

新燃料の意義と課題

— 水素の多様な利用形態 —

エネルギー・資源学会「2050年に向けた日本のエネルギー需給」
研究委員会

2020年度第2回シンポジウム（第10回ESIシンポジウム）

2021年2月4日

柴田 善朗

新エネルギーグループ

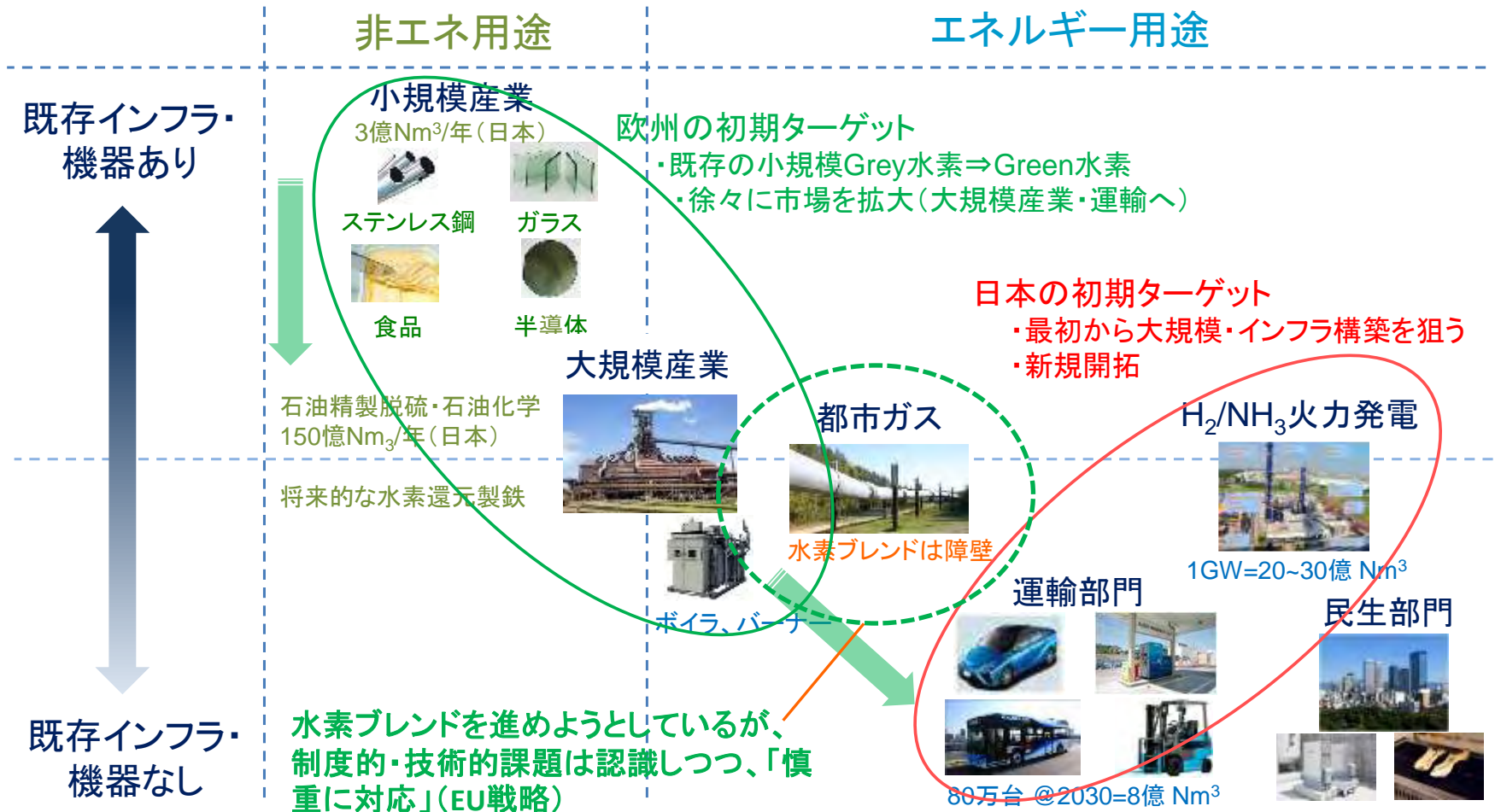
日本エネルギー経済研究所

はじめに

- 低・脱炭素化に向けて水素が期待されている
- 効率の観点から、水素は直接利用することが望ましい
- しかし、水素の輸送・貯蔵・利用には技術的課題が多い
 - 新規技術・インフラが必要な場合が多い
- そこで、水素から合成する新燃料の可能性も模索されている
 - 既存技術・インフラが利用できるメリット(“Drop-in”燃料)
- 新燃料＝合成燃料(合成メタン・メタノール等)やアンモニア
- 新燃料の課題や展望は？

水素需要のスケールアップ：欧州と日本の違い

- 欧州は既存水素インフラ・既存用途から始め徐々に拡大。我が国は最初から水素の新規インフラ・新規用途を開拓



水素の直接利用

■ 新規の専用インフラ・機器が必要な場合が多い



出所: https://sv49.wadax.ne.jp/~food-eng-jp/?action_user_view=1&r=3L7xcpUUvd8827

出所: <https://www.toshiba-newenergy.com/reference/#cont5>



出所: http://www.panasonic.com/jp/corporate/wonders/wondersolutions/hydrogen_energy.html



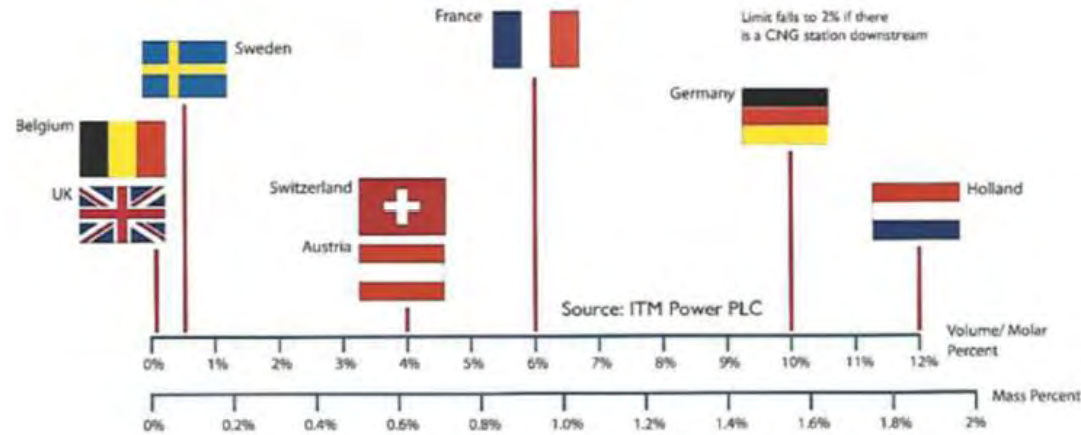
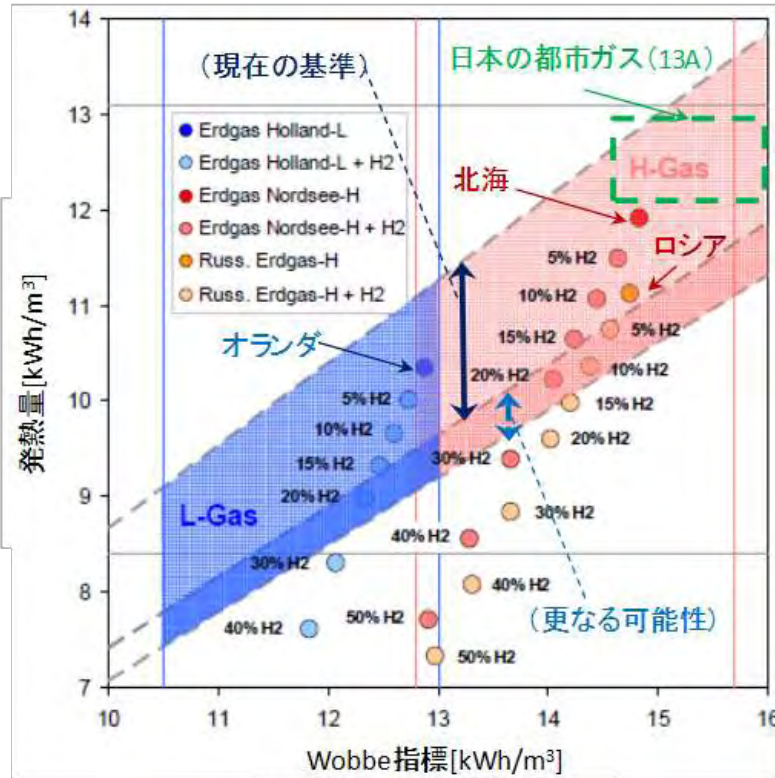
出所: レストラン「リベロ」(神奈川県藤沢市)
<https://www.hotpepper.jp/mesitsu/entry/nao-morita/17-00008>

