

余裕深度処分の技術的な信頼性構築に向けた検討状況について

加藤和之^{*} 脇寿一^{*} 齋藤典之^{*} 小野文彦^{*} 大間知行^{*} 尾崎充弘^{*}

2004年に原子力安全委員会で取りまとめられた「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」における指摘、およびそれを受けた原子力安全委員会・低レベル放射性廃棄物埋設分科会における議論を踏まえた検討を行い、安全確保の基本的考え方については、原則、人為過程/自然過程に対する防護対策、サイト要件、および工学的対策の観点から整理した。BAT (Best Available Technique) の採用、長期の地質環境変動の影響を設計および安全評価で考慮する等、国際的にも最新の論点が考慮されていることが特徴である。これらの論点をより具体化するために、調査、設計と安全評価との関係を整理するとともに、安全評価における発生の可能性が高いシナリオと低いシナリオの役割について説明した。

「施設設計について」では、安全確保の基本的考え方で示された工学的対策を具体化するために、施設設計フローの構築とそのステップ毎の検討内容を報告し、ベントナイト層を対象とした具体例を紹介した。施設設計にあたっては、建設・操業段階および埋め戻し後の安全性を確保することを念頭に、埋設施設の構成要素を抽出するとともに IAEA 等の文献を参考に施設設計において考慮する安全要件が整理された。この安全要件を基に埋設施設が有すべき機能について検討し、構成要素との関係を明らかにした。これらは、「設計において構成要素単独もしくは関係する構成要素を総合的に考慮する機能」と「設定した仕様をもとに性能評価等において確認し、場合によっては設計上対応する機能」に分類して考えることが可能である。ベントナイト層についての設計フローでは、透水性だけでなく、建設・操業における要求事項、施工技術、および構成要素全体を考慮した仕様検討も実施し、必要に応じて性能評価等によるフィードバックもあり得ることが示された。

最後に、「安全評価の考え方」ではリスク論の評価を適用する上で重要なシナリオ構築の手法、特に「発生の可能性の高いシナリオ」の構築手法を紹介した。現実的シナリオでは、標準的な地質環境条件のもとに処分システムが期待する性能を発揮した場合を想定するが、評価期間が長いため不確実性の取り扱いについて、網羅性、透明性、追跡性の確保が必要である。シナリオ設定フローでは、まず、FEP リストや THMC 相関マトリクスを参照して埋設施設の状態設定分類が作成される。次に、状態設定に岐を生じさせる要因の抽出が行われた後、シナリオ設定過程での取り扱いを明示するために、ロジックツリーが作成され、それに基づく判断によって現実的なシナリオが設定されることになる。具体例として、ベントナイト層の透水性に着目した判断事例を紹介した。

Keywords: 余裕深度処分, 廃棄物特性, 施設設計, 安全評価, リスク論的考え方

The sub-surface disposal facility under planning will accept wastes those concentration levels can be a few order higher than that disposed of in current Rokkasho LLW disposal center. Proposed waste contains the reactor core surrounding parts, the ion exchange resin, reactor core-internals replaced or decommissioned, and some of the waste from reprocessing plant operation and decommissioning. In 2004, Nuclear Safety Commission of Japan (NSC) submitted the report titled by "Commonly Important Issues for the Safety Regulations of Radioactive Waste Disposal". NSC recommended the risk-informed approach that combines the likelihood of a given scenario with its impact should be introduced in safety regulations governing radioactive waste disposal. The basic concept for the safety of the sub-surface disposal is under consideration by NSC.

Considering key issues of NSC, the basic policy of the safety is proposed in terms of radiation protection both for natural processes and human activities, and requirements for the geology and engineered barriers are discussed. The BAT (Best Available Technique) and the predictable long-term behavior of geologic environment are experimentally introduced both in the design of facility and its safety assessment. The concept of co-operation among the site investigation, the facility design and the safety assessment is also proposed.

The methodology of facility design is discussed based on the proposed basic policy of the safety. With in mind the safety for the development, operation and closure of disposal facility, key components of the facility are extracted and safety requirements for the design are clarified. Based on safety requirements, safety functions to be added to the facility are assigned. It is examined how safety functions should be divided to key component. According to results of the examination, safety functions are classified as a) a function should be considered in the design for an independent component or should be synthesized among related components, b) a function should be evaluated through the performance assessment based on its specifications in order to judge the necessity of design adjustment. The function b) has an important role to clarify the feedback route from the result of performance assessment to the facility design. The applicability of the proposed design methodology to the bentonite barrier is examined.

As a one possible realization of the risk-informed approach that combines the likelihood of a given scenario with its impact, the methodology to construct the likely scenario is examined. In this scenario, the most possible evolution of disposal system is evaluated based on the standard geologic environment, supposing the satisfactory performance of engineered barriers. The scenario should be comprehensively developed with transparency and traceability. At first, possible states of the facility are categorized based on the FEP list and the T-H-M-C coupling matrix. Considering the evolution of the facility from a certain state to another state, some possible bifurcation points are extracted. The logic tree analysis is applied to the bifurcation point and the most possible evolution concerning the bifurcation point is judged. The likely scenario is developed by the succession of judgments for extracted bifurcation points. The applicability of the methodology is examined to estimate the long-term evolution of the hydraulic conductivity of the bentonite barrier.

Keywords: sub-surface disposal, facility design, inventory, safety assessment, risk-informed approach

1 はじめに

現在、青森県上北郡六ヶ所村では、日本原燃(株)の「低

Current status of the sub-surface disposal facility development by Kazuyuki Kato (Kato.Kazuyuki@tepc.co.jp), Toshikazu Waki, Noriyuki Saito, Fumihiko Ono, Tomoyuki Ooma, Mitsuhiro Ozaki

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第22回夏期セミナーにおける公演内容に加筆したものである。

^{*}電気事業連合会 The Federation of Electric Power Companies

〒105-0003 東京都港区新橋 1-1-15 物産ビル別館 8 階

レベル放射性廃棄物埋設センター」において、原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物の浅地中処分が進められている。浅地中処分が可能な廃棄物に含まれる放射能濃度については、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令」[1]で定められている。その放射能濃度を超える廃棄物に対しては、原子力委員会が1998年に「一般的であると考えられる地下利用に十分余

裕を持った深度に処分する」方法（以下、これを「余裕深度処分」と呼ぶ）の適用性をまとめている[2]。この報告を受け、原子力安全委員会は2000年に余裕深度処分可能な放射能濃度の上限値を算出[3]しており、その値は同年、前出の法律施行令に反映されている[1]。

放射性廃棄物処分の安全規制に関しては、「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」（原子力安全委員会、2004、以下、「共通的な重要事項」[4]）においてすべての放射性廃棄物の処分の安全規制において共通的に考慮すべき重要事項が示されている。「共通的な重要事項」では、発生の可能性に基づきシナリオの想定をあらかじめ大別し、それぞれに対応した放射線防護基準との比較を行うというリスク論的な考え方に基づく安全規制の適用性を検討すべきと述べられている。この報告を受け、原子力安全委員会は、2005年9月より、放射性廃棄物・廃止措置専門部会 低レベル放射性廃棄物埋設分科会において、余裕深度処分を含む低レベル放射性廃棄物処分の安全規制の基本的な考え方について検討を進めている。

一方、日本原電（株）の東海第一原子力発電所で進められている廃止措置が本格化し、余裕深度処分対象を含む多くの解体廃棄物が発生する時期が近づいており、運転や解体により発生した廃棄物を適切に埋設処分できる流れを整える必要性が高まっている。

以上のような背景のもと、日本原燃（株）では、余裕深度処分施設の設置の可能性を確認するための予備調査を2001年7月～2002年6月にわたり行い施設設置が可能との見通しを得た。また、2002年11月～2006年3月にわたり本格調査を行い、施設の検討に必要な、地質・地下水のより詳細な情報を取得している。本報告では、余裕深度処分の技術的な信頼性構築に向けた取り組みを紹介することにより、今後実施する施設設計や安全評価における本格調査の結果を踏まえた検討の方向性を示す。なお、本格調査の結果については、別報[5]で示す。

2 余裕深度処分対象廃棄物とその特徴について

余裕深度処分対象廃棄物は、原子力発電所の運転、解体および、再処理施設、MOX燃料加工施設の操業、解体から発生する。

電気事業者は解体中の日本原電（株）東海発電所、運転中の55プラント及び、近年営業運転開始が予定されている東北電力（株）東通原子力発電所1号機、北陸電力（株）志賀原子力発電所2号機から発生する放射性廃棄物のうち、浅地中処分に関する政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物を対象に現状の検討を実施している。運転廃棄物の物量の算定上、プラントの運転期間は基本的に60年を想定した。なお、これらの廃棄物のうち、埋設施設操業開始後15年程度に搬出予定の廃棄物で性状の明らかなものを初

Table 1 Total amount of target radioactive waste (Assumed for this study)

廃棄物分類	総発生量			
	全体物量		うち初期分 ^{*1}	
	原廃棄物量(t,m ³)	廃棄体換算物量 ² (m ³)	原廃棄物量(t,m ³)	廃棄体換算物量 ² (m ³)
発電所				
運転(放射化金属)	3,600t	3,900	810t	940
運転(使用済樹脂)	9,700 m ³	11,000	1,800m ³	1,400
解体廃棄物	8,300t	9,100	1,600t	1,500
JN				
再処理操業(CB/BP除 ⁽¹⁾)	14,400t	14,000	0t	0
再処理操業(CB/BP)	5,700t	12,400	2,400t	5,200
MOX操業	400t	400	0t	0
再処理解体	8,700t	7,200	0t	0
MOX解体	2,300t	1,300	0t	0
合 計		59,300		9,040

*1)埋設施設操業開始後15年程度に搬出予定の廃棄物で、性状が明らかなもの

*2)廃棄体換算物量(m³) = 原廃棄物量(t)/廃棄体収容量(t) × 容器内容積(m³)

