

1F事故オンサイト廃棄物

1F事故で発生した多種多様なオンサイト廃棄物の管理について
(廃炉委報告書の紹介)

東北大学 新堀 雄一

(工学研究科 量子エネルギー工学専攻)

本講演の一部は、2020.9の原子力学会秋の大会
福島第一原子力発電所廃炉検討委員会セッションの講演を重複する部分があり、
その後の状況を踏まえてまとめている。

参考文献:

加藤和之:福島第一原子力発電所廃炉における廃棄物の取組みと今後について、
原子力バックエンド研究, 28 (2), 33-38 (2021).

新堀雄一: 学会廃炉委における廃棄物の取組みと今後について, 日本原子力学会誌,
63 (3), 263-266 (2021).

2020.7 学会廃炉委 廃棄物検討分科会(主査 柳原先生)
「国際標準からみた廃棄物管理 - 廃棄物検討分科会中間報告 -」
https://www.aesj.net/uploads/dlm_uploads/kokusaihyojun_report202007.pdf



1. はじめに

2. 本報告書の位置付け 中間報告

3. 本報告書の内容

「廃止措置」, 「廃炉」および「環境修復」の基本的な考え方、
廃炉および環境修復のプロセス、
廃棄物量、シナリオの検討 等

4. 今後の方向性(私見)

1F廃棄物の今後の議論の一助に

5. おわりに

1. はじめに

「国際標準からみた廃棄物管理-廃棄物検討分科会中間報告-」
(2020.7)

- ・ 本報告書の中間報告書としての位置付けやその内容
- ・ 1F廃棄物に関連する学会等の取り組み今後の方向性について

本ウィークリーウェビナーにあたり**廃炉検討委員長 宮野先生**および**同委員会 廃棄物検討分会主査 柳原先生**に深甚なる謝意を表すとともに、本報告書に携わった**委員会、分科会メンバー**および**事務局**をはじめとする**関係の皆様**に**厚く御礼**申し上げます。

2. 本報告書の位置付け

本報告書はあくまでも中間報告であり、本報告書の内容を今後どのように福島第一の廃炉に活かしていくかを、**地元の方々をはじめ様々なステークホルダーから多様な観点のご意見を伺った上で更なる検討を深めると共に、廃炉作業の進捗に伴う追加情報を得て改訂していくことが必要**となる。

本報告書では、1Fのエンドステート（最終的な状態）に着目し、燃料デブリ取出し作業が開始されようとしている同発電所の廃炉の課題として、あらかじめエンドステートの概念を関係者で共有した上で、廃棄物管理に係る対策などの取組みを進めることの必要性やエンドステートに至る過程の代表的な選択肢を、現在まで得られている情報を基に海外の知見等を踏まえてまとめている。

3. 本報告書の内容

■ 言葉の定義

廃止措置と廃炉： 1Fは既に特定原子力施設に指定されており、本報告書では、1F施設の除染・解体を、通常炉の廃止措置と区別して「廃炉」と呼称（燃料デブリ等が炉心やその周辺に分布しており、汚染も広範囲に広がっているため、通常炉の手順に従ったものではない）

・ IAEA(2006)の廃止措置に係る基本的な考え方に基づき、「廃炉」を施設に課される規制から除外するための行政的、技術的な活動と位置付け（原子炉施設（原子炉建屋、タービン建屋など）および関連する施設（廃棄物処理建屋、汚染水管理エリア、地下水管理施設など）、管理棟、港湾施設を対象とした除染・解体作業）

環境修復（サイト修復）： OECD/NEA(2016) に従ってサイトの土壌・地下水など環境に対する除染・修復（周辺の施設以外の土壌や地下水等について、放射能汚染の除去によりサイトを放射線管理上の措置が不要とすること）

参考：IAEA¹⁾の廃止措置の定義

The term decommissioning refers to administrative and technical actions taken to allow removal of some or all of the regulatory controls from a nuclear facility (except for a repository, which is, by definition, subject to closure and not decommissioning). These actions involve decontamination, dismantling and removal of radioactive materials, waste, components and structures.

