

エネルギー会 7月講演座談会



アンモニア・水素により既存設備を有効 利用して現実的な「脱炭素」をめざす

令和3年7月

松永 健一

SNW、エネルギー会会員

技術士(機械、電気電子、原子力・放射線、総合技術監理部門)



講演概要

菅首相が**2050年脱炭素**を表明して以降、産業界は**カーボンニュートラル**に向けて取り組みを加速している。

2050年のカーボンニュートラルを目指すうえで、CO₂排出の多い**電力業界**と、次いで多い**製鉄業**の動向に注目が集まっている。

一方、**再エネの課題**が次第に明らかになりつつある現在、CO₂を排出している設備の「**低・脱炭素化**」を模索することが、既存設備を有効利用しながら長期的に技術移転を進めることができるという意味で、技術的にも経済的にも**現実的な選択**のようである。

CO₂フリー燃料、水素キャリアとしての**アンモニア**の役割、一つの**ガスタービン技術**のLNG→アンモニア→水素(30%、100%)、**水素燃料航空機**への技術展開、水素発電による市場拡大が水素還元製鉄などに果たす経済効果などを紹介し、**既存技術を踏襲しつつ改良**する形での「**低・脱炭素**」を、参加者の皆さんと議論したい。

本日の内容

1. 2050年脱炭素へ向けての動向

- (1) 世界 (国際エネルギー機関IEA予測)
- (2) 日本政府 (エネルギー基本計画、水素・蓄電池、SIP)
- (3) 産業界 (電力、製鉄、商社)

2. 再生可能エネルギー等、エネルギー資源の課題

3. 技術的・経済的に現実的な選択

- (1) CO₂フリー燃料、水素キャリアとしてのアンモニア(既存技術)
- (2) ガスタービン技術 LNG→NH₃→水素→航空機へ繋がる
- (3) 水素発電の需要拡大の効果 水素還元製鉄への波及

4. アンモニア・水素による脱炭素技術

1. 2050年脱炭素化へ向けての動向

エネルギー・気候変動に対する**基本的考え**

世界の脱炭素の動向(IEA)

日本の政府・産業界の脱炭素の動向

エネルギー・気候変動に対する基本的考え

1. エネルギー 【要点だけ】

エネルギーの源は核エネルギー。原子力の知識・技術を将来へ繋ぎたい。
エネルギーは人間の幸せ(GDP、人口を考慮: 茅恒等式)と直結する。

2. 地球温暖化・気候変動 (宇宙・地球の歴史) 【要点だけ】

気候変動のことを、それほどは何も知らない。太陽の日射(ミランコビッチサイクル)と気候変動は一致。【日本のエネルギーを考える会SEJだより第15号参照】

地球温暖化 = CO2主原因説には懐疑的。資源枯渇の問題と捉える。【→3】

気候変動 = 太陽の日射(ミランコビッチサイクル) + 46億年の太陽(核融合)熱の増加と地球大気中CO2量だけではない地球環境との均衡の結果。

経済性を無視した脱炭素には同意しない。キャノングローバル戦略研・杉山大志氏の意見と同じ方向だが、個々の技術的結論には同意しない。【→4】

投資は脱炭素なので、企業は無視できない(現実的に妥協)。

3. 原子力 【今回の対象外】

軽水炉のみでは資源枯渇。2100年後半への展望はない。

核融合の実用化はかなり先(?)。高速炉は放棄できない。

4. 経済性を考慮した低・脱炭素 【今回の本題】

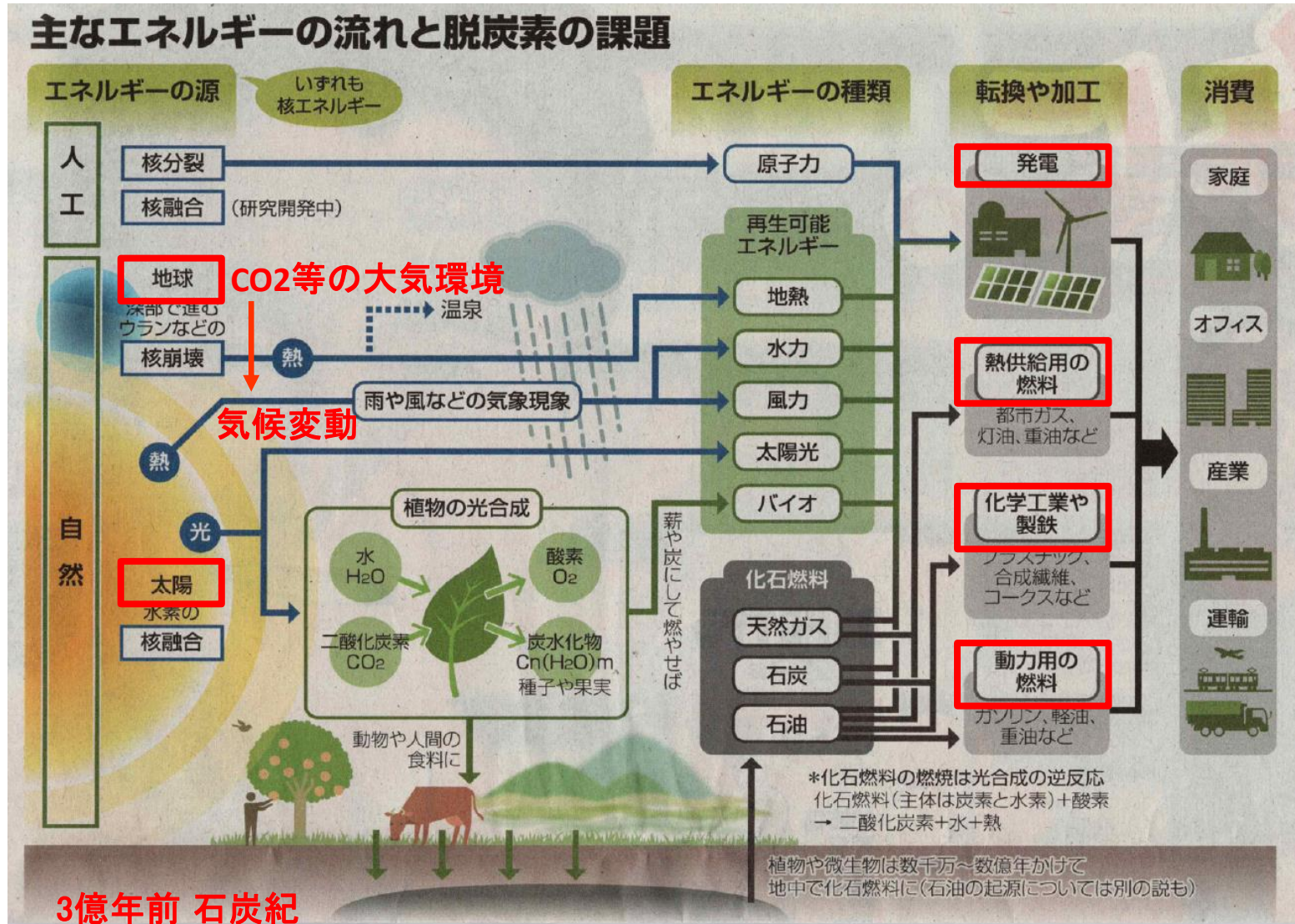
既存の産業・設備を有効活用した技術移行形の低・脱炭素をめざす。

発電だけ、エネルギー産業だけでなく、関連産業への波及・相乗効果を幅広く考慮する。



エネルギーの源と気候変動

【出典】読売新聞 2021.6.20

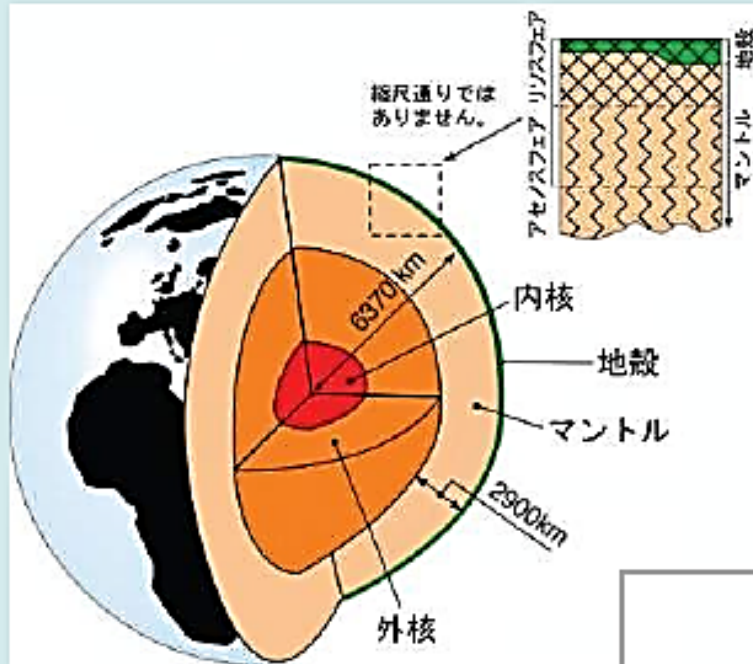


エネルギーの源 = 核エネルギー 太陽(核融合)、地熱の半分(核崩壊)

気候変動 = 太陽の日射 + 46億年の太陽(核融合)熱の増加 と 大気中CO₂量などの均衡

エネルギーの源泉 地熱の半分は原始放射性物質

放射性物質の崩壊と地温

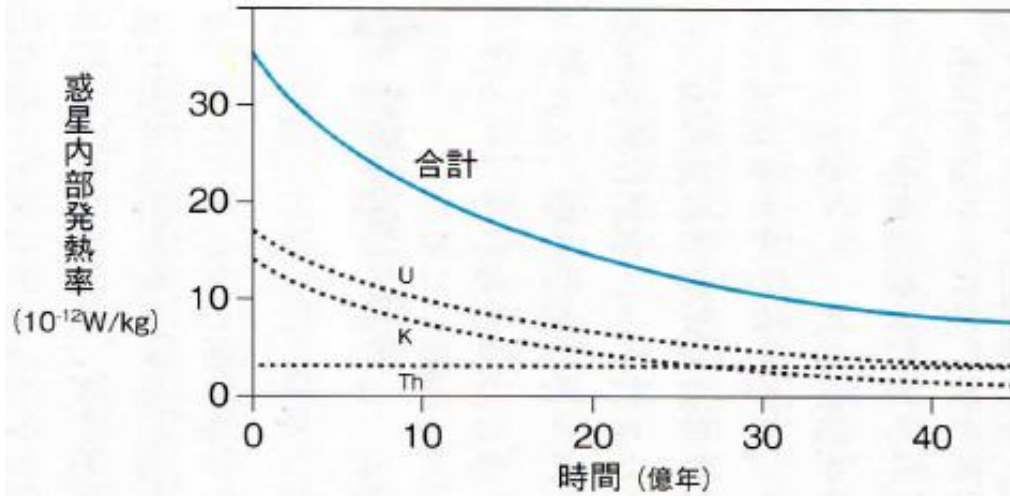


原始放射性物質(半減期が長い)

U-238 半減期 45 億年
 Th-232 140 億年
 K-40 12.5 億年
 地球の歴史 46 億年

| | 地球全体積に占める比率 | 熱放出量(ワット) | 放射性物質の存在 |
|---|-------------|------------------------------------|----------|
| 核(コア) | 16% | $1.7 \times 10^{12} \text{W}$ | 含有しない |
| マントル | 82% | $32.3 \times 10^{12} \text{W}$ (注) | 豊富 |
| 地殻 | 2% | $8 \times 10^{12} \text{W}$ | 豊富 |
| 地球全体 | 100% | $42 \times 10^{12} \text{W}$ | |
| 注 うち、放射性物質の崩壊熱 $22 \times 10^{12} \text{W}$ | | | |
| 日本地熱学会(2008) | | | 1 |

原始放射性物質の減衰



地球内部の熱源となる放射性物質の発熱率

地球創生時(46億年前)は、現在の発熱量の4.8倍(長半減期核種で評価)

地熱の発熱密度 $0.1 W/m^2$ ← 太陽熱の1/10,000

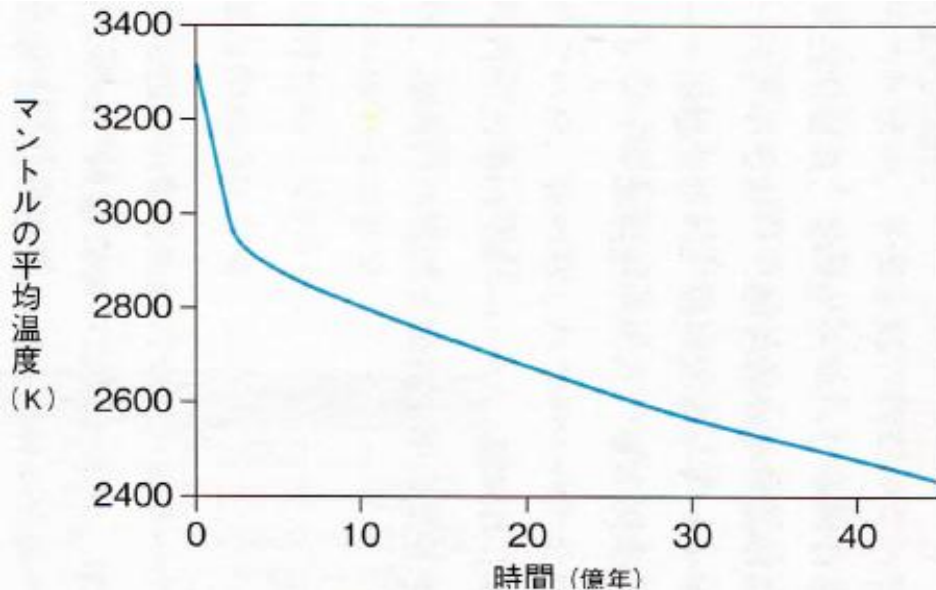
地球内部の発熱 → マントル対流
→ プレート運動 → 地表付近で
マントル溶融/マグマ発生
→ 揮発性成分(CO_2 など)の脱ガス
→ 物質循環

