

国内の新型炉技術開発の現状と 社会ニーズへの対応

令和4年3月28日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

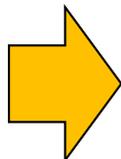
理事 大島 宏之

社会ニーズ

- ❑ エネルギー産業として、地球温暖化抑制への貢献
- ❑ 安定かつ信頼性の高い、持続可能なエネルギー供給システム
- ❑ 地政学的リスクを含む将来の不確実性への対応

評価軸

- ❖ 安全性
- ❖ 柔軟性
 - 負荷追従 + 水素・熱利用 + 立地の柔軟性
- ❖ 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



様々な選択肢に対応

多様な炉(機能の例)

ベースロード電源

- 安定・安価な電力供給

SMR

- 調整電源
- 水素供給

Pu・MA燃焼炉

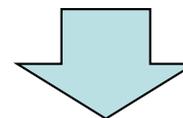
- Pu需給調整力
- MA*燃焼処理

革新炉の選択肢(例示)

- 大型高速炉

- 高温ガス炉
- 小型高速炉

- 中小型高速炉
- 大型高速炉 (燃焼専用でなく総合的に課題を解決)



高温ガス炉、高速炉は社会ニーズに対応可能な革新炉技術

* マイナーアクチノイド(MA)核種、長半減期

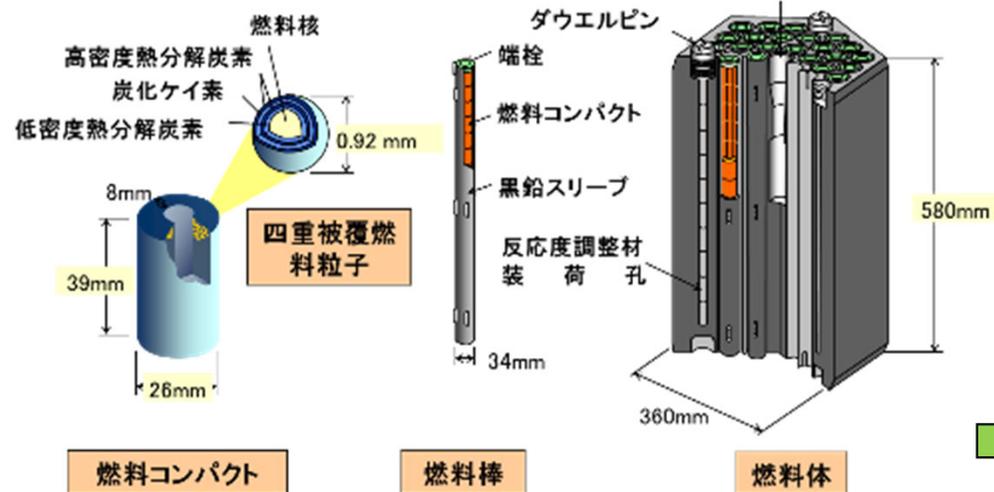
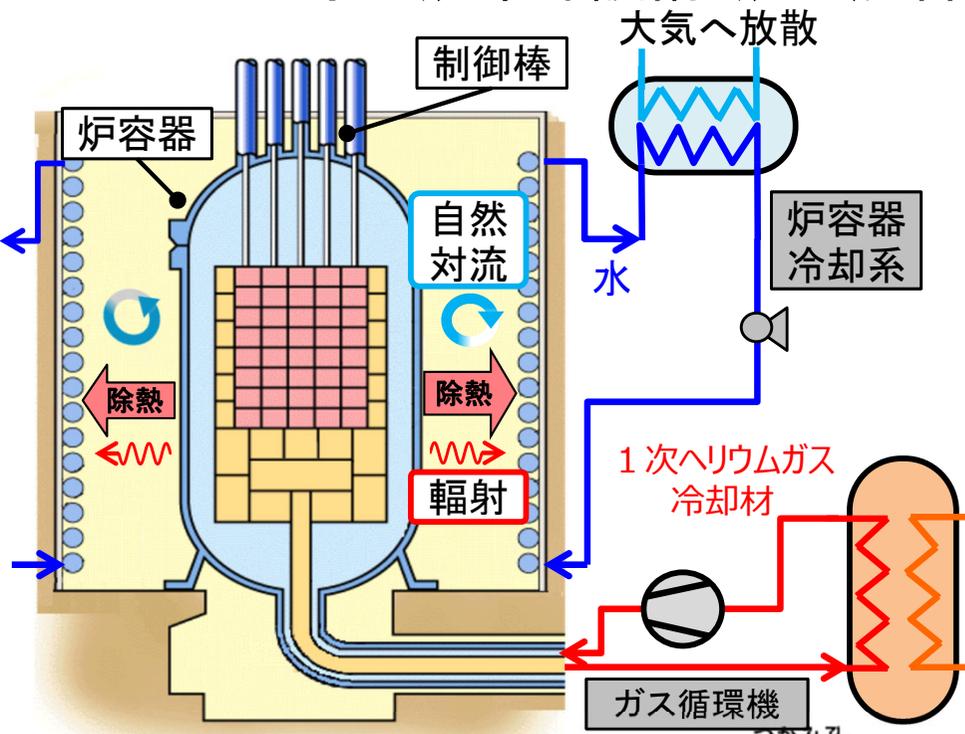
□ 高温ガス炉開発の目標（社会ニーズに応えるための俯瞰的設定のイメージ）

