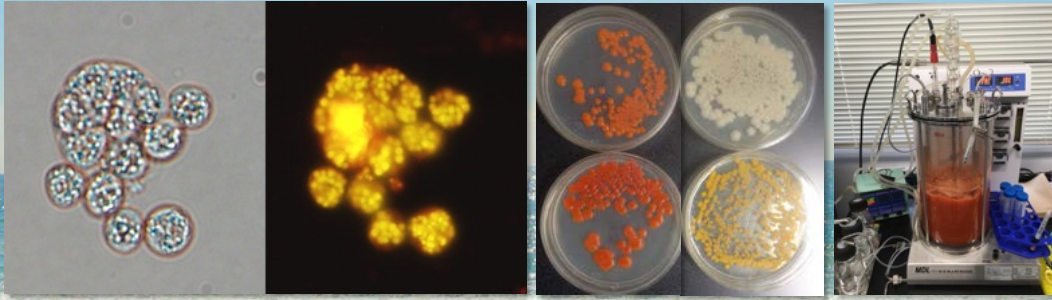


2025年度NEDO人材育成事業／カーボンリサイクル特別講座
 第2回講座 生物由来のカーボンリサイクル技術と環境との調和(2025.6.13)

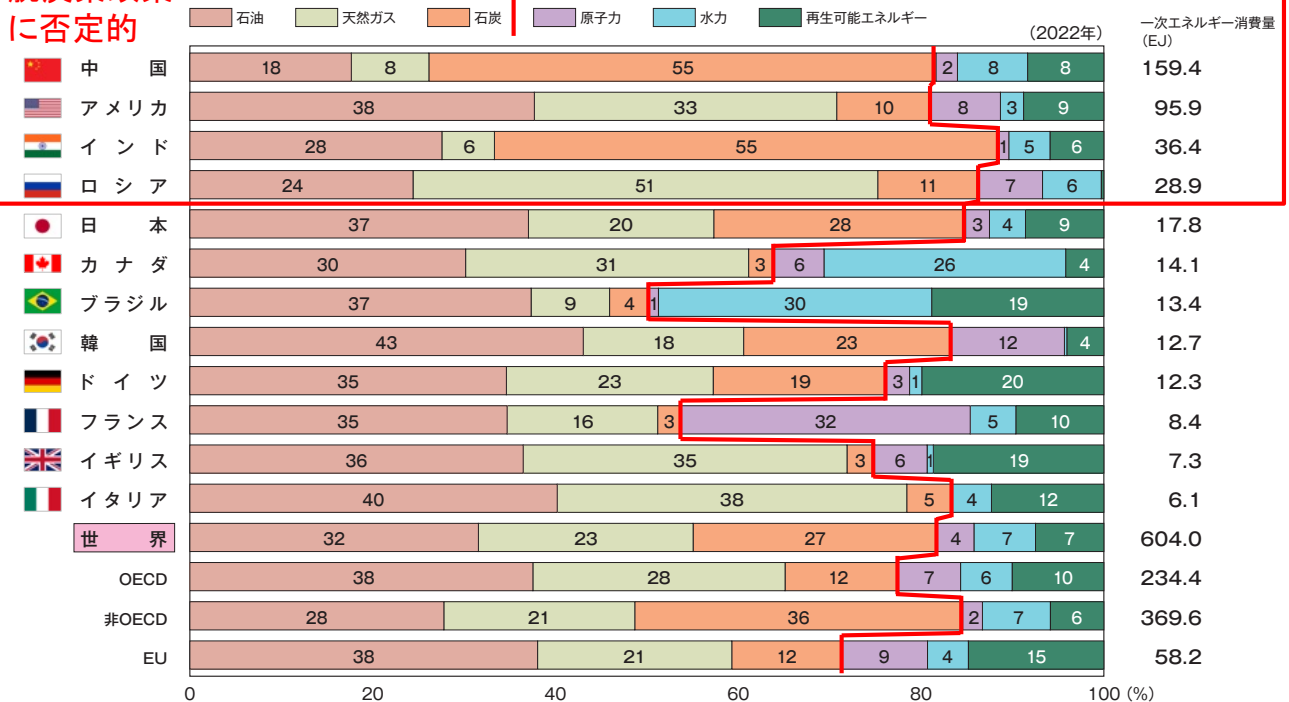
Gas-to-Lipidsバイオプロセス



秋 庸裕(広島大学大学院統合生命科学研究科)

主要国の一次エネルギー構成

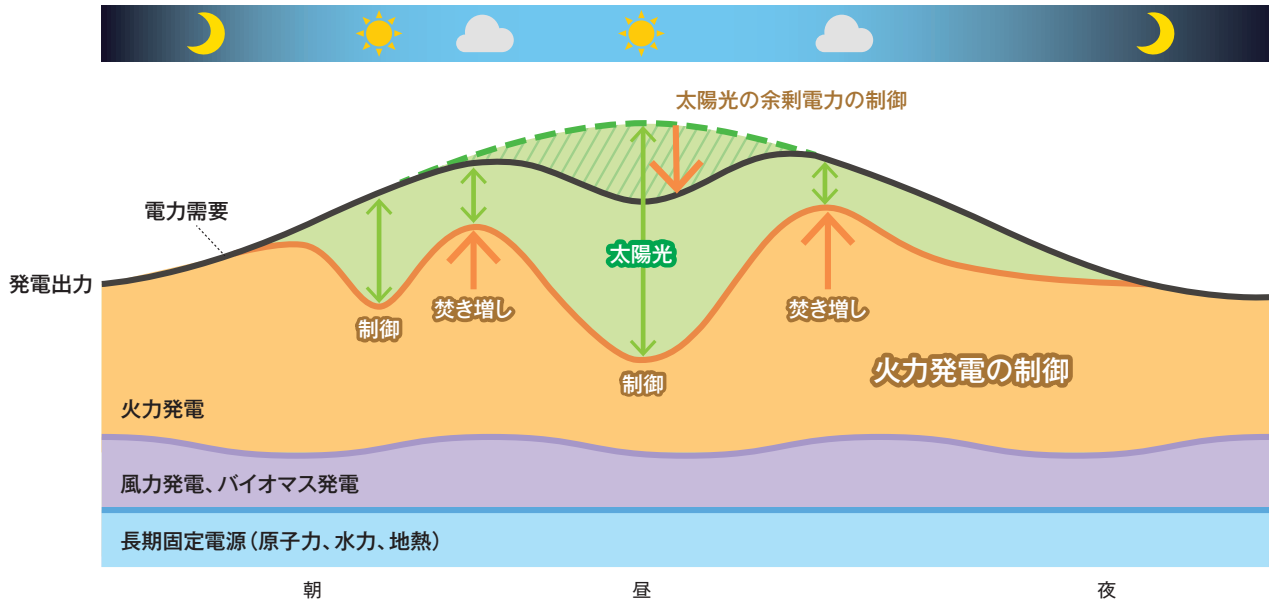
脱炭素政策
に否定的



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある
 1EJ (=10¹⁸J) は原油約2,580万kl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

