

科学技術の社会的受容性から見た高レベル放射性廃棄物の地層処分研究 (1) リスク・ベネフィットの原則に基づく他分野専門家への説明

和田隆太郎*1 田中知*1 長崎晋也*2

身近になく高度で巨大な科学技術は、その恐ろしさや未知性から社会的に受容され難いと言われており、高レベル放射性廃棄物処分地の立地問題は、その代表例の1つである。本研究では既報で述べた技術本質による演繹的なアプローチにおける科学技術の社会的受容性から見た高レベル放射性廃棄物の地層処分研究のあり方を検討した。

放射性廃棄物処分分野は高い安全性を求めるが余り、費用との相関を議論されていない。そのために経済原則が働かず、際限なく安全性だけを求める動きとなっていた。本研究では社会的受容性から端を発した検討として、リスク・ベネフィットの原則に則った意思決定が可能となるために費用の情報と共に安全性を示すことを試みた。その結果、この原則に則った安全性と費用の相関図により、日本の既存のデフォルト案(第2次取りまとめ)と海外事例との相関をわかりやすく整理でき、日本の処分概念とその相対的な位置付けを他分野の専門家もまじえて議論することができる。

Keywords: 社会科学, 社会的受容, プロセスモデル, 高レベル, 放射性廃棄物, 処分場, 立地, 演繹, パブリックコミュニケーション, リスク・ベネフィット

Generally speaking, a vast, advanced and unfamiliar science and technology is unacceptable by public for the fear of its unknown nature. The siting problem for the disposal of high level radioactive wastes is one of the typical examples. This study examined the desirable research scheme for geological disposal of the high level radioactive wastes seen from social acceptance of science and technology in the deductive approach by the technical essence described in the first report. As the safety is the most prioritized concern in the research of radioactive waste disposal, the correlation between safety and cost has not been argued. Therefore, the argument has only turned in seeking for limitless safety without paying attention to an economic principle.

In this report, as the examination evolving from a social acceptability, the author tries to explain the safety together with cost information in accordance with the principle of the risk benefit.

As a result, it turned out that the relation between the existing Japanese default proposal (H12 report) and overseas examples can be figured out to explain their relative position by the safety and cost correlation diagram made in accordance with the risk benefit principle. The nuclear field specialist can discuss a relative location of the Japanese disposal concept by this correlation diagram with another field specialist.

Keywords: social science, social acceptance, process model, high-level, radioactive waste, geological isolation, location, priori, public communication, risk-benefit

1 序論

1.1 背景と目的

現在、商業用発電原子炉は我が国で53基が運転しており、原子力発電が総発電電力量の約3分の1を占める基幹電源として重要な役割を果たしている。使用済み燃料の再処理時に発生する高レベル放射性廃棄物(以下「HLW」という)の処分事業主体である NUMO(原子力発電環境整備機構)は、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律(以下「特廃法」という) (平成12年6月7日法律第107号)に基づく国の認可法人として2000年10月に設立された。

しかし、NUMOの立地検討に先立つ文献調査への応募を巡る賛否で揺れた高知県東洋町では事実上の住民投票である2007年4月の出直し町長選挙で推進派が敗れるなど、HLW処分場の立地確保は困難を極めている。このような状況にあるのも、これまでの技術による説明と対話が十分ではないことが1つの原因であり、従来の方法を見直

す必要がある。すなわち、今後、地方公共団体の立地検討に係る文献調査へ応募することを喚起するにせよ、文献調査応募後にさらに地域住民の多数の理解を得ていくにせよ、処分時安全性・経済性等による『技術本質による演繹的な説明と対話の方法』を検討し、我が国に見合った原子力の社会的受容を進める必要がある。

そのため、初報[1]の検討結果である一般の技術者層・科学者層を対象とした技術本質による演繹的な相互理解について、原子力バックエンド分野以外の他分野の学協会との提携によるアプローチの方法のあり方について検討した。

本研究は、HLW処分の社会的受容性から端を発した検討として、リスク・ベネフィットの原則に則った意思決定が可能となるために費用の情報と共にHLW処分の安全性を示すことにより、日本の処分概念を原子力バックエンド分野以外の科学者層・技術者層から構成される専門家(以下、「他分野専門家」という)に理解し易く説明する方法を見出すことを目的とする。

1.2 処分地の選定プロセスと費用確保の状況

特廃法には NUMO による HLW 処分場の立地選定のフレームワークが記載されており、概要調査地区の選定、精密調査地区の選定、最終処分施設建設地の選定との3段階の選定プロセスが定義されている。また、特廃法第6条第1項で概要調査地区の選定の先立ち文献調査を行うことが規定されている。なお、この文献調査を対象に NUMO

Study on the high level radioactive wastes geological isolation seen from the social acceptance of science and technology; (1) The explanation based on the principle of risk & benefit for another field specialist by Ryutaru Wada(wada.ryutaru@kobelco.com), Satoru Tanaka, Shinya Nagasaki

*1 東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻
The Department of Nuclear Engineering and Management,
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
〒113-8685 東京都文京区本郷 7-3-1

*2 東京大学大学院 工学系研究科 原子力専攻
Nuclear Professional school, Graduate School of Engineering, The
University of Tokyo
〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白根白方 2-22

(Received 11 June 2009; accepted 17 August 2009)

は公募を行っており、市町村長の判断で応募できるものとされている。

なお、高知県東洋町で立地検討に先立つ文献調査への応募を巡る賛否で揺れ、2007年4月22日の出直し町長選挙では推進派の前職町長が反対派の新人に3:7の大差で敗れた。その後、国の委員会による議論[3]を踏まえて、上述の手法には概要調査地区選定前に行う文献調査には市町村からの応募の外に、国の申入れが追加されるという見直しが行われた。

他方、HLW 処分事業に必要な費用は、特廃法に基づき既に徴収と積み立てが始まっている。すなわち、原子力発電による電気の使用で便益を享受する世代が、原子力発電に伴い発生する高レベル放射性廃棄物の処分費用を負担すべきとの考え方から、消費者が電気料金の一部として負担し、原子力発電を行った電気事業者等が処分費用の拠出金として納付している。平成32年頃までの原子力発電によって生じる使用済燃料から換算されるガラス固化体の本数は約4万本であり、約3兆円と見積もられた[4]。これら、納付された拠出金は、管理等の透明性を確保する観点から国の指定法人が管理・運営し、年度毎に必要な費用を処分事業者(NUMO)が取り戻す制度となっている(2008年3月末の積立金は約5760億円[5])。消費者からは電気料金の一部として必要費用(約20銭/kWh)が徴収されている。上記の試算では後述の通り、廃棄体の定置方法や人工バリアの仕様の多少の変更は考慮しているが、坑道の支保なしケース等が設定されるなど岩盤の強度が低い地質や地下水が多い地質は費用見積の前提としていない。すなわち、比較的建設し易い地質を前提としているものと考えられる。

1.3 初報の概要と本研究の位置付け

1.3.1 初報の概要

初報[1]では2007年4月の高知県東洋町での高レベル放射性廃棄物処分場の立地検討の文献調査への応募に係る諸問題を例として、社会心理学的な視点からヒトが態度を決めるプロセスに着目して、説明と対話の方法を検討した。具体的には原因事象の分析と数的根拠の分析を踏まえて、科学技術の社会受容プロセスモデルについて検討した。公衆が健全な意思決定を行うには、進捗段階に応じた種々の理解促進活動が必要である。文献調査への応募問題等で話題が顕在化する前に十分な広域広報等で基礎知識を伝え、話題が顕在化した後に入念な科学技術アセスメントで対話することが重要である。

国民・地域住民を対象としてメディア広報・各種シンポジウム・市民講座等の広域広報が既に実施されている。興味既得層には対話フォーラム等を含めた説明と対話が進められている。興味未高揚層には、対話フォーラムや科学技術アセスメントの際のコンセンサス会議、シナリオワー

クショップ等を“劇場”として活用し、ORCAT等の対話ツールを使うことにより、主婦層・ホワイトカラー層(主に文系出身の会社員を指す)等と双方向で対話することができる。同様の手段を用いて技術シンポジウム、公開実験等を利用して技術者層・科学者層と双方向で対話することができる。これを「対話ツールを用いた各層対応による直接的な相互理解効果」と呼んだ。

他方、科学者・技術者層は技術シンポジウム、原子力学会と本人が所属する他分野学会との交流により技術的中味を理解し、議論を行うことで是非を判断することができる。なお、ここでの対話は他分野学会等での討論が該当する。この科学者・技術者層の意思決定の結果が演繹的に主婦層・自営業層・ホワイトカラー層等の他の層の理解や意思決定を助長することになる。これを「技術本質による演繹的な相互理解効果」と呼んだ。

従来のもとの前項の新しい考え方をまとめ、HLW 処分場の立地確保に係る諸問題を例とした科学技術の社会受容プロセスモデルを Fig. 1[1]に示した。原子力のように高度で広範な科学技術体系を対象とする場合は、上述のような2つのルートによる説明と対話ができる状態になって、国民・地域住民が健全で合理的な意思決定を行うことができるものと考えられる。

1.3.2 本研究の位置付けと構成

初報[1]では技術論・社会心理学の観点からHLW 処分場の社会受容プロセスモデルを検討した。本研究では、前項で述べた2つのルートによるアプローチのうち、技術本質による演繹的な相互理解について検討する。まず、他分野専門家が、学会等での説明と対話によりHLW 処分の基本的な情報と安全性・経済性の妥当性を十分に理解し、中心的ルート処理(問題対象に関する情報を十分に吟味して態度を決定する方法)によって自ら意思決定することから始まる。その上で、他分野専門家はその情報や判断の結果を主婦層、自営業層、ホワイトカラー層等に自分の意見と共に伝えることにより、技術的には周辺のルート処理(周辺の手がかりによって態度を決める方法)で判断せざるを得ない他の層の態度の決定を助長する方法である。

本研究の2章では、既往の処分研究と処分事業の現状およびリスク・ベネフィットの原則やリスクのモノサシ等のリスクに関する考え方を調査する。個々の他分野専門家も全体感としてHLW 処分時の安全性と費用との関係でとらえ、両者の相関から最適と思うものを選ぶことが考えられる。ここでは処分時の安全性を広義で処分場の品質と言え、心理学における文脈効果を調査し、一般的な費用と品質の相関による判断状況を明らかにする。本研究の3章では、理解の現状と課題を明らかにし、リスク・ベネフィットの原則に基づく処分時安全性の説明方法を示す。その上で、本研究の4章では、現状の費用試算結果とここで見出した説明方法の相関について考察する。これらを踏

