
高速炉の実用化に向けた開発目標（案）

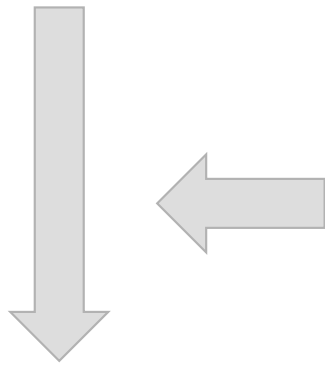
令和 4 年7月29日

高速炉サイクル開発の必要性

- 高速炉は従来のニーズ（資源の有効利用、放射性廃棄物の減容・有害度低減、ベースロード電源）に加え、新たな社会ニーズへの対応（CN社会へに貢献、経済安全保障の強化、再エネとの共生 等）に対応可能。

従来の高速炉のニーズ

- 資源の有効利用（エネルギー安全保障）
- 放射性廃棄物の減容・有害度低減（MA燃焼）
- ベースロード電源としての経済性・安全性



新たな社会ニーズへの対応

- エネルギー産業として、カーボンニュートラル社会への貢献
- 国内の技術・サプライチェーンの強化による経済安全保障の確保
- 再生可能エネルギーとの共生
- 医療等、他分野への貢献

従来ニーズに加え様々な対応

- 様々な出力規模：中大型炉～SMR
- 多目的利用（水素製造・熱利用）
- 調整電源（熱貯蔵、負荷追従）
- RI製造

高速炉サイクルの開発目標の設定の考え方

1. 循環型エネルギーの実現（高速炉サイクルの開発意義）

- 原子力の最重要課題の一つである放射性廃棄物の問題に対応するため、高放射性のマイナーアクチノイドを分離・回収・高速炉で燃焼し、高レベル放射性廃棄物減容・潜在的有害度低減を実現する。
- 現時点では比較的低価格でウラン資源を確保できているものの、今後の資源の需給バランスの不確定性は大きく、ウラン資源を有効利用する。

2. 社会実装に必須な要件

- 原子力に対する国民の信頼を失う基となった東京電力福島第一原子力発電所事故(1F事故)の教訓を踏まえ、より一層の高い安全性・信頼性が求められる。国際的に議論されている第4世代炉としての高い安全性・信頼性レベルとする。
- 他のエネルギー源と同様、安全性の強化、並びに事故リスク対応費及び政策経費を踏まえた上で、実用化の段階において電力自由化の下での必要な経済性を実現する（発電、多目的利用）。
- 我が国が継続的にプルトニウム利用することに対する国際社会の懸念を払拭するため、核拡散に対して十分な抵抗性を有することが求められる。

3. CNの達成への貢献

- 今後の我が国の主力電源の一つとされる再生可能エネルギーとの共存等を視野に必要な柔軟性(蓄熱、水素製造、負荷追従)を備えることが求められる。

高速炉サイクル開発に当たって考慮すべき事項：

- 「もんじゅ」での取組で得られた教訓を真摯に踏まえ、プロジェクトマネジメント機能の強化と効率化を徹底する。

高速炉サイクルの開発目標

■ 前掲1～3の考え方に基づき、開発目標を以下の6項目とした。

1. 安全性・信頼性
2. 経済性
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・その他市場性

1. 安全性・信頼性

開発目標

- ◆ 1F事故の教訓等を踏まえ高い安全性を追求すること。少なくとも、新規規制基準に基づく安全基準を満足する軽水炉及びその燃料サイクルのシステムと同等以上の安全性を達成すること。
- ◆ 炉システムについては、今後の国際設計基準等で次世代炉に期待されるより高い安全性・信頼性を実現する設計上の工夫（受動安全性の確保等）を施すこと。
- ◆ 施設の運転・保守・補修性を確保すること。

1. 安全性・信頼性

【海外動向】GIFでは、1F事故の教訓を活かした国際基準を整備する等、安全性向上に努めている。プラント信頼性向上に向け、ナトリウム中検査技術等の保全技術の開発がなされている。

最近のトレンド：

(安全性)

