

原子力発電所の安全性向上のための効果的なオブソレッセンスマネジメント

村上 健太

東京大学 大学院工学系研究科 レジリエンス工学研究センター 准教授

113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

murakami@n.t.u-tokyo.ac.jp

関村 直人

東京大学 副学長、大学院工学系研究科 原子力国際専攻 教授

概要

継続的な安全性向上が求められる複雑な社会インフラの典型例として原子力発電所を取り上げ、そのオブソレッセンスマネジメントの事例を分析した。3つの異なる陳腐化カテゴリーに対する制度的アプローチについて、複数の国の制度を比較しながら議論する。また、6つの技術分野における代表的な事例を紹介し、その特徴を要約する。この問題の関係者が事業者と規制機関という構図を超えて広がっていることは自明であり、最初の挑戦者へとインセンティブを与えることが課題となる。知識の陳腐化マネジメントは、品質マネジメントシステムとは必ずしも両立しないため、安全を“マーケティング”する仕組みが求められる。

キーワード

- Nuclear Safety
- Obsolescence Management
- Plant Life Management

1. 緒言

オブソレッセンス(Obsolescence)は、長い年月にわたって使われる工学システム、例えば原子力発電所、における重要なマネジメント課題である。オブソレッセンスとは時間の経過に伴って生じる非物理的な現象の総称であり、システムを構成するハードウェア、ソフトウェア、又はマネジメントプロセスが時代遅れになり、改善の余地が生じることを指す。オブソレッセンスは様々な形で現れる。一部のオブソレッセンスは、システムの外部に端を発する。産業構造の変化により交換部品の供給が滞ったり、気候変動によって自然災害に対する再評価が求められることがある。また、システムの内側からもたらされることもある。例えば、ある発電所で新しい保全方法が標準化されれば、従来の保全マニュアルは陳腐化することになる。また、最適とされるシステム構成が時代と共に変わることもある。例えば、最新型の原子力プラントの安全設計は一世代前とは幾らか異なるはずである。

社会インフラにおけるオブソレッセンスマネジメントの重要性は、東京電力福島第一原

子力発電所（以後、福島第一）の事故によって浮き彫りになった。1号機は営業運転開始からちょうど40年が経過していたため、古い設計のプラントであったことがシビアアクシデントを防げなかった原因ではないのかとの議論が行われた。たとえば、事故から3か月後、日本政府は「システム概念の進歩を含む新しい知見に対応する観点から、既存施設の高経年化対策のあり方について再評価する」と報告した¹。日本原子力学会の事故調査委員会は、建設時に考慮されていなかった自然災害に関する知見の工場、安全系やサポート系の構成、プラントのレイアウトや機器の位置的分散、シビアアクシデントに対する設計や手順などに、さまざまな技術的課題を指摘している²。各国の規制機関は、事故後に声明を出し、運転開始から長期間が経過したプラントの規制ベースを新しいプラントと調和させるための枠組みについて説明した。大まかに言うと、欧州は10年毎の定期安全レビュー³、米国は規制制度分析に基づくバックフィット規則⁴が、それぞれオブソレッセンス対策の主要な規制ツールとなっている。

オブソレッセンスは、時間に伴う知識と環境の変化に起因するという意味で同質の現象ではあるが、その現れ方は多様であり、従って対処方法も多様になる。これは、時として、オブソレッセンスマネジメント体系の歪の原因となる。例えば、日本の原子力安全の文脈では、オブソレッセンスの訳語に異なる様々な語が充てられている。高経年化対策のコミュニティでは“陳腐化”という語が長く使われてきた。品質保証のコミュニティは、サプライチェーンにおける製造中止品の管理を念頭に旧式化という語を充てるようになった。原子力規制委員会は、原子力プラントの運転期間を延長するための制度設計の中で、“設計の古さ”という訳語を作りだした。問題は、奇妙な日本語の増殖ではなく、同根の現象に対して一貫性のない対応をすることである。対応の抜けや欠けもさることながら、多重で複雑な管理に陥ることがより深刻である。オブソレッセンスには、当該技術領域の進歩の副作用という側面がある。つまり、より良いものが見つかるオブソレッセンスに気づくのである。したがって、オブソレッセンスの防止に経営資源を投入しすぎるとは、安全性向上の機会を喪失す

¹ Government of Japan, “原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書－東京電力福島原子力発電所の事故について－”, page XII-12,

https://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/iaea_houkokusho.html

² Atomic Energy Society of Japan, “The Fukushima Daiichi Nuclear Accident, Final Report of the AESJ Investigation Committee”, Chapter 7, Springer, 2015,

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-4-431-55160-7>

³ WENRA reactor harmonization working group, Western European Nuclear Regulation Association, “Position paper on Periodic Safety Reviews (PSRs) taking into account the lessons learnt from the TEPCO Fukushima Dai-ichi NPP accident”, 2013,

https://www.wenra.eu/sites/default/files/publications/rhwg_position_psr_2013-03_final_2.pdf

⁴ United States Nuclear Regulatory Commission, “Near-Term Report and Recommendations for Agency Actions Following the Events in Japan”, SECY-11-0093,

