

機能改良による高速CO₂固定大型藻類の創出 とその利活用技術の開発



PM：植田充美

京都大学高等研究院・特任教授

PJ参画機関：京都大学 高等研究院、工学研究科、
農学研究科、三重大学、関西化学機械
製作（株）、Green Earth Institute（株）

機能改良による高速CO₂固定大型藻類の 創出とその利活用技術の開発

京都大学高等研究院

植田 充美

- ・ 京都大学高等研究院
 - ・ 三重大学大学院生物資源学研究科
 - ・ 京都大学大学院農学研究科
 - ・ 京都大学大学院工学研究科
 - ・ Green Earth Institute株式会社
 - ・ 関西化学機械製作株式会社
- 北川進
柴田敏行
黒田浩一
跡見晴幸
伊原智人
野田秀夫

大型藻類CO₂固定の加速により地球環境の回復と物質生産を両立

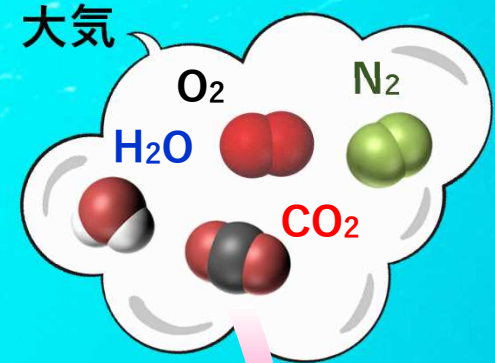
✦✦ *Air gold* の時代を拓く ✦✦

大型藻類

〔陸上植物と比べて約10倍のCO₂吸収量〕

- CO₂固定能の強化
優良株選抜育種
ゲノム編集株作製
- 藻場の拡大
- 固定したCO₂の有効活用

潜在能力を拡張



生物学的固定の強化
自然プロセスの加速

大型藻類の育種
〔優良種の選抜・ゲノム編集〕

化成品原料・
生分解性プラス
チック

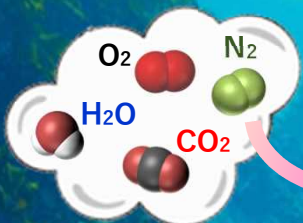
機能性
食品素材

人工代謝経路による変換
固定したCO₂の有効活用

アミノ酸

有機物

合成生物学的育種



酸素フリーN₂

低エネルギー
プロセス

基本戦略

【基盤技術】（ラボスケール）

- 2011-2017
CREST「藻類完全利用のための生物工学技術の開発」（京大・植田）
→ 大型藻類の全ての多糖成分をエタノールに変換できるアーミング酵母触媒の開発
- 2021
NEDO先導研究「大型海藻類の完全利用に向けた基盤技術の開発」（三重大・柴田）
→ 大型藻類の育種基盤とマリンポリフェノール抽出法の開発



【提案環境循環を実現する方法への展開】（ラボスケールからベンチスケールへ）

- ① 自然プロセスの人為的加速によるCO₂の効率的回収と吸収技術
- ② 吸収CO₂の有益な資源への利活用転換技術

大型藻類の優位性 (陸上バイオマスとの比較)

	澱粉糖質系 (1G)	木質系 (2G)	藻類 (3G)	
原料	農産物 (トウモロコシなど)	森林 (スギなど)	微細藻類 (スピルリナなど)	大型藻類 (クロメ)
生産性 (t/ha/年)	11	9	10~20	30
CO ₂ 固定速度 (kg-CO ₂ /m ² /年)	1.6	0.84	1.5~2.9	3.3
CO ₂ 固定量比	2.3	1	7.6	13
バイオマスエネルギー生産工程	シンプル	複雑 (リグニン除去)	シンプル	シンプル (アルギン酸多糖類の活用が鍵)
問題点	食糧と競合	陸地を利用	陸地を利用, コンタミのリスク, コスト高	藻場の拡大
生産条件	日光, CO ₂ , 淡水, 陸地, 肥料, 農薬	日光, CO ₂ , 淡水, 陸地, 肥料, 農薬	日光, CO ₂ , 淡水/汽水, 陸地	日光, CO ₂ , 海水

大型藻類がもつ その他のメリット

天然藻体を確保しやすい

養殖技術が確立されている

約6ヶ月で藻長2mの藻体を確保できる

食用と用途と競合しない

稀少な有用メタボライトを持つ

フロロタンニン類 (マリンポリフェノール類*)を持つ

フロロタンニン抽出液の市場価格：25,000円 (kg)

【引用】

- <http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/dept/22climate/kyuushuuryou/documents/page1-4-per-year.pdf>
- 経営センサー 2021.12. 「微細藻類の産業利用」

*商標登録 登録第6216128号, 登録第6216129号
(国立大学法人三重大学)

大型藻類の育種技術の確立 (CREST、NEDO先導)

(CREST研究：天草漁業協同組合・熊本県水産研究センターとの連携によりクロメ養殖に成功)

アラメ属・カジメ属褐藻類栽培技術の確立



クレモナ糸についた幼体



糸に挟み込んだ幼体



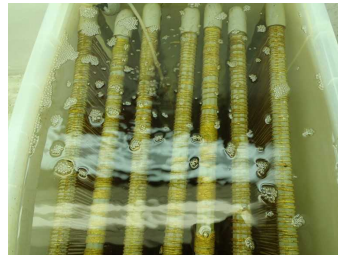
クロメの養殖 (世界初の非食用用途での海藻養殖)



ストロングポイント

クロメ配偶体の生産と種苗としての活用
約6カ月の沖出しで藻長1.5 mまで生長
施肥などの管理は不要

① 種付け



② 沖出し (約6か月)



③ 収穫



④ 乾燥
(一日半の天日干し)



