

デジタルツインに支えられる性能照査型放射性廃棄物地層処分事業

飯塚 敦*1

本稿は、原子力学会バックエンド部会夏期セミナー（2025年8月28日）における講演概要である。WTO/TBT協定により、我が国は性能照査型設計に移行した。従来から設計規準や設計指針が整備されていた分野では、「見なし規定」によって、実質的に従来の設計法を変えることはなかった。しかし、「見なし規定」を与えてくれる設計規準も設計指針もなく、実施工の経験もない放射性廃棄物地層処分分野では、まさに性能照査型設計法に依らねばならない。このとき、性能を満足していることを示す照査技術が重要となる。多種な照査が求められる場合、それらを統合的に可視化して照査を強力に支援する技術がデータ駆動型デジタルツインである。対象のデータ取得から照査のための多様なシミュレーションを自動化に支えながら一気通貫に行えるシステムとして整備されつつある。施工中の計測データもデジタルツインに取り込めば、シミュレーションの結果との比較も容易となる。照査技術の良し悪しの評価も容易となろう。データ駆動型デジタルツインに支援された優れた照査技術を有すれば、安全確保の向上、コストの縮減にも繋げていける。国際競争力の獲得にもつながる。

Keywords: 性能照査型設計, 照査技術, データ駆動型デジタルツイン, コスト縮減, 国際競争力

This paper is a summary of a presentation given at the Japan Nuclear Society Backend Subcommittee Summer Seminar (August 28, 2025). Under the WTO/TBT Agreement, Japan transitioned to performance-based design. In fields where design criteria and guidelines were already established, "deemed provisions" meant that the conventional design methods remained essentially unchanged. However, in the field of geological disposal of radioactive waste—where no design criteria or guidelines exist to grant such deemed provisions, and no construction experience is available—performance-based design is essential. Here, verification technologies demonstrating performance satisfaction become critical. When multiple verifications are required, data-driven digital twin emerges as technology that integrate and visualize these verifications, providing powerful support. Systems are being developed that enable end-to-end processes, supported by automation, from acquiring target data to performing diverse simulations for verification. Incorporating measurement data collected during construction into the digital twin also facilitates easy comparison with simulation results. Evaluating the quality of verification techniques will also become easier. Possessing excellent verification techniques supported by data-driven digital twins can lead to enhanced safety assurance and cost reduction. It also contributes to gaining international competitiveness..

Keywords: Performance-based design, Verification techniques, Data-driven digital twin, Cost reduction, International competitiveness

1 はじめに

放射性廃棄物埋設における安全確保の議論の中で、性能照査の重要性が指摘されている[1]。フィンランドなどの北欧の安全確保の考え方を紹介しながら、性能設計（性能照査型設計）の地層処分事業における階層的枠組みを解説している。性能設計は、WTO/TBT協定のArticle2.8[2]に規定されている国際標準であるが、従来からの優れた設計規準や設計指針の仕様規定に慣れ親しんだ我が国では、「見なし規定」に助けられ、本格的な照査を伴う性能設計が定着していない。しかしながら、放射性廃棄物の地層処分事業においては、未だ地層処分の経験もなく、頼るべき「見なし規定」もない。よって、本格的な照査を伴う性能設計による事業の推進が期待される。

なぜ性能設計による事業の推進に期待するのか。ひとつは、そのときの最新技術の採用が容易である。次いで、創意工夫により経済的、合理的な設計を行える。さらに、より良い設計を行えば、競争力を獲得できるからである。このとき、要求されている性能を科学的に客観的に説明できる照査技術が求められる。

設計規準や設計指針に頼る「マニュアル化」された設計作業ではなく、ひとつひとつ科学的で合理性のある根拠をエビデンスとして提示しなければならない性能設計は、一見、ハードルが高い作業と思えるかもしれない。しかし技

Performance-Based Radioactive Waste Geological Disposal Project Supported by Digital Twins, by Atsushi IIZUKA (iizuka@kobe-u.ac.jp)

*1 中央大学研究開発機構教授

立命館大学総合科学技術研究機構 客員教授、神戸大学名誉教授
Research and Development Initiative, Chuo University

〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27

本稿は、日本原子力学会バックエンド 2025 年度夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

術者は古来から、この世に未だないものを造り出す創造の担い手であった。地層処分事業が未来へつなげる事業であるならば、性能設計におけるチャレンジは必須であると信じる。

