

二重機能バイオ炭：オーバーン大学（米国）

・米国のオーバーン大学は、農地から余剰リンを回収し、緩効性リン肥料として機能する二重機能バイオ炭の開発を目的とし、現在研究中。

- ・バイオ炭は一般的に、作物の生育や土壌環境を改善するためにリン吸着・再放出が最適化するように設計されていない。
- ・オーバーン大学では、バイオ炭のリン吸着性を向上させるため、バイオ炭表面や内部細孔構造への官能基導入や金属（マグネシウムや鉄等）添加を行い、その影響を検証。
- ・特にマグネシウムを添加したバイオ炭（右図Mg/BC群）は、通常のバイオ炭に比べて窒素吸着が約20倍、リン吸着が約5倍増加。
- ・リン放出特性の評価を行うことにより、緩効性リン肥料としての機能を担保。

【社会実装状況】

- ・研究段階

【予算】

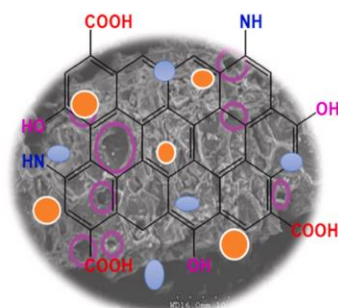
- ・AFRI競争的助成金
- ・999,586ドル
- ・2023年6月～2027年1月

出典：

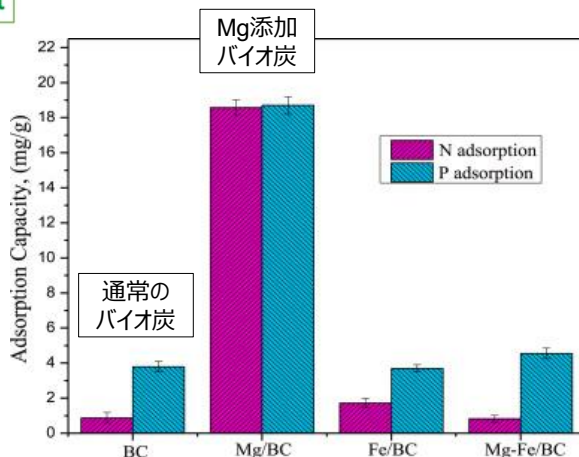
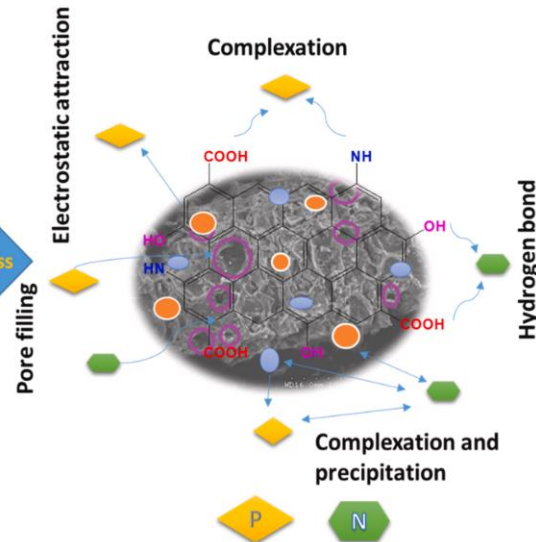
<https://portal.nifa.usda.gov/web/crisprojectpages/1029695.html>

マグネシウム添加バイオ炭のリン・窒素吸着

松の樹皮由来のバイオ炭を使用。水中でMgClととも攪拌。105℃乾燥、500℃で焼成。水洗いして乾燥。



Possible adsorption process



出典：<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142130>

遺伝子改変微生物資材：Pivot Bio（米国）

- 米国のスタートアップ企業Pivot Bio社は、ゲノム編集により窒素固定能力を増強した微生物肥料を開発。トウモロコシ用の生物学的窒素固定（BNF）の商用化資材として注目。

