

1. はじめに

地層処分システムは、長期間にわたって放射性廃棄物に含まれる核種を閉じ込め、それらを人間の生活圏から隔離するように設計されるが、考慮すべき時間スケールが極めて長いこと、天然の地層を含むため評価対象領域が大きくかつ不均質性が存在すること、などといった地層処分固有の特徴に起因して、不確実性への対応が重要な課題である。このため、地層処分システムは、このような不確実性への対応として、様々な摂動 (perturbation) を考慮しても、なお処分システムの頑健性や冗長性により、その安全性が確保されるように構築される。具体的には、処分システムの様々な構成要素に、核種の閉じ込めや核種移行の遅延といった安全機能が同時に、あるいは時間差で発揮されるように設計し、最終的には、システム全体で安全確保が長期にわたって達成されることを安全評価により確認する。

これまでの安全評価では、国際的に合意された方法論に則り¹⁾ まずシナリオを構築し、これに基づきさまざまな解析が行われ、閉鎖後長期に渡って安全性が確保されていること確認するとともに、重要なプロセスやパラメータの解析が行われてきたが^{たとえば2), 3)}、全体システム性能に対する個別の安全機能の寄与や安全機能の多重性について研究された例は少ない。これは以下の理由による。

- ・ システム全体で安全確保を達成することが地層処分の基本概念であるため、これまで全体システム性能に対する個別の安全機能の寄与について評価することの意義が明確でなかった。すなわち、これまでの安全評価は全体システム性能を評価することを目的としたシナリオに基づく評価が基本であり、個別の安全機能の性能やその相関関係に着目して合理的に解析ケースを設定し評価を行うための手法が十分検討されていない。
- ・ 安全機能は独立の関係ではなく相互に影響しており、ある安全機能が劣化しても他の安全機能が補完的に機能する。このような相互補完の関係に起因して、個別の安全機能の真の効果を評価することが本質的に難しい。(たとえば、廃棄体の核種閉じ込め機能の一つである浸出率が增大しても、核種の溶解度により浸出後すぐに沈殿することにより核種の移行が抑制されれば、安全評価結果に対するこの機能の感度が鈍感となる。このような複雑な関係に起因して、単一の安全機能の性能を評価することは難しいと考えられる)

一方、近年の安全評価のワークフレームは、まず地層処分システムに期待する安全機能とこれに基づく安全要件を設定し、次に安全機能の発揮に対する潜在的な危険性を評価し、安全要件を遵守するために十分な性能を処分システムが有していることを体系的に解析するプロセスとして定義されている^{たとえば4)}。すなわち、処分場概念の構築において安全機能は極めて重要な役割を担っており、今後わが国においても事業の進展とともに、個々の安全機能の性能や、それらの相関関係について把握しておくことが求められる可能性がある。このような知見が得られれば、安全要件を達成しうる安全機能の組み合わせや種々の摂動に対する安全機能の発揮に関するメカニズムなどを把握することができ、安全評価の信頼性を向上させることができるとともに、地層処分を構成する個別のシステム要素に対する設計要件を設定する上でも、重要な情報となる。特に設計要件に関しては、近年、多重バリアシステムの要素の一つであるガラス固化体に対して、閉鎖

後長期の安全性の観点からガラス固化体に求められる要件を整理し、これを踏まえて、ガラス固化体製造プロセスにおける記録管理項目や製造時の管理方策を具体化する試みがなされたが、上述の理由により閉鎖後長期の安全性の観点からガラス固化体が具備すべき性能を定量的に明らかにできなかった⁵⁾。安全機能の多重性に関する知見が得られれば、このような検討にも反映することも可能である。

以上のことから、本研究では、地層処分システムに期待される個々の安全機能の性能やそれらの相関関係を明らかにするための手法を構築するとともに、特に人工バリアの安全機能の多重性に着目し、それらの性能や相互補完の関係を定量的に評価することを目的とする。

2. アプローチ

2.1 対象とする処分場概念と安全機能

本研究で対象とする処分場概念は、「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」（以下、「第2次取りまとめ」という）²⁾において示された地層処分システムを評価対象とする。したがって、バリア構成、人工バリア幾何形状等は第2次取りまとめの設定に準拠するものとし、対象とする安全機能は、第2次取りまとめで設定された安全機能を考慮する²⁾。また、安全機能の多重性について検討するための指標としては、放射性廃棄物に起因する人間への被ばく線量を指標とする。

地層処分システムを構成する人工バリアと天然バリアに期待する安全機能のすべてを考慮した場合、生物圏から物理的に離れている人工バリアの安全機能の線量への感度は、天然バリアの安全機能に比べて鈍感になると考えられる。一方、人工バリアの安全機能は、地層処分システムの目的である“核種の閉じ込め”の要であり、その性能は、処分システムの長期的変遷の結果生ずるさまざまな不確実性を考慮してもなお、地層処分の安全性が担保されることを論証するうえで、極めて重要な役割を担う。このため、本研究では、人工バリアの安全機能（第2次取りまとめ 表4.1-4 参照²⁾）に着目した検討を行うこととし、人工バリアの安全機能の性能とその相互補完の関係をより詳細に明らかにするために、天然バリアの安全機能はあえて考慮しないという極端な体系を設定する。すなわち、人工バリアの外側に到達した核種は瞬時に生物圏に移行するというモデルを設定し、これを用いて人工バリアの安全機能について検討する。

なお、第2次取りまとめで示された人工バリアの安全機能のうち、オーバーパックの核種閉じ込め機能については、閉鎖後の長期安全評価の総線量に対してほとんど感度がないことが、第2次取りまとめにおいて示されている。このため、本検討では、第2次取りまとめのレファレンスケースに準拠し、いずれのケースもオーバーパックが1,000年間核種を閉じ込めると仮定する²⁾（普遍的な安全機能として取り扱う）。

以上のことから、本検討で評価の対象とした安全機能は以下の通りである。

- ・ ガラス固化体の核種閉じ込め機能
- ・ 緩衝材中での小さな物質移行速度（拡散による移行）
- ・ 間隙水中での低い核種溶解度
- ・ 緩衝材中での核種移行遅延（核種の収着）
- ・ 緩衝材外側の小さな地下水流速

2.2 安全機能の多重性に対する評価手法

これまで、閉鎖後長期の安全評価では、鍵となるプロセスやパラメータを定量的に評価するために、決定論的アプローチ、確率論的アプローチを中心として、様々な感度解析が実施されてきた。これらは、いずれも、現象理解等の科学的知見に基づくシナリオを設定し、これに基づき評価（含、感度解析）を行うという手法がとられ、一部の安全機能が劣化するというケースにおいても、他の安全機能の働きにより、安全性が担保されるという結果が得られている^{た例えば2)、6)}。このような結果は、地層処分システムの安全機能が相互に補完的であることを裏付けていると考えられる。

しかしながら、この相互補完の関係は、個別の安全機能の性能把握や安全機能の結果への感度の把握を困難にさせる。なぜなら、単一の安全機能に着目し、この機能の性能の程度を変化させようにも、他の安全機能はその機能の低下を補完するように作用し、当該安全機能が本来的に有する安全機能を評価することが難しくなるためである。さらに、従来の安全評価では、シナリオ評価に基づき解析ケースを設定する方法が一般的であり、個別の安全機能の性能やその相関関係を明らかにすることを目的として解析ケースを設定するための評価手法は十分検討されていない。

このため、ここでは、個々の安全機能の性能を、補完的に働く他の安全機能の影響なしに、定量的に評価することを目的として、一旦すべての安全機能が機能しない（以下、「安全機能を OFF にする」という）ケースを基準として設定し、これに安全機能を一つずつ地層処分システムに付加する（以下、「安全機能を ON にする」という）ことにより、線量がどのように低減しうるのかを評価する。なお、このようなケース設定は、シナリオ評価に基づくものではないとともに、既往の物理的、化学的知見と照らして非合理的に核種の移行を促進する極端なシナリオ、モデル、データを設定する必要があることに注意すべきである（たとえば、ガラスの核種閉じ込め機能を OFF にする場合、ガラス固化体は瞬時に溶解するという、非現実的な設定となる）。さらに安全機能間の関係についても分析することを目的として、ON となる安全機能を複数考慮し、これを組み合わせた解析を行い、安全機能の相互補完の組み合わせや、安全機能の相対的重要度について考察する。

上記の検討は、安全機能の ON/OFF といった離散的な取り扱いに基づく検討であるため、当該安全機能が ON となった場合の効果について容易に分析することができる反面、安全機能が発揮される条件を定量的に特定することができない。このため、得られた知見を安全評価の信頼性向上や処分場開発へ反映させるためには、さらなる検討が必要である。ここでは、このような条件を定量的に見出すために、安全機能の ON/OFF に基づく解析を補完するための検討として、**Bounding analysis** を実施し、安全機能の性能と線量の関係を定量的に把握する。具体的には、安全機能に関連するパラメータについて、ON と OFF の設定を補完するように網羅的にデータ設定を行い、それぞれについて核種移行解析を行うことにより、安全機能がどのような条件において発揮されるのか、あるいはされないのかを定量的に評価する。

以上の感度解析から導き出される安全機能が発揮される（あるいは発揮されない）条件は、最終的には、既往の物理・化学的な知見と照らして現実的に考慮される範囲かどうか照査する必要がある。もし、重要な安全機能が発揮されるパラメータの境界が、当該パラメータの現実的に取りうる範囲に入っていれば、その条件が成立することを論証することがセーフティーケースの構築において重要な鍵となる。もし、現実的に取りうる範囲が成立条件に包含されている場合は、当該安全機能の発揮は自明であるといえる。なお、本研究では、天然バリアを含めて解析を行わないことから、核種移行解析から得られる線量は極めて保守側の値であると考えられるため、実現象に基づく現象理解・パラメータの範囲との照査は行わないが（図 2.2-1 参照）、上記の知見が得られれば、安全要件を達成しうる安全機能の組み合わせや種々の摂動に対する安全機能の発揮に関するメカニズムなどを把握することができ、安全評価の信頼性を向上させることができる。さらに、これらは地層処分を構成する個別のシステム要素に対する設計要件を設定する上でも、重要な情報となる。

本研究の実施範囲

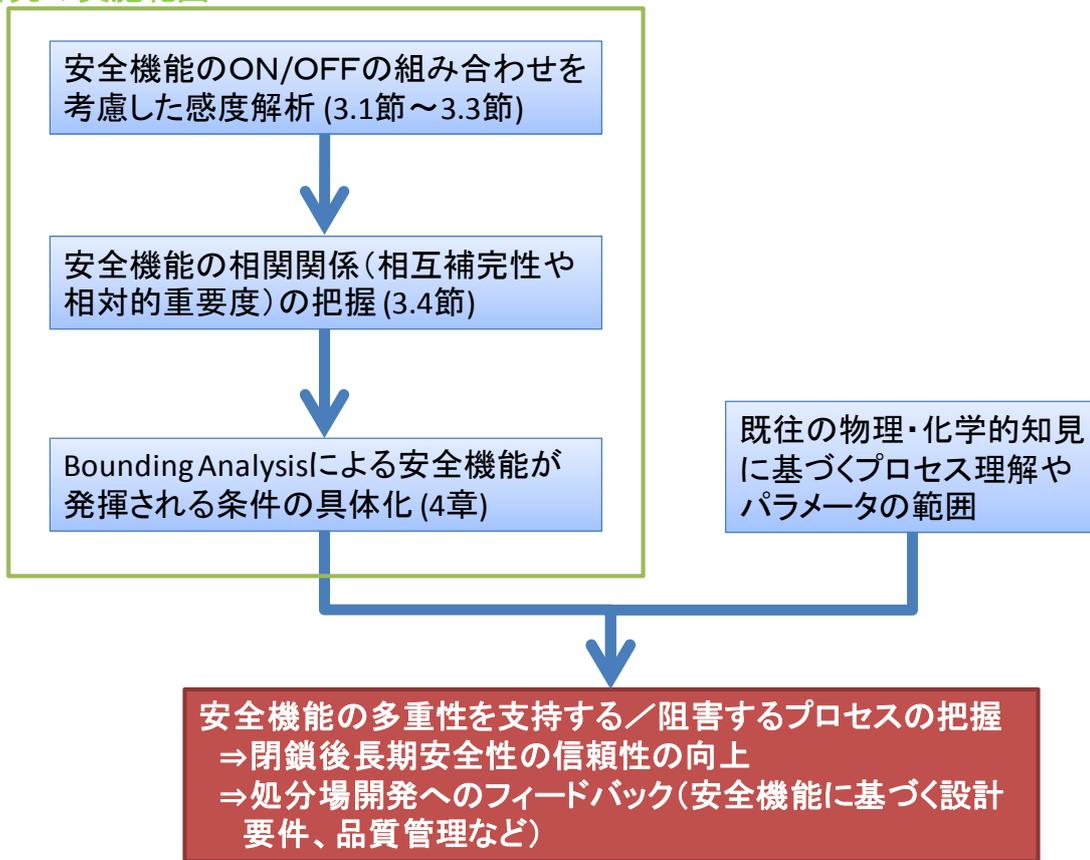


図 2.2-1 アプローチの全体像と本研究の実施範囲

3. 安全機能の ON/OFF に基づく感度解析

3.1 安全機能の取り扱い

2章に示したアプローチに基づき、表 3.2-1 および図 3.1-1 に示す 5 つの安全機能を対象として、感度解析を実施した。以下に感度解析における個々の安全機能の取り扱いについて述べる。

