

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2020.3.NO.133

目次

センターの活動状況	①
放射性廃棄物処分—不確かさへの挑戦	③

センターの活動状況

I 運営状況

理事会・評議員会の開催中止及び書面決議について

新型コロナウイルス感染症の国内複数地域での発生が確認され、政府は2020年2月25日に対策の基本方針を決定し、同月26日には内閣総理大臣よりイベント等の開催に係る協力要請がありました。

このような状況を踏まえ、当センターでは、安全面を優先することに配慮し、3月に予定していた理事会及び評議員会の開催を中止しました。

これに伴い、同理事会及び評議員会に付議することを予定していた「2020年度事業計画及び収支予算並びに資金調達及び設備投資の見込み」について、法令及び定款の規定に基づき、書面による手続を行い、提案を承認可決する旨の理事会及び評議員会の決議があったものとみなされました。

II 成果等普及活動の実施状況

2019年度 第3回原環センター講演会の開催

2019年度第3回原環センター講演会を以下のとおり開催しました。

開催日時：2020年1月24日（金）15:00～17:00

会場：原環センター 第1、2会議室

演題・講演者：TRU 廃棄物の地層処分におけるガス移行挙動に関する研究開発

(1) これまでの取り組みの流れ

地層処分バリアシステム研究開発部 大和田 仁

(2) ガス移行解析による処分場のガス影響評価

地層処分バリアシステム研究開発部 藤井 直樹

本講演では、これまで当センターが実施してきた、TRU 廃棄物の地層処分場において、廃棄体やその周辺で発生すると考えられるガス（主に水素ガス）の人工バリアシステム（EBS）中での移行挙動の評価に関する研究開発について紹介しました。

前半では、ガス発生の影響とガスの発生源及びガス移行挙動の評価の全体の流れについて説明した後、主に 1998 年度から 2007 年度にかけてスイスのグリムゼル試験場（Grimsel Test Site : GTS）で実施した原位置試験の概略及び成果を紹介しました。この試験は、円筒型の空洞内にコンクリートサイロを構築し、その周囲を配合比 20% のベントナイト混合土を緩衝材として充填した EBS を構築して実施したものです。主な成果としては、湿潤及び排水過程の水分特性曲線を得られたこと、ベントナイト混合土の飽和度依存の透水係数を得られたことなど、特性値の整備に加え、既存の二相流解析や力学連成挙動を扱うために拡張された二相流コードで、実規模スケールの複雑な EBS 中のガス移行挙動を良好に再現することができた点が挙げられます。一方、課題としては施工時の境界をはじめとした境界部のモデル化、物性値の与え方の重要性があげられます。



後半では、2008 年度以降現在まで実施している、TRU 廃棄物の地層処分におけるガス移行評価を対象に、その目標設定について述べた後、まず配合比の高いベントナイト系材料への適用に向けた室内試験による現象の理解について紹介しました。その中で、ガス圧の高まりにともなってガスと水が二相流として移行する現象とさらなるガス圧の上昇により一気にガスが透気する破過現象を含むガス移行試験についても説明しました。また、前半の GTS での原位置試験で課題としてあげられた境界部のモデル化を進める上で重要となる、水で飽和したベントナイト系材料とセメント系材料の界面のガス移行特性についても紹介しました。続いて、ガス移行解析評価で求めるもの、二相流モデルとそのパラメータなど、ガス移行解析までの一連の流れを紹介するとともに、ガスが移行する場の変化に応じて力学的な構造の変化を反映する手法について説明しました。最後に、ガス発生処分の安全性への影響を確認するための地層処分場から生物圏への核種移行への影響評価の概略について紹介しました。



2019 年度 第 4 回原環センター講演会の中止

2020 年 2 月 28 日（金）に開催を予定していた、2019 年度第 4 回原環センター講演会「高レベル放射性廃棄物の地層処分の概要と最近の取り組み」は、新型コロナウイルス感染症の流行を配慮して、中止し、2020 年度第 1 回原環センター講演会として、改めて開催することとしました。準備が整いましたら、開催案内を行いますので、多数、お越しいただきますようお願いいたします。

放射性廃棄物処分—不確かさへの挑戦

東京大学名誉教授
鈴木 篤之

冒頭あいさつ

お忙しい中にお集まりいただき、ありがとうございます。ご紹介いただきました鈴木と申します。私は、2011年3月11日の事故以降「一生、喪中」の心境でありまして、できるだけ静かにしていることを基本としております。

このたび、原環センターの研究発表会で何か話とお誘いいただいた時には非常にびっくりいたしましたと同時に躊躇（ちゅうちょ）もしたわけですが、事故後、サイトで必死に難しい作業に取り組んでおられる方々、あるいは、それにも伴って、今後ますます深刻化すると考えられる放射性廃棄物処分問題に思いを致すと、やはりこの機会に私自身も、あらためて放射性廃棄物処分の問題を考えてみるべきではと思ひ、お引き受けした次第です。

はじめに

お話をする前に、一点、お断りさせてください。放射性廃棄物処分の問題は、結局はどうしても高レベル放射性廃棄物の処分問題に帰着するかと思いますが、これは日本ばかりでなく、世界的に原子力界にとっては最大の問題のひとつであり、切実な課題になっています。そういう中で、きょうの話は『不確かさへの挑戦』と副題を付けていますが、現実はそのような暢気（のんき）な段階ではないとお感じの方も多いかと、私自身、自覚しております。

それでは、なぜ敢えてそのような話をさせていただきたいかといえ、高レベル放射性廃棄物の問題はご存じのように、各国とも非常に長期に亘って、いろいろな局面に遭遇しながら今日に至っております。日本にとっても確かに安閑としていられない課題であります。それでもなお、やはり過去の様々な教訓や事例を頭の中に置きながら将来に向けて取り組んだほうが、いい面もあるのではないかと、そういうような意味でお話をさせていただきたいし、そう思っただけで聞いていただければ大変ありがたい。

言い方を変えますと、日々、この分野でご苦労されている皆さまのお仕事、きょうは主として技術的な話をさせていただきたいのですが、技術的というよりは社会的な対話やコミュニケーションなど、いろいろとご努力されている。そういうお仕事の重要性は当然、今後とも変わらないのであって、きょうの話の内容は、

それに追加してお考えいただけたらありがたい。ただ、その追加というのも簡単な話では恐らくなくて、現実には限られた予算、時間の中で、もうすでに精一杯いろいろなことをなさっていると思いますので、それ以上、何かプラスして仕事を進めることは簡単ではないだろうと想像されます。従って、私の気持ちとしては、例えば予算的に言うならば、新たな予算としてお願いできるような新規テーマは考えられないか、そういった観点からお話しさせていただきたいと思います。

高レベル放射性廃棄物処分事業そのものは、確かに掘り出し金の算定では300年間、管理することが想定されているわけです。諸外国でも相当な期間、回収可能にするか、可逆性をどの程度考えるかということはあると思いますけれども、いずれにしても、この事業をそう簡単に終了することにはならないと思われます。そうするとどうしても若い方々に、このことの重要性を理解してもらい、あるいは技術的な意味で将来性が期待される面に目を向けてもらう、そういうことも含めて考えていければと、こういう趣旨で、お話をさせていただきたいと思います。

