

日本原子力学会 新型炉部会セッション

原子力イノベーションを支える最新の新型炉開発の状況 (5) 固有安全性を活用した 革新的金属燃料小型ナトリウム冷却高速炉

2021年9月10日

日立GE ○中原 宏尊

目次

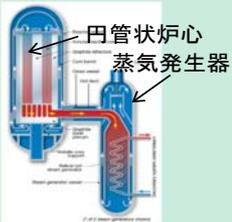
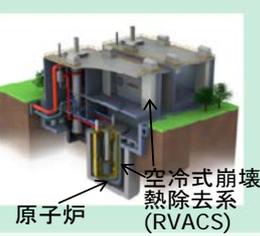
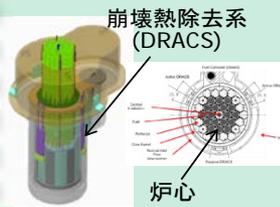
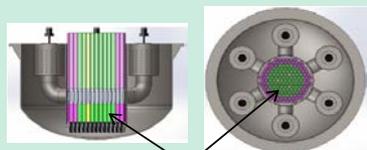
1. 開発の背景・目的
2. 開発技術の概要
3. 国内導入に向けた開発状況
4. まとめ

本報告は、経済産業省からの補助事業である「令和2年度 社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」の一環として実施した成果を含みます。

- 将来の我が国における高速炉サイクルの実現を目指し、特に革新技術として、金属燃料の固有安全、受動的安全系の採用、乾式再処理と組合わせた高い核不拡散性に注目し、第4世代原子力システムの中でも技術的成熟度が高い、革新的金属燃料小型ナトリウム冷却高速炉の技術開発を進めている。

1-2. 革新炉の技術成熟度(米国)

- 第4世代炉の内、水冷却以外の中小型Advanced Reactorの成熟度を米国研が評価*1)
⇒Na冷却高速炉(PRISM)と高温ガス炉(SC-HTGR)が最も実用化に近い結果

項目	SC-HTGR : AREVA	PRISM : GEH	溶融塩炉 : ORNL	鉛冷却炉 : WH
プラント概念				
出力(電気/熱)	272/625MW	165/471MW	42/100MW	210/500MW
熱効率	43.5%	35%	42%	42%
原子炉(入口/出口)温度	325/750°C	352/500°C	660/700°C	390/510°C
1次系圧力	6MPa	~0.1MPa	~0.1MPa	~0.1MPa
1次冷却材	ヘリウム	ナトリウム	溶融塩(F-Li-Be)	鉛
減速材	黒鉛	なし	黒鉛	なし
燃料種類	UCO粒子/ TRISO被覆	U-Zr,U-TRU-Zr /SUS被覆管	UCO粒子 /TRISO被覆	UO ₂ /アルミコーティング
TRL(技術成熟度)*2)	5	5	3	3

*1) ANL, INL, ORNL, "Advanced Demonstration and Test Reactor Options Study", July 2016.

*2) DOEの定義による技術成熟度: 5【実環境下で実機と同様の構成を有する小規模システムで検証】
>3【解析・実験により要素技術を検証】←米国研、大学等の専門家による客観的な評価

