NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025　（分野：バイオマス（SAF･バイオガス））

発表No.：1-1-2

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

団体名：電源開発株式会社、公立諏訪東京理科大学、関西学院大学、東京農工大学

発表日：2025年7月15日

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CO_2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CO_2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、及び有望な併産品の原料サンプルを協力事業者に提供し、併産品の評価を行う。

④エネルギーCO_2収支向上の方法を試行し、その効果を評価する。

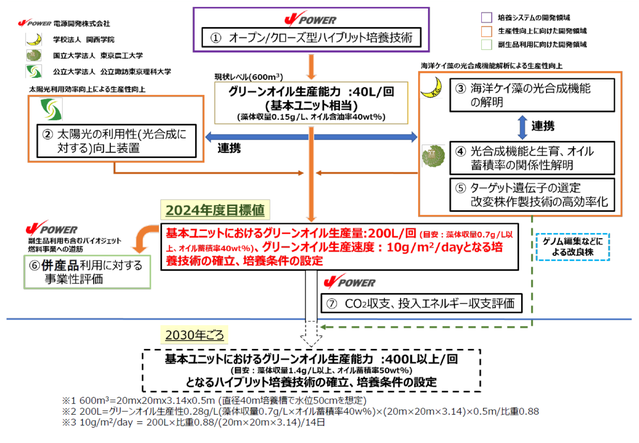
4．成果概要

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8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。グリーンオイル生産速度については、オープン培養方式での課題の解決を取り入れた培養手法を採用することで、生産速度が8.6g/m²/ dayまで向上した。

ソラリス株が生産したグリーンオイルについて、一般的なプロセスによるSAF製造を行い、 ASTM D7566規格を満足することを確認した。また、併産品の事業化検討を実施した。

さらに、エネルギー・CO_2収支向上に向けた消費電力低減に関する試行を行い、CORSIA基準、及びEPR＞1を達成可能な条件を提案した。

研究内容と実施体制



※1 600m³=20mx20mx3.14x0.5m (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/Lxオイル蓄積率40w%)×(20m×20m×3.14)×0.5m/比重0.88
※3 10g/m²/day = 200Lx比重0.88/(20m×20m×3.14)/14日

全体スケジュール

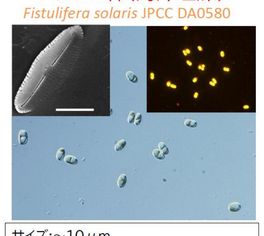
項　目	助成事業 2023年度	助成事業 2024年度
(1) 主な設備導入、既設設備の整備		
・オープン型培養培養装置(基本ユニット用)	※	
(2) 試験項目		
① オープン・クローズ型ハイブリッド培養装置の研究開発(JPOWER)		
①-1 オープン・クローズ型ハイブリッド培養装置による屋外大量安定培養技術の確立		
①-2 ハイブリッド培養システムの運用に向けた運転ノウハウの取得		
①-3 実証ユニットに向けた検討		
② 太陽光の利用性向上に向けた装置開発(諏訪東京理科大学)		
②-1 海洋ケイ藻の生育段階に対する光質、及び光量の適正化		
②-2 「有機薄膜太陽電池と光合成促進フィルム」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

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

試験に用いた海洋ケイ藻

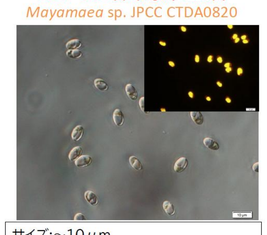
ソラリス株(海洋珪藻)　*Fistulifera solaris* JPCC DA0580



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

オイル:中性脂質
主となる脂肪酸: C16:1, C16:0, EPA

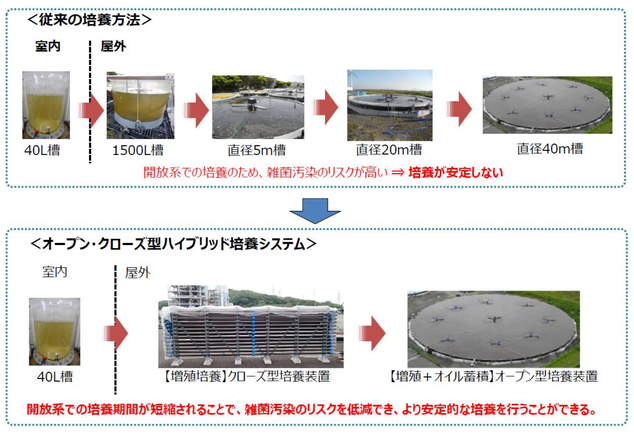
ルナリス株(海洋珪藻)　*Mayamaea* sp. JPCC CTDA0820



