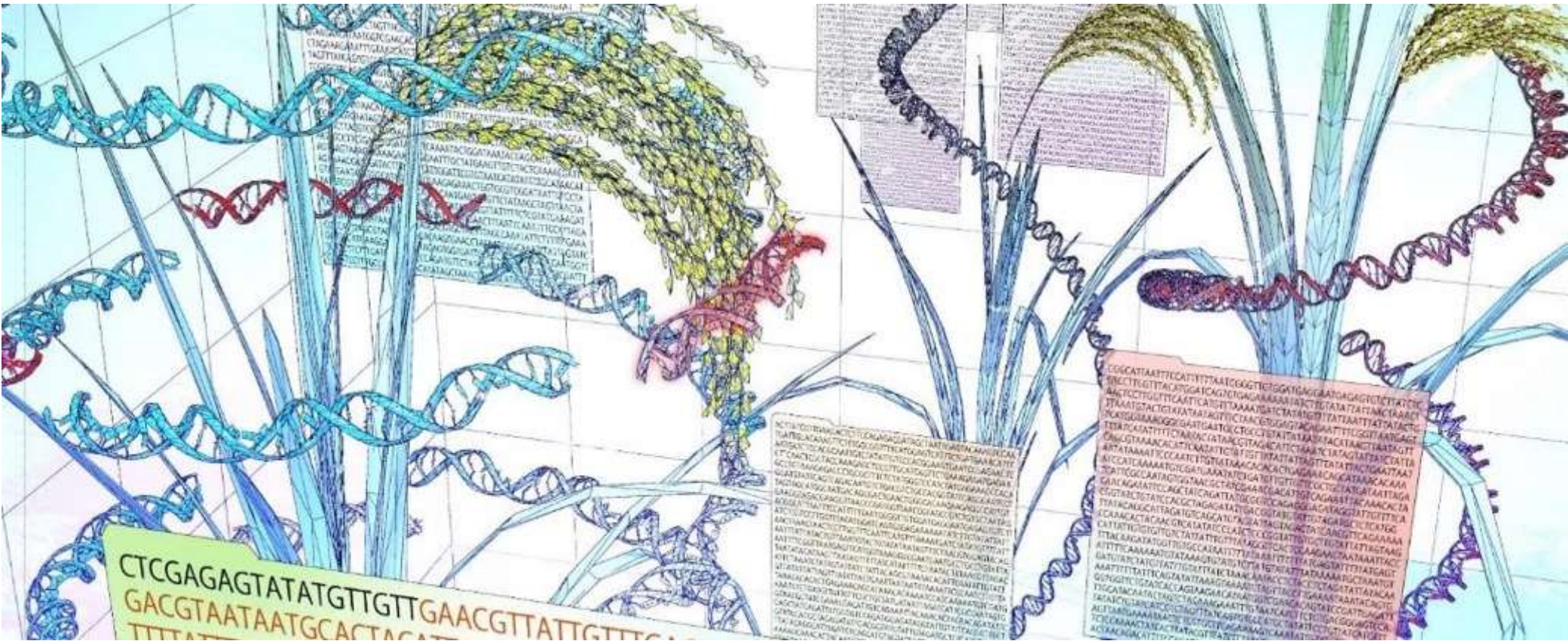


# サイバーフィジカルシステムを利用した 作物強靱化による食料リスクゼロの実現



プロジェクトマネージャー 藤原 徹 (東京大学 教授)

# 本日のお話

## 私たちのプロジェクトについて

- 1, 何が問題か。
- 2, 何を目指すか。
- 3, どうしてできなかつたのか  
そして何を計画したのか。
- 4, どこまでできたか。
- 5, これから何ができるか。



# おかしくなっている！

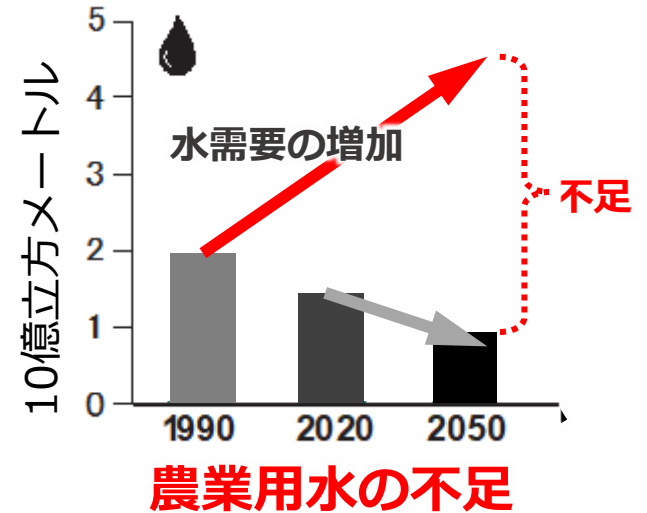
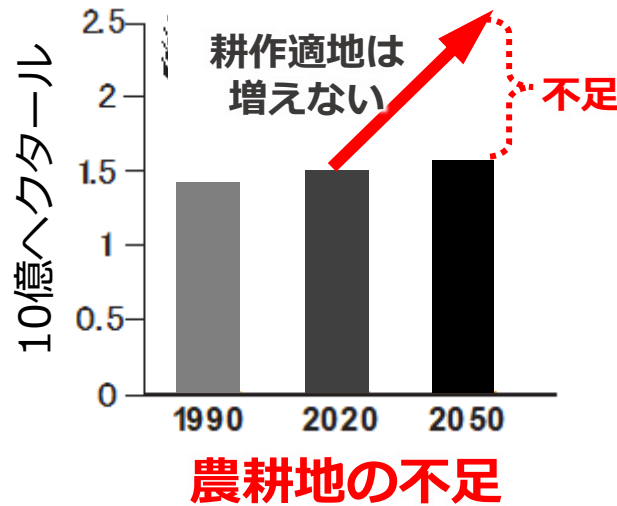
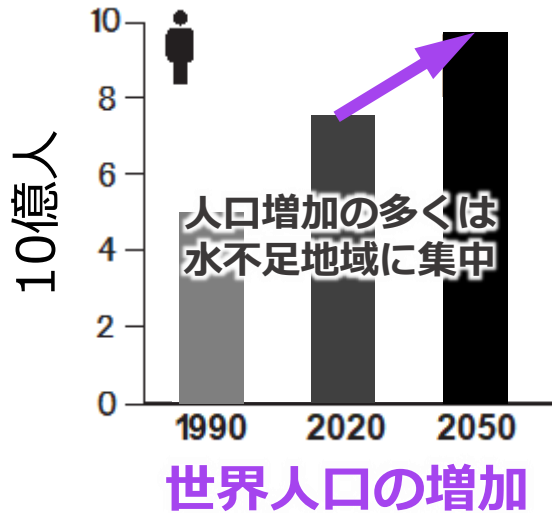
欧州の熱波、ポストガル山火事 7月16日 CNN