性能設計に基づく、より良い設計は競争力をもたらす。北欧の封じ込めに適した、亀裂の少ない硬い岩盤に比べて、亀裂や断層が散在する付加体の集積という我が国の地盤条件の中で揉まれた照査技術は、確実に国際競争力を持てる。国内にとどまらず、海外の放射性廃棄物の地層処分事業に貢献できる。国内事業コストの回収も可能となろう。

繰り返しになるが、このような展望を実現可能とするのが優れた照査技術の獲得である。それを積極的に支援できるのが、データ駆動型のデジタルツイン技術であると、著者は考えている。

2 性能照査型としての性能設計

性能設計とは、「構造物をその仕様によってではなく、その社会的に要求される性能から規定し設計する」設計の考え方である。性能明示型設計と性能照査型設計があると指摘されているが[3]、本稿では、性能設計とは性能照査型設計を指すものとする。本城[1]は、従来からの設計規準や設計指針を包含できるように、性能設計の階層構造を示している（図1）。従来からの仕様規定による設計規準や設計指針は、「見なし規定」の導入によって、性能設計の階層的枠組みにうまく取り込まれている。「見なし規定」に頼れない放射性廃棄物の地層処分事業においては、この図のアプローチ A を探ることになる。このとき、図に示される包括設計コードの策定が重要となる。我が国における包括設計

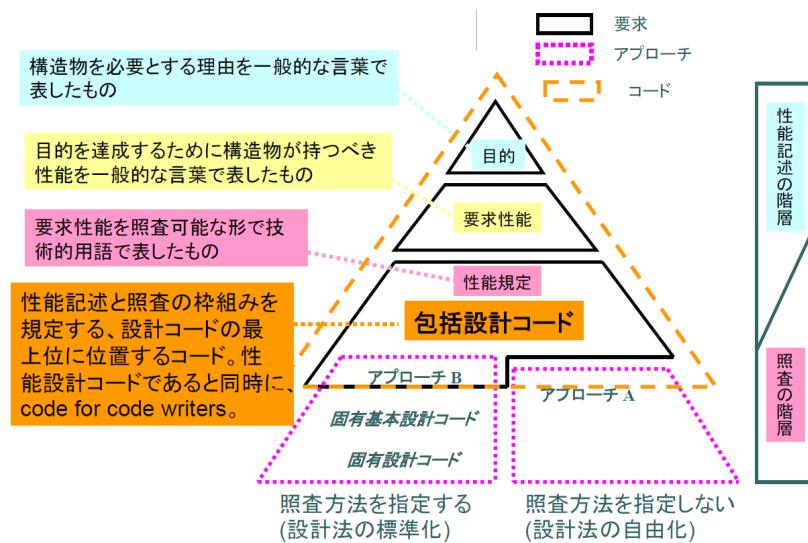


図1 性能設計の階層[4]

コードの先達としては、「性能設計概念に基づいた構造物設計コード作成のための原則・指針と用語 (code PLATFORM ver.1)」[5]や「性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則 (JGS4001-2004, 地盤コード 21)」[6]などがあり、海外においては、ISO2394 や Eurocode0 がそれにあたろう。放射性廃棄物地層処分事業においても、処分施設に対する包括設計コードの策定が急がれる。

この包括設計コードの下で行われた設計が要求性能を満足しているかどうか、それを証明する行為が照査である。科学的で合理性があり、説明力のある照査が設計の良否をわかる。すなわち、優れた照査技術を得ることが、優れた設計につながるのである。一般には、設計段階においては、数理モデルによる解析が用いられると考えられる。想定される物理・化学現象によって、多様な解析が求められる。しかも、それらの解析の科学的根拠と妥当性、解析結果の説明力が求められる。

しかし、地層処分施設のような地盤構造物の場合、さらなる留意が求められる。地盤材料が持つ顕著な非可逆的な力学特性に起因して、施工のやり方によって、構造物の品質が変化するからである。すなわち、施工という地盤への力学的作用の差異によって、出来上がりの品質が変化するのである。品質の変化は性能の変化を意味する。地盤構造物の場合、施工による性能への影響も照査の対象となるのである。性能設計に基づく EU 諸国の Eurocode の場合、地盤構造物に対しては、OM (Observational Method : 観測化施工) の併用が定着している。したがって、照査技術には、計測技術、センサリング技術も含められることになる。

多様な要素技術からなる照査を、どのように統合し、照査結果を合理的に把握すればよいのであろうか。それを助ける技術が、データ駆動型デジタルツインであると、著者は考えている。それは、データ駆動型デジタルツインを構築することによって、照査技術の能力、良否を判断できることにもつながる。