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

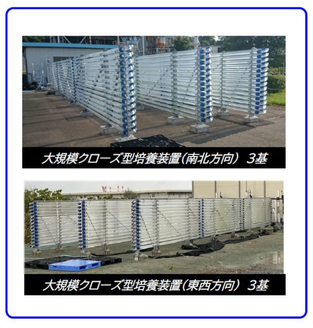
オイル:中性脂質
主となる脂肪酸: C16:1, C16:0, EPA

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

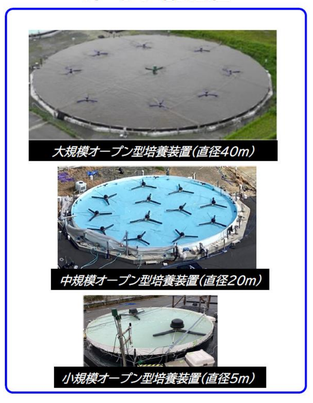


①オープン・クローズ型ハイブリッド培養装置の研究開発

クローズ型培養装置



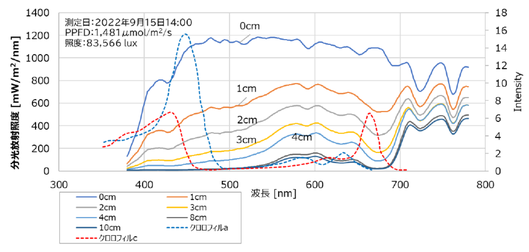
オープン培養装置



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)　オープン培養

- オープン培養装置では、ソラリス株/ルナリス株の増殖に伴う濁度上昇により光透過性が低下することが、オイル生産性の律速となっている。



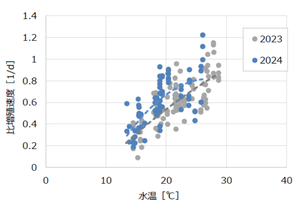
水面からの深さによる透過スペクトルの変化（濁度[OD750]:1.2）

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

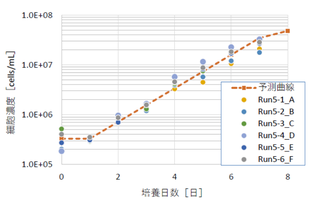
ハイブリッド培養試験（クローズ培養）　クローズ培養

＜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比増殖速度の関係から導かれる生育予想曲線を用いて、**細胞濃度の予測が可能**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

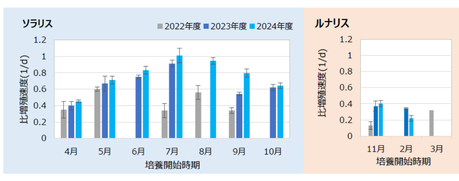
ハイブリッド培養試験（クローズ培養）

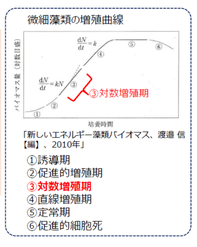
クローズ培養

＜増殖速度の改善＞

・培養条件の適正化により高い比増殖速度が得られるようになり、**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、クローズ培養装置を設置する方角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。

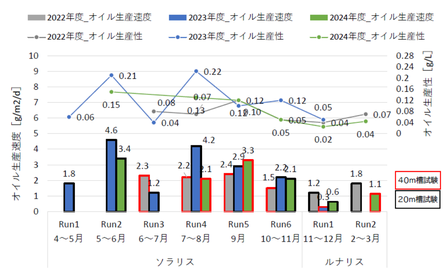
2．高酸素濃度対策や植菌時に対数増殖期の種藻体を使用したことにより、増殖速度が向上した。

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）　オープン培養

【グリーンオイル生産性と生産性速度（現状）】

ソラリス（最高値）	生産性	:0.24g/L	（目標値：0.28g/L）
	生産速度	:5.2g/m²/day	（目標値：10g/m²/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/m²/day	（目標値：10g/m²/day）

