



[2F_PL02]

日本原子力学会 新型炉部会セッション

社会動向を踏まえた新型炉開発の価値
(2) 再生可能エネルギーと共存できる新型炉
によるカーボンニュートラルへの貢献

2022年9月8日

日本原子力研究開発機構
高速炉・新型炉研究開発部門

大野修司、山野秀将



第6次エネルギー基本計画(2021年10月)

- ◆ 2020年10月、日本は、「2050年カーボンニュートラル」を宣言
- ◆ 2021年4月、2030年度の46%削減、更に50%の高みを目指して挑戦を続ける新たな削減目標を表明
- ◆ 2021年6月、「経済と環境の好循環」を作っていく産業政策＝「グリーン成長戦略」発表
- ◆ 2050年カーボンニュートラル実現に向けた課題と対応のポイント

- エネルギー分野の取り組みが重要

- 電力部門

- 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

- 水素・アンモニア、CCUS/CRなどのイノベーションを追求

- 電力部門以外(産業・運輸・業務・家庭部門)

- 脱炭素化された電力による電化を進める

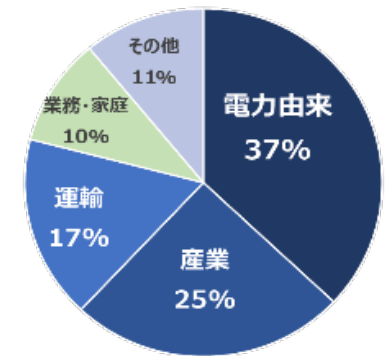
- 高温の熱需要等も脱炭素化

- 脱炭素イノベーションを日本の産業界競争力強化につなげるためにも、「グリーンイノベーション基金」などを活用し、総力を挙げて取り組む

- ◆ 2030年に向けた政策対応のポイント 【基本方針】

- 安全性を前提とした上で、エネルギーの安定供給を第一とし、経済効率性の向上による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に、環境への適合を図るS+3Eの実現のため、最大限の取組を行う

【CO2の部門別排出割合】





第6次エネルギー基本計画(2021年10月)

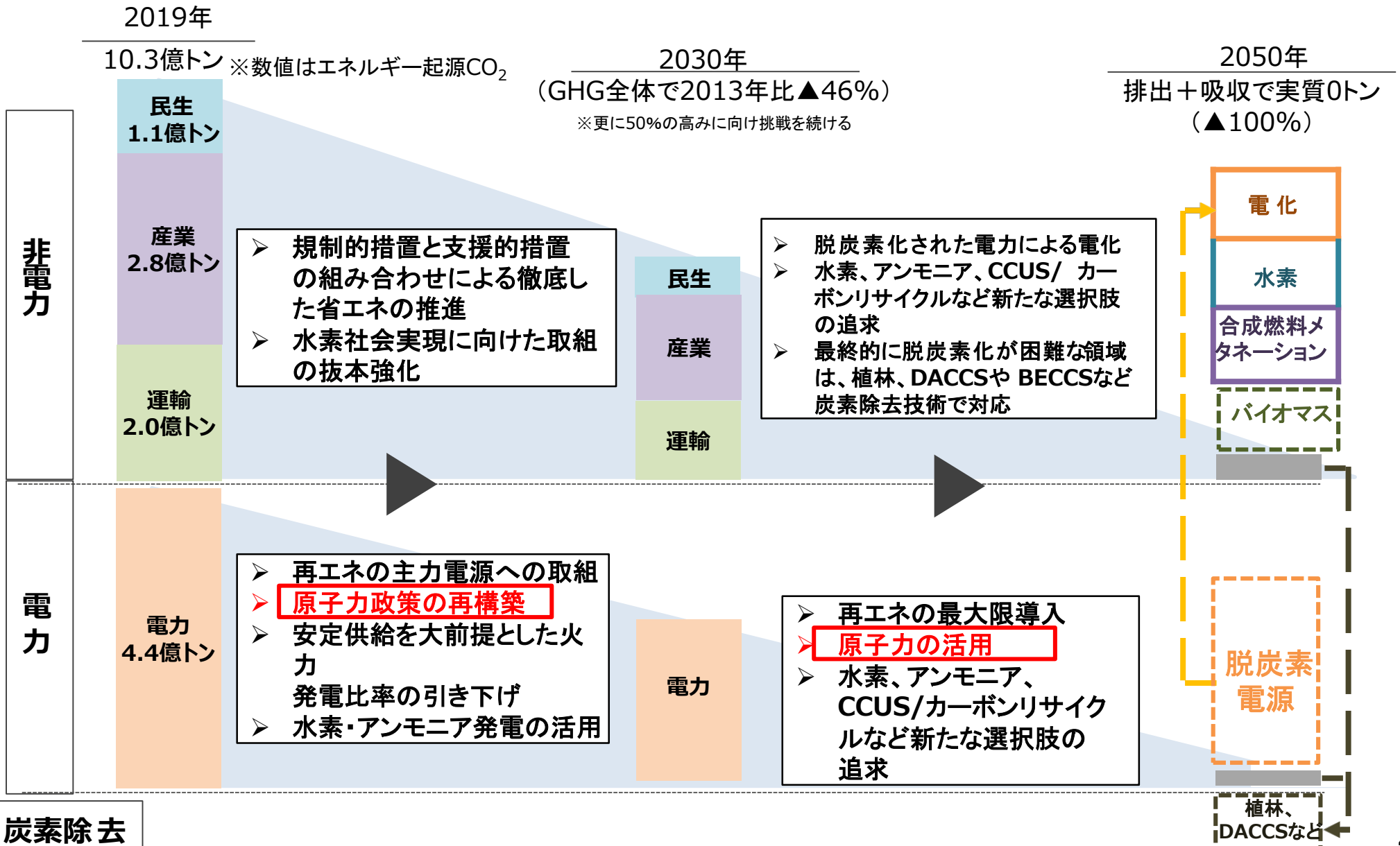
2030年度におけるエネルギー需給の見通しのポイント①

- 今回の見通しは、2030年度の新たな削減目標を踏まえ、徹底した省エネルギーや非化石エネルギーの拡大を進める上での需給両面における様々な課題の克服を野心的に想定した場合に、どのようなエネルギー需給の見通しとなるかを示すもの。
- 今回の野心的な見通しに向けた施策の実施に当たっては、安定供給に支障が出ることのないよう、施策の強度、実施のタイミングなどは十分考慮する必要。(例えば、非化石電源が十分に導入される前の段階で、直ちに化石電源の抑制策を講じることになれば、電力の安定供給に支障が生じかねない。)

