

核データ部会、シグマ調査専門委員会合同セッション

「原子炉の廃止措置における放射化断面積データの現状と利用」

(3) 廃止措置及び廃棄物処理処分における核データの利用 と今後核データに期待すること

一財) エネルギー総合工学研究所
エネルギー技術センター

田中 健一

k-tanaka@iae.or.jp

1. はじめに

国内の原子力発電所は、福島第一発電所（以下、“1F”という）の6基をはじめ、全体の約40%に相当する24基が廃止措置又は廃止措置の準備段階にある[1]。また、日本原子力研究開発機構（JAEA）では、その所有する79の研究炉、核燃料取扱施設及び研究施設などの原子力施設（研究施設等）を70年ほどの期間で1.9兆円の予算見込みで廃止措置を行なっていく計画である[2]。1Fの廃炉、原子力発電所の廃止措置及び研究施設の廃止措置は、社会一般の注目度、必要な技術及び/又は資源投入の規模は異なるが、これらの状況をひとまとめに見れば廃止措置及び放射性廃棄物の処理処分というバックエンド分野の事業（以下、“バックエンド事業”という。）が原子力産業の主力ビジネスとなっている。

海外では、原子力発電所をはじめとする原子力施設の廃止措置は世界全体で数百の規模である[3]。このうち、米国では既に数十の廃止措置終了の実績があり、その実績は日本をはじめとする廃止措置対象施設を有する各国で参照される事例となっている。また、米国では廃止措置及び放射性廃棄物の処理処分を請け負う民間会社が数社存在し、廃止措置及び放射性廃棄物の処理処分において民間企業が成り立つほどの合理化が進んでいる。欧州の各国では、廃止措置及び放射性廃棄物の処理処分は国策会社により推進されることとなっており、ステークホルダの理解を得るために効果的なバックエンド事業の推進が求められている。

2. 廃止措置を取り巻く動向

2.1 IAEAが主導するDigital Decommissioning (DD)

IAEAは、加盟国における廃止措置の合理的な実施を支援する活動として、廃止措置全

般にわたる IT 技術の導入を提唱し、定期的な情報提供（Webiner の開催）を 2020 年から開始している [4]。ここでは、安全が確保され、信頼性があり、かつ、効果的なバックエンド事業の推進に資する情報管理の方法が提案され、その中で“原子力版デジタルフォーメーション（DX[5]、以下、“原子力 DX”という）”の構築が提案されている。原子力 DX は、廃止措置だけではなく、原子力施設の立地、設計、建設、試運転/就役及び運転を含めた原子力施設のライフサイクル全体にわたって適用することで最も効果を発揮するものである。しかしながら、現時点では、各国において解決すべき重要な課題であるバックエンド業務に重点をおいた“Digital Decommissioning (DD) [6]”の概念整理及び一部機能の実装を進めることとなっている。DD は、建築/土木業界で積極的な導入が推進されている BIM (Building Information Modeling) [7]の概念及び機能を中心に据え、BIM の取り扱うデータ形式を踏襲し、廃止措置に必要な機能として、データの収集/取得のツール群、情報ハンドリングツール群（DD アプリケーションズ）及び廃止措置の実施支援システム並びに教育訓練ツールで構成されている。IAEA が主導する DD はノルウェイの IFE を中心に開発及び整備が進められている。昨年度に、IAEA の担当者よりエネルギー総合工学研究所 (IAE) に国内における DD の推進及び普及について相談があった。これに対して IAE は、廃止措置に関連する会社に声かけを行い、ゼネコン各社とエンジニアリング会社で立ち上げた勉強会の活動を開始したところである。勉強会は、今年度国内の実情を考慮したデータ形式の検討を行う計画である。

2.2 Digital Decommissioning (DD) の概要

DD は、BIM を基本機能として組み込むことから BIM のデータ構造を基本とする。BIM は IFC (Industry Foundation Classes) [8]と呼ばれるデータ形式を実装している。IFC は、“構造”と“属性”に分類されるオブジェクト指向データ群である。IFC は、そもそも建築/土木分野用に開発されたものであり、原子力施設への適用にあたっては、“属性”に放射能に関わる項目を付加する、または、放射能のデータを新たに追加するなどの拡張が必要になる。

DD は、DD における情報をハンドリング行うツール群（DD 中心機能）を中心に、データの収集/取得のツール群（データツール）及び廃止措置の実施支援システム（支援システム）の 3 つの機能群で構成される（図 1 参照）。DD 中心機能の“施設設計情報管理（施設の特性把握）”が BIM であり、noSQL と呼ばれるオブジェクト指向データベースによりデータの管理を行う。この機能により工事計画の立案、安全評価及び規制対応及びコスト評価などに必要な廃止措置対象施設のデータの引き渡しが行われる。データの引き渡し及び DD の情報出力は、“contexture focused（文脈に焦点を当てた検索方式）”という検索機能によって行われる。

