

# 機能改良による高速CO<sub>2</sub>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

国立大学法人・京都大学成長戦略本部

・PJ 参画機関:

国立大学法人・三重大学大学院地球環境センター

柴田敏行

国立大学法人・京都工芸繊維大学分子化学系

黒田浩一

国立大学法人・京都大学大学院工学研究科

跡見晴幸

・再委託先

関西化学機械製作株式会社

五洋建設株式会社

## 背景・課題

デンプンやセルロースからのバイオエネルギー研究は、**第3世代の大型藻類へと主役の変換**が進んできている。

## 課題解決のアプローチ

世界に先駆けて「養殖」に成功した褐藻の13種の大型藻類は、CO<sub>2</sub>吸収・固定量や速度が**森林の10-100倍以上**で、世界第6位のEEZを持つ日本にとっては、待望の自己生産資源となり、新しい国産バイオ資源にのし上がりつつある。さらに、外国触媒に依存しないオリジナルな国産触媒との共役により、有用で生理活性のあるバイオリファイナリー物質の生産だけでなく、自給率の低いバイオエネルギーの生産が可能になり、**将来のエネルギー安全保障**にも貢献できる。

|  | 澱粉糖質系 (IG)                           | 木質系 (2G)                             | 藻類 (3G)                             |                                   |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 原料   | 農産物<br>(トウモロコシなど)                    | 森林<br>(スギなど)                         | 微細藻類<br>(スピルリナなど)                   | 大型藻類<br>(コンブ・ホンダワラ)               |
| バイオマス生産性<br>(t/ha/年)   | 11                                   | 9                                    | 10~20                               | 30 <sup>a</sup> /210 <sup>b</sup> |
| 単位面積あたりの<br>CO <sub>2</sub> 固定量<br>(kg-CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /年) | 1.6                                  | 0.84                                 | 1.5~2.9                             | 3.3/8.8                           |
| CO <sub>2</sub> 固定量比   | 2.3                                  | 1                                    | 7.6                                 | 13/240                            |
| バイオマスエネルギー生産工程   | シンプル                                 | 複雑<br>(リグニン除去)                       | シンプル                                | シンプル<br>(アルギン酸多糖類<br>の活用が試)       |
| 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、<br>コスト高             | 養殖の広大                             |
| 生産条件   | 日光, CO <sub>2</sub> , 淡水, 陸地, 肥料, 農薬 | 日光, CO <sub>2</sub> , 淡水, 陸地, 肥料, 農薬 | 日光, CO <sub>2</sub> , 淡水/<br>汽水, 陸地 | 日光, CO <sub>2</sub> , 海水          |

### 【引】

- <http://www.ipri.alrc.go.jp/research/dep/22climate/kyuushuuyou/documents/page1-4-per-year.pdf>
- 環境センター 2021.12.「褐藻類の資源利用」/「天下での実績」/ Atouani S. El, et al., *Phycol. Res.*, 64, 185 (2016).

大型藻類は陸上植物と同じ生法で繁殖できず、むし、シーゼン倍 (3か月間)

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

すべての大型藻類の養殖  
技術を確立した！

約6ヶ月で深長2-5m  
の藻体を確保できる

食糧と競合しないもの選択可

稀少な有用メタボライトを持つ

フロロタンニン類(マリンボ  
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)

\*赤藻類: 金剛藻(211216), 金剛藻(211216), (岡田大学法人三重大学)

