

放射性廃棄物処分場の施設設計における ALARA と BAT の在り方 —スウェーデンの事例調査—

中林亮*¹ 杉山大輔*¹ 田中真悟*¹ 黒田知真*¹

わが国の中深度処分に係る規制基準では、ALARA (As Low As Reasonably Achievable) と BAT (Best Available Technique) の概念に基づく施設設計が求められる見込みである。しかしながら、具体的な対応策を示した研究事例は見当たらない。他方、諸外国の放射性廃棄物処分事業では ALARA や BAT の概念を適用した施設設計がなされてきた事例がある。本稿では、スウェーデンにおける取り組みを調査・整理し、わが国への適用を見据えた ALARA と BAT の提示手法について考察する。

Keywords: 放射性廃棄物処分, 施設設計, ALARA, BAT, 最適化, スウェーデン

Regulatory standards for intermediate-depth disposal in Japan will require facility design based on ALARA (As Low As Reasonably Achievable) and BAT (Best Available Technique). However, there are no examples of studies that show specific measures to meet the regulatory requirements for ALARA and BAT. On the other hand, there are some examples of facility design based on ALARA and BAT in radioactive waste disposal projects in other countries. In this paper, the Swedish approach is reviewed, and the methods of presenting ALARA and BAT are discussed to apply them to radioactive waste disposal projects in Japan.

Keywords: Radioactive waste disposal, facility design, ALARA, BAT, optimization, Sweden

1 はじめに

1.1 背景

原子力規制委員会では中深度処分に係る規制基準等¹⁾の改正ならびに策定作業が進められている[1]。中深度処分に係る規制基準等のうち、施設設計に関する要求事項として、廃棄物埋設地の設計プロセス（人工バリアの設計等に係る選択肢の設定、廃棄物埋設地の設置場所に係る選択肢の設定、ならびに設計オプションからの最終的な設計の選定に係るプロセス）の合理性を説明することが埋設事業者求められる見込みである[1, 2]。例えば、規制期間終了後の安全機能に着目した人工バリアの設計については、材料管理および施工管理の方法の見通しを含め、設置される環境において技術的に施工可能なものであることに加えて、廃棄物埋設地の外への主要な放射性物質の漏えいを防止する機能または低減する機能が優れているものを選択肢として設定し、天然バリアの選択肢と組み合わせて、「通常の状態において最も可能性が高いと考えられる設定」において生活環境への主要な放射性物質の移動抑制機能に係る性能が最も優れているものを選定することが要求事項に記載されている[1, 2]。「生活環境への主要な放射性物質の移動抑制機能に係る性能」の指標としては線量を基本とすることが併記されている。要求事項に明記されていないものの、この設計プロセスの要求は ALARA (As Low As Reasonably Achievable: 合理的に達成可能な限り低く) と BAT (Best Available Technique: 利用可能な最善の技術) の概念に基づいている²⁾。今後進められていく中深度処分の事業許可申請においては、ALARA と BAT に関する当該要件への対応が不可欠となるだろう。一方で、ALARA や BAT に関する調査研究はこれまでにいくつか実施され、概念レベルの理

解は深められてきたものの[3-5]、設計への反映方法の具体化には至っていないのが現状である。

諸外国における放射性廃棄物処分事業を見渡すと、規制の考え方に ALARA や BAT の概念が取り入れられているケースが多い。とくに、スウェーデンでは、環境法典[6]や原子力活動法[7]、規制側の規則[8, 9]において最適化と BAT の提示が要求されており、埋設事業者による使用済み燃料の地層処分場の立地・建設の許可申請が進められている。最適化とは、ALARA を推進するための継続的かつ反復的なプロセスとして認識されるべき放射線防護の原則であり[10]、ALARA の概念とほぼ同意であることから、最適化と BAT の概念に基づいて審査手続きが進められているスウェーデンの事例はわが国でも参考になるだろう。そこで本稿では、スウェーデンの放射性廃棄物処分場の施設設計に対する最適化と BAT の概念の適用事例を調査し、わが国の放射性廃棄物処分場の施設設計における ALARA と BAT の在り方について考察する。

1.2 スウェーデンにおける地層処分の事業申請と審査状況

スウェーデンにおける使用済み燃料ならびに放射性廃棄物の処分の実施主体であるスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (Svensk kärnbränslehantering AB; 以下、SKB 社という) は、2011 年 3 月に使用済み燃料の地層処分場を立地・建設する許可申請書をスウェーデン放射線安全機関 (Strålsäkerhetsmyndigheten; 以下、SSM という) とナッカ土地・環境裁判所 (以下、裁判所という) に提出した。この申請は、段階的な許認可プロセスの最初であり、SKB 社が提案する使用済み燃料を安全に長期管理する方法と場所の選定の妥当性に関する審査と判断がなされる。同時に、処分場建設に着手する前に達成すべき条件が設定されるこ

ALARA and BAT concept in the design of radioactive waste disposal facilities - A case study of Sweden - by Ryo NAKABAYASHI (r-naka@criepi.denken.or.jp) Daisuke SUGIYAMA, Shingo TANAKA and Kazuma KURODA

*1 一般財団法人電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部 生物・環境化学研究部門

Biology and Environmental Chemistry Division, Sustainable System Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

〒201-8511 東京都狛江市岩戸北 2-11-1

(Received 25 November 2021; accepted 10 May 2022)

¹⁾「核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則」や「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」、「第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」、関連する審査ガイドや解説。

²⁾ 原子力規制庁によって要求事項に対する科学的・技術的意見募集が実施された (令和 2 年 7 月 23 日から 8 月 21 日)。設計プロセスに関して寄せられた意見の回答[2]として、設計プロセスの要求は ALARA と BAT の概念に基づくものと示されている。

Table 1 Description of BAT in the Environmental Code

法制度	要件
環境法典 [6]	<p>第2章 一般考慮事項</p> <p>第2章第3条</p> <p>活動を行う、もしくは行おうとする者、または措置を講じる者は、必要な保護措置を講じ、制限を守り、人の健康や環境への損害や妨害を予防、阻止、抑制するために必要な予防措置を講じなければならない。同様な理由で、専門的な活動においては、利用可能な最善の技術を用いなければならない。</p> <p>これらの予防措置は、ある活動や措置が人の健康や環境に危害や不都合を及ぼす可能性があると思えるに足る理由がある場合、直ちに取らなければならない。</p>
	<p>第2章第7条</p> <p>第2条から第5条および第6条1段落目の要件は、それらを遵守することが不合理ではない範囲で適用される。この評価を行う際には、保護措置およびその他の予防措置の利点とその費用との比較をとくに考慮しなければならない。全面的な防衛活動または全面的な防衛のために必要な措置の場合には、この点もバランスをとる際に考慮しなければならない。</p>

とになっている。SSM は原子力活動法ならびに SSM が定めた規則に基づく審査を、裁判所は環境法典に基づく審査を実施する。2011 年 5 月には SSM の審査支援として、スウェーデン政府より OECD/NEA による国際的ピアレビューの実施を依頼し、2012 年 6 月にレビュー報告書が提出された。2016 年 6 月、環境法典に基づく審査に対する SSM の見解を裁判所に提出し、2018 年 1 月には裁判所と SSM がそれぞれ政府に意見書を提出した。SSM は処分場の建設許可を SKB 社に与えることを政府に勧告したが、裁判所は建設許可を与えるためには、銅製キャニスタの長期安定性に関する補足の証拠が必要であるという意見を述べた。2019 年 3 月、SKB 社は裁判所の勧告を踏まえた補足説明書を政府に提出した。2020 年 10 月には処分場建設予定地であるフォルスマルクが位置するエストハンマルの市議会が処分場を受け入れることを議決した。2022 年 1 月 27 日、政府は SKB 社の申請内容は環境法典と原子力活動法の要件を満たしていると判断し、フォルスマルクでの使用済み燃料の処分事業計画を承認した。本件は、環境法典に基づき裁判所に引き継がれ、裁判所により許可証の発行や操業に関する詳細な条件が規定される。また、SSM による継続的な審査が行われる予定となっており、これらのすべての許可が得られた場合にのみ、処分場の建設が開始される。上述の経緯の詳細については、SKB 社のウェブサイト (<https://www.skb.com/>, accessed 2022-2-14) や SSM のウェブサイト (<https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/>, accessed 2022-2-14)、ならびに海外情報をまとめた原子力環境整備促進・資金管理センターのウェブサイト (<https://www2.rwmc.or.jp/nf/>, accessed 2022-2-14) や調査報告書[11]を参照されたい。

