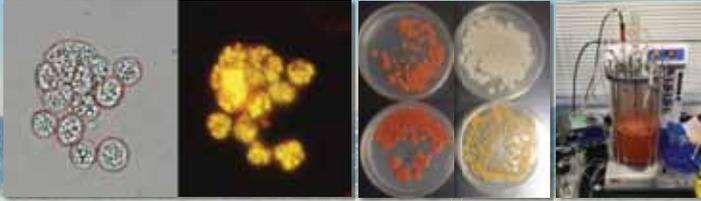


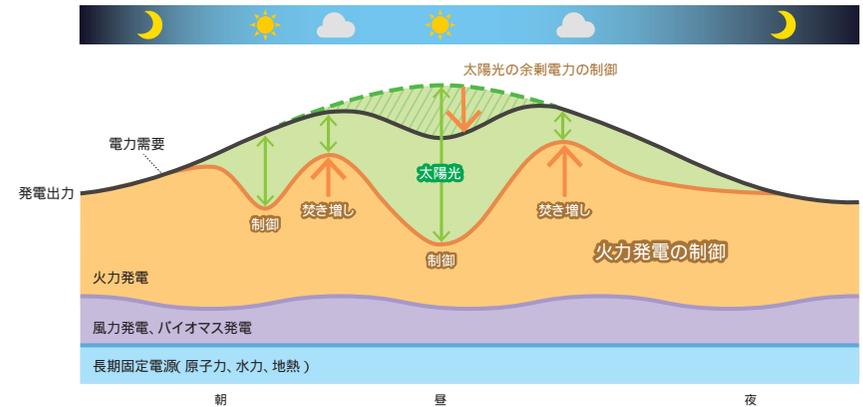
## Gas-to-Lipidsバイオプロセスの概要と意義



秋 庸裕(広島大学大学院統合生命科学研究科)

## 電力需要に対応した発電方法の組合せ

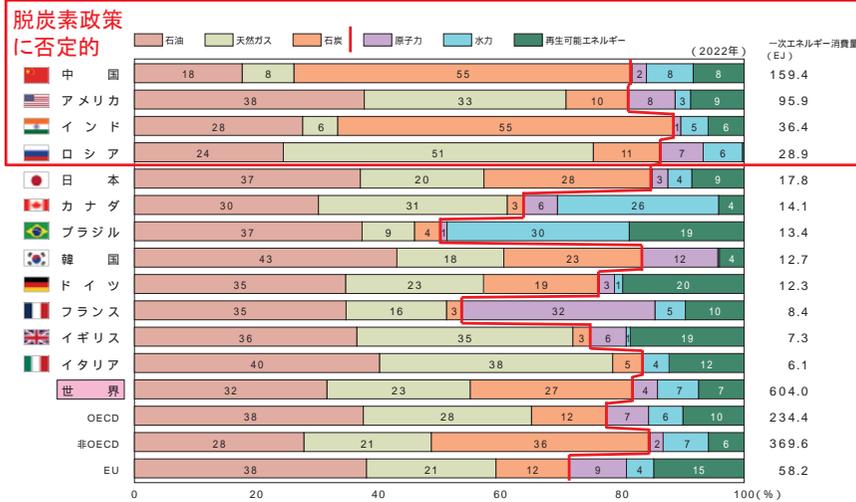
最小需要日(5月の晴天日など)の需給イメージ



電気を安定して使うには、常に発電量(供給)と消費量(需要)を同じにする必要があります。  
そのため、再生エネの出力の上下に対応出来る火力発電などで、発電量と消費量のバランスをとる必要があります。

