

令和6年度生研支援センター 調査報告書（研究開発構想）

農林水産分野のカーボンニュートラルに向けた ネガティブエミッション技術の研究開発 （概要版）



令和7(2025)年4月

農研機構 生物系特定産業技術研究支援センター

目 次

I	生研支援センター研究開発構想について	3
II	テーマの背景と目的	4
III	対象技術等	5
IV	調査方法	6
V	ネガティブエミッション技術全体を巡る動向	7
	1. 海外の研究開発プロジェクトの動向	8
	2. 論文の動向	9
	3. カーボン・クレジット制度の動向	10
VI	各技術について	11
	1. 土壌炭素貯留	12
	2. バイオ炭	21
	3. 森林の循環利用	32
	4. 海藻・海草	47
	5. その他の海洋CDRs	53
	6. ライフサイクルアセスメント（LCA）	63
VII	まとめ	64
	参考文献等・用語解説	69

生物系特定産業技術研究支援センター（生研支援センター）は、農林水産・食品分野を専門とする唯一の資金配分機関（ファンディング・エージェンシー：FA）であり、

- ①民間企業、大学、国立研究開発法人などから、幅広く研究課題の提案を募集し、
- ②採択した課題に委託研究費を供給しつつ、社会実装を見据えて研究管理を行うとともに、
- ③その研究成果の情報発信や事業化支援などを通じて、社会実装を推進している。

また、FAとしての機能強化のため、令和3年度から「研究開発構想」を策定。農林水産・食品分野の重要課題をテーマとして設定し、国内外の研究開発の動向等の情報を収集・分析した上で、今後必要と考えられる研究開発の方向性を取りまとめ。策定した構想は、関係機関・企業等に広く周知すべく、ホームページやシンポジウムなどで公表。

これまで、

- ・ 令和3年度「食品企業における研究開発動向と取り組むべき研究開発」
- ・ 令和4年度「我が国の水産業におけるリスク強靱性の強化」
- ・ 令和5年度「スマート農機の中山間地域への展開」

に関する研究開発構想をとりまとめ。本報告書は4本目。



生研支援センターHP
「研究開発の提案（研究開発構想）」
https://www.naro.go.jp/laboratory/bbrain/contents/research_information/info_gathering_analysis/index.html



Ⅱ テーマの背景と目的^{1)～5)}

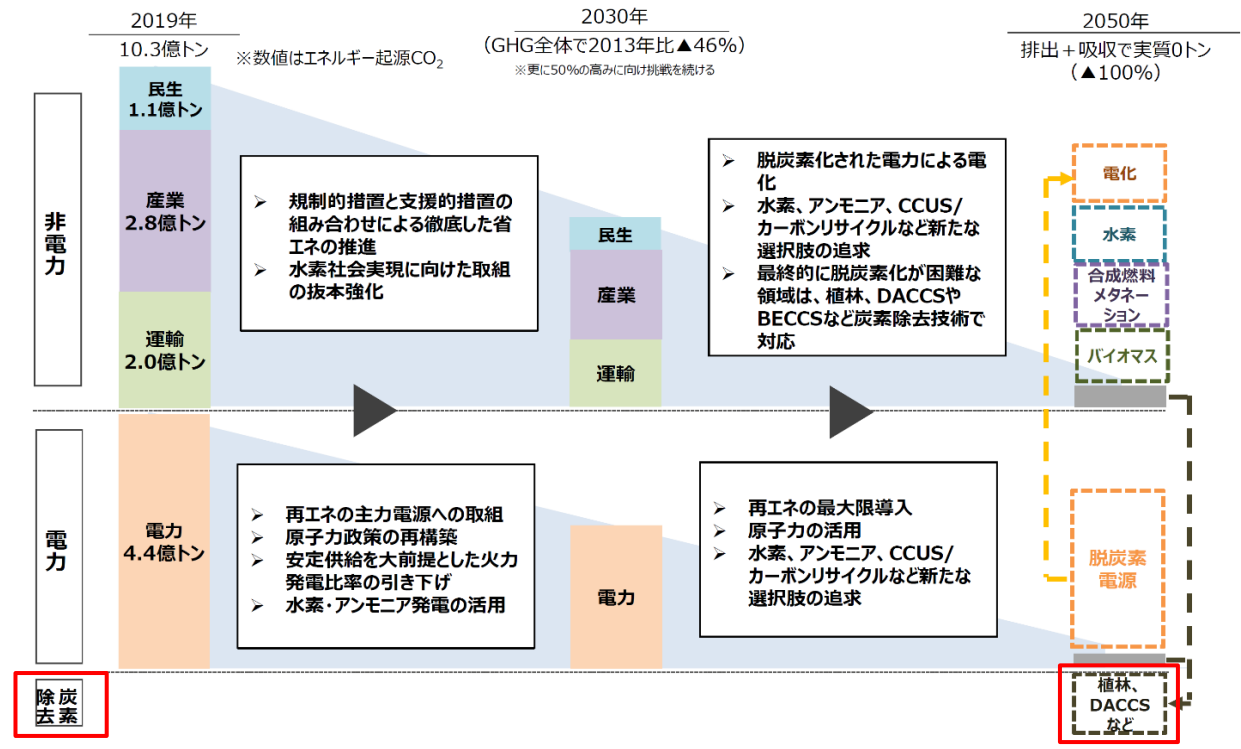
我が国は、2020年10月に「2050年カーボンニュートラル」を宣言。

カーボンニュートラルの実現に向けては、大幅なGHG排出削減が求められる一方、排出を完全にゼロに抑えることは現実的には難しいことから、大気中のGHGを回収・吸収し、貯留・固定化するネガティブエミッションが不可欠。

農林水産業は、生産過程における農地や森林、海洋の保全管理を通じて、GHGの巨大な吸収源となることが期待される、重要な産業。

土壌炭素貯留、バイオ炭、森林の循環利用、海藻・海草の増養殖等に関する研究開発が進み、農林漁業者等への導入・普及が拡大することによって、さらなるGHGの削減につながりカーボンニュートラルに貢献することが期待。

以上を踏まえ、令和6年度は「農林水産分野のカーボンニュートラルに向けたネガティブエミッション技術の研究開発」をテーマに設定。



(出典) 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (令和3年6月18日、内閣官房ほか9府省庁)
※ 赤枠は生研支援センターが追加

NEDO-TSCの整理では、ネガティブエミッション技術（NETs）とは「大気中のCO₂を回収・吸収し、貯留・固定化することで大気中のCO₂除去（CDR, Carbon Dioxide Removal）に資する技術」と定義¹⁾。
本報告書では、農林漁業者やその関連業者による取組が想定されるNETsとして①～⑤を対象とする。

- ① 土壌炭素貯留
- ② バイオ炭
- ③ 森林の循環利用（※ 1）
- ④ 海藻・海草（※ 2）
- ⑤ その他の海洋CDRs（※ 3）
（海洋肥沃化、海洋アルカリ化）

また、本報告書では、長期モニタリング等の長期的に取り組むべき基礎的な研究から、短期的に開発すべき現場課題解決型の技術開発まで幅広く取り上げる。このうち後者は、2050年（カーボンニュートラルの目標年）の時点で広く普及している状況を目指し、概ね10年後程度までに開発が見込まれる技術を想定。

● **ネガティブエミッション技術(NETs)**とは、大気中のCO₂を回収・吸収し、貯留・固定化することで**大気中のCO₂除去** (CDR, Carbon Dioxide Removal)に**資する技術**。

