

2024年度 第2回エネルギー・環境講演会

# 核燃料サイクルと 放射性廃棄物の 処理・処分の意義を考える



## 出光 一哉氏 プロフィール

福岡県出身。1982年、九州大学大学院工学研究科応用原子核工学専攻を修了。動力炉・核燃料開発事業団東海事業所に勤務したのち、九州大学で助手、助教授を経て、2002年に九州大学大学院工学研究員エネルギー量子工学部門教授に就任。文部科学省の科学技術・学術審議会の専門委員などを歴任し、2023年より九州大学名誉教授に。現在は東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センターで特任教授を務める。

2024年11月1日(金)、一般社団法人九州経済連合会と一般社団法人日本原子力学会九州支部は、2024年度 第2回エネルギー・環境講演会を開催しました。核燃料サイクル政策を推進する意義や、サイクルの過程で発生する放射性廃棄物の処理・処分の問題について、九州大学名誉教授、東北大学金属材料研究所特任教授の出光一哉氏にご講演いただきました。

### < 開催概要 >

- |                                            |                                               |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| ◆開催日時：2024年11月1日(金)15:00~16:30             | ◆主催：一般社団法人九州経済連合会<br>一般社団法人日本原子力学会 九州支部       |
| ◆開催場所：電気ビル共創館3F カンファレンスB、<br>Webライブ中継・録画配信 | ◆後援：福岡県教育委員会、福岡市教育委員会、<br>福岡経済同友会 エネルギー・環境委員会 |
| ◆参加申込者：176名                                |                                               |

## 放射性廃棄物管理の必要性とは

◇原子力発電は「トイレなきマンション」と言われる人もいますが、放射性廃棄物の処理・処分は、そのトイレをつくるための仕事となります。まず、核燃料サイクルについてです。原子燃料は核分裂しやすいウラン235と核分裂しにくいウラン238のうち、ウラン235の濃度を高めたものです。原子炉で使用された後も、燃料の中には消費されなかったウランや核分裂の過程で生成されたプルトニウムが残ります。また、使用済燃料の中には高い放射能を持つ核分裂生成物(FP)も含まれています。

核燃料サイクルの目的は、使用済燃料から有用な物質を分離・再利用し、不要なものを廃棄することです。採掘された天然ウランにはウラン235がわずか0.7%しか含まれていないため、最大5%まで濃縮して燃料として使用します。使用後はウラン、プルトニウム、核分裂生成物に分離する再処理を行い、回収されたウランは将来的に濃縮して再利用する資源として備蓄、プルトニウムはMOX燃料に加工されて再び原子炉で使用されます。九州電力の玄海3号機では、回収したプルトニウムをMOX燃料として利用したプルサーマル発電が行われています。

◇放射性廃棄物はウランや核分裂生成物を扱うすべての施設から発生し、再処理工場やMOX燃料製造工場などでは特に高い放射能濃度の廃棄物が生成されます。日本では放射性廃棄物は高レベルと低レベルに分類され、全量再処理という方針に基づき、高レベル放射性廃棄物はガラス固化されます。世界では国によって使用済燃料をそのまま高レベル放射性廃棄物として処分するケースもあります。日本では高レベル放射性廃棄物以外はすべて低レベル放射性廃棄物と分類され、さらに低レベルも放射能レベルによってL1、L2、L3の3段階に分類されています。これらの廃棄物は、放射能の強さに応じて適切な処理と処分が求められます。

## 放射性廃棄物の分類

クリアランスレベル以下の廃棄物		CL	原子力発電所解体廃棄物の大部分	上に示した全ての発生場所	再利用/一般の物品としての処分	
廃棄物の種類		廃棄物の例		発生場所	処分の方法(例)	
低レベル放射性廃棄物	発電所廃棄物	放射能レベルの極めて低い廃棄物	L3	コンクリート、金属等	原子力発電所	トレンチ処分
		放射能レベルの比較的低い廃棄物	L2	廃液、フィルター、廃器材、消耗品等を固形化		ピット処分
		放射能レベルの比較的高い廃棄物	L1	制御棒、炉内構造物		中深度処分
	ウラン廃棄物		消耗品、スラッジ、廃器材	ウラン濃縮・燃料加工施設	中深度処分、ピット処分、トレンチ処分、場合によっては地層処分	
	超ウラン核種を含む放射性廃棄物 (TRU廃棄物)		燃料棒の部品、廃液、フィルター	再処理施設、MOX燃料加工施設	地層処分、中深度処分、ピット処分	
高レベル放射性廃棄物		HLW	ガラス固化体	再処理施設	地層処分	

