

水素需要推算

2022年2月28日

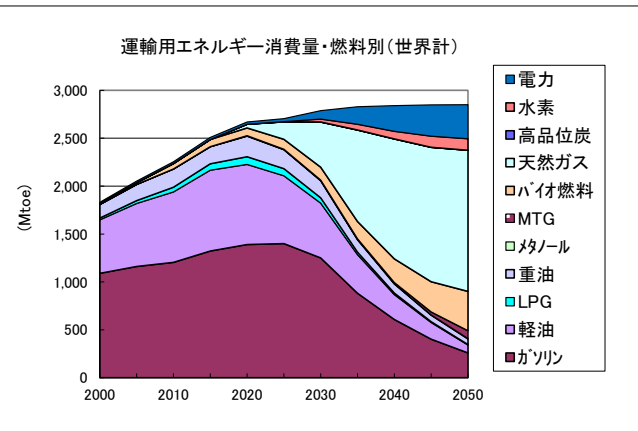
(一財) エネルギー総合工学研究所 石本

実施内容の概要

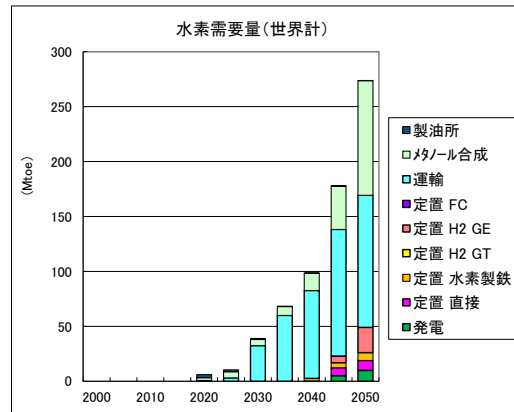
- ゼロエミ水素ビジョン研の目標
 - 2050年を対象に、グローバルなエネルギーバランスにおけるCO₂フリー水素の貢献を明示し、日本のネットゼロエミの姿を示す。
- 上記の目標が達成できるよう、下記を実施。
 - 客観的なデータに基づく分析の実施
 - 分析結果と得られる示唆を本研究会において議論を行う。

モデルによる分析結果の例

各部門における水素需要量の推移



世界・各地域の水素需要量の推移



CO₂削減への水素を含む様々な技術の寄与

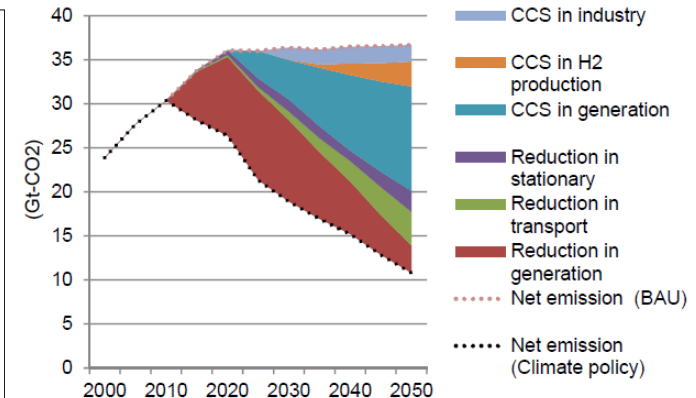
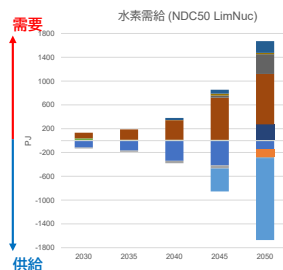
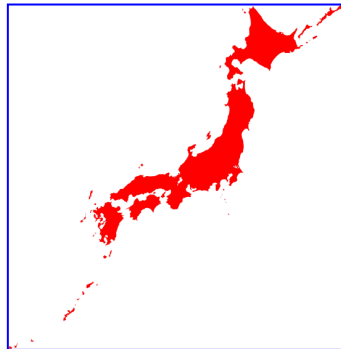


Fig. 10 CO₂ emission reduction contribution in the world

モデル計算の枠組み

- 日本については、TIMES-Japanモデルを用いて分析し、その結果をGRAPEの日本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・技術の水素需要量を日本の需要量として設定

TIMES-Japan (日本モデル)



Times-Japanの計算結果を制約条件として利用 (ソフトリンク)

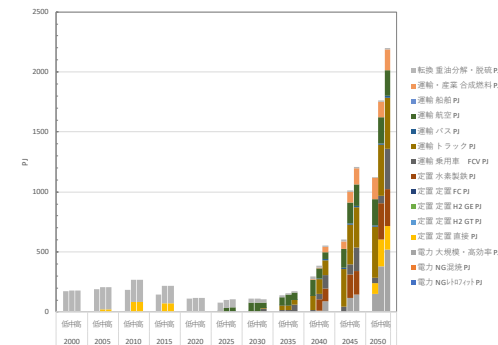
- 各部門エネルギー需要量
- 水素需要量(技術別)

GRAPE (世界モデル)



1: カナダ 2: USA 3: 西欧 4: 日本 5: オセアニア
6: 中国 7: その他アジア 8: インド 9: 中東・北アフリカ 10: サハラ以南アフリカ
11: ブラジル 12: その他ラテンアメリカ 13: 中東 14: 東欧 15: ロシア

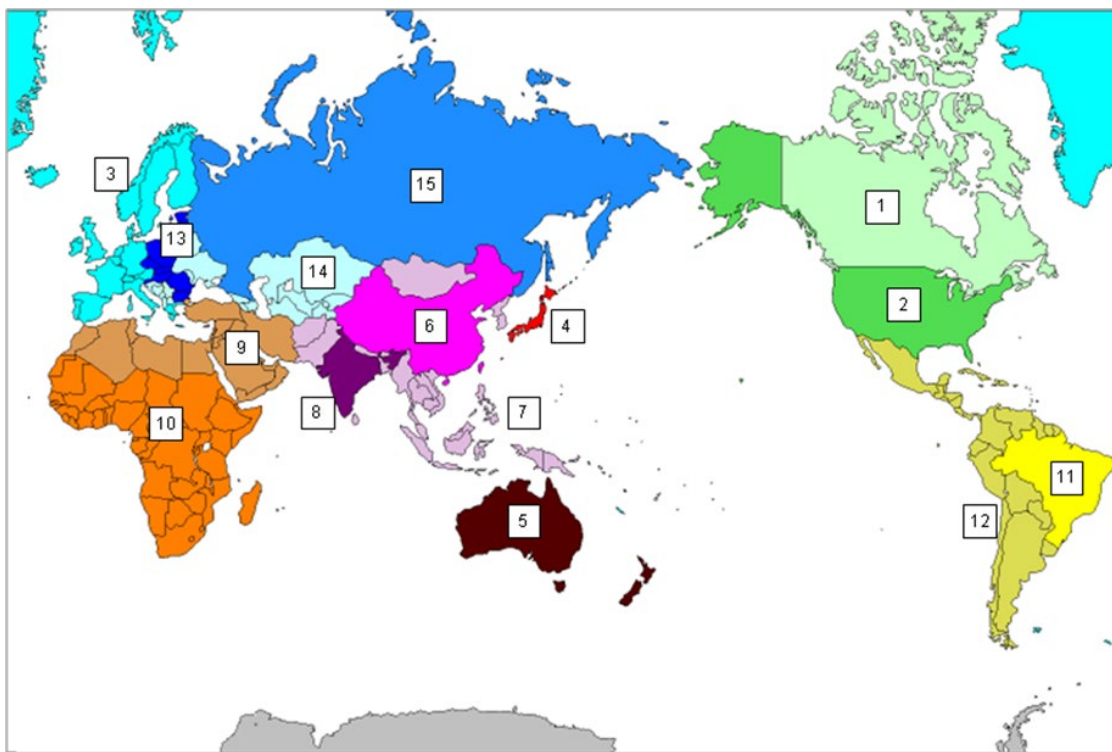
水素需要量(日本, Times-Japan)



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、制約条件を満たす「規範的な姿」を示しているご理解いただきたい。

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、2070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、その他の地域は2055年以降に運輸、発電、定置部門で利用可能と想定。

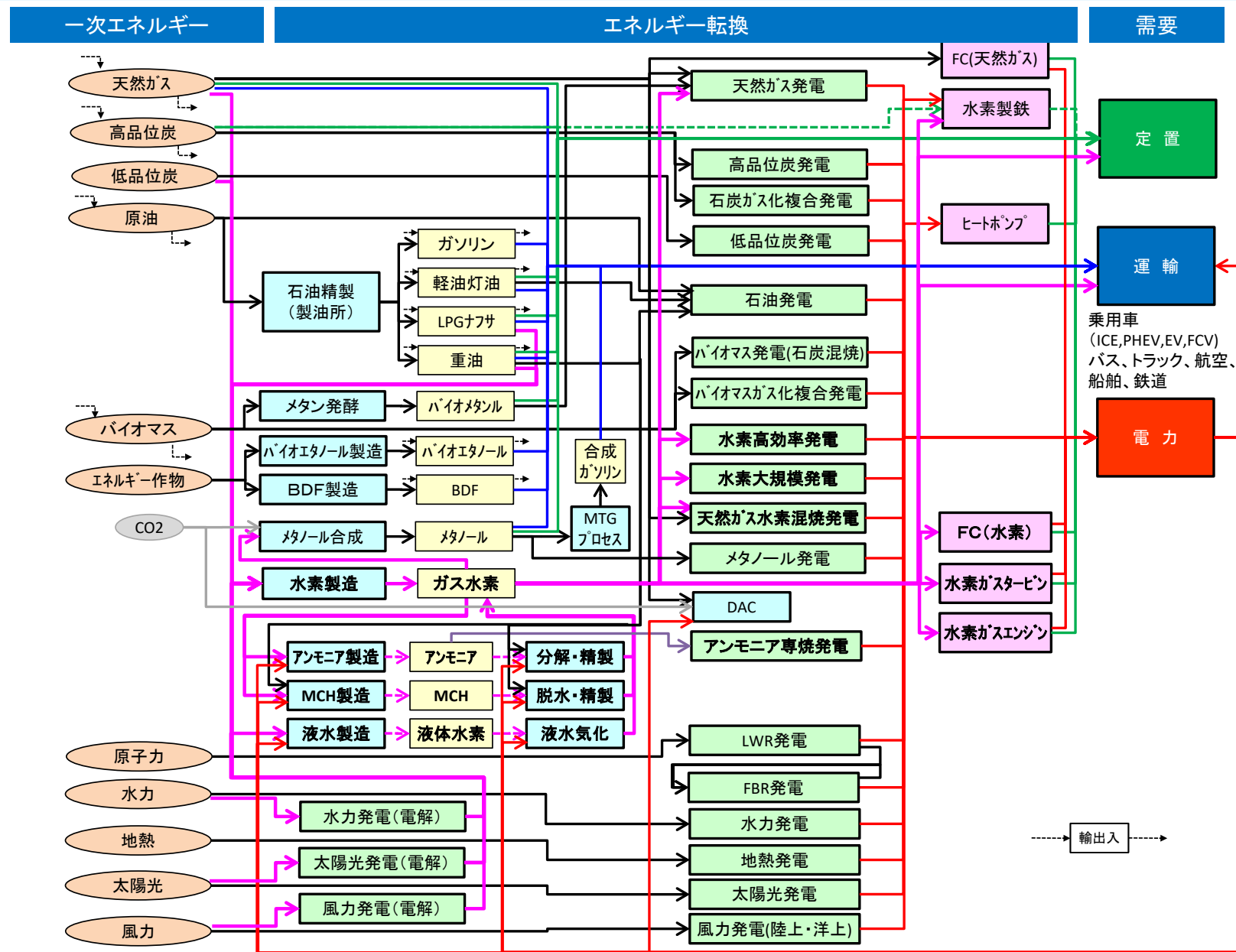


1: カナダ 2: USA 3: 西欧 4: 日本 5: オセアニア
6: 中国 7: その他アジア 8: インド 9: 中東・北アフリカ 10: サハラ以南アフリカ
11: ブラジル 12: その他ラテンアメリカ 13: 中欧 14: 東欧 15: ロシア

