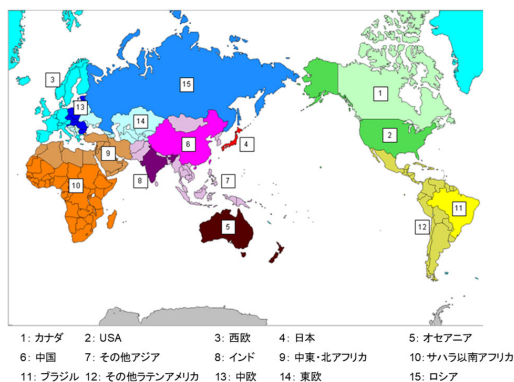


## 水素需要推算

シナリオ研では、継続して統合評価モデル GRAPE のエネルギーシステム分析モジュールを用いた水素の需給を含むエネルギー需給の分析を行った。このモデルは世界を 15 地域に分割し、地域間のエネルギー資源の貿易を含む各地域のエネルギーシステムを取り扱い、資源量や CO<sub>2</sub> 排出量の制約の下、世界全体のエネルギーシステムコストを最小化するモデルである。

## GRAPE モデル概要

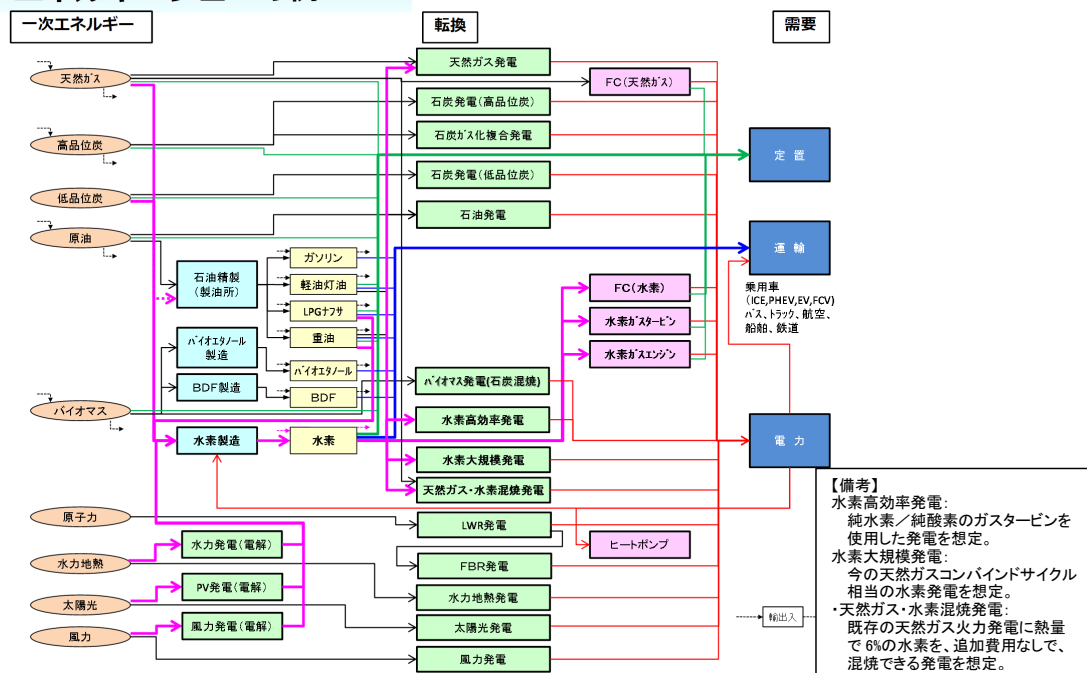
- 統合評価モデルGRAPEのエネルギーモジュールを用いて、2050年までの日本の水素需要を評価。
- 水素製造は2020年から日本国内の他、海外14地域からの輸入が可能と設定。
- 水素の需要先は、2020年から先進地域（カナダ、米国、西欧、日本、オセアニア）と2030年から中国、インド、ブラジル、ロシアの運輸（FCV）、発電（大規模発電）、定置（水素コジェネ、直接燃焼）。



- 発電、運輸、定置の各部門のエネルギー需要を推計
- 想定するエネルギーフロー、利用可能な技術オプションのパラメータを設定
- CO<sub>2</sub>制約等の制約を満たし世界全体のエネルギーシステムコストが最小になるようなエネルギー需給構造を探索・決定。
- 世界地域別のエネルギー需給、CO<sub>2</sub>排出などの諸量を出力
  - エネルギー供給構成
  - 需要構成
  - 転換構成（発電等）
  - CO<sub>2</sub>排出量、CCS量
  - 等

本モデルは、様々な制約条件の下、世界全体のエネルギーシステムコストを最小化している。したがって、計算結果は、実世界の予測を示すのではなく、2050年に世界のCO<sub>2</sub>排出を半減している「規範的な姿」を示しているをご理解いただきたい。

# 1.モデルの概要 エネルギーフローの例



本研究会におけるエネルギーモデルを用いた水素需要分析の経緯

年	主な内容
2015(H27)	<ul style="list-style-type: none"> <li>様々なケースの計算結果を利用し、<b>水素導入の意義や合理性を示す指標によるケースの評価</b></li> <li>水素有ケースでは、日本の環境、エネルギー安全保障の各指標が改善される傾向にあることを示した</li> </ul>
2016(H28)	<ul style="list-style-type: none"> <li>主に水素利用の有無によって<b>水素導入の意義や合理性を評価</b>。H27の指標に加え、燃料輸入による国富の国外流出を評価</li> </ul>
2017(H29)	<ul style="list-style-type: none"> <li>水素導入量に大きな感度を持つCO<sub>2</sub>制約、CO<sub>2</sub>貯留量、原子力導入量をパラメータとした<b>網羅的な感度分析</b>を実施</li> </ul>
2018(H30)	<ul style="list-style-type: none"> <li>水素火力発電の持つ系統調整力の反映等、<b>技術オプションの追加</b></li> <li>一定程度のCCSなし火力を維持することで、水素火力発電が世界的に導入される</li> </ul>
2019(H31/R1)	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Hydrogen Scaling Up</b>(前提条件・水素導入量)との比較による分析の深化</li> </ul>
2020(R2)	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Times-Japanとの連携による日本の水素需要量の精緻化</b></li> <li>これまでのまとめ</li> </ul>

## 1. 2015 年度

### <実施内容・計算条件>

2015 年度は、CO<sub>2</sub> 排出制約やエネルギー需要を各国の約束草案（INDCs）を考慮した内容に更新した他、既設天然ガス発電所における水素利用として、熱量ベースで 6%（体積で 20%、ハイトン相当）の混焼が可能と想定した。原子力発電の設備容量は、40 年寿命でのフェーズアウトから 40 年寿命と 60 年寿命の炉が半々となる値を上限とした。

また、従来の水素需要量の評価に加え、モデルの評価結果を利用し、CO<sub>2</sub> フリー水素チェーンの大規模な社会導入の理由づけとなる CO<sub>2</sub> フリー水素導入の意義や合理性を示すことを試みた。具体的には、3E+S の観点から水素導入の意義や合理性を示す指標を設定し、指標によるケースの評価を行った。

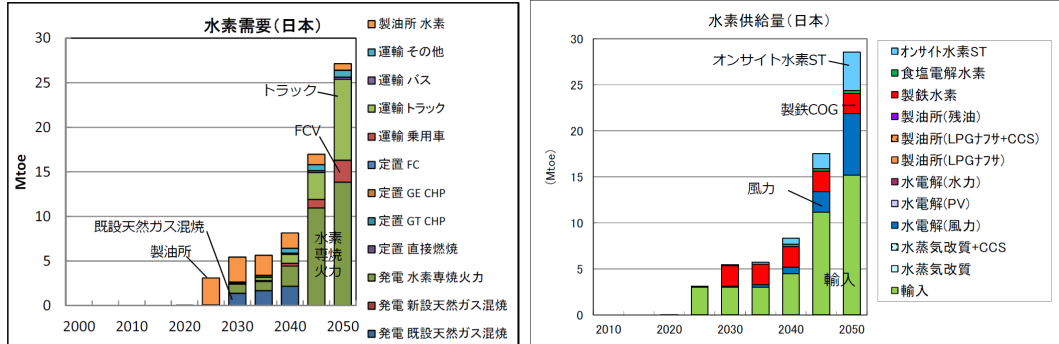
## 2. 計算条件 ベースケース概要

- エネルギー需要
  - INDCs（各国の約束草案）を考慮し、2030 年ころまではベースライン、2050 年に向けて WEO450 シナリオの需要に徐々に移行すると想定。
- エネルギー資源
  - 各地域の各資源それぞれの累積使用量が増加すると資源価格が上昇する想定した。資源価格は採掘コストと相関があり、採掘コストが低い資源から採掘されると想定したため。短期的な需給の影響による資源価格の上昇・下降は含んでいない。
- CO<sub>2</sub> 排出制約
  - 化石燃料由来の CO<sub>2</sub> 排出が対象。
  - 2025 年、2030 年は INDCs を考慮し各地域別に設定。
  - 2035 年以降は、2050 年に世界全体で 90 年比 50% 削減となるよう 2035 年の排出制約から線形に制約。
- 水素需要技術
  - 発電：事業用の大規模発電、産業用のコジェネレーション（ガスエンジン、ガスタービン）、民生用のコジェネレーション（燃料電池）
  - 定置：コジェネレーションによる熱供給、天然ガスとの混焼による直接燃焼も可能と想定。
  - 運輸：LDV、トラック、バスの FCV を想定。船舶、航空の燃料代替も想定。
- CCS
  - 発電・定置：2030 年までの CCS の貯留量は、現在計画されているプロジェクトを参考に上限量を設定。日本は、CCS による CO<sub>2</sub> 貯留量の最大値は 2050 年に 1.95 億 t-CO<sub>2</sub> と想定。

※日本の発電・運輸・定置の各部門、水素需給の計算結果は、参考資料に掲載

<計算結果・まとめ>

### 3. 計算結果 ベースケース 水素需要量、水素供給量



**需要**

- 2020年から運輸部門のFCVで水素が利用される（2020年は、1.6万台、0.15億Nm<sup>3</sup>）。
- 2020年に水素大規模発電が導入される（2020年0.3万kW、0.13億Nm<sup>3</sup>、設備利用率約85%）。
- 2025年から製油所向けのCO<sub>2</sub>フリー水素の利用が始まる。
- 2050年における水素需要は、1050億Nm<sup>3</sup>（27.1Mtoe）。
- 発電・製油所向け重要は、CO<sub>2</sub>フリー水素の導入期の大規模な需要の候補となりえる。

**供給**

- 2025年の輸入分は、全量が製油所向けの水素。FCV向けは2億Nm<sup>3</sup>をオンサイトステーションで製造。
- CO<sub>2</sub>フリー水素の輸入が始まる2020年以降は、約50%以上を海外から調達する。
- 2050年の水素供給量は約1,105億Nm<sup>3</sup>（28.5Mtoe）

**1 Mtoe = 38.78億Nm<sup>3</sup>**

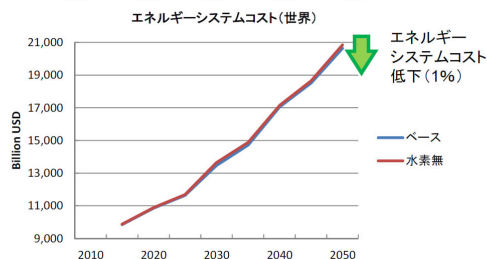
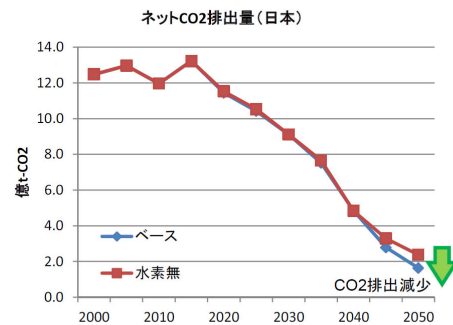
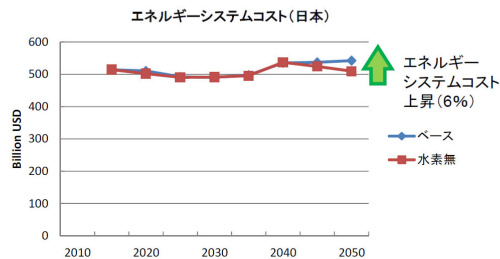
注：定置向け、運輸向けは配送ロス(10%)を含めているため、需要量の合計より総量が大きくなっている。

水素有ケース（ベースケース）の日本の2050年水素供給量は、1,107億Nm<sup>3</sup>であった。内訳は海外CO<sub>2</sub>フリー水素が5割以上を占め、風力電解が23%、オンサイト水素ステーションが15%、残りの10%が副生水素（製鉄水素86億Nm<sup>3</sup>、食塩電解11億Nm<sup>3</sup>）であった。日本の水素の2050年国内需要は、計1,053億Nm<sup>3</sup>であり、発電部門で51.0%、運輸部門で46.3%、定置部門ではゼロ、製油所水素で2.7%であった。乗用車のエネルギー消費量に占めるFCV用水素の割合が約2割（95億Nm<sup>3</sup>）、トラック、バスのそれぞれのエネルギー消費量に占めるFCトラック向けの水素の割合は45%（353億Nm<sup>3</sup>）、FCバス向けの水素は約7割（10億Nm<sup>3</sup>）であった。



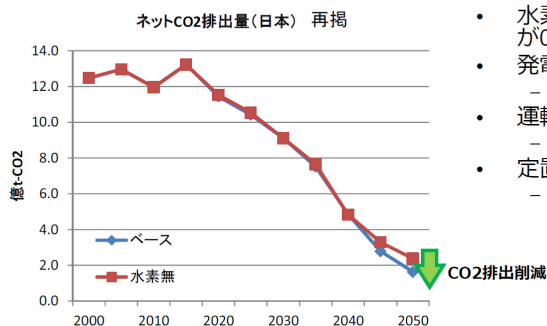
## 水素無ケースとの比較 経済性：コスト

- 水素有は水素無に対し、2050年の日本のエネルギーシステムコストが6%程度上昇
  - CO<sub>2</sub>排出量は2050年に0.74億t-CO<sub>2</sub>減少。
  - 世界全体のエネルギーシステムコストは、2050年においてベース（水素有）の方が1%小さくなる。
- 限界削減費用は精査中。
  - 2040年ごろに約400USD/t-CO<sub>2</sub>、以降上昇傾向

