

番号: A-6-1J

PJ:C⁴S研究開発プロジェクト

テーマ名:大気中のCO₂と廃コンクリートのみから新たなコンクリートを製造し、地球を救う!

担当機関名:東京大学、北海道大学

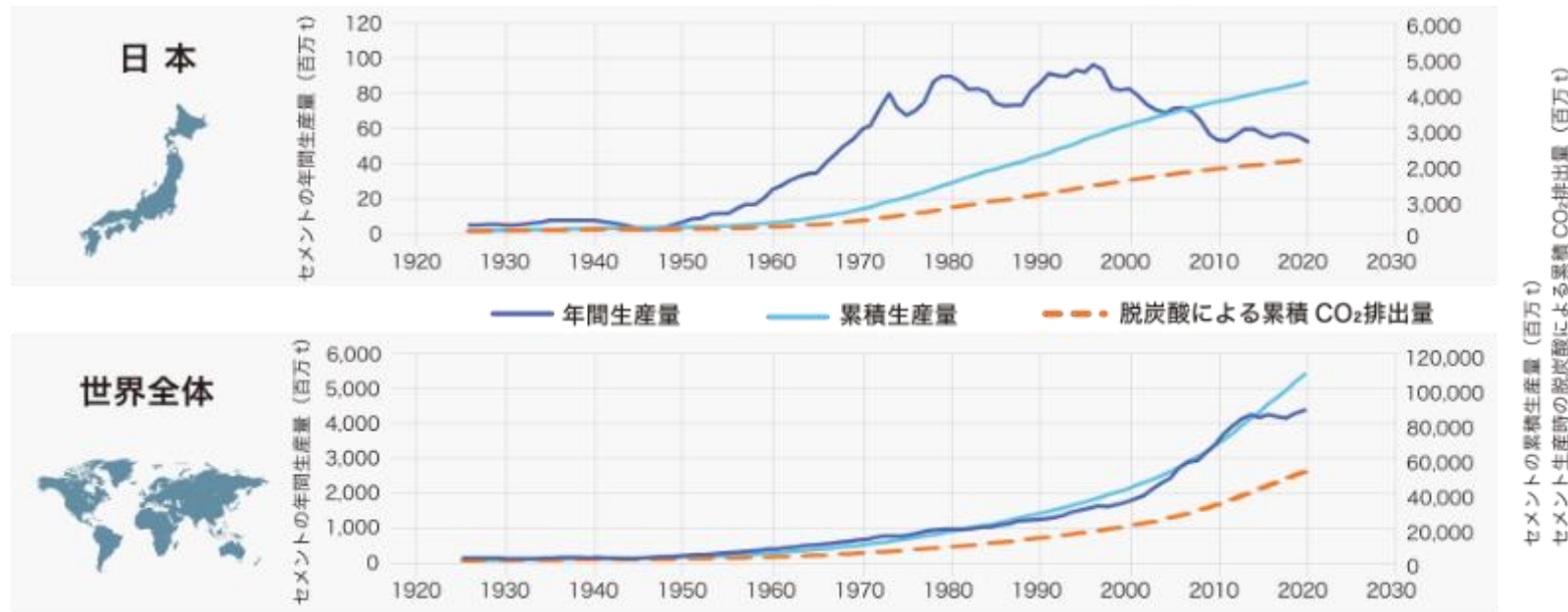
問合せ先:野口貴文(PM、東京大学教授)、noguchi@bme.arch.t.u-tokyo.ac.jp



1 セメント・コンクリートはこれまでどのくらいCO₂を排出してきたか?

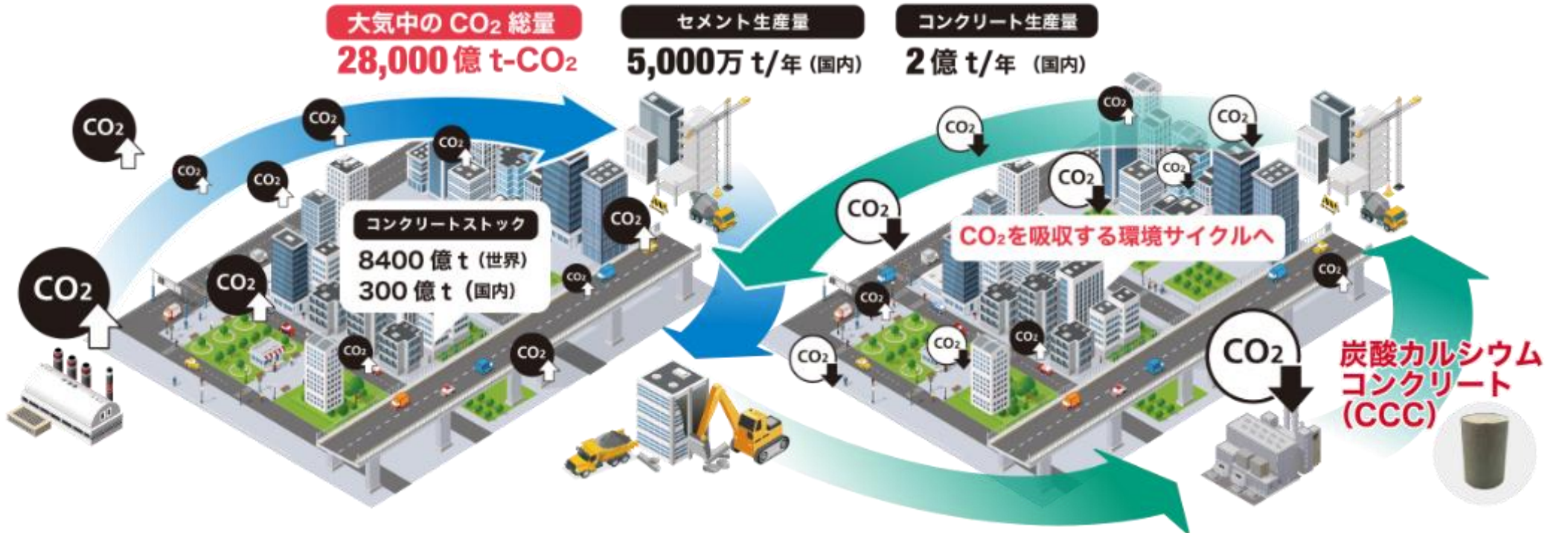
これまで、セメント生産時の石灰石の焼成(脱炭酸)によって世界全体で累積500億トン以上のCO₂(燃焼エネルギーからの排出も含めると累積800億トン以上)が排出されています。

セメントの生産量、脱炭酸によるCO₂排出量



2 プロジェクトの目標は何か?

セメント生産時に石灰石の焼成(脱炭酸)によって発生し大気中に蓄積しているCO₂の全量を回収して炭酸カルシウム(CaCO₃)としそれを結合材とした炭酸カルシウムコンクリートを建造物の建設に用います。

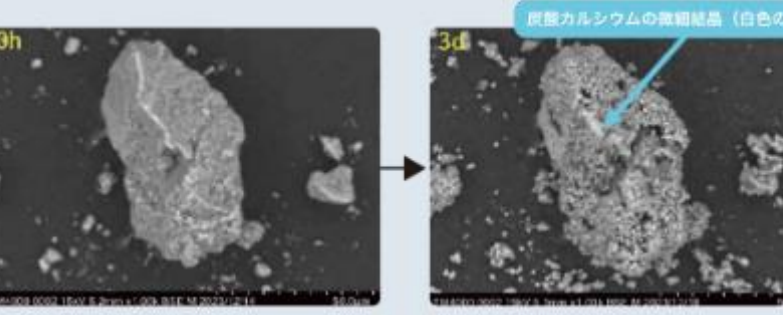
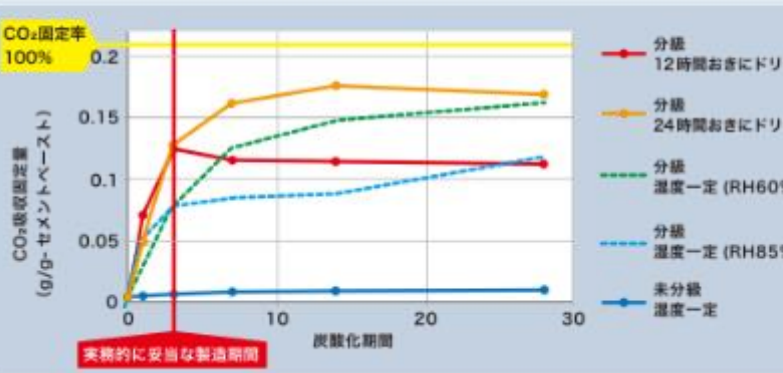
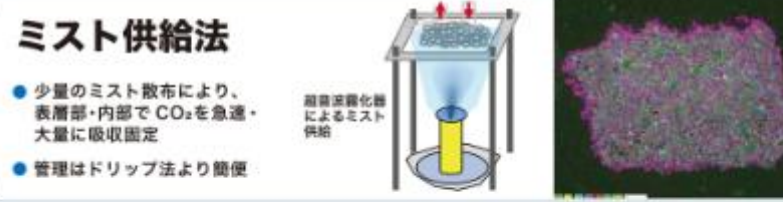
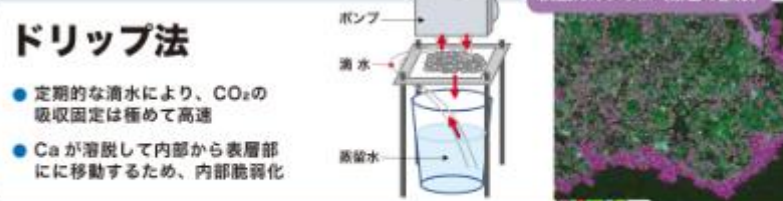


4 どうやってCO₂を回収するか?

破砕して粒度を揃えた廃コンクリートの微細粒子に過剰な水分を繰り返し与えて、廃コンクリート中のカルシウム分(CaO)と大気中の二酸化炭素(CO₂)との反応を速く多く生じさせることで、大気から大量のCO₂を回収します。

PROJECT II CCC 原材料の製造 and DAC (大気 CO₂の回収)

PROJECTの構成機関 北海道大学 増尾リサイクル



3 プロジェクトを一言で表現すると?

どこにも存在する大気中のCO₂と廃コンクリートのみを原材料として炭酸カルシウムコンクリート(CCC)を製造し、CCCを建設材料として永久的に循環させます。(PROJECT I・II)
社会実装に必要な資源循環最適化およびCO₂回収率最大化の提案、ならびにCCC建造物の基準・規格の整備を行います。(PROJECT III)

PROJECT III CCCの社会実装

PROJECTの構成機関 東京大学 工学院大学 宇都宮大学

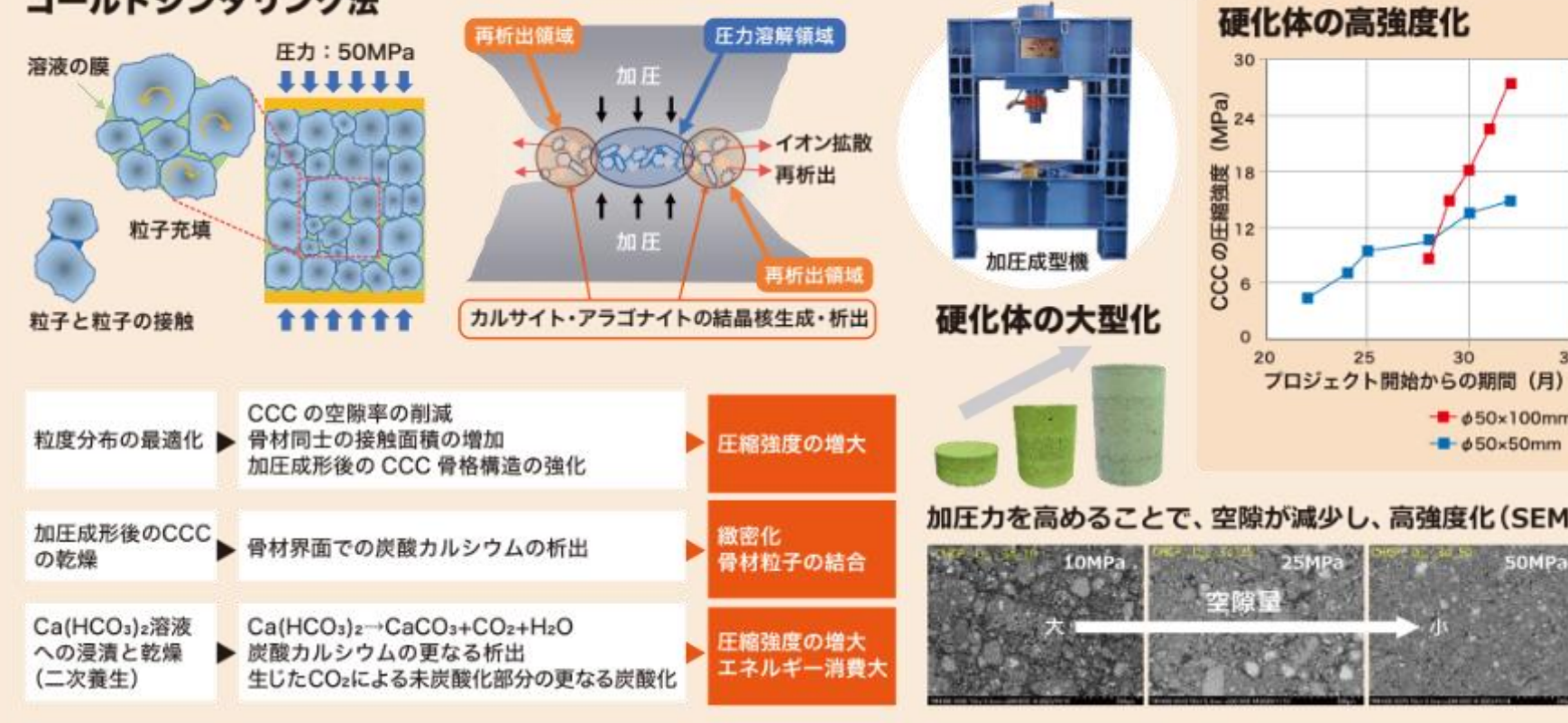


5 どうやって炭酸カルシウムコンクリート(CCC)を製造するか?

炭酸化した廃コンクリート微粒子を炭酸カルシウム溶液で繰り返し混ぜた後、固型型に密に詰めて加圧することで、微粒子の接触部でのカルシウムの溶解、および炭酸カルシウム結晶(カルサイト、アラゴナイト)の再析出を生じさせ、その後、乾燥と炭酸カルシウム溶液への浸漬を繰り返すことで、CCCユニットを製造します。

PROJECT I CCCの反応制御技術 and CCCユニットの安定化製造技術の開発

PROJECTの構成機関 東京大学 太平洋セメント

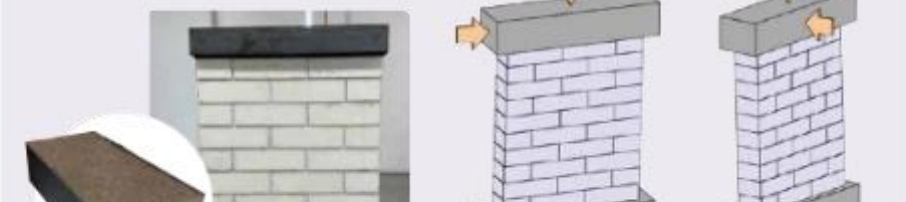
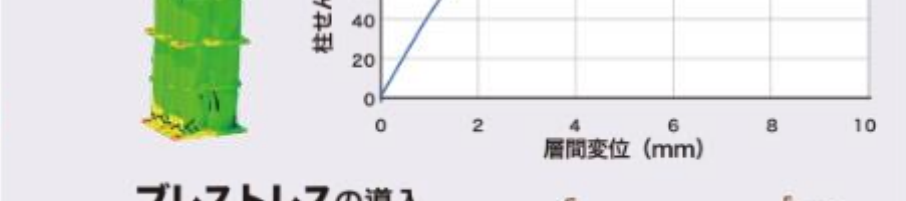
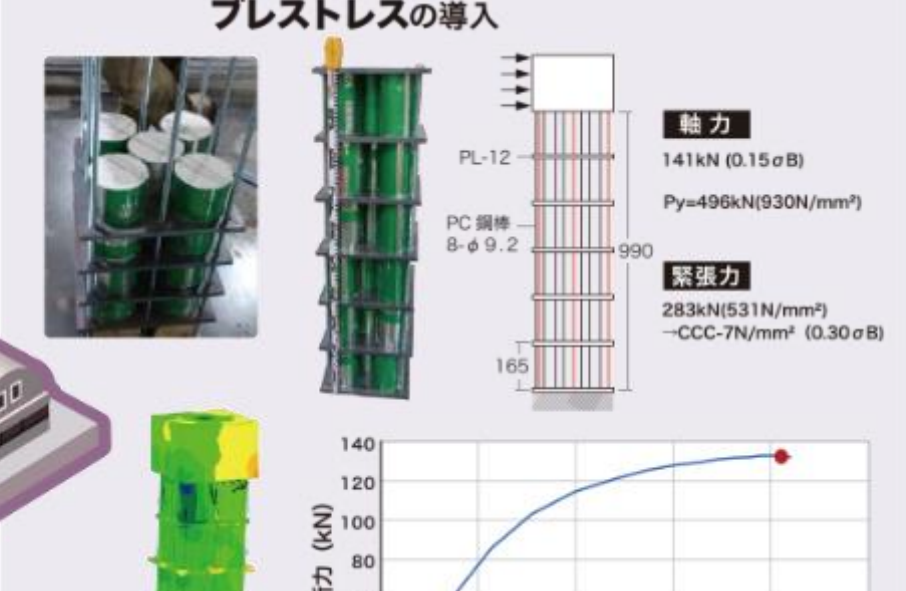


6 どうやって建造物を建設するか?

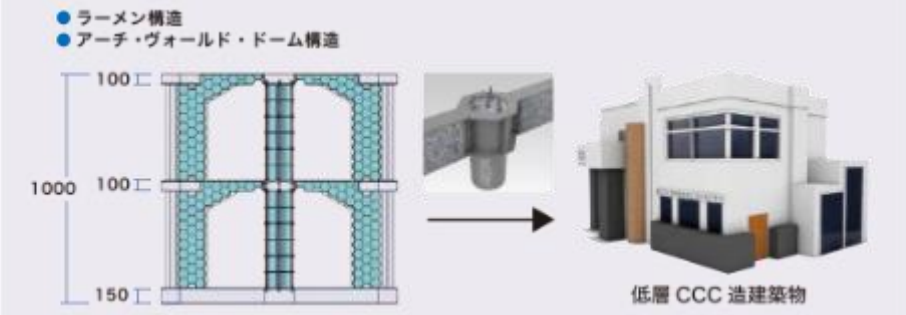
炭酸カルシウムコンクリート(CCC)ユニットを連結してプレストレスを与えることで一体化させて柱・梁・部材を構築するとともに、鋼材・木材・FRPシートなどの複合化を図る。圧縮力のみが作用するアーチ・ヴォールト・ドーム構造とすることで部材・床部材・柱部材・梁部材・床部材・床部材を連結してCCC建造物とします。

PROJECT I CCC 部材製造 原理の開発 PROJECT III CCC 建造物の構造設計・性能評価法の開発

PROJECTの構成機関 東京大学 東京理科大学 太平洋セメント

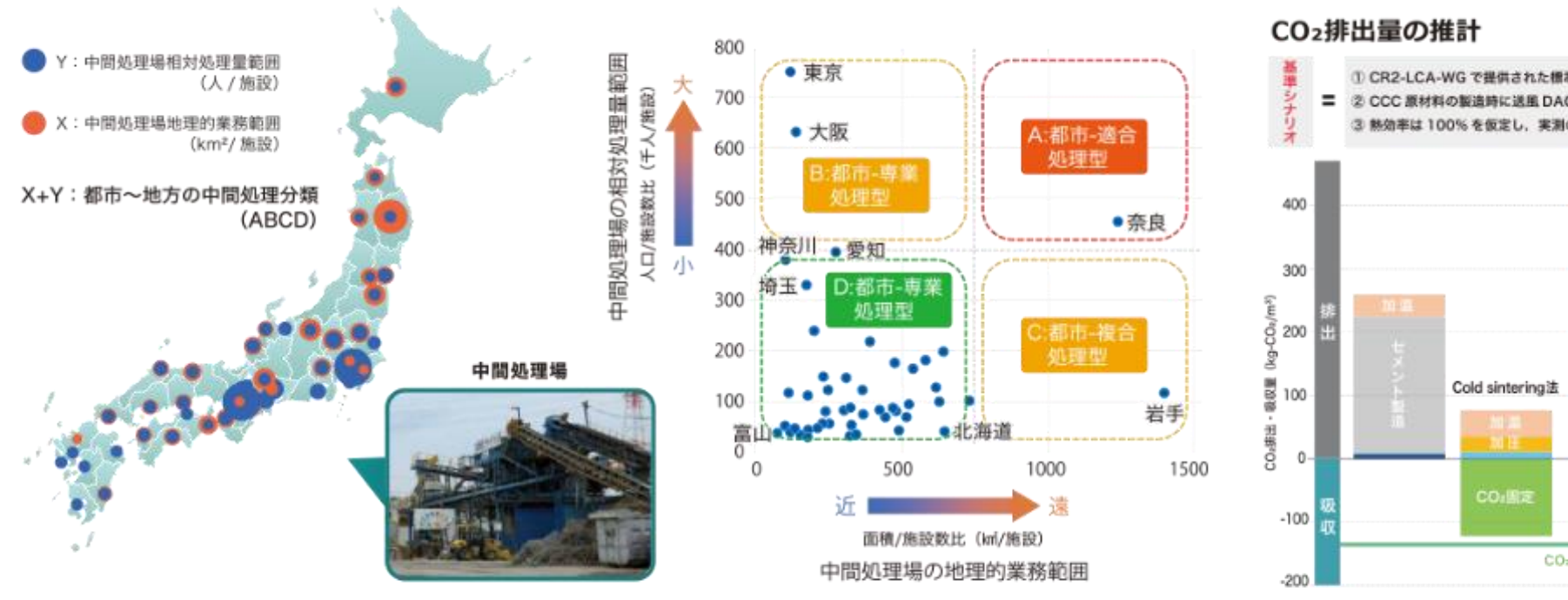


EXPO 2025 大阪万博での展示建造物
未来社会ショーケース事業出展
https://www.expo2025.or.jp/sponsorship/future/#sec1
フューチャーライフエクスプレランスの期間展示 13m²に広さ
CCCを用いた建造物(形状・さらに工夫予定)



7 CCC 原材料はどれくらい発生し、どこで製造するか?どれくらいCO₂を回収できるか?

今後、建造物が寿命を迎えて解体され、毎年約1億トン以上の廃コンクリートが発生し、2050年までに累積で約40億トンに達します。
CCCを1m³製造することに100kg以上(目標:124kg)のCO₂が大気から回収され、固定されます。



8 CCC 構造をどのように社会実装し、普及させるか?

CCCの品質、およびCCC構造の性能が建築基準法を満足することを確認したうえで、2030年に数棟のCCC建造物を建設し、2050年には半分のコンクリート建造物がCCC造となることを目指します。

年度	CCCの開発・普及	CCC生産量
2023	20MPaの圧縮強度達成	0千t
2024	実験建造物の建設	0.1千t
2029	低層CCC建造物2-3棟の建設	2千t
2040	毎年1.725倍増	345千t
2050	コンクリート建造物の50%がCCC造	110,000千t

コンクリートの必要最低強度: 12MPa
建築基準法施行令第74条「鉄筋コンクリート造に使用するコンクリートの強度は、次に定めるものでなければならない。」

2025年 大阪万博での実験建造物の展示 EXPO 2025

法律・規格の制定・改正

①建築基準法第20条に基づく大臣認定の取得
②日本建築学会規準・標準仕様書の制定
③建設省告示1446号(技術的基準)の改正
④建築基準法第37条2項に基づく大臣認定の取得
⑤日本産業規格(JIS)の制定
⑥建設省告示1446号(技術的基準)の改正
⑦建築基準法第37条1項への適合

CO₂排出削減量 日本:▲2,620万t-CO₂/年
世界:▲約21億t-CO₂/年

9 コンクリートをホワイトカーボンに! グリーンカーボン、ブルーカーボンに続く「ホワイトカーボン」によって地球の温暖化を抑制します。

大陸生態系、海洋生態系に加えて、人類生態系への炭素の固定を創出するコンクリート



番号：A-10-1J

PJ： 岩石と場の特性を活用した風化促進技術“A-ERW”の開発

テーマ名： プロジェクトの概要と適用岩石の拡大

担当機関名： 早稲田大学, 三菱重工業

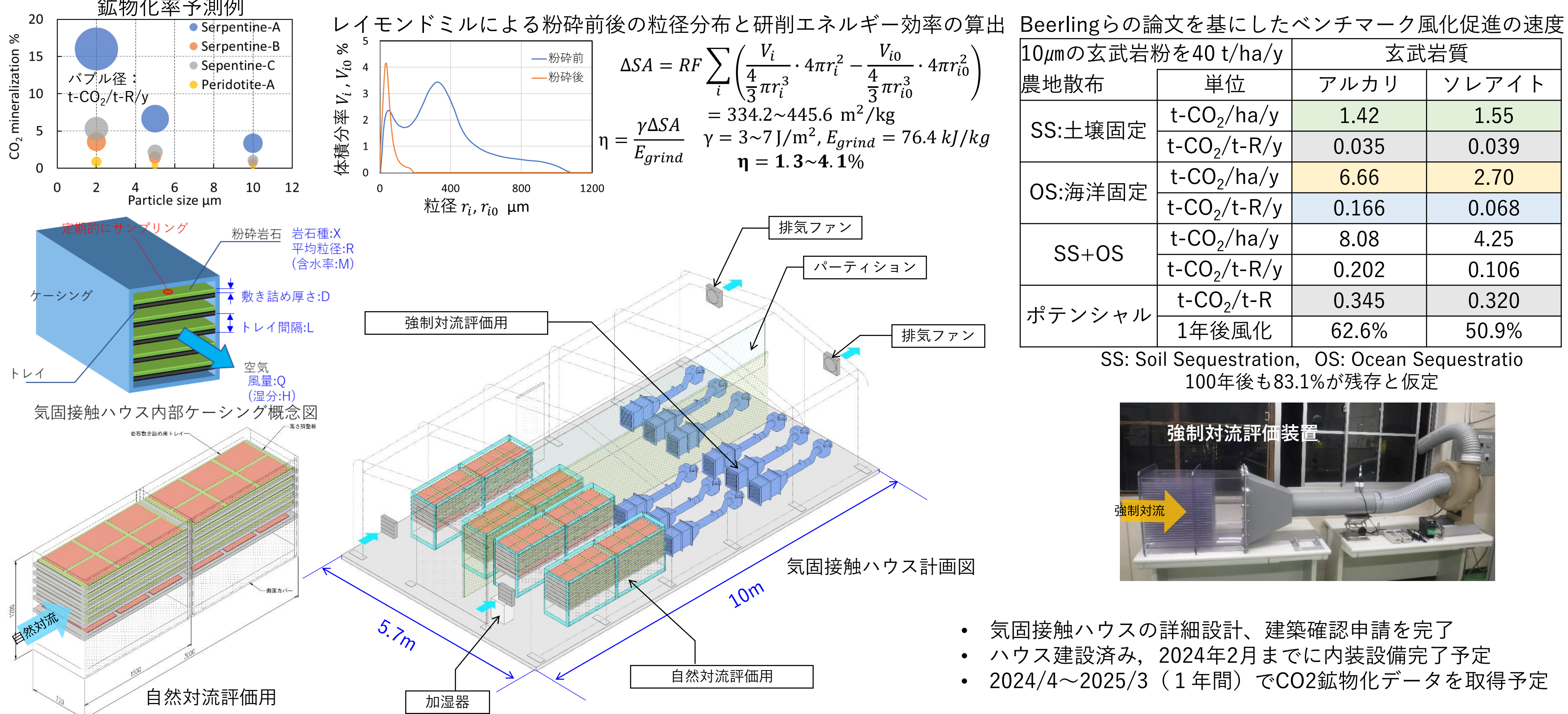
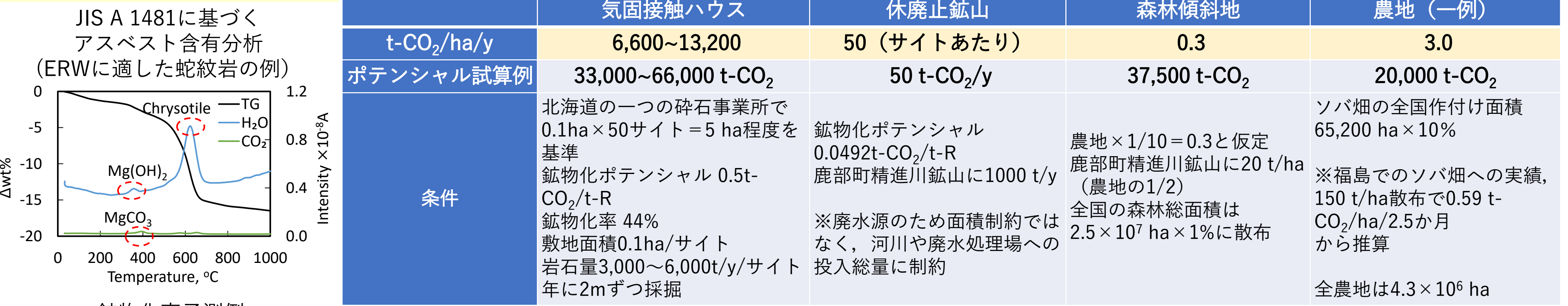
問合せ先： takao.nakagaki@waseda.jp



A-ERWの全体概要と炭素会計情報基盤



A-ERW技術適用による年間の面積当たりのCDR量ポテンシャル



番号： A-10-2J

PJ： 岩石と場の特性を活用した風化促進技術“A-ERW”の開発

テーマ名： 休廃止鉱山廃水および森林傾斜地への風化促進技術“A-ERW”の適用

担当機関名： 北海道大学・森林総合研究所・北海道立総合研究機構・国土防災技術株式会社

問合せ先： 北海道大学 工学研究院 佐藤 努 (tomsato@eng.hokudai.ac.jp)



岩石(鉱物)の風化を促進するためには？

鉱物の溶解速度一般式

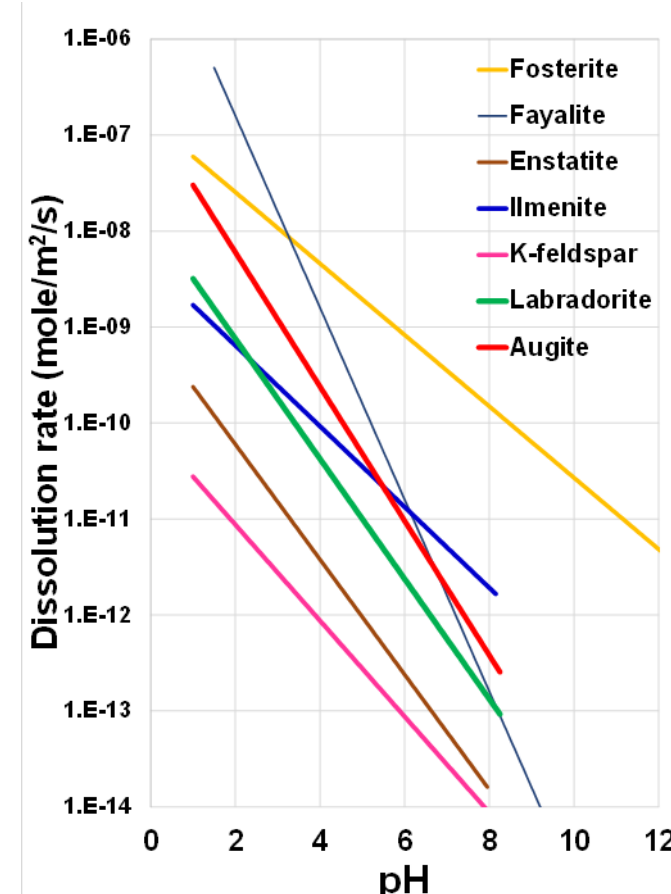
$$r = A_s k_+ a_{H^+} \left(1 - \frac{Q}{K} \right)$$

平衡からのズレ

r : 鉱物の溶解速度
 A_s : 鉱物の反応表面積
 K_+ : 鉱物固有の速度定数
 a_{H^+} : H^+ の活量(pH)
 Q : イオン活量積
 K : 平衡定数



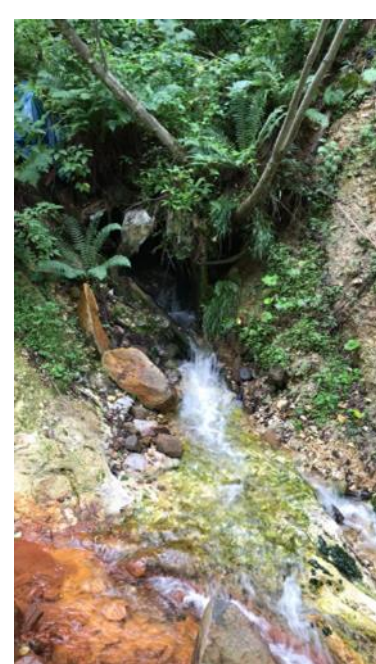
農地への玄武岩粉末の散布の様子



鉱物の溶解速度のpH依存性

- (1) 反応表面積を大きくする
- (2) 反応溶液のpHを低くする
- (3) 平衡からのズレを大きく保つ

休廃止鉱山廃水および森林傾斜地へ適用を考えた理由



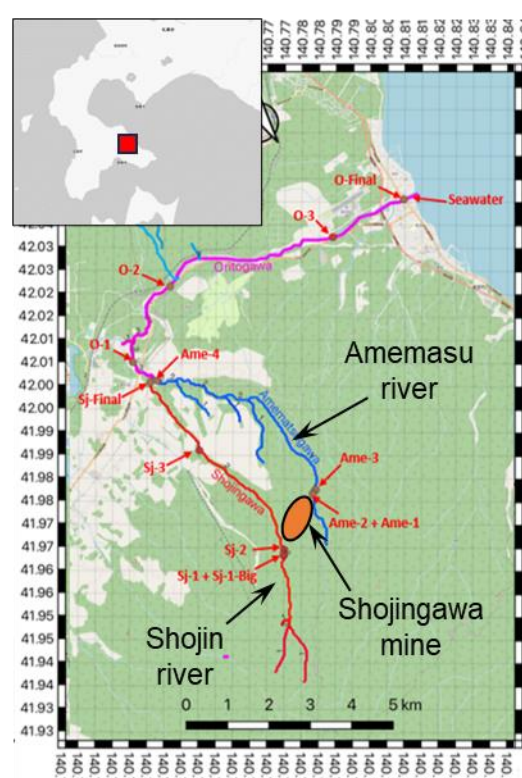
- 強い酸性の水が流れる河川がある。
- 国内でも100カ所程度の対策が必要な鉱山廃水がある。
- 長年調べられてきているので、岩石を投入する前の状況がよく把握されている場合が多い。
- そもそも有害な重金属等が含まれていることが多いので、玄武岩投入の理解が得られやすい。
- 玄武岩によって廃水が浄化されるかもしれない。



- 国内には広大な森林地がある(全国土の2/3)。
- 降雨時には大量の雨水が表層を流れる。
- 玄武岩の投入によって森林土壌の改善につながる可能性がある。
- 地滑り防止につながる可能性がある。

休廃止鉱山での小規模現場試験

試験の詳細



鉱山廃水が流入する2つの河川の水質

[mg/L]	Amemasu	Shojin
pH	3.04	3.00
Fe	16.22	26.37
SO ₄ ²⁻	549.69	306.31
Ca	15.09	6.78
Mg	2.31	1.87
Na	4.30	3.13
K	2.33	3.35
Si	20.75	11.28
Al	10.42	5.31
Cl	6.04	6.45
As	0.103	0.087
Pb	0.101	0.056

小規模現場試験を実施した休廃止鉱山とその廃水が流れる河川の位置およびモニタリングポイント

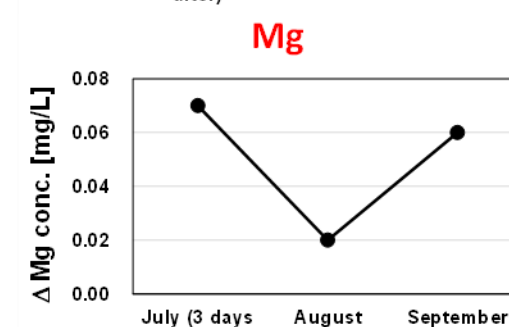
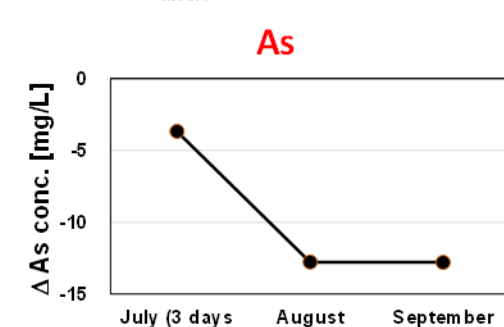
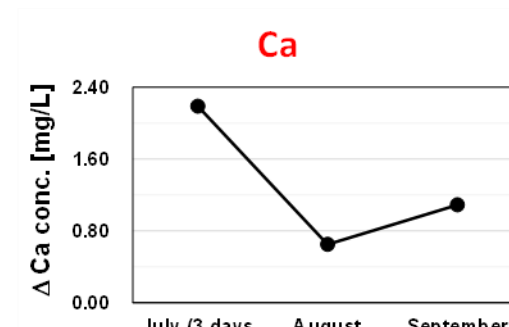
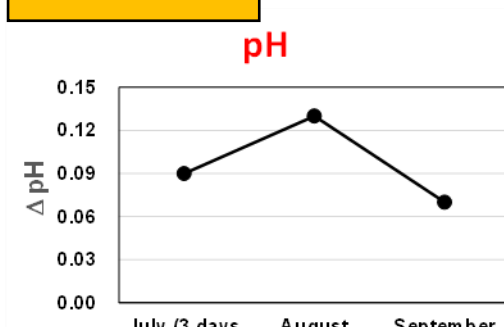
河川に投入した玄武岩

北海道函館市鉄山協和組(精進川に投入)
北海道福島町吉岡砕石工業(雨罾川に投入)
製品として出荷する採石を造るときに出るダスト(細かく粉砕された岩石)を使用
粒径: 1-2mm φ
ポリプロピレン製0.5mm φ)の袋に5kgずつ分取(問題が生じた時に撤去するため袋で投入)