高温ガス炉の機能	2030年の到達点	2040年頃の到達イメージ	2050年頃の到達イメージ
1. 水素製造炉 ・ブルー水素製造 ・グリーン水素製造	<ul style="list-style-type: none"> 高温ガス炉によるブルー水素製造実証（HTTR） IS法等によるグリーン水素製造技術確立 	<ul style="list-style-type: none"> 実用水素製造炉の運転開始 グリーン水素製造実証 	<ul style="list-style-type: none"> GT発電/水素製造ハイブリッド実用炉の運転開始 発電・水素製造比変化による調整電源機能実証
2. 発電炉 ・ランキンサイクル発電 ・ガスタービン発電 ・調整電源	<ul style="list-style-type: none"> 高温ガス炉による蒸気供給実証（海外炉協力） 	<ul style="list-style-type: none"> 調整電源としての実用発電炉の運転開始 閉サイクルHeガスタービン技術確立 	

□ 高速炉開発の目標（同上の想定イメージ）

高速炉+サイクルの機能	2050年頃の到達イメージ	21世紀後半の到達イメージ
1. 大型基幹電源高速炉 ・基幹電源 ・資源自立	<ul style="list-style-type: none"> 中規模の初号炉（実証炉）の運転 使用済み燃料のリサイクル、プルトニウム（Pu）利用の技術実証 	<ul style="list-style-type: none"> 軽水炉に置き換え、基幹電源として大型高速炉の複数基導入 MA* 燃焼にも利用
2. 高速炉SMR ・蓄熱設備を加えた「調整電源」 ・Puマネジメント ・MA燃焼	<ul style="list-style-type: none"> 調整電源としての実用炉 1～2 基運転 高Pu含有燃料の開発が完了し、Puマネジメント運用の開始 MA分離・変換・燃料化技術の実証 	<ul style="list-style-type: none"> 調整電源として、SMRを複数基導入 MA燃焼にも利用

HTTRの原子炉冷却設備/炉心燃料



HTTRの新規制基準への対応状況

安全審査

項目	従来の内容	取得した許可における新規規制基準想定内容等
BDBA	・新規規制基準による追加要求	(BDBAの想定)→ どの想定も炉心溶融は発生しない ・DBA + 原子炉停止機能の全喪失 ・DBA + 炉心冷却機能の全喪失 ・DBA + 閉じ込め機能の全喪失 ・使用済燃料プール等の冷却機能喪失
地震	・耐震重要度分類は実用炉を参考に分類 ・最大の地震動：350gal	・ 試験研究用等 原子炉施設に係る耐震重要度分類の考え方を参考に 重要度を再分類 ・ 設計基準地震動：973 gal