植林・再生林	植林は新規エリアの森林化、再生林は自然や人の活動によって減少した森林への植林
土壌炭素貯留	バイオマスを土壌に貯蔵・管理する技術（自然分解によるCO ₂ 発生を防ぐ）
バイオ炭	バイオマスを炭化し炭素を固定する技術
BECCS	バイオマスの燃焼により発生したCO ₂ を回収・貯留する技術
DACCS	大気中のCO ₂ を直接回収し貯留する技術
風化促進	玄武岩などの岩石を粉砕・散布し、風化を人工的に促進する技術。風化の過程(炭酸塩化)でCO ₂ を吸収
海洋肥沃化	海洋への養分散布や優良生物品種等を利用することにより生物学的生産を促してCO ₂ 吸収・固定化を人工的に加速する技術。大気中からのCO ₂ の吸収量の増加を見込む。
海洋アルカリ度の向上	海水にアルカリ性の物質を添加し、海洋の自然な炭素吸収を促進する炭素除去の方法
沿岸生態系のブルーカーボン管理(*)	マングローブ・塩性湿地・海草などの沿岸のブルーカーボン維持・再生によるCDR。大型海藻類(例えば、昆布)など沿岸における他の炭素隔離の可能性を議論中。
その他の海洋CDRアプローチ	研究事例が少ないが、「人工湧昇」「作物残渣または丸太など陸上バイオマス投棄」「大型海藻養殖などの海洋バイオマスCDRオプション」「海水からの直接CO ₂ 抽出(貯蔵あり)」などの手法がある



ネガティブエミッション技術（NETs）の定義・分類

（出典）ネガティブエミッション市場創出に向けた検討会取りまとめ（令和5年6月）

※ 1 我が国では、人工林の循環利用により若返りを図り排出削減効果の最大化を図るアプローチがとられていることを踏まえ、本報告書では、スマート林業の展開や木材の利用拡大等を含む、森林の循環利用に資する技術を取り扱う。（P32,33参照）
※ 2 ブルーカーボン生態系（マングローブ、塩性湿地、海草（アマモなどの顕花植物）、海藻（ワカメなどの藻類））のうち、漁業者の取組が想定される海草及び海藻を取り扱う。
※ 3 海洋肥沃化及び海洋アルカリ化は、水産業従事者及び海業従事者が地先の海で取り組むことが想定される研究開発を取り扱う。

1. 文献・聞き取り調査

農林水産分野のNETsに関係する国内外の論文や研究発表、情報誌等を調査するとともに、研究者や専門家等から、研究開発や社会実装の動向及び課題、課題達成に向けた取組等について聞き取り。

2. アドバイザリー委員会

有識者からなるアドバイザリー委員会を開催し、

- ・ 研究開発構想の調査対象や方法等調査全般に関すること
- ・ 研究開発構想の調査結果の分析に関すること

等についてご意見をいただくとともに、報告書の原案について、ご助言をいただいた。

<開催実績>

- 第1回：令和6年10月21日（月）15:00～18:00
（オンライン開催）
- 第2回：令和7年3月3日（月）13:00～16:00
（対面とオンラインの併用開催）

3. 海外の動向調査

海外における研究開発プロジェクトや論文の動向及び海外におけるカーボン・クレジット制度の動向について、外部への委託により調査。

氏名	所属・役職
いづか ゆうこ 飯塚 優子	住友林業株式会社 執行役員 サステナビリティ推進部長
いっしき たつや 一色 竜也	神奈川県 水産技術センター 企画研究部長
うつぎ はじめ 宇都木 玄	国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所 研究コーディネーター（地域イノベーション推進担当）
かさい としひろ 河西 利浩	山梨県 農政部 農業技術課 新技術推進監
きしもと あやか 岸本 文紅	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境研究部門 気候変動緩和策研究領域 緩和技術体系化グループ長補佐
つねつぐ ゆうこ 恒次 祐子	国立大学法人東京大学大学院 農学生命科学研究科 教授
はたの りゅうすけ 波多野 隆介	国立大学法人北海道大学 名誉教授
ふじい まさひろ 藤井 賢彦	国立大学法人東京大学 大気海洋研究所 大槌沿岸センター 教授
ほり まさかず 堀 正和	国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産資源研究所 社会・生態系システム部 沿岸生態系暖流域グループ長

アドバイザリー委員会委員一覧（五十音順、敬称略）

V ネガティブエミッション技術全体を巡る動向

1 海外の研究開発プロジェクトの動向

(1) 米国

米国エネルギー省（DOE）、米国海洋大気庁（NOAA）及び米国農務省（USDA）が中心となり、様々な研究開発プログラムが展開。

また、DOEはCarbon Negative Shotを2021年に発表し、CO₂の回収・貯留コストを100ドル未満/トンに削減する等の達成に向けた様々な取組を展開。

(2) EU

2010年代半ばからHorizon2020により海洋系の基礎研究を中心に支援。後継のHorizon Europeでは、海洋系に加えて陸上系のNETsに関する基礎研究や核となる技術開発にも支援している。

2050年GHG純排出量ゼロを法文化した欧州気候法が2021年に採択。また、土壌の監視・評価や持続可能な土壌管理等に向けた土壌モニタリング法が検討。

(3) 中国

国家自然科学基金においてNETsの研究開発を実施。地方単位の研究プログラムもみられる。

また、土壌污染防治法に基づく土壌モニタリング制度が創設され、土壌情報サービスプラットフォームが構築。ここに蓄積されるデータは、無償で公開。

主要プログラム	オーナー	プログラム概要	土壌	水	森林	ブルーカーボン	海洋	気候変動
SEA-CO2	DOE-ARPA-E	MRV、mCDR技術の新しいアプローチを目指す				✓	✓	✓
ROOTS		新しい植物品種と技術で土壌炭素を増加させ、温室効果ガス排出を削減し、生産性を向上させることを目指す	✓					
SMARTFARM		フィールドレベルで原料関連の排出量を正確に定量化する技術に資金を提供	✓					
HESTIA	NOAA	建物を炭素貯蔵構造に変え、排出量を相殺する技術の開発を支援		✓	✓			
Ocean Acidification Program (OAP)		海洋酸性化のメカニズム、影響、そして緩和策についての理解を深めるための研究						✓
Global Ocean Monitoring and Observing Program		地球規模での海洋の状態をモニタリングし、科学的理料を深め環境変化や海洋の役割についてのデータを提供				✓	✓	✓
National Oceanographic Partnership Program	NOAA	政府、学界、産業界が協力して海洋科学と技術の研究と開発を推進するためのプログラム				✓	✓	✓
North American Carbon Program		北アメリカ大陸の炭素循環を理解し、炭素管理戦略を開発することを目的				✓	✓	✓
Environmental Sustainability Program		環境の持続可能性を向上させるための研究と技術開発を支援		✓				
Conservation Innovation Grants	USDA	自然資源保護を促進するための新しいツール、アプローチ、実践、技術の開発を支援する競争力のあるプログラム	✓	✓	✓			