期申請対象分と仮定した。

また、発電所廃棄物以外で検討対象とする廃棄物は、日本原燃の再処理施設とMOX燃料加工施設から発生する廃棄物のうち、浅地中処分に関する政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物を超えており、かつ、核種の濃度が100GBq/tを下回るものとした。操業廃棄物の物量は両施設ともに約40年間の操業を仮定し算定している。なお、余裕深度処分に関する核種濃度の上限については、原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会で検討中（2006年9月末現在）であるが、設計、評価の成立性を評価するため、物量、放射能が多めになるよう仮に設定している。

以上の前提のもと、算出した余裕深度処分対象となる廃棄物の全体物量は廃棄体換算で約6万m³となり、内訳は発電所廃棄物が約24000m³、再処理廃棄物が約35000m³である。なお、再処理廃棄物の約1/3をチャンネルボックス(CB)とバーナブルボイズン(BP)が占める(Table 1)。そのうち、初期申請対象分と仮定した廃棄物は、約9000m³で、その内訳は発電所廃棄物約3500m³、再処理廃棄物が約5000m³である。

対象廃棄物に含まれる主要核種の放射能濃度をTable 2に示す。発電所廃棄物の方が核種濃度が高く、再処理廃棄物の方が核種濃度が高い傾向にある。発電所廃棄物の一例として放射化金属の放射能濃度の経時変化をFig.1に示す。発生から数十年程度は浅地中処分対象廃棄物と同

Table 2 Total inventory of target radioactive waste (Assumed for this study)

(Assumed for this study)				(Bq/t)
	発電所廃棄物			JNFL廃棄物
	運転廃棄物		解体廃棄物	
	放射化金属	使用済樹脂		
C-14	2.0×10^{11}	2.8×10^9	4.2×10^{11}	1.1×10^{10}
Co-60	4.3×10^{14}	3.6×10^{12}	2.9×10^{14}	2.1×10^{13}
Ni-59	9.3×10^{11}	1.1×10^{10}	2.5×10^{12}	4.3×10^{10}
Nb-94	5.2×10^9	2.4×10^8	6.5×10^9	3.8×10^9
I-129	1.1×10^3	2.4×10^5	5.0×10^3	6.4×10^4
Cs-137	1.8×10^9	4.9×10^{10}	2.0×10^9	2.2×10^{12}
Pu-239	1.8×10^8	3.3×10^8	4.2×10^7	2.5×10^8
Am-241	6.3×10^7	1.2×10^8	1.5×10^7	2.0×10^9

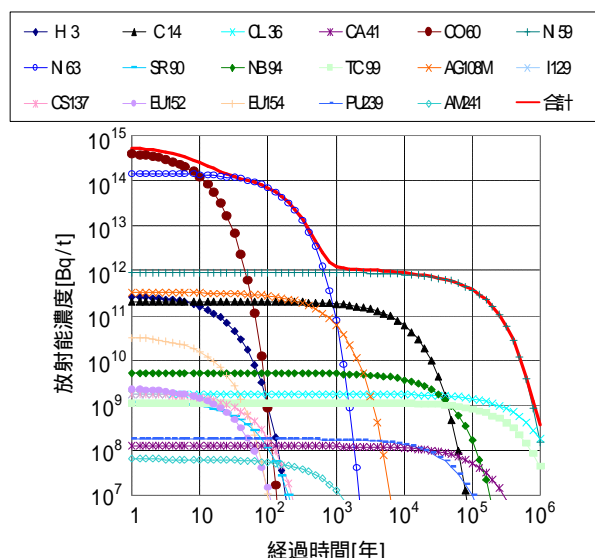


Fig.1 Time dependence of radioactivity concentration change (Example of activated waste)

様に Co-60 が支配的であり、長期的には Ni-59、C-14、Nb-94 が支配的になる。

3 安全確保の基本的な考え方

余裕深度処分を含め、放射性廃棄物の処分においては、事業者による立ち入り制限やモニタリング等の管理が終了した後も一般公衆の安全が保たれるかどうかという、長期的な安全確保が重要（たとえば、「共通的な重要事項」[4]（脚注））であるので、本論では事業終了後の安全確保を中心に議論を展開することとする。

廃棄物が人間及びその生活環境に影響をおよぼすに至る状況は様々であるが、大きく、自然過程を介する経路と、人為過程を介する経路に分けることができる[4]。長期にわたる安全性を確保する上では、これらの経路から受ける影響を低減することが重要である。なお、そのための対策を講ずるにあたって実施する処分施設の立地、設計、建設、操業及び閉鎖は、管理終了後の措置が最小限となるよう、可能な限り受動的な形で達成されるよう配慮しなければならない[6]。

3.1 人為過程に対する防護対策

人為過程を介して処分された対象廃棄物と直接接触す

（脚注）『放射性廃棄物の処分に係る安全規制にあたっては、他の原子力施設の安全規制と異なり、事業者による立ち入り制限やモニタリング等の放射線防護上の管理を基本的に実施しない管理期間終了後においても安全を保たれるかどうかという、長期的な安全確保について特段の注意を払う必要がある。すなわち、処分の対象となる放射性廃棄物には、核種の種類、放射能濃度等に大きな幅があるが、いずれの場合にも、長い期間に対する放射線防護について考慮しておくことが共通の特徴であり、そのための安全評価を予め実施しておく必要がある。』（原子力安全委員会、2004）

ることにより被ばくを被る可能性を低減するためには、対象廃棄物の特性を考慮しつつ、その影響を緩和するのに十分な深度に処分施設を建設し、廃棄物を埋設処分する必要がある。余裕深度処分に関して、原子力委員会は、一般的であると考えられる地下利用に十分余裕を持った深度（すなわち、高層建築物などの基礎が設置できる支持層上面より深く、これに基礎となる地盤の強度などを損なわないための離隔距離を確保した、例えば地表から 50～100m 程度の深度）に処分するとともに、地下の天然資源が存在しない場所を選定することとしている[1]。

3.2 自然過程に対する防護対策

3.2.1 地下水移行シナリオに対する対策

自然過程に関する影響の代表的なものに、処分された廃棄物中に含まれる放射性核種が地下水を媒体として移動して人間の生活圏に到達し影響を及ぼす可能性（以下、地下水移行シナリオ）がある。各種の人工的な構築物からなる人工バリアと地質環境のもと核種遅延特性に着目した天然バリアから構成されるシステムは、地下水移行シナリオに対する対策を主眼としたものである[4]。

人工バリアと天然バリアの組み合わせによる処分概念を具体化する上では、廃棄物特性に応じ、処分施設を設置するに適した地質環境を選定し、人工バリア設計を行うことが重要である。近年、このようなバリア概念を具体化し、その妥当性を説明する上で有効な考え方の一つとして、「技術的に最善の手段(Best Available Technique、以下 BAT)」の概念が、国際的に幅広く議論されている。放射性廃棄物処分の安全性に関する議論においては、将来世代が被る可能性のある潜在的な影響を線量計算などにより評価することが広く行われているが、このような評価には、評価期間が長いことに伴って派生する不確実性が内在している。BAT とは、このような不確実性の存在を前提とした問題に対する安全確保を図る上での対策を立案するための概念であり、放射性廃棄物処分における BAT は、各バリアからの放射性物質の放出をなるべく抑制することを目的として処分概念を構築するという考え方と捉えることができる。加えて、BAT は、前記のような処分概念の構築を行う際に、施工性、経済性等を合理的に考慮した上で、現状適用可能と思われる最善の技術を用いていることを示すべきとの概念を含んでいる。BAT が適切に適用されたことを示すことは、処分概念の妥当性を示すとともに、処分の安全性に関する信頼性を醸成する上での基礎的な情報となる。

3.2.2 地質環境変動事象に対する対策

地質環境変動事象のうち、火山活動や断層活動については、地球内部のテクトニクスに起因して発生する事象であるため、その影響の大きさは処分深度に依存しない。また、これらの事象は、急激に影響を及ぼす可能性があるが、そ

の発生の場所は局所的で限定されている。よって、これらの事象により処分場が直接的な影響を被る可能性については、火山活動や断層活動が将来的に生じる可能性の低い地域であることを調査・確認することで排除するのが基本である。

一方、気候・海水準変動、隆起、侵食については、地表面に近いほど影響の大きい事象であるので、処分深度に応じた取扱いを行う必要がある。気候・海水準変動や隆起、侵食の影響としては、降雨量、海水準、地形の変化があげられる。隆起傾向にある地域においては、侵食が相まって、処分深度を減少させる可能性がある。これらの変化は、地下水流動特性や地化学特性の変化を促し、人工バリアの特性や、天然バリアの核種移行特性に影響を及ぼす可能性がある。また、隆起と侵食が継続すると、処分場が地表近傍に接近していくため、遠い将来においては人為過程を介して廃棄物と直接的に接触する可能性も考えられる。

上記のような事象に対しては、処分深度を適切に確保することにより影響を緩和することが可能である。よって、余裕深度処分においても、これらの影響を考慮したとしても十分安全性が確保されていることを示すことが重要となる。

4 施設設計について

4.1 施設設計の基本的な考え方

埋設施設の設計にあたっては、前記の安全確保の考え方に則り、埋設施設設置に適した領域を当該サイト内で選定する必要がある。埋設施設設置領域の選定における考慮事項を3章の記述をもとに抽出すると、下記ようになる。

経済的に有用な地下資源が賦存しない地域であること(3.1)

一般的であると考えられる地下利用に十分余裕を持った深度であること(3.1)

核種の閉じ込め性に優れた地質環境であること(3.2.1)

人工バリアを構築するに適した地質環境であること(3.2.1)

火山活動、断層活動が将来生じる可能性が低い地域であること(3.2.2)

隆起、侵食及び、気候・海水準変動により、著しい影響を被らない地質環境(処分深度を含む)であること(3.2.2)