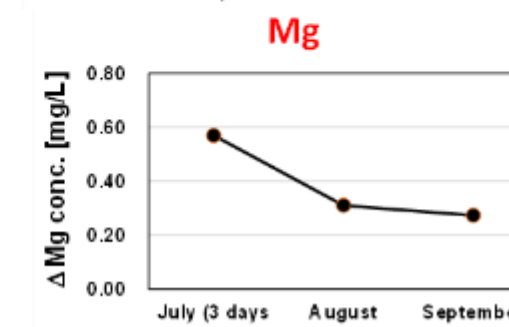
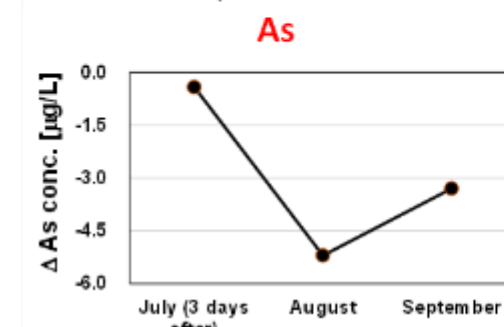
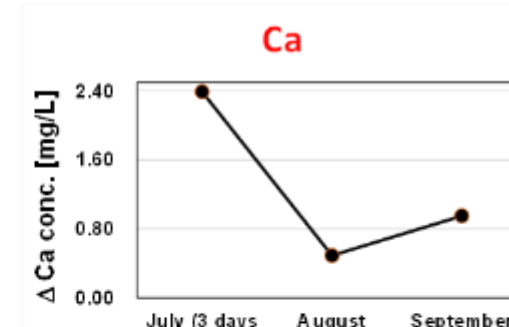
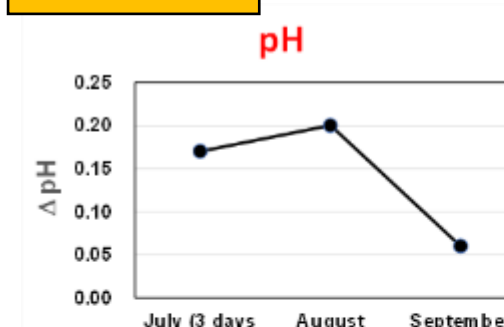


試験の結果: 玄武岩投入前後の水質の変化

雨罾川



精進川



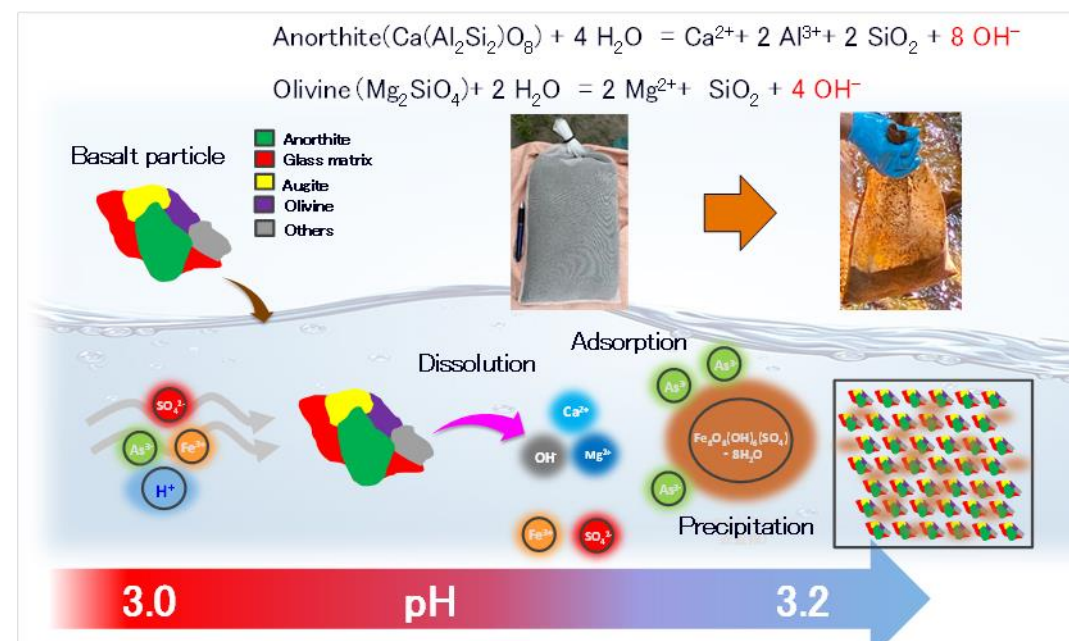
投入79日前後の玄武岩バックの変化



体積が半分くらいに減っていたバックもあった。

橙色の鉄の沈殿物が大量に生成していた。

玄武岩の投入で何が変わったか？



- pHが上昇していた。
- 玄武岩含有鉱物からCaやMgイオンが溶出した。
- 廃水に含まれるヒ素イオン濃度が低下していた。

酸性鉱山廃水への玄武岩の投入で、風化が促進され、ヒ素濃度は低減していた。

森林傾斜地での小規模現場試験

試験の詳細

メインプロット外観



休廃止鉱山のある雨罾川流域にある森林傾斜地で実施

ズリ区(傾斜: 約20°)

森林区(傾斜: 約30~35°)

森林傾斜地に投入した玄武岩

北海道福島町吉岡砕石工業
製品として出荷する採石を造るときに出るダスト
岩石粉(150-250μm)とベレット(8mm)を散布
散布量: コントロール、4 kg/m²、8 kg/m²

サブプロット



鉱物バック試験



原位置暴露試験



異なる条件で鉱物相の変化や反応溶液の変化を把握

炭素会計

本フェーズでは玄武岩と反応した休廃止鉱山廃水と森林表層水によるCDRを対象

自然プロセス

地球化学反応モデリングで定量化

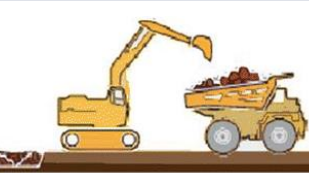
酸性鉱山廃水による玄武岩含有鉱物の溶解
森林傾斜地に散布した玄武岩含有鉱物の雨水による溶解(プロセス1)

プロセス1によってインプットされたCaイオンが海洋へ流入してアルカリ度が上昇
↓
二酸化炭素を吸収(プロセス2)

工業プロセス

森本Pとの連携

玄武岩の採掘



玄武岩の粉砕

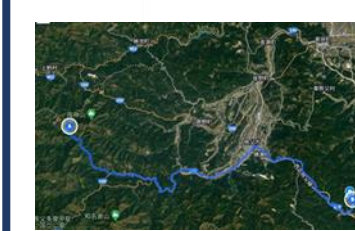


玄武岩粉末の運搬



本邦に存在する休廃止鉱山で試行中

- 各鉱山で1年間に消費できる玄武岩量を地球化学反応モデリングで算出
- その玄武岩を採掘・粉砕する際に排出されるCO₂量を算出
- 各鉱山の最寄りの玄武岩採石場からの道のりを導出
- 運搬する玄武岩量と道のりから排出されるCO₂量を算出



● 玄武岩採石場
● 休廃止鉱山

番号：A-10-3J

PJ：岩石と場の特性を活用した風化促進技術“A-ERW”の開発

テーマ名：農地を活用した風化促進技術の開発

担当機関名：京都府立大学

問合せ先：中尾淳 (na_4_ka_triplochiton@kpu.ac.jp)



00 プロジェクトのあらまし

ムーンショット目標4では「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」を掲げ、2030年までに、温室効果ガスに係る循環技術の開発および、ライフサイクルアセスメントの観点からの技術検証が明記されている。その技術として、「炭酸塩化によるCO₂吸収：岩石を粉砕・散布し、風化を人為的に加速させる技術等」との記載がある。本プロジェクトではこの目標に対し、自然岩石を利用した風化促進技術、とりわけ日本の農地を活用した風化促進におけるCO₂鉱物化の加速技術と、LC-CO₂の観点での炭素会計情報基盤の開発を行う。

農学班では主に、農地における事業環境調査および岩石散布農地での風化促進技術開発(01)、実環境場試験と効率的モニタリング法開発(02)、自然の炭素循環を含む炭素会計法の開発&大規模実証概念設計(03)を担当している。岩石散布の効果は農地が置かれた環境条件によっても、散布する岩石の種類等によっても大きく異なることが予想されるため、多くの研究機関(京都府立大学、北海道大学、農研機構、東大、国際農研、琉球大)が参画し、カラムスケールから圃場スケールまで幅広い試験設定で研究を進めている(図00-1~3)。

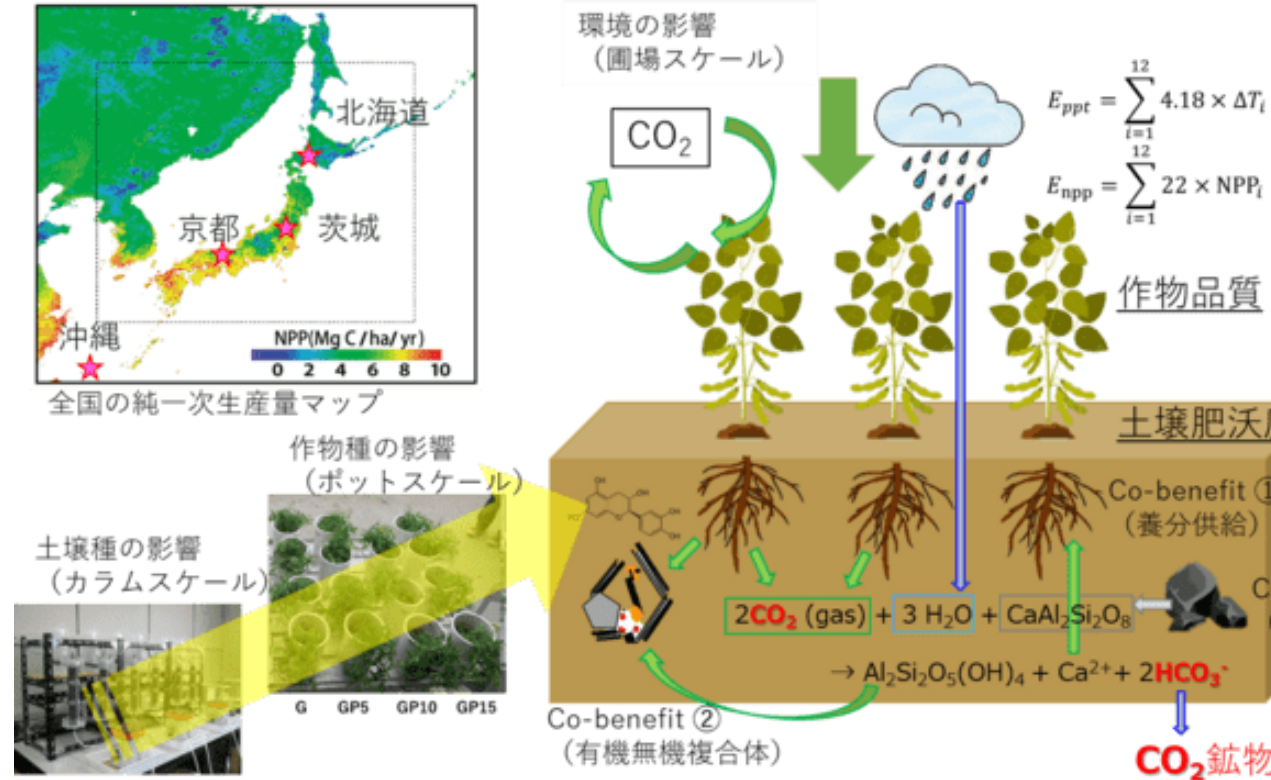


図00-1. 農学班が実施する研究計画の全体像を示した模式図

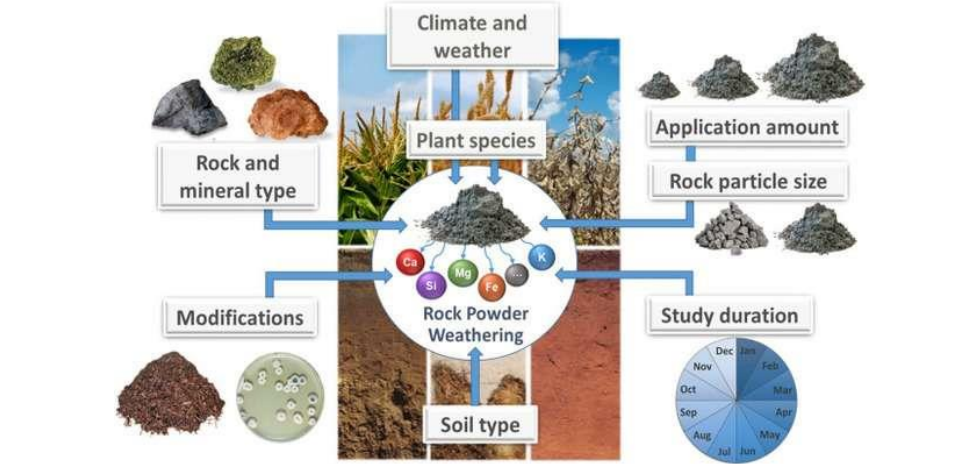


図00-2. 岩石散布による作物への養分供給 (Swoboda et al. 2022)

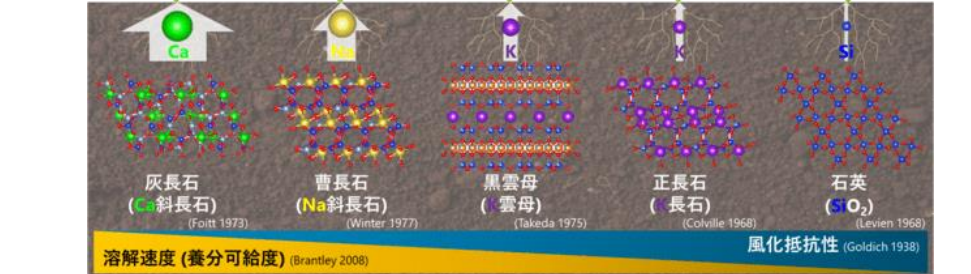


図00-3. 鉱物種ごとの風化のしやすさと供給養分の違い

01 事業環境調査&岩石散布農地での風化促進技術開発

事業環境調査：

岩石採掘場から近距離にある農地ほど輸送に伴うCO₂発生量が抑えられるのは明らかである一方、農地の土壌タイプによる風化促進効果の違いは検証されていなかった。そこで本プロジェクトでは全国178地点の農耕地土壌の物理・化学性および鉱物組成を分析し、散布効果に影響する土壌側の特徴を調べた。その結果、火山近郊に分布する黒ボク土の多くが玄武岩と同様に易風化性鉱物を元々含んでいるため、非火山性の土壌群と比べると散布効果が小さくなる可能性が示された(図01-1)。

農地での風化促進技術開発：

風化促進技術開発の前段階として、農地に散布された岩石の風化や付随したCO₂固定を定量する技術開発が不可欠である。そこで粉末X線回折(PXRD)法など、様々な手法を検討し、最適な定量法の開発を進めている。PXRD法については鉱物定量精度の大幅な向上を達成することができた(図01-2)。

また、効率的な風化促進が可能な栽培条件を解明するために、幅広い実験条件でポット栽培試験を実施した。その結果、土壌と作物の組み合わせによって収量が増加する場合も、逆に減少する場合もあった(図01-3)。

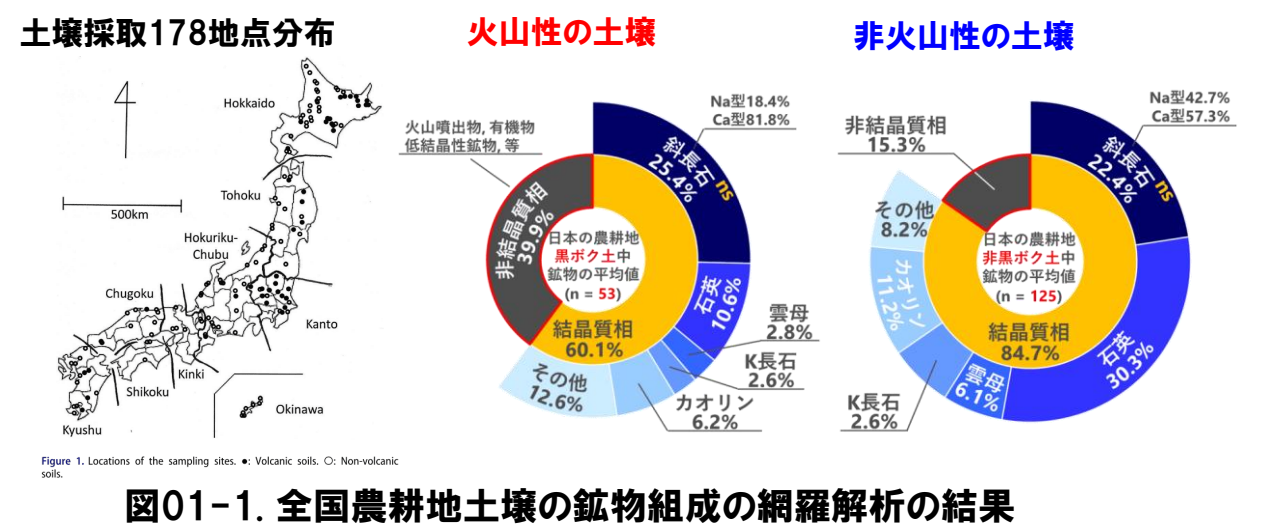


図01-1. 全国農耕地土壌の鉱物組成の網羅解析の結果



図01-3. 北大(左)および石垣(右)の土壌を用いた大豆栽培試験

02 実環境場試験と効率的モニタリング法開発

4圃場(北海道、茨城県、京都府、沖縄県)の実環境で圃場試験を実施し、作付け期間中の採水および環境モニタリング(図02-1)を実施するとともに、作付け終了後の収量および有機炭素フラックスに基づいた年間CO₂吸収量(ERWCO₂)の試算を行っている(図02-2)。茨城県では、夏季にERWCO₂量が増加する季節パターンとともに、測定期間中の正味のERWCO₂量の増加を観測することができた(図02-3)。

北大ではチャンバー法基準やCO₂センサー基準など3パターンでのERWCO₂試算方法が試され、いずれも概ね類似の試算量が示された。手法間で誤差要因や作業量の点で一長一短あるため、最適法の探索に更なる検証が必要である。京都での圃場試験では、湛水環境での風化の進行について調べるとともに、水稲に対するコベネフィット効果の検証を行い、玄武岩の風化とイネのケイ酸吸収量の増加を捉えることができた(図02-4)。沖縄での圃場試験では、サトウキビ栽培試験区では栽培を継続しており2024年2月末収穫予定である。

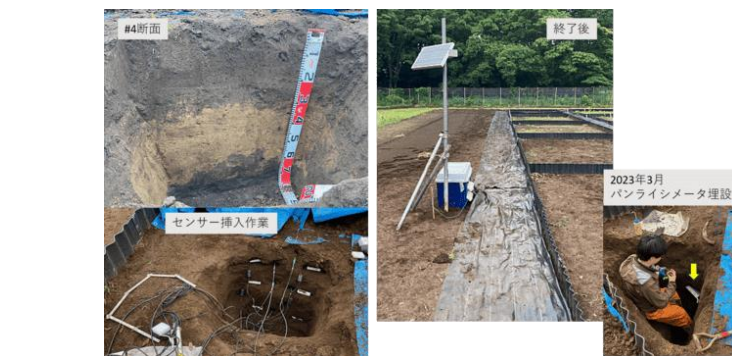


図02-1. モニタリング装置設置の様子@つくば

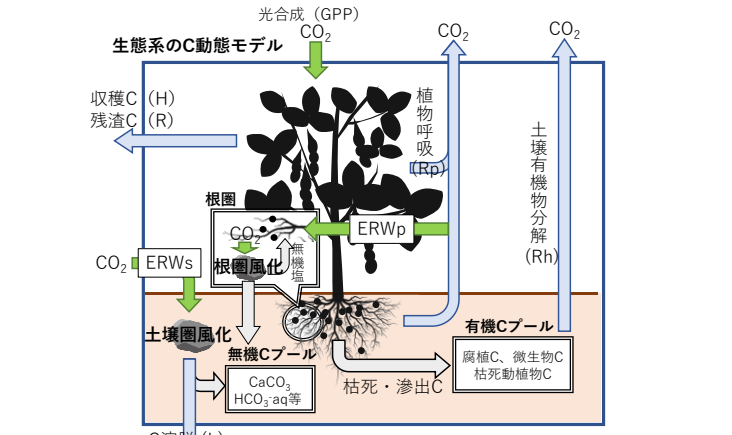


図02-2. ERW-CO₂量試算の概念図

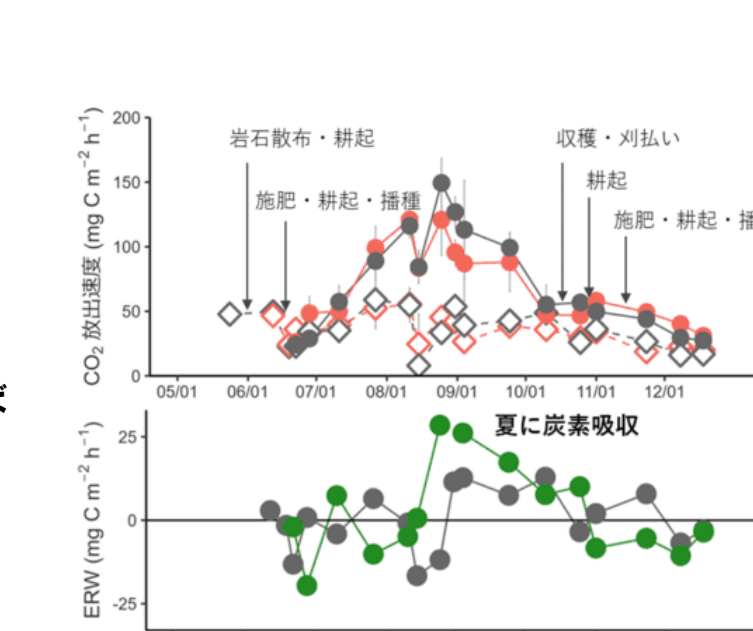


図02-3. 茨城研(つくば農研機構圃場)でのERWCO₂の経時変化。玄武岩区(ピンク)と無添加区(灰色)での土壌呼吸によるCO₂放出速度の差分を用いてERWCO₂を算出している。

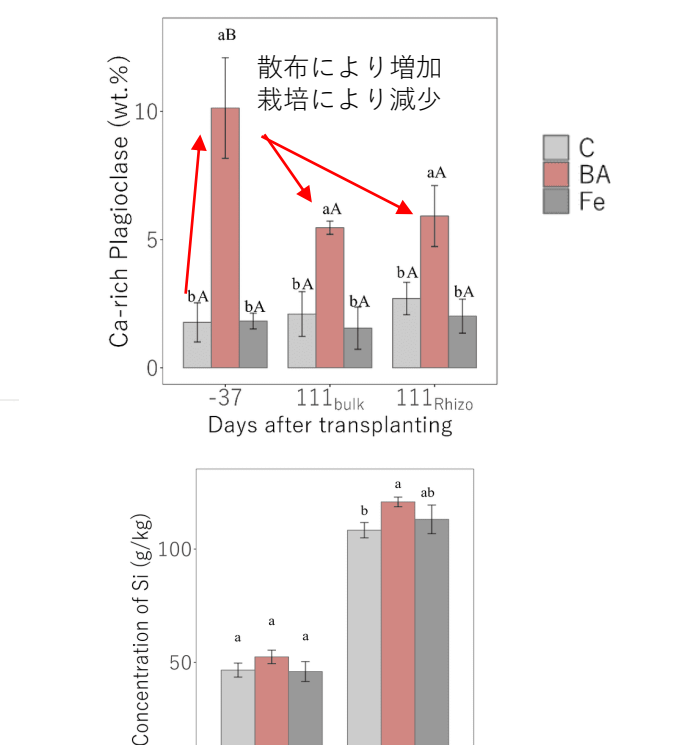


図02-4. 水田での鉱物風化量(上)、イネのケイ酸吸収量(下)@京都

03 自然の炭素循環を含む炭素会計法の開発&大規模実証概念設計

自然の炭素循環を含む炭素会計法の開発：

CO₂センサーを含む各種センサーを搭載したカラム試験で溶脱水中の無機炭素量を測定するとともに、土壌パラメータを用いたモデル予測を試みた(図03-1)。その結果、土壌中のCO₂分圧と土壌pHを用いて高い精度で予測できる目標が立った(図03-2)。現在は、CO₂分圧を考慮した反応輸送モデルの改良を進めており、圃場スケールでの実測データを用いたモデル予測の精度検証を行っている。

大規模実証概念設計：

耕作地への岩石散布による風化促進において、パイロットレベルの実証試験フィールドの準備について検討を開始した。まず、営農水田での小規模な試験実績をつくるために、京都府と謝野町の営農者に水田への岩石散布の許可を取り、2023年度米の栽培を行った。岩石散布がコメの品質に悪い影響を示さないことが検証されたことを受け、2024年度は同町内の複数地点で面積を広げた試験を実施する予定である。さらに、この実績を受け、北海道および福井県の自治体でも2024年度に水田への岩石散布の実証試験を開始する予定である。

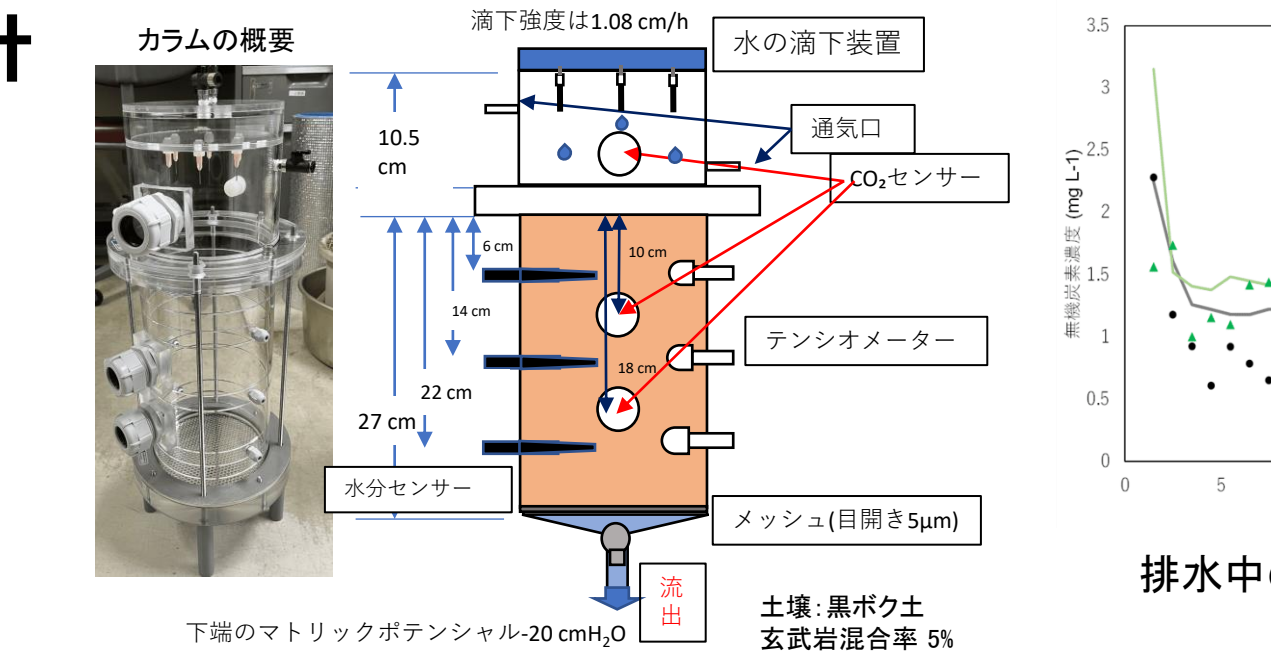


図03-1. 溶脱無機炭素量の計測と土壌パラメータの取得を平行に行うためのカラム試験の設計

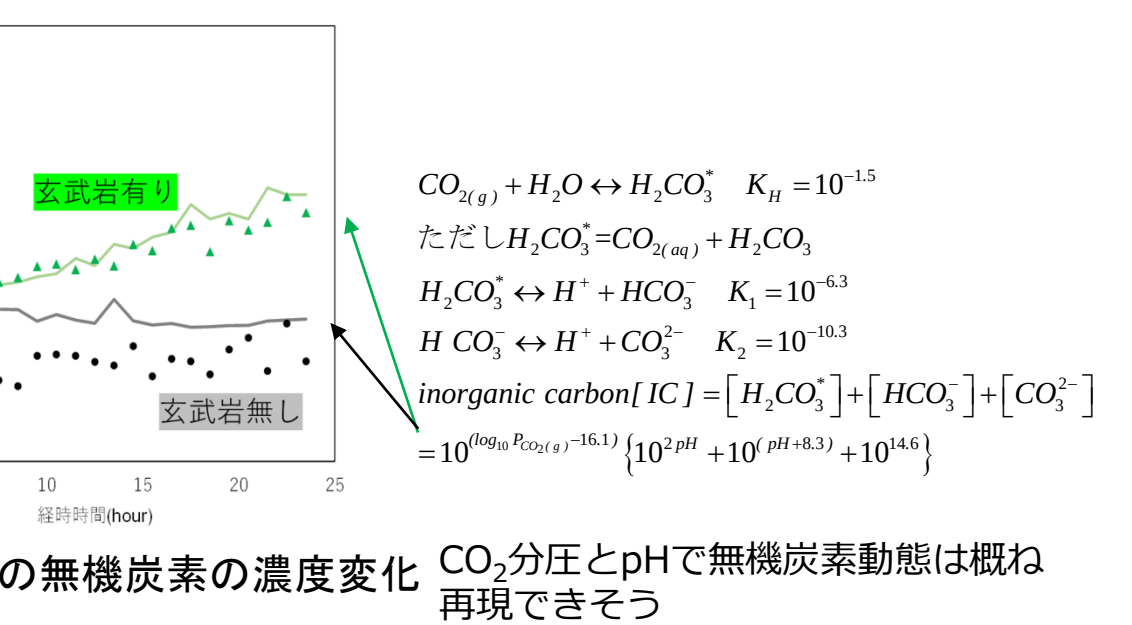


図03-2. カラム試験で得られた無機炭素溶脱量の実測値とpHおよびCO₂分圧を用いた推測値との比較

04 まとめ&今後の展望

まとめ：

2023年度の研究成果から、農地に元々存在する、もしくは玄武岩散布により増減した易風化性鉱物の量を定量することで、散布に適した農地の判別や風化した鉱物量の試算が可能となった。炭素固定量については実測もモデル推定も改良を重ねているが、信頼性の高い数値の提案には更なる検討が必要である。ポット試験の結果から作物へのコベネフィットとして期待できるのは主にケイ酸の供給とpH矯正だと判断されたが、後者は生育障害要因にもなり得るため、栽培システム構築に慎重な判断が必要となる。

今後の展望：

今年度の成果を基に、CO₂固定量のモデル計算やコベネフィット評価に必要なパラメータの種類・測定方法・タイミング等について条件の絞り込みを行う(図04-1)。屋内ライシメータ(国際農研・石垣支所)を用いた栽培試験により炭素収支の定量評価を行う(図04-2)。国際連携によって、岩石散布効果の高い海外フィールドの探索に挑戦する(図04-3)。岩石散布後複数年経過した農地における土壌特性やCO₂固定量の変化を追跡し、正確な炭素会計に資する情報の収集および体系化を目指す(図04-4)。

1) より正確に、より迅速に、より包括的に

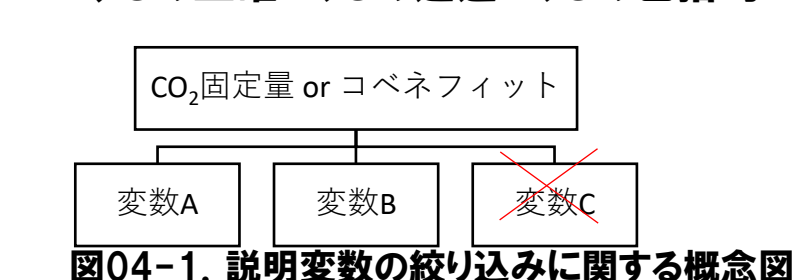


図04-1. 説明変数の絞り込みに関する概念図



図04-2. 屋内ライシメータを用いた炭素収支の定量評価@石垣

2) より広い地域への展開をさぐる

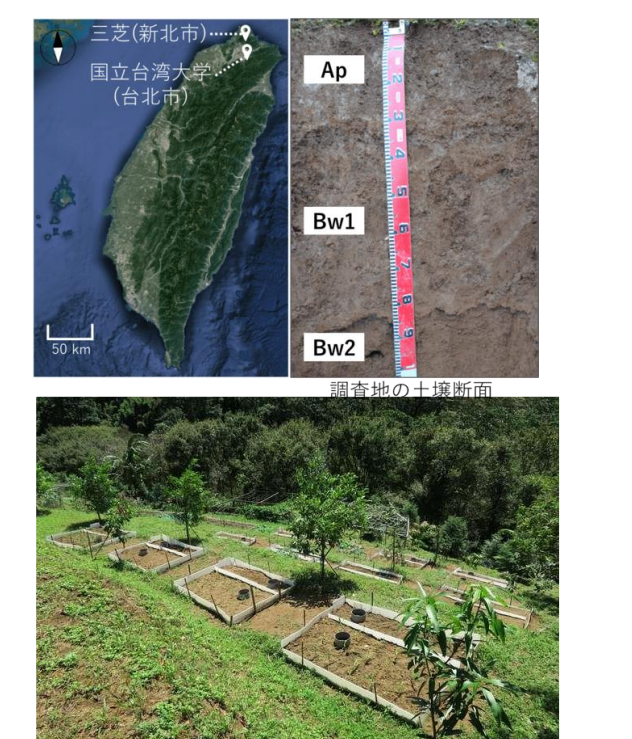


図04-3. 国際共同研究による玄武岩散布試験の様子@台湾

3) より長い期間の影響を計測・予測する

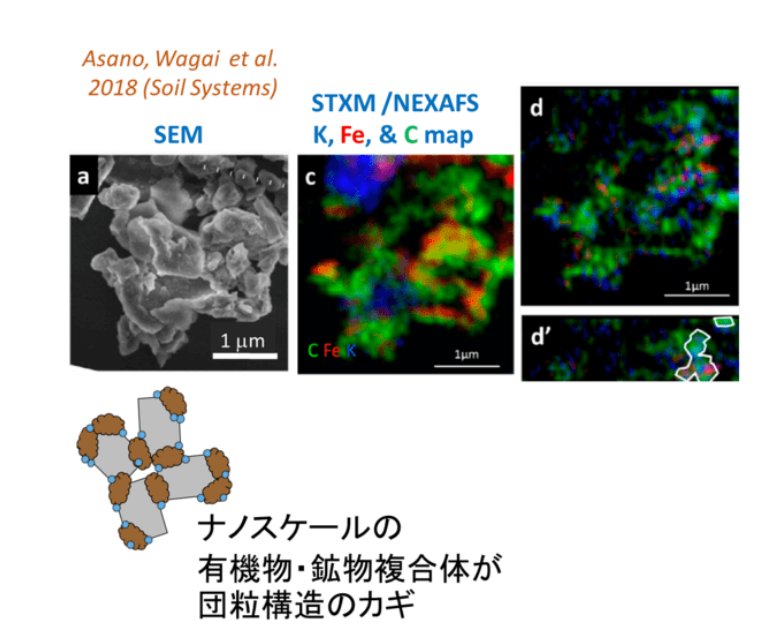


図04-4. 団粒構造中での有機物・鉱物複合体形成の様子(玄武岩風化で増加?)