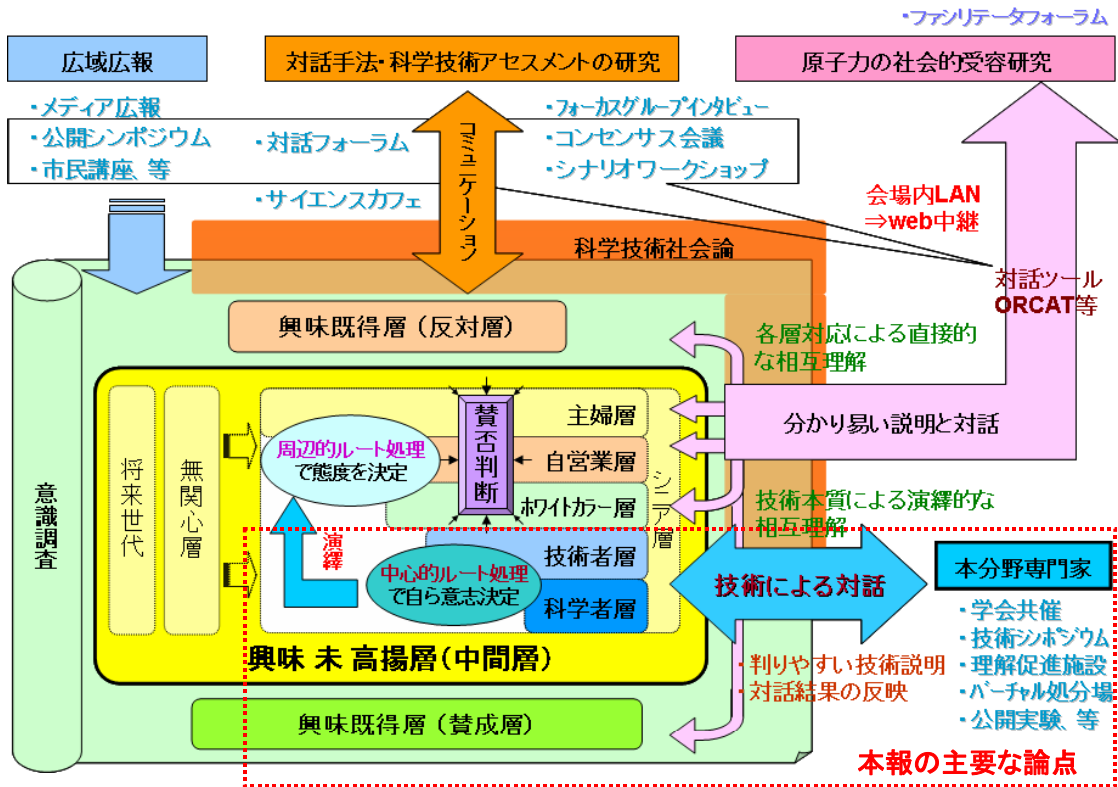


Fig. 1 The overall image of the social acceptance process model of the high-level radioactive wastes disposal site presented in first report[1] and the range of examination covered in this report

まえ、本研究はリスク・ベネフィットの原則に則った意思決定が可能となるために費用の情報と共に HLW 処分の安全性を示すことにより、日本の処分概念を他分野専門家に理解し易く説明する方法を見出すことを目的とする。

すなわち、従来の HLW 処分時の安全性という 1 つの評価の軸に加えて、地層処分にかかる費用というもう 1 つの評価の軸を提示することで、理系の科学者・技術者である他分野の専門家は、原子力エネルギーの確保というベネフィット(便益)と HLW 処分にもなうリスクについてより深く理解し、検討することができる。さらに、両者の比という形で地層処分にかかる費用と、達成される HLW 処分時の安全レベルの関係を示して、どこまで費用をかけるべきか(=どこまで安全性を追求すべきか)を他分野の専門家もまじえて議論できるようにしようと提案したものである。

化学物質による環境リスクを研究する環境リスク論[6]は放射性廃棄物処分と類似した部分がある。環境リスク論は技術を経済性(費用)と安全性の相関で議論しようとするものもある。中西[7]はリスク・ベネフィットの原則を主張している。リスク・ベネフィットの原則は「リスクは何かのベネフィットを伴っているものであり、リスク管理の原則はベネフィットとの兼ね合いで決めざるを得ない」とするものである。中西[7]はある技術が持つリスク

とベネフィットは、その技術が持つリスクを削減する対策の側から見ると、それぞれ、リスク削減量と、ベネフィット削減量に対応し、後者のベネフィット削減量を取りあえず対策費用で代用しようと述べている。リスク・ベネフィットという用語は、原子力、環境、医学・薬学、食品、金融・保険分野等で見ることが出来る[8]。また、近年では環境リスク工学、リスク工学という名称の大学の専攻等も見られるようになり、リスクという用語は多彩な分野で使われるようになった。なお、原子力分野では他にも従来からリスク論に基づき安全性を評価する手法やその結果が数多く報告されている。米国マサチューセッツ工科大学(MIT)ではリスクと見込まれる利益についてどう予測するかについて考えるために統計学や確率論を取り入れた Engineering Risk Benefit Analysis¹⁾ という講義が行われている。この講義では原子力発電炉に関する確率論的リスク評価についても紹介している。現状では廃棄物分野のものは見当たらず、数学モデルによるリスク/ベネフィット解析を目指している点で本研究とは異なる。廃棄物分野では 1990 年代の米国でリスク/ベネフィット解析(risk/benefit

¹⁾ MIT のこの講義では、信頼度および確率論的リスク評価(RPRA)、決定解析(DA)および費用効果分析(CBA)の 3 つの方法論に関する講義が行われており、講義テキストも公開されている。
<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Engineering-Systems-Division/ESD-72Spring-2007/CourseHome/>。(last visited at Oct.13,2008)

analysis)と題して有害廃棄物処分場の立地を対象とした研究報告[9, 10]があるが、これらは政策分析として認知されたリスクから補償額(compensation)を定量的に決めようとしたものである。環境分野では地下深部塩水層(帯水層)へのCO₂地中貯留について、医学・薬学分野では遺伝子技術についての社会的受容性に関して同様の題目での研究[11, 12]があるが、これらはアンケート調査結果をリスクベネフィットの相関図に整理したものである。すなわち、これらはいずれも意識調査であったり、そのデータの解析結果に基づく定性モデルを述べたものであり、技術を安全性と費用の2つの尺度から定量的に表現したものではない。本研究はHLW処分の安全性と費用(経済性)から処分概念とその研究成果を理解し易く説明するものである。かつてこの手法で評価した例は見当たらず、また、この視点からHLW処分の社会的受容性にアプローチした研究例はない。

2 現状の調査・分析と検討の方法

2.1 既往の処分研究と処分手業の調査

2.1.1 概括的な性能評価研究(第2次取りまとめ:平成12年レポート等)

HLWの地層処分技術開発は1980年頃より始まり、1990年頃より本格化し、多くの研究報告が日本原子力研究開発機構(JAEA)等から公開されている。1999年11月の地層処分研究開発第2次取りまとめ(平成12年レポート)[13]ではわが国の地質環境(分冊1)、地層処分の工学技術(分冊2)および地層処分システムの安全評価(分冊3)で概括的な性

能評価研究の成果が集大成され、わが国における地層処分の成立性が述べられている。さらに2005年9月の平成17年取りまとめ[14]では、深地層の科学研究(分冊1)、工学技術の開発(分冊2)、安全評価手法の開発(分冊3)によりその後の基盤研究の進捗成果がまとめられている。ここで示された高レベル放射性廃棄物地層処分の概念と多重バリアの構成をFig. 2に示す。

1992年に平成3年技術報告書[15]が、1999年に第2次取りまとめ[13]が発行され、この間の8年間は日本の処分研究は飛躍的に発展した。2000年から2008年間の8年間は、JAEAから2003年に平成14年度報告[16]、2005年に平成17年取りまとめ[14]が発行され、2004年にNUMOから「処分場の概要」[17]が発行された。しかし、サイト候補地が決まっていないためサイトスペシフィックに処分手業を網羅した報告書は本研究投稿時点ではまだ発行されていない。

2.1.2 地層処分の長期安全性

(1) 概要

1.2項で示した通り、日本では特廃法によって最終処分施設建設地の選定方法が示されており、段階的な調査に基づき、長期的に安定で地層処分にとって好ましい地質環境を有する処分地が選定される。また、このような地質環境条件を十分に活かすことができるよう、ガラス固化体は地下300m以深に処分することが求められている。最終処分法のもとに策定された基本方針である通商産業省告示第591号[18]には、長期安全性を確保するための基本的考え方として多重バリアシステムを採用することが示されている。これらのことから、適切な地質環境のサイトと処分

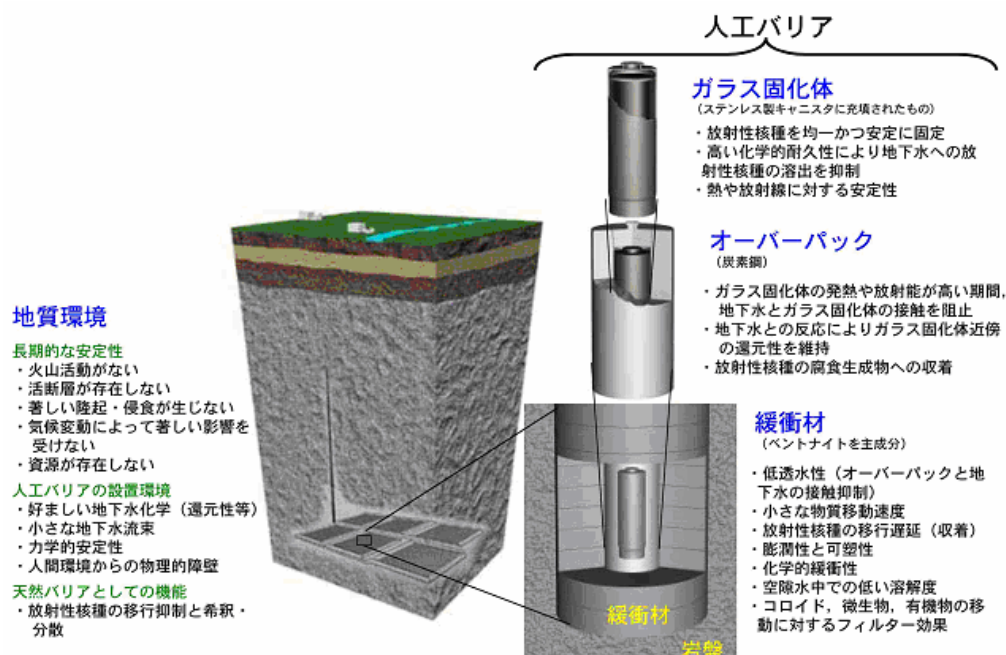


Fig. 2 The set up of the multiple barriers for the geological disposal of HLW [17]

