

地層処分の安全評価のために考慮すべき期間について －地球科学的観点からのアプローチ－

山川 稔

平成 20 年 1 月

目次

はじめに	1
第1章 HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間	2
1.1 基本的な考え方と考慮事項	3
(a) 地層処分システムの時間的特徴	3
(b) HLW の放射能・毒性が安全基準となるベースラインに戻るまでの時間	4
(c) 生物圏環境の時間的変遷	4
(d) 地層処分の安全解析結果による最大ピーク線または、 最大リスクの時期	4
(e) 社会的な関心、相場観、倫理観	4
1.2 考慮すべき期間設定の考え方とその要素	5
第2章 諸外国における HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間の取り扱い方の 現状	8
2.1 安全評価は何故長期の時間スケールを考慮する必要があるのか	8
2.2 長期の時間スケールを対象とするために生じる「不確実性」はどのように扱う ことが出来るか	9
2.3 地表環境や人間活動及び、生活習慣に関する予測の限界はどのように扱う ことが出来るか	11
2.4 地質環境についての長期予測の限界はどのように扱うことが出来るか	11
2.5 公衆にとって関心のある安全上の問題と時間スケールとは何か	11
2.6 安全性に関する適切な議論とその重要度は時間スケールによってどのように 変わるか	12
2.7 規制において、如何にあるいは、どの程度まで安全性に関して必要な議論を 選択し、それらの相対的重要度に対して指針を与えるべきか	12
第3章 我が国における HLW 地層処分の安全評価のために地球科学的観点からの考慮 すべき期間	15
3.1 地質環境の安定性	15
3.2 HLW 地層処分の安全評価のための年代測定法の現状	18
3.3 地質事象の将来予測	19
第4章 提言	25
謝辞	27
参考・引用文献	28

はじめに

米国連邦控訴裁判所(2004)は、高レベル放射性廃棄物（HLW：High-Level Radioactive Waste）地層処分場の開発段階にあるユッカマウンテン（YMT：Yucca Mountain）の処分場性能の評価期間について、米国環境保護庁（EPA：Environmental Protection Agency, 2001）の放射線防護基準の一つの側面である 10,000 年という遵守期間（Compliance Period）が無効であると判決を下し、EPA に遵守期間の見直しを命じている（Nuclear Engineering International, 2004, 2005）。

そこで、EPA(2005)は従来規定していた 10,000 年という放射線防護遵守期間経過後、1,000,000 年（100 万年）までの期間について、自然放射線に基づきより穏やかな放射線防護基準を設定することの提案・公表をしている。このような動向に対して、Moghissi(2006)は、EPA の遵守期間設定に関する考え方、設定方法、その根拠などについて包括的な解説をしている。

以上のように、HLW 地層処分を計画している国々にとって、地層処分の安全評価（処分場閉鎖後の安全評価）のために考慮すべき期間についての取り扱いは、極めて本質的課題であり、評価期間そのものが HLW 地層処分の「セフターケース」に関する安全規制上の取り扱いにとっても重要事項の一つである。

ここでは、HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間（評価期間）全体の時間スケール(Time Scales)や、処分事業段階ごとに考えられるいくつかの時間枠(Time Flame)に応じて、それぞれの評価期間に関する考え方、設定方法や評価対象すべき現象等をどのように取り扱われているのかについて概観する。

最初に、HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間に係わる基本的な考え方、考慮事項、設定方法、その具体的な根拠などを整理した後、諸外国の諸機関が進めている地層処分の安全評価期間に関する現状を紹介する。

最後に、我が国の地形学・地質学的特徴を踏まえ、地層処分の安全評価のために考慮すべき期間について地球科学的観点からのアプローチのもと取り纏め、今後の課題やその取り組み方などについて提言として紹介する。

なお、本報告書は、平成 19 年 3 月 20 日に開催された（財）原子力環境整備促進・資金管理センター賛助会員講演会での講演内容に若干加筆し作成したものである。

第1章 HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間

HLW 地層処分の最終的な安全対策の基本は「如何にして HLW を閉じ込めるか?」、あるいは「如何にして HLW を人間環境から隔離するか?」にある。そこには、HLW 地層処分の安全評価のための基本である長期の問題に「如何に対応するか?」が課せられます。

つまり、長期間にわたる隔離について、「如何にして確実にするか?」が課題になるといえる。そこには、人間の直接介入に依存せずに長期の安全性を確保できる対策（制度的管理に依存しない「受動的な安全性の概念：Passive Safety Concept」）としての地層処分の成立性の根拠がある。

HLW 地層処分の基本概念は、HLW をガラス固化し、それを金属容器（廃棄物パッケージ）に入れ、地下 300m 以深の地層・岩盤（地質環境：地表から地下深部までの地層または、岩盤及びそこに含有されている地下水より構成される）に埋設・隔離（処分）することである。これは処分後のいかなる時点においても人間とその生活環境が、HLW 中の放射性物質による影響を受けないようにすることを目的としている。

従って、地層処分の安全評価にあたっては、安定な地質環境に、工学的な対策（人工バリア）を施し、この人工バリアと地質環境（天然バリア）からなる多重の防護（多重バリア）による地層処分システムによって確保される。そして、この多重バリアが長期にわたり合理的・科学的に安全に機能するかを確認・評価（性能評価）することが求められる。

HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間（評価期間）の取り扱いに関しては、地層処分システムを包含する不均質・不連続な空間領域に種々の地球化学的システム要素などから構成される地表から地下深部までの地質環境が、マルチスケール（例えば、サイト選定における概査-精査-処分場候補スケール、処分場施設スケール、岩石圏・生物圏スケールなど）であり、その評価期間についても、処分事業開始から閉鎖までと、閉鎖後も視野に入れた全体的な時間スケール及び、それぞれの処分事業段階に応じた時間枠で構成されていることに十分考慮する必要がある。但し、対象とする空間スケール（拡がり）は処分場周辺領域を包含する数平方キロメートル程度である。

さらに、安全評価のために考慮すべき期間は、評価シナリオ、考慮事項、評価基準としての安全指標や、線量基準としての防護レベル、そしてリスク基準の目標値と密接にリンクしている。

また、これらの安全性の確認については、不確実性を伴うために様式化アプローチ（Stylized Approach：科学的に予測することが出来ないケースで、現在利用できるサイト及び、地域の情報または、最とも一般的な習慣と条件に基づき、線量評価の観点から最とも起こり得ると考えられる仮定シナリオ）による安全解析のもと間接的な実証になる。

そして、この安全解析結果については多くの意思決定者（広義のステークホルダー）の関与があるために、その信頼性の確保（社会的な合意）のためにセフターケースの作成が不可欠である。そのためには、多岐にわたる理学・工学などの成果や技術などを統合化のもと構造化アプローチで特徴づけられる段階的な進め方がより合理的であるとされている。さらに、国際安全基準や合同条件などとの整合性を保ちながら推進することが必要である。

現状での安全評価の対象となる時間スケールは、原則として、地域住民に及ぼす放射線量やリスクとして、天然ウラン鉱石の潜在的危険度と同じレベルとなる数万年または、換算水量や危険度指数(Hazard Index)が天然ウランと同程度になる数万年を設定しており、諸外国においては 10,000～100,000 年程度に設定されている。

1.1 基本的な考え方と考慮事項

HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間（評価期間）に関する基本的な考え方や評価期間の設定については、制度的管理、可逆性・回収可能性、人間活動（人間侵入）、補完的指標などを総合的に熟考する必要がある。

ここでは、基本的な考え方に基づき、特に、評価期間を設定する上での考慮事項について紹介する。

(a) 地層処分システムの時間的特徴

HLW 管理については長期的な安全対策が基本となるが、HLW 自身の放射能レベルが時間と共に減衰する特徴がある。

つまり、最初の約数千年間は、放射能レベルの非常に高い期間で、この期間に比較的寿命の短い核分裂生成物(FP)が殆ど壊変する。その後、数千年を経過すると天然ウラン鉱石（ウラン鉱山）の放射能とほぼ同じレベルまで減衰する。

そして、さらに 100 万年以上の期間、最後に残ったアクチニド（U-238, Np-237 など）や長寿命の核分裂生成物（Cs-135, I-129 など）がゆっくりと減衰する。

従って、HLW の放射能レベルが、天然ウラン鉱石のレベルに下がる数千年という期間は、安全評価上の一つの区切りとしての時間枠が設定され得る。

但し、HLW と天然ウラン鉱石の実際上の危険性を比較するには、このような放射能レベルだけでなく、いろいろなその他の要因を考慮する必要がある。例えば、地下数百メートル以深に胚胎している天然ウラン鉱床（鉱石）は、放射能レベルが同じでも生物圏（地表）に生活している人間にとっては、その潜在的危険度は遙かに小さくなるはずである。

また、地層処分システムの安全対策は、時間経過に応じて、もし、期待通りに安全機能が発揮されない場合でも、ある程度別の機能（Latent Safety Function）によって補われるものとして設計されている。

Peter De Preter & Philip Lalieux(2002)によると、長期間の安全機能の達成には4つの処分事業段階、すなわち、操業段階、発熱影響段階、隔離段階、そして地質段階で構成されると指摘している。例えば、処分場操業-発熱影響段階では、物理的閉じ込め、潜在的機能として地下水の流入抑制機能と地下水接触防止機能であり、隔離段階では耐浸出機能、そして地質段階では、拡散、収着・遅延機能及び、希釈・分散機能が期待されるように処分事業段階に応じて、取り扱う現象などに対する安全対策としての機能とそれらの性能目標などが設定されている

ということである。

さらに、処分場への立ち入り制限機能は、全段階で保持されることは言うまでもない。

換言すると、地層処分システムに期待される安全機能は、処分事業段階の時間枠に応じて、その役割が確実に実行され得ることである。

(b) HLW の放射能・毒性が安全基準となるベースラインに戻るまでの時間

諸外国の規制機関は、計画している処分場施設の安全評価基準として個人線量やリスクに関する限界や目標値を設定している。

アメリカにおいて米国科学アカデミー(NAS: National Academy of Science, 1995)は、諸外国の安全基準が設定している評価期間に対して明確な上限を課することを正当化するような倫理上の論拠はないとしている。

しかし、安全指標については、いつ最大値を示すかに関係なく、少なくとも最大値を示すまで線量計算とリスク計算を行うことを義務づける国も数カ国ある。例えば、スイスでは線量とリスクは、いかなる場合でも一定の値を超えてはならないと定めている。

(c) 生物圏（地表）環境の時間的変遷

人間活動（生活習慣）の場である地表環境の時間経過による変化（変遷）に関する将来予測は、地層処分の長期安全性を評価するための時間スケールに比べて短期間に現れる。

このような予測の限界に対しては、「カットオフ」（それ以上の時間スケールのもと、全く安全性について議論をおこなう必要がないとする期間）の考え方をしない前提のもと、様式化アプローチを採用することが適切であることが一般的に合意されている。