その他の機能の説明は本稿の目的とするところではないのでここではこれ以上触れな

いが、上述の3つの機能群のうち、データツールは、“廃止措置対象施設に関する事実”を収集又は取得する機能であり、この事実は精緻かつ詳細に収集又は取得されることが必須である。DD に固有の放射能に関するデータも測定/分析及び解析により収集又は取得される。

一方、支援システムは、BIM から提供されるデータである構造及び属性を用いて具体的な工事をプロジェクト管理の手法を用いて立案し、実施支援並びに費用の最適化を図る。最適化にあたっては、廃止措置に関連する内部条件及び外部条件（規制要件を含む）という拘束条件が課せられる。この拘束条件に対してグレーデッドアプローチの考え方が適正に適用されなければならない。BIM のデータベースに対してグレーデッドアプローチの判断条件を適用することで、プロジェクト管理の合理化及び簡略化が可能になる。

図1に示す DD の構造では、左側のデータツールでは廃止措置対象の“ありのまま(as is)”を取り扱う精緻かつ詳細なデータの取り扱いがなされ、右側の支援システムでは内部要因及び外部要因と“ありのまま”の情報にグレーデッドアプローチの考え方を適用した上で合理化及び簡略化が行われる。DD 中心機能では、データツールによって提供された“ありのまま”のデータから“Digital Twin” [6]と呼ばれるバーチャルな原子力施設が構築され、「いつ、何を、どのようにする。」といった文脈で求められる情報を支援システムに提供する。

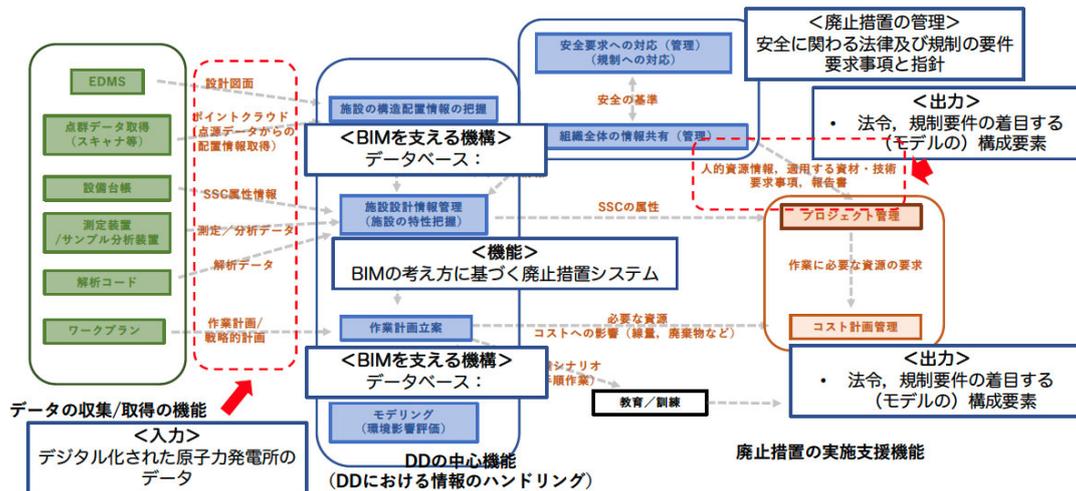


図1 IAEA が主導する Digital Decommissioning (DD)の構造

3. 精緻化と合理化（詳細化と簡略化）

3.1 グレーデッドアプローチについて

IAEA は、廃止措置に関する一般安全要求 [9]において、廃止措置の安全確保、すなわち、放射線防護の要求事項の1つとしてグレーデッドアプローチの適用を提唱している。グレーデッドアプローチは、規制のあり方として以前より提唱されていた考え方であり、国内外でバックエンド分野の重要性が増すとともに、ここ数年注目されてきた考え方である。この考え方は、名称ほどその意味することが正しく普及しているとは言い難い現状がある。この考え方が国内に持ち込まれてきた際に割り当てられた“段階的な対応”という訳語のために適用に関わる解釈が曖昧になり、“リスクに応じた規制”という説明とともに、ともすれば“規制の緩和”という文脈で用いられることが多い。しかしながら“緩和”という考えは、この考え方とは全く逆の方向性を意味する。廃止措置におけるこの考え方の適正な適用の普及を図るため、日本原子力学会標準委員会では廃止措置における基本的な安全要求事項を定める標準 [10]を定め、この中でグレーデッドアプローチの適用の前提及び適用の条件を解説した。この箇所の一部を以下に引用する[10]。

