



第16回 原子力機構報告会

未来へげんき
To the Future / JAEA

カーボンニュートラルに向けた 原子力イノベーションの取組

令和3年11月18日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

理事 大島 宏之



目次

- 日本のエネルギーの現状
- カーボンニュートラルに関わる日本の原子力政策
- 原子力イノベーションへの要請
- 原子力イノベーションの創出に向けた日本の取組み

- 高温ガス炉の特徴
- 高温ガス炉システムの多様な利用性・機動性
- 高温工学試験研究炉（HTTR）を用いた試験計画
- 熱化学水素製造法（ISプロセス）による水素製造

- 高速炉サイクルの特徴
- 高速炉開発の流れとその選択肢
- 原子力機構における高速炉の研究開発概要
 - 安全性向上技術の開発
 - イノベーションを支える技術基盤整備-ARKADIA
- 高速炉開発を通じた非エネルギー分野への貢献

- まとめ

補足資料

日本のエネルギーの現状

□ 日本の現状

- エネルギー自給率*1：12.1%
- 電源構成*2：火力75.7%
 変動ゼロエミ（太陽光、風力）7.5%
 安定ゼロエミ（安定再エネ、原子力）16.8%
- CO₂排出が非常に多い（CO₂排出係数[gCO₂/kWh]がフランスの8倍!!）
- ✓ 欧州では他国とのエネルギー連結が密、日本は島国で孤立（下表）

	日	仏	中	印	独	英	米
エネルギー-自給率	12%*1	55%*3	84%	65%	37%*3	70%*3	98%*3
主な国産資源	無し	原子力	石炭	石炭	石炭	石油 天然ガス	天然ガス 石油・石炭
太陽光 設備利用率	15%	14%	16%	18%	11%	11%	19%
風力 設備利用率	25%	29%	25%	23%	30%	31%	37%
国際パイプライン	×	○	○	×	○	○	○
国際送電線	×	○	○	○	○	○	○

*1 資源エネルギー庁 令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）

*2 資源エネルギー庁ホームページ 集計結果又は推計結果（総合エネルギー統計）https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline7

*3 資源エネルギー庁 日本のエネルギー2020 エネルギーの今を知る10の質問

グリーン成長戦略（原子力イノベーションに関連する記載）※

- 原子力は大量かつ安定的にカーボンフリーの電力を供給可能。技術自給率も高い
- 更なるイノベーションにより、安全性・信頼性・効率性の一層の向上、放射性廃棄物の有害度低減・減容化、資源の有効利用による資源循環性の向上を達成
- 再生可能エネルギーとの共存、水素製造や熱利用といった多様な社会的要請に応えることも可能

※ 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18日策定）を参照

第6次エネルギー基本計画（原子力・新型炉に関連する記載）

【2050年カーボンニュートラル実現に向けて】

- 電力部門は、再エネや原子力などの実用段階にある脱炭素電源を活用
- 原子力は、安全性の確保を大前提に、必要な規模を持続的に活用

【2030年に向けて（原子力）】

- 研究開発の推進

国際連携を活用した高速炉開発の着実な推進、小型モジュール炉技術の国際連携による実証、高温ガス炉における水素製造に係る要素技術確立等を推進

原子力イノベーションへの要請

一層の安全性向上を前提に、

- ✓ 安定供給（大規模安定 + 革新的安全性・サプライチェーン + 技術自給）
- ✓ 資源循環性（廃棄物問題解決への貢献 + 資源有効利用）
- ✓ 柔軟性（負荷追従 + 水素・熱利用 + 立地の柔軟性）

安定供給

- 原子力は安定供給に貢献する脱炭素電源
- 革新的安全性向上により、地域・国民の信頼獲得・安定供給へ
- 製造・調達等のプロセスイノベーションを通じ、原子力サプライチェーンを維持・強化。技術自給にも貢献

資源循環性

- 原子力は脱炭素エネルギー源であるが、高レベル放射性廃棄物が発生
- 技術革新により原子力も循環型エネルギーへ
- 資源の有限性にも解決策を

柔軟性

- 安価な再エネを最大限活用する負荷追従
- 発電しない時には水素製造、熱の形で利用・貯蔵（実質的な負荷追従）
- 炉型革新により、EPZ縮小・立地の柔軟性

一層の安全性向上

- 東電福島第一原子力発電所事故を踏まえた一層の安全性向上技術開発と導入促進

原子カインノベーションの創出に向けた日本の取組み

NEXIP : Nuclear Energy × Innovation Promotion

技術開発支援、研究開発基盤の供用、人材育成・産業基盤強化を通じて原子カインノベーションを創出



革新的な原子力技術開発

■ 高速炉

- ・戦略ロードマップ (H30.12) に基づき、多様な高速炉技術の競争を促進。



高速炉

■ 革新炉

- ・社会課題に対応する革新的な原子力技術開発を支援。



小型軽水炉



高温ガス炉

研究機関の連携・民間活用の促進

- 日本原子力研究開発機構 (JAEA) を通じ、民間の取組を活性化
 - ・データ、知財等の知見の共有・提供
 - ・試験研究施設の供用 等



常陽：高速実験炉

国際協力・企業連携

フランス



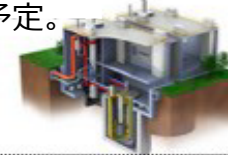
- ・ナトリウム冷却高速炉の開発
- ・その他の多様な概念の検討
- ・シミュレーションや実験等のR&D

米国



- ・2020年に新型炉実証プログラム (ARDP) を開始。TerraPower社のナトリウム冷却高速炉、X-energy社の高温ガス炉の開発・建設を支援。

- ・国内技術維持のため、新たに高速炉の多目的試験研究炉 (VTR) を建設予定。

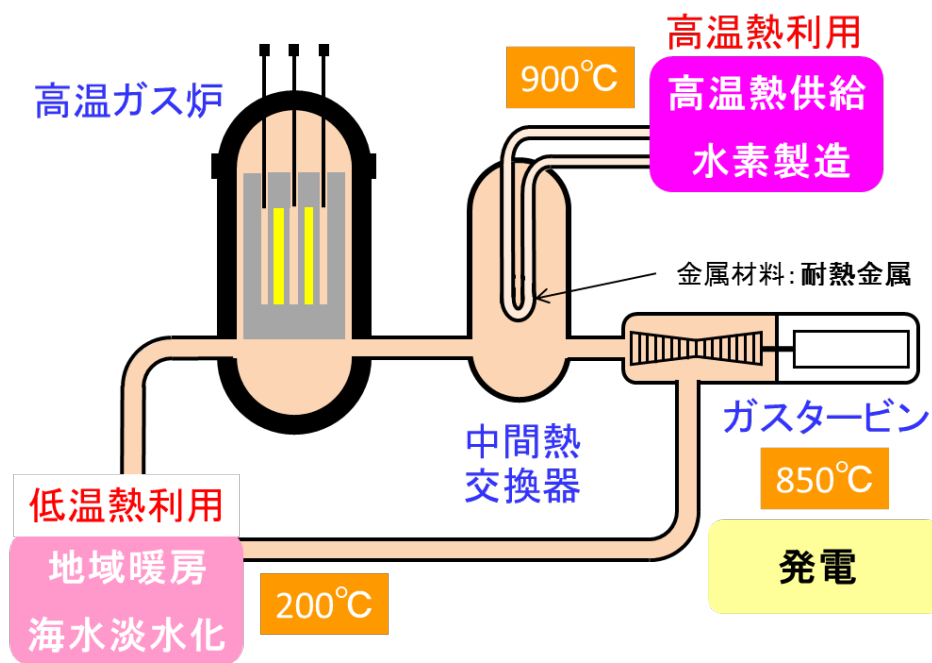


日本原子力学会秋の大会・安全部会企画セッション「SMR等革新炉の安全と安全規制について」、"原子カインノベーションの追求"、2020年9月18日 経済産業省資源エネルギー庁 舟木 健太郎、Page 4、を参照し作成

高温ガス炉の特徴

多様な熱利用が可能

- 発電のみならず、900°C程度の高温熱を供給可能
 - 水素製造、海水淡水化等の幅広い熱の産業利用が可能

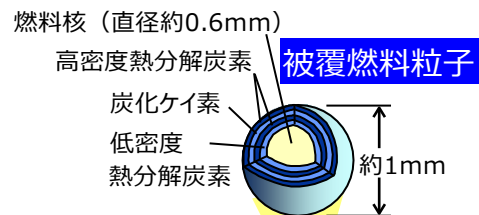


優れた安全性

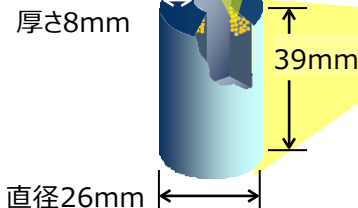
- 化学的に安定なヘリウムで炉心を冷却
 - 水素が発生せず、水素爆発なし
- 炉心に耐熱性の高いセラミックス被覆燃料及び黒鉛構造材を使用
 - 炉心溶融の恐れなし
 - 事故時でも急激に温度上昇せず、一定温度以下で安定

