

炭素超循環社会構築のための DAC農業の実現



プロジェクトマネージャー
国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
シニアエグゼクティブリサーチャー
矢野 昌裕

PJ参画機関：

農研機構、国立大学法人東京農工大学、国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学、
国立大学法人東京大学、国立大学法人岡山大学、国立大学法人信州大学、
公立大学法人滋賀県立大学、国立大学法人埼玉大学

農業は、食料の持続的な生産とともに、**バイオマスとしてCO₂を吸収・固定化し、土壤中に蓄える (BECCS)** などの**ネガティブエミッション機能を有する産業**

農林水産分野におけるネガティブエミッション技術例

- ・**スーパー作物**
光合成能力の高い植物の作出



飛躍的なバイオマス生産能の増強

- ・**バイオ炭**
バイオ炭（もみ殻、木質など）の農地施用
- ・**土壌炭素貯留**
緑肥や堆肥など有機物の農地施用
- ・**原料転換**
高機能バイオ製品・備蓄
- ・**植林・再生林**
エリートツリーの普及と木材由来の新素材
- ・**ブルーカーボン**
藻場・干潟における炭素貯留増大



10トン/haのバイオマス増（現状の2倍）の想定

<現行>

作物の平均収量を10トン/ha/年と仮定
CO₂の回収・固定量 **1.5 kg- CO₂/m²/年**

世界耕地面積: 15.0億ha
→ 22.5 GtのCO₂固定

= 世界総排出量 (33.5Gt) の
67%を吸収・固定



<2050年>

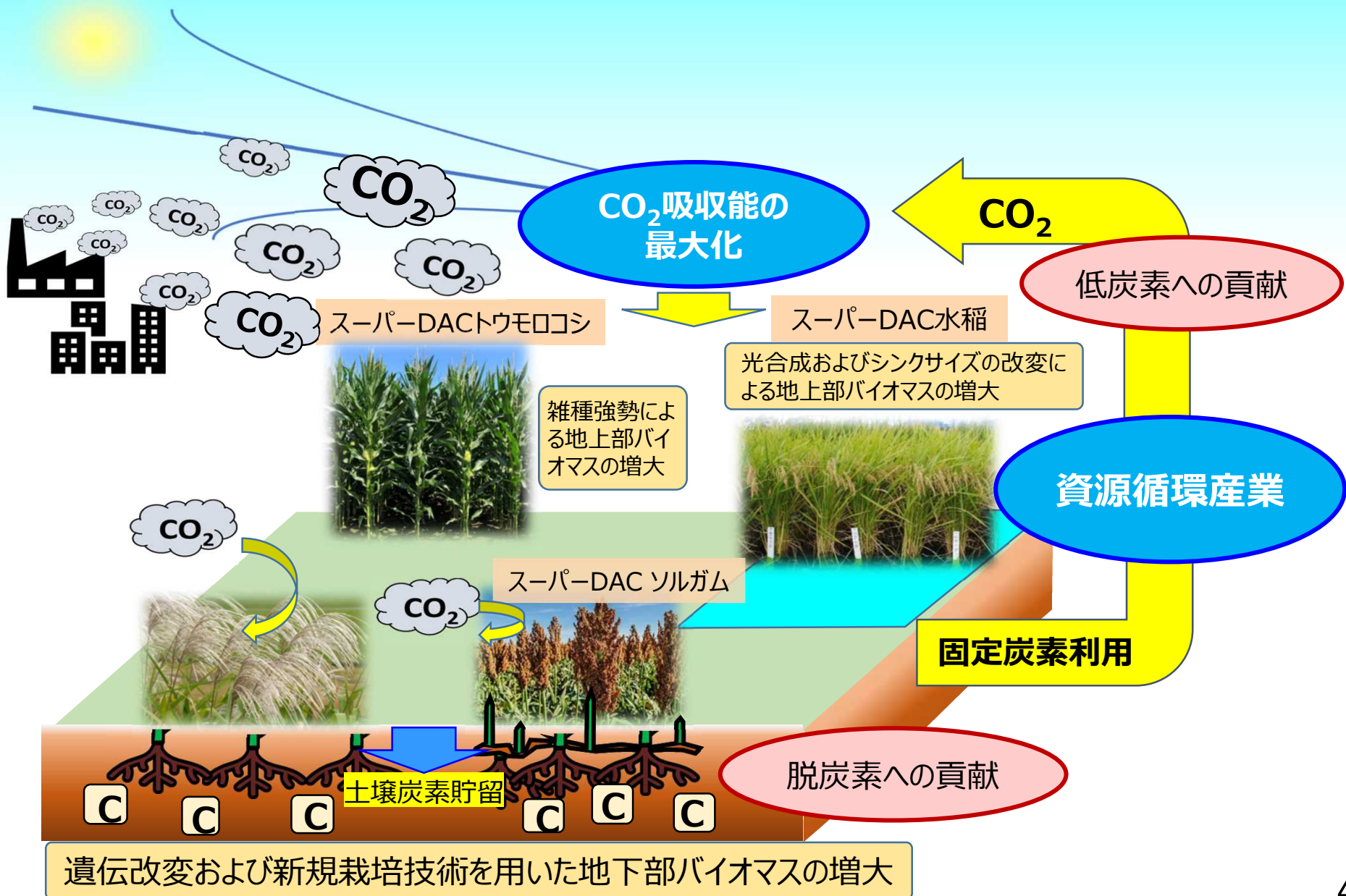
20トン/ha/年
3.0 kg- CO₂/m²/年

世界耕地面積: 15.0億ha
→ **45 Gt**のCO₂固定

= 世界総排出量 (33.5Gt) の
134%を吸収可能



2050年までに目指すべき農業の姿 (DAC農業)



PM: 矢野昌裕 (農研機構)

課題I

CO₂吸収・固定能を増強したスーパーDAC水稻の開発

(安達俊輔 : 農工大)

東京農工大、農研機構、名古屋大、東京大、岡山大

バイオマス関連
遺伝子情報

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

(米丸淳一 : 農研機構)

農研機構、東京農工大、名古屋大、信州大

分析結果

素材提供

課題III

DAC農業からの資源利用工程の経済価値および環境負荷の評価

(徳安健 : 農研機構)

