



TOKYO
METROPOLITAN
UNIVERSITY



水素を作る・運ぶ・使う 水素エネルギーの現状と将来

穴戸哲也

¹東京都立大学 都市環境科学研究科

²東京都立大学 水素エネルギー社会構築推進研究センター

³東京都立大学 金の化学研究センター

⁴京都大学 触媒・電池元素戦略ユニット

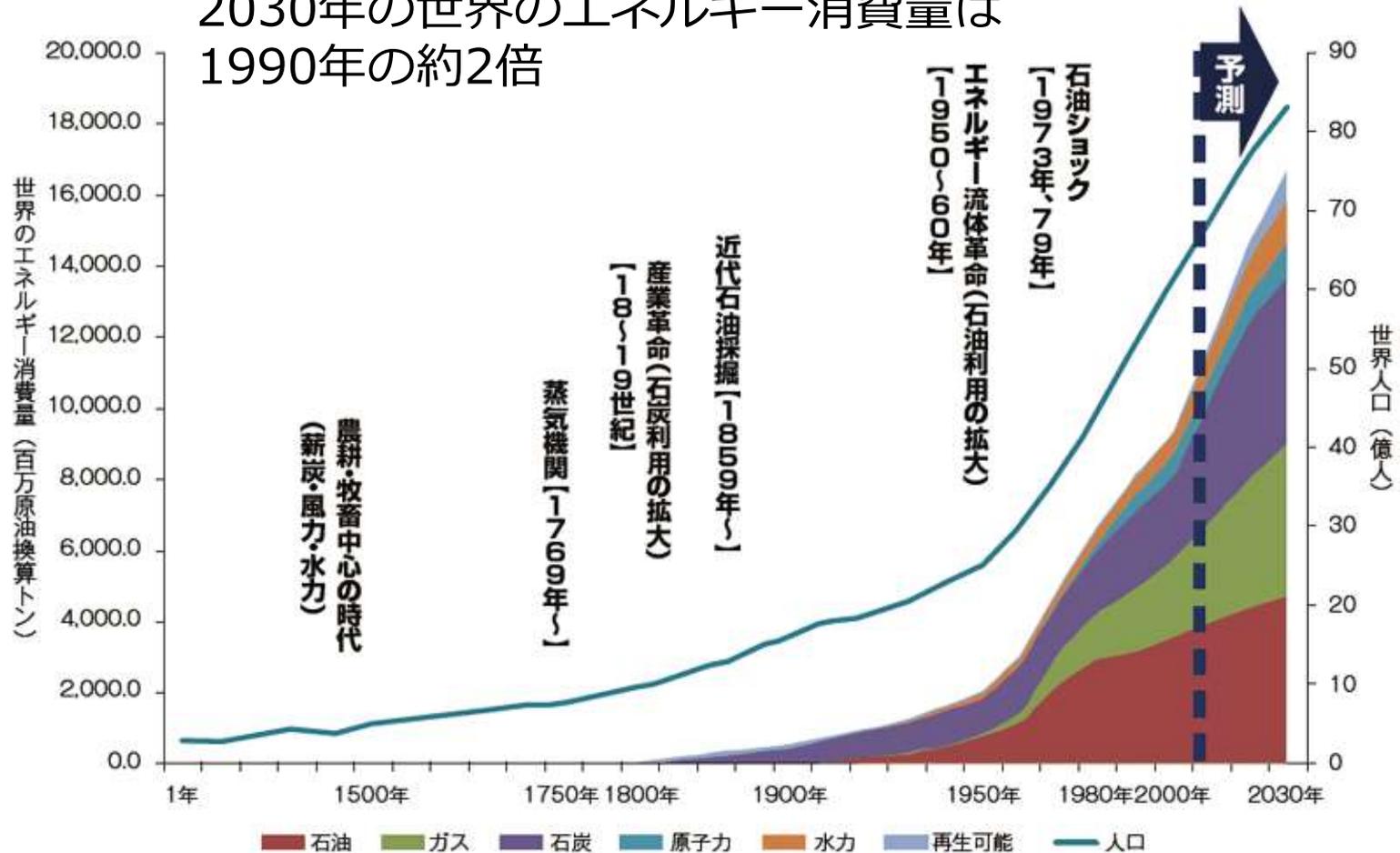
(スイソミル 2020.11.20)

Topics

- CO₂排出量の現状とCO₂排出量削減への取り組み
(水素エネルギー社会の構築の必要性)
- 燃料電池とは？
- 水素をつくる・はこぶ・使う
(効率的な水素サプライチェーンを構築するには？)
- 今後の展望

世界のエネルギー消費量と人口の推移

2030年の世界のエネルギー消費量は
1990年の約2倍



United Nations, "The World at Six Billion"

United Nations, "World Population Prospects 2010 Revision"

Energy Transitions: History, Requirements, Prospects

BP Statistical Review of World Energy June 2012

BP Energy Outlook 2030: January 2013

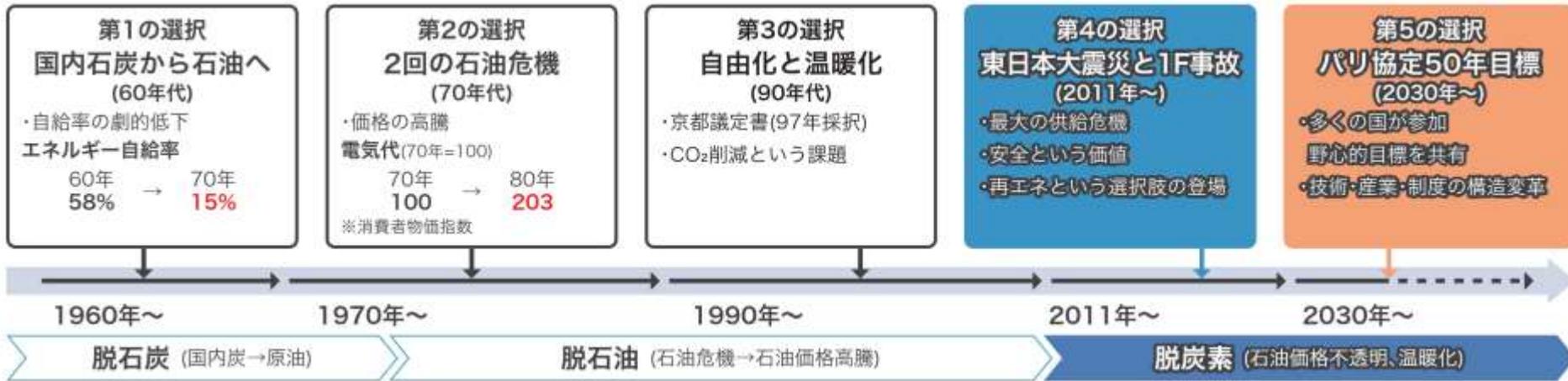
エネルギー消費

- 世界の豊かな国上位20ヶ国
おおよそ80%の天然ガス、
65%の石油、50%の石炭を
毎年消費している。
- アメリカとカナダの国民一人あたりの
年平均のエネルギー消費量は、
約300 GJ .
- 世界の最貧国の国民一人あたりの
年平均のエネルギー消費量
は？

1GJ 以下



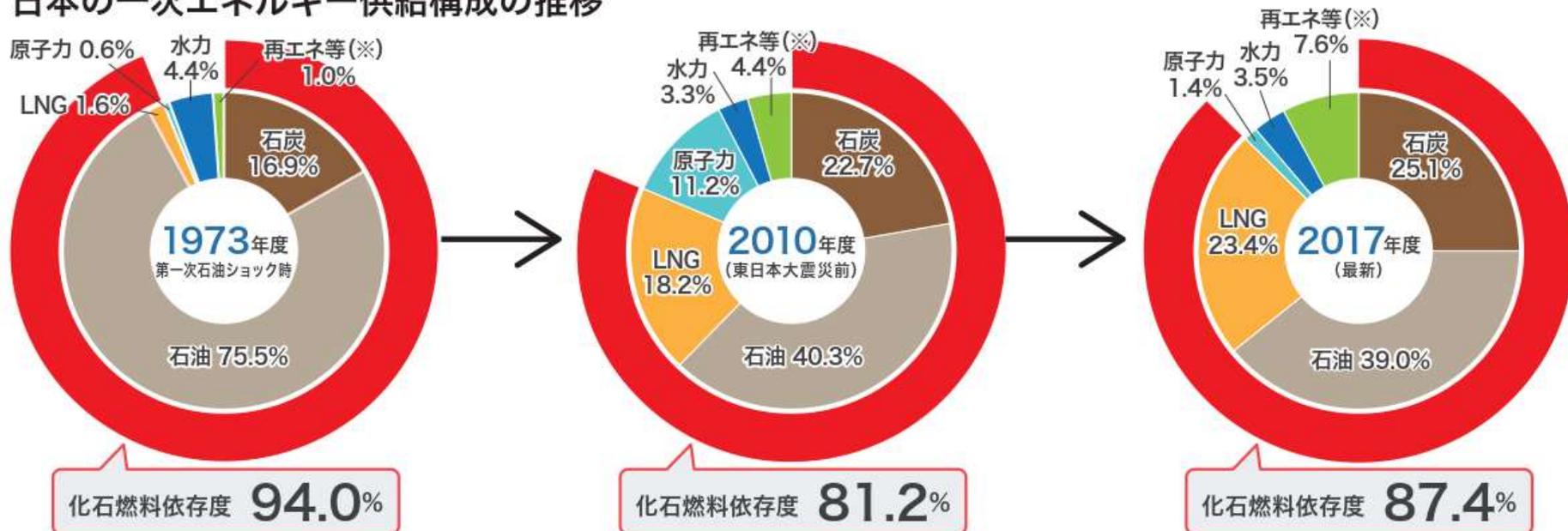
エネルギー変革の歴史



資源エネルギー庁資料

(一次)エネルギー国内供給構成の推移(日本)

日本の一次エネルギー供給構成の推移



出典:資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」

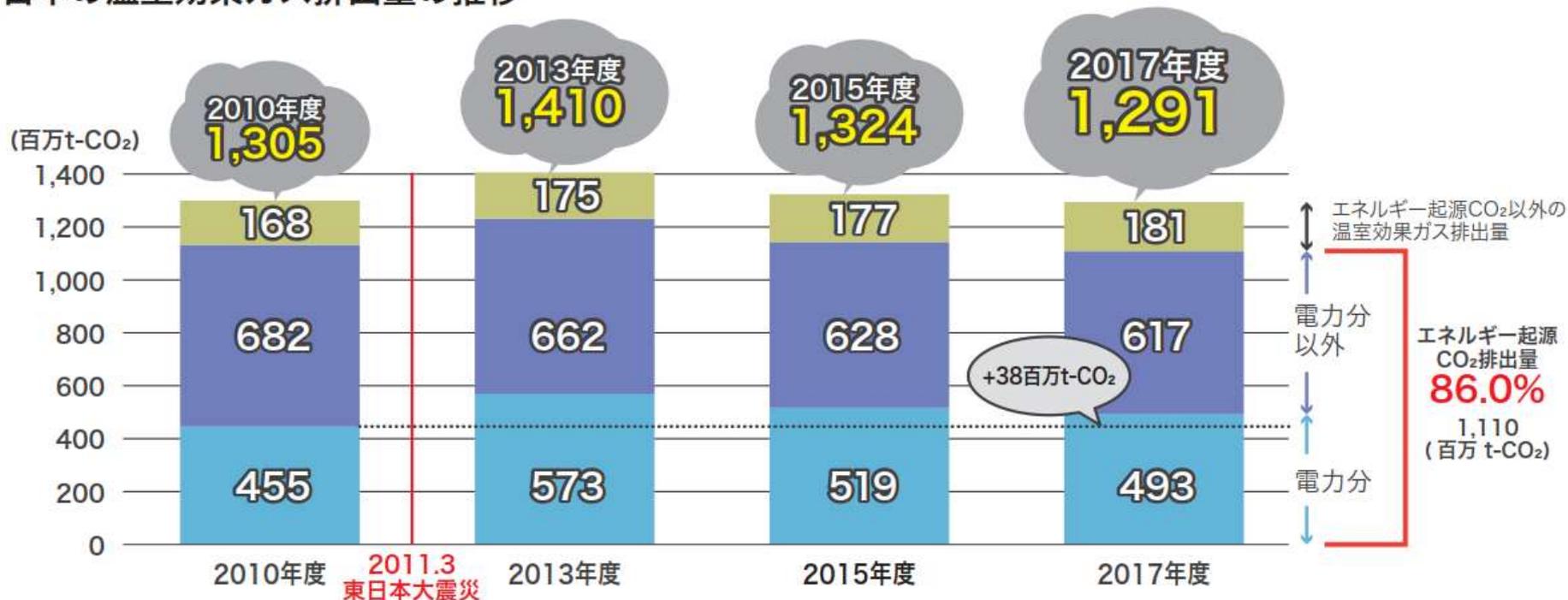
※四捨五入の関係で、合計が100%にならない場合がある。再エネ等(水力除く地熱、風力、太陽光など)は未活用エネルギーを含む。