セラミックス被覆燃料

1600°Cでも放射性物質を閉じ込める



燃料コンパクト

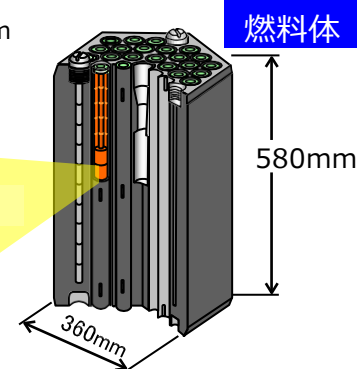


ヘリウム冷却材

高温でも安定 (温度制限なし)

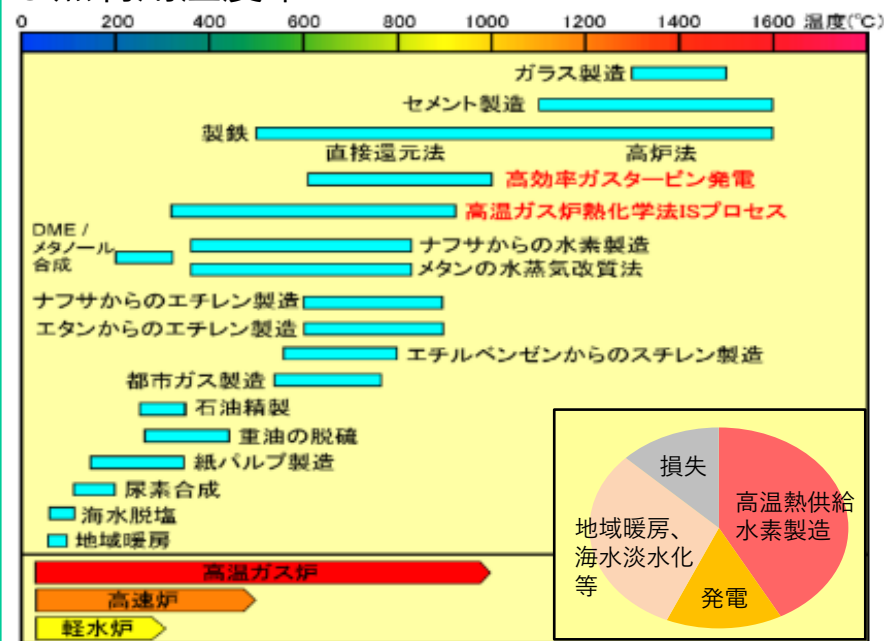
黒鉛構造材

耐熱温度2500°C



高温ガス炉システムの多様な利用性・機動性

○熱利用温度帯



コージェネシステム（水素、発電、淡水化等）



水素、淡水化

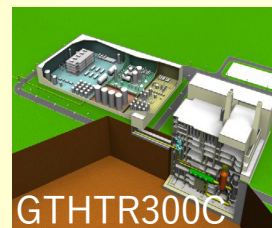
電力



高温ガス炉水素タウン

- 水素製造、発電、海水淡水化のコージェネレーションシステム
- 80%近い熱利用率

水素製造システム



GTHTR300C

水素



燃料電池自動車



製鉄

- 熱化学法（ISプロセス）やメタンの水蒸気改質法による水素製造

工業利用として高温の熱供給／熱電供給



HTR50S

プロセス熱

電力



化学プラント

- 蒸気によるプロセス熱供給（化学プラント、石油精製プラント、等）
- 蒸気タービン発電による電力供給

再生可能エネルギーとのハイブリッドシステム



GTHTR300C



発電量調整

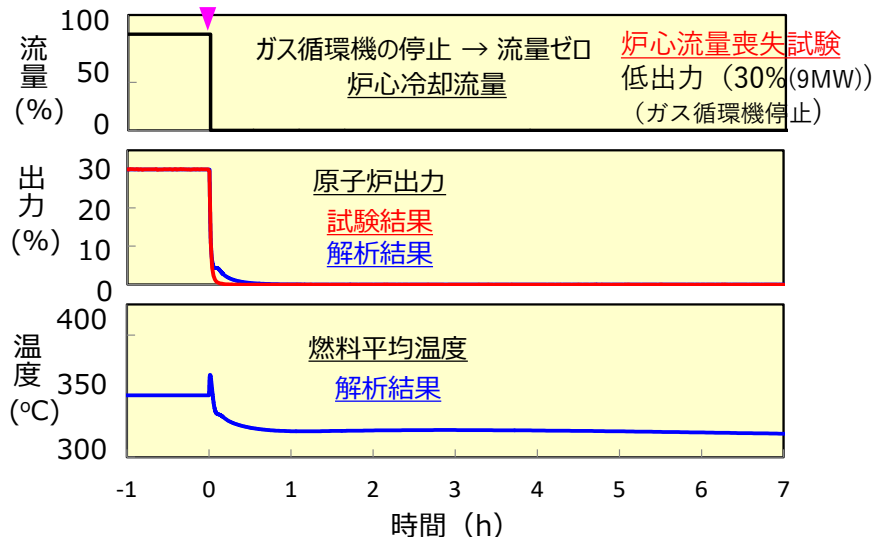
水素製造

- 再生可能エネルギーの変動を発電量調整または水素製造により吸収（高発電効率維持）

高温工学試験研究炉(HTR)を用いた試験計画

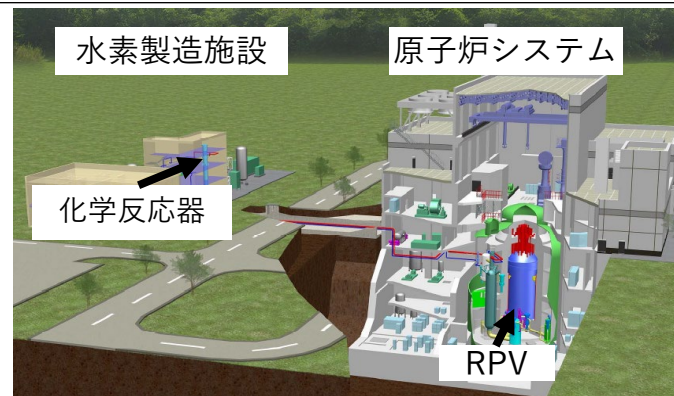
安全性実証試験

✓ 炉心冷却喪失試験 (OECD/NEAプロジェクト) を含む安全性実証試験、熱負荷変動試験などを実施



自己制御性に優れた固有の安全性を実証

HTR-熱利用試験



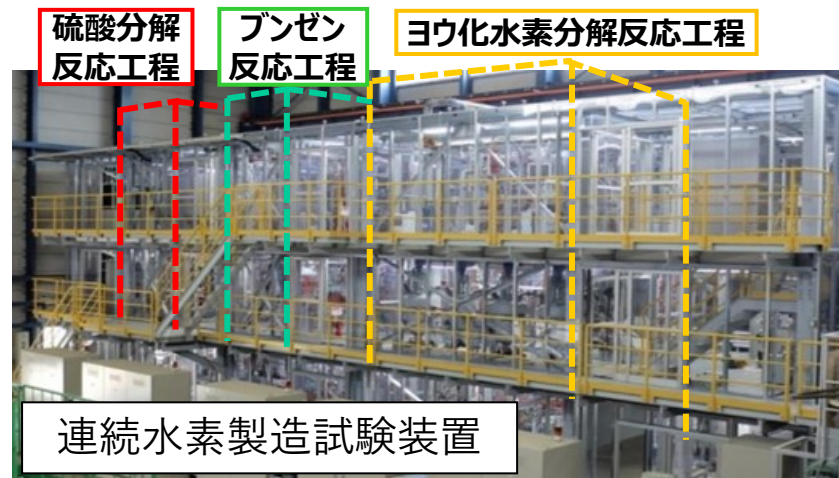
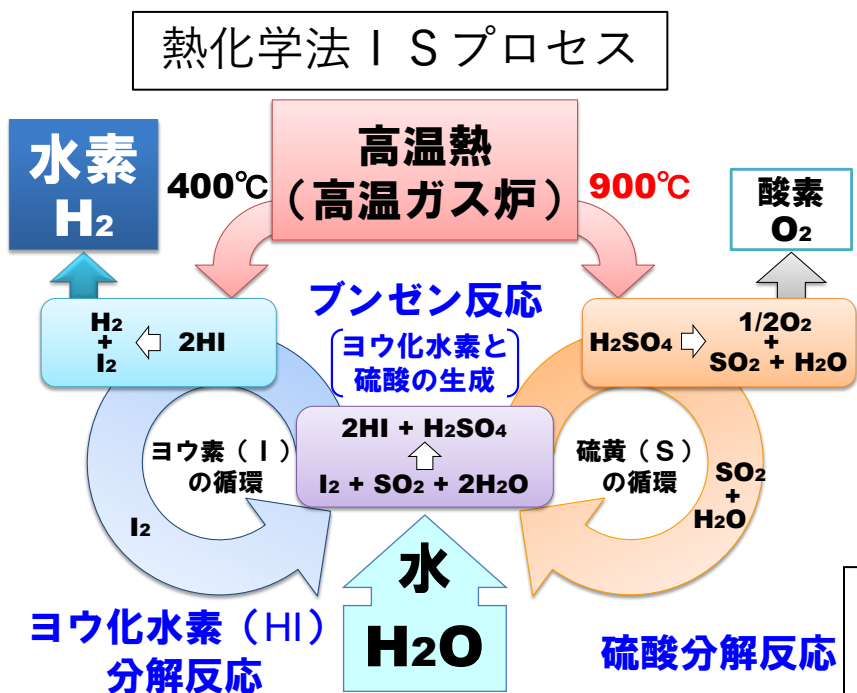
- ✓ 化学プラントを一般産業法規の下で製作し、原子炉への接続を可能とすることにより、原子力熱利用の利便性・用途拡大
 - ✓ 2030年までにHTRと水素製造施設 (メタンの水蒸気改質法) の接続技術を開発
 - ✓ 並行して熱化学水素製造法等のカーボンフリー水素製造技術を検討
 - ✓ 将来、カーボンフリー水素製造設備とHTRを接続、接続技術を実証
- 高温ガス炉と水素製造施設の接続に係る安全設計を確立