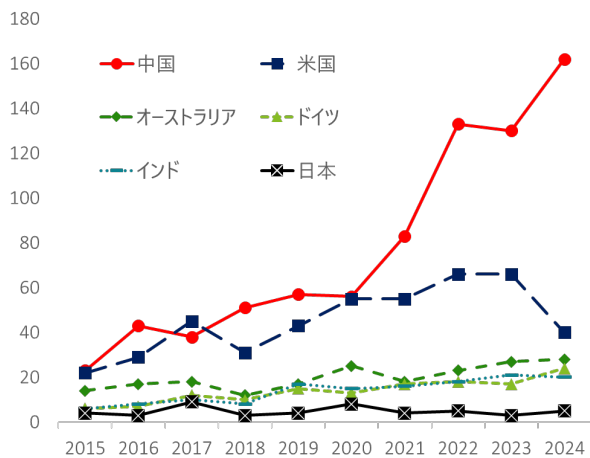
米国の主な研究開発プログラム

トピック	トピック概要	土壌	水	森林	ブルーカーボン	海洋	気候変動
Carbon Dioxide Removal (CDR) approaches	CDR技術の技術的準備状況、要件等を調査、数値モデル化できるCDRを拡大することで気候政策をサポートする				✓	✓	✓
Renewable energy incorporation in agriculture and forestry	再生可能エネルギーの活用と農業・森林廃棄物管理により農業および林業の二酸化炭素排出量を削減する	✓					
Restoration of natural wetlands, peatlands and floodplains as a strategy for fast mitigation benefits; pathways, trade-offs and co-benefits	地球システムに関する知識の向上と社会変革のための解決策の設計と評価を行う		✓				
Let nature help do the job: Rewilding landscapes for carbon sequestration, climate adaptation and biodiversity support	陸、淡水、沿岸、海洋の特定の生態系や景観に対処しながら、地域、国、大陸レベルでの「再野生化」アプローチにより生態系の回復と炭素隔離・貯留を行う		✓				
MSCA Postdoctoral Fellowships	博士号を持つ研究者の創造力と革新力を高めるための研究を支援する				✓		✓
ERC CONSOLIDATOR GRANTS	プリンシパルリサーチの科学的に画期的・野心的な提案を支援する				✓		
Network on carbon farming for agricultural and forest soils	土壌の炭素作用・生態系を包括的に理解し、科学的なMRVと長期的な効果の検証された炭素農業を実現する	✓					
EIC Accelerator Challenge: Technologies for 'Fit for 55'	グリーントランジションを強化するために、画期的なイノベーションを実現するための技術へ支援する		✓				
Innovations for soil improvement from bio-waste	バイオ廃棄物のリサイクルを通じて土壌改良剤として生産を促進し、土地の肥沃度を高める		✓				
Biogenic carbon capture and use (CCU) for circular bio-based products	生物由来の炭素の回収・利用及び循環型非化石燃料生産に向けた研究者・イノベーターへの支援を行う		✓				
Understanding the oceanic carbon cycle	海洋の炭素吸収の可能性に関する理解を深めるために、海洋の炭素循環に関する研究を行う				✓	✓	✓
Ocean and coastal waters carbon- and biodiversity-rich ecosystems and habitats in Europe and the Polar Regions	国際協力のもと海洋と沿岸における生態系を回復させ、長期的な炭素吸収源として活用する				✓		
ERC STARTING GRANTS	優れたプリンシパルリサーチが独立した研究チーム又はプロジェクトの開始を支援する				✓		
EU-China international cooperation on blue carbon	EUと中国が協力して沿岸水域におけるブルーカーボンに関する調査を実施する（TRL4を超える技術は範囲外）		✓				
Enhancing science-based knowledge on EU forests, including old-growth forests, capacities to mitigate climate change	生物多様性、樹木種間の遺伝的多様性をサポートし、炭素貯留量と吸収能力を保全及び強化する	✓					

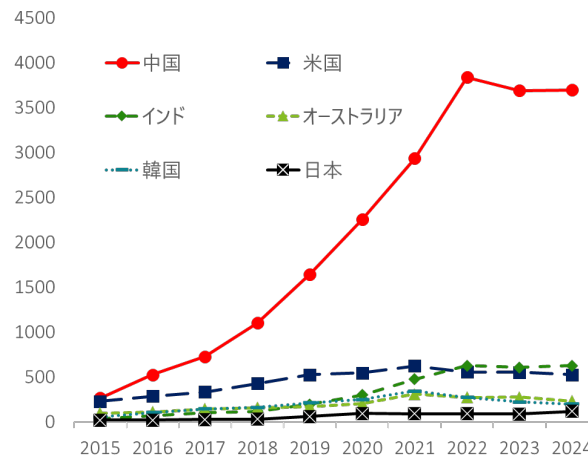
Horizon Europe内の主なトピック

2 論文の動向

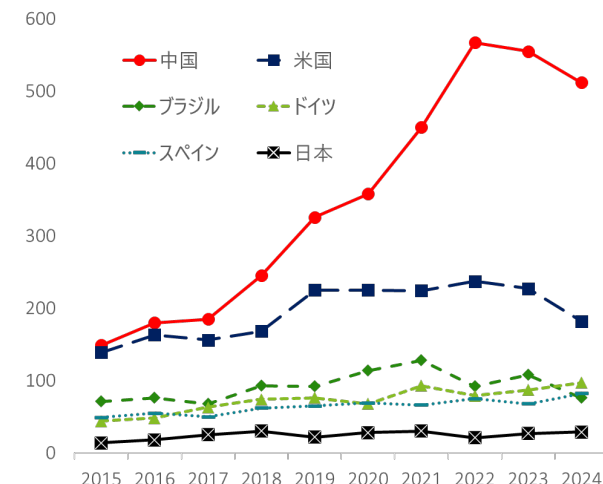
多くの研究領域において、中国の論文数が最も多く、次いで米国。我が国は、陸上系の各NETsの論文数は世界10～20位の間、ブルーカーボンの論文数は世界6位に位置づけられる。また、海洋肥沃化と海洋アルカリ化は、他の領域に比べて論文数が少なく、研究は黎明期。