水素混合：天然ガスへの水素混合の許容度

- EUは天然ガスインフラへの水素混合・水素専用への転用“repurposing”を目指す
- 地域にもよるが、欧州は我が国と比べて水素受入許容度が大きい

欧州の熱量規格と水素混合による影響

欧州主要国の水素混合上限



右図出所：“STUDY ON EARLY BUSINESS CASES FOR H2 IN ENERGY STORAGE AND MORE BROADLY POWER TO H2 APPLICATIONS FINAL REPORT” (FCH-JU), June 2017,

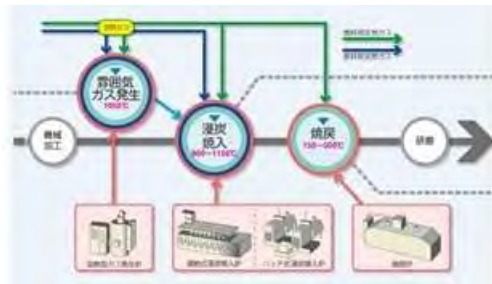
左図出所：“DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, “Energiespeicherung in Erdgasnetzen Power-to-Gas”, Fachtagung „Erdgas Umwelt Zukunft“, 2. Februar 2011”に筆者加筆。
 左図注：縦軸は発熱量、横軸はウォッベ指数（機器の安全燃焼度合の指標）。“更なる可能性”とは、DBIの提案であり具体化していない。

水素混合：天然ガスへの水素混合の課題

- 特殊用途への水素の適応は障壁。また、計量の課題も
- 混合できたとしても、混合率の時間変化への技術的対応が大きな課題

産業用特殊用途

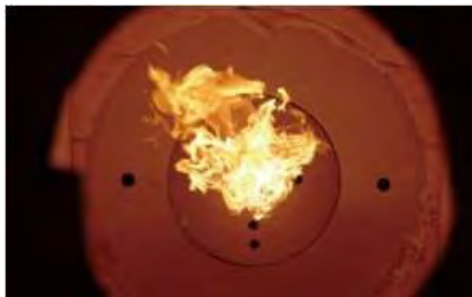
金属処理



- 金属の浸炭(炭素添加)ではガスが燃料であるとともに原料でもある
- アルミ熱処理炉

出所：東京ガスHP (<https://eee.tokyo-gas.co.jp/industry/indus/heat.html>)

超高温加熱炉



- 超高温(1,000°C以上)では、火炎の輻射が必要(炭化水素中のすす)
- ガラス熔融炉やセラミックス焼成炉

出所：東京ガスHP (<https://eee.tokyo-gas.co.jp/industry/indus/heat.html>)

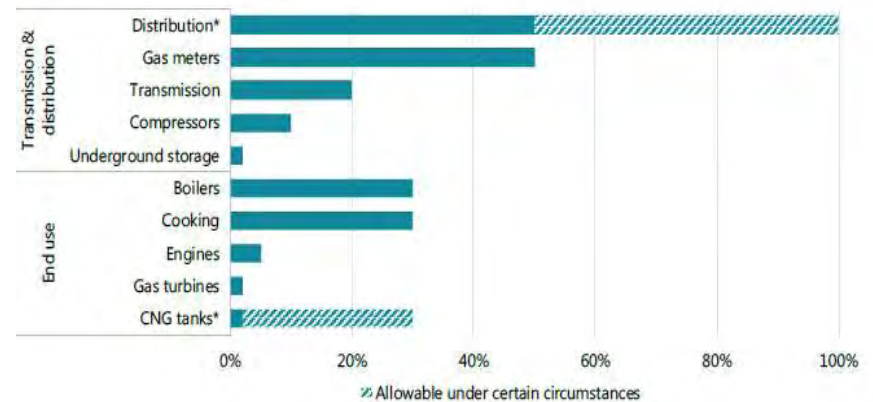
チューニングが必要な機器



http://www.khi.co.jp/pressrelease/detail/20121205_1.html

<https://taiyoseikatsu.com/words/tyg000116.html>

機器別水素混合許容割合

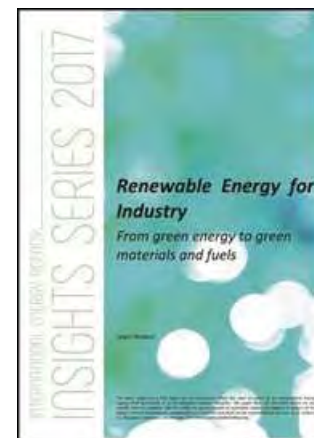
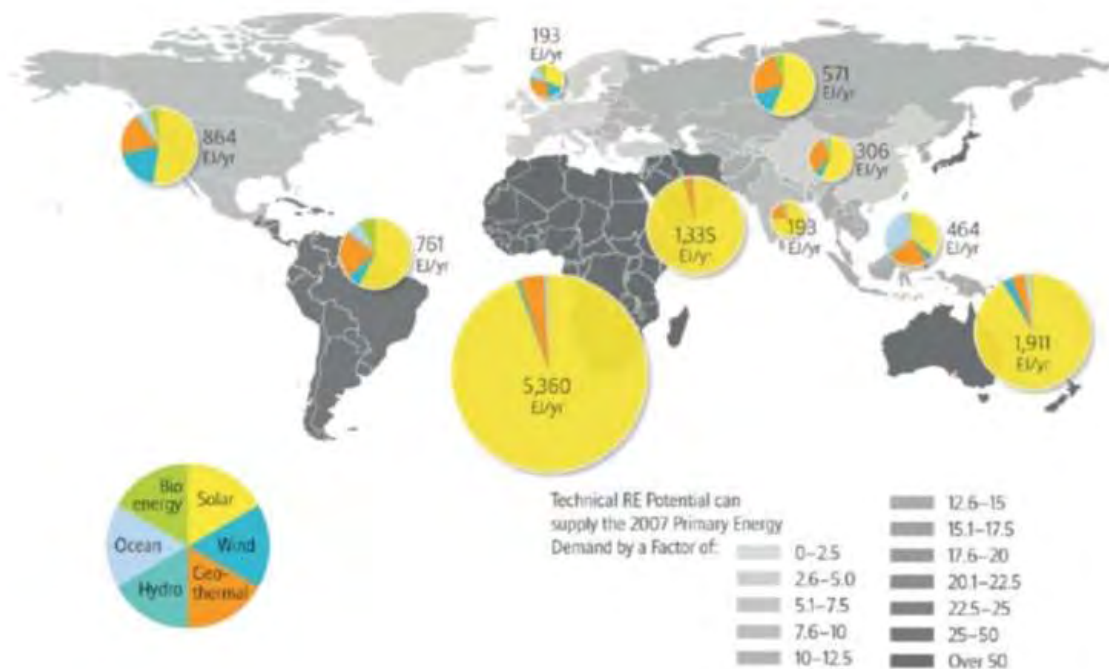


