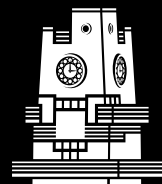


# カーボンニュートラルを実現する 再生可能燃料・原料の グローバルネットワーク



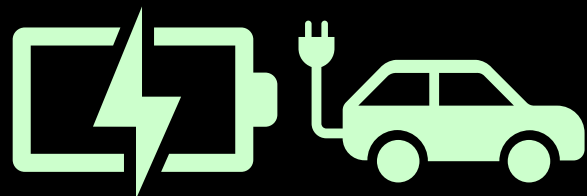
東大先端研

Research Center for  
Advanced Science and Technology  
The University of Tokyo

杉山 正和

東京大学先端科学技術研究センター

# カーボンニュートラル実現への3つの打ち手

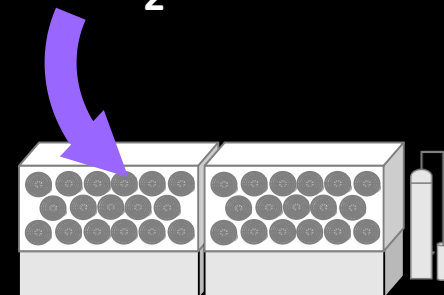


エネルギー需要の電化  
電源の脱炭素化



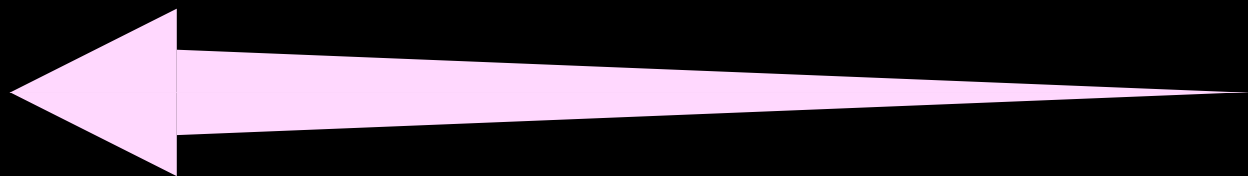
燃料としての  
CO<sub>2</sub>フリー水素

大気中の  
CO<sub>2</sub>

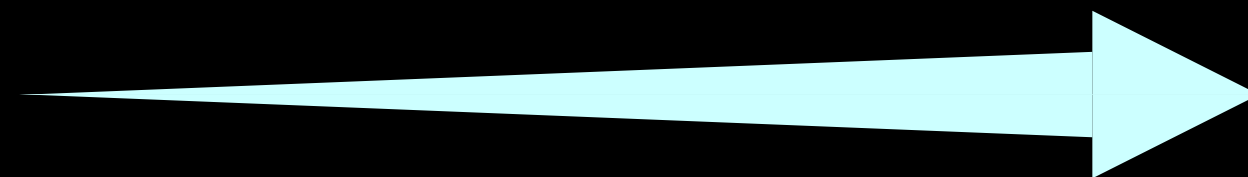


CO<sub>2</sub>の固定  
資源化

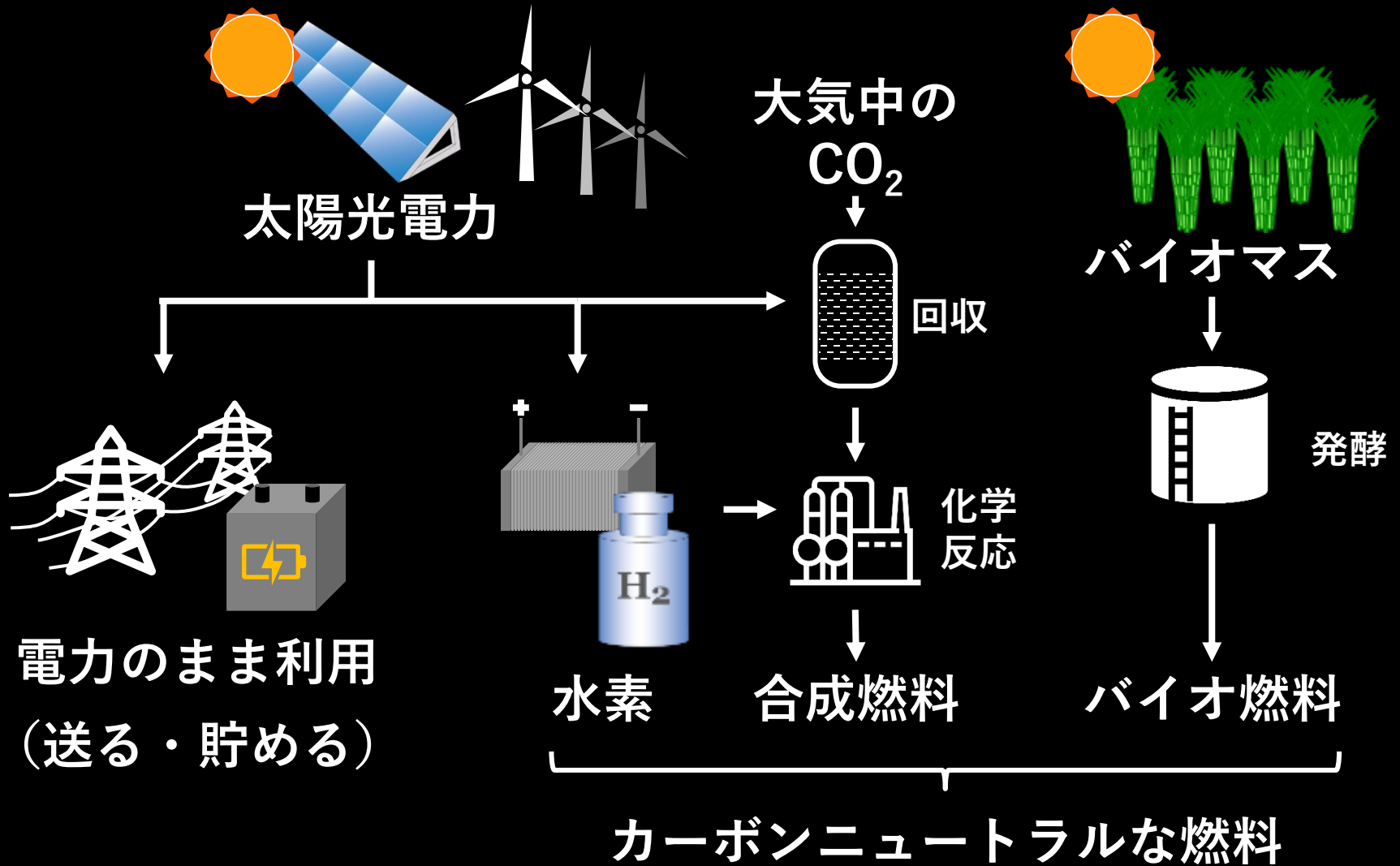
導入量



技術  
難度

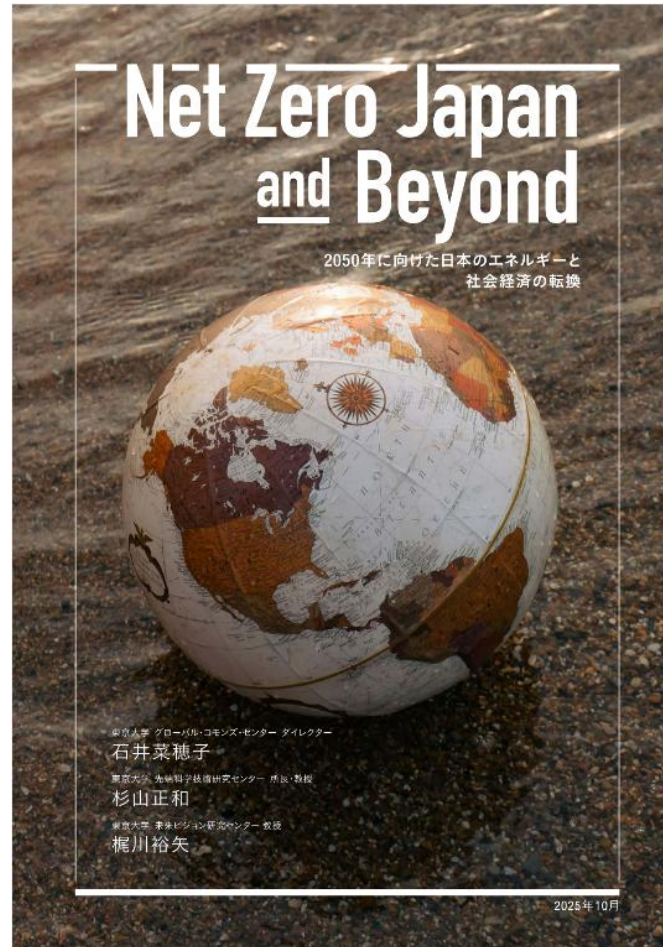


# カーボンニュートラルを実現できる エネルギー源



# カーボンニュートラルを実現する日本のシナリオ分析

東京大学グローバル・コモンズ・センター ETI-CGCによるレポート  
[https://cgc.ifi.u-tokyo.ac.jp/news/eti-cgc\\_final\\_report/](https://cgc.ifi.u-tokyo.ac.jp/news/eti-cgc_final_report/)