本稿では、スウェーデンにおける放射性廃棄物処分場の施設設計の最適化（スウェーデン語では“*optimering*”）と BAT（スウェーデン語では“*bästa möjliga teknik*”）の在り方について調査した。環境法典と原子力活動法、SSM 規則における最適化と BAT に関する記載を 2 章に、SKB 社による最適化と BAT に対する取り組みを 3 章に、国際的な専門機関（OECD/NEA）のレビュー結果を 4 章に、SSM と裁判

所の審査意見を 5 章に記す。

2 スウェーデンの規制における最適化と BAT に関する記載

2.1 環境法典

環境法典（SFS 1998:808 [6]）は、現在と将来の世代にとつての健全な環境を保証する持続的開発の促進を目的（環境法典第 1 章第 1 条）として 1998 年に制定された法律である。環境法典の BAT に関する要件（第 2 章の第 3 条と第 7 条）を Table 1 に示す。第 2 章は「一般考慮事項」について記載されたものである。例えば、第 2 条には「人間と環境を防護するために必要な知識の取得」、第 4 条には「より危険性のない化学製品、バイオ技術有機体の使用」、第 5 条には「原材料とエネルギーの節約」等があり、一般的に考慮すべき事項の一つとして BAT が記載されている。第 2 章の第 7 条では、どのような予防措置を講じるべきかを評価する際には、複数の予防措置を比較し、ある予防措置をとることによる利点と費用とのバランスを考慮しなければならないと示されている。

2.2 原子力活動法と SSM 規則

原子力活動法（SFS 1984:3 [7]）と SSM 規則（SSMFS 2008:21 [8]と SSMFS 2008:37 [9]）における最適化と BAT に関する要件を Table 2 に示す。原子力活動法の第 5 条(b)の記載により、環境法典の第 2 章の第 3 条ならびに第 7 条に記載された BAT に関する審査が原子力活動法でも必要となる。なお、この条項は環境法典の制定後に原子力活動法に盛り込まれたものである。SSM 規則のうち、「核物質および原子力廃棄物の処分の安全性に関する放射線安全機関の規則（SSMFS 2008:21）」では、第 6 条にバリアシステムに対して BAT を適用することが定められている。また、「使用済み燃料および原子力廃棄物の最終管理における人間の健康と環境の保護に関する放射線安全機関の規則（SSMFS 2008:37）」の第 2 条で最適化と BAT の定義づけがなされ、第 4 条では最適化と BAT の適用が明記されている。

Table 2 Description of optimization and BAT in the act on nuclear activities and the Swedish radiation safety authority's regulations

法制度	要件
原子力活動法 [7]	<p>第 5 条 (b)</p> <p>この法律に基づく事項を審査する場合、環境法典の第 2 章および第 5 章の第 3 条から第 5 条までを適用する。新しい原子力発電所の建設、所有、運営の許可を審査する際には、環境法典の第 17 章の第 6 条(a)も適用される。</p>
SSMFS 2008:21 [8]	<p>第 6 条</p> <p>バリアシステムは利用可能な最善の技術を考慮して設計、建設しなければならない。</p> <p>第 6 条に関する注釈</p> <p>利用可能な最善の技術の使用は、その技術が、技術的かつ経済的観点から、この分野において工業的に使用可能であることを意味する。このことは、技術が入手可能であることを意味し、実験段階で存在しているものは含まれない。その技術はスウェーデンで入手可能なものである必要はない。</p>
SSMFS 2008:37 [9]	<p>第 2 条</p> <p>この規則では、以下の用語を次に述べられている意味において使用する。</p> <p>利用可能な最善の技術</p> <p>放射性物質の放出およびそれによる人間の健康と環境に対する有害な影響を、不合理な費用を伴うことなく制限するために利用可能な最も効果的な措置。</p> <p>最適化</p> <p>人間に対する放射線量を経済的および社会的な要因を考慮して合理的に達成可能な限り低く保つこと。</p> <p>第 4 条</p> <p>使用済み燃料や核廃棄物の最終処分においては、最適化を行い、利用可能な最善の技術を考慮しなければならない。</p> <p>第 4 条に関する注釈</p> <p>規則では、最適化を行わなければならない、その際には、利用可能な最善の技術を考慮しなければならないことを要求している。この最適化と利用可能な最善の技術は、処分場の防護能力の改善を目的として併用すべきである。</p> <p>処分場の最適化のための措置は、計算されたリスクに基づいて評価すべきである。</p> <p>最終処分に係わる利用可能な最善の技術の適用とは、処分場およびそれに付属するシステム構成要素の立地、設計、建設、操業および閉鎖が、合理的に可能な限りの範囲において、人工バリアと地層バリアの両方からの放出を防止し、制限し、遅延させるように実行すべきであることを意味している。様々な措置の間のバランスを取る際には、処分場の防護能力に対するそれぞれの影響に関する包括的な評価を実施すべきである。</p> <p>計算されるリスクに著しい不確実性が伴うケース、例えば、閉鎖から長い期間が経過した後の処分場の解析や、処分場システムの開発作業の初期段階で実施される解析等では、利用可能な最善の技術をより重視すべきである。</p> <p>最適化と利用可能な最善の技術の適用の間で矛盾が生じた場合、利用可能な最善の技術の方に優先順位を与えるべきである。</p> <p>処分場に関して反復して行われるリスク解析および継続的な開発作業を通じて蓄積される経験は、こうした最適化および利用可能な最善の技術の適用において活用すべきである。</p>

以上の規則の記載内容から着目すべき点を抽出すると、BAT は主に多重バリアシステムからの核種放出を抑制するための措置、最適化は被ばく線量・リスクの低減に重点を置き、いずれも実行可能性を考慮して合理的な施設設計に資する概念であることである。ただし、被ばく線量やリスクの評価結果の不確実性が大きい場合や施設設計の初期段階、最適化と BAT の間で矛盾が生じる場合は、BAT を優先することが強調されている。BAT に重点を置くことにより、個々のバリア構成要素の放出抑制能を高め、処分システム全体の頑健性を向上することを目的としていると考えられる。

3 SKB 社による最適化と BAT への対応

SKB 社は環境法典ならびに原子力活動法に基づく許可申請書を SSM と裁判所に提出するとともに、処分場の閉鎖後長期の安全性に関する報告書 SR-Site (以下、SR-Site 報告書という) [12]を申請書の一部として 2011 年 3 月に提出した。SR-Site 報告書には最適化と BAT に対する SKB 社の考え方についての記載がある。以下に SKB 社の考え方を概説するとともに、SR-Site 報告書や関連報告書を参照して評価事例を紹介する。