出所：IEA, "The Future of Hydrogen"

世界規模でのRenewable Fuelの可能性

- “The extreme abundance of solar and wind resources in some regions is likely to spur international trade in renewables-based, **hydrogen-rich chemicals and fuels**”, IEA, Insights Series, 2017
- 概ね再エネ発電コスト $\text{¢} 3/\text{kWh}$ が条件

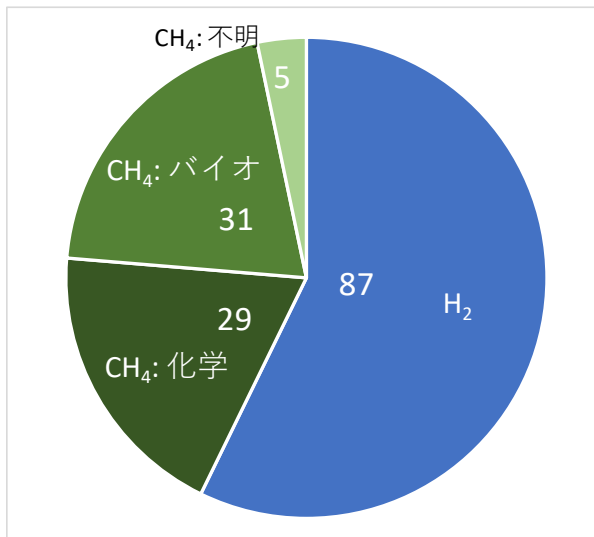
Technical renewable energy potential in various parts of the world



出所: “Renewable Energy for Industry, From green energy to green materials and fuels”, Insights Series, IEA 2017

Power to Methane事例

世界のPtGプロジェクトの内訳



出所: “Power-to-Gas: Electrolysis and methanation status review”に基づき集計

STORE&GO Falkenhagen (水素、メタン)



出所: <https://www.storeandgo.info/demonstration-sites/germany/>

HELMETH (FCH-JU:EU) (SOEC)

SoCal Gas & NREL (バイオメタネーション)

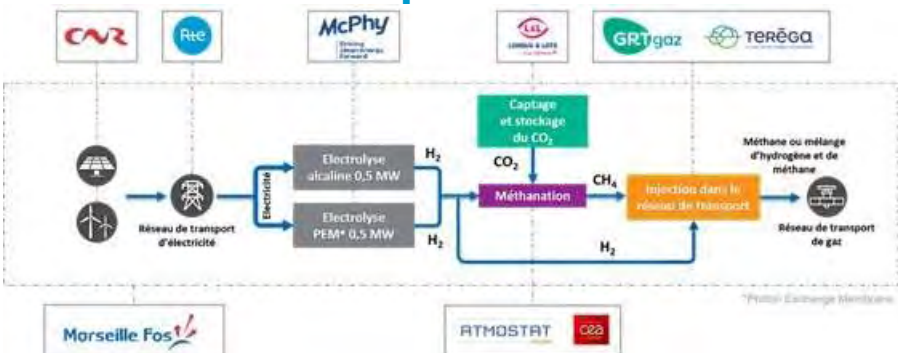


出所: <http://www.helmeth.eu/index.php>



出所: SoCal Gas & NREL

Jupiter 1000



出所: <https://www.jupiter1000.eu/projet>

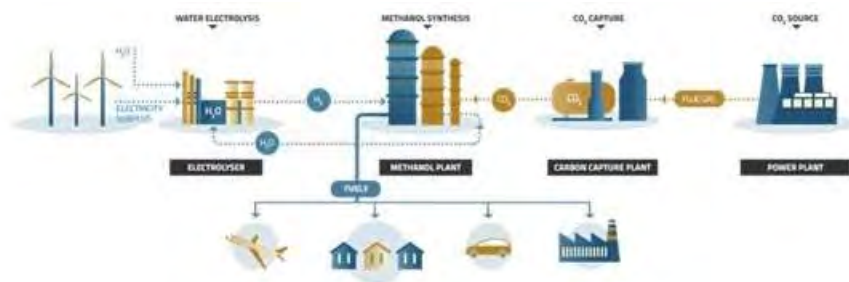
Power to Liquid Fuel事例

sunfire



出所: <http://www.sunfire.de/en/applications/syngas>

MefCO2



出所: <https://www.spire2030.eu/mefco2>

Carbon Recycling International (CRI) George Olah Plant



出所: <http://www.thinkgeoenergy.com/opening-of-co2-to-methanol-plant-at-svartsengi-geothermal-plant/>