あらまし

きょうの話は、大きく分けて6項目。第1に、「不確かさ」に関して。これは、お集りの方々は十分ご存じなので簡単にしますが、そのことが、高レベル放射性廃棄物処分の問題について多くの人の理解を難しくしている背景にあるのではないかと思います。従って、そういう意味で、まずその不確かさについて、ちょっとおさらいしたい。

第2に、その不確かさについては、実は、ご存じの方もおられると思いますが、軽水炉を発明したアルビン・ワインバーグが、1972年の『ミネルヴァ』という雑誌に書いた論文で触れております。もう50年くらい前になるでしょうか。そのことについて、話のきっかけとしてお話しします。その当時、ワインバーグが考える科学は自然科学と言っていいかと思いますが、この不確かさの問題は、自然科学では扱い難い問題だということを示唆していました。従って、これをどう取り扱うかは、彼にとっても、一生大きな課題だったようです。

私が、そのことについて自分なりに勉強していく中で思い付いたといえますか、非常に参考になったもの

が、ハーバート・サイモンの理論でありまして、第3に、これについてお話させていただきたい。それは、このサイモン的な考え方が、高レベル放射性廃棄物処分の安全性に係る不確かさに取り組んでいく上で大事なのではという意味であります。

第4に、そういう目で見ると、アメリカの廃棄物アイソレーション・パイロット・プラント（WIPP）やフィンランドのオルキオットの事例が非常に参考になりますので、その点について触れたいと思います。それらの事例も踏まえつつ、第5と第6の項目で、それぞれ、これまでの日本における検討活動例と、これから日本において、どういう取り組みをすべきかについて考えてみたいと思います。

処分安全性評価に係る不確かさ

処分システムは、一言で言うと、工学バリアと天然バリアで構成された多重バリアシステムです。その処分システムの安全性については、システムが置かれた地質環境条件に非常に依存しています。例えば、地下水による放射性物質の移動が拡散支配か移流支配か、あるいは還元雰囲気か酸化雰囲気に依存しています。それらの環境条件下での安全性については、セーフティーケースというコンセプトで評価する考え方が国際的にも採用されています。

図-1 は、多重バリアシステムと処分安全性の関係性について簡潔に示しています。これは、米国サンディア国立研究所のピーター・スウィフトによる 2017 年の資料¹⁾を基礎にしています。

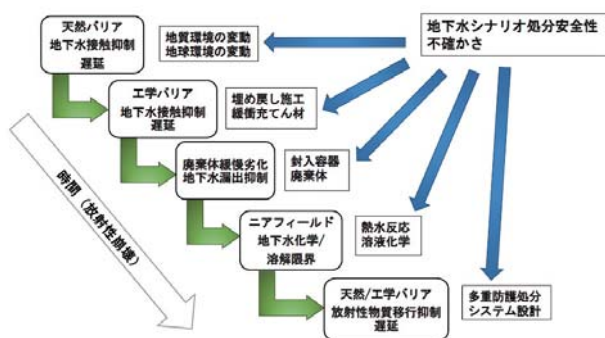


図-1 処分安全性評価に係る不確かさ

図-2 と 3 は、その資料で紹介しているフランスの安全評価例です。もちろんある試算ケースの例示です。図-2 が使用済燃料自身を処分した、いわゆる直接処分と称する場合で、図-3 が再処理後の高レベル放射性廃棄物の例です。ここで顕著な点は、粘土層だから比較的均質媒体で拡散支配、それから還元雰囲気ということもあって、その結果、主として問題になる核種がヨウ素 129 や塩素 36 になります。直接処分との差は、ピーク値の差が多分、一番大きいと。そういうことを示しています。

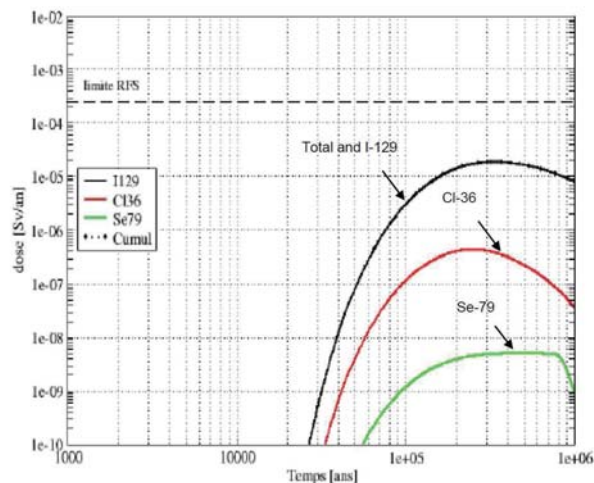


図-2 処分安全性の処分システム依存性（1）：フランスの評価例：使用済燃料

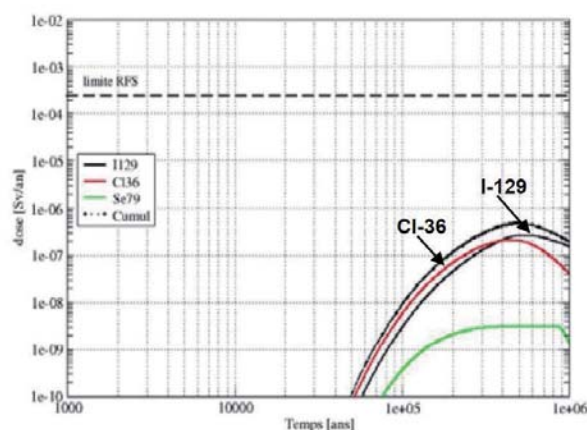


図-3 処分安全性の処分システム依存性（1）：フランスの評価例：高レベル放射性廃棄物

図-4 はスウェーデンの例で、この場合は、亀裂性花崗岩のため移流が支配的です。その結果、標準的なケースにおける環境影響は十分に低い値になります。支配核種はラジウム 226 だということが示されています。

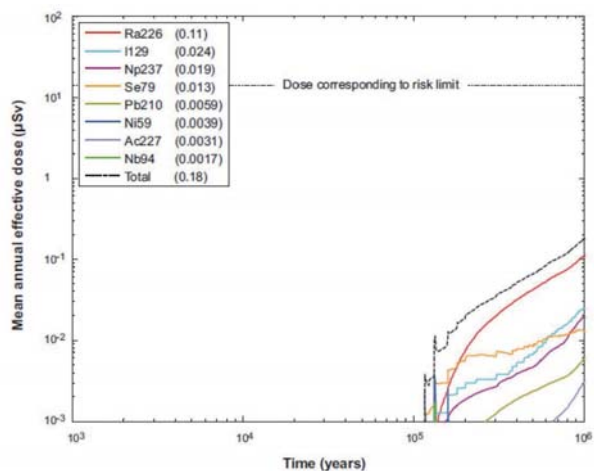


図-4 処分安全性の処分システム依存性（2）：スウェーデンの評価例

図-5 のユッカマウンテンは、亀裂性凝灰岩のため移流が支配的で、また酸化雰囲気のため重要な核種がプルトニウム 242 やネプツニウム 237 になってきて、しかも影響の程度は比較的大きくなっています。