<https://www.ene100.jp>  
資源エネルギー庁「日本のエネルギー」より作成

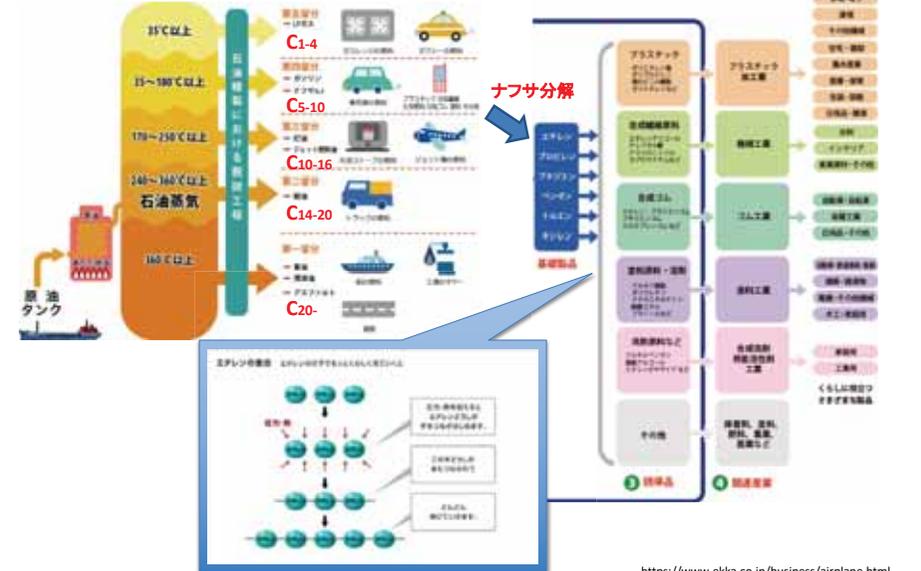
## 主要国の一次エネルギー構成



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある  
1EJ(=10<sup>18</sup>J)は原油約2,580万kの熱量に相当(EJ:エクサジュール)  
※一次エネルギー: 自然界から得られた変換加工しないエネルギー

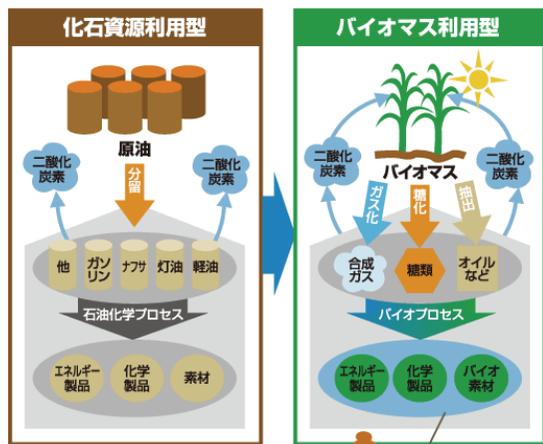
<https://www.ene100.jp>  
エナジー・インスティテュート世界エネルギー統計レビュー2023より作成・改

## オイルリファイナリー → ナフサの利用



<https://www.ekka.co.jp/business/airplane.html>  
<http://www.meiwakai.com/meiwatanker/job/chemical-products/>

# 「オイルリファイナリー」と「バイオリファイナリー」



海外の資源に頼ることのない産業が実現したり、限りのある資源ではなく再生可能な資源を使うことで、地球温暖化防止にもつながる、とても重要な研究開発なのです。



[https://www.jba.or.jp/top/bioschool/industry/ind\\_01.html](https://www.jba.or.jp/top/bioschool/industry/ind_01.html)

# 微細藻類燃料の開発状況

戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業					福島再生可能エネルギー次世代技術研究開発事業
実施主体	[H]	J-POWER	DENSO	DIC	福島再生可能エネルギー次世代技術研究開発事業
共同実施者	ちとせ研究所、神戸大	東京電力エス・エヌ	中興大、ウボタ、北光興産	神戸大、基礎生物学研究所	筑波大
共同実施者	ポトリオコックス	陸奥	シュードココミクサ	クラミドモナス	土着藻類
共同実施者	バイオマス	糖類	ジェット燃料・ディーゼル	ジェット燃料	ジェット燃料等
共同実施者	合成ガス	糖類	ジェット燃料	ジェット燃料	基礎研究
共同実施者	バイオプロセス	エネルギー製品	化学製品	バイオ素材	

国交省・経産省「2020年オリンピック・パラリンピック東京大会でのバイオジェット燃料利用に関する検討について」(2016年)