## 研究開発の概要

日本の独自のバイオマスを自力育種し、創成したオリジナル国産触媒で、化石燃料に依存せず、エネルギー安全保障も実現できる新しい液体燃料を生産するに成功した。

## ・優良大型藻類株の選抜・育種

優良大型藻類株の育種・養殖完了  
草本と比べて13-240倍以上のCO<sub>2</sub>吸収・固定能

## ・新養殖技術の拡大（国産バイオマス増産）

実証地・周南市一調査養殖・プラント設置開始  
共役藻場で[Nature Positive]な海洋開拓

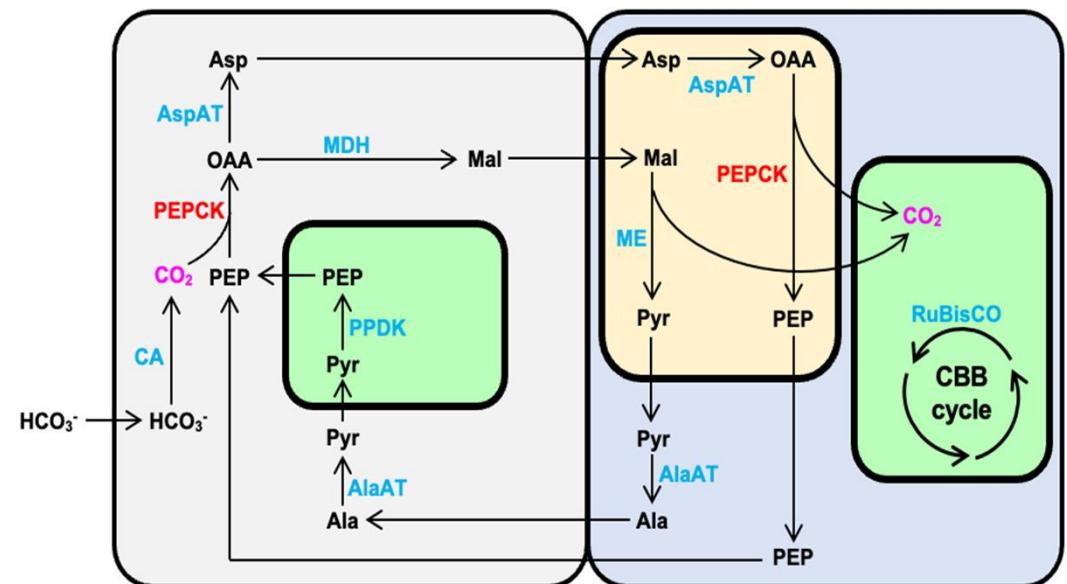
## ・湿潤大型藻類を原料としたエタノール発酵・生産

成分に特化したアーミング酵母（国産触媒）の組み合わせ  
ーエタノール収率の向上

・CO<sub>2</sub>吸収・固定/光合成系の新共役系の提唱  
大型藻類特有の系の発見（植物を凌駕）

## 大型藻類において機能している可能性のある新提案CO<sub>2</sub>濃縮系 (植物を凌駕する)

藻体内のPEPC活性が著しく低い、PEPCK活性が高いことから初発のCO<sub>2</sub>固定がPEPCKが担う  
CO<sub>2</sub>を固定している酵素はphosphoenolpyruvate carboxykinase (PEPCK)である  
炭素はHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>として取り込まれる



