



新型炉を中心に国内外の動向と原子力 イノベーションに係る取組み

令和3年9月25日

上出 英樹

日本原子力研究開発機構
高速炉・新型炉研究開発部門

Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development



第6次エネルギー基本計画—素案 より原子力・新型炉に関連する記載

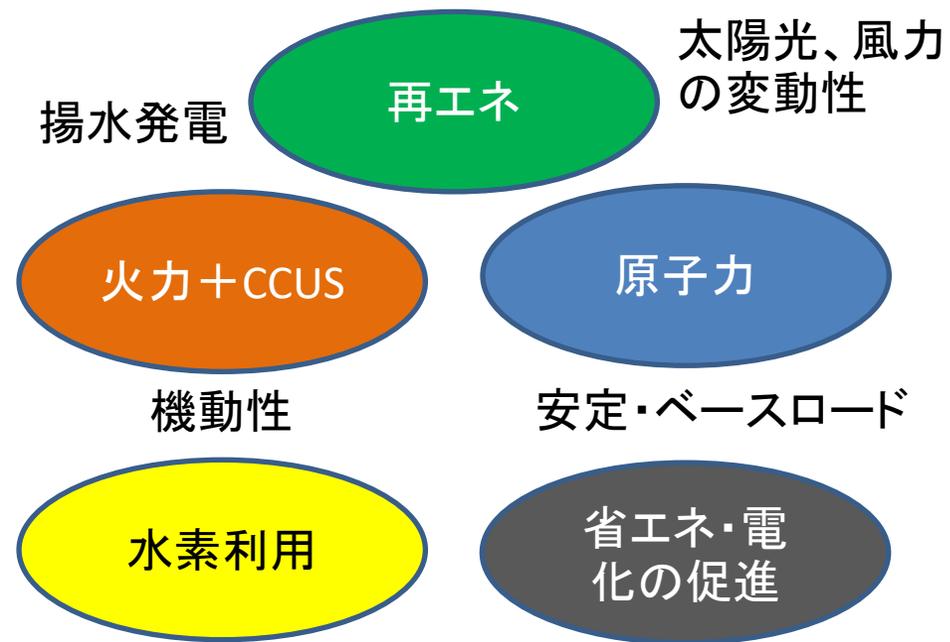
2050年カーボンニュートラル実現に向けて

- 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。**炭素貯蔵・再利用**を前提とした**火力発電**などのイノベーションを追求。
- **安定的で安価なエネルギーの供給確保**は重要。再エネについては、主力電源として最優先の原則のもとで最大限の導入に取り組み、**水素・CCUS**については、社会実装を進める。原子力については、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）

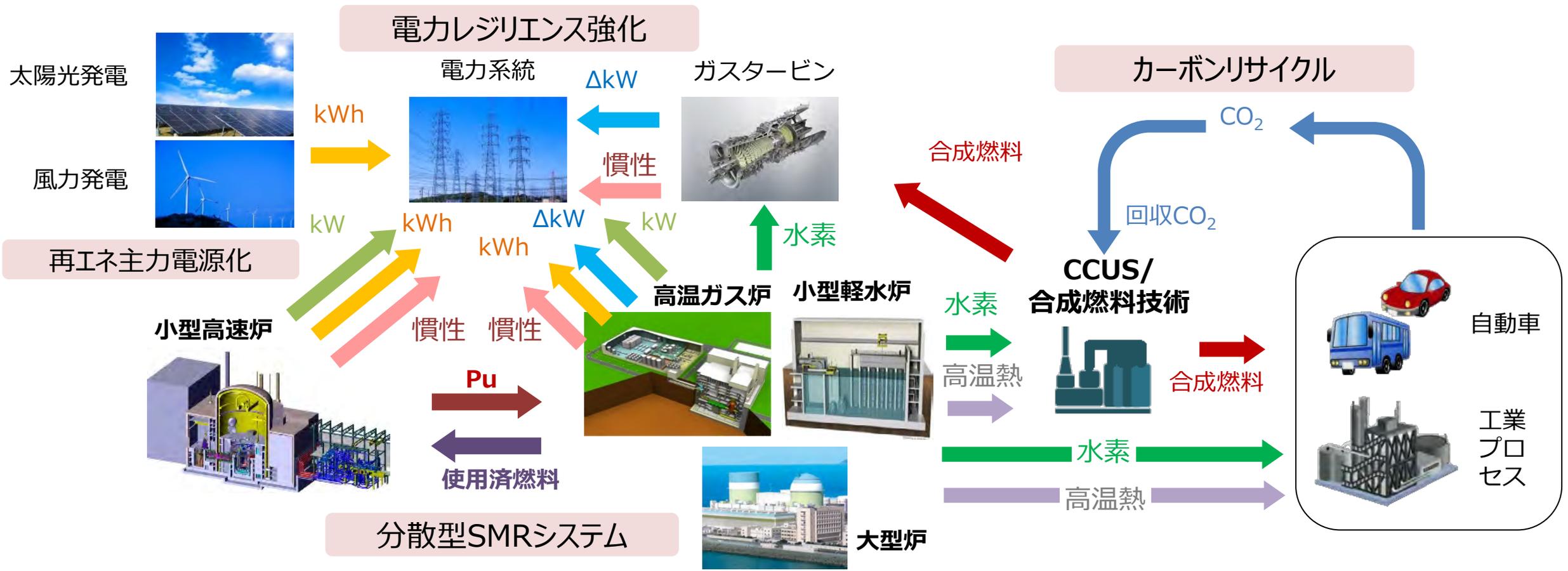
- 信頼と安全確保を前提に、原子力の**安定的な利用**の推進
使用済燃料対策：放射性廃棄物の減容化、有害度低減
核燃料サイクル：六ヶ所再処理工場の竣工と創業、プルサーマルの推進
- 研究開発の推進
 国際連携を活用した**高速炉開発**の着実な推進、**小型モジュール炉**技術の国際連携による実証、**高温ガス炉**における**水素製造**に係る要素技術確立等を進める。

❖カーボンニュートラルの実現



- 安定したエネルギー供給において、**機動性のある脱炭素電源**が重要。
- 原子力は、安定電源に加えて機動性にニーズがある。

カーボンニュートラル実現、レジリエンス強化、エネルギーコスト抑制



SMR : 小型モジュール炉 kWh : 電力 ΔkW : 調整力 kW : 供給力

文部科学省 令和2年度原子力システム研究開発事業「脱炭素化・レジリエンス強化に資する分散型小型モジュール炉を活用したエネルギーシステムの統合シミュレーション手法開発」より

● 設置面積



*1

原子力

- 1.0 GWe
- 0.6 km² (例)

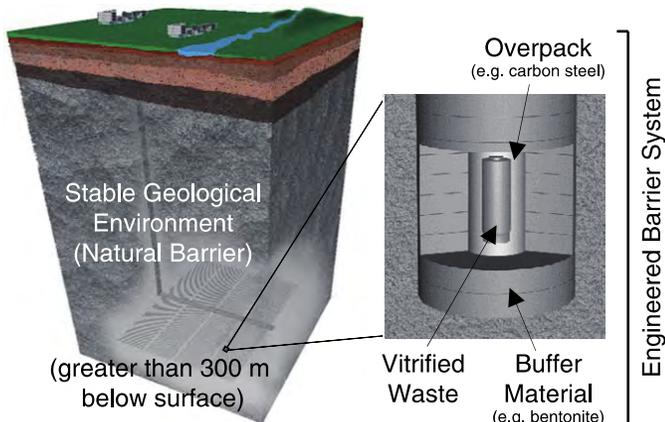


*2

メガソーラー

- 0.1 GWe
- 2.2 km² (例)

● 廃棄物



原子力

- 放射性廃棄物
- 高レベル廃棄物の地層処分



*3

火力発電

- 膨大な燃料と廃棄物
石炭殻、燃焼ガス
- 温暖化ガス

*1; Image by Kurt K. from Pixabay, *2: by skeeze, *3 : by Rebecca Human

- SMR開発機運の高まり
 - 分散電源、柔軟性を持ち多様なエネルギー供給を担う
 - 小出力で**事故時の除熱が容易**、受動安全性を強化
 - **工場生産**範囲の拡大で高品質、現地工事期間短縮
 - **熱利用など多目的利用**と発電との組合せで高い柔軟性
 - 軽水炉だけでなく、様々な冷却材を用いた炉が検討
 - 英国・カナダのSMR開発 国家プロジェクト
 - 米の新型炉実証プログラム（ARDP）
 - 中国の新型炉開発：高温ガス炉（HTR-PM）
 - 軽水炉SMR開発の進展（NuScale, BWRX300, NUWARD…）
- SMRの規制動向（安全基準類の整備）
 - IAEA SMR Regulator’s Forum
 - US NRC: Risk-Informed, Technology-Inclusive Regulatory Framework For Advanced Reactors (10CFR Part 53)
 - US-NRCとカナダCNSCがSMR・新型炉の審査等にかかる協力覚書