電力需要に対応した発電方法の組合せ

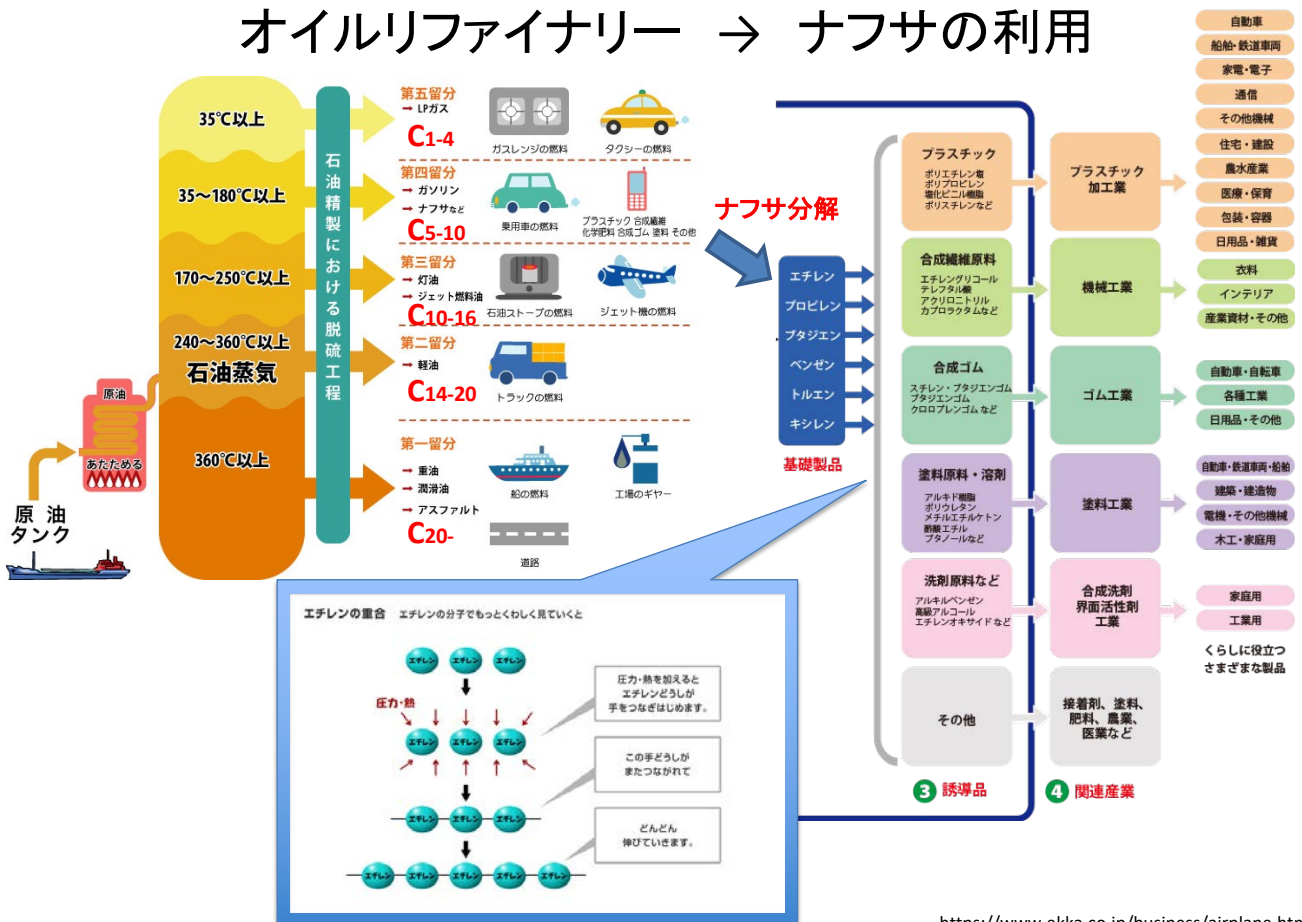
最小需要日(5月の晴天日など)の需給イメージ



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。

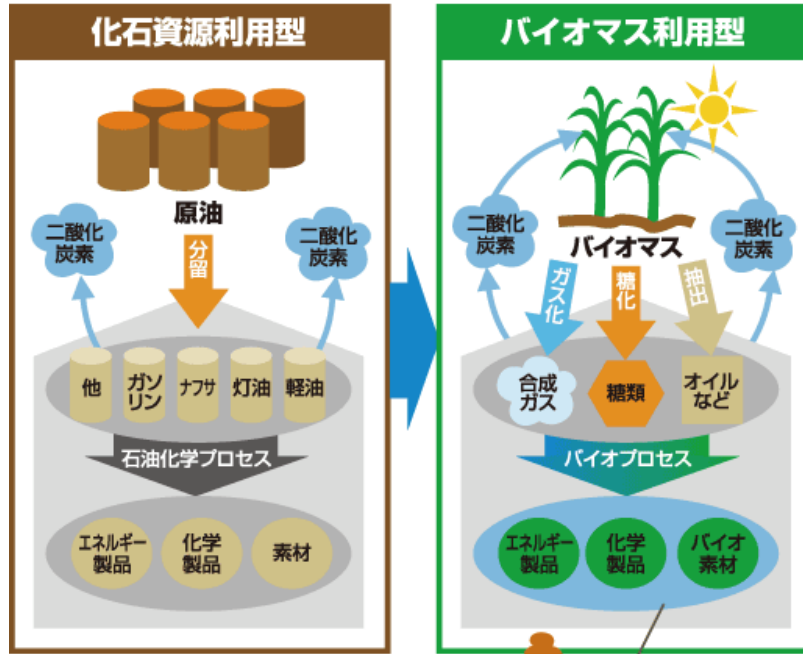
<https://www.ene100.jp>
資源エネルギー庁「日本のエネルギー」より作成

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.meiwakaiun.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

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"> 陸生植物由来 油脂原料：パーム、大豆、菜種、ひまわり等 エタノール：トウモロコシ、サトウキビ等 	<ul style="list-style-type: none"> 非可食原料 油脂原料：ジャトロファ、ポンガミア、廃食油等 エタノール：セルロース系、都市ゴミ等廃棄物、大型藻類 	<ul style="list-style-type: none"> 微細藻類（淡水系、塩水系）
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 主に食用原料として長期間かつ広域に商業化。 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展。 LCA や持続可能性（熱帯雨林伐採等）基準で CO₂ 削減効果の少ないものもある。 	<ul style="list-style-type: none"> 醗酵可能糖への変換や、合成ガス (CO, H₂) に転換した上で、各種プロセスによりエタノールや化学品原料を製造。 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。 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 健康食品や飼料などでは既に商業化されているが、化学品原料やバイオ燃料用途としてはまだ実証段階。 開放型 (Open Pond) ないしは閉鎖型 (Photo Bioreactor) による培養方法。
課題	<ul style="list-style-type: none"> 食糧との競合が不可避。 灌漑など水資源の大量使用による土地の砂漠化。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 化学品原料やバイオ燃料用として大量の培養～油分抽出技術の開発。 藻類そのものの脂質生成能力の向上。