	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
HTR	▼ 設置変更許可取得	▼ 運転再開	■ ■	■ ■	■ ■					
	安全性実証試験、熱負荷変動試験		各種試験、熱負荷変動試験	各種試験						
HTR-熱利用試験			HTRを活用した「固有の安全性」確認のための試験			カーボンフリー水素製造に必要な技術開発				
			世界最高温の950°Cを出力可能なHTRを活用した国際連携の推進							
			高温熱を利用したカーボンフリー水素製造技術の開発 (IS法、メタン熱分解法)							

高温ガス炉の安全性を確証し、高温ガス炉による水素製造技術を確立

熱化学水素製造法(ISプロセス)による水素製造

- 水の熱分解：4000°C以上の高温熱が必要
- ISプロセス：ヨウ素 (I) と硫黄 (S) を利用して 約900°Cの熱で水を熱分解
 ヨウ素と硫黄はプロセス内で循環 ⇒ 有害物質の排出なし
 高温ガス炉との組み合わせ ⇒ 炭酸ガスの排出なし



- ・ 2014年3月完成、
- ・ 水素製造量：～100L/h-H₂
- ・ W 18.5 × D 5 × H 8.1 (m) ・ 加熱方式：電気ヒーター

今後の技術課題

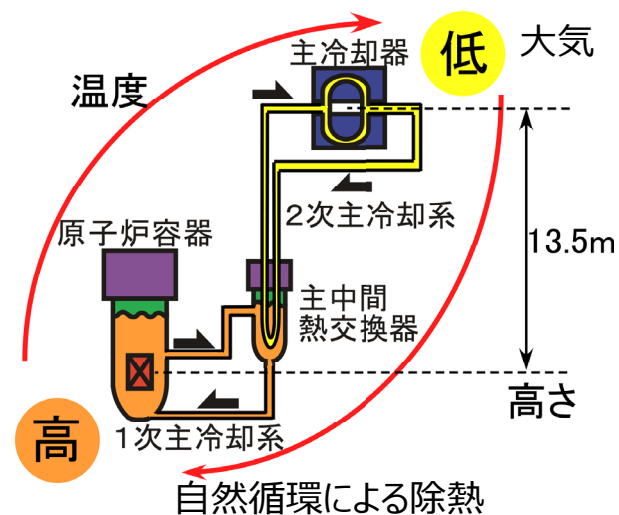
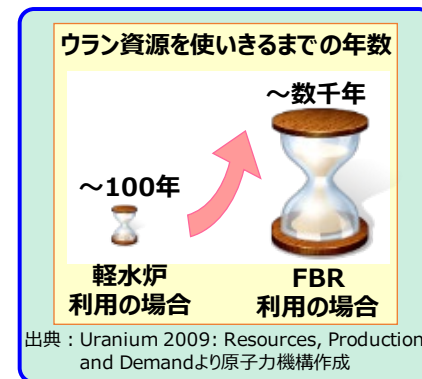
- 陽イオン交換膜開発等の熱効率向上技術
- セラミックスを用いた反応器高圧化技術
- 経済性向上に資する要素技術開発

- 世界で初めて、実用工業材料で製作した試験装置による150時間連続運転(水素製造30L/h)を達成、運転手順有効性を確認(2018年度)。
- この運転で用いた起動・停止手順が、HTTRとの接続を想定した運転手順に適用できること、運転後の耐食性機器材料に有害な腐食がないことを確認(2019年度)。
- 92L/h水素製造を達成。運転中の組成制御のため、多成分溶液の物性データを水素製造試験により取得し、これを用いた溶液組成計算法を提示して妥当性を検証。(2020年度)

高速炉サイクルの特徴

< 特長 >

- 軽水炉に比べ数十倍以上のウラン資源の有効利用が可能
- 燃料のリサイクル（ウラン資源輸入不要）と技術自給（国産）により、海外情勢に左右されない安定エネルギーを確保
⇒ 有限資源の有効利用 エネルギーセキュリティの強化
- 運転時にCO₂を排出しない
- マイナーアクチノイド（MA）を核燃料としてリサイクルすることにより、放射性廃棄物の量を減らし、放射能が減衰するまでの期間を大幅に短縮（10万年⇒300年）することが可能
- エネルギー事情に応じ、プルトニウムの生成／燃焼が可能
⇒ 環境への負荷を低減
- ベースロード電源としての利用に加え、蓄熱技術との組み合わせにより電気出力を調整可能し、太陽光や風力等、出力変動再エネを補完
⇒ CO₂ 排出せずに変動再エネと共存
- 高い自然循環能力を有し、空気との熱交換が可能なことから、電源が喪失しても長期に安定した崩壊熱除去が可能（高速実験炉「常陽」で実証済み）
⇒ 高い安全性

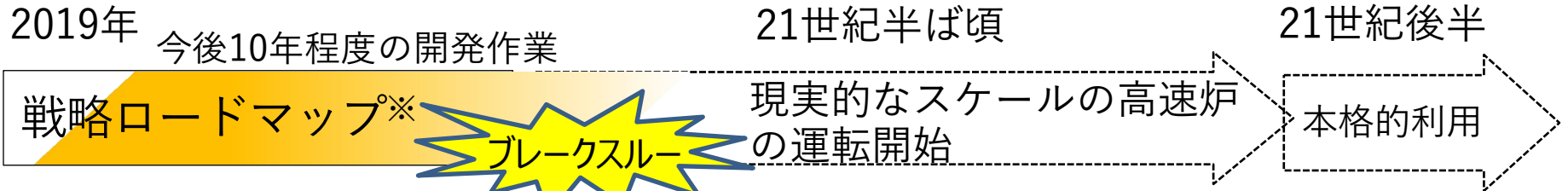


グリーン成長戦略で求められるイノベーションの実現

< 課題 >

- さらなる安全性向上の追求と高い経済性の同時達成

高速炉開発の流れとその選択肢



技術イノベーション

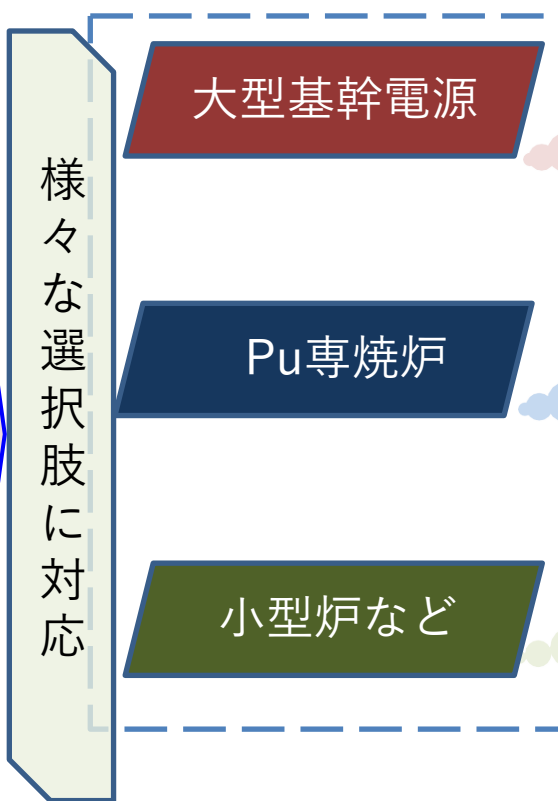
社会のニーズ 選択肢

民間、大学



原子力機構

- 炉心安全
- ✓ 炉心溶融排除
- ✓ 受動的炉停止
- ✓ 容器内事故収束
- 燃料サイクル
- ✓ Puの柔軟な利用
- 経済性・環境
- ✓ 開発コスト削減
- ✓ AIの活用
- ✓ 建設等コスト削減
- ✓ 変動再エネとの協調
- 保全
- ✓ 信頼性設計
- ✓ IoTの活用



Uの有効活用による長期安定なベースロード電源
(エネルギーセキュリティ)
MAの燃焼、閉じ込め

LWRサイクル長期利用
Puバランスの確保
廃棄物減容 (TRU)

SMARTグリッド
再生可能エネルギー
との連携 (電源網の
信頼性アップ)

※ 2018年12月原子力関係閣僚会議決定

原子力機構における高速炉の研究開発概要

【高速炉開発の戦略ロードマップ】

- 民間が取組む多様な技術開発に対応するニーズ対応型の研究基盤の維持・発展
- ナトリウム冷却高速炉の開発を通じて蓄積している研究開発知見と試験研究インフラを“研究開発基盤”として発展