【火山活動は地球が活着している証】

熱源である放射性物質は地球質量に比例/冷却は地球表面全体
→ 大きな地球ほど冷却までの寿命が長い。

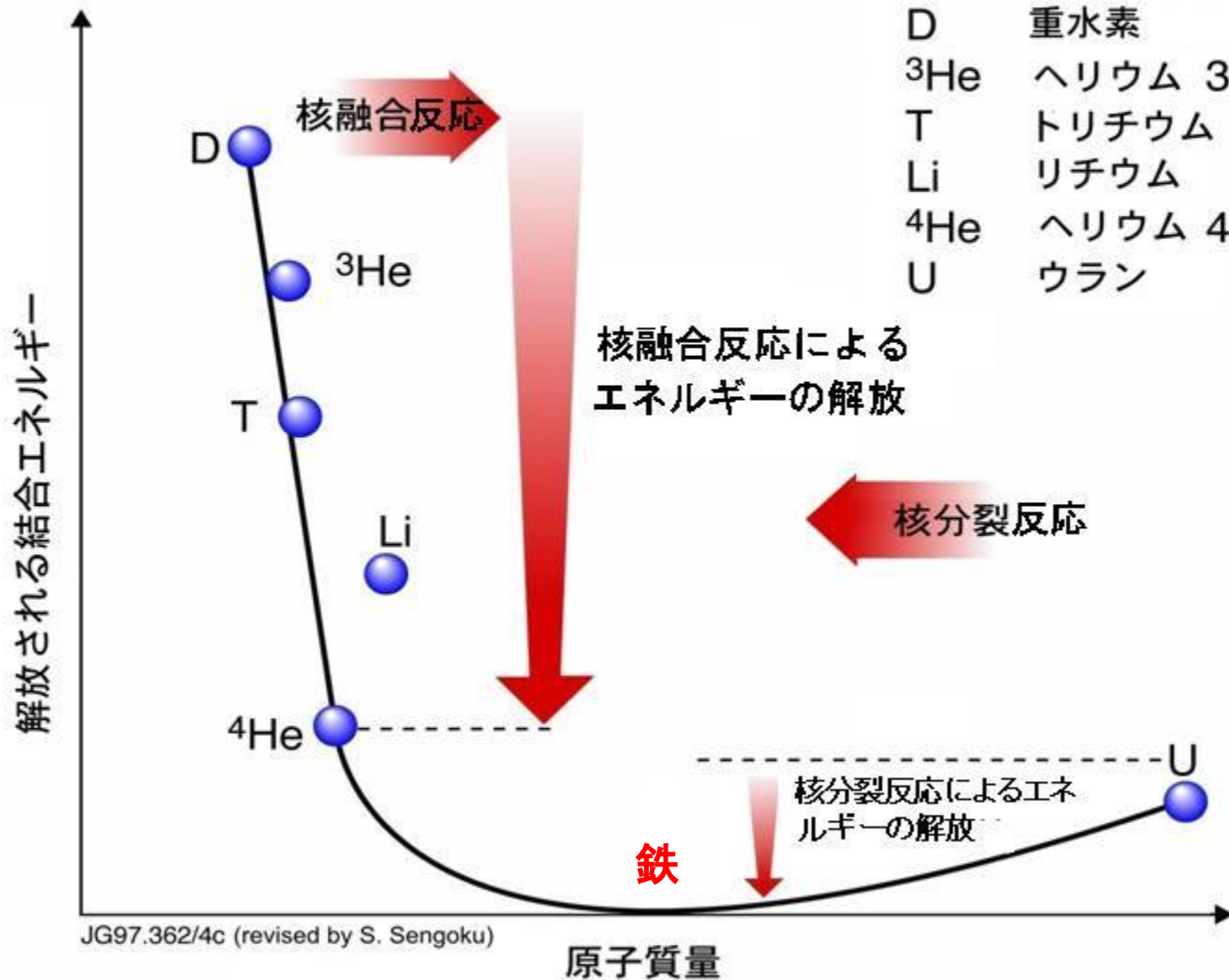
【地球はまだ数十億年は火山活動】

太陽光度増大の影響の方が先



地球内部の平均温度の変化

核融合反応と核分裂反応



太陽は、核融合の進展に伴い、燃料の質量数が増え、発熱量を増していく

宇宙史から知るエネルギー 水素から物質は生成

ビッグバン前は物質はなく電磁波(放射線)が溢れる → いかにして太陽や地球は誕生したか

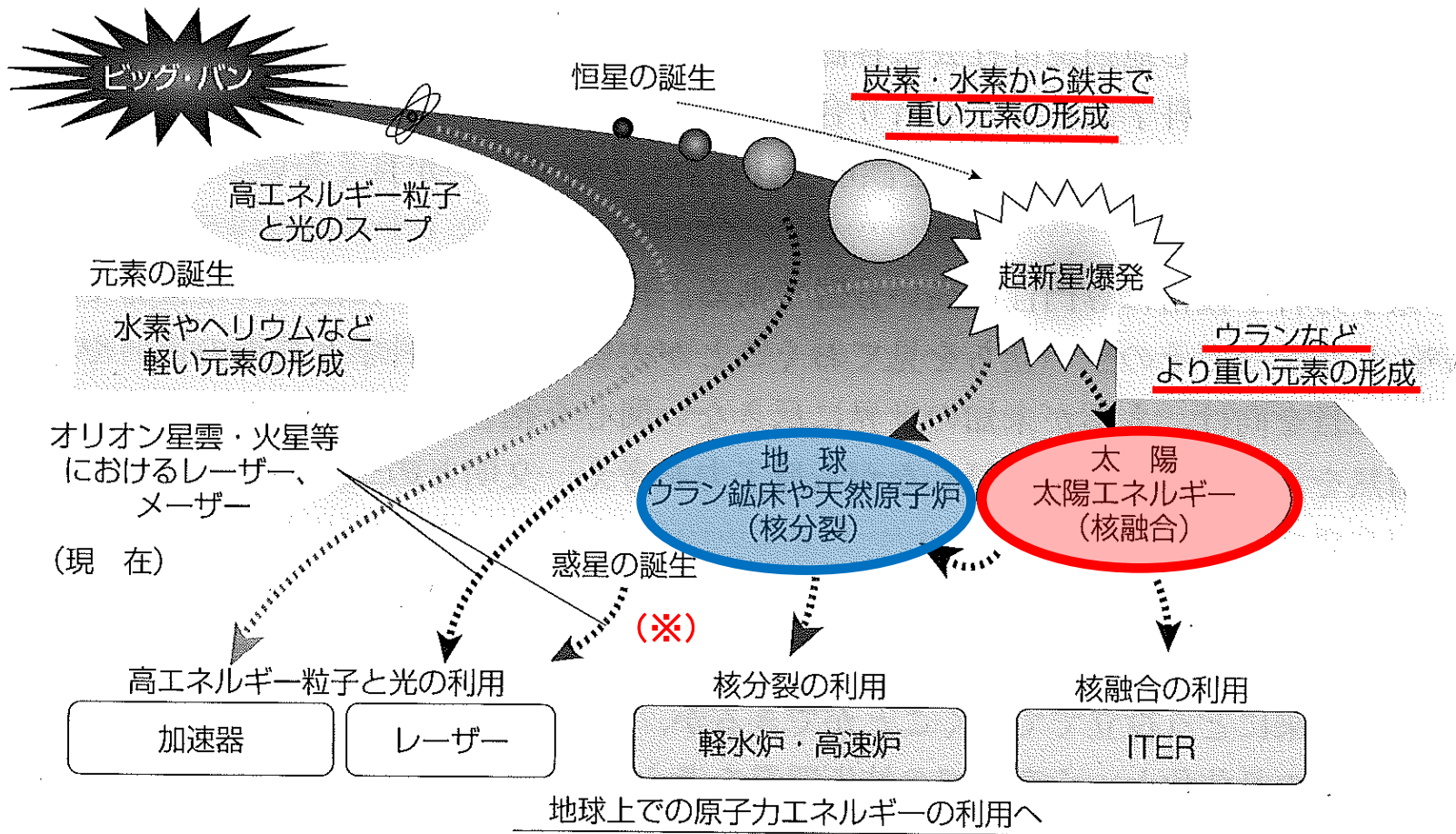


図1 宇宙誕生と原子力 - 自然に学び、自然を真似るのが、科学の原点 -

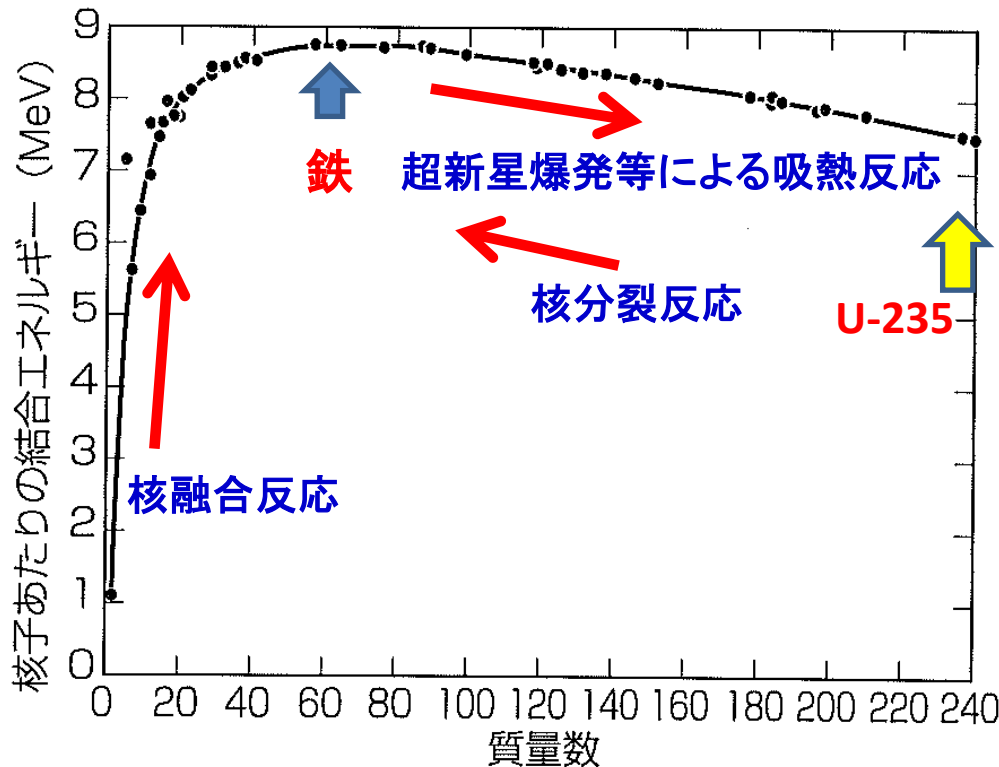
(※) ウラン等の崩壊熱(地熱の源) → 地熱発電

宇宙のエネルギー 水素からの物質生成

太陽光発電の大量導入時代に必要な蓄エネ手段の一つが「水素」

元素の中で核子の結合エネルギーが最も大きく安定している鉄が作られるとエネルギー生成のプロセスは止まってしまう

鉄よりも重い元素は、吸熱反応が起こる大きなエネルギー(超新星爆発等)が必要



超新星爆発エネルギーで中性子吸収・過剰
⇒β崩壊(電子放出)
⇒中性子が陽子へ変わる(原子番号が一つ増)

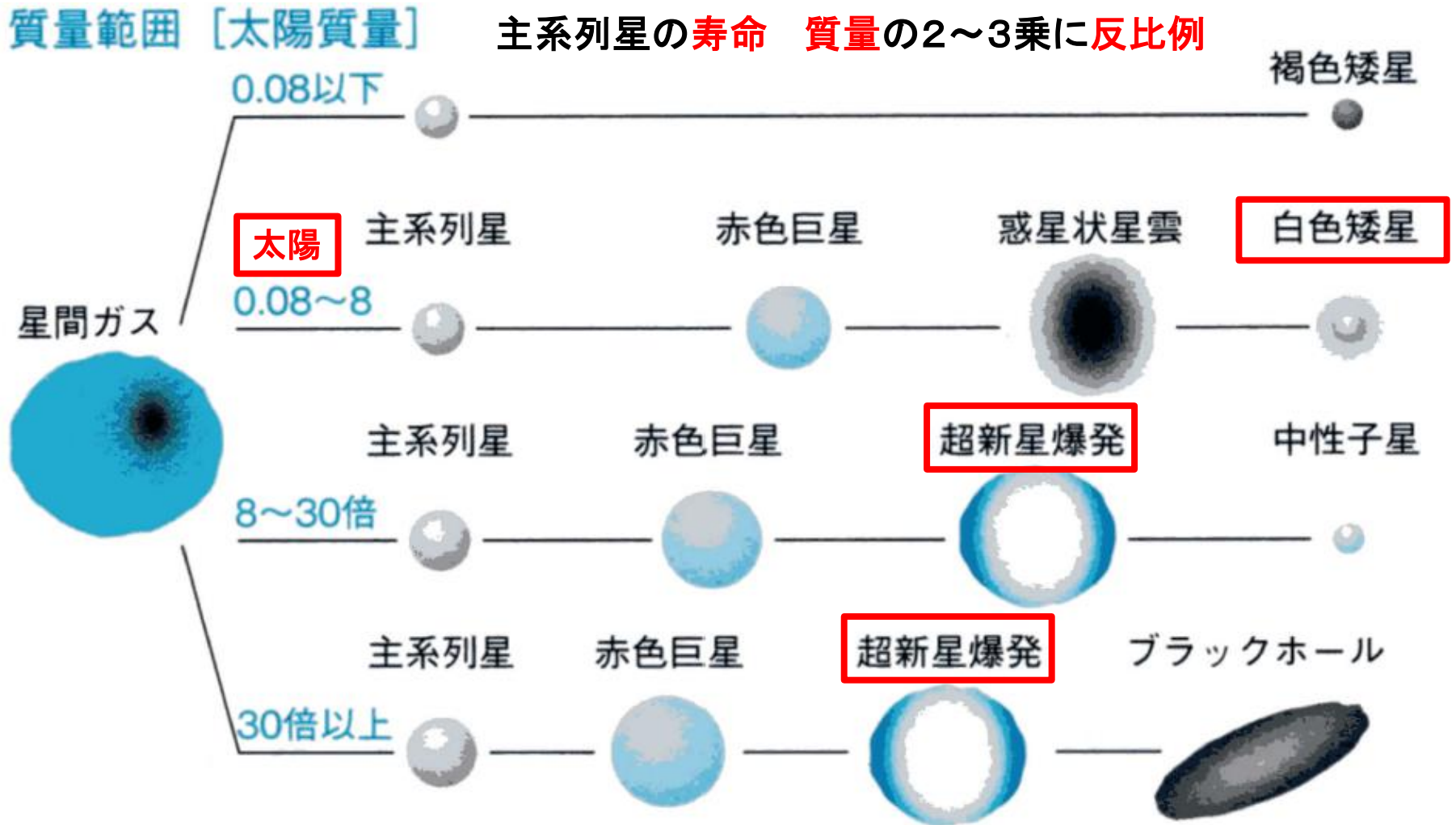
超新星爆発などの莫大なエネルギーを「質量」という形で貯蔵
⇒「核分裂」はそれを解放するもの

図1-7 質量数に対する核子あたりの平均結合エネルギー

(出典：ジェームスJ. ドウデルスタット、ルイスJ. ハミルトン(著)、成田正邦、藤田文行(訳)、「原子炉の理論と解析(上)」、現代工学社(2001))

核子エネルギーと物質生成

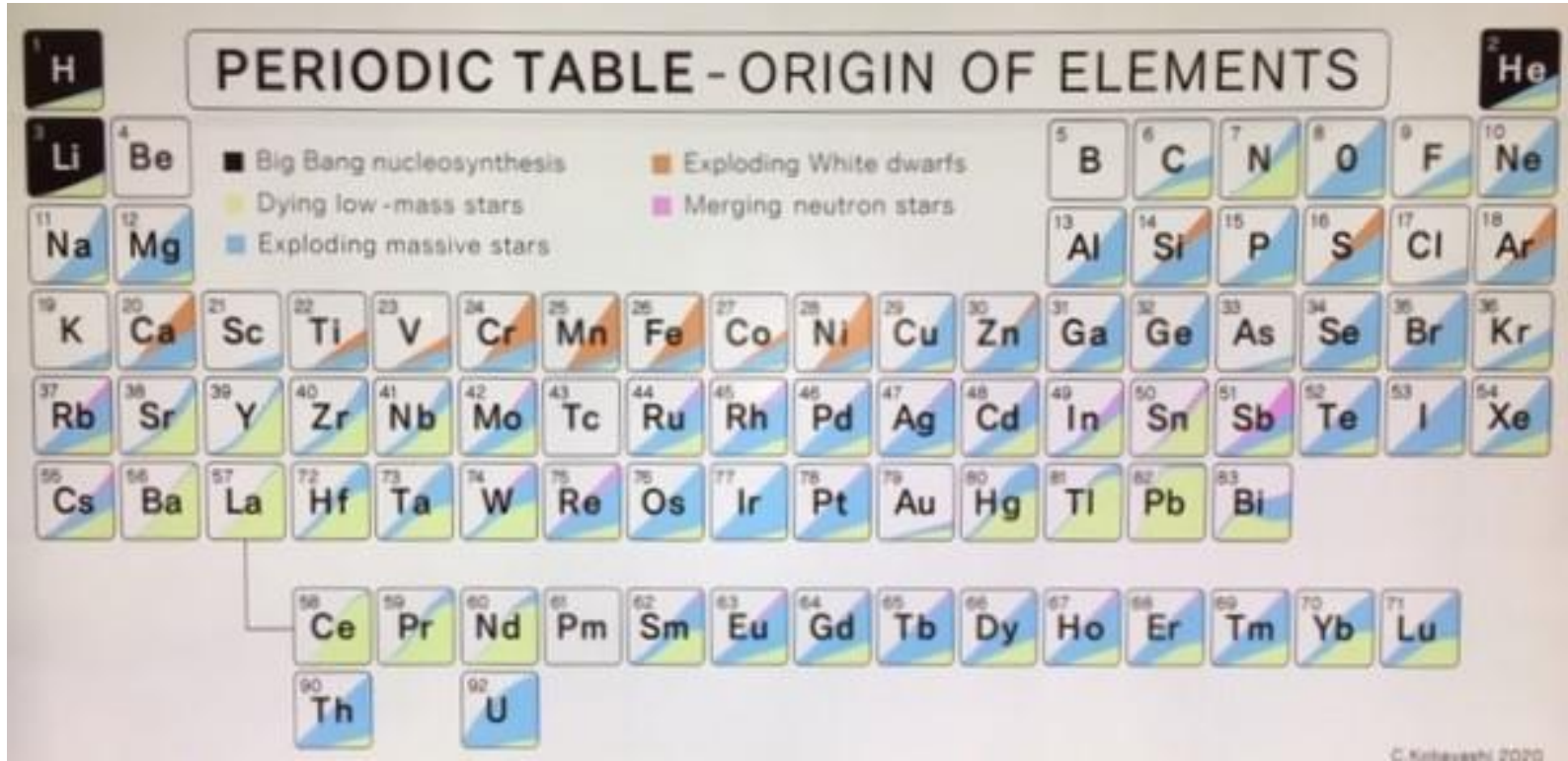
宇宙史から知るエネルギー 遠い将来の太陽



太陽 誕生後明るさを増す → 赤色巨星 → 脈動変光星 (膨張と収縮を繰り返す → 外層からガス放出) → 白色矮星 (核融合でできたヘリウム, 炭素, 酸素) 冷却/暗くなる **寿命 約100億年**

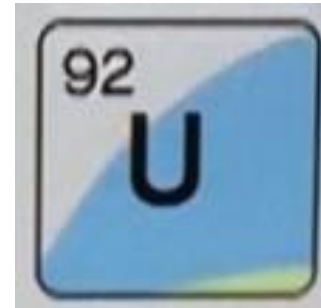
宇宙史から知るエネルギー 物質はどこから来たか

周期表 (宇宙の生成過程シミュレーション結果)



ビッグバン

超新星爆発など
低質量星の死



超新星爆発など

低質量星の死

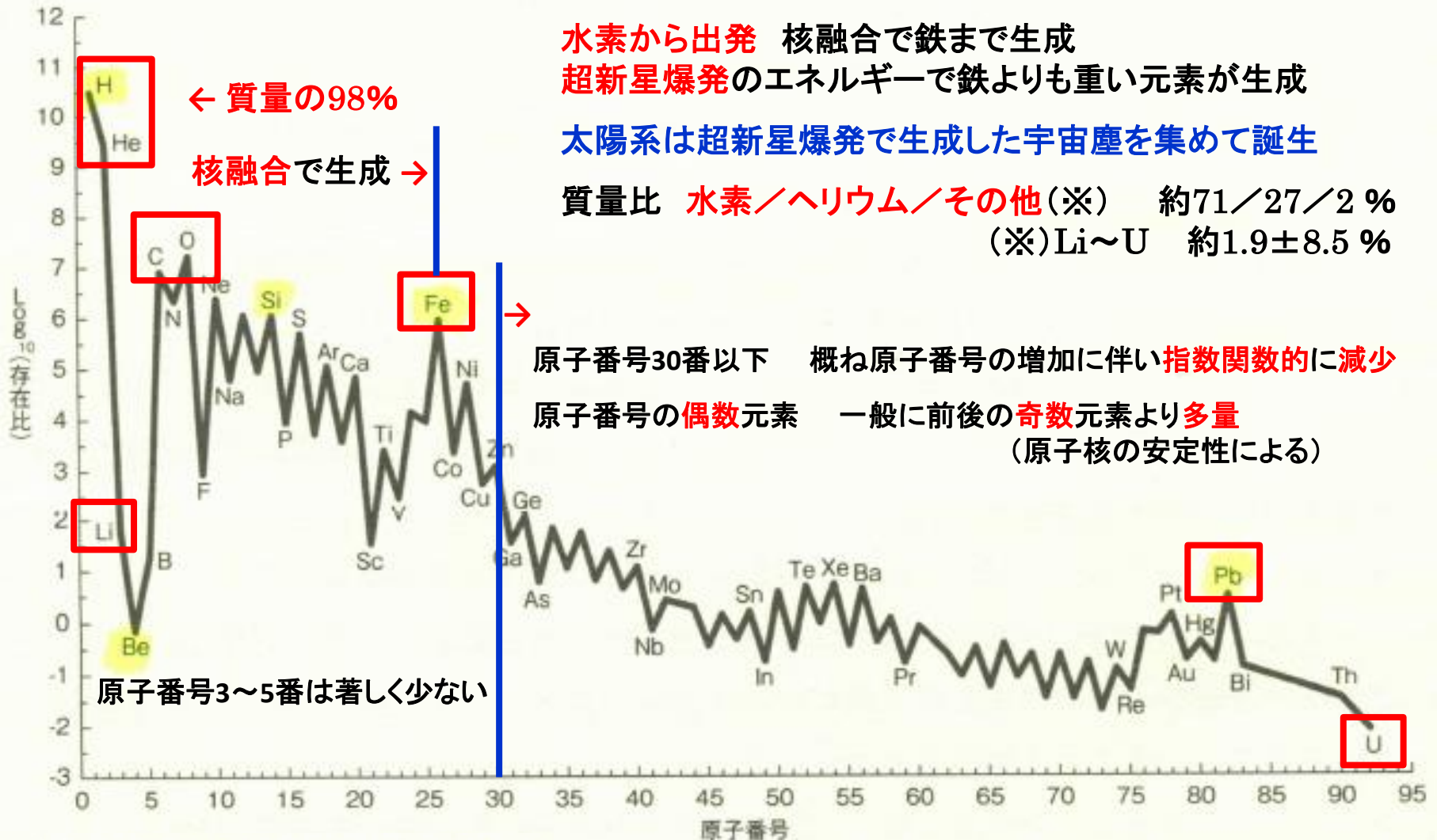
太陽系にある物質 水素とヘリウムが主成分

太陽系の原子存在比

水素から出発 核融合で鉄まで生成
超新星爆発のエネルギーで鉄よりも重い元素が生成

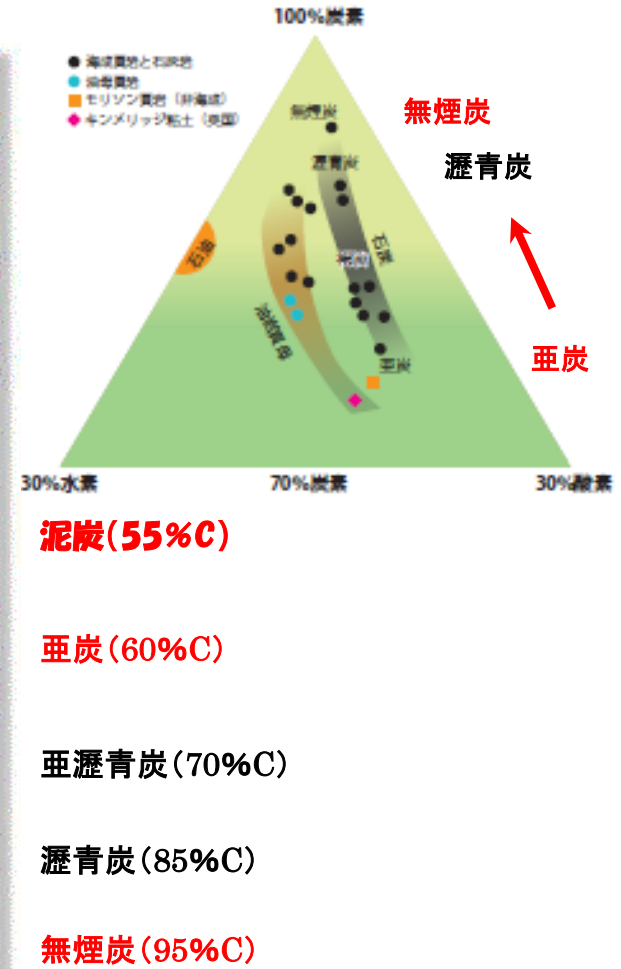
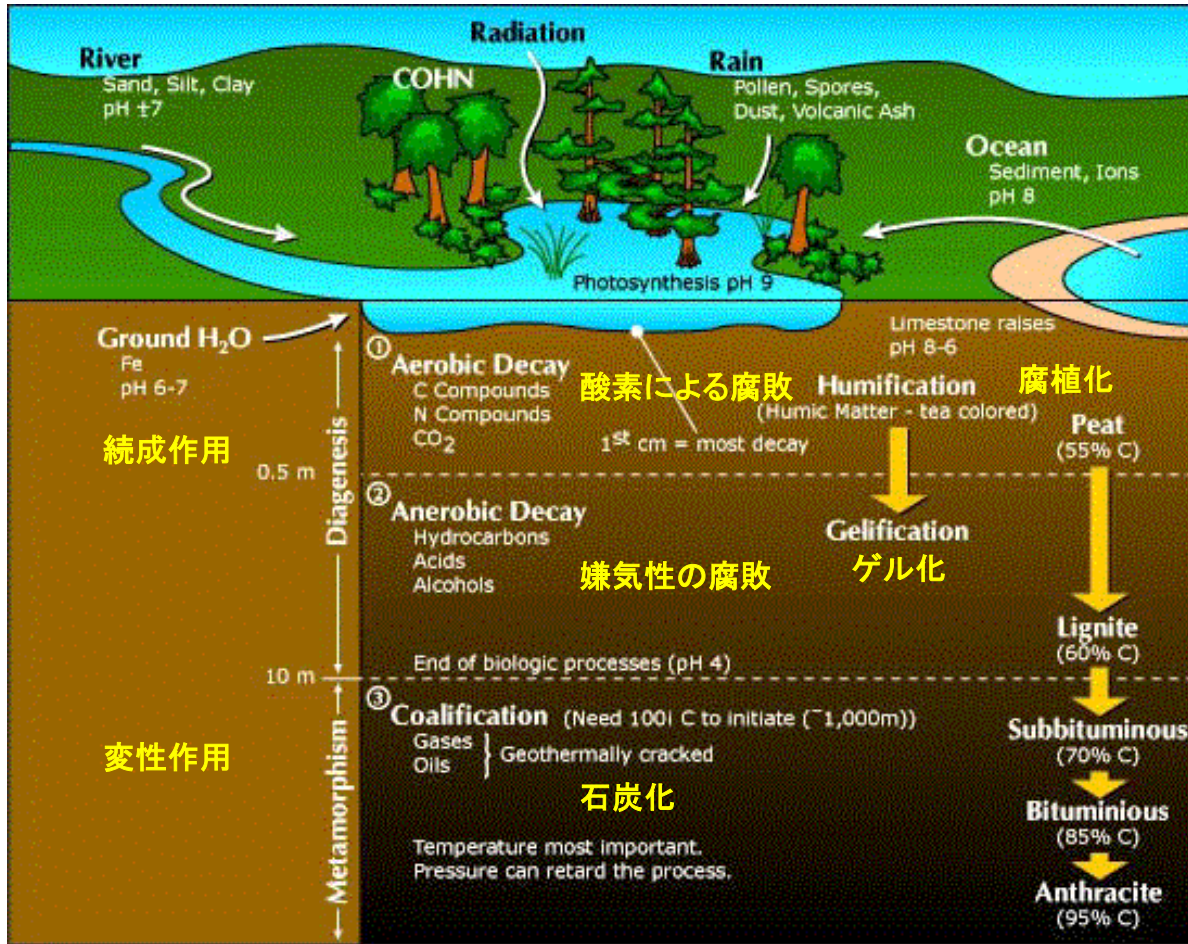
太陽系は超新星爆発で生成した宇宙塵を集めて誕生

