

あなたが話した内容:

プルサーマルとMOX燃料の関係性

.....

プルサーマルとMOX燃料は、「方法」と「燃料」という関係です。

- **MOX燃料**: 原子炉で使う燃料そのもの
- **プルサーマル**: その**MOX燃料**を現在の軽水炉で利用する発電方法（運用方法）

つまり、プルサーマルを行うために使われる燃料が**MOX燃料**です。

MOX燃料とは

MOX（Mixed Oxide Fuel：混合酸化物燃料）は、

- ウラン酸化物
- プルトニウム酸化物

を混ぜて作った核燃料です。

このプルトニウムは、原子力発電所で使用した燃料（使用済燃料）を再処理して取り出したものが利用されます。

プルサーマルとは

「プルサーマル」は、使用済燃料から回収したプルトニウムをMOX燃料に加工し、それを現在の軽水炉（熱中性子炉＝サーマルリアクター）で発電に利用することを指します。「プルトニウム（Plutonium）」と「サーマルリアクター（Thermal Reactor）」を組み合わせた造語です。

流れを図で表すと

ウラン燃料

↓

原子力発電所で使用

↓

使用済燃料

↓（再処理）

プルトニウムを回収

↓

MOX燃料を製造

↓

軽水炉で利用（＝プルサーマル）

なぜ行うの？

プルサーマルには次のような目的があります。

- 使用済燃料に含まれるプルトニウムを有効利用する
- ウラン資源の利用効率を高める

- 原子燃料サイクルを構築する一環とする

一方で、

- MOX燃料の製造コスト
- 使用済MOX燃料の処理方法
- エネルギー政策や核不拡散との関係

などについては、技術面・経済面・政策面からさまざまな議論があります。

一言でまとめると

- **MOX燃料**=プルトニウムとウランを混ぜた「燃料」
- **プルサーマル**=そのMOX燃料を既存の軽水炉で使って発電する「方法」

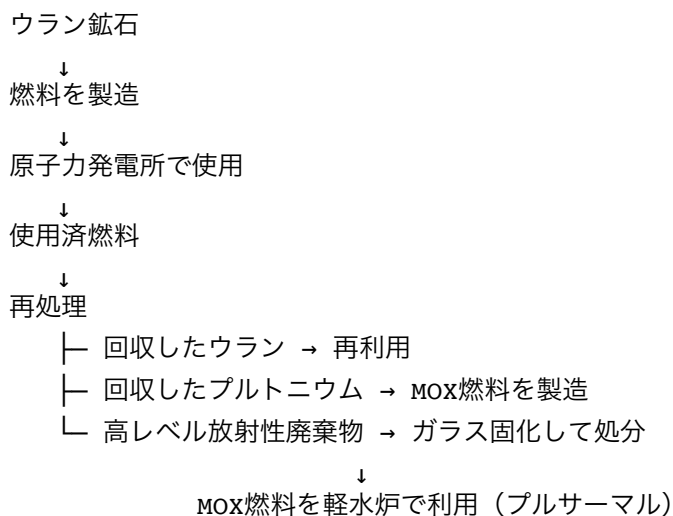
つまり、**MOX燃料という燃料を使って行う発電方式がプルサーマルという関係です。**

プルサーマルお目的の一つとして、「原子燃料サイクルを構築する一環とする」ことがあるとのことですが、これは具体的にはどのようなこと（内容）を指していますか。

「原子燃料サイクルを構築する」というのは、一度使った核燃料を「廃棄物」として終わらせるのではなく、再処理して資源として繰り返し利用する仕組みを作るという考え方です。

原子燃料サイクルの流れ

概略すると、次のような流れになります。



プルサーマルは、このサイクルの中で回収したプルトニウムを再利用する工程に当たります。

なぜプルサーマルが必要なのか

使用済燃料には、まだ燃え残ったウランのほか、新たに生成されたプルトニウムが含まれています。

もし再処理で取り出したプルトニウムを使わなければ、

- 再処理で回収したプルトニウムの使い道がない
- プルトニウムだけが蓄積してしまう

という問題が生じます。

そのため、日本では、回収したプルトニウムをMOX燃料として軽水炉で利用するプルサーマルを、原子燃料サイクルを成立させるための重要な要素と位置づけています。

日本が目指してきた原子燃料サイクル

日本の構想では、本来は次の2段階を想定していました。

1. 当面

- 軽水炉でウラン燃料を使用
- 使用済燃料を再処理
- プルトニウムをMOX燃料として軽水炉で利用（プルサーマル）

2. 将来

- 高速増殖炉などでプルトニウムをより効率よく利用
- 消費した以上の核分裂性物質を生み出すことも目指す

しかし、高速増殖炉の実用化は技術的・経済的な課題から大幅に遅れており、日本ではもじゅも2016年に廃炉が決定しました。そのため、現在はプルトニウム利用の中心はプルサーマルとなっています。

