総 説

放射性廃棄物処分における核種移行評価パラメータの定量化手法： 専門家意見聴取の活用事例調査

中林 亮^{1,*}, 杉山 大輔¹

Quantification of Radionuclide Migration Parameters in Safety Assessment of Radioactive Waste Disposal: Review on the Use of Expert Elicitation

Ryo NAKABAYASHI^{1,*} and Daisuke SUGIYAMA¹

¹Radiation Safety Research Center, Nuclear Technology Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, 2-11-1 Iwadokita, Komae-shi, Tokyo 201-8511, Japan

(Received May 20, 2019; accepted in revised form September 5, 2019; published online May 12, 2020)

Expert elicitation has traditionally been accepted in some countries as a way to quantify the uncertainty of radionuclide migration parameters in the safety assessment of radioactive waste disposal. However, expert elicitation has not yet been explicitly performed in the field of radioactive waste disposal in Japan. To discuss the applicability of expert elicitation in Japan, here we broadly review the histories and methodologies of expert elicitation in some papers and review in more detail case studies on the utilization of expert elicitation in the safety assessment of radioactive waste disposal in the US, UK, and Sweden. From the literature review, we suggest that it is valuable to adopt expert elicitation to quantify the uncertainty of parameters in Japan. In particular, the documentation of each elicitation step is critical to ensuring the traceability and transparency of expert elicitation. The documentation enables the regulator to evaluate whether the expert judgment including the elicitation process is adequate. Furthermore, we recommend providing not only an aggregated expert judgment for safety assessment but also the distribution of individual expert judgements. Individual expert judgments will be used for related analyses (e.g., sensitivity or uncertainty analyses), leading to increased confidence in the safety assessment.

KEYWORDS: radioactive waste management, safety assessment, probabilistic approach, radionuclide migration parameter, uncertainty, expert judgment, expert elicitation, behavioral aggregation approach, mathematical aggregation approach, mixed aggregation approach

I. はじめに

我が国で検討が進められている中深度処分の規制要求には、ALARA (As Low As Reasonably Achievable) の考え方が取り入れられ、合理的に利用可能な優れた技術を用いて放射性物質を閉じ込める人工バリアの設計の選定およびできるだけ安定で廃棄物埋設に適した廃棄物埋設地の配置の選定を求め、それらの設計に関わるプロセス (以下、設計プロセスという) の妥当性を適切に説明することが要求される見込みである¹⁾。筆者らは上述の規制要求への対応策の1つとして確率論的アプローチを基盤とした施設設

計オプション間の定量的な評価手法を具体化するとともに²⁾、当該手法で用いられる核種移行評価パラメータの設定方法の考え方を提案してきた³⁾。放射性廃棄物処分に内在する不確実性を管理することは、安全評価の信頼性を高めるために重要である。一般的に不確実性は、データが本質的にばらつくことに起因する不確実性 (偶然的な不確実性) と情報や知識が欠如していることに起因する不確実性 (認識論的な不確実性) に分けることができる⁴⁾。放射性廃棄物処分の場合はバリア材の不均質性や万年単位に亘る評価期間の長さから、認識論的な不確実性が支配的に存在する。これらの不確実性を低減するよう努力がなされるべきであるものの、その性質上、不確実性を完全に避けることはできず、不確実性を考慮した安全評価の実施が不可欠である。そのような状況で安全評価の信頼性を高めていくには、不

¹ (一財)電力中央研究所 原子力技術研究所 放射線安全研究センター

* Corresponding author, E-mail: r-naka@criepi.denken.or.jp

確実性を管理すること、すなわち不確実性を特定し、安全評価に対してどの程度影響があるかを理解すること、不確実性が評価内でどのように取り扱われているか(決定論的扱いもしくは確率論的扱い)を述べることで、単に値や確率分布として表現するだけでなく、その設定根拠を明示することが必要と考える。このような不確実性の管理は、放射性廃棄物処分に関する意思決定にとって重要な判断材料となるだろう。

先行研究³⁾では上述の考え方を念頭に置き、設定した核種移行評価パラメータの不確実性が十分に管理されたものであることを保証することが設計プロセスの妥当性の向上につながると考え、不確実性を初期(設計から施工完了)および長期(施工完了から評価対象期間終了)の観点から大別し、それぞれの管理方法について検討した。初期の不確実性の多くは、材料管理や施工管理などの直接的な観察・評価によって管理することが可能と考えられるが、長期の不確実性については、直接的な管理を適用することはできない。長期の不確実性を定量的に把握するためには現状有する科学的根拠に基づいたシミュレーション等による予測や評価に頼らざるを得ず、したがってその確からしさには評価者(専門家)の主観的な判断が関わらざるを得ない。このような状況において、安全評価で用いる核種移行評価パラメータの確率分布(長期の不確実性)が十分に管理されたものであることを保証するという目的を達成するためには、専門家判断によって定量化するだけでなく、定量化に至るまでのプロセスを可視化する必要がある。すなわち、検討に用いられた知見、情報を、専門家判断における前提条件や仮定を含めて追跡可能なかたちで透明性をもって整理することが重要であると考えられる。しかしながら、その具体的な手法は整備されていない。

本報では、専門家判断を取得するための一般的な方法論について調査し、その特徴を整理する。その後、諸外国(米国、英国、スウェーデン)における核種移行評価パラメータの定量化に向けた専門家判断の活用事例を調査し、各国が採用した手法を整理するとともに、我が国での運用に向けた重要な示唆を整理する。最後に調査結果を踏まえ、我が国の放射性廃棄物処分事業への適用性について考察し、我が国に適した専門家意見聴取のあり方について先行的な提案を試みる。

II. 専門家意見聴取の方法

1. 専門家意見聴取の種類

専門家判断(expert judgment)とは、専門家の論理的思考に基づく定性的、もしくは定量的なデータ(判断、意見、および情報など)を意味する⁵⁾。定量的には点推定値や確率分布として表現される⁵⁾。この専門家判断を取得するためのプロセスが専門家意見聴取(expert elicitation)とされ、専門家意見聴取は、「正式な専門家意見聴取(formal expert elicitation)」と「略式な専門家意見聴取(informal

expert elicitation)」に大別することができる^{5,6)}。

「正式な専門家意見聴取」とは、複数の構成要素から成り立つ体系化された専門家意見聴取で、各構成要素の内容が詳細に文書化され、透明性と追跡性が高いプロセスを意味する⁵⁾。「略式な専門家意見聴取」は、「正式な専門家意見聴取」の構成要素のうち、いくつかが簡略化されたプロセスを意味し、その簡略化の程度には幅がある。「正式な専門家意見聴取」を構成する要素は、提案されている手法^{5~11)}によって多少の違いがあるものの、大別すると下記の7つの要素から成り立つと考えられる。

- 1) 目標の定義
- 2) 専門家の選定
- 3) 事前トレーニング
- 4) 専門家判断の聴取
- 5) フィードバック
- 6) 専門家判断の集約
- 7) 文書化

以下では、文献^{5~11)}の記述に基づき、各要素について説明する。

1) 目標の定義では、得られた専門家判断がどのように使用されるかという目標を明確に定義する。この定義が、専門家の選択や、専門家に提供されるべき情報、専門家に要求する判断の形式を手引きすべきである。また、専門家判断を要する不確実性は評価結果に大きく影響を及ぼすものである必要がある。

2) 専門家の選定では、必要な情報や専門知識を有し、質問に回答するためにそれらの情報を適用できる能力や、幅広く独立した意見を表現できる個人であるべきである。また、意思決定を公表する意思があり、利益相反を開示する意思があることが望まれる。

3) 事前トレーニングでは、専門家全員が必ずしも確率的概念を熟知している訳でないため、自身の信念の度合いを定量的に表現する手段について理解するためのトレーニングを行う。また、定量的な判断を実施するうえで重要となるのは潜在的なバイアスの存在を認知することである。人々は一般的には自信過剰である。つまり、彼らは正しいという確率を過大評価する傾向がある。しかし、適切な訓練を受け、可能性のあるバイアス、特に過信を認識した場合、確率をより正確に推定することができる。自信過剰のバイアス以外にも、アンカーリング(以前の値または初期値にあまりにも大きな重みを与える)、可用性バイアス(容易に利用可能なデータに大きな重みを与える)など、潜在的で無意識のバイアスが存在するが、人々が潜在的なバイアスを認識することは、バイアスを避けるために役立つとされる。

4) 専門家判断の聴取では、中断のない議論につながるプライベートな環境で開催する。聴取対象の専門家に対して、共通で統一的な方法で質問し、専門家判断のみならず、その判断の背後にある理由について具体的な回答を提

供するよう求める。

5) フィードバックでは、専門家判断の聴取が完了した後、できるだけ早く聴取結果をフィードバックする必要がある。必要に応じて、各専門家はそのフィードバックに基づき、それぞれの判断を改訂または明確化する必要がある。改訂する場合は、その根拠を明確にしなければならない。4)と5)は必要に応じて繰り返し実行することが可能である。

6) 専門家判断の集約では、各専門家から得られた専門家判断を集約する。集約のアプローチとしては、数学集約アプローチ、行動集約アプローチ、混合集約アプローチが存在する。なお、集約アプローチごとに、4)専門家判断の聴取や5)フィードバックの方法が異なることに留意されたい。各アプローチの詳細はII-2節で述べる。

7) 文書化では、透明性と追跡性を高めるために各構成要素の詳細を明確に記さなければならない。専門家判断は、判断を裏付ける根拠とともに明確に記述されるべきである。すべての専門用語の明確な定義が提供されるべきであり、判断に使用されるすべての仮定が明示されるべきである。専門家判断は、それらの根拠となる論理と情報を伴って文書化されるべきである。専門家が使用する判断やモデルを決定する際に重要と考える計算は記録し、公開、非公開に関わらず、すべての文献は適切に参照される必要がある。

2. 専門家判断の集約方法

(1) 行動集約アプローチ

行動集約アプローチ(behavioral aggregation approach)は、専門家間の相互作用(対面式会議もしくは遠隔式会議)を通して、各専門家が有する知識や情報を共有し、専門家集団として合意する1つの確率分布(コンセンサス分布)を導くことを目的としている^{12~15)}。個人ではなく、集団で物事に取り組むことは、他者が有する異なる視点を取り入れることで、より新しい情報や視点を蓄積できるとともに、相互間でのエラーチェックが働くことで、各専門家の熟考が進み、導き出す解の質が向上することが期待される^{13,14,16)}。すなわち、専門家間の相互作用によってより優れた解を得ようというのが本アプローチの本質といえる。また、対面式会議等を通し、問われている内容について専門家間で共通理解が得易くなることも利点の1つである¹⁴⁾。しかしながら、コンセンサス分布にバイアスが掛からないように留意する必要がある。例えば、専門家間に上下関係が存在する場合、下の立場の者が意見を出すことを遠慮し、自身の専門知識を十分に貢献させることができない場合や、これと関連して、上の立場の者が議論や判断までも支配する可能性もある。これにより、新しい意見や重要な情報等が欠落し、本来あるべき不確実性を十分に表現されない可能性がある。また、コンセンサスの達成を意識した集団では、すべてのメンバーが広く受け入れられ