実証地：地元漁協と周南市の支援一山口県周南市・戸田漁港

港湾区域外の共同漁業権区域を使用して調査養殖

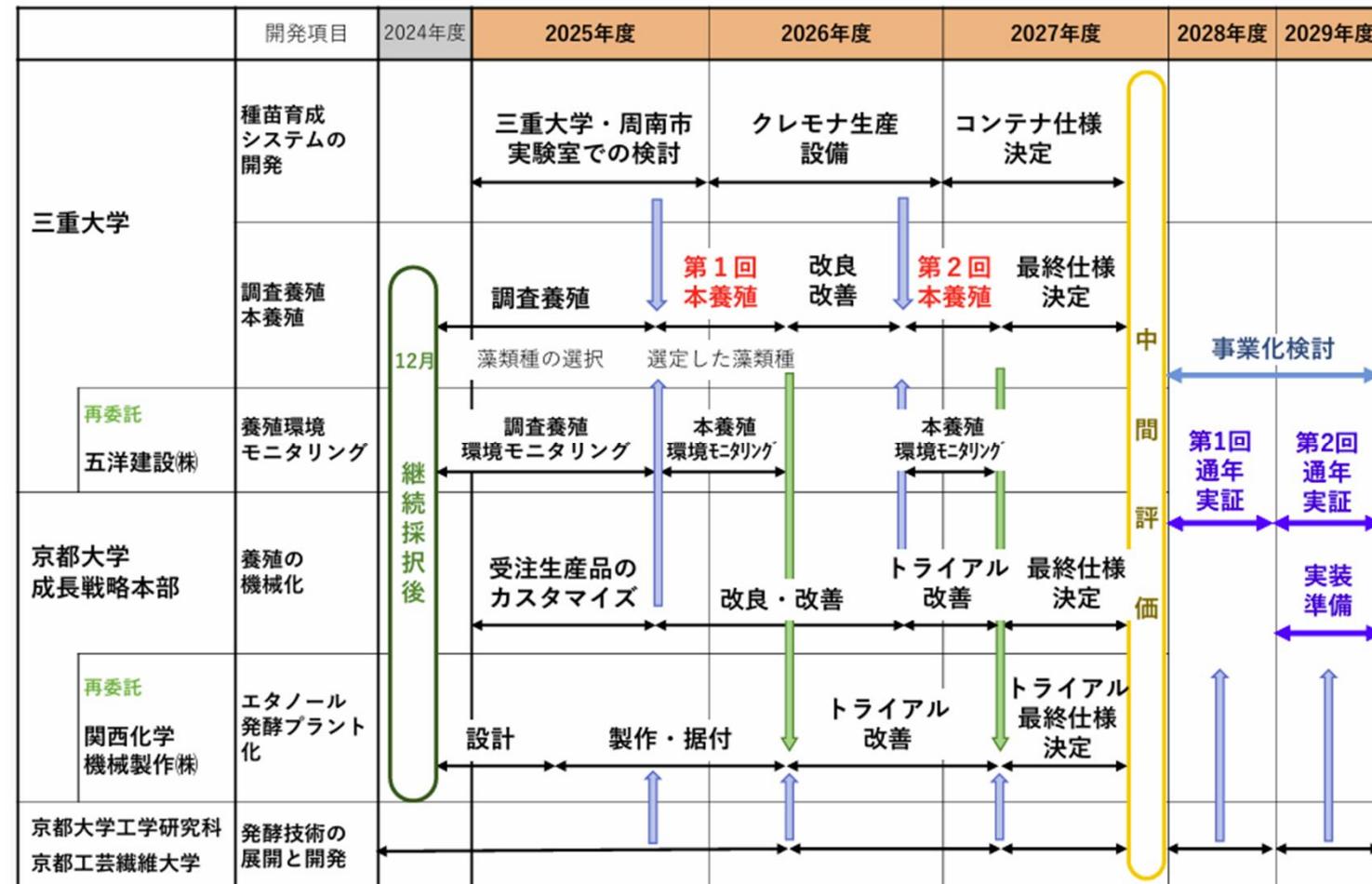
区画漁業権（かき垂下式）：約3.2 ha

戸田漁港（桑原漁港）  
実証試験の場として  
約25 haを確保

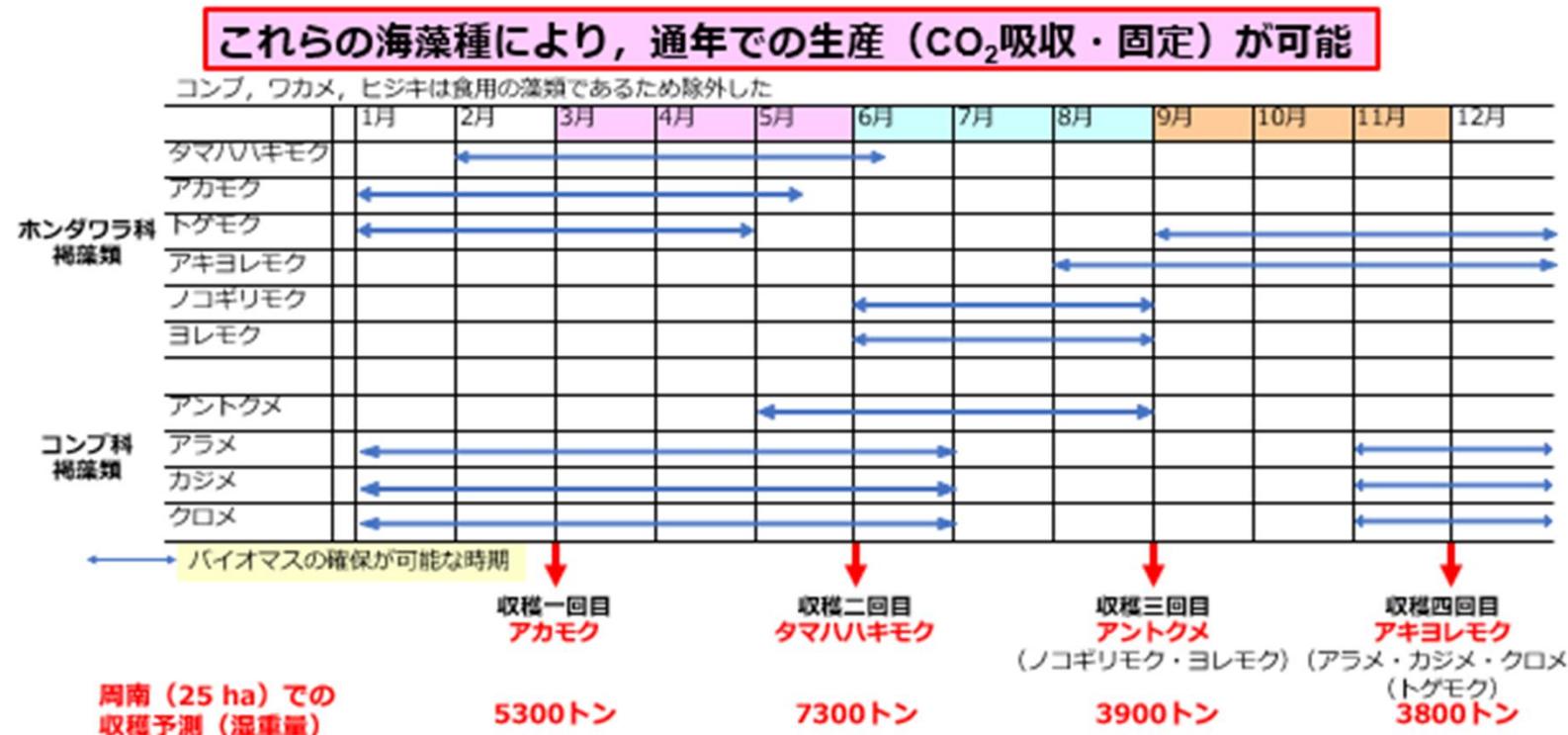
育種センター入札  
プラント用建屋工事入札  
ともに完了につき、  
工事開始