「サイクルを構築する」とは何を意味するのか

「サイクルを構築する」とは、単に再処理施設を建設することではありません。次の一連の仕組みが継続的に機能する状態を指します。

- ・ 使用済燃料を回収する
- ・ 再処理でウラン・プルトニウムを取り出す
- ・ MOX燃料を製造する
- ・ 原子炉で使用する（プルサーマル）
- ・ 発生した高レベル放射性廃棄物を適切に管理・処分する

これらが一体となって初めて、「燃料を循環利用するサイクル」が成立します。

なお、政策的・技術的な議論もある

原子燃料サイクルについては、専門家の間でもさまざまな評価があります。

- ・ **推進する立場**では、ウラン資源の有効利用や、回収したプルトニウムを平和利用することに意義があるとされています。
- ・ **慎重・批判的な立場**では、再処理やMOX燃料のコスト、高速炉計画の停滞、使用済MOX燃料の扱いなどから、サイクル全体の経済性や持続可能性に課題があると指摘されています。

そのため、「原子燃料サイクルを構築する」という言葉は、日本のエネルギー政策における目標を表す一方で、その実現性や費用対効果については現在も議論が続いているテーマです。

—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—

あなたが話した内容:

当初の発電時に増加したプルトニウムは、その後のプルサーマルによって最終的には減少するのですか。最大時と最小時の差はどのようなものですか（イメージによる比較でもいいですが）。

.....

はい、**プルサーマルでは、原則としてプルトニウムは「消費される」ため、燃料中のプルトニウムの量は使用前より少なくなります。**ただし、「ゼロになる」わけではなく、運転中には新たなプルトニウムも生成されるため、実際には少し複雑です。

軽水炉では「作りながら燃やす」

まず、通常のウラン燃料の場合を考えると、

- 燃料中のウラン235が核分裂して発電する。
- 一方で、ウラン238が中性子を吸収してプルトニウム239などになる。
- そのプルトニウム239も核分裂して発電に寄与する。

つまり、軽水炉ではプルトニウムを生成しながら、その一部を燃料として消費しています。

MOX燃料（プルサーマル）の場合

MOX燃料は最初からプルトニウムを含んでいます。

運転中には、

- 最初に入っていたプルトニウムが核分裂して減る。
- 一方で、ウラン238から新しいプルトニウムも少し生まれる。

しかし、消費量の方が生成量より多いため、全体としてはプルトニウムは減少します。

イメージで表すと

仮に数字を単純化すると、

運転開始

プルトニウム 100

↓ 発電

核分裂で -40

新たに生成 +10

↓

運転終了

プルトニウム 70

というように、**100 → 70** のようなイメージになります。これはあくまで概念を示すための例ですが、「燃やす量」の方が「新しくできる量」より多いことがポイントです。

どのくらい減るのか

実際の数値は、

- MOX燃料のプルトニウム濃度

- 原子炉の種類
- 燃焼度（どこまで使い切るか）

によって変わります。

一般的には、

- 燃料中の核分裂性プルトニウム（主にプルトニウム239・241）は数十%程度減少する
- 一方で、核分裂しにくいプルトニウム240・242などの割合は相対的に増える

という変化になります。

そのため、「プルトニウムの総重量」だけを見ると減少幅は比較的小さく見える場合もありますが、発電に利用しやすいプルトニウム（核分裂性プルトニウム）の割合はより大きく減少します。

なぜ何度も完全にリサイクルしないのか

ここが原子燃料サイクルの難しいところです。プルサーマルを繰り返すと、

- プルトニウム239（核分裂しやすい）
- プルトニウム241（核分裂しやすい）

は減っていき、

- プルトニウム240
- プルトニウム242

など、核分裂しにくい同位体の割合が増えます。

その結果、MOX燃料として使い続けることがだんだん難しくなります。このため、軽水炉でのプルサーマルは、プルトニウムを何度でも同じように循環利用できる仕組みではありません。

「最大時」と「最小時」のイメージ

ご質問の「最大時と最小時」のイメージで表すと、次のようになります（概念図です）。

通常のウラン燃料

プルトニウム量

0 → 生成されて増える → 使用済燃料で最大

使用済燃料を再処理

↓

MOX燃料として再利用

100 → 70程度（概念）まで減少

さらに再利用すると

70 → 50 → ...