統合評価手法 (ARKADIA) の開発

常陽

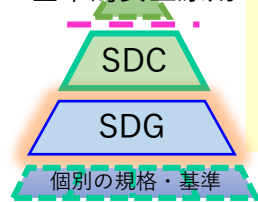
もんじゅ



- 「常陽」「もんじゅ」それ以降の設計検討等の知見を整備するとともに知識ベース化
- 多様な冷却材・システムの評価に対応するため、物理現象に基づく評価手法（マルチフィジックス評価）を開発

規格基準の整備

基本的な安全原則



SDC/SDGの位置づけ

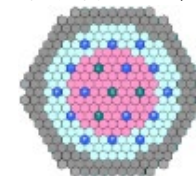
- 安全性、経済性を高いレベルで両立させ、かつ多様な高速炉概念に適用可能な規格・基準類の整備

安全性向上技術の開発

- 再臨界事故防止、炉心溶融事故防止など炉心燃料設計を含む炉心安全
- 冷却材の化学反応等の特有事故の抑止

国際協力

スーパーフェニックス (仏) 金属燃料炉心 (米)



- フェニックス、スーパーフェニックス等のナトリウム冷却炉の運転経験が豊富な仏との協力
- 金属燃料、解析コード開発等の開発が先行する米国との連携
- 実用化に向けた基盤技術の確立

民間による研究開発をサポート

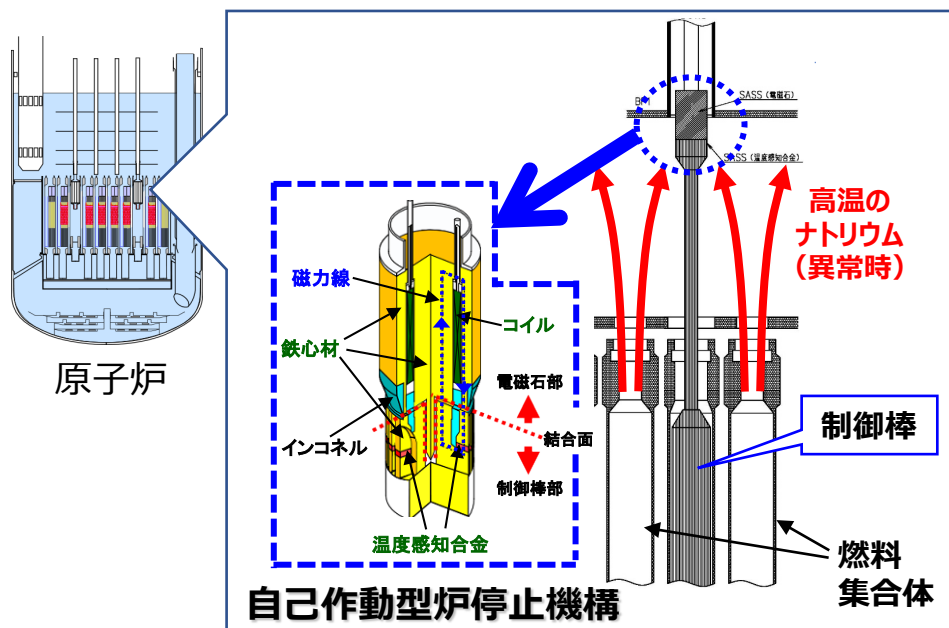
産業界や関係省庁との連携を強化し、2024年以降に採用する可能性のある技術の絞り込みに対応、21世紀半ばの適切なタイミングでの高速炉導入に向けた研究開発を推進

安全性向上技術の開発

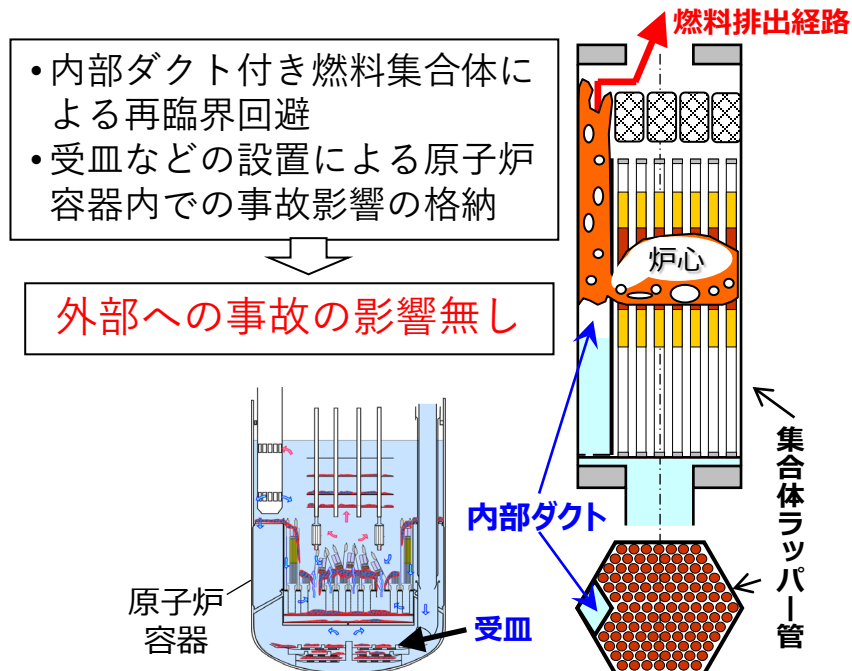
■ 炉心損傷事故対策の強化例

- 高速炉は一般に炉心の物質配置が最大反応度体系でないため、炉心損傷事故が発生し、炉心の物質配置が変化すると、正の反応度が入り、出力上昇が起こる可能性がある。

- 炉心損傷事故の発生を防止し、また万が一炉心損傷に至っても再臨界を防止（事故影響を緩和）
 - 異常の発生時に炉心が損傷しないよう、高温で受動的に負の反応度を投入する仕組み（温度感知合金のキュリー点温度での磁性変化を利用して受動的に（自然に）制御棒を挿入）
 - 万一炉心が溶融したとしても、溶融燃料を早期に炉心から排出できる炉心構成。溶融燃料が自然に出ていくことで未臨界を達成・維持する仕組み（燃料排出用の内部ダクトを燃料集合体に設置）

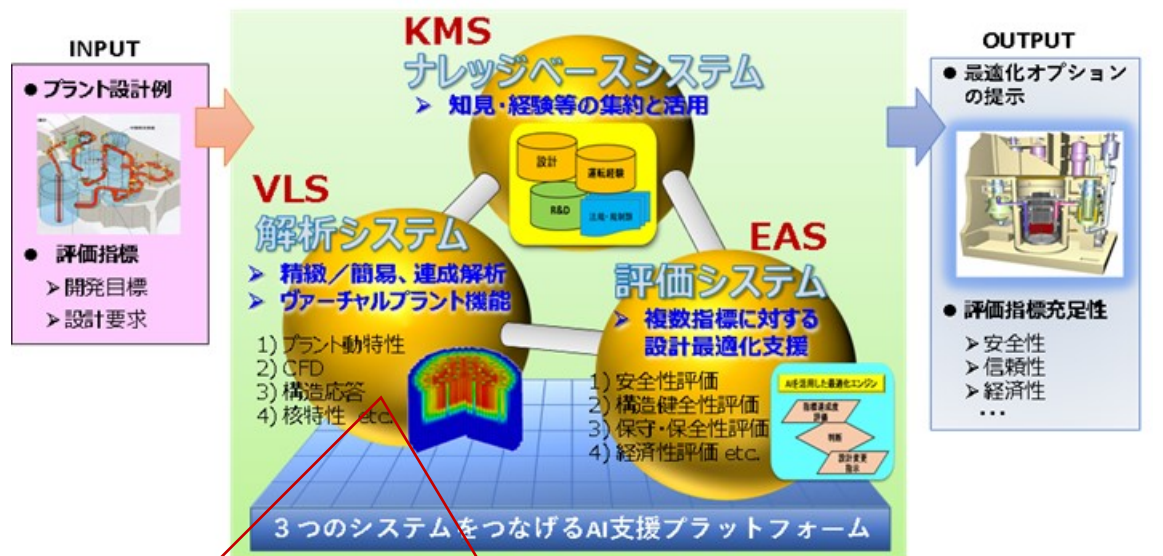


- ・「常陽」に設置し、通常運転時の安定性と運転性を確認
- ・ナトリウム中試験によって事故時の有効性を確認



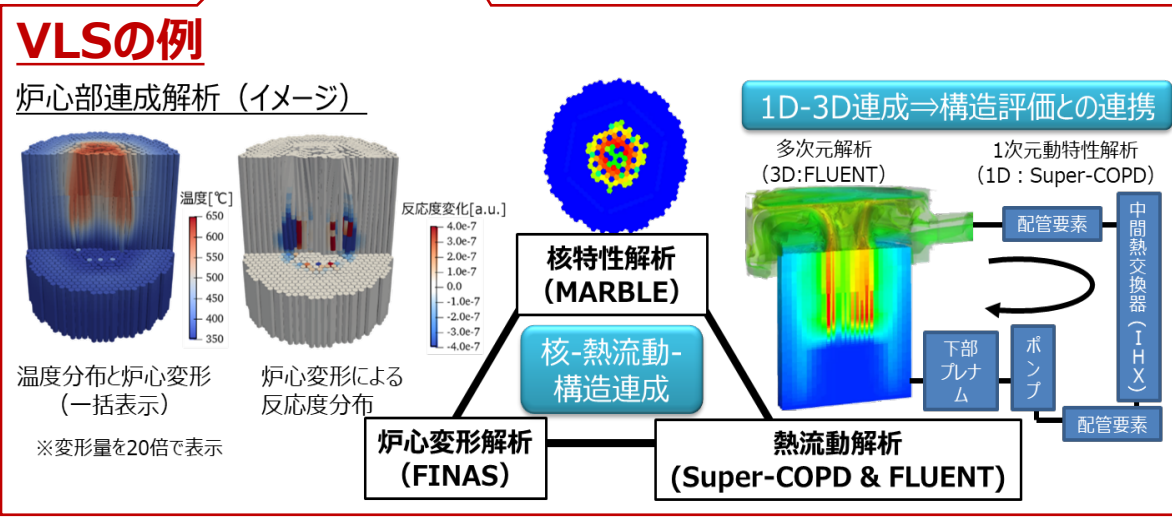
- ・カザフスタンの安全試験炉で排出挙動を確認

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 (デジタルトリプレット)
- 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