3.1 SKB 社の最適化と BAT に対する考え方

SR-Site 報告書の 2.7.3 項では、“「利用可能な最善の技術の使用」の全般的評価は、放射性廃棄物の管理方法の選択から細部にまでおよぶ広範な問題である。選択した方法の安全評価においては、この広範な問題の限られた部分しか扱うことができないし、またそうすべきである。したがって、ここでの BAT を採用していることの評価は選定したサイトにおいて、銅／鋳鉄製キャニスタ、緩衝材、および埋め戻し材を用いた、垂直定置の KBS-3 方式の枠内に限られる。”と述べている。SR-Site 報告書の 2.7 節で“許可申請書は、i) 代替方法と KBS-3 概念を選定した理由、ii) 選択した材料、バリアの寸法などに関する動機付けを備えた KBS-3 概念の技術開発についての説明を提供する報告書によってサポートされている”と述べられているように、KBS-3 概念³⁾と代替処分概念の比較について別の報告書で説明があり、KBS-3 概念の採用は BAT の使用という要件を遵守していると SKB 社は判断している（詳細は本稿の 3.2 節を参照）。そのうえで、処分場を構成するバリアの“材料や寸法の選択を、安全評価の結果に基づいて BAT の観点から論じることが、ある程度可能である。”と説明している。

上述の理由については、SR-Site 報告書の 2.7.4 項から読み解くことができる。“実際のところ、この 2 つ（著者補足：BAT と最適化）を明確に区別するのは難しいことが多い。”と述べており、この理由として、“BAT の議論は、好ましい方法の安全評価の結果に基づく場合、安全評価で選択または分析する代替技術が一般的にないため、既に選択した解決策の最適化の説明に「降格」されることが多い。

（「最適化」という言葉は、SSMFS2008:37 と同じ意味で使われている。すなわち、「経済的・社会的要因を考慮した上で、人間に対する被ばく線量を合理的に達成可能な限り低く抑える」、いわゆる ALARA の原則である。）”と述べている。これは、安全評価の段階で詳細な代替技術を設定できない場合があり、複数の代替技術から「最善」の技術と比較・選択することができず、既に選択された技術の経済性やリスク・線量の観点、すなわち最適化の観点から、その技術を選択したことの妥当性を説明せざるを得ないことを指摘しているものと理解できる。しかしながら、SSMFS2008:37 の第 4 条で BAT と最適化の併用が求められていることから、BAT の観点からの考察が不可欠である。SKB 社は SR-Site 報告書の 2.7.5 項で“以上の議論を踏まえて、長期安全性の評価におけるリスク計算の結果は BAT の観点から考察する必要があると結論した。”と述べ、“この考察を行うために、リスク計算実施後の追加的解析作業の一部として重要なバリアの寸法、レイアウトのルール、処分場深度などに関するリスク感度解析を実施した。”としている。つまり、SKB 社は現実的にあり得る代替技術を複数設定したリスク感度解析を実施することで、KBS-3 概念に採用した技術が「最善」か否かを評価したものと理解できる。

また、SR-Site 報告書の 14.3.1 項において、“この基本設

計を変更することでリスクの低減やリスクに潜在的に影響を及ぼす不確実性の低減を実現できるかどうかについて、フィードバックできる可能性がある。設計の幾つかの側面のうち、安全機能の達成において、この種のリスクまたは不確実性の低減が現実的に実現可能だと認められないものについては、当該解決策の採用が「最適化すべき」という要件を満たしており、かつ「BAT を使用する」という要件も遵守していると主張できる。”と述べている。BAT の優先順位が上であることから、つまり、リスク感度解析の結果を BAT の観点から考察し、ある選択肢が BAT の使用にあたと判断されれば、同時に最適な選択肢であるという主張だと解釈できる。

なお、SR-Site 報告書の前段階として準備された SR-Can 報告書[13]に対する規制側（放射線防護機関 SSI と原子力発電検査機関 SKI）⁴⁾によるレビュー[14]では、規制側が感度解析と不確実性解析の必要性について指摘している。具体的には、代替設計や材料の選択が核種漏出やリスクにどのような影響をもたらすかについて、感度解析を用いて定量的に示すべきと指摘している。さらに感度解析や不確実性解析の重要な目的は“SSI の規則や一般的なガイドライン (SSI FS 1998:1 and 2005:5) に記載されている最適化の原則と利用可能な最善の技術に基づいて、漏えいのリスクと結果を最小化するように、処分場をどのように設計できるかを評価することである。”と記載している。SKB 社が SR-Site 報告書で、感度解析の結果に基づき BAT について議論した理由として、上述のような規制側の指摘も要因の一つとなった可能性が高いと推測される。

3.2 処分概念の選択に関する BAT 評価

SKB 社は KBS-3 概念以外の代替処分概念（ロングトンネル、WP-cave、深孔処分（Fig.1））の説明ならびに選定理由を環境影響評価書[15]や手法選定報告書 (P-10-47[16]) に記載している。以下に、その中身を概説する。

ロングトンネル概念は、深さ約 500 m の地中に水平方向に全長約 5 km の 3 本の処分用トンネルが位置し、さらに約 100 m 深い位置に調査用トンネルが存在する。処分用トンネルにはキャニスタが水平に設置され、キャニスタは緩衝材で覆われる。KBS-3 概念と比較して、環境面で岩石採取量が大幅に少ないという利点があるものの、建設中の労働衛生と安全性という観点で劣るとともに回収が難しい。WP-cave 概念は原子力発電所の地下化研究から発想を得たものであり、処分場は中央のシャフトを起点に車輪のスポークのような立体的な複数の処分用トンネルで構成されている。その周囲には厚さ 5 m の緩衝材が配置され、さらにその周囲にトンネルとボアホールで構成される水理ケージが設置される。水理ケージは緩衝材や処分場内への地下水の流入を抑える効果が期待される。また、限られた範囲内に廃棄物を集中して設置することからキャニスタに近接する岩盤の温度が高くなると想定され、温度の過度な上昇を防ぐために冷却用の換気口の設置が必要となる。WP-cave

³⁾ 使用済み燃料をキャニスタ（外側：銅製容器、内側：鋳鉄製容器）に封入し、地下 500 m の結晶質岩中に直接処分する処分概念。キャニスタの周囲にはベントナイト緩衝材を設置し、キャニスタ、ベントナイトと結晶質岩の多重バリアにより廃棄物を隔離する。

⁴⁾ 放射線防護機関 SSI と原子力発電検査機関 SKI が 2008 年に合併して SSM が設置された。

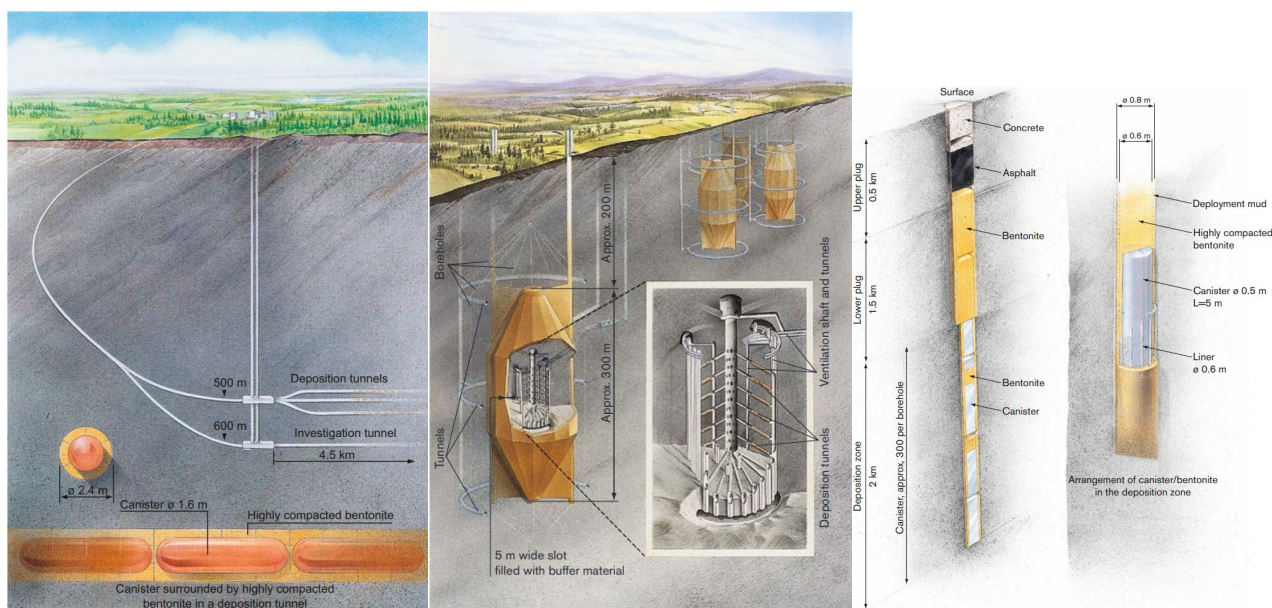


Fig.1 Schematic illustrations of the long tunnels (left), WP-cave (middle) and deep boreholes (right) concepts. This is taken from Figures 3-9, 3-10 and 3-11 in Ref. [16]. Courtesy of SKB.