➡ 炉心溶融の可能性排除／大規模な追加工事無しに新規規制基準合格

緊急時活動レベル※の見直し

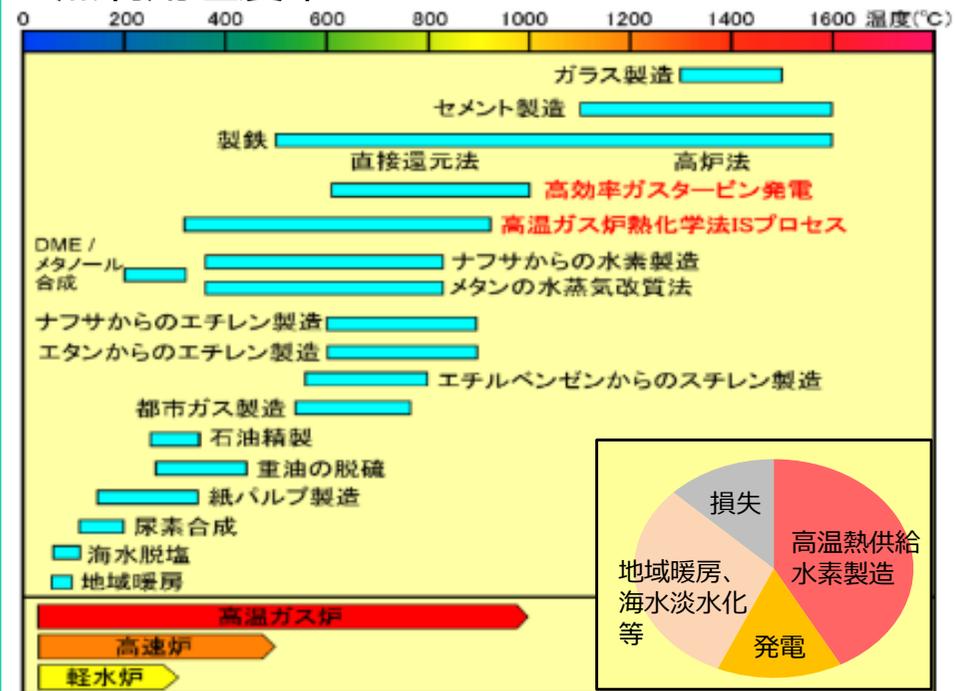
事象	変更前	変更後
原子炉運転中の非常停止が必要な場合に、原子炉の停止機能及び冷却機能を喪失する事象	GE	AL
使用済燃料に対する冷却機能の喪失	GE	AL
原子炉運転中に、燃料、1次系バウンダリ、原子炉格納容器の閉じ込め機能が全喪失	GE	SE

HTTRにおけるGEは、**防護設計の基準をはるかに超える自然事象やテロ行為**により、原子炉施設の**閉じ込め機能を大きく破損させる事象が発生した場合のみ**と整理

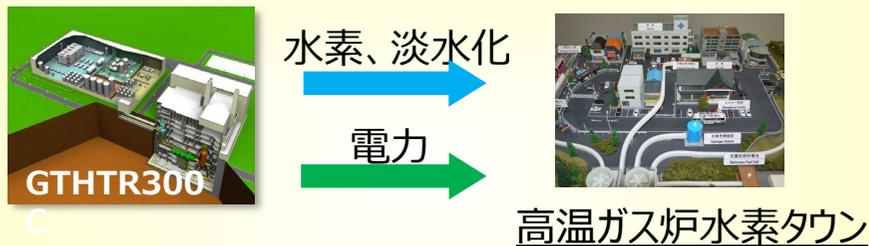
➡ 内部事象では敷地外での待避不要 ※AL（警戒事象）、SE（施設敷地緊急事態）、GE（全面緊急事態）

➡ 高温ガス炉はシビアアクシデントフリーのポテンシャルを有することが示された。

○熱利用温度帯



コジェネシステム（水素、発電、淡水化等）



- 水素製造、発電、海水淡水化のコ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



- 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



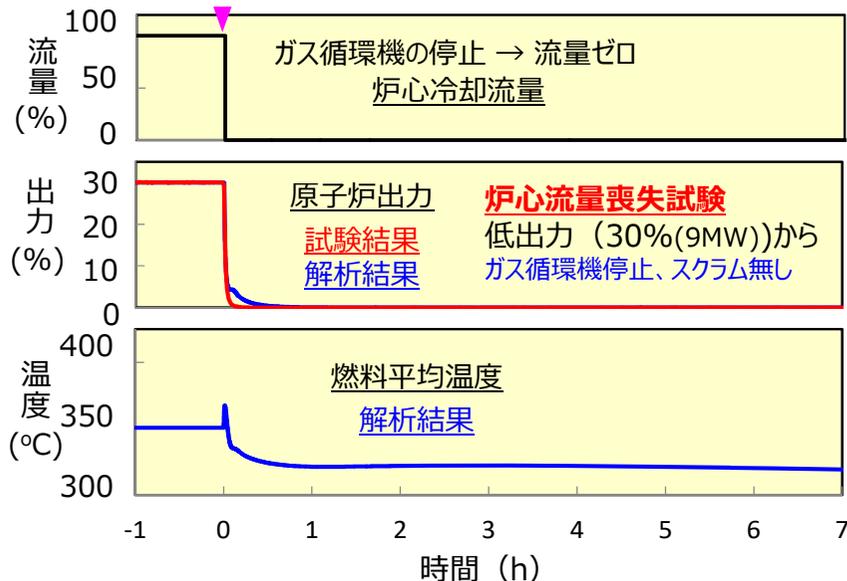
- 蒸気によるプロセス熱供給（化学プラント、石油精製プラント、等）
- 蒸気タービン発電による電力供給