「6 m x 6 mの生け簀筏」を使用して  
区画漁業権の海域で調査養殖を実施中

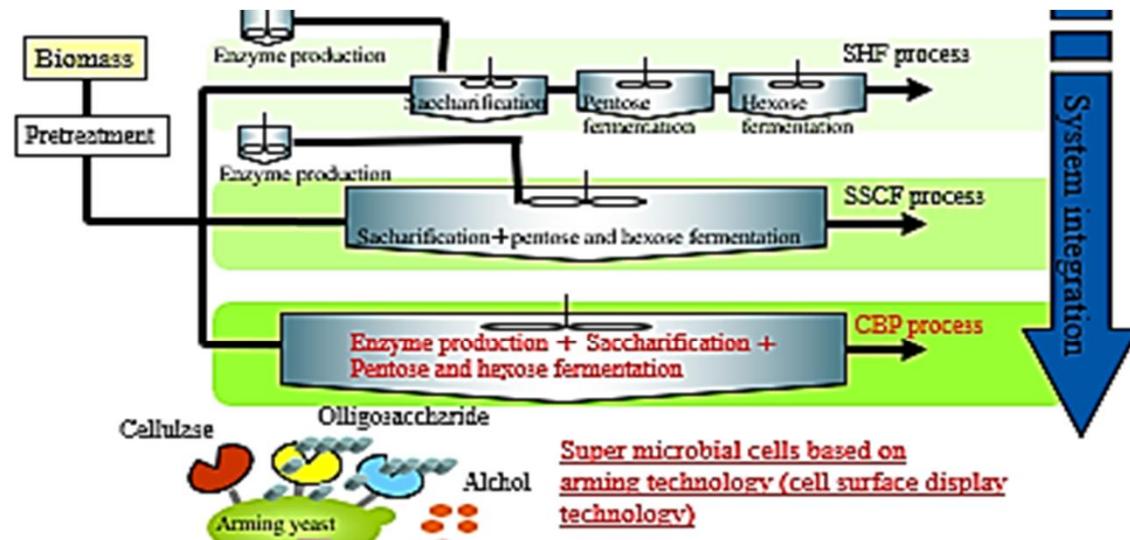
## 実証実験スケジュール



# 大型藻類養殖の年間スケジュール



## 世界が目指してきたOne Pot System -CBP (Consolidated bioprocessing) -



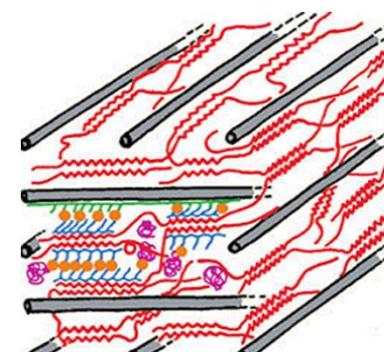
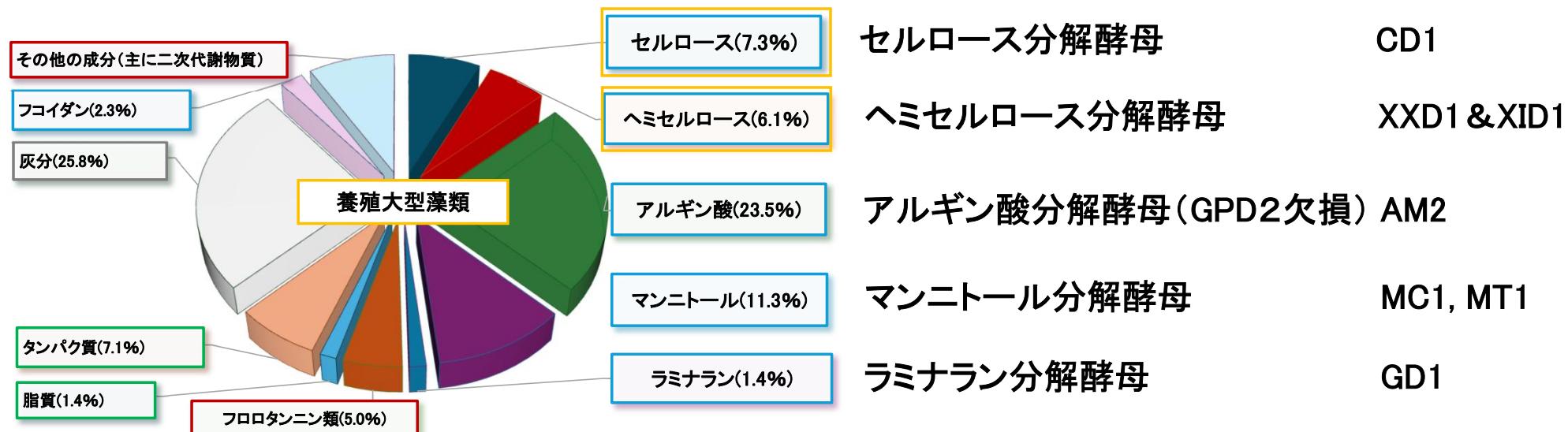
SHF : Separate hydrolysis and fermentation

SSCF : Simultaneous saccharification and co-fermentation

CBP : Consolidated bioprocessing

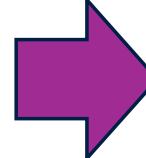
By US. DOE Lynd et al.