概念には、緩衝材や水理ケージ等の工学設計の長期的変遷や高温下での放射性核種の溶解度等に関する多くの不確実性が伴うことから、安全な処分場建設を実現することは KBS-3 概念と比較して困難とされる。ロングトンネル概念と WP-cave 概念ともに 1990 年初頭以降は開発が進められておらず、代替処分概念として適さないと判断された。他方、深孔処分概念については開発検討が進められてきた。2008 年当時では、米国や英国の調査において最も綿密かつ完成度が高い検討であると評価された。SKB 社は KBS-3 概念と比較して、廃棄物を地下 5 km に埋設するという深孔処分の概念は人間侵入の可能性を低減させ、また、生活圏までの核種移行時間が著しく長くなると予想している。一方で、深孔処分概念の実現可能性と長期的な放射線安全性の両方を完全に明らかにするためには、少なくとも数十年にわたる大規模な作業が必要とのことである。申請書類の一部である KBS-3 概念と深孔処分概念の比較に関する報告書 (P-14-21[17]) において、SKB 社は深孔処分概念におけるサイト選定プログラムに必要な知識を備えるためには、30 年程度の研究・開発期間が必要であると推定している。さらに、候補地の選定や許可の取得には約 20 年、その後、処分場建設には 40 年から 50 年かかると想定している。また、廃棄時に発生するリスク等の深孔処分概念の弱点を指摘している。SKB 社は、深孔処分概念に残された課題を解決するためには時間がかかり、それによってスウェーデンの使用済み燃料の最終処分が遅れることは、深孔処分概念を採用することで得られる潜在的な利益を正当化することにつながらないと主張している。以上から、SKB 社は KBS-3 概念を採用することは BAT の使用という要件を満たしていると判断している。

3.3 KBS-3 概念の詳細化段階における BAT 評価の一例

ここでは KBS-3 概念に基づく設計を詳細化する段階（詳細化段階）における、銅キャニスタの厚さに関する BAT 評

価の事例について紹介する。SR-Site 報告書では、腐食によるキャニスタの破損は、処分場によって生じるリスクを構成する主要因である。腐食によるキャニスタ破損は、その周囲の緩衝材の浸食を受けて定置孔内で移流条件が成立するのに伴って、地下水との接触によるキャニスタの銅製シールの腐食が促進された結果として生じることになる。

Fig.2 に銅キャニスタの厚さを変化させたケースで評価した 100 万年後のキャニスタ破損数の平均値（以下、平均破損数という）の比較が示されている。図中の「semi-correlated base case」は基本設計（厚さ 5 cm）を示し、「2.5 cm Cu」と「10 cm Cu」は厚さをそれぞれ半分の 2.5 cm、2 倍の 10 cm に変更した代替設計を示す⁹⁾。キャニスタを 10 cm に増やすと、平均破損数は約 3 分の 1 になるが、逆に厚さを半分の 2.5 cm にすると、平均破損数は約 2 倍になる。ここで、SKB 社は基本設計に基づいて算出されたリスクが規制限度値（ 10^{-6} /年）を下回っており、厚さを増加したとしてもリスク低減の程度は控えめなものであることを述べている。加えて、キャニスタを厚くするにつれて、製造および溶接に関する問題が増加するため、BAT の観点から基本設計の銅の厚さ（5 cm）は妥当であると主張している。

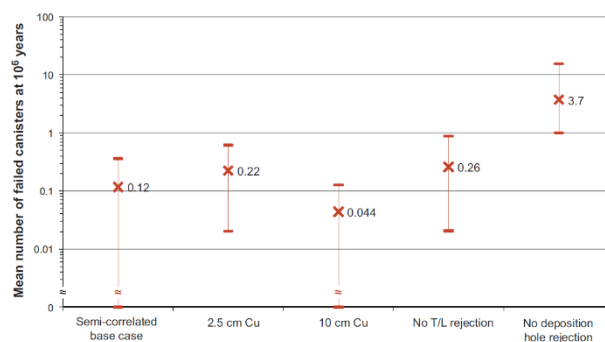


Fig.2 Mean number of failed canisters at 10^6 years. This is taken from Figure 14-6 in Ref. [12]. Courtesy of SKB.

Table 3 Progress in the development of canister design specifications

法制度	要件
Status report 1977[20] ^{注1}	材質：銅製 長さ：4.9 m, 外径：91 cm, 内径：51 cm 厚さ：20 cm
KBS-2 report 1978[21]	材質：銅製 長さ：4.7 m, 外径：77 cm, 内径：37 cm 厚さ：20 cm
KBS-3 report 1983[22]	材質：銅製 長さ：4.5 m, 外径：80 cm, 内径：60 cm 厚さ：10 cm
RD&D-Programme 92[23]	材質：ステンレス製（内側容器）、銅製（外側容器） 長さ：4.85 m, 外径：88 cm, 内径：68 cm 厚さ：10 cm（ステンレス製：5 cm, 銅製：5 cm）
RD&D-Programme 95[24]	材質：鋳鉄製（内側容器）、銅製（外側容器） 長さ、外径、内径：詳細な値を研究中 厚さ：10 cm（鋳鉄製：5 cm, 銅製：5 cm）
RD&D-Programme 98[25]	材質：RD&D-Programme 95 から変更なし 長さ：4.83 m, 外径：105 cm, 内径：85 cm 肉厚：RD&D-Programme 95 から変更なし
RD&D-Programme 2001[26]	材質：RD&D-Programme 95 から変更なし 長さ：4.835 m, 外径：105 cm, 内径：85 cm 厚さ：RD&D-Programme 95 から変更なし
RD&D-Programme 2004[27]	RD&D-Programme 2001 から変更なし
RD&D-Programme 2007[28]	RD&D-Programme 2001 から変更なし

注1：セラミックス製容器も検討

他方、厚さ 2.5 cm について SR-Site 報告書では触れられていない。そこで、別の報告書（TR-10-50[18]）で示されているリスクを確認したところ、厚さ 2.5 cm でも規制限度値を十分に下回っていた。厚さ 2.5 cm を採用しなかった理由を明確にするために、SKB 社によるキャニスタ設計開発の経緯を調査した。以下のその結果を記す。

KBS-3 概念の開発に関する報告書[19]では、1970 年代後半から 2009 年までの KBS-3 概念の開発経緯について概説している。Table 3 にキャニスタの開発経過を示す。SKB 社は 1995 年の RD&D-Programme 95[24]にて、使用済み燃料を収納する鋳鉄製容器とその周りを銅製シェルで覆うというキャニスタ構造を提案し、SR-Site 報告書でも変更なく用いられている。ただし、銅製シェルの厚さについては、RD&D-Programme 98[25]と RD&D-Programme 2001[26]で 3 cm にすることを目的とした開発成果を発表している。厚さを薄くすることで溶接が容易となり、キャニスタの品質（密封性）が向上する一方で、機械的安定性の低下等が懸念されると述べられている[26]。RD&D-Programme 2004[27]では、厚さを薄くすることも検討されているが、銅の厚さの選択は、短期的・長期的な安全性、技術、環境、資源効率などを考慮した最適化の問題であると述べるに留まっており、以降の RD&D-Programme では厚さの議論は行われてい