| | | (2019年 ⇒ 旧ミックス) | | 2030年度ミックス(野心的な見通し) |
|---|-----------|-------------------------|-----------------------|--|
| 省エネ | | (1,655万kl ⇒ 5,030万kl) | | 6,200万kl |
| 最終エネルギー消費(省エネ前) | | (35,000万kl ⇒ 37,700万kl) | 2050年に向けて更に増加 | 35,000万kl |
| 電源構成 発電電力量: 10,650億kWh ⇒約9,340 億kWh程度 | 再エネ | (18% ⇒ 22~24%) | 太陽光 6.7% ⇒ 7.0% | 36~38%※ |
| | | | 風力 0.7% ⇒ 1.7% | ※現在取り組んでいる再生可能エネルギーの研究開発の成果の活用・実装が進んだ場合には、38%以上の高みを目指す |
| | | | 地熱 0.3% ⇒ 1.0~1.1% | |
| | 水素・アンモニア | (0% ⇒ 0%) | 水力 7.8% ⇒ 8.8~9.2% | 2050年に向けて増加必要 |
| | 原子力 | (6% ⇒ 20~22%) | バイオマス 2.6% ⇒ 3.7~4.6% | 20~22% |
| | LNG | (37% ⇒ 27%) | | 減少 |
| | 石炭 | (32% ⇒ 26%) | | 20% |
| 石油等 | (7% ⇒ 3%) | | 19% | |
| (+ 非エネルギー起源ガス・吸収源) | | | | 2% |
| 温室効果ガス削減割合 | | (14% ⇒ 26%) | | 46% 更に50%の高みを目指す |

2050年カーボンニュートラルの実現

出所: 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)

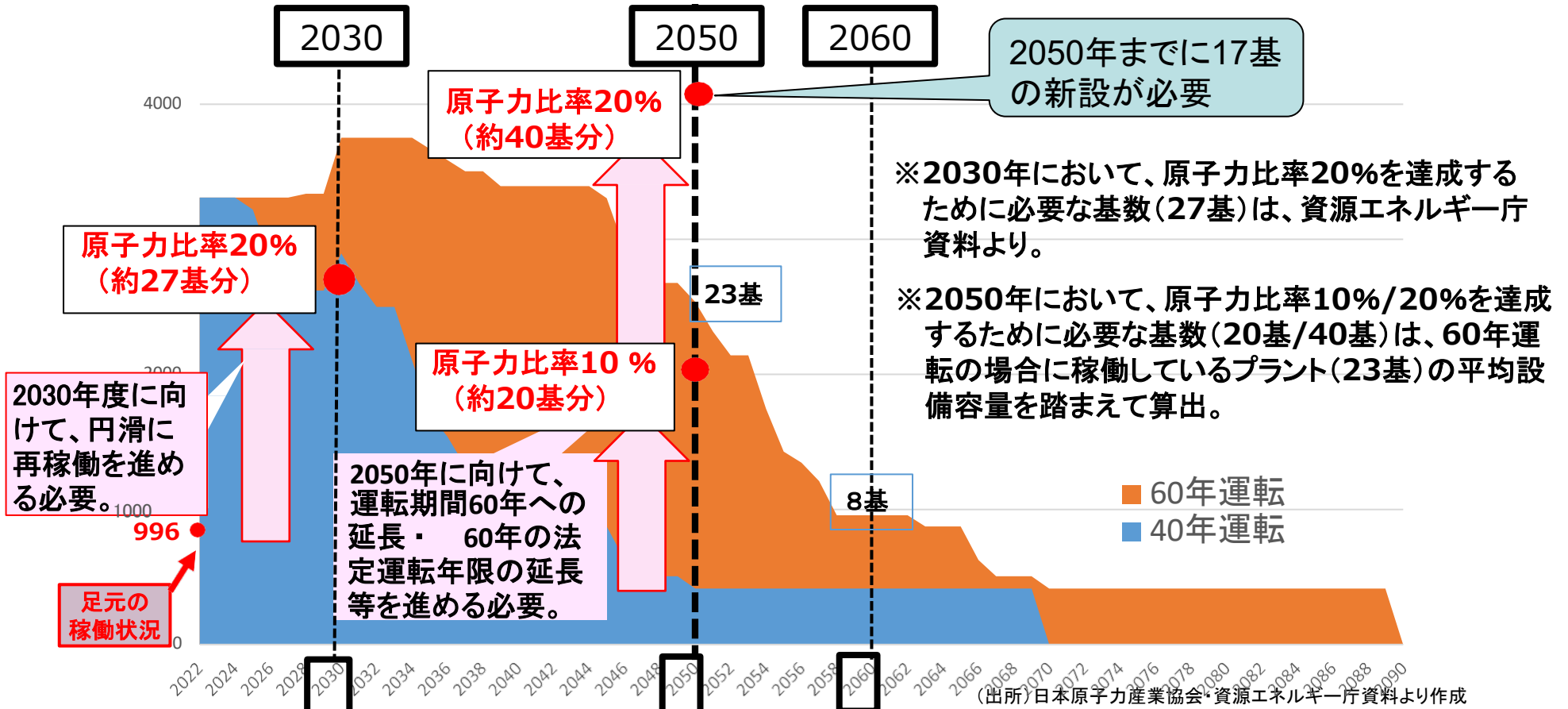




原子力発電の設備容量の見通し

出所:経団連提言「グリーントランスフォーメーション(GX)に向けて」(令和4年4月)

- 2030年度エネルギーミックスにおける原子力比率(20%)を実現しようとした場合、約2700万kWの設備容量が必要(発電電力量約1900億kWh)※設備容量の70%の発電電力量が得られると仮定。
- 2050年段階で原子力比率を10%または20%に維持しようとした場合、以下図表にプロットした設備容量が必要となる。(2050年の発電電力量は1.4兆kWhと想定)。60年に運転期間を延長したとしても、2050年に23基、2060年では8基のみ稼働可能。
- なお、足元、再稼働※しているプラントの設備容量は996万kW(美浜3、大飯3・4、高浜3・4、伊方3、玄海3・4、川内1・2の計10基)のみ。
 ※新規規制基準に合格し、一旦稼働を再開したプラント(その後停止した5基も含む)