Center for Global Commons



# 技術経済モデル

## 社会経済シナリオ想定

### サービス需要

- 日本国内1エリア
- 2018年～2050年
- 最終需要約30種  
粗鋼生産量、プラ生産量、  
照明・動力、暖房、給湯、  
旅客人キロ、  
貨物トンキロ

### エネルギー価格

- 化石燃料輸入価格
- グリーン水素、e-fuel  
輸入価格

### 資源制約

- 再エネ導入量制約
- CO<sub>2</sub>貯留量制約

### 政策

- GHG排出量制約
- (カーボンプライシング)

## TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System)

### エネルギー転換技術

- 発電(石炭、LNG、太陽光)
- 石油精製
- エネルギー回収(ER)
- 水電解

### CO2関連技術

- CCUS(CO<sub>2</sub>分離回収、DAC、  
メタネーション、FT合成)

### 線形計画法に基づく技術選択

- 目的関数:総システムコスト最小化
- 分析期間:2018年～2050年
- タイムスライス:12時間帯/年
- 部分均衡、動的最適化モデル

### 需要技術

- 産業部門
- 高炉・転炉法、電炉法
  - ナフサ分解炉
  - リサイクル(MR、CR)
  - セメントプラント
- 民生部門
- 照明、動力機器
  - 家庭用/業務用エアコン
  - ヒートポンプ給湯器
- 運輸部門
- 乗用車、トラック、鉄道
  - 航空、船舶

## 技術シナリオ想定

- 設備費
- 運用維持費

- 効率
- 稼働率

- 導入開始年度
- 耐用年数

## モデル出力

### エネルギー転換技術

- エネルギーミックス
- 発電設備稼働年度

### シャドウプライス

- 電力コスト
- 国内水素コスト
- その他エネルギーコスト
- 炭素価格

### エネルギー消費

- 年度別消費量
- エネルギー種別消費量
- 業種別消費量

### 需要技術

- 自動車技術構成
- 熱需要機器構成
- ストックエネルギー効率
- 需要技術稼働年度

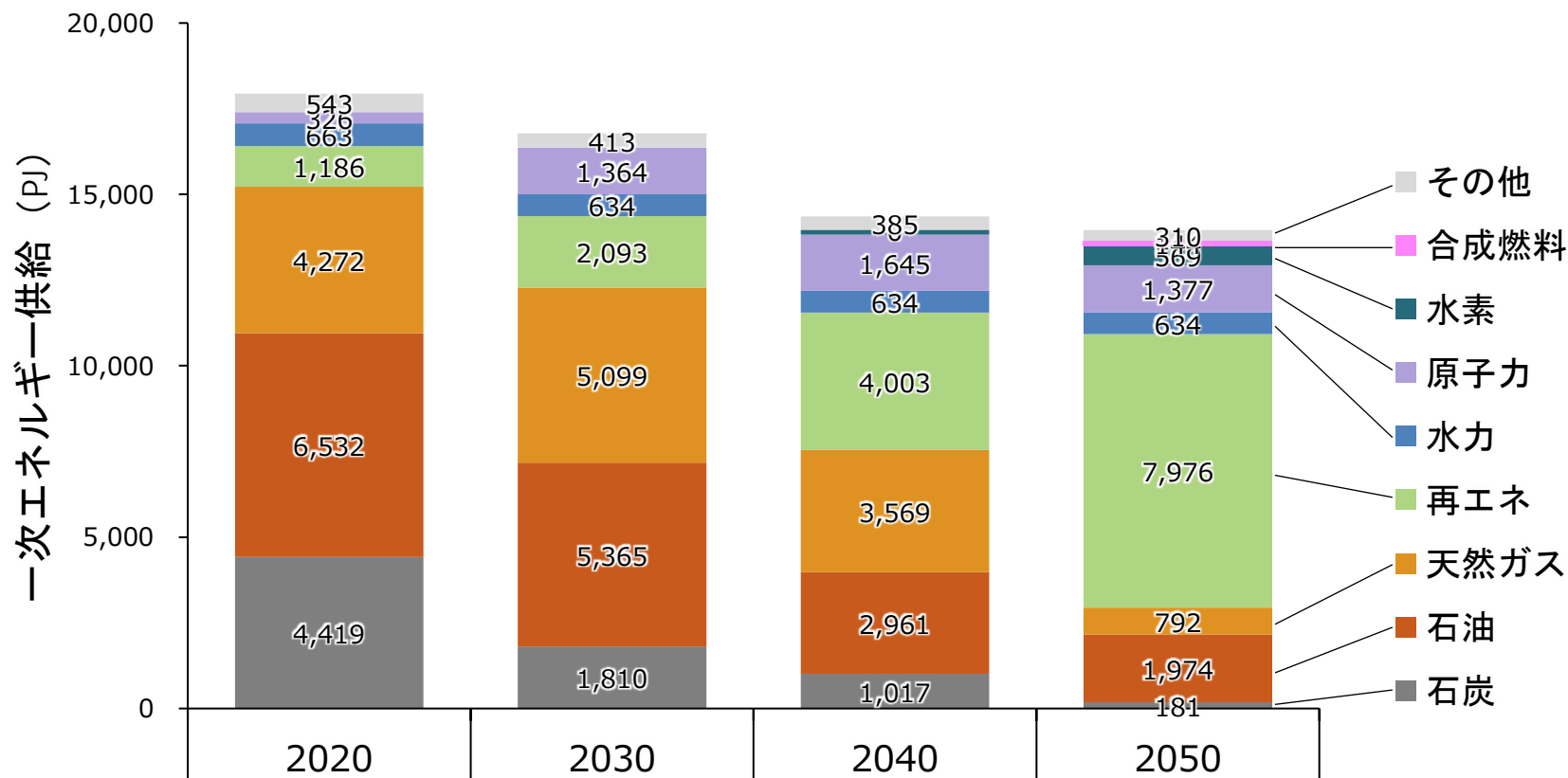
### その他

- 総システムコスト
- GHG排出量

- 社会経済やエネルギー関連技術に関する仮定のもとで、  
総コストを最小化するエネルギーシステムの姿を最適化計算により求める。
- 技術想定（賦存量・コスト等）により異なるエネルギーシステムの姿が出現。  
→ カーボンニュートラル(CN)実現への寄与が大きい技術  
特定分野の技術進展がもたらすインパクト（低コストでのCN実現可能性）などを分析