各地で洪水 最上川 7月28日



# 1. 何が問題か 1

今のままでは、2050年の世界人口を支えるだけの食料を生産できない

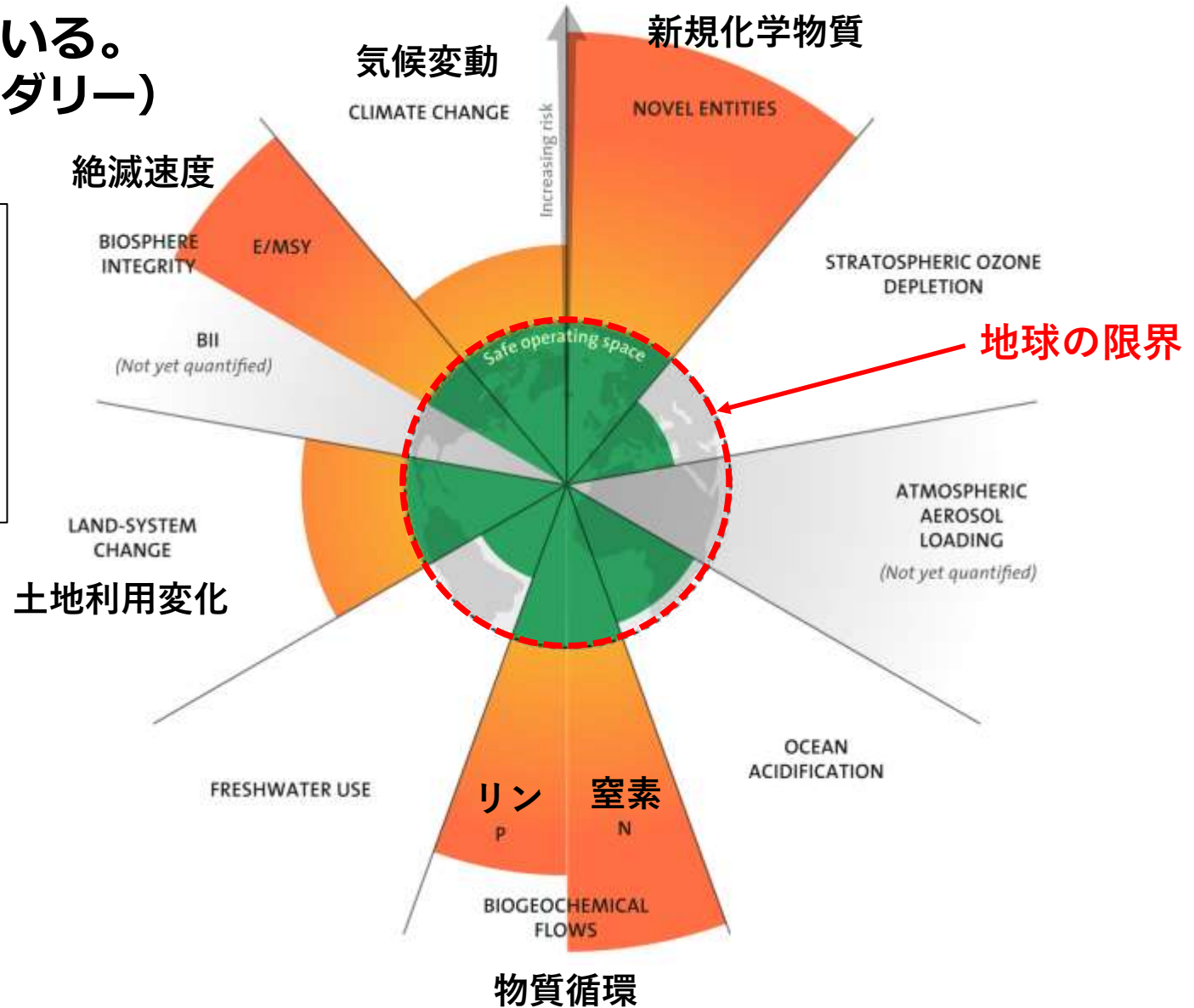


食糧危機が世界中で起こる可能性

# 1. 何が問題か 2

地球の限界が近づいている。  
(プラネタリー・バウンダリー)

地球環境に影響を及ぼす9つの要因の中には、すでに安全に活動できる範囲を超えた要因がある。

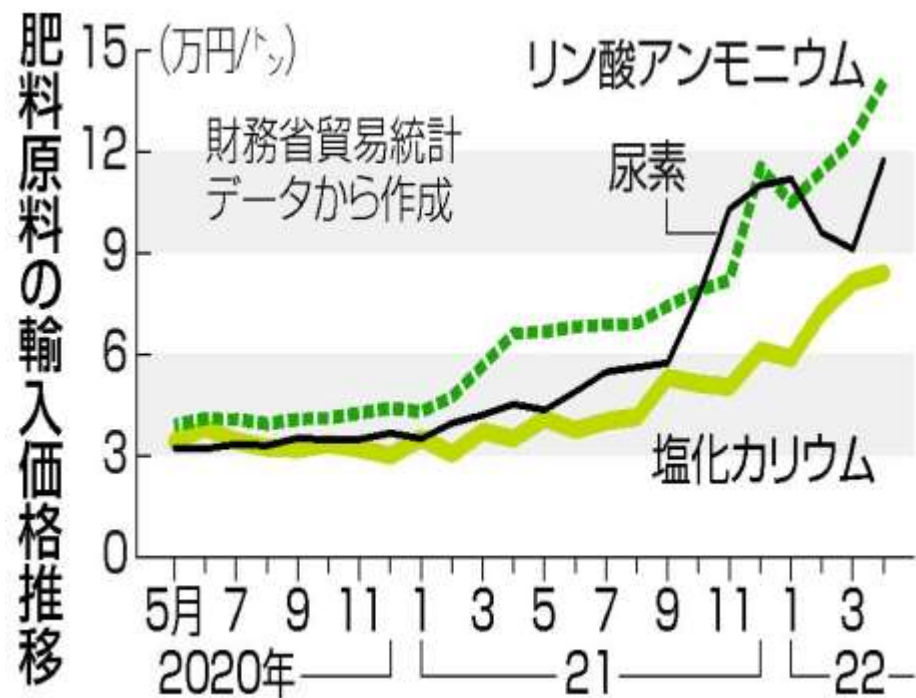




# 1. 何が問題か 3

## 肥料最高値、農家を直撃 政府・与党、新たな補助金検討

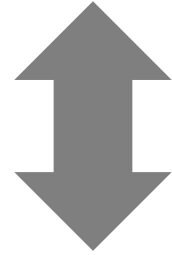
JII.COM 2022年06月02日09時56分



肥料の販売価格が高騰し、農家経営への影響が避けられそうにない。全国農業協同組合連合会（JA全農）は6月から大幅値上げに踏み切り、主要品目が過去最高値を更新した。ロシアのウクライナ侵攻で、肥料の原料となる窒素などの産出量が多い両国からの輸出が停滞し、国際市況が高騰したことなどが原因。今後も高値圏での推移が続くとみられ、政府・与党は新たな補助金制度の検討に入った。

# 1. 何が問題か 4

人口増加に見合う食料増産の必要性

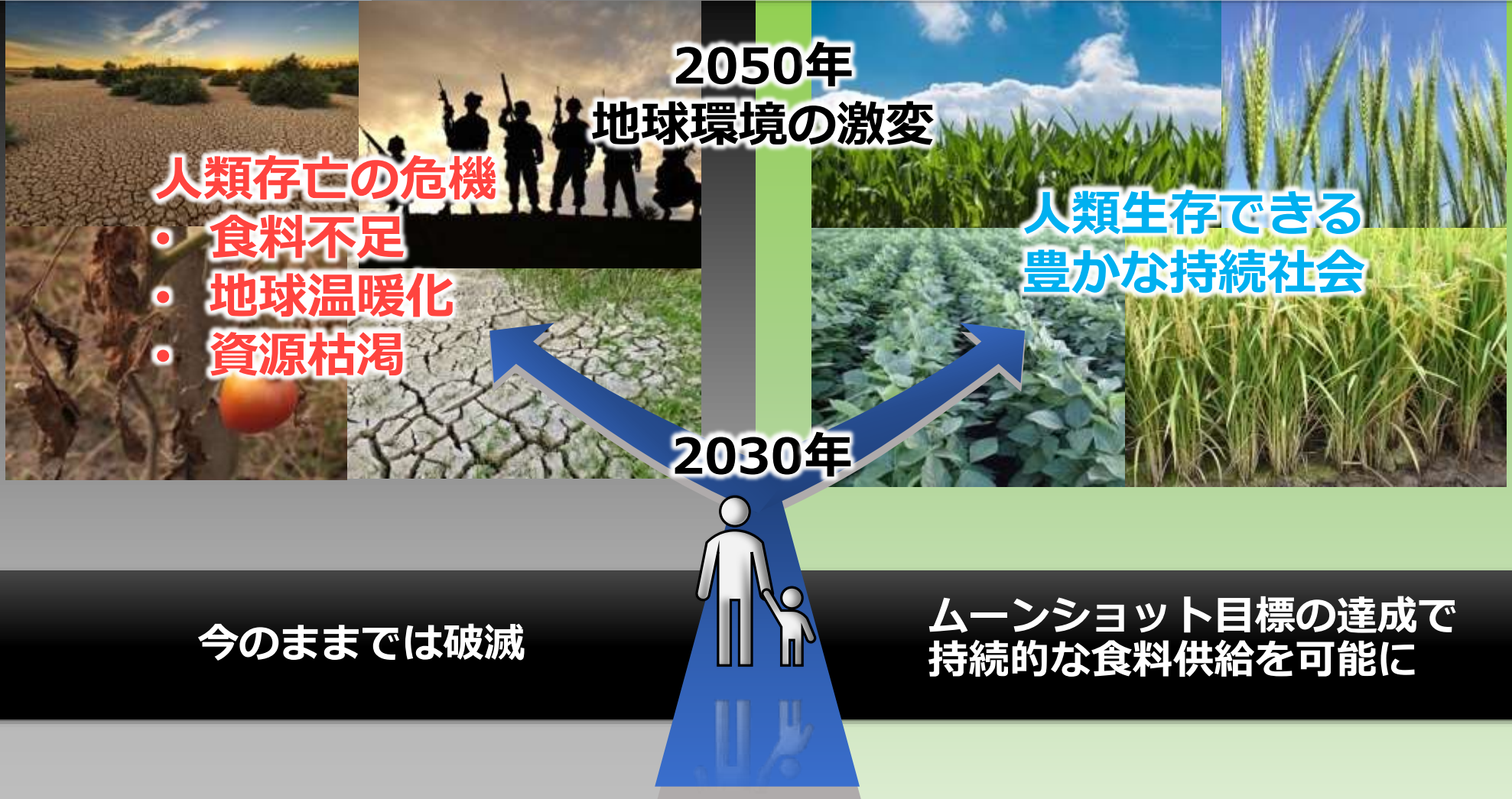


- **必要な資源（水、肥料、土地）が不足**
- **気候変動や社会情勢の影響を大きく受ける**

**気候変動に強く、環境に影響を与えにくい作物を  
迅速に開発することが必要。**

# 2. 何を目指すか 1

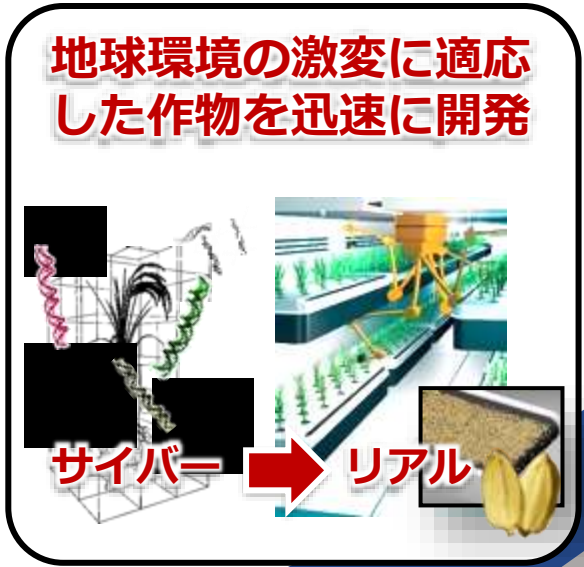
2030年までが、食料危機が起こるかどうかの分岐点





# 2、何を目指すか 2

イネ・ムギ・ダイズを中心に**環境変動に強く** かつ **少ない資源で栽培できる**作物を開発し持続可能な農業を実現する。



2020年 (MS始動)

