

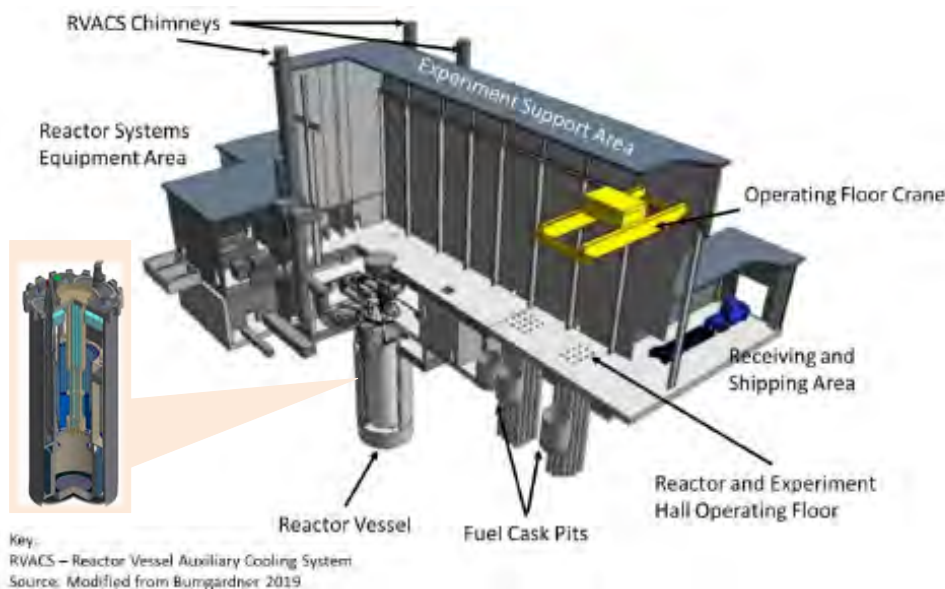
# 米国のVTR, Natrium計画と 日本の高速炉開発

令和4年7月18日

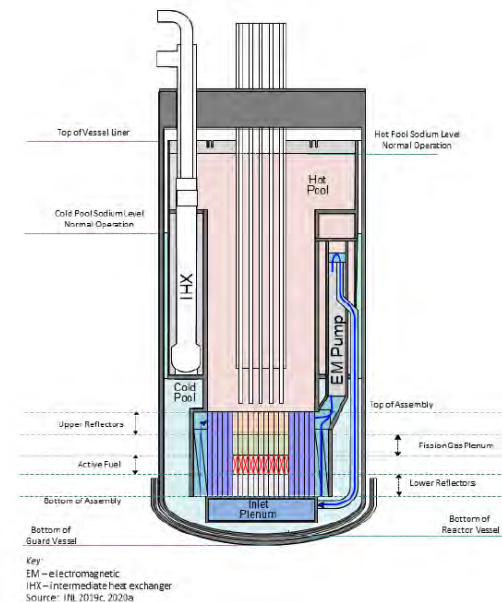
日本原子力研究開発機構  
佐賀山 豊

# VTRの概要

- 米国では、FFTF炉、EBR-2炉の運転停止後、米国内に高速中性子照射試験炉が無い状況
- 米DOEは、ナトリウム冷却による**多目的高速実験炉（VTR）**の建設を推進。VTRはナトリウムの他に鉛、熔融塩、ガスの冷却材を用いて炉内試験が可能。**高速中性子照射が可能な金属燃料を用いる高速炉である。発電はしない。**
- DOEのWhite Paperでは、Natrium炉とVTR炉を連続して建てることで、100~200億程度の経費削減に寄与、とされる。
- 設計・建設はNatrium炉と同じ**ベクテル社・GE日立社・テラパワー社連合**。
- PRISM炉（GE日立・ニュークリアエナジー社）の設計技術がベース



VTR施設の概念図



VTRの断面図

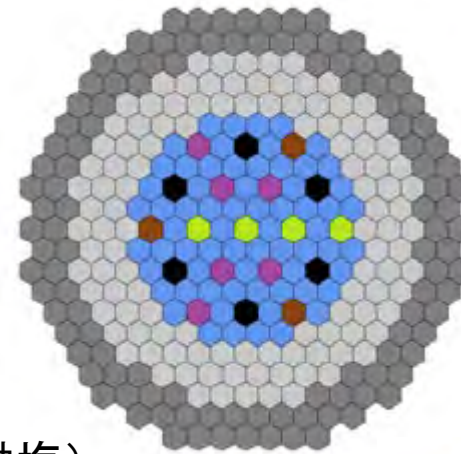
# VTRの概要

## 【VTRの仕様】

- ① 出力: ~300MWt
- ② タンク型炉
- ③ 金属炉心燃料
- ④ 高速中性子束は約 $4 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$
- ⑤ 照射量は30 dpa/年以上
- ⑥ 炉内カートリッジを用いることで、多種類の冷却材環境下 (Na・鉛/鉛ビスマス・ガス・熔融塩) での燃料や材料の試験が可能
- ⑦ 長尺燃料、有効試験部は1m以下

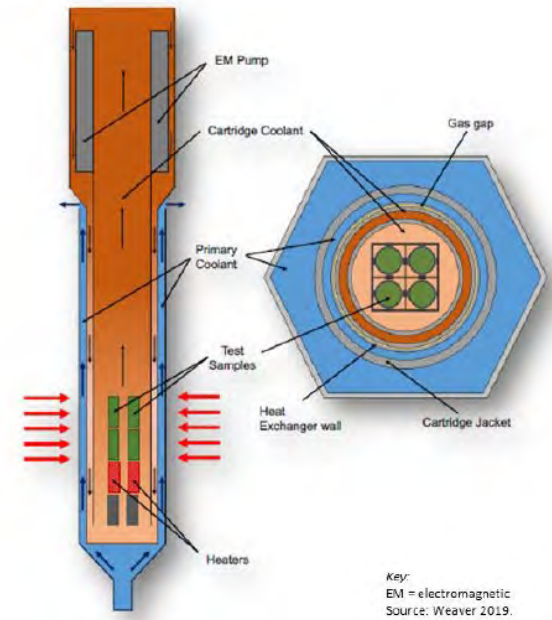
## 【参考: 常陽の主な仕様】

- ① 出力: 100MWt
- ② ループ型炉
- ③ MOX炉心燃料
- ④ 高速中性子束: 最大約 $2.9 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$  (新規制基準対応後)



