

セーフティケースへの情報統合—NUMO 包括的技術報告書を例として

藤山哲雄*1

地層処分は、数万年以上にわたり放射能が残存する放射性廃棄物を地下深部に隔離して閉じ込め、人間の生活環境に影響を与えないよう安全性を確保する。このような長期間の安全性をどのように確保するのかについてはステークホルダーの関心が高く、地層処分の安全性に関するコミュニケーションを行っていくうえでの重要な論点の一つである。事業者がステークホルダーに対して処分場の安全性について説明していくに当たっては、安全性の論拠としてセーフティケースに統合される情報がその技術的な土台（拠り所）となる。NUMOは、特定のサイトを対象としないセーフティケースとして、わが国の地質環境に対して安全な地層処分を実現する方法を説明した「包括的技術報告書」を公表している。本稿では、安全確保にかかわる情報をセーフティケースに統合した例として、包括的技術報告書に示した長期の安全確保にかかわる論拠の要点を紹介している。また、これまでのNUMOの経験から、多様な科学技術分野における専門家との安全コミュニケーションにおいて留意すべき地層処分特有の論点について考察している。

Keywords: 地層処分, 安全コミュニケーション, セーフティケース, 長期安全性

1 はじめに

セーフティケースは、処分場の安全性の裏付けとなる可能な限りの技術的な証拠、論拠や論述などを体系化し、様々な側面から安全性にかかわる議論を積み上げた総合的な文書である（IAEAの安全用語集[1]では「ある施設または活動の安全を裏付ける論拠及び証拠を収集したもの」と定義されている）。事業者が処分場の安全性に関してステークホルダーとコミュニケーションを行っていくうえでは、セーフティケースに統合される情報がその技術的な説明の土台（拠り所）となる。NUMOは、特定のサイトを対象としないセーフティケースとして、わが国の地質環境に対して安全な地層処分を実現する方法を説明した報告書「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—」（以下、包括的技術報告書）[2]を2021年2月に公表している。包括的技術報告書では、最新知見に基づき、処分場を閉鎖する前までの段階（建設・操業段階）、および処分場を閉鎖した後の数万年以上の長期にわたる安全性を確保するための考え方や方法、その成立性を示す論拠などを示している。

以下では、日本原子力学会2021年秋の大会において開催されたバックエンド部会企画セッション「地層処分に関する安全コミュニケーション」の講演2として報告した内容から、セーフティケースへの情報統合の例として、包括的技術報告書に示した論拠のうち、特に長期の安全確保にかかわる論拠の要点を紹介する。また、多様な科学技術分野における専門家と安全コミュニケーションにおいて留意すべき地層処分特有の論点について考察する。

2 地層処分の長期の安全確保に関わる論拠

2.1 地下深部の一般的な特徴と地層処分の基本概念

地下深部の地質環境が一般的に有する以下の性質は、地層処分の長期の安全性を支える論拠の一つである。

- ・地下深部の地下水は、酸素がほとんど存在しない還元状態にあることから、地下水との接触による物質の腐食や溶解などが起こりにくい。このため、放射性廃棄物に含まれる放射性物質は地下水に溶けにくく、多くが廃棄物の周りに沈殿物として残存する。
- ・地下深部では地下水の流れが地形の影響を受けにくい。そのため、地下水の流れが極めて緩慢である。このため、地下水に放射性物質が溶解しても、周囲の岩盤に移動しにくい。
- ・岩盤に含まれる鉱物は、地下水中に溶解している多くの種類の物質を収着する性質を有する。このため、地下水の動きに応じて放射性物質が移動しようとしても、その動きが抑制される。
- ・化石燃料が数億年といった長い時間をかけて形成されて地下に保存されている例などからもわかる通り、地下深部の環境は長期にわたって変化が小さく安定的である。このため、上記の放射性物質を閉じ込める性質は長期にわたって維持される。

地層処分は、このような地下深部の地質環境が本来的に有する放射性物質の隔離・閉じ込め機能（天然バリア機能）に工学的な対策による閉じ込め機能（人工バリア機能）を組み合わせることで、放射性廃棄物を長期にわたって人間の生活環境から隔離し、地下深部に閉じ込める多重バリアシステムを構築する。これにより、放射性物質が地下水に溶解してもその量は微量であり、人間の生活環境に到達するまでには非常に長い時間がかかる。その間に放射能は減衰し、結果として将来の人間に対する放射線の影響を受け入れ可能な低いレベルに抑えることができる。これは国際的に合意されている地層処分の基本概念である。