<https://www.nrc.gov/docs/ML1118/ML11186A950.html>

るといふ副作用をもたらす恐れすらある。

オブソレッセンスマネジメントは原子力以外の産業、特に規制の厳しい産業、にとって重要である。そこで、本論文は、既存の原子力プラント群における長期運転を例題として、効果的なオブソレッセンスマネジメントについて議論する。まず、国際的な安全基準を参照しながらオブソレッセンスを分類し、そのマネジメントの制度的な枠組みについて検討する。次に、いくつかの技術分野における実践例を紹介する。本稿では事例の詳細に深く立ち入ることはせず、改善の契機、安全性向上への貢献度、事業者へのインセンティブに焦点を当てる。最後に、安全マネジメントという大きな枠組みにおけるオブソレッセンスマネジメントの位置づけを議論する。

2. 調査の方法と対象

まず、国際的な安全基準及び規制の枠組みとの関係に着目しながら、オブソレッセンスを分類する。これは、何が対策の引き金となるか知るための一助である。規制の仕組みは国によって異なっているが、オブソレッセンスはプラントの運転期間に伴って顕在化する現象であるので、軽水炉の長期運転に関係した安全基準がこの領域を包絡していることが多い。そこで、経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)の調査報告書⁵を足掛かりにして各国の長期運転にかかる法制度を確認した。それを、長期運転に関係する国際原子力機関(IAEA)の安全基準と比較し、規制要求を分類した。長期運転の体系に関する考察は別稿に譲り、ここではオブソレッセンスに対する規制要件にのみ着目する。

分析のスタート地点は、SSG-48 と呼ばれる経年劣化管理に関する IAEA の安全ガイドの表 1 である⁶。ここではオブソレッセンスを、対象、現象、結果、管理方法に基づいて分類している。必ずしも表の行と列が一対一に対応しないことは興味深い。IAEA の安全基準では、技術の陳腐化のみが SSG-48 で扱われ、その他の項目、特に規制と基準の陳腐化は、定期安全レビューの安全指針である SSG-25⁷で扱われることになっている⁸。日本、米国、フランスの経年に伴う規制要求とその対応については、各規制機関のホームページから確認した。日本の規格基準、業界ガイドの改定状況を詳細に調査し、その一部は米国の状況と

⁵ Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Cooperation and Development, “Legal Frameworks for Long-Term Operation of Nuclear Power Reactors”, NEA-7504, 2019,
https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_15154/legal-frameworks-for-long-term-operation-of-nuclear-power-reactors?details=true

⁶ International Atomic Energy Agency, “Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants”, IAEA Safety Standards Series No. SSG-48, 2018,
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1814_web.pdf

⁷ International Atomic Energy Agency, “Periodic Safety Review for Nuclear Power Plants”, IAEA Safety Standards Series No. SSG-25, 2013.
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1588_web.pdf

⁸ Charter 2.29 of the reference 6

比較した。事例は技術分野に分類し、事業者毎または国毎の違いを議論した。

次にオブソレッセンスマネジメント実施例を調査した。IAEA の主催する Plant life management Conference (PLiM)はこの領域でもっとも権威のある国際会議であり、2012年⁹、2017年¹⁰、2022年¹¹に開催された3回のPLiMの会議紀要を網羅的に確認した。陳腐化に対する具体的な規制事例については、IAEAの別の国際会議の紀要も参照した¹²。1) 炉心設計、2) 電気品、3) 機械品、4)外的ハザードに対する設計基準、5) システムの構成や冗長性、6)シビアアクシデントに対する設計拡張状態に対応したプラントの変更について議論した。

図1 オブソレッセンスのタイプ¹³

| 対象 | 現象 | 結果 | マネジメントの方法 |
|-------------|--|--|--|
| 技術 | 交換部品や技術支援の欠如 供給者の欠如 産業基盤の欠如 | 故障率増加と信頼性低下 によるプラントの性能と 安全性の低下 | 体系的に機器等の耐用年数と予 測される陳腐化を同定する 耐用年数に基づく交換部品の準 備と、タイムリーな部品交換 供給者との長期契約 同等品の開発 |
| 規制と規 格基準 | 機器等やソフトウェアの現 行規制及び規格基準からの 逸脱 設計上の弱点（性能検証、 系統分離、多様性、又は過 酷事故への対応力等） | 現行の規制基準及び規格 基準より低いプラントの 安全水準（深層防護の弱 点、又は高い炉心損傷リ スク等） | 現行の規制基準及び規格基準に 照らしたプラントの体系的な安 全再評価（定期安全レビュー 等）と、適切な改良、バックフ ィット、又は改造 |
| 知識 | 機器等に関する現行の規 制基準及び規格基準の知識 が最新に保たれない | 安全性向上の機会の喪失 | 知識の継続的更新と、その適用 の改善 |

⁹ International Atomic Energy Agency, “3rd International Conference on NPP Life Management (PLiM) for Long Term Operations (LTO)”, CN-194, Salt Lake City, USA, 2012.

https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=reportnumber:%22IAEA-CN--194%22

¹⁰ International Atomic Energy Agency, “Fourth International Conference on Nuclear Power Plant Life Management”, CN-246, Lyon, France, 2017.