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

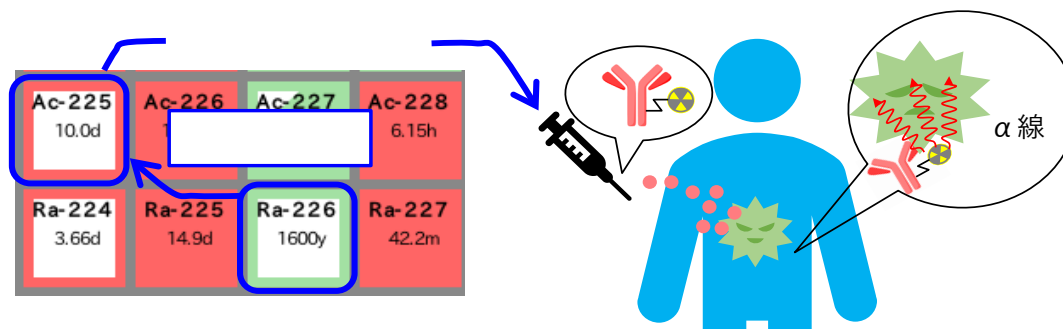
- 競争力のある3E+S適合プラント像の提示
- 開発期間短縮・コスト削減
- 技術散逸防止・伝承・発展、人材育成

高速炉開発を通じた非エネルギー分野への貢献

医療用・工業用RI製造 – 国内供給確立への貢献 –

- 幅広いエネルギー特性、高中性子束・大容量の中性子照射場の提供
 - ✓ 中性子捕獲反応（中低速～熱中性子）
 - ✓ (n,2n) 反応（高速中性子）
 - ✓ 加速器に比べ、高中性子束・大容量で大量製造が可能
- ほぼ100%輸入 → 工業用・医療用RIの国内製造（市場適合性等を踏まえて具体化）
 - ✓ 工業用：Co-60：液面計、レベル計、品種改良、発芽防止 Ir-192：非破壊検査
Ni-63：環境分析：ガスクロマトグラフィー Fe-55：校正線源 等
 - ✓ 医療用：Co-60：滅菌、がん治療（ガンマナイフ） Ir-192：がん治療（小線源療法）
Au-198：がん治療（小線源療法） Ac-225：がん治療（内用療法） 等

RIの国内供給体制の確立に 研究用原子炉JRR-3 と連携して貢献



■ 2050年カーボンニュートラルに向けた原子力、新型炉の役割

- カーボンフリーエネルギーの安定供給を実現するためには、変動再エネの導入を支えることができる機動性のある脱炭素電源が必要。高い安全性と経済性を有する高温ガス炉や高速炉をはじめとする革新的な原子力システムはその有力な選択肢
- 高温ガス炉によるカーボンフリーな水素製造や熱利用は、製造部門や運輸部門等における温室効果ガス排出量削減など、多様な社会的要請に応えることが可能
- 原子力による長期持続可能エネルギーシステムの社会実装には、資源有効利用、放射性廃棄物の有害度低減・減容化を可能とする高速炉サイクル（クローズドサイクル）システムの開発が必要

■ 原子力機構におけるカーボンニュートラルに向けた原子力イノベーション

カーボンニュートラルに向けた原子力イノベーションに貢献する革新的な原子力システムとして、高温ガス炉及び高速炉サイクルの開発を推進：

- 高温ガス炉開発は、HTTR設計・建設・運転を通して蓄積した高度な技術力、新規規制基準対応審査の経験、ガスタービン及び水素製造技術など我が国が有する高度な高温ガス炉技術を利用して早期の実用化を実現する。さらに、厳しい国際競争に打ち勝ち、技術の国際展開を目指す。
- 高速炉サイクル開発は、「常陽」及び「もんじゅ」の建設・運転等を通じて蓄積した世界レベルの炉技術、燃料技術をもって、安全性を格段に向上させた革新的な高速炉概念の構築と技術基盤の発展を推進するとともに、それらを民間に示し、高速炉開発を加速する。さらに、放射性廃棄物の有害度低減・減容化等に向けた取り組みを推進し、クローズドサイクルの実現を図る。



高速炉・新型炉研究開発部門ホームページ

<https://www.jaea.go.jp/04/sefard/>

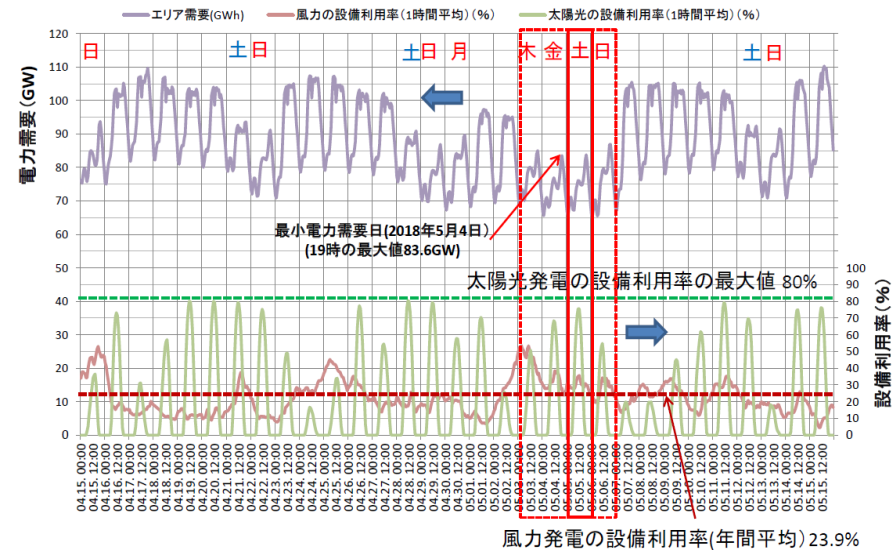


補足資料

最適な電源比率の試算例(1/2)

- NPOニュークリアサロンでは、変動再エネが増加した場合の電力安定需給の状況について、過去の実測データ(右図)を用いて試算※1~3。
- 試算の想定 (2050年度における適切な電源構成を検討するため)
 - 2050年度の気象条件と電力需要は2018年度と同一と仮定 → 2050年度の変動再エネの設備容量での発電出力の経時変化を計算
 - 2050年度の年間総発電需要は、2017年度と同等 (1100TWh) と仮定
 - 2050年度の電源構成を複数ケース仮定し、電力需給状況がどのようになるかを試算

電力需要と太陽光発電・風力発電の設備利用率(1時間平均)の履歴
(2018年4月15日~5月15日)



- 安定再エネ (水力等) の年間総発電量は、15%と想定 (日本国土条件の上限)
- 変動再エネ (太陽光+風力) の年間総発電量は、20%、40%、85%の3ケースを想定
- 太陽光と風力の発電量比率は、4:1 (2030年の政府目標) と1:1の2ケースを想定
- 安定電源 (原子力and/or CCUS火力) は、[総発電量 - (安定+変動再エネ)] と仮定

※1: NPOニュークリア・サロン、「日本における変動型再生可能エネルギーと原子力エネルギーの共生」、2019年9月3日 (http://www.ns-fuji-ie.jp/NPO_Nuclear_Salon/documents/2019_09_03_nuclear_energy_and_renewable_energy.pdf)

※2: 佐藤、他「日本における再生可能エネルギーと原子力の共生(その2)」2019年11月27日 (http://www.ns-fuji-ie.jp/npo_index.html)

