

**2024年度NEDO再生可能エネルギー一部成果報告会
プログラム No.3**

**バイオジェット燃料生産技術開発事業
微細藻類基盤技術開発**

**海洋ケイ藻のオープン・クローズ型
ハイブリッド培養技術の開発**

発表日：2024年12月18日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 芳賀 剛

団体名 電源開発（株）／公立諏訪東京理科大学／関西学院大学／（国）東京農工大学

問い合わせ先 電源開発（株）技術開発部 若松研究所 mail: tsuyoshi_haga@jpower.co.jp

事業概要

1. 目的

本事業ではSAFの商用化に向け、その原料であり、カーボンリサイクル技術の一つである微細藻類の安定大量培養技術の確立を目的とする。またエネルギーCO₂収支の試算と効率化を進めると共に、収益性が認められた高付加価値併産品物質については事業化に向けた検討を加速していく。

2. 期間

助成事業：2023年4月1日～2025年3月31日

3. 目標（中間・最終）

【2023年度】

- ①中規模オープン型培養装置を活用したユニットにより安定大量培養技術を醸成し、大規模オープン型培養装置設置後は、基本ユニット（600 m³クラスのオープン型培養装置）として藻油（グリーンオイル）生産量2002 L/回(例：藻体収量0.7 g/L, オイル蓄積率40 wt%)を達成する安定大量培養技術確立に向けた培養条件等の改良を行う。
- ②ケイ藻の生理学的なアプローチにより得られた知見を活用し、グリーンオイル生産速度（10 g/m²/day）の向上に資する培養条件の改善方法を立案する。
- ③SAF改質/流通事業者とのネットワーク構築、SAF原料品質確認の準備を行う。
また、有望な併産品の原料 サンプルを協力事業者に提供し、併産品評価の準備を行う。
- ④エネルギーCO₂収支向上について検討し、具体的な方法を立案する。

【2024年度】

- ①基本ユニットによるグリーンオイル生産量200 L/回(例：藻体収量0.7 g/L, オイル蓄積率40 wt%)を達成する安定大量培養技術を確立する。
- ②グリーンオイル生産速度向上（10 g/m²/day）に係る培養条件をハイブリッド型培養システムで検証する。
- ③SAF製造事業者とのネットワーク構築、SAF原料品質確認、及び有望な併製品の原料サンプルを協力事業者に提供し、併製品の評価を行う。
- ④エネルギーCO₂収支向上の方法を試行し、その効果を評価する。

4. 成果・進捗概要

オープン・クローズ型ハイブリッド培養試験を2023年度8回、2024年度はソラリス株にて6回実施し、グリーンオイル生産性やグリーンオイル生産速度向上に向けた検証を行った。現在、ルナリス株での培養試験を実施中。
また、SAF原料としての品質確認ならびに併製品の事業化検討を実施中。
さらに、エネルギー・CO₂収支向上に向けた消費電力低減に関する試行を行い、評価を実施中。

- ・ 研究内容と実施体制
- ・ 全体スケジュール
- ・ 検討状況
 - ① オープン・クローズ型ハイブリッド培養装置の研究開発
 - ② 太陽光の利用性向上に向けた装置開発
 - ③ 海洋ケイ藻の光合成機能解析
 - ④ 光合成機能と生育、オイル蓄積率の関係性解明
 - ⑤ 海洋ケイ藻の改変技術開発
 - ⑥ 併産品も含むSAF製造事業の採算性検討
 - ⑦ CO₂削減効果とエネルギー収支の試算と更なる効率化検討

-  電源開発株式会社
 学校法人 関西学院
 国立大学法人 東京農工大学
 公立大学法人 公立諏訪東京理科大学

太陽光利用効率向上による生産性向上



② 太陽光の利用性(光合成に対する)向上装置

① オープン/クローズ型ハイブリット培養技術

現状レベル(600m³)

グリーンオイル生産能力 :40L/回
(基本ユニット相当)
(藻体収量0.15g/L、オイル含油率40wt%)

連携

- 培養システムの開発領域
- 生産性向上に向けた開発領域
- 副産品利用に向けた開発領域

海洋ケイ藻の光合成機能解析による生産性向上



③ 海洋ケイ藻の光合成機能の解明

連携



④ 光合成機能と生育、オイル蓄積率の関係性解明

⑤ ターゲット遺伝子の選定
改変株作製技術の高効率化

2024年度目標値

 副産品利用も含むバイオジェット
燃料事業への道筋

⑥ 併産品利用に対する事業性評価

基本ユニットにおけるグリーンオイル生産量:200L/回 (目安:藻体収量0.7g/L以上、オイル蓄積率40wt%)、グリーンオイル生産速度:10g/m²/dayとなる培養技術の確立、培養条件の設定

ゲノム編集などによる改良株

JPPOWER

⑦ CO₂収支、投入エネルギー収支評価

2030年ごろ

基本ユニットにおけるグリーンオイル生産能力 :400L以上/回
(目安:藻体収量1.4g/L以上、オイル蓄積率50wt%)
となるハイブリット培養技術の確立、培養条件の設定

※1 600m³=20m×20m×3.14×0.5m (直径40m培養槽で水位50cmを想定)

※2 200L=グリーンオイル生産性0.28g/L(藻体収量0.7g/L×オイル蓄積率40wt%)×(20m×20m×3.14)×0.5m/比重0.88

※3 10g/m²/day = 200L×比重0.88/(20m×20m×3.14)/14日

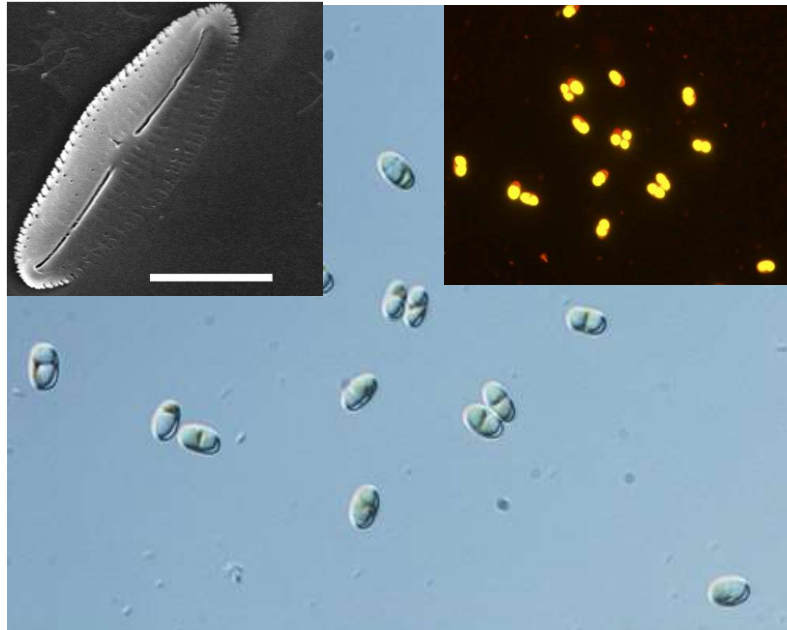
項 目	助成事業	
	2023年度	2024年度
(1) 主な設備導入、既設設備の整備		
・ オープン型培養装置(基本ユニット用)	※	
(2) 試験項目		
① オープン・クローズ型ハイブリッド培養装置の研究開発(JPOWER)		
①-1 オープン・クローズ型ハイブリッド培養装置による屋外大量安定培養技術の確立		
①-2 ハイブリッド培養システムの運用に向けた運転ノウハウの取得		
①-3 実証ユニットに向けた検討		
② 太陽光の利用性向上に向けた装置開発(諏訪東京理科大学)		
②-1 海洋ケイ藻の生育段階に対する光質、及び光量の適正化		
②-2 「有機薄膜太陽電池と光合成促進フィルム」のハイブリッド型培養システムへの適用性把握		
③ 海洋ケイ藻の光合成機能解析(関西学院大学)		
③-1 窒素飢餓下における光合成状態の環境応答に基く培養系評価		
③-2 シームレスな培養規模拡大に資する光ストレス緩和法の確立		
④ 光合成機能と生育、オイル蓄積率の関係性解明(東京農工大学)		
④-1 オイル生産性を最大化させる培養プロセスのブラッシュアップ		
⑤ 海洋ケイ藻の改変技術開発(東京農工大学)		
⑤-1 ゲノム編集による改良株の作出と評価		
⑤-2 改変株のnon-GMO 化手法の検討		
⑥ 併産品も含むSAF 製造事業の採算性検討(JPOWER)		
⑦ CO2削減効果とエネルギー収支の試算と更なる効率化検討(JPOWER)		

※ 2022年12月強風により直径40m培養槽倒壊、2023年10月復旧工事完了、11月直径40m培養槽試験再開

試験に用いた海洋ケイ藻

ソラリス株(海洋珪藻)