滋賀県立大、農研機構、埼玉大、東京大

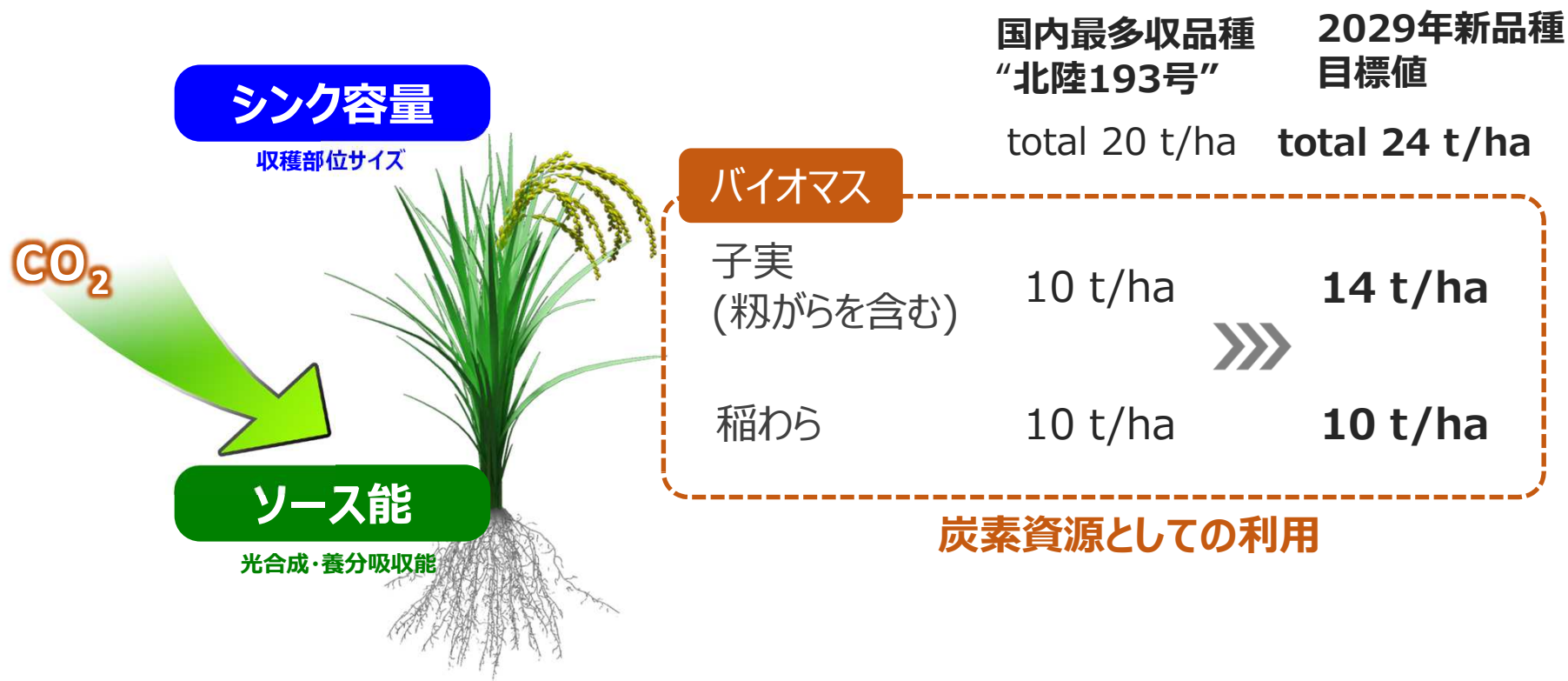
素材提供

分析結果

作物関連データ

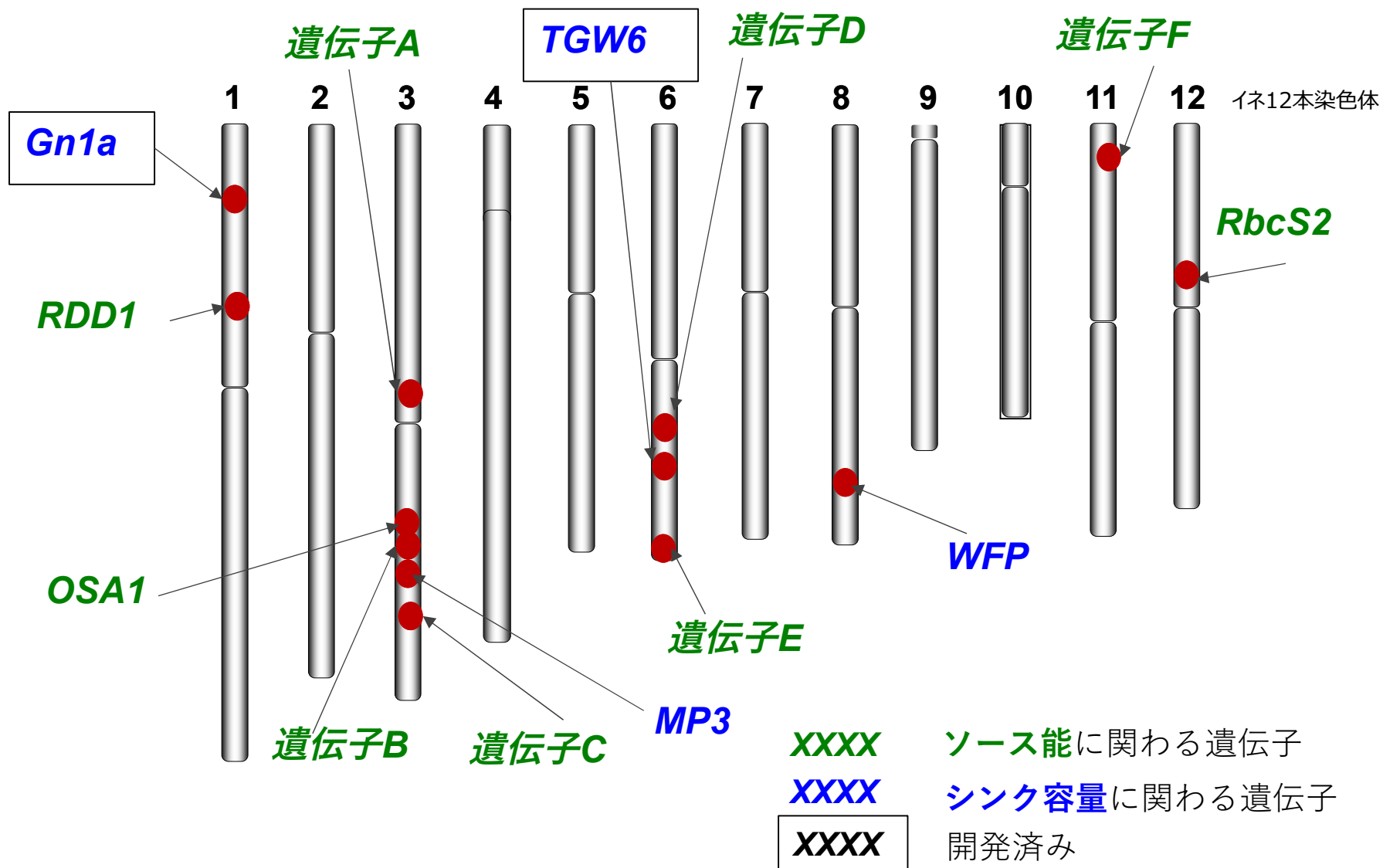
LCA関連データ

スーパー-DAC水稲の開発目標



シンク容量・ソース能それぞれの限界値を突破し、
大気中CO₂を最大限吸収できるスーパー-DAC水稲の開発

改変対象とする遺伝子一覧



改変する有用遺伝子

Gn1a (Grain number 1a)



Koshihikari

NIL-Gn1

機能欠損により粒数を増加
ゲノム編集で実現可能

Ashikari *et al.* (2005) **Science**

TGW6 (Thousand-Grain Weight 6)



Control

RNAi-TGW6

機能欠損により子実サイズを拡大
ゲノム編集で実現可能

Ishimaru *et al.* (2013) **Nature Genetics**

OSA1

(*Oryza sativa* Plasma Membrane H⁺-ATPase)

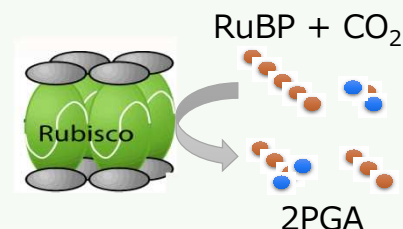


発現上昇により気孔開度・収量が上昇
最終的にゲノム編集での実現を目指す

Zhang *et al.* (2021) **Nature Communications**

RbcS2

(*Rubisco* small subunit 2)

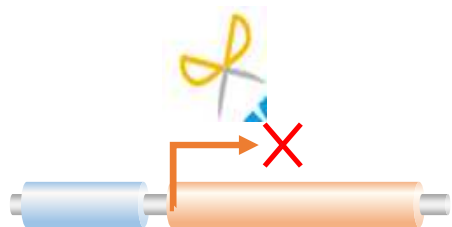


発現上昇によりCO₂固定酵素Rubisco含量
が増加し、圃場でのイネ子実収量が増加
最終的にゲノム編集での実現を目指す

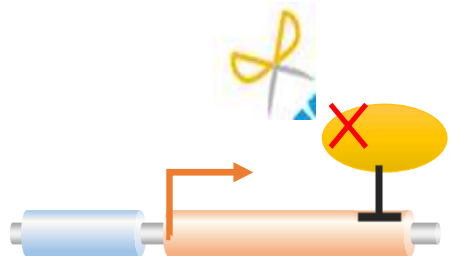
Yoon *et al.* (2020) **Nature Food**

①ゲノム編集

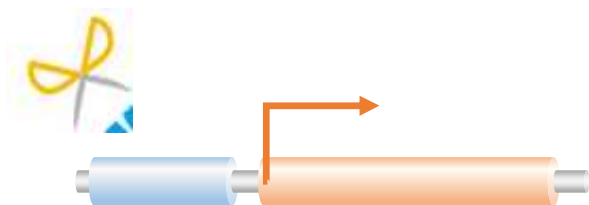
対象遺伝子の破壊 (KO)



