



Tokyo Tech

カーボンニュートラル達成に向けた エネルギーストレージベストミックス のための提言

加藤之貴

日本機械学会 動力エネルギーシステム部門

カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会(蓄エネ研) 主査

東京工業大学 科学技術創成研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所 所長、教授

E-mail: kato.y.ae@m.titech.ac.jp

カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会報告会（蓄エネ研セミナー）

2024年3月14日(木)15:05-15:30早稲田大学西早稲田キャンパス61号館210室



ゼロカーボンエネルギー研究所

Laboratory for Zero-Carbon Energy

© 2024, Yukitaka Kato, Tokyo Tech

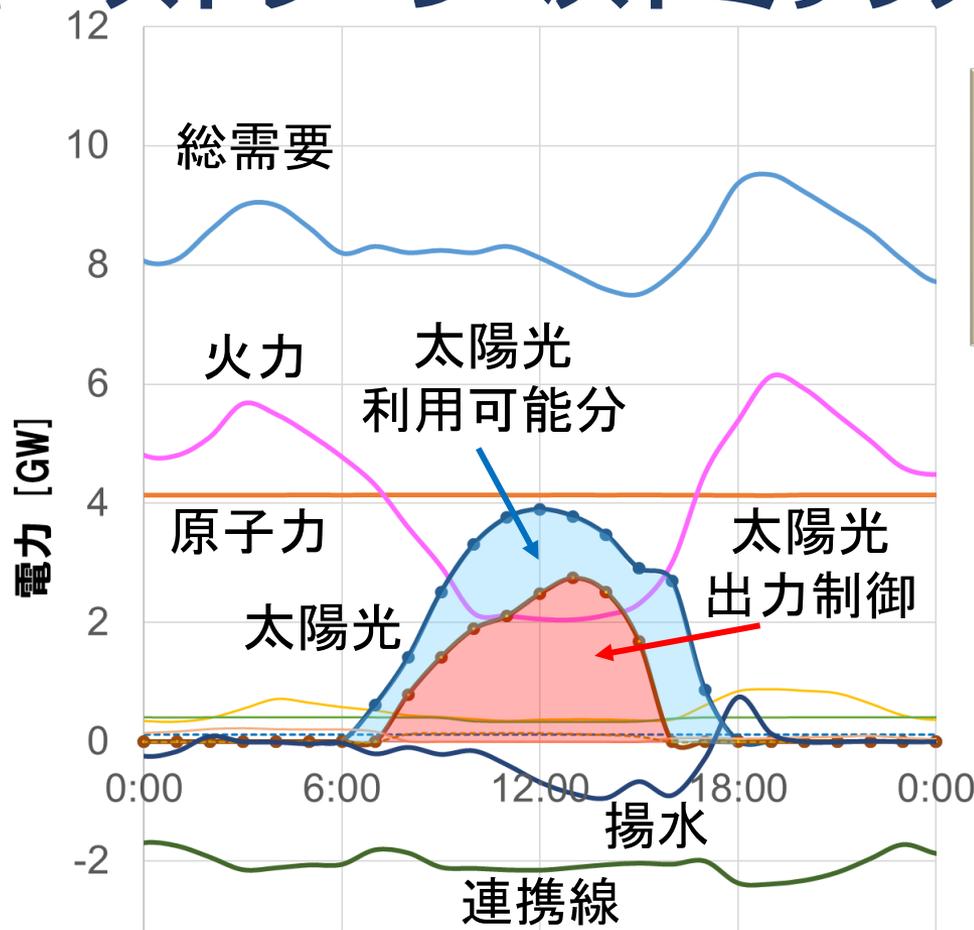
カーボンニュートラル達成に向けたエネルギーストレージ ベストミックスのための提言（2024年）

https://www.jsme.or.jp/pes/Research/A-TS08-13/A-TS08-13_01.pdf

日本機械学会動力エネルギーシステム部門「カーボンニュートラルに向けたエネルギー貯蔵技術研究会」（2021年10月～2024年3月）は、学術専門家集団として、関連技術の実現可能性、事業性等にかかる科学的見地に基づいた望ましい2050年カーボンニュートラル達成に向けた最適なエネルギーストレージ技術を検討し、提言を提出した。

- ✓ **提言1：変動性再生主力電源化に対応したエネルギーストレージベストミックスの確立を図るべき**
- ✓ **提言2：ゼロカーボンエネルギーによるグリーン社会への転換を図るべき**
- ✓ **提言3：産業・民生部門における蓄熱技術の更なる有効活用を図るべき**
- ✓ **提言4：2050年以降のカーボン・ネガティブ・エミッションの実現を目指したエネルギーストレージ戦略を構築すべき**

提言1：変動性再エネ主力電源化に対応したエネルギーストレージベストミックスの確立を図るべき



- ✓ 再エネの変動性に対応したエネルギーストレージの拡大
- ✓ 余剰再エネの出力制御（出力抑制）の回避

太陽光発電の**出力制御**が増大（九州、四国、中国、北海道。九電は2021年で実施82日、総電力4.2%、5.1億kWe、電力約100億円相当）[2,3]

- ◆再エネ利用が困難
- ◆タービンが担ってきた**慣性力の不足**による電力の質の低下[4]
- ◆**再エネ=蓄エネ**
- ◆電池以外、かつ**慣性力を有した低コストエネルギー貯蔵**の研究

Fig. 国内の太陽光発電の出力抑制例[1],
2020年3月

[1] 九州電力、https://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0254/3848/area_jyukyuu_jisseki_2019_4Q.csv

[2] 九電、再エネ出力制御見通し（2021年度）

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/036_02_09.pdf

[3] 日経、2022/5/6、<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC0258POS2A500C2000000/>

[4] 経済産業省、2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略、2021/06/18、

https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_gaiyou.pdf

エネルギーストレージ技術

✓ エネルギーストレージ技術の確立

2050年も現在の電力需要並みと想定すれば、変動性再エネによる発電量で40%確保し、出力調整可能な安定電源で残りの60%の発電量を確保できる場合でも、朝夕の不足電力発生に伴って停電に至らないように、1年間に数十日程度は100GWh規模の電力貯蔵量が必要となる。

✓ 水素技術の課題

電解効率を87%程度、生成水素の液化効率を80%程度、さらに水素を用いた発電効率を65%程度とすると、入力電気から出力電気へのトータル変換効率は40%超。実際の液化効率21%程度を用いると実質的なトータル変換効率は12%程度。イオン交換膜を用いた水電解、極低温技術（もしくは、水素改質技術）、水素燃焼等の新規開発技術を低コストで実現が必要。安全性確保、技術の大規模な普及や政策・制度面の後押しなどが必要