➤ 高速炉開発で応える社会的要請

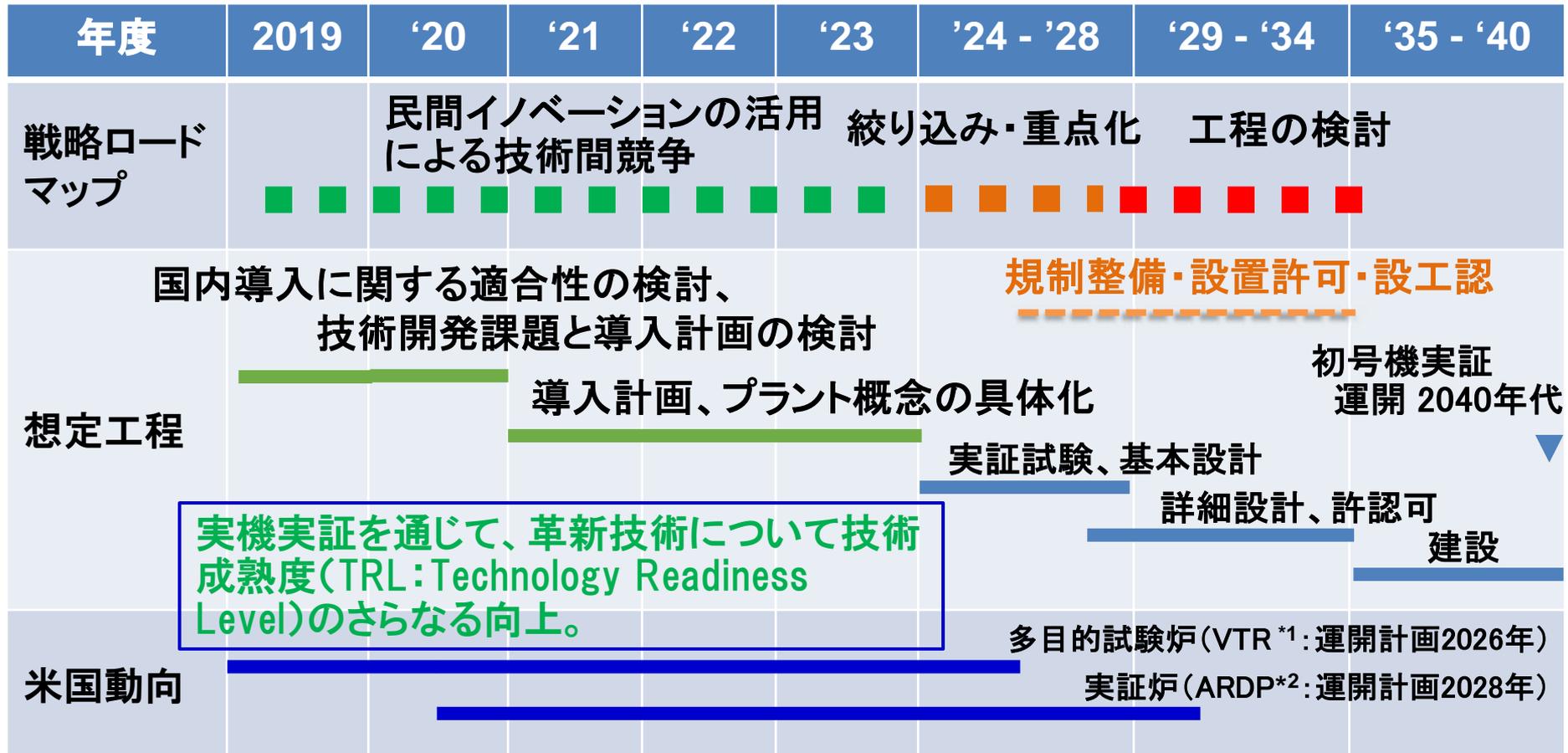
- より高い安全性・信頼性と経済性、機動性
- 資源有効利用、放射性廃棄物対策、核不拡散性
- 国際協力による最新知見の活用、開発コスト抑制
- 2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、
原子力は最大限導入される再生可能エネルギーとの共存、
多様な利用(熱利用等)

➤ 米国、2020年代後半に金属燃料小型高速炉の建設計画が推進、 技術実証。革新技術の国内導入で効率的な開発を目指す。

- 高速中性子照射施設の多目的試験炉(VTR: Versatile Test Reactor)プログラム
- 商用を目指した先進的原子炉実証プログラム(ARDP: Advanced Reactor Demonstration Program)の高速炉Sodium