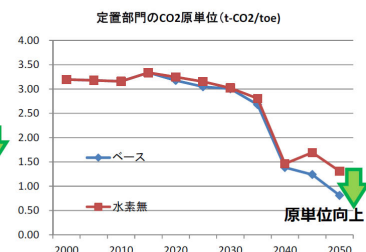
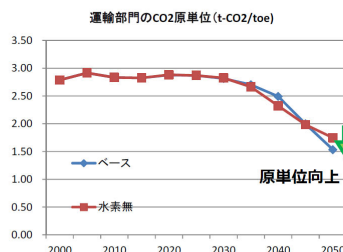
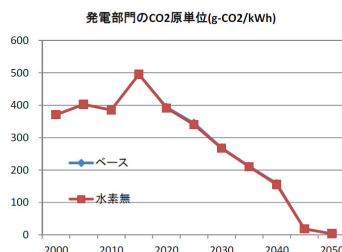


## 水素無ケースとの比較 環境：CO<sub>2</sub>排出量

- 水素有の方がCO<sub>2</sub>削減が進む

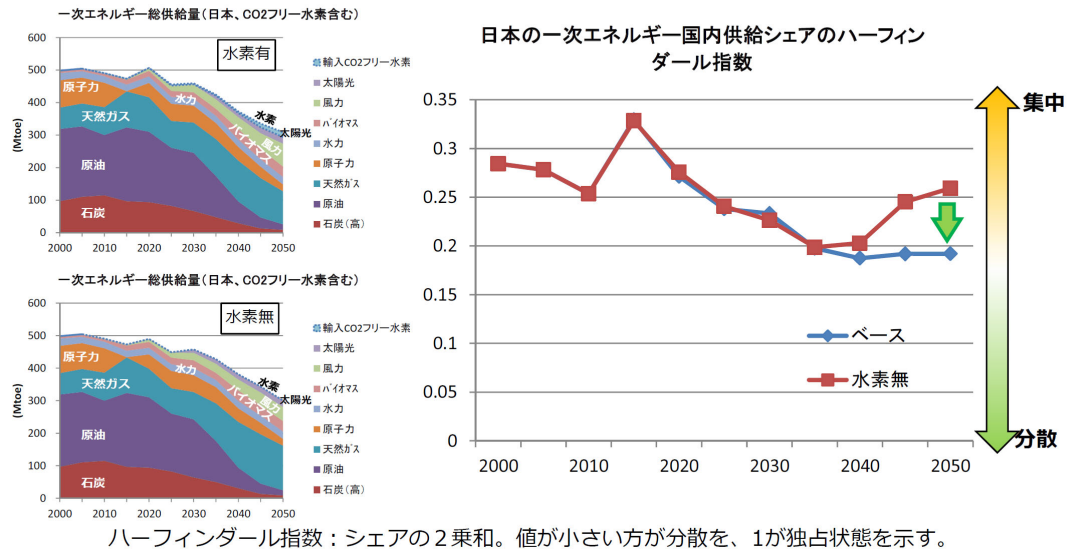


- 水素有りは、水素無しに対し、2050年にCO<sub>2</sub>排出量が0.74億t-CO<sub>2</sub>減少する。
- 発電のCO<sub>2</sub>原単位はほぼ同じ
  - 原単位 = CO<sub>2</sub>排出量/発電電力量
- 運輸部門のCO<sub>2</sub>原単位は水素有のほうが低くなる。
  - 原単位 = CO<sub>2</sub>排出量/運輸部門の燃料消費量
- 定置部門は水素有の方がCO<sub>2</sub>原単位が小さい。
  - 原単位 = CO<sub>2</sub>排出量/定置部門のエネルギー消費量



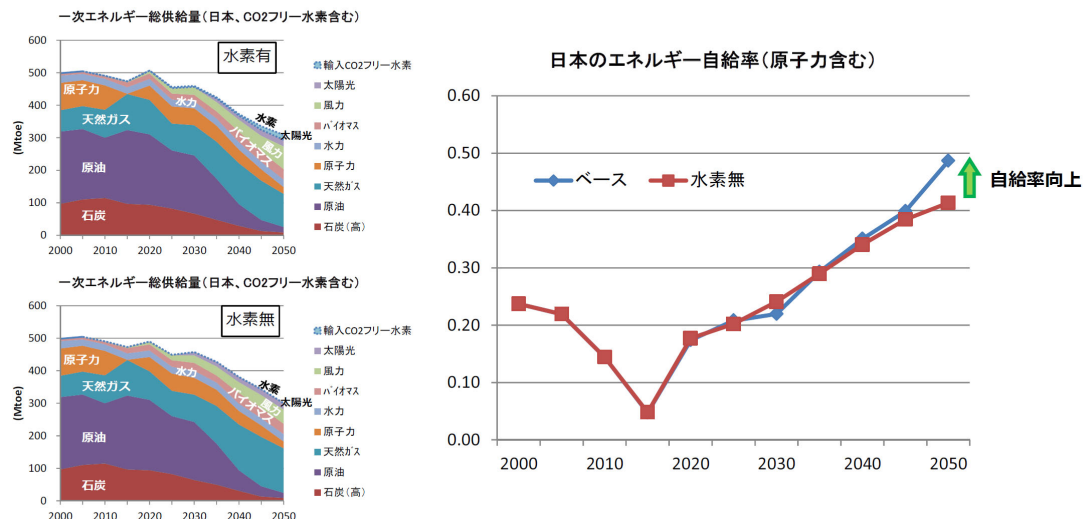
## 水素無ケースとの比較 エネルギー安全保障

- 水素導入のすすむ2040年以降では、水素有ケースの方が、一次エネルギー源はより分散する。
  - 水素無ケースにおいてCO<sub>2</sub>削減のため天然ガスの輸入量の増加に伴い、天然ガスのシェアが増加することによる。



## 水素無ケースとの比較 エネルギー安全保障

- エネルギー自給率 = 一次エネルギーの国内生産量 / 一次エネルギーの国内供給量
  - 国内産出は、再エネ、原子力、自主開発した水素を含む
- 水素導入のすすむ2050年では、エネルギー自給率が向上する。
  - 天然ガス輸入の減少と、風力（水電解含む）の増加で国内産出分が増加。



水素有ケース（ベースケース）と水素無ケースを比較すると、日本に CO<sub>2</sub> フリー水素が

導入された時期では、環境、エネルギー安全保障の各指標が改善される傾向があることが分かった。世界全体で最適化を行っているため、必ずしも水素導入によって日本のエネルギーシステムコストが低下しない場合もある（世界全体では水素無に比べてエネルギーシステムコストは低下しており、経済的にも適切である）。しかし、水素無ケースでは日本のCO<sub>2</sub>排出量が水素有ケースに比べて増加してしまうなど、他の指標が悪化しており、現実の世界にもみられるような指標間のトレードオフがあることが示された。

## 2. 2016 年度

### <実施内容・計算条件>

2016 年度は以下の内容を実施した。

- ① 2015 年度に用いたモデルに基づき、指標によるケース評価を強化し、水素の意義をより明確に訴求。
- ② 政府及び国際機関等の目標等との整合性の確保
  - ・ CO<sub>2</sub> 制約、資源価格等、外部条件のアップデート
- ③ 技術パラメータの精査
  - ・ 水素技術、再エネ水素供給の精緻化・妥当性の考察
- ④ 分析指標の多角化
  - ・ 水素関連機器の市場規模(日本総研殿にデータ提供)
  - ・ 燃料輸入額
  - ・ CO<sub>2</sub> 原単位の精緻化(運輸部門)
- ⑤ 感度分析：水素需要量に影響が大きいパラメータを変化させ、水素導入量と各指標との関係性の考察。
  - ・ 水素技術 OFF、補助金、CCS・原子力利用、CCS 貯留量

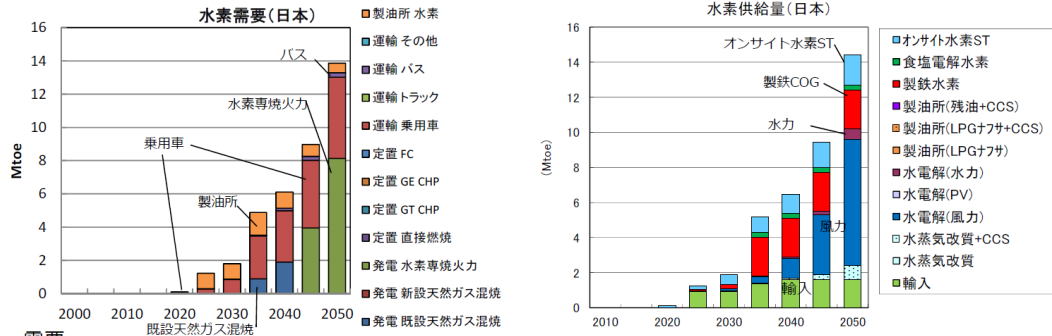
### 2.計算条件 ベースケース条件概要

- ・ エネルギー需要
  - ・ INDCs (Intended Nationally Determined Contributions, 各国の約束草案) を考慮し、2030 年ごろまではベースライン、2050 年に向けて WEO2015 450 シナリオの需要に徐々に移行すると想定。
- ・ エネルギー資源
  - ・ 各地域の各資源それぞれの累積使用量が増加すると資源価格が上昇する想定した。資源価格は採掘コストと相関があり、採掘コストが低い資源から採掘されると想定したため。短期的な需給の影響による資源価格の上昇・下降は含んでいない。
- ・ CO<sub>2</sub> 排出制約
  - ・ 化石燃料由来の CO<sub>2</sub> 排出が対象。
  - ・ 2025 年、2030 年は INDCs を考慮し各地域別に設定。
  - ・ 2035 年以降は、2050 年に世界全体で 90 年比 50% 削減となるよう 2035 年の排出制約から線形に制約。
- ・ 水素需要技術
  - ・ 発電：事業用の大規模発電(水素火力、高効率水素火力)、産業用のコジェネレーション(ガスエンジン、ガスタービン)、民生用のコジェネレーション(燃料電池)
  - ・ 定置：コジェネレーションによる熱供給、天然ガスとの混焼による直接燃焼も可能と想定。
  - ・ 運輸：LDV、トラック、バスの FCV を想定。船舶、航空の燃料代替も想定。
- ・ CCS
  - ・ 発電・定置：2030 年までの CCS の貯留量は、現在計画されているプロジェクトを参考に上限を設定。日本は、CCS による CO<sub>2</sub> 貯留量の最大値は 2050 年に 1.95 億 t-CO<sub>2</sub>/年と想定。
  - ・ 他の地域の CCS の年間貯留量は、ETP2015 シナリオの 1.5 倍の値を上限とした。

## <計算結果・まとめ>

### 3. 計算結果 ベースケース 水素需要量、水素供給量（日本）

1 Mtoe = 38.78億Nm<sup>3</sup>

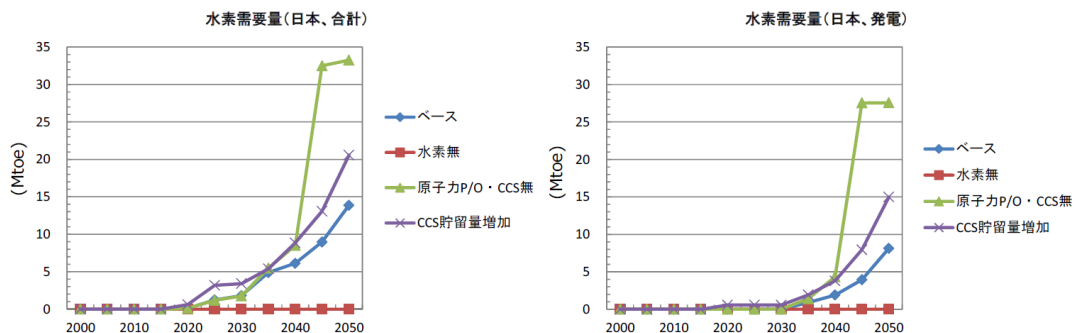


- 需要
- 2020年から運輸部門のFCVで水素が利用される（2020年は、47万台、3.7億Nm<sup>3</sup>）
  - 2035年には既設の天然ガス火力で水素混焼が行われる。（2020年 20%の混焼設備として380万kW相当、34億Nm<sup>3</sup>、設備利用率約85%）。
  - 2045年には水素の専焼火力が用いられる。（2050年、818万kW、設備利用率約85%）
  - 2025年から製油所向けのCO<sub>2</sub>フリー水素の利用が始まる。
  - 2050年における水素需要は、560億Nm<sup>3</sup>（14.4Mtoe）。
  - 製油所・発電向け需要は、CO<sub>2</sub>フリー水素の導入期の大規模な需要の候補となりえる。
- 供給
- 水素は、輸入、及び国内の水電解、副生水素、オンサイトステーション（運輸向け）によって水素が製造される。
  - 輸入はロシア等から。
- 注：定置向け、運輸向けは配送ロス(10%)を含めているため、需要量の合計より総量が大きくなっている。

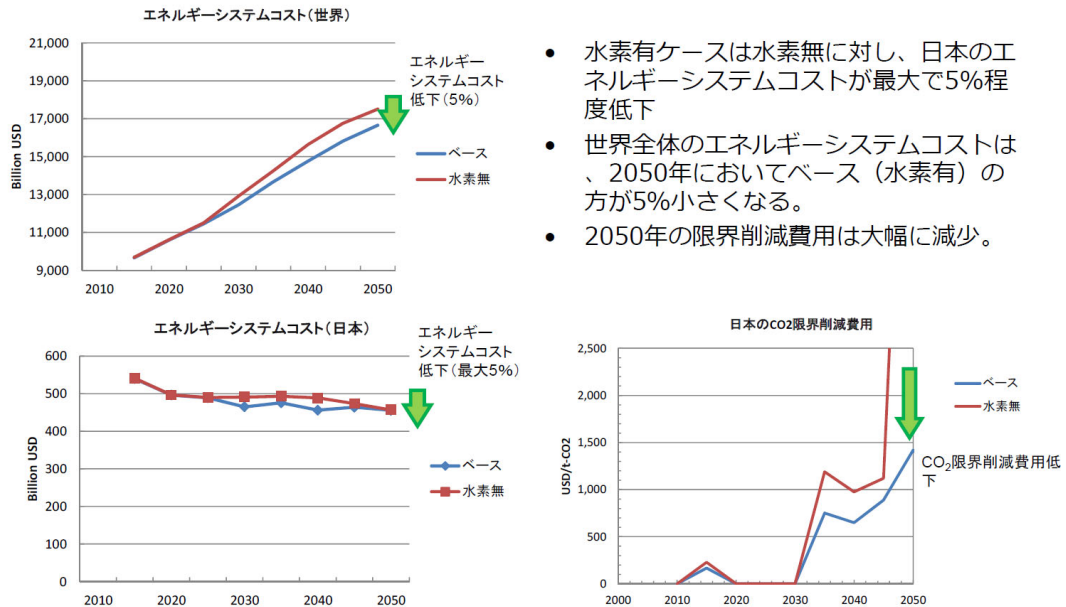
### 日本の水素需要のまとめ

1 Mtoe = 38.78億Nm<sup>3</sup>

- 日本の水素需要は、原子力フェーズアウト・CCS無ケースで約1300億Nm<sup>3</sup>（2050年）
- 発電部門の水需要の変化が日本の水素需要に大きく影響する。
- 日本の水素需要量は、海外の水素製造の条件（CCSの利用可能性）にも依存する。