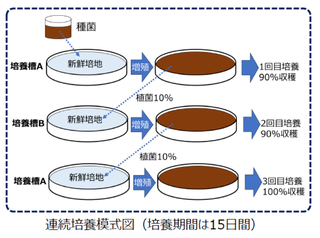


※1 グリーンオイル生産速度は、グリーンオイル生産性の値が最大の時の値を示す。

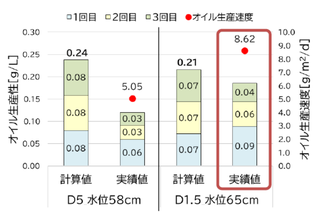
①オープン・クローズ型ハイブリッド培養装置の研究開発

連続培養　オープン培養

培養液の濁度上昇に伴う光不足によるグリーンオイル生産性、生産速度の停滞を解消する方法として、低濃度培養と回収を連続的に繰り返すオープン連続培養を考案し、D5m槽およびD1.5mPC槽を用いて試験を行った。
その結果、D1.5mPC槽（水位65cm）での３回連続培養にて、グリーンオイル生産速度が8.6 g/m²/dayまで向上することを確認した。オープン連続培養の手法を改善することによってグリーンオイル生産速度の向上が期待される。



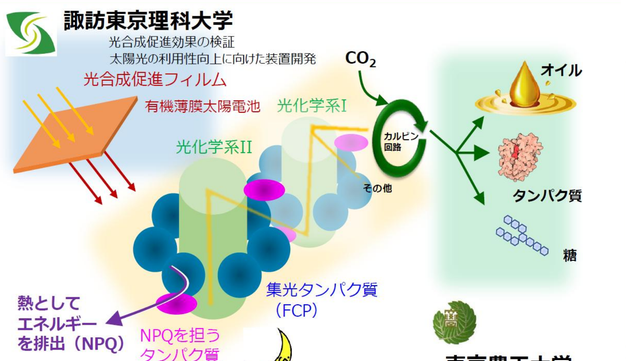
連続培養模式図（培養期間は15日間）



連続培養開始時は、100万cells/mL程度でスタートし、5日間培養する。
その後、培養液の10%を使用し2回目の培養をスタートする。
3回目も同様に5日間培養し、その後全量を回収する。

培養開始時期
D5m：2024年8月23日～
D1.5m：2024年9月19日～

委託先での検討状況



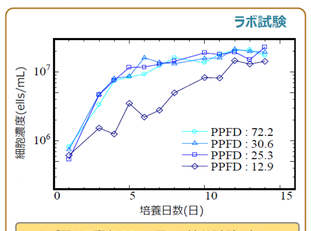
②太陽光の利用性向上に向けた装置開発

委託先 公立諏訪東京理科大学

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

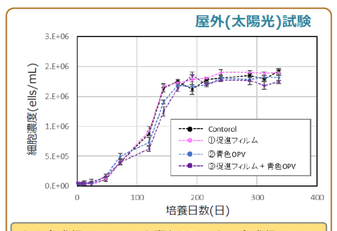
②-2「有機薄膜太陽電池と光合成促進フィルム」のハイブリッド型培養システムへの適用性把握

ラボ試験



光量が異なる青色OPVを用いた培養試験において、PPFDが 12.9～ 25.3 [μmol/m²/s]の範囲内にソラリス株の増殖における光量の閾値があることを確認した。

屋外(太陽光)試験



①光合成促進フィルム、②青色OPV、③光合成促進フィルムと青色OPVの組み合わせでの培養した結果、各条件においてバイオマス量、比増殖速度に有意な差は見られなかったことから、青色OPVのみを培養システムに用いることとした。

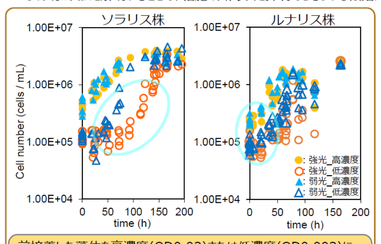
【成果】
培養装置の上面に設置するOPVとして、透過後の光量がPPFD25 [μmol/m²/s]以上で、高い発電能力を持つ青色有機薄膜太陽電池（青色OPV）が適用可能であることを確認した。
青色OPVと光合成促進フィルムとの組み合わせ条件において、バイオマス量、比増殖速度に有意な差は見られなかったことから、青色OPVのみを培養システムに用いることとした。

③海洋ケイ藻の光合成機能解析

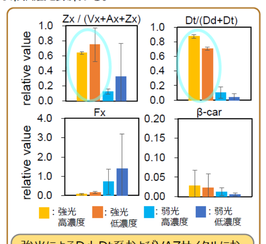
委託先 関西学院大学

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

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を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)に希釈し、弱光(50 μmol/m²/s)または強光(2,500 μmol/m²/s)で培養した結果、低濃度の細胞において顕著な生育遅延が確認された。更にルナリス株は基本的に希釈ストレスを受けやすかった。



強光によるDd-Dt系およびVAZサイクルにおける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･希釈率による有意差はなかった。

【成果】
ソラリス株とルナリス株では、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異なることが明らかとなり、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見込みを得た。