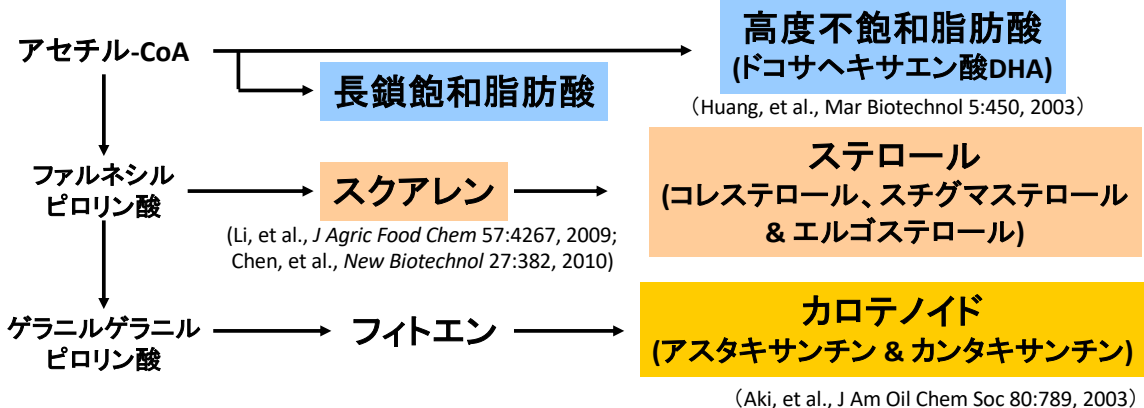
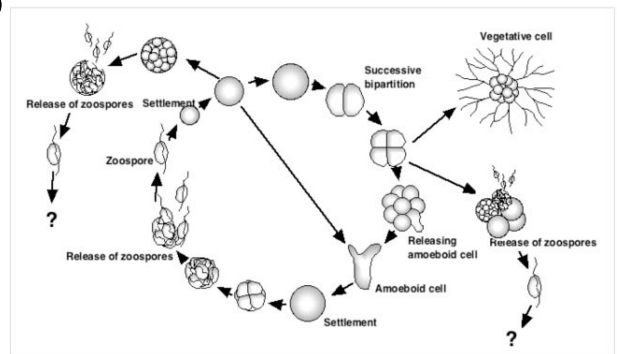
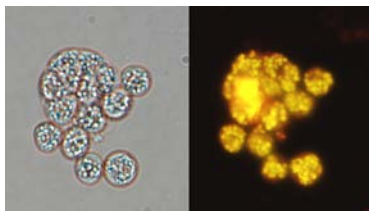
微細藻類燃料の開発状況

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
主要事業者	I H I	J-POWER	DENSO	D I C	藻類産業創成コンソーシアム
共同実施者	ちとせ研究所・神戸大	東京農工大・日揮	中央大・クボタ・出光興産	神戸大・基礎生物学研究所	筑波大
微細藻株	ポトリオコッカス 油分(炭化水素)を体外分泌し、保持する特徴を有する藻。増殖能力の高い株を獲得済みであり、更なる改良も実施。 	珪藻 海洋珪藻オイル成分の分布がサンプル。細胞の付着性がない。自己凝集性がある。 	シュードココミクサ 日本国内の温泉から発見された藻類。酸性条件下で生育可能であり、野外培養に有利。 	クラミドモナス 海産性モデル緑藻の <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> の近縁種 	土着藻類 
目的代替油	ジェット燃料	ジェット燃料	ジェット燃料・ディーゼル	ジェット燃料	ジェット燃料等
開発段階	応用研究 ~ 商用実証へ 鹿儿岛市内に国内最大級(1500㎡)屋外培養設備を構築し、プレ実証試験を開始 	基礎~応用研究(中期) 大型培養槽(円型10㎡、20基・福岡県)により、藻類の連続培養試験を実施中 	基礎~応用研究(中期) 60㎡培養槽(レースウェイ型・愛知県)における、藻類の試験培養を実施中 	基礎~応用研究(中期) 25㎡屋外レースウェイ培養槽を設置し(米国)、屋外培養を実施中 	基礎研究 
研究開発の概要	屋外大規模培養実証を実施中 商用スケールに向けた課題抽出 海外での培養適性評価試験の実施 発電所等の排CO2の有効利用検討 等	屋外培養条件の確立、育種 屋外における半連続培養等の最適化 遺伝子組換えによる育種技術の確立 耐冷性株併用による過冬培養の検討	屋外培養条件の確立、育種 屋外における培養条件の最適化 遺伝子組換え株の商用利用手法確立 藻の省エネ、低コスト回収技術開発	屋外培養条件の確立、育種 屋外における培養条件の最適化 遺伝子組換えによる育種技術確立 代謝解析による油分向上技術検討	福島県内に存在する再生可能エネルギー資源(土着藻類)を活用し、次世代の技術開発を実施。
研究開発支援状況	24年度からNEDO事業(戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業)にて実施。	25年度からNEDO事業(戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業)にて実施。	23年度からNEDO事業(戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業)にて実施(中央大上)。25年度から別のNEDO事業実施(中央大、クボタ、出光興産と)	24年度からNEDO事業(戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業)にて実施。	25年度~27年度まで上記事業を実施。

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)

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%)



食品市場に出されている機能性脂質

高度不飽和脂肪酸 赤文字:オーランチオキトリウムが生産可能

ドコサヘキサエン酸(DHA): 動脈硬化・腫瘍・炎症抑制、脳神経系機能など
エイコサペンタエン酸(EPA): 血栓・動脈硬化・炎症抑制、中性脂肪低下など
共役脂肪酸: 脂質代謝改善、体脂肪低下、動脈硬化抑制、免疫調節など