- 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
- CO₂排出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、CO₂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）
 - CO₂排出量、CCS量
 - 等

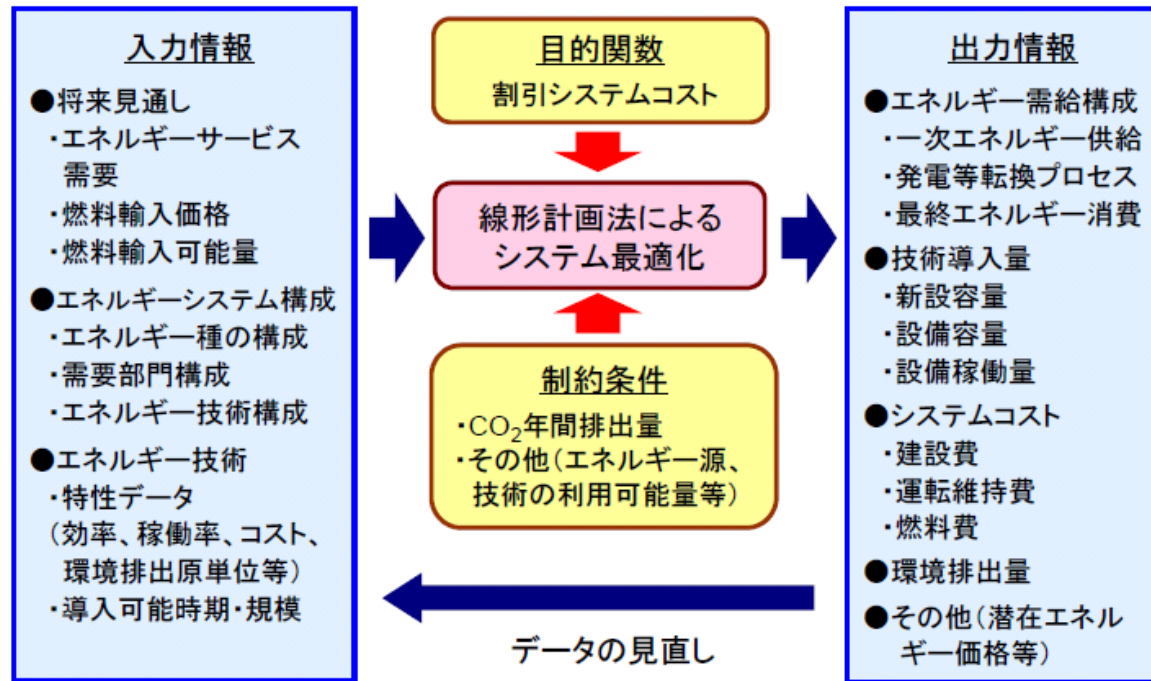
本モデルは、様々な制約条件の下、世界全体のエネルギーシステムコストを最小化している。したがって、計算結果は、実世界の予測を示すのではなく、2050年に世界のCO₂排出を半減している「規範的な姿」を示しているご理解いただきたい。

GRAPEモデルのエネルギー需給フロー（1地域分）



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)

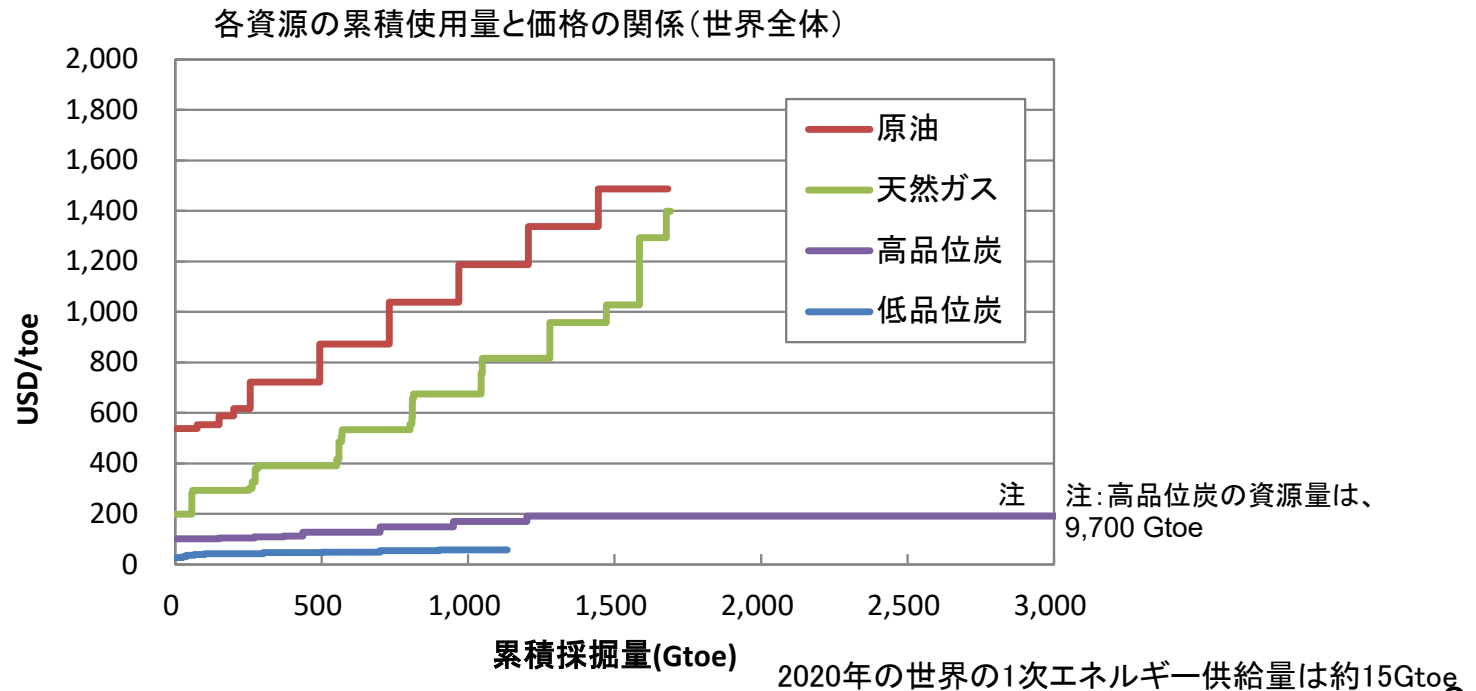
- エネルギー需要
 - 各国のNDCs（国が決定する貢献）を考慮し、2030年ころまではSTEPS(Stated Policy Scenario)、2050年に向けてSDSシナリオの需要に徐々に移行すると想定。
- エネルギー資源
 - 各地域の各資源それぞれの累積使用量が増加すると資源価格が上昇する想定した。資源価格は採掘コストと相関があり、採掘コストが低い資源から採掘されると想定したため。短期的な需給の影響による資源価格の上昇・下降は含んでいない。
- CO₂排出制約
 - 化石燃料由来のCO₂排出が対象。（本資料では、これをネットゼロにすることをカーボンニュートラルとしている。）
 - 2050年、2060年、2070年に世界全体でカーボンニュートラルになる3ケースを設定。
- 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、水素製鉄
 - 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。
 - その他：CO₂と水素を利用した合成燃料製造（メタノール経由、FT合成）
 - アンモニア利用技術（石炭混焼、船舶燃料）
- CCS
 - ETP2017のSDSの各地域のCO₂貯留量を上限に設定

主な前提条件(1)

- 人口・GDP
 - World Population Prospects 2019の中位推計を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（2020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（GRAPEモデル）
 - IEAのWorld Energy Outlook 2021(WEO2021)のStated Policies Scenario（STEPS）とSustainable Development Scenarios（SDS）から作成
 - 2030年までは各国がNDCsに沿った行動をとるとしてSTEPS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。



水素技術 (運輸、産業・民生、発電)

- 部門毎に選択可能な技術オプションして、下記を考慮

運輸 (乗用車、トラック、バス、航空、船舶)



出典: トヨタ自動車

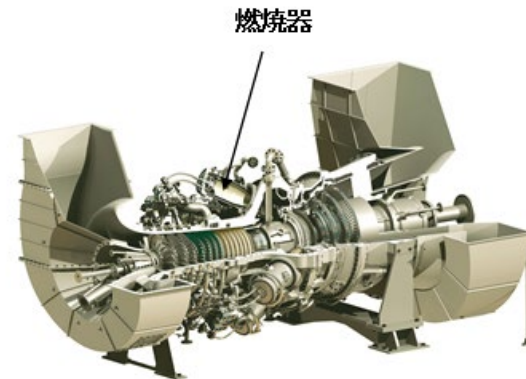
民生・家庭 (燃料電池コジェネレーション、水素製鉄)



出典: 一社 燃料電池普及促進協会HP



発電 (専焼・天然ガスとの混焼)



産業 (コジェネレーション、水素製鉄他)

出典: 川崎重工業資料

水素技術 (運輸、産業・民生、発電)

• GRAPE及びTIMES-Japanの考慮する水素技術

	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、アンモニア、MCH,メタン 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、アンモニア混焼火力 水素コジェネ (ガスエンジン、ガスタービン、燃料電池) 水素製鉄 合成燃料製造 (メタノール、合成ガソリン、FT 合成) ※ 天然ガスへの混焼 石油精製 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、アンモニア混焼火力 燃料電池 (PEFC) 産業 (水素製鉄、高温炉) 合成燃料製造 (メタノール、合成ガソリン、FT 合成) ハイトン 石油精製 (重油分解、脱硫) 乗用車、バス、トラック、他

モデルの主な改良・追加点

- CO₂制約の更新
 - 各国の中期目標、CN達成時期、CO₂制約への反映
- 新技術・燃料の考慮
 - アンモニア直接利用（船舶燃料、石炭混焼）
 - MCH、合成メタンの追加（水素キャリアとしてまとめて表示）
 - 合成燃料(efuel FT合成)の追加（主に自動車、航空燃料向け）
 - 乗用車、トラック、バスのコスト、効率のアップデート
- 天然ガス等資源量アップデート
 - シェールガスの賦存量のデータ更新