これらの考慮事項を確認するための調査、評価方法は別報[5]に示すとおりである。そのような調査、評価で得られた当該地域の地質環境条件(地質環境の変動に関する情報を含む)を考慮した上で、施設設計においては、建設・操業から事業終了後の安全確保を目的として、合理的に適用可能な最善の技術を用い、各人工バリアからの核種の放出を抑制するために、人工バリアと天然バリアを適切に組み合わせたバリアシステムを検討する。検討に際しては、

過度に単一のバリアまたは機能に依存しない、頑健性の高いバリアシステムの構築を目指す。また、設計・施工に際しては、品質保証計画を立案し、現状の工学技術において実行しうることを示すことにより、人工バリアに工学的な欠陥が生じる可能性を極力排除する必要がある。

以下では、以上のことに配慮した、埋設施設の設計の手順とその具体例を示す。

4.2 施設設計の進め方

人工バリアおよび埋設施設を設計するための基本的な流れは、Fig.2に示すとおりである。

まず、建設・操業段階および、埋戻し後の安全性を確保することを考慮して、国内検討事例、海外検討事例を参考に、埋設施設の構成要素を抽出する。一方、IAEA(2006)[6]等を参考に施設設計において考慮する安全要件を設定する。次に、3章の考え方を基に「埋設施設の構成要素」と「施設設計において考慮する安全要件」を対照させ、各構成要素毎に具備すべき機能を整理し、それをもとに各構成要素に関する設計フローを構築し、そのフローに基づき各構成要素の仕様や空洞設計・施設レイアウトの検討を実施する。なお、これら一連の設計の流れにおいて特記すべきは、埋戻し後の性能に関する検討および、地質環境条件の変動を考慮することが重要な点である。よって、一連の設計によって設定された仕様例に対しては、安全評価を行い、その結果を踏まえた上で、必要に応じて設計に適宜反映していくことが求められる。

Fig.3に施設設計において考慮する安全要件を整理した結果を示す。また、Table 3には埋設施設の構成要素が有すべき機能と構成要素の関連を示した表を示す。

施設設計において考慮する安全要件(Fig.3)は建設・操業段階と埋戻し後の2段階に分けて整理した。建設・操業～埋戻し後を通じて考慮すべき事項としては、「多重の安全機能を有する受動的な人工バリアシステムを設計」すること、「適切な定置、構造物の配置、レイアウトのための設計」、および、「有害な現象や擾乱を緩和する特

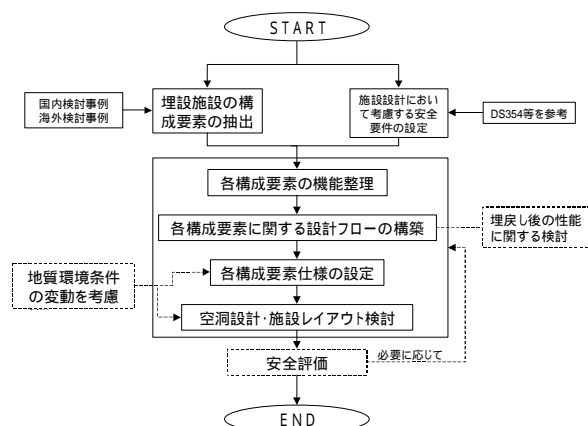


Fig.2 Examined integrated flowchart for the disposal facility design

建設・操業段階	埋戻し後
多重の安全機能を有する受動的人工バリアシステムの設計	
適切な定置、構造物の配置、レイアウトのための設計	
	閉じ込め性、低流速、拡散・分散等の有用なプロセスを有する埋設施設の設計
建設・操業期間中の安全確保するための設計	処分環境下における使用を踏まえた構成要素の相互作用・補完性を考慮した設計
	人間侵入の影響を最小化するための設計
有害な現象や擾乱を緩和する特性を有する設計	

Fig.3 Example of safety requirements for the disposal facility design

性を有する設計」を行うことが挙げられる。さらに、建設・操業段階においては、「建設・操業期間中の安全を確保するための設計」が必要である。また、埋め戻し後に対しては、「閉じ込め性、低流速、拡散・分散等の有用なプロセスを有する埋設施設の設計」や、「処分環境下における使用を踏まえた構成要素の相互作用・補完性を考慮した設計」、「人間侵入の影響を最小化するための設計」が求められる。

埋設施設の構成要素が有すべき機能と構成要素の関連の整理(Table 3)においては、各構成要素が有すべき機能を「設計において、各構成要素単独として考慮する機能(印)」、「設計において、関係する構成要素を総合的に考慮する機能(印)」、「を考慮した設計により設定した仕様をもとに、性能評価等において確認し、場合によっては設計上考慮する機能(印)」に分類して整理した。例えば、埋め戻し後について、ベントナイト層には特に低

透水性を、高緻密コンクリート層に対しては特に拡散による遅延効果を期待して設計を行うが、力学的安定性や核種収着等、埋め戻し後の長期にわたり期待すべき機能の多く

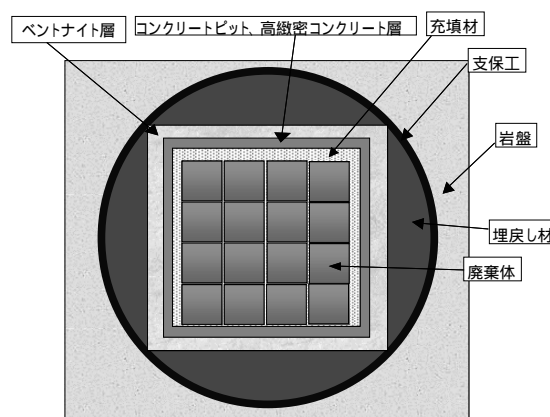


Fig.4 Example of conceptual design for the sub-surface disposal facility

Table 3 Example of functional requirements for the facility

	安全要件項目	埋設施設が有すべき機能		各構成要素が有すべき機能						
		機能	機能の内容	廃棄体	充填材	コンクリート破砕	ベントナイト層	高緻密コンクリート層	埋戻し材	支保工
建設・操業段階		操業空間の確保、自重・外力に対する安全性確保	確実な建設、操業が行われる空間、力学的安定性が確保されること							
			廃棄体は受ける荷重に耐える強度を有し、定置後安定させること							
		放射線被ばくに対する安全性確保	空洞安定性の確保							
			汚染拡大防止							
埋戻し後		放射線被ばくに対する安全性確保	廃棄体定置作業等での安全性を高めるため、高線量廃棄体では遅い機能性を有し表面線量率を低下させること							
			廃棄体定置作業後において作業を実施する場合は、十分な遮蔽を有する環境を保つこと		*	*		*		
			力学的安定性の確保							
			各構成要素が著しく物理的な影響を受けないこと							
		放射性核種の放出抑制	放射性核種の拡散を抑制することにより漏出速度を低減すること							
			放射性核種の閉じ込めと放出された放射性核種に対する放出率の低減							
			溶解性放射性核種を収着すること							
			埋設施設を通過する地下水流量を抑制すること							
		地下水移動の抑制	埋設施設内に地下水の卓越流路を形成しないこと							
			自己シール性							
			施設内に発生した空隙を充填できること							
			化学的安定性の確保							
		熱変質に対する安定性確保	埋設環境及びバリアの相互作用により著しい劣化が生じないこと							
			発熱廃棄体に起因する処分施設内温度が許容温度を超えないこと							
			放射性金属ガス・金属腐食ガスの透気に対する安定性確保							
			埋設施設内の圧力が著しいバリア材の劣化を生じないこと及びガス透過により地下水の卓越流路を形成しないこと							
		コロイドの移動抑制	放射性核種コロイドの移動及び天然コロイドの侵入を防止すること							
			人間侵入の防止							
		人間侵入の防止	容易な侵入を防止すること							

は、設計された仕様をもとに性能評価を行い、必要に応じて設計上考慮すべき機能として位置づけることができる。

施設設計フローに基づく検討の結果として得られる埋設施設の構成要素の代表的な組み合わせの例を Fig.4 に示す。ここで示した例は、放射能の漏出を最も抑制しようと現段階で想定している施設形態である。よって、対象廃棄物の放射能が比較的小さい場合や天然バリア特性がよい場合には合理性や頑健性を考慮しつつ最適な組み合わせや仕様を検討する余地がある。

4.3 各構成要素に関する設計例

Table 3 の機能表から構成要素の仕様を設定するまでの流れについて、廃棄体とベントナイト層を例に示す。

4.3.1 廃棄体の設計例

廃棄体は、操業中の放射線障害防止等のために、廃棄物を処分容器に充てん、密閉したものである。廃棄体の設計において、廃棄体単独として考慮する機能、設計上考慮すべき事項および、設計での対応を Table 4 に示す。

廃棄体の設計において、廃棄体単独として安全性の観点から考慮する機能としては、

- ・ 操業空間の確保、自重・外力に対する安全性確保として、廃棄体の定置された場合に受ける荷重に耐える強度を有すること
- ・ 汚染拡大防止として、操業時における放射性物質の容器外への漏洩を防止すること
- ・ 放射線被ばくに対する安全性確保として、廃棄体は定置作業時での安全性を高めるため、十分な遮蔽機能を有し表面線量率を低下させること

があげられる。これに対応する設計上考慮すべき事項としては、「短期的に受ける荷重」、「処分容器の密閉性」、「必

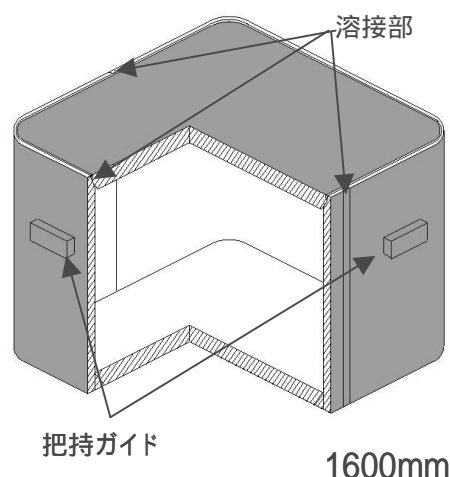


Fig.5 Example of a rectangular stainless steel container for the sub-surface disposal