但し、様式化の条件設定については、実施側、規制側それぞれの役割が明確にされる必要があるとしている。例えば、フィンランドの場合、規制の中で具体的に示され、それは計算された線量やリスク値の設定である。これはあくまでも安全性を判断するための指標としている。

また、補完的指標、例えば地質圏からの放射性核種フラックスなどの適用可能性については、特に参照値あるいは尺度として取り扱うことが肝要であるとしている。

(d) 地層処分の安全解析結果（計算結果）による最大ピーク線量または、最大リスクの時期

地層処分の安全解析は、想定される放射性核種の移行シナリオ（基本シナリオ、変動シナリオ、稀少シナリオ）を FEP（Feature<特質>・Event<事象>・Process<プロセス>）に基づき策定し、それにもとづいて解析モデル（数式化）を開発し、それに対象とする放射性核種の移行シナリオに不可欠なパラメーターを入力し、解析を行う。その結果、放射能線量として最大ピークの個人線量または、最大リスク限界時期を評価期間として取り扱うこととしている。

(e) 社会的な関心（安全、安心）、相場観、倫理観

社会的な対話や意思決定における信頼性確保のためには、セフターケースの役割、健全でバランスの取れたステークホルダーの参加、非専門家の早期参画、事業側・規制側間の開かれた

相互信頼感の醸成が必要である。このように評価期間の時間枠の区分は、これらの基本的な考え方、評価手法、評価シナリオや評価指標などと密接にリンケージしていることに熟知することが必要であるとしている。

1.2 考慮すべき期間設定の考え方とその要素

考慮すべき期間設定の考え方としては、純粋に科学的な合理性で導くことは難しいために、地球規模のシナリオ、例えば欧米では氷河再来シナリオなどに依存するべきではないと指摘されている。それは、シナリオとして取り扱う諸現象とそれに対応する時間が超長期になるために、不確実性が時間と共に増大し、信頼性が著しく失われるためである。つまり合理性の欠如に繋がる。

従って、HLW 地層処分の安全評価のための考慮すべき期間については、その安全評価の段階的な事業期間、つまり、制度的に決められた対象期間に応じたシナリオに基づき、従来の安全規制をベースに、操業から事業終了までの平常時評価、事故時評価、そして閉鎖後の長期安全評価に区分されている。

安全評価として考慮すべき期間とその設定の基本的な考え方は、処分場から生物圏への放射能放出量がピーク値になるまでとしている。

但し、不確実さが時間と共に増大するために、このピーク値に過度に意味を持たせることのないように慎重に取り扱うことが基本とされている。

図一1(核燃料サイクル開発機構、1999)に示すように、まず、考慮すべき期間については、HLW の潜在的毒性である放射能特性の時間的变化による放射能の時間的減衰に着目し、(1)天然ウラン鉱石の潜在的危険度と同じレベルとなる数万年、(2)換算水量と危険度指数(Hazard Index)が天然ウランと同程度になる数万年、(3)FP(核分裂生成物)が急激に数千分の1に減衰する1,000年を考慮することとしている。但し、これらは安全評価期間を規定するものではない。

また、放射線防護基準の観点から安全性を考慮する時間枠は数万年までとし、念のための評価として放射能線量が最大になるまでとすることが原則となっている。

さらに、リスクの観点からも HLW が地域住民に及ぼすリスクを天然ウラン鉱石の潜在的危険と同じレベルになる数万年としている。

しかし、処分場における HLW の放射能の防護対策は、地上のものと比べて地下に隔離された空間としての物理的な深度と多重バリアシステムによる幾重の安全機能により、より安全側に確保されている。

但し、人間侵入については、侵入を防ぐ方法はなく、かつ侵入を科学的に予測することは不可能であるが、シナリオ上侵入が1回だけ生じることを想定することとしている。なお、これは評価期間として別枠で取り扱うべきものと考えられている。

HLW 地層処分の安全評価に係わる時間スケールの設定における考慮すべき要素(因子)としては、最初に、適切なサイト選定による好ましい地質環境特性と安定な地質環境のもと多重

たものである。この表は、安全評価の時間枠を軸とした考慮すべき要素（検討すべき重要事項）を検討することにより、これらの要素が安全評価上どのような位置づけと意味（役割）を有するのかを考察することに役立たせることが出来る。

但し、安全評価の意味合いが評価期間によって大きく変化することに十分に考慮することが必要である。

表—1 安全評価における時間枠設定の考え方の一例

【(財) 原子力安全研究協会（平成 14 年度放射性廃棄物処理処分対策調査研究,2003）】

		平成 昭和 大正 明治 平安 縄文～ 最終氷期～ 対応する過去の時間スケール 百年 千年 一万年 十万年			
考慮すべき因子	制度的管理	安全評価上、受動的制度的管理が人間活動(侵入)の抑止に有効と考えてよい期間		安全評価上、制度的管理が有効に機能するとは考えにくい期間	
	人間活動・生活様式	現世代とほぼ同等と考えられる期間		大規模な地表の環境変化に伴う人間生活・行動様式の大きな変化が想定される期間	
	地表環境	次の氷河サイクルが到来するまでの期間		大規模な地表の変化が起こると考えられる期間	
	地層処分システムの安定性と深部の特性	・地域性を考慮して、構造運動に起因する天然現象の規則性に基づき、かなりの確度で推定が可能な期間 ・人工バリアによって好ましい設置環境を維持できることが期待され、人間の生活環境から廃棄物を物理的に隔離できる期間		地質環境の予測の確度が減少する期間	
	天然バリア	天然バリアとしての安全機能が期待できる期間		地質環境の変化に伴う天然バリア機能の変化が想定される期間	
	人工バリア	人工バリアの安全機能が期待できる期間		地質環境の変化に伴う人工バリア機能の変化が想定される期間	
評価方法	潜在的危険性	等価なウラン鉱石の毒性より極めて大きい期間		等価なウラン鉱石の毒性より大きい期間	
	処分システム	想定されるシナリオに基づく決定論/確率論の評価(必要に応じた“What-if”シナリオの評価)		地質環境の予測の確度の減少に伴う“What-if”シナリオの評価	
	人間侵入	閉鎖後管理による抑制が期待できる期間		様式化されたアプローチによる人間侵入の評価	
評価指標		線量・リスク		補完的安全指標 (濃度やフラックスによる天然の放射性核種との比較)	

それぞれの因子と因子間の関係について考慮すべき時間枠を検討し、合わせてこのような時間枠に対応して安全評価をどのように行うか、そしてその際の評価指標をどのように考えるかについて提示したものである。ただし、この表で示した時間枠は、厳密な数字を与えることを意図したものではない。

核燃料サイクル開発機構(1999)は、我が国における HLW 地層処分の安全性評価について 1,000 年までは安全評価解析結果をもとに安全性を確認し、1,000 年以降は生物圏（地表環境）を含めて「合理的なシナリオ」を設定し、そのシナリオの発生の「しやすさ」やその影響を評価して安全性を確認することが望ましいとし、地層処分の安全性を評価すべき時間枠については具体的な数字を設定していない。

但し、地質環境の長期安定性の評価に関する時間スケールについては、過去数十万年程度の地形学・地質学的な記録（証拠）のもと「将来 10 万年程度」の変化を検討することが期待されると結んでいる。

第2章 諸外国における HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間（評価期間）の取り扱い方の現状

HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間（評価期間）については、処分事業（閉鎖後も含めた）としての全体の時間スケールや、いくつかの処分事業段階での時間枠に応じた評価の考え方・方法、そして、考慮すべき現象（事象）等によって設定される。ここでは、これらがどのように取り扱われているのか概観する。

最初に、OECD/NEA ワークショップ(2002)で議論された処分場閉鎖後の安全評価における時間スケールの取り扱いについて取り上げる。

このワークショップでは、諸外国における現状及び、今後の課題とその取り組み方への提言がなされた。これらは、我が国の HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間を検討する上で参考になるので、その論点や具体的な検討内容などを簡単に要約する。

全体セッションでは、時間スケールの取り扱いに関連する現状・課題が報告され、その後の議論を踏まえ、処分場閉鎖後の安全評価のための時間スケールの取り扱いに関する課題を以下 7 つの視点で捉え取りまとめている。

2.1 安全評価は何故長期の時間スケールを考慮する必要があるのか

HLW 地層処分の安全評価で取り扱われる期間としては、放射性核種の放射能レベルに着目して、屢々、100 万年あるいは、それ以上の超長期間として言及されていることに関して、放射能レベルが現在受け入れられるものより高くないように、将来世代や環境が防護されなければならないとする倫理的な原則にもとづくものと、HLW の潜在的危険性が非常に長く存続する放射性核種の環境への放出が極めて遠い将来に生ずるという技術的な要素によるものとを区別して議論されている。

但し、規制機関の多くは、処分場によって厳守すべき最小限の防護レベルが提示されており、厳密な「カットオフ」を与える正当な理由はないものとして合意されている。

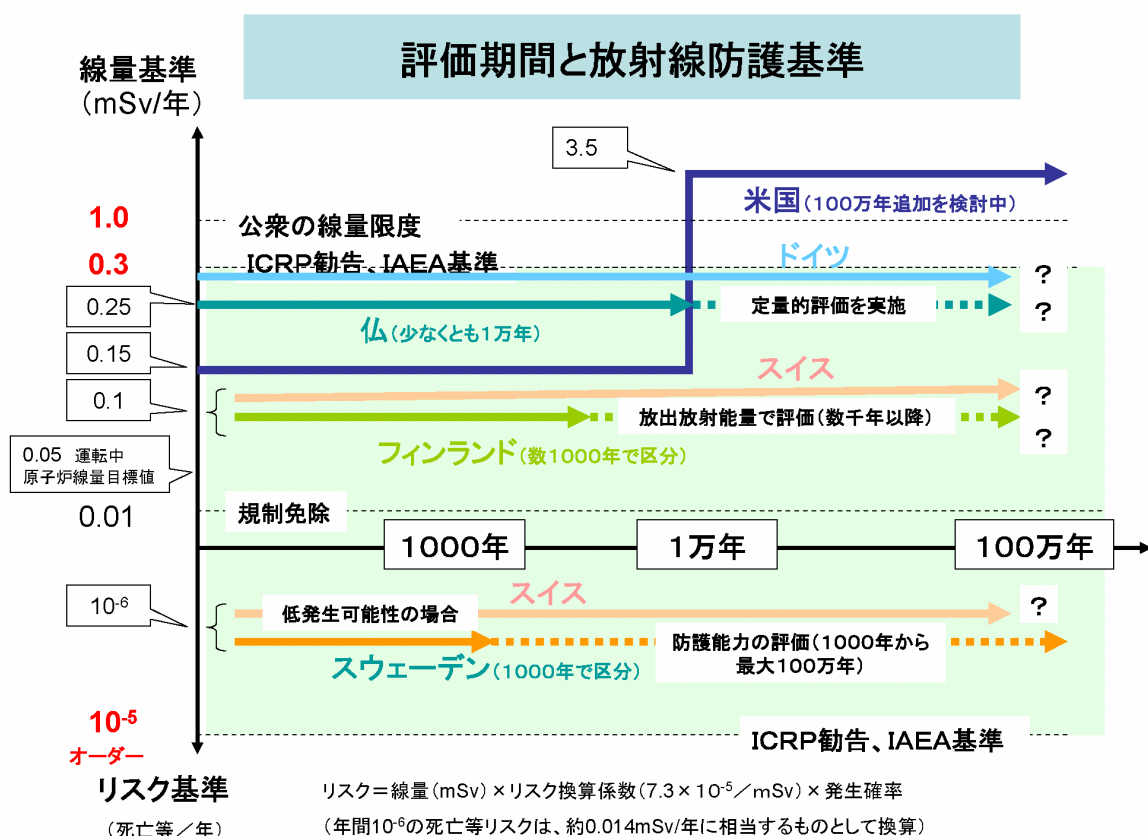
また、いくつかの国の規制機関ではいつそれが生ずるかに拘わらず線量あるいは、リスクの計算値が最大となるまでの評価（線量やリスクを適用する時間スケールの提示）を求めているが、それ以上の期間については、安全性に無関心ということではない。

