

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2019.12.NO.132

目次

センターの活動状況	①
原子力施設の廃止措置と廃棄物管理の課題	③

センターの活動状況

I 成果等普及活動の実施状況

2019年度 第3回原環センターセミナーの開催

第3回原環センターセミナー「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅲ」を以下のとおり開催しました。このセミナーでは、安全評価の基礎的知識を持つ技術者・研究者を対象に、安全評価から見た放射性廃棄物処分の全体像をより深く理解していただくことを目標としています。基礎知識講義の後、簡便なプログラムを用いた解析演習を行い、実践的知識を深めていただきました。

開催日時：2019年10月11日（金）10:30～18:30
会場：京都大学東京オフィス 大会議室 A,B
講師：東海大学名誉教授 大江 俊昭 氏

プログラム：

- 課題1：事例分析 浅地中ピット処分（低レベル放射性廃棄物埋設事業）
- 課題2：有限差分法による放射性核種移行解析
 - I. 移流方程式によるトレンチ処分の解析
 - II. 移流・分散方程式による解析
- 課題3：多重バリアの総合安全評価
 - I. 解説 地層処分「JAEA 第2次とりまとめ」
 - II. 事例分析「第2次とりまとめ」
 - III. 解説 地層処分「包括的技術報告」（NUMO レビュー版）



2019年度 原環センター研究発表会の開催

各界から170名のご来賓を頂き、2019年度原環センター研究発表会を開催しました。以下のとおり、当センターからの研究発表と鈴木篤之東京大学名誉教授による特別講演「放射性廃棄物処分－不確かさへの挑戦」を行いました。

開催日時：2019年12月6日（金）13：45～16：45

会場：星陵会館ホール（星陵会館2階）

プログラム：

開会挨拶 理事長 高橋 彰

研究発表 可逆性・回収可能性の維持に伴う技術的対応と性能評価に向けた工学技術の役割
地層処分工学技術研究開発部長 江守 稔

特別講演 放射性廃棄物処分－不確かさへの挑戦
東京大学名誉教授 鈴木 篤之 氏



開会挨拶 高橋彰理事長



研究発表 江守稔
地層処分工学技術研究開発部長



特別講演 鈴木篤之
東京大学名誉教授



特別講演 放射性廃棄物処分－不確かさへの挑戦
鈴木篤之 東京大学名誉教授

原子力施設の廃止措置と廃棄物管理の課題

国立大学法人福井大学 附属国際原子力工学研究所
特命教授 柳原 敏

はじめに

私は旧日本原子力研究所、今の JAEA で原子炉の安全研究や廃止措置の研究と実務の仕事を 35 年ほどしてきました。「動力試験炉 (JPDR) の解体プロジェクト」に参加したのをきっかけに廃止措置に携るようになりましたが、JPDR 解体プロジェクトが終了した 1996 年以降もこの仕事が面白くて、そのまま廃止措置と放射性廃棄物の処理の仕事を続けています。退職近くになり、福井大学の附属国際原子力工学研究所に移りました。

福井県には、全部で 15 基の原子力発電所が建設され、その半分近い 7 基が既に停止し、廃止措置について本格的に取り組もうという話が進んでいるところです。本日は、これまでの経験に基づいて、廃止措置、特に廃棄物管理の話題を中心に話を進めたいと思っています。

まず、「通常炉の廃止措置」について話をし、次に、日本原子力学会の福島第一廃炉検討委員会に廃棄物検討分科会があり、そこで議論している内容について紹介する予定です。

廃止措置とは

図-1 の赤い字で書いてあるのが、廃止措置を進めているか準備をしている施設です。全体で 26 基の施設が対象ですから、わが国の原子力利用にとって重要な課題です。



図-1 我が国の原子力発電所

敦賀地区では、JAEA の施設の「もんじゅ」と「ぶげん」、関西電力の施設の「美浜 1、2 号」、「大飯 1、2 号」、日本原子力発電の施設の「敦賀 1 号」が現在、廃止措置を決めて準備作業、あるいは工事に入っています。また、東京電力の「福島第一原子力発電所」では、事故で損傷した「1、2、3、4 号」、損傷はないのですが建屋表面が汚染している「5、6 号」の廃止措置工事を進める事になります。

表-1 は廃止措置を決定した幾つかの施設です。廃止措置を実施する場合、廃止措置計画書の認可が必要ですが、そこには、費用、全体工程を記載することになっています。全体を見ると、通常炉の場合、廃止措置工程の期間は概ね 30 年を目途に考えられていることが分かります。

表-1 主要な廃止措置計画における期間と費用

原子力発電所	タイプ	出力 (万kWe)	廃止措置費用の予測 (億円)	廃止措置期間
JPDR	BWR	1.5	230 ^{注1}	10
東海発電所	GCR	16.6	885	25
ぶげん	新型 転換炉 ^{注2}	16.6	750	25
浜岡 1 号機	BWR	54	379	27
浜岡 2 号機	BWR	84	462	27
美浜 1 号機	PWR	34	324	30
美浜 2 号機	PWR	50	359	30
敦賀 1 号機	BWR	35.7	363	24
島根 1 号機	BWR	46	382	30
玄海 1 号機	PWR	55.9	364	28
伊方 1 号機	PWR	56.6	407	40
もんじゅ	FBR	28	3750	30
福島第一	BWR	^{注3}	80000	40

注1：実績（技術開発を含む）、注2：重水減速沸騰軽水冷却型
注3：1号機：46万kWe、2-5号機：78.4万kWe、6号機：110万kWe

JPDR の廃止措置工事は 10 年で終わりました。伊方発電所は 40 年ですが、伊方 1 号が終わった後に続いて、伊方 2 号の廃止措置に取り組むということで 40 年を計画していると聞いています。

費用については、我が国では物量一次近似といって、物量をベースに算出する近似式があり、それで費用を算定します。ただ、廃止措置計画書に記載されている費用がどこまでの範囲を対象としているかは説明されていません。これから廃止措置工事が進

むと、実際に必要とした費用が明らかになり、廃止措置計画書に記載された額との比較が可能になると思います。

プラントライフサイクル

廃止措置の具体的な内容に入る前にライフサイクルの話をして頂きます。原子力発電所のプラントライフサイクルは、まず、設計・建設、続いて運転・保守、運転開始から40年が過ぎて施設が老朽化し、そのまま運転しても保守費用が高くなるから恒久停止するか、60年運転して廃止設置、これが基本だと考えます。