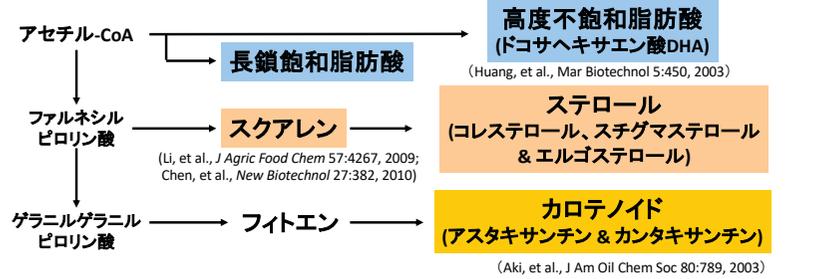
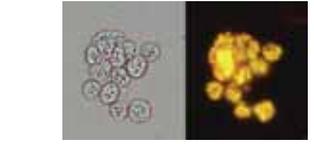
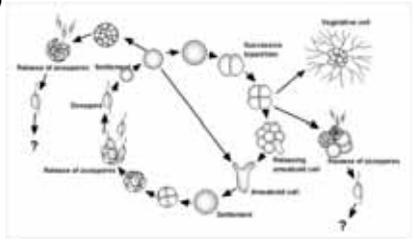
# バイオマス資源の変遷

	第一世代 (1970年代~)	第二世代 (1990年代~)	第三世代 (2000年代~)
原料	<ul style="list-style-type: none"> <li>陸生植物由来</li> <li>油脂原料: パーム、大豆、菜種、ひまわり等</li> <li>エタノール: トウモロコシ、サトウキビ等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>非可食原料</li> <li>油脂原料: ジャトロファ、ボンガミア、廃食用油等</li> <li>エタノール: セルロース系、都市ゴミ等廃棄物、大型藻類</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>微細藻類 (淡水系、塩水系)</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>主に食用原料として長期間かつ広域に商業化</li> <li>燃料用途の拡大によって食糧用途と競合したため、第二世代プロセスの開発が進む</li> <li>LCAや持続可能性 (熱帯雨林伐採等) 基準で CO<sub>2</sub> 削減効果の少ないものもある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>醗酵可能糖への変換や、合成ガス (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) に転換した上で、各種プロセスによりエタノールや化学原料を製造</li> <li>第1世代に比べて生産コストが高く、いまだ実用化に至っていない</li> <li>エタノールや BDF 以外にジェット燃料やブタノールなども開発中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>微細藻類の種類によっては単位面積当たりの脂質収率が陸生植物に比べて100倍以上</li> <li>健康食品や飼料などでは既に商業化されているが、化学原料やバイオ燃料用途としてはまだ実証段階</li> <li>開放型 (Open Pond) ないしは閉鎖型 (Photo Bioreactor) による培養方法</li> </ul>
課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>食糧との競合が不可避</li> <li>灌漑など水資源の大量使用による土地の砂漠化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>5 炭糖 6 炭糖同時醗酵、酵母の耐性向上などによる生産性向上</li> <li>セルロース分解酵素の再利用などによる生産コストの低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>化学原料やバイオ燃料用として大量の培養~濃縮抽出技術の開発</li> <li>藻類そのものの脂質生成能力の向上</li> </ul>

三井物産戦略研究所レポート「バイオマス資源としての微細藻類」(2011)

# 油糧微生物ラビリンチュラ類オーランチオキトリウム属

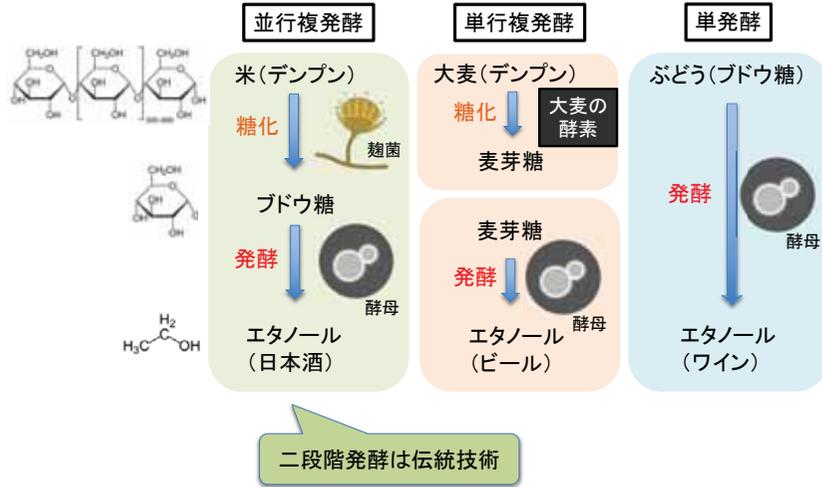
- ❖ 海洋性真核微生物(ストラメノパイル/不等毛類)
- ❖ 従属栄養で実験室酵母に匹敵する高い増殖性
- ❖ 取り扱いが容易、凍結保存可能
- ❖ 海洋生態系において重要な役割
- ❖ 有用脂質を生産する(~80 wt%)