2030年までに  
MS目標達成

2050年  
(豊かな社会)

### 3. なぜできなかったのか。

限られた植物しか  
利用していない

遺伝子の機能の  
情報が不十分

思い通りの品種を  
迅速に開発できない

多数の遺伝子を  
一度に改良できない

# 何を計画したか 1 未利用の植物の利用と遺伝子情報集積

Hunter et al. (2019) Planta 250:709-729より



栽培化

近代育種



主食になった作物はごく一部

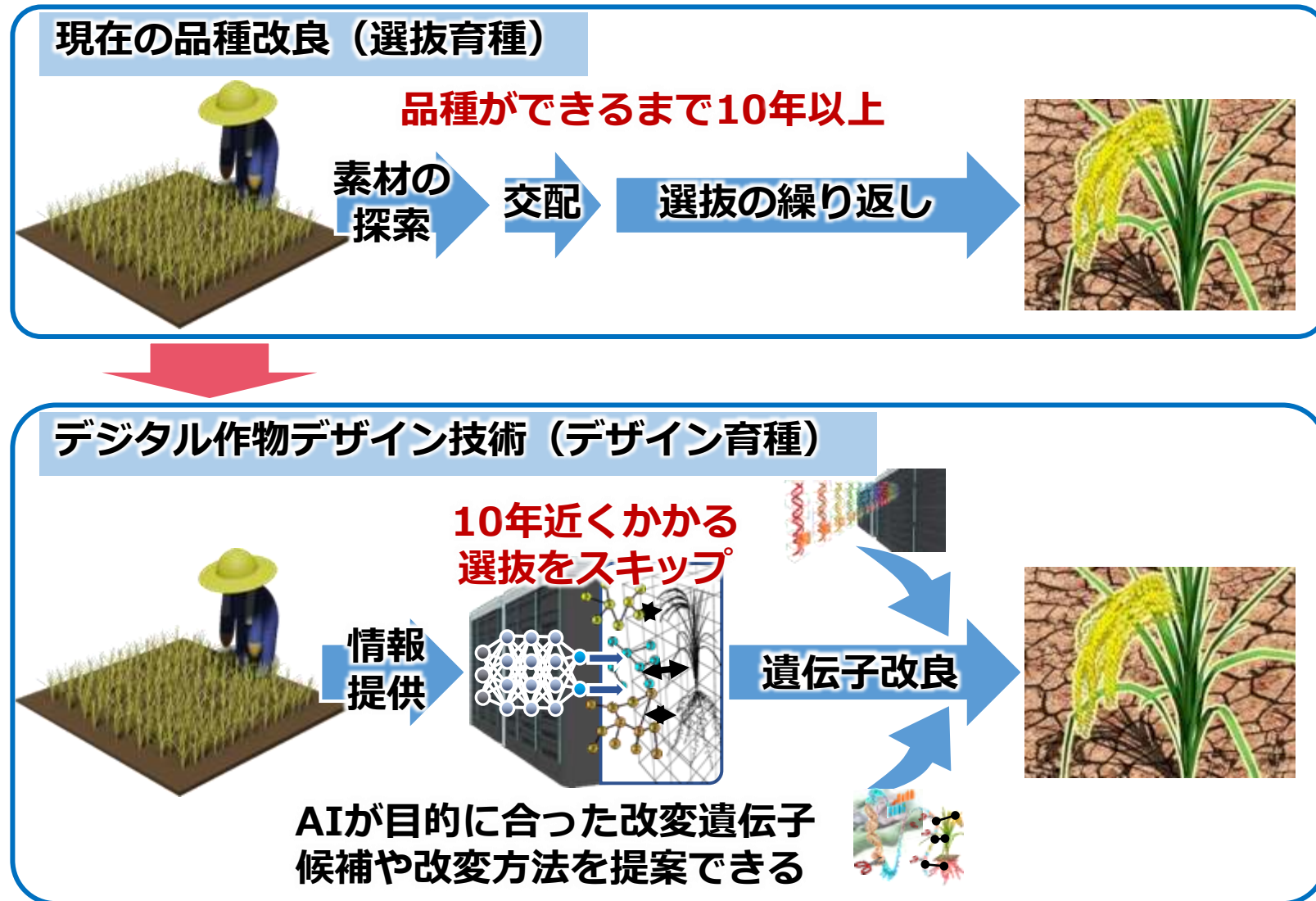


環境ストレスに強い未利用の野生植物などを研究対象に重要な遺伝子を見出す。



# 何を計画したか2 作物をデザインする。

多様な作物種で、AIによる目的に合った改変遺伝子や改変方法の提案

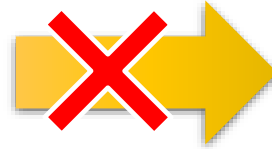


# 何を計画したか3 ゲノムを自由に変える。

少数の遺伝子の利用だけでは環境の激変に耐えきれない。

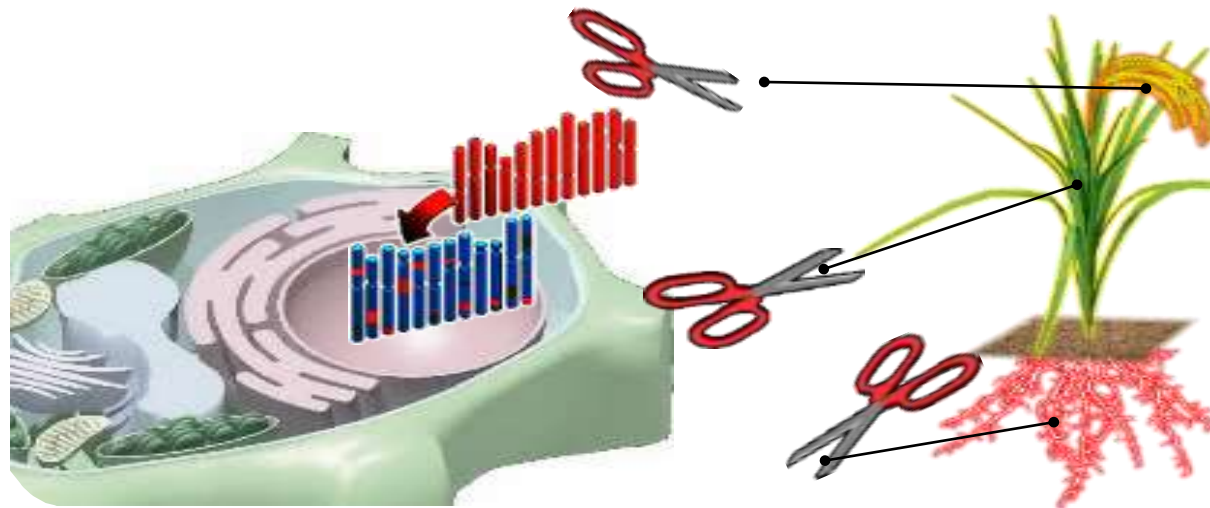


1か月水がなくても育つイネ  
(右側：*DRO1*遺伝子)



強烈な干ばつ下的水田

## 多数の遺伝子を正確に変える技術を開発



# 3、何を計画したのか：全体像

野生植物等未利用な遺伝子群を使って、劣悪環境下でも少ない資源投入で生育可能な作物をデザイン。デザインに基づき、多数の遺伝子を正確に改変し、強靱な作物を迅速に作出する。

