

微細藻類由来バイオマスを活用した産業利用に係る研究開発



2025年6月13日

カーボンリサイクル特別講座 ワークショップ

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【専門コース】

■ IMATは広島県大崎上島の大崎発電所構内において微細藻類の産業応用に資する活動を行っています。



大崎クールジェン
(大崎発電所構内)

カーボンリサイクル実証拠点



基礎研究エリア

実証研究エリア

藻類研究エリア(IMAT)

長島（広島県）航空写真



IMAT 基盤技術研究所

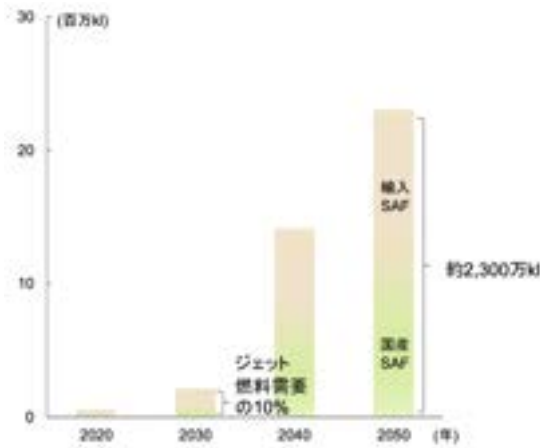


IMAT基盤技術研究所 大崎上島拠点
- 2022年4月開所



IMAT基盤技術研究所 産業支援施設
- 2024年9月竣工

日本のジェット燃料需要



日本・米国におけるSAF目標

	SAF導入比率			備考
	2025年	2030年	2050年	
日本	-	10% (約2.5～5.6百万kl)	-	・ 政府目標(国内線・国際線)
米国	-	約8%製造 (11百万kl)	100%製造 (130百万kl)	・ 政府目標 ・ 製造資金支援(総額43億ドル)、税制優遇を検討中

出所：SMBCLレポート 持続可能な航空燃料（SAF）国産化に向けた取組と事業機会

国内でのSAF製造可能量について（2050年予測）

- 推測 1：未利用量のみSAFに振り向ける場合
- 推測 2：未利用量に加え発電用等バイオマス以外の供給源がある既利用分をSAFに振り向ける場合
- 推測 3：全ポテンシャルをSAFに振り向ける場合

	廃棄物	廃食油	植物油脂	バイオマス糖	木質バイオマス	CO ₂ ・水素	製造可能量
推測1	20 万kl	5.0 万kl	3.2 万kl	-	164 万kl	514 万kl※	760 万kl
推測2	377 万kl	5.6 万kl	3.2 万kl	-	186 万kl	514 万kl※	1,086 万kl
推測3	424 万kl	21 万kl	3.2 万kl	2.3 万kl	347 万kl	514 万kl※	1,312 万kl

出所：運輸総合研究所「我が国におけるSAFの普及促進に向けたサプライチェーン全体の課題・解決策」

※ CO₂・水素については2030年における水素供給目標

将来の国内SAF需要をカバーするには、持続的に供給可能なSAF製造が必要

IMAT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からの委託業務を受託しています

<事業名> 微細藻類由来バイオジェット燃料生産の産業化とCO₂利用効率向上に資する拠点整備・技術開発

- <内 容>
- ① 複数のアプローチによる技術検証が可能な微細藻類研究拠点の整備
 - ② 微細藻類の生産における各種工程の手法・条件の標準化

<期 間> 2020年8月～2025年3月

1 研究拠点の設備

安定したデータの取得と複数のアプローチによる技術検証が可能な屋内研究拠点を整備します。

◆特徴①

光・水温制御により世界各地の気候を再現可能な3種の培養設備を導入



◆特徴②

乾燥、成分抽出・分析など、藻類生産に関する一連の工程の技術検証が可能



2 手法・条件の標準化

微細藻類の生産における標準手法・標準条件を整備し、それらを用いて標準参照値の取得を行います。

◆培養

- 環境条件（光、水、栄養等）
- 設備稼働条件（水深、曝気量、流速等）
- 標準（推奨）手法

◆乾燥、抽出

- 装置稼働条件（温度、時間、溶媒等）
- 標準（推奨）手法

◆分析

- 必要（推奨）分析項目
- 装置稼働条件
- 標準（推奨）手法

◆成果の表記

- 生産性の表記法
- 製品に含まれる藻類の割合表記

3 排ガス利用・分析

大崎クールジェンから供給されるCO₂を用いて微細藻類の培養試験を実施し、産業化に必要な各種分析を実施します。



CO₂の利用

◆要点

- 排ガス由来のCO₂の利用
- 標準手法・条件の利用
- 微細藻類の生産における技術経済分析、環境影響分析の実施

4 モデルケース作成

取得したデータと他のNEDOプロジェクトにおいて得られた実証データを比較・分析し、産業化に必要な知見を取得、提案する。

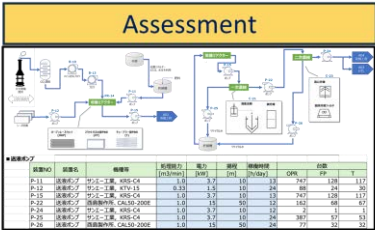


産業化に有用な情報の整理

モデルケースの作成・提案

微細藻類関連技術の研究基盤構築およびその成果の公正な比較・評価を通じて、
微細藻類由来バイオジェット燃料の産業化に貢献する

IMATでは微細藻類の産業支援を目的とし、以下のリソースを保有しています。



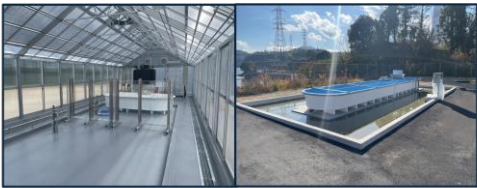
【プロセスフロー解析】
【GHG排出量の計算】



【工程の産物評価】
【バイオマスのポテンシャル評価】

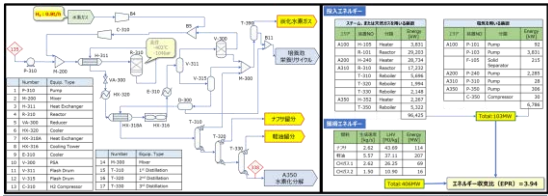
今回は、微細藻類産業化の課題解決のための検討事項として、以下の3点を紹介します。

- ・微細藻類種の比較のための培養・分析条件の標準化
- ・大規模実証時のプロセス評価事例
- ・屋外安定培養に資する培養環境の把握



Field verification

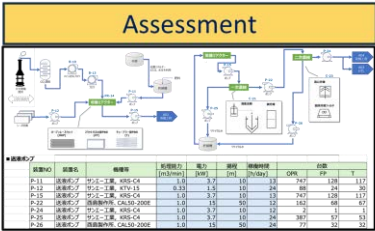
【屋外での安定性、コンタミネーション評価】
【育種株の安全性評価】



Process simulation

【専用ソフトを用いたプロセス設計】
【エネルギー収支比、コスト計算】

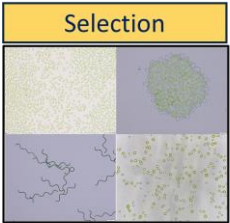
IMATでは微細藻類の産業支援を目的とし、
以下のリソースを保有しています。



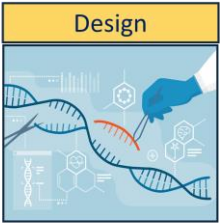
【プロセスフロー解析】
【GHG排出量の計算】



【工程の産物評価】
【バイオマスのポテンシャル評価】



【産業価値の高い株を選定】
【株の基礎データ取得】



【産業株の更なる高機能化】
【安定培養のための菌叢解析】



【気象条件を模擬した培養設備】
【安定したバイオマス生産】



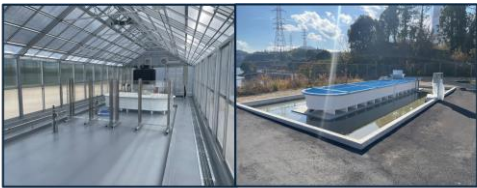
【藻類の性状に合わせて選定】
【環境負荷の少ない手法提案】



【抽出・分析サンプル調整】
【用途に合わせた手法選定】

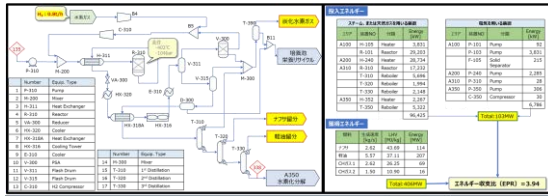


【スケラブルな抽出設備】
【多様なバイオマスを検討可能】



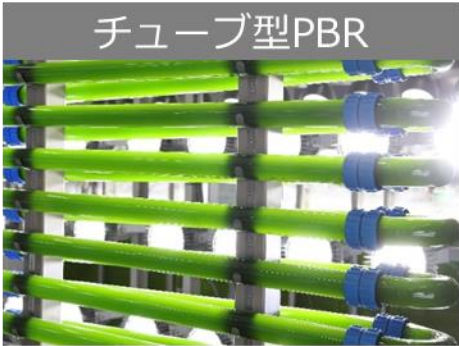
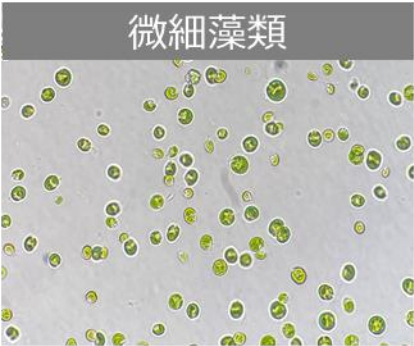
Field verification