CO₂排出制約

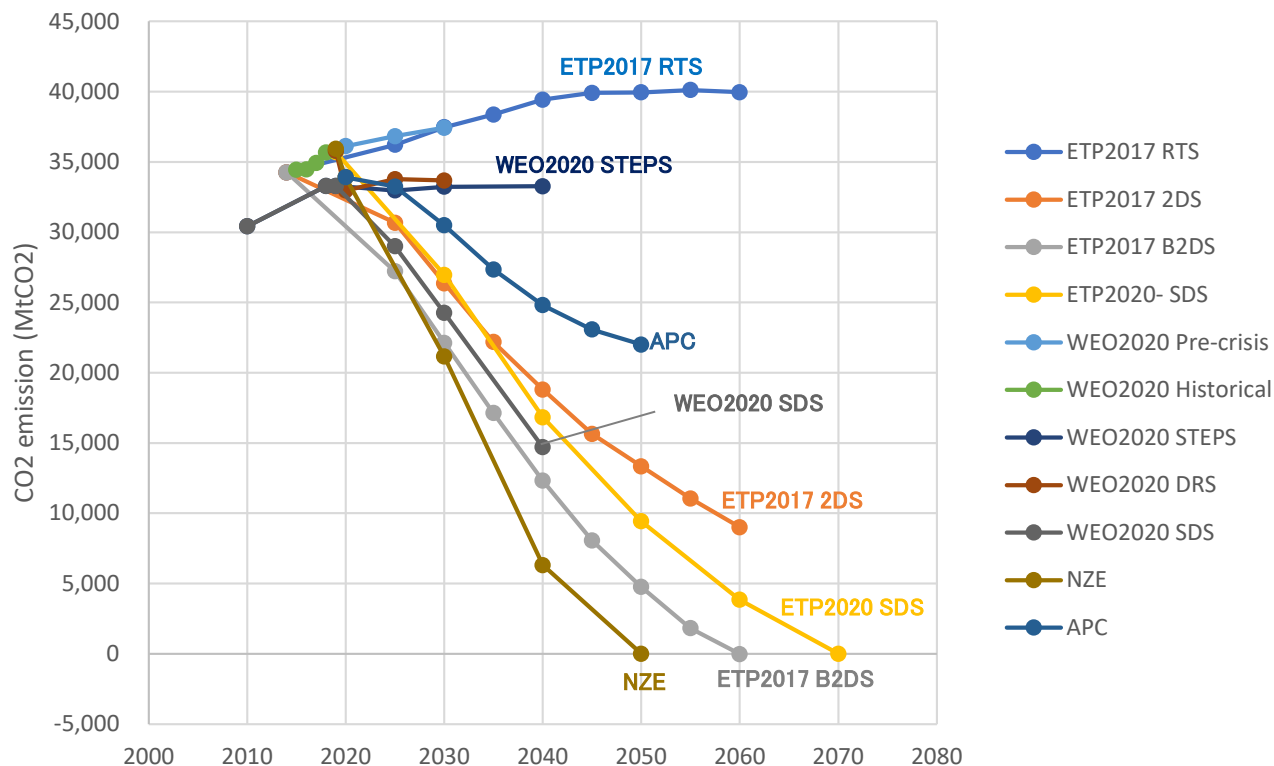
- 2030年
 - 各国NDC等を参考に地域ごとに設定

地域略称	名称	目標年	削減率	基準年
CAN	カナダ	2030年	-43%	2005年比
USA	アメリカ	2030年	-51%	2005年比
WEU	西欧	2030年	-55%	1990年比
JPN	日本	2030年	-46%	2013年比
OCE	オセアニア	2030年	-27%	2005年比
CHN	中国	2030年	CO2原単位65%減	2005年比
SEA	その他東南アジア	2030年	-29%	BAU比
IND	インド	2030年	-34%	2005年比
MEA	中東北アフリカ	2030年		
SSA	サハラ以南アフリカ	2030年		
BRA	ブラジル	2030年	-43%	2005年比
OLA	その他ラテンアメリカ	2030年		
CEU	中欧	2030年	-55%	1990年比
EEU	東欧	2030年		
RUS	ロシア	2030年	-30%	1990年比

CO₂排出制約（世界）

- ETP2017 B2DS(Beyond 2°C Scenario)のCO₂排出量を中心に、その他の地域の削減度合によって上下に1ケース、合計3ケースで分析を行う。
 - (1)2050年カーボンニュートラル
 - (2)2060年カーボンニュートラル（今回報告のケース）
 - (3)2070年カーボンニュートラル
- 地域別のCO₂排出量制約も考慮
 - 2050年カーボンニュートラル 日本、米国、カナダ、EU、豪州
 - 2060年カーボンニュートラル 中国

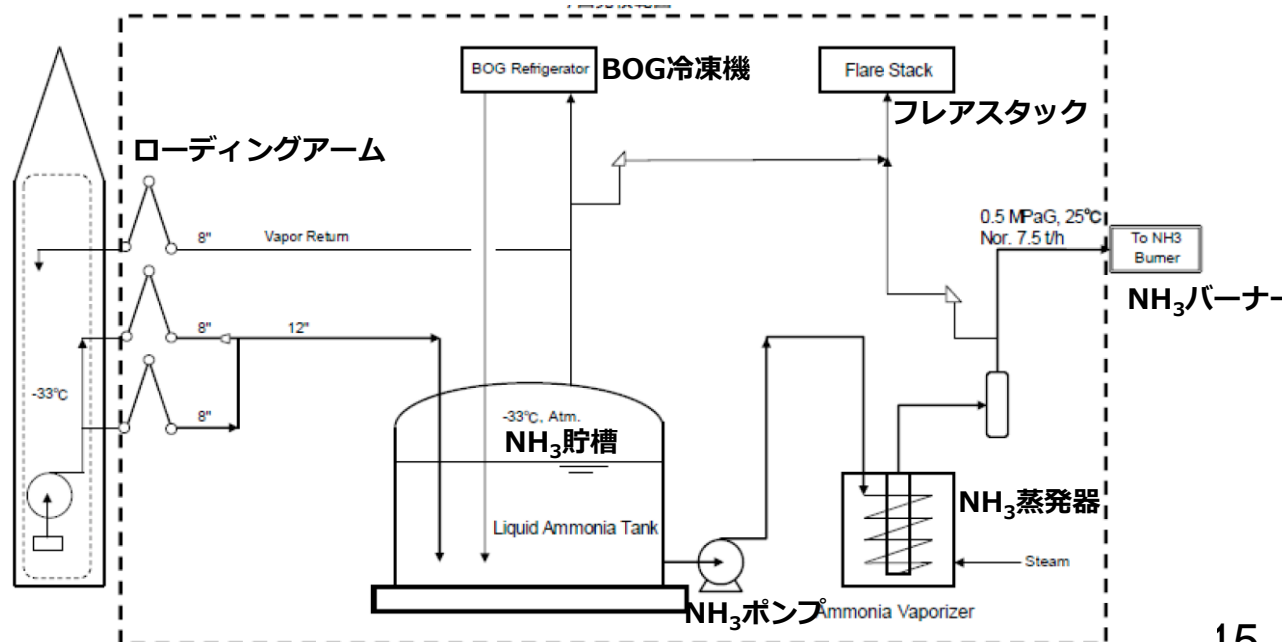
様々なシナリオの世界のCO₂排出量



- 2050年以降
 - 世界全体
 - 2070年、2060年、2050年カーボンニュートラルの3ケース
 - 計上範囲：化石燃料利用によるCO₂排出
 - 日本の2050年カーボンニュートラル
 - 日本：40 Mt-CO₂/yの土地利用による吸収を想定
 - 米国、カナダ、豪州 2050年カーボンニュートラル
 - EUの2050年気候ニュートラル
 - 292 Mt-CO₂/yの土地利用による吸収と非CO₂GHGの排出320 Mt-CO₂/yの差の28 Mt-CO₂/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-CO₂/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

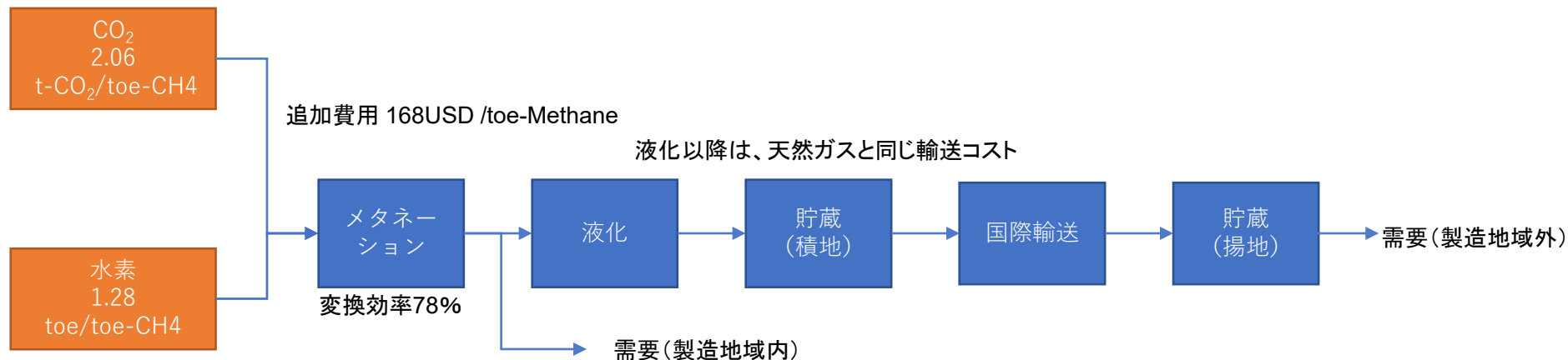
アンモニアの直接利用（特に船舶燃料、石炭混焼）

- 船舶燃料
 - － 追加コスト無しの燃料代替を想定（他の燃料と同様）
- 既設石炭火力発電におけるアンモニア混焼
 - － 混焼率20%（熱量ベース）～100%（2050年）
 - － 追加コストの範囲
 - ローディングアーム、貯槽、気化設備、フレアスタック、電気・計装、土木、配管工事等
 - － 文献の追加設備の見積もりから100万kWへスケールアップして設備費を試算(約143億円)
 - － 追加設備費140USD/kW混焼濃度の増加とともに0.7乗で追加コストが増加すると想定



合成メタンの設定

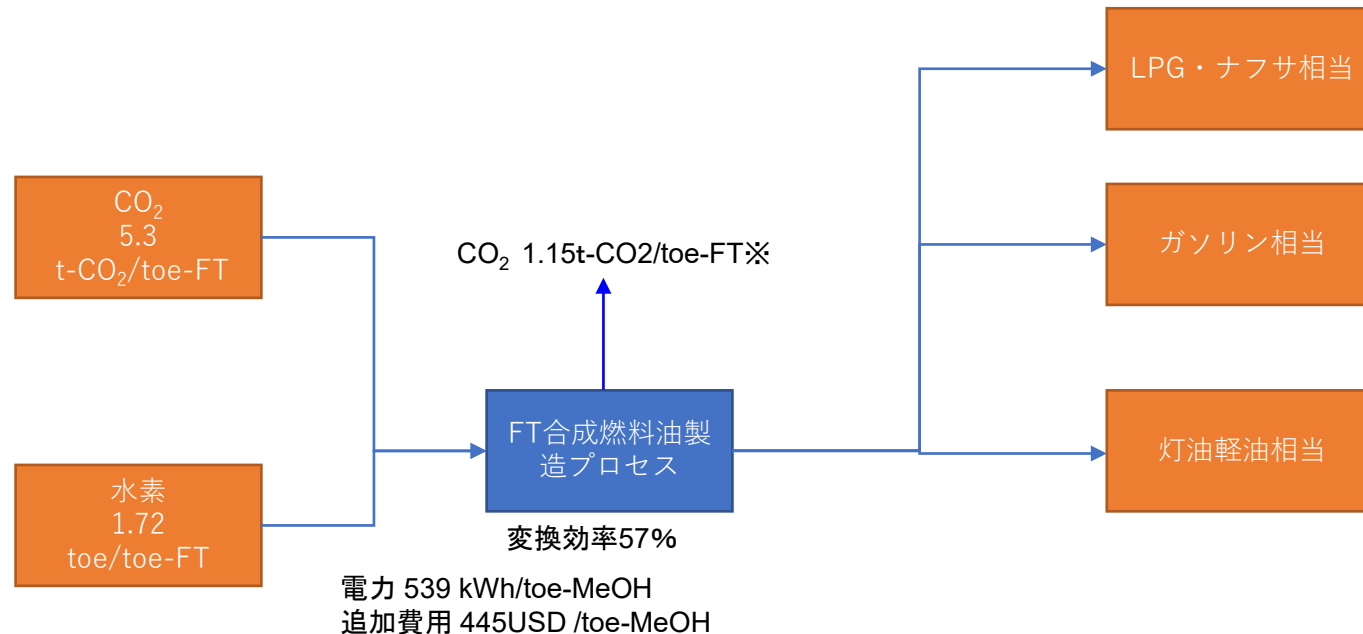
- CO₂と水素を原料に合成メタンを製造、製造後は、輸送・利用について、天然ガスと同様に取り扱えると仮定