3.1.1 ガラス固化体の核種閉じ込め機能

ガラス固化体の核種閉じ込め機能に関しては、機能を考慮する場合、つまり ON の場合には第 2 次取りまとめで考慮されているガラス溶解速度を用いる（ガラスの寿命約 70000 年）。本研究ではガラス固化体と核種は調和溶解するものとし、固化ガラスの溶解速度と核種の放出速度は比例するものとする。また、ガラス固化体の溶解に伴うガラスの表面積の時間的減少は考慮しない。

OFF の場合には、オーバーパックの破損後（処分後 1,000 年時）、ガラス固化体が瞬時に溶解し、全核種がガラス固化体近傍の間隙水に溶出する（すなわち、オーバーパックの破損後すぐに全核種がガラス固化体から瞬時放出される）。

3.1.2 緩衝材中での小さな物質移行速度(拡散による移行)

緩衝材中での小さな物質移行速度が ON の場合、ガラス固化体から緩衝材間隙水に移行した核種は、緩衝材中を拡散により移行する（拡散係数は第 2 次取りまとめの設定に準拠）。

緩衝材中での小さな物質移行速度が OFF の場合、ガラス固化体から緩衝材間隙水に移行した核種は、瞬時に緩衝材中を移行し緩衝材外側へ到達する。解析的な取り扱いとしては、瞬時に緩衝材外側に到達させるために、 1.0×10^{30} [m³/y] という極めて大きな流量を設定し、緩衝材の内側から外側へ移行させる。このような設定は、物理的には考えにくいものの、拡散現象という安全機能を OFF にするための便宜的な想定であることに注意する。

3.1.3 間隙水中での低い核種溶解度

間隙水中での低い核種溶解度を ON にした場合、緩衝材中およびガラス固化体近傍の仮想的領域において、間隙水に対して溶解度限界に到達するまでの核種量が溶存し、これを超えた場合核種は沈殿する。（溶解度は第 2 次取りまとめの設定に準拠）

この機能を OFF の場合、すべての核種を可溶性核種として取り扱う。なお、第 2 次取りまとめにおいて可溶性として取り扱われている元素は、この機能の ON/OFF の影響を受けない。

3.1.4 緩衝材中での核種移行遅延(核種の収着)

緩衝材中での核種移行遅延性能を ON にした場合、核種の緩衝材中での移行は収着により遅延される。（収着分配係数は第 2 次取りまとめの設定に準拠）

核種の緩衝材への収着機能を OFF にした場合、核種の緩衝材中での収着による遅延は考慮しない（全核種収着なし）。第 2 次取りまとめにおいて緩衝材への収着分配係数が 0 である元素は、この機能の ON/OFF の影響を受けない。

3.1.5 緩衝材外側の小さな地下水流速

緩衝材外側の小さな地下水流速に関して、この機能が ON の場合、緩衝材の外側に到達した核種は、掘削影響領域（以下、「EDZ」という）を通過する地下水と瞬時に混合し周辺母岩へ移行する（第2次取りまとめと同じ EDZ の地下水流量を設定）。すなわち、EDZ 地下水流量が小さい場合、緩衝材外側から放出される核種量が抑えられ、移行率は小さくなる。

この機能が OFF の場合、緩衝材外側に到達した核種は、掘削影響領域を流れる極めて早い地下水によって移行し、緩衝材からの核種の放出が促進される（すなわち、緩衝材外側の核種濃度は常に 0 となる）。

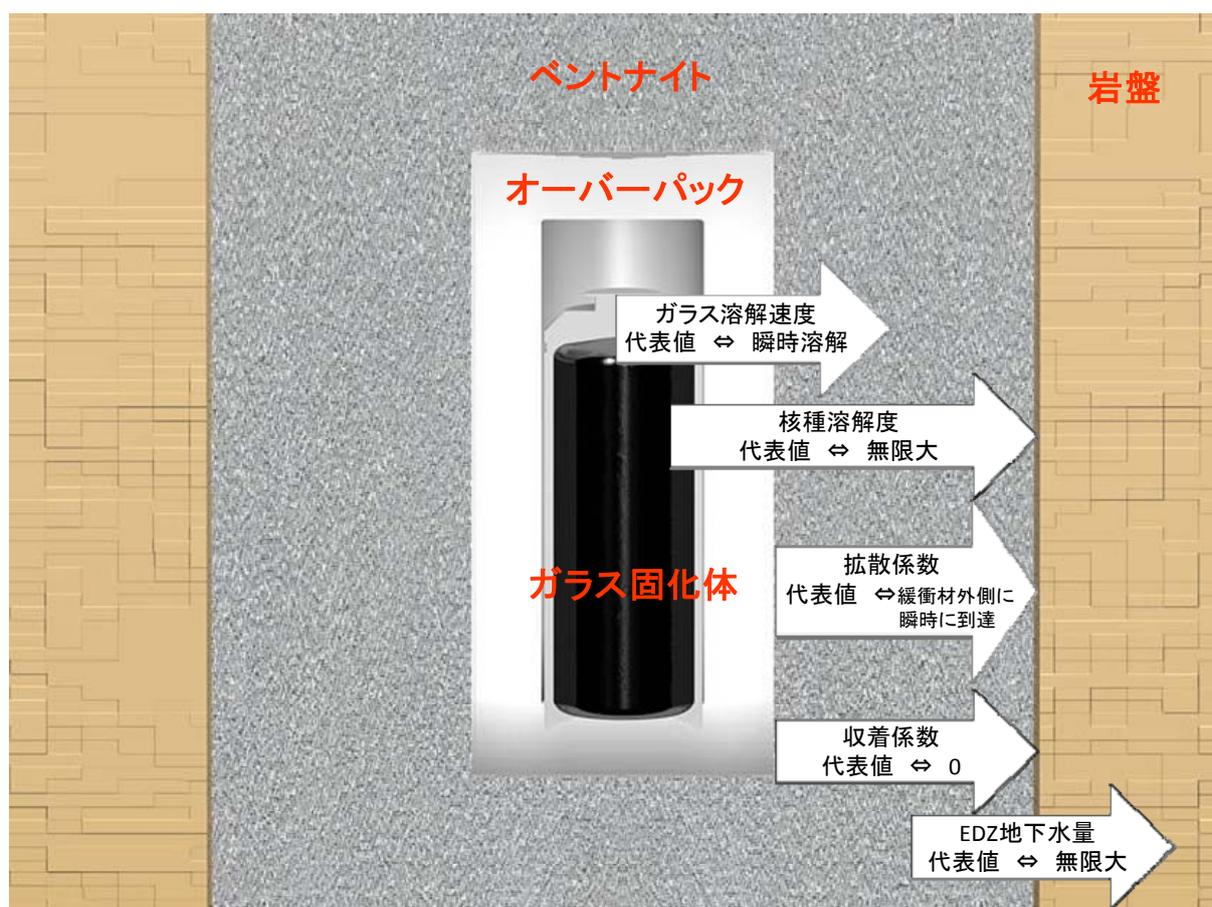


図 3.1-1 本研究で着目した安全機能

3.2 解析ケース

3.1 節のアプローチ方針に基づき、表 3.2-1 に示す 5 つの安全機能を対象として、表 3.2-3 に示す解析ケース（32 ケース）を設定した。ケース設定においては、安全機能の相互補完の関係を分析するために、まず、すべての安全機能が機能しないケースを基準として設定し、これに安全機能の一つずつ地層処分システムに付加するように設定するとともに、それらの組み合わせも考慮した。

本研究では、解析対象核種として、評価核種を半減期や核種移行上の特徴を考慮して4つのグループに分類し、グループ毎に代表的核種を1つ選定し、前記の32ケースの解析結果を考察した。核種の分類結果および各グループにおける感度解析上の代表的核種の選定結果を、表3.2-2に示す。具体的には、①短半減期核種、②長半減期で可溶性の核種、③長半減期で可溶性かつ緩衝材及び天然バリアへの収着が期待できない核種、④長半減期で溶解度の低い核種に分類した。また、代表的核種の選定においては、従来の閉鎖後安全評価における線量への寄与度や、インベントリの大きさを考慮した。なお、長半減期で可溶性かつ緩衝材及び天然バリアへの収着が期待できない核種として選定したI-129はガラス固化の際に揮発するためガラス固化体には含まれないと考えられるが、諸外国において評価している事例があるため、参考のために評価核種に含めた。

表 3.2-1 本研究で選定した安全機能とそれらの解析上の設定内容

安全機能	“ON” の定義	“OFF” の定義
ガラス固化体の核種閉じ込め機能	第2次取りまとめのガラス溶解速度	瞬時溶解
緩衝材中での小さな物質移行速度（拡散による移行）	第2次取りまとめの拡散係数	緩衝材外側に瞬時に到達
間隙水中での低い核種溶解度	第2次取りまとめの核種溶解度	可溶性
緩衝材中での核種移行遅延（核種の収着）	第2次取りまとめの分配係数	非収着
緩衝材外側の小さな地下水流速	第2次取りまとめのEDZ地下水流量	EDZ地下水流量 = ∞ (0濃度境界)

表 3.2-2 核種の分類と本研究での選定核種

核種の分類	核種例	解析用選定核種
短半減期核種	Cs-137, Sr-90, Ce-144, Ru-106	Cs-137
長半減期、可溶性	Cs-135	Cs-135
長半減期、低収着	I-129	I-129
長半減期、低溶解度	Np-237, Th-229, Se-79, Tc-99	Np-237*