質量比 水素／ヘリウム／その他(※) 約71／27／2 %
(※) Li~U 約1.9±8.5 %



(注) シリコン存在量を10⁶として正規化した

石炭の生成過程 石炭化で水素減少

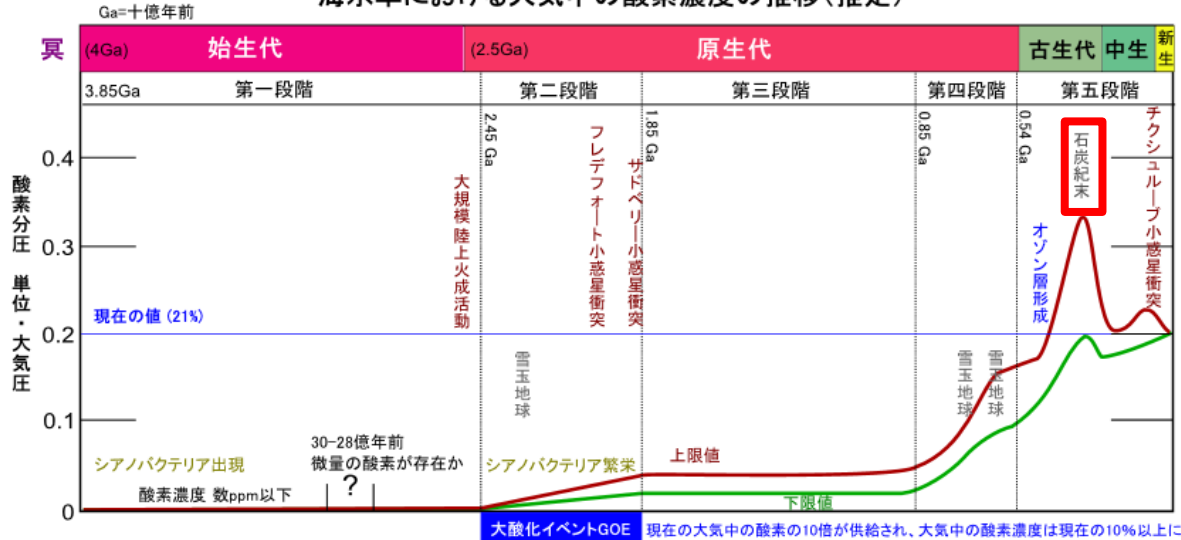


The Anatomy of a Swamp 石炭を生成する沼(水面下)の断面。左側は2つの主な生成過程、**続成作用**(バクテリアによる腐敗)と**変性作用**(熱, 圧力による変化)を、右側は、これらの過程の**生成物**(泥炭から無煙炭)を示す。上部の白い矢は、最終的に石炭の灰となる**不純物**が泥炭にどのように入るかを示す。

枯れて腐ればCO2 は元に戻る → 石炭化で固定

石炭生成と大気成分 石炭は大気CO₂の固定化

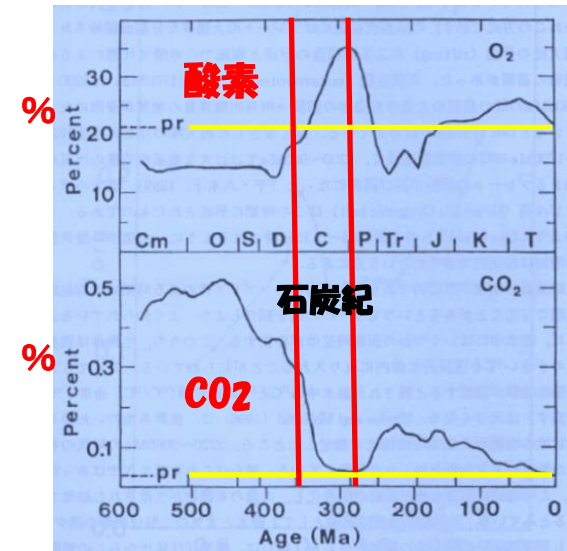
海水準における大気中の酸素濃度の推移(推定)



大酸化イベント



枯れて腐ればCO₂ は元に戻る → 石炭化で固定



石炭紀は、**高温多湿**な環境の地域が多く、植物や昆虫は**巨大化**。高湿度の熱帯ではシダ植物が径2m×高さ40m、巨大トンボの羽は70cmにも達した。

酸素濃度が非常に高く、それが昆虫の巨大化につながったと考えられている。

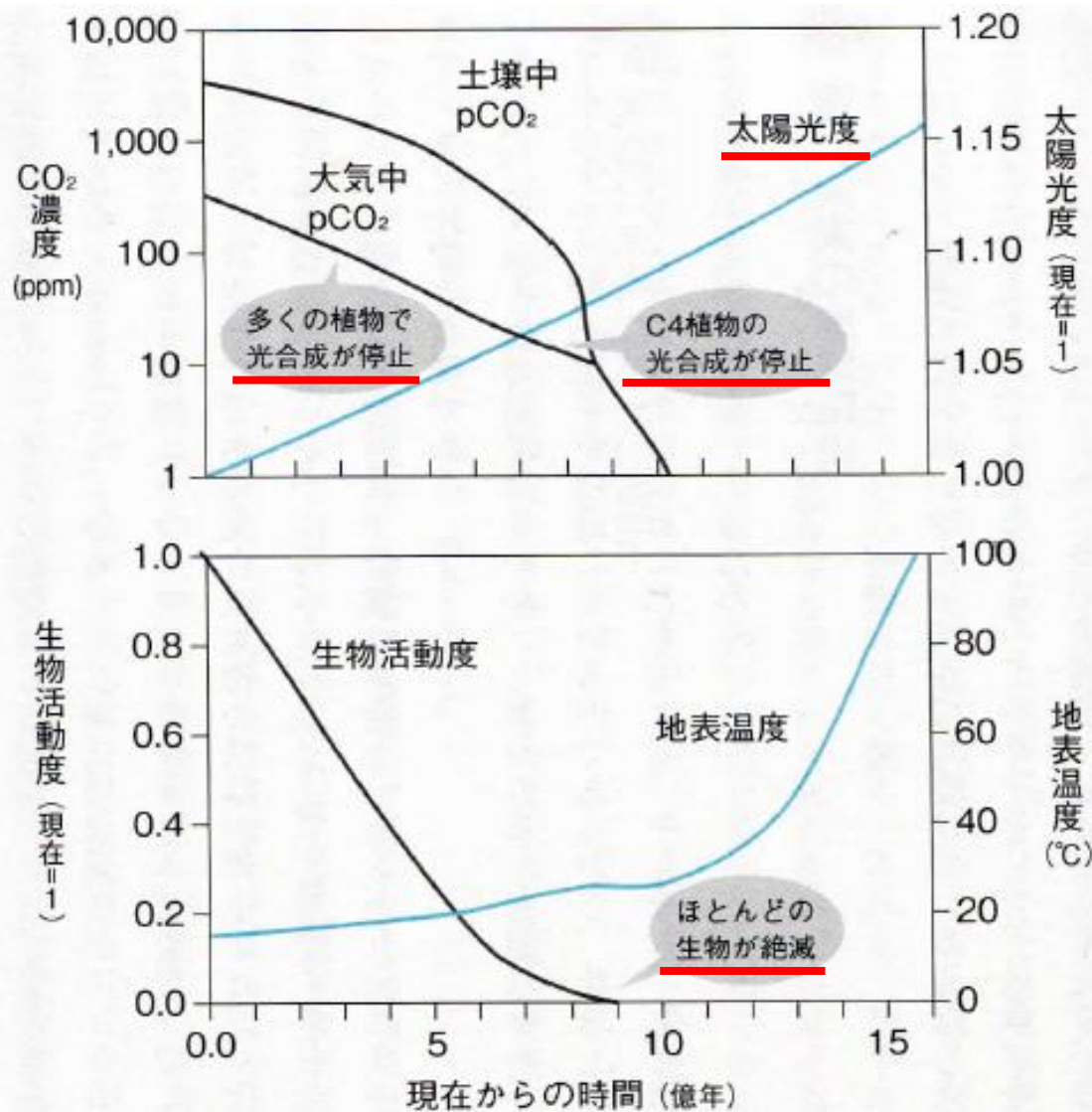
北極では氷河が形成され、石炭紀後期の**氷河期**(数百万年)によって、多くの生物が**絶滅**することになった。

石炭紀の植物の巨大化は、大気中のCO₂量(栄養分)が多かったことを、大気中の酸素濃度の急増は、植物へのCO₂の固定化(石炭量)の急増/大気中CO₂の急減を裏付けるものと考えられる。

→ **石炭は石炭紀以降の大気中CO₂を、太陽光で閉じ込めたもの。**【報告者】

最終的に地球環境はどうなるのか

遠い将来の地球環境



大気中のCO₂濃度は、短期的には増加するものの、**長期的には低下**

150ppm以下で多くの植物(**C3植物**)が光合成を停止<現在、約400ppm>

10ppm以下で**C4植物**(トウモロコシ、サトウキビなど)の光合成も停止
【約10億年後】

太陽光度が現在の1.1倍になる → 成層圏の**水蒸気**量が急増／太陽からの紫外線で分解 → **水素**が地球から逃げ出す → **海洋**が無くなる
【約15億年後迄】

太陽の寿命は約100億年
残り約50億年 → 中年期

遠い将来の地球の運命

●環境問題とは**長期的な**幸せと**短期的な**幸せの選択

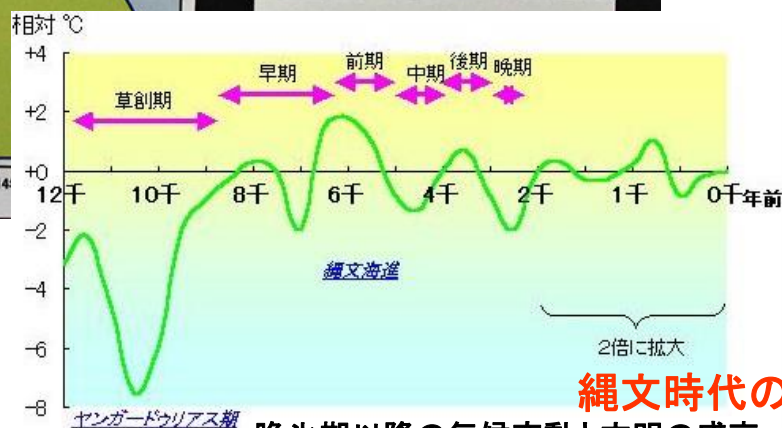
気候変動 縄文時代は1～2℃も温暖だった

【出典】品川区立 品川歴史館



- ①上大崎貝塚 (縄文前期)
- ②池田山北遺跡 (縄文早期・前期)
- ③桐ヶ谷遺跡 (縄文早期・中期)
- ④居木橋遺跡 (縄文早期・前期・中期・後期)
- ⑤大井権現台貝塚 (縄文後期)
- ⑥大井鹿島遺跡 (縄文早期・前期・中期・後期・晩期)
- ⑦大森貝塚 (縄文後期・晩期)

温暖化もあるが寒冷化もある SEJだより第15号



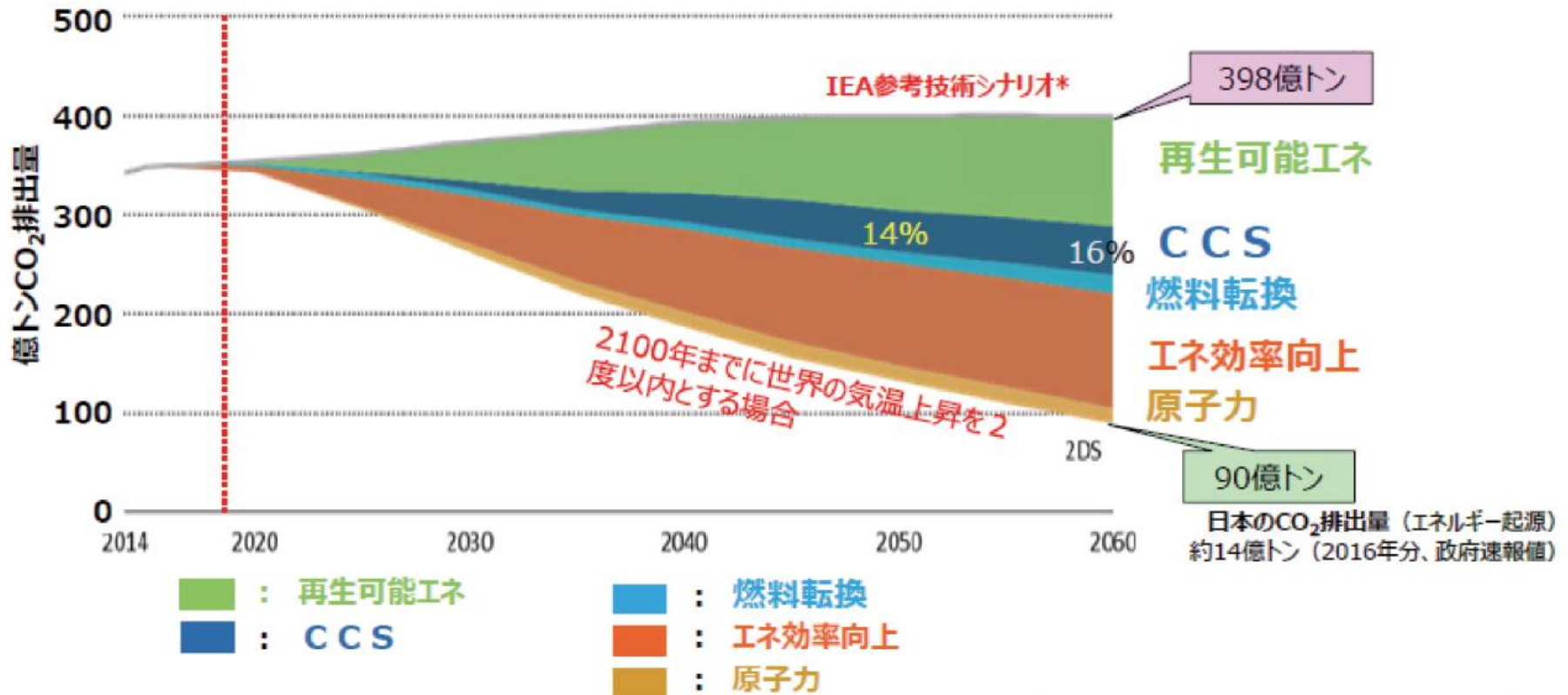
縄文時代の気温

晩氷期以降の気候変動と文明の盛衰、安田1996

大森貝塚 現在、標高約10m 縄文後期～末期(4400～2300年前)には、6～7m崖下の京浜東北線の場所まで海岸があったらしい。縄文前期の遺跡は、さらに高い標高位置にあることが分かる。縄文時代は、今から約13,000～2,300年前の約1万年。暖かく「**縄文海進**」。

世界の脱炭素の動向 (1)

2060年までの世界の累計CO₂削減量の見通し 【出典】IEA 2017年



*パリ協定に基づくCO₂排出の抑制とエネルギー効率の改善に向けた各国の現在の削減目標を考慮

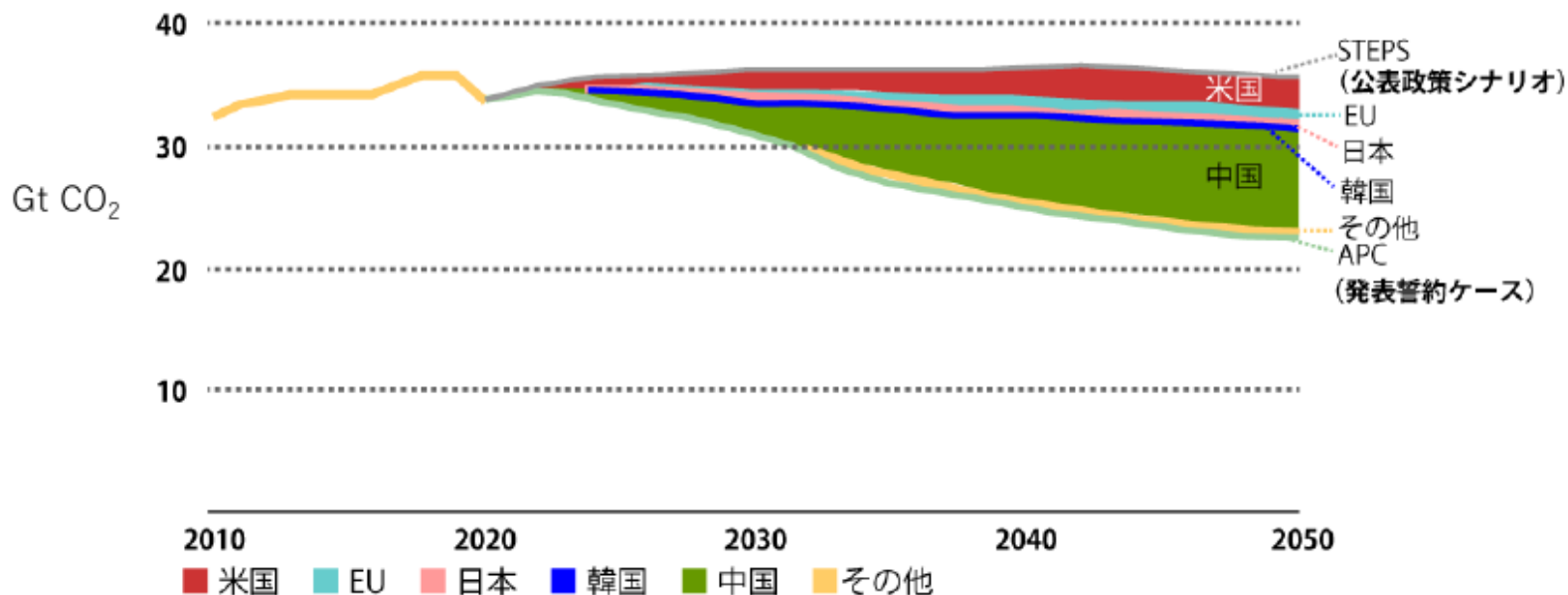
出典：IEA "Energy Technology Perspectives 2017"

再エネによる削減量3割。地域に偏在するため送配電の柔軟・安定が必要。
化石燃料改質による水素利用が2030年から増加。2050年迄の削減量の
14%見込(燃料転換)。CCSとの組合せからの水素利用も必要。「CCUS
使わずしてカーボンゼロの達成はできない」(IEA事務局長)

世界の脱炭素の動向 (2)

世界のCO₂排出量—発表誓約ケース(APC)と公表政策シナリオ(STEPS)—

Gt CO₂=10億トンCO₂



今あるネットゼロ誓約を達成すれば、2050年には世界でCO₂排出量が220億トンまで減少する。現在の政策と比べれば大幅な削減となるが、ネットゼロエミッションにはほど遠い。長期的なネットゼロ誓約を実現するためには、具体的な政策と計画が重要

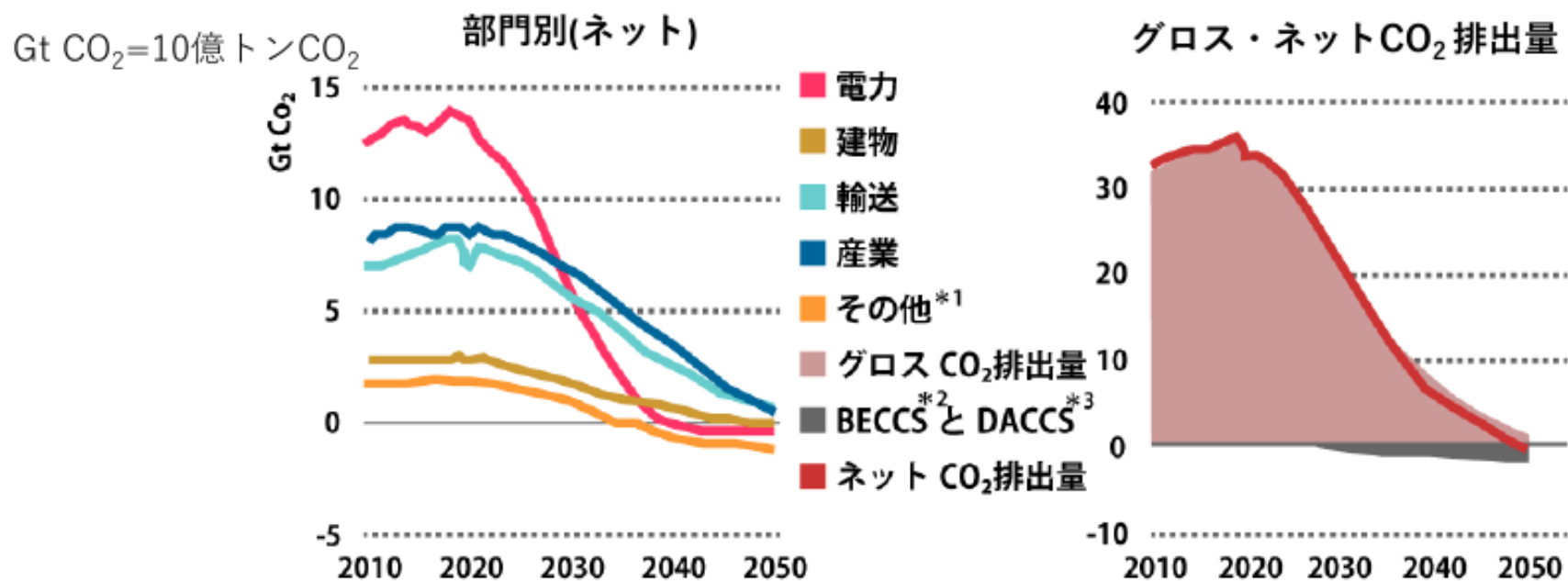
STEPS 実施されている、または政府発表政策のみを考慮したシナリオ。

APC 特定政策で下支えされているかどうかに関わらず、完全かつ期限内の達成を想定。2100年までに約2.1°Cの気温上昇(50%の確率)。

NZE 2050年ネットゼロを達成するために必要なシナリオ。気温上昇1.5°C。見通しではない。

世界の脱炭素の動向 (3)