るアイデアを不合理に受け入れるという危険な意思決定がなされる、いわゆる集団思考が働く可能性がある^{12,15,17,18)}。行動集約アプローチにおいて、これらのバイアスを可能な限り低減する重要な役割を課せられるのがファシリテーターである^{14,19)}。ファシリテーターは公平性を保ちつつ、潜在的なバイアスを見極め注意を促すとともに、議論が円滑に進むように、出された意見を常にフィードバックすることを心がける必要がある¹⁴⁾。しかしながら、経験豊富なファシリテーターを以ってしても、意見を1つに集約することができない可能性は十分にあり得ることが、本アプローチの短所ともいえよう。

行動集約アプローチを基盤とした手法としてSHELF(SHeffield ELicitation Framework)^{10,20)}が一例として挙げられる。本手法は対面式会議を通して各専門家が有する知識や情報を共有し、専門家集団として合意する1つの確率分布(コンセンサス分布)を導くという行動集約の原則に基づいた手法である。SHELF法では、専門家個人に意見聴取を実施し、三分位数や四分位数、もしくは直接的に累積確率分布として回答を求め、各確率分布と等価平均化した確率分布を出発点として、最終的にコンセンサス分布を取得する。なお、SHELFでもファシリテーターの重要性が主張されている。ファシリテーターは統計や確率論的推論の知識を有しており、グループの相互作用によって生じるバイアスに対処できる経験豊富なファシリテーターである必要があるとされる^{10,15)}。SHELFのソフトウェアパッケージは<http://www.tonyohagan.co.uk/shelf/>から無料でダウンロード可能である(2019年3月アクセス)。

(2) 数学集約アプローチ

数学集約アプローチ(mathematical aggregation approach)は、専門家間の相互作用なしに、複数の専門家から個別に意見(確率分布)を引き出し、それらを数学的に結合し、単一の確率分布を取得するものである^{12,14,15)}。数学集約アプローチを使用する理由として、行動集約アプローチで直面する潜在的なバイアス(例えば、集団思考)を避けることを目的として利用されるケースが多い¹⁵⁾。数学的な結合ルールとしては、各意見の重みを等価と見なす等価平均化²¹⁾や、各意見に重みをつけた加重平均化が挙げられる。後者のルールを活用した最も有名で幅広い分野で利用されているのがCooke法^{9,22~24)}である。以下に、Cooke法の概要を説明する。

Cooke法は前述したSHELF法とは対照的に、専門家間で意見交換を実施することを禁じ、各専門家の個別の意見を聴取した後、加重平均化し1つの分布を取得するアプローチである。本手法の一番の特徴は、定量化したい変数(ターゲット変数: target variable)について専門家が回答する前に、主催者側が設定した、ターゲット変数に関連した質問(シード変数: seed variable)への回答が求められる点である。このシード変数の回答結果を踏まえ、各専門家の重み付け係数が決定される。シード変数は、主催者

側にとっては真値を把握できており、専門家にとっては未知の値である必要がある。シード変数に関する複数の設問(通常、10 から 20 個程度の設問²³⁾)に対し、専門家は個別に、最も確からしい値(50 パーセンタイル値)と不確実性の範囲(例えば、5 パーセンタイル値と 95 パーセンタイル値)を回答する。このシード変数に関する設問への回答から、専門家ごとに統計精度スコア(statistical accuracy score)と情報量スコア(information score)という 2 つの指標を算出し、この 2 つの指標を掛け合わせることによって、専門家の重み付け係数を決定する。統計精度スコアとは、正しい値を回答する統計的確からしさを評価したものであり、情報量スコアとは、回答の振れ幅(不確実性)の与え方の傾向を評価したものである。

Figure 1 に統計精度スコアと情報量スコアの関係性を例示する。統計精度スコアが高いということは、真値に対して正確に回答していることを意味し、情報量スコアが高いということは回答のばらつきが小さいことを意味する。すなわち、正規分布で表現した場合、真値を平均値とし、標準偏差が小さい分布と考えることができる。他方、統計精度スコアが低いことは、真値に対して乖離した回答をしていることを意味し、情報量スコアが低いということは、回答のばらつきが大きいことを意味する。すなわち、正規分布で表現した場合、平均値が真値から乖離し、標準偏差が大きい分布と考えることができる。この 2 つの指標を掛け合わせて、各専門家の重み付けを実施するのが Cooke 法の特徴である。

シード変数への回答後、専門家はターゲット変数に対し回答する。回答形式は、シード変数と同様で、最も確からしい値と不確実性の範囲を回答し、主催者に提出する。主催者は、提出された回答を、事前テストで算出した専門家

の重み付け係数に基づき加重平均化し、1 つの回答(確率分布)に集約するというのが Cooke 法の一連のプロセスである。Cooke 法は EXCALIBUR(EXpert CALIBration)というソフトウェアパッケージとして公開されており、<http://www.lighttwist.net/wp/> からダウンロード可能である(2019 年 3 月アクセス)。

Cooke 法の課題としては、最終的な集約結果がシード変数の質に大きく左右されるため、その設定には多大な時間と努力が要するものと考えられている²⁵⁾。近年でもシード変数を設定するための戦略が議論され続けている²³⁾。また、無比の原則(無差別)や公平の原則を考えると加重平均よりも等価平均が好まれるかもしれないが、ただその選択はしばしば恣意的なものであることが多いとされる¹⁴⁾。

(3) 混合集約アプローチ

行動集約アプローチと数学集約アプローチを混合したアプローチを混合集約アプローチ(mixed aggregation approach)という。混合集約アプローチは、専門家間である程度の相互作用を生じさせ、他者が有する情報や知識を共有し、自身の意見に反映後、最終的に得られた確率分布を数学的に 1 つに結合するアプローチである¹²⁾。行動集約アプローチと数学集約アプローチの要素の採用の程度によって、混合集約アプローチに違いが生じてくる。ここでは Delphi 法^{26,27)}と IDEA 法^{11,28)}を概説する。

Delphi 法は対面式会議を介さず、ファシリテーターを介した反復的な意見のフィードバックを実施することによってコンセンサスの達成を試みるアプローチである。各専門家は個別に確率とその設定理由をファシリテーターに提出する。それらはファシリテーターを介して、全専門家に提供される。このとき、専門家が互いに対話する機会は設けない。また、提供されるデータは匿名性が担保されて

Fig. 1 Conceptual diagram of relationship between statistical accuracy score and information score in Cooke method on the basis of Ref. 22

おり、これによって対面式会議で現れる同調圧力や支配的・独断的な個人からの影響を避けることができる。提供された確率やその根拠を参考に、各専門家は自ら設定した確率を変更することができ、その変更理由とともにファシリテーターに再度提出する。このフィードバック作業を数回繰り返すことによって、最終的にコンセンサスが得られた1つの確率分布を取得しようというアプローチである。なお、最終的に得られる確率分布は統計的に集約(中央値や平均値)されることが多い。専門家間の直接的な相互作用はないものの、各専門家の意見を参考に個人の意見を変更できる点、さらに最終的な分布を統計的に集約する点で、行動集約と数学集約の混合型と称される。

IDEA法(Investigate Discuss Estimate Aggregate)は前述した手法の要素を組み合わせたアプローチである。IDEA法は、行動集約や数学集約アプローチの欠点を最小限に抑え、最適化したアプローチとされる。まず、本手法は、Cooke法と同様に事前テストを実施し、各専門家の重み付け値を算出する。次に、各専門家は個別に確率とその設定理由をファシリテーターに提出する。その後、専門家は対面式会議を介して、意見の相違を議論し、その結果をフィードバックし、個人の意見を修正する。ここでは、SHELFのように対面式会議を実施し、他者の判断に関するフィードバックを受けることが個人の定量的判断に有益と考え、相互意見交換を実施している。ただし、個人の意見については、Delphi法と同様に匿名性が担保されている。対面している際に、個人の意見が同定されてしまうことにより、支配的な意見に従うという圧力に曝される恐れがある。匿名性が担保されることにより、集団バイアスを避けることを目的としている。会議後、各専門家は自らの意見にフィードバックを掛けて、再度確率を設定する。この確率を事前テストの結果を踏まえた専門家重み付け値を用いて数学的に集約する。数学集約アプローチを採用することは、会議の段階において専門家がコンセンサスを達しないといけなさと感じる圧力を低減する狙いがある。

(4) 集約アプローチの比較

行動集約アプローチと数学集約アプローチ、混合集約アプローチには3つの違いがあると考えられる。1つ目の違いは、専門家間の相互作用の有無である。専門家間の相互作用によって、より質の高い解を導くことを志向する行動集約アプローチに対し、数学集約アプローチは専門家間の相互作用によるバイアスを避け、最終的な解に意見の多様性を最大限に反映することを重視している。混合集約アプローチは、専門家間の相互作用の利点(情報の更新やエラーチェック等)を認め、集団バイアスを可能な限り低減するために、意見の匿名性を担保している。これにより数学集約アプローチで得られる意見よりも、質が高まった意見の多様性を最終的な解への反映を志向するものと理解できる。

2つ目の違いは、集約後の確率分布に対する専門家集団

としてのコンセンサスの有無である。行動集約アプローチは、専門家間の相互作用によって1つの解を取得するため、その解はコンセンサスが得られたものである。他方、数学集約アプローチは、数学的に結合した分布に対して専門家グループのコンセンサスを得ることはしない。これは混合集約アプローチも同様である。

3つ目の違いは、集約した確率分布の再現性である。数学的集約アプローチの1つであるCooke法は、専門家判断は科学的データであるというのが根本にある考え方とし、科学的データとして受け入れるためには、説明責任(scrutability/accountability)、経験的管理(empirical control)、中立性(neutrality)、公平性(fairness)という4つの科学的プロセスの原則を満たす必要があるとしている²²⁾。特に一点目の説明責任では、専門家の氏名や評価、用いたツール等のすべてのデータがピアレビューに利用でき、結果は公開され、かつ能力のある査読者によって再現可能でなければならないとしている。数学集約アプローチの場合、各専門家の確率分布から集約後の確率分布は等価平均もしくは加重平均という統計処理が行われているため再現性が高い。これは混合集約アプローチも同様である。他方、行動集約アプローチの場合、各専門家の意見から最終的なコンセンサス分布への変化は暗示的であり再現性という点で他のアプローチと比較して劣る可能性がある。

行動集約アプローチと数学集約アプローチのどちらが質の高い解を効率的に取得できるかを検証した研究がいくつか存在するものの、研究によって主張が異なり、統一した見解が得られていないのが現状である¹²⁾。また数学集約アプローチの中でも等価平均と加重平均のどちらが優れているかという見解については、等価平均の方が優れていると主張する研究もあれば¹²⁾、Cookeの手法の方が優れていると主張する研究もある²⁹⁾。混合集約アプローチと比較した研究は本調査の範囲ではみつからなかったが、混合集約アプローチは行動集約や数学集約アプローチの欠点を最小限に抑え、最適化したアプローチとされることから、より質の高い解を取得できる可能性がある。しかし、プロセスを構成する要素、すなわち手順が複雑になることから、合理性という観点で行動集約アプローチと数学集約アプローチに比べて劣ると考えられる。