参考

カーボンニュートラル(CN)に向けた社会変革

出所:資源エネルギー庁、革新炉WG 第1回会合 資料6(令和4年4月20日)

- 近年、期限付きカーボンニュートラル目標を表明する国・地域が急増し、そのGDP総計は世界全体の約90%を占める(前回COP終了時には約26%)。
- こうした中、金融市場の動きも相まって、あらゆる産業が、**脱炭素社会に向けた大競争時代に突入**。環境対応の成否が、企業・国家の競争力に直結することに。

カーボンニュートラルの波

<期限付きCNを表明する国地域の急増>

| | |
|-------------------------|-----------------------------------|
| COP25 終了時 (2019) | 期限付きCNを表明する国地域は121、世界GDPの約26%を占める |
| COP26 終了時 (2021) | 期限付きCNを表明する国地域は154、世界GDPの約90%を占める |

(出所) World Bank, World Development Indicators, GDP (constant 2015 US\$)

(参考) COP26終了時点のCN表明国地域

金融機関の動き

<世界的なESG投資額の急増>

- 全世界のESG投資の合計額は、2020年に35.3兆ドルまで増加

| 年 | 投資額 (兆ドル) |
|------|-----------|
| 2014 | 18.3 |
| 2016 | 22.9 |
| 2020 | 35.3 |

(出所) GSIA 「Global Sustainable Investment Review」

<企業情報開示・評価の変化>

- 企業活動が気候変動に及ぼす影響について開示する任意枠組み「TCFD」に対し、世界で2,616の金融機関等が賛同
- また、「TCFD」は、情報開示だけでなく、インターナル・カーボンプライシングの設定も推奨

産業界の対応

<サプライチェーン全体の脱炭素化>

- 国内外で、サプライチェーンの脱炭素化とそれに伴う経営全体の変容(GX)が加速

| | | |
|-----------|-----------|---------|
| 海外 | Microsoft | 2030年まで |
| | Apple | 2030年まで |
| 国内 | リコー | 2050年まで |
| | 麒麟 | 2050年まで |

カーボンニュートラル表明

<GX時代における新産業の萌芽>

- 商品価格・機能に加えてカーボンフットプリントが購買判断の基準になるような、消費行動の変容を促す新産業が発展
- また、脱炭素関連技術の開発・社会実装について、大企業のみならず、スタートアップが主導するケースも増加

環境対応の成否が、企業・国家の競争力に直結する時代(GX時代)に突入

- EUタクソミーは、EUのサステナビリティ方針に資する経済活動を明示した、いわば「グリーン・リスト」。
※企業が基準に合致する旨を開示することで、「グリーン債券」の発行等を通じて資金調達しやすくなる効果がある。
- 欧州委員会は加盟国等からの意見聴取を経て、2022年2月2日付で原子力および天然ガスの取扱いに関するドラフトを承認。7月に欧州議会及び欧州理事会で可決 (2023年1月1日発効)。

補完的委任規則 (complementary Delegated Act) における原子力と天然ガスの記載

以下の条件に適合する原子力・天然ガスについてはEUのサステナビリティ方針 (気候変動緩和・適合) に資する。

原子力

- 2045年までに建設許可を受けた新規原発。
- 2040年までに延長認可を受けた既設原発。
- 放射性廃棄物の管理について、資金面や処分場の計画についての条件あり。

<具体的には以下のような条件を記載>

- 放射性廃棄物の管理等の資金を確保すること
- 低レベル/中レベルの放射性廃棄物の運用可能な処分施設を有すること
- 2050年までに高レベル放射性廃棄物処分施設が運用開始できるよう
詳細な文書化された計画を有していること