* 実際の総線量への支配核種はTh-229であるが、Np-237と放射平衡となるため、Th-229ではなくその親核種であるNp-237を選定する。

表 3.2-3 解析ケース一覧

ケース番号	概要	ガラスからの核種の抑制	溶解度制限	緩衝材の収着	緩衝材中での拡散	緩衝材からの核種の放出の抑制	母岩の安全機能
0	全バリア機能無し	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
1-1	ガラス溶解速度のみを考慮	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
1-2	溶解度のみを考慮	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
1-3	拡散係数のみを考慮	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
1-4	分配係数のみを考慮	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
1-5	EDZ流量のみを考慮	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF
2-1	ガラス溶解速度 + 溶解度を考慮	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
2-2	ガラス溶解速度 + 拡散係数を考慮	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
2-3	ガラス溶解速度 + 分配係数を考慮	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
2-4	ガラス溶解速度 + EDZ流量を考慮	ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF
2-5	溶解度 + 拡散係数を考慮	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF
2-6	溶解度 + 分配係数を考慮	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
2-7	溶解度 + EDZ流量を考慮	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF
2-8	拡散係数 + 分配係数を考慮	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
2-9	拡散係数 + EDZ流量を考慮	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
2-10	分配係数 + EDZ流量を考慮	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF
3-1	ガラス溶解速度 + 溶解度 + 拡散係数を考慮	ON	ON	OFF	ON	OFF	OFF
3-2	ガラス溶解速度 + 溶解度 + 分配係数を考慮	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF
3-3	ガラス溶解速度 + 溶解度 + EDZ流量を考慮	ON	ON	OFF	OFF	ON	OFF
3-4	ガラス溶解速度 + 拡散係数 + 分配係数を考慮	ON	OFF	ON	ON	OFF	OFF
3-5	ガラス溶解速度 + 拡散係数 + EDZ流量を考慮	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF
3-6	ガラス溶解速度 + 分配係数 + EDZ流量を考慮	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
3-7	溶解度 + 拡散係数 + 分配係数を考慮	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF
3-8	溶解度 + 拡散係数 + EDZ流量を考慮	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF
3-9	溶解度 + 分配係数 + EDZ流量を考慮	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF
3-10	拡散係数 + 分配係数 + EDZ流量を考慮	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF
4-1	溶解度 + 拡散係数 + 分配係数 + EDZ流量を考慮	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF
4-2	ガラス溶解速度 + 拡散係数 + 分配係数 + EDZ流量を考慮	ON	OFF	ON	ON	ON	OFF
4-3	ガラス溶解速度 + 溶解度 + 分配係数 + EDZ流量を考慮	ON	ON	ON	OFF	ON	OFF
4-4	ガラス溶解速度 + 溶解度 + 拡散係数 + EDZ流量を考慮	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF
4-5	ガラス溶解速度 + 溶解度 + 分配係数 + 拡散係数を考慮	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF
5	ニアフイールドの安全機能を全て考慮	ON	ON	ON	ON	ON	OFF

3.3 データ

表 3.3-1～表 3.3-4 にニアフィールドの安全機能を全て考慮した解析ケースである表 3.2-3 のケース番号 5 に対応する解析ケース（第 2 次取りまとめのリファレンスケースにおける人工バリア中核種移行解析に対応する）で用いた各パラメータとその設定値を示す。ケース番号 5 以外のその他の 31 の解析ケースでは、表 3.3-1～表 3.3-4 に示す一部のパラメータの値を、表 3.2-3 に示す ON/OFF の解析上の設定内容に合わせて変更している。

表 3.3-1 人工バリアに係る入力データ

パラメータ	設定値
緩衝材内側半径 [m]	0.41
緩衝材外側半径 [m]	1.11
緩衝材の高さ [m]	2.14
緩衝材間隙率 [-]	0.41
緩衝材乾燥密度 [kg/m ³]	1.60 × 10 ³
ガラス固化体の初期体積 [m ³]	0.15
ガラス固化体の密度 [kg/m ³]	2.75 × 10 ³
ガラス溶解速度 [g/m ² /y]	0.365
ガラス固化体近傍の仮想的な領域の体積 [m ³]	0.001
ガラス固化体近傍の仮想的な領域の間隙率 [-]	1
掘削影響領域通過流量 [m ³ /y]	0.001
掘削影響領域の体積 [m ³]	0.001
掘削影響領域の間隙率 [-]	1

表 3.3-2 核種の半減期およびインベントリ

核種	半減期 [y]	インベントリ [mol]	核種	半減期 [y]	インベントリ [mol]
Pu-240	6.54 × 10 ³	1.78 × 10 ⁻¹	Ac-227	2.18 × 10 ¹	1.48 × 10 ⁻⁹
U-236	2.34 × 10 ⁷	1.05 × 10 ⁻¹	Sm-151	9.00 × 10 ¹	3.20 × 10 ⁻⁵
Th-232	1.41 × 10 ¹⁰	6.50 × 10 ⁻⁶	Zr-93	1.53 × 10 ⁶	8.54 × 10 ⁰
Cm-245	8.50 × 10 ³	7.26 × 10 ⁻³	Nb-93M	1.36 × 10 ¹	7.21 × 10 ⁻⁵
Pu-241	1.44 × 10 ¹	1.23 × 10 ⁻⁵	Se-79	6.50 × 10 ⁴	8.04 × 10 ⁻²
Am-241	4.32 × 10 ²	1.88 × 10 ⁻¹	Tc-99	2.13 × 10 ⁵	8.27 × 10 ⁰
Np-237	2.14 × 10 ⁶	3.74 × 10 ⁰	Pd-107	6.50 × 10 ⁶	2.04 × 10 ⁰
U-233	1.59 × 10 ⁵	1.17 × 10 ⁻³	Sn-126	1.00 × 10 ⁵	2.25 × 10 ⁻¹
Th-229	7.34 × 10 ³	2.51 × 10 ⁻⁶	Cs-135	2.30 × 10 ⁶	3.19 × 10 ⁰
Cm-246	4.73 × 10 ³	8.29 × 10 ⁻⁴	Nb-94	2.03 × 10 ⁴	2.80 × 10 ⁻⁴
Pu-242	3.87 × 10 ⁵	1.12 × 10 ⁻²	I-129 *	1.57 × 10 ⁷	1.46 × 10 ⁻³
U-238	4.47 × 10 ⁹	1.31 × 10 ¹	Cs-137	3.00 × 10 ¹	2.66 × 10 ⁻¹⁰
U-234	2.45 × 10 ⁵	1.50 × 10 ⁻²	Pb安定同位体	-	3.81 × 10 ⁻³
Th-230	7.70 × 10 ⁴	5.37 × 10 ⁻⁵	Sm安定同位体	-	3.33 × 10 ⁰
Ra-226	1.60 × 10 ³	2.62 × 10 ⁻⁷	Zr安定同位体	-	4.74 × 10 ¹
Pb-210	2.23 × 10 ¹	3.48 × 10 ⁻⁹	Nb安定同位体	-	2.67 × 10 ⁻²
Am-243	7.38 × 10 ³	4.01 × 10 ⁻¹	Se安定同位体	-	6.86 × 10 ⁻¹
Pu-239	2.41 × 10 ⁴	1.60 × 10 ⁻¹	Pd安定同位体	-	1.18 × 10 ¹
U-235	7.04 × 10 ⁸	1.46 × 10 ⁻¹	Sn安定同位体	-	6.82 × 10 ⁻¹
Pa-231	3.28 × 10 ⁴	2.23 × 10 ⁻⁶	Cs安定同位体	-	8.84 × 10 ⁰

* I129の半減期に関しては、「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—」（以下第2次TRU取りまとめという）⁷⁾のデータを使用した。また、I129のインベントリに関しては、使用済燃料中のI-129全体の質量に対して、ガラス固化体への移行率として0.1%を考慮し、1.46E-03 molとした。

表 3.3-3 人工バリア(緩衝材)の核種移行パラメータ

元素	溶解度 [mol/l]	分配係数(人工バリア) [m ³ /kg]	間隙水中の拡散係数 (人工バリア)[m ² /y]
Se	3.00 × 10 ⁻⁹	0	2.00 × 10 ⁻²
Zr	1.00 × 10 ⁻⁶	10	3.00 × 10 ⁻²
Nb	1.00 × 10 ⁻⁴	1	3.00 × 10 ⁻²
Tc	4.00 × 10 ⁻⁸	0.1	3.00 × 10 ⁻²
Pd	1.00 × 10 ⁻⁹	0.1	3.00 × 10 ⁻²
Sn	5.00 × 10 ⁻⁶	1	3.00 × 10 ⁻²
Cs	可溶性	0.01	5.00 × 10 ⁻²
Sm	2.00 × 10 ⁻⁷	1	3.00 × 10 ⁻²
Pb	2.00 × 10 ⁻⁶	0.1	3.00 × 10 ⁻²
Ra	1.00 × 10 ⁻¹²	0.01	3.00 × 10 ⁻²
Ac	2.00 × 10 ⁻⁷	1	3.00 × 10 ⁻²
Th	5.00 × 10 ⁻⁶	1	3.00 × 10 ⁻²
Pa	2.00 × 10 ⁻⁸	1	3.00 × 10 ⁻²
U	8.00 × 10 ⁻⁹	1	3.00 × 10 ⁻²
Np	2.00 × 10 ⁻⁸	1	3.00 × 10 ⁻²
Pu	3.00 × 10 ⁻⁸	10	3.00 × 10 ⁻²
Am	2.00 × 10 ⁻⁷	10	3.00 × 10 ⁻²
Cm	2.00 × 10 ⁻⁷	10	3.00 × 10 ⁻²
I*	可溶性	0	3.08 × 10 ⁻³

* I129に関しては、第2次TRU取りまとめ⁷⁾のデータを使用した。

表 3.3-4 線量換算係数

核種	線量換算係数 [(mSv/y)/(Bq/y)]	核種	線量換算係数 [(mSv/y)/(Bq/y)]
Pu-240	1.49 × 10 ⁻¹¹	Am-243	2.44 × 10 ⁻¹¹
U-236	1.35 × 10 ⁻¹²	Pu-239	1.50 × 10 ⁻¹¹
Th-232	1.54 × 10 ⁻¹⁰	U-235	1.52 × 10 ⁻¹²
Cm-245	4.85 × 10 ⁻¹¹	Pa-231	2.44 × 10 ⁻¹⁰
Pu-241	3.66 × 10 ⁻¹³	Ac-227	8.54 × 10 ⁻¹¹
Am-241	1.63 × 10 ⁻¹¹	Sm-151	1.59 × 10 ⁻¹⁵
Np-237	1.30 × 10 ⁻¹¹	Zr-93	1.56 × 10 ⁻¹⁴
U-233	1.71 × 10 ⁻¹²	Nb-93M	2.32 × 10 ⁻¹⁵
Th-229	7.90 × 10 ⁻¹¹	Se-79	2.68 × 10 ⁻¹²
Cm-246	3.53 × 10 ⁻¹¹	Tc-99	1.22 × 10 ⁻¹⁴
Pu-242	1.42 × 10 ⁻¹¹	Pd-107	1.44 × 10 ⁻¹⁵
U-238	1.33 × 10 ⁻¹²	Sn-126	9.84 × 10 ⁻¹³
U-234	1.44 × 10 ⁻¹²	Cs-135	1.14 × 10 ⁻¹³
Th-230	3.60 × 10 ⁻¹¹	Nb-94	7.08 × 10 ⁻¹³
Ra-226	3.80 × 10 ⁻¹¹	I-129*	3.20 × 10 ⁻¹²
Pb-210	3.04 × 10 ⁻¹¹	Cs-137	5.40 × 10 ⁻¹³

* I129に関しては、第2次TRU取りまとめ⁷⁾のデータを使用した。

3.4 解析結果

表 3.2-3 の解析ケースに基づき GoldSim[®]を用いて解析した結果を図 3.4-1～図 3.4-4 に示す。本図の結果は、単一のガラス固化体に対する人工バリア外側からの核種移行率に線量換算係数を乗じ、線量を評価した場合の最大線量を示している（ガラス固化体 1 本からの放出率を 40,000 倍して総放出率を計算している）。なお、各ケースの値は、ケース 0 で規格化した。また、ON/OFF の影響を受けないケース（たとえば、可溶性である Cs-135 において溶解度が考慮されているケース）は結果の考察の対象から除外した。

核種毎の解析結果に基づく考察を以下に示す。

3.4.1 共通的な傾向

- 単一の安全機能を仮定したケース（ケース 1-1～1-5）において、線量抑制効果が発揮されるのは、ガラスの閉じ込め性能のみ（ケース 1-1）である。
- 2つの安全機能の組合せにおいてガラスの閉じ込め性能が機能している場合は、その他の安全機能の効果は殆どみられない（ケース 2-1～2-4）。これらのケースの最大移行率はガラスの溶出率で規定されている。