## 大型藻類由来多糖分解酵母株の創成



- セルロース
- アルギン酸 (Caイオンによりスタック)
- ヘミセルロース群
- ポリフェノール類
- ラミナラン
- マンニトール

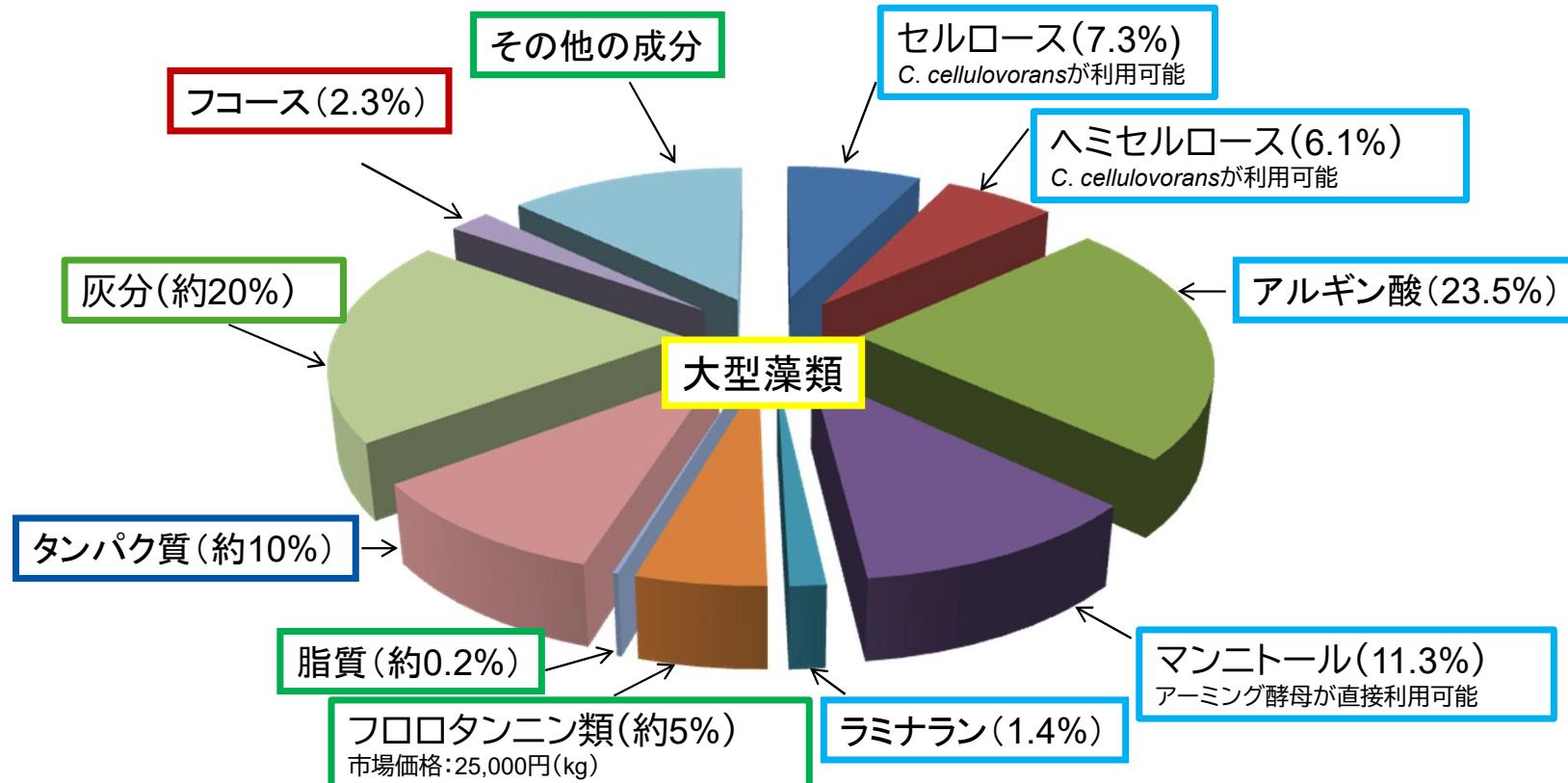
## CD1-アーミング酵母の機能一裁断新聞紙を直接発酵して、エタノール生成



裁断新聞紙原料にセルラーゼ表層提示酵母(CD1株)  
を加えたもの

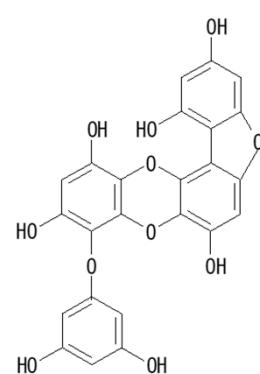
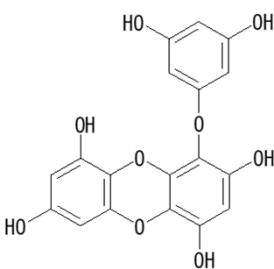
裁断新聞紙原料にセルラーゼ表層提示酵母(CD1株)  
を加えて一晩放置したものの(エタノールへ変換)