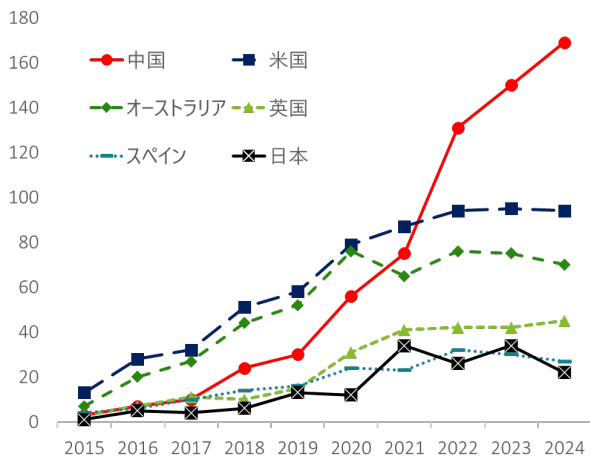
土壌炭素貯留



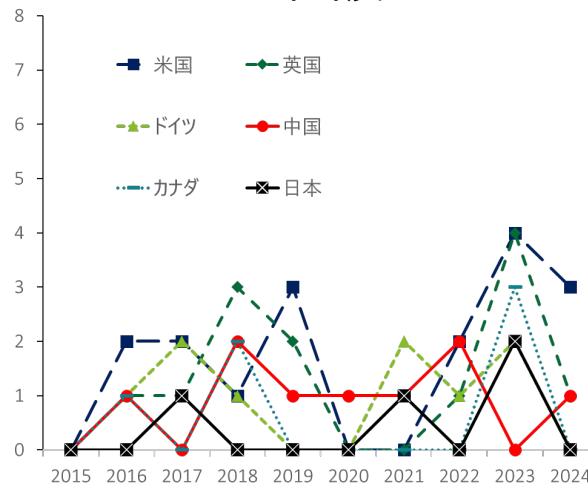
バイオ炭



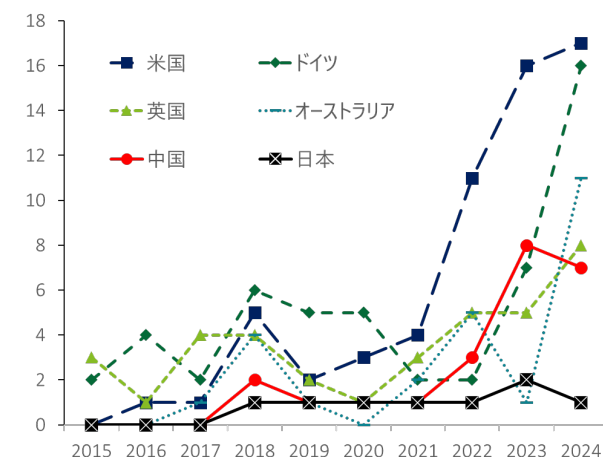
森林の循環利用



ブルーカーボン



海洋肥沃化



海洋アルカリ化

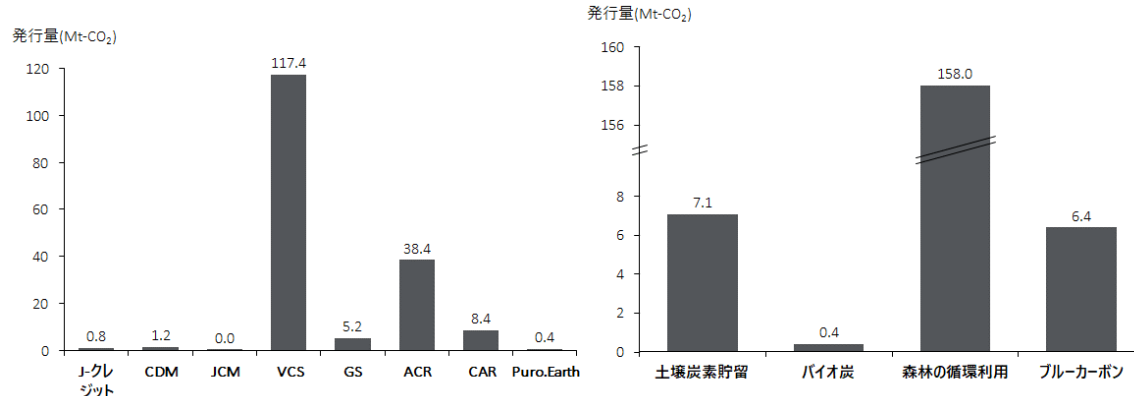
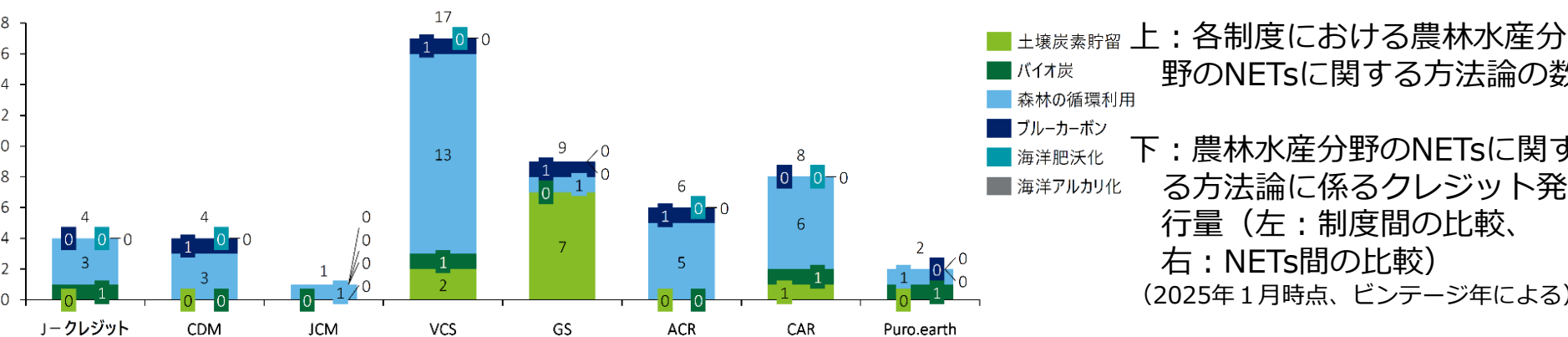
3 カーボン・クレジット制度の動向

カーボン・クレジット制度には、CDM（※1）等の国連・政府主導のものと、VCS（※2）等の民間主導のものがある。日本国内では、2013年度に国内クレジット制度とJ-VER制度がJ-クレジット制度として一本化され、経産省・環境省・農水省の共同により運営されている。

カーボン・クレジットの品質を担保するため、IC-VCM（※3）等のイニシアチブにおいて、ルールメイキングが進められている。^{1) 2)}

主要8制度において、農林水産分野のNETsのうち方法論が最も多いのは、森林の循環利用で33。土壌炭素貯留が10、バイオ炭とブルーカーボンがそれぞれ4と続き、海洋肥沃化及び海洋アルカリ化はない。

クレジット発行量は、制度別ではVCSが突出して多い。NETs別では森林の循環利用が突出して多く、計画外の森林破壊の回避や米国非連邦林地における森林管理改善などに対してクレジットが発行されている。



※1 京都議定書で定められたClean Development Mechanism。

※2 Verified Carbon Standard。独立した第三者機関Verra（米国）が運営。プロジェクト地域は世界全体をカバー。

※3 Integrity Council for the Voluntary Carbon Market。ボランタリークレジットに関する金融・産業・認証機関のタスクフォース。「ガバナンス」「GHG排出の影響」「持続可能な開発」の観点で、「透明性」「追加性」「永続性」等10の規定を設定したCore Carbon Principle（CCPs）を2023年に公表。

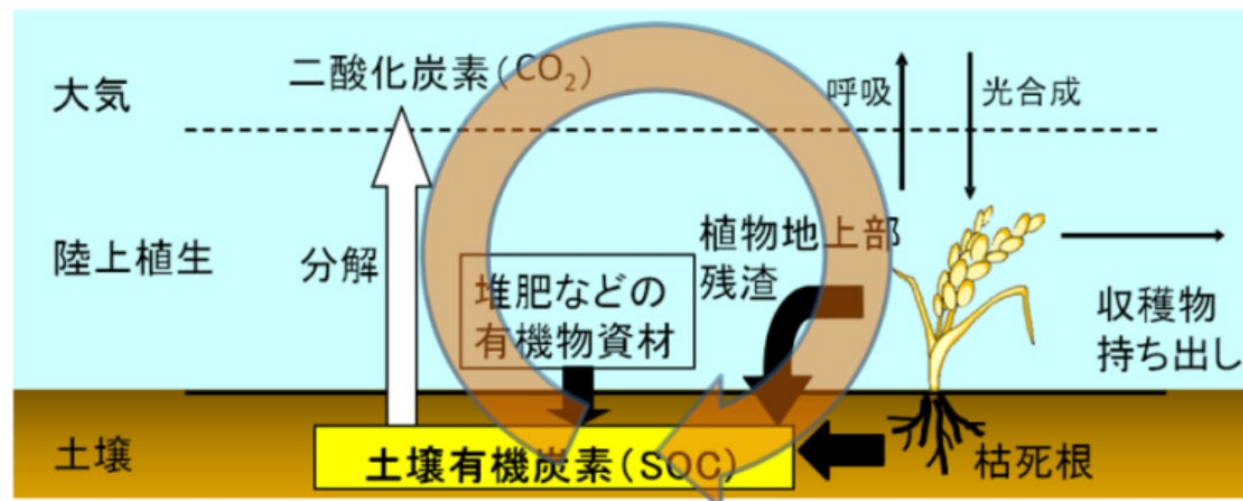
VI 各技術について

① 土壤炭素貯留の概要

- 土壤炭素貯留とは、堆肥などの有機物資材*の投入や、収穫残渣の土壌へのすき込み等により、土壤有機炭素（SOC）を増やすこと。SOCはもともと植物が光合成で大気から吸収した CO_2 に由来するので、SOCの増加分だけ、大気の CO_2 が減少するとみなせる¹⁾。このため、土壤炭素貯留はNETsの一つとされる。

*バイオ炭も土壤炭素貯留に関わる技術であるが、本報告書ではバイオ炭は独立した項目として扱う。

- 土壤有機物は、土壌の物理性、化学性、生物性を向上させる機能がある。このため、一般に土壤有機物含量を高く保つことは、土壌の肥沃度向上にも役立つ¹⁾。
- 農地を対象とする土壤炭素貯留技術は、このような農業に有益な機能をもつ土壤有機物を保持するために実施されてきた。