- Fossil Fuels
- Renewable sources (wind, solar, hydroelectric)
- Nuclear power

出典:総合エネルギー統計

温室効果ガスの排出量 (日本)

日本の温室効果ガス排出量の推移



温室効果ガス:

二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、一酸化二窒素(N₂O)、
ハイドロフルオロカーボン類、パーフルオロカーボン類、六フッ化硫黄(SF₆)

出典: 総合エネルギー統計、環境行動計画(電気事業連合会)、
日本の温室効果ガス排出量の算定結果(環境省)を基に作成

二酸化炭素排出量と気温上昇

グローバル且つユニバーサルな課題

2017年の世界の平均濃度

406 ppm

工業化(1750年)以前の平均

278 ppm

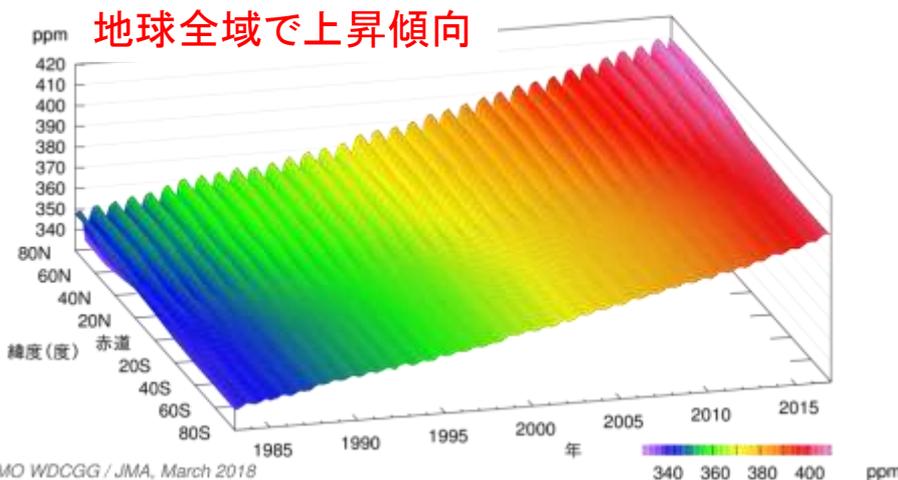
CO₂の累積総排出量と世界平均地上
気温の応答は、ほぼ比例関係

世界の平均気温を一定に
するためには、CO₂の累積排出量
を一定にする、つまり、**増分の排出量
(年間排出量)をゼロ**にすることが必要

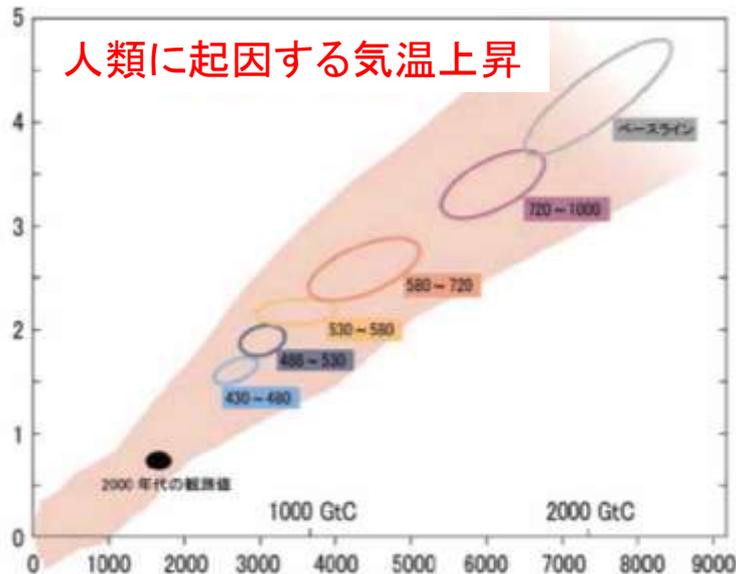


**CO₂の排出量低減
CO₂の回収・資源化**

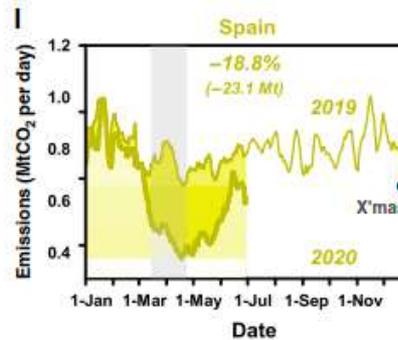
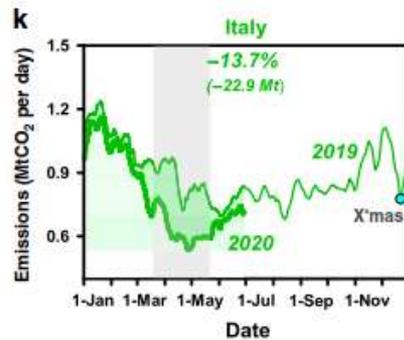
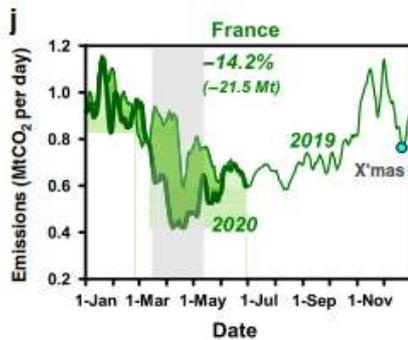
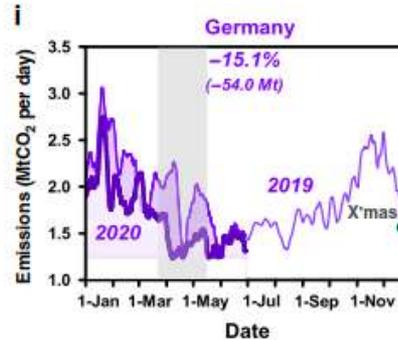
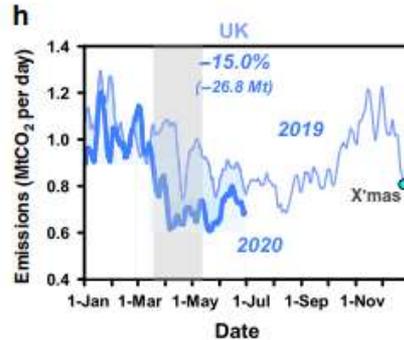
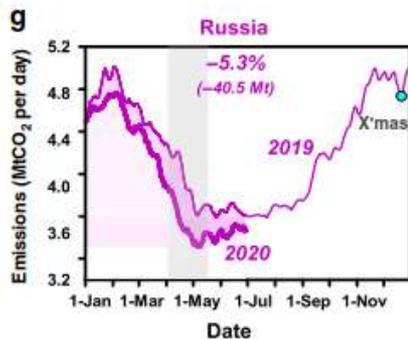
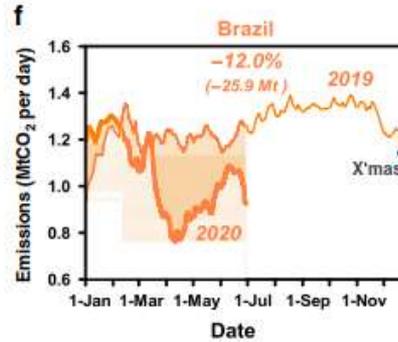
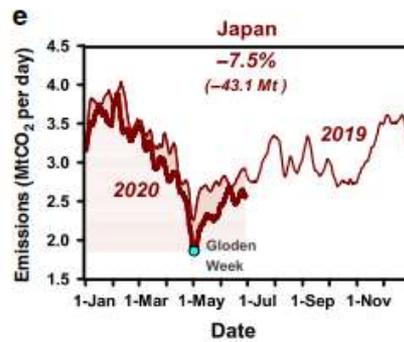
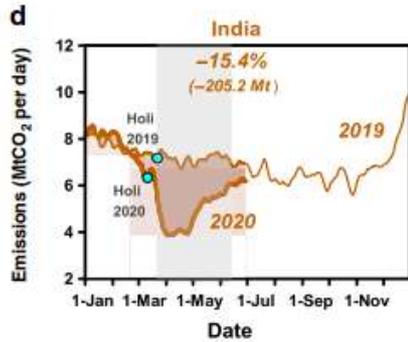
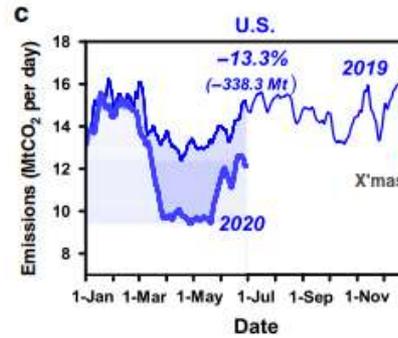
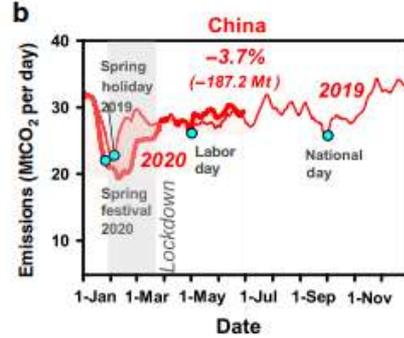
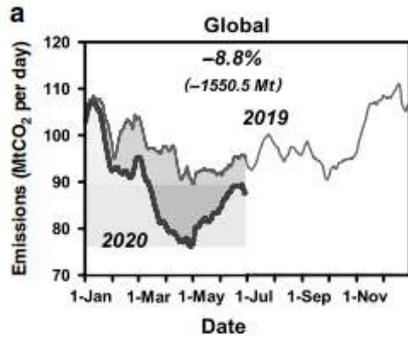
出典: 気候変動に関する政府間
パネル第5次評価報告書



1861-1880年平均との気温差/°C



1870年以降の人為起源CO₂累積排出量/GtCO₂



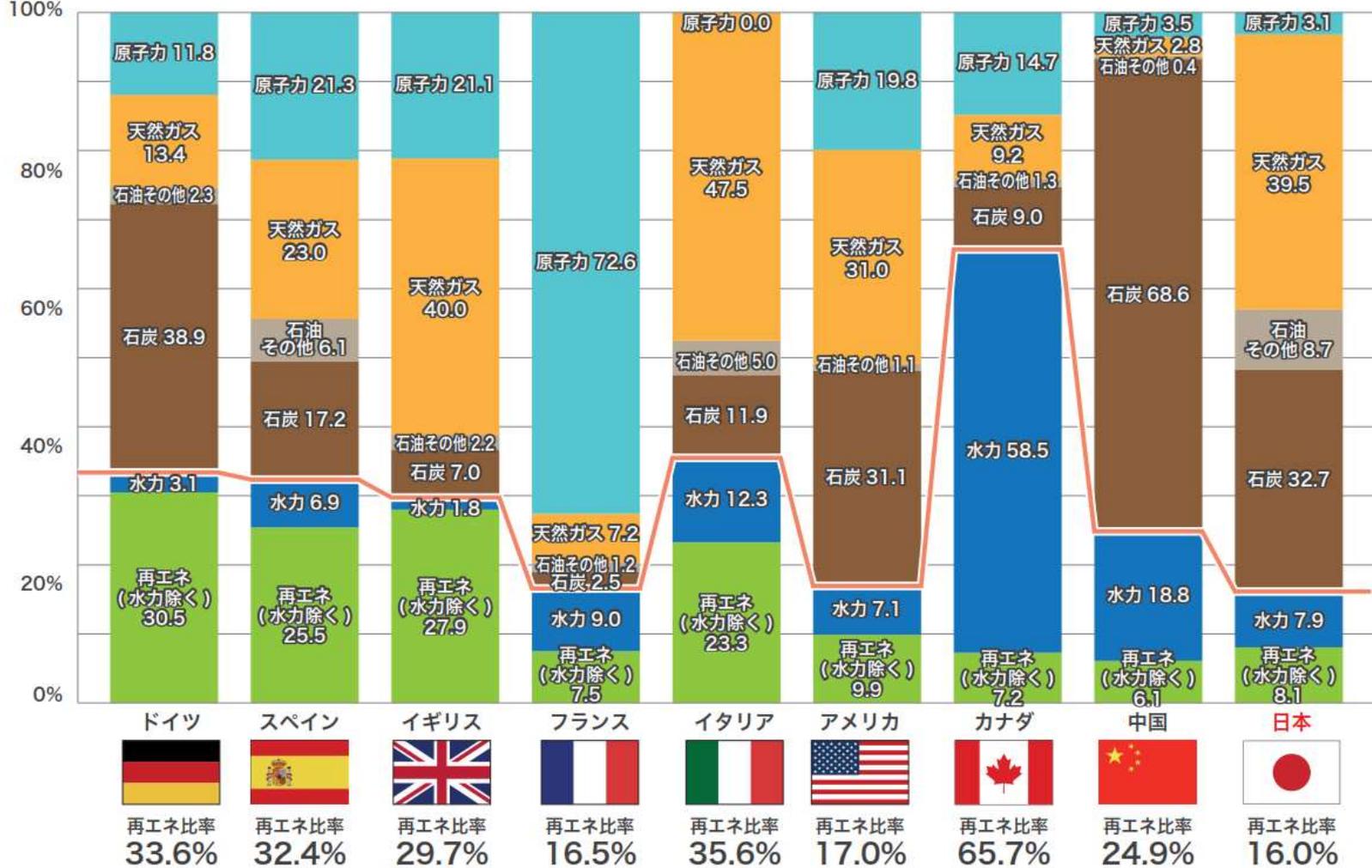
Daily CO₂ emissions for countries.