## 大型藻類に含まれる成分と完全利用

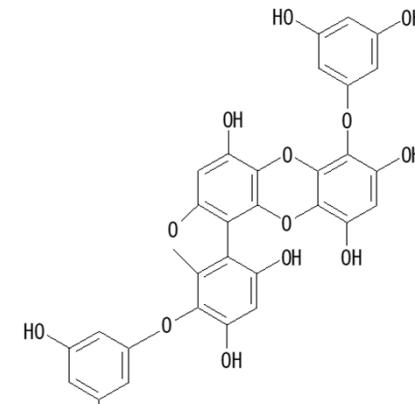


## リファイナリーの代表的物質：マリンポリフェノール®

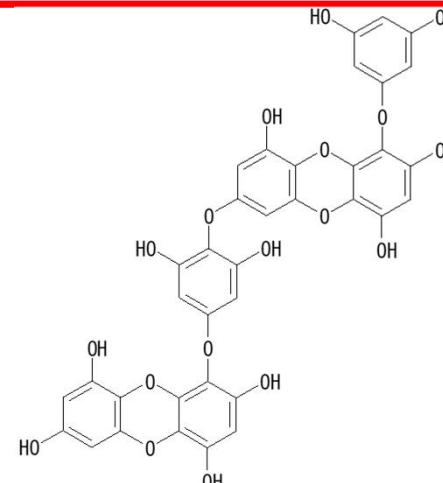
アラメ・カジメ類に含まれる主なフロロタンニン類（マリンポリフェノール®）



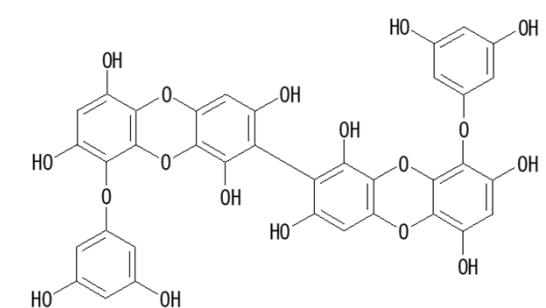
Fucofuroeckol A



Phlorofucofuroeckol A



Dieckol



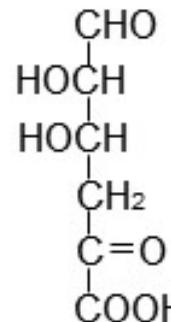
8,8'-Bieckol

市場価格  
5 mg 約85万円

コンブ系—マコンブや陸上植物には含まれない化合物群

抗酸化性, 抗炎症性, 抗アレルギー性, 抗糖化性,  
美白作用などの生理機能を持っている

## 新規単糖：アルギン酸デオキシ糖（DEH）



4-Deoxy-L-erythro-5-hexoseulose  
uronic acid (DEH)

MW: 176

アルギン酸（藻体に占める割合：約20%～60%）



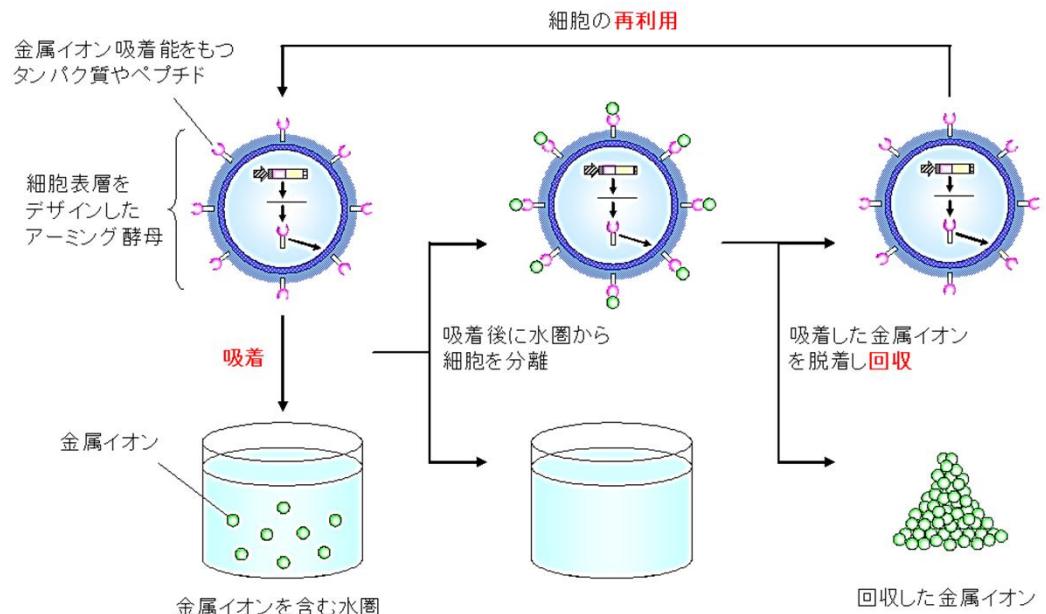
DEHへと分解させることにより

- ① 発酵生産の原料となる  
(海藻バイオリファイナリーの原料)
- ② 生理活性物質として直接利用できる  
(単なる食物繊維や食品添加物としての  
利用) – 難病治療薬（舞蹈病など）に効能

