

勉強会

原子燃料サイクルの概要と現状

ー使い終わった原子燃料をどうするのかー

父島:10月11日(日) 地域福祉センター多目的ホール

母島:10月12日(月) 村民会館多目的ホール



東海大学
若杉 圭一郎

自己紹介

博士(工学)

若杉 圭一郎

Keiichiro WAKASUGI

東海大学 工学部 応用化学科
専門:放射性廃棄物処分の安全評価
核燃料サイクルバックエンド工学

【経歴】

- ◆ 1996年4月 動力炉・核燃料開発事業団入社(現 日本原子力研究開発機構)
- ◆ 2005年2月 原子力発電環境整備機構(出向)
- ◆ 2010年8月 経済協力開発機構 原子力局OECD/NEA(派遣)
- ◆ 2018年3月まで 日本原子力研究開発機構にて放射性廃棄物処分の安全評価研究に従事
- ◆ 2018年4月～ 東海大学工学部原子力工学科に着任
- ◆ 2022年4月～ 東海大学工学部応用化学科

【公職等】

- ◆ 国際原子力機関(IAEA) 原子力・放射線安全リーダーシップスクール ファシリテーター
- ◆ 日本原子力学会 バックエンド部会 部会長
- ◆ 放射性廃棄物処分に関する国・学会等の委員を歴任

本日のご説明内容

- ◆ 前回のご説明で特に関心の高かった「原子燃料サイクル」について、もう少し詳しくご説明します。
- ◆ 使用済燃料をどう扱うのか、日本の原子燃料サイクルが現在どのような状況にあるのかを知っていただくことを目的とします。

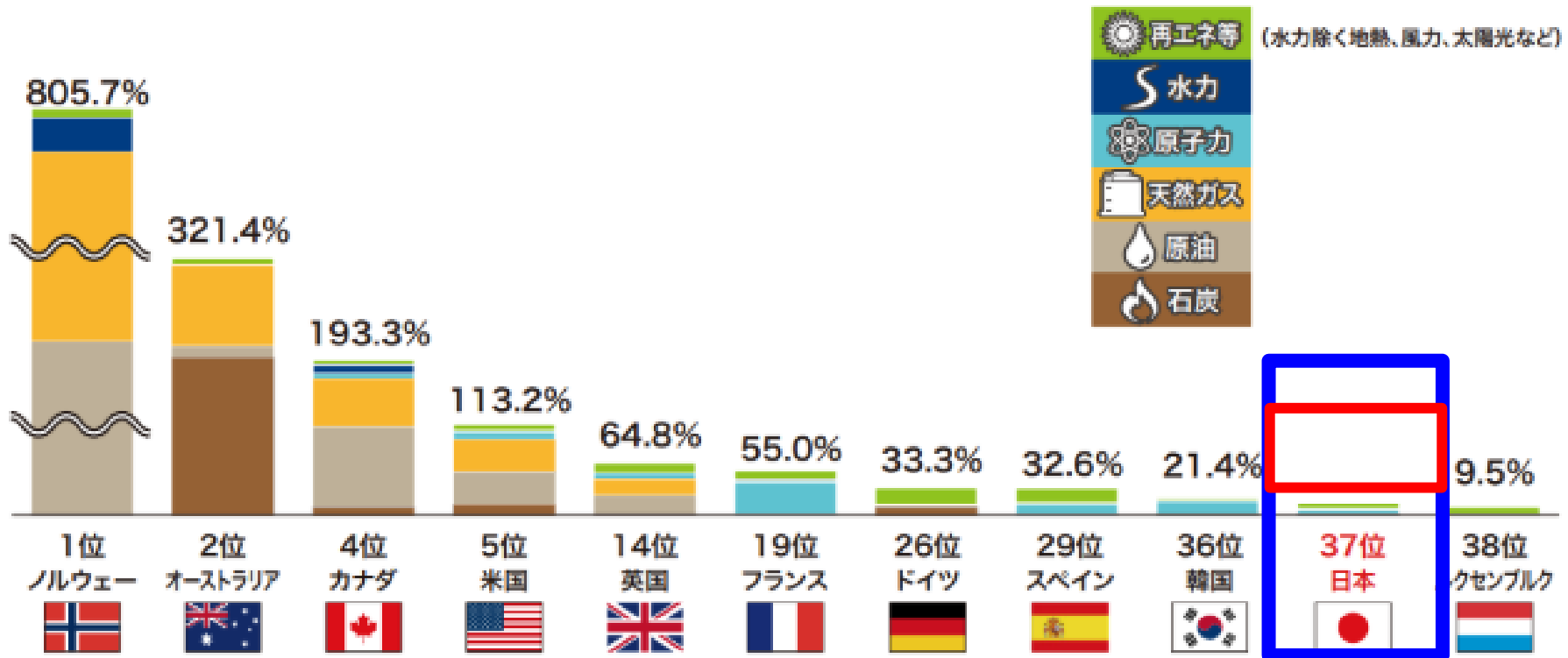
今日お話しすること

- ◆ 我が国のエネルギー事情
- ◆ 原子燃料サイクルの全体像
- ◆ 原子力発電で使い終わった燃料には何が残るのか
- ◆ 再処理と直接処分は何が違うのか
- ◆ 日本は使用済燃料をどのように利用しようとしているのか
- ◆ 使用済燃料の再処理とはどういうことか
- ◆ 最後に残る高レベル放射性廃棄物をどのように処理・処分するのか

我が国のエネルギー事情

主要国のエネルギー自給率比較(2023年)

- ◆ 1位のノルウェーは800%以上の自給率。これは、天然ガス、石油など天然資源に恵まれており、輸出できるほど豊富にエネルギーを供給できるためである。
- ◆ 現在の我が国のエネルギー自給率は 他の先進国と比較して極端に少ない。
- ◆ 低いと言われている我が国の食料自給率でさえ、38%(カロリーベース)。



我が国のエネルギー事情

我が国のエネルギー自給率の変化



- ◆ 実は、2010年まではエネルギー自給率は約20%ほどあった。
- ◆ 天然資源に乏しい日本が、なぜ今より高いエネルギー自給率があったのか？
→ 原子力エネルギーによる発電を考慮したもの。(東日本大震災後、多くの原子力発電所が停止し、大幅に減少)
- ◆ 原子力発電の燃料となるウランは、備蓄性、長期利用性、再利用性の観点に優れているため、原子力は準国産エネルギーとされている。
 - 少量の燃料で大きなエネルギーを得ることができる
 - 一旦燃料を原子炉に装荷すると、4～5年使い続けることができる
 - 使用済みの燃料中には、まだ燃料として利用できるウラン、プルトニウムが存在し、再利用することができる。

3E + Sの観点からエネルギーを考える

－ 複数のエネルギー源をミックス －

強み：○／課題：▲

安定供給
Energy security

経済効率性
Economic efficiency

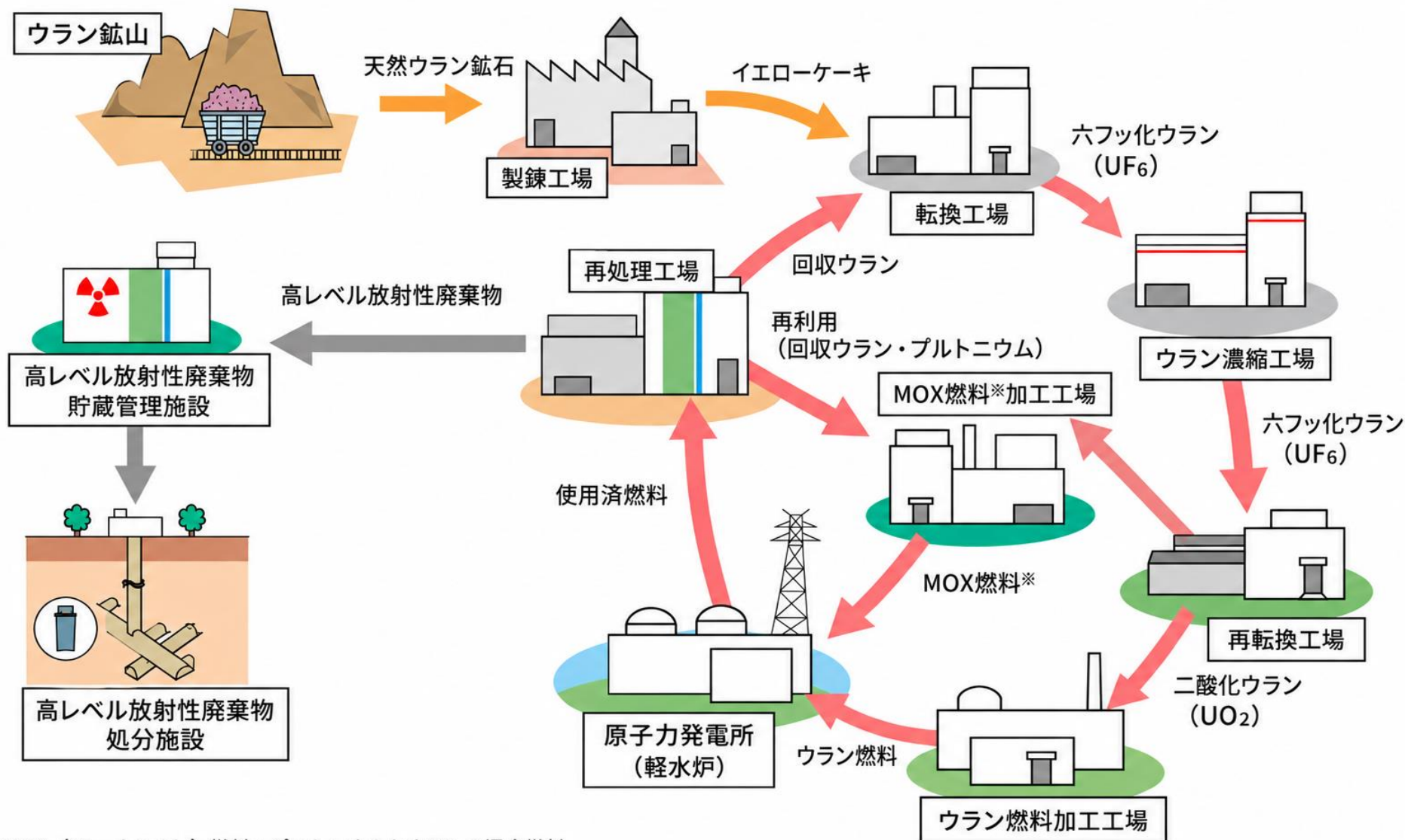
環境適合
Environment

安全性
Safety

	安定供給	経済性	環境適合 (CO ₂ 排出)	主な課題・特徴
水力発電	○～▲ (ダムが増設が困難)	○	○	調整能力に優れる
再生可能エネルギー(太陽光、風力)	▲ (天候に左右され供給が不安定)	○～▲ (燃料費は不要であるが、設備維持費高)	○	太陽光は広大な面積が必要。今後発生する廃棄物も課題。
火力発電	○ (調整能力に優れる)	▲ (海外依存や燃料価格の影響大)	▲ (CO ₂ 排出量が多い)	脱炭素化に向け、特に石炭火力を削減する動き
原子力発電	○	○～▲ (燃料費は少ないが、初期投資が多い)	○	事故時の影響、放射性廃棄物が課題