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

委託先 東京農工大学

遺伝子改変株の作出

集光関連の遺伝子（*Lhc*遺伝子）としてタンパク質をコードする配列から69個の遺伝子を特定し、機能を推定

2個の*Lhc*遺伝子をターゲット遺伝子として選定し、パーティクルガン法によりCRISPR-Cas9を導入し改変株を作成

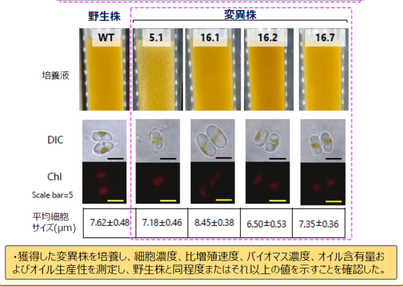
シークエンス解析により変異導入を確認した単一クローン4種類19株を獲得。

【成果】
ソラリス株の遺伝子改変技術を確立した。

獲得した遺伝子改変株の評価

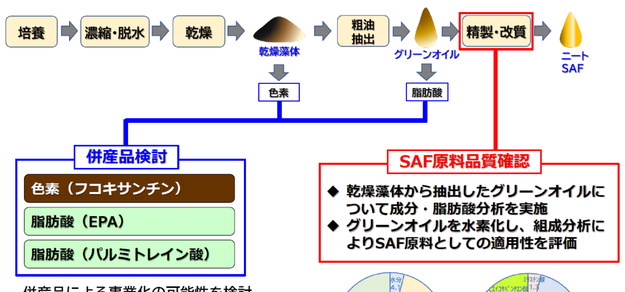
バイオマス、オイル生産性評価

	野生株/変異株	細胞濃度 (×10⁶ 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)
	親藻株	–	–	0.7	40	0.28
	野生株	1.88±0.28	0.91±0.02	0.99±0.08	45.6±0.74	0.43±0.04
変異株	5.1	1.23±0.05	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

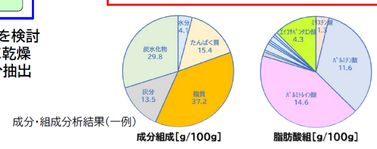


・獲得した変異株を培養し、細胞濃度、比増殖速度、バイオマス濃度、オイル含有量およびオイル生産性を測定し、野生株と同程度またはそれ以上の値を示すことを確認した。

⑥併産品も含むSAF 製造事業の採算性検討



併産品による事業化の可能性を検討するため、協力事業者(2社)に乾燥藻体のサンプルを提供し、成分抽出効率等を評価した。

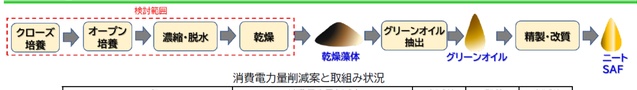


⑥併産品も含むSAF 製造事業の採算性検討

以下のフローにより、ソラリス株が生成したグリーンオイルを対象にSAF原料としての適用性を評価した結果、ASTM D7566規格を満足することが確認された。

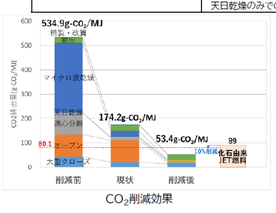
ソラリス株のグリーンオイルから生産したSAF相当品

⑦ CO_2 削減効果とエネルギー収支の試算と更なる効率化検討

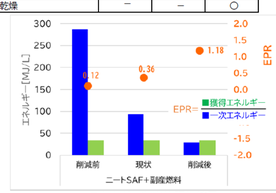


消費電力量削減案と取組み状況

工程		消費電力量削減案	削減前	現状	削減後
培養	クローズ型	循環ポンプの夜間間欠運転	–	○	○
		藻体高濃度化	–	–	○
	オープン型	低エネルギー撹拌機構の採用	–	–	○
		夜間の撹拌停止	–	–	○
		日中の撹拌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＋マイクロ波仕上げ乾燥による消費電力低減	–	○	–
		天日乾燥のみでの乾燥	–	–	○



CO_2削減効果



エネルギー収支比評価結果

目標と成果

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。

ソラリス株/ルナリス株によるハイブリッド培養試験を16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を取り入れることで、ソラリス株では生産速度が8.6 g/m²/dayまで向上した。

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

ソラリス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した結果、ASTM D7566規格を満足することが確認された。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した。

④エネルギー・CO_2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CO_2削減効果について評価し、CORSIA基準、及びEPR＞1を達成可能な条件を提案した。

連絡先：電源開発株式会社　技術開発部　若松研究所　バイオ･環境技術研究グループ　西村 恭彦
MAIL： yasuhiko_nishimura@jpower.co.jp