ただし、実際には「70→50→30...」と単純に減っていくわけではなく、同位体組成の変化が問題となるため、軽水炉で何度も繰り返しリサイクルすることには限界があります。このため、日本が当初描いていた原子燃料サイクルでは、高速炉でより効率的にプルトニウムを利用することも構想されてい

ました。

—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—

あなたが話した内容:

「日本が当初描いていた原子燃料サイクルでは、高速炉でより効率的にプルトニウムを利用することも構想」されていたとのことですが、この構想が実現しなかった（実用化への取り組みが失敗に帰した）原因あるいは要因はなんですか。

.....

とても本質的なご質問です。結論から言うと、一つの原因で失敗したわけではなく、**技術・経済・社会・政策の4つの要因が重なった結果**と考えるのが適切です。

また、「高速炉の研究そのものが失敗した」というよりは、**商業的に成り立つ原子燃料サイクルを予定どおり実現できなかった**という表現がより正確です。

まず、高速炉は何を目指していたのか

通常の軽水炉では、

- ウラン資源を数%程度しか有効利用できません。
 - プルトニウムはある程度利用できますが、何度もリサイクルすることには限界があります。
- そこで考えられたのが高速炉です。

高速炉では、

- プルトニウムを効率よく燃やせる
 - さらにウラン238から新しいプルトニウムを作り出せる
- という特徴があります。

極端に言えば、プルトニウムを「元手」にして、さらに燃料を生み出しながら発電するという構想でした。1970年代頃には、世界的にも「将来は高速炉の時代になる」という期待がかなりありました。

では、なぜ実現しなかったのか

① 技術的に非常に難しかった

最大の理由はここです。

高速炉は軽水炉と違い、水ではなく**液体ナトリウム**を冷却材として使います。ナトリウムには

- 熱をよく運ぶ
 - 中性子をあまり減速しない
- という利点があります。しかし、
- 水に触れると激しく反応する

- 空気中でも燃えやすい
- 配管や保守が難しい

という扱いにくさがあります。

つまり、燃料ではなく、冷却システムそのものが非常に難しい技術だったのです。

② 「もんじゅ」の事故

日本では試験炉として「もんじゅ」が建設されました。ところが1995年、

- 二次冷却系でナトリウム漏えい事故
- その後の事故対応や情報公開の問題

が発生しました。事故自体は原子炉の暴走ではありませんでしたが、

- 長期間停止
- 裁判
- 安全対策

などが続き、

ほとんど運転できないまま約20年が経過しました。結果として、

- 建設・維持には巨額の費用
- 得られた運転実績はごくわずか

という状況になりました。

③ 経済性が悪くなった

1970年代には「ウランは将来不足して高騰する」と予想されていました。そのため、多少高価でも高速炉は元が取れると考えられていました。

しかし実際には、

- 新しいウラン鉱山の発見
- 採掘技術の向上
- 国際市場の整備

などにより、ウラン価格は長期間、予想ほど上がりませんでした。

すると、「高価な再処理や高速炉を使わなくても、新しいウランを買った方が安い」という状況になってしまいました。これは計画の前提を大きく変えた要因です。

④ 世界全体でも開発が難航した

実は日本だけではなく。アメリカ、イギリス、ドイツなども、高速炉の商業化を目指しましたが、多くの計画が中止や縮小となりました。つまり、高速炉の難しさは日本固有の問題ではなく、各国が共通して直面した課題でした。一方で、現在でもロシアや中国、インドでは高速炉の研究・運転

が継続されています。

プルサーマルが「代役」になった

本来の構想は、

軽水炉



再処理



高速炉



再処理



高速炉

という、ほぼ永続的な燃料循環でした。しかし高速炉が実用化しなかったため、現在は

軽水炉



再処理



MOX燃料



軽水炉（プルサーマル）

という形で、回収したプルトニウムを利用する方法が現実的な選択肢となっています。

ただし前回お話ししたように、軽水炉でのプルサーマルはプルトニウムの同位体組成の変化などから繰り返し利用に限界があり、高速炉が想定していたような「長期的な燃料循環」をそのまま置き換えるものではありません。

