

次世代革新炉開発に必要な 研究開発項目 及び基盤インフラについて

革新炉開発（高速炉・高温ガス炉）

令和4年10月28日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

高速炉開発

高速実験炉「常陽」、原型炉「もんじゅ」による技術実証の成果

「常陽」の使命

- 高速増殖炉の基礎・基盤技術の実証
- 燃料、材料の照射試験
- 将来炉の開発のための革新技术の検証



- 初臨界 1977年
- 積算運転時間 約71,000時間
- 試験用集合体の照射実績 約100体

これまでの主な成果

- 増殖性能の確認
消費した以上の燃料が生成されることを確認
- FBR核燃料サイクルの輪を完成
使用済燃料から取り出したPuを再び燃料として「常陽」に装荷
- ナトリウムの自然循環による崩壊熱除去の実証
⇒後続炉の安全設計に反映
- 酸化物燃料の性能確認
燃料ペレット中心近傍を溶融させ、溶融限界線出力密度を確認
- 高速中性子照射場としての利用
利用実績（～2008年）：約4万試料、研究120件
- 自己作動型炉停止機構の開発
模擬制御棒を用いた機能確認試験を実施

再稼働後に期待される
研究開発分野

放射性廃棄物減容化
・有害度低減

高速炉開発

基礎基盤・多目的利用

原子力人材育成

「もんじゅ」の使命

- 発電プラントとしての信頼性の実証
- ナトリウム取扱技術の確立



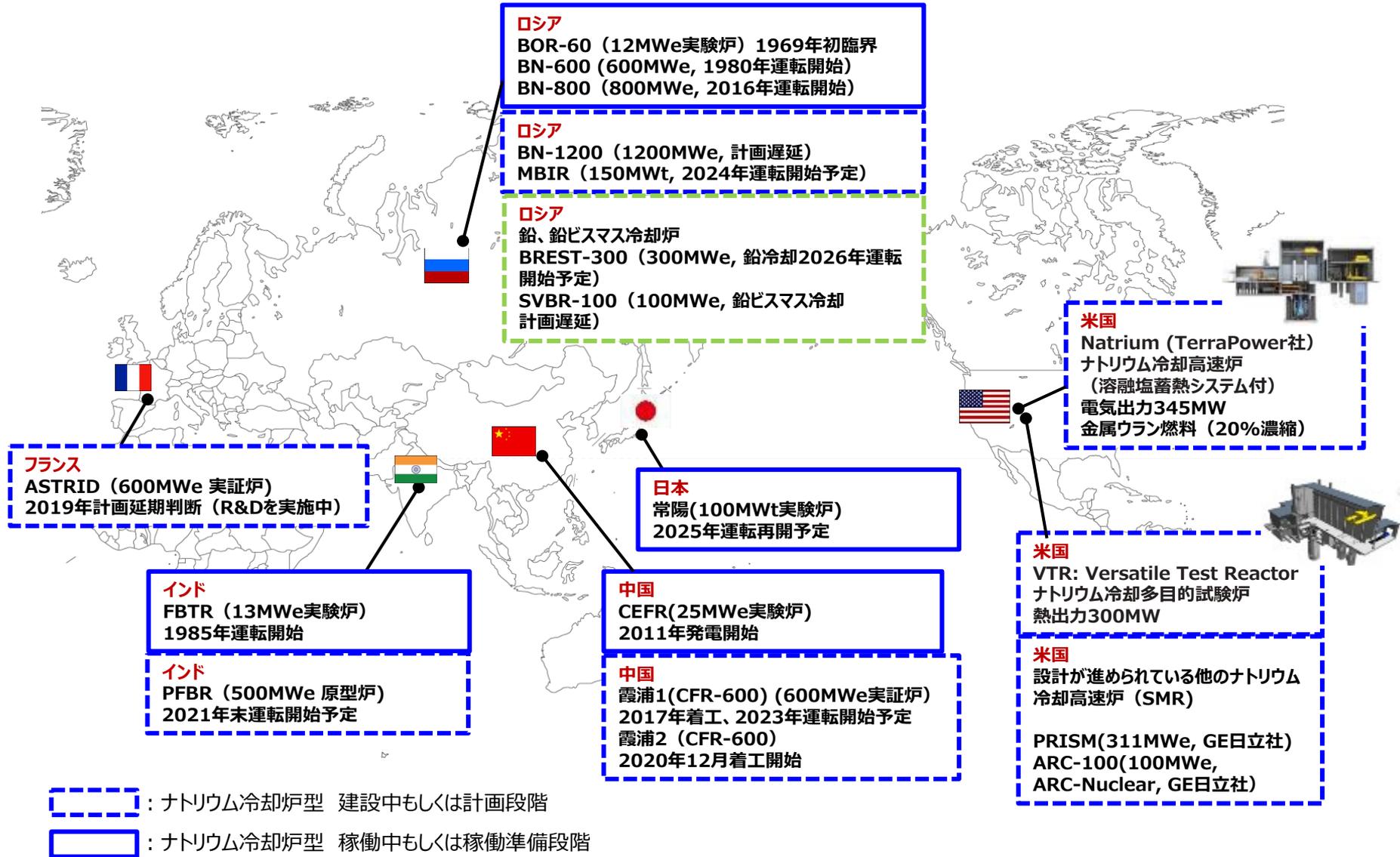
- 【定格出力】 28万 k We
- 【運転実績】
- 初臨界 1994年
- 原子炉運転時間 5300 時間
- 発電時間 883 時間
- 発電電力量 1 億kWh

これまでの主な成果

- 高速増殖炉の炉心の設計手法並びに機器の設計及び製造手法を確立
- 高速増殖炉の運転・保守管理技術を蓄積
- 我が国初の高速増殖炉システムによる発電を達成（40%出力まで）
- 炉心の増殖性能(期待された増殖比約1.2)を確認
- ナトリウム機器・設備の運転、保守等の経験により取扱技術を蓄積
- ナトリウム漏えい対策技術を向上
- ナトリウム冷却高速炉に関する安全評価手法を開発

～1992年	もんじゅ設計・建設	1995年8月～	性能試験（40%出力試験）
1993年10月～	性能試験（臨界試験）の実施	2010年5月	性能試験再開
1994年4月	初臨界	～2014年12月	運転再開を目指した準備
1995年8月	初送電	2016年12月	廃止措置へ移行

世界の高速炉開発状況



高速炉サイクルの役割の多様化（研究開発対象の変化）

従来の高速炉サイクルの役割（エネルギー安全保障）

- （1970年代後半～90年代）
- ・ プルトニウム増殖とその利用
- ・ 基幹電源（軽水炉に置き換わる主力電源）



常陽



もんじゅ

放射性廃棄物減容・有害度低減

（1980年代後半～現在）

- ・ プルトニウムリサイクル（軽水炉から回収した高次化プルトニウムの有効利用）
- ・ MAリサイクル（MA分離回収とその利用）



CPF
（高レベル放射性物質研究施設）



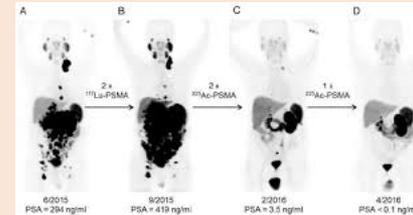
MA分離試験

新たに期待される機能（2010年代以降）

- ・ カーボンニュートラルへのさらなる貢献、経済安全保障強化
 - ✓ 原子力利用促進・持続性確保のため、高速炉サイクルによる
- ・ **放射性廃棄物の減容・有害度低減の早期実証**
- ・ 再エネと協調する「調整電源」機能 → 電力網への「機動性」を提供
- ・ 高速中性子場を利用した国民福祉向上への貢献
 - ✓ **医療用RIの工業生産・安定供給**



日仏協力、日米TerraPower協力の活用（溶融塩蓄熱技術利用等）



Ac-225による前立腺がん治療の例

- ・ 高速炉サプライチェーンの再構築・維持（工業分野での期待）
 - ✓ 高速炉サイクル実用化に向け、**高速炉技術のサプライチェーンを再構築**する

導入に向けた技術ロードマップ^o (高速炉)

第4回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会
原子力小委員会 革新炉ワーキンググループ
2022年7月29日開催より引用