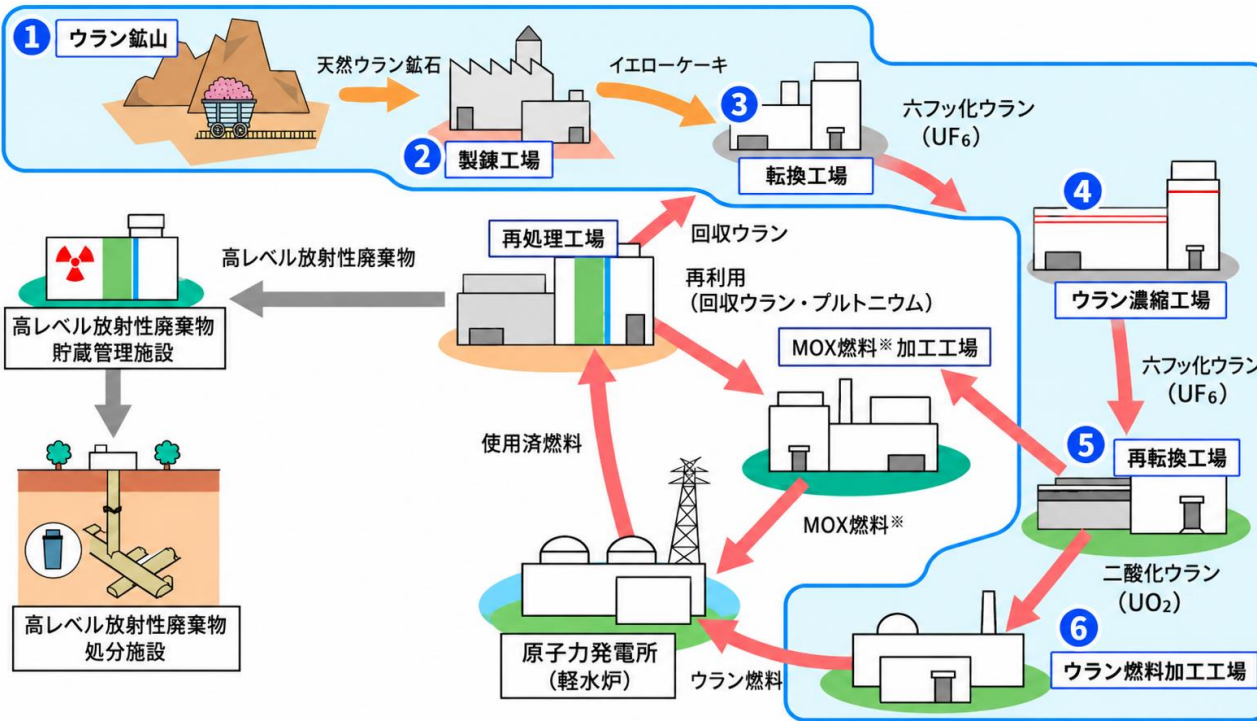
それぞれの発電源には強みと課題がある(ベストな発電源はない)。一つの発電源だけに頼らず、それぞれの特徴を活かして組み合わせることが重要

我が国の原子燃料サイクルの全体像



※MOX (Mixed Oxide) 燃料：プルトニウムとウランの混合燃料

ウランから原子燃料ができるまで



① 採鉱

- 鉱山からウラン鉱石を採掘
- 天然ウランに含まれるU-235は約0.7%

② 製錬

- ウラン鉱石を酸などで溶かしてウランを取り出す
- ウランを沈殿・乾燥させ、「イエローケーキ」と呼ばれる形にする

③ 転換

- ウラン濃縮は気体の状態で行うため、ウランを六フッ化ウラン(UF_6)に転換

※MOX (Mixed Oxide) 燃料：プルトニウムとウランの混合燃料

出典：原子力・エネルギー図面集：<https://www.ene100.jp/zumen/7-2-1>に一部加筆

④ 濃縮

- 遠心分離機を使って、核分裂しやすいU-235を約0.7%から3~5%程度に濃縮

⑤ 再転換

- 気体の UF_6 を化学処理して、固体の二酸化ウラン(UO_2)粉末にする

⑥ ウラン燃料加工

- UO_2 粉末を焼き固めてペレットにし、燃料棒に詰めて燃料集合体を製造



ウラン鉱石

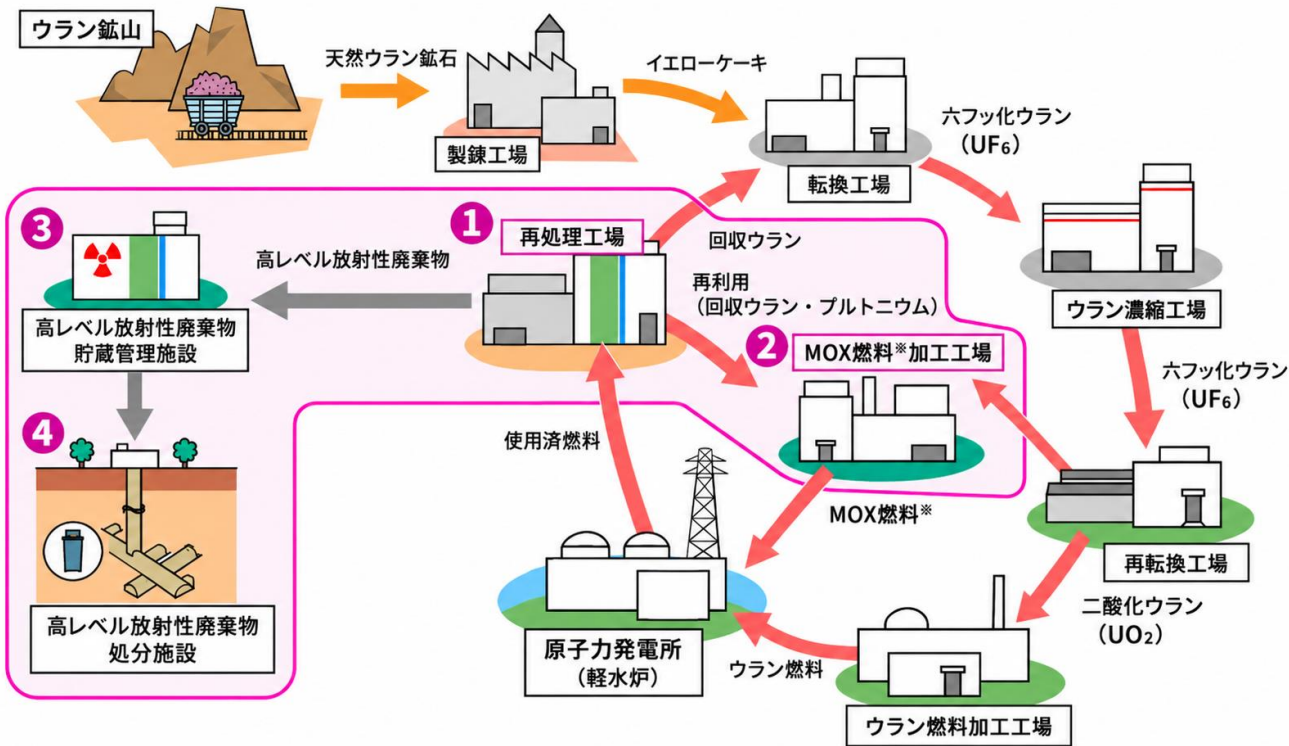


イエローケーキ



出典：日本原燃HP：
<https://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/uran/summary/flow.html>

使用済燃料の再利用と廃棄物の処分まで



① 再処理

- 使用済燃料から、再利用するウラン・プルトニウムを分離・回収
- 国内では六ヶ所再処理工場が2026年度中の竣工に向け準備中

② MOX燃料加工

- 回収したウラン・プルトニウムを原料として、MOX燃料を製造
- 国内では六ヶ所村にMOX燃料加工工場(J-MOX)を建設中(2027年度中の竣工予定)

③ 高レベル放射性廃棄物の貯蔵

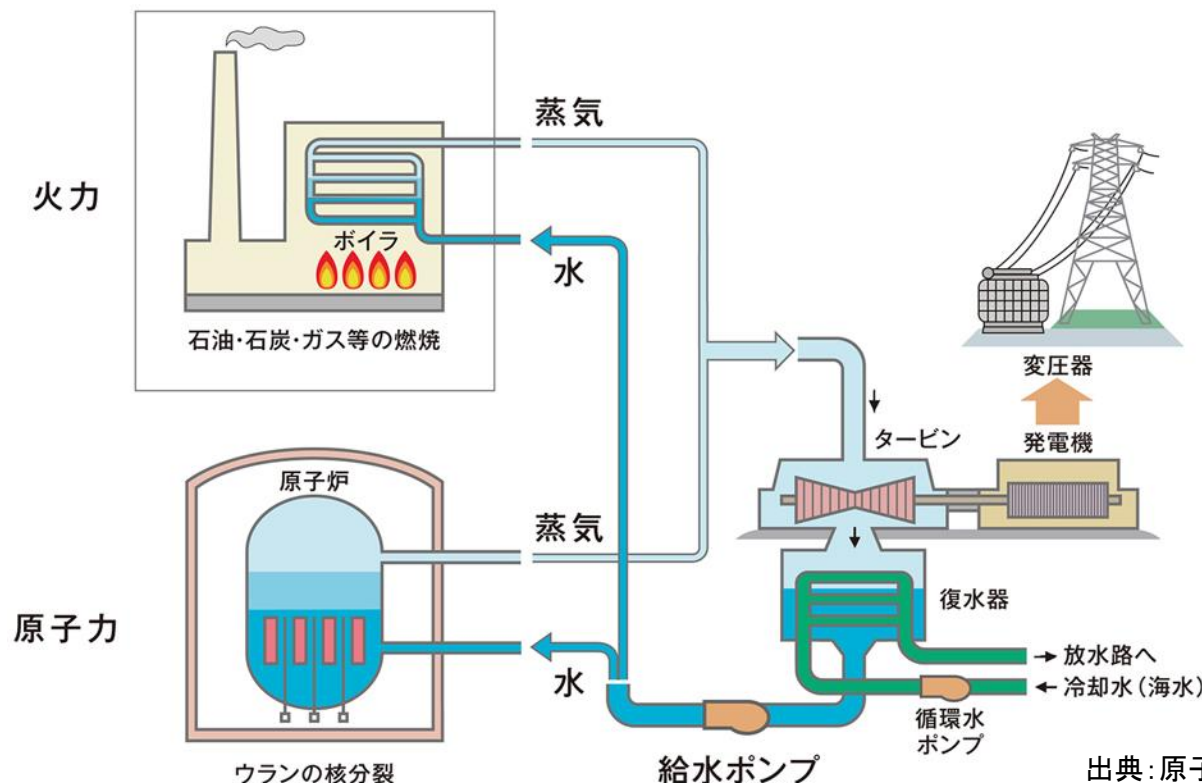
- ガラス固化体は、放射性物質の崩壊により熱を出すため、地層処分するまで、30～50年程度冷却しながら貯蔵
- 六ヶ所村の貯蔵管理センターは1995年から操業