- 微生物資材は、窒素固定細菌*Kosakonia sacchari*及び*Klebsiella variicola*で構成され、トウモロコシ、コムギ、ソルガム等に対応。
- 通常、窒素固定細菌は、*nifL*遺伝子により土壌窒素が高濃度な条件下では窒素固定活性が低下。ゲノム編集により*nifL*遺伝子を働かなくすることで、高濃度窒素条件下でも窒素固定を促進。
- 255件の圃場試験の結果、トウモロコシの化学肥料（約23-45kg/ha）を微生物資材PROVEN®40に置き換えることで植物体内の窒素量が7%増加。
- 2022年のノースカロライナ州立大学の報告では、通常に比べて約45kg/ha少ない窒素施肥（約22%減）で、トウモロコシの収量が最大約879kg/ha増加（約7%）。

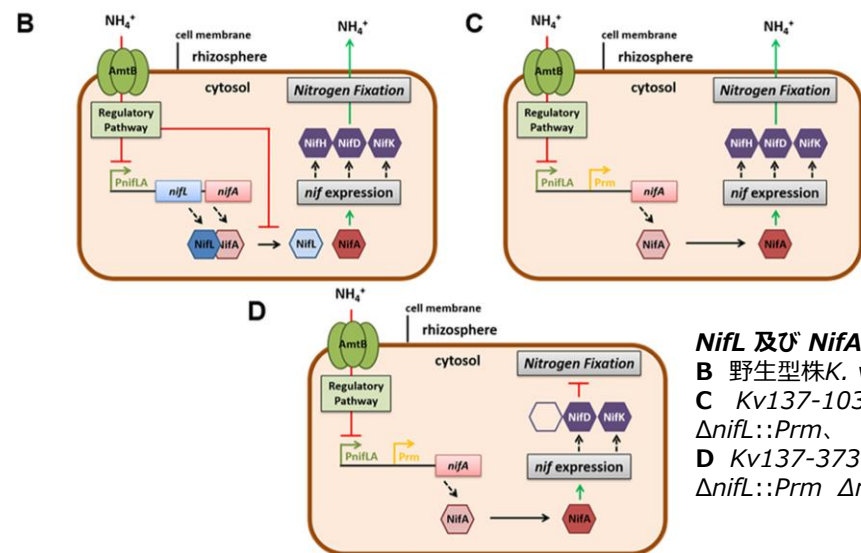
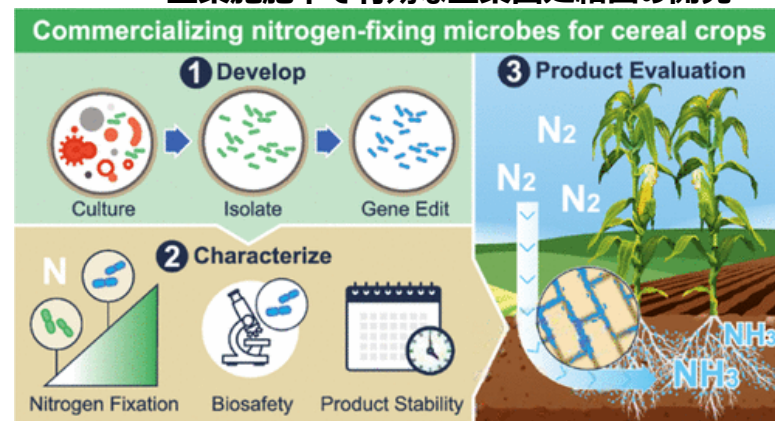
【社会実装状況】

- 2023年、米国の約500万haの農家で利用され、売上は1億ドル以上

【予算】

- 2021年にDCVCとシンガポールのテマセク・ホールディングスが主導するシリーズDで4億3000万ドルを調達
- 累計資金調達：6億ドル

窒素施肥下で有効な窒素固定細菌の開発



NifL 及び NifA 制御

B 野生型株 *K. variicola* 137
 C Kv137-1036;
 $\Delta nifL::Prm$
 D Kv137-3738;
 $\Delta nifL::Prm \Delta nifH$