Fistulifera solaris JPCC DA0580

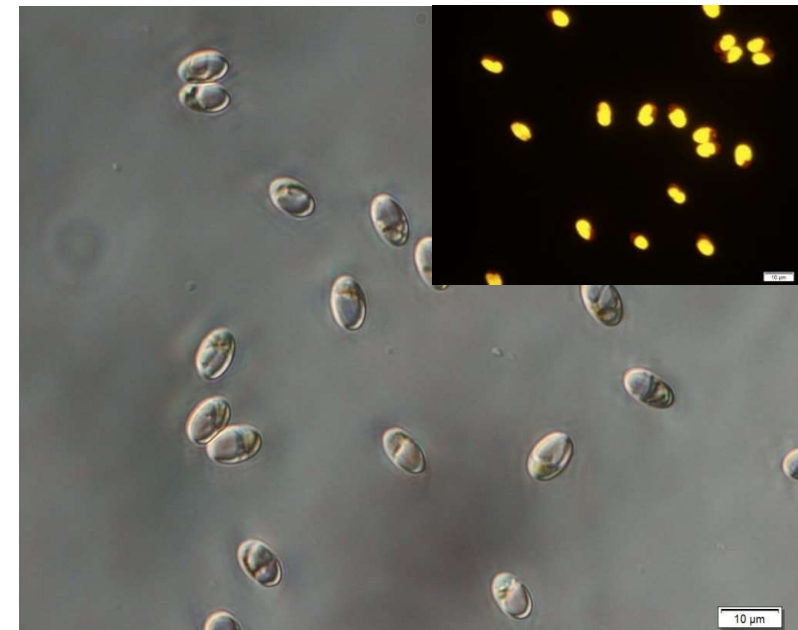


サイズ: ~10 μm
オイル含油量: up to 65wt% (実験室)
生育: 7 days (0.5g/L: 25°C)
適用温度範囲: 15 ~ 45°C

オイル: 中性脂質
主となる脂肪酸: C16:1, C16:0, EPA

ルナリス株(海洋珪藻)

Mayamaea sp. JPCC CTDA0820



サイズ: ~10 μm
オイル含有量: up to 60wt% (実験室)
生育: 10 days (0.5g/L: 10°C)
適用温度範囲: 4 ~ 25°C

オイル: 中性脂質
主となる脂肪酸: C16:1, C16:0, EPA

①オープン・クローズ型ハイブリッド培養装置の研究開発

<従来の培養方法>

室内

屋外



40L槽



1500L槽



直径5m槽

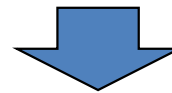


直径20m槽



直径40m槽

開放系での培養のため、雑菌汚染のリスクが高い ⇒ **培養が安定しない**



<オープン・クローズ型ハイブリッド培養システム>

室内

屋外



40L槽



【増殖培養】クローズ型培養装置



【増殖 + オイル蓄積】オープン型培養装置

開放系での培養期間が短縮されることで、雑菌汚染のリスクを低減でき、より安定的な培養を行うことができる。

クローズ型培養装置



大規模クローズ型培養装置(南北方向) 3基



大規模クローズ型培養装置(東西方向) 3基

オープン培養装置



大規模オープン型培養装置(直径40m)



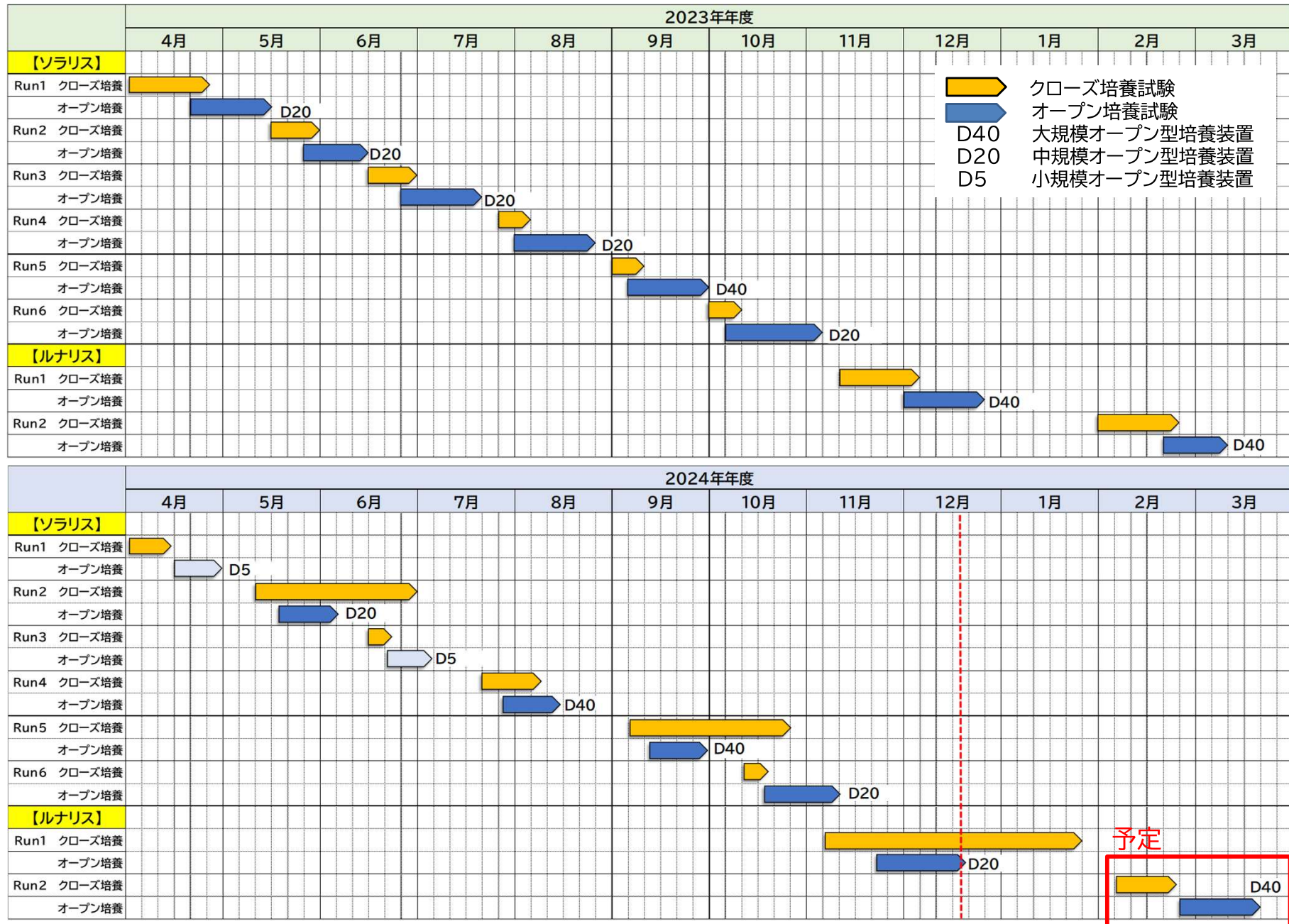
中規模オープン型培養装置(直径20m)



小規模オープン型培養装置(直径5m)