廃止措置とは原子力施設の一部又は全部をそこに課せられている規制から除外するための行政的、技術的な活動である（処分施設は除外、処分施設は、定義上、閉鎖の対象であり、廃止措置ではない）。この廃止措置の活動には、放射性物質、廃棄物、機器・構造物の除染、解体、撤去が含まれ、放射線リスクの低減を実現するために適用されるものであり、安全確保に必要な事前の計画や評価に基づいて実施される。

1) IAEA, Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material, Safety Requirement, No.WS-R-5, 2006

参考: OECD/NEAの定義

Environment Remediation / Site Remediation ²⁾

(環境修復/サイト修復)

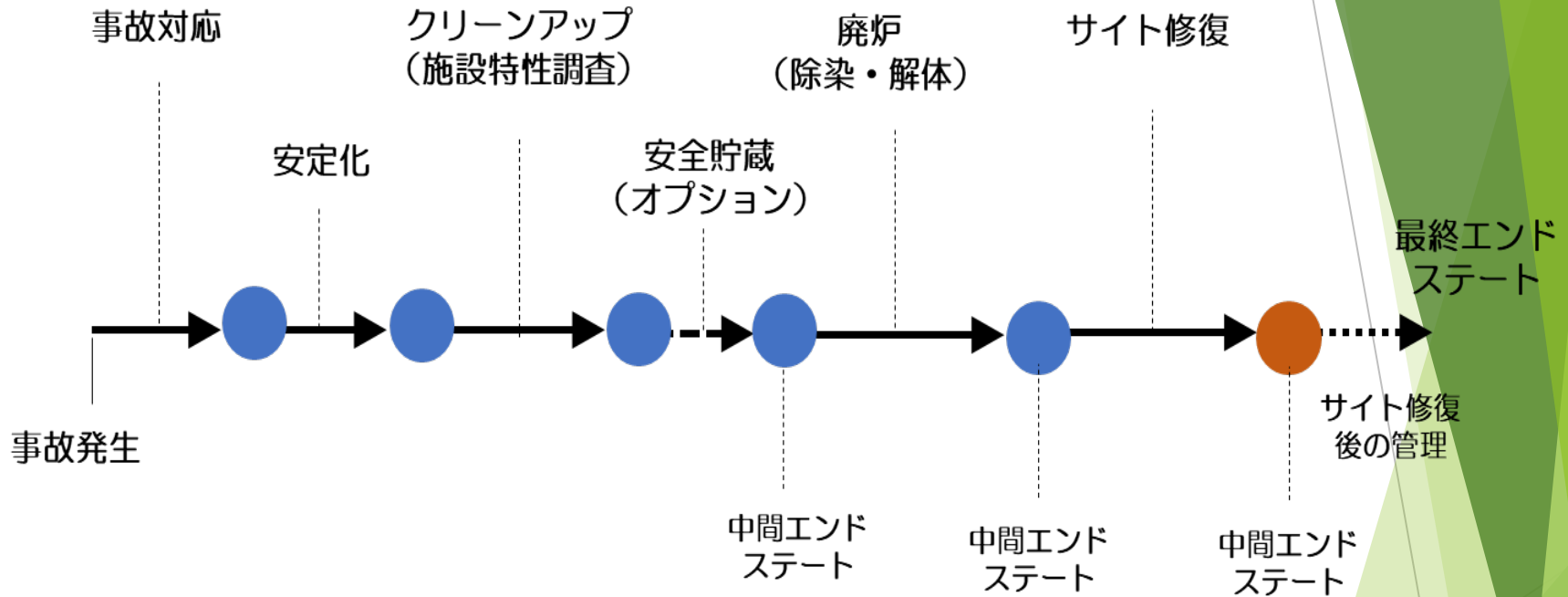
The term “remediation” is used here to refer to actions taken to reduce the impact from contamination in land areas and in the associated groundwater, in order to protect the environment and leave the site in a state that is suitable for its next use. 環境を保護し、サイトを次の使用に適した状態に保つために、陸域および関連する地下水の汚染による影響を減らすために取られる措置を指す。

When there is radioactive contamination on the land of a nuclear power site, activities such as decontamination are being considered as "site remediation" to distinguish it from decommissioning. While decommissioning is an activity to lift the regulations imposed on the target facilities, site restoration targets soil, groundwater, etc. and the site is safe for radiation control by removing radioactive contamination. Site remediation is an effort to bring it into a state.

原子力サイトの土地などに放射能汚染がある場合、その除染などの活動は「サイト修復」として廃止措置とは区別した検討がなされている。廃止措置は対象となる施設に課されている規制を解除するための活動であるのに対して、サイト修復は土壌、地下水などを対象とし、放射能汚染の除去によりサイトを放射線管理上安全な状態にする取り組みである。

2) OECD/NEA, Strategic Considerations for the Sustainable Remediation of Nuclear Installations, OECD 2016, NEA 7290

事故発生から最終状態に至るまでの主要な過程 (同報告書, 2020)



本報告書では、**1Fの廃炉およびサイト修復も目指す状態（施設の規制解除および放射線管理上の措置を不要とすること）**が、原則的に通常炉と同様にあることを述べている。