図1 水素ステーション161か所@2023、イワタニ水素ステーション尼崎

https://www.cev-pc.or.jp/lp_clean/spot/
https://www.cev-pc.or.jp/suiso_station/detail1.html

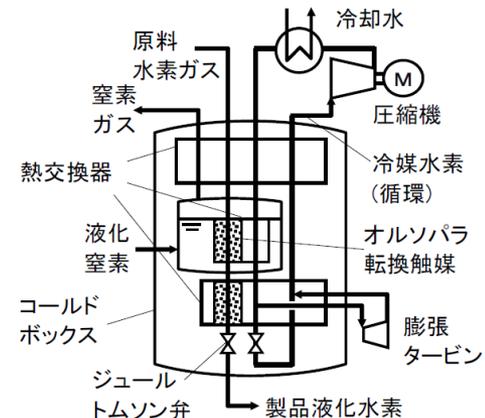


図2 水素液化プロセスフロー

山下誠二, J. Japan Soc. Energy & Res., 37(4), 2016

(提言1-2) エネルギーストレージ技術の社会実装を図るべき

✓ エネルギーストレージミックスの経済合理性

さまざまな技術オプションを適切に組み合わせたエネルギーシステムを構築することが必要。エネルギー貯蔵量当りの設備コストの低減に向けた技術開発を促進、社会実装を図る

✓ 国産技術開発とサプライチェーン構築

特定国資源に頼らない国内産業のサプライチェーンを構築すべき

✓ 投資環境の整備

エネルギーストレージに関する投資を促すために、カーボンニュートラルへの貢献に応じたインセンティブ付与など、一層の制度面の整備を期待する。

(提言1-3) エネルギーストレージ技術の開発を支援すべき

✓ 次世代技術開発支援

エネルギーストレージ技術で世界を先導していく必要がある。蓄熱技術については、従来の顕熱技術だけでなく、効率を向上させた潜熱蓄熱や化学蓄熱は日本が主導できる可能性を有している。

エネルギーストレージベストミックス のための蓄エネルギー技術俯瞰

揚水：大容量。慣性力を有し系統安定化に寄与。コスト、立地の問題。

蓄電：政府支援もあり着実に研究開発が進展。

水素：政府支援もあり多くのプロジェクトが進行。

圧縮空気：長時間かつ大容量のエネルギー貯蔵手段として実証が進んでいる

蓄熱：多種多様な技術があり、利用方法も多様でマッチングが重要。蓄熱手段によっては長期蓄熱も可能

蓄熱技術の現状；

- ・空調分野（室温レベル）で着実な導入
冷水、温水、氷、地中熱
- ・温度レベルが上がると実用例が著しく限定
- ・低中温域では蒸気アキュムレータが実用化
- ・高温域では太陽熱発電において、硝酸塩系混合溶融塩が実績あり
- ・EU、米国で再エネ利用向けの蓄熱研究開発が進んでいる
- ・実装が進まない理由として、技術面と経済成立性の問題がある
- ・国内での大型実証プロジェクトが少ない

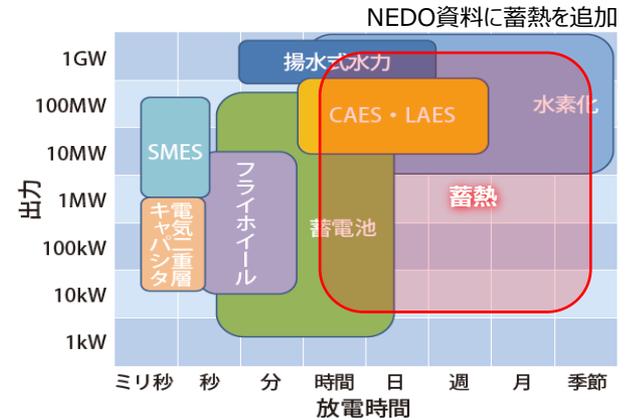


図 15 電力貯蔵技術の各方式の出力・放電時間

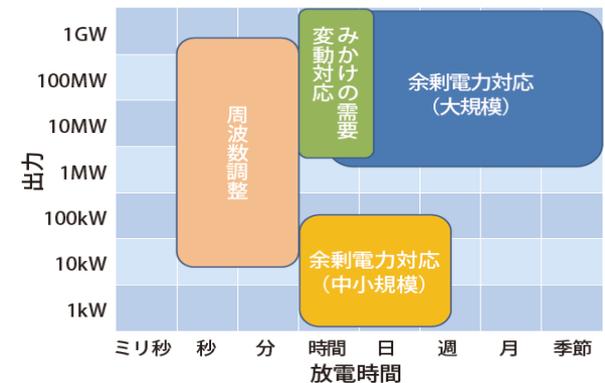


図 16 各用途に必要な出力・放電時間

出展：NEDO技術戦略研究センターレポート「電力貯蔵分野の技術戦略策定に向けて」2017年7月

岩城智香子、東芝エネルギーシステムズ、蓄エネ研資料
(2023/7/29) (加藤改変)

提言2：ゼロカーボンエネルギーによるグリーン 社会への転換を図るべき

(提言2-1)調整力に富んだクリーンな安定電源を確立すべき

✓ 水力発電の出力調整機能

揚水発電によって調整力としての役割を担ってきた。しかしながら、我が国の国土条件の制約により限界があり、2030年までにほぼ限界に近い発電量になると予想

✓ 火力発電の出力調整機能

再エネの変動性に対応した調整力として役割を果たしてきた火力発電は蓄熱技術を導入して調整力として柔軟性を持つ。高効率化による低排出化、水素、アンモニアやバイオマス等の低炭素燃料化を図り、炭素回収・再生循環利用(CCU)、適地は限られるが貯留(CCS)と併せ運用する。