(1) リスク・ベネフィットの原則に基づく他分野専門家への説明

場の設計を選定することによって期待される安全機能を発揮するシステムを構築することが、安全確保のための構想の基本となっている。なお、日本では現状はまだ候補地が決まっていないので、場所を特定しないサイトゼネリックな評価結果[13]を引用している。

(2) 適切なサイトの選定

地層処分の安全確保の観点から、サイト選定では、まず処分場の性能に大きな影響をもたらす事象が生じる可能性のある場所を避けることが重要である。前述の通り、日本では特廃法によって最終処分施設建設地の選定方法が示されており、段階的な調査に基づき、長期的に安定で地層処分にとって好ましい地質環境を有する処分地が選定されるものとされている。すなわち、特廃法では 1) 処分場の性能に大きな影響をもたらす天然現象(例えば、火山・火成活動、断層活動、著しい隆起・侵食など)の活動履歴や地質環境への影響のおそれがある地域は選定しないこと、2) 将来の人間活動によって処分場が破壊されないよう利用可能な天然資源が存在する地域は選定しないことが示されている。また、処分事業主体(NUMO)[19]は、サイトの地質環境の要件について更に詳細に規定している。第四紀の未固結堆積物であることの記録があった場合、火山から半径 15km 以内もしくはサイト候補地の直近に活断層があった場合、鉱物資源の存在が確認された場合は事業申請の際の安全審査で処分地から除外される。すなわち、現時点では上述の内容がサイト選定の際の足切り要件(処分サイトとして採用しない条件)として存在している。

(3) 天然バリア

放射性核種が地下水に溶解して人間環境に影響を及ぼすという可能性を抑制するために、できるだけ好ましいとされる地質環境の要件もある。これはサイトの天然バリアに関する要件と言うことも出来る。すなわち、1) 人工バリアの健全性と放射性核種の保持・移行遅延機能が保証されるよう岩盤が力学的に安定であること、2) 地下水の流量が小さく化学的に還元性であること、3) 地質媒体が放射性核種の移行に対して大きな遅延機能を有すること、4) 処分場から人間環境までの地下水の移動距離が長く、放射性核種の分散希釈効果が大きいこと、等である[17]。

これらについて規制側による定量的な合否基準は現時点では存在しないが、処分場の安全性、経済性を確保するに当たり重要なポイントである。これらについて処分事業者(NUMO)は、複数の候補地を選定した後、そのサイト調査により詳細が把握されることとしている[17]。

(4) 人工バリア

地層処分の長期安全性を確保するための多重バリアシステムの重要な構成要素として、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材等があり、人工バリアとして位置付けられている。人工バリアは Fig. 2[17]中に示す機能を期待している。なお、第 2 次取りまとめ[13]では炭素鋼製オーバー

パックによる地下水とガラス固化体の接触を阻止する機能の寿命は 1,000 年間を設定している。また、使用済み燃料(SF)の直接処分を計画しているスウェーデンは銅製オーバーパックを採用しており、この寿命は確率的な取り扱いをしているが最大では 10,000 年間を設定している[20]。第 2 次取りまとめ[13]では、上記の人工バリアに坑道掘削や支保施工および坑道へのプラグの設置等を含めた領域を工学技術と呼んでいる。また、プラグには坑道付近の地下水の透水を抑制するバリアを期待している。現状の第 2 次取りまとめ[13]の安全評価にプラグの透水抑制機能は計上されていないが、本研究では、上述の人工バリアにプラグを加えたものを「工学バリア」と呼ぶ。

(5) 安全評価

地層処分の最終的な目的は、処分場閉鎖後長期間にわたって放射性廃棄物を人間や環境から安全に隔離することである。規制要件について、原子力安全委員会が 2000 年に示した HLW 処分の安全規制の基本的考え方(第 1 次報告)[21]では「一般公衆に対する評価線量が最大となる時期においても、あらかじめ基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないこと等を確認することが基本」とされている。

そのため、現時点では第 2 次取りまとめ[13]と同様に、安全指標には線量を基本とし、また評価の時間スケールについてはとくに限定せず、現在の人々と対比して人間への影響が最大となる時期やその期間がわかるように評価を行っておくことが重要であると考えられている[17]。

(a) 安全評価の方法論

地層処分の不確実性(後述)を考慮した安全性を評価するアプローチとして国際的に確立されてきた基本的な手順は、1991 年に OECD/NEA[22]により以下の通りであると示されている。

- ①処分場の場の特徴(Feature)と安全性能に影響を及ぼすと考えられる種々の事象(Event)及びプロセス(Process)を考慮して、システムの将来の挙動に関するシナリオを描く
- ②次に、シナリオに従ってシステムに関連する長期的な現象を表現するため、物理・化学的な法則に基づいた数学モデルの開発と必要なデータの整備が行われる
- ③最後にモデルとデータを用いた影響解析による予測を行ってシステムの性能を推定した後、これを安全規制のために定められた指針や基準と比較して安全性を判定する

(b) 地層処分の不確実性への対処[15, 23]

安全評価においては、固有の性能を前提としつつ予測に付随する不確実性について配慮することが必要である。このような不確実性は安全評価の基本的な要素であるシナ

リオ、モデル及びデータに関して様々な形で取り扱われる。安全評価の不確実性は、以下に示す考慮すべき時間/空間スケールに加え、そこで起こり得る現象の複雑さや知識の限界、さらに評価そのものの行為における過誤に起因する[17]。

- ・極めて長い時間スケールを考慮しなければならないこと、
- ・天然の地層という不均質で大きな空間領域を有するシステム要素を含むこと

このため安全評価の信頼性を向上させるためには、これら不確実性の個々の要因を特定し、その特徴に応じた対策をとることが重要である。なお、2004年にOECD/NEA[24]は考慮すべき時間スケールが長くなればなるほど安全評価の不確実性は増加するが、時間の経過とともに放射性廃棄物が有する潜在的な毒性は放射性崩壊により減少すると指摘している。

(c) 基本シナリオとレファレンスケース[13]

第2次取りまとめ[13]では評価シナリオを「接近シナリオ」と「地下水シナリオ」の二つのタイプに分類している。地下水シナリオはさらに、システムが長期間にわたって安定で外的な擾乱もなく、システムの安全機能が期待どおり発揮されるとする「基本シナリオ」と、将来において何らかの擾乱を想定する「変動シナリオ」とに分類されている。また、レファレンスケース[13]は、「基本シナリオに焦点をあて、サイト選定による安定な地質環境と適切な工学的対策によって地層処分システムに期待される機能が固有の性能として発揮されることを前提としたシナリオに対応する解析ケース」と定義されている。

現状の安全評価におけるレファレンスケースの概要をFig. 3[13]に示す。また、地下水シナリオに基づく安全評価解析のパラメータをTable 1[13]に示す。Table 1をみて判る通り、性能評価には取り扱うパラメータが多く、本分野専門家でも全容を理解することが容易ではない。

(d) 安全評価の結果とその国際比較

第2次取りまとめ[13]では、総本数4万本のガラス固化体を処分することを想定した処分場の性能を示すために、ガラス固化体1本に基づく結果を4万倍することによって線量を算出している。これは、すべての廃棄物が一律1,000年でオーバーパックによる物理的閉じ込め機能を失い、その結果地下水に移行した放射性核種は一樣に人工バリア、母岩、断層破碎帯を通過して生物圏に至ることを想定した極めて保守的な評価であると述べられている。レファレンスケースについてこれら解析モデルを用いた線量推定の結果、人間への影響が最大となるのは処分後約80万年で線量当量として $0.005 \mu\text{Sv/y}$ となったとしている[13]。

安全評価の信頼性を全体的に確かめる一つの方法として、各国の包括的な安全評価報告書と比較することが挙げられる。これは、それぞれの安全評価では独立にその妥当性を保証するための努力が払われていることから、一つの安全評価が妥当であれば、その違いが定量的に説明されることによって比較の対象も相対的に妥当であるか否かが判断できるものと考えられるためである。第2次取りまとめ以降、スウェーデンSKBのSR97[20]、ベルギーONDRAFのSAFIR2[25]、米国DOEのYMP TSPA[26]、スイスNAGRAのEN2002[27]等の安全評価書が公表された。これらの安全評価報告書における線量の推定結果と第2次取