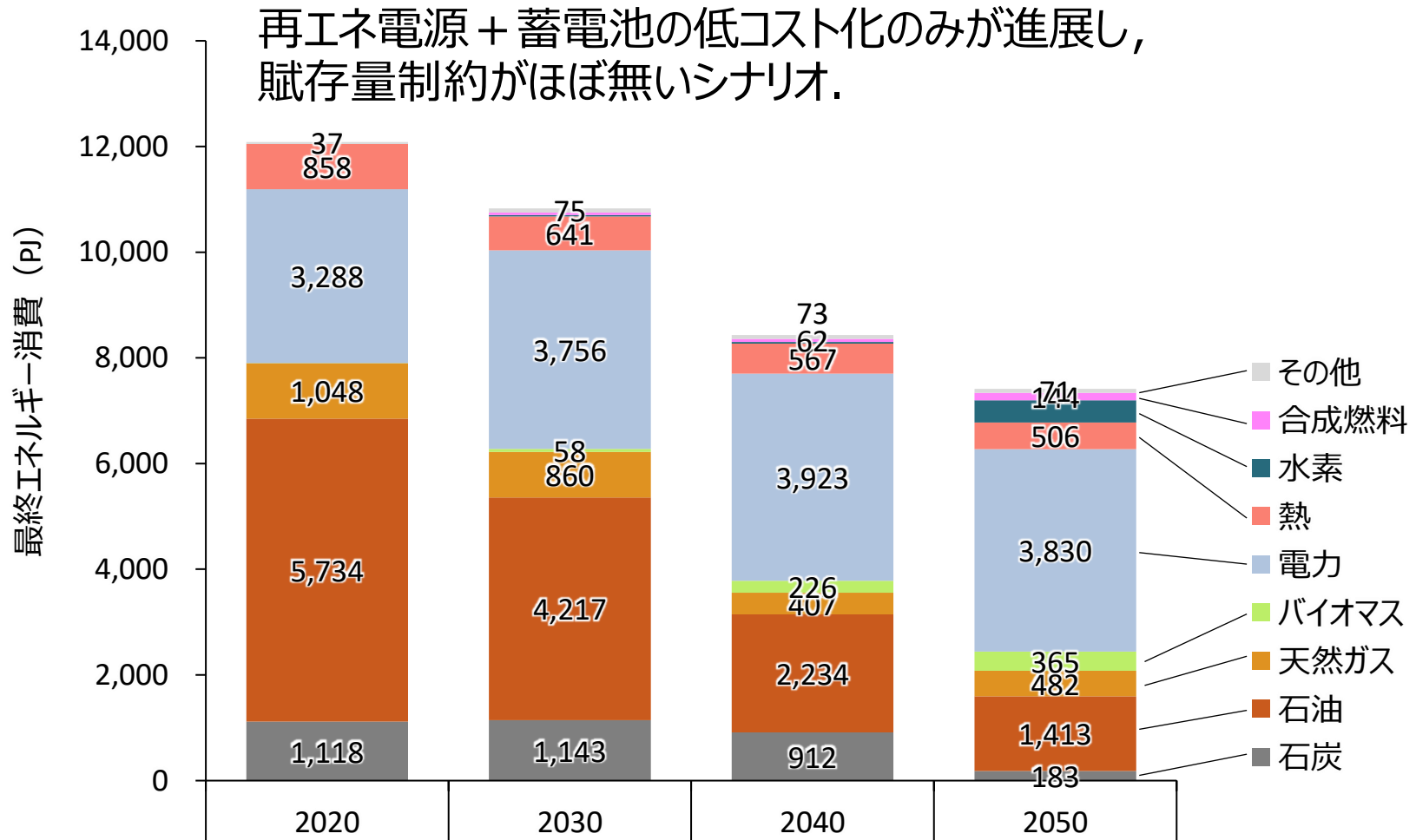
# 1 次エネルギー供給

再エネ電源 + 蓄電池の低コスト化のみが進展し、  
賦存量制約がほぼ無いシナリオ。



- エネルギー需要は逡減（人口減・エネルギー利用効率向上）
- 化石燃料への依存度が低下し再エネ（太陽光・風力）主体に

# 最終エネルギー消費

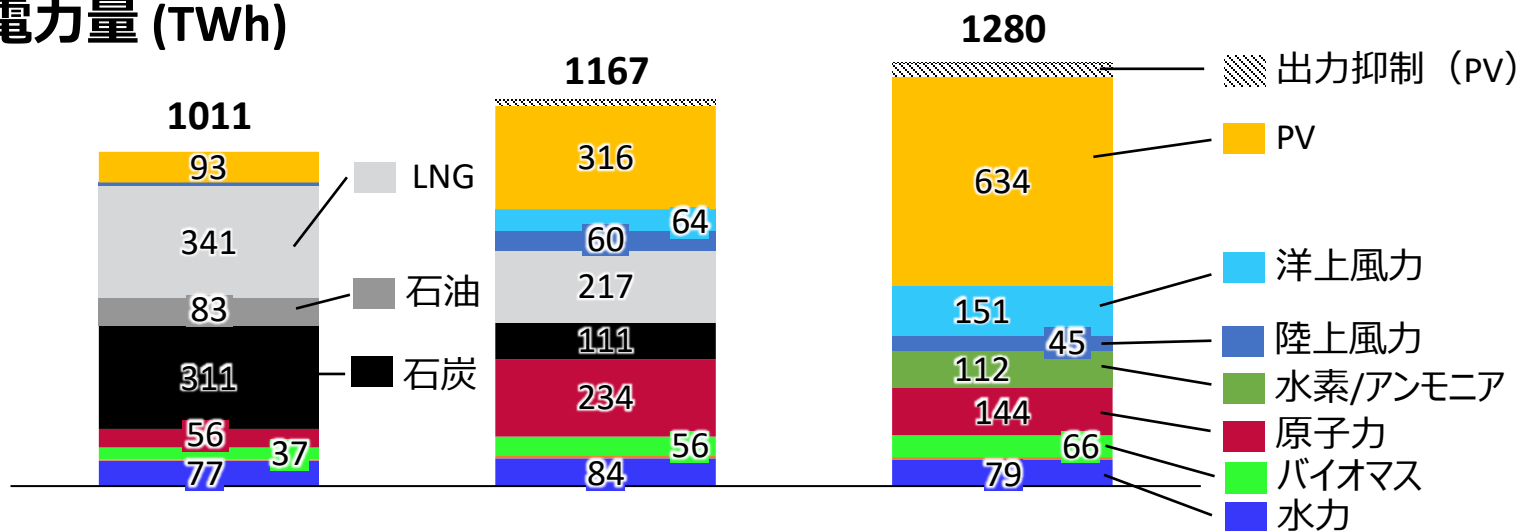


- 化石燃料への依存度が低下し電力が主体に。
- しかし、化石燃料の利用は残る。（国内CCS, DAC-CCS）

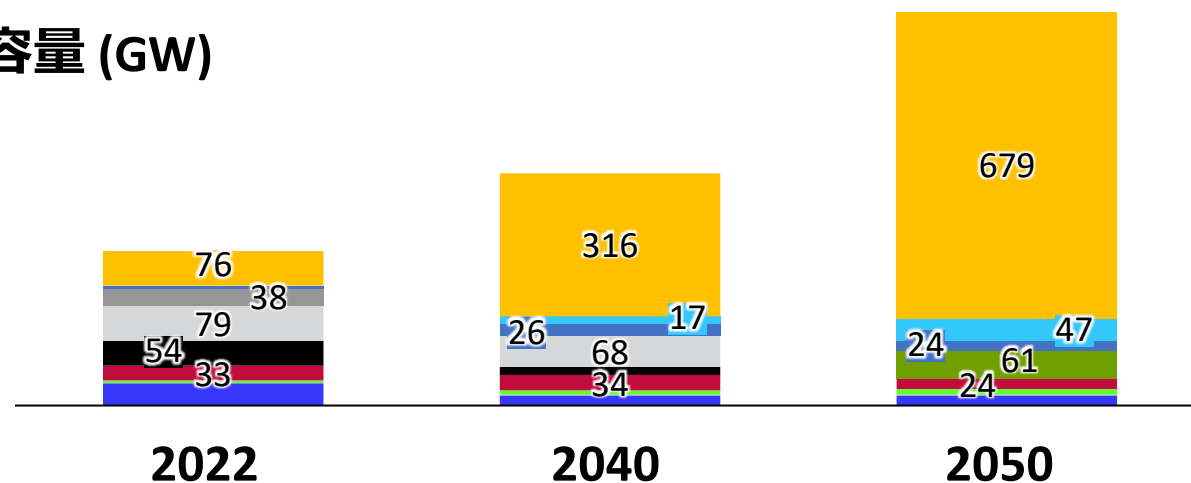
# 電源ミックス

再エネ電源 + 蓄電池の低コスト化のみが進展し，賦存量制約がほぼ無いシナリオ.

## 発電電力量 (TWh)



## 設備容量 (GW)



2050年には680 GWの太陽電池，1300 GWhの定置用蓄電池が必要になる。

# 再エネ発電の導入ポテンシャル

## 太陽光発電

環境省：令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書（R2年3月）

	設備容量 (GW)			発電量 (TWh/年)		
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 1	Level 2	Level 3
①住宅用等	60	162	210	72	195	253
②公共系建築物	8	17	19	10	21	23
③発電所・工場等	17	26	36	21	31	44
④低・未利用地	2	19	33	2	23	40
⑤農地 (設置可能な面積の占有率)	612 (25%)	1,224 (50%)	2,447 (100%)	715	1,431	2,861
<b>合計</b>	<b>699</b>	<b>1,447</b>	<b>2,746</b>	<b>820</b>	<b>1,700</b>	<b>3,222</b>
農地以外の計	87	224	298	105	270	360

## 風力発電

	設備容量 (GW)	発電量 (TWh/年)
陸上	285	685
洋上	1,120	3,460

日本のカーボンニュートラル実現に必要な発電量を確保するには...

