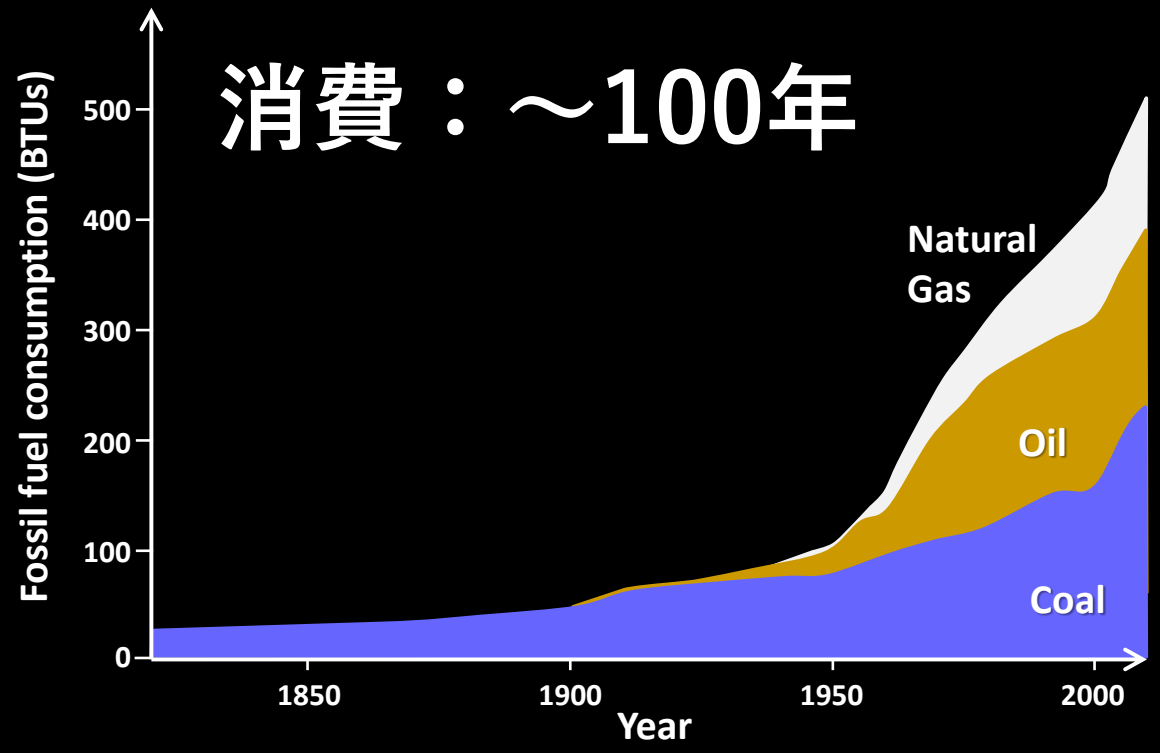
CO_2の回収・資源化システム：カーボンニュートラルの切り札となるか？

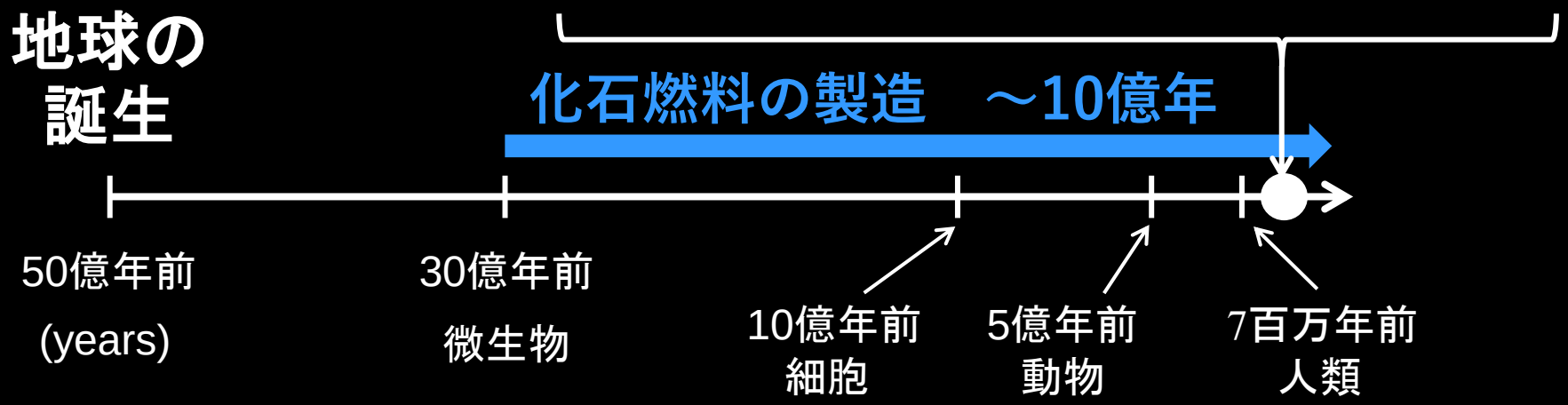
UTokyo
Green
Transformation

東京大学先端科学技術研究センター
杉山 正和

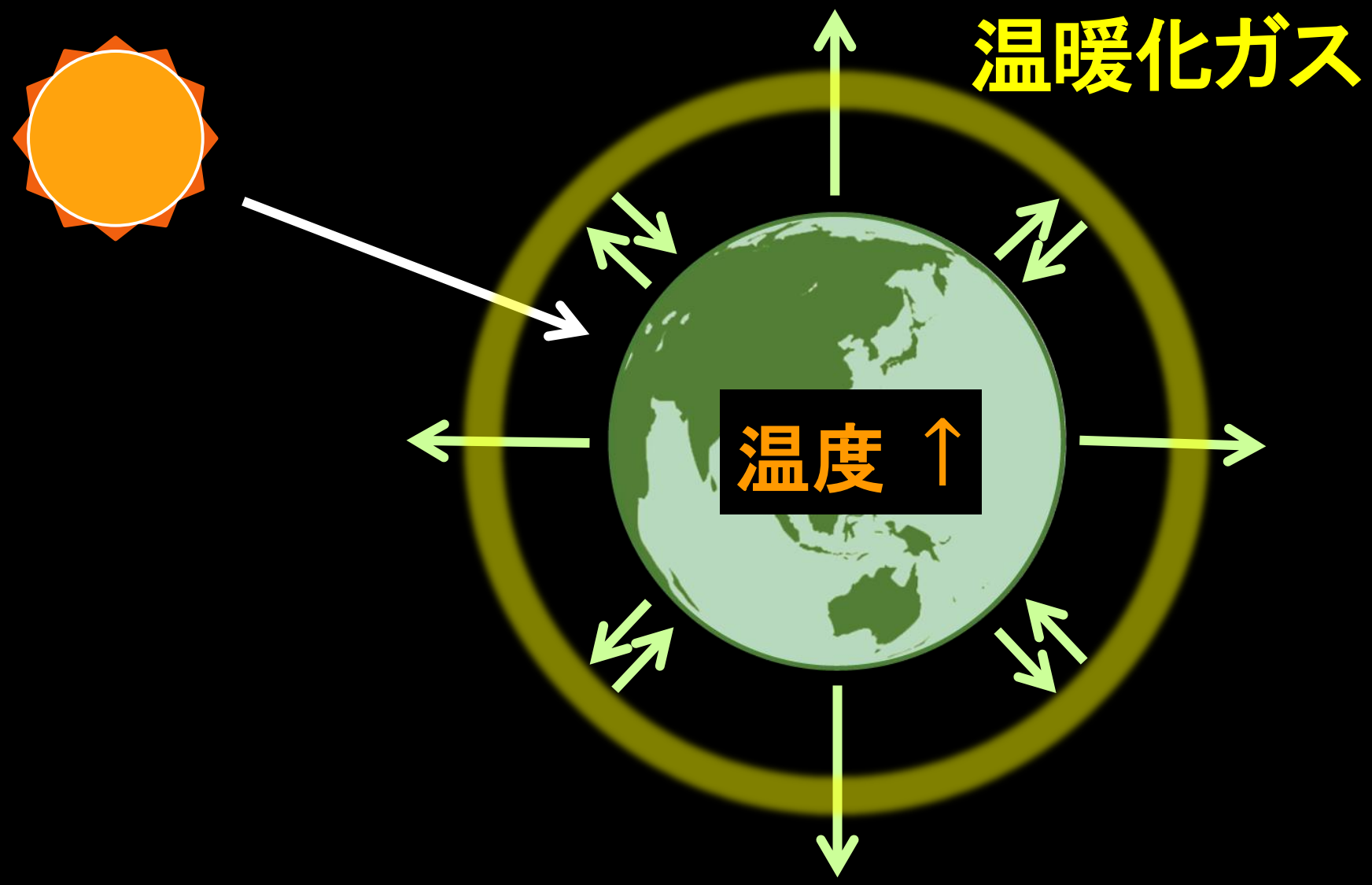
東大先端研
Research Center for
Advanced Science and Technology
The University of Tokyo

化石燃料の製造と消費


消費：～100年
Fossil fuel consumption (BTUs)
500
400
300
200
100
0
1850
1900
1950
2000
Year
Natural Gas
Oil
Coal