【屋外での安定性、コンタミネーション評価】
【育種株の安全性評価】



Process simulation

【専用ソフトを用いたプロセス設計】
【エネルギー収支比、コスト計算】

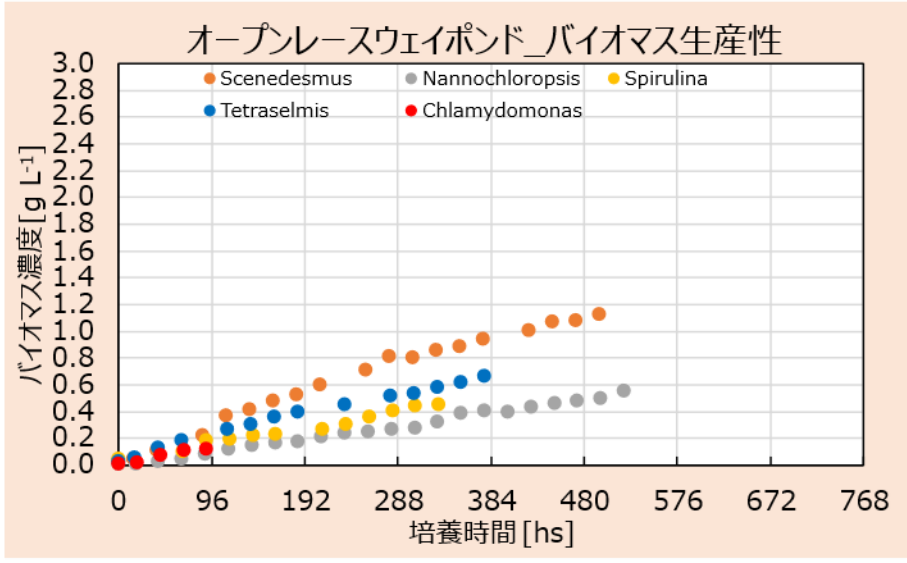
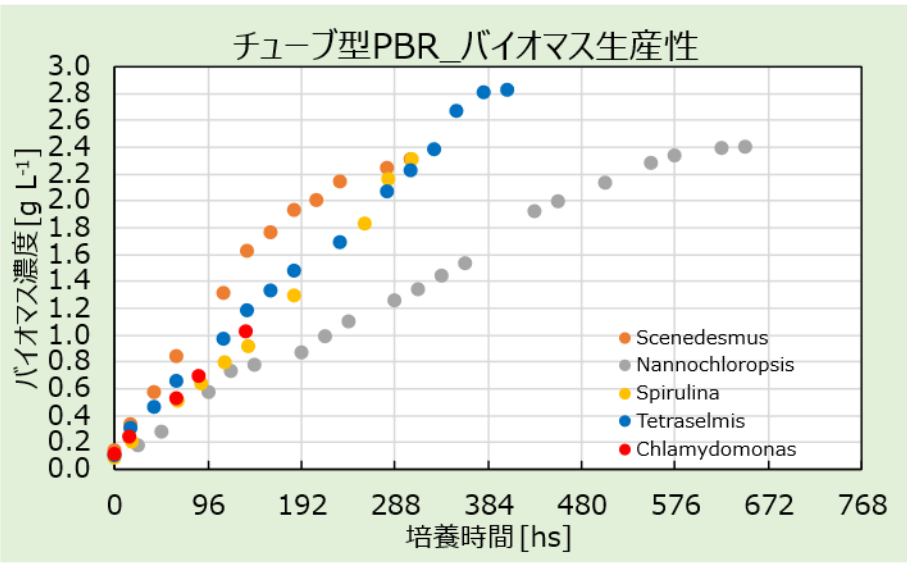
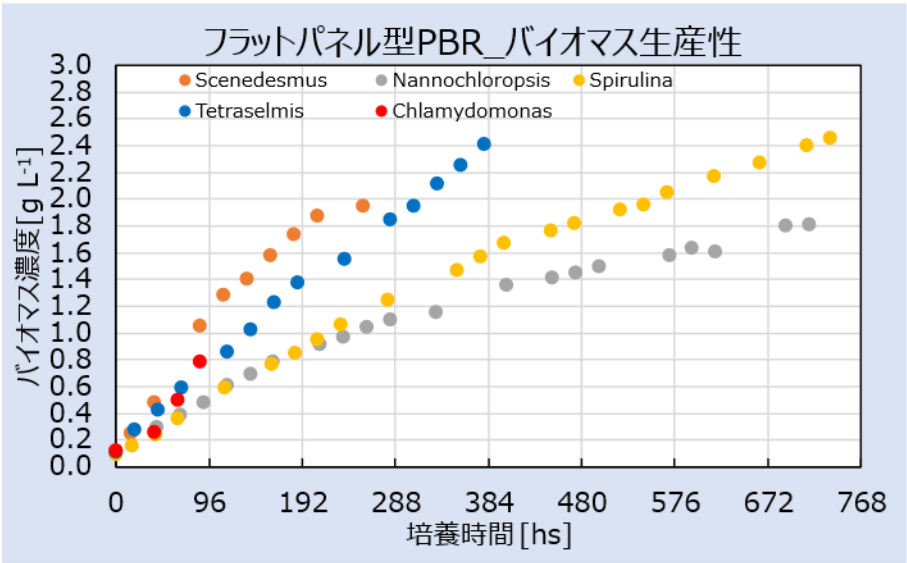


微細藻類種
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> CC1010
<i>Scenedesmus obliquus</i> UTEX393
<i>Spirulina plantensis</i> UTEX3086
<i>Nannochloropsis oceanica</i> NIES-2145
<i>Tetraselmis suecica</i> UTEX LB2286
<i>Botryococcus braunii</i>

培地	pH	CO ₂ 濃度
BG11	7.5 前後	3.0 % 前後
BG11	7.5 前後	3.0 % 前後
SOT	9.0 前後	0.9~1.6 %
F/2	7.8 前後	1.0 % 未満
F/2	7.8 前後	3.0 % 前後
Chu13	7.0 前後	3.0 % 前後

培地	pH	CO ₂ 濃度
BG11	7.5 前後	3.0 % 前後
BG11	7.5 前後	3.0 % 前後
SOT	9.0 前後	0.9~3.5 %
F/2	7.8 前後	1.0 % 未満
F/2	7.8 前後	3.0 % 前後
Chu13	7.0 前後	3.0 % 前後

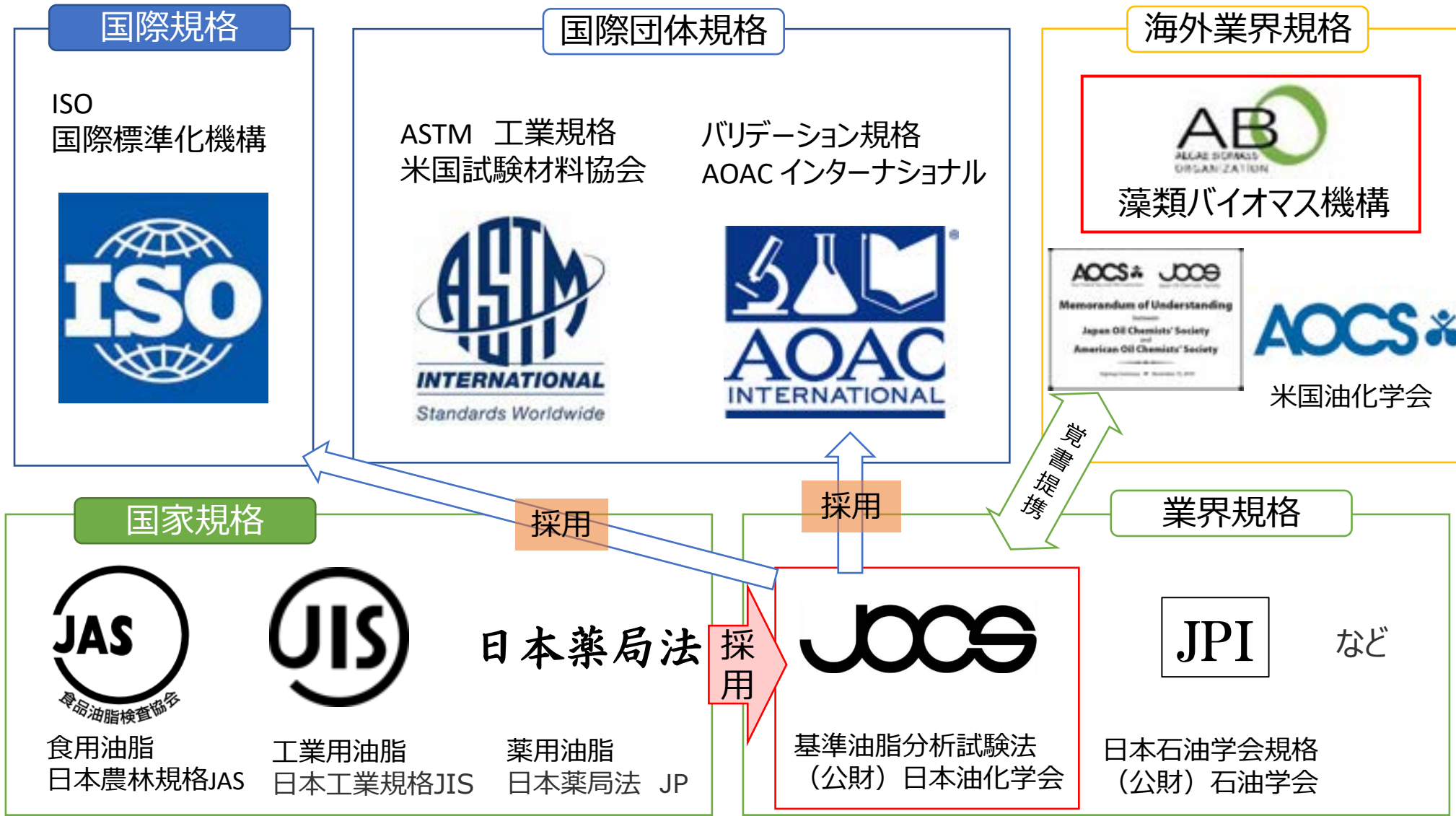
培地	pH	CO ₂ 濃度
BG11	7.5 前後	3.0 % 前後
BG11	7.5 前後	3.0 % 前後
SOT	9.0 前後	0.4~1.0 %
F/2	7.8 前後	1.0 % 未満
F/2	7.8 前後	3.0 % 前後
Chu13	7.0 前後	3.0 % 前後



最終プロットまでのバイオマス生産性 [$\text{g L}^{-1} \cdot \text{d}$]

	FP-PBR	T-PBR	ORP
<i>Scenedesmus</i>	0.172	0.172	0.067
<i>Nannochloropsis</i>	0.059	0.093	0.026
<i>Spirulina</i>	0.079	0.175	0.029
<i>Tetraselmis</i>	0.145	0.171	0.041
<i>Chlamydomonas</i>	0.181	0.163	0.031
<i>Botryococcus</i>	0.106	0.096	0.034