①オープン・クローズ型ハイブリッド培養装置の研究開発

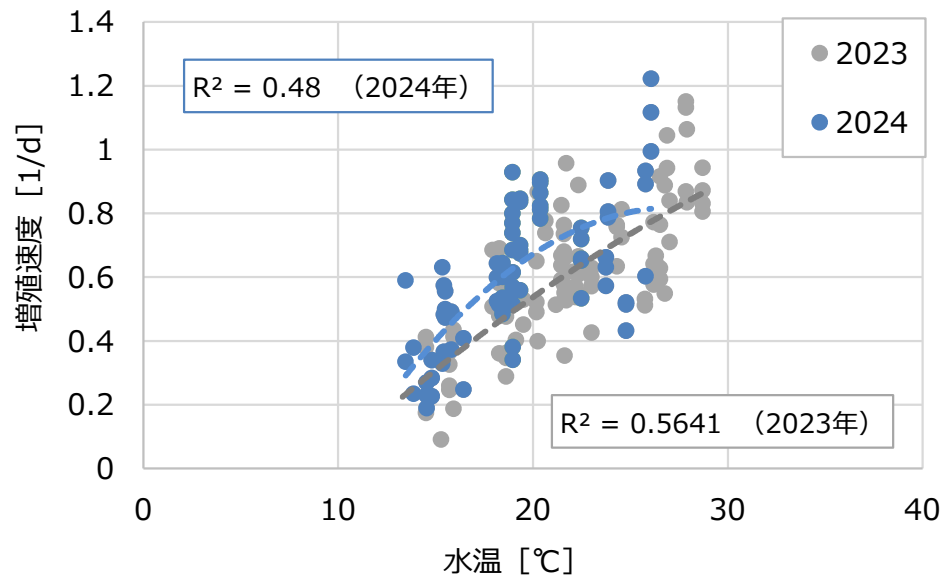
2023～2024年度試験実績・予定



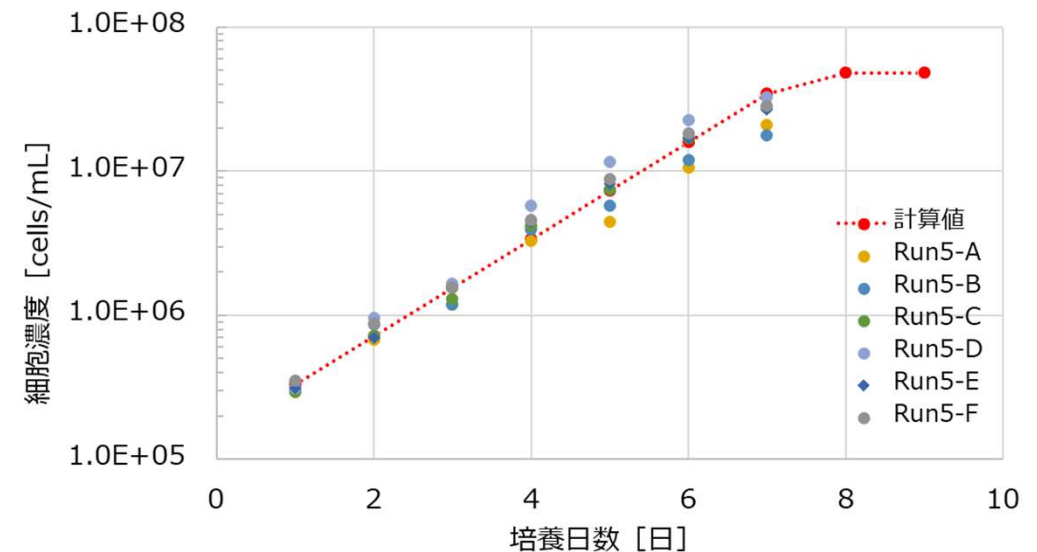
ハイブリッド培養試験（クローズ培養）

<クローズ培養の安定化>

- クローズ培養条件の適正化により、オープン培養の植菌（移植）に必要な藻体濃度まで**安定培養が可能**となった。
- ソラリスのクローズ培養では水温と増殖速度の関係から導かれる生育予想曲線を用いて、**藻体濃度の予測が可能**となった。



水温と増殖速度の関係（ソラリス）
※ 誘導期後の対数増殖期を対象



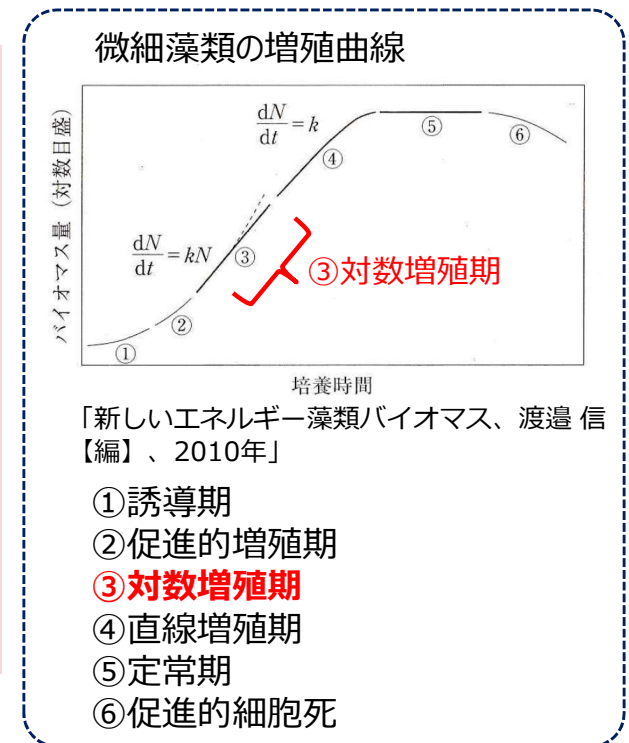
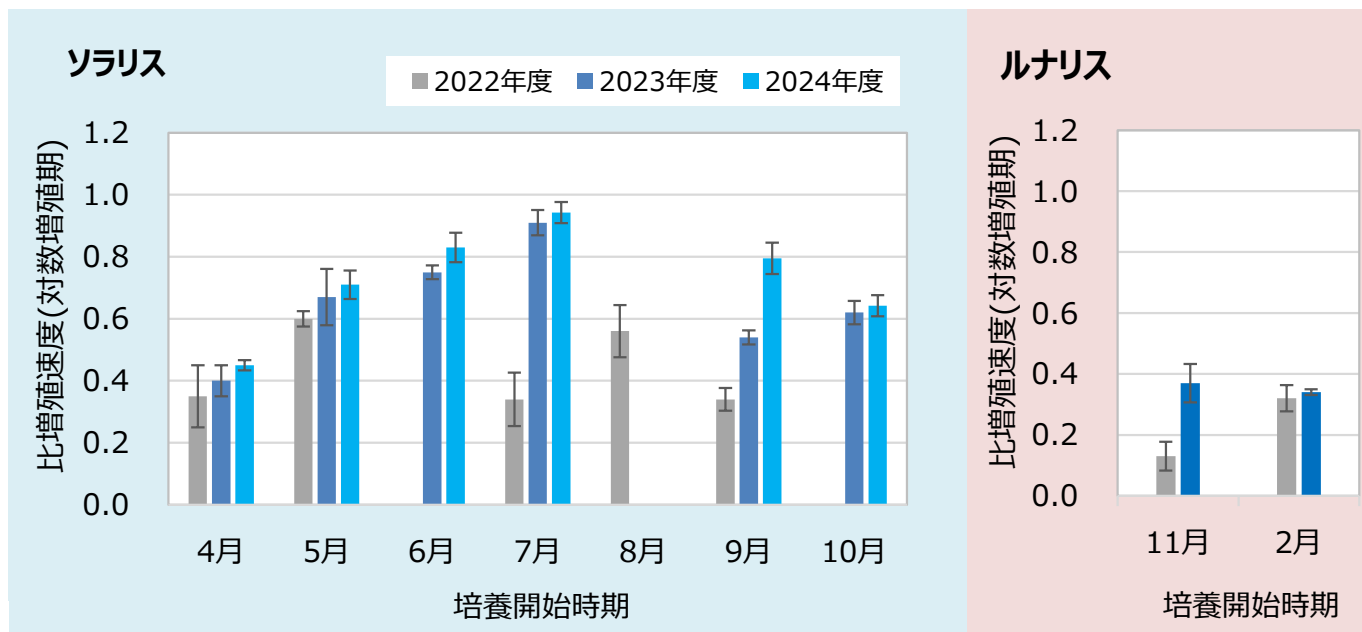
ソラリス生育予測曲線と実績値

ハイブリッド培養試験（クローズ培養）

<増殖速度の改善>

・培養条件の適正化により高い増殖速度が得られるようになっており、**培養期間を短縮することができた。**

クローズ培養における増殖速度(対数増殖期)



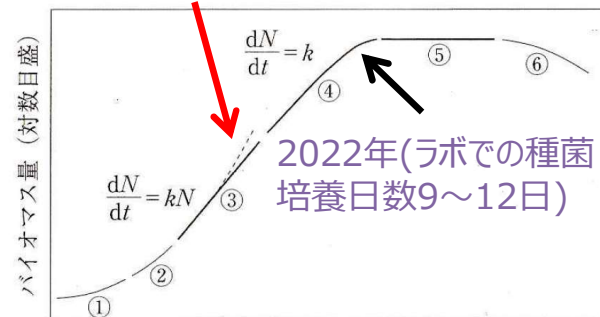
主な培養条件の改善項目

1. 強光阻害対策として細胞濃度に応じた日射量の管理条件を決定した。また、クローズ培養装置の設置方向の違いによる生育差を解消するために日射量の管理値を装置毎に見直した。
2. 高酸素濃度対策や植菌時に対数増殖期の種藻体を使用したことにより、増殖速度が向上した。