しかし、このような線量やリスクとは別の議論にもとづく方が適切であるという考え方もある。

諸外国における放射線防護基準としての線量基準(mSv/y)とリスク基準（死亡率/年）及び、

評価期間との関係について、図一2(廃棄物安全小委員会資料、2006)に示す。国際機関としての ICRP 勧告(1999)と IAEA 基準(2005)では、線量基準は 0.3mSv/y で公衆の線量限界は 1.0mSv/y、リスク基準は 10^{-5} オーダーを提示している。

一方、評価期間については、フランスは少なくとも 1 万年、フィンランドは数千年で区分し、スイスはいかなる時期においても基準値を超えてならないとしている。スウェーデンは 1,000 年で区分し、その後、放出放射エネルギーや防護能力の評価の考え方を示しているが具体的な数値は表示していない。アメリカにおいては、最近 100 万年の期間が提案され、現在検討中である。



図一2 諸外国における評価期間と放射線防護基準

【出典：第18回総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会
廃棄物安全委員会資料, 2006】

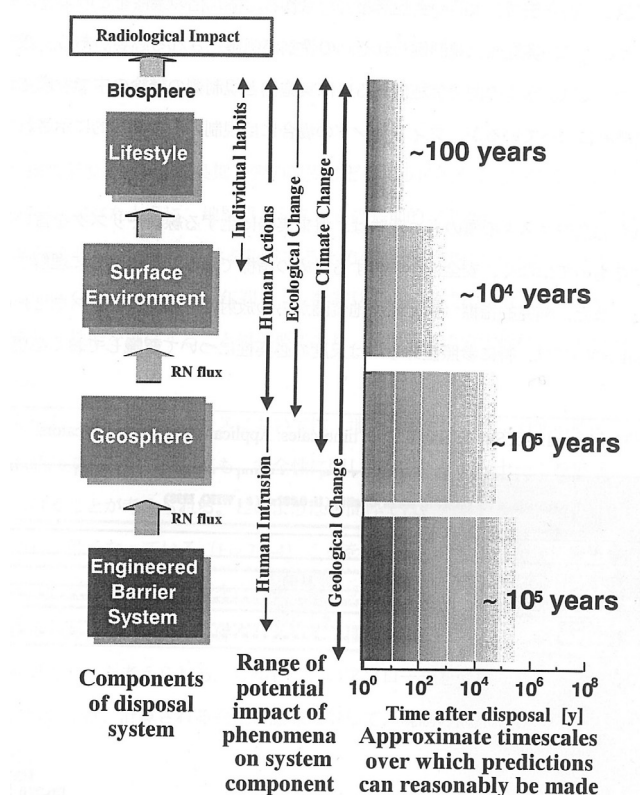
2.2 長期の時間スケールを対象とするために生じる「不確実性」はどのように扱うことができるか

Umeki & Smith(2002)は、図一3に地層処分システムの構成要素に対する合理的な予測可能な時間スケールを概念的に示している。例えば、生物圏評価に関連する人間の生活様式の将来予測は不可能であるし、また処分システムの将来予測に関しても限界があると指摘している。

安全評価上の不確実性は、一般にシナリオ・モデル・パラメーターに随伴するものとして取り扱われている。不確実性の種類としては、サイト選定のもと地層処分システムが構築される地質環境や多重バリアシステム（処分場周辺）中で起こる現象理解に伴う不確実性、処分場周辺の地質環境の変遷のモデル化及び、予測手法に関する不確実性、そして、将来起こり得る人間侵入や天然事象などに関する不確実性などがある。これらはデータ不足、時間・空間に関する不連続性・不均質性などによる多様性を対象とする時間スケールの長さなどに起因している。このような不確実性については、完全に避けることが不可能であり、時間スケールが大きくなると共に増大する。但し、定量的あるいは、押さえ込み（**Bounding**）が可能な不確実性については保守的なアプローチや、確率論的手法を適用することとしている。

なお、地層処分システムの将来挙動に関する予測の限界性については、セフターケース中で明確に認識され、規制においても反映される必要がある。

一方、地質環境の長期予測、公衆の安全上の問題と時間スケールの認識などの取り扱いが難しい不確実性については、代替的あるいは、補足的なアプローチが考えられている。現状では、それぞれの不確実性について取り扱うための手法、例えば保守的なアプローチや確率論的な手法が適用されている。



The different components of the disposal system, the phenomena that may act on these components, and the time scales over which predictions can reasonably be made.

図一三 地層処分システムの構成要素に対する合理的な予測可能な時間スケールの概念

【H. Umeki and P. Smith, 2002】

2.3 地表環境や人間活動及び、生活習慣に関する予測の限界はどのように扱うことが出来るか

地表環境、人間活動、生活習慣に関する予測の限界については、長期間を対象とするために一般的には様式化アプローチを採用することが適切であることが合意されている。その様式化の方法について、諸外国では実施側と規制側の議論の中で考慮される仕組みになっている。

例えば、フィンランドでは、規制の中で具体的に提示されている。つまり、計算された線量やリスクは、将来の安全性を判断するための指標になるものと考えられている。

また、補足的指標、例えば地質圏からの放射性核種フラックスなどの適用可能性については、参照値あるいは、尺度の必要性として認識する必要があるとしている。

2.4 地質環境についての長期予測の限界はどのように扱うこと出来るのか

HLW 地層処分システムの長期的な安全性は、適切なサイト選定により好ましくかつ、安定な地質環境のもと多重バリアの安全機能が確保されることによって成立するために、取り分け地質環境の安定性がその基盤となるものである。

地質環境の安定性を評価対象とする時間枠、例えば、その安定性に対する確度が低減されるような超長期においては、HLW 自体の潜在的危険性は著しく低くなっていることを考慮し、過度に厳密性にとらわれずに一般的に受容される放射線学的影響について評価することが適切と考えられている。

また、様式化アプローチもこれらの時間枠に対する評価手法として有効であると考えられている。

2.5 公衆にとって関心のある安全上の問題と時間スケールとは何か

公衆は不均質な集合であるために、容易に受容される一般的な解を見いだすことは難しいが、公衆にとって関心の高い初期の期間、例えば 1,000 年間は HLW 地層処分の安全評価にとってあまり重要視されていない。但し、公衆はより長い期間、例えば氷河期の再来による影響などには関心が高い。

また、公衆はモデルの限界についての認識があり、長期予測への懐疑的な性向がある。このことが HLW 地層処分の一つの特徴である受動的な安全性(Passive Safety)に関する理解が進まないことの要因の一つにもなっている。

しかし、公衆は、線量やリスクに対する補完的な安全指標あるいは、性能の指標よりも馴染みやすい天然の放射能レベルや、河川などにおける天然放射性核種濃度を用いることが、公衆とのコミュニケーションの手段として有効である。

公衆の関心事への理解・啓蒙を促進するためには、積極的な対話、例えば HLW 地層処分場の安全機能と地層処分システムの構成要素の挙動にもとづいた時間枠を簡潔にかつ、可視化し

た素材（情報）として提供することが必要であるとしている。

2.6 安全性に関する適切な議論とその重要度は時間スケールによってどのように変わるか

この課題を考察する前提として、HLW の危険性と地層処分システムの長期的な挙動に係わる不確実性が時間と共に増大するということである。

HLW 地層処分の安全評価（セフティーケース）の信頼性向上のために、例えば異なる指標の適用、ナチュラルアナログの適用、定性的な検討などの多面的な推論（Multiple Lines of Reasoning）の重要性が再考され、より包括的に安全評価における枠組みを定義しようとする傾向が強くなってきている。

2.5 で前述した公衆にとって関心の高い初期段階においては、より厳密に物理的な閉じ込めに関する安全評価の信頼性を適切に提示することが必要である。

また、放射性核種の移行挙動に関するモデル化は、線量やリスクの評価に不可欠である。特に、線量計算に用いるモデルの適用限界に関する検討は、安全性への適切な議論とその重要度を考察する上で意義のある役割を果たすことになるとしている。

2.7 規制において、如何にあるいは、どの程度まで安全性に関して必要な議論を選択し、それらの相対的重要度に対して指針を与えるべきか

諸外国において、安全評価の時間スケールを考慮した規制における指針の整備が進んでおり、線量計算に関する補足的な議論などが活発化している。とりわけフィンランドの規制内容は特筆すべきものとなっている。

フィンランドの例として、(a)将来の環境が予測可能な期間（Environmentally Predictable Future : ”Predictable” という概念は、数字表示が可能な意味）である数千年間は、線量の保守的な推定、(b)極端な気候変化が起きる期間（例えば、永久凍土、氷河作用）は、地質圏から生物圏へのフラックスの制限値にもとづく防護基準、(c)さらに遠い将来（Farthest Future）である約 20 万年以降は、厳密な定量的な安全評価はせず、定性的な考察にもとづく安全性に関する議論をすることとしている。

一方、アメリカにおいては、米国科学アカデミー(1995)からの勧告のもと、環境保護庁(EPA)は、従来の 1 万年後までの期間に加え 1 万年後から 100 万年期間に対して放射線防護基準として、3.5mSV/y を設定する案を公表している。

しかし、地質圏が安定である期間を超える期間における線量評価については、規制上の指針が求められているが、まだ、コンセンサスは得られていない。

さらに、予測モデルに関する限界性は公衆にも認識されており、規制上においても安全評価モデルに関して限界があることを踏まえ過度に要求をしないよう留意することである。

また、異なる時間枠における指標の適用や議論の重み付けについては、規制側の指針が必要であるが、実施側としての裁量や責任分担の余地を残し、同じく過度に限定することのないよ

うに配慮することが必要である。

諸外国における HLW 地層処分に係る安全評価の評価期間及び安全基準・指標の一例を表一2A/2B(総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 第 18 回廃棄物安全小委員会資料,2006)に示す。