✓ 原子力発電の出力調整機能

2050年までのカーボンニュートラルを実現するには、安定電源をゼロ・エミッション電源である原子力とCCS付き火力を活用していく必要がある。

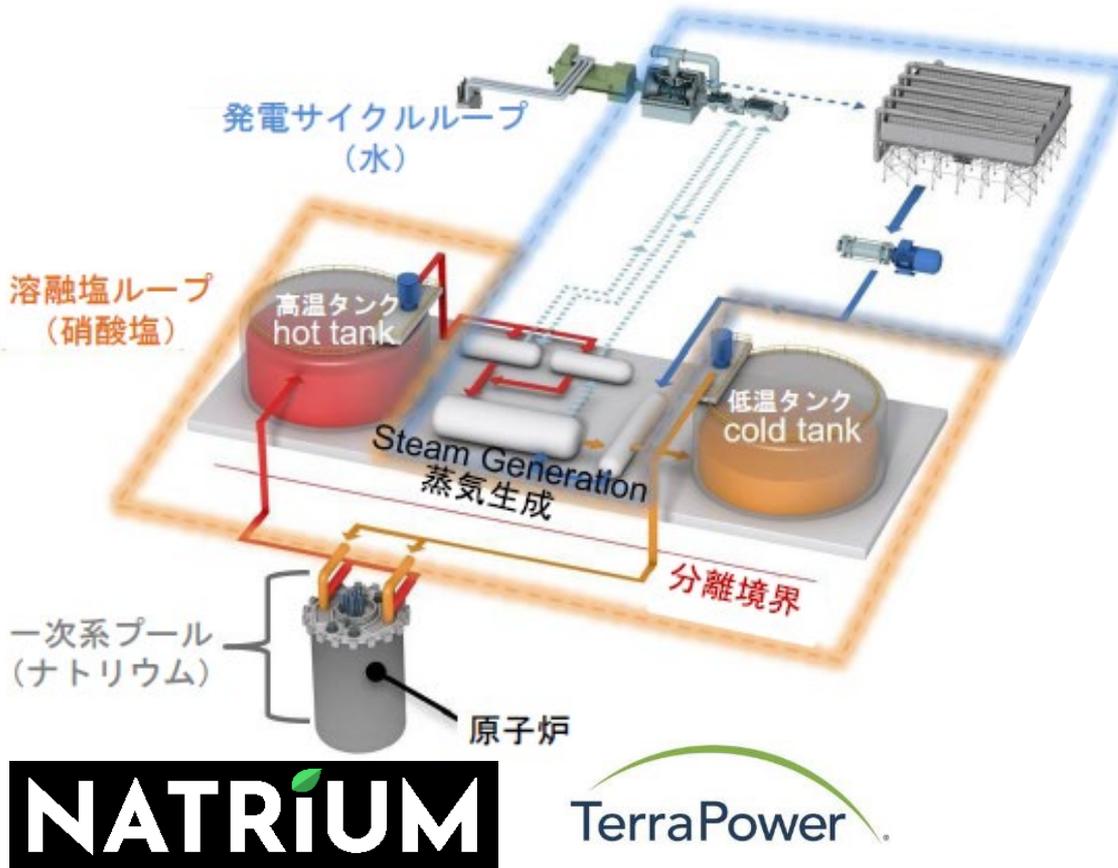


日本全国の水力発電所

<http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/energy/electrical-japan/type/4.html>

✓ 原子力発電の出力調整機能

高温蓄熱による再エネとの連携



1. ナトリウム冷却高速炉 (SFR), 2028年運開予定
2. 溶融塩蓄熱と連携
3. 再生可能エネルギーとの連携

- 出力調整可能
- 24時間365日100%出力しながら電力価格追従運転 (price follower)
- 発電容量345MWe、蓄熱を組み合わせると500MWe(5.5時間)

図1 Natrium, 溶融塩蓄熱と連携したナトリウム冷却高速炉

[1] METI, 第2回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 革新炉ワーキンググループ, 2022/05/19, 資料4 TerraPower社の高速炉開発について (TerraPower社資料)

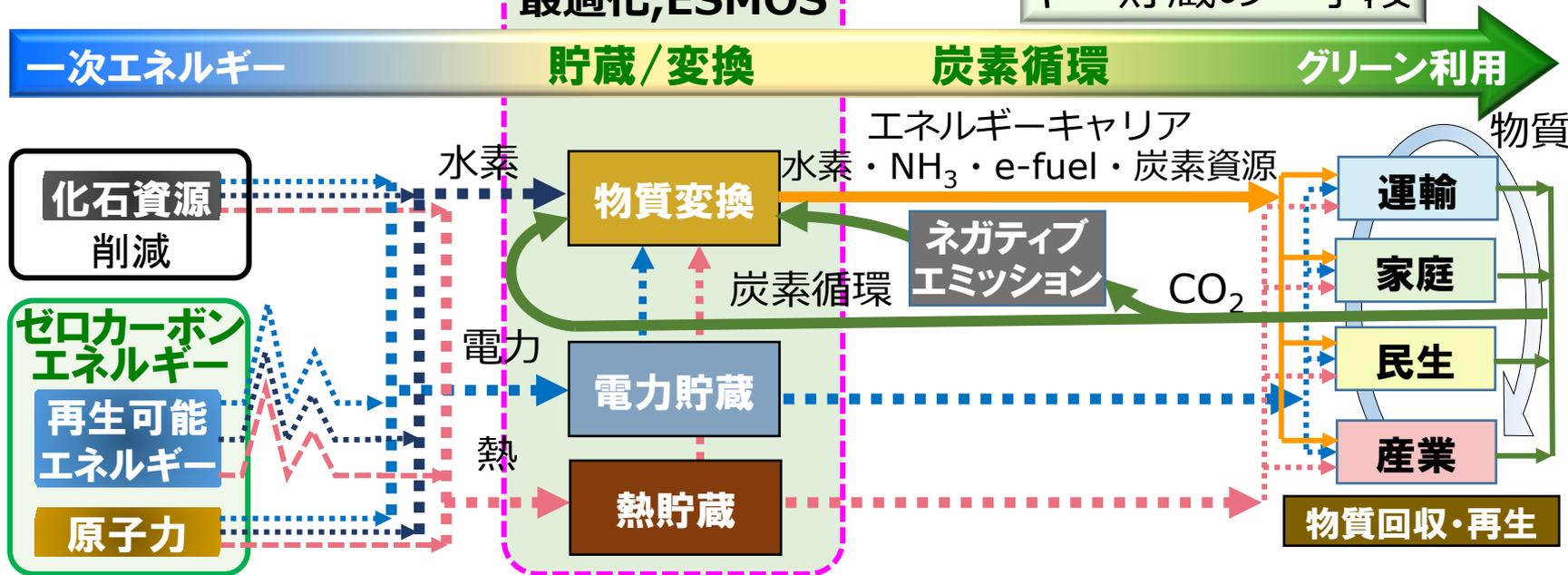
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/kakushinro_wg/pdf/002_04_00.pdf