## 課題 4

### 「情報技術」

有用遺伝子と  
ゲノム情報の整理

## 課題 3

### 「製造・組立て技術」

ゲノム多領域  
同時改変技術

## 課題 2

### 「デザイン技術」

環境ストレス下の  
遺伝子発現データの集積

サイバー空間での  
作物デザイン

## 課題 1

### 「部品化技術」

野生植物の  
環境適応力の解明

有用遺伝子の  
機能解明

2050年

豊かな社会

食料リスクゼロ  
の実現

- ・ 迅速で的確な作物育種
- ・ 気候変動適応型作物の創出（干ばつ、貧栄養、塩害、高温の克服）



# 3. 何を計画したのか:具体的に誰がやるのか

## 部品化技術

**課題1 作物強靱化**



- ・イネ、コムギ、ダイズ野生種の収集と評価
- ・厳しい環境に耐える未利用植物の収集と評価
- ・高度なストレス耐性を可能にする有用遺伝子の同定

イネ、コムギ、ダイズ  
素材提供

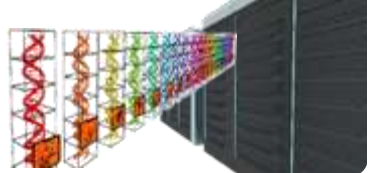
蓄積 **情報技術** 提供

**既存の強靱化遺伝子情報**

- ・ 遺伝子発現情報
- ・ 文献情報

収集


**課題4 作物有用遺伝子エンサイクロペディア**



- ・ 遺伝子発現情報の収集と整理
- ・ 遺伝子発現ネットワーク解析ツールの開発

## デザイン技術

**課題2 デジタル作物デザイン**



- ・ 作物デザイン技術の開発
- ・ AI生育予測モデルの開発
- ・ 高精度表現型解析技術の開発

仕様書

学習

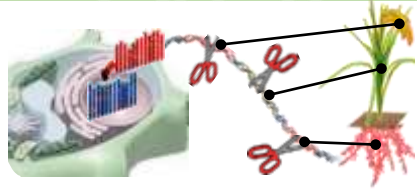
**課題2 評価**



栽培計測プラットフォーム

## 製造技術

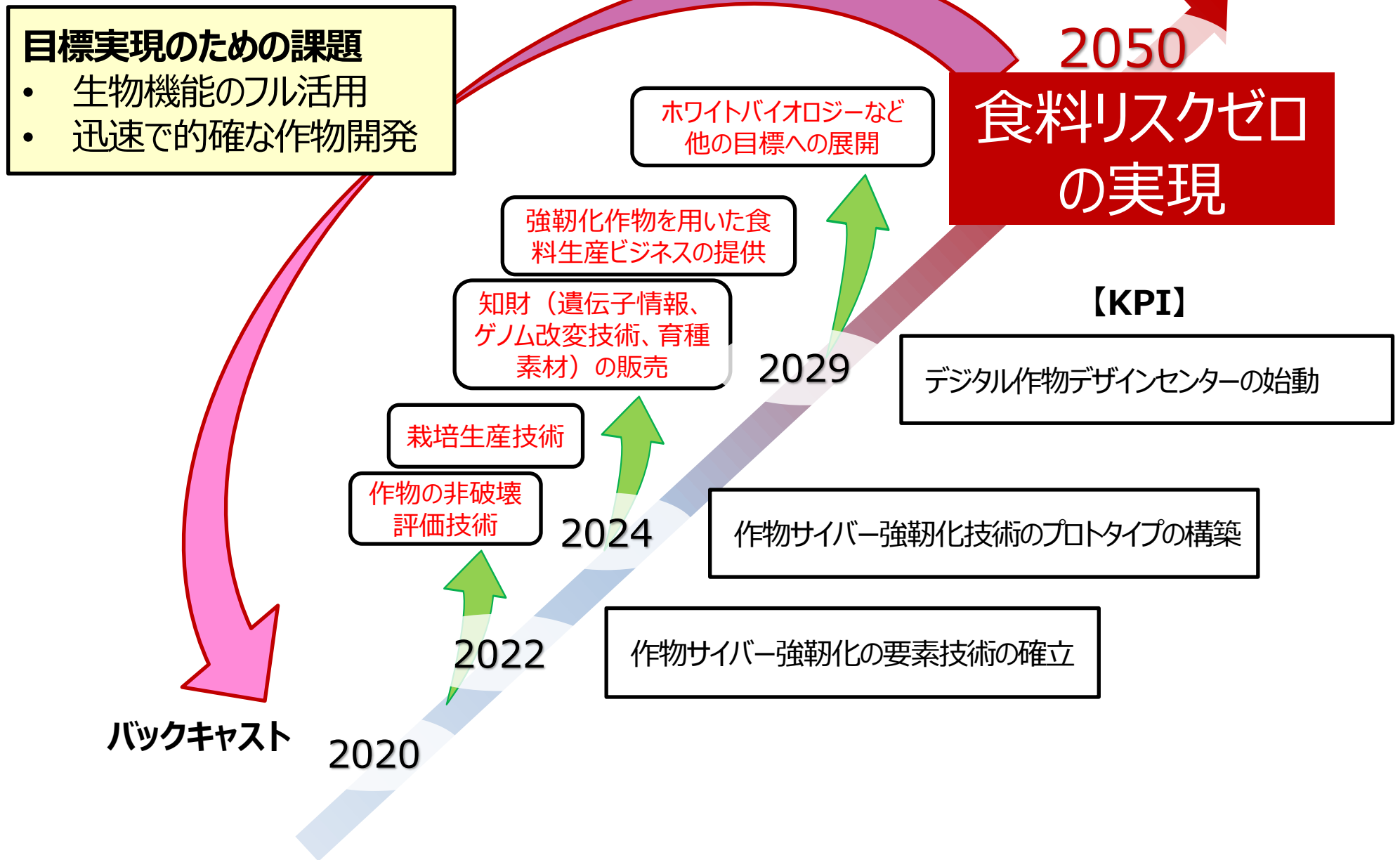
**課題3 ゲノム・ダイナミック改変**



- ・ ゲノム編集の効率化と高精度化
- ・ 多点同時改変技術の開発
- ・ ゲノム再編技術の開発

デザイン作物

# 3.何を計画したのか:年次計画はどうなっているのか。



**4, どこまでできたか**



# 未利用遺伝資源スーパー遺伝子の利用

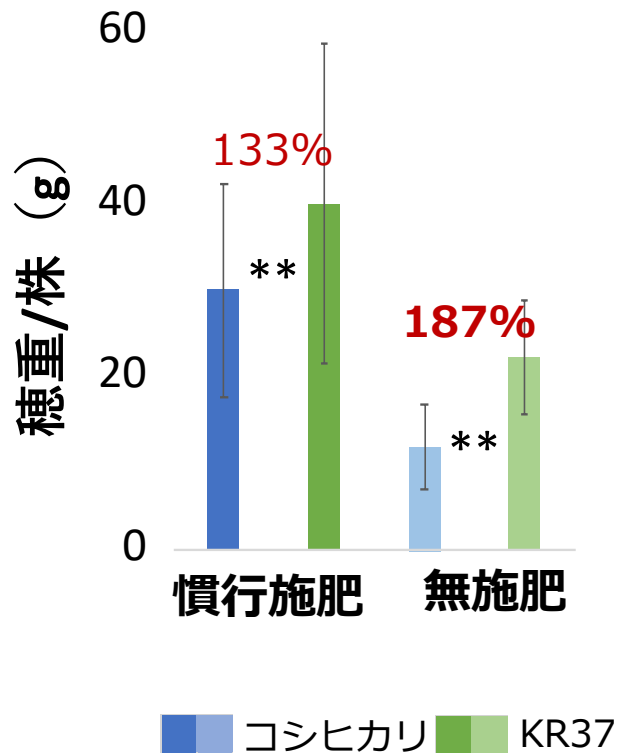
さまざまな環境で生育する未利用遺伝資源の有用遺伝子を見つける



# 進捗1 少ない栄養で育つイネ、ダイズの発見

強い栄養欠乏でも生育するシステムを  
イネ やダイズで取得し、遺伝子を推定

滋賀県立大学 圃場栽培 (n=17~26)