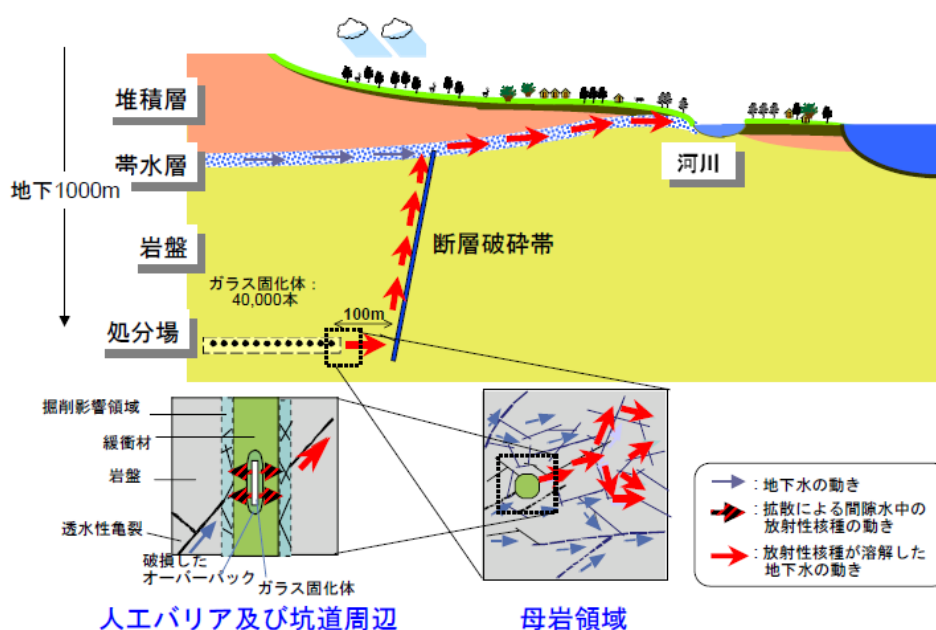
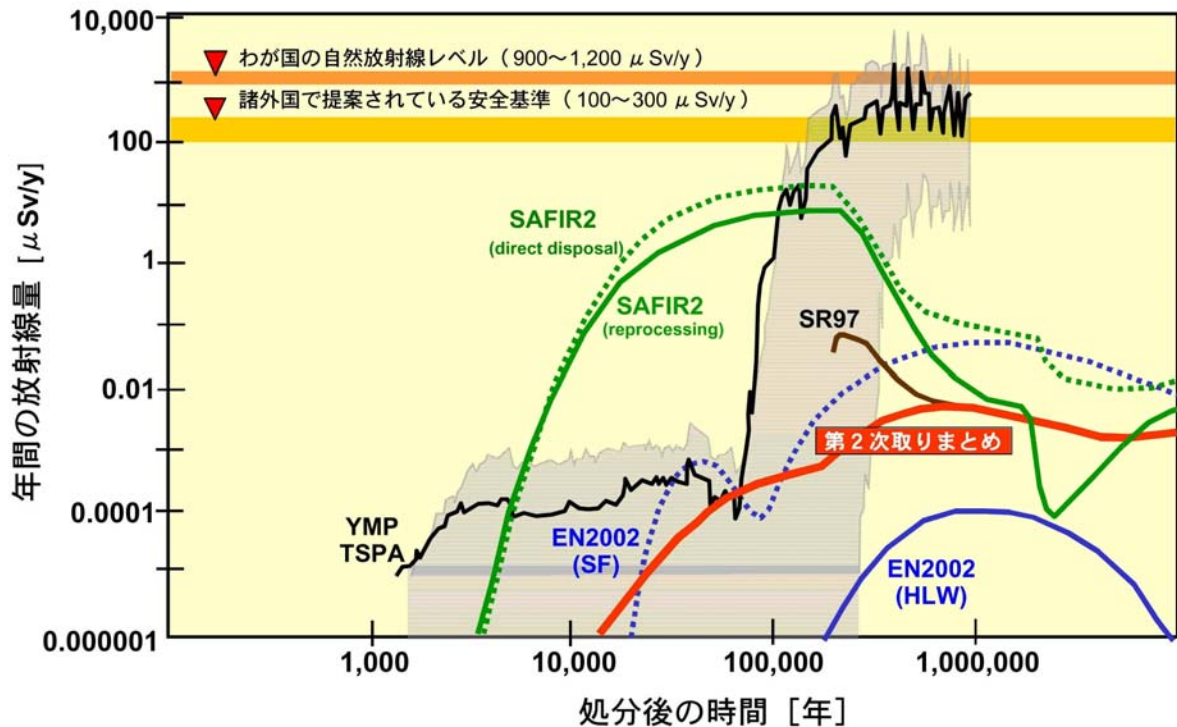


Fig. 3 The outline of the safety evaluation (reference case) of the H12 report for HLW disposal [13]

Table 1 The parameter of the safety evaluation analysis based on a groundwater scenario [13]

| 天然バリアのパラメータ | | 単位 | 人工バリアのパラメータ | | 単位 |
|--------------|--|-------------------|--------------------|--|---------------------|
| 移行距離 | | m | ガラス固化体近傍の仮想的な領域の体積 | | m ³ |
| 動水勾配 | | — | ガラス固化体中の核種インベントリ | | mol |
| 透水量係数 | | m ² /s | ガラス固化体の体積減少率 | | l/y |
| 巨視的(縦方向)分散長 | | m | 緩衝材長さ | | m |
| マトリクス拡散深さ | | m | 間隙水中の拡散係数 | | m ² /y |
| マトリクス拡散寄与面積率 | | % | 緩衝材の間隙率 | | - |
| 有効間隙率 | | % | ガラス固化体中心からの距離 | | m |
| 乾燥密度 | | Mg/m ³ | 緩衝材内側半径 | | m |
| 実効拡散係数 | | m ² /s | オーバーパック破損後の経過時間 | | y |
| 分配係数 | | — | 崩壊定数 | | 1/y |
| | | | ガラス固化体表面積 | | m ² |
| | | | ガラス固化体密度 | | g/m ³ |
| | | | ガラス固化体体積 | | m ³ |
| | | | ガラス溶解速度 | | g/m ² /y |
| | | | 緩衝材真密度 | | kg/m ³ |
| | | | 分配係数 | | m ³ kg |
| | | | 元素の溶解度 | | mol/m ³ |
| | | | 緩衝材外側半径 | | m |
| | | | EDZ に対して設定した仮想的な体積 | | m ³ |

EDZ:掘削影響領域



(YMP TSPA については確率論的シミュレーション結果の平均値及び分布の95%から5%の範囲を示す)

凡例

- ・ 第2次取りまとめ : 日本 JAEA のレファレンスケース[13]
- ・ SR97 : スウェーデン SKB の Aberg を対象とする合理的なケース(reasonable case for Aberg) [20]
- ・ SAFIR2 : ベルギー ONDRAF の井戸を移行経路とする再処理オプションと直接処分オプションのケース[25]
- ・ YMP TSPA : 米国 DOE のノミナルシナリオ(nominal scenario) [26]
- ・ EN2002 : スイス NAGRA の使用済燃料とガラス固化体に対するレファレンスケース[27]

Fig. 4 The comparison of the safety evaluation results of the H12 report and other counties [17]

りまとめ[13]のレファレンスケースの結果とを比較したものを Fig. 4 [17]に示す。なお、Fig. 4 の縦軸の年間の放射線量は年間被ばく線量当量の意味である。

2.1.3 HLW 処分事業の費用評価

HLW 処分事業の費用は 1999 年に国の委員会[3]で試算結果を評価したものが、公開されている。この試算では電気事業者等[28]や研究開発機関[13]の研究開発成果等で提案された処分概念を引用して議論された。

この費用は Table 2[3]の項目と内訳で積み上げられた。積み上げに用いる数量、工数等は、施設・設備の試設計並びに施工計画等の検討を行い設定された。積み上げ方法及び人件費単価、材料費単価・損料については、一般公共工事等に用いられている手法・価格を用いられた。試算に当たっては、我が国において処分事業を合理的に行うことを想定し、その主要な物理的条件に選択の幅がある場合には、その影響の大きさについて検討することが適当であるとされた。そこで、以下の試算ケースの設定パラメータについて、現在までの知見に基づいた合理的な選択の範囲で比較評価することとし、代表的な 11 ケース(組み合わせ)を設定し、試算を行われた。

- ①岩種は、堆積岩のような軟岩系岩盤と花崗岩のような硬岩系岩盤の 2 種類とした。
- ②深度は、軟岩系(堆積岩)は 500m、硬岩系(花崗岩)は 1000 m と 1100m とした。
- ③支保は、軟岩系(堆積岩)はコンクリート製セグメントとし、硬岩系(花崗岩)はなしとした。
- ④緩衝材の厚さは 40cm と 70cm の 2 種類とし、施工方法はブロック型と一体型の 2 種類を想定した。
- ⑤オーバーパック材質は、単一(炭素鋼:厚さ 18cm と 19cm)と複合(炭素鋼+チタン系合金:厚さ 7cm)を想定した
- ⑥地下施設へのアクセス方法は、斜坑及び立坑と全て立坑の 2 種類を想定した。
- ⑦立地調査地点数及び立地候補地点数は、2 ケースを設けた。

上述の代表的 11 ケースについての試算の結果、HLW 処分費用の試算値は約 2.7~3.1 兆円の範囲にあるとされた[3]。また、今後の研究開発の進展により、技術的に一層の最適化が可能な条件(支保形式、オーバーパックの材質等)は、適宜処分費用の見積りへの反映を検討することが適当とされている。一方、地質環境等の主に具体的な処分地の物理的状況により確定する条件(岩種、処分深度等)は、「代表的なケースを平均した値を資金確保制度の基本となる合理的見積りとすることが適当」とされている。この合理的見積りの時期に関する記載はないが、サイト候補地または処分地が決まった段階を想定しているものと考えられる。

2.1.4 現状の地層処分を取り巻く状況の考え方の整理

(1) 処分研究の現状

1990 年代には日本の処分研究は飛躍的に発展した。

NUMO が設立された 2000 年以降は事業が進展と予想されたが、サイト候補地が決まっていなかったためサイトスペシフィックに処分事業を網羅した報告書が本研究投稿時点ではまだ発行されていない。

他方、事業側の基盤研究は地層処分基盤研究調整会議[23]等により分担が決められ、重複がないように推進されている。全体として研究開発の重複等が排除される等の調整機能を発揮しているが、現状では理解促進に係る研究開発の計画や内容は議論されていない。

(2) 適切なサイト選定の現状

現状は候補サイトが決まっていないので、場所を特定しないサイトゼネリックな評価を行っている。サイト候補地が出てくれば、調査活動でサイト特性を把握し、サイトスペシフィックな評価に移行するものと考えられる。すなわち当該場所の地質調査が行われ、その場所に見合った処分システム、人工バリアの仕様が検討されるものと考えられる。

(3) サイト選定と処分費用の相関

2.1.2(2)項で示した通り、処分場の地質環境には火山、

Table 2 Cost estimation items and its breakouts for a disposal site [3]

| 項目 | | 内訳 | |
|----|--|-----|-------|
| 1. | 技術開発費 | 直接費 | 人件費 |
| 2. | 調査費および用地取得費 | | 材料費 |
| 3. | 設計および建設費 ・ 地上施設 ・ 地下施設 ・ 地上設備 ・ 地下設備 | | 機械経費 |
| 4. | 操業費 | 間接費 | 現場管理費 |
| 5. | 解体および閉鎖費 | | 一般管理費 |
| 6. | モニタリング費 | | |
| 7. | プロジェクト管理費 | | |

(1) リスク・ベネフィットの原則に基づく他分野専門家への説明

活断層等に対して足切り条件がある。しかし、現時点では岩盤の強度や安定性および地下水流動条件には足切り条件はない。すなわち、これらについてはサイト候補地が決まればその場所の地質に見合った処分システム・人工バリアの仕様が検討されることが考えられる。

言い方を変えれば、サイト候補地の地質に応じて建設方法や人工バリア構造が変わる可能性があることを意味している。地質(天然バリア)の状態が悪ければ、処分深度を深くしたり、工学バリアで補強して所期の安全性を担保するとの考え方がある。逆に地質(天然バリア)の状態が良ければ、工学バリアを簡略化して経済的な処分システムを提案するとの考え方もある。