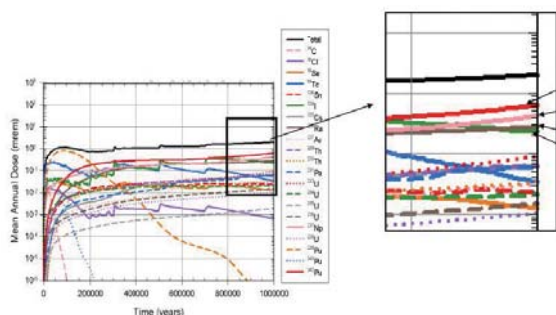


図-5 処分安全性の処分システム依存性 (3) : ユッカマウンテンの評価例

このように地質環境条件次第でいろいろなケースがあり、処分安全性に係る不確かさはそれぞれの環境条件の変動に大きく左右されます。表-1 はセーフティーケースという、国際的に共通した考え方の紹介ですが、色々な科学的な根拠ないし論理に基づいて、なぜ安全かを説明しましょうということです。ただ、そこには不確かさがどうしても伴うだろうと。

表-1 長期安全性評価に関する国際的考え方：Safety Case

長期安全性評価に関する国際的考え方：Safety Case - 科学的根拠、科学的解析、科学的論理展開 - 科学的法則にもとづく数値解析モデル - 科学技術の可能性にもとづく処分概念の設計 - 設計・建設・運転段階に係る意思決定の科学的合理性 → 上記論理総合にもとづく長期安全性性能基準等に係る規制基準適合性評価 不確かさ要因 - 評価対象期間： 例、ユッカ・マウンテンに関するEPA基準、10,000年から1,000,000年 - 地質環境要件(天然バリア)の長期挙動(太陽活動/気候変動等を含む地球環境) - 工学的多重防護性(工学バリア)の長期挙動(構造強度、地下水化学、等々) - 評価基準・指標の合理性(線量基準、濃度基準、安全機能目標、等々) - Best Available Technology (BAT) と将来的技術革新 → 評価モデルの頑健性 (Robustness) → 処分計画の可逆性・回収可能性 (Reversibility & Retrieval)	
--	--

端的に言えば、安全性を評価すべき対象期間が非常に長い。それは、例えばユッカマウンテンの場合、環境保護庁 (EPA) の評価期間が最初は1万年だったところ、後から100万年に延ばしたことに如実に表れています。天然バリア、工学バリアにも、それぞれ長期挙動を考えざるを得ない。そういう長い期間に互る安全性についての評価基準をどのように考えるか。さらに技術的な今後の進歩等をどのように折り込むか。現時点での最善技術にもとづいて評価するという考え方、これについても国際的にある種の合意が得られていますけれども、長期の評価対象期間を考えれば、現実には多分、技術革新が起きるわけです。

セーフティーケースに関連して、2017年に経済協

力開発機構／原子力機関 (OECD/NEA) からコミュニケーションに関わるレポート²⁾が出ていまして、それをちょっと参考までに借りてきました (表-2)。

表-2 Safety Case の説得性 (Communication)

処分事業実施：十分な柔軟性 (段階的進め方) ・サイト特性の設計条件を超える変動 ・技術的、政治的境界条件の変化 ・科学技術的進歩の反映 → 柔軟性への対応：処分計画の可逆性と処分廃棄物の回収可能性 ・規制要件：フランス(2016情報)、ドイツ(2010情報)； - 非規制要件：フィンランド(2015情報) (2000年の処分原則政府決定では要求) → 柔軟性への対応：モニタリング (例、EU第7期プロジェクトのMoDeRn) ・閉鎖前：地質環境要件の地質化学特性の確認 ・閉鎖後：何をいつまでモニタリング？ 長期安全性評価：頑健性 (Robustness) の補強 ・線量基準以外の基準にもとづく評価 ・ナチュラアナログによる類似事象の提示 ⇒ 何故、それほど必要か？ Safety Caseのさらなる強化？	
---	--

レポートの中で次のようなことを指摘しています。セーフティーケースの説得性を上げていくうえでコミュニケーション上重要な点は、処分事業に十分な柔軟性があること、段階的に進めることと、処分の安全性評価に十分な頑健性をもたせそれを補強していくことだという指摘です。段階的に進めるということも、よく言われていることですが、そういう中で、その設計条件を超える変動を柔軟性のひとつとして考えていく。

それから可逆性、回収可能性です。このコミュニケーションのレポートによれば、フランスとドイツが規制の観点からもその点を重視しているけれども、フィンランドは、安全評価上は、それを条件としていないことになっています。ただ、フィンランドも2000年の処分事業に関する政府原則決定の際は、それを条件にしていたという話です。

さらに、柔軟性への対応としてのモニタリングの有用性が指摘されています。そして、安全評価の頑健性を補強するものとして、線量基準以外の評価基準が場合によっては有効かもしれない、また、ナチュラアナログも有効かもしれないというような指摘があります。

ワインバーグの洞察

いろいろと国際的にも議論を尽くしてきている中で、なぜ、なお、今こういうコミュニケーション論を必要とするか？セーフティーケースと言っているけれども、さらにセーフティーケースの中身の強化を求められるのではないかと？そういうことをアルビン・ワインバーグの問題意識との関係で見えます。

ワインバーグについては、軽水炉を発明した人として有名ですが、科学的実証性の限界、つまり、どこまで科学は実証できるかという問い掛けが、『ミネルヴァ』誌の論文³⁾ “Science and Trans-Science” として

発表され、多くの論議を呼びました。この論文は日本でも、確か大阪大学的小林傳司先生らを中心にかなり注目され、そういう意味で社会科学の分野の方々への影響もあったと思います。この中で、科学的実証性の問題と放射性廃棄物処分問題との関係性が示唆されています。

ワインバーグは1955年から73年にかけてオークリッジ国立研究所の所長に就いていますが、それ以前から軽水炉概念を発案し、当時、軽水炉特許のほとんどは彼と彼の師であるユージン・ウィグナーの連名で出されていると言われます。その際、よく引き合いに出されるのが海軍船舶用原子炉誕生の話です。軽水炉であれば、船用原子炉が可能との考えを彼はもっていたようです。

私は原子力の研究開発状況見聞のため1978年にアメリカに独りで滞在していた時期があり、偶々（たまたま）、ワインバーグの部屋でその警咳（けいがい）に接するという幸運に恵まれたことがあります。そのときの記憶によれば、海軍からハイマン・リコヴァ提督という、かなり個性的で猛烈な人だったらしいですが、研究所に派遣されていて、この人に軽水炉船という着想を漏らしたため軍用原子炉が優先されたとのこと。彼自身、それは本意ではなかった。彼は後に熔融塩燃料原子炉の有望性を説くわけですが、それにあまりに拘ったためオークリッジの所長を辞める羽目になったようです。

