



日本機械学会環境工学部門 NEE研究会
 第29回講演討論会
 日時:2025年11月21日
 14:30~17:00
 大阪大学工学研究科
 オープンイノベーションオフィス

二酸化炭素を有用物質に変える光・ 生体触媒で構成される人工光合成

大阪公立大学人工光合成研究センター
 天尾 豊







1

二酸化炭素を有用物質に変える光・生体触媒で構成される人工光合成

講演概要

太陽光エネルギーを利用して水と二酸化炭素を原料として燃料や有価物質を作り出す人工光合成技術はカーボンニュートラルやカーボンリサイクル達成に向けた技術として期待されている。この講演ではカーボンリサイクルのための光・生体触媒で構成される人工光合成技術の概要と、社会実装への可能性について紹介する。

2

- 1 温室効果ガスとしての二酸化炭素の利用・資源化の意義
- 2 光合成と人工光合成
- 3 二酸化炭素のプラスチック原料への変換のための光・生体触媒で構成される人工光合成
- 4 社会実装に向けた人工光合成技術
- 5 今後の展望

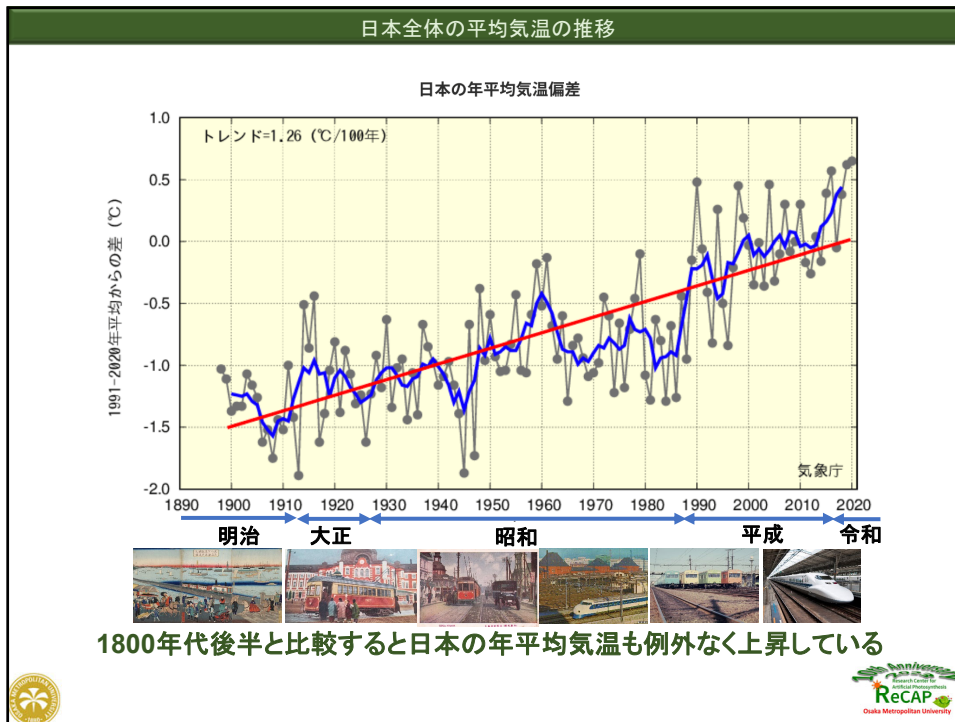


3

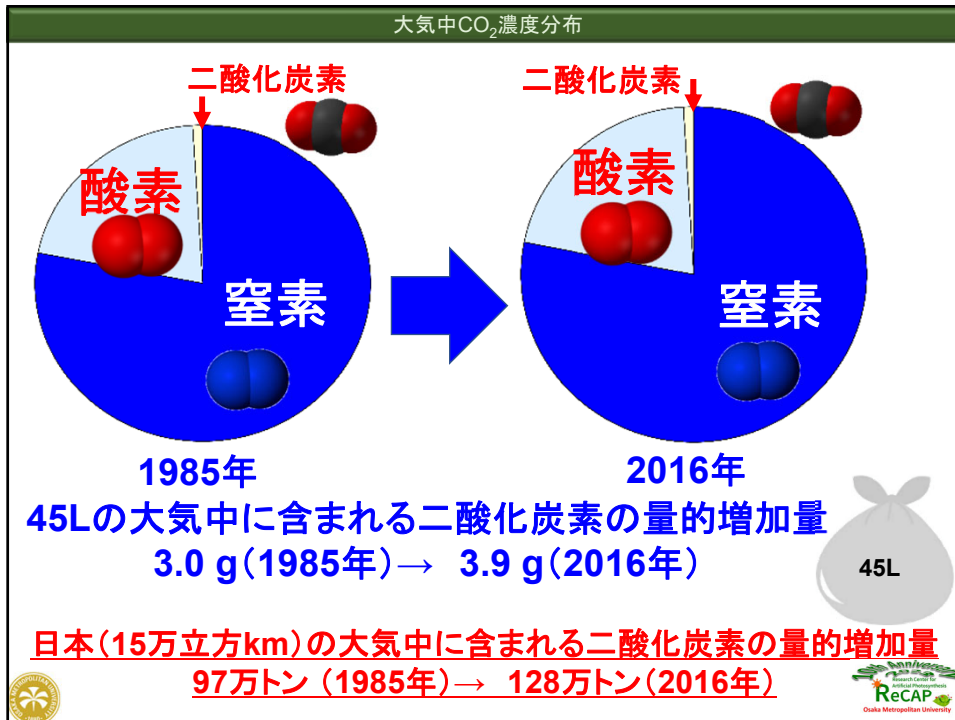
温室効果ガスとしての二酸化炭素の 利用・資源化の意義



4



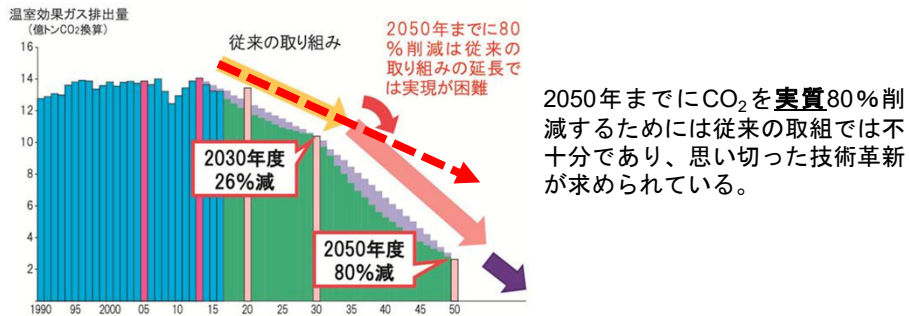
5



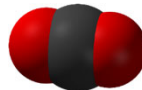