(4) 処分費用変動の可能性

現状の HLW 処分費用の試算では、岩盤の強度が低い地質や地下水が多い地質は費用見積りの前提としておらず、比較的建設し易い地質を前提としている。なお、国の委員会[3]では、具体的な処分サイトの物理的状況により確定する条件(岩種、処分深度等)は、代表的なケースを平均した値を資金確保制度の基本となる合理的見積りとするのが適当とされている。

岩盤の強度が低く、安定性が悪い地質の場合、建設工事には費用と期間がかかる。さらに、湧水量が多い地質の場合は止水工事を伴うため、一層の費用と期間がかかる。

従って、サイト候補地によっては総コストが高い場所と安い場所が存在するものと考えられる。すなわち、処分費用低減の観点からは、掘削し易い場所、力学的安定性に優れている場所(建設コストが少なくすむ場所)、割れ目・亀裂が少ない場所(効率的に廃棄体を設置できる場所)、地下水流速が遅い場所(追加設置する工学バリアが少なくすむ場所)が望ましいと言える。逆に岩盤の強度が低く、安定性が悪い地質や、湧水量の多い地質は費用の観点からは望ましくないと言える。

2.2 既往のリスクに関する考え方の調査**2.2.1 原子力の安全文化と安全・安心の科学**

科学哲学者である村上[29]は、自然科学は、客観性を標榜するあまり、それを乱し、あるいは汚すような、人間的な要素が入り込むことを極度に警戒し、人間を取り扱う場合でさえ、それを純粋に物質系としてのみ捉えることを、自らの義務としてきたと述べている。また、この学問観は人文・社会科学にも反映され、自らの守備範囲を、自然科学の扱わない人間現象に限定することでもって、自己のアイデンティティとして認めてきたとしている。そのため、自然科学と人文・社会科学は相互乗り入れする準備はできておらず、むしろ現代の学問は自然現象と、人文・社会現象を峻別し、その間に分業を成立させることをもって、その出発的としてきたと述べている。

他方、村上[30]は、原子炉の多重防護システムを例とし

て安全文化について述べている。原子炉の多重防護システムは、起こり得る最悪の事態を推定して、それが万一起ったときにも安全が確保できるように、何重にも防護のための対策を立て、また大きなシステムである。そのため、そのシステムの個々の要素に最悪の故障が起きたとしてもなお、システム全体が安全に状態を保てるような配慮をするという方法を採用している。こうした多様な要素の累積体であるシステムについて、「機械は故障し、人間は過ちを犯す」という前提をたって、1つ1つの要素に何らかの不都合が発生する確率を算定している。これが所謂「確率論的安全評価」(PSA)の考え方である。

村上[30]は、原子力分野の安全評価の手法は、安全やリスクの定量的把握にも努力を払った結果として、PSAを行うことにより、はるかに小さい数字であるが仮想的な最大事故のシナリオと確率を算出できてしまうと述べている。また、人間が関与する限り、人工物や人間-機械系に絶対安全はあり得ないと指摘している。この理論的な絶対安全がない系で「安心を得る」ための方法として、リスクの認知と定量化・評価を伴う絶え間ないリスク管理への配慮、および、ヒューマンエラーに対する安全戦略を提案している。

従って、人間的な要素が入り込む原子力等の科学技術の利用に伴う安全性は理論的な絶対安全はないとの前提に立ち、リスクを認知した上でリスクを定量化・管理し、安全性に関する情報を継続して提示することが必要である。

2.2.2 環境リスク論とリスク・ベネフィットの原則

HLW 処分という環境と廃棄物を取り扱う観点で重要な研究領域として環境リスク論がある。環境リスク論は米国で放射性物質について発ガン性物質を管理する際に発達した研究領域である。中西[6]は環境リスクとは、環境への危険性の定量的な表現で「どうしても避けたい環境影響」の起きる確率で表現されると定義している。さらに中西[6]は、リスク論とは(絶対的な)安全領域がない危険性とわれわれはどうつきあうかという科学であると述べている。すなわち、安全領域がないからそこ逃げ込んで問題を解決することはできないため、リスクをどう管理するかという課題にいつも直面することになっており、これがリスク・マネジメントであると述べている。つまり、微妙な危険性もリスクとして評価する代わりに、ある程度のリスクは許容するとの立場に立つのである。

また、中西[7]は、リスクは必ずなんらかのベネフィットを伴っているものであり、リスク管理の原則はベネフィットとの兼ね合いで決めざるを得ないという、リスク・ベネフィットの原則を提唱している。さらに、リスク・ベネフィットの原則は社会がもっている経済力に対応できる範囲が決まるため、リスク(ΔR)当たりのベネフィット(ΔB)を一定にする、すなわち、 $\Delta B/\Delta R$ を一定にするように環境規制を行うことを提唱したものである。中西[7]はま

た、ある環境対策のリスク当たりのベネフィット($\Delta B/\Delta R$)は、言い換えれば、一人のヒトの命を救うためにかけられる費用であると述べている。すなわち、その環境対策で見積もられ、貨幣価値で表現された命の価値でもであると述べている。また、社会全体でみれば、その時代の社会がもっている経済力でヒトの命は決まるとしている。そのため、計算された、1人を救うための費用が安いとされる物質、すなわち、 $\Delta B/\Delta R$ が小さい物質の使用や活動から規制を始めるべきであると指摘している。しかし、この原則もリスクの受任者とベネフィットの受益者がかなり一致している場合には良いが、両者が完全に乖離しているときには適用しなくなると述べている。

他方、岡[31]はリスク便益分析において規制の費用と削減されるリスクの比つまり単位リスク削減費用の境界値を決める考え方に2つの方法があると述べている。1つは単位リスク削減便益を境界値とするものである。これはリスク削減の便益がその費用を上回れば削減行為を行うものであり、「費用便益分析」であると述べている。これはヒトの余命の価値と費用(ヒトの1年余命延長にかかる費用)との比較という概念とも言えるとしている。他の1つは境界値をあえて決めず、単位リスク削減費用の事例間の相互比較、あるいは過去の事例との比較を行うものであり、「費用効果分析」であると述べている。岡[31]はこれら2つを比較評価し、効率性だけを追求する費用便益分析は倫理的に難しく、効率性以外の他の価値への開放されている費用効果分析の方が現実的に有効であると述べている。

現状ではHLW処分は、経済原則の下での議論は行われていない。上述の通り環境分野では取り入れて議論されているが、放射性廃棄物の処分においても、安全性に関する情報と共に費用(経済性)に関する情報を提示し、リスク・ベネフィットの原則に基づく議論を行うことが必要である。

2.2.3 リスクのモノサシ

社会心理学者である中谷内[32]は、リスク問題への心理学的アプローチの根底にある動機は、環境リスク問題について、公衆と専門家ではリスクの捉え方がどう違うかを明らかにし、それらの知見を援用したリスクコミュニケーションを通じて合意形成と社会的意思決定を図ろうとしたものであると述べている。また、中西[6]の環境リスク論は、人の生命や健康、財産への影響があるかどうか不確定な問題に対して、リスクがある、という前提でその大きさを確定し、対抗策を講じる考え方であり、この考え方の中では、どこまでリスクを許容するかについて社会的な合意が必要となると述べている。しかし、中谷内[32]は環境リスクの専門家は、影響の不確定な部分についてはリスクの存在を前提とし、リスクをゼロにすることは不可能と考えて対策を探る傾向にあるのに対して、公衆はあくまでもゼロリスクを求めがちであるという点を指摘している。

中谷内[33]は、このように一般的な、リスクの判断基準がないものは、どのリスクがどの程度危険なのか、一人一人が判断できるようなモノサシを創り、モノサシと共に情報を提供すべきであると述べている。リスクの判断基準がないと、小さなリスクを避けるために大きなコストをかけたり、反対に大きなリスクなのにあまり顧みられないといったことが起こるためである。また、中谷内[33]は、対処を誤ると、あたふたと場当たりのリスク回避行動に走って生活の質を不必要に低下させてしまったり、拙速に眼前のリスクを回避しようとするあまりに別のリスクを高めてしまったりすると指摘している。

従って、作用/副作用のリスクをバランス良くマネジメントできるように、HLW処分に伴う放射線(能)影響の範囲で、関係者が共有できるリスクの判断基準(モノサシ)を作ることが必要である。

2.3 選択肢と文脈効果

何の事前の知識や関連もない人々によってなぜ特定の選択肢が選択されるという、ヒトが選択・選好する理由については、数多くの研究例がある。

選択肢を提示する側が意図する場合、意図しない場合に係わらず、状況に応じて特定の選択肢が公衆等の意思決定者に選択される傾向があるとされている。ここではその代表例として、選択をもたらず効果という側面から文献調査した結果を示す。

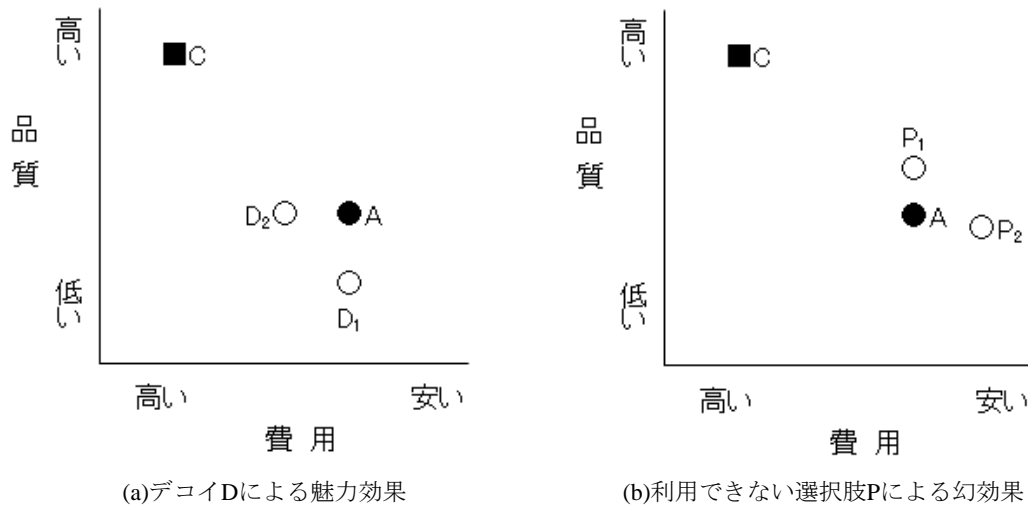
従来は新製品の発売に伴って売上が減少するのは、その新製品と類似した製品だとする類似性仮説[34]が選択に関する多くの代替理論の根拠とされてきた。

