはリスクによる定量的評価期間を長期に拡張することが可能となると解釈できる³¹⁾。

とあり、IAEA WS-R-4においても「不確実性が大きくなりすぎて、規準が意思決定の合理的な根拠として役に立たなくなるような時間を超えて規準を適用する場合は注意が必要である。閉鎖後のそのような長期間に、線量やリスク以外の安全の指標が適切かもしれません、その利用は、考慮されるべきである」とある³⁾。これらの考え方に基づけば、長期の時間スケールにおいては、必ずしも線量やリスクを指標として評価するのが適切とは限らず、濃度・フラックスといった放射線影響以外の付加的な指標を考慮した評価を行い、それに応じて準備された基準と比較することにより、将来予測等に伴って発生する超長期の評価に対する不確実性に対処することが可能となると考えられる³⁾。

(5) 時間スケールと評価基準に関する各国の考え方

地層処分の放射線防護に関する指標および考慮すべき時間スケールに関する基本的な考え方に基づいて、諸外国では、以下のような評価基準を定めている。

1) 米国EPA(40 CFR Part 197³²⁾)/NRC(10 CFR Part 63³³⁾)^{3.1-2)}

- ・ 当初の1万年間^{3.1-3)}：従来の0.15 mSv/yの防護基準を維持
- ・ 1万年後から100万年後までの期間：3.5 mSv/yの防護基準を維持

2) フランス³⁴⁾

- ・ 少なくとも1万年間について天然バリアの安定性を立証（線量で評価）
- ・ 1万年の天然バリアの安定性が要件とされているが、線量評価期間の限度とすることにはしていない
- ・ 発生が確実であるかきわめて可能性の高い事象について、0.25 mSv/y

3) フィンランド³⁵⁾

- ・ 数千年までは線量
- ・ それ以降は放出放射能量で評価
- ・ 影響が0.5Svを超える可能性がある場合、その年間発生確率のオーダは最大でも 10^{-6} (1/year)
(想定外事象；期間の概念なし)

4) スウェーデン^{29),36)}

- ・ 1000年は定量的なリスク評価
- ・ それ以降は最大で100万年まで、少なくとも10万年ないし氷期1サイクルの期間については防護能力の評価

3.1-2) 1992年エネルギー政策法の規定に従っておらず、全米科学アカデミーの勧告に整合するように基準が策定されていないと判断され、1万年の遵守期間が無効に。100万年を遵守期間、3.5mSv/y（基準点としたコロラド州の自然バックグラウンド放射線の7mSv/yと、ユッカマウンテンの最も被ばくを受けるグループが存在する地点の3.5mSv/yとの差で設定）を基準値とする規則案をEPA及びNRCが2005年に連邦官報に掲載、意見募集結果の反映などを検討中。

3.1-3) 適合評価期間（1万年）の根拠は以下のとおり¹⁸⁾。

- ・ この期間には、廃棄物そのものの危険度が最大となる期間が含まれる
- ・ この期間は十分に長く、天然バリアと人工バリアの頑健性を試すような多様な状況がこの期間内に起こると予想されるため、深地層処分場の頑健性に関する適切な評価が実施されると期待できる
- ・ この期間は、各種の長寿命有害物質（長寿命有害物質の定義には放射性核種も含まれる）の地層処分に関するほかの規制で定められた期間と一致する

This is a blank page.

5) ドイツ³⁷⁾

- 評価期間については言及されていない
- 評価期間全体を通じて、0.3 mSv/y を超えない

6) スイス³⁸⁾

- 具体的な期間を示さず、「いかなる時点においても」基準を満たすことを要求
- 発生が合理的に予想されるプロセスおよび事象については、0.1 mSv/y を上回らない
- 発生確率の低いプロセスおよび事象については、放射線学的な死亡リスクとして 10^{-6} (1/year) を上回らない

また、英国健康安全局（HSE）による全産業を対象とした安全目標の枠組みを参考に、諸外国の地層処分における放射線防護基準が受容リスクのどのあたりに位置するかについて示したものが図 3.1-1 である。各国の基準値は、線量あるいはリスクで示されている。リスクは、線量にリスク換算係数（例えば、 $7.3 \times 10^{-5} \text{ mSv}^{-1}$ ）と発生確率を乗じて算出される¹⁹⁾とされており、健康影響のエンドポイント（死に至らないガンが含まれるかどうか）によってリスク換算係数が異なっている³⁹⁾。そこで、ここでは、オーダとして線量がどの程度のリスクに相当するかを図示した。いずれの基準値も受容限度（ALARP^{3.1-4)}）領域に位置しており、米国の 1 万年以降の基準値が公衆の個人的リスクをやや超えたところに位置するものの、作業従事者の個人的リスクを下回っており、許容範囲であると考えられる。