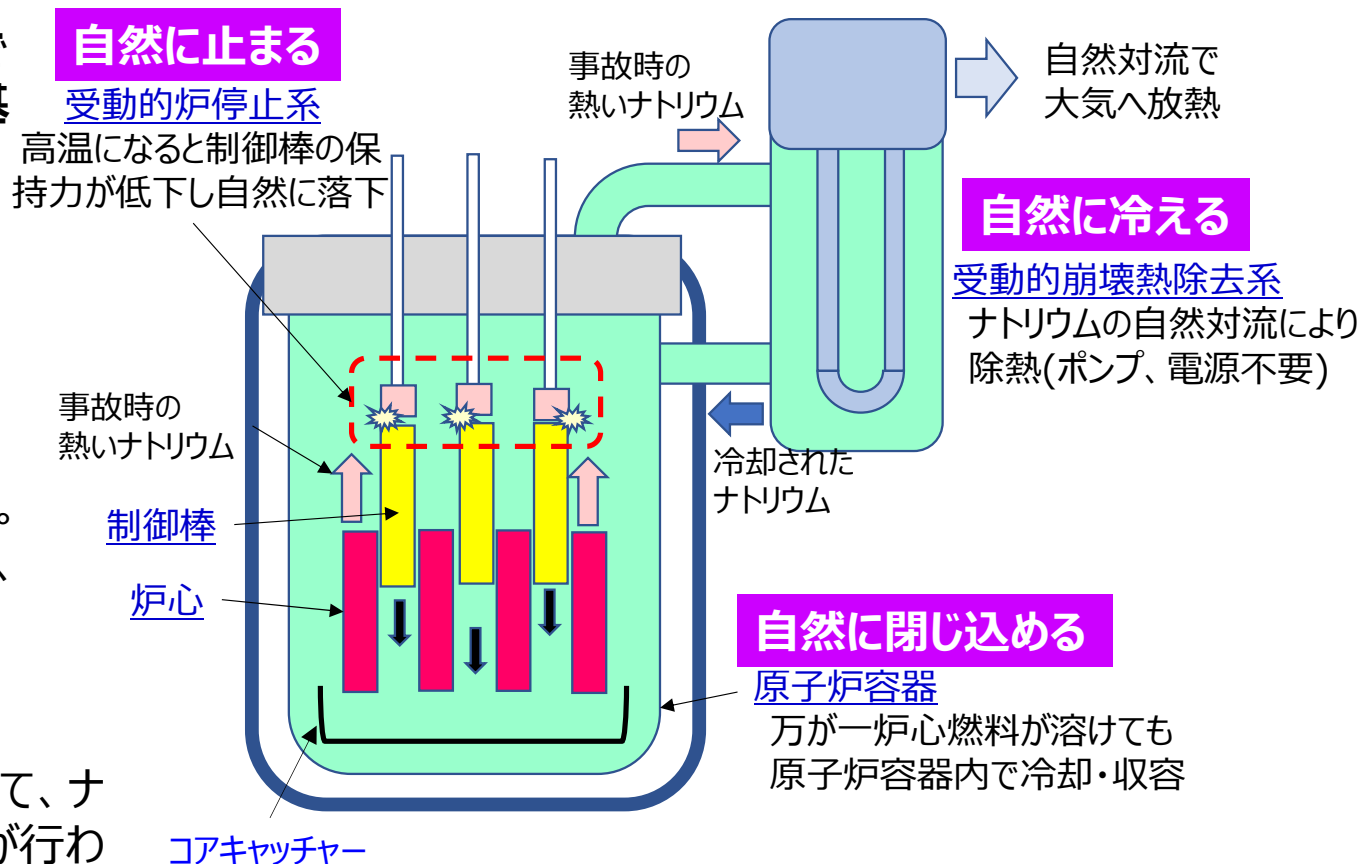
- GIF*において、我が国主導でナトリウム冷却高速炉（SFR）の安全基準を整備。1F事故の教訓を活かし、先進的な基準であり、IAEA、OECD/NEA等で、国際基準として審議中。*:第4世代原子炉フォーラム
Generation IV International forum