3 データ駆動型デジタルツイン

デジタルツイン (DT) とは、コンピュータの仮想空間内

に構築される「双子」のことである。GIS ベースの 3 次元可視化にとどまらず、多種多様なシミュレーションの実施も、現在では可能となっている。仮想空間内の「双子」の振舞いを知って、現実にある実物の挙動を予測するのである。

我が国では、地形データや地質データなどの調査データや気象データや物流データを含む広範囲の各種のインフラデータがデジタル情報として利用可能になってきている。国土地理院や防災科研などの国研のみならず、地方自治体でもインフラデータのクラウド化が進んでいる。それらをプラットフォームとして集約している代表格が国土交通データプラットホーム (国交 DPF, 図 2) [7]である。デジタルツイン構築のデータソースはおおむね整ってきていると考えられる。解像度を高めたければ、必要に応じて追加の調査を行い、データの稠密性を高めればよい。

このようにデータの提供環境は整ってきているとしても、問題は、シミュレーションまで行うデジタルツイン構築に一体どれだけの人工や工数がかかるのかということである。これを解決するカギが自動データ変換・データ統合技術である。多種多様な、書式や様式もまちまちのデータから、必要な情報を自動で抽出し、読み取る。そして、それらを必要な形式に自動で統合できる技術である。

このような技術として、著者が期待しているのが神戸ポートアイランドにある理化学研究所で開発された DPP (Data Processing Platform) [8] [9]である。神戸丸ごと、地盤も含めた約 42 万棟の建物を仮想空間内に再現し、地震によって生じる被害の様子を示した「神戸丸ごとシミュレーション」[10]を実現できた基幹技術であった。現在、SIP 第 3 期の中で[11] [12]、多様なデータの変換から統合までの適用拡大が図られている。各種シミュレーションに供される入力データの自動構築までを守備範囲としている。このような技術によって、デジタルツインは多大な工数や人工をかけることなく自動構築されようとしている。もちろん、自動構築の過程では、適切に技術者の専門知の注入を求めるべきことは付記しておきたい。

「双子」の 3 次元可視化にとどまらず、データの取得か

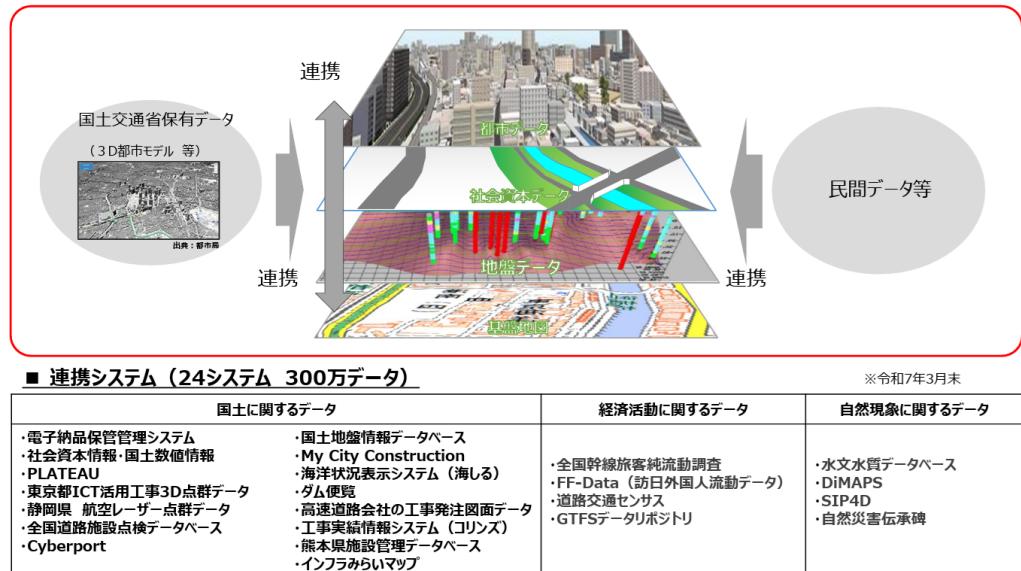


図2 クラウド化されたインフラデータの一例：国土交通データプラットフォーム[7]