■ 主な脂質の国家規格と業界規格

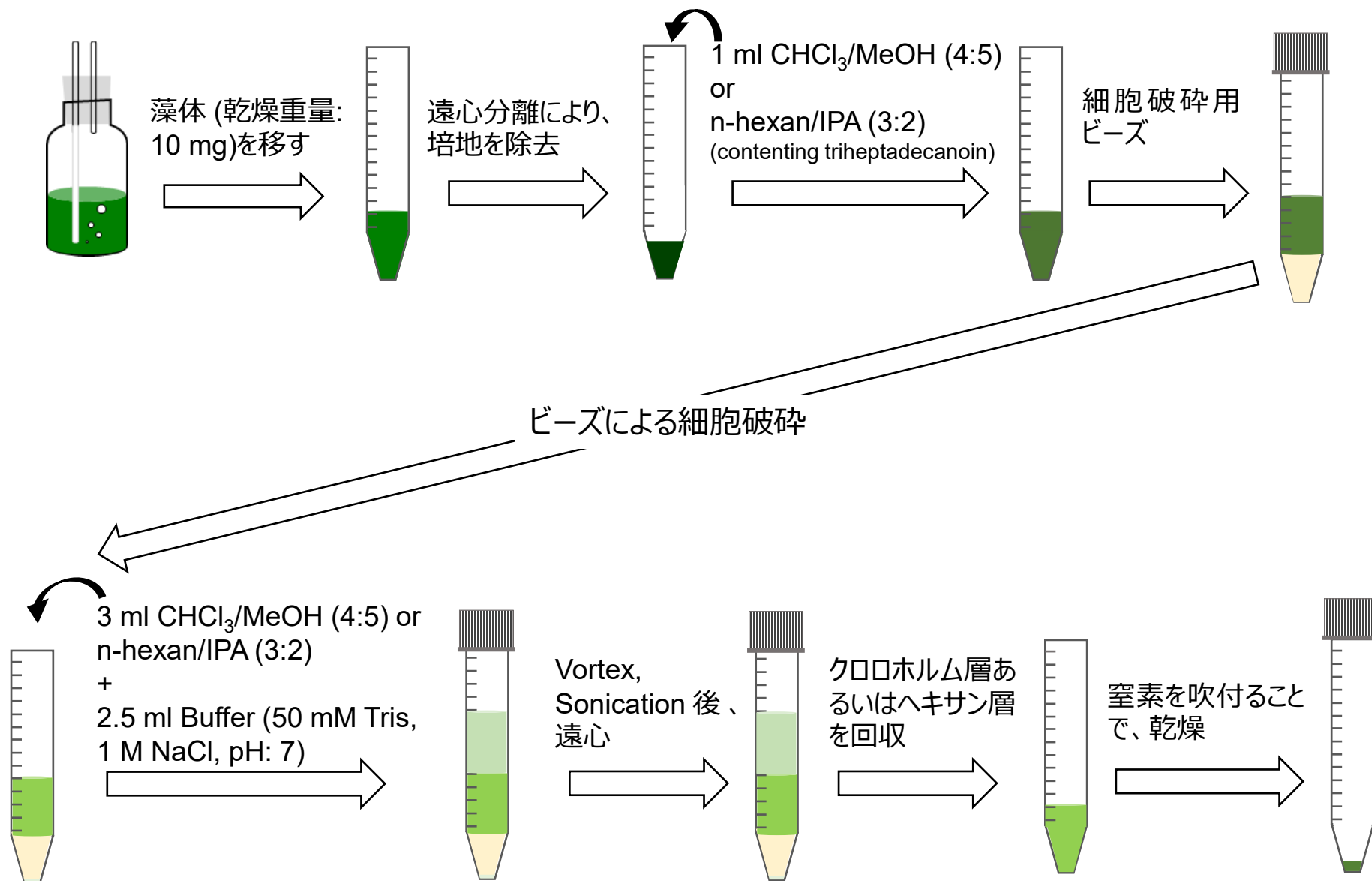


抽出溶媒	参照出来る規格	概略
CHCl ₃ /MeOH	AOAC 983.23-1984	脂質の分析方法が特定されていない食品サンプルや加工食品に推奨
	JOCS参2.1.2	リン脂質などの極性脂質を多く含む大豆や卵関連の食品に推奨
Hexane/IPA	JOCS参2.1.4	クロロホルム-メタノールの代替品として推奨
ジエチルエーテル	AOAC 920.39-1920	動物飼料中の脂質抽出
	JOCS参2.1.1	脂質含量が多い種実(アーモンド, ごま, 落花生等), 魚介類, 獣鳥肉類, 果実類に推奨

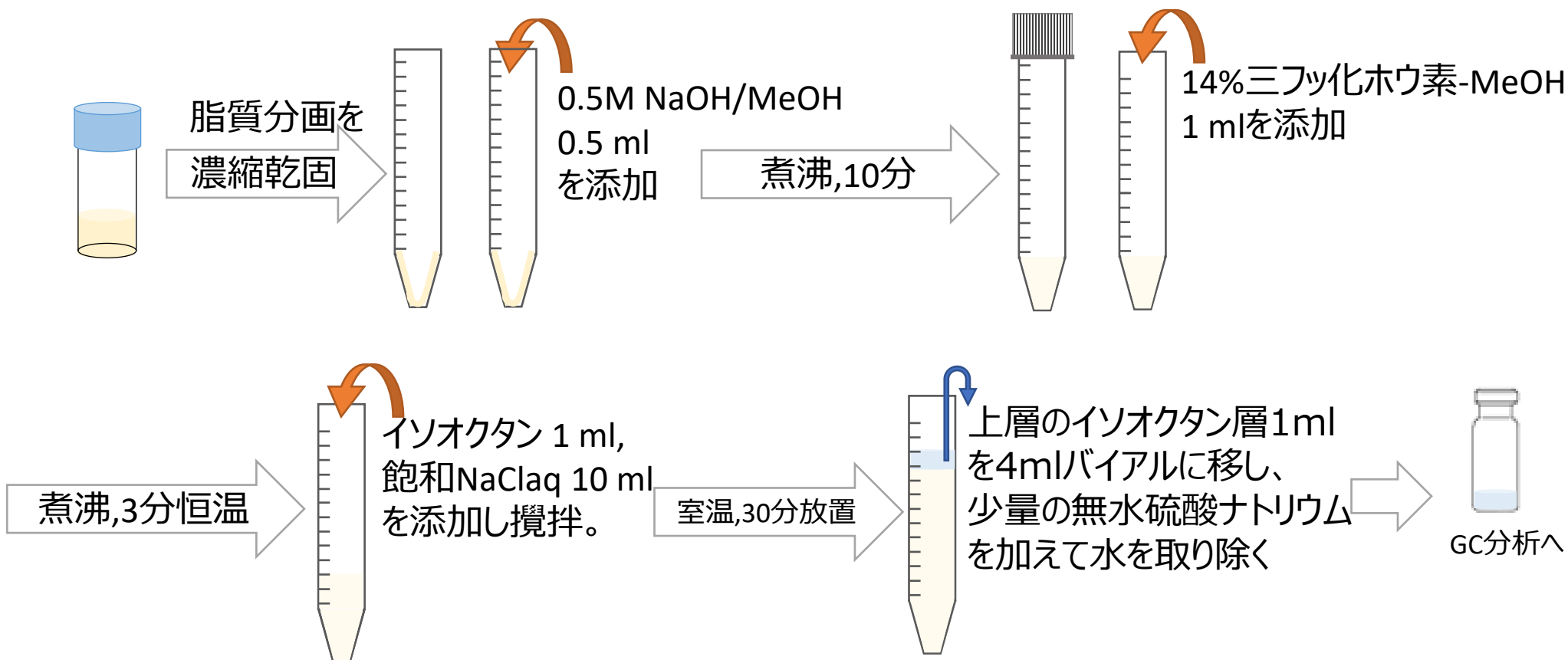
(参考文献)
-ABO (2017) "Industrial Algae Measurements"
-日本油化学会制定 基準油脂分析試験法 2018年増補・改訂版

参照出来る文献	抽出溶媒	藻類種
Guido et al., (2013), <i>Journal of Visualized Experiments</i> ; e50628:1–9.	CHCl ₃ /MeOH (4:5)	<i>Scenedesmus obliquus</i> , <i>Phaeodactylum tricornutum</i>
Halim et al., (2011), <i>Bioresource Technology</i> ;102(1):178–85.	Hexane, hexane/IPA (3:2)	<i>Chlorococcum</i> sp.
Fajardo et al., (2007), <i>European Journal of Lipid Science Technology</i> ;109:120–6.	EtOH	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>
Lee et al., (1998), <i>Biotechnology Techniques</i> ;7:553–6.	CHCl ₃ /MeOH (2:1), hexane/IPA (3:2), dichloroethane/MeOH (1:1), dichloroethane/EtOH (1:1), acetone/dichloromethane (1:1)	<i>Botryococcus braunii</i>
Molina Grima et al., (1994), <i>JAOCs</i> ;71(9):955–9	CHCl ₃ /MeOH/water (1:2:0.8), hexane/EtOH (1:2.5), hexane/EtOH (1:0.9), butanol, EtOH, EtOH/water (1:1), hexane/IPA (1:1.5)	<i>Isochrysis galbana</i>
Nagle and Lemke, (1990), <i>Applied Biochemistry and Biotechnology</i> ;24:355–61.	1-butanol, hexane/IPA (2:3), MeOH/CHCl ₃ (1:1)	<i>Chaetoceros muelleri</i> , <i>Monoraphidium minutum</i>

(参考文献)
 -Ronald H., et al. (2012) "Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review"
 -ABO (2017) "Industrial Algae Measurements"