負の制御因子の破壊 (KO)

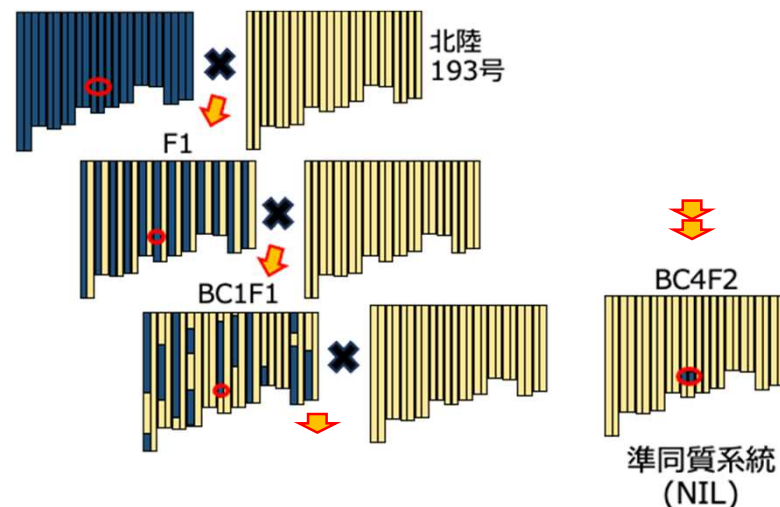


プロモータ領域への変異導入による遺伝子発現上昇



②DNAマーカー選抜

北陸193号を遺伝背景とした準同質系統の育成



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

高速世代促進技術

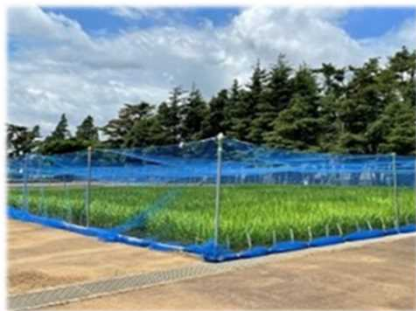


通常6年かかるNIL育成を2年に短縮

課題I CO₂吸収・固定能を増強したスーパー-DAC水稲の開発 シンク容量の向上 (Gn1a, TGW6)

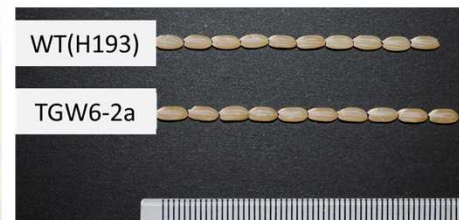
Gn1a (Grain number 1a)

Knockout

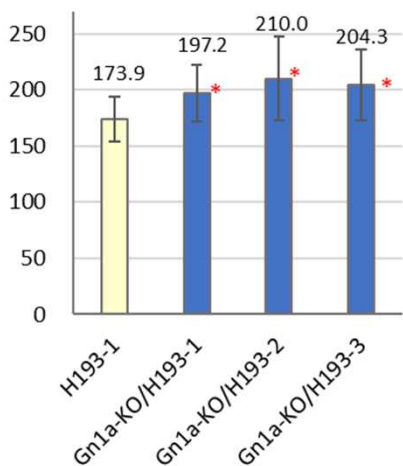


TGW6 (Thousand-Grain Weight 6)

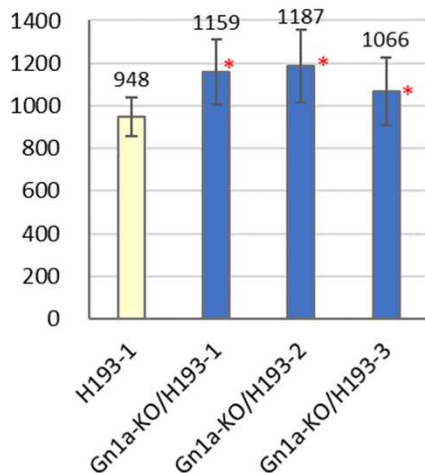
Knockout



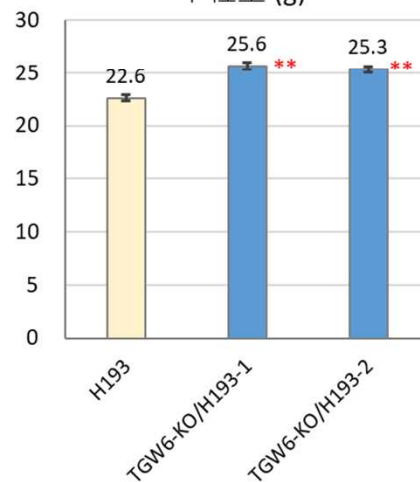
1穂粒数



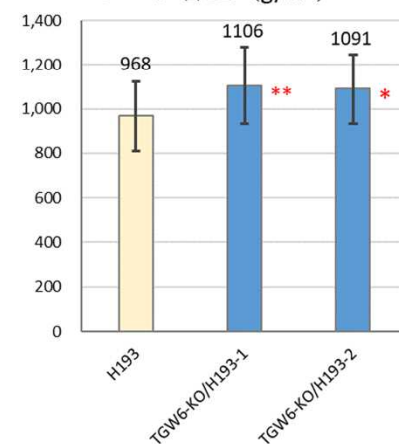
シンク容量 (g/m²)



千粒重 (g)



シンク容量 (g/m²)



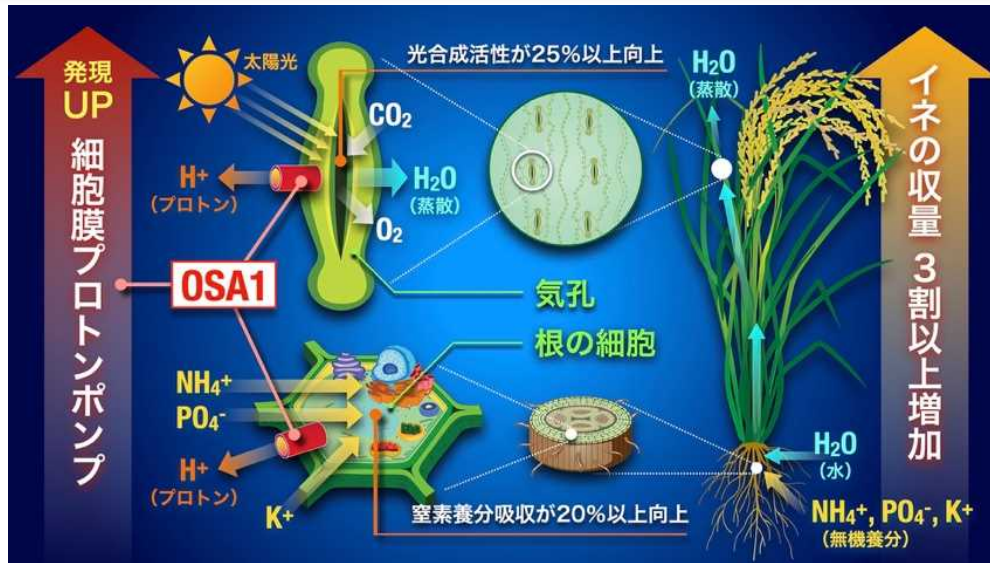
✓ 野外隔離圃場栽培したGn1a-KOゲノム編集系統は、北陸193号に比べて**シンク容量が最大25%増加**