出典：ACS Synth. Biol. 2021, 10, 12, 3264-3277
<https://doi.org/10.1021/acssynbio.1c00049>

生物的硝化抑制作物の開発や機構解明：国際農研（日本）

- 国際農研は国際トウモロコシ・コムギ改良センター（CIMMYT）等と共同で、窒素施肥6割減でも生産性を維持する生物的硝化抑制（BNI）強化コムギを開発。
- また、国際農研は農研機構と共同で、トウモロコシの根から産生される親水性BNI物質「MBOA（6-メトキシ-2-ベンゾキサゾリノン）」の同定に成功。

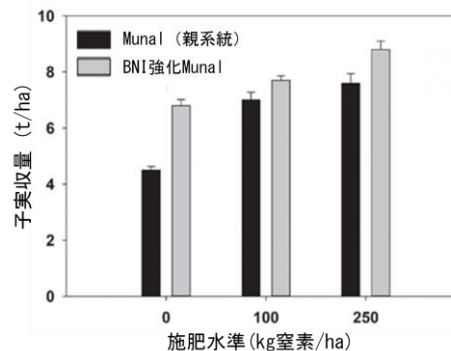
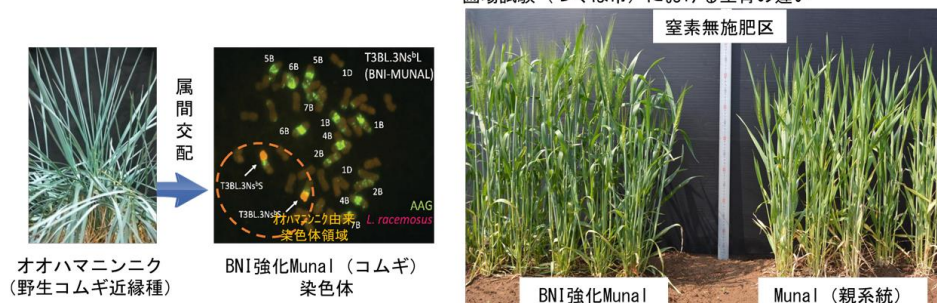
- 農地における窒素肥料の50%以上は、硝化菌がアンモニア態窒素を酸化し、硝酸態窒素に変換することにより流出。硝化、脱窒により温室効果の高い N_2O が発生することも課題。
- 国際農研では、高いBNI能を持つ野生コムギ近縁種であるオオハマニンニクの属間交配により、多収品種にBNI能を付与した世界初のBNI強化コムギを2021年に開発。
- また、トウモロコシにおいては根から生産されるBNI物質を数種類同定し、特に親水性のMBOAが硝化菌の硝化反応と増殖を強く抑制すること等を検証。

【社会実装状況】

- 研究開発・実証段階（BNI強化コムギはインド、ネパールで実証中）

BNI強化コムギ

圃場試験（つくば市）における生育の違い



出典：国際農研プレスリリース

<https://www.jircas.go.jp/ja/release/2021/press202107>

<https://www.jircas.go.jp/ja/release/2023/press202305>

eSoil：リンショーピング大学（スウェーデン）

- Horizon2020 HyPhOEコンソーシアムメンバーであるリンショーピング大学は、植物根に低電力の電気刺激を与えて成長を促進する電気伝導性栽培基質eSoilを開発中。

- eSoilは有機ELディスプレイ等に使われているPEDOTと呼ばれる導電性ポリマーに有機物を混合したもので、主な構成成分はセルロース。
- eSoil中のオオムギの苗に15日間にわたり0.5Vの電圧をかけた結果、対照と比べて最大50%早く成長。
- 電気刺激が成長を促進するメカニズムは不明。