地球の誕生
化石燃料の製造　～10億年
50億年前
(years)
30億年前
微生物
10億年前
細胞
5億年前
動物
7百万年前
人類

地球温暖化



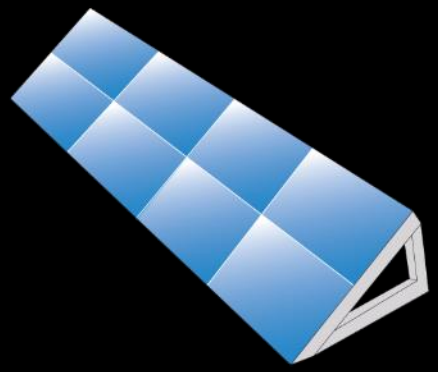
流れは変えられる

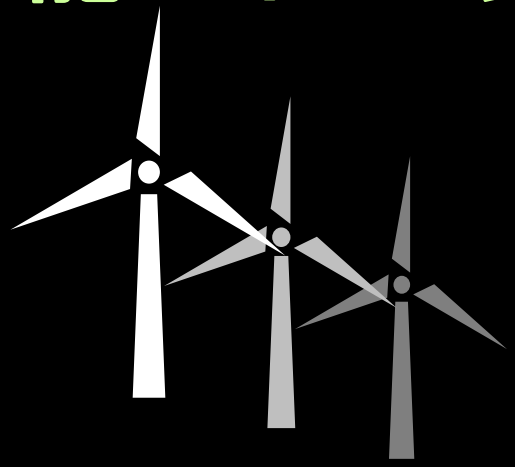
→ CO_2

化石燃料

↓

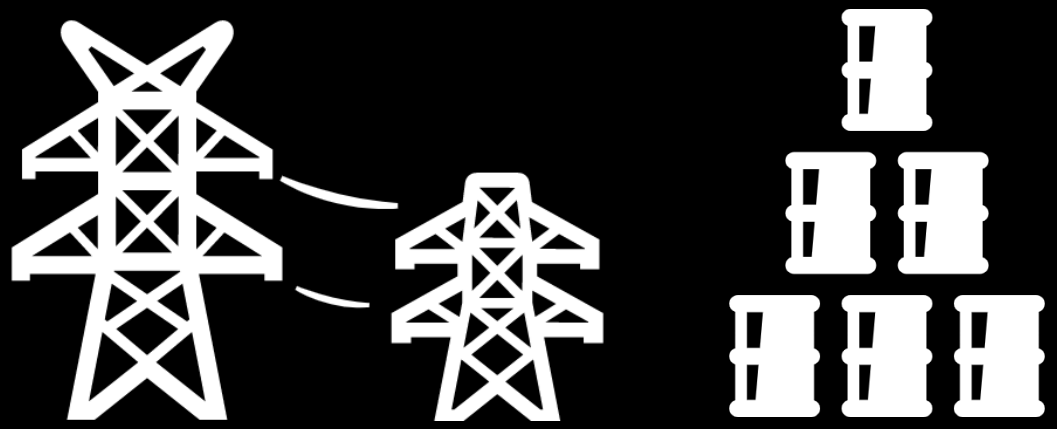
再生可能エネルギー





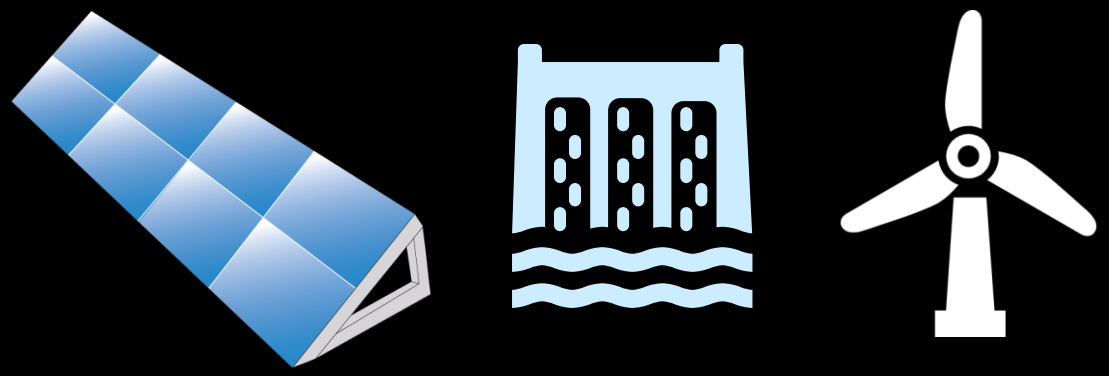
CO_2
排出なし

化石燃料
の時代



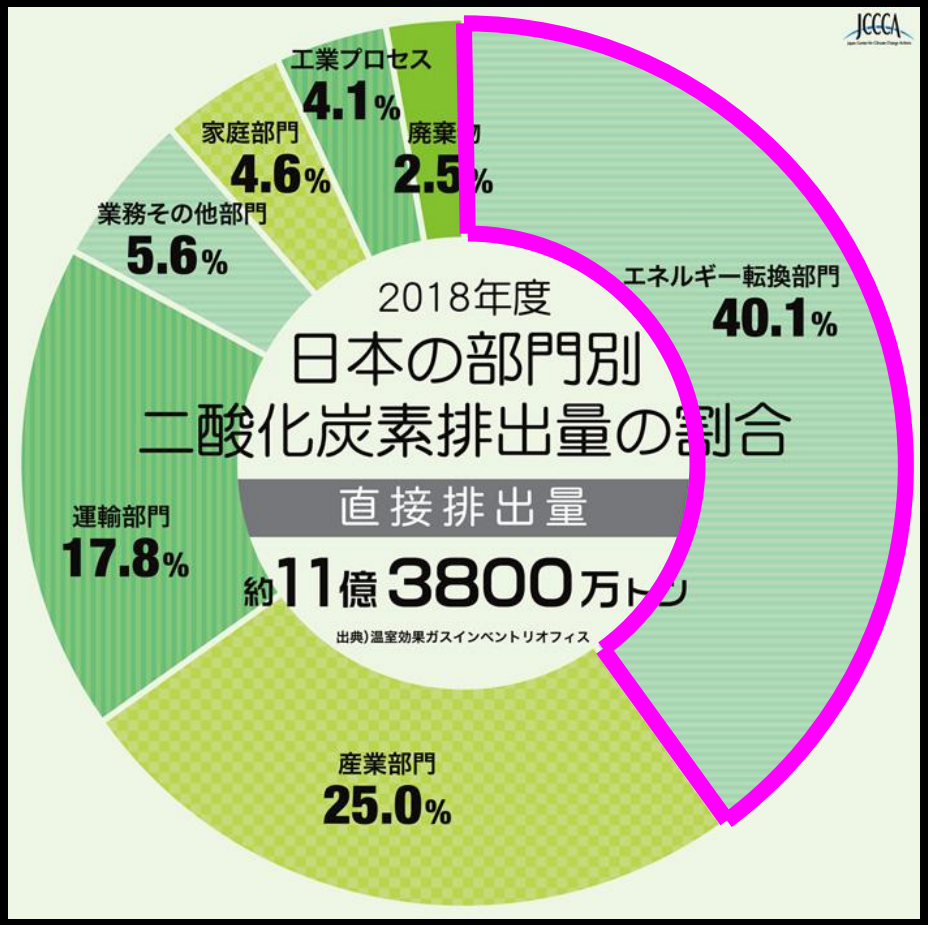
エネルギーは国の政策

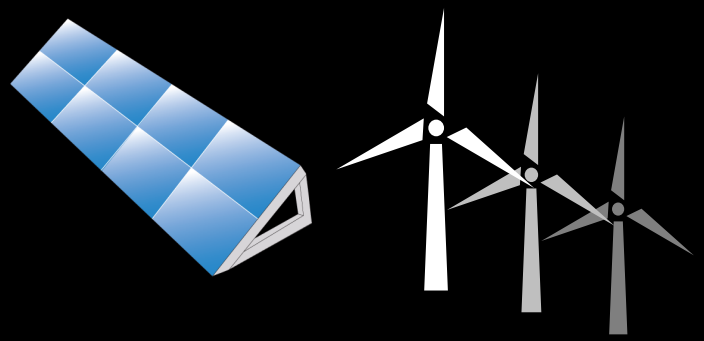
再生可能
エネルギー
の時代

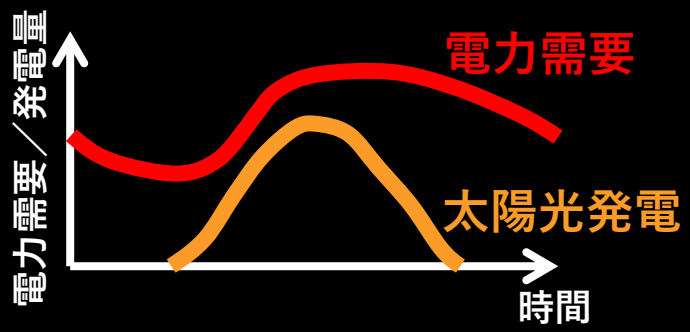


エネルギーは地域の課題
にもなる

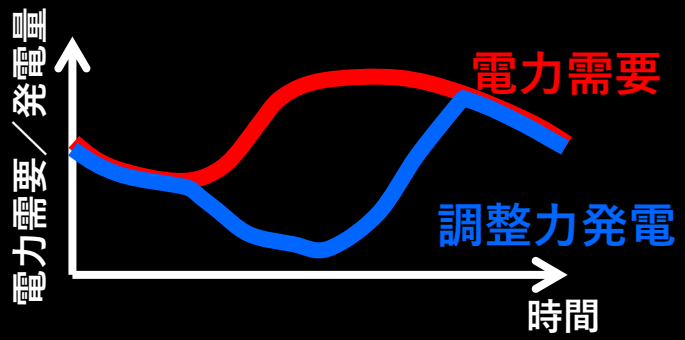
電力


JCCCA
工業プロセス
4.1%
家庭部門
4.6%
廃棄物
2.5%
業務その他部門
5.6%
エネルギー転換部門
40.1%
2018年度
日本の部門別
二酸化炭素排出量の割合
直接排出量
約11億3800万トン
出典）温室効果ガスインベントリオフィス
運輸部門
17.8%
産業部門
25.0%

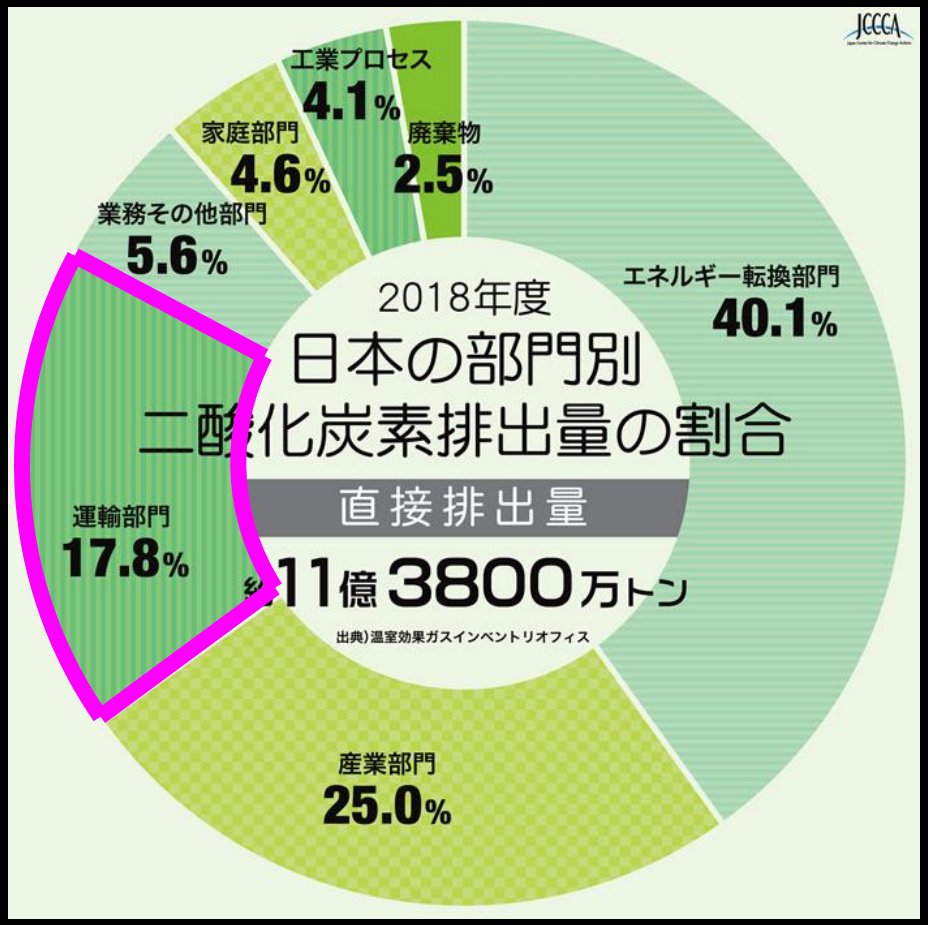


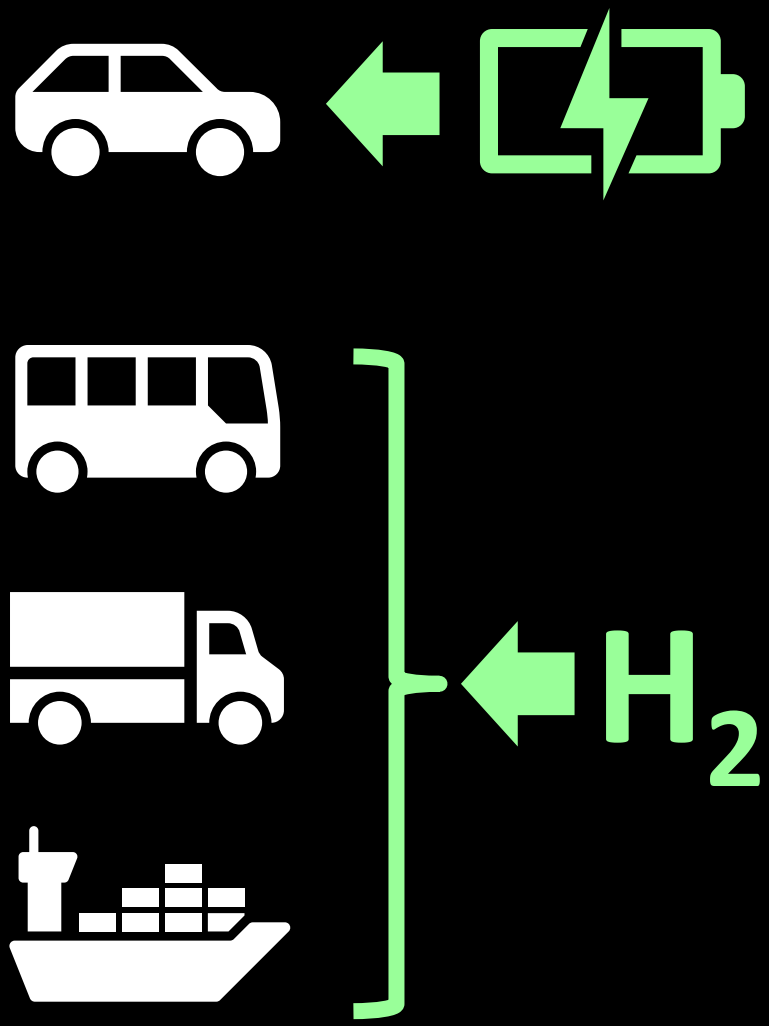

電力需要／発電量
電力需要
太陽光発電
時間

H_2

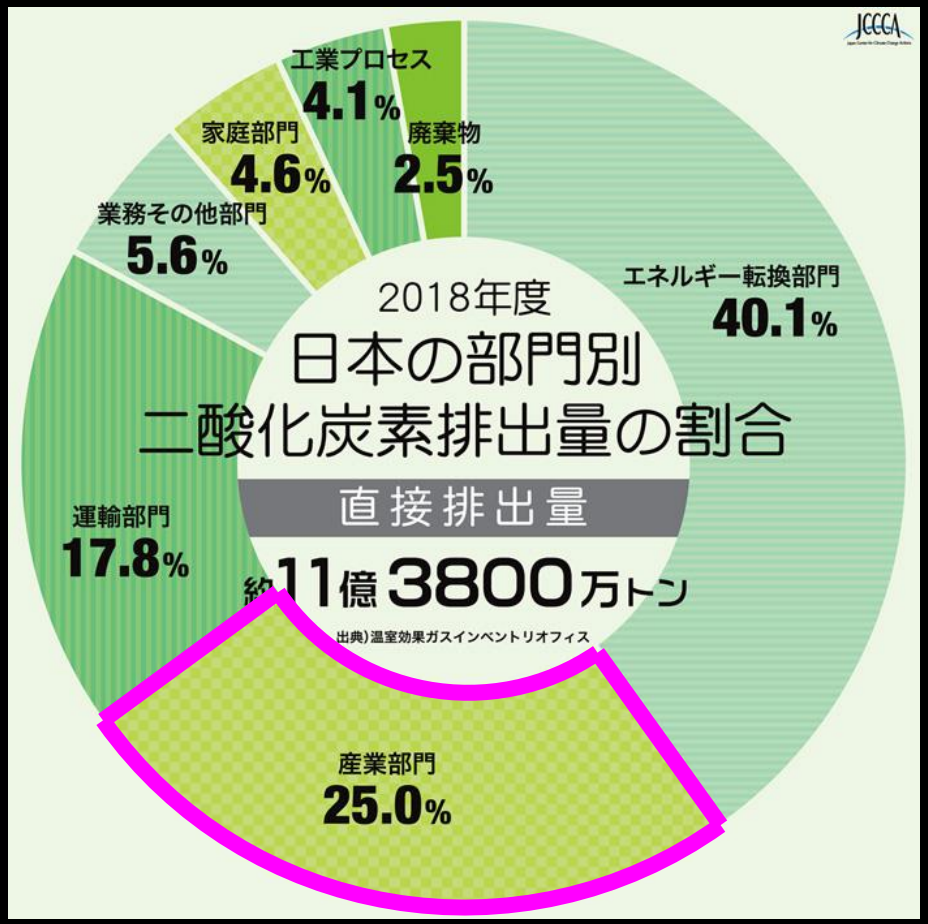

電力需要／発電量
電力需要
調整力発電
時間

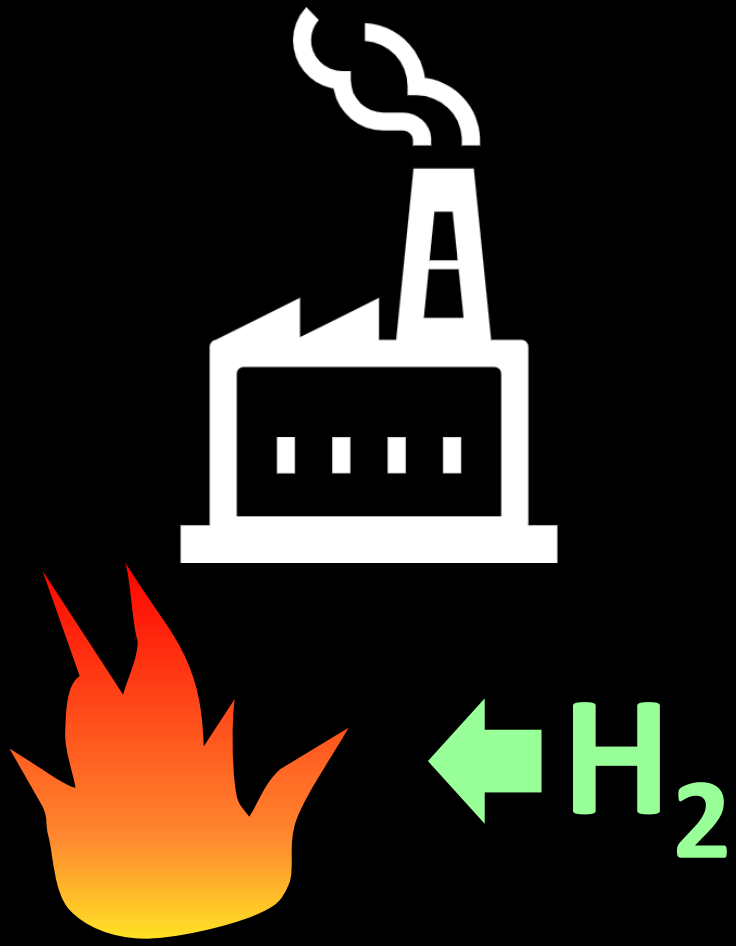
運輸


JCCCA
工業プロセス
4.1%
廃棄物
2.5%
家庭部門
4.6%
業務その他部門
5.6%
エネルギー転換部門
40.1%
2018年度
日本の部門別
二酸化炭素排出量の割合
直接排出量
運輸部門
17.8%
11億3800万トン
出典）温室効果ガスインベントリオフィス
産業部門
25.0%