再生可能エネルギーとのハイブリッドシステム



- 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）

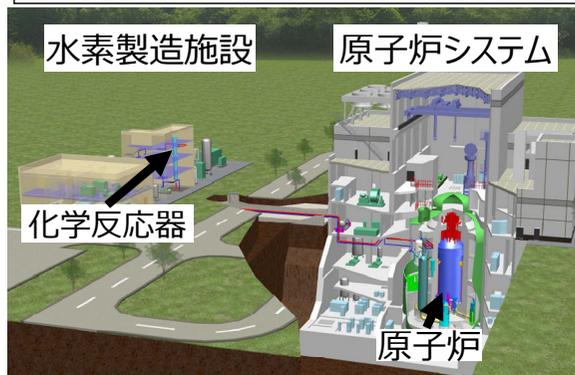
安全性実証試験



- ✓ 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
- ✓ 「固有の安全性」を実証

自己制御性に優れた固有の安全性を実証

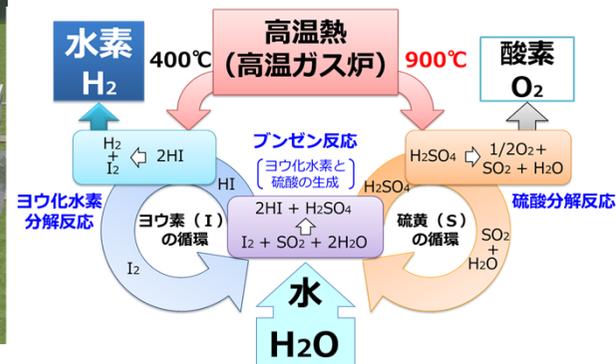
HTTR-熱利用試験



- ✓ 2030年までにHTTR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
- ✓ 原子炉と化学プラント接続に関する安全性確保の考え方を提案
- ✓ 将来、カーボンフリー水素製造設備とHTTR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

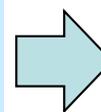
グリーン水素製造 (ISプロセス法)



- ✓ 高温ガス炉との組み合わせで炭酸ガスの排出なし
- ✓ ヨウ素と硫黄を利用して 約900°Cの熱で水を熱分解
- ✓ 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 (世界初)

JAEAは高温ガス炉技術について、

- HTTRで950°Cの出口温度 (世界記録) を達成
- HTTRの安全性実証試験で、「固有の安全性」を実証
- ISプロセス法によるグリーン水素製造技術を開発
- HTTR-熱利用試験計画で、原子力による水素製造を実証へ (熱利用にかかる安全規制を含む)



高温ガス炉技術で世界のフロントランナー

わが国における高速炉サイクル開発の経緯

2021年10月 **第6次エネ基** (国際連携を活用した高速炉開発の着実な推進)

2021年6月 **グリーン成長戦略** (「戦略ロードマップ」に基づき高速炉開発を着実に推進)

2018年7月 **第5次エネ基** (核燃料サイクル開発維持)

2016年12月 **もんじゅ廃止措置決定**

2011年3月 **東日本大震災**

2005年10月 **原子力政策大綱** (2050年頃からの商用化)