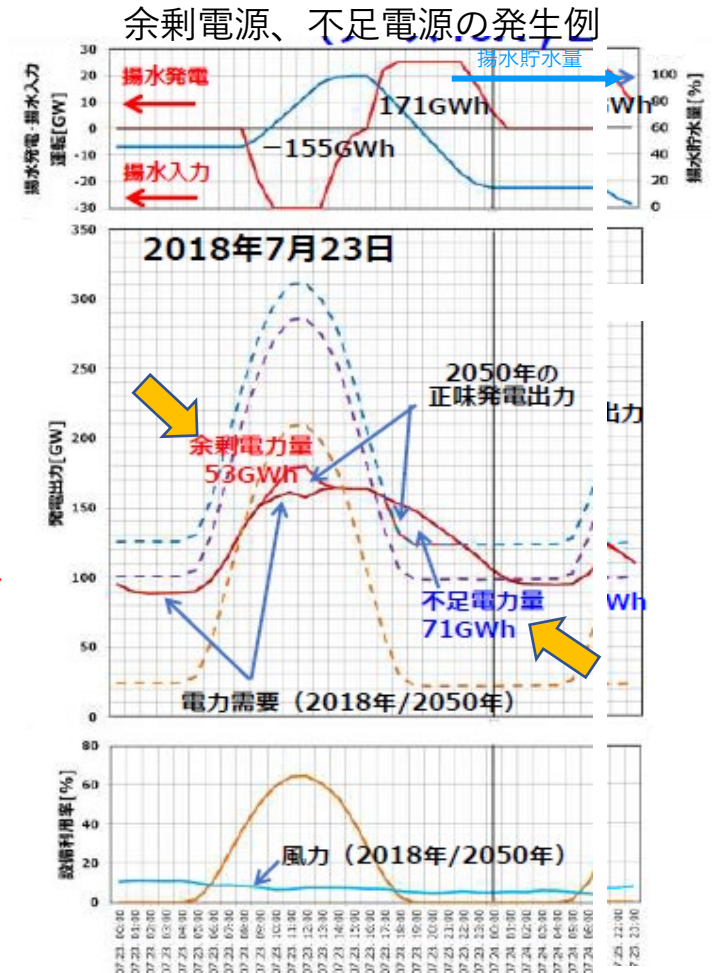
※3: 小竹、他「変動性再生可能エネルギーの変動性と安定電源の役割」2020年10月6日、機械学会動力エネルギーシステム部門企画講習会

最適な電源比率の試算例(2/2)

- 変動再エネ(VRE)の発電量は40%程度が安定供給の限界であり、原子力等の安定電源も必要

○ 以下のような結果が示されている※1~3。

- 太陽光と風力の比率は、4:1より1:1の方が安定電源等による調整が容易。
- VRE比率85%(安定再エネ+VREで100%となるケース)では、変動を調整できる電源が15%の安定再エネ(揚水を含む)だけとなり、余剰電力及び不足電力がほぼ毎日発生し、大容量蓄電池で対応できる規模を大きく逸脱し、電力安定供給を実現することは困難。
- VRE比率40%では、安定再エネと安定電源の負荷追従性(揚水を含む)で調整できない日が多く発生するが、70GWh規模の蓄電容量があれば、昼間の余剰電力で不足電力の発生は解決できる。揚水発電の拡大と大容量蓄電池の導入が必要。
- VRE比率20%では、特に太陽光と風力の比率を1:1とすれば、安定再エネ(揚水を含む)の起動停止と、安定電源の負荷追従性で、VREの変動性を十分調整でき、余剰/不足電源がほとんど発生しない。



※1: NPOニュークリア・サロン、「日本における変動型再生可能エネルギーと原子力エネルギーの共生」、2019年9月3日 (http://www.ns-ns-fuji-ie.jp/NPO_Nuclear_Salon/documents/2019_09_03_nuclear_energy_and_renewable_energy.pdf)

※2: 佐藤、他「日本における再生可能エネルギーと原子力の共生(その2)」2019年11月27日 (http://www.ns-fuji-ie.jp/npo_index.html)

※3: 小竹、他「変動性再生可能エネルギーの変動性と安定電源の役割」2020年10月6日、機械学会動力エネルギーシステム部門企画講習会

世界の高温ガス炉開発状況

英国：AMR計画
 U-Battery (英国U-Battery社、10MWt、商用炉、設計段階、BEIS AMRプログラム フェーズ1完了、フェーズ2 (10M£) 開始)
 英国政府 10ポイント計画及びエネルギー白書 (2030年代初頭のSMR/AMR導入計画)
 BEIS AMR研究開発・実証プログラム (2030年代初頭のAMR実証計画)

ポーランド：HTGR計画
 EUHTER (実験炉、10-30MWt、750℃、設計段階)
 化学プラント蒸気供給炉 (商用炉、165MWt、750℃、予備設計段階、石炭火カプラント代替として国内10~20基を計画)

中国
 HTR-10 (実験炉、10MWt、750℃、稼働中)
 HTR-PM (実証炉、2×250MWt、750℃、2021年臨界 (9月達成)・グリッド接続、2022年全出力運転の予定)
 HTR-PM600 (商用炉、国内6ヶ所で計画)

カナダ：SMR計画
 MMR (米国USNC、5~10MWe、設計段階)
 U-Battery (英国U-Battery社、10MWt、設計段階)
 StarCore (カナダStarCore Nuclear社、36MWt、設計段階)

カザフスタン：KHTR計画
 (50MWt、実験炉、設計段階)

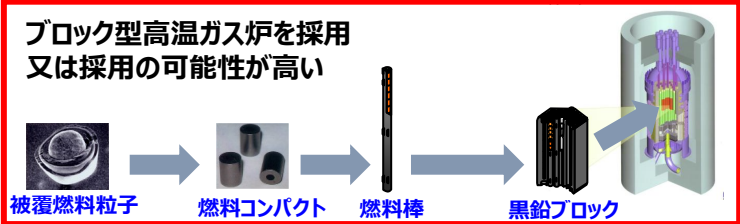
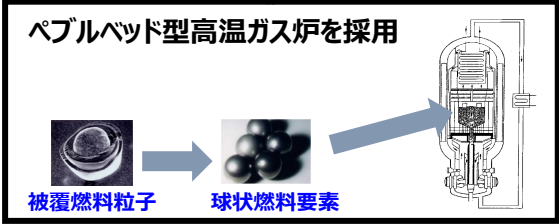
日本
 HTRT (試験研究炉、30MWt、950℃、稼働中)
 GTHT300C (熱利用実証炉、600MWt、950℃、設計段階)

米国
 MMR (米国USNC、5~10MWe、商用発電炉、設計段階)
 Xe-100 (米国X-energy社、200MWt、750℃、商用発電炉、設計段階)

EU：GEMINI+計画
 高温ガス炉コジェネレーションシステムの設計、R&D (2021年2月終了、次期計画検討中)

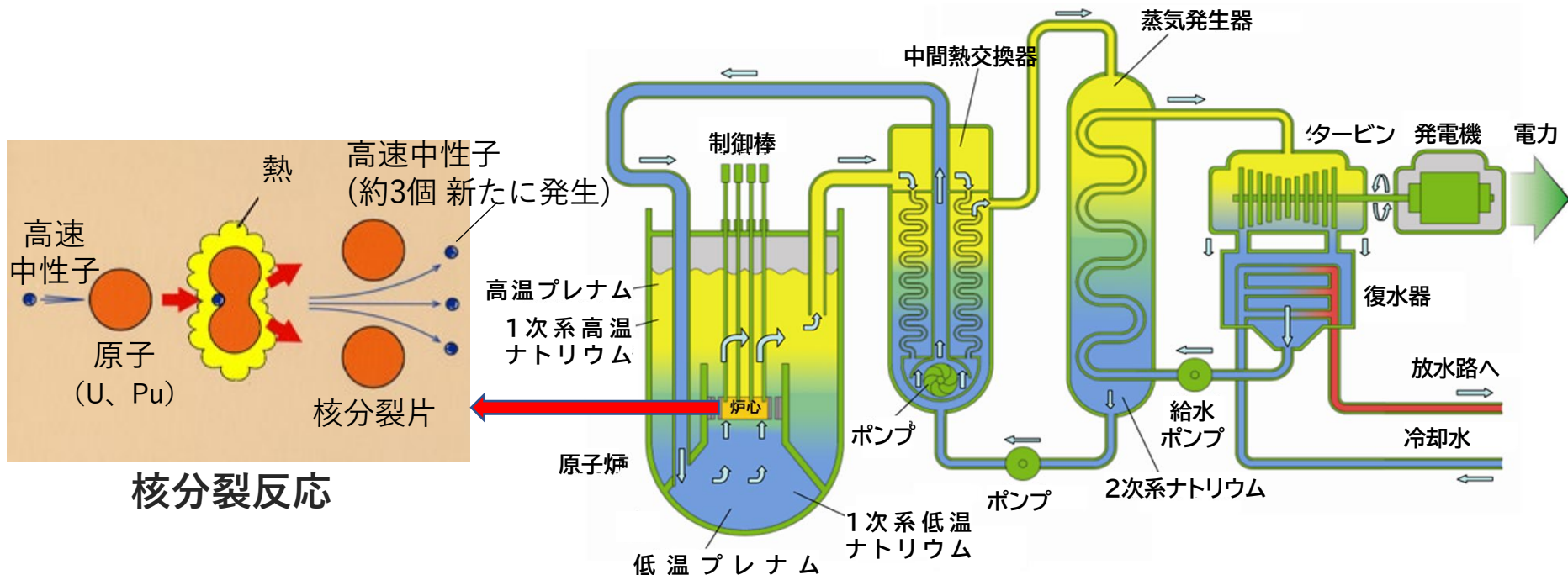
韓国：NHDD計画
 (200MWt、実証炉、設計段階)