- ロシア、中国、インドは、GIFの安全基準を受け入れ、SFRの建設・運転を推進。米国、カナダ等は、SFR等新型炉の安全審査のフレームを整備中。
- 各国の新型炉は、**受動的安全性を確保**し、炉心損傷発生確率を大きく低減。更にシビアクシデント対策も講じることで、**実質的に緊急退避不要化を追求**。これらは、GIFの安全基準に合致する方向。

(信頼性)

- プラント信頼性向上に向けた技術開発として、ナトリウム中検査技術等の保全技術の開発が行われている。

GIF安全基準を満足するSFRの設計



2. 経済性

開発目標

- ◆ 市場ニーズに応じた経済性を有すること。
 - 基幹電源として利用するプラントは、他の基幹電源と競合し得る経済性を有すること。
 - 小型電源や多目的用途に利用する場合には、市場ニーズに応じた経済性を有すること。
- ◆ なお、上記の経済性は1F事故を踏まえた安全性の強化、並びに事故リスク対応費及び政策経費を踏まえた上で実現すること。

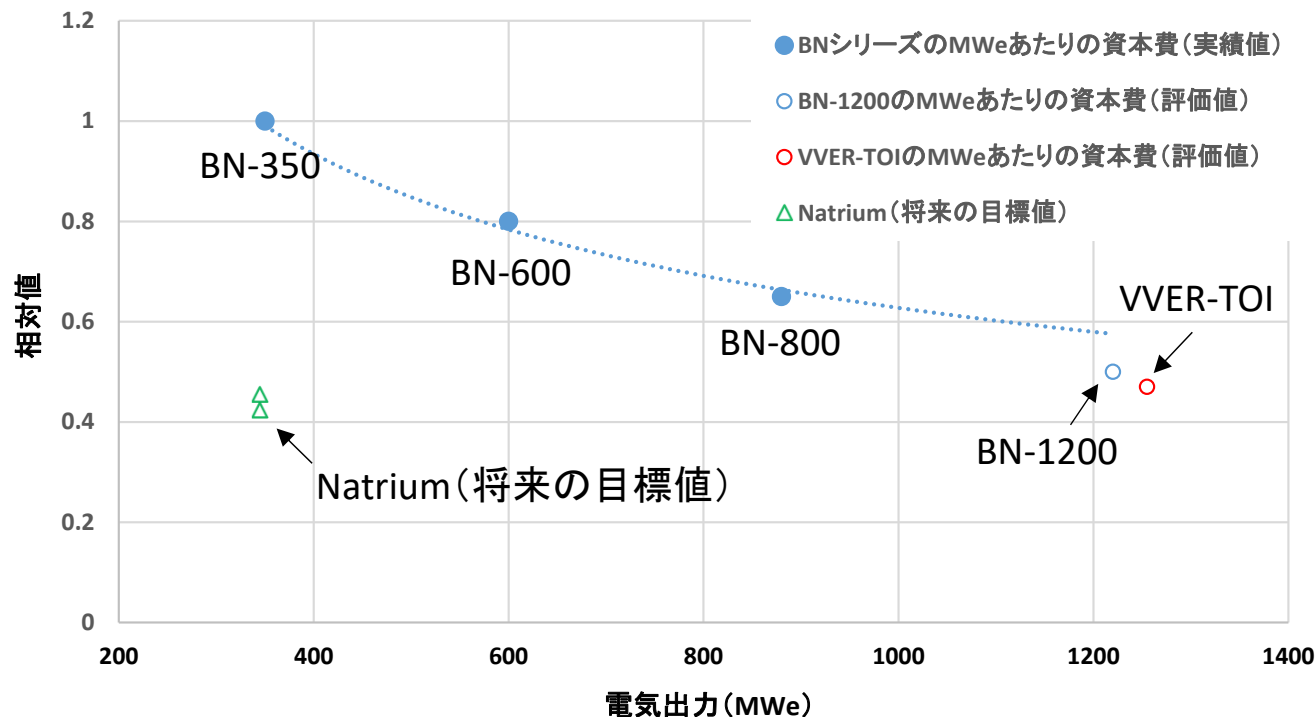
2. 経済性

【海外動向】高速炉開発で先行するロシアでは、商用高速炉が商用軽水炉に比肩すると評価

最近のトレンド

【ロシア】下図のようにBN-350からBN-800の実績値はスケール則に一致。商用炉BN-1200は、原子炉容器コンパクト化、ループ数削減、蒸気発生器大型化等により、スケール効果以上の経済性向上を目指す。これにより、最新の軽水炉VVER1200-TOIと同等の**資本費**を達成できると評価。なお、VVER-TOI（ツインプラント）のオーバーナイトコストは約3100ドル/kWe。（*1）