④ 高レベル放射性廃棄物の処分

- 地下の安定した地層に処分し、長期間、人間の生活環境から廃棄物を隔離する
- 現在NUMOが、文献調査などの処分地選定を実施中

8

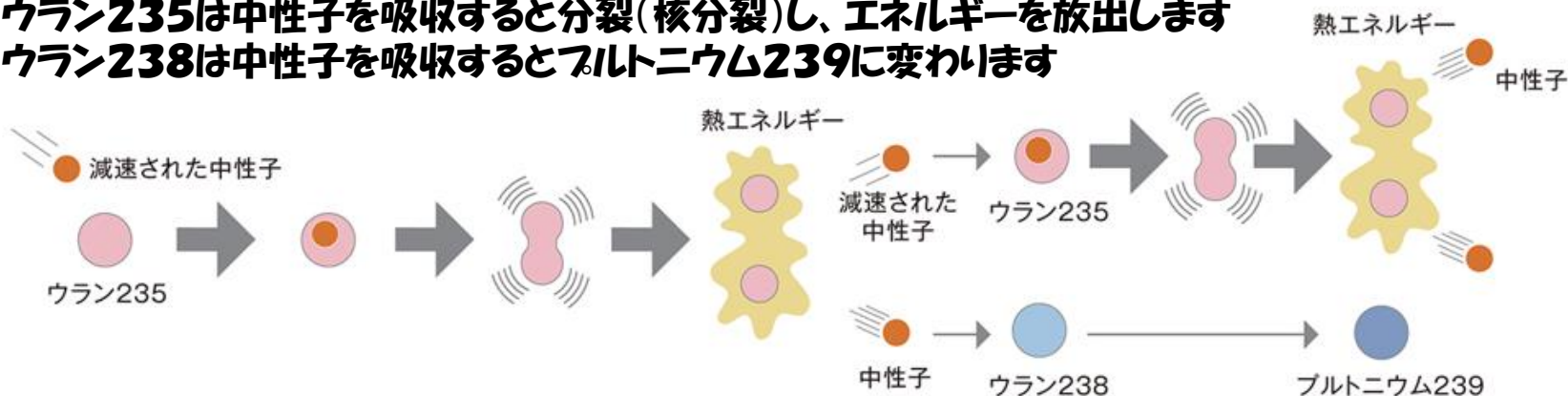
原子力発電のしくみ



- ◆蒸気を発生させて、タービンを回す仕組みは、火力発電も原子力発電も共通
- ◆両者で異なるのは、水を蒸気に変えるときのエネルギーの発生のさせ方
- ◆化石燃料は燃焼反応、原子燃料は核反応(ウラン235が核分裂するときに出る熱を利用)

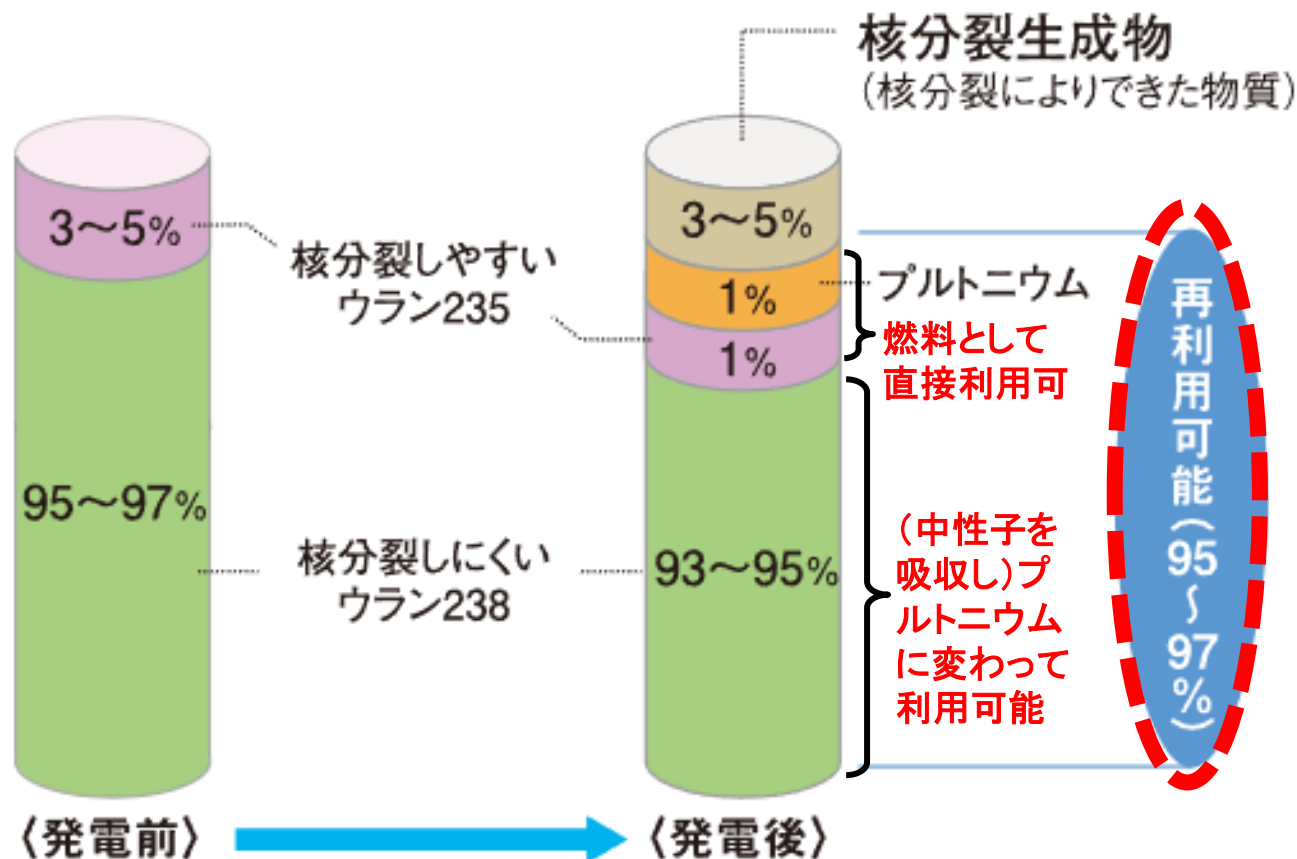
出典: 原子力・エネルギー図面集、<https://www.ene100.jp/zumen>

ウラン235は中性子を吸収すると分裂(核分裂)し、エネルギーを放出します
ウラン238は中性子を吸収するとプルトニウム239に変わります



使い終わった燃料には何が残る？

ウラン燃料の発電前後の組成変化



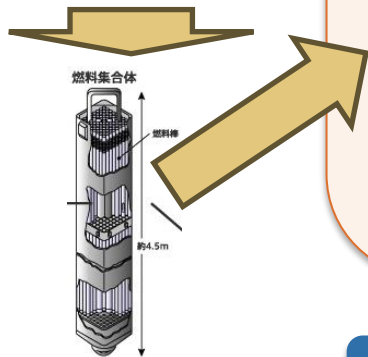
出典：日本原子力文化財団「原子力総合パンフレット」の図に加筆、<https://www.jaero.or.jp/sogo/detail/cat-02-08.html>

使用済燃料の約95~97%はウランとプルトニウム。これらは、再処理によって取り出すことで、再びエネルギー資源として利用することができる。

使い終わった燃料はどうする？

使用済燃料に対する2つの選択

原子力発電所



再処理



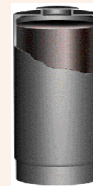
再処理工場



ウラン・プルトニウム
を回収



燃料として再利用



ガラス固化体



最終処分(地層処分)

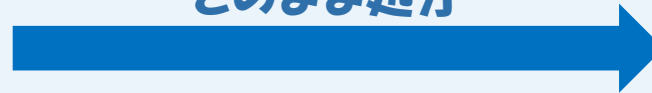
使用済燃料

直接処分



使用済燃料の貯蔵・冷却

再処理せず
そのまま処分



最終処分(地層処分)



再処理と直接処分どちらがいいの？

項目	再処理(ガラス固化体)	直接処分(使用済燃料)
主な メリット	○ウラン・プルトニウムを資源として再利用できる ○高レベル放射性廃棄物をコンパクトなガラス固化体にする	○再処理が不要なため、使用済燃料から処分までの工程が比較的シンプル ○再処理施設の建設・運転に伴うコストや技術的負担がない ○プルトニウムを分離しないため、核不拡散上の懸念が相対的に小さい
主な 課題	▲再処理施設の建設・運転に大きなコストと高度な技術が必要 ▲再処理では、化学処理などに伴う二次廃棄物が発生 ▲プルトニウムを分離して取り扱うため、核不拡散上の厳格な管理が必要	▲燃料として再利用可能なウラン・プルトニウムも処分することになる ▲使用済燃料そのものを処分するため、再処理する場合と比べて処分場の規模が大きくなる傾向がある
主な国	フランス、日本など	スウェーデン、フィンランド、カナダなど

