資料３－１

第７回グリーンイノベーション戦略推進会議ＷＧ

バイオマスをCO_2吸収源としたネガティブエミッション技術

2022年2月18日（金）

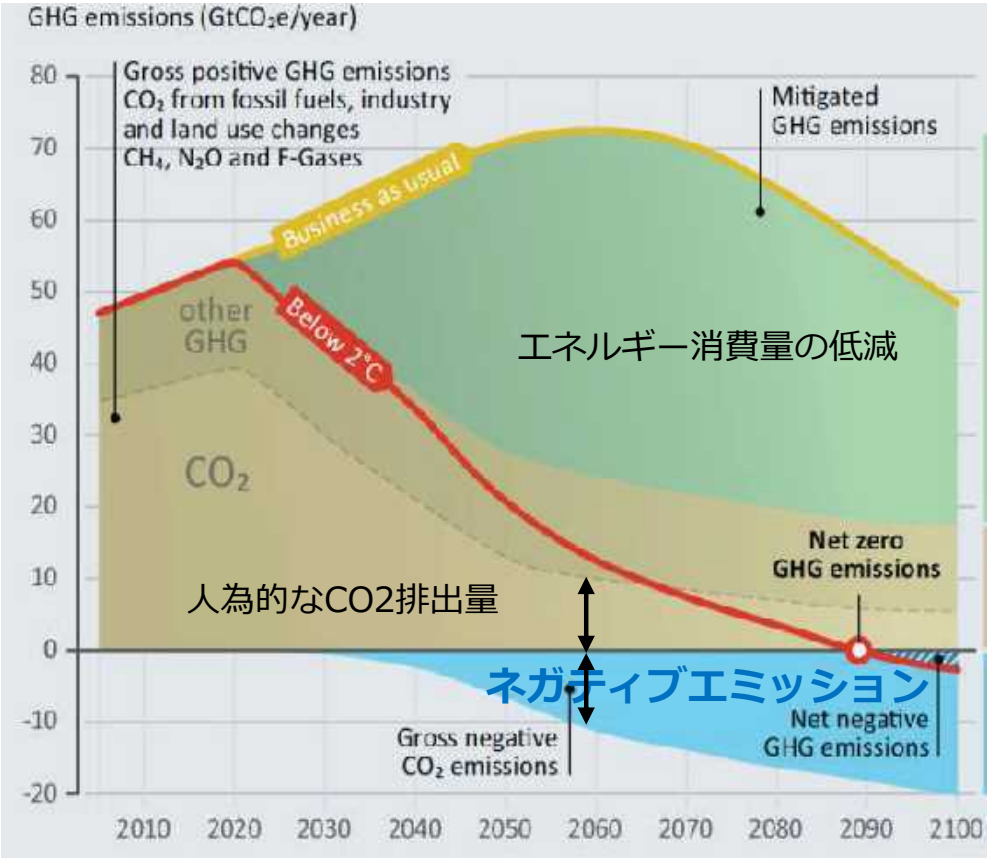
JST　研究開発戦略センター
未来創造研究開発推進部
低炭素社会戦略センター

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

© 2022 CRDS

CO_2の人為排出に対する吸収と固定

- 温室効果ガスの人為的な排出のうち、約半数が大気中に蓄積。
- 2℃目標でも、2060年頃には人為的なCO_2排出量約100億トン/年とCO_2の吸収・固定量約100億トン/年をバランスさせる必要がある。
- 将来的には陸域・海域による吸収増加を含めて、200億トン/年の吸収・固定が必要。



データ出典：Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration, DOI:10.17226/25259

ネガティブエミッション技術のポテンシャル

種類	費用*	炭素固定速度**(推定)(Gt/y/CO_2)
沿岸部ブルーカーボン	低	0.13
植林/森林管理	低	1-1.5
土壌炭素貯留	低-中	3
BECCS	中	3.5-5.2
DAC	高	0***
炭素鉱物化	中-高	不明