ない。その後、SKB 社は SR-Can 報告書で実施されたキャニスタ破損分析の追加解析として 100 万年後に破損したキャニスタの数を、キャニスタの厚さの関数として計算している[29]。その結果は SR-Site 報告書で示された結果と類似しており、厚さを 2 倍の 10 cm にしてもキャニスタの破損数はわずか 0.5 倍にしかならないことが示されている。他方、厚さを薄くしても、キャニスタの破損数や線量評価の結果として算出されるリスクの増加は僅かであると指摘している。しかしながら、厚さを薄くすることを採用しなかった理由については明示されていなかった。

今回の調査では SR-Site 報告書で厚さを 2.5 cm にした代替設計よりも基本設計の 5 cm を BAT の使用にあたりと判断した明確な根拠を読み取ることはできなかったが、調査結果から推察される理由の一つとして、2.5 cm のように厚さを薄くすることでキャニスタの機械的安定性が低下してしまうことが考えられる。一方で、前述した SR-Can 報告書の規制側によるレビュー結果[14]についても再度触れておきたい。レビュー結果として“SSI の規則や一般的なガイドライン(SSI FS 1998:1 and 2005:5)に記載されている最適化の原則と利用可能な最善の技術に基づいて、漏えいのリスクと結果を最小化するように、処分場をどのように設計できるかを評価することである。”とあり、漏えいのリス

⁹⁾ Fig.2 の横軸の「T/L rejection」と「deposition hole rejection」は、定置孔の周囲と内部における大きな地下水移流条件の発生を避けるための手法であり、semi-correlated base case, 2.5 cm Cu と 10 cm Cu では両手法を適用している。「No T/L rejection」と「No deposition hole rejection」は厚さ 5 cm で各手法を適用しない場合の結果を示している。

クの最小化と記されている。つまり、2.5 cm にすることが経済的・技術的に達成可能であったとしても、基本設計である 5 cm と比較して、リスクが少しでも増加する 2.5 cm の設計は規制のガイドラインに反すると考え、選択できなかったとも推察できる。

3.4 SKB 社による最適化と BAT の評価に関するまとめ

SKB 社では、処分概念を選択する段階（概念選択段階）における BAT の評価と、設計を詳細化する段階における最適化と BAT の評価が実施されている。概念選択段階では代替処分概念の安全評価などの定量的な分析を実施することはせず、安全性や経済性、技術性などの定性的な情報に基づく理論的な考察から、各処分概念を比較評価しており、詳細化段階では、感度解析によって安全性に関する指標（リスク）を定量化し、それと経済的・技術的かつ定性的な情報を組み合わせることで代替手法を比較評価している。いずれも比較評価を基本としているものの、概念選択段階から詳細化段階に進み対象範囲が狭まるにつれて、より細かく分析がなされているようである。また、過去の SKB 社の処分概念や設計の開発・検討経緯が報告書として事細かに取りまとめられていることが特徴と言える。

4 OECD/NEA の専門家グループによるレビュー

OECD/NEA の国際レビューチーム（International Review Team; 以下、IRT という）はスウェーデン政府からの要請により、SR-Site 報告書のレビューを実施した。IRT は 10 人の国際的専門家と 1 人のオブザーバーから構成され、2011 年 5 月から 2012 年 6 月まで活動し、最終報告書[30]を提出した。報告書では、最適化と BAT はレビューの対象外であるため、最適化と BAT に関する詳細な意見を述べることは差し控えると述べられていた。しかしながら、最適化と BAT に関する興味深い点として、IRT は以下の見解を述べている。

“国際的に、最適化と BAT は地層処分場で共通的な理解に至った慣例ではない。例えば、米国やフィンランドの規則では最適化について触れていない。”

“最適化と BAT をどのように解釈するかにもよるが、SSM の規制の書き方では、SKB 社が「完全に(fully)」最適化することはできないと考えられる。この意味で、IRT は SKB 社が線量を下げするために追加的な技術しか使えず、したがって「最適化」ができなかったという SKB 社の結論を理解し、同情している。”

“処分場施設設計開発プロセス全体を通して保守的な仮定を行っていると考え、SKB 社の処分場は「過剰設計」している可能性があるとして IRT は疑っている。つまり、SKB 社は規制の拘束値以下で線量を低減する方向で設計改善に取り組んでおり、BAT の方向、つまり処分場性能の信頼性を高める方向に設計改善に取り組んでいる。”

上記の見解について、IRT の最終報告書の下記の文章から意味を読み取ることができる。

“最適化という考え方により、SKB 社は施設設計と計算されたリスク間のトレードオフが、利用可能な最善の技術を用いて適切にバランスされているかを評価することができる。例えば、SKB 社はリスクを下げるために処分場の設計を変更することを考えるかもしれない。処分場をさらに深くしたり、銅製キャニスタをさらに厚くしたり、緩衝材を厚くしたりすることも、技術的に可能であれば検討できる。最適化では、処分場の設計を変更するための労力が大きく、リスク低減効果が小さい場合、SKB 社は計算上のリスクを下げないという選択肢を取ることができる。一方で、BAT という考え方は SKB 社にこの選択肢を常に許可するとは限らない。最適化と BAT が矛盾する場合は、SKB 社は、技術的・経済的に工業的に実現可能な技術であれば、合理的に可能な限り、人工バリアと天然バリアの両方からの放出を制限・遅延させるように設計を改善しなければならない。”

上記の文章から、「最適化と BAT の概念を採用した施設設計」では、バリアシステムの個々の構成要素に BAT の概念を適用して設計された処分場に対し、最適化の観点から長期的なリスク・線量が経済的・社会的な要因を考慮して合理的に達成可能な限り低く抑えられているかを評価することが重要と IRT は解釈しているものと推察する。仮に、リスク・線量を低減することに対して、施設という単位において BAT を使用するという考えのもとでなされた施設設計が経済的・社会的な要因を踏まえると合理的ではないと判断された場合、バリアシステムの個々の要素に対する BAT を再検討することができる。これは、最適化のプロセスであると考えられる。しかしながら、SSM 規則では、最適化と BAT が矛盾する場合は、BAT を優先することを明示しているため、上述のようなフィードバック機能が働かず、経済的・社会的な要因、被ばく線量やリスクなどの全体的なバランスを度外視した過度に保守的な施設設計につながることを懸念しているものと推察される。

5 規制側のレビュー

5.1 SSM

SSM は原子力活動法ならびに SSM 規則の要件に従い、SKB 社の申請を審査し、2018 年 1 月 23 日に「使用済み燃料の最終処分施設の認可申請に関する意見書」[31]と関連する 6 冊の報告書（SSM 2018:02 から SSM 2018:07）を政府に提出した。SSM は意見書において、処分場の建設許可を与えることを勧告している。6 冊の報告書は SSM の意見概要、関係機関から提出された意見に対する SSM の回答、システム全体に関する審査報告書、処分場閉鎖後の放射線安全性に関する報告書等で構成される。ここでは、最適化および BAT に関連する記載について概説する。

5.1.1 原子力活動法

システム全体に関する審査報告書（SSM 2018:04）[32]において、“環境法典第 2 章第 3 条の要件に対する評価では、処分場というシステム全体を評価する必要があり、その評価は段階を分けて実施する必要がある。第一段階として、