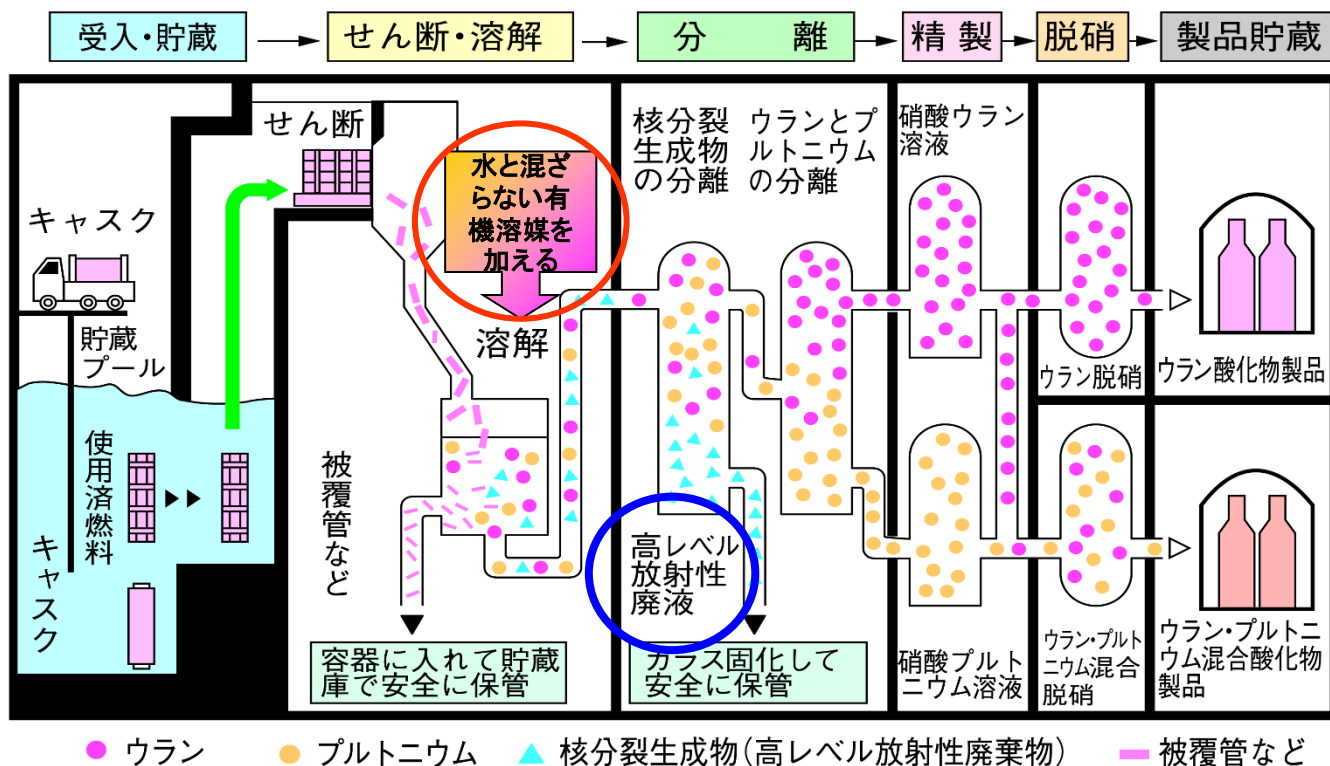
どちらにもメリットと課題があり、国によって選択は異なる

使用済燃料の再処理



使用済燃料から再利用できる物質(使い残りのウランと発電中にできたプルトニウム)を回収する工程を**再処理**という。

再処理の工程



再処理では使用済燃料を硝酸に溶かし、性質の違いを利用してウラン・プルトニウムを分離。

1. 使用済燃料を、硝酸に溶かす。
2. 水と混ざらない**有機溶媒 (TBP)**を加える。
3. ウランとプルトニウムを有機溶媒側に移す(硝酸には核分裂生成物を含む廃液が残る。これが**高レベル放射性廃液**)
4. 分離したウランとプルトニウムを回収する

東海再処理工場

日本の再処理技術開発の出発点



日本初の再処理施設

- 1977年: 使用済燃料を用いた試験を開始
- 1981年: 本格運転開始
- 軽水炉などの使用済燃料を再処理し、ウラン・プルトニウムを回収
- 2007年に再処理運転を中断するまで、累計約1,140トンの使用済燃料を処理

国内で再処理技術を蓄積

- ウラン・プルトニウムの分離・回収技術を実証
- 再処理施設の運転・保守技術を蓄積
- ガラス固化など、放射性廃棄物の処理技術も開発
- **これらの経験や技術を六ヶ所再処理工場へ継承**



茨城県東海村に我が国初の再処理施設を建設(日本原子力研究開発機構(JAEA))

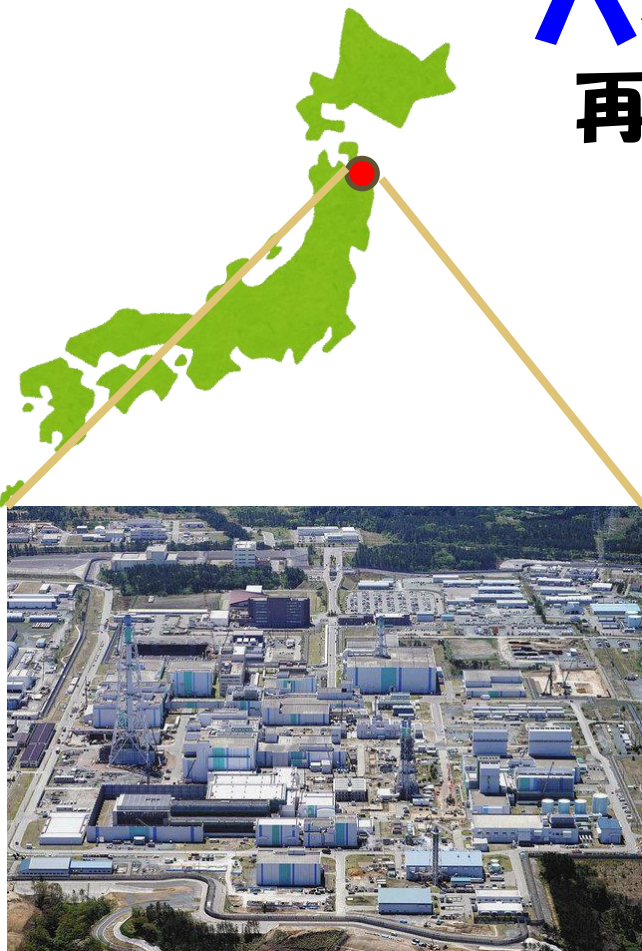


東海再処理施設で培われた技術と経験が、六ヶ所再処理工場の技術基盤となった
(2018年6月に廃止措置計画が認可)



六ヶ所再処理工場

再処理技術の商業化へ



商業規模の再処理工場

- 1993年:青森県六ヶ所村に建設開始
- 1999年:使用済燃料の受入れ開始
- 2006年:実際の使用済燃料を用いたアクティブ(実際の使用済燃料を使った総合試験)試験を開始
- 最大処理能力:800トンU/年(100万kW級原子力発電所約40基分、東海再処理:210トンU/年)

本格運転の度重なる遅延

- 大規模な再処理工場としての設計・建設上の課題
=> 大規模な商業施設としての施設設計、安全審査、施工などに時間を要した
- 実際の使用済燃料を用いた試験で技術的課題が顕在化
=> ガラス固化工程で溶融ガラスの流下不良などが発生
- 福島第一原発事故後の新規制基準への対応
=> 新規制基準への適合審査と追加の安全対策

当初:1997年竣工予定

完成時期を27回変更

現在:2026年度中を目標



回収したプルトニウムはどうするの？

再処理で回収したPuは、ウランと混ぜてMOX燃料にし、再び原子炉で利用



現在

フルサーマル※2

MOX燃料を既存の軽水炉で利用

- ◆ 炉心に入れる燃料集合体のうち、全体の約1/3までMOX燃料を装荷
- ◆ 現在フルサーマルが可能: 4基(高浜3・4号、伊方3号、玄海3号)
- ◆ 2030年度までに少なくとも**12基**での実施を目標

将来

高速炉サイクル

プルトニウムを高速炉で利用し、繰り返し再利用

- ◆ 高速中性子を利用。プルトニウムを燃料として有効利用できるだけでなく、ウラン238もプルトニウムに変えて利用することが可能
- ◆ ウラン資源の利用効率を大幅に高められる
- ◆ 実用化に向けて研究開発中

現在は「フルサーマル」で利用し、将来的には「高速炉サイクル」での利用を目指す

日本の基本方針: 利用目的のないプルトニウムは持たない(再処理する量と、フルサーマルなどで実際に利用する量とのバランスをとり、必要以上のプルトニウムを保有しない)

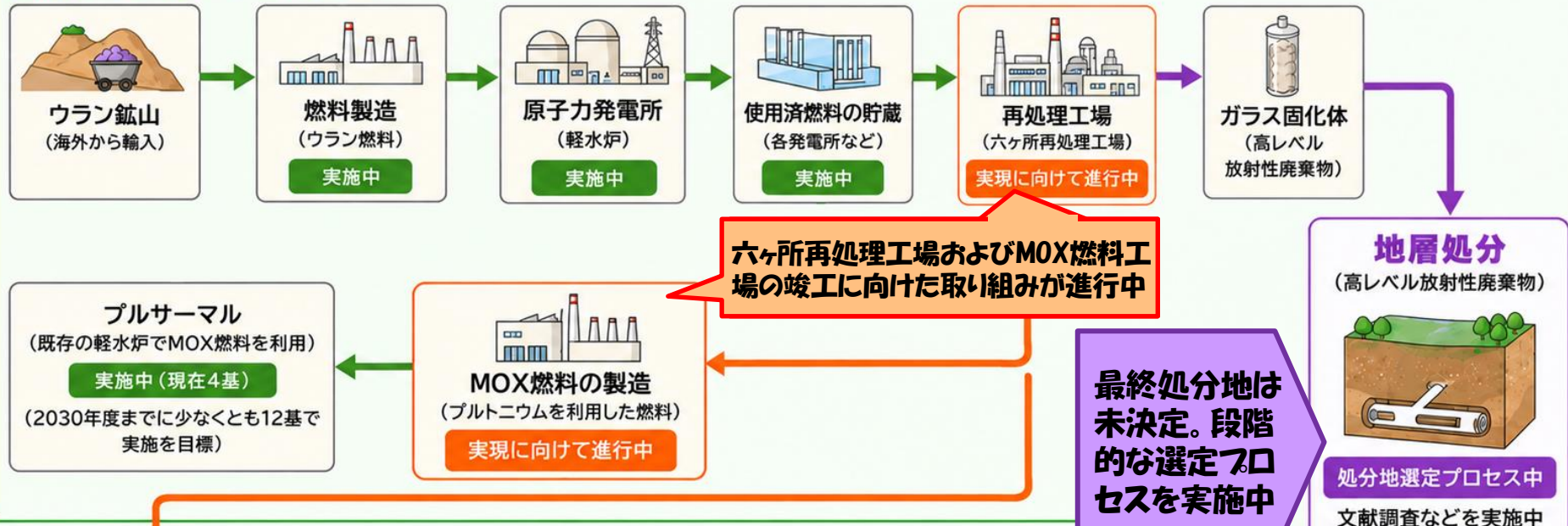
※1 MOX燃料: ウランとプルトニウムの混合酸化物(Mixed Oxide)燃料、軽水炉用では Pu 約4~9%