H_2

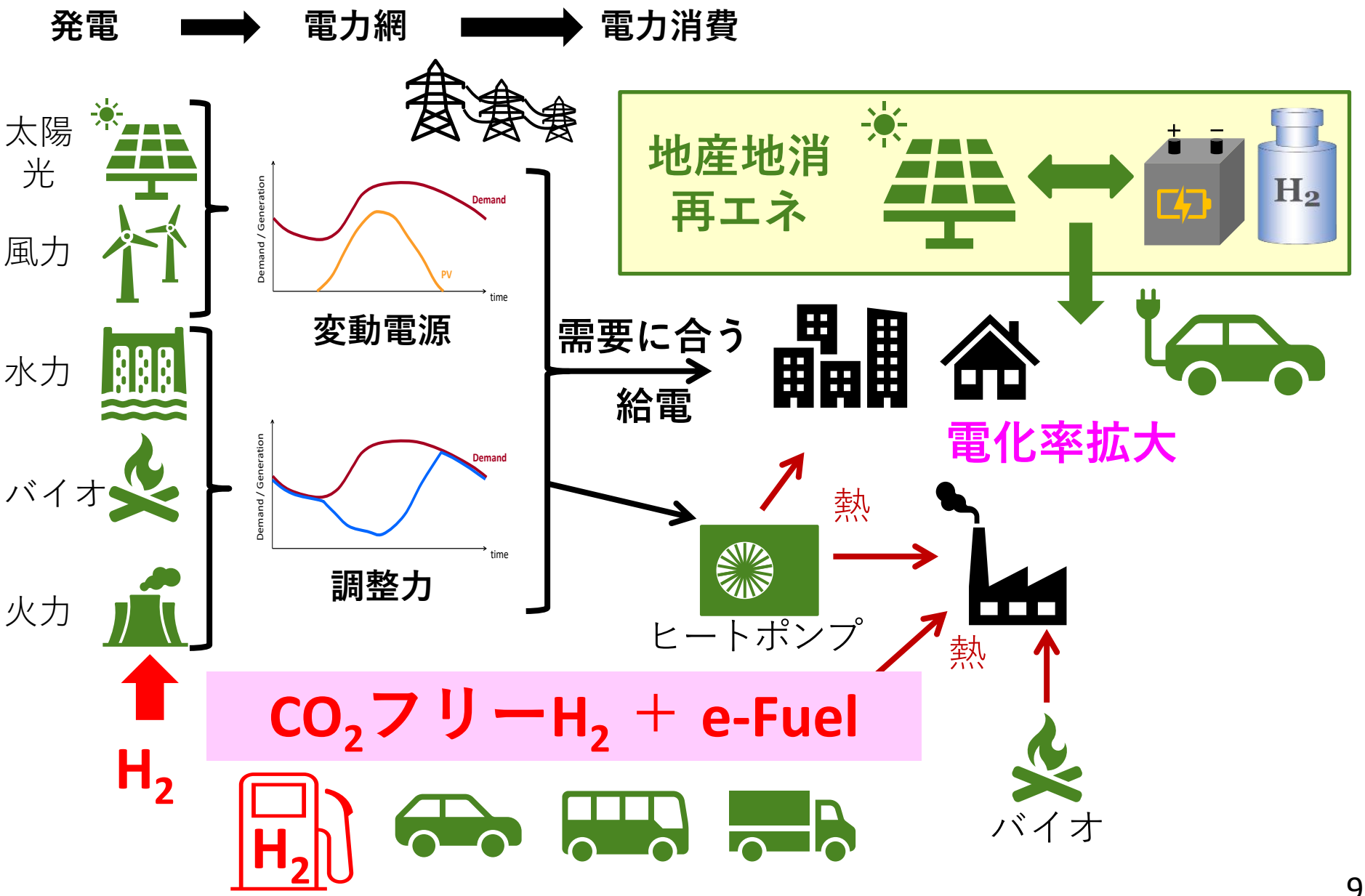
産業


JCCCA
工業プロセス
4.1%
廃棄物
2.5%
家庭部門
4.6%
業務その他部門
5.6%
エネルギー転換部門
40.1%
2018年度
日本の部門別
二酸化炭素排出量の割合
直接排出量
約11億3800万トン
出典）温室効果ガスインベントリオフィス
運輸部門
17.8%
産業部門
25.0%