【米国】報道では、テラパワー社Natriumプロジェクトのコストは40億ドル規模。DOEは最大20億ドルを支援予定。同社は後継炉のオーバーナイトコストを2800～3000ドル/kWeと予想。（*2,*3）



*1: Limited Scope Sustainability Assessment of Planned Nuclear Energy Systems Based on BN-1200 Fast Reactors", IAEA-TECDOC-1959, 2021

*2: <https://www.reuters.com/business/energy/bill-gates-4-bln-high-tech-nuclear-reactor-set-wyoming-coal-site-2021-11-17/>

*3: <https://natriumpower.com/frequently-asked-questions/#cost-and-funding>

高速炉（BNシリーズ）とNatrium炉と軽水炉（VVER）の建設費の比較

3. 環境負荷低減性

開発目標

- ◆ 高レベル放射性廃棄物量低減・潜在的有害度低減のため、マイナーアクチニド（MA）を分離・回収し、燃料として利用できるようにすること。
- ◆ 炉、燃料製造、再処理の建設・運転・廃止措置を通じて発生する放射性廃棄物量（高レベル放射性廃棄物を含む）を、軽水炉及びその燃料サイクルシステムを参照して、合理的に実現可能な限り低減すること
- ◆ ライフサイクルでの環境影響（土地占有、毒性、大気汚染、GHG、酸性化、富栄養化、電離放射線、水資源利用等）が他電源と比して少ないこと。

3. 環境負荷低減性

【海外動向】世界各国で、MA燃焼に関する研究が進行している

最近のトレンド

【フランス】

- 1980年代から、軽水炉の使用済燃料からの**MA抽出やMA含有燃料の製造、照射試験**を多数実施。
- 2020年の**エネルギー多年度計画**（PPE）では、長期的なFBRの導入の可能性に備えた研究開発を継続。
- 2021年の「**フランス2030**」では、より良い廃棄物管理を取り入れた革新的な炉の開発に、2030年までに4億ユーロを投資することを表明。

【米国】

- アルゴンヌ国立研究所（ANL）によるIFRプログラム（1989～1994年）において、**金属燃料高速炉でMAを均質に炉心へ装荷して燃焼させる研究開発**を実施。
現在もアイダホ国立研究所（INL）で**金属燃料照射試験、EBR-II使用済金属燃料の乾式サイクル、廃棄物処理技術**の開発を継続中。
 - 600本以上の燃料を製造し照射試験を実施
 - 3トン以上の資料済み燃料を再処理
- 米韓の金属燃料サイクル共同研究は2011年から2020年に実施（現在は中断）
- DOEは2022年3月、「放射性廃棄物と先進的原子炉における処分システムの合理化（ONWARDS）」プログラムとして、11件の放射性廃棄物削減プロジェクトを選定し合計3,600万ドルを交付。

【ロシア、インド、中国】

- ロシアでも**MA燃焼に係る研究開発**が行われている。
- インドでもMOX燃料でのMA燃焼の研究開発をしており、**将来的に採用する金属燃料サイクルではMA含有燃料が基本**。
- 中国は高速炉燃料サイクルを採用する計画だが、サイクルシステムはまだ具体化していない。

4. 資源有効利用性

開発目標

- ◆ 軽水炉及び軽水炉のプルサーマル利用から高速炉へ円滑に移行できること。
- ◆ エネルギー需給や資源の不確かさへの対処を始め、社会のニーズに合った増殖比に柔軟に対応可能であること。
- ◆ 資源有効利用の観点から、燃料サイクル内でU及びPuの十分な回収による資源循環を図ること。

