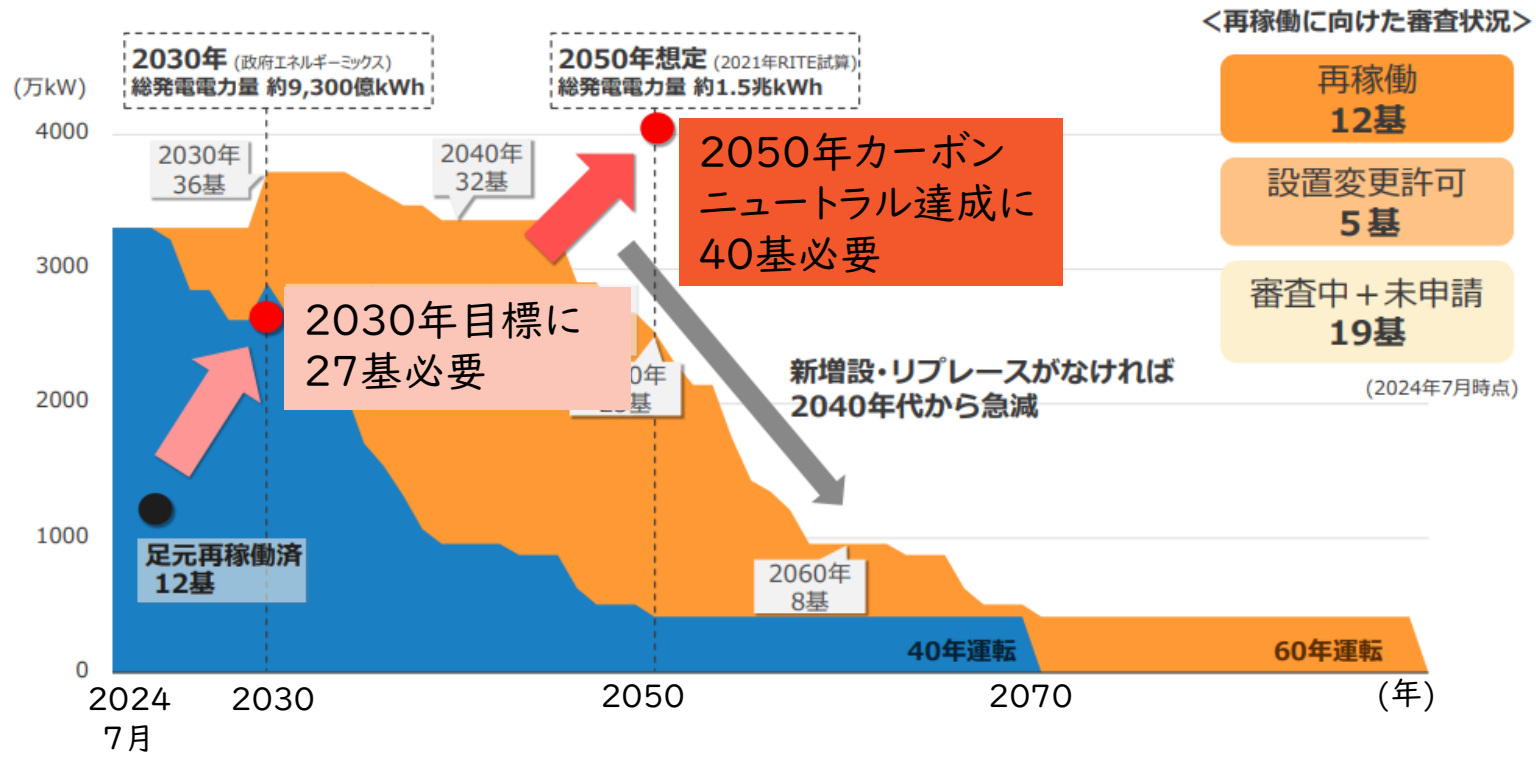
共通技術基盤SWG第1回会合
燃料開発におけるバックエンドの視点
ー新型燃料の実用化に向けてー

令和8年2月16日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター
燃料高温科学研究グループ

三島 理愛

新型燃料(ATF)の開発と実用化の重要性



日本国内の原子力発電所の設備容量見通し[1]

[1] 一般社団法人日本経済団体連合会, エネルギー基本計画の見直しに向けた提言, 2024年7月.