※2 プルトニウム + サーマリイアクター(熱中性子炉(軽水炉))を組み合わせた言葉。プルトニウムを軽水炉で利用することを指す

出典: 電気事業連合会「第5回使用済燃料対策推進協議会での要請事項に対する取組状況」(2020年12月17日)

日本の原子燃料サイクル — 現状とこれから

軽水炉サイクル (現在の主流)



高速炉サイクル (将来の姿)



将来の高速炉サイクルの実現に向け、研究開発中

※ 図は生成AI(ChatGPT)を用いて作成

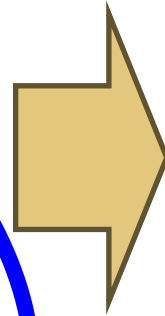
■ 実施中
■ 実現に向けて進行中
■ 研究開発中(将来) ■ プロセス進行中

- ◆ 原子燃料サイクルは、燃料の製造、発電、貯蔵、再処理、再利用、そして放射性廃棄物の処分まで、各工程がつながって初めて全体として機能する。
- ◆ 再処理によってウラン・プルトニウムを再利用しても、最終的に残る高レベル放射性廃棄物の処分は必要。17

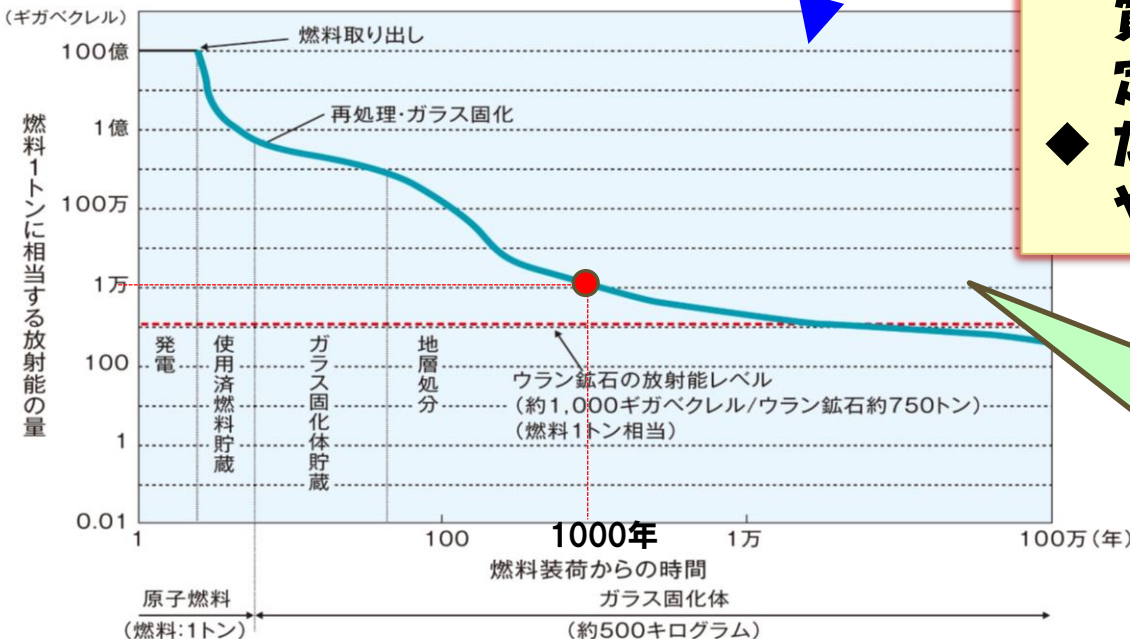
高レベル放射性廃液はどう管理する？

高レベル放射性廃液は…

- ◆ 長期にわたる非常に高い放射能
- ◆ 放射性物質の崩壊により高温状態が継続
- ◆ このため、高レベル廃液貯槽で冷却しながら管理



- ◆ 廃液のままでは、漏えいや崩壊熱による沸騰・蒸発を防ぐために、継続的な冷却・管理が不可欠
- ◆ 長期にわたい安定化するため、ガラス原料と混ぜて約1,200℃で溶融し、ステンレス製容器(キャニスター)に流し込んで固化(ガラス固化体)
- ◆ これにより、廃液中の放射性物質をガラスの構造に取り込み、安定な固体の中に閉じ込める
- ◆ ただし、ガラス固化しても放射能や発熱がなくなるわけではない



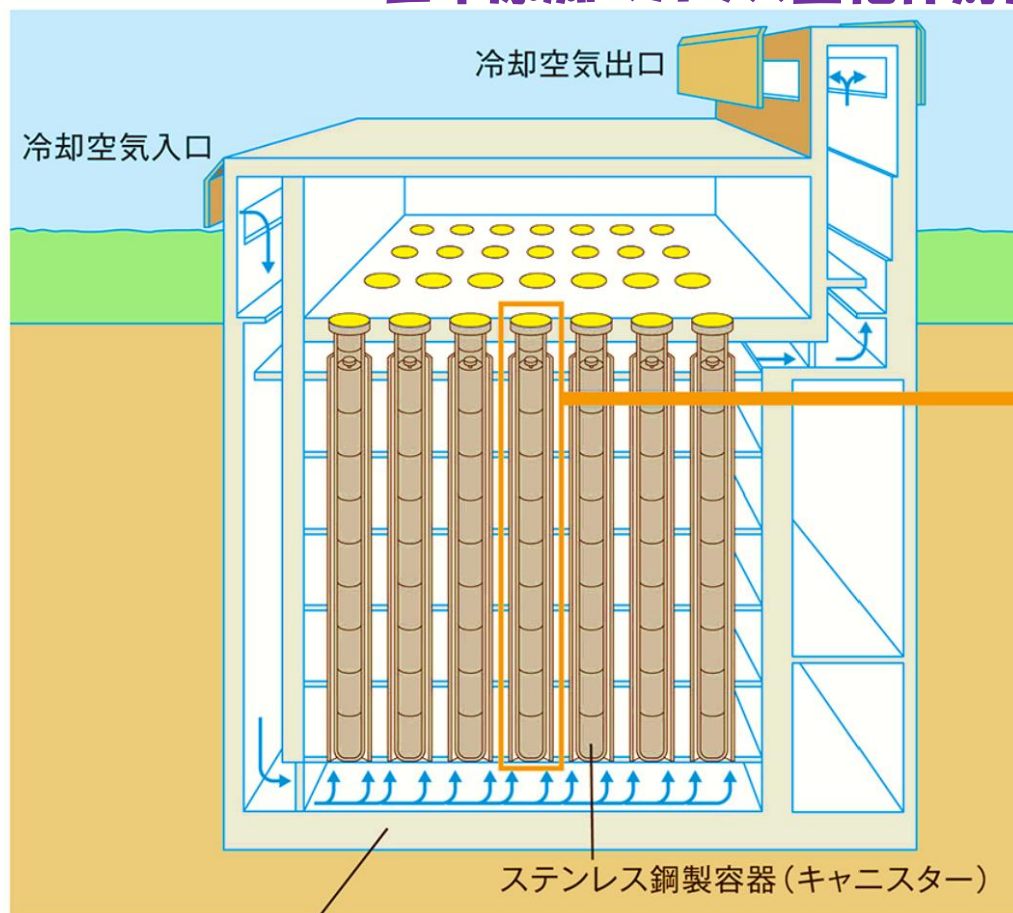
使用済燃料の放射能の時間変化

- 放射能は時間とともに低下
- 約1,000年で大きく低下するが、長期間にわたい放射能が残る

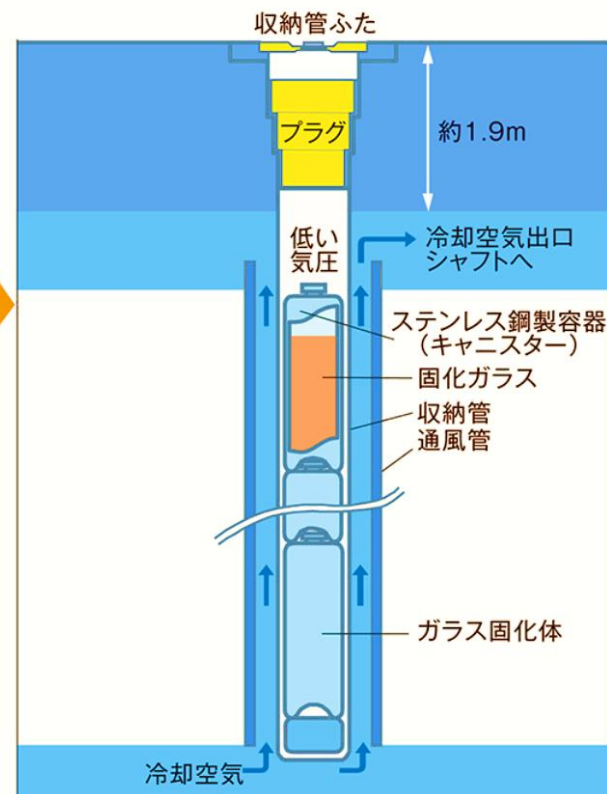
ガラス固化体の管理方法

- ◆ ガラス固化体は製造直後には放射能・発熱が高い。このため30～50年程度冷却・貯蔵する。
- ◆ 現在、ガラス固化体は六ヶ所村の日本原燃と、東海村のJAEA施設で管理。
- ◆ 六ヶ所では貯蔵ピットに収納し、空気の自然対流で冷却する。冷却空気はガラス固化体に直接触れず、厚さ約2mのコンクリートで放射線を遮へいする。