- 2025年からは事故耐性燃料(*)を実装すること 等

※燃料被膜管に新素材を活用する等、シビアアクシデントに至る事象が発生した場合でも事故リスクを低下させる技術

天然ガス

CO2の排出量によってはグリーンと認定。

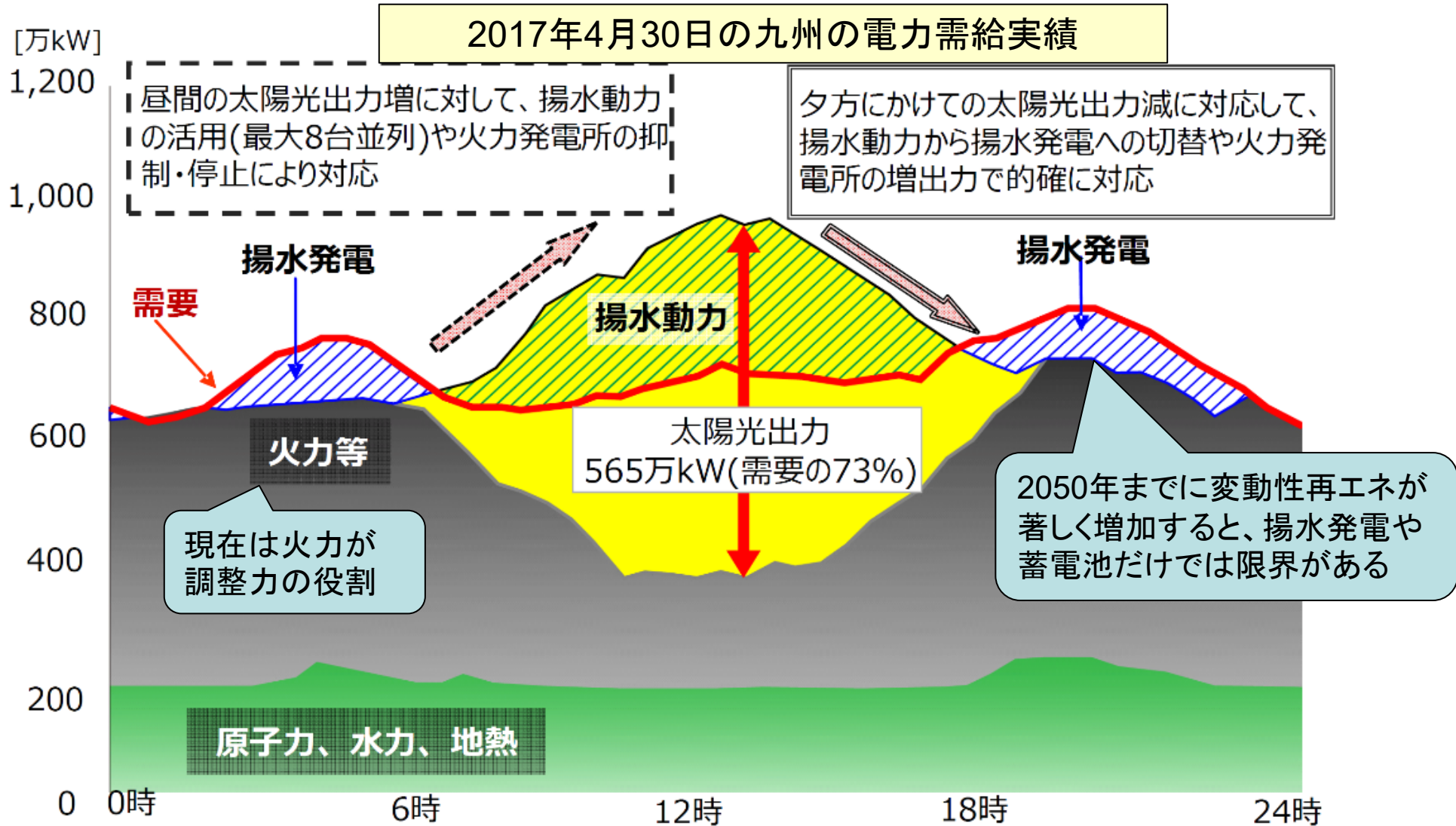
※具体的には、

- 100 g CO₂/kWh未満のもの、又は、
- 2030年までに建設許可を得たものであれば、
- ① 270gCO₂/kWh未満であるもの、又は、 ② 20年間にわたる年間平均排出量が550kgCO₂/kW以下のものが対象。
さらに、既存の高排出な火力発電所の建て替えに限定する等、複数の条件あり。

⇒日本の一番発電効率が良いガス火力でも327gCO₂/kWh程度のため、発電所のプラントから排出されるCO₂を回収し地下に貯蔵するCCSを行う、または、水素を約50%程混焼する、もしくは稼働率を20%未満とする必要があり、極めて厳しい基準。



変動性再エネの不安定な発電量をカバーするため、 調整力が必要



負荷追従による系統安定化・再エネ導入への貢献

出所: 資源エネルギー庁、革新炉WG第1回会合 資料6(令和4年4月20日)

- 軽水炉やSMR・高速炉等の新たな炉型においては、再エネの大量導入等との親和性も勘案し、負荷追従可能なシステムを持ち、系統全体の安定化に貢献。

<フランスの軽水炉PWR>

- ・ 原子力発電比率が7割以上に上るフランスでは、一部の原子力発電所は柔軟に出力を調整し、電力需要の増減に対応。
- ・ 通常の制御棒に加え、中性子吸収量が小さい制御棒を併用することで、出力 50%で運転可能。

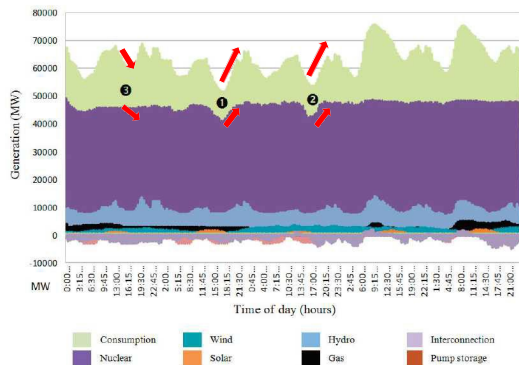


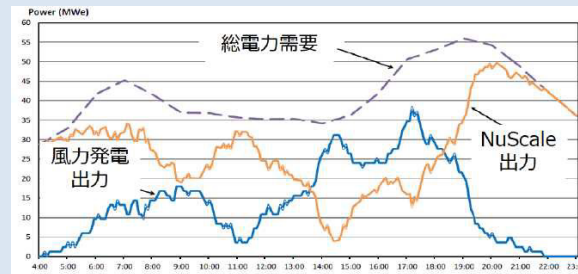
FIG. 20. Generation mix and demand in France during the Easter holiday, from 30 March to 3 April 2013 (reproduced from Ref. [23]).

(出典) Non-baseload operation in nuclear power plants: load following and frequency control modes of flexible operation, IAEA, 2018

(出典) https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2015/12/sp_necg_1208-12.pdf

<NuScale VOYGR(SMR)>

- ・ 最大12基のモジュールを個別に起動・停止、制御棒調整、タービンバイパス制御により、様々な時間単位での負荷追従運転が可能。



NuScale VOYGRによる負荷追従イメージ



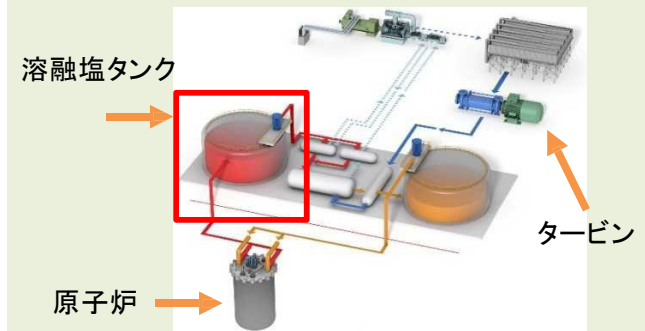
NuScale VOYGR 外観図

※NuScale社HP(<http://www.nuscalepower.com>)から引用

<TerraPower 高速炉 Sodium>

- ・ 高速炉の高温と蓄熱性能に優れた溶融塩タンクを組み合わせ、負荷追従が可能。
- ・ 蓄熱システムにより、5時間半以上にわたり、電気出力を34.5万kWから50万kWまで引き上げることが可能。
- ・ 溶融塩タンクによる蓄熱システムは、出力変動する再エネの補完として既に実用化。

システム概念図



参考: 本会の発表[2F08]