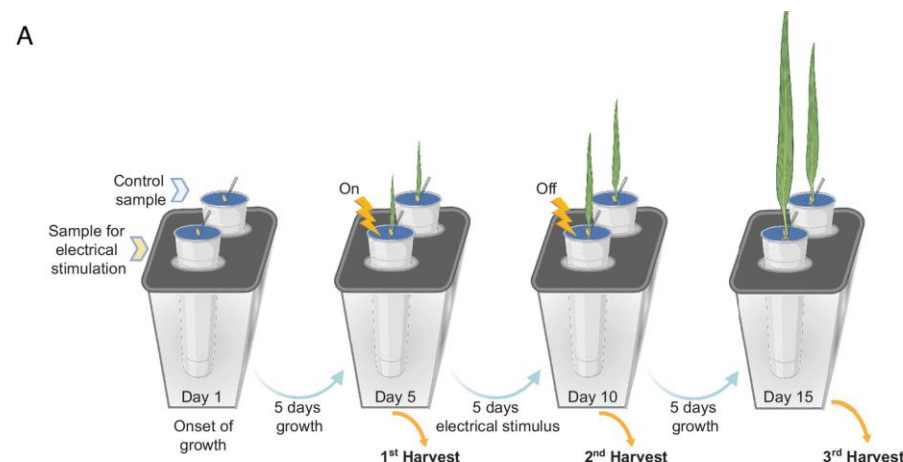
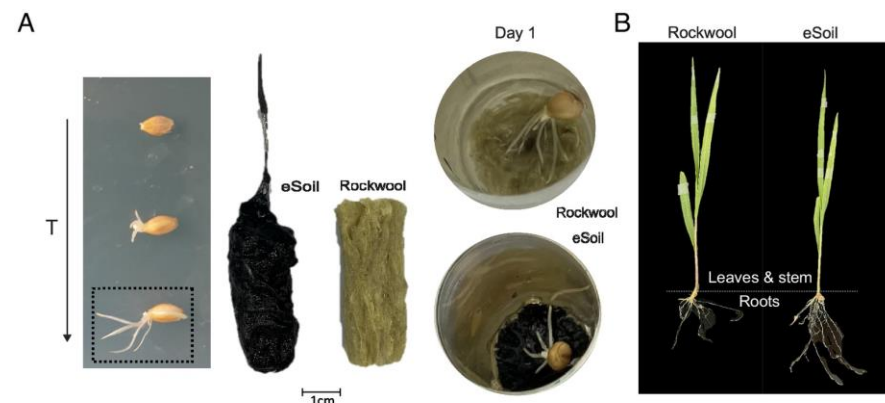
【社会実装状況】

- 研究段階

【予算】

- Horizon 2020
- 3,311,110ユーロ
- 2018年9月～2021年10月

eSoilによる生育試験



出典：
<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2304135120>

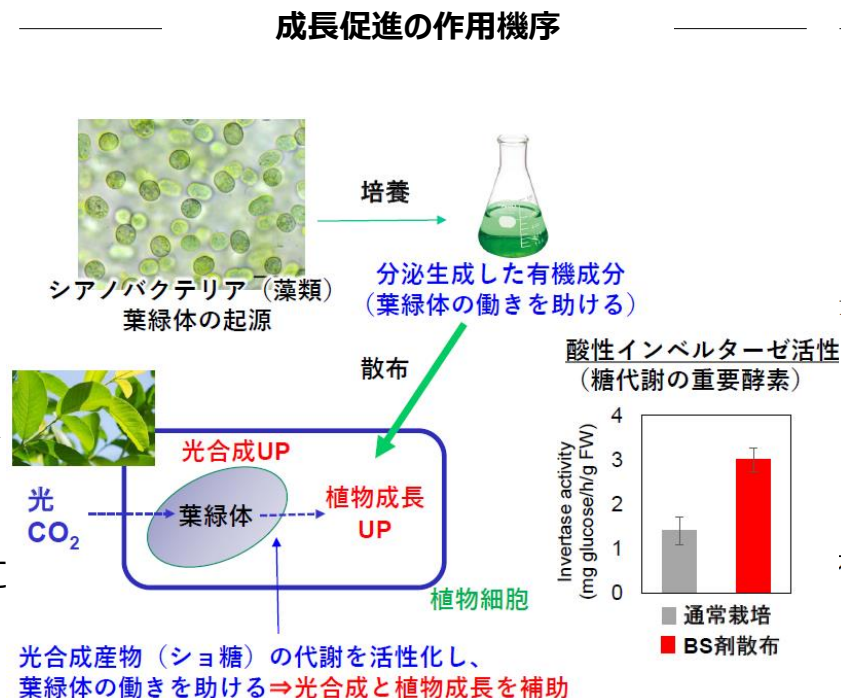
シアノバクテリア由来バイオスティミュラント：パナソニック環境エンジニアリング（日本）