Audi e-diesel and e-ethanol

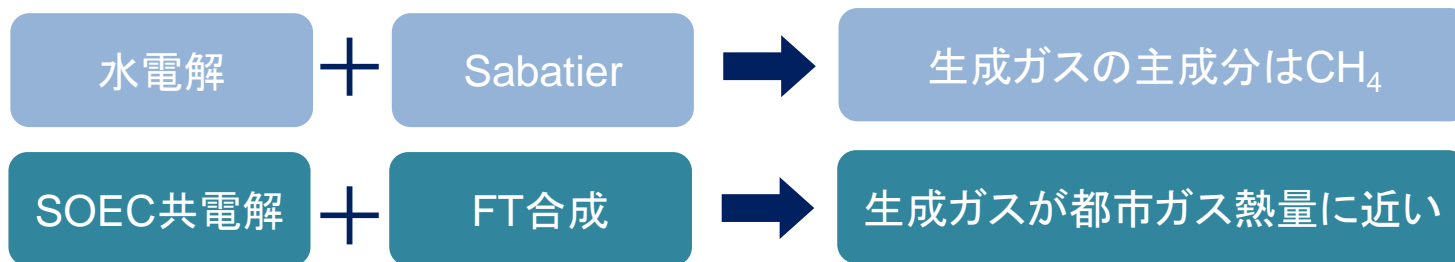


出所: <http://www.sunfire.de/en/applications/syngas>

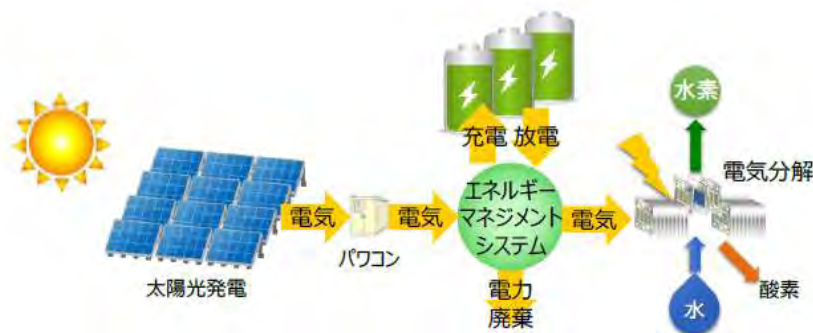
今後期待される技術

- 高効率かつ生成ガス成分を変化できる技術(都市ガス標準への対応が可能)
- 自然変動再エネ対応として蓄電池と水電解の併用によるコスト最小化も

合成ガス製造の選択肢



蓄電池と水電解の協働

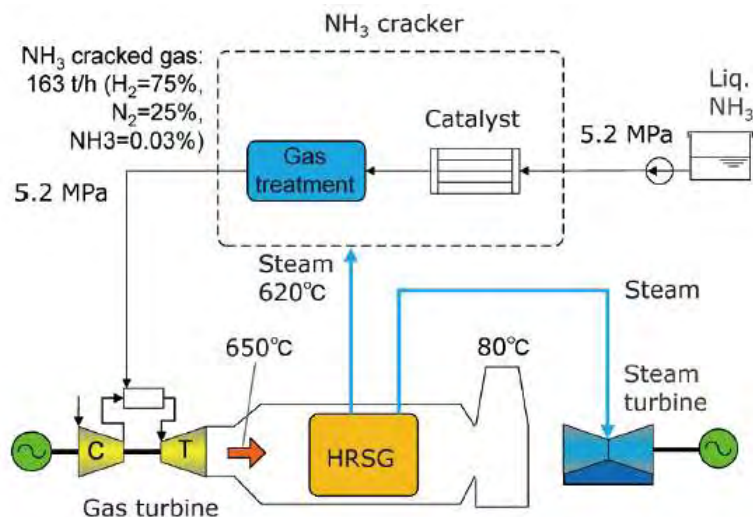


出所: "再生可能エネルギーによる安価な水素製造に必要な技術レベルを試算～蓄電池援用の妥当性を初めて提示、再エネの主力電源化にむけた開発指針として期待", 国立研究開発法人物質・材料研究機構 NIMS, 国立大学法人東京大学, 国立大学法人広島大学, 2018年12月

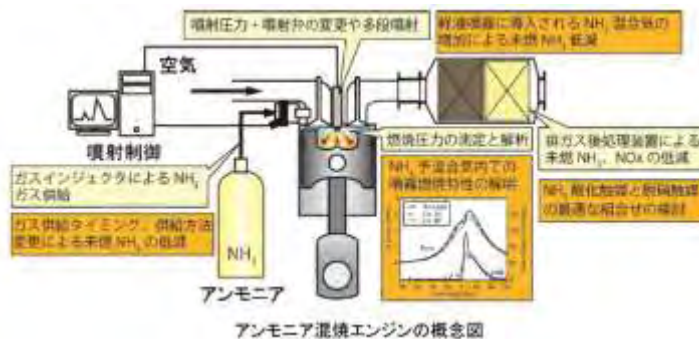
アンモニア：石炭火力混焼は過渡期のオプション

- アンモニアは石炭火力との混焼（微粉炭とアンモニアの燃焼特性の親和性により）が進められているが、2050年ネットゼロの場合は石炭火力は最小限になるはず
- 投資促進を踏まえると、石炭・アンモニア混焼の次のステップとしてアンモニア分解GTCCを踏まえた長期計画が必要
- 船舶用アンモニアエンジンの開発・利用計画も広がっている

アンモニア分解GTCC



アンモニアエンジン



出所：野勢，荒木，仙波，古市，谷村，“発電用大型ガスタービンにおけるアンモニア利用技術の開発”，日本燃焼学会誌 第61巻198号（2019年）293-298

低・脱炭素燃料に対応する船用動力システムに関する研究，海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所

アンモニア：大規模から小型分散型への可能性も

- 現在はHaber-Bosch法による製造・大型・定格運転が基本→変動再エネ (Green H₂) よりも化石燃料+CCS (Blue H₂) との親和性が強い
- ただし、小型分散型アンモニア合成の取組みも(つばめBHB:エレクトライド触媒)→再エネとの親和性

大規模集中型NH₃製造



小規模・分散型NH₃製造



既存法

Tsubame BHB

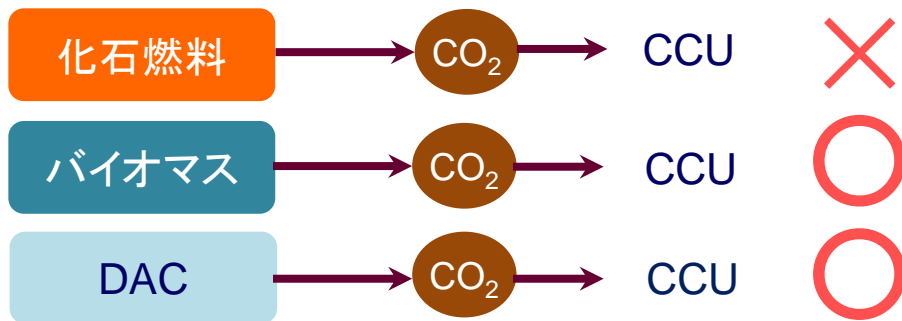
	既存法	Tsubame BHB
ターゲット	大量集中生産 スケールメリット	小規模分散型 オンデマンド生産
一基あたり 年間生産能力	20万～120万トン	1千～10万トン (目標値)
設備投資額	800M～3B\$	1M～80M\$
動作条件	10～30MPa 400～500℃	3～5MPa 300～400℃ (目標値)

出所: <https://tsubame-bhb.co.jp/>

合成炭化水素燃料の製造用CO₂に関して

- 欧州を中心に、多くの論文・報告書で「CO₂はバイオマス由来かDAC由来でなければならない」「CCUはCO₂を再排出するので固定化期間の長い製品が好ましい」等の見解が見られるが、、、

