

福島第一発電所の廃止措置と放射性廃棄物の処理処分 バックエンド部会関係者による検討

林道寛^{*1}

福島第一原子力発電所の対応については、原子力災害対策本部が「廃止措置に向けた中長期ロードマップ」を改訂（2013年6月）し、その道筋を示している。また、日本原子力学会は、事故により発生する放射性廃棄物の処理処分について、その研究開発課題の抽出と解決に向けた考え方を取りまとめ、2013年3月にホームページで公開している。

日本原子力学会は2012年6月に、「事故調査委員会」を発足させ、あらゆる関係する部会等が連携しつつ、総力を結集して、独自の視点から報告書を取りまとめつつある。本講演では、これらの検討状況のうち、放射性廃棄物の処理・処分と廃止措置について留意すべき事項と課題対応の進め方の提案の要点を紹介する。

Keywords: 福島第一発電所, 放射性廃棄物, 廃止措置

Nuclear Emergency Response Headquarters developed revision of "The Mid-and-Long Term Roadmap toward the Decommissioning of Fukushima-Daiichi" on June, 2013. This roadmap set out a detailed process for decommissioning. While Atomic Energy Society of Japan (AESJ) published the R&D plans for treatment and disposal of radioactive waste of Fukushima-Daiichi to put the roadmap into shape at the end of March, 2013. And also AESJ set up "Accident investigation commission of Fukushima-Daiichi" in June, 2012. This commission is making the report from AESJ's unique perspective.

This report introduces the current status of the examination's progress of the investigation commission on the main point of approach to promote treatment and disposal of the radioactive waste and decommissioning of Fukushima-Daiichi.

Keywords: Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, treatment & disposal of radioactive waste, decommissioning

1 はじめに

福島第一発電所の事故による放射性廃棄物はきわめて多量であり、またその種類も伐採木、飛散した瓦礫類、汚染水処理二次廃棄物等多種多様である（Table 1）。また、今後廃止措置に向けてプラント内の瓦礫類の撤去作業や設備の解体撤去作業に伴い発生する放射性廃棄物も多量であり、廃止措置方式として、エンドステートをどのような方式を選定するのかによって、放射性廃棄物の対応も異なってくる。本稿においては、中長期ロードマップや原子力学会の特別専門委員会の報告書およびサイトの現状を踏まえて、課題とその対応についての検討状況を報告する。

東京電力福島第一原子力発電所（1～4号機、以下F1）では事故に伴い、放射性核種で汚染された廃棄物や伐採木、瓦礫およびそれらの対応に伴う二次廃棄物も多量に発生する。さらに、今後の廃止措置やその準備作業に伴いさらに多種多様な廃棄物も発生する。これらの廃棄物の処理・処分は、その性状や核種濃度などに応じた対応を基本とし、サイトの現状を踏まえたリスクの低減化と廃棄物の減容・安定化を考慮する必要がある。また、廃止措置・放射性廃棄物の処理処分は、個々の段階の最適化が、必ずしも全体の最適化とはならないとされ、F1の廃止措置においても、プロジェクト全体のマネジメントをどう行うか、また、最終状態（エンドステート）をどのように想定するかを、ステークホルダーにおいて共有し、技術的な課題のみならず社会的受容性に柔軟に対応することが肝要となる。

本節では、廃止措置上の留意点に主眼を置き、通常プラントと事故プラントとの相違点についてまとめるとともに、関連する課題についての提案をまとめる。なお、F1につい

ては原子力災害対策本部が、「東京電力福島第一原子力発電所 1～4号機の廃止措置に向けた中長期ロードマップ」[1]を作成し、3期で約40年に及ぶ計画および必要となる研究開発を詳述している。また、日本原子力学会では、F1の放射性廃棄物処理・処分について、特別専門委員会を設置し、「研究開発課題の抽出と解決に向けた考え方」[1]を報告書にとりまとめている。本節では、これらとの重複を避け、現状を考慮した本調査委員会における提案を記載している。