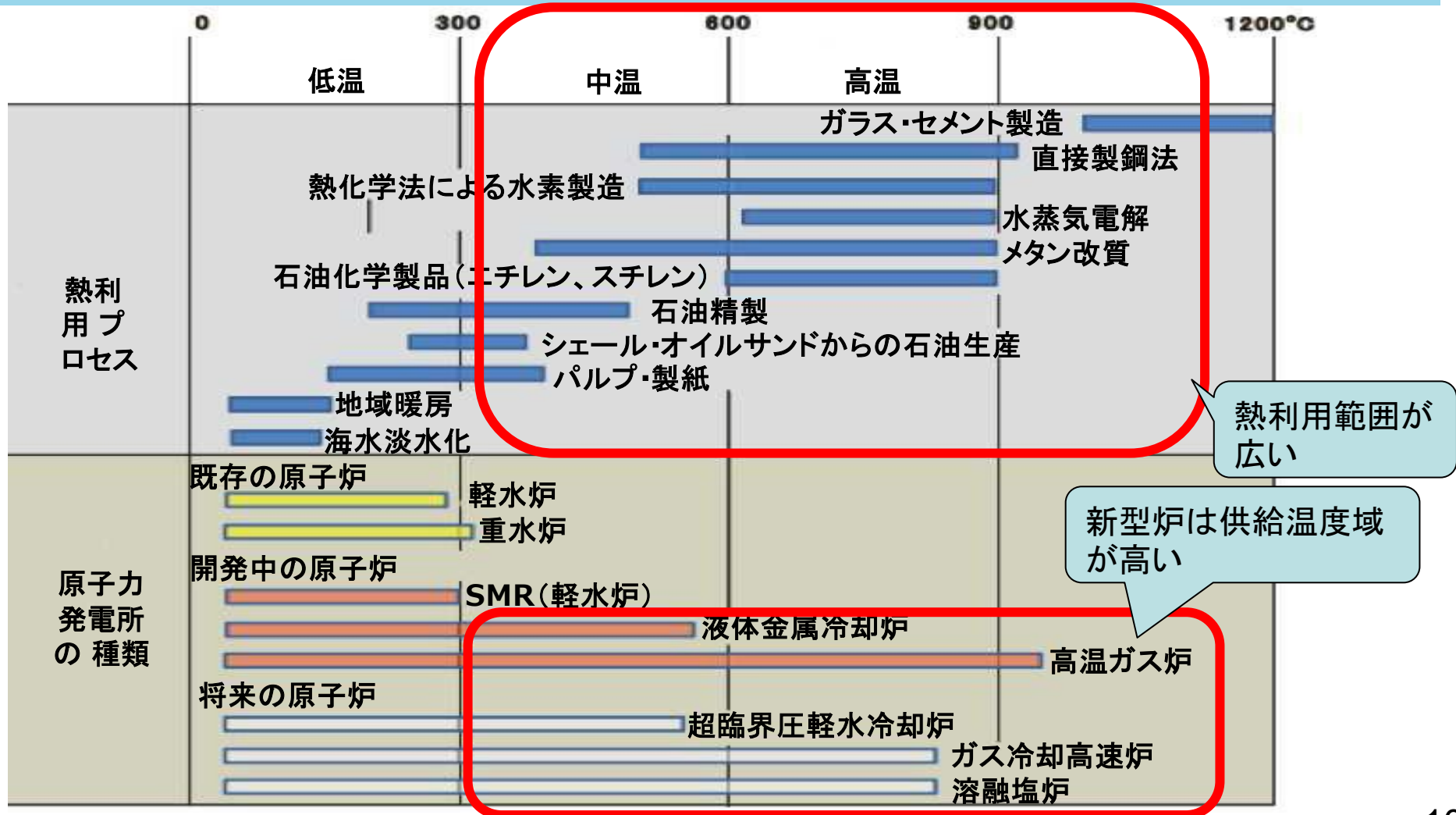
(高速炉の日負荷追従運転の検討)



熱利用プロセスと各炉型の温度範囲

出所:資源エネルギー庁、革新炉WG第1回会合 資料6(令和4年4月20日)