農地の土壤炭素貯留の概念図（農研機構, 土壌の CO_2 吸収見える化サイト）

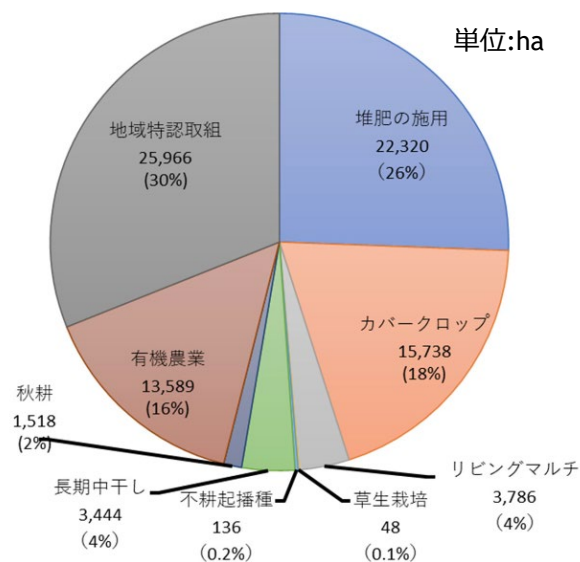
②土壌炭素貯留のための農地の管理技術

管理技術	炭素貯留効果	その他の効果	課題
堆肥の施用	土壌有機物量が増加	家畜排泄物処理対策	堆肥の製造・運搬コスト 品質のばらつき
収穫残渣の土壌へのすき込み	土壌有機物量が増加	後作の減肥	病害虫の発生源 CH ₄ 発生増加（水田）
カバークロップ、 リビングマルチ、 草生栽培	作物の緑肥としての投入により土壌有機物量が増加 冬期間の作付により土壌侵食を抑制	休閑期の有効利用 堆肥に比べ労力・運搬コストが小さい 土壌物理性を改善	緑肥作物の種子のほとんどが輸入
多毛作・二期作、 輪作	収穫残渣により土壌有機物量が増加 土壌侵食を抑制	生産量増加 土壌養分の地下水への溶脱を防止	肥料などの資材や作業量の増加
省耕起・不耕起	土壌有機物の分解を抑制 耕起作業に伴う土壌CO ₂ の放出を抑制 土壌侵食を抑制	団粒構造が発達 蒸発散を抑制（節水）	雑草繁茂、湿害、土壌物理性の悪化（土壌孔隙率の低下等）
農地整備	土壌改良や暗渠の資材として 大量の有機物を土壌に投入		木材チップは有効だが、もみ殻では効果が小

- 「今後の環境保全型農業に関する検討会報告書」²⁾などを参考にして作成。
- 土壌侵食の抑制は有機物を多く含む作土の流失を軽減し、土壌炭素貯留の低下を防止する。

③土壌炭素貯留を取り巻く情勢

- COP21（2015年）で、フランス政府が4パーミル・イニシアチブを提案したことで、地球温暖化対策における土壌炭素貯留の重要性について国際的に注目が高まった。
- EUでは、土壌の健康（Soil health）の実現のため、土壌モニタリング法の制定に向けた手続きが進行。土壌炭素貯留変化の評価のための測定・報告・検証（MRV）の方法を検討³⁾。
- 海外では、民間主導のカーボン・クレジット制度（VCS、GS等）で、方法論が採用されているが、クレジットの発行量は少ない。
- 国内では環境保全型農業直接支払の対象。山梨県は独自の認証制度を運用。



環境保全型農業直接支払交付金の令和6年度版取組の手引き（左）及び令和5年度における支援対象取組別面積と各取組みが全体に占める割合（右）（農林水産省ウェブサイト及び環境保全型農業直接支払交付金最終評価）

果樹（モモ）園での草生栽培とやまなし4パーミル・イニシアチブのロゴマーク（山梨県ウェブサイト、4パーミル・イニシアチブについて）

① 土壌炭素貯留のメカニズム

- ・有機物が微生物の分解を受け、土壌鉱物と結合して安定化するプロセスについて、植物、微生物、土壌鉱物の相互作用と団粒構造の役割の研究が進められている⁴⁾。

② 農地の土壌炭素貯留管理技術

ア 堆肥の施用

- ・長期連用試験などの多くの研究により、土壌炭素貯留に有効なことを確認。
- ・生態系スケールの炭素収支および温室効果ガス収支の観測により、草地が炭素を貯留、温室効果ガスを正味で吸収するために必要な堆肥施用量を推定⁵⁾。

イ 多毛作・二期作、輪作、田畑輪換

- ・温暖化の影響で作付の変化がみられる。多毛作や二期作では、単作よりも多くの収穫残渣が土壌に還元される。温暖化により、飼料用トウモロコシの二期作適地が拡大⁶⁾。再生イネを利用したコメの二期作の栽培技術も開発⁷⁾。いずれも、土壌炭素貯留の研究は見当たらない。
- ・地力増進作物等を組み入れた輪作体系の導入は炭素貯留の効果が高い²⁾。オホーツク地域で、従来は畑地の輪作体系に含まれていなかったダイズの作付けが増加⁸⁾。基盤整備による水田の汎用化等により導入拡大が見込まれる田畑輪換はCH₄排出削減に有効だが、土壌炭素は減少⁹⁾。

ウ カバークロップ

- ・緑肥利用マニュアルの公開¹⁰⁾。緑肥が堆肥何トンに相当し、化学肥料をどれだけ減肥できるかが示されている。

エ 不耕起・省耕起

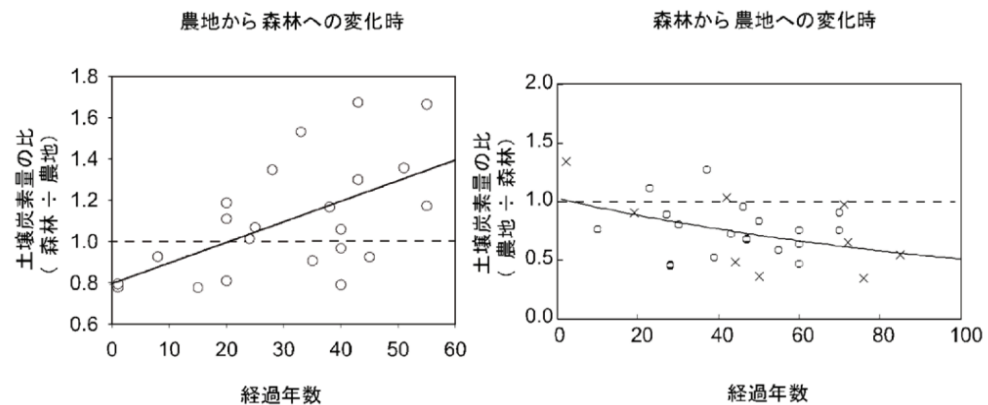
- ・カバークロップを併用した約20年間の長期試験で、土壌炭素貯留を確認。土壌中の微生物群集のバイオマスと多様性が増加し、土壌呼吸量が増加¹¹⁾。
- ・国内の畑地での4年間のフラックス観測では、慣行栽培に比べて温室効果ガスの排出削減に有効。夏季に低温で降水が多い年には、土壌水分の増加により土壌有機物の分解が加速¹²⁾。

③ 作物の遺伝的改変

- 作物の根圏の改良には、地下部の計測が重要となるため、米国エネルギー省（DOE）によるROOTSプログラムで、根圏環境の改善のためのセンシングやモニタリング技術の開発を実施¹³⁾。
- 日本では、ムーンショットプログラム（目標4）で、CO₂固定・吸収能を高めた作物の開発により、作物の地上部（収穫部）だけではなく地下部も増やすことで、脱炭素と食料生産の両立（DAC農業）をめざす研究を実施中¹⁴⁾。