それからもう一つ、ワインバーグの著書「中性子連鎖反応炉の物理理論」。古典的な教科書として知られ、1960年代から70年前半にかけて原子力を勉強した人たちは、恐らく、ほとんど例外なく、この図書のお世話になっているだろうと思います。

そういう人が、この科学的実証性の限界を問題提起しました。原子炉の過酷事故と低放射線リスクに共通する“*How safe is safe enough?*”の問題はどうしても通常の自然科学の領分を超えてしまう。つまり、技術者、科学者だけで決められる話ではないのではという問題提起です。

それはなぜかという、これも彼から直接聞いた話ですが、当時、原子力の利用が世界的に拡大していく中、旧ソ連型の原子炉がかなり使われ出しており、それが、いわゆる深層防護や多重防護の面でアメリカ型原子炉に比べて本質的に劣っているのではと憂慮され論議を呼んでいたこと。もう一つは、当時すでに、低放射線影響に係るリスク評価問題が話題になっていて、ワインバーグの研究所が、その調査を国から受託し、そのことを勉強するようになって、科学的実証性の限界を示す、また別の問題に遭遇したとのこと。

このミネルヴァ論文の中で、少しだけでも岩塩層処分場の話が出てきます。カンザス州の岩塩層に地層処分場をつくるという計画が既に当時、具

体化といいますか、話に上っていました。しかし、社会的にそう簡単にことが運ばないことが明らかになりつつあり、論文執筆がちょうどその頃のタイミングであったことが関連していると思われます。

この種の問題について、これまでどのように扱われて来たか？ご存知のように、原子炉事故については、深層防護にもとづく決定論、さらにそれを補強する確率論です。確率論で問題となる稀頻度事象について言えば、専門家の意見分布が大事だ、と、原子力リスク論で著名な米国原子力規制委員会元委員のアポストラキス博士も語っています。しかし、それだけでは、ワインバーグの問い掛けに十分に応えていません。低放射線リスクに関しては、いわゆる線形仮説を立て、その不確かさについて安全規制上の保守性を持たせることにしています。地層処分についてはセーフティーケースです。

これらは、社会的な安全安心という議論と大いに関連があります。ワインバーグは、その論文の中では、社会とのコミュニケーションを丹念に地道に繰り返すことが肝要と、その点を奨励しています。このことの重要性に疑義をはさむ余地はありません。

ただ、後に触れるように、サイモンの場合は、やや違う。社会的な理解や合意を得るために、科学技術自身を改善したり、見直したり、改革していくという視点がかなり強調されているように思います。彼は、よくArtificialという英語を使っていますが、要するに、何か人と人工物が関わる場合に、それ自身と、その周りの環境、これらが調和するような形で考えていく必要がある、という考えです。これは当たり前といえども、その点を特に彼は主張しています。

ワインバーグの論文³⁾についてですが、英語なので日本語にあえてしてみました。

たとえば、技術が齎（もたら）す負の影響など、科学技術と社会との相互作用から招来する多くの問題、すなわち、科学を通じて社会的問題を扱おうとする試みには、科学に向けられた問いでありながら科学では答えられない問題が付きまとう。このような問題について、超科学という用語を私は提案したい。（I propose the term trans-scientific.）

何故ならば、これらの問題は、認識論的に言えば、事実に関する設問であるが科学の言葉では解答不能だからだ。確かに、それらは、科学を超越している。公共性に係る政策がこの超科学的側面に関わる場合、科学者の役割は、科学的に間違いなく答えられる課題に対する場合とは異ならなければならない。

“Trans-Science”という言葉は彼の造語ですが、原子炉重大事故や低線量リスクと言った問題は、通常の科学の領分を超えているという意味から使われた用語です。それで、この論文は自然科学者の正直な告白であり、これこそまさに社会科学の新たな役割を示唆しているというふうに受け取れたわけですが、同

時に、私自身は、この領分を超えている部分をあえて科学する、これは行動科学と言われることが多いと思いますけれども、その必要性や重要性を暗示しているのではないかと。サイモンの科学がその種の科学のひとつだと思っています。

それでは、放射性廃棄物処分の問題がワインバーグの論文の中でどこに出てくるかというところのほうです。農薬の危険性や超音速旅客機製造問題と並んで例示されています。ちょっと細かい話ですが、岩塩層の salt mines が複数形になっています。ということは、このとき既に、カンザス州だけではなくて、ニューメキシコ州のほうの話も、彼の頭の中にあったような気がしないわけではありません。

サイモンの科学

そこで、次にサイモンの科学です（表-3）。サイモンの科学といっても彼は非常に守備範囲が広くて、人工知能の話から企業など社会的組織の意思決定論まで含みます。現状をより望ましい状況に変革しようとする行動、活動の設計が、彼の主たる興味だということです。その中で、適応性や学習の繰り返しなど、そういうことの重要性を強調しています。

表-3 サイモンの科学

➤ 人工知能/意思決定論/人工物の科学 「現状をより望ましい状況に変革しようとする 行動・活動の設計」 ➤ 著書：“<i>Sciences of the Artificial</i>” (3rd, 1996) 適応性の術/記憶と学習の繰り返し/ 探索ガイド・設計の階層化 ➤ 米国科学アカデミー研究評議会2003年報告 地層処分計画の適応型段階化 ➤ ユッカマウンテンの混迷 適応性の欠如

彼も造語を用いています。それは“Satisficing”という語句であって、なかなか理論どおりにはいかない。だから、どこで満足をするかが大事だということを言っています。サイモンの業績ですが、彼は計算科学分野のノーベル賞と言われているチューリング賞を受賞すると同時に、実際に、経済科学分野でノーベル賞を顕彰されています。

これらふたつの賞を受賞した人は彼一人だけだと思います。チューリングとは確か第2次大戦でドイツの暗号を解読した人の名前だと思います。サイモンは人工知能の研究を初期にやっけていて、その時に、理論より学習、例えば金庫破りは全ての組み合わせを考えるよりも、誕生日や記念日のようにその人にとって記憶しやすいものを多分使うことが多いといった人間の行動を非常に重視した人です。ですから、ヒューリスティックによる計算科学を提唱して、そのプログラ

ム言語でチューリング賞を、意思決定論の分野でノーベル経済学賞をもらっていると私は理解しています。

その際、理論的決定よりも次善的決定、つまり、理論的に正しいということが、必ずしも現実にならぬとは限らない。理論的決定も大切だけれども、それだけにとどまらない場合も非常に重要だというような主張です。それを“Satisficing Decision”という英語にしています。

私の理解では、彼は、適応性や学習の繰り返しにもとづく意思決定論の有用性を示す様々な研究や実証的事例を追究し、それらを貫く彼自身の考え方を、“Science of the Artificial”という英語で表現しました。その和訳が『人工物の科学』です。最終的には、それを成書にしています。