※出典：日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」を基に作成

◇放射性廃棄物の分類や処分の基準は人体への影響を評価して行われます。国際的には廃棄物処分後の人体への影響を自然放射線レベルの数分の1に抑えることを目指しており、自然放射線レベルは年間1ミリシーベルトが基準です。日本ではそれよりさらに厳しく、自然放射線の100分の1の年間10マイクロシーベルト以下に抑える基準を採用しています。放射性廃棄物の分類は、原子力規制庁によって明確化され、廃棄物の放射能濃度に応じて4つの区分が設けられています。L3は非常に低い放射能レベルの廃棄物が対象でトレンチ処分されます。低レベル放射性廃棄物のL2はコンクリートピット処分、より厳密な管理が必要なL1は中深度処分、最も高い放射能濃度を持つ高レベル放射性廃棄物等は地層処分を行うとされています。

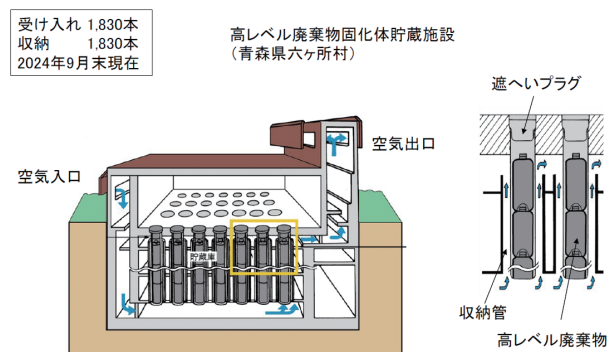
◇高レベル放射性廃棄物のガラス固化体を収納する容器は、直径約40cm、高さ約1m、重さ約500kgのガスボンベに似た形状をしています。その放射能レベルは非常に高く、近づくと5～10秒で致死量の放射線を浴びる危険があるため、人間が直接接触することはできません。また、放射線によって発熱しており、製造直後は約2kWの熱を発しているため、仮に放射線が出ていなくても触れることができないほどの高温です。このため、高レベル放射性廃棄物の管理や操作には遠隔操作ロボットが使用され、安全に処理される仕組みとなっています。高レベル放射性廃棄物の放射能レベルは、約300～1000年で初期の1000分の1に減少します。しかし、その後は半減期の長い物質が残り、減少速度が遅くなります。1万年で1万分の1程度、100万年経ってもさらに一桁低下する程度に留まり、有害度が下がるのに非常に長い時間が必要です。

## 高レベル放射性廃棄物の処分について

◇地層処分は、地下深部の高い安定性と閉じ込め能力を利用して、高レベル放射性廃棄物を安全に管理する方法です。地下には古い化石が残るほどの保管能力があり、これを活用して廃棄物を長期間隔離します。高レベル放射性廃棄物は初期の発熱が非常に高いため、30～50年ほど地表で冷却管理を行い、発熱を数百W程度に低下させてから地下に埋設します。埋設後の最初の1000年間は、完全密封によって放射性物質の漏洩を防ぎます。また、1000年以後もまだ残っている放射性廃棄

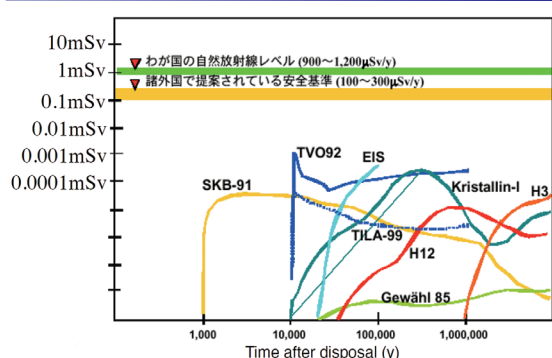
物がガラス固化体からが漏れ出す可能性に備え、多重のバリアを設けて将来世代や環境への影響を最小限に抑える設計がされています。国内では、青森県六ヶ所村に高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センターがあり、ガラス固化体を9本ずつ縦積みにして自然対流で冷却する仕組みを採用しています。国内には、この貯蔵管理センターで保管されているフランスなどから返還された1,830本を含め、約2,000本のガラス固化体が貯蔵管理されています。停電時にも冷却が維持できる安全な設計が施されており、現在も管理が継続されています。