- パナソニック環境エンジニアリングは、シアノバクテリアの分泌成分からなる成長刺激剤「Novitek（ノビテク）」を開発し、現在効果を実証中。

- 植物の成長と光合成を補助する有機成分をシアノバクテリアで合成。シアノバクテリアが生み出した成分や剥がれた外膜の膜脂質だけを抽出する装置を開発。
- 通常のシアノバクテリアは産生した成分を細胞外に分泌しないが、遺伝子組換えによって外膜が自動的に剥がれるようにすることで、有機成分を効率良く抽出。
- ホウレンソウ、トマト、コマツナ、ナス、エダマメ等の圃場試験の結果、品目によって異なるが、10~50%の収量増。

【社会実装状況】

- 実証段階



出典：パナソニック環境エンジニアリング社提供資料

圃場試験（一部抜粋）

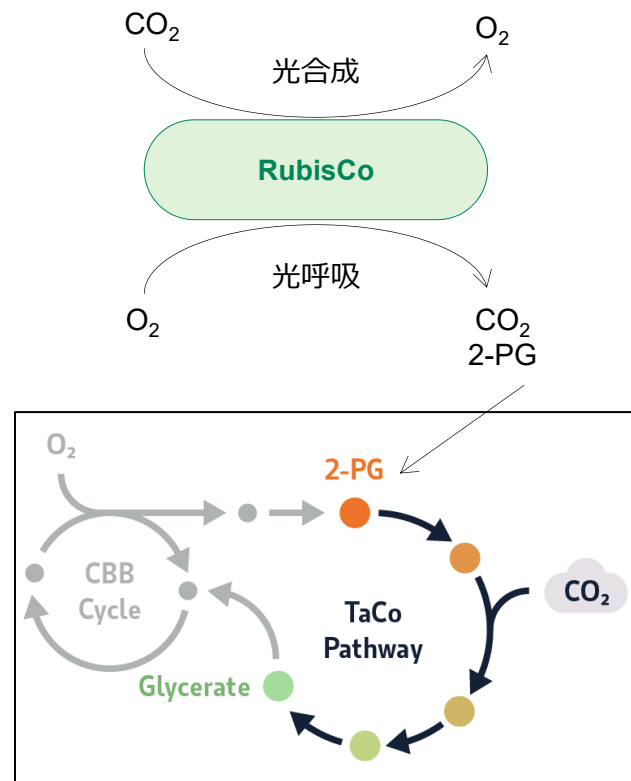
実証場所	品目	収穫増	施用方法
研究フェーズ	実験室		
	ホウレンソウ	+54%	
	レタス	+22%	
	イチゴ	+47%	
	トウモロコシ (2020)	+21%	
農業試験場（大阪）	ミニトマト (2020)	+39%	
	ミニトマト (2021)	+34%	第一花房着果まで4回葉面散布
	ダイズ (2021)	+10%	開花まで4回葉面散布
実証フェーズ	農地 (2021)		
	ホウレンソウ（福岡）	+40%	葉面散布 2回
	トマト（滋賀）	+44%	葉面散布5回
	コマツナ（滋賀）	+23%	葉面散布2回
	農地 (2022)		
	ナス（京都）	+20%	葉面散布4回
	ミニトマト（福島）	+15%	葉面散布5回
	エダマメ（兵庫）	+26%	葉面散布2回