ここで、例えば時計の話が出てきて、時計は時を伝えるだけにとどまらない。18世紀最大の技術的課題は航海時計、振動が激しく緯度が大きく変化する中でも有効に作動する時計の製造でした。つまり、ものをつくる場合に、時計は単に時間を測る機能だけにはとどまらず、それがどのような環境条件下で使用されるかが重要だという話です。あるいは、車でも、当初は馬車よりも高速で快適な乗り物をつくれればよかったわけですが、いまでは、安全走行が可能な自動運転まで考えるようになっていきます。そういう意味で、人工物は、科学技術と言い替えてもいいと思いますけれども、環境適応性と創造性、すなわち環境要件への科学技術の適応と柔軟性そして創造性が非常に大事だということです。その「人工物の科学」には私がとくに参考にさせてもらった1996年の第3版⁴⁾になって追加された部分も結構あり、その内容を目次にそって表-4にまとめておきました。

表-4 “Science of the Artificial” 目次

1. 自然界と人工的世界の理解 人工物の定義：「人工ダイア」的イメージを超えて「人の行動・営為、等々」 2. 経済的合理性：適応性の術 (<i>Adaptive Artifice</i>) 不確かさの存在、効用最大化より手続き合理性 3. 思考の心理：術の自然科学化 (<i>Embedding Artifice in Nature</i>) 「蜂の行動」：複雑性は蜂ではなく行動環境にある 4. 記憶と学習：思考環境としての記憶 記憶と学習の繰り返しによる人の認識過程 5. 設計の科学：人工物を創成する 最適解から満足解へ、探索ガイド・設計の階層化による問題解決 鈴木・元田「システムの設計・運用・評価」(岩波書店, 2001) 6. 社会的計画：進化する人工物の設計 アポロ計画：資源集中、効率運用、組織運営、等々 7. 種々の複雑系 複雑系とは？ サイバネティックスとシステム科学、遺伝的アルゴリズム 8. 複雑系アーキテクチャ：階層システム 社会システム、生物・物理システム、複雑系の進化、生物学的進化、等々
--

第1章から第8章まで。この中で、彼自身、この人工物 (the Artificial) という言葉の使用にはかなり躊躇 (ちゅうちょ) したと述懐しています。「人工的」には人工ダイアのような偽物的イメージが既にできあがっているので、この言葉は誤解されるのではないか、

その意味が伝わらないかもしれないという危惧もあったようです。しかし、外にはいい言葉がどうも見つからなかったとのこと。

“Adaptive Artifice”という表現が使われています。「適応性の術」と訳しましたが、現実問題では種々の不確かさの存在が避けられない。とくにそれが将来予測に関わる場合は、最も正しい行動を最初から決めることは難しく、シミュレーション等を駆使して望ましい行動を段階的に探索することが重要になる。この段階的探索を手続き合理性と彼は呼んでいます、そのことを、また適応性という言葉で表現していると私は理解しています。人工物の科学の中には、そのような適応性ある人工物をいかに創成するかという課題も含まれます。これに関する方法論についてもこの本で言及しています。

岩波書店から「現代工学の基礎」という講座全集を刊行することになり、その中に、材料系や情報系と並んで設計系という領域を設けることになりました。私が、その一部の分冊「システムの設計・運用・評価」を担当することになって、その際、この「人工物の科学」の第5章で推奨されている方法論の構成をベースにし、大阪大学の元田浩先生のお力も借りて書いたことがあります。2001年のことです。

米国科学アカデミー研究評議会レポート

その後、サイモンは、アポロ計画等の社会的計画問題や複雑系アーキテクチャ：階層システムなどにも興味の対象を拡げています。こういうサイモン流考え方の文脈に沿って放射性廃棄物処分問題を考察してみると非常に興味深いところがあります。

米国科学アカデミーの研究評議会内の委員会が“One Step at a Time (一歩ずつ)”と題する報告書⁵⁾を2003年に出しています。これはネバダ州ユッカマウンテンの計画を見直そうというのが本当の狙いですが、ユッカマウンテンだけに絞っては差し障りがあることから、より一般的に地層処分の問題はどうかあるべきかを議論しようという米国エネルギー省からの委託研究でした。この委員会には、私も委員として参加しいろいろな議論しました。

結局のところ、“Adaptive Staging”つまり適応性の高い段階化にもとづいて進めるべきだ、と。“Linear Staging”という英語を使っていますが、一本道を行くような従来の方法は難しい、が結論です。ただ、この“Adaptive Staging”にも長所と欠点があることも指摘しています。閉鎖していない段階が長く続くと、それなりに、その期間、安全管理に要する費用が増大する。一方、モニタリングデータの蓄積が進み、新知見の学習ができる。さらに長期的なモニタリング技術の開発も期待できる、などが長所として挙げられています。この点は、私自身が、きょう、お話したい点と大いに

関連しています。

ユッカマウンテンが、なぜ科学アカデミー内に委員会までつくって議論する必要があるかということ、ご存じのように、ユッカマウンテン計画は、ユッカマウンテンの名前が一遍、候補地に挙がってから、ひたすら一本道なのです。何が何でも進めたい。いろいろな問題に遭遇しながらも、ときどきの政権がそれぞれ、ある種の大きな決定をしています。一番よく知られている決定が、1987年の改訂核廃棄物政策法です。このときに、ユッカマウンテンを強引にサイトとして政府決定したわけです。同時に、第2処分場を建設しなければならないことが法律で規定されており、これについて2010年までに検討結果を報告するように同改訂法で決められましたが、これは実施されませんでした。それから、監視付中間貯蔵施設 MRS (Monitored Retrievable Storage) についても検討するように改訂法で求めています、これも中途半端な形で処理されました。

結局はユッカマウンテンだけだ、と。こういう流れの中で、とうとうネバダ州選出のリードという上院議員が民主党の大統領候補者にオバマを推す交換条件として、自分が上院院内総務に就くとともに、ユッカマウンテン計画の中止決定をオバマ政権に求めるといふほどまでに政治的な問題となってしまったと聞いています。実際、オバマ政権によって完全な休止状態に追い込まれ、今では全く埒(らち)が明かなくなっています。

海外の先行例の学習：米国 WIPP 及びフィンランド

それでは、サイモンの考えから見た先行例です。地層処分計画の国際的状況を眺めたときに、計画が一番進んでいる、米国の WIPP とフィンランドの例を見てみたいと思います。

WIPP は、サイトとして最初に考えられた場所ではなかったようです。ワインバーグの論文のところちょっと触れたように、カンザス州のライオンズから WIPP すなわちニューメキシコ州カールスバッドの方に関心が移ったようです。WIPP が検討対象地になってからもいろいろな紆余曲折がありました。例えば、岩塩層という比較的均質な媒体であることから、どこを掘っても地質環境特性はそんなに変わらないだろうと想定していたところ、実際は、いろいろと想定外の地質データが採取され、処分場設計建設の場所を変えたりしました。そういうこともあって、科学者は信用できないとの不信感が地元の一部に拡がり、EEG (Environmental Evaluation Group) という専門家グループがニューメキシコ州の機関として設置されました⁶⁾。これは、英語で“Stewardship”機関と称されています。“Stewardship”とは、適当な訳語がみつかりませんが、私の理解では、地元の立場から専門家たちが集まって、このプロジェクトを監視、評価し、意見

それから、注目すべきは、オンカロ (ONKALO) の役割です。同施設で、天然バリアの地質特性を事前調査し工学バリア性能の確証試験ができるようになっています。フィンランドの処分計画では、いわゆる多重バリアを、原子炉で言う深層防護の一形態とな