ハイブリッド培養試験（クローズ培養）

<増殖における誘導期間の短縮（ソリス）>

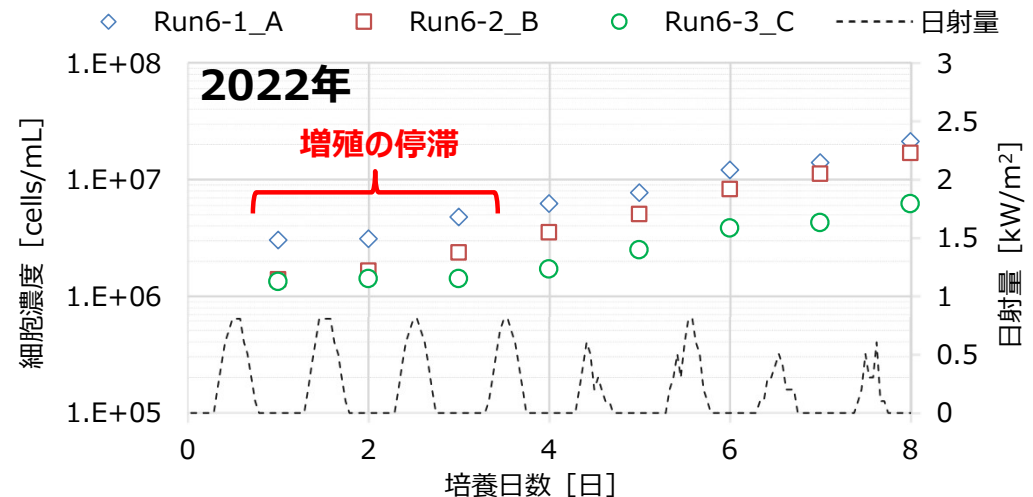
2023年、2024年
(ラボでの種菌培養日数7日)



培養時間
微細藻類の増殖曲線

「新しいエネルギー藻類バイオマス、
渡邊 信【編】、2010年」

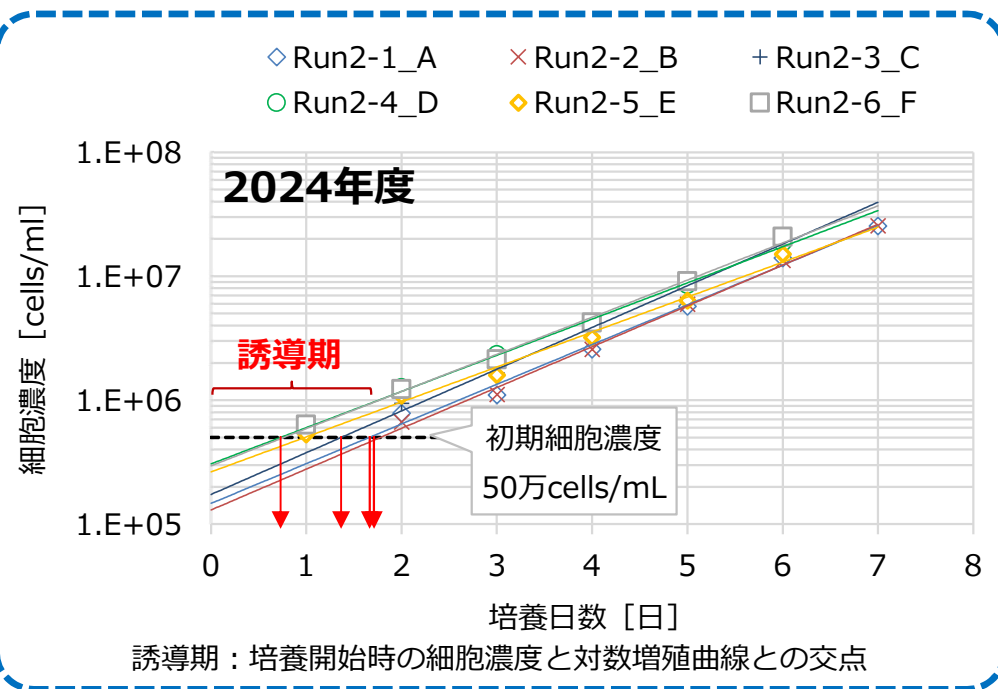
- ①誘導期
- ②促進的増殖期
- ③対数増殖期
- ④直線増殖期
- ⑤定常期
- ⑥促進的細胞死



2022年までは、クローズ培養初期に増殖が2日～3日停滞することが確認されていた。

関西学院大学の検討により、ラボ培養で高濃度化した種藻体をクローズ培養に植菌していたことが原因で、藻体が弱光順化した可能性が示唆された。

対策として、クローズ培養の種藻体として「**対数増殖期**」の藻体を植菌することで、クローズ培養初期の**増殖停滞（誘導期）**を2～3日から約1日へと短縮することができた。



誘導期：培養開始時の細胞濃度と対数増殖曲線との交点

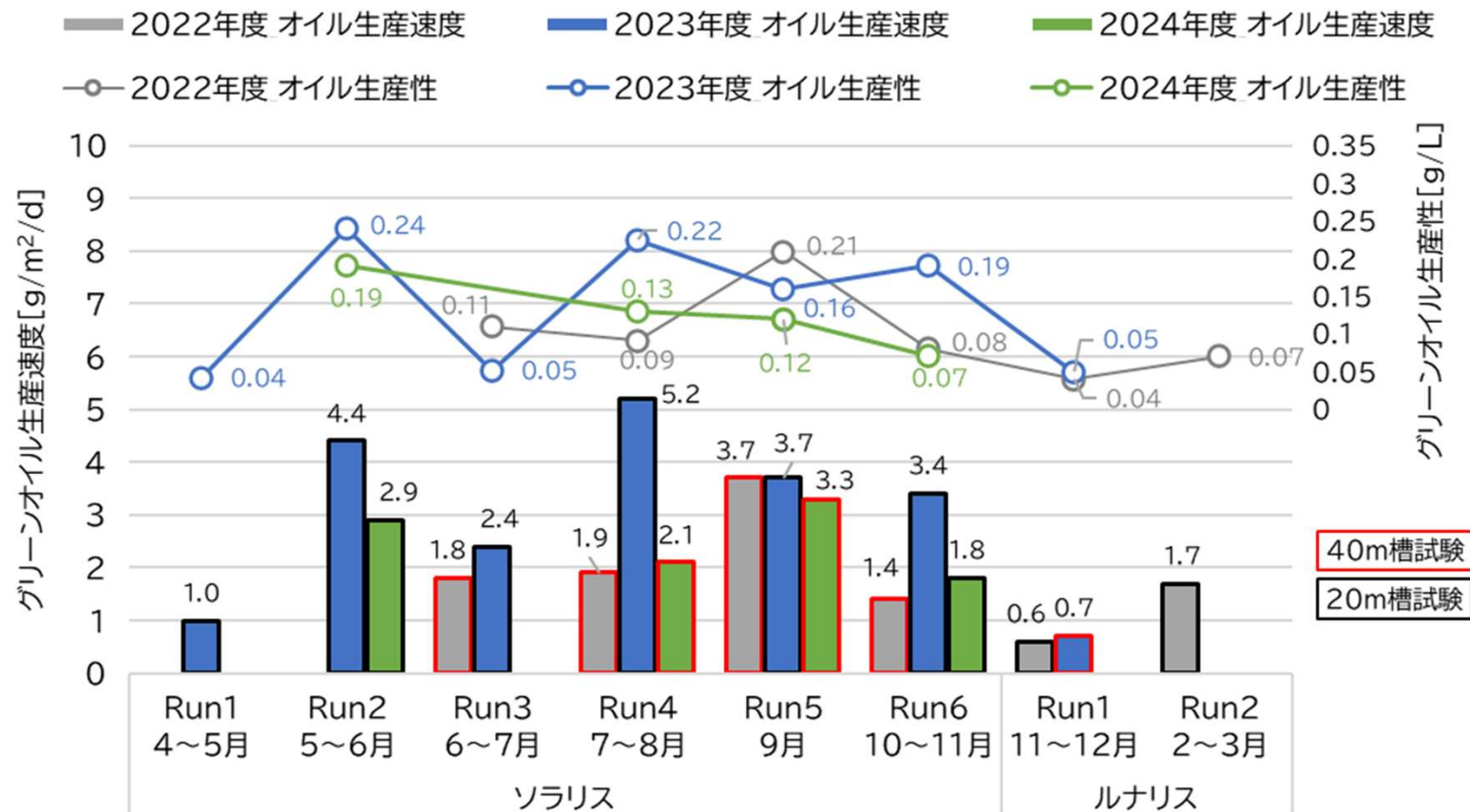
①オープン・クローズ型ハイブリッド培養装置の研究開発

ハイブリッド培養試験（オープン培養）

【グリーンオイル生産性と生産性速度（現状）】

ソリス（最高値）	生産性 : 0.24g/L	（目標値 : 0.28g/L）
	生産速度 : 5.2g/m ² /day	（目標値 : 10g/m ² /day）
ルナリス（最高値）	生産性 : 0.07g/L	（目標値 : 0.28g/L）
	生産速度 : 1.7g/m ² /day	（目標値 : 10g/m ² /day）

