



配布資料

水素社会の実現に向けて ～水素エネルギーへの期待・将来性～

加藤之貴

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

kato.y.ae@m.titech.ac.jp

第18回 原子力機構報告会 水素社会の実現に向けて

～水素が作るクリーンでサステナブルな未来社会～

2023年11月15日 13:50-14:35

イイノホール、東京都千代田区内幸町2-1-1

内容

1. カーボンニュートラル達成のための水素利用
2. 水素は二次エネルギー
3. 水素を作る・運ぶ
4. 炭素循環産業システム(ACRES)と水素
5. まとめ



Tokyo Tech

カーボンニュートラル 達成のための水素利用



ゼロカーボンエネルギー研究所
Laboratory for Zero-Carbon Energy

©2023 Yukitaka Kato, Tokyo Tech

移動体利用、燃料電池自動車、FCV

Fuel Cell Electric Vehicle: FCV、FCEV



MIRAI, FCV, Toyota, 2020

2020年 第2世代、710万～、走行750 km(135 km/kg-H₂)
FCV 128 kW, モーター134 kW, FC 330個, H₂タンク141 L
Li-ion電池 (4Ahx84個)

https://toyota.jp/mirai/gallery/?padid=from_mirai_grade_navi-menu_gallery
http://toyota.jp/mirai/001_p_001/spec/spec/

産業利用、水素製鉄



HYBRIT – the world's very first pilot plant for fossil-free steel, SSAB Oxelösund

再エネ(水力)→電解水素→水素製鉄

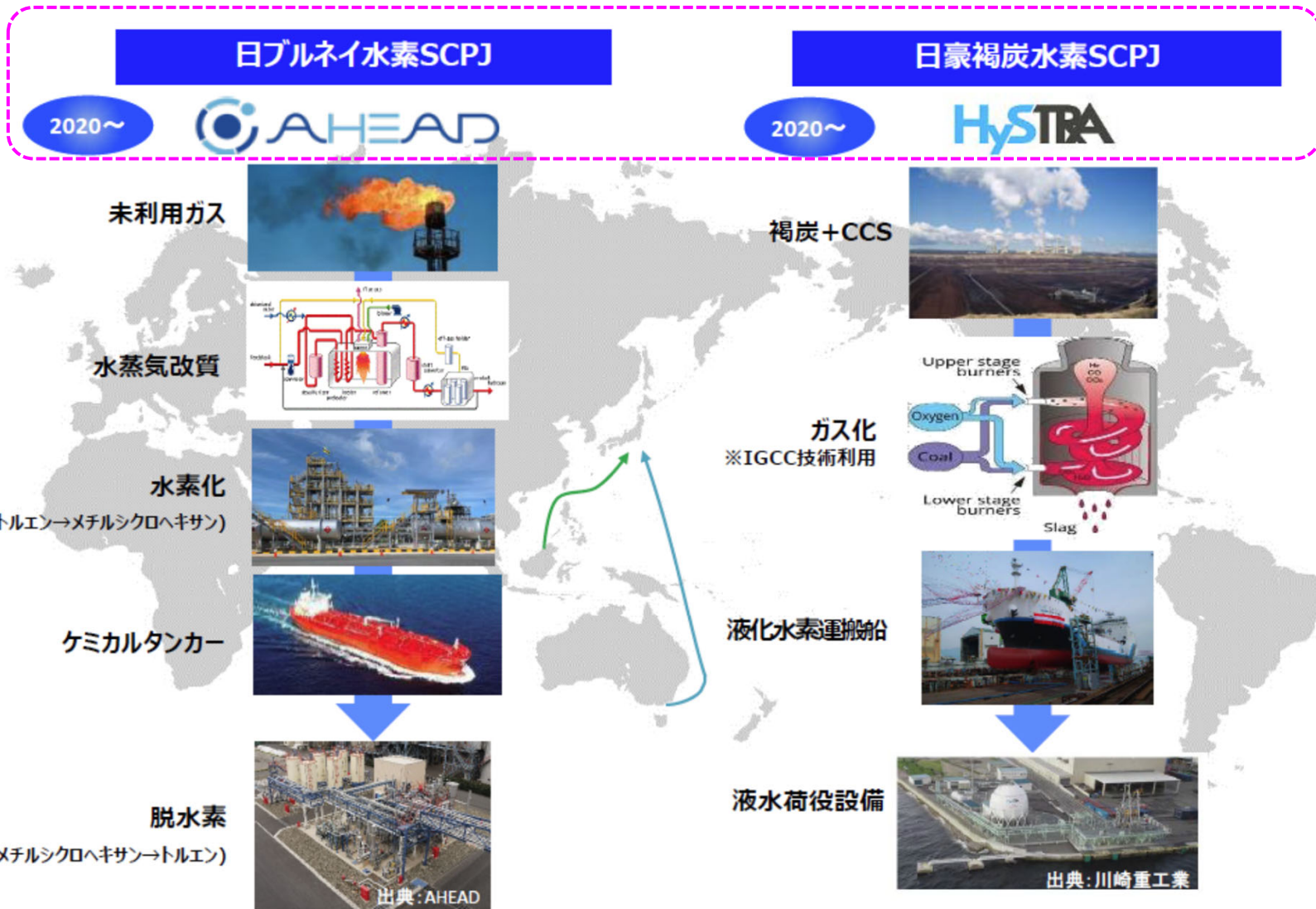


1. 100% 炭素フリー水素(Green H₂)で鉄還元、Green Steel製造
2. 2021年製品Volvo, Mercedes-Benzへ出荷
3. SSABは2016年R&D開始し、5年で実用化
4. 2025年大型商用化

HyBRIT, SSAB, <https://www.ssab.com/ja-jp/news/2020/08/media-invitation-hybrit--the-worlds-very-first-pilot-plant-for-fossilfree-steel-is-now-to-start-oper>
<https://www.ssab.com/news/2021/09/ssab-to-deliver-fossilfree-steel-to-mercedesbenz>