1-4. 全体計画の考え方

- 戦略ロードマップ(2018年12月)
- 2040年代に初号機実証、2050年代以降商用炉→革新技術導入



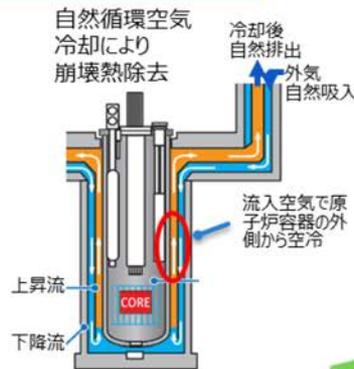
*1) Versatile Test Reactor

*2) Advanced Reactor Demonstration Program; Demonstrations/ Natrium

核燃料サイクルへ貢献し、高い安全性・経済性を有する 革新的小型ナトリウム冷却高速炉

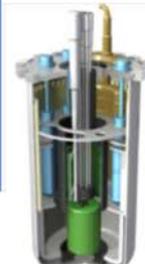
革新的安全システム

- 受動的な崩壊熱除去
- 異常時の出力抑制可能な金属燃料



優れた経済性と建設性

システム単純化、小型モジュール化による工期削減



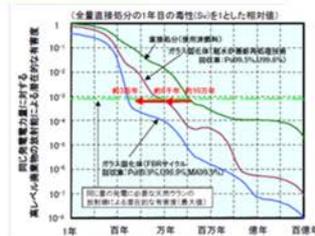
原子炉容器

原子炉容器内に機器を収納

- 熱交換器
- ポンプ
- 一次系配管削除

有害度低減

- 高速中性子利用
- プルトニウム増殖 (資源有効利用)
- マイナーアクチノイド燃焼 (有害度低減)



放射性毒物継続期間短縮 (約10万年→約300年)

【出典】第3回もんじゅ研究計画作業部会(H24.11.21)資料1-1

拡張性

米国で2つの実炉計画に採用
VTR：高中性子密度を利用した試験炉
Natrium：蓄熱システムを備えた高速炉

VTR (多目的試験炉) Natrium* (ARDP採択)



*TerraPower社とGE Hitachi Nuclear Energy社の共同開発



➤ ナトリウム冷却タンク型炉

- 大気圧に近い運転圧力(ナトリウム沸点・高)
- 出力変動に対し冷却材温度変動小(ナトリウム熱容量・大)

➤ 金属燃料(U-Pu-Zr 三元系合金燃料等)

- 高い増殖性、高次アクチノイド生成抑制・燃焼特性
- 冷却材・燃料温度上昇に伴う負の反応度特性
- 燃料ピン内の平坦な温度分布、定常/異常時の温度低、炉心蓄積熱エネルギー小(対MOX燃料)

➤ 受動的安全系設備(RVACS*:原子炉容器補助冷却システム)

*Reactor Vessel Auxiliary Cooling System

- 崩壊熱除去系の高い信頼性(静的機器、空気の自然循環利用)
- 初期投資・運転及び保守費用の抑制(電源及び運転操作が不要)

- **金属燃料高速炉サイクル(乾式再処理)**
 - 燃料組成に対する高い柔軟性、使用済燃料の蓄積量削減 *マイナーアクチノド
 - 高レベル放射性廃棄物の有害度低減、核不拡散性(PuとMA*の同時回収)
 - コンパクトな核燃料サイクル施設との一体型高速炉概念オプション

- **小型モジュール構造**
 - モジュールの工場製作による信頼性、輸送性の向上
 - モジュール工法による現地建設工期短縮

- **高速炉と蓄熱システムとの組合せ(再生可能エネルギー対応)**
 - 柔軟な出力応答(蓄熱システムを備えることで機動的な電気出力調整)

➤ 金属燃料炉心、崩壊熱除去系RVACS、SA安全解析ツールが課題

項目	要素技術	TRL	備考*1*2
安全関連設備	● 制御棒駆動機構CRD等 CRD、ロッドストップ、USS:Ultimate Shutdown System	5	● 反応度制御/能動的安全系は米評価6
	● 受動的炉停止系 自己作動型炉停止機構SASS、ガス膨張機構GEM、固有反応度フィードバック等		● 金属燃料炉心の固有/受動的安全性は米評価6、但し国内評価5（耐震炉心拘束の効果検討要）
	● 自然循環崩壊熱除去系RVACS、蒸気発生器補助冷却系SG-ACS		● 崩壊熱除去系は米評価5
	● 液位保持機能を持たせた格納容器	5	● 格納機能は米評価5
安全関連設備の外部ハザード等対策	● シビアアクシデント対策(SA安全解析ツール)		● SA安全解析ツールは米評価5、但し国内要検証
	● 安全関連設備の外部ハザード等対策	5	● 日米評価6、但しサイト条件で設計対応要
	● 耐震(水平免震)		● 免震は実証対応要で国内評価5
運転保守	● 炉内の検査技術、運転、保守技術	5	● 米評価5
	● ナトリウム漏えい検知技術	5	● 日米評価5