要な処分容器肉厚の確保」があげられ、「適切な構造計算」、「適切な蓋閉め方法の選定」、「適切な肉厚設計」などの対応が考えられる。

廃棄体の設計においては、さらに、廃棄体搬出、受け入れ時の「表面の除染性およびその確認性」や、「輸送、定置の効率性」、「加工性」、「経済性」などについても考慮した上で仕様を設定する。

なお、現段階において考えられる廃棄体仕様例を Fig.5 に示す。ここで示す廃棄体は、肉厚が約 5cm の溶接構造用圧延鋼材 (JIS G3106) からなる、一辺 1.6m の正六面体の容器で、重量は約 32 トンである。

4.3.2 ベントナイト層の設計例

ベントナイト層は、埋設施設を通過する地下水流量を抑制するため、コンクリートピットまたは高緻密コンクリー

Table 4 Example of design requirements for the metallic container

埋設施設が有すべき機能		設計上考慮すべき事項	設計での対応
機能	機能の内容		
操業空間の確保、自重・外力に対する安全性確保	廃棄体は定置された場合に受ける荷重に耐える強度を有すること	短期的に受ける荷重	適切な構造計算
汚染拡大防止	操業時における放射性物質の容器外への漏洩を防止すること	処分容器の密閉性	適切な蓋閉め方法の選定
放射線被ばくに対する安全性確保	廃棄体は定置作業時での安全性を高めるため、十分な遮蔽機能を有し表面線量率を低下させること	必要な処分容器肉厚の確保	適切な肉厚設計

Table 5 Example of design requirements for the bentonite layer

埋設施設が有すべき機能		設計上考慮すべき事項	設計での対応
機能	機能の内容		
操業空間の確保、自重・外力に対する安全確保	確実な建設、操業が行われる空間、力学的安定性が確保されること	外力に対する支持力、圧密	適切な密度、厚さ
地下水移動の抑制	埋設施設を通過する地下水流量を抑制すること	透水性	適切な密度、厚さ

ト層の外側に設置されるベントナイト系材料を用いた人工バリアである。Table 3 に基づき、抽出したベントナイト層単独として考慮する機能に対し、設計上考慮すべき事項と、それに対する設計での対応を整理した表を Table 5 に示す。

ベントナイト層の設計において、ベントナイト層単独として考慮する機能としては、

- ・ 操業空間の確保、自重・外力に対する安全性確保として、確実な建設、操業が行われる空間、力学的安定性が確保されていること
- ・ 地下水移動の抑制として、埋施設を通過する地下水流量を抑制すること

が考えられる。それに対応する設計上考慮すべき事項としては、それぞれ「外力に対する支持力、圧密」、「透水性」があげられ、それを満たすためには、設計上、適切な密度と厚さを設定することで対応できる。

ベントナイト層の設計フロー例を Fig.6 に示す。前述した設計上考慮すべき事項の整理を行い、ベントナイト層の密度、厚さを設定することを念頭において「ベントナイト層の透水性能等の観点からの検討」、「建設・操業段階における支持力、圧密の検討」を行い、ベントナイト単独として考慮する機能を満足する材料仕様を設定する。その設定した仕様をもとに、埋戻し後の力学的安定性、化学的安定性などの性能評価を行い、機能が満足されているか確認し、問題のある場合は、設計に反映する。なお、4.1 でも示したとおり、設定した仕様が施工可能であることが重要である。

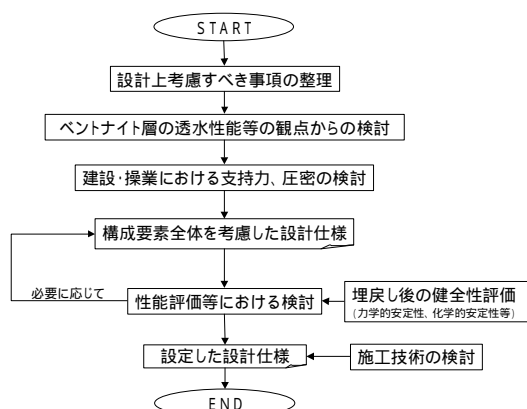


Fig.6 Example of design flowchart for the bentonite layer

以下に、Fig.6 で示した設計フローにおける「建設・操業における支持力、圧密の検討」の検討手順を示す。まず、Fig.7 に示す埋施設の建設・操業順序に基づき、各過程でベントナイト層が受ける影響要因を抽出した。ベントナイト層への影響としては、Fig.7 の建設・操業順序の工程 2,3 においては、「コンクリートピット、高緻密コンクリート層の建設時の荷重」を考慮する必要がある。また、工程 4,5 においては「廃棄体定置および充填材施工時の荷重」を、工程 6 では「上部ピットおよび埋戻しなどの荷重」を考慮する必要があることがわかる。設計においては、これらの荷重を考慮して、適切な仕様（密度、厚さ）を設定することが重要となる。

ベントナイト層の施工技術の一例を Fig.8 に示す。ベントナイト層の施工にあたっては、所定の密度および厚さを達

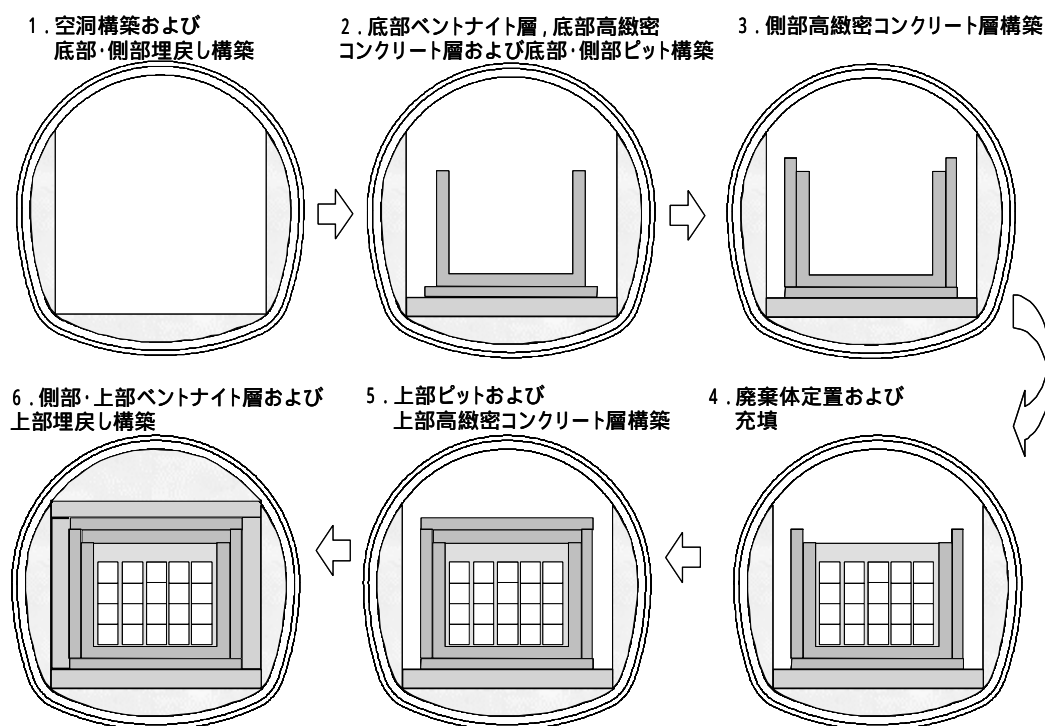


Fig.7 Example of construction steps of the disposal facility

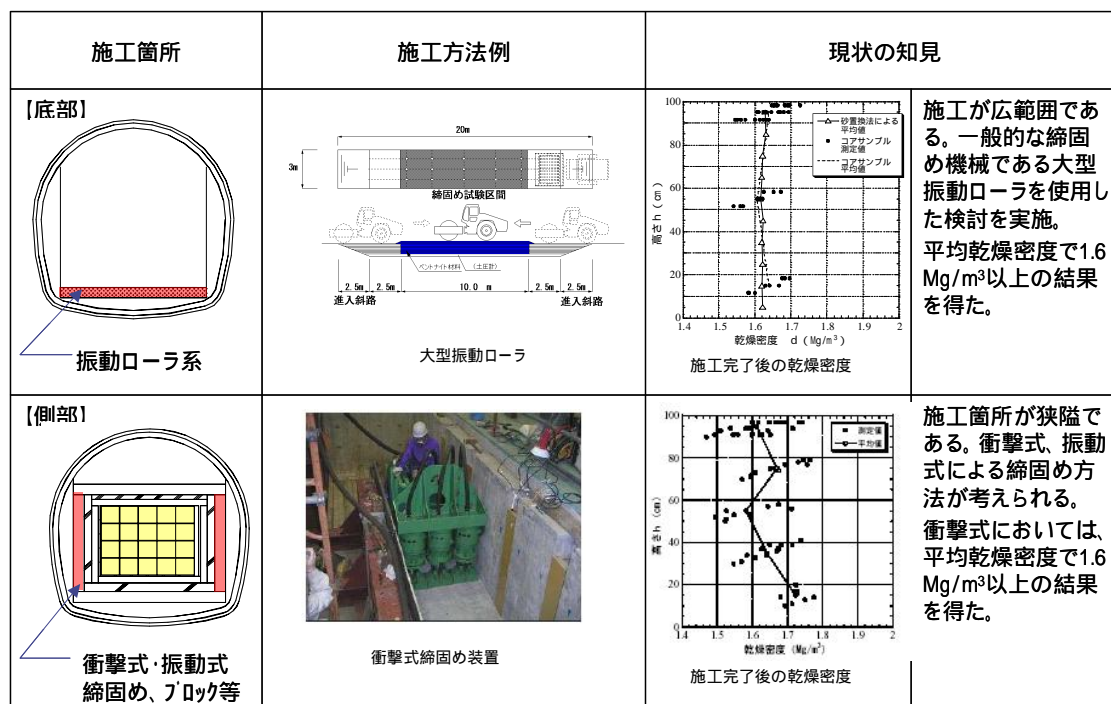


Fig.8 Example of available construction technique of bentonite layer

成するために、「施工箇所」、「施工方法」などを考慮する必要がある。底部については、施工範囲が広いことから、作業の効率性などを考慮して、土木施工で一般的に用いられている締固め機械である大型振動ローラを使用した試