国際水素サプライチェーン

国内ゼロカーボンエネルギーはそのまま利用し、水素は海外から輸入



METI, 2050年カーボンニュートラルの実現に向けた検討, 2020/12/21

https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/035/035_004.pdf

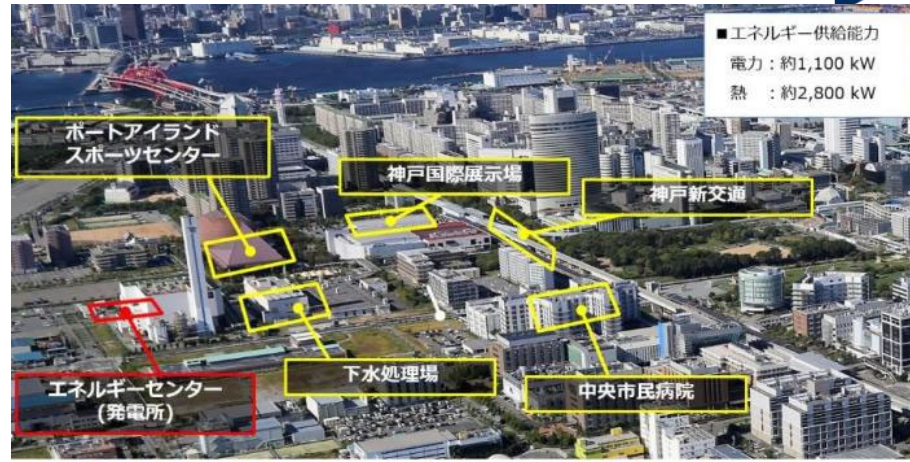
水素スマートシティ神戸：水素地域コージェネ



液化水素の荷揚基地

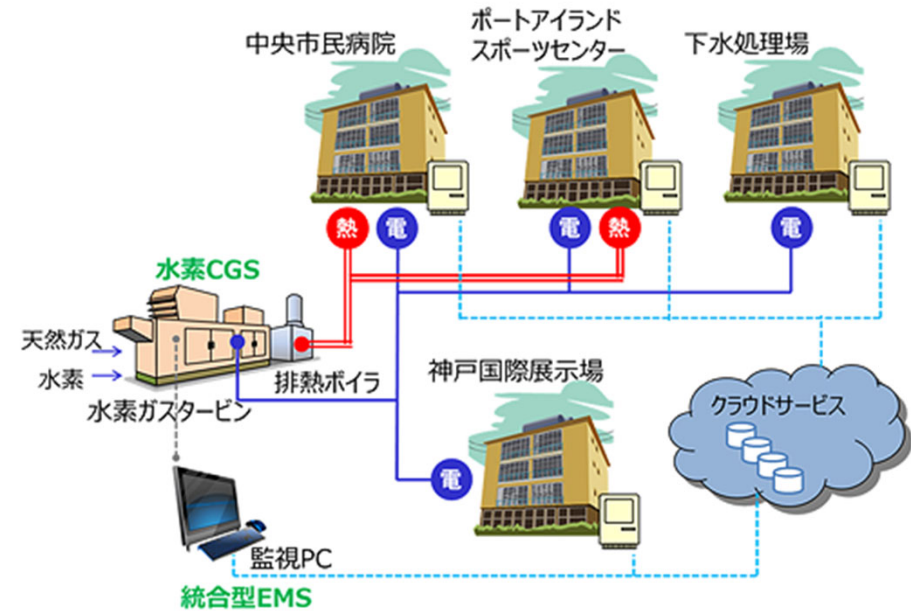


液化水素運搬船の神戸港における接岸試験



2,800 kWの熱
1,100 kWの電力

NEDO、(株)大林組と川崎重工(株)、市街地における水素燃料100%のガスタービン発電、熱電供給を世界初達成。1MW級水素ガスタービン発電設備（水素CGS）



神戸市、水素スマートシティ神戸構想、2021/5/14
<https://www.city.kobe.lg.jp/a22668/shise/kekaku/kikakuchosekyoku/energy/hydrogen/20190106040301.html>
 NEDO、2018/04/20、https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100945.html

トヨタウーブンシティ

トヨタ、ENEOS共同PJ



[1] Toyota, 2021/05/10

<https://www.woven-city.global/>

<https://global.toyota/en/newsroom/corporate/31171023.html>

[2] Toyota, 2022/03/23,

https://global.toyota/en/newsroom/corporate/36977466.html?_ga=2.243

[21658.1719709169.1651680956-1413414356.1651680956](https://global.toyota/en/newsroom/corporate/36977466.html?_ga=2.243)

[3] <https://global.toyota/jp/newsroom/corporate/37405940.html>



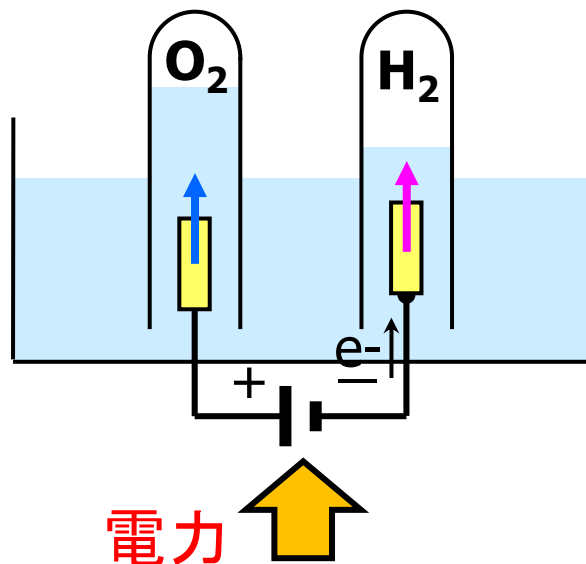
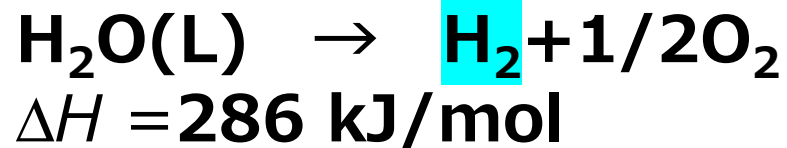
Tokyo Tech

水素は二次エネルギー

水素製造

水電気分解

(燃料電池水分解、IS法熱化学水素製造)

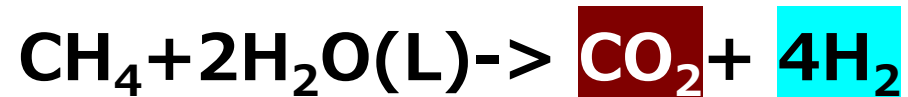


再生可能エネルギー、
原子力を用いて製造
→ **Green水素**

Green水素が国際目標

燃料改質

メタン水蒸気改質 (> 800°C):



$$\Delta H = 253 \text{ kJ/mol-CH}_4$$

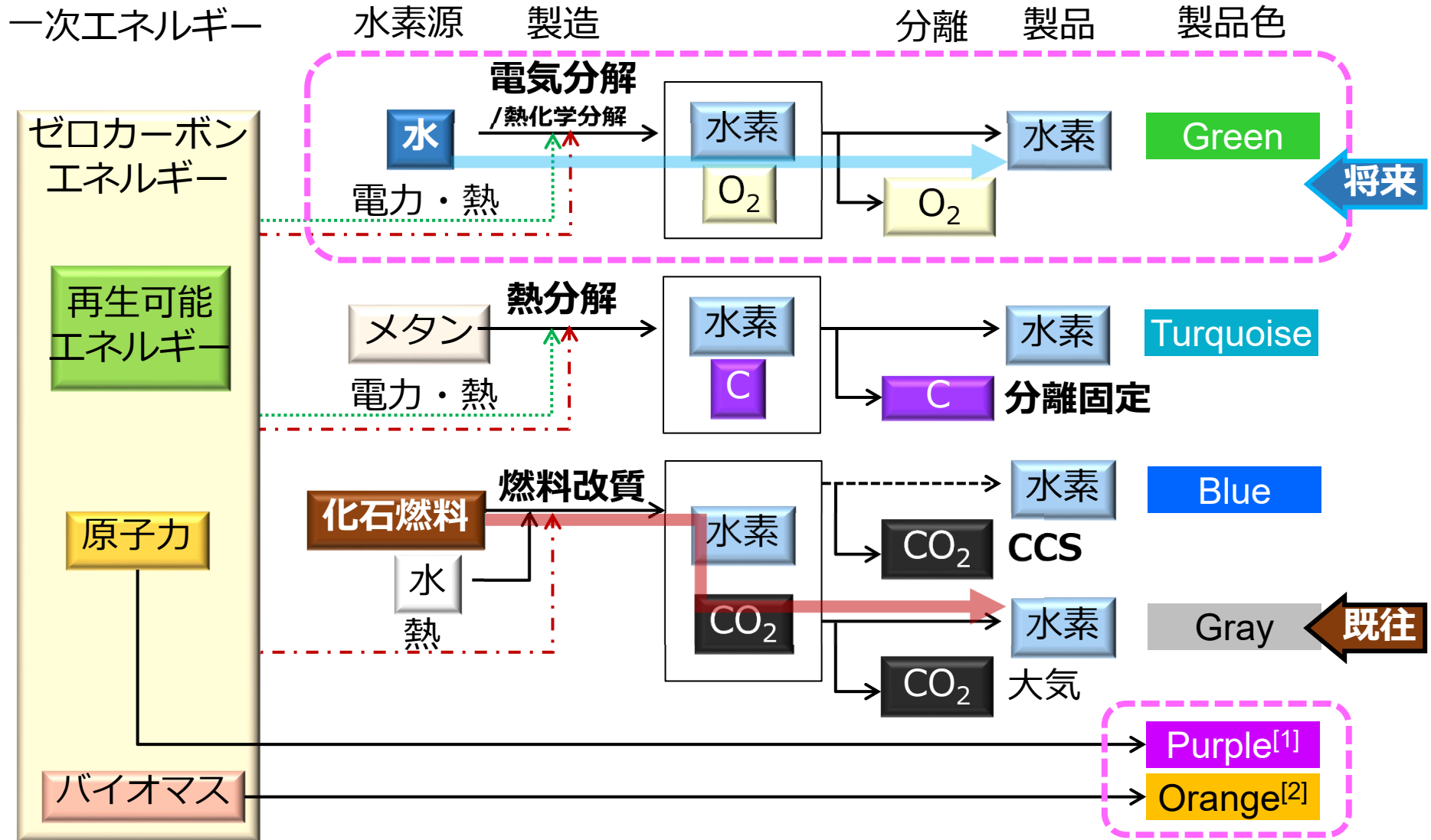
$$= 63 \text{ kJ/mol-H}_2$$

製造が容易で普及。
CO₂発生を伴う
→ **Gray水素**

CO₂を回収貯留
(CCS)付き改質水素
→ **Blue水素**

CN水素製造パス

グリーン水素には再エネ
または原子力が必要



[1] <https://ieei.or.jp/2021/02/yamamoto-blog210203/>

[2] <https://www.cleanenergywire.org/news/government-defines-green-hydrogen-decides-rules-rapid-market-ramp>