番号: A-11-1J

PJ: LCA/TEA の評価基盤構築による風化促進システムの研究開発

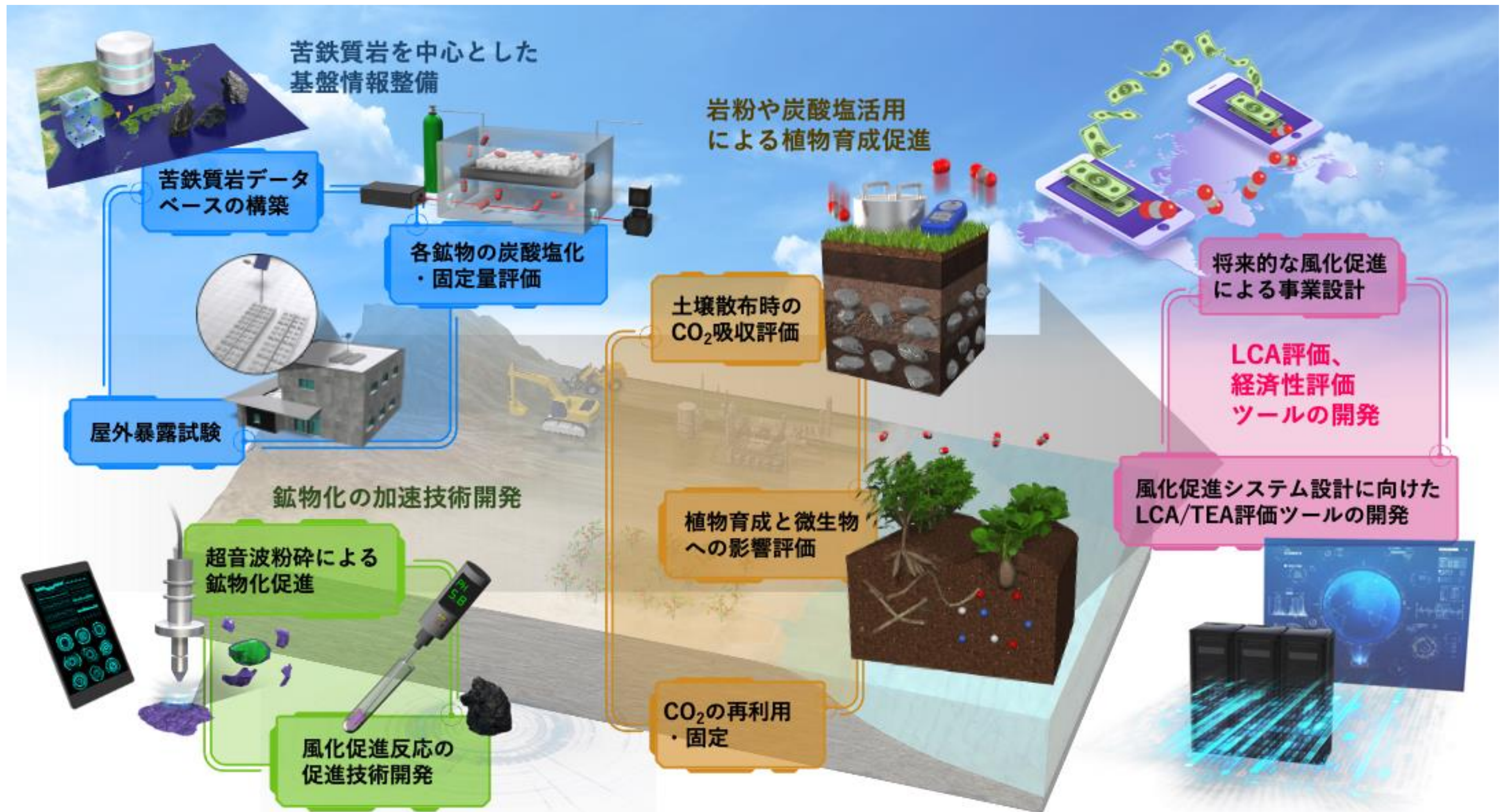
テーマ名: プロジェクト全体概要のご紹介

担当機関名: 産業技術総合研究所・理化学研究所・筑波大学・東京農業大学

問合せ先: M-info_MS_enhancedweathering-ml@aist.go.jp



苦鉄質岩データベース開発とCO₂固定量測定技術開発により風化促進のCO₂固定量算定方法を開発します。また、現状よりも速い炭酸塩化の実現、植物育成促進に向けた岩粉や炭酸塩の最適な利活用方法開発により、鉱物採掘から岩粉や炭酸塩利活用までのLCA/TEA評価ツール開発とトータルシステム設計をします。



アカウンティング

- 苦鉄質岩の**鉱物組成**、**形状**、**採掘サイト**情報等に関する国内版データベースを開発。
- **制御条件**（試料室内）、**長期屋外暴露条件**、**土壌散布**条件でのCO₂吸収量をマイクロレベルで測定。

低コスト化

- **超音波粉碎方法**を用いて、粉碎に要するエネルギーを削減し、風化促進による**CO₂固定化コスト**を現状の半分以上に。
- 湿度、温度、CO₂濃度、pH、時間的要因変化による反応速度への影響解析、**人為的な反応加速**実現。
- CO₂吸収量等の時系列変化を考慮し、**将来シナリオに基づくLCA/TEA**を行う評価ツール開発。
- 利活用まで含めた炭酸塩粒度の**最適化**とコスト最小となる**トータルシステム設計**。

利活用

- 形状（粒子サイズ等）や岩質（苦鉄質岩、玄武岩）が異なる**培土条件**（含有量の違いによるミネラル分・pHの変化）または炭酸マグネシウム散布土壌での植物の光合成活性、成長速度等の指標を計測。
- 圃場環境でCO₂固定と微生物活性（細菌叢）を含めた土壌全体への効果を評価。

番号：A-11-2J

PJ：LCA/TEA の評価基盤構築による風化促進システムの研究開発

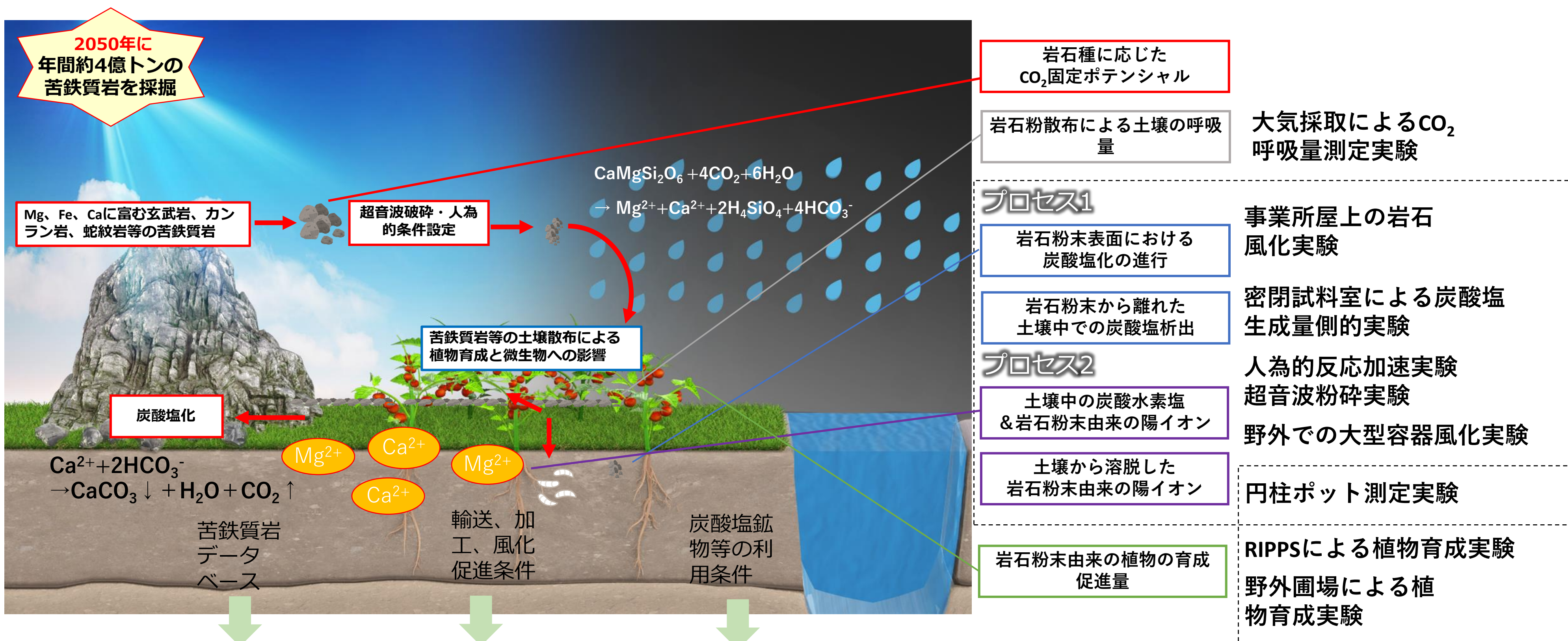
テーマ名：（国）産業技術総合研究所による研究開発

担当機関名：産業技術総合研究所・筑波大学

問合せ先：M-info_MS_enhancedweathering-ml@aist.go.jp



（国）産業技術総合研究所では風化促進の社会実装に向けてCO₂固定量算定方法開発に資する様々な実験、低コスト化に向けた研究開発、苦鉄質岩データベースの開発、及び鉱物採掘から岩粉や炭酸塩利活用までのLCA/TEA評価ツール開発とトータルシステム設計をしています。



LCA/TEA評価ツール 全体システムのCO₂収支・コストを計算し、コスト最適な炭酸塩加工・利活用条件を探索

アカウンティング

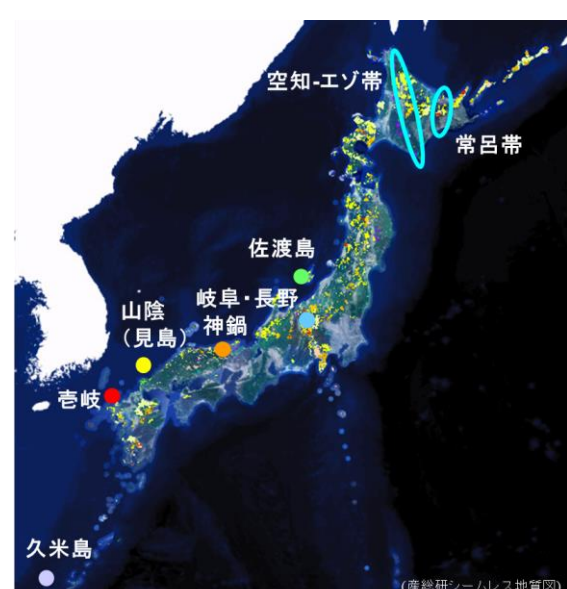
- 苦鉄質岩の国内版データベース開発では既に7地域の苦鉄質岩を採取。GISを使った全国の採石候補地における輸送距離と散布面積の相関関係を分析。
- 長期屋外暴露実験ではイオン溶出量の評価を実施中。一部の試料で炭酸塩化を確認。その他、土壌チャンバー実験により、土壌散布条件でのCO₂吸収量を観測。密閉容器内での炭酸塩化速度測定実験装置の開発。

低コスト化

- 超音波粉碎方法を用いて、粉碎に要するエネルギーを削減。現在、従来技術に対して25～50%、粉碎エネルギーを削減することに成功。
- 湿度、温度、CO₂濃度、pH、時間的要因変化による反応速度への影響解析、人為的な反応加速実現。溶解と個体炭酸塩生成の速度に影響する因子を明確化。
- 温度、pH、有機酸、NaClで溶解速度の促進効果を確認。長期挙動予測を実施中。

利活用

- 岩粉の農地散布の他、工業的製法による炭酸塩製造方法と炭酸塩の処理方法を開発。
- 国内の風化促進パラメータを収集し、LCA/TEA評価ツールの基盤を作成。
- 簡易版ツールでCO₂除去コスト最小となる（粉碎する岩石の）粒径を試算。



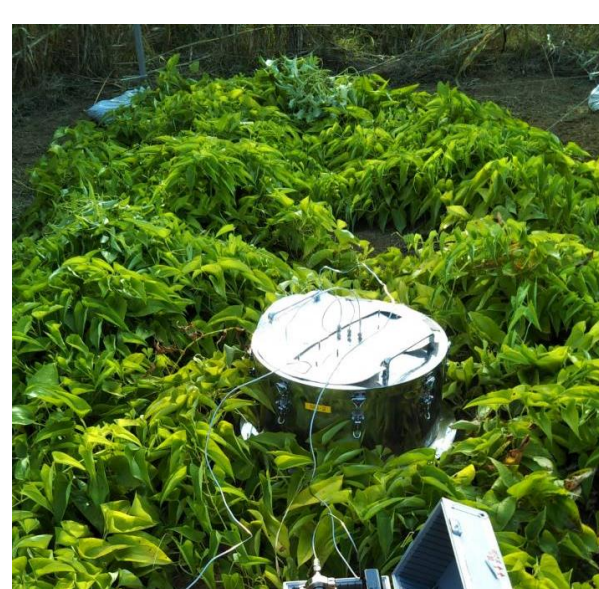
全国苦鉄質岩の分布図



大型容器によるモニタリング実験装置



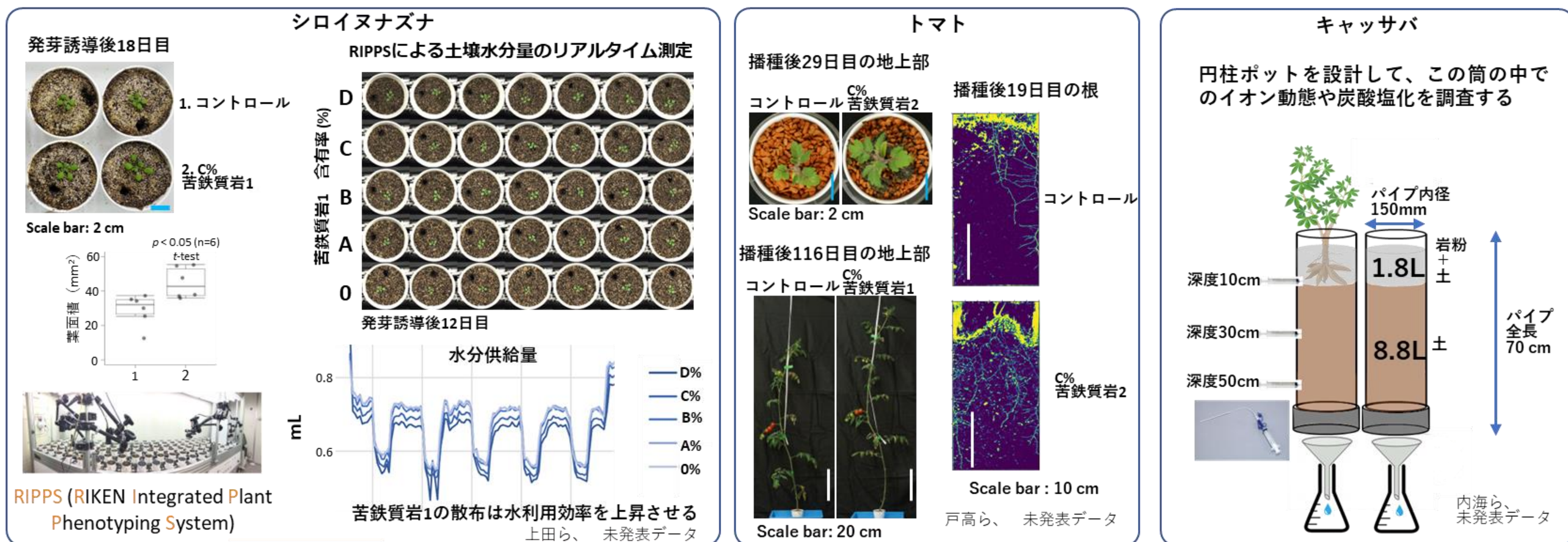
長期野外暴露実験装置



土壌チャンバー実験装置



（国）理化学研究所および東京農業大学では風化促進の社会実装に向けて、苦鉄質岩散布による植物への生育評価を連携して進めています。モデル植物や作物を利用して、オミックス解析やフェノーム解析を進めるための実験室レベルでの研究から、圃場やポット栽培での収量評価や土壌微生物相への影響等フィールドレベルでの有効性評価まで行い、各土壌条件で有効な植物への苦鉄質岩散布条件の決定や詳細な解析を進めています。



実験室レベルでの解析

- 屋内環境でポット栽培によるモデル植物（シロイヌナズナ）を材料に地上部でのバイオマス増強効果のある苦鉄質岩・粒度・含有量を検証済（バイオマス増強効果のある条件を同定）
- トマト・キャッサバにおけるバイオマス増強効果のある苦鉄質岩散布の探索中（根などのバイオマス増強効果のある条件を同定）
- トランスクリプトーム解析等の各オミックス解析を進行中
- RIPPSにより給水量・植物の表現型等のリアルタイム計測を進め、植物への苦鉄質岩散布効果の詳細を観察中（水利用効率の上昇を確認）
- 円柱ポット実験による植物育成環境におけるイオン動態や炭酸塩化を測定中



東京農業大学宮古亜熱帯農場で圃場試験



キャッサバ



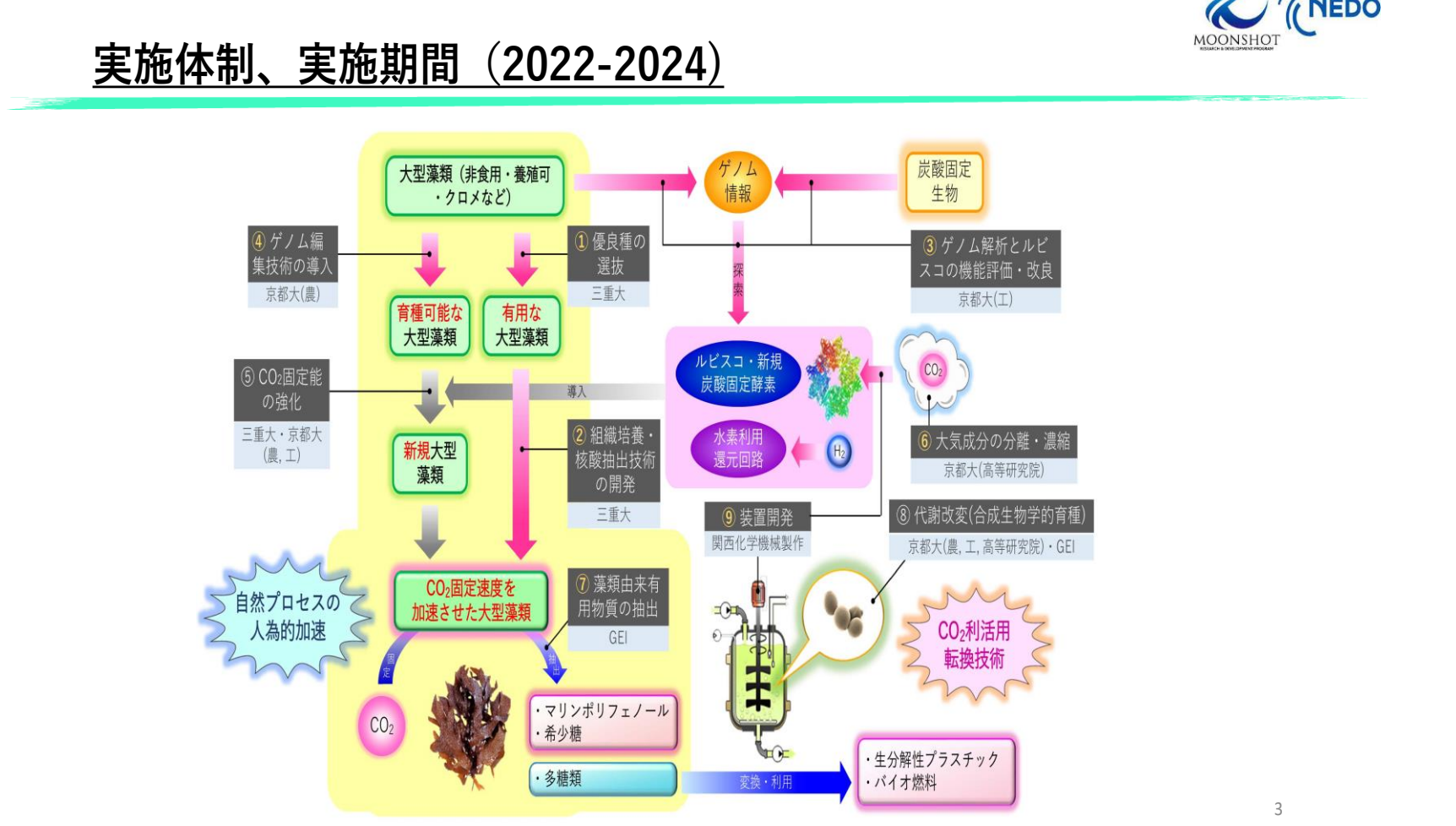
ヤムイモ



陸稻

フィールドレベルでの解析

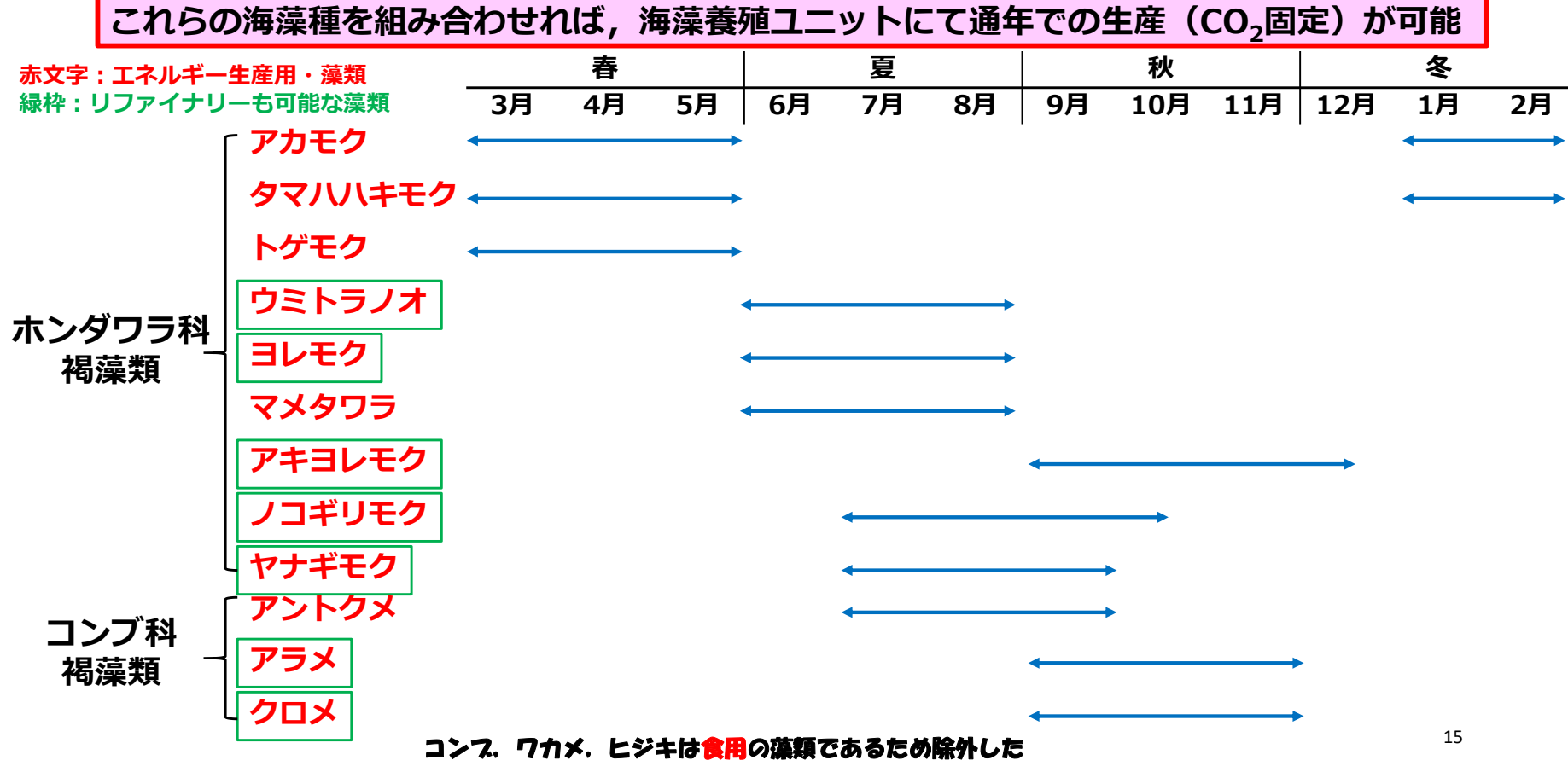
- ヤムイモ・キャッサバ・陸稻・コーヒークのポット栽培による苦鉄質岩含散布の植物生育への評価を進行中（このうち、一部の作物・土壌条件で有効性を確認）
- 苦鉄質岩散布した圃場でのヤムイモ・キャッサバの地上部や地下部のバイオマス評価を進行中
- ポット栽培による苦鉄質岩散布の土壌微生物相への影響評価を進行中
- 苦鉄質岩含有土壌のCO₂固定効果の評価を進行中（産総研との連携）



ホンダワラ科褐藻類の調査とETR (光合成) 測定



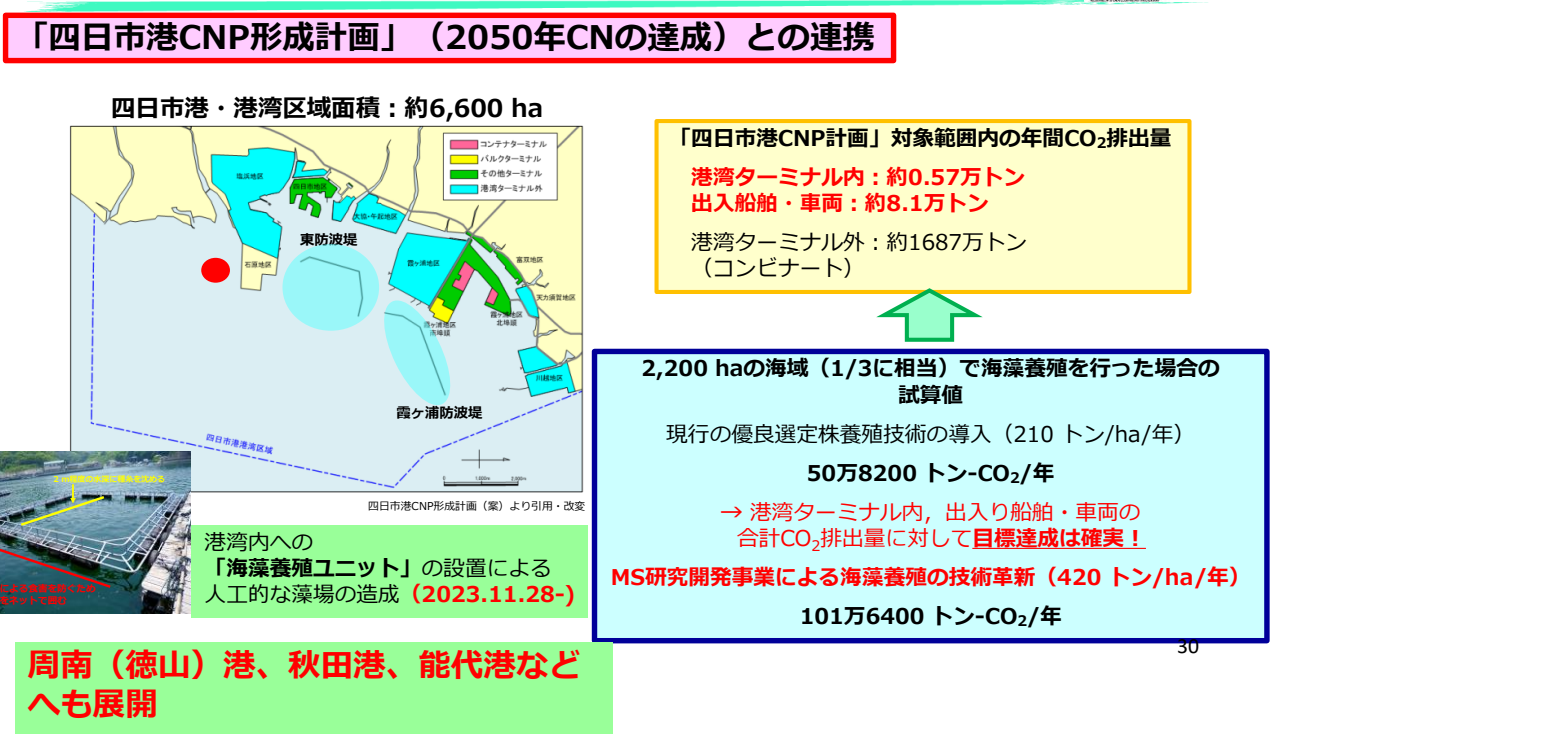
主な大型藻類の通年生産可能



社会実装のイメージー大型藻類の藻場拡大ー洋上風力発電や海上空港との共役



四日市港内での大型藻類養殖の実証試験の場



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 (スピリリナなど)
生産性 (t/ha/年)	11	9	10~20
CO ₂ 固定速度 (kg-CO ₂ /m ² /年)	1.6	0.84	1.5~2.9
CO ₂ 固定量比	2.3	1	7.6
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 (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
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

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3-5m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)

番号：A-7-2J

PJ：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

テーマ名：CO₂固定速度の加速に向けたCO₂固定関連酵素群の探索と機能評価

担当機関名：京都大学大学院工学研究科

問合せ先：跡見 晴幸 (atomi.haruyuki.8r@kyoto-u.ac.jp)



目標

大型藻類由来CO₂固定代謝関連酵素の機能評価と微生物由来高機能Rubiscoの探索と機能評価を行い、有用酵素の同定を目指す。

③- 1. 大型藻類由来炭素固定代謝関連酵素の機能評価
対象とする酵素

- Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (**Rubisco**)
- Phosphoenolpyruvate carboxykinase (**PEPCK**)
- Phosphoenolpyruvate carboxylase (**PEPC**)

③- 2. 微生物由来高機能Rubiscoの探索と機能評価

高機能Rubisco遺伝子を得るために、炭素源として炭酸塩のみを含む無機塩培地にH₂/O₂を低流速で導入する条件で**化学独立栄養微生物**のスクリーニングを行う。

進捗状況のまとめ

③- 1. 大型藻類由来炭素固定代謝関連酵素の機能評価

○PEPCK

5種の精製した組換え型酵素について、**基礎的な反応速度論的解析を終え**、種々の生物のPEPCKとのパラメータの比較により大型藻類PEPCKの特性を明らかにした。

○PEPC

5種の遺伝子を発現し、**2種**について十分量の可溶性タンパク質が得られ精製を進めている。精製後にPEPCKと同様な酵素学的解析を行う。

○Rubisco

組換え型酵素の可溶性タンパク質を得て、**粗精製画分のRubisco活性を検出**した。

③- 2. 微生物由来高機能Rubiscoの探索と機能評価

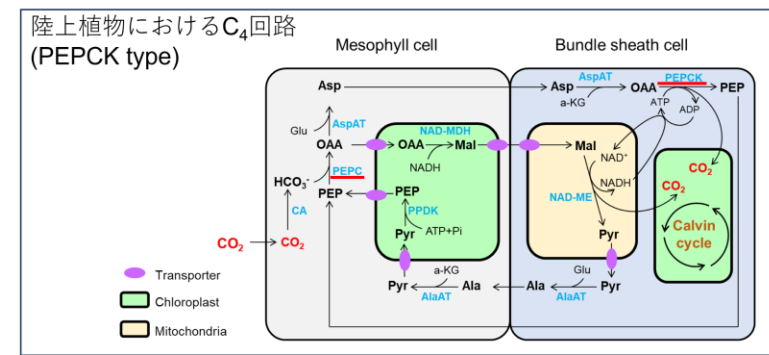
8種の試料から化学独立栄養生育を示す微生物を得て、単離を試みている。単離に成功した株から順次ゲノム解析に着手している。

背景

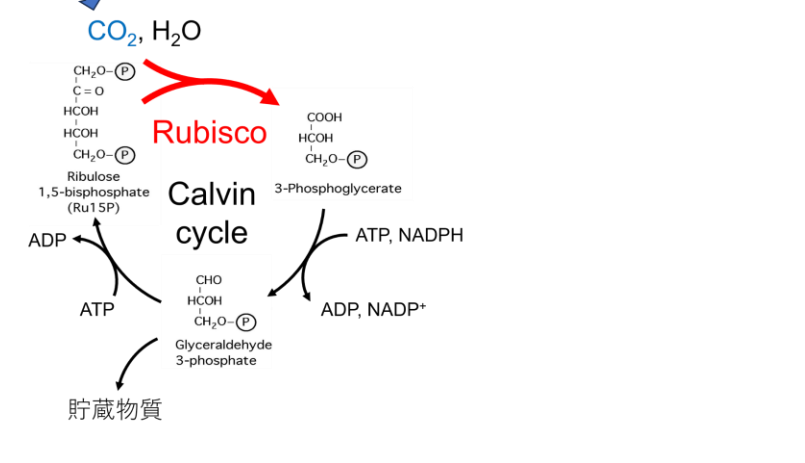
植物・藻類のCO₂濃縮機構

一般に、**Rubisco**のCO₂固定活性を高めるためRubiscoへ高濃度のCO₂を供給する機構（CO₂ Concentrating Mechanisms, CCMs）が存在する

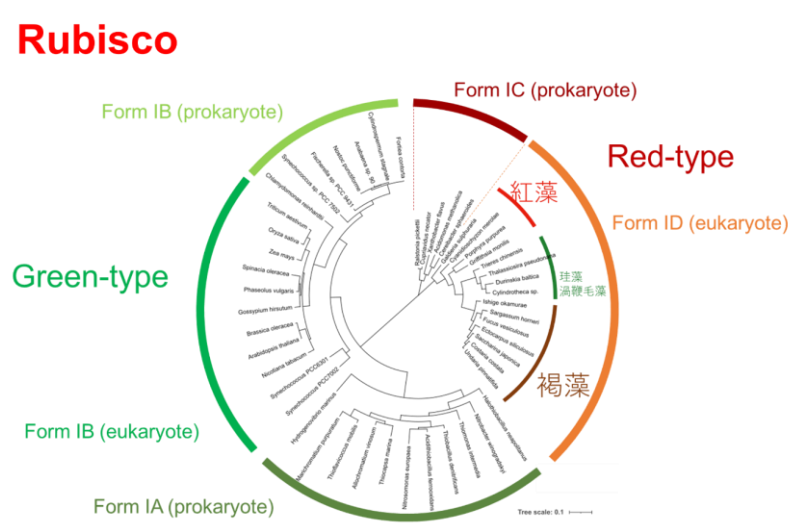
水中では**炭酸の大部分はHCO₃⁻**として存在するため、CO₂への変換も重要な役割



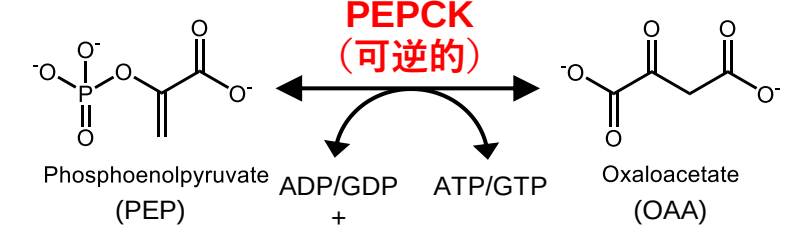
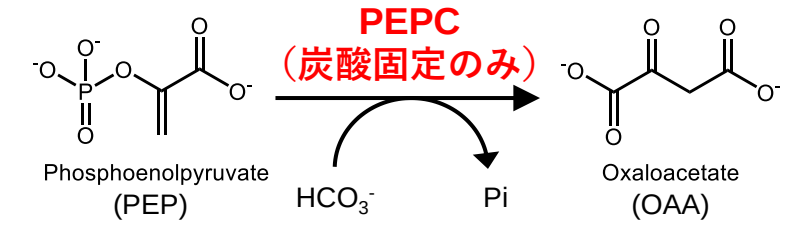
例
・HCO₃⁻の能動的輸送
・Carbonic anhydraseによるCO₂への変換
・C₄回路のようなCO₂供給代謝経路



大型藻類のCO₂固定遺伝子



Form ID Rubiscoは**高いCO₂選択性** (S_{C/O}) が知られているものの、褐藻由来精製Rubiscoを対象とした解析例はなかった



・褐藻のゲノム上にPEPC, PEPCK遺伝子有り

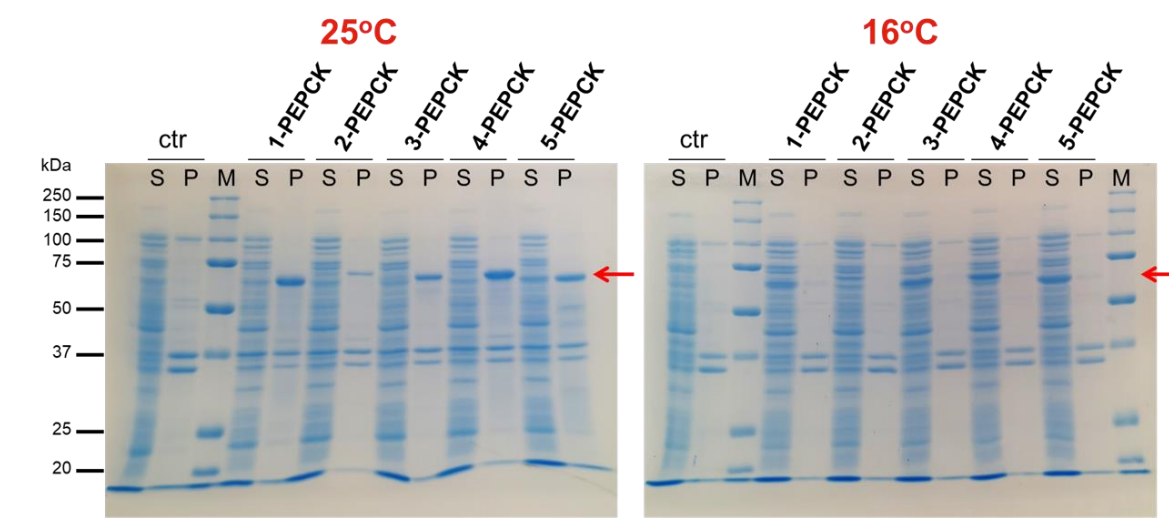
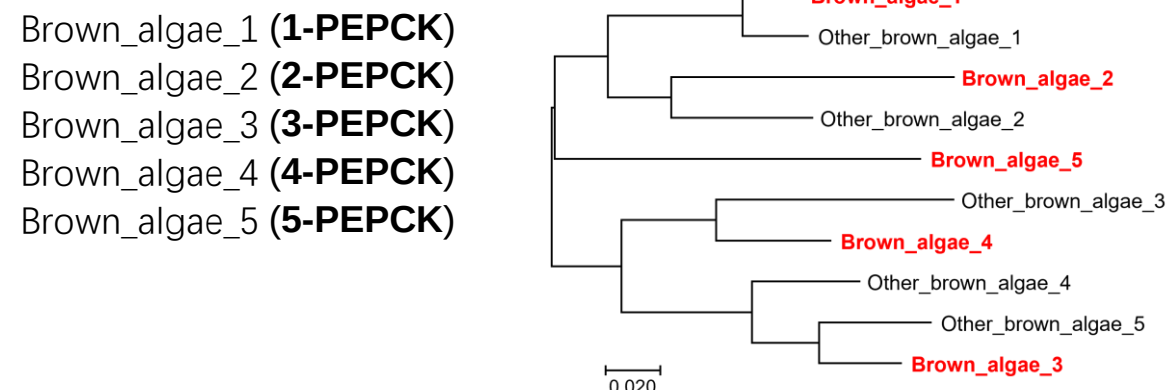
・褐藻抽出液から**高い活性を示すのはPEPCK**