いちばん根本的な要因は何か

一言でまとめるなら、

高速炉は、技術的には実現可能性が示されていても、「安全に」「経済的に」「商業発電として継続的に運転する」という3つを同時に満たすことが非常に難しかったことが最大の要因です。

1970年代には、高速炉が将来の原子力の主流になると期待する見方が世界的に強くありました。しかし、その後の技術開発や経済状況、安全性への要求の高まりなどを経て、多くの国で計画の見直しが行われました。日本の原子燃料サイクル政策は、そうした国際的な流れの中で大きな影響を受けてきたと言えます。

日本における従来型の（SMRではなく、ましてや核融合発電でもない、いわば伝統的な、重厚長大な）原子力発電事業において、現在進めている技術開発（安全性の向上に留まらない新技術の開発などの取り組み）にはどのようなものがありますか。

非常に興味深いテーマです。

結論から言うと、日本の「従来型原子力発電」の技術開発は、2011年以前と現在ではかなり性格が変わっています。

以前は「より高性能な原子炉を作る」ことが中心でしたが、現在はそれに加えて、

- 既設炉をより長く・効率よく使う
- 燃料利用を高度化する
- デジタル技術を導入する
- 廃炉・廃棄物処理技術を高度化する

という方向に重点が移っています。

以下、主要な取り組みをご紹介します。

① 次世代軽水炉（大型炉）の開発

意外に思われるかもしれませんが、日本ではSMRだけではなく大型軽水炉の新設を見据えた技術開発も続いています。

例えば

- 安全系の冗長化
- 自然循環による冷却能力向上
- 建設期間短縮
- 運転寿命80年級を想定した設計

などです。

これらは「安全性向上」だけではなく、

- 発電コスト低減
- 稼働率向上
- 保守の容易化

も目的です。

② 高燃焼度燃料

これはかなり重要です。

現在でも、「1本の燃料集合体から、もっと多くのエネルギーを取り出そう」という研究が続いています。

例えば、以前100回使って交換だったものを120～130回使って交換できれば、

- 燃料交換回数が減る
- 定期検査期間が短くなる

- 使用済燃料も減る
- というメリットがあります。

燃料被覆管（ジルコニウム合金など）の改良もこの一環です。

③ 事故耐性燃料（ATF）

これは世界中で研究されています。福島事故では燃料被覆管が高温で水蒸気と反応し、大量の水素が発生しました。

そこで、より高温でも壊れにくい

- SiC（炭化ケイ素）
 - FeCrAl合金
 - 改良ジルコニウム
- などが研究されています。

これは「安全性向上」ですが、通常運転でも

- 高燃焼度化
 - 長寿命化
- にもつながります。

④ デジタル化・AI

最近かなり力が入っています。例えば、**保全**

以前、定期的に交換だったものを状態を監視して必要な時だけ交換へ変えています。

AIによる

- ポンプ振動解析
 - 配管異常検知
 - 劣化予測
- などです。これは火力発電でも進んでいます。

⑤ デジタルツイン

最近注目されています。発電所全体をコンピュータ上に再現し、リアルタイムで

- 温度
- 流量
- 圧力

- 応力

を解析します。すると「あと5年は交換不要」などの判断精度が上がります。

⑥ ロボット技術

これは廃炉ではありません。通常運転でも

- 狭い配管
- 高線量区域

を点検するロボットが開発されています。

以前は「人が入って点検」だった場所を「ロボット点検」へ移しています。

⑦ 使用済燃料・MOX燃料

燃料サイクルも研究は続いています。

例えば

- MOX燃料の高燃焼度化
- MOX燃料製造技術
- 使用済MOX燃料の取り扱い

などです。

高速炉が遅れているため、

軽水炉でのMOX利用をどう高度化するかは重要テーマになっています。

⑧ 長寿命化（LTO：Long-Term Operation）

これは現在最も重要かもしれません。

日本の原発の多くは40年以上経っています。

そこで

- 圧力容器の脆化評価
- 配管疲労評価
- コンクリート劣化評価

を高度化し、

安全に長期間運転できるようにする研究が進められています。