<https://www.iaea.org/publications/13640/nuclear-power-plant-life-management?supplementary=91871>

¹¹ International Atomic Energy Agency, “Fifth International Conference on Nuclear Power Plant Life Management”, CN-297, Vienna, Austria, 2022. *To be disclosed online soon.*

¹² International Atomic Energy Agency, “Effective Nuclear and Radiation Regulatory Systems”, IAEA Proceedings Series, STI/PUB/2034, The Hague, The Netherlands, 2019

<https://www.iaea.org/publications/15194/effective-nuclear-and-radiation-regulatory-systems>

¹³ Table 1 of the reference 6

3. オブソレッセンスマネジメントの制度的な枠組み

3.1 技術的なオブソレッセンス

技術的なオブソレッセンスとは、供給網の変化に伴って、消耗品、予備品、又は技術サポート等が難しくなることを指す。技術的なオブソレッセンスに対しては、経年劣化管理と同様の枠組みの中で、すなわち発電プラントの信頼性を高め、機器の故障が予期せず長期化するような事態を避けるために、多様な手段を講じることができる。Leadership and Management for Safety に関する IAEA の安全要求 11 は次の通りである。“The organization shall put in place arrangements with vendors, contractors and suppliers for specifying, monitoring and managing the supply to it of items, products and services that may influence safety.”¹⁴。これは、品質マネジメントシステムのための上位標準である ISO-9001 の 8.4 節「外部から提供されるプロセス、製品及びサービスの管理」を原子力安全の文脈において具体化したものと整理できる¹⁵。一部の産業、例えば航空機産業¹⁶では、品質マネジメントシステムと紐づく具体的な技術的なオブソレッセンス管理のプロセスが標準化されており、主に製造中止品の把握と対応に注意が向けられている。原子力産業の場合、技術的なオブソレッセンスを管理するプロセスは、IAEA の安全ガイド¹⁷、技術レポート¹⁸、international-generic ageing lessons learned¹⁹、業界団体の技術レポート²⁰等の形で体系化されている。プラントの状況と供給網を比較して、事前に課題を予測することが重要である。製造中止品が発生する場合、市場で余剰品を捜索するという単純な段階から、設備自体の設計変更を行うという複雑なものまで、9種類のアプローチから選択することができる。

3.2 規制と規格基準のオブソレッセンス

規制と規格基準のオブソレッセンスとは、システムティックな安全の再評価とプラント

¹⁴ International Atomic Energy Agency, “Leadership and Management for Safety”, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 2, requirement 11.

<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1750web.pdf>

¹⁵ International Organization for Standardization, “Quality management systems”, ISO 9001:2015, 2015.

¹⁶ Society of Automotive Engineers, “Quality Management System – Requirements for Aviation, Space and Defense Organizations” AS9100 Revision D, 2016

¹⁷ Chapter 6 of the reference 6.

¹⁸ International Atomic Energy Agency, “Management of Ageing and Obsolescence of Instrumentation and Control Systems and Equipment in Nuclear Power Plants and Related Facilities through Modernization”, IAEA Nuclear Energy Series No. NR-T-3.34, 2022.

¹⁹ International Atomic Energy Agency, “Technological obsolescence programme (version 2021)”, IGALL (international generic ageing lessons learned) database, TOP 401, 2022.

<https://gnssn.iaea.org/NSNI/PoS/IGALL/SitePages/Home.aspx>

²⁰ Atomic Energy Association, “Guideline for Discontinued Products Management”. ATENA 20 – ME04 (Rev.0), 2020, *in Japanese*,

<https://www.atena-j.jp/report/2020/09/atena-20me04rev0.html#000128>

の改造等によってマネジメントされるものを指す。規制や規格基準は、技術の進歩を反映しながら改定される。系統分離、安全系やサポート系の冗長性、プラントが包絡すべき内的・外的事象の設定などの設計思想は、技術の進歩や運転経験を踏まえて時代と共に変化する。自然ハザードや環境影響評価に関係する情報の中には、研究によって更新されたり、社会や環境の変化に影響されるものがある。一つ一つの乖離は小さなものかもしれないが、複数の要素が重畳することで、初期のプラントと最新のプラントの間に見過ごせないほどの安全レベルの違いが生じるかもしれない。有効な規制ツールの一つは、改正された規制基準の遡及適用、いわゆるバックフィット、である。基準の遡及適用は許認可取得者の財産権を侵害する行為でもあるが、事故時の社会的影響の大きさを考慮して原子力安全のためにバックフィットを認める法制度を持つ国は多い。合理的な意思決定ができるよう、事業者のコストと公衆安全への影響を天秤にかける公式な手続きが整備されている国もある。別の規制ツールは、原子力分野で定期安全レビューと呼ばれている制度である。これはおおむね 10 年毎に繰り返されるプラントの体系的な安全再評価である。最新型のプラント、例えば欧州型加圧水炉をベンチマークとして、通常 14 の視点を使って、対象となるプラントの弱点を多角的に評価して、必要な対策を講じる。欧州連合では 10 年毎の安全再評価が義務付けられている²¹。チェコ共和国など²²、SSG-25 とほぼ同じ規制基準を採用している国がある。その他の国、例えばフランスでは²³、SSG-25 との同等性を確認しつつ、国内のニーズを参考に重点項目を設定し、定期安全レビューを実施している。