➡ **C₄回路のようなCO₂濃縮機構が存在？**

PEPCK

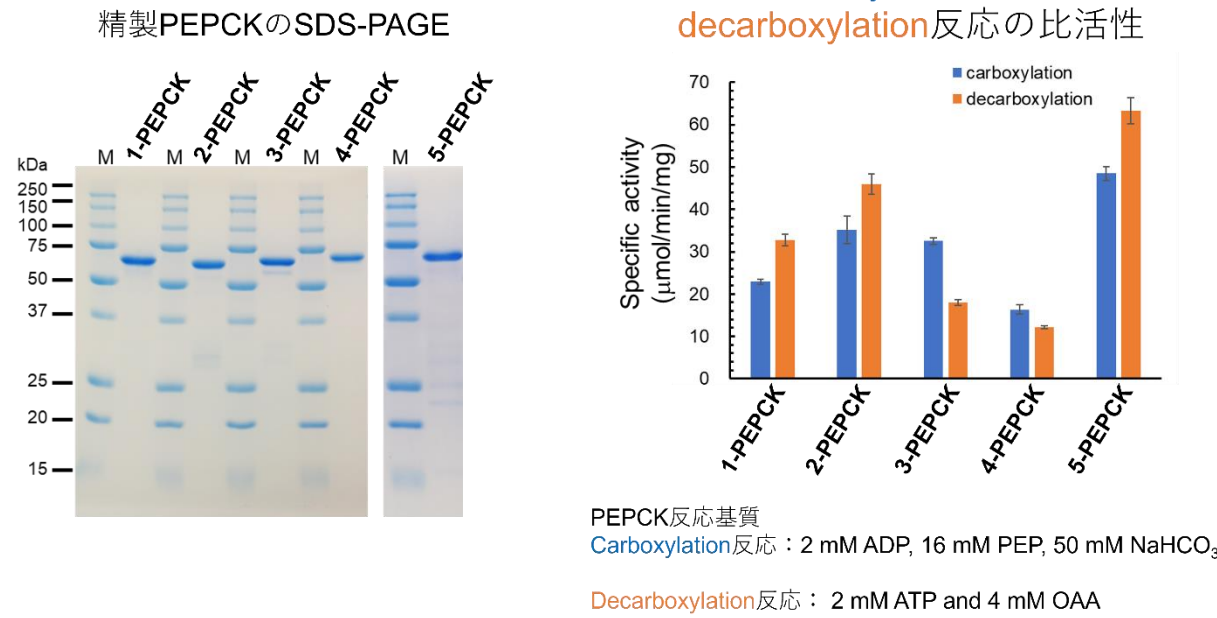
褐藻由来PEPCK遺伝子の発現

系統樹の分布をもとに5種を選択

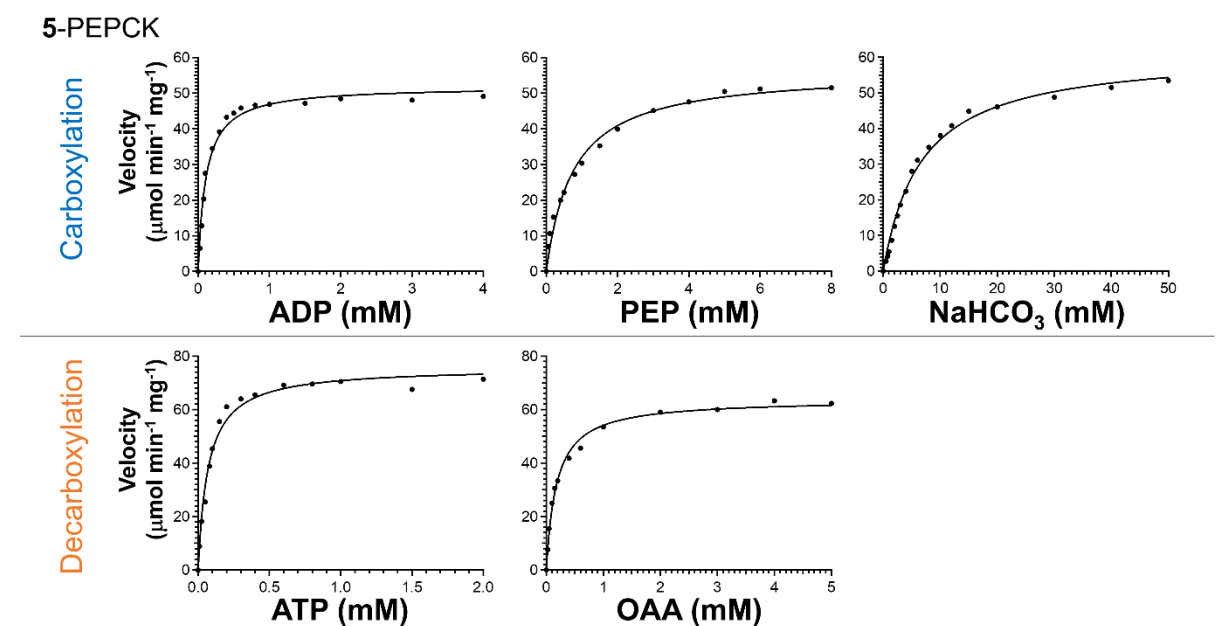


16℃でPEPCK発現大腸菌を培養することにより**5種の可溶化PEPCK**を取得

褐藻由来PEPCKの精製と比活性の検出



褐藻由来PEPCKの速度論的解析



褐藻由来PEPCKと既知の精製PEPCKとの比活性の比較

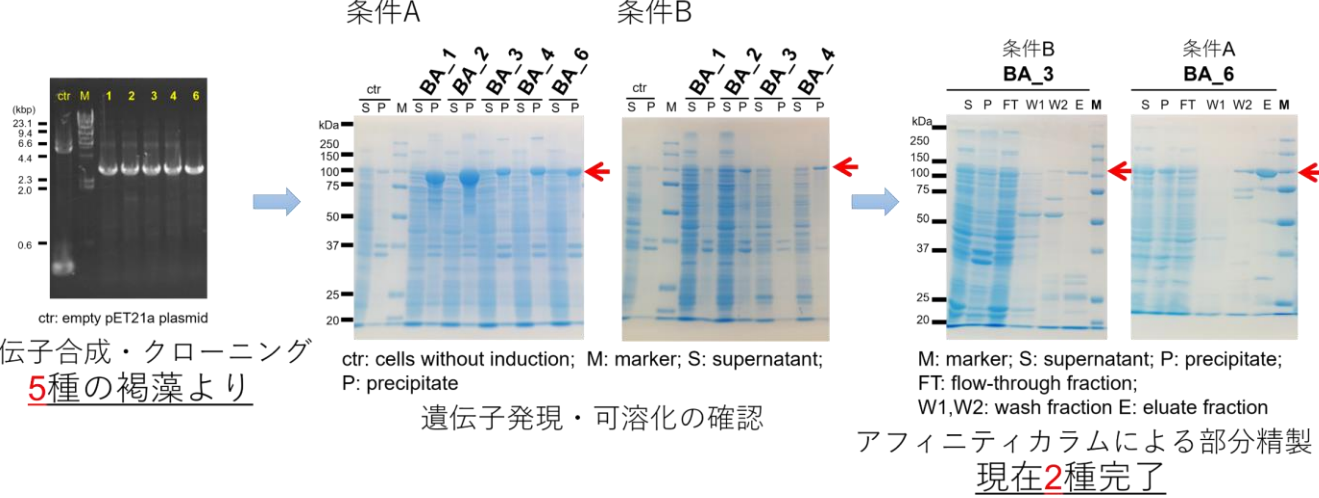
Organism		Carboxylation	Decarboxylation
		V _{max} or specific activity (mmol min ⁻¹ mg protein ⁻¹)	
C3植物, ATP-type	<i>Arabidopsis thaliana</i>	3.2	5.4
C3植物, ATP-type	<i>Oryza sativa</i> (rice)	-	10
C3植物, ATP-type	<i>Cucumis sativus</i> (cucumber)	48	-
C4植物, ATP-type	<i>Sorghum bicolor</i> (sorghum)	-	20
C4植物, ATP-type	<i>Zea mays</i> (maize)	-	23
C4植物, ATP-type	<i>Megathyrsus maximum</i>	41.6	51
CAM植物, ATP-type	<i>Ananas comosus</i> (pineapple)	8.1	17
緑藻, ATP-type	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	6.0	9.6
珪藻, ATP-type	<i>Skeletonema costatum</i>	0.037	-
珪藻, ATP-type	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	0.041	-
酵母, ATP-type	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	16.3	20
バクテリア, ATP-type	<i>Escherichia coli</i>	3	26
褐藻, ATP-type	<i>Ascomyces nidodum</i>	33.03	-
褐藻, ATP-type	Brown_algae_1	23.6	32.7
褐藻, ATP-type	Brown_algae_2	39.2	45.9
褐藻, ATP-type	Brown_algae_3	34.3	18.0
褐藻, ATP-type	Brown_algae_4	17.8	12.2
褐藻, ATP-type	Brown_algae_5	61.6	75.8
ヒト, GTP-type	<i>Homo sapiens</i>	43.8	39.4
バクテリア, GTP-type	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	4.7	22.5
アーキア, GTP-type	<i>Thermococcus kodakarensis</i>	76.9	44.4
アメーバ, PP _i -type	<i>Entamoeba histolytica</i>	34	-

-: Not determined

褐藻PEPCKは既知PEPCKと比較して**最高レベルの活性を有している**

PEPC and Rubisco

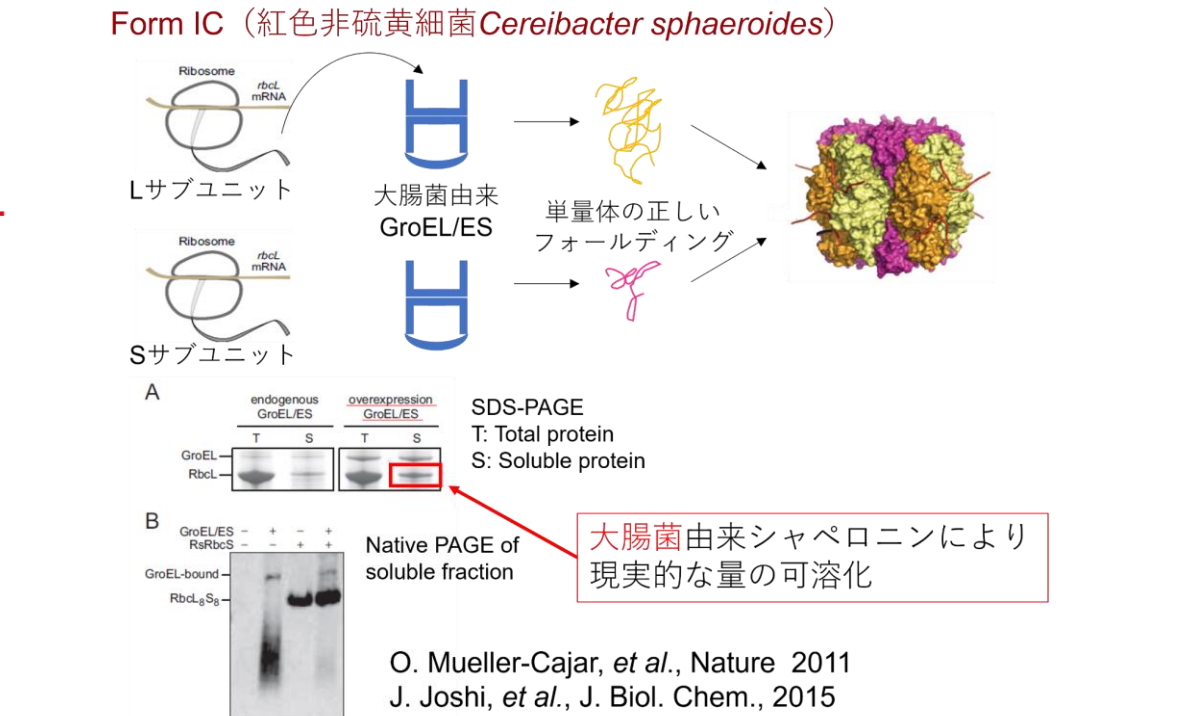
褐藻由来PEPC解析の進捗



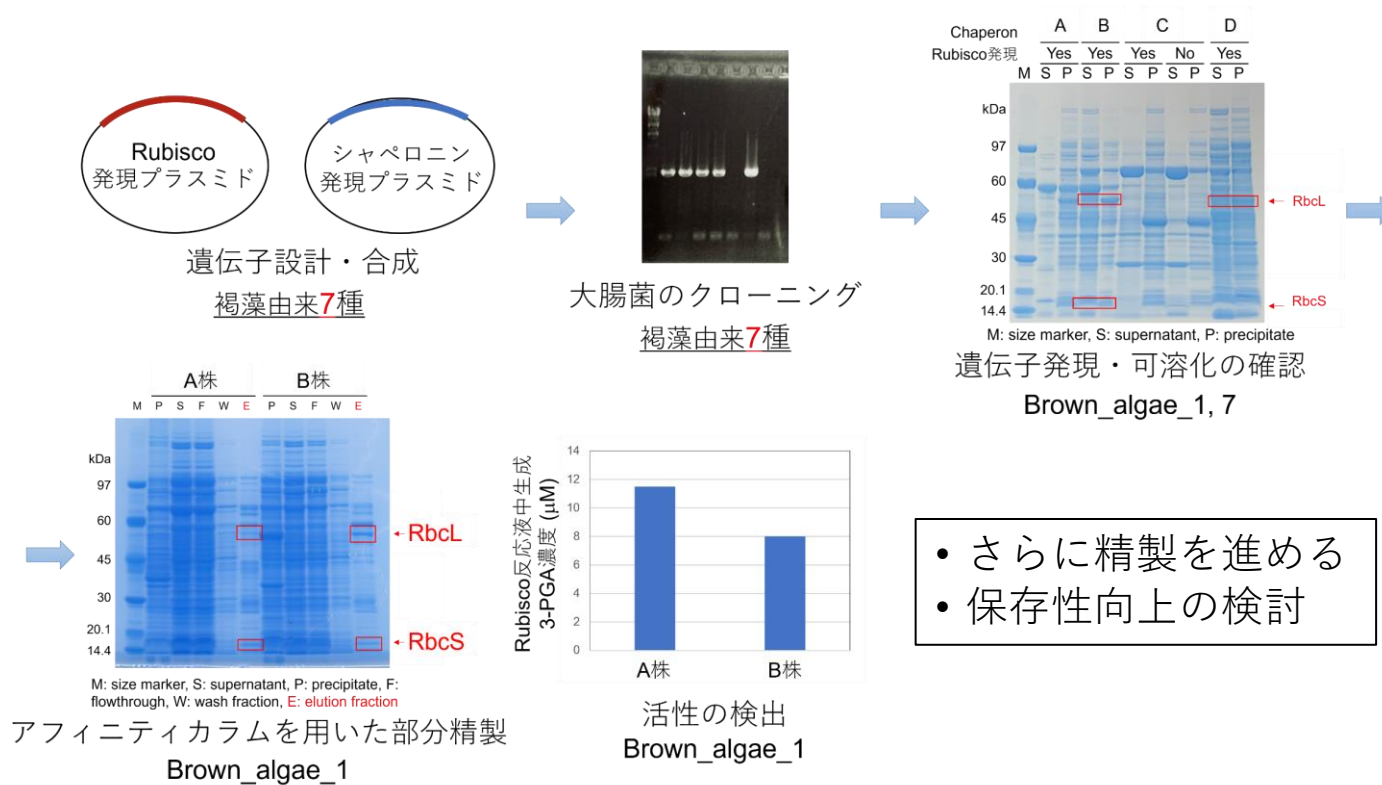
・さらに精製を進める
・PEPC活性を評価し、酵素学的特性を明らかにする

褐藻由来Rubiscoの大腸菌における発現戦略

褐藻Rubisco (Form ID) と近縁のForm IC Rubiscoの発現戦略を参考にした



褐藻由来Rubisco解析の進捗



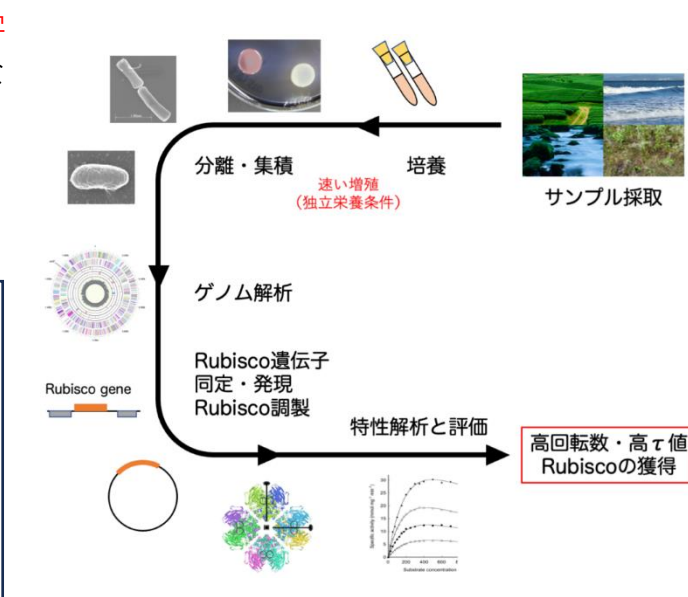
・さらに精製を進める
・保存性向上の検討

化学独立栄養培養

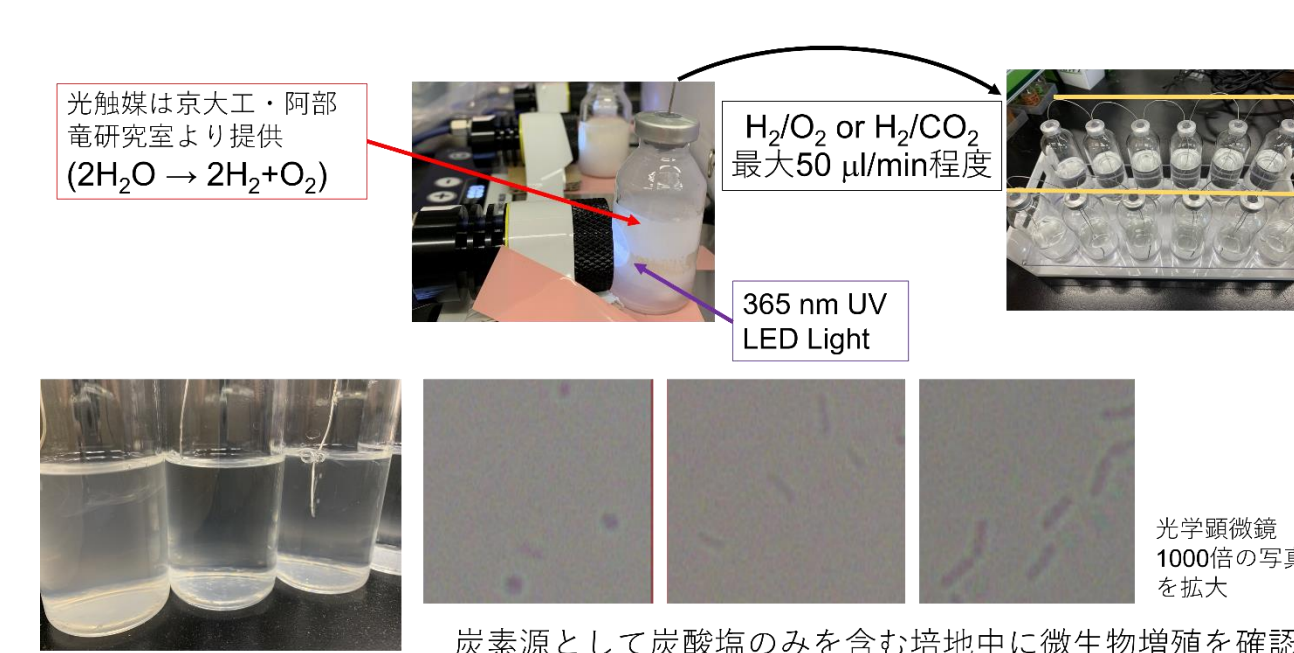
微生物由来高機能Rubiscoの取得

環境中の土壌・水を採取し、**化学合成独立栄養**条件において良好な生育を示す微生物を取得し、Rubiscoを始めとした高機能なCO₂固定酵素の同定を目指す

Calvin-Benson-Basshamサイクルは非常に多くの**好氣的独立栄養**生物で利用されている
H₂(aq)+0.5O₂(aq) ⇌ H₂O(l)
H₂とO₂からH₂Oを生成する際に生じるΔGを利用できる微生物を標的とする



H₂の酸化をエネルギー源とした化学独立栄養微生物の探索



得られた水素酸化細菌の16S rDNA配列解析

各サンプルのメジャーな配列

- No. 2 **Hydrogenophaga sp.** と99%以上一致
- No.12 **Cupriavidus necator** と99%以上一致
- No.13 **Cupriavidus necator** と99%以上一致 (No.12と一致)
- No.16 **Acinetobacter tjernbergiae** と100%一致
- No.17 **Acinetobacter oleivorans** と100%一致
- No.18 **Acinetobacter johnsonii** と99%以上一致
- No.19, 20は数種の配列が混在しており解析不能

現在上記**8サンプル**からCO₂固定微生物の増殖に成功

単離・ゲノム解析進行中

番号: A-7-3J

PJ: 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

テーマ名: 大型藻類の育種を加速させるゲノム編集技術の確立

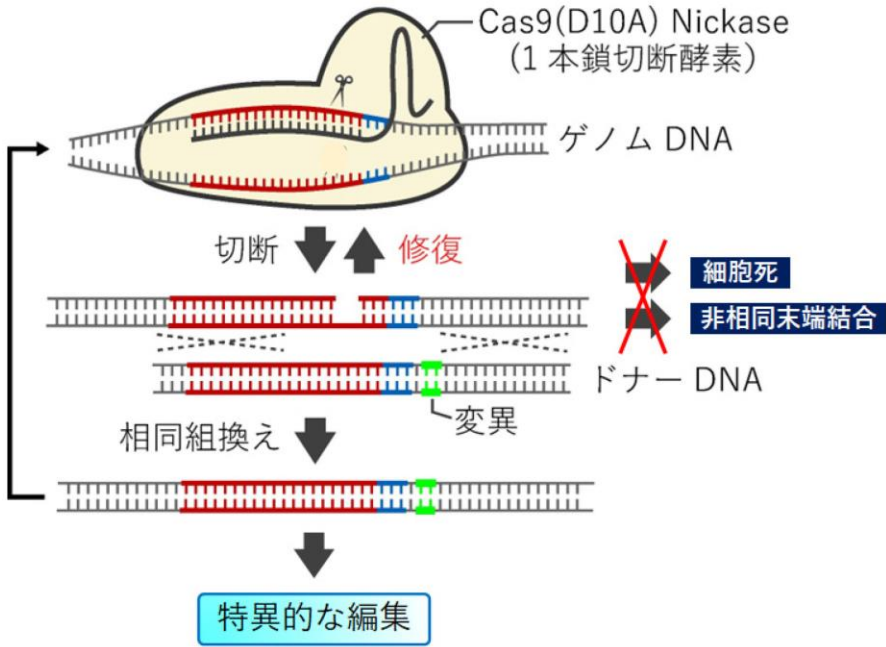
担当機関名: 京都工芸繊維大学、京都大学高等研究院

問合せ先: 黒田浩一 (kuroda@kit.ac.jp)



① CRISPR/Cas9 systemにおけるゲノム編集効率向上戦略

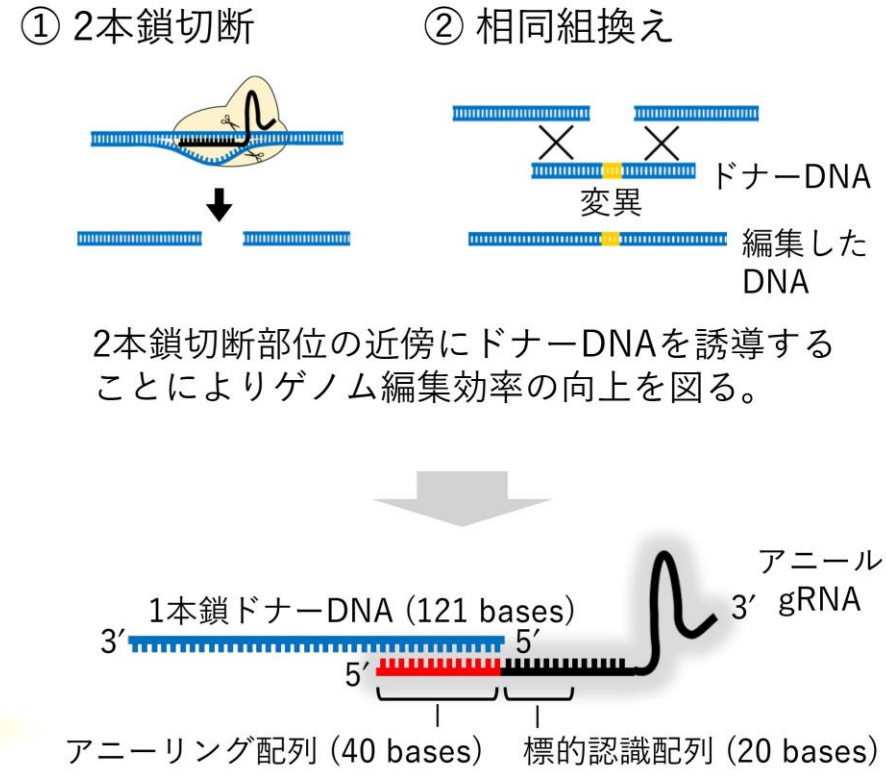
CRISPR Nickase システム



ゲノム編集の正確性・適用範囲を飛躍的に向上

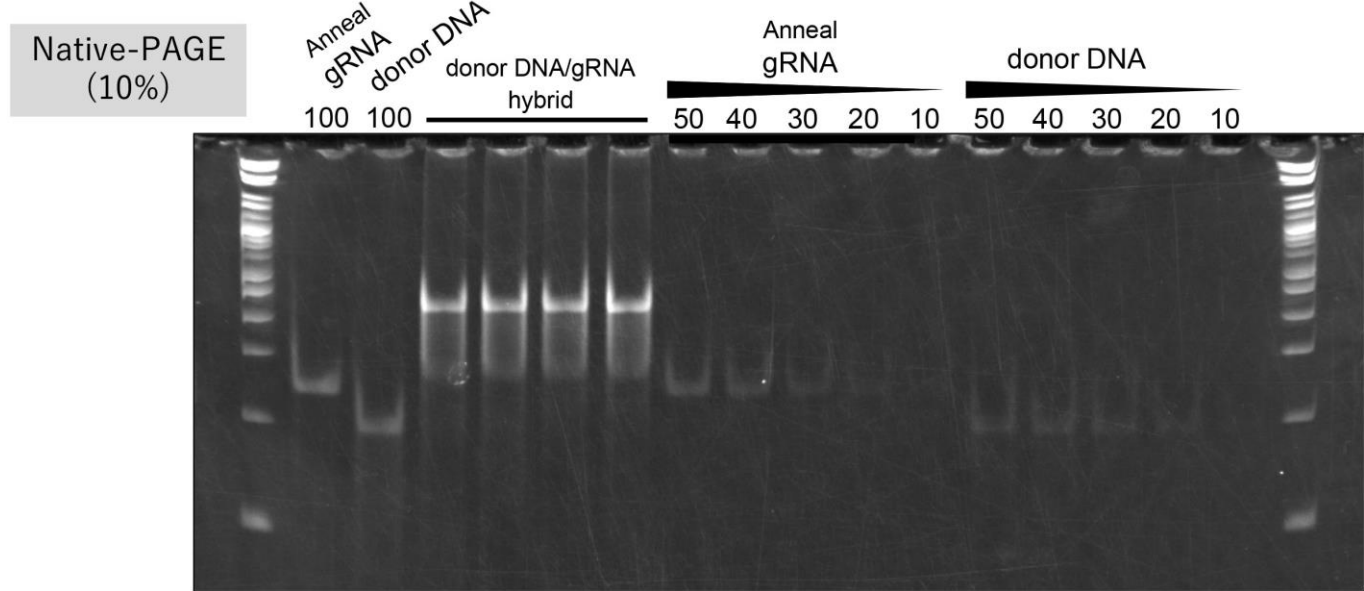
Satamura et al., Sci Rep, 2017, 7: 2095

ドナーDNA/gRNAハイブリッド



② ドナーDNA/gRNAハイブリッドの調製

- ① Anneal-gRNA発現のための融合遺伝子構築
- ② *in vitro* 転写による Anneal-gRNAの合成
- ③ Anneal-gRNAとdonor DNAのアニーリング
- ④ donor DNA/gRNAハイブリッド形成の確認

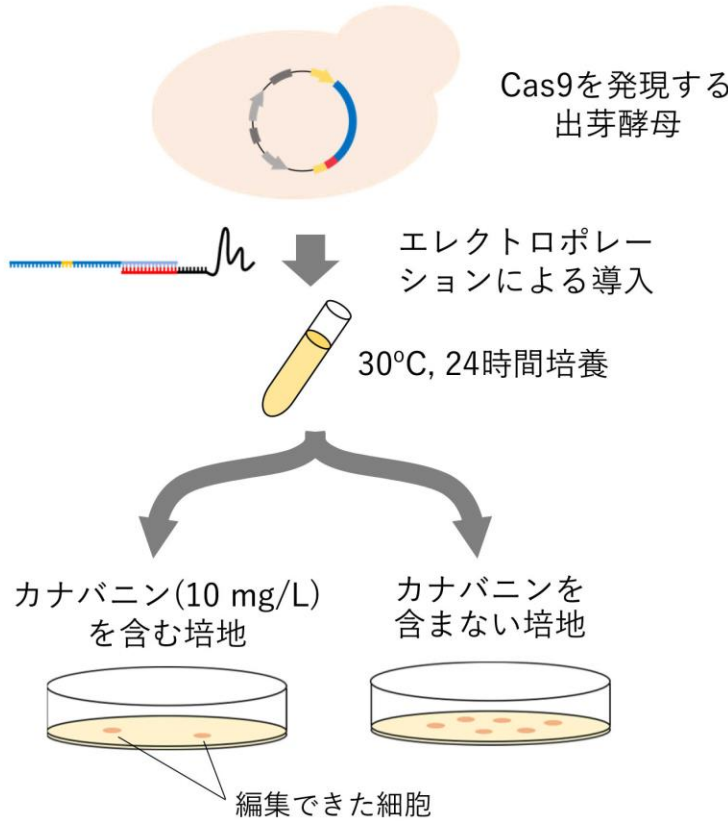


80%以上のAnneal-gRNAとdonor DNAがハイブリッドを形成した。

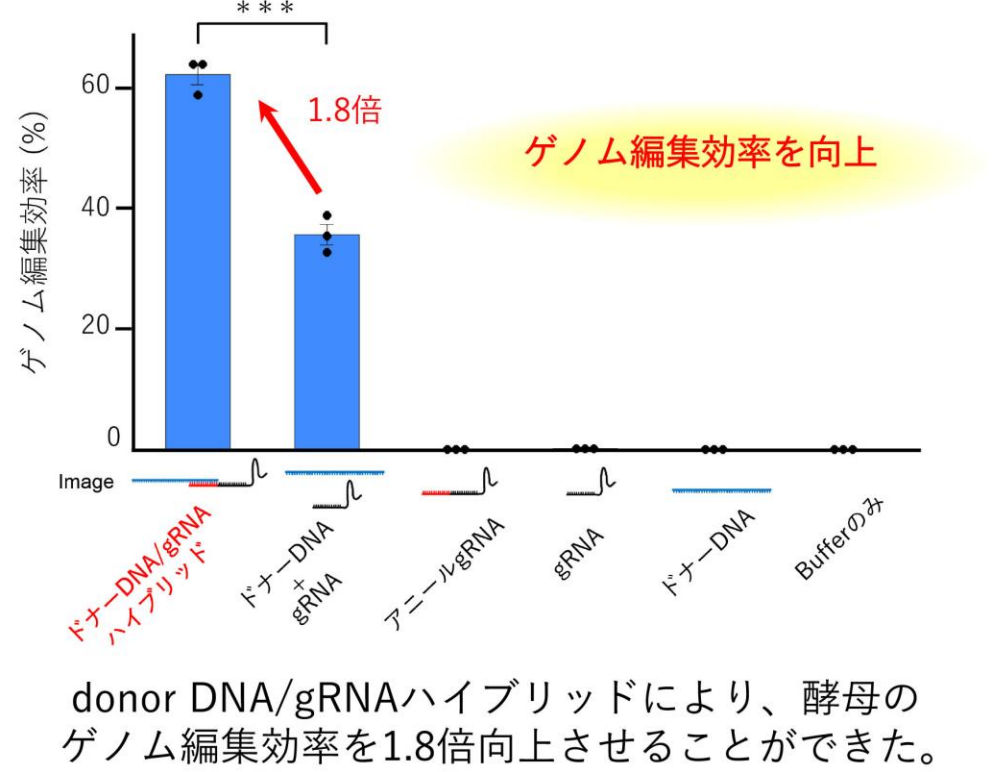
Aiba et al., Biomolecules, 2022, 12: 1621

③ ドナーDNA/gRNAハイブリッドによるゲノム編集効率の向上

CAN1 遺伝子への終止コドンの挿入



ゲノム編集効率の測定



Aiba et al., Biomolecules, 2022, 12: 1621

④ 藻類でのゲノム編集

クラミドモナス (微細藻類)

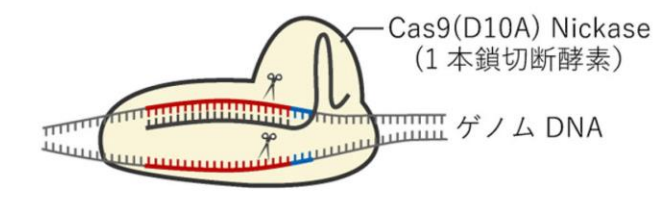
- ・2本鞭毛をもつ単細胞性の緑藻
- ・光合成や遺伝の研究に用いられてきた
- ・実験条件の最適化



国立環境研究所より *Chlamydomonas reinhardtii* を入手し、培養を開始

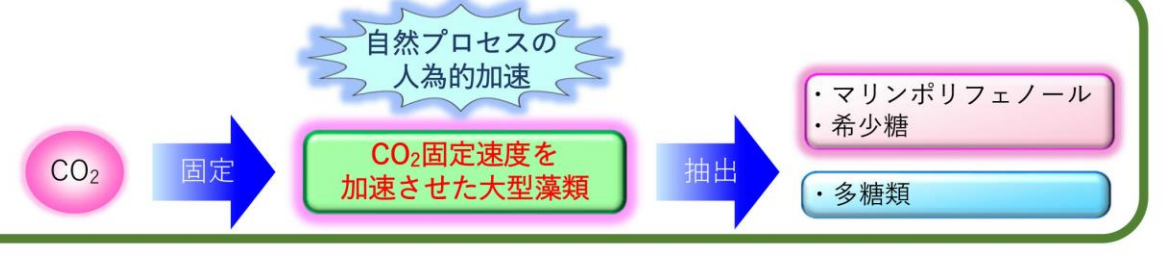
クロメ (大型藻類)

- ・実験条件の最適化
- ・ゲノム編集技術の確立

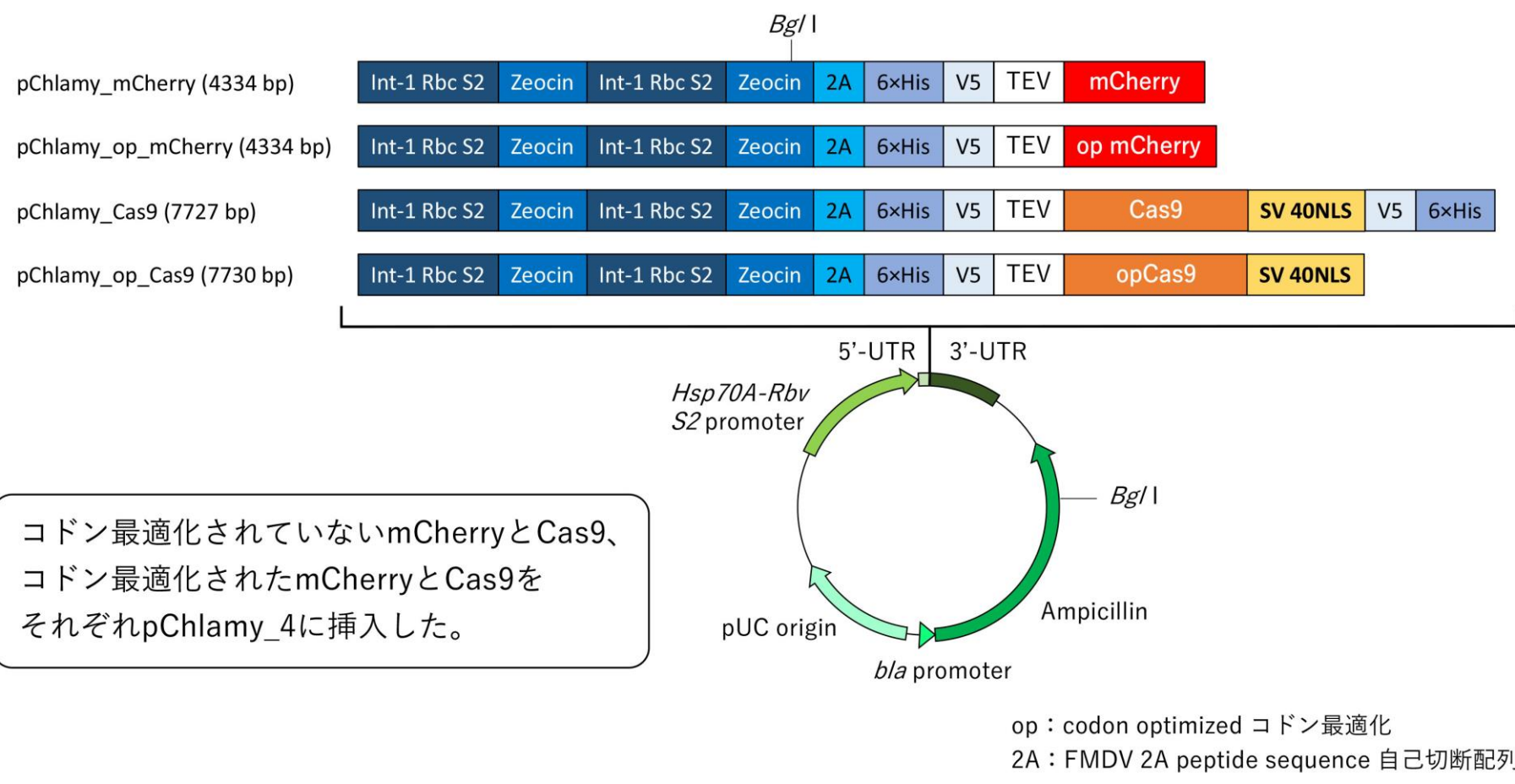


大型藻類

- ・大型藻類の機能強化 (CO₂固定能、生育速度など)



⑤ 発現プラスミドの構築



⑥ クラミドモナスへの遺伝子導入

■ エレクトロポレーション法、パーティクルガン法による遺伝子導入

蛍光タンパク質、Cas9タンパク質の発現 (発現ベクター、遺伝子導入法の最適化)

Cas9-蛍光タンパク質の発現、gRNAの導入

遺伝子編集の確認 (編集効率を評価)



エレクトロポレーション法: 電気パルスによって細胞に孔をあけ核酸を導入



パーティクルガン法: 核酸をコートした金属微粒子を細胞内に導入

⑦ パーティクルガン法の結果

■ Chlamydomonas 2236株への遺伝子導入 (5 µg/mL Zeocin含有培地, 0.6 µm Tungstenを使用)

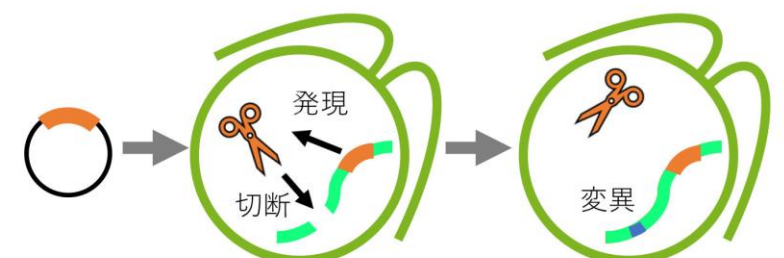
Negative Control	pChlamy_mCherry	pChlamy_op_mCherry	pChlamy_Cas9	pChlamy_op_Cas9
コロニー数				
2	47	36	40	21

- ・得られたコロニーを新しいプレートに画線し、耐性の確認を行う予定。
- ・pChlamy_mCherry、pChlamy_op_mCherryを導入したクラミドモナスに対しては、蛍光顕微鏡によりmCherryの発現確認も行う。

⑧ 発現系と編集内容について

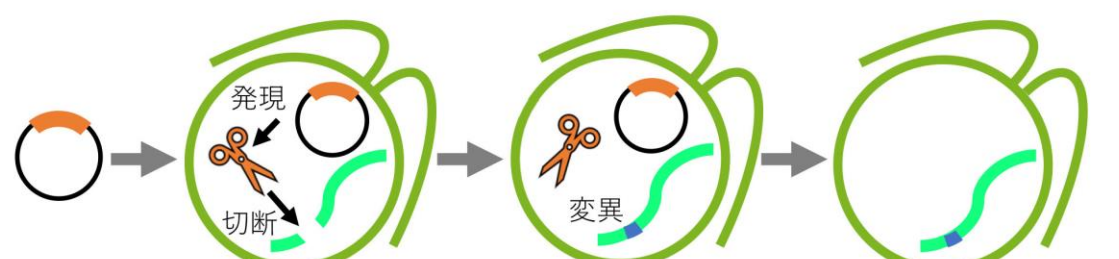
現在実験中の手法

Cas9遺伝子をゲノムに組み込む安定発現系
↓
陸上養殖



最終目標

一時的発現系でゲノム編集
↓
自然界で既に確認済みの配列を再現
編集後、Cas9遺伝子は欠落させる



番号: A-7-4J

PJ: 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

テーマ名: 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

担当機関名: 三重大大学 大学院生物資源学研究所

問合せ先: 柴田 敏行 (shibata@bio.mie-u.ac.jp), 三宅 英雄, 田中 礼士, 山本 康介, 奥山 哲也



CO₂吸収・固定に優れた大型藻類の選抜, その組織培養と種苗生産技術の開発

研究の目的



コンブ科褐藻類



ホンダワラ科褐藻類

有用大型藻類を選抜し, それらの
種苗生産技術を開発する

ETRを指標とした有用大型藻類の選抜

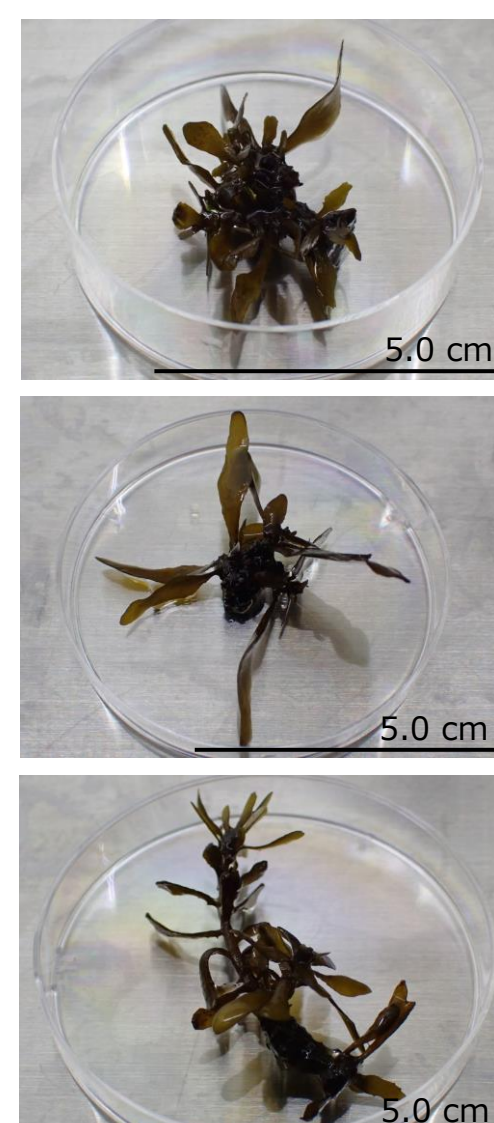
ETR*	($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
アカモク	7.9
トゲモク	6.6
ワカメ	3.0
アキヨレモク	5.7
ヤツマタモク	8.3
ヤナギモク	6.0
タマノハキモク	10.9
ナラサモ	10.4
ジョロモク	7.0
フシシジモク	11.1
エンドウモク	5.4