④ 耕作放棄や土地利用変化にともなう土壌炭素量の変化

- 耕作放棄された畑地では、土壌炭素量は2年後に最少、その後は徐々に増加。福山に比べて十勝では、土壌有機物の分解抑制と木本植物への遷移により、放棄直後の土壌炭素量の減少量が小さく、その後の増加量が多い¹⁵⁾。一定期間の耕作放棄後に耕作を再開した場合も調査中。
- 耕作放棄水田では、土壌炭素量はいったん減少、回復までは15年かかり、放棄後30年後に最大値¹⁶⁾。
- 農地から森林への転換した場合は、転換後約20年間は転換前よりも炭素量が減少するが、その後は長期間にわたって増加¹⁷⁾。



土地利用変化に伴う土壌炭素蓄積量の変化
（森林総合研究所研究成果選集2022）

⑤ モニタリング

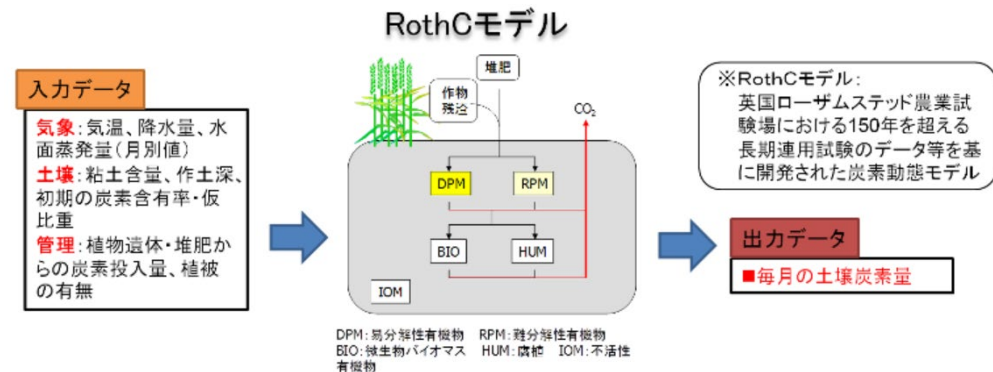
- ・ 国内では公設試験研究機関による長期連用試験のほか、土壌環境基礎調査（1979-1998年）、農地土壌炭素貯留等基礎調査（2015年-）¹⁸⁾等で、土壌炭素量の経年変化のデータを蓄積。
- ・ カーボン・クレジットの方法論では、土壌炭素量の直接測定が求められており、土壌を採取し乾式燃焼法で定量化する標準的な方法以外の方法も採用。
- ・ 米国ではリモートセンシングで土壌炭素貯留を計測するスタートアップ企業が現れている¹⁹⁾。

⑥ モデリング

- ・ RothCモデルを、国内の長期連用試験のデータに基づいて改良し、有機物投入などの土壌管理による土壌炭素貯留を計算するウェブサイトを開発。
- ・ 0.1km×0.1kmの区画毎に土壌炭素量の変化を計算し、1979年以降の土壌炭素貯留の変化の全国推計や将来予測を実施^{20), 21)}。
- ・ DNDCモデルを利用して、炭素貯留とN₂O、CH₄の排出を同時に取り扱う研究が、日本を含めた各国で活発に行われている。

⑦ 環境影響評価

- ・ 近年の温暖化緩和技術の普及を目指す研究プロジェクトには、温室効果ガス削減のLCA評価、営農評価、地域経済への影響評価などが組み込まれている。



簡易な土壌炭素動態モデルを使用した農地の土壌炭素貯留の計算
(農研機構, 土壌のCO₂吸収見える化サイト)

【課題1】農地における土壌炭素貯留の普及に向けた実証的研究および新規技術の開発

＜背景＞

- ・ 農地を対象とする土壌炭素貯留技術の効果は全国一様ではなく、土壌、気象、作物によって異なる。技術の普及を進めるためには、土壌・気象条件や栽培する作物に応じて、各技術の適用による土壌炭素貯留効果と営農上の効果をわかりやすく提示するとともに、近年の気候変動やスマート農業の普及等の社会情勢に応じて、それらの技術を改良し、新たな技術を開発する必要がある。
- ・ バイオ炭を除く既存の土壌貯留炭素技術では、土壌中に投入する有機物資材の多くは比較的短期間に分解されてしまう。炭素貯留効果を高めるためには、投入する有機物量を増やすか、土壌中での分解が遅い有機物を投入する必要がある。その一つの方法として、近年著しく進歩しているゲノム編集技術などの技術を用いた作物の遺伝的改変が考えられる。

＜研究開発の方向性案＞

- ・ 飼料用トウモロコシの二期作や、再生イネを利用したコメの二期作、温暖化にともなう新たな輪作体系や、基盤整備による水田の汎用化にともなう田畑輪換など、今後、普及の拡大が予想される新たな栽培方法の導入に伴う土壌炭素貯留への影響を、他のGHGへの影響を含めて定量化し、生産性の向上と土壌炭素貯留を両立させる技術として確立する。
- ・ 不耕起・省耕起やカバークロープなどの既存の土壌炭素貯留技術について、スマート農業の導入も含めた全国規模の実証試験を実施し、作物の収量・品質や土壌炭素貯留効果、及びそれらに影響を及ぼす要因を解明し、併せて他のGHGへの影響やその他の環境影響、経済性も評価して、技術導入マニュアルとして提示する。
- ・ 遺伝的改変（光合成速度の増加、開花時期の調節、深根性、木質増強など）によりバイオマスが増大した作物や、土壌中での分解が遅い成分を多く含む作物を開発し、圃場試験により生育・収量および土壌炭素貯留効果を実証するとともに、他のGHG、水利用、土壌環境への影響を含めて、土壌炭素貯留技術としての可能性を評価する。

【課題2】耕作放棄地の活用に向けた炭素貯留の解明および技術開発

＜背景＞

- 耕作放棄による荒廃農地の発生は、国内農地面積の減少の主な要因となっている。荒廃農地の面積は、2022年時点で25.3万haであり。そのうち9.0万haは再生利用が可能な荒廃農地（1号遊休農地）に分類され、その55%は中山間地にある。人口減少と高齢化が急速に進む地域の耕作放棄地の適切な管理と有効活用は、農地の多面的機能の発揮の観点からも重要²²⁾。
- 荒廃農地の発生防止、解消に向けて、国の施策が拡充されており²³⁾、遊休農地の粗放的利用や林地化²⁴⁾、グリーンインフラとして活用する取り組み²⁵⁾も行われている。一方、耕作放棄された農地や、農地から林地への転用後の土壌炭素貯留に関する研究も開始されており、これらの研究を発展、拡充することにより、耕作放棄地を土壌炭素貯留にも活用できる可能性がある。

＜研究開発の方向性案＞

- 耕作放棄後の農地について、環境の変化および植生の遷移に伴う生態系の炭素動態と、炭素の各プールへの分配を解明し、耕作放棄地を活用した土壌炭素貯留の可能性を評価する。
- 一定期間の耕作放棄後に耕作を再開した農地の土壌の炭素・窒素動態、および耕作放棄期間の最小限の管理（草刈り、耕うん等）が土壌炭素貯留に及ぼす影響を解明し、耕作放棄期間に土壌炭素量を保持・増加させ、耕作を再開しやすくするための管理法を開発する。
- 耕作放棄された農地を飼料作物栽培や、その他の粗放的利用に供した場合の土壌炭素貯留を定量化し、向上させるための管理技術を開発する。
- 耕作放棄された農地をバイオ炭原料の供給源として利用するための技術を開発する。
- 再生困難な荒廃農地を林地に転用した場合の生態系の炭素動態を解明し、林地転用に伴う土壌炭素貯留に加えて、早生樹を利用した森林の循環利用を通じて、カーボンニュートラルに寄与する技術を開発する。