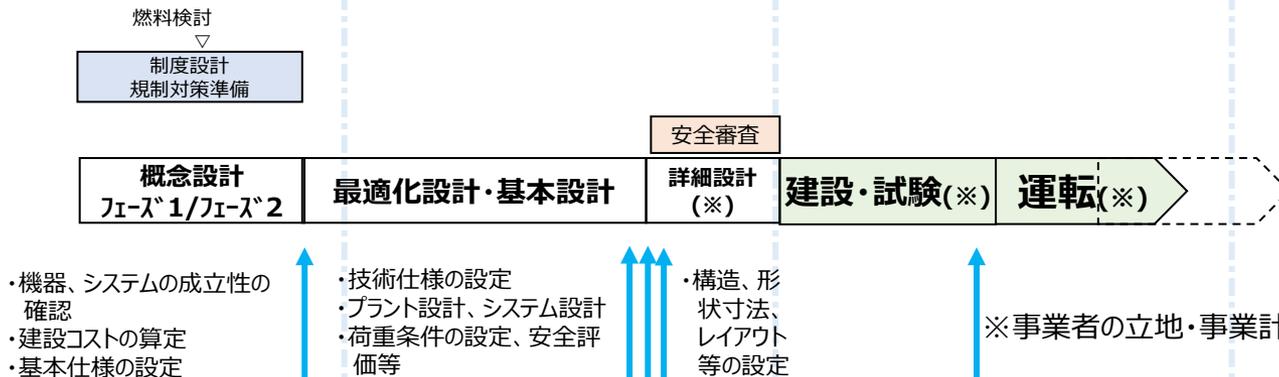
2020年

2030年

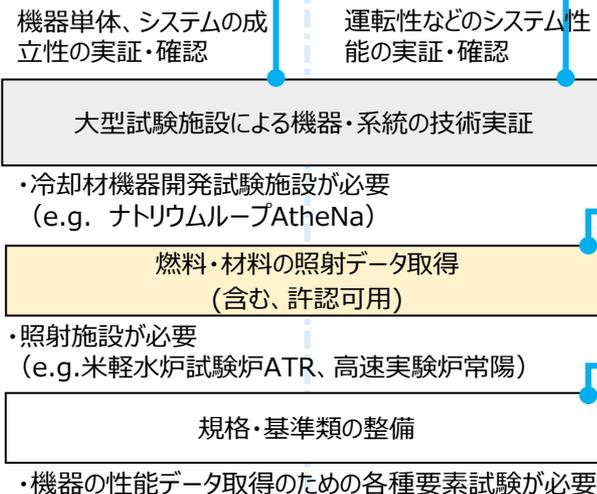
2040年

2050年

炉の建設・運転
【実証炉】

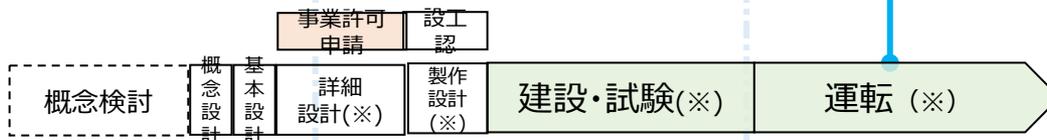


研究開発
(R&D)



燃料供給

燃料製造施設の建設・運転



□ 高速炉開発の方向性

- ◆ 高速炉の開発目標の設定
 - 安全性・信頼性
 - 経済性
 - 環境負荷低減性
 - 資源有効利用性
 - 核拡散抵抗性
 - 柔軟性・その他市場性
- ◆ 技術絞込みを実施する上での評価軸の設定
- ◆ 高速炉技術評価委員会の横断的評価

□ 今後の開発の作業計画

- ◆ 研究開発を進めつつ技術絞込みを実施する上での今後のマイルストーン
 - 2023年夏： ナトリウム冷却炉の中から、2024年以降の概念設計の対象となる炉概念の仕様と中核企業を選定
 - 2024～2028年頃： 実証炉の概念設計・必要な研究開発
 - 2028年頃： 炉の概念設計の結果と制度整備の状況等を踏まえたステップ3への移行の判断

高速炉の開発に必要な研究開発と基盤整備 1.安全性向上技術

技術開発項目	技術内容	
	開発・試験研究	実証・性能確認方策
受動的炉停止系開発 TRL : 7	キュリー点式電磁石の特性を用い炉心温度上昇時に制御棒を切り離す機構を開発 ・キュリー点式電磁石・制御棒保持機構開発済	・常陽での信頼性実証試験実施済
自然循環の直接炉心冷却系開発 7	炉内自然循環 + 2次系ループ自然循環 + 空気自然通風による崩壊熱除去 (仏と共同試験) ・評価技術を開発してNa試験で妥当性確認済 ・評価技術の追検証・高度化 (水流動試験 : PHEASANT、Na試験 : PLANDTL) ・米FFTF、EBR-II、仏Phenixデータの活用	・より大きな体系での性能確認試験 (大型Na試験 : AtheNa、新機能実証試験施設)
シビアアクシデント緩和技術・炉内終息技術 4~6	内部ダクト付集合体による溶融燃料早期炉心外排出 + コアキャッチャーでの冷却 (カザフ・仏協力) ・内部ダクト付集合体の構造開発 (製作試験) ・性能評価 (解析) ・流動試験 (水流動試験 : 新設、Na試験 : CCTL) ・コアキャッチャー構造の開発 ・事象評価技術の確立 (Na試験 : MELT)(仏とコード開発)	・炉内照射試験 (新機能実証試験施設) ・事故後冷却実証試験 (大型Na試験 : AtheNa)
大容量蒸気発生器でのNa-水反応抑制技術 2~6	高感度のNa中水素計による監視 + Naへのナノ粒子分散による化学反応抑制 ・センサー開発 ・性能試験 (Na試験 : グローブボックス施設、仏協力) ・ナノ粒子製作技術開発 ・Na-水反応試験 (Na試験 : SWAT-2R)	・総合実証試験 (Na試験 : SWAT-3R)
Na燃焼対策、放射性物質移行評価法、確率論的安全評価 4~7	Na燃焼や事故時放射性物質挙動に係る重要挙動について評価の不確かさを低減 (米協力) 確率論的安全評価を設計に反映するため、手法・信頼性データベースを高度化 (米・仏協力) ・放射性物質挙動/エアロゾル挙動試験 (Na試験 : 新設) ・手法開発、信頼性データベース拡充	・重要挙動に着眼した試験で評価法の妥当性確認 ・実機の建設・運転により実績を重ねる
規制に必要な基盤知見整備	合理的なナトリウム冷却高速炉特有の安全要件を構築し、規制に必要な基盤知見を整備 ・国際標準の安全要件/設計ガイド構築 (GIF、IAEA枠組下で標準化活動を主導、参画)	・日本の規制機関との対話

青字 : JAEAでの研究開発、黄色字 : 既設装置での試験、赤字 : 新設装置での試験、緑字 : 国際協力による研究開発

高速炉の開発に必要な研究開発と基盤整備 2.経済性向上技術

技術開発項目	技術内容	
	開発・試験研究	実証・性能確認方策
大型原子炉容器の開発 ④～⑦	大型高速炉へ対応する大径原子炉容器の開発（構造・製作性、耐熱性、流動安定性）	
	・大径薄肉容器の製作手法開発 ・大径の遮蔽プラグ開発（ 仏と情報交換 ）	・部分試作試験等 ・遮蔽プラグ実証試験（ 大型Na試験：AtheNa ）
	・炉壁冷却系の開発（水試験）	・炉壁冷却実証試験（ 大型Na試験：AtheNa ）
	・スケール流動試験（水試験）	・大スケール水流動試験（水試験）
大容量蒸気発生器の開発⑦	高強度伝熱管採用により一体貫流型とし、コンパクト化を図る	
	・機器開発	・総合実証試験（ 大型Na試験：AtheNa ）
炉心の高燃焼度化 ⑤～⑦	放射線耐性・高温強度が高い被覆管材料（ODS鋼）と太径中空燃料ペレットにより高燃焼度化	
	・高燃焼度燃料の照射データ蓄積、長寿命炉心材料開発（ 照射試験：常陽、米(TREAT炉)・仏協力 ） ・長寿命制御棒開発（ 大型Na試験：AtheNa、照射試験：常陽 ）	・照射知見の蓄積（ 常陽、新機能実証試験施設 ）
高温強度に優れる構造材料の開発⑦	316FR鋼、改良9Cr-1Mo鋼に対して60年設計を可能とするための材料強度基準を開発・規格化	
	・材料試験データ取得中（ 材料試験、仏との共同試験 ）	・民間規格として設計基準化
構造設計基準の開発⑦	高温下での各種構造の設計評価手法開発、設計基準の構築	
	・薄肉大口径容器の座屈試験、等	
合理的な保守基準構築と保守手法開発⑤	Na冷却炉の特性を考慮した保守基準の確立と、それに対応するNa中可視化等の保守手法開発	
	・米機械学会でのJAEA提案の保守基準の発行	・国内の保守基準へ展開し規格化
	・検査装置開発（ 仏協力等、水中試験、Na試験：保全技術開発ループ ）	・総合実証試験（ Na試験：AtheNa ）
プラント設計支援手法開発②	開発知見を集約した知識ベースとAIにより短期間で設計最適化する手法（ARKADIA）の開発	
	・ナレッジベース、核・熱・構造統合モジュール等高度シミュレーション、AI設計最適化など各種構成モジュールとプラットフォームの開発	・AIによる設計支援実証（ 新機能実証試験施設設計への適用実証含む ）

青字：JAEAでの研究開発、黄色字：既設装置での試験、赤字：新設装置での試験、緑字：国際協力による研究開発

④～⑦：新たなニーズに対応した研究開発

高速炉の開発に必要な研究開発と基盤整備

- 3. 環境負荷低減性
- 4. 資源有効利用性
- 5. 核拡散抵抗性
- 6. 柔軟性

技術開発項目	技術内容	
	開発・試験研究	実証・性能確認方策
MA燃焼④～⑤	<p>MAの分離手法・添加燃料を開発し、高速炉による照射で放射性廃棄物減容・有害度低減を実証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・MA分離手法は実験室レベルで開発済 ・工学試験レベルのMA分離手法開発 (セル施設) ・MA添加燃料の製造 (セル内燃料製造施設) ・ピンレベル試験照射試験 (常陽) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ピンレベル照射試験データ蓄積 (常陽) ・集合体レベル照射試験 (新機能実証試験施設)
再生可能エネルギー（再エネ）との協調に向けた蓄熱装置による調整電源機能②	<p>変動再エネの負荷変動に追従して出力調整可能な、熔融塩蓄熱・発電設備と接続する技術開発 (蓄熱装置、発電システムは太陽熱発電技術から導入)</p> <ul style="list-style-type: none"> (米協力の可能性) ・Na-熔融塩熱交換器開発 (大型Na試験：AtheNa) ・Na-熔融塩化学反応試験 (Na試験：グローブボックス施設) ・熱利用システムと高速炉接続の安全論理構築 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子炉と蓄熱・発電システムを接続・運転し実証 (新機能実証試験施設)
高速中性子照射技術開発	<p>医療用等、RI製造等のニーズに応えるため、RI照射技術、RI精製技術の開発、連続供給体制構築</p> <ul style="list-style-type: none"> ・照射試料装荷・取出機開発 (モックアップ試験) ・RI精製技術開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・照射運転でのRI等製造 (常陽、新機能実証試験施設) ・RI精製・生産設備の運用
原子力高度化に向けたイノベーション技術の研究②～③	<ul style="list-style-type: none"> ・地震の入力動を大幅に低減し、立地に依存しないプラント標準化に貢献する浮体免震技術 ・燃料製造プロセスを大幅に簡素化し、燃料製造コスト低減に貢献する3Dプリント技術による燃料製造技術 	