TRL 1-2:基礎技術の研究段階

TRL 2-3:実現可能性を示すための研究段階

TRL 4-5:技術の開発段階

TRL 6:技術の実証段階

TRL 7-8:システムの試運転

TRL 9:システムの運転段階

*1 “Advanced Demonstration and Test Reactor Options Study” Appendix B PRISM, (ANL, INL, ORNL, January, 2017)

*2 “現時点で我が国が保有している高速炉サイクル技術に対する評価について”,高速炉開発会議資料.平成30年6月

2-2. 開発技術の実現性評価(続き)

➤ 金属燃料(性能向上)、蓄熱システム、再処理(周辺技術)が課題

項目	要素技術	TRL	備考 ^{*1*2}
炉心燃料	● 金属燃料・被覆管・集合体 ● 将来の性能向上(高燃焼度・高被覆管温度、MA含有燃料)	6~	● 設計技術は国内評価6以上 ● 但し高性能化は国内評価5
	● 金属燃料炉心設計 ● 金属燃料構造設計・評価手法	6~	● 国内外知見の蓄積 ● 国内燃料挙動解析コード
原子炉構造、冷却材系	● 原子炉容器 ● 燃料交換機(炉内燃料移送装置IVTM)	4	● 炉容器は米評価5 ● 燃料取扱等は米評価4
	● ナトリウム冷却材系配管、弁、ポンプ等 ● 中間熱交換器 ● 蒸気発生器	4	● ポンプは米評価4 ● 中間熱交換器は米評価6 ● 蒸気発生器は米評価7
原子炉補助施設	● 燃料出入機、燃料検査設備、燃料処理設備 ● 冷却材純化系	6	● 日米評価6
計装制御	● 炉内計装 ● 破損燃料検出設備	5	● 炉内計装は米評価5
その他(原子炉本体外)	● 原子炉に蓄熱システムを備えた中間熱輸送系を導入したシステム	5	● 原子炉との組み合わせの実証なく国内評価5
	● 金属燃料サイクル(乾式再処理・燃料製造) ● 周辺技術(前処理、後処理等)	4	● キー技術は国内評価6 ● 周辺技術は国内評価4~5