(Aki, et al., J Am Oil Chem Soc 80:789, 2003)



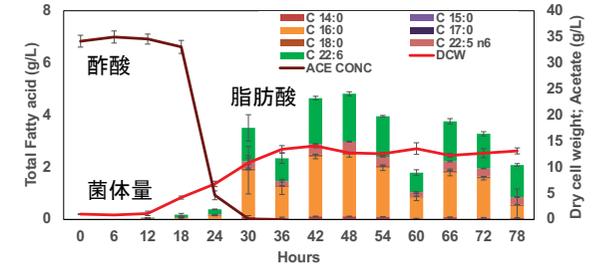
## 醸造酒の製造工程



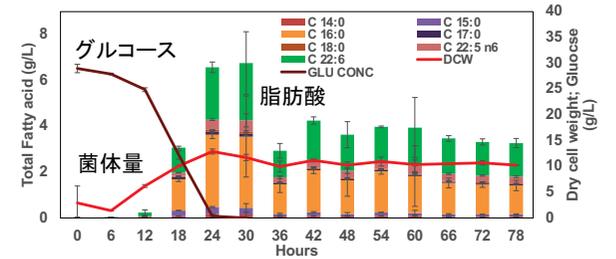
## 酢酸を炭素源としたオーランチオキトリウムによる油脂生産

30 g/L acetate or glucose  
6 g/L polypeptone  
2 g/L yeast extract,  
20 g/L sea salts  
50 mL-medium/200 mL flask  
pH6.5, 28C, 150 rpm

30 g/L acetate  
 $\mu: 0.55$   
 $Y_{X/S}: 0.47$   
 $Y_{TFA/S}: 0.16$

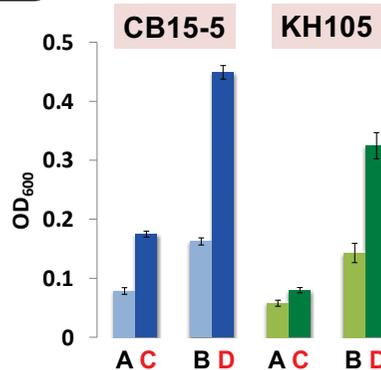
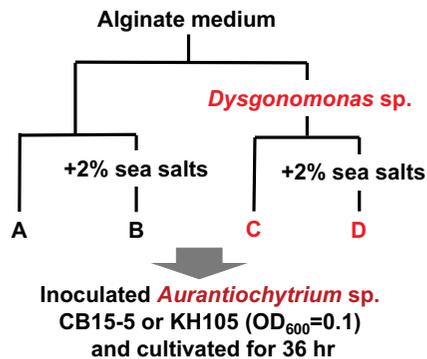


30 g/L glucose  
 $\mu: 0.98$   
 $Y_{X/S}: 0.42$   
 $Y_{TFA/S}: 0.22$



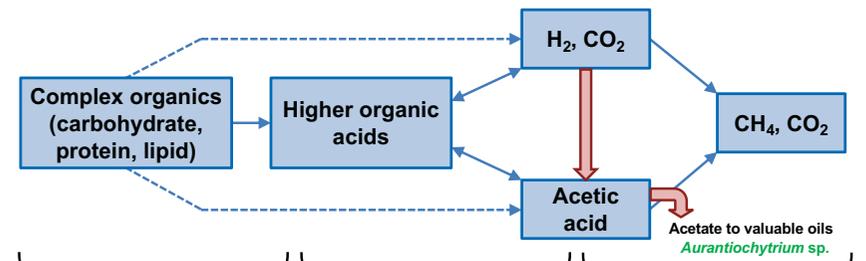
Perez CMT, et al., J. Oleo Sci., 68, 541 (2019)

## 嫌気性微生物ジスゴノナスはアルギン酸からオーランチオキトリウムが資化可能な物質を生成する



## メタン発酵に関わる微生物とその役割

McCarty PL (1982) In Anaerobic Digestion, modified



### Stage 1 Hydrolysis & Acidogenesis

Hydrogen  
*Enterobacter aerogenes*  
2,3-buthandiol  
*Paenibacillus polymyxa*  
Ethyl-3-hydroxybutyrate  
*Paracoccus denitrificans*  
Cellulose degradation  
*Neocallimastix frontalis*  
Starch degradation  
*Pyrococcus friosus*