6

パリ協定：第21回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）が開催されたフランス・パリにて2015年12月12日に採択

気候変動抑制に関する多国間の国際的な協定：産業革命前からの世界の平均気温上昇を「2度未満」に抑える。加えて平均気温上昇「1.5度未満」を目指す



二酸化炭素とは？



- 二酸化炭素は、化学式が CO_2 と表される化合物である。
- 有機物を燃やすだけで生成するため、地球上で最も代表的な炭素の酸化物となっている。気体は炭酸ガス、固体はドライアイス、水溶液は炭酸水と呼ばれる。

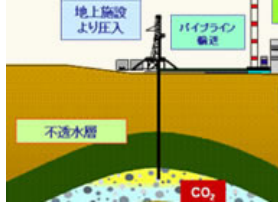


高純度の二酸化炭素は多様な用途がある。

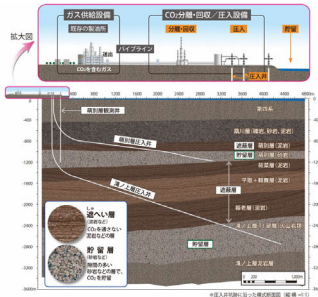
要するに炭水化物の燃えカスであり、これを元に戻すには大変な知恵がいる



● 回収したCO₂を地中に隔離する, CO₂地中貯留に関する技術開発



CO₂地中貯留とは、大規模なCO₂発生源である発電所や製鉄所、セメント工場などから排出されるガス中のCO₂を分離・回収して、それを地中深くのキャップロックと呼ばれる不透水層を上部に持つ帯水層に圧入し、貯留・隔離することによって大気中にCO₂が放出されるのを抑制して、地球温暖化防止に役立てようとする技術 (RITEホームページより引用)