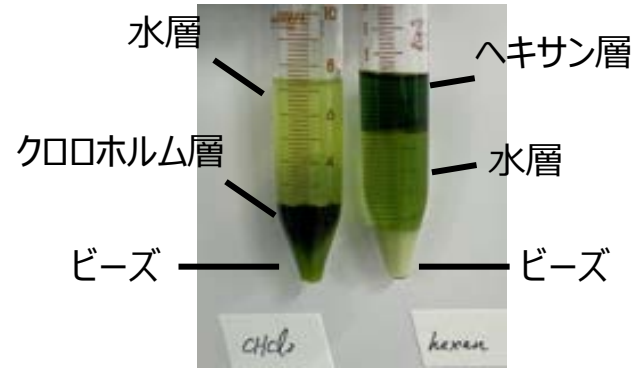


脂質のメチルエステル化

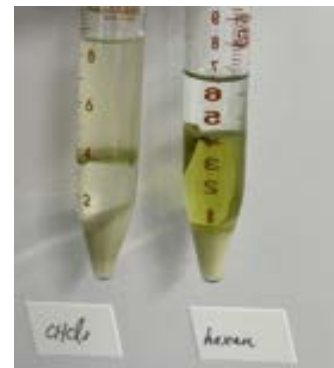


クラミドモナス

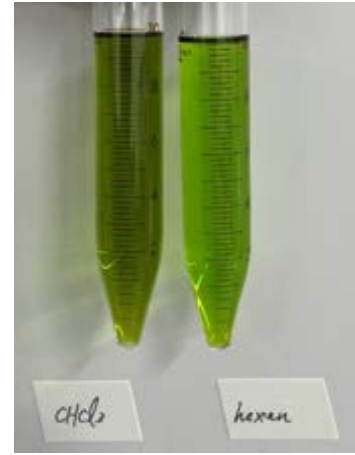
抽出1回目



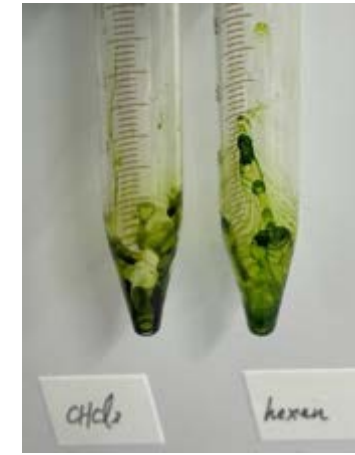
抽出6回目



抽出混合物

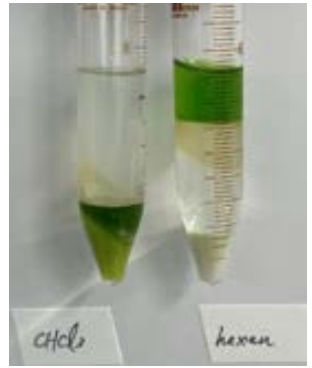


乾燥物



ナノクロロプシス

抽出1回目



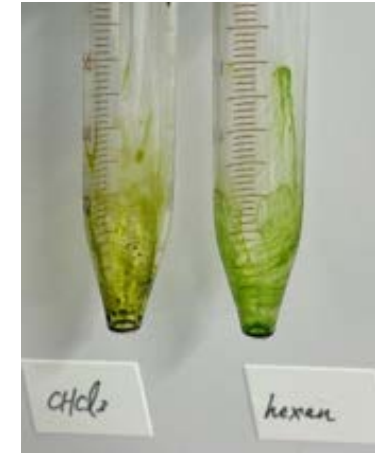
抽出6回目



抽出混合物



乾燥物



島津製作所様

トリプル四重極型ガスクロマトグラフ質量分析計 GCMS-TQ8040NX



Analytical conditions:

Column, TC-2560 (0.25 mm × 100 m × 0.20 μm, GL Science Co., Ltd)

Column oven: 50°C (hold 1 min), 20°C/min to 120°C, 4°C/min to 240°C, 240°C (hold 30 min)

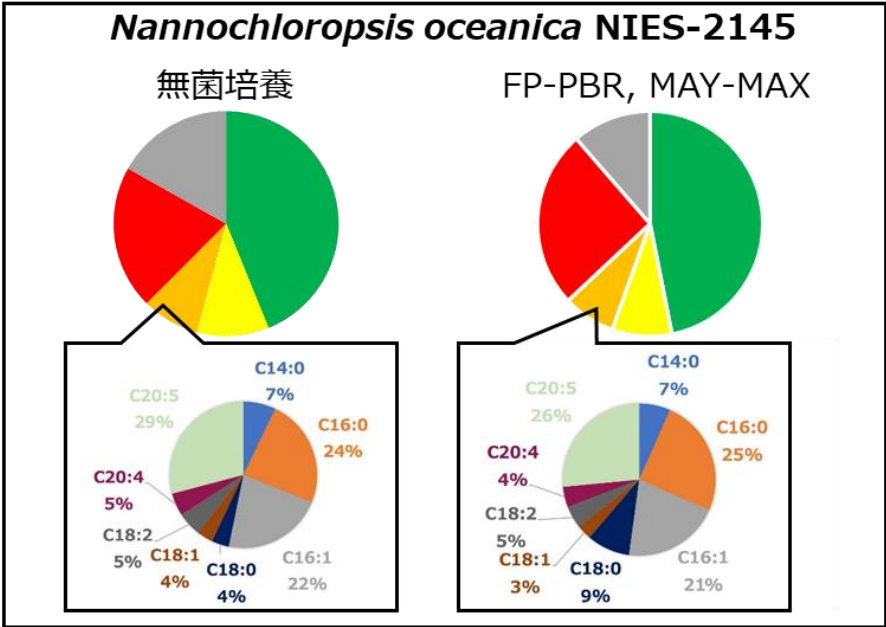
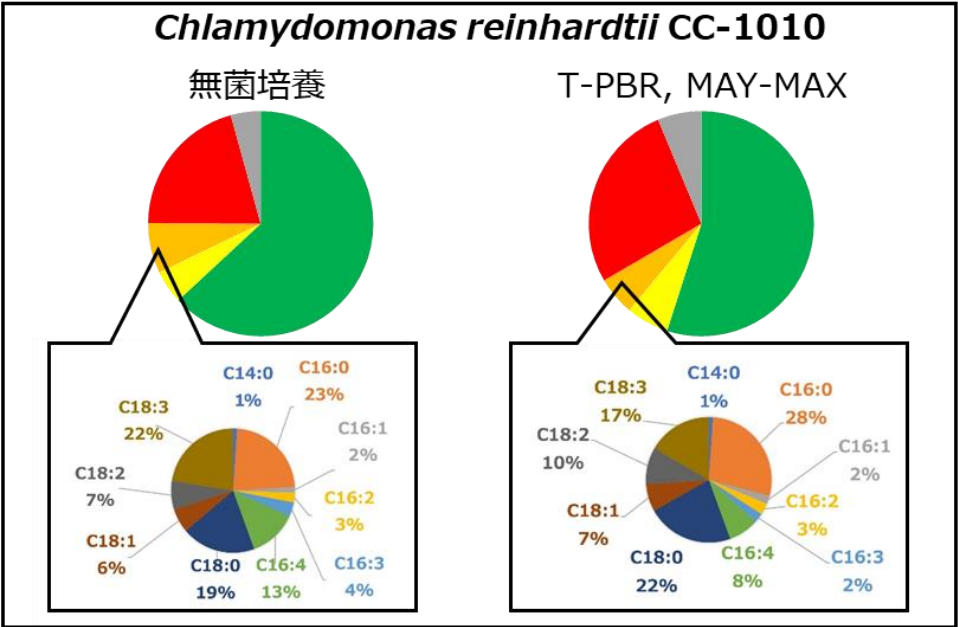
Injection temp.: 240°C

Flow rate of He, 1.3 mL/min

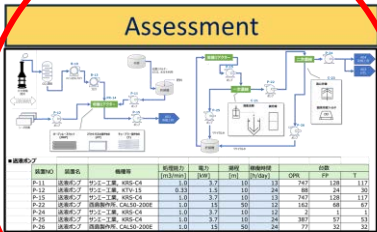
Detector, MS

バイオマス全体のポテンシャル評価が可能なように、
脂質成分だけでなく含有成分全体の把握が可能な体制を整えている

対象	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> CC-1010 (無菌培養)	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> CC-1010 (T-PBR, MAY-MAX)	<i>Nannochloropsis oceanica</i> NIES-2145 (無菌培養)	<i>Nannochloropsis oceanica</i> NIES-2145 (FP-PBR, MAY-MAX)
タンパク質	63.09%	54.93%	43.86%	46.89%
脂質	11.99%	11.65%	18.62%	16.13%
脂肪酸	7.20%	5.54%	8.29%	7.52%
灰分	4.29%	6.27%	16.83%	11.37%
炭水化物	20.63%	27.15%	20.69%	25.61%