3.4.2 Cs-135

- ガラスの閉じ込め性能が OFF にも関わらず、ケース 2-9、3-10 は大幅な線量低減効果が発揮されている。これらに共通している安全機能は、緩衝材中での拡散および緩衝材からの核種の放出の抑制（EDZ 地下水流量）である。すなわち、核種移行の観点からは、核種が緩衝材中を拡散によりゆっくり移行し、かつ小さい EDZ 地下水流量に起因して緩衝材外側からの核種の放出が抑えられていることにより、初期にガラス固化体中に存在した Cs-135 のほぼ全量が緩衝材中に均質に分布するケースである。これらのケースの最大線量は、初期のガラス固化体中に存在する Cs-135 の全量が、緩衝材中で均質に分布したときの間隙水中での Cs-135 濃度 (C_{max})、EDZ 地下水流量および線量換算係数の積で与えられる。本節では、これらの安全機能の組み合わせにより核種移行が抑制される性能を「緩衝材の閉じ込め性能」と称する。
- 収着による遅延効果を考慮した緩衝材の閉じ込め性能（ケース 3-10）は、ガラスの閉じ込め性能が機能するケース（ケース 1-1）と同等の線量低減効果が発揮されている。このことから、今回の条件では、収着による遅延効果を考慮した緩衝材の閉じ込め性能とガラスの閉じ込め性能は相互補完の関係にあると考える。
- 収着による遅延効果のない緩衝材の閉じ込め性能は、ガラスの閉じ込め性能の有無によって線量が低減する（ケース 2-9 とケース 3-5 の比較）。一方、収着による遅延効果を考慮した緩衝材の閉じ込め性能が機能している場合、線量はガラスの閉じ込め性能の有無にほとんど依存しない（ケース 3-10 とケース 4-2 の比較）。このことから、ガラスの閉じ込め性能と緩衝材の閉じ込め性能の関係は、それぞれの安全機能が合わさってより高い効果を発揮する和の関係ではなく、より強い高い性能を発揮する安全機能により支配されるという関係であることがわかる。このような安全機能間関係が、安全機能の線量への感度を複雑にしている。

3.4.3 Np-237

- ・ 溶解度制限による核種閉じ込め性能が ON の場合であっても、緩衝材中での小さな物質移行速度(拡散)が OFF の場合には、溶解度制限の効果は見られない。これは、緩衝材中を核種が瞬時に移行し、間隙水中の核種が常に持ち去られるため、緩衝材内側の核種量が速やかに減少すること、さらに、瞬時に緩衝材外側に到達させるために、緩衝材中に 1.0×10^{30} [m³/y] という極めて大きな流量を設定しているため、ガラス固化体が瞬時に溶解しても、緩衝材内側における Np-237 の濃度が溶解度を下回ることに起因する。(ケース 1-2、2-6、2-7、3-9)
- ・ 緩衝材内側および緩衝材中において沈殿が生じ、間隙水中の Np-237 濃度が低く抑えられることにより、最大線量が大幅に低減するケース(ケース 2-5、3-1、3-7、3-8、4-1、4-4、4-5、5)が存在する(以下、この安全機能により核種移行が抑制される性能を「溶解度制限による閉じ込め性能」という)。これらの解析ケースに共通している点は、溶解度と併せて拡散係数が ON になっていることから、溶解度による線量低減効果は、緩衝材中の核種移行速度が小さい場合に発揮されると考えられる。
- ・ ガラスの閉じ込め性能が機能していない場合においても、溶解度制限による閉じ込め性能および緩衝材の閉じ込め性能が機能することにより、大幅な線量の低減が見込める(ケース 2-5、3-1、3-7、3-8、4-1)。すなわち、相互補完の関係が存在していると考えられる。
- ・ 緩衝材の閉じ込め性能が機能している場合は、ガラスの閉じ込め性能の最大線量への影響はほとんど見られない(ケース 3-10 とケース 4-2 の比較)。また、溶解度制限による核種の閉じ込め性能が機能している場合、ガラスの閉じ込め性能の最大線量への影響はほとんどない(ケース 3-8 とケース 4-4 の比較)。このことから、ガラスの閉じ込め性能は他の複数の安全機能と競合関係にあるとともに、より性能の高い緩衝材の閉じ込め性能や溶解度制限による核種の閉じ込め性能に支配される。
- ・ 一方、緩衝材の閉じ込め性能、および溶解度制限による核種の閉じ込め性能の関係は、これらを同時に考慮したケースにおいて、非常に大きな線量抑制効果が見られる(ケース 3-8、4-1)。
- ・ 溶解度制限と拡散係数の両方の機能が ON の場合において、EDZ 流量の ON/OFF により、大きく異なる(ケース 2-5、3-8)。つまり緩衝材の閉じ込め性能(拡散係数と EDZ 流量の両方が ON)は、溶解度制限が ON の場合にも、線量低減効果を有する。

3.4.4 Cs-137

- ・ ガラスの閉じ込め性能が OFF にも関わらず、ケース 2-9、3-10 は大幅な線量低減効果が発揮されている。これらは Cs-135 同様に、緩衝材の閉じ込め性能が機能しているケースである。
- ・ 短半減期核種である Cs-137 は、一部のケースで Cs-135 とは異なった傾向を示す。たとえば、Cs-135 ではケース 3-4 はガラスの溶解速度により最大線量が支配され、

その他の安全機能の影響は見られなかったが、Cs-137では拡散係数や収着を考慮することにより、はっきりと線量低減の効果として表れている。これは、Cs-137の半減期が約30年と短いことに起因していると考えられる。

3.4.5 I-129

- ・ 複数の安全機能の組合せを考慮したケースにおいて大幅な線量の低減しているケースは、単一の安全機能としてガラスの閉じ込め性能を考慮したケースと最大線量がほぼ一致していることから、I-129ではガラスの閉じ込め性能がどの安全機能より優位性が高いと考えられる。
- ・ 単一の安全機能を考慮したケースにおいて、拡散係数を考慮したケースの線量の低減効果が大きいのは、Iの拡散係数が他の元素に比べて約1桁低いことに起因する。
- ・ 緩衝材の閉じ込め性能（拡散係数とEDZ流量の両方がON）を考慮したケース（ケース2-9）では、核種の放出抑制に関する安全機能が発揮されており、ガラスの閉じ込め性能に次ぐ低減効果を示している。

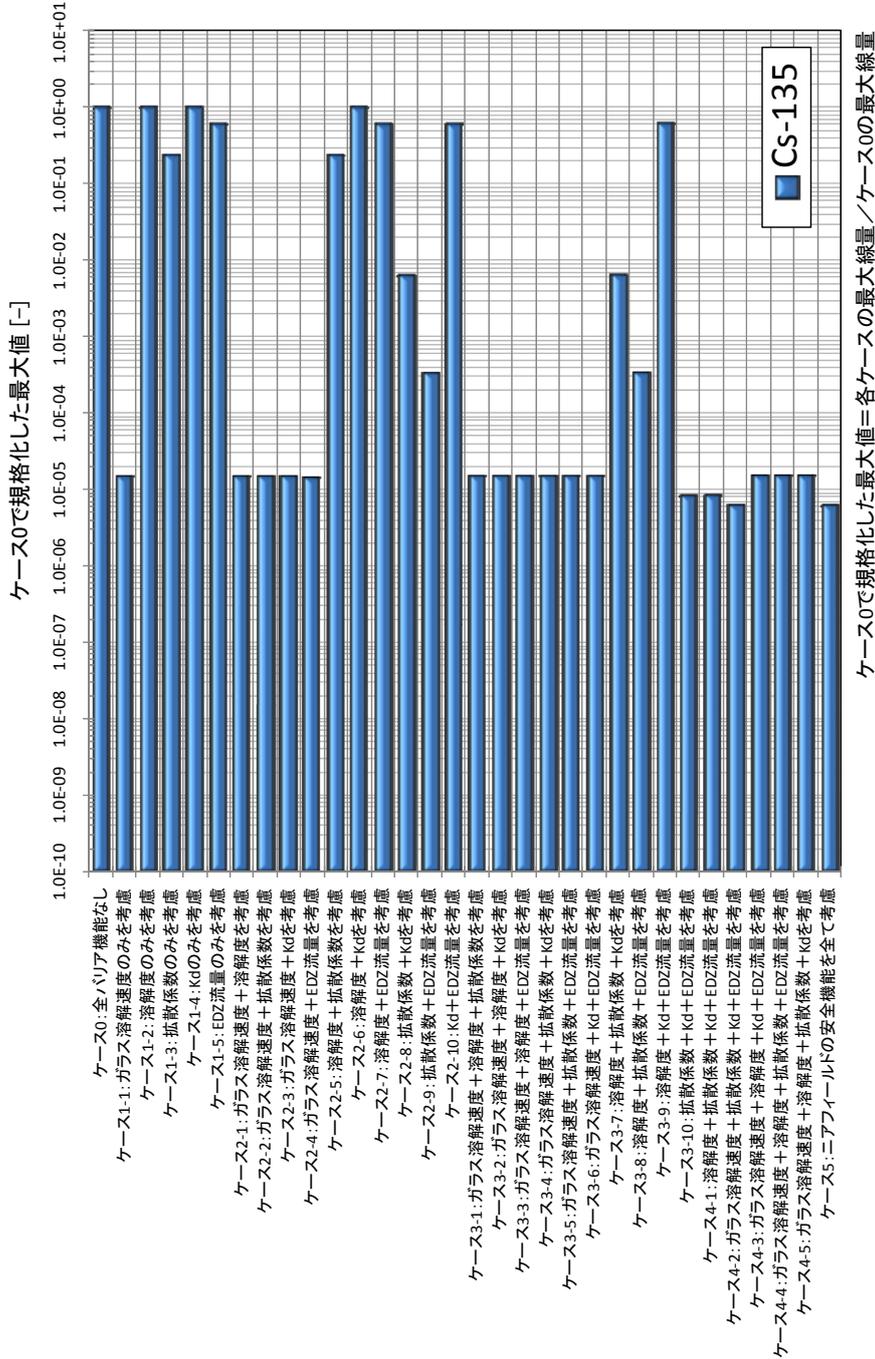


図 3.4-1 安全機能の組み合わせを考慮した感度解析結果(ケース0を基準とした各ケースのCs-135の最大値)