Effects of the COVID-19 pandemic on daily CO₂ emissions globally and in each of 11 regions are reflected by the shaded differences between January 1st and June 30th of 2019 and 2020.

Zhu, Liu et al., *Nature Communications* (2020) 11:5172

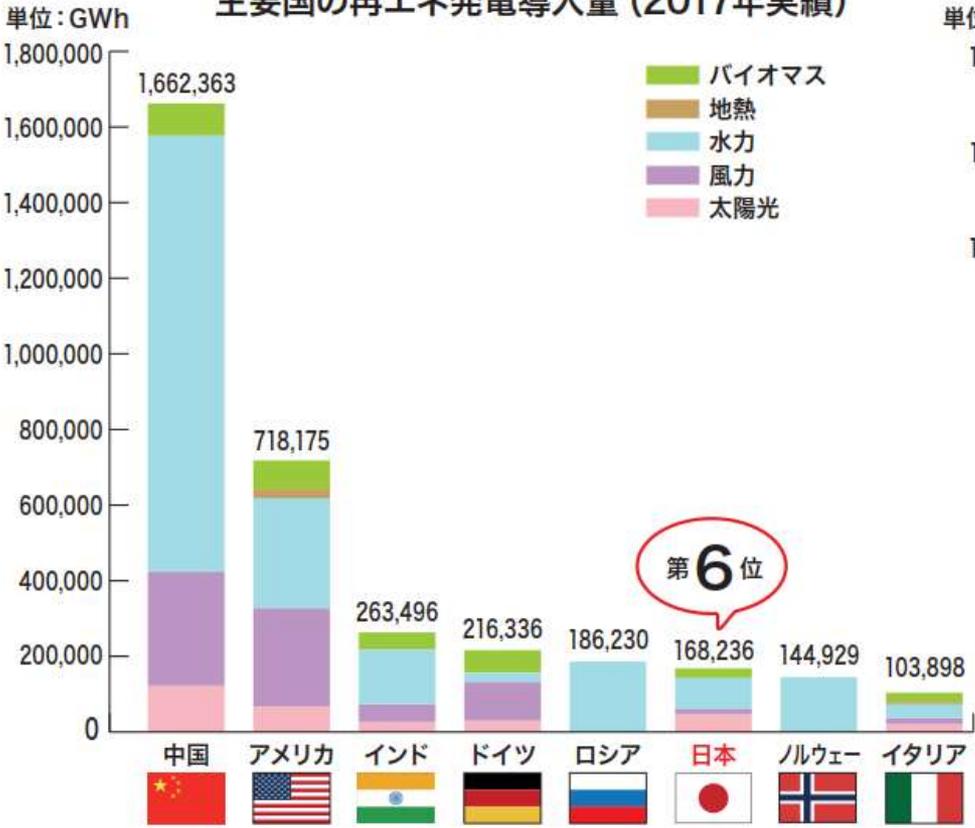
発電電力量に占める再生可能エネルギー比率(2017)

(発電電力量に占める割合)



再生可能エネルギー発電・太陽光発電 (2017)

主要国の再エネ発電導入量 (2017年実績)



主要国の太陽光発電導入量 (2017年実績)



日本の再エネ電力比率は2017年で、16.0%。
 再エネ発電設備容量は世界第6位で、太陽光発電は世界第3位。

現在のエネルギーの基本的視点

エネルギー基本計画（第5次 2018年7月3日 閣議決定）

エネルギー政策の推進にあたっては、生産・調達から流通、消費までのエネルギーサプライチェーン全体を俯瞰し、基本的な視点を明確にして中長期的に取り組んでいくことが重要

“3E” (3つの“E”)

Energy Security : 安定供給

Economic Efficiency : 経済効率性の向上

Environment : 環境への適合

+

“S”

Safety : 安全性

安全性 (Safety) を前提とした上で、エネルギーの安定供給を第一とし、経済効率性の向上による低コストでのエネルギー供給を実現し、同時に環境への適合を図る。

将来の電源構成(2030年度)

<3 E + Sに関する政策目標>

安全性(Safety)
安全性が大前提

自給率
(Energy Security)

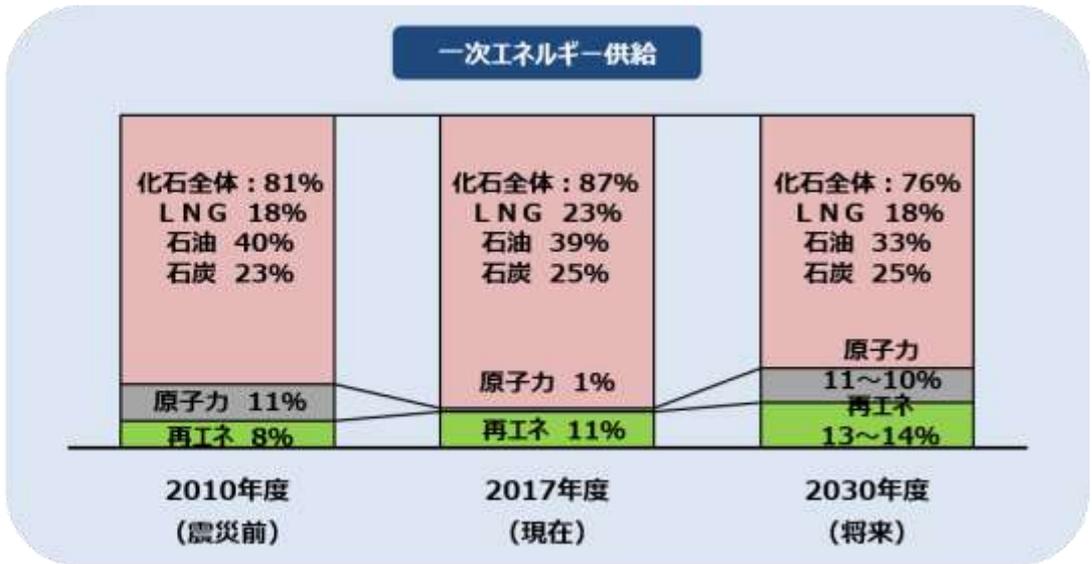
震災前(約20%)を
更に上回る概ね25%程度

経済効率性(電力コスト)
(Economic Efficiency)

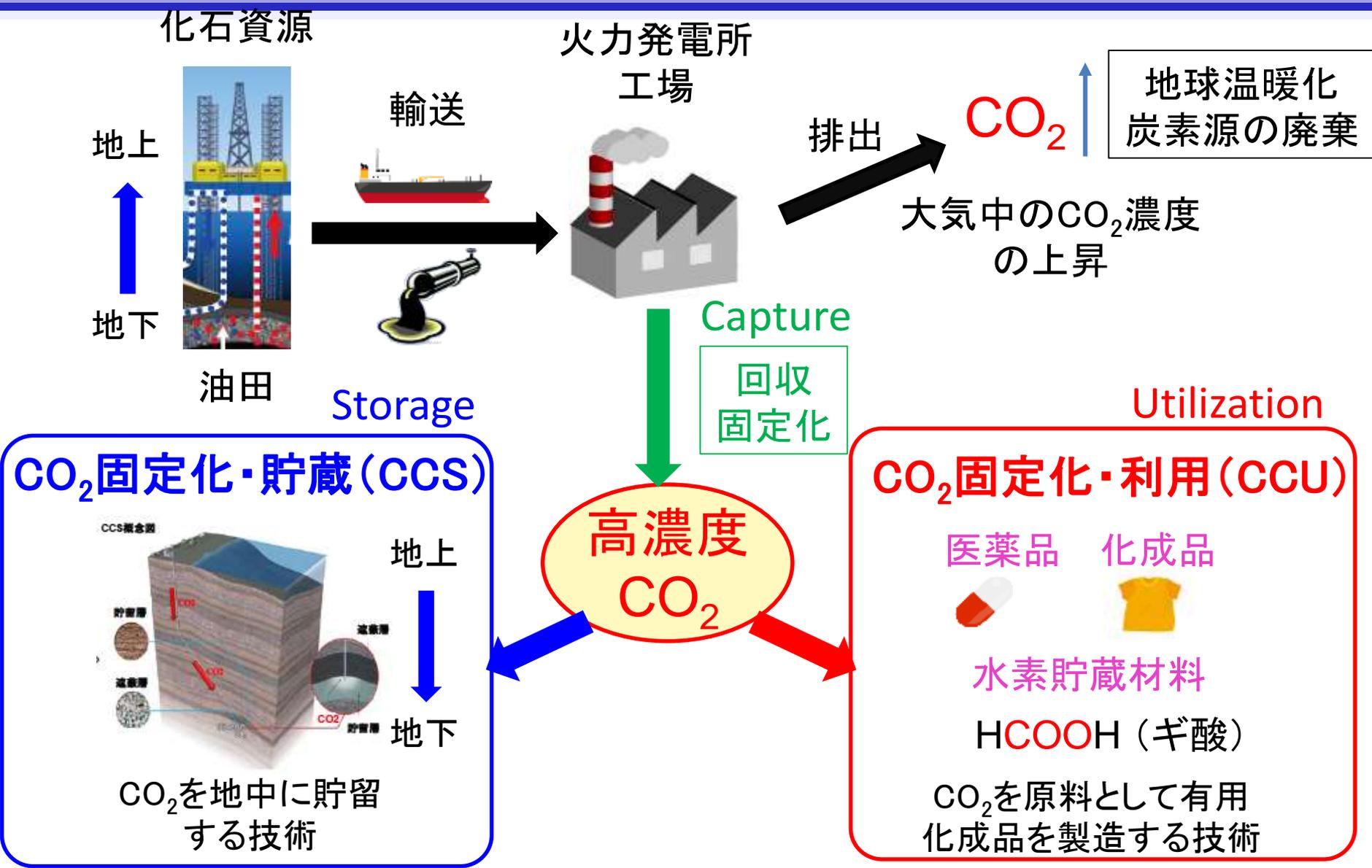
現状よりも引き下げる

温室効果ガス排出量
(Environment)

欧米に遜色ない
温室効果ガス削減目標



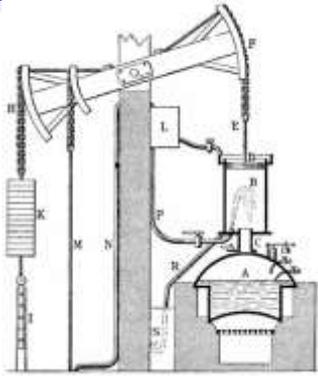
二酸化炭素の回収・貯留・利用技術 (CCSとCCU)