H_2

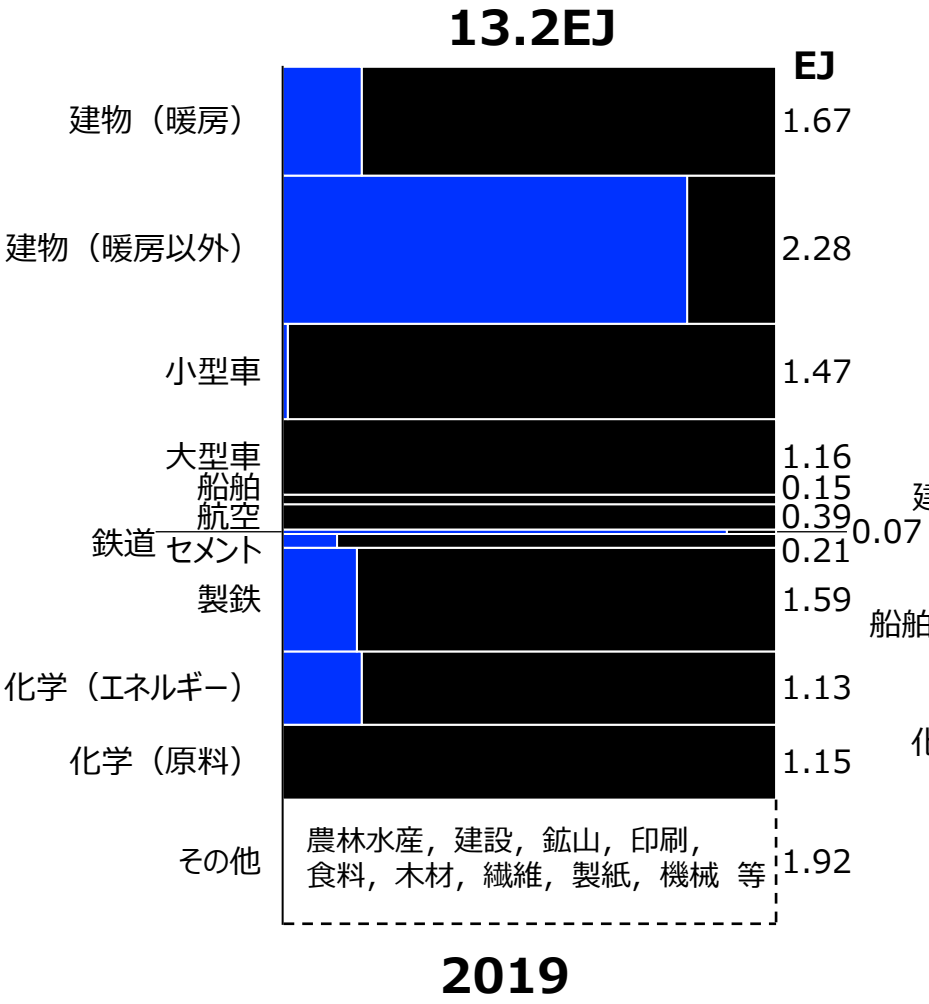
高温熱源

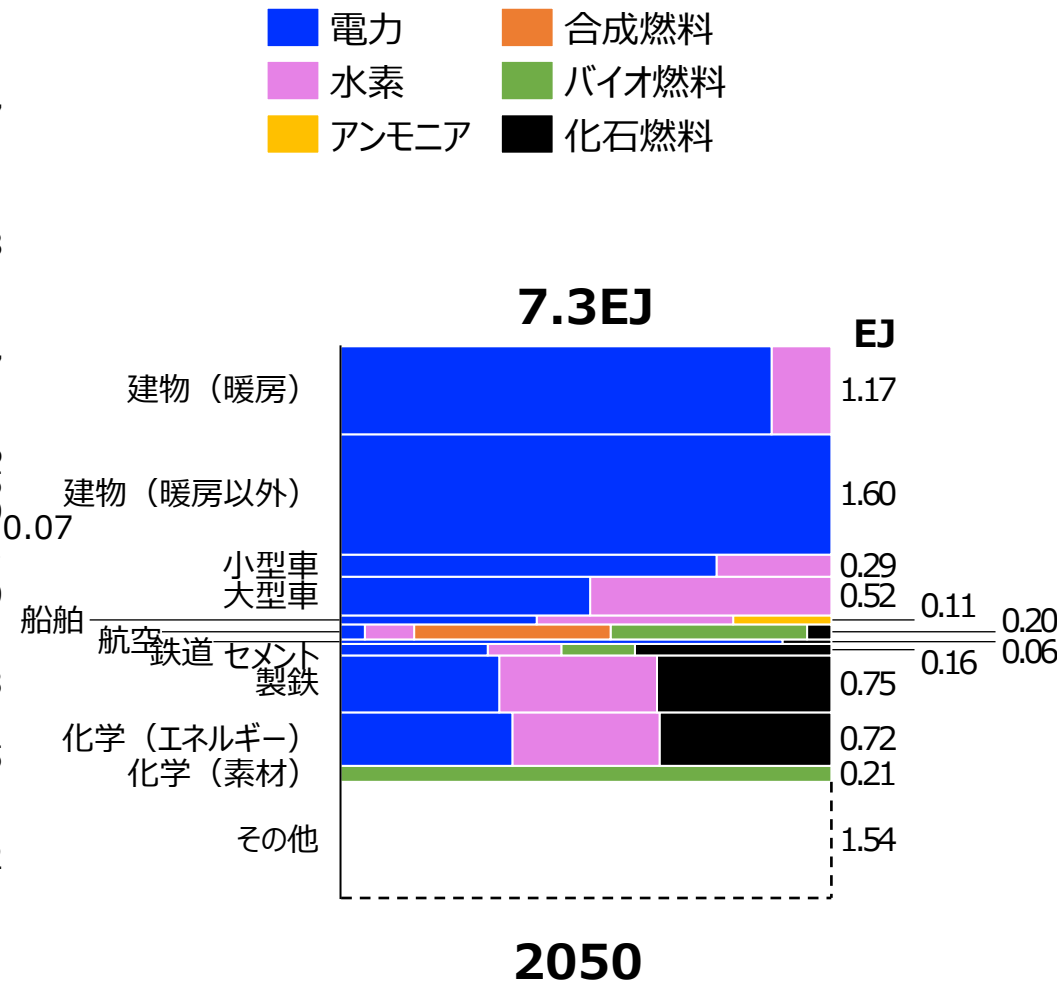
エネルギーの脱炭素戦略：まとめ



用途ごとの脱炭素戦略

東京大学グローバルコモンズセンターによる検討結果





カーボンニュートラル実現に向けた取り組み

2025　2030　2050

地域

今，身の回りでできること

地産地消の再エネ
まちの魅力創造

技術開発
政策・投資

国

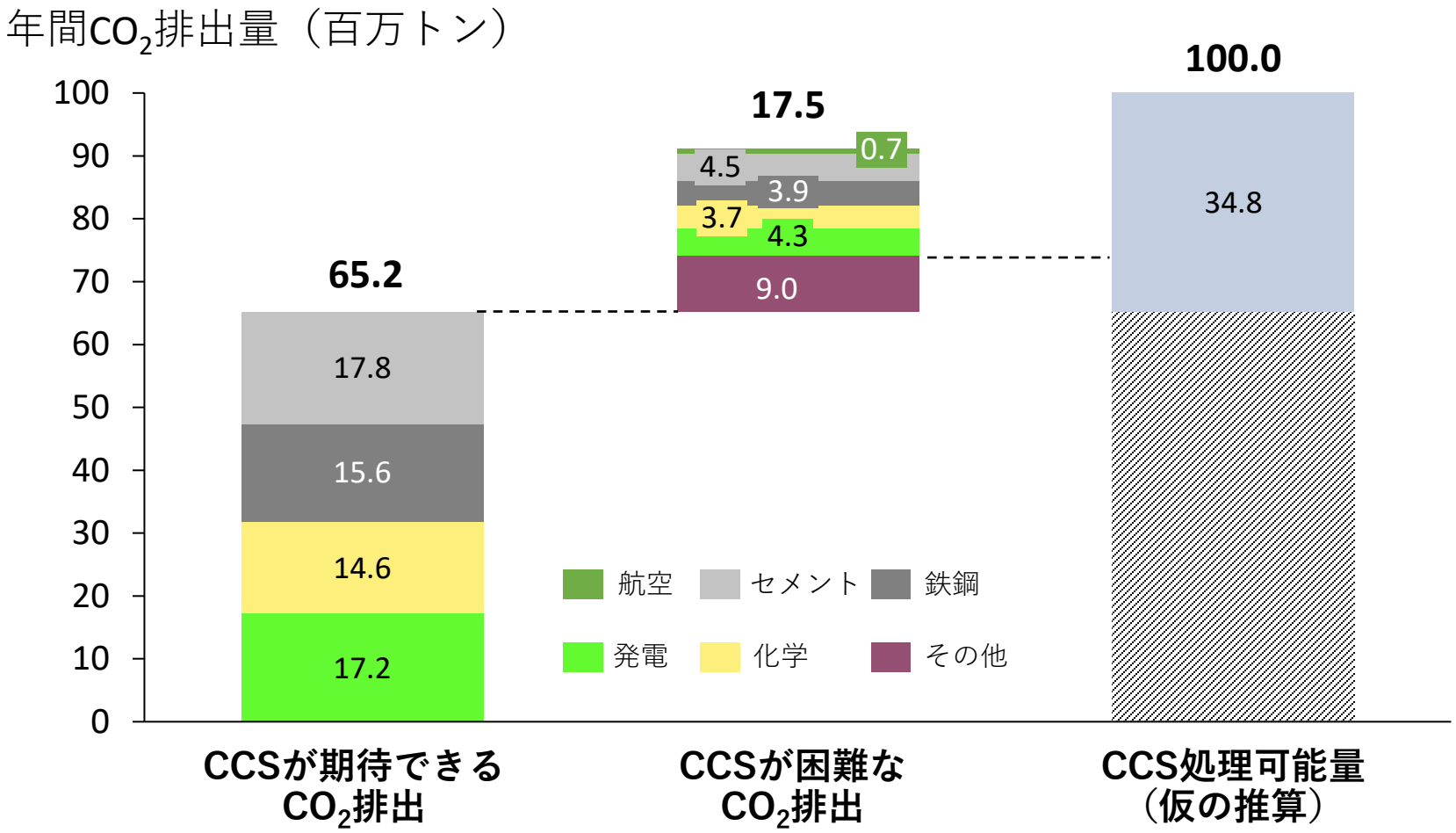
グリーン水素の
グローバルネットワーク

地球

地球規模の持続可能性を目指す

カーボン
リサイクル

2050年のCO_2排出



CCU

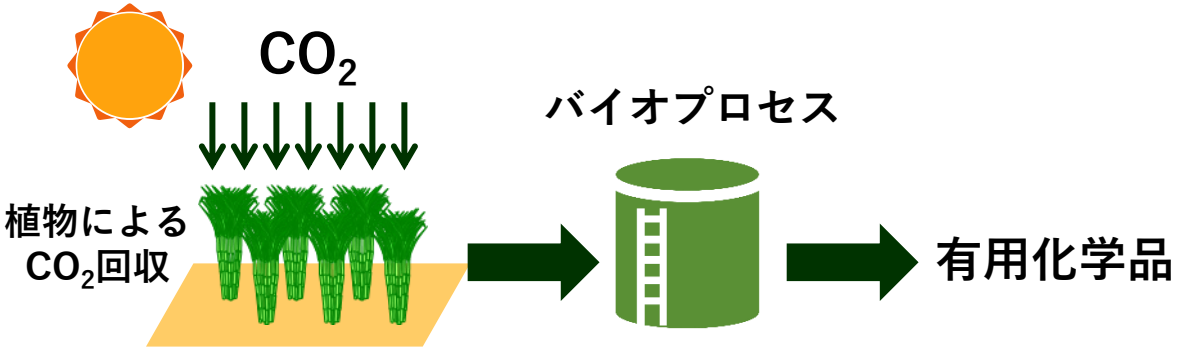
DAC
+
CCU

新規技術

CO_2還元技術

バイオ

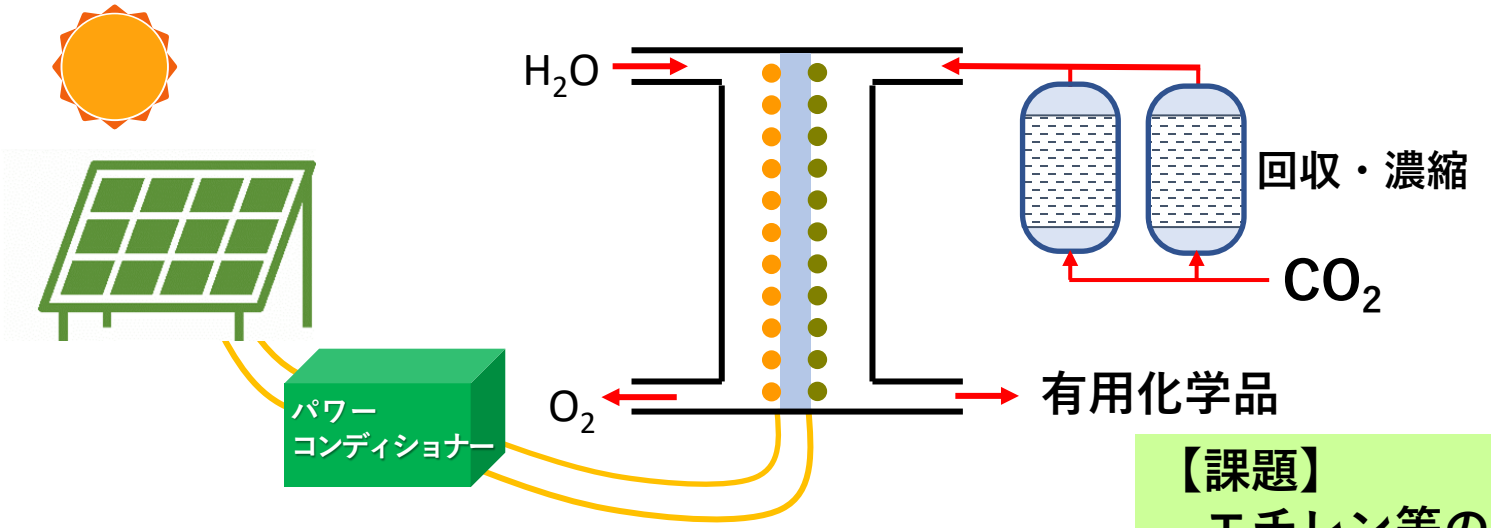
CO_2と水の捕集，還元を一体化，
複雑な生成物を算出する優れたプロセス．



【課題】
面積効率の向上

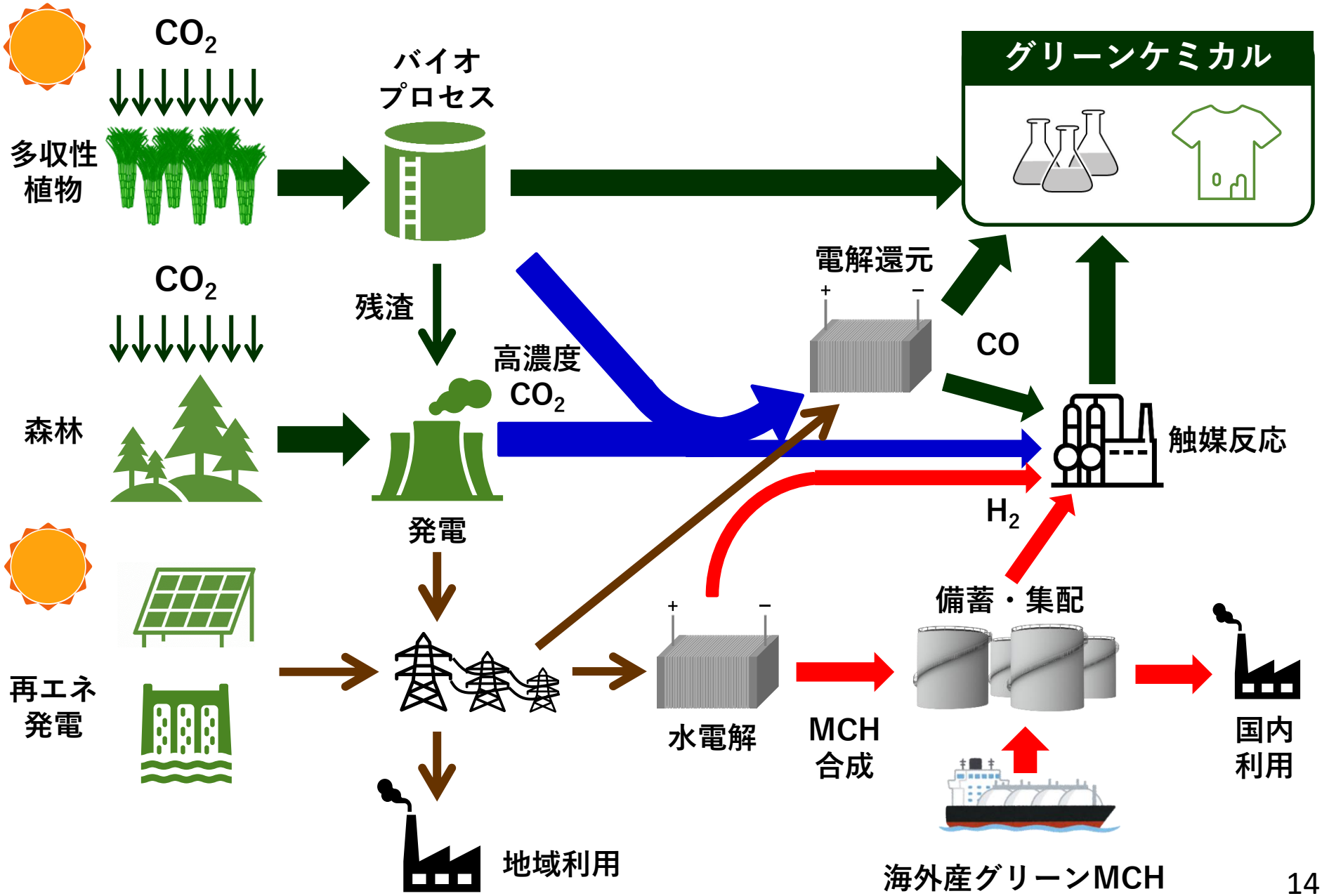
物理的手法

高効率，スケーラブル．