■ 廃炉および環境修復のプロセスについて

9

廃炉のプロセス：通常の廃止措置の考え方を基盤とすれば、「廃炉」の過程についても、**複数の選択肢**が存在する。

・ **即時解体**：放射能汚染物質を含んでいる器材、構造物、設備の部分を撤去するか、又は、規制当局が示す無拘束の許容レベルか、制限付き許容レベルまで除染することを基本方針とする。この場合、廃止措置作業は運転停止後に速やかに開始される。この基本方針は**廃止措置の迅速な完遂**を意味し、**全ての放射性廃棄物を保管施設か処分施設へ移送**することを含んでいる。

・ **遅延解体**：安全貯蔵、安全保管、安全隔離などとも呼ばれ、**放射能汚染を含む施設の一部を処理するか安全に貯蔵・維持できる状態にして管理**し、その後、上述のような撤去、又は許容レベルまでの除染を行う。放射性廃棄物の扱いは即時解体と同様である。

・ **原位置処分**（Entombment）：放射性核種で汚染した物質を、放射能レベル、核種の化学形態および周辺環境等を考慮して適切な安全機能を施した上で原位置に処分すること、又は、構造的に長寿命材料の中に格納するなどして、規制当局が示す施設の無拘束解放に係る許容レベルか、制限付き使用に係る許容レベルまで放射能の減衰を待つことを基本方針とする。

- ・ IAEAやOECD/NEAなどの国際機関では、事故及び環境汚染を対象にして、原子力施設の廃止措置（廃炉）および原子力サイトの除染・修復などに係る過去の経験や現状のレビュー

- ・ 本報告書では、その中で、1Fにおける施設の除染・解体及びサイトの除染・修復を実施する上で有益な事項を抽出している。例えば、

- a) 事故直後から施設の修復が終了するまでのタイムラインにおいて、**施設の除染・解体のほか、サイトの除染・修復までを含めた様々な活動**が必要であること
- b) 事故後の取り組みでは、**エンドステートを見据えた上で、そこに至るまでの道筋と計画を十分に検討**することが重要であること
- c) **十分な情報がなくエンドステートが明確に定義できない段階では、複数のエンドステートの選択肢を設定し、それぞれの利点・難点を検討**することが有用
- d) **放射性廃棄物管理計画を廃炉、環境修復の作業計画と統合**して検討すること

事故炉の環境修復(2/2)

e) 環境修復とは汚染からの被ばくを低減することであり、完全な除染や、サイトをバックグラウンド状態に戻すことでは必ずしもなく、**長期のステewardシップ**を環境修復活動として考慮することもあり得ること

ステewardシップとは、「(アクティブな)環境修復、環境評価の終了後、残留物による健康、環境への影響からの長期にわたる保護が必要な場合にとられる技術的、社会的な対応策(サイト管理、モニタリング、保守、情報管理など)」と定義されている。

f) **放射性廃棄物の処分**などの取り組みは**周辺住民を含む様々なステークホルダーとのコミュニケーション**および**社会的合意なくして解決が困難**であること

ことも取り上げている。

■ 廃棄物量 (固体廃棄物) (1/2)

1F: 通常炉に比較して2桁高いとの試算も

1F廃炉・サイト修復で発生する放射性廃棄物の試算例*)

Waste Category	Unit	Dismantling Unit 1 to 6	Demolishing other NPP facilities	Decommissioning water treatment facilities	Decommissioning waste treatment and storage facilities	Environmental remediation	Total
Debris	t	644	0	0	0	0	644
HLW		2,042	0	0	0	83	2,125
TRU		0	0	16	0	830	846
L1		100,135	104,543	310	1,050	76,030	282,069
L2		429,462	329,364	38,174	200	1,424,600	2,221,800
L3		951,309	2,825,634	151,320	26,325	1,375,000	5,329,587
Total		1,483,592	3,259,541	189,820	27,575	2,876,543	7,864,646

1～6号機

その他の
施設

水処理施設

廃棄物処理/
貯蔵施設

環境修復
(サイト内)

放射能レベルが比較的高い(L1), 比較的低い(L2), 極めて低い(L3)低レベル放射性廃棄物として区分

TRU: TRans Uranium (超ウラン元素)を含む廃棄物で主に再処理工場から排出

TRU廃棄物の正式名称: 長半減期低発熱放射性廃棄物

*) H. Kawamura, et al., Decommissioning and Environmental remediation Scenario development for Fukushima Daiichi, Proceedings of TopSafe 2017, 12-16, February 2017, IAEA