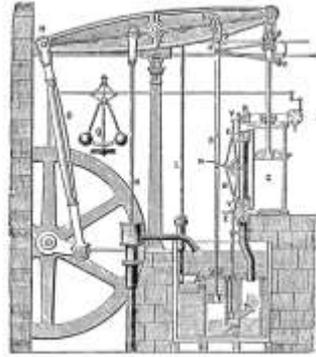
採掘した炭素源をCO₂として再埋蔵

CO₂を炭素源としてリサイクル・資源化

現在の火力発電システム



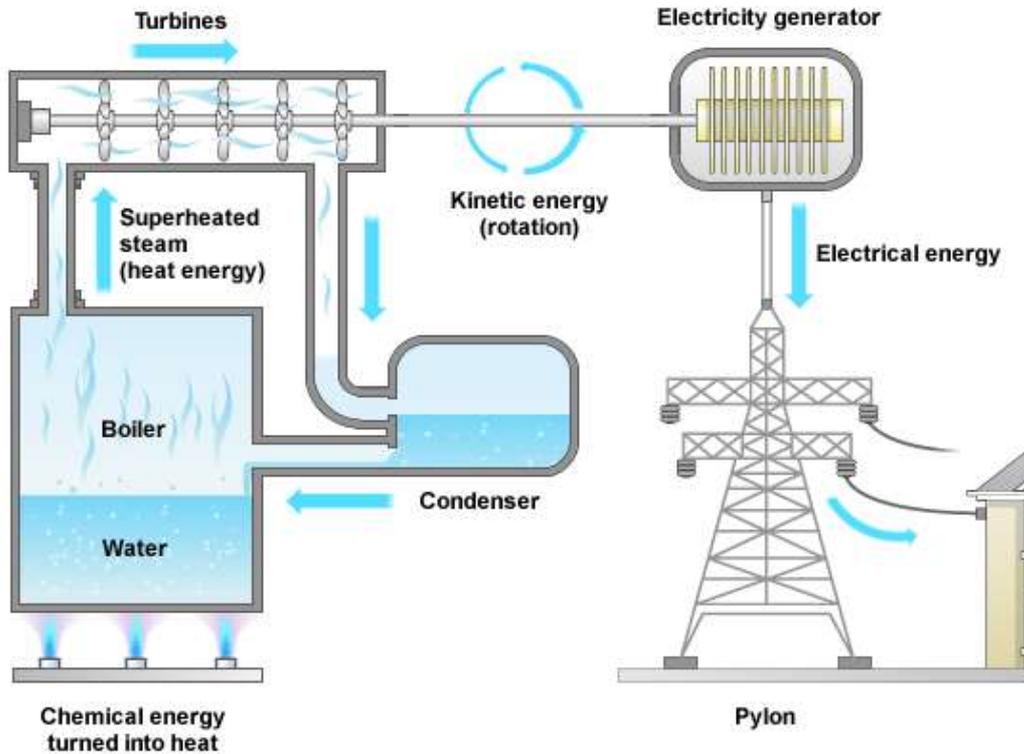
Thomas Newcomen



James Watt



エンジン



化学エネルギー
→ 熱エネルギー
→ 運動エネルギー
→ 電気エネルギー

熱機関

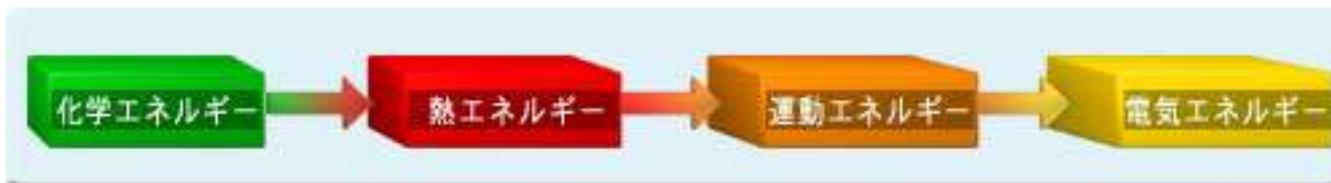
化石燃料を燃焼している。
→CO₂が排出される

効率が向上すれば低減できる

(水素) 燃料電池

熱機関による発電

エネルギー変換効率 **最大で60%程度**



燃料電池による発電

エネルギー変換効率 **最大で83%(理論上)**



Sir Humphry Davy
(1778-1829)
アルカリ金属
アルカリ土類金属の発見

1801年に原理を提唱

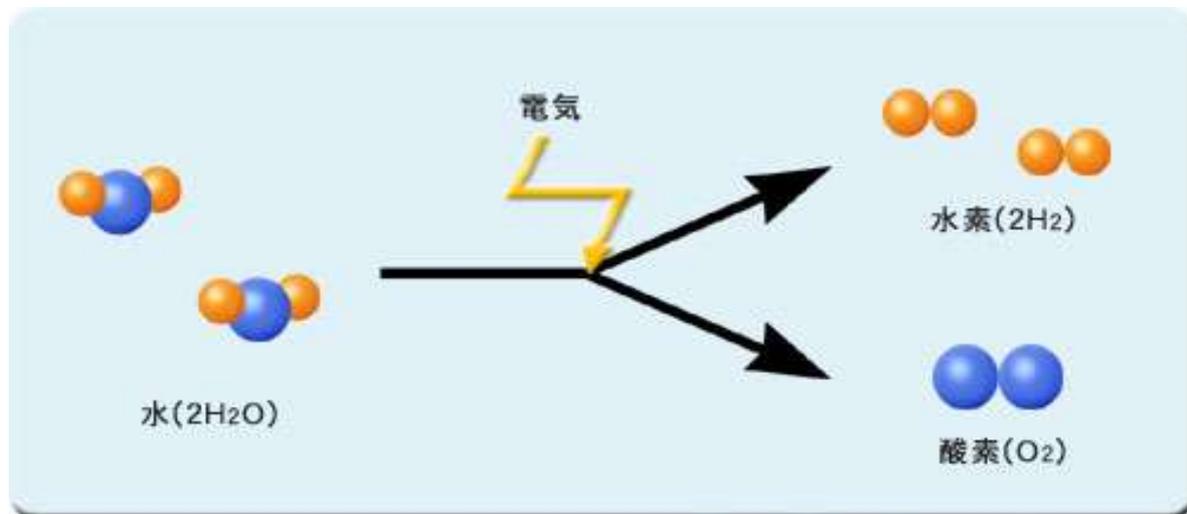
Faradayの先生



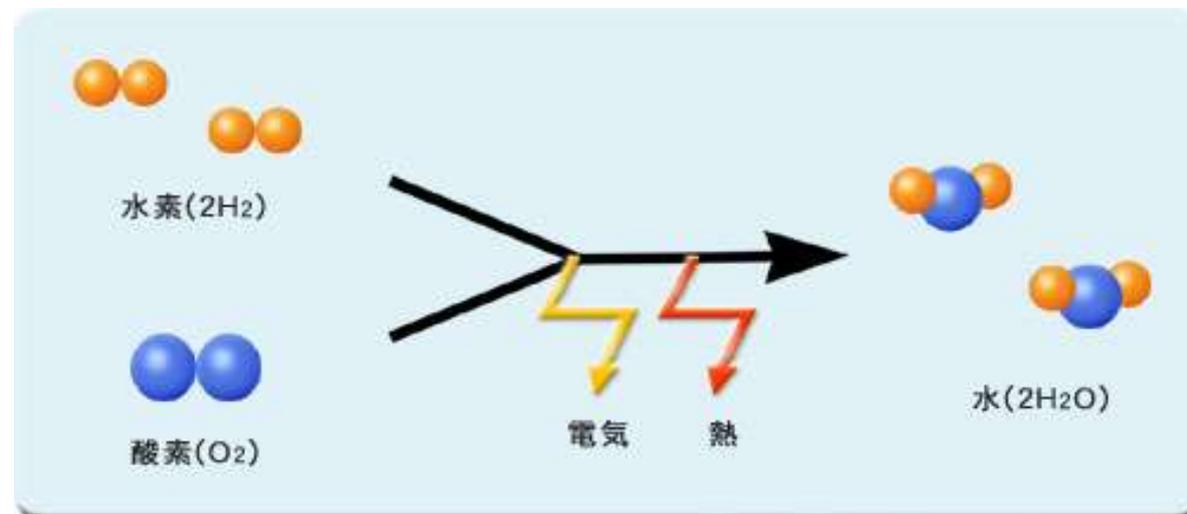
Sir William Robert Grov
(1811-1896)
1838年 燃料電池の原型
を作成