[2] Natrium, Terrapower, <https://natriumpower.com/>

エネルギーストレージベストミックスとグリーン社会

エネルギー貯蔵
最適化, ESMOS

炭素循環もエネルギー貯蔵の一手段



ESMOS: Energy Storage Mix
Optimized System

- グリーン化に伴う必須技術
1. ゼロカーボンエネルギー
 2. エネルギー貯蔵最適化 (ESMOS)
 3. 炭素循環・ネガティブエミッション = **GX技術**

Overview of ZC, Tokyo Tech

http://www.zc.iir.titech.ac.jp/jp/events/publications/files/Overview_ZC_2021.pdf

提言 3 : 産業・民生部門における蓄熱技術の更なる有効活用を図るべき

(提言3-1)蓄熱技術を用いた熱エネルギー利活用を図るべき

1. 高温ケミカルヒートポンプのための材料開発
2. シリコン含浸炭化ケイ素(SiSiC)フォームとCaOの複合化
 - ✓ 高熱伝導度、材料の高い繰り返し耐久性、高反応性、高出力化。
 - ✓ 体積膨張・凝集塊形成をSiSiC内で抑制

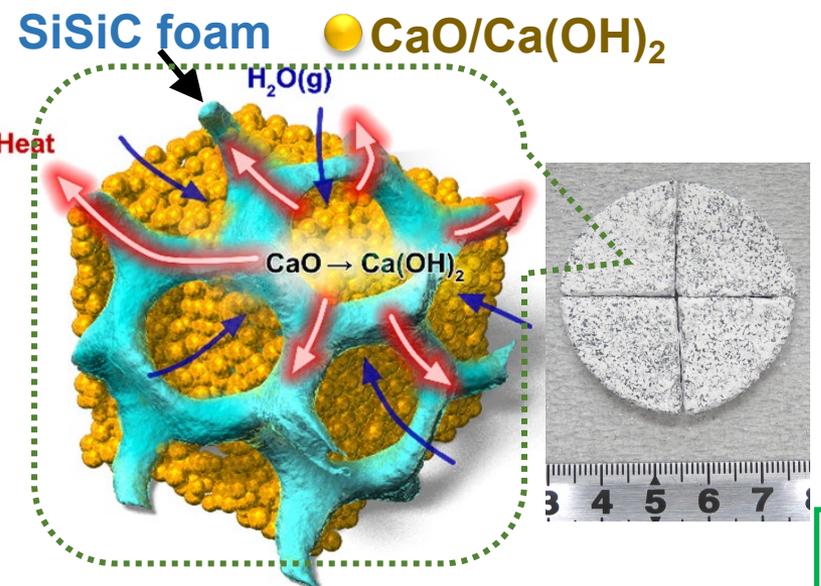


図1 新たな蓄熱技術：SiC/CaO複合化学蓄熱ブロック[2]

[1] Funayama, Kato, et al., Energy Storage, 1, e53 (2019).
 [2] Funayama, Kato, et al., Appl. Therm. Eng., 220 (2023), 119675.