水素の価値

- 水素製造はエネルギー損失を伴う。水素を作る電力を直接使った方が効率的。
- 燃料電池(約4割)より電池(約9割)が効率的。

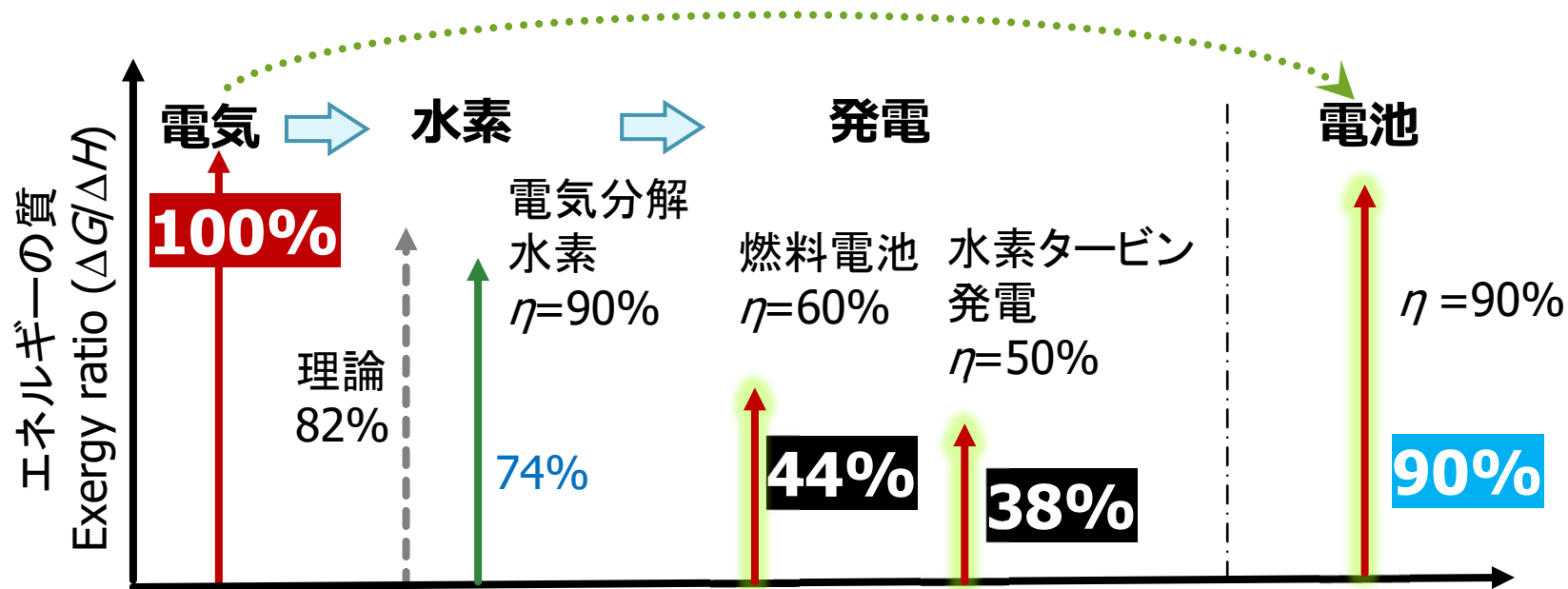


Fig. 電気を起点とするエネルギーの質の変化(熱力学的仕事率、エクセルギー)($\Delta G/\Delta H$) (HHV)

Exergy: thermodynamic quality of energy
 Ex. 100 J@300°C > 100 J@30°C

Y. Kato; *ISIJ Int.*, 50(1), pp. 181-185 (2010).



Tokyo Tech

水素を作る・運ぶ

水素タウン

再エネ → アルカリ水電解 → 水素 → 圧縮水素分配 → FC利用

PV: 太陽電池 Photovoltaic



太陽電池(PV)再エネ(20 MW)を利用した電解水素製造施設(10 MW, 1,200 Nm³/h)
福島県浪江町、 Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R)

NEDO, FH2R, 2020/03/07

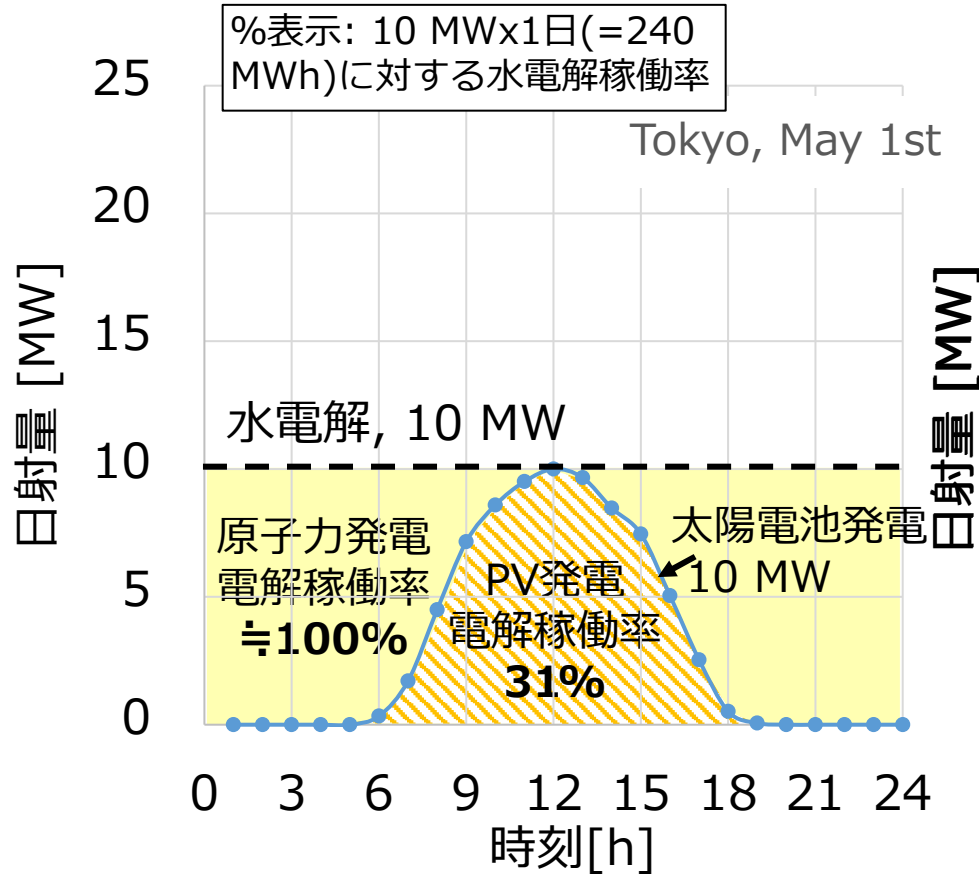
https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100422.html

