

技術解説

核燃料サイクル施設の規制基準と六ヶ所再処理施設の安全対策

New Regulatory Standards for Nuclear Fuel Cycle Facilities and Safety Measures for Rokkasho Reprocessing plant

芳中 一行 鈴木 将文
YOSHINAKA Kazuyuki SUZUKI Masafumi

福島第一原子力発電所事故を契機に原子力施設の規制基準が見直された。核燃料サイクル施設に対しても自然災害への対策、重大事故への対処など多くの要求が追加された。六ヶ所再処理施設では原子燃料のリサイクルの実現を目指して、新しい基準に適合させ安全性を向上させるために各種安全対策が進められている。

The regulatory standards for nuclear facilities were revised, reflecting the lessons learned from Fukushima-Daiichi NPS accident. Many requirements for safety measures, in case there are natural disaster or severe accidents, are added for nuclear fuel cycle facilities. Aiming achievement of the nuclear fuel cycle, various safety measures for conforming to new regulatory standard and improving, have been taken at Rokkasho reprocessing plant.

キーワード：核燃料サイクル，再処理施設，規制基準，重大事故，安全対策

1 はじめに

福島第一原子力発電所事故（以下「1F事故」という）を受け、2013年に原子力発電所だけでなく、核燃料サイクル施設の規制基準についても大きく見直された。自然災害への対策、環境へ影響を及ぼす重大な事故への対処に関する要求など、多くの規制要求が追加されている¹⁾。六ヶ所再処理施設は、操業目前の状態にあったが、新たな規制への対応が必要となったことから、未だ操業に至っていない。

さらに、令和2年度から新検査制度と呼ばれる新たな規制の枠組みが導入され、事業者の一義的責任がより明確にされた。操業開始に向け、こ

れらの基準への適合、安全性を向上させる各種取り組みが進められている。本稿では、核燃料サイクルの中核である再処理施設を中心に、適用された規制基準と安全対策例について、同施設の特徴を踏まえて概説する。

2 再処理施設の特徴

2.1 多様な施設構成

再処理施設では、原子力発電所から受け入れた使用済燃料を機械的に小片にせん断し、被覆管内の燃料ペレットを硝酸で溶解した後、有機溶媒を用いて、ウラン、プルトニウムとそれ以外の放射性物質を分離する（図1）。この分離処理に伴い、高レベル放射性廃液が発生し、ガラス固化される。

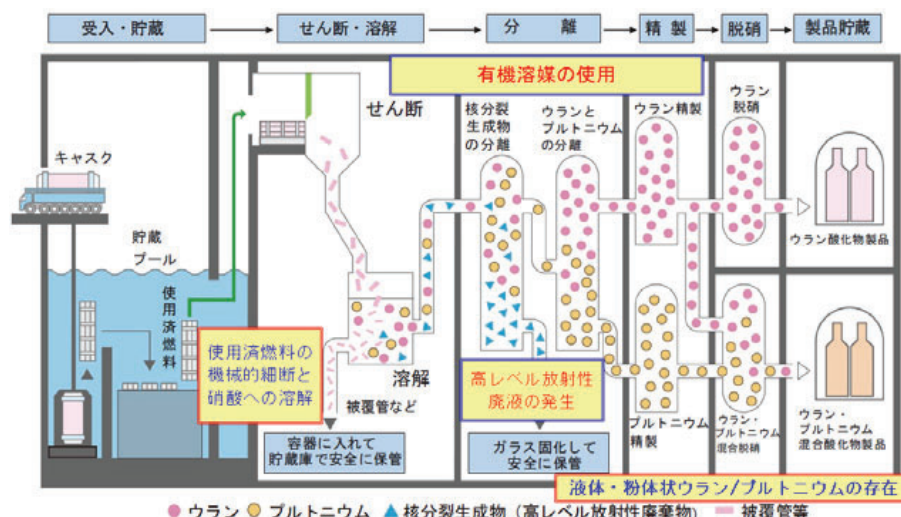


図1 再処理工程とその特徴

処理の過程において各所で取扱う放射性核種の種類や濃度は大きく異なっており、工程設備は多くの建物に分けて設置される。

2.2 有機溶媒

ウラン、プルトニウムとそれ以外の放射性物質を分離する有機溶媒として、n-ドデカン（炭素数12個の直鎖系飽和炭化水素）で希釈された

リン酸トリブチル (TBP) が用いられる。これらは共に消防法で危険物第四類 (引火性液体) に該当する物質であり、火災防止の注意を必要とする。また、TBP は、一定の条件下で急激な分解反応を起こす物質 (レッドオイルと呼ばれる) が生成されることが知られており、溶液の濃縮処理時での加熱温度の制限などの安全対策が講じられる。