3.3 Knowledge Obsolescence

知識のオブソレッセンスとは、現行の規制や規格基準が、最新の知識基盤に基づいていない状態を指す。前節で説明された安全再評価は、規制や規格基準が更新されることを前提としているが、これは他のスキームがなければ成功しないかもしれない。一般に、産業界の規格基準は定期改定のサイクルを定めている。各国の規制機関は、改定規格を規制がエンドースする枠組みや、運転経験や研究開発に基づいて規制基準を見直す枠組みを有している。しかし、これらの仕組みが形骸化することで、知識が陳腐化する。国際的で多層的なピアレビ

²¹ The Council of the European Union, “amending Directive 2009/71/ establishing a Community framework for the nuclear safety of nuclear installations”, Council directive 2014/87/Euratom of 8 July 2014, 2014

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2014.219.01.0042.01.ENG

²² State Office for Nuclear Safety, Czech Republic, “Periodické hodnocení bezpečnosti (Periodic Safety Review)”, BN-JB-2.9 (Rev. 1.0), 2019, *in Czech*,

<https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/BN-JB-2-9-REV-1-0-redakce-upraveno.pdf>

²³ Jayet-Gendro Sylvie, Salvatores Stefano, “EDF experiences on LTO for the 900 MWe PWR Fleet”, Proceedings of 5th International Conference on Plant Life Management, IAEA-CN-297-046, Vienna, Austria, 2021

ューは、知識の陳腐化を見出すための主要なツールである。例えば、SALTO (Safety Aspects of Long Term Operation : 安全な長期運転) レビューに関する最近の報告書によると、2018~2022 年までのピアレビューにおける所見の 5.6%がオブソレッセンスに関するものであった²⁴。国内及び国際的なピアレビューに加え、様々な情報提供の仕組みが準備されている。新しいトラブルや自然災害の情報には新しい知見が含まれることがある。運転経験の報告は各国で規制要件となっており、経験を共有するための国際的な枠組みも準備されている。最近では、知識のオブソレッセンスを認識する契機として、ステークホルダーの関与がより重視されるようになってきている²⁵。安全性向上に関する研究の長期的なロードマップを作成することは、ステークホルダーを巻き込む良い方法である²⁶。

4. オブソレッセンスマネジメントの事例

4.1 核燃料の供給と革新的核燃料の開発

核燃料は、原子力発電所におけるもっとも重要な消耗品であり、燃料集合体の性能はプラントシステム全体に影響を与える。一見すると、核燃料に技術的な陳腐化、すなわちメーカーによる製造中止、が生じることはないように思えるが、実際には供給網の持続性には潜在的な課題がある。新型燃料の開発には材料試験炉をはじめとする独特なインフラが必要とされるので、ひとたび止まった研究開発を回復させることは容易ではない。福島第一事故の影響は、日本の核燃料供給網と研究インフラの両方に壊滅的な影響を与えた²⁷。また、最近の国際的な分断はロシア型軽水炉の燃料調達と燃料濃縮に影響を与える可能性がある²⁸。

核燃料の改良は継続的に進められてきた。材料の改良と品質管理は、ピンホール等の微細な欠陥の発生頻度を減少させ、稼働率の向上と一次冷却水中の放射性物質量の低減に貢献

²⁴ Operational Safety Section, International Atomic Energy Agency, “SALTO Missions Highlights 2018–2022, Long term operation safety practices in nuclear power plants”, Working material, 2023
https://www.iaea.org/sites/default/files/22/09/salto_mission_highlights_2018-2022.pdf

²⁵ International Nuclear Safety Group, International Atomic Energy Agency, “Ensuring robust national nuclear safety system – Institutional strength in depth”, INSAG-27, 2017
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1779_web.pdf

²⁶ Takizawa M., Takagi S., Miyano H., Sekimura N., “Development of Technical Information Basis in Japanese Ageing Management Program for System Safety of Nuclear Power Plants”, Proceedings of 3th International Conference on Plant Life Management, IAEA-CN-194-1P07, Salt Lake City, United States, 2012

²⁷ Kaminaga M., “Japan: Decommissioning of JMTR and Study for Construction of a New Material Testing Reactor”, Appendix of IAEA-TECDOC-1943, 2021
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/52/019/52019874.pdf?r=1

²⁸ Kukihara Michiko, Kitamura Yusuke, Tsuji Shushi, “Consideration of the nuclear fuel transport for uranium procurement”, Proceedings of 18th convention of Japan Society of Maintenology, page 609, 2022, Kyoto, *in Japanese*

している²⁹。新型燃料では、燃料集合体を構成する燃料棒の数が増加し、一本あたりの直径が小さくなっている。これにより、核燃料の除熱性能が向上し、安全余裕が高められている。核燃料の性能は、長い間、規制上の制限を満足することが確認されている燃焼度、つまり供用期間末期までの発熱量によって指標されてきた³⁰。新型燃料の導入により、事業者は燃料の交換や廃棄に関する選択肢を広げることが可能になる。最近では、過酷事故が生じても大量の水素を発生しない材料の導入が進められている³¹。