Nikken, <https://www.nikken-cm.com/project/FH2R/>

UR都市機構、<https://www.ur-net.go.jp/aboutus/publication/web-urpress61/special6.html>

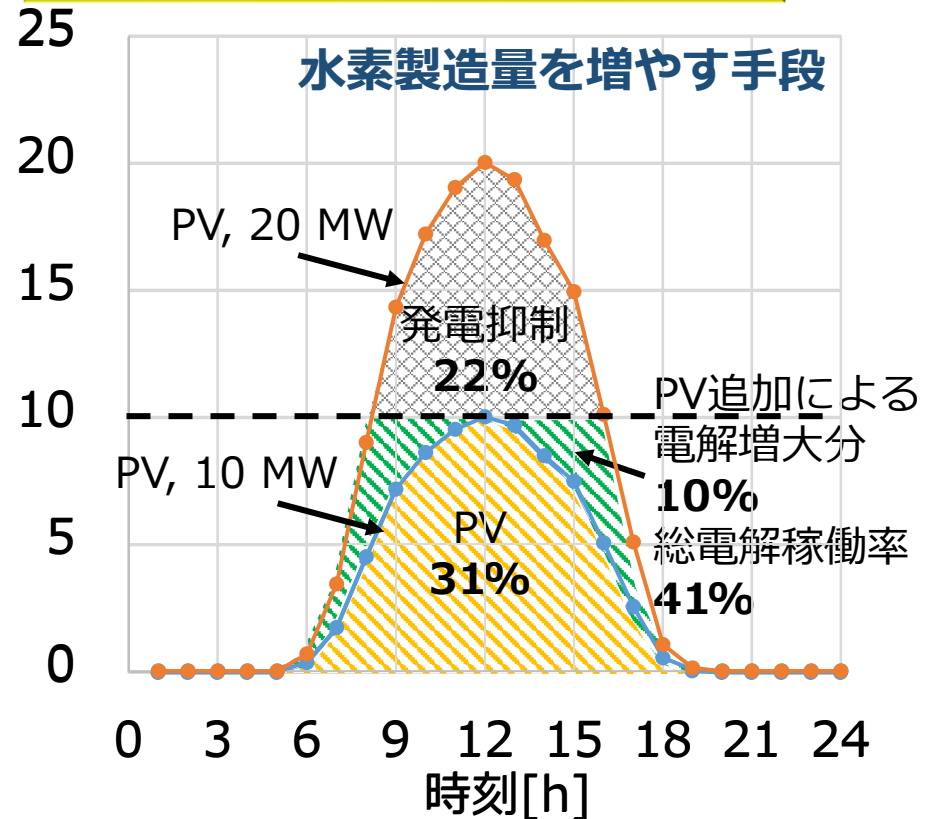
再エネの水素製造の低稼働率

- PVは水電解稼働率が低く、PV容量を増やすと発電抑制が発生
- 原子力は安定で稼働率が高く効率的な一次エネルギー源



10 MWのPVで10 MW水電解を行った時の電解稼働率(東京5/1の全日晴天ケース)

PVでの水電解稼働率は31%、原子炉利用は24時間一定出力で稼働率100%



PVを追加積載し20 MWで10 MW水電解を行った時の電解稼働率(同左ケース)

PV容量を2倍にすると稼働率は41%。ただし22%分は発電抑制



液体燃料の輸送効率

液化水素



燃料エネルギーに対する 所用エネルギー割合 [1-7] エネルギー密度 相対比*

30% (1) %

CCS 液化

×1

液化天然ガス



10%

液化

1.8e5 m³ (LNG Sakura 300 m)[2]

× (2)

原油



32万トン(VLCC Fujisan Maru, 338m, 3.5e5 m³)[3]

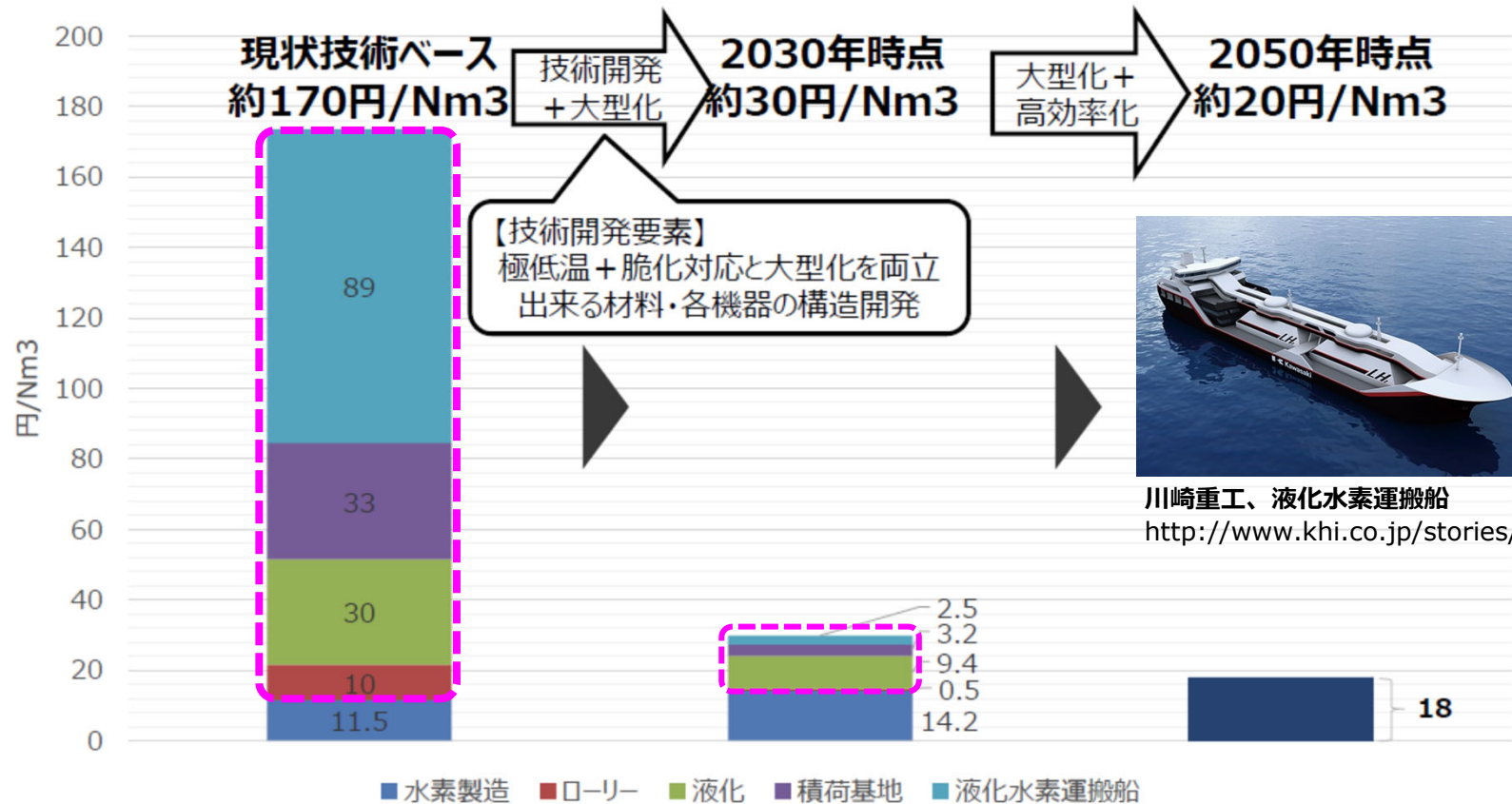
× (3)