炉心の断面図

- Driver fuel (66)
- Control assembly (6)
- Safety assembly (3)
- Instrumented/rabbit fixed test location (6)
- Example non-instrumented test location (4 shown)
- Reflector (114)
- Shield (114)



カートリッジの断面図

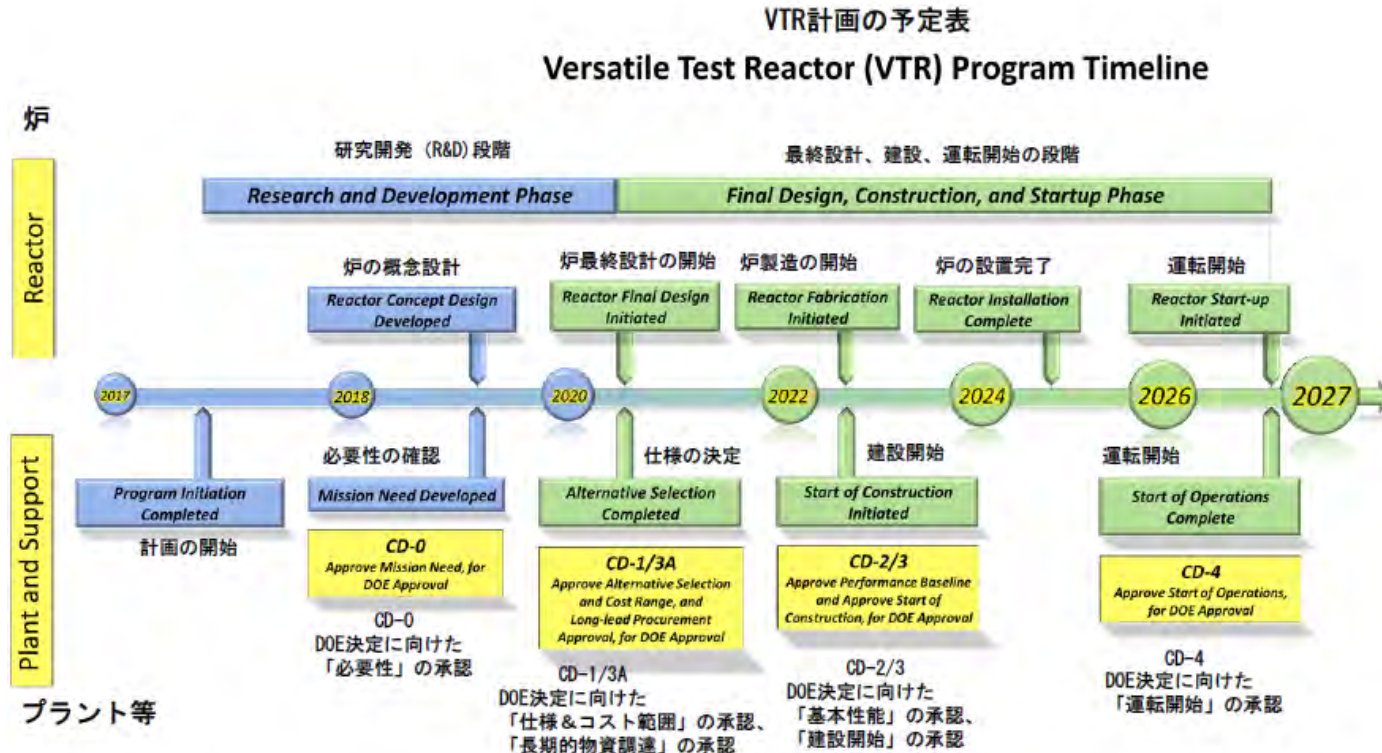
参考:

- ① John H. Herczeg DOE 原子力局次官補代理「U.S. Department of Energy Advanced Reactor Research and Development Program for Fast Reactors」(高速炉開発会議第8回戦略WG資料、2018年3月1日)
- ② John H. Herczeg DOE 原子力局次官補代理の発言「U.S. Department of Energy Advanced Reactor Research and Development Program for Fast Reactors」(高速炉開発会議第8回戦略WG(2018年3月1日)の議事録(同4月25日公表))
- ③ VERSATILE TEST REACTOR (VTR) OVERVIEW, Tony Hill, Idaho State University, Idaho National Laboratory, Applied Antineutrino Physics Workshop, October 10-11, 2018
- ④ DOE/EIS-0542 May 2022, Final Versatile Test Reactor Environmental Impact Statement Volume 1
- ⑤ Versatile Test Reactor(VTR) Experimental Capabilities, KEVAN D. WEAVER, NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, DECEMBER 7, 2020

Key:  
EM = electromagnetic  
Source: Weaver 2019.

# VTR開発計画と現状

- 当初DOEは、2022年にVTRの立地サイトを決定し、2026年には運転を開始する予定であった。
- 2022年度は上院・下院で\$0の査定となり、予算獲得が不透明な状況。



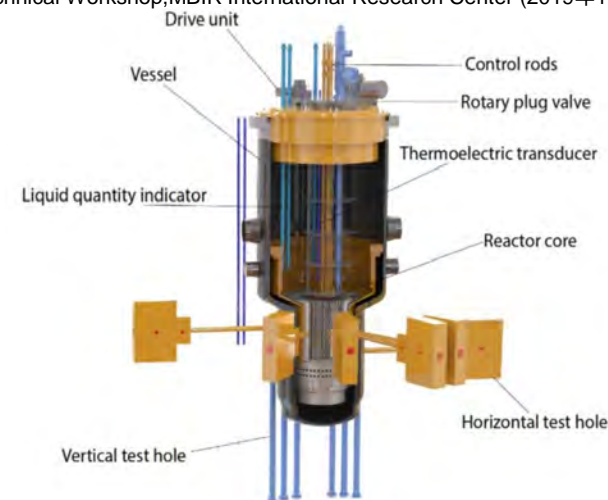
出典: 「Advanced Reactors Summit VI」(2019年1月29-31日)における Pasamehmetoglu氏発表  
([https://gain.inl.gov/SiteAssets/VersatileTestReactor/VTR\\_OVERVIEW.pdf](https://gain.inl.gov/SiteAssets/VersatileTestReactor/VTR_OVERVIEW.pdf))