青字：JAEAでの研究開発、黄色字：既設装置での試験、赤字：新設装置での試験、緑字：国際協力による研究開発

④～⑤：新たなニーズに対応した研究開発

高速炉の開発課題と施設整備

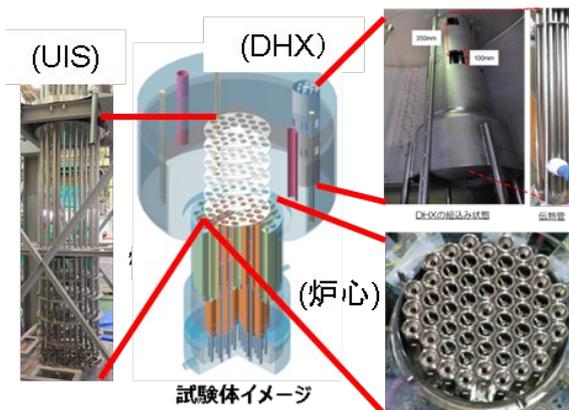
	試験項目	必要な措置、(施設名) ○基盤あり/△基盤整備中/×新設	必要スペック
水流動試験	内部ダクト付集合体の水流動試験	× ループ新設 (水流動施設)	実寸集合体・実流量の水流動試験
	炉容器内自然循環模擬水流動試験	× 試験体新設 (水流動施設)	1/10縮尺原子炉容器模擬
	材料・構造強度試験	○ (材料試験装置) △ (耐震試験設備)	高温クリープ試験等、中規模加振機
ナトリウム試験	自然循環ナトリウム流動試験	○ (PLANDTL施設)	炉容器 + 冷却系の組合せ体系の試験
	・Na中水素計性能試験 ・ナノ粒子混入NaでのNa-水反応試験	○ (気中試験装置、AtheNa等ループ設備) ○ (グローブボックス内装置)	小規模Naループ、等
	Na-水反応総合実証試験	○ 試験体新設 (SWAT-3R施設)	蒸気発生器模擬試験体での試験
	事故後冷却要素試験	○ (MELT施設)	微粒化挙動・堆積挙動の試験
	放射性物質挙動/エアロゾル挙動試験	× 装置新設	Na中FP気泡挙動試験、等
	Na中検査装置試験	○ (保全技術開発ループ)	可視化性能のNa中確認試験等
大型ナトリウム試験 AtheNa試験施設	・事故後冷却実証試験・炉壁冷却実証試験	△ 炉容器熱流動試験ループ新設	縮尺原子炉容器・熱源模擬
	蒸気発生器性能試験	△ 10MW～のSG試験ループ新設	実寸伝熱管でSG模擬
	・内部ダクト付集合体のNa流動試験 ・制御棒集合体のNa中動作試験	△ 長尺集合体の試験ループ新設	実寸集合体・実流量のNa流動試験、及び制御棒動作試験
	遮蔽プラグ実証試験	△ 遮蔽プラグ試験ループ新設	約550℃・縮尺遮蔽プラグ模擬
	・保守装置実証試験 ・Na中動作機器実証試験	△ 大型Naポット試験装置新設	メンテナンス温度 (約200℃)、大径のNaポット試験装置
	Na-溶融塩熱交換器試験	△ 溶融塩試験ループ新設	10MW～のNa-溶融塩熱交換試験
常陽	・高燃焼度燃料のピンレベル照射試験 ・MA燃料のピンレベル照射試験 ・医療用RI照射試験	○ 照射リグ製作 (常陽)	(再稼働準備中)
新機能実証試験	・内部ダクト付き集合体の照射試験 ・MA添加燃料の照射試験	× 常陽でのピン照射に加え、大型集合体の照射試験が必要	・もんじゅ以上の寸法の燃料集合体 ・直接炉心冷却系を持つこと
	自然循環崩壊熱除去の炉内実証試験	× 直接炉心冷却系体系での試験が必要	・調整機能実証が可能な出力規模である数百MWの熱出力を持つこと
	高速炉-蓄熱接続による調整電源実証	× 蓄熱設備 + 高速炉の組み合わせが必要	・照射試料を運転中に迅速に出入可能な設備を付帯
	医療用RIの連続供給	× 常陽での照射と併せて連続供給必要	

研究開発課題への今後の取組み内容（1）

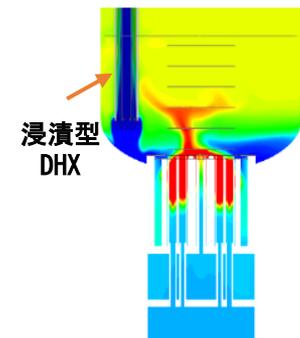
○ 自然循環の炉心冷却系開発

炉内自然循環による崩壊熱除去

- 「常陽」や海外炉等の実機実証試験データ、全炉心規模のNa試験により評価手法の妥当性を確認済
- タンク型炉の実験と解析評価の経験が限られ、今後はマルチレベル手法（原子炉容器 + 2次系（プラント全系）のCFD + 1次元解析手法）の妥当性確認を国際協力、既存施設を活用して行う



PLANDTL-2試験装置体系



浸漬型DHXによる炉心冷却時の炉内温度分布の評価

水流動試験施設

Na試験施設(PLANDTL)

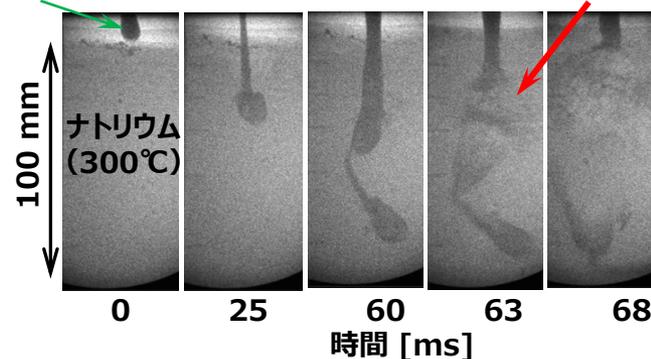
○ シビアアクシデント緩和・炉内終息技術

溶融燃料の早期炉心外排出 + コアキャッチャーでの冷却

- 事象推移中の主要現象について、評価手法を確立し、Na試験によりその妥当性を確認済
- コアキャッチャー上の燃料堆積など一部の挙動について試験データ取得と評価手法の検証・高度化、海外の実燃料試験の活用、既存施設による詳細データ取得により、検証レベルを上げる

溶融スチール

溶融スチールの急速な微粒化



MELT施設における微粒化挙動の可視化試験

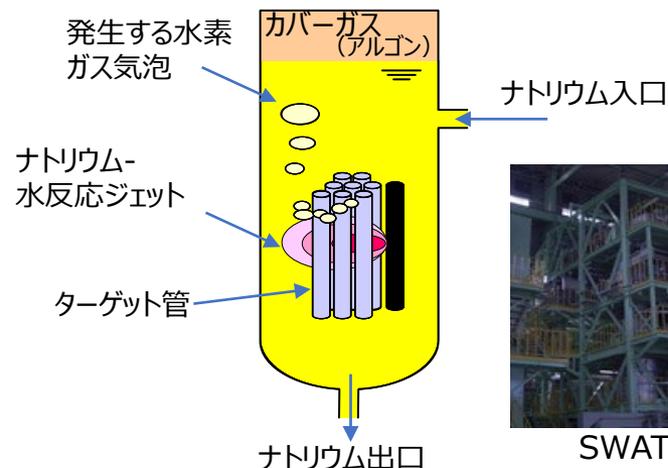
Na試験施設(MELT等)

大型Na試験施設(AtheNa)

研究開発課題への今後の取組み内容（2）

○ Na-水反応抑制技術

- 蒸気発生器内の水・蒸気リークの早期検知するセンサー（水素計）を開発
- Na-水反応事故時の挙動評価手法を開発し、実験室レベルの試験により妥当性確認済
- リーク早期検知技術、事故評価手法ともに、工学規模試験によって技術実証を行う



SWAT-3R
試験装置

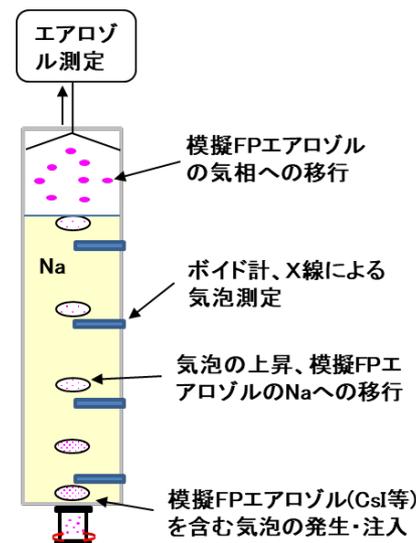
(ナトリウム-水反応現象)

Na試験施設(AtheNa利用、SWAT-3R、等)

Na-水反応試験のイメージ

○ 放射性物質移行評価技術

- 重大事故時の放射性物質移行挙動を評価する解析コードを開発し、米協力（比較解析）も活用して妥当性確認中
- 今後、重要挙動に着眼した試験を実施して解析コードの妥当性確認を補強する