28歳のとき

(水素) 燃料電池

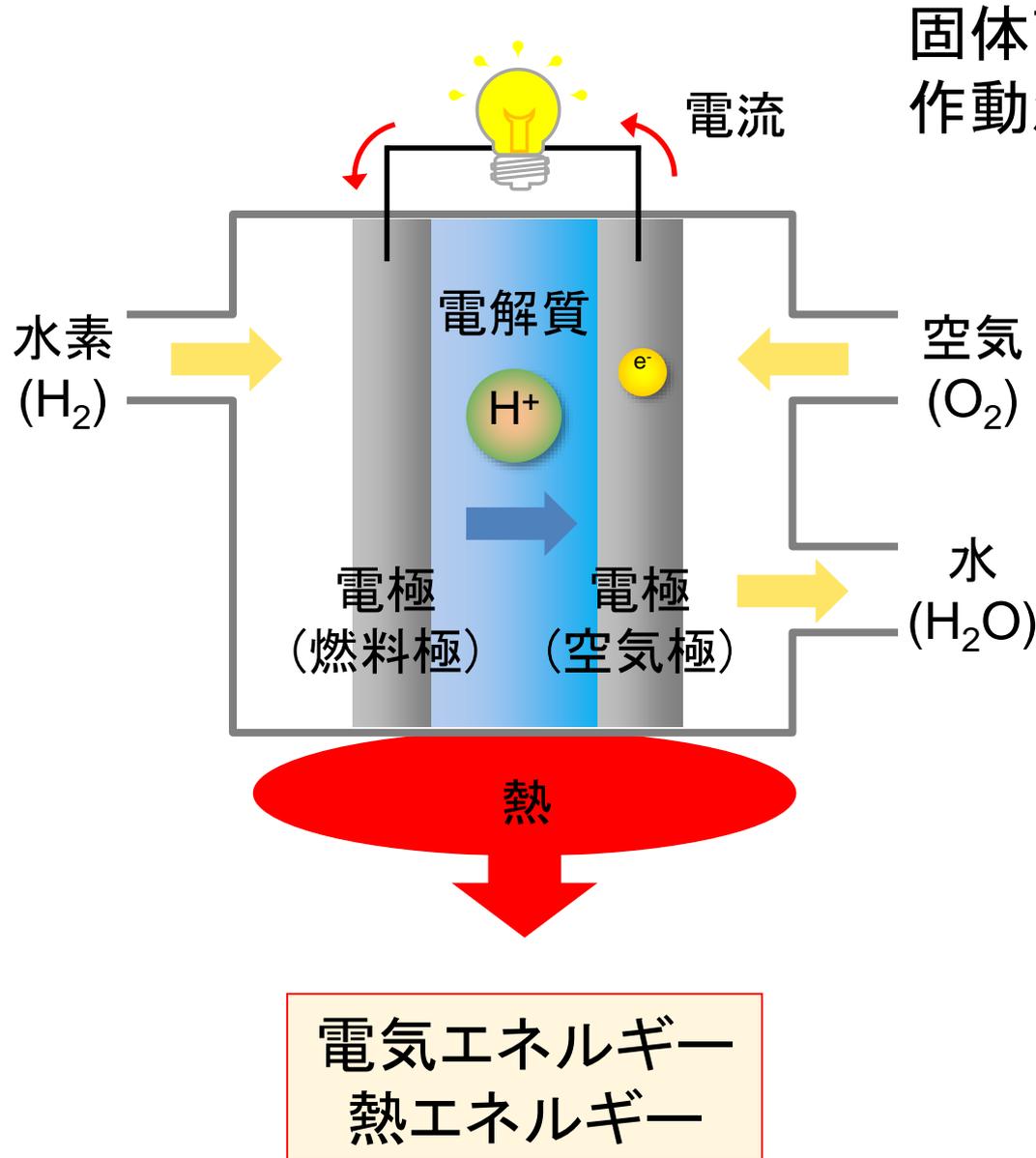


電気分解



燃料電池による発電

燃料電池 (Fuel Cell) の原理



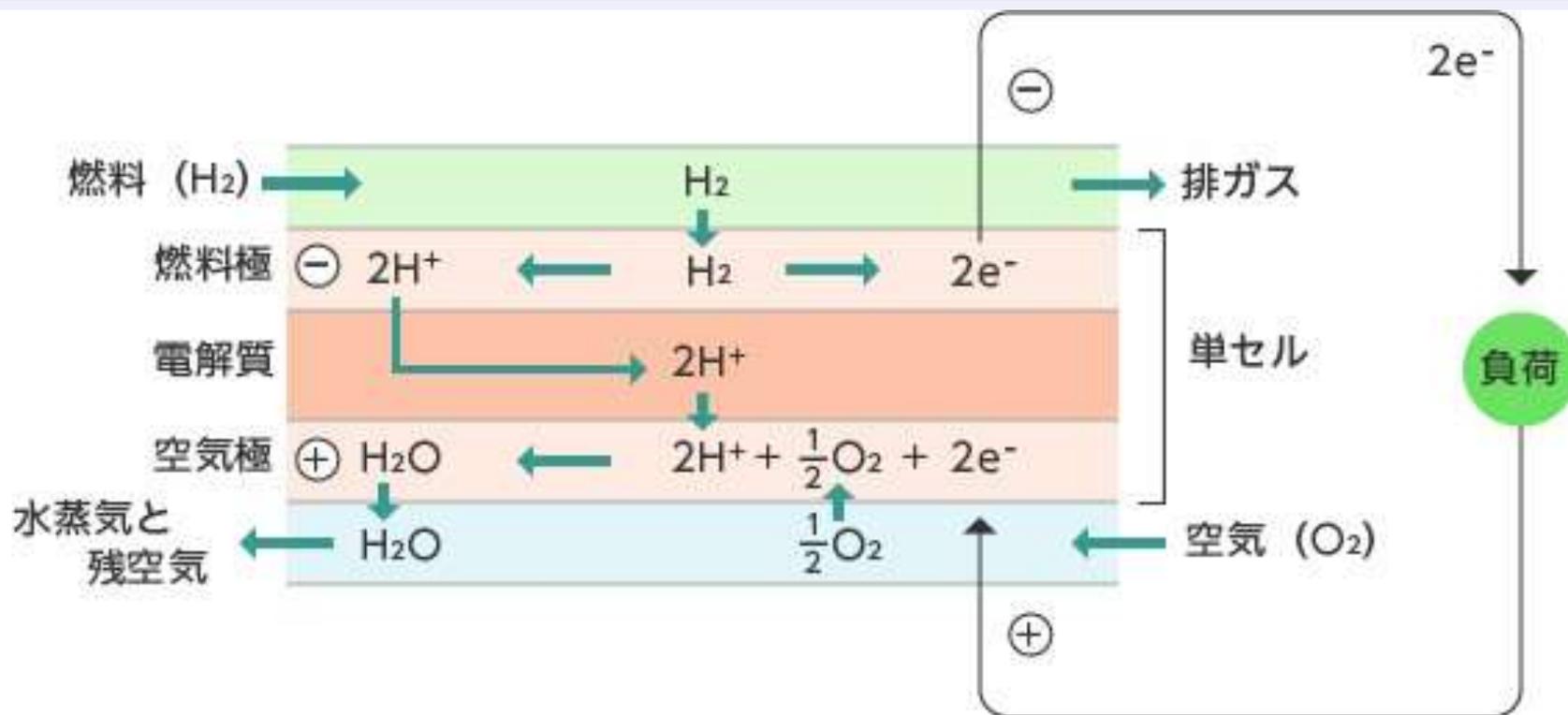
固体高分子型燃料電池
作動温度 80-90°C

水素(H_2)と酸素(O_2)から
電気エネルギーと
熱エネルギーを生みだ
す。

生成物は水(H_2O)だけ
 CO_2 を排出しない(?)

電極(触媒)には、白金
(Pt)が使用されている。

(水素) 燃料電池



水素分子 水素イオン (プロトン) 電子

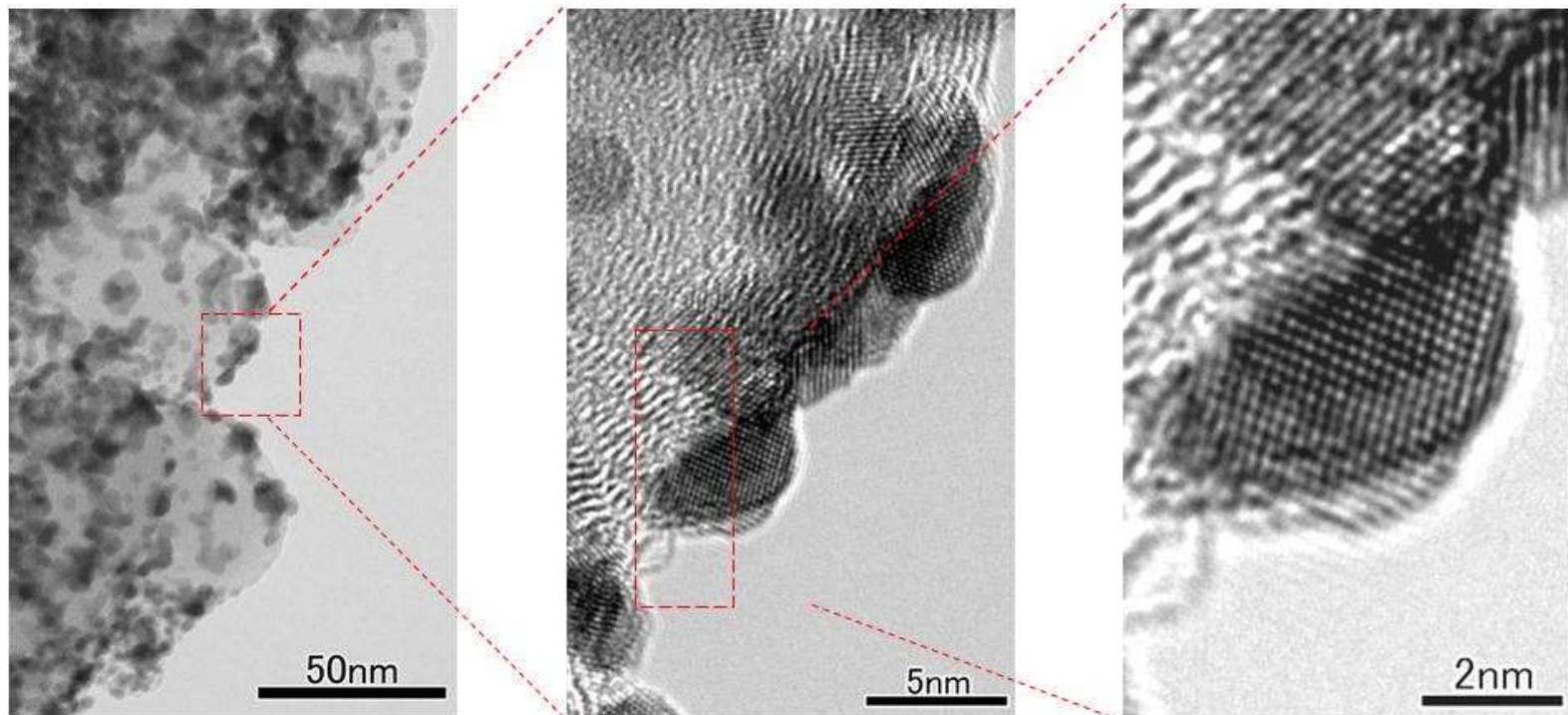
日本ガス協会HP



固体高分子型
PEFC

Polymer Electrolyte Fuel Cell

ナノ粒子の形成 (触媒: 空気極 燃料極)



$$1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$$

原子数100個から数千個程度

金属ナノ粒子

透過型電子顕微鏡

(TEM: Transmission Electron Microscope)

(水素) 燃料電池

従来のシステムによる発電

1次エネルギー (石炭・石油・天然ガスなど)



エネルギー利用効率



家に届くのは、最初にあったエネルギーのたった37%

送電の際のロスはかなり大きい

電気はためる(蓄電)が苦手

エネファームなら、ムダがなくなります!

エネファーム発電

1次エネルギー (天然ガス)



エネルギー利用効率



エネファームなら、最初にあったエネルギーのなんと85.8%も利用できます。

基本的に水素(H₂)が燃料

水素(H₂)はどこから、またどうやってつくるのだろうか?

水素燃料電池に必要な水素の量

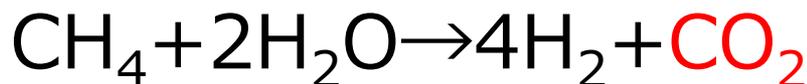
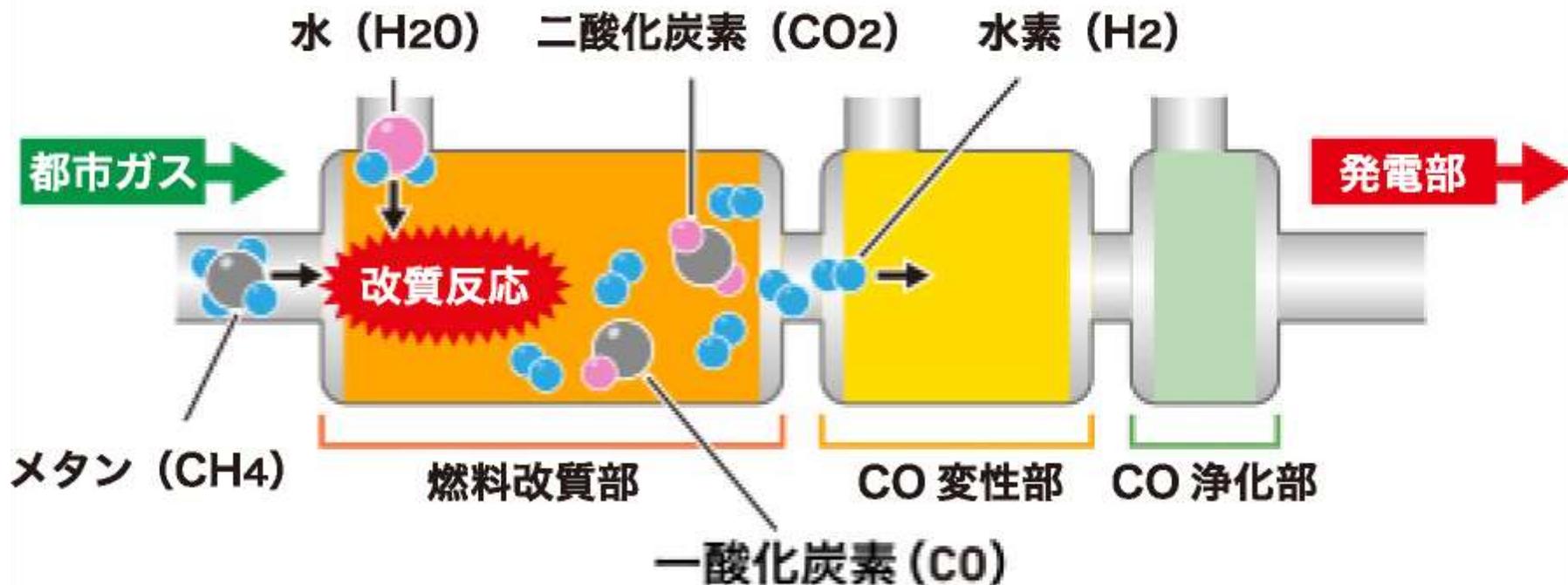
携帯オーディオ 携帯電話	PDA	デジタルカメラ	ビデオカメラ	ノートパソコン
1W	3W	5W	10W	30W
10ml/min			100mL/min	

電動工具	掃除機	電動自転車	自家発電機 自動販売機	ロボット	燃料電池自動車
50W	100W	300W	1kW	2kW	50kW
	1L/min		10L/min		500L/min