#### 4. 水素導入の意義の評価 経済性：コスト



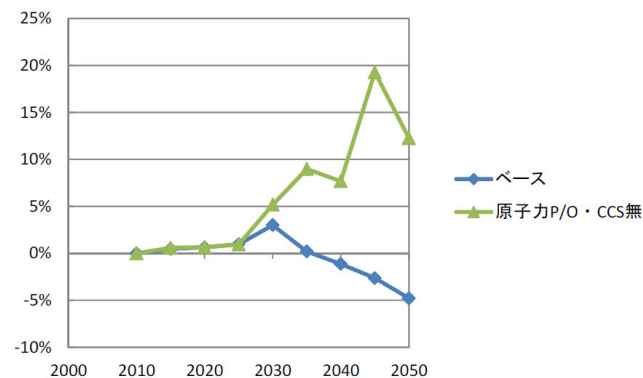
- 水素有ケースは水素無に対し、日本のエネルギーシステムコストが最大で5%程度低下
- 世界全体のエネルギーシステムコストは、2050年においてベース（水素有）の方が5%小さくなる。
- 2050年の限界削減費用は大幅に減少。

#### 4. 水素導入の意義の評価 資源輸入額（国内還元率考慮）

- 燃料輸入に伴う国外流出量  

$$= \sum_{\text{燃料}} \text{輸入量} \times \text{燃料価格} \times (1 - \text{還元率})$$
- 還元率 水素：0.535、その他の燃料：0.15（第5回シナリオ研報告より）
- 水素有は、水素需要が増加し始める2035年以降に国外流出額が低減している。
- 原子力フェーズアウト・国内CCS無のように大量に水素を輸入すると、燃料価格によっては、水素無ケースよりも国外流出が増えることがあることが分かった。

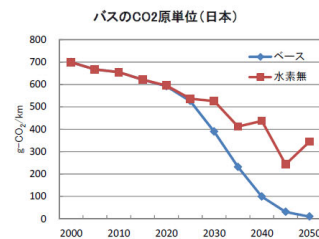
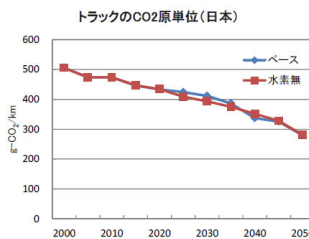
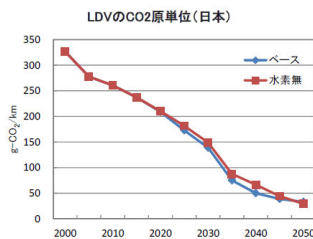
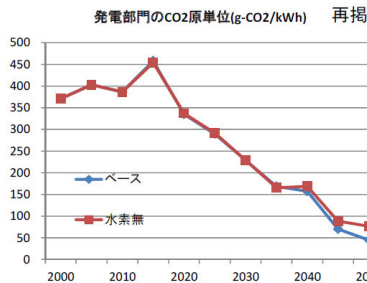
水素無ケースとの比較した国外流出量の増減率





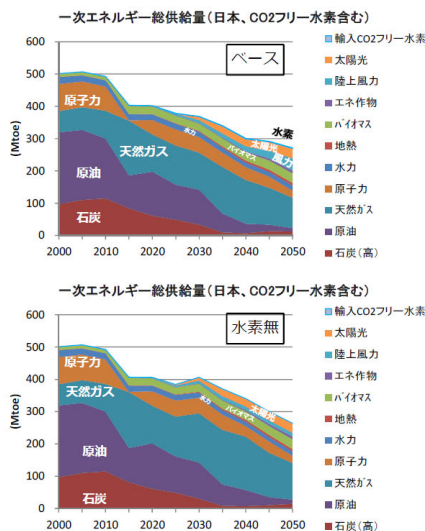
#### 4. 水素導入の意義の評価 環境：CO<sub>2</sub>排出量

- 日本のCO<sub>2</sub>排出量は、水素有ケースは、水素無しとほぼ同じ。
- 発電のCO<sub>2</sub>原単位は2040年以降水素有が小さくなる。
  - 原単位 = CO<sub>2</sub>排出量/発電電力量
- 運輸部門全体のCO<sub>2</sub>原単位は、水素有が最大で10%程度大きくなる。
  - 原単位 = CO<sub>2</sub>排出量/走行距離（または燃料消費量）
  - 部門別に見ると自動車は水素ありの方が原単位が低い。
  - 水素有ケースでは、船舶、航空で石油系燃料の使用が続き、バイオ燃料等の導入が遅れているため。
- 定置部門は水素有ケースの方がCO<sub>2</sub>原単位が増加。
  - 原単位 = CO<sub>2</sub>排出量/定置部門のエネルギー消費量
  - 石油系燃料の使用が水素なしに比べて小さい。

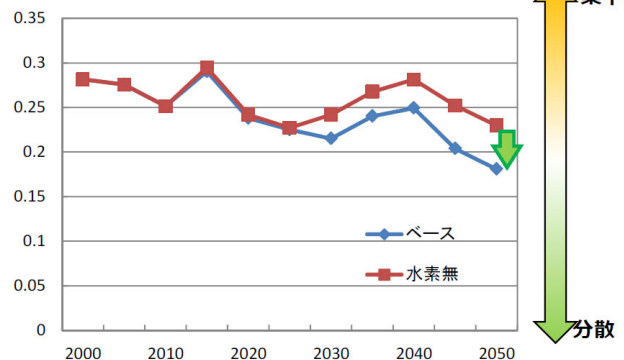


#### 4. 水素導入の意義の評価 エネルギー安全保障

- 水素導入のすすむ2040年以降では、水素有ケースの方が、一次エネルギー源はより分散する。
  - 水素無ケースにおいて、天然ガスのシェアが増加するため一次エネルギー資源がより集中。



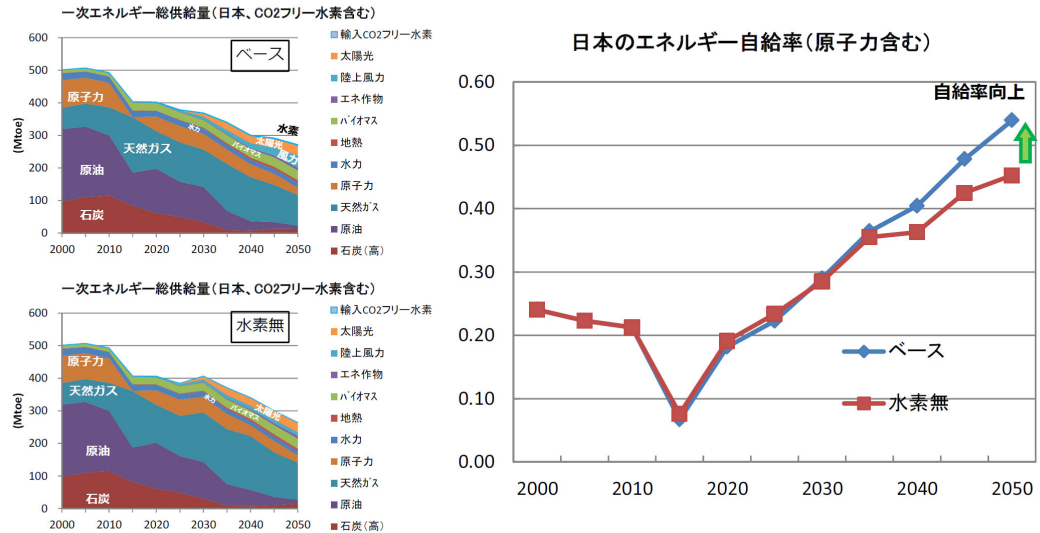
日本の一次エネルギー国内供給シェアのハーフィン  
ダール指数



ハーフィンダール指数：シェアの2乗和。値が小さい方が分散を、1が独占状態を示す。

#### 4. 水素導入の意義の評価 エネルギー安全保障

- エネルギー自給率＝一次エネルギーの国内生産量/一次エネルギーの国内供給量
  - 国内産出は、再エネ、原子力、自主開発した水素を含む
- 水素導入のすすむ2050年では、エネルギー自給率が向上。
  - 天然ガス輸入の減少と、風力の増加で国内産出分が増加。



水素利用の意義については水素技術があることで、各種指標が改善される。

世界では、経済性が改善される（エネルギーシステムコスト低減）。

日本では、

- ・ 経済性が改善される（エネルギーシステムコスト、CO<sub>2</sub> 限界削減費用低減）。
- ・ 環境性が改善される（CO<sub>2</sub> 原単位の改善する部門あり）。
- ・ エネルギー安全保障が改善される（エネルギー資源多様性、自給率向上）。

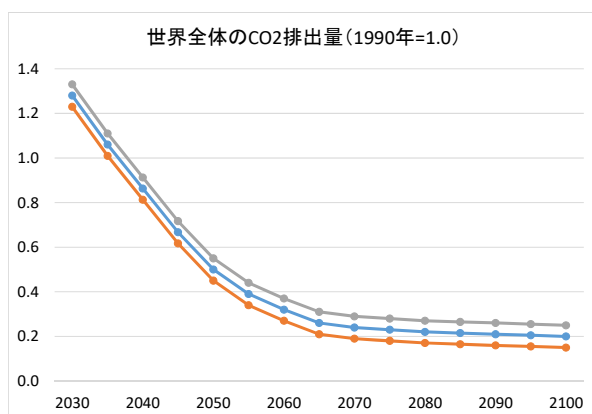
### 3. 2017 年度

#### ＜実施内容・計算条件＞

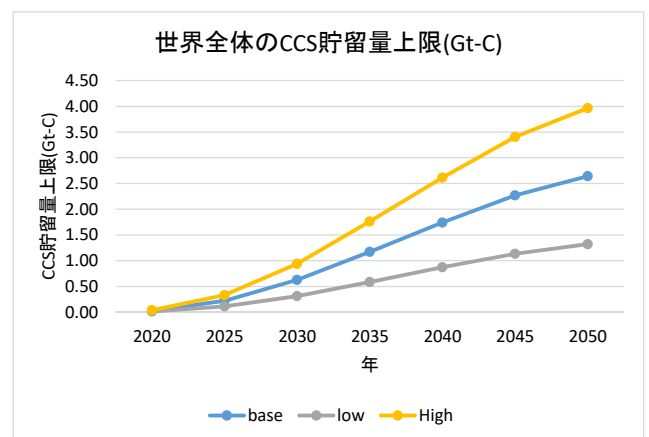
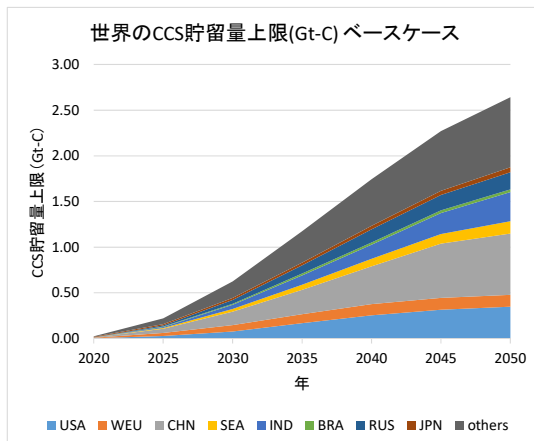
- 1) 2016 年 GRAPE モデルを用いた感度分析  
ー網羅的な拡張版感度分析を実施
- 2) GRAPE モデルの拡張（2017 年モデルの作成）  
ー各種条件の検討と一部条件の実装

#### 【感度分析の条件設定】

- (1) CO<sub>2</sub>制約：条件設定
  - ・CO<sub>2</sub>排出量の上限として設定
  - ・ベースケース
    - ー～2030：Paris 協定で宣言された世界各国の NDC 準拠
    - ー2030～：下記グラフ青線（2050 年時点で 1990 年比世界半減、先進国 80%減）
  - ・感度分析ケース設定
    - ー高位（削減強化・橙線）：2030 年以降の削減率を+5% (排出量を-5%)
    - ー低位（削減緩和・灰線）：2030 年以降の削減率を-5% (排出量を+5%)

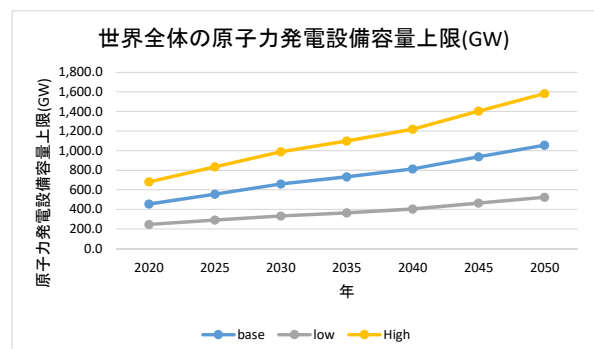
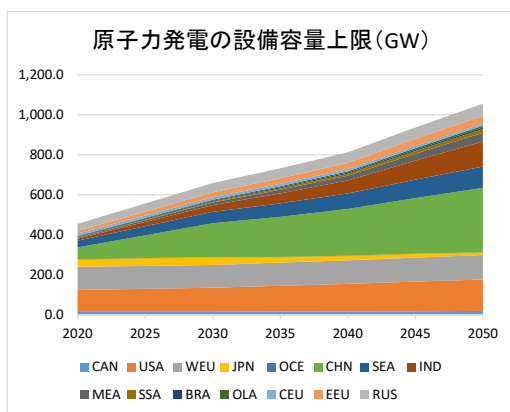


- (2) CCS 可能量：条件設定
  - ・2020 年以降の地域別累積 CCS 貯留量の上限として設定
  - ・ベースケース：ETP2015 2DS シナリオに準拠
  - ・感度分析ケース設定
    - ー高位：貯留量上限を+50%
    - ー低位：貯留量上限を-50%



### (3) 原子力：条件設定

- ・条件1：2020年以降の地域別原子力発電設備容量上限
- ・条件2：日本の原子炉寿命（40年/60年）&フェーズアウトあり/なし
- ・ベースケース
  - ー日本以外：IAEA Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the period up to 2050, 2015 edition
  - ー日本：新規制基準適合性に係る審査から推定
- ・感度分析ケース設定
  - ー高位：上限+50%、日本の炉寿命 60年
  - ー低位：上限-50%、日本の炉寿命 40年+フェーズアウト