→農地の相当部分に太陽電池設置  
→風力発電の大量導入

# 農地への太陽光発電導入



**“First agrivoltaic system for carbon-neutral orcharding being tested,”**  
press release, Fraunhofer ISE (Sep. 14, 2021)  
<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2021/first-agrivoltaic-system-for-carbon-neutral-orcharding-being-tested.html>



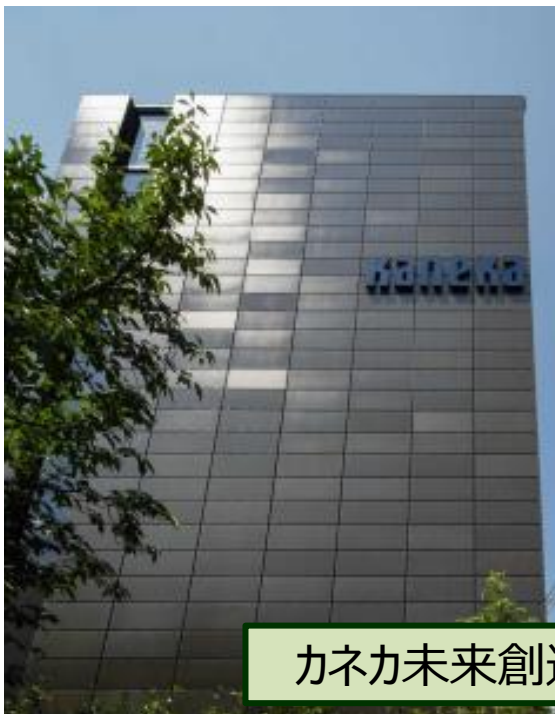
# 農地への太陽光発電導入



**Polysolar Ltd., UK**

<https://www.polysolar.co.uk/projects-technology/solar-on-polytunnels>

# 建物壁面でも発電：環境に調和する太陽電池



カネカ未来創造館（芦屋）

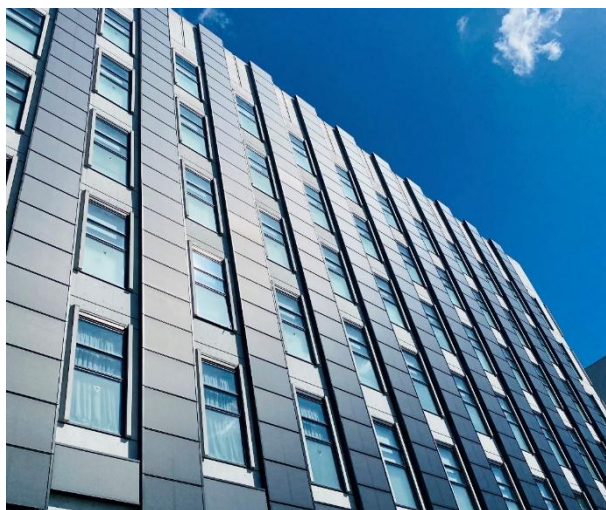


古平町複合施設かなえーる

写真提供：(株)カネカ, 大成建設(株)

## 東京大学 先端研3号館・3号館南棟

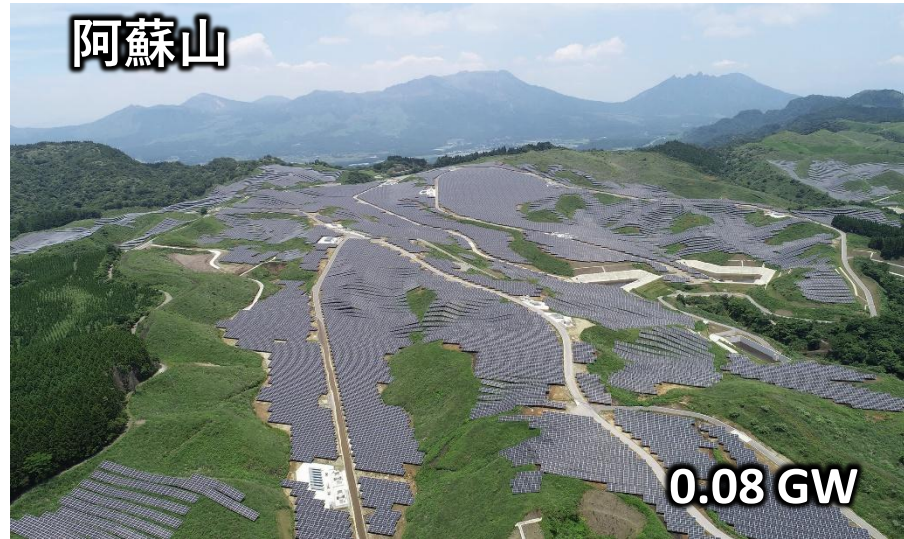
既存建物に  
環境調和型太陽電池を設置



提供：大成建設株式会社  
撮影：(有) シンフォトワーク 宮本 真治

# 大規模太陽光発電

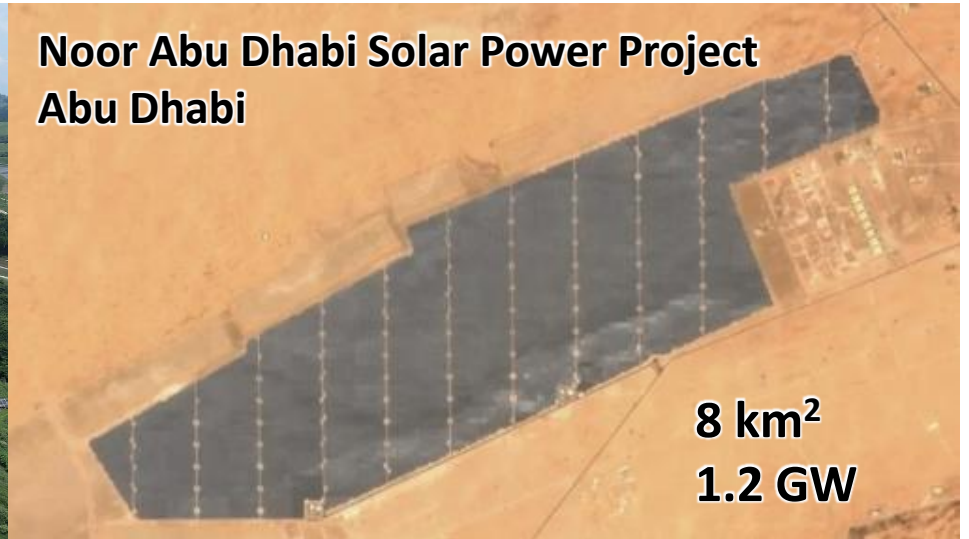
阿蘇山



0.08 GW

FRIDAY Digital  
<https://friday.kodansha.co.jp/article/318278?page=1>

Noor Abu Dhabi Solar Power Project  
Abu Dhabi



8 km<sup>2</sup>  
1.2 GW

<https://www.theecoexperts.co.uk/solar-panels/biggest-solar-farms>

ギガソーラーの実装可能性は、日本と海外で大きく異なる。

# 再生エネルギー適地から消費地へのエネルギー輸送

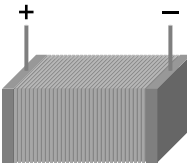
大規模  
エネルギー  
消費地



大陸間の  
水素輸送



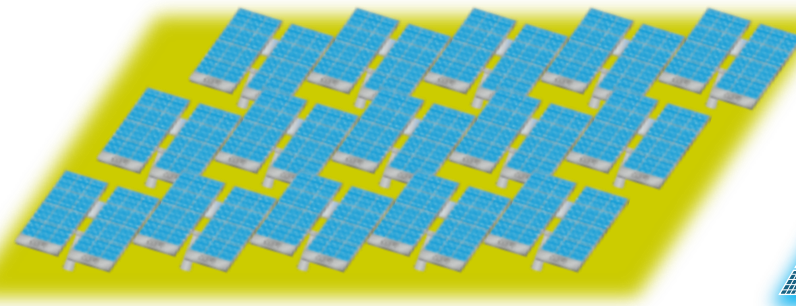
グリーン  
電力



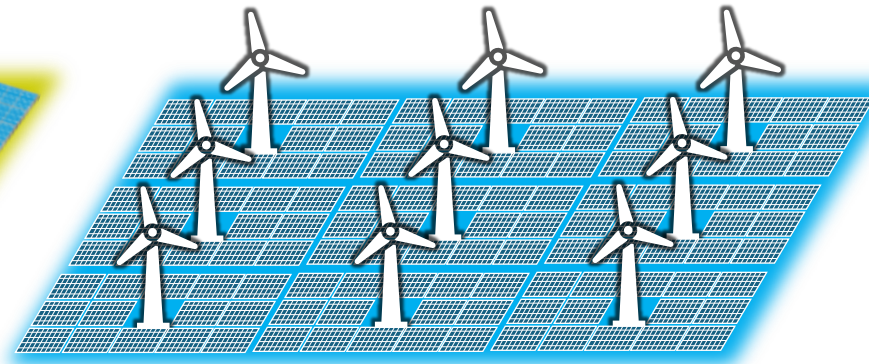
水電解



グリーン水素  
(水素キャリア)