以上を踏まえると、各集約アプローチは異なる特徴を有し、利点や欠点は互いにトレードオフの関係にあることから、絶対的に正しいと言える集約アプローチは存在しないと理解できる。重要なことは、専門家意見聴取の実施者が、どの集約アプローチを採用したのか、その根拠の正当性を明示的に述べることだろう。

3. まとめ

本章では専門家意見聴取の一般的な方法論を整理した。専門家意見聴取は、「正式な専門家意見聴取」と「略式な専門家意見聴取」に大別することができ、「正式な専門家

Fig. 2 Conceptual diagram of expert judgment obtained using behavioral aggregate, mathematical aggregate, and mixed aggregate approaches

意見聴取」によって得られた専門家判断は透明性、追跡性に優れている。しかし、「正式な専門家意見聴取」を構成するすべての要素を完全に実施することは、多大な時間や労力が必要になると考えられる。場合によっては、「正式な専門家意見聴取」よりも厳格さを和らげた「略式な専門家意見聴取」が合理的と判断されることもあり得るだろう。また、集約方法として行動集約アプローチ、数学集約アプローチ、混合集約アプローチについて整理した。各アプローチで得られる確率分布の概念図を Fig. 2 に例示する。行動集約アプローチの場合、1つの集約分布のみが最終出力として得られ、数学集約アプローチと混合集約アプローチは集約分布以外に専門家個人の確率分布が得られるのが特徴的である。また、混合集約アプローチは専門家の意見交換を実施することで専門家の熟考が進み、数学集約アプローチで得られる専門家個人の意見よりも質の高い意見の取得が期待できる。ただし、各アプローチで特徴が異なるとともに、それぞれ利点や欠点があることから、現状では絶対的に正しいアプローチが存在しないと考えられる。

このような状況において、諸外国(米国、英国、スウェーデン)が放射性廃棄物処分の安全評価におけるパラメータの不確実性の定量化において、「正式な専門家意見聴取」を採用したのか、それとも「略式な専門家意見聴取」を採用したのか、集約アプローチは何を採用したのか、採用した根拠やその正当性に関する主張を整理することが重要と考える。III章では、それらの点について調査、整理を実施する。

III. 諸外国の専門家意見聴取の事例

1. 米国

(1) 米国の専門家意見聴取の活用に関する歴史

米国の連邦規則「ネバダ州ユッカマウンテン地層処分場での高レベル放射性廃棄物の処分」の 10 CFR 63.21(c) (19)³⁰⁾に、“専門家意見聴取がどのように使用されたかを説明すること”という規定がある。米国原子力規制委員会(NRC)は伝統的に許可申請における技術専門家の適切な判断を受け入れており、地層処分場の許可申請手続きにおいては、専門家判断が重要な役割を果たすものと認め³¹⁾、

使用済み燃料や高レベル放射性廃棄物の性能評価における専門家意見聴取について調査^{5,32)}を進めてきた。1996年には、「高レベル放射性廃棄物プログラムにおける専門家意見聴取の使用に関するガイダンス(NUREG-1563)⁶⁾」を発行した。地層処分の安全評価に関わるサイト特性評価や性能評価には大きな不確実性が内在することをNRCは認識しており、これらの不確実性を低減するための第一の手段は、十分なデータや情報を収集することであると指摘しつつ、データの空間的および時間的変動性、同一のデータに対する多重解釈の可能性、数千年に亘る期間中の容器性能を予測するための検証された理論の不足といった要素は、技術的専門家の解釈および主観的判断によって、補完・補足することが必要であると主張している⁶⁾。NRCは、必要なデータや情報を入手するための手段が十分に検討され、それらの手段を実装することが実用的ではないと結論付けられたときに専門家判断が採用されるべきとしている。また、専門家判断に関する理論的根拠が透明性をもって十分に文書化されているものならば、「正式な専門家意見聴取」のみならず「略式な専門家意見聴取」の活用を認めている⁶⁾。

NUREG-1563では、許可申請手続きで受け入れ可能な「正式な専門家意見聴取」のプロセスを示した(Fig. 3)。本プロセスは9つのステップから構成されており、専門家グループや専門家パネル形式での専門家意見聴取に適用可能である。ステップ2の専門家の選定では、Generalist, Normative expert, Subject-matter expert という3つのタイプの専門家を選定する必要があるとしている。Generalistとは、関心のある問題を解決するために必要な1つ以上の専門領域の、十分な技術的背景を有する個人を意味し、問題の解決のために専門家判断がどのように使用されるかを理解している。Normative expertとは、確率に関する理論的および概念的な知識を十分に有し、専門家意見聴取の実務経験を有する個人を意味する。Subject-matter expertは、専門家判断を提供する個人を意味し、特定の領域やトピックにおける大家として認知されている個人である。GeneralistとNormative expertは意見聴取チームとして機能し、意見聴取プロセス全体を管理、実施し、最終的に文書化する責任を有しているが、専

Fig. 3 Components in an acceptable expert elicitation process

Dashed lines indicate a feedback loop. The figure was drawn on the basis of Ref. 6.

専門家判断を提供する立場にはない。あくまでも Subject-matter expert のみが専門家判断を提供することに留意すべきである。なお、ステップ 8 の専門家判断の集約に関する NUREG-1563 の記述には、具体的に採用すべき集約方法については述べられていない。その代わりに、いかなる集約方法(すなわち、行動集約や数学集約、混合集約アプローチ)が採用されても、個々の専門家の意見は文書化され保存されるべきであること、異なる意見を組み合わせるために使用した技術の理論的根拠、異なる意見が性能評価に及ぼす影響を十分に議論したかについて、明確に文書化する必要があるとしている。

その後、NRC は米国エネルギー省(DOE)によるネバダ州ユッカマウンテンにおける地層処分場の建設認可に関わる許可申請を見据えて、NRC が審査するうえでのレビュープラン³³⁾を示した。そこでは、NUREG-1563 で提案された 9 つの要素で成り立つ「正式な専門家意見聴取」の手順に従う、もしくはそれに匹敵する手法が用いられているかを確認するとしている。2008 年に DOE はユッカマウンテン処分場の建設認可に関わる許認可申請書³⁴⁾を NRC に提出した。その申請書ではユッカマウンテンにおける確率論的火山ハザード評価、確率論的地震動ハザード評価、飽和層の地下水流動と物質移行の評価において「正式な専門家意見聴取」を実施している。これらの評価結果は NRC のレビューによって、NUREG-1563、NUREG/CR-6372⁸⁾および NUREG-2117³⁵⁾のガイダンスと整合的であり、許可申請のために専門家意見聴取がどのように活用されたかについて、適切に説明しているものと判断し、10 CFR 63.21(c)(19)の要件が満たされていると結論付けている³⁶⁾。次節では核種移行評価パラメータの定量に関わ

る、飽和層の地下水流動と物質移行の評価における「正式な専門家意見聴取」の活用事例について概要を紹介する。

(2) 米国の具体例

DOE は 1997 年にユッカマウンテンサイトでの飽和層の地下水流動と物質移行を評価するための専門家意見聴取プロジェクト(Saturated Zone Flow and Transport Expert Elicitation Project: 以下、SZEE という)を開催した³⁷⁾。2008 年に DOE が提出した申請書³⁴⁾の飽和層の地下水流動と物質移行の評価結果は、この SZEE の結果を参照したものである。SZEE の目的は飽和層の地下水流動と物質移行をモデリングするうえで重要となるモデルやパラメータの不確実性を定量化することである。本プロジェクトは、SZEE Contractor, Methodology Development Team (MDT), Expert Panel, Technical Specialist の 4 つの主要グループで編成されている。SZEE Contractor は、請負業者である Geomatrix Consultants 会社がプロジェクト全体を管理し、最終的な報告書としてまとめあげる。MDT はプロジェクト計画の策定や、ワークショップの円滑化、専門家パネルのメンバーの募集、方法論と結果の文書化を担当した。MDT には専門家意見聴取に関するガイダンスの開発や意見聴取の実務経験を有するメンバーが Normative expert として参加し、飽和層に関する技術的側面を理解し、ユッカマウンテンにおける性能評価(Total system performance assessment)の実施経験を有するメンバーが Generalist として参加している。Expert Panel は、著名な 5 人の専門家が Subject-matter expert としてパラメータ等の不確実性の定量化に関する判断を実施する役割を担う。Technical Specialists はワークショッ

プやフィールドトリップを通じて、専門家パネルのメンバーに専門的なデータや解釈、意見聴取の訓練などを提供した。本プロジェクトは3回のワークショップと1回のフィールドトリップが中心であり、これらの活動を通して専門家間の交流が促進され、評価に必要なすべてのデータが提供され議論することができる。3回目のワークショップ後に、個別インタビューによって専門家の意見が聴取され、それが文書化された。意見聴取の結果は全専門家に回覧され、その結果を踏まえて専門家は評価を最終的に決定した。これらの個々の意見は最終的に等価に重み付けされて、1つの専門家判断を取得している。すなわち、SZEEでは、II章に挙げたうちの混合集約アプローチが採用されている。

ここでSZEEが混合集約アプローチを採用し、等価な重み付けを採用した理由として、「商業用原子炉発電所等の重要設備のための確率的地震動ハザード評価に関する専門家意見聴取の活用に関する包括的なガイダンス (NUREG/CR-6372)⁸⁾」を参照していることに着目したい。このガイダンスは、NRCやDOE、米国電力研究所 (EPRI) が設置した委員会 (Senior Seismic Hazard Analysis Committee: 以下、SSHAC という) が1997年に取りまとめたものである。なお、2012年には、SSHAC から得られた経験に基づき、より実践的な手順を定めたガイドライン (NUREG-2117³⁵⁾) が発行されているが、専門家意見聴取の構造は大きく変わっていないことから、SSHAC の考え方を紹介する。

SSHAC では、専門家グループとして1つの値や確率分布に対してコンセンサスを得ること、すなわち行動集約アプローチによってコンセンサス分布を取得することは現実的に困難としている。専門家間の情報交換においてバイアスがかからず、各専門家の情報や意見が真に反映されているのであれば、その結果得られたコンセンサス分布は信頼できる。しかしながら、コンセンサス分布は人格に強く依存する可能性がある。コンセンサス分布の取得を強要することは、本来考慮されるべき不確実性が抑制されてしまうリスクにつながることをSSHACは最も懸念している。SSHACはコンセンサス分布の取得を目指すよりも、各専門家の意見を統合した確率分布が科学コミュニティ全体の意見を反映したものであるということに対してコンセンサスを得ることのほうが現実的としている。すなわち、その時代の科学コミュニティとして道理にかなった意見の多様性を重視し、最終的にそれらの意見を集約した1つの確率分布 (「コミュニティ分布」と表現されている) の取得を目指すというのがSSHACの考え方である。以上から、SSHACは行動集約アプローチではなく、コンセンサス分布の取得を強要することのない専門家間の相互作用によって、質が高くかつ幅広い意見を取り入れ可能な混合集約アプローチを採用したものと理解できる。

