

高レベル放射性廃棄物地層処分における性能設計

飯塚敦*1

本稿は、2020年8月26日に開催されたバックエンド夏期セミナーの講演内容をまとめたものである。性能照査型設計、すなわち性能設計の紹介に始まり、性能照査型設計法が生まれた背景とそれがもたらす光と影を論じた。性能照査型設計法では性能を客観的に照査する照査技術が鍵を握っており、優れた照査技術を有する者が競争力を持つことを説明した。地層処分分野においても、この性能照査型設計法の整備は必須であり、今後の持続的発展のためには、決して「みなし規定」による、従来からの仕様設計法の衣替えで済ませてはならないことを論じた。さらに、性能照査型設計法は当然万能ではなく、土構造物のような荷重履歴依存性を顕著に有する構造形式に対しては、特別の手当てが必要なことも説明した。しかし地層処分においても、このような土構造物が存在するが、その特殊性を逆手にとって、最新のICT技術と融合させれば、次世代型の性能照査技術となり得ることを論じた。最後に、我が国の地層処分事業の市場規模に話題を移し、海外展開を行い市場規模の拡大を図らねば、とても民間建設会社による積極的な技術開発投資が叶わないことを指摘した。我が国の地層処分技術の海外展開を図るためには、まずは技術要件を性能照査型設計法としてまとめることが不可欠であり、それによって始めて、事業を支える技術の持続的発展を促すことができる。

Keywords: 高レベル放射性廃棄物, 地層処分, 性能照査型設計法, 性能照査技術

This paper is a summary of the talks in the back-end summer seminar held on August 26, 2020. This paper begins with the introduction to performance-based design, and then discusses the background to the emergence of the performance-based design method and the light and shadow it brings. It is explained that the key is the verification technique to verify the performance objectively, and the person who has excellent verification technique has a competitive edge. It is also argued that the performance-based design method is indispensable in the field of geological disposal, and that the design method should not be replaced by the conventional design-by-specification method which is clothed in the garb of the "Deemed Provision" for sustainable development in the future. It is also explained that the performance-based design method is not a panacea for all types of structures, and special care is needed for structural forms with significant loading history dependence, such as soil structures. However, such structures also exist in the case of geological disposal of radioactive waste, and it is argued that a performance verification technique for the next generation can be developed if the characteristics of the soil structure are integrated with the latest ICT technology. Finally, the paper moves on to the market scale of geological disposal projects in Japan, and points out that the private sector will not be able to invest aggressively in technological development unless the market scale is expanded overseas. In order to promote the overseas deployment of Japanese geological disposal technology, it is essential to summarize the technical requirements as a performance-based design method, which can promote the sustainable development of the technology to support the project.

Keywords: High-level radioactive waste, Geological disposal, Performance-based design method, Performance verification technique

1 はじめに

我が国は、1995年にWTO/TBT協定に調印した。この協定のArticle2の2.8に性能設計の規定がある。すなわち、2.8 Wherever appropriate, Members shall specify technical regulations based on product requirements in terms of performance rather than design or descriptive characteristicsである。仕様から性能への規定の転換であった。この協定に基づき、従来の設計法の性能規定化が行われた。そのほとんどが所謂「みなし規定」への変更であって、設計者にとっては「従来通り」が多くにまかり通るので、苦労は増さないが、我が国の設計法そのものの国際競争力は、特に東南アジアにおいて、失っていった。それは結局、我が国の建設業界の海外展開を難しくしていった。設計法を抑えた提案型のアプローチをとれないことから、中国や韓国の建設業界との価格競争に陥ってしまったように感じる。

高レベル放射性廃棄物の大深度地下への地層処分において、処分場建設のための設計法の整備が進んでいる。超長期の安全性を担保した設計が求められている。ここでも性能設計化が図られる。ただし、高度な研究開発が伴う分野であるため、国内の地層処分事業だけから研究開発費を回

収することは難しいであろう。「みなし規定」といった国内専用の性能設計化ではなく、国際競争力をもって海外でも通用する性能設計化なくしては、地層処分事業の成功は難しいと思われる。このあたりの事情を本稿では論じてみたい。