運転・保守の期間は発電して電気を売るわけですから、電力会社は収入を得ることが出来ます。ところが、運転が終わった後もその施設には放射能が存在しますので、作業員や公衆の放射線安全を確保する必要がありますことから安全規制は継続して続けます。そこで、廃止措置工事では、合理的に作業を実施してこの安全規制を解除し、次の事業展開を図ることが重要になります。廃止措置工事は施設の後片付けですから、放射性廃棄物が出てくる、これをどうするかが重要な課題です。放射性廃棄物の処分は廃止措置を完了する一つの条件です。廃止措置は規制の解除を目指して作業をするのですが、炉規制法には、廃止措置の完了条件が記載されています。

簡単に言うと、以下の四つの条件です。まず、一つめは、核燃料物質の譲渡で、これは、運転に使う予定であった未使用の核燃料や使用済み燃料が対象です。使用済み燃料は、我が国では廃棄物ではなくて、有価物ですので、廃棄ではなくて譲渡です。二つめは、施設や敷地の放射能の除去です。原子力発電所の中には管理区域が設けられていて、管理区域の中では、汚染されている場所もあります。そこをきれいにしなさいという条件です。三つめは、放射性廃棄物の廃棄です。廃止措置工事は放射性のものと放射性でないものを分ける作業ですから、放射性のものはどうするかというと、これはきちんと廃棄しなさいというのが条件です。四つめは、作業員の放射線管理記録が失われないように、どこか別の管理機関にきちんと引き渡してください、ということです。

廃止措置の方式

廃止措置の方式は様々で、国際原子力機関 (IAEA) が、その概略を3つに分類しています。基本的には、放射性のものを扱いますので、時間軸をどう考慮するかを戦略として考えることです。図-2に、即時解体、遅延解体、原位置埋設と示しています。IAEAでは、即時解体を immediate dismantling、遅延解体を deferred dismantling、原位置埋設を entombment と表現しています。

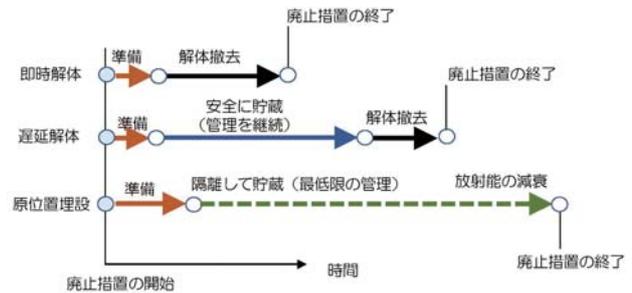


図-2 廃止措置の方式（時間軸で考える）

即時解体は、運転が終わったらすぐに解体作業に入り、なるべく早く解体作業を終えて、敷地を有効に使いましょうという考え方です。これに対し、遅延解体は安全貯蔵という期間を設けて作業の実施を遅らせます。時間が経過すると放射能レベルの減衰により作業が容易になる、あるいは、発生する放射性廃棄物の量を少なく出来ます。ただ、廃止措置が完了する時期が遅くなります。原位置埋設は特殊な場合です。遅延解体の安全貯蔵期間を極端に長く考える、つまり、施設の主要な部分は取り除くにしても、例えば、地下の部分そのまま埋めてしまうというような考え方です。この場合、施設や土地をかなり長い期間にわたって管理する必要があります。

日本では、廃止措置の標準的な工程が考えられていて、5年ないし10年の安全貯蔵を経て施設を解体撤去するとしています。廃止措置工事での作業員の被ばくを考える場合、ガンマ線を放出するCo-60が主要な核種になりますが、Co-60の半減期は概ね5年です。5年、10年待っても、放射能レベルは2分の1か4分の1程度なので、作業がそれ程楽になることはないと思います。廃止措置計画に記載されている廃止措置の期間が30年という計画は、基本的には即時解体に近いと思います。

廃棄物と有価物の分離

原子力発電所の中の機器や構造物には、放射性のものも、放射性でないものも存在するわけです。廃止措置工事とは、これらをいかに合理的に分離して放射性でないものを有価物として有効利用するための作業と考えることが出来ます。放射性のものと放射性でないものを分ける考え方は、クリアランス制度という形で制度化されています。クリアランスされたもの、つまり、放射性でないものは、我々が普通に生活している所に出して、そこで自由に使えるようにしようというのがクリアランス制度の考え方です。

クリアランス制度では核種ごとに放射能濃度の基準値が決められています。これは、「クリアランスされたものが出回ったときに、それによって受ける被ばくが $10\mu\text{Sv/y}$ のオーダー以下なら容認しましょう」ということで、つまり、それ以上の被ばくにならな

いよう「放射性核種の存在量を規制しましょう」ということです。図-3 に示しましたように、 $10\mu\text{Sv/y}$ を基準にして、核種ごとに放射能濃度が決められています。例えば、Co-60 ですと 0.1Bq/g という値です。

廃止措置を完了した後に、その敷地を様々な形態で使用するためには基準が必要です。国際原子力機関 (IAEA) では、そこに立ち入って活動する、あるいは、そこで生活するなどのシナリオを考えて、敷地解放の基準を検討しています。これは、 $10\mu\text{Sv/y}$ から $300\mu\text{Sv/y}$ くらいまでの範囲で、適切な値を設定すれば良いと報告書には示されています。

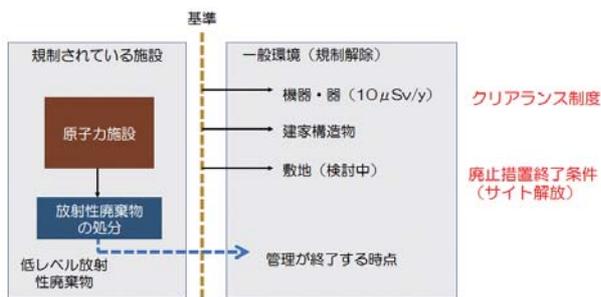


図-3 もの（有価物）と土地の有効利用

国によって様々な事情がありますから基準の考え方も違って、例えば、アメリカの場合 $250\mu\text{Sv/y}$ 、ドイツの場合 $10\mu\text{Sv/y}$ です。IAEA が示す $10\mu\text{Sv/y}$ から $300\mu\text{Sv/y}$ の範囲で、適切に設定すれば良いということになります。日本ではこの敷地の解放基準は現在検討中です。