1994年
もんじゅ初臨界

1990

1977年
常陽初臨界

1980

1970



1966年

動力炉開発の基本方針

自主的な開発が必要、
実験炉、原型炉の開発を推進

1985~1999年
電気事業者が中心となって実証炉開発

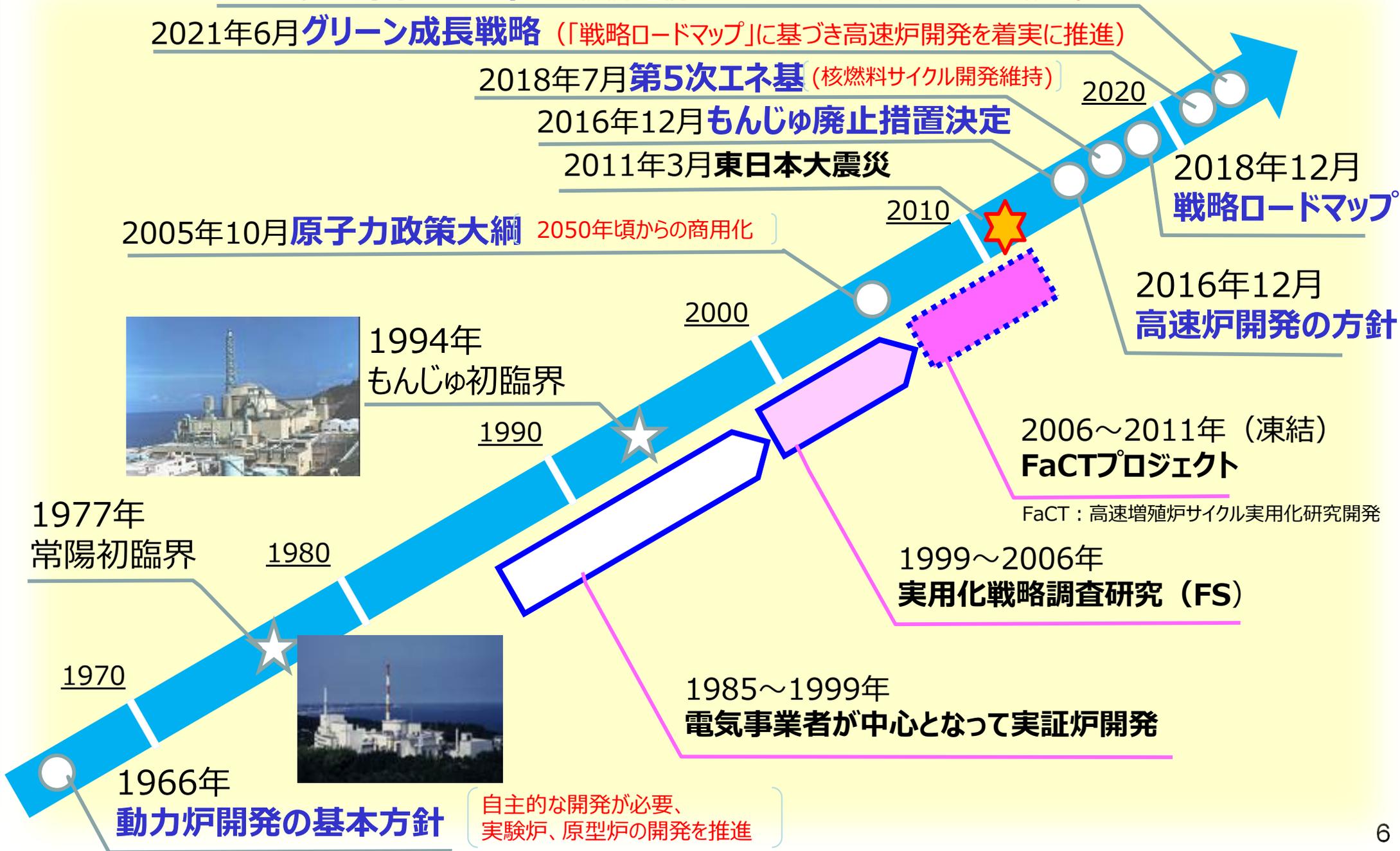
1999~2006年
実用化戦略調査研究 (FS)

2006~2011年 (凍結)
FaCTプロジェクト

FaCT : 高速増殖炉サイクル実用化研究開発

2016年12月
高速炉開発の方針

2018年12月
戦略ロードマップ



「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



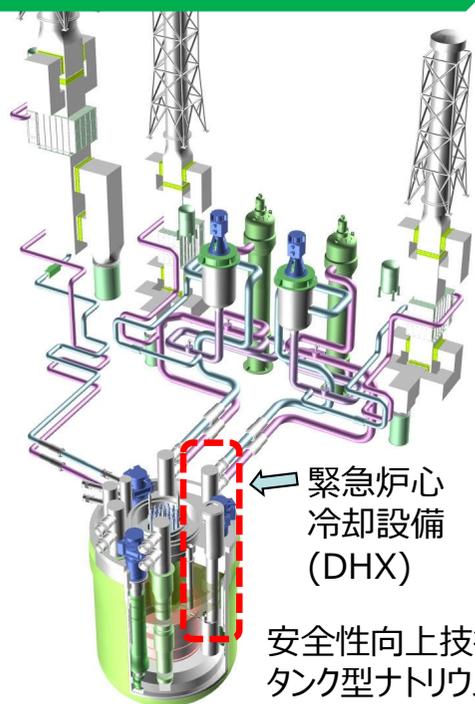
これまでの主な成果

- 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

- 高速炉サイクル実用化研究開発（FaCT）およびその後の高速炉の**安全性強化**等を目指した研究開発、**日仏ASTRID協力**等を通じて、高速炉の実用化に向けた研究開発は着実に進展
- 安全性向上技術の**試験実証**と国際的な**安全設計基準**の整備を行い、それらを取り入れた**新しい高速炉の設計概念**を構築