代替手法やサイトの比較について、第二段階として KBS-3 概念の詳細設計を開発する際の SKB 社の選択について評価する必要がある”と述べられている。

第一段階の処分概念に関する SSM の評価では、KBS-3 概念の代替処分概念として深孔処分概念に着目すべきとしている。その理由として、使用済み燃料の隔離性を高めることで、処分場の頑健性が高まることを挙げている。一方で、深孔処分概念が KBS-3 概念と比較して、放射線安全の観点で有利になる可能性があっても、BAT の使用と判断できる十分な理由とはならないとしている。深孔処分概念の採用が BAT の使用にあたりと判断するためには、関連する知識・技術の両方をさらに発展させ、実証しなければならないと述べている。SSM の見解によれば、深孔処分概念の開発に向けた投資によって安全性を評価、検証できるかは現段階で判断できず、すなわち、KBS-3 概念と比較して放射線安全上の利点につながるかは予測できないとしている。合理的なコストを評価する際には、代替技術を適用するためのコストだけでなく、代替技術を実証するためのコストも関係している。代替技術に関連して申請者に調査を課せば課すほど、実際に達成できる環境上のメリットはより厳しくなる。申請された活動が重大な環境問題に関連していると考えられる場合、SSM の見解では、作成しなければならない代替案の調査に高い要求を課することができるが、その一方で、申請された技術が人の健康と環境に重大な損害を防止するための要件を満たしている可能性が高い場合、申請者に代替案の広範な調査費用を要求することは妥当ではないとしている。また、代替手法を開発するために使用済み燃料の中間貯蔵を長期間継続することは合理的ではないと判断している。以上を踏まえて SSM は、使用済み燃料の最終処分のために SKB 社が採用した KBS-3 概念と、それに至った考え方は、BAT の使用を遵守していると評価している。

第二段階の詳細化段階に関する評価については、後述する SSMFS 2008:21 の要求への対応と重複するところはあるが、ここでの評価の特徴は開発プロセスにおける SKB 社の選択と他国との比較に着目している点である。キャニスタの設計を例に挙げると、計画初期段階ではセラミック等の材料の適用が検討されてきたが、製造上の課題や起こり得る劣化プロセスを考慮して除外されていることに着目し、除外したキャニスタは、許可申請書の基本設計となるキャニスタと比較して、決定的な利点はないと SSM は判断している。また、SSM は諸外国のキャニスタの製造状況を調査しており、例えば、米国ユッカマウンテンプロジェクトでは、100 万年以上の耐久性を持つと推定される Hastelloy C-22 (モリブデン、ニッケル、クロムの合金) 製カプセルが開発されていることに着目しているが、米国の初期のプログラムにおける材料選択はスウェーデンの地質環境と大きく異なる酸化環境で腐食防止機能を満たすという要件が主な動機と考えている。C-22 の耐腐食性解析は材料が複雑であるため、かなりのリソースが必要と SSM は考えている。以上を踏まえて、SSM は SKB 社が採用しているキャニスタの設計とそれに至った考えは BAT の使用を遵守していると評価している。

5.1.2 SSM 規則

SSMFS 2008:37 の第 4 条に記載された“使用済み燃料や核廃棄物の最終処分においては、最適化を行い、利用可能な最善の技術を考慮しなければならない。”という要件に対して、使用済み燃料処分場の閉鎖後安全性に関する審査報告書 (SSM 2018:07) [33]において、“SSM は SKB 社が提案する KBS-3 概念の多重バリアシステム (銅/鋳鉄製キャニスタ、ベントナイト緩衝材、フォルスマルクサイトの約 500 m の良好な岩盤条件) の使用は、利用可能な最善の技術と最適化の要件を十分に考慮していると考えられる。”と述べ、規制要件を満たすための条件が整っていると結論付けている。

BAT の使用を遵守することに加えて、リスク分析で定量化されたリスクに基づき、経済的に合理的な範囲で線量やリスクを低減するために、どのような対策や施設設計の調整が最も効果的かを示すことができると SSM は述べ、SKB 社の評価ではキャニスタの厚さに関する感度解析は実施されているが、総じて最適化に関する分析が少ないと指摘している。ただし、最終処分場の規模設定および設計は、定量化やモデル化を容易に行うことができない数多くの要因に左右されるとして、現在の審査段階では線量やリスクに基づく定量的な最適化分析を限定的に使用することは合理的であると判断している。操業開始という最終処分場プロジェクトの進んだ段階、すなわち処分場深度におけるさまざまな状態が明らかになる段階で、また最終処分場の構成要素の試験的な製造が進められ多くの情報が入手される時点で、最適化の分析が必要であると SSM は述べている。

次に SSMFS 2008:21 の第 6 条に記載された“バリアシステムは利用可能な最善の技術を考慮して設計、建設しなければならない。”という要件に対して、使用済み燃料処分場の閉鎖後安全性に関する審査報告書 (SSM 2018:07) [33]において、“SSM は KBS-3 概念の人工バリアは銅/鋳鉄製キャニスタとベントナイト緩衝材で構成されており、規制要件を満たす可能性があると考えられる。”と指摘しているものの、“SSM は処分場の構成要素の設計、製造、試験が十分に実施され、処分場の操業段階に向けて適切であると考えられるまで大幅な開発作業が必要である。”としている。

前述の SSMFS 2008:37 の要件に対する意見と同様に、SKB 社の現在の設計は最終的なものではなく、今後の科学界全体からの新たな知見を含む追加情報に基づいて、建設段階でバリアシステムをさらに開発・改良する機会を SKB 社が十分に活用することが必要と SSM は述べている。SSM は、現在の設計に従った銅、ダクタイル鋳鉄、ベントナイト粘土などの SKB 社の人工バリアの材料選択は、フォルスマルクのサイト条件を考慮すると適切であり、BAT の使用にあたりと考えている。SSM は、銅製バリアが、他のバリアと共に、また主としてフォルスマルクの最終処分場環境のよく知られた条件との関連において、最終処分場の防護能力に十分に寄与すると予想できると考えている。この予想は、処分場構成要素のすべての観点に関して完全な知識が存在しない状態で立てられたものであり、またその他にも代替バリアとして想定可能な材料は存在するものの、広範な研究開発活動を追加せずに他の材料の方が明確に優れていることを示すことはきわめて困難と SSM は判断して

いる。以上から SSM は、SKB 社が採用した厚さ 5 cm の銅製シェルとそれに至った考え方は BAT の使用を遵守していると結論づけている。

5.1.3 SSM による評価のまとめ

SSM による審査では、処分場の建設・操業段階までにさらなる技術開発を進めることを前提として、SKB 社の最適化や BAT の判断は妥当と評価している。BAT に関する評価においては、SKB 社がこれまで取り組んできた技術開発の経緯や選択肢の除外・選択等の理由、さらに他国の技術のスウェーデンへの適用性の考察を審査の着眼点の一つとしているようである。SSM は審査報告書 (SSM 2018:07) [33]において、立地・建設に関する許可申請の審査段階で最も重要な点は、SKB 社が他のバリアや処分場の化学的・機械的な環境条件に対する材料の適合性を評価するための十分な知識があること、残された不確実性とその影響を可能な限り最小化する方法を特定するための十分な知識があることとしており、SKB 社はこれらの条件を満たしていると SSM は判断している。つまり、今後の技術開発を進めるにあたり、SKB 社が十分にその知識・能力を有していることを示すことが重要であり、その根拠として、最終的に比較した技術に関する安全性や技術的・経済的な情報のみならず、これまでの技術開発の経緯や他国の技術の適用性について整理しておくことが、BAT の重要な判断材料の一つとされているようである。

5.2 ナッカ土地・環境裁判所

裁判所は環境法典の要件に従い、SKB 社の申請を審査し、2018 年 1 月 23 日に政府に意見書[34]を提出した。裁判所は意見書において、銅製キャニスタに対して特定の腐食形態やその他のプロセスに関する不確実性が非常に大きいため、裁判所は、SKB 社の安全解析に基づいて、SSM 規則に定められたリスク基準を満たすと結論づけることはできないとした。現在の証拠では、環境法典に基づく総合的なリスク評価において、処分場の長期的な安全性を十分に裏付けるものではなく、結論としては、キャニスタの長期閉じ込め能力に関する補足説明を SKB 社が提示した場合にのみ、この申請は承認されるとした。裁判所の意見では、環境法典における BAT の要件に対する適合性について明確には触れられていない。