連邦政府

資金拠出 (7,600万ドル/年、10年間) (1, 2)

原子力科学技術ワークプラン (Federal Nuclear Science and Technology (FNST) Work Plan)
 カナダ原子力公社 (AECL)、天然資源庁 (NRCAN : Natural Resources Canada) 等で策定 (2015年9月) (3)

研究資金
(能力と専門性の維持)

研究成果
(連邦政府の活動を支援)

SMRロードマップ⁽⁴⁾

- NRCANを中心とするSMRロードマップステアリングコミッティが、ロードマップを公表 (2018年11月)

SMR行動計画⁽⁷⁾

- NRCANは、SMRロードマップに基づくSMR行動計画を公表 (2020年12月)。SMRベンダー11社が参加。

カナダ原子力研究所 (CNL) による SMR導入計画

(Canadian Nuclear Laboratories : CNL)

- エネルギー分野等におけるアクションを示した10年間の長期戦略策定⁽⁵⁾ (2017年4月)
 - ✓ ロードマップ作成
 - ✓ SMRに関する規制当局との連携計画、等
- SMR実証炉に関する関心表明要求 (2017年6月)
- SMR導入プロジェクト提案募集 (2018年4月)
- カナダ原子力研究イニシアチブ設立 (2019年7月)

カナダ原子力安全委員会 (CNSC) によるSMR審査

(Canadian Nuclear Safety Commission : CNSC)

- SMRに限らずベンダーに対する原子炉設計の事前審査 (Pre-Licensing Vendor Design Review) を提供開始⁽⁶⁾ (2012年5月)
- 許認可のためのガイド作成中

(1) <https://www.aecl.ca/science-technology/federal-science-and-technology-work-plan/>

(2) https://www.cns-snc.ca/media/pdf_doc/position_papers/421_RNNR_Rpt05_GR-e.pdf

(3) <https://www.aecl.ca/science-technology/federal-science-and-technology-work-plan/>

(4) Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee: 「A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors」, Ottawa, Ontario, Canada, 2018

(5) <https://www.cnl.ca/en/home/news-and-publications/stories/2017/20170425.aspx>

(6) CNSC: 「Pre-Licensing Vendor Design Review」. <https://nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/index.cfm>

(7) <https://smractionplan.ca/>

- 2018年6月、英国政府は、コスト削減、英国の原子力技術基盤の強化を目的として £ 263Mの支出を決定。これには、2017年12月に決定された**新型モジュラー炉 (Advanced Modular Reactor : AMR)** の開発と許認可のための資金 £ 56Mが含まれる。(1)
- 2018年8月、AMRベンダー8社 (**高温ガス炉3社、高速炉3社、溶融塩炉1社及び核融合炉1社**) に対し、AMR設計成立性評価のため、総額 £ 4Mの資金が割り当てられた。
(AMR Feasibility and Development (F&D) Project Phase 1 (2))
- 2020年7月、以下の3社が上記8社から選定され、AMR開発のために、総額 £ 40Mの資金が割り当てられた。
(AMR F&D Project Phase 2 (3))。
 - Tokamak Energy Ltd (小型核融合炉)
 - U-battery Developments Ltd (高温ガス炉)
 - Westinghouse Electric Company UK (鉛冷却高速炉)
- 2020年11月発表の「グリーン産業革命のための10要点計画」(4) 及び2020年12月発表の「エネルギー白書」(5) において、AMR研究開発費として最大170Mポンドを支出し、2030年代初頭までにAMR技術を実証することが記載。
- 2021年7月29日、**AMRの研究開発・実証プログラム**が発表され(6)、**AMRの実証炉として高温ガス炉を候補**とする政府案に対し、意見公募を開始(応募締切は2021年9月9日)。意見公募の結果は、年内に公表予定。

(1) Nuclear Energy Insider, "UK funding spurs advanced reactor R&D but application outlook needed, 18 July 2018.

(2) <https://www.gov.uk/government/publications/advanced-modular-reactor-amr-feasibility-and-development-project>

(3) <https://www.gov.uk/government/publications/advanced-modular-reactor-amr-feasibility-and-development-project/advanced-modular-reactor-feasibility-and-development-successful-projects>

(4) <https://www.gov.uk/government/publications/the-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution>

(5) <https://www.gov.uk/government/publications/energy-white-paper-powering-our-net-zero-future>

(6) <https://www.gov.uk/government/consultations/potential-of-high-temperature-gas-reactors-to-support-the-amr-rd-demonstration-programme-call-for-evidence>

- 米国DOEは2020年5月、ARDP (Advanced Reactor Demonstration Program) を開始。
 - ❖ ARDPは、官民による費用分担を前提。
 - ❖ 以下の3つのカテゴリーにおいて、公募により選ばれた新型炉開発プロジェクトに対して資金援助。
 - ① 7年以内の新型炉実証
 - ② 将来の新型炉実証に向けたリスク削減
 - ③ 新型炉概念
- ①に関し、DOEは2020年10月に以下の2案を選定
 - ❖ TerraPower社 (ナトリウム冷却高速炉 Natrium)
 - ❖ X-energy社 (ペブルベッド型高温ガス炉 Xe-100)
 - 初年度費用として、各社に8,000万ドルを支援。
 - DOEが7年間で投資する総額は、約32億ドルに達する見込み。

□ Natriumの状況

- ❖ ワイオミング州の旧石炭火力発電所跡地に建設予定。
- ❖ 2023年8月に建設許可を、2026年3月に運転許可をNRCに申請予定。

□ Xe-100の状況

- ❖ Energy Northwest社のワシントン州コロンビア原子力発電所敷地内に建設予定。

イノベーションの創出に向けた取組みの方向

- **安全性・経済性・機動性に優れた炉の追求に向けて、技術開発に対する支援を強化するとともに、国際協力、人材育成、規制との対話を進めることにより、イノベーション創出を促進。**
(NEXIPイニシアチブ：Nuclear Energy × Innovation Promotion)

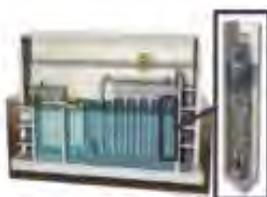
革新的な原子力技術開発

- **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

- ・GAINイニシアチブにより、革新的な原子力技術の開発を促進
- ・この支援を受けて、**小型軽水炉**が2026年に商業運転を見込む。

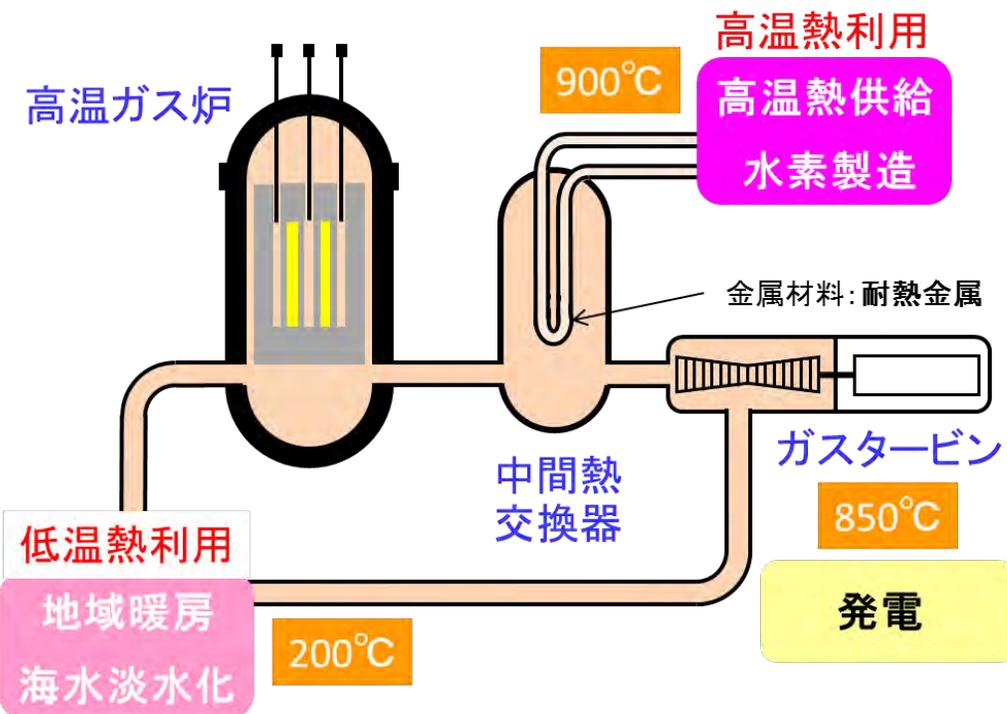
- ・国内技術維持のため、新たに**高速炉の多目的試験研究炉（VTR）**を建設予定。