4. 資源有効利用性

【海外動向】

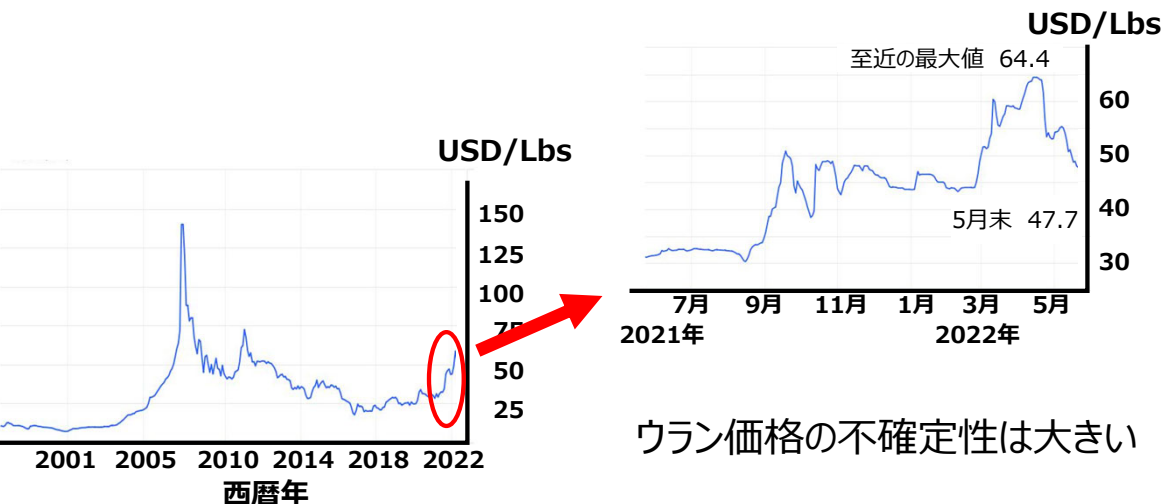
ウラン価格の不確実性が増している。ウランを有効利用できる高速炉のポテンシャルは大きい。

最近のトレンド：

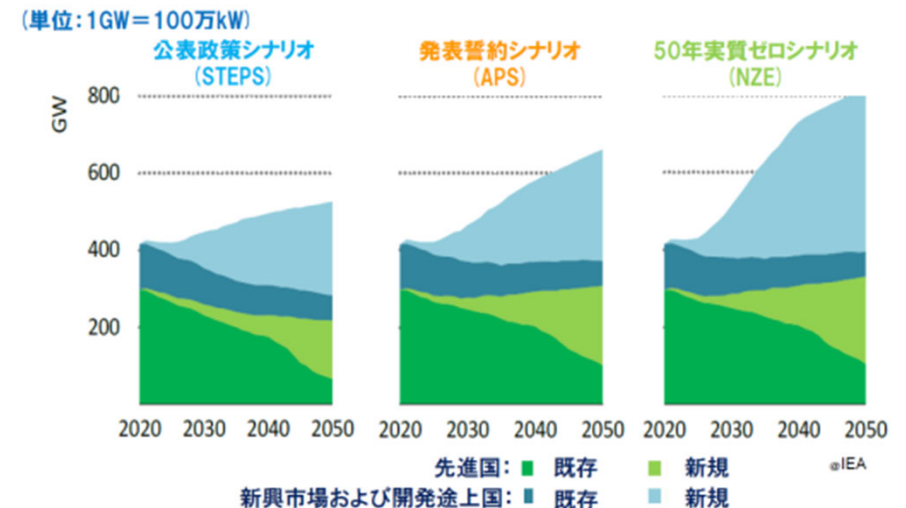
- 現時点では比較的低価格でウラン資源を確保できているが、世界的なCN実現に向けて軽水炉利用の増大※のため、**中長期的なウラン価格の不確実性は大きい。**
- 国内にある劣化ウラン等を再利用し、**天然ウランの輸入を不要にできる高速炉は我が国のエネルギーの自立に大きく貢献する可能性がある。**
- Financial Times(2021年10月12日)によれば、**ウランの国際価格が上昇に転じており、「イエローケーキ」(ウラン精鉱)の国際価格は9月に1ポンドあたり50ドルと、2012年以来の高値を付けた。**