これに対して、SKB 社は、裁判所が政府に提出した声明の中で言及した腐食などのプロセスについて追加調査を行った[35]。これらの調査結果を考慮して算出した閉鎖後の放射線量は、SSMFS 2008:37 のリスク基準に相当する線量を下回っており、これは KBS-3 概念に従ってフォルスマルクの岩盤の約 500 m の深さに建設された処分場が長期的に安全であるという SR-Site 報告書の結論を裏付けるものとしている。以上から、環境法典における BAT の要件に適合していると主張している。

6 ALARA と BAT の在り方に関する考察

6.1 設計の各段階における ALARA と BAT の在り方

スウェーデンの埋設事業者、規制側の関連文書を概観す

ると、KBS-3 や深孔処分等の処分概念を選択する段階で BAT の概念が適用され、選択された処分概念 (KBS-3) の設計を詳細化する段階、すなわち、レイアウトや材料仕様等を選択する段階で最適化と BAT の概念が適用されている。ここでは、スウェーデンにおける概念選択段階で最適化の概念が適用されていない理由について考察する。

今回の調査では直接的に明らかにできなかったものの、最適化の指標である長期的な被ばく線量・リスクに内在する不確実性が、概念選択段階では非常に大きいことが要因の一つと推測される。SKB 社は代替処分概念の深孔処分について、長期的な放射線安全性を明らかにするためには数十年にわたる大規模な研究・開発作業が必要と述べ、SSM は深孔処分概念の開発に向けた投資によって安全性を評価、検証できるかを現段階で判断できず、放射線安全上の利点につながるかは予測できないと述べている。これらの記載は、概念選択段階での被ばく線量・リスクの評価結果には大きな不確実性を有する可能性を指摘しているものと理解できる。SSMFS 2008:37 の第 4 条に関する注釈では“処分場の最適化のための措置は、計算されたリスクに基づいて評価すべきである。”と記載されているが、概念レベルで議論されている段階では評価に内在する不確実性は大きく、そのような不確実性の重量の結果として算出される被ばく線量やリスクに基づき、処分概念を比較して最適化検討を実施することは合理的ではないと判断したものと考えられる。

スウェーデンの事例を参考に、概念選択段階と詳細化段階の各段階における ALARA と BAT の関係について整理した (Fig.3)。なお、詳細化段階における ALARA と BAT の併用については次節で説明する。評価に内在する不確実性が大きい概念選択段階では BAT、すなわち核種の放出を抑制するという予防措置の観点で処分概念を定性的な情報に基づき論理的に選定し、その後の詳細化段階における最適化で、処分システム全体としての防護能力 (長期的な被ばく線量やリスク) を定量的に示して比較するというスウェーデンの事例は、わが国における ALARA と BAT への対応として参考になるだろう。

また、スウェーデンが代替処分概念の深孔処分ではなく、基本処分概念の KBS-3 を採用するに至った考え方は、概念

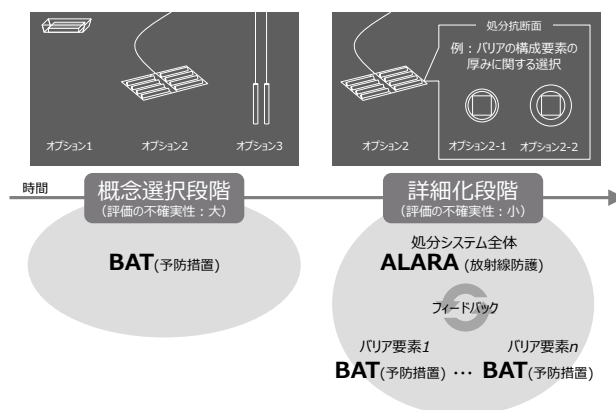


Fig.3 Conceptual diagram of the relationship between ALARA and BAT during the conceptual and detailed design phases

選択段階における BAT への対応としてわが国でも参考になるだろう。代替処分概念の開発状況によっては放射性廃棄物の最終処分が大幅に遅れる可能性が考えられる。スウェーデンの場合、深孔処分に期待される安全性には不確実性があり、今後の研究開発によって不確実性を低減することができるか現段階で予測することができない。他方、深孔処分を採用することで最終処分時期が大幅に遅れることは現段階で明らかであり、使用済み燃料の中間貯蔵を長期間継続する必要がある。基本処分概念の KBS-3 については、これまでに研究開発が重点的に進められていることから、安全性に関する不確実性が深孔処分概念よりも小さく、かつ最終処分実現までの期間が短いと考えられるため使用済み燃料の中間貯蔵期間が短い。これらを総合的に勘案して、スウェーデンの事業者側・規制側ともに、KBS-3 概念を BAT の使用にあたるとして採用することが合理的であると判断している。わが国においても、概念設計の BAT を選定する際には、代替処分概念の研究・開発作業にかかる時間や、それに伴うリスク（中間貯蔵期間の延長等）を勘案し、総合的に概念設計の BAT を選定することが重要だろう。

6.2 詳細化段階における ALARA と BAT の併用

裁判所と SSM による審査意見書を概観すると、今後さらに技術開発が必要であるという認識ではあるものの、さらなる設計の詳細化において反復的に最適化と BAT の検討を進めることを条件として、処分場建設の認可を与えることは妥当であるという認識であった。一方で、国際的な視点からレビューを実施した IRT の意見に注目すると、最適化よりも BAT を優先した場合に、保守的な施設設計につながる可能性の懸念が示されたことに留意する必要がある。ALARA と BAT の併用では、バリアシステムの個々の構成要素に対して BAT を使用するという考えのもとで設計された処分場が、処分システム全体を ALARA の概念に照らして、長期的なリスク・線量が経済的・社会的な要因を考慮して合理的に達成可能な限り低く抑えられるものとなっているかを評価すべきであると言えよう (Fig.3)。すなわち、もしリスク・線量を低減することに対して、BAT を使用するという考えのもとで行った施設設計が経済的・社会的な要因を踏まえると過度に保守的で合理的ではないと判断された場合、バリアシステムの個々の要素に対する BAT を再度検討するというフィードバックループを働かせることが重要と指摘したい。また、規制側は最適化と BAT の使用に基づき漏えいと、長期的なリスク・線量を最小化すべきであることを述べているが、最適化も BAT の使用も決して核種放出量や長期的なリスク・線量を最小化するものではなく、経済的・技術的・社会的な要因とのバランスを勘案して選択肢を決定するものであることに留意する必要がある。

一方で、安全性の向上（被ばく線量の低減と処分システムの頑健性の向上）を目指すうえで、最適化と BAT の使用を併用することは埋設事業者と規制側にとって重要な姿勢であることに変わりはない。わが国でも、ALARA と BAT の使用を併用して処分場の施設設計を検討することが重要であるが、BAT の使用のみに重点を置くのではなく、ALARA の概念を適用したフィードバック機能を有効に用

いることが肝要であろう。

6.3 詳細化段階における ALARA と BAT の提示手法

SKB 社はキャニスタの厚さの感度解析を実施して、100 万年後のキャニスタ破損数を算出した。感度解析や不確実性解析を実施することは最適化や BAT を検討するうえで重要な役割を担うと規制側が述べている。ただし、BAT については定量的な判断基準がないため、どこまでもキャニスタの破損数を低減させることにもなり得る。すなわち、BAT の判断理由の明示と、その判断の正当性を如何に主張するかが BAT の検討において重要となる。SKB 社の場合、算出したキャニスタ破損数に基づきリスクを算出して、厚さを 5 cm でも既にリスク基準値よりも十分に低く、厚さを 10 cm に変更しても、リスクの低減の程度は僅かであること、他方、厚さを増す分、コストが大幅に増大することや技術的な課題が大きいことを挙げて、現状の 5 cm の厚さを BAT と判断している。リスク等の安全性を示す定量的な指標と経済性や技術性などの定性的な指標を用いた比較によって、個々の構成要素の BAT を選定することが有用な判断手法になる可能性がある。ただし、IRT の意見のように、個々の構成要素のみで選択した BAT を積み重ねると、全体システムとして過度に保守的な施設設計になり得る懸念があることから、全体としての BAT のバランスを ALARA の概念によって合理的に再評価する必要があることを指摘したい。