(1) グレーデッドアプローチに関わる要求事項

廃止措置に関わる全ての者は、グレーデッドアプローチの考え方に基づき、廃止措置の計画、実施及び終了の全ての段階における全ての局面に対して、廃止措置対象施設の特性及び廃止措置作業に伴うリスクの程度を考慮して、状況に応じた効果的な施策を講じて廃止措置を遂行しなければならない。

(2) 適用に関する留意点の引用

- b) 適用する対象箇所及び／又は作業というように範囲を限定し、その範囲の特性に見合うものであること。
- c) 対象施設の規模、施設の種類及びその施設の構造上の複雑さに応じるものであること。
- d) 廃止措置の作業を開始する時点における対象施設の物理的、化学的及び放射能インベントリの特性上の状態を考慮していること。

(3) 適用の手順に関する箇所の引用

- f) グレーデッドアプローチの適用においては、一意に定めた（適用において解釈の違いが発生しない）定量的及び／又は定性的に設定された判断基準によってグレード（区分）が設定され、区分ごとに安全要求及び／又は安全基準の遵守に対して必要な対策が示されていること。

グレード（区分）ごとに必要な施策は次のとおり設定する。

- 最もリスクの低いグレードに対する対策を決定する。
- 採るべき対策の判断を行おうとするグレードと最もリスクの低いグ

レードとのリスクの差分を判定する。

- グレード間のリスクの差分を考慮し、追加すべき対策を決定していく。

なお、定性的な判断基準は、そのグレードに求められる必要十分条件が異なる解釈の余地のないように定められていなくてはならない。

- g) グレードの設定及びグレードごとの対策は、文書化されており、作業における対策の実装の判断が検証可能であること。

(注：引用箇所中の b)、c)、d)、f)、g) は学会標準記載のままとした。)

上記の引用から分かるように、グレーデッドアプローチの適用では、対象に対して精緻な調査（対象に対する詳細な事実の把握）を行い、厳密に適用範囲、適用の基準及びその対策を設定することが必須なのである。このような精緻な作業の下にグレーデッドアプローチの適用が可能になる。この適正な適用は、合理的な資源の投入及び廃止措置の活動自体の簡略化を可能にし、合理的な廃止措置を実現する。グレーデッドアプローチの考え方の適用は、精緻化と合理化、又は、詳細化と簡略化という相反する活動を表裏一体で行なっていくことであると言える。

なお、上述の通り DD の構造も“相反する活動が表裏一体”となっており、このような構造はグレーデッドアプローチによってその妥当性が担保されるものである。

3.2 DD における精緻化（詳細化）

DD におけるデータツール（図 2 の左側のツール群）では、精緻かつ詳細なデータが収集又は取得される。図中左側の上 3 つの機能は、原子力施設の詳細な構造並びにこれを構成する系統、構造物及び機器（Systems、 Structures and Components (SSC)）の構造及び属性に関するデータの収集及び取得を行う機能である。構造について 3D-CAD による 3 次元表示を行うための情報が整備され、DD 中心機能における“施設の構造配置情報の把握”機能で 3 次元表示がされる。DD における各々の SSC の属性は、通常の IFC に加え原子力特有のデータが必要になるが、これらについては原子力学会標準[11]に詳細が規定されている（図 3 参照）。

放射能に関わるデータは、測定装置/サンプル分析装置及び解析コードにより収集及び取得される。収集及び取得の方法は、上述の属性を規定するものとは別の原子力学会標準[12]に規定される（図 4 参照）。測定値及び/又は分析値は、国際的な動向に従いその信頼性を ISO の定めるところ [13]に準拠した形式であることが求められる。

解析コードとは、中性子照射による放射性物質の生成及び消滅を解析評価するため中性子束分布を計算するコード及び計算された中性子束を入力として放射性物質の生成及び消滅を計算するコード並びにこれらで用いられる断面積データを指す。これらについては、信頼性の保証（V&V）がなされ、計算の不確かさに関する情報が提示可能である

ことが求められる。また、測定値及び/又は分析値並びに計算結果に加え、その値の信頼性を説明するための情報が“文脈に焦点を当てた検索方式”に従い提供できるものとなっていることが求められる。