✓ 野外隔離圃場栽培したTGW6-KOゲノム編集系統は、北陸193号に比べて**シンク容量が最大14%増加**

- ✓ 交配集積固定系統を育成中 (現在F₂)
- ✓ 来年度の野外隔離圃場栽培の実施申請中

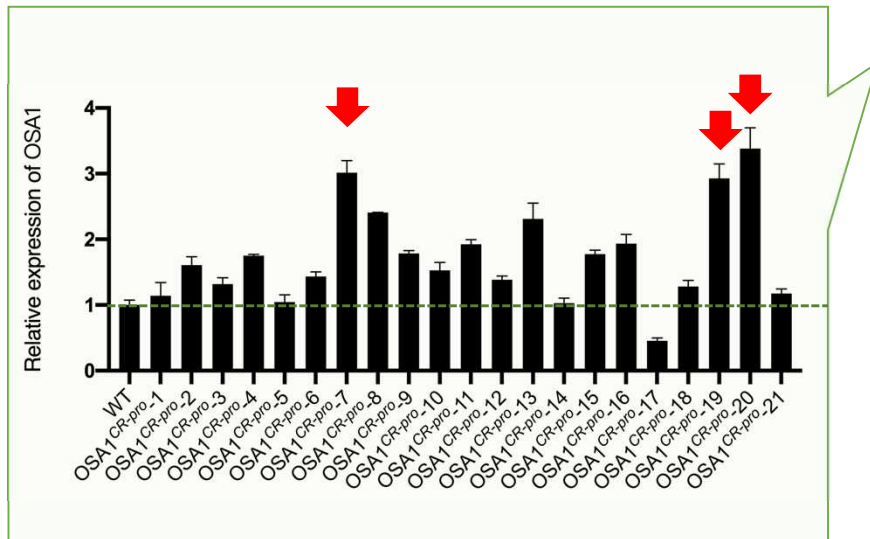
Marker-selection

課題I CO₂吸収・固定能を増強したスーパー-DAC水稲の開発 ソース容量の向上 (OSA1発現上昇)

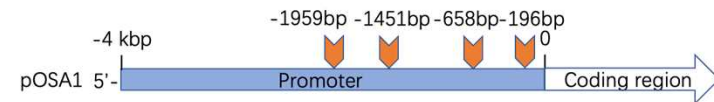


稲品種“日本晴”のOSA1過剰発現により、
光合成と収量性が大幅に向上

Zhang, Kinoshita et al. 2021 Nature Communications 12: 735



Overexpress ゲノム編集



- ✓ 形質転換に依存しないOSA1発現上昇を実現するため、プロモーター領域にゲノム編集によって変異導入
- ✓ 日本晴を原品種としたT0では、**日本晴よりも発現レベルの高い系統が複数出現**
- ✓ 本手法による過剰発現系統の育成が期待

DAC能力の飛躍的向上を目指した戦略

(現状)

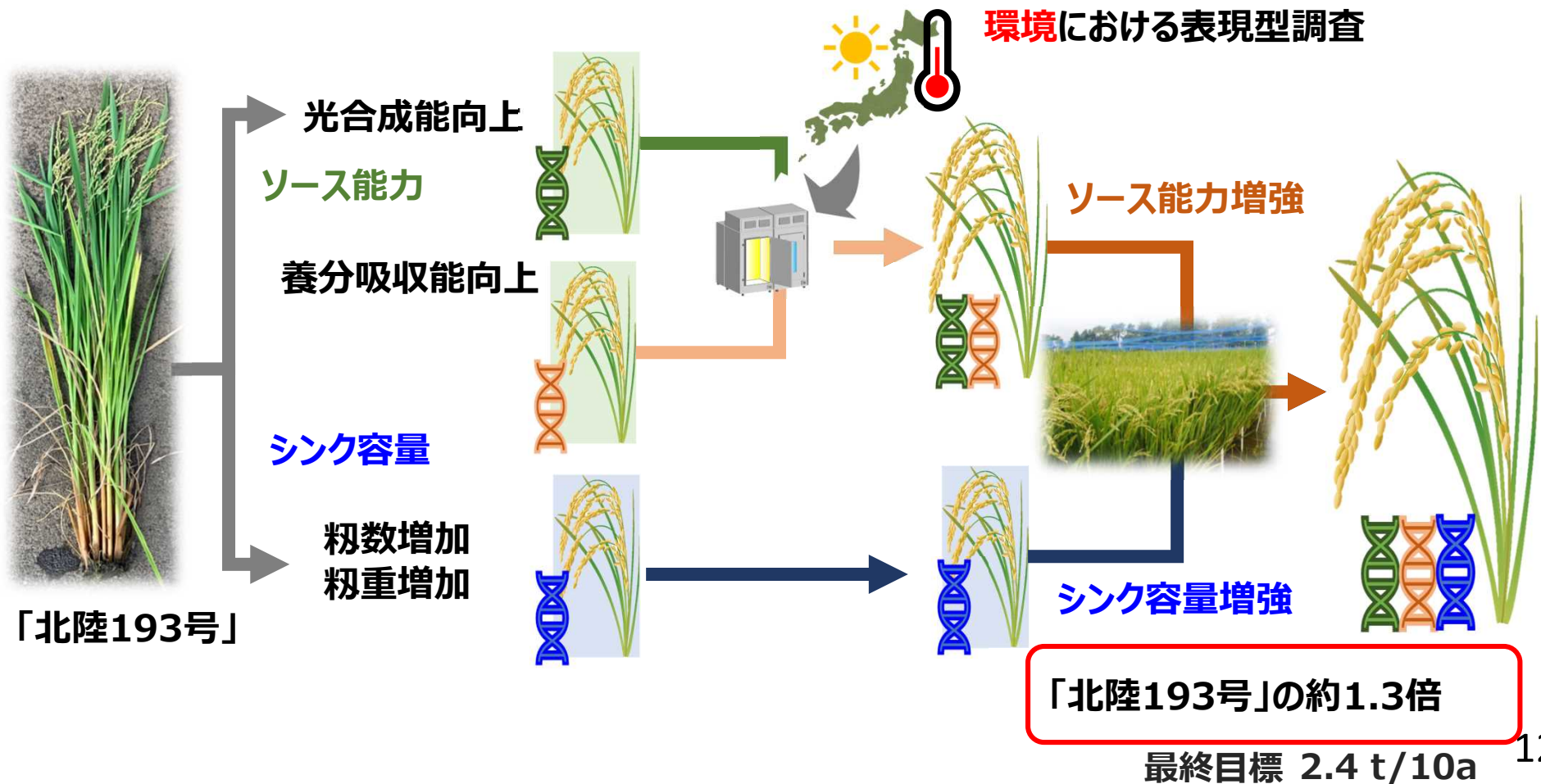
(2022-2024 : FS期間)

(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



スーパー-DACトウモロコシの開発

(現状)

(2022-2024 : FS期間)

(2025-2030)



Mi29 *Zea nicaraguensis*

トウモロコシは湿害に弱い

耐湿性に優れたトウモロコシ近縁種 (テオシント)



複数のトウモロコシ自殖系統

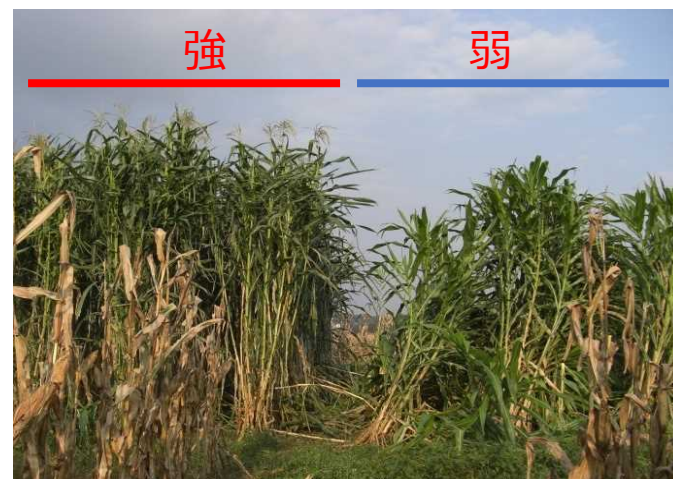
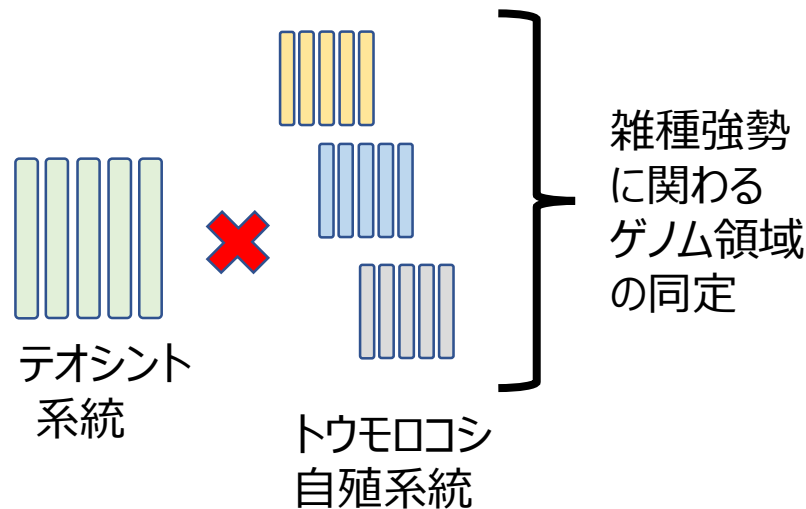