国際協力を活用したプラント設計技術の開発



PLANDTL-2試験で得られた**実証データ**と解析技術を適用して設計

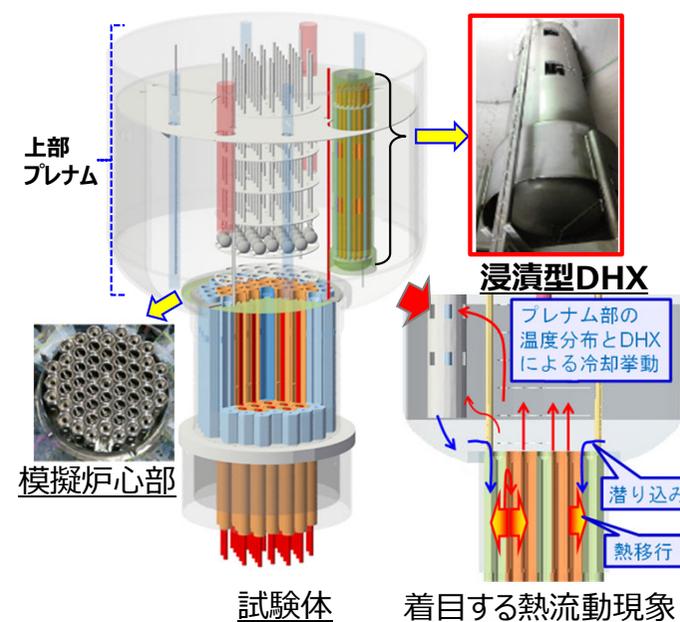
緊急炉心冷却設備 (DHX)

安全性向上技術を取り入れたタンク型ナトリウム冷却高速炉

- 日仏協力の成果によってタンク型ナトリウム冷却高速炉の設計技術を獲得
- 実証データに裏付けられた安全性向上技術と**SDC-SDG**、設計規格基準類を適用

安全性向上技術の開発（実証データの蓄積）

- 高速炉に適用可能な受動的炉停止機構、ナトリウムの**自然循環による除熱特性**、シビアアクシデント時の**熔融燃料流出挙動**等について、実証性の高い試験を実施してデータを蓄積
- データに基づき解析ツールを検証し、プラント設計に適用



自然循環除熱に関するPLANDTL-2試験

- 原子炉容器内の液体ナトリウムの流動挙動を詳細に計測（**日仏共同実験**として実施）

規格基準の整備



- 実証された設計技術に裏付けられた**国際的な安全基準**を体系的に整備

SDC：安全設計
クライテリア
SDG：安全設計
ガイドライン

核燃料サイクル技術開発の成果

- ❑ 廃棄物管理の負荷低減
- ❑ 地政学的リスクへの対応と安定供給



- 小規模マイナーアクチノイド (MA)リサイクル(SmARTサイクル)試験による実証
 - MA含有MOXペレット製造に向けて、**世界最高レベル2gのMA回収**を達成
- 「常陽」での**MA含有MOX燃料**の照射試験を通じて**照射挙動を把握**
- 核変換特性を向上させる**長寿命炉心材料** (ODS鋼被覆管等) を開発
- **国際協力** (米国、仏国等) を活用し、MAサイクルに係る研究開発を推進

SmARTサイクル研究

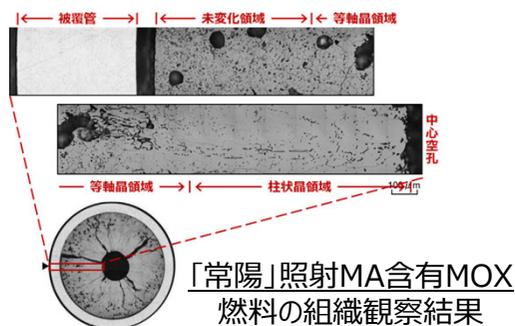


SmARTサイクル研究

SmART : *S*mall *A*mount of *R*euse *F*uel *T*est *C*ycle

- **MAを中心とした分離変換データの取得とサイクル成立性の小規模実証**を目指す
- これまでに、ペレットレベルでの燃料製造・照射試験を可能とする**約2gのMAを回収**