なお、第 2 章に関する今後の国際機関等の動向については、2005 年に第 2 回ワークショップがパリで開催されている。そこでは諸外国の規制機関、研究機関への事前質問状が配布され、これらの回答と合わせて、ワークショップの報告書(「A State of the Art」)が近日発刊される予定である。

表一 2 A 諸外国における高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る安全評価の評価期間及び安全基準・指標

【第 18 回 廃棄物安全小委員会公開資料,2006】

諸外国における放射線防護の評価期間と基準等

評価期間(防護基準の遵守期期間)

評価期間を明示的に限定している国………米国(遵守を証明する期間は、1 万年、100 万年(見直し案))
評価期間を明示的に限定していない国………フィンランド(少なくとも数千年は線量拘束値を適用。それ以降は放出放射能拘束値を適用)、
フランス(少なくとも 1 万年は天然バリアの安定性を立証し、線量をチェック。以降も定量的評価を実施)、
スウェーデン(1,000 年間は定量的なリスク評価を実施。ただし、以降も最大 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、安全指標として評価)、
スイス(いかなる時点においても基準を満たすことを要求)、ドイツ(記述なし)

* カナダはドラフトにおいて、有害性を維持する期間やバリアの設計寿命等の要素を考慮して設定。

放射線防護基準

【国際基準等】
ICRP Pub.81………自然過程に基づく評価として、線量拘束値 0.3mSv/年、リスク拘束値 10^{-5} /年オーダー
IAEA(DS154)………線量拘束値 0.3mSv/年、リスク拘束値 10^{-5} /年オーダー
* 線量拘束値:ある 1 つの行為に関係する特定の線源(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のことであり、規制の対象となるすべての行為による個人の被ばく線量の合計についての限度である線量限度とは異なる。

【諸外国】
通常シナリオ………線量基準 フィンランド(0.1mSv/年又は放出放射能/年)、フランス(0.25mSv/年)、スイス(0.1mSv/年)
発生の可能性の低いシナリオ………線量基準 フィンランド(0.1mSv/年あるいは放出放射能/年と[(線量または放出放射能)×確率]で表される期待値とを比較)
………リスク基準 フランス(数値は示していないがリスク概念の適用を示唆)、スイス(10^{-6} /年)
シナリオを分けていない国………線量基準 米国(0.15mSv/年、3.5mSv/年(見直し案))、ドイツ(0.3mSv/年)
………リスク基準 スウェーデン(10^{-6} /年)

* カナダはドラフトにおいて、放射線吸収線量の上限として 1mSv。併せて 1mSv/年の 1/3 の線量拘束値、1mSv/年に相当する 10^{-5} /年のリスク基準を示唆(例示)。

シナリオの発生の可能性を考慮したリスク論的考え方の適用が有効

表—2B 諸外国における高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る安全評価の評価期間
及び安全基準・指標

【出典：第18回 廃棄物安全小委員会公開資料,2006】

	安全基準・指標における評価期間の位置付け	安全基準・指標		
		線量	リスク	その他の安全指標
ICRP	—	線量拘束値として0.3mSv/年(自然過程に基づく評価。線量/確率分離アプローチ)	リスク拘束値として 10^{-5} /年のオーダー(自然過程に基づく評価。統合アプローチ)	
IAEA	—	0.3mSv/年未満	10^{-5} /年オーダーを超えない	
カナダ	対象廃棄物に伴う汚染物質がその有害性を維持する期間や工学バリアの設計寿命等の要素を考慮して設定。	放射線吸収線量の上限として1mSv/年(併せて、1mSv/年の1/3の線量拘束値を示唆(ICRPの勧告を例示))	(ICRPのリスク拘束値 10^{-5} /年を例示)	
フィンランド	十分予測可能な期間(少なくとも数千年)	①公衆の中で最も被ばくした者[0.1mSv/年] ②集団の平均[①の1/100~1/10]。		
	十分予測可能な期間以降(数千年以降)			核種毎の固有拘束値(放出放射線量)等
	期間の概念無し(想定外事象単独で評価)		【想定外事象】 結果として生じる影響×発生確率が、線量値あるいは放出放射線量拘束値を下まわること(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ーは最大でも 10^{-6})。	
フランス	少なくとも10,000年間について天然バリアの安定性を立証	【基準状況】 0.25mSv/年(発生が確実であるかきわめて可能性の高い事象)	【偶発的事象に関する仮想状況】 リスク概念([当該事象の発生確率]×[それに伴う被ばく効果])の使用を検討することができる。処分場の設計で考慮しなければならない仮想状況に関連する(線量当量として表現される)個人被ばくは、確定的影響を生じさせると考えられるレベルを大きく下回る水準に維持されなければならない。	
ドイツ	—	0.3mSv/年を超えない	—	
スウェーデン	処分場閉鎖後の最初の1,000年間とそれ以降の二つの期間について処分場の防護能力を評価[SSIFS 1998:1](後者の期間は、最大100万年までとし、少なくとも10万年ないしは氷期1サイクルの期間[SSIFS 2005:5]) 注)SSI Report 2000:18では、1,000年以内を、現実的な定量分析に基づいて評価を行える期間としており、1,000年以降については、隔離能力を示す安全指標として計算することが求められている。	—	10^{-6} /年を超えない[SSIFS 1998:1](ただし、極めて少数に限定される場合には最大リスクが 10^{-5} /年を超えないならば基準を満足すると見なすことができる[SSIFS 2005:5]) リスクは、「放射線量を受ける確率と放射線量による有害な影響の積」として定義されている。	
スイス	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及び事象】 0.1mSv/年を上回らない	【発生確率の低いプロセス及び事象】 放射線学的な死亡リスクとして 10^{-6} /年を上回らない	
米国	処分後1万年まで	0.15mSv/年を超えない	—	
	1万年より後、地質的に安定した期間(百万年)まで	3.5mSv/年を超えない		

ICRP : ICRP Pub. 81「長寿命放射性固体廃棄物の処分に対して適用されるものとしての放射線防護勧告」(1999)

IAEA : DS154 (IAEA安全基準シリーズWS-R-4「安全要件：放射性廃棄物の地層処分」)(2005)

カナダ : カナダ原子力安全委員会(CNSC)が、G-320「放射性廃棄物管理の長期的な安全性に関する評価(ドラフト)」(2005)

フィンランド : 放射線・原子力安全センター(STUK)の「使用済燃料処分の長期安全性の指針YVL8.4」(2001)

フランス : 原子力施設安全局(DSIN)の安全基本規則No. III.2.f「放射性廃棄物の深地層処分場の閉鎖後の安全性を確保するために、同処分場設置の設計・建設段階で採用すべき目標の規定」(1991)

ドイツ : 原子炉安全委員会(RSK)の「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)

スウェーデン : 放射線防護機関(SSI)のSSIFS 1998:1「廃棄物等管理防護規則」、SSIFS 2005:5「廃棄物等管理防護規則ガイドライン」

スイス : スイス連邦原子力安全検査局(HSK)及び連邦原子力施設安全委員会(KSA)のHSK-R-21「放射性廃棄物処分に関する防護の目標」(1993)

米国 : 環境保護庁(EPA) : 40 CFR Part 197「ネバダ・ユッカマウンテンに関する環境放射線防護基準」(2005、見直し中)。原子力規制委員会(NRC) : 10 CFR Part 63「ネバダ・ユッカマウンテンにおける地層処分場への高レベル放射性廃棄物の処分」(2005、見直し中)

第3章 我が国における HLW 地層処分の安全評価のために地球科学的観点からの考慮すべき期間（評価期間）

ここでは、HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間について、我が国の地形学・地質学的特徴を踏まえた地球科学的観点からのアプローチを紹介する。

3.1 地質環境の安定性

HLW 地層処分の安全評価については、処分場周辺の地質環境の長期的な安定性が基本的な要素となる。

地質環境の安定性とは、HLW を埋設した「場（サイト：処分場周辺）」の地質環境が長期にわたって全く不変不動であるということを意味していない。つまり、処分場周辺の地質環境がある程度変化することを考慮に入れても、その地質環境が地層処分にとって好ましく、かつ期待される役割、それは(a) 長期にわたって「場」として物理的隔離（深度）が保持される、(b) 人工バリアシステムの健全性（機能維持）のために設置環境としての主要な地質環境特性（岩盤の力学・熱・水理・地下水の流動と地球化学）の持続、(c) 天然バリアとしての性能（物質移行を支配する移流・拡散、吸着・遅延、希釈・分散など）を果たすことが出来れば、その「場」の地質環境は安定であるとみなすことが出来る。

HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間を検討するにあたり、まず、最初に地質環境の安定性に影響を与える天然事象に対して、地球科学的観点から2つの考慮すべき要素（規制要因）を取り上げる。

第1の要素は、日本列島が島弧-海溝型のテクトニクス場で支配されて発現する天然事象の様式、特性や活動性及び、天然事象による地質環境への影響の規模（範囲と程度）に係わる要素である。ここで考慮すべき天然事象については、このようなテクトニクス場において、偏在的かつ急激で地域的である「火山・火成活動・熱水活動」と「活褶曲や活撓曲を含む断層・地震活動」及び、緩慢で広範囲である「隆起・侵食、気候・海水準変動」である。

地質環境の安定性の検討・評価にとって、前者はそれらの天然事象が著しい変動の記録がなく、将来にわたってもそのような変動が生起することが少ないと見込まれる適切なサイトの選定により確保される。

一方、後者はそれらの天然事象による地質環境への影響の規模を科学的に理解し、それらの影響に相応した適切な安全対策により確保される。

従って、HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間（評価期間）の検討については、これらの発現する天然事象の様式、特性や活動性及び、地質環境に与える影響の規模を科学的に検討・評価することが基本となる。

第2の要素は、日本列島の広域応力場を支配しているテクトニクス場の変遷プロセスによって特徴付けられる“広域的で内的（侵食、堆積作用など）・外的（火山活動、断層運動など）な営力”による累積的な地学現象による地質環境への影響に係わる地質事象である。これらは

地形学的な変動史（変動地形学）・地質構造発達史・古水理地質学的変遷史などに伴う地質構造特性、岩盤の力学・水理・熱・物質移行に関する特性、水質形成プロセス（進化＜変遷＞：化学組成、pH, Eh、形成（滞留）年代、混合などを考慮した地下水流動系特性＜古水理地質流動特性を踏まえた流動場：移流・拡散場、水理特性など＞）に関する「いわゆる広義の地質事象」による影響の規模に係わる要素である。