トウモロコシxテオシントのF1雑種作出



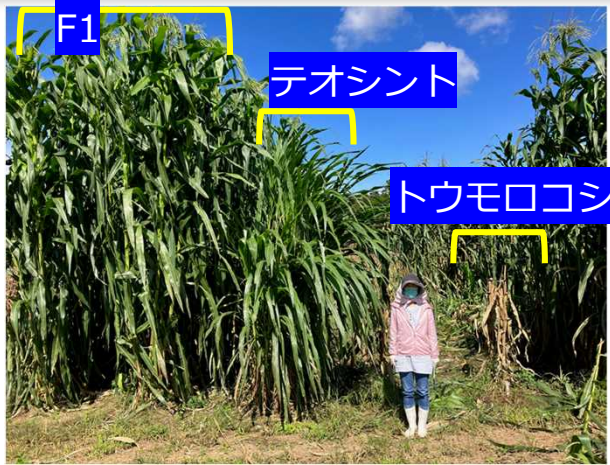
1m

トウモロコシ (茎葉バイオマス) の2倍



耐倒伏性等の付与

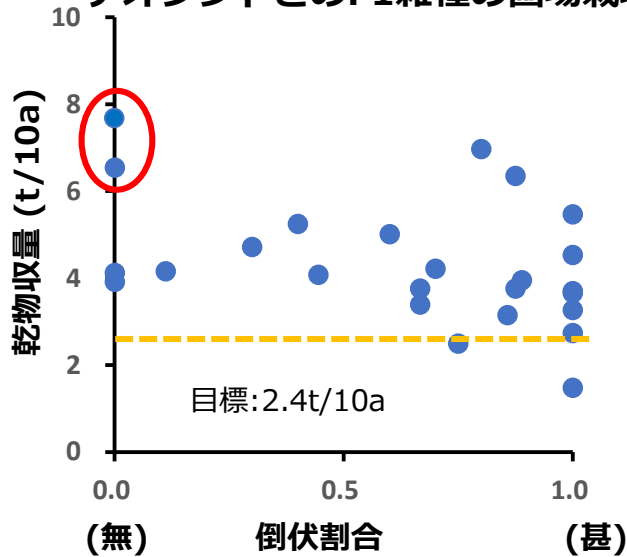
課題II. 作物バイオマスの増大による炭素固定に関する研究 スーパー-DACトウモロコシの開発



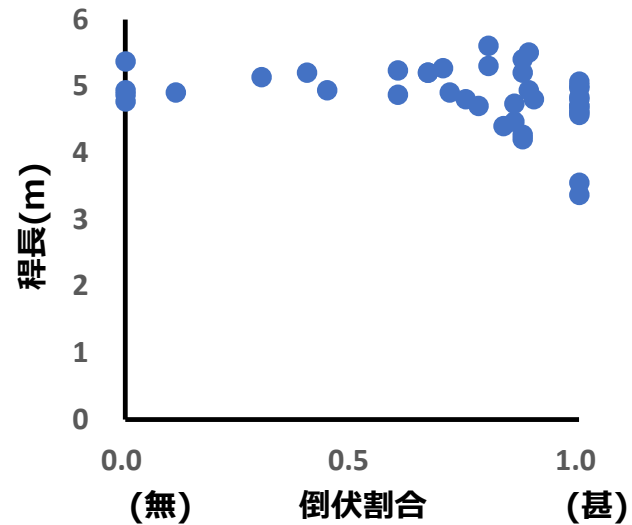
テオシントとのF1雑種の圃場栽培



倒伏割合の評価



倒伏割合と乾物収量 (上) および稈長 (下) との関係



- ・高収量で耐倒伏性が高い系統が複数得られた (赤丸)。
- ・多くの系統で目標収量の2.4t/10aを達成した。

(現状)

(2022-2024 : FS期間)

(2025-2030)

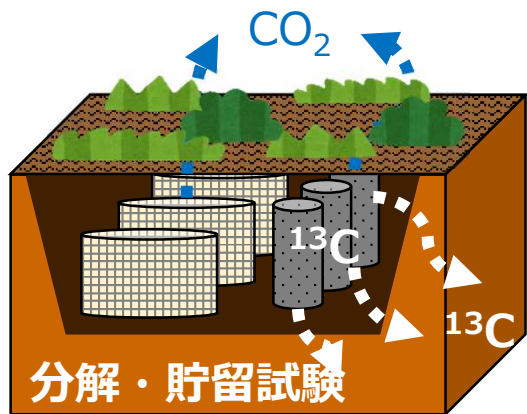
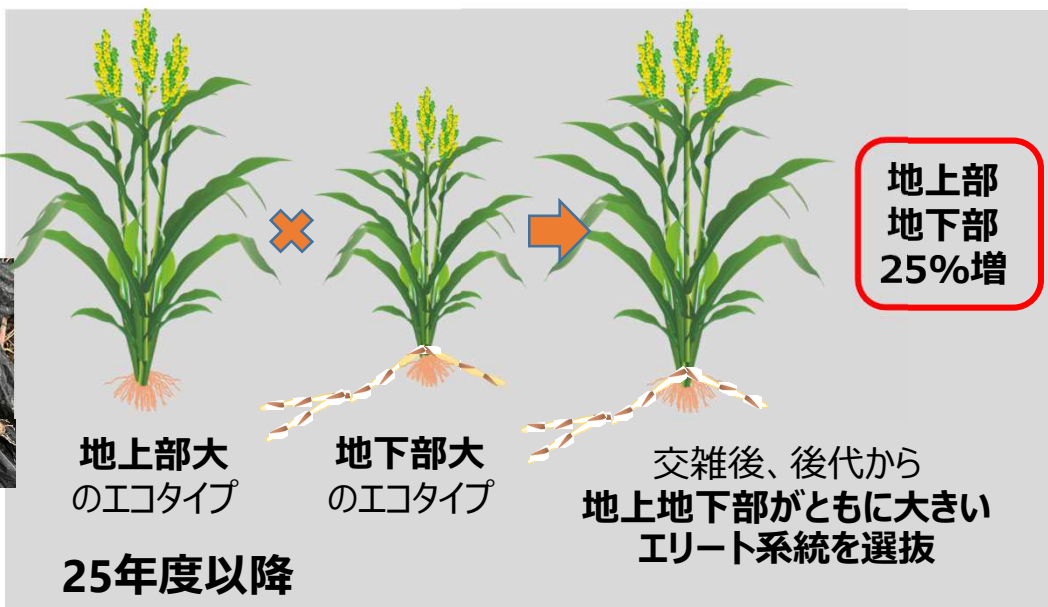