2050年ネットゼロ排出量シナリオ(NZE)における世界のCO₂排出量



*1 農業、燃料生産、エネルギー転換、関連プロセス排出量、CO₂の直接大気回収

*2 CCS付バイオマス発電 *3 CO₂の直接大気回収・貯留

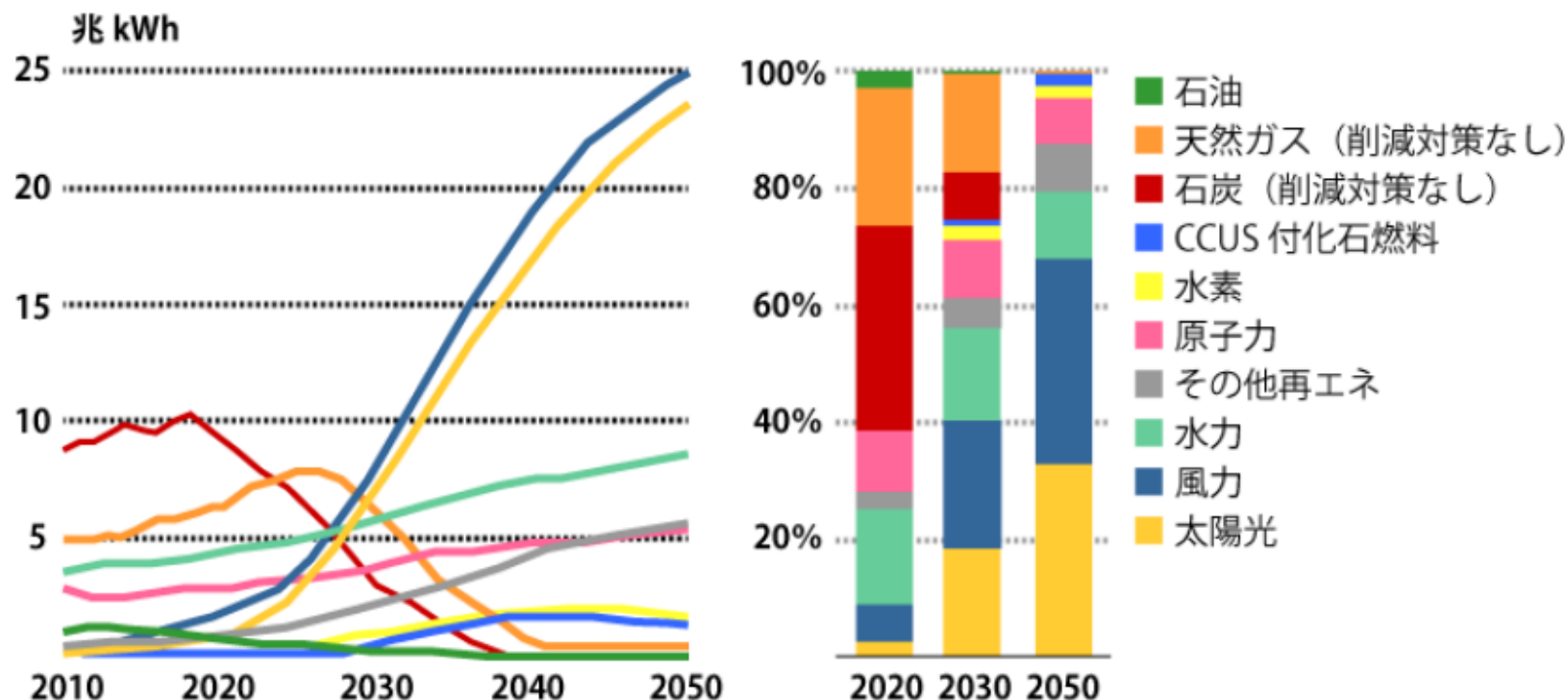
世界の排出量で最速かつ最大の削減は、最初に電力部門で見られる。発電は2020年には最大の排出源であったが、主に石炭火力からの大幅な削減により、2030年までに排出量は60%近く減少し、2040年頃の排出量はネガティブになる

NZE 2050年ネットゼロを達成するために必要なシナリオ。気温上昇1.5°Cまで。見通しではない



世界の脱炭素の動向 (4)

2050年ネットゼロ排出量シナリオ(NZE)における世界の発電量(電源別)



太陽光と風力発電が先頭に立ち、再生可能エネルギーシェアを2020年の29%から2050年までに90%近くまで押し上げる。原子力と水素、CCUSが再生可能エネルギーを補完する

2050年ネットゼロでは、50年のエネルギー需要は現在より8%減、経済規模は2倍以上、人口は20億人増加。電力は全体の50%、輸送、産業など全てで重要な役割。

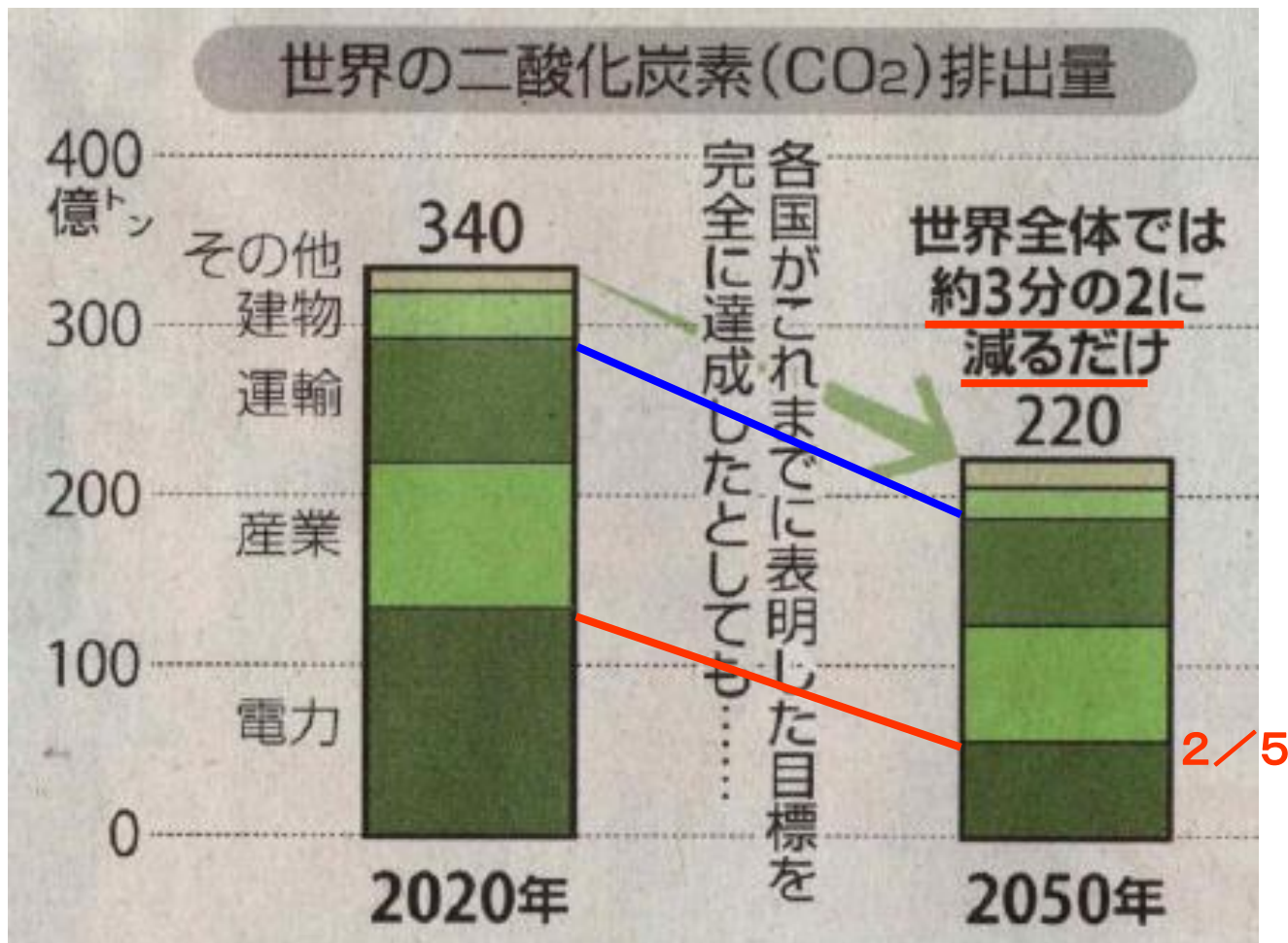
★ネットゼロでは、再エネ20年29%→30年60%→50年90% (非現実的?)

NZE 2050年ネットゼロを達成するために必要なシナリオ。気温上昇1.5°Cまで。見通しではない

【出典】NET Zero by 2050 : A Roadmap for the Global Energy Sector, IEA2021.5 (原産翻訳)

脱炭素への道は険しい(1)

【出典】読売新聞 2021.6.20 国際エネルギー機関IEA2021年5月発表の工程表



電力約2/5でも、全体は約2/3に減るだけ 産業・運輸などの脱炭素が鍵。
産業・運輸に波及する技術、電力だけでなく送配電の効率向上が求められる

【出典】NET Zero by 2050 : A Roadmap for the Global Energy Sector, IEA2021.5 (原産翻訳)



脱炭素への道は険しい (2)

【出典】総合エネ調基本政策分科会 2021.6.20 デロイトトーマス コンサルタント資料

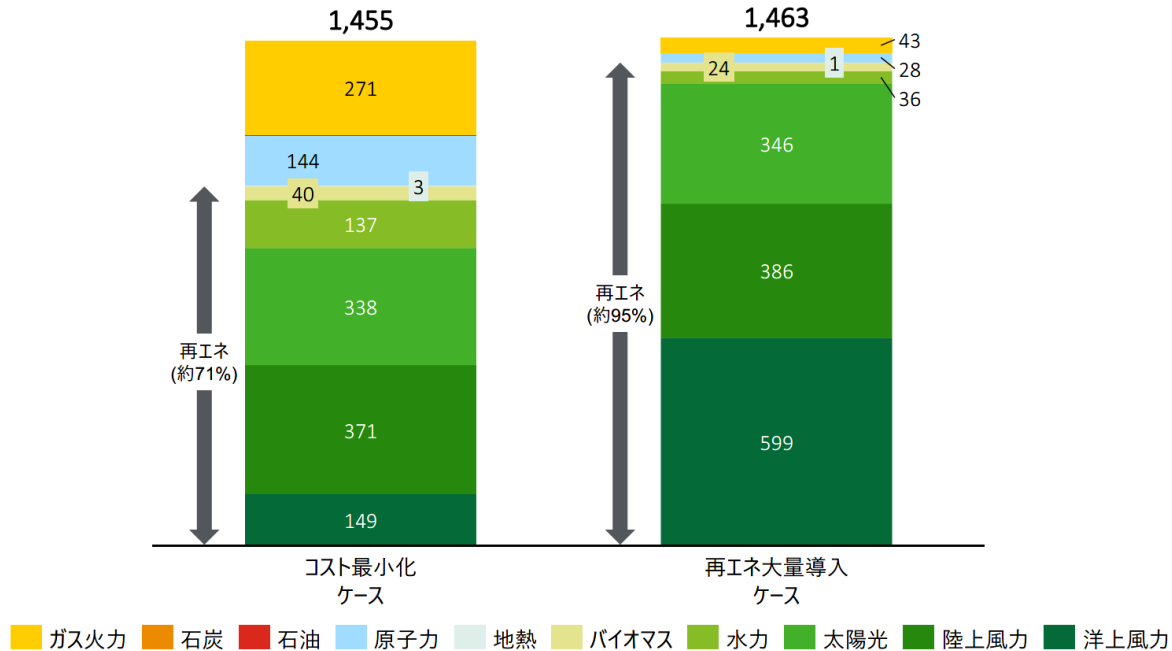
2050年電源構成参考値(分科会)：再エネ約5～6割、原子力+CCUS約3～4割、水素・アンモニア約1割を示した上で6団体から複数のシナリオ分析を求めた。

【シミュレーション結果：発電電力量】

両ケースとも発電電力量は約1,450TWhとなり、コスト最小化ケースでは再エネが約71%導入される

カーボンニュートラル社会における2050年の電源別発電電力量

単位：TWh



| シナリオ名 | CO2削減目標 | 再エネ導入量 |
|--------------|--|-------------------------------|
| ■ コスト最小化ケース | <ul style="list-style-type: none"> 2030年 46%削減 (2013年比) 2050年 カーボンニュートラル | コスト最小化の条件の下、内生的に算出 |
| ■ 再エネ大量導入ケース | | 全発電電力量に占める再生可能エネルギーの割合を95%と設定 |

脱炭素への道は険しい (3)

【出典】総合エネ調基本政策分科会 2021.6.20 デロイトトーマス コンサルタント資料

デロイトトーマス コンサルタント社は、IEAで開発された長期エネルギー分析プログラム「TIMES」を用いたシナリオ分析を紹介。両ケースで、発電限界費用は現状の約2倍、約5倍へと上昇する可能性を示し、「エネルギーシステム全体が柔軟性を持たないことが電力価格に影響する」などと指摘。

【シミュレーション結果：発電に係る費用（円/kWh）】

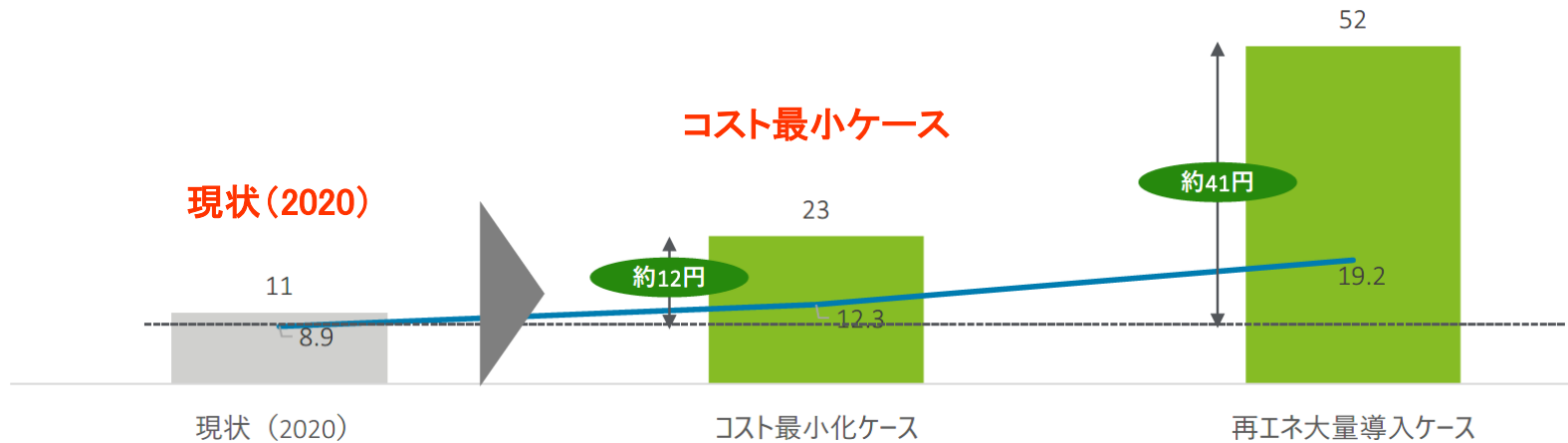
2050年のカーボンニュートラル社会では、約12円/kWhの電力限界費用上昇が起こる可能性があり、再エネ大量導入する場合は約41円/kWhまでの上昇もあり得る

カーボンニュートラル社会における発電に係る費用の比較

単位：円/kWh

■ 発電限界費用 — 発電平均費用

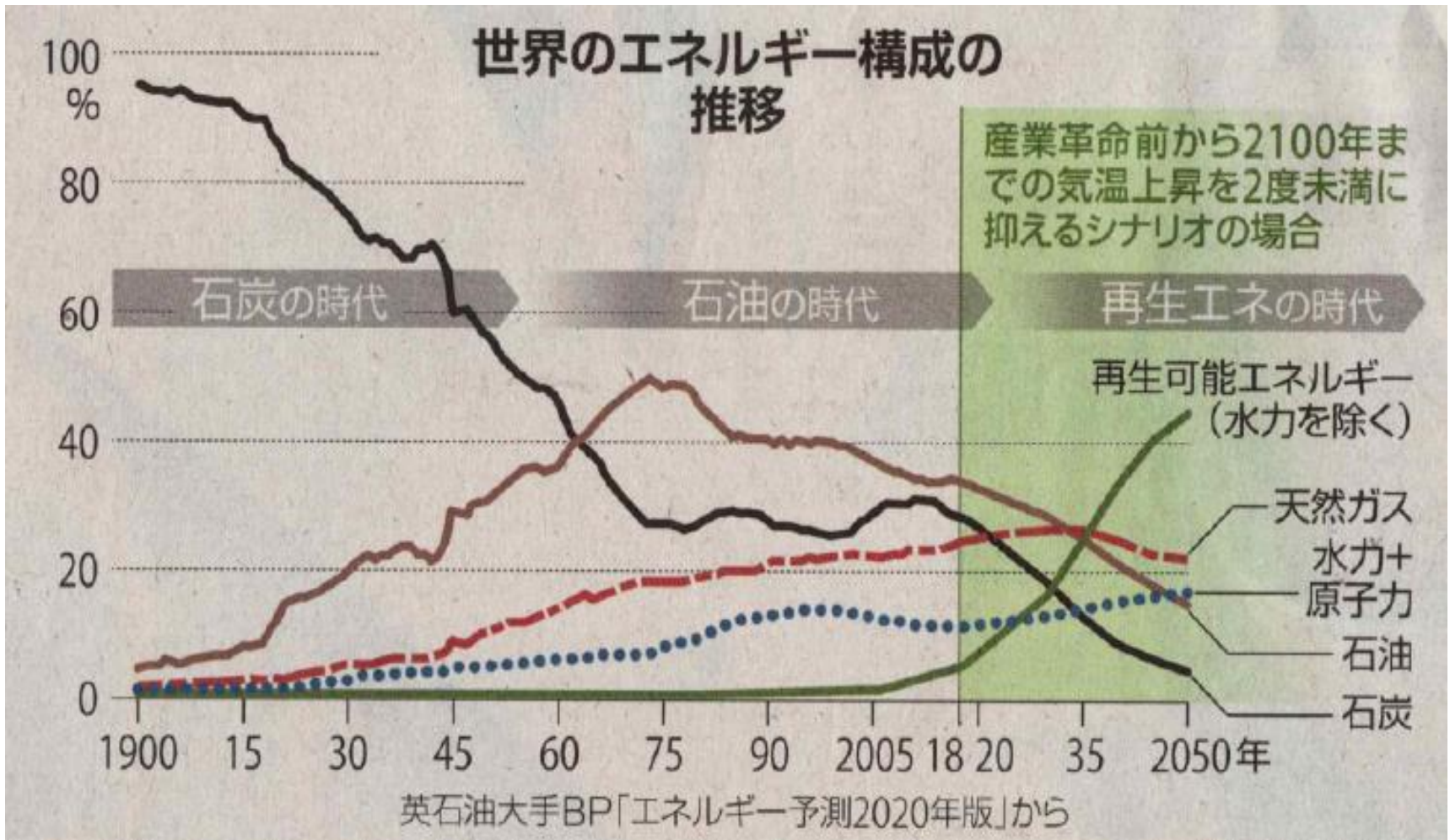
再エネ大量導入ケース



| シナリオ名 | CO2削減目標 | 再エネ導入量 |
|--------------|--|-------------------------------|
| ■ コスト最小化ケース | <ul style="list-style-type: none"> 2030年 46%削減 (2013年比) 2050年 カーボンニュートラル | コスト最小化の条件の下、内生的に算出 |
| ■ 再エネ大量導入ケース | | 全発電電力量に占める再生可能エネルギーの割合を95%と設定 |

世界のエネルギー構成の推移

【出典】読売新聞 2021.6.20 英石油大手BPエネルギー予測2020年版



政府の動向

1. **2050年脱炭素を表明**（菅首相） 2020年10月
 - ・2030年削減目標を26→46%減に上積み 2021年4月気候サミット
2. エネルギー基本計画**6次**見直し
 - ・**2030年**電源構成目標の見直し議論
3. 再エネの**課題** 不安定性・被災急増・電力需給
 - ・2021年1月大雪で電力需給が逼迫。2022年2月に電力不足？
 - ・北海道大停電は単純な発電比較では分からない 2018年9月
 - ★再エネ(太陽光、風力)普及のために**送電網の強化を決定**
北海道ー関東、九州ー本州に複数ルートを新增設
4. **CO₂フリー燃料**開発の促進
 - ・経済産業省「水素・燃料電池戦略**ロードマップ**」・・・**水素**
 - ・内閣府**SIP**「エネルギーキャリア」(2014～2018年)・・・**アンモニア**
SIP: 戦略的イノベーション創造プロジェクト

産業界の2050年脱炭素戦略の例

1. 電力（JERA） 2050年時点で排出CO₂をゼロ

- (1) 非効率**石炭**火力・・休廃止（国の方針どおり）
- (2) LNGタービン・・30年台後半**NH₃混焼**20%。40年代**専焼**に。
30年台**水素混焼**30% ～一部**専焼**
- (3) 再エネ・・**洋上風力**を中心。**蓄電池**で導入支援

2. 商社（三菱商事、丸紅）

- (1) 海外**肥料**工場を**5年後**に**発電燃料**用NH₃生産へ**転換**。
2030年日本市場の1/4規模。生産に伴うCO₂は**回収・貯留**。
輸出用岸壁は**既存**。近くにガス田・パイプライン有。
- (2) アンモニア燃料生産で生じるCO₂は、**CCS**ではなく豪州で
展開する植林・木材チップ事業で**実質排出ゼロ**に。