2 放射性廃棄物

F1の事故廃棄物は、建屋のみならず、伐採木、瓦礫、汚染水処理による二次廃棄物が存在し、放射性廃棄物の性状自体が十分には分かっていないのが現状である。また、これらの廃棄物の長期的な保管にも留意する必要がある。ここでは、廃止措置や処理・処分に向けた対応において重要となるこれら廃棄物の特徴をまとめ、放射性廃棄物の性状分析の重要性および放射性廃棄物の長期保管などについての課題対応について考える[2, 3]。

① 廃棄物の特徴と処理・処分上の留意点

伐採木や瓦礫類は、ヨウ素・セシウムなどの揮発性核種のほか、TRUやFPなどの燃料起源の核種が含まれている可能性があることや塩分や有機物にも留意する必要がある。

a. 伐採木等

今後の廃棄物処理・処分に向けて、付着した放射性核種の分析と定量化が必要となる。伐採木や汚染土壌については、大容量の処分場概念や有機物の影響（錯体形成による放射性核種の移行促進、微生物の活性化、ガス発生等）に配慮した概念を検討し、その安全評価手法の開発が重要となる。

b. 瓦礫類

瓦礫類はコンクリート片と金属類に大別される。今後保管していく瓦礫類についても、有害物の除去と、付着した放射性核種の分析と定量化を行うことが急務であり、その体制作りが必要である。また、瓦礫については、通常の廃止措置と

Examination on decommissioning & radioactive waste management of Fukushima-Daiichi by Hiroshi RINDO (rindo.hiroshi@jaea.go.jp)

*1 (独)日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第29回夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

Table 1 Total amount of the radioactive solid waste generated and stored in Fukushima-Daiichi site

(H24.12.27時点)

保管場所	エリア境界空間線量率 (mSv/h)	種類	保管方法	保管量 ※1		前回報告比 (H24.9.28)	エリア占有率
固体廃棄物貯蔵庫	0.05	コンクリート、金属	容器	2,000	m ³	—	m ³ 35%
A：敷地北側	0.45	コンクリート、金属	仮設保管設備	5,000	m ³	—	m ³ 43%
B：敷地北側	0.05	コンクリート、金属	容器	4,000	m ³	—	m ³ 98%
C：敷地北側	0.01	コンクリート、金属	屋外集積	31,000	m ³	+2000	m ³ 90%
D：敷地北側	0.02	コンクリート、金属	シート養生	2,000	m ³	—	m ³ 86%
E：敷地北側	0.01	コンクリート、金属	シート養生	3,000	m ³	—	m ³ 88%
F：敷地北側	0.01	コンクリート、金属	容器	1,000	m ³	—	m ³ 99%
L：敷地北側	0.01未満	コンクリート、金属	覆土式一時保管施設	5,000	m ³	+1000	m ³ 66%
O：敷地南西側 ※2	0.07	コンクリート、金属	屋外集積	6,000	m ³	—	m ³ 36%
合計（コンクリート、金属）				59,000	m ³	+3000	m ³ 68%
G：敷地北側	0.01	伐採木	屋外集積	11,000	m ³	-7000	m ³ 53%
H：敷地北側	0.02	伐採木	屋外集積	16,000	m ³	—	m ³ 93%
I：敷地北側	0.02	伐採木	屋外集積	11,000	m ³	—	m ³ 100%
J：敷地南側	0.06	伐採木	屋外集積	12,000	m ³	—	m ³ 77%
K：敷地南側	0.04	伐採木	屋外集積	5,000	m ³	—	m ³ 100%
M：敷地西側	0.01	伐採木	屋外集積	17,000	m ³	+6000	m ³ 80%
合計（伐採木）				72,000	m ³	-1000	m ³ 79%

※1 端数処理で1,000m³未満を四捨五入しているため、合計値が合わないことがある。

原子力学会特別専門委員会より

比較して高濃度の汚染物量が多くなることに留意する必要がある。

c. 汚染水処理二次廃棄物

汚染水二次廃棄物は、含まれる放射性核種濃度に基づき処理していくことになる。このため、廃棄体処理の前に放射性核種分析と定量化を行う必要がある。発生プロセスを Fig. 1 に示す。