⑤ 裁断



⑥ 乾燥クロメチップ

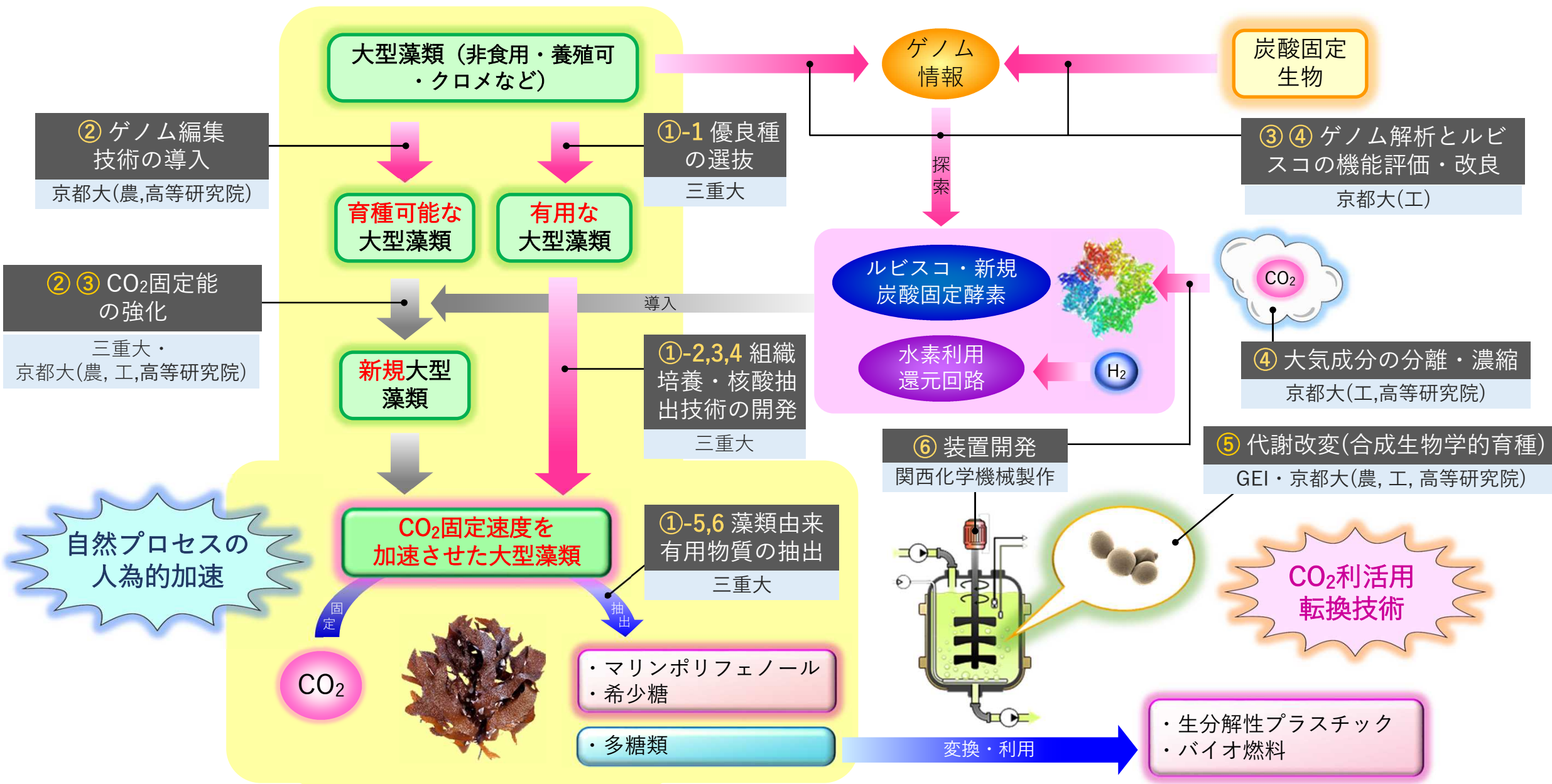


バイオリファイナリー原料

「天草モデル」を
日本全国の漁協と展開し、「大型藻類育
種の技術革新」によ
り藻場面積を飛躍的
に増加させる

- ・藻場拡大の波及効果
- ・水産資源(魚介類)量
の回復と増加
- ・漁業従事者の収入増

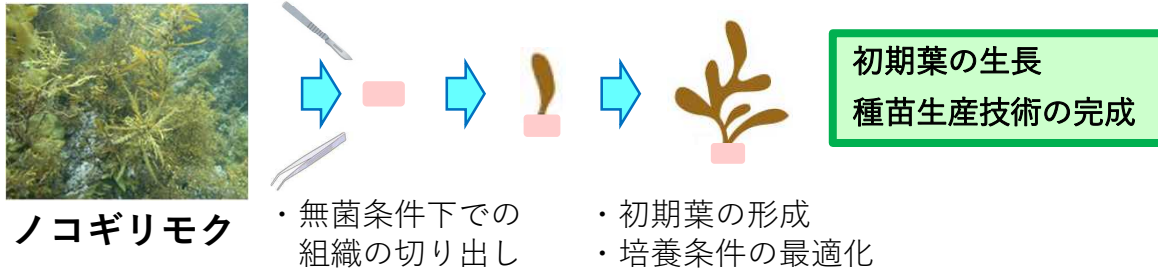
プロジェクトの実施体制 (2022-2024年度)