Blanco et al. (2018)のデータから試算。図中の数値は2030年の設定

追加技術オプション 合成燃料製造（FT合成）

- CO₂と水素から炭化水素燃料を製造。製造後は、輸送・利用について、モデル内で対応する油種と同様に取り扱えると仮定



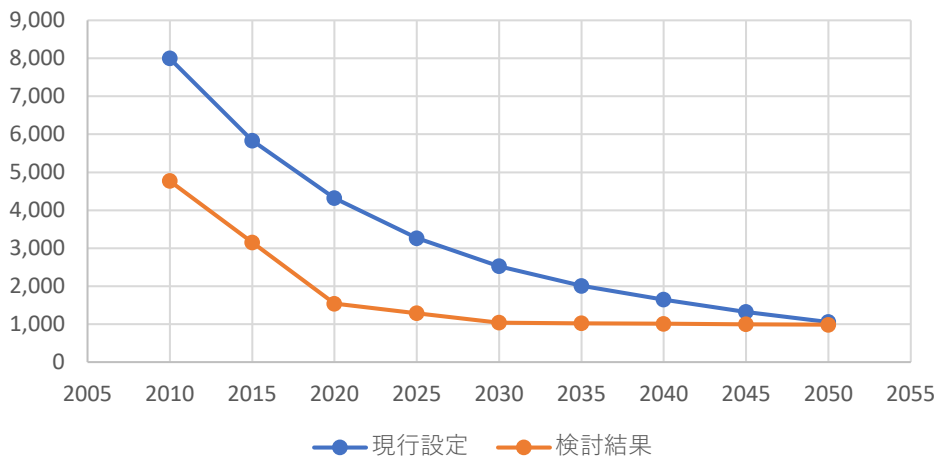
Koning et al. (2015) およびZang et al. (2021) のデータに基づき試算
※合成した成分の一部を系内の加熱（逆シフト反応）に利用し、大気放出

設定条件確認箇所

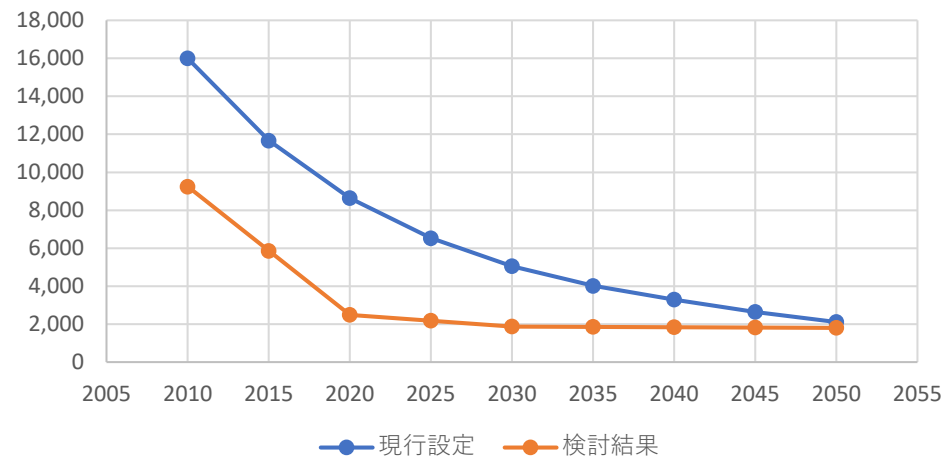
● 運輸部門

- 乗用車、トラック、バスのコスト、効率のアップデート
 - DOEのトラック向け燃料電池システムコスト、車載用水素貯蔵システムのコストの目標値と想定される燃料電池システム出車載水素貯蔵量を参考に検討を進めた。
 - 現在の足元のリース価格とは大きく異なることや2050年の車両コストが現在の設定とおおむね整合していることから、現在の設定から変更しないこととした。

トラック車両コスト（万円/台）



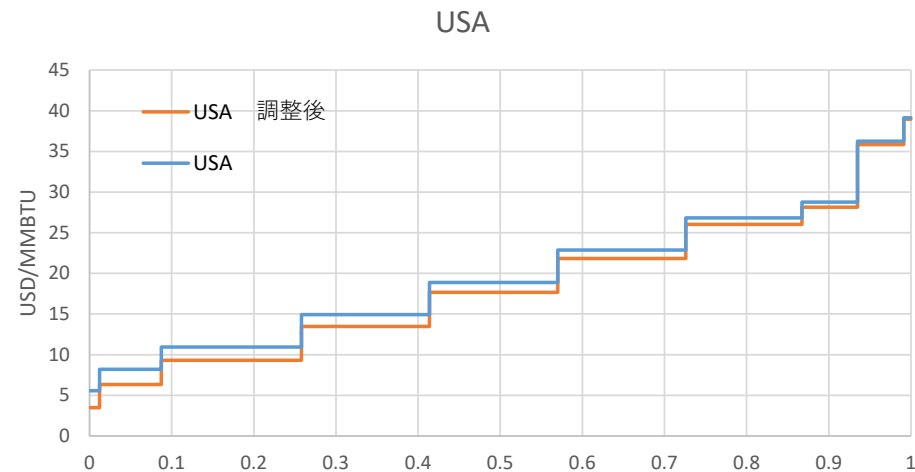
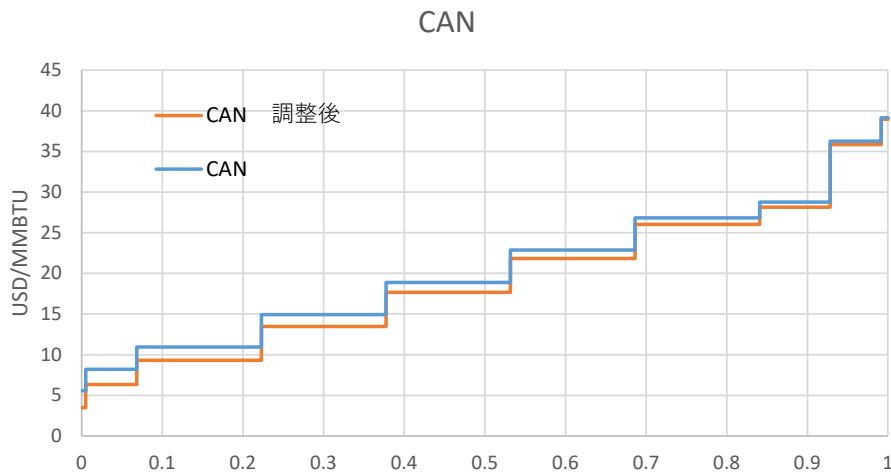
バス車両コスト（万円/台）



設定条件変更箇所（その他）

- 天然ガス等資源量アップデート

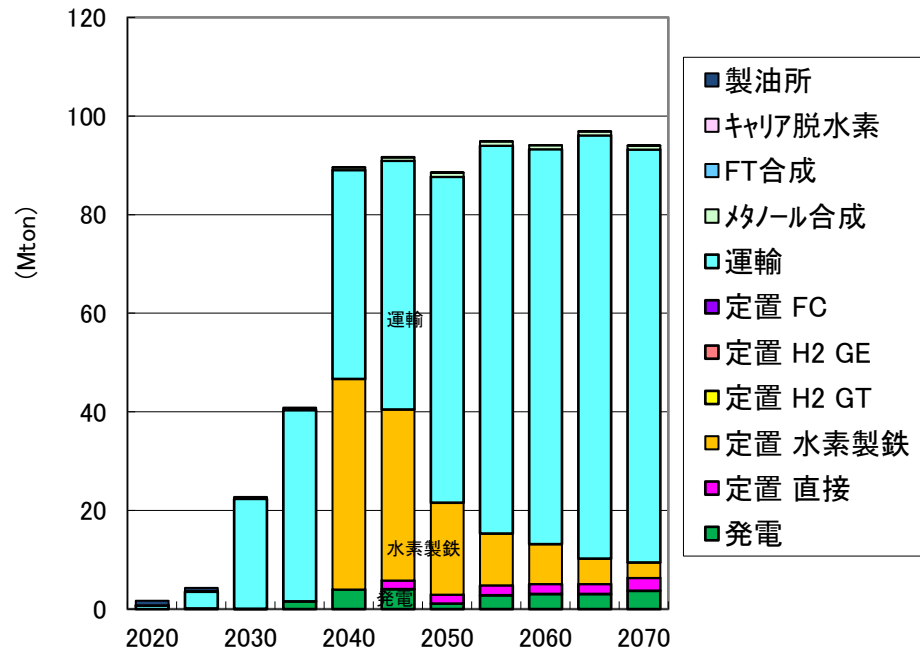
- 現在の資源量はIIASAのGlobal Energy Assessment(2012)に基づき設定。
- これを置き換えられる世界全体の資源量のデータを見いだせなかったため、資源量は変更なし。
- 米国、カナダについては、WEO2021の天然ガス価格（2020年 2 USD/MMBTU）を想定を参考に、2020年の価格を調整した。



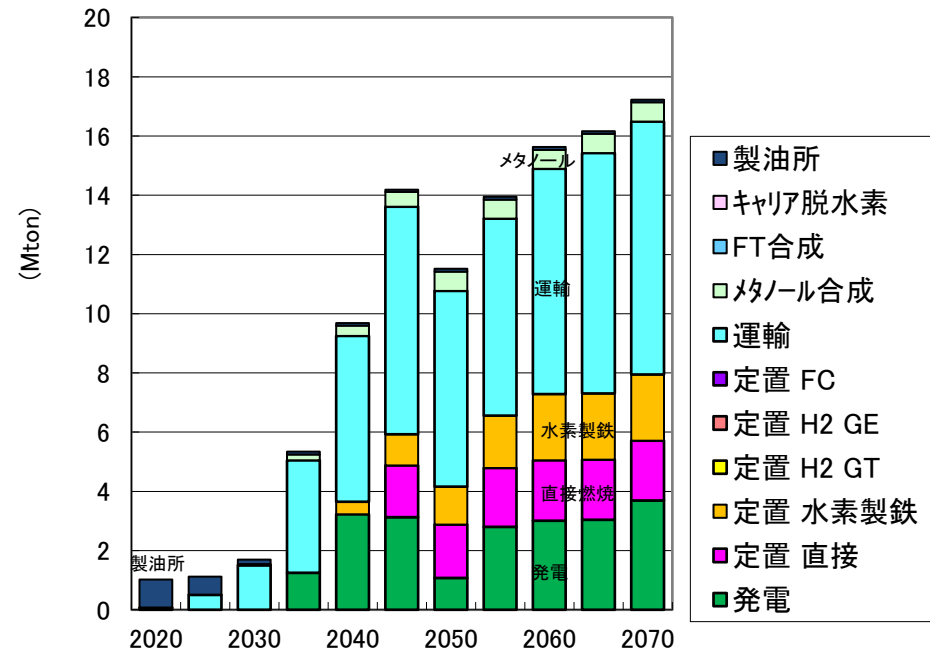
結果（水素需要量、部門別）

- 水素需要量は、2050年に向けて急激に増加し、2060年には約1億t。
- 世界の水素需要の内訳は、2060年に運輸向けが8割超、水素製鉄向けに9%、大規模発電向けが3%。
- 日本は2050年は、発電、運輸、製鉄などに2060年に1,560万tの水素を需要している。

水素需要量(世界計)