### Stage 2 Acetogenesis & Dehydrogenation

Cellulose to acetate  
*Clostridium thermoaceticum*  
Acetate and vitamine B12  
*Acetobacterium sp.*  
 $H_2/CO_2$  to acetate/ethanol  
*Moorella sp.*

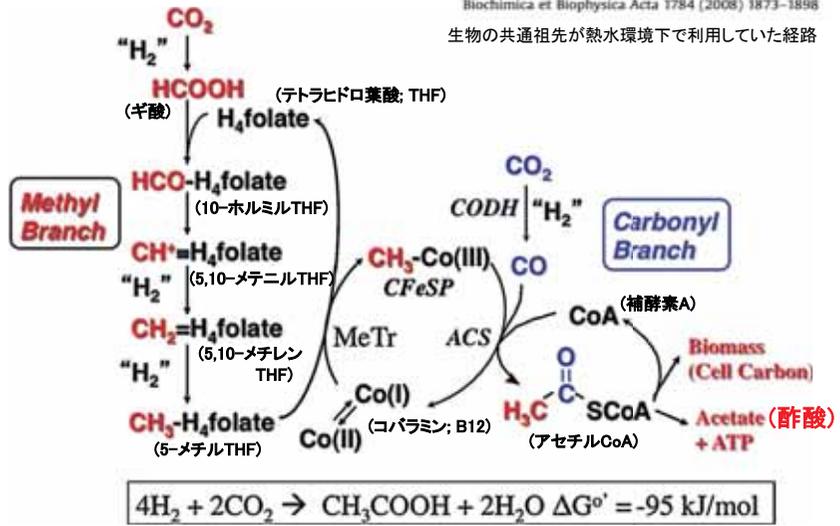
### Acetogens

### Stage 3 Methanogenesis

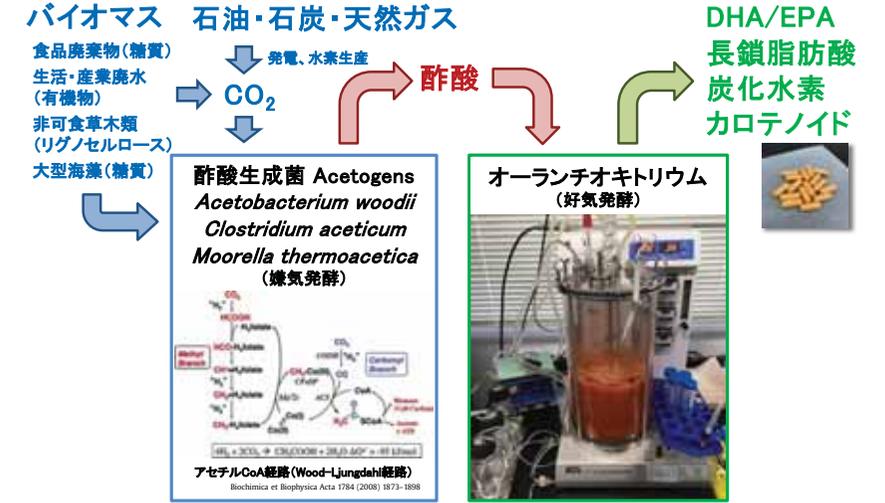
$CO_2$ -formate conversion  
*Methanosarcina barkeri*  
 $H_2/CO_2$  to methane  
*Methanobacterium thermoautotrophicum*  
Acetate to methane  
*Methanosaeta concilli*

# アセチルCoA経路 (Wood-Ljungdahl経路) による炭素固定と酢酸生成

ジュンジャー  
Biochimica et Biophysica Acta 1784 (2008) 1873-1898  
生物の共通祖先が熱水環境下で利用していた経路