ジアシルグリセロール: 体脂肪・コレステロール・空腹時血糖低下など

中鎖脂肪酸含有脂質: 体脂肪蓄積抑制など

リン脂質(レシチン): 高度不飽和脂肪酸の効果向上

アスタキサンチン: 抗酸化、免疫機能増強、抗癌など

スクアレン: “酸素の運び屋”、肝炎改善、抗癌、抗炎症、皮膚保護効果など

コエンザイムQ10: 抗酸化、心不全改善・予防、免疫賦活など

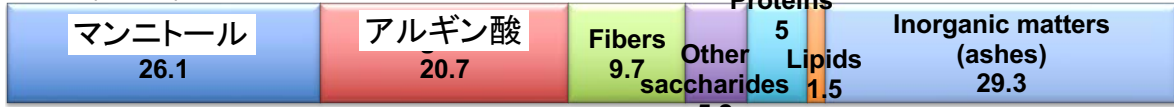
植物ステロール: 血中コレステロール低下、前立腺肥大抑制、血圧上昇阻害

有用油脂を生産する独立・従属栄養微生物

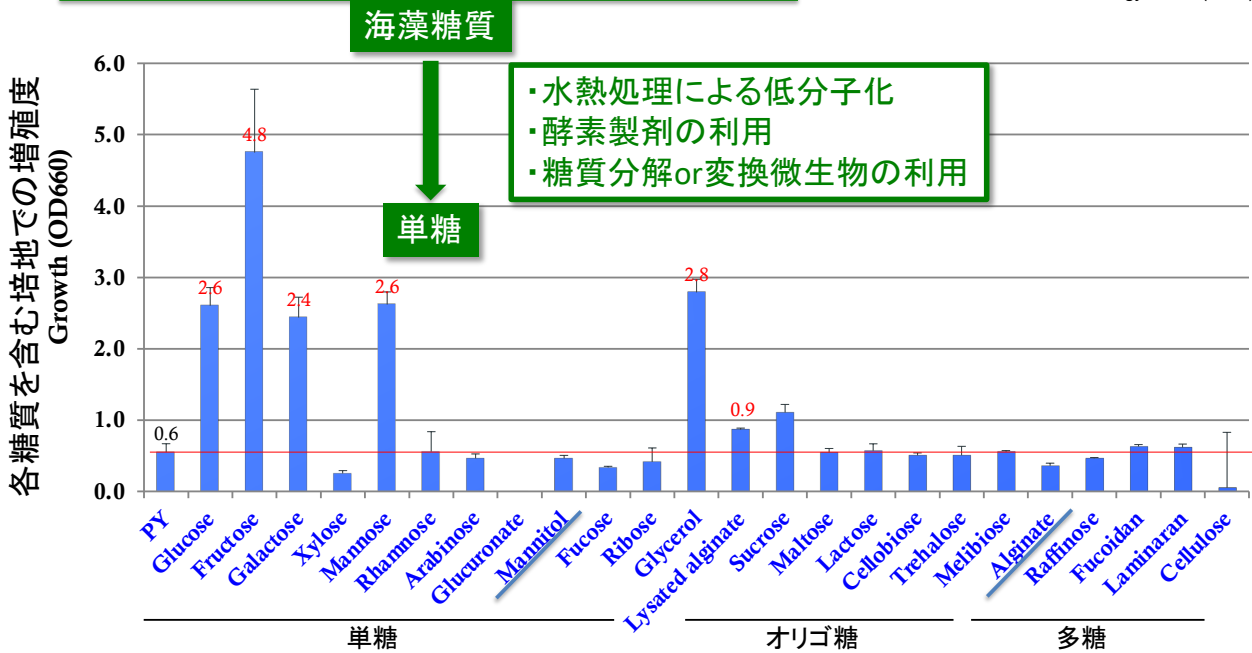
	独立栄養(光合成)藻類	従属栄養微生物
代表的な油脂生産種	・ユーグレナ ・ナンノクロロプシス ・シュードコリスチス ・ボトリオコッカス	・コリネバクテリウム(細菌) ・モルティエセラ(真菌) ・ <u>オーランチオキトリウム</u> (ストラメノパイル/不等毛類)
栄養源・低炭素対応	塩類、ビタミン、微量元素(CO ₂ 固定) 糖類含有培地での光従属栄養も可	食品廃棄物、生活廃水、未利用草木、大型海藻等のバイオマス利用で低コスト・低炭素循環
増殖速度	概ね低速でコスト高	培養条件の調整で高速化
細胞密度	低め(国内での太陽光は不安定・不十分、電灯はコスト高)	暗所で高密度化
培養設備	光照射のため薄い形態→面積大	形態自由、積層可能→面積小

オーランチオキトリウム属は主要海藻糖質を直接資化できない

褐藻 (コンブ), 乾燥重量%



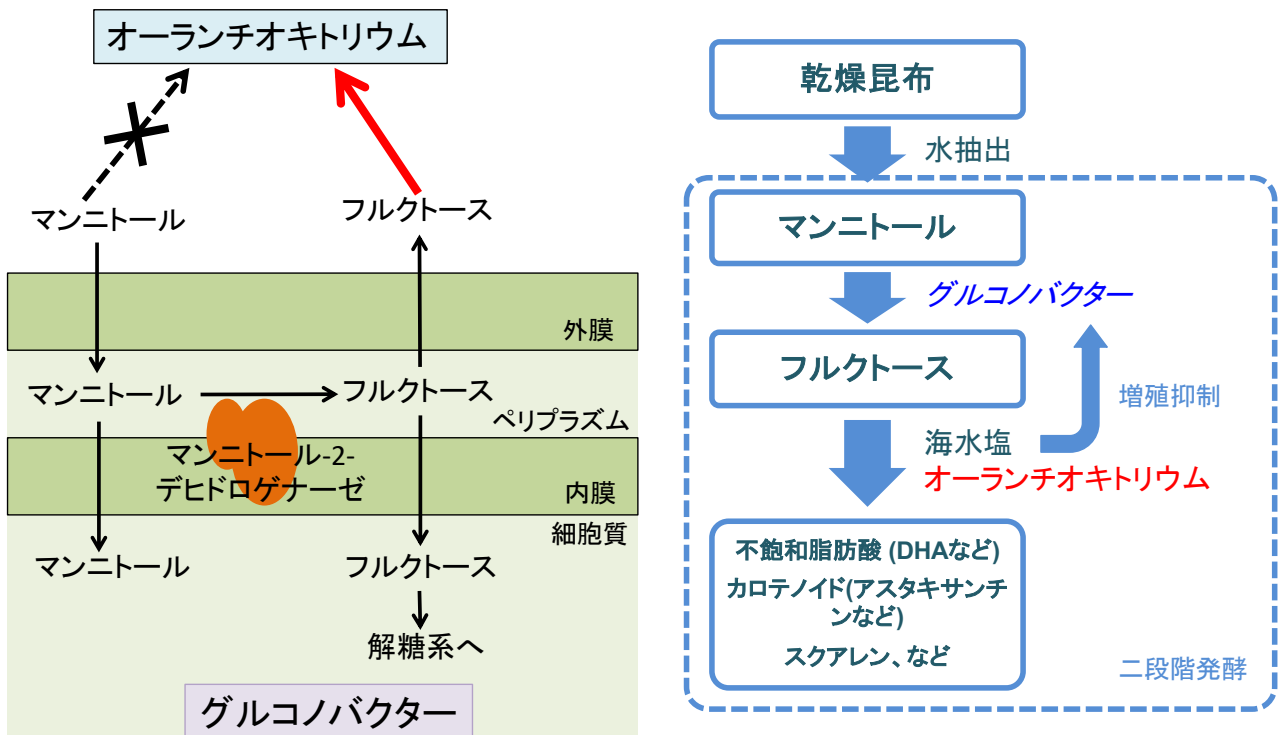
M. Sato, Seaweeds Bioenergy, CMC (2011)



Aurantiochytium sp. KH105 was cultivated in liquid medium (0% (PY) or 1% each saccharide, 0.6% peptone, 0.2% yeast extract, 2% sea salts, pH 7.0) for 3 days at 28°C, 140 rpm (n=3).