- 液化H₂は低密度で原油の3倍以上の往復輸送が必要
- 液化、CCSに同量水素が必要
- LNGより蒸発しやすく備蓄が困難

[1] HySTRA技術研究組合 <http://www.hystra.or.jp/project/>
 [2] 川崎重工業 <https://www.khi.co.jp/stories/articles/vol55/>
 [3] 飯野海運 <https://www.namura.co.jp/ja/product/ship/case/20200326.html>
 [4] AKIBA, Etsuo, The Method of High-Density Hydrogen Storage and Transportation, 水素を高密度に貯蔵輸送する方法とその展望, J. the Combustion Society of Japan, Vol.53 No.163 (2011) 16-21
 [5] LNG COMPOSITION EXAMPLE, The Source-The Japan Gas Association 「LNG small scale plant (Technical Guide Line)」(2000), <http://www.miyairicorp.co.jp/miyairi/lngcng/15.htm>
 [6] 石油連盟 統計情報 換算係数一覧(2018) <https://www.paj.gr.jp/statis/kansan/>
 [7] 神谷祥二、液体水素コンテナの開発—液体水素の長所と短所—、圧力技術42(3), 2004 https://www.jstage.jst.go.jp/article/hpi/42/3/42_3_146/_pdf

国内水素の価値

海外水素は液化+輸送コストが過大
→国内水素が経済的



(出典) 事業者へのヒアリングから資源エネルギー庁作成

METI, 2050年カーボンニュートラルの実現に向けた検討, 2020/12/21
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/035/035_004.pdf

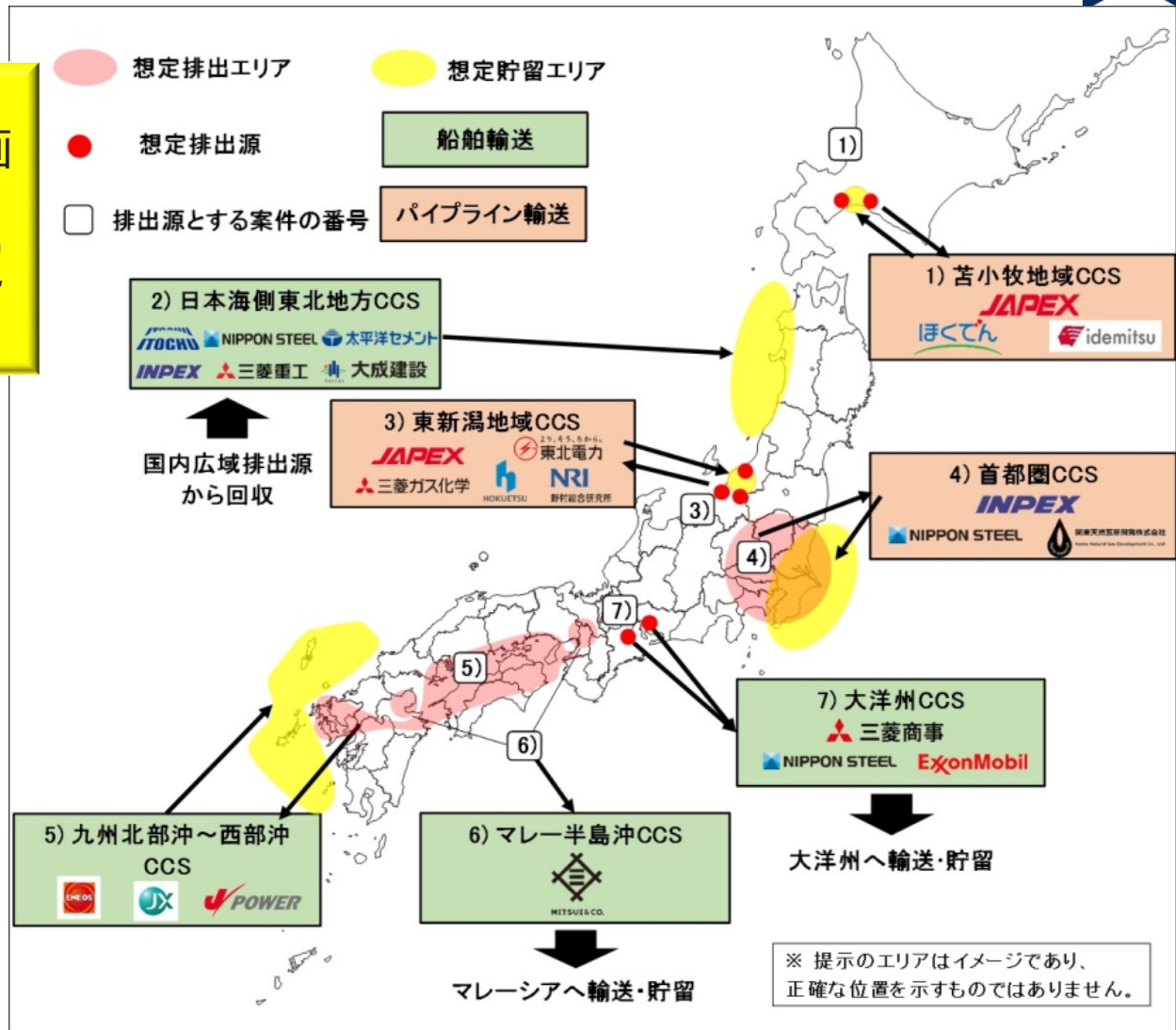
CCS, CO₂ 回収貯留

1,300万吨-CO₂/y
 = 1 GW発電所3基x10年を計画
 → 1 GW発電所1基x30年分
 → 現行火力発電所70GW超
 [3]への適応は課題

CCS, CO₂ Capture and Storage:化石燃料の燃料改質水素(Gray水素)で生成するCO₂を回収貯留しBlue 水素とする。

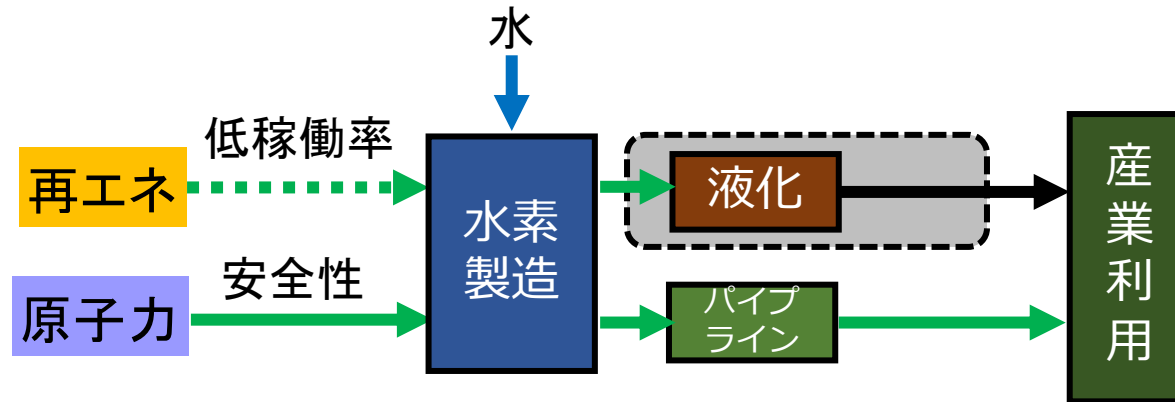
432 million-ton-CO₂/y for 913.5 TWh with, 0.473 kgCO₂/kWh in Japan in 2020
 Large scale thermal power plant of 1 GW emits 4 million-ton-CO₂/y

- [1] JOGMEC, 2023/06/13
https://www.jogmec.go.jp/news/release/news_01_00034.html
- [2] MOE, 2022/04/15
<https://www.env.go.jp/content/900445408.pdf>
- [3] METI, 2022/01/25,
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/044_05_01.pdf