Na中FP気泡挙動試験のイメージ

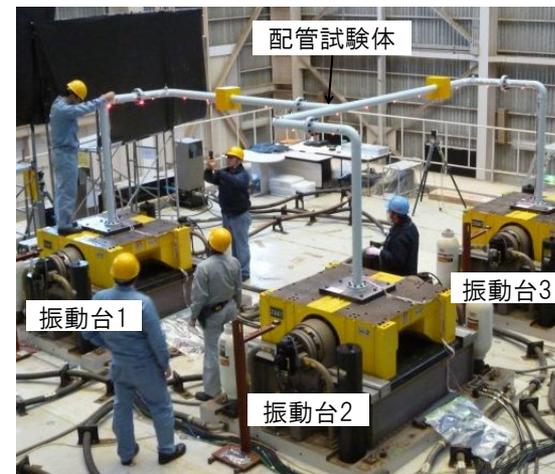
Na試験施設(新設)

研究開発課題への今後の取組み内容（3）

○ 構造材料の開発 ○ 構造設計基準の開発

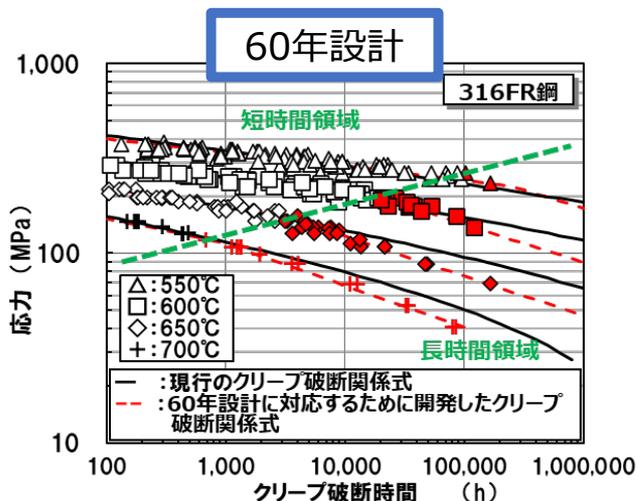
- 高速炉構造材料候補材料である316FR鋼、改良9Cr-1Mo鋼に対して60年設計を可能とするための材料強度基準を開発・規格化する。このための材料試験データを取得中
- 高温化での各種構造の設計評価手法を開発する。薄肉大口径容器の座屈試験等のデータも活用
- 耐震性の確保の課題に対して、重要な機器・配管系設備に対する評価手法開発、耐震安全性向上に寄与する

耐震試験設備

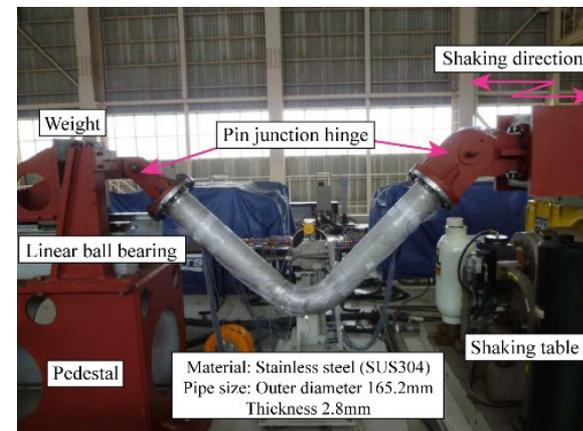


配管系の地震時挙動試験

材料試験装置



構造材料長時間試験施設



工ルボ要素試験

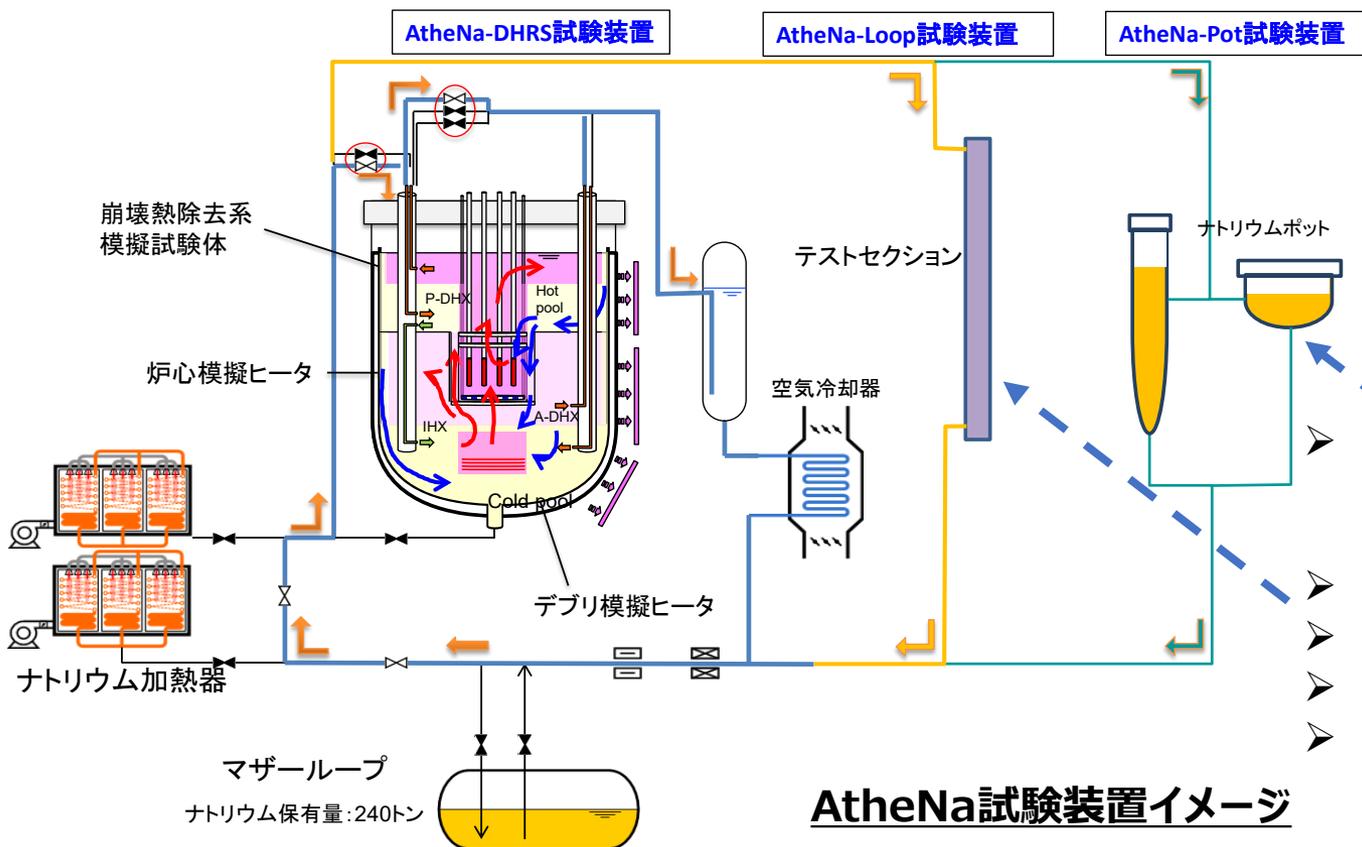
研究開発課題への今後の取組み内容（４）

○ 大型原子炉容器の開発

- 枢要大型機器の構造・製作性など設計検討を通じ、大型炉について耐震性、安全性、経済性等が成立する見通しを得た
- 冷却系機器開発試験施設（AtheNa）等を用いて、実寸大機器の性能試験、実液中試験を行い、信頼性実証が必要

○ 大容量蒸気発生器の開発

大型Na試験施設(AtheNa)



AtheNa外観

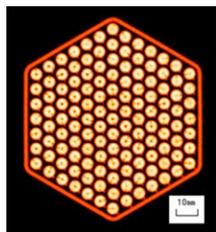
- 保守装置、Na中動作機器の実証試験
- 集合体の流動試験
- 遮へいプラグ実証試験
- 蒸気発生器性能試験
- Na-溶融塩熱交換器試験

AtheNa試験装置イメージ

研究開発課題への今後の取組み内容（5）

- 炉心の高燃焼度化
- MA燃焼

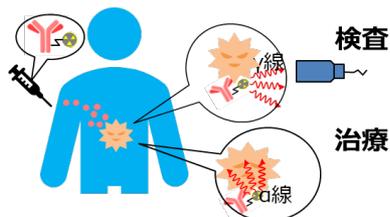
- 高燃焼度燃料やMA燃料のピンレベル照射試験、長寿命炉心材料開発のための照射試験が必要
- 加えて、集合体レベルの照射も必要
- 医療用RI製造等のニーズに応える研究・技術開発も進める



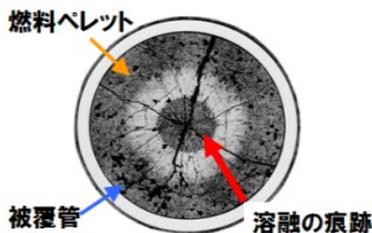
燃料集合体X線CT画像



金属燃料



医用RIによる検査・治療



MOX燃料の
溶融限界(PTM)試験



材料照射

医療用RI製造
(特に世界的に注目されるAc-225)