2.2 変動帯に位置するわが国における地層処分に適した地質環境の存在

火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象が活発なわが国において、数万年以上にわたる長期の安全確保に適した地質環境が存在するのかについては、しばしばステークホルダーから懸念が示される。例えば、処分場近傍で火山活動が生じれば、処分場の隔離機能を損なう恐れがあるとともに、火山近傍は熱水や低pHの地下水が存在するため人工バリアの性能を低下させる可能性が

Integration of safety arguments and evidences into a safety case carried out at NUMO by Tetsuo FUJIYAMA (tfujiyama@numo.or.jp)

*1 原子力発電環境整備機構

Nuclear Waste Management Organization of Japan
〒108-1104 東京都港区芝4丁目1-23

本稿は、日本原子力学会2021年秋の大会企画セッション「地層処分に関する安全コミュニケーション」における講演内容に加筆したものである。

ある。また、処分場内で規模の大きな断層が活動するとその活動の範囲内に存在する人工バリアの閉じ込め機能が損傷するとともに、破碎された岩盤の範囲（破碎帯）の透水性が上昇し、放射性物質の主要な移行経路となり得る。したがって、処分場の設置場所は、このような自然現象の著しい影響範囲を避けて選定する必要がある。

わが国の火山活動は、第四紀（約 260 万年前～現在）の間、位置がほとんど変化していないことや、大規模なカルデラを有する火山を除くと多くの火山で過去のマグマの活動は概ね半径 15 km の範囲に収まっていることが既存データにより明らかとなっている[3]。また、日本列島はプレートの運動により大局的には地殻が圧縮された状態にあり、地殻にひずみが徐々に蓄積されて岩盤の強度が耐えきれなくなったときに断層が活動することから、プレートの運動傾向が大きく変わらなければ、基本的に地殻の中の同じ弱面（断層）が繰り返し活動すると考えられている。断層活動によって影響を受けた破碎帯の幅は、断層の長さの 1/150～1/350 程度との知見がある[3]。このように、処分場に著しい影響をもたらす自然現象の影響範囲は限定的であり、これらの自然現象を支配するプレート運動が現在まで数百万年以上にわたり大きく変化していないことや、地域差はあるものの現在のテクトニクスが数十万年オーダーで継続していることなどの科学的知見を拠り所として、サイトの選定時に著しい影響範囲を回避すれば、将来 10 万年程度であればこれを回避することができると考えられる。また、著しい自然現象の影響が及ぶ範囲を避けた場所では、地下深部の岩盤が本来的に有する地層処分にとって好ましい熱環境（地温が低いなど）、水理場（地下水流動が緩慢など）、力学場（岩盤の変形が小さいなど）、化学場（高 pH あるいは低 pH の地下水でないなど）を有する場所が、わが国でも広く存在すると見込まれている[3]。

以上が変動帯に位置するわが国でも地層処分に適した地質環境を選定できるとする基本的な論拠であり、「第 2 次取りまとめ」（1999）[4]で示された後、東北地方太平洋沖地震後に集積された最新の知見も踏まえて、地層処分技術 WG（2014）[3]によって再確認されている。

2.3 長期の安全性を確保するための基本的な考え方

2.1 および 2.2 を踏まえて、わが国における処分場の長期の安全性は、候補地となるサイトに対して次のような作業を行って確認する。

- ・段階的な調査（文献調査、概要調査、精密調査）により、処分場に重大な影響を与える可能性のある自然現象（活断層や火山活動など）が及ぶ範囲が将来 10 万年程度にわたって避けられることを確認する。また、熱環境、水理場、力学場、化学場に関する地質環境特性を定量的に把握し、将来にわたって処分場の安全機能に影響を与えない範囲で維持される見込みがあるかを評価する。将来の地質環境の変化は、過去数百万年から現在に至るまでにその場所の地質環境が形成されてきた地質学的な変遷を把握し、その傾向を将来にも当てはめることによって評価する。
- ・地質環境や人工バリアの安全機能などにかかわる様々