* 推定費用。低:0-20($/t/$CO_2$)、中:20-100($/t/CO_2)、高:100($/t/$CO_2$)以上。

** 現在の技術で安全に、かつ$100/t/$CO_2$ (Gt/y/CO_2)で遂行できると推定できる値。

*** 実質的に、$100/t/$CO_2$ (Gt/y/CO_2)を上回っている($600/t/$CO_2$)。

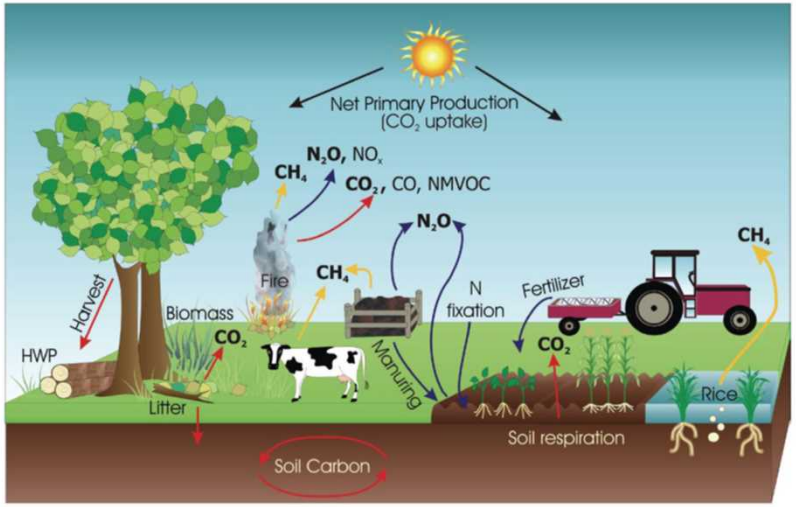
欧州の動向①

EUの農業政策（CAP）を2030年目標達成に向けたNETsの重要な柱に

- 2030年55%削減に対してネガティブエミッションの重要性を強調（それまではNETsはモラルハザードを引き起こすとして積極的に考慮されてこなかった）
  - ◆ 「Fit for 55」で2050年に向けて必要な変革の推進に向け、土地利用セクターには炭素管理のためのより良いインセンティブが必要であることを明記
  - ◆ 農業・林業 におけるNETsの真正性を監視・検証するための規制枠組みを開発し、2023年に公表する予定
- 2021年よりEUカーボンファーミング・イニシアチブを開始。新しいグリーンビジネスモデルとして炭素農業（カーボンファーミング(Carbon farming)）を推進し、農業従事者へのインセンティブの仕組み構築へ
  - ◆ カーボンファーミング:気候変動を緩和する目的で、農場レベルで炭素貯留（メタン、N_2O排出含む）を管理する農法。気候変動適応、生物多様性保全による環境経済学的メリット等のコベネフィット（共便益）も期待。
  - ◆ 技術ハンドブック（EUにおける成果主義的炭素農業）を発刊(2021.2)。 5つの有望な分野のレビューとそのスキームを特定
  - ◆ 成果ベース（評価困難な場合は行動ベースとのハイブリッドなども考慮）での炭素クレジットに対して報奨金支給

→ 次のステップととして**EU-ETS(排出権取引）での炭素クレジット**として取り込むことを検討

→ **研究開発として農地、森林等の炭素貯留（他GHG排出含む）のモニタリング・計測方法、評価方法が必要**



出典：Technical Guidance Handbook - setting up and implementing result-based carbon farming mechanisms in the EU

欧州の動向②

HORIZON2020（2014～2020）下でのNETs関連プロジェクト

[Quantifying and Deploying Responsible Negative Emissions：責任のあるネガティブエミッションの定量化と展開]（NEGEM）

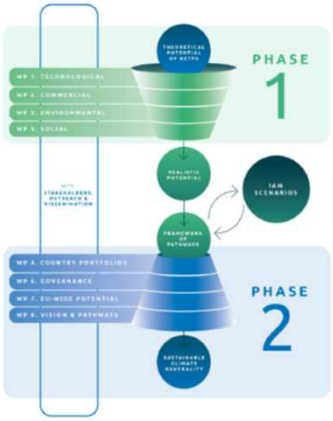
・目的：ネガティブエミッションとその実践について、技術、環境、社会、経済の側面より横断的かつ統合的な分析を行い、大規模に展開する現実的な可能性を評価、さらに地球への影響、許容性、実現可能性についての評価を提供