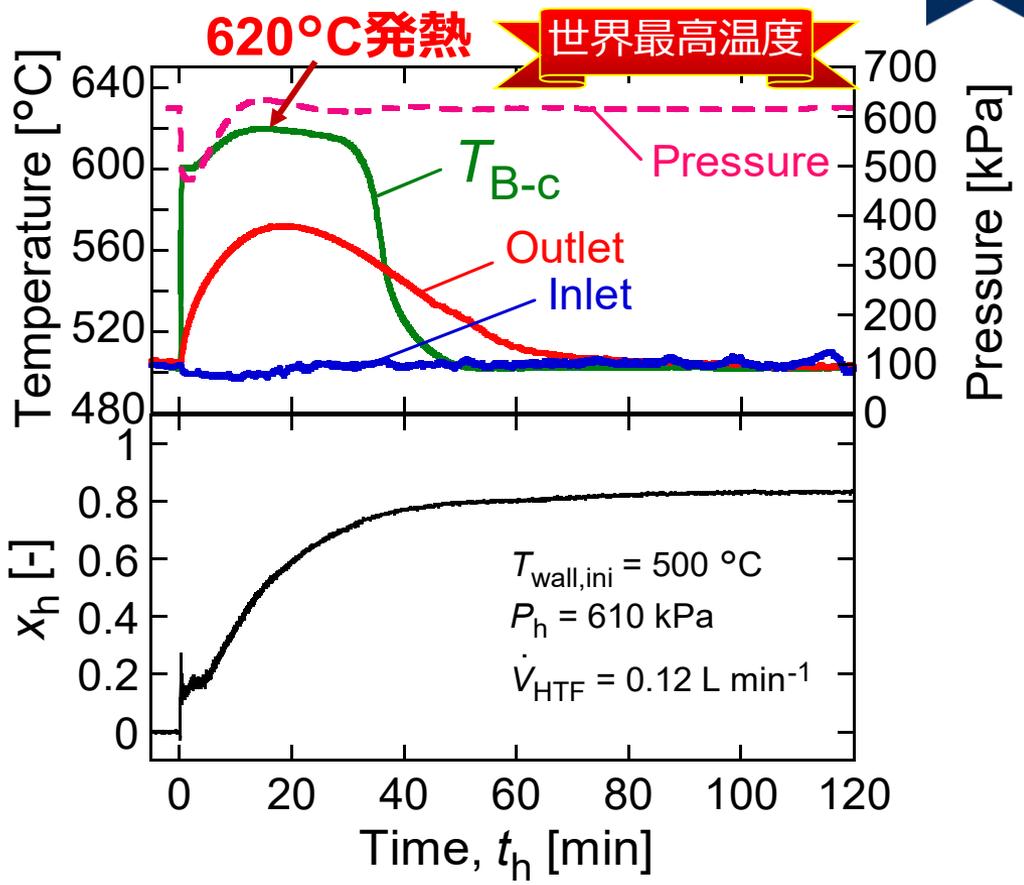


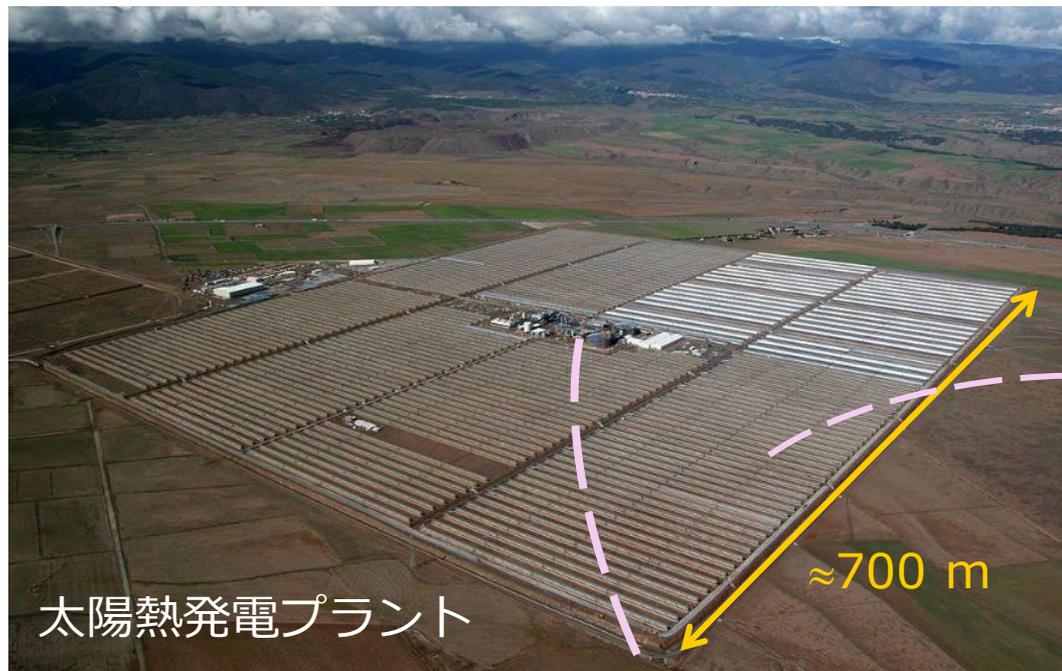
図2 CaO系複合化学蓄熱ブロックを充填した高温ケミカルヒートポンプの水和熱出力実験結果 [1]

- ✓ Initial temp.: 500 °C, $P_h = 610\text{ kPa}$
- ✓ The center temperature (B-c) attained 620 °C
- ✓ The HTF outlet reached 572 °C
- ✓ The conversion reached 83% after 120 min

✓ 熱エネルギー利活用

再エネ蓄熱事例：顕熱蓄熱（溶融塩）

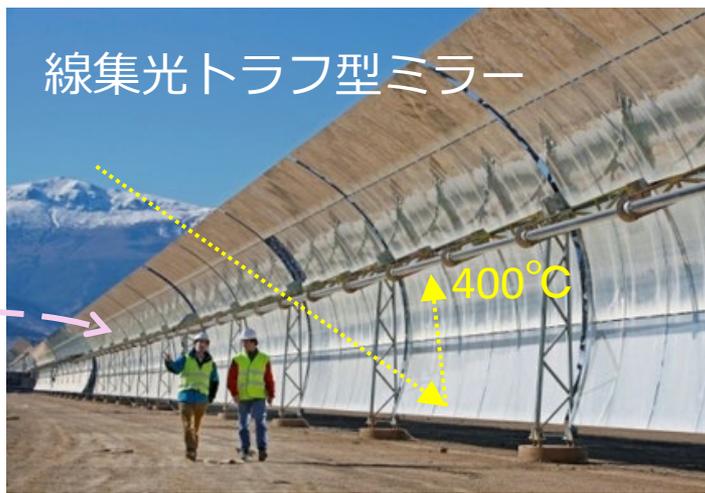
Andasol Solar Power Station, Spain, CSP(太陽集熱発電), 150 MWe, Solar Filed 5.1e5 m², TES = 400°C, 発電効率16%, 400億円 (30万円/kWe)



太陽熱発電プラント

≈700 m

https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=3



線集光トラフ型ミラー

400°C

http://euro.typepad.jp/blog/images/2010/01/09/andasol_1.jpg

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e5/12-05-08_AS1.JPG/1200px-12-05-08_AS1.JPG

クラシックな蓄熱技術による大規模蓄電が社会実装済

<http://d2r42o2f7hk334.cloudfront.net/wp-content/uploads/2011/10/andasol-3.jpg>

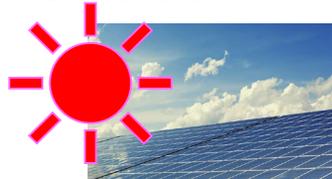


溶融塩顕熱蓄熱+蒸気発電システム

(提言3-2) 次世代エネルギー産業を支援すべき

✓ 蓄熱技術を導入した次世代産業 :

出力抑制再生エネ



CN社会



セクター
カップリング
(80%)

低コストで
仕入れ

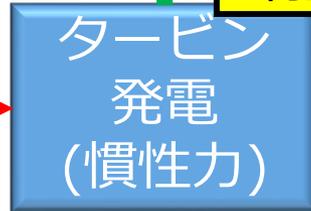


電力100%

熱



熱



電力40%

売電で
利益

熱融通



CN熱の
産業利用
が進む。

図1 電力蓄熱発電システム(P2H2P)の基本構成

CHP: Chemical Heat Pump, P2H2P: Power to Heat to Power

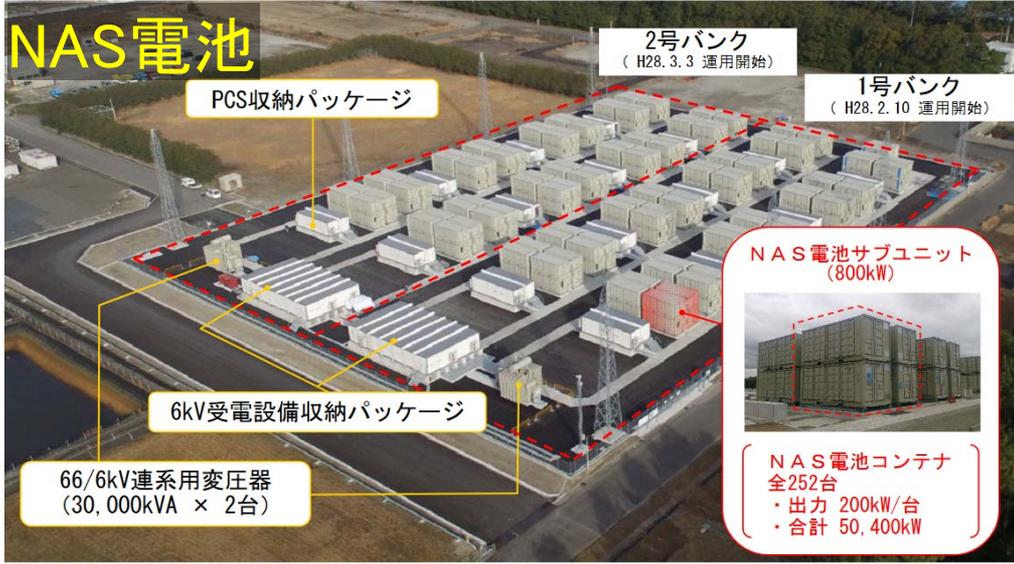
- 出力抑制再生エネを低コストで仕入れ、需要時に売電できる。
- 蓄電池より**低コスト、大規模向け**にスケールアップが容易な蓄エネルギー発電システム
- タービン発電を有するため、蓄電池に無い電力供給に**慣性力がある**。出力変動する再生エネ電力の安定供給に必須。
- 高温熱の産業直接利用**による高効率利用、セクターカップリング利用。
- ドイツ、EU、米国などで研究開発が先行。