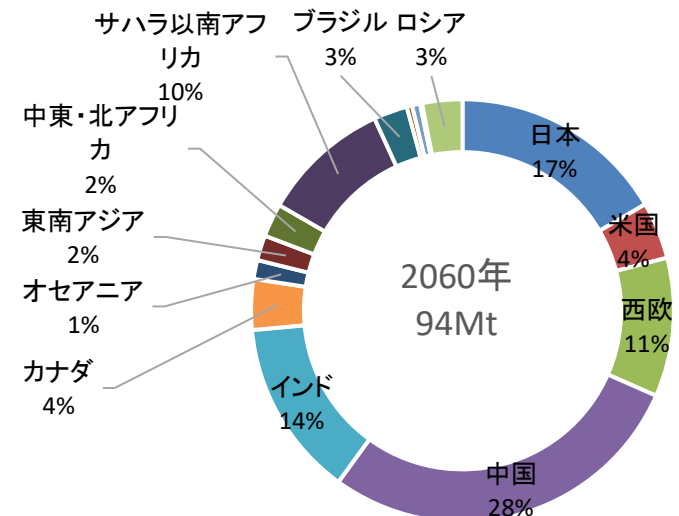
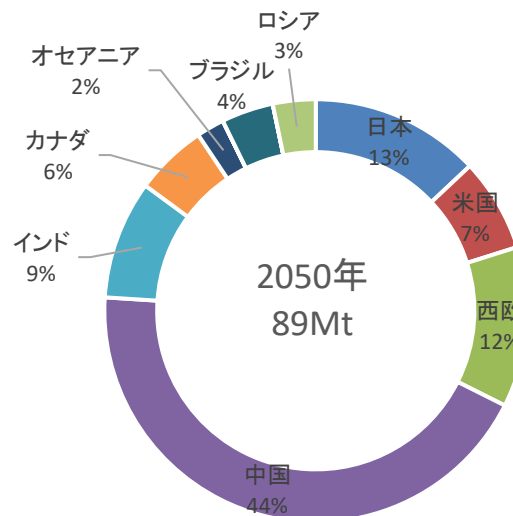
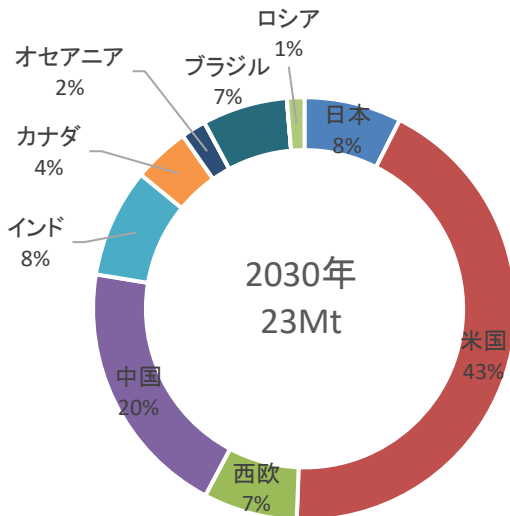


水素需要量(日本)



結果（水素需要量、地域別シェア）

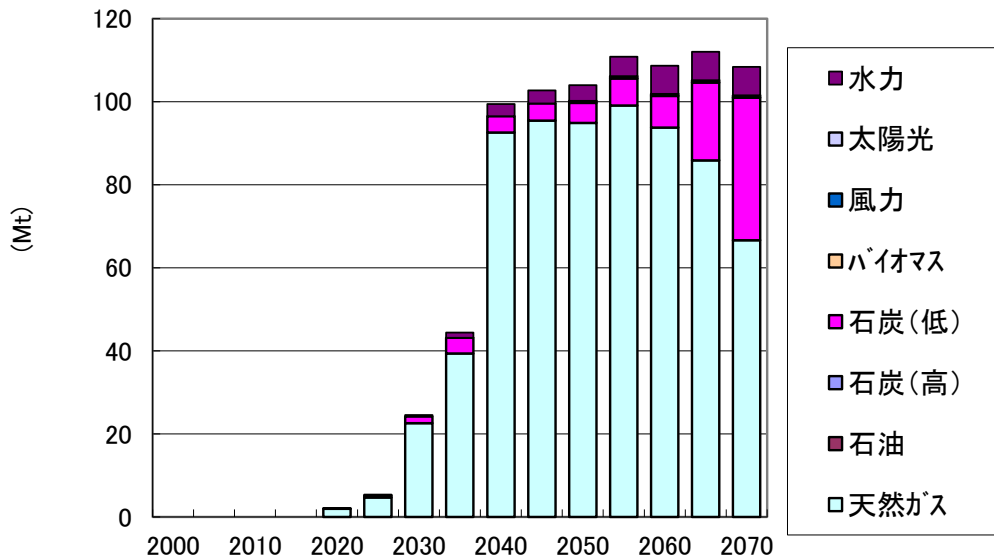
- 主要な水素需要地域
 - － 日本、米国、西欧、中国、インド
 - － エネルギー需要が大きい、または、CNの達成時期が早い地域
- 2050年にはこれらの5地域の需要量が世界全体の水素需要の9割弱を占める。



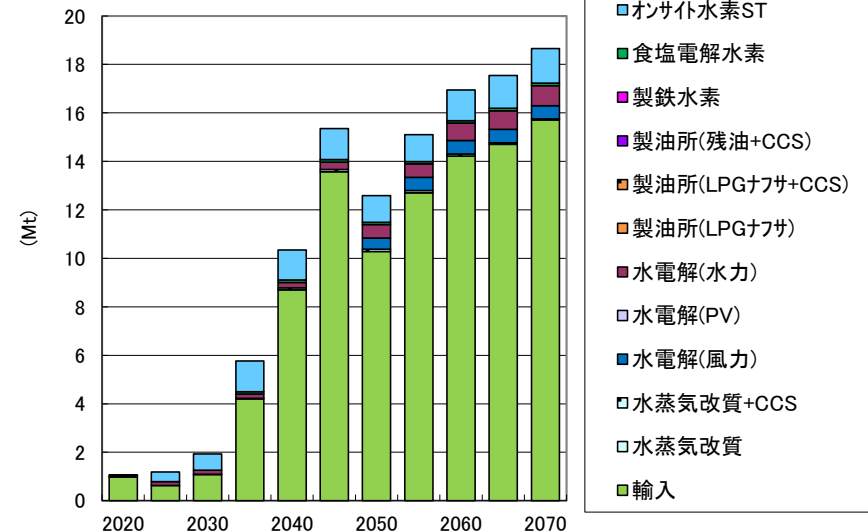
結果（水素製造量）

- 世界では風力や天然ガス、低品位炭、水力から年間1億 t 水素が製造される。
 - － 水素の貿易量は、2060年には4,580万tに上る。
- 期によって異なるものの、日本の水素の需要の約80%は海外からの輸入によって賄われている。

水素製造量(世界)



水素製造量(日本)



結果（発電電力量）

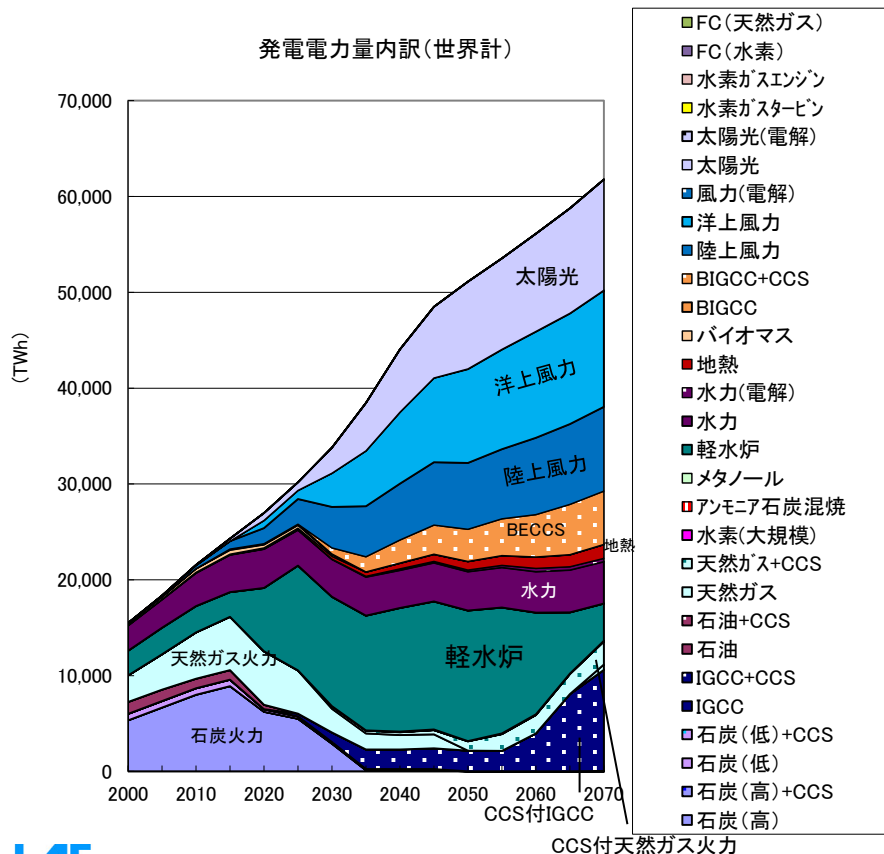
世界

- 太陽光、風力、バイオマスなどの再生可能エネルギー由来の発電技術が時間とともに増加
- 2060年では、再生可能エネルギー由来の発電技術が70%、原子力発電が18%
- 負の排出であるCCSを備えたバイオマスガス化発電（図中 BIGCC+CCS）も2060年では、全体の8%（再生可能エネルギーの内数）
- 2060年の世界の発電電力量当たりのCO₂排出量は負となっている(-74 g-CO₂/kWh)。

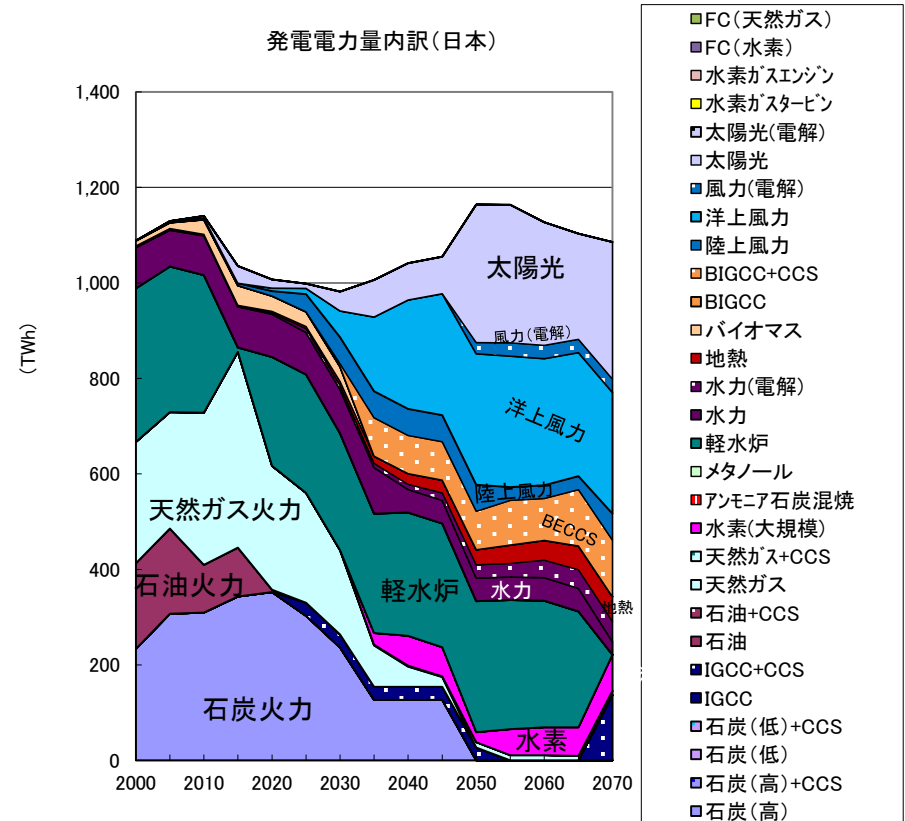
日本

- 石炭火力、天然ガス火力の低下に伴い、洋上風力、太陽光等の再エネの割合が上昇
- 2060年に水素火力は発電電力量の5%程度を占める

発電電力量内訳(世界計)