TRL 1-2:基礎技術の研究段階
TRL 6:技術の実証段階

TRL 2-3:実現可能性を示すための研究段階
TRL 7-8:システムの試運転

TRL 4-5:技術の開発段階
TRL 9:システムの運転段階

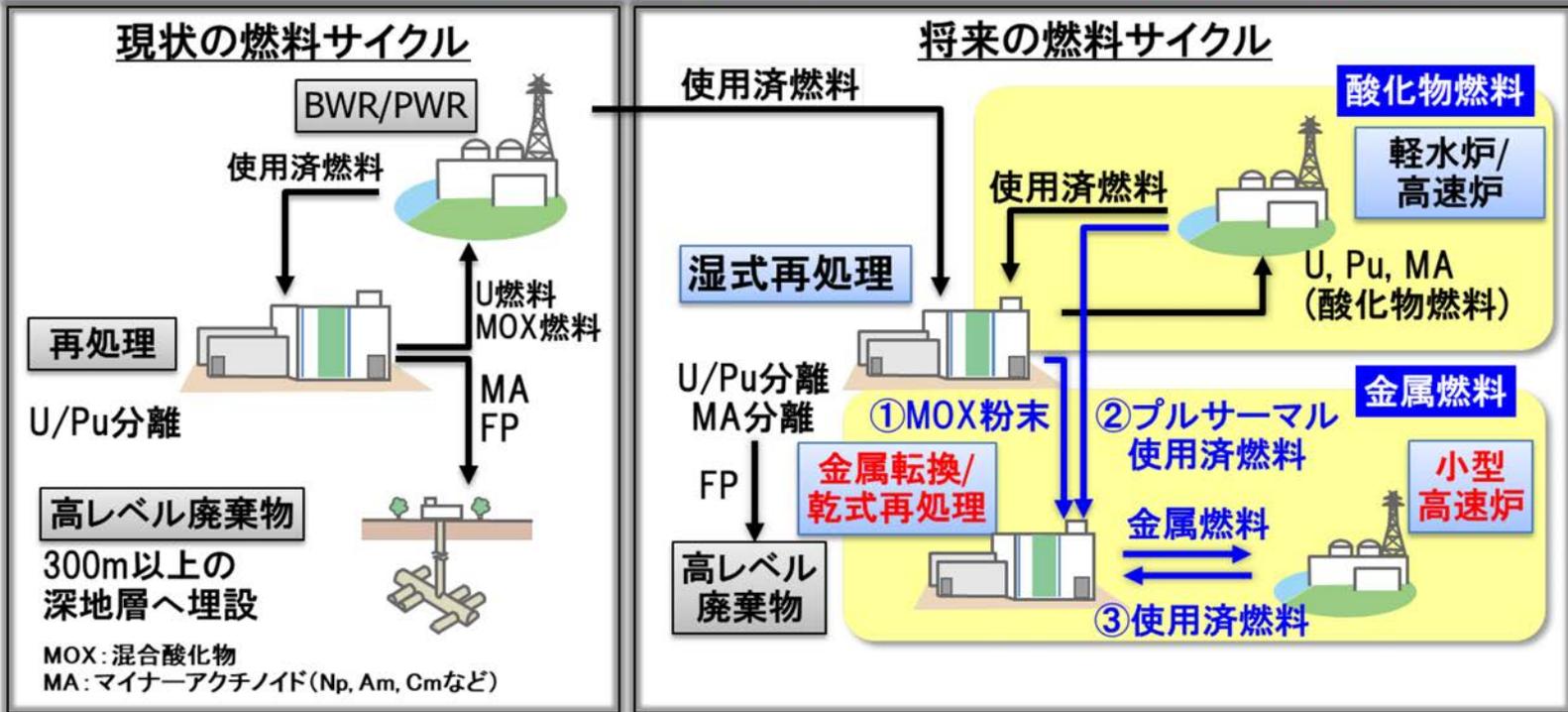


- 開発技術の実現性に関して、国内における技術成熟度レベル(TRL)を評価した。国内開発の実績、今後の米国実機の活用で、「技術の実証段階(TRL6)」以上へのレベル向上に取り組む。

- 課題解決に向けた開発状況
 - 金属燃料サイクル(再処理周辺技術)、金属燃料炉心
 - ⇒国内の燃料サイクルと整合した、金属燃料高速炉サイクルへの移行、導入シナリオ及び炉心の成立を確認。
 - 崩壊熱除去系RVACS
 - ⇒原子炉容器外側(空気)と内側(ナトリウム)の流路を組合せた3次元解析モデルを構築し、定常解析で自然循環によるRVACS除熱の成立を確認。
 - SA安全解析ツール
 - 蓄熱システム

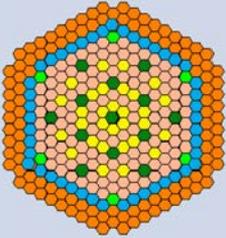
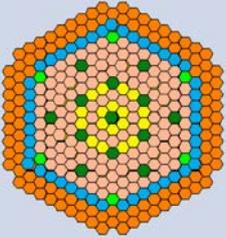
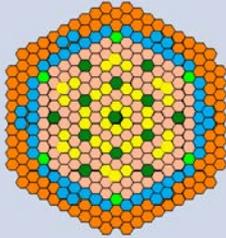
3-2. 金属燃料高速炉サイクルシナリオ