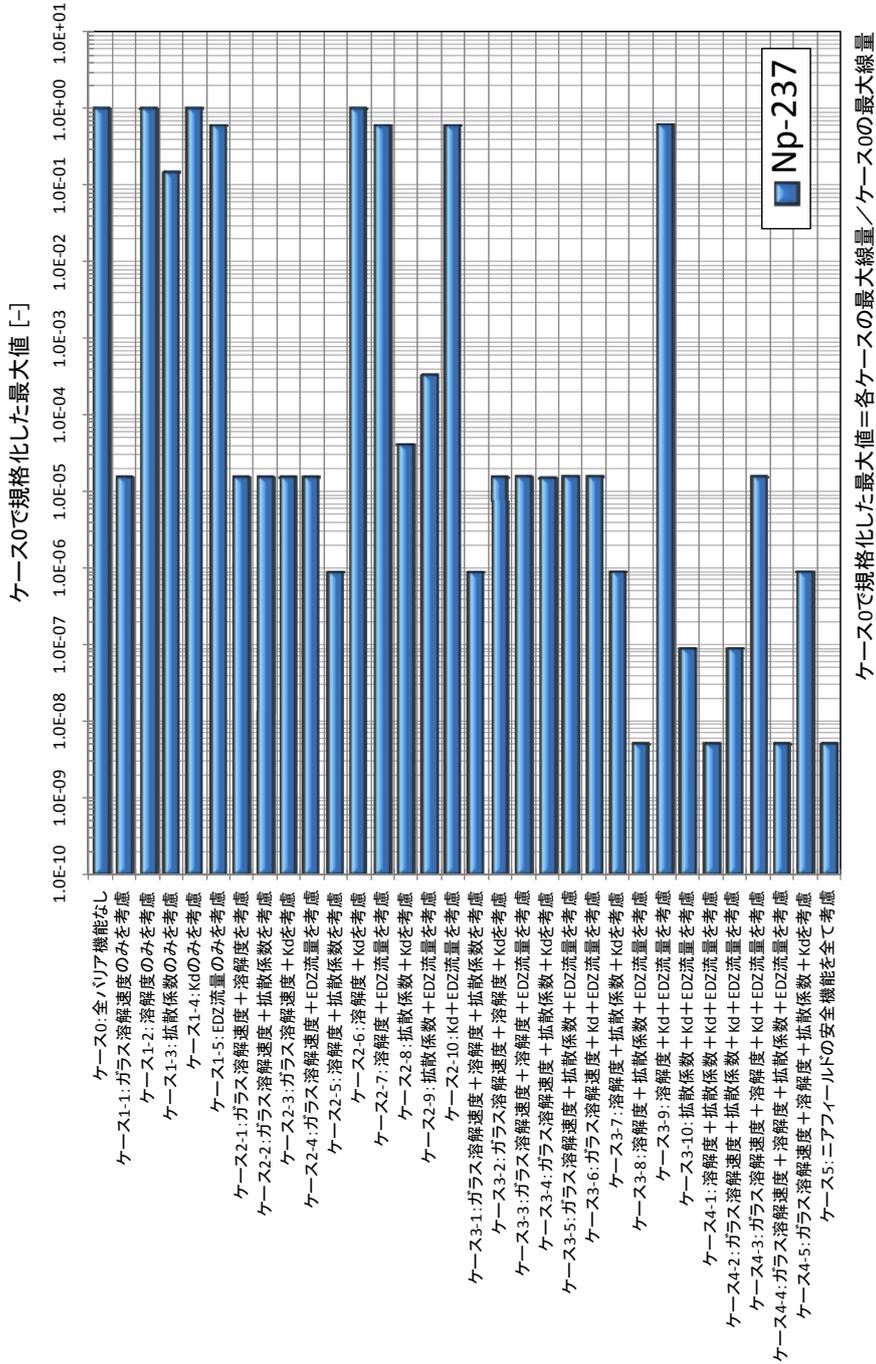


図 3.4-2 安全機能の組み合わせを考慮した感度解析結果(ケース0を基準とした各ケースの Np-237 の最大値)

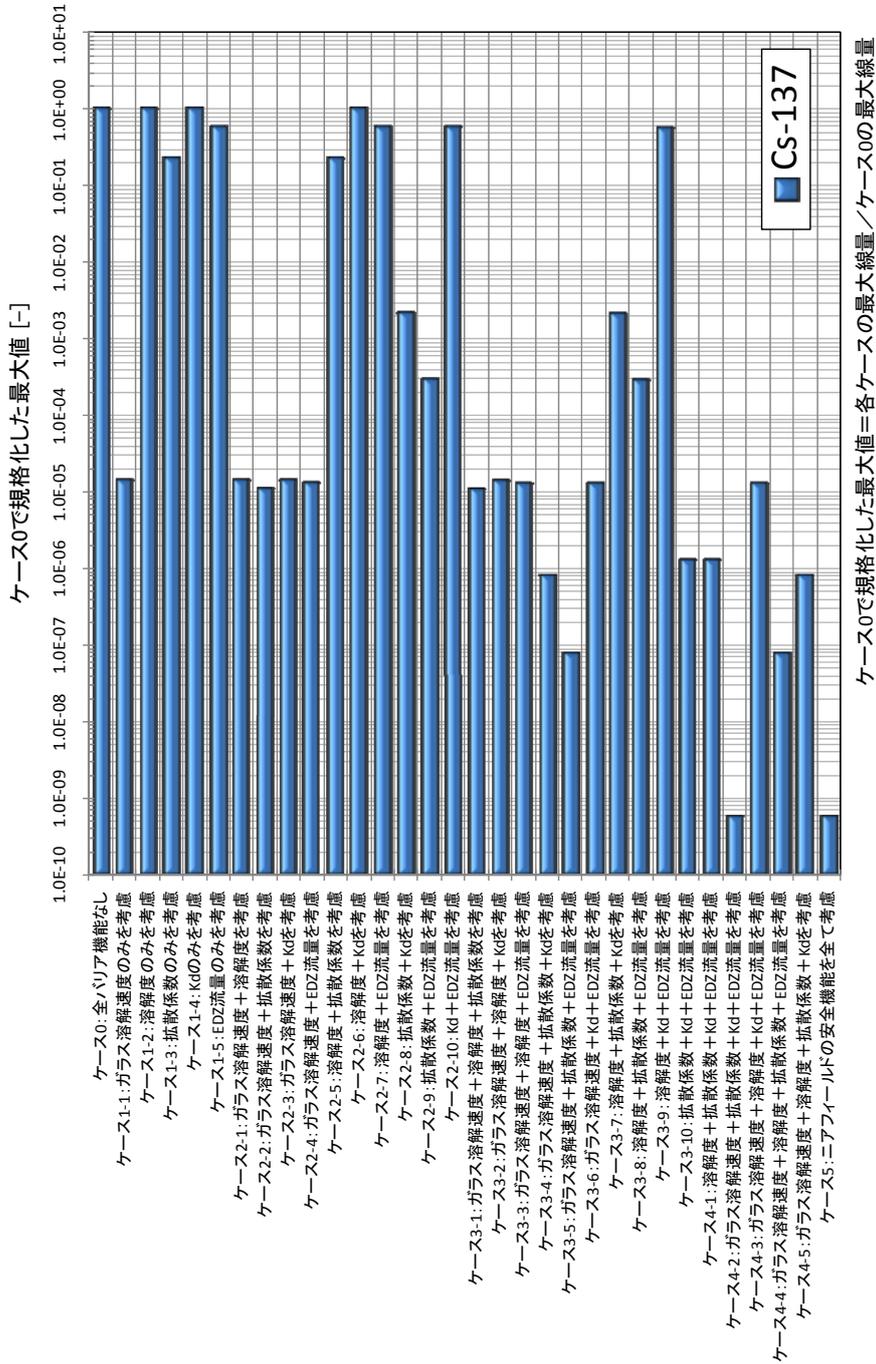


図 3.4-3 安全機能の組み合わせを考慮した感度解析結果(ケース0を基準とした各ケースの Cs-137 の最大値)

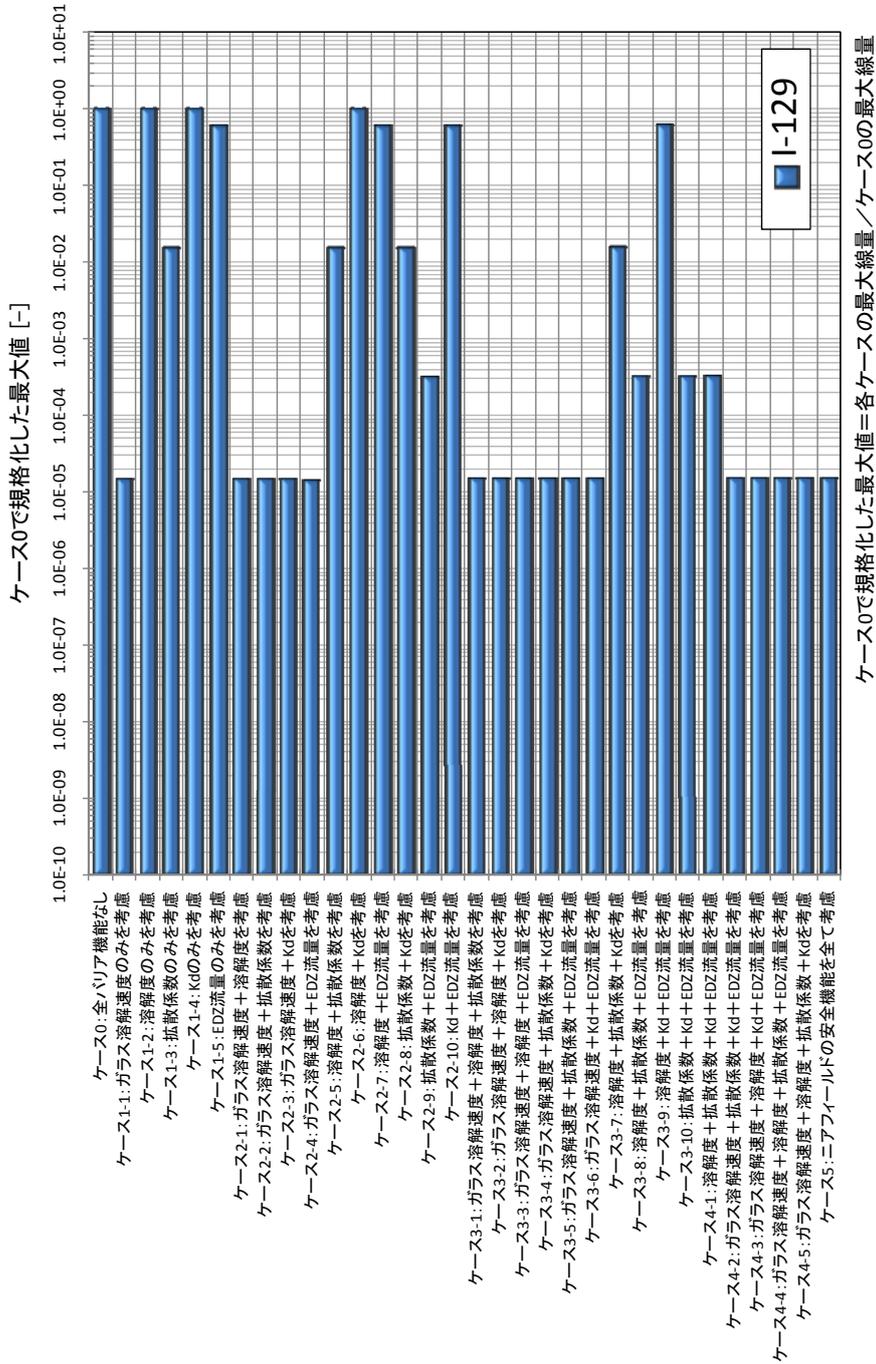


図 3.4-4 安全機能の組み合わせを考慮した感度解析結果(ケース0を基準とした各ケースの I-129 の最大値)

4. Bounding Analysis

4.1 解析の目的

図 2.2-1 に示したように、安全機能の ON/OFF に基づく感度解析から得られる知見を、既往の物理化学的知見に基づくプロセス理解やパラメータの範囲と照らして、処分場開発の設計要件や品質管理にフィードバックしていくためには、安全機能の多重性について、より定量的な理解が必要となる。しかしながら、3章で実施した感度解析は、安全機能の ON/OFF といった離散的な取り扱いに基づく検討であるため、当該安全機能が ON となった場合の相対的効果や、安全機能が相互補完的に機能するメカニズムを解明するための定性的な情報を把握することができる反面、

- ある安全機能が発揮される条件は何か？
- どの安全機能がどのような性能を発揮すると、どれくらいの線量低減効果が見込めるのか？

といった安全機能の性能とその多重性を定量的に評価するための情報を得ることが困難である。このため、上記の問いに対する定量的な知見を得るためには、安全機能の ON/OFF の組み合わせのみならず、安全機能の ON/OFF 間の過渡状態を考慮した解析を実施する必要がある。このような関係が明らかとなれば、安全機能の性能について定量的な知見が得られるだけでなく、あるクライテリアを満たすために必要となる安全機能の種類とその性能の程度（境界）を具体化することが可能となる（ここでは、このような境界を明らかにするための解析を **Bounding analysis** と呼ぶ）。