先ほどお話しましたが、機器や構造物を解体して放射性のもので不要と判断すると、それは放射性廃棄物として管理が必要になります。ただ、廃止措置で発生する放射性廃棄物は全て低レベル放射性廃棄物に分類することが出来ます。この放射性廃棄物は処分場に埋設処分して決められた期間その処分場を管理することになります。放射性でないものと放射性のものをどう取り扱うかが廃止措置工事の肝になります。

サイト修復

世界の廃止措置の状況を見ると、廃止措置工事の対象施設だけでなく施設が存在するサイト全体を考える場合、事故とか不適切な放射性物質の取り扱いなどでサイトの一部に汚染が残されているケースが報告されています。IAEA や OECD/NEA ではサイト全体を放射能汚染のない状態に戻すことを前提に、サイトの修復を廃止措置とは別の活動として捉え、この議論が進んでいます。これは、後でお話する福島第一原子力発電所での取り組みに関連しますが、廃止措置に加えてサイト修復も考えること、また、発生する放射性廃棄物を適切に処理・処分することが重

要な課題です。つまり、廃止措置、サイト修復、放射性廃棄物の処理・処分が原子力サイトや原子力施設の後片付けでは主要な課題になります。廃止措置とサイト修復の違いについてみますと、サイト修復とは、汚染源を対象として、汚染による被ばくを低減するための活動ということで、廃止措置が目指す規制解除よりも被ばく低減が目的であることになります。この点が廃止措置とサイト修復の主要な違いです。

放射性廃棄物

次は、廃止措置と放射性廃棄物に係る課題です。2018年11月に敦賀で廃炉国際シンポジウムが開かれました。このシンポジウムでは外国から様々な立場の人を招聘して講演をお願いしました。そのなかで、アメリカからは Energy Solutions 社の廃止措置の専門家を招待して話をしてもらいました。この会社は廃止措置の専門会社で、例えば、Zion 原子力発電所の廃止措置を手掛け、工事を効率的に実施した経験を持っています。この会社で廃止措置工事に携ってきた Colin Austin さんが、Zino 原子力発電所の廃止措置の実施状況やアメリカの原子力発電所の廃止措置の状況などを紹介されました。

その講演の冒頭で、図-4 のスライドを示して、「What you see?」と始めました。これを見たら、「これは原子力発電所じゃないの?」というだけの話ですけれど、彼が言うには、「違うよ。これは廃棄物だよ」、「廃棄物として見なさない」と話を切り出したのが非常に印象的でしたので、このスライドを紹介しました。要するに、廃止措置を実施する施工業者、事業者、専門家から見たら、廃止措置の対象となるプラントをどう見るかということ、「これはプラントじゃないよ。これは廃棄物だよ。全部廃棄物として見なさい」というのが彼の主張です。これは立派な建造物ですけど、このプラントの廃止措置を安全でいかに効率的に進めるかを考えると、全部廃棄物として扱うことの重要性を示しています。



図-4 廃止措置対象の施設は「放射性廃棄物」と見なせ

日本の原子力発電所でもアメリカの原子力発電所でも同じですが、廃止措置が決まったものは、全部廃棄物と見ることになります。ただ、先ほど話しましたように、全部廃棄物になるわけではなくて、放射性廃棄物の部分と有価物の部分をきちんと分けて、放射性廃棄物の部分は着実に処理して処分場に搬出する、そういう形で対処することが必要になります。

その廃止措置をどのように実施するかというと、廃止措置は廃止措置の完了条件が明らかにされていて終わりが明確です。もちろん、廃止措置を開始する時点も明確で、廃止措置計画書が認可された時点から工事を進めることになります。つまり、始めと終わりが明確なプロジェクトですので、常にプロジェクトをどのように進めるかということが重要になります。

廃止措置工事の流れ

図-5に廃止措置をどのように進めるかを示しています。プロジェクトを進める上では、まず準備が必要ですが、具体的にどのような準備かということ、施設が持っている特性を明らかにしておくことです。何をやるにしても、対象となるものの中身や特性をきちんと把握することが原則だと思います。原子力発電所の廃止措置の場合には、どこにどんな放射能が存在するかを明確にしておく、また、放射能に関する観点だけではなく、どこにどんなものが存在するかの把握も必要です。このような施設の特性を把握することが廃止措置の第一歩として実施すべき活動になります。

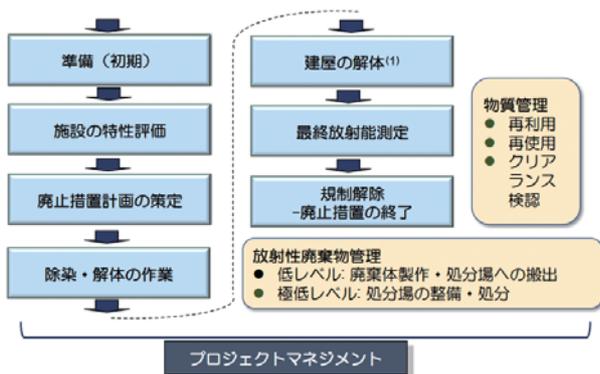


図-5 廃止措置工事の流れ

調査した施設の特性に基づいて廃止措置工事の計画を策定することになりますが、全体計画の策定が、この後に続く様々な活動において非常に重要な役割を負います。策定した計画に沿って施設内の機器や構造物を解体し、あるいは、放射能を取り除く作業が行われます。

施設内の機器や構造物の除染・解体の作業が終わりますと、建屋の中には何にもなくなり、建屋の構造だけが残ります。この建屋の解体でも、放射性的

ものと放射性でないものを区分することになります。例えば、原子炉建屋を解体し、発生する廃棄物の全てを放射性廃棄物にするということは非合理的ですので、建屋の中の放射性核種で汚染されている部分は取り除いて、そうでない部分は産業廃棄物として産業廃棄物の処分場に搬送するか、あるいは有価物として利用することになります。このような活動が図-5に示す「建屋の解体」です。この活動では、建屋内面の汚染部分を除去しますが、その後に建屋に放射能汚染した部分が存在しないことを確認しますので、「最終放射能測定」も含まれます。

最終的には、対象となる領域の放射能を測定し、これが「最終放射能測定」でして、有意な放射能がないことを確認した上で規制が解除される、この流れが廃止措置の一連の工程になります。このような流れの中で、特に注意しなくてはいけないことは、工事で発生する放射性廃棄物をどう管理するのかということです。それから、もう一つが物質管理です。つまり、有価物をどのように再使用・再利用するかについても十分に考える必要があります。ここまで示したように、施設の特性評価、除染・解体の作業に加えて廃棄物や有価物の管理が必要になりますので、廃止措置工事は様々な分野を網羅した総合工学であり、これが非常に重要な観点と考えています。