海外の高照度地域



日本の遠洋

# 水素をどこで製造するか？

日本政府のグリーン成長戦略で必要とされているCO<sub>2</sub>フリー水素

→ 2000万トン/年 (@2050)

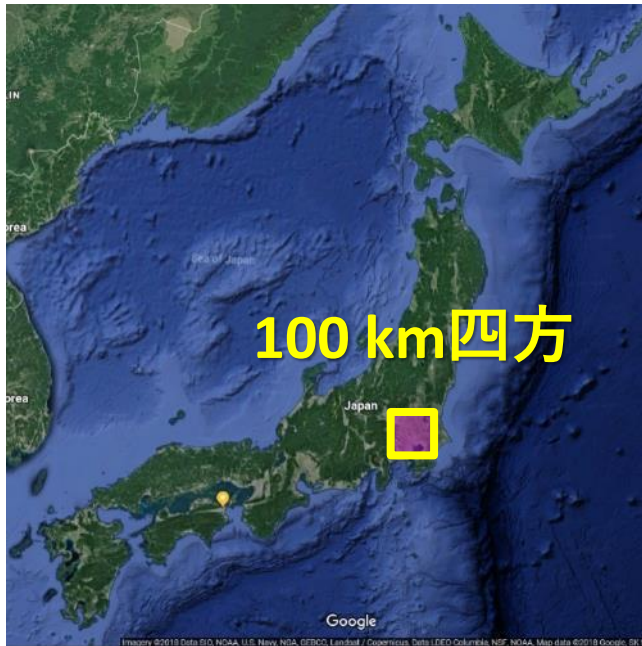
仮に、再エネ電力による水電解で製造すると... 水電解に必要な電力：1000 TWh/年

現在の日本の年間発電量に等しい

必要な面積（太陽光発電の場合）

日本

PV発電容量 ~900 GW  
(設備利用率 13%)



オーストラリア

PV発電容量 ~ 600 GW  
(設備利用率 19%)



# 海外からのCO<sub>2</sub>フリー水素輸入

製造 (海外・洋上)



消費 (日本)

H<sub>2</sub>

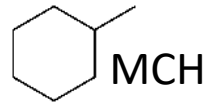
大気からのCO<sub>2</sub>

メタン

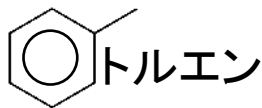
既存ガスインフラ

アンモニア

燃焼・発電



水素  
分離



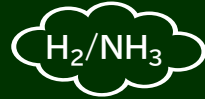
液体水素

燃料電池  
移動体



# カーボンニュートラル燃料（CN燃料）

水素／アンモニア



- グリーン $H_2/NH_3$ ：再エネ電力の燃料化
- ブルー $H_2/NH_3$ ：CCSのアウトソーシング
- サプライチェーン・機器の総入れ替えが必要

合成燃料

(e-fuel/e-methane)



- 大気中の $CO_2$ とグリーン $H_2$ から製造される燃料
- 既存機器で利用可能
- 原理的には大量供給可能だが高価

バイオ燃料



- 既存機器で利用可能
- 供給量に制約が大きい

CN燃料の適用が期待される用途

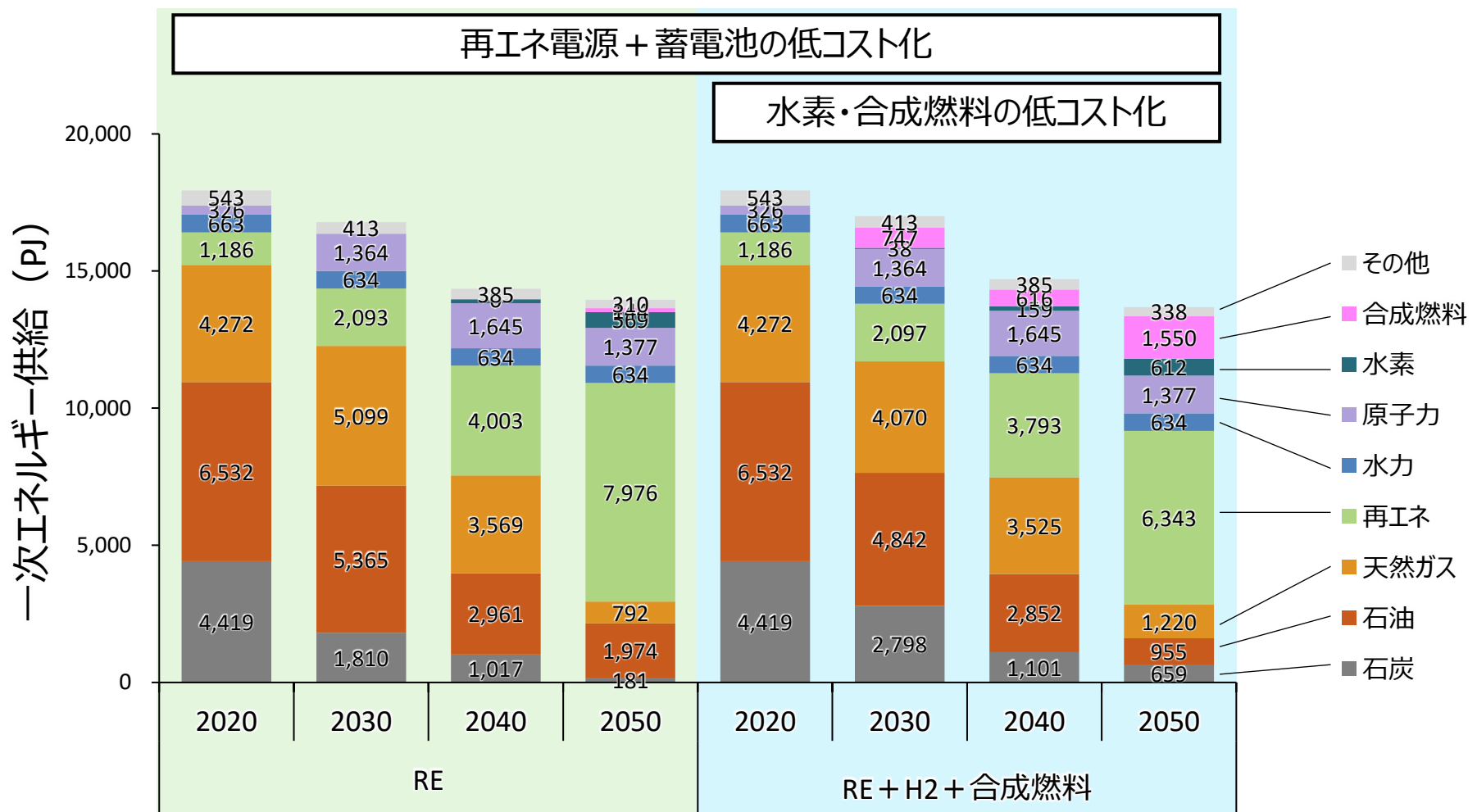
部門	用途
発電	■ 太陽光・風力発電の調整力（水素・アンモニア火力発電）
産業	■ 鉄鋼：水素による直接還元（DRI） ■ セメントや化学の製造プロセスの熱需要 ■ 都市ガスの合成メタンによる代替
民生	■ 水素燃料電池による熱・電気コージェネ
運輸	■ 重負荷車両（水素・合成燃料） ■ 航空（SAF）