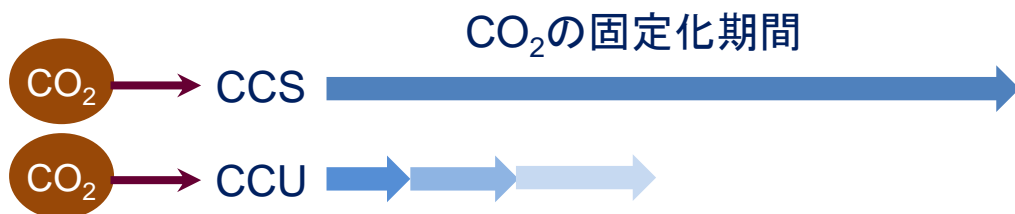
欧州やIEAのスタンス



疑問点

既に排出されている化石由来CO₂を利用するのが何故悪いのか？

CCUのCO₂の固定化期間を伸ばすべき

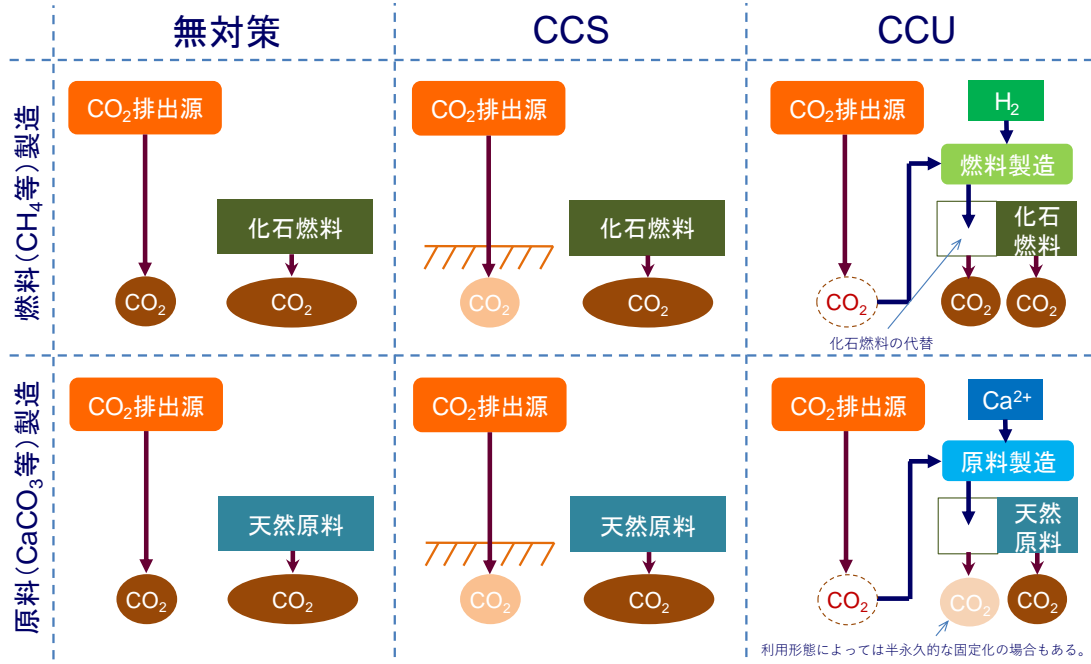
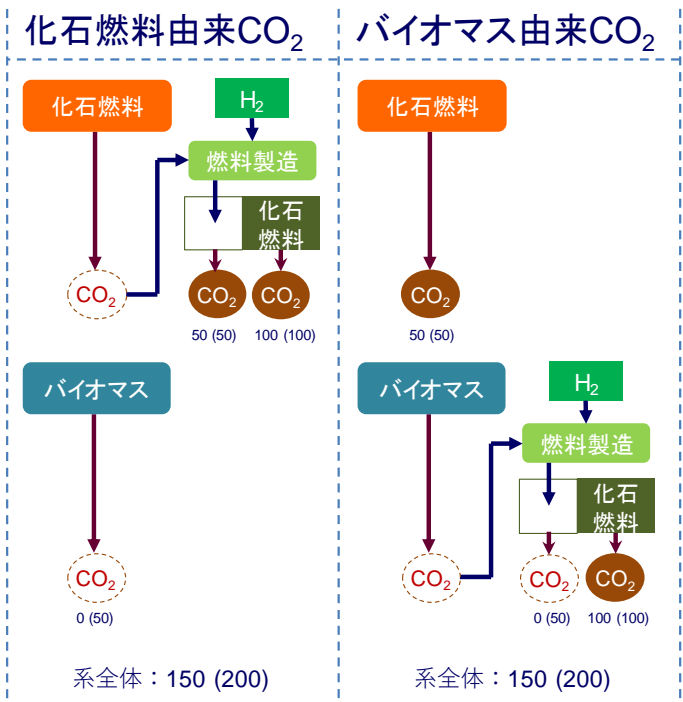


固定化期間を長くしても、いずれは放出されるなら意味がないのでは？

合成炭化水素燃料から見えてくるCCUの姿

CO₂排出量は、
 化石燃料+CCU > バイオマス+CCU
 = 化石燃料 > バイオマス
 ⇒ CCUを無視して、おかしい
 ∴ CO₂起源は関係ない

CCS = CO₂固定化 ⇒ CO₂固定化・貯留
 CCU = CO₂回収 - CO₂再排出 + 従来型燃料・原料削減
 ⇒ 従来型燃料・原料の代替
 ∴ CO₂再排出は何の問題もない(元々のCO₂排出の時間差・地点差排出)。
 ⇒ ただし何が何を代替しているのか？



出所：柴田，“CCU・カーボンリサイクルに必要な低炭素化以外の視点 -CCUSという分類学により生じる誤解-”，日本エネルギー経済研究所，2020年2月

水素・CCS・CCUの分類学

- ブルー水素はCCS。合成燃料は“グリーン水素supported by CO₂”
- CCUはCO₂を含有する資源の消費の削減が本来の目的

CO₂分離回収

水素

CCS

固定化・貯留

CCSが
低炭素効果

Blue H₂ (CCSが必要)

Grey H₂

CCU

製品 = 非エネ

Reuse¹⁾

CO₂が
代替効果

Recycle¹⁾

製品 = エネルギー²⁾

H₂要 (絶対的に)

合成燃料

H₂が
代替効果

Green H₂

CO₂不要

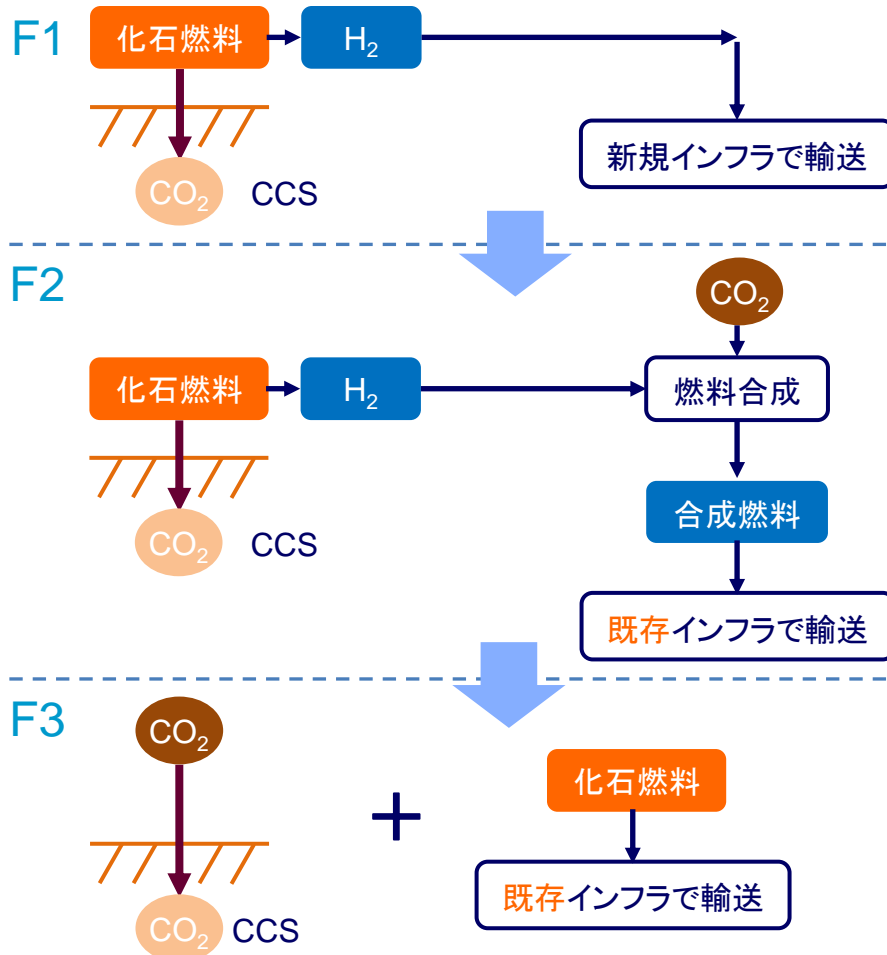
既存インフラ・技術活用のメリット
(都市ガスや天然ガス自動車)

CO₂要 (便宜的に)

1) 一部の技術にはCO₂の固定化もある。2) 藻類バイオ燃料は水素不要であるが、ここでは非表示

化石燃料+CCS由来水素+CCU?

- ブルー水素にCCU(合成燃料製造)を適用させると、水素製造・CCUの意味がなくなることもある



- ✓ 水素輸送には新規インフラが必要という障壁によって、F1が困難な場合、**既存インフラ**が利用できる**F2**を選択しようとする
- ✓ すると、既存インフラで化石燃料が輸送できるので、わざわざ水素製造・合成燃料製造の必要もなく、F3でいいのではないか
- ✓ ブルー水素が製造できるということはCCSが実施可能ということであり、F2=F3。いや、**F3の方が効率的**
- ✓ ブルー水素はCCSという切り札を1回使っているため、重ねてCCUを利用するのは非合理的なはずだが、**輸送が困難な褐炭の場合**や、輸送が国境を超え自国内CO₂削減が必須でCCS不可の場合はどうか？**ルール作りが必要**。H₂輸送 vs CO₂輸送？
- ✓ ただし、F2は低コストであれば選択される可能性も。また、Green水素とBlue水素が同一箇所でミックスされる場合は区別できない