例えば、除染や解体の作業についてみると、作業員が手作業で機器を切断する場合の解体技術は、運転中の保守作業などで使われる簡単な道具になります。一方、炉心部は放射能レベルが高いため、解体作業では遠隔操作機器を使うことになります。廃止措置工事では、作業の状況に応じて、技術を使い分けることが必要になります。除染や解体の作業以外でも、施設の特性を評価する場合、建屋を解体する場合、放射能測定する場合、作業の内容は全く異なります。さらに、放射性廃棄物、物質管理が必要ですから、工事には多種多様な要素が含まれており、適切に工事内容や工程を調整して、安全で合理性を確保した作業を進める上でプロジェクトマネジメントの考え方を適用することになります。つまり、廃止措置工事はプロジェクトであって、プロジェクトマネジメントが重要だということになります。

プロジェクトマネジメント

プロジェクトマネジメントの話をし少しします。プロジェクトマネジメントの第一歩が計画策定です。プロジェクト遂行で大切なことは、始めから終わりまでの中身を精査してその計画を立案し、それに従って作業を進めることです。計画検討の初期段階では幾つかの案が考えられますが、廃止措置プロジェクトを取り巻く状況を勘案にして適正なもの、つまり、基本計画案を選択します。続いて、その基本計画案に対してより

詳細に作業を具体化した工事計画を作り工事が実施されます。工事の実施に当たっては、詳細な工事計画を変更しなくてはいけない場合が出てくるとも思います。その場合は、その状況に応じて計画を変更しますが、常に最終的な目標を目指して進めるということがプロジェクトマネジメントの要点です。廃止措置についてみると、最終目標は対象となる施設に掛けられている規制の解除と工事で発生する放射性廃棄物の処分ですので、この点を必ず考慮して適正に計画を変更して工事を進める事になります。このような点がプロジェクトマネジメントの基本かと考えます。

ここで、廃止措置工事における作業が実際はどのように行われるのか、私の経験から少しお話しします。先程、廃止措置工事には色々な作業があるということを紹介しましたが、その主要なものは、除染と解体です。解体作業とは放射性廃棄物とそうでないものを分離する作業です。放射性廃棄物を処分する形態に作り替える、つまり、容器に収納して安定化した上で処分場へ持っていくことになります。解体作業では、この流れを見越して詳細な工事計画を立案して作業を実施します。例えば、放射能レベルが異なる部分が存在する機器や構造物があるとします。この場合には、切断して分解する過程で、放射能レベルが類似するものを分別して容器に収納する、また、材質が同じものや発生場所が近いものなどを容器に収納することが必要になります。さらに、放射性廃棄物は容器単位で管理されるのが通常ですので、容器にはどのような機器を収納しているのか、放射能レベルはどの程度なのか、などの記録が必要になります。この記録は処分場に搬出する時に必要になります。放射性廃棄物の分別作業をいつの時点で実施するのか、記録の作成はどの時点か、などの計画策定も重要な課題です。

解体作業では施設に据え付けられていた機器や構造物をその場所から動かすこととなりますので、機器や構造物に付着していた放射性核種が移行して他の場所を汚染する、つまり、汚染拡大の可能性もあります。このようなことがないようにグリーンハウスを設置するなどの作業の準備をすることになります。準備が出来たら、汚染拡大に注意して解体、分解、切断の作業をし、切断片を容器に収納します。解体作業が終わった後は、後片付けが必要で、グリーンハウスの撤去などを行います。作業の実施領域ごとにこのような一連の取り組みが実施されます。

作業領域ごとに発生する放射性廃棄物は一旦保管し、その後、必要に応じて、分別や安定化処理を行い、また、毒性のある不適切物の除去なども実施します。このようにして放射性廃棄物を処分場へ搬出する準備をします。例えば、L2廃棄物を搬出することが想定されるのは、青森県の六ヶ所村に在ります低レベル放射性廃棄物の埋設センターです。この低レ

ベル放射性廃棄物の埋設センターは現在日本で放射性廃棄物を受け入れている唯一の処分場ですが、放射性廃棄物の受け入れは原子力発電所の運転から出てくるものに限定されています。廃止措置工事で発生する放射性廃棄物については認可申請がなされていませんのでそこに搬出することは出来ません。原子力発電所の運転・保守で発生する放射性廃棄物に関しても、処分できる放射性廃棄物の形態が限定されていて、均一・均質固化体、例えば、放射性廃液をモルタルと一緒に均質に固化した廃棄体、それから、機器の切断片などをドラム缶に収納してモルタルなどで固めた充填固化体を処分しています。このような廃棄体の形状は200ℓドラム缶です。

廃止措置工事では、大型の切断片を収容できるような容器を使う方が、機器や構造物を切断する手間が省けて解体作業が効率的に出来るはずですが、容器の形状や寸法は決まっていません。容器の取り扱い性能、容器を運搬する時の安全性など様々な観点から分析して、処分場で処分可能な容器の技術基準を作るが必要になります。幾つかの原子力発電所で既に解体作業が始められている現状を考えると、廃止措置工事で発生する放射性廃棄物を処分するための容器の基準が未だに設定されていないのは大きな問題ではないかと思っています。

廃棄物の発生量

放射性廃棄物の発生量についてみますと、小型の原子力発電所の場合、例えば、敦賀1号や福島第一の1号ですが、施設を解体して更地にするとどのくらいの廃棄物が発生するか、表-2のように試算されています。この表では、放射能レベルの比較的高い廃棄物、L1の量はそれほど多くなく、沸騰水型原子炉（BWR）で約50トン、加圧水型原子炉（PWR）で約120トンです。

表-2 小規模原子力発電所（50kW級）の廃止措置で発生する廃棄物量の試算例

区分	放射能レベル区分	廃棄物推定量（トン）	
		BWR	PWR
放射性廃棄物	放射能レベルの比較的高いもの	50	120
	放射能レベルの比較的低いもの	760	710
	放射能レベルの極めて低いもの	5,530	1,860
	クリアランスレベル以下のもの	140,330	191,120
	合計	146,670	193,810