# 大型藻類に濃縮される金属種

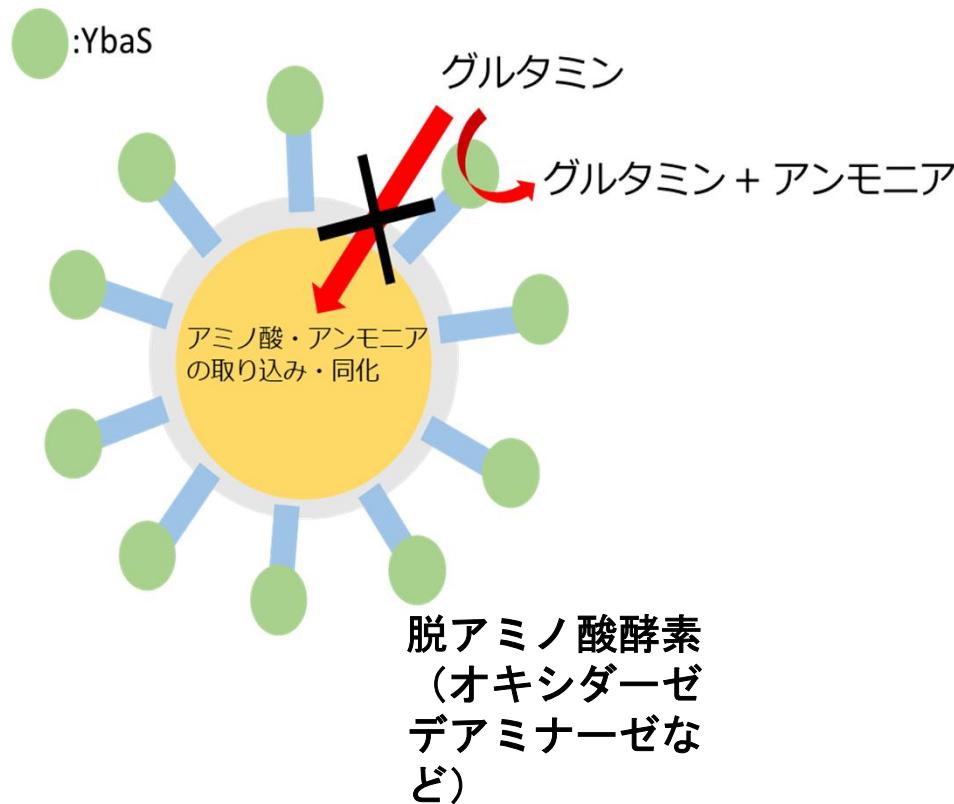
| ・元素  | クロメ含有量(μg/g)          | 海水濃度(ppm)            | 濃縮(倍)   |
|------|-----------------------|----------------------|---------|
| Ca   | $2.76 \times 10^4$    | $4 \times 10^2$      | 69.0    |
| Mg   | $3.78 \times 10^3$    | $1.35 \times 10^3$   | 2.8     |
| 57Fe | $7.20 \times 10^2$    | $1 \times 10^{-2}$   | 72000.0 |
| Sr   | $3.28 \times 10^2$    | 8                    | 41.0    |
| 56Fe | $5.80 \times 10$      | $1 \times 10^{-2}$   | 5800.0  |
| Zn   | $5.74 \times 10$      | $1 \times 10^{-2}$   | 5740.0  |
| As   | $4.65 \times 10$      | $3 \times 10^{-3}$   | 15500.0 |
| Al   | $4.19 \times 10$      | $1 \times 10^{-2}$   | 4190.0  |
| Rb   | $1.35 \times 10$      | $1.2 \times 10^{-1}$ | 112.5   |
| Mn   | 3.31                  | $2 \times 10^{-3}$   | 1655.0  |
| Ni   | 2.61                  | $2 \times 10^{-3}$   | 1305.0  |
| Ba   | 1.73                  | $3 \times 10^{-2}$   | 57.7    |
| Hg   | 1.00                  | $3 \times 10^{-5}$   | 33333.3 |
| Se   | $9.94 \times 10^{-1}$ | $4 \times 10^{-4}$   | 2485.0  |
| Cr   | $9.14 \times 10^{-1}$ | $5 \times 10^{-5}$   | 18280.0 |
| V    | $9.00 \times 10^{-1}$ | $2 \times 10^{-3}$   | 450.0   |
| Li   | $3.33 \times 10^{-1}$ | $1.7 \times 10^{-1}$ | 2.0     |
| Cd   | $1.93 \times 10^{-1}$ | $1.1 \times 10^{-4}$ | 1754.5  |
| Pb   | $1.35 \times 10^{-1}$ | $3 \times 10^{-5}$   | 4500.0  |
| U    | $1.01 \times 10^{-1}$ | $3.3 \times 10^{-3}$ | 30.6    |
| Ga   | $9.66 \times 10^{-2}$ | $3 \times 10^{-5}$   | 3220.0  |
| Co   | $7.21 \times 10^{-2}$ | $1 \times 10^{-4}$   | 721.0   |
| Be   | $2.01 \times 10^{-3}$ | $6 \times 10^{-7}$   | 3350.0  |
| Tl   | $1.30 \times 10^{-3}$ | $<1 \times 10^{-5}$  | 103.0   |
| In   | $4.85 \times 10^{-4}$ | $<<2 \times 10^{-2}$ | -       |