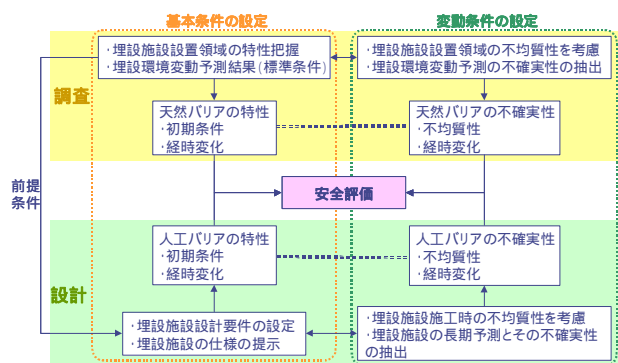


Fig.9 Relationship among geological environment research, facility designing, safety assessment

験を実施しており、その結果としてベントナイト乾燥密度で平均 1.6Mg/m³以上の密度に締め固められることを確認している。一方、側部については、コンクリートピット及び高緻密コンクリート層や埋め戻し材に隣接した狭隘な箇所施工を進めることを念頭に、一例として、衝撃式や振動式による締固め方法を検討している。Fig.8 には衝撃式による試験結果を示しており、ベントナイト乾燥密度で平均 1.6Mg/m³以上という結果を得ている。

5 安全評価の考え方

5.1 安全評価の基本的な考え方

安全評価の目的のひとつは、事業終了後の長期に及び安全性が確保しうような工学的な対策がとられているかを判断する上での材料を提供することである。安全評価と地質環境調査、設計の関係を模式的にあらわした図を Fig.9 に示す。この図に示すように、地質環境調査や施設設計により得られた情報を適切に安全評価に反映することが重要である。地質調査においては、埋設施設設置領域の地質環境の不均質性や、環境変動特性予測の信頼性を検討した上で標準的な地質環境条件が設定されるが、その過程の妥当性を示すとともに、その過程で抽出された不確実性を適切に評価に取り込むことが重要である。設計に際しても同様であり、基本的な人工バリア条件を設定する過程と、その過程で抽出された施工時の不均質性や、埋設施設の特長の長期予測に含まれる不確実性の取り扱いが重要である。不確実性の取り扱いを安全評価において表現する方法としては、「リスク論的な考え方の適用」が考えられる[4]。「リスク論的な考え方」は大きく統合アプローチと、線量/確率分解アプローチに分けられるが[7]、原子力安全委員会より、線量/確率分解アプローチの一例として、シナリオを発生の可能性に応じていくつかの線量基準を使い分ける段階的線量基準の有効性が議論されている[8]。すなわち、調査や設計に際して抽出された不確実性の程度に応じて、「発生の可能性の高いシナリオ」、「発生の可能性の低いシナリオ」等の複数シナリオに分類する方法である。

「発生の可能性の高いシナリオ」は、「3 安全確保の基本的な考え方」で示した防護対策が適切に採られていることを前提として、天然バリアや人工バリアが想定される機

能を発揮することができるとして行う評価である。この評価を行うにあたっては、防護対策の適切性を示すことが重要であり、そのために標準的な地質環境条件を設定する過程や、人工バリア機能を決定するに至る過程を追跡性と透明性をもって整理することが重要である。

一方、「発生の可能性の低いシナリオ」は、地質環境調査と施設設計の過程で抽出された不確実性の幅を表現するための評価である。このようなシナリオとしては、様々な想定が可能であるが、地質環境の変動や、人工バリアの劣化など、想定しうる不確実性に対する処分システムの頑健性を評価する上では、評価に関連する事象の相関関係に十分に配慮した上で評価を実施することが重要である。

5.2 安全評価の進め方

5.2.1 評価フロー

5.1 で示したように、不確実性の取り扱いに関する過程を透明性と追跡性を確保しつつ整理した上で評価を行うことを目的に Fig.10 に示すような評価フローを構築した。

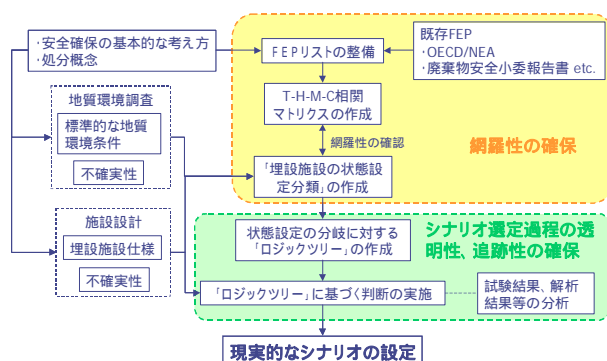


Fig.10 Example flowchart for the development of the likely scenario

まず、基本的な処分概念や埋設施設を念頭に、既存 FEP を参照し、余裕深度処分概念に関する FEP を抽出・整理する。次に、FEP と別途、候補地点の地質環境調査で明らかになった地質環境条件、施設設計により提示される埋設施設仕様および、それらの過程で抽出された不確実性を加味し、将来的に考えられる埋設施設の状態を網羅的に抽出する。シナリオの構築に際しては埋設施設の状態が経時的にどのように変遷するか明らかにすることが基本である。埋設施設のある時点における埋設施設の状態の設定は、埋設施設の状態を想定する上で重要な分岐点を抽出し、その分岐に対する確からしさを整理することにより可能となる。確からしさの想定においては、試験結果や解析結果、ナチュラアナログ等の知見を考慮し、埋設施設の各構成要素の特性が変化する速さや程度を予測する。なお、予測の過程で、どのような知見を用いてどのような判断を行ったかについては、ロジックツリーを用いて、追跡性と透明性を確保しうるように整理する。以上のような検討をとりまとめることにより、ある時点における埋設施設の状態を確からしさに応じた評価シナリオとして提示する。

5.2.2 FEP リストの整備及び T-H-M-C 相関マトリックスの作成

余裕深度処分における FEP リストは、処分システムの安全性を評価する上で重要な特性、事象、プロセスを網羅的に抽出することを目的とし、国際的な協力により作成された「OECD/NEA(1992)の FEP リスト」[9]、「廃棄物安全小委員会報告書の FEP リスト」[10]、及び国内外の放射性廃棄物処分場及び放射性廃棄物処分研究の安全評価シナリオ例（例えば、[11]、[12]、[13]）などを参考として作成する。前出の FEP リストには、余裕深度処分には明らかに関係しない FEP や、サイト条件、廃棄物特性、人工バリアに対して影響や発生の確率が小さい FEP が含まれて

Table 6 An example of T-H-M-C coupling matrix

		ベントナイト層		高緻密コンクリート層		
ベントナイト層	水理	None	LI	LI	None	LI
	変形に伴う密度変化による水理影響	力学	膨潤力によるモンモリロナイトの移動(均質化)	None	膨潤力によるひび割れ影響	None
	化学的変質による水理影響	化学と力学の連成影響	化学	None	None	ベントナイトによるセメントの溶脱影響
高緻密コンクリート層	LI	None	LI	水理	None	LI
	None	溶脱に伴う剛性低下によるベントナイトの変形影響	None	ひび割れによる透水係数と拡散係数の影響	力学	ひび割れによるセメントの溶脱影響
	None	None	高 pH による化学的変質影響	溶脱による透水係数と拡散係数の影響	溶脱による剛性低下影響	化学

いるため、「余裕深度処分概念」や「安全確保の考え方」に基づき、FEPのスクリーニングを実施する。次に、処分システムの安全性を評価する上で重要な特性、事象、プロセスとその関連性をFEPリストとの連続性を維持して網羅的に整理し、安全上重要な事象を選定することを目的とし、SKB(2001) [13]を参考にして、FEPを整理・統合し、これらを関連付けた「温度・水理・力学・化学」の関連マトリクス(以下「T-H-M-C 関連マトリクス」)を作成する。なお、余裕深度処分の対象廃棄物は低発熱性であることから温度影響は検討対象から除外した。Table 6にT-H-M-C 関連マトリクスの例を示す。Table 6に示すT-H-M-C 関連マトリクス例は時計回りに潜在的な影響が示されており、例えば、「ベントナイトの力学」が「高緻密コンクリートの力学」に及ぼす影響として「ベントナイトの膨潤力による高緻密コンクリートのひび割れ」が考慮されている(赤枠部)。また、「高緻密コンクリートの力学」が「ベントナイトの力学」に及ぼす影響として、「高緻密コンクリートの溶脱に伴う剛性低下によるベントナイト層の変形」が考慮されている(青枠部)。

5.2.3 埋設施設の状態分類の設定

事業終了後の遠い将来における埋設施設の状態を想定する際の、重要なシナリオ上の分岐点を明確化することを目的に、埋設施設の状態分類の設定を行った。まず、地質環境条件や埋設施設仕様を念頭に、T-H-M-C 関連マトリクスで網羅性を確認しつつ、埋設施設の状態に影響を与える因子を抽出する。続いて、埋設施設の構成要素間の状態の整合性に十分配慮し、埋設施設の状態を網羅的に抽出し、分類・整理する。