Arafiles K, et al., *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 98, 9207 (2014)

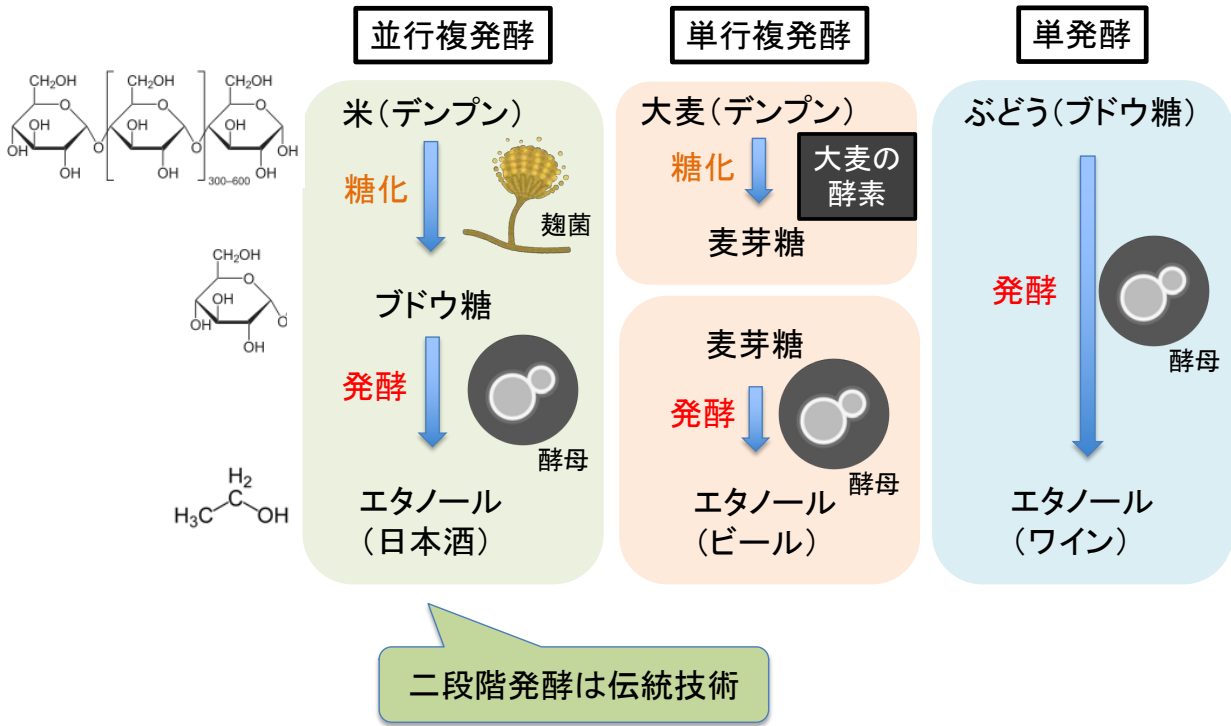
グルコノバクターとオーランチオキトリウムの二段階培養による大型藻類からの有用脂質の生産



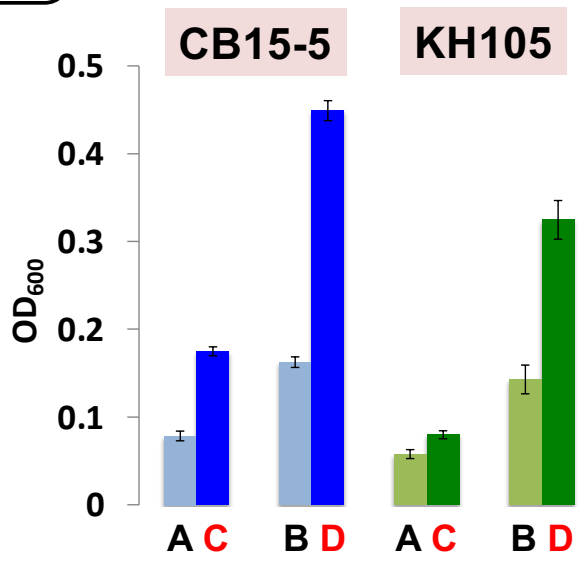
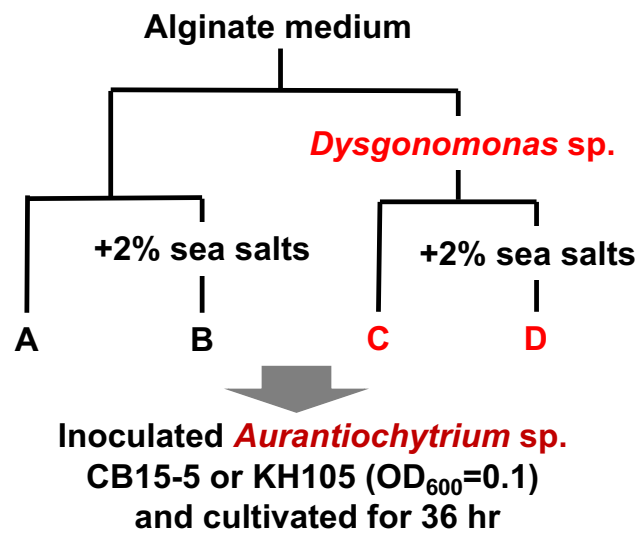
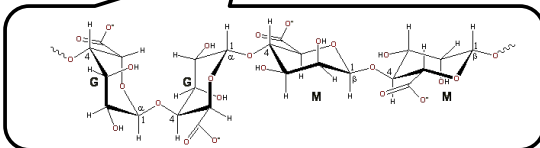
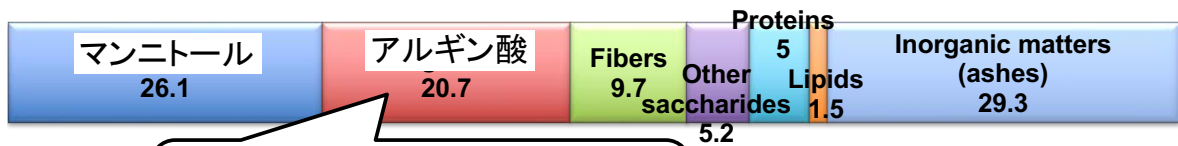
Richardt et al., *AEM*, 01166, (2012)

Arafiles K, et al., *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 98, 9207 (2014)

醸造酒の製造工程



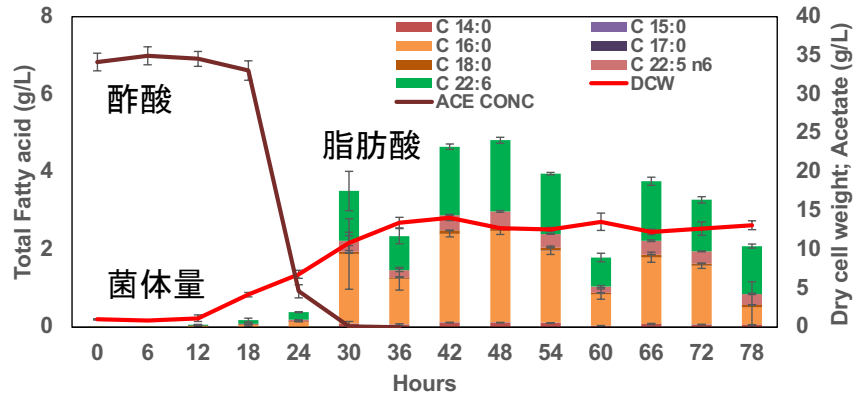
嫌気性微生物ジスゴノモナスはアルギン酸からオーランチオキトリウムが資化可能な物質を生成する