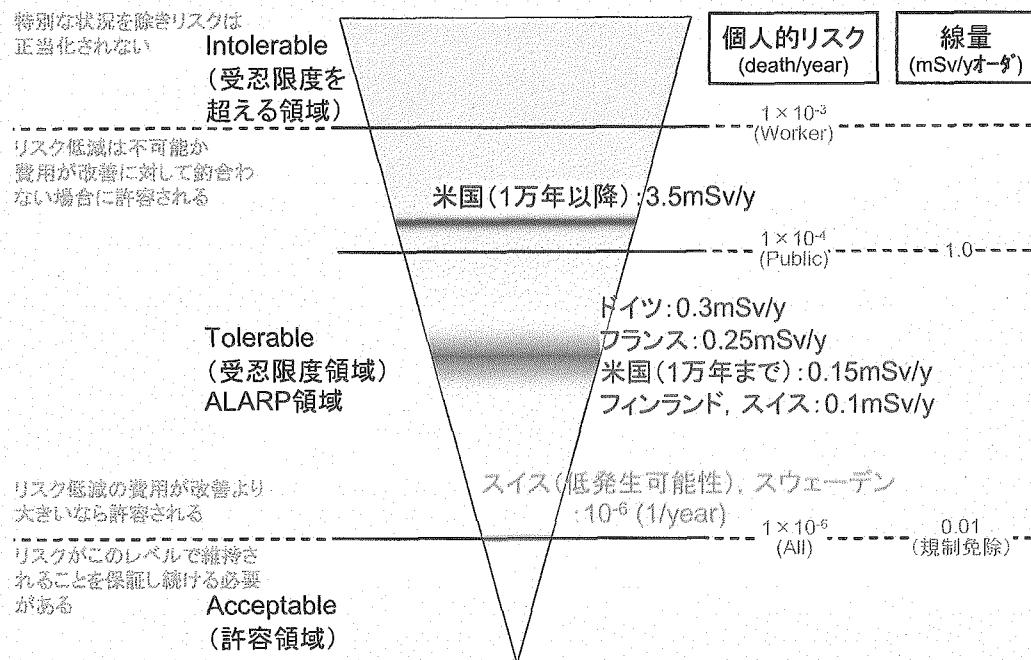


図 3.1-1 諸外国の地層処分における放射線防護基準
(英國 HSE による全産業を対象とした安全目標の枠組みを一部加工、各国の防護基準を加筆)

3.1-4) As Low As Reasonably Practicable: ALARA の原則に「実際できること」という概念を取り入れたものとして提唱された⁴⁰⁾。

This is a blank page.

(6) 生物圏評価の考え方

線量やリスクを評価する場合、人間の生活環境である地表環境における核種移行のプロセスとこれによる被ばくの形態（被ばく経路）についてモデルを構築して評価を行い、人間への影響を推定する生物圏評価が必要となる。

国際的には、将来予測の不確実性に対処するため、レファレンスバイオスフィアの考え方に基づき、様式化されたモデルを構築しており、第2次取りまとめにおいても、この考え方を採用し、将来も現在と同じ人間の生活環境や様式が継続することを仮定し、個人が受ける年間の線量を算出した。なお、IAEA TECDOC-1077では、地層処分の評価時間と生物圏および決定集団との関係について言及しており⁴¹⁾、この考え方に基づけば、事業廃止までの数百年程度は現在の環境条件を反映した生物圏モデルが有効であるものの、時間の経過とともに地表環境や人間生活の様式の変化、人間そのものの存在の不確実性が増大することから、レファレンスバイオスフィアの考え方等に基づく様式化された生物圏モデルを採用すること望ましいと考えられる。

また、線量もしくはリスクを評価する対象としては、仮想的被ばく集団の代表的メンバー（決定集団の考え方の拡張）、もしくは最も被ばくを受ける個人を設定するという2つの考え方がある。諸外国においては、前者の考え方を採用している国が多い³⁹⁾。

一方、最近の研究では、地層処分に影響を及ぼす可能性のある将来的な変遷について、その影響を適切に取り込みつつ、なるべく現実的な評価が行えるようにすることが求められている⁴²⁾。この観点から、地表環境の変遷（例えば、気候変動や隆起・侵食等）に伴う人間の生活環境や様式の変化を考慮した生物圏のモデル化についても例示的に検討している⁴³⁾⁻⁴⁵⁾。

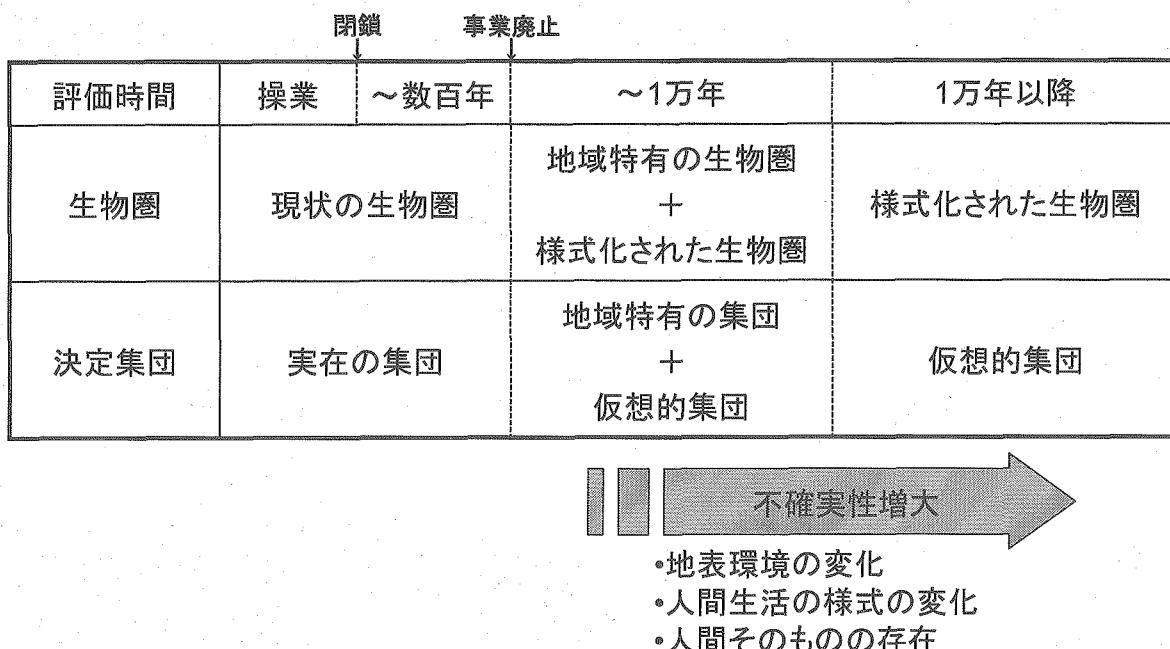


図 3.1-2 生物圏評価の考え方－評価時間との関係－（IAEA TECDOC-1077⁴¹⁾に基づき作成）

(7) 制度的管理

2.2章で述べたように、人間侵入の確率を減らすための合理的な措置の例として、能動的（立入制限または放出に関するモニタリングなど）および受動的（記録およびマーキングなど）な制度的管理が挙げられている。