- MBIRは、包括的プログラム「ロシア連邦における原子力利用における設備、技術及び科学研究の開発」の一環として、建設される。
- 高速実験炉BOR-60の後継炉に位置づけられる。
- 設計寿命は最大50年。3つのループチャンネルがあり、ナトリウム、鉛、鉛ビスマス、ヘリウム、熔融塩の冷却材に対応。燃料（MOX、窒化物、金属）や原子炉材料等の試験が可能
- 2015年5月、デミトロフグラードにあるロシア国立原子炉科学研究所（RIAR）が建設許可を取得
- 2015年9月、着工
- 2022年1月、フランス、韓国及びアフリカ原子力委員会が参加提案
- 2022年1月、ロスアトム社は2027年に建設完了と発表

項目	値
熱出力(万kWt)	15
電気出力(万kWe)	~4
燃料	振動充填U-PuO <sub>2</sub>
1次冷却材	ナトリウム
1次系圧力	0.6MPa
1次系温度	330-512°C
設計寿命	50年

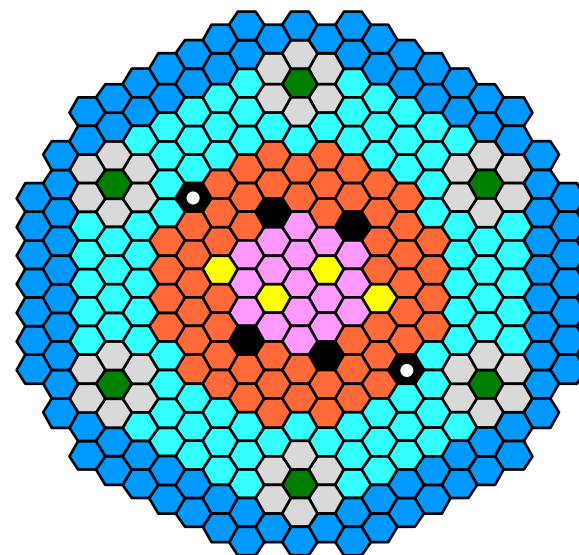
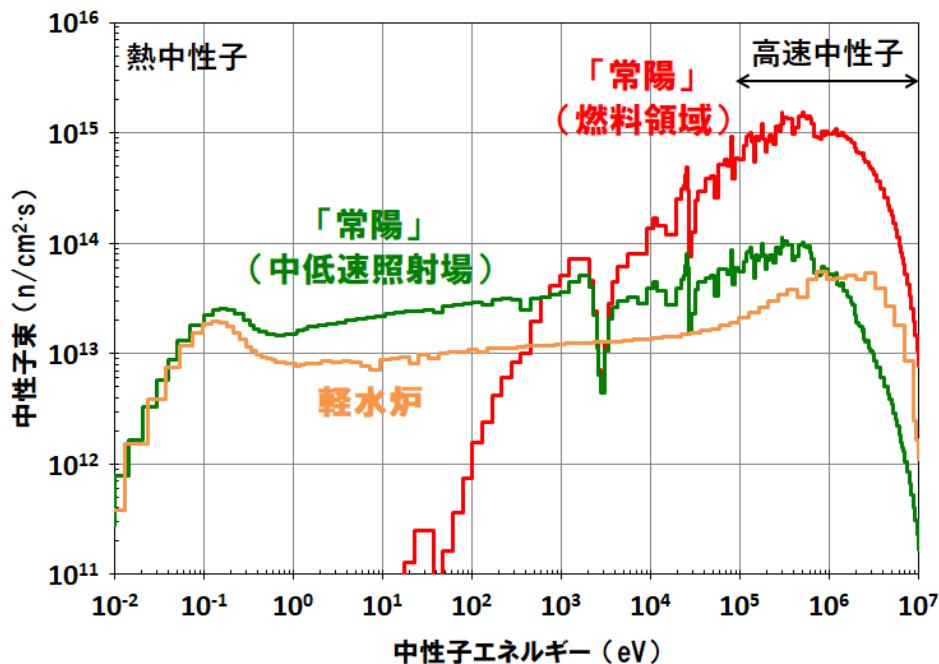
出典: Experimental capabilities of MBIR reactor Scientific and Technical Workshop, MBIR International Research Center (2019年11月)



# 中性子照射施設としての「常陽」の特徴

- **高速中性子照射量** ( $\sim 10^{15} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ )
- **反射体領域での中低速中性子照**(\*1)
- **照射後試験 (PIE) 施設が隣接**

医療用ラジオアイソトープ(RI)製造(\*2)  
ナトリウム以外の冷却材(\*3)  
等、幅広い研究・技術開発に対応可能



炉心構成

- 燃料領域
- 照射試験用集合体
- 反射体 (ステン/鋼) 領域
- 中低速照射場 (6カ所)
- 中性子減速用集合体
- 主炉停止系 (4本、炉心第3列)
- 後備炉停止系 (2本、炉心第5列)