インドネシア
 実験実証炉計画 (10MWt、500~1,000℃、設計段階)



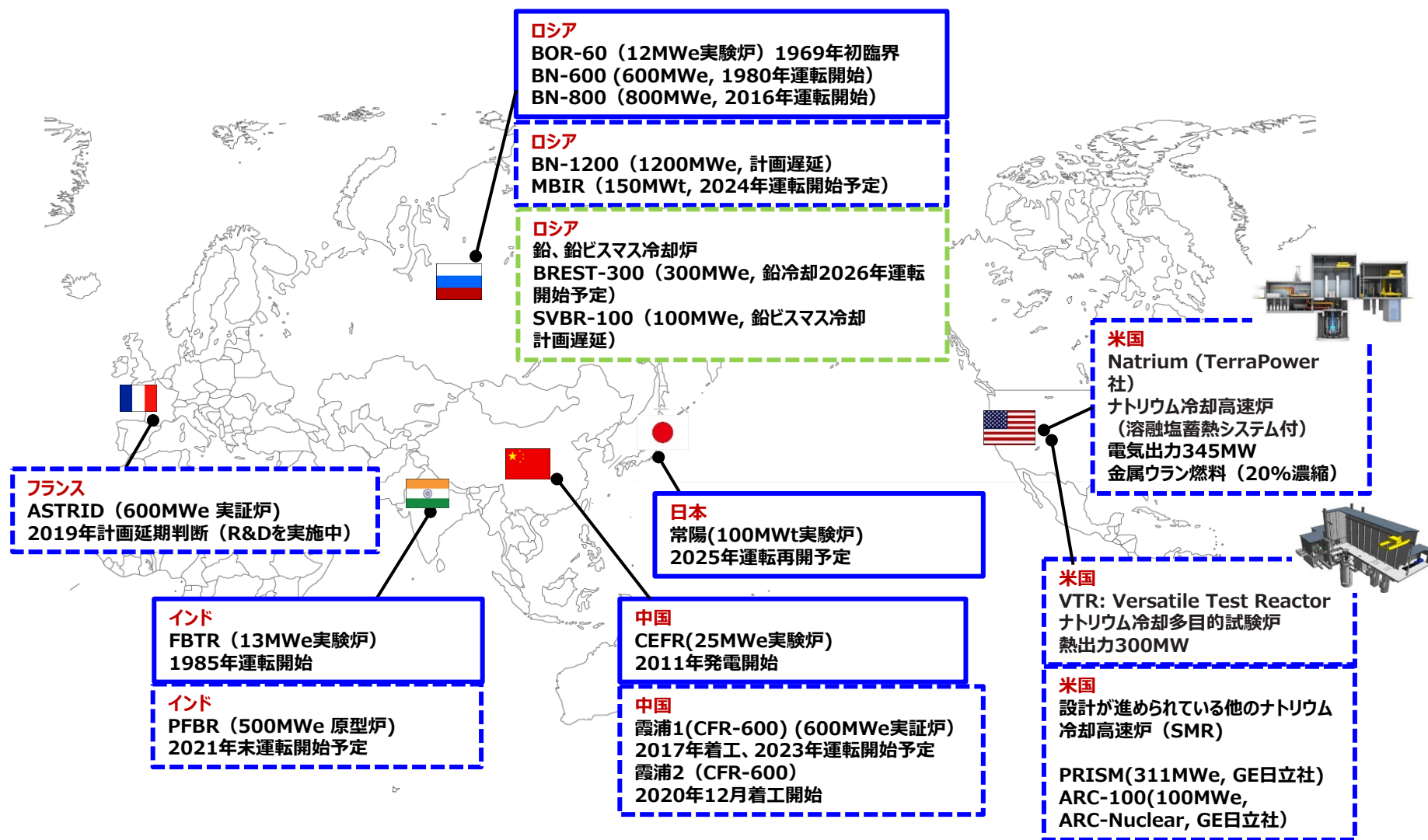
高速炉プラントの概要

熱の取り出しから発電まで



- ⇒ 炉心の中で高速中性子が起こす核分裂反応により熱を発生
- ⇒ 熱が1次冷却系のナトリウムに伝わる
- ⇒ 中間熱交換器を介して2次冷却系ナトリウムに熱が伝わる
- ⇒ 蒸気発生器を介して水に熱が伝わる
- ⇒ 蒸気発生器の中で水蒸気が発生、水蒸気がタービンを回す
- ⇒ タービンが発電機を駆動し、発電