*ETR

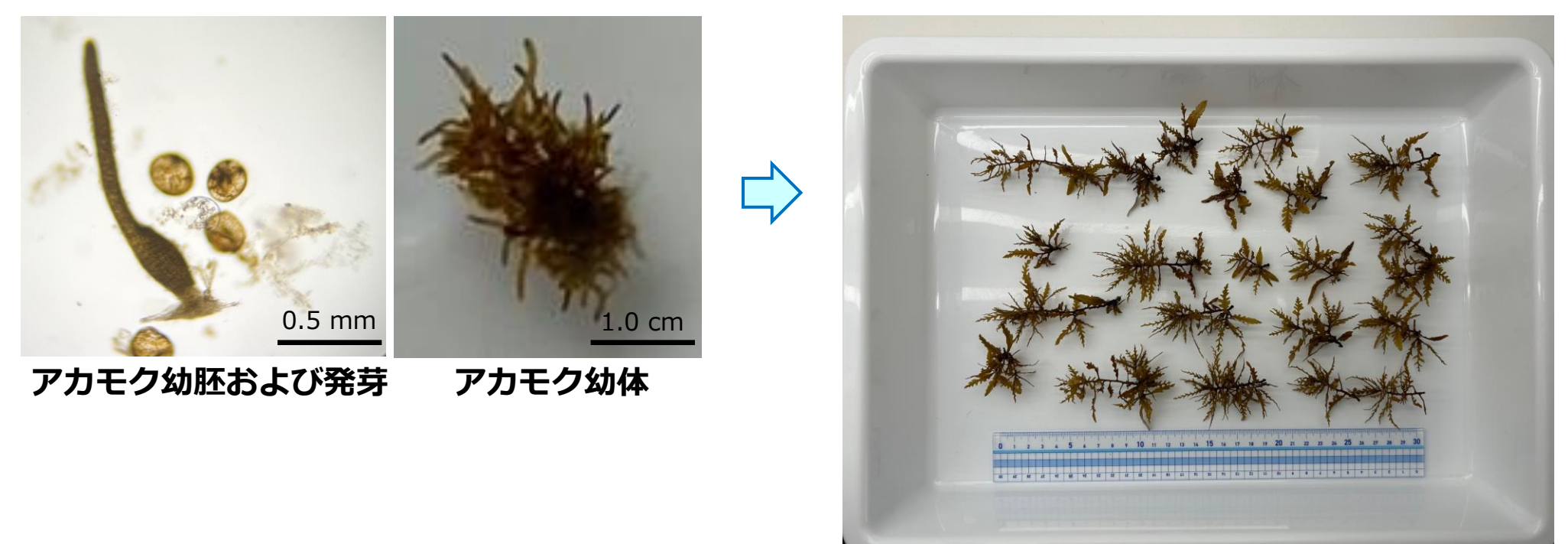
光合成の最上流から下流への電子伝達速度
→ CO₂吸収・固定能と相関があるとされる

代表的な大型藻類である
ワカメのETRと比較を行った
→ 光合成活性に優れた
有用藻種としてホンダワラ科
褐藻類を選抜した

組織培養技術の開発



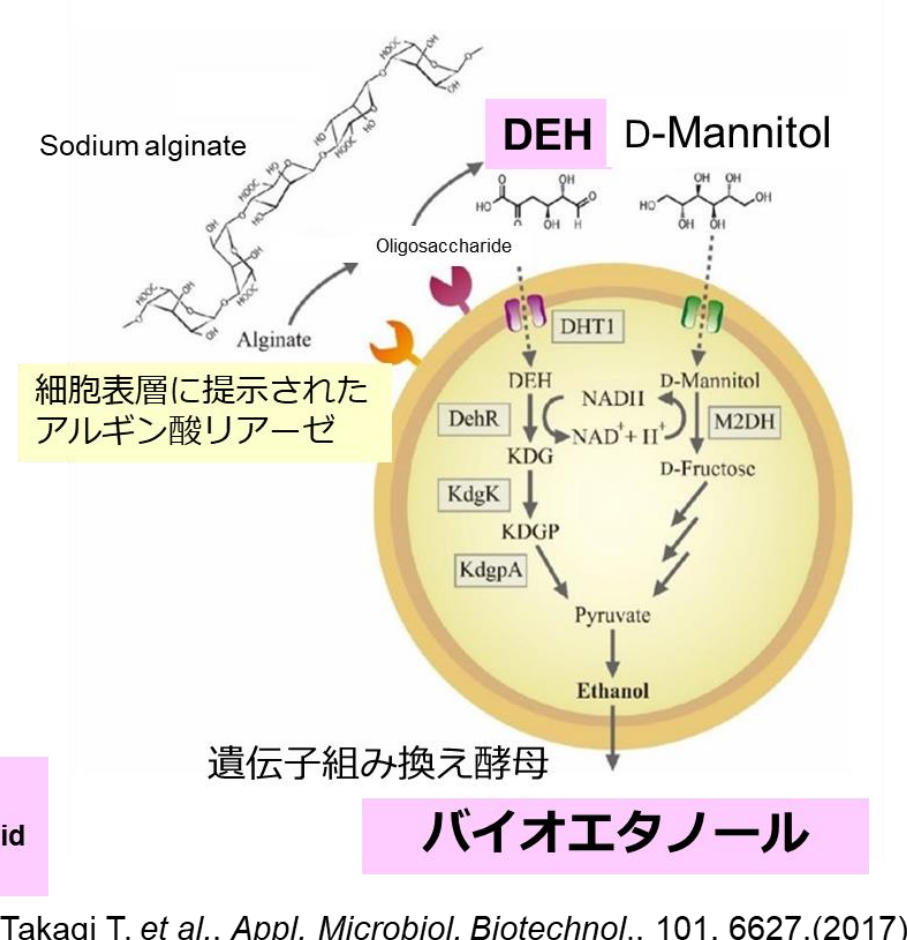
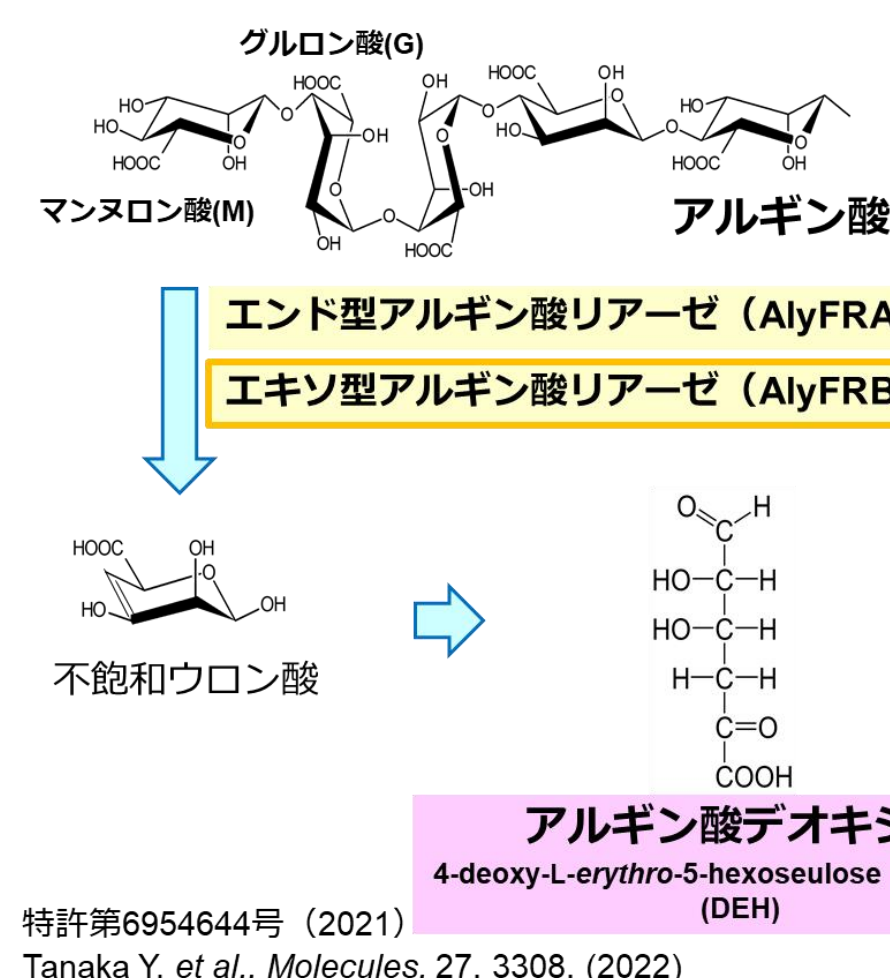
受精卵の採取と室内培養による幼体の生産



培養条件の最適化により, アカモクについて
室内培養 (閉鎖系) での種苗生産技術を開発出来た

微生物前処理法を組み合わせたカスケード型物質生産プロセスの開発

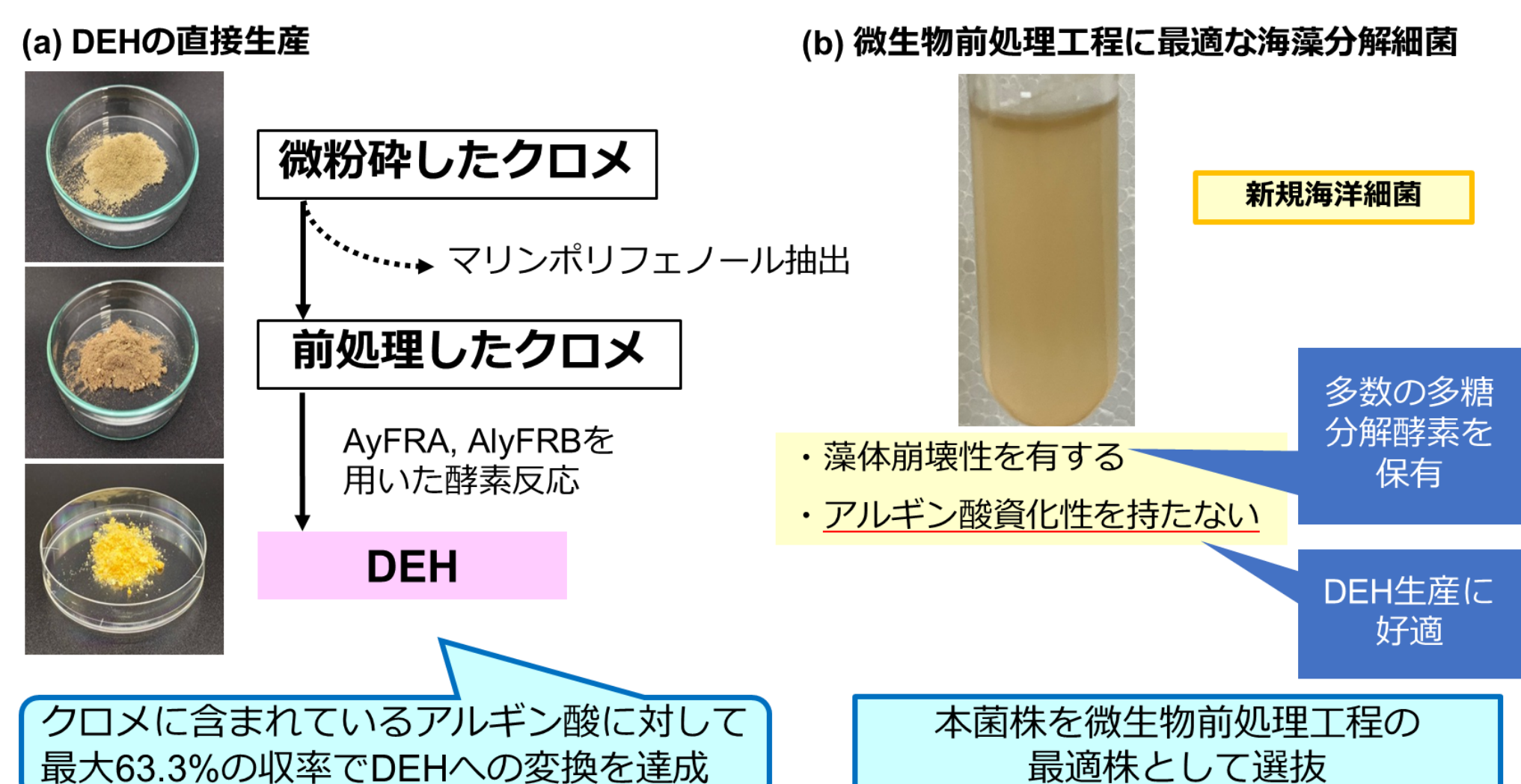
これまでの取り組み



研究の課題

- ✓ 褐藻類には, フロロタンニン類や様々な糖質が含まれている
- ✓ フロロタンニン類は, タンパク質との結合能や抗菌性を持つため除去することが好ましい
- ✓ 藻体内で, アルギン酸は不溶性のゲル状態で存在する
→ アルギン酸Naとして可溶化することで酵素反応において有利
その一方で, アルギン酸Naは濃度を上げると高い粘性を示すため, 培養液や反応溶液の取り扱いが難しくなる

研究の成果



研究の目的

- ✓ 前処理としてポリフェノールを除去したクロメ粉末の調製
- ✓ クロメ粉末 (アルギン酸含有) からのDEHの直接生産
- ✓ 微生物前処理工程に最適な海藻分解細菌の選抜

- ✓ 不溶性のアルギン酸からのDEHの直接生産を達成
- ✓ アルギン酸を可溶化するための多くの工程の削減 (酸・アルカリ不使用)
- ✓ 微生物前処理のための最適な海藻分解細菌の獲得

番号： A-7-5J

PJ： 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

テーマ名： 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実用化

担当機関名： Green Earth Institute 株式会社

問合せ先： keisuke.yamamoto@gei.co.jp

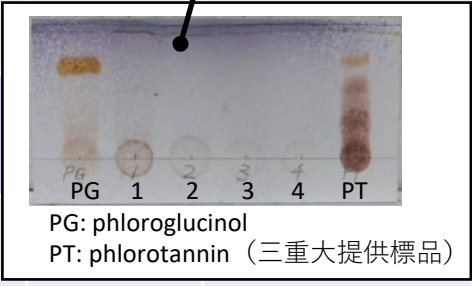


大型藻類からの有用成分取得を志向したカスケード型生産プロセス*へのエタノール発酵の適用

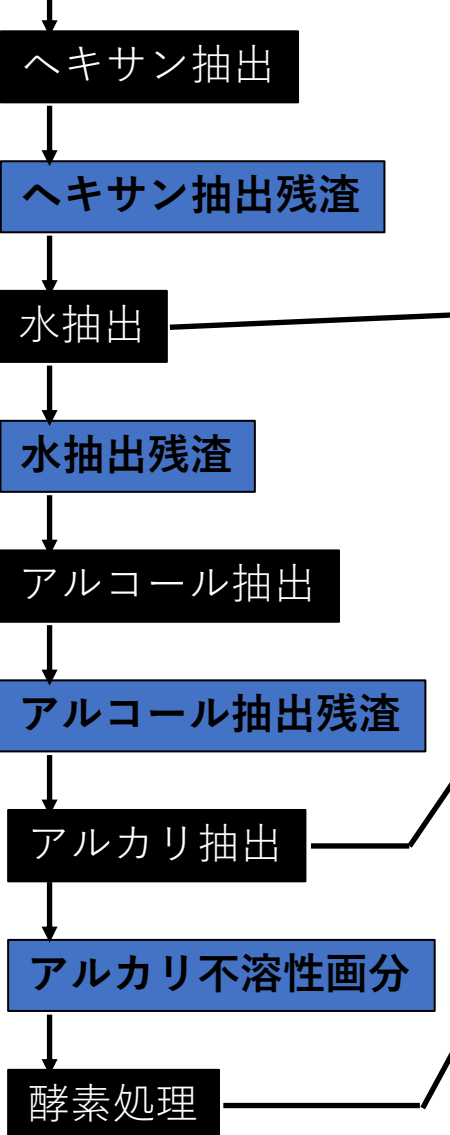
*NEDO先導研究プログラム「大型海藻類の完全利用に向けた基盤技術の開発」

エタノール発酵に未利用な有用成分の
各分画ごとの測定重量 (g)

	海藻油	マリンポリ フェノール
ヘキサン抽出物	0.73	
水抽出物		
アルコール水抽出物		Detected on TLC
アルコール除去洗浄水		
アルカリ水抽出物		
アルカリ除去洗浄水		
酵素処理液		
合計	0.73	
回収率	0.91%	



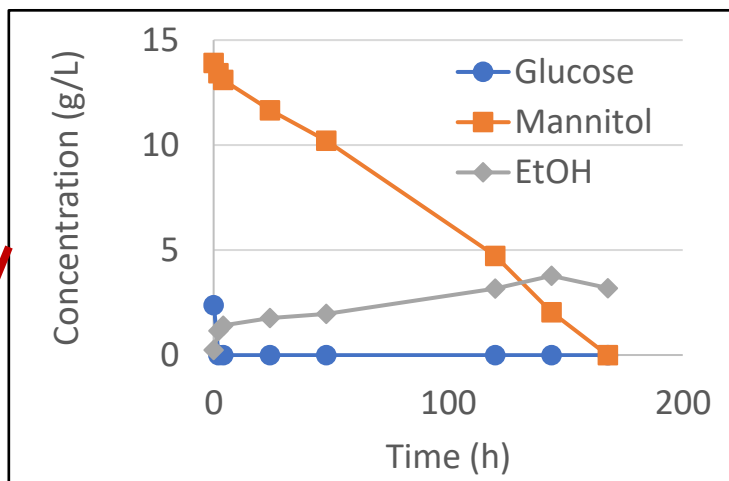
乾燥クロメ粉末(80g)



エタノール発酵に利用可能な成分の
各分画ごとの測定重量 (g)

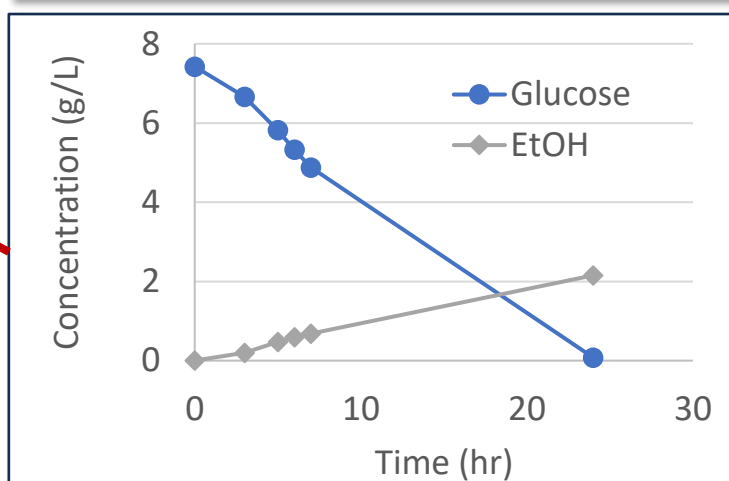
	マンニ トール	ラミナ リン	アルギ ン酸	グル コース
ヘキサン抽出物				
水抽出物	13.1	3.14	10.1	
アルコール水抽出物				
アルコール除去洗浄水			1.48	
アルカリ水抽出物			13.4	
アルカリ除去洗浄水			0.43	
酵素処理液				3.13 (2.82)*
合計	13.1	3.14	25.4	2.82*
回収率	16.4%	3.93%	31.8%	3.53%*

*セルロースとして



【糖化条件】
37°C, pH 4.5
酵素：CTec3 約10%
(対炭素源重量)
【発酵条件】
35°C, pH 6.0
菌株：AM1株
菌体濃度：OD₆₀₀= 25

・中和時に発泡・沈殿形成
・AM1株によるエタノール発酵の進行は
確認されず→試薬実験にて、アルギン酸
単独ではエタノール発酵が進行しないこ
とが確認された



【中和】
6M H₂SO₄を使用
【発酵条件】
同上
【糖化条件】
50°C, pH 4.5
酵素：CTec3 約10%
(対乾燥重量)
【発酵条件】
35°C,
pH制御無し(6.2→4.2)
菌株：Summit/AB Biotek
菌体濃度：0.5 g/L
(OD₆₀₀= 1.4)

- 「水抽出物」のうち一部を糖化酵素処理後、アーミング酵母AM1株を用いてエタノール発酵を実施し、エタノール生産を確認。「水抽出物」画分全量を使用した場合を想定すると、約4g (対乾燥クロメ重量収率約5%) のエタノールが取得されると概算
- 「アルカリ不溶性画分」の一部を酵素糖化 (CTec3/Novozymes) してエタノール酵母 (Summit Ethanol Dry Yeast/AB Biotek) を用いたエタノール発酵を実施し、エタノール生産を確認。「アルカリ不溶性画分」全量を使用した場合を想定すると、約0.9g (対乾燥クロメ重量収率約1%) のエタノールが取得される計算

大型藻類からのエタノール生産を志向したカスケード型生産プロセスの改良

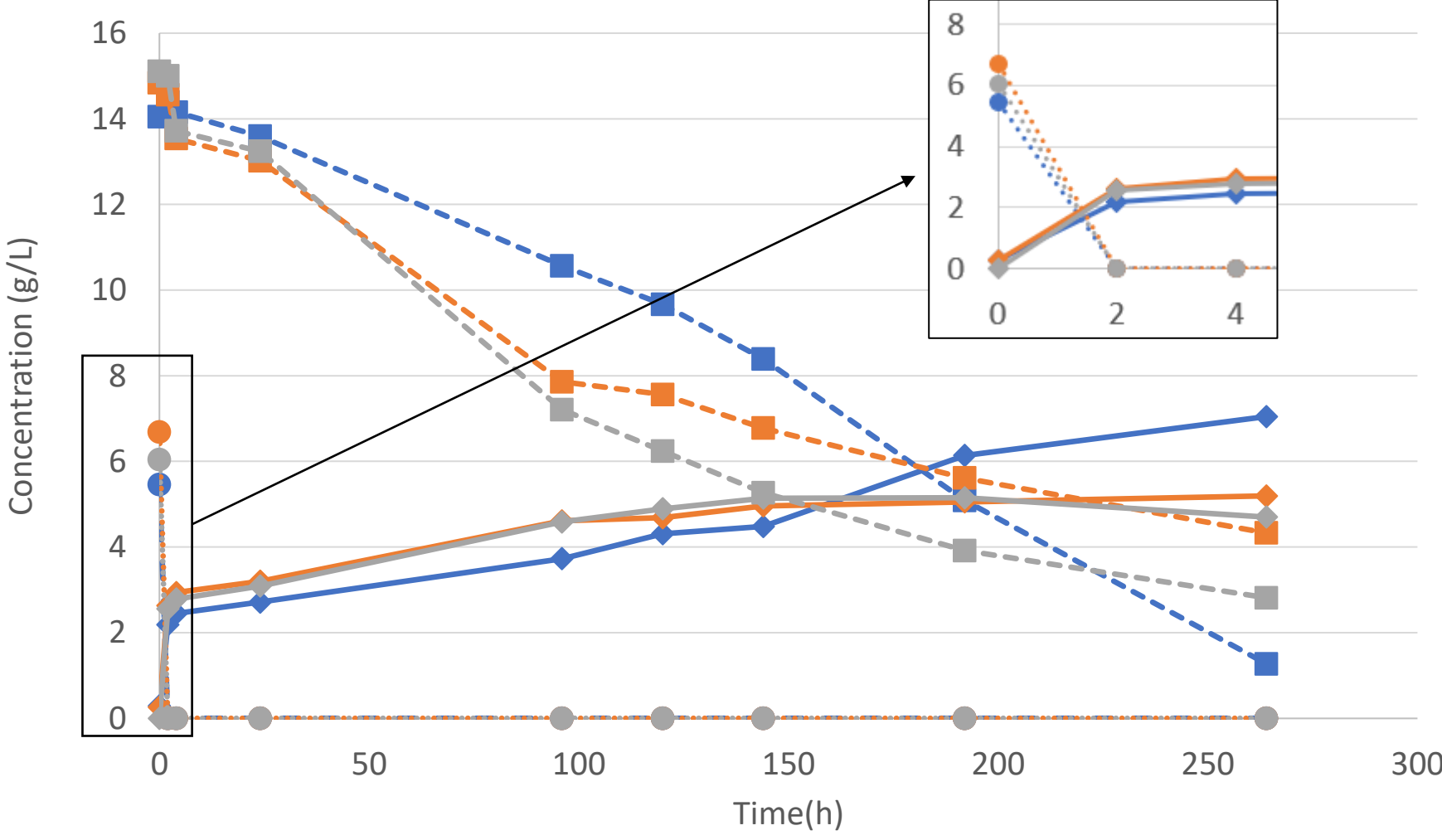
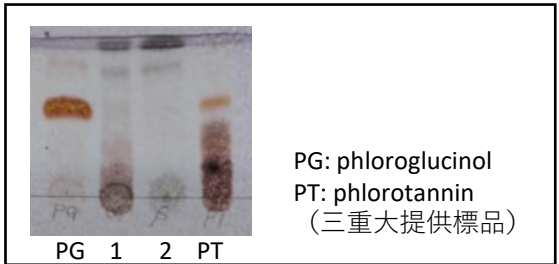
乾燥クロメ粉末

特許申請予定のため非公表

	Test1	Test2	Test3
特許申請予定のため非公表			
EtOH最大 到達濃度*	7.05 g/L (264h)	5.19 g/L (264 h)	5.15 (192h)
収率	8.5%	6.2%	6.2%

→ エタノール (右グラフ)

→ マリンポリ
フェノール



Legend for the graph:

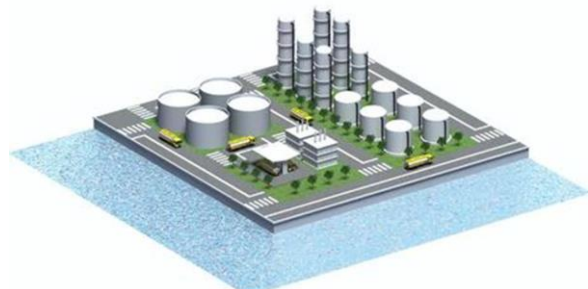
- Test1-Glc (blue circle)
- Test1-Mannitol (blue square)
- Test1-EtOH (blue triangle)
- Test2-Glc (orange circle)
- Test2-Mannitol (orange square)
- Test2-EtOH (orange triangle)
- Test3-Glc (grey circle)
- Test3-Mannitol (grey square)
- Test3-EtOH (grey triangle)

- アーミング酵母AM1株によるエタノール発酵により対乾燥クロメ粉末重量として5% (2023年度目標) を超えるエタノール生産が確認された
- TLC分析により、発酵後残渣からマリンポリフェノールを抽出することが可能であることを示唆する結果が得られた

大型藻類からのエタノール生産実用化に向けた今後の検討事項

- 水揚げされた海藻をエタノール発酵の原料にするまでの前処理方法の検討
- エタノール発酵の各種パラメタの更なる改善 (収率、濃度、速度)
- 海藻発酵液からのエタノール精製の検討
- 海藻発酵残渣の処理方法 (有価物抽出などを含む) の検討
- スケールアップの検討 (前処理、発酵、精製、廃棄物処理)
- 実験結果を踏まえた事業計画の策定と事業体制の構築

事業化イメージ例：湾岸・海上マリンバイオリファインリーコンビナート



番号: A-7-6J

PJ: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

テーマ名: 大型藻類のCO₂固定加速のための装置開発

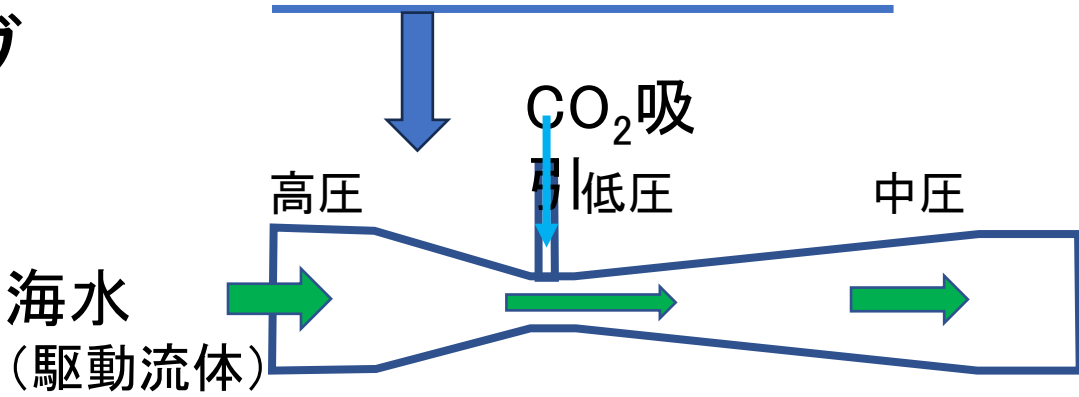
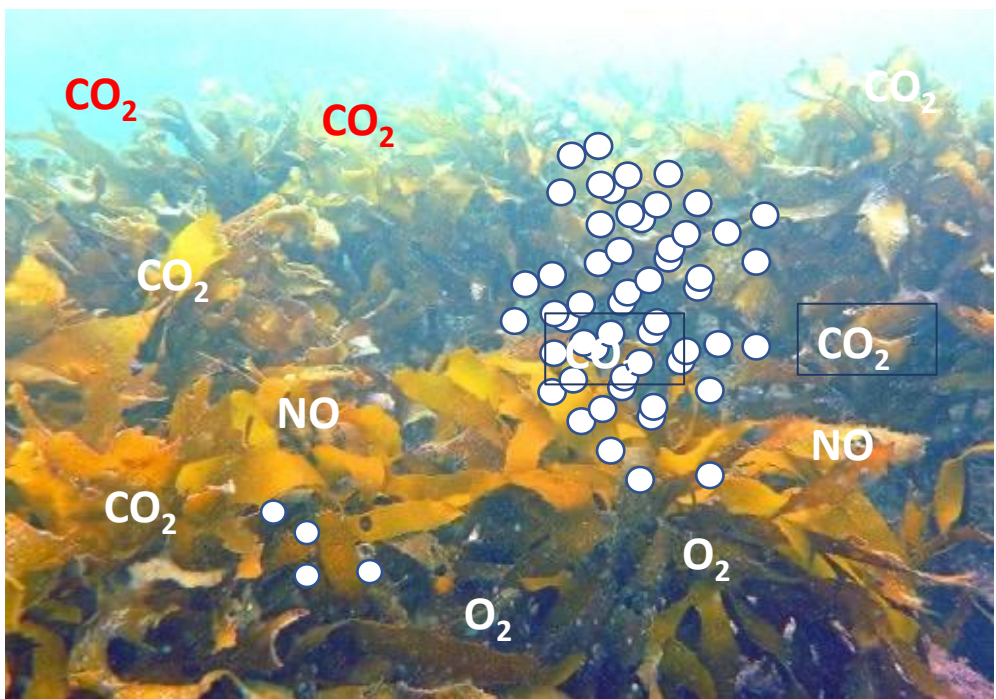
担当機関名: 関西化学機械製作株式会社 (KCE)

問合せ先: 大嶋 寛 (ooshima@kce.co.jp)

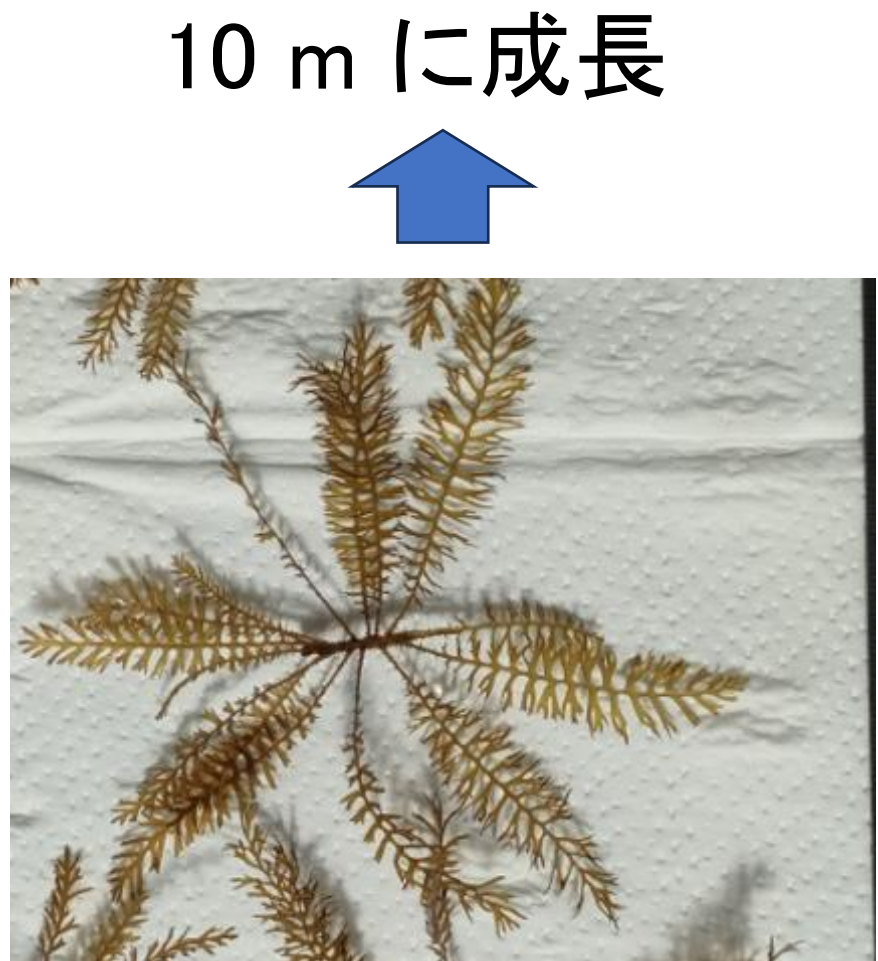
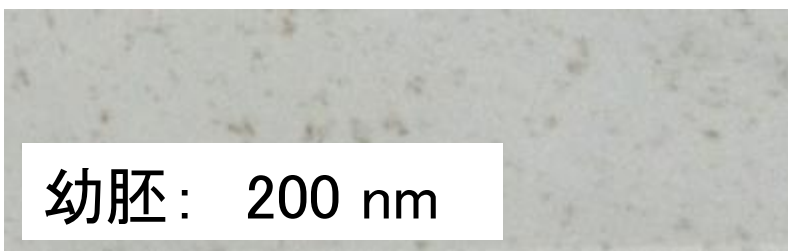


目的: (1) 海洋藻場および陸上養殖藻場にCO₂ファインバブルを供給し、大型藻類の生長を加速させることを目的として、それに適したファインバブル供給システムを開発する。
(2) 藻場の環境改善を図る。

実験1: 大型藻類としてアカモク(学名 *Sargassum horneri* (Turner) C. Agardh) を選び、その幼胚から成長した幼体の成長に及ぼすCO₂ファインバブルの影響について検討した。なお、ファインバブル発生機構としては、ベンチュリー管型を採用した。