注) 原子力安全基盤機構、平成20年度廃止措置に関する調査報告書：廃止措置ハンドブック、平成21年11月

放射能レベルの比較的低い廃棄物、L2の量はBWRで約760トン、PWRで約710トンです。これらは原子力発電所の運転廃棄物を処分している低レベル放射性廃棄物埋設センターで処分することが可

能な廃棄物に相当します。放射能レベルが極めて低い廃棄物、L3の量が結構多いことが分かります。BWRで約5,530トン、PWRで約1,860トンと試算されています。放射能レベルが極めて低いものについては、JPDR解体プロジェクトで当時の日本原子力研究所の敷地の一部に処分場を建設し、処分した経験があります。放射性廃棄物として処分することが必要なもの以外はクリアランスレベル以下のものとして整理されています。これらは有価物として扱うことができるのです。その量は、BWRで約14万トン、PWRで約19万トンになります。再利用や再使用が可能な有価物であって、廃止措置工事で発生する廃棄物の全重量に対して、BWRで約96%、PWRで約98%になります。原子力発電所の廃止措置で発生する放射性廃棄物を適切に処分することは重要ですが、それに加えてこの有価物をいかに有効に使うかということは非常に重要な課題ではないかと思っています。

廃止措置の概略工程

先ほど、我が国では既に26基の原子力発電所で廃止措置工事やその準備が進められていて、廃止措置の期間は大体30年くらいと紹介しました。その工程はもう少し細かく検討されています。電力会社のホームページにも掲載されていて、一般的には、第1段階、第2段階、第3段階、第4段階というような形で示されています。ある施設の廃止措置の例ですが、第1段階が準備期間で、準備期間とは何かというと、残存放射能の測定、つまり、施設の特性評価です。それから、安全貯蔵しながら外側のものを片付けようというのが第2段階です。第3段階は原子炉の主要な部分の解体、第4段階は残った建屋を解体して整地するという計画です。図-6を見ると、一例ですが、廃止措置を開始してから20年くらい炉心部の主要な機器をそのままにしておく、つまり、安全貯蔵です。その後、5年から10年かけて炉心部の解体作業で、これが廃止措置計画に記載されている一般的な工程です。

ここで、第3段階、炉心部の解体の中身のみをみると、炉心部の主要な機器である炉内構造物、原子炉压力容器、また、汚染の可能性がある蒸気発生器、一次



図-6 主要な工程 (例)

系配管などを解体撤去し、これらの機器を放射能レベルに応じて分別、廃棄体の作成などの工程を経て処分場へ搬出することになります。これらの作業を約5年間でやる工程になります。図の上側に解体作業、下側に放射性廃棄物の処理処分に関することを載せています。特に、処分場に搬出するためには技術基準に適合した廃棄体を作る工程が重要になります。

プロジェクト管理を適切に実施する上では、計画されたマイルストーンに沿って着実に作業を進めることが重要です。つまり、廃止措置の期間を30年と決めたら、その計画通りに完了するよう管理することになります。

プロジェクトリスク

プロジェクトの遂行には、コスト超過、工程遅延、災害の三つのリスクが考えられます。原子力施設でリスクというと放射線リスクを考えますが、使用済み燃料を取り出した後の廃止措置工事では、放射線リスクはかなり低くなりますから、工程を守れるのか、予算内で工事を実施できるのかなどのリスクを分析することが重要だと思います。リスクが容認できない場合は、その作業の効率化などを考えるのか、計画を変更してリスクを容認できるレベルにすることが求められます。

図-7は、プロジェクトの計画検討においてよく使われるゴールツリーで、ゴールを達成する主要な課題をブレークダウンする手法です。ここでは、廃止措置の完了条件として、使用済み燃料の譲渡、施設及び土地の除染、放射性廃棄物の適切な処分、それから廃棄物と有価物の分離を挙げています。放射性廃棄物と有価物を分離するためには、施設の特性評価の結果に基づいて工事計画を立て、機器や構造物の除染、解体作業が行われます。放射性廃棄物の処分は、廃棄物を仮保管、廃棄体を作成、処分場への搬出などの工程を挙げる事が出来ます。このようなゴールツリーに基づいて工程の期限が守れるかどうかを考えます。

放射性廃棄物の管理では廃棄体を作成し適切な時期に処分場へ搬出しますが、このためには、処分場

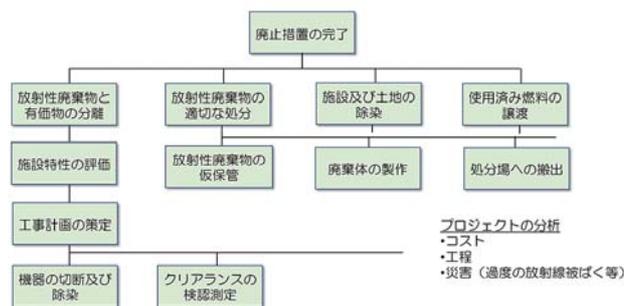


図-7 ゴールツリー分析 (例)

が必要です。処分場の整備には認可申請が必要です。廃止措置の全体工程 30 年の中で、第 3 段階、あるいは第 4 段階までに処分場が整備されて、発生する放射性廃棄物の処分が可能になるか否かの分析が重要です。

放射性廃棄物の処分には、L1、L2、L3 という 3 つの形態があります。L1 は、大体地下 70m から 100m までの深さに穴を掘って埋める処分形態です。L2 は、六ヶ所村で実施されているピットタイプの処分形態です。L3 は、JPDR 解体プロジェクトで行いましたトレンチ処分で、地表に溝を掘って埋める方式の処分形態です。

この 3 つの形態に処分する L1、L2、L3 廃棄物の全てが処分できないと廃止措置の完了条件の一つである「放射性廃棄物の廃棄」が達成できないこととなります。このためにはどういったことが必要かという、廃棄体の技術基準の整備、技術基準に基づく廃棄体の作成、次に、廃棄体の確認、処分場への搬出といった工程が必要になります。

放射性廃棄物の処分場を整備して放射性廃棄物を処分するためには、図-8 に示すように、立地、地元説明、認可申請、建設、輸送という工程が必要で、処分場が建設されると、最後に、処分場に搬入された廃棄体を定置することになります。L1、L2、L3 の放射性廃棄物のいずれも同じような工程を経て処分が実現します。