大量のCO_2資源化に必須．

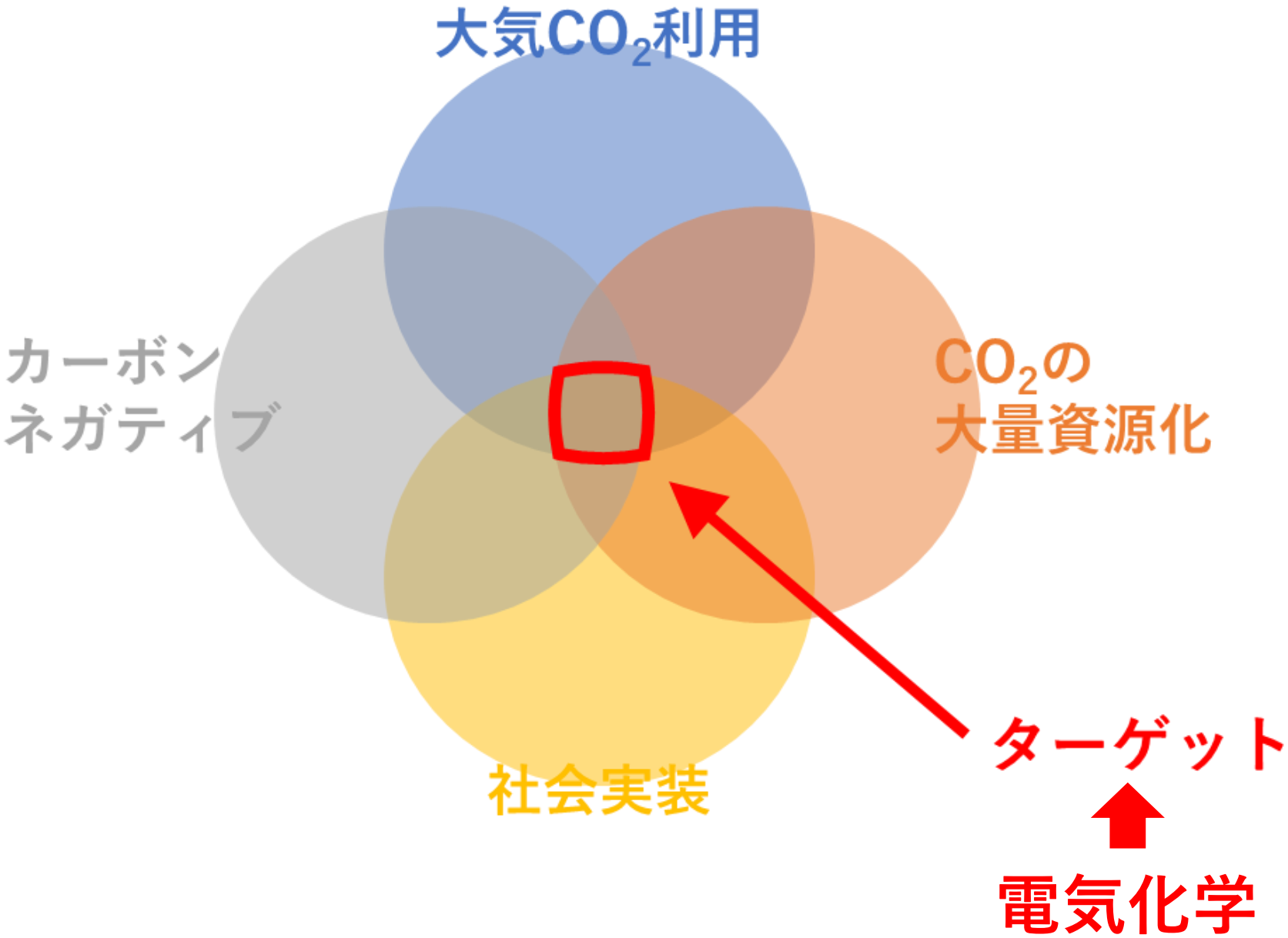


【課題】
エチレン等の有用品生成

地域の特性を活かした多様なシステム構成

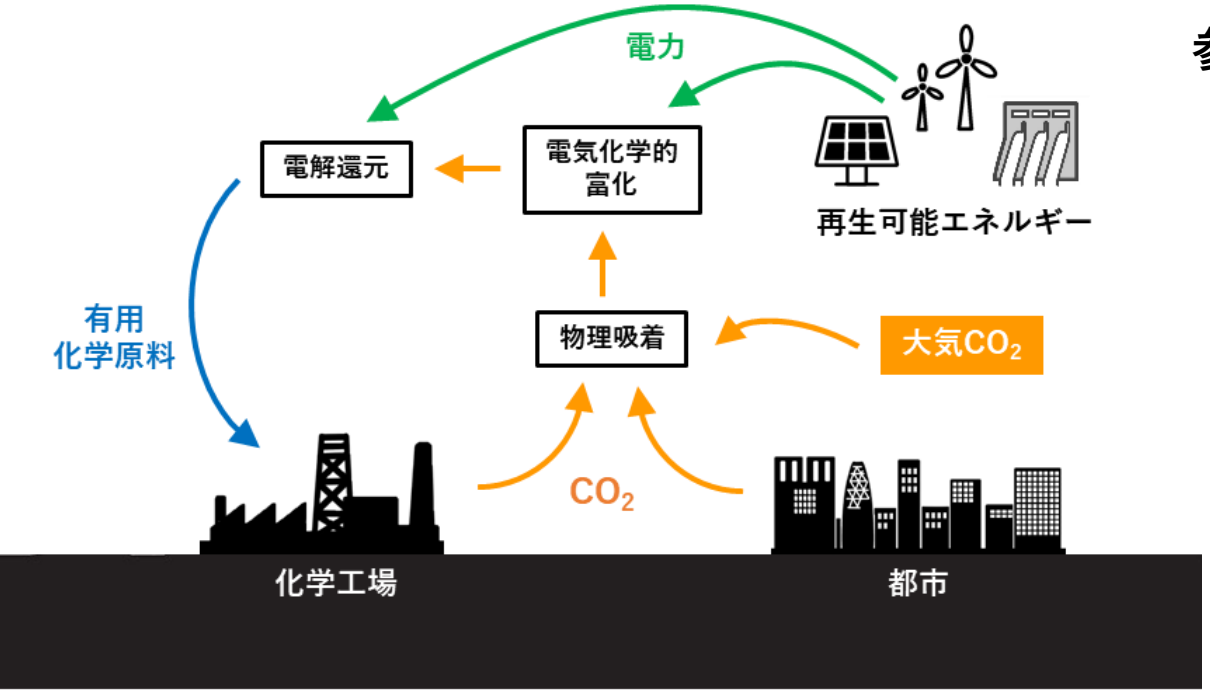


大量のCO_2資源化を社会実装できる技術が必要



電気化学プロセスによる
CO_2資源化を目指した電極・反応器開発

PM: 東京大学先端科学技術研究センター　杉山 正和

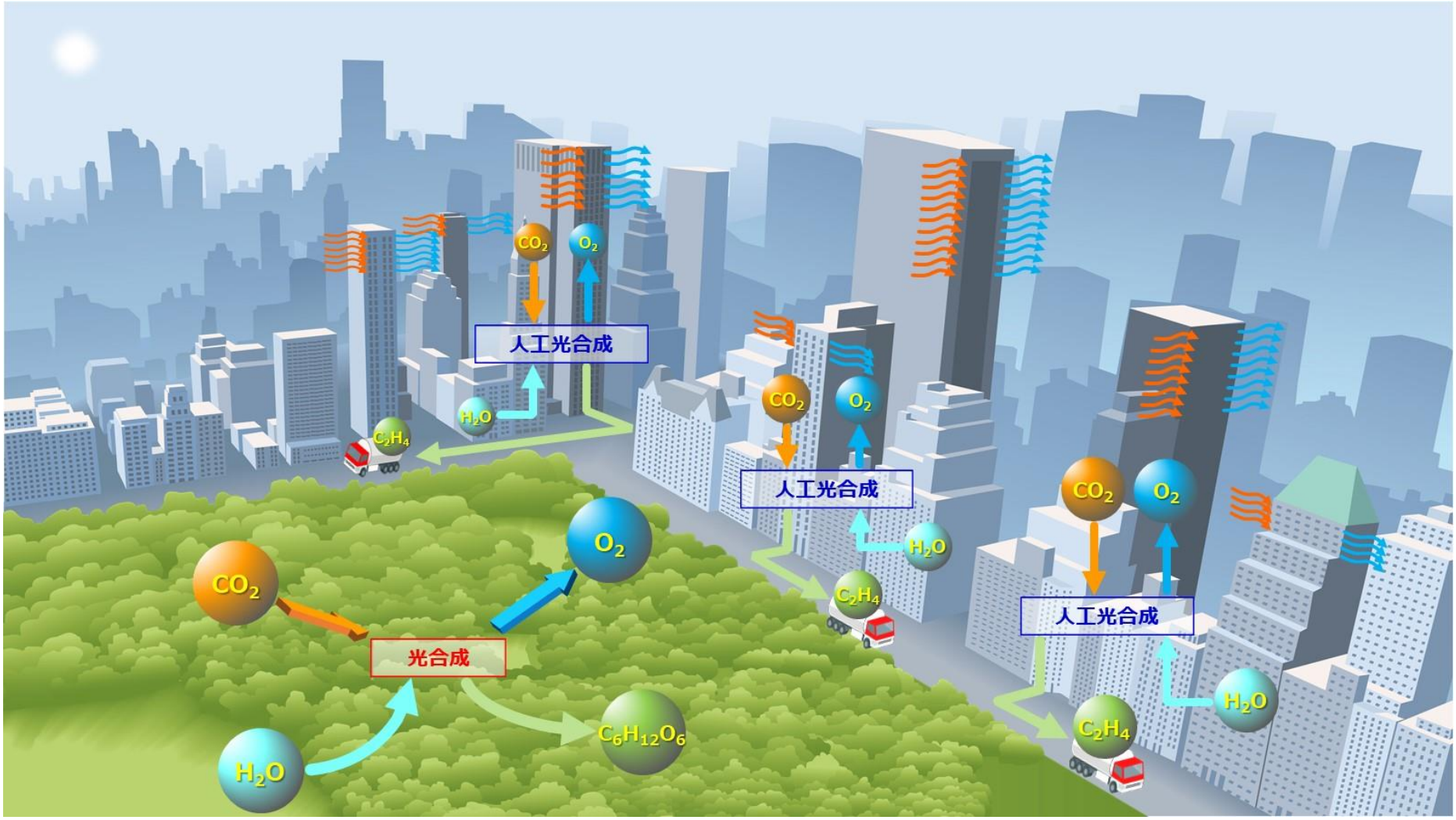


プラットフォームエネルギーである
電気エネルギーを用いたCO_2循環システムの構築
～ CO_2排出１億ton/年削減@2050に向けて ～

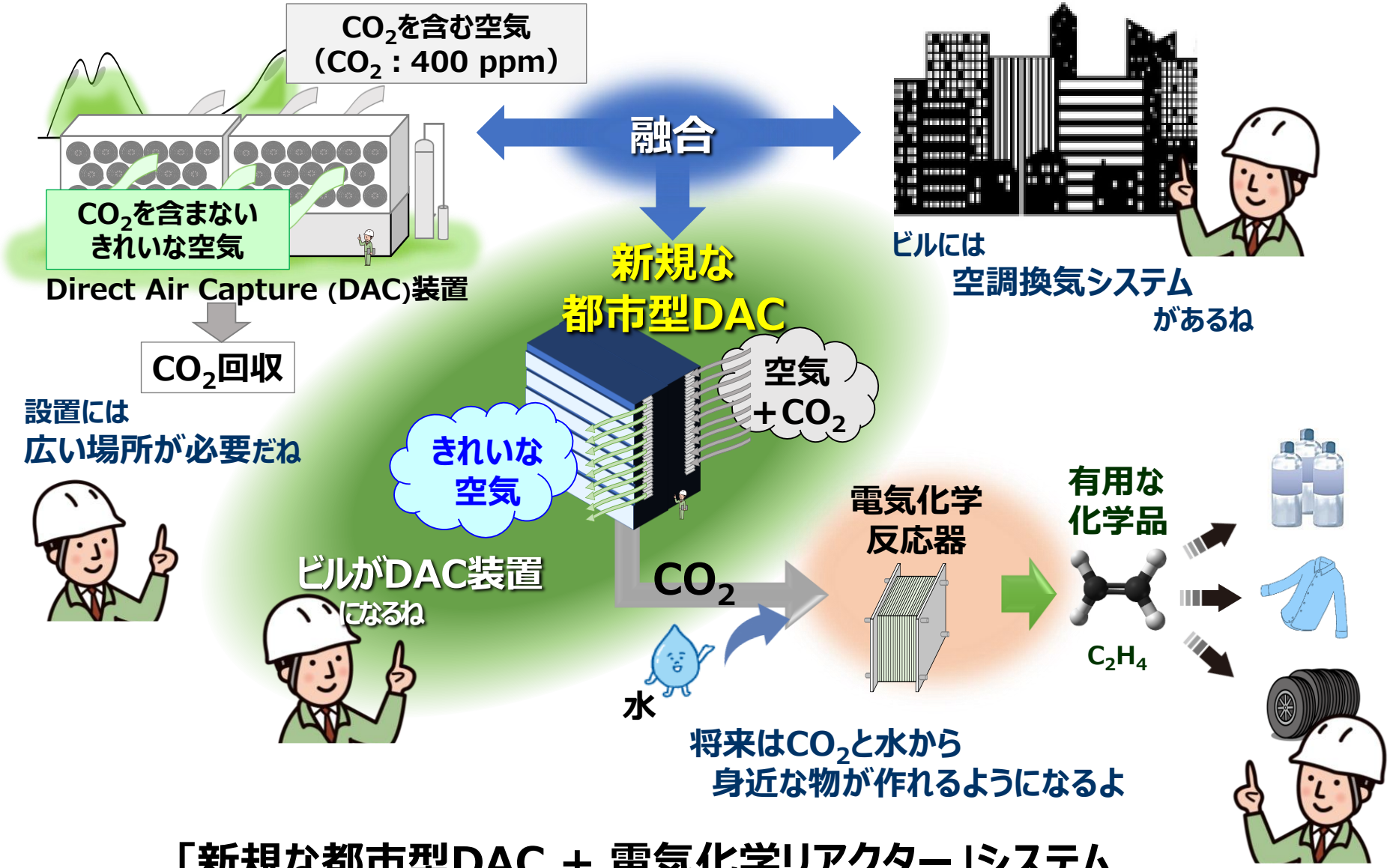
参画機関

国立大学法人東京大学
国立大学法人大阪大学
国立研究開発法人理化学研究所
宇部興産株式会社
清水建設株式会社
千代田化工建設株式会社
古河電気工業株式会社

社会実装イメージ


CO_2
O_2
人工光合成
H_2O
C_2H_4
CO_2
O_2
人工光合成
H_2O
C_2H_4
CO_2
O_2
人工光合成
H_2O
C_2H_4
O_2
CO_2
光合成
$C_6H_{12}O_6$
H_2O