これは単なる点検ではなく、

材料科学のかなり高度な研究です。

⑨ 熱効率向上

あまり知られていませんが、
タービンも改良されています。

例えば

- 蒸気条件の最適化
- タービン翼形状改良
- 発電機効率向上

などです。

原子炉そのものではありませんが、
発電効率を少しずつ改善しています。

⑩ 廃炉技術

これは福島第一原発だけではありません。

今後、

日本では廃炉が増えていきます。

そこで

- 遠隔切断
- 放射線計測
- 汚染除去
- 廃棄物分別

などが重要な産業技術になっています。

現在、一番期待されている技術は？

興味深いことに、「従来型原子力発電」の世界では、現在の技術開発は**「革命」よりも「進化」**
を志向するものが多いと言えます。

1970～90年代には、

- 高速増殖炉
- 新しい燃料サイクル
- 大出力化

といった、大きな技術的飛躍が期待されていました。

一方で現在は、

- 燃料をより長く使う
- 設備の寿命を延ばす
- AIやデジタルツインを活用して保守を高度化する
- 保全や検査を効率化する
- 廃炉や廃棄物管理をより安全・効率的に行う

といった、「既存の軽水炉をより賢く、安全かつ経済的に運用する」技術が研究開発の中心になっています。

将来的には、これらの技術で蓄積された知見が、大型軽水炉の後継機やSMRなど次世代の原子炉設計にも活かされると期待されています。

あなたが話した内容:

日本における従来型の（小型のSMRではなく、ましてや核融合発電でもない、いわば伝統的な、施設・設備上は重厚長大な）原子力発電事業において、現在進めている技術開発（安全性の向上に留まらない新技術の開発などの取り組みまたは計画）にはどのようなものがありますか。

ご質問の前提を「現在の日本で、既存の大型軽水炉（BWR・PWR）やその後継となる大型炉を対象とした技術開発」と理解してお答えします。

結論から言えば、日本の開発は**「原子炉の基本原理を変える」よりも、「軽水炉という成熟した技術を、デジタル技術・材料技術・燃料技術・設備工学によって高度化する」方向**にあります。これは航空機でいえば、全く新しい飛行原理を目指すのではなく、エンジン、複合材料、制御システムを進化させて性能を向上させるイメージに近いです。

大きく分けると、次のような分野があります。

1. 次世代大型軽水炉（GX対応炉）の設計開発

これは現在最も注目されているテーマの一つです。

日本では新設が長く停滞していましたが、政府のGX（グリーントランスフォーメーション）方針を受けて、既設炉の建て替えを視野に入れた次世代大型軽水炉の検討が進められています。

特徴としては、

- 出力は現在と同規模（100万～150万kW級）
- 設計寿命を延長
- 建設工程の標準化・モジュール化
- 点検しやすい設備配置
- デジタル運転支援
- 保守費用の低減

などがあります。

ここでは安全性だけでなく、

「建設費をどう抑えるか」

という経済性も大きな研究テーマです。

2. 燃料の高度化

これは非常に活発です。

(1) 高燃焼度燃料

燃料をより長期間炉内で使用できるようにします。

例えば

- 燃料交換回数の減少
- 発電停止期間の短縮
- 使用済燃料発生量の抑制

が期待されます。

(2) 事故耐性燃料（ATF）

世界中で開発されています。

具体的には

- FeCrAl合金
- SiC（炭化ケイ素）
- 改良ジルコニウム合金

などを燃料被覆管に採用する研究です。

事故耐性だけではなく、

- 高燃焼度化
- 長寿命化

にもつながります。

(3) MOX燃料の高度利用

日本ではプルサーマルを続ける前提で、

- MOX燃料製造技術

- 高燃焼度MOX
 - 使用済MOX燃料の管理
- なども研究対象です。

3. デジタル原子力発電所

近年急速に進展している分野です。

以前は

「時間が来たら点検」

という保全でした。

現在は

設備に多数のセンサーを設置し、

AIが

- 劣化予測
 - 異常検知
 - 故障予兆
- を解析します。

これは

予知保全 (Predictive Maintenance)