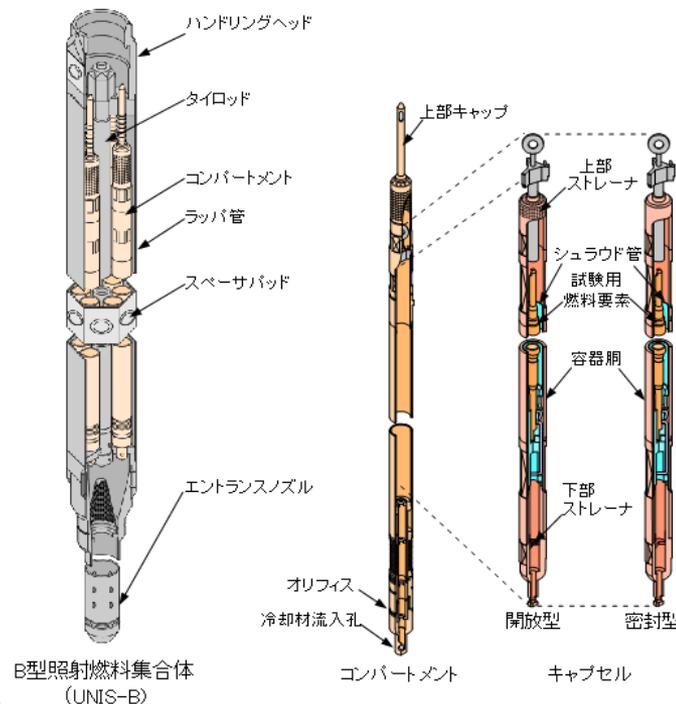
(医療会、がん患者会等からの期待)

実験炉「常陽」

新機能実証試験施設 (新設提案)



高速実験炉「常陽」



「常陽」での燃料ピン照射装置

研究開発課題への今後の取組み内容（6-1）新機能実証試験施設の効果

- ◆ 常陽、AtheNa等を活用することにより実証炉の開発を進めることは可能と考える。
- ◆ これに加えて新機能実証試験施設を整備することにより、高速炉の信頼性向上やそれを活用した新たな機能の開発（MA燃焼、医療用RI製造）等を行うことが可能になる。

項目	AtheNa、常陽等を利用した開発	新機能実証試験施設を利用するメリット
MA燃焼	<ul style="list-style-type: none"> ・「常陽」でのピンレベルの照射試験実施済 →各種燃焼試験を経てMA燃料として実用化 	<ul style="list-style-type: none"> ・集合体レベルでの照射試験を先行して実施（MOX、金属燃料オプション比較） ⇒MA燃焼による放射性廃棄物減容・有害度低減を早期に実証
再エネとの協調 （蓄熱装置による調整電源機能）	<ul style="list-style-type: none"> ・蓄熱装置は太陽熱発電技術を導入 ・Naとの熱交換、Na-蓄熱材の化学反応対策はAtheNa等の炉外試験で開発 （なお、「常陽」は2次主冷却系が安全系のため、設置が技術的に困難であり、<u>長期間の運転停止</u>となる） 	<ul style="list-style-type: none"> ・高速炉システムとの接続技術を実証 ・再エネとの協調に必要な機動性を実証 ・需要にあわせた発電により経済性向上 ⇒高速炉の調整電源機能を実証
医療用RI製造	<ul style="list-style-type: none"> ・「常陽」での照射試験によりRI製造を実証 （「常陽」単独では定期検査期間は製造不可となる） 	<ul style="list-style-type: none"> ・常陽と新機能実証試験施設を組合わせた照射により、製薬上の要請となるRIの連続供給が可能となる ⇒高速炉によるRI供給の産業化には必須
タンク型原子炉容器の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・炉内流動、炉壁冷却、遮蔽プラグ等の開発をAtheNa等での実証試験で確立 （タンク型炉設計の知見はASTRID協力で入手したものを活用） 	<ul style="list-style-type: none"> ・小型だが段階的・早期に実証 ・製作性等の知見集積 ⇒原子炉容器の信頼性向上に寄与
安全性向上	<ul style="list-style-type: none"> ・PLANDTL、AtheNa等でタンク型炉での自然循環を模擬試験 （「常陽」（ループ型体系）で自然循環技術確立） ・模擬試験による安全審査データ取得 	<ul style="list-style-type: none"> ・タンク型の小型炉で自然循環試験を実施し、総合的な性能を確証 ・タンク型炉の安全審査経験の早期蓄積

研究開発課題への今後の取組み内容（6-2）新機能の実証試験施設

【提案】 社会ニーズに対応し、高速炉で実現可能な新機能を実証する新たな試験施設

1. 放射性廃棄物の減容・有害度低減

- 実用化時に多数基導入される基幹電源炉をMA燃料とし、**国内蓄積のMAを全量処理**

国内蓄積のMAを全量処理

新機能実証試験施設で達成すべき目標

- 試験集合体レベルでのMA燃焼実証
- 金属燃料でのMA燃焼にも対応

2. 再エネ協調；調整電源

- 高速炉SMRを実用化し、「再エネ+高速炉（SMR+基幹電源大型炉）」で電力供給

多数基導入で原子力による調整電源実用化

人材確保・育成、技術伝承

- Ac-225の工業生産実証
- 「常陽」と併せて国内必要量を連続供給

- 冷却系の実証
- タンク型炉の設計・製造知見獲得
- サプライチェーン再構築

大型化、多数基導入で基幹電源炉として実用化

「常陽」+新機能実証試験施設で産業化、世界へ供給

- 世界の**Ac-225必要量を連続供給**
- JRR-3と連携しMo-99の国産化も実現

3. 国民福祉向上への貢献

- 新機能実証試験施設で得られた実証データを基に、**今後の開発負荷及び開発リスク低減**
- 回復したサプライチェーンを活用

4. 高速炉技術基盤の確立

高速炉開発にかかる人材育成・技術的知見の継承

○ 高速炉に関する人材育成や技術的知見の**維持・継承**が必要。具体的な方策は以下のとおり。

⇒ **国内外の実炉の開発プロジェクトへの参画**【国内が最も望ましい、海外プロジェクトも効果あり。ものづくりプロジェクト等によるサプライチェーン維持も含む】

⇒ **世界に誇る研究基盤施設（「常陽」や「冷却系機器開発試験施設（AtheNa）」、DX）を活用した研究開発**【日本技術の優位を活かす】

※「人材育成の取組を進めるとともに、原子力機構と国内外の大学、民間の研究施設等との連携の強化」（高速炉開発の方針）が重要

○ 高速炉の最後の運転（常陽）は約15年弱前、建設経験（もんじゅ）は約30年前。

高速炉の建設や運転経験を有する人材の高齢化（建設経験者は60～70代、運転経験者は40～50代）が進行。



今世紀半ばの実証炉の開発を目指すためには、実プロジェクトへの参画や、基盤研究施設を活用した研究開発の継続的な実施により、我が国において培ってきた高速炉の知的基盤、技術的基盤を維持・継承していくことが不可欠。

高温ガス炉開発

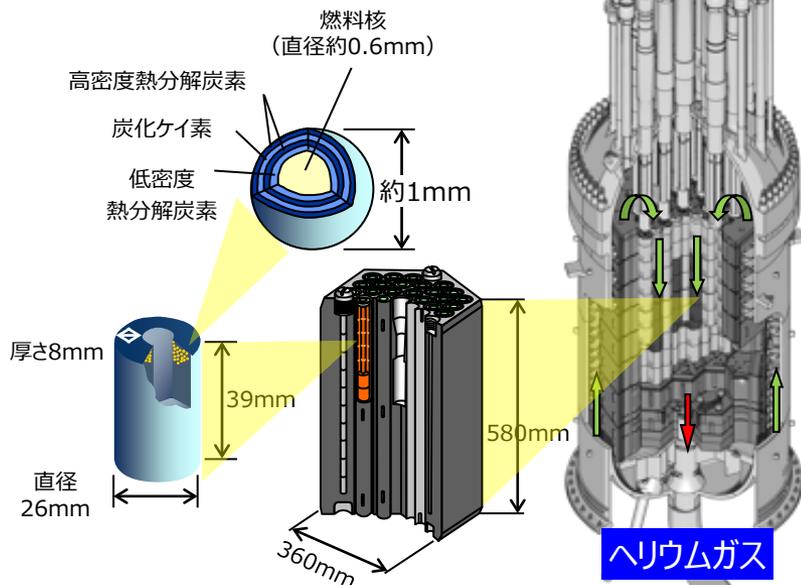
高温ガス炉の特長

●優れた安全性

高温ガス炉は、その高い固有の安全性により、炉心溶融が起こらない設計が可能

被覆燃料粒子

1600°Cでも放射性物質を閉じ込める

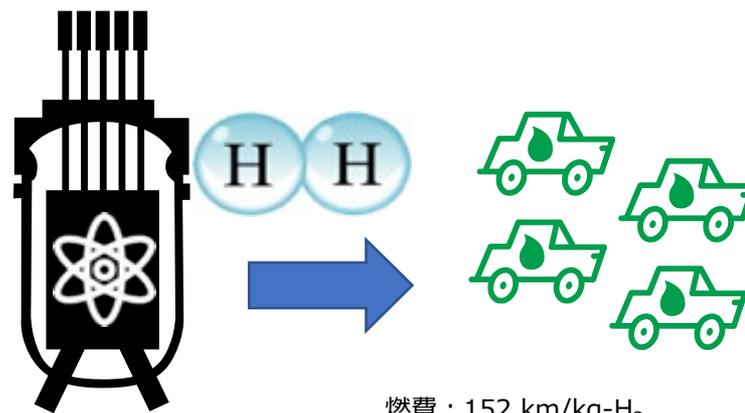


黒鉛構造材
耐熱温度2500°C

高温でも安定
(温度制限なし、
化学的に不活性)