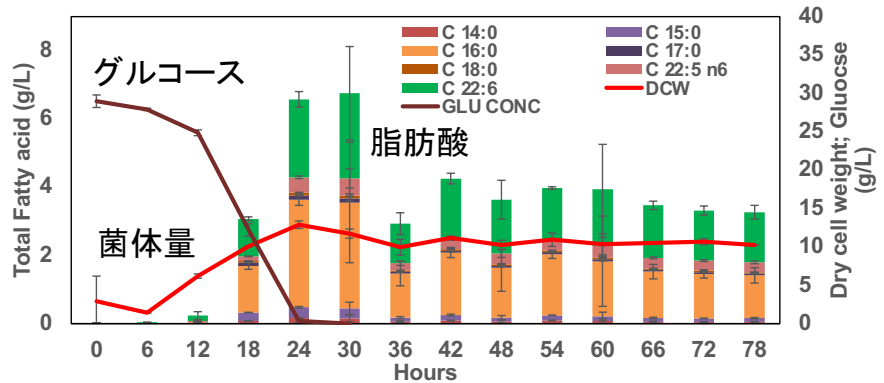
酢酸を炭素源としたオーランチオキトリウムによる油脂生産

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
 μ : 0.55
 $Y_{X/S}$: 0.47
 $Y_{TFA/S}$: 0.16



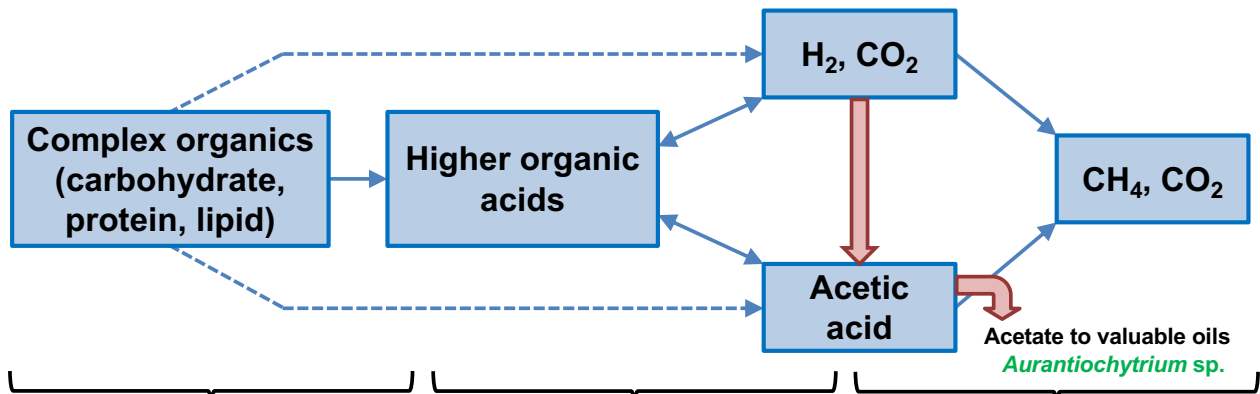
30 g/L glucose
 μ : 0.98
 $Y_{X/S}$: 0.42
 $Y_{TFA/S}$: 0.22



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

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

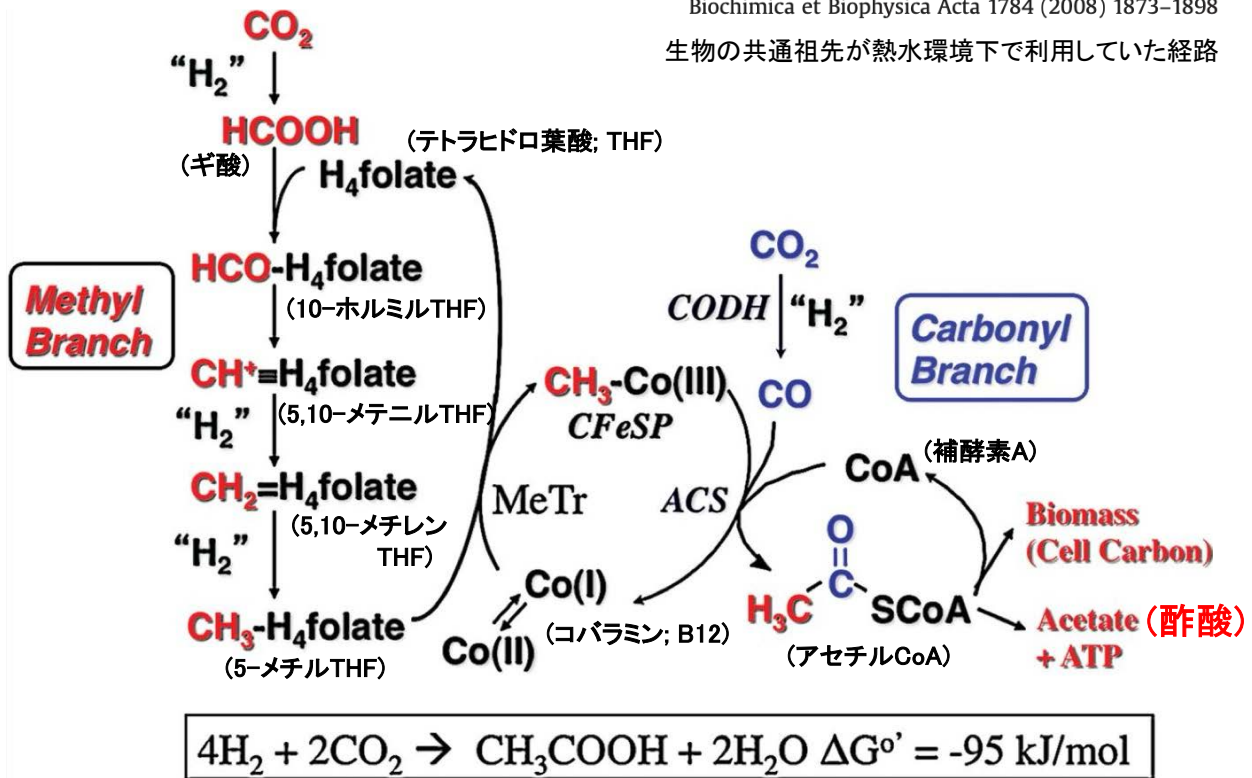
CO_2 -formate conversion
Methanosarcina barkeri
 H_2/CO_2 to methane
Methanobacterium thermoautotrophicum
 Acetate to methane
Methanosaeta concilli

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

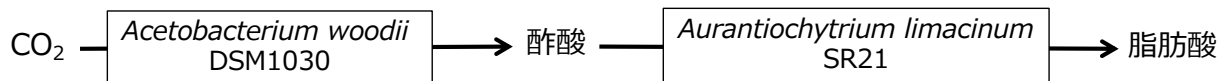
ジュンジャー

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



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



培地: 総有機窒素源を0.5%を含む
Acetobacterium用培, pH7.8

基質: H₂/CO₂ (6:4)混合ガス

培養条件: 30°C, 700 rpm

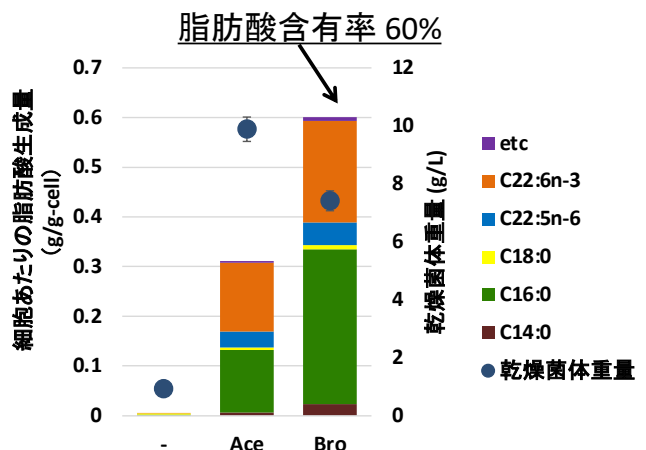
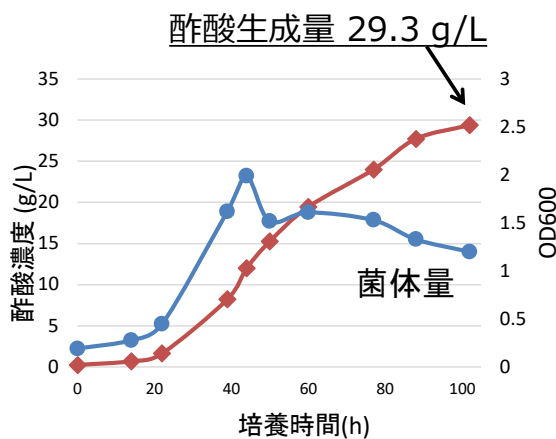
-: Acetobacterium用培地のみ