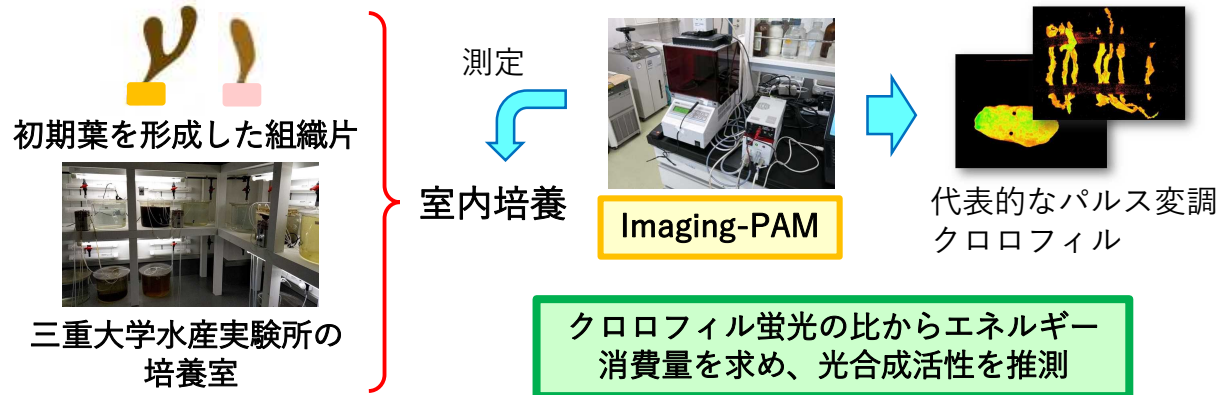
大型藻類の育種と機能強化、完全利用を加速させる基盤技術の開発（三重大学）

①-1. 有用ホンダワラ科褐藻類からの組織培養と再生技術の開発

- ・成熟した母藻から受精卵を採取する必要がある
- ・受精卵の放出が間歇的であり安定した種苗の生産は難しい



①-3. 室内水槽での大型藻類の培養技術および幼体を対象とした光合成測定・CO₂固定量測定技術の開発

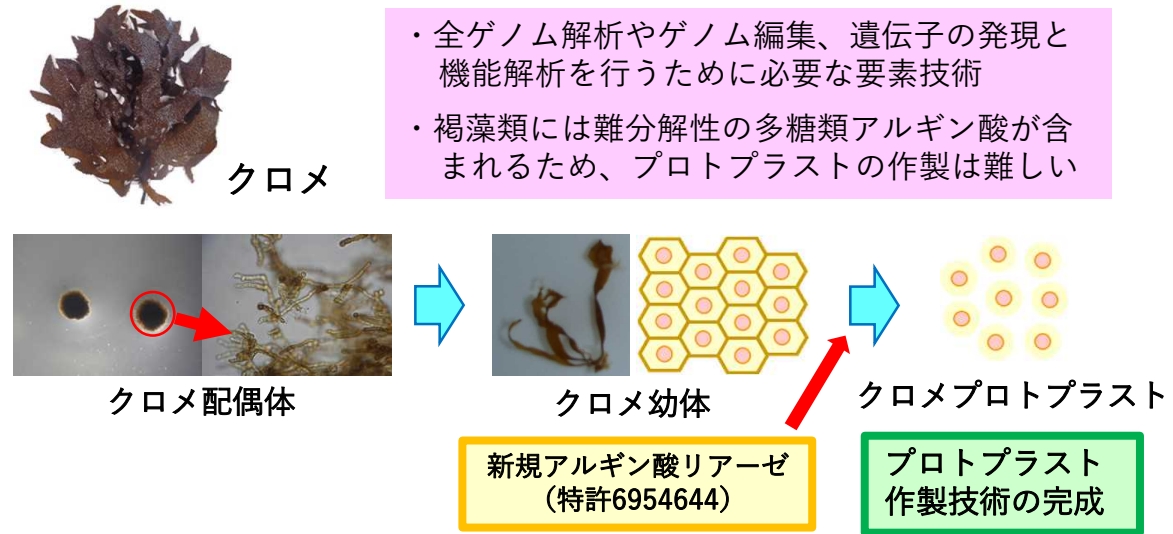


①-6. 微生物前処理法を組み合わせた物質生産プロセスについてLCAに基づく環境影響評価の実施

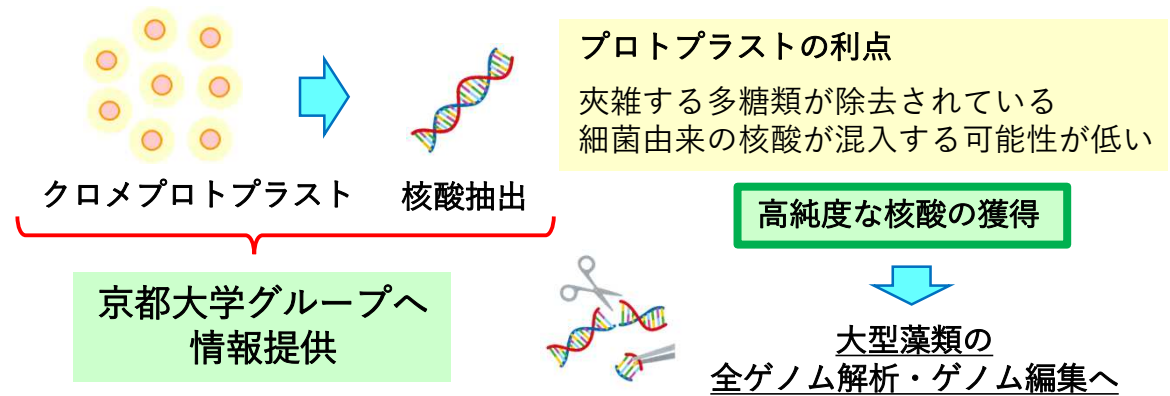
CO₂排出削減のポイントとなるボトルネックを特定

LCAの算定

①-2. 褐藻類からのプロトプラスト作製技術の確立



①-4. ゲノム編集と機能改変のための核酸抽出技術の開発



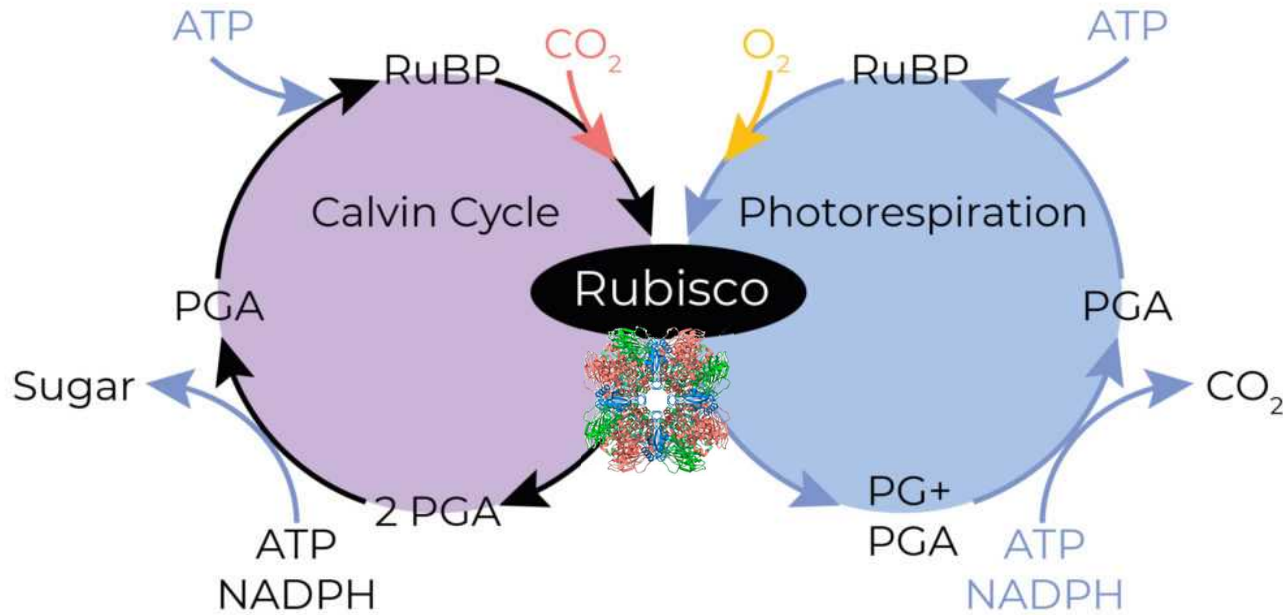
①-5. 微生物前処理法の開発

マリンポリフェノール・多糖など有用物質を高効率に回収