アカモクの成長



幼胚

幼体

成長した幼体

結果 (目標 1) アカモク幼体を小型水槽で培養したときの成長比較

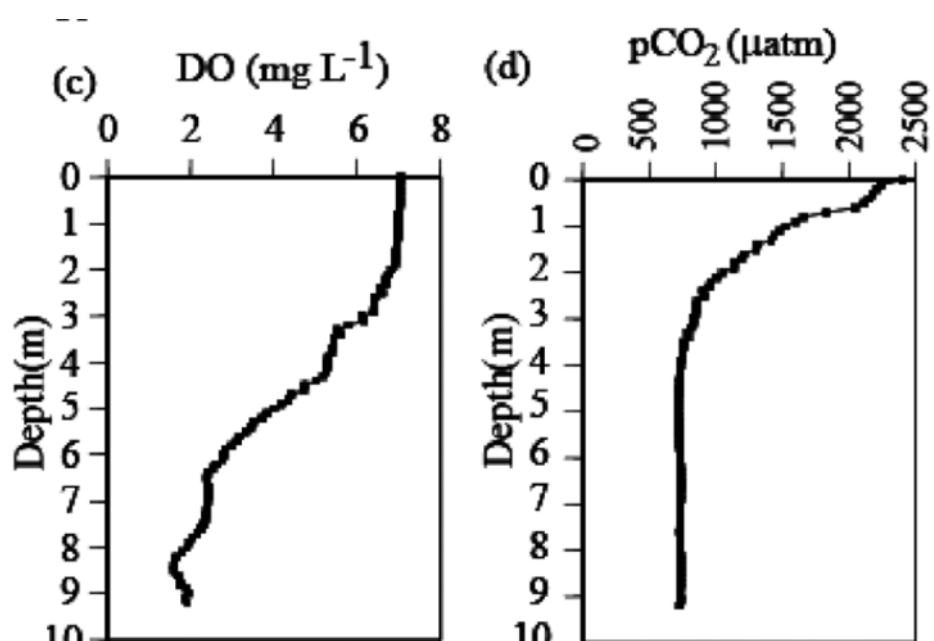
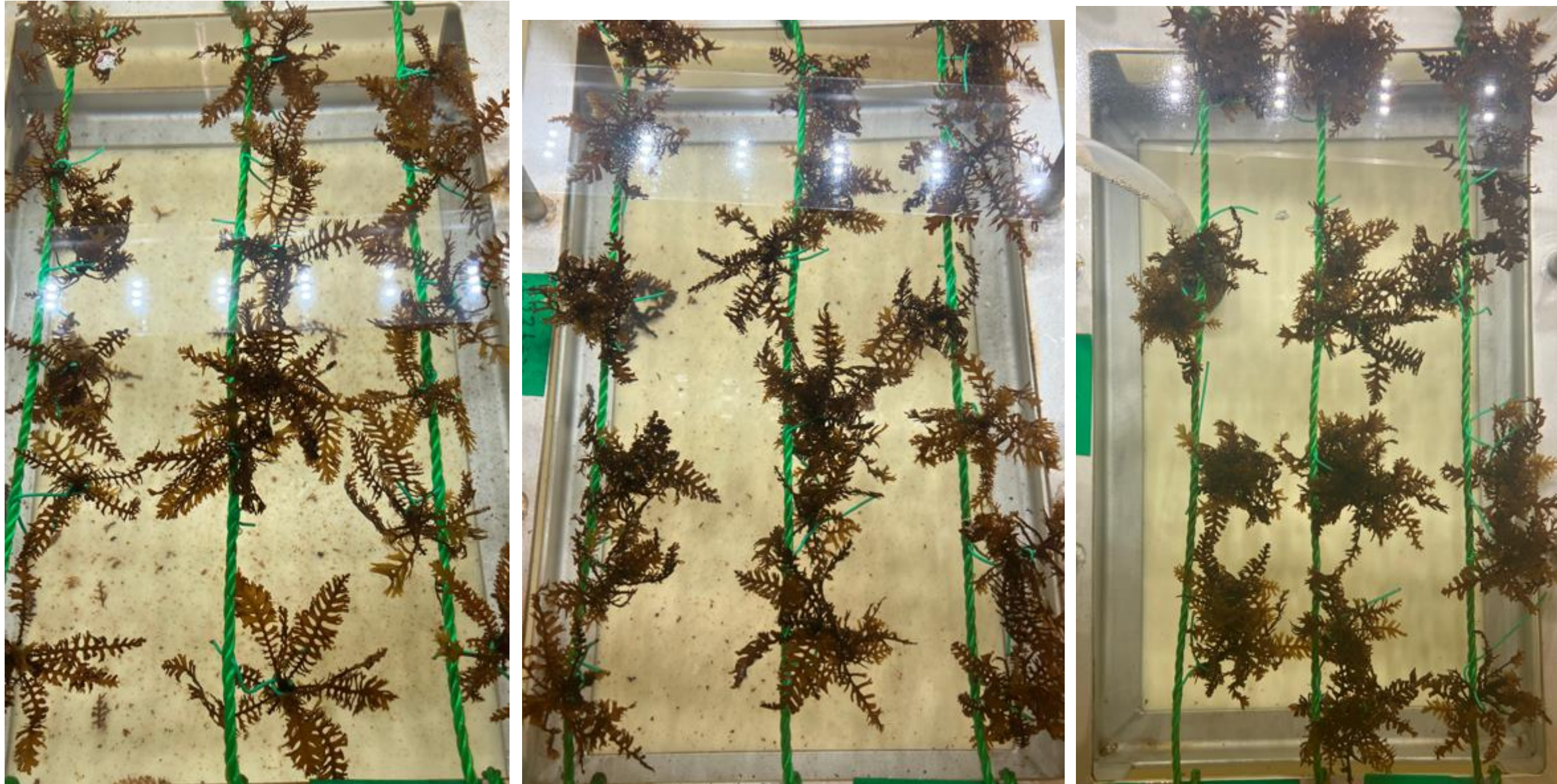
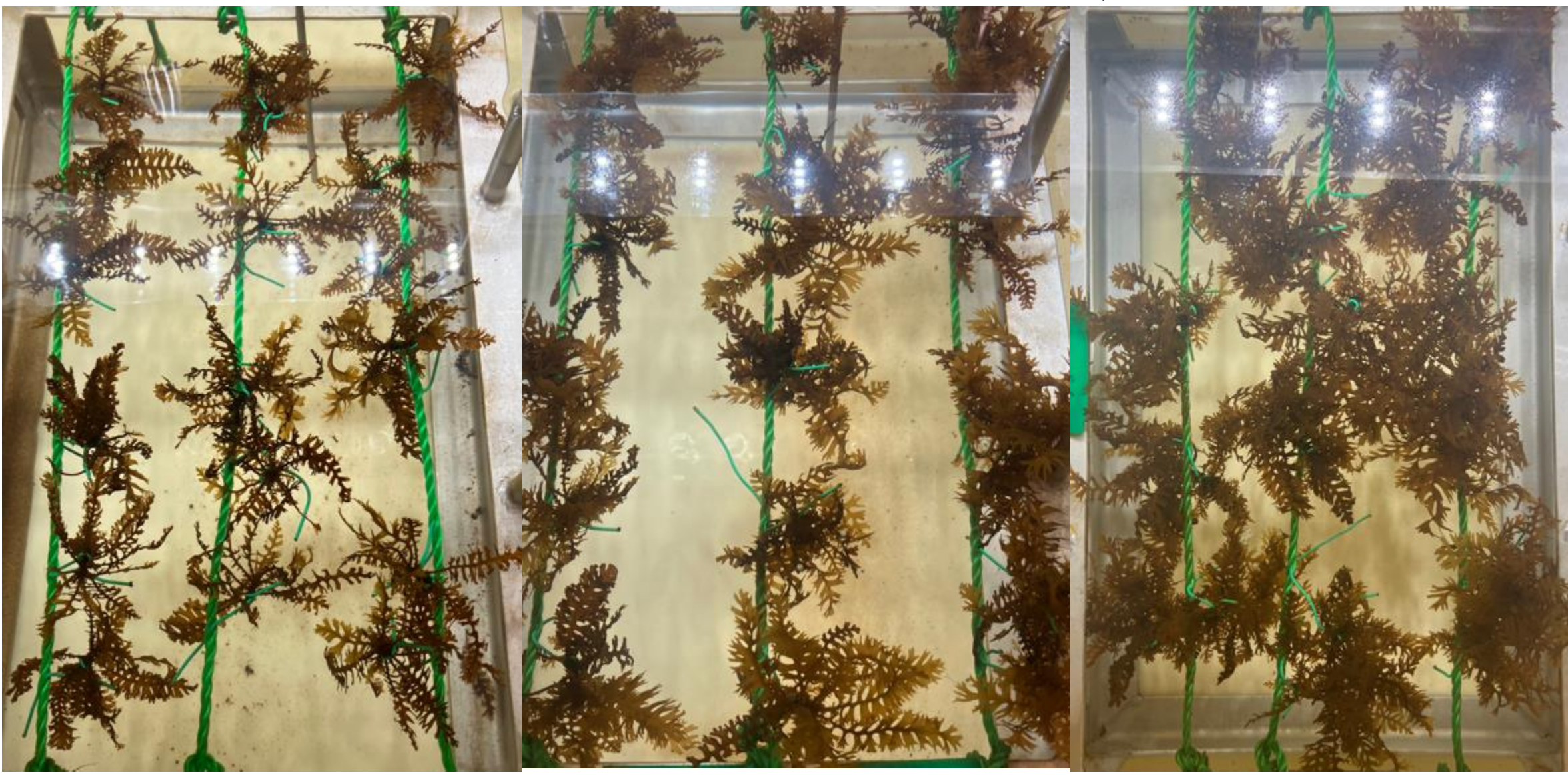
(目標 2) 藻場の環境改善 (海水の縦循環)

培養日数

0 d

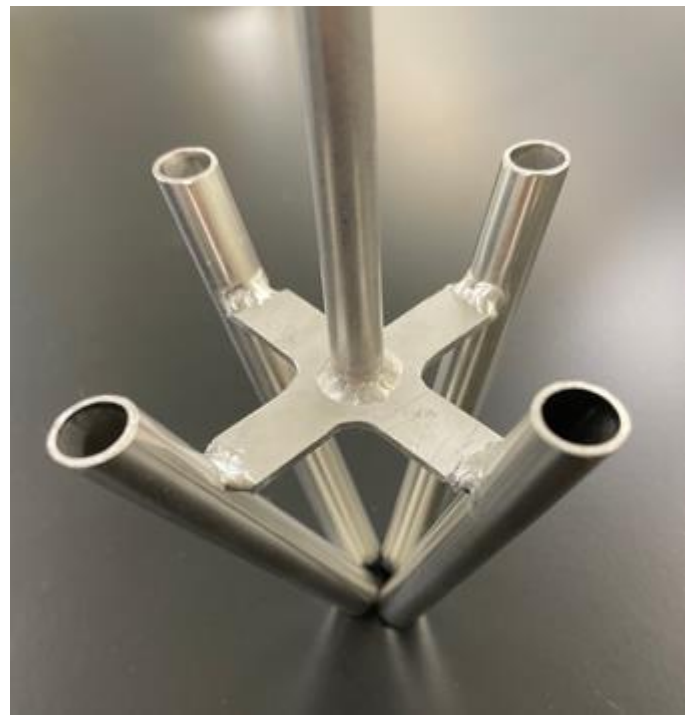
15 d

27 d



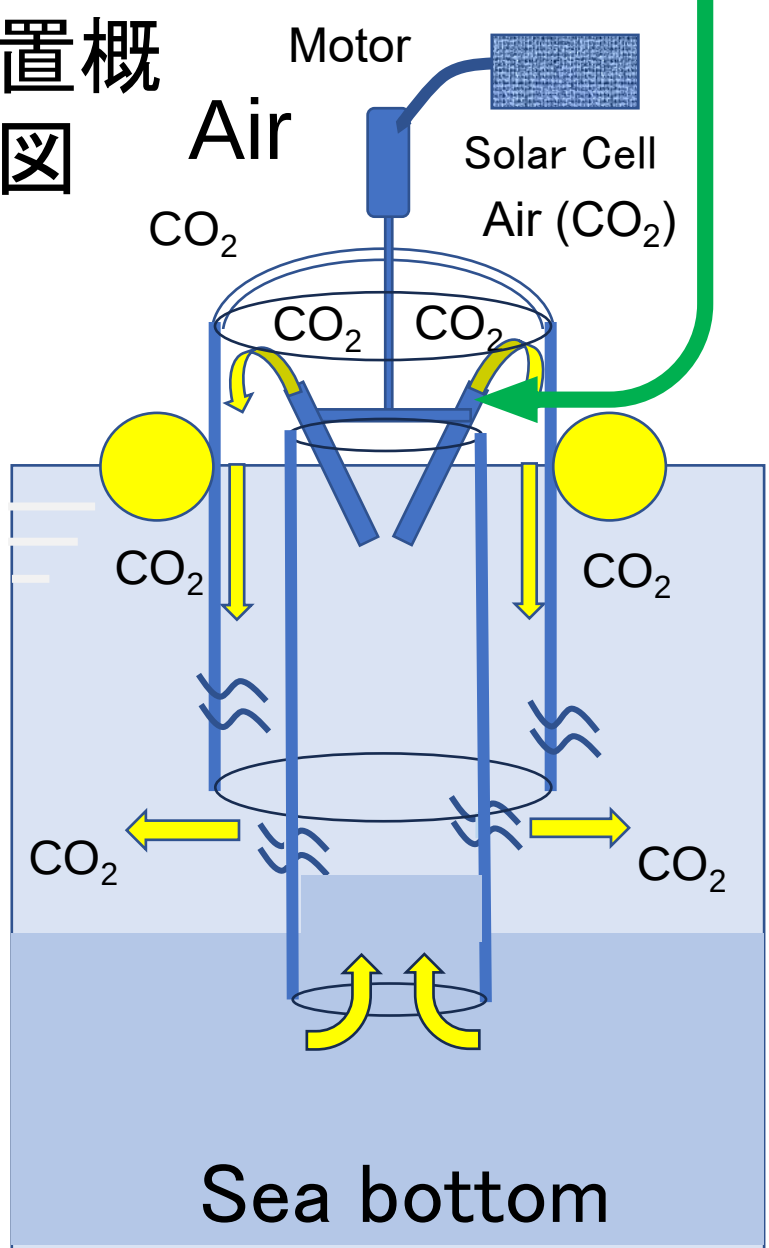
西宮 2014.11.10 (藤井智康, 日本水文学会誌, 47巻(2),107-118 (2017))

pCO₂, DOの深さ分布例



WW-mixer^{TR} (KCE)

装置概念図



培養液分析

供給ガス	pHav (9:00)	CO ₂ av, ppm 16:00 (9:00)	O ₂ av, ppm (9:00)	HCO ₃ ⁻ totalav, ppm 16:00 (9:00)
測定期間	0 - 48 d	0 - 48 d	19 - 48 d	0 - 48 d
CO ₂	(7.49)	13.2* (4.53)**	(4.77)	195.8 (182.4)
Air	(7.93)	(1.41)	(4.79)	(150.4)

* 1日の最大値

** 1日の最小値

実用植物で検証

植物の開発

テーマ名： 多様な植物の成長促進効果を有する共生微生物株の獲得

担当機関名： 産業技術総合研究所

問合せ先： 産業技術総合研究所 玉木秀幸 tamaki-hideyuki@aist.go.jp

要旨

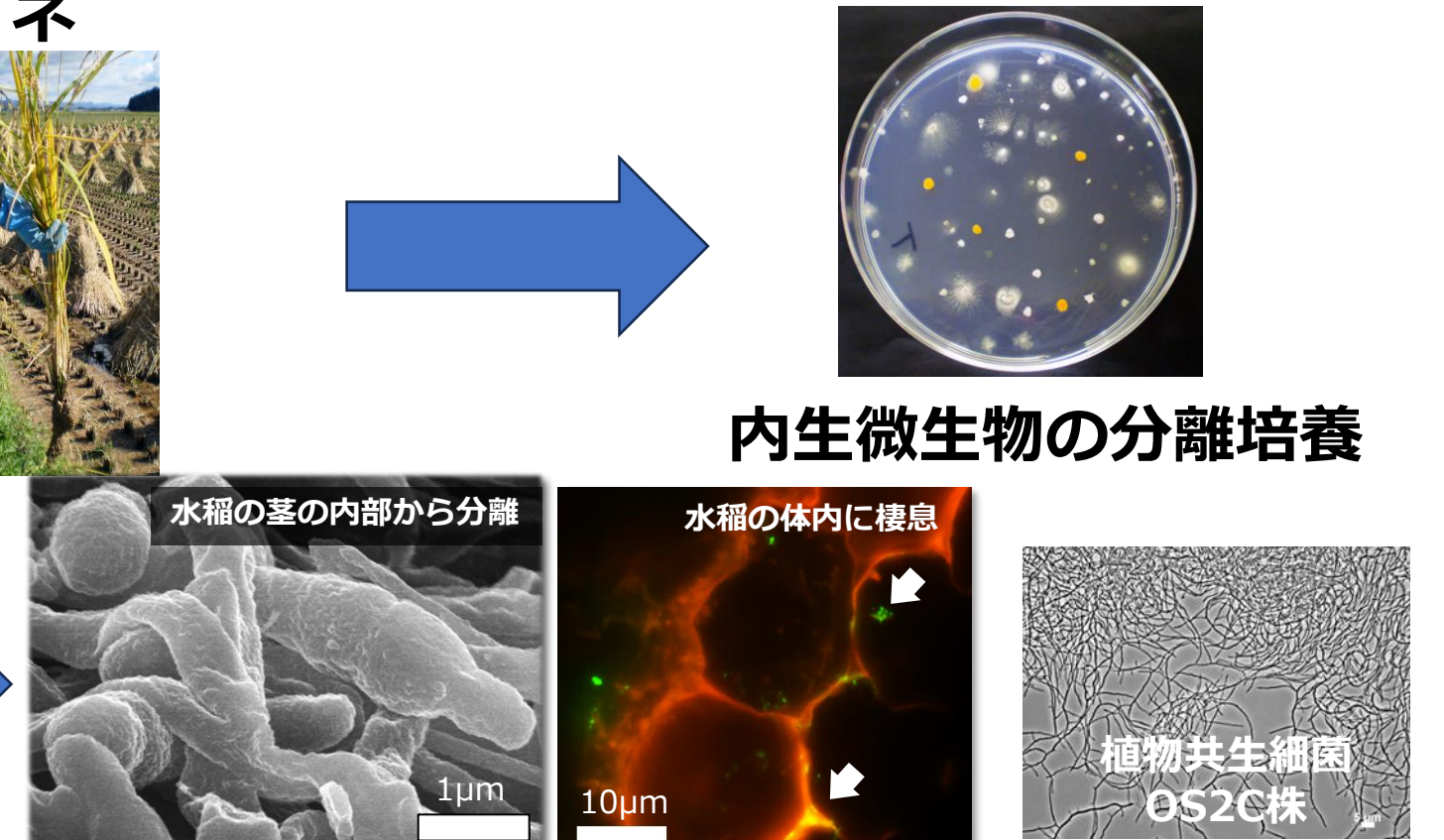
土壌や植物の根圏には多様な微生物が存在する。農薬や化学肥料の使用量を低減した植物栽培プロセスを実現する上で、植物成長促進細菌（Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, PGPR）の活用が注目されている。我々は、水稻の茎に内生する放線菌ストレプトマイセス・サーモカルボキシデウス（*Streptomyces thermocarboxydeus*）OS2C株が、イネの栄養成長期における生育を促進するとともに、収穫期における籾の生産性を顕著に向上させることを発見した。また、OS2C株の接種により、イネだけでなくエリアンサスなどの草本種や、ポプラやユーカリなどの樹木種の生育においても促進効果を示すことを明らかとした。さらに、実験室内の栽培環境下において、ポプラの休眠を抑制する作用を見出した。以上の結果は、OS2C株が広範な植物種に有益な効果をもたらす有用微生物資材として、CO₂資源化に貢献しうることを示唆するものである（特許出願完了：特願2023-192519）。本発表では、OS2C株の多様な植物種に対するバイオマス生産性向上効果等について詳細に紹介する。また、OS2C株の接種の有無によるイネの遺伝子発現の比較解析の結果に基づいて、OS2C株の作用機序についても議論したい。

水稲に内生する放線菌 ストレプトマイセス・サーモカルボキシデウス
(*Streptomyces thermocarboxydus*) OS2C株の純粋分離

圃場の収穫期のイネ



OS2Cの単離

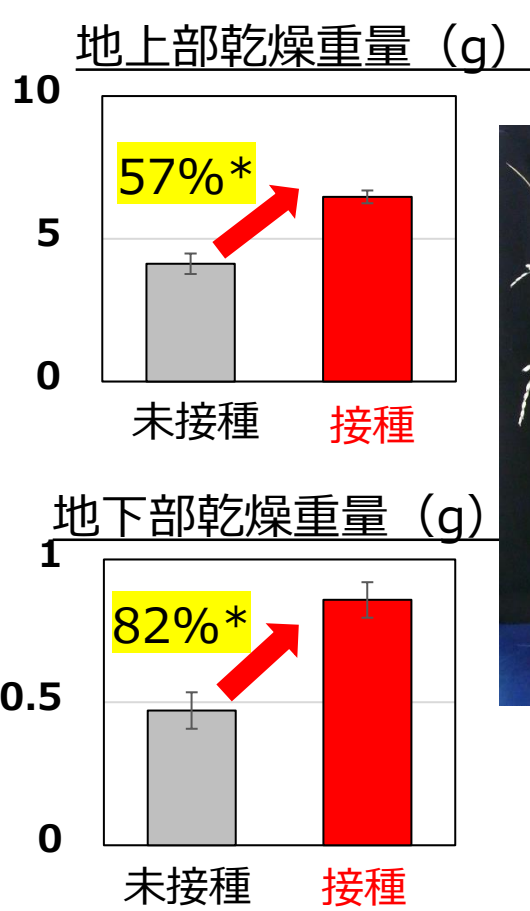
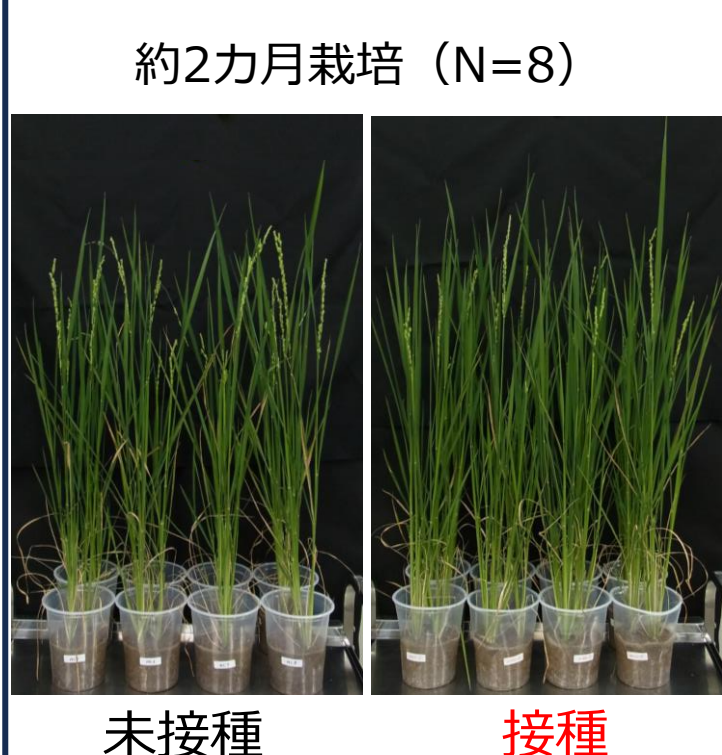


(Kanno *et al.*, Environ. Microbiol. 2016)

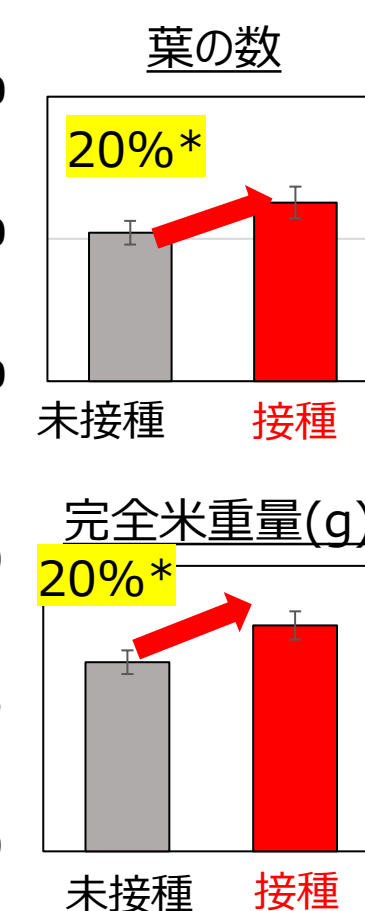
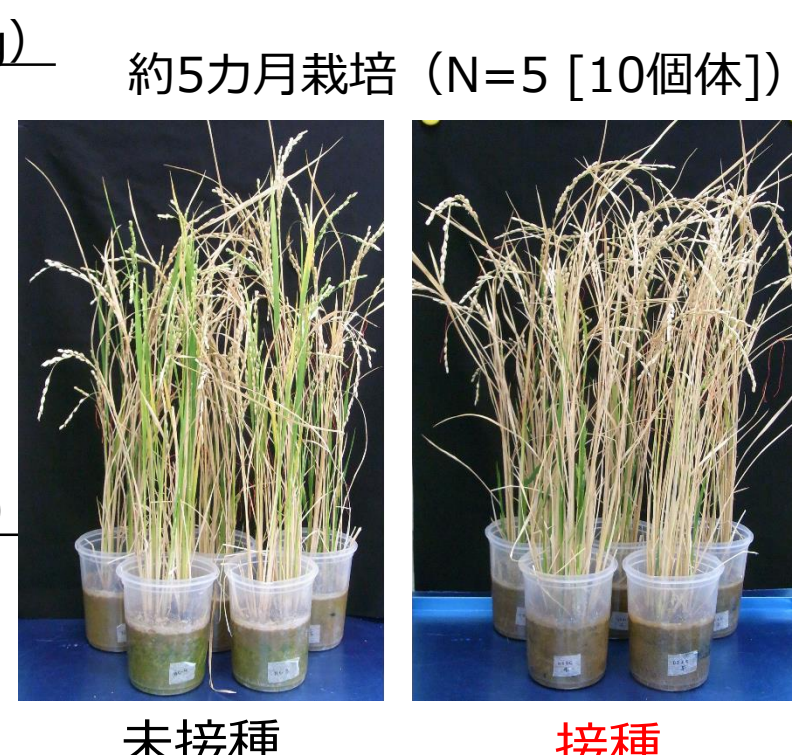
1. 草本系植物におけるOS2C株の成長促進効果

イネにおけるバイオマス生産性及び籾生産性の向上

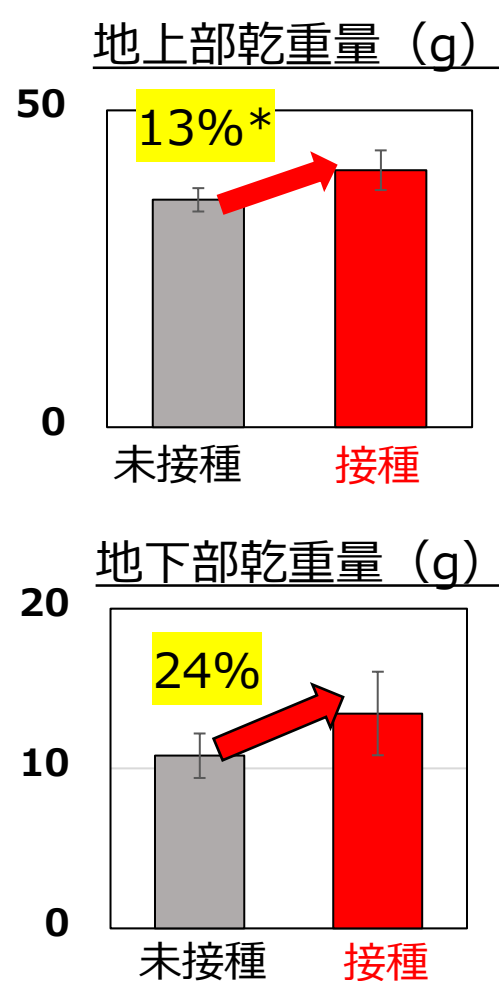
◆イネでの生育促進効果（栄養成長期）



◆イネでの生育促進効果（収穫期）



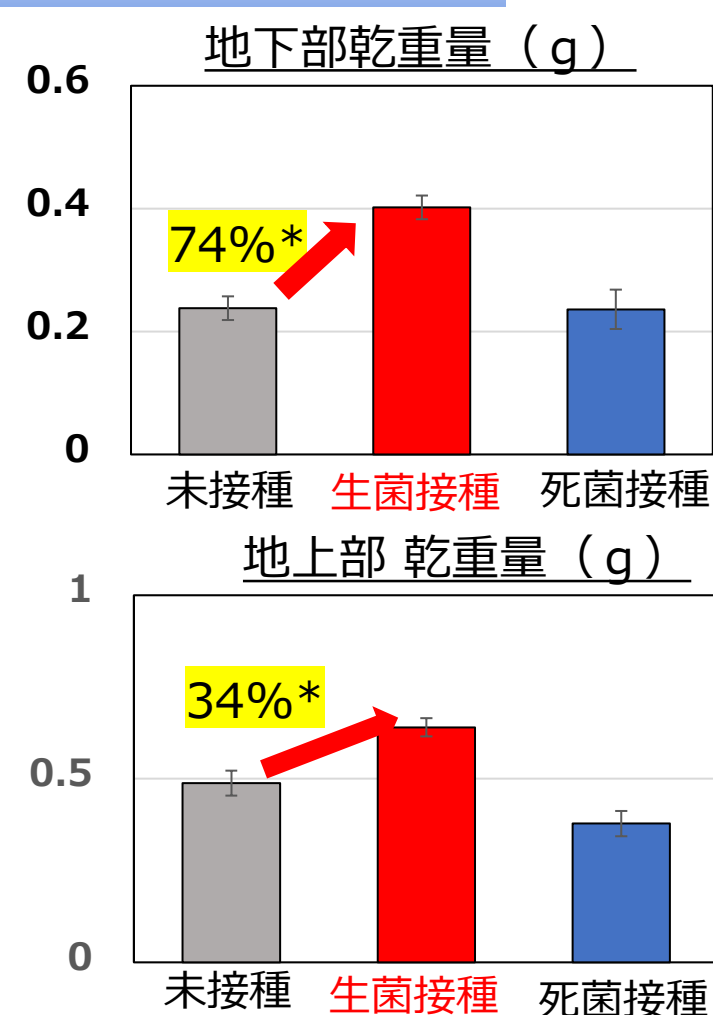
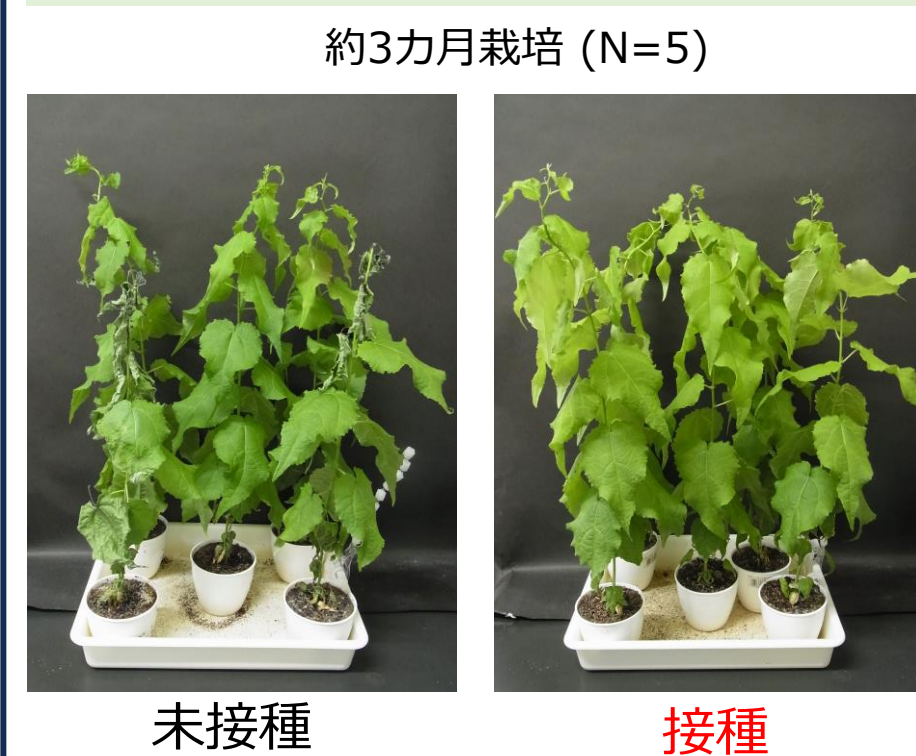
エリアンサスにおけるバイオマス生産性の向上



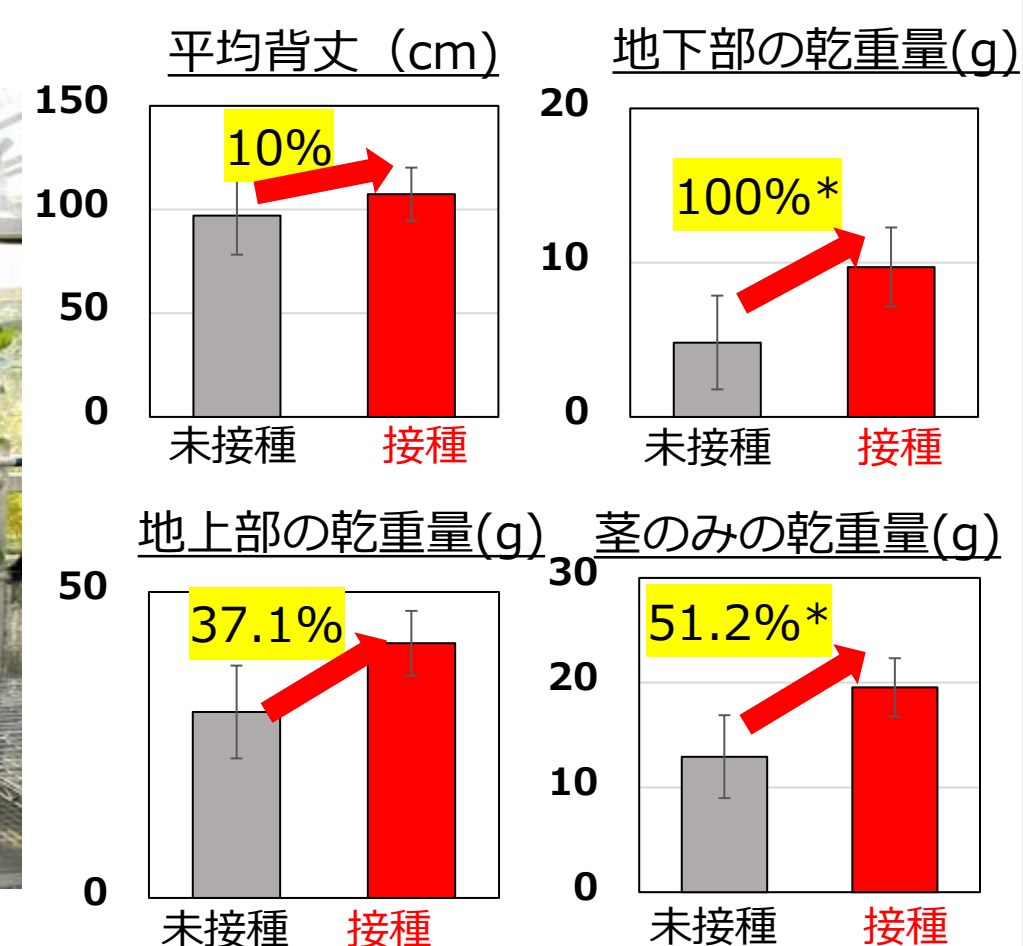
2. 木本系植物におけるOS2C株の成長促進効果

ポプラにおけるバイオマス生産性の向上

◆OS2C株のポプラでの生育促進効果



ユーカリにおけるバイオマス生産性向上



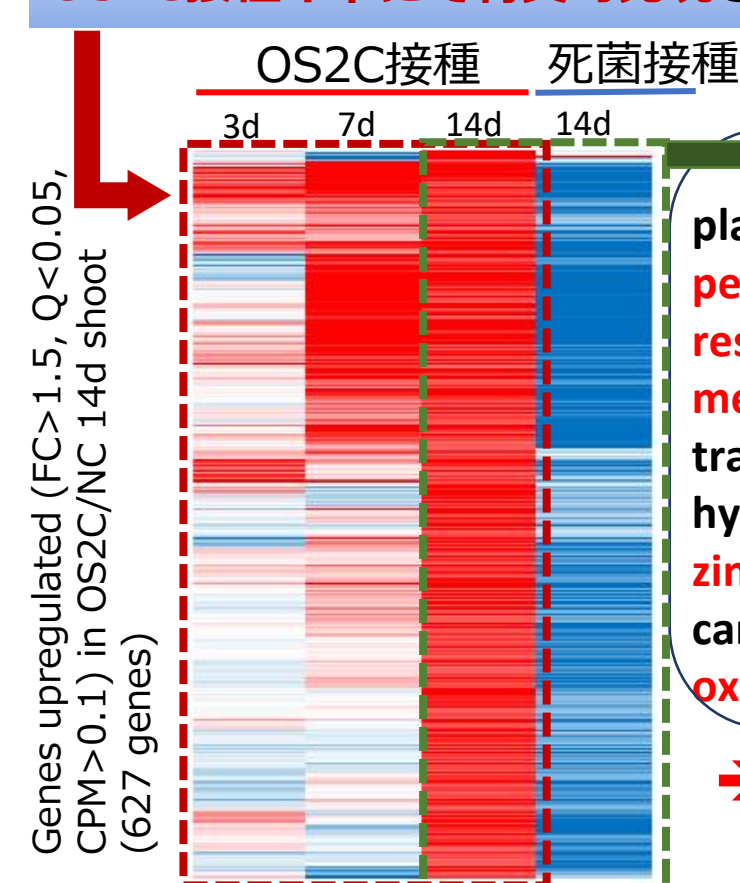
3. OS2C株のその他の有用機能

ポプラでの休眠抑制効果

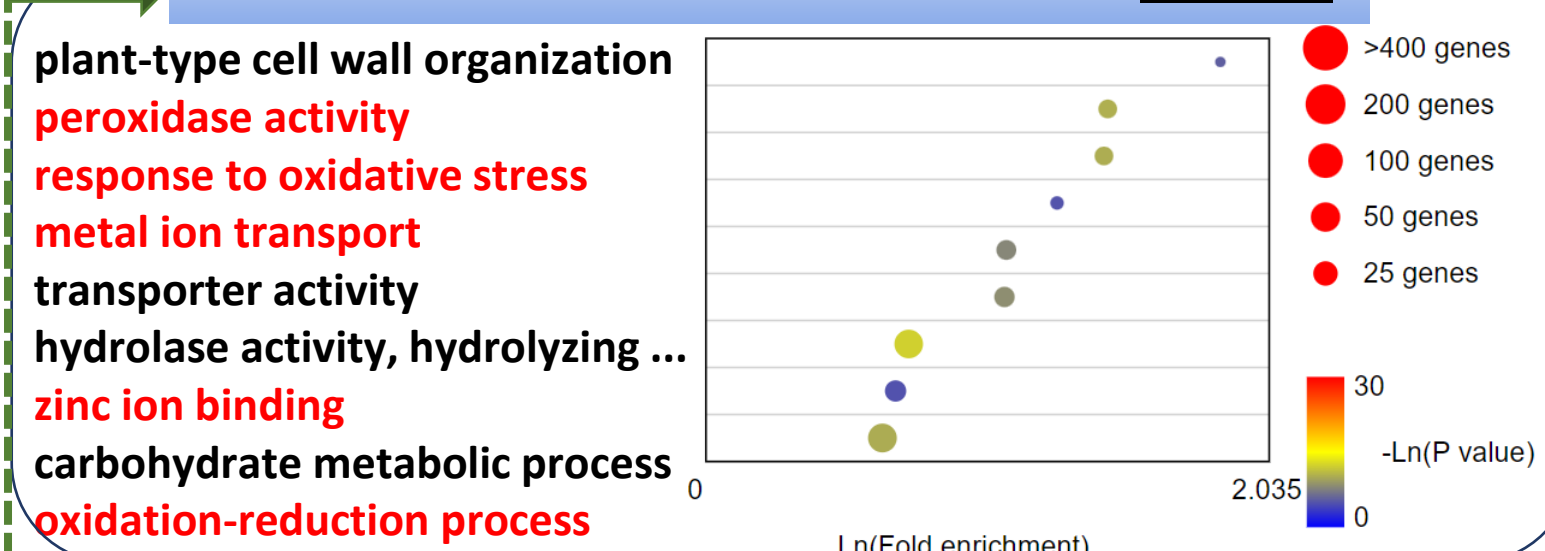


4. イネの網羅的遺伝子発現比較解析 (RNA-Seq) を通じた

未接種イネに比べて、
OS2C接種イネにて特異的発現を示す遺伝子群

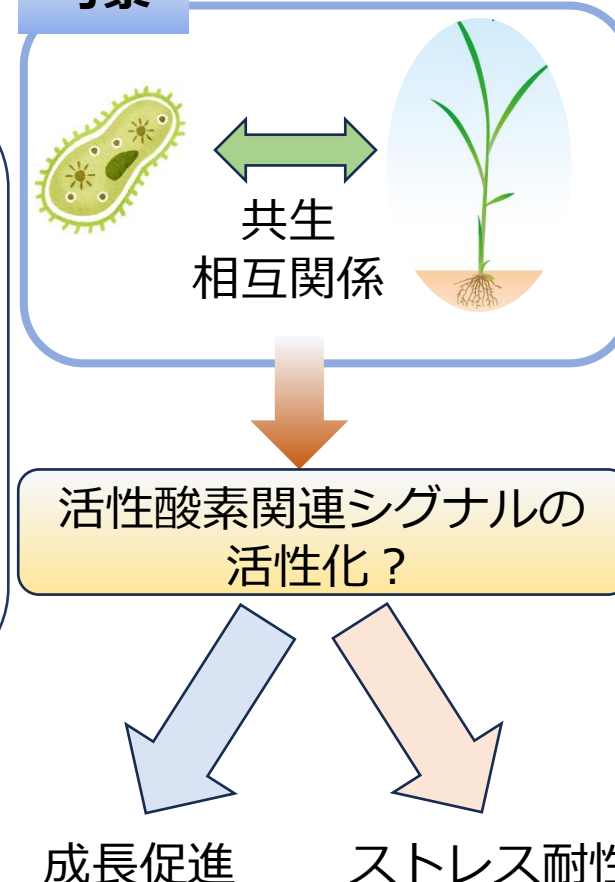


死菌処理に比べて、
OS2C接種イネにて高い発現レベルを示した遺伝子群



→ 活性酸素消去系の遺伝子群が高い発現傾向

考察

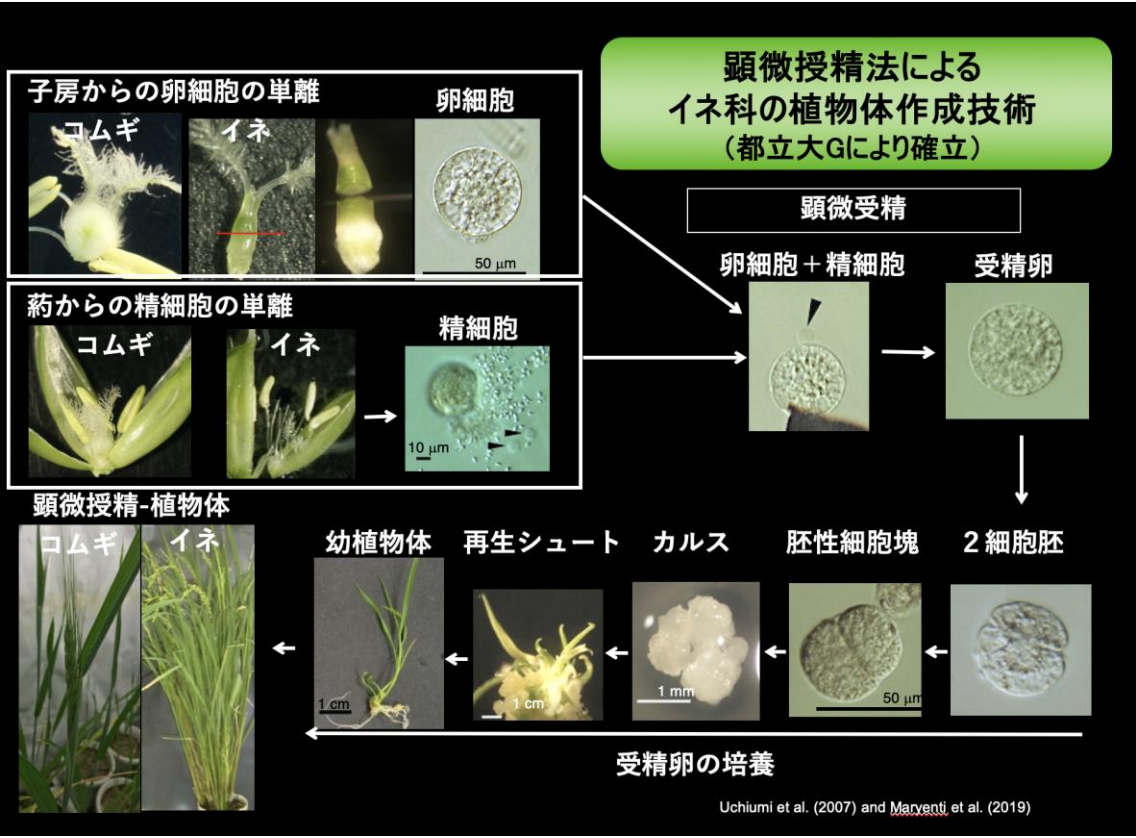


研究の概要および目的

大気中の希薄なCO₂を吸収して低コストに固定化できる手段としては、幅広く栽培されている植物（作物）を利用する技術が最も現実的なものの一つである。世界の穀物生産の約6割を占めるイネとコムギの残バイオマスの有効利用はなされておらず、バイオマスの有効活用に適した形質、すなわち効率よくCO₂を固定化する形質をイネやコムギに付与することが重要になる。