# 酢酸生成菌とオーランチオキトリウムの二段階発酵による未利用バイオマスや化石燃料由来ガスからの油脂生産



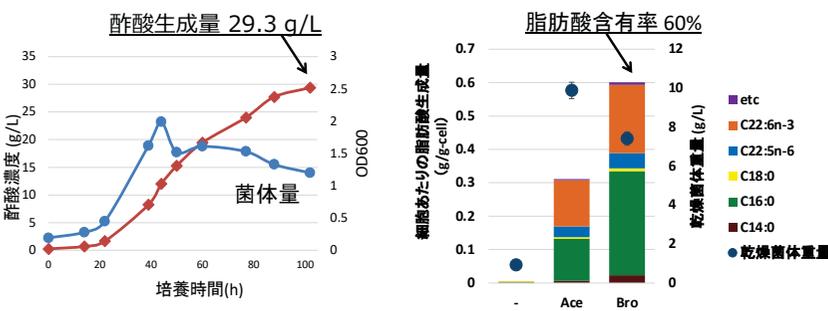
特許第7048056号、PCT/JP2018/047230

# アセトバクテリウムとオーランチオキトリウムの二段階培養によるCO2からの油脂発酵

CO<sub>2</sub> → *Acetobacterium woodii* DSM1030 → 酢酸 → *Aurantiochytrium limacinum* SR21 → 脂肪酸

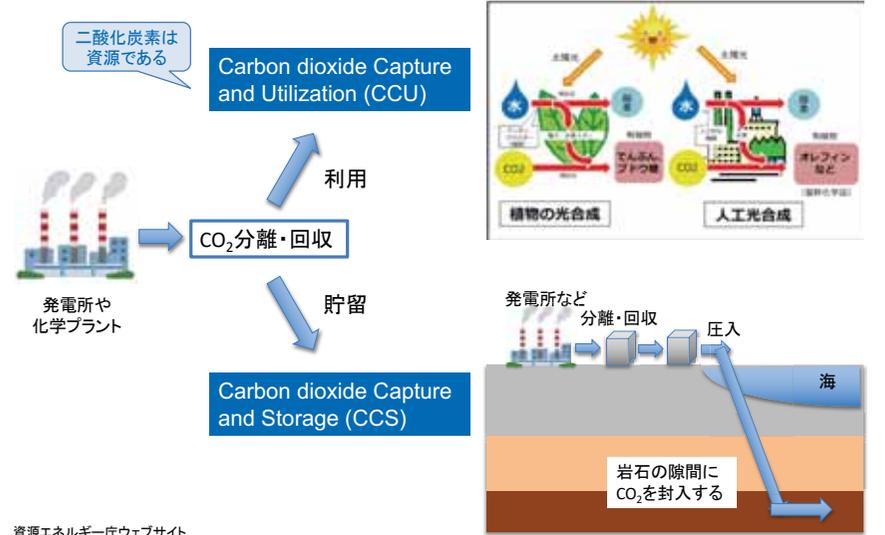
培地：総有機窒素源を0.5%を含む *Acetobacterium* 用培地, pH7.8  
 基質：H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> (6:4)混合ガス  
 培養条件：30℃, 700 rpm

Ac: 標品酢酸約 30 g/Lを含む *Acetobacterium* 用培地  
 Bro: CO<sub>2</sub>を基質とした*A. woodii*培養液(左図)  
 初期pH6.0, 28℃, 250 rpm, 48 h



廣谷蘭ほか、第9回学際的脂質創生研究会(2019)

# 火力発電等のCO2削減技術(CCUS)



資源エネルギー庁ウェブサイト  
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/jinkouku/ugousei.html>