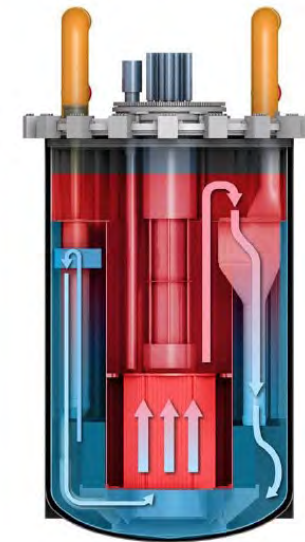
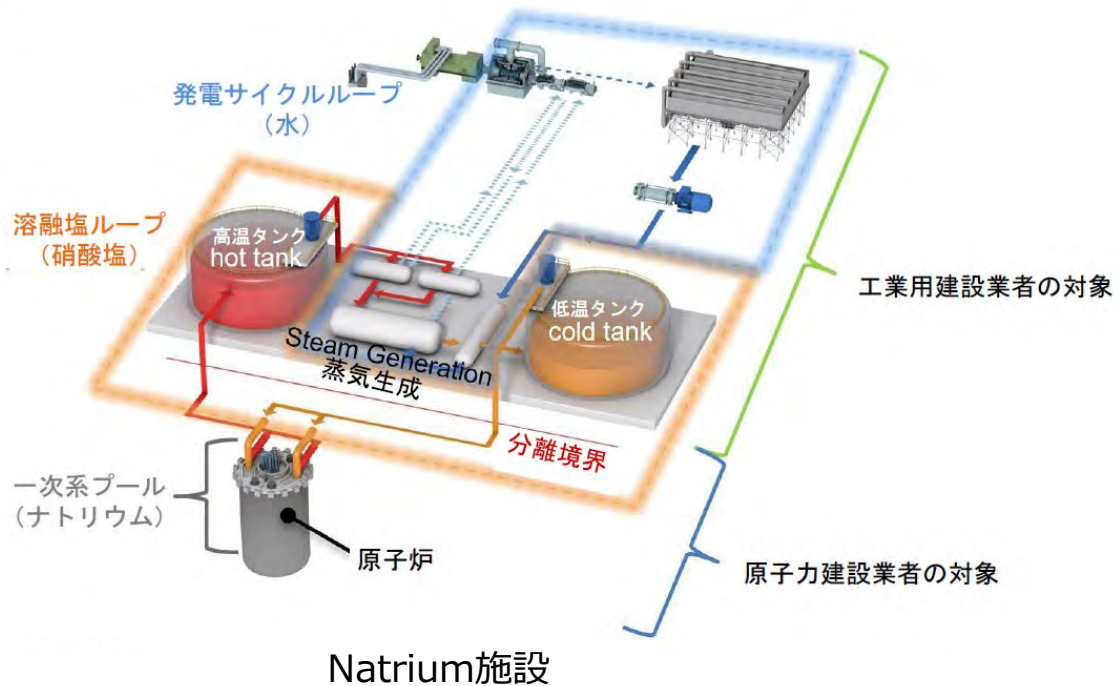
\*1: 反射体領域に減速材を設置することにより軽水炉に近いスペクトルでの照射が可能

\*2: Ac-225の場合は、高速中性子が必要であり炉心燃料領域の「照射試験用集合体」、Mo-99(Tc-99m)の場合は、中低速中性子が必要な「中低速照射場」を使用

\*3: キャプセル内に他冷却材を封入する可能性はあるが事故時の評価等が必要

# Natriumの概要

- ビル・ゲイツ氏がオーナーであるテラパワー社は、GE日立社・ベクテル社と合同でナトリウム冷却高速炉Natriumの開発を推進。
  - ✓ 原子炉はGE日立社のPRISMがベース。2次系以降に熔融塩（硝酸塩）技術によるエネルギー貯蔵システムを組合せる。
  - ✓ 2020年10月、米国DOEの革新炉実証プログラム（ARDP）に選定、最大2000億円の資金を獲得、ワイオミング州ケメラーで7年以内の実証炉建設・運転を目指す。