埋設施設の飽和後を想定して作成した状態設定分類(例)をTable 7に示す。Table 7に示す状態設定の分類(例)において、岩盤とEDZに関しては、EDZの緩み領域が進展しないことを処分システムの状態設定上着目すべき機能とし、分岐の判断指標は緩み領域の進展に影響する処分空洞の内空変位量とした。埋戻材と支保工については、低透水性及び処分空洞とベントナイトの形状維持を状態設定上着目すべき機能とし、貫通ひび割れの発生を低透水性の分岐、溶脱後を含む材料の剛性を形状維持の分岐とした。ベントナイト層と高緻密コンクリート層については、それぞれ、低透水性と低透水性及び低拡散性を状態設定上着目すべき機能としており、それぞれ、密度低下と化学的変質、ひび割れと溶脱を分岐としている。廃棄体層は、処分システムの形状維持を状態設定上着目すべき機能とし、腐食に伴う剛性低下と空隙充填を分岐とした。

5.2.4 状態設定の分類に対するロジックツリーの作成と判断の実施

(1) ロジックツリーの活用方法と検討プロセス

本検討においては、シナリオ設定における透明性と追跡性を確保することを目的とし、ロジックツリーを活用することとした。本検討は、埋設施設の状態を左右する分岐が生じる要因を整理したものであり、シナリオの設定の過程で、それらの要因をどのように取り扱ったかというシナリオ設定における判断の過程を明示するものである。ロジックツリーの作成においては、5.3で抽出した状態設定上の機能毎に埋設施設の状態の分岐が生じる要因を抽出し、それらを判断する上での流れを念頭に整理する。要因の抽出に際しては、FEPリストやT-H-M-C 関連マトリクスを

Table 7 An example of disposal system condition classification

構成要素	状態設定上、 着目すべき機能	施設性能 ← 高 低 →		
EDZ・岩盤	形状安定(力学)	維持	低下 内空変位	喪失 顕著な内空変位
埋戻材・支保工	低透水性(水理)	維持	貫通ひび割れなし	喪失 貫通ひび割れあり
	力学安定(力学)	維持	低下	喪失
ベントナイト層	低透水性(水理)	維持	密度維持 緩慢な変質	低下 密度低下 変質影響の顕在化
	低透水性(水理)	維持	貫通ひび割れなし	喪失 貫通ひび割れあり
高緻密コンクリート層	低透水性(水理)	維持	貫通ひび割れなし	喪失 貫通ひび割れあり
	低拡散性(水理)	維持	ひび割れ発生: 少 溶脱の程度: 小	低下 ひび割れ発生: 多 溶脱の程度: 大
廃棄体層・RCピット	力学安定(力学)	維持	低下	喪失

参考とする。また、ロジックツリーの各分岐に対する判断を行う上で必要な試験結果、解析結果、ナチュラルアナログや調査結果等知見を収集、整理するとともに、シナリオ設定の過程でそれらをどのように取り扱ったかについて別途記録する。

(2) ロジックツリーによる判断事例

ロジックツリーの活用方法を、ベントナイト層の低透水性について検討した事例に基づき示す。T-H-M-C 相関マトリックスを参考にすると、ベントナイト層における種々の変化は、地下水の浸入を起点として、膨潤等の事象に対応する力学的な影響と地下水成分との化学反応に起因する化学的な影響が主要な要因と考えられる。そこで、T-H-M-C 相関マトリックスによる検討結果を踏まえ、ベントナイト層の透水性を支配する主要な要因として『モンモリロナイト密度の変化』、『ベントナイト特性の変化』及び『短絡経路の形成』を抽出した。また、抽出したそれぞれの要因について、さらにその要因に変化を生じるものを抽出・整理した。たとえば『モンモリロナイト密度の変化』を生じる要因としては、「モンモリロナイトの存在量」、「間隙率の変化」、「モンモリロナイトの空間的な均質化」及び「ベントナイト層厚さの変化」を抽出した。このような検討を他の要因に関しても実施し、ベントナイト層の透水性に対するロジックツリーを構築した。その例を Fig.11 に示す。

Fig.11 に示したロジックツリーに対し、判断に必要な試験結果、解析結果、ナチュラルアナログや調査結果等の知見の整理に基づき、ベントナイト層の透水性に対して影響を生じる各要因に関する取り扱いの判断（「発生の可能性が高いもの」とそうでないもの）を実施した。各要因に関する取り扱いの判断においては、対象とする期間に応じて整理することが適切な状況を想定する上では有効であ

ると思われることから、期間に応じて取り扱いの判断を実施した。Fig.11 の太線部分は、1,000～10,000 年程度の評価期間を対象として、発生の可能性が高いと判断した要因である。

判断事例においては、『モンモリロナイト密度の変化』の原因となる「初期存在量の不均質性」及び『短絡経路の形成』の原因となる「施工不良」については、処分施設建設・操業についての品質保証により通常の状態では想定されないものと判断した。また、『ベントナイト特性の変化』の原因となる「周辺地下水の塩水化」については、処分施設は降水を起源とする地下水域に設置され、1 万年程度の間は大きく環境は変動しないと仮定し、この要因も通常の状態では想定されないものと判断した。さらに、『短絡経路の形成』の原因となる「飽和に伴う膨潤により均質化しない」についても既存のベントナイトブロックを用いた膨潤試験より均質化が確認されており[13]、ブロックの隙間等は存続しないと考えられることから、この要因についても通常の状態では想定されないものと判断した。

(3) ロジックツリーの評価結果に基づくパラメータ設定例

5.2.4(2)で実施したロジックツリーによるベントナイト層の透水性に対する検討結果より、通常の状態では想定される影響要因を考慮した場合の長期的な透水性に関する評価を実施した。評価に際しては、電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005)[12]で用いられている解析モデルを参考とした。

解析条件としては、ベントナイト層としてベントナイト配合率 70% の材料を想定し、セメント系材料としては普通ポルトランドセメントを想定した。解析体系としては、処分施設断面を 1 次元体系でモデル化し、ベントナイト層に関しては岩盤に近い側から順に第 1 層、第 2 層、...と分割し、高緻密コンクリート層に接触している部分を第 7 層と

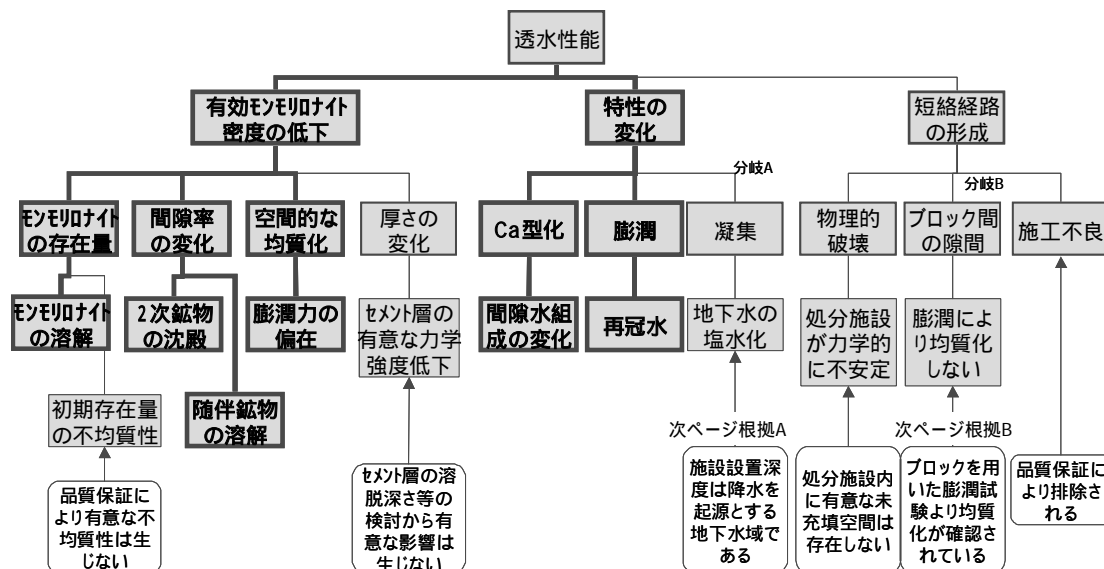


Fig.11 Analyzed logic tree for the long term hydraulic property of the buffer

して実施した。また、ベントナイト層の透水性能の評価結果としては、7層に分割した各部分の透水係数を調和平均した値をベントナイト層全体の等価透水係数と定義し評価指標とした。

ベントナイト層の透水性能に関する評価結果の一例を Fig.12 に示す。セメント系材料に接している第1層及び第7層においてはモンモリロナイトの溶解及び随伴鉱物として存在するケイ酸塩鉱物の溶解が進展し、透水係数が増加し低透水性の特性を失うが、中央部においては変質が少ないため、低透水性を維持している。そのため、ベントナイト層全体の等価透水係数としては、中央部の低透水性に支配された 10^{-11} m/s 程度の低透水性が維持されている。以上の検討により、発生の可能性が高いシナリオのパラメ

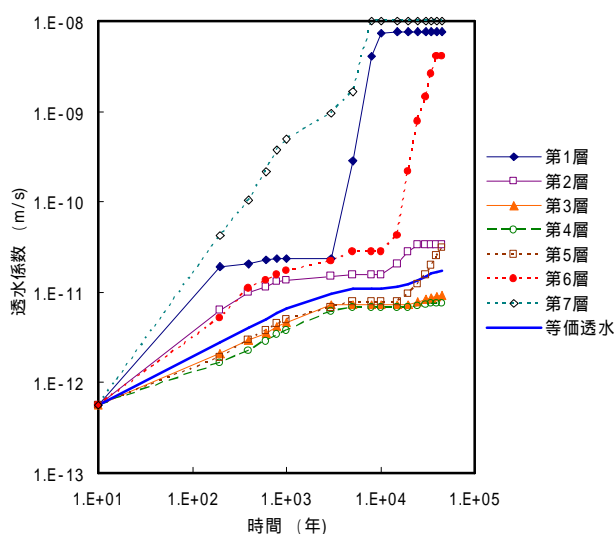


Fig.12 Calculated hydraulic conductivity of bentonite

ータとして、1 万年後のベントナイト層の透水係数を 10^{-11} m/s と設定できる。

5.2.5 発生の可能性の高いシナリオの設定

5.2.3 で作成したシナリオの状態設定分類の各分岐に対し、5.2.4(2)のロジックツリーによる検討によって判断を実施した結果の一例を Table 8 に示す。太線で示す施設性能の組み合わせがこの時点での想定を表す。このような埋設施設の状態設定を代表的な時間毎に作成し、それをつなげるにより、ひとつのシナリオを設定することができる。以上の検討過程を経た上で設定される発生の可能性の高いシナリオのイメージを Fig.13 に示す。