な不確実性を考慮して、所要の安全性に対して十分な余裕を持たせた処分場（人工バリア、地下施設、地上施設など）を設計する。

- ・設計した処分場の安全性に将来影響を及ぼす可能性のある事象を網羅的に抽出し、安全評価上考慮すべき「シナリオ」を設定する。このシナリオを表現する数学的なモデルを用いて、処分場の将来の状態変遷や、処分場から人間の生活圏まで放射性物質が移行する現象、および将来の人間が放射性物質を摂取し被ばくした場合の影響などを解析的に評価する。この際、現象理解や解析モデルの概念化などにかかわる不確実性を考慮して、科学的な合理性を有する範囲で保守性を失わないようにシナリオ、モデル、パラメータの設定を行う。これによって算出される放射線学的影響が許容できる範囲であるか（規制機関が提示した安全基準を下回るか）を確認し、安全性が満たされないと判断される場合には、地質環境の調査・評価の拡充や処分場設計の見直しなどを行い、安全性を確保できるようにする。
- ・以上の一連の技術的な検討に関する知見・データや評価結果など、あらゆる論拠をセーフティケースとして取りまとめ、規制機関をはじめとしたステークホルダーの確認を受ける。

2.4 包括的技術報告書に統合された長期の安全確保に関する論拠

サイトを特定しない段階において長期の安全確保の見通しを示すために、包括的技術報告書[2]では、第 2 次取りまとめ以降の最新知見を反映して、以下のような主張を支える論拠を取りまとめている。

2.4.1 所要の安全機能を有する処分場を構築するための技術基盤

① 処分場の設置に適した地質環境を選定する技術

サイトの適格性を判断するための要件や基準、これらに照らして安定な地質環境を選定するための方法論や、わが国の多様な地質環境に対してその特性を調査・評価する技術、取得した地質環境情報を処分場の設計および安全評価の対象となる地質環境モデルとして解釈・統合するための技術を整備してきている。こうした処分場の設置に適した地質環境を選定する技術の適用性については、日本原子力研究開発機構（JAEA）により進められてきた深地層の研究施設計画などにおける実証試験や、わが国の地下深部に広く分布する岩種の特徴を反映した地質環境モデルを具体的に提示することなどによって確認している。これらのことから、文献調査の段階以降、処分場の設置に適した地質環境を選定していくうえで、準備しておくべき技術基盤は適切に整えられてきている。

② 所要の安全機能を有する処分場を設計する技術およびこれを実現するための工学技術

サイト環境条件を考慮して所要の安全機能を有する処分場を設計するため、処分場の各構成要素に期待する安全機能が発揮されるための設計要件を明らかにし、これを満足するように処分場の基本的な仕様を設計する方法を提示している。また、多様なサイト条件などに柔軟に対応するた

め、処分概念の多様化や設計オプションの技術開発を進めている。処分場を建設し、操業・閉鎖するために必要な関連技術についても、他の土木施設における十分な実績の蓄積とともに地層処分への適用に向けた技術開発が着実に進められており、十分な信頼性をもって実用化できる見通しを得ている。これらによって、サイトの地質環境条件に対して所要の安全機能を有する処分場を設計し、これを工学的に実現することに関して、文献調査以降の段階を進めていくうえで必要となる技術基盤を整えている。

③ 設計した処分場の安全性を評価する技術

国際的な議論の進展や、地層処分システムのふるまいおよび放射線学的影響評価に関する解析技術の進歩などを踏まえ、地質環境モデルと設計した処分場に対応して、閉鎖後長期の安全評価を行うためのシナリオの構築、評価モデルおよびパラメータの設定、線量評価という一連の方法と解析技術の基盤を整備している。これを技術的な基盤として、文献調査以降の事業段階を進めていくうえで、処分場の安全性を評価するための準備を整えている。

2.4.2 わが国の一般的な地質環境を想定した処分場に対する安全評価による安全性の見通し

全国規模で取得されている既存データをもとに、わが国の地下深部に広く分布する深成岩類、新第三紀堆積岩類、先新第三紀堆積岩類という異なる特徴を有する三種類の岩種を検討対象母岩として選定し、各岩種の特徴を反映した地質環境モデルの構築を行い、これを想定されるサイトの地質環境条件として、処分場の仕様例を具体的に示した。設計した処分場に対する安全評価を行った結果、閉鎖後の長期において処分場によってもたらされると考えられる線量は、国内外の動向を参考として仮設定した安全性を検討するための「めやす」線量を下回ることが示された。