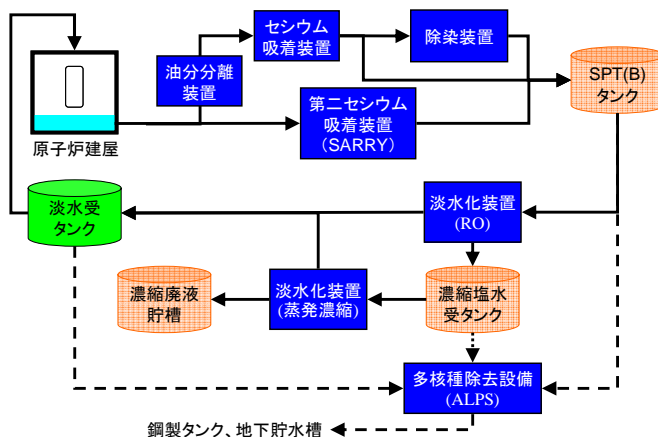


Fig. 1 The treatment system of the contaminated water

既発生の二次廃棄物は実廃棄物からのサンプリング分析が困難であるが、今後の滞留水処理設備は、除去した核種について、その代表部位を定めてサンプリングできるようにすることを提案する。その際、サンプリング試料の代表性に留意する。また、とくにゼオライトの分析については、溶解時に気中に移行する核種に留意する。

廃棄体製作にあたり、二次廃棄物中の塩分濃度とホウ酸量を分析する必要がある。廃棄体処理をどう行うかについては、

二次廃棄物の発生経緯を分析し、放射性核種以外の有害物などの定量化も行うことも必要となる。

F1 の廃棄物に共通した課題として、廃棄物中の塩分やその他不純物（油分、フェロシアン化物、有機物、ホウ素）を考慮した廃棄体容器の選定、バリア構成の検討、処分時の核種移行挙動特性などの評価について、システム全体を考慮して対応していくことを提言する。その際には、これまでの処分形態を基本としつつも、新たな処分形態の検討も必要となる。Table 2 に二次廃棄物の発生予測を示す。

② 放射性廃棄物の性状分析の重要性および放射性廃棄物の長期保管についての提案

放射性廃棄物は、そこに含まれる核種（インベントリ）、それらの濃度のみならず、化学的な性状を考慮した処分システムの性能評価を必要とする。したがって、処理・処分を行うに当たり、廃棄物中の放射性核種分析とその濃度の特定が重要である。とくに F1 の場合、通常の原子力発電所の解体時のインベントリ評価と異なり、水素爆発事故による系統を構成する設備機器の破損、熔融燃料にさらされた冷却水による汚染（燃料要素、FP、CP が混在）を考慮する必要がある。

F1 の廃棄物は発電所廃棄物ではあるが、従来のようなスクリーニングファクター法や平均濃度法などがそのまま適用できないことが予測できる。再処理廃棄物に近い性状を有する廃棄物と想定して対処する必要がある。また、放射能濃度や核種組成も多種多様である可能性もあり、分析後の統計的な解析評価が可能か否かを早急に見極めることが重要である。ロードマップによれば、2014 年頃までに廃棄物の性状把握、物量評価等、2017 年頃までに廃棄物の性状に応じた既存の処分概念への適応性の確認、2021 年頃には廃棄物の処理・処分における安全性の見通しを確認することになっている。

3 廃止措置に向けて

廃止措置は燃料デブリ取出し後の 2022 年頃から開始される予定である。ここでは、通常の発電所との違いを比較し、廃止措置実施上の留意点について記載する[2, 3]。

① 建屋除染

F1 の場合は、通常の発電所と異なり、プラント機器・系統を撤去する前に、放射線量を低減するために、一定の放射線レベル以下まで建屋を除染する必要がある。除染する上でのポイントとして a. 二次廃棄物発生、b. 除染方法の選定、c. 区分の観点があげられる。また、区分の観点からは、以下が必要となる。