制度的管理とは、「法律に基づいて指定された当局または公的機関による放射性廃棄物サイトの

「管理」のことをいう⁴⁶⁾。土地利用制限やモニタリング等の制度的管理は、処分施設閉鎖後も継続してよいものの、処分施設の安全性を保証するために必要なものではなく追加的な保証対策としてとらえられるべきであり、処分システムの安全機能を低下させる人間の活動の可能性を妨げ、減らすことで安全に寄与が可能となる³⁾。

制度的管理の観点で考慮すべき時間スケールは、

- ① 操業期間（処分場閉鎖まで）
- ② 管理期間（閉鎖後から事業廃止まで）
- ③ 事業廃止以降

と分けられる⁴¹⁾。これらの期間のうち、特に事業廃止以降においては人間侵入の可能性が高まることから、受動的な制度的管理に基づく合理的な措置が被ばく発生の可能性の排除／低減の実現に対して有効となると考えられる。なお、「特定廃棄物の最終処分に関する法律」⁴⁷⁾（以下、「最終処分法」という）において義務付けられている記録の永久保存や保護区域の設定は、受動的管理に相当するものと解釈できる。

3. 2 規制への適合性を示すための考え方

IAEA WS-R-4 では、地層処分施設の防護の最適化において最も重要なことは、信頼できる工学および技術的解決策が採用されることであり、信頼できる品質マネジメントの原則が地層処分施設の設計、操業および閉鎖の作業全体を通して適用されることと述べた上で、以下を満足すれば、防護は最適化されるとしている³⁾。

- ① 地層処分施設の開発および操業の各段階において様々な設計オプションの長期安全性に関して細心の注意が払われている。
- ② 一般に予測される範囲の処分施設の自然の変化により生じる線量やリスクの評価値が、一定の時間枠、すなわち結果について意味のある解釈ができなくなるほどには不確実性が大きくならない期間において該当する制限値を超えないことについて、合理的な保証がある。
- ③ 地層処分施設の性能を乱して線量やリスクを高めるかもしれないような事象の起こりやすさが、サイト選定と設計によって合理的に可能な範囲で下げられている。

一方、ICRP Publication 81では、自然過程についての拘束値を満たし（上記②に相当）、かつ偶然の人間侵入の可能性を減らすための合理的な措置がとられており（上記③の一部に相当）、また技術上及び管理上の原則が守られている（上記①に類似）ならば、放射線防護の要件は満たされていると考えることができるとしている¹⁾。

上記②については、単に拘束値を上回ると推定されるだけの理由によって、必ずしも提案されたセーフティケースにおいて安全性が示されていないと短絡的に判断するのではなく、安全評価において導入した保守的な取り扱いなど、拘束値を上回る理由の正当性についてその裏づけを踏まえ総合的に評価することが適切と考えられている¹⁾。

以上のことから規制への適合性を示すためには、安全評価の結果が環境安全の観点から所定の線量やリスクの値（拘束値）を超えないこと、あるいは、超える理由の正当性について裏付けとともに示すことや超えるような事象の発生可能性が事前の対策により合理的に達成可能な範囲で十分に低減できることを明示するだけでなく、サイト選定、処分場設計などの対策そのものの信頼性についても明らかにすることが求められる。

以下では、規制への適合性を示すための論点として、次の観点から例をまとめる。

- ・ 頑健な性能を有する処分システムの構築

- 安全評価による処分システムの信頼性の提示

(1) 頑健な性能を有する処分システムの構築

地層処分システムは、複数のバリアを組み合わせ、十分に余裕のある核種の保持・閉じ込め機能が期待できる多重バリアシステムを構築することにより、システム全体の性能として、様々な不確実性の影響を被りにくい頑健なものとすることを基本とする。

このような処分システムが有るべき頑健性は、個々のシステムの性能に十分余裕を付与したり（例えば、オーバーパックの厚さを設計で求められるものよりも十分厚くするなど）、安全機能の重複性を与えることによって得られる。また、将来予測が比較的容易な地質環境や設計オプションを選択することにより、処分システムに関する信頼性の向上に寄与すると考えられる³⁰⁾。

対策の信頼性確認については、対策により鍵となる安全機能（例えば、オーバーパックによる閉じ込めや緩衝材による核種保持・移行遅延など）が発揮し得るシステム性能を確保できることや、システム性能の評価に関し、不確実性を低減できること、あるいは不確実性の影響を被りにくくすることができるなどを示すことが考えられる⁴⁸⁾。また、実績があり信頼性が評価されている工学的、技術的手立てがとられていることや、それぞれの対策の品質について保証するとともに、処分事業に関わる管理上の原則が守られていることを確認することも、対策の信頼性確認にとって重要となる^{1),3),48)}。品質保証のための計画は、段階を踏んだ処分事業に柔軟に対応できるよう繰り返しレビューを受け、適宜見直しを行うことが重要である¹⁶⁾。

なお、信頼できる工学および技術的解決策の検討に際しては、BATの適用の考え方および具体的な適用方法について、検討していく必要がある。

3.1(2)で述べたとおり、SSIのガイドラインには、サイト選定、設計、建設等の段階で、放射性物質の放出が抑制・遅延されるようにBATを適用すると書かれており²⁹⁾、“利用可能な” “最善の” 技術が何であるかを具体的に検討し、実行することが必要となる。

(2) 安全評価による処分システムの信頼性の提示

安全評価により頑健な処分システムの性能を、信頼性をもって示すために鍵となる論点の取り扱いについて、以下に国際的な考え方の例を整理する。

1) 不確実性の取扱い

地層処分システムの長期挙動を理解し、その性能を評価する上で、不確実性をどのように取り扱うかが重要となる。不確実性としては、処分システム、シナリオ、モデル、データに関わるものに分類されている⁴⁹⁾。