・期間：2020年6月－2024年5月

・総予算：€5,817,835

・参加機関：VTT技術研究センター（フィンランド）＋15パートナ組織による学際的コンソーシアム

フェース１：インパクトとポテンシャル評価
フェーズ２：開発経路のフレームワーク



[Land-Use Based Mitigation for Resilient Climate Pathways：回復力のある気候経路のための土地利用ベースの緩和策]（LANDMARC）

・目的：

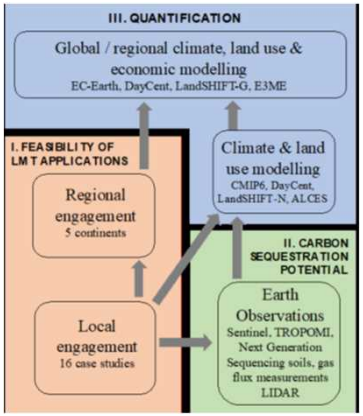
- 農業、林業、およびその他の土地利用セクターにおける、陸上ベースのネガティブエミッションのソリューションの気候への影響推定
- ネガティブエミッションの地域的、世界的拡大の可能性の評価
- 潜在的な環境、経済、社会のコベネフィットとトレードオフのマッピング

期間：2020年7月－2024年6月

総予算：€7,062,990

参加機関：デルフト工科大（オランダ）＋19パートナ組織による学際的コンソーシアム

地球観測改良、シミュレーションモデル・評価ツール開発



[Ocean-based technologies to remove carbon dioxide：CO2を除去する海洋ベースの技術]（Ocean Nets）

目的：海洋ベースのネガティブエミッションの実現可能性と影響の調査。

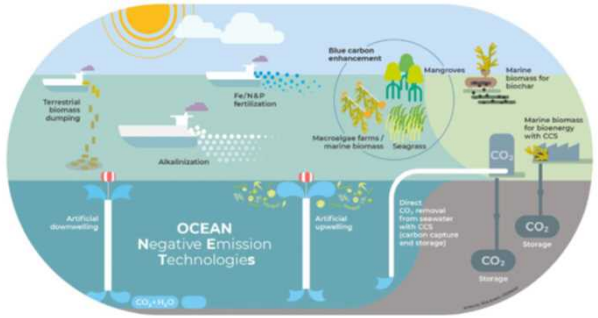
期間：2020年7月－2024年6月

総予算：€7,192,894

参加機関：ヘルムホルツ海洋研究センター・キール（ドイツ）＋13パートナ組織による学際的コンソーシアム

陸域と比較してネガティブエミッションの知識が限定的な海洋ベースの実現可能性と影響の調査

- **海洋アルカリ化**
- **炭素の回収と貯留を伴うバイオ炭またはバイオエネルギーのための海洋バイオマス**
- **直接CO_2二酸化炭素貯留と海水からの除去**
- **人工湧昇**
- **人工的なダウンウェル**
- **ブルーカーボンシンクの強化**
- **海洋施肥**
- **陸域バイオマス投棄**



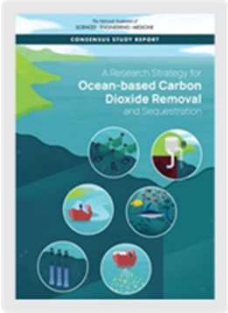
出典：European Commission's HP, https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_LC-CLA-02-2019

米国の動向①

アカデミアの動きが先行。NETsに関する課題を様々な観点から検討

- 米学術機関の全米アカデミーズによるNETs関連の調査報告書
  - ① Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration A Research Agenda（2019）
  - ② A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration（2021）

  ※②は陸域と比較して海洋におけるNETsの研究や調査が少ないとの問題意識より発刊された



出典：The National Academies Press, https://www.nap.edu/

- 元DOE長官のモニツ氏らが立ち上げたEnergy Futures Initiativeが、より多くのCO_2除去が可能な研究開発・実証プログラムへの投資についてのポートフォリオを提案している。種々のアプローチによる土壌炭素貯留の強化、植物の特性に関する理解とその応用、ELSIへの対処などが優先事項として挙げられている。また、研究開発の促進に向けてコベネフィットを強調することや炭素クレジットの評価に向けた基礎的な検討も重要としている。

➡ いずれの取組みにおいても、<u>CO_2除去（緩和）</u>だけではなく、<u>気候変動による影響とそれへの対策（適応）</u>の必要性を指摘し、具体的な課題を明記。