2.3 高レベル放射性廃液

高レベル放射性廃液を取扱う貯槽などは、セルと呼ばれる厚いコンクリートに囲われたエリアに設置され、放射性物質の閉じ込めを目的に、セル内部の空間、貯槽内の空間はそれぞれ周辺より圧力の低い状態 (負圧) で維持される。高レベル放射性廃液には、多くの放射性物質が含まれており、廃液中の水などが放射線を受けると水素ガスが発生する。このため貯槽内に水素ガスが滞留しないよう、槽内に空気などを送り込む等の対策が講じられる。

また、放射線のエネルギーが吸収されると廃液の温度が上昇することから、高レベル放射性廃液貯槽には冷却水配管が槽内外に引き回されており、高レベル放射性廃液の温度が一定以上にならないよう管理される。

2.4 臨界安全管理

原子力発電所では、核燃料物質の核分裂反応を連鎖的に起こさせて臨界状態とし、核分裂反応によるエネルギーを取り出すが、再処理施設では、原子力発電と違い、いかなる場合においても、臨界を起こしてはならないとされている。

再処理施設では、液体状、粉体状のウランやプルトニウムが存在するが、これらが臨界状態となるためには、一定量、一定濃度以上の核燃料物質が必要となる。こうした性質を利用して、装置の大きさを小さくすること (形状寸法管理)、核燃料物質の濃度を制限すること (濃度管理) 等により、臨界が生じないよう安全対策が施されている。

3 1F 事故を踏まえた安全対策の追加要求

1F 事故の直接的な原因として津波に対する対策が十分でなかったことがある。そこで、規制基準に、それまで明記されていなかった津波をはじめとする自然災害への対応が明示的に要求事項に追加された。また、重大事故は起こりえないとして、従前は重大事故への対策は事業者の自主的な取り組みとなっていた。そのことに関しても見直され、重大事故への対処が要求事項となった。重大事故の想定は事業ごとに異なるが、過去に起きた火災・爆発事故や臨界事故のほか、高レベル放射性廃液の蒸発乾固、その他の考えうる事故が再処理事業、加工事業など、事業ごとの法令¹⁾で規定されている (表 1)。

3.1 自然災害等への対処の要求

自然災害により共通的に設備を故障させ、安全対策を無効なものとしてしまう脅威があることを 1F 事故で改めて認識させられた。新しい規制基準においては、津波に対する基準が具体化されたほか、地震に対しても耐震設計の基準となる地震動の見直しが行われている。立地サイトの自然環

表 1 重大事故の規定と主な事故事例

分類	核反応、崩壊熱等による事故、損傷等	水素ガス、有機溶媒等による火災・爆発	その他
再処理施設における重大事故	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 臨界事故 ✓ 液体状の放射性廃棄物等の蒸発乾固 (冷却機能喪失) ✓ 使用済燃料の著しい損傷 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 水素爆発 (放射線分解による水素 (水素滞留防止機能喪失)) ✓ 有機溶媒等による火災・爆発 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 左記の事故に係るものを除く放射性物質の漏えい
【主な事故例】	<ul style="list-style-type: none"> ●旧ソ連キュム (高レベル廃液貯槽：冷却系故障による有機混合物の爆発) (1957 年) ●米国アイダホ (硝酸ウラニル溶液水相中のウラン濃度上昇による臨界) (1978 年) ●ロシア (抽出工程：TBP-硝酸ウラン錯体の急激な熱分解反応による爆発) (1993 年) ●東海再処理施設 (アスファルト固化処理施設：アスファルトと硝酸塩の急激な化学反応による火災爆発) (1997 年) 		
加工施設における重大事故	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 臨界事故 	-	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 核燃料物質等の閉じ込め機能の喪失
【主な事故例】	<ul style="list-style-type: none"> ●JCO 臨界事故 (規則違反による質量制限超過) (1999 年) 		
(参考) 1F 事故のケース	全電源喪失⇒冷却機能喪失⇒炉心損傷⇒水素爆発 (ジルコニウム-水反応) (2011 年)		

境を基に、各施設の設計で考慮すべきものや規模等を評価し、具体的な対策が検討されていくことになるが、規制基準の解釈には、考慮すべき外部からの衝撃（自然現象）の例として、具体的に、洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、火山の影響等が挙げられている。また、自然現象のほかにも、安全性を損なわせる原因となるものとして、航空機落下等の人為的な事象についても設計上の考慮が求められている。