CO₂固定能強化作物：Crop4Clima（EU）

- イスラエルのEvogeneが主導するコンソーシアムCrop4Climaは、遺伝子組換えにより光呼吸から生じるCO₂の捕捉を実現。CO₂を60%多く吸収できるセイヨウアブラナ品種を開発し、収量等について検証中。
 - 先行研究のHorizon2020 FutureAgriculture プロジェクト（2016年1月～2021年3月、助成金4,871,410ユーロ）において、光呼吸によって放出されたCO₂を再捕捉し、カルビン-ベンソン回路に取り込む代謝経路であるTaCo経路（TartronylCoA経路）を開発し特許化。
 - 本プロジェクトでは、新たなTaCo経路を有するセイヨウアブラナ品種を遺伝子組換えにより開発し、圃場及び温室における収量と干ばつ耐性を検証中。
- 【社会実装状況】
- 実証段階
- 【予算】
- Horizon
 - 2,475,562ユーロ
 - 2023年5月～2025年12月

TaCo経路

- TaCo経路では、3つの酵素を使用して、光合成を阻害する光呼吸副産物2-PG（2-ホスホグリコール酸）を、カルビン-ベンソン回路に供給できる代謝物に変換。



出典： <https://crop4clima.eu/>を基にNTTデータ経営研究所作成

窒素固定遺伝子の導入：マドリード工科大（スペイン）

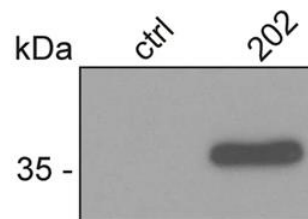
- スペインのマドリード工科大は、植物自体に窒素固定能を付与することを目的として、窒素固定細菌のニトロゲナーゼ構成遺伝子をミトコンドリアへ導入。

- 窒素固定酵素であるニトロゲナーゼは、Fe-タンパク質 (NifH) とMoFe-タンパク質 (NifD2NifK2；異なるアイソフォームが存在) から構成され、酸素により失活。また、ニトロゲナーゼ酵素の機能には、金属補因子や電子伝達系等の複数遺伝子や、その他アクセサリタンパク質が不可欠であり、一連の多数の遺伝子を導入する必要があるため、作物にこれらの遺伝子を直接導入し、発現させることは困難。
- マドリード工科大では、イネを用いた研究においてミトコンドリアを標的として遺伝子組換えを行い、Fe-タンパク質を発現。低酸素環境であるミトコンドリアで発現させることで、ニトロゲナーゼ活性の失活を防止。
- 作物レベルでは、窒素固定活性の変化が確認されなかったが、葉から単離したFe-タンパク質が電子伝達とニトロゲナーゼ補因子合成において部分的な活性を示したことを確認。
- 今後は、ニトロゲナーゼの機能発現を目指し、安定的なFe-タンパク質蓄積や、細胞内の電子伝達系に連携させるための研究を予定。

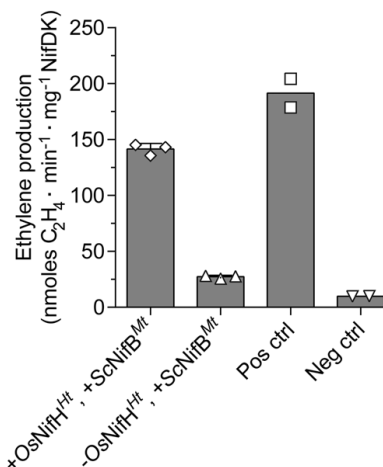
【社会実装状況】

- 研究段階

イネにおけるFe-タンパク質の発現、活性評価



Fe-タンパク質 (NifH) の発現を示すバンドが遺伝子組換え系統 (202) で検出される。



遺伝子組換え系統は正常に成長。

遺伝子組換え系統 (+OsNifH^{Ht}) においてニトロゲナーゼ補因子活性の増加を確認。

アポミクシス育種：AsexualEmbryo（EU）

・オランダのラドバウド大学が主導するコンソーシアムAsexualEmbryoは、アポミクシス（無性胚発生により母株と同一遺伝子型の種子を形成）を用いたレタスとトマトの効率的な育種技術を研究。