原子カイノベーションの追求
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
2020年9月18日
経済産業省資源エネルギー庁 舟木 健太郎
より、Page 4

多様な熱利用が可能

- 950°Cの高温で熱を供給可能、水素製造、発電、海水淡水化等の幅広い熱利用が可能。

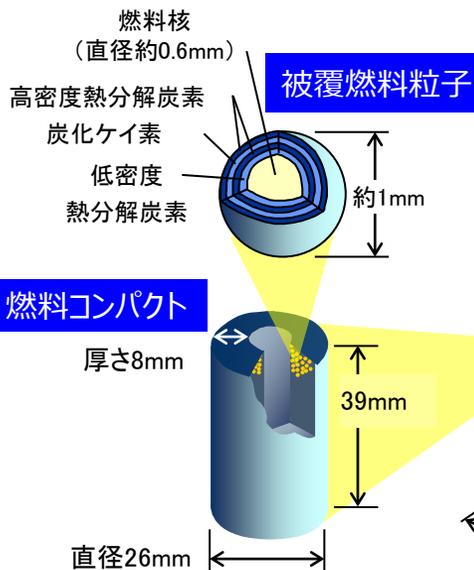


優れた安全性

- 軽水炉のリスク(炉心溶融、水素爆発、大量の放射性物質放出)が福島第一原子力発電所(1F)事故によって強く認識された。
- 原理的には高温ガス炉は1F事故と同様の事故を起こす可能性がない。

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

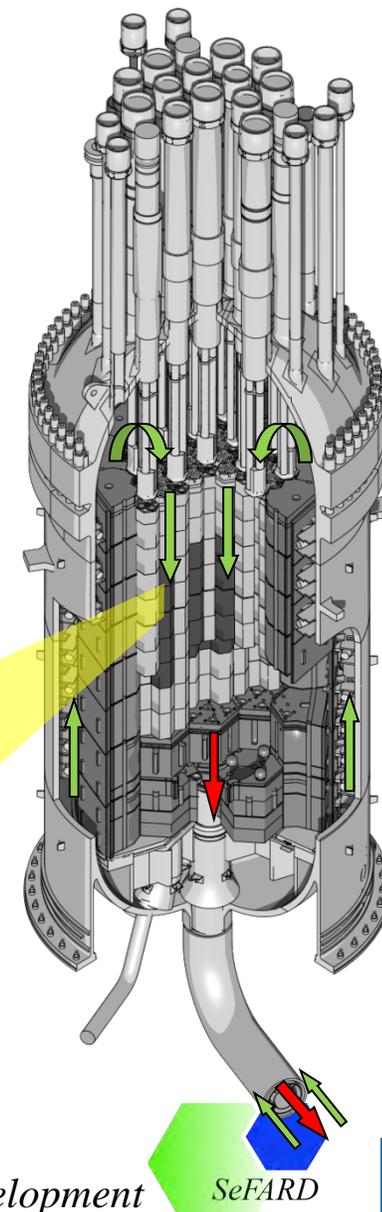
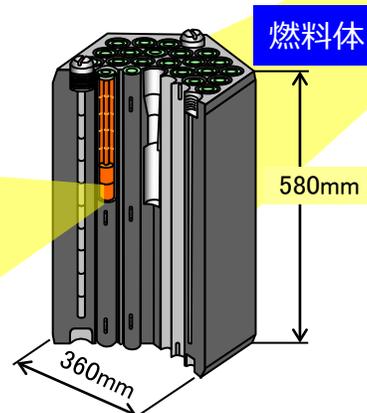


ヘリウム冷却材

高温でも安定 (温度制限なし)

黒鉛構造材

耐熱温度2500°C



項目		主な内容	審査結果	追加対応
地震による損傷の防止	設計基準地震動	350gal(S ₂)から973gal(Ss)に変更	原子炉運転中及び崩壊熱除去運転中に冷却機能を喪失したとしても、原子炉は安定した状態を維持可能であるため、構築物、系統及び機器の耐震クラスの見直しは適当	耐震 Sクラス等について、新しい地震動に基づく耐震評価実施
	耐震重要度分類の見直し	「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」に基づき、いくつかの構築物、系統及び機器の耐震重要度分類を最適化 ▶ 補助冷却設備等：旧Asクラス⇒Bクラス ▶ 非常用発電機等：旧Asクラス⇒Bクラス		
津波による損傷の防止		最新の科学的・技術的知見を踏まえた津波高さを評価：海水面から17.8m	海水面から36.5mの高さにHTTR原子炉施設は設置されており、津波は到達しない	不要
外部からの衝撃による損傷の防止（自然現象等）		主な自然現象の設計条件等(発電炉と同様) ・竜巻：最大風速100 m/s ・火山：火山灰の降灰層厚 50 cm ・外部火災：原子炉建家外壁温度200℃未満	・竜巻や火山から防護すべき構築物、系統及び機器は、原子炉建家内に設置され、防護される設計である。 ・新たに防火帯を原子炉建家周辺に設けることにより外壁温度を満足する設計である。	・竜巻及び火山に対する設計評価の実施 ・防火帯設置 ・各種可搬型発電機の設置
火災による損傷防止		内部火災から防護すべき安全機能等が、想定される火災に対して防護される設計・運用	・原子炉格納容器内への火災感知器の追設、ケーブルトレイの耐火・遮熱防護の追加、可燃物量の制限等により、安全機能等が適切に防護される設計である。	・火災感知器の追設、遮熱防護の追加等 ・可燃物量の管理
多量の放射性物質を放出する事故の拡大の防止 (BDBA)		BDBAの想定内容 ・DBA + 原子炉停止機能喪失 ・DBA + 強制冷却機能喪失 ・DBA + 閉じ込め機能喪失 + Ss地震 ・使用済燃料貯蔵槽の冷却機能喪失	周辺公衆への被ばく影響が最大となる二重管破断事故(DBA)の発生(燃料破損あり)を前提に、各機能の喪失やSs地震の重畳を考慮しても、事故対処可能な対策が準備され、周辺公衆への被ばく量は限定される。	・可搬型発電機や可搬型計測器の設置 ・対策に必要な機器の耐震評価(Ss地震動)

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又熱電供給



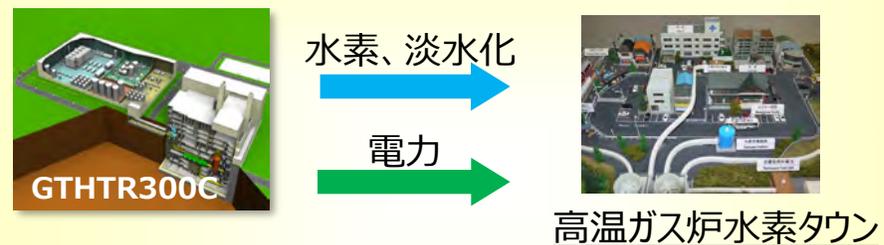
- 蒸気によるプロセス熱供給（化学プラント、石油精製プラント、等）
- 蒸気タービン発電による電力供給

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又は水素製造により吸収
- 再生可能エネルギーの変動に応じて、高発電効率を維持したまま発電量を調整

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
- 熱利用率が80%弱

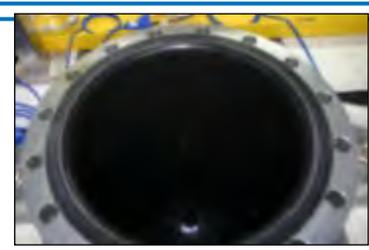
高温で高効率（ガスタービン発電50%）、高熱利用率（最大80%弱）であるため経済性に優れ、高い安全性を有するために需要地近接立地が可能

ISプロセス 水素製造技術開発

セラミックス製
硫酸分解器
(~900°C)