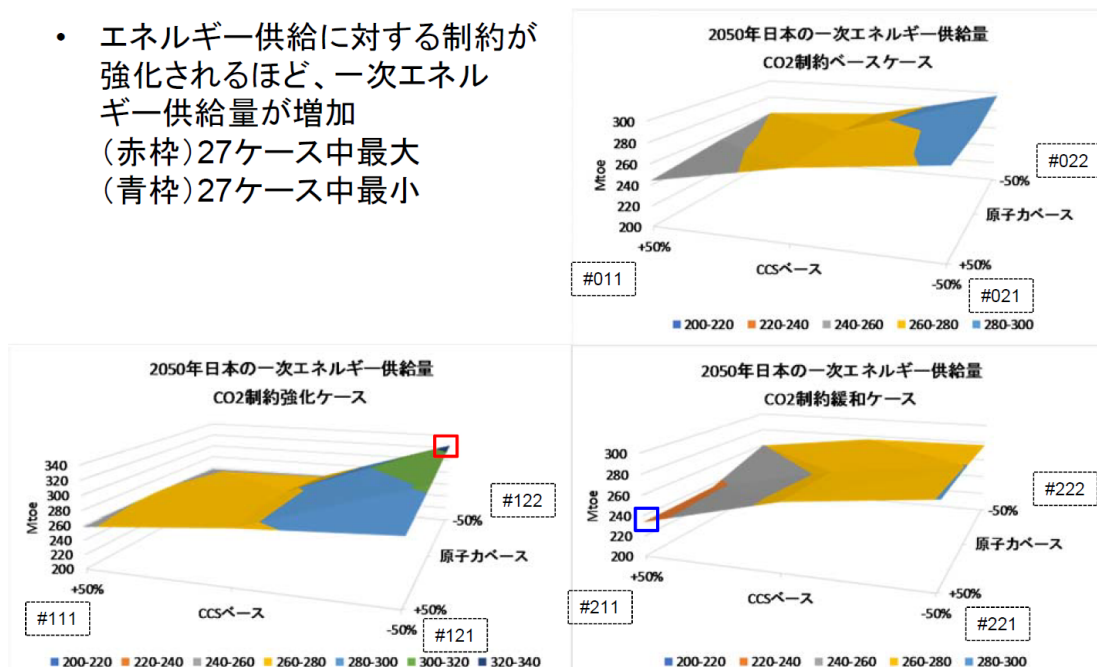


## <計算結果・まとめ>

(1) 感度分析結果 A)：一次エネルギー供給量

### 感度分析結果 A):一次エネルギー供給量

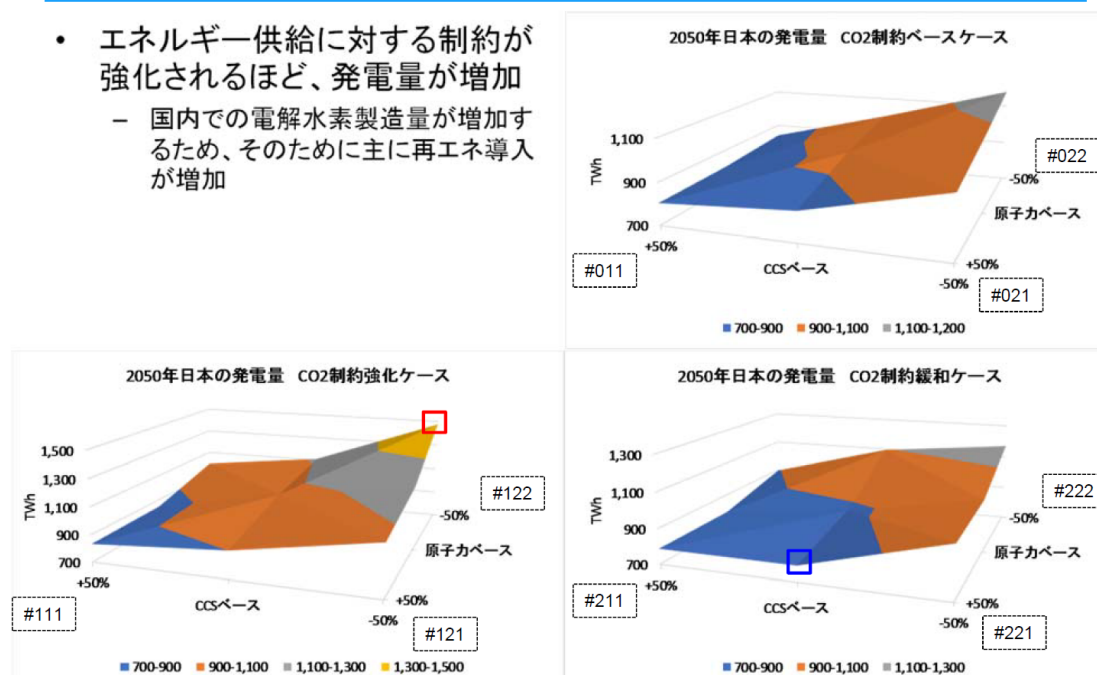
- エネルギー供給に対する制約が強化されるほど、一次エネルギー供給量が増加  
(赤枠)27ケース中最大  
(青枠)27ケース中最小



(2) 感度分析結果 B)：総発電量

### 感度分析結果 B):総発電量

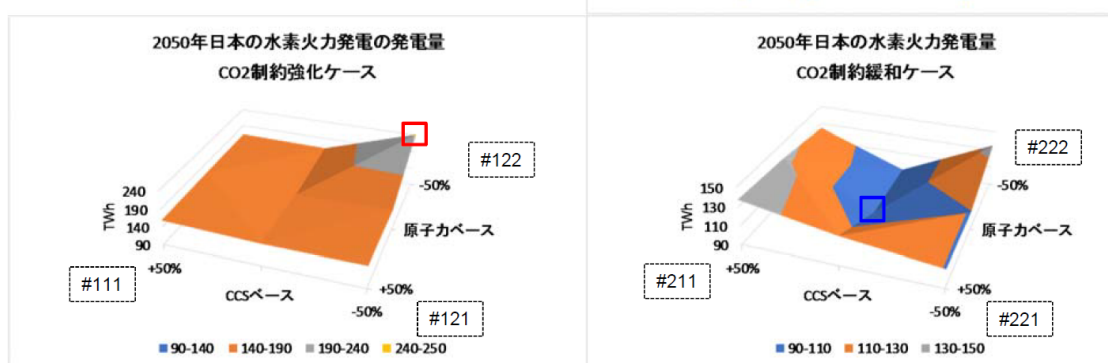
- エネルギー供給に対する制約が強化されるほど、発電量が増加
  - 国内での電解水素製造量が増加するため、そのために主に再エネ導入が増加



(3) 感度分析結果 C)：水素火力発電由来の発電量

## 感度分析結果 C): 水素火力発電由来の発電量

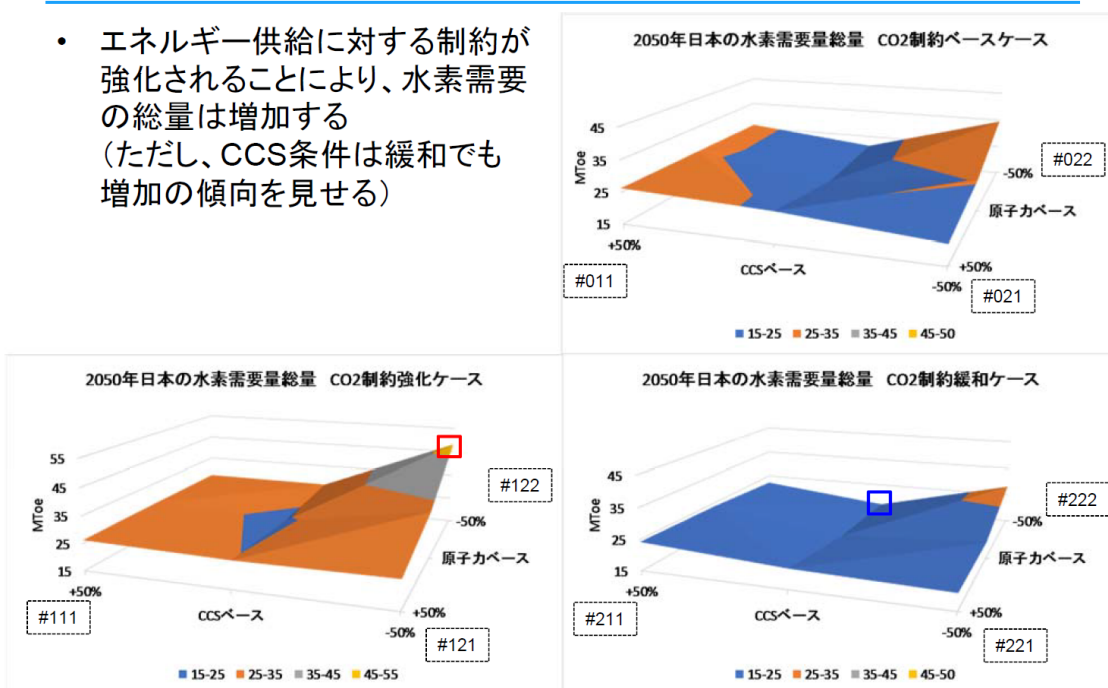
- 水素火力発電由来の発電量はCO2制約が緩和されると減少するが、他のパラメータに対する感度は一方向ではない



### (4) 感度分析結果 D) : 水素需要総量

## 感度分析結果 D): 水素需要総量

- エネルギー供給に対する制約が強化されることにより、水素需要の総量は増加する (ただし、CCS条件は緩和でも増加の傾向を見せる)

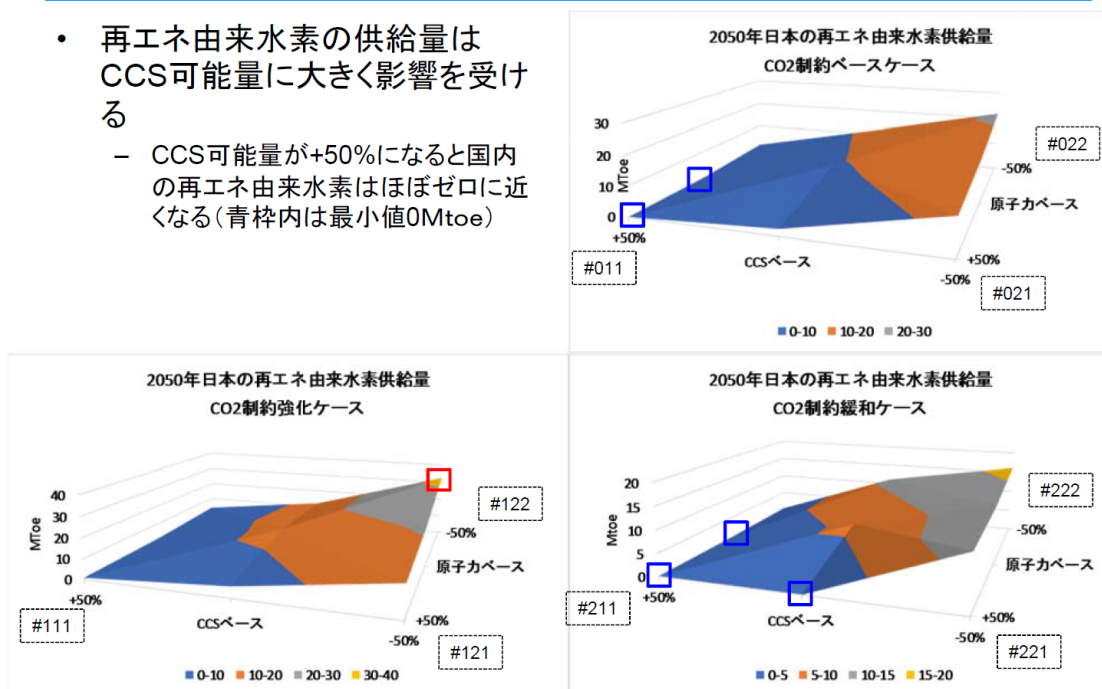


### (5) 感度分析結果 E) : 再エネ由来水素供給量



## 感度分析結果 E): 再エネ由来水素供給量

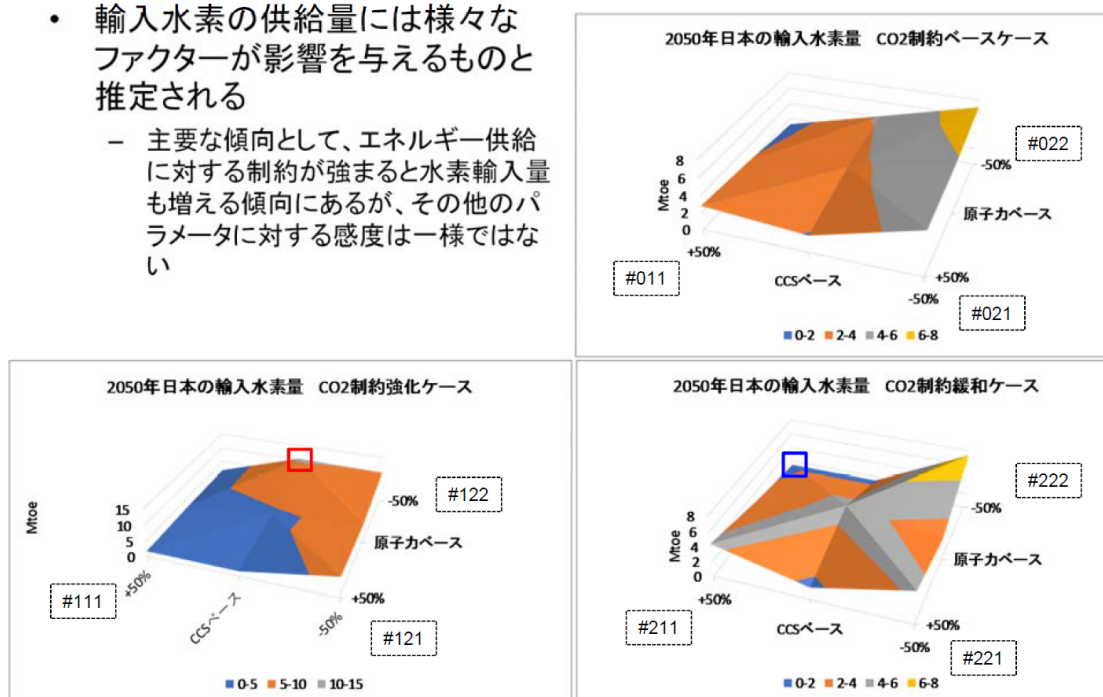
- 再エネ由来水素の供給量はCCS可能量に大きく影響を受ける
  - CCS可能量が+50%になると国内の再エネ由来水素はほぼゼロに近くなる(青枠内は最小値0Mtoe)