■ 廃棄物量 (固体廃棄物) (2/2)

通常炉

通常炉	区分	量(ton)	
BWR 110万kW級1基	L1	80	放射性廃棄物 中深度処分相当の放射性廃棄物
	L2	850	ピット処分相当 //
	L3	11,810	トレンチ処分相当 //
(原子力安全基盤機構, 廃止措置ハンドブック, 2009)	CL	28,490	クリアランス対象物
	NR	495,420	放射性廃棄物でない廃棄物
	合計	536,650	非放射性廃棄物

クリアランス対象物：放射性廃棄物として扱う必要のないもの

原子力施設およびRI施設の操業や廃止措置に伴って発生する解体物等のうち、一定の基準以下の放射性物質濃度であることが国より確認されたもの（放射線量が自然界よりも十分低い（1/100以下）レベルのもの）。当面の利用方針として、原子力施設由来のものであることを理解した業者や施設等での再利用¹⁾。

1) (一財)エネルギー総合工学研究所原子力発電所廃止措置調査検討委員会：原子力施設及びRI施設の解体物等のリサイクルに向けて,(制定：2018年11月/改定：2019年2月/技術レポート1 Vol. 1.01)

1Fにおける放射性廃棄物の低減・減容の必要性 (廃棄物の最小化と現場指向)

水素発生や臨界への配慮

参考：管理・処分形態

第2種廃棄物埋設(管理型処分)

<https://www.jnfl.co.jp/en/business/llw/>

Trench disposal; LLW for near-surface disposal without engineered barrier (L3 waste)

(トレンチ処分)

L3

Pit disposal; LLW for near-surface disposal with engineered barrier (L2 waste)

(ピット処分)

L2

Subsurface disposal; LLW for sub-surface Disposal with engineered barrier (L1 waste)

(Intermediate depth disposal)

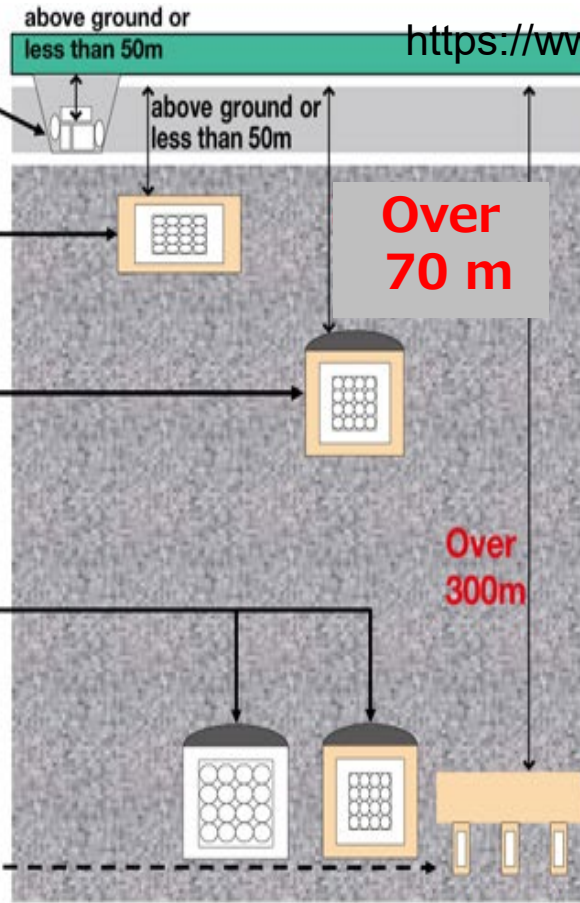
(中深度処分)

L1

LLW for geological disposal (TRU waste)

(地層処分)

High-level radioactive waste for geological disposal (vitrified waste)



This is made from "Graphical Flip-chart of Nuclear & Energy Related Topics 2014" by the Federation of Electric Power Companies of Japan.