3.2 重大事故への対処の要求

表 1 には規定された重大事故のほか、過去に世界各国で起きた事故例²⁾の情報を合わせて記載した。再処理の方法は、「ピューレックス法」と呼ばれる現在の工業的再処理技術として利用されている方法の他に「リン酸ピスマス沈殿法」、「レドックス法」等、様々な方法がある。方法が異なれば、用いられる化学物質や工程設備が異なるため、一概に同列で議論することはできないが、参考のために記載したものである。

従前より、こうした事故の教訓のうち必要な事項については設計に反映されており、同様の事故を発生させないよう安全上の配慮がなされている。「加熱濃縮時の TBP の混入防止や温度の制限」、「高レベル放射性廃液貯槽等での水素掃気設備の設置」（火災・爆発の防止）、「高レベル放射性廃液貯槽の冷却系の多重化」（冷却機能の確保）や、「設備の形状・寸法管理、ウランやプルトニウムの濃度管理（臨界事故防止）」等はそうした対策の現れである。

新しい規制基準では、自然災害時や、既に設計で考慮されている安全対策が機能しなかった場合を想定に入れ、表 1 に挙げた「有機溶媒等による火災・爆発」、「水素爆発」、「蒸発乾固」、「臨界事故」等の重大事故への対処を求めている。

4 六ヶ所再処理施設における安全対策

4.1 六ヶ所サイトの環境と自然災害等への備え

六ヶ所村の核燃料サイクル施設（再処理施設を含む）は、青森県の太平洋側（下北半島）の尾駱沼を囲うようにして立地されている。再処理施設は海岸線からは約 5 km の位置、海拔約 55 m

の高台に設置されていることから、津波の影響は受けず、追加の対策は必要ないと評価されている。また、敷地周辺には、出戸西方断層などの断層があるが、文献調査、ボーリング調査等を行い、基準地震動の設定、施設の耐震性評価が行われ、必要な箇所に補強の処置が施されている。

この他、前述した考慮すべき外部からの衝撃に対し各種対策がとられているが、ここでは、そのうちの主なものについて解説する。

最大風速 100 m/s の竜巻を想定し、屋外ダクトや冷却塔などの防護対象施設を鋼製の防護板や防護ネットで囲う処置、冷却塔の新設等の対策を実施している。火山の影響については、八甲田山の噴火等について評価した（最大層厚 55 cm の降下火砕物を想定）上で、その影響を受けない（火山灰が内部に取り込まれない）ように非常用ディーゼル発電機吸気口等に除灰用ろ布、フィルタ等が追加されている。

このほか、近隣（約 0.9 km）の石油備蓄基地の火災を考慮し、防火帯を設けている。なお、航空機落下については、近隣に三沢基地・三沢空港があり、従前より F-16 戦闘機の落下に対して防護設計（コンクリート壁等による防護）を行っていた。新しい規制基準施行を受け、その他の民間航空機、自衛隊機なども考慮に入れて落下確率を評価しなおし、追加的防護措置は不要であるとの判断がなされている^{3) 4)}。

4.2 重大事故対策の概要

重大事故の対策としては、従来より考慮してきた安全対策に係る設備が故障等で使用できない状況を想定し、①可搬型設備により安全上の必要な機能を確保できるようにすること、②事故が発生した場合に環境への影響を小さくするために、換気の切替え等の処置によりセル内や槽内に放射性物質を滞留させ、放出を抑制すること等の対策が講じられる（図 2）^{3) 4)}。蒸発乾固対策を例にとりて説明する。蒸発乾固は、高レベル放射性廃液等の冷却機能喪失時に沸騰によって溶液中の水分が蒸発し、溶質が乾燥・固化に至るまでの一連の現象である。その過程で放射性物質の大気中への放出を伴う。可搬型