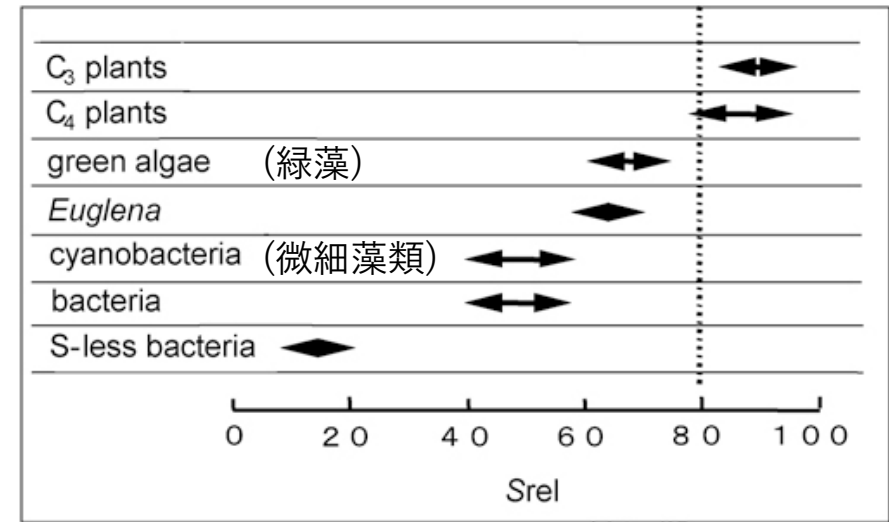
CO₂固定酵素Rubiscoの特性の解析 (京都大学・工, 高等研究院)

Rubisco (Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase) :

カルビン-ベンソン回路においてCO₂固定反応に関与する唯一の酵素



様々なRubiscoのCO₂特異性



CO₂への親和性が高く、O₂と反応しにくい性質が求められる



● S_{rel} : Carboxylase/oxygenase relative specificity of Rubisco (τ 値) による評価

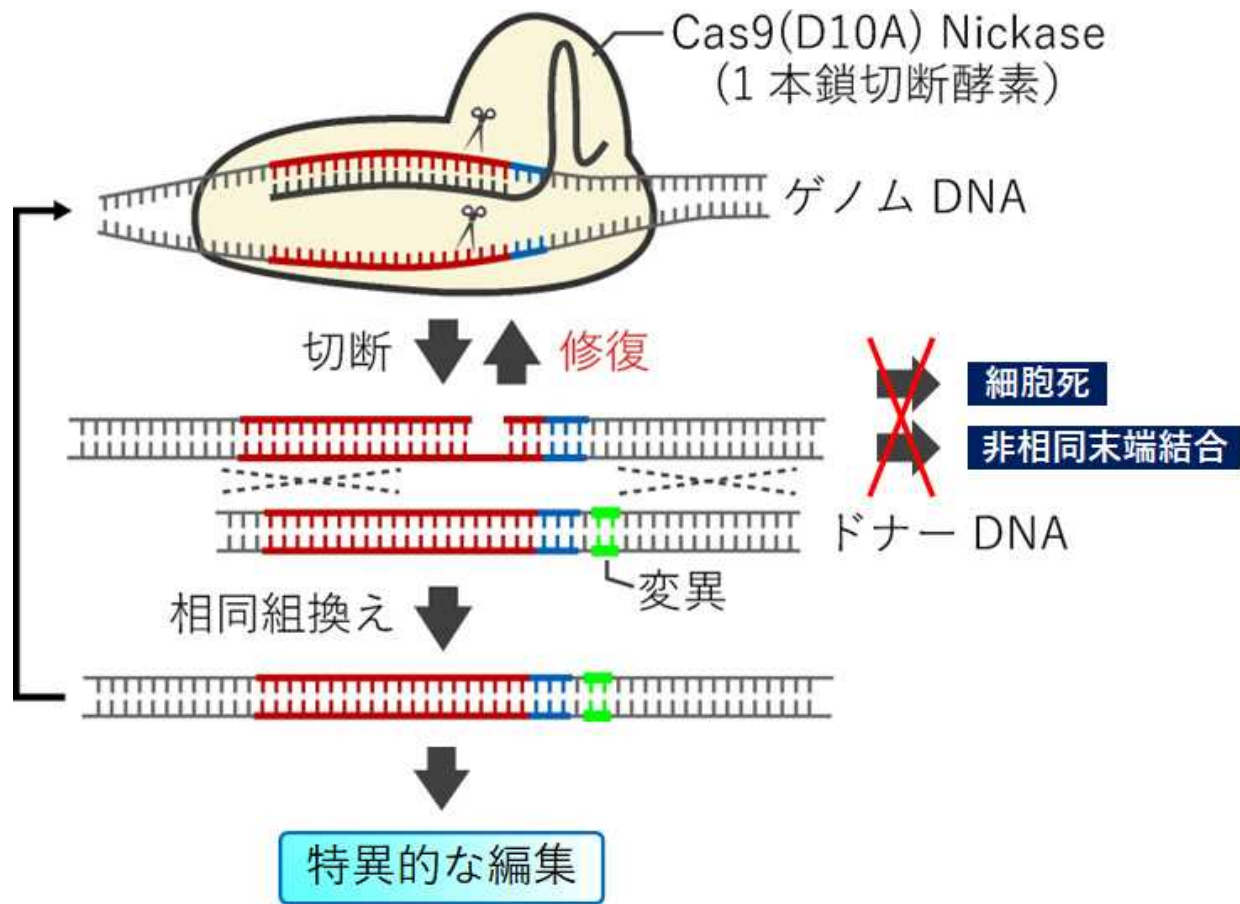
$$S_{rel} = \frac{V_{cmax}/K_{cm}}{V_{omax}/K_{om}}$$

各生物種由来RubiscoのS_{rel}値

ハウレンソウ:	80-90
藍藻 (微細藻類):	40-50
紅藻 <i>Galdieria</i> :	238
紅藻 <i>Cyanidium</i> :	230
褐藻 (大型藻類):	?