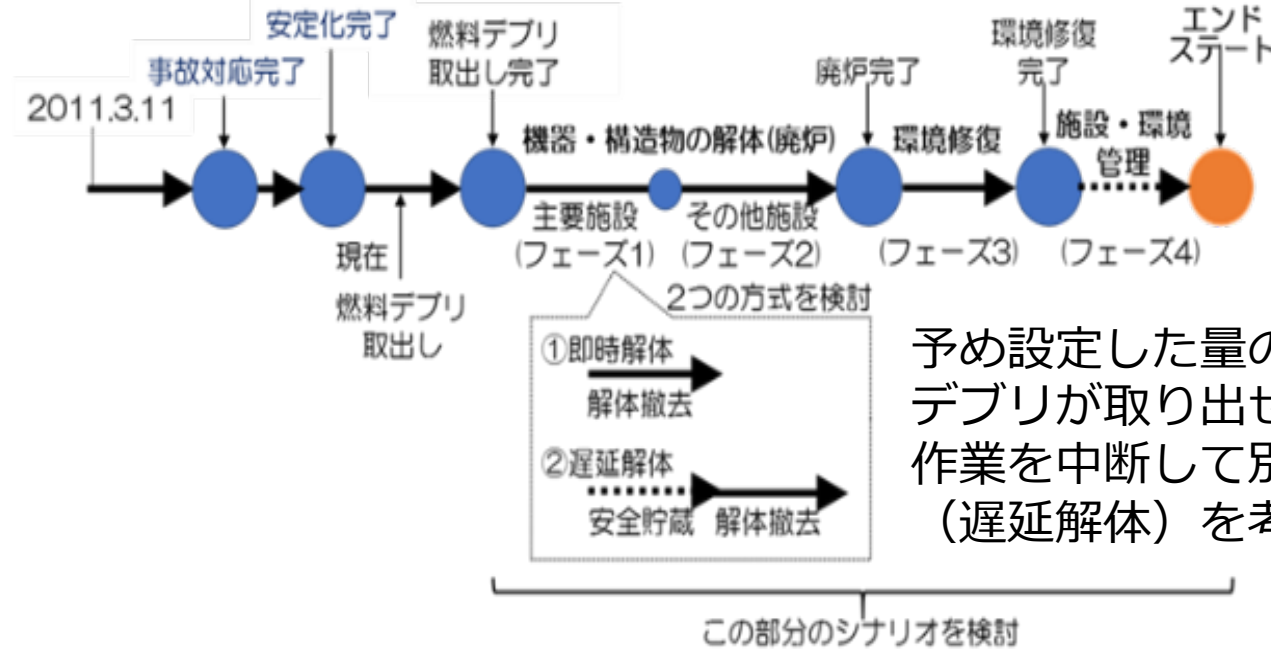
RI研廃 : http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/maisetsu/1261057.htm

基本安全機能: 遮蔽、飛散防止、閉じ込め、移行抑制、隔離

■ シナリオの検討(1/3)

15

検討対象範囲と時間軸



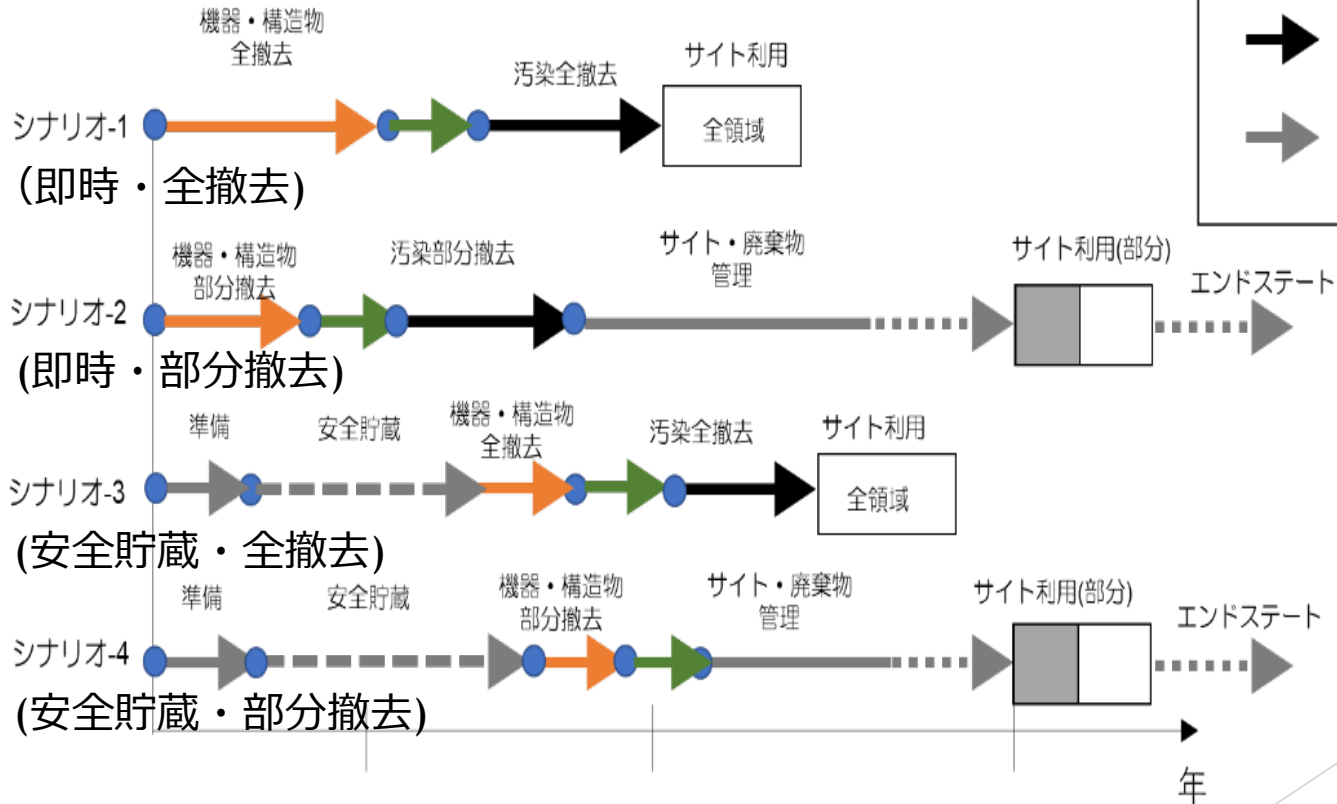
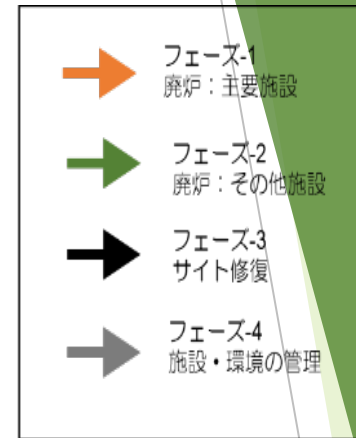
予め設定した量の残存燃料及び燃料デブリが取り出せない場合は、一旦作業を中断して別の取り組みを検討(遅延解体)を考慮