➤ 導入～平衡期まで新燃料用Puを充足する、SFリサイクル、原子炉導入ペースを設定。SF発生量や再処理量などの諸量推移を評価。



3-3. 金属燃料高速炉炉心構成

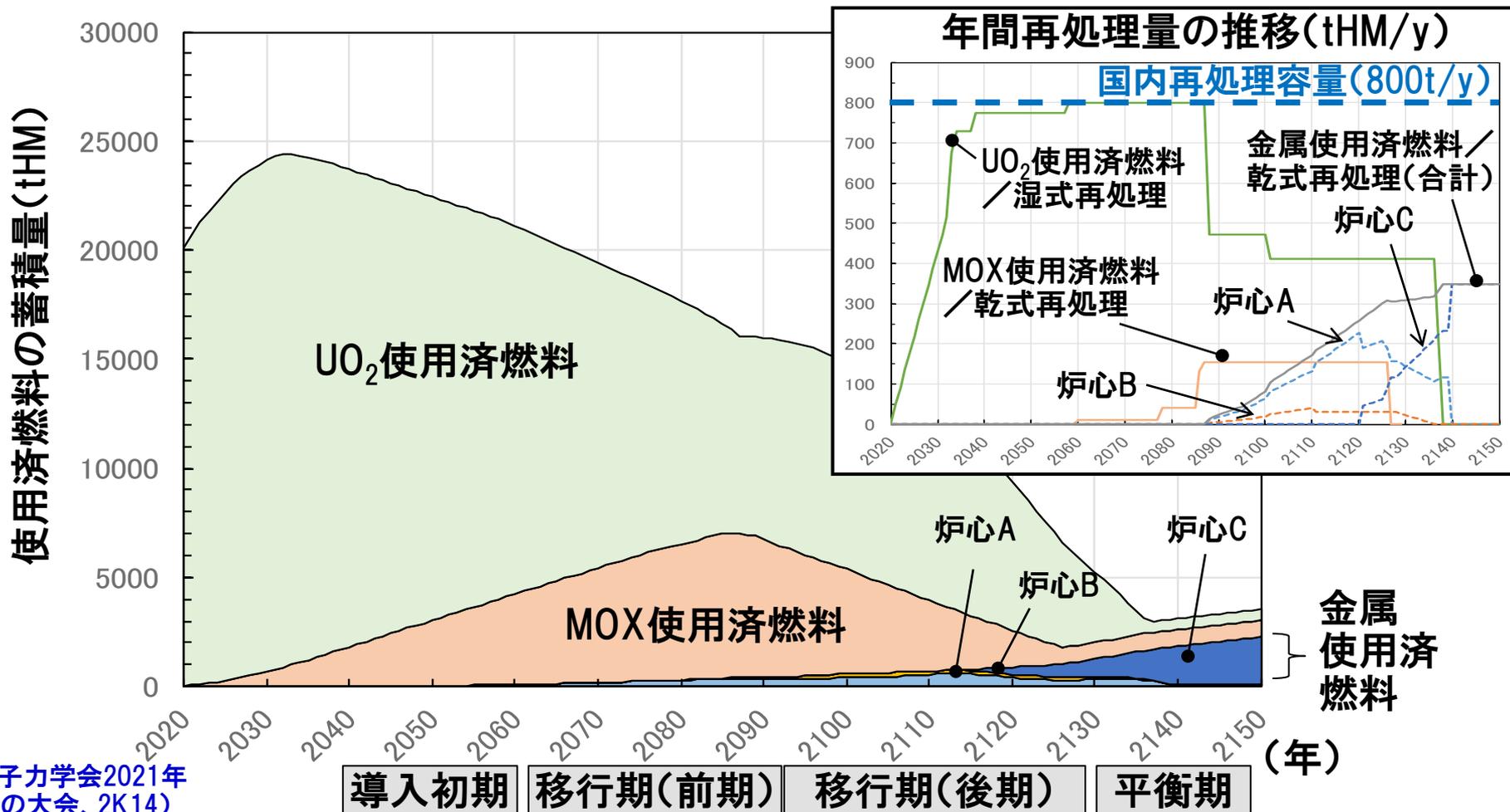
- マルチリサイクル時(平衡期)までPuf含有率の変化に対応。
- Pu残存比(燃焼前後Pu量の比率) ≥ 1 、Pu増殖で資源有効利用可。