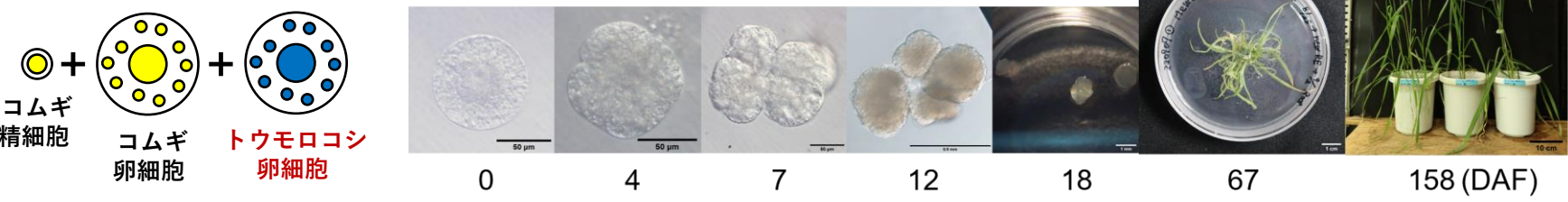
また、エリアンサスなどの高バイオマス植物は熱帯・亜熱帯起源であることから温帯域ではそのバイオマス生産能が十分に発揮できておらず、耐寒性などを新たに付与することが、高効率CO₂資源化バイオマス植物の創出に繋がる。

本テーマにおいては、顕微授精法によってこれまで交配が不可能であった異種植物間の交雑植物を作出し、それら新奇植物の中から高い効率でCO₂資源化を行う新たなコムギ、イネ、およびエリアンサスなどを選抜することで、高効率CO₂資源化作物・植物を創生する技術要素を確立する。さらには、異種細胞（配偶子）の選択的融合を促進する新奇細胞表面修飾材料の開発を進めることで、新たな超遠縁ハイブリッド作出の技術要素とする。

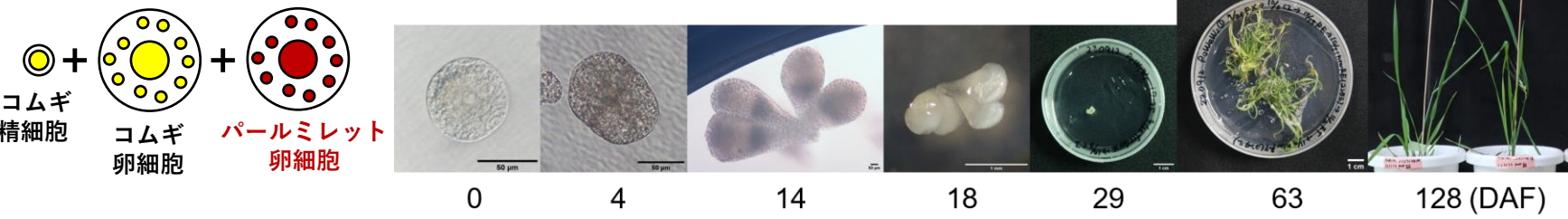


新たなイネ・コムギの創生に向けた要素技術の確立とその可能性の検証

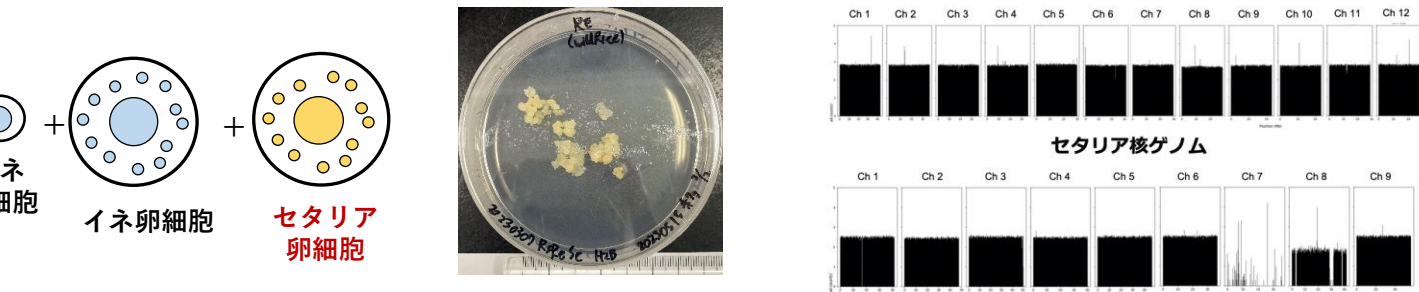
◆コムギ × トウモロコシ交雑植物の作出



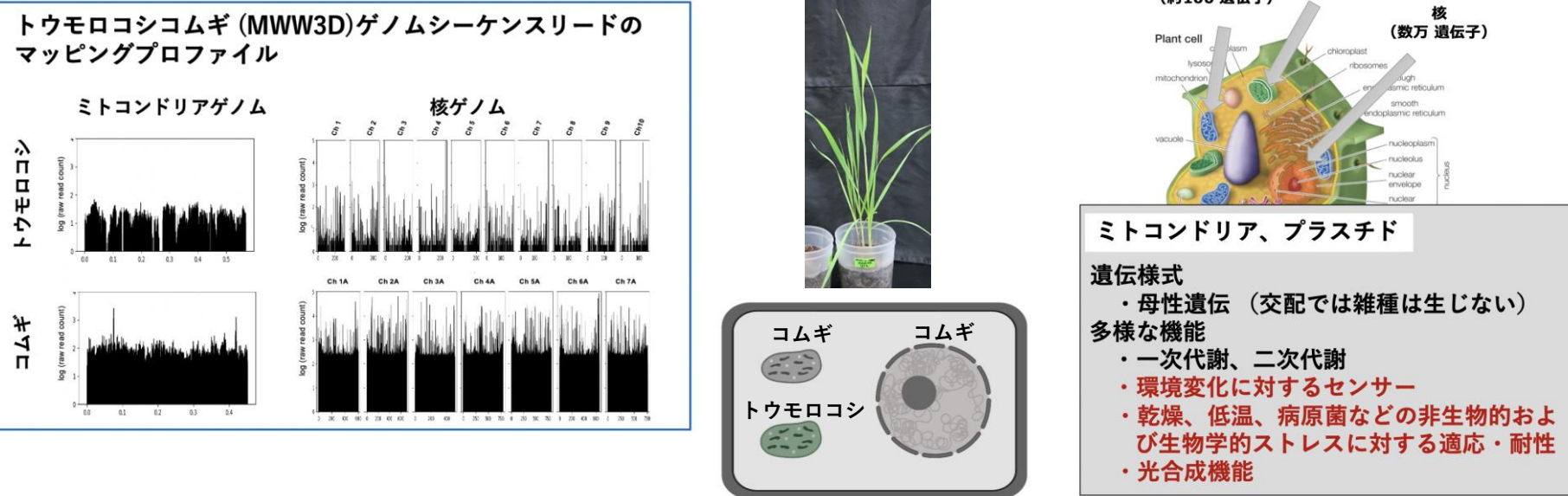
◆コムギ × パールミレット交雑植物の作出



◆イネ × セタリア交雑受精卵由来カルスおよびそのゲノム組成

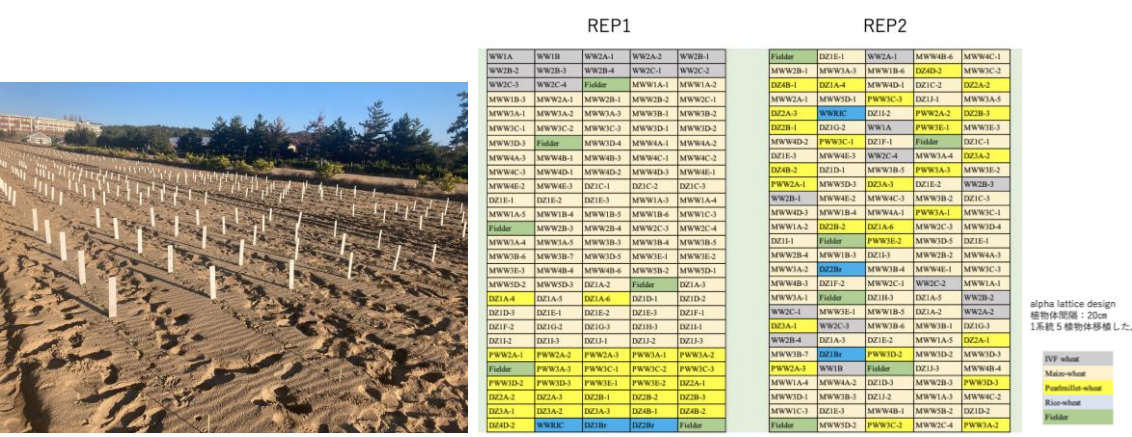


◆コムギ × トウモロコシ交雑植物のゲノム組成



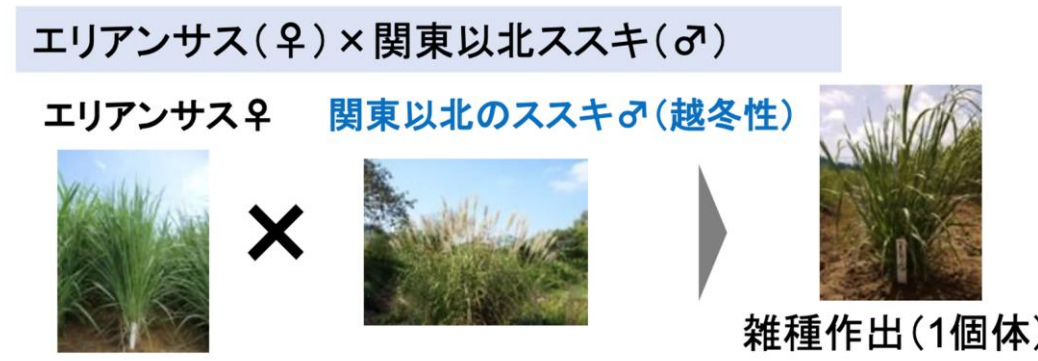
《今後の方針》

- 農業形質、生理的形質の調査
 - トウモロコシ-コムギ種子の増殖済
 - 光合成能力、様態の解析
 - 光合成速度・炭素安定同位体比の測定
 - 細胞壁形質の分析
- イネ-C4植物カルスの再分化および交雑植物のゲノム組成決定

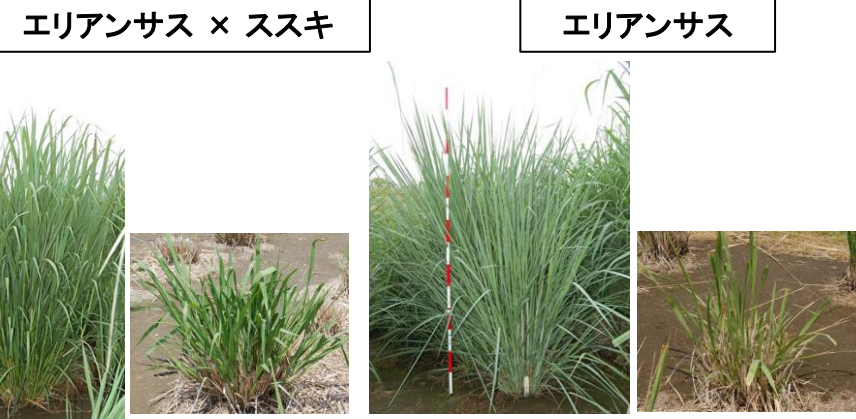


新バイオマス植物の創生に向けた要素技術の確立とその可能性の検証

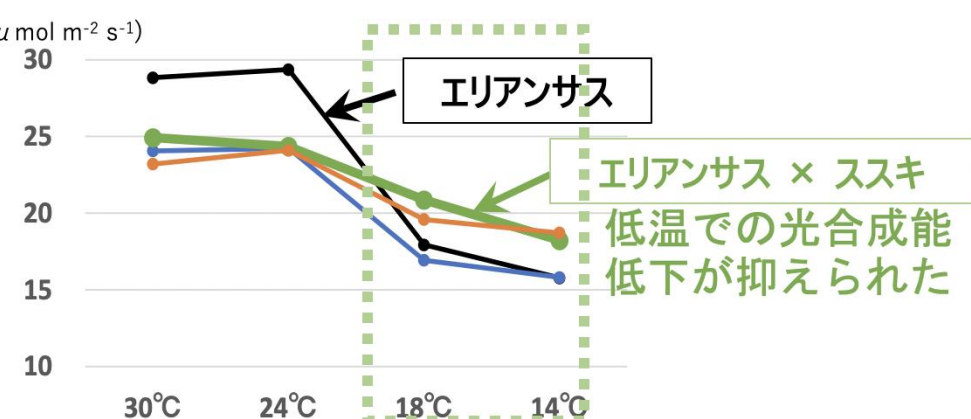
◆交配によるエリアンサス × ススキ作出



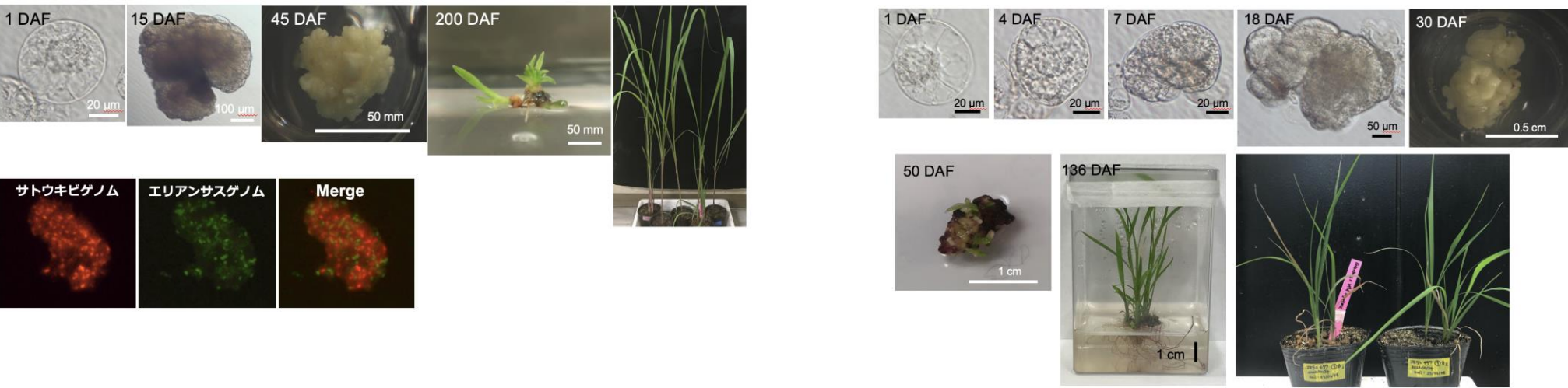
◆北関東における生育・越冬性



◆様々な温域での光合成活性



◆エリアンサス×サトウキビ（左）およびエリアンサス×サトウキビ/ススキの三重交雑体候補（右）の作出

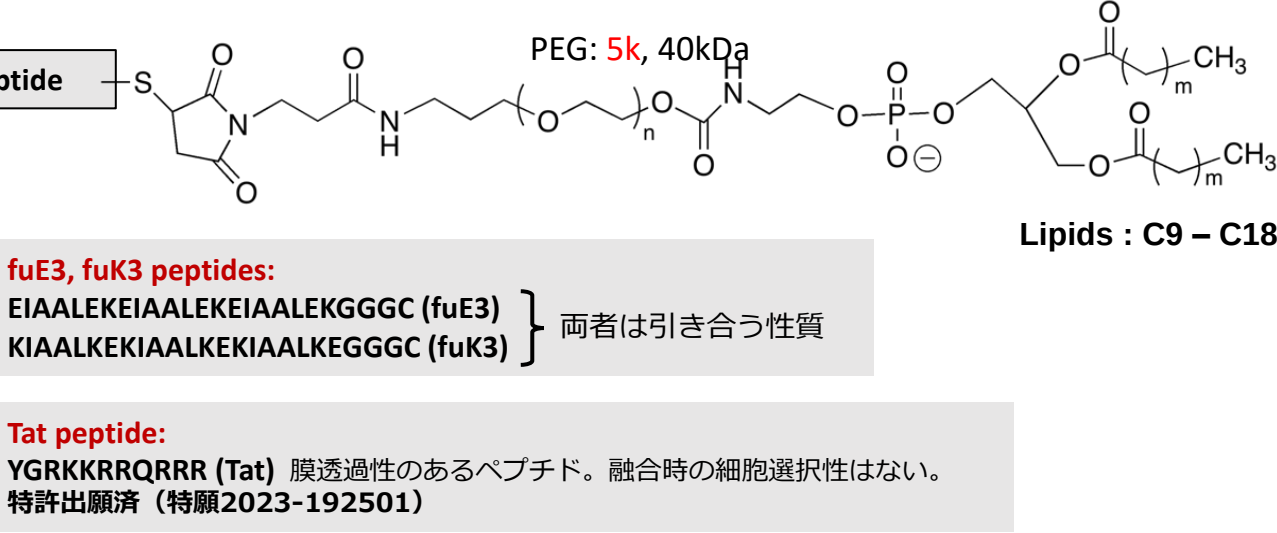


《今後の方針》

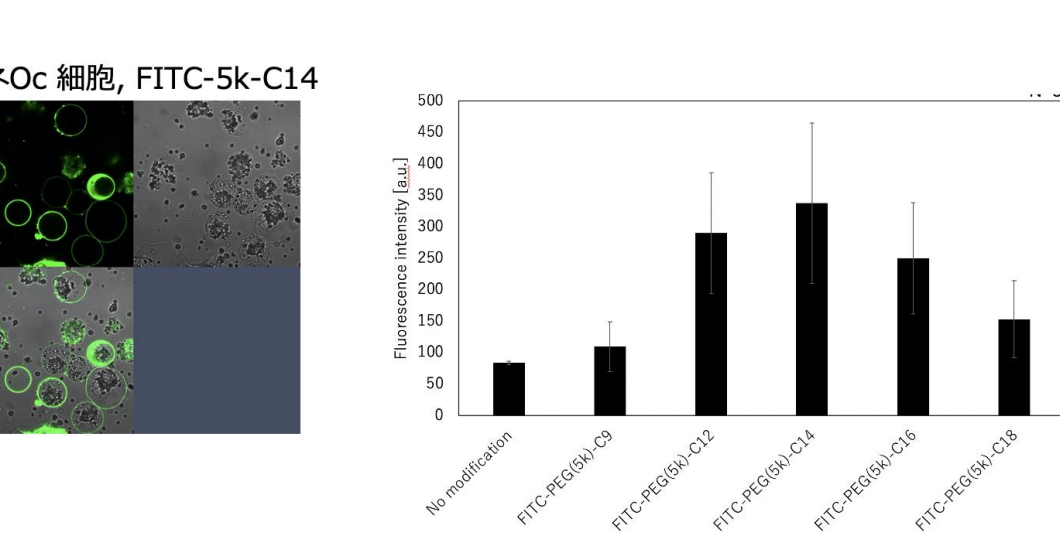
- 耐寒性、バイオマス生産能、光合成能力などの形質評価の実施
 - エリアンサス × ススキ属間雑種について石垣島（国際農研）、鳥取（鳥取大）、秋田（秋田県立大）にて耐寒性、バイオマス形質などを評価する栽培試験を実施
- エリアンサス-サトウキビ雑種およびエリアンサス × サトウキビ/ススキ三重交雑体の形質評価に向けた株増殖および基本的生育特性評価

ペプチド PEG 脂質結合体を用いた異種細胞融合高効率化技術の開発

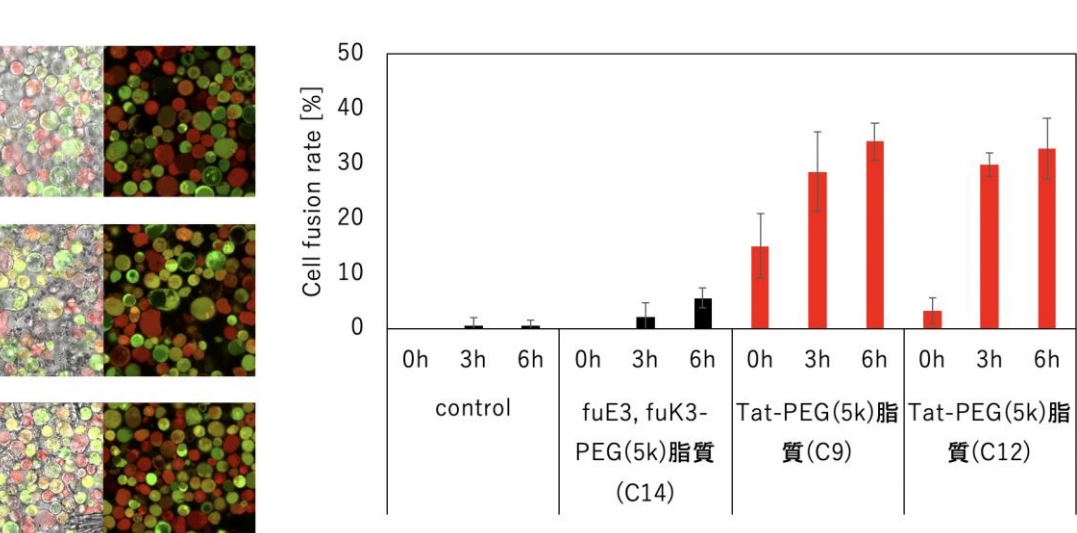
◆2種類のペプチドPEG脂質結合体



◆ イネ培養細胞を用いた至適炭素鎖長の決定



◆イネプロトプラストの融合効率



《今後の方針》

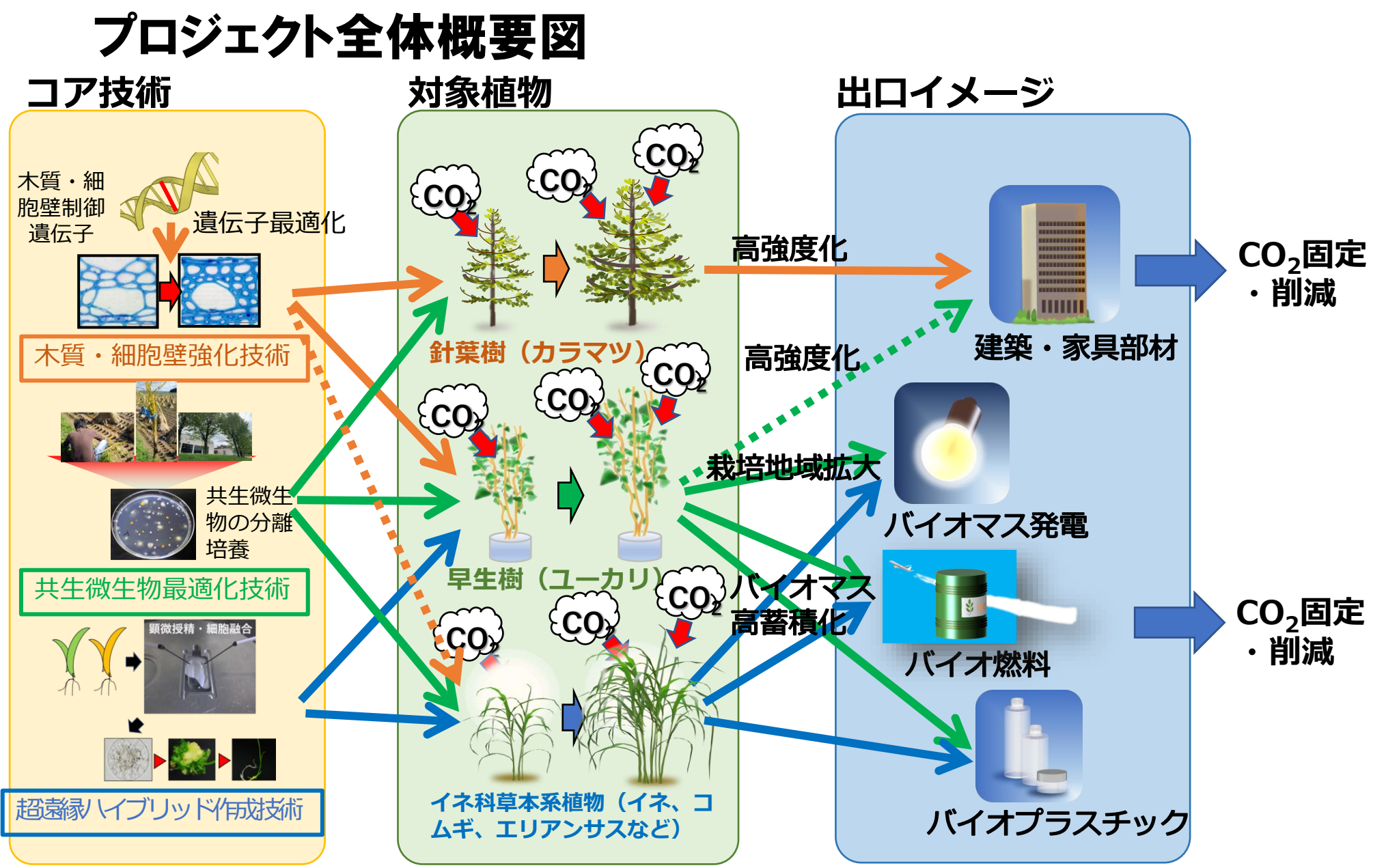
細胞表面修飾材料（細胞融合促進素材）の更なる改良
オリゴペプチド部分をオリゴDNAに変更した新材料を開発し、培養細胞あるいは葉肉細胞のプロトプラストを利用した細胞融合実験での効果を検証する。
効果が確認できた際はユーカリプロトプラストやイネ科植物配偶子融合に適応する。

研究概要

本プロジェクトでは三つのコア技術を駆使し、CO2固定能が高いだけでなく、産業利用上の付加価値が高い木質バイオマスが得られる植物（とその成長をサポートする技術）の開発を目指している（右図）。

本テーマでは、木質形成のマスター制御因子であるNST転写因子の高活性化（木質・細胞壁強化技術）によってCO2固定化能力が高く、かつ木造高層建築に利用可能な高強度な木材を生み出す樹木の開発を進めている。これまでに、遺伝子に変異を導入したNST転写因子の活性を網羅的に解析し、高活性化変異を特定した。さらに、高活性化変異を導入（遺伝子最適化）したNST転写因子を発現させた植物において、木質・細胞壁が強化されることを実証した。

また、高強度樹木の社会実装を見据えて、遺伝子最適化の方法は遺伝子組換えではなく塩基置換型ゲノム編集の適用を考慮しており、そのための技術確立に取り組んでいる。



成果まとめ

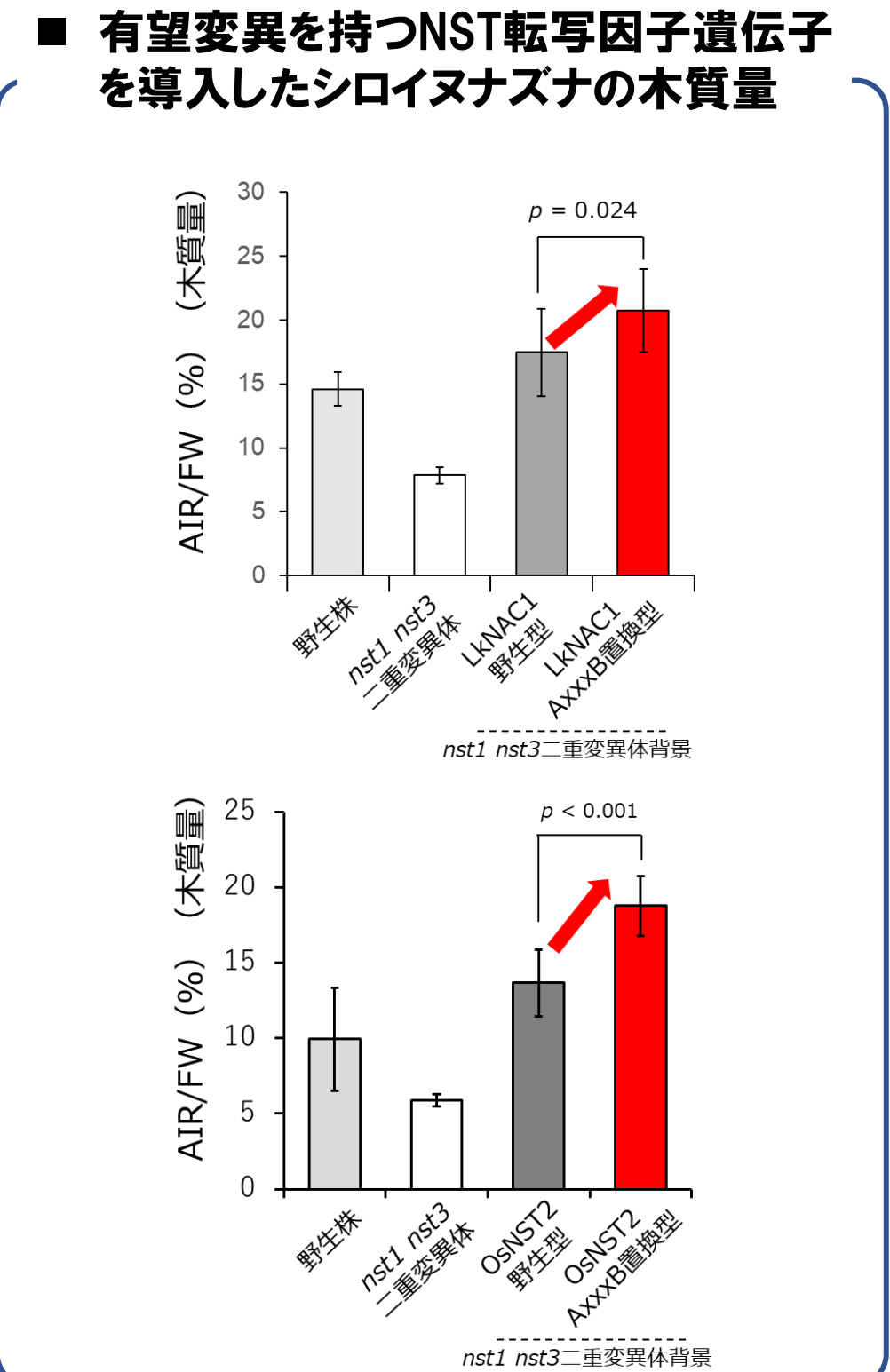
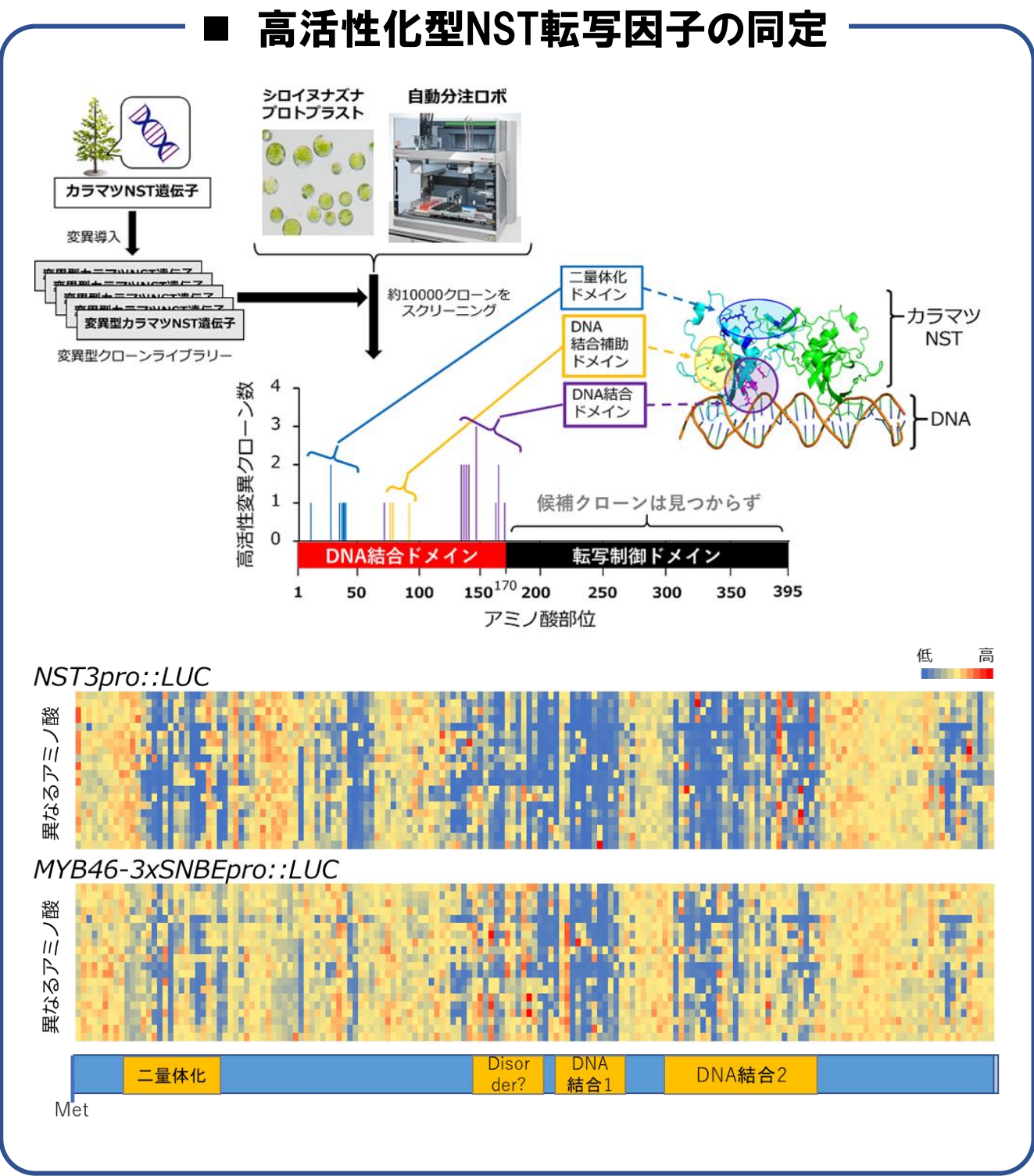
- NST転写因子の高活性化変異を特定
- NST高活性化変異による木質増強効果の実証
- カラマツのゲノム編集システムの確立

■ 植物の木質形成を制御する鍵因子であるNST転写因子遺伝子を同定 (産総研)



通常株 NST ノックアウト

Takata et al., Tree Physiol. 39, 514-525 (2019)



■ 有望変異を持つNST転写因子遺伝子を導入したポプラ

植物体



切片観察像

LkNAC1導入 (置換なし)

高活性化型LkNAC1導入 (AxxxB)

高活性化型LkNAC1導入 (AxxxB + GzyxH)

木質量

AIR/FW (%) (1-30節間) ≒ 木密度

AIR/FW (%) (木質量)