苦小牧におけるCCS大規模実証試験

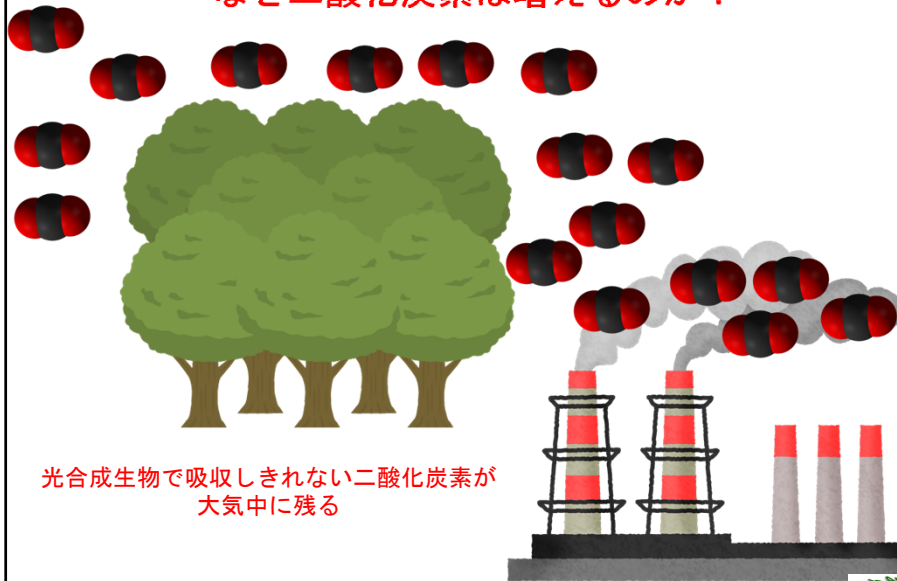
苦小牧では、日本初となるCCSの大規模実証試験 (CO₂の分離・回収、圧入、貯留、モニタリング) が国家プロジェクトとして実施

物理的に二酸化炭素を削減する有効な方法である
処理の方法としては安易であるが生産性は何もない。

日本CCS調査株式会社から引用



なぜ二酸化炭素は増えるのか？



光合成生物で吸収しきれない二酸化炭素が大気に残る



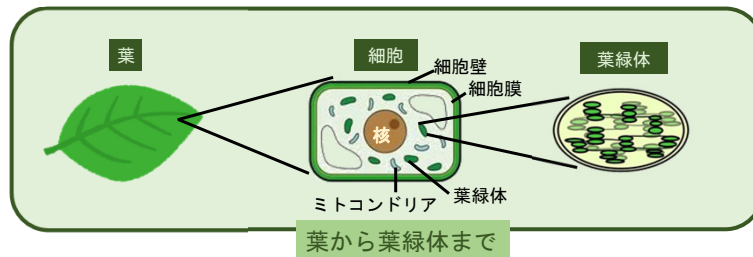
光合成と人工光合成



11

●自然界の光合成とは

緑色植物が太陽光のエネルギーを用いて、二酸化炭素(CO_2)と水(H_2O)から炭水化物(ブドウ糖 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)を合成し、酸素(O_2)を放出する



太陽光エネルギー+二酸化炭素=ブドウ糖(エネルギー)

→人工的に実現し太陽光と二酸化炭素から有用な物質を作る
二酸化炭素を積極的に有用なものに変えられる



12

● 光合成の光が関わる過程（明反応）

光化学反応系およびこれと直接に関連する反応に属する部分。すなわち光による色素（クロロフィル）の励起と、励起色素による水または他の水素供与体の分解と、生じた還元力によるリン酸化（光リン酸化）の総称。明反応は葉緑体のラメラ部分で進行する。明反応で生じた還元型補酵素 NADPH とアデノシン三リン酸は、暗反応を推進する駆動力となる。

✓ CO₂を原料としてブドウ糖を作るためのエネルギーや還元力を得る。

● 光合成のCO₂を固定して糖などを作る過程（暗反応）

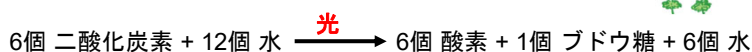
光エネルギーに直接に依存しない部分をいう。明反応において光エネルギーを受けて生成したアデノシン三リン酸 ATP および還元型補酵素 (NADPH₂) を利用してCO₂を固定して糖などを作る過程のこと。暗反応の反応はカルビンベンソン回路という循環的な反応経路をなしている。

✓ CO₂を原料としてブドウ糖を作るため反応経路。

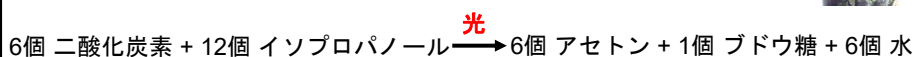
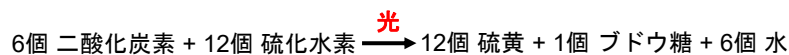


多様な光合成

酸素発生型光合成（主に植物）



非酸素発生型光合成（緑色硫黄細菌・紅色非硫黄細菌）



いろいろなタイプの光合成があり、必ずしも水と二酸化炭素を原料にはしていない



もう一つ大事なこと！：6個の二酸化炭素が次々に結合してブドウ糖を作っているわけではない。



● 人工光合成は2つの種類に大別できる

✓ 光合成反応過程を一つ一つ解明し人工的に再現する（学術的研究）

例)

- 水を分解して酸素発生させるタンパク質の構造解明

酸素発生光化学系IIの1.9 Å分解能における結晶構造
Nature 誌
2011年末米国科学誌サイエンス
『2011年10大ブレイクスルー』に選出
大阪市立大学 神谷信夫特別招聘教授
ノーベル化学賞級の研究