数学的な集約方法としては、加重平均よりも等価平均を

実施することが望ましいとSSHACは判断している。加重平均を採用した場合の欠点として、審査の際に規制当局から問われるだろう2つの難問 (1つは専門家のうち誰がベストなのかという問い、もう1つはどのような重み付けをするのかという問い) に対し、科学的根拠をもって回答、説明する必要があることを挙げている。SSHACはこれらへの回答を避けるために、等価な重み付けを実施することを採用し、等価平均化することを正当化するための2つの条件を提案している。第一に専門家は等しく信頼できるものでなくてはならない。本プロセスの専門家選定において、優秀な科学的評価者であるという能力について、体系的に審査されている必要があるとしている。そして第二に、専門家は完全に独立しているか、もしくは偏りなく平均的に相互依存していることである。専門家が完全に独立していることは現実的ではないため、専門家パネルですべてのモデルやデータベースを完全に共有し、専門家間で偏りがなく平均的な相互依存していることを示すことを推奨している。

SZEEでは、上述のSSHACの考え方を参考に、等価平均を採用したことの妥当性を示すため、(1)多様な見解と経験を有する非常に優秀な専門家を注意深く選定し、プロジェクト全体を通し協力し続けるという、各専門家のコミットメントを確立すること、(2)包括的なデータベースを特定し、それらを全専門家に配布すること、(3)意見聴取の方法論に関するトレーニングや評価者としての専門家の役割をトレーニングすること、(4)データや解釈、あらゆる仮説の科学的議論の自由な意見交換を促進するために、ワークショップやフィールドトリップを通じて専門家間の交流を促進すること、(5)フィードバックや感度解析結果を専門家に提供すること、(6)フィードバックを参照して、専門家が評価を修正する機会を提供すること、という6つの事項が実施された。

ここで、上述(1)の専門家の選定に関する具体的な選定プロセスを紹介する。始めにSZEEではMDTが専門家の選定基準を策定した。その選定基準は以下の5つである。

1. 学校教育や関連する経験に基づく能力が幅広く認められており、専門性に関する評判が高い技術者または科学者であること。査読された学術論文や報告書などの専門性に関する具体的な証拠が必要である。
2. 飽和破碎岩中の地下水流動と核種移行に関して、その特性評価に関する現地測定や実験室測定、分析と数値モデリングなどの分野で、1つ以上の経験を有し、今回の問題領域の理解があること。ユッカマウンテンサイト特性評価プロジェクトで主要な役割を担っている個人も専門家パネルのメンバーとして選定することができるが、そのような経験は参加の要件ではない。
3. 専門家パネルの構成メンバーとして参加するため、

プロジェクトに必要な時間と労力を費やすことへのコミットメントすること。また、自身の技術的立場を説明し、それを守ることに意欲があること。

4. コミュニケーションと対人関係のスキル、柔軟性と公平性、そして簡素化する能力を有する個人であること。その個人は、自身が所属する組織での技術的立場の代表として行動するのではなく、個々の技術的解釈および不確実性の評価を提供するように具体的に求められる。
5. 多様な意見、分野、および組織的背景を有する専門家(例えば、政府機関、学術機関、および民間企業)を選定することはバランスのとれた専門家パネルを提供するのに役立つ。

次に、MDTは専門家パネルメンバーの候補者の推薦人を選定するために広範な調査を行った^{a)}。その後、MDTによって特定された15人の地球科学者と技術者に、パネルメンバーとして適切な専門家を推薦するよう依頼の手紙が郵送された。推薦を要請する手紙にはプロジェクトの簡単な説明とパネルメンバーを選ぶための上記の選択基準が記載されている。結果的に推薦された専門家パネルの候補者は59名であった。MDTは各候補者が選定基準1.と2.を満たしているかを最初に評価して候補者の絞り込みを図った。その後、残りの選定基準が適用され、最終候補者が挙げられた。評価に当たっては、各候補者の専門性に関する評判と出版物について、さらに、各候補者が受け取った推薦の数を検討材料にしたという。その結果、この段階で合計17人が最終候補者として選定された。候補者は電話にて参加要請とともに、SZEEでの役割について、また、自身が担当する専門分野の会議にはすべて参加する必要があること、潜在的な利益相反を公開すること等の参加条件が説明されたという。最終的に5人の専門家が専門

Fig. 4 Individual and aggregate cumulative distributions of volcanic aquifer hydraulic conductivity
The figure was drawn on the basis of Ref. 37.

^{a)} 文献³⁷⁾には、“The MDT conducted a broad search to obtain nominations for the expert panel.”という記載のみで、推薦人の選定基準に関する詳細な記述はなかった。

家パネルのメンバーとして参加の承諾を受けたという。

最後にSZEEで取得された分布の一例をFig. 4に示す。これは帯水層(凝灰岩)の透水係数について専門家意見聴取された結果であり、各専門家の意見と最終的に集約した結果が記されている。

なお、SZEEでは「正式な専門家意見聴取」が採用されているが、SSHACではリスクレベルに応じた専門家意見聴取の活用法を提案していることに注目したい(Table 1)。SZEEは表中のレベル4を採用して不確実性を定量化しているものの、NUREG-1563⁶⁾で「略式な専門家意見聴取」の活用も認めていることから、パラメータの重要度に応じてレベル1からレベル4の手法を活用することが合理的と考えられる。この考え方は、いわゆる等級別アプローチ(Graded approach)³⁸⁾に相通じるものと理解できる。

2. 英国

(1) 英国の専門家意見聴取の活用に関する歴史

英国の放射性廃棄物の浅地中処分ならびに地層処分に関する規制ガイダンス^{39,40)}には、環境セーフティーケース(ESC)を作成するうえでの専門家判断の必要性が述べられている(§7.3.29)。また、ESCにおける判断の重要性に応じて、事業者は「略式な専門家意見聴取」もしくは「正

Table 1 Degrees of probabilistic seismic hazard analysis issues and levels of study

Study level	Issue degree	Approach to estimating community distribution
1	Non controversial and/or insignificant to hazard	Technical integrator (TI) evaluates/weights models on the basis of literature reviews and experience, and estimates community distribution
2	Significant uncertainty and diversity, controversial, and complex	TI interacts with proponents & resource experts to identify issues and interpretations, and estimates community distributions
3	Highly contentious, significant to hazard, and highly complex	TI brings together proponents & resource experts for debate and interaction, focuses debate and evaluates alternative interpretations; estimates community distributions
4	Highly contentious, significant to hazard, and highly complex (Need to address the issue by expert panels)	Technical facilitator/integrator organizes panel of experts to interpret and evaluate, focuses discussions, avoids inappropriate behavior on part of evaluators, draws pictures of evaluators' estimate of the community's composite distribution, and is ultimately responsible for project

This table was created on the basis of Ref. 8.

式な専門家意見聴取」のどちらかを選択すべきと述べられおり、専門家意見聴取を実施する際は、専門家の選定や聴取の手法を説明すること、専門家判断やその判断を裏付ける理由を明示的に文書化すること、専門家判断および/または採用された抽出方法の使用に起因するバイアスを特定し、排除または最小化する妥当な措置を講じ文書化すること、が求められている (§7.3.30)。

これに対し、地層処分実施主体である原子力廃止措置機関(NDA)と放射性廃棄物管理会社(RWM 社)は、RWM 社の前身である Nirex 社、放射性廃棄物管理局(RWMD)時代から、地層処分の実現に向けてこれまで多くのパラメータの不確実性を「正式な専門家意見聴取」によって定量化してきた。1991 年と 1992 年には、セラフィールド近辺の水理地質や、地層処分施設と地層における放射性核種の収着性や溶解度に関する数百にも及ぶパラメータに対して不確実性を定量化し⁷⁾、2000 年代に入るとウランやネプツニウム、テクネチウム、炭素の溶解度や分配係数などの核種移行評価パラメータの不確実性を専門家意見聴取によって定量化するために、数多くのワークショップを開催してきた^{41~43)}。

また、ドリッグ村近郊にある低レベル放射性廃棄物処分場を運営、管理をしている低レベル放射性廃棄物レポトリ会社(LLWR 社)は、許可を受けている施設が満杯になることを受けて、2002 年に同処分場内の新規施設での処分の許可申請とともに、処分場全体の安全性や環境影響などに関する ESC を規制機関であるイングランドとウェールズ環境庁(EA)に提出した^{b)}。その後、EA のレビュー結果を踏まえ、LLWR 社は 2011 年に再度 ESC を提出している。この更新版の ESC では、Nirex 社が採用した手法⁷⁾をベースに、不確実性が大きく LLWR の安全性能に重要な影響を及ぼす可能性がある核種移行評価パラメータ(例えば、ベントナイト改良砂の透水係数など)の定量化を実施し、処分場全体の安全性や環境影響などに関する ESC を提出している⁴⁴⁾。この ESC に対するレビューの結果、EA は LLWR 社が採用した専門家意見聴取のアプローチは適切であることを認め、専門家意見聴取によって設定された値は現実的であると判断している⁴⁵⁾。

近年では、RWM 社はこれまでの専門家意見聴取を活用してきた経験を踏まえ、新たな方法論を示した⁴⁶⁾。RWM 社がこれまで実施してきたワークショップの一例を挙げると、4 人の専門家と、1 人のファシリテーター、オブザーバーとして RWM 社のスタッフが同席し 2 日間行われ、その後報告書として会議の記録が文書化されている⁴¹⁾。報告書のページ数は膨大で、ウランの溶解度に関する 6 つの確率分布を取得した報告書は 275 ページにも達している⁴¹⁾。RWM 社はこれまでの経験として、ワークショップの開催とその後の報告書作成はときには効果的と

しつつも、非常に資源消費的なものだったと考えた。定量化に費やす努力がパラメータの重要性に比例するアプローチ(Graded approach)が必要と考え、方法論を提案するに至った⁴⁶⁾。次項では LLWR 社の専門家意見聴取の活用事例と RWM 社の最近のアプローチについて紹介する。

(2) 英国の具体例

(a) 浅地中処分(LLWR 社の取組み)

ESC では、不確実性が大きく LLWR の安全性能に重要な影響を及ぼす可能性がある核種移行評価パラメータ(例えば、ベントナイト改良砂の透水係数など)を定量化するために「正式な専門家意見聴取」が採用されている⁴⁴⁾。ここで採用された手法は、Nirex 社が採用していた手法⁷⁾をベースとしており、以下の要素で構成される。

- 考慮すべきパラメータ / 問題の特定
- 適切なファシリテーターと適切な専門家の選定
- プリーフィング資料の準備
- 会議の開催
 - 参加者(ファシリテーター、専門家、オブザーバー)の紹介
 - 会議背景の説明
 - トレーニングの実施
 - パラメータの定義
 - 意見聴取の実施
- 会議の文書化
- 文書化された記録のレビュー