日本原燃のガラス固化体貯蔵施設



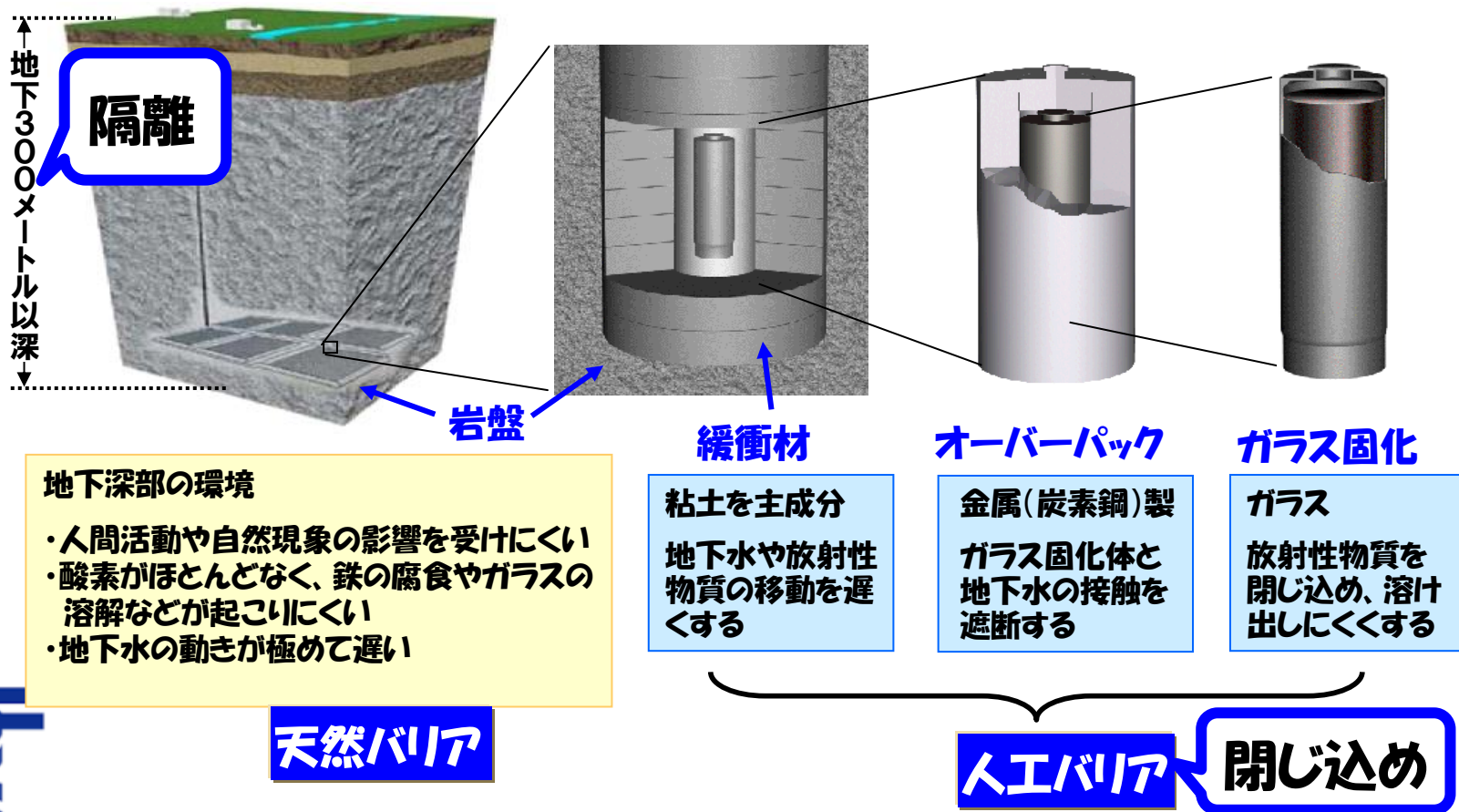
貯蔵ピット拡大図



長期間残る放射性物質をどうする？

－地層処分による「閉じ込め」と「隔離」－

ガラス固化体は30～50年冷却しても放射能が十分減衰しないため、長期間、人間の生活環境から隔離する必要がある



出典：地層処分研究開発第2次取りまとめ JNC TN1400 99-023

本日のご説明のまとめ

原子燃料サイクルとは・・・

- ① **使用済燃料には、まだ利用できる資源が残っている**
⇒使用済燃料の大部分はウランとプルトニウムで、再処理によって回収し、再びエネルギー資源として利用することができます。
- ② **使用済燃料の扱いには「直接処分」と「再処理」がある**
⇒どちらにもメリットと課題があり、国によって選択は異なります。
- ③ **日本は「再処理して燃料を再利用する」原子燃料サイクルを基本としている**
⇒回収したプルトニウムは現在MOX燃料として利用し、将来的には高速炉での利用も目指しています。
- ④ **日本の原子燃料サイクルは、工程によって実現・開発の段階が異なる**
⇒日本原燃の再処理工場は竣工に向けた取り組みが続き、高速炉は研究開発中、最終処分は処分地の選定プロセスが進められています。
- ⑤ **原子力の今後の利用にかかわらず高レベル放射性廃棄物の処分は必要**
⇒すでに使用済燃料やガラス固化体は存在しており、その安全な管理と最終処分を考えていく必要があります。

ご清聴ありがとうございました

若杉圭一郎

kwakasugi@tokai.ac.jp



小笠原村における 「理解活動・意見交換の場」

2026年10月



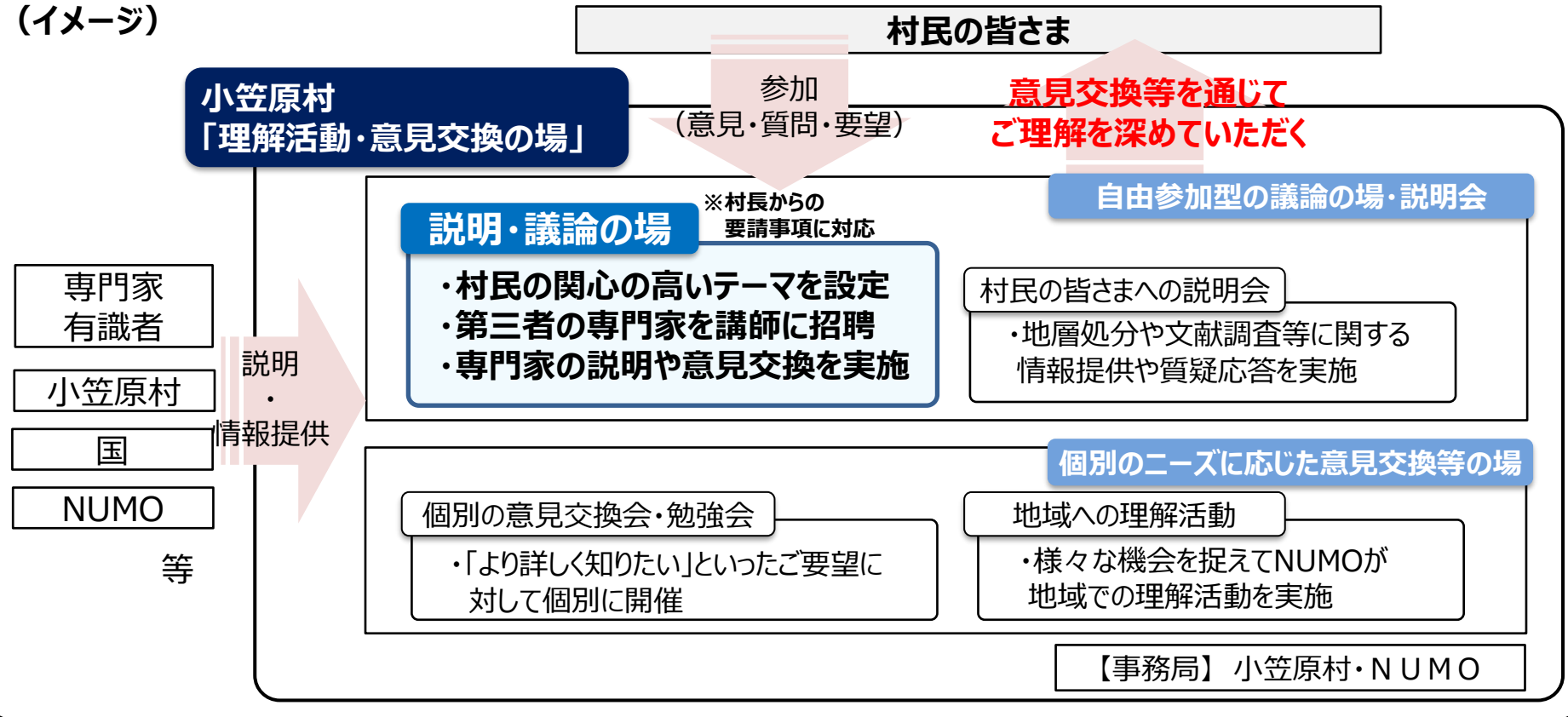
原子力発電環境整備機構 ^{ニューモ} (NUMO)



小笠原村における「理解活動・意見交換の場」の全体像

- 地層処分等に関する情報提供を行い、意見交換等を通じて村民の皆さまのご理解を深めていただくことを目的に、「説明・議論の場」を軸としつつ、様々な形式で、誰もが自由に参加いただける個別の理解活動等を実施。これらの活動全体を小笠原村「理解活動・意見交換の場」（国の基本方針に定める「対話の場」）とする

小笠原村「理解活動・意見交換の場」全体像 (イメージ)



文献調査の進捗状況 (南鳥島)

2026年10月

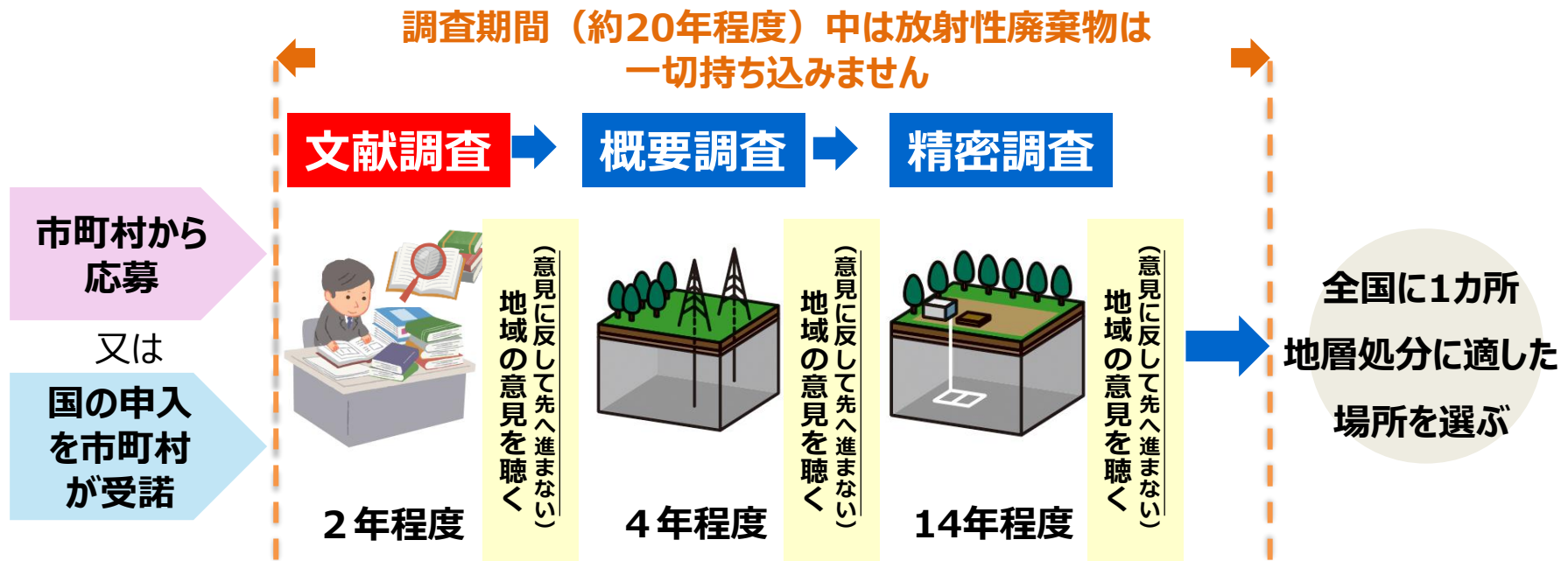


原子力発電環境整備機構 ^{ニューモ} (NUMO)