- フェーズ1: 廃炉作業のうち主要施設(原子炉建屋・タービン建屋)の解体終了まで
- フェーズ2: 残存する他の構造物の解体が終了するまで
- フェーズ3: 汚染土壌・地下水の除去・処理等サイト修復が終了するまで
- フェーズ4: サイト利用に必要な準備が終了するまで (廃棄物の管理などを含む)

エンドステートは、機器・構造物及び汚染土壌・地下水等の汚染が全て取り除かれた状態を基本とするものの、それらの一部を管理・監視する状態をも考慮する。

■ シナリオの検討(2/3)

本報告書では上述したタイムラインおよび領域区分に対し、2つの廃炉方式（**即時解体**、**遅延解体**）と2つのエンドステート（**制限なし解放**、**制限付き解放**）を組み合わせた4つのシナリオを設定。



■ シナリオの検討(3/3)

本報告書は、これらいくつかのシナリオの検討を通して、

放射性廃棄物の減衰による放射性廃棄物量のみではなく、複眼的に比較検討が必要となることを指摘している。たとえば、

- ・**サイトの有効利用（一部/全部、制限/無制限）が可能か、**
- ・**安全性（作業員及び公衆）は確保されるのか、**
- ・**合理性（経済性）は確保されるのか、**
- ・**放射性廃棄物の安全な管理は可能か、**
- ・**放射性廃棄物の行先を決められるのか、**
- ・**サイトの利用計画が社会的受容性を有するか、そして、**
- ・**エンドステートまでの概略工程が社会的受容性を有するか（地域間及び世代間等の公平性、意思決定プロセスの透明性）**などが、

国際的な議論からも、シナリオの検討には重要となることに言及している。

4. 今後の方向性(私見) (1/3)

放射性廃棄物の最終的な処分までを考えれば、1Fサイトおよびその周辺のみではなく、廃棄物を処分するサイトのことにも考慮する必要がある。

(特定サイトのエンドステートも、搬出する先の廃棄物の処分サイトを含めて俯瞰すれば、事故修復の一つの中間的なステートということになるかもしれない)

1Fサイトのステート（状態）を、関係者（ステークホルダ）で共有し、そこに向けて進捗を管理し、また課題を抽出するとともに、その解決に向けた技術や関連する規制の整備、また、何より大切な**社会的側面での議論を深めることが重要**

現状では、燃料デブリの取り出しが予定されており、燃料デブリの炉内での分布や性状に関する詳細な情報の蓄積が、達成目標やその選択肢の議論には必要となる。また、これまで得られたデータを踏まえ、燃料物質の計量管理方策や事故進展挙動評価に加え、遠隔操作技術、分析技術、処理・処分技術の構築に関する継続的な検討が重要となっている。