一個体あたりの茎AIR量 (1-30節間) ≒ 地上部バイオマス生産量

置換なし, GzyxH, AxxxB, AxxxB + GzyxH

置換なし, GzyxH, AxxxB, AxxxB + GzyxH

ピンク色: UV照射下でのリグニン自家蛍光を疑似カラーで表示

■ 有望変異を持つNST転写因子遺伝子を導入したカラマツ

植物体



切片観察像

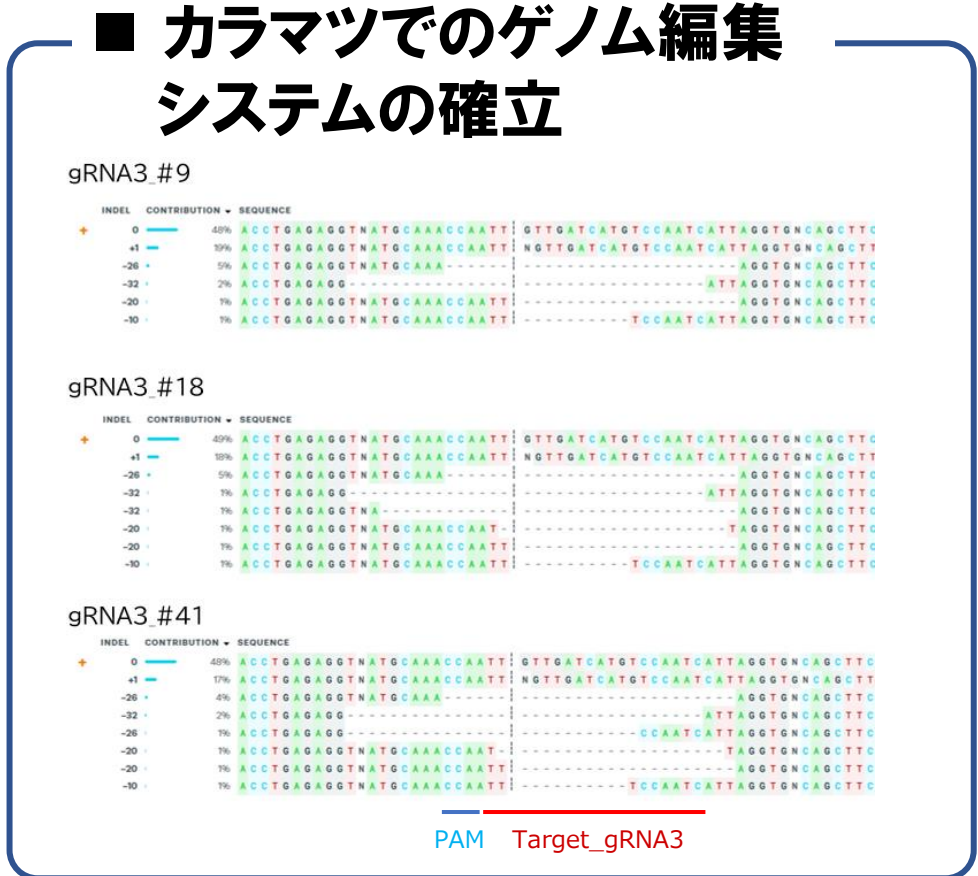
LkNAC1導入 (置換なし)

高活性化型LkNAC1導入 (AxxxB)

細胞壁厚

細胞壁厚 (μm)

LkNAC1導入 (置換なし), 高活性化型LkNAC1導入 (AxxxB)



番号： A-9-1J

PJ： 炭素超循環社会構築のための DAC農業の実現

テーマ名： DAC農業

担当機関名：農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）、東京農工大、名古屋大、東京大
岡山大、信州大、埼玉大、滋賀県立大

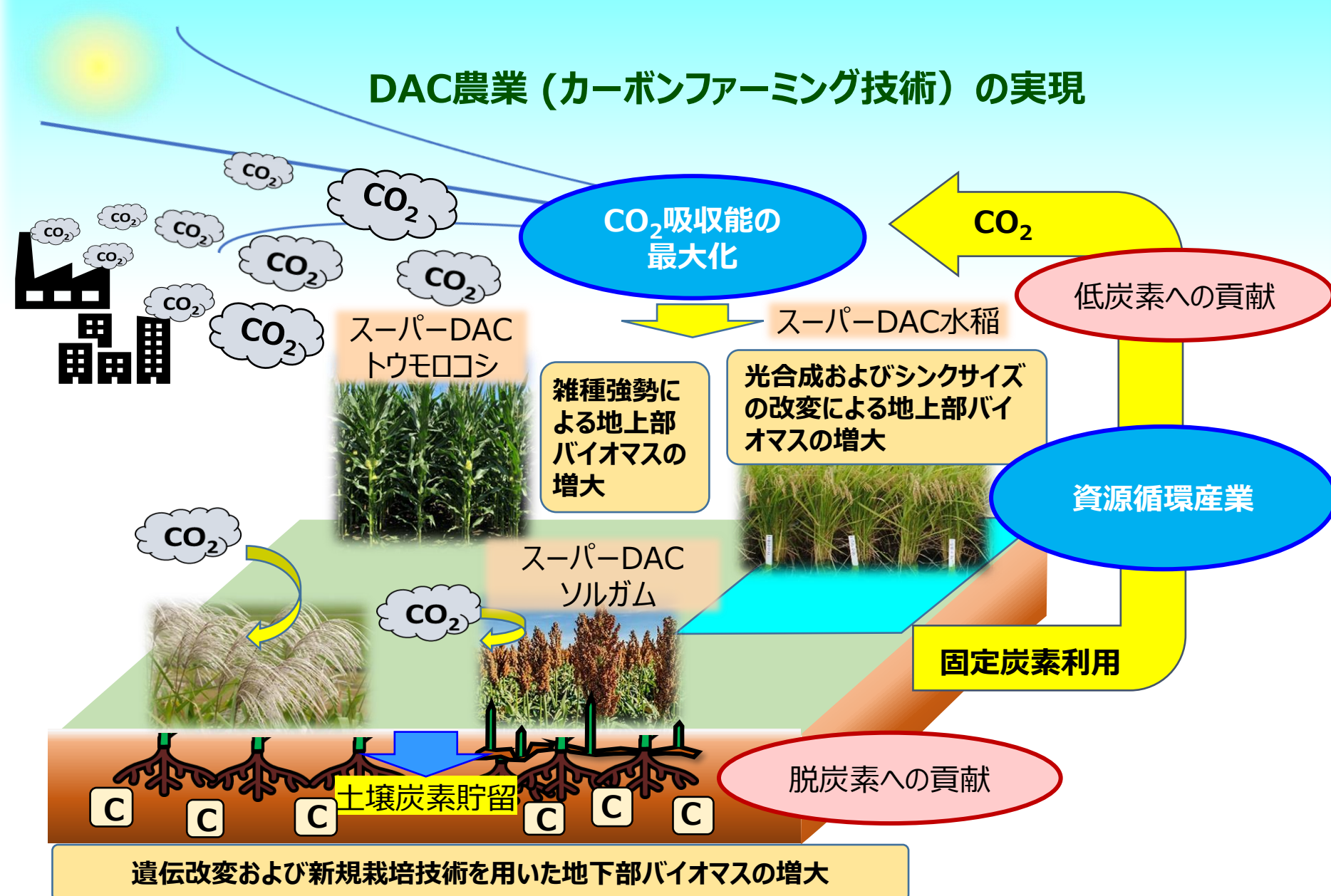
問合せ先：矢野昌裕PM（農研機構 シニアエグゼクティブリサーチャー） e-mail:myano@affrc.go.jp



研究概要

CO₂吸収・固定能とバイオマス生産能に係る遺伝子の改変および集積の最適化による「スーパーDAC作物」の設計と有効性評価に加えて、作物残渣分解および土壌炭素貯留の評価技術を開発します。作物生産からの有価物回収・利用する炭素循環の経済価値および環境負荷を評価します。

2050年までに目指すべき農業の姿（DAC農業）



DAC農業実現に向けた課題、開発目標、実施体制

技術的課題	2030年の達成目標	研究開発テーマ
農作物のCO ₂ 固定能力の倍増	1 スーパーDAC作物開発 水稻、籾収量1.5倍 トウモロコシ 茎葉2倍	● 課題I CO ₂ 吸収・固定能を増強したスーパーDAC水稻の開発 ● 課題II 作物バイオマスの増大による炭素固定に関する研究
バイオマスの地中貯留	2 地下部バイオマスの増大 &農地炭素貯留評価技術開発 ソルガム 根・地下茎 2倍	● 課題II 作物バイオマスの増大による炭素固定に関する研究
バイオマスの地上部による資源循環・利用	3 スーパーDAC作物による資源循環ブレイクスルーの解析・調査	● 課題III DAC農業からの資源利用工程の経済価値・環境負荷評価

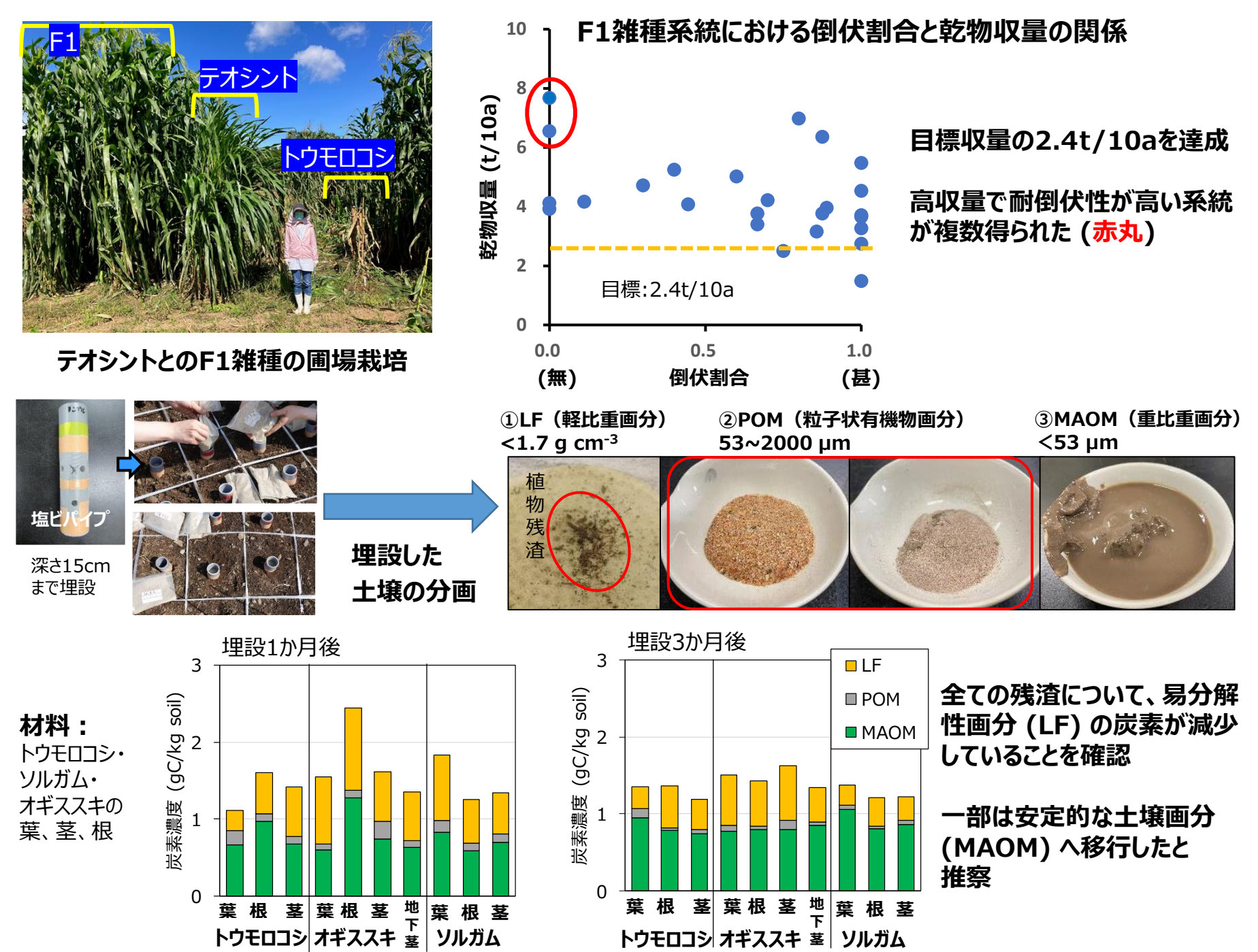
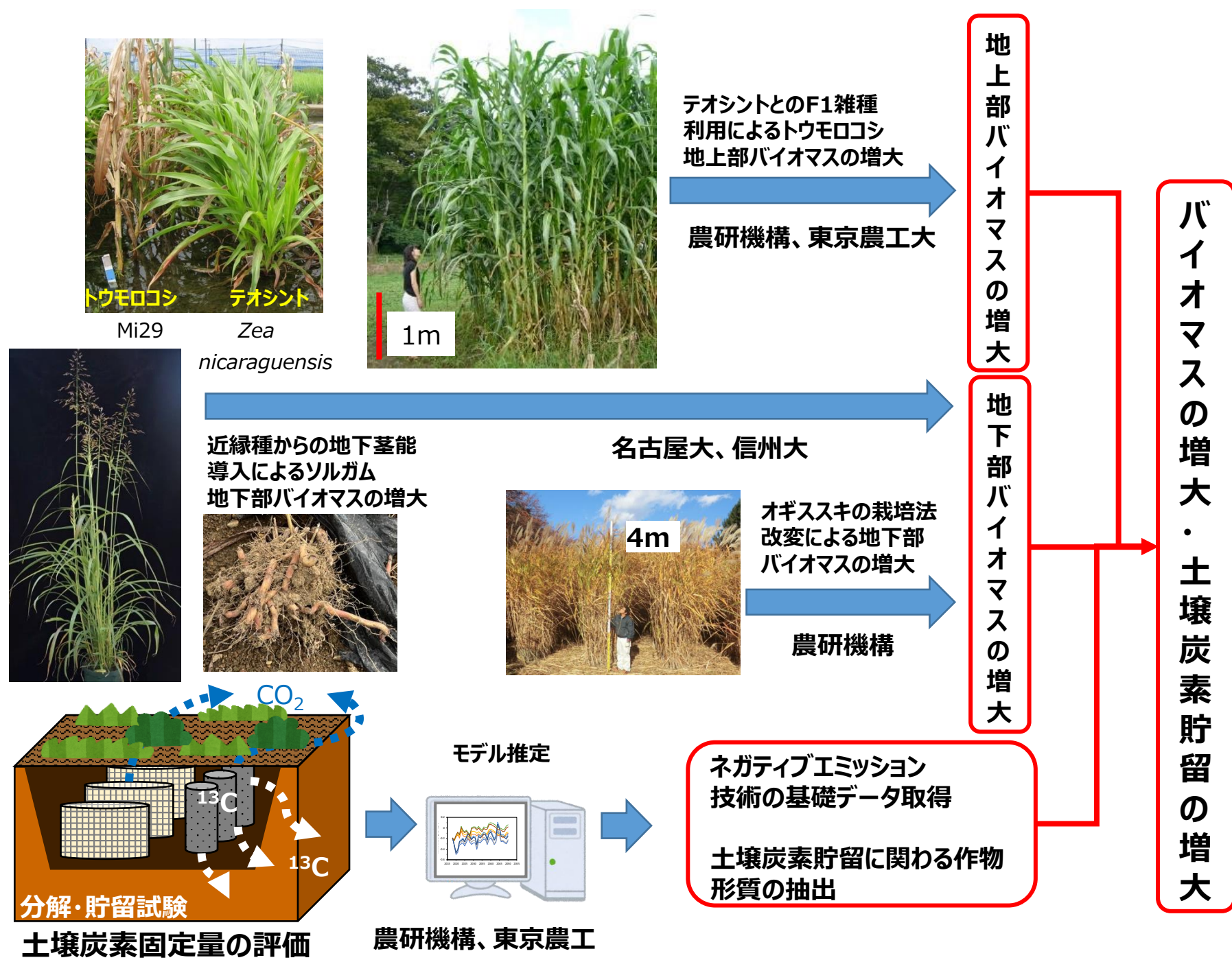
代表機関：農研機構

参画機関：課題I（東京農工大、農研機構、名古屋大、東京大、岡山大）

課題II（農研機構、名古屋大、東京農工大、信州大）

課題III（農研機構、埼玉大、東京大、滋賀県立大）

課題Ⅱ：作物バイオマスの増大による炭素固定に関する研究



課題Ⅲ：DAC農業からの資源利用工程の経済価値・環境負荷評価

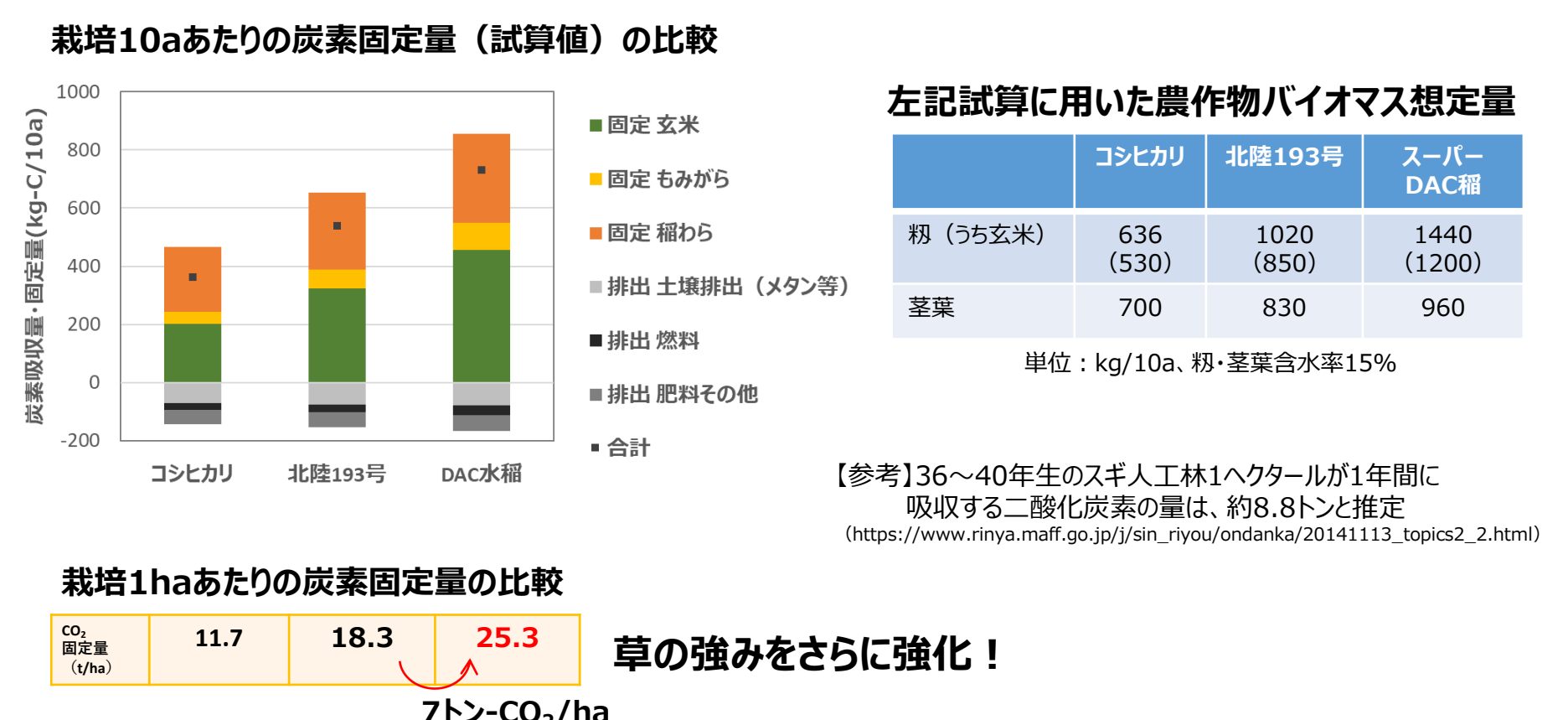
固定炭素利用



作物バイオマスの素材・変換特性の評価
資源循環による新事業創出のためのシナリオ策定

スーパーDAC作物からの資源利用技術を実証

スーパーDAC水稻のDAC能力（試算例）



スーパーDAC水稻は25.3トン/haのCO₂を吸収できるものと期待。

2022-2024
：FS期間

2025-
2030

番号: A-9-2J

PJ: 炭素超循環社会構築のための DAC農業の実現

テーマ名: CO₂吸収・固定能を増強したスーパーDAC水稻の開発 (課題Ⅰ)

担当機関名: 農業・食品産業技術総合研究機構(農研機構)、東京農工大、名古屋大、東京大
岡山

問合せ先: 安達俊輔 (東京農工大学農学研究院准教授) e-mail: adachi@go.tuat.ac.jp



研究概要

植物体のCO₂吸収・固定能力がきわめて高い「スーパーDAC水稻」の開発を目指します。具体的には、葉の光合成能力・養分吸収能力(ソース能)に関わる遺伝子、種子数や種子サイズなど収穫部位の容積(シンク容量)に関わる遺伝子をゲノム編集技術等によって改変し、新たな育種素材を開発します。

育種素材を開発するための2つのアプローチ

①ゲノム編集

1 対象遺伝子の破壊 (KO) Knockout

難易度 中

注目遺伝子の機能欠損によって有用な表現型を獲得

2 負の制御因子の破壊 (KO) Regulator-KO

難易度 中

注目遺伝子の発現上昇によって有用な表現型を獲得

3 プロモータ領域への変異導入による遺伝子発現上昇 Overexpress

難易度 高

注目遺伝子の発現上昇によって有用な表現型を獲得

②DNAマーカー選抜

1 北陸193号を遺伝背景とした準同質系統の育成

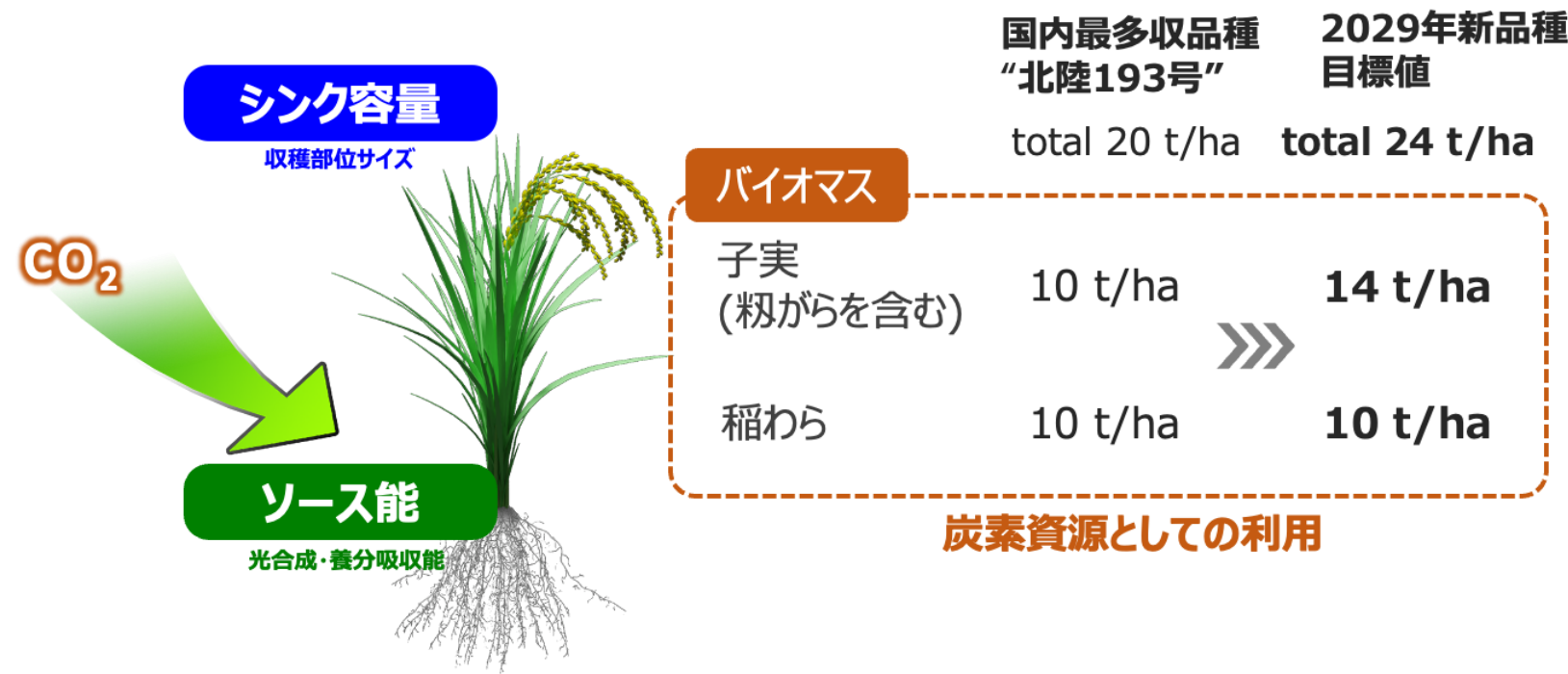
Marker-selection

人工交配によって注目遺伝子を北陸193号へ導入し、有用な表現型を獲得

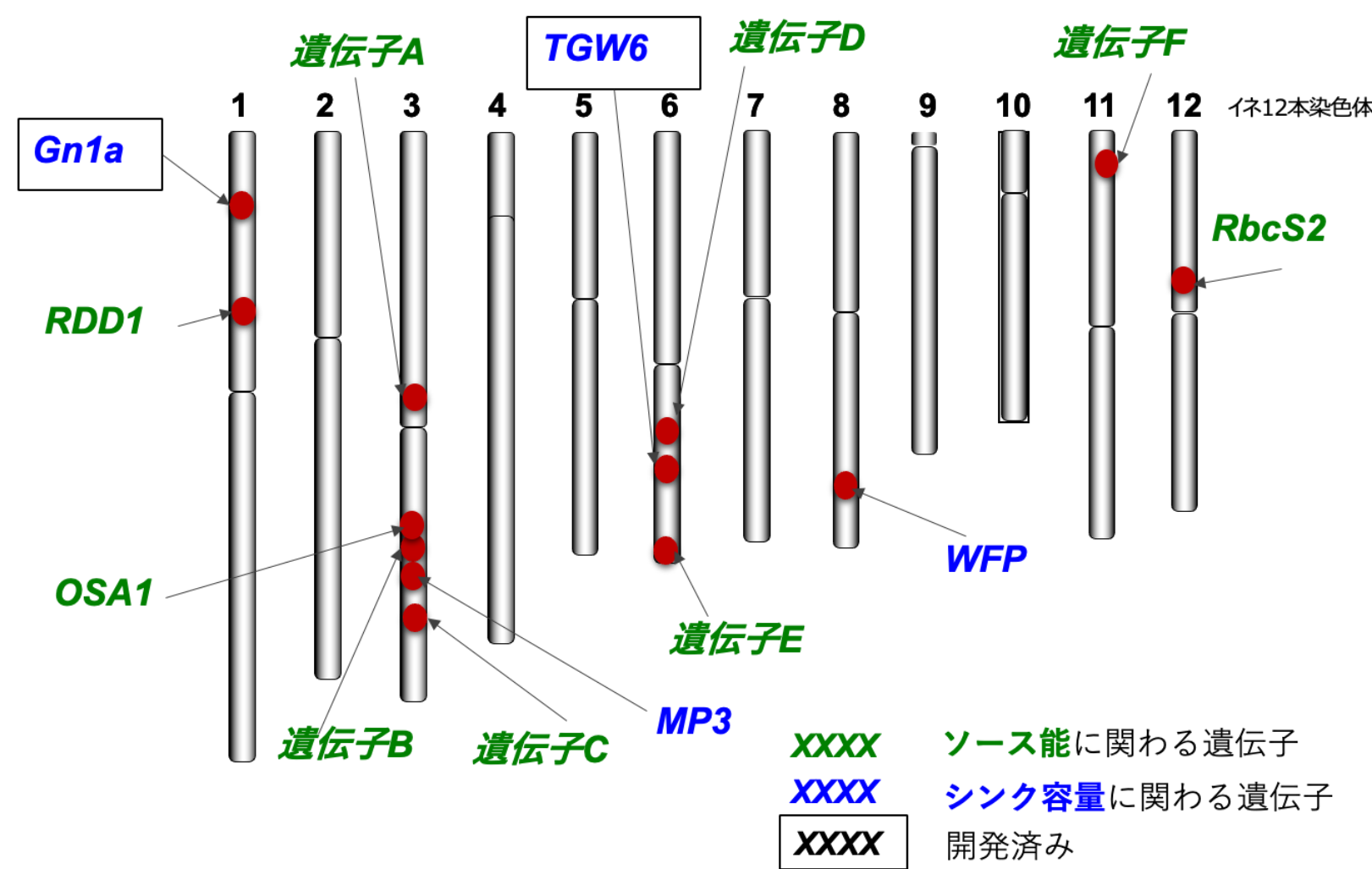
2 高速世代促進技術

内寸高さ1100mm 小型グロースチャンバー
最適化された人工気象環境
播種から収穫までを100日程度で完結
通常6年かかるNIL育成を2年に短縮

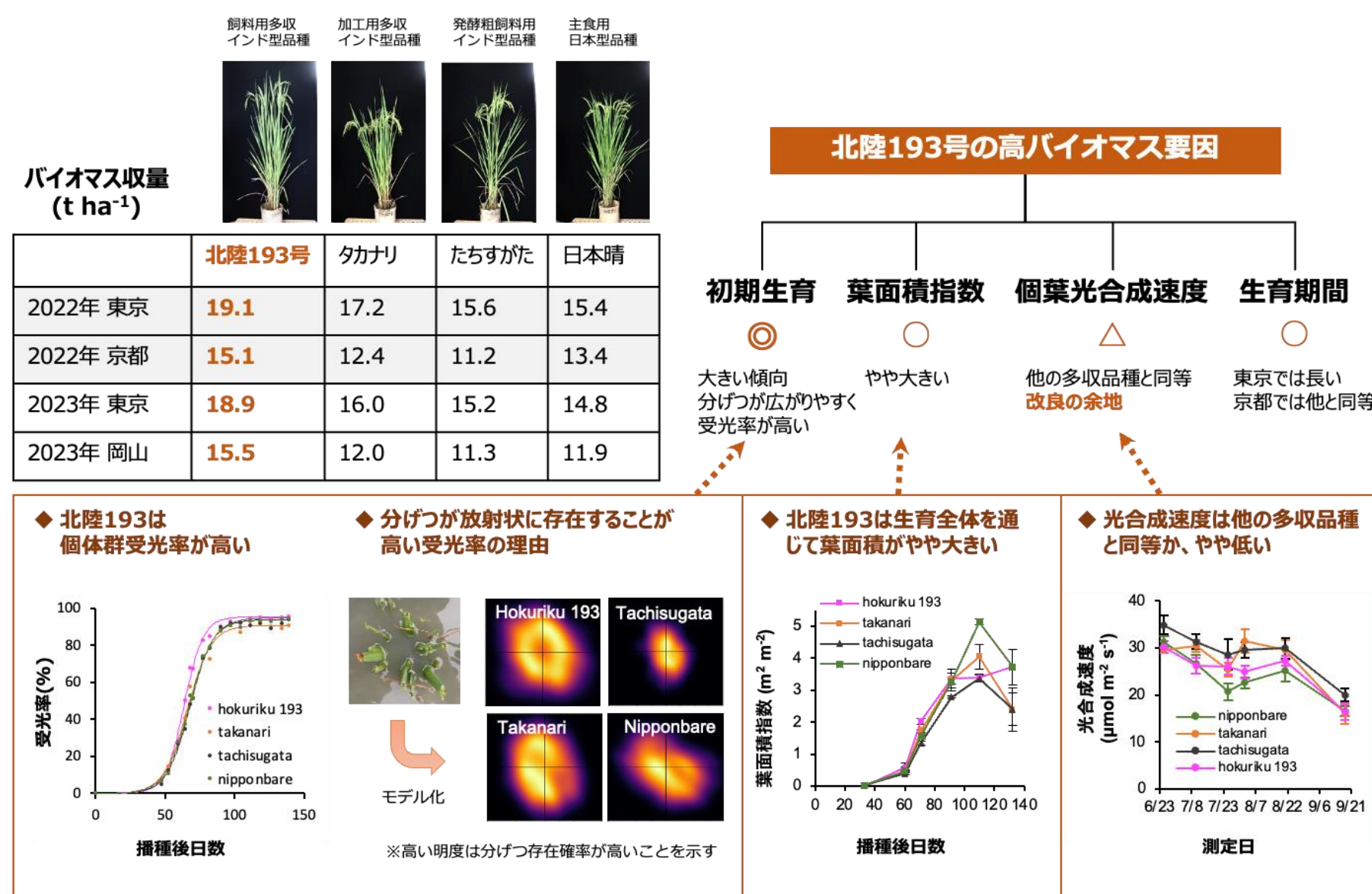
スーパーDAC水稻の開発目標



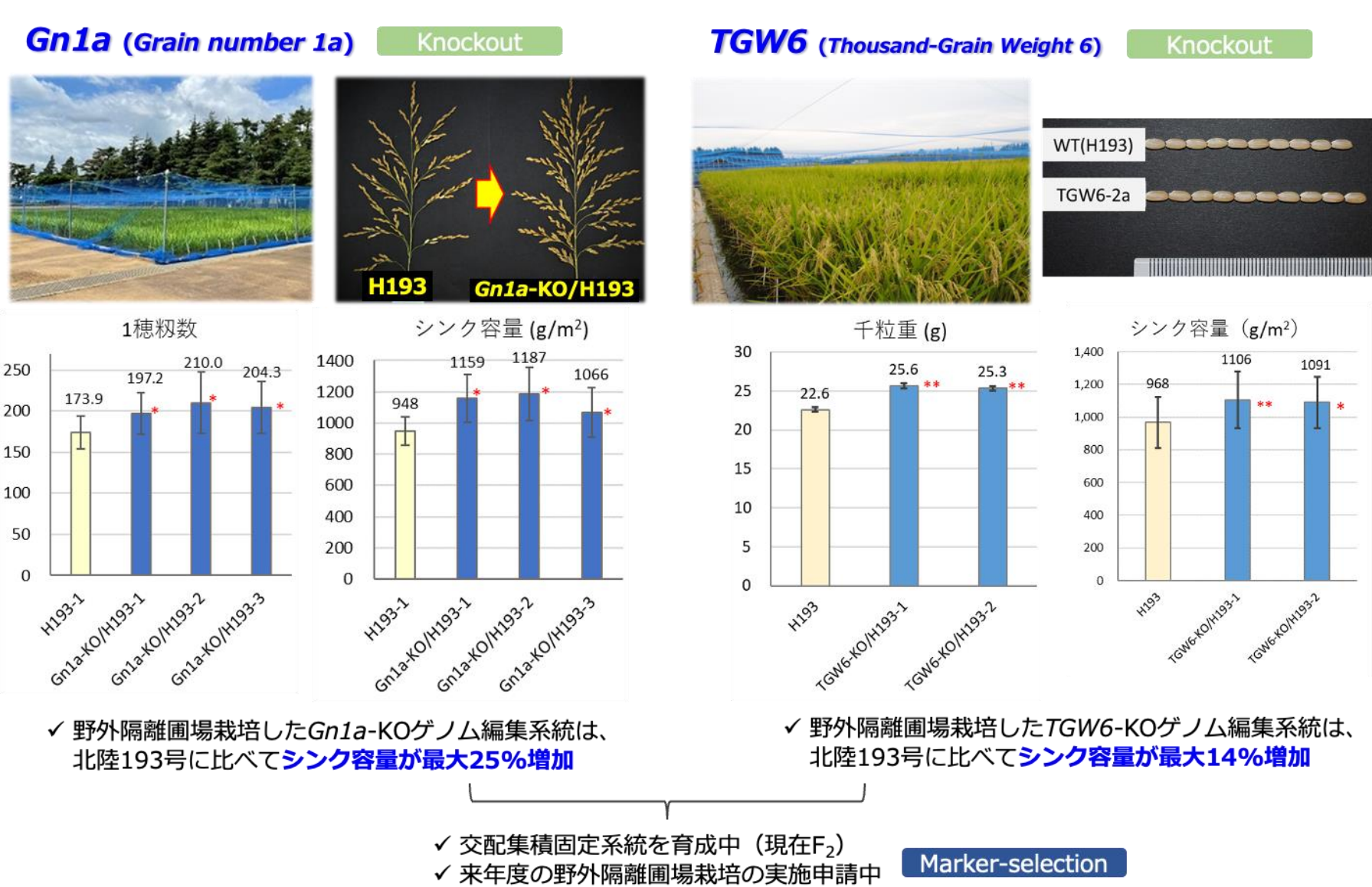
改変対象とする遺伝子一覧



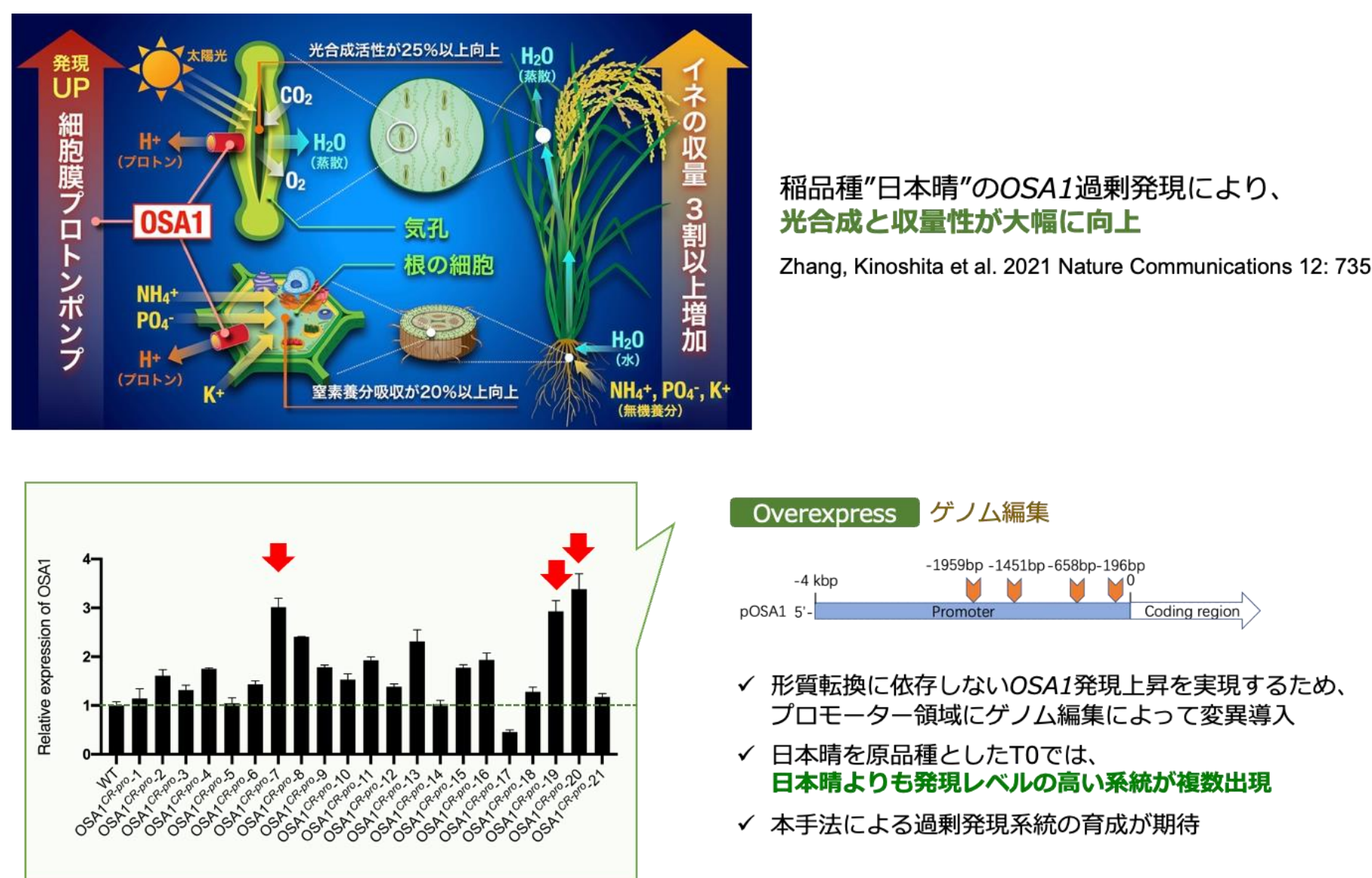
北陸193号の高バイオマスの要因



シンク容量の向上 (Gn1a, TGW6ノックアウト)



ソース能の向上 (OSA1発現上昇)



DAC能力の飛躍的向上戦略

(現状)

(2022-2024 : FS期間)

(2025-2029)

ゲノム編集技術等による遺伝子改変系統の作出
高精度人工気象器内の表現型調査

高速世代促進による複数遺伝子の迅速集積
高精度人工気象器内および圃場環境における表現型調査