東京大学グローバル・コモンズ・センター

「ネットゼロに向けた持続可能な燃料の役割とは —移動体に焦点を当てた日本におけるトランジション戦略—」

<https://cgc.ifi.u-tokyo.ac.jp/news/mrireport2024/>

# 1 次エネルギー供給：シナリオ想定の影響



水素・合成燃料の低コスト化

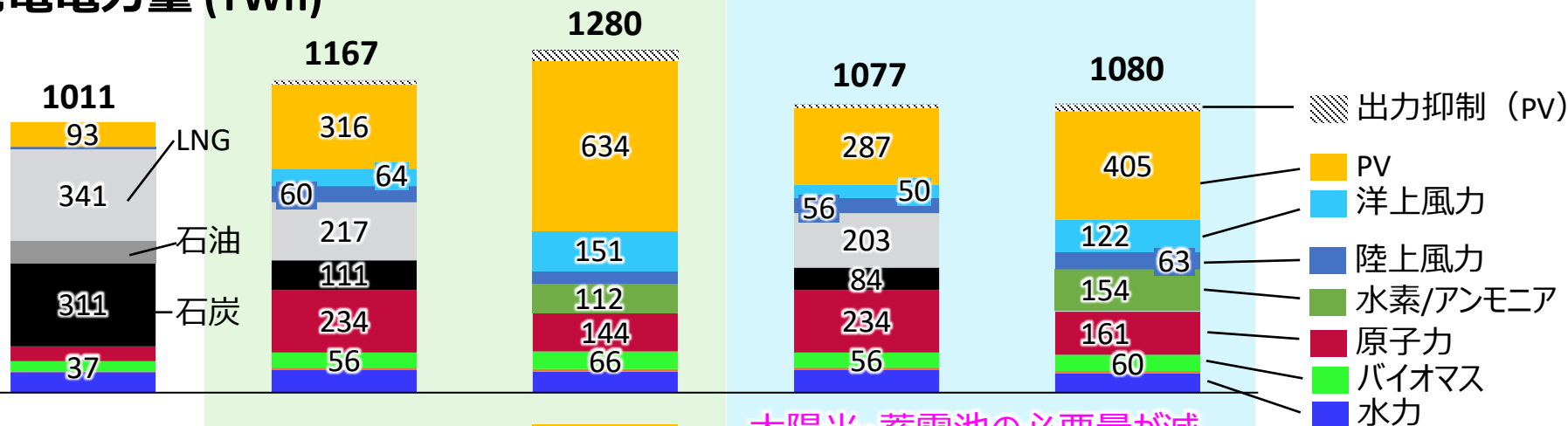
➔ 合成燃料・水素によるエネルギー供給増（再エネによる直接供給が減）

# 電源ミックス：CO<sub>2</sub>フリーな燃料（水素）が大量に輸入できたら...

再エネ電源 + 蓄電池の低コスト化

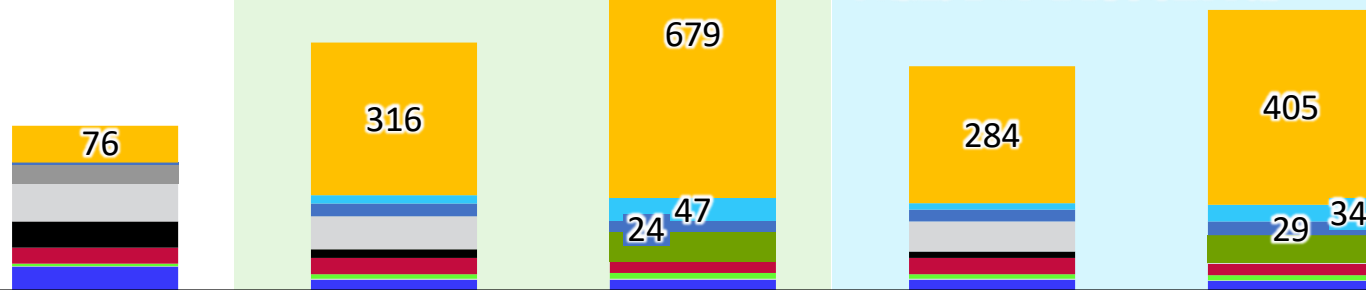
水素・合成燃料の低コスト化

発電電力量 (TWh)



設備容量 (GW)

太陽光・蓄電池の必要量が減  
(水素火力発電の調整力により  
太陽光の出力抑制が減)



蓄電池容量 (GWh)