2 性能設計

性能設計とは「構造物に要求する性能を明示し、その性能を設計供用期間に構造物が保持することを客観的に確認する」設計法である(土木学会)。従来の仕様設計のように、

性能設計 地盤コード21

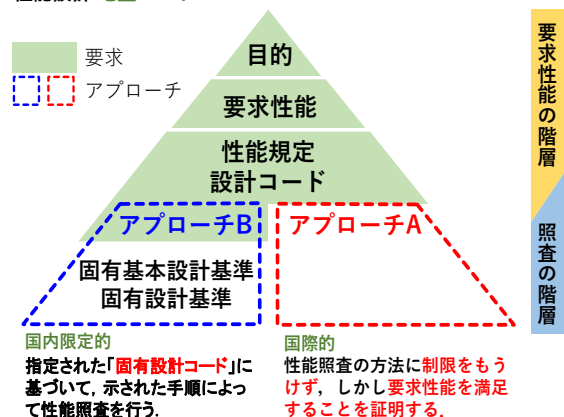


Fig.1 性能設計の階層構造

Performance-based design for the geological disposal of high-level radioactive waste, by Atsushi IIZUKA (iizuka@kobe-u.ac.jp)

*1 神戸大学 都市安全研究センター

Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University

〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第36回バックエンド夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

「仕様」にその構造物が具備すべき性能を暗黙に担保するアプローチとは異なり、構造物の目的を明らかにし、それを満足するために構造物が保持しなければならない要求性能を規定する。次いで、実際の設計がその要求性能を満足しているかの性能照査を行えるように、要求性能を具体的に記述（設計コード）しなければならないという階層的構造となっている。従って、要求性能を満足する仕様の選択には任意性があり、設計者の差配に自由度が高くなる。しかし同時に、その仕様が正しく要求性能を満足しているかを客観的に照査できねばならない。この「自由度」と「照査技術」がイノベーションをもたらす、競争力の源泉となるのである。例として、地盤工学会が示した地盤コード21を Fig.1 に示す。性能規定において、2つのアプローチが示されている。アプローチ A が本来の性能照査型の設計法（性能設計法）であるが、我が国の事情を反映して、「みなし規定」も含めてまとめている（アプローチ B）。「みなし規定」においては、示された手順によって性能照査を行うのであるから、仕様の選択に自由度は得られず、そもそも競争力を得るための性能照査技術そのものの刷新や更新は望むこともできない。競争力のひとつの指標となり得る生産性向上に積極的には寄与しない。国内専用のガラパゴス化との批判の所以である。しかし、性能設計が技術の進歩を後押しする「大義ある黒船」かと問われれば、どうもそうではない面もありそうである。

3 EU (European Union) の国際戦略

欧州における EU 統合に伴って、統一市場を形成し流通を自由にするため、製品等の技術的な要件を統一することが必要になった。しかし EU 加盟各国の思惑や事情もあり、その実現は難しく、結局、基本的な要求性能を CEN（欧州標準化委員会）において定め、それに適合する製品等は EU 内を自由に流通させることができるとした。ここに性能設計の源流を見ることができる。建設構造物に対しても同様であり、EU 加盟各国独自に定められていた設計基準に代わるものとして、EU 内で統一的に用いる性能照査型の Eurocodes が生まれた。特定の国の設計基準、すなわち仕様を優先することなく、適切な照査によって要求性能を満足していることが客観的に示されれば良しとする体系化は、EU 加盟国バラバラの設計基準を客観的な照査を担保に包含するものとなっている。EU 内での統一的な設計体系である Eurocodes は、特定の国の仕様に依存しない普遍性を具備したのである。結果的にそうなったか、意図的にそうしたかは分からないが、要求性能を満足すれば個別の仕様（設計基準）に縛られない、この Eurocodes の普遍性の具備は、先進技術の取り込みによる新たな仕様を積極的に受け入れることができ、生産性や品質向上を後押しするイノベーションを惹起する大義を獲得した。その後、性能照査型の設計体系に関わる種々の技術要件の ISO 化をはかることにより、デジュールもしくはデファクトによる国際的スタンダードとして、EU の海外展開の先兵となっていく。大義を後ろ盾に、EU 域内に留まらず、海外でも Eurocodes の定着をはかるのである。特に、その国に求められる固有の

仕様が未だ定まらない中、独占的な経済侵略を警戒するため、ある特定の国の仕様をそのまま受け入れるわけにもいかず、しかし経済的に効率よく社会基盤を整備しなければならない開発途上国にとっては、Eurocodes は願ってもない設計体系となるのである。

しかしここで気付かねばならない。大義に裏打ちされた強かな戦略を。そして、照査技術に関してである。性能照査型の設計体系、すなわち性能設計では、設計が照査技術と一体となっており、優れた照査技術を有する者が競争力を持つ。ここで「優れた」とは、もちろん科学的に優れていることが本意だが、「客観的に照査」できねばならないことから、その結果に広く合意できるお墨付きと合理性を持つこととも解釈できる。ISO 化を通しての照査技術のデジュールもしくはデファクト化は客観性を謳う合意能力獲得のための EU の国際戦略と言っても良いであろう。