蓄電と蓄熱の規模比較

敷地面積基準で、顕熱蓄熱はNAS蓄電池の半分以下



375 MWh
5,600 m²
(= 40 x 140 m)
 太陽熱発電プラント(50 MWe)の溶融塩顕熱蓄熱 + 蒸気発電システム,
 Andasol, Spain



300 MWh
14,000 m²
(= 100 x 140 m)
 NAS大型蓄電システム,
 九州電力[2]

NAS電池、50 MWe、300 MWh-e/day
 180億円 (6万円/kWh、2020家庭用目標価格)

[1] NREL, Andasol 1 CSP Project, <https://solarpaces.nrel.gov/project/andasol-1>
 [2] 九州電力株式会社, 豊前蓄電池変電所における大型蓄電システムによる需給バランス改善実証の成果について, (2018)
http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/180320/180320_3.pdf

表 大規模再エネに対する蓄エネ技術比較

蓄エネ手法	蓄電池	蓄熱	水素
蓄電	充電	加熱	水電解
貯蔵形態	電池	蓄熱材	圧縮水素
発電	放電	蒸気タービン	燃料電池
エクセルギー効率	◎(90%)	○(>36%)	△(<34%)
コスト	400 \$/kWh[1]	100 \$/kWh[2]	>500 \$/kWh[3]
慣性力	×	◎	×
貯蔵安全性	△	◎	×
大規模化	○	◎	△
装置製造国	×海外輸入	◎国産	◎国産

- 蓄熱はコスト、発電の慣性力、安全性で大規模蓄エネに適している
- エクセルギー効率は電池に劣るが、セクターカップリングを行うことで水素蓄エネより効率が高い。

[1] 三菱総合研究所, 資源エネルギー庁調査報告書、定置用蓄電システムの普及拡大策の検討に向けた調査, 2023年2月28日

https://www.meti.go.jp/medi_lib/report/2022FY/000050.pdf

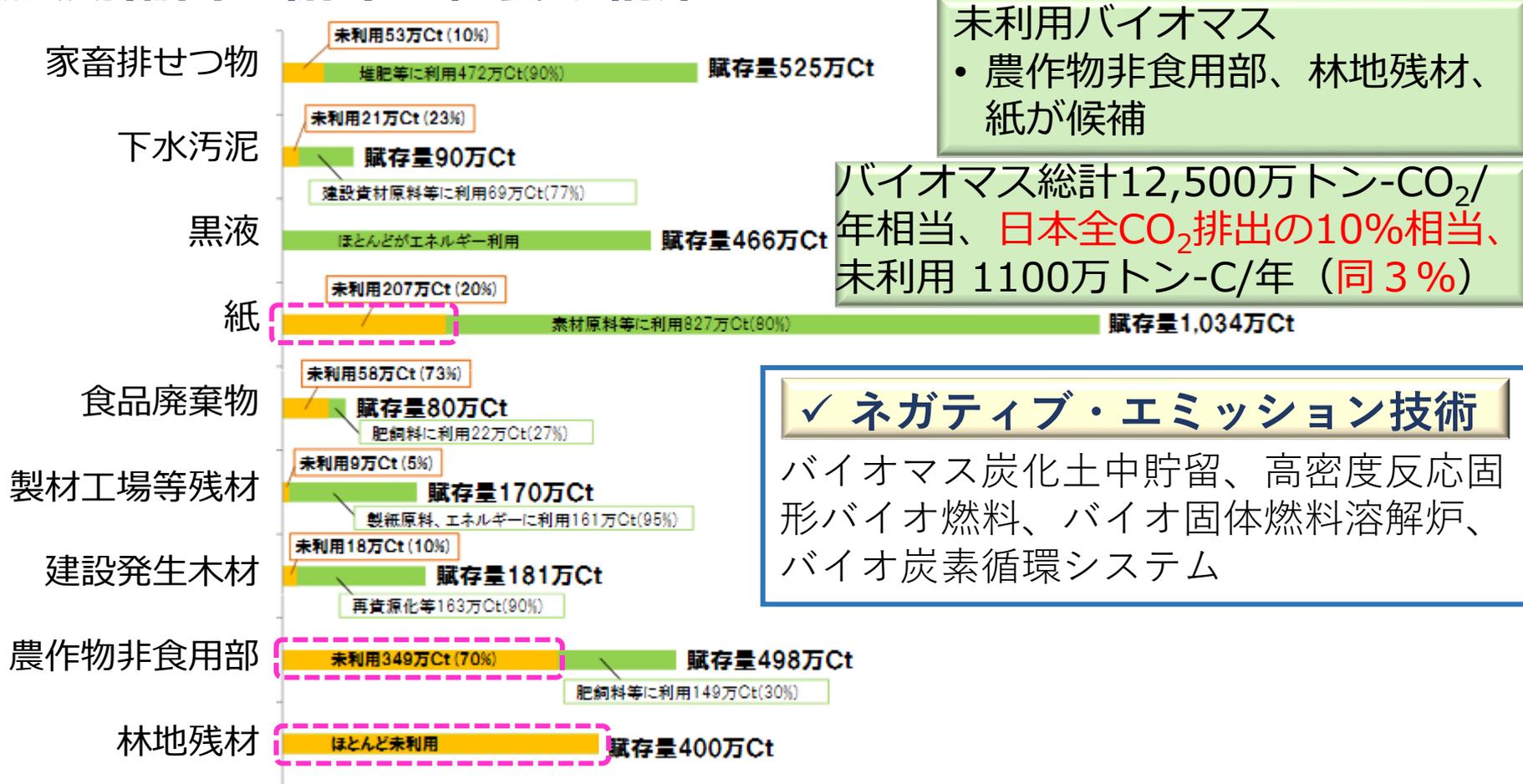
[2] 藤井祥万, 再エネ電力の熱ストレージの可能, 資源エネルギー庁報告, 2024年2月9日