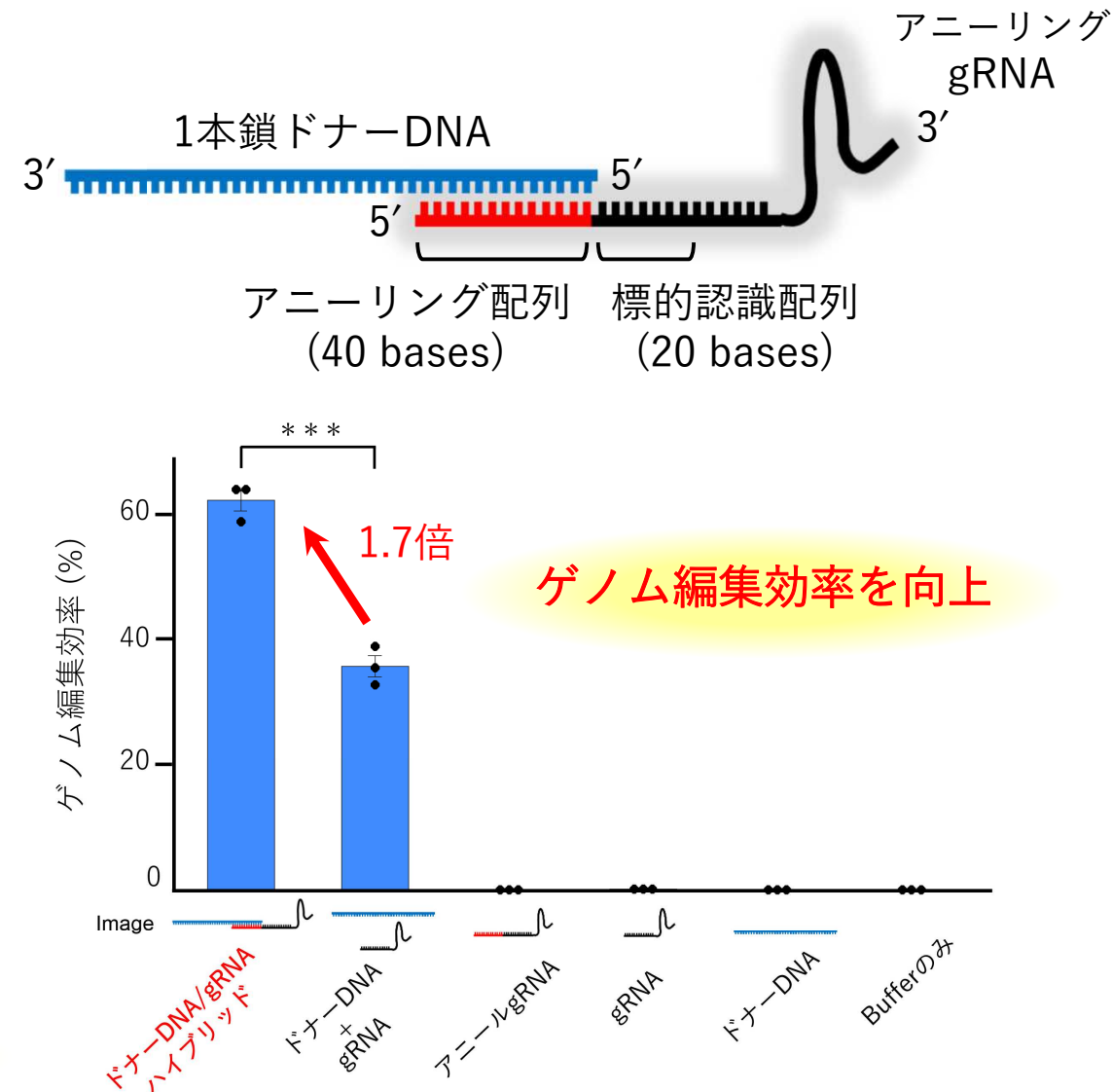
大型藻類におけるゲノム編集技術の確立 (京都大学・農, 高等研究院)