処分システムに関わる不確実性の取扱いについては、上述の「頑健な性能を有する処分システムの構築」で述べたように、対策の信頼性を事前に確認することが重要となる。また、シナリオの不確実性については、システム性能に影響を及ぼすと考えられる主要なものに抜け落ちのないことを示すことが重要である。安全評価において不確実性に適切に対処し、処分システムの安全性に関する議論を裏づけるため、以下に示す項目を組み合わせて論証することが考えられる¹⁶⁾。

- 複数の解析手法の活用（決定論的評価、確率論的評価など）
- 自然のシステムの観察結果（古水理地質学的な痕跡など）やナチュラルアナログの活用
- 複数の概念モデルの選択
- 保守的で簡略な評価と現象をより精緻にとらえる評価の組合せ
- 線量やリスク以外の指標の適用など

信頼をもって利用できる情報や根拠を十分に活用し、普遍的な科学的・技術的知見と整合がとられるべきであることは言うまでもない。

2) 不確実性の影響を被りにくい評価

安全評価において取り扱う不確実性の幅は、システム性能の裕度を大きくする側と小さくする側が考えられるものの、とくに安全評価においては、後者の不確実性の影響を被りにくいものとするため、保守側の取扱いであることが明らかなことを示すことが考えられる。また、解析における境界条件の設定のしかたや評価対象の次元やスケールに対し、評価結果が影響を受けにくいものであるべきである。そのためには、性能を評価するための適切な指標を選ぶことも重要なとなる。さらに、できるだけ簡略で理解しやすく、評価の目的にかなっており、十分に確立された理論に基づいて進めるべきであると考えられる。

このような評価は、すべてのシステム要素に対してというよりも、不確実性を被りにくい評価であることを示すのに有効なシステム要素（例えば、性能に余裕を持たせた人工バリア）に対し、適用することが重要である。

3) モデルの信頼性とレビュー

安全評価に用いるモデルについては、評価の目的に沿ったものであるとともに、信頼性を高めておくことが重要である。モデルによる解析結果が地層処分システムの長期挙動を詳細に予測することはできないものの、特定のシステム構成要素の挙動について、実測データ（原位置試験、ナチュラルアナログ研究、サイト特性調査や処分場操業期間中の測定など）との比較によりモデルの信頼性を論ずることは可能である。さらに実測データとの比較以外にも、客観的なレビュー、解析解、並びに他のコードや性能評価報告書との比較などにより、モデルの信頼性を示すことも可能である。不確実性の影響が重要となる現象に対して、系統的なデータ整備を行い、レビューによりモデルを見直すことが考えられる。なお、客観的なレビューは、独立の専門家がレビューの目的をよく理解し、独立の技術的な寄与をするのであれば、科学的・技術的な信頼性を高め有効なものとなると考えられている¹⁶⁾。

4) 簡略な取扱いと様式化アプローチ

専門家でないに人も理解できるような簡単な手法により処分システムの性能を例示することは、より精緻な解析結果を理解する助けとなり、信頼を高め、納得を得るのに役立つ。このような簡略な取扱いとしては、簡略なモデルを用いた感度解析やシステム性能の理解のためのナチュラルアナログの適用（システム構成要素の長期健全性、プロセスの理解向上、プロセスを支配する要因の抽出、概念モデルの開発、好ましいケースの作成、モデルの検証）などが考えられる。

不確実性に起因する事象から考えて、そもそも定量化することや低減することが不可能な以下に起因する事象が挙げられる⁵⁰⁾。

- ・ 意図しない人間の侵入
- ・ 生物圏や地表環境の時間的推移など

安全評価においては、これらの不確実性の要因を様式化した簡略なやり方で取り扱うことにより、無制限に様々な憶測をめぐらしてしまうことを避けることが考えられている。

事象に応じて理にかなった様式化を図ることが重要であり、その事象の取扱いに関わる様々な分野の専門家との意見交換や規制側との意見交換を踏まえて、様式化した取扱いとして適切なものが検討され、シナリオやアプローチなどが設定される。その際、対象とする事象の特徴やシステム性能への影響を適切にとらえ、その影響に対するシステム性能の頑健性を示すとの観点が重

要と考えられる。

3. 3 段階的アプローチと回収可能性

処分場構築の各段階で、技術的要因や社会的、政治的受容に照らして次に進めるか決定される。段階的なレビューの機会の設定や、情報と経験の積み上げにより、施設の実現可能性と安全性への信頼を徐々に高めることを可能にする。処分場構築の段階に応じた情報の増加に伴い、技術的信頼性のレベルが向上する。サイトの地質環境や設計に関わる新たな情報や社会的、政治的な状況の変化を想定した意思決定のための柔軟なアプローチが求められる。このため、回収可能性のための措置を備え、できるだけ先の段階まで処分場の地質環境や設計などの選択肢を保持することが社会からの信頼を得やすいと考えられている。柔軟性を備えることは、安全性に関する信頼性がないからではなく、利用できる選択肢をできる限り有効に活用したいとの考えに基づく。

段階を進めるにつれてサイトや設計に固有な情報に基づいて繰り返しセーフティケースを作成することが考えられる⁵¹⁾。セーフティケースは、処分事業のある段階において、処分場が長期にわたって安全であるということを支持する論拠を集めたものであり、安全評価の結論やそれに対する技術的信頼の表明などで構成される⁵²⁾。更に、ある段階において安全評価上重要な未解決の問題がある場合、後の段階でその問題を合理的に取り扱うことができるとの見通しを示しておくことが求められる⁵⁰⁾。