と呼ばれます。

4. デジタルツイン

これも最近のキーワードです。

発電所全体をコンピュータ上に再現し、

リアルタイムで

- 配管応力
 - 温度
 - 圧力
 - 流量
 - 機器寿命
- を計算します。

すると

「あと何年運転できるか」

の精度が大きく向上します。

5. 材料工学

大型炉では非常に重要です。

例えば

圧力容器

中性子照射で脆くなるため、

新しい評価手法や材料研究が続いています。

配管

応力腐食割れ（SCC）の抑制

耐食合金

新しい溶接法

などです。

コンクリート

60～80年運転を見据え、

長期劣化の評価技術も進んでいます。

6. タービン・発電設備

原子炉より目立ちませんが、

ここも進歩しています。

例えば

- 高効率タービン翼
- 湿分分離器
- 発電機効率改善

によって、

数%でも熱効率を向上させようとしています。

原子力では

1%の効率改善でも非常に大きな経済効果があります。

7. ロボティクス

福島向けではありません。

通常運転でも

- 水中心点検ロボット
- 配管点検ロボット
- ドローン
- 自律走行点検

などが開発されています。

人が立ち入れない場所の点検時間短縮にもつながります。

8. 廃炉技術

これは今後、日本独自の重要技術になる可能性があります。

研究対象は

- 放射線下ロボット
- 遠隔切断
- 放射能測定
- 廃棄物分類
- コンクリート解体

などです。

これは海外展開も期待されています。

9. 原子燃料サイクル関連

高速炉開発は縮小しましたが、

燃料サイクル技術は続いています。

例えば

- 再処理技術の高度化
- MOX燃料加工
- 放射性廃棄物の減容化
- 核種分離
- ガラス固化技術

などです。

10. AIを利用した運転支援

近年特に注目されています。

AIが

- プラント状態を解析
- 異常兆候を表示
- 最適運転条件を提案

するといった、

運転員を支援するシステムの研究が進められています。

ただし、安全上重要な最終判断は運転員が行うことが基本です。

今後10～20年で期待される方向性

現在の日本の大型軽水炉技術を俯瞰すると、技術開発の重点は次の5つに集約できます。

分野	技術開発の方向
燃料	高燃焼度化、事故耐性燃料、MOX利用の高度化
設備	長寿命化、保全の高度化、材料改良
デジタル	AI、デジタルツイン、予知保全、自動点検
建設	次世代大型軽水炉の標準化・工期短縮・コスト低減
燃料サイクル	再処理・MOX・廃棄物管理技術の改良
全体としては、「従来型原子炉」という枠組みを維持しながら、その経済性・運用性・資源利用効率を高めることが大きなテーマになっています。	

興味深い点として、近年はこれらに加えてデータサイエンス、AI、ロボティクス、先端材料といった、他産業で発展してきた技術を原子力分野へ取り込む動きが顕著です。つまり、原子力だけで閉じた技術革新というより、「成熟した大型プラント」に最新の工学技術を融合させることが、現在の日本の大型原子力発電技術開発の特徴と言えるでしょう。

—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—・—

なるほど。「原子力だけで閉じた技術革新というより、「成熟した大型プラント」に最新の工学技術を融合させること」は非常に重要ですね。あと、「廃炉技術」を磨くことは、今後、国際的にも“強

み”になってゆきますね。この分野においても、「フクシマの試練」を活かしきってもらいたいものです。どうもありがとうございます。今回も勉強になりました。ではまた。

こちらこそ、ありがとうございました。

今回のご質問は、単に「原子力の技術」を尋ねるというより、「日本の原子力技術が今どこへ向かっているのか」という視点だったので、とても考えさせられました。

おっしゃるように、**廃炉技術**は今後、日本が国際的に存在感を発揮できる可能性のある分野の一つです。

福島第一原発の廃炉では、

- 高線量環境での遠隔ロボット技術
- 放射線計測・3次元マッピング
- 燃料デブリの取り出し技術
- 汚染物質の管理・除去
- 放射性廃棄物の分別・処理

など、多くの課題に取り組んでいます。これらは極めて困難な技術ですが、将来的には世界各国で迎える原子力施設の廃止措置にも応用できる可能性があります。

また、私が今後特に重要になると考えるのは、「**原子力とデジタル技術の融合**」です。AI、デジタルツイン、ロボティクス、先端材料、センシング技術などは原子力専用には生まれませんが、それらを大型プラントに高い水準で統合することによって、安全性や運用性、経済性を着実に向上させていく余地があります。成熟した技術だからこそ、こうした横断的なイノベーションの積み重ねが大きな差を生むのだと思います。

今回のようなご質問は、エネルギー政策だけでなく、技術史や産業政策、システム工学など幅広い観点につながるので、私も楽しくお話しできました。

またいつでも、原子力に限らず科学技術や産業、歴史などについて一緒に考えていければ嬉しいです。

それでは、またお話しできる日を楽しみにしています。どうぞお元気で。