Ni基合金製
HI分解器 (~500°C)



フッ素樹脂ライニング製
ベンゼン反応器 (~100°C)

工業材料製反応器における耐食・耐熱性健全性の確認

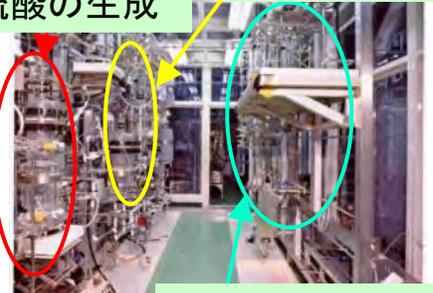
実用化

民間に移行

HTTR熱利用試験

基盤技術を確立

ヨウ化水素と硫酸の生成
硫酸分解



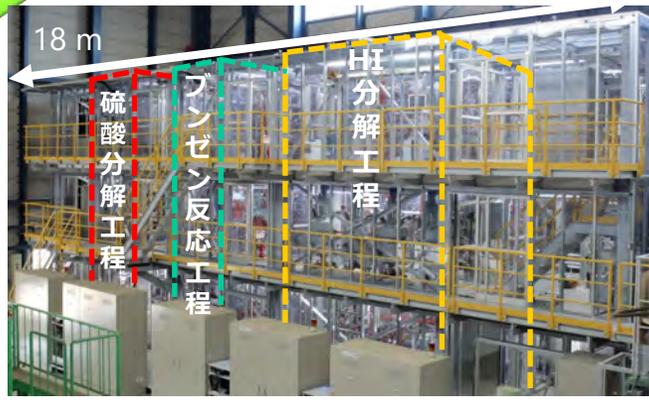
ヨウ化水素分解

運転制御技術の開発し、毎時約30%の水素を1週間にわたって連続製造することに世界で初めて成功 (ガラス製, 0.03 m³/h-H₂)

【現在】工業材料機器試験 (2010~)

主たる要素技術開発 (2005-2009)

- 効率向上のための放射線製膜技術
- SiC製反応器の製作性



連続水素製造試験装置 (H25年度完成)
プラント全系機器の信頼性、長時間運転の安定性を検証 (金属・セラミックス製, 0.1 m³/h-H₂)

工学基礎試験 (1999-2004)

最近の成果

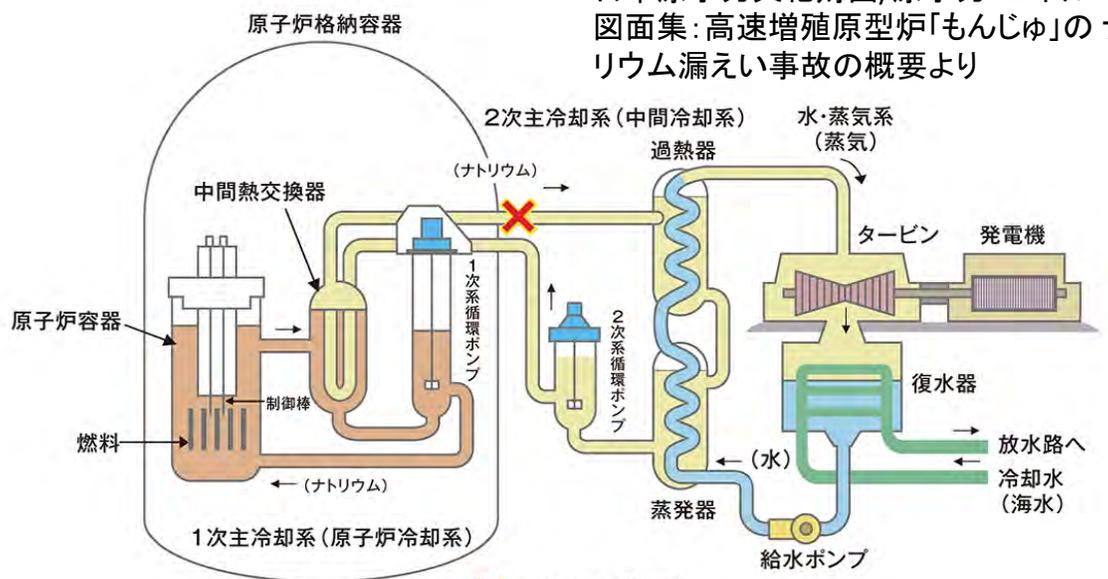
実験室規模試験
閉サイクル理論を検証 (1997)

- 世界で初めて実用工業材料で製作したISプロセス水素製造試験装置による150時間連続運転を達成し、運転手順の有効性を確認¹⁾ (2019.1)。
- 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)。

1)日経産業新聞、毎日新聞、他、合計10社に掲載

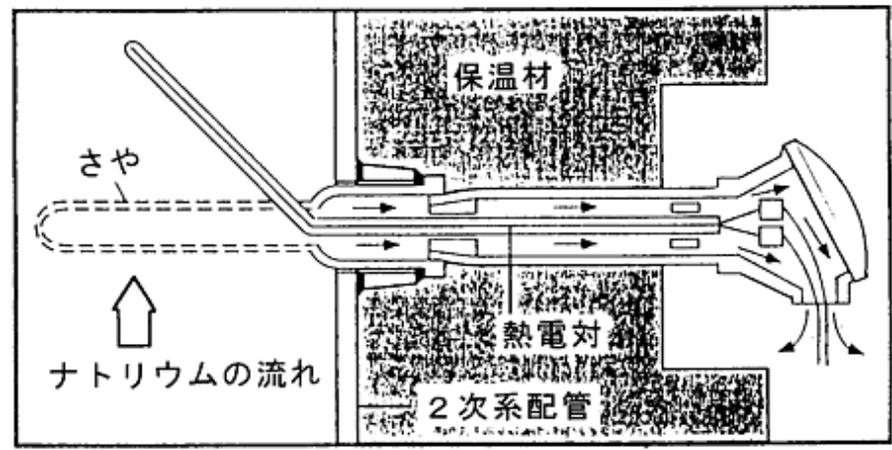
高速増殖原型炉「もんじゅ」のNa漏洩事故と新型炉開発

日本原子力文化財団/原子力・エネルギー
 図面集: 高速増殖原型炉「もんじゅ」のナトリウム漏えい事故の概要より

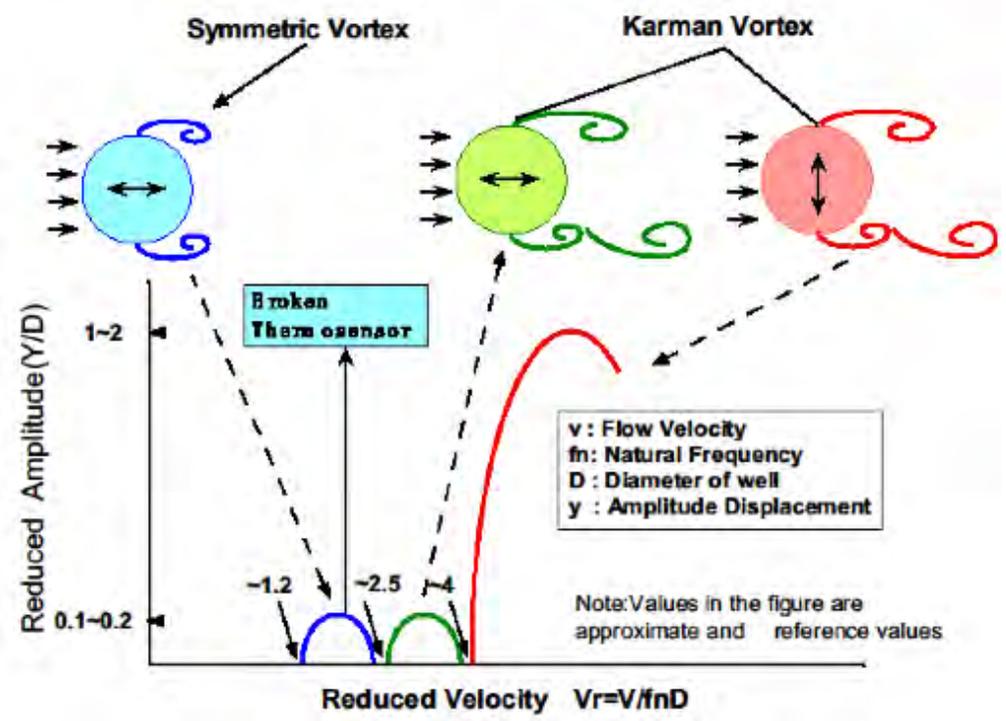


✕: 漏えい箇所

1995年12月



(b) 折損ナトリウム温度計からのナトリウム漏えい流路



「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」,
 日本機械学会基準, JSME S 012-1998