放射線防護原則の遵守の評価は、セーフティケースに基づくと考えられている¹⁾。セーフティケースは、実施側における事業の推進に関わる意思決定、あるいはそれに対する規制側の判断において中心的な役割を果たす⁵³⁾。

段階的な意思決定プロセスでは、段階を踏んで継続的にセーフティケースに関する信頼性を高めることによって、次の段階での意思決定の負担を軽減していくことができると考えられており⁵⁴⁾、国民や地域住民、国、関係地方自治体、規制側などの意見を取り込みつつ、透明性を確保し、注意深く、慎重な意思決定を行うことが適切とされている⁵⁵⁾。

地層処分事業は各段階において、前の段階に遡ることができる可逆性を確保しつつ進めるという考え方がある⁵¹⁾。可逆性を確保するためには、前の段階における意思決定の再評価や、段階を後戻りするための技術面や資金面などの保証が求められ、意思決定後の状況によっては後戻りできる姿勢が処分の原則に組み込まれているということを示すこととなる⁵¹⁾。

段階的意思決定においては、前の段階のセーフティケース（安全に関する判断の拠り所）をくつがえす可能性のある新たな知見が得られた場合、前の段階に遡ってセーフティケースを再評価し、必要に応じてそれまでに講じられた対策を見直すことが考えられる⁵¹⁾。処分場の閉鎖に至るまで、可逆性や回収可能性などの選択肢を残しつつ地層処分システムの構築を進めることが求められる。回収可能性は、安全性に不可欠なものではなく、長期の受動的安全性を損なうことなく将来世代に不当な負担をかけない手法で実現すべきであり、再評価や将来世代の選択による段階の遡りの決定は慎重になされるべきと考えられている⁵¹⁾。

なお、段階を踏まえるごとに根拠や論理構築が充実してくることから、プロジェクトの進展について後戻りする必要が生じる可能性は小さくなり、選択肢も限られたものとなっていくと考えられる⁵³⁾。また、セーフティケースは、廃棄体の定置後においては、新たな情報によりくつがえされることのないよう十分に頑健であることとされている⁵¹⁾。

段階的な意思決定について、米国科学アカデミーは、必要に応じて遡りを保証しつつ段階的かつ柔軟に計画を進めることができ「より成功を導きやすいアプローチである」との考え方（adaptive staging）を提案している⁵⁴⁾。これは、事業段階と処分段階の違い、すなわち処分事業の期間（少

なくとも数十年）において地層処分全体としての影響が有意かどうか（数十万年先）を直接確認することはできない。このため、事業段階において将来の地層処分システムの性能について社会の信頼を得つつ意思決定を行う必要があると考え、処分事業の達成目標をおおまかに定めておき、それを達成するための1つの標準的な段階的進め方を設定しつつも、安全規制の変更も視野にいれつつ段階の進展に応じて柔軟に意思決定を進めることが望ましいアプローチであると考えているものである⁵⁴⁾。

具体的な段階的進め方としては、相当期間の可逆性を保証することにより処分事業の開始に関する意思決定の負担を軽減するため、米国では、まず処分場建設段階において、処分場全体の内から限られた割合（10%）の処分坑道を先行的に建設して問題のないことを確認したのち、操業段階において、残りの処分坑道を建設するような段階的な進め方が提案されている⁵³⁾。また、スウェーデンでは、同様に全廃棄体のうちの10%を先行的に埋設してモニタリングにより問題のないことを確認したのち残りの全数を処分する進め方としている⁵⁵⁾。更にスイスでは、処分施設とは別に長期間モニタリングを行うパイロット施設を設け、パイロット施設での数十年のモニタリングにより安全確認がなされた後、処分施設を閉鎖するとの進め方が政府の諮問機関により提唱されている⁵⁶⁾。

4.まとめと規制の具体化に向けた課題

本章では、地層処分の安全規制に関する動向のまとめとして、まず、前章までの事項を整理した上で、規制の具体化に向けた国際的な課題について述べる。最後に、わが国の規制上留意すべき点の例を挙げる。

地層処分の事業においては、事業の進展に応じた段階的アプローチを採用するとともに、回収可能性などの将来世代の意思決定の自由を保ちつつ、実施することが望ましいとされている^{5),6)}。また、地層処分に関わる不確実性の存在により、処分システムの安全性の提示や判断は、合理的な保証の範囲内で行われるべきであるとの国際認識がある^{3),16)}。諸外国の安全基準は、IAEA や OECD/NEA の放射性廃棄物管理および地層処分に関する原則^{5),6)}や ICRP の放射線防護の原則¹⁹⁾に基づき提案されており、廃棄物処分という行為に対する線量またはリスク拘束値として定義されている。

一方、規制への適合性を示すためには、安全評価の結果が環境安全の観点から拘束値を超えないこと、あるいは、超える理由の正当性について裏付けとともに示すことや超えるような事象の発生可能性が事前の対策により合理的に達成可能な範囲で十分に低減できることを明示すること、およびサイト選定、処分場設計などの対策そのものの信頼性についても明らかにすることが求められる。

具体的に規制基準を策定する際に考慮すべき点としては、3 章で述べた IAEA や OECD/NEA、ICRP の原則に基づく安全基準や時間スケールの考え方などの検討状況を踏まえ、NRC は以下のようにまとめている¹⁴⁾。

- ・ 時間にに関する見解：1万年のような特定のカットオフ時間に対する科学的根拠はない。しかし、政策的理由はあるか？
- ・ “合理的保証”という規制概念を用いて、地層処分の安全性をどのように評価するか？
- ・ 規制当局は地層処分の代替となる処分方法の調査について要求すべきか？
- ・ サイト選定と処分方法の選択において規制当局の役割は何か？
- ・ 法的及び規制上の問題：政府機関及び規制当局の役割は何か？
- ・ 回収可能性に対して規制当局はどのような態度を取るべきか？
- ・ 将来に対する社会的活動が予測できない場合に、人間侵入はどのように取り扱われるべきか？
- ・ 事業開始後100年間のリスク（例えば、輸送、職業人の健康影響）は1万年のリスクあるいは最大となるリスクと比較して重み付けすべきか？
- ・ 段階的な処分事業プロセスや意思決定プロセスを始めて、どのように合理的な決定に到達できるか？