2050年カーボンニュートラル実現

「GX実現に向けた基本方針」(2023年)

「第7次エネルギー基本計画」(2025年)

以下3点の同時実現性が見込まれる原子力を最大限活用

◆脱炭素化

◆エネルギー安全保障

◆経済成長

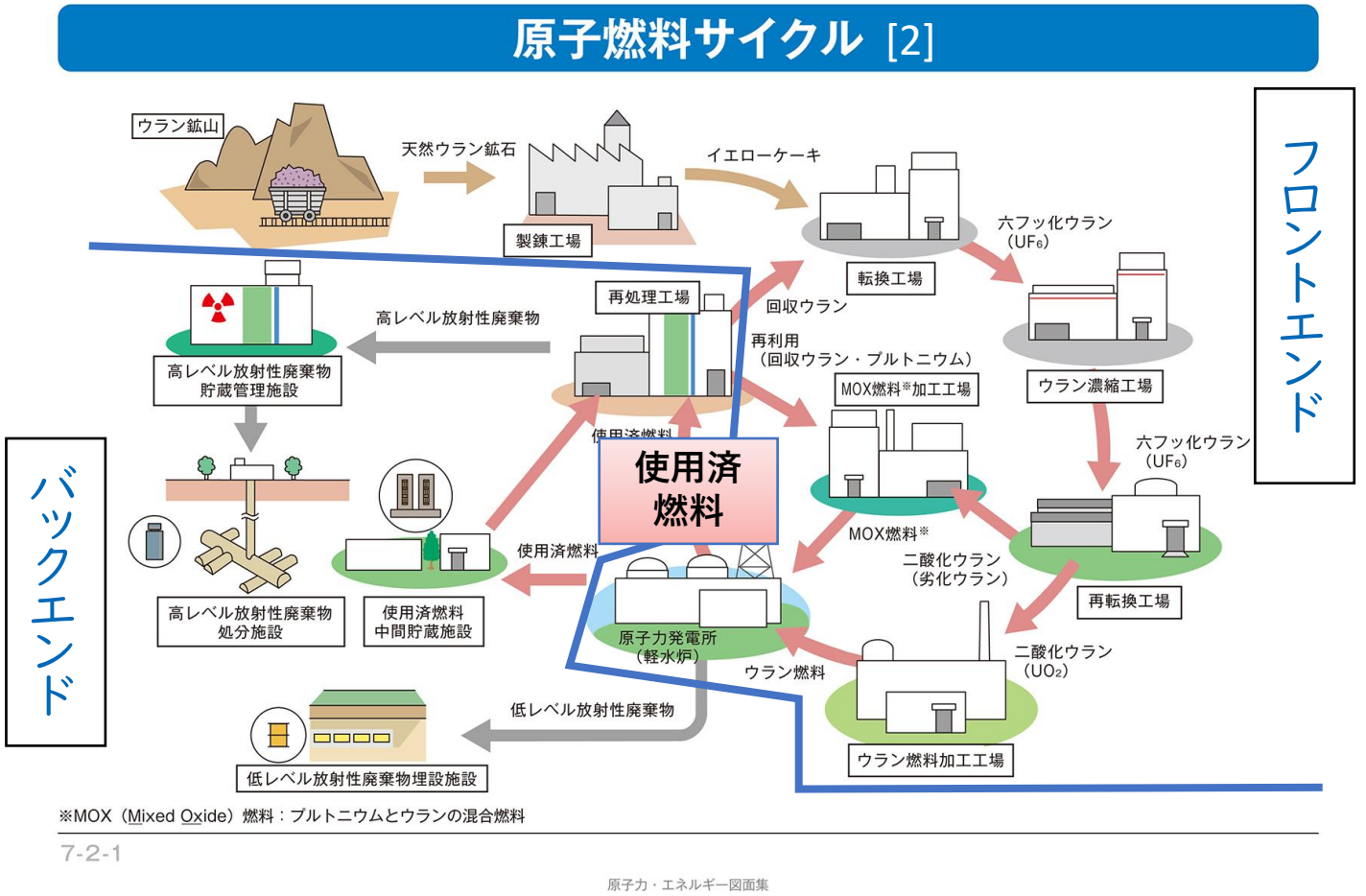
→安全性確保を前提とした原子力利用によって将来日本のエネルギー安定供給を目指す

安全性向上・経済性向上を両立した軽水炉の新型燃料(ATF)の実用化は喫緊の課題

将来のATF使用済燃料を巡る課題

- 使用済燃料の受け渡し地点がフロントエンドとバックエンドの境界
- フロントエンド側の仕様変更にともなって使用済燃料の性質は変化する