- a. サイト内の廃棄物を α 濃度および β γ 濃度との関係にプロットし、TRU 廃棄物のように、トレンチ、ピット、余裕深度および地層処分に分類し(クリアランス以下も考慮していく必要がある)、性能評価により処分形態を再評価する。
- b. その上で、安定的に保管する上での処理形態を検討する。

② 汚染の形態

F1 施設の建屋内除染方法に影響する汚染の状況としては、汚染源と汚染を受けた対象との関係で概略は次の 4 タイプに区分される。a 揮発性核種による表面汚染、b 揮発性核種による浸透汚染、c 汚染水(滞留水、循環水)による表面汚染、d 汚染水(滞留水、循環水)による浸透汚染

F1 では、事故収束作業の被ばく低減を目的として行う建屋内除染が当面の対象となる。放射線防護の最適化の観点から、除染に伴う作業員等の被ばく線量が、除染による低減線を上回らないことの確認が必要である。

③ 除染方法(適用技術)

除染方法を選定する場合、除染によって被ばく低減の効果ができるように、汚染状況と汚染レベルに応じて具体的方法を選定する必要がある。また、除染作業に伴う二次廃棄物の発生量、その処理やそれらの保管等についても考慮して合理的な方法を選定する必要がある。狭隘な場所等により除染作業が困難である場合、必ずしも除染によらずとも、解体撤去、遮へい等の方法により被ばくを低減することもできる。F1 の現場の環境条件は厳しいことが想定されるため、化学薬品等を用いた複雑な除染方法はできるだけ避けて簡便な方法を選定するとともに、揮発性核種の再浮遊が生じ難い方法を選定すべきと考える。具体的な建屋除染方法の例を以下に列挙する。a. 水洗浄、b. 高圧ジェット洗浄、c. ショットブラスト、d. ドライアイスブラスト、e. スキャブラ、f. シェービング、g. ジェル除染(ストリッパブルコーティング)等々

なお、高圧水洗浄などの水を使う場合は、汚染を拡大する可能性があることに留意する。

このようにそれぞれの汚染に応じた方法の選定、複数の組合せ、水処理の一元化、作業の順序等も考慮した上、除染に伴う被ばく線量とその後の作業線量とのバランスも考えて最適となる計画を策定する。また、計画策定に当たっては、過去の事例を十分に参考にすることが重要である。除染作業で発生した二次廃棄物については、できるだけ減容した上で汚染源別(廃液系 or 気体系)に分別して、発生施設名、汚染状況、汚染レベル等の後処理等に有益となる情報とともに

構内保管する。

④ 廃止措置上の留意点(通常プラントと事故プラントの相違点)

F1 の廃止措置は、燃料デブリ回収の後になるため、中長期ロードマップにおいても、廃止措置作業は第 3 期の半ばあたりとなっている。事故によって汚染された施設の廃止措置と廃棄物をどのように安定化して、エンドステートをどのようにするかについては、複数のシナリオが考えられる。どのシナリオを選択するかについては、科学技術的な観点だけでなく社会的な観点でも検討が必要であり、事実認識の上で現実的なシナリオを選択するべきである。事実に基づき廃止措置や廃棄物管理のシナリオを提示していくことが重要である[4]。

通常のプラントと F1 のような炉心損傷事故を起こしたプラントとの廃止措置を行う観点での相違点を Table 3 に示す。さらに、次のような点にも違いがある。

- a. 塩分、ホウ素、油分、有機物の付着や混入の可能性がある、処理・処分プロセスへの化学的影響等の考慮が必要となる。
- b. 解体の対象構造物が破損しているなどの状態となっている。また、解体作業環境が厳しいため、広範にわたり遠隔などの解体工法が必要となる。
- c. 解体部位の限定や解体工法の工夫によって放射性廃棄物量を低減していくことも重要である。

廃止措置を実施するために必要なものは、(i)費用、(ii)実施組織、(iii)技術、(vi)処分場である。とくに F1 の場合、廃棄物発生を抑制する技術の適用を考慮すべきである。