②-1. CRISPR Nickase システム

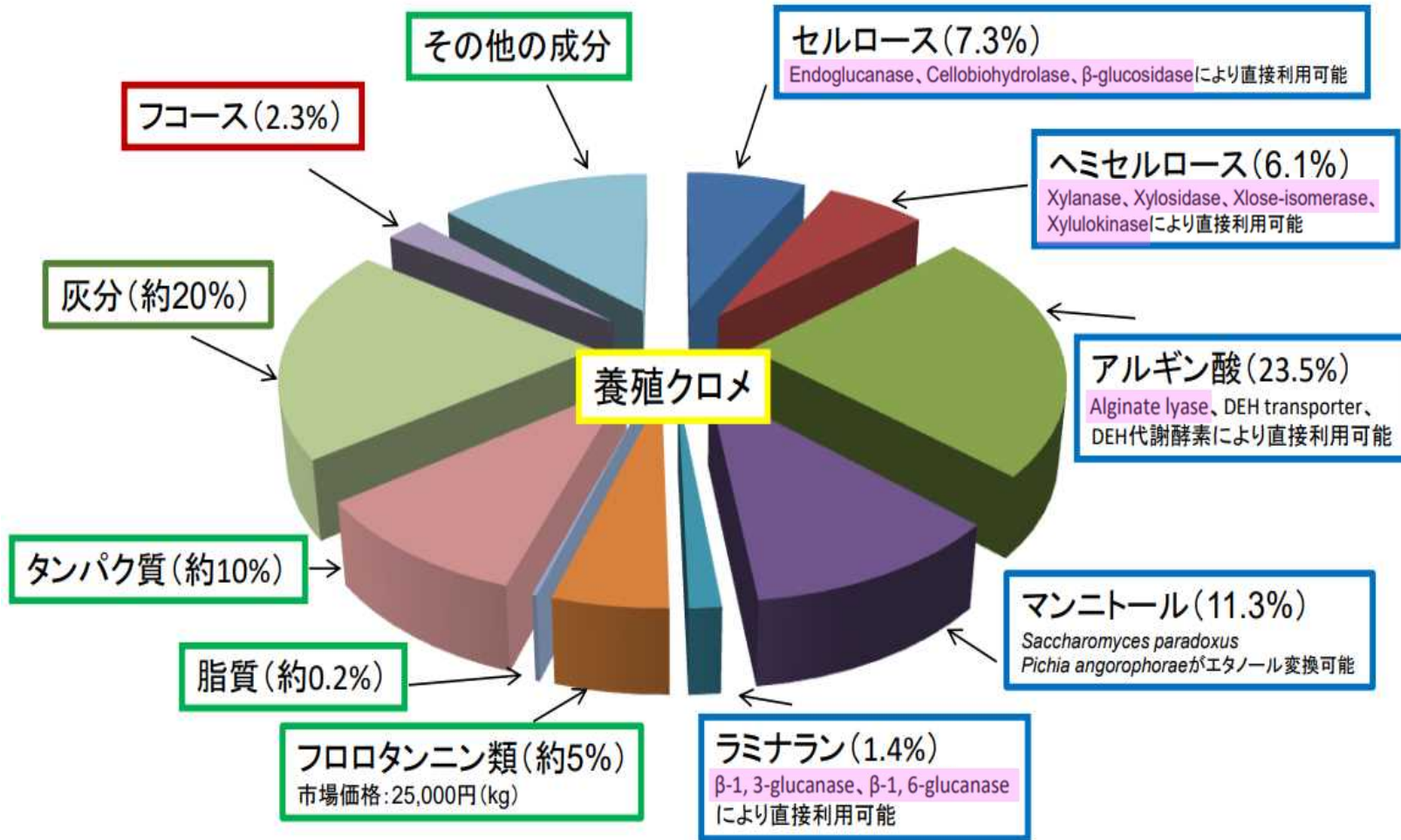


ゲノム編集の正確性・適用範囲を飛躍的に向上

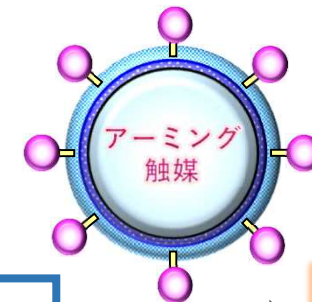
②-2. ドナーDNA/gRNAハイブリッド



大型藻類のカスケード生産プロセスの一環としてのエタノール発酵の最適化検討 (Green Earth Institute、京都大学・農、京都大学・高等研究院)



CRESTで開発の
アーミング酵母



糖類

エタノール

⑤-1. 条件の最適化

全体としてのエタノール収量の最大化

	大型藻類中の割合	1kgから得られるエタノール (現在最大値) (g)
セルロース	7.3%	480
ヘミセルロース	6.1%	270
アルギン酸	23.5%	520 ※
マンニトール	11.3%	500
ラミナラン	1.4%	500

※: 予測値

(ラボスケール)

ベンチスケールでの大型藻類からのエタノール発酵の実施 (Green Earth Institute)

ラボスケール



8連Jar (250 mL)



1 L~10 LJar



ベンチスケール



90 L, 300 L槽



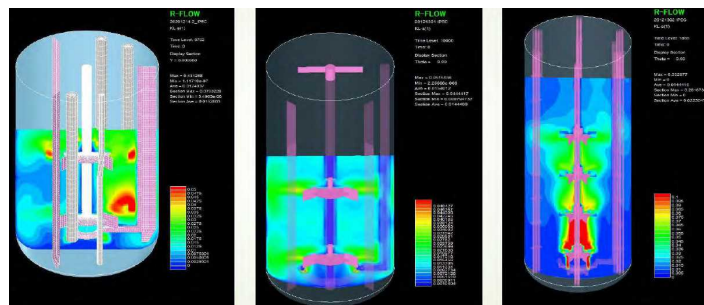
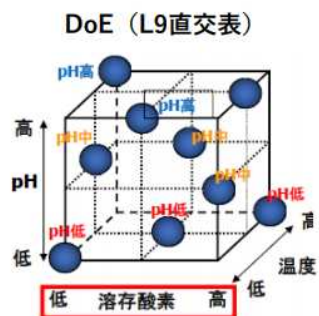
パイロットスケール



数千L槽

GEIのスケールアップの実績 (パイロットテストの実施状況)

ターゲット製品	使用菌体	場所	発酵槽容量	時期
アミノ酸	コリネ型細菌	米国	2 m ³	2016年
アルコール類	コリネ型細菌	米国	2 m ³	2016年
アミノ酸	コリネ型細菌	中国 (日本企業)	3 m ³	2016年
アミノ酸	コリネ型細菌	中国	15m ³	2018年
アミノ酸	コリネ型細菌	中国	10m ³	2018年
アルコール類	コリネ型細菌	日本	40m ³	2020年
希少糖	大腸菌	日本	4 m ³	2021年
アルコール類	アルコール酵母	日本	4 m ³	2021年