# LNG火力と石炭火力の進化の方向性



# カーボンリサイクル実証研究拠点 (広島県大崎上島)

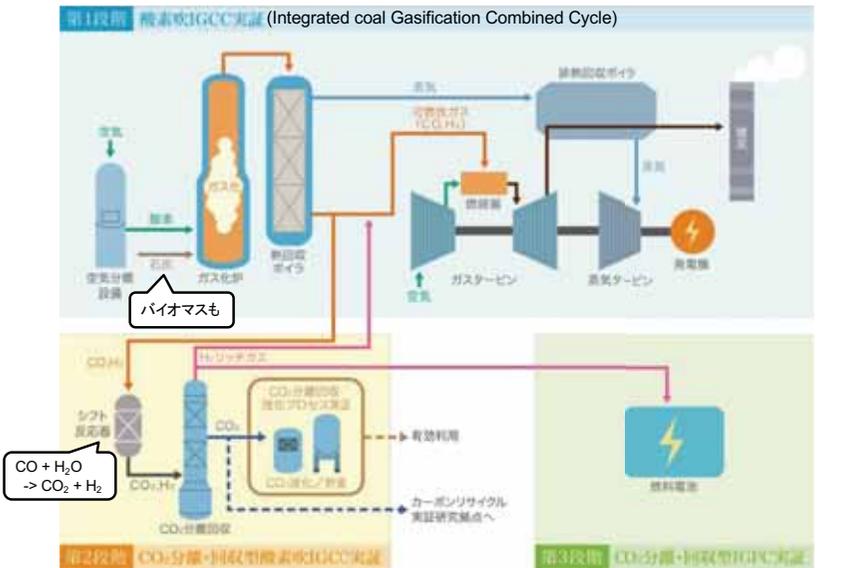


Introduction of R&D and Demonstration Themes

<p>Theme 1</p> <p>Research and Development of Domestic for Chemical use of CO<sub>2</sub></p>	<p>Theme 2</p> <p>Research and Development of Chemical Synthesis Technology for Carbon Recycling</p>	<p>Theme 3</p> <p>Development of a Gas-to-Lipids Bioprocess</p>	<p>Theme 4</p> <p>Research &amp; Development of CO<sub>2</sub> Purification Technology for Industrial Use</p>
<p>Theme 5</p> <p>Research &amp; Development of CO<sub>2</sub> Purification Technology for Industrial Use</p>	<p>Theme 6</p> <p>Research &amp; Development of CO<sub>2</sub> Purification Technology for Industrial Use</p>	<p>Theme 7</p> <p>Research &amp; Development of CO<sub>2</sub> Purification Technology for Industrial Use</p>	<p>Theme 8</p> <p>Research &amp; Development of CO<sub>2</sub> Purification Technology for Industrial Use</p>

<https://osakikamijima-carbon-recycling.nedo.go.jp/>

# 大崎クールジェンプロジェクト



<https://www.osaki-coolgen.jp/project/overview.html>



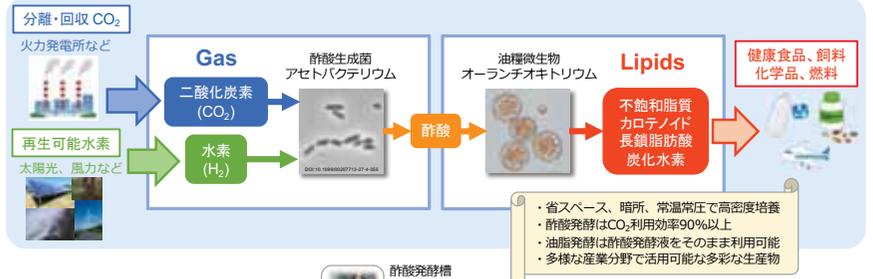
カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/CO2有効利用拠点における技術開発/研究拠点におけるCO2有効利用技術開発・実証事業

# Gas-to-Lipids バイオプロセスの開発

New Energy and Industrial Technology Development Organization



▶火力発電所などから分離・回収されるCO<sub>2</sub>の有効利用技術を確認するため、CO<sub>2</sub>を固定化して酢酸を生成するプロセスと、その酢酸から高付加価値脂質や化学原料などを合成するプロセスからなる二段階発酵によるバイオリアイナー技術『Gas-to-Lipids/バイオプロセス』を開発します。そのため、個別および一貫製造プロセスのベンチスケール試験を行うとともに、環境負荷、技術競争力および実現可能性について評価し、早期の事業化に資する知見を得ることを目的としています。(実施期間：2020~2024年度)



▶実証研究拠点設備 (広島県大崎上島)



この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものです。





カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/CO2有効利用拠点における技術開発/研究拠点におけるCO2有効利用技術開発・実証事業

## Gas-to-Lipids バイオプロセスの開発

New Energy and Industrial Technology Development Organization



### 一貫製造プロセスの構築

詳細設計に基づき、実証サイトの設備整備(地盤整備、テント建設、電気・ガス・水道配管)を行った後、実証サイト内にCO<sub>2</sub>から脂質を製造する一貫製造プロセスのための一連の発酵装置と分析装置を建設した。



研究施設

屋内研究室



H<sub>2</sub>チャンバー内部に酢酸発酵槽を設置

脂質発酵槽など



屋内研究室設備

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものです。



カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/CO2有効利用拠点における技術開発/研究拠点におけるCO2有効利用技術開発・実証事業