→バックエンド側の設備の再検討が必要となる



[2] 一般財団法人日本原子力文化財団, 原子力・エネルギー図面集, 2016, https://www.ene100.jp/zumen

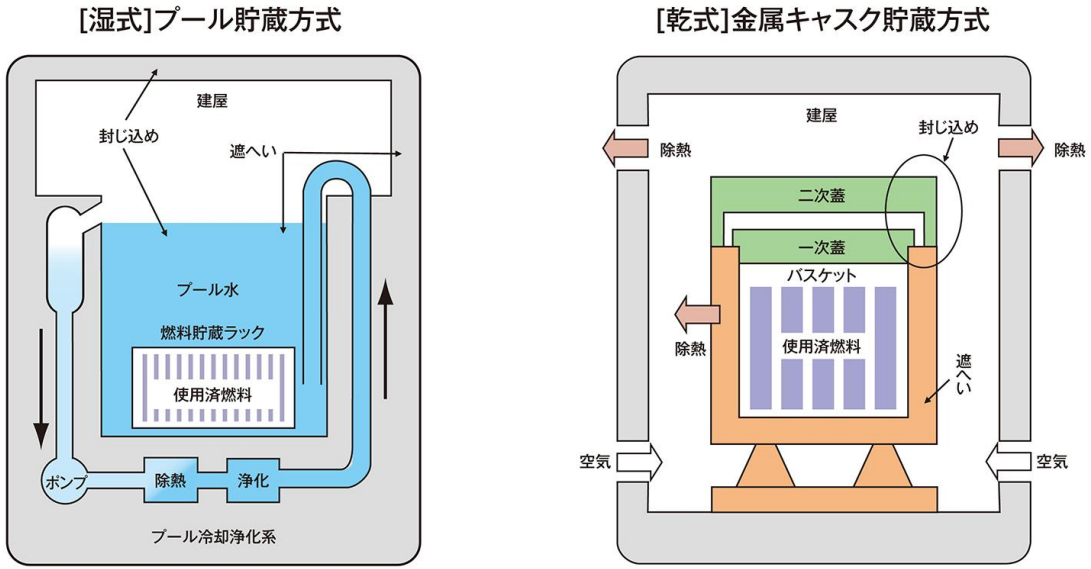
使用済燃料の変化がバックエンドに及ぼす影響 ①使用済燃料の中間貯蔵施設

高燃焼度化によって、使用済燃料の単位量あたりの
- 核燃料物質の含有量の増加
- 発熱量の増加

→臨界管理・温度管理の観点から保管設備の拡大、冷却期間の長期化

再処理施設、ガラス固化体の中間貯蔵施設、最終処分施設も同様の検討が必要。

使用済燃料の中間貯蔵方式（例）[2]