施工後数百年は、設計仕様どおりに施工された人工バリアは再冠水過程を経て飽和に至る期間と考えられる。この過程においては、覆工と支保工の溶脱と腐食が開始する一方で、ベントナイトが飽和し低透水性を発揮する。また、覆工と支保工を経てベントナイトに侵入した Ca イオンや、

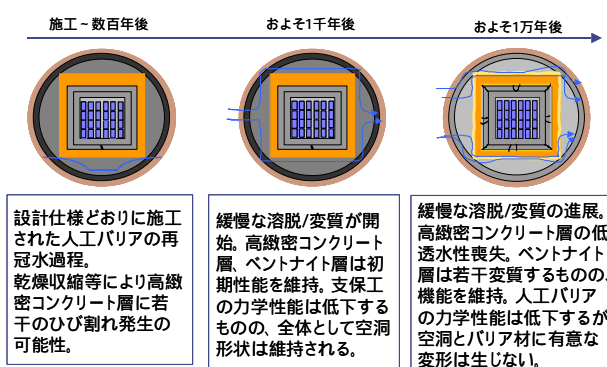


Fig.13 The current assumption of likely scenario (after saturation)

Table 8 An example of disposal system condition (several thousands years)

構成要素	状態設定上、着目すべき機能	高	施設性能	低
EDZ・岩盤	形状安定(力学)	維持	低下 内空変位	喪失 顕著な内空変位
埋戻材・支保工	低透水性(水理)	維持 貫通ひび割れなし	低下	喪失 貫通ひび割れあり
	力学安定(力学)	維持	低下	喪失
ベントナイト層	低透水性(水理)	維持 密度維持 緩慢な変質	低下 密度低下 変質影響の顕在化	喪失 破断
	低拡散性(水理)	維持 貫通ひび割れなし	低下	喪失 貫通ひび割れあり
高緻密コンクリート層	低透水性(水理)	維持 貫通ひび割れなし	低下	喪失 貫通ひび割れあり
	低拡散性(水理)	維持 ひび割れ発生: 少 溶脱の程度: 小	低下 ひび割れ発生: 多 溶脱の程度: 大	喪失 破断
廃棄体層・RCピット	力学安定(力学)	維持	低下	喪失

高アルカリ溶液の影響に伴い、ベントナイトの緩慢な化学的変質が始まるかもしれない。高緻密コンクリート層は、配合・施工・操業管理によりひび割れ発生が抑制されるが、若干の初期ひび割れが存在し、緩慢な溶脱が開始すると想定される。

施工後数千年では、覆工・支保工及び埋戻材の溶脱と腐食が進展すると考えられる。ベントナイトは緩慢な化学的変質が進展するが、所要の低透水性を維持すると考えられる。拡散支配場にある高緻密コンクリート層は非常に緩慢な溶脱と経年ひび割れの進展が予想されるものの所要の低拡散性能を維持すると想定した。

施工後1万年程度では、覆工・支保工及び埋戻材の大部分で溶脱と腐食が生じると想定している。しかし、溶脱後もセメント系材料が一定の剛性を維持すること、二次鋳物が空隙を閉塞することが期待できることなどから、処分空洞の形状は維持されと考えられる。ベントナイト層は緩慢な化学的変質が進行するものの Fig.12 で示したように所要の低透水性は維持されるものと考えられる。高緻密コンクリート層は非常に緩慢な溶脱の進展とベントナイト膨潤圧等による経年ひび割れの進展と腐食膨張により貫通ひび割れが発生し、低透水性は喪失すると想定しているものの、ベントナイト層が周囲を覆っていることからその内側は拡散支配となっており、低拡散性は機能として期待できるものと考えている。また、廃棄体層は鋼製容器の腐食により剛性が低下するものの、処分空洞と人工バリアの性能に有意な影響を及ぼす変形は生じないものと想定した。

5.3 発生の可能性の高いシナリオに対する線量試算

5.2.5 で示した発生の可能性の高いシナリオについて、
2.で示した廃棄物発生量と放射能濃度を前提条件として

線量の試算を実施した。

5.3.1 線量試算の前提

処分候補地点に、Fig.4 に示すトンネル施設を処分物量に応じた規模で設置することを想定する。処分場の規模がある程度大きい場合には、設置場所の地下水特性に応じて、トンネルごとに地下水パラメータが異なること等が予想されるが、本試算ではそのような場所に応じた違いは考慮せず、すべての施設に対し同一のパラメータを与えることとした。

評価モデル及び評価パラメータは、Fig.13 に示したような経時的な施設状態の変化に応じて設定することも想定されるが、時間毎にパラメータやモデルを切り替えた核種移行評価方法は既存の検討例が少ないことから、ここではおよそ1万年後の状態が、埋め戻し直後より生じ、その状態が評価期間中継続するとの前提のもと設定することとした。

5.3.2 評価モデル及びパラメータ

線量試算においては、廃棄体及び周囲の充てん材からなる廃棄体層、高緻密コンクリート層、ベントナイト層の3層の人工バリア及び天然バリアを、期待するバリアとしてモデル化した。人工バリアのモデル概念を Fig.14 に、代表的な評価パラメータとその設定根拠を Table 9 に示す。

現評価においては、閉鎖後瞬時に人工バリア内の間隙は地下水で飽和されると仮定しており、評価モデル上は廃棄体層を瞬時分配平衡領域として取り扱い、この領域に存在する充填材（セメント系材料を想定）に対し、分配係数で表される収着を見込んだ。また、放射化金属については、材質や形状を考慮した溶出率を設定した。なお、廃棄体容器の閉じ込め機能は本試算では無視している。

高緻密コンクリート層は、ベントナイト層接触面における非常に緩慢な溶脱の進展と、ベントナイト膨潤圧等によ

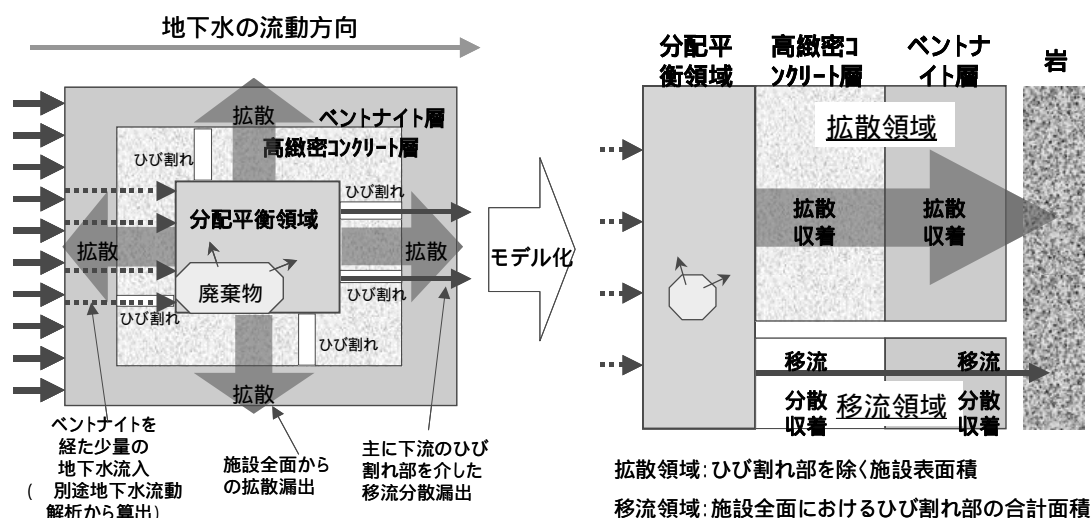


Fig.14 Concept of the EBS assessment model for likely scenario

る経年ひび割れの進展、及び鉄筋の腐食膨張による貫通ひび割れの発生が考えられる。したがって、モデル上は全表面積の一定割合がひび割れ及びひび割れに伴う劣化部になると想定し、ベントナイト層を介して施設に浸入した地下水はこの領域（以下、移流領域）から卓越して流出する移流分散による移行と分子拡散による移行は、廃棄体層の濃度を介して連成した。

コンクリートピットは、施工直後においては十分に低透水性、低拡散性をもった部材と考えられるが、長期的な鉄筋の腐食に伴うひび割れの評価に関する不確実性が大きいことから、本試算では核種遅延機能を期待していない。ベントナイト層は、核種移行の観点からほぼ均一な媒体と考えられるため、移流領域、拡散領域それぞれについて均一な地下水流動が存在するものとした。

施設浸入水量は、ベントナイト層の透水係数及び評価対象地点の地下水流況を参考とした3次元地下水流動解析により算出した。

天然バリアに漏出した核種は、1次元移流分散方程式に従い生活圏へ移行する。地下水流速及び生活圏までの移行距離は、評価対象地点の地下水流況を参考に設定した。なお、被ばく経路としては、流出域における水産物摂取による内部被ばくを想定し線量を算出した。

5.3.3 モデル式

試算に用いたモデル式を以下に示す。崩壊項は省略した。

$$\varepsilon_w \cdot R_{fw} \cdot V_w \frac{dC_w}{dt} = S \cdot \text{Deb} \frac{\partial C_b}{\partial x} \bigg|_{x=0} - Q \cdot C_w + S_a \cdot \text{Dea} \frac{\partial C_a}{\partial y} \bigg|_{y=0}$$