Ace: 標品酢酸約 30 g/Lを含む

Acetobacterium用培地

Bro: CO₂を基質としたA. woodii培養液(左図)

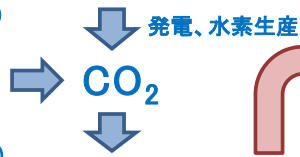
初期pH6.0, 28°C, 250 rpm, 48 h



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

バイオマス 石油・石炭・天然ガス

食品廃棄物(糖質)
生活・産業廃水(有機物)
非可食草木類(リグノセルロース)
大型海藻(糖質)



酢酸

DHA/EPA
長鎖脂肪酸
炭化水素
カロテノイド



酢酸生成菌 Acetogens
Acetobacterium woodii
Clostridium aceticum
Moorella thermoacetica
(嫌気発酵)

アセチルCoA経路(Wood-Ljungdahl経路)
Biochimica et Biophysica Acta 1784 (2008) 1873-1898

$4H_2 + 2CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 2H_2O \Delta G^\circ = -95 \text{ kJ/mol}$

オーランチオキトリウム (好気発酵)



特許第7048056号、PCT/JP2018/047230

火力発電等のCO₂削減技術(CCUS)

二酸化炭素は資源である

Carbon dioxide Capture and Utilization (CCU)



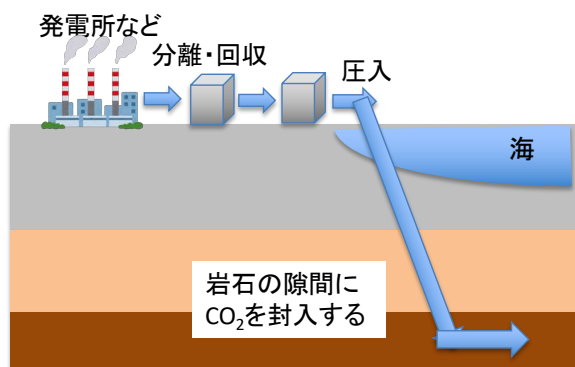
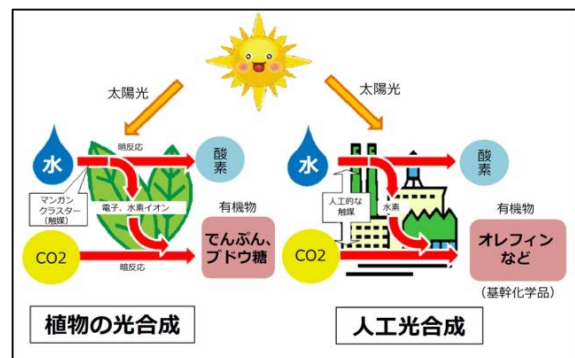
発電所や化学プラント

CO₂分離・回収

利用

貯留

Carbon dioxide Capture and Storage (CCS)

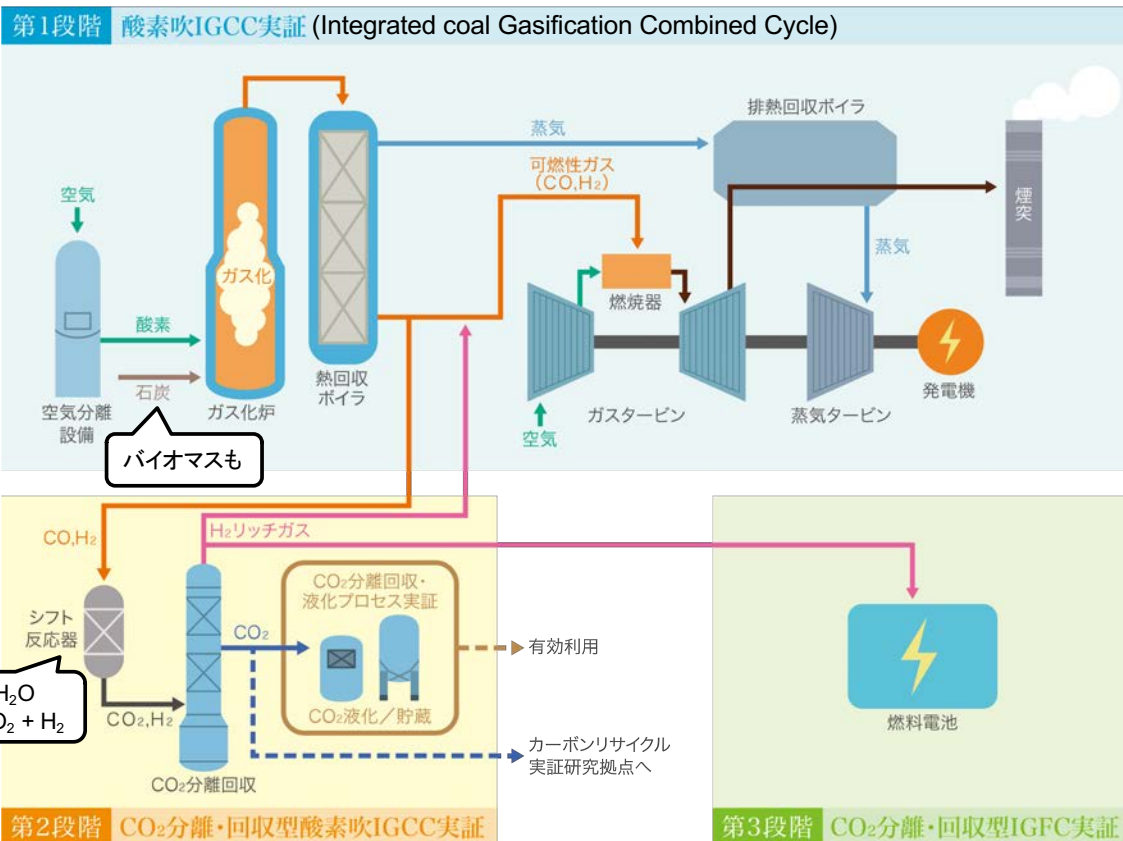


LNG火力と石炭火力の進化の方向性



2022年6月「脱炭素火力発電に係る技術ロードマップ」(経済産業省)

大崎クールジェンプロジェクト



カーボンリサイクル実証研究拠点(広島県大崎上島)