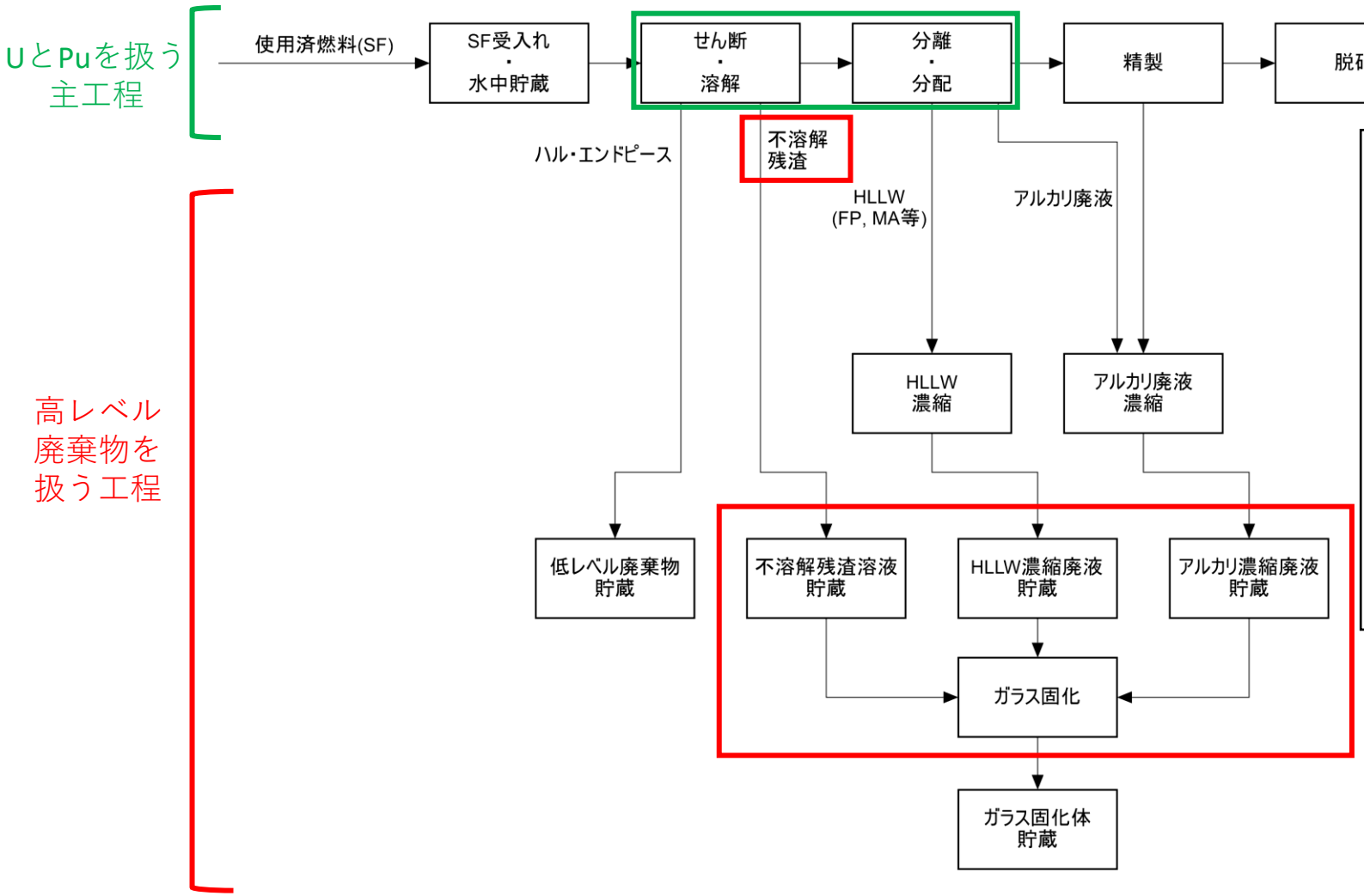
7-7-2

原子力・エネルギー図面集

[2] 一般財団法人日本原子力文化財団, 原子力・エネルギー図面集, 2016, https://www.ene100.jp/zumen

使用済燃料の変化がバックエンドに及ぼす影響 ②再処理工場

六ヶ所再処理工場の概要 [3]



安定合金相、溶解液中の共存元素によって、

- 使用済燃料の溶解性の低下
- 溶媒抽出法によるU、Puの分離回収性の低下

不溶解残渣の発生量の増加

- 白金族元素を主成分とした難溶性合金 [4]
  高燃焼度化にともなって発生量は増加する
  $Mo_{20wt\%}$-$Ru_{50-60wt\%}$-$Rh_{10wt\%}$-$Pd_{10wt\%}$-$Tc_{0.5-5wt\%}$
- モリブデン酸ジルコニウム化合物の析出沈殿物の増加
  $ZrMo_2O_7(OH)_2(H_2O)_2$

[3] 日本原燃株式会社, 事業紹介パンフレット 六ヶ所再処理工場の概要, 2005.
[4] 日本原子力研究所化学部溶解試験グループ, 使用済燃料の溶解試験, JAERI-M 91-010,1991, https://doi.org/10.11484/jaeri-m-91-010.

使用済燃料の変化がバックエンドに及ぼす影響 ③ガラス固化体の製造

ガラス固化体の品質(核種閉じ込め性能)に影響を及ぼす要因

◆全放射能濃度

◆発熱量；発熱性核種(Sr-90、Cs-137、Am-241、Cm-244)

- ✓ ガラス固化体の温度上昇によるガラス非晶質構造の変質

◆ガラス構造元素 (Si、Al、Na、B、P、Ca、・・・)

- ✓ SiとAlの組成比はガラス構造に影響を及ぼす[5,6]

→ガラス構造による核種閉じ込め性能の低下

◆白金族元素濃度 (PGM; Pd、Ru、Rh)