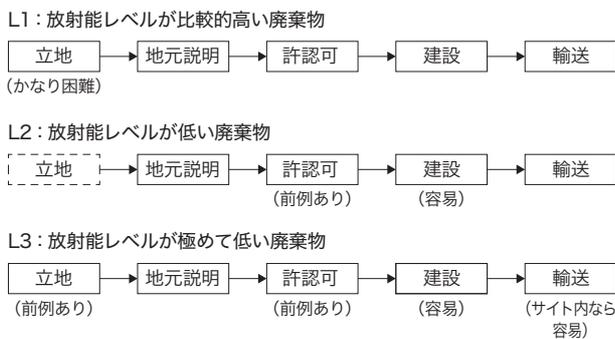


図-8 処分が可能になるまでの工程

これまでに計画された廃止措置工事で発生する放射性廃棄物について、大体 30 年間でこのような工程が実現できるのか否かについて考えてみたいと思います。

その前に、L1、L2、L3 の処分場ができないと発生する放射性廃棄物を施設から外に出すことができないから工事に影響がでます。例えば、L1 についてみると、これは先ほど紹介しましたが、小型の原子力発電所で、100 トンとか 200 トンですので、それ程多くない量です。処分場がなく搬出できないとしても、仮に保管しておく対策が取れます。L2 について

みると、施設を整備して施設内に仮の保管場所を確保することは不可能ではないと考えます。ただ、L1 に比べると少し困難になります。L3 についてみると、量が多いので施設内に保管場所を確保することは困難ではないかと思えます。このため、搬出先がないと、廃止措置工事を進めることが困難で、工程に大きな影響が出ることとなります。そこで、工程遅延のリスクを分析する場合、L1、L2、L3 の処分場が整備できないことを考える、特に L3 ができないと、工程遅延のリスクがかなり高くなるといえます。

リスク分析の例

このような仮保管の可能性も考えてリスク分析をしました。先ほどお話ししたように、処分場を整備して、L1、L2、L3 を処分場に搬出するためには、立地、地元説明、許認可、建設、輸送という条件を全て満たす必要があります。このような工程で 20 年くらいをかけて処分が可能なのか少し定量的に考えます。つまり、これらを実現する上で期間は十分なのかを考えます。

立地は技術的ではなく社会的な課題ですから、10 年ぐらい見ることにします。それから、地元説明に 2 年、許認可に 3 年、建設に 3 年、輸送に 2 年、これらを 20 年程度の期間に割り振ります。割り振った期間でそれができるか否かを判断します。例えば、L1 の場合、処分の建設経験はないので、10 年で立地は多少困難、地元説明は 2 年間で多分可能、許認可は 3 年で可能、建設は技術力があれば 3 年で確実に可能、搬出は 2 年で可能と推定します。L2 の場合、六ヶ所村の既存の処分場に搬出することを想定すると、立地は実現しています。L3 の場合、建設はトレンチを掘るだけでするので 1 年で可能、と定性的に判断してみます。

意思決定の分野では、図-9 のように可能性の判断を点数化します。我々はものを対数スケールで判断することが多くあります。ここでも、対数スケール

廃棄物処分に必要な条件（処分場の建設）

- L1：立地、地元説明、許認可、建設、搬出
- L2：地元説明、許認可、搬出
- L3：立地、地元説明、許認可、建設、搬出・定置・埋戻し

処分区分	予想期間			成立の可能性		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
立地	10	10	10	多少困難	多分可能	ほぼ可能
地元説明	2	2	2	多分可能	多分可能	多分可能
許認可	3	3	3	多分可能	確実に可能	確実に可能
建設	3	2	1	確実に可能	確実に可能	確実に可能
搬出	2	3	1	ほぼ可能	ほぼ可能	確実に可能
処分実施の可能性				0.38	0.81	0.70

可能性（確率）の設定
 確実に可能：1.00 ほぼ可能：0.90 多分可能：0.78
 多少困難：0.60 かなり困難：0.30

図-9 リスク評価（廃棄物搬出の可能性）

で0.1から1.0の点数を付けることにし、確実に可能が1、ほぼ可能が0.9、多分可能が0.78、多少困難が0.6、かなり困難が0.3とします。全ての要素が実現すると放射性廃棄物の処分が可能になりますので要素ごとの数値を掛け算して、L1廃棄物処分の可能は0.38、L2は0.81、L3は0.71となります。

廃止措置を完了するためにはL1、L2、L3の全てが処分出来ることが条件ですので、廃止措置が予定通りに完了出来ない可能性、つまり、負のリスクをこの結果から考えます。L1、L2、L3のいずれかの処分が出来なければ廃止措置は完了しないと、各々が失敗する確率から廃止措置を予定通り完了しない確率を計算すると、0.78になります。一方、L2とL3だけを考え、先ほど述べましたが、L1は取りあえずどこかに仮保管して良いとすると、0.54となります。まとめると、30年の工程で予定通りの完了は多分不可能、L1をどこかに中間貯蔵することで廃止措置の完了を認めてもらえるなら可能性はあるという結果です。

- 全て (L1、L2、L3) を対象にする場合

$$P(\bar{E})=P(\bar{E}_1 \cup \bar{E}_2 \cup \bar{E}_3) \\ =0.78$$

予定通りの完了は
多分不可能

\bar{E}_1 : L1 処分場が否
 \bar{E}_2 : L2 処分場が否
 \bar{E}_3 : L3 処分場が否

- L2 と L3 のみを対象にする場合

$$P(\bar{E})=P(\bar{E}_2 \cup \bar{E}_3) \\ =0.54$$

予定通りの完了は
多少困難

図-10 廃止措置が予定通り完了しない可能性

このように工程遅延のリスクを考えると、廃止措置を30年で完了するつもりなら、L1廃棄物の処分場の整備に人と資源をかなり投入しないと、計画通り終わらないことが分かります。

福島第一の廃炉廃棄物

福島第一(1F)の廃炉の話に移ります。まず、中長期ロードマップを見ると、第1期計画、第2期計画、第3期計画があり、現時点は第2期計画の最終段階です。第3期計画は2021年の燃料デブリ取り出しから始まり、最終的に終わるのは、2011年から30年ないし40年ですから、2050年くらいと記述されています。

福島第一の将来を考える上では、廃炉が終わるとはどのような事なのか、放射性廃棄物はどこに持って行くのか、最終的に敷地はどうするのか、などの議論が重要だと思います。このような議論をするためには福島第一の廃炉からはどのくらいの量の廃棄物が発生するのかの推定が必要になります。福島第一サイトから放射能汚染を全部取り除いたらどれだけの廃棄物量になるの