世界の高速炉開発状況



--- : ナトリウム冷却炉型 建設中もしくは計画段階

--- : ナトリウム冷却炉型 稼働中もしくは稼働準備段階

高速炉安全性向上技術の開発

理想とする高速炉像構築のため、必要な安全性・信頼性向上技術を研究開発し、成果を原子力イノベーションへ反映

研究開発実施項目

再臨界回避技術

- 炉心溶融時の挙動把握
- 溶融炉心排出技術

多様な炉心冷却技術

- 信頼性が高く多様な手段を用いる崩壊熱除去系

冷却材の化学活性抑制技術

- ナノ粒子の冷却材付加による化学活性抑制

保全技術

- 冷却材中可視化技術
- リスクを考慮した保全計画策定

炉心安全：

- 再臨界事故が起らないこと
 - ✓ 自然に止まる
- 炉心溶融事故が起らないこと
 - ✓ 自然に冷える

プラント安全性：

- 高速炉特有の事故の局限化、炉心安全への影響がないこと

基幹電源としての可能性追求：

- 競合電源と発電コストが同等
- 安全性・経済性を両立させる保全最適化設計

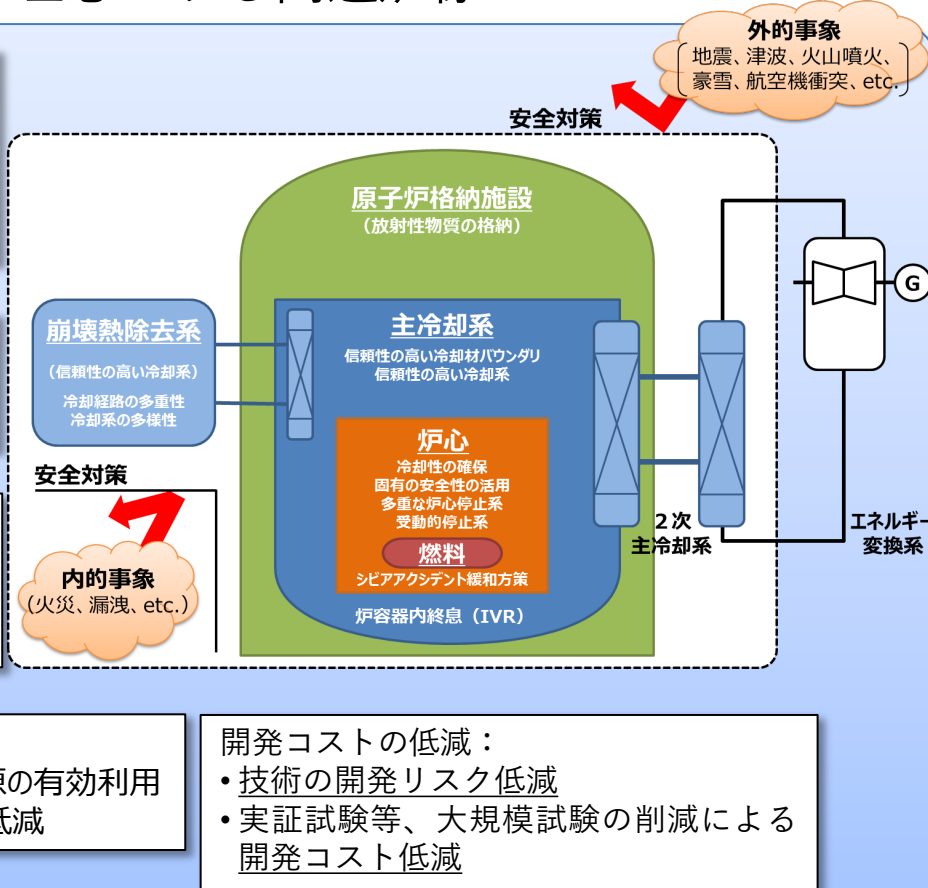
高速炉としての特徴の拡張：

- 核燃料サイクルの実現による資源の有効利用
- 使用済燃料の減容化・有害度低減

開発コストの低減：

- 技術の開発リスク低減
- 実証試験等、大規模試験の削減による開発コスト低減

理想とする高速炉像



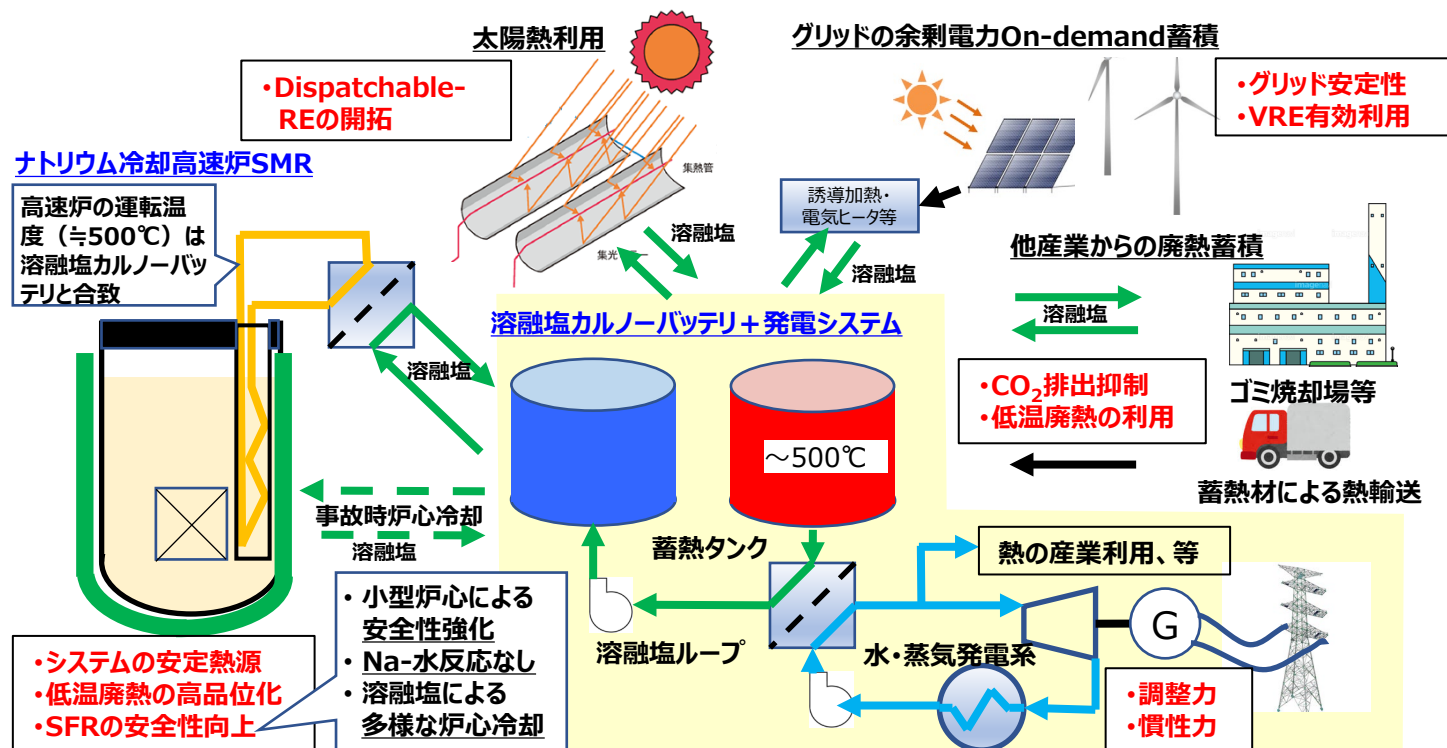
高速炉の多様な熱利用

■ 将来のエネルギー利用の方向性

- 再生可能エネルギーの最大限活用 + 安定供給（安価、慣性力によるグリッド安定）
- 機動性（供給調整力）を持ち再生可能エネルギーと共存するカーボンフリーエネルギー源の開発
⇒ 高速炉SMRとカルノーバッテリー（熔融塩蓄熱発電）を組み合わせたエネルギー供給は安定供給 + 機動性の一つの解

■ 特徴

- 安全性強化：高速炉SMRの小型炉心と多様な冷却によりシビアアクシデントに対する安全性強化、Na-水反応排除
- 高速炉SMR + カルノーバッテリーにより機動性と安定供給、多様な熱源利用・熱利用をカーボンフリーで実現



高速炉の安全設計クライテリア/ガイドラインの国際的な整備

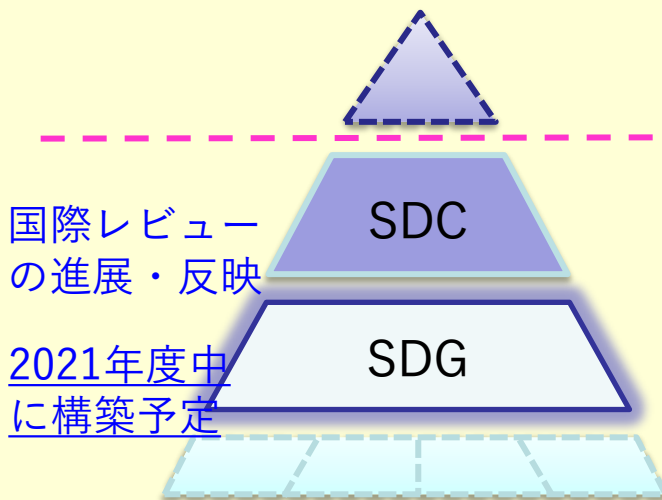
- ◎ 世界の高速炉の安全性向上に向け、我が国主導で安全設計要件を構築
- ◎ 高速炉開発国が安全規制や安全設計へ反映の意向を示し事実上の世界標準へ

◆主たる成果：

- SDCレポート (2017年改訂版公開) 安全アプローチSDGレポート (2020年改訂版公開)
- ロシア等の規制関連機関から反映の意向、中国・インドでも安全設計に反映の意向
- IAEAやOECD/NEA等で規制機関による国際的なレビューを反映した系統別SDG構築中

< SDC/SDGの位置づけ >

基本的安全原則（例：深層防護、ALARAの原則等）



一般的安全設計クライテリア

SDCを設計に展開するためのガイド
特定系統・機器設計の推奨事項

各国毎の規格・基準（ASME、JSME、民間規格等）

国際的な共通化・調和の推進を目指す。

SDC: Safety Design Criteria
SDG: Safety Design Guideline

大型ナトリウム試験施設AtheNaの整備

冷却系機器開発試験施設 (AtheNa)*

- 熱交換器、ポンプ等のナトリウム中実証試験が可能
- マザーループが完成
(ナトリウム純化試験、流量計試験等を実施)
- 大型のナトリウム加熱器を整備中
- 2024年以降、試験ニーズに応じて試験ループの設計・建設に着手



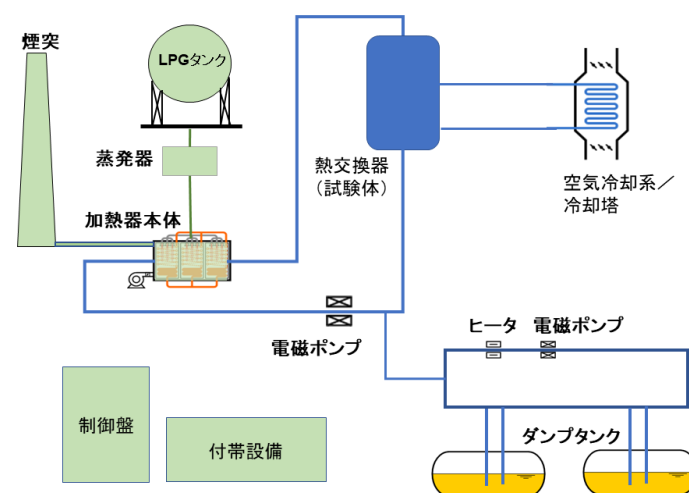
* Advanced Technology Experiment Sodium (Na) Facility



加熱器本体
最大出力30MW x 2基

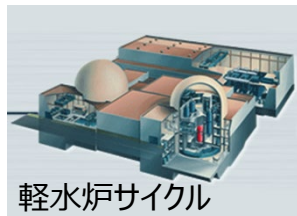


マザーループ
240トンのナトリウムを保有



- 蓄熱技術に必要な機器の小型化、熱過渡健全性の実証
- 海外（米国等）等から、革新的な熱交換器等の社会実装に向けたナトリウム熱流動試験のニーズ

持続可能なエネルギーシステムの実現と原子力の貢献



- 使用済燃料 (Puサーマル含)
- 劣化ウラン

軽水炉サイクル



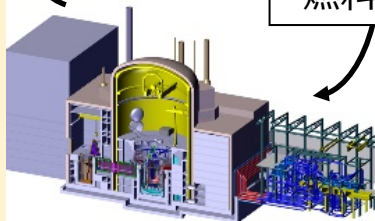
Hybrid HTGR

燃料工場

SFR/HTGR共用再処理

核燃料サイクル

燃料工場

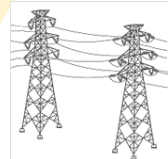


SFR

核燃料サイクルによる
エネルギー資源自立

熱供給

蓄熱システム



- 需給調整力
- 慣性

H2による
エネルギー貯蔵

H2製造

水素

- 需給調整力
- 慣性



水素GT発電、等

- ベースロード電源
- 蓄熱による需給調整力
- 慣性

- Pu増殖
- MA燃焼

ウラン資源の有効利用、
放射性廃棄物の減容化・有害度低減

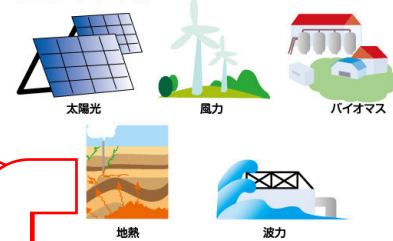
他産業から/環境中
の炭酸ガス

カーボン・サイクルの実現

•メタン/石油製品、等

炭酸ガス還元による再資源化

再生可能エネルギー(一例)



変動再生エネ増強に不可欠
の安定・安価な電力供給