フィンランドの安全機能、安全性能目標ですが、規制当局が求めていることに対して、事業許可申請者である Posiva 社が提示している案⁷⁾を並べてみました(表-6)。工学バリアによる放出抑制期間を1万年にする。短寿命核種については500年間閉じ込める。これらは一種の安全機能目標です。それから、被ばく評価も最大だけではなく、平均についてもその規制上の妥当性を評価すると。これもある種の非常に注目すべき工夫だと思います。

- ◆STUK基準：
 - 安全機能目標
 - 1) 工学バリアからの放出量抑制（10,000年間）
 - 2) 短半減期核種について閉じ込め（500年間）
 - 線量評価（十分な信頼性の下、評価可能な期間において）
 - 1) 年当り最大被ばく線量が0.1 mSv以下
 - 2) 年当り平均的被ばく線量が無視しうるほど低い
 - 環境放出量（上記期間以降）
 - 1) それに伴う放射線影響が地殻の自然放射線影響と同程度
 - 2) 全体としての放射線影響が無視できるほど低い
- ◆Posiva社提示：
 - 評価期間の区分
 - 1) 初期100年間は建設・埋設・運転中
 - 2) 100年～10,000年は、線量評価可能、現在の気候条件を仮定
 - 3) 10,000年～150,000年は、次期氷河期
 - 4) 150,000年～1,000,000年は、氷河期繰り返し

ちょっと話が戻りますけれども、ユッカマウンテン

- ・当初計画からの変遷
- ・段階的サイト選定計画策定（1983）：国内禁止原則
- ・使用済み燃料管理（1994）ロシアへの返還禁止 ・実施主体（1995）TVO社からPosiva社
- ・低レベル廃棄物処分：Olkiluoto（1992）、Lovisa（1997）
- ・Olkiluotoでの処分場建設計画申請（1999）：原則決定の政府案申請
- ・規制機関の関与（2000）：処分事業の安全面に関する肯定的評価
- ・地元自治体議会承認（2000）：最終的選定では、雇用重視、地元の数量性
- ・政府 処分事業原則決定（2000）、議会の関与（2001）：政府案の承認
- ・地下特性調査施設（ONKALO）の建設（2004）：地質環境特性の詳細実地調査
- ・中間貯蔵施設延長協議：KPA Olkiluoto（2011）、Lovisa（2000）
- ・規制機関の関与（2008）：処分場の多重防護（深層防護の一形態）にもとづく安全原則
- ・段階的实施：各バリアの安全機能と性能目標：モニタリングによる信頼性向上
- ・安全評価方法の段階化：評価基準の段階化と多元化
- ・処分場建設計画申請（2012）：工学バリア強化型（KBS-3）
- ・新規発電会社分（2012）：Fennovoima社、Posiva社と交渉、
- ・2期分建設計画の検討開始（2016）：Fennovoima社

	フィンランド (STUK, 2015)	WIPP (40CFR191/194, WIPP/LWA)
立地選定	地質環境条件優先	岩層層優先 カンザス州からニューメキシコ州に変更
探掘調査評価	ONKALO施設	広域調査より建設地点変更 Stewardship機関 (EEG) による第三者評価
許認可	計画遂行原則/建設/運転/閉鎖	試験的処分/運転/5年毎再認可
入入れ廃棄物	既存発電炉使用燃料棒優先 処分総量：4,000トン(2000)、 6,500トン(2002)	DOE軍事用TRU廃棄物に限定 表面線量率と濃度で規定 処分総量と放射能と体積で規定
工学バリア	500年間閉じ込め維持 (短半減期核種) 10,000年間開放抑制機能重視 (性能目標) 鋼製オーバーパック (KBS-3)	酸化マグネシウム充てん地下水移行抑制 延焼能
安全評価	100年～10,000年 最大 <0.1 mSv/年、平均 十分低い 10,000年以上 (水周期到来考慮) 最大 自然放射線並、平均 十分低い	～10,000年 (発生頻度1/10 ⁴ 年以上の頻度： ナリオ) 最大 <0.15 mSv/年 飲料水濃度：40CFR Part141基準以下
モニタリング	天然バリア：岩盤力学、水文学、地下水化学、 等々 工学バリア：実規模原位置試験、SKBとの協研	充てん材特性、処分室環境特性、 地下水特性、 塩水特性、揮発性ガス特性、温度分布、 等々
回収可能性	安全事件から除外 など、2000年の政府原案決定では回収可能性 を要しない	試験的処分は回収可能性を前提で実施 その後の処分も必要であれば回収

について、米国科学アカデミーの委員会で議論をした時の逸話です。委員会の最後に、各委員にそれぞれコメントを求めます。報告書のできあがりについてはどう思うかと。大体のところ、みんなの感想は「よかった」と肯定的でした。私の順番になって、「あんまり満足していない」とつい本音を漏らしてしまったのです。みんなびっくりもし、苦笑していましたけれども。何故かと言えば、“Adaptive Staging”を勧告しても、ユッカマウンテンのプロジェクトは恐らく変わらないだろうと思ったのです。その大きな理由の一つは、ユッカマウンテンは軍事用と民生用の廃棄物を一緒に処分することになっており、それについて報告書が何も言及していないからです。これは、長期的安全性評価に係る不確かさの観点からはそれを増幅する方向ですから、その点に関し懸念を抱く人々からすればどうしても分かりにくい。ですから、そこを“Adaptive”に変えられれば、随分、話は違ったのではないかと、今でもそのように思っています。数年前に、オバマ政権のDOE 長官だったマサチューセッツ工科大学物理学教授のアーネスト・モニッツが、辞める前に、偶然ですけれども「やっぱり両方を一度に進めるのは難しい。少なくとも、最初は軍事用から始めるなど、両者を分離すべきだった」と、感想を吐露していました。

「サイモンの科学」的挑戦：国内の検討例

そこで次に、「サイモンの科学」的挑戦ですが、今までお話ししたことを参考に箇条書きにしてみました。

■ 挑戦的課題

技術的課題 / 制度的課題

■ 挑戦的課題への取組み（例示）

1. 原子力機構における萌芽的研究例
2. 国際協力：モニタリング技術
3. 安全目標の評価指標の検討
4. 工学的安全機能強化の意味

サイモンの科学から見ると、社会的不安の根源にある長期的安全性評価に係る不確かさへの取組みとして、安全性能評価の信頼性を向上させること、それが何よりも肝要だと思います。モニタリング技術も含まれます。日本の現状について、少しサーベイしたところ、日本原子力研究開発機構（原子力機構）の研究の中にサイモン的な取組みに関係しそうな萌芽的挑戦例⁸⁾が見られました（表-8）。

たとえば、逆解析などによる手法開発、不確かさ評価や事前予測に着目した研究。それから機械学習による高度化。機械学習は今ではAIとの関係からあらためて非常に注目されています。そういう技術革新の方向性に沿い、今後、多くの若い人たちがますます興味を持ちそうな課題、そういう課題にぜひ継続的に挑戦してほしいと思います。