●多様な熱利用

900°Cを超える高温熱を供給可能で、水素製造、高温蒸気による化学プラントプロセスの熱源、発電等の幅広い熱利用が可能



高温ガス炉

燃費：152 km/kg-H₂
年間走行距離を10,000kmと仮定
年間の必要水素量：約730m³/台

高温ガス炉* (熱出力250MW) で、燃料電池車
20万台の水素製造が可能

* 水分解による水素製造効率50%、稼働率80%を仮定

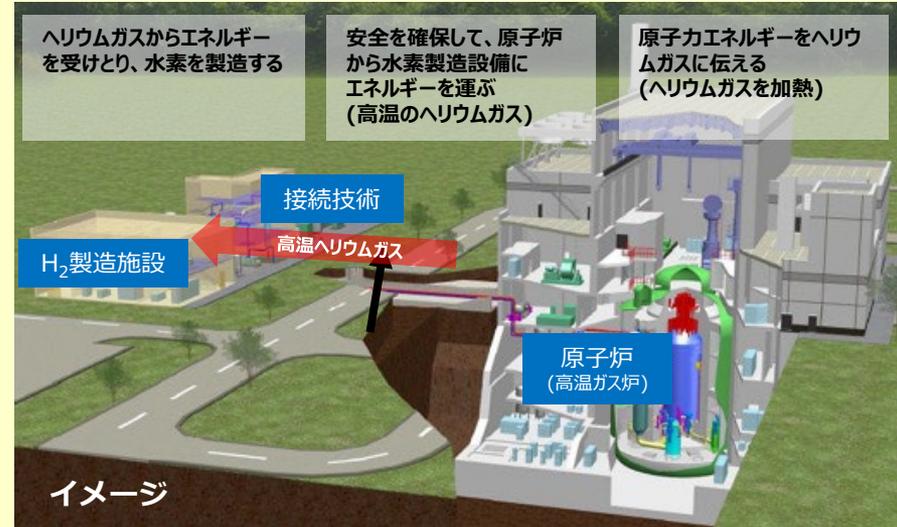
高温ガス炉開発の概要

高温ガス炉技術



- 原子炉出口温度**950℃達成** (2004年4月)
- 950℃、50日間高温連続運転 (2010年3月)
- 安全性実証試験 (**炉心流量喪失試験**) (2010年12月)
- 新規制基準に係る設置変更許可の取得 (2020年6月)
- **HTTR運転再開** (2021年7月)
- 安全性実証試験 (**炉心冷却喪失試験**) (2022年1月)
- HTTR H₂製造プロジェクトを開始 (**2022年**)

カーボンフリー水素大量製造技術



- 高温ヘリウムガス (電気ヒーターで加熱) を熱源として、**水蒸気改質法**による安定した水素製造を達成 (2003年)
- HTTRに水素製造施設 (水蒸気改質法) を接続し**2030年までに**高温ガス炉と水素製造施設の**高い安全性を有する接続技術を確立***
- 並行して、熱化学水素製造法など**カーボンフリー水素製造法について開発を実施**

*経済産業省 資源エネルギー庁の事業「超高温を利用した水素大量製造技術実証事業」を三菱重工株式会社と共同で受託

世界の高温ガス炉開発

<p>米国</p> 	<p>エネルギー省 (DOE) による開発支援 (新型炉実証プログラム, 2020年～)</p> <ul style="list-style-type: none">• ~2028年に稼動する革新炉原子炉の建設を支援• X-energy社 (高温ガス炉) が選定
<p>英国</p> 	<p>ビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS) による開発支援 (新型モジュール炉研究開発・実証プログラム, 2022年～)</p> <ul style="list-style-type: none">• BEISは新型モジュール炉として高温ガス炉を選定• 2030年初頭までに高温ガス炉を実証• 英国国立原子力研究所 (NNL) と原子力機構が参加するチームが、英国の新型炉開発プログラムの予備調査を行う実施事業者として採択
<p>ポーランド</p> 	<p>ポーランド政府による高温ガス炉計画</p> <ul style="list-style-type: none">• 国立原子力研究センター (NCBJ) は教育科学省から高温ガス炉実験炉の設計のための予算を獲得• 高温ガス炉実験炉の概念設計を開始 (2022年)
<p>中国</p> 	<p>エネルギー技術創新“十三五”計画 (能源技術創新“十三五”規画)</p> <ul style="list-style-type: none">• 研究炉 (HTR-10) を用いた研究開発• 実証炉 (電気出力210MW) が運転中 (2021年12月送電開始、2022年全出力運転予定)
<p>日本</p> 	<p>経済産業省及び文科省によるNEXIPイニシアチブ</p> <ul style="list-style-type: none">• 原子力機構による高温工学試験研究炉 (HTTR) を用いた研究開発• 民間企業 (東芝ESS及び三菱重工業) による商用高温ガス炉開発

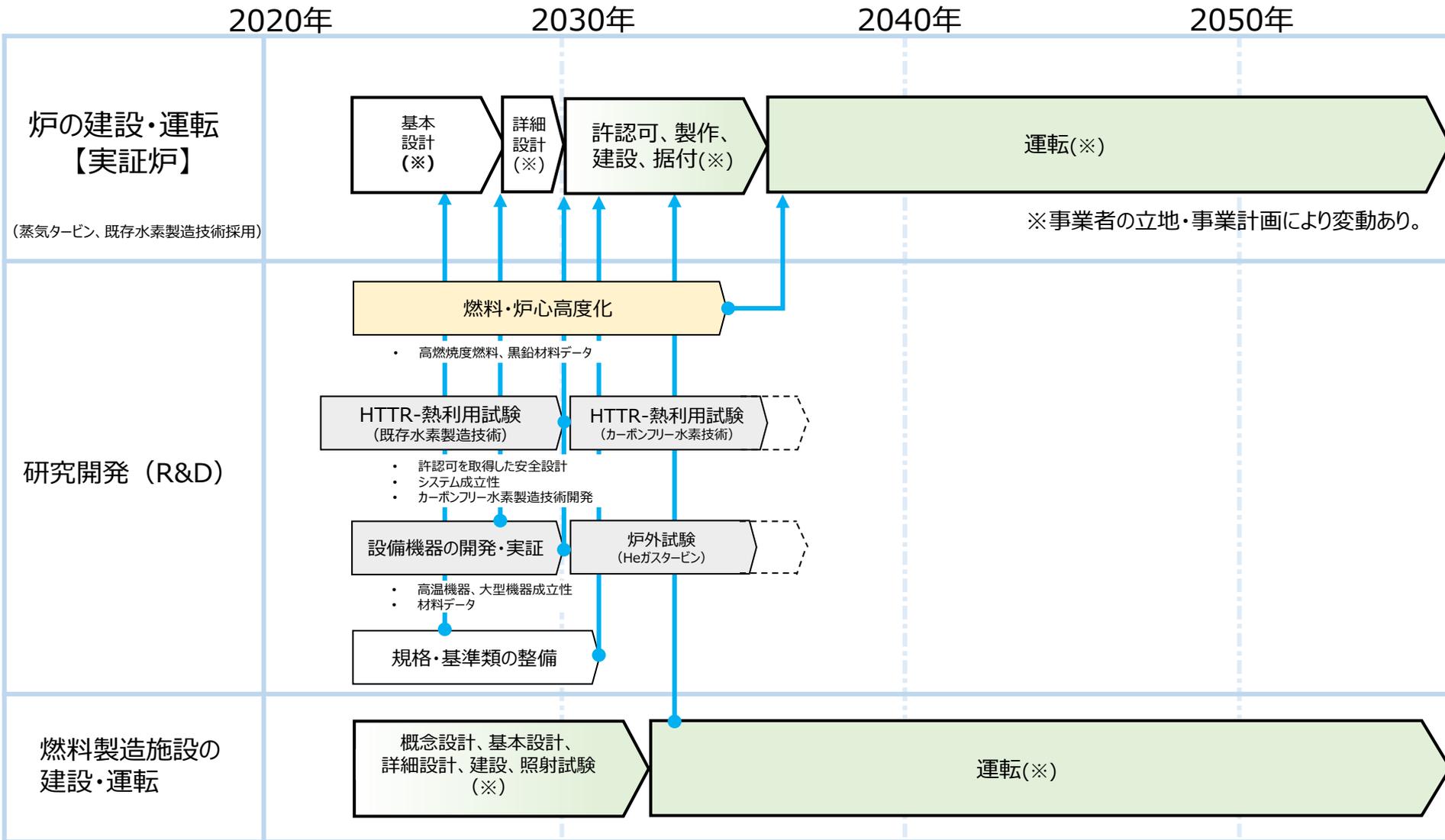
高温ガス炉実証炉

- 実証炉の出力規模は、今後、ユーザーの需要によって決定されるが、次の炉へのスケールアップは、HTTRの技術の延長線上にあることを前提として、HTTR熱出力30MWの1桁倍である200～300MWが望ましい。
- 将来、高温ガス炉を水素製造、蒸気利用等により化学プラントなどに活用することを目的とすれば、200～300MWを超え、例えば、高温ガス炉固有の安全性を活かす最大熱出力600MWまでスケールアップをする考え方もある。一方で、200～300MWをモジュール化して活用する考え方もある。
- 実用炉の規模は別途検討されるとして、本検討においては、200～300MWをターゲットとして、今後必要となる事項、例えば、大型環状炉心の解析技術、燃料・材料規格、安全基準、大型機器の製作性・成立性、熱利用施設の接続技術等を検討する。

炉型	HTTR	実証炉
出力	30MWt	200～300MWt
スケールアップ率	—	約7～10倍（HTTR）
炉心	中実	環状
IHX成立性	ヘリカルコイル型	ヘリカルコイル型

導入に向けた技術ロードマップ° (高温ガス炉)

第4回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会
原子力小委員会 革新炉ワーキンググループ
2022年7月29日開催より引用



実証炉に向けた主な課題（高温ガス炉）

- HTTRの技術の延長上にある範囲で大型化を目指し、開発要素を少なくする
- 蒸気タービン、既存水素製造技術等を接続し、2030年代の運転開始が可能な実証炉を開発