水素の供給・貯蔵が重要な課題
水素源をどこに求めるか？

燃料電池用水素製造 エネファームの場合

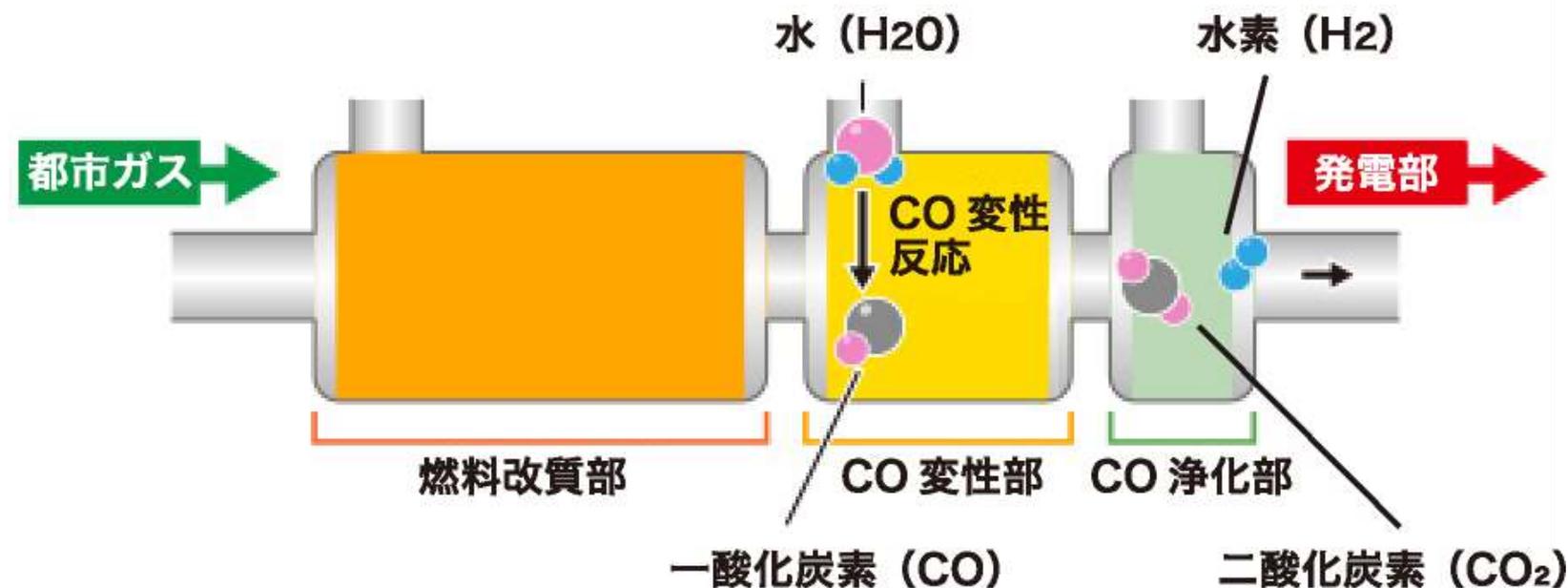
1. 燃料改質部でメタンに水を加え改質反応



触媒のはたらきによって水素を製造している！

燃料電池用水素製造 エネファームの場合

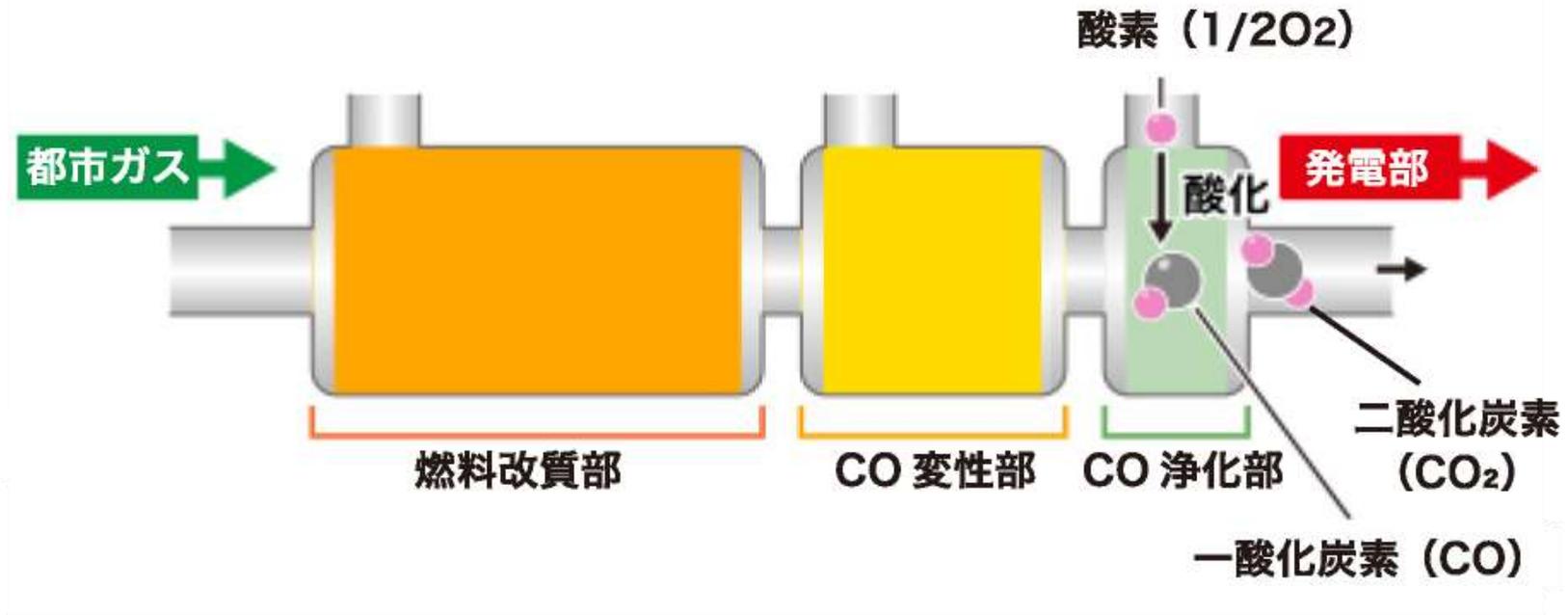
2. 改質で発生した一酸化炭素を変性



触媒のはたらきによってCO(一酸化炭素)を変換している!