- ✓ 溶融炉底部に酸化物および金属PGMの堆積
- ✓ ガラス溶融炉の運転安定性の低下

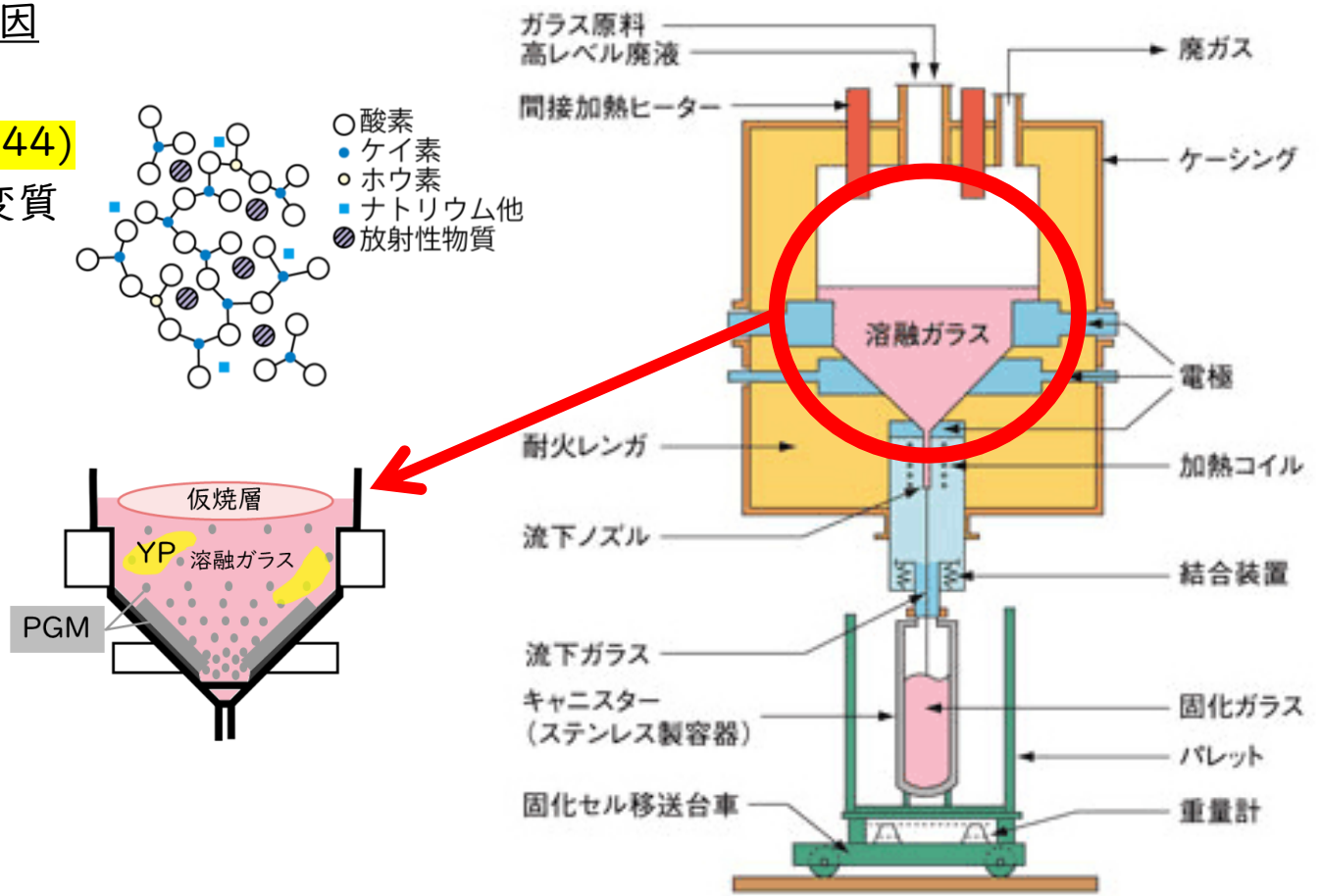
◆Mo濃度

- ✓ モリブデン酸塩によるイエローフェーズ(YP)の分相
- ✓ ガラス固化体の核種閉じ込め性能の低下

【現行の対策】

- ➢ 溶融炉の更新、炉底形状の変更
- ➢ ガラス原料の形状・組成の改良
- ➢ 炉底の詰まりを除去する洗浄運転
- ➢ PGM、Mo、発熱性核種の濃度管理のためにガラス固化体の高レベル廃液の割合(廃棄物充填率)を制限