このプロジェクトはファシリテーター、専門家、オブザーバー、記録者の 4 つのタイプのメンバーで構成されている。Nirex 社での専門家意見聴取のプロジェクトにファシリテーターとして長年参加してきた個人が、本プロジェクトでもファシリテーターを担当している。彼は、30 年近く放射性廃棄物処分の性能評価(特に地下水流動モデリング)を実施しており、英国のみならず、米国やオーストラリア、フランス、ハンガリー、ロシアなどで HLW や ILW, LLW 処分に携わってきた。また、国際協力プロジェクト(HYDROCOIN と INTRAVAL)に EA の代表として参加した経験を有し、HYDROCOIN の最終報告書では、不確実性の取り扱いに関する章の執筆を担当している。専門家の選定に関する基準については LLWR 社の報告書⁴⁴⁾において明記されていないものの、Nirex 社の手法⁷⁾を採用している報告書⁴⁶⁾では、専門家は下記の性質をもつべきだと述べられていることから、LLWR 社が実施した専門家意見聴取でも同様な考え方で選定されたものと推察される。

- 必要な知識や専門的知識を有すること
- 知識や専門的知識を適用する能力を実証していること
- 広範で多様な独立した意見や課題解決のためのアプローチを有すること
- 自身の判断が公に示されることを厭わないこと

^{b)} 当時の操業者である英国原子燃料会社(BNFL)が提出した。

- すべての利益相反を公に開示することを厭わないこと

オブザーバーは一般的な議論に貢献するが、彼らは専門家判断を提供することはしない。記録者は会議での討議の記録を担当する。

この手法では、対面式会議で意見を交わし、行動集約アプローチによって1つのコンセンサス分布を取得することを目的としている。ここで、LLWR社が行動集約アプローチを採用した根拠に注目する。

LLWR社は、異なる経験を有する複数の専門家から意見を聴取することが望ましいと考えている。行動集約アプローチは、複数の専門家の対話によって情報や知識の交換が促進され、過信の解消に役立つと判断している。また、最終的にコンセンサスが達成されれば、専門家グループのメンバーの1人ひとりが最終的な確率分布を支持すると考えている。ただし、行動集約アプローチでは、支配的な個人がグループの意見を集約してしまう可能性があることも指摘しているが、これはファシリテーターの責任で回避することができるとしている。他方、数学集約アプローチで集約した確率分布は、専門家グループのメンバーが確率分布を支持する意思がない可能性があることを欠点としている。この確率分布の正当性は、集約プロセスに依存すると指摘している。また、Delphi法についても言及しており、対面式会議ではなく反復的なアプローチによってコンセンサスを達成しようという試みは、行動集約アプローチのような対面式会議で潜在的に存在するバイアスを回避することができるものの、非常に時間がかかりコスト面での負担が大きいと評している。以上を踏まえると、LLWR社は、プロセスの合理性と、最終的な分布の正当性から行動集約アプローチを採用したものと理解できる。

本報告書の評価結果の一例として、人工バリア材の1つであるベントナイト改良砂(bentonite enhanced sand)の透水係数に関する長期の不確実性について定量化した値をTable 2に示す。評価に当たって、不確実性を定量化する時点を設定しており、ここでは、施設建設時、西暦2180年(制度的管理期間終了から10年後)、西暦3180年(施設の特性が予測可能と考えられる時間の限界)、西暦7000年(長期)の4つの時点での評価を実施している。各

時点で下限(0パーセンタイル値)と上限(100パーセンタイル値)、最頻値(50パーセンタイル値)とした対数三角分布で表現している。また、一般に、時間の経過とともに設計された特徴は継続的な変化を示すと判断し、各時点の値を線形補間することによって経時変化を表現している。

(b) 地層処分(RWM社の取組み)

2017年にRWM社が提案した専門家意見聴取の方法論は、手順AとBから構成される⁴⁶⁾。手順Aは、1人の専門家が専用の定量化スプレッドシートツールを用いて確率分布を算出する資源効率的なものであり、「略式な専門家意見聴取」と理解できる。このスプレッドシートツールは2014年のウラン廃棄物処分プロジェクト⁴⁷⁾における化学パラメータの不確実性の定量化に適用され、ツールの使用が効果的かつ効率的であることが判明しているという(関連報告書⁴⁷⁾は現状入手不可能であり、化学パラメータに関する詳細は不明)⁴⁶⁾。他方、手順Bは「正式な専門家意見聴取」であり、行動集約アプローチによってコンセンサス分布を得ることを目的とした、資源消費的なものである。これらの手法は、パラメータに関する情報量と重要性という2つの指標によって使い分けがされている。情報量が少なく重要性が低いものは手順Aの採用が推奨され、情報量が多く重要性が高いものは手順Bの採用が推奨される。その中間は、例えば、複数の専門家でスプレッドシートツールを使用することや、少人数で「正式な専門家意見聴取」を実施することが推奨されている。なお、手順Aで用いる定量化スプレッドシートツールは<https://rwm.nda.gov.uk/publication/methods-for-management-and-quantification-of-uncertainty-uncertainty-quantifier-tool/?download>からダウンロード可能である(2019年3月アクセス)。

また、本方法論では異なる専門家によって生成された確率分布を数学的に組み合わせる数学集約アプローチではなく、1人の専門家による不確実性の定量化、もしくは行動集約アプローチにより、コンセンサス分布を取得することを優先していることに着目したい。

RWM社は過去に数学集約アプローチの1つであるCooke法によって気候変動シナリオに関するパラメータを定量化した経験を有している⁴⁸⁾。しかし、その経験からCooke法のいくつかの欠点を指摘している。例えば、シード変数の設定は、ファシリテーターにとって非常に時間がかかる作業と指摘している。また、シード変数への回答の結果、統計精度スコアや情報量スコアが低いと評価される専門家が少なく、最終的な確率分布の組み合わせプロセスにおいて、重み付け係数としてゼロを割り当てられてしまう傾向が多かったという。これはII-2-(2)項で述べたようにシード変数の設定の難しさが影響していると考えられる。また、数学集約アプローチによって取得した確率分布は、専門家間のコンセンサスが得られていないことも欠点と指摘している。さらに、Cooke法のような数学集約ア

Table 2 Evolution of the elicited values of the hydraulic conductivity of bentonite-enhanced sand

Time	Hydraulic conductivity [m/s]		
	0 percentile	50 percentile	100 percentile
As built	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}
2180 AD	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}
3180 AD	10^{-10}	10^{-9}	10^{-7}
7000 AD	10^{-10}	10^{-8}	10^{-6}

The distribution is taken to be log-triangular (with mode at the 50 percentile value). This table was created on the basis of Ref. 44.

アプローチは複数の専門家が関与することを前提としていることも欠点として指摘している。以上から RWM 社は、LLWR 社と同様な考え、すなわちプロセスの合理性と最終的な分布の正当性、さらに自社の経験に基づく考え (Cooke 法の欠点) から行動集約アプローチを採用したものと理解できる。

3. スウェーデン

(1) スウェーデンの専門家意見聴取の活用に関する歴史

処分実施主体であるスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (SKB 社) は、1990 年代より処分場の長期安全性を評価し、報告書 (SR-97⁴⁹⁾, SR-Can⁵⁰⁾, SR-Site^{51,52)}, SR-PSU^{53,54)}) として取りまとめてきた。これらの評価では、パラメータの不確実性を定量化するために、「略式な専門家意見聴取」が活用されてきた。これと併行して、スウェーデンの規制機関である原子力発電検査機関 (SKI) と放射線防護機関 (SSI) は、SKB 社の許可申請への対応を見据えて、専門家意見聴取の調査を進めてきた^{55,56)}。SR-97 のレビューでは、両機関ともに SKB 社の専門家意見聴取の透明性や追跡性が低い (参加者や質問内容、回答内容を読み取ることができない等) と主張し、米国や英国の例を参考に、「正式な専門家意見聴取」を活用することの重要性を主張した^{57,58)}。しかしながら、SKB 社は「正式な専門家意見聴取」の方法を調査⁵⁹⁾したうえで、必要に応じて「正式な専門家意見聴取」を適用すると述べているが、そのような手段をとるよりも、文書化された質の高い入力データを得ることのほうが重要であると強調している⁶⁰⁾。以下に、SR-Site と SR-PSU で使用されたデータの定量化プロセス^{51~54)}について概説する。

(2) スウェーデンの具体例

SKB 社は、安全評価で用いるデータを決定するために、安全評価を実施するチーム (顧客: customer) と安全評価の入力データ案を提示するチーム (供給者: supplier) の 2 つ分けて作業を進める。本一連の作業では、情報源となるデータの適格性を確認すること、また安全評価の入力データが適格であることを示す必要がある。ここでいう、適格性 (qualification) とは、透明性、追跡性、科学的妥当性が高いものを意味する。

供給者側は、まず入力データの情報源を抽出する。情報源となるのは、SKB 社の報告書やデータベース、査読付き学術論文、その他機関の報告書が候補となるが、その中から適格性の高い情報源を抽出する。抽出する際の確認事項としては、例えば、実験データやフィールドサンプリングデータは品質管理システム (ISO9000 シリーズや、それに匹敵するもの) に準拠して取得されたデータであるか、データの不確実性や代表性に関する情報が抽出可能か、モデリングで得られたデータは、モデリングツールの品質が確保されているか、条件設定が追跡可能かなどを確認する

ことで、情報源となるデータの適格性を確認することができる。その後、情報源となるデータの実処分環境への適合性や、空間的・時間的変動性の有無ならびにその取り扱い、データ間の相関性などを議論、整理したうえで、適格性の高いデータ (実測データやモデリングデータ) に基づき、安全評価の入力データ案を、一点もしくは確率分布やパーセンタイル範囲等で提示する。上記の一連の適格性確認プロセスはすべて明瞭に文書化されなければならない。顧客側は、供給者側の適格性確認プロセスならびに提示された安全評価の入力データ案の適格性を確認し、最終的に安全評価の入力となるデータを決定する。

上述のプロセスでは、「正式な専門家意見聴取」は行われることがなく、適格性のあるデータに基づき、「略式な専門家意見聴取」によって入力データが提案、決定される。ただし、SKB 社は「正式な専門家意見聴取」はあらゆるデータ決定に適用可能としており、その実施の可否については下記基準の両方を満たした場合としている⁵²⁾。

- 安全性レベルに大きな影響を与えるほど、不確実性が大きい問題である。
- 他の確立された手段によって評価された不確実性に対し、「正式な専門家意見聴取」は不確実性の低減にさらに貢献できる。