窒素十分

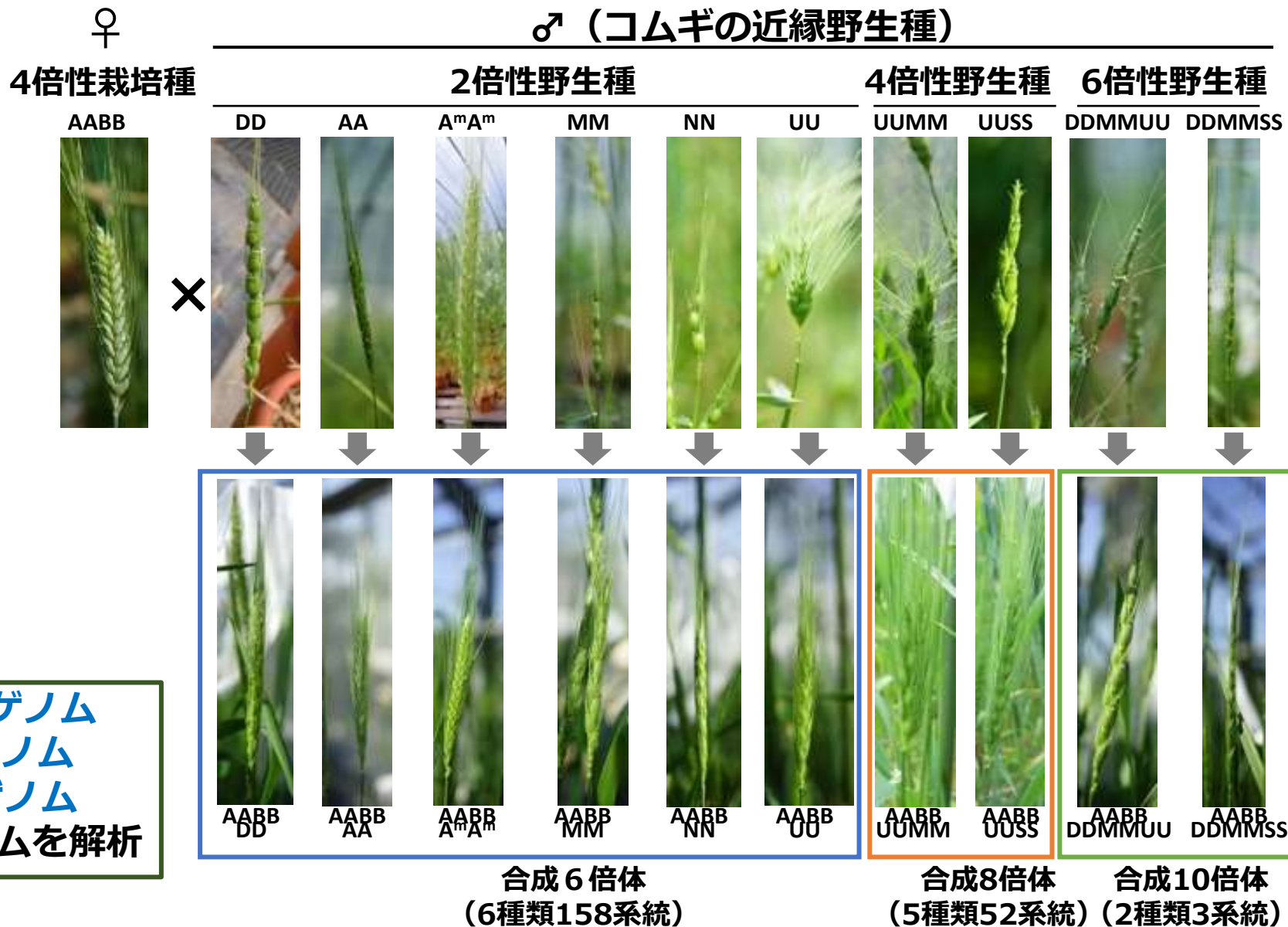


窒素4分の1



# 進捗2 野生コムギのゲノムを栽培種に導入

- 導入された野生種ゲノム：13種類
- 系統化された新規合成コムギ：213系統



# 進捗 3 栄養が少なくても収穫量が減らないイネ

イネの低栄養での収量維持には茎数（分けつ数）維持が必要

低栄養条件でも分けつ数を増加させることに成功

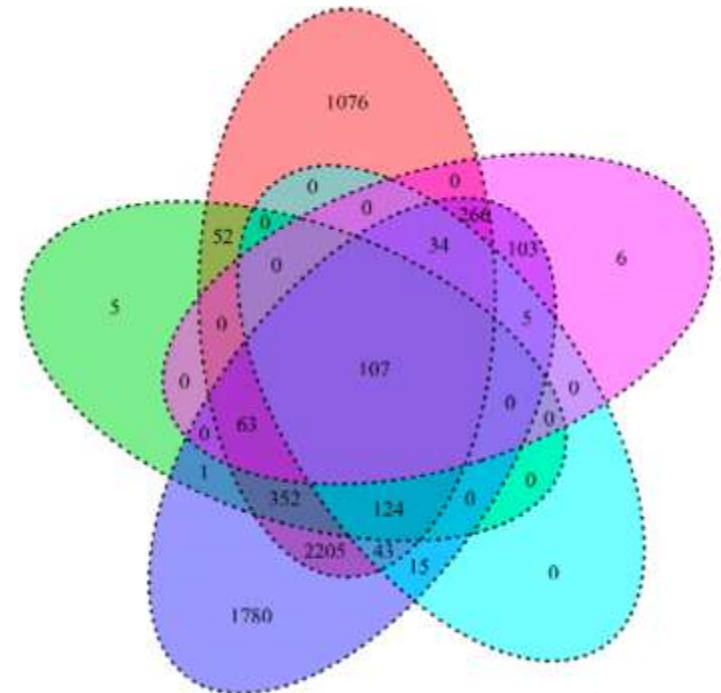
網羅的発現解析から有用遺伝子を同定



咲かないコシヒカリ 2021/11/25撮影

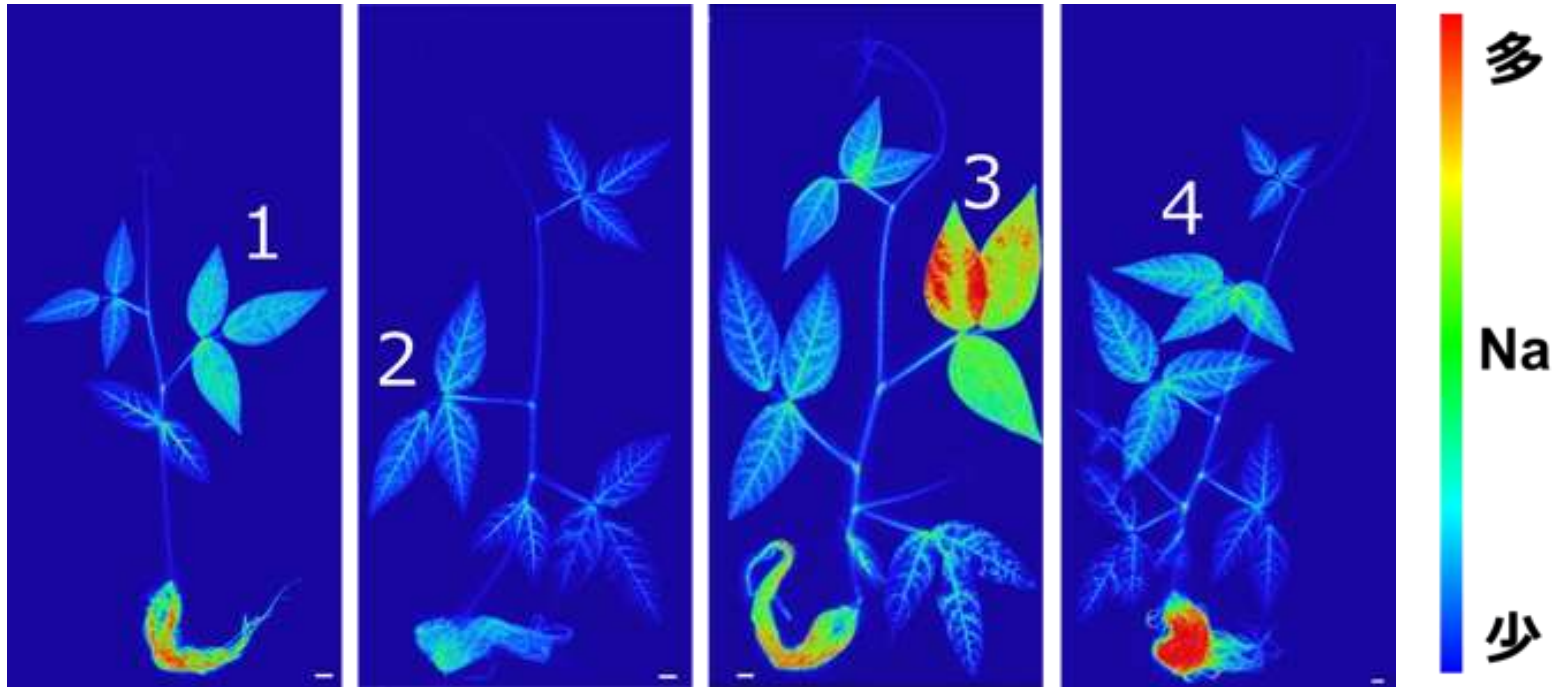


施肥応答性の分けつ制御遺伝子を用いた分けつ制御





## 進捗 4 葉を使ってナトリウムをためる新たな耐塩性機構



耐塩性のアズキ野生種 *Vigna luteola* は生育に伴いナトリウムを蓄積する葉を交代させることを発見（最上位完全展開葉にナトリウムを蓄積する）

**このシステムを駆動する遺伝子を発見。**

# 進捗 6 海水でのキヌアの栽培に成功

塩集積抑制遺伝子 *CqHKT1* を同定



0 M  
NaCl

0.2 M  
NaCl

0.4 M  
NaCl

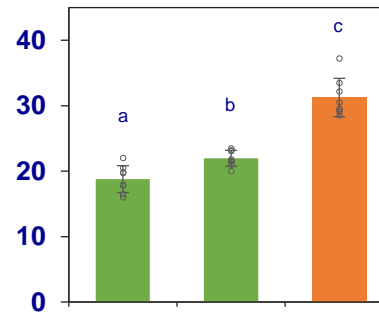
0.6 M  
NaCl

# 進捗 7 成長を制御する遺伝子 *CqRHT1* をキヌアで同定

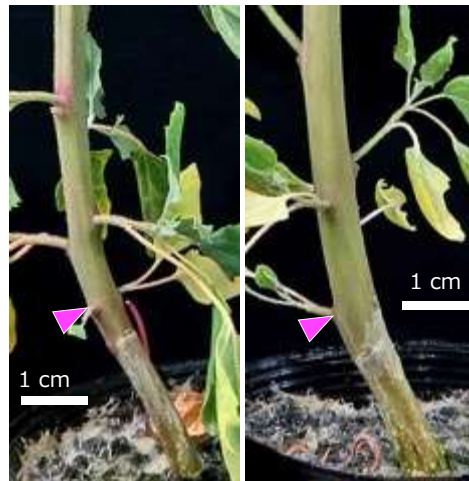
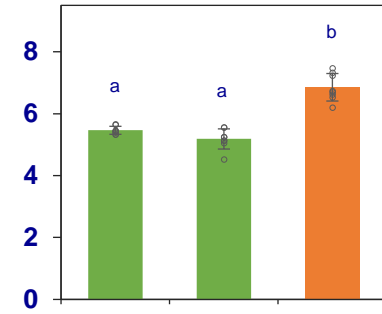
*CqRHT1* 遺伝子の発現を抑制すると  
キヌアの成長が促進される



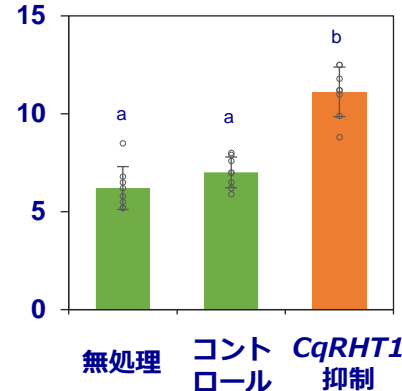
背丈 (cm)