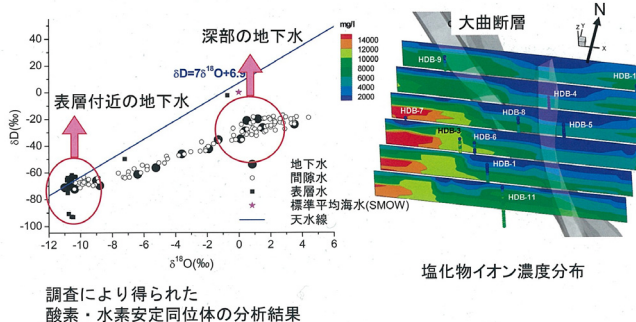
これらの地質事象による地質環境特性の安定性については、地質構造の安定性、地下水の地球化学的な安定性、低い透水性や遅い流速及び、隔離された深部停滞水などの水理場としての閉鎖系の存在と拡散場支配による優位性などにより検討・評価されるものである。つまり、このような地質環境特性の安定性への影響を検討・評価することが基本となる。

次に、第2の要素に関する具体的な最近の研究事例を紹介する。

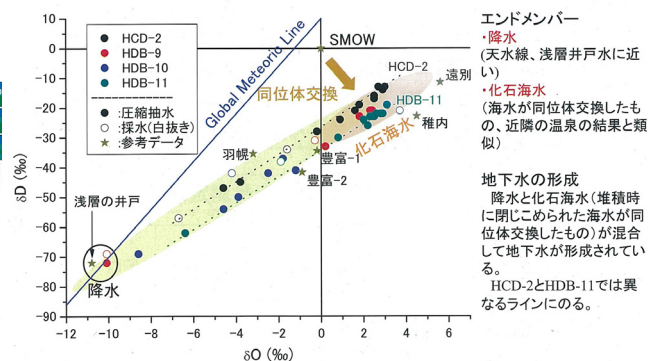
石川博久(2007)、木方建造(2007)は、幌延深地層研究施設周辺の地下水の起源とその形成プロセスについて図一4に示すように取りまとめた。両者によると、浅層井戸水と地下深部の地下水は、すべて天水線にのり、その起源は降雨水（天水）であると結論づけている。

また、殆どその天水線上にのる化石海水（塩分濃度が現海水のものより高い）は、連続的に海水が同位体交換で形成されたもので、近隣の温泉水（豊富温泉など）と類似する特徴を有していることを指摘している。この事実により、降雨水が堆積時に閉じこめられた海水と同位体交換によって混合して地下水が形成されたものと解釈している。

地下水の地球化学特性の把握(幌延URLの例)



水素・酸素同位体比による地下水起源の検討



図一4 幌延深地層研究施設周辺における地下水の地球化学的特性とその起源

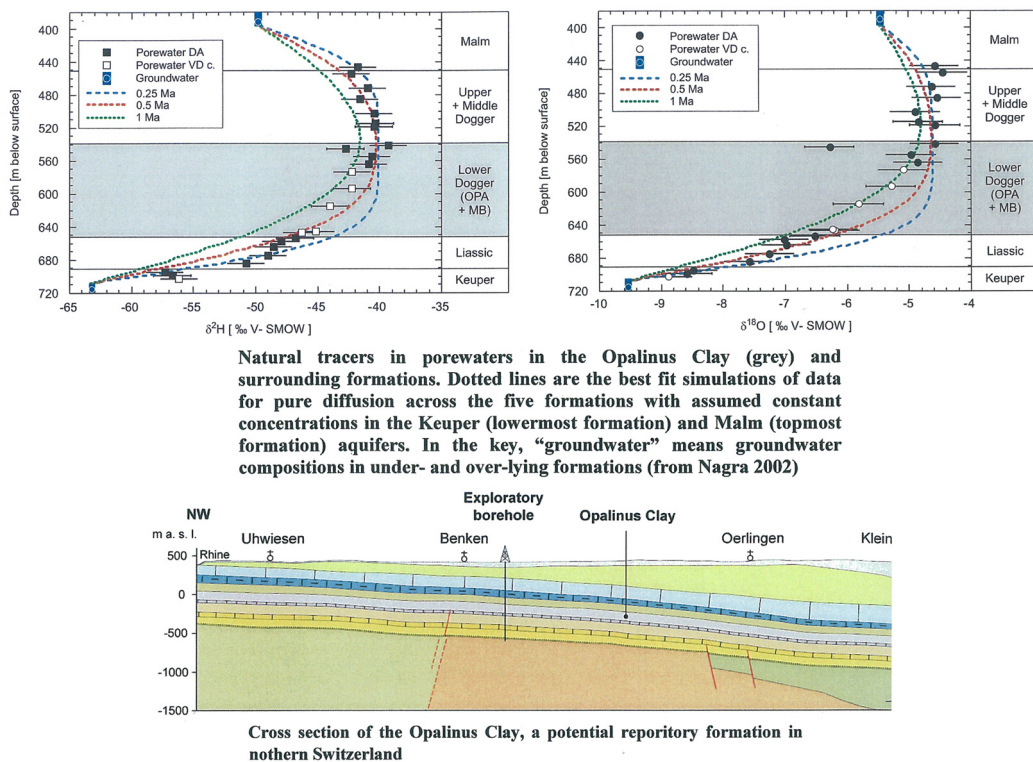
【左図：石川博久,2007, 右図：木方建造,2007】

そして、He-4 は深部に向けて濃度増加がみられることから、深部の地下水ほど滞留時間が数百万年の超長期にわたることも推測している。

さらに、化石海水が賦存している第三紀中新世の地層（稚内層）内に全く異なる水素-酸素同位体比を持つ地下水が存在していることから、この地下水は海水との同位体交換をせず隔離された停滞水と考えられる。これは稚内層上位にある第三紀鮮新世の地層（声問層）の堆積時に閉じこめられた海水がそのままの状態では停滞していることを示唆しているものである。

つまり、深部の化石海水は、降雨水起源の天水とは混和せず閉鎖系の停滞した深層地下水として隔離されたものとみなされる。これは深部地下水の長期安定性を意味する具体的な証拠であり、かつ深部地質環境の水理・地化学的特性が長期的に安定であることを示唆するものである。

また、海外事例として Schneider et.al.,(2002)は、スイス北部に広く分布するジュラ紀の乳白色オパリナス粘土層（モンテリ地下研究施設の母岩）の深度方向に5つの層準を対象に、水素-酸素同位体濃度による移行プロセスを100万年、50万年、25万の3つのケースでのモデル計算値と、原位置実測データとの比較にもとづいて解析・評価し、図一5に示す結果を得ている。ここでの広域地下水流動システムは氷河期以降（100 万年前以降）に形成されたもので、濃度一定と仮定してモデル解析による水素同位体の濃度プロファイル求めた。その結果を原位置実測データと比較すると100 万年のケースと原位置実測データが殆ど一致することにより、この移行プロセスは、100 万年にわたって拡散場に支配されていると解釈されると結論づけている。この事実も地下水の長期安定性を示す具体的な証拠になる。



図一5 オパリナス粘土層とその周辺層中の間隙水における自然トレーサーの地球化学的挙動
【S.Schneider, P.Zuidema & P.Smith, 2002】

3.2 HLW 地層処分の安全評価のための年代測定法の現状

HLW 地層処分の安全評価ために考慮すべき期間（評価期間）の設定については、地質環境の形成・変形・破壊・停止などの変遷（変化）過程に密接に関与するテクトニクスイベントの発現様式、特性、活動性やその影響の規模に関する知見を蓄積することが必要である。特に、それらの年代（時期）の決定は不可欠である。

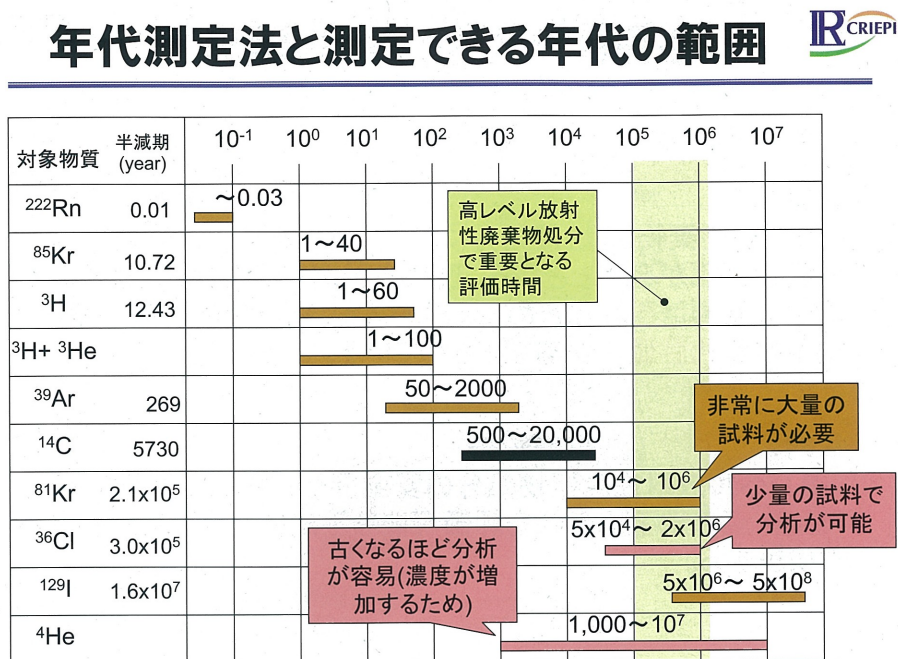
地球科学分野では、従前の方法である化石などによる相対年代や、放射性元素の崩壊物理則による自然崩壊系列特性による絶対年代の測定法が確立されており、最近では、先駆的な分析機器の導入と、その試料調整技術の高度化とともに測定精度の信頼性が高い。

一方、地下水の水質形成・混合・移動・停滞などの変遷（進化）などを解析する上での年代測定の適用範囲と測定精度などについては、信頼性の高いデータが十分に取得出来ているとは言えない。

特に、HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間としては、少なくとも 100 万年程度までの時間スケールの測定が適用範囲になる。

木方建造(2007)による現状での地下水を対象にした年代測定法の取りまとめを図一 6 に示す。

また、深部地下水の流速は、一般的に非常に遅いために現状の流速計や測定技術では十分でないのが現状であるが、天然放射性同位体に着目した地下水の年代値に基づき地下水の流速の評価に応用されている。



図一 6 年代測定法と測定できる年代の範囲

【木方建造、2007】

3.3 地質事象の将来予測

地質事象の将来予測については、数枚のプレートの相対的な水平運動によって支配・形成された島弧-海溝型のテクトニクス場で特徴付けられている日本列島のダイナミックスを注視することが必要である。

地層処分の安全性のために考慮すべき期間の設定については、前述した天然事象それぞれの発現様式、特性・活動性及び、地質環境への影響の規模などについて、地層処分の安全評価のための時間-空間スケール上規制される諸要素のもと、地球科学的観点から検討・評価し、取りまとめることが基本となる。

諸外国における考慮すべき期間（評価期間）、換言するなら防護基準の遵守期間については、すでに表—2A/2B に示したとおり、アメリカのように明示的に限定している国や、フィンランド、スウェーデン、スイスなどのように、その期間を 1,000 年から 10,000 年または、100,000 年までのようにそれぞれの時間枠を設定している国々もある。しかし、最近、アメリカのように 100 万年の見直し案が提案・公表され、現在も検討されている。