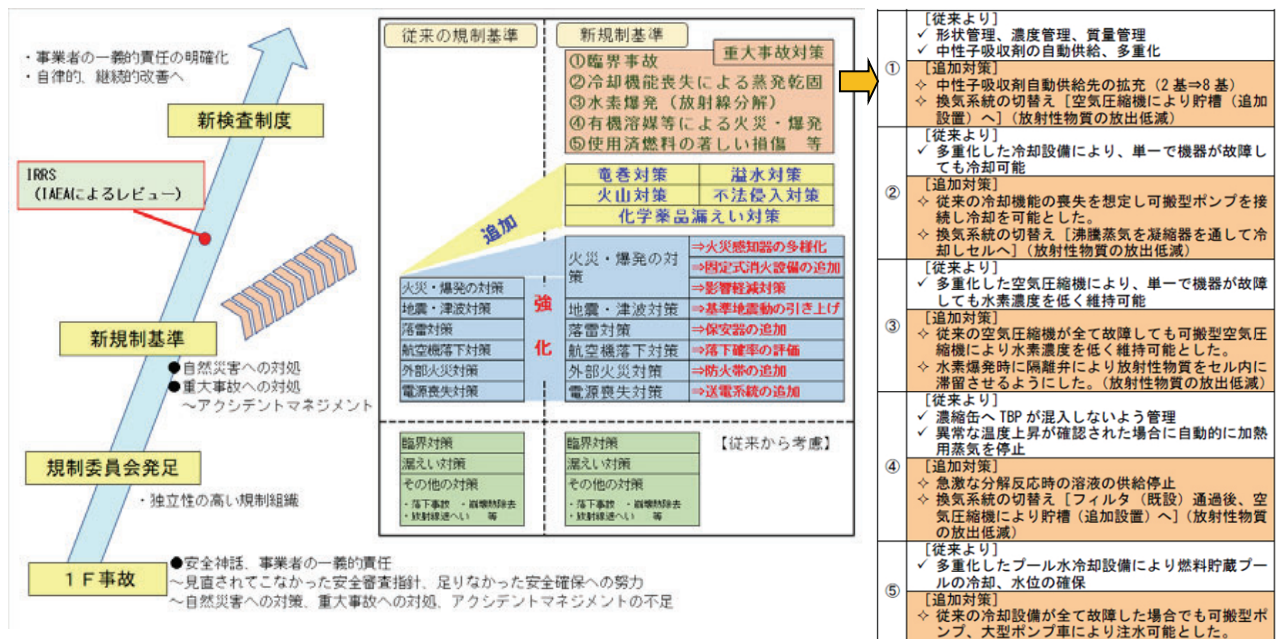


図2 規制基準の追加要求と六ヶ所再処理施設の安全対策の概要

ポンプによる冷却を可能とすること、貯槽内への直接注水を可能とするほか、換気設備の切替え等によりセル内に閉じ込める対策を講じている。その他の重大事故も同様の対処であり、例えば水素爆発対策の場合は、可搬型空気圧縮機を用いて貯槽内の水素の滞留の防止を図ることになる。なお、この事故の発生原因である水素は放射線分解によるものであるため、1F事故の際に発生したと考えられる水素（温度条件により急激に反応が進むジルコニウム-水反応）とは様相が異なると考えられる。

5 おわりに

2016年に原子力規制委員会が受けた国際原子力機関（IAEA）によるレビューの中で、「従来の事業者の行う検査と重複する規制側の立会検査は、事業者の一義的責任を曖昧にする」との趣旨で指摘があり、新しい検査制度が導入された。アメリカの規制を参考に導入されたものであるが、この制度を有効なものとするためには、①事業者が自律的に安全確保、改善を図ること、②チェックリストによる確認に終始することのない、安全上の影響の程度を考慮した監督ができる現場の検査官の養成が必須であろう。一部の方からは改悪との指摘もあるようだが、そうした懸念を払拭し信頼を得ていくためには、それぞれがそれぞれの役割を果たし、安全確保に対し弛まぬ努力をし続

けなければならない。

最後に本稿の作成にあたり、日本原燃（株）松田孝司氏にレビューの協力をいただいた。この場を借りて感謝申し上げる。

<参考文献>

- 1) 原子力規制委員会ホームページ https://www.nsr.go.jp/law_kijyun/law/saishori_kisoku.html
- 2) 原子力百科事典 ATOMICA https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_04-10-03-03.html, 1998年
- 3) 青森県ホームページ <https://www.pref.aomori.lg.jp/kensei/seisaku/2008-0709-1059-380.html>
- 4) 日本原燃（株）：再処理工場の安全性向上に向けた取組みについて、2021年

芳中 一行 (よしなか かずゆき)

技術士（原子力・放射線部門）

日本原子力研究開発機構
再処理廃止措置技術開発センター
核燃料取扱主務者
e-mail : yoshinaka.kazuyuki@jaea.go.jp



鈴木 将文 (すずき まさふみ)

技術士（原子力・放射線部門）

青森県原子力センター
e-mail : masafumi_suzuki@pref.aomori.lg.jp