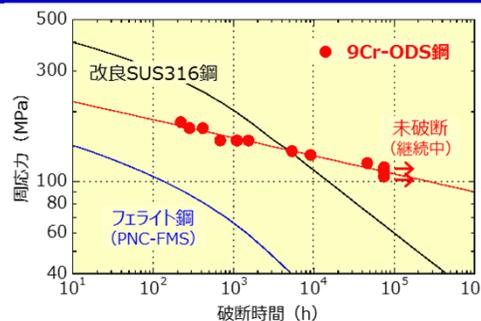
MA含有MOX燃料の照射試験



「常陽」照射MA含有MOX燃料の組織観察結果

- 「常陽」短期・高線出力試験に供したMA含有MOX燃料について**Am等の再分布挙動に関する定量データ**を取得、照射挙動評価に必要な**詳細な組織変化データ**を取得
- 次期照射試験に向けて**MA含有MOX燃料設計コード開発を継続**

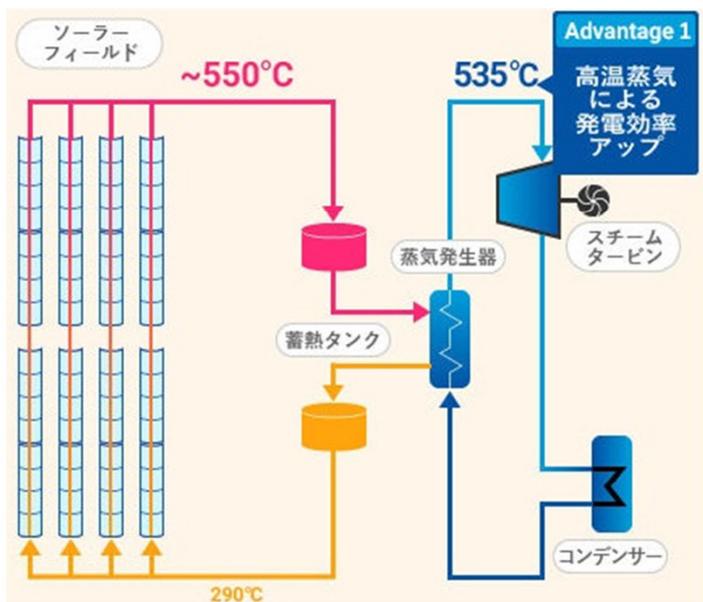
長寿命炉心材料の開発



9Cr-ODS鋼被覆管の700℃における内圧クリープ破断強さ

- ODS鋼被覆管が高速炉の実用化段階の使用条件に相当する高温・長時間環境において**世界最高レベルのクリープ強度を維持**し、イオン照射後も**酸化物分散粒子を含む微細組織が安定であることを実証**
- ODS鋼被覆管の量産技術開発の一環として**大型アトライターを整備し、試作・評価試験を実施**

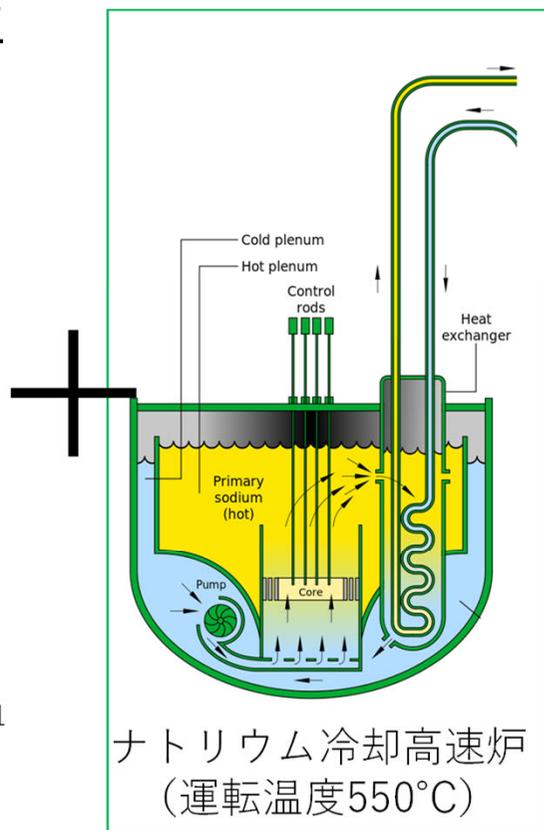
□ 高速炉の熱利用の可能性



溶融塩を用いた蓄熱・発電システム*1
(太陽熱発電で実用化済み)