米国の動向②

全米アカデミーズの調査報告書で指摘されている研究開発課題

実装

- 沿岸部ブルーカーボンの社会実装（海域）
- 炭素の吸収・固定に関する科学的・実験的知見統合のためのネットワーク形成（全般）
- 土地所有者間のインセンティブ、土地所有者の公平性に関する社会科学研究（陸域）、等

- 炭素固定のための実証プロジェクトやフィールド実験（海域）
- 農業土壌炭素プロセスを改善する実験的ネットワーク、森林実証プロジェクト（伐採された木材の収集、処分、保存の増加、森林の回復等）

- 全国の農地モニタリングシステム
- 農地土壌の炭素吸収・固定の予測および定量化のためのデータモデルプラットフォーム
- 森林資源増強プロジェクトのモニタリング
- 気候変動を考慮した沿岸部のマッピング、各地での沿岸部開発や科学的知見の統合、等

- 高密度に炭素貯留ができる作物
- 沿岸生態系をネガティブエミッション技術として活用するための基礎研究
- 深層土壌の挙動、バイオ炭の利用、木材の保存、等

基礎

適応

緩和

国内での議論

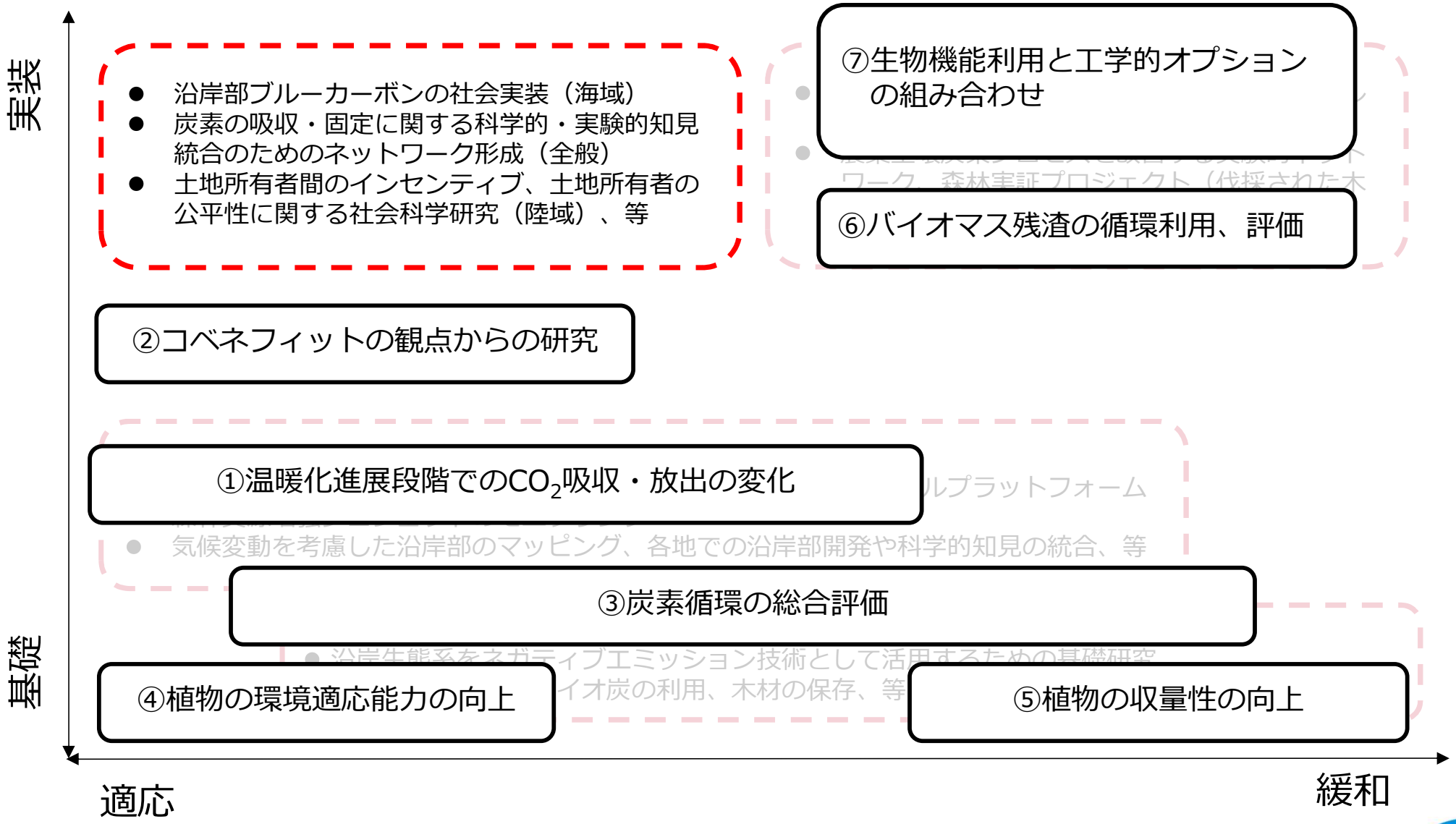
JST-CRDSにて実施したWSやその他調査を踏まえて研究開発課題を整理。

✓ 気候変動の影響を考慮したより詳細なモデリングや、工学的なオプションとネガティブエミッション技術の適切な組み合わせなど、適応と緩和の双方の側面から課題が抽出された。

	研究開発課題例	具体的な内容
適応	①温暖化進展段階でのCO_2吸収・放出の変化	海面上昇など、気候変動に関連するパラメータの組込。
	②コベネフィットの観点からの研究 （コベネフットとして生物多様性や環境保全）	気候モデルと土地利用の両面からの検討。バイオ炭による土壌改良効果など。
	③炭素循環の総合評価	海洋と大気の炭素循環の理解。土壌中の炭素と窒素の総合評価。より詳細な現象解明など。
	④植物の環境適応能力の向上	準耕作地・非耕作地での水、温度、塩などに対する耐性、病虫害耐性など。
緩和	⑤植物の収量性の向上 (単位面積・単位資源投入量当たりの収量)	植物へのCO_2供給促進、光合成CO_2固定能増強、光エネルギー変換効率の増強など。