- ・アポミクシスの人為的誘導は、F1作物のクローン種子を介して雑種強勢の個体の安定的な継代に寄与。
- ・AsexualEmbryoプロジェクトの目標は、アポミクシスのメカニズム解明と、トマトとレタスにおける人為的アポミクシス・システムの開発。
- ・クローン配偶子生産を可能にするMiMe（Mitosis instead of Meiosis：減数分裂の有糸分裂への置換）は、シロイヌナズナとイネでは確立していたが、トマトとレタスでは未確立だったことが研究背景。
- ・右図のドイツ マックス・プランク植物育種研究所の先行研究では、MiMeをトマトに応用。SISPO11-1、SIREC8、SITAMの3つの遺伝子をゲノム編集でノックアウトすることで、クローン配偶子を生産。F1と同じ遺伝子型を持つ4倍体のF2を作出。

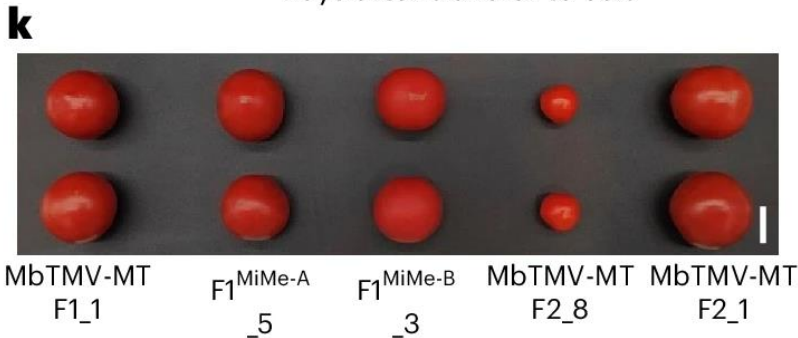
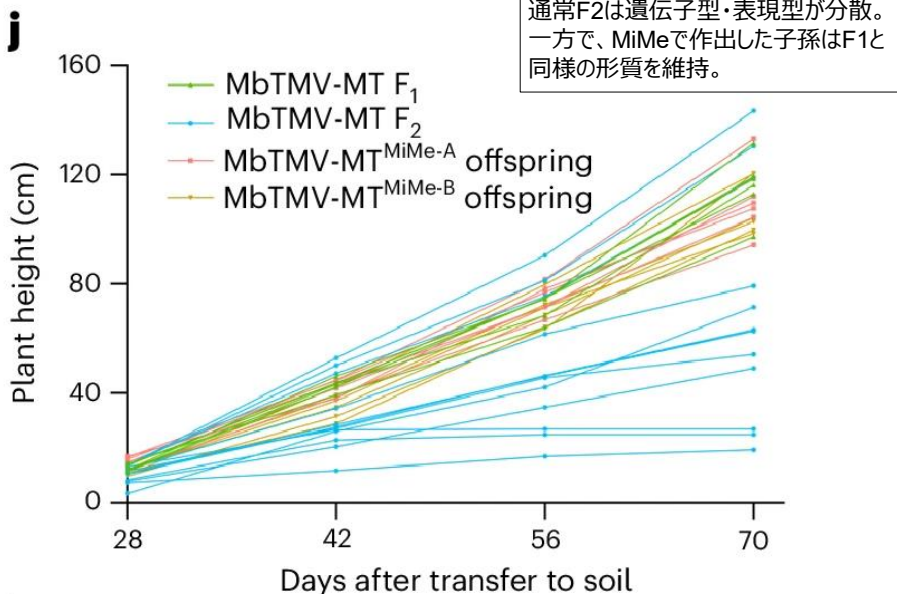
【社会実装状況】

- ・研究段階

【予算】

- ・Horizon
- ・1,500,000ユーロ
- ・2023年5月～2028年4月

トマトにおけるMiMeシステムの確立



出典：<https://doi.org/10.1038/s41588-024-01750-6>

植物RIイメージング：量子科学技術研究開発機構（日本）

- 量子科学技術研究開発機構が主導する植物RIイメージングコンソーシアムは、ラジオアイソトープ（RI）によって植物内部の栄養成分をリアルタイムで可視化するシステムを構築することにより、栄養素の輸送メカニズムを検証。