Huberら[35]は、非対称的で優越されている(すなわち、劣等な)選択肢を追加することにより規則性と類似性仮説[34]が歪曲されることを示しており、劣等な選択肢の追加による「魅力効果」(Attractive effect)があると述べている。これはFig. 5(a)でAよりは劣るが、Cには影響されない選択肢であるD1~D2(デコイと呼ばれる)を加えることにより、デコイを優越するターゲット選択肢Aが選択されやすくなるという現象を示すものである。なお、ここではデコイD1~D2がCよりターゲット選択肢Aに接近しており、負の類似性効果を示すことが条件とされている。

また、奥田[39]は、同一選択肢が加わることによってターゲット選択肢の選択率が向上する「多数効果」(Plurality effect)があると述べている。多数効果では2つの属性両方についてターゲット選択肢Aと同じ値を持つ選択肢が加えられた場合、選択肢Aが選択されやすくなることが示されている。

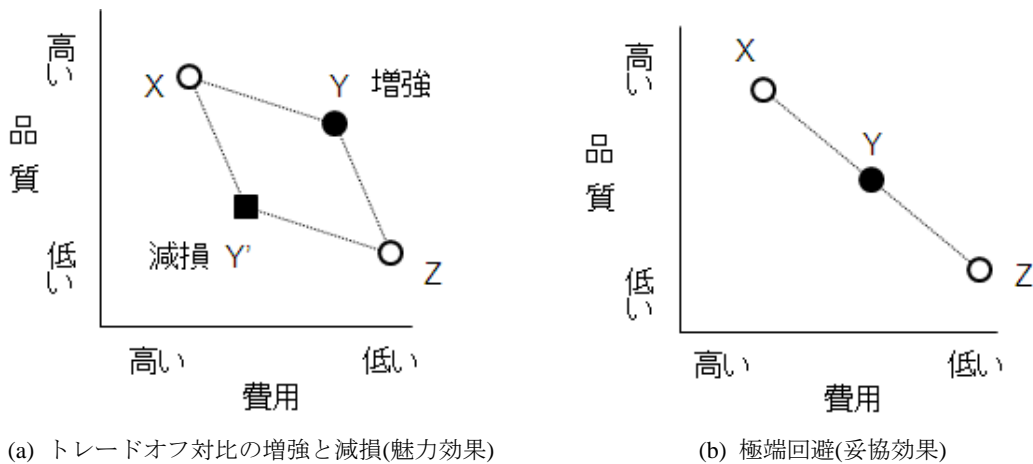
さらに、「幻効果」(Phantom effect)は、Fig. 5(b)で基本集合に対して存在が呈示されているものの、品切れ等の理由のために利用可能ではない選択肢P1~P2を加えることでも、ターゲット選択肢Aが選択され易くなる現象である。

(1) リスク・ベネフィットの原則に基づく他分野専門家への説明



注記) 選択肢は横軸X(価格)と縦軸Y(品質)の属性により表されるよう変更した。選択肢A とC は基本集合, D1 とD2 はA に支配される選択肢, P1 とP2 はA を支配する選択肢である。

Fig. 5 The illustration of attractive effect contributing to decision making [40]



注記) 選択肢は横軸X(価格)と縦軸Y(品質)の属性により表されるよう加筆した。選択肢Yがターゲット選択肢である。トレードオフ対比は「魅力効果」の一部と考えられている。極端回避は「妥協効果」とも呼ばれている。なお、原典ではY' はwと記載されていた。

Fig. 6 The illustration of the trade-off contrast and the avoidance of extremes [36]

幻効果が生じる条件として、標的よりも優れた選択肢が存在していることと、その選択肢が入手不可能であることの2つが必須だと考えられている[39]。

また、Simonsonら[36]は、魅力効果を説明する仮説としてトレードオフ対比と極端回避を提唱している。トレードオフ対比とは3つの選択肢を2つずつ対にして対比した場合に、ある選択肢が他の選択肢よりも相対的に得に見えたり、損に見えたりする考え方である。これには増強(Enhancement)と減損(Detraction)があると述べている。Fig. 6(a)のX, Y, Zの3選択肢では、XとY, XとZおよびYと

Zの3対におけるトレードオフを比較すると、Yが最も有利となる。これを増強と呼んでいる。一方、X, Y', Zの3選択肢ではY'が最も不利となり、これを減損と呼んでいる。他方、Fig. 6(b)のX, Y, Zの3選択肢のように3選択肢が一直線に並んだ場合は、利益も損失も大きい両端の選択肢(X, Z)は避けられ、中間の選択肢Yが有利となる。Simonsonら[36]は、この中間的な選択肢が選択されやすくなるという現象を極端回避(Extremeness Aversion)と呼んでいる。また、Huberら[37]は、これを「妥協効果」(Compromise effect)と定義している。Simonson[38]は、電化製品店での

実験で品質が良い順に価格も高くなるデジタルカメラで2種類の選択の際には50% : 50%だったのが、3種類とすると22% : 57% : 21%となったと報告している。すなわち、Simonsonら[36]は3種類準備すると真ん中が選ばれる傾向にあると述べている。なお、妥協効果ではターゲット選択肢は中間的な選択肢であり、他の選択肢と類似しない場合(他の点の近くにプロットされない場合)において効果が生じるものと考えられる。また、Simonsonら[38]は、魅力効果や妥協効果はヒトが自分の選択を正当化するために生じるのであり、個々の選択肢の望ましさを比較した結果生じるのではないと主張している。さらに、魅力効果および妥協効果が他者に選択結果を知られない場合より、知られる場合の方が大きくなることを示し、選択の正当化が魅力効果や妥協効果の原因であると主張している。ここでは上述した魅力効果、多数効果、幻効果および妥協効果をTable 3で整理する。これらの効果は社会心理学分野では「文脈効果 : Context Effect」とも言われている。

従って、魅力効果、多数効果および幻効果は、ターゲット選択肢と同一または類似の選択肢が存在していることが前提条件と考えられる。逆に、妥協効果は、他の選択肢と類似しないことが前提条件と考えられる。

2.4 検討の方法

2.1.4項で示したHLW処分の既往の研究動向の調査によれば、技術的信頼性・安全性の向上を目指した基盤研究と処分事業の推進に資する実施研究が推進されているが、公衆との相互理解に向けて科学技術社会論の視点から見た研究計画はまだ十分に検討されていない。その結果、HLW処分場の立地検討では公衆の理解が進んでいないことから恐ろしさや未知性が残り、他分野専門家であってもリスク認知のみが先行し、ベネフィット認知が十分ではない状態が継続することが予想される。このような状況にありながら、本分野専門家と他分野専門家間で共有できるリスクの判断基準(モノサシ)を持ち合わせていない。

そのため、本研究では技術本質による演繹的な相互理解のために、他分野専門家への理解し易いHLW処分研究成

果の説明内容として、リスク・ベネフィットの原則に基づき、リスクとベネフィットを認知した上で定量化・管理し、安全性に関する情報を継続して提供することを検討する。したがって、HLW処分に関するリスクとベネフィット、すなわち、安全性と費用(経済性)の両面から説明する方法を検討した。

3 検討の結果

科学技術に係る説明には本質的に判りにくい体系のものと、判りやすい体系のものがある。HLW処分の安全性は、対象物が判りにくく、評価期間も長いことから本質的に判りにくい対象である。環境リスク論として2.2.2項で示した通り、一般に経済原則を導入してリスクやその対策の選定経緯および判断に係る情報を共有した方が、説明を受ける側に理解され易い。ここでは、リスク・ベネフィットの原則に基づき、日本の処分概念を他分野専門家に理解し易く説明する方法を見出す。

3.1 ベネフィットの認識に係る課題

前述の通り、環境リスク論の基本的考え方は、「絶対的な安全領域がない危険性とわれわれはどうつきあうかという科学」であり、「リスクは必ずなんらかのベネフィットを伴っている」ために、「微妙な危険性もリスクとして評価する代わりにある程度のリスクは許容するとの立場に立つ」ことである。

現代は、原子力発電による電気を使用することでベネフィットを享受している。しかし、現状では以下の2つの点でHLW処分はベネフィットが認識されていない。

①原子力エネルギー利用とそれに伴って発生するHLW処分とその費用

最近の原油価格の高騰やCO₂等の温室効果ガスによる地球温暖化への懸念から、CO₂を出さない原子力発電が現代の生活に必要なものであるとの認識は広がっている。しかし、電気を使用することでベネフィットを享受しつつも、国民には原子力発電に伴い発生するHLW処分の必

Table 3 The psychological effect having specific options

| 名称 | 心理学的な効果の内容 |
|------------------------------|--|
| 魅力効果 (Fig.5, 6) [35] | Aよりは劣るが、Bには影響されない選択肢であるD(デコイ)を加えることにより、デコイを優越するターゲット選択肢Aが選択されやすくなるという現象 |
| 多数効果 [39] | AとBの比較において、Aに支配される選択肢が加わることによってターゲット選択肢Aの選択率が向上するという現象 |
| 幻効果 (Fig. 5) [39] | AとBの比較において、品切れ等の理由のために利用可能ではない選択肢P(幻)を加えることでも、ターゲット選択肢Aが選択され易くなる現象 |
| 妥協効果 (Fig. 6) [36, 37] | X, Y, Zの3選択肢のように3選択肢が一直線に並んだ場合は、利益も損失も大きい両端の選択肢(X, Z)は避けられ、中間の選択肢Yが有利となる現象 |

(1) リスク・ベネフィットの原則に基づく他分野専門家への説明

要性まで実感として認識されていない。

②現世代における HLW 処分費用の徴収とその方法

原子力発電による電気の使用で便益を享受する世代が、HLW 処分費用を負担すべきとの考え方から、消費者が電気料金の一部として負担することとされている[3]。すなわち、特魔法に基づき、約 3 兆円という積立金の下で処分事業を進めようとしている[3]。既に、現状で約 20 銭/kWh(1 か月に 300kWh(約 7,000 円)の電気を使用する家庭の負担額は約 20 円)程度の HLW 処分費用を既に支払っている[5]。処分事業の費用は税金とは別の体系の積立金として既に徴収されていることは、電力の消費者(=国民)にはあまり知られていない。