一方、我が国は具体的な数字を設定していないが、地質環境の長期安定性の評価期間については、核燃料サイクル開発機構報告書（1999）によると、過去数十万年以降、地形学・地質学的な記録のもと将来 10 万年程度の変化を検討することとしている。

ここでは、将来数十万年程度を将来予測の時間スケールとして地球科学的観点のもと概観してみる。

HLW 地層処分の安全評価の対象としている地質環境は、様々な時間-空間スケールのもと、大気・海洋・固体地球・生命が相互に作用し合った地球システムの分化と進化の過程として捉えることが出来る。

また、固体地球における地球システムは、上部マントルを支配するプレート運動やマントル内部での超巨大なホットプルームとコールドプルームの活動などに深く関与している。このような地球ダイナミックスを担う地球内部構造・機能に加えて、それらの運動（活動）の時間的发展過程である時間断面としての“歴史性”を重視する地球科学の特殊性がある。それは“過去に学び、現在を考え、将来を見通す”、つまり、“過去は将来を語る鍵”とする帰納法的・演繹的類推（ナチュラルアナログ）または、経験則による手法を駆使することにより信頼性の高い地質事象の将来予測が可能になる。

従って、この歴史性を体系的かつ、合理的に積み上げていく研究のために、地球表層部、例えば、海底・湖沼・湿原堆積物、珊瑚礁、陸上堆積物、岩石、砂漠の堆積物、氷床などに記録・保存された地球内部からの情報や、宇宙から送られてきたメッセージを適切に取得・解説・解析することが将来予測の科学的妥当性を高めるために不可欠な手段となる。

我が国における地質事象の発現様式の特徴に関して、木村敏雄(1999, 2002)は安定大陸である欧米諸国と比べて地質事象区（同一とみなせるある地質事象が生起している地域）が狭く、その活動期間としての活動寿命が短いということを論じている。それは、それらの地質事象の活動期間（寿命：生成期-成長期<成熟・定常期：例えば、ある地質事象の平均変位量や平均

速度などが、おおむね一定で変化している期間（-衰退期）に着目すると、その期間は数千年間から数十万年間程度であると指摘している。

また、活動パターン・プロセスは非線形、カオス的で不可逆的であるが、地球システムの変化（変動）には、一般的に周期構造をもつリズムがあり、そのリズムには倍周期があることが知られている。そして、その周期には、比較的短周期、非周期と突発的なイベントに識別され、これらの周期の記録は、地球システムの応答として捉えることが出来る。

つまり、前者が氷期-間氷期サイクルや気候の温暖化・寒冷化のミランコビッチサイクルなど、後者は生物の大量絶滅事件の要因となっている長周期の酸素欠乏事件や隕石の大衝突などが好例である。

これらの地球システムの変化(分化と進化)の動的な応答特性については、地形学、地質学的、地球物理学的、地球化学的なアプローチにより、データ・知見を取得・蓄積・解析し、地球システムの変化として具備している規則性（地域性、同時性、累積性、継続性、周期性＜再来間隔、時階性など＞）や、一般的な傾向及び、そのフィードバック機能を理解することが必要である。

また、時間-空間スケールにおける地質事象に関する将来予測に随伴する不確実性の取り扱いに関しては、その要因解明（不確実性の性質とその幅の把握）と低減への対策に特段の配慮が必要である。

将来予測手法に関しては、一般的に、類推法、シミュレーション解析法、確率論的手法などがある。現状では、地質事象に関する過去のデータ・知見などから時空分布特性とその変遷プロセスなどに関する一般性（規則性、周期性、傾向など）及び、地質事象の再活動の可能性と規模などに着目した帰納法的または、経験的な外挿法が広く適用されている。

なお、地層処分の安全評価のための天然事象の発現期間の設定については、地層処分の安全評価期間よりも長く考慮するために、対象とする地質環境の大きさ（地質事象区としての広がり）及び、取り扱う天然事象の選択肢も多くなることについては免れ得ない。

HLW 地層処分の安全評価の基盤となる地質環境の長期的な安定性評価を左右する天然事象は、前述した通り、急激で地域的な天然事象である火山・火成活動・熱水活動、活褶曲や活撓曲を含む断層・地震活動及び、緩慢で広範な天然事象である隆起・侵食作用、気候・海水準変動である。

これらの天然事象の発現様式、特性や活動性に関しては、日本海拡大に伴う日本列島の現地形の形成母体となった 600 万年前以降から始まった圧縮応力場で特徴づけられるインバージョンテクトニクス（応力場が変換したことにより断層のセンスの変化一例えば正断層から逆断層へ）をもたらしたプレート運動に密接に関係している。さらに、近年の地球科学の飛躍的な知識レベルの向上と知見の蓄積が著しい。

プレート運動については、図一 7 (Kious & Tilling, 1996) に示すとおり地球表層部に分布する十数枚のプレートが約 25 億年前以降に誕生し、その後水平運動を開始・移動し、その一生（海嶺での発生＜誕生: 上昇＞-移動-海溝への沈み込み＜下降＞）は約 2 億年間と考えられている。

日本列島を取り囲むプレートの中で、特に太平洋側から日本海溝に沈み込んでいる太平洋プ

プレート（沈み込み速度：8～9cm/年）とフィリピン海プレート（沈み込み速度：4～5cm/年）の運動史については、現在の日本列島の骨格が形成された、前述の 600 万年前以降からより具体的に考察することが可能である。

但し、両者のプレート自身の運動史については、約 3,000 万年前まで遡れるが、日本列島の形成過程としての日本海の解離・拡大期である約 1,500 万年前以降から現在までの運動史がよく理解されている。それによれば、太平洋プレートは約 1,500 万年前以降、フィリピン海プレートは約 300 万年前以降より、現在とほぼ同様な運動方向や移動速度のもと定常的に推移しており、両プレート運動は、総じて安定域にあるといえるといえる。

例えば、東北日本の火山活動については、その火山フロント位置がこの期間中大きく移動しておらず、特に日本海側の火山の活動域・様式（マグマの組成、規模、噴出頻度など）は、一定の規則性のもと推移しているといえる。

また、過去のプレート運動の大きな変化（変動）に要する時間スパンは、約 2～300 万年と見積られている。但し、フィリピン海プレートの場合は、太平洋プレートより分布面積（規模）が約 1/10 程度の非常に小さいために変化に要する時間が短く、数十万年程度であると考えられている。

吉田鎮男(2006)によると、将来のプレート運動の予測にもとづき、太平洋プレート運動に起因する考慮すべき地質事象については、将来 100 万年程度まで、フィリピン海プレート運動に関連する場合は、将来数十万年程度までの予測は可能であると指摘している。

次に、天然事象の発現様式、特性及び、活動性について、文献調査などの知見などから、天然事象の変化値や地質環境特性や安定性に関する限界値の見積もりについて整理し、その後、将来予測の時間枠について紹介する。

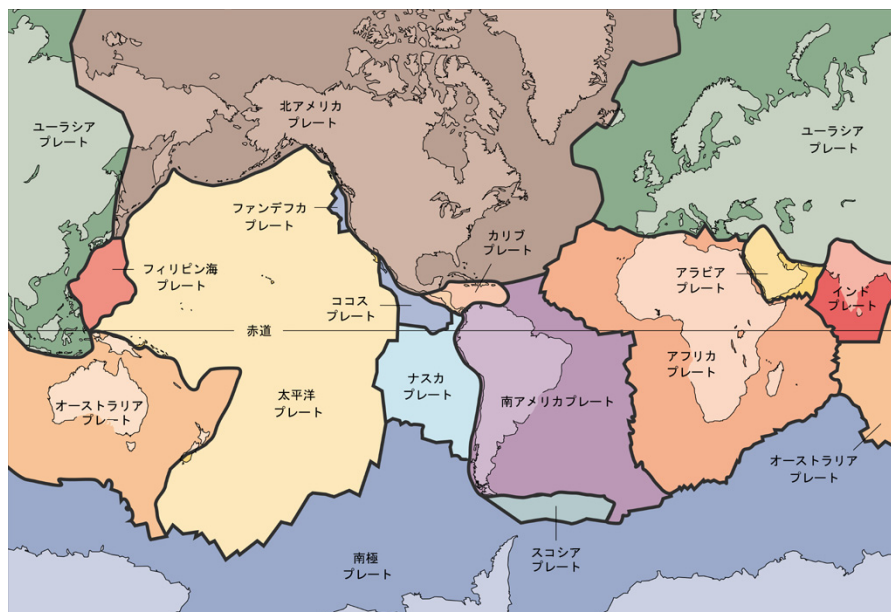
活断層（震源断層も含む）の活動については、竹内章（2000）によると現在の断層地形は、約 600 万年前以降のインバージョンテクトニクスに支配されており、現在進行中のテクトニクスは、プレート収束運動による地体構造区の地域性と時階性が顕著に現られている。これは、プレート境界の配置や深部地質構造の地域差も関係するものと考えられ、将来の断層運動を推定する上で、過去に受けた断層の活動履歴や現在の断層地形の形成に関与したネオテクトニクスを地域ごとに整理し、断層運動の地域特性を明らかにすることにより将来予測が可能であるとしている。

気候変化に伴う氷河性海面変化やテクトニクスによる隆起・沈降に伴う汎世界的な海水準変動については、過去約 1 億年前以降より概観することが可能である。特に、約 2,000 万年前以降からのデータ・知見の蓄積は著しい。とりわけ、過去 70 万年前以降、精度の高い新しい知見が整理されている。その解析結果より海水準は、約 10 万年周期で上下し、1 周期の変動量は約 130m、これは現在のそのピークに近い水準である。

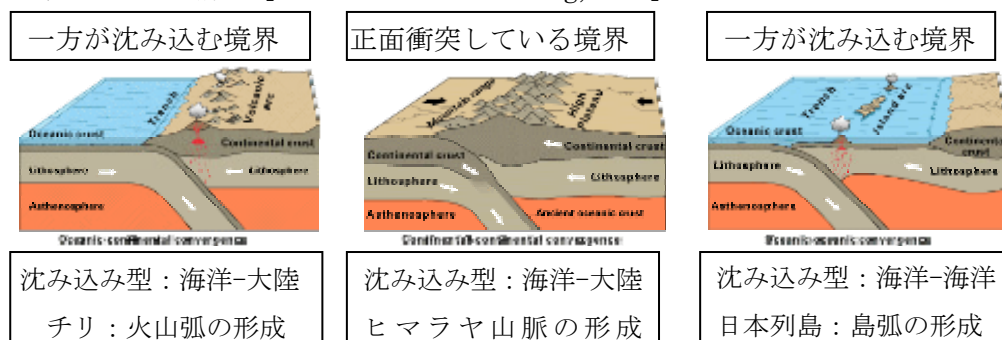
また、この周期の中で 1 桁小さい変動周期としてダンスガード-オシュガー周期もある。