年間1300万吨-CO₂貯留に向けた7プロジェクト

水素サプライチェーンの選択



- 欧州はパイプラインで産業への水素配送が主流
- 国内の安定で安全な原子炉を用いた水素製造 + 水素パイプラインでの産業直接利用が合理的



Tokyo Tech

炭素循環産業システム(ACRES) と水素

Active Carbon Recycling Energy System

Y. Kato; *ISIJ Int.*, 50(1), pp. 181-185 (2010).

炭素循環産業システム, ACRES

ACRES: Active Carbon Recycling Energy System

再エネ、原子力→CO₂還元→CO製鉄→CO₂循環利用

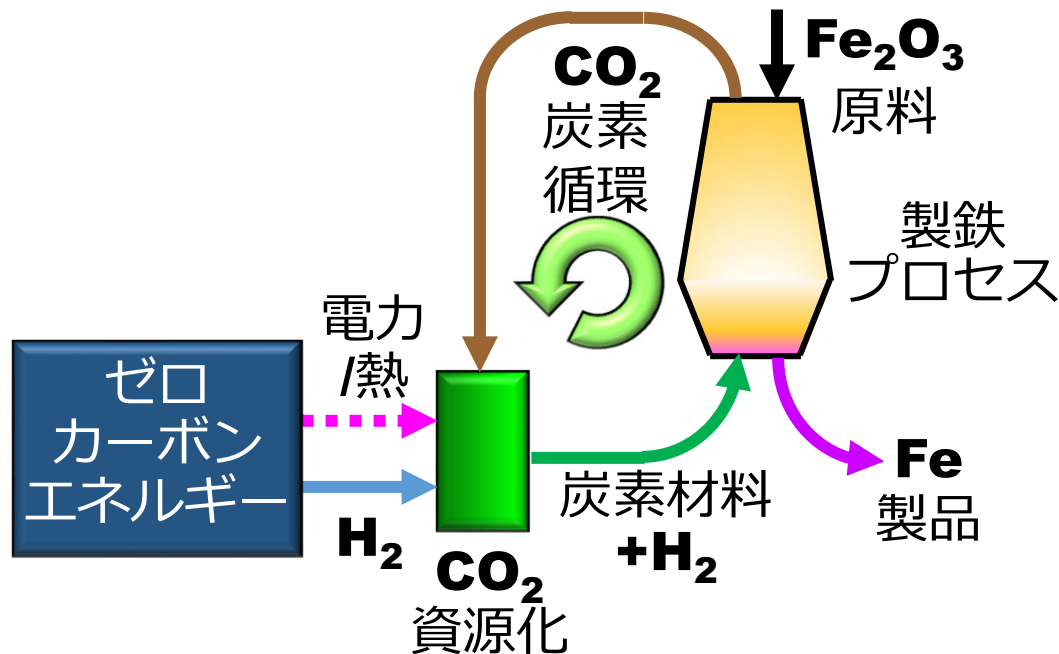


Fig. 製鉄向けの炭素循環システム(iACRES)の構成
iACRES: Ironmaking process based on ACRES

Y. Kato, *ISIJ Int'l*, 50(1), 181(2010).

- 炭素循環製鉄
 - ゼロカーボンエネルギー(ZCE)を用いたカーボンニュートラル(CN)炭素材料の循環供給によるゼロカーボン製鉄
 - 水素製鉄、MIDREX、MIDREX H₂を超える究極のCN製鉄プロセス
 - スクラップ利用を含む物質循環も包含可能。
- CO₂資源化
 - ゼロカーボンエネルギー(ZCE)を用いたCO₂電気分解 $CO_2 \rightarrow CO + 1/2O_2$
 - 水素とCOを基本としたカーボンニュートラル炭素材料を循環利用する。

固体酸化物電気分解セルによるCO₂還元

固体酸化物電気分解セル
SOEC: solid oxide electrolysis cell

- CO₂のCOへの電気分解による資源化
- 電子利用効率が高い
- セルの金属支持により大容量化が可能

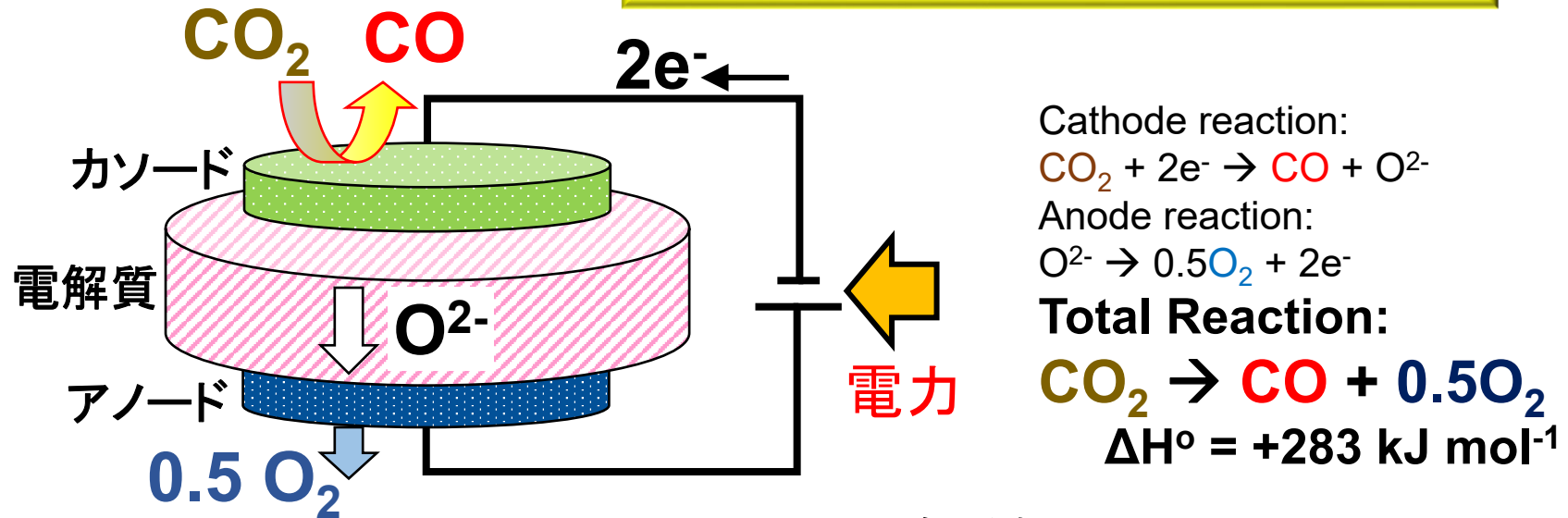


Fig. 1 SOECのCO₂電気分解原理

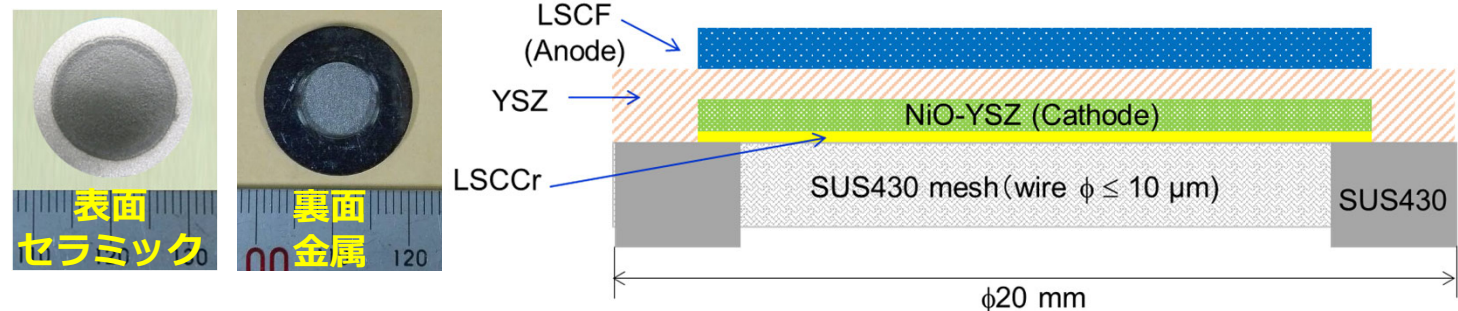


Fig. 2 金属支持SOEC[1,2]

[1] Kato, Japan Patent 2018-140934(2018)
[2] Takasu, Kato, ISIJ Int'l, 60(12), (2020)