新型燃料の開発の前半部分は、燃料サプライヤーのイニシアティブで進められるが、材料試験炉を利用した各種試験においては国際プロジェクトの果たす役割が大きかった³²。開発の後半は、先行試験燃料の装荷への協力や、新型燃料を装荷したときのプラントレベルでの安全評価など、事業者の役割がより大きくなる。新型燃料の使用は、安全設備の大きな変更なしにプラントレベルの安全性を向上させるが、日本のように海外で実用化されている新型燃料をなかなか導入できない国もある。安全解析コードが陳腐化しているため、新型燃料集合体の安全審査には、これらのコードの検証のために非常に長い時間がかかる³³。日本では、燃料交換サイクルが燃料以外の保全活動に律速されているため、新型燃料を使用するインセンティブが他国より低いことが背後要因となっている。

4.2 電気品と制御計装品の交換

原子力発電所における安全上重要な機器等は性能検証の対象となる。これは、通常の経年劣化と設計基準事故が重畳したとしても、機器等が設計された機能を果たせることを検証するための体系的なプログラムである³⁴。機器毎に環境条件と検証寿命が定義されるので、

²⁹ International Atomic Energy Agency, “Quality and Reliability Aspects in Nuclear Power Reactor Fuel Engineering”, IAEA Nuclear Energy Series No. NF-G-2.1,
https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1656_web.pdf

³⁰ Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Cooperation and Development, “Very High Burn-ups in Light Water Reactors”, NEA-6224, 2006,
https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14246/very-high-burn-ups-in-light-water-reactors

³¹ Goldner Frank J., McCaughey W, Wachs Daniel M, Kamerman D, Jensen Colby, Hayes Steve L., Nelson Andrew, Harp Jason, Capps Nathan, Linton Kory, Petrie Christian, Saleh Tarik A., White Joshua T., “The U.S. Accident Tolerant Fuels Program — Update on a National Initiative”, Proceedings of TopFuel 2021, Santander, Spain, 2021.
<https://www.osti.gov/servlets/purl/1873835>

³² Institutt for energiteknikk, “50 Years of Safety-related Research The Halden Project 1958-2008”, homepage, checked on 2023/09/19
<https://www.oecd-nea.org/jointproj/docs/halden/the-halden-project-1958-2008.pdf>

³³ Kudo Yoshiro, “Preparation status of computer programs and AESJ standards in the core and fuel areas (2) Roadmap towards the introduction of new design fuels as well as the continuous improvement of safety evaluation”, Journal of the Atomic Energy Society of Japan, in press, *in Japanese*.

³⁴ International Atomic Energy Agency, “Equipment Qualification for Nuclear Installations”, IAEA Safety

安全上重要な電気品の交換を十分な予見性をもって実施できる。ただし、検証寿命を迎える機器を同等品と交換するような場合であっても、両者が設計検証の観点から同等と言えることを厳密に確認することが求められる。設置環境を精緻に評価して検証寿命を延長したり、事業者が製造中止品を自ら作成したりすることもある³⁵。

オブソレッセンスマネジメントとして、古い電気品を近代化することも行われている。多くの国で、初期の原子力プラントで採用されていたアナログ式の制御機器が、プログラマブルロジックコントローラなどのデジタル機器に置き換えられつつある³⁶。一般にデジタル機器の保全コストはアナログ回路より安価であり、故障した機器の交換に要する時間も短くなることが多い。日本のPWRにおける中央制御室を含む制御装置のデジタル化³⁷や、イギリスのPWRにおけるデータプロセスコントロールシステムの全交換プロジェクト³⁸など、幾つかの優れた事例が知られている。これらの改造工事においては、リニューアルされる電気品のグレーディングと系統毎の重要度との関係の整理、系統分離コンセプトの実装、段階的な交換と使用前試験を可能にするような工程管理、交換前の運転員のトレーニングなどが関係する。

高性能な計装機器はプラントのパフォーマンス向上にも有用である。米国のほとんどのプラントでは、原子炉内の流量測定のための機器を交換することにより、定格出力を数パーセント程度アップレートすることを実現している³⁹。

4.3 大型構築物等の交換

長期運転を迎える軽水炉では、規制要求として、又は予防保全のため、大型の機器や構築物を交換することが多い。加圧水型軽水炉の蒸気発生器や原子炉容器上蓋、炉内構築物、沸騰水型軽水炉の炉心シュラウド、加圧重水炉の燃料チャンネル領域、及び各プラントのタービンなど、多くの交換実績がある。大型構築物の交換は、顕在化した物理的な経年劣化への対処、供給網の維持、機器レベルでの新技術の導入、予防保全と信頼性の向上、プラントレベルでの出力の向上等、多様な要素を考慮しながら、戦略的に実施されるものである。

関係する産業基盤は、既存のプラント群の維持だけでなく新しいプラントの建設にも必要とされるので、大型機器の交換に当たってはオーナーズグループや政府のイニシアティ

Standards Series No. SSG-69, 2021

https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1978_web.pdf

³⁵ Dou Yikan, “Study and practice on EQ technology for full life cycle of NPPs”, Proceedings of 4th International Conference on Plant Life Management, IAEA-CN-247-035, Lyon, France, 2017

³⁶ See reference 17

³⁷ Noguchi Munehisa, “Latest status of IC modernization in Japanese PWR plants”, Proceedings of 5th International Conference on Plant Life Management, IAEA-CN-297-023, Vienna, Austria, 2021