グリーンオイル生産性、生産速度の向上に向けて、従来とは異なる手法にて培養試験を実施し、評価中。



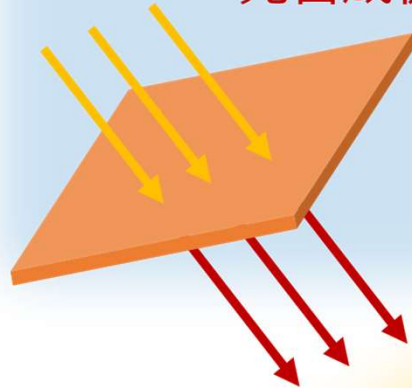
※1 グリーンオイル生産速度は、グリーンオイル生産性の値が最大の時の値を示す。



諏訪東京理科大学

光合成促進効果の検証
太陽光の利用性向上に向けた装置開発

光合成促進フィルム



有機薄膜太陽電池

光化学系I

光化学系II

CO₂

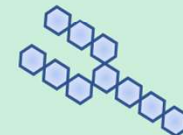


その他

オイル



タンパク質



糖

熱として
エネルギー
を排出 (NPQ)

NPQを担う
タンパク質
(Lhcx)

集光タンパク質
(FCP)



関西学院大学

光合成機能の解析



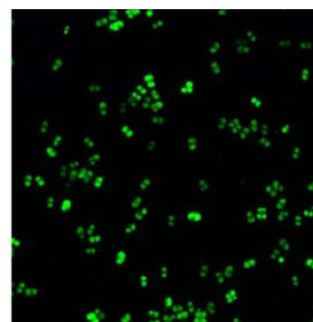
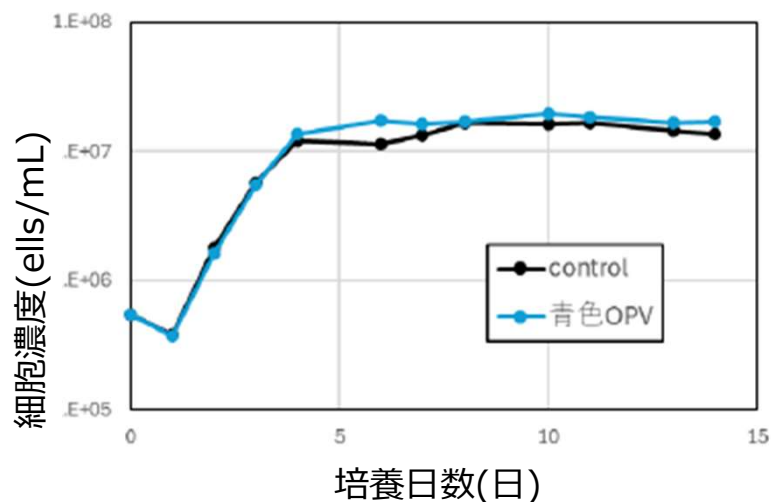
東京農工大学

光合成機能と生育、オイル蓄積率
の関係性解明
海洋ケイ藻の改変技術開発

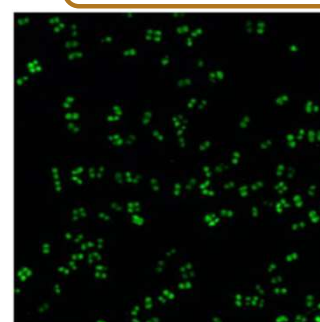
青色OPVを用いた培養試験



ガラス温室



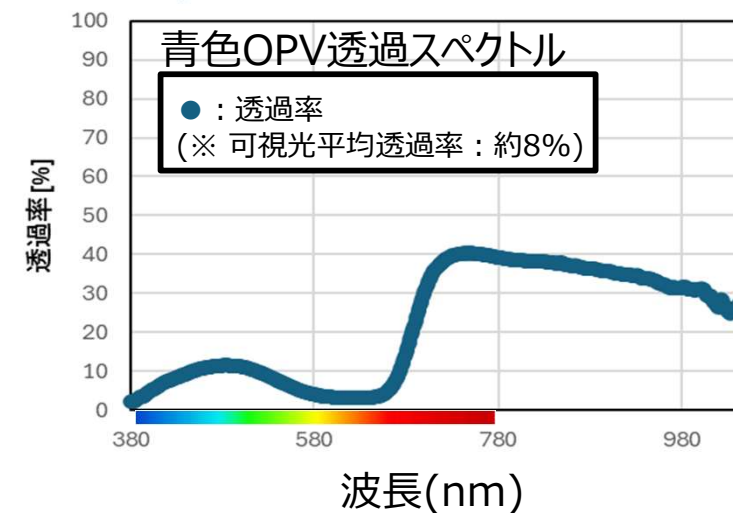
Control



青色OPV

オイル蛍光染色(青色OPV、14日目)

青色OPV特性評価



- ・ 可視光領域の平均透過率(AVT)は約8%
- ・ 発電効率は約3%

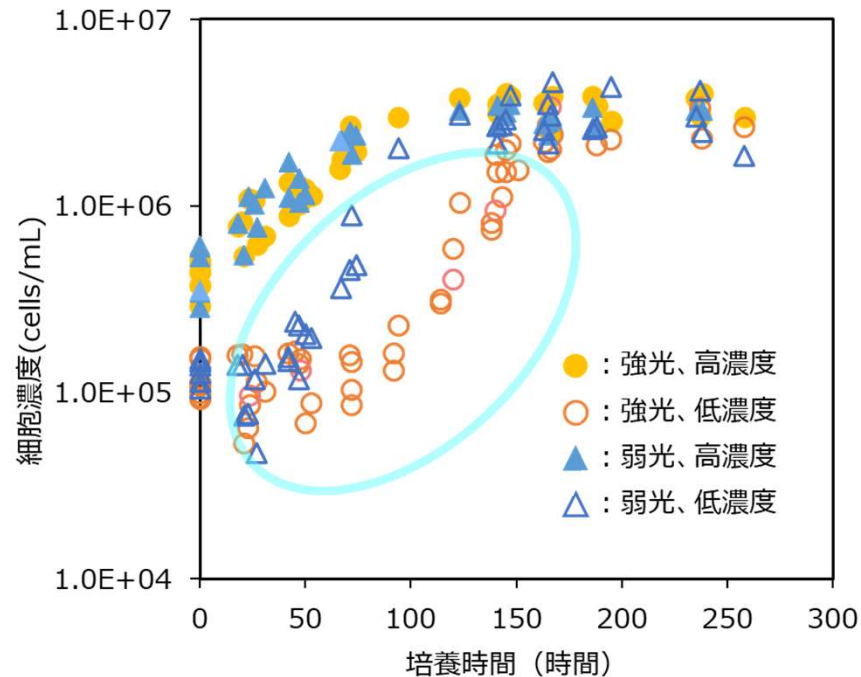
ガラス温室内の自然太陽光下において、青色OPVで培養した結果、controlと比較して生育には差がなかったが、オイル蓄積はControlよりも少なくなる傾向を示した。
→緑色OPVで培養した時のオイル蓄積を確認する。

現在の取り組み

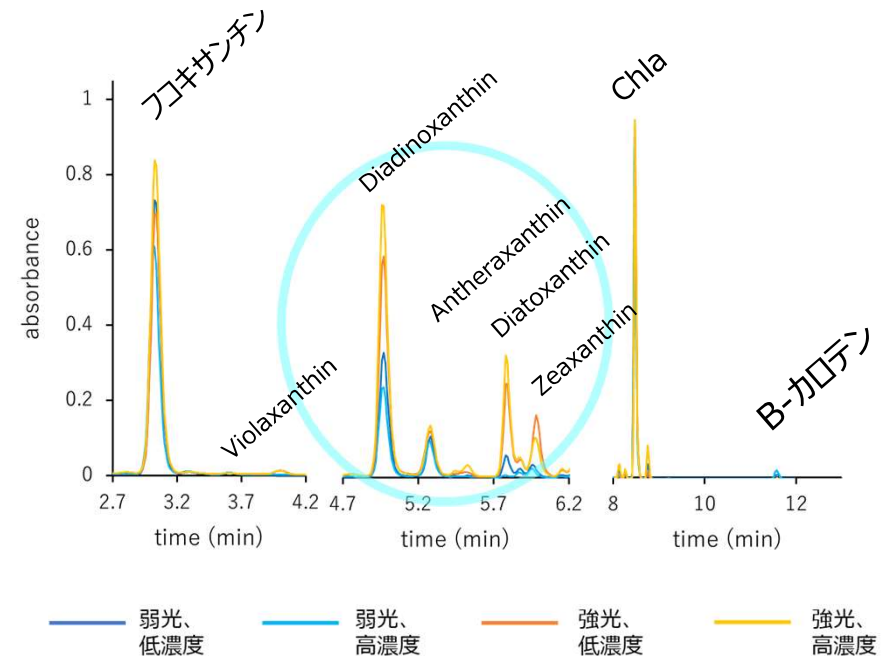
青色OPVで培養した時のオイル蓄積がControlよりも低くなったことから、緑色OPVを用いた時のオイル蓄積を確認する。
また、培養に適したOPVの膜厚や可視光領域の透過率の検討を行う。