上述の BAT を判断するための定性的な情報の一つとして、これまで実施してきた技術開発の経緯や他国の技術の適用性を示すことは有効な情報となり得る。SSM は SKB 社に反復的な BAT の検討を求めているが、その検討能力を SKB 社が有しているか否かが BAT の重要な判断材料とされている。過去に実施された BAT に関する調査研究[3]で、BAT は Moving target（社会の認識や技術の進歩によって変化しうるもの）であり、埋設事業者は Moving target に対して常にアクセスするよう不断の努力を惜しまないという姿勢を内外に示し続けることが必要、と述べられている。この姿勢において、これまでの技術開発の経緯や他国の技術の適用性を検討することは、不断の努力を惜しまずに技術を検討・選択するプロセスの一部となるものであり、わが国の検討においても必須となるだろう。

7 おわりに

本稿では、スウェーデンの放射性廃棄物処分場の施設設計に対する最適化と BAT の概念の適用事例を調査し、わが国の放射性廃棄物処分場の施設設計における ALARA と BAT の在り方について考察した。ALARA と BAT の概念は処分場の安全性を向上するうえで重要な考え方である一方で、BAT のみに傾倒することは、過度に保守的な施設設計につながる恐れがあることに留意しなければならない。ALARA の概念に基づく処分システム全体の合理性評価によって、個々のバリア構成要素における BAT の再評価を実施することが肝要である。また、BAT を評価するうえで、埋設事業者がこれまで取り組んできた検討の詳細を示すこ

とは重要な根拠の一つとなり得るだろう。これまでの技術開発には多くの費用や時間が投入されてきたのが現実であり、他の代替技術の開発のために同程度の費用や時間を投入する価値があるか、十分に検討する必要があるものと思われる。

わが国の放射性廃棄物の施設設計に関する規制要求に、ALARA と BAT の概念がはじめて取り入れられることから、ALARA と BAT の概念を適用した施設設計方法については、さらなる議論が必要と考えられる。スウェーデンのみならず、諸外国の最新事例の調査結果も含めて、わが国に適した設計方法の具体化が今後も求められるであろう。

参考文献

- [1] 原子力規制委員会: 第 17 回原子力規制委員会, 資料 2, 第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規則等の改正案. 令和 3 年 6 月 30 日 (2021).
- [2] 原子力規制委員会: 第 40 回原子力規制委員会, 資料 1, 中深度処分に係る規制基準等における要求事項に対する科学的・技術的意見の募集結果について. 令和 2 年 11 月 25 日 (2020).
- [3] 杉山大輔, 長谷川宏: 放射性廃棄物処分における「技術的に最善の手段 (BAT)」の考え方－諸外国事例のレビューとわが国への示唆－. L06001, 電力中央研究所報告 (2006).
- [4] 川上博人, 青木広臣, 鈴木篤之: 放射性廃棄物処分の放射線防護の最適化, 処分システムの頑健性確保に係るガイドラインの策定に向けて. 日本原子力学会誌 **53** (1), pp. 36-41 (2011).
- [5] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 28 年度原子力発電施設等安全技術対策委託費 (安全規制及び安全基準に係る内外の動向調査) 事業報告書. 平成 29 年 3 月 (2017).
- [6] SFS 1998:808. Miljöbalk [Swedish Environmental Code].
- [7] SFS 1984:3. Lag om kärnteknisk verksamhet [The Nuclear Activities Act].
- [8] SSM: The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste. SSMFS 2008:21 (2008).
- [9] SSM: The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations Concerning the Protection of Human Health and the Environment in Connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste. SSMFS 2008:37 (2008).
- [10] 服部隆利: ICRP 新勧告－新しい放射線防護の考え方と基準, 第 5 回計画被ばく (線量拘束値, 履行). 日本原子力学会誌 **52** (8), pp. 495-499 (2010).
- [11] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 30 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業, 放射性廃棄物海外総合情報調査 (国庫債務負担行為に係るもの) 報告書 (平成 30 年度分). 平成 31 年 3 月 (2019).
- [12] SKB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Volume I-III. Technical Report, TR-11-01 (2011).
- [13] SKB: Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation Main report of the SR-Can project. TR-06-09 (2006).
- [14] SKB: SKB's handling of the regulatory review of the safety assessment SR-Can. 1292956 (2011).
- [15] SKB: Miljökonsekvensbeskrivning, Mellanlagring, inkapsling och slutförvaring av använt kärnbränsle (2011).
- [16] SKB: Choice of method – evaluation of strategies and systems for disposal of spent nuclear fuel. P-10-47 (2010).
- [17] SKB: Uppdatering av rapporten Jämförelse mellan KBS-3-metoden och deponering i djupa borrhål för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. P-14-21 (2014).
- [18] SKB: Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site. TR-10-50 (2010).
- [19] SKB: Utvecklingen av KBS-3-metoden, Genomgång av forskningsprogram, säkerhetsanalyser, myndighetsgranskningar samt SKB:s internationella forskningssamarbete. R-10-40 (2010).
- [20] SKB: Kärnbränslecykelns slutsteg. Förglasat avfall från upparbetning, Kärnbränslesäkerhet. I – Allmän del; II – Geologi; III – Anläggningar; IV – Säkerhetsanalys; V – Utländsk verksamhet; Kompletterande geologiska undersökningar. KBS KärnbränsleSäkerhet (1977).
- [21] SKB: Kärnbränslecykelns slutsteg. Slutförvaring av använt kärnbränsle, Kärnbränslesäkerhet. I – Allmän del; II – Teknisk del. KBS KärnbränsleSäkerhet (1978).
- [22] SKB: Kärnbränslecykelns slutsteg, Använt kärnbränsle – KBS 3.I – Allmänt; II – Geologi; III – Barriärer; IV – Säkerhet; Sammanfattning (1983).
- [23] SKB: RD&D-Programme 92: Treatment and final disposal of nuclear waste. Programme for research, development, demonstration and other measures (1992).
- [24] SKB: RD&D-Programme 95: Treatment and final disposal of nuclear waste. Programme for encapsulation, deep geological disposal, and research, development and demonstration (1995).
- [25] SKB: RD&D-Programme 98: Treatment and final disposal of nuclear waste. Programme for research, development and demonstration of encapsulation and geological disposal (1998).
- [26] SKB: RD&D-Programme 2001: Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. TR-01-30 (2001).
- [27] SKB: RD&D-Programme 2004: Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, including social science research. TR-04-21 (2004).
- [28] SKB: RD&D-Programme 2007: Programme for research, development and demonstration of methods for the

management and disposal of nuclear waste. TR-07-21 (2007).

- [29] SKB: Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. TR-09-22 (2009).
- [30] OECD/NEA: The Post-closure Radiological Safety Case for a Spent Fuel Repository in Sweden. An international peer review of the SKB license-application study of March 2011 (Final report). NEA/RWM/PEER(2012)2, Paris, France (2012).
- [31] SSM: Yttrande över ansökningar om tillstånd till anläggningar för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. SSM2011-1135-23 (2018).
- [32] SSM: 2018:04 Systemövergripande frågor. SSM2011-1135-18 (2018).
- [33] SSM: 2018:07 Strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning. SSM2011-1135-17 (2018).
- [34] NACKA TINGSRÄTT: Mark- och miljödomstolens yttrande. M 1333-11 (2018).
- [35] SKB: KOMPLETTERING OCH YTTRANDE, M2018-00217/Me; Svensk Kärnbränslehantering AB, angående ansökan om tillstånd enligt miljöbalken till anläggningar i ett sammanhängande system för slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall (2019).