以上を踏まえると、今後わが国の規制を検討する上では、国際的な原則やそれを参照して策定された各国の規制の例を参考していくべきものと、さらにわが国の特徴として技術的な観点のみならず、社会、環境、政治などの観点を考慮して検討していくべきものが考えられる。前者については、上記の規制の具体化に向けた国際的な課題についての検討の進展を適切に把握しておくことが重要である。一方、後者については、国際的な動向を参考としつつもわが国において検討を深めておくことが求められる。ここでは、後者の技術的な観点の例として地質環境の長期安定性に関わる規制上の留意点について述べる。

原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会報告書「高レベル放射性廃棄物の地層処分の研

究開発等の今後の進め方について」(以下、専門部会報告書)では、とくに変動帯に位置するわが国の地質学的条件を考えれば安全確保上地質環境の長期安定性が重要であることから、まずサイト選定により安定な地質環境による隔離性を確保し、その上で多重バリアシステムを構築するという安全確保の考え方を以下のとおり示している⁵⁷⁾。

- ・ 深部の地質環境は、一般に地表近くの環境に比べ極めて長期の地質学的时间にわたり安定であると考えられている。したがって、処分場として適切な地点を選べば、放射能レベルが高い期間や、その後の期間においても、埋設された廃棄物が人間環境に有意な影響を及ぼさないようにすることができると考えられる。
- ・ この際、深地層に存在すると想定される地下水の中に放射性物質が溶出する可能性について考慮しておくことが重要であり、このために多重の防護系(多重バリアシステム)を設けるのが基本的な考え方である。

さらに、わが国の地質環境の安定性に関して、専門部会報告書では、

- ・ 地震・断層活動や火山・火成活動のように急激かつ局所的な現象については、「場所によつては地質環境への影響は大きいものの、大きな変形を伴うような影響を及ぼす地域は比較的狭い範囲に限定されており、また過去数十万年の時間スケールでみれば、これらの現象が規則的に起こっていることから、今後十万年程度であれば、その規則性及び継続性からそれらの影響範囲を推論することが出来ると考えられる。」
- ・ 隆起・沈降・侵食及び気候・海水準変動のように緩慢かつ広域的な現象については、「地下水系などに広い範囲で影響を及ぼすが、緩慢かつ広域的であるから、過去数十万年程度について、広域にわたる比較的精確な地質学的な記録が残されている。それらの記録を基に、将来についても十万年程度であれば、その及ぼす影響の性質や大きさ、また影響範囲の移動や拡大の速度などを推測することができる」と考えられる。」

としている。

すなわち、地質環境の安定性に関する十万年という時間スケールは、十万年の期間を厳密に保証しようとするものではなく、地層処分の観点から地質環境の将来的な条件変動について検討することを見込める概略的な期間として示された。これを踏まえ、第2次取りまとめの安全評価では、適切にサイトが選ばれれば、火山や断層の直撃などは、十万年程度の時間スケールでは生じないであろうという見込みを念頭に置きつつも、現在の地質環境条件が十万年を超えてほぼ持続されるといったケースから、様々な変動が生じるようなケースまでを地下水シナリオという軸で検討を行った。その上で、火山や断層が直撃するようなケース(接近シナリオ)についても仮想的な評価を行った。

このような検討経緯を踏まえ、最終処分法では、地質環境の長期安定性の重要性に鑑み、概要調査地区選定と精密調査地区選定の段階それぞれにおいて、以下の点を満たすこと求めている。

➤ 概要調査地区選定

- ・ 地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと。
- ・ 将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生ずるおそれがないと見込まれること。

➤ 精密調査地区選定

- ・ 地震等の自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと。

これらを満たす地質環境を選定すれば、上述の天然現象による影響が生ずる可能性は十分小さくできると考えられるものの、共通的重要事項では「不確実性を勘案した上で、なお安全確保上

支障がないことをいかに確認するかが重要である」としている。このためのひとつのアプローチとして、共通的重要な事項では「シナリオの発生の可能性を勘案し、その影響の大きさを評価する、いわゆるリスク論的考え方に基づく安全評価」が提案されている。

また、評価の時間スケールについて、第2次取りまとめでは、「安全評価の時間スケールの設定にあたっては一つの要因のみではなく、種々の要因を考慮し、防護目標や安全指標をどのように設定するかという問題とあわせて検討しておくことが重要となる。このことは、地質環境の長期安定性について論ずることが可能であると結論した少なくとも将来十万年程度の期間を越える予測の不確実性が増大する期間の性能評価を行う際にはとくに配慮する必要があると考えられる。」としている。すでに述べたとおり、共通的重要な事項では「超長期の放射線防護基準については、天然の放射能濃度との相対的比較などの補完的指標を考慮することも考えられる」としており、この考え方を、評価の時間スケールやリスク論的考え方とともに規制上どのように系統立てて取り扱い、併せて安全評価においてどのように具体的に適用するかを検討しておくことが、わが国における規制上の重要な留意点と考えることができる⁴⁻¹⁾。

時間スケールとリスク論的考え方を系統立てて扱うための具体的な例として、時間スケールを適切に区分した上で、線量-確率分解アプローチに基づき、天然現象の発生可能性と影響（多重バリアシステムへの影響、放射線学的影响など）を時間スケールに応じて整理するアプローチが示されている³⁰⁾。このようなアプローチを実際の地質環境において適用し、安全評価へと結びつけて検討することが、規制を策定する上で有効と考えられる。