シームレスな培養規模拡大に資する光ストレス緩和法の確立

ハイブリッド培養において、クローズ培養からオープン培養へ藻体に移した後に藻体の生育停滞が認められている。そのメカニズムを解明することで、細胞のストレスを抑制できるような段階的希釈法を探索する。



前培養した藻体を高濃度(OD0.03)または低濃度(OD0.003)となるように希釈し、弱光($50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)または強光($2,500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)で培養した結果、低濃度の細胞において生育遅延が確認された。

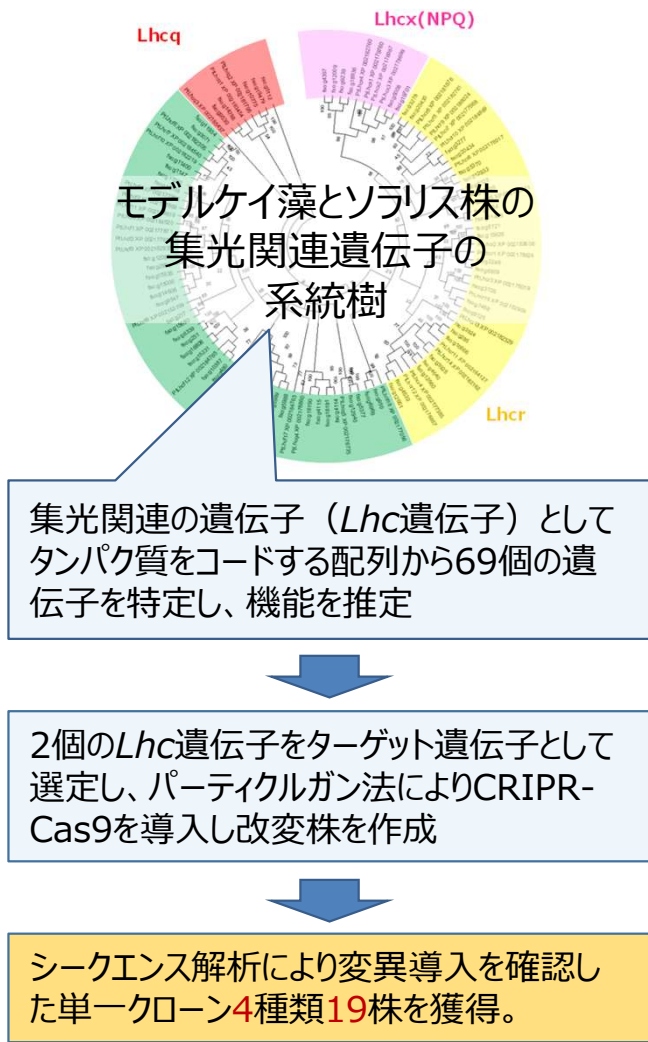


強光下において各キサントフィル量が増加し、特にDD-Dt系の増加、および還元型キサントフィルの増加が顕著であった。一方で、フコキサンチンや β -カロテン量は光量による大きな変化はなかった。

現在の取り組み

- ・屋外大型培養において最適な初期濃度・環境条件を試算する。
- ・ソリス株、ルナリス株では、温度特性だけでなく、窒素欠乏、強光ストレスなどに対する順化戦略が対照的であることから、培養規模拡大における希釈に関して、両株におけるシームレスなスケールアップ戦略をカスタム化する。