⑤-2. 実験計画法 (DoE)、CFD (Computational Fluid Dynamics) などを活用することで効率的なスケールアップ

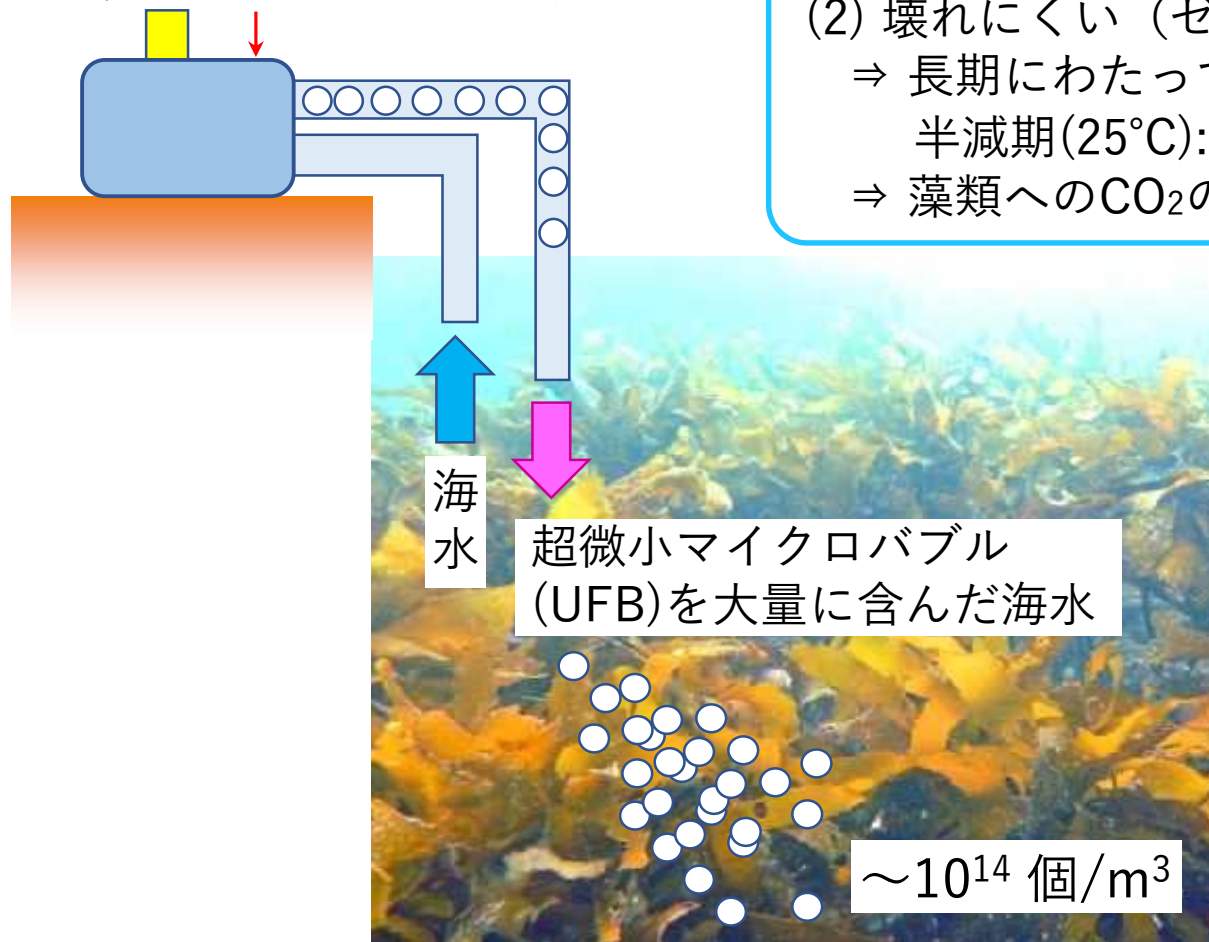
大型藻類のCO₂固定加速のための装置開発（関西化学機械製作株式会社）

CO₂ (空気)のマイクロバブル化に関する開発研究

空気

(N₂: 78%, O₂: 21%, CO₂: 0.04%, etc.)

マイクロバブル
発生装置 (大型)



マイクロバブル

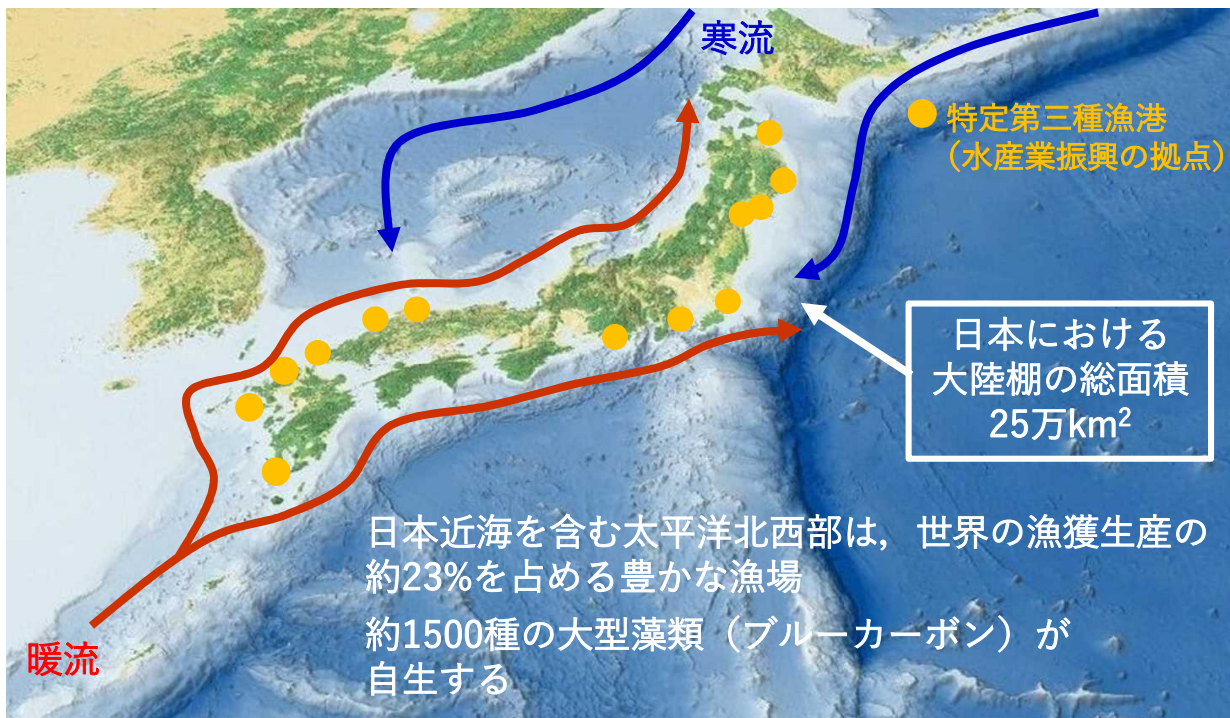
- (1) サブミクロン～数10 μ mの気泡
- (2) 壊れにくい (ゼータ電位はマイナス)
⇒ 長期にわたって安定に海水中に浮遊
半減期(25°C): 2 weeks (超微小バブル)
⇒ 藻類へのCO₂の安定供給

大型藻類に空気(CO₂)を
安定・連続的に供給

CO₂固定の促進

2050年のシナリオ

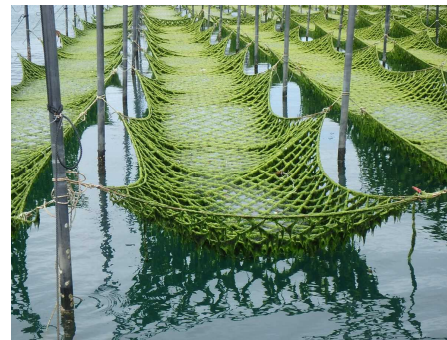
1. 恵まれた海洋環境と漁業インフラ



(写真：yochizu / PIXTA を改変)

漁業協同組合の数：945組合（2018年度，水産庁データ）
第一種漁港（地域の漁業の拠点）：2,042（2022年度，水産庁データ）
特定第三種漁港（水産業振興の拠点）：13

2. 歴史ある海藻養殖とその洗練された技術



海苔粗朶（のりそだ）



延縄式（はえなわしき）養殖

➡ マニュアルから機械化へ

- ・ 養殖海藻の収穫量：396,800トン（2020年度，政府統計）
- ・ 養殖対象種は，ノリ類，コンブ類，ワカメ類，モズク類など多種にわたる
- ・ 種苗生産から販売までのバリューチェーンが確立している