⁴⁻¹⁾ 安全確保の考え方および安全評価シナリオ、事業の段階に応じた規制の関わり方に関しては、「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第1次報告）」⁵⁸⁾を、事業の段階に応じた規制のあり方に関しては、「放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度のあり方について」（案）⁵⁹⁾についても、それぞれ参照のこと。

参考文献

- 1) ICRP: "Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste", ICRP Publication 81 (1998).
- 2) 核燃料サイクル開発機構: "わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第2次取りまとめ", JNC TN1400 99-020 (総論レポート), JNC TN1400 99-023 (分冊3) (1999).
- 3) IAEA: "Geological Disposal of Radioactive Waste", IAEA Safety Requirements, No. WS-R-4 (2006).
- 4) 通商産業省: "特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針を定めた件", 平成12年10月2日, 通商産業省告示第591号 (2000).
- 5) OECD/NEA: "The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-lived Radioactive Wastes", A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee of the OECD Nuclear Energy Agency (1995).
- 6) IAEA: "The Principles of Radioactive Waste Management", IAEA Safety Series No. 111-F (1995).
- 7) 原子力安全委員会: "放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について" (2004).
- 8) 田中知ほか: "放射性廃棄物処分の原則とその適用性の考え方", 日本原子力学会誌, Vol.32, No.11 (1990).
- 9) 中山真一ほか: "連載講座 放射性廃棄物の処分 第5回 廃棄物との共存をめざして", 日本原子力学会誌, Vol.46, No.4 (2004).
- 10) 武田邦彦, 那須昭子, 丸山宣広: "高レベル廃棄物の世代間倫理からの考察", 日本原子力学会和文論文誌, Vol.2, No.1 (2003).
- 11) ICRP: "A Framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-Human Species", ICRP Publication 91 (2004).
- 12) IAEA: "Ethical Considerations in Protecting the Environment from the Effects of Ionizing Radiation", IAEA-TECDOC-1270 (2002).
- 13) SKN: "Ethical Aspects of Nuclear Waste. Some Salient Points Discussed at a Seminar on Ethical Action in the Face of Uncertainty in Stockholm, Sweden, September 8-9, 1987", SKN Report 29 (1988).
- 14) NRC: "Disposition of High-level Waste and Spent Nuclear Fuel, The Continuing Societal and Technical Challenges, Committee on Disposition of High-level Radioactive through Geological Isolation, Board on Radioactive Waste Management Division on Earth and Life Studies", National Research Council (2001).
- 15) 原子力発電環境整備機構: "応募要領", 高レベル放射性廃棄物の最終処分施設の設置可能性を調査する区域の公募関係資料-1 (2002).
- 16) IAEA: "Regulatory Decision Making in the Presence of Uncertainty in the Context of the Disposal of Long Lived Radioactive Wastes", IAEA-TECDOC-975 (1997).
- 17) NRC: "Disposal of High-level Radioactive Wastes in Geologic Repositories", 10 CFR Part 60 (1983).
- 18) NRC: "Disposal of High-level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain", Nevada, 10 CFR Part 63 (1999).

- 19) ICRP: "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP Publication 60 (1991).
- 20) ICRP: "Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste", ICRP Publication 46 (1985).
- 21) ICRP: "Radiological protection policy for the disposal of radioactive waste", ICRP Publication 77 (1998).
- 22) ICRP: "Protection of Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure", ICRP Publication 82 (1999).
- 23) 辻本忠, 草間朋子: 放射線防護の基礎第2版, 日刊工業新聞社 (1992) .
- 24) 独立行政法人科学技術振興機構 : 原子力百科事典 ATOMICA ホームページ, <http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/index2.html> (参照日 : 2006.8.9) .
- 25) 社団法人日本アイソトープ協会 : 長寿命放射性固体廃棄物の処分に適用する放射線防護勧告, ICRP Publication 81 (2000) .
- 26) 福井弘道 : リスクマネジメント論 第01回 序論, ガイダンス, 「リスク」の定義, http://gc.sfc.keio.ac.jp/class/2005_14440/slides/01/ (参照日 : 2006.8.9)
- 27) IAEA: "Safety Indicators in Different Time Frames for the Safety Assessment of Underground Radioactive Waste Repositories, First Report of the INWAC Subgroup on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal", IAEA-TECDOC-767 (1994).
- 28) IAEA: "Natural Activity Concentrations and Fluxes as Indicators for the Safety Assessment of Radioactive Waste Disposal", IAEA-TECDOC-1464 (2005).
- 29) SSI: 廃棄物等管理防護規則ガイドライン(SSI FS 2005:5) (2005).
- 30) Chapman, N. and McCombie, C.: "Principles and Standards for the Disposal of Long-lived Radioactive Wastes", Elsevier (2003).
- 31) 小佐古敏莊, 杉浦紳之, 山本英明, 大越実, 石黒勝彦, 浜田達二, 藤原啓司, 岩井敏, 伊藤敦夫, 竹内光男, 佐々木文昭, 奥山茂, 高須亞紀, 中居邦浩 : "地層処分を念頭においた ICRP Publication 81 の解説", 原子力バックエンド研究 Vol.9 No.2 (2003) .
- 32) EPA: "Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for Yucca Mountain", Nevada, 40 CFR Part 197 (2005).
- 33) NRC: "Disposal of High-level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain", Nevada, 10 CFR Part 63 (2005).
- 34) DSIN: 安全基本規則 No.III.2.f 「放射性廃棄物の地層処分」 (1991).
- 35) STUK: "Long-term Safety of Disposal of Spent Nuclear Fuel" (YVL, 8.4) (2001).
- 36) SSI: "The Swedish Radiation Protection Institute's Regulations on the Protection of Human Health and the Environment in connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste" (SSI FS 1998:1) (1998).
- 37) RSK: 「鉱山における放射性廃棄物の最終埋設処分のための安全基準」 (1982).
- 38) HSK/KSA: "Protection Objectives for the Disposal of Radioactive Waste" (HKS-R-21/e) (1993).
- 39) OECD/NEA: "Management of Uncertainty in Safety Cases and the Role of Risk", Workshop Proceedings, Stockholm, Sweden, 2-4 February 2004 (2005).
- 40) Clarke, R.: "Control of Low Level Radiation Exposure -Time for a change?", J. Radiological Protection, 19, 107 (1999).
- 41) IAEA: "Critical Groups and Biospheres in the Context of Radioactive Waste. Disposal,