遺伝子改変株の作出



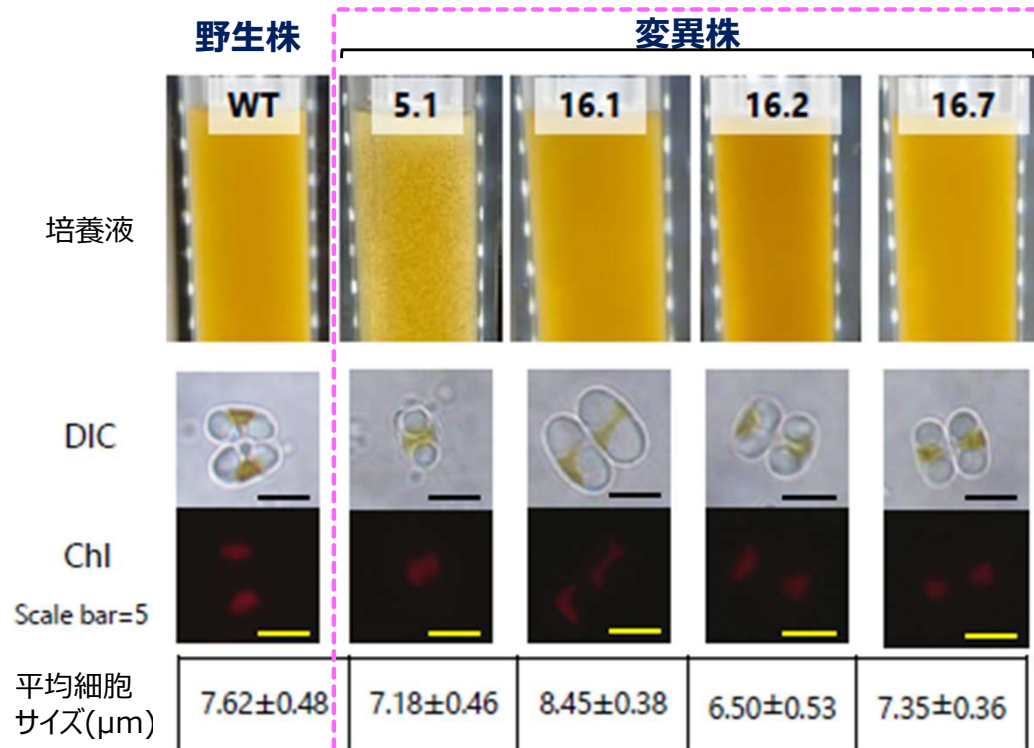
現在の取り組み

- ・オイル生産性向上に向けた最適培養条件の検討
- ・作出した変異株についてのスケールアップ時の評価

獲得した遺伝子改変株の評価

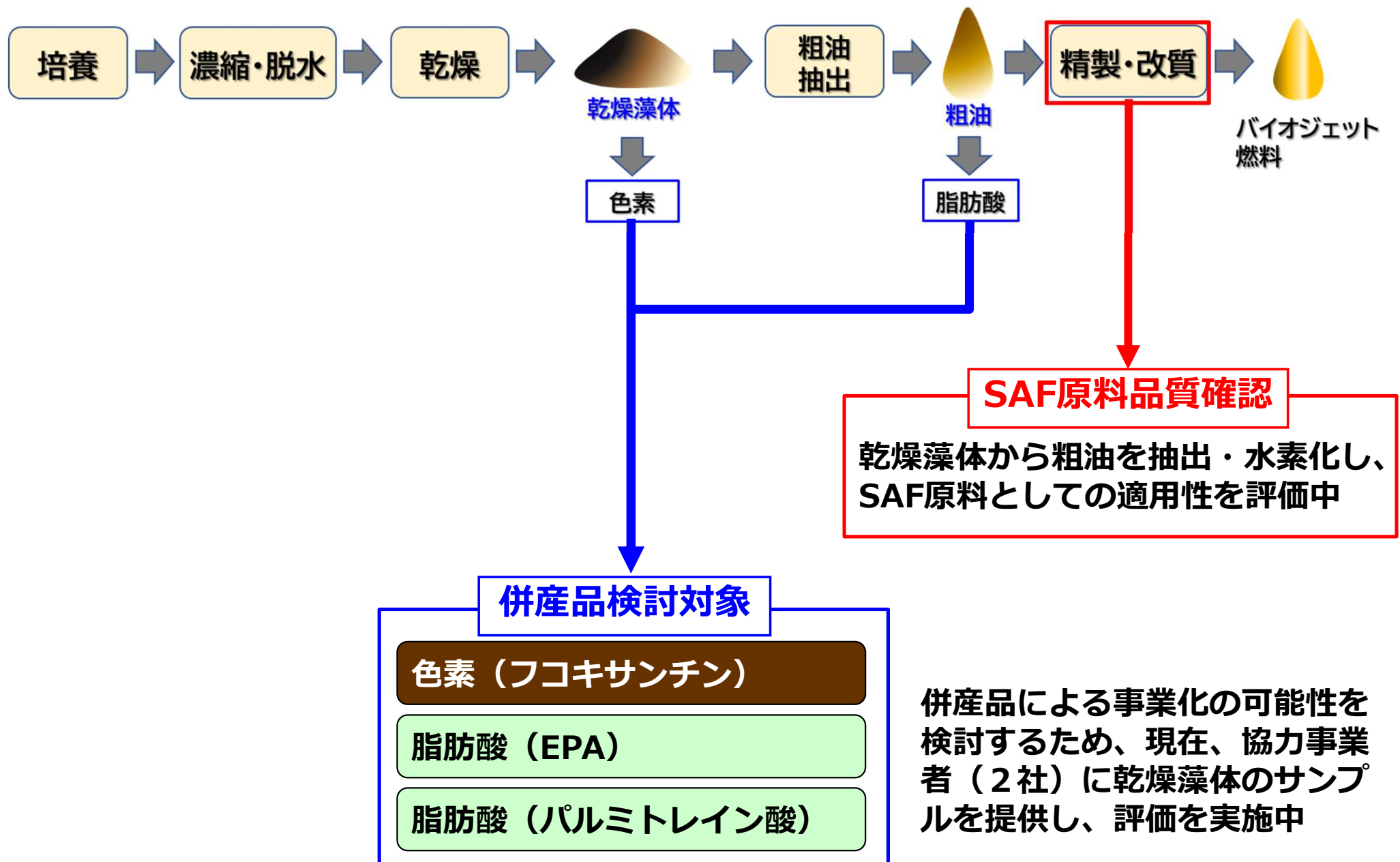
バイオマス、オイル生産性評価

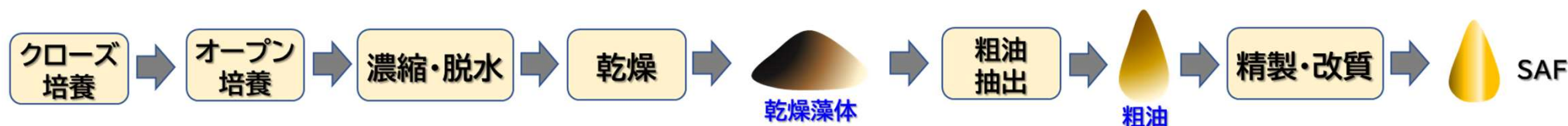
野生株 /変異株	細胞濃度 ($\times 10^6$ cells/ml)	比増殖速度 μ [day $^{-1}$]	バイオマス濃度 (g/L)	オイル含有量 (%)	オイル生産性 (g/L)
目標値	—	—	0.7	40	0.28
野生株	1.88 ± 0.28	0.91 ± 0.02	0.99 ± 0.08	43.6 ± 0.74	0.43 ± 0.04
変異株					
5.1	1.23 ± 0.06	0.91 ± 0.27	1.04 ± 0.01	50.4 ± 2.26	0.53 ± 0.02
16.1	2.22 ± 0.11	1.02 ± 0.25	1.08 ± 0.03	46.3 ± 3.92	0.50 ± 0.04
16.2	2.68 ± 0.10	1.87 ± 0.38	1.17 ± 0.10	46.8 ± 1.34	0.55 ± 0.06
16.7	2.12 ± 0.17	0.97 ± 0.30	1.07 ± 0.02	47.3 ± 5.94	0.51 ± 0.07



・獲得した変異株を培養し、細胞濃度、比増殖速度、バイオマス濃度、オイル含有量およびオイル生産性を測定し、野生株と同程度またはそれ以上の値を示すことを確認した。

⑥ 併産品も含むSAF 製造事業の採算性検討



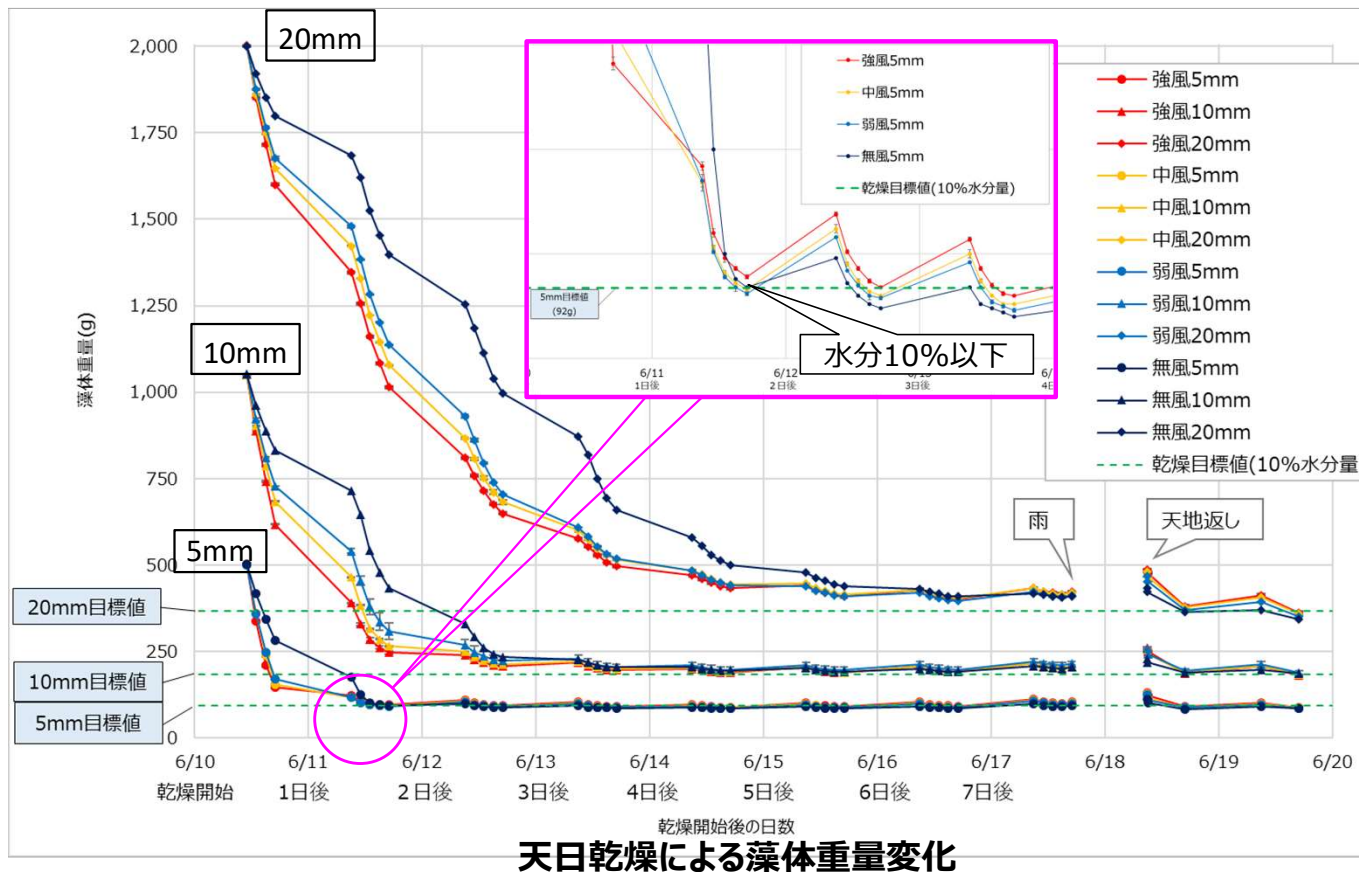
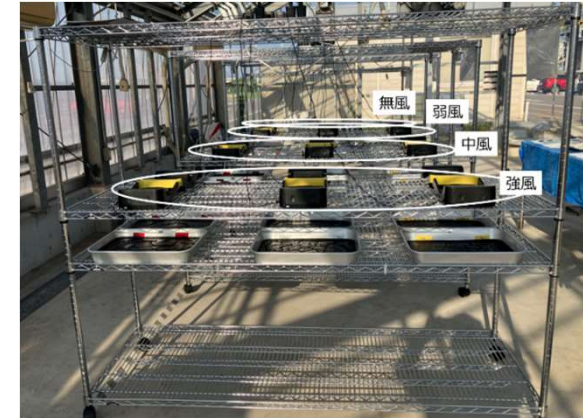
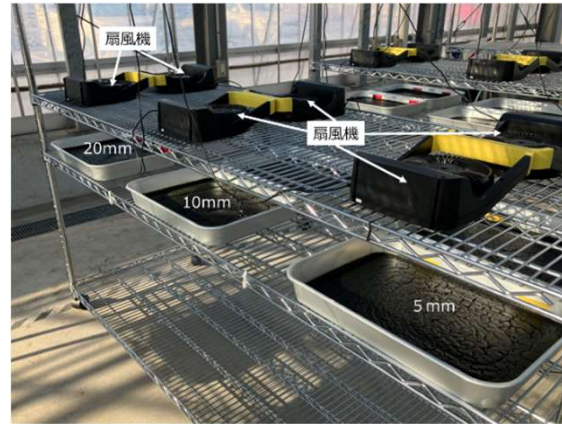