上述の 2 つの点でベネフィットが認識されない体系となっているため、現状ではリスク・ベネフィットの原則による HLW 処分の安全性に係る説明は成立しない。まず上述のベネフィット情報を説明し、正しく理解されることから始まる。これらの情報はマスメディアを使った広域広報により国民に正しく認識されるべきである。その上ではじめて他分野専門家を含め、どこまでのリスクを許容するかを対話することができる。

3.2 リスク・ベネフィットの原則に基づく処分時安全性の説明方法

ベネフィット情報に係る広域広報の次の段階として、本分野専門家である各研究機関はバリア性能や安全評価の結果等をリスク・ベネフィットの原則に基づいて説明しなければならない。それには、まず、現状の情報でリスク・ベネフィットの原則に基づいた安全評価結果を示せるか否かを確認する必要がある。この検討では前述した約 3 兆円の費用試算結果とは第 2 次取りまとめ[13]に基づく 4 万本での年間の最大放射線量(最大被ばく線量当量: 処分後約 80 万年で $0.005 \mu\text{Sv/y}$)を引用した。また、前述の Fig. 4 の各国の比較結果より安全評価結果を引用し、各国の廃棄物発生量と処分費用の調査結果[41]から処分単価を導出して Table 4 に示した。なお、廃棄物発生量は燃料状態でのウラン重量換算で規格化した。再処理施設におけるガラス固化体の発生量は使用済み燃料 1 ton(ウラン換算)当たりで約 1.25 本とした。また、Fig. 4 にはフィンランドの年間の最大放射線量が示されていないため、別途の文献[42]より引用し、Table 4 に反映した。ベルギー(GF1)、スイス(GF2)はガラス固化体の年間の最大放射線量を記載した。また、フィンランド(SF1)、スウェーデン(SF2)、米国(SF3)は参考情報との位置付けで使用済み燃料直接処分時の年間の最大放射線量を記載した。なお、Table 4 で年間の放射線量は年間被ばく線量当量の意味である。

なお、米国は確率論的安全評価(PSA)を行っており、1 万年以降は破壊的シナリオの評価を組み込んでいる等に

より、評価体系が大きく異なっている。例えば 10 万年後辺りでは火成侵入シナリオ等により放射線量の数値が大幅に増加している。そのため、Table 4 では米国の放射線量の数値は確率論的シミュレーション結果の平均値を示し、処分後経過時間の異なる 3 つの最大放射線量の情報を示した。また、本研究では米国の安全評価の代表値としては 6 万年後の放射線量である $0.01 \mu\text{Sv/y}$ を利用することとした。

Table 4 の個人の最大被ばく線量当量と処分単価の相関を Fig. 7 にプロットした。Fig. 7 では、横軸は 2.3 項で示した心理学の文献例と同じ費用(処分単価)だが、縦軸は品質に変えて安全性(年間の最大被ばく線量当量(放射線量))と表示した。海外事例等は各々の処分概念に基づく安全性と費用との相関図で比較して議論しようとするのが、リスク・ベネフィットの原則に基づいて本研究が見出した説明方法の重要なポイントである。これは前述の岡[31]が指摘する費用効果分析に近い考え方に基づくものである。また、国内規制・基準がまだ整備されていないため、諸外国で提案されている安全基準である $100\sim 300 \mu\text{Sv/年}$ を図中に表示した。

Fig. 7 の A 点が日本の評価例であり、その他の点である GF1~GF2, SF1~SF3 は海外事例である。本研究では、まず、これらの点をトレードオフ対比することで技術的に専門家の理解を深めることができると考えている。

心理学的研究でいう品質と処分時安全性は必ずしも完全に一致するものではない。しかし、処分時の安全性は「あらかじめ基準値として定められた放射線防護レベルを超えていないこと等を確認する行為」を基本的な考え方としており、この基準値への合否という視点からは広義で処分場の品質と表現することができると考えられる。心理学的な効果は 2.3 項で述べた通り、海外事例との対比は魅力効果・多数効果・幻効果・妥協効果をもたらす。なお、ここで幻効果があるとしたのは、海外に立地される処分場であり、日本では利用できないためである。GF2-A 点-GF1 は A 点が中央に位置して選択され易くなるという妥協効果(極端回避性)をもたらす構成である。また、SF1~SF3 は A 点よりも品質(安全性)がやや劣る位置にあるが A 点の付近にあり、A 点が選択され易くなるという魅力効果・多数効果をもたらす構成である。

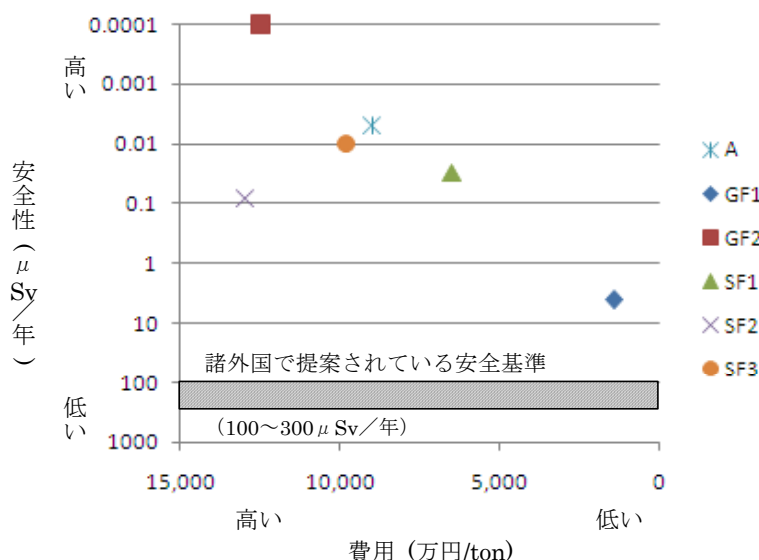
Fig. 7 では海外事例も合わせて HLW 処分費用と処分時安全性との相関で表現できることが判った。また、Fig. 7 の A 点を見れば、日本の現時点での HLW 処分事業化検討の成果は、費用の点でも安全性の点でも、国際的にバランスがとれたものである。

但し、日本で利用できる選択肢は 1 点で良いのかという議論はある。Fig. 7 のような形で提示していないものの、現状では第 2 次取りまとめ[13]の成果で社会的合意が得ら

Table 4 International comparison of the cost and safety for HLW disposal operation

| 対象国 | 項目 | 発生量[41] (ton) [*] (a) | 年間の最大放射 線量 [*] (μ Sv/y) | 処分後の 時点 (万年) | 総費用[41] (億円) (b) | 処分単価 (万円/ton) (c=b÷a) | (備考) 円換算レート |
|---------------------|-----|--------------------------------------|---|--------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 日本 | A | 32,000 | 0.005 | 80 | 29,000 | 9,000 | — |
| ベルギー | GF1 | 4,934 | 4.00 ^{*1} | 20 | 707 ^{*4} | 1,400 | 1EUR=158 円 |
| スイス | GF2 | 3,455 | 0.0001 ^{*3} | 100 | 4,300 | 12,500 | 1SSF=98 円 |
| フィンランド [*] | SF1 | 6,500 | 0.03 [42] | 1 | 4,200 | 6,500 | 1EUR=158 円 |
| スウェーデン [*] | SF2 | 9,300 | 0.08 | 20 | 12,100 | 13,000 | 1SEK=17 円 |
| 米国 ^{*5} | SF3 | 70,000 | (0.0001) | 1 | 68,400 | 9,800 | 1\$=119 円 確率論的評価の 平均値 |
| | | | 0.01 | 6 | | | |
| | | | (1520) | 48 | | | |

*1 発生量は燃料状態でのウラン重量換算
 *2 Fig. 4 の年間の放射線量の最大値を読取
 *3 再処理に伴うガラス固化体分として表示
 *4 幅として表示されている費用の中央値
 *5 米国は 6 万年時点の放射線量をプロット



A は第 2 次取りまとめの処分概念の安全評価と費用試算した研究事例(日本の既存のデフォルト案)
 GF1 (ベルギー)、GF2 (スイス)は海外のガラス固化体処分の研究事例
 SF1 (フィンランド)、SF2 (スウェーデン)、SF3 (米国)は海外の使用済み燃料直接処分(参考情報)の研究事例

Fig. 7 The illustration of safety evaluation results of HLW disposal based on the principle of risk benefit

れていないため、A 点以外の選択肢は必要である。しかし、ここでは選択肢の必要性を提言するまでとし、具体的な選択肢の設定方法は後報に譲る。

なお、このリスク・ベネフィットの原則の基づく説明には、前述の①電力料金—原子力発電—HLW 処分費用のリンク、②現世代における HLW 処分費用の徴収と変動の可能性等のベネフィット情報について、広域広報等により国民に周知させることが前提であることに注意しなければならない。

3.3 検討結果のまとめ

興味未高揚層(中間層)の他分野専門家に理解され易い

と考えられるリスク・ベネフィットの原則に基づき費用(経済性)の情報と共に処分時安全性を説明する方法について検討した結果は以下の通りである。

- ①現状では原子力エネルギーの利用に伴う放射性廃棄物の課題解決には経済原則が働いていない。経済原則が働かせ、リスク・ベネフィットの原則[7]から合理的な説明をするためには、HLW 処分の費用(経済性)に関する情報と共に、その安全性を示すべきである。
- ②上記①の手法により、日本の既存のデフォルト案(第 2 次取りまとめ[13]で示された安全性と国の委員会[4]で示された費用試算結果)は、海外事例との相関を整理で

(1) リスク・ベネフィットの原則に基づく他分野専門家への説明

きる。また、海外事例も合わせて地層処分にかかる費用と、達成される HLW 処分時の安全レベルの関係を示すことにより、どこまで費用をかけるべきか(=どこまで安全性を追求すべきか)を他分野の専門家もまじえて議論できるものと考えられる。

- ③但し、現時点の我が国で利用可能なものとしてプロットできるのは日本の既存のデフォルト案の 1 点であり、HLW 処分地を確保することについて他分野の専門家と議論するためには他の選択肢を準備するべきである。

4 考察と提案

前章ではリスク・ベネフィットの原則に則った安全性と費用の相関図により、日本の既存のデフォルト案と海外事例との相関で相対的な位置付けを説明出来ることを述べた。本章ではそこで利用した費用試算結果に見直す要因はないかを考察する。