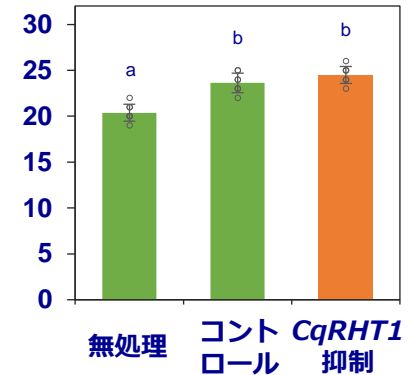
茎直径 (mm)



節間長 (cm)



節数



コントロール

*CqRHT1* 抑制



# 進捗 8 野生種にあるよくない遺伝子の除去

## 【不良形質の例】



このうち、  
植物体が大きくならず、また正常な種子が着粒しない**生育不全**  
に関わる**遺伝子**の解析に注力



解読された野生種ゲノム配列情報を使って、**生育不全に関わる**  
**遺伝子のゲノム領域を2.1Mbの範囲に絞り込むことに成功**



ゲノム切断遺伝子による除去へ



# 進捗 9 人工環境での作物の自動栽培計測が可能に (世界初)

外部仕様



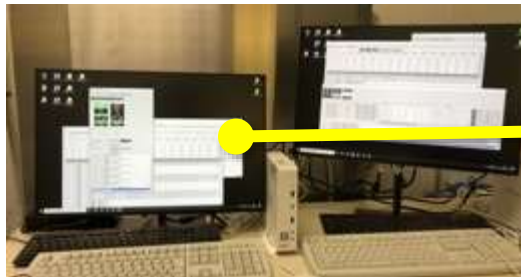
カメラ制御  
ユニット



栽培制御  
ユニット



環境計測  
システム

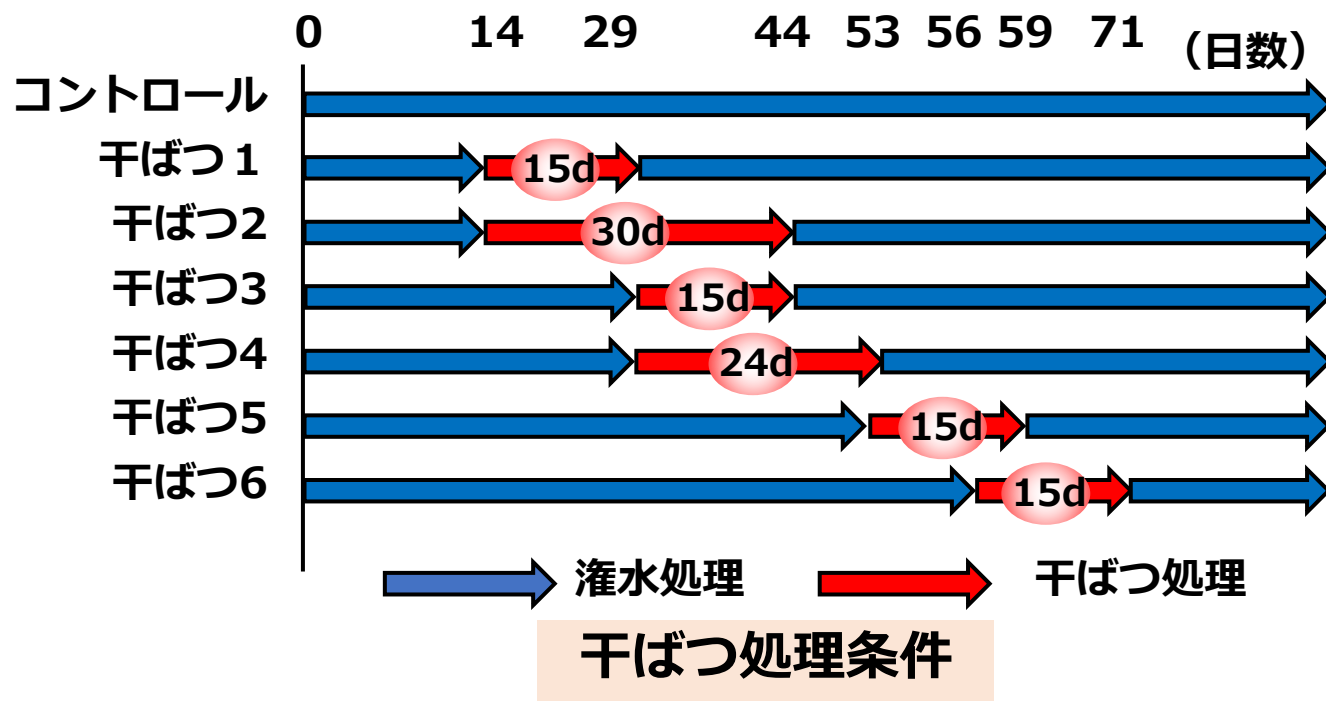


内部仕様

イネを栽培中の様子



# 進捗10：干ばつ条件での詳細な遺伝子発現データ取得



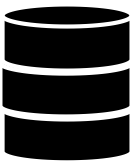
コントロール 干ばつ1 干ばつ2 干ばつ3 干ばつ4 干ばつ5 干ばつ6



# 進捗11：統計解析とネットワーク解析で重要遺伝子を選定

## ① 発現データの活用 (生育初期)

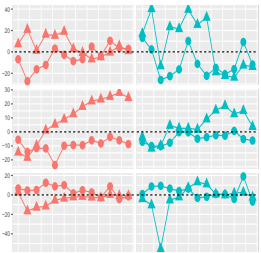
- 干ばつストレス下のイネのデータ
- 遺伝子発現：695点
- 生育値：624点



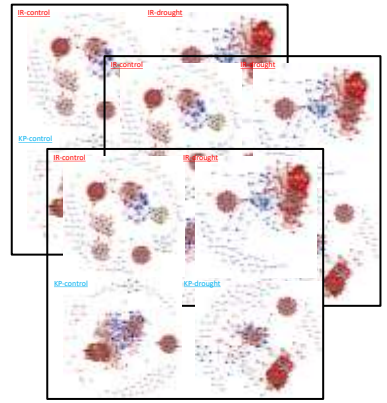
\*CREST  
「ROOTomicsを利用した環境レジリエント作物の創出」  
生物研・吉野花奈美博士より提供