地下茎が発達するソルガム属植物



地下茎

エコタイプ
収集および
・地上部大
・地下部大
優良系選抜



地下部炭素固定量の評価

モデル推定



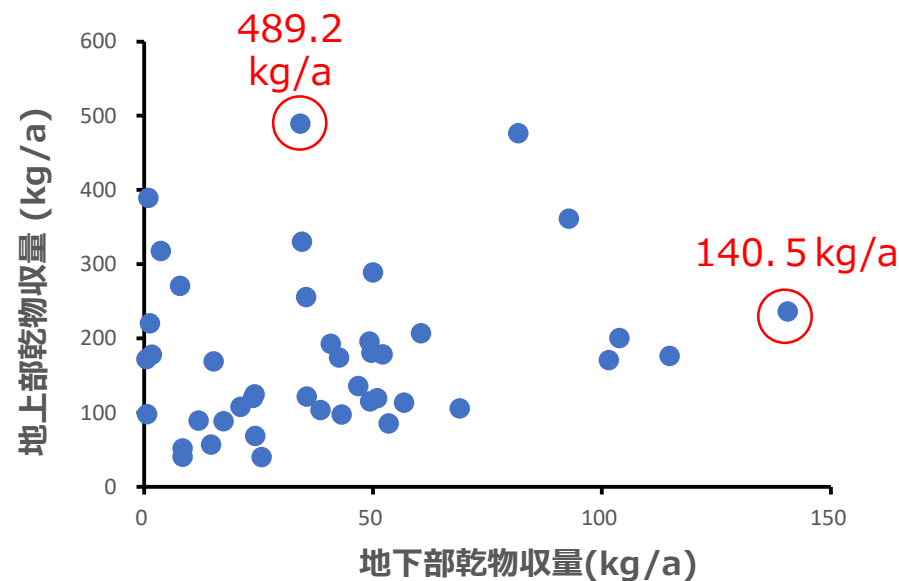
ネガティブエミッション技術の基礎データ取得

土壌炭素貯留に関わる作物形質の抽出

ジョンソングラスの多様性調査



収集したエコタイプ（ポット）に対して、地上部乾物収量と地下茎乾物収量を調査。

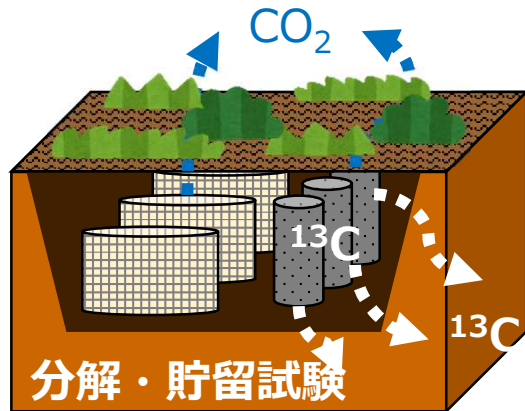


地上部収量
40.3~489.2 kg/a
平均; 181.8 kg/a

地下茎重
0.5~140.5 kg/a
平均; 40.4 kg/a

➡ 地上部と地下部に
多様な変異

土壌炭素貯留：作物部位の非標識残渣埋設実験



モデル推定



ネガティブエミッション技術の基礎データ取得

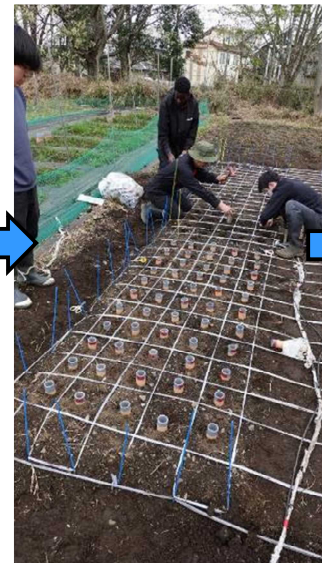
土壌炭素貯留に関わる作物形質の抽出

地下部炭素固定量の評価

トウモロコシ・
ソルガム・
オギススキの
葉、茎、根



深さ15cmまで埋設



C₃土壌にC₄残渣各種を混和して埋設・培養中（2023年3月末～）

土壌炭素貯留：作物部位の非標識残渣埋設実験

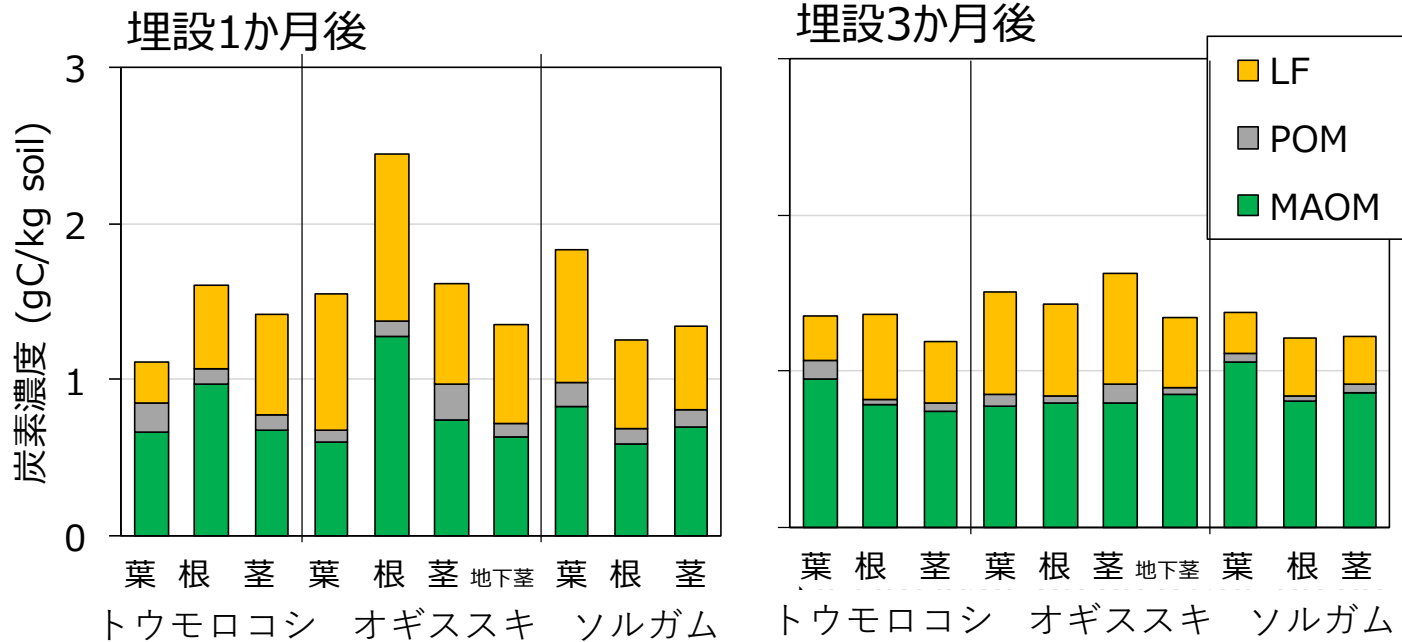
埋設した土壌
の分画

① LF (軽比重画分)
1.7 g cm^{-3}

② POM (粒子状有機物画分)
53~2000 μm

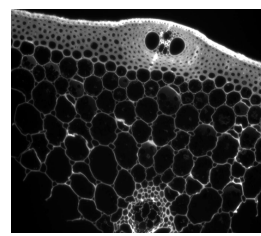
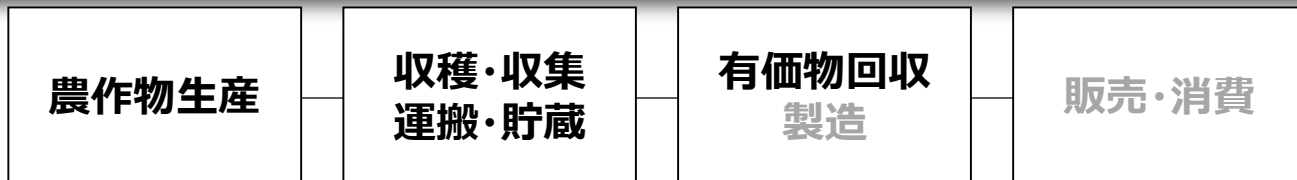
③ MAOM (重比重画分)
$53 \mu\text{m}$