第一種漁港の漁協関係者との意見交換会



京都大学と三重大学チームによるクロメ養殖場（天草・鬼池）の視察

大型藻類の育種と養殖による藻場の拡大

閉鎖した火力発電所跡地の活用



全国で進む老朽化した火力発電所の閉鎖
跡地利用が地域にて問題化している

洋上風力発電施設と連携した
海藻養殖場の造成



洋上風力発電の促進区域・有望な区域



資源エネルギー庁資料より引用

53,665 km² (2019 再エネ海域利用法)

海上公共施設の整備と連携した
海藻養殖場の造成

中部国際空港の取り組み



セントレアグループ CSR活動より引用

海上空港 (長崎, 北九州, 神戸, 関西,
中部, 羽田) 総周縁: 77 km

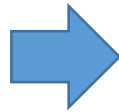
マリンバイオマスコンビナートの構築

マリンバイオマスを原料として多様な製品をワンストップで生産する拠点の構築

ラボスケール



8連Jar (250 mL)



1 L~10 LJar



ベンチスケール



90 L, 300 L槽



パイロットスケール



数kL槽

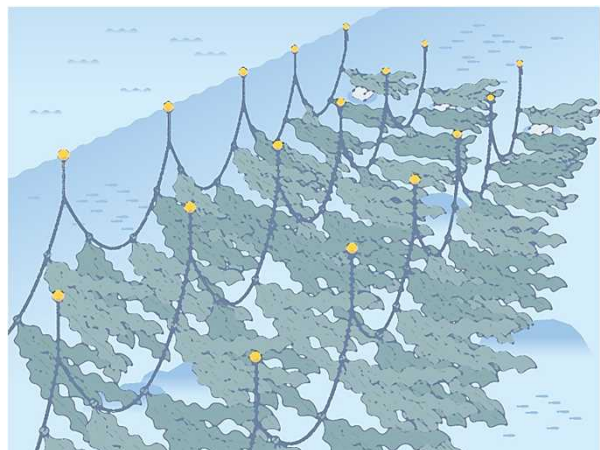
ブルーカーボンエタノールの
パイロットスケールでの生産

機能性マリンポリフェノール(フロロタンニン類)の
抽出のスケールアップとアプリケーション開発

ブルーカーボンエタノールのアプリケーション
としてSAF(持続可能な航空燃料)への転換

糖からのエタノール以外のグリーン
化学品生産の開発

2050年の想定



①大型藻類の大規模養殖

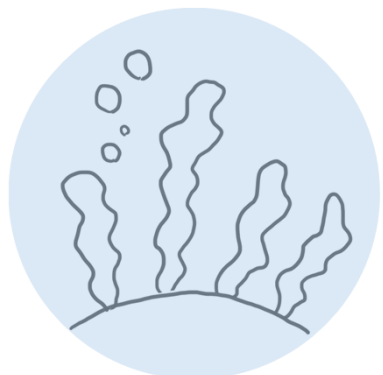
6,500 km² (約80 km 四方)

- ・日本における大陸棚面積 (25万 km²) の約38分の1に相当
- ・クロメ養殖場の約5万倍の規模に相当

ゲノム編集技術により生育量を5倍以上に向上させた大型藻類の養殖
(海藻150トン/ha/年)



CO₂固定



ブルーカーボン

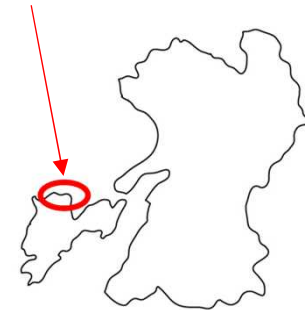
CO₂排出削減量 1.07 億 ton-CO₂/年

→ 日本の総CO₂排出量の約10%の削減効果

2,900万 kL/年のエタノール生産

日本で消費されるガソリンの約1/3量に相当

熊本県・天草市五和地区



クロメ養殖の区画漁業権の面積
(H25年度現在)

126,700 m² (0.1267 km²)

大型藻類活用への見通し

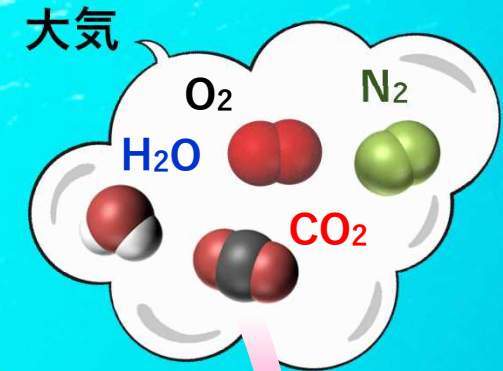
	澱粉糖質系 (1G)	木質系 (2G)	藻類 (3G)			藻類(3G)
原料	農産物 (トウモロコシなど)	森林 (スギなど)	微細藻類 (スピルリナなど)	大型藻類 (クロメ)		大型藻類 (クロメ)
生産性 (t/ha/年)	11	9	10~20	30		150 ↑
CO ₂ 固定速度 (kg-CO ₂ /m ² /年)	1.6	0.84	1.5~2.9	3.3	2050年 のシナリオ ➡	16.5
CO ₂ 固定量比	2.3	1	7.6	13		327
バイオマスエネルギー生産工程	シンプル	複雑 (リグニン除去)	シンプル	シンプル (アルギン酸多糖類の活用が鍵)		シンプル
問題点	食糧と競合	陸地を利用	陸地を利用, コンタミのリスク, コスト高	藻場の拡大		解消可能
生産条件	日光, CO ₂ , 淡水, 陸地, 肥料, 農薬	日光, CO ₂ , 淡水, 陸地, 肥料, 農薬	日光, CO ₂ , 淡水/汽水, 陸地	日光, CO ₂ , 海水		日光, CO ₂ , 海水

【引用】

- <http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/dept/22climate/kyuushuuryou/documents/page1-4-per-year.pdf>
- 経営センサー 2021.12. 「微細藻類の産業利用」

大型藻類CO₂固定の加速により地球環境の回復と物質生産を両立

Blue gold の時代を拓く



生物学的固定の強化
自然プロセスの加速

大型藻類の育種
〔優良種の選抜・ゲノム編集〕

有機物

低エネルギー
プロセス

酸素フリーN₂

アミノ酸

人工代謝経路による変換
固定したCO₂の有効活用

機能性
食品素材

化成品原料・
生分解性プラス
チック

合成生物学的育種