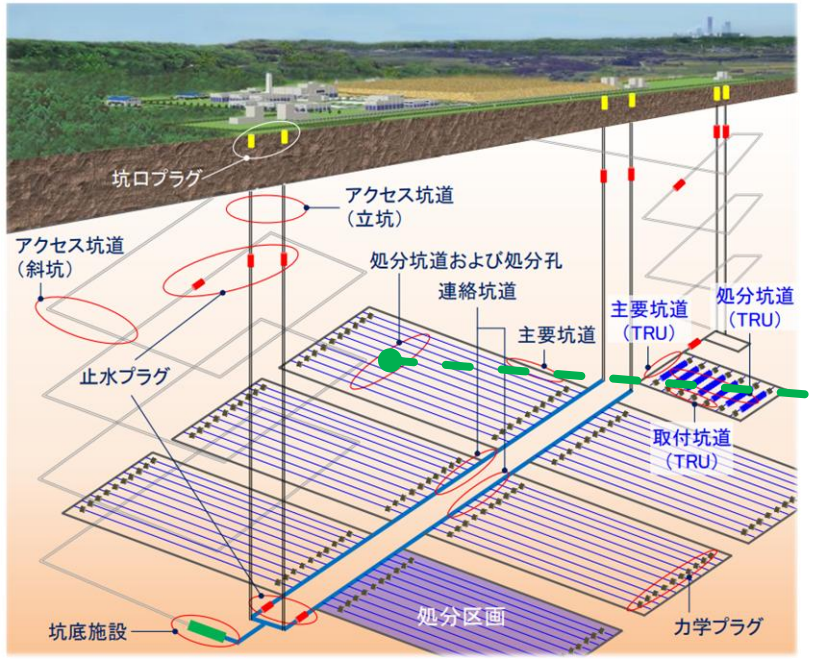
→単位量あたりのガラス固化体発生本数の増加



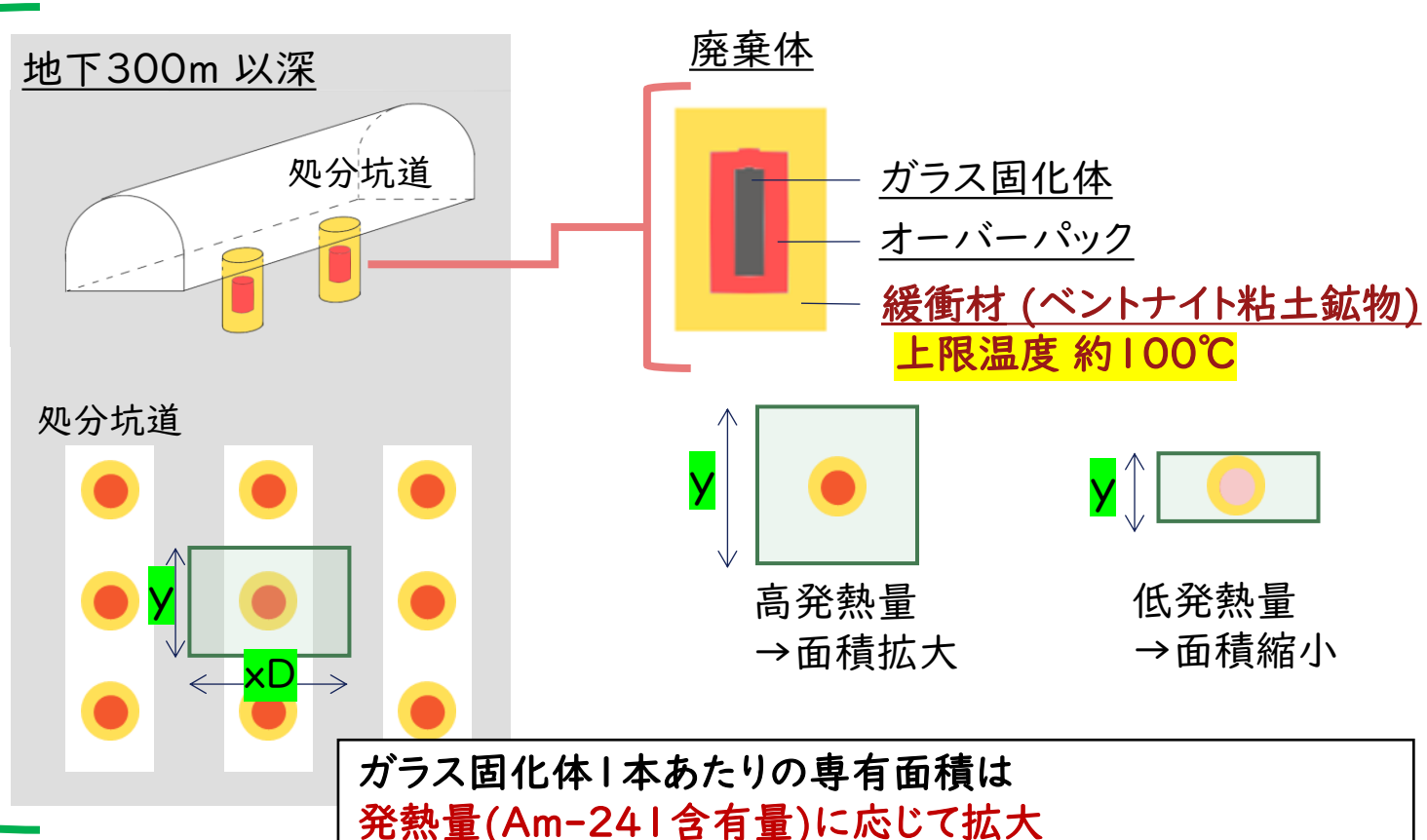
液体供給式直接通電型セラミック法(LFCM法)のガラス溶融炉 [7]