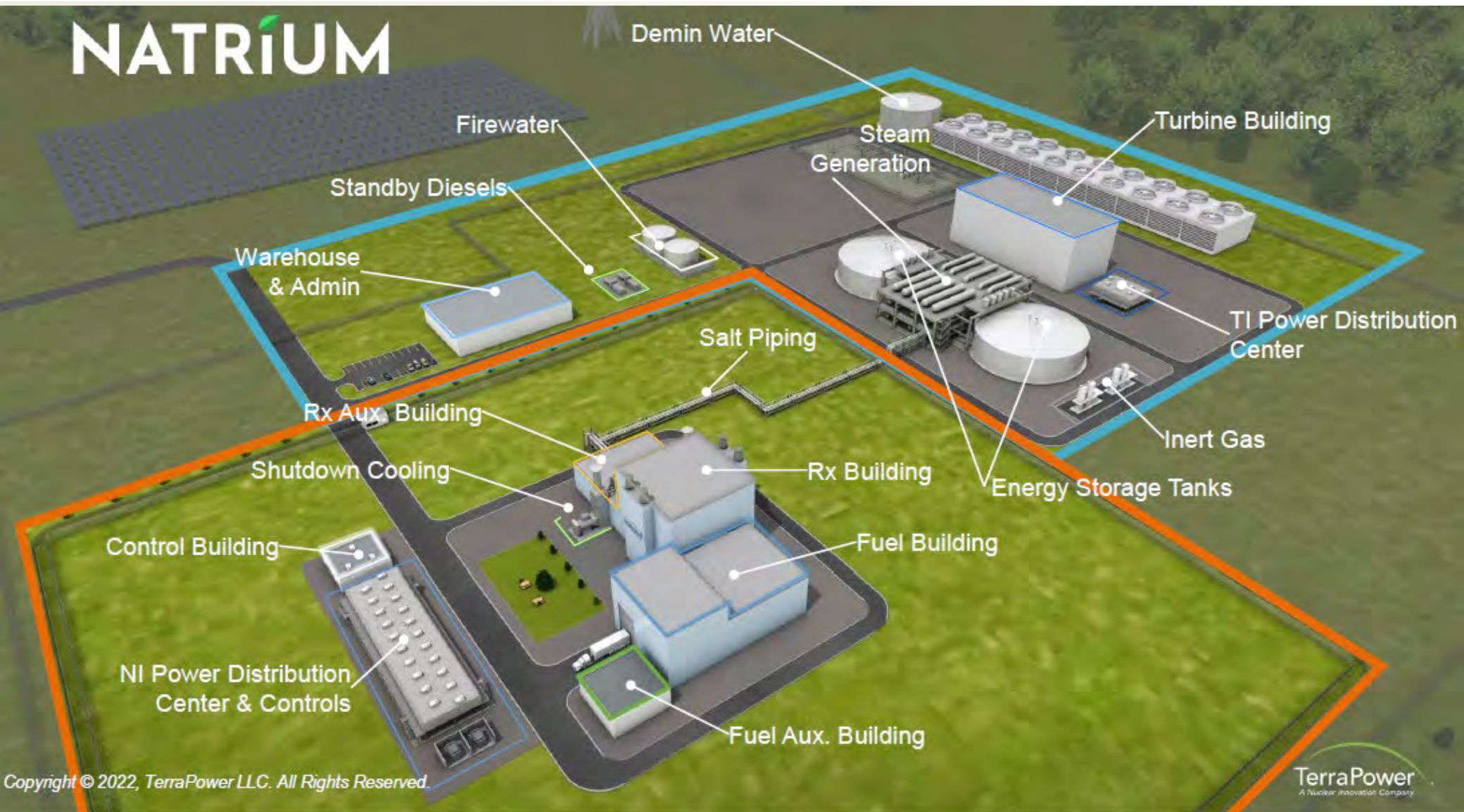


- ・ 大気圧で運転
- ・ 優れた熱伝導性
- ・ 熱除去系の小型化
- ・ 高温性能
- ・ 高い実用性
- ・ 豊富な経験

Natriumの断面図



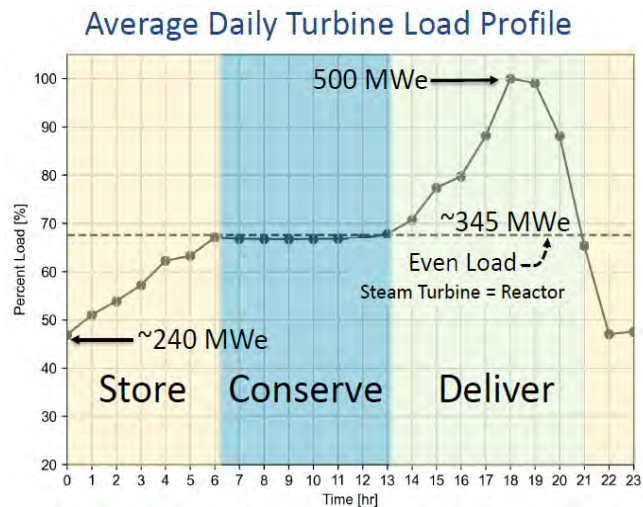
# Natriumの概要



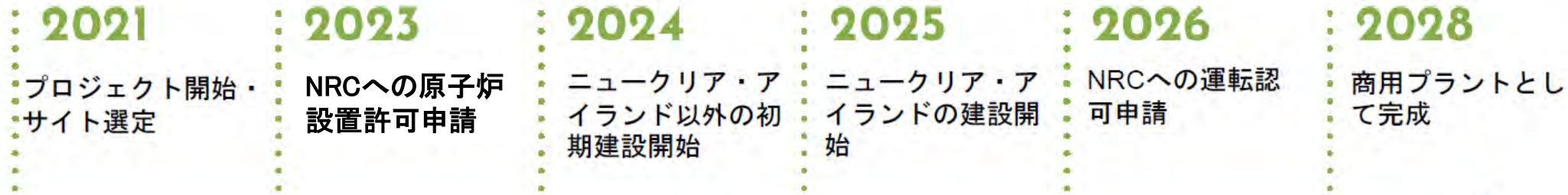


## 【仕様】

項目	仕様
炉出力	345MWe
タービン出力	500MWe (熱貯蔵により5.5時間対応)
冷却材	ナトリウム
熱貯蔵媒体	熔融塩 (硝酸塩)
炉型	タンク型
燃料	金属燃料 (HALEU)
崩壊熱除去	RVACS及びSG



## Natriumのスケジュール



エンジニアリング、調達、建設、試運転

出典: 第2回革新炉WG 資料4 METI:Advanced Reactor Working Group, Eric Williams Vice President of Engineering, Terrapower