(6) 拡張感度分析結果 F): 輸入水素供給量

## 拡張感度分析結果 F): 輸入水素供給量

- 輸入水素の供給量には様々なファクターが影響を与えるものと推定される
  - 主要な傾向として、エネルギー供給に対する制約が強まると水素輸入量も増える傾向にあるが、その他のパラメータに対する感度は一様ではない



#### 4. 2018 年度

2018 年度は、1) 地政学的リスクファクターが水素導入にもたらす影響の分析、2) 2018 年モデルでの分析、3) Joint Crediting Mechanism(JCM)的な技術移転の影響分析、等を実施した、

##### 1) 地政学的リスクファクターが水素導入にもたらす影響の分析

###### <実施内容・計算条件>

###### 「地政学的リスクファクターの分析」

- ・ 下記地政学的リスクファクターの定式化
  - －GRAPE モデル内の水素輸送コスト決定式に地政学的リスクファクターを導入した。
  - －[供給地域]、[需要地域]、[年代]に設定、基準値を 1.0 としてシナリオに応じて設定した。
- 例) 供給地域：中国、入荷地域：日本、年代：2020 年のリスクファクターを 2.0 とすると、2020～25 年の間中国から日本への水素輸送コストが 2 倍になる。
- = エネルギー需給構造の決定において設定の年代において中国→日本のルートが選択されづらくなると考えられる。

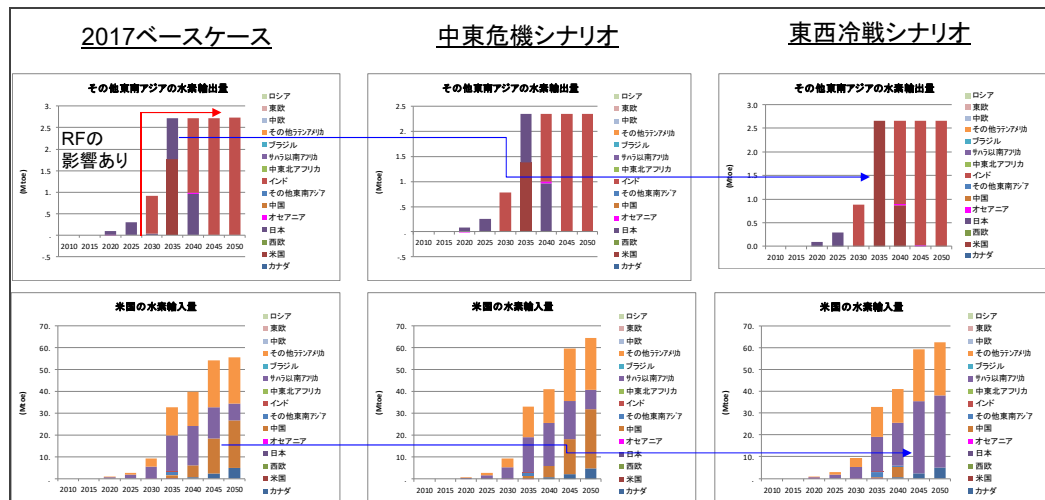
###### 「地政学的リスクシナリオ」

- ・ 中東危機シナリオ
  - －2030 年に中東で安全保障上のリスクが生じたと仮定、2030 年以降、地域 9 中東・北アフリカからのリスクファクターを 1.0→2.7 とした。2.7 という数字は第一次オイルショック時の WTI crude oil price の数値を参考にした（1973 年 7 月-1974 年 1 月の変化）。
- ・ 東西冷戦シナリオ
  - －東西冷戦を参考に下記の通りとした。
  - 西側：カナダ、日本、アメリカ、オセアニア、その他アジア、ブラジル、その他ラテンアメリカ
  - 東側：中国、中欧、東欧、ロシア
  - 第三世界：インド、サハラ以南アフリカ、中東・北アフリカという区分けを行って 2030 年以降、西側諸国と東側諸国間にリスクファクターを設定した（値は 2.0 を仮設定）。

<計算結果・まとめ>

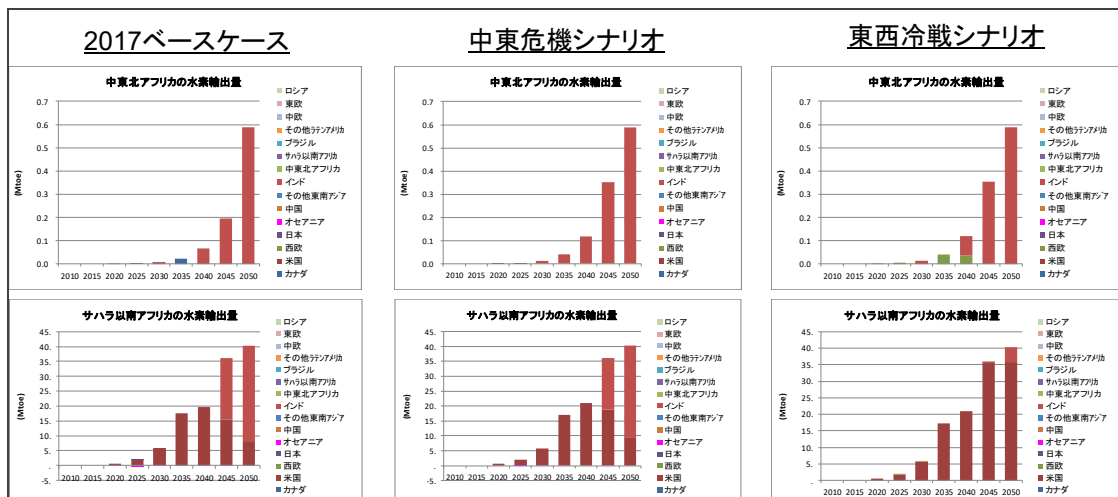
## 地政学的リスク分析: 国際水素輸送の変化

- ・ 東南アジア: 日本に輸出していた水素が米国へ
- ・ 米国: 中国から輸入していた水素をサハラ以南アフリカから輸入



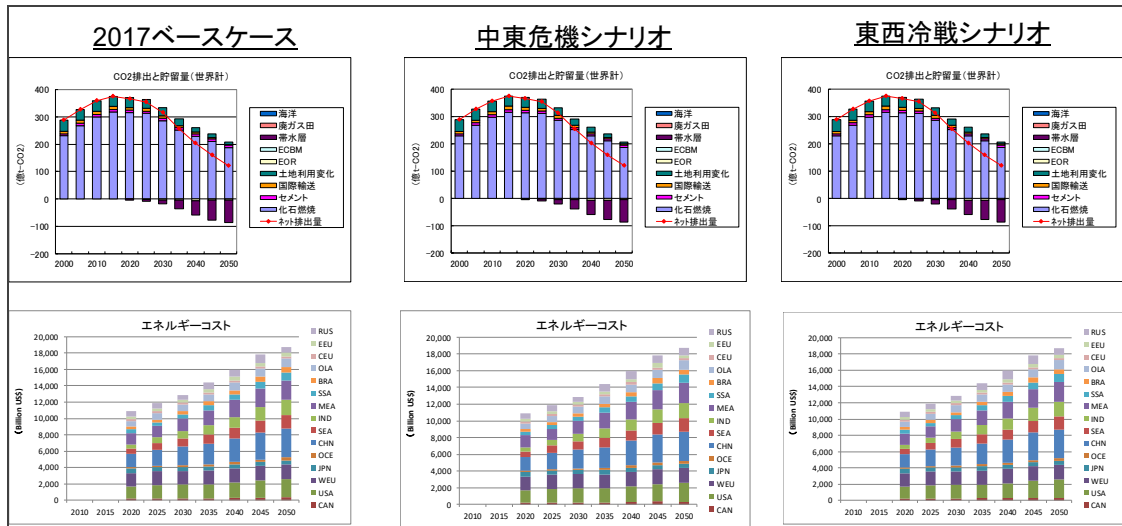
## 地政学的リスク分析: 国際水素輸送の変化

- ・ 本モデルでは中東の水素輸出自体が小さいので、中東危機シナリオの水素需給構造に対する影響は小さい
- ・ サハラ以南アフリカ: 東西冷戦シナリオの設定で輸出先をインド→米国に切り替える



## 地政学的リスク分析:CO<sub>2</sub>排出量・エネルギーコスト

- ・ CO<sub>2</sub>排出量、エネルギーコスト共にほぼ変化なし



- ー地政学的リスクファクターは 2～3 倍程度の変化で水素需給の構造に変化を生じるが、エネルギー需給構造全体、CO<sub>2</sub>排出量、エネルギーコストにはほぼ影響しない。
- ー理由としては、現在のリスクファクターがモデルの仕様上水素輸送にのみ影響を与えるため。
- ー水素の大供給元はサハラ以南アフリカ、ラテンアメリカ、ロシア、中国の4カ国で、それぞれ地理的に離れているので、リスクファクターに対しては輸出入構造の組み替えで対応してしまうものと推定される。

## 2) 2018 年モデルの概要

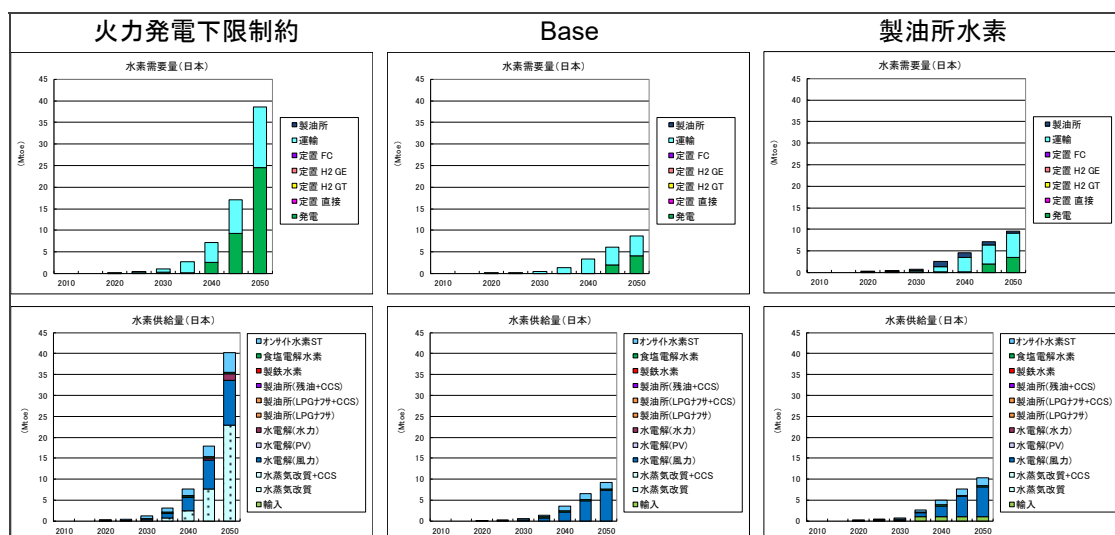
### <実施内容・計算条件>

- ・2017 年モデルをベース（エネバラ、CO<sub>2</sub> 排出実績値はそのまま）に人口、GDP 予想を最新のものにアップデートした。
- ・下記パラメータを追加した。
  1. 水素火力発電の持つ系統調整力の反映：従来日本に適用してきた CCS なし火力発電の設備容量下限制約を世界的に導入した。
  2. 水素の産業利用：「製油所水素」=製油所におけるナフサからの製造水素を輸入水素で代替 を世界的に選択可能とした。
- ・製鉄所の副生水素の供給量を 0 に設定した。  
ーシナリオ研におけるご指摘を参考にした。
- ・今回の分析  
ー上記新規導入パラメータの国内外水素需給に対する影響を評価した。
  - ①上記条件共になし。
  - ②火力発電下限制約を導入。
  - ③製油所水素を導入。

### <計算結果：まとめ>

#### 分析結果：水素需給（日本）

- ・輸入水素は製油所水素の設定によってのみ入る。2035年頃には水素需要の半分を占める
- ・火力発電下限制約により輸入天然ガスのCCS付き改質が大規模導入



- ・CCS なし火力発電の設備容量下限制約について
  - ー世界的にも日本に対しても、水素導入量を大きく増加させるパラメータである。
  - ー天然ガス→発電→CCS という順序が天然ガス→水素製造 (CCS) →発電という順序に

切り替わっている模様である。

－今回一律に 20%という下限値を設定したが、妥当な値については今後精査検討が必要である。

- ・製油所水素について

－産業用水素需要は運輸と並んで、2025 年前後の水素の立ち上げ期に需要を下支えする効果が期待できる。

－2050 年には石油精製の縮小により半減し、発電、運輸水素需要の増大により水素需要に占める割合は小さくなる。



### 3) Joint Crediting Mechanism (JCM) 的な技術移転の影響分析

#### <実施内容・計算条件>

先進国から途上国・新興国への早期の技術移転により、水素の需給状況はどのように変わるのかという問題意識に基づき分析を行った。

地域間の技術進展度の違いについては、下記の通りとした。

- ・ GRAPE 内パラメータ（いずれも 2100 年以降全世界一定）

- －発電効率：地域により異なるが新興・途上地域は先進地域より概ね低い

- －車両効率：新興・途上地域は先進地域の 10 年遅れ

- －水素利用技術の利用可能年（製造は全世界で 2020 年から可能）

先進地域：2020 年

中国、インド、ブラジル、中欧、東欧：2030 年

上記以外：2055 年

- ・ JCM 的条件設定

- －各効率を 2030 年以降先進国最高水準（概ね日本の値）に設定

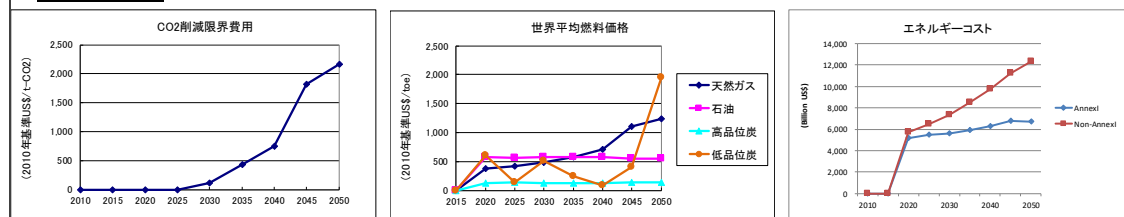
- －水素利用技術の利用可能年を全世界的に最も遅くとも 2030 年に設定

#### <計算結果・まとめ>

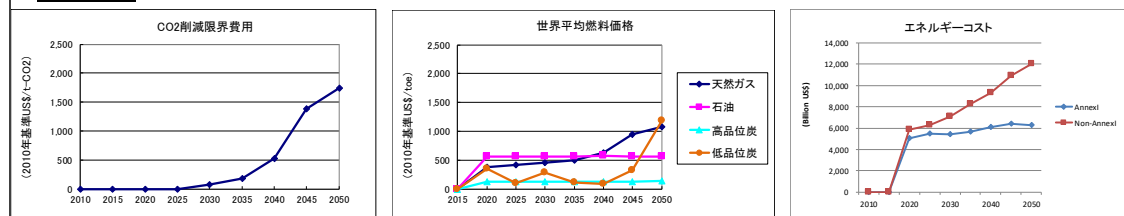
##### 分析結果:CO<sub>2</sub>削減限界費用・エネルギーコスト