[3] DOE, Advanced Liquid Alkaline Electrolysis Experts Meeting Report, Summary Report, January, 2022

<https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-04/liquid-alkaline-electrolysis-experts-meeting-report.pdf>

提言4：2050年以降の カーボン・ネガティブ・エミッションの実現を 目指したエネルギーストレージ戦略を構築すべき

(提言4-1) ネガティブ・エミッションを実現するバイオ炭素長期備蓄型循環型社会の構築



未利用バイオマス
 ・ 農作物非食用部、林地残材、紙が候補

バイオマス総計12,500万トン-CO₂/年相当、**日本全CO₂排出の10%相当**、未利用 1100万トン-C/年 (**同3%**)

✓ ネガティブ・エミッション技術
 バイオマス炭化土中貯留、高密度反応固形バイオ燃料、バイオ固体燃料溶解炉、バイオ炭素循環システム

※本資料の賦存量は「バイオマス活用推進基本計画」(平成22年12月閣議決定)に記載されている数値をもとに炭素トン換算にした 7

図1 日本のバイオマスの賦存量と利用可能量(2012)

MAFF, バイオマスをめぐる現状と課題, 2012
https://www.maff.go.jp/j/biomass/b_kenntou/01/pdf/1_1.pdf
 電力調査統計結果概要2019, 2020.6エネ庁
https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/pdf/2019/0-2019.pdf

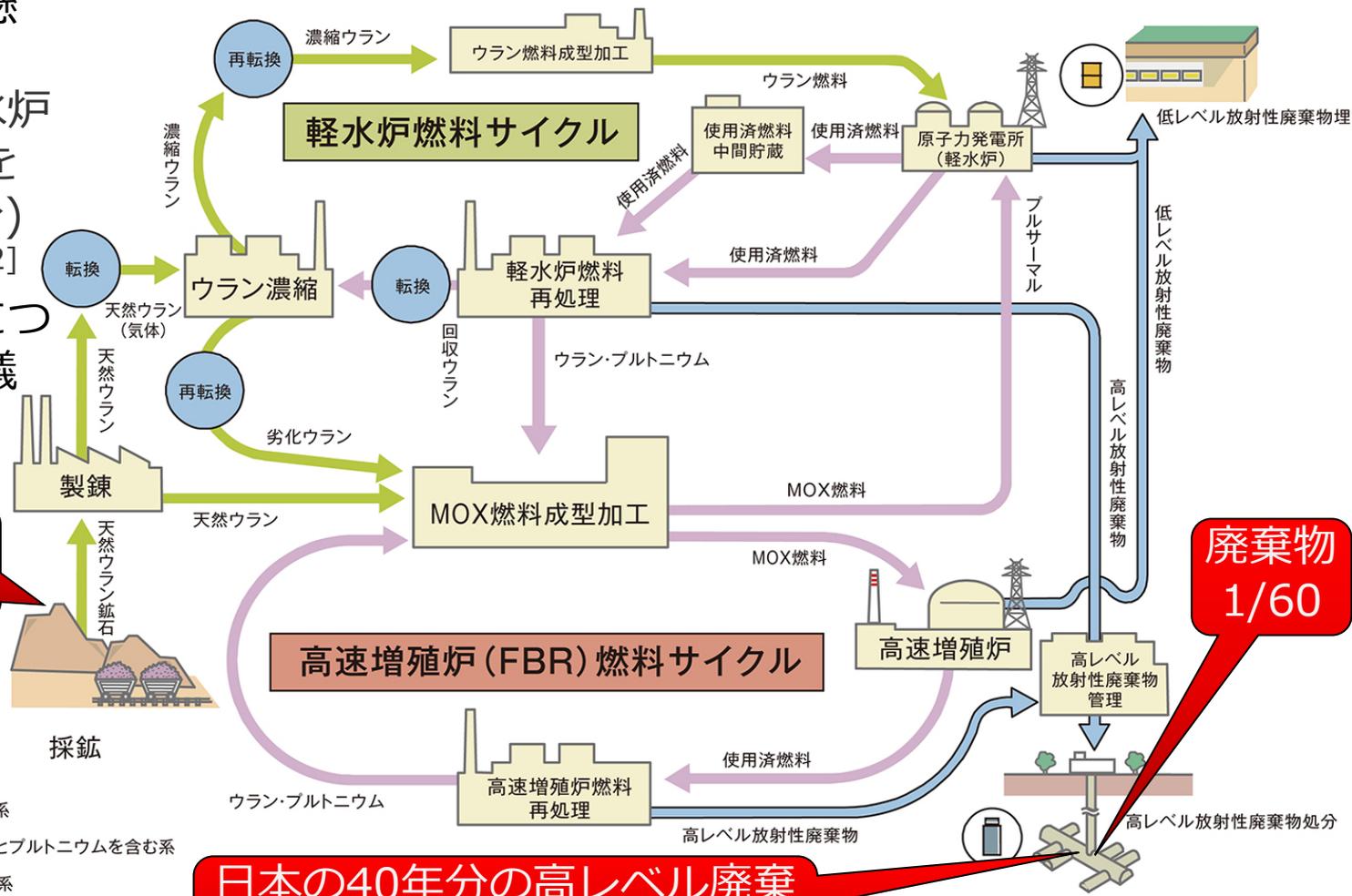
(提言4-2) 持続可能な脱炭素化に向けた核燃料サイクルの早期実用化

✓ 高速炉と核燃料サイクルによる究極のエネルギーストレージ^[1]

■ 軽水炉の利用拡大でウラン価格高騰が懸念

■ 高速炉により軽水炉に比べウラン資源を60倍以上(千年超分)の有効利用が可能^[2]

■ 核燃料サイクルについて多様な視点で議論を深めていく



60倍以上のU有効利用

廃棄物 1/60

日本の40年分の高レベル廃棄物処分用地 5km²→0.08km²

[1] 原子燃料サイクル (FBRを含む)、原子力・エネルギー図面集 <https://www.ene100.jp/zumen/7-2-2>
 [2] 前川 洋、高速増殖炉～ウランの有効利用 https://www.ies.or.jp/publ/icity_j/mini/87.pdf

■ ウラン系
 ■ ウランとプルトニウムを含む系
 ■ 廃棄物系

第7期エネルギー基本計画と熱

2050年に向けて成長が期待される、14の重点分野を選定。

・高い目標を掲げ、技術のフェーズに応じて、実行計画を着実に実施し、国際競争力を強化。・2050年の経済効果は約290兆円、雇用効果は約1,800万人と試算。



2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略、2021/6/18

3. 次世代熱エネルギー産業

・2050年に都市ガスをカーボンニュートラル化する、
 ・総合エネルギーサービス企業への転換を図る(ガスコジェネ)、
 ・合成メタンの安価な供給(LNG同等)を実現する