	⑥バイオマス残渣の循環利用、評価 （多様な資材と多様な環境条件での利用・評価）	地熱を使った冬季の植物栽培。工場や発電所、焼却場の排ガス(CO_2)利用、藻類の大規模培養、木材利用の新規利用方法の可能性の検討など。
	⑦生物機能利用と工学的オプションの組み合わせ技術	長期的なモニタリング、農林水産業のDX化、省エネルギー化。吸収源拡大の候補地の開拓・創出に向けた社会実装への具体的な取組。

課題の整理

**全米アカデミーズの調査報告書で挙げられていた課題の上に
JST-CRDSによる国内での議論の結果を重ねてマッピング。**



社会との関わりの観点からのその他の課題

JST-CRDSにて実施したWSやその他調査を踏まえて課題を整理。

課題	対策例
食料との競合	耕作不適地の有効活用など、農作物生産と土地利用で競合しない取組。
土地の制約	陸域については農地法等、海域についてはロンドン条約等、NETsの開拓に伴う既存の条約や法整備との齟齬への対応（規制の見直しなど）。
気候変動による 海岸線の変化などの影響	気候変動適応策の実施（例：アメリカ海洋大気庁(NOAA) のNational sea grant プログラムでは、大学を中心に適応策関連の34のプログラムが進行中）。
既存の生態系への影響	陸域あるいは海域での大規模なNETsの展開や、遺伝子組み換え生物の導入などによる既存の生態系や生物多様性への影響、その他社会的・倫理的観点からの懸念への対応。生態リスク評価やリスクコミュニケーション。
汚染物質の蓄積、濃縮	CO_2吸収に伴って生じる汚染物質の蓄積、濃縮による影響の総合的な評価と対応策の検討。
地場産業の権利の侵害	現場で主体的に取り組む団体への資金環流や、企業からの参入障壁を下げるためのJクレジットの導入など、各ステークホルダーへのインセンティブを維持するための経済的な仕組みづく。（例：フィンランドのメッツォプログラム（森林）、ドイツの連邦水管理法（海洋）など、土地所有者へのインセンティブが維持される仕組み）。
景観・文化の侵害	土地所有者や地域住民からのコンセンサスを得るための工夫が必要。インセンティブとそれに伴う公平感などの社会学的な取組など。