燃料電池用水素製造 エネファームの場合

3. 浄化部で一酸化炭素を酸化



触媒のはたらきによってCO(一酸化炭素)を変換している！

水素製造プロセス

メタン・プロパン
メタノール
ジメチルエーテル
ガソリン

石油、天然ガス等
化石燃料



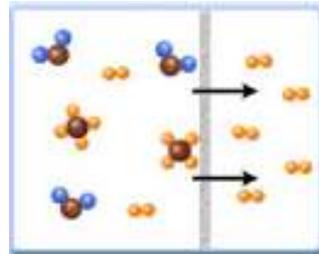
触媒等を用いて改質

製鉄所、化学工場等
からの副産物



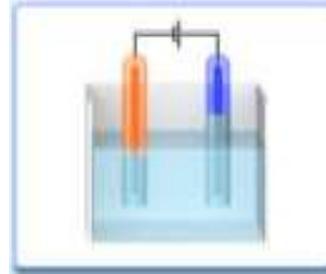
石油精製
コークス

副生ガスを精製



水素分離膜

CO₂を副生



発電した電気を用いて水を電気分解

CO₂を副生しない

太陽電池・光触媒
(太陽光、風力等)
再生可能エネルギー

自然エネルギー



バイオマス

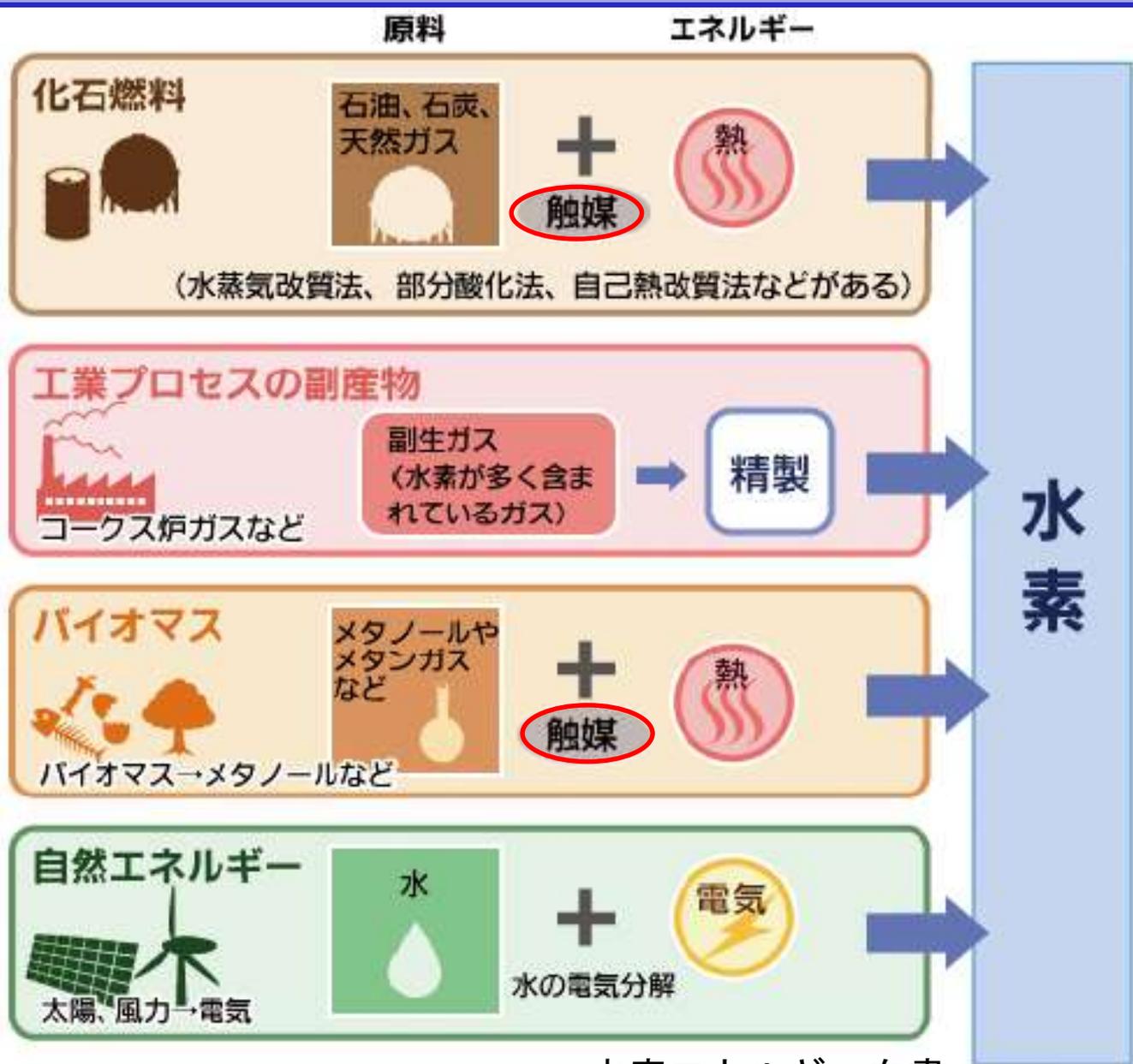


廃棄食品
木材 など

発生したメタノール
やメタンガスを触媒
等を用いて改質

カーボンニュートラル

水素製造法 水素をどこからどのように作るか



二酸化炭素回収・貯留技術 (CCS: Carbon dioxide Capture and Storage) との組み合わせが必要

光触媒による水分解も候補の一つ

バイオマスの利用



バイオマスの使用によって発生するCO₂は植物が生育中に光合成により取込んだもの

動植物を起源とするエネルギー源としての有機性資源の総称

バイオマスは大気中のCO₂濃度を増やさずに、持続的に利用できる再生可能資源

カーボンニュートラル

太陽光発電→電気分解



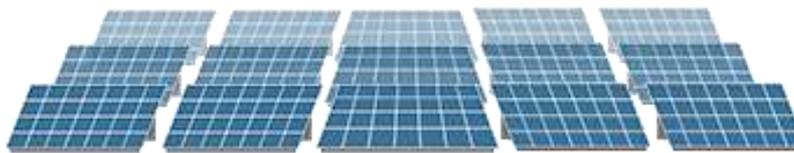
日射量が少ない



日射量が多い



狭い



広い



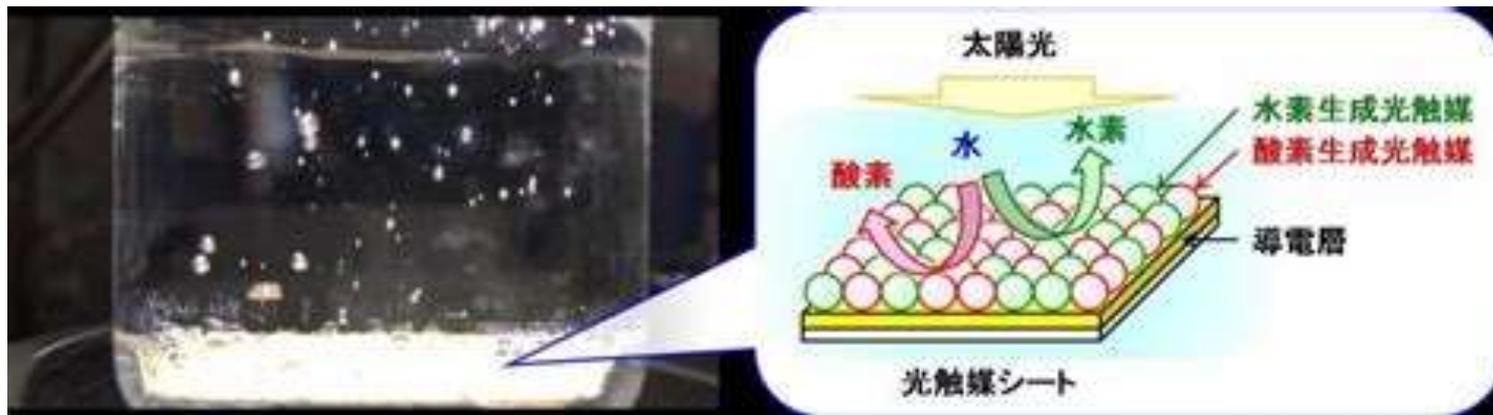
送電線が使えない



送電線が使える

土地2ヘクタール
(200 m x 100m)に
おかれたソーラー
パネルは約1MW
(1,000kW)の発電
が可能

光触媒



太陽光での水分解の効率
はまだ改善の必要がある

日本で最初に実験的に発見された。
1972年 本多-藤嶋効果

日本の研究者は世界をリードしている
人工光合成とも呼ばれる



東京理科大
藤嶋昭教授

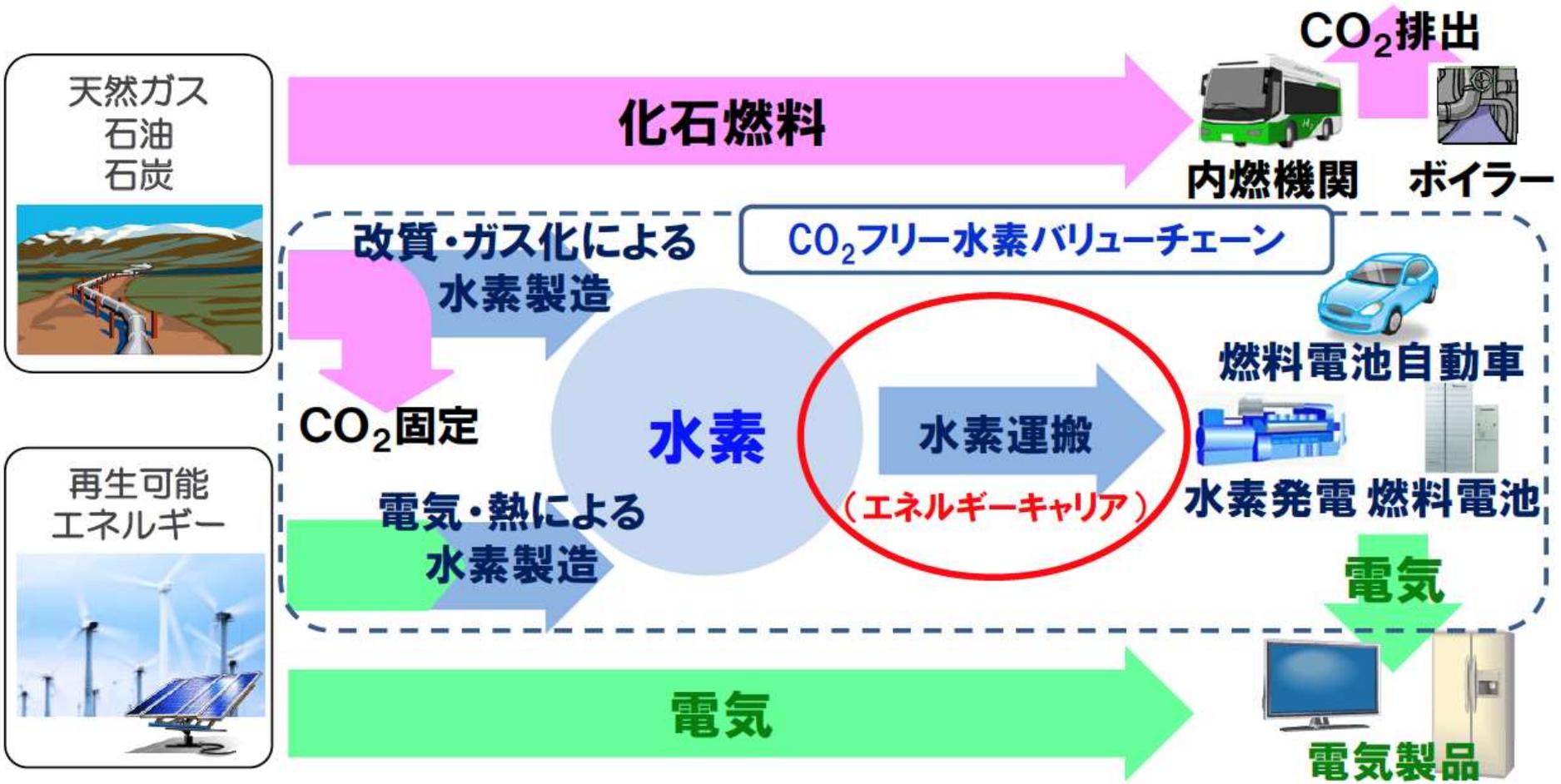


東京大
堂免一成教授



東京都立大学
井上晴夫教授

水素とエネルギーキャリア



水素をどの様に貯蔵・運搬するか？

内閣府 村木 茂 PD 資料

2020東京オリンピック・パラリンピックでの実証イメージ

- 燃料電池バスによる選手・観客輸送、燃料電池自動車による競技支援
- 選手村・競技場へのエネルギー供給の一部を水素化



水素の運搬・貯蔵

製造

輸送・貯蔵

利用



輸送・貯蔵について
様々な検討が行わ
れている

資源エネルギー庁

水素の特徴

水素ガスの質量表示と体積表示

水素ガス1kgは、約 11.2Nm^3 (0°C 、大気圧での体積)



1辺0.28mの立方体

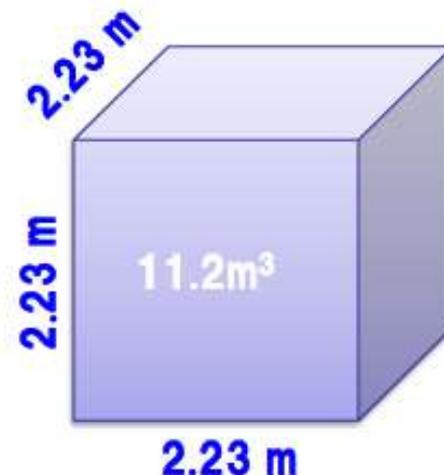


1辺0.24mの立方体

70MPaに圧縮すると、
約24ℓ (0.024m^3)の体積に！



-253℃で液体にすると
約14ℓ (0.014m^3)の体積に！

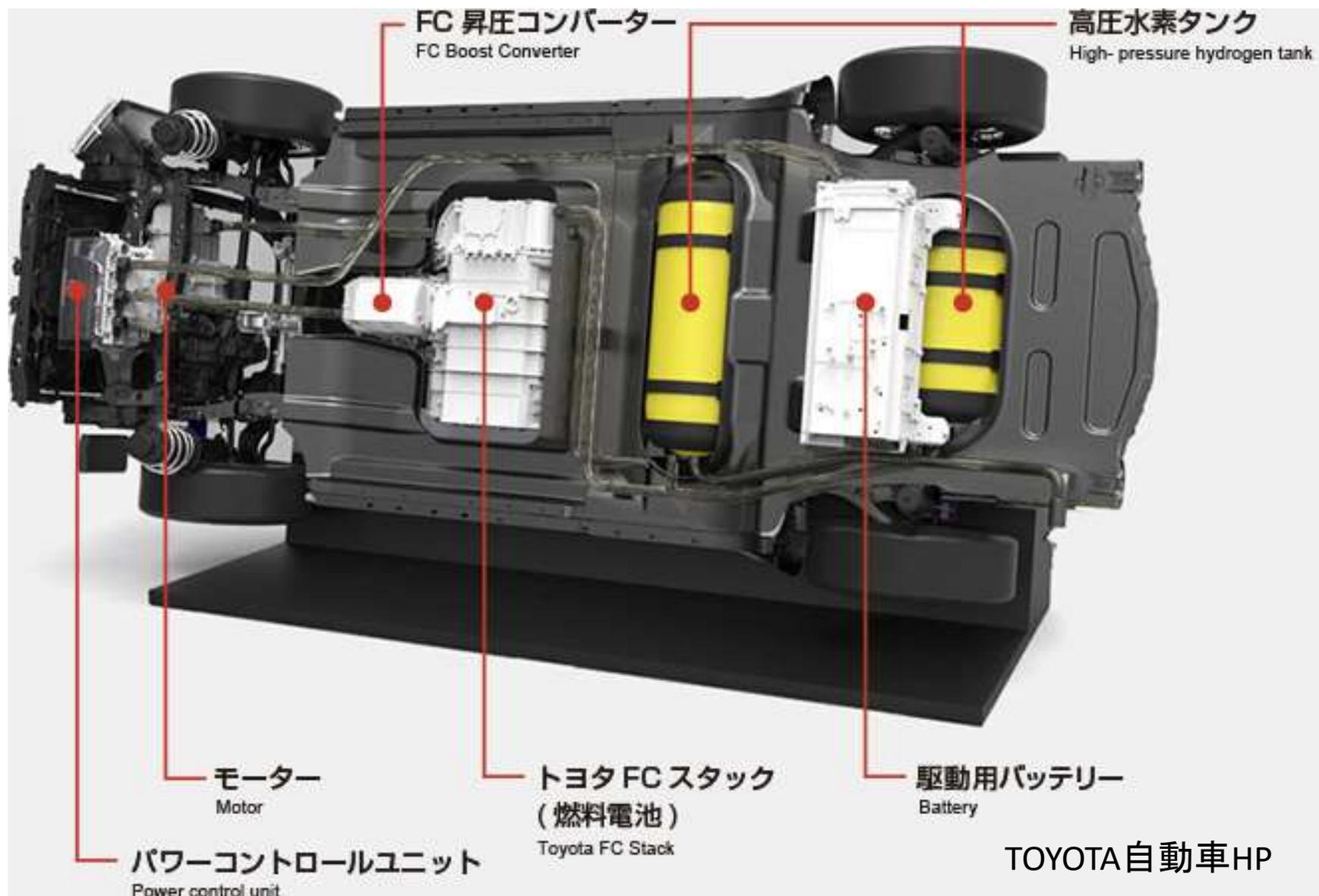


70 MPa
= 700気圧

体積を小さくする
ために、**極低温**
あるいは**圧縮**が
必要



燃料電池自動車の構造



水素の供給・貯蔵

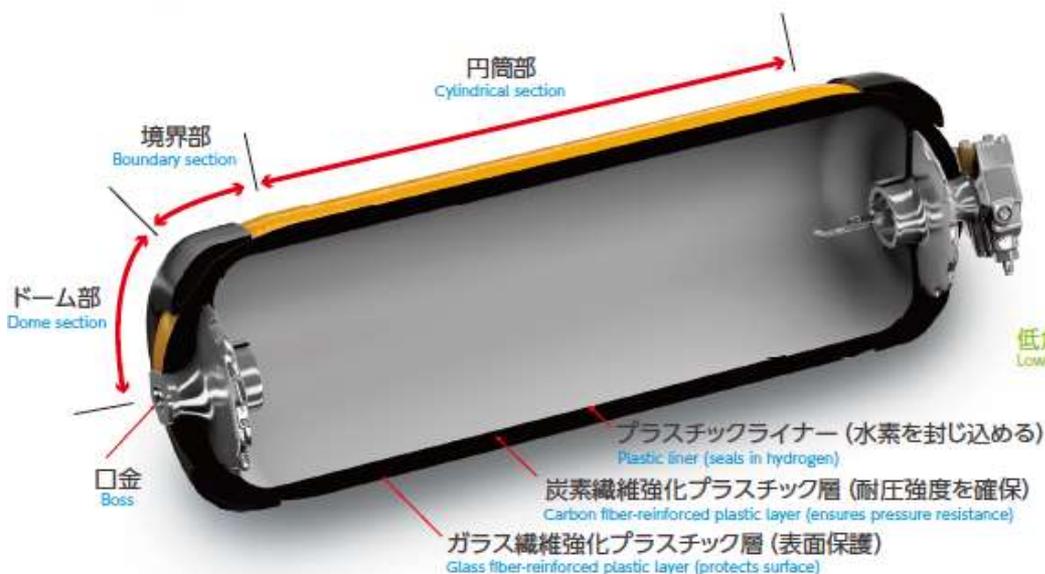
高圧水素ボンベ

炭素繊維強化プラスチック層構成の革新により軽量化

Lighter weight achieved through innovations of carbon fiber reinforced plastic layer structure

世界トップレベル*2のタンク貯蔵性能5.7 wt%を実現

Tank storage density of 5.7 wt% achieved, a world top level*2



高圧水素タンク High-pressure hydrogen tank

公称使用圧力 Nominal working pressure	70 MPa (約700気圧) 70 MPa (approx. 700 bar)
タンク貯蔵性能 Tank storage density	5.7 wt% (世界トップレベル*2) 5.7 wt% (world top level*2)
タンク内容積 Tank internal volume	122.4 L (前方60.0 L, 後方62.4 L) 122.4 L (front tank: 60.0 L, rear tank: 62.4 L)
水素貯蔵量 Hydrogen storage mass	約5.0 kg Approx. 5.0 kg

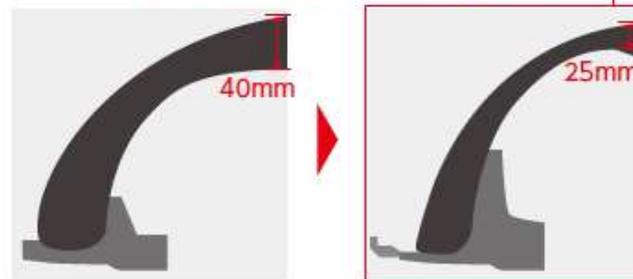
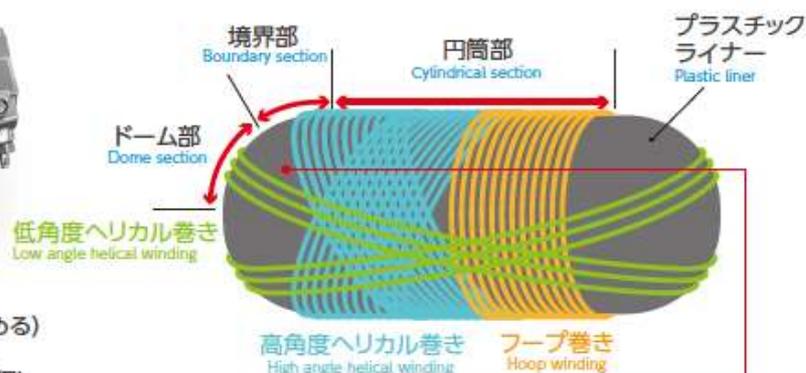