	炉心A ^[1]	炉心B ^[1]	炉心C
炉心構成	 <ul style="list-style-type: none"> ○ 炉心燃料 120体 ○ 内部ブランケット 30体 ○ 径方向ブランケット 45体 ● 制御棒等 13体 ● GEM 6体 ○ 反射体+遮蔽体 177体 	 <ul style="list-style-type: none"> ○ 炉心燃料 132体 ○ 内部ブランケット 18体 ○ 径方向ブランケット 45体 ● 制御棒等 13体 ● GEM 6体 ○ 反射体+遮蔽体 177体 	 <ul style="list-style-type: none"> ○ 炉心燃料 114体 ○ 内部ブランケット 36体 ○ 径方向ブランケット 54体 ● 制御棒等 13体 ● GEM 6体 ○ 反射体+遮蔽体 168体
導入時期	導入初期(2040年)～	移行期前期(2080年)～	移行期後期(2090年)～ 平衡期～
燃料体数	炉心燃料:120体 内部ブランケット:30体 径方向ブランケット:45体	炉心燃料:132体 内部ブランケット:18体 径方向ブランケット:45体	炉心燃料:114体 内部ブランケット:36体 径方向ブランケット:54体
装荷燃料	<ul style="list-style-type: none"> ・MOX粉末※由来 (※UO₂-SFの再処理回収物) ・Pu中のPuf含有率:62% 	<ul style="list-style-type: none"> ・プルサーマルMOX-SF由来 ・Pu中のPuf含有率:49% 	<ul style="list-style-type: none"> ・金属使用済燃料由来 (マルチリサイクルを想定) ・Pu中のPuf含有率:66～74%
増殖性	・Pu残存比:1.06	・Pu残存比:1.01	・Pu残存比:1.13

[1] 原子力学会2020年秋の大会、2I010。 GEM: Gas Expansion Module
(原子力学会2021年秋の大会、2K16)

3-4. 金属燃料高速炉サイクル諸量

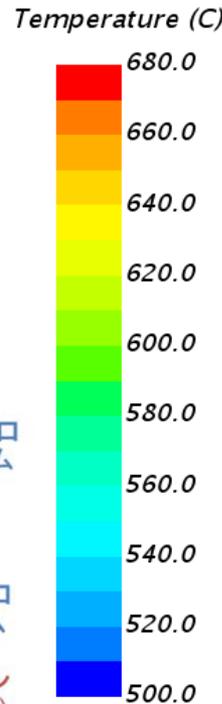
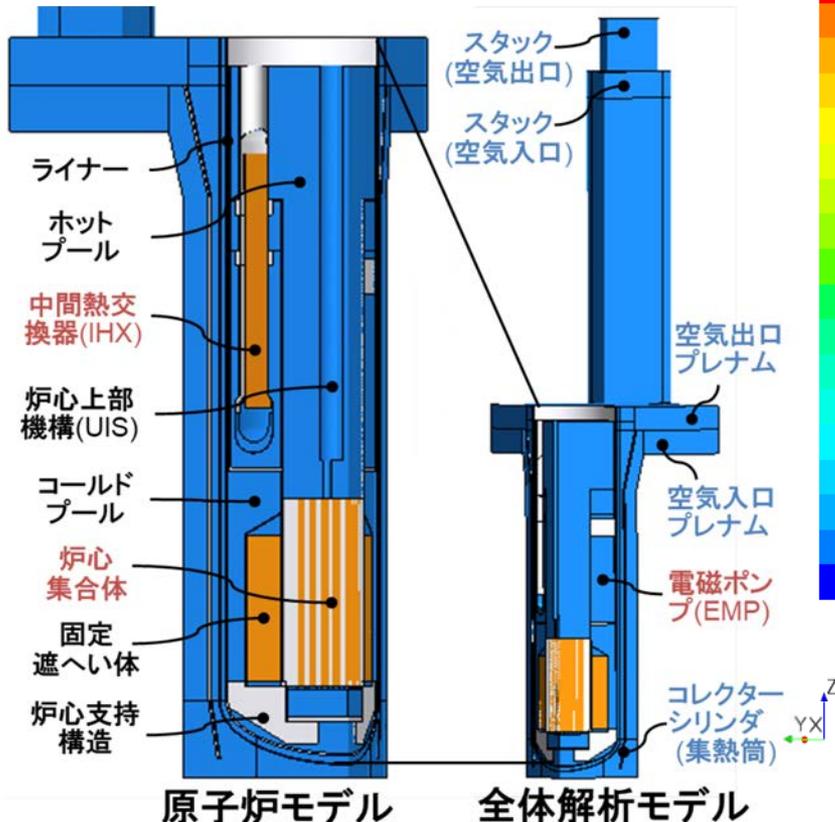
- プルサーマル、高速炉導入で使用済燃料の蓄積量を低減。
- 新燃料に必要なPu量、再処理量の観点でシナリオの成立を確認。