375      1290      296      501

2022

2040

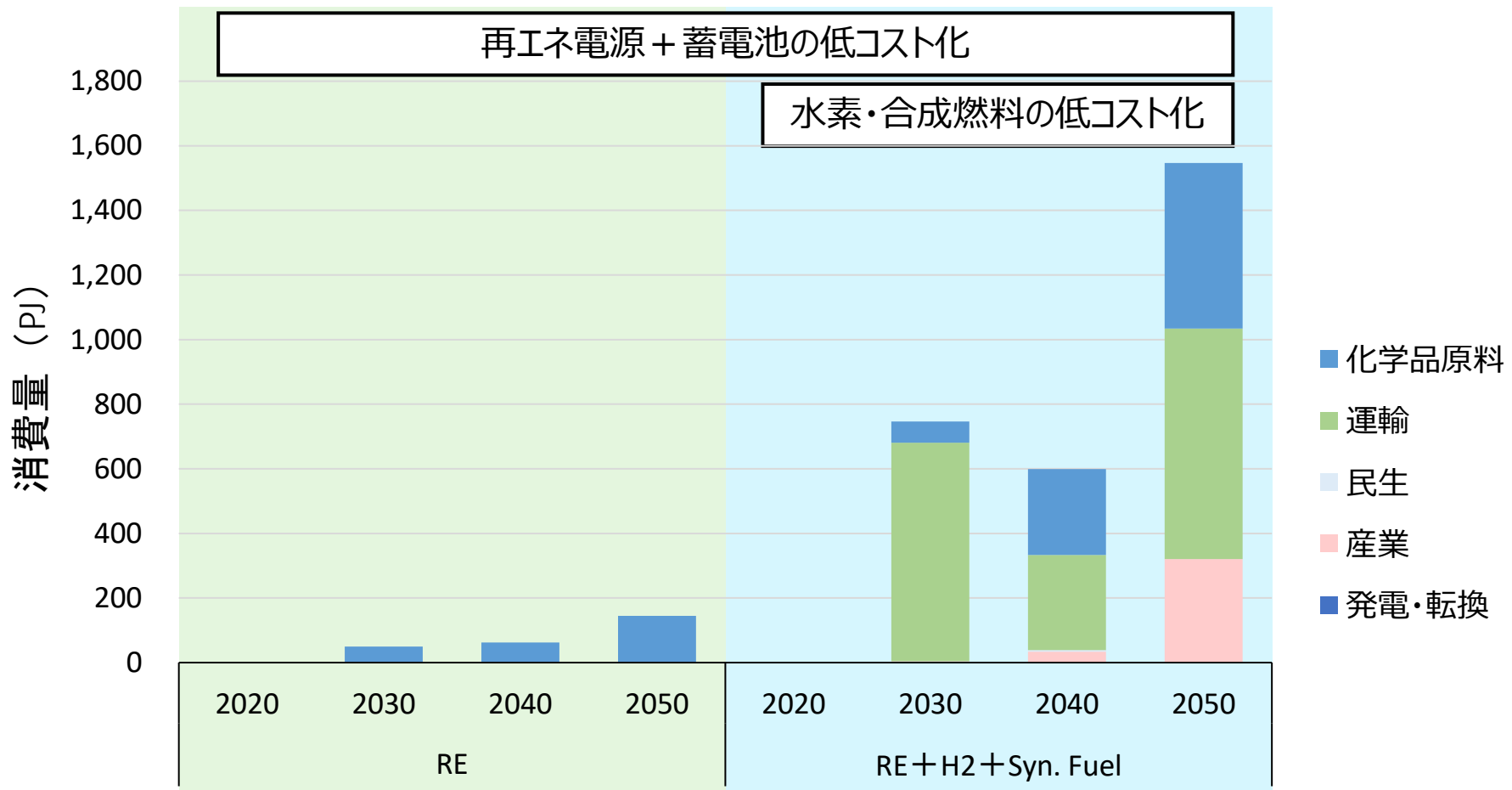
2050

2040

2050

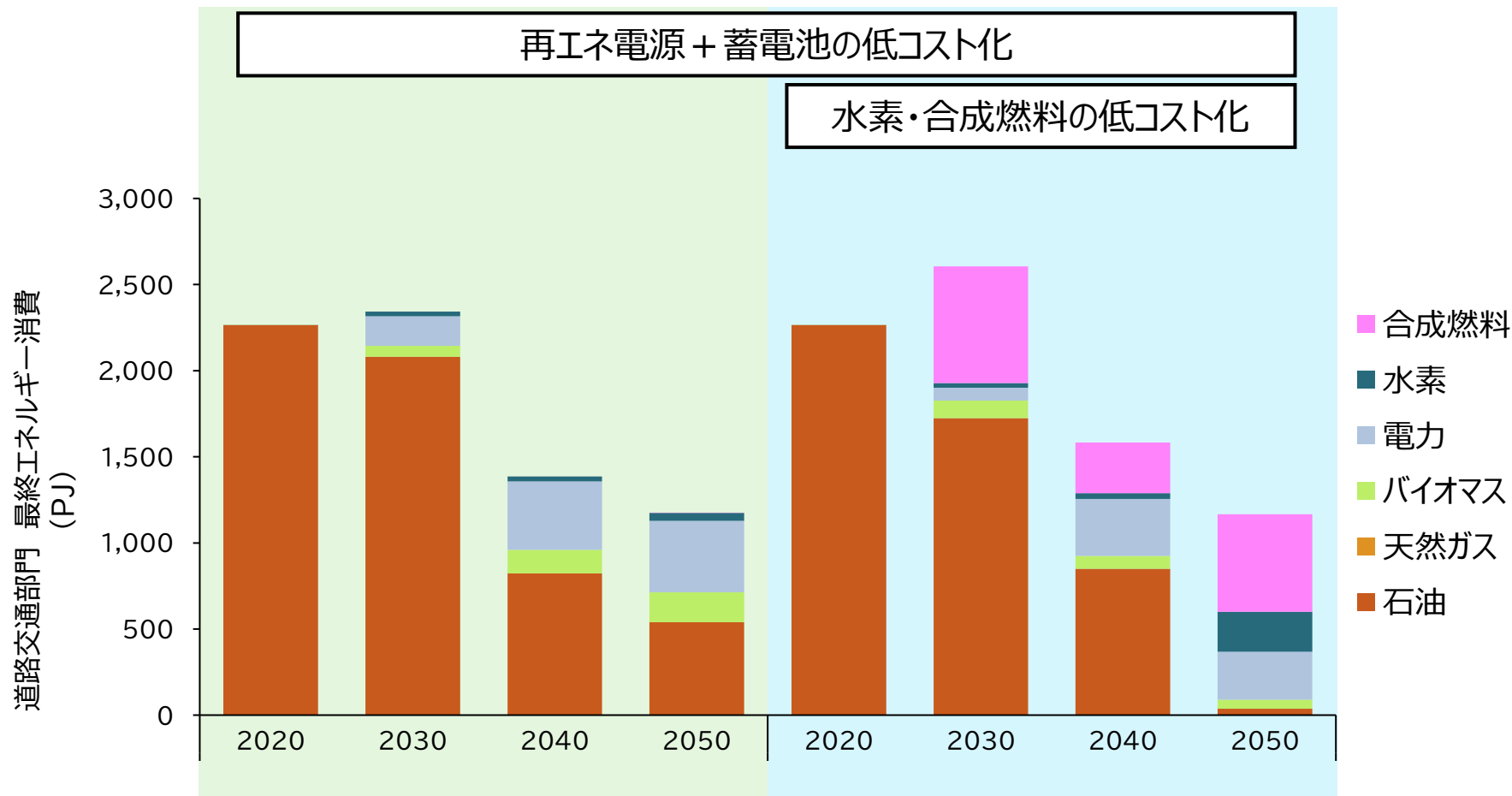


# カーボンニュートラルな合成燃料・原料の需要と用途



合成燃料の低コスト化 → 化学・運輸・中小規模産業で合成燃料の利用が増  
 (水素も低コスト化するが、既存インフラで利用可能な合成燃料を優先して利用。)