✓ 光合成反応過程の重要部分を真似して有用物を作り出す（学術的+実用化研究）

例)

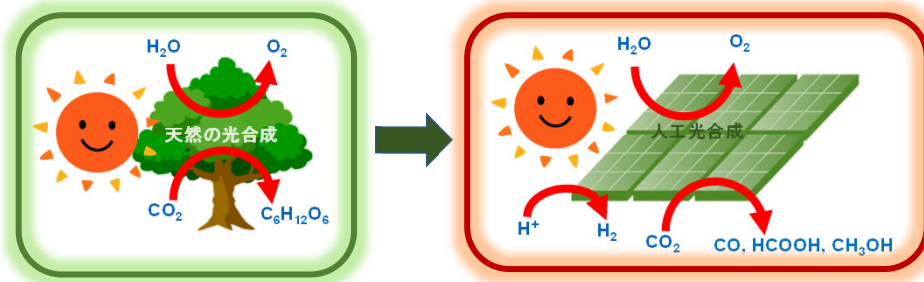
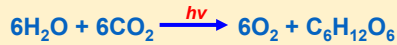
- 二酸化炭素をメタノールなどの燃料に変える
- 二酸化炭素からギ酸を作り、ギ酸から水素を取り出す（二酸化炭素の循環）

人工光合成技術

入口: 二酸化炭素

出口:

- ・水素
- ・低炭素燃料
- ・化学品
- ・生分解性高分子
- ・エンジニアリングプラスチック

人工光合成研究のトレンド

- 水を光分解して水素を作る
- 二酸化炭素を還元して一酸化炭素、ギ酸、メタノールなどを作る



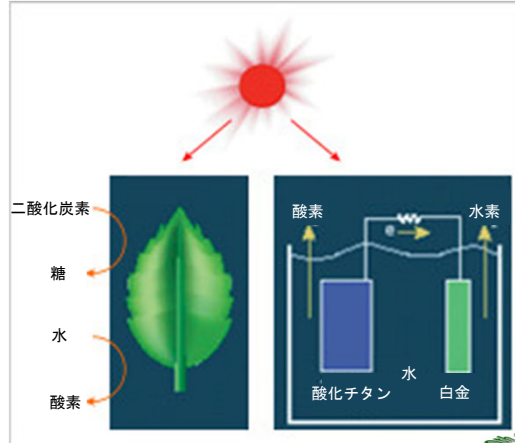
● 人工光合成研究の原点



1972年 東京大学の本多健一と藤嶋昭により、酸化チタン電極を用い、紫外線を照射することにより水を水素と酸素に分解する本多-藤嶋効果が発表



1974年1月1日朝日新聞



Nature 238, 37 – 38(1972)



二酸化炭素のプラスチック原料への変換
のための光・生体触媒で構成される人工
光合成

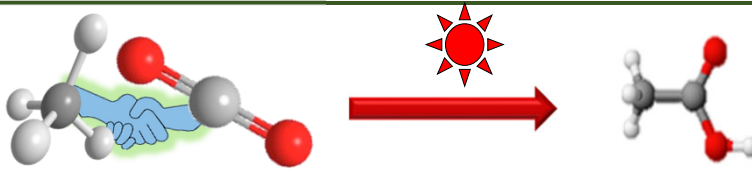


二酸化炭素を還元する光酸化還元系



炭素数1の二酸化炭素が還元されても炭素数1のメタンやメタノールにしかならない(炭素数は拡張されない)