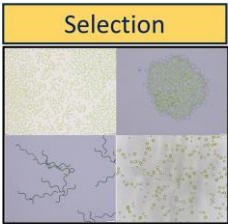
IMATでは微細藻類の産業支援を目的とし、
以下のリソースを保有しています。



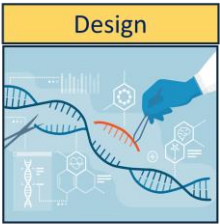
【プロセスフロー解析】
【GHG排出量の計算】



【工程の産物評価】
【バイオマスのポテンシャル評価】



【産業価値の高い株を選定】
【株の基礎データ取得】



【産業株の更なる高機能化】
【安定培養のための菌叢解析】



【気象条件を模擬した培養設備】
【安定したバイオマス生産】



【藻類の性状に合わせて選定】
【環境負荷の少ない手法提案】



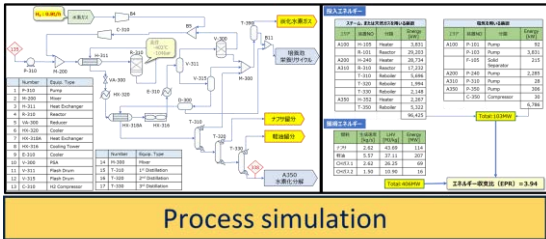
【抽出・分析サンプル調整】
【用途に合わせた手法選定】



【スケラブルな抽出設備】
【多様なバイオマスを検討可能】



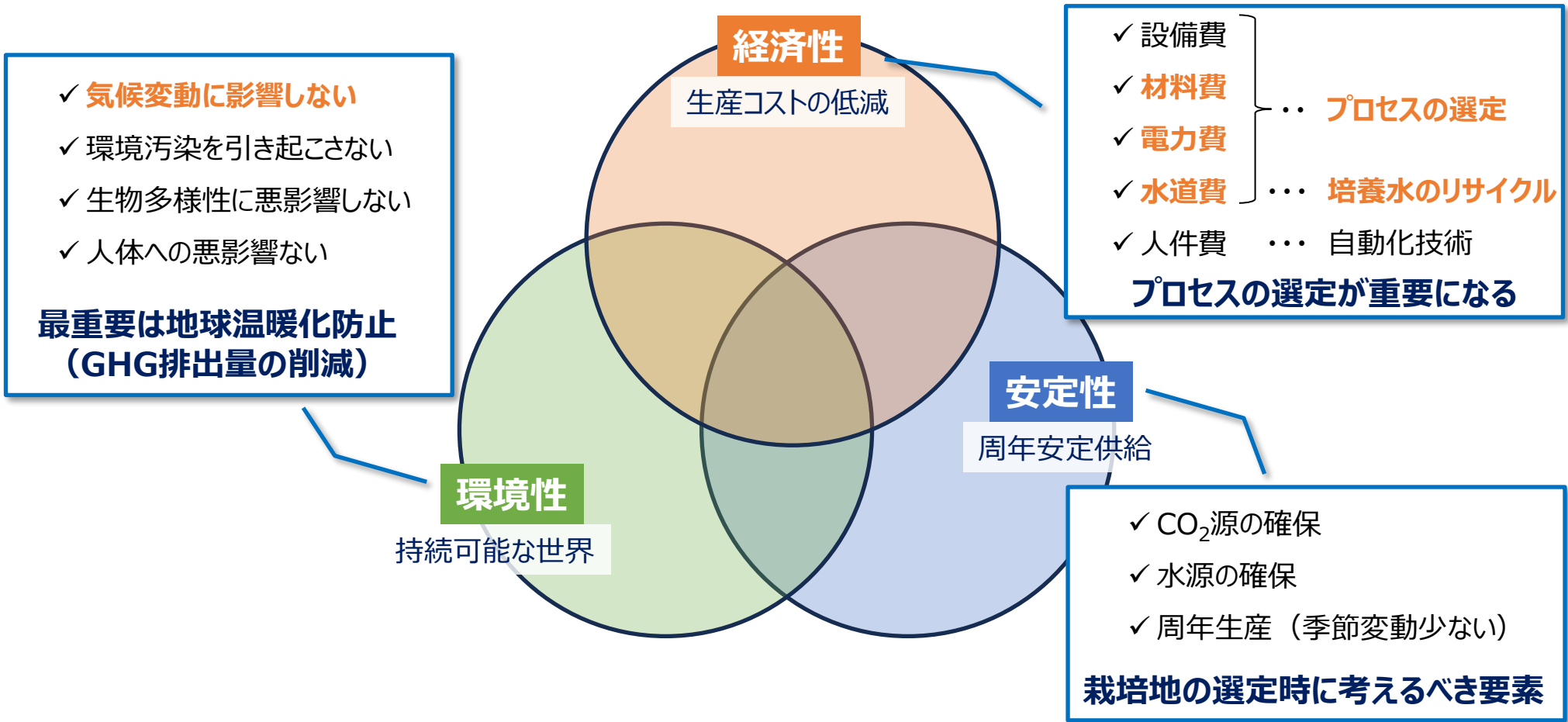
【屋外での安定性、コンタミネーション評価】
【育種株の安全性評価】



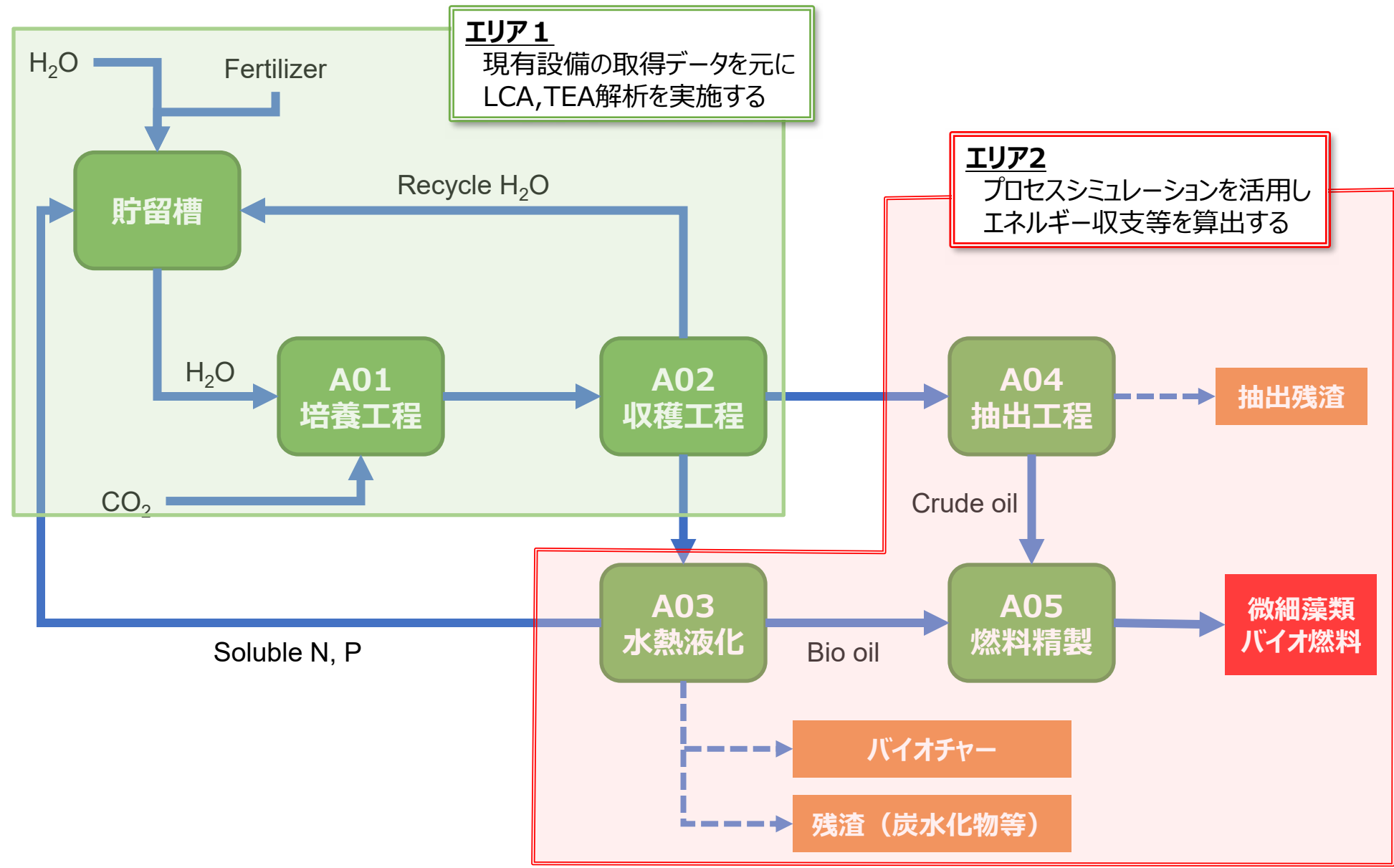
【専用ソフトを用いたプロセス設計】
【エネルギー収支比、コスト計算】

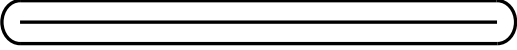
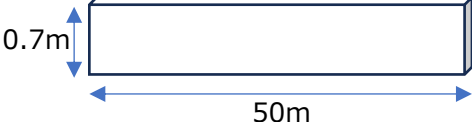
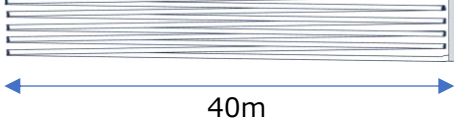
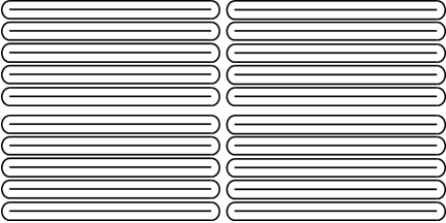
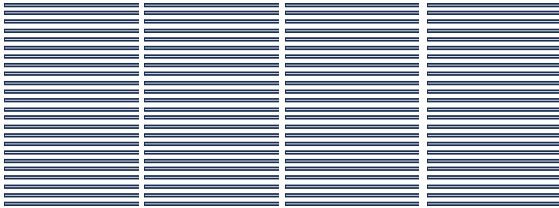
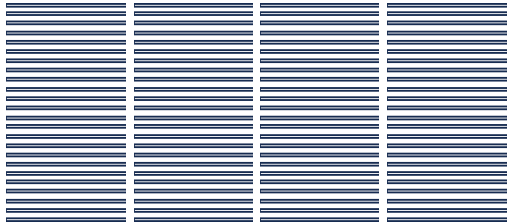
バイオ燃料に求められる3つの要素

— これらを考慮したプロセス設計をする必要がある —



環境性と経済性で重要な“電力”を中心にプロセスを評価する

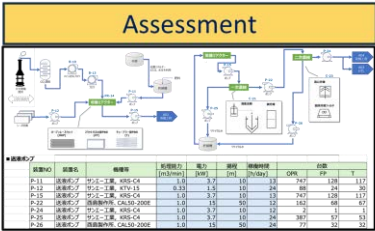


	オープンレースウェイ	フラットパネル型PBR	チューブラー型PBR
リアクター	 200 x 20m, 3,914m ² 水深：20cm	 幅：7.0cm	 φ：6.28cm 段数：10段
ユニット (平面図)	槽数：2×10基 設置間隔：1m  敷地：410 x 210m, 86,100m ² 培養面積：78,280m ²	槽数：4×144基 設置間隔：0.8m  敷地：208 x 127m, 26,416m ² 培養体積：1,411m ³	槽数：4×144基 設置間隔：0.8m  敷地：168 x 156m, 26,208m ² 培養体積：1,427m ³
攪拌方法	攪拌パドル	曝気（エアレーション）	水流ポンプ
総面積	2,153ha	888ha	1,048ha
リアクター数	5,000基	193,536基	230,400基
到達藻体濃度	0.5g/L	2g/L	2g/L
換算値	培養/敷地積比：90.9%	面積/培養体積比：18.7m ² /m ³	面積/培養体積比：18.4m ² /m ³

	オープンレースウェイ	フラットパネル型PBR	チューブラー型PBR
材料・材質	ライナー(ターポリン) : 高密度ポリエチレンにポリ塩化ビニルをコーティングし、防水性が高く、紫外線に対する耐性もある。養殖用の池などの実績あり	プラスチックバッグ : 低密度ポリエチレンでできており、透明なバッグ。大塚テクノ株式会社の微細藻類培養にも用いられている（下記写真）	ホウケイ酸ガラス : ホウ酸の含入率が高く、熱膨張率の低いガラス。チューブラーPBRに一般的に使われている。
		 https://www.otsukakj.jp/news_release/20230427.html	
使用量	厚さ : 0.2mm 重さ : 0.13kg/m ² 総面積 : 19.6百万m ² /プラント 総重量 : 2,544t/プラント	厚さ : 0.3mm 重さ : 0.19kg/m ² 総面積 : 19.4百万m ² /プラント 総重量 : 3,677t/プラント	厚さ : 2.5mm 重さ : 6.25kg/m ² 総面積 : 36.3百万m ² /プラント 総重量 : 225,792t/プラント
交換頻度 (仮定値)	1/5 回/年	1 回/年	1/25 回/年
TEA分析用	Min : 1/10 回/年、Max : 1/2 回/年	Min : 1/2 回/年、Max : 2 回/年	—