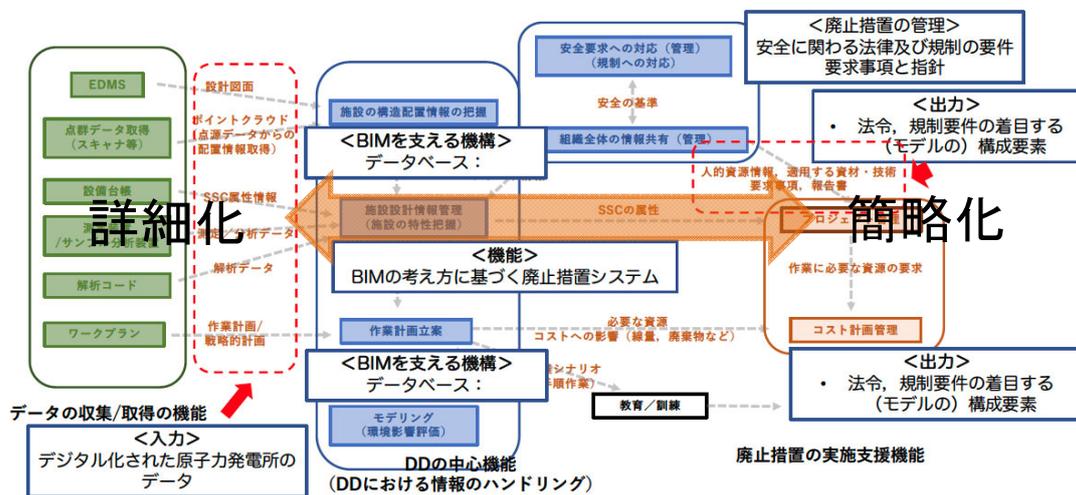


図2 Digital Decommissioning (DD) における詳細化と簡略化のイメージ

Data from sub-task of investigation of plant characteristics													
名称 Name of SSC	設置場所 Location	重量 Wt	設置 個数 #s	汚染面積 Area of surface		材質 Mt	系統 Name of sys.	寸法 Size	形状 Shape	その他 附属物 Appendage	有害物 Hazardous	設置の 履歴 History	参照 図書 Ref.
				外表面 Outer	内表面 inner								
□△ポンプ (ポンプ本体)	C/V EL. Om エリア番号XX (Area XX)	XX t	1台	XX m ²	XX m ²	SUS	RCS ①	Xm*Ym*Zm (縦,横,高さ)	立方体 cube	保温材	なし	XX年	[設計図 面] [系統図]
□△ポンプ (ポンプモータ)	C/V EL. Om エリア番号XX (Area XX)	XX t	1台	XX m ²	なし	CS	RCS ①	Xm*Ym*Zm (縦,横,高さ)	立方体 cube	なし	なし	XX年	[設計図 面]
○○タンク	C/V EL. Om エリア番号XX (Area XX)	XX t	1基	XX m ²	XX m ²	SUS	RCS ②	Xm, Ym (直径,高さ)	円柱 cylinder	保温材 ヒータ	保温材 (石綿)	XX年	[設計図 面] [系統図]

図3 学会標準で提案する原子力施設の構造 (SSC) データベースの例

Data from sub-task of plant characterization													
名称 Name of SSC	経過時間 Time step from shutdo wn	放射化汚染 濃度 Activation by neutron concentration (Bq/ m ³)		2 次的汚染 密度 Radioactive contamination Density (Bq/m ²)		放射化汚染 放射能 Activation by neutron Radioactivity (Bq)		2 次的汚染 放射能 Radioactive contamination Radioactivity (Bq)		放射化+2 次的 放射能濃度 Total Radioactivity Concentration (Bq/ton)		レベル 区分 Classificatio n	
			
核種 Radionuclide		...	Co-60	...	Co-60	...	Co-60	...	Co-60	...	Co-60	...	
□△ポンプ (ポンプ本体)	5	...	XX Bq/m ³	...	XX Bq/m ²	...	XX Bq	...	XX Bq	...	XX Bq/t	...	L3
□△ポンプ (ポンプモータ)	5	...	XX Bq/m ³	...	XX Bq/m ²	...	XX Bq	...	XX Bq	...	XX Bq/t	...	CL
○○タンク	5	...	XX Bq/m ³	...	XX Bq/m ²	...	XX Bq	...	XX Bq	...	XX Bq/t	...	L2

図4 学会標準で提案する原子力施設の放射能インベントリデータベースの例

3.3 DDにおける合理化（簡略化）

実際の廃止措置工事を計画し、費用の見積りを行う支援システムでは、具体的な工事対象の特性（放射能に関する情報を含む）及び工法に依存するリスクの大きさが DD の中心機能から提供される。支援システムでは、リスクの大きさに応じて取るべき対策の程度を判断し、合理化を図っていくものである。