また、不確実性が大きい将来の人間の生活様式や地表環境の設定を必要としない補完的指標として、処分場の放射能に関する長期の閉じ込め性能や、処分場に残存する放射性物質による潜在的放射性毒性と天然ウランのそれとの比較などを示した。さらに、地質環境の長期安定性や人工バリアの長期挙動に関する安全評価上の設定の合理性を傍証するナチュラルアナログの事例を示した。これらにより閉鎖後長期に人間の生活環境に有意な放射線影響を与えないことを示唆する根拠を補強した。

2.4.3 セーフティケースとしての信頼性の提示

セーフティケースとしての信頼性を論じるためには、一連の技術検討に対する品質が確保されていること、不確実性を特定しこれに対処していること、技術的な検討を支えるマネジメントが的確に行われていることなどが必要であり、包括的技術報告書では以下のように対応している。

① 技術的品質の確保

包括的技術報告書における一連の技術検討においては、例えば、地質環境モデルの構築に当たっては品質に留意して取得された地下深部のデータを活用すること、解析手法や計算コードについては十分な実績があり品質が保証されているものを適用すること、モデルやデータ設定の技術的な妥当性などについて外部の専門家に確認を行いながら検討を実施することなど、技術的品質の確保に関する論拠を

示している。

② 不確実性への対処

人工バリアの設計では、地質環境特性の評価やバリア材の長期的な変質評価などの不確実性に対応するため、所要の設計要件に対して十分な余裕を持たせた仕様例を示した。また、基本シナリオの安全評価では諸外国の安全規制で示されている最も厳しい線量基準 ($10\mu\text{Sv/y}$) を事業者の目標として設定して検討を行うことや、十分な保守性を確保したモデル化やパラメータ設定により安全評価解析を実施している。

③ マネジメントシステムの開発

安全な処分場を実現するためには、NUMO と関係機関が連携して技術開発を進めていくためのマネジメント、今後具体化されていく規制要件といった上位の要求事項に応じた処分場の設計要件などを階層的に管理する要件マネジメント、膨大な知識・情報・データを分野間・世代間で共有・継承していくための知識マネジメント、長期の事業展開を見据えた人的資源に関するマネジメントなどを体系的に実施していくマネジメントシステムの開発が必要であり、これらにかかわる事業者としての方針や考え方を示している。

2.4.4 不確実性の低減に向けた技術課題の特定

地質環境の調査・評価、処分場の設計および建設・操業・閉鎖、安全評価にかかわる技術については、さらなる信頼性向上に向けた取り組みが必要であり、これに向けた技術課題を提示している。

包括的技術報告書は、特定のサイトを対象としないセーフティケースとして、地質環境モデルの構築においては、適切なサイト選定によって処分場を設置する母岩は隆起・侵食の影響が及ばない十分な深度にあり、好ましい地質環境特性が長期にわたって維持されるものとしたこと、また、地質環境特性の空間的な不均質性などに起因する調査データの不確実性などはサイトに依存するため、各検討対象母岩について代表的な特性値を設定したことなど、地質環境の時間的・空間的の評価にかかわる不確実性を直接的に取り扱うことは行っていない。地質環境の長期的な変遷を反映した地質環境モデルの構築と処分場設計や安全評価への反映は、サイト特定後の段階的な調査において具体的に実施していく。

包括的技術報告書は、以上の 2.4.1～2.4.4 に統合した多面的な論拠をもって、サイトを特定しない段階において、わが国の地質環境において長期の安全確保ができる見通しを示している。

3 安全コミュニケーションにおいて留意すべき地層処分特有の論点

これまで NUMO が実施してきた包括的技術報告書に関する説明会[5]や様々な対話活動の経験から、多様な科学技術分野における専門家との地層処分の安全コミュニケーションにおいて留意すべき点として、以下を挙げるができる。