- ・ CO<sub>2</sub>削減限界費用、世界平均の燃料価格、エネルギーコスト共にJCMありケースの方が安価となる

#### 基準ケース



#### JCMあり



JCM 的な技術移転による効果は以下の通りである。

- －技術移転による各種効率の早期向上によりエネルギー消費が抑制される。
- －CO<sub>2</sub> 削減限界費用、世界平均の燃料価格、エネルギーコスト共に低下する。
- －先進国、日本の水素導入に対しては負の効果となる。

## 5. 2019 年度

コスト最適化と異なる手法による水素需要推算との比較分析、具体的に GRAPE モデルに少し手を加え、“Hydrogen Scaling Up” との比較、エネルギー需給シミュレーション（例：GRAPE 等）で別途推算された結果を整理し政策との整合性・現実性等を検討した。

### <実施内容・計算条件>

- ・ Hydrogen Scaling Up (HSU) および水素基本戦略における、水素関連技術を中心とした将来想定を分析
- ・ 上記分析結果に基づいて GRAPE モデルの計算条件を作成。必要に応じて可能な範囲でモデルの改良を実施
- ・ 計算を実行、基本的な条件設定であるベースケースおよび、元々の推算結果と比較

#### ① GRAPEモデルの改良

- ・ GRAPE 2018年モデルをベースに改良
- ・ 新規技術オプションとして、アンモニア、有機ハイドライドを水素の船舶輸送用キャリアに追加
  - ーアンモニアの利用方式には直接燃焼と脱水素利用の2方式を設定
  - ーコスト・効率・エネルギー消費等の諸元はIAEが過去に実施したサプライチェーン分析\*に準拠
- ・ 他組織が実施した水素需要推算の想定を再現できるように、水素発電電力量、各用途向け水素供給量等の上限・下限を設定できるようにパラメータを追加

#### ② “Hydrogen Scaling Up” by Hydrogen Councilとの比較

##### <HSUとの将来想定比較(主要条件)>

項目	GRAPE ベースケース (条件と計算結果を含む)	HSU	GRAPE HSUケース
CO <sub>2</sub> 排出 制約	～2030年 INDC準拠 2050年 世界全体で'90年比 50%削減 ・ 33Gt/y (2015) ・ 28Gt/y (2030) ・ 11Gt/y (2050) 2015-2050年の累積排出 量 1,119 Gt	ETP2017の気温上昇2℃ 抑制シナリオに準拠 ・ 33Gt/y (2015) ・ 26Gt/y (2030) ・ 13Gt/y (2050) 2100年までの累積排出量 を900Gtに抑制	ETP2017 の2DC 準拠、 以下の条件で制約 ・ 26.3Gt/y (2030) ・ 13.3Gt/y (2050) 2100 年までの累積排出量 を900Gt に抑制
GDP シナリオ	・ 2010年USDベースの GDP <sub>MER</sub> ・ 2015-50年の平均成長 率2.6%	・ 2015年USDベースの GDP <sub>PPP</sub> ・ 2015-50年の平均成長 率3.3%	・ (過去の計算との連続性 を考えて) ベースケースと同じ
人口	・ UN WPP2017 + 社人 研(日本) 準拠	・ UN WPP2015	・ ベースケースと同じ

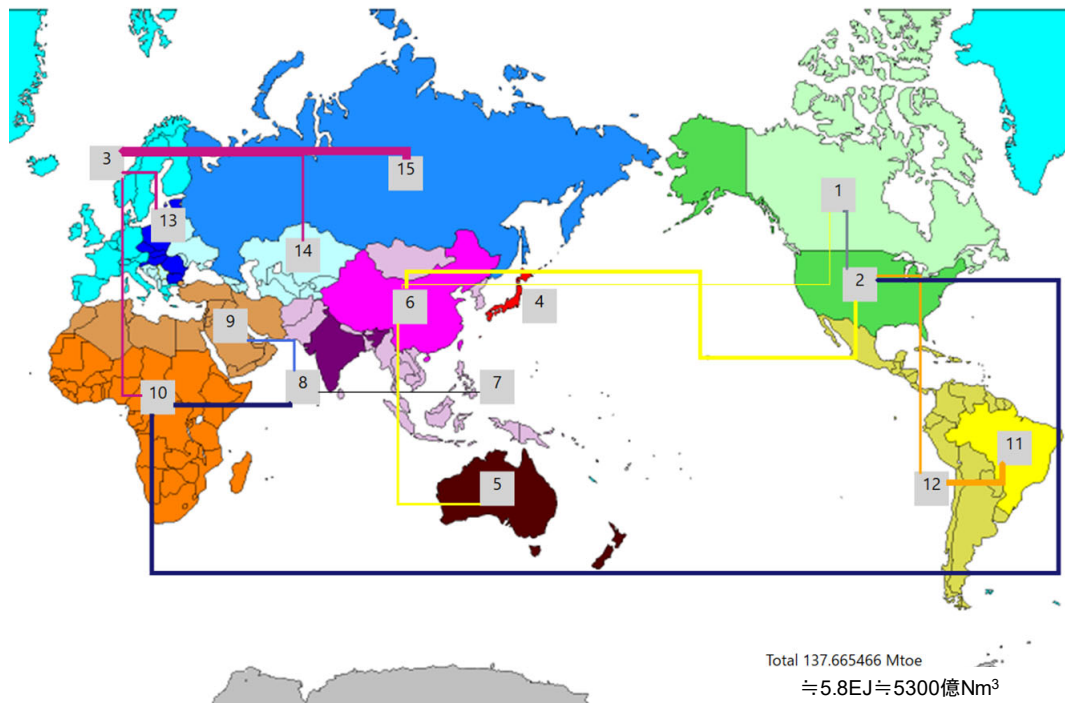
<HSUとの将来想定比較(水素技術)>

項目	GRAPE ベースケース (条件と計算結果を含む)	HSU	GRAPE HSUケース
国際水素サプライチェーン	<ul style="list-style-type: none"> <li>410万t/y (2030)</li> <li>4,600万t/y (2050)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>10万t/y (2030)</li> <li>5,500万t/y (2050)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現状のまま</li> </ul>
エネルギーキャリア	液化水素、ガス水素	液化水素、LOHC、NH <sub>3</sub> 、CH <sub>4</sub>	キャリアに有機ハイドライドとアンモニアを追加
Power to Gas	<ul style="list-style-type: none"> <li>690TWhの電解水素(再エネ) (2030)</li> <li>9,735TWhの電解水素 (2050)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>250-300TWhの余剰風力・太陽光が水素に変換される (2030)</li> <li>500TWhの余剰再エネ (2050)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>HSUに合わせた電解水素導入量の上限制約を追加</li> <li>300TWh (2030)</li> <li>500TWh (2050)</li> </ul>
水素需要※ (2050)	<ul style="list-style-type: none"> <li>水素発電 688TWh/y</li> <li>FCV 5億台</li> <li>FCTラック 5,890万台</li> <li>産業用/家庭用水素(定置部門) ごくわずか</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水素発電 1,500TWh/y</li> <li>FCV 4億台</li> <li>FCTラック 500万台</li> <li>産業用水素 130Mt/y</li> <li>家庭用水素 94Mt/y</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水素発電、FCV、FCTラックをHSU相当に下上限設定</li> <li>産業用水素の導入下限 133Mt/y</li> <li>家庭用水素 94Mt/y</li> </ul>

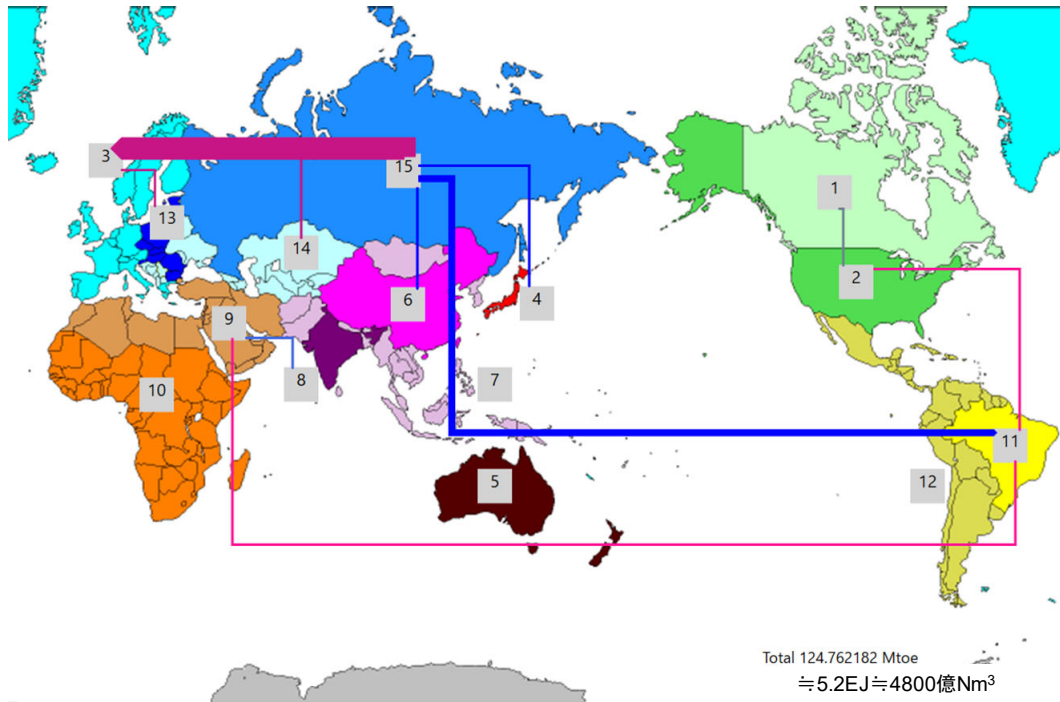
※ Mtは換算値、GRAPE内ではtoe単位で設定

<計算結果・まとめ>

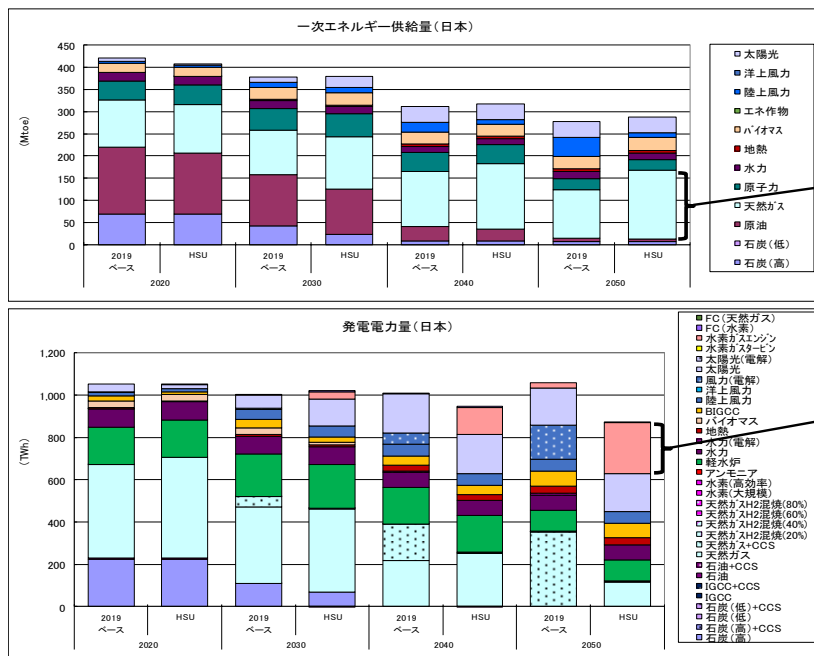
<試算結果(国際水素輸送 ベース 2050年)>



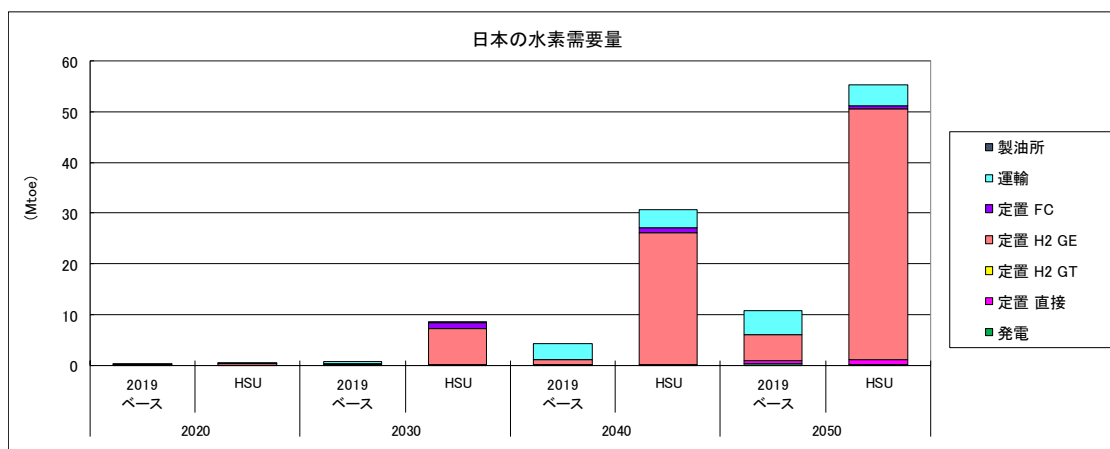
<試算結果(国際水素輸送 HSU 2050年)>



<試算結果(日本・全体)>

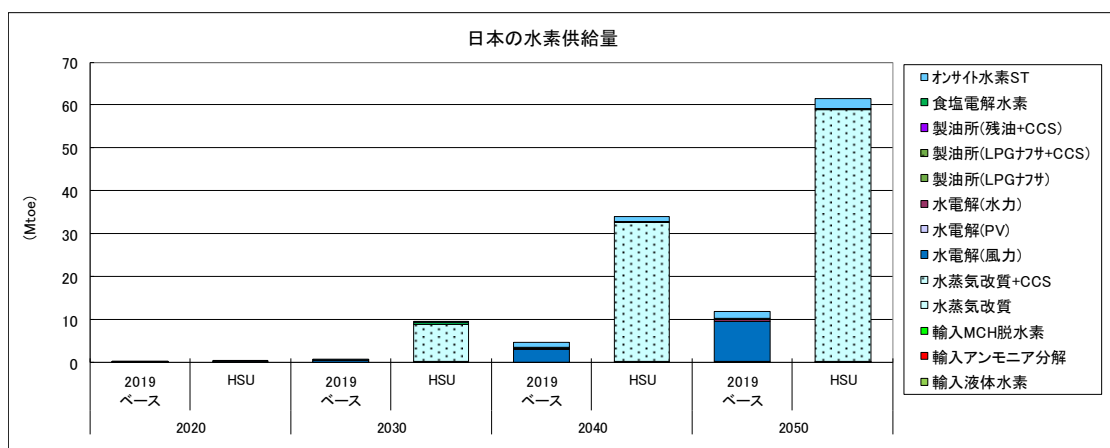


### <試算結果(日本・水素需要)>



- ・日本の水素需要はベースケースに比べて大きく伸び、特に定置用の水素ガスエンジンコジェネでの水素需要が約10倍となる。  
→ 「定置」水素需要の下限制約のために増加していると推測される
- ・家庭用燃料電池、水素の直接燃焼も増加する。