か、大林組の河村さんが推定しており、総容積で560万m³、重量で790万トンとしています。これは小型の原子力発電所1基を全て解体した場合約20万トン、大型だと約50万トンで、その10倍以上になります。この値がどれほどの信頼度があるかは別にして、他にデータがないのでこれを使って議論します。

福島第一の廃棄物管理については、その発生量を低減するために様々な努力がなされていて、焼却施設も整備されました。これに加えて、圧縮、溶融などで減容することを考えることも必要と思います。また、クリアランスにより放射性廃棄物でないものを区分して、サイトの中で限定的に、例えば、容器とかに有効に使う方法も考えられます。

福島第一のサイトは広くて、3.5km²で、中には様々な施設があります。1号から4号の原子炉建屋やタービン建屋は廃炉の対象で重要な施設です。また、このような原子力施設だけではなく、トリチウム汚染した水を貯蔵しているタンクもあり、廃棄物保管施設が山側に幾つか配置されています。それから、港湾の底には泥がたまっていて放射能レベルが結構高いことが予想されています。

日本原子力学会の福島第一廃炉検討委員会に設置された廃棄物検討分科会では、福島第一サイトの廃炉・修復で発生する放射性廃棄物の対策が必要との観点から、最終的にそれらをどうすべきか、議論のたたき台を作っています。福島第一サイトや発生する放射性廃棄物をどうするかは、様々な立場の人たちが話し合っ決めていくことになると思うのですが、議論が進むよう、基本的な情報を整理しています。つまり、中長期ロードマップで定義する廃炉完了の姿はどうあるべきか、それを含めて福島第一のサイトをどうするのか、そろそろ議論する時期に来ているのではないかと思います。ただ、最近の話題は燃料デブリ取り出しであり、核燃料物質をどの程度撤去できるのか、建屋の解体はどうするのか、サイト全体の修復はどうするのか、などの議論があります。中でも、廃炉完了の期間ですが、例えば、2050年までの30年で完了できるのか。もっと時間がかかるのではないのか、サイト全体をきれいにするには100年から300年くらい必要ではないかと考える人もいます。近い将来の取り組みだけではなく、長期にわたる時間スケールで福島第一サイトの修復を俯瞰することが必要ではないかと考え、最終の姿を目指す幾つかのシナリオについて検討しました。

図-11は最終の姿までを時間スケールで示したもので、シナリオ検討の範囲を設定しています。2021年から燃料デブリ取り出しを始めて、10年ないし20年で燃料デブリの大部分が取り出されたという前提です。

廃炉・サイト修復のシナリオは多種多様ですが、通常炉では廃止措置のシナリオを即時解体、遅延解

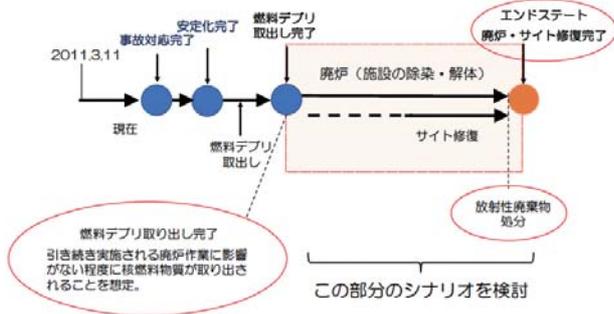


図-11 議論の要点： シナリオ検討

体、原位置埋設に分類しているのので、福島第一についても同じような考え方を導入しました。図-12は、施設の解体について、全部撤去するケースと一部残すケースを考慮したことの説明です。1の「全て撤去」は、施設の全てを撤去するシナリオです。2の「地上部のみ撤去」は、地上部の機器や構造物を撤去し、地下の部分はそのまま残すシナリオです。

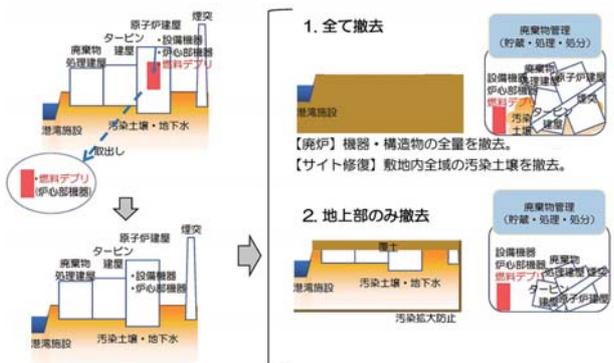


図-12 シナリオの検討：施設の解体・撤去

このようなシナリオの検討は、世界の廃炉やサイト修復に関して調査した報告書に記載されている知見 (lessons learned) に基づいています。IAEA や OECD/NEA では過去の経験や知見を活かすことの必要性を強調しています。

シナリオの想定

先ほど述べた考え方に基づいてシナリオ 1、2、3、4 を考えてみました。

シナリオ 1 は施設を全部撤去するケースです。燃料デブリ取り出しが終わった後に機器・構造物を撤去し、また、サイトも修復して、サイトのグリーンフィールドを達成します。放射性廃棄物は約 790 万トンで容積にすると約 540 万 m³ になります。

シナリオ 2 は、建屋・構造物の一部を解体撤去し、地下部を残す考え方です。建屋や地上構造物を解体撤去した後は残存物を管理しますが、放射性廃棄物も管理区域で保管します。サイト修復を実施しますから、修復された領域は解放されて利用が可能にな

シナリオ概要

- ・廃炉作業により機器・構造物の全量を撤去
- ・サイト修復（汚染撤去）によりサイト全域を制限なし敷地解放

特徴

- ・大量に発生する廃棄物の処分先の確保が必要
- ・完了後には土地を自由に使用することが可能

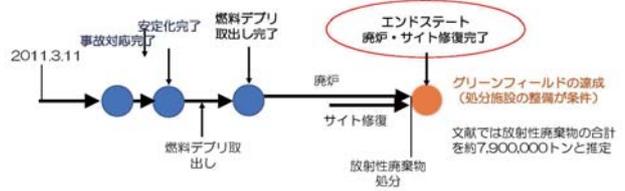


図-13 シナリオ 1：施設全体を解体撤去

シナリオ概要（建屋・構造物の一部のみ解体撤去）

- ・廃炉作業により建屋・地下構造物の一部を解体・撤去、残存物は管理
- ・発生する放射性廃棄物を管理区域で保管
- ・サイト修復（汚染撤去）によりサイトの一部を解放
- ・廃棄物の搬出が完了した時点でサイトの多くの部分を解放