実証研究エリア 研究テーマ1 CO ₂ 有効利用コンクリートの研究開発 CO ₂ を固定化する対象も、建物の構造物などに使用される鉄筋コンクリート製品や電線杆打設コンクリート構造物へ応げる技術を開発します。	実証研究エリア 研究テーマ2 カーボンリサイクルを志向した化成基調合成技術の研究開発 ペットボトルなどの原料となる「エチレングリコール」をCO ₂ から効率良く製造可能とするための触媒およびプロセスの開発を実施します。	実証研究エリア 研究テーマ3 Gas-to-Lipids バイオプロセスの開発 CO ₂ から酢酸を製造し、高付加価値脂質や化学品原料を合成する二段階発酵プロセスによるバイオリファイナリー技術を開発します。
基礎研究エリア 研究テーマ4 経路選別由来 SAF の製造に係る研究開発	基礎研究エリア 研究棟	基礎研究エリア 共用棟

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

Introduction of R&D and Demonstration Themes

Theme 1 Research and development of Concrete for Effective Use of CO ₂ Concrete Product: Road Blocks, etc. Cast In-Place Concrete: Dams, River Structures, etc. Tunnel, Waterways, etc. Subbridge, Bridge, etc.	Theme 2 Research and Development of Chemical Selective Synthesis Technology for Carbon Recycling Ethanol Synthesis from CO ₂ Polyethylene Synthesis from CO ₂ Paraxylene (PX) (monomer) PET bottles, Textile Products	Theme 3 Development of a Gas-to-Lipids Bioprocess Thermal Power Plant CO ₂ Separation Unit Gas-to-Lipids Bioprocess Ethanol, Chemicals, Plastics, etc.	Theme 4 Establishing a research base and developing technologies that lead to increased CO ₂ utilization rate for the production of microalgae-derived SAF Microalgae cultivation EPA, Fats/oils Feedstock for sustainable aviation fuel	Theme 5 Research & Development of CO ₂ Fixation by Microalgae and High-Value Ingredients Production Microalgae cultivation EPA, Fats/oils Feedstock for sustainable aviation fuel
Theme 6 A novel CO ₂ decomposition and reduction process using atmospheric pressure plasma CO ₂ decomposition CO, H ₂ , etc. CO ₂ fixation Urea	Theme 7 Production of Value-added Chemicals from CO ₂ Using Boron-doped Diamond Electrodes CO ₂ fixation CO ₂ fixation CO ₂ fixation CO ₂ fixation	Theme 8 Research and development of carbon recycled LP gas manufacturing technology and process CO ₂ fixation LP gas synthesis technology LP gas synthesis technology	Theme 9 R&D for synthesis of silicon carbide derived from industrial waste using CO ₂ as a carbon source Industrial waste CO ₂ fixation Silicon carbide	Theme 10 Development of algal biomass production and application technologies enabling high efficient CO ₂ utilization CO ₂ fixation Algal biomass Algal biomass



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CO₂の有効利用技術を確認するため、CO₂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品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ファイナリー技術『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。

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CO₂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



H₂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。

CO₂を再資源化する高効率水素駆動型酢酸発酵技術の確立

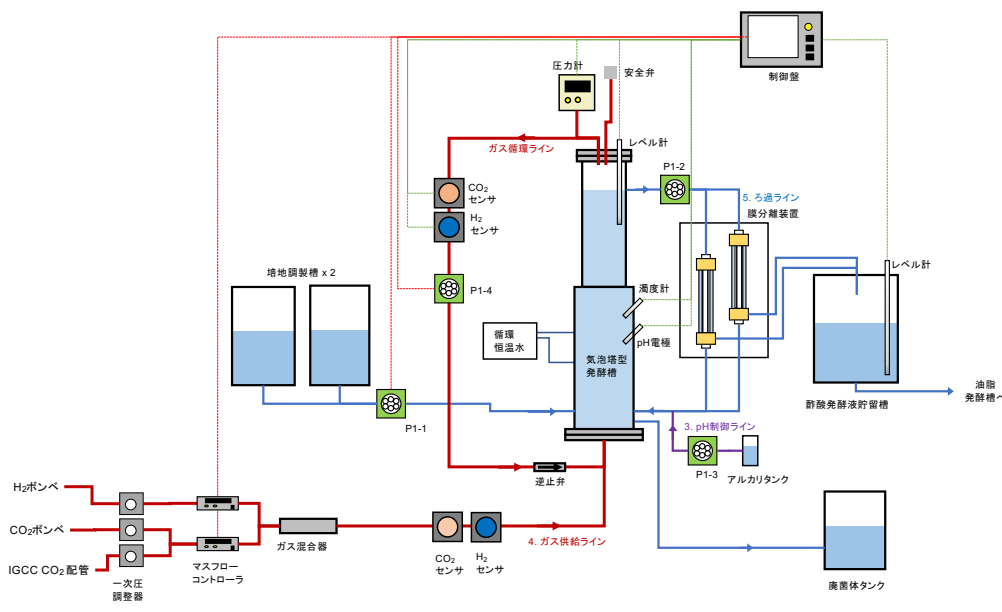
酢酸生産量の目標値を達成するため、H₂や発電試験設備排ガスに含まれるCO₁に対する安全性を高めた酢酸発酵実証設備を構築した。



H₂/CO₂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



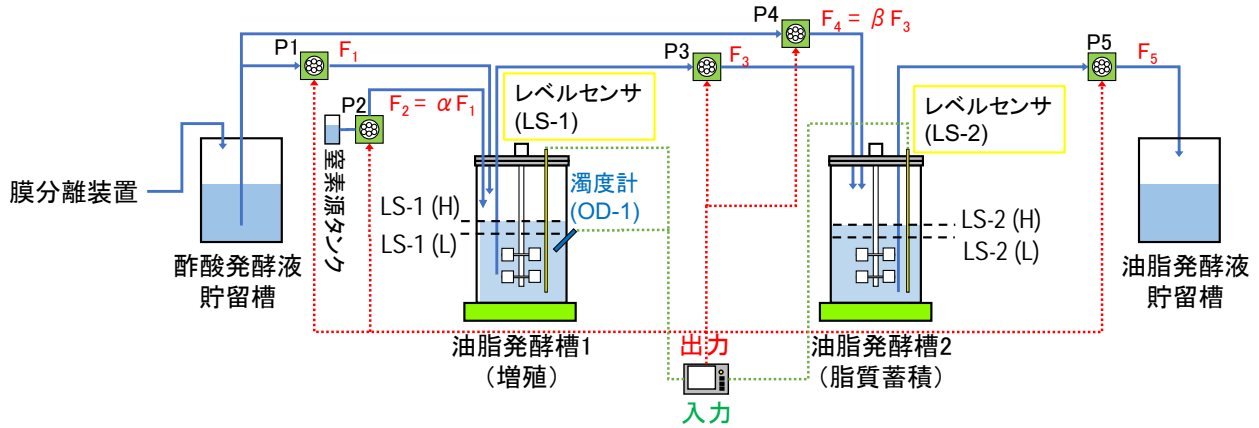
H₂を高効率で供給する気泡塔型酢酸発酵槽



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。

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 ³ 以下が前提)
反応条件	ほぼ常温常圧	ほぼ常温常圧	高温高压(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%(合成ガスからの軽灯油生成反応の例)
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)