大手電力の2050年へ向けた取り組み

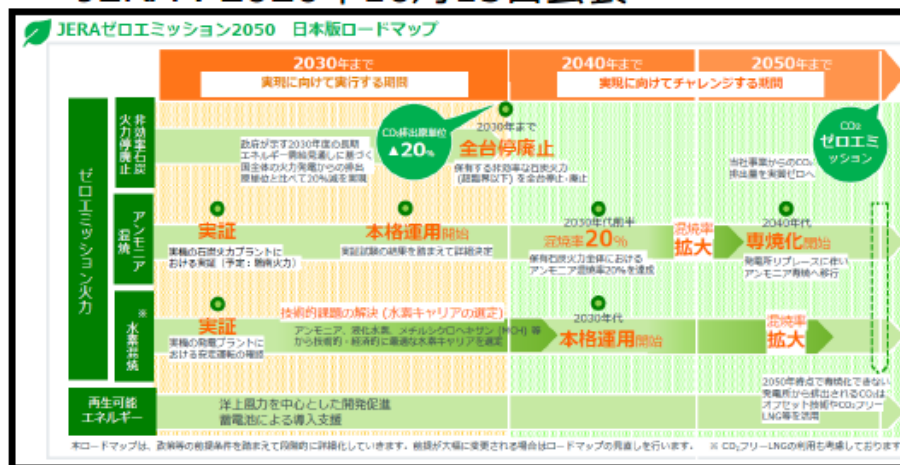
大手電力の2050年に向けた取り組み

- 2030年に向けた非効率火力削減計画を作成するとともに、大手電力各社は2050年に向け、カーボンニュートラルの取組方針を公表している。
- 社によってはロードマップを示す等、カーボンニュートラルに向けた具体的な行動指針を表明。

<取り組み事例>

・JERA：2020年10月13日公表

・電源開発：2021年2月26日公表

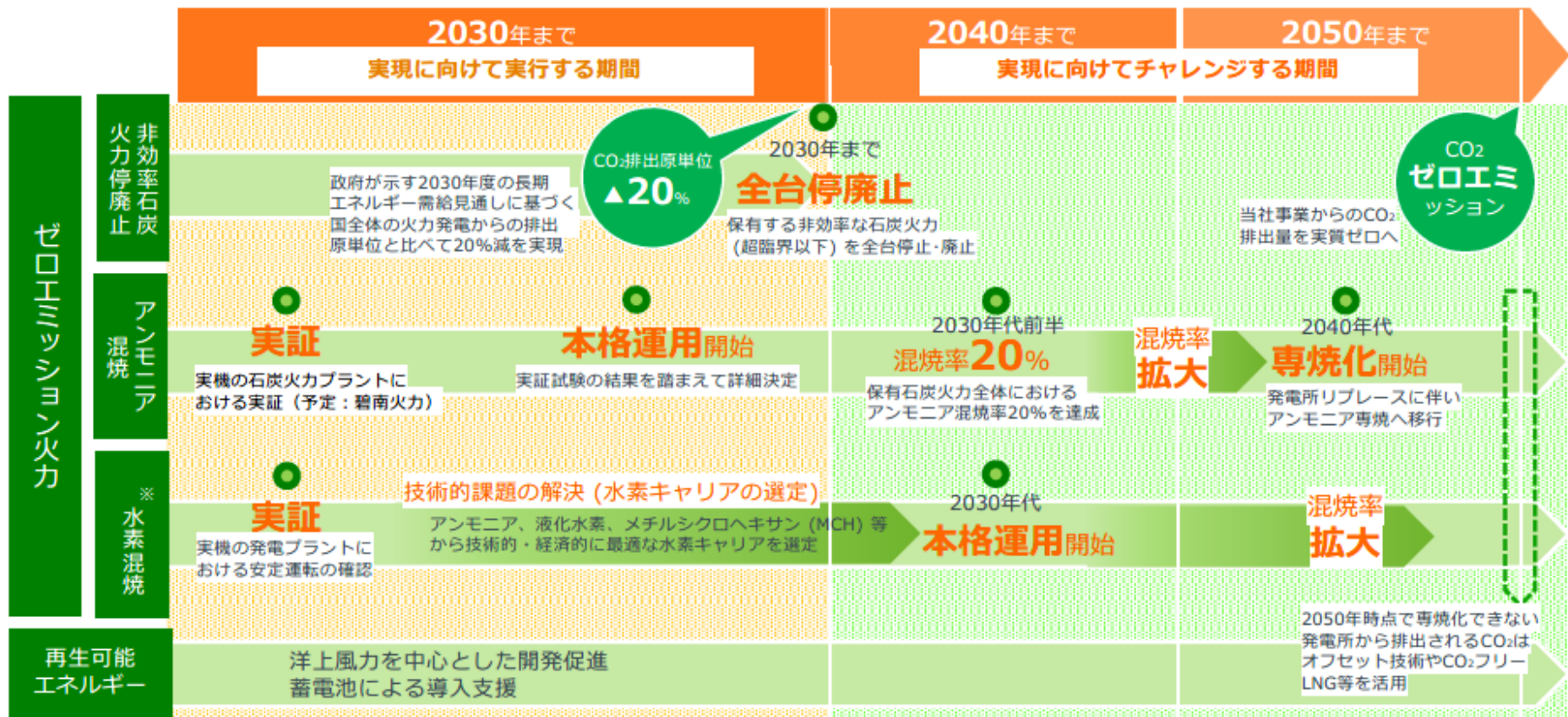


その他以下の事業者が2050年方針を公表

| 会社 | 公表日 | 会社 | 公表日 |
|------|------------|-------|------------|
| 沖縄電力 | 2020年12月8日 | 北海道電力 | 2020年3月19日 |
| 関西電力 | 2021年2月26日 | 中部電力 | 2021年3月23日 |
| 中国電力 | 2021年2月26日 | 東北電力 | 2021年3月24日 |

JERAの2050年脱炭素戦略の例

JERAゼロエミッション2050 日本版ロードマップ



非効率石炭火力・・休廃止(国の方針どおり)

LNGタービン・・30年台後半アンモニアNH₃混焼20%。40年代専焼に。

30年台水素混焼30% ~一部専焼

再エネ・・洋上風力を中心。蓄電池で導入支援

大手電力の非効率な石炭火力の割合

● 電力大手の石炭火力設備における非効率型の割合

【出典】読売新聞 2021.6.20

(網掛けは半分以上) 休廃止による影響度

| | 設備数 | 発電容量 | 休廃止による影響度 |
|-----------------------|-----|------|------------------|
| 中国 | 83% | 61% | 大 ↑ ↓ 小 |
| 九州 | 60% | 51% | |
| 電源開発 (Jパワー) | 57% | 42% | |
| 四国 | 67% | 37% | |
| 北陸 | 50% | 34% | |
| JERA (東電、 中部系列) | 22% | 19% | |
| 東北 | 20% | 16% | |
| 関西 | 0% | 0% | |

中国電、九電、Jパワーが多い。関電はゼロ
JERAは、20%程度で中位置



大手商社の脱炭素を巡る新たな動き



三菱商事が出資するインドネシア企業の工場。アンモニアの燃料活用を目指す（三菱商事提供）

三菱商事が出資するインドネシアの工場。アンモニアの生産過程で排出するCO₂を地中に貯留する計画

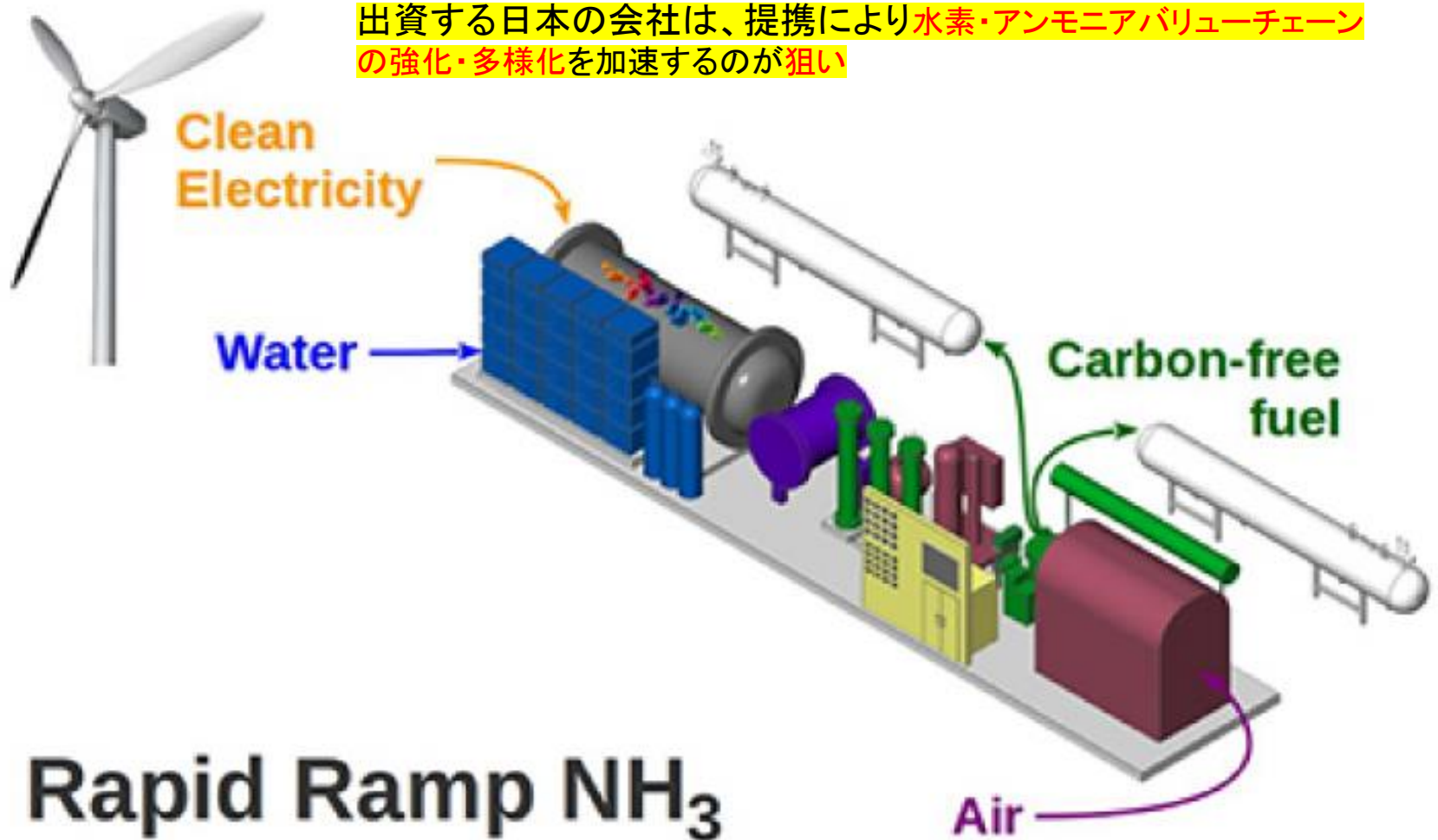
読売新聞 2021.4.7

| | |
|-------|---|
| 三井物産 | <u>CO₂の地中貯留</u> に取り組む英企業に出資 |
| 三菱商事 | <u>アンモニアの発電燃料</u> としての供給に向けて、生産時に発生するCO ₂ の地中貯留を検討 |
| 伊藤忠商事 | アンモニア生産の国内最大手・宇部興産などと、 <u>船舶用アンモニア燃料の供給事業</u> を推進 |
| 住友商事 | デンマークの海運会社などと、シンガポールで <u>船舶用アンモニア供給</u> の事業化を目指す |
| 双日 | 2050年までに <u>原料炭権益からの撤退</u> を表明 |

商社の新たな動きは、発電用・船舶用のアンモニア燃料、生産過程から排出するCO₂地中貯留、石炭権益からの撤退

分散型グリーンアンモニア製造技術の例

出資する日本の会社は、提携により水素・アンモニアバリューチェーンの強化・多様化を加速するのが狙い



Rapid Ramp NH₃

革新的触媒でグリーンアンモニアを製造する技術。カーボンフリーアンモニアが船舶や発電向けの燃料利用および水素キャリアとして重要な役割を担う

2. 再エネ等、エネルギー資源の課題

2050年脱炭素の実現可能性

【国際環境経済研究所の評価例】

達成するためのラフな需給構造[80%削減の場合] 電力分野

1. 化石燃料電源の比率を20%程度に低下させる必要。
2. 原発の新設・建替えが不可能として、既設・建設中の全原発を再稼働・稼働し、60年稼働 ⇒ 15%程度以下
3. その結果、再エネ電源比率 ⇒ 65 %以上必要となる。
原発の稼働状況によっては、65 %を上回る必要。
[100%削減の場合は、更に厳しい]

[太陽光・風力エネ導入の限界]

- ・もはや経済的に耐えられない・・・仮に全額負担なら、CO2排出1トン低減に約8万円のコスト。2019年度の買取額2.4兆円。国民1人当たり年間2万円。
- ・発電量が天候等により大きく変化。一定以上になると「調整力」として蓄電設備等（現状高額）が必要。⇒再エネの出力抑制。
⇒ 今年1月大雪で電力需給が逼迫。来年2月に電力不足？

水素エネルギーの重要性

【国際環境経済研究所の評価例】

日本は2050年までにCO2排出を**80%削減** [当時]するためには…

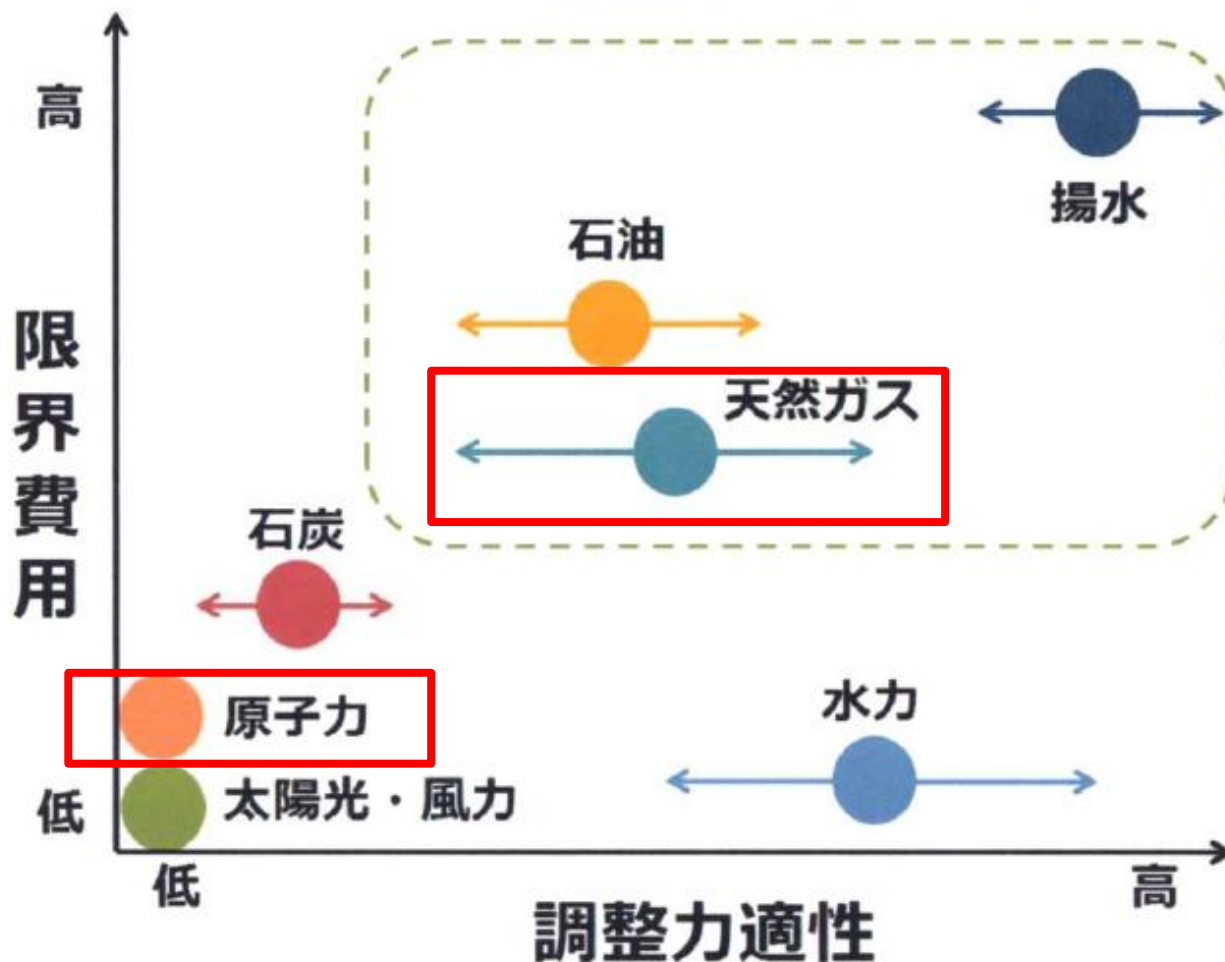
1. **再エネ**の比率を大幅に**高め**なければならないが、一定の**経済性を確保**しつつ**安定的に供給**できるとは言えない。
2. 一方、**世界**には**安価な再エネ**が大量にある地域が広範囲に存在。
3. 日本は隣国と送電線やパイプラインで繋がっていないので、**海外**の再エネに恵まれた地域から、**安価な再エネを大量に導入**することを考える必要がある。

[水素エネルギーの重要性]

1. 長距離運搬が可能な形態は、**化学エネルギー** [水素] ⇒海外の再エネ資源に恵まれた地域から**再エネを大量に導入**する手段
2. 電力システムの「**調整力**」を確保しつつ、国内再エネを含む**再エネの導入拡大**を可能とする手段
3. 日本では、エネルギー消費の**約75%が熱**、25%が電力。産業分野、熱エネルギー分野の**脱炭素化**の手段



再エネ(自然変動)大量導入過渡期に必要なガス火力の調整力

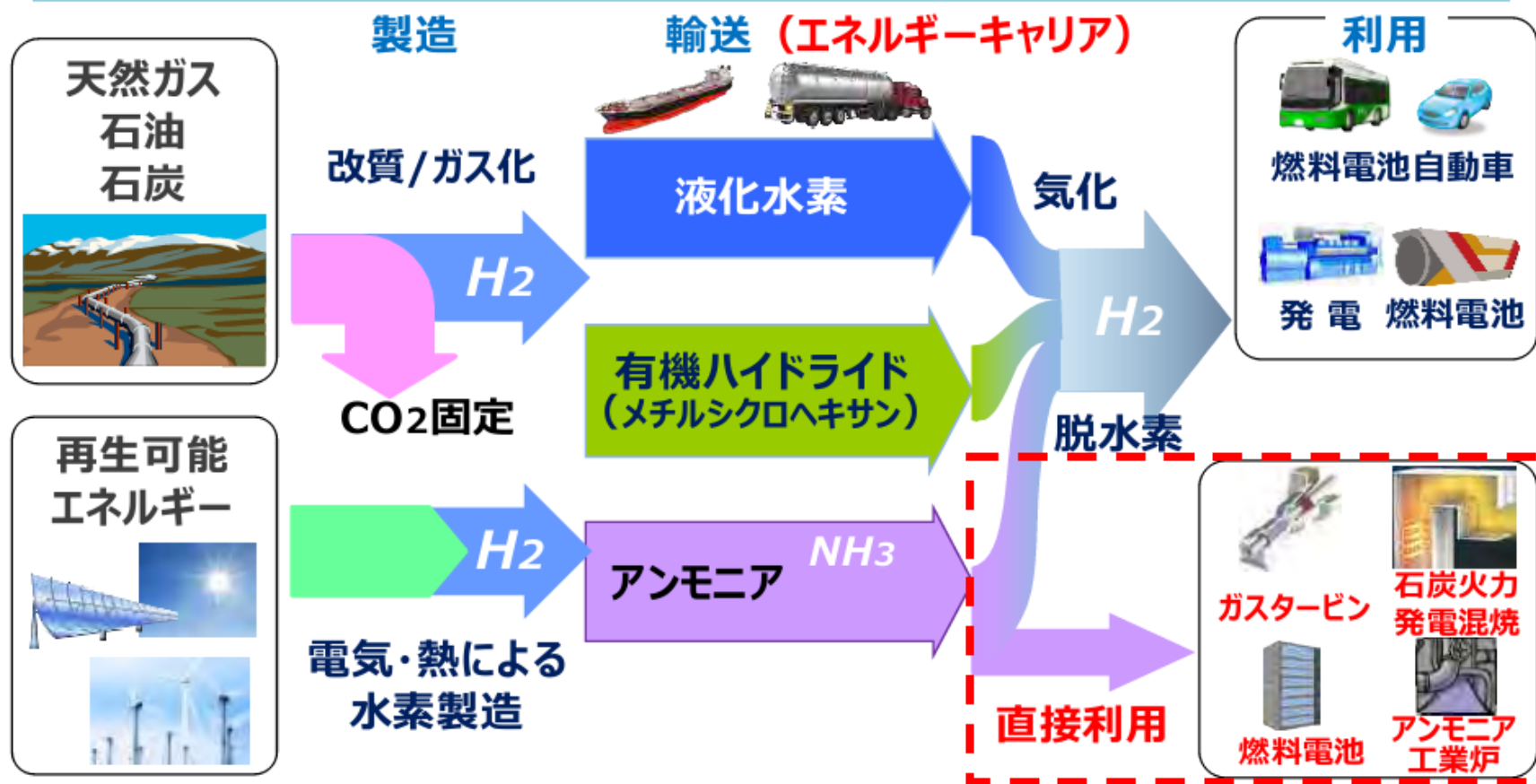


水素混焼GTは、再エネ(自然変動)大量導入過渡期の調整力と、低・脱炭素エネルギーとして位置づけ

3. 技術的・経済的に現実的な選択

アンモニア・水素による既存技術を活用した脱炭素化

水素キャリアとしてアンモニアが有利



←SIP「エネルギーキャリア」の取組により、
実用化に向け具体的な成果が出ている

<アンモニア直接利用技術対象分野>

【発電分野】

中小型ガスタービン、大型コンバインドサイクルガスタービン、
石炭火力発電へのアンモニア混焼、固体酸化物形燃料電池

【産業分野】

各種工業炉

【運輸分野】

船舶用エンジン



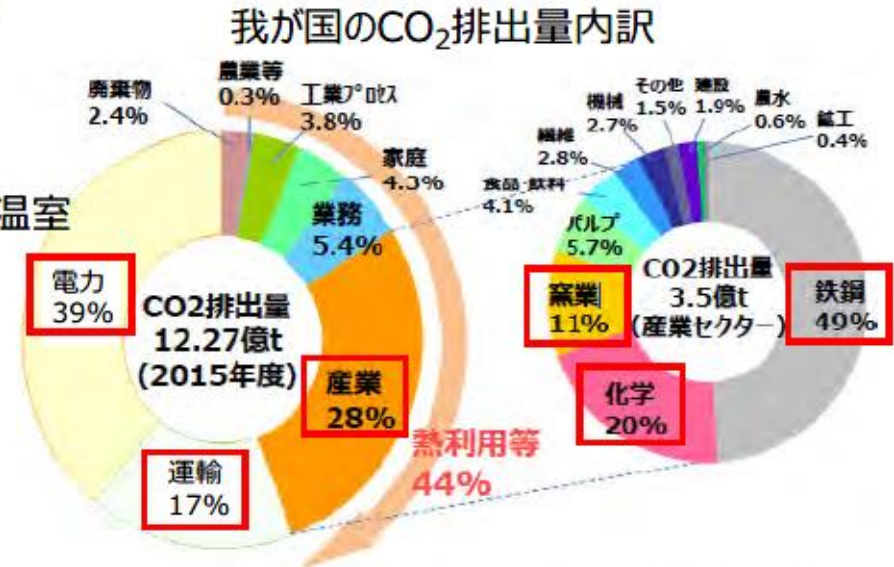
アンモニア燃料利用による社会貢献

我が国のエネルギー需給を巡る構造的課題

- エネルギーセキュリティ／自給率
- CO₂排出制約
 - ・2030年度、2013年度比26%減が目標。
 - ・パリ協定を踏まえ、長期的には2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指すことは国の重要課題