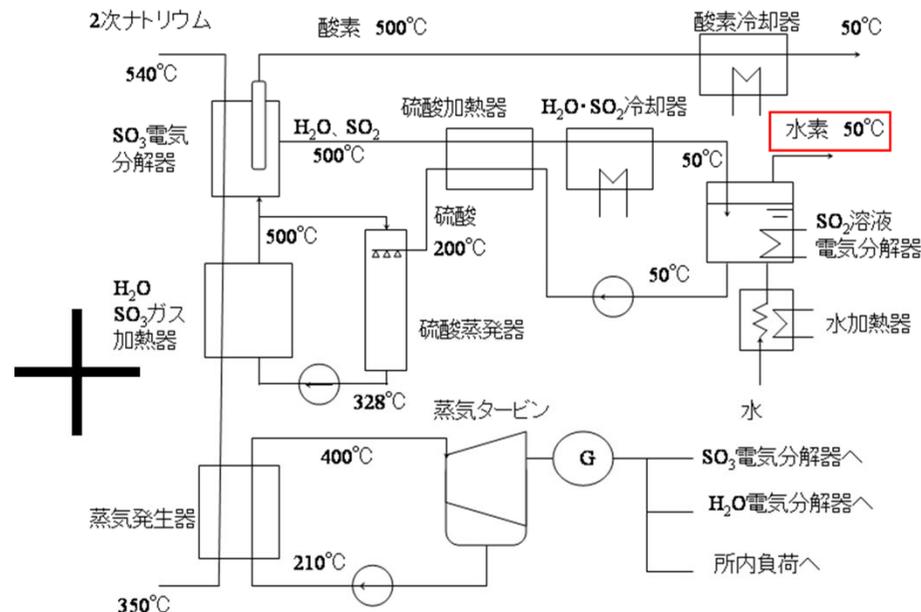
- 高速炉SMRと組合せた発電システム
- 出力変動の大きい再生可能エネルギーを補う機動性をもった電源

再生可能エネルギーと共存し、**カーボンニュートラルへ貢献する原子力**



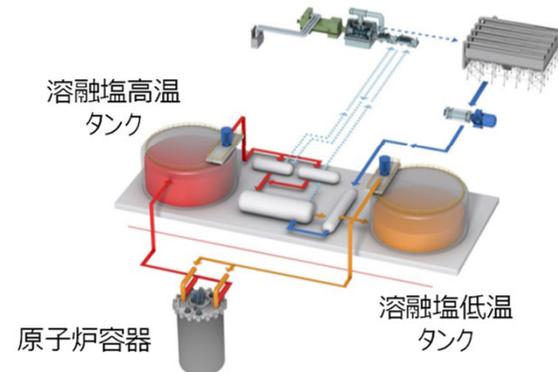
ナトリウム冷却高速炉
(運転温度550℃)

*1: <https://www.chiyodacorp.com/jp/service/solar-energy/>
*2: Y.Chikazawa, et al., Proc. 15th WHEC, paper ID30J-08(2004)



ハイブリッド熱化学法による水素製造システム*2
(500℃程度の熱源に最適化した水素製造技術)

- グリーン水素の製造



協力協議を開始（MOU締結）した米国TerraPower社も、熱利用・蓄熱技術との組合せを追求

- カーボンニュートラル（CN）の達成と同時に、海外の情勢に左右されない且つ長期にわたる**エネルギーセキュリティ**を確保（安定・安価）することが重要。既に3割強（仏国では7割）の電力を賄った実績のある原子力技術は有力且つ現実的な選択肢
- 次世代炉は多目的利用にも有効：**再エネをサポート（変動成分吸収）**し、カーボンフリーで安定・安価なエネルギー供給を可能とする。電力以外に、水素製造や熱利用により**産業・輸送部門のCN化**に貢献
- 原子力を進める以上は、プルトニウムの管理、放射性廃棄物減容・有害度低減、ウラン資源の飛躍的利用効率アップを実現し、高い安全性を有する**高速炉サイクルの実用化**が不可欠
 - すでに廃棄物減容に向けたサイクル技術は、MAの分離とペレット製造・炉内照射特性の把握など、多くの成果をあげている。
- 高温ガス炉の950℃の運転温度、原子力による水素製造技術など、**トップランナーとして日本の技術を国内で実用化**することは、グリーン成長など「国益」にもつながる。
- 高速炉は、ロシアと中国が実用化レベルに到達しつつあり、輸出を視野に開発協力を進めている。日本も「もんじゅ」を経て実証レベルまで到達、それが国の「強み」であり、日仏協力、テラパワー社との協力など国際的にも注目されている。
 - **サプライチェーンの維持、技術自給率、優秀な人材の確保方策が課題**
 - ❖ 実用化に向けて**計画の早期具体化**、次世代炉に対する**安全規制・基準の構築**・予見性確保、**国内開発や国外開発参入**に対する国の支援施策が重要