- Fourth report of the Working Group on Principles and Criteria for Radioactive Waste Disposal", IAEA-TECDOC-1077 (1999).
- 42) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成17年取りまとめ－一分冊3 安全評価手法の開発－”, JNC TN1400 2005-016 (2005) .
 - 43) 加藤智子, 石原義尚, 鈴木祐二, 内藤守正, 石黒勝彦, 池田孝夫, Richard Little : “気候変動による影響を取り入れた地層処分安全評価の生物圏モデルの検討”, 核燃料サイクル開発機構公開技術資料, JNC TN8400 2001-003 (2001) .
 - 44) 加藤智子, 鈴木祐二: “汚染土壤の削剥を考慮した地層処分安全評価生物圏モデルの検討”, 核燃料サイクル開発機構公開技術資料, JNC TN8400 2003-008 (2003) .
 - 45) 鈴木祐二, 加藤智子, 牧野仁史, 大井貴夫 : “TRU 廃棄物処分に特有な放射性核種を考慮した生物圏評価データセットの整備と線量への換算係数の算出”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-DATA/Code 2006-011 (2006) .
 - 46) IAEA: “Safety Glossary Version 1.2 draft” (2005).
 - 47) 通商産業省：「特定廃棄物の最終処分に関する法律」(平成12年, 法律第117号) (2000) .
 - 48) OECD/NEA: “Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories, Its Development and Communication”, OECD/NEA, Paris, France (1999).
 - 49) IAEA: “Scientific and Technical Basis for Geological Disposal of Radioactive Wastes”, Technical Reports Series No.413, Vienna, Austria (2003).
 - 50) OECD/NEA: “Geological Disposal of Radioactive Waste Review of Developments in the Last Decade”, OECD/NEA, Paris, France (1999).
 - 51) OECD/NEA: “Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste, Reflections at the International Level”, OECD/NEA, Paris, France (2001).
 - 52) OECD/NEA: “Post-closure Safety Case for Geological Repositories, Nature and Purpose”, OECD/NEA, ISBN 92-64-02075-6 (2004).
 - 53) NRC: “Progress Report: Principles and Operating Strategies for Staged Repository Systems, Attachment A of a Letter Report to Dr. Margaret Chu from Board on Radioactive Waste Management”, National Research Council (2002).
 - 54) NRC: “One Step at a Time, The Staged Development of Geologic Repositories for High-Level Radioactive Waste, Committee on Principles and Operational Strategies for Staged Repository Systems, Board on Earth and Life Studies, National Research Council of the National Academies”, The National Academy Press, Washington, D.C. (2003).
 - 55) SKB: “Site Investigation –Investigation Methods and General Execution Programme”, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Corporation (SKB), TR-01-29 (2001).
 - 56) EKRA: “Disposal Concepts for Radioactive Wastes. Final Report” (2000).
 - 57) 原子力委員会：“高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究開発等の今後の進め方について” (1997) .
 - 58) 原子力安全委員会：高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について (第1次報告), 平成12年11月6日 (2000) .
 - 59) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会：廃棄物安全小委員会報告書「放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度のあり方について」(案), 平成18年6月14日 (2006) .

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)	1
		1

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン(a)	rad	m ⁻¹ (b)
立体角	ステラジアン(a)	sr(c)	m ² · m ⁻² = 1 (b)
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
压力	ニュートン	N	m · kg · s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジユール	J	N · m
工率, 放射率	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s · A
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	フアラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリイ	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度(w)	°C	cd · sr(c)
光度	ルクス	lx	lm/m ²
(放射性核種の)放射能吸収線量, 質量エネルギー分与, ガイドライン量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	ベクレル	Bq	J/kg
			J/kg
			m ² · s ⁻²

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時は記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	m ⁻¹ · kg · s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	m ² · kg · s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg · s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m · s ⁻¹ · s ⁻¹ = s ⁻²
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m · s ⁻¹ · s ⁻² = s ⁻³
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg · s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² · kg · s ⁻² · K ⁻¹
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	m ² · s ⁻² · K ⁻¹
質量エンタルピー	一		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² · s ⁻² · K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m · K)	m · kg · s ⁻³ · K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ · kg · s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m · kg · s ⁻³ · A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ · s · A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² · s · A
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	m ⁻³ · kg ⁻¹ · s ⁴ · A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m · kg · s ⁻² · A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² · kg · s ⁻² · mol ⁻¹
モルエンタルピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	m ² · kg · s ⁻² · K ⁻¹ · mol ⁻¹
モル熱容量	一		
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ · s · A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² · s ⁻³
放射強度	ワット毎平方メートル	W/m ²	m ⁴ · m ⁻² · kg · s ⁻³ = m ² · kg · s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² · sr)	m ² · m ⁻² · kg · s ⁻³ = kg · s ⁻³

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ⁻²⁴	ヨクタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻¹⁸	エクタ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻¹⁵	ペクタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼット	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49) × 10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10) × 10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30) × 10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アード	ル	1アード=1 dam ² =10 ⁴ m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バル	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バー	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボルト	P	1 P=1 dyn · s / cm ² =0.1Pa · s
ストークス	St	1 St = 1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチール	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホルト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	IX unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁴ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W · m ⁻² · Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	Torr	1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
標準大気圧	atm	1 Torr = (101 325/760) Pa
カリ	cal	1 atm = 101 325 Pa
ミクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m