2021年6月

米国原子力規制委員会(NRC)へ規制関与計画(REP)を提出

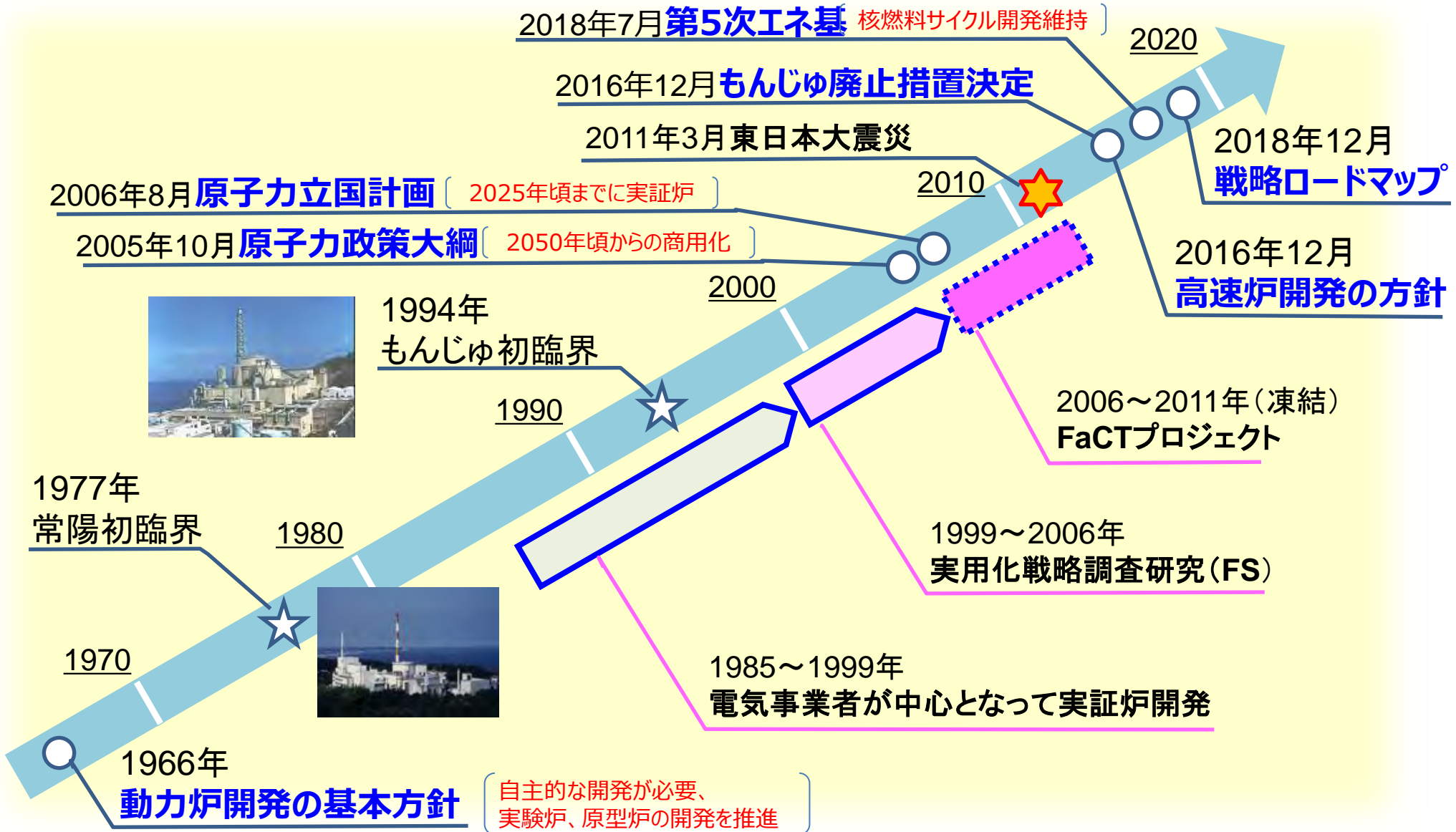
2021年10月

DOEとテラパワー社との契約事業が開始

2022年1月

**JAEA/MHI/MFBRとテラパワー社の協力に関する覚書を締結**

# 我が国における高速炉サイクル開発の経緯





## 「高速炉開発の方針」 (2016年12月20日 原子力関係閣僚会議決定)

- 我が国は「エネルギー基本計画」※に基づき、核燃料サイクルを推進するとともに、高速炉の研究開発に取り組むとの方針を堅持。
  - 昨今の情勢変化（福島事故後の安全性の要請、電力自由化、国際動向）を踏まえて、世界最高レベルの高い安全性と経済性の同時達成を追求。  
※第4次エネルギー基本計画（2014年4月11日閣議決定）
- 今後の高速炉開発は①国内資産の活用、②世界最先端の知見獲得、③コスト効率性の追求、④責任体制の確立という4原則を関係者で共有して推進。
  - 開発方針を具体化する「戦略ロードマップ」を2018年目途に策定し、「実証ステージ」における今後10年程度の開発作業を特定。（2017年初頭から「戦略ワーキンググループ」を設置して検討）
  - 国際協力が国内プロジェクトと相乗効果を生み出すよう全体統括をしながら、日仏ASTRID協力、日米協力等の国際協力、常陽、その他の国内施設を活用。もんじゅ再開で得られる予定であった知見は、国際協力等の方策で入手。

## 「戦略ロードマップ」（2018年12月21日 原子力関係閣僚会議決定）

- 「高速炉開発の方針」に基づき、今後10年程度の開発作業を特定する「戦略ロードマップ」を策定。
- 基本的考え方
  - 高速炉開発の意義として、資源の有効利用性、廃棄物の減容、有害度の低減という3点の重要性は不変ながら、プルトニウムマネジメント、MOX使用済み燃料処理という要素も追求する必要がある。
  - 「ウラン需給の現状等の政策環境・社会情勢を勘案すれば、高速炉の本格的利用が期待されるタイミングは21世紀後半のいずれかのタイミングとなる可能性がある。」「上記の場合、技術や経験の段階的な蓄積・発展の必要性を勘案しつつ、例えば21世紀半ば頃の適切なタイミングにおいて、技術成熟度、ファイナンス、運転経験等の観点から現実的なスケールの高速炉が運転開始されることが期待される。」
  - 今後10年程度の各プレイヤーの役割：
    - 国：エネルギー基本計画等を通じた原子力開発の方向性、高速炉の開発目標を提示。民間リソースの活用を前提とした適切な規模の財政支援。
    - 電気事業者等ステークホルダー：最終的な技術の選択。将来性のある技術に対して早期の段階から開発に関与。
    - JAEA：多様な技術開発に対応可能な研究開発基盤の維持・発展。設計手法や安全基準等の国際標準化。
    - メーカー：創意工夫を活かした技術開発を推進。

## 「戦略ロードマップ」（2018年12月21日 原子力関係閣僚会議決定）

- 今後の開発の作業計画：フランスや米国等との国際協力を活用し、実用化のための技術基盤の確立とイノベーションの促進に取り組む。
  - ステップ1（競争の促進）：  
まず当面5年間程度は、民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進する（NEXIP）。
  - ステップ2（絞り込み・重点化）：  
2024年以降に採用する可能性のある技術の絞り込みを、国、原子力機構、電気事業者がメーカーの協力を得て実施する。
  - ステップ3（今後の開発課題及び工程についての検討）：  
関係者の理解が共通化されたタイミングで工程を検討する。



# グリーン成長戦略（2021年6月）

◆ 2050年カーボンニュートラル(CN)実現に向けて、原子力を含めたあらゆる選択肢を追求

◆ 目標

- ① 国際連携を活用した**高速炉**開発の着実な推進
- ② 2030年までに国際連携による**小型モジュール炉**技術の実証
- ③ 2030年までに**高温ガス炉**における水素製造に係る要素技術確立
- ④ ITER計画等の国際連携を通じた**核融合**研究開発の着実な推進

◆ 高速炉の現状を記載

➢ 世界各国で高速炉開発が進展

- ・ロシアは実証炉を運開済み、実用炉を2035年に運開予定。中国は実証炉建設中。
- ・米国は民間活力により高速炉開発が加速。

◆ 今後の取り組み

➢ 国際連携を活用し開発を着実に推進

- ・「戦略ロードマップ」に基づき、例えば今世紀半ば頃の適切なタイミングに、現実的なスケールの高速炉の運転開始を期待。
- ・それに向けて、2023年度末頃までは多様な技術間競争を促進。日仏、日米協力で効率的な開発を推進

➢ JAEAが保有するデータ・施設を最大限活用

- ・建設・運転・保守経験で培われたデータ、施設を最大限活用。
- ・「常陽」の再稼働に向けた準備を速やかに進める。

## 成長戦略「工程表」

●導入フェーズ： 1. 開発フェーズ 2. 実証フェーズ 3. 導入拡大・コスト低減フェーズ 4. 自立商用フェーズ

●具体化するべき政策手法： ①目標、②法制度（規制改革等）、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達等

	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	～2030年	～2040年	～2050年
高速炉	○戦略ロードマップに基づく開発 ステップ1 ・民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進			ステップ2 ・国、JAEA、ユーザーがメーカーの協力を得て技術を絞り込み（常陽等の施設を活用）		一定の技術が選択される場合	ステップ3 ・工程の具体化	例えば21世紀半ば頃の適切なタイミングに、現実的なスケールの高速炉の運転開始を期待
	・国際協力を活用した効率的な開発 ・日仏協力（安全性・経済性の向上）・日米協力（多目的試験炉等）							