例えば、作業員の被ばく予測を行い、防護の対策を計画する場合、リスクが相応に大きいものであれば精緻かつ詳細な評価（データツールで得られたものをそのまま用いる評価）が必要になり、リスクが小さいと判断される場合は簡略化された評価を用いることになる。また、発生する放射性廃棄物のレベル区分ごとの物量見積り（クリアランス物を含む）も、放射能レベルの程度及び解体で用いる工法の精度などを考慮し、それらにふさわしい評価が行われることになる。

4. まとめ（核データに期待すること）

廃止措置及び放射性廃棄物の処理処分の合理化では、国際的な動向として IT 技術の導入が積極的に進められている。IAEA は、廃止措置を支援する強力な仕組みとして DD の開発及び整備を推進している。IAEA が主導する DD はノルウェイの IFE が提案する構造を基本に必要な機能やデータの形式を開発、整備していこうとしている。国内においては、このような活動は皆無であり、昨年より IAEA の動向を把握する活動が始まったばかりである。

DD の導入の効果、特に費用対効果については、「壊すことやゴミの処理にそのような投資が必要か？」という疑問は当然であり、DD だけでは投資に対する説得力を持たないと言える。しかしながら、DD を原子力 DX のサブシステムとして捉え、将来に向けた原子力の継続活動を合理的に進めるための第一歩とすることで説得力を持つものになるであろう。

廃止措置及び放射性廃棄物の処理処分における放射性物質濃度の評価（放射能インベントリ評価）では、核データに関する種々の要求がなされ、それに対する核データとしての対応がなされてきている。これにより、廃止措置における放射能インベントリ評価の精緻化が進んできた。このような活動を今後も継続的に進んでいくことを核データのエンドユーザとして切に願うところである。

これに加え、廃止措置及び放射性廃棄物の合理化に資する DD を国内に導入し定着させ、さらには原子力施設のライフサイクル全体で利用可能な原子力 DX として発展させていくために次のような事項を期待する。

- 核データに収納されている各核種のデータ整備の方法の説明
- 核データに収納されている各核種のデータの信頼性（核データの V&V）の説明

- ▶ 核データに収納されている各核種のデータの使用上の留意点（使用の制限）の説明
- ▶ 核データの取り扱いの方法及びその信頼性（核データ処理コードのV&V）の説明
- ▶ DDで要求される情報の提供方法検討

なお、これらについては今後国産DDにおけるIFCの形式を検討する際に提供可能な形式を検討していく計画である。

参考文献

- [1] 電気事業連合会、原子力発電所の廃止措置 廃止措置の状況
<https://www.fepc.or.jp/nuclear/haishisochi/>
- [2] JAEA、バックエンドロードマップの概要
https://www.jaea.go.jp/about_JAEA/backend_roadmap/s01.pdf
- [3] 原子力デコミッションング研究会、世界の廃止措置データベース
<http://www.decomiken.org/worlddb/>
- [4] IAEA, Digital Tools, Virtual Reality and Robots to Help in Accelerating Dismantling of Retired Nuclear Facilities, IAEA Survey Shows
<https://www.iaea.org/newscenter/news/digital-tools-virtual-reality-and-robots-to-help-in-accelerating-dismantling-of-retired-nuclear-facilities-iaea-survey-shows>
- [5] 経済産業省、産業界におけるデジタルトランスフォーメーションの推進
https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/dx/dx.html
- [6] IAEA, Digitalization Supports Safe and Effective Nuclear Facility Decommissioning
<https://www.iaea.org/newscenter/news/digitalization-supports-safe-and-effective-nuclear-facility-decommissioning>
- [7] 国土交通省、BIM/CIM ポータルサイト
http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bimcim/spec_arch_new.html
- [8] BuildingSMART Japan、IFCとは <https://www.building-smart.or.jp/ifc/whatsifc/>
- [9] IAEA, Decommissioning of Facilities, No.GSR.Part 6, IAEA, 2014
- [10] 日本原子力学会、原子力施設の廃止措置の基本安全基準：2022、2022年度中に発行予定
- [11] 日本原子力学会、原子力発電所の廃止措置計画時の特性調査指針：発行予定
- [12] 日本原子力学会、原子力発電所の廃止措置計画時の放射能インベントリ評価指針：発行予定
- [13] ISO, Determination of the characteristic limits (decision threshold Detection limit and limits of the coverage interval) for measurements of ionizing radiation, ISO 11929-1~3, 2019