まとめ

- 生物機能を活用したネガティブエミッション技術について、農地・森林・海洋における国内外の動向と、今後実施が期待される研究開発課題についてまとめた。
- 欧米では、社会実装に向けた積極的な取組みが見られる。バイオマスをCO_2吸収源にする場合は緩和（CO_2の吸収・固定）のみならず適応（気候変動による影響への対応）の観点も必要との認識の下で研究開発が進められている。また、土地所有者へのインセンティブやその公平性について等、社会実装に向けた社会との関わりについての研究開発も課題として挙げられている。
- 今後実施が期待される主な研究課題は、気候変動による影響への対応（海面上昇や温暖化の影響を加味したモデリング等）や、工学的なアプローチ（モニタリングやDX化等）との組み合わせなど、適応と緩和の側面を検討していく必要がある。
- 農地、森林、海洋それぞれで、産官学の取組が進められている。今後、より長期的に、より広範な活動を推進していくことが、カーボンニュートラルの実現のためには重要である。

参考資料

戦略的創造研究推進事業

先端的低炭素化技術開発（ALCA）

背景・課題

○低炭素社会の実現に向けて、産業部門、運輸部門、民生部門において温室効果ガス排出を大幅に削減する革新的な技術の開発が必要。
○パリ協定を踏まえ、日本も2030年度までに2013年度比で26%の温室効果ガス排出削減を目標としている。

事業概要

【事業の目的・目標】

- 2030年の社会実装を目指し、低炭素社会の実現に貢献する革新的な技術シーズ及び実用化技術の研究開発や、優れた機械的特性をもつ軽量材料の開発、リチウムイオン蓄電池に代わる革新的な次世代蓄電池等の世界に先駆けた革新的低炭素化技術の研究開発を推進。

【事業概要・イメージ】

○ 実用技術化プロジェクト

- 2030年の社会実装を目指し、温室効果ガス削減に大きな可能性を有する世界に先駆けた革新的な技術シーズを発掘。
- 要素技術開発を統合しつつ実用技術化の研究開発を加速。
- 件数・単価：継続4プロジェクト×0.5～2億円

○ 特別重点プロジェクト

- 2030年の社会実装を目指して取り組むべきテーマについて、文部科学省と経済産業省が合同検討会を開催して設定し、産学官の多様な関係者が参画して共同研究開発を実施(「次世代蓄電池研究加速プロジェクト」を実施中)。
- 件数・単価：継続1プロジェクト×3～20億円

【事業スキーム】

✓支援対象機関：大学、国立研究開発法人等
✓事業期間：平成22～令和４年度
　研究期間は原則５年間とし、ステージゲート評価を経て「実用技術化プロジェクト」へ移行（さらに最長５年間）

未来社会創造事業

「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域

背景・課題

○現状の削減努力の延長上だけでなく、パリ協定で掲げられた2050年の温室効果ガス大幅削減目標の達成には、世界全体の排出量の抜本的な削減を実現するイノベーションを創出することが不可欠。
○温室効果ガスの大幅な排出削減と経済成長を両立するためには、低炭素・脱炭素社会の実現に資する革新技術を学界が創出し、産業界へ橋渡しすることが必要。

事業概要

【事業の目的・目標】

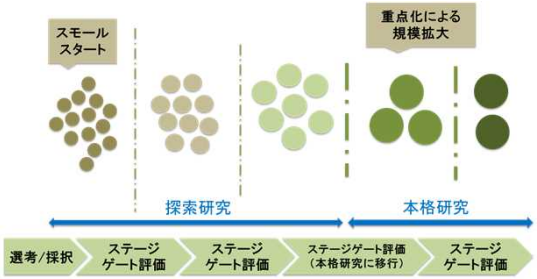
・2050年の社会実装を目指し、エネルギー・環境イノベーション戦略等を踏まえ、温室効果ガス大幅削減というゴールに資する、従来技術の延長線上にない革新的エネルギー科学技術の研究開発を強力に推進。

【事業概要・イメージ】

・少額の課題を多数採択し、途中段階で目標達成度及びCO_2排出量大幅削減の可能性の判断に基づく厳しい評価（ステージゲート評価）を経て、評価基準を満たした課題のみ次のフェーズに移行する仕組みを採用。