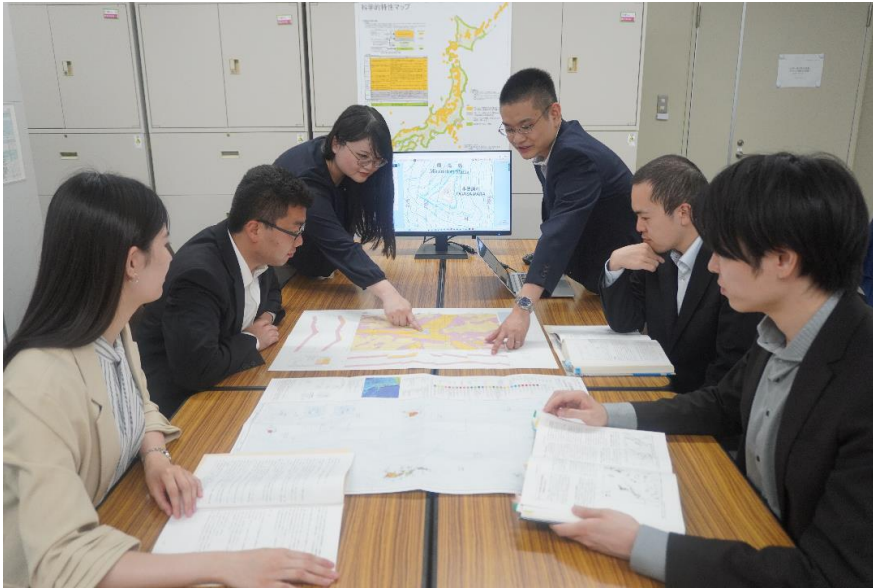
文献調査とは？

- 段階的な調査を行い、最終的に全国に1カ所、処分場に適した場所を選びます。
調査期間中は、放射性廃棄物は一切持ち込みません。
- 次の概要調査に進む際には、知事及び市町村長のご意見をお聴きし、これを十分に尊重することとしています。



誰が調査を行っているのか

- NUMO（東京都）の技術部・地域交流部の職員二十数名が、調査を担当しています。



資料を机上に広げて検討しているところ



文献調査の主な担当者

- * 各分野に対応して、地質や土木などの専門技術者が担当しています。
- * これに加えて、品質管理、説明資料作成などの作業も含めて、二十数名が、文献調査に携わっています。

文献・データの収集中です

- 並行して、収集した文献・データから評価に必要な情報を抽出しています。



- 今後は、引き続き、文献・データの収集、情報の抽出・整理を進めます。
- それらに基づき、情報の読み解き、評価、報告書作成を進めます。

収集した主な文献・データ

(1) 地域固有の文献・データ

- 20万分の1地質図幅「小笠原諸島」（海野ほか、2009）
- 沿岸の海の基本図「南鳥島」（海上保安庁水路部、2001）
- 日本地方地質誌4 中部地方（日本地質学会編、2006）
- 日本の地形4 関東・伊豆小笠原（貝塚ほか編、2000）

(2) 全国規模の文献・データ

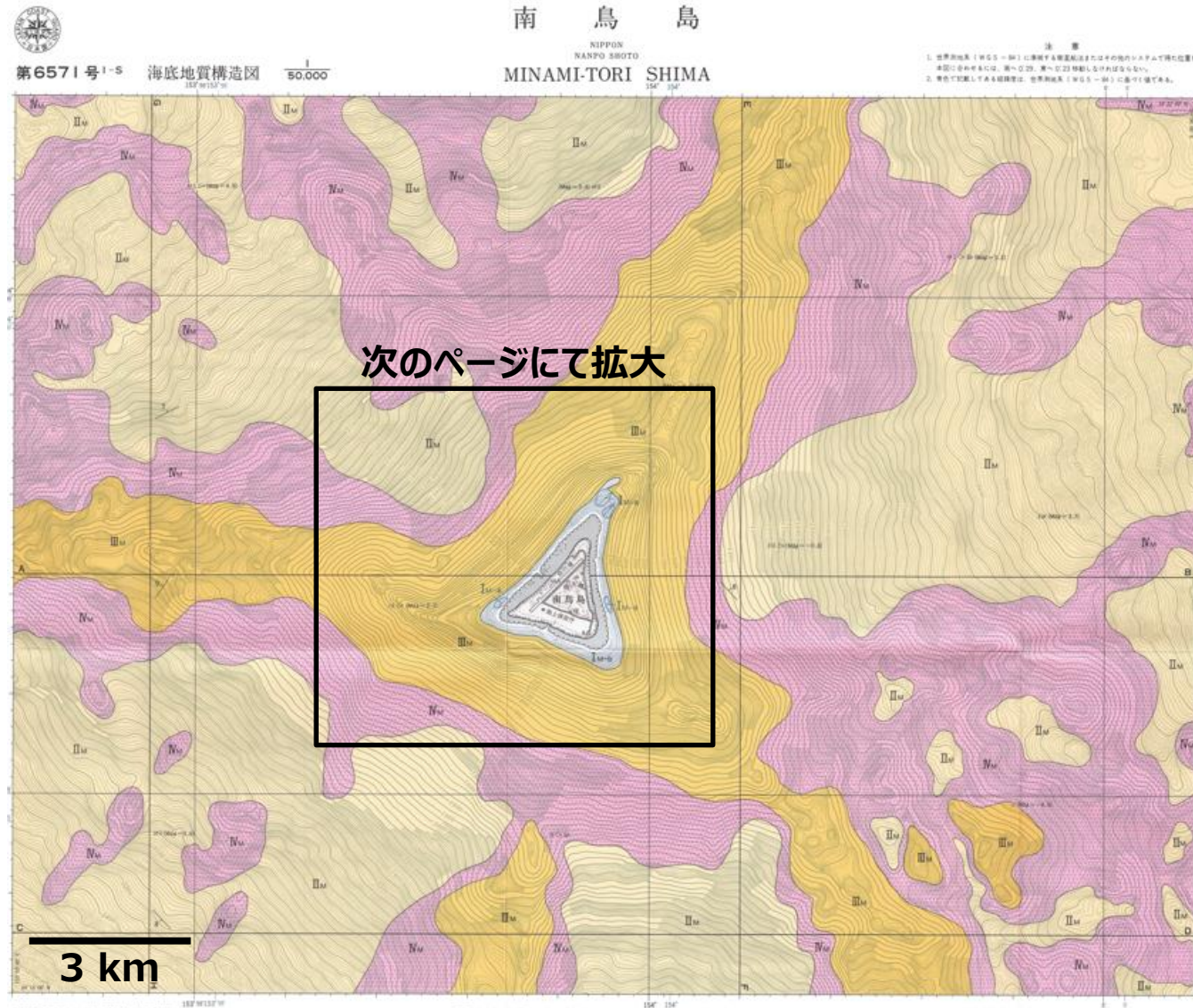
(科学的特性マップの作成に用いられたもののうち南鳥島が掲載されているもの)

- 活断層データベース（産業技術総合研究所地質調査総合センターウェブサイト）
- 日本の火山（第3版）（産業技術総合研究所地質調査総合センター、2013）
- 全国地熱ポテンシャルマップ（産業技術総合研究所地質調査総合センター、2009）

その他、南鳥島やその周辺海域に関する学術論文や調査の報告書、科学的特性マップの作成に用いられてはいないものの、有用な全国規模の文献・データも収集しています。

主な文献・データの例：沿岸の海の基本図「南鳥島」

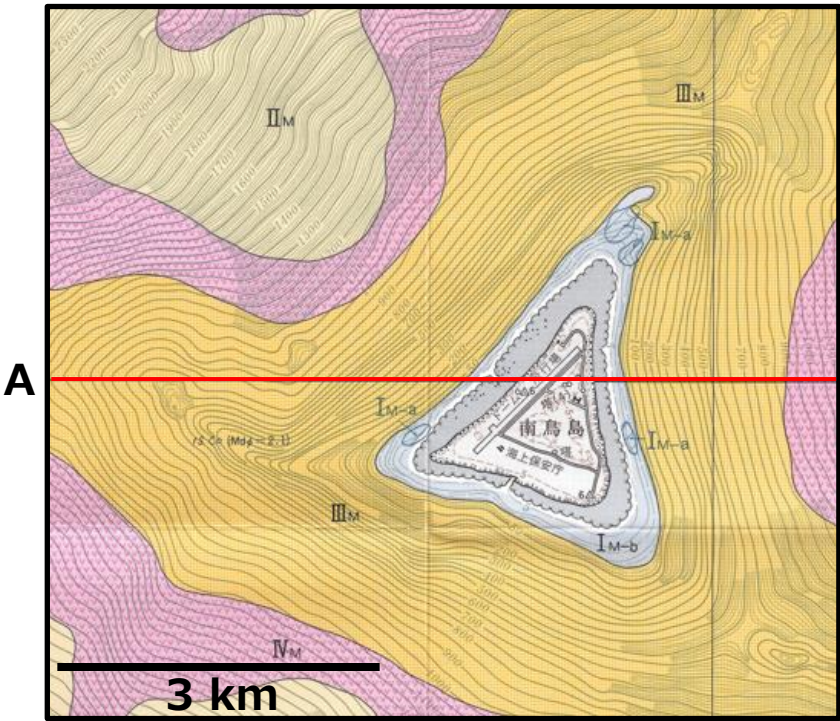
- 海上保安庁が発行している、海底の地形、地質調査の報告書や地質図を確認しました。
- 地質図は、その場所を構成する地層や岩石ができた時代や分布している場所を色別に示したものです。