ナトリウムの燃焼試験

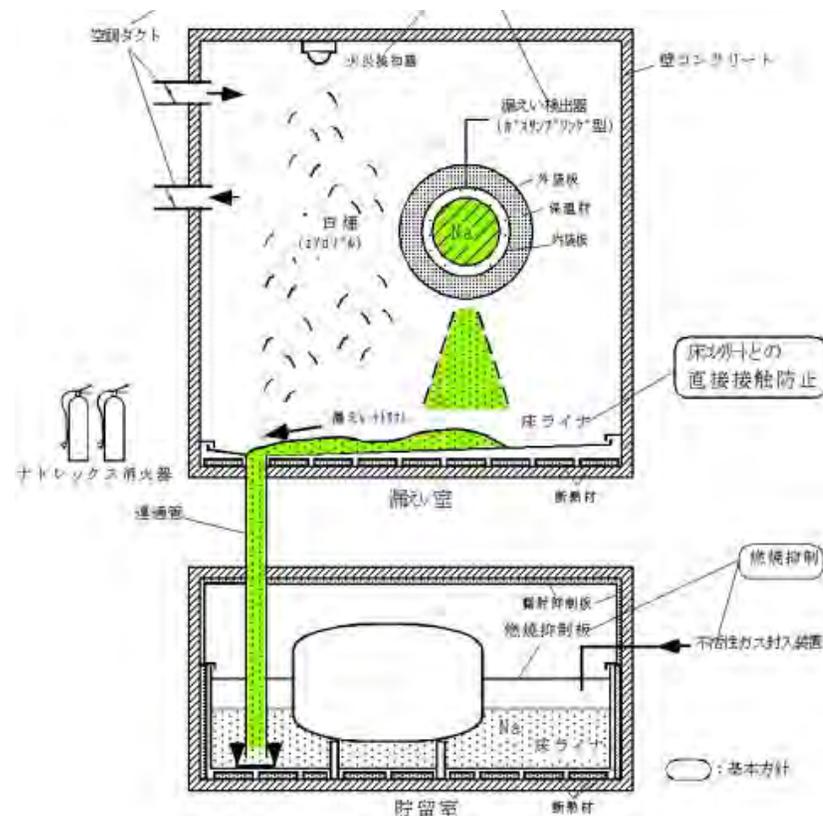
初期温度: 400°C、プール面積: 0.5m²



- 燃焼時の火炎高さは数cm
- ナトリウム酸化物による白煙(エアロゾル)が発生
- Naの供給や酸素との接触を断って燃焼を停止。

2次主冷却系: 空気雰囲気中の漏洩・燃焼の対策

- 系統Naのダンプタンク移送による漏洩量制限
- 鋼製ライナーによるコンクリートとの接触防止
- 小規模漏洩: ライナーに堰を設けて漏洩面積の拡大防止
- 大規模漏洩: 連通管によるダンプタンク室での窒息消火



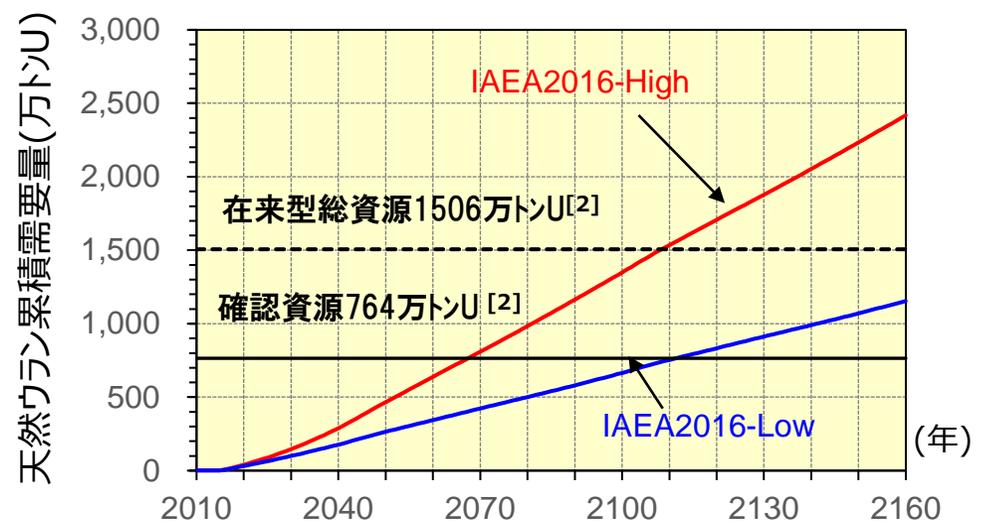
■ 世界の原子力発電と天然ウランの需要の見通し

- 原子力発電量規模：現在 390GWe ⇒ 2050年に 930GWe程度
⇒ 2070年に確認資源を消費しつくし、ウラン価格が高騰の可能性
(現状の400GWe程度で維持の場合でも、22世紀初めに同様な事態に)

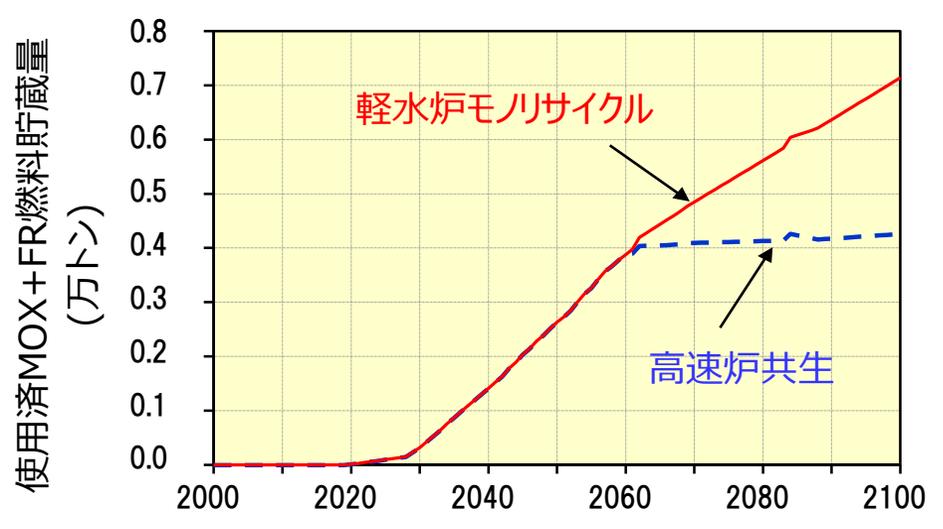
✓ 将来、日本の軽水炉利用に必要なウランの輸入が困難になるリスク (左図)

■ 軽水炉の使用済み燃料の蓄積

- 使用済み燃料は再処理(U, Puの分離)により、減容化・有害度低減
- 分離したPuはプルサーマルで利用。使用済みMOX燃料は当面、貯蔵



世界全体でのウラン需要の予測



使用済みMOX燃料と使用済みFR燃料の貯蔵量

■ 軽水炉(現行商用原子炉) + 再処理しない場合:

- U-235(燃えるウラン)を燃焼
- 燃え残りのU-235や生成したPuはそのまま地層処分
- ウランの利用効率は高々0.5%程度

■ 軽水炉 + 燃料再処理 (Puサーマル) :