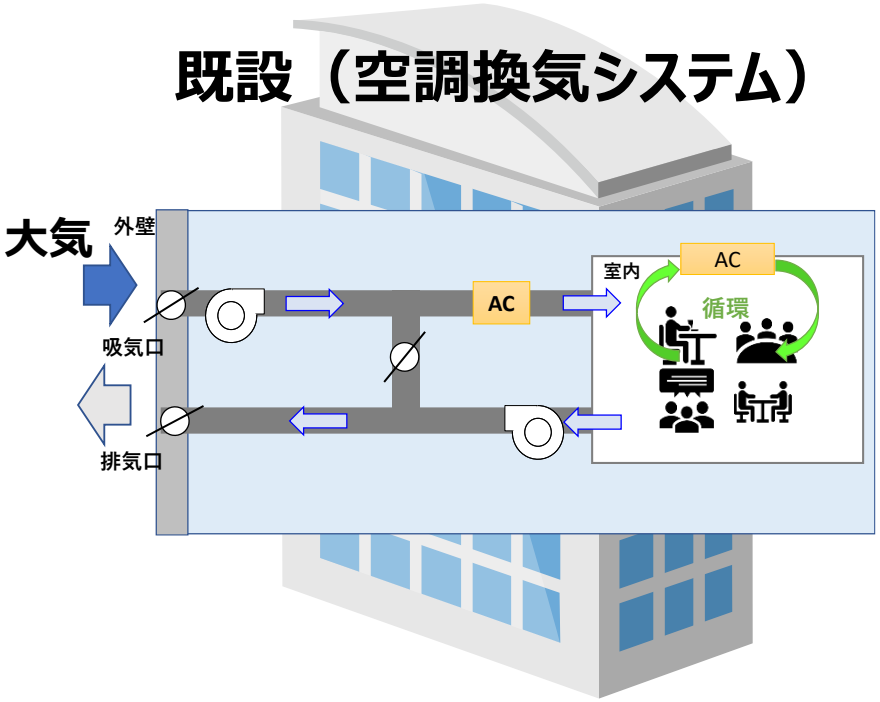
都市型CO_2回収・資源化システム



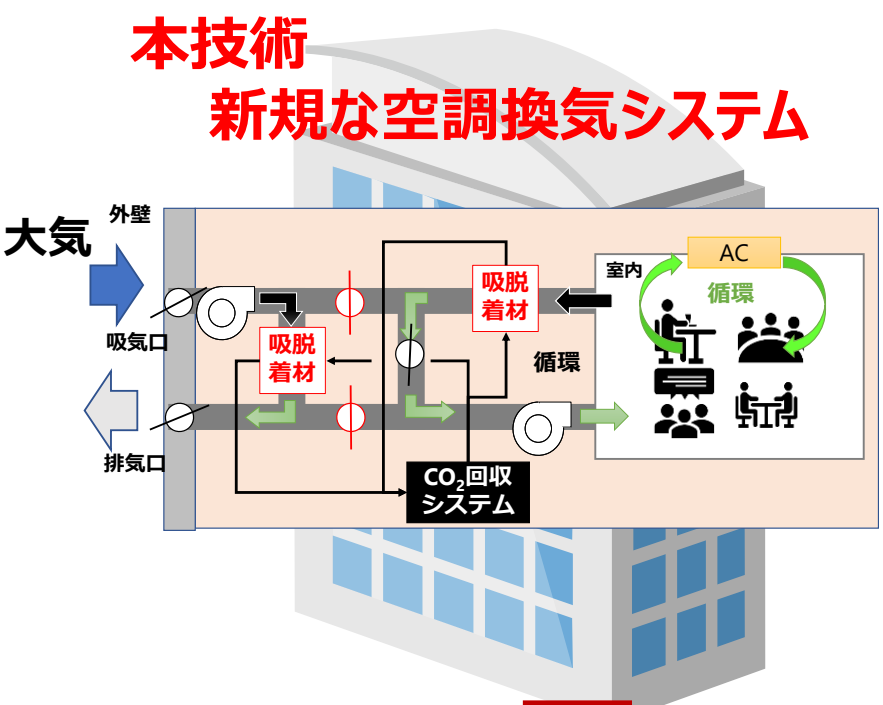
「新規な都市型DAC ＋ 電気化学リアクター」システム

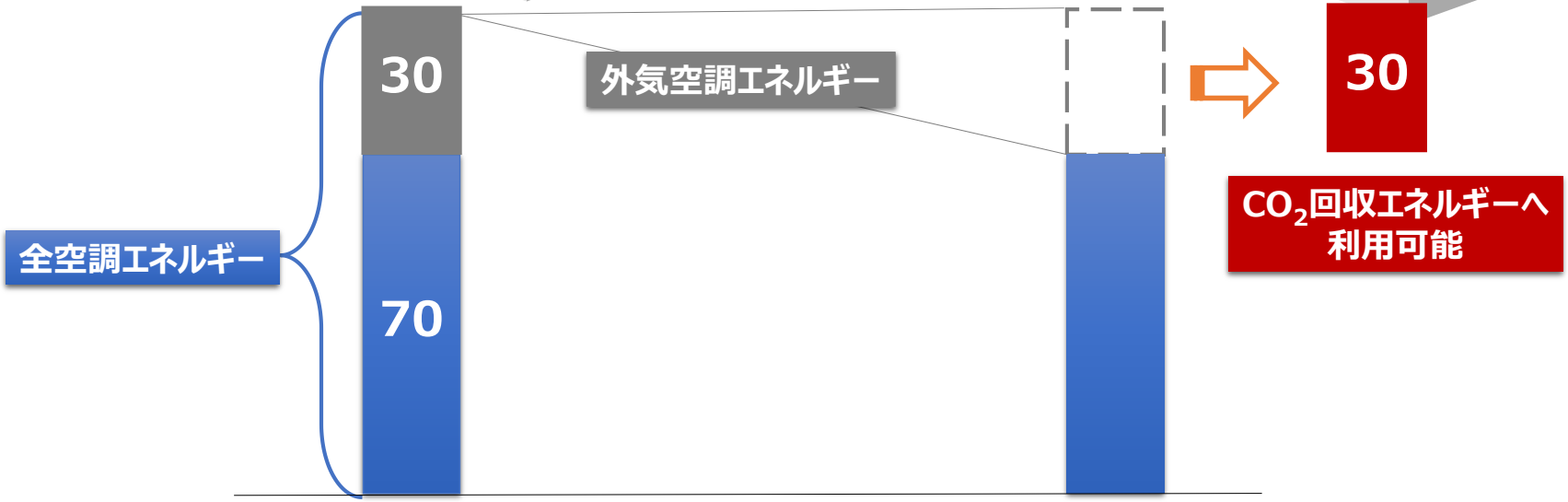
大気からも室内空気からもCO_2を回収

既設（空調換気システム）



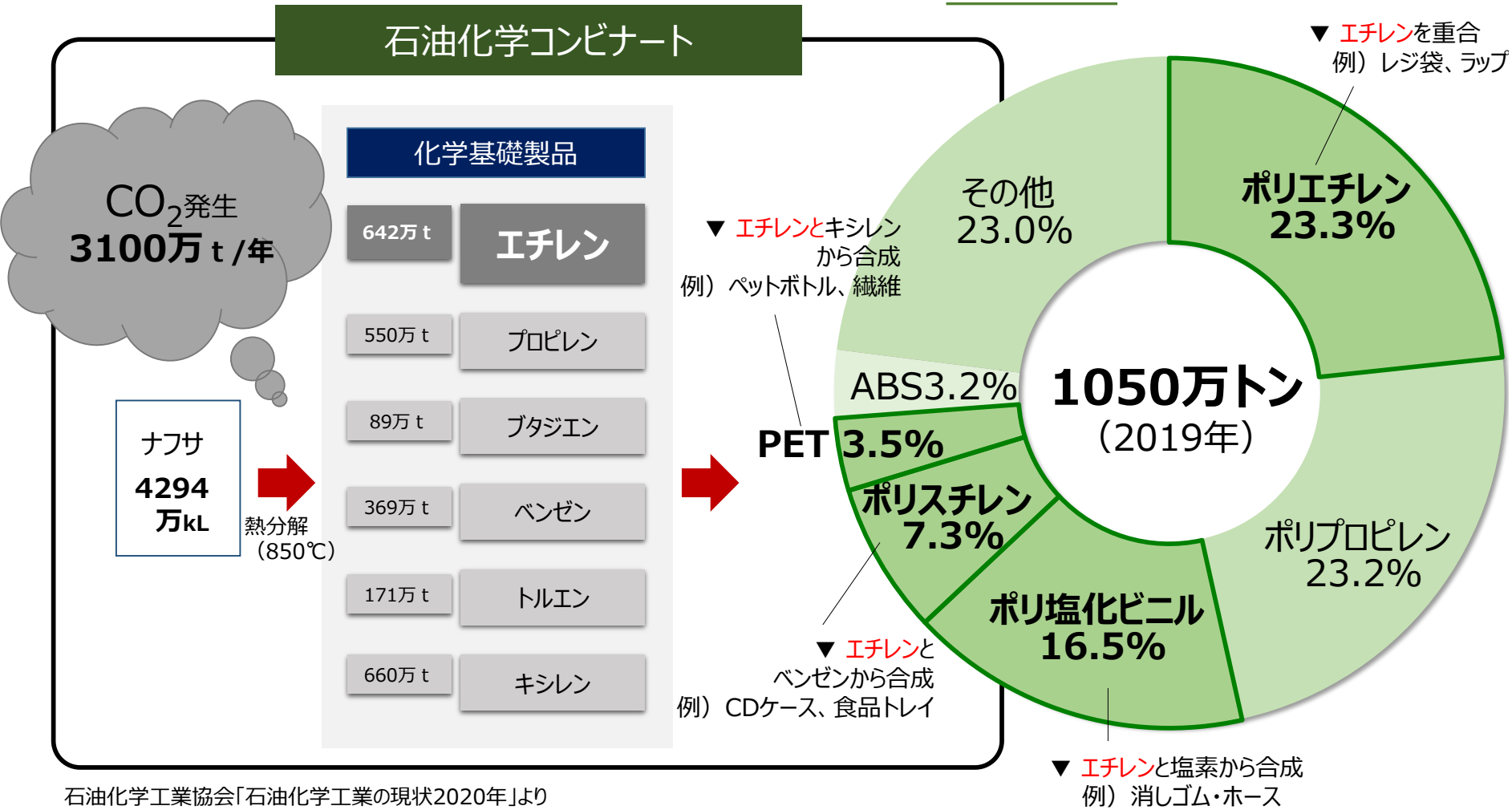
本技術
新規な空調換気システム





CO_2を有用化学品に

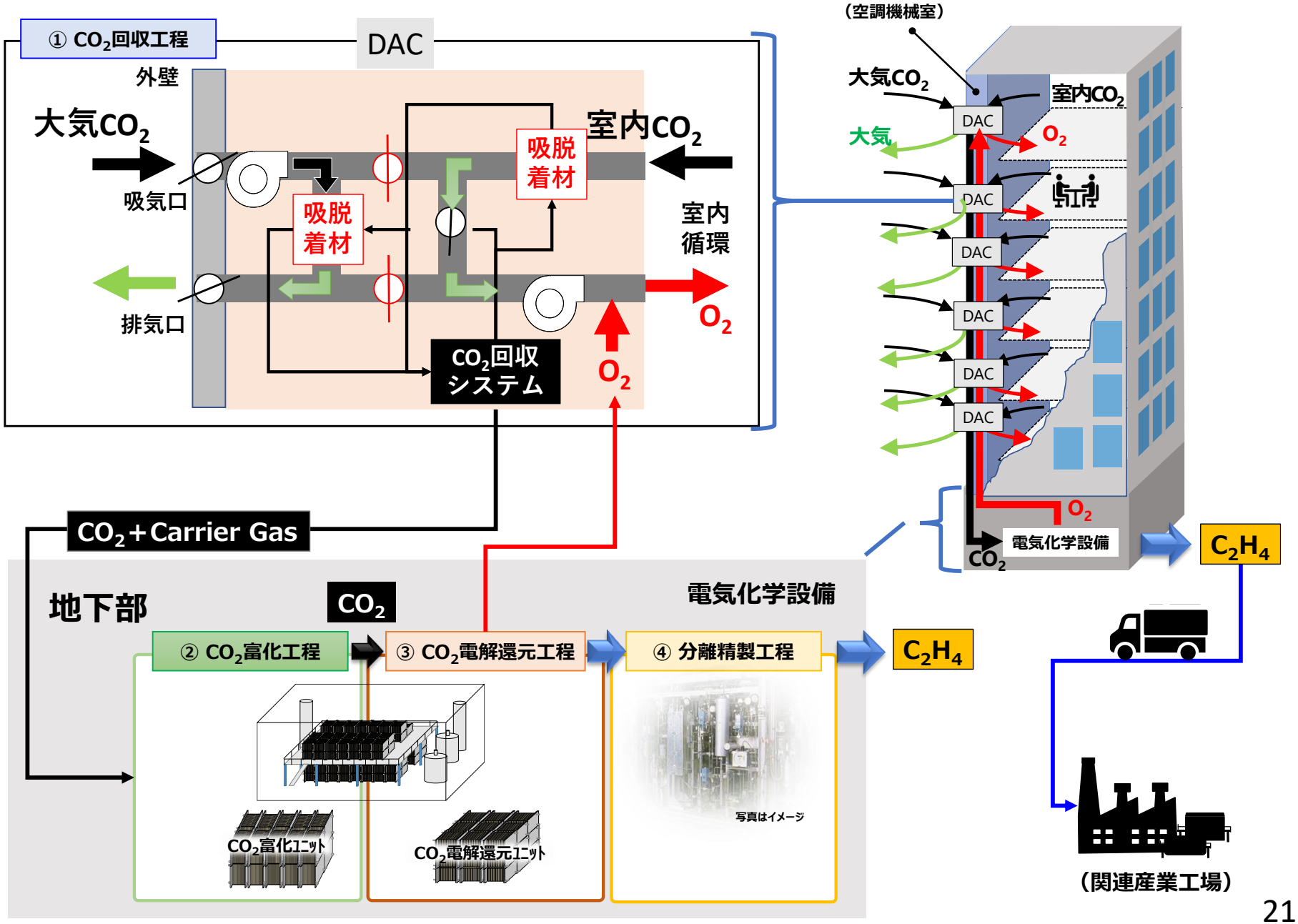
プラスチック製品の約半分に
エチレンが使用されている。



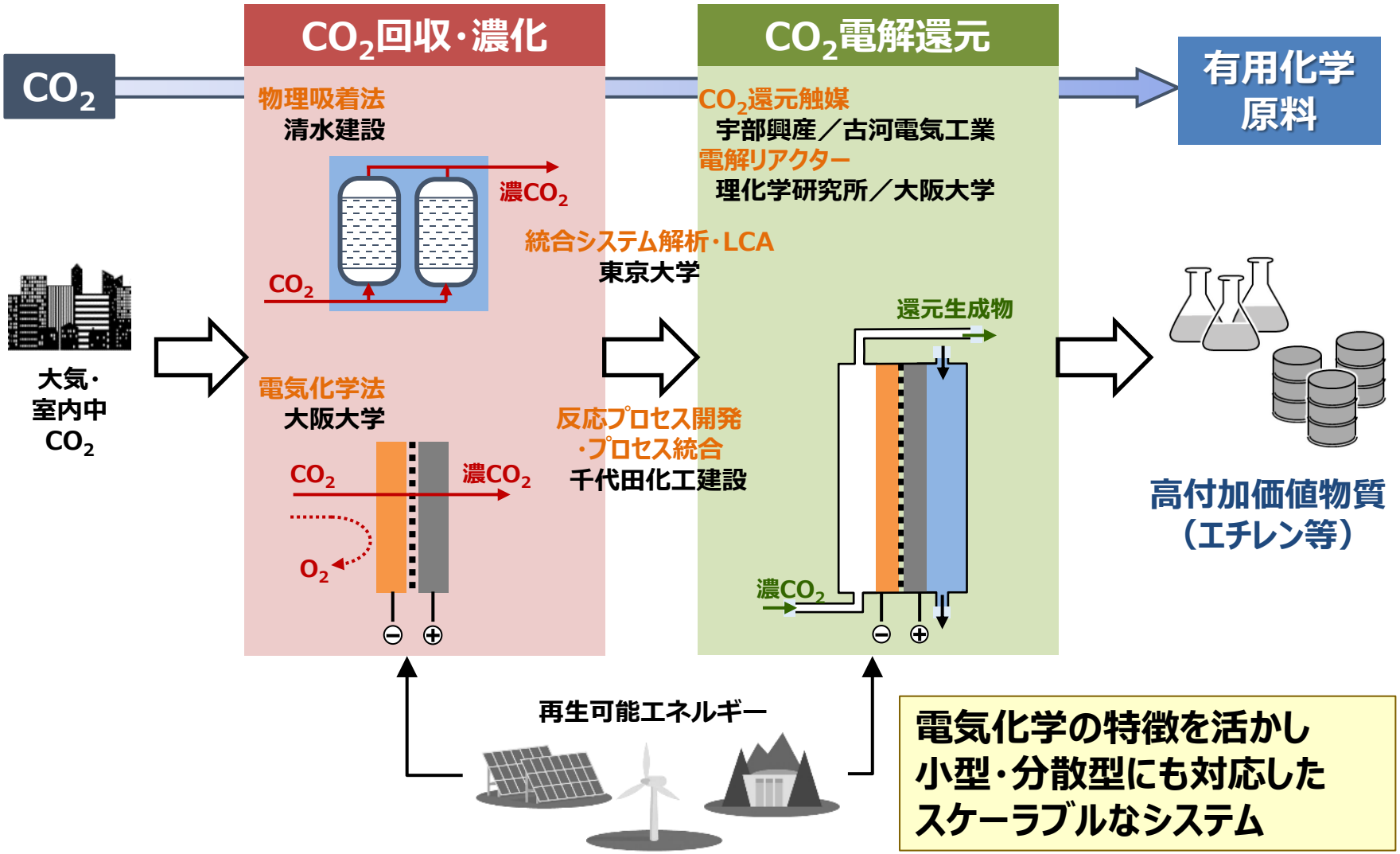
石油化学工業協会「石油化学工業の現状2020年」より

プラスチック循環利用協会 プラスチックリサイクルの基礎知識2020
http://www.pwmi.or.jp/pdf/panf1.pdf

「都市型人工光合成」（CO_2と酸素も循環）

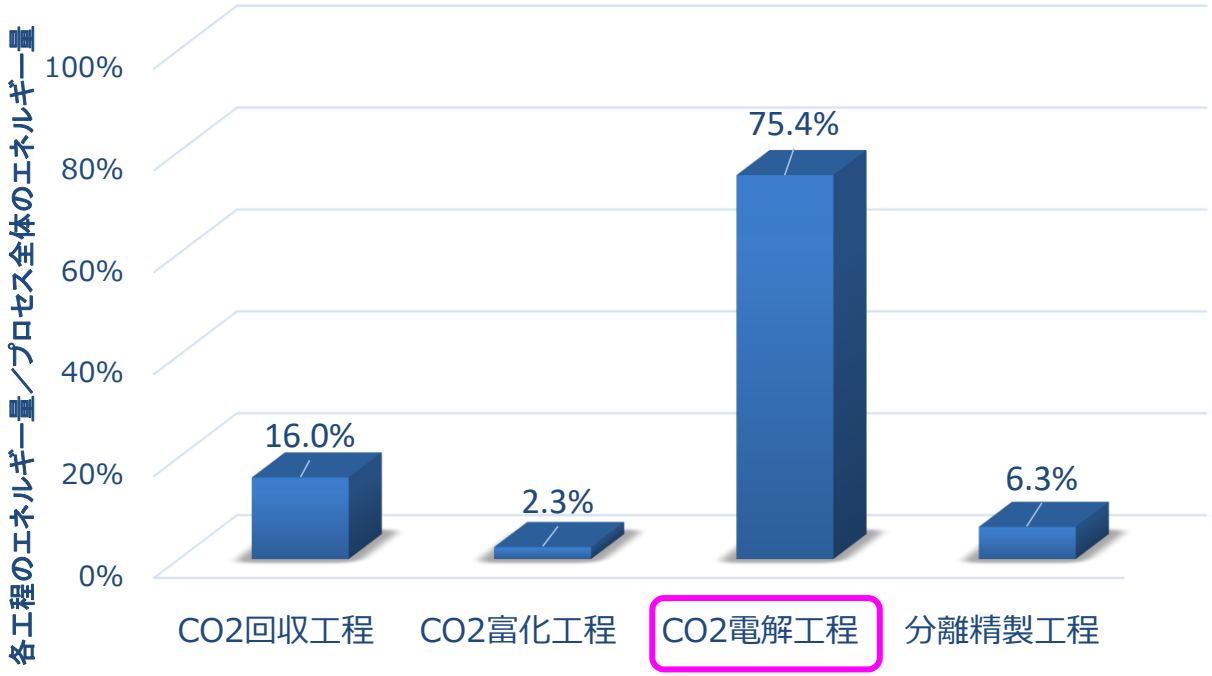


プロジェクト概要



電気化学の特徴を活かし
小型・分散型にも対応した
スケーラブルなシステム

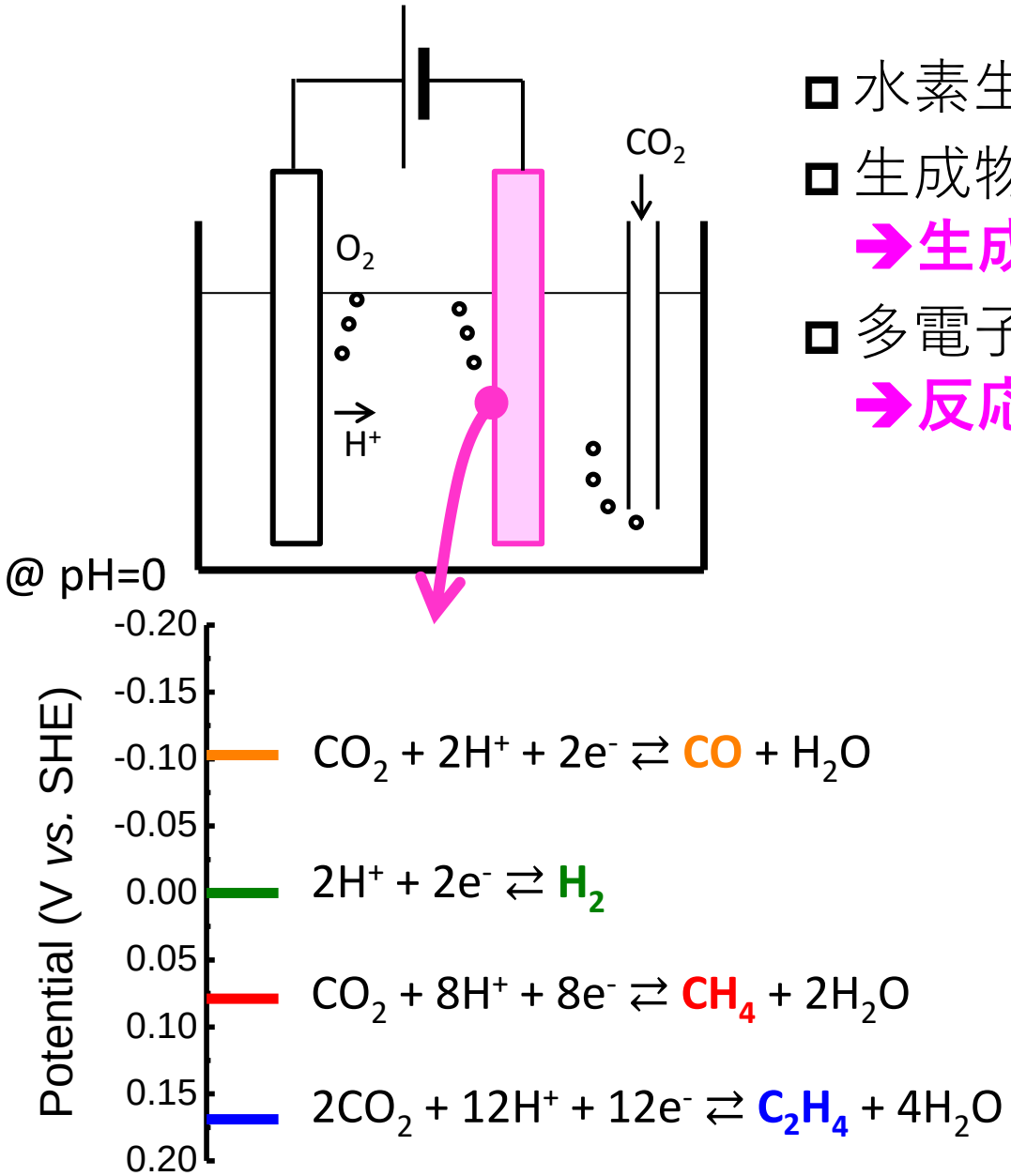
各工程における概算エネルギーの割合



達成目標年度	2022	2024	2029
CO_2排出量※ (t-CO_2/t-C_2H_4)	+1.0 ～ +1.5 デバイス開発／検証	+0.5 ～ +1.0 実験室規模	＜－0.5 パイロットプラント
内） 運転時CO_2排出量 （FE: 電流効率）	－0.5 ～ 0.0 (5.0～4.5 V, FE= 55 ～65%)	－1.0 ～ －0.5 (4.5～3.8 V, FE= 55 ～80%)	＜－2.0 (3 V, FE= 80%)
内） 設備CO_2排出量	+1.5	+1.5	+1.5

※大気CO_2回収からエチレン生成までのシステム全体のCO_2排出量（設備込）

CO_2の電気化学還元



- 水素生成と電位が近い
- 生成物が異なる反応の電位が近い
  ➔生成物の選択率が問題
- 多電子反応
  ➔反応速度が問題

CO_2電気化学還元の難しさ

◻ 水電解

- 生成物はつねに水素
- 技術課題：過電圧の低減，長寿命（変動電源対応）
- 技術フェーズ：社会実装，量産による低コスト化
  【今の技術】

◻ CO_2還元

- 多様な生成物，選択性に課題
- 水電解よりも大きな過電圧
- 技術課題：電極，反応器の設計
- 技術フェーズ：基礎研究～ラボ実証
  【2030年以降の技術】

CO_2電気化学還元の電極

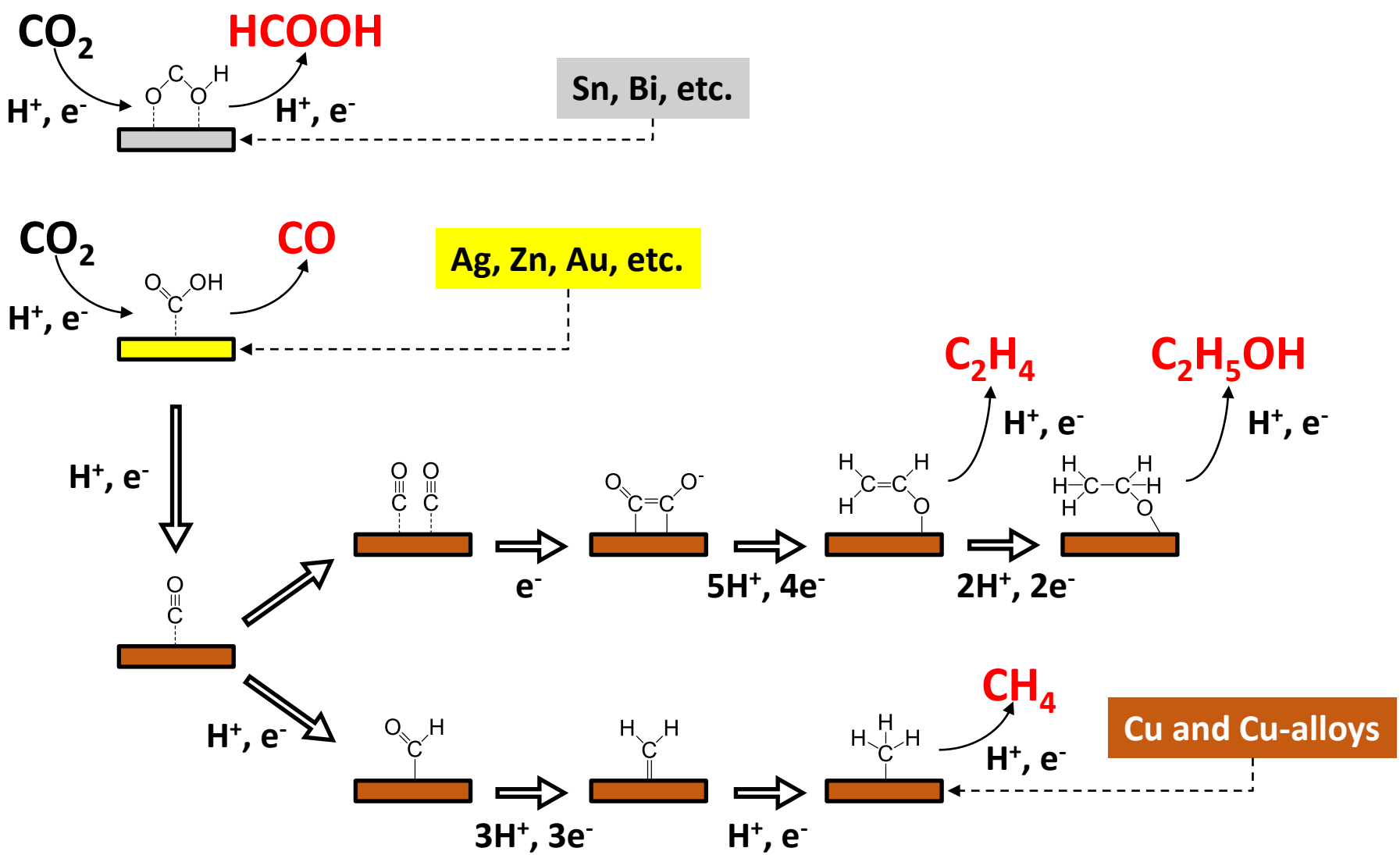
ほとんどの金属: $H_2O \rightarrow H_2$ or $CO_2 \rightarrow CO, HCOO^-$
Cuだけ: $O_2 \rightarrow CH_4, C_2H_4, C_2H_5OH$, etc.