CO₂排出削減に向けた新たな取組みが必須

水素エネルギーキャリアであるアンモニアを燃料として**電力・運輸・産業**に活用



←資源エネルギー庁「第10回水素・燃料電池戦略協議会」資料より抜粋

なぜアンモニアなのか？

2050年100%削減に変更。2030年中間目標は？

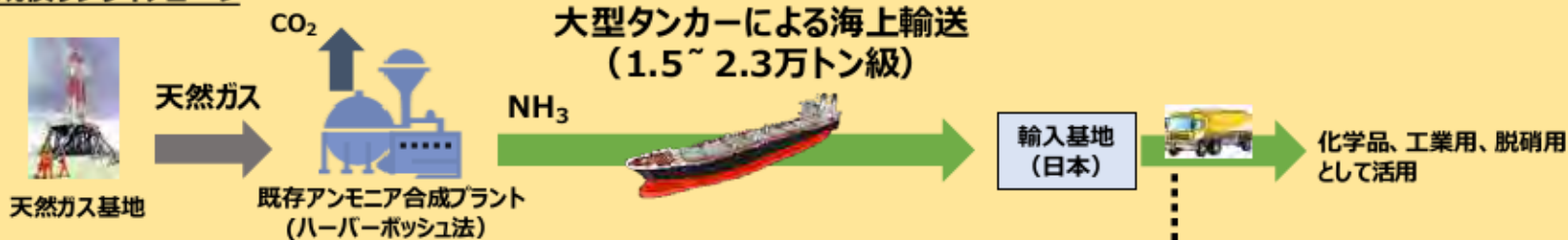
- ✓ 直接利用（脱水素が不要）が可能であり、利用時にCO₂を排出しない。
- ✓ 肥料および化学品原料用途等でのマーケットが現存し、コスト構造も明確。（アンモニア燃料市場は未開拓）
- ✓ 水素キャリアの中で水素密度が最も大きく、輸送、インフラ整備をより小規模に形成できる。
- ✓ 「水素基本戦略」では水素キャリアの中でアンモニアの導入が最も早く2020年代半ばからの導入が期待される。
- ✓ 現在、我が国のアンモニアの直接利用技術のレベルは世界最高水準にある。

アンモニアのCO₂フリー燃料としての利用技術を確立することによって、我が国における**低炭素化推進への貢献とアンモニア燃料関連産業の国際市場が拓ける。**

アンモニアバリューチェーンの現状と将来展望

■ アンモニアを大量供給するためのサプライチェーンは既に確立している

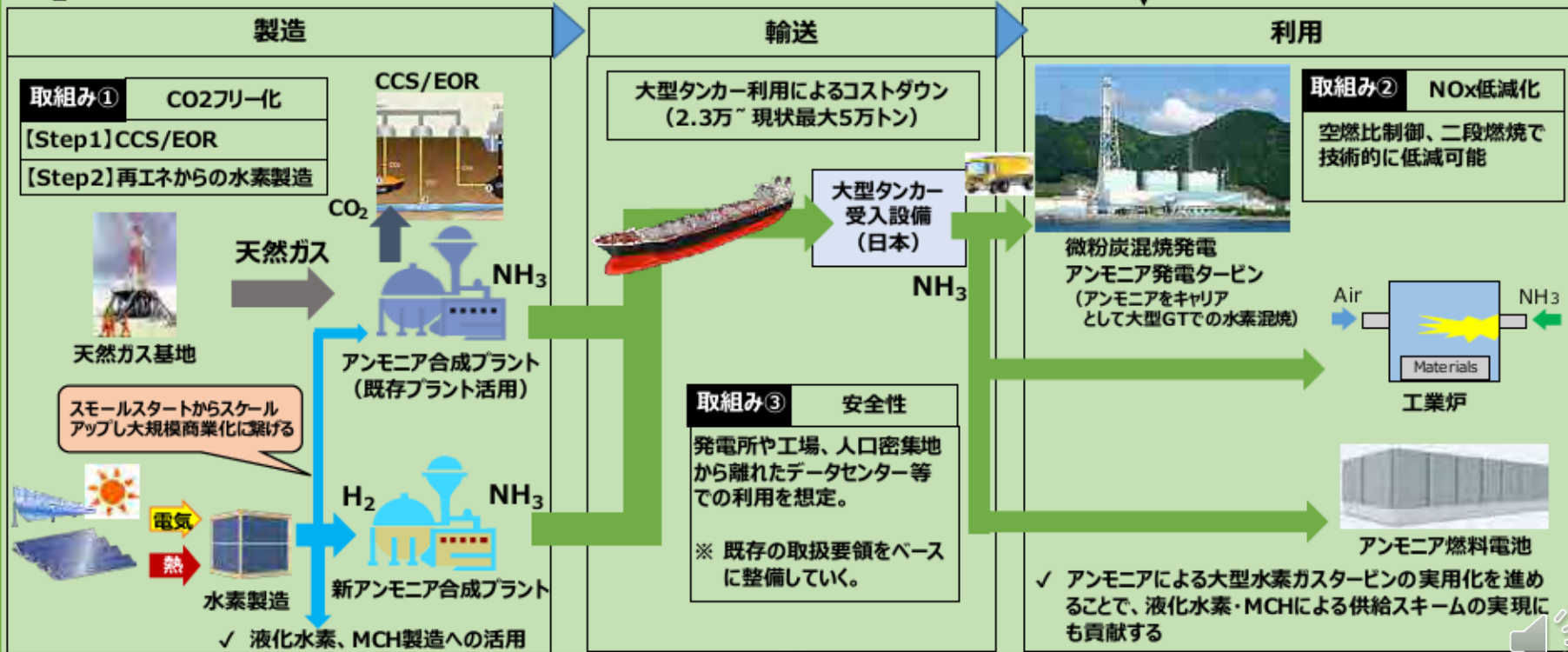
既存大規模サプライチェーン



将来目指す姿

既存サプライチェーンを活用することで
アンモニア利用分野への展開も早期に可能

CO₂フリーアンモニアサプライチェーン

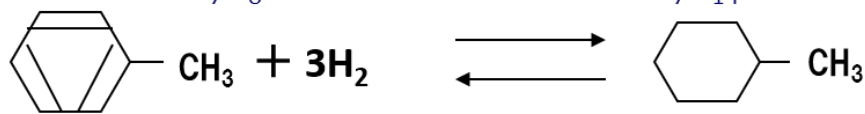


水素エネルギーキャリアの比較

第1表 各エネルギーキャリアの物性値

| | 水素含有率 (重量%) | 水素密度 (kg-H ₂ /m ³) | 沸点 (°C) | 水素放出 エンタルピー 変化* (kJ/molH ₂) | その他の特性** |
|---------------------------------|----------------|--|------------|--|-------------------|
| 液化アンモニア | 17.8 | 121 | -33.4 | 30.6 | 急性毒性、腐食性 |
| 有機ヒドライド (MCH：メチル シクロヘキサン) | 6.16 | 47.3 | 101 | 67.5 | 引火性、刺激性 |
| 液化水素 | 100 | 70.8 | -253 | 0.899 | 強引火性、強可燃性、 爆発性 |

* : MCH : トルエン (C₇H₈) (分子量92) とMCH (C₇H₁₄) (分子量98) の水素分子の差により水素を運ぶ



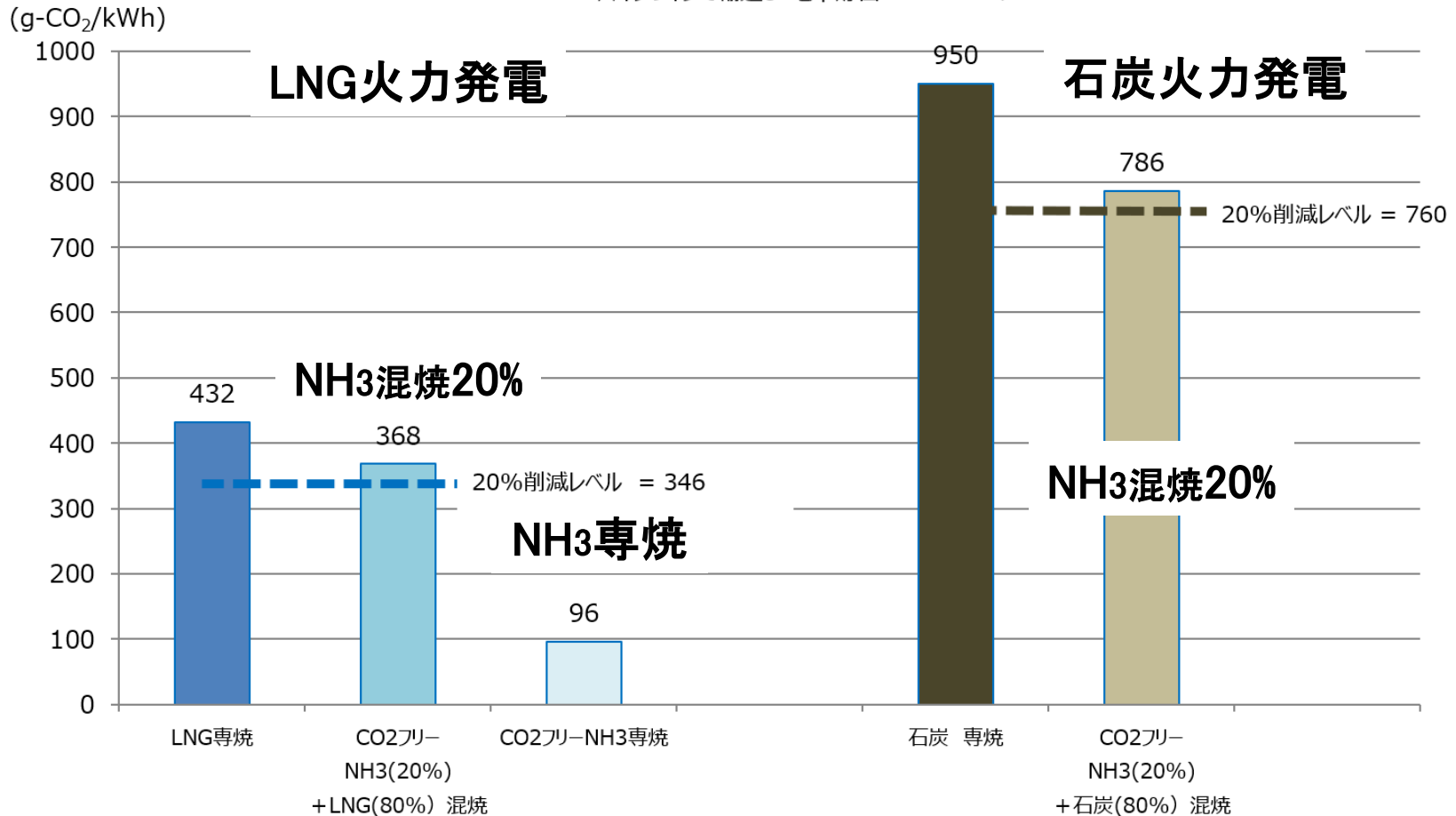
* 水素放出エンタルピー変化： 水素を取り出す際に必要となるエネルギー。

** 「その他の特性」の記載事項は、MSDSの「危険有害性情報」のサマリーから引用。各物質の正確な特性については、それぞれの物質のMSDSを参照のこと。

ライフサイクルでのCO2排出量

ライフサイクルでのCO₂排出量

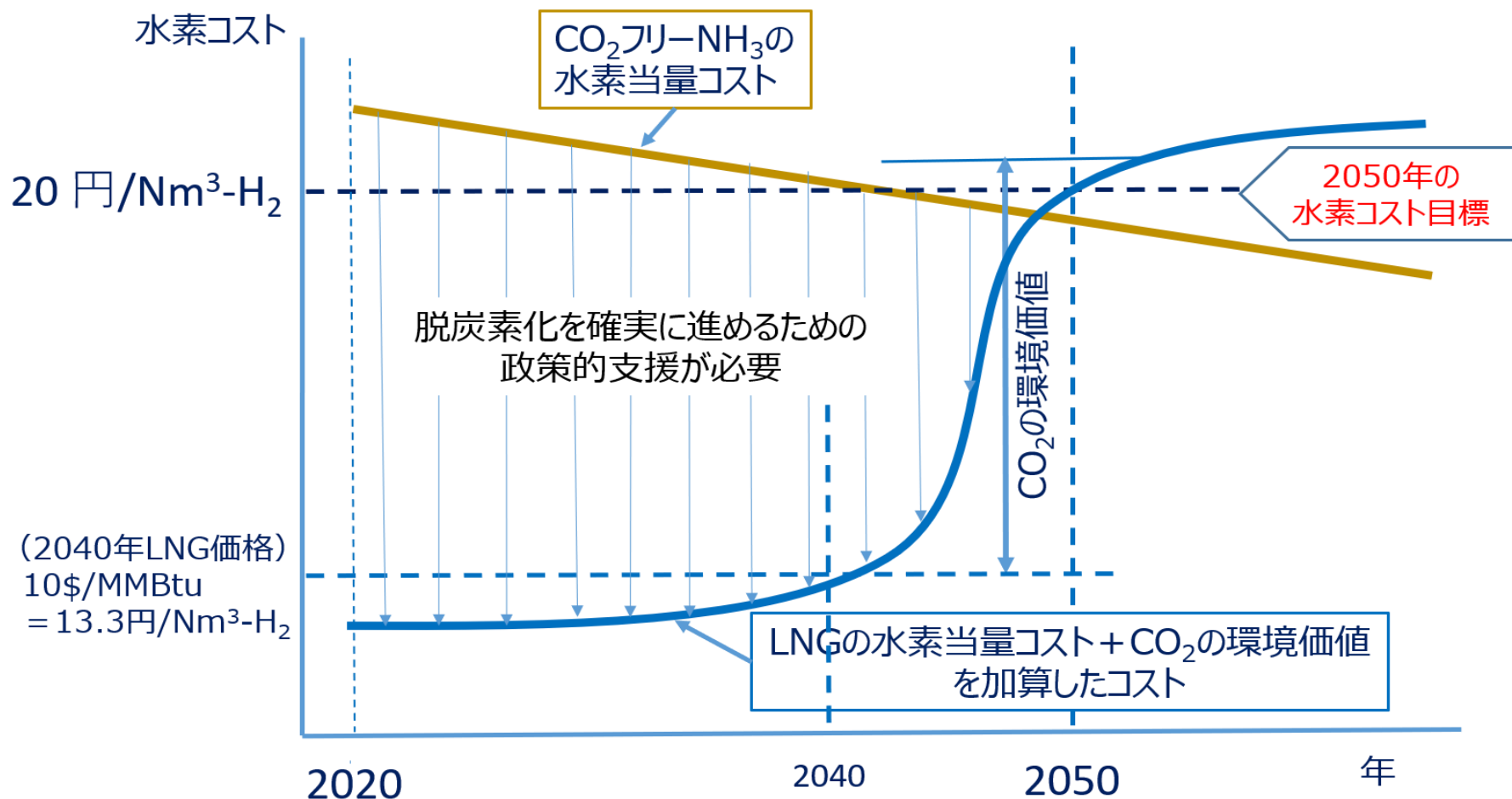
CO₂フリー-NH₃ : 天然ガスを原料とし、CCSでCO₂フリーとしたもの
プロセスからのCO₂は100%回収
煙道からのCO₂を20%回収
⇒パイプラインで輸送し・地下貯留



データ出典 : Akito Ozawa, Yuki Kudoh, Naomi Kitagawa, Ryoji Muramatsu: "Life Cycle CO₂ emissions from power generation using hydrogen energy carriers", International Journal of Hydrogen Energy, 44(2019) 11219 - 11232 の図12のデータをもとに筆者が作図。

アンモニアのLNGに対する価格競争力

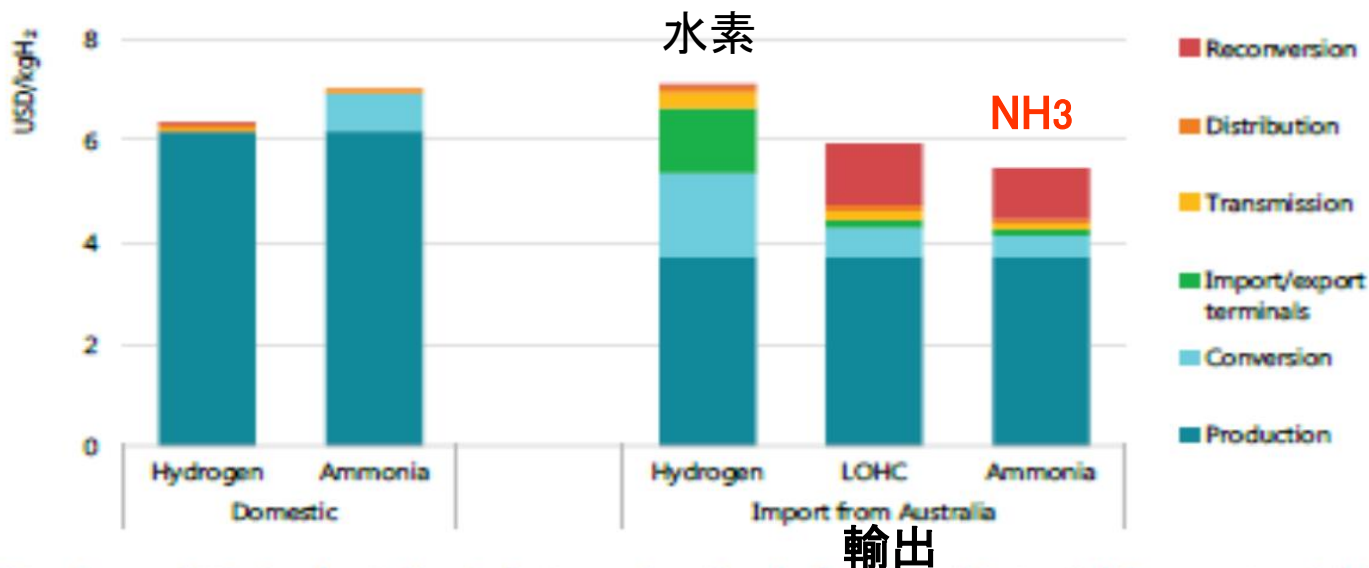
CO₂フリー-NH₃のLNGに対する価格競争力の変化
(イメージ図)



水素輸送コスト (オーストラリア～日本)

【図2】オーストラリアから日本へ再エネ水素を輸送する場合の水素輸送コスト
(水素キャリアの種類別輸送コストの比較)

Figure 30. Cost of delivering hydrogen or ammonia produced via electrolysis from Australia to an industrial customer in Japan in 2030



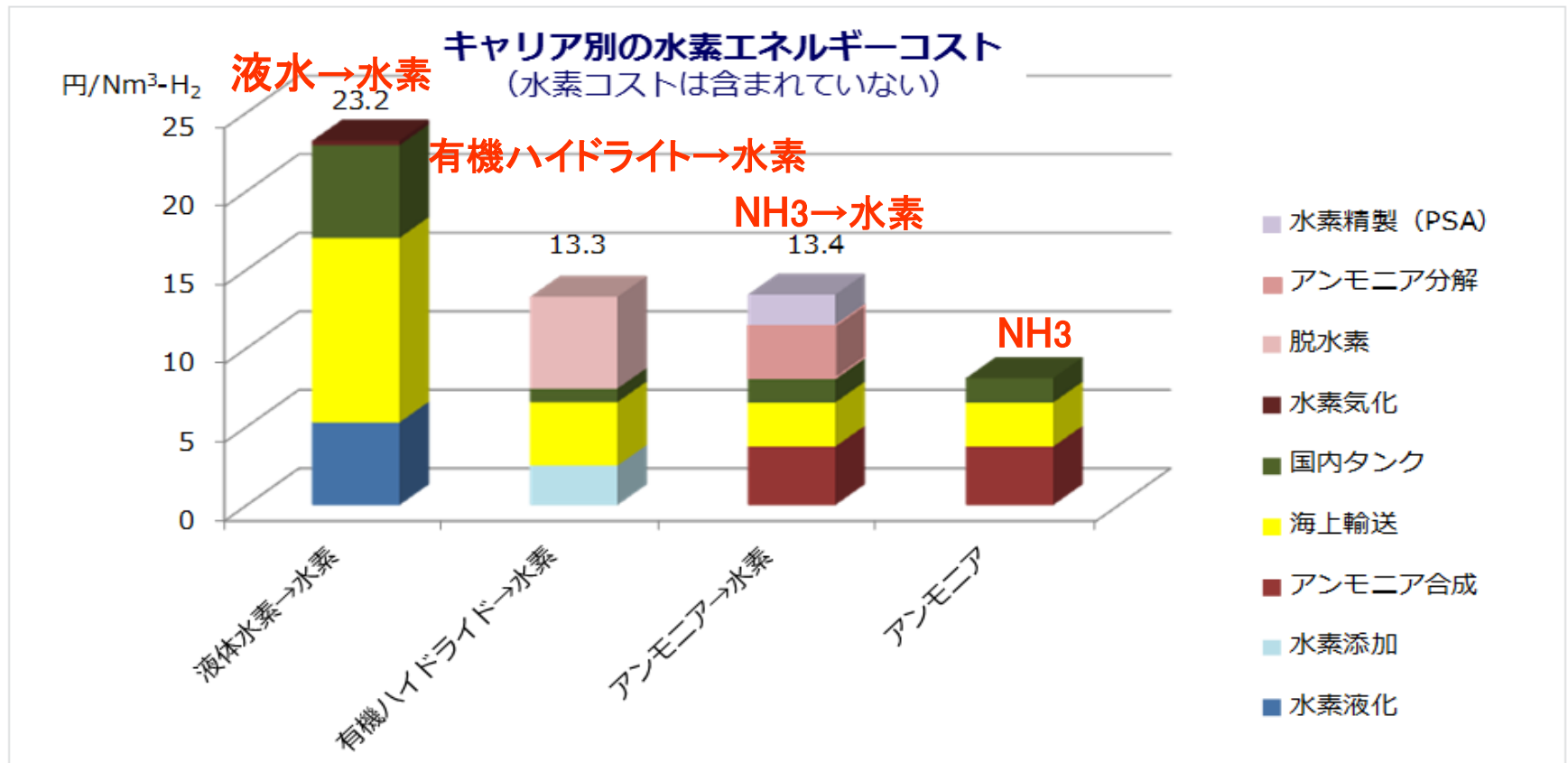
Notes: Assumes distribution of 500 tpd in a pipeline to an end-use site 50 km from the receiving terminal. Storage costs are included in the cost of import and export terminals. More information on the assumptions is available at www.iea.org/hydrogen2030.