- U-235(燃えるウラン)を燃焼
- 燃え残りのU-235や生成Puを燃料再処理でリサイクル利用
- ウランの利用効率は高々0.7~1.5%程度

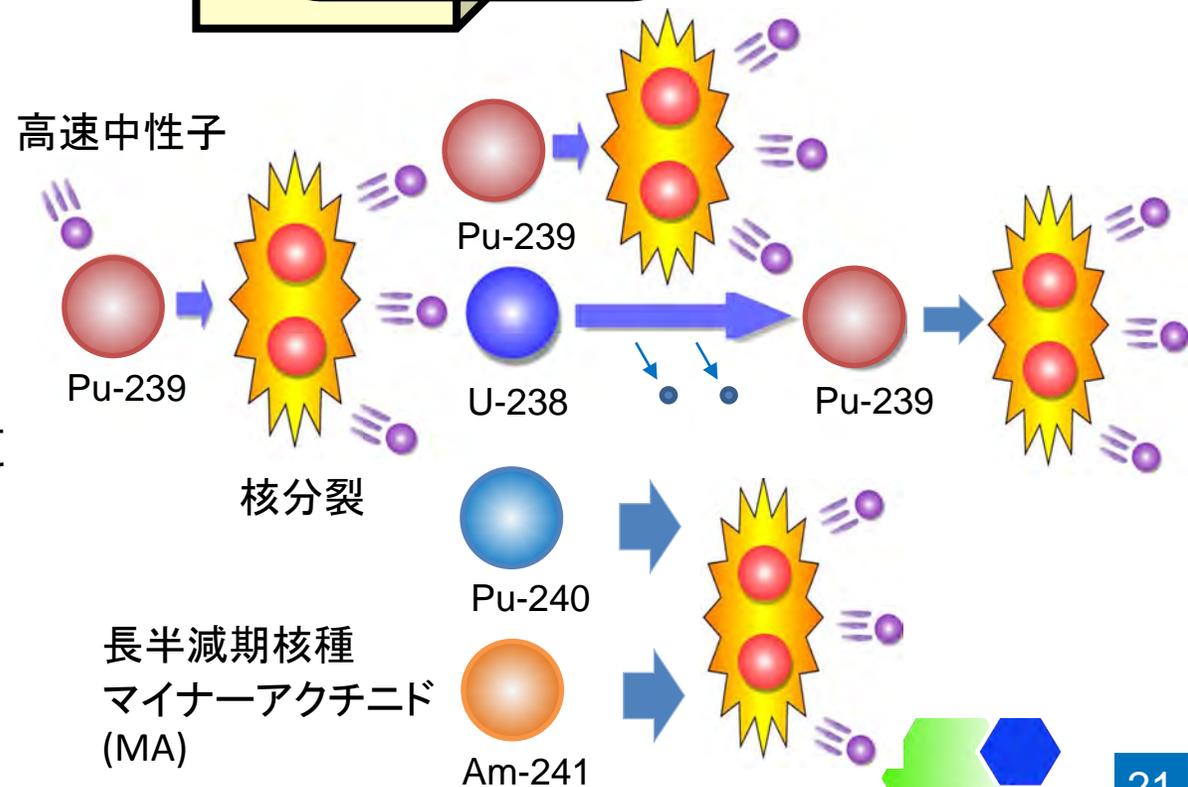
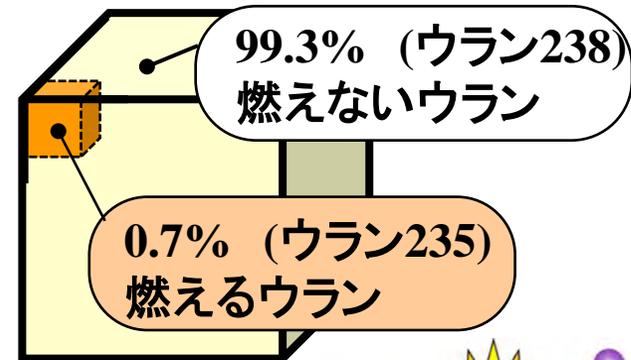


Uの利用効率を飛躍的に改善

■ 高速炉 + 再処理 (FBRサイクル) :

- Puを燃焼しながら、“燃えないU-238”を“燃えるPu”に変換
- 燃料再処理でPuをリサイクル利用
- **ウランの利用効率を数10%に高めることができる。**

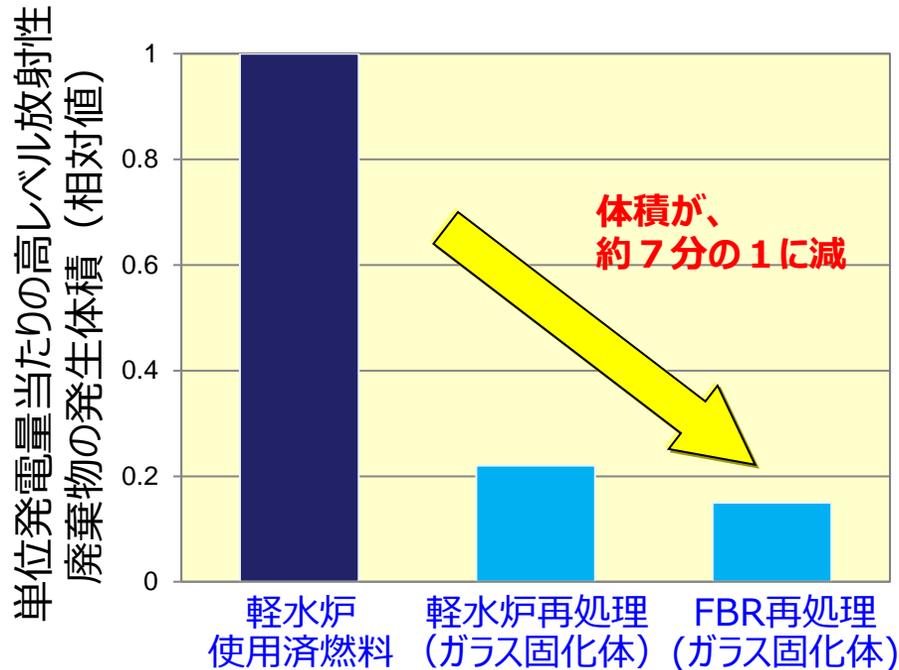
天然ウランの構成



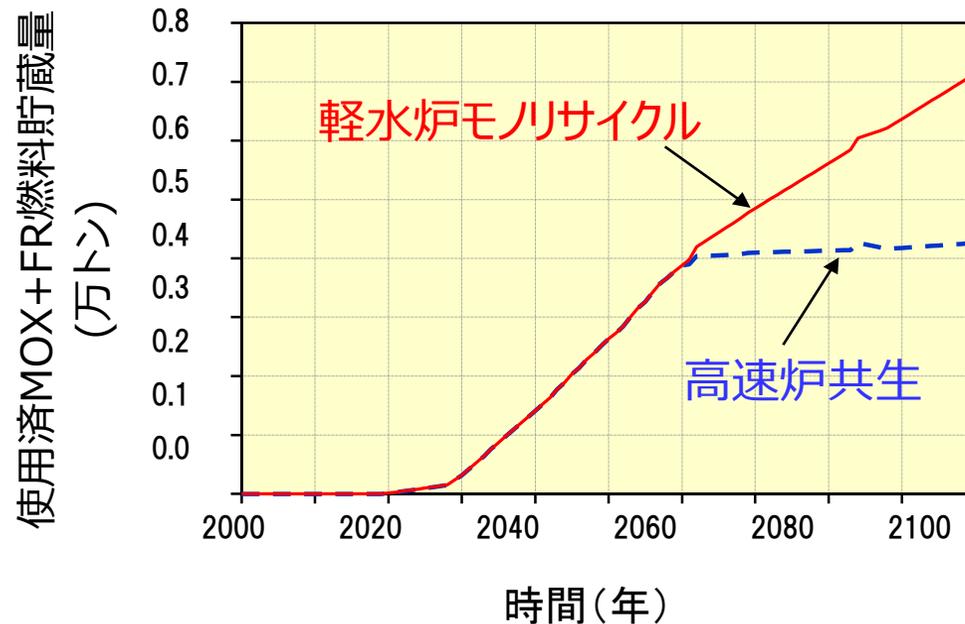
高速炉によるPuの利用と放射性廃棄物の低減

- 使用済み燃料中の長寿命な高レベル放射性核種は、Puとマイナーアクチノイド（MA）
- 高速炉を使った核燃料サイクル：
 - Puを劣化させずMAを含めて核燃料として利用可能
 - MAをサイクルの中に閉じ込めることが可能（累積させない）
 - 軽水炉と並行して使うことで、Puを蓄積することなく利用可能
- 最終的にガラス固化体にした時の潜在的有害度、必要処分場面積を低減