CCS・CCU・カーボンリサイクルに対する誤解

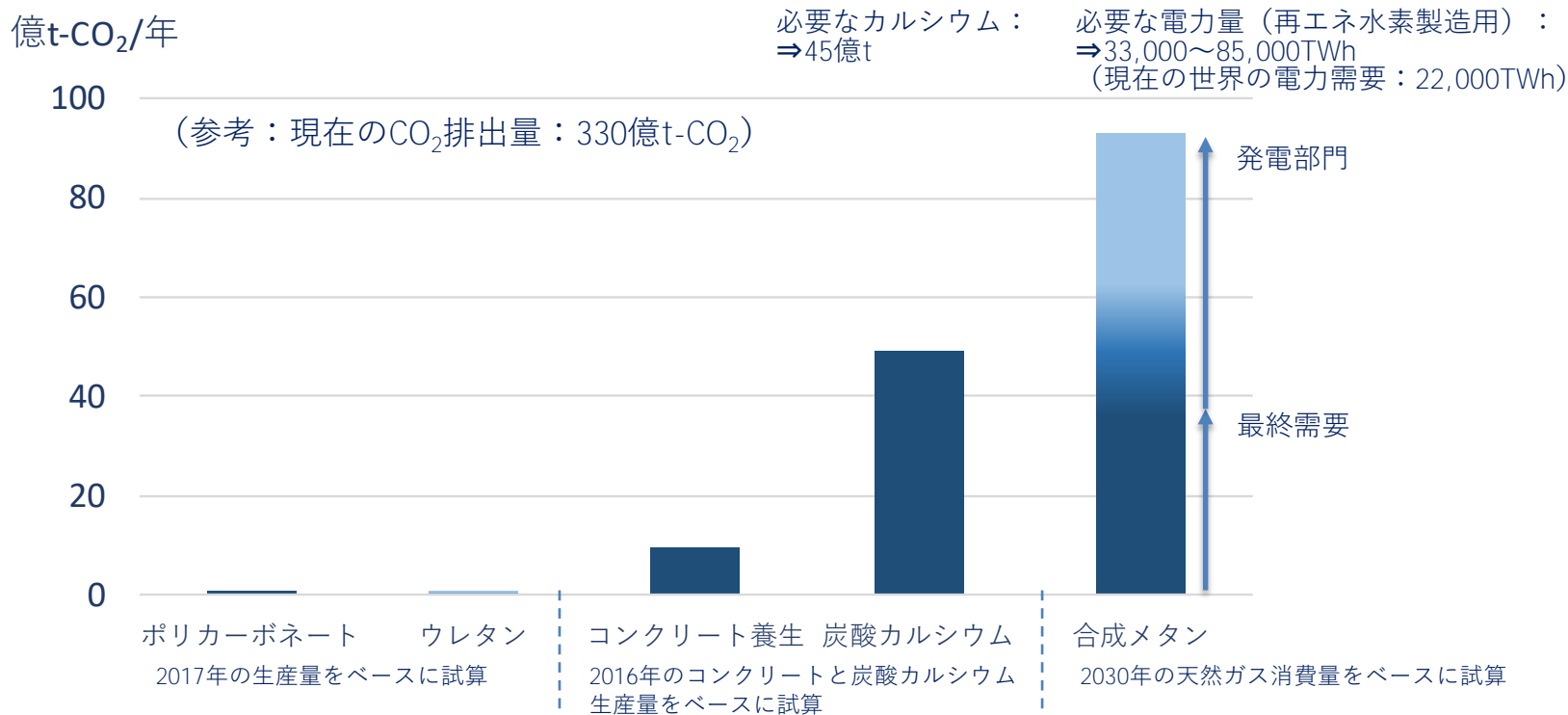
- **CCSとCCUは全く異なる技術**。CCSは化石燃料を利用し続け低炭素化を図る。CCUは化石燃料を代替⇒カーボンリサイクルはプラスチックのリサイクルをアナロジーにするとわかりやすい
- CCUで製品が非エネルギーの場合は、**再利用するCO₂が化石由来等CO₂を代替する限りにおいて意義がある**
- CCUで製品がエネルギー（合成燃料）の場合、**水素に代替効果があるのであってCO₂には無い**。つまり、**CO₂を再利用することによるCO₂排出削減効果はない**。言い換えれば、合成燃料は水素の**キャリアー**に過ぎない。また、合成燃料は、CO₂を回収・利用・再排出しているだけであり、**CO₂再排出は全く問題ない**
- したがって、バイオマス由来CO₂やDAC由来CO₂を利用した場合でもネガティブエミッションではない

		特徴	効果
CCS		CO ₂ の固定化・貯留	CO ₂ の固定化・貯留
CCU	製品が非エネルギー（建材等）	水素不要	CO ₂ が代替効果
	製品がエネルギー	水素必要	水素が代替効果

CCUによるCO₂利用ポテンシャル≠CO₂削減ポテンシャル

- 合成メタンや炭酸カルシウムのポテンシャル大
- ただし、それぞれ膨大な電力(再エネ水素製造用)とカルシウムが必要
- 利用ポテンシャルであって削減ポテンシャルではない

CCUによるCO₂利用ポテンシャル(世界)

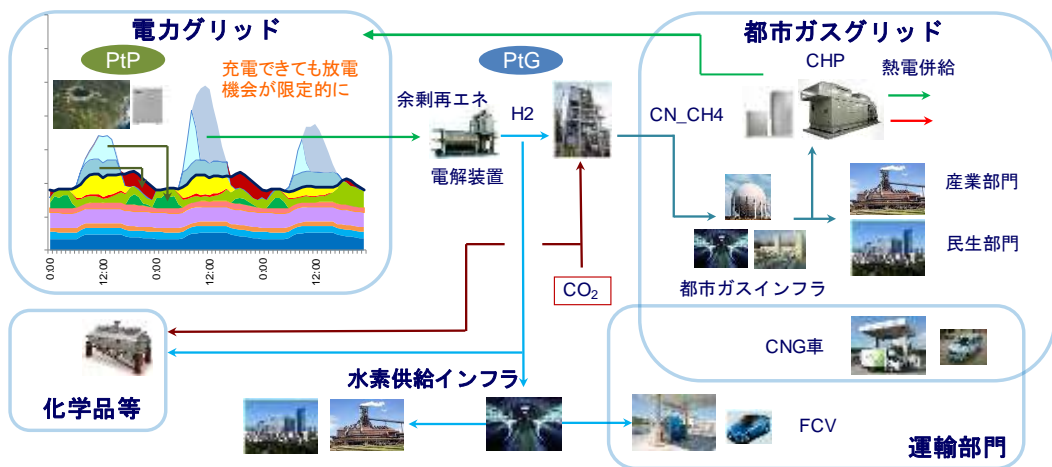


出所：令和元年度海外炭開発支援事業海外炭開発高度化等調査「石炭火力発電所等から発生するCO₂の分離回収・貯蔵・利用等の技術開発動向調査」, JOGMEC

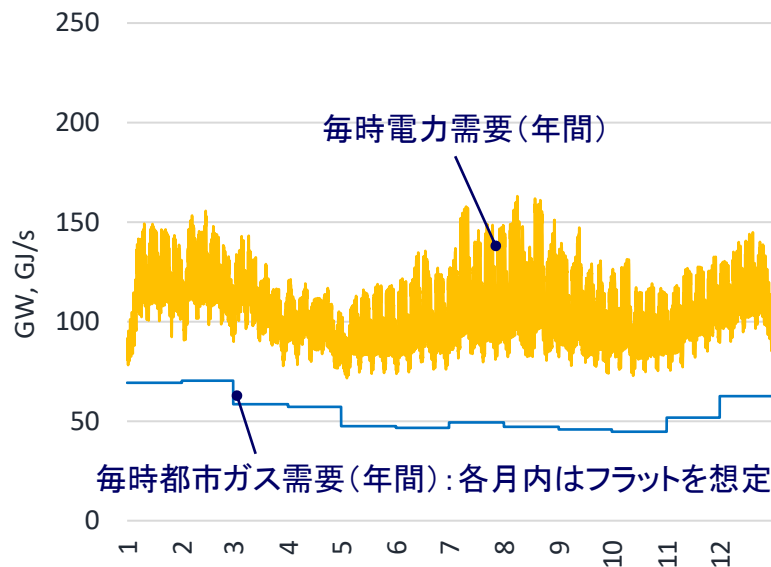
Energy System Integrationの意義

- “Power to Power”型エネ貯蔵(揚水発電や蓄電池)だけでは限界。PtGのような一方通行型も必要。PtGを通じて電力系統と都市ガスや運輸部門を連結することで、電化が厳しい部門での低炭素化にも期待
- 合成燃料経由で既存インフラを活用できれば、**再エネの受け皿**が拡大。同時に、**エネルギー貯蔵の必要容量を抑制**する効果も