発電電力量内訳(日本)



結果（乗用車保有台数）

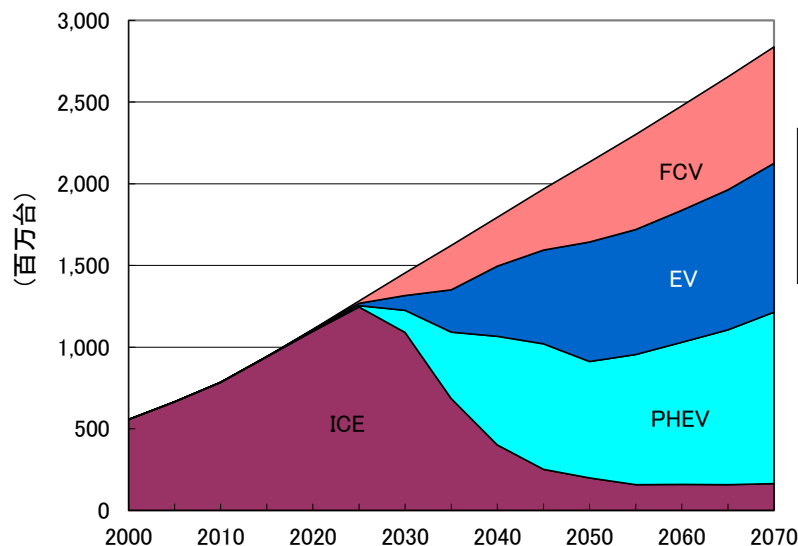
● 世界

- 乗用車の台数構成は、2060年には多い順にプラグインハイブリッド車(PHEV)、電気自動車、燃料電池自動車、内燃機関自動車（ハイブリッドを含む）となっているが、内燃機関自動車以外の車種の比率に大きな違いはない。

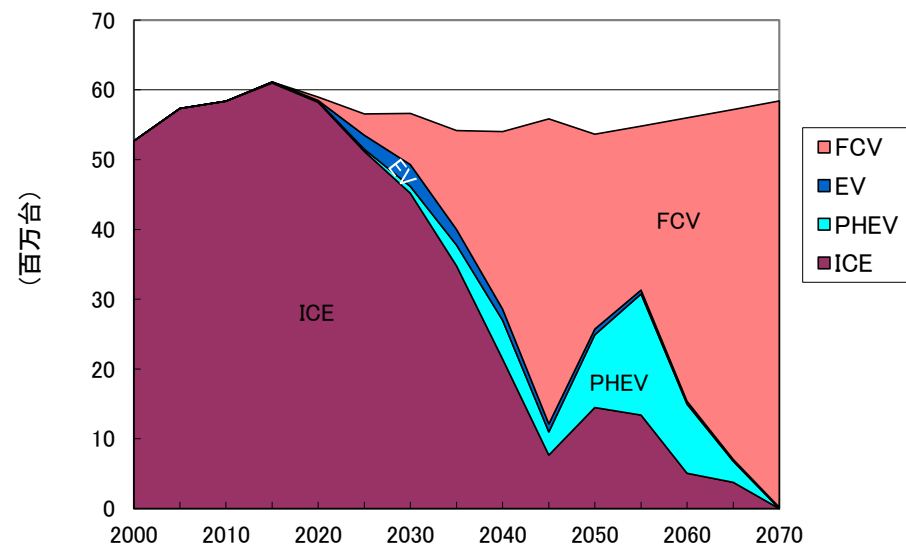
● 日本

- 2060年には、FCVは63%程度のシェアを占める。
 - 2045年に一度FCV台数が増加しているが、運輸部門の他のモード、発電も併せて増加しており、他の部門の制約や厳しいCO2排出制約が影響していると考えられる。
- 乗用車の年間コストは、車種間で大きな違いはなく、車両コストや燃料コストの変化により車種構成は変わりうる。

乗用車保有台数(世界計)



乗用車保有台数(日本)

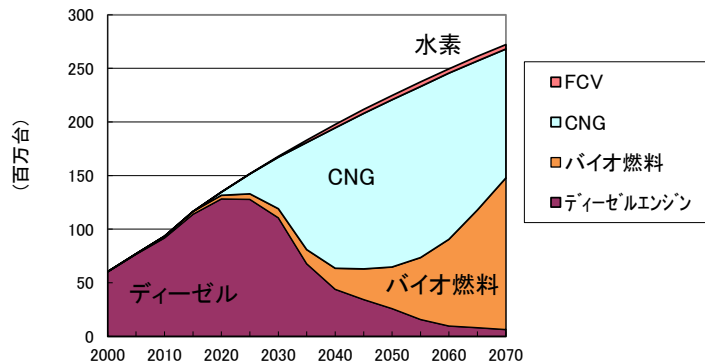


結果（トラック・バス）

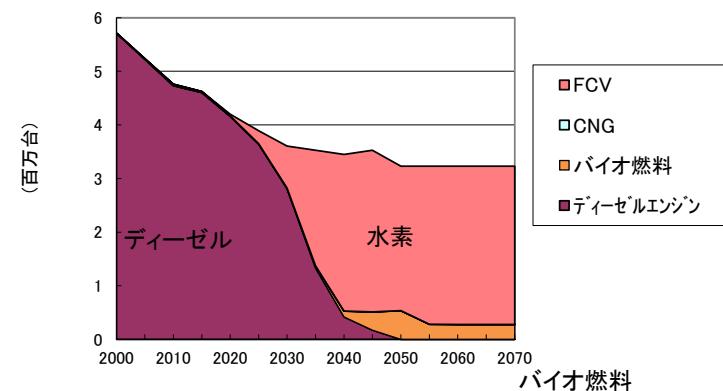
- 世界：トラックは、ディーゼルから、天然ガス、バイオ燃料、燃料電池へ。バスは、ディーゼルからCNG、バイオ燃料、燃料電池へ
 - 2050年以降、2060年ゼロエミッションに向けてトラックではCNGとバイオ燃料、バスでは水素のシェアが大きく増加する。
- 日本：トラック、バスともに、ディーゼルから燃料電池へ
- 燃料電池バスは、他燃料のバスと同程度のコスト競争力を持っているため、世界、日本で大きなシェアを持つ。

トラック

トラック保有台数(世界計)

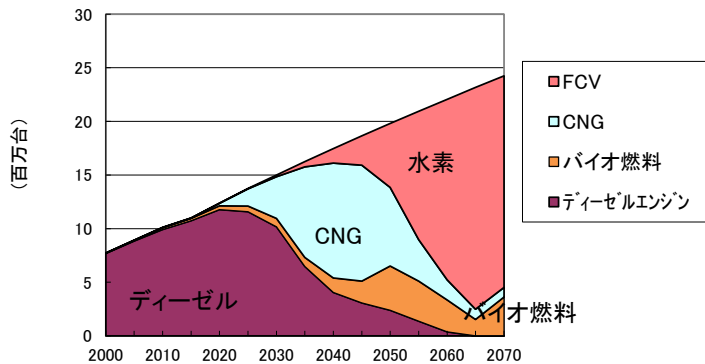


トラック保有台数(日本)

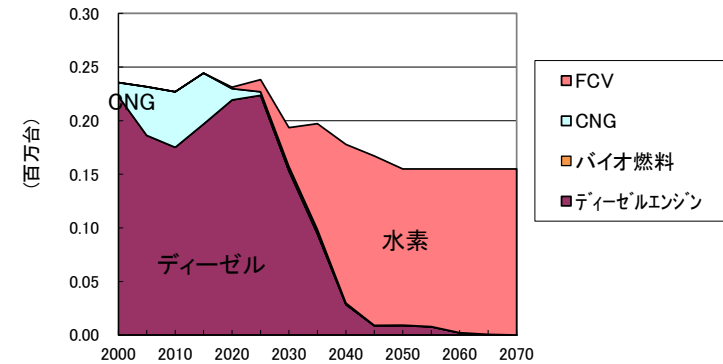


バス

バス保有台数(世界計)

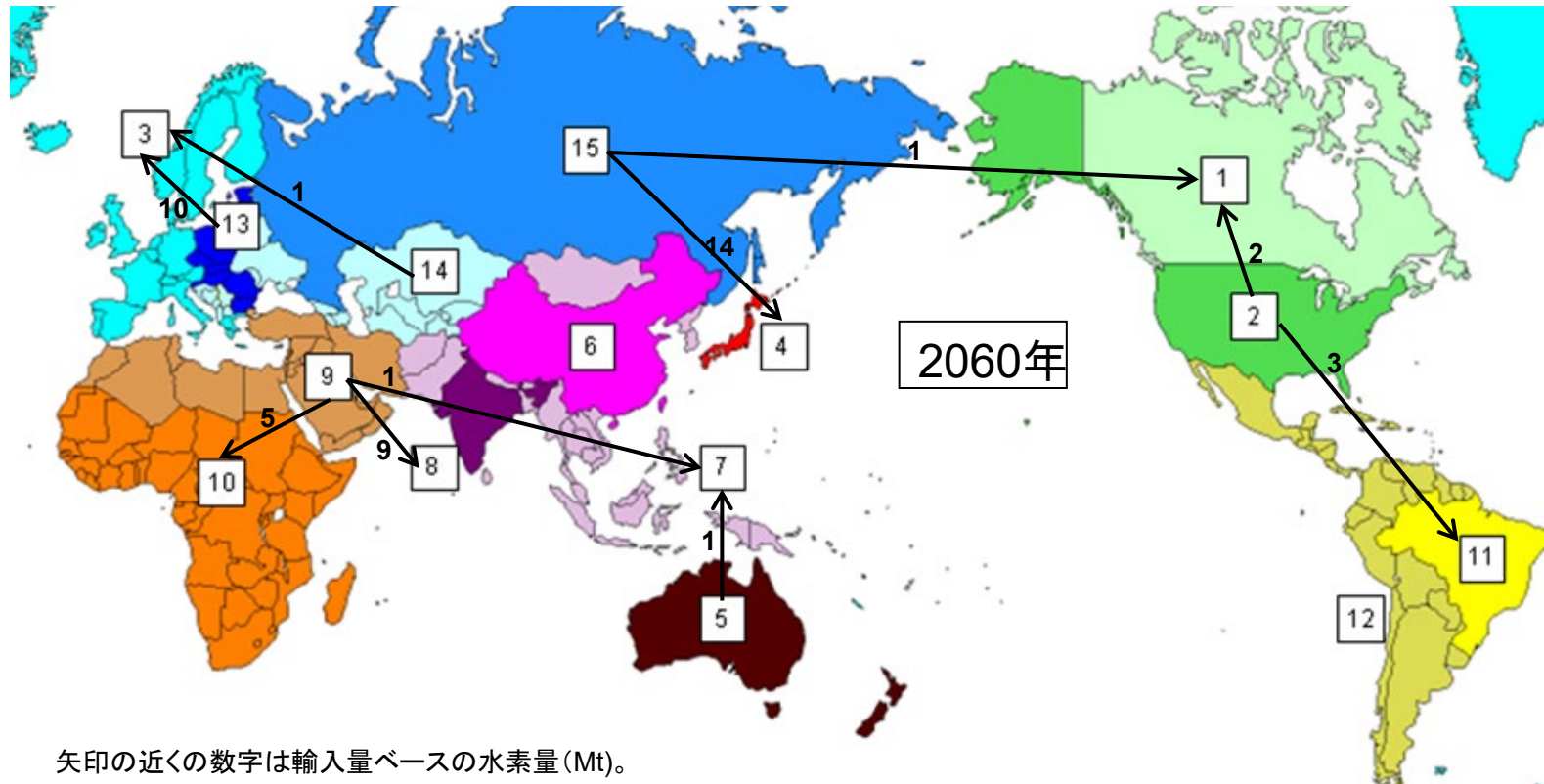


バス保有台数(日本)