## ② 遺伝子群と表現型の関連を検出

Surprisal analysisによる主働遺伝子群の推定

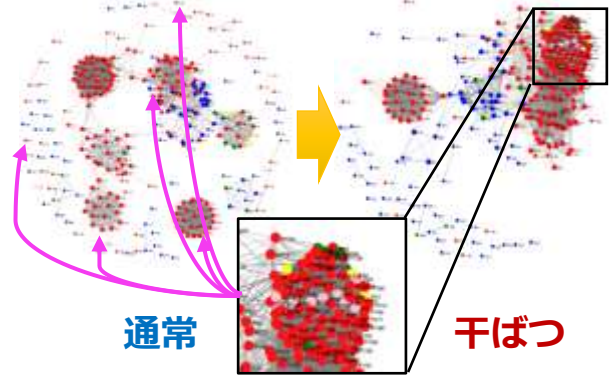


## ③ 共発現ネットワーク解析



## ④ 干ばつによりネットワーク構造が変化するハブ遺伝子の抽出

干ばつ耐性遺伝子の候補を14個選定することに成功





# 進捗12:各種非破壊計測技術の開発

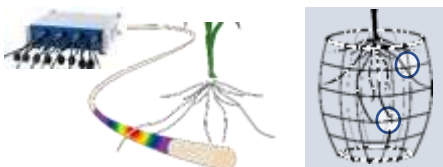
①マルチカメラ画像による  
ストレス状態の非破壊  
4D計測

RGB画像と遠赤画像の3D  
データの同時計測・統合技術を開発



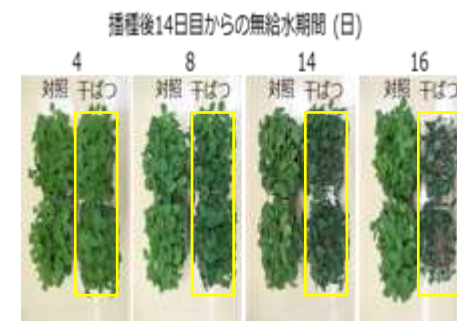
②光ファイバーセンシング  
による根の生長リアルタイム計測

地中のひずみを3次元で可  
視化するデバイスとプログラ  
ムを開発



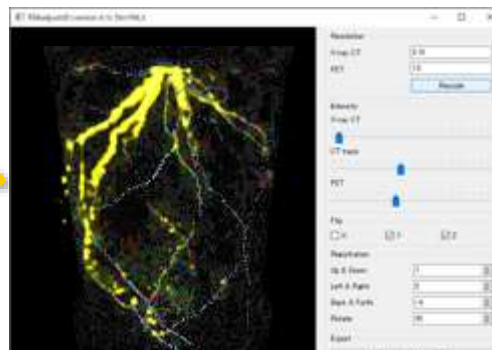
③植物からの放出化合物による生理状態可視化  
技術開発

BVOCs (生物起源揮発性有機化合物) の捕集分析システムの整備  
乾燥の進行に伴い増加するBVOCsを検出

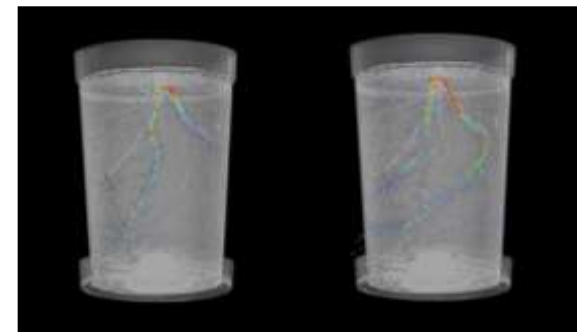


④PET-CTによる形態-生理状態イメージング技術開発

PET画像とX線CT画像の効率的な融合方法を構築



1サンプル数分で画像合成完成



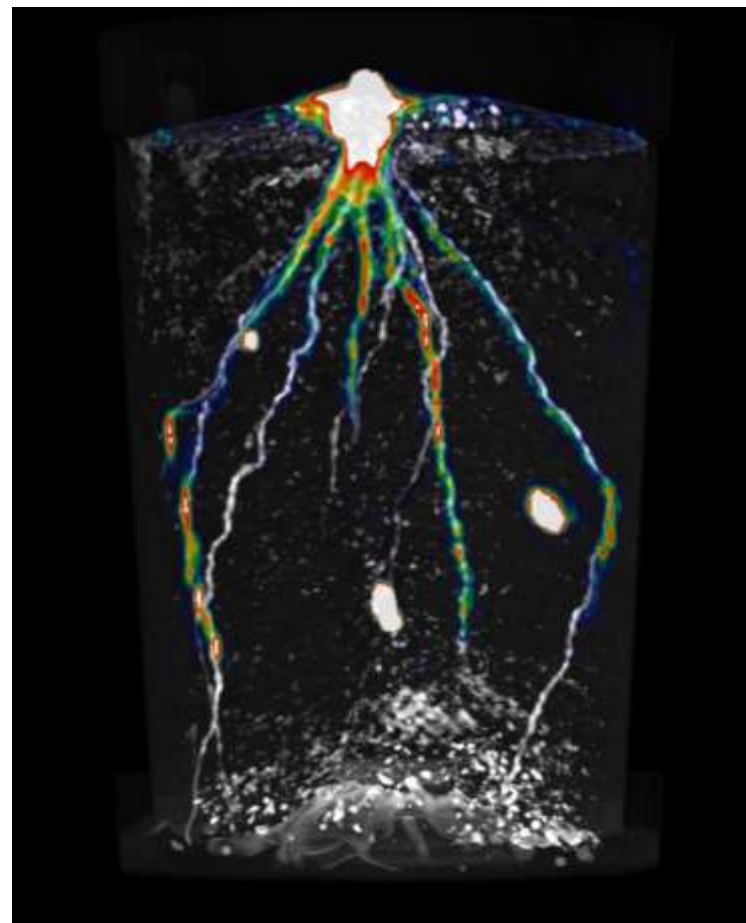
干ばつ  
ストレス

干ばつ  
ストレス回復



PET画像とCT画像の融合に成功し、  
炭素 ( $^{11}\text{C}$ :光合成産物) の根への転流を見える化した

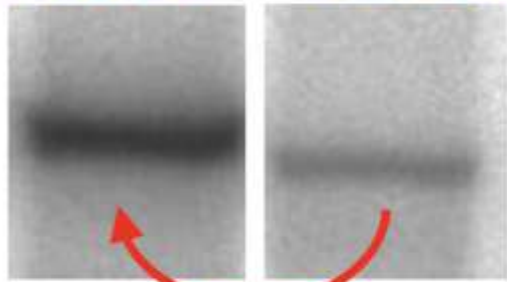
耐塩性や干ばつ耐性への品種改良において  
根の形質を評価することは極めて重要



# 進捗 1 3 : 多くの遺伝子の改変に使える強い polIIIプロモーターを開発

*in vitro* 転写 (タバコ)

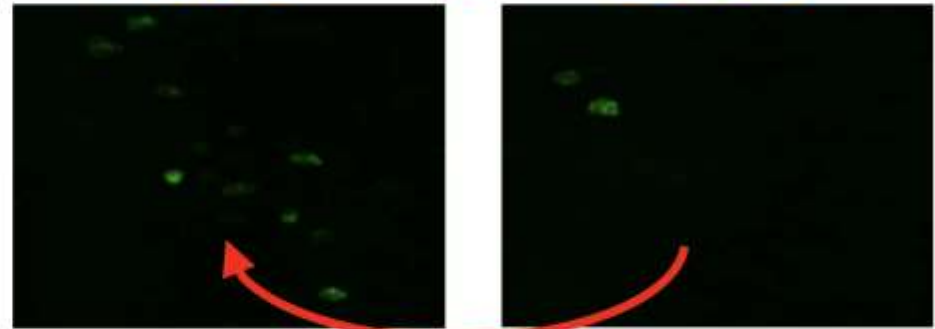
AtU6 > OsU6



× 6.7

*in vivo* 転写 (タマネギ)