技術分野	実証炉の課題
炉心	<ul style="list-style-type: none">● 炉心高度化<ul style="list-style-type: none">➢ 大型環状炉心解析技術開発
燃料	<ul style="list-style-type: none">● 実用高温ガス炉燃料設計基準● HTTR使用済燃料用いた前処理技術の確証● 使用済燃料再処理技術開発
安全防災	<ul style="list-style-type: none">● 実用高温ガス炉の安全基準策定
構造	<ul style="list-style-type: none">● 実用高温ガス炉黒鉛構造民間規格化● 材料データ取得
設計	<ul style="list-style-type: none">● 設備機器の開発・実証<ul style="list-style-type: none">➢ 大型機器の製作・成立性➢ 安全・燃料取扱・接続関連施設の性能及び製作性確証
熱利用	<ul style="list-style-type: none">● HTTR-熱利用試験<ul style="list-style-type: none">➢ 水素製造施設接続に係る安全設計・安全評価技術の確立➢ 高温ガス炉水素製造システム運転制御技術確立

開発課題と整備・項目（高温ガス炉）

整備状況

○：整備済み（利用可能） △：整備中
□：追加整備が必要（予算未定） ×：未整備（新規案件）

下線は機器等の整備が必要な項目

分野	実証炉の課題	開発・整備項目	整備状況	検討状況
炉心	<ul style="list-style-type: none"> 炉心高度化 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 大型環状炉心解析技術開発 	<ul style="list-style-type: none"> 環状炉心性能評価手法の妥当性確認、炉心・炉内構造成立性確認 	△	
燃料	<ul style="list-style-type: none"> 実用高温ガス炉燃料設計基準 HTTR使用済燃料用いた前処理技術の確証 使用済燃料再処理技術開発 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料設計基準策定 TRISO燃料製造再整備 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 民間燃料メーカーへの委託により実施 TRISO燃料再処理試験 <ul style="list-style-type: none"> ▶ HTTR使用済燃料を用いた再処理技術の確証 	△ × □	<ul style="list-style-type: none"> 技術実証済み、加工施設整備要、濃縮ウラン確保が課題、海外調達可 未照射燃料を用いた技術確証済、セル内機器の整備要
安全防災	<ul style="list-style-type: none"> 実用高温ガス炉の安全基準策定 	<ul style="list-style-type: none"> 規則内規策定、合理的な防災計画策定、安全評価コードシステムの整備及び検証 	△	
構造	<ul style="list-style-type: none"> 実用高温ガス炉黒鉛構造民間規格化 材料データ取得 	<ul style="list-style-type: none"> 黒鉛構造物規格策定及び鋼構造物規格策定 既存の照射場を用いた照射試験 	□	<ul style="list-style-type: none"> JRR-3、「常陽」、HFIR、ATR（以上米国）、HFR（オランダ）、JHR（フランス）等での照射試験において、照射キャプセル等の準備が必要
設計	<ul style="list-style-type: none"> 設備機器の開発・実証 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 大型機器の製作・成立性 ▶ 安全・燃料取扱・接続関連施設の性能及び製作性確証 	<ul style="list-style-type: none"> 大型化に向けた機器の性能及び製作性確証 機器の設計手法の検証 	△	
熱利用	<ul style="list-style-type: none"> HTTR-熱利用試験 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 水素製造施設接続に係る安全設計・安全評価技術の確立 ▶ 高温ガス炉水素製造システム運転制御技術確立 	<ul style="list-style-type: none"> 高温ガス炉と水素製造施設の接続技術確立 <ul style="list-style-type: none"> ▶ 水素製造施設接続に係る安全設計の確立 ▶ プラントシミュレータの開発及び設HTTR-熱利用試験施設による検証 	△	<ul style="list-style-type: none"> エネ庁の委託費により整備予定

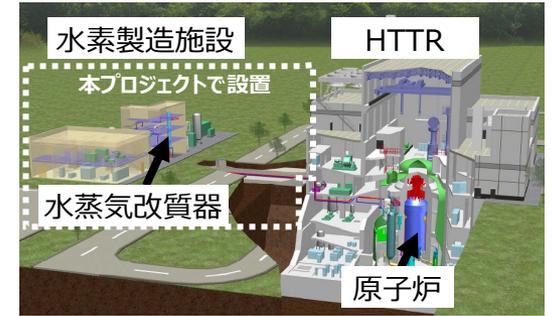
HTTR-熱利用試験 - 概要 -

【目的】

「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（令和3年6月閣議決定）」に示された、2030年までの大量かつ安価なカーボンフリー水素製造に必要な技術の開発に向け、脱炭素高温熱源（高温ガス炉）と水素製造施設の高い安全性を実現する接続技術を確立する

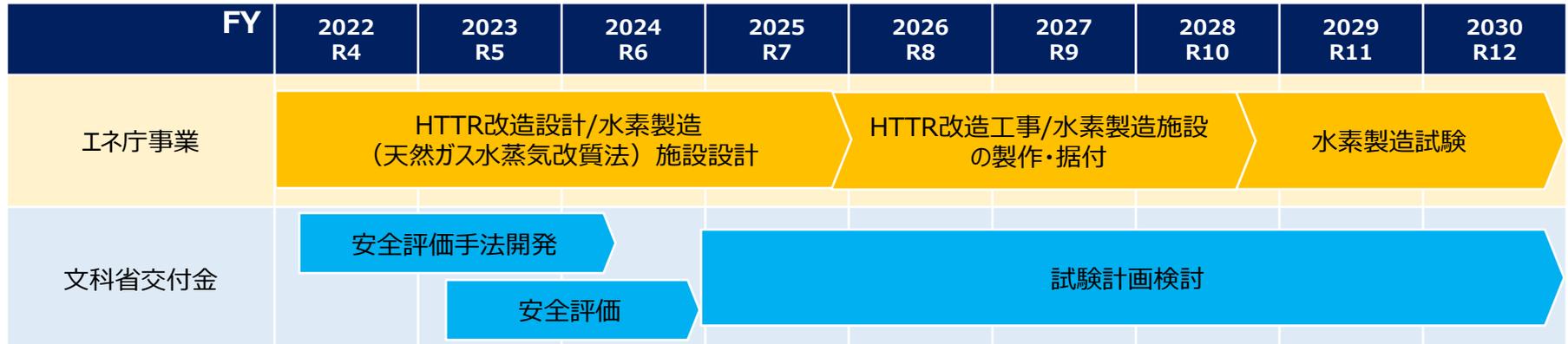
【内容】

- 高温熱源として、世界最高温度（950℃）を記録した高温ガス炉試験研究炉HTTRを活用
- 高温ガス炉と水素製造施設の接続に係る安全設計及び安全評価技術の確立（原子力規制委員会からの許認可取得）
- 商用技術が確立されている天然ガス水蒸気改質法による水素製造施設をHTTRに接続し、高温ガス炉と水素製造施設の接続技術を確立



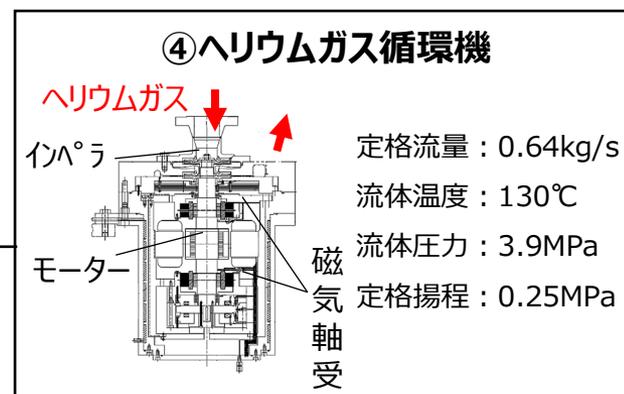
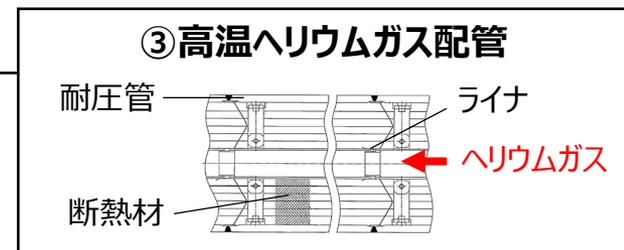
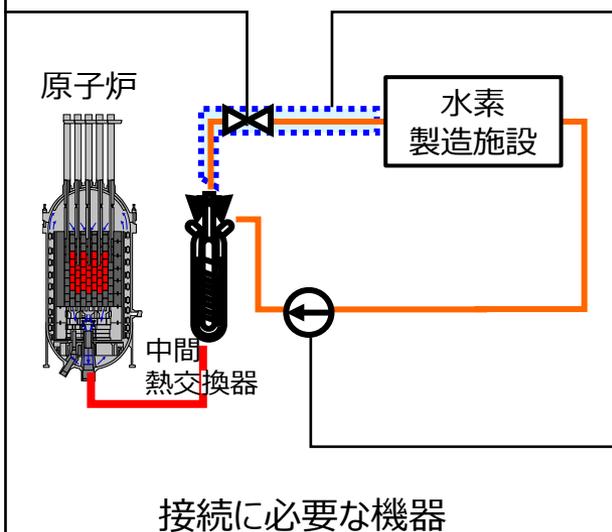
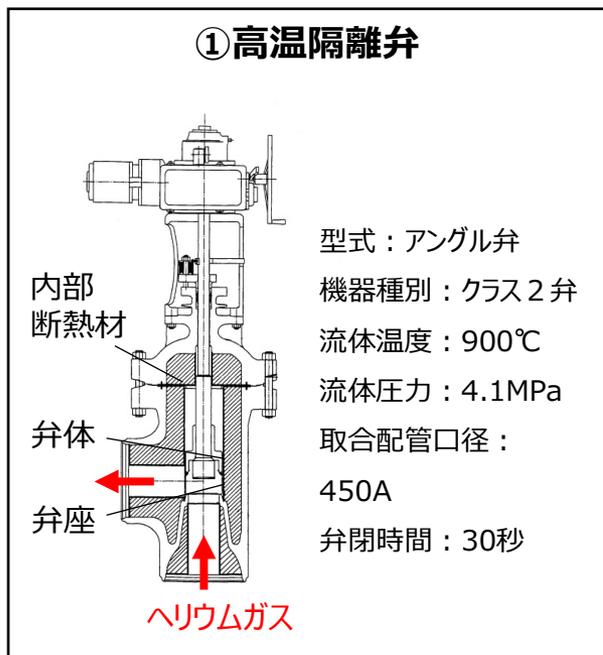
試験イメージ