Energy System Integrationのイメージ



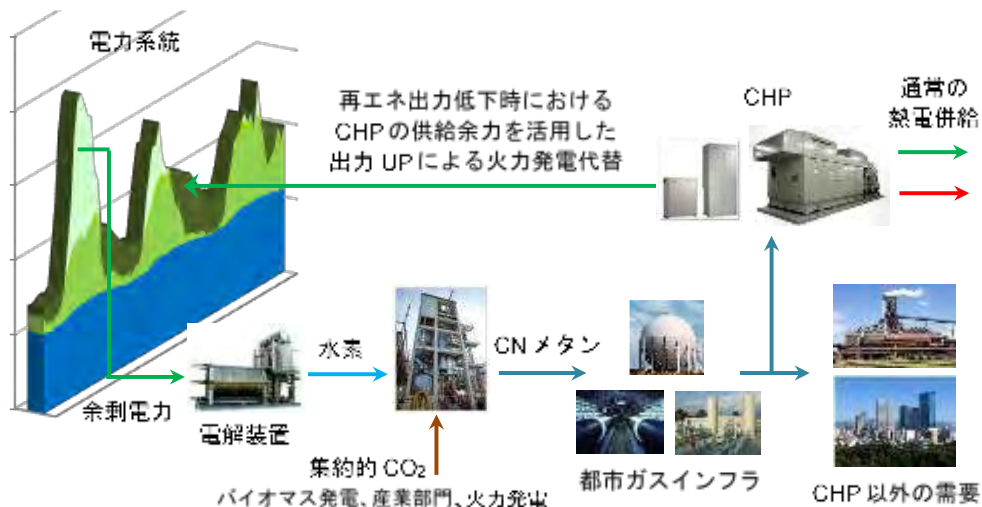
電力需要と都市ガス需要の規模



都市ガスインフラによる再エネ出力変動緩和への貢献

- CHPは熱電併給と併せて、再エネの出力変動緩和策(VPP)としても期待
- CNメタンが混合された都市ガスを利用できれば、より低炭素なVPPが可能

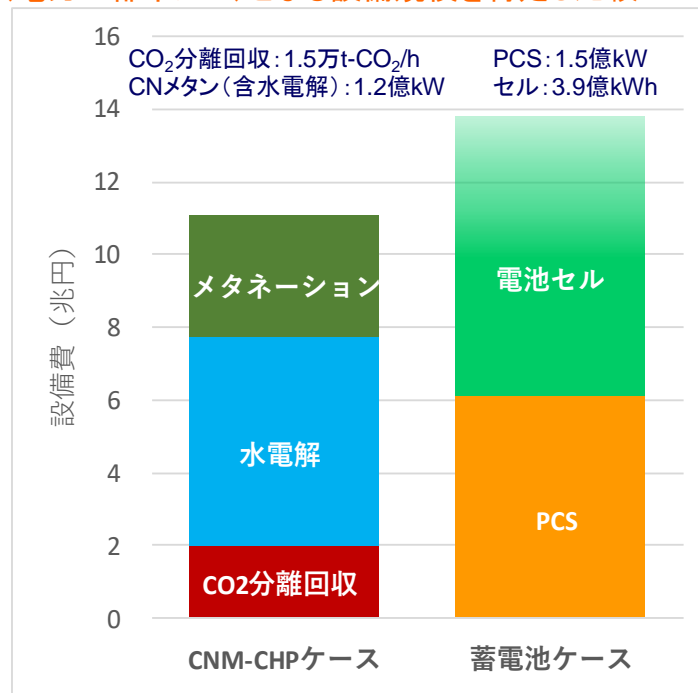
CHPの合成メタン利用による再エネ出力変動緩和のイメージ (CNM-CHP)



蓄電池とCNM-CHPの設備費比較

(PV3億kW+風力1億kW+CHP0.34億kWのケース)

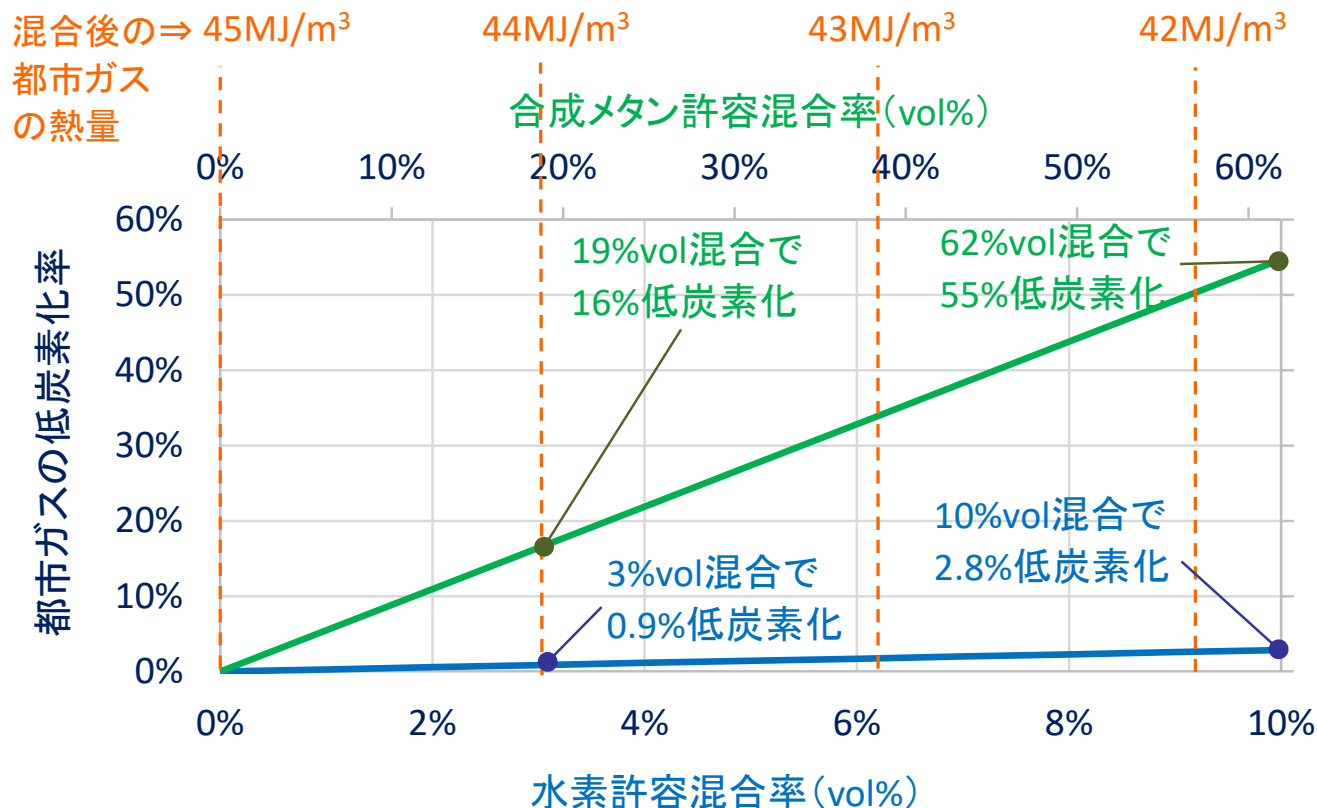
CNM-CHPケースと蓄電池ケースで同等のCO₂排出量(電力+都市ガス)となる設備規模を特定し比較