本章では、安全機能の性能の程度を、その安全機能に関係するパラメータ値に置き換え、**Bounding analysis** として、モンテカルロシミュレーションに基づく解析を実施することにより、安全機能の多重性の関係を定量的に検討する。ここで、モンテカルロシミュレーションとは、入力パラメータに対して確率密度関数や幅（レンジ）を設定し、パラメータ値の組み合わせを網羅的に考慮することを目的として、確率密度関数やレンジに従いパラメータ値をサンプリングすることで入力データセットを複数作成し、得られた各入力データセットを用いて解析を複数回実施し（これをリアライゼーションという）、最後に、得られたリアライゼーションの解析結果を整理することにより、入力パラメータセット群とそれに対応する解析結果群の関係について分析する方法である。

ここでは、第 2 次取りまとめの安全評価において最大線量に対して最も支配的な核種だった Cs-135 を対象とするとともに、3章で実施した安全機能の ON/OFF を考慮した解析に基づき、緩衝材の閉じ込め性能とガラス固化体の閉じ込め性能に着目して、検討を行う。

4.2 モデル・データ

処分場概念、人工バリアの幾何形状等は、2章の設定と同じものを使用する。また、3章と同様に、天然バリアの安全機能を考慮しないため、人工バリア中を移行した核種は瞬時に生物圏に達する。なお、本検討では簡単化のため、オーバーパックの核種閉じ込め性能、および緩衝材の収着による核種移行遅延性能は、第 2 次取りまとめのレファレンスケースの設定値で固定する。

Cs-135 は、可溶性であるため本解析で考慮した安全機能は、ガラスの閉じ込め性能、および緩衝材の核種閉じ込め性能である。以下に解析における安全機能の取り扱いを述べる。

- ガラスの閉じ込め性能
 - ガラスの閉じ込め性能は、ガラスの溶解速度のパラメータで表現する。
 - ガラスの閉じ込め性能が ON の場合は第 2 次取りまとめの設定値、OFF の場合は、瞬時溶解すると仮定する。
- 緩衝材の核種閉じ込め性能
 - 緩衝材の核種閉じ込め性能は、3 章の解析に基づき、緩衝材中の拡散係数および掘削影響領域通過流量のパラメータで表現する。
 - モンテカルロシミュレーションにおいて、拡散係数と掘削影響領域通過流量を独立に取り扱った場合、地下水流動の観点から明らかに矛盾した解析ケースが設定される恐れがある。すなわち、モンテカルロシミュレーションでは、パラメータに設定したレンジからランダムにサンプリングを行い、それらを組み合わせるため、たとえば、緩衝材中に早い移流が生じて入る場合（拡散係数が極めて大）に、緩衝材外側の地下水流動が極めて遅い（掘削影響領域通過流量が極めて小）といったケースが生じる可能性がある。このような矛盾したケースが設定されることを避けるため、緩衝材から移流により移動する地下水量と掘削影響領域通過流量が等しくなるものと仮定し、モデル化を行う。
 - 安全機能の ON と OFF の間を補完するために設定する拡散係数の幅は、一般的な拡散係数の大きさをはるかに超える領域も存在する。この場合、拡散現象ではなく移流現象による移行を想定する必要がある。このため、ここでは数学モデルとして拡散方程式を用いるのではなく、移流拡散方程式を用いることとする（実際、拡散方程式の拡散項を大きくすると、解が振動し適切な解が得られない）。
 - ここでは拡散係数の ON と OFF の過渡状態を考慮するために、移流拡散現象を想定し、移流と拡散の比として定義されるペクレ数（以下、「Pe 数」という）を指標として緩衝材中の核種の移行速度をコントロールする。すなわち、緩衝材の核種閉じ込め性能が ON の場合、緩衝材中は拡散支配となり Pe 数は 1 より十分低い値となり、緩衝材の核種閉じ込め性能が低下し移流支配となる場合は、Pe 数は 1 を超えて大きくなる。なお、現象論的には、緩衝材中で移流を仮定することの意味を注意深く検討する必要がある。これらの検討は、図 2.2-1 で示したように安全機能が発揮される条件を具体化した後に実施する。

以上の概念モデルに基づき、本研究で用いた数学モデルは以下の通りである。

・ 支配方程式

Bounding analysis において GoldSim を用いて構築した人工バリア中核種移行解析モデルでは、各セルに対して次の支配方程式が適用される。

$$\frac{\partial A_{ij}^m}{\partial t} = f_{ij}^m - \lambda_{ij} A_{ij}^m + \lambda_{IJ} A_{IJ}^m + S_{ij}^m \quad (4-1)$$

- A_{ij}^m : セル m での元素 i の同位体 j の核種量[g]
 f_{ij}^m : セル m に流入／流出する拡散フラックスあるいは移流フラックス[g/y]
 S_{ij}^m : セル m への外部ソース[g/y]
 t : オーバーパック破損後の経過時間[y]
 λ_{ij} : 崩壊定数[1/y]

(当該核種およびその親核種を表すパラメータインデックスとして、ij (元素 i の同位体 j) および IJ (元素 I の同位体 J) を用いている。)

・ ガラスの溶解

ガラスの溶解については、ガラスマトリクスが一定の割合で溶解するモデルを定義する。この場合、核種はガラスの溶解に伴いガラス固化体中での核種溶存比に応じてガラスから溶出する(調和溶解)。すなわち、ガラス固化体中からの核種の溶出 ($S_{ij}^{Glass \rightarrow Reservoir}$)、および緩衝材への核種の放出 ($f_{ij}^{Reservoir \rightarrow Buffer}$) を含む内側境界条件は、式(4-1)中での f 、 S が以下のように表される。

$$S_{ij}^{Glass \rightarrow Reservoir} = M_{ij}^{Glass} \cdot g_{Si} \quad (4-2)$$

$$f_{ij}^{Reservoir \rightarrow Buffer} = D_i^r (C_{ij}^{Reservoir} - C_{ij}^1) \quad (4-3)$$

- M_{ij}^{Glass} : ガラス固化体中の元素 i の同位体 j のインベントリ[g]
 g_{Si} : ガラス固化体の体積減少率[1/y]
 $C_{ij}^{Reservoir}$: ガラス固化体近傍の仮想的な領域 (以後、この領域を「リザーバ」と呼ぶ) における元素 i の同位体 j の濃度[g/m³]
 C_{ij}^1 : 1 番目のセル中の元素 i の同位体 j の濃度[g/m³]
 D_i^r : リザーバからの元素 i の拡散移行率[m³/y]

ここで、拡散移行率 D_i^r は、以下のように与えられる。

$$D_i^r = \frac{A}{\frac{L_r}{D_e} + \frac{L_1}{D_e}} \quad (4-4)$$

- A : 拡散断面積[m²]
 L_r : リザーバセル中の拡散長さ (当該セルの長さの 1/2) [m]
 L_1 : 緩衝材中の 1 番目のセル中の拡散長さ (当該セルの長さの 1/2) [m]
 D_e : 緩衝材中の実効拡散係数 [m²/y]

(補足 : Bounding analysis において GoldSim を用いて構築した解析モデルでは、モデルの制約上、全核種一律の実効拡散係数を設定する必要がある。このため、本研究では、全核種の緩衝材中の実効拡散係数について、第 2 次取りまとめレファレンスケースにおける「Se、Cs 以外の核種」の値で固定している)

また、ガラス固化体中の核種量の時間変化 M_{ij}^{Glass} は次のように表現される。

$$\frac{\partial M_{ij}^{Glass}}{\partial t} = -M_{ij}^{Glass} \cdot g_{Si} - \lambda_{ij} M_{ij}^{Glass} + \lambda_{IJ} M_{IJ}^{Glass} \quad (4-5)$$

・ 緩衝材中の核種移行

緩衝材中の移行においては、式(4-1)中の f_{ij}^m が以下のように表される。

$$f_{ij}^m = D_i (C_{ij}^m - C_{ij}^n) + Q^m \cdot C_{ij}^m \quad (4-6)$$

- D_i : 元素 i の拡散移行率[m³/y]
- C_{ij}^m : セル m 中の元素 i の同位体 j の濃度[g/m³]
- C_{ij}^n : セル n 中の元素 i の同位体 j の濃度[g/m³]
- Q^m : セル m からセル n への流量[m³/y]

ここで、セル m からセル n への流量 Q^m は次式で表される。

$$Q^m = \left(\frac{Pe \cdot D_e}{L_b} \right) \cdot A^m \quad (4-7)$$

- Q^m : セル m からセル n への流量[m³/y]
- Pe : 緩衝材中の Pe 数[-]
- D_e : 緩衝材中の実効拡散係数 [m²/y]
- L_b : 代表長さ (緩衝材の厚さ) [m]
- A^m : セル m の外側表面積[m²]

また、拡散移行率 D_i は、以下のように与えられる。

$$D_i = \frac{A}{\frac{L_m}{D_e} + \frac{L_n}{D_e}} \quad (4-8)$$

- A : 拡散断面積[m²]

- L_m : セル m 中の拡散長さ (当該セルの長さの 1/2) [m]
 L_n : セル n 中の拡散長さ (当該セルの長さの 1/2) [m]
 D_e : 緩衝材中の実効拡散係数 [m²/y]

緩衝材中における単位体積あたりの元素 i の同位体 j の総量 A_{ij}^B は以下のように表される。

$$A_{ij}^B = \varepsilon^B C_{ij}^B + (1 - \varepsilon^B) S_{ij}^B + P_{ij}^B \quad (4-9)$$

A_{ij}^B : 緩衝材中における単位体積あたりの元素 i の同位体 j の総量
 [g/m³]

C_{ij}^B : 緩衝材中における単位体積あたりの元素 i の同位体 j の液相
 濃度 [g/m³]

S_{ij}^B : 緩衝材中における単位体積あたりの元素 i の同位体 j の収着
 濃度 [g/m³]

P_{ij}^B : 緩衝材中における単位体積あたりの元素 i の同位体 j の沈殿
 濃度 [g/m³]

ε^B : 緩衝材の間隙率 [-]

このとき、緩衝材中における単位体積あたりの元素 i の同位体 j の収着濃度 S_{ij}^B は、以下のよう
 に表される。

$$S_{ij}^B = \rho^B Kd_i C_{ij}^B \quad (4-10)$$

ρ^B : 緩衝材真密度 [kg/m³]

Kd_i : 元素 i の分配係数 [m³/kg]

また、(4-10)式が成り立つとき、

$$\varepsilon^B C_i^* + (1 - \varepsilon^B) \rho^B Kd_i C_i^* < \sum_j A_{ij}^B \quad (4-11)$$

C_i^* : 元素 i の溶解度 [g/m³]

緩衝材中における単位体積あたりの元素 i の同位体 j の沈殿濃度 P_{ij}^B は、以下のように表され
 る。

$$P_{ij}^B = A_{ij}^B - \left(\varepsilon^B C_i^* + (1 - \varepsilon^B) \rho^B Kd_i C_i^* \right) \frac{A_{ij}^B}{\sum_j A_{ij}^B} \quad (4-12)$$

この時の緩衝材中の元素 i の同位体 j の液相濃度 C_{ij}^B は、同位体存在に応じた元素の溶解度の
 分配を考慮して、以下のように求められる。

$$C_{ij}^B = C_i^* \frac{A_{ij}^B}{\sum_j A_{ij}^B} \tag{4-13}$$

・ 天然バリアへの放出

緩衝材外側と天然バリア境界、すなわち掘削影響領域においては、緩衝材外側から放出された核種と緩衝材外側を流れて天然バリアへ流れ込む地下水との瞬時混合を仮定し、さらに天然バリアへの核種の移行を考慮する。すなわち、掘削影響領域から天然バリアへの核種の放出 ($f_{ij}^{EDZ \rightarrow Hostrock}$) を含む外側境界条件については、式(4-1)中での f を以下のように表す。

$$f_{ij}^{EDZ \rightarrow Hostrock} = C_{ij}^{EDZ} \cdot Q^{EDZ} \tag{4-14}$$

C_{ij}^{EDZ} : 掘削影響領域内の元素 i の同位体 j の濃度 [g/m³]

Q^{EDZ} : 掘削影響領域通過流量 [m³/y]