地層処分の分野において、EU を中心に多くの国際プロジェクトが実施されている。著者の専門は地盤工学だが、その縁で少しでも関わらせてもらっているプロジェクトに、BEACON（Bentonite Mechanical Evolution）や CEBAMA（Cement-based materials, properties, evolution, barrier functions）などがある。これらのプロジェクトを大胆に俯瞰すれば、性能照査技術の開発とその標準化と言えよう。我が国の技術者や研究者が少なからず参画していると思われるが、彼らに期待されている役割は、照査技術そのものの開発というよりも、EU が有する照査技術の V&V（Verification and Validation, 検証と妥当性確認）もしくは改良・高度化であると言え、言い過ぎであろうか。EU は、地層処分の分野も性能照査型の設計体系による環境整備を進め、これによって、EU 以外の国々の地層処分手業への展開をはかろうとしていると考えられる。自国の地層処分手業への技術開発投資を回収する市場として見据えているのである。この時、性能照査型の設計体系は、大義を背景にした普遍性と国際スタンダードのお墨付きを持つために、海外展開には絶好の体系となることは先に述べた。しかも、照査技術を握れば、クライアント側について事業を実現できるため、受注者として価格競争に陥る心配も生じない。

以上、「はじめに」に紹介した WTO/TBT 協定の Article2.8 の条文は、EU のためにあるのかと思ってしまう。実に見事な戦略であろう。ただし、地層処分の分野においては、EU 内において、北欧勢と大陸勢との間に技術的イニシアティブの取り合いとも思える不協和があるようで、そのために、緩衝材の性能評価について、実験的手法であれ、解析的手法であれ、何であれ、EU としての統一的な照査技術の確立には至っていないようである。社会基盤整備で Eurocodes が示した圧倒的な強さはまだ見られない。我が国にとっては、後塵を拝さないための猶予があたえられているのかもしれない。

4 土構造物の特殊性

性能設計では、構造物に対する「要求性能の提示」に始まり、「設計」、「性能の照査」、「施工」と続き、その構造物の「引き渡し」の順序となる。「設計」の後、「施工」に入

る前に、「性能の照査」がある。しかし、土構造物の場合、同じ施工を行うのだが、その施工手順の違いで土構造物の性能が変化してしまう。力学的には、塑性変形が支配的となるため、荷重履歴の違いが応力や変形に差異をもたらすと説明される。そのため、性能の照査に、施工という载荷シナリオを考慮した将来予測が求められる。求められる信頼度を満足するように、この将来予測をどのようにして行うかが重要となる。古くからわが国でも情報化施工と呼ばれているが、施工中の土構造物の挙動を計測し、それを用いて入力パラメータのキャリブレーションを逐一行うことによって、将来予測の精度と信頼性を高める OM (Observational Method) の利用が EU でも推奨されている。こうなると、施工に伴って詳細設計が変更されること（設計変更）が前提となり、工期や工事費にも影響するため、将来予測を含めた照査技術の選択がより重要となる。土構造物の挙動を、信頼をもって、より良く説明できる照査技術を有する者がますます競争力を有することになる。

5 地層処分における次世代型照査技術とその先

地層処分場においても、ベントナイト緩衝材や埋め戻し土、締固め土などは土構造物の一種であるから、地盤材料固有の荷重履歴依存性から抜け出すことはできない。その土構造物の性能や品質の変化を知ろうとする将来予測に、OM によるキャリブレーションを用いたとしても、地層処分の場合、通常の社会基盤構造物が未だ経験したことのない超長期にわたる予測が求められる。超長期に比べれば一瞬と言えそうな短期間の計測によって、信頼できる精度を獲得できるまでキャリブレーションを行えるか、誠に心許ない。方法論の刷新が求められる。

不確実性を確率密度関数で表し、統計解析を行うという信頼性解析がある。これを進展目覚ましい ICT 技術の環境下で紐解けば、多数シナリオによるシミュレーションと言えるだろう。シミュレータの V&V を済ましておくのが前提となるが、スーパーコンピュータや GPGPU による大規模で高解像度の高速計算が手軽に実施可能となりつつある現在、物理化学的な挙動の揺らぎや分岐、その物理化学的挙動を記述するのに必要な入力パラメータの揺らぎなどの不確実性の成因を有らん限り洗い出し、すべてのシナリオに対して Multi-physics シミュレーションを実施する。この多数シナリオに対するシミュレーションの実施プロセスは、当然、自動化されるが、そうすると出力は、大数の法則により、確率変数として得られる。ロバスト制御の考え方に従えば、超長期に及ぶリスクを最小化する設計や施工を可能とするであろう。