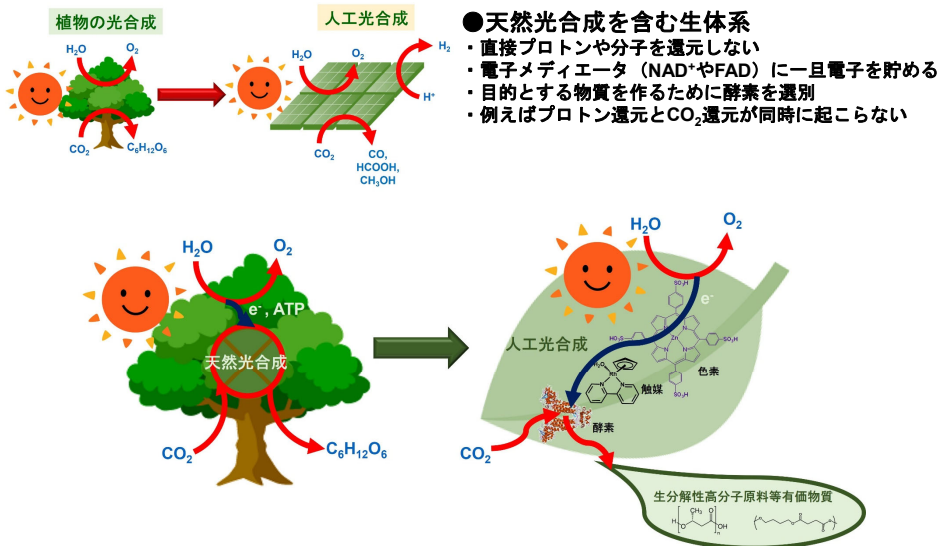
二酸化炭素の資源化の次なる挑戦
天然の光合成と同様炭素一炭素結合を生成させる



例えばメタン(炭素数1)と二酸化炭素(炭素数1)を光エネルギーを用いて結合させて酢酸(炭素数2)を合成



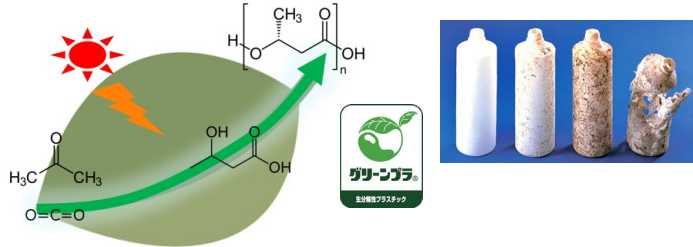
CO₂固定に資する人工光合成のコンセプト



太陽光エネルギー・生体触媒を使って二酸化炭素を有機物質に変換

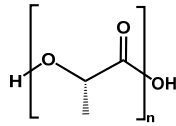


可視光を利用して二酸化炭素と有機化合物から生分解性高分子を合成

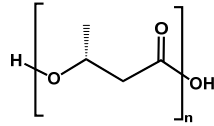


簡単な有機分子と二酸化炭素から生分解性高分子の原料を光エネルギーを使って作る新しい人工光合成

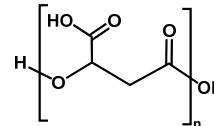
→新しいグリーンケミストリー・二酸化炭素利用技術



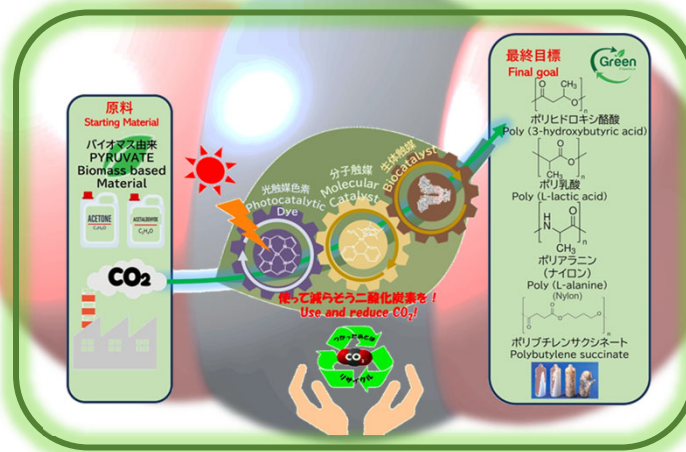
ポリ乳酸



ポリヒドロキシ酪酸



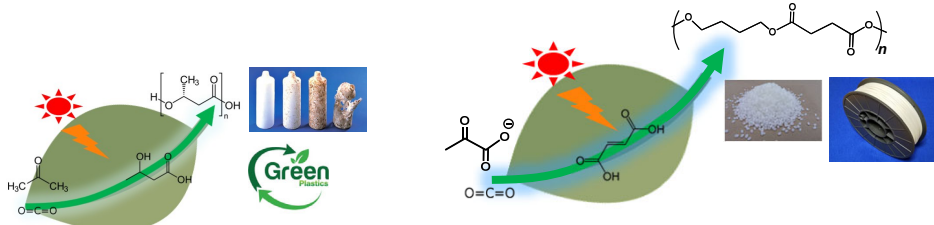
ポリリンゴ酸