表-8 挑戦的課題に関連する萌芽的研究例
（原子力機構成果発表会資料、2019）

- ・ 多層覆土内の浸透流解析におけるマッチング方法の改善（逆解析手法の適用）
- ・ 幌延地域での水質観測データに基づく地下水中の酸化還元電位の不確かさ評価
- ・ 坑道掘削後の岩盤の透水性を事前に予測する（Mean Stress Indexの適用）
- ・ 微小な領域を分析する手法で炭酸塩鉱物の年代を測定
—地下水環境の変遷の推定に有効な年代測定手法—
- ・ 大量の鉱物粒子を迅速に分析・鑑定する
—山地の形成過程を解明するための新たな要素技術—
- ・ 地層処分場設計に関わる情報の一元化管理を目指して
—地層処分のための設計支援システムの開発—
- ・ 岩石亀裂中の核種移行メカニズムの解明を目指して
—亀裂性結晶質岩中の核種移行遅延に及ぼす微細表面変質層の影響—
- ・ 森林から溪流・河川へ放射性セシウムはどう動くか
—上流域での溶存態セシウム流出の現象理解を目指して—
- ・ 上空からの放射線測定値換算技術の高度化（機械学習による高度化）

国際協力については、例えば、原環センターがフランスとの共同研究で無線通信によるモニタリング技術について具体的な成果を出されています⁹⁾。これもサイモンの技術革新と大に関係します。

次に、不確かさへの取組みと密接に関連する安全基準や安全性能目標の設定についてです。私が原子力安全委員会（安全委員会）時代に、先ほど申し上げたフィンランド的な線量基準などを日本でもいかに考えるべきか、議論しました。当時、安全委員会事務局に外向していた原子力機構の舟木泰智さんらが精力的に国際的な考え方を調査し整理してくれました¹⁰⁾。それによると、各国ともいろいろな枠組みを採用し、線量基準や拘束値は10 μ Sv/年から100mSv/年に亘っていました。評価上想定すべき被ばく可能性、被ばくシナリオに応じて参照すべき線量値を工夫していました。

安全委員会では、それらを参考にしながら、日本として、不確かさをいかに扱うべきか、当時としては、極めて先進的な議論をした記憶が残っています。すなわち、不確かさについて、被ばくシナリオと線量評価との組み合わせとして捉え、いわば原子炉安全の深層防護の発想に倣った安全目標基準を提示しました。最大とともに平均についても線量評価し、多重バリアを深層防護の一形態とみなす、現在のフィンランド規制機関の考えと類似するところが少なくありません。もっとも、現在はいっそう進んだものになったと仄聞（そくぶん）しています。

表-9は、多重バリアシステムの安全機能上の役割に関する解析モデルで、フィンランドのような工学バリア強化のサイモン科学的意味を理解するのに有効です。やはり安全委員会時代に旧原子力安全基盤機構（JNES）の人たちの協力によるものです¹¹⁾。

青木広臣さんが中心になって開発されたモデルと聞いていますけれども、モデルによれば、工学的な防護機能は廃棄体からの溶出率と工学バリアからの移行率及び崩壊定数によって記述できます。処分場に存在する放射能インベントリに対して人工バリア・天然バ

表-9 放射性廃棄物処分施設の安全特性把握のための
4 因子公式(青木広臣, 鈴木俊一, 川上博人, JNES, 2002)

被ばく線量率 (Sv/y) : $D = Q \times E \times G \times B$:	
Q :	放射能インベントリ (Bq)
E :	人工バリア防護機能 (1/y)
G :	天然バリア防護機能 (1/y)
B :	線量換算係数 (Sv/Bq)
人工バリア防護機能 : $E = f$ (溶出率, 移行率, 崩壊定数)	
溶出率 : f (浸透水量, 廃棄体空隙率, 遅延係数, 腐食速度, 崩壊定数)	
移行率 : f (移流(透水係数), 拡散(拡散係数), 遅延(分配係数))	
残留放射能インベントリ変動 = 溶出項 + 移行項 + 崩壊項	
移行項 : 工学バリアからの放出フラックス (放出率)	
天然バリア防護機能 : $G = (1/2)^{T/t} \times$ 拡散補正	
T :	実効的移動時間 = 遅延係数 $\times$ 移動距離 / 実流速
t :	放射性崩壊半減期
拡散補正 :	拡散低減効果 $\times$ 拡散加速効果 $\times$ 放射性崩壊効果

リアの防護機能と線量換算係数をかけると、被ばく線量率が推定でき、放射能がどのくらい処分場に残っているかというインベントリの変化は、溶出、移行、崩壊という項の和になります。その内、工学バリアからの移行量は、フィンランドの規制でも1万年間の抑制機能を要求しているわけですが、そういう表し方が可能になります。本モデルによれば、移行率当りの放出率(放出率/移行率)は、溶出率/移行率の関数として、核種如何によらず表現できます。つまり、溶出率が支配的か、移行率が支配的かによって、放出率が大きく変わってくるという特徴があります。これは、いずれも基本的には工学バリアの設計に依存します。

また、最大被ばく線量は人工バリアの機能喪失時期に著しく依存することが明らかになります。つまり、どのくらい人工バリアの安全機能が持つように設計するかが重要になり、フィンランドの工学バリア強化による不確かさへの取組みの意味を理解できます。

以上、断片的ながら、サイモン科学的取組みに関する、これまでの国内における検討活動例を紹介しました。

「サイモンの科学」的挑戦：将来の方向性

最後に将来の方向性ですが、ちょっと唐突な話になることをお許しください。最近非常に話題になっている技術に、量子技術の応用と、いわゆるデータ・サイエンスがあります。

量子技術の応用については、イノベーション政策強化推進のための有識者会議が、既に中間報告¹²⁾「量子技術イノベーション」を出しています。その中で、生産性革命の実現、健康長寿社会の実現、安全安心社会の実現という3つの目指すべき社会像を掲げ、それぞれ、量子コンピューター、量子センサー、量子暗号が役に立つはずと位置付けています。そのような関係性は別にして、この内、量子センサーと量子コンピューティングは、放射性廃棄物処分の分野でも重要になるのではないかと考えていたところ、2019年10月、日経新聞に英国量子センター研究開発ハブ構想が紹介

されており、イギリスが量子技術の応用に非常に力を入れていることを知りました¹³⁾。ハブ構想では、グラビティーやグラビティーグラディエントに係る量子技術の応用分野として、資源探査や土木工学が挙げられています。

これはイギリスの話で悔しく思っていたところ、東京大学の香取秀俊先生が2015年に光格子時計を発明され、すでに日本発のアイデアが提示されていました¹⁴⁾。先にサイモンの航海時計の話をしていましたが、今や、この光格子時計が注目されており、水準測定が、地下に重い物質が詰まっている場所を探り当てる地下の状態推定ツールとしても有望視されます。原理は、レーザー冷却された原子を1つずつ捕獲して原子同士が相互作用を受けないようにすることのようです。