[1]内閣官房、グリーン成長戦略 本文、2021/06/18
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf
 [2] 同広報、
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_koho_r2.pdf

- 1.再エネ導入拡大には出力制御の克服、そのためのエネルギーストレージベストミックスが必要
- 2.熱に関する、熱回収・貯蔵、熱利用の概念はCNへの量的な貢献があり追加が望ましい。
- 3.日本のエネルギー安定供給にむけ第7次エネルギー長期計画への反映が重要。

提言の主張点

1. **量的にCNに重要なエネルギーストレージミックスおよび蓄熱に関する目標を国家戦略（第7次エネ基、GIなど）に追加が適切。**
 1. 再エネの普及拡大には出力制御の克服が必須。エネルギーストレージベストミックスが必須。
 2. 蓄熱は低コストなエネルギー貯蔵技術であり、再エネの出力抑制の克服、主力電源化にむけたエネルギーストレージミックスに貢献。
 3. 蓄電池は資源が海外依存しており、高価。低コストの国産エネルギー貯蔵オプションが必要。
 4. ネガティブ・エミッションを実現するバイオ炭素長期備蓄型循環型社会の構築
 5. 高速炉と核燃料サイクルは究極のエネルギーストレージである。あらゆる選択肢の連携が持続可能なCNエネルギー社会実現に必要。
2. **日本がストレージミックス、蓄熱技術の開発を怠るとエネルギーサプライチェーンの弱点となり、エネルギー経済安全保障上のリスクとなる。**
3. **先行してきた国産技術を有しながら、国際開発競争から落伍する懸念が増大する。世界をリードする国産熱利用技術開発の推進が必要。熱需要、ポテンシャル、ブレークスルー分野の同定、課題の克服が必要。**

蓄エネ研幹事、委員の皆様 のご貢献に感謝いたします。

表 日本機械学会動力エネルギーシステム部門「カーボンニュートラル
に向けたエネルギー貯蔵技術研究会」
(2021年10月～2024年3月) 参画者一覧、68名 (含む主査、5幹事)

No.		所属機関	氏名
1	主査	国立大学法人東京工業大学	加藤 之貴
2	幹事	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	山野 秀将
3	幹事	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	高野 和也
4	幹事	株式会社日立製作所	上遠野 健一
5	幹事	東芝エネルギーシステムズ株式会社	岩城 智香子
6	幹事	三菱重工業株式会社	近藤 浩夫
7	委員	国立大学法人東京大学	小宮山 涼一
8	委員	国立大学法人東京大学	藤井 祥万
9	委員	国立大学法人東京工業大学	竹下 健二
10	委員	国立大学法人東京工業大学	奈良林 直
11	委員	国立大学法人東京工業大学	木倉 宏成
12	委員	国立大学法人東京工業大学	高橋 秀治
13	委員	国立大学法人北海道大学	能村 貴宏
14	委員	国立大学法人東北大学	丸岡 伸洋
15	委員	国立大学法人新潟大学	児玉 竜也
16	委員	国立大学法人新潟大学	Selvan Bellan
17	委員	国立大学法人新潟大学	郷右近 展之
18	委員	国立大学法人電気通信大学	大川 富雄
19	委員	国立大学法人電気通信大学	小泉安郎
20	委員	国立大学法人山梨大学	武田 哲明
21	委員	国立大学法人京都大学	伊藤 啓
22	委員	国立大学法人九州大学	守田 幸路
23	委員	国立大学法人九州大学	森 昌司
24	委員	学校法人早稲田大学	中垣 隆雄
25	委員	学校法人立命館 立命館アジア太平洋大学	松尾 雄司
26	委員	国立研究開発法人産業技術総合研究所	斉田 愛子
27	委員	一般財団法人エネルギー総合工学研究所	岡崎 徹
28	委員	一般財団法人エネルギー総合工学研究所	木野 千晶
29	委員	日本原子力発電株式会社	小竹 庄司
30	委員	東京電力ホールディングス株式会社	梅沢 修一
31	委員	三菱重工業株式会社	高橋 良太
32	委員	三菱重工業株式会社	井手 章博
33	委員	富士電機株式会社	定廣大輔
34	委員	大成建設株式会社	上田 洋二
35	委員	小林政徳 技術士事務所	小林政徳

No.		所属機関	氏名
36	委員	原子力システム研究懇話会	堀 雅夫
37	委員	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	早船 浩樹
38	委員	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	ヤン ジング ロン
39	委員	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	大野 修司
40	委員	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	大滝 明
41	委員	学校法人早稲田大学	天野 嘉春
42	委員	国立大学法人岩手大学	柴田 貴範
43	委員	国立大学法人三重大学	西村 顕
44	委員	学校法人 近畿大学	井田 民男
45	委員	国立大学法人千葉大学	小倉 裕直
46	委員	NPO法人NSF	中神 靖雄
47	委員	学校法人松山大学	松田 圭司
48	委員	学校法人青山学院大学	麓 耕二
49	委員	独立行政法人海技教育機構 海技大学校	中村 雄史
50	委員	国立大学法人神戸大学	浅野 等
51	委員	株式会社IHI	中澤 亮
52	委員	東芝エネルギーシステムズ株式会社	白川 昌和
53	委員	ダイハツ工業株式会社	堀川 英知
54	委員	株式会社IHI	石川 温士
55	委員	一般財団法人電力中央研究所	服部 康男
56	委員	国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学	中川 二彦
57	委員	三菱重工業株式会社	寶山 登
58	委員	一般財団法人電力中央研究所	深田 利昭
59	委員	学校法人早稲田大学	香川 澄
60	委員	国立大学法人東京大学	菊地 隆司
61	委員	大成建設株式会社	島屋 進
62	委員	大阪公立大学	大久保 雅章
63	委員	国立大学法人東京工業大学	高須 大輝
64	委員	国立大学法人東京工業大学	船山 成彦
65	委員	国立大学法人東京工業大学	加藤 敬
66	委員	国立大学法人東京工業大学	原田 琢也
67	委員	国立大学法人東京工業大学	Massimiliano Zamengo
68	オブ ザーバ	丸紅株式会社	鈴木 豪

提言を広め、CN社会に向けて、皆が連携
した蓄エネ技術の普及を願っております。
ご清聴ありがとうございました。



蓄エネ研幹事一同（2024/03/14）