このとき、掘削影響領域通過流量 Q^{EDZ} は以下のように表される。

$$Q^{EDZ} = \left(\frac{Pe \cdot D_e}{L_b} \right) \cdot A^{EDZ} \tag{4-15}$$

Pe : 緩衝材中の Pe 数 [-]

D_e : 緩衝材中の実効拡散係数 [m²/y]

L_b : 代表長さ (緩衝材の厚さ) [m]

A^{EDZ} : 掘削影響領域の外側表面積 [m²]

以上の数学モデルに基づき、GoldSim により解析モデルを構築した。また、モンテカルロシミュレーションに用いた幅を設定したパラメータを表 4.2-1 に示す。なお、リアライゼーション数は 2000 を設定した。

表 4.2-1 モンテカルロシミュレーションにおけるパラメータ設定

パラメータ	単位	設定値			備考
		分布	最小値	最大値	
ガラス溶解速度	g m ⁻² y ⁻¹	対数一様	3.65 × 10 ⁻³	2.42 × 10 ⁴	最小値=第2次取りまとめレファレンスケース設定値/100 最大値=瞬時放出(OP破損後1年で放出される値)
Csの溶解度	mol l ⁻¹	可溶性で固定			第2次取りまとめレファレンスケース設定値
Csの人工バリア(緩衝材)の分配係数	m ³ kg ⁻¹	0.01で固定			第2次取りまとめレファレンスケース設定値
Csの人工バリア(緩衝材)の実効拡散係数(De)	m ² s ⁻¹	1.2 × 10 ⁻¹⁰ で固定			
人工バリア(緩衝材)のPe数	-	対数一様	0.001	1000	移流支配から拡散支配までの核種移行の影響を考慮するため、Pe数に対して上下3桁の幅広の分布を設定した。 なお、第2次取りまとめレファレンスケースでは、人工バリア中の移流は考慮していない。

4.3 解析結果

4.3.1 全体的な傾向

4.2 節で述べた核種移行モデル、データを用いて、安全機能の ON/OFF 間の補完的条件を考慮したモンテカルロシミュレーションを行った。人工バリアからの Cs-135 の移行率に線量換算係数を乗じることにより線量を求め、全リアライゼーションにおける Cs-135 の最大線量を評価した。結果は、ガラス溶解速度と Pe 数を軸に、各リアライゼーションにおける Cs-135 の最大線量の大きさをコンター図として図 4.3-1 に示した。

傾向としては、ガラス溶解速度が高く、Pe 数が大きいほど線量が高い結果となっており、これまでの安全評価に基づく理解と整合している。また、線量のクライテリアの例として $10 \mu\text{Sv/y}$ を仮定し、この基準を上回る（あるいは下回る）パラメータの範囲を図中に示した。これから、ガラスの溶解速度が $3\text{g/m}^2/\text{y}$ （第 2 次取りまとめのガラス溶解速度の設定値の約 10 倍）以下であれば、Cs-135 の線量は Pe 数によらず $10 \mu\text{Sv/y}$ を下回る。本研究では、天然バリアの安全機能を無視しているため、この境界値は保守的な値であると考えられるが、より包括的に安全機能や核種移行に関わるプロセスを考慮したうえで上述のような範囲を明らかにすることができれば、処分場開発における設計要件や品質管理要件の検討にフィードバックできる情報が得られると考えられる。

4.3.2 安全機能と最大線量の関係

リアライゼーション毎の最大線量への安全機能の影響度を把握するため、各リアライゼーションの最大値が、

- 緩衝材の閉じ込め性能
- ガラス固化体の閉じ込め性能

のどちらの安全機能の働きによって支配されているのかを分析した。

具体的には、リアライゼーション毎に、緩衝材の閉じ込め性能が機能している場合の最大線量、およびガラス固化体の閉じ込め性能が機能している場合の最大線量のそれぞれを算出し、実際のリアライゼーションで計算された最大線量がどちらの安全機能で規定されているのかを分析した。なお、緩衝材の閉じ込め性能に規定された場合の最大線量は、

$$C_{\max} [\text{Bq/m}^3] \times \text{EDZ 地下水流量} [\text{m}^3/\text{y}] \times \text{Cs-135 の線量換算係数} [(\text{mSv/y})/(\text{Bq/y})]$$

により算出される。また、ガラス固化体の閉じ込め性能によって規定された場合の最大線量は

$$g_{\text{si}} [1/\text{y}] \times \text{Cs-135 のインベントリ} [\text{Bq}] \times \text{Cs-135 の線量換算係数} [(\text{mSv/y})/(\text{Bq/y})]$$

により算出される。図 4.3-2 に、緩衝材の閉じ込め性能が機能しているケースの最大線量の領域とガラス固化体の閉じ込め性能が機能しているケースの最大線量の領域の境界を点線で示す（数学的には上式を同時に満たす解が境界となる）。たとえば、図の右下の領域は緩衝材の閉じ込め性能が最大線量を支配しており、ガラス固化体の閉じ込め性能の線量への感度は低くなる。これは、

この領域におけるガラス固化体の溶解速度が緩衝材中の核種の移行速度に比べて十分速いため、核種の移行は緩衝材中での移流・拡散および外側境界（EDZ 地下水流量）に支配されることに起因する。

一方、図の左上はガラス固化体の閉じ込め性能が最大線量を支配しており、緩衝材の閉じ込め性能の線量への感度は低くなる。これは、この領域における緩衝材中の核種の移行速度がガラス固化体の溶解速度に比べて十分速いため、ガラス固化体からの核種の浸出率がそのまま緩衝材外側の移行率に等しくなっていることに起因する。

図 4.3-2 のように、線量と安全機能の関係が把握できれば、得られた安全評価の線量結果に照らして、どの安全機能を強化すれば効果的に安全性を高められるのかを簡便に把握することが可能となる。たとえば、第 2 次取りまとめのケースについて、Pe 数、ガラス溶解速度はそれぞれ以下のとおりである。

●Pe 数

松本ら⁹⁾は Pe 数の有効粘土密度依存性を明らかにしている（図 4.3-3）。また、第 2 次取りまとめのレファレンスデザインにおける緩衝材の有効粘土密度は、動的試験および静的試験でばらつきはあるものの、およそ 1.4 [Mg/m³]～1.8[Mg/m³]の範囲に収まっている¹⁰⁾。これらの関係から、第 2 次取りまとめの Pe 数はおよそ、 $4 \times 10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-3}$ の範囲である。

●ガラスの溶解速度

第 2 次取りまとめのレファレンスケースにおけるガラスの溶解速度の設定値は 0.365 [g/m²/y]である。

図 4.3-4 に上記範囲を示す。すなわち、第 2 次取りまとめの安全評価は緩衝材の閉じ込め性能が最大線量を支配している領域に位置する。すなわち、第 2 次取りまとめにおいて Cs-135 の線量を直接的に支配しているのは、緩衝材の閉じ込め性能であり、ガラスの核種閉じ込め機能の感度は小さい。このことは、第 2 次取りまとめのレファレンスケースを基本とする感度解析においてガラス溶解速度の感度が小さいと示されているいくつかの検討例とも合致する^{2)、6)}。

4.3.3 現象理解に基づく感度解析結果の解釈

以上の感度解析の結果は、最終的には、既往の物理・化学的な知見と照らして現実的に考慮される範囲かどうかを照査する必要がある。たとえば、第 2 次取りまとめのレファレンスケースでは、上述のように Cs-135 の最大線量は緩衝材の閉じ込め性能により規定されるが、図 4.3-2 によれば、緩衝材の閉じ込め性能が機能しない条件（たとえば、緩衝材の流出による移流の発生、EDZ 流量の増大などによる Pe 数の増加）を想定すれば、ガラス固化体の核種閉じ込め性能の線量に対する感度が高くなる。ここでは、本研究の感度解析によって導き出された安全機能が発揮される条件が、現状の現象理解と照らして現実的に考慮すべき範囲かどうかについて概略的に検討した。

図 4.3-4 より、最大線量に寄与する安全機能が切り替わる境界と第 2 次取りまとめのガラス溶解速度の設定値との交点は、Pe 数が 5×10^{-3} (log 値で約-2.3) である。すなわち、Pe 数がこの値以上になれば、緩衝材の閉じ込め性能の感度は小さくなり、ガラス固化体の核種閉じ込め性能の線量に対する感度は高くなる。

一方、上述のように、第 2 次取りまとめにおける緩衝材仕様の Pe 数は $4 \times 10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-3}$ であることから、50%以上（第 2 次取りまとめのリファレンスデザインの設定で最も高い Pe 数は 2.5×10^{-3} 。これが、上述の境界値である Pe 数 5×10^{-3} になるためには 50%の緩衝材の密度低下が必要）の緩衝材が流出しない限り、ガラスの閉じ込め性能が発揮される条件は成立しない。逆に言えば、50%以上の緩衝材の流出がなければ、Cs-135 の最大線量は緩衝材の閉じ込め性能により規定されることになる。なお、安全機能の多重性の観点からは、このような緩衝材の流出が生じたとしても直ちに安全性が損なわれるわけではなく、ガラスの閉じ込め性能が補完的に機能し、核種の移行を抑制する。

このような安全機能の相互補完のメカニズムに対する理解を深めることにより、安全機能が発揮される条件を定量的に評価することが可能になるとともに、人工バリア周囲の環境変遷や天然バリアの特性の不確実性への対応性を高めるような安全かつ合理的な処分場概念の構築に向けて、システム要素の設計要件の設定に必要な基盤情報を提供することができる。