現状では、個々には整合させていないが各関係機関の発信する意見を集約し、総括的に見れば、Fig. 7 の日本の既存のデフォルト案である A 点について、「日本のどの場所に作っても、徴収する約 3 兆円の費用の下で十分な安全性を確保した処分場を設置できる」と言っているようにも聞こえる。著者は日本の国・電力・事業主体等の関係機関が責任を全うして真面目に取り組もうとする結果、約 3 兆円の費用の枠内で HLW 処分を実現したいとする気持ちの表れと理解しているが、これが一般的に理解されているか否か、リスク・ベネフィットの原則から妥当な内容であるか否かは疑問がある。

2.1.4(4)項で示した通り、岩盤の強度が低く、安定性が悪い地質の場合、建設工事には費用と期間がかかる。さらに、湧水量が多い地質の場合は止水工事を伴うため、一層の費用と期間がかかる。これらは 7 カ月を要して 80 m の破砕帯を突破し、1963 年に完成した黒部ダムの建設記録 [43, 44] から明らかである。黒部ダムは当時の金額で予算約 380 億円に対して実際は 513 億円を要したとされている。特に難工事を極めた大町トンネルを担当した第 3 工区は当時の予算約 16 億円に対して、実際は約 30 億円と約 2 倍になったとされている [43]。

他方、上述を踏まえてか、NUMO のホームページ [5] では「国が処分に必要な金額(単価)を定めており、この単価は、毎年見直され、また計画の見直し等があった場合にも見直され、適切な処分費用が確保される」ため、不足することはないと述べられている。将来の実処分場で実際に破砕帯との遭遇等により総費用が増加すれば、電力料金による追加徴収等の方法で消費者に負担がかかるものと予想される。しかし、その変動幅や費用が不足する際の対応策は必ずしも国民が周知するところとはなっていない。

Fig. 7 の日本の既存のデフォルト案である A 点について

も、前述の理由で費用試算を見直す必要が生じる可能性がある。費用が増額になれば電力料金による追加徴収等の方法で消費者に負担がかかるため、最初からサイト選定の評価の中にどのサイトは費用が高く、どのサイトなら費用は安いという経済性の項目が入っていることを周知とする方が合理的である。将来、複数の候補サイトが現れ、処分サイトを選定する段階となれば、経済原則からして安い費用で高い安全性が得られる場所が選定されるべきである。また、一国のエネルギー利用にかかる負担を一身に背負い、電力消費者=国民の負担低減に寄与するため、処分地となる当該の地域は他の地域より誉れをもって賞賛されるべきである。

そのため、Fig. 7 の A 点については、現状の約 3 兆円の費用積算のベースを明らかにし、仮に岩盤の強度(安定性)不足や湧水により建設費用が増加した場合、あるいは、良好な岩盤による工学バリアが合理化できた場合の費用の変動幅と変動した場合の対策を明らかにし、経済原則が働くようにするべきである。また、場合によっては、A 点は横軸(費用)との相関またはその変動幅を見直さなければならない。

5 結言

放射性廃棄物処分分野は高い安全性を求めるが余り、費用との相関を議論されていない。そのために経済原則が働かず、際限なく安全性だけを求める動きとなっている。

ここでは HLW 処分の社会的受容性から端を発した検討の結果として、リスク・ベネフィット原則に則った意思決定が可能となるために費用(経済性)の情報と共に HLW 処分の安全性を示す説明の方法を検討した。その結果、この原則に則った費用と安全性の相関図では、第 2 次取りまとめによる日本の既存のデフォルト案と海外事例との相関をわかりやすく整理できる。また、海外事例も合わせて地層処分にかかる費用と、達成される HLW 処分時の安全レベルの関係を示すことにより、どこまで費用をかけるべきか(=どこまで安全性を追求すべきか)を他分野の専門家もまじえて議論できるものと考えられる。

なお、このリスク・ベネフィットの原則の基づく説明には、①電力料金-原子力発電-HLW 処分費用の相関、②現代における HLW 処分費用の徴収と変動の可能性等のベネフィット情報について、国・電気事業者等の広域広報により国民に内容を説明し、理解されることから始まる。

参考文献

- [1] 和田隆太郎, 田中知, 長崎晋也: 高レベル放射性廃棄物処分場の立地確保に向けた社会受容プロセスモデル. 日本原子力学会和文論文誌 8[1], 19-33 (2009).

- [2] 経済産業省資源エネルギー庁,TALK. 考えよう、放射性廃棄物のこと。～原子力エネルギーの未来のために、地層処分(2008).
- [3] 総合資源エネルギー調査会 電気事業分科会原子力部会 放射性廃棄物小委員会:「放射性廃棄物小委員会 報告書中間とりまとめ～最終処分事業を推進するための取組の強化策について～」,平成 19 年 11 月 1 日(2007).
- [4] 総合エネルギー調査会: 高レベル放射性廃棄物処分事業の制度化のあり方, 総合エネルギー調査会 原子力部会中間報告,平成 11 年 3 月 23 日(1999).
- [5] 原子力発電環境整備機構:
http://www.numo.or.jp/q_and_a/01/01.html (last visited at Aug.6, 2009).
- [6] 中西準子: 環境リスク論—技術論からみた政策提言—,岩波書店, 東京(1995).
- [7] 中西準子: 水の環境戦略,岩波新書,東京(1994).
- [8] 椿 広計: 「特集 統計科学とリスク解析」について—リスク解析の価値依存性とプロフェッショナルの役割—. 統計数理 **54**[1], 1-3 (2006).
- [9] Kunreuther, H., Easterling, D.: Are risk-benefit tradeoffs possible in siting hazardous facilities?. The American Economic Review **80**[2], Papers and Proceedings of the Hundred and Second Annual Meeting of the American Economic Association, 252-256 (1990).
- [10] Groothuis, P.A., Miller, G.: The role of social distrust in risk-benefit analysis: A Study of the siting of a hazardous waste disposal facility. Journal of Risk and Uncertainty **15**[3], 241- 257 (1997).
- [11] Kohko, T. et al.: Public acceptance and risk-benefit perception of CO₂ geological storage for global warming mitigation in Japan. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change **12**[7], 1237-1251 (2007).
- [12] Siegrist M.: The influence of trust and perceptions of risks and benefits on the acceptance of gene technology. Risk Analysis **20**[2], 195- 204 (2000).
- [13] 核燃料サイクル開発機構: わが国における HLW 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).
- [14] 核燃料サイクル開発機構: 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成 17 年取りまとめ—, JNC TN1400 2005-20 (2005).
- [15] 動力炉・核燃料開発事業団: 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 —平成 3 年度—, PNC TN 1410 92-081 (1992).
- [16] 核燃料サイクル開発機構: 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発 —平成 14 年度報告—, JNC TN1400 2003-004 (2003).
- [17] 原子力発電環境整備機構: 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性—「処分場の概要」の説明資料—, NUMO-TR-04-01 (2004).
- [18] 通商産業省: 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針を定めた件, 平成 12 年 10 月 2 日 通商産業省告示第 591 号 (2000).
- [19] 原子力発電環境整備機構: 「概要調査地区の選定上の考慮事項」検討にあたっての基本方針,総合資源エネルギー調査会 原子力部会 高レベル放射性廃棄物処分専門委員会技術 WG(第 2 回) 資料 4, 平成 14 年 7 月 16 日(2002).
- [20] Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.(SKB): SR 97 - Post-closure safety, Technical Report, TR-99-06, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1999).
- [21] 原子力安全委員会: 高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について(第 1 次報告) (2000).
- [22] OECD/NEA: Review of safety assessment methods, Disposal of radioactive waste, A report of the performance assessment, Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee, OECD/Nuclear Energy Agency (1991).
- [23] 資源エネルギー庁、日本原子力研究開発機構: 高レベル放射性廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画, 資源エネルギー庁(2006).
- [24] OECD/NEA: The handling of timescales in assessing post-closure safety, lessons learnt from the April 2002 workshop in Paris, OECD/Nuclear Energy Agency, Paris, France (2002).
- [25] ONDRAF/NIRAS: Technical overview of the SAFIR2 report, Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, NIROND 2001-05E (2001).
- [26] U.S. Department of Energy (DOE): Yucca Mountain science and engineering report rev.1, Technical information supporting site recommendation consideration, DOE/RW-0539-1 (2002).
- [27] Nagra: Project Opalinus Clay, Safety report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste, National cooperative for the disposal of radioactive waste, Technical Report 02-05 (2002).
- [28] 電力中央研究所・電気事業連合会: 高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術(1999).
- [29] 村上陽一郎: 科学者とは何か, 新潮選書, 東京(1994).
- [30] 村上陽一郎: 安全と安心の科学, 集英社新書, 東京 (2005).
- [31] 岡敏弘: 「特集 環境・健康とリスク—何が課題か」リスク便益分析と倫理,科学 72, 10, 岩波書店, 東京, pp.1009-1014(2002).
- [32] 中谷内一也: リスクのモノサシ, NHK ブックス

(2006).

- [33] 中谷内一也: ゼロリスク評価の心理学, ナカニシヤ出版 (2004).
- [34] Tversky, A.: Elimination by aspect; A theory of choice. *Psychological Review* **79**, 281-299(1972).
- [35] Huber, J. et al.: Adding asymmetrically dominated alternatives: Violations of regularity and the similarity hypothesis. *Journal of Consumer Research* **9**, 90-98(1982).
- [36] Simonson, I., Tversky, A.: Choice in context: Tradeoff contrast and extremeness aversion. *Journal of Marketing Research* **29**, 281-295 (1992).
- [37] Huber, J., Puto, C.: Market boundaries and product choice: Illustrating attraction and substitution effects. *Journal of Consumer Research* **10**, 31-44 (1983).
- [38] Simonson, I.: Choice based on reasons: The case of attraction and compromise effects. *Journal of Consumer Research* **16**, 158-174 (1989).
- [39] 奥田秀宇: 意思決定における文脈効果-魅力効果, 幻効果, および多数効果-. *社会心理学研究* **18**, 147-155(2003).
- [40] 田村真史: 選好形成における理想点の役割についての意思決定文脈効果からの検討, *立命館人間科学研究* **9** (2005).
- [41] 原子力環境整備促進・資金管理センター: 諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について(経済産業省資源エネルギー庁監修) (2008).
- [42] Vieno, T., Nordman, H.: Safty assessment of spent fuel disposal in Hastholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuuvaraan TILA-99, POSIVA99-07. WHO (1998); Guidelines for Drinking-water Quality, World Health Organization (1999).
- [43] 木本正次: 『黒部の太陽』, 信濃毎日新聞社, 長野(1992).
- [44] 関西電力: 20 世紀の大事業「黒部ダム建設」, <http://www.fururu.net/e-patio/category/living/1128077761/> (last visited at Aug.6, 2009).