乾燥後、画分ごとの重量割合、有機炭素を測定

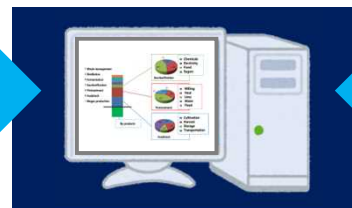


全ての残渣について、易分解性画分 (LF) の炭素が減少していることが確認された
一部は安定的な土壌画分 (MAOM) へ移行していると考えられる

資源利用シナリオ策定のための調査・解析



スーパーDAC作物の生産・調達
(調査・解析)



原料成分・構造特性、変換効率
(調査・解析)

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

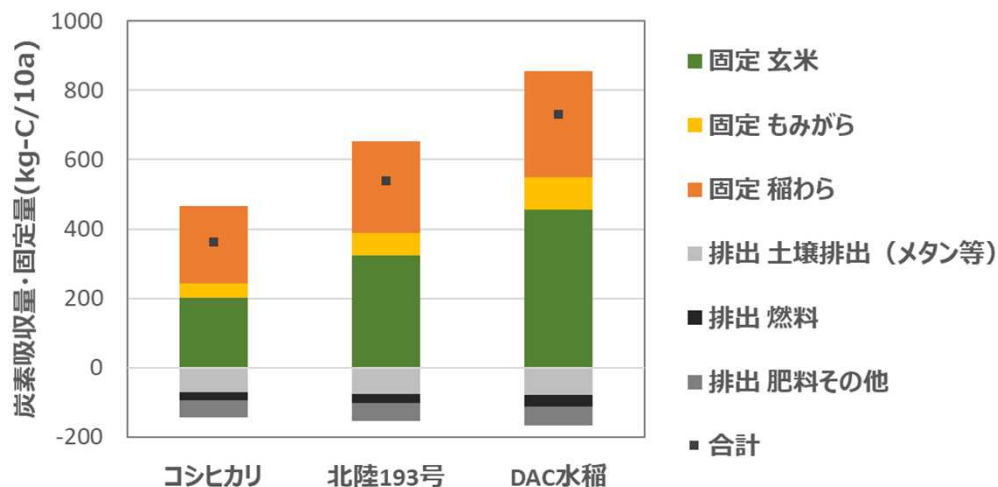
スーパーDAC作物からの資源利用技術を実証

2022 - 2024
: インパクト見極め

2025 - 2030
: 本格開発・加速

スーパーDAC水稲のDAC能力

栽培10aあたりの炭素固定量（試算値）の比較



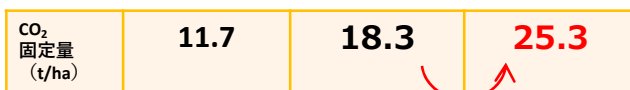
左記試算に用いた農作物バイオマス想定量

	コシヒカリ	北陸193号	スーパーDAC稲子実
子実（籾殻含） （玄米）	636 (530)	1020 (850)	1440 (1200)
茎葉	700	830	960

単位：kg/10a、籾・茎葉含水率15%

【参考】36～40年生のスギ人工林1ヘクタールが1年間に吸収する二酸化炭素の量は、約8.8トンと推定
 (https://www.rinya.maff.go.jp/j/sin_riyou/ondanka/20141113_topics2_2.html)

栽培1haあたりの炭素固定量の比較



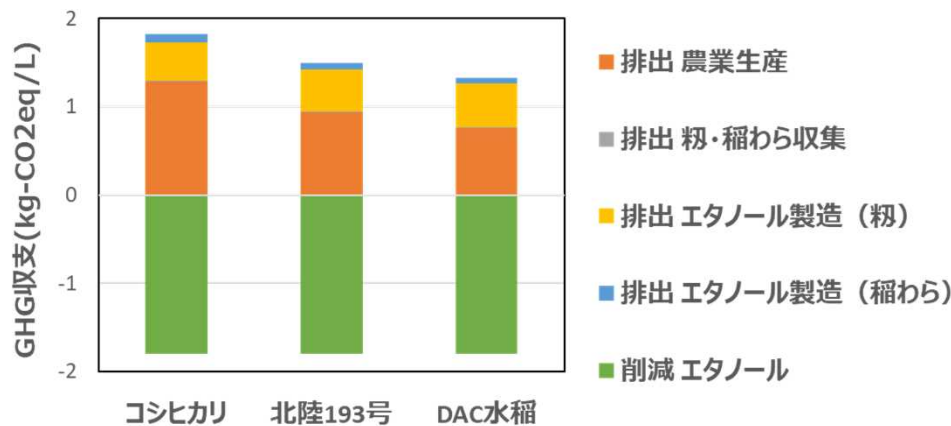
草の強みをさらに強化！

7トン-CO₂/ha

スーパーDAC水稲は25.3トン/haのCO₂を吸収できるものと期待。

子実&茎葉→エタノール

製造エタノール 1 LあたりのGHG収支



エタノール製造・利用した際のGHG収支 (栽培規模6万ha)

	コシヒカリ	北陸193号	DAC水稲
CO2排出 (t/6万ha)	0.026Mt 増加	0.111Mt 削減	0.227Mt 削減
エタノール製造 (kL/6万ha)	24.8万	36.1万	48.2万

(Mt = 10⁶t)

【バイオ燃料として再注目されるエタノール】

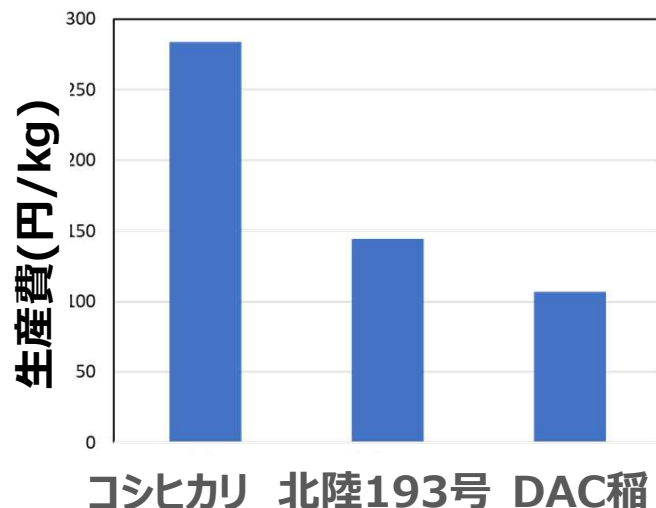
6万haでのスーパーDAC稲栽培
48万kL エタノール

収率50%と仮定 → **24万kL SAF**

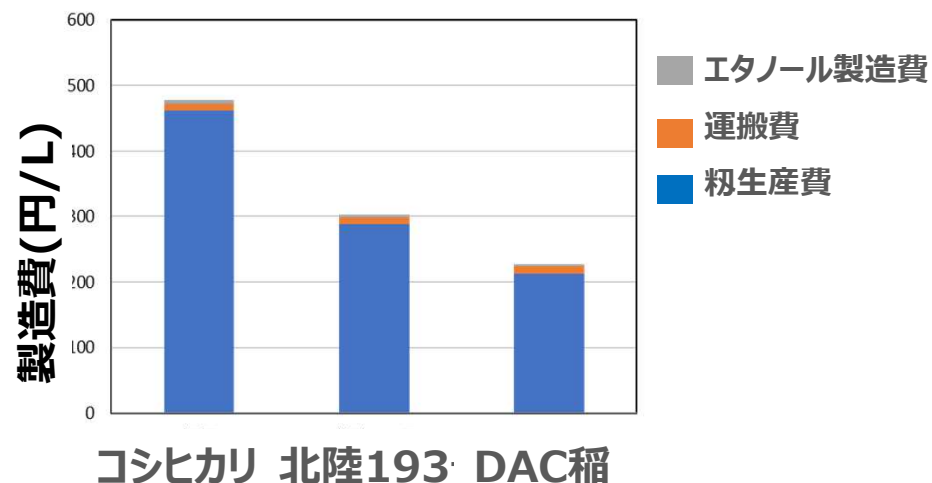
参考：2030年の国内SAF需要量 = 171万kL相当
 2030年までにバイオマスプラスチック200万トン導入