[5] D.M. Strachan, T.L. Croak, Compositional effects on long-term dissolution of borosilicate glass, Journal of Non-Crystalline Solids 272(1) (2000) 22-33. https://doi.org/10.1016/S0022-3093(00)00154-X.
[6] M. Nakase, R. Mishima, T. Abe, et al., Evaluation of Aluminum Hexacyanoferrate utilization for PGM and Mo removal from simulated high-level-raffinates in reprocessing for repository area minimization, Annals of Nuclear Energy 224 (2025) 111569. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111569.
[7] 日本原燃株式会社, ガラス固化技術の確立から新型ガラス溶融炉の開発へ, 2024, https://www.jnfl.co.jp/ja/special/highest-technology/development-glass-melter/ (accessed 2024.9.6).

使用済燃料の変化がバックエンドに及ぼす影響 ④地層処分場



地下施設のイメージ[8]



- 高レベル放射性廃棄物の地層処分はバックエンドの工程の中で特に経済的・時間的コストが高い
- 発電量あたりの処分場面積を節約することでコスト低減が見込まれる[9]

ガラス固化体1本あたりの専有面積は
発熱量(Am-241含有量)に応じて拡大

廃棄体専有面積 (m^2)
＝廃棄体ピッチ y (m) × 坑道離間距離 xD (m)

発電量あたりの処分場面積 (m^2/kWh)
＝ 廃棄体本数 (本/kWh) × 廃棄体専有面積 (m^2/本)

[8] 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現 －適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－, NUMO-TR-20-01,2021.
[9] T. Sakuragi, T. Okamura, R. Hamada, et al., Optimal waste loading in high-level nuclear waste glass from high-burnup spent fuel for waste volume and geological disposal footprint reduction, MRS Advances 7(7) (2022) 150-154.

ATF使用済燃料がバックエンドに及ぼしうる影響

従来UO_2燃料からの変更点		使用済燃料に生じうる従来UO_2燃料からの変化	保管・管理	再処理	ガラス固化	地層処分
被覆管材質	・Cr-coated Zry ・FeCrAl-ODS ・SiC ・・・ ・・・	・使用済燃料組成の変更 ・被覆管材料と燃料ペレット間の安定合金相の形成 ・・・ ・・・	・・・	・使用済燃料の溶解性の低下 ・U、Puの分離回収性の低下 ・・・	・ガラス原料の形状・組成の改良 ・ガラス固化体発生本数の増加 ・・・	・廃棄体専有面積の増加 ・単位量あたりの処分場面積の増加 ・・・
燃料ペレット	・Cr添加UO_2ペレット ・・・ ・・・	・使用済燃料組成の変更 ・添加剤との安定合金相の形成 ・・・ ・・・	・・・	・使用済燃料の溶解性 ・U、Puの分離回収性の低下 ・・・	・ガラス原料の形状・組成の改良 ・・・	・廃棄体専有面積の増加 ・単位量あたりの処分場面積の増加 ・・・
高燃焼度化	・5%超燃料 ・炉内滞在期間の長期化 ・・・ ・・・	・使用済燃料組成の変更 ・核分裂生成物(FP)の増加 ・超ウラン元素(TRU)の増加 ・白金族元素を主成分とする安定合金相の大粒径化 ・・・ ・・・	・臨界管理 ・発熱量(崩壊熱)の増加 ・温度管理 →保管設備の拡大、冷却期間の長期化 ・・・	・使用済燃料の溶解性の低下 ・不溶解性残渣の発生量増加 ・・・	・ガラス原料の形状・組成の改良 ・溶融炉の更新、炉底形状の変更 ・白金族元素、Mo、発熱性元素の濃度管理によるガラス固化体発生本数の増加 ・・・	・廃棄体の発熱量(崩壊熱)の増加 ・廃棄体専有面積の増加 ・単位量あたりの処分場面積の増加 ・・・