## 高レベル放射性廃棄物の貯蔵



※出典：電気事業連合会「INFOBASE」を基に作成

## 安全評価の結果



※出典：日本原子力文化財団「原子力・エネルギー図面集」を基に作成

◇一方、安全性の評価は重要な課題です。埋設後に放射性物質が地表に流出した場合、それが地表に住む人々にどのような影響を与えるかを評価するため、さまざまなシナリオが検討されています。各国の安全評価の結果によると、処分場が適切に機能すれば、住民の被ばく量は自然放射線レベル（年間1ミリシーベルト）の数分の1から10分の1以下の目標に対してさらに100分の1以下に抑えられるとされています。日本の場合、自然放射線レベルのさらに5桁下まで影響を抑えられるという評価が得られています。これは、適切な設計と性能が発揮されれば、長期的に放射性物質の漏洩をほぼ防ぐことが可能であることを示しています。

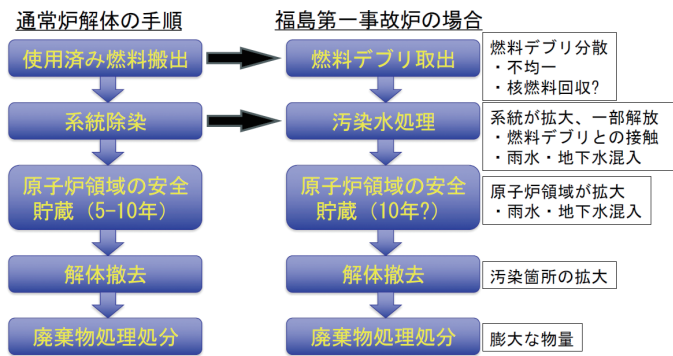
しかし、評価対象の時間スケールは1000年、1万年、さらには10万年と非常に長期にわたるため、実証実験を行うことは現実的に不可能です。このため、評価の妥当性を検証するために、自然現象や長期間にわたる類似ケースを参考に安全性を推定する「ナチュラルアナログ」と呼ばれる研究が行われています。

## 福島第一原子力発電所における廃棄物処理

◇廃炉のプロセスは、使用済燃料の取り出しから始まり、系統除染や冷却期間を経て、最終的に解体撤去と廃棄物の処分が行われます。まず、使用済燃料を再処理のために取り出し、配管などに蓄積された放射性物質を洗浄して除染します。その後、放射能レベルが下がるまで一定期間冷却を行い、解体作業に移行します。この解体作業は、放射線レベルや設備の場所によって4つの段階に分けられます。最初に放射能に関係のない部分を解体し、その後、原子炉に近い高放射線エリアを順次解体していきます。最後に原子炉本体や外部建物を解体することで廃炉が完了します。

◇福島第一原子力発電所の廃炉作業は、通常のプラントの廃炉とは異なり、炉心に溶け落ちた「燃料デブリ」の取り出しが最大の課題となっています。使用済燃料貯蔵プールからの使用済燃料の取り出しは進められていますが、炉心に溶け落ちて広がった燃料デブリの取り出しは難易度が高く、小さな欠片を取り出して、茨城県大洗町の日本原子力研究開発機構（JAEA）の施設で分析が行われることになっています（注）。福島県大熊町の分析施設はまだ建設許可を取得している段階で、完成には時間がかかります。燃料デブリはユニットによって性質が異なります。1号機ではコンクリートと混ざったものが多数見られ、2号機は破損が少なく炉心に多く残っていると考えられています。3号機はその中間的な状態です。それぞれの放射性物質の漏出経路も異なり、これが燃料デブリの特徴や性質の違いを生じさせています。L1相当の廃棄物だけでも約