しかしながら、SKB 社は上記の両方の基準を満たしたパラメータ、すなわち、計算されたリスクに対して感度が大きく、かつ「正式な専門家意見聴取」によってさらに不確実性が大幅に減少すると考えられるパラメータはなかったと結論付けている⁵²⁾。例えば、核種移行評価パラメータの 1 つである処分孔内のダルシー流速は安全評価への感度が非常に高いものの、サイトデータの収集やサイトにおける包括的な水理特性・水理変遷モデリングを通して、専門家グループによって長い期間評価され、外部からもレビューを受けている。このような長年の評価結果に対して、「正式な専門家意見聴取」を限られた時間で実施することは有益ではないと判断している。なお、保守的な評価結果が、100 万年の評価期間全体を通して規制基準を大幅に下回っているという事実は、「正式な専門家意見聴取」を実施する必要性がないという見解にも影響を与えたとも主張している⁵²⁾。上述の適格性確認のアプローチは国際的な水準に匹敵する厳密なアプローチであると、経済協力開発機構/原子力機関 (OECD/NEA) が組織した国際的レビューチームによって評価されている⁶¹⁾。

評価結果の一例として、SR-PSU⁵³⁾ に示されたセメント系バリアの実効拡散係数の定量化された値を **Table 3** に示す。適格性ありと判断されたコンクリートの化学的劣化モデルによるシミュレーション結果⁶²⁾に基づき、「略式な専門家判断」によって対数三角分布が設定されている。

4. 各国の比較

米国、英国、スウェーデンにおける専門家意見聴取の活

Table 3 Effective diffusivities used in SR-PSU radionuclide transport modelling

Time AD	Effective diffusivity [m^2/s] of construction concrete in bottom, walls and lid of BMA 1-2.		
	Best estimate	Min	Max
2,000-2,100	3.5×10^{-12}	—	—
2,100-2,500	5.0×10^{-12}	—	—
2,500-3,000	5.0×10^{-12}	—	—
3,000-22,000	5.0×10^{-12}	—	—
22,000-34,000	2.0×10^{-11}	8.0×10^{-12}	2.0×10^{-11}
34,000-54,000	2.0×10^{-11}	8.0×10^{-12}	2.0×10^{-11}
52,000-58,000	2.0×10^{-10}	2.0×10^{-11}	2.0×10^{-10}
58,000-102,000	2.0×10^{-10}	2.0×10^{-11}	2.0×10^{-10}

This table was created on the basis of Ref. 53.

用に関しては2つの共通点があると考えられる。1つは、事業者側と規制側それぞれが専門家意見聴取の必要性を認識していることである。特に各国の規制文書や勧告等で、専門家意見聴取の活用に関する記述が存在することや、今回調査した範囲では、米国とスウェーデンの規制側は独自に専門家意見聴取の手法を調査していることが特徴的だろう。

2つ目は、評価結果に与える影響度(パラメータの重要度)に応じて、「正式な専門家意見聴取」と「略式な専門家意見聴取」を使い分けるという、いわゆる Graded approach が必要と考えている点である。米国の NRC は「正式な専門家意見聴取」ならびに「略式な専門家意見聴取」の活用を認めており、SSHAC ではリスクレベルに応じた専門家意見聴取の活用の考え方を示している。同様に、英国の EA は重要度に応じた専門家意見聴取の活用を推奨しており、RWM 社はその考え方に整合性のある手法を新たに提案している。スウェーデンでも同様に、SKB 社が重要度を考慮して「略式な専門家意見聴取」を活用している。強調すべき点は、専門家意見聴取の種類に関わらず、透明性と追跡性が高い文書化が実施されている点である。

「正式な専門家意見聴取」を実際に活用している米国と英国を比較すると、両国ともに専門家間の相互作用によって、より質の高い情報を取得することを重要視していることがわかる。ただし、最終的な集約方法は異なり、米国は最終的に数学的に集約する混合集約アプローチを採用し、英国は行動集約アプローチを採用している。米国は、専門家集団が1つのコンセンサス分布の取得を目指すことは、同調圧力等によって本来あるべき不確実性を低く見積もる可能性があること指摘している。そのため、幅広い意見を反映することの重要性を主張するとともに、科学コミュニティ全体としての客観的な分布(コミュニティ分布)を取得することを目的としている。これを達成するためには、意見交換を通じて専門家個人の意見分布の質を高め、最終的にそれぞれの意見分布が評価時の科学的知見に基づく合理的な分布であるというコンセンサスの形成が不可欠である

と理解でき、合理的というコンセンサスを得た分布を集約することでコミュニティ分布を取得できる。専門家間の意見交換がない数学集約アプローチでは、各専門家の意見分布が評価時の科学的知見に基づく合理的な分布であるというコンセンサスの形成は不可能だろう。他方、英国はファシリテーターによって、同調圧力等のバイアスを避けることができるとしている。さらに、英国は行動集約アプローチによって取得した分布は、専門家1人ひとりがその正当性を主張できるが、数学集約アプローチで取得される最終的な分布は専門家グループのコンセンサスを得る訳ではなく、この分布の正当性は集約プロセスに依存すると主張している。これは、等価平均化する際はその正当性(すなわち、等価平均化できる根拠)、Cooke 法の場合はその考えそのものの正当性を示す必要があると理解できる。Cooke 法の場合は、統計精度スコアと情報量スコアという数学的な2つの指標に基づき重み付けをする点で、論理的には正当性は認められるものと考えられる。しかし、英国の RWM 社の経験例が示すように、シード変数の設定が課題であるとしている点では、実用的には正当性が疑問視される。他方、等価平均化を採用する米国のアプローチの場合は、等価平均化するための理由(専門家が互いに等価に平均的な相互依存性を有すること、専門家が体系的に審査され選定されていること)を明示することで正当性を示すことができると考えられる。なお、米国の混合集約アプローチで取得を目指すコミュニティ分布と英国の行動集約アプローチで取得を目指すコンセンサス分布ではコンセンサス形成の意味が異なることに留意されたい。コミュニティ分布は不確実性を評価時の科学的知見に基づいて「合理的」に表現した分布であるというコンセンサスの形成を目指したものであり、他方、コンセンサス分布は不確実性を評価時の科学的知見に基づいて表現した「唯一」の分布であるというコンセンサスの形成、すなわち、専門家が支持する1つの分布の作成を目指したものである。知見の蓄積等が進み専門家間の意見のばらつきが小さくなると、究極的にはコミュニティ分布はコンセンサス分布に近づくものと考えられる。以上を踏まえると、米国と英国の集約アプローチには違いはあるものの、最終的に得られる分布の正当性を両アプローチともに主張することができると理解でき、実際に各規制当局によるレビューでは集約された分布の妥当性が認められている。

また、米国と英国で集約アプローチに違いはあるものの、専門家間の相互作用の重要性を主張している観点で、議論の場とファシリテーターの存在が不可欠である。ファシリテーターの役割は、同調圧力などの潜在的バイアスを見極め、専門家間の公平性を保ちながら議論を円滑に進行させることである。ときには、議論が発散したり、専門家間で共通理解が得られないまま議論が進んだりする可能性があるだろう。これらを防ぐためには、ファシリテーターは専門家グループの議論の内容を聞き、議論内容を明確化

する能力も求められる。すなわち、専門家意見聴取の能力や実務経験のみならず、対象とする問題領域に関する知識が不可欠である。今回の調査範囲において、英国の例⁴⁴⁾でファシリテーターを担当した人物は、放射性廃棄物処分の分野の仕事に長年携わり、かつ不確実性の管理、そして専門家意見聴取の実務経験が豊富であることから、ファシリテーターとしての条件を満たしている人物だと理解できる。他方、米国の例³⁷⁾ではファシリテーターとしての役割を、Generalist と Normative expert が協力して担当したものと理解できる。専門家意見聴取の能力や実務経験を有する人物として SSHAC のメンバーが Normative expert として参加し、放射性廃棄物処分に関する知識は Generalist が補完するかたちが取られている。以上のように、米国と英国でファシリテーターの形式が異なるものの、両例ともに専門家意見聴取の能力と放射性廃棄物処分の知識を有する個人もしくはチームがファシリテーターとしての役割を担っていることが明らかになった。

最後にデータの再現性に着目すると、米国、英国、スウェーデンともに、透明性と追跡性をもって文書化すること重要と考えていることから、各国が採用した「正式な専門家意見聴取」と「略式な専門家意見聴取」、集約アプローチに関わらず、十分に再現性を確保することができるものと考えられる。

5. まとめ

本章では米国、英国、スウェーデンにおける専門家意見聴取の歴史やその活用事例を調査した。各国ともに、1990年代頃より専門家意見聴取の必要性を認め、手法の調査、開発が進められてきた。各国の事業者と規制側はいずれも放射性廃棄物処分におけるパラメータの不確実性を定量化するうえで、専門家意見聴取は重要な手段と認識している。また、すべての不確実性を定量化するために、「正式な専門家意見聴取」を活用することは合理的ではないと考えられており、重要度に応じて「略式な専門家意見聴取」と使い分けることが共通認識されている。ただし、いずれの専門家意見聴取でも、透明性と追跡性をもって十分に文書化することが重要とされている。集約アプローチとしては、米国と英国で採用したアプローチならびにその根拠は異なるものの、最終的な確率分布の正当性はいずれも保証されていることが明らかになった。また、米国では専門家意見聴取の能力や実務経験を有する個人と放射性廃棄物分野に関する知識を有する個人が協力してファシリテーターとしての役割を担い、英国ではその両方を有する個人がファシリテーターを務める形式を採用していることが明らかになった。以上の調査結果を踏まえ、IV章では我が国への専門家意見聴取の適用性について考察する。

IV. 我が国への専門家意見聴取の適用に関する考察

1. 専門家意見聴取の導入の有効性

米国や英国、スウェーデン等の諸外国はパラメータの不確実性を定量化するに当たり、専門家意見聴取を積極的に取り入れているのに対し、現在検討が進められている我が国における放射性廃棄物の中深度処分に関する事業許可基準規則の骨子案⁶³⁾では、「合理的に通常起こり得ると考えられる範囲内の状態設定」において、「科学的に最も可能性が高い状態のパラメータを設定」した評価を行い、「与えられる線量が、より小さい設計が選ばれていることを基本とする。また、決定した設計が、合理的に通常起こり得ると考えられる範囲内の状態設定で、保守的にパラメータを設定した場合の評価シナリオにより与えられる線量が、年間当たり 100 マイクロシーベルトを超えないこと。」という評価の考え方が示されているものの、具体的なパラメータの設定方法については明確な言及がない。本研究で調査した専門家意見聴取の活用事例は、パラメータの設定方法の検討に資するものである。パラメータ値の設定には評価者の判断が不可欠であり、その判断の妥当性を評価するためには、検討に用いられた知見、情報を、評価者の判断における仮定も含めて追跡可能な形で透明性をもって整理することが重要である。また、単一の科学的知見にしても人によって解釈が異なる可能性があるため、科学的知見を最大限活用しようとなると専門家間の交流によって解釈の共有を図ることが不可欠であろう。以上を踏まえると、科学的知見を最大限活用し放射性廃棄物処分における安全評価パラメータを設定するためには、米国や英国、スウェーデンのような専門家意見聴取という手法は有効であり、我が国の放射性廃棄物処分の分野における専門家意見聴取の活用について考察を深めておく必要があると考える。