³⁸ Annex 1 of reference 17

³⁹ Hashemian H. M., “Maintenance of process instrumentation in nuclear power plants”, Springer, 2006,

ブが重要になる⁴⁰。日本の加圧水型軽水炉オーナーは、順々に蒸気発生器を交換していくことで供給網を支えてきたが、需要が一巡したことで新たな戦略が必要な局面に来ている⁴¹。

大型機器の交換は、運転経験から蓄積された知識を機器等の設計に生かす機会でもある。例えば、カナダでは、中性子照射による劣化が明らかになったためカランドリアや圧力管を交換する必要があったが、顕在化した経年劣化への対応として必要だったものだが、新しい管材を使用することで事故に対する安全余裕を大幅に向上させることを可能にした⁴²。日本では、予防保全として一部の三ループ加圧水型軽水炉の炉内構造物を取り換えたが、炉内構造物の機械設計が見直され、新しい規制基準によって見直された地震動に対しても十分な安全余裕を確保できるようになった⁴³。

4.4 ハザードの再評価

プラントの設計基準ハザードの見直しは新しい運転経験を起点とすることが多い。福島第一事故後の対応は、規制機関における知識のオブソレッセンスに対するアプローチの多様性を示している。日本の事業者は、新知見を反映するために、過去にも設計基準の地震動と津波高さを段階的に引き上げていたが⁴⁴、それでも事故を防ぐことはできなかった。事業者の自主的な対策では不十分であったという批判をうけ、政府は2012年に厳格なバックフィットを法制化した。新たな規制規則は、過去の自然災害を考慮する期間が引き延ばされることにより、設計基準ハザードを引き上げた⁴⁵。規制機関は、新たな自然災害の経験や研究を反映して、自然災害のバックフィッティングを継続的に実施している。一方、欧州委員会は、福島第一原子力発電所事故直後に、設計基準を超えてハザードが厳しくなったときの影

⁴⁰ Minami Y., Takai H., Ishikawa T., “Extension of operational period of nuclear power plants taking into account cost efficiency and activities for long term operation”, Proceedings of 4th International Conference on Plant Life Management, IAEA-CN-246-006, Lyon, France, 2017

⁴¹ Gottshling, Amy, “How PLiM & Refurbishments in Canada are Achieving Net-Positive Objectives for Nuclear”, Panel Discussion 3 of 5th International Conference on Plant Life Management, IAEA-CN-297-009, Vienna, Austria, 2021

⁴² Fong W. W. L., Neal P. D., Fraser C. R., Bramburger C. C., Nitheanandan T., “Enhanced nuclear pool-boiling from a glass-peened calandria tube”, Proceedings of 8th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer, CW-12600-CONF-001 Rev 1, Lausanne, Switzerland, 2012,

⁴³ Tatsuno Takahiro, “Overview of replacement of 3 loop PWR reactor vessel internals”, Proceedings of 5th International Conference on Plant Life Management, IAEA-CN-297-009, Vienna, Austria, 2021

⁴⁴ Atomic Energy Society of Japan, “The Fukushima Daiichi Nuclear Accident, Final Report of the AESJ Investigation Committee”, Section 2.1.3, Springer, 2015,

⁴⁵ Kamae Katsuhiro, “Design Basis Ground Motion Required on New Regulatory Guide -Introduction of Lessons Learned from Recent Disastrous Earthquakes”, Insights Concerning the Fukushima Daiichi Nuclear Accident, Atomic Energy Society of Japan, Vol. 2, page 161-172, 2021, https://www.aesj.net/document/fukushima_vol2/Vol2_19_161-172_web.pdf

響を段階的に評価するストレステストとピアレビューを実施することを要求した⁴⁶。これは、設計基準を直接変えることなく、自然災害に対する弱点を見出すというアプローチである。米国は、別のアプローチを取っている。外的事象に対する個別プラント審査（IPEEE: Individual Plant Examination for External Events）は事故前に自国のプラントに義務付けられていた⁴⁷。規制委員会は IPEEE に基づくリスク評価と事故の知見を比較し、追加措置が正当化されるかを検討した⁴⁸。

4.5 冗長性と多様性の強化

原子力発電所における安全上重要な設備の冗長性や系統分離に関する規制要求は国毎にそれほど大きく異なる訳ではない。すなわち、規定された運転状態に対して十分な能力を、単一故障基準や多様性に関する要求を満たしながら維持することが求められている⁴⁹。しかし、この要求を達成するための設計思想は同じ国でも異なっている。既存の原子力プラント群は、現行規制要件を満足していたとしても、重要なシステム、特にサポート系の冗長性と多様性を強化してきた。日本の多くのプラントは、1990年代にアクシデントマネジメント研究の成果を反映して⁵⁰、また2010年代に福島第一事故の教訓を反映して、非常用電源を強化した。欧州では、定期安全レビューにおいて、多くの規制機関が、サポート系、特に最終ヒートシンクの多様性を強化するよう、許認可取得者に奨励した。たとえば、スイスのある発電所では、一つの河川とその上流のダムを独立した二つの水源として扱うことのリスクが指摘され、事業者は地下水や水道水などの選択肢を検討することになった⁵¹。