通常炉の廃止措置と福島第一原子力発電所の廃炉の違い



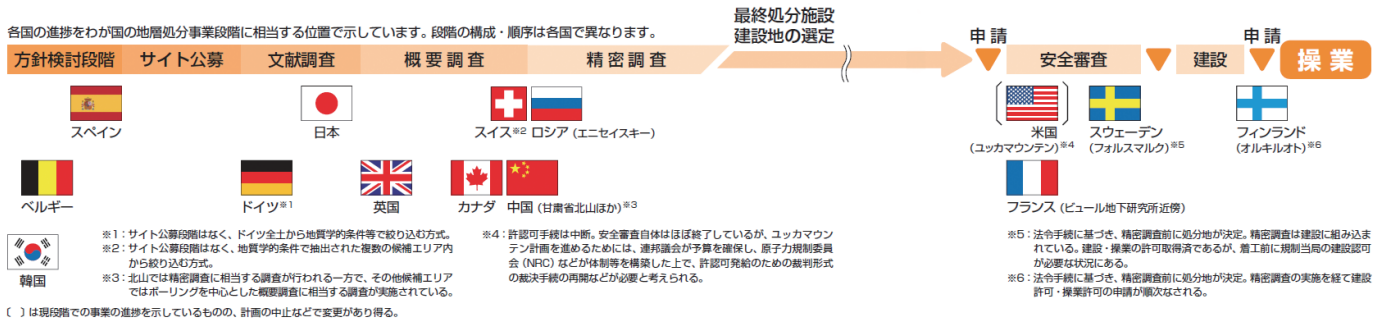
40万トンが見込まれ、従来の廃炉プラント50基分の約20倍に達する量です。瓦礫も約70万m<sup>3</sup>に達する可能性があります。これらを効率的に処分するためにリサイクルや減容化が検討されています。焼却できる廃棄物は焼却炉で処理し、コンクリートなどの有用成分は回収する計画です。さらに、事故発生後、初期の段階で発生した高濃度の放射性廃液を沈殿させた廃スラッジも問題となっています。現在、津波対策の観点から高濃度スラッジの移動が求められており、水中で攪拌し別の場所に移す作業が計画されています。

この作業は燃料デブリ取り出しに匹敵する規模の難易度を伴います。汚染水の処理も継続されており、トリチウムを除く放射性物質を除去した水が海洋放出されています。今年9回目の放出が行われており、この作業は長期的に続けられる予定です。

(注)2024年11月7日に2号機から少量の燃料デブリが取り出され、採取した燃料デブリは分析のためJAEAへ搬送されました(2024/11/12)。

次世代に負担を残さないような取組みを

処分事業の進捗状況



出典：資源エネルギー庁「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について 2024年度版」

◇使用済燃料の再処理は、廃棄物の量を大幅に削減し、処分場をコンパクトにするために重要な役割を果たします。使用済燃料をそのまま処分する場合、処分場の面積は再処理する場合の数倍の広さが必要になりますし、燃料を覆うバリア材も強化する必要が出てくるなど、多くの課題が生じます。フィンランドやスウェーデン、アメリカは使用済燃料を直接処分する方針を採っていますが、日本では国土の狭さを考慮し、再処理によるガラス固化を選択しています。この方法は、安全性を確保しつつ、処分場の規模を最小限に抑えるために国土の狭い日本に適しています。日本人ひとりが一生で排出する高レベル放射性廃棄物の相当量は、ガラス固化体では約200グラムで、手のひらに乗る程度の量です。それを1箇所に集めて安全に管理・処分しようというのが、日本の基本方針で、現世代が責任を持って安全な廃棄物処理を行い、次世代にできる限り負担を残さないよう取り組んでいるところです。コスト面では、福島第一原子力発電所を除いた場合、再処理にかかる費用は1kW時あたり1円以下、核燃料サイクル全体でも3円以下と算定されています。こうしたコストをかけても、MOX燃料を新たなエネルギー資源として利用できますので、核燃料サイクルは、費用対効果の観点からも日本に適したエネルギー政策だと思えます。

▶ これまでに開催したエネルギー講演会の講演録を九州エネルギー問題懇話会 ホームページに掲載しています。ぜひご覧ください。

九エネ懇 検索