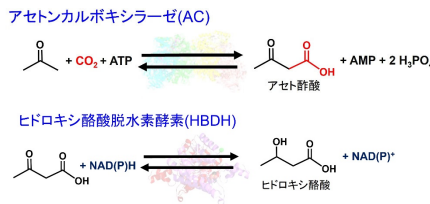
太陽光エネルギー・いろいろな触媒を使って二酸化炭素を有価物質に変換



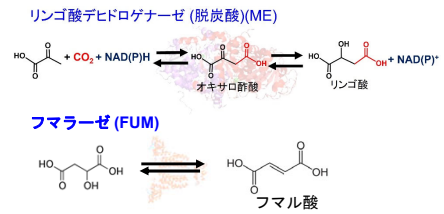
光エネルギーによるCO₂を有価物に変換



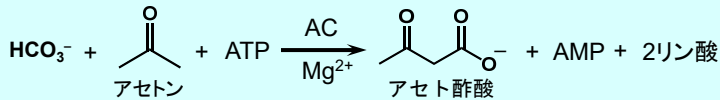
● 二酸化炭素を原料として光エネルギーで**生分解性プラスチック**を作る



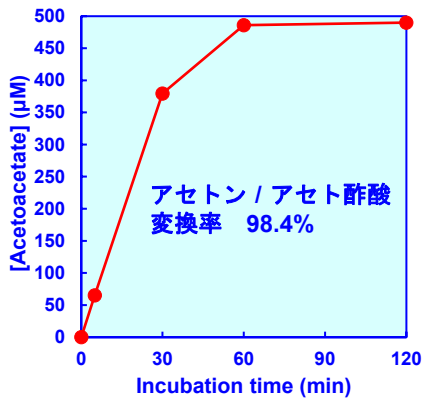
● 二酸化炭素を原料として光エネルギーで**C=C結合を有する有機化合物の合成とエンジニアプラスチック**を作る



CO₂固定能を有する生体触媒(アセトンカルボキシラーゼ)



手順：酵素抽出液
培養(アセトン培地) → 集菌 → 超音波破碎 → 超遠心 → 上澄み液回収 → 硫酸による沈殿濃縮



反応条件	
アセトン	500 μM
NaHCO ₃	50 mM
ATP・2Na	2.0 mM
MgCl ₂	5 mM
酵素抽出液	AC, HBDH

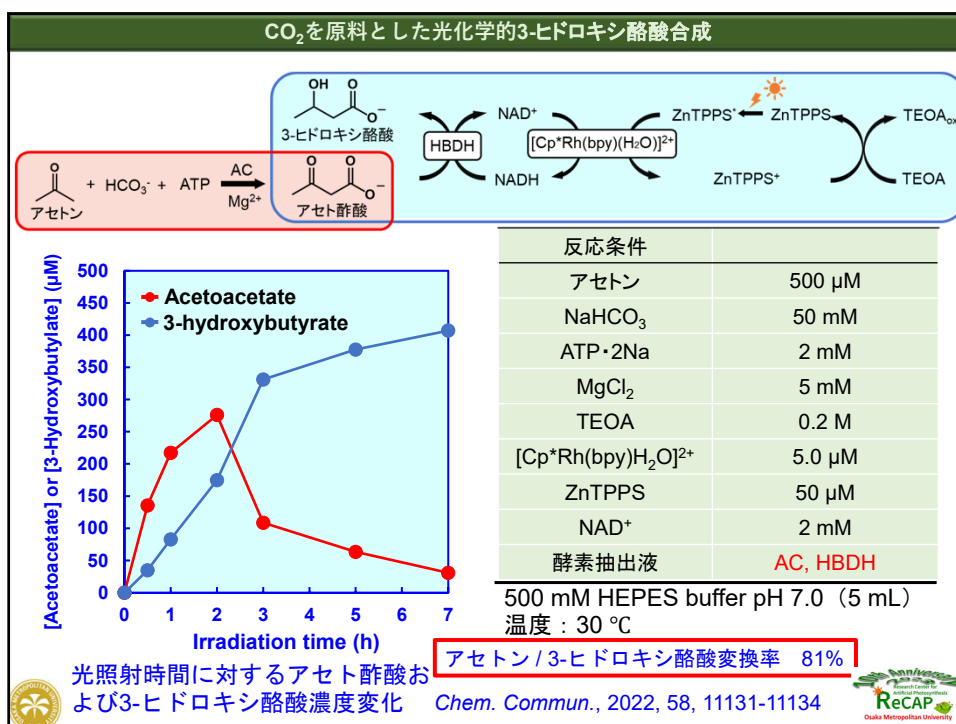
500 mM HEPES buffer pH8.2 (5 mL)
温度：30 °C 分析：イオンクロマトグラフィー