- ## 【工程・将来計画】
- ◆ エネ庁事業：水素製造施設をHTTRと接続し、水素製造試験を実施
 - ◆ 文科省交付金：HTTR-熱利用試験に係る許認可取得及び試験計画の検討を実施



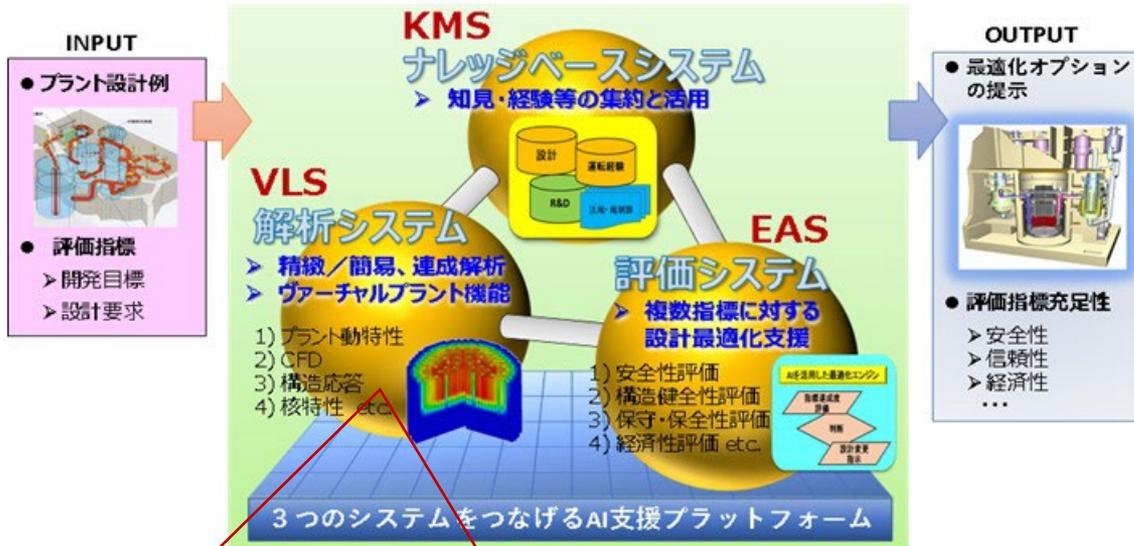
HTTR-熱利用試験 – 接続技術開発 –

接続技術	開発対象	機能	R&D内容
システム設計	<ul style="list-style-type: none"> プラントシミュレーター 	<ul style="list-style-type: none"> プラント制御特性評価 	<ul style="list-style-type: none"> 過渡試験データによる検証
安全評価	<ul style="list-style-type: none"> 可燃性ガス火災爆発影響評価手法 	<ul style="list-style-type: none"> 離隔距離評価 	<ul style="list-style-type: none"> 評価ガイドの確立
機器	<ul style="list-style-type: none"> ① 高温隔離弁 ② 高温ヘリウムガス配管 ③ ヘリウムガス循環機 	<ul style="list-style-type: none"> 水素製造施設異常時の隔離 (①) 高温ヘリウムガス供給 (②、③) 	<ul style="list-style-type: none"> 締切性能の確証 (①) 断熱性能確認 (②) 磁気軸受性能確証 (③)



参考資料

イノベーションを支える技術基盤整備－ARKADIA



統合評価手法の名称

「AI支援型革新炉ライフサイクル最適化手法
(ARKADIA : Advanced Reactor Knowledge- and AI-aided Design Integration Approach through the whole plant lifecycle) 」

- 安全性・経済性追求から廃止措置最適化までを可能とするプラント設計支援ツールとして、高速炉に関わるナレッジベースと解析技術を統合した手法 ([デジタルリプレット](#))

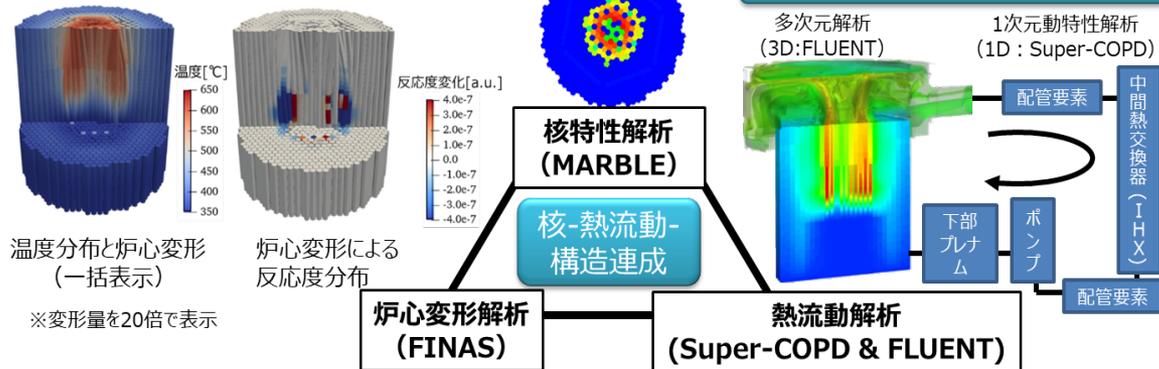
- 従来は困難であった様々な視点を取り入れた設計の最適化、設計に要する期間の短縮、実験代替等の開発費の低減化を実現し、今後の高速炉プラント設計のプロセスを変革するとともに、社会受容性の高いプラント概念構築・設計を可能とする

- 民間の新型炉技術開発活動を支援することで多様な炉概念に反映

- 安全審査に使用する解析コード群の整備
- 競争力のある3E+S適合プラント像の提示
- 開発期間短縮・コスト削減
- 技術散逸防止・伝承・発展、人材育成

VLSの例

炉心部連成解析 (イメージ)



KMS: Knowledge Management System
VLS: Virtual plant Life System (Virtual Plant)
EAS: Enhanced and AI-aided optimization System

TRL (Technology Readiness Level) の定義

技術開発の相対的なレベル	TRL	TRLの定義
システムの運転段階	TRL 9	想定される全ての条件で運転された実システム
システムの試運転段階	TRL 8	試験と実証を通じて完成し性能確認された実システム
	TRL 7	フルスケールで、同様な（原型的な）システムを、現実的な環境において実証しているレベル
技術の実証段階	TRL 6	工学規模で、同様な（原型的な）システムを、現実的な環境において検証しているレベル
技術の開発段階	TRL 5	実験室規模で、同様なシステムを、現実的な環境において検証しているレベル
	TRL 4	実験室環境で、機器・サブシステムを検証しているレベル
実現可能性を示すための研究段階	TRL 3	解析や実験によって、概念の重要な機能・特性を証明しているレベル
	TRL 2	技術概念・その適用性を確認しているレベル
基礎技術の研究段階	TRL 1	基本原理を確認しているレベル

ナトリウム冷却高速炉の研究開発課題（TRLの向上を目指して）

安全性向上技術	TRL
自然循環崩壊熱除去評価技術	7
再臨界回避評価技術	6
コアキャッチャ評価技術	6
放射性物質移行挙動評価技術 (ARKADIA)	4(*)
安全評価手法・確率論的評価手法 (ARKADIA)	7(*)

炉心燃料の技術	TRL
高燃焼度燃料照射	6
長寿命制御棒照射	7(*)
MA含有燃料照射	5
ODS鋼被覆管	5
新集合体・新材料燃料設計手法開発	4
内部ダクト集合体製造加工技術	4
核設計手法高度化 (ARKADIA)	6
熱設計手法高度化 (ARKADIA)	6
燃料設計手法高度化 (ARKADIA)	6
遮へい評価手法高度化 (ARKADIA)	6

原子炉構造／冷却系の技術	TRL
材料強度基準高度化 (316FR) (ARKADIA)	7
設計手法高度化 (ARKADIA)	7
原子炉容器内流動適正化	5
材料強度基準高度化 (改良9Cr) (ARKADIA)	7
設計手法高度化 (ARKADIA)	7

冷却材特有の技術	TRL
ナトリウム燃焼評価 (ARKADIA)	6(*)
SG微小リーク検知試験	4
機構論的ナトリウム水反応評価 (ARKADIA)	5
ナトリウム中目視検査装置	5

イノベーションに係る技術	TRL
AI設計支援手法開発(ARKADIA)	2(*)
ナノ流体によるNa-水反応安全性向上	2(*)
調整電源機能のための蓄熱システム	2(*)
SMRのための浮体式免震	3(*)
3Dプリント技術による燃料製造プロセス	2(*)

- 常陽、もんじゅ以降、国際協力も含めて獲得・蓄積した技術を2018年に専門家レビューいただいた結果である。

(*) 技術検討以降に追加されTRLを独自評価