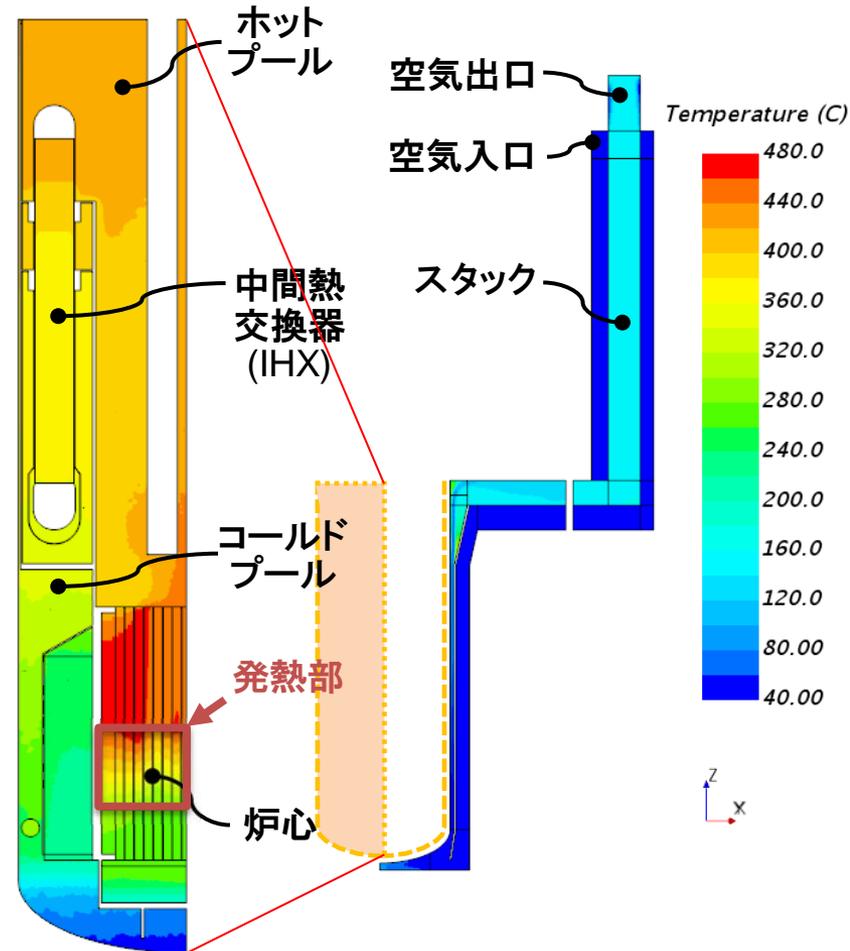
(原子力学会2021年秋の大会、2K14)

➤ 熱流動定常解析で自然循環によるRVACS除熱の成立を確認。

- 原子炉容器外側の空気と内側の主要機器、構造物とナトリウムをモデル化(約1,700万メッシュ)



内側(ナトリウム)温度



外側(空気)温度

(原子力学会2021年秋の大会、2K17)

- 固有安全性を活用する革新技術を採用した金属燃料小型高速炉は、米国で2020年代後半には建設、運開が期待され、国内導入で高い実機実証のポテンシャルを有すると評価。
- 国内サイクル政策に整合した金属燃料高速炉サイクルシナリオ・炉心概念、受動的安全系RVACSの除熱が成立する見通しを得た。
- 革新技術の実証を進め、高速炉開発戦略ロードマップに示された高速炉導入に資する開発を進めていく。

END

原子力イノベーションを支える最新の新型炉開発の状況
(5) 固有安全性を活用した
革新的金属燃料小型ナトリウム冷却高速炉

日立GE ○中原 宏尊