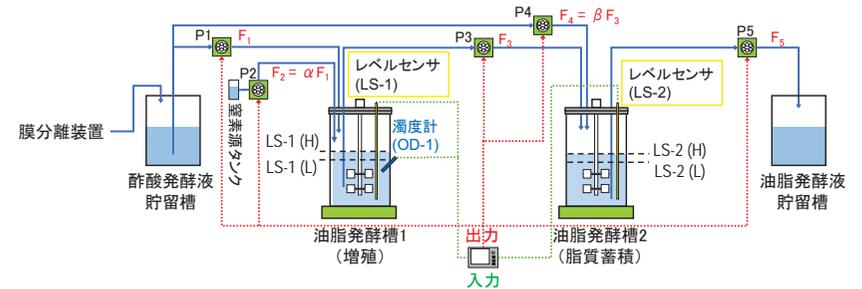
## Gas-to-Lipids バイオプロセスの開発

New Energy and Industrial Technology Development Organization



### 酢酸を原料とした脂質発酵システムの構築

発酵酢酸から多様な有用脂質を生産するための二槽発酵システムを構築した。自動制御装置により、細胞の増殖と脂質の蓄積を連続的に行うことができる。



この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものです。



カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発/CO2有効利用拠点における技術開発/研究拠点におけるCO2有効利用技術開発・実証事業

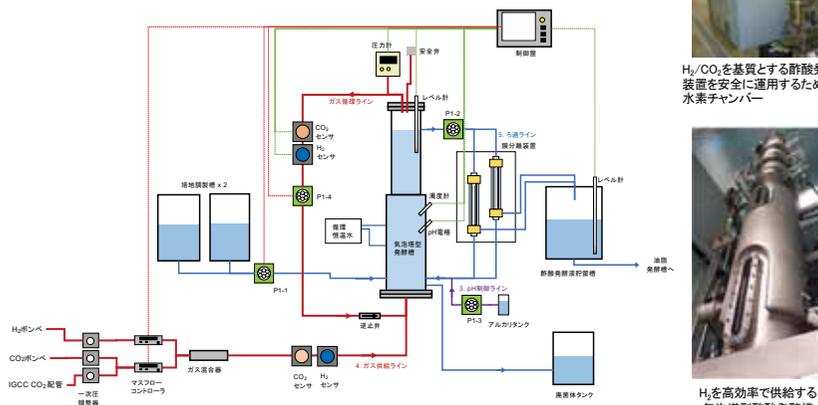
## Gas-to-Lipids バイオプロセスの開発

New Energy and Industrial Technology Development Organization



### CO<sub>2</sub>を再資源化する高効率水素駆動型酢酸発酵技術の確立

酢酸生産量の目標値を達成するため、H<sub>2</sub>や発電試験設備排ガスに含まれるCO<sub>2</sub>に対する安全性を高めた酢酸発酵実証設備を構築した。



H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>を基質とする酢酸発酵装置を安全に運用するための水素チャンバー



H<sub>2</sub>を高効率で供給する気泡塔型酢酸発酵槽

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものです。

## カーボンリサイクル技術の比較

技術名称	Gas-to-Lipids バイオプロセス (今回提案)	微細藻類	フィッシャー・トロプシュ合 成法
生産物	高付加価値油脂 汎用性油脂 (燃料)	高付加価値油脂 汎用性油脂 (燃料)	液体燃料
設備面積	小規模	広大な敷地	小規模
反応触媒	非光合成微生物 (暗所にて高密度)	光合成微生物 (低密度)	Fe (低効率)、Ru (高価)、Co (高価)
エネルギー源	水素 (現状価格でも対応可能)	光 (変換効率が低い)	水素 (10円/Nm <sup>3</sup> 以下が前提)
反応条件	ほぼ常温常圧	ほぼ常温常圧	高温高圧 (放熱用水が必要)
原料炭素利用率	第1段発酵100%、第2段発酵70%程度 (菌体利用含む)	開放系では未利用炭素の回収困難	60% (合成ガスからの軽油生成反応の例)
カーボンリサイクル技術ロードマップ対応フェーズ	フェーズ1~3 (高~低価格、育種株の使い分け)	フェーズ1~3 (高~低価格)	フェーズ2~3 (汎用品のみ)

# カーボンニュートラルコンビナートへの設置を想定



「カーボンニュートラルコンビナートの実現に向けた論点整理(概要)」2022年3月  
カーボンニュートラルコンビナート研究会より

## 「理想の食」から「気候変動対策」まで、人のより良い暮らしに直結する研究を展開中！

<https://home.hiroshima-u.ac.jp/aki/>