ら各種シミュレーションまでを一気通貫で実現するのが、ここで言うデータ駆動型のデジタルツインである。

地層処分分野で開発が進められているT-H-M-C（熱-水-力学-化学）連成解析などは、地層処分施設やその構成要素の能力を評価するのに用いられるシミュレーション技術であるが、性能設計の枠組みの中では、性能の照査技術ともなる。データ駆動型デジタルツインを構築しておけば、地層処分施設建設前に、仮想空間内の「双子」のいろいろな性能を各種のシミュレーションによって知ることができる。しかも複数の物理現象の重畳に対しても、個別結果の単純な重ね合わせではなく、媒介変数を共有した弱連成解析の実施が容易となる。設計にとどまらず、施工プロセスの決定や計測の最適化にも使える。リスクの洗い出しやトータル費用コストの算定にも威力を発揮する。3次元可視化もデータ駆動型デジタルツインの出口の一つであるから、各

種シミュレーションの結果や連成結果の説明力も増す。施工途中であれば、計測結果もシミュレーション結果と比較しながら可視化できる。以上、データ駆動型デジタルツインは、設計のみならず施工時の計測管理を高次元で支援できる技術なのである（図3）。さらに、地層処分施設の供用後も、自然条件や社会条件の変化に対して、仮想空間内に構築されたデータ駆動型のデジタルツインに支えられて、地層処分施設の性能変化の評価も可能となろう。

では、残されている技術的課題はなにか。計算機環境は問題にならない。GPGPUの高性能化が計算能力を著しく向上させているし、今やスーパーコンピュータとて利用が広く開放されており、クラウド利用も進んでいる。各種のシミュレーション技術の能力向上もさることながら、そのシミュレーション技術のV&V（Verification & Validation）が正しく行われているかが重要である。とくに、放射性廃棄

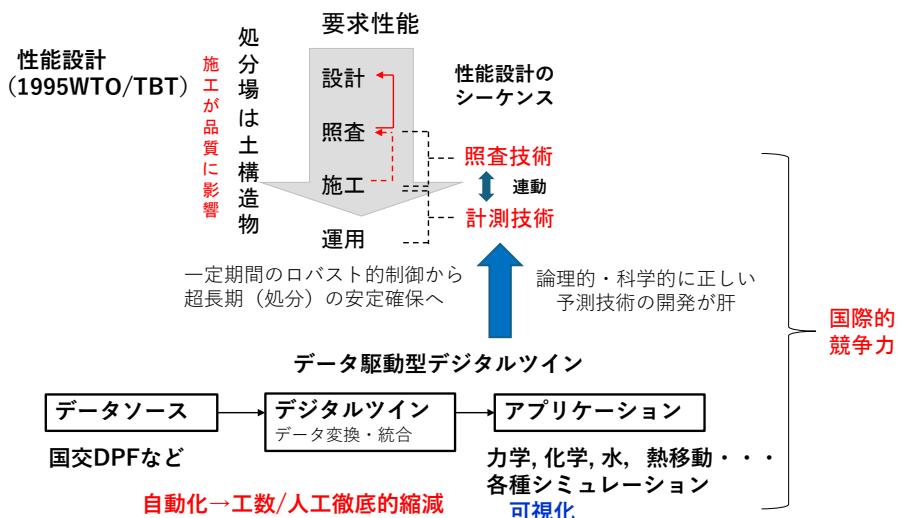


図3 性能照査型設計を支えるデータ駆動型デジタルツイン

物地層処分事業においては、入力データが持つ不可避的な曖昧さ、シミュレーションが有する誤差を念頭に、シミュレーション結果が持つ不確実性の把握が重要となる。この不確実性を狭めることができればできるほど、安全確保とコスト縮減につながる。よって、この検討と関連する技術開発に一層の投資を行っても良い。結果的に競争力を得ることに繋がっているのだから、投資に対するリターンは十分に期待できるはずと考える。

4 おわりに

我が国の原子力発電所は、稼働中が 14 基、設置変更許可申請中が 4 期、審査中が 8 期ある。この他に廃炉が 24 基ある[13]。これらの原子力発電所から排出される核燃料廃棄物はリサイクル（プルサーマル）が構想されており、そのもとで処分すべき使用済み燃料の量が概算されている。それによると地層処分に要する事業費は約 3.5 兆円と見積もられている[14]。プルサーマルで廃棄物の体積は 1/3 から 1/4 となると仮定すると、ワанс・スルー方式（リサイクルを考えない）に換算すると、全 50 基は約 13~16 基分に相当するから、処分費用は、1 基あたり約 2300 万円に見積もれる。世界の稼働中の原子力発電所は 436 基[15]であるから、核燃料廃棄物処分の市場は、このように粗く見積もっても、ざっと約 100 兆円規模と概算される。