特徴

- ・敷地の無制限再利用の可能性は少ない
- ・放射性廃棄物の発生量を低減できる
- ・敷地の一部を再利用することが可能
- ・長期にわたる管理が必要となる可能性

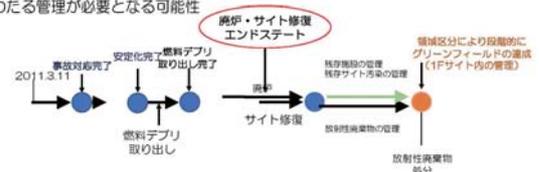


図-14 シナリオ 2：構造物の一部を残存

ります。このシナリオでは放射性廃棄物の発生量を低減することが出来ます。また、敷地の一部を再利用することが可能ですが、長期にわたる管理が必要な領域が部分的に残ります。

シナリオ 3 は、シナリオ 1 に遅延解体を加えて、安全貯蔵した後に施設を解体撤去するケースです。発生する放射性廃棄物を保管して、処分場が確保された時点で放射性廃棄物を搬出します。サイト修復によりサイトの一部分が解放できます。ただ、安全貯蔵の期間を設けていますから、サイトを利用できる時期が遅くなってしまいます特徴があります。

シナリオ 4 は、遅延解体と部分的な解体撤去の双方を取り入れたケースです。安全貯蔵の後に施設の

シナリオ概要

- ・遅延解体（安全貯蔵後に施設解体）
- ・発生する放射性廃棄物を管理区域で保管
- ・処分施設が確保された時点で放射性廃棄物を搬出
- ・サイト修復（汚染撤去）によりサイトの一部を解放

特徴

- ・廃炉作業は先延ばしされる（将来の作業は容易）
- ・敷地の無制限再利用の可能性は少ない
- ・放射性廃棄物の発生量を低減できる



図-15 シナリオ 3：安全貯蔵後に施設全体を解体撤去

シナリオ概要

- ・遅延解体（安全貯蔵後に施設の一部を解体）
- ・発生する放射性廃棄物を管理区域で保管。
- ・処分施設が確保された時点で放射性廃棄物を搬出
- ・サイトの汚染は安全性を評価して監視（スチュワードシップ）

特徴

- ・廃炉作業は先延ばしされる（将来の作業は容易になる可能性）
- ・敷地の無制限再利用の可能性は少ない
- ・放射性廃棄物の発生量を大幅に低減できる
- ・長期にわたる管理が必要となる可能性



図-16 シナリオ4：安全貯蔵後に施設の一部を解体撤去

一部を解体し、発生する廃棄物を管理区域で保管します。処分場が確保された時点で放射性廃棄物を搬出しますが、サイト利用に関する安全を確認して、汚染の一部を残してそのまま監視するケースです。例えば、米国のエネルギー省（DOE）が進めるサイト修復活動では、放射性核種による汚染の程度が低い場合には放射性廃棄物にしないで、そのままにして監視を続ける方策が採られており、このような方策も廃棄物対策の一つとして考慮しても良いのではないかと考えます。もちろん、放射能レベルが高くてその周りで活動する人に悪い影響を及ぼすようなら不可能ですが、十分に放射能レベルが低い場合にはこのような手段も有り得るのではないのでしょうか。廃炉・サイト修復が完了するまでには時間がかかるのですが、その反面、放射性廃棄物の発生量をかなり低減できる特徴があります。

まとめてみますと、シナリオ1のケースはなるべく早くサイト全体をきれいにするので、全領域の利用が可能になります。シナリオ2のケースは、施設の一部を残すので、サイトの全域を利用できる事にはなりません、部分的な利用は可能です。シナリオ3のケースは、安全貯蔵により時間はかかりますが、サイトの全域を利用することが可能になります。シナリオ4のケースは、廃炉完了までにかかなり時間がかかり、また、サイトの利用も限定されますが、放射性廃棄物の発生量をかなり低減できます。

このようなシナリオを議論する目的は福島第一サイトを有効に利用することが前提ですから、どのような利用の形態があるのかについて考えることも必要になります。また、利用の形態は社会的にも受容されるものでなくてはならないので、様々な立場の

人々に参加してもらうことが前提になります。もちろん、放射線安全を優先することは必須ですが、経済性の観点も考慮しなくてははいけません。それから、発生する放射性廃棄物はどこに持って行くのかということ。放射性廃棄物の処分の可能性を明らかにすることが一番重要なことかと考えます。これは放射性廃棄物を処分する場所の決定と、それが社会的に受容されるかどうかの議論になります。もちろん、福島第一サイト周辺の人々、福島県の人々の考えを第一に考慮することは当然ですが、我が国全体で考えた場合、どのようなシナリオが適切であるかの判断が必要になります。

最終的にどのようなシナリオが社会的合意を得られるのかは、安全性、合理性、社会の利益などを総合的に勘案して、十分な議論の下で決められるものと思います。

まとめ

我が国のこれからの原子力利用にとって、廃止措置あるいは廃炉、サイト修復、放射性廃棄物の処分、そして物質管理は本当に重要な課題で、当面の課題に対する対策だけでなく、全体を考える必要があるということが要点です。また、放射性廃棄物の行き先を含む処分です。ここを真剣に考えていかなくてはならないと思います。私の経験では、放射性廃棄物の処分ですとか廃止措置というのは、後送りができる性質の事業です。だけど、いつまでも後送りは許されません。今の世代が実施しなくてはいけない課題と、次の世代に託す課題を明らかにして、我々が実施しなくてはならない事は計画をきちんと作った上で、確実に進める、そういう姿勢が求められると思っています。

廃炉の課題は、福島第一に限定しますと、エンドステートまでの工程です。これには多種多様なシナリオがあるので、全部きれいにするという、そこだけで考えるのではなくて、いろんなシナリオを考えながら、いろんな立場の人々と議論をした上で、合意形成に持っていく必要があります。シナリオの選択あるいはシナリオの改良に当たって、ステークホルダーの参加を得て、合意形成の議論を始める時期が来ているのではないかと思います。

（本稿は、2019年8月9日に開催された2019年度第2回原環センター講演会の内容を再構成したものです。）

編集発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号（ニチレイ明石町ビル12階）

TEL 03-6264-2111（代表） FAX 03-5550-9116

ホームページ <https://www.rwmc.or.jp/>