◆2022年3月、原子力小委員会※の下に、革新炉ワーキンググループが設置され、原子力発電の新たな社会的価値を再定義し、我が国の革新炉開発に係る道筋を示すこととなり、高速炉も革新炉の一つとして議論対象としている。

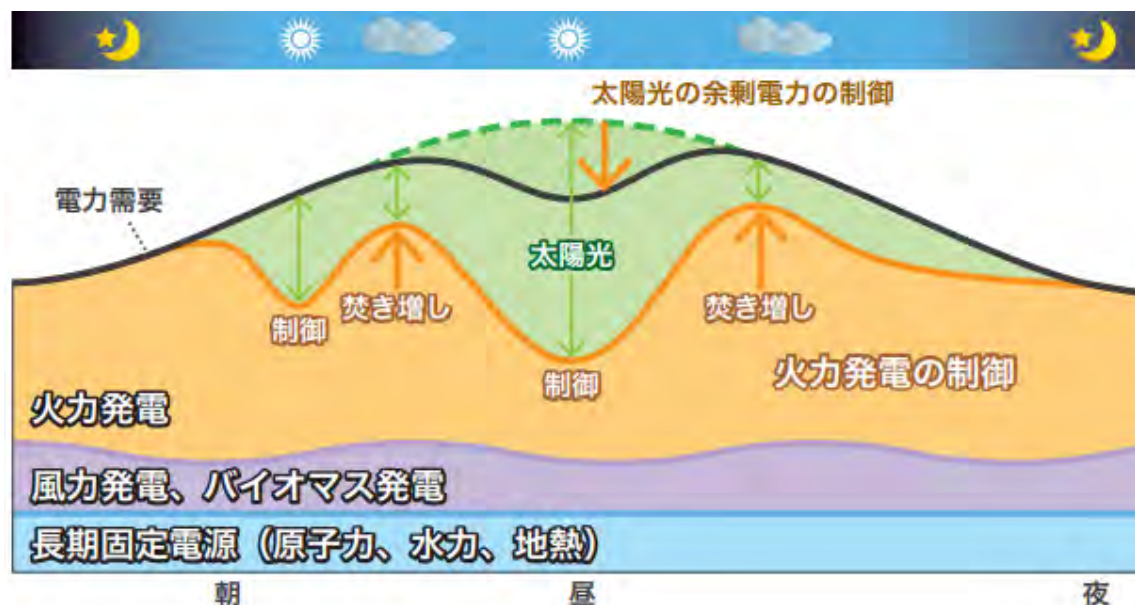
- ✓ 第1回革新炉WG（4月開催）：革新炉開発の現状と取り組み（三菱、日立、東芝）、革新炉開発の価値
- ✓ 第2回革新炉WG（5月開催）：革新炉開発の価値  
テラパワー社での開発の現状
- ✓ 第3回革新炉WG（7月開催）：革新炉開発の課題  
革新炉の今後の見通し（NRC）  
革新的な原子炉技術（NEI）

※経済産業省 資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会の委員会

◆前述の戦略ロードマップについては、現在改訂に向けた検討が行われている。

# 再エネとの共存

- 菅 前総理は、2020年10月臨時国会にて「2050年カーボンニュートラル宣言」
- 原子力には、変動エネルギーである再生エネルギーとの共存が求められるようになった。
- 高速炉は、**負荷追従運転、蓄熱及び水素製造等、調整電源としての機能が期待**できる。



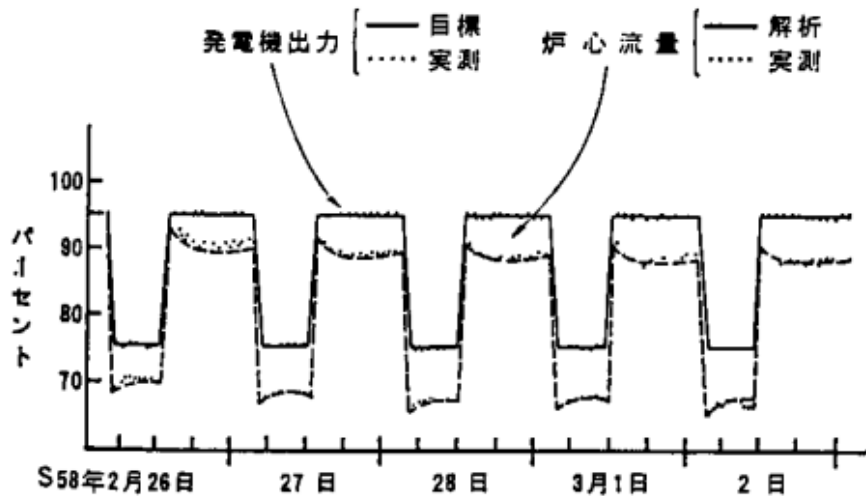
## 再生可能エネルギーへの対応状況

[出典]日本のエネルギー2020 エネルギーの今を知る10の質問



## ● 負荷追従運転

- 原子力発電所は日負荷追従運転が可能（下図）。高速炉においても日負荷追従運転を検討中  
 但し、原子力は燃料コスト割合が火力等と比べ小さく、フルパワーで運転するベースロード運用が経済的。  
 そのため、出力を下げずに電気出力のみを抑える技術の検討が盛んとなっている。