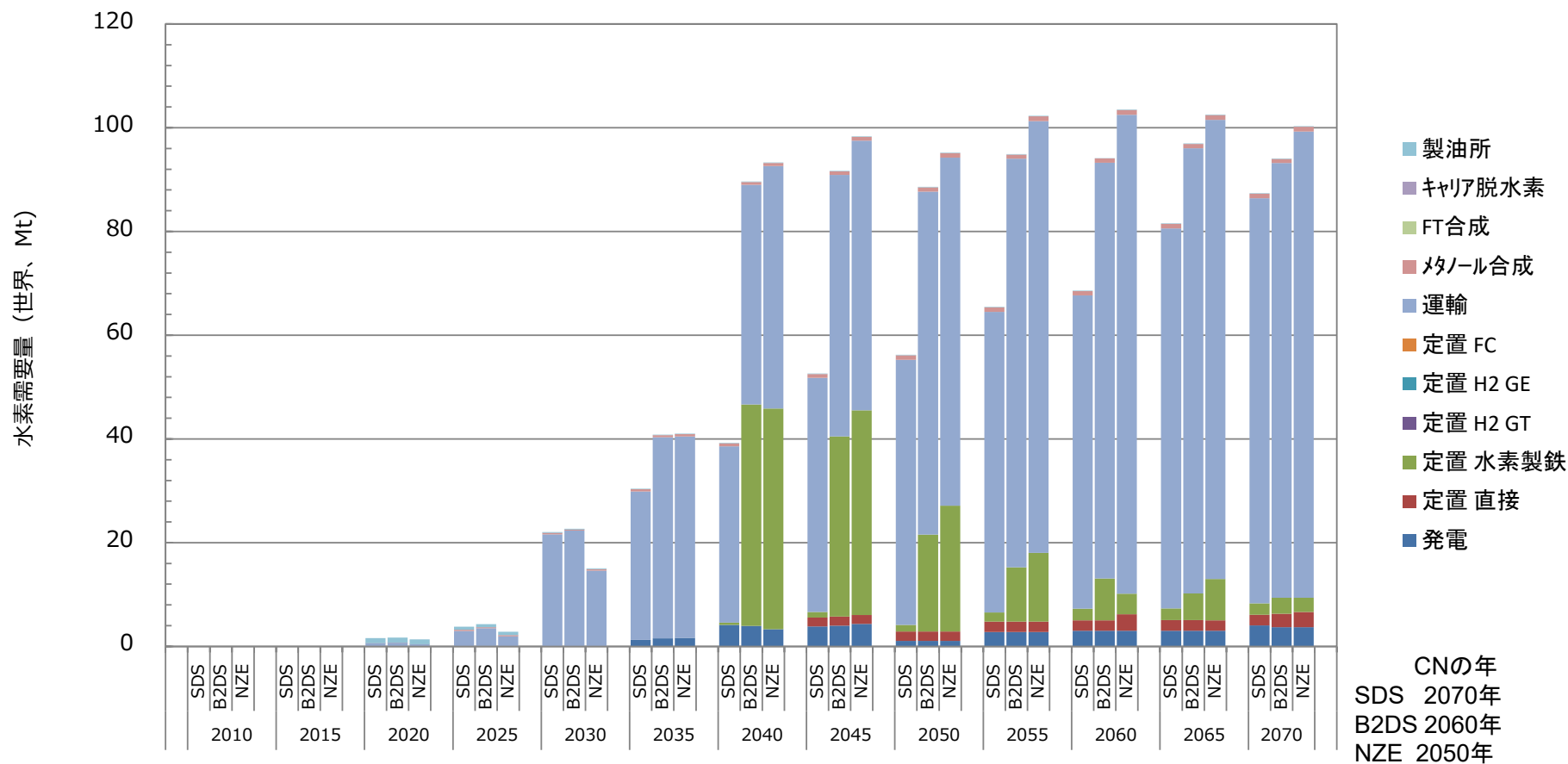
結果 (世界水素輸送)

- 輸入地域：西欧、インド、日本等
- 輸出地域：ロシア、東欧、中東北アフリカ等
- 輸送コストが距離に依存するため、近い地域へ輸出する。
- **実際のエネルギー資源貿易は、モデルでは考慮されていないエネルギー安全保障等多くの要素が関連するため、ここで示す輸出入の経路や量が将来において必ずしも再現されるわけではないが、この図は、今回採用した前提条件や最適化の方法論において、水素を域外から調達することが経済合理的であることを示している。**

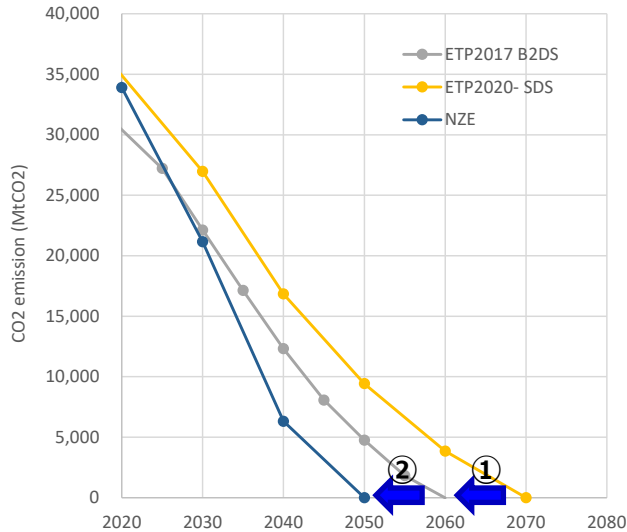


ケース別の水素導入量

- 試算したケースの中で最もCNを達成するのが遅いケースでは、運輸部門における利用が中心。
- CN達成年が前倒しされることで、産業や運輸部門での水素需要の増加が生じる。

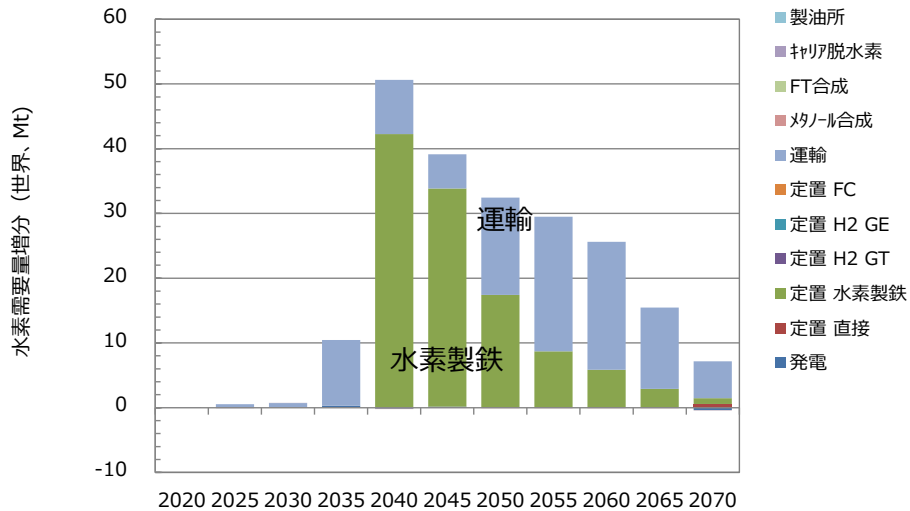


世界全体のCN達成年と水素需要量の変化

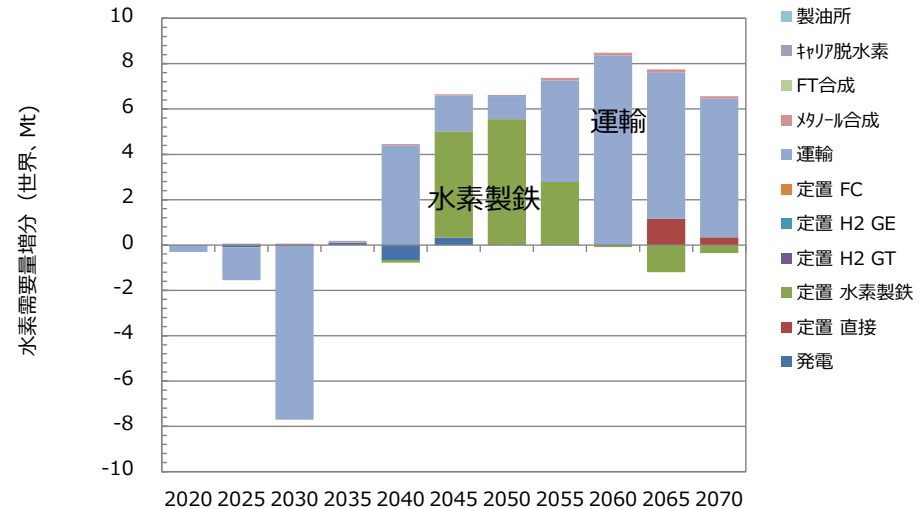


- 2070年CN達成のケースでは、主に運輸部門での水素利用が見られる。
- ①2070年から2060年
 - － 運輸、水素製鉄が増加
- ②2060年から2050年
 - － 運輸、水素製鉄、水素直接利用が増加
- 水素需要の増加量は、2070年から2060年CN達成に変化する場合（①）の方が2060年から2050年にCN達成に変化する場合（②）よりも水素需要量の増加量が多い。

① 水素需要の増分(2070年CNから2060年CN)

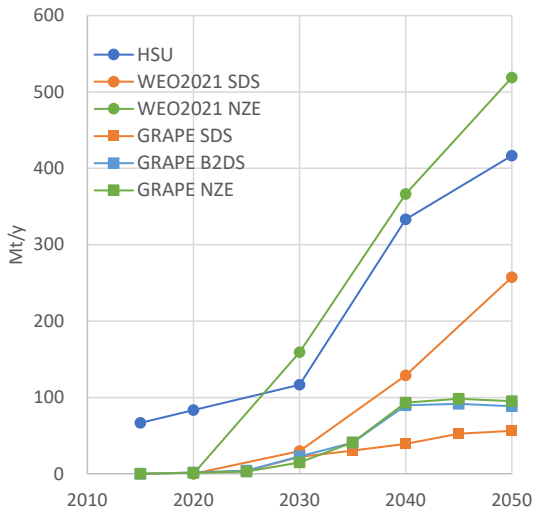


② 水素需要の増分(2060年CNから2050年CN)