出所: 柴田, “分散型コージェネのカーボンニュートラルメタン利用による再エネ出力変動緩和”, (2020.1), 第36回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス

CNメタン混合の方が都市ガスと再エネによってWin-Winの関係

- 現在の都市ガス熱量を基準とした許容混合率(vol%)は合成メタンは水素の6倍程度
例えば、3vol%-H₂=19vol%-CH₄、10vol%-H₂=62vol%-CH₄(許容混合率は仮の値)
- 低炭素化効果: 合成メタンは水素の19倍*程度(許容混合率と熱量の両方の影響)
* CO₂分離回収用投入熱量によるCO₂排出は含まず。また、水素、合成メタンともに、熱量調整のために必要なLPGの添加も捨象。



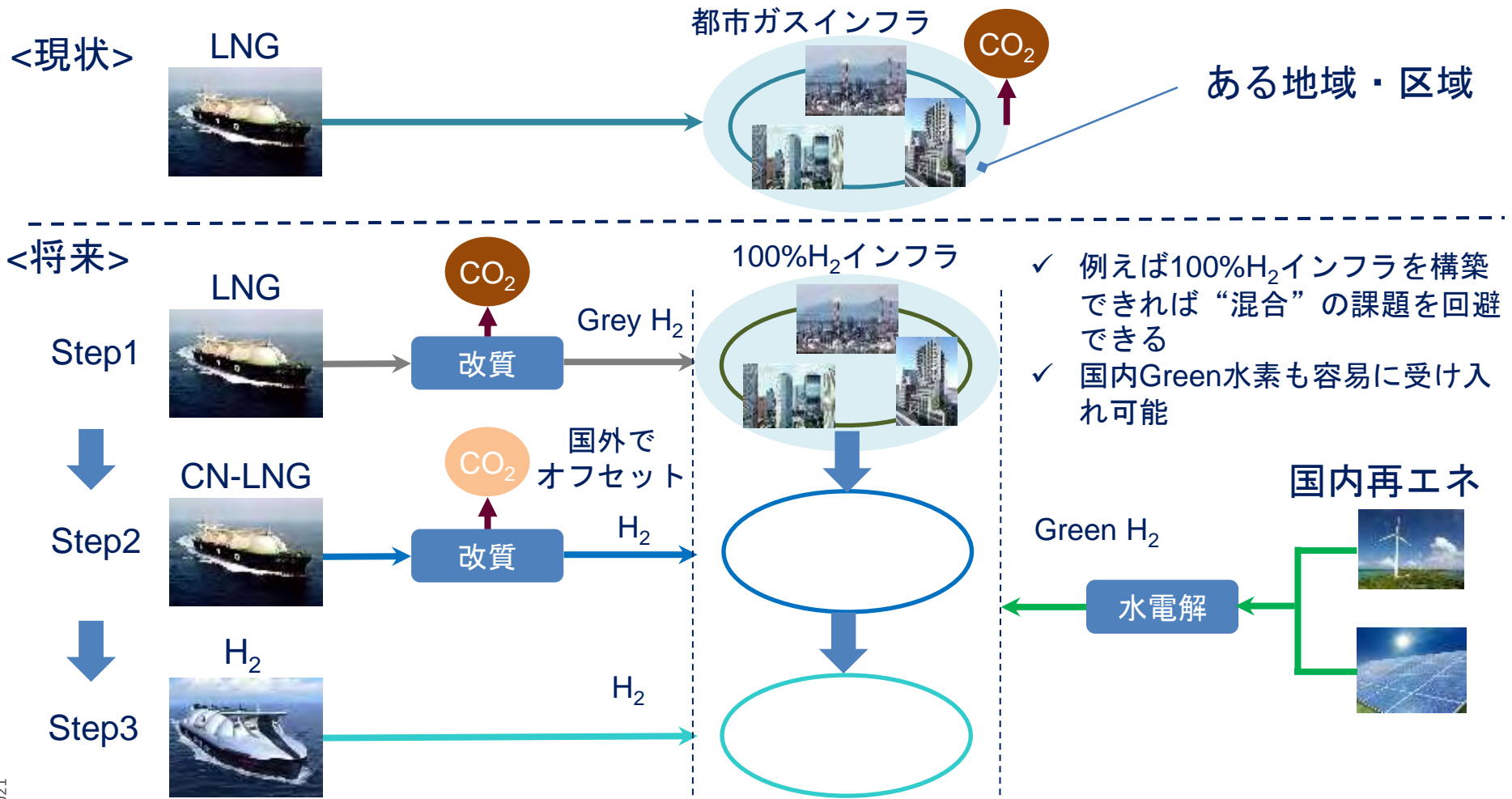
注: 許容混合率・熱量はあくまで想定値であり、実際の可能性を踏まえたものではない。

合成燃料の課題

- 電力化の傾向。レジリエンスの観点からもガス**インフラ**の必要性
 - 多様な経路
- 例)
- 再エネ→充電インフラ→BEV
 - 再エネ→水電解・輸送・貯蔵・水素ステーション→FCEV
 - 再エネ→水電解・CO₂分離回収・メタネーション・都市ガスインフラ・CNGステーション→CNG
 - 再エネ→水電解・CO₂分離回収・FT合成・ローリー・ガスステーション→ICE
-
- 欧州では水素や合成燃料は、主に“Hard-to-Decarbonize”部門を対象（産業、大型運輸、船舶、航空等）
-
- 水素か合成燃料か？
- ✓ “既存インフラ・技術を利用できるメリット＞CO₂分離回収・燃料合成コスト”であれば合成燃料
 - ✓ 既存インフラの観点からは、まずは合成燃料で将来的には水素か？ただし、いつまで合成燃料か？現在のインフラもいずれ更新時期を迎える
 - ✓ また、CO₂が極端に減少する将来はDAC依存か？ただし、バイオマス由来CO₂は期待できる
 - ✓ 合成燃料→水素のパスの場合、混合でなく100%が理想的（部分的にオンサイト熱調）

一つのアイデア: 水素が最終的なゴールの場合

- 地域・区域によっては、長期的なゴールに向かって受入(需要)側を先行整備することも考えられる



まとめ

- 再エネ主力電源化・大規模導入・再エネ系統統合の観点からEnergy System Integrationは重要
- 電力化が進むとしても、レジリエンスの観点からガスインフラは必要
- 合成燃料は既存インフラを利用できることから Energy System Integrationへの貢献度大
- ただし、合成燃料製造を目的化してはいけない。既存インフラ活用というメリットを生かせる範囲において合成燃料が水素より優位
- インフラ更新・再構築を踏まえ、地域によっては合成燃料から水素への転換も模索すべき(その場合、特殊需要に対しては個別にオンサイト熱調か)
- 長期的なインフラの在り方を踏まえた工程表が必要か

- 合成燃料の低炭素化効果は水素に依存。CO₂は回収・利用・再排出で、このプロセスに低炭素化効果はない。合成燃料は水素を利用し易くする方策
- CCSとCCUは個別に扱うべき。同じ領域で扱うことでCCU・カーボンリサイクルに対する誤った認識を生み出している

ありがとうございました。
yoshiaki.shibata@edmc.ieej.or.jp