2. 我が国に適した専門家意見聴取のあり方

すべてのパラメータに対して専門家意見聴取を実施することは多大な時間や労力が必要となり合理的ではないだろう。まずは体系的な感度解析を実施し、線量に対する感度、すなわち重要度が比較的高いパラメータを抽出すべきであり、重要度が低いパラメータは専門家意見聴取の対象から除外するのが現実的である。また、重要度が大きいパラメータすべてに対し、「正式な専門家意見聴取」を実施することも合理的でないことに留意すべきである。米国や英国、スウェーデンの事例からも明らかなように、パラメータの重要度に応じて、専門家意見聴取の実施レベルを決定することが現実的だろう。すなわち、感度解析によって重要度が比較的高いことが示されたパラメータ群の中で、さらに重要度を細分化し、重要度の高いパラメータの不確実性を定量化する場合は「正式な専門家意見聴取」

を、重要度の低いパラメータの不確実性を定量化する場合は「略式な専門家意見聴取」を実施するなどの等級別アプローチ(graded approach)を採用することが現実的だと考える。ただし、スウェーデンのSKB社の事例のように、パラメータの重要度が高いとしても、「正式な専門家意見聴取」の実施は、不確実性をさらに低減できる見込みがあるパラメータを優先的に実施するのが合理的だろう。ただし、その判断に至った根拠も十分に示すことを忘れてはならない。「略式な専門家意見聴取」の簡素化のレベルは様々に考えられるため、採用すべき「正式な専門家意見聴取」の構成要素については今後の検討課題であるものの、「正式な専門家意見聴取」や「略式な専門家意見聴取」を問わず、検討の記録を注意深く文書化することが重要であることを強調したい。特に設定根拠や参照した文献情報などは、定量化したデータの透明性や追跡性を確保するためには不可欠であり、文書化された情報を使用することで、規制側が設計プロセスの妥当性を評価することが可能になると考えられる。

専門家意見聴取はその時代における最新の情報や知識に基づいて実施されるものである。当然、時代の経過とともに新たな実験データの蓄積や、技術の進歩により新知見が得られることがあるだろう。すなわち、専門家意見聴取で定量化された値は一過性のものではなく、データの蓄積や新知見の取得に応じて更新され得る値であり、専門家意見聴取は必要に応じて繰り返し実施されることが望ましいだろう。特に、最終的に集約した分布だけではなく、集約前の専門家個人の意見分布を記録し、さらに個人の意見分布を用いた感度解析や不確実性解析を実施することは、専門家個人の意見のばらつきが大きく、線量への寄与が大きいパラメータをみつけ出すことができ、安全評価の信頼性を高めるために解決すべき課題を抽出することに役立つだろう。これは、「未解決の課題の存在を認め、これらの課題を将来の開発段階において解決する作業のためのガイダンスを提供すべき」というセーフティケースの概念³⁸⁾と親和性が高いものとする。上述を踏まえると、専門家集団として合意する1つのコンセンサス分布を取得することを目的とする行動集約アプローチよりも、最終的な集約分布の取得のみならず専門家個人の意見分布を記録する混合集約アプローチの採用が望ましいと考える。数学集約アプローチは混合集約アプローチと同様に専門家個人の意見分布を取得することが可能であるものの、専門家間の対話等の相互作用を禁じていることから、専門家間でのエラーチェックが機能せず、質が低い専門家個人の意見分布を取得することにつながる可能性が高く、加えて意見分布に対する専門家間のコンセンサスの形成も難しいことから採用を控えたほうが良いだろう。米国のような混合集約アプローチであれば、専門家間の意見交換によって個人の意見にフィードバックがかかり、質を高めた意見を幅広く取得することができ、さらに各専門家の意見分布が合理的であ

るというコンセンサスの形成が達成可能である。

ただし、混合集約アプローチを採用した場合でも、潜在的なバイアスを見極め、専門家間の公平性を保ちつつ議論を円滑に進めるファシリテーターの存在が不可欠である。ファシリテーターの資質としては、専門家意見聴取に関する能力や実務経験、そして放射性廃棄物処分野に関する知識が必要とされるが、我が国では放射性廃棄物処分における専門家意見聴取の事例がほとんどない状況であり、当該分野の専門性をもったファシリテーターが不在と考えられる。この現状を踏まえると、英国の例のように個人がファシリテーターとしての上述の役割を両方担うよりも、米国の例のように、専門家意見聴取に関する能力や実務経験を有する個人と、当該分野の専門性を有する個人が協力してファシリテーターの役割を担うことが我が国にとって現実的だろう。

ここで、我が国における専門家意見聴取の試行実験⁶⁴⁾を例とした考察を試みる。この先行研究では、我が国の余裕深度処分における人工バリアの劣化時期の不確実性の定量化を実施している。Fig. 5に評価結果の一例として、低透水層と低拡散層の劣化に関する専門家判断の結果を示す。この研究例は、個々の専門家判断を取得することを志向しており、コンセンサス分布を取得することを目的としていない。そのため、コンセンサス分布を取得しなければならないという同調圧力等のバイアスは掛からず、専門家

Fig. 5 Expert judgments on degradation of low-permeability coefficient (a) and low-diffusivity coefficient (b)
The figure was drawn on the basis of Ref. 64.

Fig. 6 Example of difference in consensus degree on possibility that degraded part of low-diffusivity layer composed of cementitious materials will maintain its realistic performance after 30,000 years between expert groups A and B before and after applying a feedback process to expert elicitation
The figure was drawn on the basis of Ref. 64.

の幅広い意見が取得されたものと考えられる。にも関わらず、この先行研究では専門家間の相互作用および議論のフィードバックの効果により、専門家意見のばらつきを減少させる効果が認められている (**Fig. 6**)。ファシリテーターの効果については不明であるものの、専門家間の知見の共有ならびに議論のフィードバックの効果によって、専門家個人の判断の質が変化し、結果的に意見分布の集約が進む場合があることを示唆しているとみることができよう。このことから、専門家間の相互作用を禁じる数学集約アプローチや、陽にコンセンサス分布の取得を志向する行動集約アプローチよりも、専門家間の相互作用によって幅広い意見の取得を目指す混合集約アプローチが、現状では有効に機能すると考えられる。筆者らは混合集約アプローチの適用性について専門家意見聴取の実験検討等を積み、さらに考察を深めていくべきと考えている。

V. おわりに

本報では、一般的な専門家意見聴取の方法論を調査するとともに、諸外国 (米国と英国, スウェーデン) における放射性廃棄物処分分野での専門家意見聴取の活用事例を調査することで、我が国への専門家意見聴取の適用性について考察した。

実験的に評価することが困難な不確実性を有するパラメータ値の設定には評価者の判断が不可欠であり、その判断の妥当性を評価するためには、検討に用いられた知見、情報を、評価者の判断における仮定も含めて追跡可能な形で透明性をもって整理することが重要である。米国や英国、スウェーデンでは専門家意見聴取を活用してパラメータの不確実性を定量化するとともに、設定根拠や参照した文献情報、検討の記録などは慎重に文書化している。この文書化された情報を各国の規制側が審査し、専門家意見聴取で得られた値の妥当性が認められている事例も存在する。専門家意見聴取によってパラメータの不確実性を定量

化し、検討の記録を注意深く文書化することは、我が国でも同様に規制側が設計プロセスの妥当性を評価するためには有効な手段となるだろう。

専門家意見の集約方法としては、米国のような混合集約アプローチが現状では我が国で有効に機能する可能性があると考えられる。混合集約アプローチはコンセンサス分布の取得を目的としないため、同調圧力等のバイアスが低減された専門家間の意見交換を通じて、質を高めた専門家個人の意見分布を取得できる。この集約前の専門家個人の意見分布を記録し、さらに個人の意見分布を用いた感度解析や不確実性解析を実施することは、セーフティケースの概念との親和性が高く、安全評価の信頼性を高めることに役立つものと考えられる。専門家間の意見交換を促進しバイアスの低減の役割を担うファシリテーターについても、米国のように専門家意見聴取に関する能力や実務経験を有する個人と、当該分野の専門性を有する個人が協力してファシリテーターの役割を担うことが我が国にとって現実的と考えられる。今後、専門家意見聴取に関する例題演習等を通して、我が国への混合集約アプローチの適用性に関する考察をさらに深めることが強く望まれる。また、専門家意見聴取というプロセス全体を通して使用した情報や、得られた情報 (専門家判断やその判断根拠) は、これらの情報の関係性がわかるように体系的に管理する必要がある。特に、専門家判断は適時検討、更新されるものであることを踏まえ、情報更新やその変遷履歴を確認できるような管理システムを構築することも重要と思われる。

— 参考文献 —

- 1) The Secretariat of the Nuclear Regulation Authority of Japan, *Dainishu Haikibutsu Maisetsu nikakawaru Kiseikijun To no Kosshian* (Shiryo 27-1), *Hairo To nitomonau Hoshasei Haikibutsu no Kisei nikansuru Kentou Chimu Dai 27 kai Kaigo* (Heisei 29 Nen 11 Gatsu 2 Nichi) (2017),