このような大規模で高解像度の高速計算を利用した多数シナリオに対する Multi-physics シミュレーション技術は、次世代型の照査技術として整備されても良い。極めて強力な国際競争力をもつものとなるであろう。

さらに、このようなシミュレーション技術を用いれば、地層処分場丸ごとのシミュレーションも視野に入る。仮想空間内に地層処分場を構築し、それを対象に多種多様なシミュレーションを行うのである。用いるシミュレータの

V&V はもちろん必須である。これがなければ、物理的かつ化学的に正しい予測を期待できなくなるからである。このようなシミュレーションの結果を統合的に可視化して示せば、有力な合意形成の道具となる。なにがどうなるのか、クライアントばかりでなく、広く人々に説明力を持つであろう。なおここで、コンピュータの仮想空間内への地層処分場の構築には、施工手順やそれに関わる外力作用ばかりでなく、地盤や岩盤の力学的化学的特性、地表と地下の物理化学的環境条件、オーバーパックや緩衝材の力学的化学的特性などの多種多様なデータの入力が必要になる。このようなデータをインフラデータプラットフォームなどのクラウド上から見つけ出す自動検索技術、そして見つけ出したデータからシミュレーションに必要な情報を自動抽出する技術、これらはデータ駆動型技術と呼ばれるが、その基本システムの開発と整備は、地層処分を対象とはしていないが、国交省を中心に精力的に進められている。近い将来、利用できる段階に至るであろう。このような地層処分場丸ごとシミュレーション技術は、性能設計における照査技術の枠を超えるが、我が国の地層処分技術体系に組み込まれれば、我が国の地層処分技術に強力な国際競争力を与えるものとなるであろう。

6 地層処分市場の拡大

我が国の原子力発電所は、運用中（操業停止も含む）33基、建設・計画 11 基である（JAIF による）。他に廃炉が 27 基ある。現在のところ、核燃料リサイクル（プルサーマル）が構想されており、そのもとで、処分すべき高レベル放射性廃棄物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（NUMO による）。比較するのに適切性の疑義はお許しいただくとして、我が国の自動車産業の売上が年間約 69 兆円と聞くと、地層処分建設の市場規模の小ささを感じる。たとえワンス・スルー方式に変更となったとしても、自動車産業の規模にはとても及ばない。自動車産業では各社しのぎを削る技術開発を行っているが、地層処分場建設では民間建設会社が技術開発に積極投資できるとは思えない。投資を回収するには市場が小さすぎる。海外技術の国内展開が関の山であろう。これでは技術者の空洞化を起しそうである。いわば、海外技術のユーザと化して、技術隷属化への道をたどりかねない。我が国の地層処分事業は、欧米に比べて、環太平洋造山帯に位置し、多くは付加体によって島国が形成されているという過酷な自然環境下にあることを強く認識しなければならない。しかも長期に及ぶ事業の継続には人材の確保が必須であり、その質にも空洞化を起してはならない。民間建設会社においても弛まぬ技術開発が行われ、人材育成と技術の継承と発展を持続できるようにしなければならない。

そのためには、地層処分の市場規模を拡大して捉えねばならない。そこで目を向けたのが海外である。現在（2020 年 1 月時点、JAIF による）、全世界で 437 基の商用原子炉が運用されているという。さらに、全世界で 141 基の原子炉が建設中または計画中である。合計数は 578 基にも及ぶ。

この内、アジアと中近東に 141 基が運用中もしくは建設・計画中である。我が国では核燃料リサイクルを想定しており、それによって高レベル放射性廃棄物の体積は 1/4 になるとのことだから (JAEA による)、仮に、我が国の 1 基あたりの地層処分建設費を目安に、ワンス・スルー方式を想定すると、全世界の原子炉を対象とした場合、約 184 兆円規模、アジアと中近東の原子炉を対象とした場合、約 44 兆円規模となる。あまりにも粗い見積もりであるが、我が国の自動車産業の市場に近付く規模を持つ (ただし、自動車産業の市場は単年度であるが、地層処分場の建設市場はそうではない)。これぐらいの市場規模を持てば、民間建設会社にも技術開発を促す競争的な環境を提供できるのではないだろうか。このように海外の地層処分に目を向けることによって、我が国の地層処分技術の空洞化を避けることができ、持続的進化を可能にできると考える。