上記の使用量と交換頻度を仮定してGHG排出量の計算をおこなった

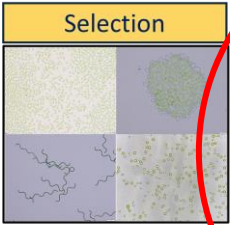
IMATでは微細藻類の産業支援を目的とし、
以下のリソースを保有しています。



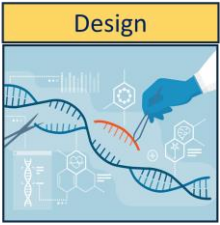
【プロセスフロー解析】
【GHG排出量の計算】



【工程の産物評価】
【バイオマスのポテンシャル評価】



【産業価値の高い株を選定】
【株の基礎データ取得】



【産業株の更なる高機能化】
【安定培養のための菌叢解析】



【気象条件を模擬した培養設備】
【安定したバイオマス生産】



【藻類の性状に合わせて選定】
【環境負荷の少ない手法提案】



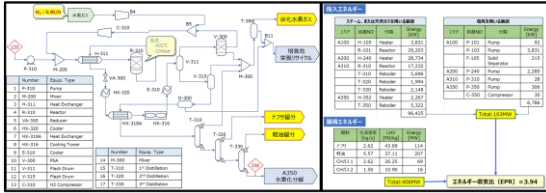
【抽出・分析サンプル調整】
【用途に合わせた手法選定】



【スケラブルな抽出設備】
【多様なバイオマスを検討可能】



【屋外での安定性、コンタミネーション評価】
【育種株の安全性評価】



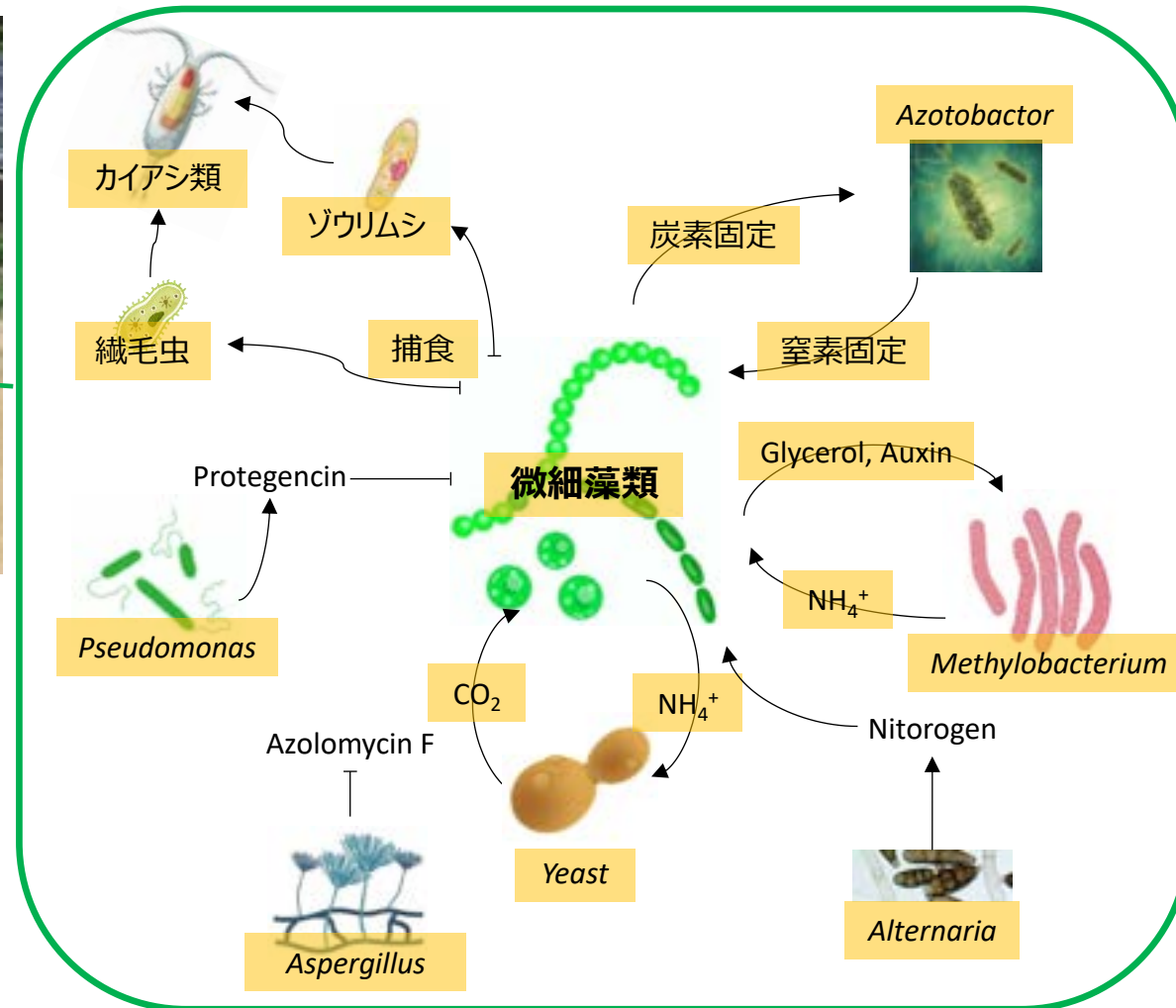
Process simulation

【専用ソフトを用いたプロセス設計】
【エネルギー収支比、コスト計算】

- 屋外環境での培養では、微細藻類は様々な微生物と相互に関わりを持って生育を行っている。



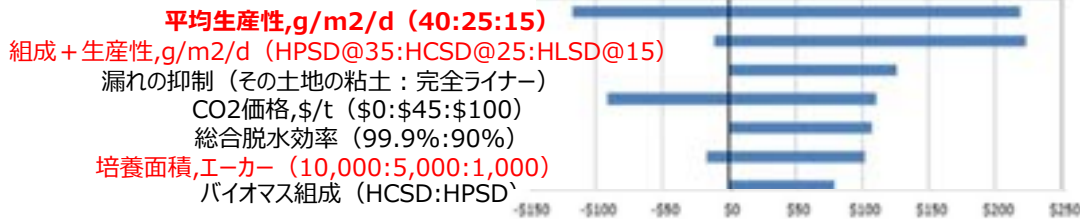
その生育環境の把握は、培養を行う上での安定化のためにも重要であり、将来的には共培養等の生産性向上のための情報を得る事が出来る。



Calatrava et al. *Plants* 2023, 12, 788.

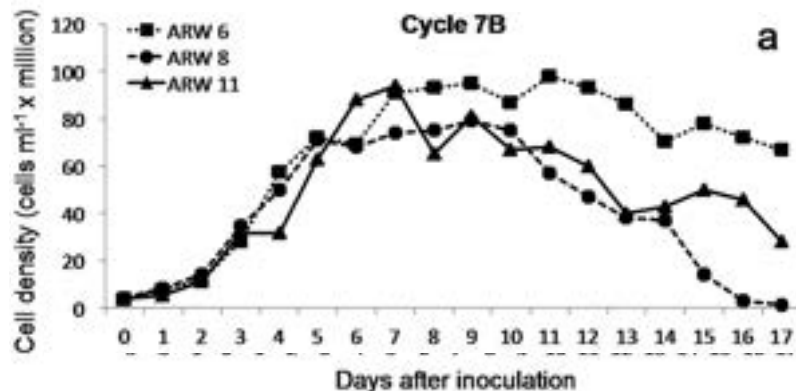
■ 微細藻類を開放系で培養を行うと、様々な外来生物に晒されることになる。ポンドクラッシュの多くは外来生物のコンタミネーションによって引き起こされており、その生産コストの影響は非常に大きい。そのため、コンタミネーションの抑制・リスク管理は非常に重要となり、国内外問わず多くの検討がなされている。

最小販売価格の変化（\$/t-藻、ベースライン：\$491/t）

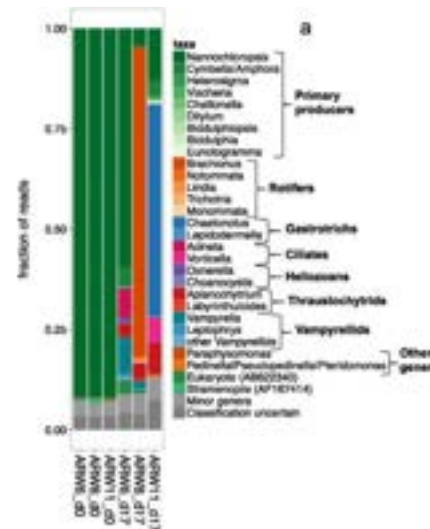


Conceptual Basis and Techno Economic Modeling for Integrated Algal Biorefinery Conversion of Microalgae to Fuels and Products (NREL,2019)

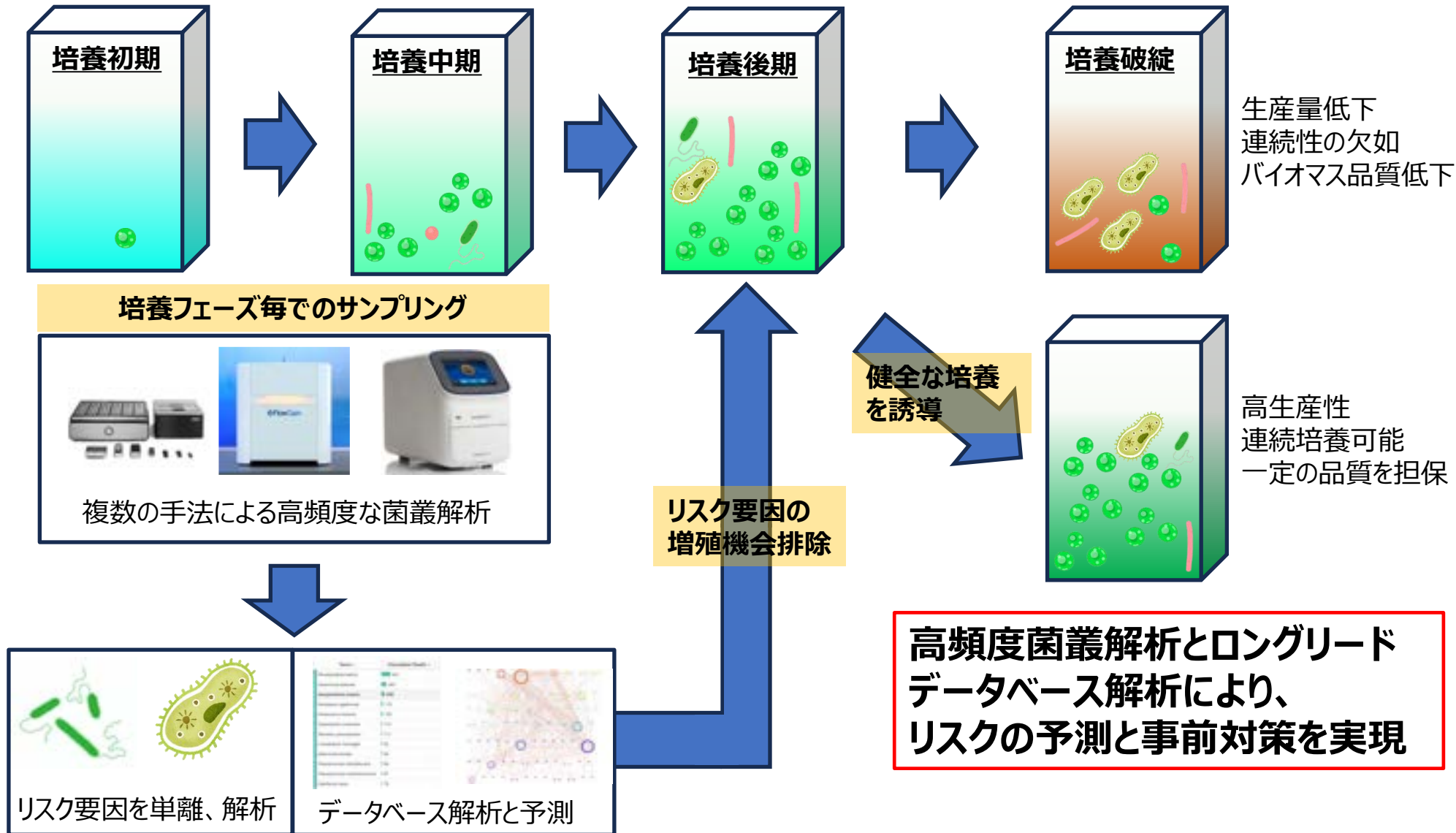
コストへの影響の大きい要素は生産性に関するものが上位を占めており、安定生産は産業化の課題解決事項として最重要事項の1つであり、バイオマス生産あたりのコストが200 \$ /tほどの低減が期待できる。