- [in Japanese].
- 2) R. Nakabayashi, D. Sugiyama, "Methodology to optimize radiation protection in radioactive waste disposal after closure of a disposal facility based on probabilistic approach," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**[3], 335-347 (2018).
 - 3) R. Nakabayashi, Y. Watanabe, D. Minato, D. Sugiyama, "Study on practical application of optimization method for radioactive waste disposal facility design based on probabilistic approach: Discussion on procedure for setting radionuclide migration parameters," *Trans. At. Energy Soc. Jpn.*, **18**[1], 6-20 (2019), [in Japanese].
 - 4) IAEA, *The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste*, IAEA Safety Standards Series No. SSG-23, International Atomic Energy Agency (2012).
 - 5) A. R. DeWispelare, L. T. Herren, E. J. Bonano, R. T. Clemen, *Background Report on the Use and Elicitation of Expert Judgment*, CNWRA 94-019, Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses (1994).
 - 6) J. P. Kotra, M. P. Lee, N. A. Eisenberg, A. R. DeWispelare, *Branch Technical Position on the Use of Expert Elicitation in the High-Level Radioactive Waste Program*, NUREG-1563, U. S. Nuclear Regulatory Commission (1996).
 - 7) L. D. Phillips, S. J. Wisbey, *The Elicitation of Judgmental Probability Distributions from Groups of Experts: A Description of the Methodology and Records of Seven Formal Elicitation Sessions Held in 1991 and 1992*, Report NSS/R282 Nirex UK, Didcot, UK. (1993).
 - 8) R. J. Budnitz, G. Apostolakis, D. M. Boore, L. S. Cluff, K. J. Coppersmith, C. A. Cornell, P. A. Morris, *Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts*, NUREG/CR-6372, Lawrence Livermore National Laboratory (1997).
 - 9) R. M. Cooke, L. J. H. Goossens, *Procedures Guide for Structured Expert Judgment*, Project report EUR 18820EN, Brussels, European Commission (2000).
 - 10) J. P. Gosling, "SHELF: The Sheffield Elicitation Framework (Chapter 4)," *Elicitation: The Science and Art of Structuring Judgment, International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, New York, 61-93, ISBN 978-3-319-65051-7 (2018).
 - 11) A. M. Hanea, M. Burgman, V. Hemming, "IDEA for Uncertainty Quantification (Chapter 5)," *Elicitation: the Science and Art of Structuring Judgment, International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, New York, 95-117, ISBN 978-3-319-65051-7 (2018).
 - 12) R. T. Clemen, R. L. Winkler, "Combining probability distributions from experts in risk analysis," *Risk Anal.*, **19**[2], 187-203 (1999).
 - 13) L. D. Phillips, "Group Elicitation of Probability Distributions: Are Many Heads Better Than One?," *Decision Science and Technology*, Springer, Boston, MA, 313-330, ISBN 978-1-4613-7315-5 (1999).
 - 14) European Food Safety Authority, "Guidance on expert knowledge elicitation in food and feed safety risk assessment," *EFSA J.*, **12**[6], (2014).
 - 15) A. O'Hagan, "Expert knowledge elicitation: subjective but scientific," *Am. Statist.*, **73**[S1], 69-81 (2019).
 - 16) N. L. Kerr, R. S. Tindale, "Group-based forecasting?: A social psychological analysis," *Int. J. Forecast.*, **27**[1], 14-40 (2011).
 - 17) G. Montibeller, D. von Winterfeldt, "Cognitive and motivational biases in decision and risk analysis," *Risk Anal.*, **35**[7], 1230-1251 (2015).
 - 18) G. Montibeller, D. von Winterfeldt, "Individual and Group Biases in Value and Uncertainty Judgments (Chapter 15)," *Elicitation: The Science and Art of Structuring Judgment, International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, New York, 377-392, ISBN 978-3-319-65051-7 (2018).
 - 19) L. D. Phillips, M. C. Phillips "Facilitated work groups: Theory and practice," *J. Oper. Res. Soc.*, **44**[6], 533-549 (1993).
 - 20) J. E. Oakley, A. O'Hagan, *SHELF: the Sheffield Elicitation Framework (version 3.0)*, School of Mathematics and Statistics, University of Sheffield, UK. (2016), Available at <http://tonyohagan.co.uk/shelf>. Accessed 28 February 2019.
 - 21) R. L. Keeney, D. von Winterfeldt, "Eliciting probabilities from experts in complex technical problems," *IEEE Trans. Eng. Manage.*, **38**[3], 191-201 (1991).
 - 22) R. M. Cooke, *Experts in Uncertainty: Opinion and Subjective Probability in Science, Environmental Ethics and Science Policy Series*. Oxford University Press, New York, ISBN 978-0-195-06465-0 (1991).
 - 23) J. Quigley, A. Colson, W. Aspinall, R. M. Cooke, "Elicitation in the classical model (Chapter 2)," *Elicitation: the Science and Art of Structuring Judgment, International Series in Operations Research & Management Science*, Springer, New York, 15-36, ISBN 978-3-319-65051-7 (2018).
 - 24) A. R. Colon, R. M. Cooke, "Expert elicitation: Using the classical model to validate experts' judgments," *Rev. Environ. Econ. Policy*, **12**[1], 113-132 (2018).
 - 25) U. S. EPA, *Expert Elicitation Task Force White Paper*, U. S. Environmental Protection Agency (2011).
 - 26) N. Dalkey, "An experimental study of group opinion: The Delphi method," *Futures*, **1**[5], 408-426 (1969).
 - 27) G. Rowe, G. Wright, "Expert opinions in forecasting: The role of the delphi technique," *Principles of Forecasting, Int. Series in Operations Res. & Manage. Sci.*, **30**, Springer, Boston, MA, 125-144, ISBN 978-0-306-47630-3 (2001).
 - 28) A. M. Hanea, M. F. McBride, M. A. Burgman, B. C. Wintle, F. Fidler, L. Flander, C. R. Twardy, B. Manning, S. Mascaro, "Investigate discuss estimate aggregate for structured expert judgement," *Int. J. Forecasting*, **33**[1], 267-279 (2017).
 - 29) J. W. Eggstaff, T. A. Mazzuchi, S. Sarkani, "The effect of the number of seed variables on the performance of Cooke's classical model," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, **121**, 72-82 (2014).
 - 30) U. S. NRC, *Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, NV*, Federal Register, 66 FR 55792 (2001).
 - 31) U. S. NRC, *Disposal of High-Level Radioactive Wastes in Geologic Repositories; Conforming Amendments*, Federal Register, 51 FR 22288 (1986).
 - 32) E. J. Bonano, S. C. Hora, R. L. Keeney, D. von Winterfeldt, *Elicitation and Use of Expert Judgment in Performance Assessment for High-Level Radioactive Waste Repositories*, NUREG/CR-5411, SAND89-1821, Sandia National Laboratories (1990).

- 33) U. S. NRC, *Yucca Mountain Review Plan Final Report*, NUREG-1804 Revision 2, U. S. Nuclear Regulatory Commission (2003).
- 34) U. S. DOE, *Yucca Mountain Repository License Application, General Information*, DOE/RW-0573, Update No. 1, U. S. Department of Energy (2008).
- 35) U. S. NRC, *Practical Implementation Guidelines for SSHAC Level 3 and 4 Hazard Studies*, NUREG-2117, Rev. 1, U. S. Nuclear Regulatory Commission (2012).
- 36) U. S. NRC, *Safety Evaluation Report Related to Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada, Volume 3: Repository Safety after Permanent Closure*, NUREG-1949, Vol. 3, U.S. Nuclear Regulatory Commission (2014).
- 37) K. J. Coppersmith, R. C. Perman, R. A. Freeze, L. Gelhar, D. Langmuir, S. P. Neuman, C. F. Tsang, *Saturated Zone Flow and Transport Expert Elicitation Project*, U. S. Department of Energy, Contract No. DE-AC01-91RW00134 (1997).
- 38) IAEA, *IAEA Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2018 Edition*, International Atomic Energy Agency (2018).
- 39) Environment Agency, Northern Ireland Environment Agency, Scottish Environment Protection Agency, *Near-Surface Disposal Facilities on Land for Solid Radioactive Wastes: Guidance on Requirements for Authorisation* (2009).
- 40) Environment Agency, Northern Ireland Environment Agency, *Geological Disposal Facilities on Land for Solid Radioactive Wastes: Guidance on Requirements for Authorisation* (2009).
- 41) D. Swan, C. P. Jackson, *Formal Structured Data Elicitation for Uranium Solubility in the Near Field*, SA/ENV/0920 Issue 3 (2007).
- 42) H. Yates, F. M. I. Hunter, C. P. Jackson, *Formal Structured Data Elicitation of Technetium Retention Properties for Hard Rocks/Sandstones and Clay-rich Rocks*, SERCO/TAS-1012, Issue 2.3 (2010).
- 43) C. P. Jackson, H. Yates, *Key Processes and Data for the Migration of ^{14}C Released from a Cementitious Repository*, SERCO/TAS/002925/002 Issue 2.2 (2011).
- 44) C. P. Jackson, M. Couch, H. Yates, V. Smith, M. Kelly, M. James, *Elicitation of Uncertainties for LLWR*, SERCO/E.003796/010 Issue 2 (2011).
- 45) EA, *Review of LLW Repository Ltd's 2011 Environmental Safety Case: Safety Case Management*, Issue 1, Environmental Agency (2015).
- 46) RWM, *Geological Disposal: Methods for Management and Quantification of Uncertainty*, NDA Report NDA/RWM/153, Radioactive Waste Management (2017).
- 47) L. M. C. Limer, J. C. Wilson, *Integrated Project Team on Uranium: Phase 2. Near-field Conditions and Uncertainties in Uranium Geochemistry*, Galson Sciences Report 1207-ASS-4.3-1 Version 1 (2014).
- 48) W. P. Aspinall, L. Bailey, T. K. Hincks, M. Poole, R. S. J. Sparks, *Development of a Bayesian Belief Network to Assess Variant Climate Change Scenarios*, University of Bristol Report (2008).
- 49) SKB, *Deep Repository for Spent Nuclear Fuel. SR 97 - Post-Closure Safety (Main Report Vol. I, Vol. II and Summary)*, SKB TR-99-06, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1999).
- 50) SKB, *Long-Term Safety for KBS-3 Repositories at Forsmark and Laxemar - A First Evaluation. Main Report of the SR-Can Project*, SKB TR-06-09, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2006).
- 51) SKB, *Data Report for the Safety Assessment SR-Site*, SKB TR-10-52, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2010).
- 52) SKB, *Long-Term Safety for the Final Repository for Spent Nuclear Fuel at Forsmark. Main Report of the SR-Site Project*, SKB TR-11-01, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2011).
- 53) SKB, *Data Report for the Safety Assessment SR-PSU*, SKB TR-14-10, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2014).
- 54) SKB, *Safety Analysis for SFR Long-Term Safety. Main Report for the Safety Assessment SR-PSU*, SKB TR-14-01 (Revised edition), Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2015).
- 55) R. D. Wilmot, D. A. Galson, *Expert Judgement in Performance Assessment*, SKI Report 00 : 4, Swedish Nuclear Power Inspectorate (2000).
- 56) S. Hora, M. Jensen, *Expert Judgement Elicitation*, SSI report 2002 : 19, Swedish Radiation Protection Authority (2002).
- 57) SKI, *Opinions on SKB's Safety Assessment SR 97 and SFL 3-5*, SKI Report 00 : 47, Swedish Nuclear Power Inspectorate (2000).
- 58) S. Hora, *Expert Opinion in SR 97 and the SKI/SSI Joint Review of SR 97*, SSI report 2002 : 20, Swedish Radiation Protection Authority (2002).
- 59) S. Mishra, *Assigning Probability Distributions to Input Parameters of Performance Assessment Models*, Technical Report TR-02-11, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2002).
- 60) A. Hedin, *SKB's Handling of the Regulatory Review of the Safety Assessment SR-Can*, Document ID 1292956, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2011).
- 61) OECD, *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*, Radioactive Waste Management, Organisation for Economic Co-operation and Development (2012).
- 62) L. O. Höglund, *The Impact of Concrete Degradation on the BMA Barrier Functions*, SKB R-13-40, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2014).
- 63) Secretariat of the Nuclear Regulation Authority of Japan, *Chushindoshobun niokeru Haikibutsu Maisetsushisetsu no Ichi, Kozo oyobi Setsubi nikakawaru Kosshian (Shiryo 3, Besshi 1)*, Dai 22 Kai Genshiryoku Kisei Iinkai (Heisei 30 Nen 8 Gatsu 1 nichi) (2018), [in Japanese].
- 64) D. Sugiyama, T. Chida, T. Fujita, M. Tsukamoto, "A risk-informed approach of quantification of epistemic uncertainty for the long-term radioactive waste disposal - Improving reliability of expert judgements with an advanced elicitation procedure -, " *CRIEPI Rep.*, L10012 (2011), [in Japanese].