3.1 数万年以上といった長期における自然現象（特に断層活動）の影響

2.2 で述べた処分場に著しい影響をもたらす可能性のある自然現象のうち、特に断層活動については、その活動の予測が困難であり、数万年以上にわたって安定な場所を選定することはできないとの懸念が示されることが多い。サイト近傍に存在する規模の大きな活断層については、入念な調査を行うことでその位置を把握し、影響を回避することは可能と考えられる。しかし、調査時に活断層の見落としが生じる可能性や、サイト調査では把握しきれない深さ数 km 以上の地下深部から将来的に断層が伸展してくる可能性を科学的に否定することはできない。

これに対して、包括的技術報告書の安全評価では、地下から伸展してきた断層が処分場を直撃する確率は 2.2×10^{-7} (回/年) 程度と 100 万年に 1 回も生じない極めて小さな確率であること、またこのような事象が処分場閉鎖後 1,000 年時点で起こることを仮定して地表への放射線影響を評価した結果は年間 14 mSv であり、人間の健康にただちに影響を与えるものではないことを示している[2]。こうした論拠には、なお研究開発を行って信頼性を高めていく必要がある。しかしながら、安全コミュニケーションにおいては、将来にわたって断層活動を確実に回避できることを保証できなければ処分場は成立しないというわけではなく、事象の発生確率の低さとこれが生じた場合の影響の大きさから、将来の断層活動によりもたらされるリスクに基づく検討を様々な専門家の見解を取り入れながら進めていく必要性を示すことが重要と考えられる。

3.2 解析による長期的な評価に対する信頼性

数万年以上の長期を対象とした処分場の状態変遷や核種移行挙動など、安全評価で行う解析の結果が信頼できるのかという懸念がしばしば示される。数万年以上の長期に対する解析的な評価結果に不確実性は避けられない。ここで重要なことは、こうした現象自体を科学的な厳密性をもって取り扱い、どれだけ真の値に近い結果を出すかということではなく、地層処分の安全性を判断するという意味で十分な解析を行っているかどうかである。解析モデルやデータの整備に当たっては、保守性を確保したモデル化やパラメータ設定、解析コード・モデル・パラメータの妥当性に関する専門家の確認、複数のコードを用いた解析による最も保守的な結果の採用など、数値解析の信頼性確保に必要なあらゆる手立てを講じる。また、解析モデルや計算コードについては、理論解や室内実験との比較、ベンチマークとなる解析コードとの比較といった検証 (Verification)、および現場実験や地下研究所などで取得した様々な挙動の実測データに対する再現性の確認といった妥当性確認 (Validation) をできる限り行う。さらに、セーフティケースでは、安全評価による解析に加え、ナチュラルアナログを活用して長期予測に対する信頼性の傍証などを行う。安全性のコミュニケーションでは、このような考え方とそれに基づく論拠を共有することで、信頼性を議論することが重要と考えられる。

4 おわりに

長期における地層処分の安全性については、将来の人間が有意な放射線影響を受けるリスクは受け入れ可能な十分に低いレベルであるとする論拠が、十分に信頼に足るものとしてステークホルダーに受け入れられることが必要である。セーフティケースは、統合された多面的な論拠によってこの判断の材料を提供する。セーフティケースは事業の進展に応じて段階的に詳細化し、処分場を閉鎖するまで信頼性の向上を図るものであり、最新知見を踏まえた安全性の見通しとともに、その段階における不確実性を明らかにし、次段階においてそれにどのように対処するかを示すことが重要である。専門家を含めた多様なステークホルダーに地層処分の安全確保に関して相互理解を得ていくためには、個別の技術分野にかかわる論拠のみならず、このようなセーフティケースに統合された論拠の信頼性に基づく安全性の説明やその論証構造の全体像を示し、コミュニケーションを進めていくことが重要と考えられる。

参考文献

- [1] IAEA: IAEA Safety Glossary, terminology used in nuclear safety and radiation protection. 2018 edition (2018).
- [2] 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—. NUMO-TR-20-03 (2021).
- [3] 総合資源エネルギー調査会: 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価—地質環境特性および地質環境の長期安定性について—. 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術 WG (2014).
https://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/chisou_shobun_wg/report_001.pdf (accessed 2021-12-10)
- [4] 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—総論レポート. JNC TN1400 99-020 (1999).
- [5] NUMO ホームページ: 地層処分技術オンライン説明会 (改訂した包括的技術報告書).
<https://www.numo.or.jp/technology/techpublicity/lecture/210513.html> (accessed 2021-12-10)