以上の事実から、その変動幅は小さいことを考慮しても将来 100 万年程度までの変動幅の予測は可能である。

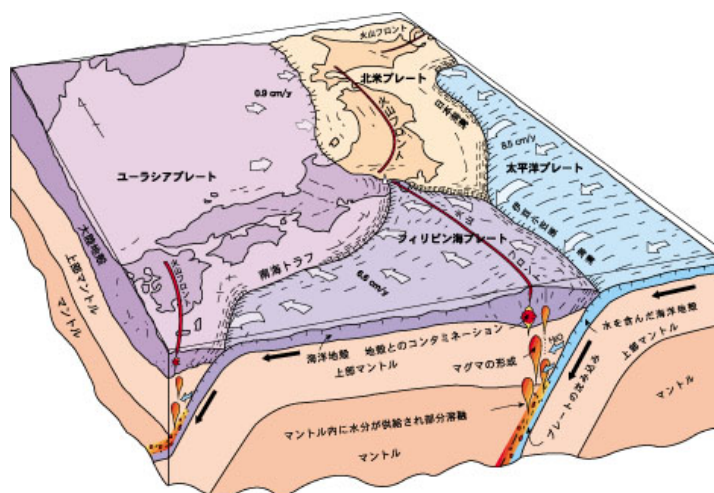
(a)プレートの分布図【W.J.Kious & R.I.Tilling, 1996】



(b)主要なプレート構造【W.J.Kious & R.I.Tilling,1996】



(c)プレートテクトニクスから見た日本列島【(社)全国質調査業協会連合会,2007】



図ー7 地球表層におけるプレートの分布図と構造及びプレートテクトニクスから見た日本列島

隆起・侵食については、第四紀の隆起域で 10 万年程度で 50m 未満、最大では中部山岳地域で約 2,000m、沿岸域で最大である室戸半島で約 1,800m である。これは 10 万年当たりで算定すると、前者は 111m、後者は 100m 程度である。将来 50 万年程度であれば、最大隆起量の将来予測は可能である。

次に、地球内部エネルギーに起因する地質現象として、花崗岩類の火成活動史または、冷却史として地下深部における花崗岩質マグマの発生・上昇・固定・冷却（固結）過程に着目して、花崗岩体の固結（定置）から地表面への隆起プロセスの時間枠を紹介する。

日本列島に分布する代表的岩種については、地質調査所（1995）によると第四紀堆積物を含む堆積岩は約 60%、火成岩は約 35%（火山岩 20%、深成岩 15%）、変成岩は約 4%、そして、その他として超塩基性岩は約 1% で構成されている。

特に、深成岩の大部分を占める花崗岩類の主要な形成時期は、ジュラ紀から第三紀に集中しているが、新しい花崗岩類として第四紀鮮新世以降に活動した丹沢山塊の丹沢花崗岩、八幡平の葛根田花崗岩、北アルプス穂高連峰の滝谷花崗岩などがある。

一般的に、花崗岩質マグマの冷却史（岩体形成）は非常に長い時間を要し、さらに、その後の地表面への隆起プロセスの時間枠は、岩体の規模（大きさ）、固結深度や周辺岩盤の力学的性質による浮力、温度、差応力などによって支配されることが解っている。ここでは、事例として 2 つの花崗岩体の隆起プロセスとその時間枠について紹介する。

佐藤興平ほか（1986）によると丹沢花崗岩質（トータル岩質岩）マグマの貫入時期は、主要構成鉱物である角閃石（閉鎖温度 500°C で結晶化）による K-Ar 年代測定法では、1,000 万年前頃、黒雲母（閉鎖温度 300°C で結晶化）による K-Ar 年代測定法では、500 万年前頃と見積もられている。この事実から、花崗岩質マグマが貫入してから鉱物の結晶化が完了（固結）するまで、500 年以上の時間がかかったことが推定される。

一方、この丹沢花崗岩の陸上での風化産物としての花崗岩礫は、約 200 万年前以降に堆積した足柄層群の地層に挟在されている。この事実から木村敏雄（1999, 2002）は、丹沢花崗岩質マグマから黒雲母の結晶が出来た（固結）時期を 500 万年前し、その後隆起したものと仮定し、この花崗岩体の頂上部が地表に現れるまで少なくとも 300 万年（500 万年-200 万年=300 万年）の時間が費やされたものと解釈している。

次に、北アルプス穂高-滝谷火山深成複合岩体（コンプレックス）の形成場とその滝谷花崗閃緑岩体の隆起プロセスの時間枠について紹介する。

原山智（1999）によると、この複合岩体は、北アルプス槍ヶ岳-穂高連峰沿いの火山構造的グラーベンの中に埋積した穂高安山岩類、主にデイサイト質溶結凝灰岩で、その一部はこのグラーベンから流出した丹生川火砕流堆積物として御岳北麓-高山盆地-松本盆地の広範囲（約 300km³）に分布している。そして、その丹生川火砕流堆積物への貫入岩体としての滝谷花崗閃緑岩（滝谷プルトン）が産状している。北アルプス連峰では 500 万年前頃黒部川花崗岩など地殻浅所に花崗岩質マグマが集積しており、滝谷花崗閃緑岩もこれと同時期に貫入・固結したものと考えられている。

また、このグラーベンの上位に堆積した大峰火砕流堆積物は、町田洋ほか（1997）が指標テフ

ラ解析により、フィッシュトラック年代(167 万年)より若い年代で、約 100～167 万年年前に堆積したものであると解釈している。この事実から、滝谷花崗閃緑岩が地表に現れるまで少なくとも 300 万年(500 万年-200 万年=300 万年)の時間を要したものと解釈される。

そして、長橋良隆(1998)によると、現在の北アルプス槍ヶ岳-穂高連峰の中軸として隆起したのは滝谷花崗閃緑岩体の固結以降であり、その後の穂高-滝谷コンプレックスを傾動させた隆起運動は、恐らく 70 万年以降であると推察している。

また、原山智(1994,1998,1999)は、これらの北アルプス槍ヶ岳-穂高連峰を形成した滝谷花崗閃緑岩体の隆起運動については、単一のプロセスでない多段階の隆起プロセスであるとしている。そのプロセスについては、マントル内に起因する南北性の高温領域形成後に、北アルプスの火成活動の様式として、フィリピン海プレートと太平洋プレートの干渉作用によって変化する最大主応力方向、差応力などの地殻内応力に支配された結果であると指摘している。

以上の事実から、花崗岩類の岩体の地表への隆起プロセスの時間枠については、少なくとも数百万年の時間を要する長期的な隆起(上昇)運動であることが言える。

最後に、アメリカ・エネルギー省(DOE)が HLW 地層処分場の開発段階にあるユッカマウンテン(YMT)プロジェクトの現状、特に処分場性能の評価期間としての遵守期間の見直し(案)の内容について、その骨子を簡単に紹介する。

YMT 地域は、火山・地震の多いコンバージェント(収束型)プレート境界に位置し、我が国の島弧-海溝型テクトニクスと類似したテクトニクス場の特徴を有している。

EPA(2005)は放射線防護基準としての遵守期間を 10,000 年経過後、1,000,000 年(100 万年)までの期間まで延長する見直し案を提案・公表した。

ここでは、その提案の考え方や根拠についてレビューし、我が国における HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間(評価期間)に関する基本的な考え方や評価期間の設定の根拠として参考になるものと考えられる。

最初に、HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間に関する基本的な考え方として、その取り扱いは、規制側(規制機関)の放射線防護基準の策定する場合の技術上・倫理上の拘束(規制)要素を考慮する必要があるとしている。

しかし、数万年後の将来に起こる天然事象とその変遷及び、生物圏を含めた地質環境に与える変化や影響に関する適切な情報は、時間スケールの拡大に伴いそれら自身に起因する不確実性の増大を促すために、限定されたシナリオのもと、状況に応じて様式化アプローチで取得することが得策であるとしている。それは、自然と人間が係わり合う相互システムの詳細さを極めて長時間にわたって正確に評価することに限界があるからである。

さて、アメリカにおいて環境放射線防護基準の見直し案として、EPA(2006)は放射線防護の遵守期間を 10,000 年から 1,000,000 年(100 万年)までとした基本的な考え方、考慮すべき天然事象とその評価期間などに関して“Fact Sheet”として取りまとめている。その記述内容は下記の通りである；

① 放射線防護基準

- ・ 従来、当初の 10,000 年間、年間 15mrem(0.15 mSv/y)を超えない個人防護基準を維持し、YMT 近隣住民が現在アメリカ国内で唯一操業中の地層処分施設である WIPP(Waste Isolation Pilot Plant)の近隣住民と同程度に防護されること。
- ・ 10,000 年後から 1,000,000 年(100 万年)後までの期間は、年間 350mrem(3.5 mSv/y)を超えない基準を追加し、YMT 近隣住民が生涯に受ける放射線量が国内の他の地域の人々が受ける自然放射線量を超えないように処分場からの放射線量を制限すること。

② 天然事象への考慮

100 万年間にわたって自然過程、破壊過程による潜在的な影響を評価するための天然事象として以下を考慮に入れることが要求されていること。

- ・ 処分坑道への影響及び、廃棄物容器の破損をもたらすような地震活動
- ・ 廃棄物容器への直接的影響または、放射性核種の環境への放出をもたらすような火山活動
- ・ 放射性核種の環境放出につながる雨量の大幅増大を引き起こすような気候変動
- ・ 廃棄物容器を破損し得る腐食プロセスをもたらすような天然事象（例えば、断層活動や熱水活動）

③ DOE による安全評価に対する要求

- ・ 10,000 年後から 1,000,000 年後までの期間において、安全に影響を及ぼす天然事象とそのプロセスの評価、そして放射線量の計算において中央値（メジアン）を採用し、最も予想される処分場性能にもとづいた形で放射線防護の遵守期間を判定すること。
- ・ 放射線量の計算においては、健康影響についての国際的合意などの最新の知見を使用すること。

一方、NRC は EPA の見直し案に対して放射線防護基準そのままに採用し 10,000 年を超える期間については、DOE に気候変動の影響を評価する必要があることを提示している。

なお、現時点では、この見直し案に対する最終的な見解は公表されていない。

第 4 章 提言

HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間（評価期間）については、処分場性能の評価期間に関する時間スケールに応じた地質環境特性の変化及び、天然事象の発現様式、特性・活動性などによる地質環境へ及ぼす影響の規模（範囲と程度）を注視し、我が国の地形学・地質学的特徴を踏まえ、地球科学的観点からのアプローチのもと取りまとめ、今後の課題やその取り組みについて表－3 に要約し、提言する。

最初に、地層処分に関連して検討すべき天然事象は、安全評価期間内に放射性核種が処分場外へ移動（漏洩）させる要因の可能性として地下水の流動と地球化学的環境の検討・評価が必要である。特に、地下水の人工バリアシステム（特にガラス固化体）への浸入、地下水中への