量子コンピューターは、実用化にはなお時間がかかると言われてはいますが、デジタルアニーラと違って、本当の量子コンピューターではないですけれども、専用のコアを超並列で処理し組み合わせて高速の演算を可能にする技術がすでに実用化されています。この組み合わせ最適化は、サイモンが言っている現実的最適化の考え方に近いわけで、非常に興味深いものがあります。

次にデータ・サイエンスですが、これも2019年11月の日経新聞でたまたま目にした例があります。JFE製鉄所高炉の安全運転、運転の効率化に、AI、データ・サイエンスが使われている由。センサーで収集したデータと物理モデルからリアルタイムで高炉の運転状態を推定し最適化フィードバックをかける。これはもう実際に全JFE製鉄所で実用化が始まっています¹⁵⁾。海外ですが、原子力発電所の安全運転への応用例も報告されています。日本ではいろいろな問題が起きるたびに、ヒューマンエラーなど、人的要因にもとづくトラブルがしばしば発生します。このような人的要因にもとづく運転トラブルを出来るだけ少なくし運転の安全性と効率性を向上させる試み、運転状態の予兆診断が、エクセロン社のほうで実施されています。同社が所有している発電所では、復水ポンプやタービン、給水ポンプなどの回転機器、そこでの潤滑油温度を診ていると、予兆診断ができる。これも実用化されています¹⁶⁾。

これらは、いずれも、状態の不確かさに係る問題の解決を目指しており、サイモンの取組みと言っているでしょう。AIなどの先進的IT技術は原子力や製鉄業など、重厚長大な産業とは無縁と思われる節がありますが、そんなことはありません。

このデータ・サイエンスという言葉が最近盛んに使われており調べてみたところ、たとえばカルフォルニア大学バークレー校がそのための研究教育プログラムを既に提供していました¹⁷⁾。図-6はそれを仮訳したものです。

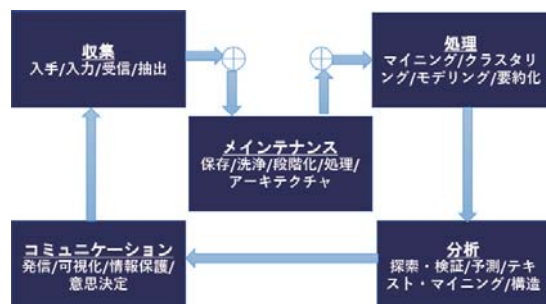


図-6 技術革新の方向性：データ・サイエンス

まずデータを収集し、これをメンテナンスし、さらに適切に処理し分析して、その結果をいろいろな形のコミュニケーションに利用します。こういうシステム全体をデータ・サイエンスとして捉えようという発想です。日本でも、東京大学はじめ幾つかの大学が、専門の学部や研究教育センターなどを新設しており、若い学生や社会人に非常に人気があると聞いています。地層処分に欠かせない長期的モニタリングの空間軸と時間軸に亘った不確かさを考慮すると、このデータ・サイエンス的視点が不可欠であり、多様な人材の持続的糾合が切に望まれます。

放射性廃棄物処分は、長期的事業であり、将来の技術革新の流れと無関係ではあり得ません。処分技術には、長期的安全性評価に伴う不確かさという本源的課題があり、社会的不安の根源もその点と無関係ではありません。そのような立場からすると、サイモン科学による技術革新にもとづく不確かさへの挑戦が不可欠であり、量子技術やデータ・サイエンスに代表されるような革新的技術の導入に積極的に取り組むことが肝要であるように思います。

おわりに

放射性廃棄物処分問題、就中（なかんずく）、高レベル放射性処分問題は、原子力安全に係る課題のひとつですが、原子炉安全とは異質の側面を有しつつ、原子炉事故リスク評価と同様に、軽水炉の生みの親、ワインバーグによる問題提起「科学的領分を超える難題」と大いに関連しています。

原子力安全問題の起源である高レベル放射性物質を産む原子炉とその最終処分に係る地層処分とが、いずれもワインバーグの問題提起に関係することは、原子力の同問題との宿命性を示唆しています。この難問の解決なくして、原子力が、少なくとも、人類文明史の一時期、エネルギー源として有用であったと歴史的に評価されることは難しい。

しかし、ワインバーグ自身が指摘するように、この問題は実は原子力分野だけに留まりません。多くの科学技術が社会との関係において避けて通れない課題でもあります。したがって、その解決策の発見には、科学技術に広く跨る革新的考え方に求める必要があるかもしれません。ここでは、その一つとして、ハーバート・サイモンの提唱した「人工物の科学」を紹介しました。原子力は、その黎明期の20世紀半ばに、科学技術の進歩を先導する役割を担いました。21世紀には、古典的科学の領分を超える難題に係る科学、たとえばサイモン科学によって、原子力が新たな技術革新を牽引することを願って已みません。

参考文献

- 1) Peter Swift (2017); <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/11/f46/Peter%20Swift%20PRACoP%202017%20final.pdf>
- 2) OECD/NEA (2017), "Communication on the Safety Case of a Deep Geological Repository"
- 3) Alvin Weinberg (1972), "Science and Trans-Science", *Minerva*10(2):209-222
- 4) Hebert Simon (1996), "The Sciences of the Artificial", 3rd ed., The MIT Press
- 5) National Research Council (2003), "One Step at a Time", The National Academies Press
- 6) Southwest Research and Information Center: <http://www.sric.org/nuclear/eeg.php>
- 7) STUK (2015); <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/127160/stuk-b197.pdf>
- 8) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、第14回原子力機構報告会、2019年11月12日
- 9) Modern2020 (2019); www.modern2020.eu/fileadmin/Final_Conference/Presentations/Day_2/Session_6/1_Presentation_Session_6_Schroeder_Modern2020_Presentation_WP3.2_NRG_v7.pdf
- 10) 原子力安全委員会 (2000); <http://warp.dandl.go.jp/infondljp/pid/9483636/www.nsr.go.jp/archive/nsc/senmon/shidai/haishi/haishi031/siryo2.pdf>
- 11) 原子力安全基盤機構 (2002); <http://warp.dandl.go.jp/infondljp/pid/10207746/www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000123989.pdf>
- 12) 統合イノベーション推進会議 (2019); https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/pdf/ryoushi2019_hokoku_honbun.pdf
- 13) UK Quantum Technology Hub (2019); <https://www.quantumsensors.org/>
- 14) 東京大学 (2015); https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/features/f_00063.html
- 15) JFE Steel (2019); <https://www.jfe-steel.co.jp/release/2019/11/191105.html>
- 16) AVEVA (2019); https://sw.aveva.com/hubfs/Campaign%20Assets/Power/IndSol_SE-LIO-PredictiveAssetMonitoringNuclear_04-17.pdf
- 17) UC Berkeley (2019); <https://datascience.berkeley.edu/about/what-is-data-science/>

（本稿は、2019年12月6日に開催した2019年度原環センター研究発表会の特別講演「放射性廃棄物処分－不確かさへの挑戦」の内容を再構成したものです。）

編集発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター
〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号（ニチレイ明石町ビル12階）
TEL 03-6264-2111（代表） FAX 03-5550-9116
ホームページ <https://www.rwmc.or.jp/>