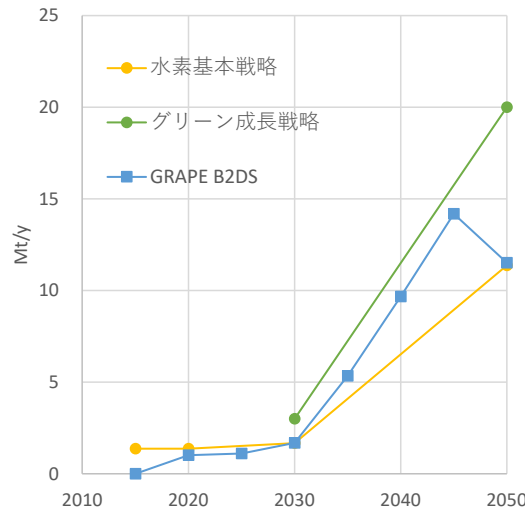


各国地域目標との比較

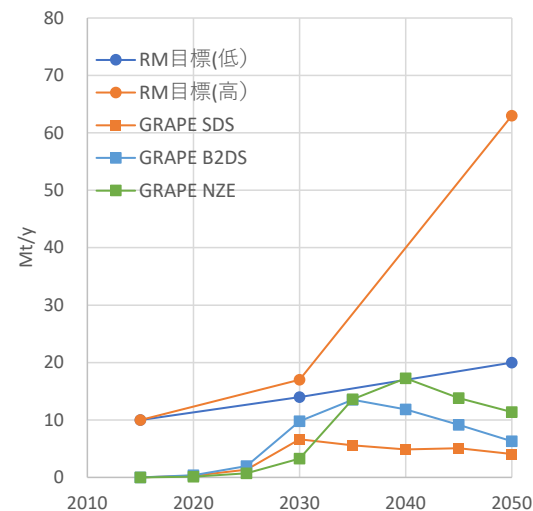
水素需要の推移（世界）



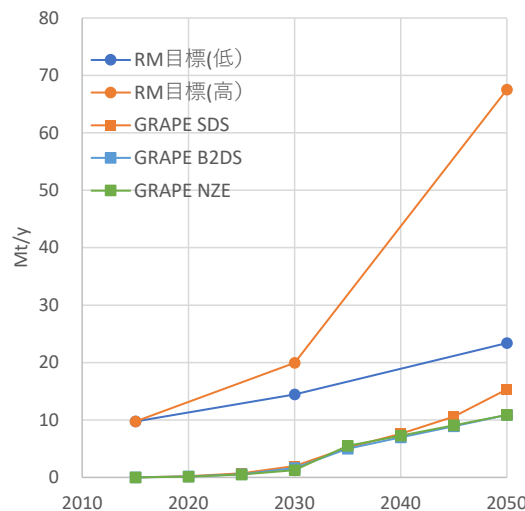
水素需要の推移（日本）



水素需要の推移（米国）



水素需要の推移（EU）



- 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
 - 2040年以降はGRAPEの結果は、WEO2021と比較して水素需要が小さくなっている
- 日本
 - 2050年の値は、水素基本戦略とグリーン成長戦略の中間程度の値（2050年以降は増加）
- 米国
 - GRAPEで明示的に考慮されていない既存分を考慮するとGRAPE NZEは、業界団体報告の値のRM(高)とRM(低)の間に位置する。
- EU(GRAPEのWEU(西欧)とCEU(中欧)の和)
 - GRAPE NZEは、2050年は、FCH JUのRM(高)とRM(低)の間に位置する。

世界：

Hydrogen Council, Hydrogen Scaling Up, 2017

IEA, World Energy Outlook 2021、2021

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

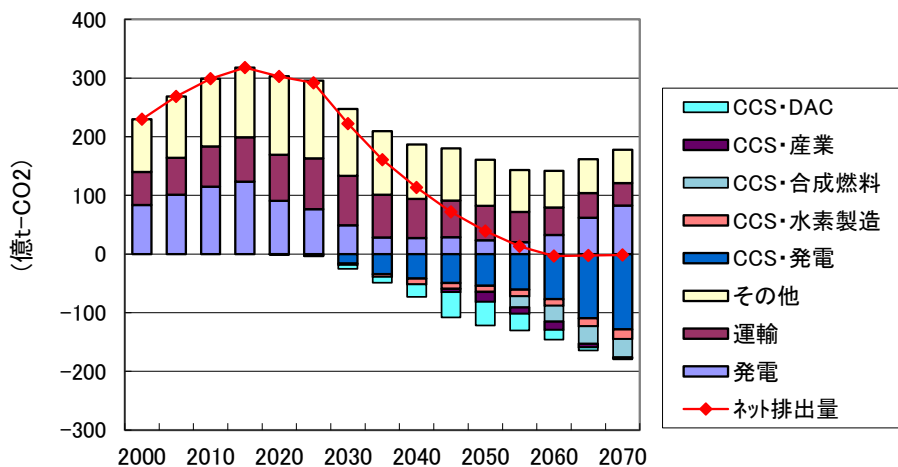
EC, A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, 2020

WEO2021の水素需要は、水素製造への投入エネルギー量から推定

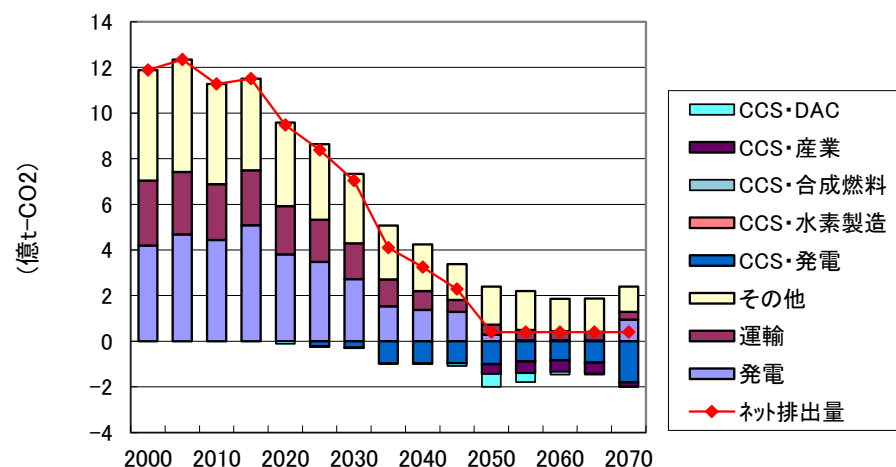
結果 (CO₂排出量)

- 再エネに加えてCO₂の回収貯留（CCS）によるCO₂排出量削減により2060年のカーボンニュートラルを達成している。
- 世界
 - 2030年から2060年にDACによる大気からのCO₂除去
 - 2055年以降にCO₂からの合成燃料製造
- 日本
 - 2030年から本格的に発電でのCCSや2050年以降はDACも利用してのCO₂を回収・貯留。
 - 2050年にカーボンニュートラルを達成。

CO₂排出と回収量（化石燃焼起源、世界計）



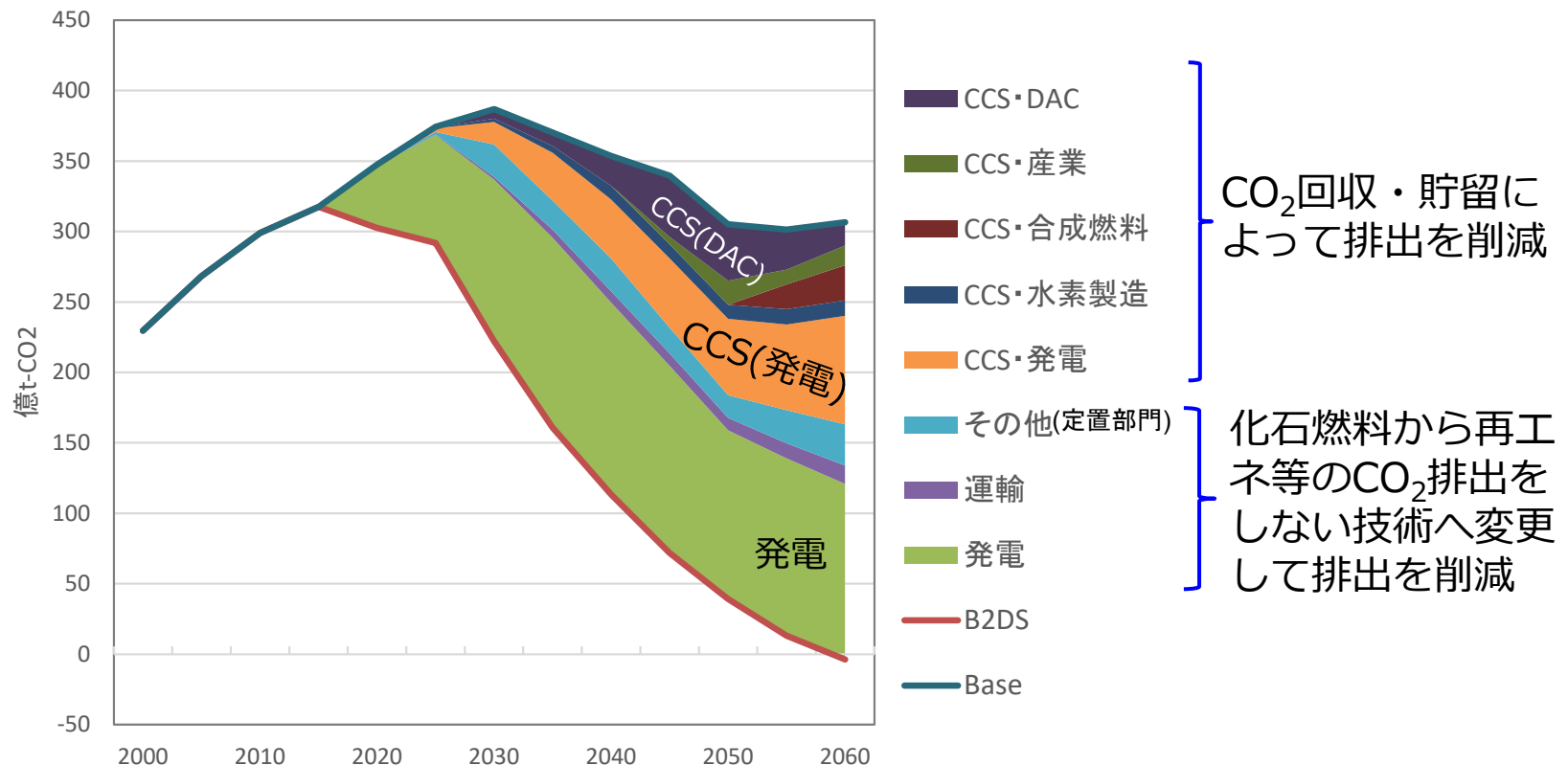
CO₂排出と回収量（化石燃焼起源、日本）



合成燃料については、製造地域でCO₂を回収し、利用地域でCO₂を排出したとカウントしている

結果 (2060年CNとCO₂制約なしのCO₂排出量の差)

- CO₂削減は、発電部門の再エネへの転換やCCSが量的な寄与が大きく、DACも一定程度の役割を担う。
- 水素は発電、運輸、産業でのCO₂削減に寄与している。
 - 本ケースでは、最終エネルギー需要の3%程度が水素で賄われている。



まとめ

- 本研究では、分析対象をそれぞれ世界、日本とする当研究所のGRAPEモデルとTIMES-Japanモデルをソフトリンクさせ、2050、2060、2070年にそれぞれカーボンニュートラルを達成する条件において日本を含めた世界の水素需要量を分析。
- 需要
 - 水素は主に運輸部門で用いられ、発電等の他の部門でも用いられる。
- 輸送
 - 日本は期によって異なるものの必要な水素の多くを輸入。
 - また、水素の多くは需要される地域内で製造されるが、世界全体の需要量の3～4割程度は地域外から供給。
 - 国際的な貿易によって一定程度の水素を供給
- 製造
 - 主に風力や天然ガス、水力、低品位炭から水素が製造される。
- 世界全体がカーボンニュートラルを達成する期限を前倒しすると水素需要量が大きく増加する可能性がある。

今後の進め方

- 本日の議論を踏まえた変更等の検討
 - 時間を要する内容は次年度実施
- ビジョンに含めるデータ、指標等の検討