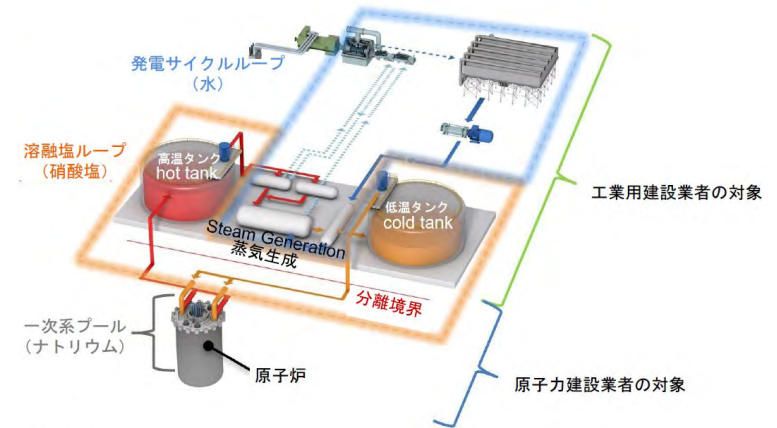
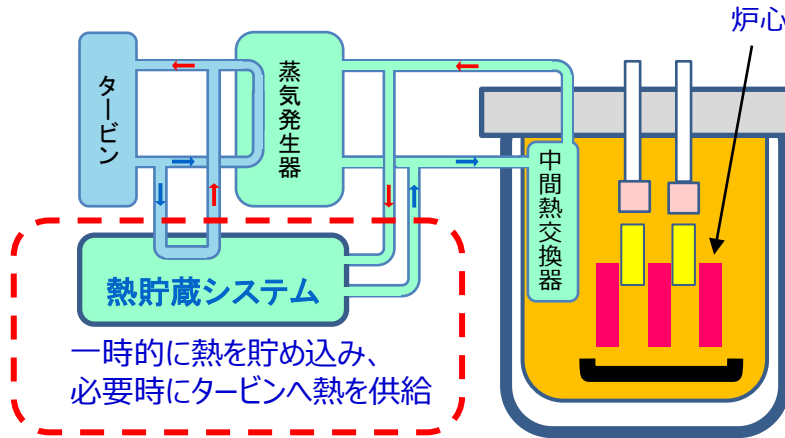


95%出力⇔75%出力の  
日負荷追従運転

福島第一発電所5号機の日負荷追従運転実績

## ● 熱貯蔵

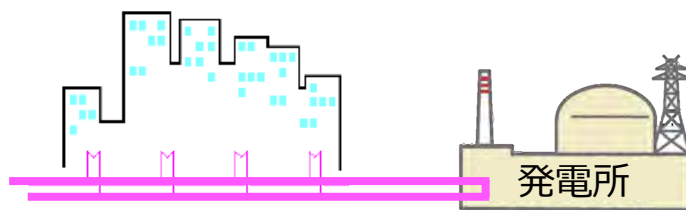
- 高速炉の高温冷却材を利用した熱貯蔵システムにより、原子炉出力を変動させずに、電気出力制御が可能
- 米国テラパワー社のNatrium炉は、熱貯蔵により定格34.5万kWから最大50万kWに電気出力増が可能な設計



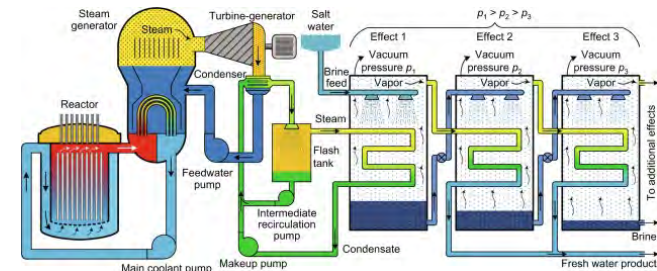
余剰電力の使い方としては以下がある。

## ● 地域熱供給、海水淡水化

- タービン排熱等により地域熱供給、海水淡水化が可能。
- 地域熱供給はBN-600、海水淡水化はロシアのBN-350で実績あり。



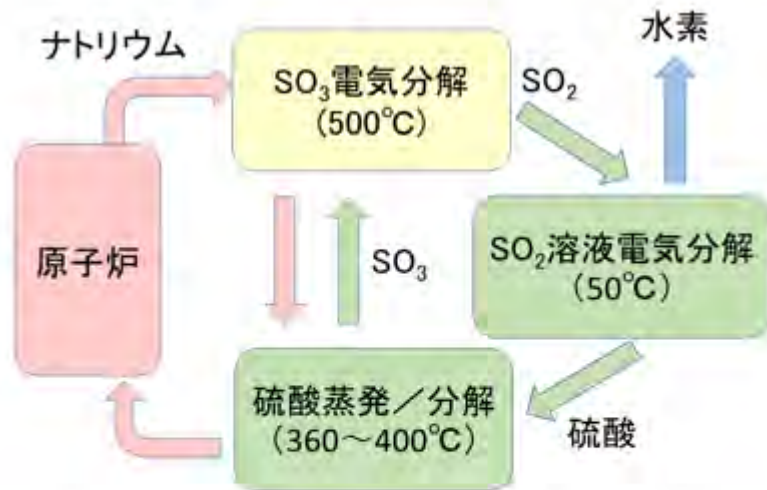
地域への熱供給



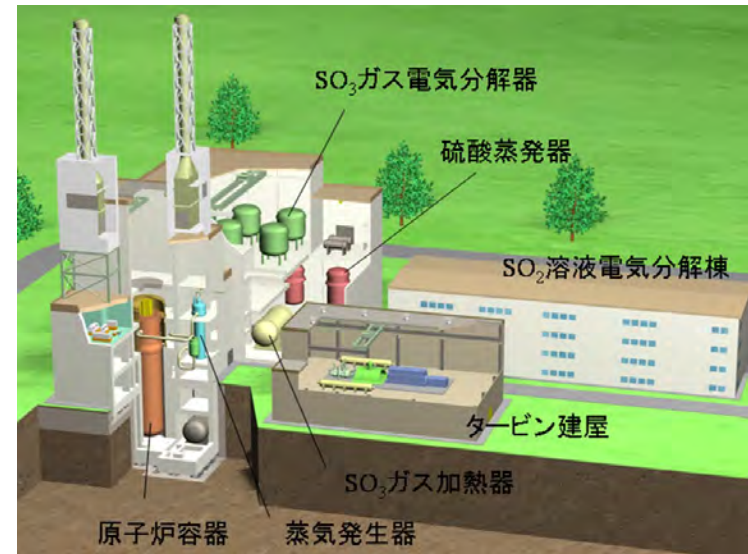
蒸留式による海水淡水化\*

- **水素製造（ハイブリッド熱化学法等）**

- 高速炉の高温を利用して、水素を供給することが可能。
- ハイブリッド熱化学法では0.4l/hの1時間連続運転実証済み。



高速炉によるハイブリッド熱化学法水素製造イメージ



水素製造プラントイメージ

[出典]原子力水素製造プラントのシステム設計研究—平成15年度の研究成果のまとめ— (JNC TN9400 2004-037)