【課題3】NETsとしての有効性の評価のための基盤技術

＜背景＞

- 様々な農地の管理技術が、肥沃度の向上に加えて土壌炭素貯留にも有効とされているにも関わらず、生産現場への普及は十分ではない。そのビジネス上の理由として、カーボン・クレジット取引の仕組みが十分に整っていない点に加えて、土壌炭素貯留の測定・検証の精度が低い点が指摘されている²⁶⁾。また、カーボンニュートラルに向けた土壌炭素貯留の重要性が、生産者や消費者に十分に浸透していないことも、普及が進まない一因と考えられる。
- このため、信頼性のある土壌炭素貯留の測定・評価手法を開発するとともに、他の環境影響を含めて、土壌炭素貯留技術のNETsとしての有効性とその意義を、生産者、消費者、企業、投資家などにわかりやすく示すことが重要。

＜研究開発の方向性案＞

- 土壌炭素貯留メカニズムの解明をさらに進め、農地土壌の炭素貯留ポテンシャルを明らかにする。
- 気候変動に伴う地温上昇や土壌水分量の変化が土壌呼吸に及ぼす影響を解明し、農地の土壌炭素モデルを改良するとともに、日本土壌インベントリを高度化し、農地管理技術の導入に伴う土壌炭素貯留の圃場規模および全国規模でのモデル評価・予測を精緻化する。
- 圃場での簡易測定、長期モニタリング、カーボン・クレジット用の検証など、それぞれの目的に応じた精度が得られ、使いやすい土壌炭素量の測定法（リモートセンシングを含む）を開発する。
- CH₄、N₂Oとのトレードオフ、生物多様性などのその他の環境影響・環境保全効果、経済性を含めて、土壌炭素貯留技術のNETsとしての有効性を評価する手法を標準化する。

○調査対象

- ・バイオ炭は、炭素の長期固定作用を持つ一方、多孔質構造による保水性・保肥性・通気性を備えており種々の用途に用いられているが、本項では農業関連を中心に調査を実施した。

【農業関連】土壌改良（農地・緑地・牧草地）、
肥料、生育阻害物質の吸着（連作障害の回避）、
家畜飼料（腸内環境改善）、他

【その他】水ろ過、埋立、エネルギー生産、
コンクリート混和材、
重金属・有害化学物質の吸着固定化、他

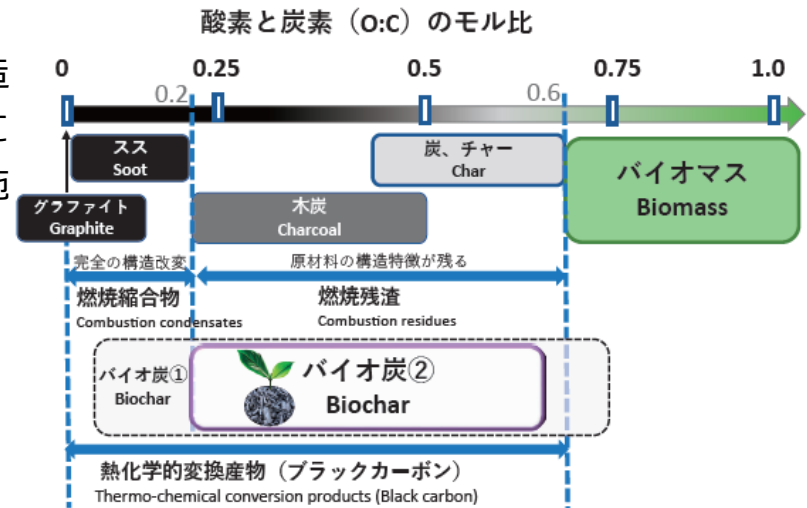


図1 Journal of Life Cycle Assessment, Japan,
Vol.18, No.1 36-42, 2022

○定義（2019年改良IPCCガイドライン¹⁾）

- ・燃焼しない水準に管理された酸素濃度の下、350℃超の温度でバイオマスを加熱して作られる固形物。

○構成技術

- ・原料の探索と選定：多岐に亘るバイオ炭原料であるバイオマスの選定
- ・炭化装置²⁾：炭化の連続性、熱源供給方法、炭化温度、開閉式/密閉式、構造、耐熱性、GHG発生防止
- ・炭化プロセス²⁾：バイオマス調整、熱分解（温度と滞留時間、熱エネルギー供給）、温度・滞留時間管理
- ・バイオ炭の高機能化：作物の生育促進や耐病性の向上を目的とした微生物群定着や堆肥混合等の機能付与
- ・施用技術：対象土壌、対象作物、施用方法、施用量と効果の連関性
- ・LCA³⁾：サプライチェーン全体を通じて環境影響を評価する技法（学術研究課題として、長期施用時の固定効果、施用後の流出による影響、バイオマス資源の利用可能性等）

○原料

- ・国内では、バイオ炭の原料になるバイオマスとして、木材、家畜糞尿、草木、籾殻、木の実、剪定枝、下水汚泥由来物、海藻・藻類などがある。その性質と効果は千差万別である。各種残渣の有効活用や原料の輸送コストの面から、地域内で収集可能かつ一定量以上確保可能な原料であることも重要な視点となる。
- ・国外、特にアジアでは、地域内での収集かつ大量確保の点から、次が注目されている。
コーヒー・オイルパーム・サトウキビの残渣、ホテイアオイなど

○バイオ炭の施用状況⁴⁾

- ・環境省の調査によると、国内での2018年度のバイオ炭の施用量は約2,500t、CO₂貯留量は約5,000t-CO₂と見積もられている。
バイオ炭の使用量を1haあたり10tとすると、バイオ炭を施用している農地面積は250haとなり、日本の農地面積450万ha(平成27年度)の0.006%ほどとなる。

○バイオ炭の普及活動

- ・日本の農業全体で温暖化抑制に積極的に取り組むため、山梨県が提案して4パーミル・イニシアチブ推進全国協議会が令和3年2月に設立された。令和6年12月時点の参加者数は66（県・自治体、大学など研究機関、民間団体）、展開を全国的に広げつつある。
（注）4パーミル・イニシアチブ：土壌中の炭素量を毎年4パーミル（4/1000）増やすことができれば、大気CO₂の増加量を相殺し、温暖化を防止できるという考え方に基づいた国際的な取り組み
- ・立命館大学内に設置されている日本バイオ炭コンソーシアムは国内外のバイオ炭の貯留に係る社会実装の加速化を目指しており、令和5年2月時点の会員は40以上（産業界、学術・研究機関、自治体、農業法人やNPOなど）、会員によるビジネス・エコシステムの形成を通じバイオ炭の社会実装が広がりを見せている。
- ・日本クルベジ協会は、バイオ炭の農地施用によるJ-クレジット制度運営管理事業とクルベジ普及事業を展開している。
（注）クルベジ：クールベジタブルの略。意味合いは、CO₂を減らすことで地球を冷やす野菜（炭を入れた畑で作った野菜のこと）。