水素によるCO₂資源化

CO₂をCOに変換して水素化が経済的、合理的

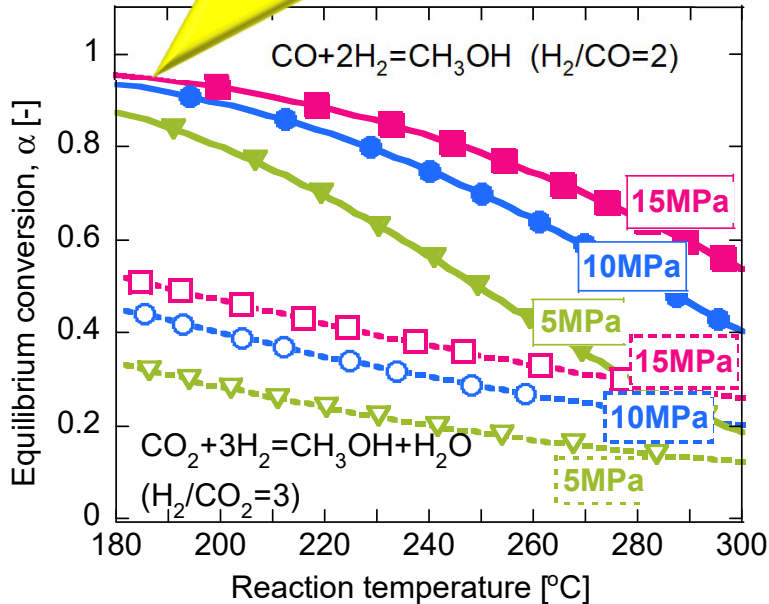
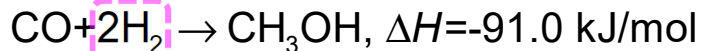
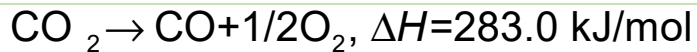
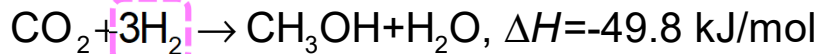


Fig. 1 CO₂またはCOからのメタノール製造の反応平衡量(COが有利)



e-fuel, SAFは水素利用先
ACRESと連携でCNが達成できる

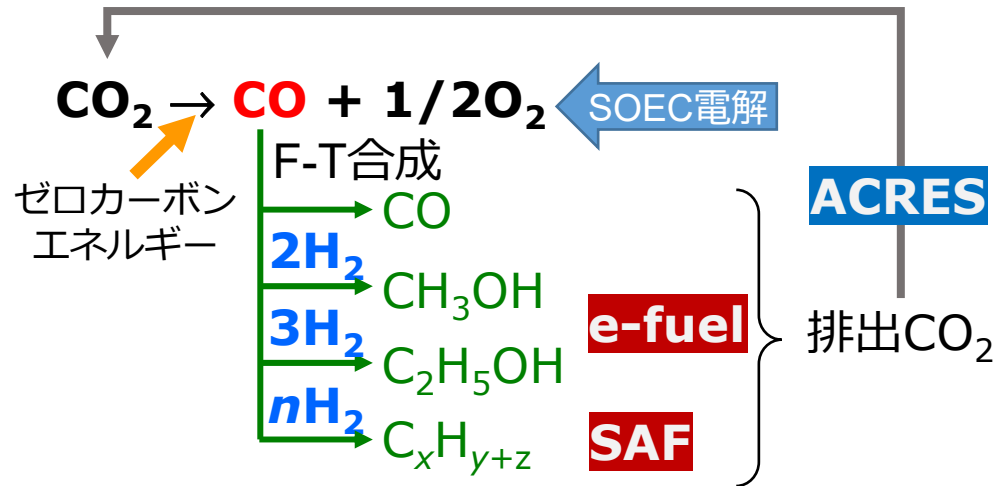
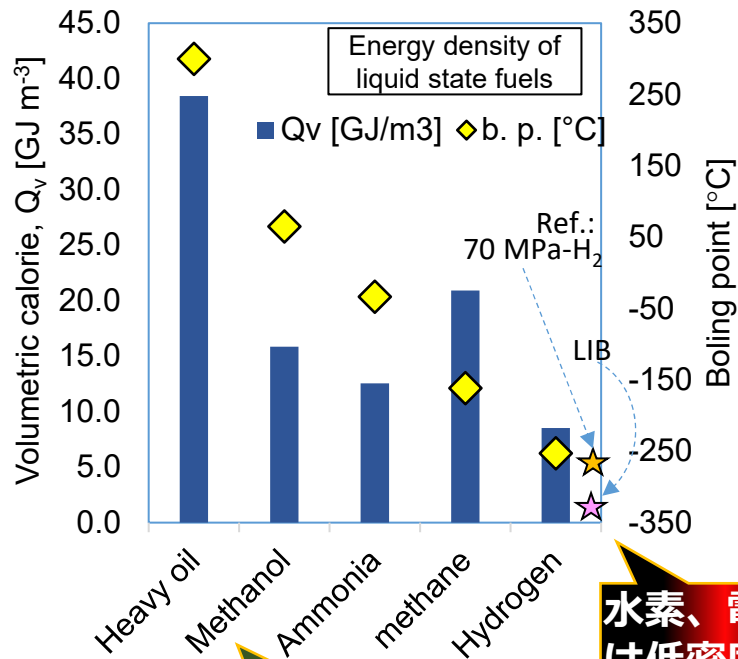


Fig. 2 水素とACRESの連携：COに水素添加 (FT, Fisher-Tropsch合成)でe-fuel、SAFが製造できる。発生CO₂はACRESで循環再利用。

* CO経由では所用H₂が3から2molに節約できる。

なぜ、e-fuel

グリーン水素によるe-fuel燃料製造は有効。e-fuelは水素キャリア



メタノール等が高密度、常温液体で実用的なe-fuel候補

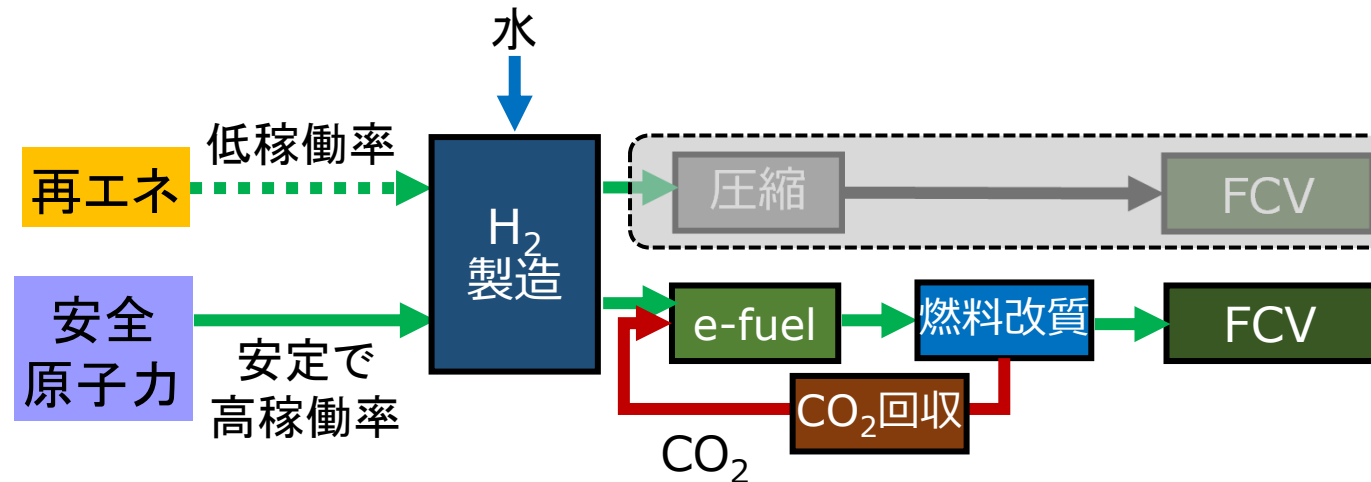
水素、電池は低密度、高コスト

1. 燃料のエネルギー密度
重油 > LNG > メタノール > NH₃ > H₂
2. 水素：液体水素はエネルギー密度が低く、かつ極低温（-253℃）
3. 二次電池：LIB電池は低密度で高価。資源が外国に依存し供給安全保障が課題。
4. **大密度、常温長期貯蔵できる液体e-fuel、メタノール、DME、エタノールが有用。**
5. **圧縮/液化水素の製造・輸送コストが省略できる。在来エンジン、ガソリンステーションインフラ利用できる。**
6. e-fuelからの二次CO₂排出を回収・再利用することでカーボンニュートラルが成立。→スマートエネルギーシステムの創成

e-fuel：「余剰電力により製造した水素や、その水素と濃縮回収した二酸化炭素やバイオガス中の二酸化炭素を原料として合成・製造したカーボンニュートラルな燃料」（日本機械学会）