- 革新炉は低温(～300℃)から高温(～900℃)の熱供給の可能性があり、水素製造だけでなく、地域暖房や製鉄等の産業プロセス熱にも適用の可能性がある。



熱利用範囲が広い

新型炉は供給温度域が高い



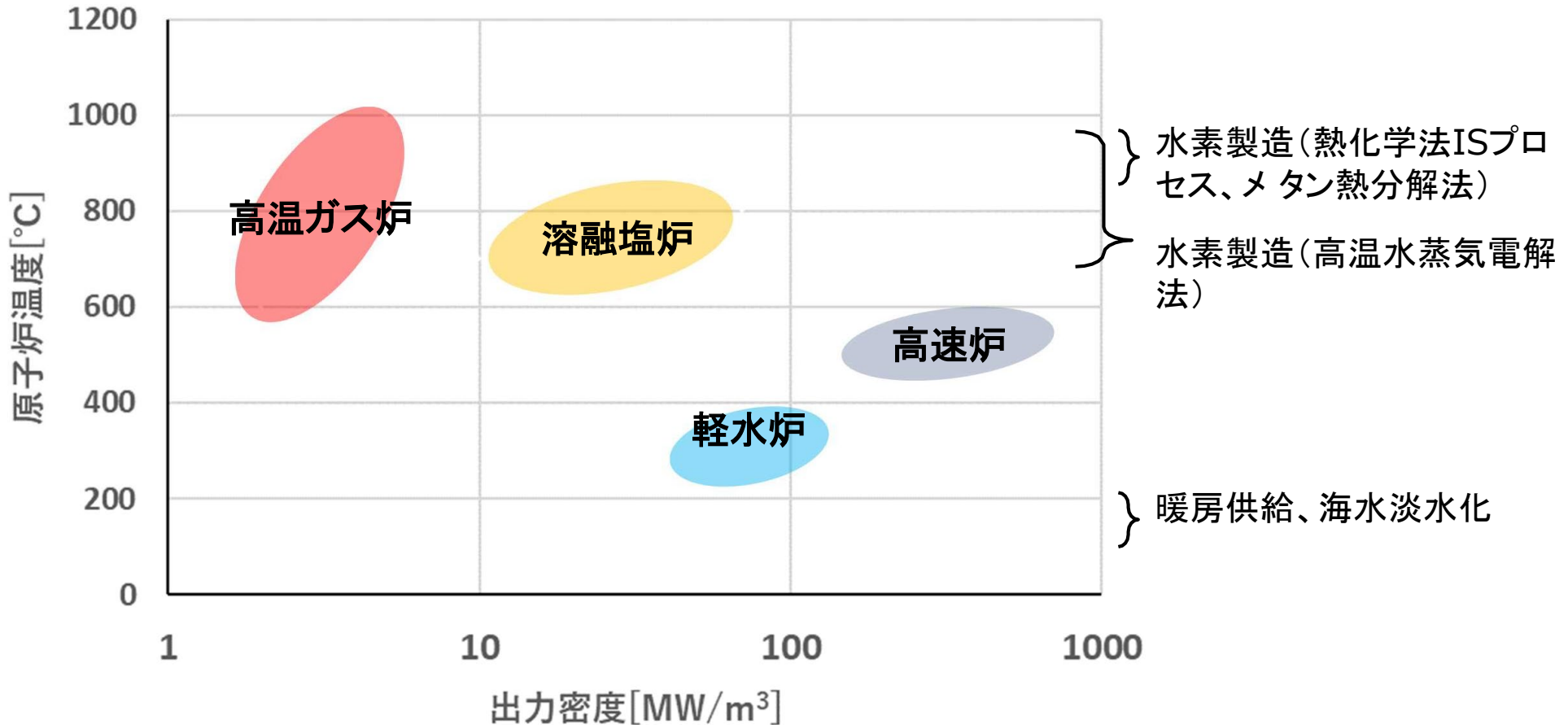
各炉型の原子炉温度や出力密度

出所:資源エネルギー庁、革新炉WG第1回会合 資料6(令和4年4月20日)

- 原子炉温度が高い炉型は、発電効率がよく、水素製造等の熱利用のポテンシャルを持つ。
- 出力密度が高い炉型は、炉心が小さく、発電の経済性向上のポテンシャルを持つ。

各炉型の原子炉温度や出力密度の領域(イメージ)

熱利用の形態





国内外にて開発が進められている水素製造方法

出所:資源エネルギー庁、革新炉WG第1回会合 資料6(令和4年4月20日)

- 常温の電解法が世界で競争が加速するが、カーボンフリー水素製造には再エネコストの高さが壁。
- 高温を活用したカーボンフリー水素製造方法については、世界で研究開発が加速。

運転温度(°C)

0

700

800

900

1000

高温ガス炉

| | 名称 | 特徴 | 開発者 | CO ₂ | 技術熟度 | 課題 |
|---|----------------|---|---------------------------------------|-----------------|------|--|
| 0 | 電気分解 | 脱炭素電源を使った場合、CO ₂ 排出ゼロ。 | — | なし | 実用 | 高効率化 |
| 1 | メタン水蒸気改質法(SR法) | 高温ガス炉を活用し、熱源からのCO ₂ 排出減を達成。完全なCO ₂ フリーを達成するには、CCS等で回収することが必要。 | — | 排出あり | 実用 | グリーン水素にするには、CO ₂ の処理(CCS等)が必要 燃料費により価格変動 |
| 2 | 水の熱化学分解法(IS法) | ヨウ素Iと硫黄Sを利用し、約900度の熱で水を熱分解。CO ₂ 排出ゼロ。JAEAにより1997年頃から開発が進められている。 | JAEA | なし | 研究 | 高温、腐食性環境に耐える材料開発他 |
| 3 | 高温水蒸気電解法 | 高温を活用することで、電気分解の効率を向上。CO ₂ 排出ゼロ。 | 東芝、独Sunfire、丁Topsoe、米Fuel Cell Energy | なし | 研究 | 低価格化、大容量化 |
| 4 | メタン熱分解法 | 高温の液体金属中でメタンを熱分解。炭素は固形炭素の形で回収でき、CO ₂ 排出ゼロ。 | 米カリフォルニア大学、独カールスルーエ大学等 | なし | 研究 | 高温、腐食性環境に耐える材料開発他 |



高温ガス炉等の超高温を利用した水素大量製造

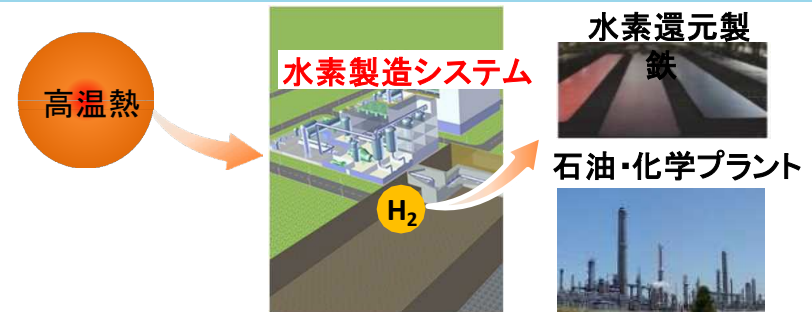
出所: 資源エネルギー庁、革新炉WG第1回会合 資料6(令和4年4月20日)

- 令和4年度より、日本原子力研究開発機構(JAEA)所有の**高温ガス炉試験炉(HTR)の超高温(950℃)を用いた水素製造技術の実証を開始。**

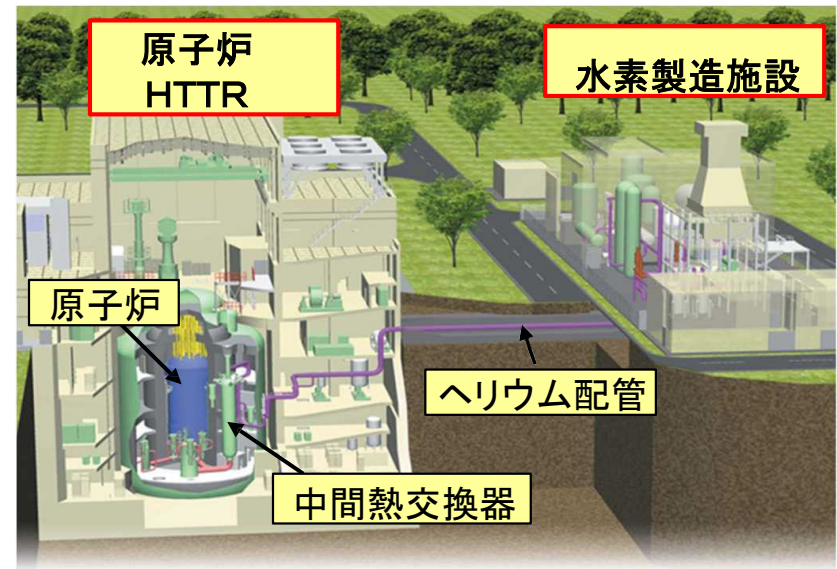
超高温を利用した水素大量製造技術実証

日本原子力研究開発機構、三菱重工業株式会社

- 800℃以上の脱炭素高温熱源(例えば、高温ガス炉、太陽熱、核融合等)を活用したカーボンフリー水素製造法によって、**2050年には約12円/Nm³で大量の水素を安定的に供給する可能性**を念頭に、製鉄や化学等での産業利用に繋げることを目指す。
- 高温でも利用可能な高温隔離弁の開発等、**HTRと水素製造施設を安全に接続する技術開発**を実施。
- 国内外の様々なカーボンフリー水素製造技術(IS法、メタン熱分解法、高温水蒸気電解等)の**フィージビリティスタディを実施**。超高温熱源の活用に適した水素製造技術を検討。
- 並行して、上記で検討した技術の**実用化スケール向けの実現性及び成立性を確認**。