放射性核種の溶解及び、放射性核種を含んだ地下水の移動・遅延・希釈・分散などに関するそれぞれの特性と、それらの長期挙動の予測による地質環境特性の長期安定性（地質構造、水理場とその地球化学的性質など）の評価が重要である。それには、HLW 地層処分の安全評価のために放射性核種移行プロセスの時空間の「場」を科学的に検討・評価することが基本である。

次に、HLW 地層処分の安全評価期間内に地質環境へ変化（影響）を与える天然事象について地球科学的な観点から提言をする。特に、ここでは適切なサイトとして選定された処分場周辺の地質環境の長期安定性の評価に着目する。

我が国における地質環境の長期安定性については、前述したとおり、欧米諸国のような安定大陸と比べ基本的な課題(規成要素)がある。これらの課題は、地形学・地質学的特徴を踏まえ、考慮すべき主要な天然事象としては、泥火山を含む火山・火成活動・熱水活動、活褶曲・活撓曲運動を含む活断層・地震活動及び、気候・海水準変動を取り上げることが基本である。

表－３ 地層処分に関連して検討すべき天然事象

1. 安全評価期間内に放射性核種が処分場外へ移動 (1) 現在の地質環境での放射性核種の移動（地下水の流動と地球化学的環境） ■ 地下水のガラス固化体への浸入 ■ 地下水への放射性核種の溶解（地下水の地球物理・化学的諸性質） ■ 放射性核種を含んだ地下水の移動・遅延・希釈（地下水の水理場・流動） (2) 評価期間内の地質環境の変化（放射性核種の移行プロセスと関連） ■ 火山・火成活動、熱水活動、泥火山の発生 ■ 気候・海水準変動 ■ 活断層の新生（活褶曲・撓曲運動も含む）
2. 安全評価期間内の処分施設周辺岩盤の健全性保持 (1) 処分施設岩盤が本来もつ健全性の保持 ■ 岩盤の諸物性 ■ 地質構造（割れ目、断層、破碎帯、褶曲、撓曲など） (2) 処分施設岩盤破壊による健全性喪失 ■ 海面上昇に伴う侵食による破壊 ■ 活断層の新生に伴う破壊 ■ 熱水活動を含む火成活動による破壊

【木村敏雄（私信 1999）に加筆】

次に、安全評価期間内の処分場施設周辺岩盤の健全性を検討・評価するために、処分場施設岩盤の力学的・熱的・水理的な特性や、地下水の移動経路となる割れ目・断層破碎帯などの岩盤の緒特性に係わる長期健全性を科学的に明らかにすることである。

さらに、処分場施設岩盤の健全性喪失に深く関与する海面上昇に伴う岩盤の相対的隆起による浸食・破壊や、活断層の新生に伴う破壊・破断、熱水活動による広範囲な熱水変質や破壊などによる地質環境への影響の規模を把握することが必要である。これらの影響の規模を把握す

ることにより、処分場周辺の地質環境の長期安全性を評価することが可能となる。

最後に、HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間（評価期間）としての天然事象の将来予測で取り扱う時間スケールとしては、対象地域の特定(サイトの選定)、検討すべき天然事象の特定とその規模、活動性及び、発現様式などの評価により設定される。

従って、評価期間での将来予測の確度は、特定された地域におけるプレートテクトニクス変動史等に関してどれだけの量・質とも十分な地球科学的な情報が取得されるかに左右される。

吉田鎮男（私信 2006）によれば、地球科学的な経験則も踏まえ、将来予測の確度は 1/10 程度の考え方、例えば 1,000 万年間の詳細な地史が解析出来れば、その 1/10 である 100 万年は確度の高い将来予測が可能であることを示唆している。

つまり、HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間については、一般論として適切に選ばれた処分場周辺の地質環境と処分深度なども勘案すると、我が国において確度の高い将来予測の時間スケールとしては 70~80 万年程度、もし確率論的手法による将来予測であれば、その将来予測期間は、それ以上になることが可能であると言えそうである。

謝辞

本報告書をまとめるに際し、木村敏雄東京大学名誉教授が地層処分の観点から取りまとめた地層環境の長期安定性等に関する文献（論文や専門書）及び、貴重な情報（私信）によるところが多い。また、吉田鎮男氏（東電設計・最高顧問）には地層処分の安全評価のための考慮すべき期間に関する基本的な考え方や最新の評価根拠などに関する情報（私信）のご提供を頂いた。さらに、諸外国における HLW 地層処分の安全評価のために考慮すべき期間の取り扱いの現状紹介については、原子力安全研究協会の委託報告書を参考・引用させて頂きました。ここに、以上の方々に深く感謝の意を表します。

最後に、今後の HLW 地層処分の事業化段階において、地質技師(地質学者)の行動認識（役割）や地質学の貢献のあり方などについて、地層処分研究開発プロジェクトに精通している広義の地球科学分野を専門とする仲間が私達へ送った「エール」をご紹介させていただきます。

「地質学と地質技師（地質学者）とは」

Conclusions for geologists ;

- **Geologic disposal needs geology**
- **Geologic disposal needs geologists as advocates**
- **Geologists have the best long-time databases**
- **Geologists understand natural variability**
- **Geologists must live with uncertainties**
- **Geologists must participate in decision process**

参考・引用文献：

United States Court of Appeals for the District of Columbia(2004)
Circuit No. 01-1258

Nuclear Engineering International(2004)November

Nuclear Engineering International(2005)May

EPA(2001.2005)

40CFR Part197 : Public Health and Environmental Radiation Protection Standards for
Yucca Mountain, Nevada

EPA(2006)

Fact Sheet on Proposed Amendments to EPA's Public Health and Environmental
Radiation Protection Standards for Yucca Mountain, Nevada(40 CFR Part 197)

A.Alan , Moghissi(2006)

Perspective the Origin of the EPA's 10,000-year Time Flame for The High-Level Waste
Repository, Nuclear News, Feb.,

Peter De Preter & Philip Lalieux(2002)

Fulfillment of the Long-term Safety Function by the Different Barriers during the Main
Time Flames after Repository Closure, The Handling of Timescales in Assessing Post-Closure
Safety of Deep Geological Repositories, Workshop Proceedings, Paris, France, 16-18 April
pp.159-164

National Academy of Science(1995)

NAS Report : Technical Bases for Yucca Mountain Standard

核燃料サイクル開発機構(1999)

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 TN 1400 99-020, 総論レポート. pp.1-4, 分冊-I, pp. II-4

原子力安全委員会(1999)

高レベル放射性廃棄物の処分に係わる安全規制の基本的考え方について(第1次報告)

原子力安全研究協会(2003)

地層処分の安全規制等に係わる基本的な考え方に関する調査研究（委託調査研究：平成 14 年度放射性廃棄物処理処分対策研究委託）

OECD/NEA(2002)

The Handling of Timescales in Assessing Post-Closure Safety of Deep Geological Repositories, Workshop Proceedings, Paris, France. 16-18 April

H. Umeki & P. Smith, Handling of Timescales(2002)

Application of Safety Indicators, The Handling of Timescales in Assessing Post-Closure Safety of Deep Geological Repositories, Workshop Proceedings, Paris, France, 16-18 April, pp.111-122

ICRP, ICRP Pub. 81(1999)

「長寿命放射性固体廃棄物の処分に対して適用されるものとしての放射線防護勧告」

IAEA, DS 154(2005)

IAEA 安全基準シリーズ WS-R-4「安全要件：放射性廃棄物の地層処分」

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(2006)

第 18 回廃棄物安全小委員会資料（HP 公開資料：諸外国における放射線防護の評価期間と基準、諸外国における高レベル放射性廃棄物の地層処分に係わる安全評価の評価期間及び安全基準・指標）

石川 博久(2007)

幌延深地層研究施設周辺における地下水の地球化学的特性とその起源、報告会：地層処分計画を支える技術基盤の継続的な強化-国の地層処分基盤研究開発の成果と今後の展開-pp.27

J. Schneider, P. Zuidema & P. Smith(2002)

Handling of Timescales in Safety Assessments : the Swiss Perspective, Handling of Timescales in Assessing Post-Closure Safety of Deep Geological Repositories Workshop Proceeding, Paris, France, 16-18 April pp.101-110

木方 建造(2007)

年代測定法と測定できる年代の範囲、報告会：地層処分計画を支える技術基盤の継続的な強化-国の地層処分基盤研究開発の成果と今後の展開、pp.66, 67

W. Jacquelyne Kiouss & Robert I. Tilling(1996)

This Dynamic Earth, the Story of Plate Tectonics(Paper Back),Geological Survey of America

全国地質調査業協会連合会(2007)

HP 公開資料：プレートテクトニクスから見た日本列島

竹内 章(2000)

日本列島のテクトニクス、将来予測研究シンポジウム-日本列島の過去・現在・未来-, 核燃料サイクル開発機構（東濃地科学センター）,JNC TN 7400 2000-003, pp.1-6

地質調査所(1995)

100 万分の 1 日本地質図 第 3 版 CD-ROM 版の数値地質図データベース

木村 敏雄(1999)

地質事象の予測について：地層処分に関連して（私信）

木村 敏雄(2002)

日本列島の地殻変動-新しい見方から-, 愛智出版

佐藤興平, 柴田 賢、内海 茂(1986)

丹沢トータル岩質岩体の角閃石と黒雲母の K-Ar 不一致年代、地質学雑誌、vol.92, pp.439-446

原山 智(1999)

穂高-滝谷火山深成コンプレックスの形成場と飛騨山の隆起、日本列島テクトニクスワーキンググループ：日本列島における 6Ma 以降のテクトニクス変遷史、講演要旨集、12

原山 智(1998)

北アルプス、第四紀滝谷花崗閃緑岩と穂高安山岩、日本地質学会、第 105 学術大会見学旅行巡検案内書, pp.129-142

原山 智(1994)

世界一若い露出プルトンの冷却史-北アルプス・滝谷花崗閃緑岩の年代と冷却モデル
地質学論集：浅部マグマ溜まりとその周辺現象の地球科学 43, pp.87-97

町田 洋、山崎 春男、新井房雄、藤原 治(1997)

大峰火砕流堆積物：北アルプス形成史研究のための一指標テフラ、地質学雑誌, 106, pp.129-142

長橋良隆(1998)

中部日本、大峰地域の鮮新世火砕流堆積物-層序、記載岩石学的特徴. 地質学雑誌. 104, pp.184-198

吉田 鎮男(2006)

地質事象の 100 万年将来予測について (私信)

財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター（原環センター）
Radioactive Waste Management Funding and Research Center (**RWMC**)
〒104-0052 東京都中央区月島1丁目15番7号パシフィックスクエア月島8階
電話 (03)3534-4511 (代) FAX (03)3534-4567
ホームページアドレス：<http://www.rwmc.or.jp/>

本書の転載などの問い合わせは(財)原子力環境整備促進・資金管理センター企画部までお願いいたします。