原子力発電所の多くは米国、フランス、中国などにあって、先進国に偏っているものの、東南アジアや中近東だけでも、建設計画中を含めると 140 基を超えるようである。これらの国々は、いずれ放射性廃棄物の処分に頭を悩ませるに違いない。我が国の国際貢献を期待できる。付加体という不利な地質条件を克服して成し遂げられる地層処分技術を有している。しかもデータ駆動型デジタルツイン技術を有しており、それぞれの国の地形的、地層的特性を考慮した性能設計が行える。北欧米に比べて、際立った競争力を持つに違いない。この国際貢献で、国内の処分コストを取り戻せばよい。

上記は「絵にかいた餅」の感を否めない。しかし、地層処分事業に求められる技術の開発に、国内の民間企業が R&D 投資をするかと考えると、市場が小さすぎるよう感じる。民間企業の R&D 投資を促し、将来に向けてより良い技術開発が定着できるように、海外市場への展開も視野に入れるべきであろう。ひいてはそれが、地層処分のさらなる安全確保につながるからである。

参考文献

- [1] 田中知: 放射性廃棄物埋設における安全確保の考え方-世界から学ぶ性能照査の重要性-. 原環センタートピックス 2025.4. NO.153, 原環センター, pp.5-16, (2025).
- [2] Article2.8, Agreement on Technical Barriers to Trade. World Trade Organization (1995).
https://www.wto.org/english/docs_e/legal_e/tbt_e.htm (accessed 2025-10-1).
- [3] 福井二郎: 道路橋基礎の性能設計. 基礎工 8 月号, 株式会社総合土木研究所 (2001).
- [4] 本城勇介, 性能設計と信頼性設計. 第 22 回中部地盤工学シンポジウム, 特別講演 (2010).
- [5] 土木学会 包括設計コード策定基礎調査委員会: 包括設計コード（案）性能設計概念に基づいた構造物設計コード作成のための原則・指針と用語. 第 1 版, (ver.1 code PLATFORM ver.1) (2003).
https://www.jsce.or.jp/committee/acecc/code/CODE_PLA_TFORM_ver.1_j.pdf (accessed 2025-10-1).
- [6] 地盤工学会基準部: 性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則. 地盤工学会誌, Vol.57, No.5 (616), pp.38-39 (2009).
- [7] 国土交通省: 国土交通データプラットフォーム.
https://www.mlit.go.jp/tec/tec Tk_000066.html (accessed 2025-10-1).
国土交通データプラットフォームの新バージョンをリリース、～データ連携の拡充、利用者向け支援情報の充実～. 参考資料 (2005).
https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08 hh_001190.htm (accessed 2025-10-1).
- [8] 大石哲: 多様な情報からデジタルツインを自動作成するデータ処理プラットフォーム. (2022_riken_002), 2022 年度新技術説明会資料, 理化学研究所 (2022).
- [9] Otani.H., Chen.J., Fujita.K. and Hori,M.: A Data Integration Framework for Urban Area Disaster Simulations. 6ICCM in SD&EE, KEYNOTE (2017).
- [10] Youtube: 防災・減災へ都市丸ごと統合シミュレーション (完全版). 理化学研究所 (2025).
<https://www.youtube.com/watch?v=DqeEgG52AZY> (accessed 2025-10-1).
- [11] SIP 第 3 期戦略的イノベーション創造プログラム, スマート防災ネットワークの構築. サブ課題 E-1-1 (2025).
<https://www.nied-sip3.bosai.go.jp/research/detail-e.html> (accessed 2025-10-1).
- [12] SIP 第 3 期戦略的イノベーション創造プログラム, スマートインフラマネジメントシステムの構築. サブ課題 D (2025).
https://www.pwri.go.jp/jpn/research/sip/sub-assignment_d.html (accessed 2025-10-1).
- [13] 資源エネルギー庁: 日本の原子力発電所の状況. (2025).
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/ (accessed 2025-10-1).
- [14] 原子力発電環境整備機構 (NUMO) : 地層処分の費用について. (2025).
<https://www.numo.or.jp/tsumitate/> (accessed 2025-10-1).
- [15] 一般社団法人 日本原子力産業協会: 世界の原子力発電開発の動向. (2025)
<https://www.jaif.or.jp/inf/wnpp/> (accessed 2025-10-1).