- 植物内での元素の輸送や蓄積の動態解析は難しく、元素動態や分配のメカニズムの多くが未解明。
- RIを用いたライブイメージングは生きたままの植物で解析可能。
- 放射性同位体の半減期が短いうえ、非侵襲的な手法のため同一個体で繰り返し実験可能。
- ^{11}C 標識した二酸化炭素や糖を用いて、植物体内の動態を解析。
- RIイメージングで得た「栄養の流れ」の知見は、作物栽培における CO_2 や肥料投入等のコスト最適化に寄与。

【社会実装状況】

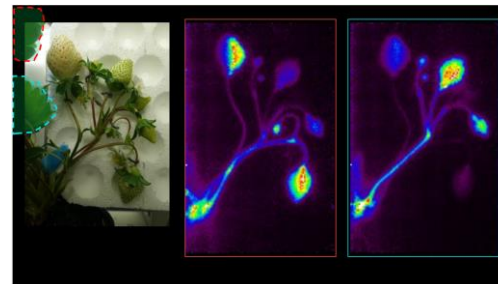
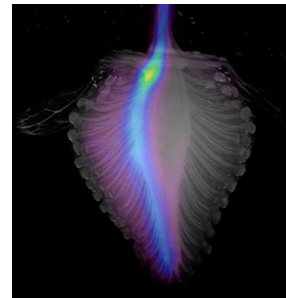
- 研究段階

【予算】

- F-REI第4分野公募研究「農作物の生産性向上や持続可能な作物生産に資するRIイメージング技術の開発及び導き出される生産方法の実証」
- 2023年度予算規模：2億円程度
- 2023年度～2029年度

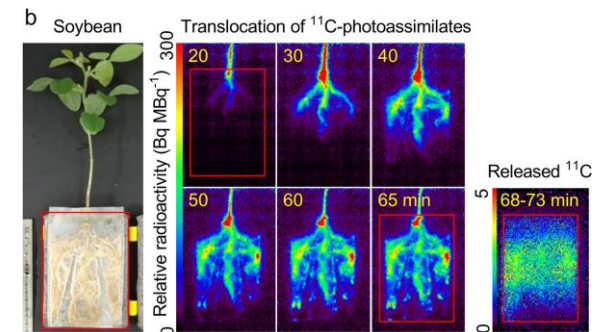
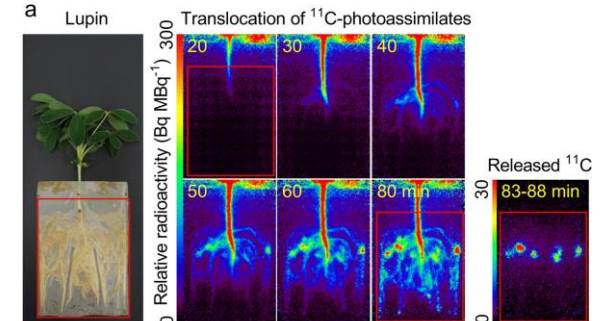
—— イチゴ果実内部に運ばれる糖 ——

- RIで標識した二酸化炭素をイチゴの葉に与え、光合成でできた糖分が果実に運ばれる様子をPET-CTで撮像（上図）。
- 特定の葉に標識二酸化炭素を与えると、決まった果実のみに標識二酸化炭素に由来する糖分が運ばれる様子を確認（下図）。



—— 根圏土壌における根分泌物の分布 ——

- 標識二酸化炭素を植物に与え、根圏土壌における炭素化合物の動態を観察。養分獲得能力が高いルピナスは、同じマメ科植物のダイズに比べて根圏への分泌特性が異なることを画像で確認。



出典：QST提供資料

<https://www.qst.go.jp/site/photograph/>

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-65668-9>