・低炭素社会の実現に向けた開発テーマに関連が深い有望な他事業等の技術シーズを融合する形での研究開発を実施。

・社会・経済的なインパクトや産業ニーズが大きく、分野共通のボトルネック課題が存在する領域をFAで特定し、連携して支援する仕組みを構築。基礎研究から実用化まで切れ目のない支援により、研究開発を強力に加速。



※ 先端的低炭素化技術開発（ALCA）事業の仕組みを発展させ、2050年の温室効果ガス削減に向けた研究開発を未来社会創造事業「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域として推進。

【事業スキーム】

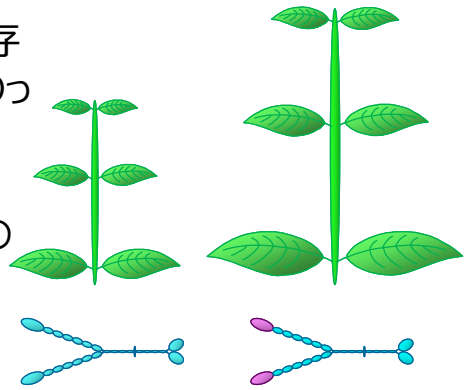
✓ 支援対象機関：大学、国立研究開発法人等
✓ 事業規模：3.5千万円程度／課題／年（直接経費＋間接経費）
✓ 事業期間：2017年度～（研究期間は原則５年間とし、ステージゲート評価を経て本格研究へ移行（さらに最長５年間））

「戦略的創造研究推進事業　先端的低炭素化技術開発（ALCA）」の研究開発課題例

研究開発課題名：原形質流動の人工制御：植物バイオマス増産の基盤技術としての確立
研究開発代表者：富永　基樹（早稲田大学教育・総合科学学術院　准教授）
研究開発期間：2014年度～2019年度

課題概要：
　あらゆる植物の細胞内では、原形質流動と呼ばれる細胞内輸送が見られる。シロイヌナズナで原形質流動を発生しているミオシンモーターを人工的に高速化したところ、植物の大型化が明らかとなった。
　本課題では、ミオシンの更なる高速化によりシステムとしての完成を進めると共に、資源植物として有望視されているイネでの検証実験を行い、様々な植物バイオマス増産に適応可能な普遍的基盤技術としての確立を目指す。

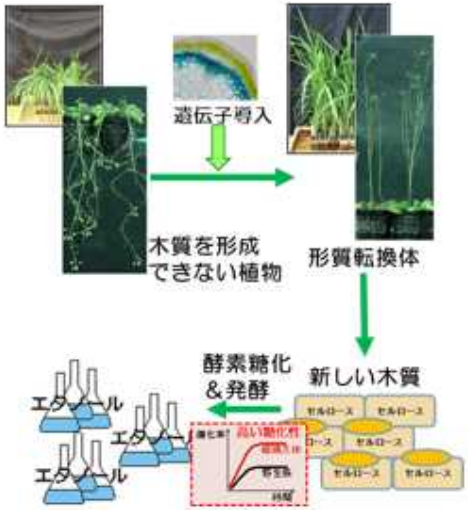
主な成果あるいは支援期間後の発展：
・陸上植物の基部に位置するゼニゴケXIをシロイヌナズナで発現することにより、原形質流動が成長制御システムとして陸上植物に保存され、植物細胞の極性成長に関わっていることを発見した。
・高速化するミオシンXIの発現により、カメリナ種子やポプラバイオマスの増産に成功した。
・イネモデル植物であるブラキポディウムの大型化と種子の増産に成功した。



研究開発課題名：ゼロから創製する新しい木質の開発
研究開発代表者：光田　展隆（国立研究開発法人産業技術総合研究所生物プロセス研究部門　研究グループ長）
研究開発期間：2011年度～2019年度

課題概要：
　重要遺伝子の変異により、木質を作ることのできない植物に、さまざまな遺伝子を追加発現させていくことにより、通常よりも分解しやすい木質や逆に強化木質などの新しい木質を形成する植物を開発する。