4.6 設計拡張状態

軽水炉の基本となる設計思想は、冷却材喪失等の深刻な事故が発生しても、核燃料の大きな損傷を防止することであった。その後の安全研究によって燃料損傷に至るシナリオが見出され、安全基準が高度化すると共に、格納容器保護に着目した燃料損傷後のアクシデントマネジメントが整備された。必要な設備は新型原子炉の設計に最初から取り入れられたが、

⁴⁶ Council of the European Union, “Ad Hoc Group on Nuclear Security - final report”, 10616/12, 2012,

⁴⁷ United State Nuclear Regulatory Commission, “Perspectives Gained From the Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) Program - Final Report”, NUREG-1742, Volume 1, 2002
<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1742/vol1/index.html>

⁴⁸ See reference 4

⁴⁹ International Atomic Energy Agency, “Safety of Nuclear Power Plants: Design”, IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 revision 1, 2016

⁵⁰ Atomic Energy Society of Japan, “The Fukushima Daiichi Nuclear Accident, Final Report of the AESJ Investigation Committee”, Section 2.1.1.3, Springer, 2015,

⁵¹ Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI, “EU stress test: Swiss national action plan; Follow up of the peer review 2012 year-end status report”, 2012,
https://www.ensi.ch/en/wp-content/uploads/sites/5/2013/01/ensi_swissap_eng_121231_final.pdf

改造工事を経て既設炉に追設されることもあった。こうして、設計基準を超える事象に対する設計拡張状態が定義されてきた。例えば、バックフィット規則と定期安全レビューを併用しているスイスでは、1960年代に設計されたプラントに、1991年から1993年にかけてバンカー式の原子炉停止系と残留熱除去系が、1992年に耐圧強化格納容器ベント系が、2003年に受動的水素再結合器が、段階的に要求されてきた⁵²。

設計を拡張するための枠組みの違いは、福島第一原子力発電所事故後の各国の対応から観察される。米国は、1980年代後半に整備された規制分析の枠組みを使ってコストベネフィット評価を実施し⁵³、特定の炉型に対して耐圧強化ベントや燃料プール冷却機能の増強を要求すると共に、事故時の発電所外からの支援策を強化することを求めた⁵⁴。一方、欧州ではすべてのプラントに対してストレステストを要求して緊急に対処すべき弱点がないかを確認し、その後の定期安全レビューの中で更なる安全強化に取り組んだ⁵⁵。例えば、フランスでは現在第四回の定期安全レビューが順次実施されているが、そこでの主要な改造は使用済み燃料プールとオフサイトからの安全対策に注目したものである。フランスの事例の特徴は、電力事業者と規制機関が数年の期間をかけて注目すべきレビュー項目と改善の方向性について合意し、それをすべてのプラントに順次展開していくことである⁵⁶。日本では、事故後に規制基準を変更して大規模な改造を伴うシビアアクシデント対策を導入した⁵⁷。その後も、規制機関のイニシアティブで、事故分析の結果をふまえて事故時の排気系の運用方針を変更するなど、大きなコストを掛けずに追加的な変更が行われている。

5. 考察

図1は、これまで見てきた事例を大まかに分類したものである。イニシアティブの観点から、事例は二つのグループに分類できる。一つ目は、事業者が、検証寿命を迎える機器の交換に際して、安全余裕の増加、運転保守費用の削減、産業基盤の維持などを考察し、戦略的に新

⁵² Sshwarz Geroge, “Switzerland back-fitting standards to existing NPPs”, Proceedings of the International Conference on Effective Nuclear and Radiation Regulatory Systems, IAEA Proceedings Series, STI/PUB/2034, The Hague, The Netherlands, 2019

⁵³ United State Nuclear Regulatory Commission, “Regulatory Analysis Guidelines of the U.S. Nuclear Regulatory Commission, Draft Report for Comment” NUREG/BR-0058, Rev. 5, 2017
<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/brochures/br0058/index.html>

⁵⁴ See reference 4

⁵⁵ European Nuclear Safety Regulation Group, “EU stress tests specifications”, Annex 1, Declaration of ENSREG on March 25, 2011,
https://energy.ec.europa.eu/system/files/2014-10/20110525_eu_stress_tests_specifications_0.pdf

⁵⁶ See reference 23

⁵⁷ Atomic Energy Society of Japan, “The Fukushima Daiichi Nuclear Accident, Final Report of the AESJ Investigation Committee”, Section 7.1.2, Springer, 2015,

しい技術を取り入れるものである。二つ目は、規制機関がイニシアティブを取り、新しい知見に対する対策が講じられることである。後者はより受け身になりがちで、時にはプラントライフマネジメントの失敗、すなわち当初の事業計画より早い時期の原子炉永久停止に繋がる。日本では、福島第一事故後、多くのプラントがバックフィット規制によって永久停止した。4.5節で言及したスイスのプラントも、最終ヒートシンクに関する規制上の合意は得られたものの、経営判断として2019年末に永久停止した。規制主導型のアプローチが比較的うまく行ったと思われるスイスでさえ、リアクティブなオブソレッセンスマネジメントは難しかった。いずれの取組においても、プラントライフマネジメントの成功には、知識のオブソレッセンスに取り組むステークホルダーの貢献が重要である。規制がイニシアティブを取る場合は、安全再評価の頻度やバックフィットの発動条件に関する明確な要件を設定すると共に、規制機関自らが安全研究に取り組むことにより、事業者のプロアクティブな対応を促す必要がある。日本では、バックフィットが規制要件化されているが、定期的な安全再評価は事業者の自主的安全性向上を促すための届出制度になっている。この枠組みを利用して、各プラントが独自の改善を提案するような文化が醸成されるかどうかは今後の課題である。