廃棄体層核種濃度
拡散領域拡散分
移流領域
移流領域分散分

(1)

$$\varepsilon_b \cdot R_{fb} \frac{\partial C_b}{\partial t} = \text{Deb} \frac{\partial^2 C_b}{\partial x^2}$$

拡散領域
拡散領域拡散分

(2)

$$\varepsilon_a \cdot R_{fa} \frac{\partial C_a}{\partial t} = \text{Dea} \frac{\partial^2 C_a}{\partial y^2} + \frac{Q}{S_a} \frac{\partial C_a}{\partial y}$$

移流領域
移流領域
移流領域

核種濃度
分散分
移流分

(3)

Cw : 廃棄体層内間隙水中の核種濃度 (Bq/m³)

Ca : 移流領域の間隙水中の核種濃度 (Bq/m³)

Cb : 拡散領域の間隙水中の核種濃度 (Bq/m³)

Dea : 移流領域の実効分散係数 (m²/s)

Deb : 拡散領域の実効拡散係数 (m²/s)

Vw : 廃棄体層の体積 (m³)

w : 廃棄体層中の間隙率 (-)

Rfw : 廃棄体層中の遅延係数 (-)

a : 移流領域の間隙率 (-)

b : 拡散領域の間隙率 (-)

Rfa : 移流領域の遅延係数 (-)

Rfb : 拡散領域の遅延係数 (-)

Q : ひび割れ等を経由した施設からの地下水流出流量 (m³/s)

S : 拡散領域の断面積 (m²)

Sa : 移流領域の断面積 (m²)

ここで、(1)式は廃棄体層内の間隙水中濃度を均一として、拡散による漏出（右辺第1項）と移流による速い漏出（右辺第2項及び第3項）が考慮され、さらに健全部（拡散領域）の拡散については、(2)式で表現される。また、ひび割れ等を経由した速い移行（移流領域）による漏出については、(3)式で表現される。

Table 9 Main parameters for likely scenario

対象バリア	パラメータ	設定値	設定理由	
放射化廃棄物	溶出率 (1/y)	1E-5 ~ 3E-4	廃棄物種類ごとに、還元条件における腐食速度、比表面積から設定。長期的に仮に酸性化地下水が浸入した場合でも、廃棄物周辺の還元状態（低酸素状態）は保たれると予測	
分配平衡領域（セメント系材料）	透水係数 (m/s)	1.00E-05	廃棄体容器（金属）との界面に高透水性が生じる可能性が否定できないと仮定	
	C-14分配係数 (ml/g)	1	放射化金属から溶出する想定化学形態のFAセメント実測分配係数から設定	
高緻密コンクリート層 (0.5m)	透水係数(m/s)	1.00E-05	施工後から再冠水までの乾燥収縮や長期の腐食膨張等による貫通ひび割れを想定	
	実効拡散係数(m ² /s)	健全部 (99%)	1.00E-12	FAモルタルの拡散係数試験結果からの予測値
		亀裂部 (1%)	2.00E-09	自由水中のHTO拡散係数を設定。亀裂割合は乾燥収縮や長期の腐食膨張等による貫通ひび割れから想定
	C-14分配係数 (ml/g)	1	放射化金属から溶出する想定化学形態のFAセメント実測分配係数から設定	
ベントナイト層 (1m)	透水係数 (m/s)	1.00E-11	乾燥密度1.6g/cm ³ のベントナイト系材料の劣化解析から、1万年程度の透水係数(1E-11m/s)を算出	
	実効拡散係数(m ² /s)	2.00E-10	HTO拡散係数の値を代表して設定	
天然バリア	地下水流速(m/y)	0.1	調査により得られた候補地点の調査データから設定	
	移行距離 (m)	500	調査により得られた候補地点の地下水流況を参考に仮定	
	C-14分配係数 (ml/g)	0.3	候補地点の実岩データ実測分配係数から設定	
生活圏	評価水系の希釈水量(m ³ /y)	3.40E+07	既設地点の申請書より	
	その他生活圏パラメータ等	-	サイト依存性のあるパラメータは六ヶ所1・2号施設申請値、その他については新発見・新勧告ベース	

低拡散バリア層、ベントナイトともに上記(1)～(3)式を用いるが、ベントナイト外側(ベントナイトと天然バリアの境界)を濃度ゼロで固定し、低拡散バリア層とベントナイトの境界の濃度を等しくすることにより、両バリアを連成した。

天然バリアと人工バリアの結合については、両者を連成するのではなく、人工バリアの外側境界の濃度を保守的に0として、人工バリアからの核種漏出量を求め、それを天然バリア(1次元)の生成項とした。

$$\varepsilon g \cdot R_{fg} \frac{\partial C_g}{\partial t} = \varepsilon g \cdot D_g \frac{\partial^2 C_g}{\partial z^2} - \varepsilon g \cdot V_g \frac{\partial C_g}{\partial z} + \frac{R(t,i)}{L \cdot S_g} \quad \text{-----(4)}$$

C_g : 天然バリア間隙水中の核種濃度 (Bq/m³)

D_g : 天然バリア中の分散係数 (m²/s)

g : 天然バリア中の間隙率 (-)

R_{fg} : 天然バリア中の遅延係数 (-)

V_g : 天然バリア中の地下水流速 (m/y)

L : 核種流入域の長さ (-)

S_g : 天然バリアの流路断面積 (m²)

$R(t,i)$: 人工バリアからの核種漏出量 (Bq/y)

5.3.4 評価結果

線量試算結果は Fig.15 に示すように、10 μSv/y を下回る結果となった。しかし、本試算結果は、5.3.2 に示すように、いくつかの仮定を含んでいる。今後、これらの仮定の妥当性を吟味し、本検討で示した方法論に従い各種設定の最適化検討を実施していく予定である。

6 まとめ

本論では余裕深度処分に関する検討状況についてまとめた。主な内容を下記に示す。

余裕深度処分対象となる廃棄物の全体物量は約 6 万 m³ で、再処理廃棄物の方が核種濃度が高い傾向にある。発電所廃棄物の一例である放射化金属の放射能濃度の経時変化をみると、発生から数十年程度は浅地中処分対象廃棄

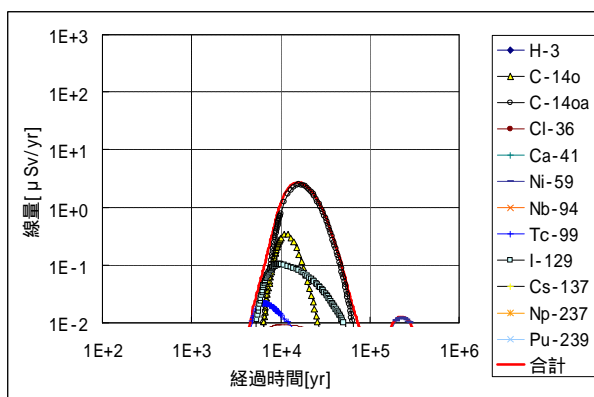


Fig.15 Calculated Dose for likely scenario (Ingestion of aquatic products)

物と同様に Co-60 が支配的であり、長期的には Ni-59、C-14、Nb-94 が支配的になる。

地下水移行シナリオに対する防護対策としては、BAT の概念に基づくバリアを適切に採用することが重要である。また、気候・海水準変動や隆起、侵食の影響に対しては、対象廃棄物の特性や処分深度を考慮した上で評価方法を検討することが重要である。

施設設計においては、建設・操業から事業終了後の安全確保を目的として BAT を適用したバリアシステムを検討するための設計フローを構築した。

安全評価を行うにあたっては、標準的な地質環境条件を設定する過程や、人工バリア機能を決定するに至る過程を追跡性と透明性をもって整理することが重要である。そのため、「T-H-M-C 相関マトリックス」、「埋設施設の状態分類」、「ロジックツリー」を組み合わせたフローを提案した。

謝辞

本検討をまとめる上では、電力中央研究所の杉山大輔氏、窪泰浩氏、日揮(株)の中居邦浩氏、(株)大林組の佐藤立氏、三菱マテリアル(株)の高瀬敏郎氏、東電設計(株)の谷智之氏、関西電力(株)の樋口奈津子氏にご助力いただいた。また、バックエンド夏期セミナーでは座長を務めていただいた日本原子力研究開発機構の梅木博之氏をはじめ、東北大学の柊山修教授、原子力発電環境整備機構の北山一美氏など多くの方からご意見をいただいた。本論をまとめなおすにあたっては、それらの貴重なご意見を参考にさせていただいた。

参考文献

- [1] 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令。
- [2] 原子力委員会：現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方について (1998)。
- [3] 原子力安全委員会：低レベル放射性固体廃棄物の陸地処分の安全規制に関する基準値について (第3次中間報告) (2000)。
- [4] 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)。
- [5] 石田裕樹、守友常雄、佐々木泰：余裕深度処分の成立性確認に向けた地質環境調査について、原子力バックエンド研究 13 (2006)。
- [6] IAEA: Disposal of Radioactive Waste. DS354. (2006)。
- [7] ICRP: Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste (1999)。
- [8] 原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会 低レベル放射性廃棄物埋設分科会：海外の安全基準とシナリオ設定の考え方、埋分第5-1号 (2006)。

- [9] OECD/NEA : Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste (1992) .
- [10] 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報告書 - 高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係る基盤確保に向けて - (2003) .
- [11] 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 - , 分冊 3 地層処分システムの安全評価 , JNC TN1400 99-023 (1999) .
- [12] 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構 : TRU 廃棄物処分技術検討書 - 第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ - , JNC-TY1400 2005-002 , FEPC TRU-TR2-2005-01 (2005) .
- [13] SKB : Project SAFE, Scenario and system analysis. R-01-13 (2001).
- [14] 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 - , 分冊 2 地層処分の工学技術 , JNC TN1400 99-022 (1999) .