主な成果あるいは支援期間後の発展：
・これまでわかっていなかった植物の一次細胞壁形成を制御している転写制御因子を明らかにした。
・発見した遺伝子の導入により木質（二次細胞壁）のかわりに、バイオマス分解を阻害するリグニンがほぼない一次細胞壁の蓄積に成功した。
・発見した別の遺伝子の導入により木質の大幅な強化に成功。
・民間企業からの資金提供を受けた共同研究を開始した。
・農水省「農林水産技術会議国際共同研究パイロット事業」に採択（2020年度、ロシアとの共同研究）。

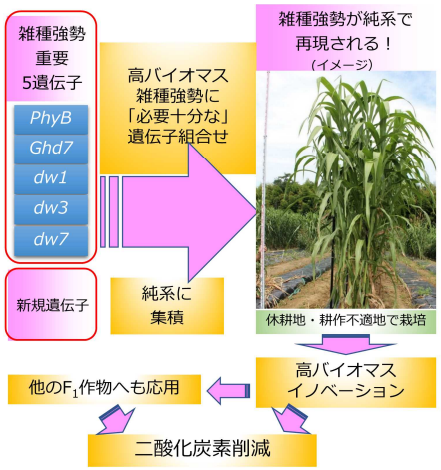


「未来社会創造事業」の研究開発課題例

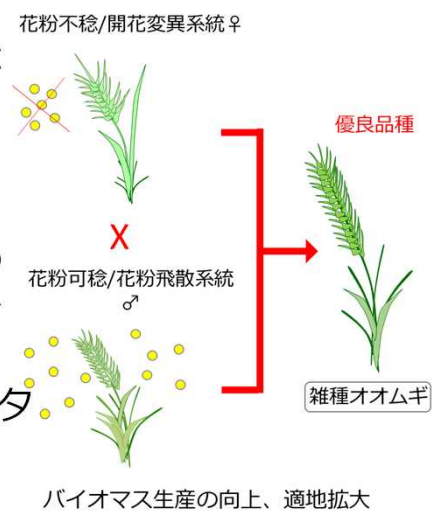
研究開発課題名：雑種強勢の原理解明によるバイオマス技術革新
研究開発代表者：佐塚　隆志（名古屋大学生物機能開発利用研究センター 教授）
研究開発期間：（探索研究）2017年度～2020年度／（本格研究）2021年度～2025年度予定

研究概要：
生育旺盛でロバストな高バイオマス・高糖性ソルガム新品種（純系やF_1）の育種デザイン、創出、及び社会実装を進める。具体的には、社会実装に重要な新規遺伝子の同定や、ソルガムの社会実装を想定した栽培試験を行う。また、バイオリファイナリーにおける発酵生産技術開発も行う。

主な成果あるいは支援期間後の発展：
・ソルガムF1品種「天高」の高バイオマス性について解析を行い、6つの遺伝子座が高バイオマス型アレルとなることが高バイオマスの必要条件であるということを明らかにした。
・純系を背景とした6遺伝子座の高バイオマスアレル集積を進めた結果、6つの遺伝子座は5つに集約し、集積系統の樹立を目指す。
・ソルガムバイオマスのバイオリファイナリー技術として、ソルガム搾汁液からの3,4-AHBA発酵生産をグルコース標品と比較し、ソルガムバイオマス利用の有効性を明らかにした。



研究開発課題名：超開花性による高バイオマス雑種オオムギ育種法の開発
研究開発代表者：佐藤　和広（岡山大学資源植物科学研究所　教授）
研究開発期間：2018年度～2022年度予定

研究概要：
雑種強勢（ヘテロシス）は雑種第一代の個体の生産能力が両親の生産能力を上回る現象で、同じ資源投資でバイオマスや耐性が向上する育種技術である。
本課題では、雑種強勢効果が優れているオオムギについて、開花性変異を活用して、新たな資源投資を伴わない栽培の効率化と、生育地の拡大に伴う不良環境でのバイオマス生産を確保し、二酸化炭素の資源化を目指す。

主な成果あるいは支援期間後の発展：
・最新の塩基解読法および整列技術によって20品種のオオムギにおける染色体単位のゲノム配列解析に成功した。
・品種間で遺伝子領域配列の63パーセントが共通で、残りの37パーセントは異なることが分かった。
・本成果によりオオムギのデジタル育種が進み、品種をデザインする技術の開発が期待される。