*Rhodobacter capsulatus*から得たACを含む酵素抽出液を用い、高効率でCO₂を固定することに成功。

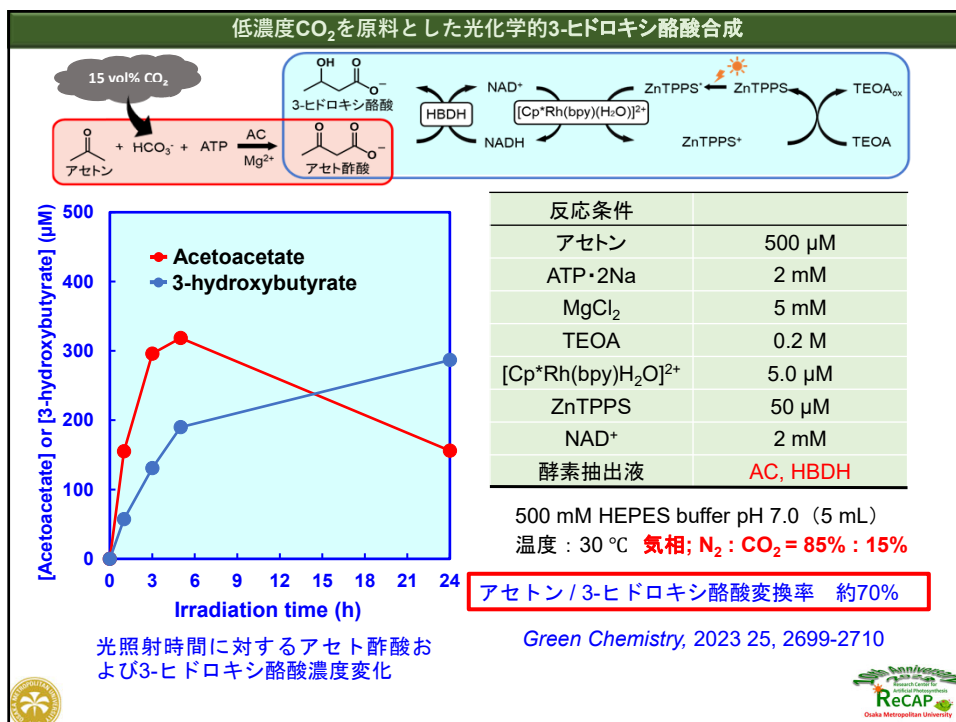
アセト酢酸生成の経時変化

Catalysis Surveys from Asia 2023, 27, 67-74.
Sustainable Energy & Fuels 2023, 7, 360-368.





27



28

社会実装に向けた人工光合成技術



29

人工光合成研究のトレンド

- 水を光分解して水素を作る(水素製造)
- 二酸化炭素を還元して一酸化炭素、ギ酸、メタノールなどを作る(炭素ベース燃料生成等)

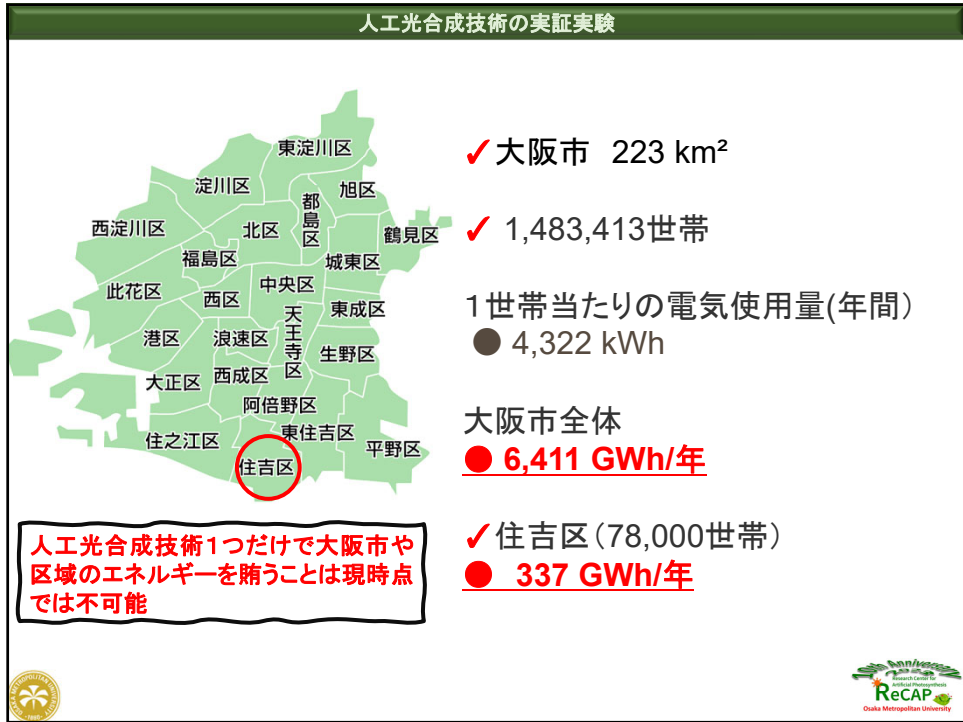
古くから人工光合成に関する基礎研究が進められてきたが、出口をどうするかが明確でないことが人工光合成技術の理解や普及の妨げになっている