高温熱による産業界への水素活用のイメージ



HTR-水素製造施設の構成(イメージ)

超高温の活用で脚光を浴びる高温ガス炉

出所:資源エネルギー庁、革新炉WG第1回会合 資料6(令和4年4月20日)

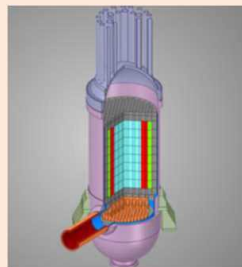
- NEXIPにおいて、水素製造、蓄熱のアイデアで柔軟性を有する高温ガス炉2炉型を支援。

NEXIPで支援中の高温ガス炉提案

高温ガス炉コジェネプラント (水素製造・発電)

三菱重工業株式会社

- 高温ガス炉の900℃超の熱を活用し、発電と大量・安定の水素製造が可能なコジェネプラント。
- 水素の大量安定供給で製鉄等プラント等の脱炭素に貢献可能。
- HTTR設計・製作・建設、実用炉検討を通じた経験。



蓄熱型高温ガス炉

東芝エネルギーシステムズ株式会社、富士電機株式会社

- 熱出力600MWt/ユニットで、4ユニット合わせて電気出力約100万kWを達成する高温ガス炉。
- 発電用を念頭とし、熔融塩蓄熱システム併設により負荷追従が可能。
- 高温水蒸気電解との接続による水素製造オプション。
- HTTR建設主要企業としての経験。

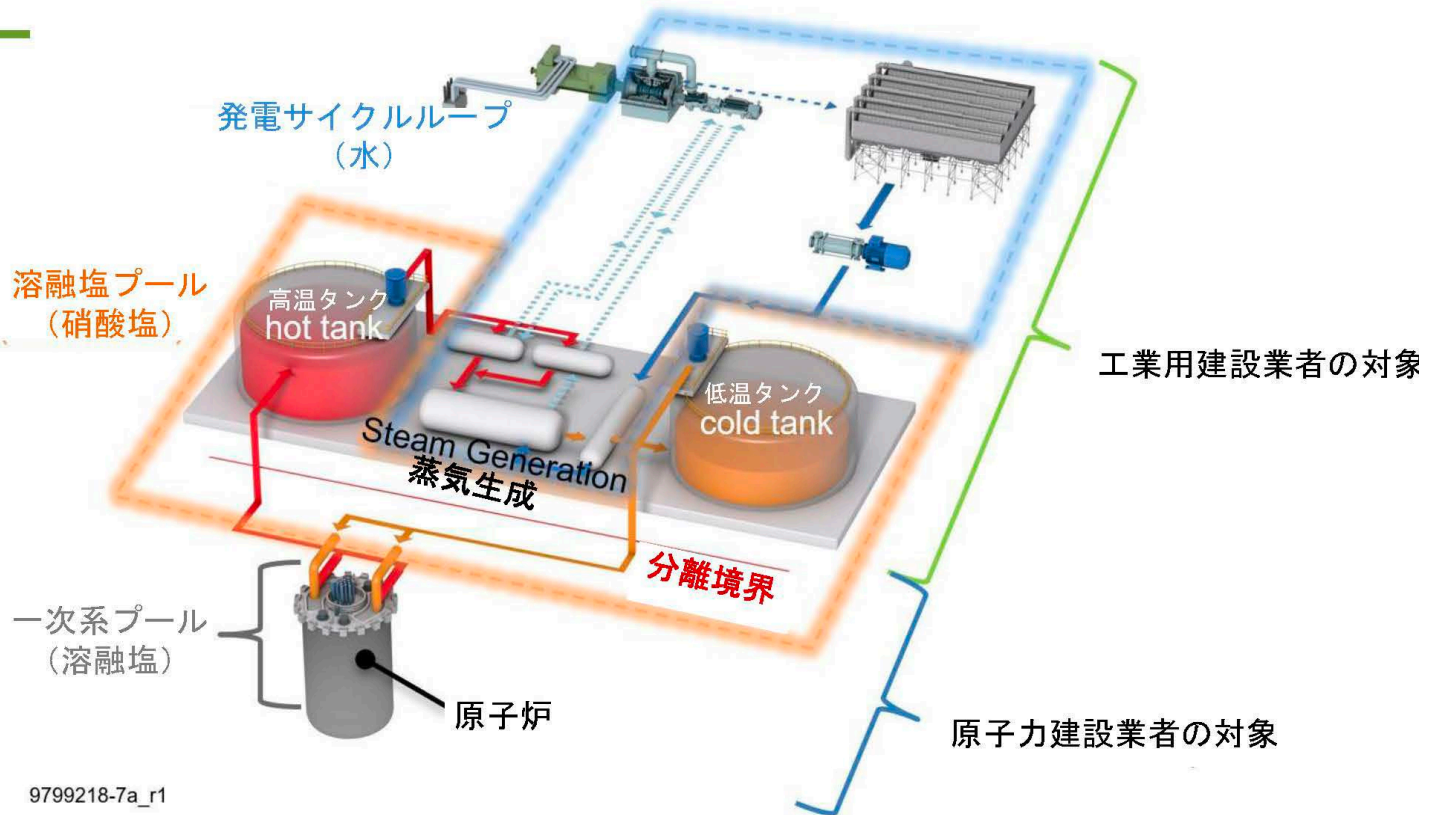




蓄熱設備を有する新型炉 テラパワー社Natrium

出所:資源エネルギー庁、革新炉WG第2回会合 資料4(令和4年5月19日)