# 金属イオン吸着・回収酵母作成

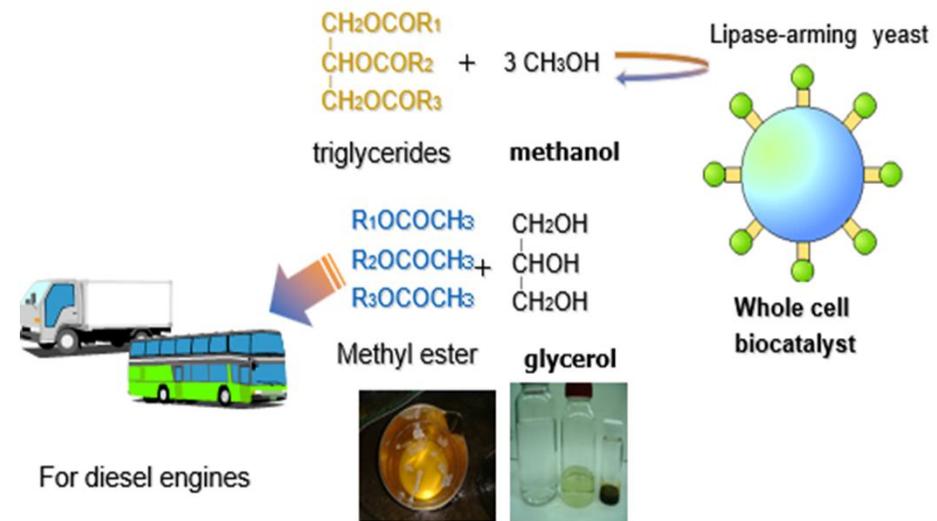


細胞表層工学技術を用いることにより、  
健康・環境被害重金属の選択的除去  
レアメタルの選択的な回収が可能  
(大型藻類の抽出残渣からの  
レアメタルや半導体必須メタル生産)

## 細胞表層でのタンパク質のアミノ酸からアンモニア生産



## 細胞表層での脂質の脂肪酸エステルからバイオディーゼル生産



# 「その他」の成分として、ヨウ素

| 元素<br>(イオン)                   | かん水中の濃度<br>(ppm) | かん水/海水比 |
|-------------------------------|------------------|---------|
| I                             | 130              | 2270    |
| Mn                            | 0.089            | 470     |
| Ba                            | 3.7              | 310     |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 270              | >10     |
| Cs                            | 0.0014           | 4.7     |
| Li                            | 0.82             | 4.6     |
| Br                            | 156              | 2.3     |
| Na                            | 10900            | 1.0     |
| Cl                            | 18100            | 0.96    |
| Rb                            | 0.11             | 0.89    |
| Sr                            | 6.9              | 0.86    |
| K                             | 270              | 0.70    |
| Ca                            | 165              | 0.40    |
| Mg                            | 350              | 0.28    |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | <2               | <0.001  |
| U                             | <0.000002        | <0.001  |

Copyright (C) SIS All rights reserved

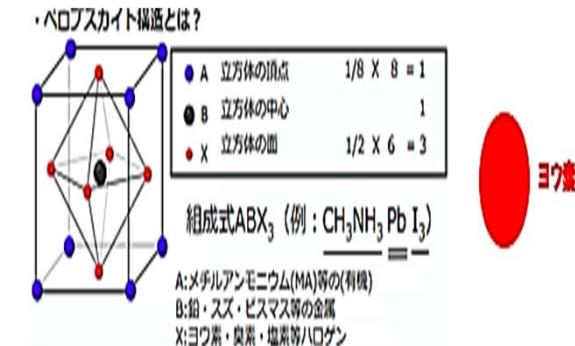
地球地殻に存在するヨウ素の0.8%は海水中にある。海底堆積物から生成するヨウ素酸イオン( $\text{IO}_3^-$ )と、それが還元バクテリアの作用でヨウ素イオンとなった形で海水中には0.06 ppmのヨウ素が存在している。大型褐藻類（コンブなど）は海水の千から万倍の80-1800 ppmのヨウ素イオンを含む。

地球の地殻にある全量は  $8.6 \times 10^{12}$  トンと言われており、その中の70%は海洋堆積物の中にある。

日本のヨウ素の大部分は、千葉県茂原地区から天然ガスの採取と一緒に産出される。このヨウ素は、太古の藍藻、珪藻やそれを食した生物が地下に沈み、地球の地下熱で還元的分解を受けて生成したものと考えられている。茂原地区・地名の由来のように、この地区は藻類が茂っていたものと考えられる。

地下にパイプを挿入し天然ガス採取の際に、海水より溶解塩分が多い“かん水”と言われる水を伴うが、その中にヨウ素イオン( $\text{I}^-$ )が多量に存在する。その“かん水”から塩素あるいは次亜塩素酸ナトリウムで酸化しヨウ素( $\text{I}_2$ )を得て、残りの“かん水”は地盤沈下を防ぐために地下に戻す。

## ペロブスカイト用ヨウ素の 自国供給源—大型藻類



## 今後の展望

日本では、バイオマスの液体燃料化は、うまく進んでいないのが現状であった。この窮状を打破すべく、海洋における大型藻類にそのCO<sub>2</sub>の大量吸収・固定能を見出し、日本の独自のバイオマスを自力育種し、国産オリジナル触媒により、化石燃料への依存を減らしエネルギー安全保障も実現できる液体燃料を生産する技術の確立が可能になってきている。海洋活用により漁業の回帰と地球気候変動を抑制する効果を創出して地球環境再生にも貢献していく戦略 (Nature Positive) を推進する開発戦略が確立しつつある。

## 希望するマッチング先

- ・海洋開拓における船舶と大型藻類などの育種と回収の機械自動化に取り組む企業
- ・液体バイオエネルギーのサプライチェインにご関心のある組織
- ・海洋藻場の非破壊センシングシステム開発の企業

## 社会実装のイメージ

陸上植物を凌駕するCO<sub>2</sub>吸収・固定量を持つ優良大型藻類株取得・養殖成功 (コンブ系-13倍；ホンダワラ系-240倍以上)  
—バイオマスとバイオエネルギーの国産生産・増産系確立