人工光合成技術を使って水分解して製造した水素、二酸化炭素から製造した一酸化炭素やギ酸を一体何に使うのか？



30

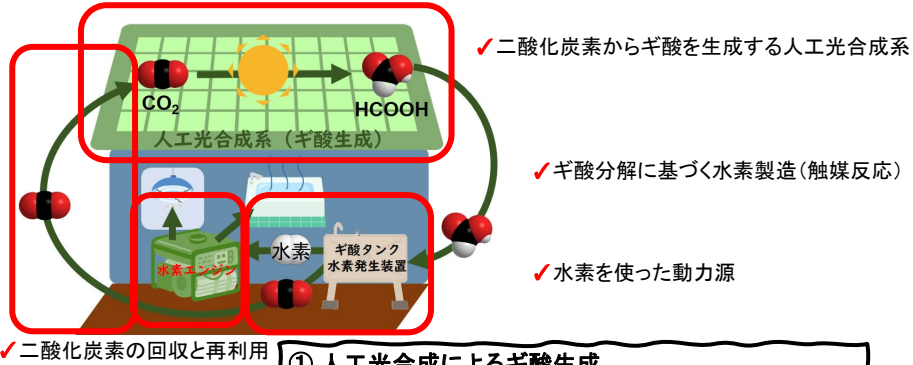


31



32

「水素自立型エネルギー社会実証実験」



✓二酸化炭素の回収と再利用

✓二酸化炭素からギ酸を生成する人工光合成系

✓ギ酸分解に基づく水素製造(触媒反応)

✓水素を使った動力源

- ① 人工光合成によるギ酸生成
- ② ギ酸をタンクで貯蔵
- ③ 必要な時にギ酸から水素生成 ($\text{HCOOH} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$)
- ④ 水素を活用して発電、発電時の熱を利用して貯湯

必要な水素量：

- 一般的な計算で燃料電池を使った場合5人家族の一軒家で1時間に600~1000L必要
- ギ酸に換算すると1.2~2.1kgの相当

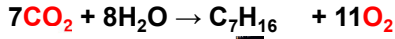


今後の展望



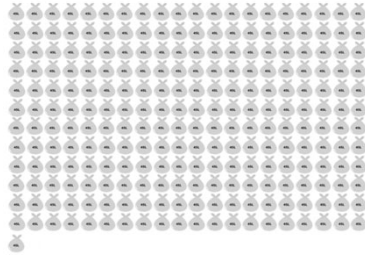
二酸化炭素利用を目的とした技術の難しさ

仮に光エネルギーを使って二酸化炭素と水からヘプタンができるとする

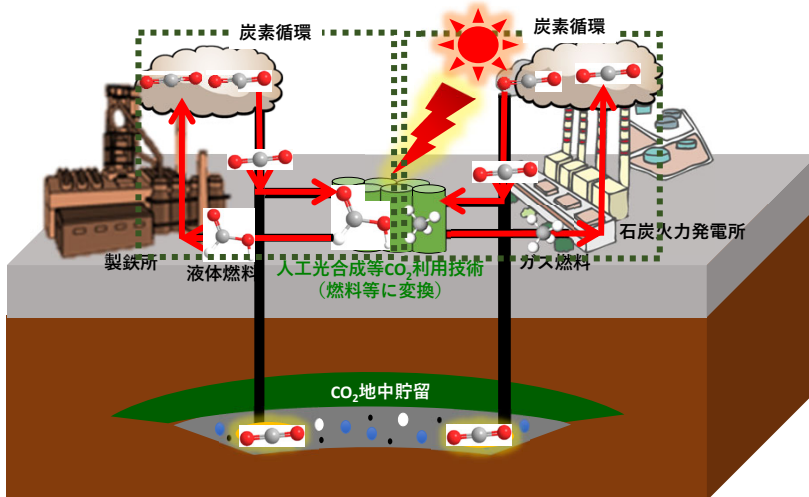


ヘプタン 60 L (比重0.7 41.4kg) を作るために二酸化炭素は **65000 L (128 kg相当) 必要**

大気中の二酸化炭素濃度は **0.04%程度：約1625000 L の大気をかき集める必要がある。**



45 Lゴミ袋250袋でかき集めても全く足りない・・・
しかもかき集めた非常に希薄な二酸化炭素を含む気体を濃縮しない限り設備が巨大化しすぎてこの技術の適用は難しい



CO₂再利用技術を駆使した循環型社会像への提案
~CO₂を地産地消しながら循環させる~



カーボンニュートラル社会の必要性

◎今後の地球環境やエネルギー問題を解決するためには脱化石資源社会を構築して行かなくてはならない。

◎再生可能エネルギーは様々であり、一つに的を絞ることをせず、用途に応じて併用することが必要である。

◎二酸化炭素の排出をゼロにすることは事実上不可能であり、排出量を削減するような科学技術が必要である。

◎排出量を削減するような科学技術を駆使し、二酸化炭素の排出と回収・利用のバランスをとり実質ゼロを達成する必要がある。

◎経済性をとるか地球環境をとるかは各々の立ち位置によって違う。この点は文系・理系の観点から議論すべき課題である。