施設自体の廃止措置を行うためには、発生する廃棄物量以上の保管施設が一時的にも必要となる。F1 の場合、廃棄物量が膨大であり、サイト内でいたずらに廃棄物を移動させることなく最適化を図り、施設の廃止措置計画を策定する際には、既に発生している廃棄物と併せて廃棄物全体の処理処分の見通しと、そのシナリオを選定することが肝要である。以下に、廃止措置を行うに当たってのポイントを整理する。

- a. 廃止措置計画を立案するための基本情報は施設の状況と汚染分布である。F1 の原子炉周りについてはどちらの情報も現時点では確認できない状況である。そのため、ある前提条件で計画を策定しつつ、作業の進捗に伴い適宜計画を見直していく。
- b. 放射性物質の汚染については、汚染源と汚染を受けた対象との関係を把握し、汚染核種の種類、対象物の種類、汚染浸透の有無を確認する。また、放射性物質の汚染以外の性状として、有害物質の含有を確認することも重要である。
- c. 解体工法上の留意点として、とくに揮発性核種に汚染されているものについては、飛散の少ない機械的切断工法の適用が望ましい。また、必要に応じて遠隔装置の使用も視野にいれて、対象物の特性に合致した適切な工法を選択すべきである。
- d. 事故施設の解体廃棄物は、最終的な処理処分の方針が不明な段階では、発生場所や線量率などを考慮して、大まかな分別をした上で保管しておく。
- e. 作業被ばく低減目的の除染はその費用対効果を考えて

Table 2 Estimated volume of the secondary waste after operating of the ALPS (Advanced Liquid Processing System)

多核種除去設備 (未稼働)	水酸化鉄スラッジ	(約 150 基/年)	水酸化鉄スラッジ	HIC (外径 1.5 m、高さ 1.8 m) 内で保管予定
	炭酸塩スラッジ	(約 600 基/年)	炭酸塩スラッジ	
	活性炭	(約 4 基/年)	活性炭	HIC 内で保管予定、乾燥状態
	Ag 添着活性炭	(約 8 基/年)	Ag 添着活性炭	
	チタン酸塩	(約 8 基/年)	チタン酸塩	
	フェロシアン化合物	(約 5 基/年)	フェロシアン化合物	
	酸化チタン	(約 7 基/年)	酸化チタン	
	キレート樹脂	(70 基/年)	キレート樹脂	
	樹脂系吸着材	(10 本/年)	樹脂系吸着材	吸着塔内で保管

原子力学会特別専門委員会報告書より

Table 3 Difference of the decommissioning between ordinary nuclear power plant and Fukushima-Daiichi NPPs

	通常プラントの廃止措置	事故プラントの廃止措置
燃料	運転中と同様に取出し、搬出して処理が可能	燃料デブリの形で回収して、当面保管(扱いについて検討要)
施設	建屋を遮へいとして活用することができる	建屋、設備の破損がある
状況把握	汚染状況を事前に調査して廃止措置計画を立案可能	汚染状況の事前把握は困難。進捗に応じて確認していく。
環境	環境汚染はない	土壌、草木、海浜砂等の環境汚染あり
放射性核種	主な核種は原子炉周りの構造材の Co-60	左記に加え、気中では揮発性核種 (Cs-134/137、Sr-90)、汚染水中に重金属 FP 核種及び燃料構成核種がある可能性あり
浸透汚染	構築物への浸透は殆どない	破損施設や地下部への浸透を考慮する必要あり
物量	放射性廃棄物となる物量はユニット当たり 1~2 万トン	放射性廃棄物となる物量はユニット当たり数十~数百万トン(想定)
処分制度	現行法令で処分制度は整備済み	処分制度はない
汚染水	既存施設で処理	FP 核種や塩分を含む多量の汚染水がある

対応していく必要がある。一方、放射性廃棄物量を低減するための除染については、合理的に行えるかどうかを計画段階で十分に検討を行う。

⑤ 事故炉の廃止措置に関する法整備

事故施設の廃止措置に関わる法制度として、2012年6月27日に原子炉等規制法が改正された。同改正法により、F1は特定原子力施設に指定された。原子力規制委員会が定める措置について実施計画を定めて、これを遵守する義務が課せられた。特定原子力施設に指定されると、廃止措置規制も含めた一般の規制法の規定が免除され、実施計画に基づく措置を中心に実施していくこととなった。その具体的な内容は原子力規制委員会の裁量で決められることとなる。事故施設であっても、廃止措置段階のリスクは段階的に低減していくこととなる。