7 我が国の国際貢献

地層処分技術の海外展開を考えると、その技術は性能照査型の設計体系に準拠していなければならない。そうでなければ国際舞台に立てないからである。特に、性能の照査技術が国際競争力の鍵を握ることはすでに述べた。土構造物の特殊性を逆手に取った次世代型の照査技術にも言及した。優れた照査技術を具備した性能照査型の設計体系を用意して、海外展開をはかることは、我が国の国際貢献にもつながっている。

環太平洋造山帯に位置し、多くは付加体によって島国が形成されているという我が国の過酷な自然環境下で地層処分を可能とする技術は、多くの国々への適用力を有していることを意味する。すなわち、対象とするクライアントを選ばないとも言えるかもしれない。これも価格競争に陥らずに、説明力を持った提案型のビジネスを可能とする素地であろう。

8 おわりに

本稿では、高レベル放射性廃棄物の地層処分場建設のための性能照査型の設計体系について論じたものである。本稿で述べた内容を要約すると以下になるよう。

- ・性能照査型設計法は、我が国にとっては WTO/TBT 協定に基づくものであり、地層処分建設の設計法においても性能照査型の設計法としなければならない。
- ・我が国においては、すでに既存の固有設計コードは「みなし規定」を用いて、性能照査型に衣替えしているが、その実は従来からの仕様設計法と本質的に変わるところがなく、性能照査型設計法の「うま味」である先進技術の取り込みや技術開発を活用できていない。かえって国内専用のガラパゴス化に陥ってしまい、生産性向上に寄与していない。
- ・性能照査型設計法の鍵は、性能の照査技術にあり、優れた照査技術を握るものが競争力を持てる。
- ・性能照査型設計法は、EU 統合による統一市場の形成に端を発しているが、その結果、国別の固有性を廃した普

遍性を具備し、それによって EU の統合的設計体系である Eurocodes をして、EU の海外展開の道を拓いた。

- ・性能照査型の設計体系に関わる種々の技術要件の ISO 化をはかることにより、デジュールもしくはデファクトによる国際的スタンダードとして、Eurocodes は EU の海外展開の先兵となっていく。

- ・地層処分の分野においても、EU において、彼らの性能照査技術のデジュールもしくはデファクト化が図られていると考えられるが、まだ十分に性能照査技術として練られたものとはなっていない。

- ・施工履歴の違いによって性能が変化する土構造物などは性能設計のシーケンスに馴染まないが、OM を用いたキャリブレーションにより性能設計化が行われている。

- ・地層処分の分野でも、土構造物としての施工履歴依存性を有すると考えられるが、それを逆手にとって、大規模・高解像度・高速計算を可能とする ICT 技術を用いて、想定外をなくす多数シナリオに対する Multi-physics シミュレーション技術を確立できる。これは次世代型の性能照査技術とも言え、シミュレーション結果の可視化によって合意形成にも寄与することから、強力な競争力を具備するものとなる。

- ・さらに進めて、地層処分場をコンピュータ内の仮想空間に構築することによって、多種多様なシミュレーションによる将来予測を可能とする「地層処分場丸ごとシミュレーション」の実施が現実のものとなりつつある。

- ・我が国の地層処分市場は、3.5 兆円規模しかなく、これでは民間建設会社が技術開発投資を積極的に行うには小さすぎるであろう。

- ・しかし、海外に目を向ければ、十倍以上の市場規模を見ることができ、民間建設会社の技術開発投資も実となる環境を提供できる。

- ・環太平洋造山帯に位置し、多くは付加体によって島国が形成されているという我が国の過酷な自然環境下で地層処分を可能とする技術は、多くの国々への適用力を有しており、我が国の国際貢献に大きく寄与できる。

- ・そのためには、まずは地層処分の建設事業の技術要件を「みなし規定」ではなく、性能照査技術を具備した性能照査型設計体系としなければならない。地層処分に関わる技術開発に投資と回収の循環をもたらす、ガラパゴス化に陥ることなく、持続的な発展を可能としなければならないと考える。

以上、思い入れが先行し、十分な考察に至っていないことを危惧する。読者諸氏からの忌憚のない意見をいただき、我が国の地層処分技術のあり方を考えてゆきたい。

最後に、本稿執筆において有益な討議をいただいた神戸大学の橋伸也博士に謝意を表す。さらに、本稿執筆の機会を与えてくださった原子力学会バックエンド部会の方々に感謝申し上げます。