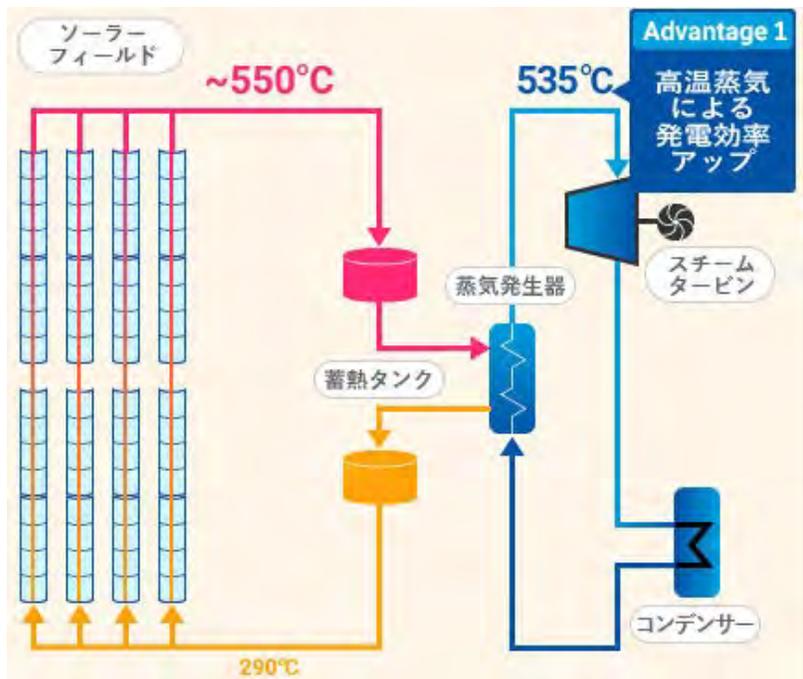
放射性廃棄物の発生量を低減



使用済みMOX燃料と使用済み高速炉燃料の貯蔵量

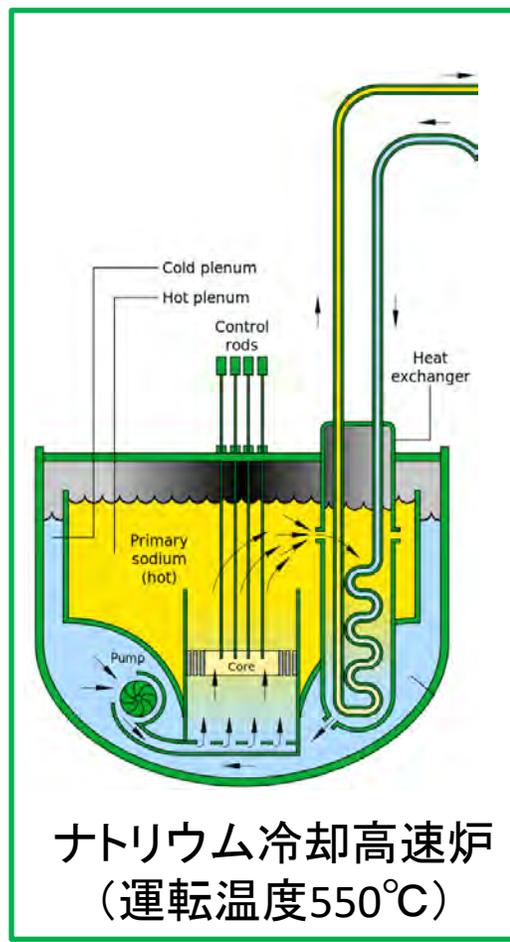


550°Cの高温を利用した多様な熱利用



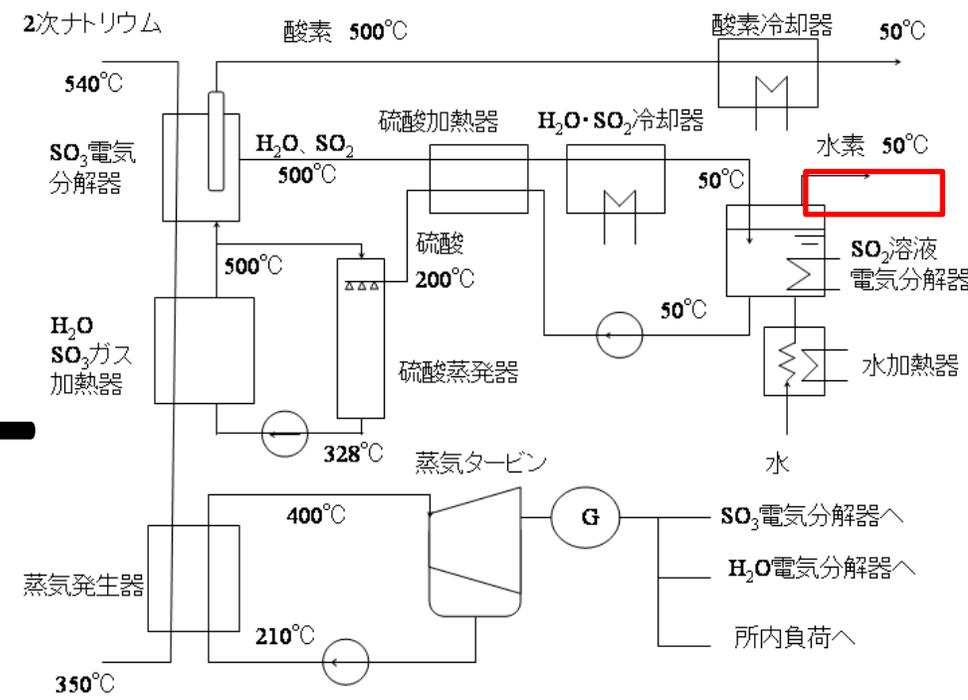
溶融塩を用いた蓄熱・発電システム*1
(太陽熱発電で実用化済み)

+



ナトリウム冷却高速炉
(運転温度550°C)

+



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

↓

- 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

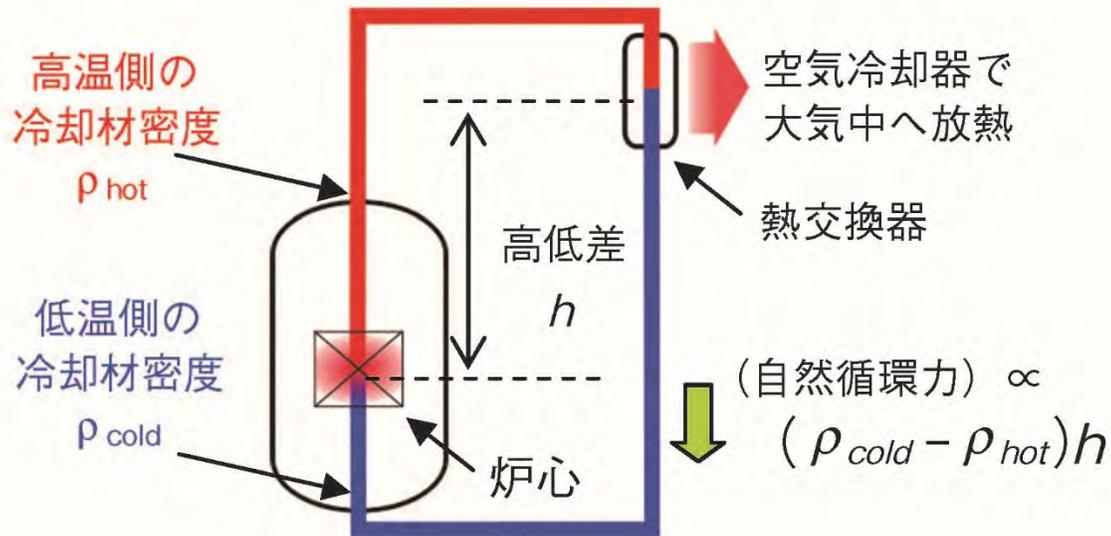
- グリーン水素の製造

*1: <https://www.chiyodacorp.com/jp/service/solar-energy/>

*2: Y.Chikazawa, et al. : Proc. of 15th WHEC, paper ID30J-08 (2004)