課題Ⅲ. DAC農業からの資源利用工程の経済価値および環境負荷の評価
水稲子実からのエタノール製造コスト試算結果

子実1kgの生産費



子実からのエタノール製造費
(6万ha規模)

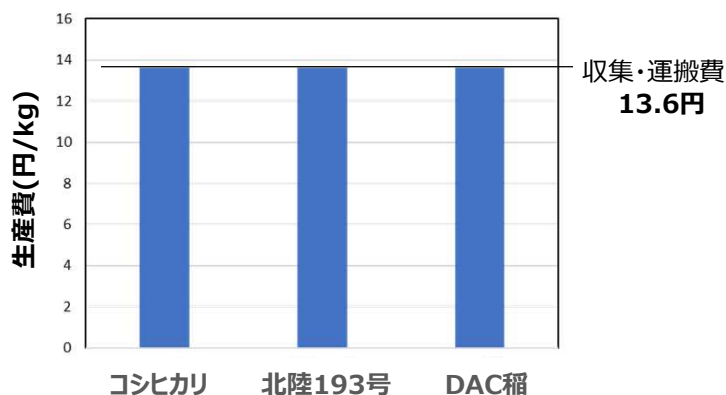


スーパーDAC水稲玄米生産費 = 107円/kg

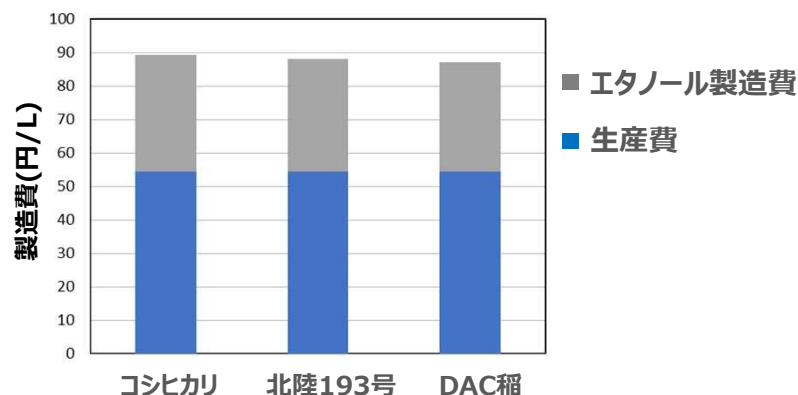
同玄米からのエタノール製造費 = 227円/L

③スーパーDAC水稲では、いくらでエタノール製造できる？（茎葉）

稲わら1kgの生産費



稲わらからのエタノール製造費（6万ha規模）



スーパーDAC水稲からのエタノール製造時における各試算値

スーパーDAC作物	部位	原料費 (円/kg)	各原料からの製造 (kL/6万ha規模)	エタノール製造コスト (円/L)
水稲	子実	107	36.0万	227
	茎葉	13.6	12.2万	87.0

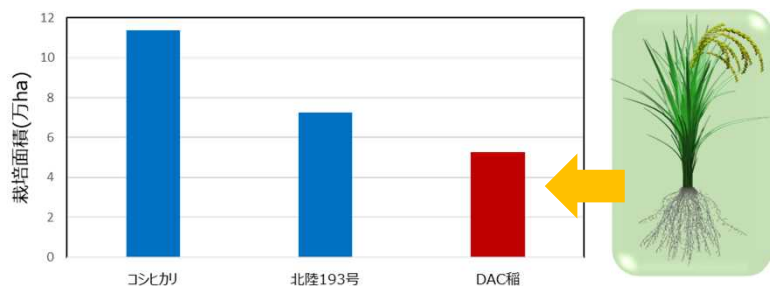
課題Ⅲ. DAC農業からの資源利用工程の経済価値および環境負荷の評価

DAC農業による炭素固定・利用方法の特徴

Impact!

DAC農業（水稲）の特徴

133万トンCO₂回収に必要な水田面積



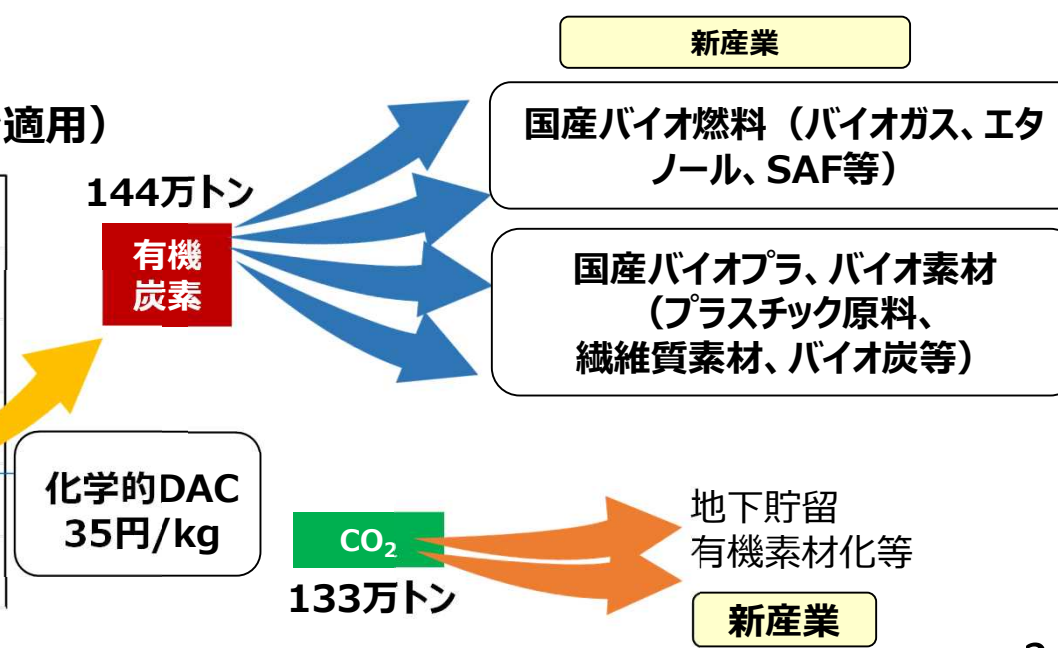
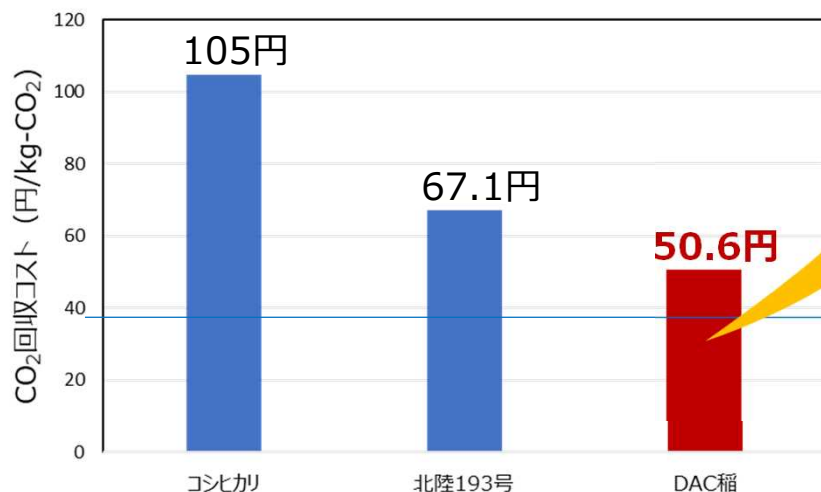
比較 **化学的DACプロセス**

固定量：133万トンCO₂/年
 国内総建設費1,230億円
 国内コスト試算値35円/kg-CO₂
 設備敷地面積6.9ha

【参考】国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター（令和2年2月）「低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書 二酸化炭素のDirect Air Capture (DAC)法のコストと評価」<https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2019-pp-07.pdf>

11.4万ha→7.3万ha→5.3万ha

CO₂回収コスト（6万ha規模での試算値を適用）



2050年までに目指すべき農業の姿 (DAC農業)