AtU6 > OsU6



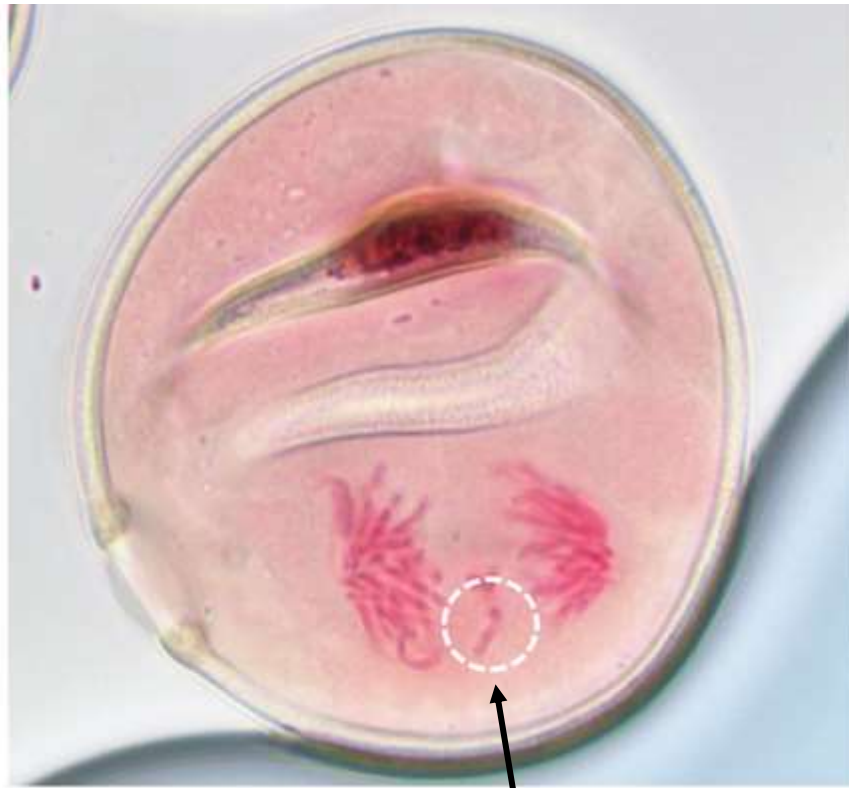
× 1.6 発現によるGFP蛍光の回復

シロイヌナズナのU6プロモーターが強力であることを発見。  
PolIIIプロモーターの強度を調べる世界に先駆けた研究成果

# 進捗 1 4 : ゲノム切断遺伝子の同定

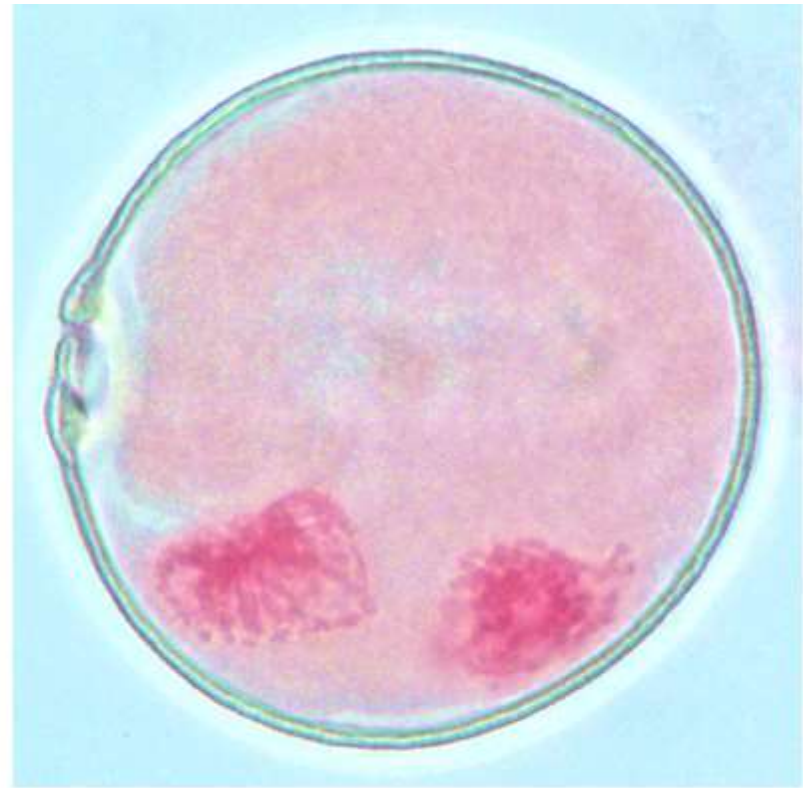
**ゲノム切断遺伝子を同定し、ゲノム切断を観察した**

候補遺伝子導入個体



切断されたゲノム断片

非導入個体

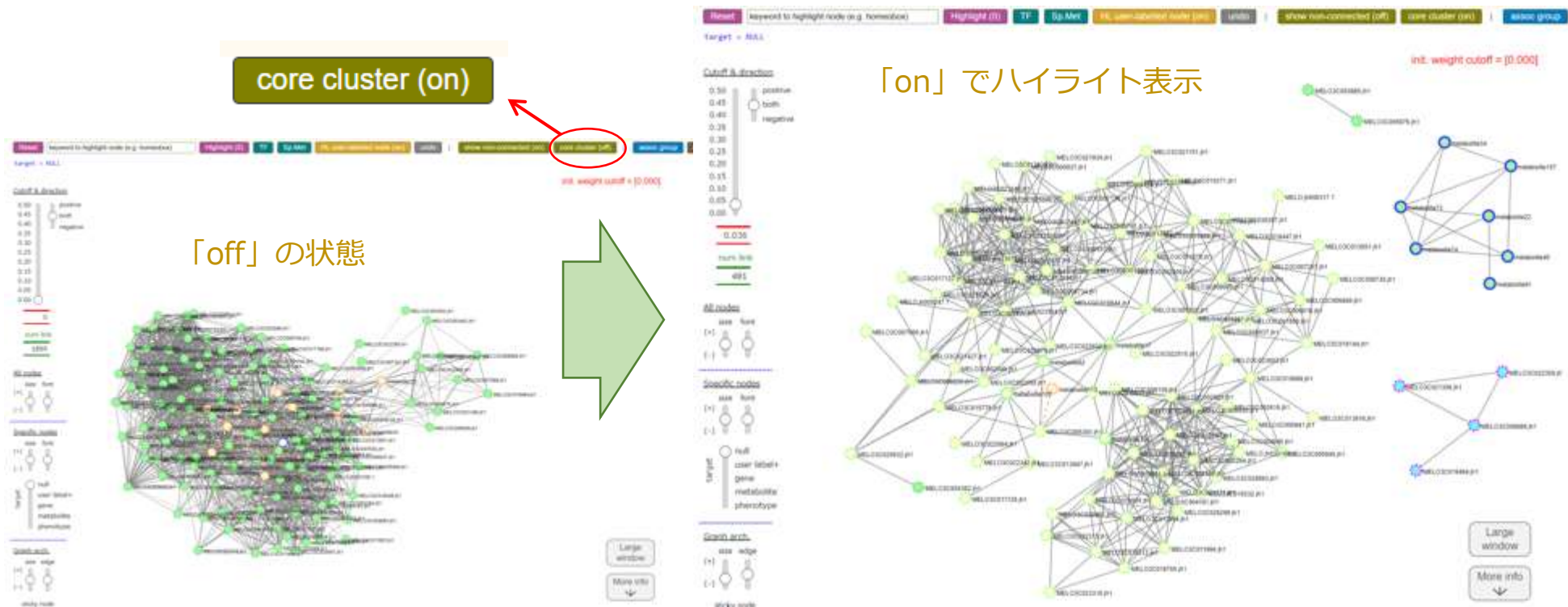


(コムギの花粉)



# 進捗 1 5 統合型因子間ネットワーク解析基盤の構築

複雑な遺伝子ネットワーク中の**中核的な機能クラスター（コアクラスター）を予測し、表示**させるアルゴリズムを開発した



# これまでの活動やこれからの予定

## これまでの活動状況

### 【研究活性化のための取組】

- コンソキックオフ会議（2021年1月26日）
- 第1回 MS若手の会（コンソ内）（2021年6月25-16日）
- R3年度研究成果検討会（2021年12月3日）
- R4年度研究計画検討会（2022年3月9日）

### 【アウトリーチ】

- 目標5キックオフミーティング（2021年3月24日）
- 筑波会議2021への出席（2021年9月21-30日）
- **公開オンラインシンポジウム「2050年、食料リスクのない豊かな社会を目指して」（2021年10月22日開催）**
- アグリビジネス創出フェア2021出展（2021年11月24-26日）

### 【国際連携】

- 国際植物フェノタイピングネットワーク（IPPN）に参加（2021年）

## 今後の予定（2022年度の予定）

### 【研究活性化のための取組】

- プロジェクト全体説明会（2022年4月20日）
- 第2回 MS若手の会（2022年7月29-30日）
- **目標4（南澤PM課題）との合同ワークショップ（2022年10月～）**
- 研究成果検討会（2022年11-12月）
- 目標5プログラム 若手研究者コミュニティ設立の提案（共同提案）
- サイトビジット（研究実施担当者との直接対話）（2022年夏～）

### 【アウトリーチ】

- **国際シンポジウム「Diverse plant genetic resources for future sustainable agriculture」（2022年7月16日）**
- 目標5成果発表会（2022年8月31日）
- BioJapan2022出展予定（10月12-14日）
- アグリビジネス創出フェア2022出展予定（10月26-28日）

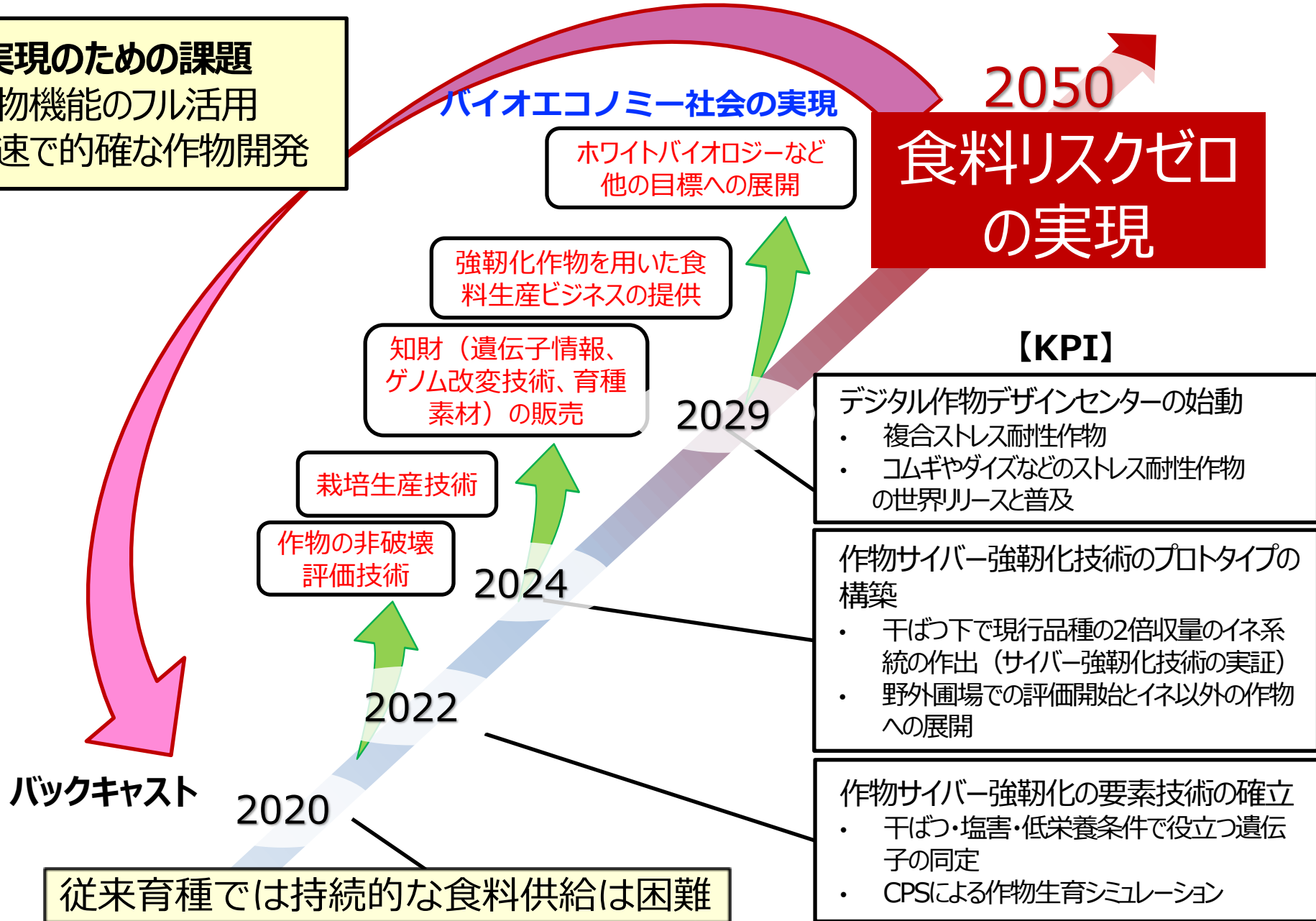
### 【国際連携打合せ・国際会議（動向調査）】

- WUR関係者来訪
- CIAT関係者来訪
- Plant Nutrition Colloquium（8月）
- International Conference of the German Society for Plant Science（8-9月）
- 7th International Plant Phenotyping Symposium（9月）
- 2nd International Wheat Congress（9月）
- Inter Drought（11-12月）

# 5, これから何ができるか

## 目標実現のための課題

- 生物機能のフル活用
- 迅速で的確な作物開発





ご清聴ありがとうございました。

参画機関：東京大学、大阪公立大学、海洋開発研究機構、かずさDNA研究所、九州大学、京都大学、神戸大学、国際農林水産業研究センター、滋賀県立大学、島根大学、筑波大学、名古屋市立大学、名古屋大学、農研機構、福島大学、明治大学、理化学研究所、龍谷大学、量子科学技術研究開発機構