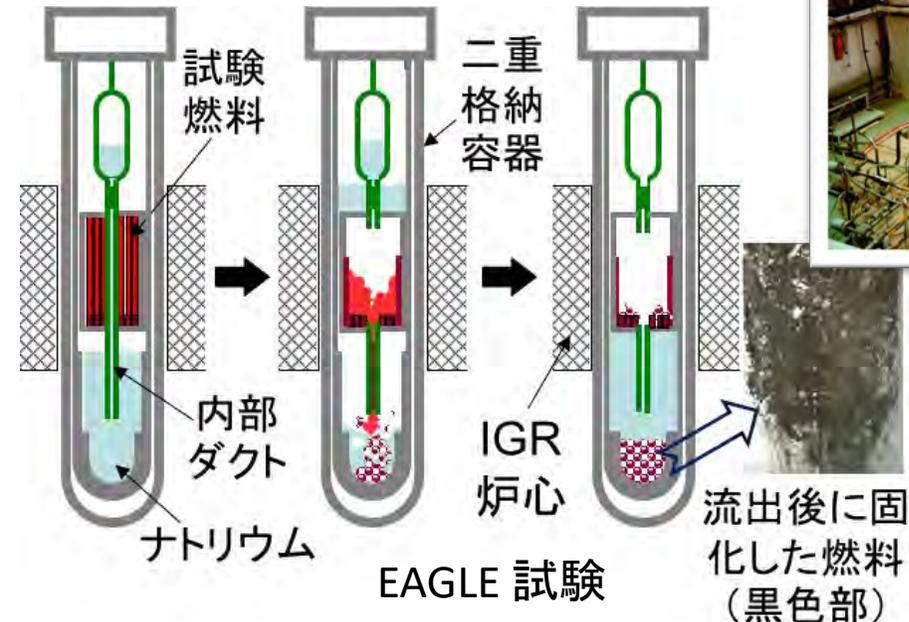
<炉心停止後の崩壊熱の除去が容易>

- ナトリウムは大気圧下の**沸点が883℃**と高く、炉心出口温度550℃でも加圧する必要がない。(低圧システム)
- 1次系のバウンダリーが破損しても、低圧なので**ナトリウムの保持が容易**で、炉心が露出するリスクが低い。
- 熱伝導率が水の100倍**かつ高温で運転されることから、フィンつき熱交換器(空気冷却器)で、大気に放熱が容易で、空気冷却器を高いところに置く。
- 温度が高いと軽くなる物性と**高所に空気冷却器**を配置することで、密度差でナトリウムが**自然循環**し、炉心の残留熱を無限のヒートシンクである**大気に放熱**できる。



<炉心溶融事故時の再臨界排除>

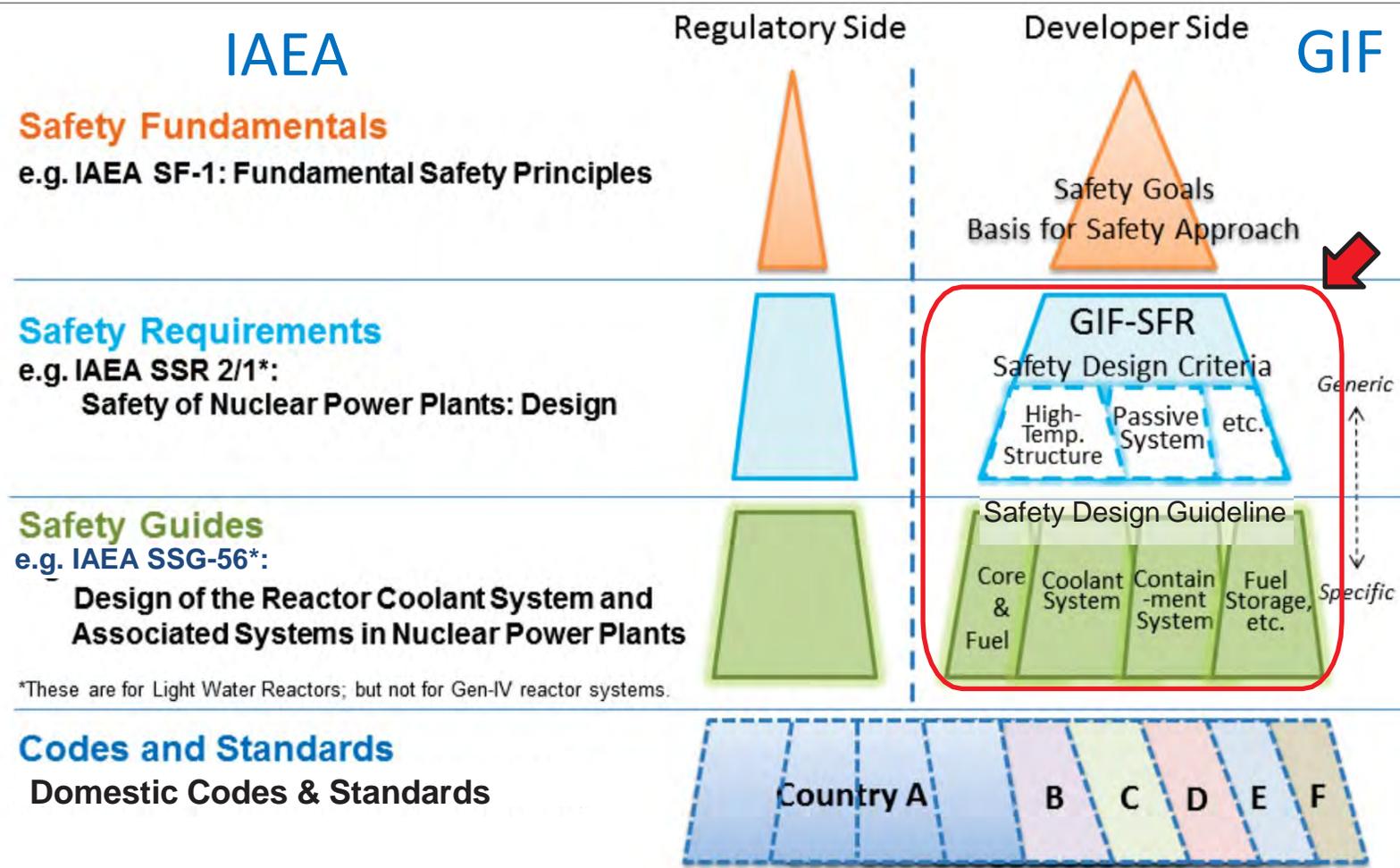
- 可能性：高速炉は一般に炉心の配置が最大反応度体系でないため、万が一の**炉心溶融事故時に、正の反応度**が入って、再臨界と出力上昇が起こる可能性がある。
- 防止：事故時に炉心が溶融しないよう、高温で**受動的に制御棒**を挿入する仕組み。(キュリー点で磁力を制御)
- 緩和：万が一炉心が溶融し始めても、**溶融燃料を早期に排出**できる炉心構成とする。燃料が出ていくことで未臨界を維持。
- 終息：**自然循環**や**熱伝導**を使い、一旦溶けた**燃料を確実に保持・冷却**して、事故を終息させる。



カザフスタン IGR試験炉



Safety Design Criteria (SDC) and Guideline (SDG) of Sodium cooled Fast Reactor in GIF*



- SFRのSDCはIAEA, OECD/NEA WGSAR、各国規制機関のレビューを経て完成。
- SFR SDGは2段階で作成中。
 - SDG on Safety Approach and Design Conditionが規制側のレビューを受けて完成
 - SDG on Key Structures, Systems and Componentsは、レビューを受けて改訂中。
- さらに他の炉型（LFR, VHTR, MSRなど）に展開中。
- IAEAの多様なSMR用安全基準構築活動に参加、知見を反映。

* GIF: Generation-IV International Forum（日米仏英ロシア中国など13か国とEUが加盟）
https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_93020/safety-design-criteria

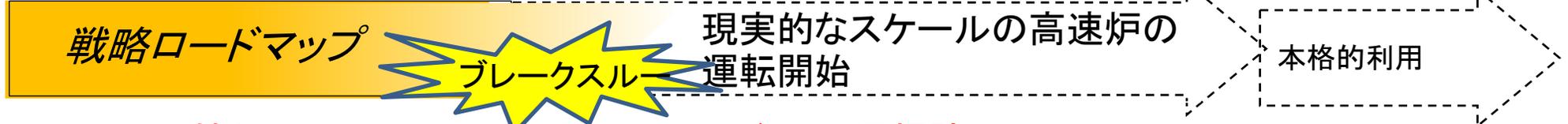
高速炉開発の意義とその選択肢

2019年

今後10年程度の開発作業

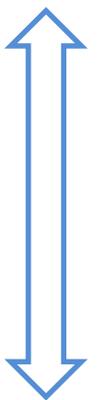
21世紀半ば頃

21世紀後半



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

様々な
選択肢
に対応



- 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)

- 2050年カーボンニュートラルに向けて原子力、新型炉の役割
 - 変動再エネ（太陽光、風力）の導入を支える安定・脱炭素電源、機動性への期待
 - 持続可能なエネルギーシステム：環境影響、廃棄物、経済安全保障
- 世界におけるSMR（小型炉）開発の動きと機動性の強化
- 日本における原子力イノベーション
 - NEXIP
 - 高温ガス炉（高温を生かした機動性、水素製造）
 - ナトリウム冷却高速炉（核燃料サイクルとPu利用、廃棄物減容、熱利用）