# 運輸セクターの最終エネルギー消費



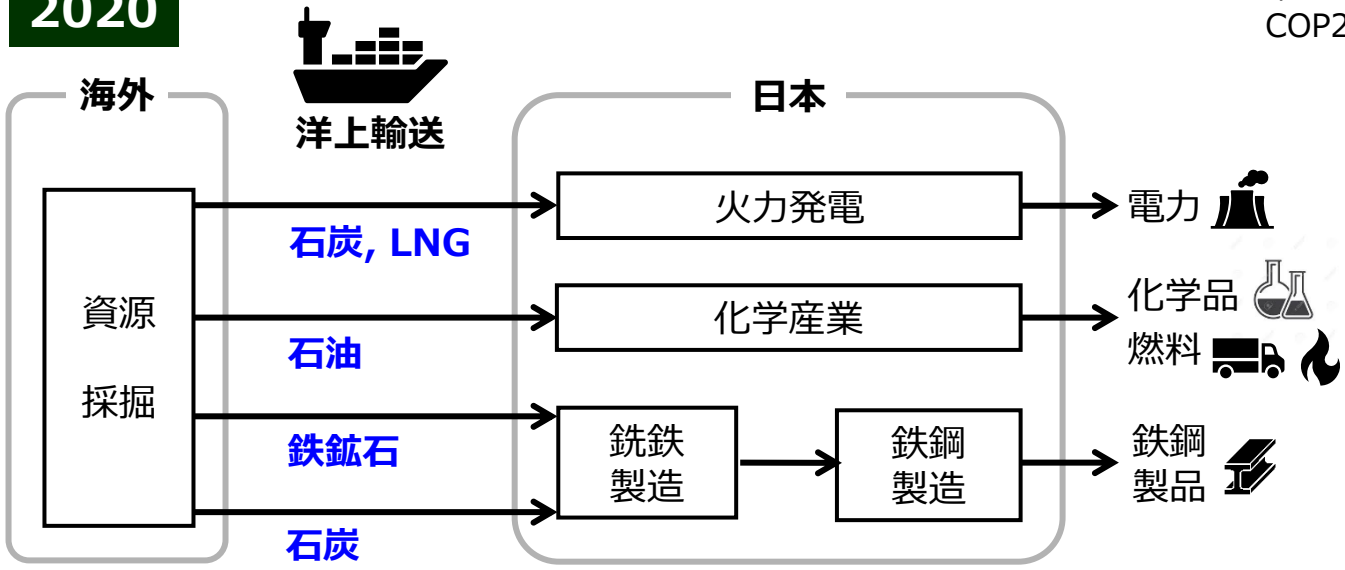
移動体をカーボンニュートラル化するために：

- 水素・合成燃料が高コスト→電化，化石燃料 + 国内DAC-CCS
- 水素・合成燃料が低コスト→電化，水素化，大型車は合成燃料利用

# カーボンニュートラル時代の国際サプライチェーン

東京大学グローバルコモンズセンター  
COP28 Japan Sessionにおける発表資料から

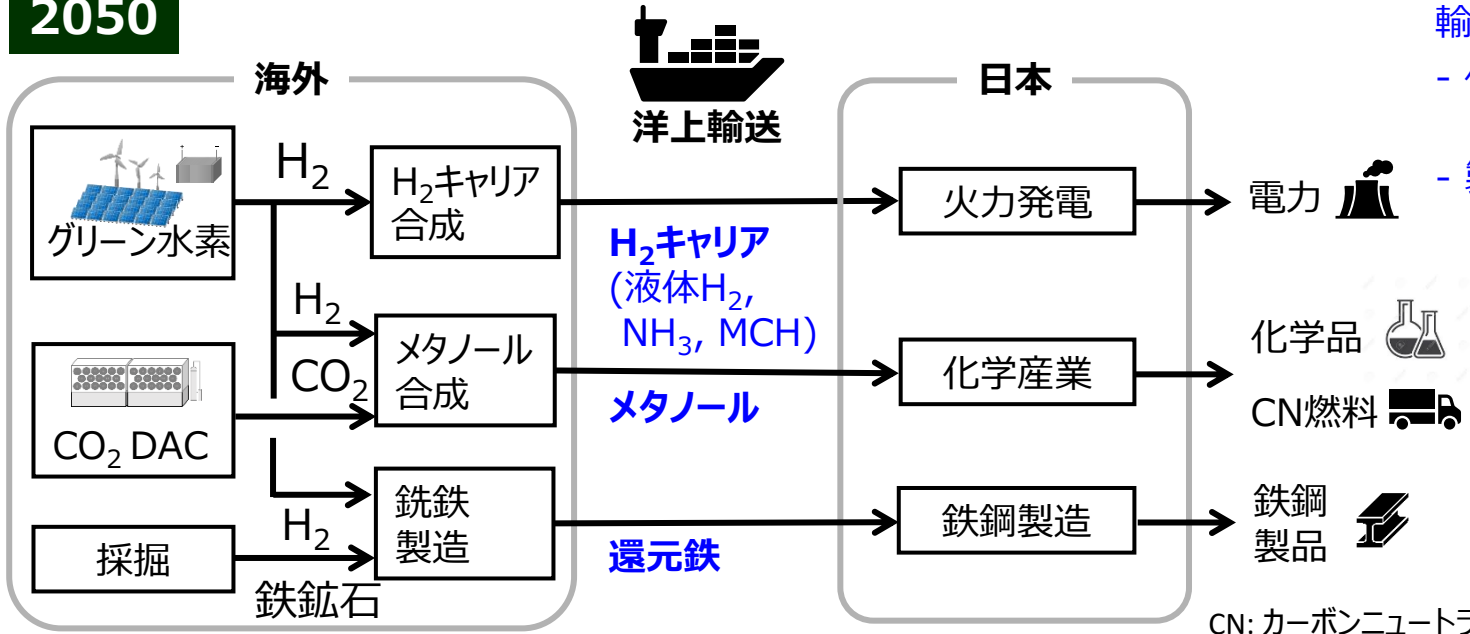
2020



水素を運ぶのは大変。  
水素製造地で1次加工し、  
運びやすい固体として  
輸入する選択肢もある。

- 化学品用水素 → メタノール  
(大気回収したCO<sub>2</sub>と反応)
- 製鉄用水素 → 銑鉄  
(鉄鉱石を水素還元)

2050

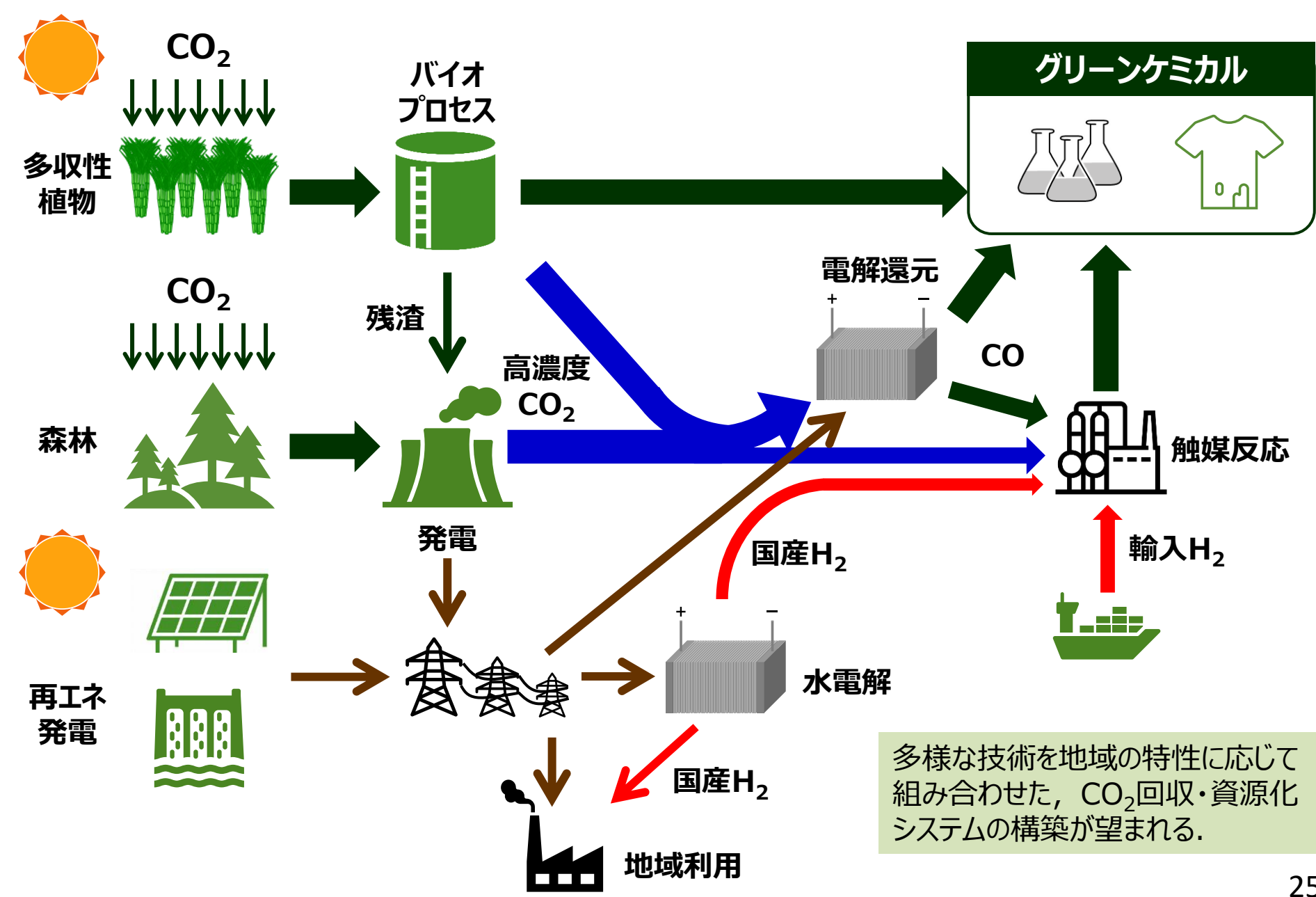


CN: カーボンニュートラル

# カーボンニュートラル(CN)燃料の大量実装は攻めの施策

- エネルギー利用の電化と電源のCN化は  
様々な技術想定の下でも共通するCN実現に向けた最重要施策
- 一方、燃料の直接利用は大型移動体や重工業には不可避  
→ CN水素の利用はCN実現のために不可避  
しかし、水素の輸送・貯蔵はつねに難題.
- 常温常圧で液体のCN燃料（合成燃料）の大量生産・低コスト化実現  
→ CN実現へのハードルが大幅に低下  
（トランジションに必要な総コストを低減できる可能性）
- ただし、CN燃料（合成燃料）の大量生産・低コスト化には以下が必須。
  - 技術開発・社会実装に向けた大規模な投資
  - 合成燃料の製造適地（主に海外）とのパートナーシップ
  - 国境をまたぐCO<sub>2</sub>排出に関する国際ルール形成（事業の予見性確保）これらを大胆に推進することが、  
技術選択を多様化して確実にCNの実現を目指すための前提条件.

# ハイブリッドなシステム展開



多様な技術を地域の特性に応じて組み合わせた、CO<sub>2</sub>回収・資源化システムの構築が望まれる。

# カーボンニュートラル実現に向けたマルチスケールな取り組み

2025

2030

2050

今、身の回りでできること

地域



地産地消の再エネ  
まちの魅力創造

国



電化推進  
再エネ発電徹底導入

製鉄・化学産業等の  
脱化石資源

地球



グリーン水素の  
グローバルネットワーク

カーボンリサイクル

他の軸：導入可能量，技術成熟度 等

地球規模の持続可能性を目指す 26

# シナリオにおける仮定（水素・合成燃料関係）

円/MJ

		2020	2030	2040	2050
高位	水素	7.89	7.89	6.61	5.33
	e-crude		10.67	8.94	7.21
	e-メタノール		10.67	8.94	7.21
	e-ナフサ		11.90	9.97	8.04
	e-ケロシン		11.43	9.58	7.73
	e-ガソリン		11.27	9.44	7.61
	e-SAF		11.90	9.97	8.04
	e-ディーゼル		11.27	9.44	7.61
	e-メタン		9.37	7.85	6.33
低位	水素*	7.89	2.37	2.37	1.58
	e-crude		3.20	2.81	2.42
	e-メタノール		2.81	2.42	2.03
	e-ナフサ		3.43	3.01	2.62
	e-ケロシン		3.57	3.13	2.73
	e-ガソリン		3.38	2.97	2.57
	e-SAF		3.57	3.13	2.73
	e-ディーゼル		3.38	2.97	2.57
	e-メタン		3.20	2.81	2.42
共通	バイオエタノール	3.00	3.00	3.00	3.00
	バイオディーゼル		3.00	3.00	3.00
	バイオSAF		3.00	3.00	3.00

←20円/Nm<sup>3</sup>