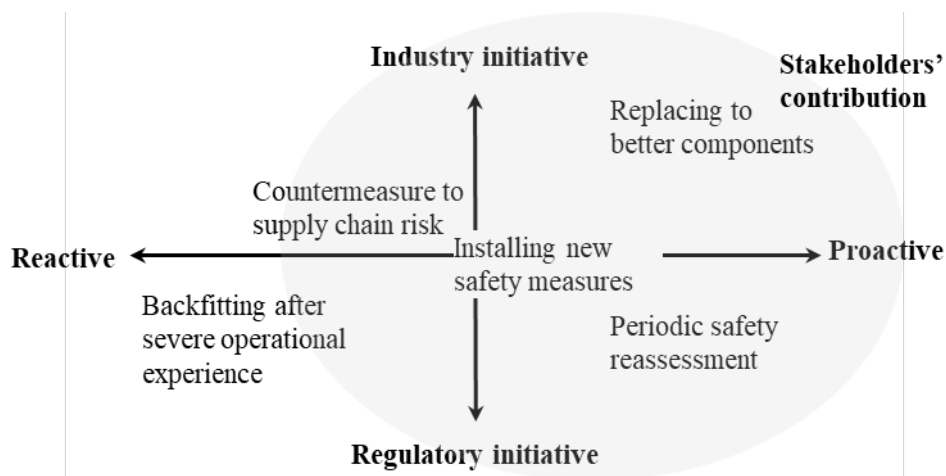


図1 オブソレッセンスマネジメント事例の分類

原子力産業界がイニシアティブを取る場合、後発の事業者が先行者の努力を利用して、より多くの利益を得るといった問題が生じる可能性がある。特に、ある国に複数の許認可取得者がいる場合、これは日和見の姿勢を誘発しかねない。戦略的にオブソレッセンスマネジメントを進めるには、エネルギー行政からの支援と、事業者団体を通じた協力の両方が必要である。これは、米国における事故耐性燃料開発の進歩や、日本の加圧水型軽水炉における大

型構築物交換で実証されている。製造中止品への対応は、供給網の調査や共通する予備品の統合など、業界全体で取り組むことも可能である。オブソレッセンスマネジメントは、長期運転と新設の両方を睨み、グローバルな産業構造の問題として扱うべきである。

ここまでの考察を踏まえると、社会インフラの安全管理体制はオブソレッセンスマネジメント全体を包絡できるのかという疑問が生じる。原子力を含む多くの産業は、ISO-9001で標準化された品質マネジメントシステム(QMS)を適用して安全管理体制を構築している。原子力安全では、QMSの顧客を原子力安全と読み替え、プロセスアプローチ、プロセスアプローチ、リスクベース思考、PDCA サイクルにより、安全への期待と現実の乖離を管理している。規制や規格のオブソレッセンスへの対応は、顧客の期待の変化に対応するものであり、技術のオブソレッセンスへの対応は、QMSにおける外部から提供されるプロセス、製品、サービスの管理に直結するものである。しかし、第4章で示したように、これらの対応は知識のオブソレッセンスへの対応とセットで実施されることが多い。すなわち、陳腐化したものを最新の規制・規格に適合したものに置き換えるだけでなく、原子力の安全性・信頼性に対する長期的な戦略のもと、さらなる改善を図っている。安全要求事項の再定義は、QMSにおける顧客の再定義のアナロジーであり、「安全のマーケティング」と言い換えることができる。これがうまくいかないと、オブソレッセンスマネジメントはリアクティブになりがちで、たとえ大事故に至らなくても、予期せぬ運転経験による事業継続の失敗の可能性が高まる。規制機関にとっては、議会による監視や市民を巻き込んだ公聴会が「安全のマーケティング」として機能し、技術進歩を損なわない規制システムの維持に役立っていると考えられるが、その構造を分析するにはさらなる事例研究が必要である。

6. 結論

本研究における主要な調査結果は次の通りである。

- オブソレッセンスには幾つかの側面があり、そのマネジメントは多岐にわたる。規制機関は QMS、バックフィット、定期安全レビュー等によってオブソレッセンスを監視している。
- オブソレッセンスへの対応は、運転保守コストの削減、原子炉の出力や可用性の向上、産業基盤の維持など、複数の技術課題に同意に対処できるよう計画される。産業界のイニシアティブを維持する仕掛けが重要である。
- リアクティブなオブソレッセンスマネジメントは、プラント永久停止の引き金になりえる。規制要件や QMS を超えた安全性の向上、いわゆる“安全のマーケティング”が、プラントライフマネジメント成功の鍵である。

利益相反の申告

本論文に関して、開示すべき利益相反関連事項はない。

謝辞

PLiM-5 の企画・運営に参加されたすべての方に感謝いたします。

CRedit authorship contribution statement

Kenta Murakami: Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Project administration, **Naoto Sekimura:** Conceptualization, Investigation, Supervision