これらの現状を考慮すれば、本報告書に示されている関連の海外事例、さらにその選択の背景についても整理しつつ、放射性廃棄物や今後取り出すデブリの合理的な安定保管を念頭に置く中間エンドステートの議論を深める段階にある。

Time-series image after debris removal (デブリ取出し後の時系列のイメージ)

Decommissioning
(廃止措置)

Environmental remediation
(site remediation)
環境修復 (サイト修復)

Time

Waste Management/Disposal
(廃棄物の管理・処分)

The abolition of 1F nuclear power plant needs to proceed with all of these.
1Fを廃止するには、これらを全て進める必要がある

参考：

20

Waste Management/ Disposal (廃棄物の管理・処分)

廃棄物の管理・処分とは、廃棄物の減容化、安定化、無害化を指す。
(IAEA, 2011)

無視し得る程度の影響しかもたらさない液体または気体上の放射性物質を放出するか、あるいは固体状の放射性物質をクリアランスする(放射性物質を規制上の管理から外す)ことを除き、廃棄物を閉じ込めることおよび生活圏から隔離することを挙げている。

IAEA: Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirement No. SSR-5 (2011)

4. 今後の方向性(私見) (2/3)

21

放射性廃棄物の物量の低減について、現在、1Fでは、焼却などによる減容が図られている一方、クリアランス制度（放射性廃棄物として扱わなくてよい廃棄物のサイト内外の再利用、クリアランスレベル以下の廃棄物と放射性廃棄物の合理的な分別手法と規制の整備を含む）の検討が重要

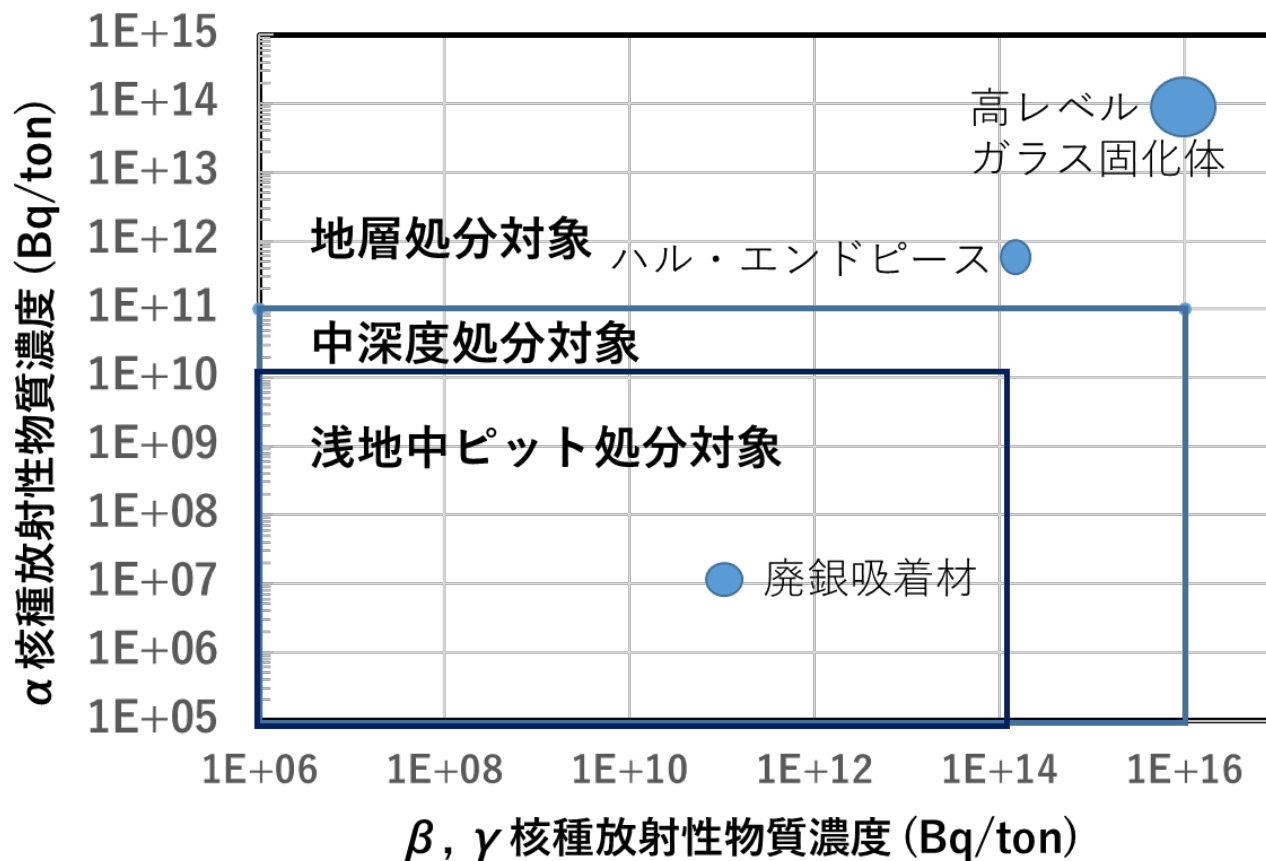
再利用では、通常炉で既に検討される処分容器の一部としての利用に加え、バリア機能（低透水性や低拡散性）を持つ資材への大規模な利用も）廃棄物の中で考えていく必要がある。これらの検討は廃炉および環境修復の過程にも大きく影響する。