### <試算結果(日本・水素供給)>



- ・ベースケース → HSUケースで水素の供給源は9割以上が天然ガスとなり、国内再エネ水素はゼロとなる。
- ・天然ガスの形で水素を間接的に輸入している形態となる。

### <まとめ>

- ・GRAPEのベースケースと比較するとHydrogen Scaling Upの将来想定は、水素源を天然ガスに強く依存しており、産業、家庭用の電熱源としての水素利用を重視している。  
ー再エネからの水素製造量が対照的に非常に少なく、1.5EJ/78EJ (2050) となっている  
ーHydrogen Scaling Up内での水素需給の整合性は明確には示されていない

- ・ HSUの読み込み、条件設定の修正等、モデルの更なる改良等、今後も検討の余地がある  
と考えている
- － 交通部門での水素需要不一致の分析
- － 特に定置部門の水素需要に対する直接的な導入量設定



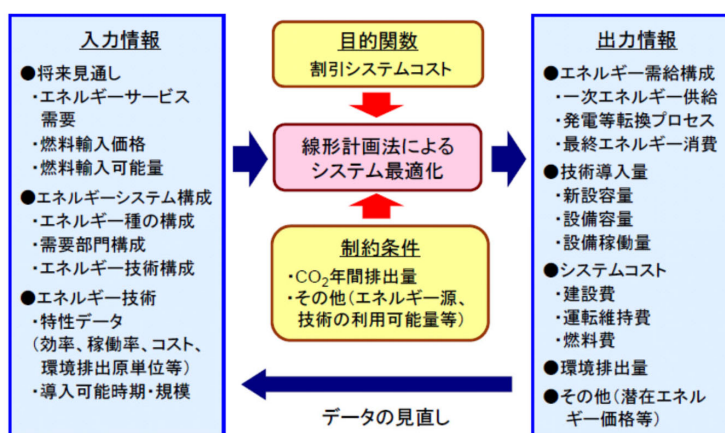
## 6. 2020 年度

### <実施内容・計算条件>

2050年カーボンニュートラルを満たすCO2排出量を満たしつつ、日本の各部門の水素需要を詳細に分析するため、日本の1国モデルでエネルギー需要が細分化されているTIMES-Japanモデルとのソフトリンクを行い、日本の水素需要量が高・中・低の3ケースにおける分析を実施した。

## TIMES-Japanの概要

- IEA実施協定(現在は技術協力プログラム)の一環として開発されたプラットフォーム
- 時間：1期5年，2070まで。年単位で需給バランス。電力のみ夏，冬，中間期および昼夜の6時間帯。
- 需要：産業，家庭，業務，運輸。各需要をさらに分割
- 割引率：3%/年



出典：（社）日本原子力産業会議 資料

### ※エネルギーサービス需要の例

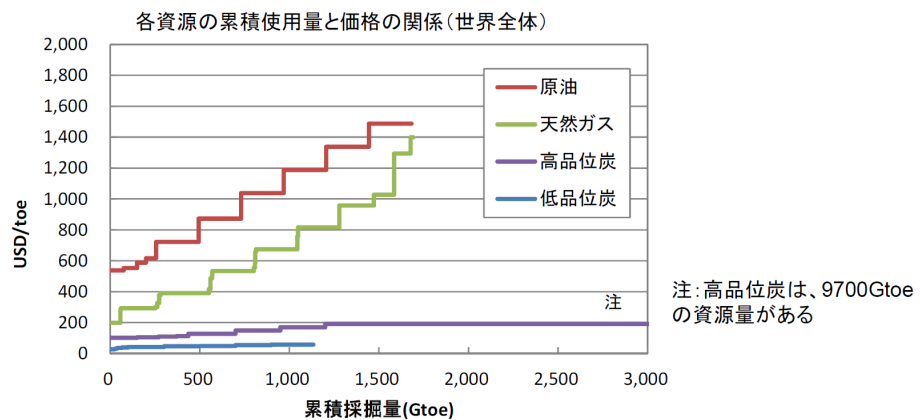
産業部門：素材産業の生産量(トン)、化学等の有効エネルギー量(PJ)  
運輸部門：輸送サービス量(人キロ、トンキロ)  
民生部門：業務・家庭の有効エネルギー量(PJ)

## 主な前提条件(1)

- 人口・GDP
  - World Population Prospects: The 2017 Revisionを15地域に集計。日本は、国立社会保障・人口問題研究所のデータ（2018年）を利用
  - GDPは、OECDのENV-GROWTHモデルのSSP2を利用
- エネルギー需要
  - WEO2020のStated Policies Scenario (SPS) と Sustainable Development Scenarios (SDS) から作成
  - 2030年までは各国がNDCに沿った行動をとるとしてSPSベースのシナリオとし、以後、2050年に向けてSDSへ遷移するようエネルギー需要を作成。

## 主な前提条件(2)

- 資源価格は、各地域ごとに累積使用量の増加とともに価格が上昇する様子を表現。
  - 採掘コストが低い箇所から採掘していくため。
  - 資金流入による市場価格の乱高下は反映していない。
- 資源価格 = 生産コスト + ロイヤリティ
- 資源価格の初期値
  - 原油：80\$/bbl
  - 天然ガス：17\$/MMBtu(日本CIF)
  - 高品位炭（無煙炭、瀝青炭、亜瀝青炭）92\$/t
  - 低品位炭（褐炭）：35\$/toe
- IIASAのGlobal Energy Assessment(2012)の資源量を基にコストカーブを作成
- 資源量評価には大きな不確実性がある。



## 主な前提条件(3)

- GRAPE及びTIMES-Japanの考慮する水素製造技術

	GRAPE	TIMES-Japan
水素製造	水蒸気改質 ガス化 水電解	水蒸気改質（天然ガス） 石炭ガス化 水電解
水素輸送	国際輸送：液化水素（海上）、パイプライン（陸上） 国内配送：タンクローリー（ガス、液化水素）・パイプライン	国際輸送（輸入）：液化水素  小口配送（タンクローリー 液・ガス） 大口配送（パイプライン ガス）
水素利用	専焼・混焼ガスタービン 水素コジェネ（ガスエンジン、ガスタービン、燃料電池） 石油精製 合成燃料製造（ <b>メタノール、合成ガソリン</b> ）※ 天然ガスへの混焼 乗用車、バス、トラック、航空、船舶（航空と船舶は燃料代替）	水素専焼発電 燃料電池（PEFC） 産業（ <b>水素製鉄、高温炉</b> ） 合成燃料製造（ <b>メタノール、合成ガソリン</b> ） ハイタン 石油精製（重油分解、脱硫） 乗用車、バス、トラック、他

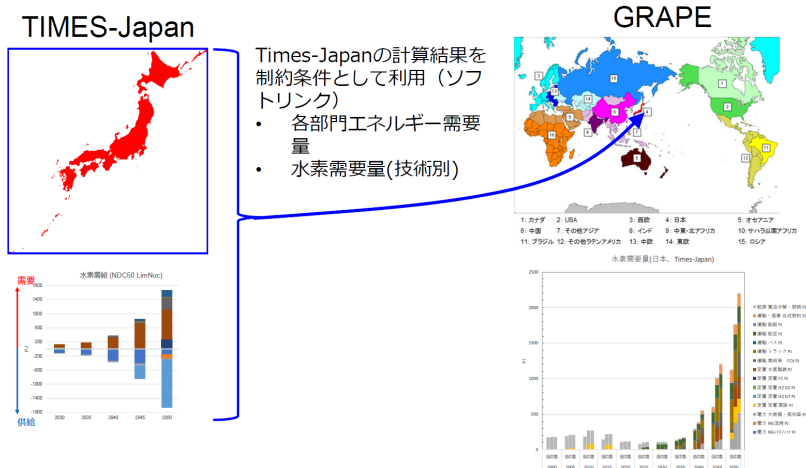
両モデルの技術オプションを整合的にするため、**太字**の技術オプションをGRAPEへ追加

## モデルの主な変更点

- Times-Japanとのソフトリンク
- CO<sub>2</sub>制約の変更
- 技術オプションの追加
  - 合成燃料製造（水素・CO<sub>2</sub>を原料としたメタノール・合成ガソリン製造）
  - 水素製鉄
  - 直接空気回収

## Times-Japanとのソフトリンク

- 日本をTIMES-Japanで分析し、その結果をGRAPEの入力条件として利用し、世界全体の結果を得る。
  - Times-Japanの結果は、2070年の日本のゼロエミッションを試算したKato and Kurosawa (2021)をベースに条件を変更して試算。
- エネルギー需要（電力、運輸、定置）と各部門・技術の水素需要を日本の需要量として設定
- 前年度実施したHydrogen Scaling upを参考に設定した前提条件は、他の報告書等を考慮して改訂して分析に用いる。



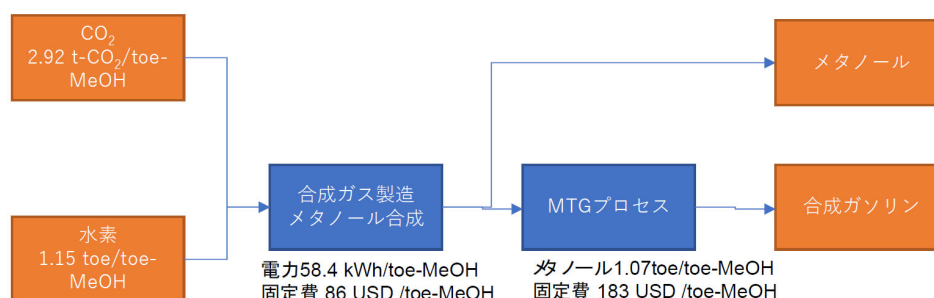
Kato and Kurosawa, (2021), Sustainability Science, accepted.

## CO<sub>2</sub>排出制約の変更

- 日本の2050年カーボンニュートラル
  - 日本：40 Mt-CO<sub>2</sub>/yの土地利用による吸収を想定
- EUの2050年気候ニュートラル
  - 292 Mt-CO<sub>2</sub>/yの土地利用による吸収と非CO<sub>2</sub>GHGの排出320 Mt-CO<sub>2</sub>/yの差の28 Mt-CO<sub>2</sub>/yをエネルギー部門でネット・ネガティブとして削減
    - EC (2018) A Clean Planet for allの1.5TECHシナリオを参照
- 中国の2060年カーボンニュートラル
  - 1,150 Mt-CO<sub>2</sub>/yの土地利用による吸収を想定
    - UNFCCCに提出された隔年報告書の2014年の値を参照
- 国際航空、国際船舶は90年比50%減
- その他（変更なし）
  - 2030年
    - 各国NDCを参考に地域ごとに設定
  - 2050年
    - 90年比世界全体で半減

## 追加技術オプション 合成燃料製造

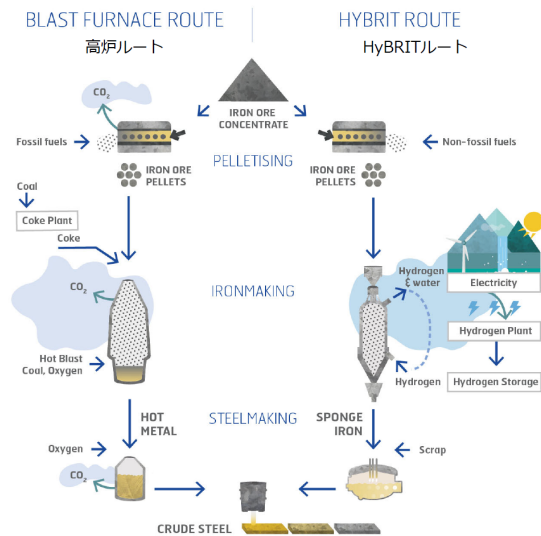
CO<sub>2</sub>と水素からメタノールを合成し、必要に応じて合成ガソリンを製造。



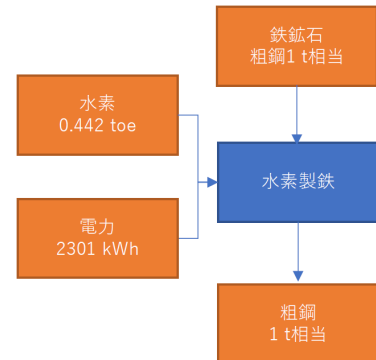
メタノール合成: Perez-Fortes(2016)の質量バランスを参考に設定  
MTG: GCA(1987)、IEA ETSAP、等を参考に設定

## 追加技術オプション 水素還元製鉄

- 水素により酸化鉄を還元しスポンジ鉄を製造、電気アーク炉で溶解して粗鋼を製造する技術(DRI-EAF)
- IEA(2019)の前提条件からモデル用の前提条件を作成。定置部門の粗鋼生産に必要な高品位炭を水素と電力で代替