統合エネルギー システム (IES)



9799218-7a_r1



蓄熱設備を有する新型炉 テラパワー社Natrium

出所:資源エネルギー庁、革新炉WG第2回会合 資料4(令和4年5月19日)

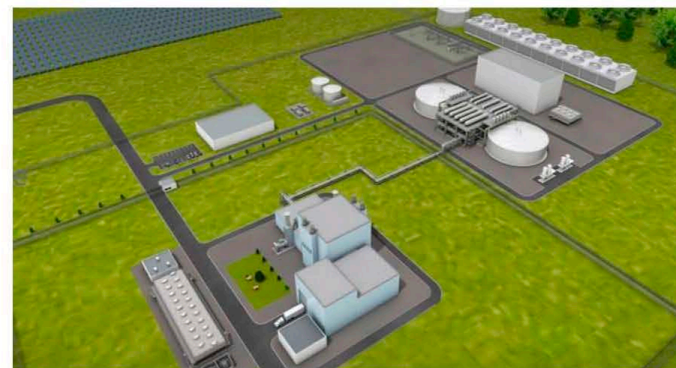
今後の原子力の可能性を再考する

原子力の再定義

- 原子力の「スプロール化」を排除
 - デザイン・ツー・コスト (DTC)
 - 簡素化
 - 工期短縮
 - 設計に特化した人材配置
- 正味熱効率~ 41%

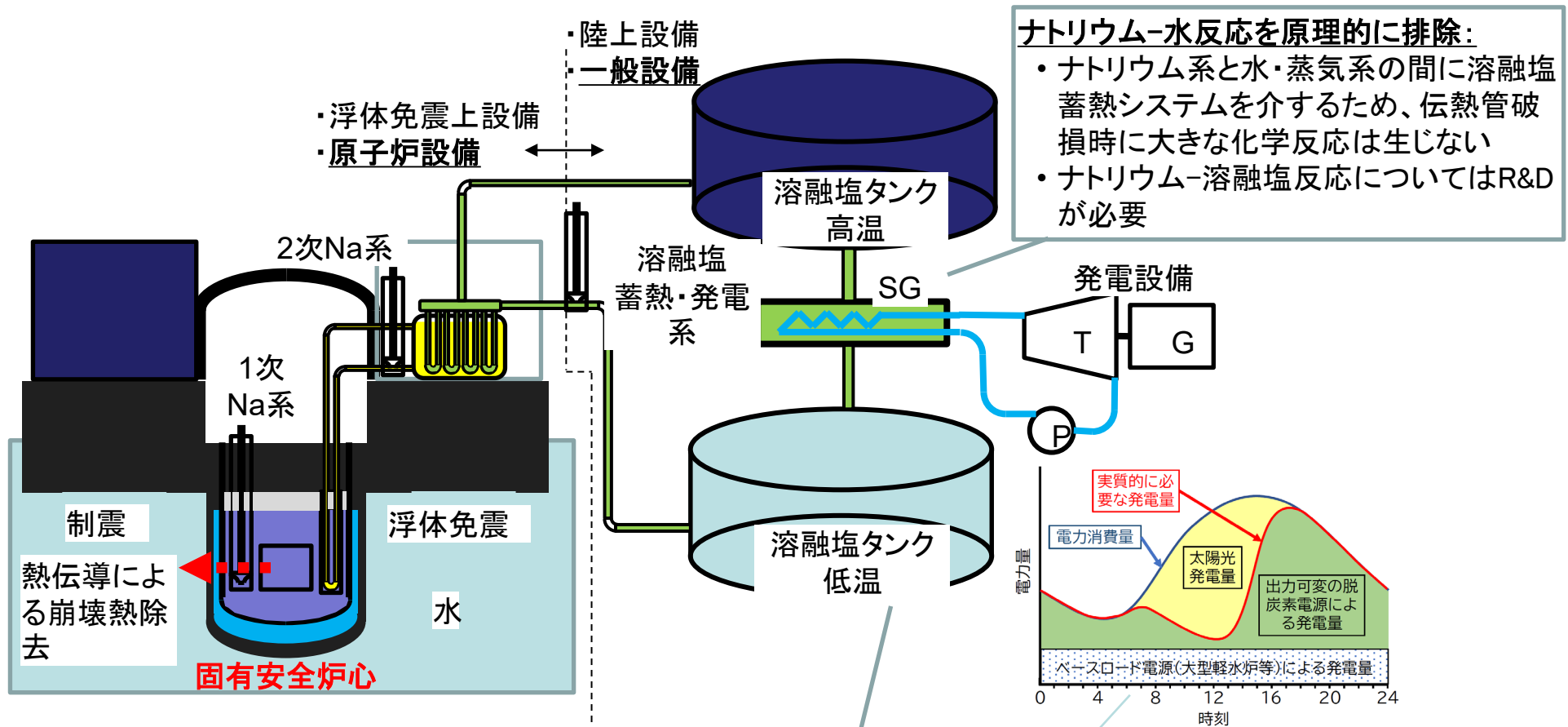
再生可能エネルギーとの融合

- ゼロエミッション、出力調整可能なエネルギー源
- 24時間365日100%で出力する原子炉の価格追随者 (プライスフォロワー)
- 発電容量345MWe
- エネルギー貯蔵装置と組み合わせて500MWe (5.5時間) まで拡張可能





高速炉SMRのプラント概念例



蓄熱システムにより原子炉出力100%のまま電気出力を変動可能:

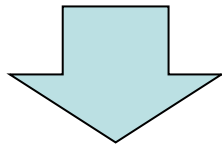
- ・太陽光発電等の出力変動に追従して出力を変化し、電力供給を安定化(=調整電源機能)
→売電価格が高くなり、収益向上
- ・原子炉出力は100%を維持できるため、出力調整しても経済性維持

参考)原子力機構のSMR開発(令和3年3月)
<https://www.jaea.go.jp/04/sefard/faq/files/material0601.pdf>

まとめ

◆報告内容

- 2050年カーボンニュートラルに向けた社会動向
- 変動性再エネの導入拡大に伴う調整力の重要性
- 再エネと共存できる新型炉システム



- ◆再エネと共存できる新型炉はカーボンニュートラルに貢献できる技術であり、政府によってグリーンTRANSフォーメーション(GX)技術開発が後押しされ、**早期実用化と社会実装**が進むことを期待する。