Source: IEA analysis based on IAE (2019), "Economic Evaluation and Characteristic Analyses for Energy Carrier Systems" and Reuß (2017), "Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model". All rights reserved.

The cost of transport from Australia to Japan could represent between 30% and 45% of the full cost of hydrogen; yet imports of electrolytic hydrogen could still be cheaper than domestic production.

(出典) IEA "The Future of Hydrogen" June 2019

キャリア別の水素エネルギーコスト (1)



(出所) JST科学技術未来戦略ワークショップ

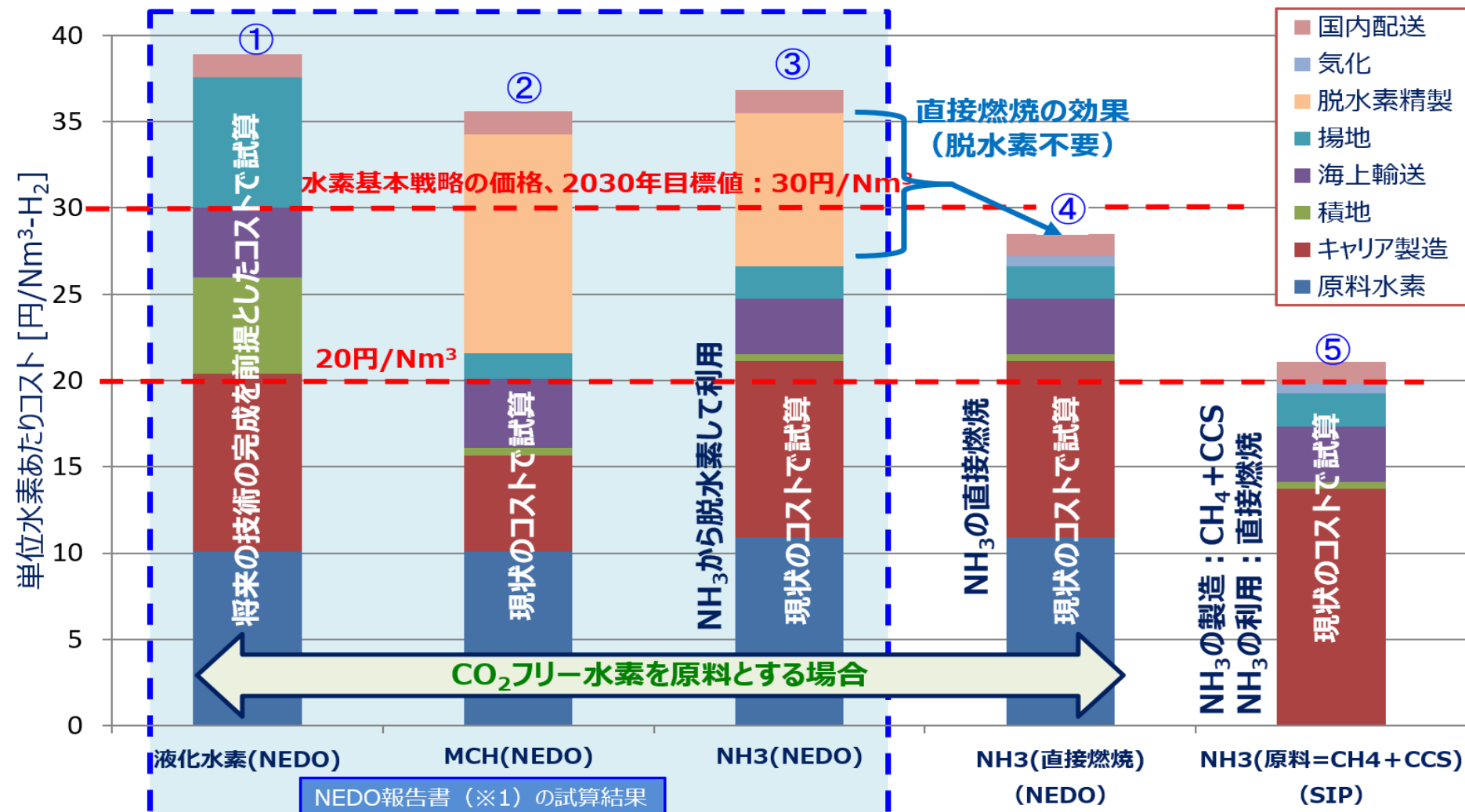
「再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギーキャリアの基盤技術」報告書
(平成24年7月28日) に収載されている (財) エネルギー総合工学研究所 村田氏講演資料)

(主な前提)

・供給生成水素量：70億Nm³/年、金利：4%、海上輸送距離：2万km

キャリア別の水素エネルギーコスト (2)

【図3】エネルギーキャリア別、水素コスト比較 (単位水素あたりのコスト)



(※1) ①～③については、NEDO成果報告書(平成26～27年度成果報告書)「エネルギーキャリアシステム調査・研究エネルギーキャリアシステムの経済性評価と特性解析」による。④は、③から脱水素精製コストを減じ、熱量当量の水素価格換算したもの。

(※2) ⑤については、上記のNEDOの検討条件に準拠し、SIP「エネルギーキャリア」にて試算。

水素ガスタービンが水素消費を拡大

- 水素焼きガスタービンにより消費される燃料水素は大規模かつ安定。
- 水素インフラ導入期においては、水素供給事業への参入リスクを下げ、インフラの拡充への波及効果が期待される。

GT 出力500MW 効率60%
20vol%水素混焼プラント 1基
水素消費量：1.4t/h



燃料電池自動車
10~13万台



100,000~130,000

20%混焼でFCV10~13万台相当の水素消費。専焼なら



アンモニア戦略ロードマップ (コンソーシアム案)

2018 2020 2025 2030 2040 2050

供給サイド

天然ガス
×CCS有

調査・FS・導入準備

CO₂フリーアンモニア導入開始

←NH₃輸入量 50万Ton/Y

←NH₃輸入量 300万Ton/Y

再生エネ由来

国内/海外輸入デモ

調査・FS・海外実証

初期導入

本格導入

利用サイド

発電

小型GT
(~1MW)

実証

初期導入

本格導入

→オリパラデモ計画

石炭
混焼

デモ

既設改良設計/実証

初期導入

本格導入

中型GT
(1~100MW)

デモ

既設改良設計/実証

初期導入

本格導入

大型GT
(100MW~)

要素
技術

主要設備開発

実証

初期導入

本格導入

アンモニア直接利用（ガスタービン発電）

現在の開発状況

(1) 中小型ガスタービン発電技術



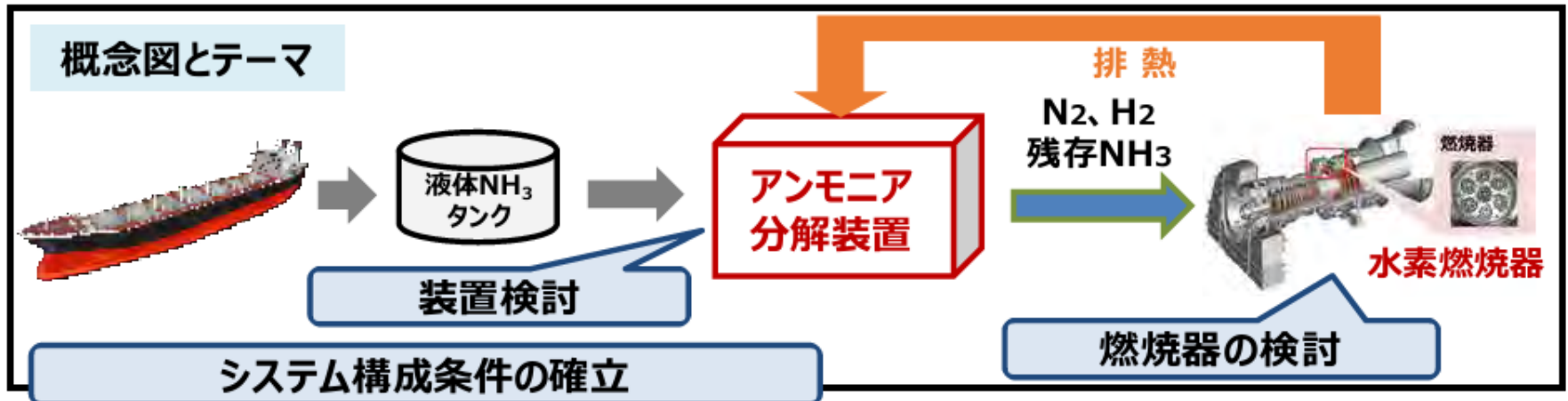
- IHI, トヨタエナジーソリューションズ、産総研、東北大

| 項目 | 50 kW | 2 MW |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------|
| 発電効率 | メタン専焼とほぼ同等 | 実証機にて H30年4月から本格的に アンモニア混焼試験開始 |
| NOx (タービン出口) | 脱硝後、 10ppm以下 | |

(2) 大型ガスタービン混焼発電技術（数百MW級）

（アンモニアを水素に分解し、水素として燃焼し発電）

- 三菱日立パワーシステムズ、三菱重工業



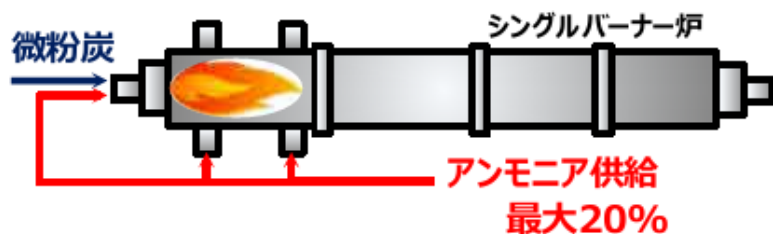
発電分野への比較的早期の水素エネルギーの導入 ⇒ CO₂排出の大幅削減

アンモニア直接利用（石炭混焼発電）

現在の開発状況

(2017年1月10日プレス発表)

(3) 石炭混焼発電技術 ● IHI, 中国電力、中部電力、東北電力、関西電力、電中研



NOx排出量を
環境基準値以下で
燃焼することに成功

CO₂排出量を
20%削減すること
に成功

| 2013年 | 日本のCO ₂ 排出量 | 下記発電所に 20%混焼した場合 | 日本での CO ₂ 排出削減量 | アンモニア必要量 |
|-----------|------------------------|---------------------|-------------------------------|-----------|
| 国全体 (※1) | 約 13.1 億トン | 石炭火力発電所 | 約 4,000 万トン | 2,000 万トン |
| 電力部門 (※2) | 約 5.4 億トン | | | |

(※1) 出典：環境省 温室効果ガス排出量算定結果

(※2) 出典：長期エネルギー需給見通し関連資料、H27.7資源エネルギー庁

国全体：約 3% 削減
電力部門：約 7% 削減
(石炭の使用量から熱量等価で試算)

今後の取り組み

既存石炭火力発電所の大幅な改造を行うことなくCO₂排出を大幅削減

- ① 燃焼シミュレーション技術の確立とそれを用いた大型化(既設発電所レベル)への適用
- ② 既設発電所での本格導入に向けた具体的設計と経済性・安定供給に向けた検討

アンモニア直接利用（石炭混焼発電）

◆既存石炭火力発電所でのアンモニア混焼発電試験 (2017年6月29日、9月8日プレス発表)

- ・ シングルバーナーでの20%混焼実証を踏まえ、水島発電所2号機（石炭ボイラー・蒸気タービン）でのアンモニア混焼発電試験に成功

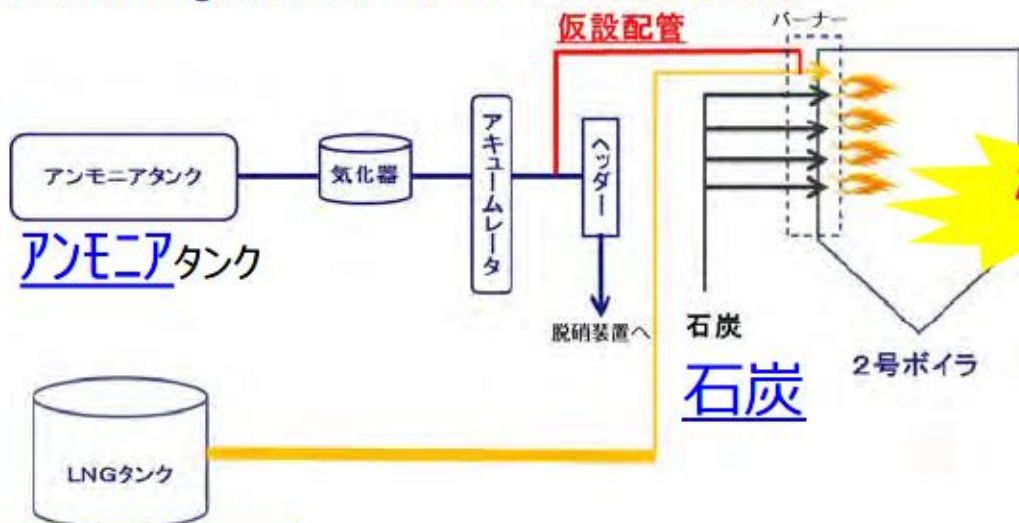
- ・ **156MW / 1MW（アンモニア燃料供給）**

燃焼は変化なく安定。

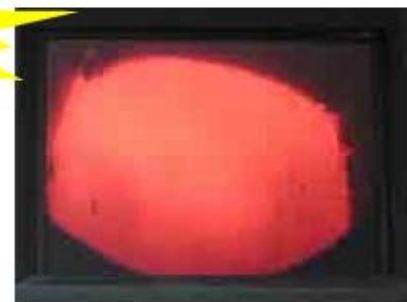
排ガス中のNH₃濃度はゼロでNO_x値の変化もなし。



中国電力 水島発電所



世界初



今後の取り組み

複数の電力会社とメーカ共同で

既設火力発電所でのアンモニア混焼システムの基本設計を実施

(外航船からのアンモニア受入、貯蔵方法、配管ルート等も含め具体的に検討)

発電分野への比較的早期の水素エネルギーの導入 → CO₂排出の大幅削減

国際展開へ向けた取組み

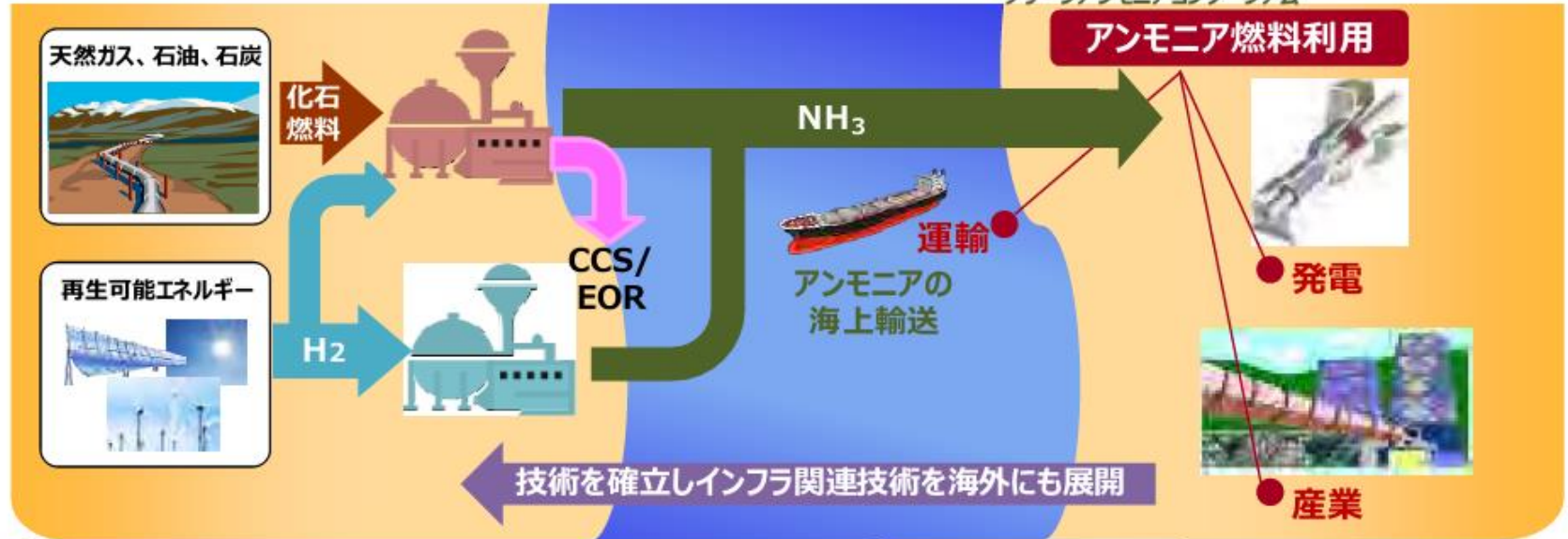
海外からの関心も高まってきており、国際連携も視野に入れた取組みを推進中

海外政府・企業

国際協力

SIP 日本政府・企業

グリーンアンモニアコンソーシアム



| | | | |
|--|-----------|-----------|-------|
| ノルウェー王国 | アメリカ合衆国 | サウジアラビア王国 | カタール国 |
| | | | |
| CO ₂ フリーアンモニアのサプライチェーン構築に向けた共同調査・研究 | | | |
| | オーストラリア連邦 | 南アフリカ共和国 | |
| | | | |
| 太陽エネルギーを利用したCO ₂ フリー水素・アンモニア製造技術の活用 | | | |

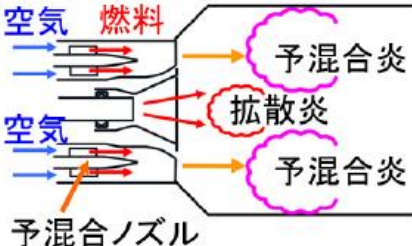
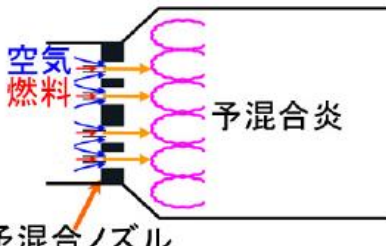
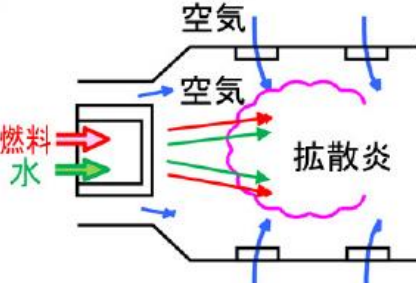
情報交換