Electrode	Potential (V) vs. *nhe*	Current density (mA cm^{-2})	Faradaic efficiency/% CH_4	C_2H_4	EtOH	PrOH	CO	$HCOO^-$	H_2	Total
Cu	−1.44	5.0	33.3	25.5	5.7	3.0	1.3	9.4	20.5	103.5*
Au	−1.14	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	87.1	0.7	10.2	98.0
Ag	−1.37	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.5	0.8	12.4	94.6
Zn	−1.54	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.4	6.1	9.9	95.4
Pd	−1.20	5.0	2.9	0.0	0.0	0.0	28.3	2.8	26.2	60.2
Ga	−1.24	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.2	0.0	79.0	102.0
Pb	−1.63	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	97.4	5.0	102.4
Hg	−1.51	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	99.5	0.0	99.5
In	−1.55	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	94.9	3.3	100.3
Sn	−1.48	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1	88.4	4.6	100.1
Cd	−1.63	5.0	1.3	0.0	0.0	0.0	13.9	78.4	9.4	103.0
Tl	−1.60	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.1	6.2	101.3
Ni	−1.48	5.0	1.8	0.1	0.0	0.0	0.0	1.4	88.9	92.4†
Fe	−0.91	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	94.8	94.8
Pt	−1.07	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	95.7	95.8
Ti	−1.60	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	tr.	0.0	99.7	99.7

Electrolyte: 0.1 M $KHCO_3$; temperature: 18.5 ± 0.5°C.
* The total value contains C_3H_5OH (1.4%), CH_3CHO (1.1%) and C_2H_5CHO (2.3%) in addition to the tabulated substances.
† The total value contains C_2H_6 (0.2%).