被覆管、燃料ペレット
→新たな課題発生の可能性

高燃焼度化
→以前から検討されていて多数判明している

ご提案

提案
バックエンドへの影響について検討結果をATF提言資料に付記することでATF早期実現を図る。

- 案①;課題抽出表の拡充
  主に被覆管材質に着目して課題の抽出・見込みを取りまとめる

第一候補

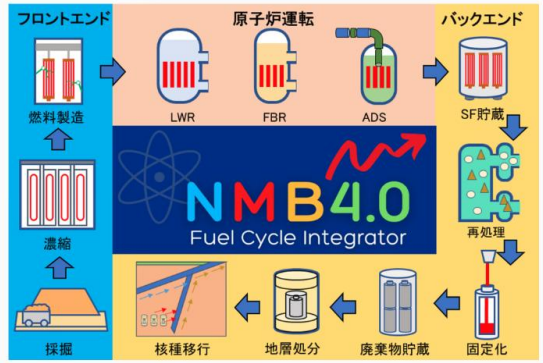
従来UO_2燃料からの変更点		使用済燃料に生じる従来UO_2燃料からの変化	保管・管理	再処理	ガラス固化	地層処分
被覆管材質	・Cr-coated Zry ・FeCrAl ・SiC ・・・ ・・・	・使用済燃料組成の変更 ・被覆管材料と燃料ペレット間の変定合金相の形成 ・・・ ・・・	・・・	・使用済燃料の溶解性の低下 ・U、Puの分離回収性の低下 ・・・	・ガラス原料の形状・組成の改良 ・ガラス固化体発生本数の増加	・廃棄体専有面積の増加 ・単位量あたりの処分場面積の増加 ・・・
燃料ペレット	・Cr添加UO_2ペレット ・・・ ・・・	・使用済燃料組成の変更 ・添加剤との安定合金相の形成 ・・・ ・・・	・・・	・使用済燃料の溶解性 ・U、Puの分離回収性の低下 ・・・	・ガラス原料の形状・組成の改良 ・・・	・廃棄体専有面積の増加 ・単位量あたりの処分場面積の増加 ・・・
高燃焼度化	・5%超燃料 ・炉内滞在期間の長期化 ・・・ ・・・	・使用済燃料組成の変更 ・核分裂生成物(FP)の増加 ・超ウラン元素(TRU)の増加 ・白金族元素を主成分とする安定合金相の大粒径化 ・・・ ・・・	・臨界管理 ・発熱量(崩壊熱)の増加 ・温度管理 →保管設備の拡大、冷却期間の長期化 ・・・	・使用済燃料の溶解性の低下 ・不溶解性残渣の発生量増加 ・・・	・ガラス原料の形状・組成の改良 ・溶融炉の更新、炉底形状の変更 ・白金族元素、Mo、発熱性元素の濃度管理によるガラス固化体発生本数の増加 ・・・	・廃棄体の発熱量(崩壊熱)の増加 ・廃棄体専有面積の増加 ・単位量あたりの処分場面積の増加 ・・・

- 2028年　課題抽出表の完成
- 2030年代　ATFの実機適用
- 2040年頃　課題解決の見通しをつける
- 2050年　カーボンニュートラル達成
  & 持続可能な原子力利用の実現

※影響を定量的に見積もる必要がある場合にはシナリオ評価も視野に入れる。

- 案②;将来の核燃料サイクルシナリオを定量的に評価
  核燃料サイクルシナリオ評価コード NMB4.0 (NMBコード) [10]
  ・JAEAと東京科学大(旧東工大)の共同開発
  ・無償で公開、Microsoft Excelで動作し誰でも使用できる
  ・ユーザーによる様々なシナリオ設定に基づき、物量計算が可能
  ・経済的コストの計算が可能

Concept https://nmb-code.jp/



核燃料サイクルの全工程をモデル化・多様なシナリオを定量化
シナリオの設定・分析に高い柔軟性と網羅性を提供
多様なユーザーの利用を想定し、Microsoft Excel®で動作
ユーザーと共に進化するコード

[10] T. Okamura, R. Katano, A. Oizumi, et al., NMB4.0: development of integrated nuclear fuel cycle simulator from the front to back-end, EPJ Nuclear Sci. Technol. 7 (2021). https://doi.org/10.1051/epjn/2021019.