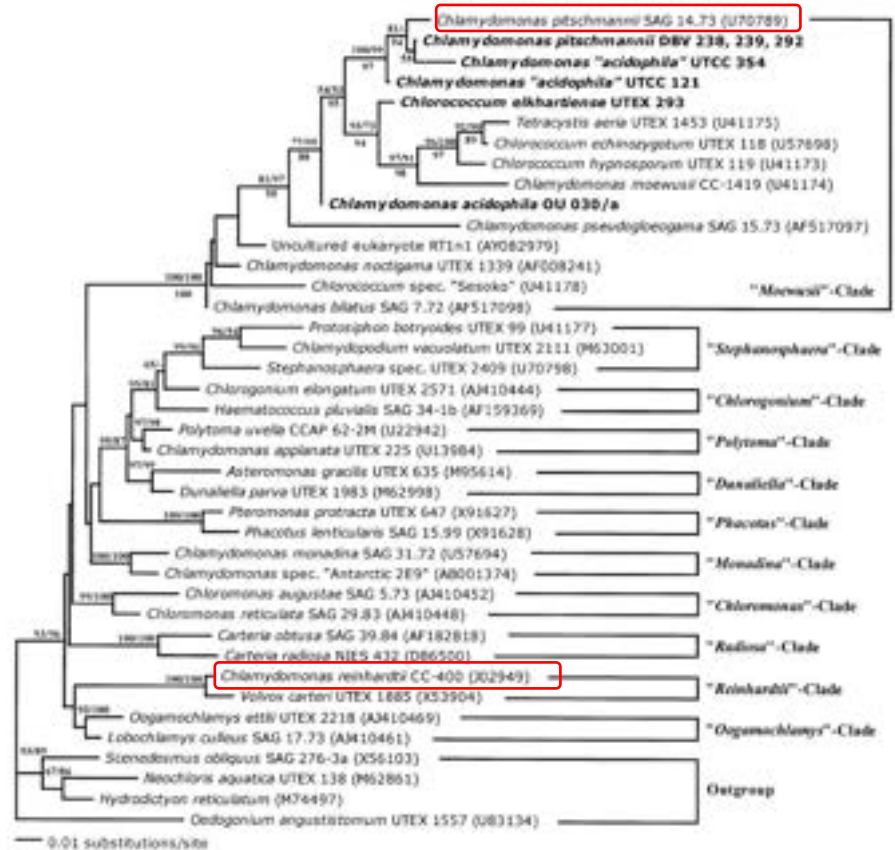
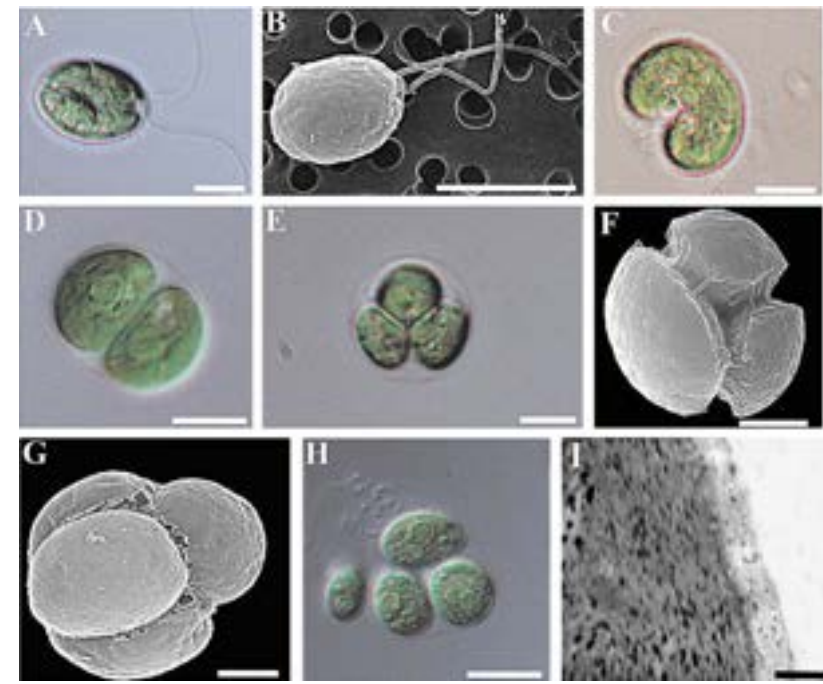
Carney et al. *Algal Research* 17 (2016) 341–347



微細藻類を単独で培養した際、その外来生物のコンタミネーションは顕著に生産性に効いている。



C. pitshmannii

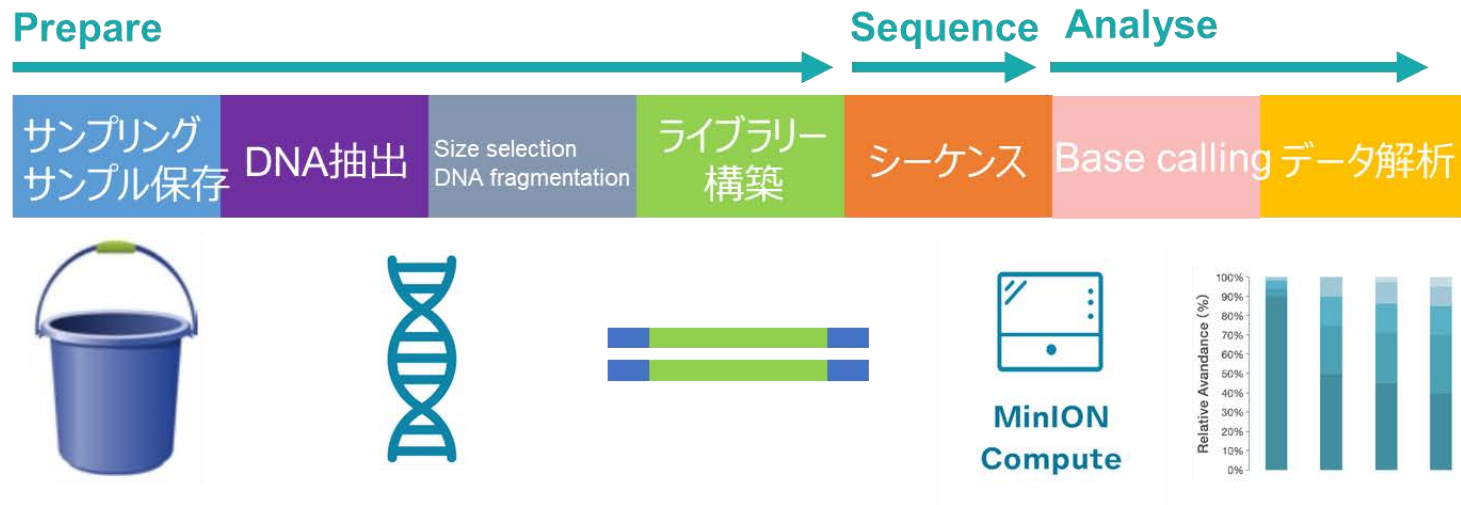


- クラミドモナス属の中では酸性領域でも生育が可能な特徴を持つ種
- 中性領域では生育が不安定で破綻しやすい傾向にある
- ゲノム情報はショートリード由来のもののみ

Antonino Pollio. et al., 2005

- Nanoporeを用いてロングリード配列を決定
- その配列情報と特にリスクの高い生物叢を用いてコンタミネーションリスクを推定

解析手順



- 中性領域(pH 6.5), 酸性領域(pH3.5)に調整したチューブ型フォトバイオリアクターを同時に運用開始
- 19日間培養液をサンプリング
- gDNA抽出後、ナノポアシーケンサー (MinION) を用いてシーケンス