現状では、今後のデブリ取出しを経て、それらの分布状態や性状が段階的に明らかになること、また、1Fの状況をこれらのデータをも加えて把握し、データを蓄積、整理していくことが期待される段階にあることを認識しつつも、放射性廃棄物の処分についての議論を進める上では、燃料デブリの取出しを本格的に進めていく前に、デブリを含んだ廃棄物の定義、さらに処分の実施主体についての議論も開始する時期に来ている。

4. 今後の方向性(私見) (3/3)

処分形態の選択には、処分システムを想定した評価が前提にあり、特に、放射性物質の化学形態を考慮する必要がある

放射性廃棄物の区分と処分形態



燃料デブリの炉内での分布や性状（→濃度だけでなく、放射性物質の地下環境における化学形態を把握することが処分形態を決める上で必要になる）

例： 廃銀吸着材は I-129 を含む
（濃度によっては中深度、浅地中への処分も可能であるものの、地層処分相当のTRUとしての位置づけも）

電事連・JNC: 第2次TRULレポート (2005)および朽山(2016)より作成

5. おわりに

23

本報告書の重要なメッセージの一つは、1Fの廃炉・サイト修復で発生する放射性廃棄物の取り扱いは、世代を超えた長期にわたることが予想され、エンドステートを念頭に**サイト内においても中間エンドステート（廃炉（除染・解体）やサイト修復等の各活動の達成目標）**を定め、**着実にステップを踏むことが重要**となることを指摘している点にある。

前述において、放射性廃棄物の処分サイトのエンドステートにも言及したが、本報告書では、燃料デブリ取出し作業が開始されようとする1Fサイトにおいても、その状況によって、廃棄物を安定に管理し、段階的に目標とすべきステート（状態）を議論していくことの重要性にも併せて言及している。

学会における廃棄物分会では、**廃棄物量の再見積りを進めるとともに、クリアランス制度、廃棄物の再利用、放射性廃棄物の定義、処分までに至る間の安定な保管とその処分に及ぼす影響の検討をさらに深める**時期に来ていると考える。これらの取り組みを通して、ステークホルダーとの意見交換を進めていくことが重要となる。

HLW: 高レベル放射性廃棄物 (使用済燃料を再処理し、UやPuを除いた後に残った5%の核分裂生成物やUやPu以外のアクチノイドをガラス固化したもの). 但し、本講演のp.12では1F事故により破損した燃料をHLWとして区分している。なお、フィンランド、スウェーデン等では再処理を行わないことから、使用済燃料がHLWとなる。何れのHLWも地層処分相当の廃棄物となる。

TRU: 本講演p.12の下段に簡単な説明あり。再処理工場やMOX(UとPuの混合酸化物)燃料加工施設等から排出される。例えば、燃料の被覆管、廃液、フィルターなどであり、放射能レベルにより処分形態 (地層処分、中深度処分、ピット処分等) が選択される。その意味では1Fの多様な廃棄物に類似していると言われる場合がある。但し、p.12の表では、地層処分相当の量となる。

L1, L2 およびL3廃棄物 : 本講演p.12の下段に簡単な説明あり。発電所から排出される廃棄物であり、放射能レベルの比較的高い、燃料棒や炉内構造物等がL1, 放射能レベルが比較的低い、廃液、フィルター、廃器材、消耗品等を固化したものがL2, 放射能レベルが極めて低い、コンクリートや金属等がL3と呼ばれる。レベルの基本(目安)は本講演p.22および右図を参照。

なお、この他にも、放射性廃棄物には、ウラン廃棄物(ウラン濃縮・燃料加工施設からの消耗品、スラッジ、廃器材)やRI・研究所等廃棄物などがある。

CL: 本講演p.13に説明あり。クリアランス対象物 (放射性廃棄物として扱う必要のないもの) .