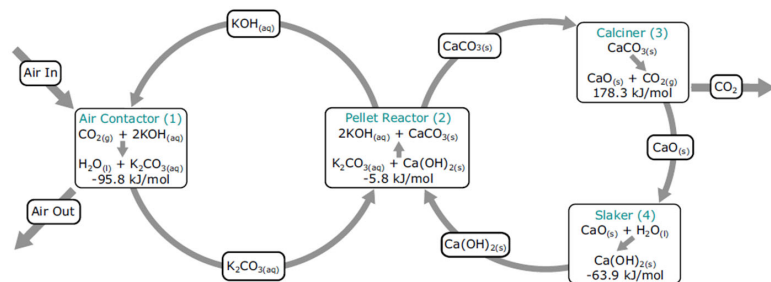
HYBRIT Webページ



IEA, The future of Hydrogen, 2019

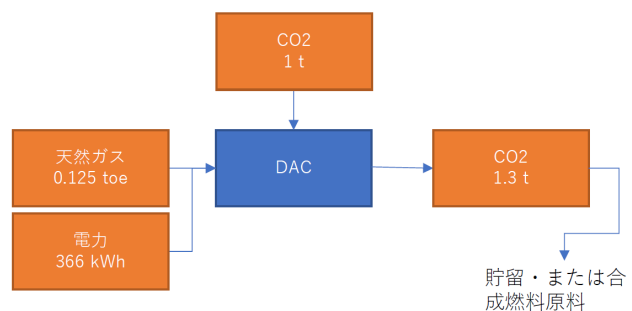
## 追加技術オプション 直接空気回収

- 苛性溶液(KOH, NaOH)やアミン系の固体吸着材を用いて大気中からCO<sub>2</sub>を回収する技術
- 大規模化がより容易と考えられる苛性溶液を用いるシステムをモデルに追加



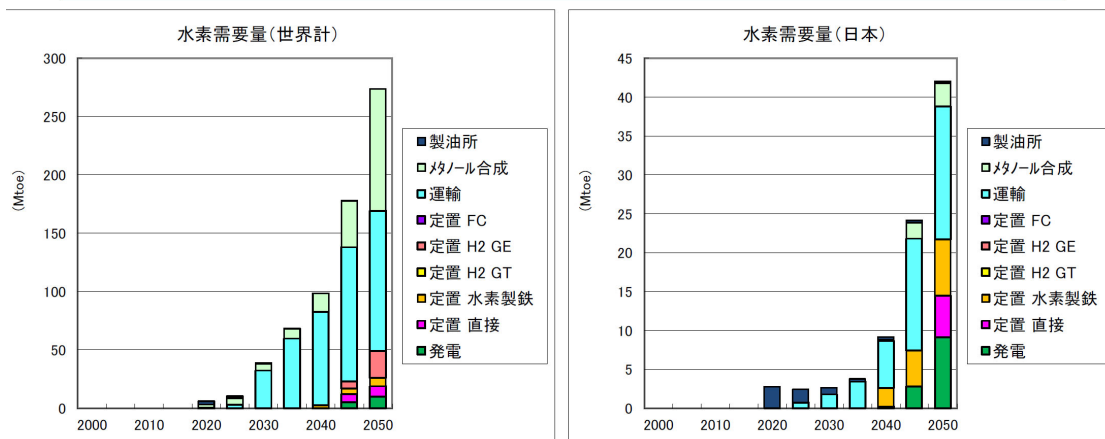
商用プラントのイメージ

Keith et al., Joule 2, 1–22



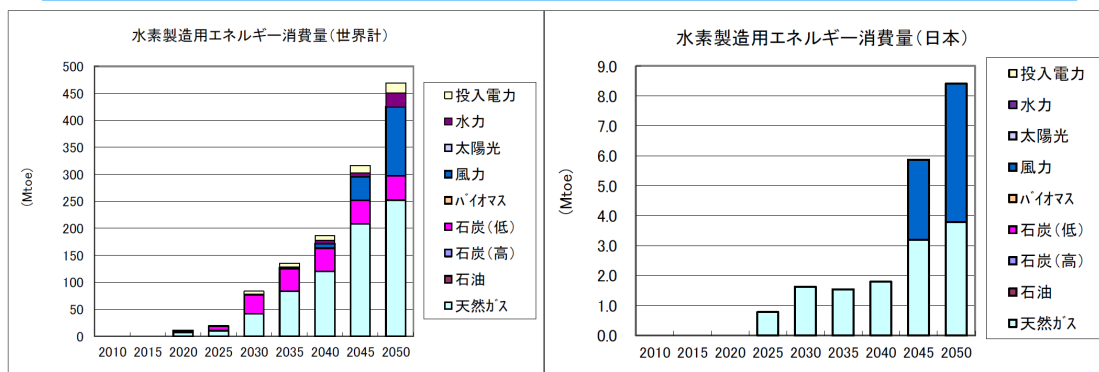
<計算結果・まとめ>

## 計算結果：水素需要(中ケース)



- 世界では、2050年に約10,600億Nm<sup>3</sup>/年の水素が、メタノールの合成、運輸に利用される。メタノールは運輸と定置で利用される。
- 日本では、2050年に1,600億Nm<sup>3</sup>/年（1460万t/年）の水素が運輸、発電、水素製鉄等利用される。

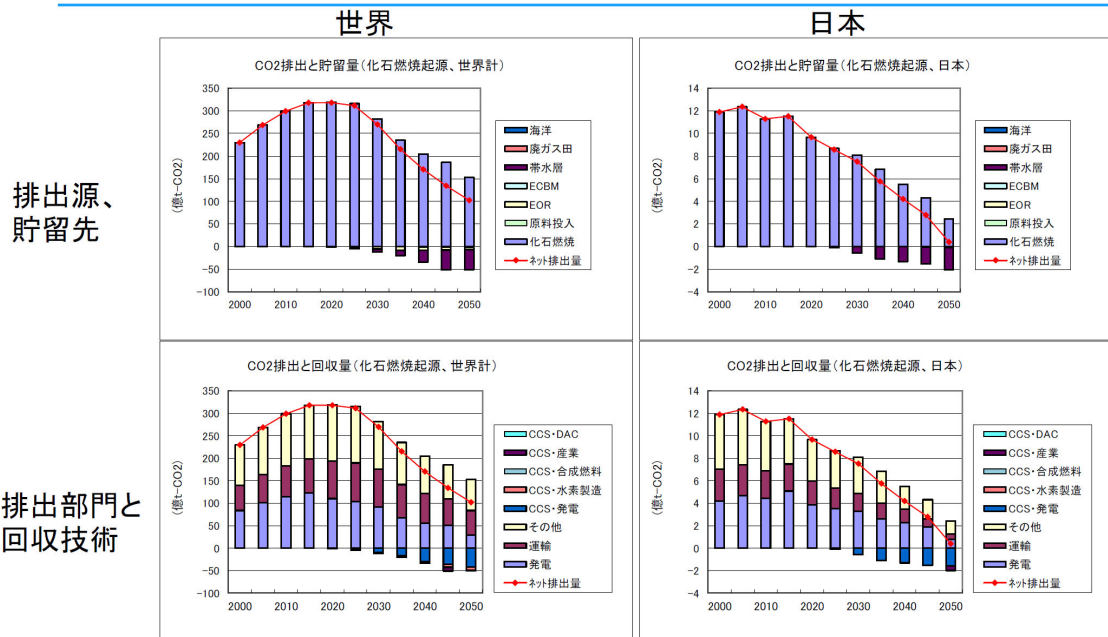
## 計算結果：水素製造投入エネルギー(中ケース)



- 世界では、2050年では、天然ガス改質と風力発電による水電解、低品位炭から水素が製造される。
- 日本では、風力の水電解で水素が製造されるが、大半は輸入である。

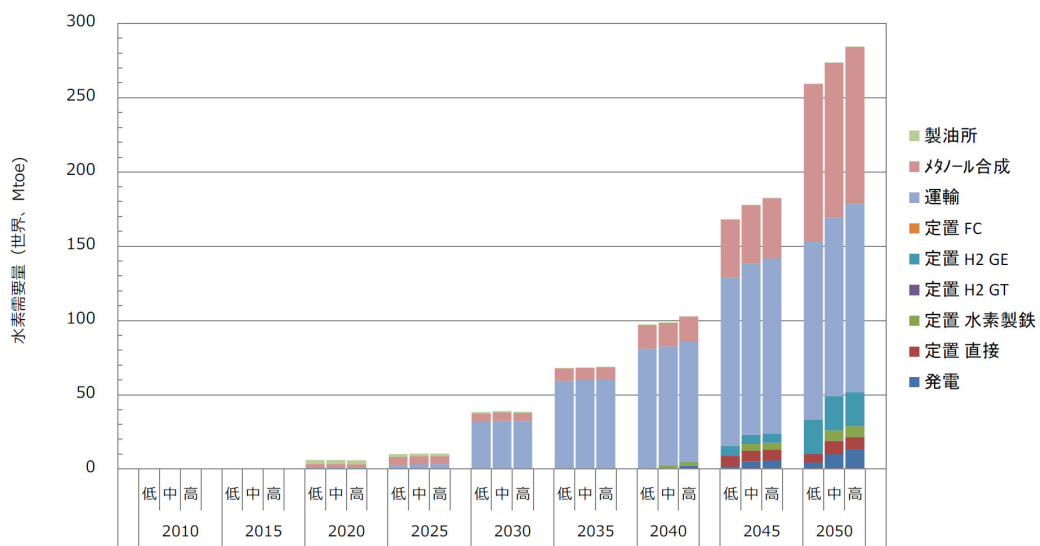


## 計算結果：CO<sub>2</sub>排出量(中ケース)



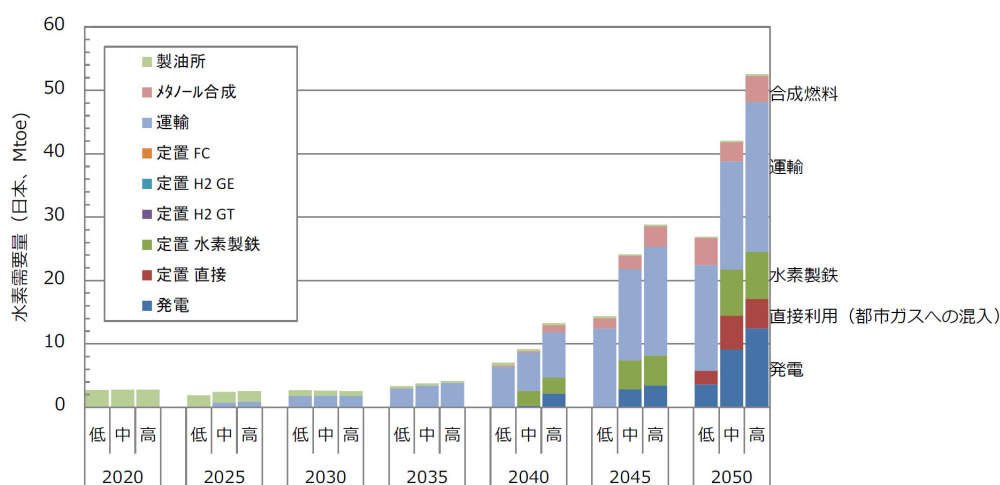
- CCSは主に発電部門（IGCC、BECCS）で用いられる。
- ネガティブエミッションはBECSSのみでDACは導入されない。（DACの導入はバイオマス資源量の想定に依存）

## ケース別水素需要量（世界）



- 2050年の中ケースで10,600億Nm<sup>3</sup>/年程度の水素需要がある。  
水素需要量は、バイオマス資源量、運輸部門の乗用車やトラックの前提条件でも変わりうる。
- BECCSによるネガティブエミッションによって発電部門の脱炭素化が進み、他の部門での削減要求がやや甘くなり、水素の導入が減少している。

## ケース別水素需要量（日本）



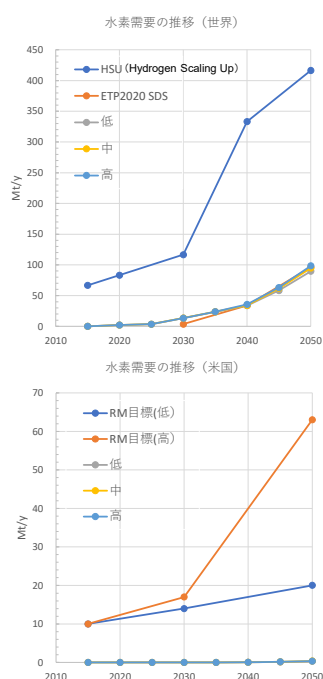
- 2050年カーボンニュートラルの条件において、低、中、高のケース2050年に日本の水素需要量は、1,000～2,000億Nm<sup>3</sup>/年
- 主な用途は、発電、運輸、水素製鉄

## まとめ

- 日欧等の炭素中立（または気候中立）を反映し、Times-Japanと連携してGRAPEモデルを用いて世界のエネルギー需給を分析。
- 中ケースにおいて、世界全体で2050年に約10,600億Nm<sup>3</sup>/年の水素需要がある。
  - 水素需要量は、バイオマス資源量、運輸部門の乗用車やトラックの前提条件でも変わりうる。
  - BECCSによるネガティブエミッションによって発電部門の脱炭素化が進み、他の部門での削減要求がやや甘くなり、水素の導入が減少している。
- 2050年カーボンニュートラルの条件において、低、中、高のケース2050年に日本の水素需要量は、1,000～2,000億Nm<sup>3</sup>/年。主な用途は、発電、運輸、水素製鉄。



## 各国のロードマップ等との比較



- 政策、業界団体文書、国際機関報告書等の値を整理
  - 主体により目的や評価法が異なることに留意
- 世界
  - ETP2020 SDSとおおむね整合的
- 日本
  - 水素基本戦略の2050年の値は中と低の間
  - グリーン成長戦略の2050の値と高ケースは、おおむね整合的
- 米国
  - 業界団体報告の値とは乖離がある
  - 日・欧のCO<sub>2</sub>制約が厳しくなり、他の先進国全体の制約が相対的に緩くなったと考えられる。
- EU (GRAPEのWEU(西欧)とCEU(中欧)の和)
  - FCH JUのロードマップの範囲内

世界：  
Hydrogen Council, Hydrogen Scaling Up, 2017  
IEA, Energy Technology Perspectives 2020, 2020  
日本：  
水素基本戦略, 2017  
2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, 2020  
米国：  
Fuel Cell & Hydrogen Energy Association, ROAD MAP TO A US HYDROGEN ECONOMY, 2019  
EU：  
FCHJU, HYDROGEN ROADMAP EUROPE, 2019  
EC, A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, 2020

LAE The Institute of Applied Energy

※米国とFCHJUの目標値は既存の水素需要量を含む

26

## 今後の方向性

- 世界各国・地域のカーボンニュートラル政策※のCO<sub>2</sub>制約への反映
- 計算期間の拡大（例：2070年程度まで）
- カーボンニュートラルに寄与しうる新技術・燃料の考慮
  - エネルギーキャリア
    - MCH
    - アンモニア（特に船舶燃料、石炭混焼等）
    - 合成燃料(efuel)（ディーゼル、航空燃料等）
- 技術オプションのデータ更新
  - 乗用車、トラック、バスの効率・コスト
  - 他

※現時点での参考資料：UNFCCCに提出された各国の長期戦略、第二回 産構審 地球温暖化対策検討WG 資料3 等