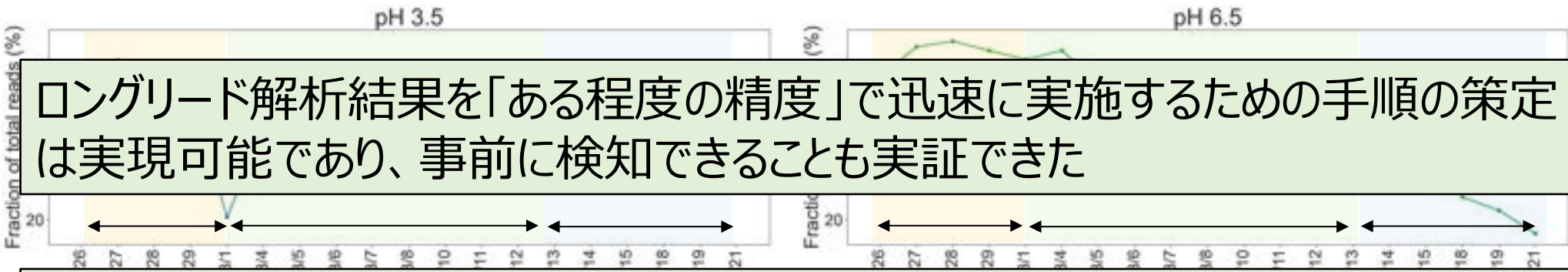


pH 6.5

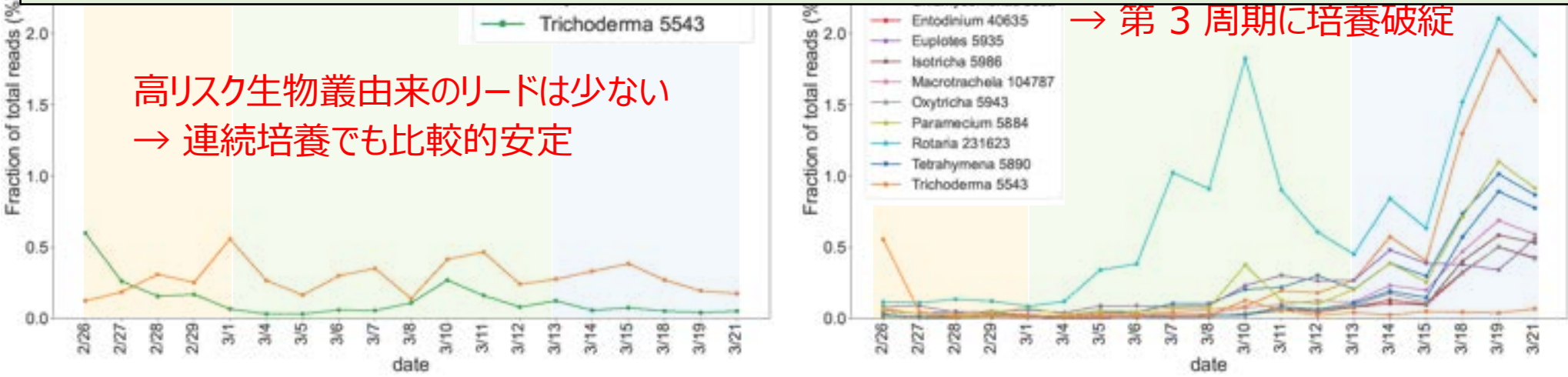


pH 3.5

培養液から検出された分類群（属）の時系列データ
（全てのサンプルでリード数が 0.05 % 未満の属は非表示）



一方で、**連続的な培養動態ネットワークの時系列的な挙動の把握**には、より踏み込んだ解析手法の確立が必要である

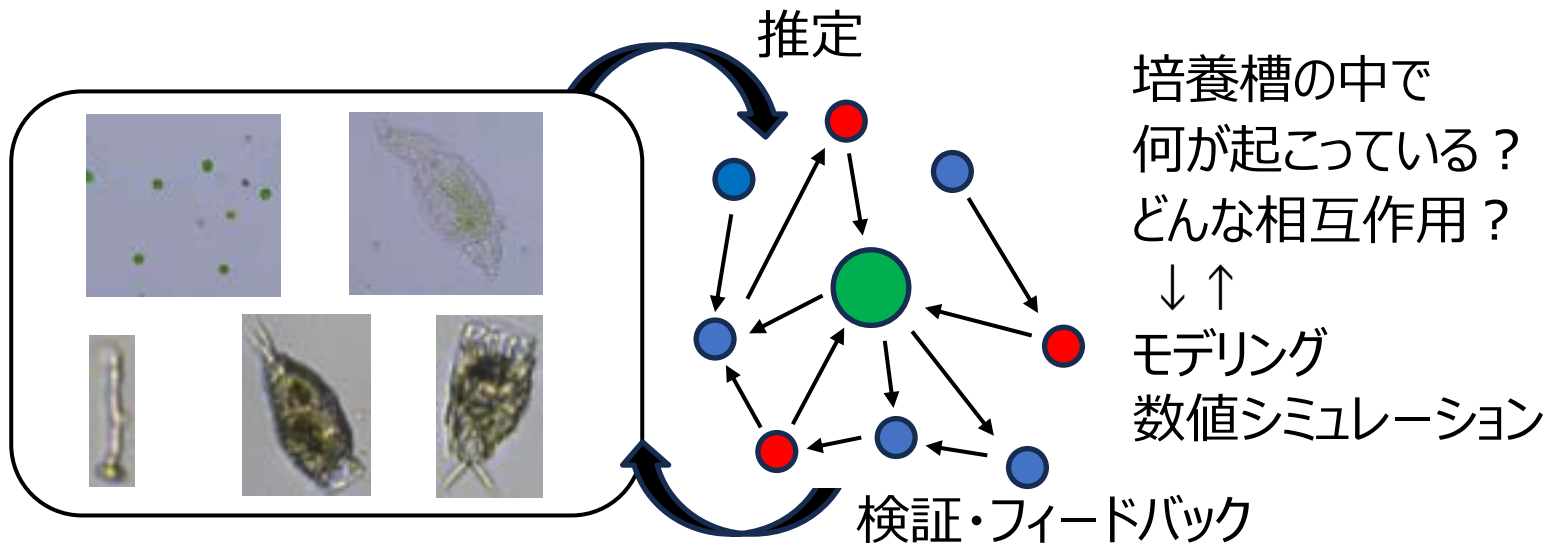


目的：培養液中コンタミネーション検出環境の整備

Third-generation sequencing (ONT, MinION) を用いた
メタゲノム解析による培養液中菌叢の網羅的解析

最終的には …

**目的とする藻類の培養において有益、あるいは有害な微生物群相の
継続的なモニタリングと対応策の提案**

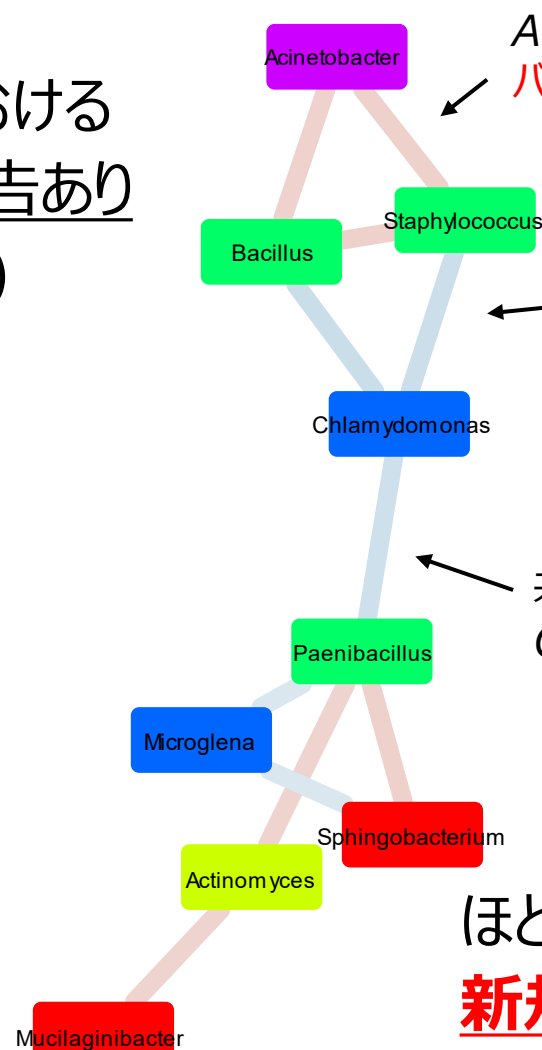


取り組み事例：培養破綻の予測を行うための時系列的な解析

confidential

pH 6.5 培養液中における
 一部の相互作用は報告あり
 (正の相関, 負の相関)

- クラミドモナス目
- モラクセラ目
- スフィンゴバクテリア目
- 放線菌目
- バシラス目



Acinetobacter と Staphylococcus 間での
 バイオフィーム形成促進による、環境ストレス適応？

Shipitsyna et al. 2016

Chlamydomonas reinhardtii 抽出物により
 Staphylococcus のバイオフィーム残存率低下

Ghaidaa, H. A. et al. 2020

共接種試験では分離株 MEZ6 は
 Chlamydomonas reinhardtii を迅速に死滅させる

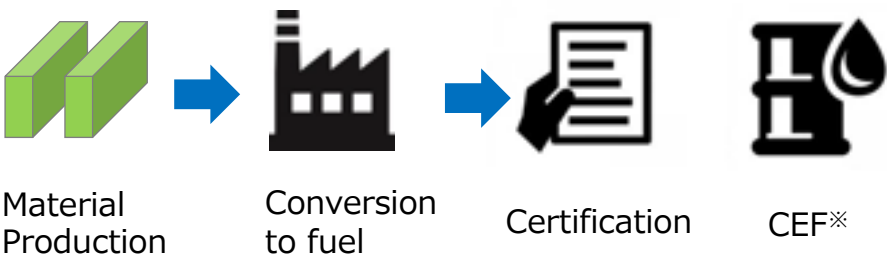
Zhao, N. et al. 2022

ほとんどの相関は報告がない
新規のバクテリア-バクテリア,
微細藻類-バクテリア間相互作用？

二国間クレジットの活用支援



CEF認証のための情報整理

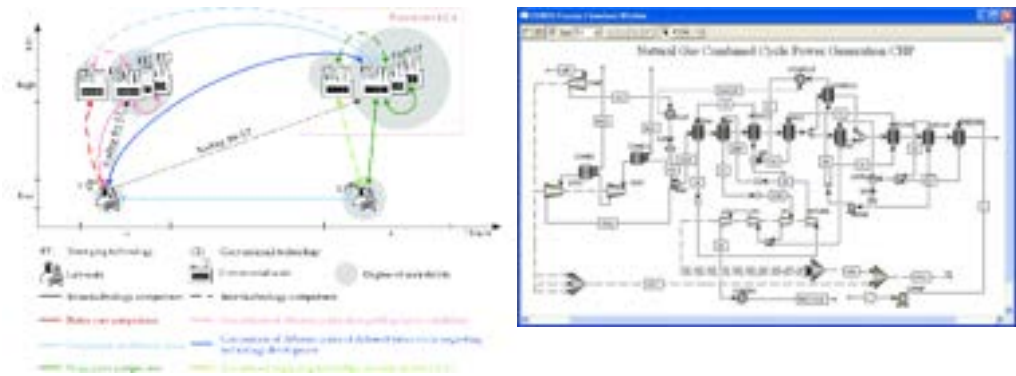


※ CORSIA eligible fuel

拠点設備を活用した技術基礎検証



将来価値を考慮したLCA



IMATの保有するリソースを最大限活用し、
微細藻類を用いた産業価値向上のために様々な側面からの支援を行ってまいります。