【消費電力低減に関する取り組み】

	改善策	採用
クローズ培養装置	循環ポンプの夜間間欠運転	○
	培養日数減	○
	藻体高濃度化	—
オープン培養装置	低エネルギー攪拌機構の採用	○
	夜間の攪拌停止	○
	日中の攪拌ON/OFF運用	—
濃縮・脱水	重力沈降後の藻体回収による遠心分離処理量低減	○
	処理流量増による遠心分離消費電力削減	○
乾燥	天日乾燥の促進	○
	天日乾燥＋マイクロ波仕上げ乾燥による消費電力低減	○

⑦ CO₂ 削減効果とエネルギー収支の試算と更なる効率化検討

天日乾燥促進検討



試験パラメータ

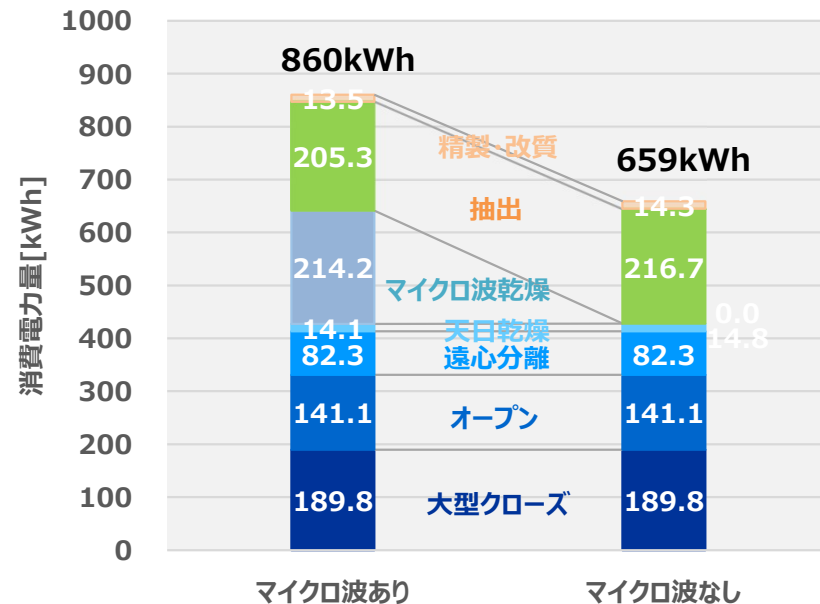
試料厚み (5, 10, 20mm)
通風条件 (0, 1, 2, 3m/s)



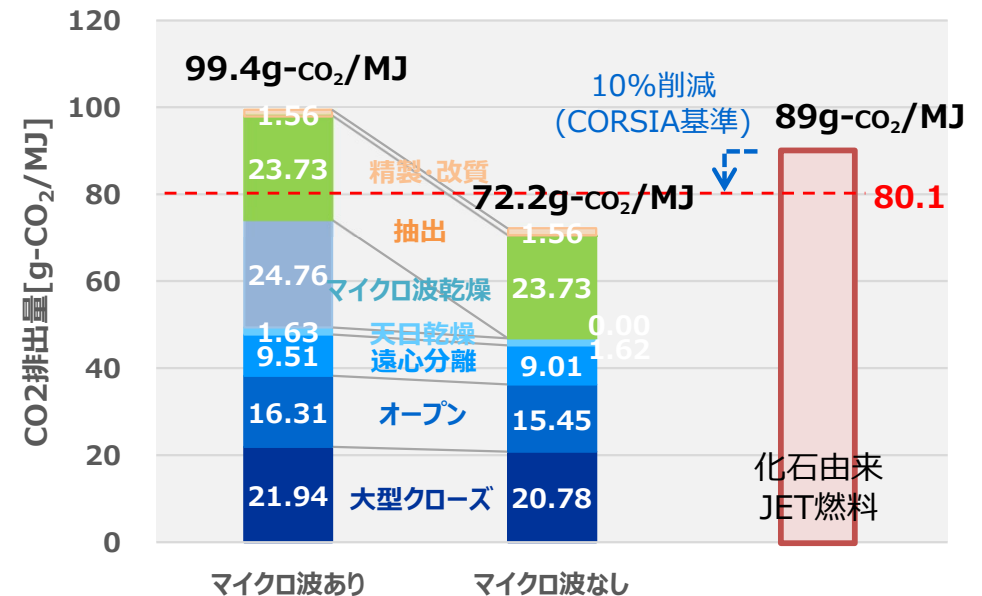
- ・6月の乾燥試験では、5mm厚・無風条件でも1.5日間で水分10%以下に到達した。
- ・ただし、乾燥速度は、気温や天候の影響を受けるため、引き続き、季節性データを取得中

⑦ CO₂ 削減効果とエネルギー収支の試算と更なる効率化検討

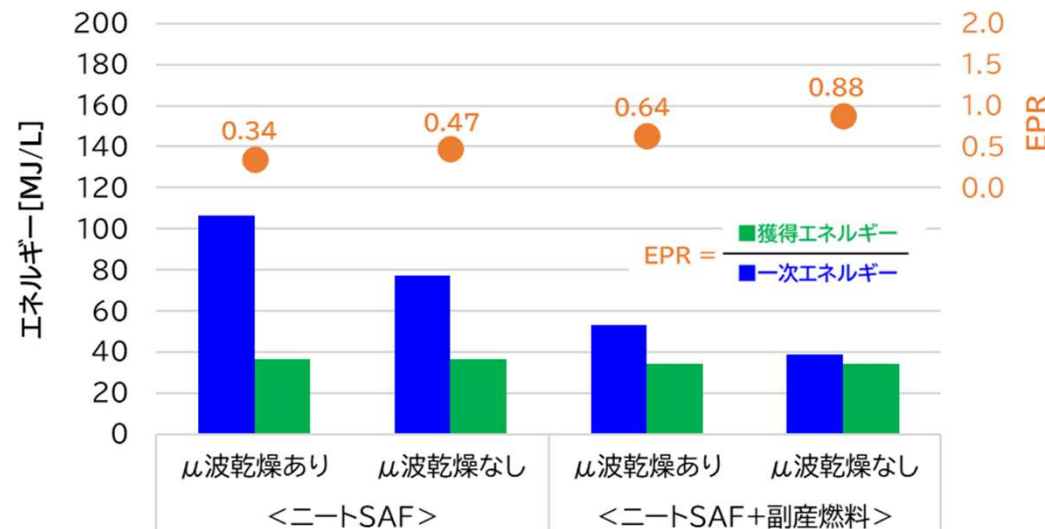
マイクロ波乾燥→天日乾燥のみとした場合の試算



【消費電力量】



【CO₂排出量】



【EPR試算】

乾燥工程を天日乾燥のみとする場合、マイクロ波乾燥による消費電力を抑えることができるため、EPRは1.38倍に向上する。
さらに、ニートSAF + 副産燃料までを考慮することで、EPRは約2.6倍に向上する。

2024年度目標と実施状況

2024年度目標と実施状況

- ①基本ユニットによるグリーンオイル生産量200 L/回(例：藻体収量0.7 g/L, オイル蓄積率40 wt%)を達成する安定大量培養技術を確立する。
- ②グリーンオイル生産速度向上（10 g/m²/day）に係る培養条件をハイブリッド型培養システムで検証する。

今年度、ソラリス株によるハイブリッド培養試験を6回実施し、培養条件を変えながらグリーンオイル生産性および生産速度に関するデータを取得した。また、グリーンオイル生産性および生産速度の向上に向けて、従来とは異なる培養手法での試験を実施し、データを評価中。現在、ルナリスによる培養試験を実施中。

- ③SAF製造事業者とのネットワーク構築、SAF原料品質確認、及び有望な併製品の原料サンプルを協力事業者を提供し、併製品の評価を行う。

現在、乾燥藻体から粗油を抽出・水素化し、SAF原料としての適用性を評価中。また、乾燥方法の違いによる成分組成および脂肪酸組成に及ぼす影響を確認した。現在、協力事業者に乾燥藻体のサンプルを提供し、高付加価値成分であるフコキサンチン、EPA、パルミトレイン酸を対象とした評価を実施中。

- ④エネルギー・CO₂収支向上の方法を試行し、その効果を評価する。

天日乾燥促進検討や消費電力低減に向けた各種取り組みを行い、エネルギー収支やCO₂削減効果について評価中。

ご清聴ありがとうございました。

本研究成果は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の助成事業で得られたものです。
ここに感謝の意を表します。