※国際エネルギー機関の報告書(「World Energy Outlook 2021」2021年10月)では、2050年CN達成のため、原子力発電設備容量が2050年に現在の約2倍になると予測

ウランスポット価格の推移



世界の原子力発電設備容量の見通し



5. 核拡散抵抗性

開発目標

- ◆ 核拡散抵抗性と核物質防護を担保できる高速炉サイクルとすること。

5. 核拡散抵抗性

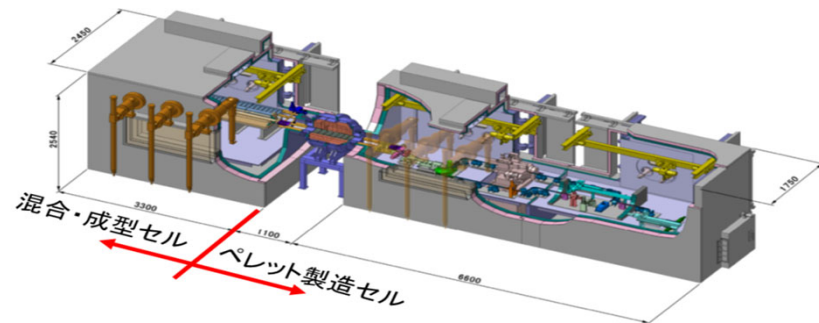
【海外動向】燃料へのアクセスを困難化や盗取機会を減らすことによって、核拡散抵抗性を高める設計・開発がなされている。

最近のトレンド

- 核拡散抵抗性として、燃料アクセスの困難化や燃料盗取の機会減等が考えられている。※

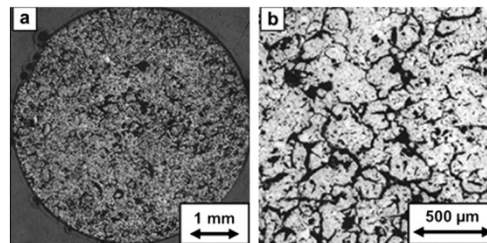
※出典：Sodium-Cooled Fast Reactor, Proliferation Resistance and Physical Protection White Paper, GIF October 2021

- Puを単体で分離せず、マイナーアクチニド（MA）と共抽出し、高温・高線量として燃料へのアクセスを困難にする
 - ✓ MA含有MOX燃料の開発
 - ✓ MA含有燃料の製造・再処理時の遠隔自動操作技術
- 炉の運転期間を長期化し、燃料の交換頻度を下げ、燃料が盗取される機会を減らす。
 - ✓ 長期運転を可能とする炉心設計
 - ✓ 燃料の高燃焼度化に向けた材料開発



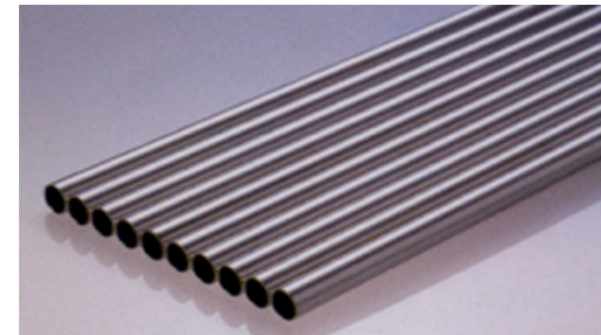
MA含有燃料を製造・再処理するための遠隔自動操作技術の概念

[出典] Y. Yamada, "A Conceptual Design of Engineering-scale Plant Applied the Simplified MA-bearing Fuel Fabrication Process", FR17, 2017