高圧ガス容器のガスの種類による色別



プラスチックライナー形状の改良と積層パターンの効率化により炭素繊維使用量を約40%低減

Innovations to the plastic liner configuration and efficient layering pattern resulted in a reduction of approximately 40% in the amount of carbon fiber used



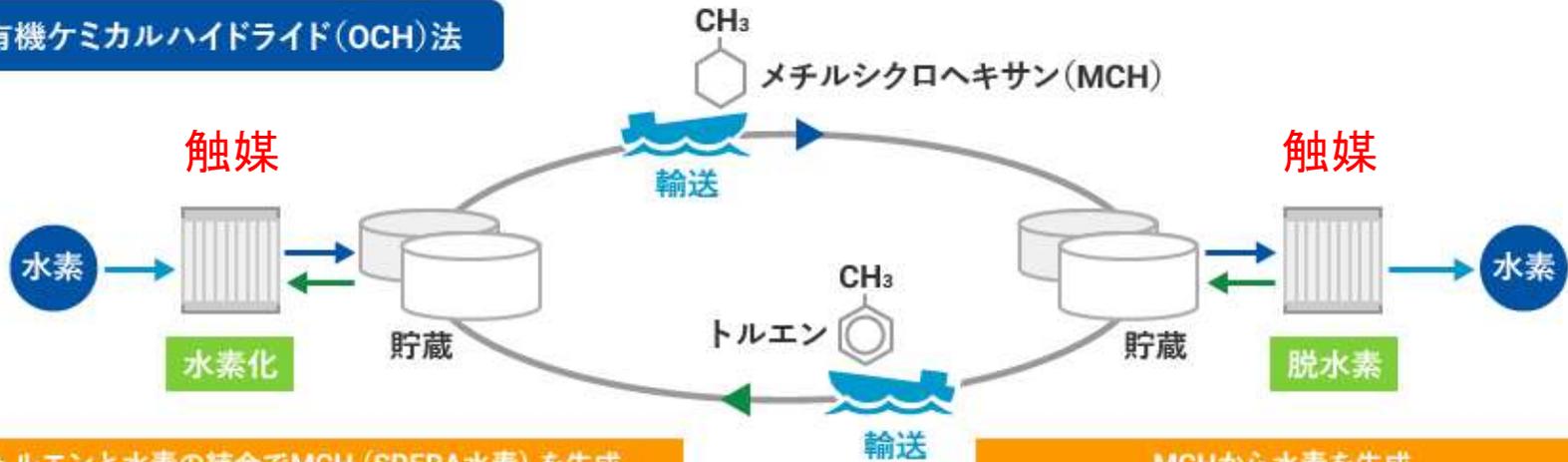
従来技術
Conventional technology

新技術
New technology

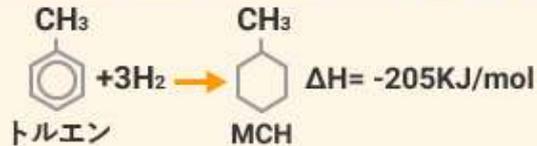
*2 2014年11月現在 トヨタ調べ *As of November 2014, Toyota data

ケミカルハイドライド

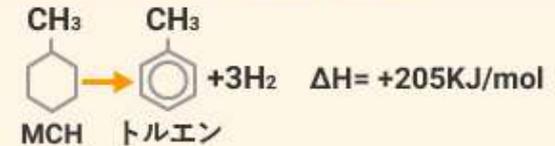
有機ケミカルハイドライド(OCH)法



トルエンと水素の結合でMCH (SPERA水素) を生成



MCHから水素を生成



SPERA水素

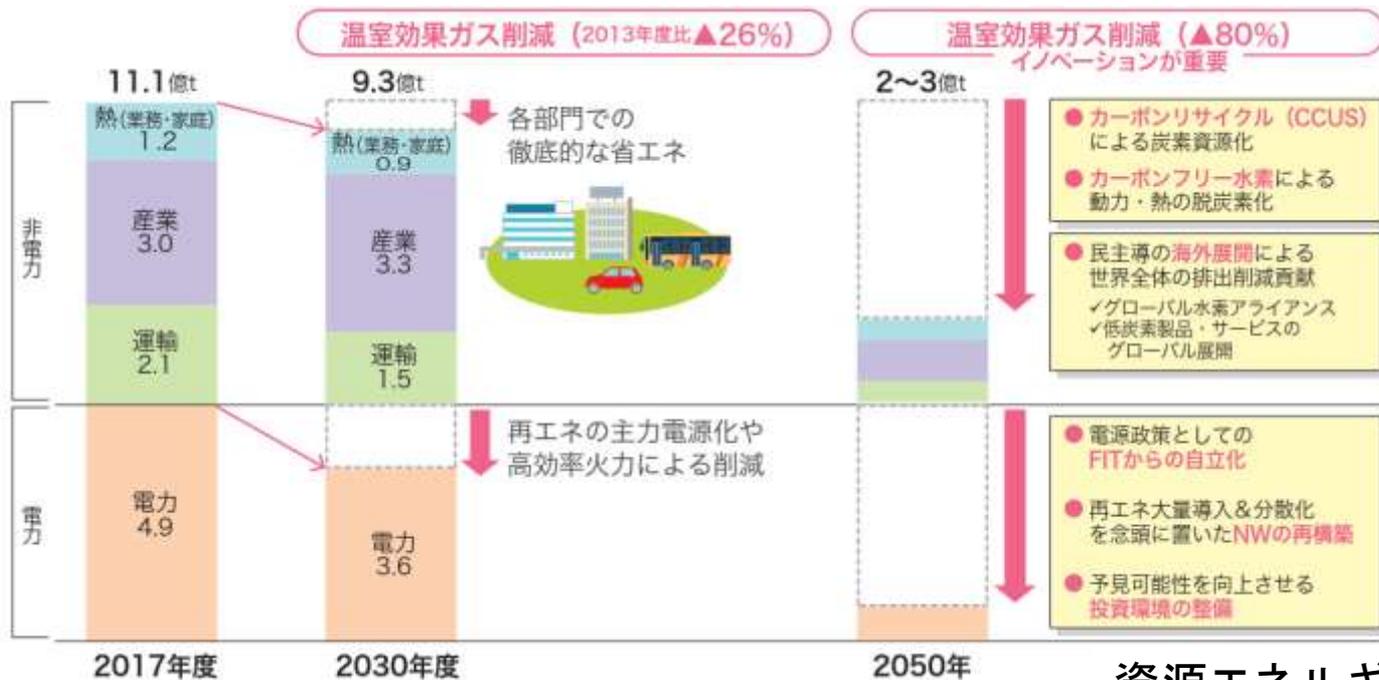
Chiyoda corp.

触媒の働きが重要!!

脱炭素化にむけて

	主要要素	脱炭素化を軸とした将来
 ↓ 運輸 (2.1億トン)	車体・システム	電動化・自動運転・マテリアル
	燃料	電気・水素・バイオ燃料
 ↓ 産業 (3.0億トン)	プロセス	CCUS・水素還元・さらなるスマート化
	製品	非化石エネルギー燃料
 ↓ 民生 (1.2億トン)	熱源	電気・水素等
	機器	機器のIoT化・M2M制御
 ↓ 電力 (4.9億トン)	火力	CCUS・水素発電等
	原子力	次世代原子炉
	再エネ	蓄電×系統革新

イノベーション



水素社会の実現に向けた取組

製造



輸送・供給 (サプライチェーン)

水素ステーション
全国で推進
(2020年160箇所、2025年320箇所)



大規模水素海上輸送網
液化水素運搬実証船の進水式



利用

運輸
分野

燃料電池車 (FCV・FCバス等)

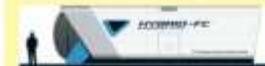


発電
分野

燃料電池コジェネ (エネファーム等)



燃料電池複合発電システム
[HYBRID-FC]



水素発電 (CO₂フリー火力電源)



その他 産業分野での活用 (Power-to-X)

水素をどうやってつくるか？
CO₂フリー水素
再生可能エネルギーの利用

水素をどうやって
運搬・貯蔵するか？

水素をどのように活用するか？
水素燃料電池
水素発電
・・・

今後の展望・期待

大都市では、**高効率なエネルギー変換システム**の構築が必須。

燃料電池システムを 家庭、運輸、オフィス、公共施設など
様々な場所・形態で導入し、**二酸化炭素排出量の削減**を進める
ことが必要。

東京オリンピック・パラリンピックの開催は、上記のシステム
の導入・活用を加速するチャンス。

水素エネルギーに関する**都民の理解の広がり**が**水素エネルギー**
の導入・利用拡大に必須。

再生可能エネルギーによる**水素製造の割合を増やし**、化石燃料
からの**水素製造の割合を減らす**努力が必要。

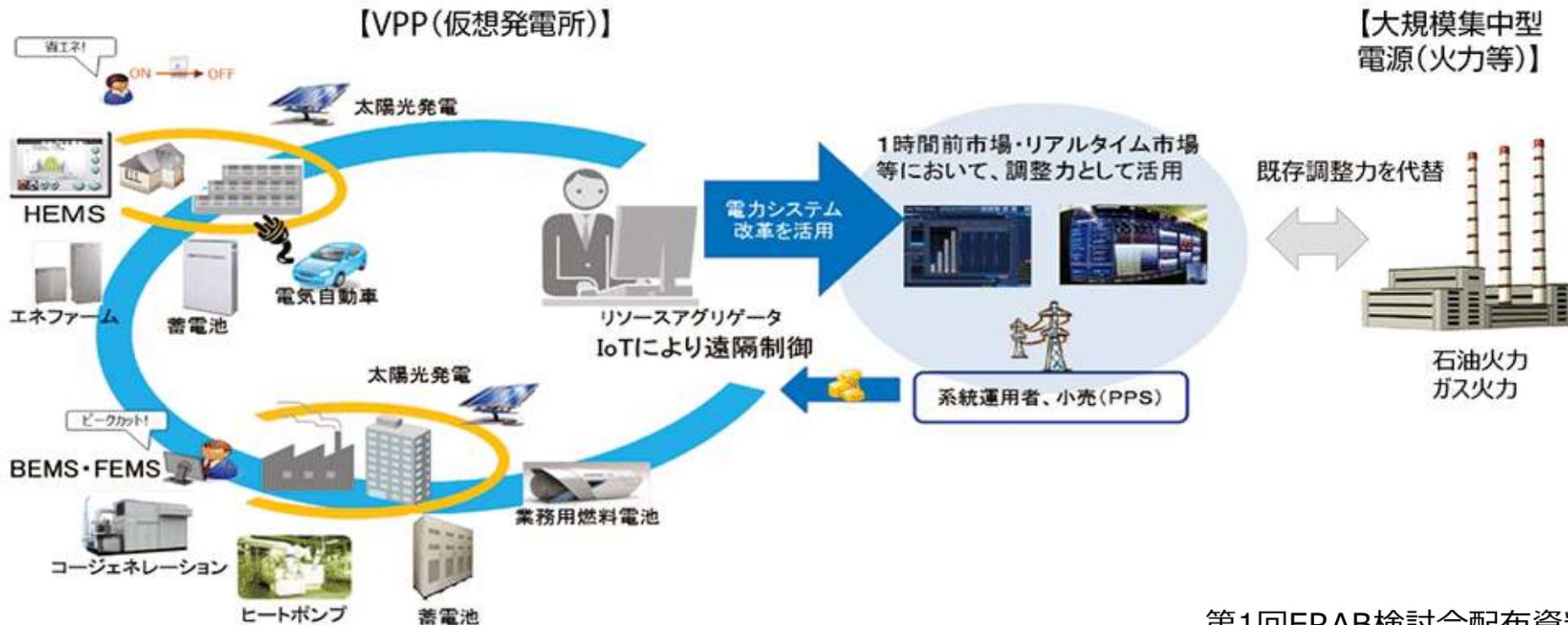
水素社会の実現に向けた取組

再生可能エネルギーの 基幹エネルギー化

- ・エネルギーの脱炭素再化
→再生可能エネルギーの利用拡大
- ・再生可能エネルギーの地産地消
- ・災害時のレジリエンスの向上

再生可能エネルギーの マネージメント

- ・無駄のない活用を実現 最適な需給調整
VPP(バーチャルパワープラント)の構築
- ・エネルギーの貯蔵技術
(バッテリー・化学物質の利用)



第1回ERAB検討会配布資料

「IoTを活用した需要家側のエネルギーリソースアグリゲーションについて」

2016/1/29 経済産業省