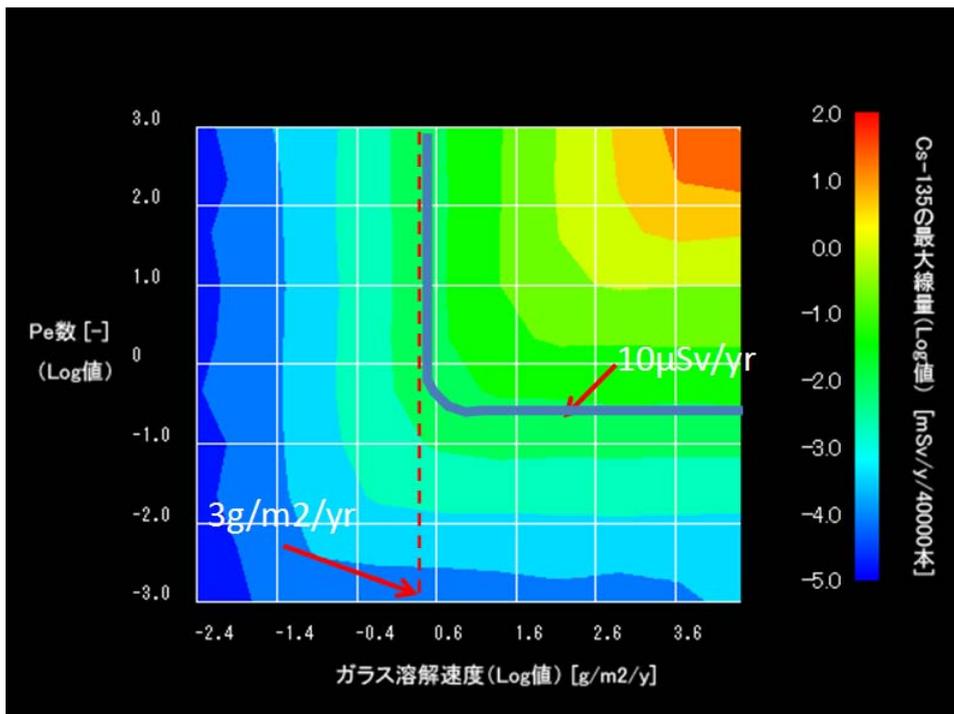


図 4.3-1 ガラス溶解速度と Pe 数を軸とした Cs-135 の最大線量のコンター図

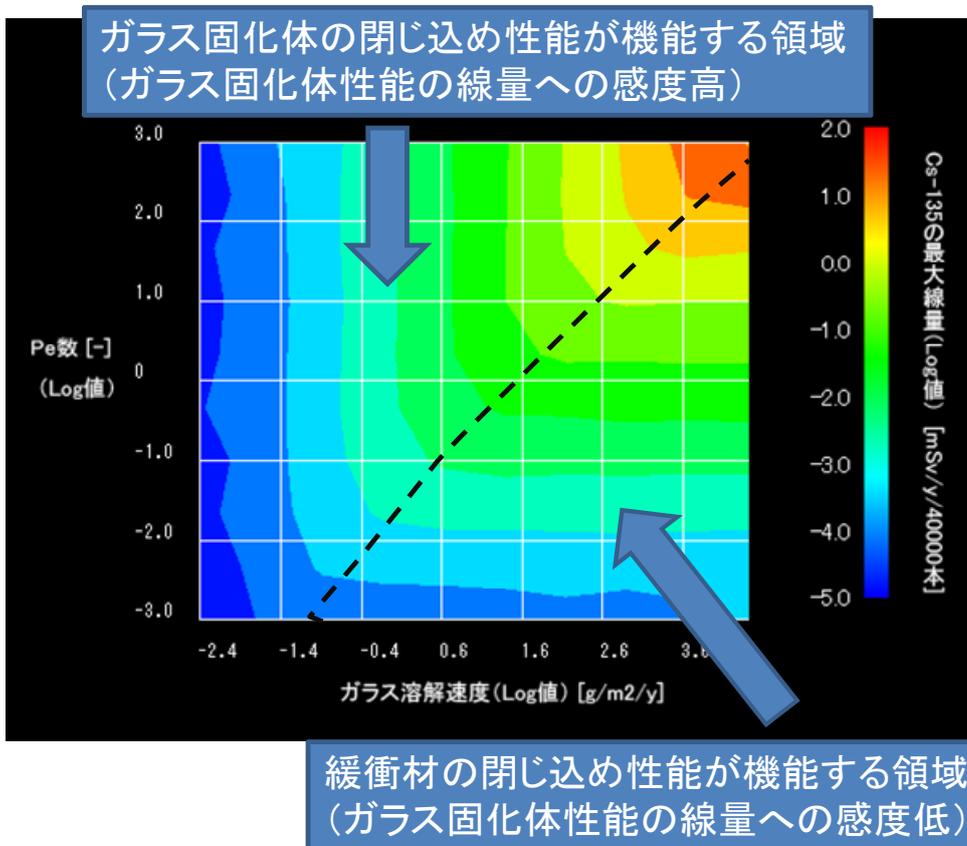


図 4.3-2 ガラス固化体の閉じ込め機能および緩衝材の閉じ込め機能が発揮される領域

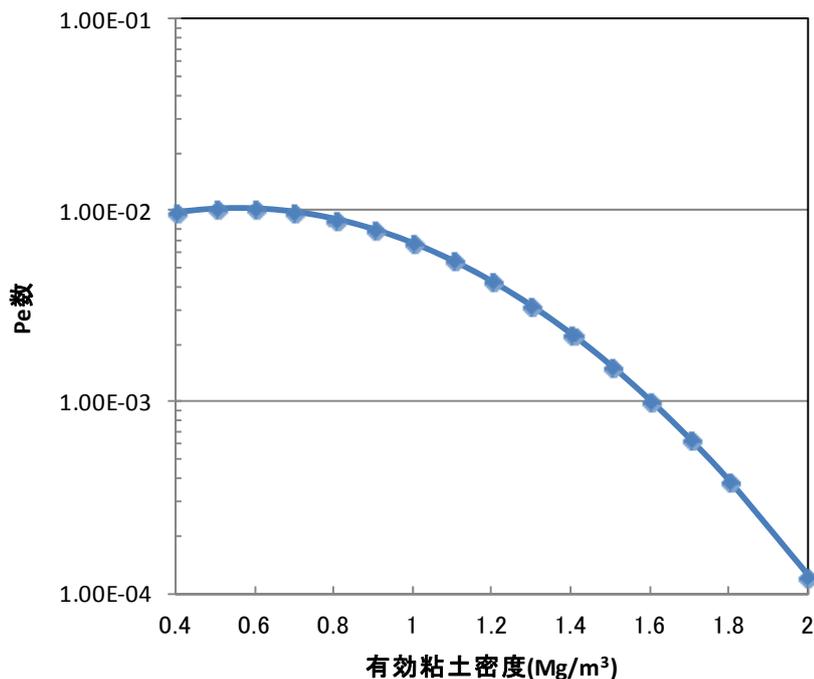


図 4.3-3 Pe 数と有効粘土密度の関係(松本ら⁹⁾に示されている関係式に基づき作成)

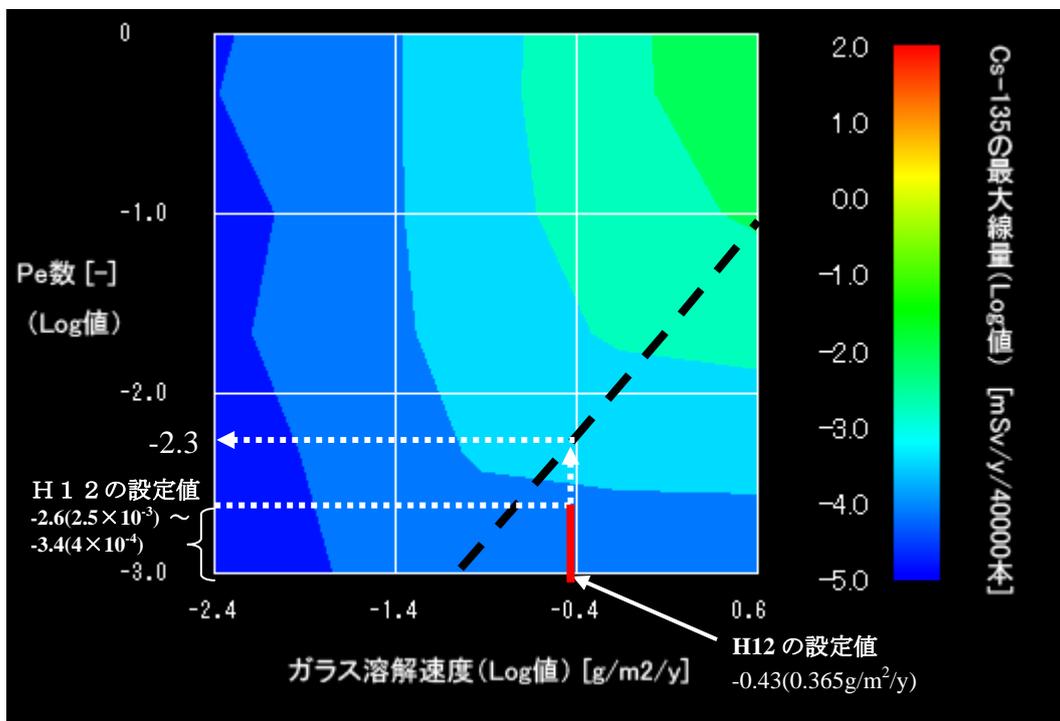


図 4.3-4 安全機能が発揮される条件と第2次取りまとの条件との比較
(図 4.3-2 に第2次取りまとの条件をプロット)

5. まとめ

地層処分システムの安全機能のうち、特に人工バリアの安全機能に着目し、安全機能の多重性について分析することを目的として、個別の安全機能の性能や安全機能間の相関関係を明らかにするための手法を構築した。これに基づき、安全機能の一つずつ地層処分システムに付加することにより、線量がどのように低減しうるのかを評価した。代表的な4つの核種に着目して、解析結果を相互に比較・分析した結果、個別に安全機能の評価した場合、いずれの核種においても、緩衝材の収着や拡散といった安全機能による最大線量の低減効果は低く、ガラスの溶解速度の相対的低減効果は高い結果となった。これは、処分システム全体を対象として実施されているガラスの核種閉じ込め性能に対する線量への感度として得られている既往の知見とは異なるものであった。

さらに、安全機能間の関係についても分析するために、ONとなる安全機能を複数考慮し、これを組み合わせた解析を行い、安全機能の相互補完の組み合わせや、安全機能間の相対的重要度について検討した。この結果、複数の安全機能の相互補完の関係が明らかとなった。たとえば、Cs-135では、ガラスの核種閉じ込め性能がOFFの場合（すなわちガラス固化体が瞬時に溶解する場合）であっても、緩衝材中での拡散・収着と緩衝材からの核種の放出の抑制が同時に機能することによって、ガラスの核種閉じ込め性能とほぼ同等の線量低減効果が発揮された。このような安全機能の相互補完の関係が地層処分の長期にわたる安全確保をより確実なものにしていると考えられる。また、緩衝材の閉じ込め性能や溶解度制限による閉じ込め性能が機能している場合は、ガラスの閉じ込め性能の最大線量への感度が小さい結果となった。たとえば、Np-237では、緩衝材内側および緩衝材中にNp-237の沈殿が生じ、間隙水中の濃度が低く抑えられることにより最大線量が大幅に低減するため、ガラスの核種閉じ込め性能の最大線量への感度はほとんど見られなかった。

上述のON/OFFに基づく解析では、安全機能がどのような条件で有効に機能しているのかを定量的に評価することができないため、Bounding Analysisを実施し、安全機能の性能と線量との関係を把握した。ここでは、ON/OFFの解析結果に基づき、緩衝材の閉じ込め性能とガラス固化体の閉じ込め性能に着目しそれぞれの安全機能が発揮される条件をCs-135を対象に評価した。この結果、第2次取りまとめの解析条件は、緩衝材の閉じ込め性能が機能する条件であり、ガラスの閉じ込め性能の感度が小さいこと、また、ガラスの閉じ込め性能の感度が高くなる条件は、Pe数が高い範囲に限られることから、母岩の地下水流速が小さく、緩衝材の品質が適切に管理されている限りにおいては、緩衝材中のPe数が低く維持されることにより、ガラスの閉じ込め性能が優位に発揮される可能性は小さいことがわかった。

このような知見は、今後明らかとなる地質環境条件の特徴を考慮して、地層処分システムを構成するシステム要素の安全機能に対する性能要求を検討するうえで、重要な知見になると考えられる。

今後は、天然バリアの安全機能を含めて検討し、さらに感度解析から導き出される知見を、既往の物理・化学的な知見と照らして現実的に考慮される範囲かどうか照査し、セーフティーケースの構築に資する基盤情報として整理していく。

参考文献

- 1) OECD/NEA : "Review of Safety Assessment Methods, A Report of the Performance Assessment Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee", OECD Nuclear Energy Agency (1991).
- 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—, 分冊3 地層処分システムの安全評価」, JNC TN1400 99-023 (1999).
- 3) Nagra : "Project Opalinus Clay, Safety Report, Demonstration of Disposal Feasibility for Spent Fuel, Vitrified High-level Waste and Long-lived Intermediate-level Waste (Entsorgungsnachweis)", National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Technical Report 02-05, Wettingen, Switzerland (2002).
- 4) SKB : "Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation, Main Report of the SR-Can project", Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report, TR-06-09 (2006).
- 5) 日本原子力学会 「地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント」 特別専門委員会 : “地層処分対象放射性廃棄物の品質マネジメント, ~地層処分において必要と考えられる高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の特性~ 報告書”(2010).
- 6) 日本原子力学会 「イエローフェーズ含有ガラス固化体評価」 特別専門委員会 : “イエローフェーズを含むガラス固化体の処分時影響評価試算結果の妥当性について” 報告書 (2008).
- 7) 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 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
- 8) GoldSim Technology Group LLC: “GoldSim Contaminant Transport Module User’s Guide”, GoldSim Technology Group LLC (2010).
- 9) 松本一浩, 菅野毅, 藤田朝雄, 鈴木英明 : “緩衝材の飽和透水特性”, PNC TN8400 97-296 (1997)
- 10) 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).