SIPエネルギーキャリア

CO₂フリーアンモニアバリューチェーンに関する情報交換を幅広く実施（国際会議等においても積極的に発信）

4. アンモニア・水素による脱炭素技術

水素ガスタービン用**燃焼器**の技術開発状況

| 燃焼器 | マルチノズル 燃焼器 | マルチクラスタ 燃焼器 | 拡散燃焼器 |
|-------------------------------|---|---|---|
| 燃焼方式 | 予混合燃焼方式 | 予混合燃焼方式 | 拡散燃焼方式 |
| 構造 |  <p>空気 燃料 予混合炎 拡散炎 予混合炎 予混合ノズル</p> |  <p>空気 燃料 予混合炎 予混合ノズル</p> |  <p>空気 空気 燃料 水 拡散炎</p> |
| NO _x | 予混合ノズルにより火炎温度は均一にできるため、NO _x は低い | 小さな予混合ノズルにより火炎温度を均一にできるため、NO _x は低い | 燃料と空気を別々に噴射する。火炎温度が高い領域ができ、NO _x が高くなる |
| 逆火 フラッシュバック 燃焼温度 | 火炎伝搬可能な領域が広く、水素専焼時にリスクが高くなる 1650 °C | 火炎伝搬可能な領域が狭く、リスクは少ない 1650 °C | 予混合方式のような予混合部を持たないためリスクはない 1200~1400 °C |
| サイクル効率 | 蒸気・水噴射しないため効率低下なし | 蒸気・水噴射しないため効率低下なし | NO _x 低減のため、蒸気・水を噴射し、効率が低下する |
| 水素混焼比率 | ~ 30 vol% | ~ 100 vol% (開発中) | ~ 100 vol% |

開発・運用状況

2018年実績のある燃焼器で確認

実用化済み

2020年**80%**混焼の検証
2025年100 %**専焼**(計画)

開発中

1970年開発・運用開始

実用化済み

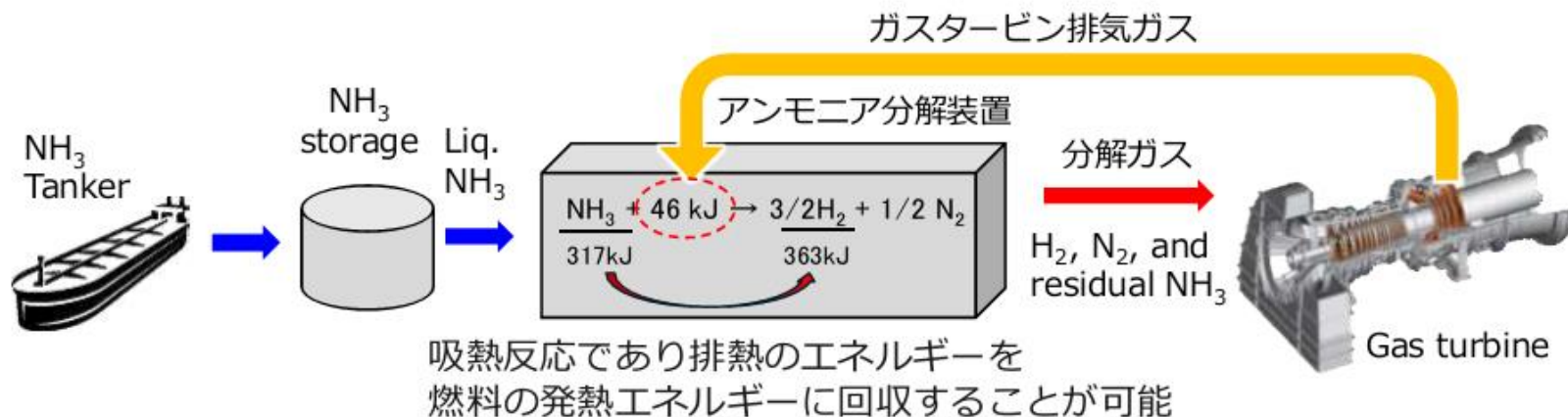
燃料別に対応する燃焼器の技術開発が課題

- ガスタービンの排ガスの熱を利用してアンモニアを水素と窒素に分解し、既に実用化されている水素混焼のガスタービン燃焼器により燃焼させる
- 将来に水素専焼燃焼器が実用化されれば、燃料の全てをアンモニア分解水素とすることも可能

予混合燃焼（ドライ式低NOX技術）

マルチクラスター（ドライ式低NOX技術）

| | Pre-mix combustor (H ₂ & LNG Co-firing) | Multi Cluster burner (100% H ₂ firing) |
|------------|---|---|
| 燃焼器 タイプ |  |  |

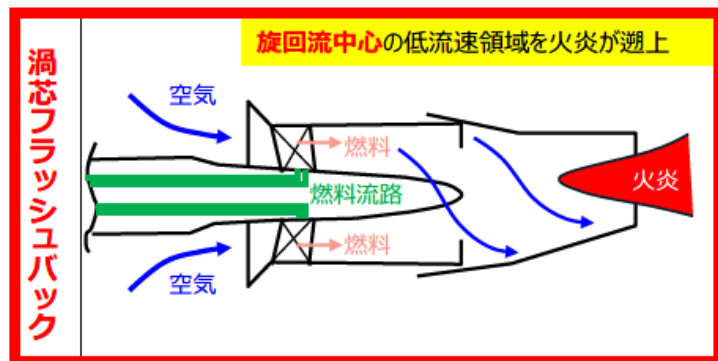


水素混焼GTは既に実用化済み

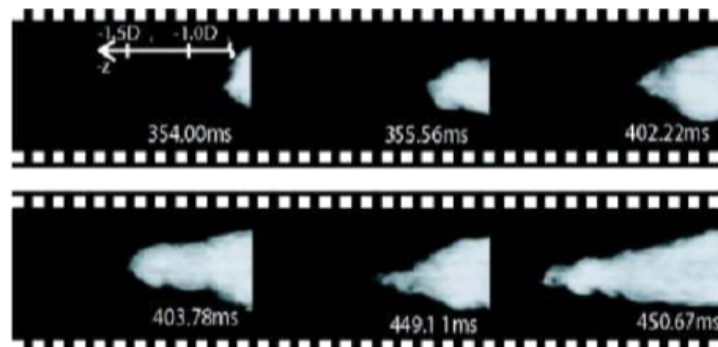
水素専焼燃焼器が開発されれば、燃料をNH3分解水素にすることも可能

燃焼器の課題は逆火対策と環境対応

旋回流(燃料混合に利用)を伴う燃焼におけるフラッシュバックは、旋回中心を火炎が遡上する“渦芯フラッシュバック”であり、水素混焼時において最も高リスクになる。

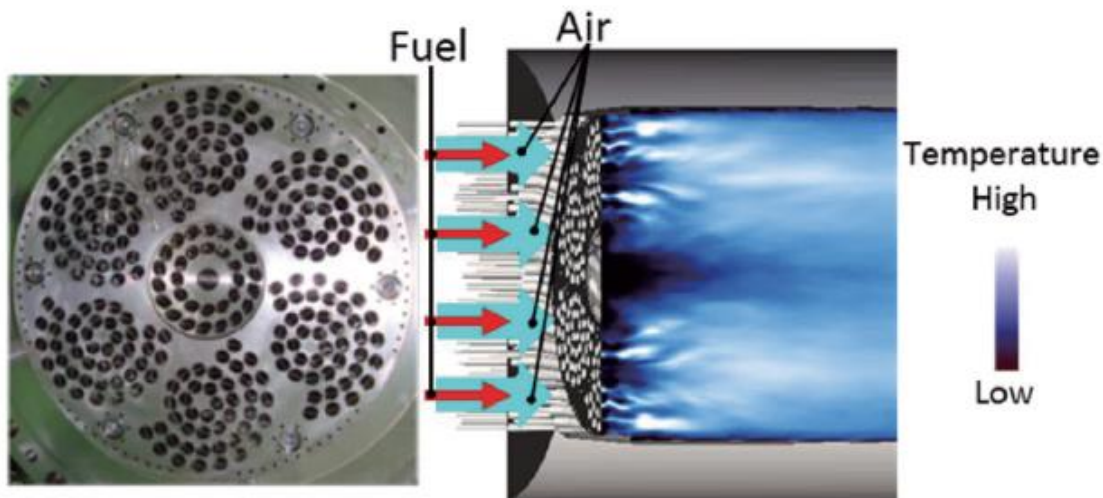


モデルバーナによる渦芯フラッシュバックの様子



参考文献

Analysis of Combustion Induced Vortex Breakdown Driven Flame Flashback in a Premix Burner With Cylindrical Mixing Zone
F. Kieseewetter, M. Konle and T. Sattelmayer
J. Eng. Gas Turbines Power 129(4) (Apr 03, 2007)

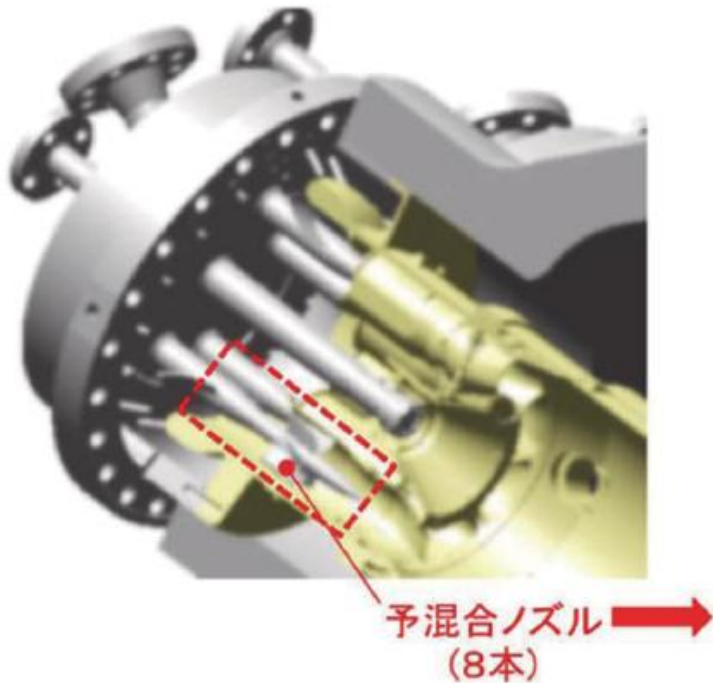


水素燃料を空気に対して同軸方向に噴射するタイプの予混合ノズル

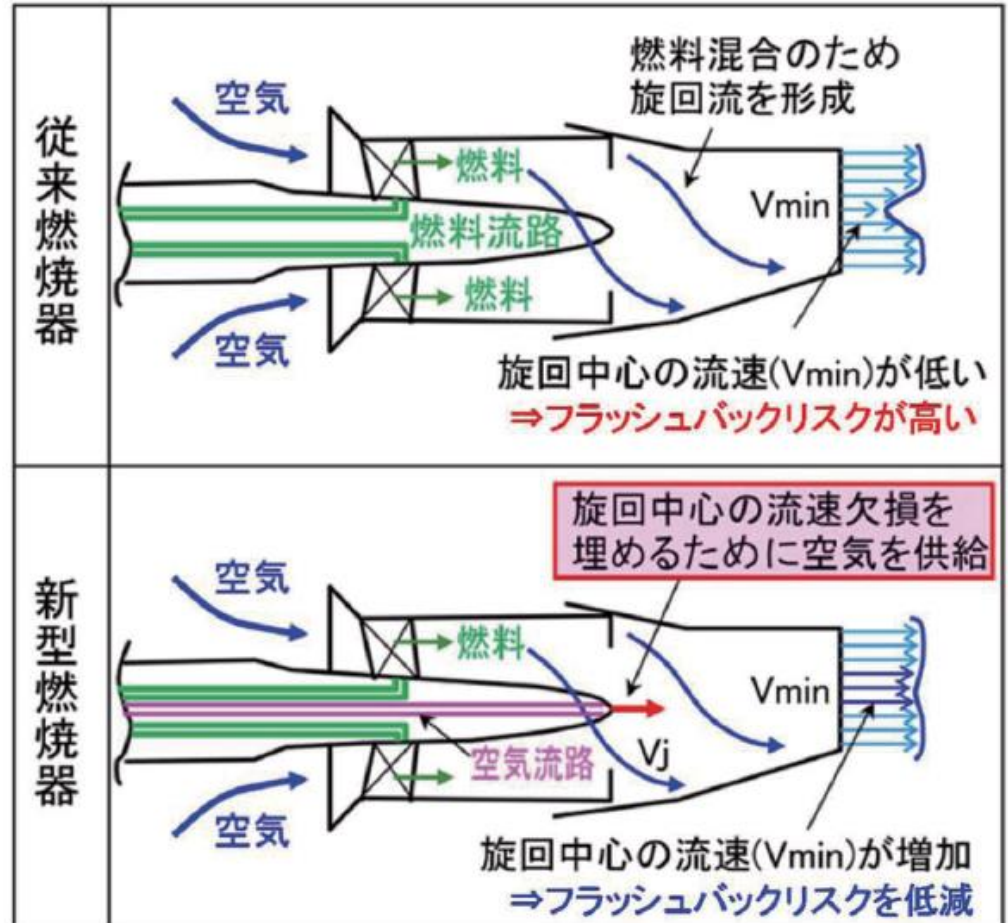


予混合燃焼器の開発例（水素混焼）

水素添加により燃焼温度が上昇。**水素混焼**によるフラッシュバック発生リスク上昇を防ぐことを目的として、新たに開発した燃焼器の概要



現在の大型GTは効率が良い、水や水蒸気の噴射を伴わずに低NOX化を実現可能な**予混合燃焼方式**が主流



水素航空機の開発



エアバスは今後、数か月の間に、水素燃料電池と水素燃焼技術などを試験実証。約5年をかけ、水素技術を開発。2020年代後半までに本格的プロトタイプを完成。2035年までに水素航空機を量産。

エアバスのゼロエミッション航空機

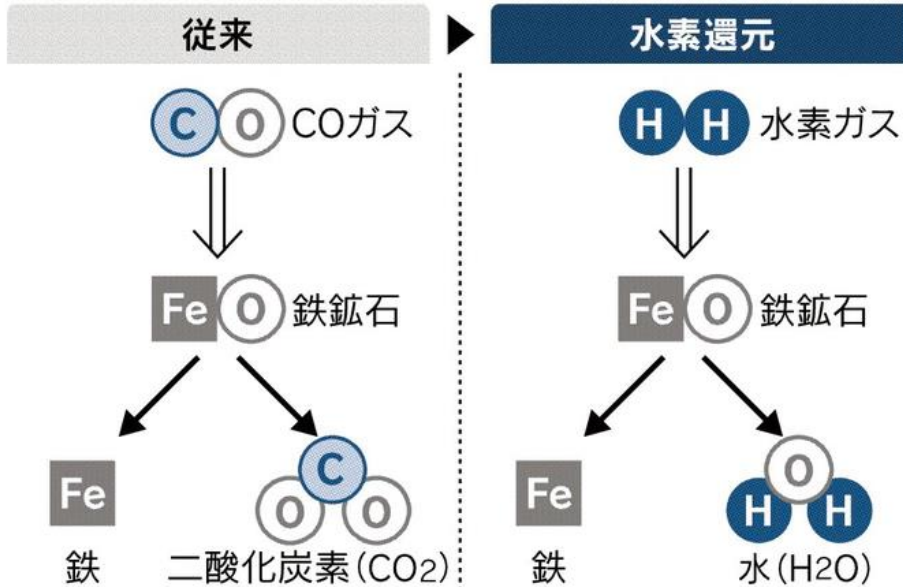
現在の航空機は、鉄道などと比べ、多くのCO₂を排出する。飛行機で1km移動するのに排出されるCO₂は、乗客1人当たり96gとされ、鉄道(18g)の約5倍[国土交通省試算] 全世界で排出されるCO₂総排出量のうち、航空輸送での排出量は約1.7% [日本航空機開発協会調査]

水素航空機は液体水素を燃料としCO₂を排出しない。水素ガスタービン技術には発電用の技術が活用でき、類似技術で開発を加速できる。経産省は専用エンジンと液水貯蔵タンクの開発に補助金で後押し



水素製鉄法

水素製鉄法のイメージ



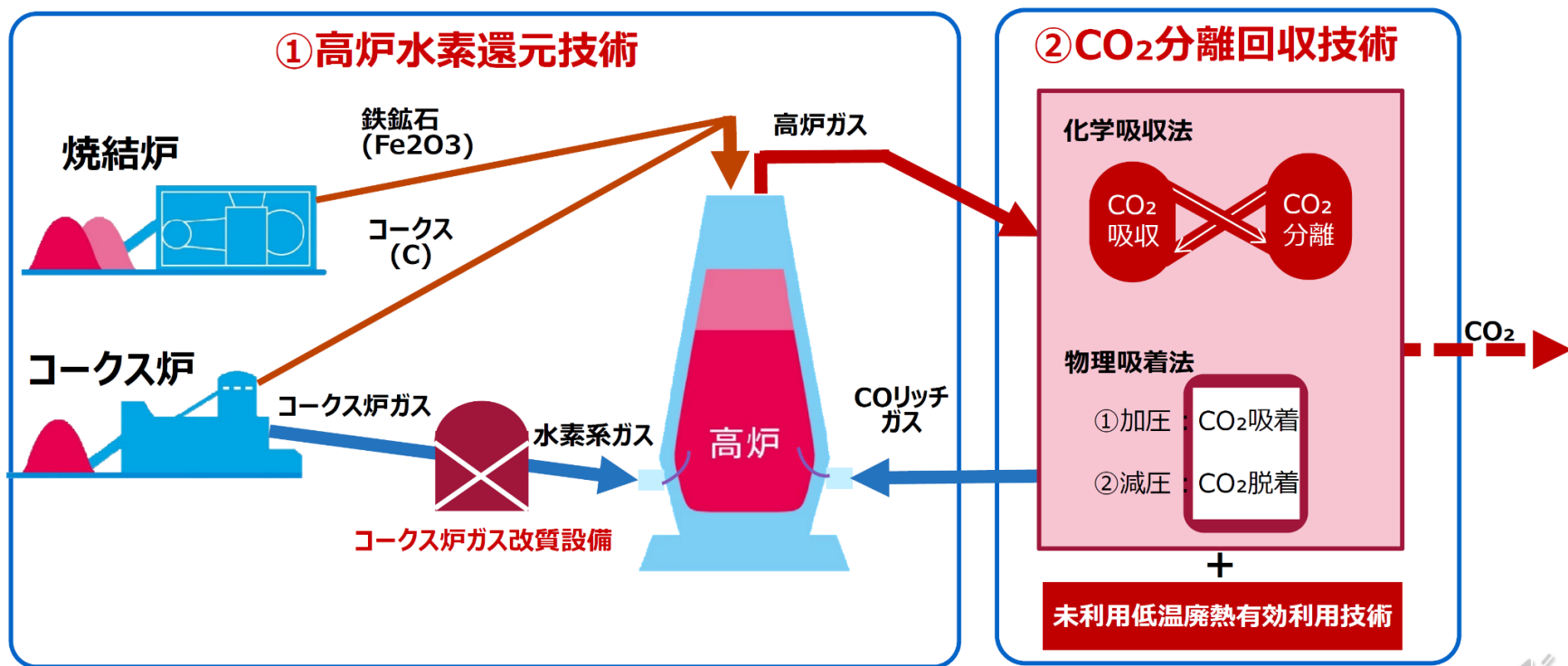
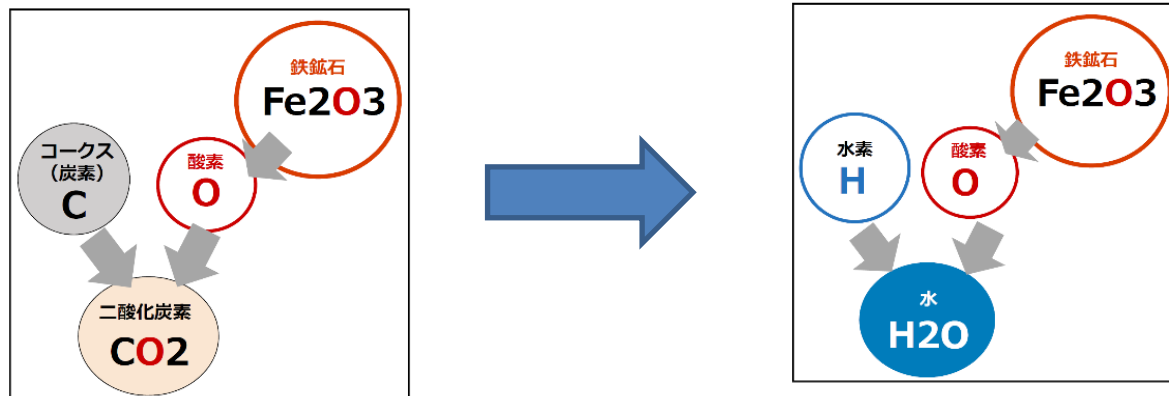
酸素を除去して鉄の強度を高める**還元工程**で、石炭の代わりに水素を利用して鉄をつくる方法。水素は酸素と結びつくため、還元に使っても水となり、理論上はCO₂が発生しない。技術が実用化されれば、CO₂排出量の大幅削減の切り札になる可能性がある。

酸化鉄である**鉄鉱石**から高炉を使い、**2,000°C以上**の環境下で酸素を取り除いて鉄を生産する。還元工程では現在、石炭を蒸し焼きにしたコークスを使用するのが主流だ。だが、コークスの**炭素**は**酸素**と結びつくことでCO₂を大量に発生する。製鉄プロセスの上工程は全体のエネルギー消費の約8割を占めるとされ、国内では2000年代から**日本製鉄**などが研究を進めている。

国内の製造業で排出するCO₂のうち、**4割超**を**鉄鋼業**が占めており、水素還元の技術への期待は大きい。ただ、研究開発に膨大な費用が必要なことに加え、水素を使うことで熱を奪う「**吸熱反応**」が発生し、**高炉内の温度が低下**するといった技術的な壁もある。



高炉水素還元技術



まとめ 柔軟で安定な低・脱炭素移行戦略

2050年脱炭素のために

1. 既存発電技術の低炭素化を図る移行戦略が必要
2. その中で、再エネの課題を直視し、再エネの調整や利用拡大にも寄与し、既存設備を活用した経済的CO₂フリー燃料[アンモニア]への転換を適切に考慮
3. 発電だけでなく、送配電系統、CCSUや蓄エネを含めた総合的で現実的な比較評価が必要
4. 戦略選択の前提として原子力の位置づけの明確化が必要

アンモニア・水素により既存設備を有効利用して現実的な「脱炭素」をめざす

ご清聴ありがとうございました