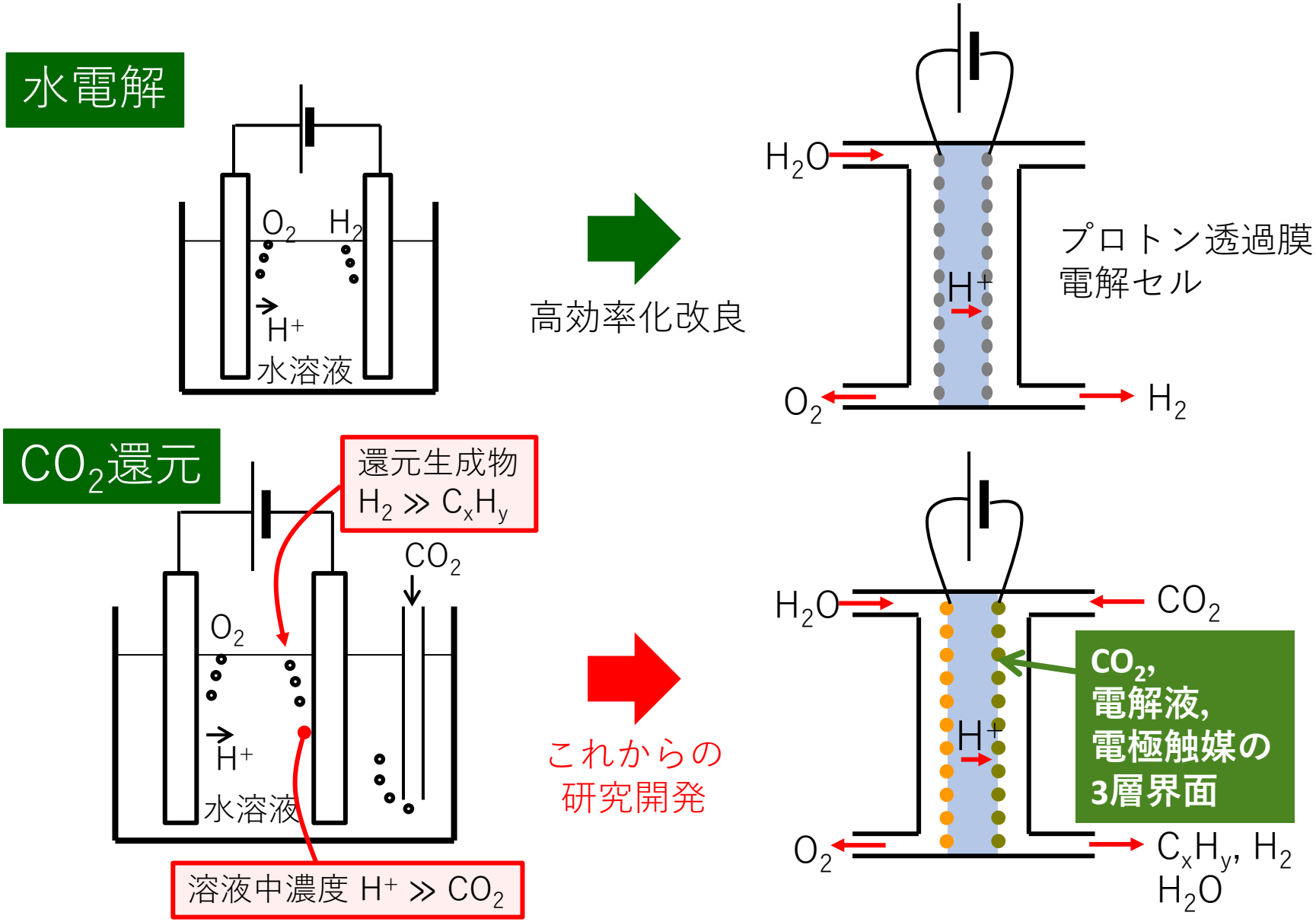
Y. Hori et al., Electrochimica Acta **39**, 1833-1839 (1994)

想定される反応メカニズム

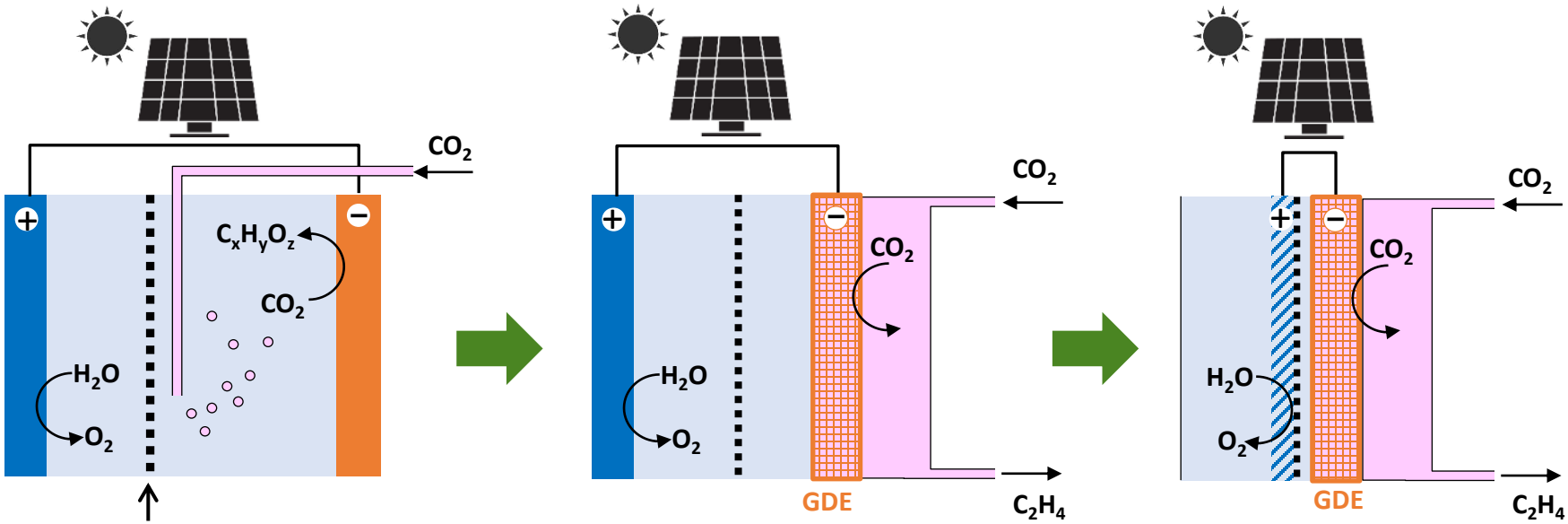


K. Kamiya, K. Fujii, M. Sugiyama, S. Nakanishi, Chem. Lett. **50** (1), 166-179 (2021)

電気化学還元装置の進化：反応場の制御



CO_2電気化学還元装置の展開

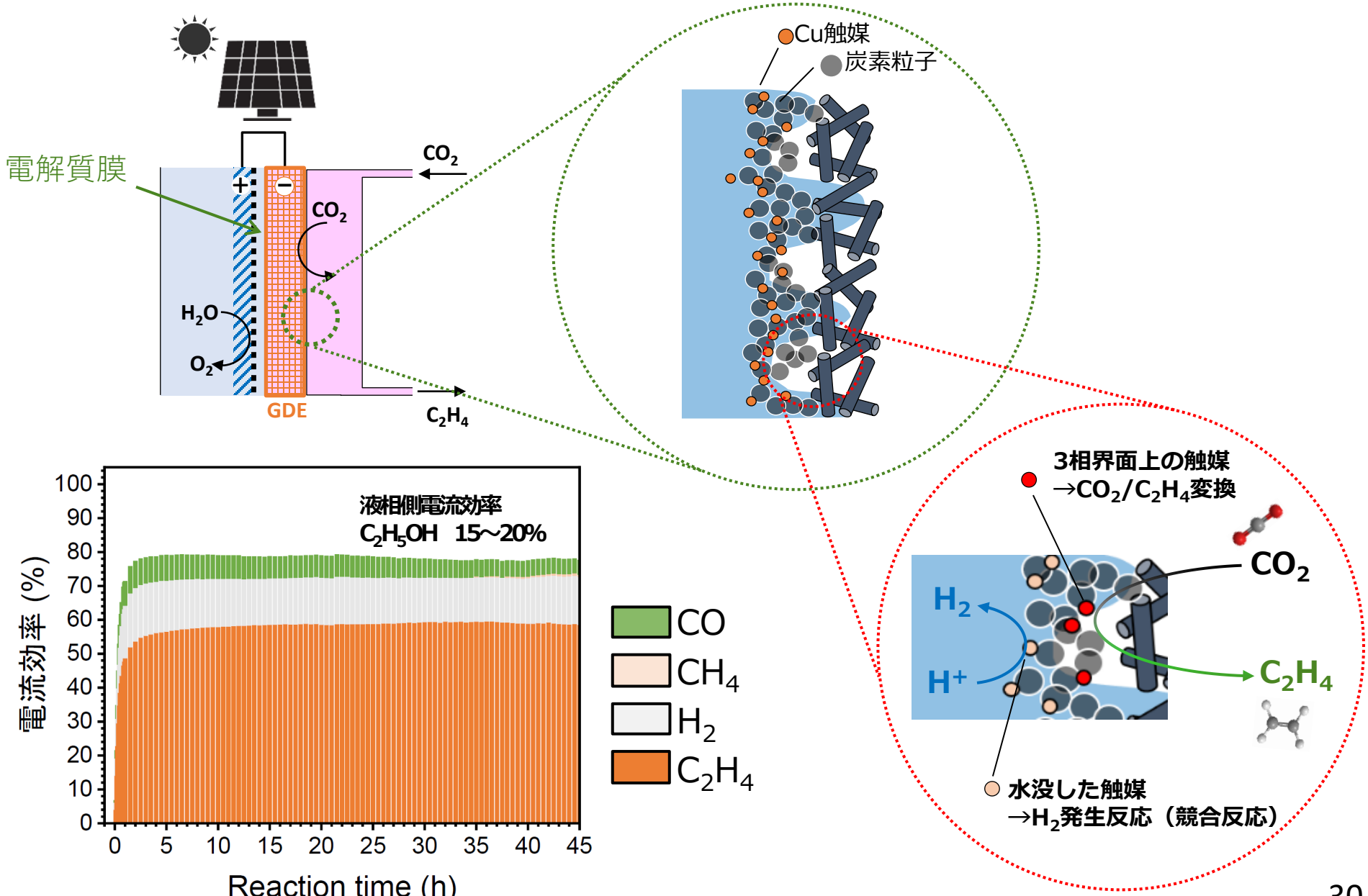


ガス拡散電極
(GDE: gas diffusion electrode)

ポリマー電解質

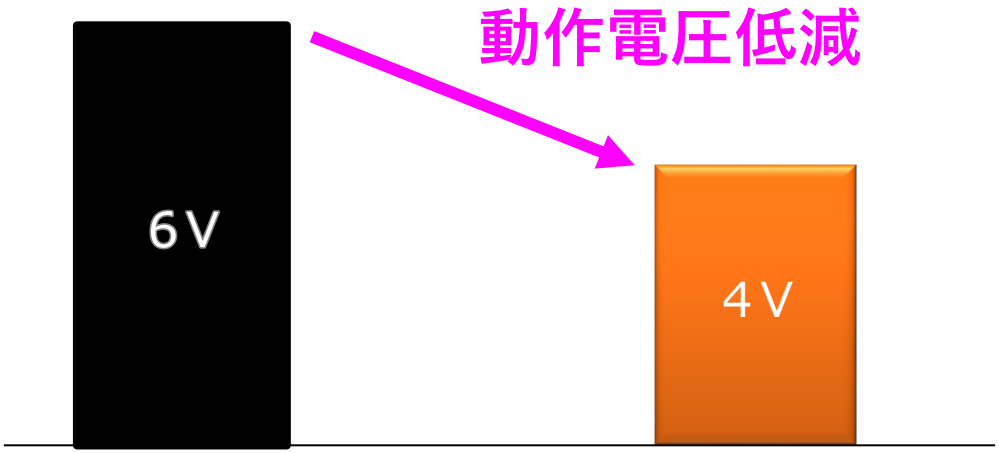
利点	高CO_2濃度＠カソード → H_2生成の抑制	動作電圧低減
開発要素	構造制御 - ガス拡散経路 - 親水・疎水制御	反応器構造 膜材料 大型化・量産可能性

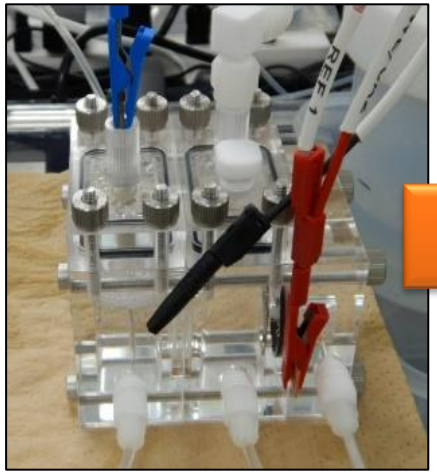
CO_2電解還元装置の電極



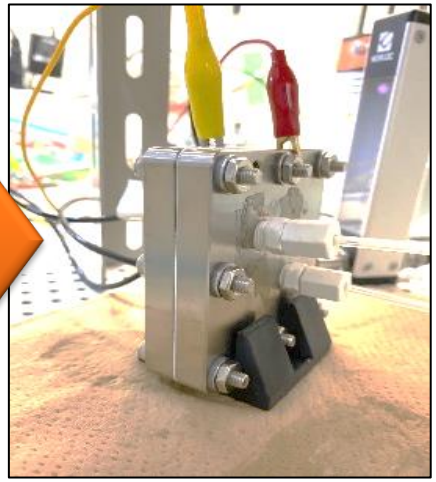
ポリマー電解質型反応器の開発

膜電極複合体(MEA)の開発





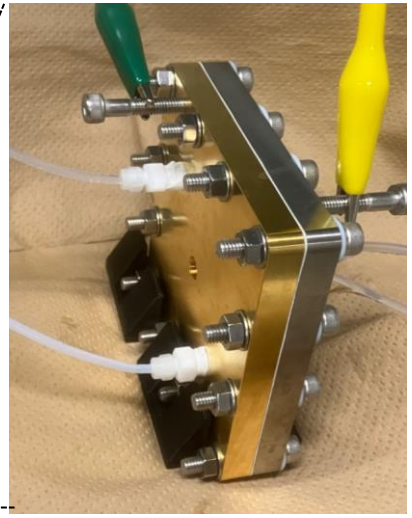
ガス拡散電極型



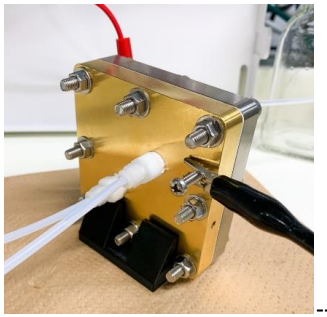
ポリマー電解質型

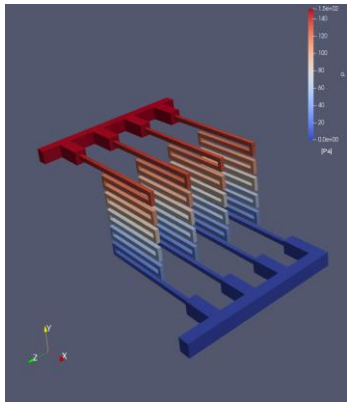
大面積化・スタック化

5.0 cm角

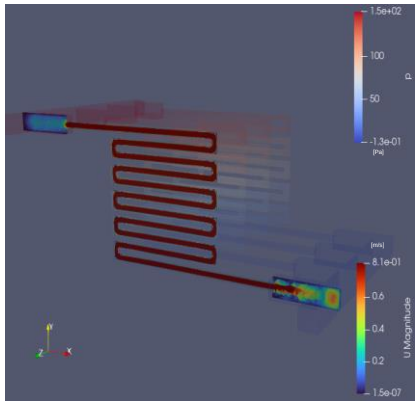


2.5 cm角





圧力分布



流速分布

カーボンニュートラル実現に向けた取り組み

2025　2030　2050

地域

今，身の回りでできること

地産地消の再エネ
まちの魅力創造

技術開発
政策・投資

国

グリーン水素の
グローバルネットワーク

地球

地球規模の持続可能性を目指す

カーボン
リサイクル

マルチスケールな取り組みを，俯瞰力をもって進めていきましょう.