主な文献・データの例：沿岸の海の基本図「南鳥島」

- 海上保安庁が発行している海底の地質図について、南鳥島付近を拡大したものです。

平面図

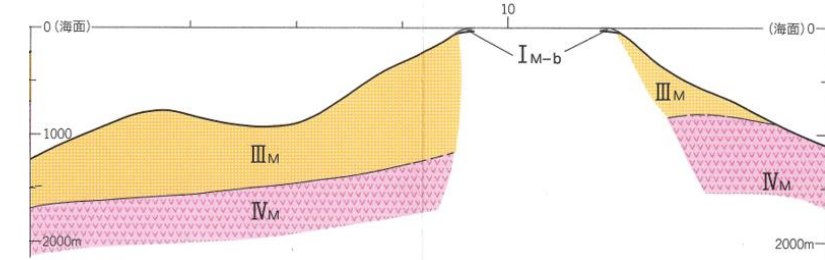


層序区分
Stratigraphic Division

時代 Geological Age		陸上地質層序* Land Stratigraphy	音波探査層序 Acoustical Stratigraphy in the sea area	
第四紀 Quaternary	現世 Recent	海浜堆積物 Beach Deposits ビーチロック Beach Rock	I_M-a	I_M-b
	更新世 Pleistocene	離水サンゴ礁 Emerged Coral Reef		
新第三紀 Neogene			II_M	III_M
古第三紀 Paleogene				
白亜紀 Cretaceous				IV_M

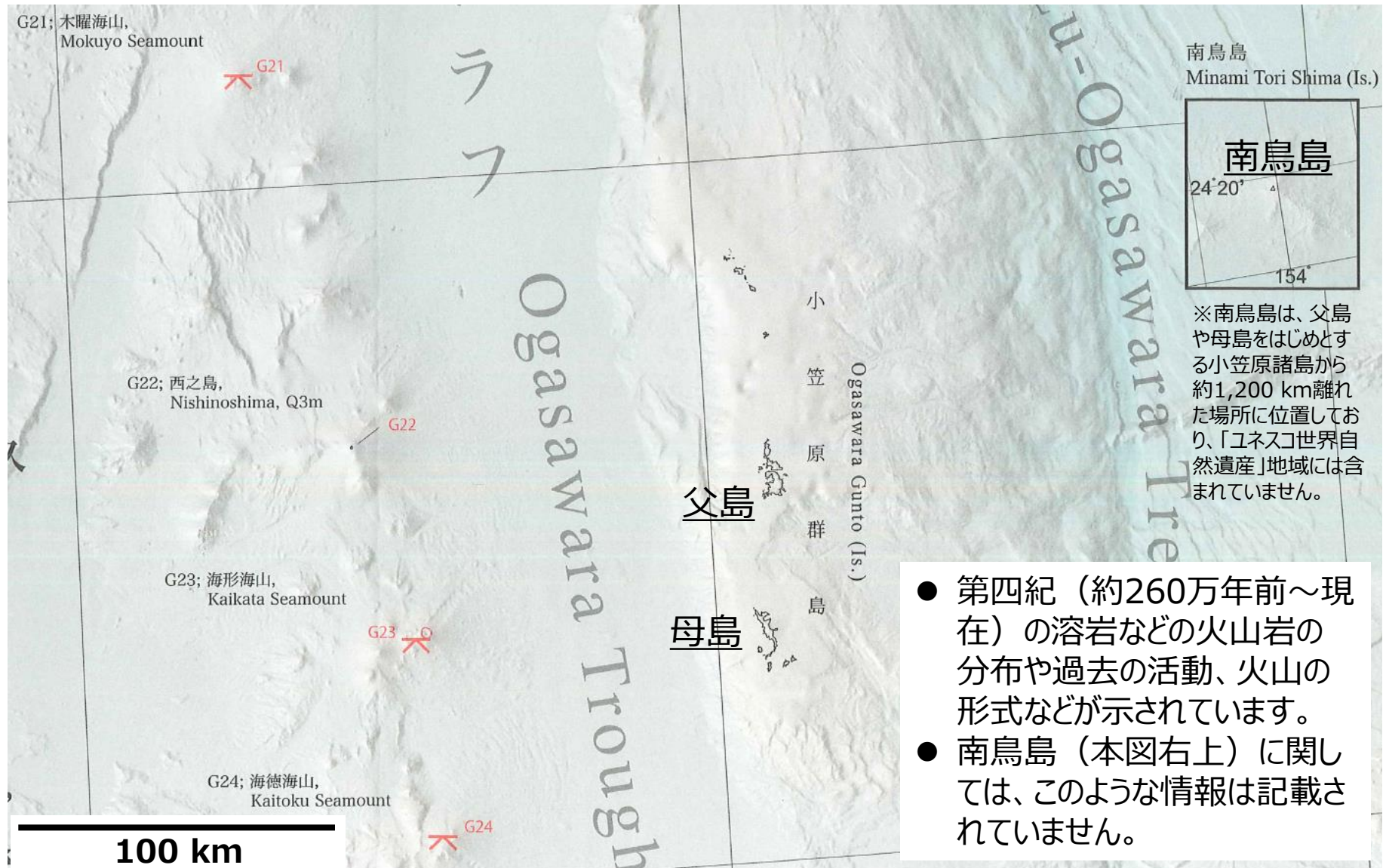
*「南鳥島および沖ノ鳥島の地形と地質」(1987・長岡信治) 小笠原研究年報11による。
After “The geomorphology and geology of Minami-Tori Sima and Oki-no-Tori Sima”
(1987 Shinji Nagaoka) Bulletin of the Ogasawara Research No. 11.
I_M-a層は最終氷期の最大海退期以後の堆積物をいう。層相の記載は報告書にある。

断面図



II_M	III_M	II_M層は、 斜面・谷堆積物
		III_M層は、 サンゴ石灰岩または 再堆積石灰岩
IV_M		玄武岩質火山岩層

主な文献・データの例：日本の火山（第3版）



「読み解き」・「評価」の例：寿都町

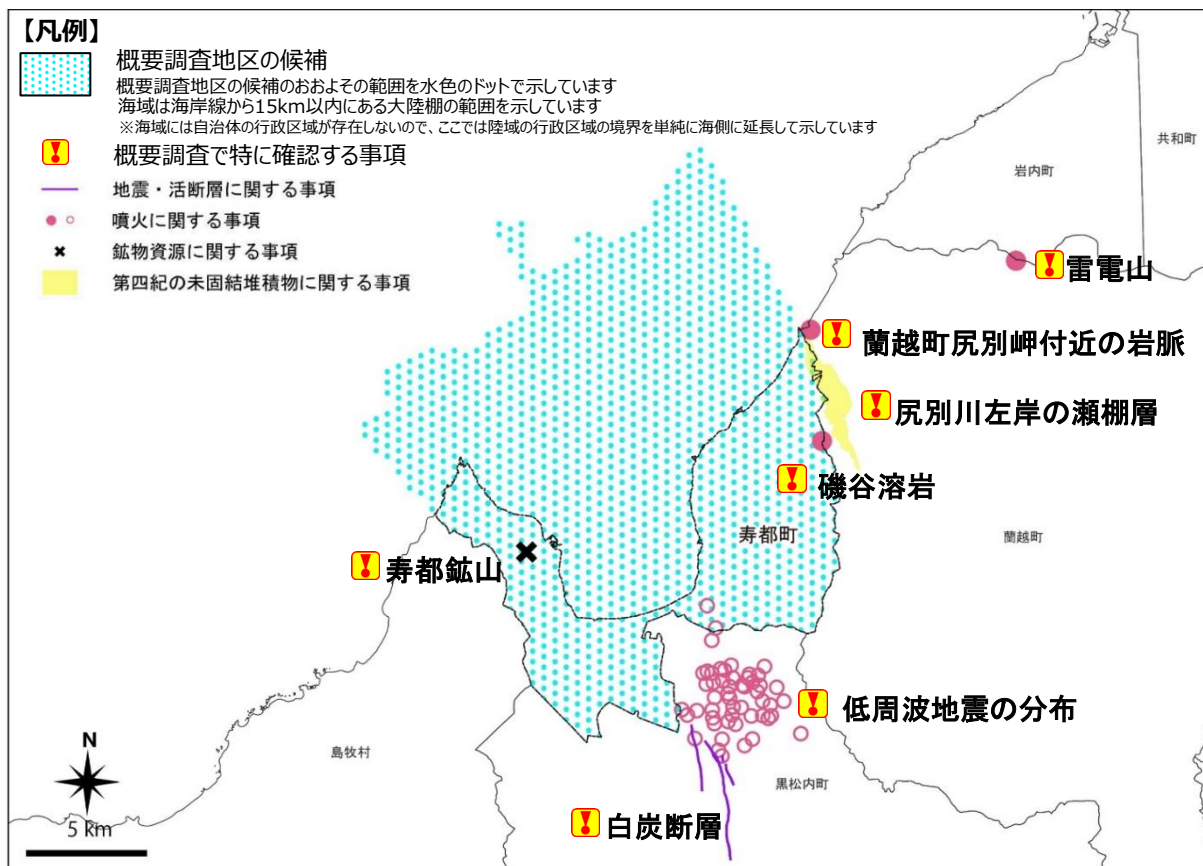
② 読み解き



③ 評価



- **読み解き**：文献から抽出した情報を地図上に整理して、調査内容を文章でまとめます。
- **評価**：文献調査で避ける場所はありませんでしたが、概要調査で確認しなければならない事項（図中の🚨）がいくつか残っています。例えば、火山の活動年代、地下300mより深いところでの断層の分布など。南鳥島の調査でも同様に、避ける場所や現地調査で確認すべき事項（留意事項）を評価・整理する予定です。



避ける場所

➤ なし

🚨 概要調査で特に確認する事項

○寿都鉱山

➤ 230m以深の分布が不明

○白炭断層

➤ 寿都町の地下での分布が不明

○低周波地震の分布

➤ 新たな火山が生じる可能性

○蘭越町尻別岬付近の岩脈

➤ 第四紀の火山の活動中心の可能性

○磯谷溶岩

➤ 第四紀の火山の活動中心の可能性

➤ 第四紀の火山活動の跡の可能性

○雷電山

➤ 第四紀の火山の活動中心の可能性

○尻別川左岸の瀨棚層

➤ 第四紀の未固結堆積物

ご清聴ありがとうございました。