参考：化学便覧 第6版、丸善、<https://www.chem-reference.com/searchmain.php>
Toyoko Kagaku
(2021), <https://www.toyokokagaku.co.jp/product/gas/physical/>

移動体向け炭素循環システム, vACRES



炭素循環型モビリティシステム、vACRES*[1]

*Vehicle system based on ACRES

- 国内の安定電源である安全な原子炉を用いた水素と回収CO₂を用いたe-fuel製造をすると、移動体向けの炭素循環型システム^[1]が形成できる。
- 水素が活用でき、従来ガソリン供給インフラが利用できる。
- 国内原子力は安定で高稼働率な一次エネルギー源

[1]内閣府、SIP、スマートエネルギーマネジメントシステムの構築(2023)
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip_3/keikaku/06_smartenergy.pdf



Tokyo Tech
Green Transformation Initiative

グリーン・トランスフォーメーション・イニシアティブ

Tokyo Tech GXI

文部科学省ミッション実現加速化経費（教育研究組織改革分（組織整備））

【事業目的】

政府方針である2050年カーボンニュートラル(CN)実現のためには**グリーン・トランスフォーメーション(GX, 緑転, CN化に応じた産業及び社会の構造の変化)**が必須である。GX社会を先導(Initiation)する研究活動の推進とスタートアップの強化, 産業・社会とのオープン院ベシオンを進めるために展開。

東工大Tokyo Tech GXI産官学連携委員会参加企業

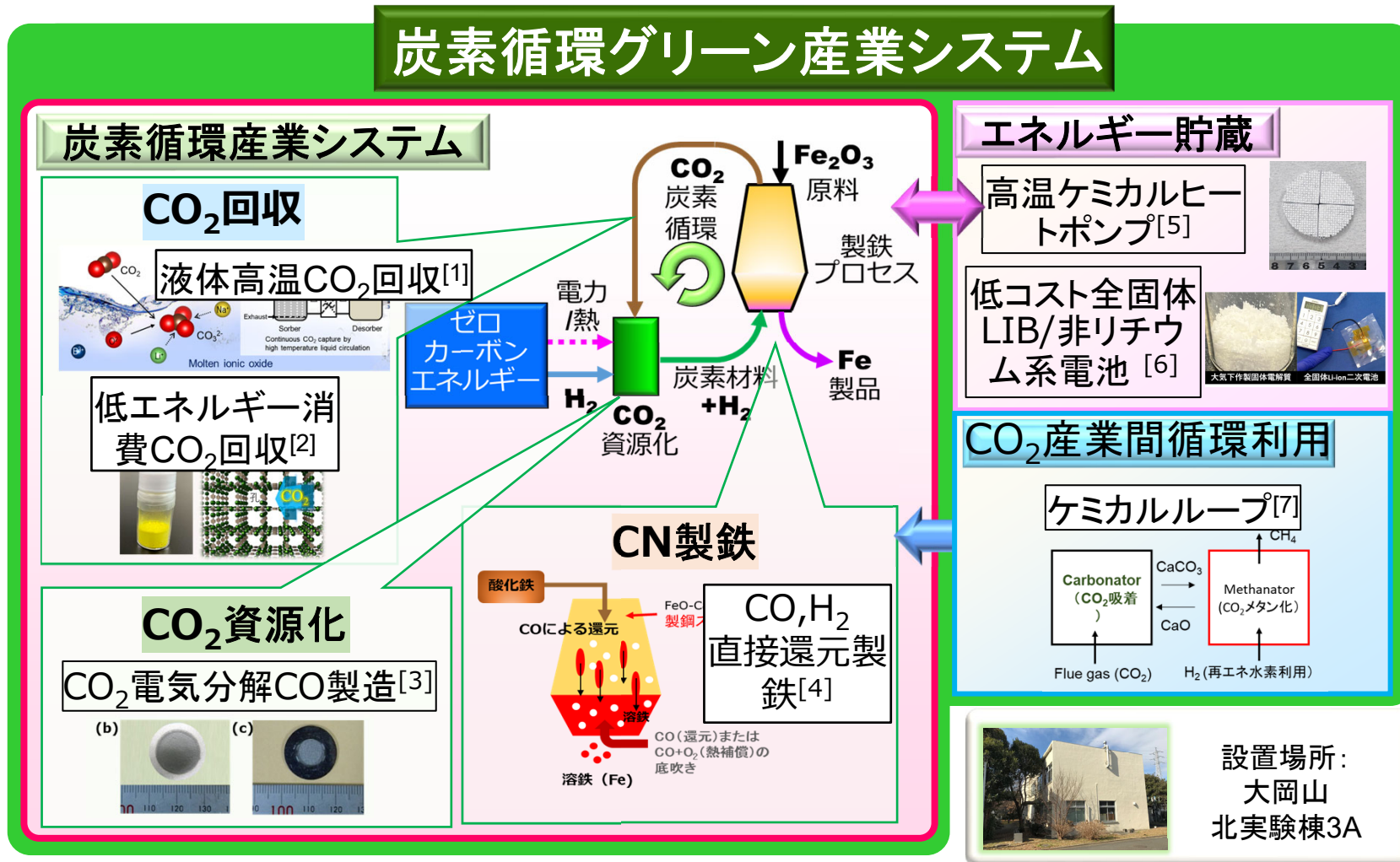
40社を超える企業が参画、増加中。海外組織も参画。



エネルギー総合工学研究所ら

※五十音順、2023年9月現在

★ゼロカーボンエネルギー駆動の炭素循環技術を用いたCN産業システムの創成と技術実証。



[1] Harada, J. Materials Chem. A, 7, 21827(2019); [2] Murakami, Chem. Com, 57. 6656(2021); [3] Takasu, Kato, ISIJ Int'l, 60(12), pp. 2870-2875 (2020); [4] Morita, Kobayashi, 耐火物, 71(4), 150-157 (2019); [5] Funayama, Kato, Energy, 201, 117673 (2020); [6] Takei, Yasui, Jpn. J. Appl. Phys., 62, SM1025 (2023); [7] Keller, Otomo, J CO2 Utilization, 40, 101191 (1-11) (2020).

まとめ: 水素エネルギーの将来展望

1. 水素は二次エネルギー。一次エネルギーが必須。再生可能エネルギー、原子力エネルギーを用いた電解によるグリーン水素が主力。CCS付き燃料改質水素（ブルー水素）はCO₂貯留場の確保が課題。
2. 水素は貯蔵、輸送の高コストが課題。海外水素依存からの脱却のため国産水素の確立が必要。国内再エネ、原子力による水電解が重要。
3. 国内の再エネは広大な用地と低い電解稼働率が課題。安全な原子力は小面積、安定出力、高い稼働率が利点の理想的な一次エネルギー源。
4. CO₂の資源化(e-fuel)が水素の活用先。ACRESとの連携でカーボンニュートラルが達成できる。CCS負荷低減に貢献。
5. 原子力は水素製造の重要な一次エネルギー源。
6. 日本には実現を可能にできる技術集積とポテンシャルがある。

CN実現に向けて連携できれば幸いです。
ご清聴ありがとうございました。



加藤研学生、スタッフの研究貢献に謝意を表します。