今後F1にかかる保安のための規則が施行されることになるが、その内容は一般の施設の規制と大差ない内容となっている。F1の安定化と廃止措置を迅速かつ安全に進めるための規制はどうあるべきかという観点から、進捗状況を考慮して適切な対応をしていくことが望まれる。

4 提案

以上の現状を鑑み、次の提案を行う。

- a. 現状の分析対象廃棄物は限定されており、計画を全うするためには、優先順序を考慮しつつ広範にわたり分析する必要がある。また、それぞれの廃棄物に対して、統計的手法、理論計算手法の適用の可否を見極めるためにも試料分析を急ぐべきである。加えて、分析データの品質を向上させるため、学会標準等、分析の標準化についても並行して進めることが肝要である。
- b. 分析設備を早急に整備すべきである。分析設備は現在サイトの近くに設置することが検討されているが、現行の計画の試料数（2016年末までに50個/年、2020年までに200個/年）で十分なのかを早急に見極め、場合によっては分析設備の増強を行う。

発生した放射性廃棄物は、少なくとも20～25年間のさまざまな形態の長期保管が必要となる。種々の廃棄物に共通的な長期貯蔵の課題としては、インベントリ評価や分別（放射能濃度やリサイクルの可能性）、ガス発生対策（水の放射線分解、金属腐食、有機物分解等に伴う）などが挙げられる。現在、周囲への汚染拡大の影響の恐れのある一部の瓦礫等については容器に収納され一時保管されているが、今後長期の貯蔵に適した容器の機能や材料の選定が課題となる。とくに塩分やホウ素を含有している廃棄物容器については、腐食を評価し、耐食性を考慮した容器（可能であれば輸送兼用）に保管する。

5 まとめ

F1の廃止措置と放射性廃棄物処理・処分は、長期的かつ広範な業務であり、社会的受容性を重視し、適切なマネジメントによるプロセス全体の最適化と進捗状況に応じた柔軟な対応を行うべきである。とくに、

- ① 放射性廃棄物処理・処分と廃止措置については、技術的視点のみならず、社会的な視点からもさまざまなオプションが考えられるため、ステークホルダー間のエンドステートについての認識の共有が必要となる。
- ② 事故炉の安定化と廃止措置を迅速かつ安全に進めていくための規制制度は、リスクの低減という観点から見直していくことも重要である。
- ③ 放射性廃棄物の処分においては、これら廃棄物の放射性毒性、化学形態および廃棄体の物理的かつ化学的特性を考慮した処分システムのバリエーションの評価が必要であり、従来の処分形態のみならず新たな処分形態も視野に入れるべきである。
- ④ 放射性廃棄物の処理・処分においては、インベントリや濃度、化学的性状の分析が重要であり、廃止措置を加速させるためには、その体制の一層の増強が必要となる。
- ⑤ サイト内における放射性廃棄物の長期的な保管については、その容器の維持管理および運搬についても配慮する。

以上、現時点における原子力学会事故調査委員会のバックエンド部会関連の検討状況について報告したが、現場の状況は時々刻々と進捗している。また、対策を進めていく上で、新たに直面する課題も多いと考えられるため、工程にとらわれることなく、柔軟な対応と適切な見直しが必要である。

参考文献

- [1] 日本原子力学会：福島第一発電所事故により発生する放射性廃棄物の処理・処分～研究開発課題の抽出と解決に向けた考え方～ 特別専門委員会
- [2] 日本原子力学会：東京電力福島第一発電所事故に関する調査委員会中間報告シンポジウム
- [3] 日本原子力学会：東京電力福島第一発電所事故に関する調査委員会セッション 2013年秋の大会報告
- [4] IAEA: Decommissioning Strategies for Facilities Using Radioactive Materials, IAEA Safety Reports Series No.50 (2007)