フランスにおけるMA含有MOX燃料の開発

[出典] F. Lebreton et al., J. Nucl. Mater. 438 (2013) 99



燃料の高燃焼度化に向けた材料開発の例
酸化物分散強化型（ODS）フェライト鋼被覆管の開発

6. 柔軟性・その他市場性

開発目標

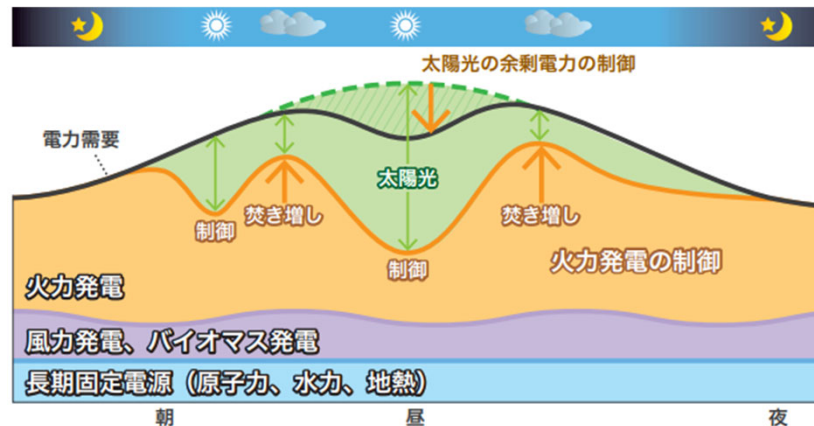
- ◆ エネルギー供給システム全体の中で、再生可能エネルギーとの共存等を視野に、必要な柔軟性を備えること（原子炉出力規模の選択肢、負荷追従能力、等）。

6. 柔軟性・その他市場性

【海外動向】変動する再生可能エネルギーとの共存のため、蓄熱による熱利用等の活用を検討
多様なエネルギー利用として原子力水素製造技術の開発が進められている

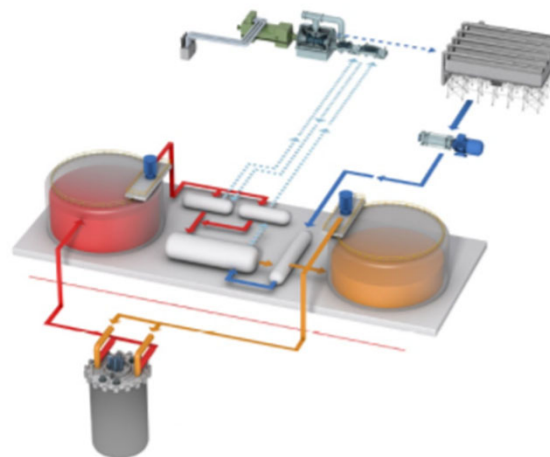
最近のトレンド

- 各国は、様々なエネルギー利用（蓄熱、熱供給、水素製造等）を検討。
- 高温プラントである高速炉は、**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。
- 米国は高速炉**Natrium炉**を開発中。熱貯蔵により定格34.5万kWから最大50万kWに電気出力を増大可。
（市場価格が低い時間帯に熱を貯蔵し、市場価格が高い時間帯に出力を増大させ、市場に対応する。）
- 日本では、高速炉の安全性を損なうことなく、再生エネルギーと調和する調整電源としての技術を検討中。



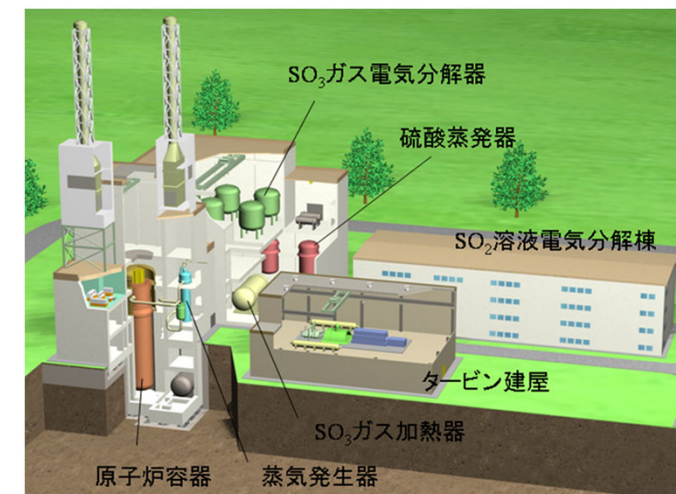
再生可能エネルギーへの対応状況

[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



蓄熱によるエネルギー貯蔵

[出典] テラパワー社ウェブサイト Natrium炉



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)