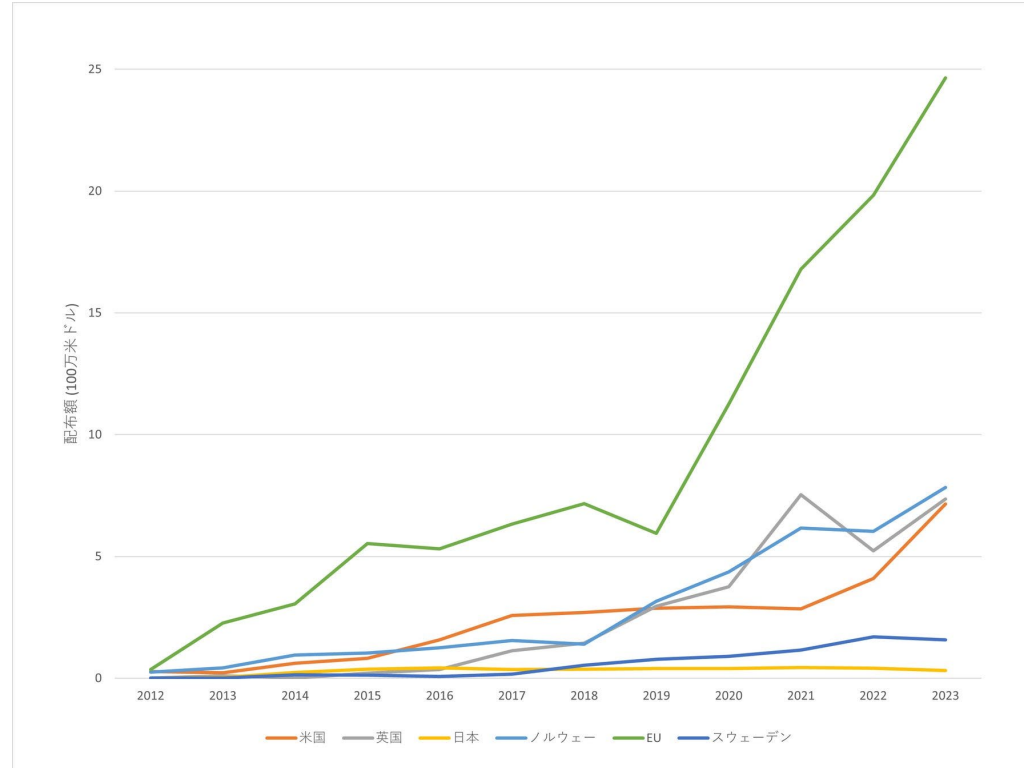
2. バイオ炭（2）研究動向 ー国別比較ー

○研究動向（論文発表のトレンド）

- ・2009年にBiocharに関する国際会議が多数開催され（「IBI conference」「USDA-SSSA biochar」「Asia-Pacific biochar」「北米biochar会議」）、その後に論文発表が増加し、2020年には2,500報に達した⁵⁾。

○バイオ炭に関する国別グラント⁶⁾

- ・2012年から2023年までのバイオ炭に関連するグラント（競争的資金）の採択件数における上位五ヶ国の動向は、それぞれ増減があるものの、長期的には増加傾向。公開直後のグラント情報にはデータベースに格納されていないものもあり、直近の集計値は過小評価の可能性がある。



【ポイント】

- ・2012年から2023年までのバイオ炭に関連するグラントの国別付与額推移件数に関しては突出した国はない。

- ・配賦額ではEUがとびぬけて多い。
（2023年配付額：EU約2500万ドルはノルウェー、英国、米国の約3倍）
この背景にはEUでいち早く政権主導の国家プロジェクトが立ち上がったことがある。

- ・中国はグラントデータ非公開のため調査対象から除外されている。

図2 バイオ炭に関連するグラントの国別付与額推移(2012～2023年)
アスタミューゼ株式会社 バイオマスによる二酸化炭素固定技術

2. バイオ炭（2）研究動向 ー国内事例ー

○国内 国プロおよび大学等研究機関や民間団体による研究を元に研究動向を見る。
【国プロ】

みどりの食料システム戦略実現技術開発・実証事業⁷⁾（R2-6）

-農地土壌の炭素貯留能力を向上させるバイオ炭資材等の開発-
（実施者）福井県、農業・食品産業技術総合研究機構、
立命館、秋田県立大学、他

[令和5年度 研究実績報告書から抜粋]

- ・“N₂O低排出型バイオ炭資材” “鶏ふんを原料とするバイオ炭”の評価や肥料効果の確認が行われた。
- ・“地域で生産されたバイオ炭を用いた農業現場での施用”
“地域毎（北海道・中国・九州）のバイオ炭施用”において、
作物収量データなどの収集や効果確認が行われた。
- ・“農地への最適なバイオ炭施用条件”が研究成果として提示される予定。

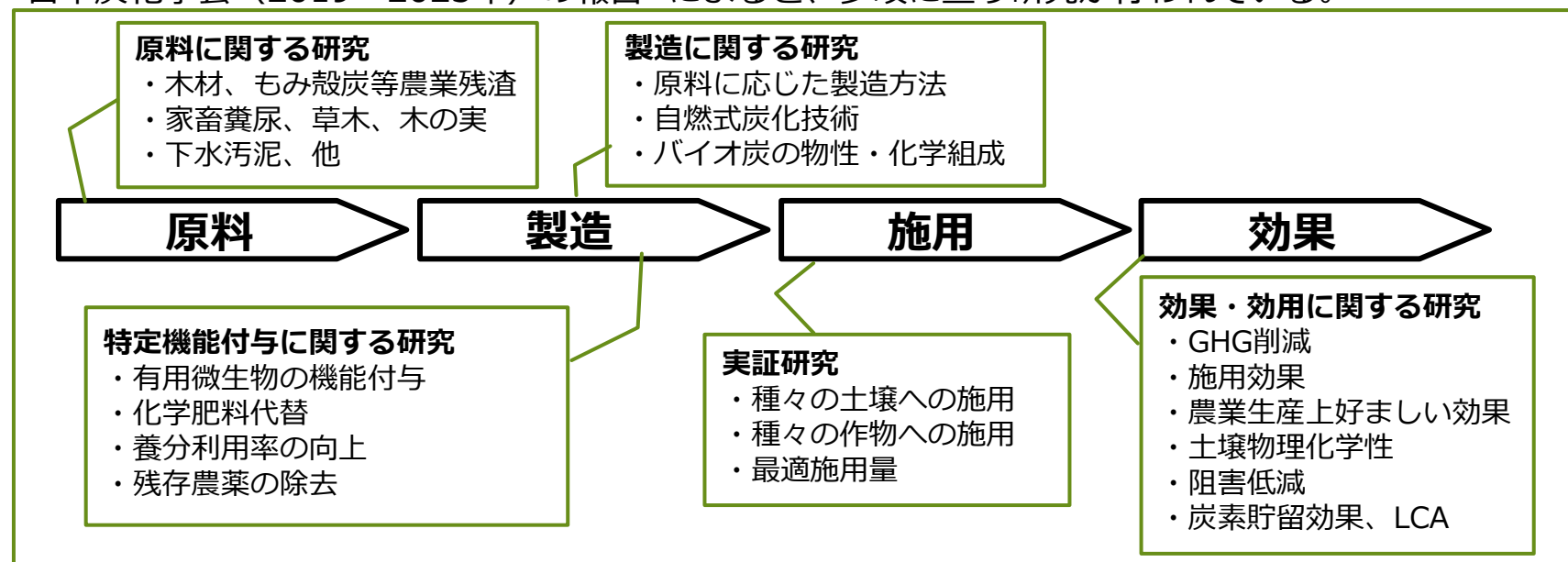
グリーンイノベーション基金事業⁸⁾（R4-12）

-高機能バイオ炭の製造・施用体系確立に関する研究-
（実施者）株式会社ぐるなび、片倉コープアグリ株式会社、他
[全体計画から抜粋]

- ・イネもみ殻等高機能バイオ炭の開発
“有用微生物の探索・同定・培養法の確立”
“バイオ炭と有用微生物等を組み合わせた高機能バイオ炭開発”
- ・高機能バイオ炭等によるCO₂固定効果の実証・評価
“バイオ炭の連年施用に伴う農作物影響調査”
“高機能バイオ炭の農地施用体系等の確立”
“高機能バイオ炭施用効果の現地実証試験”
“環境価値評価手法の開発” “環境価値評価システムの検討開発”

【大学等研究機関や民間団体による研究】

日本炭化学会（2019～2023年）の報告⁹⁾によると、多岐に亘り研究が行われている。



○参考：近年の欧米における政府主導の研究事例

【EU】⁶⁾

2019年末に発表された欧州グリーンディールにもとづき、「2050年までに排出ゼロを達成する世界初の大陸になる」ことを目標に、さまざまなEU圏内のプロジェクトが立ち上げられている。政権主導ということもあり、2020年以降、毎年1000万ドルをこえる資金が投じられている計算となる。プロジェクトの起案は2023年以降も継続されており、EU各国での研究はさらに活性化すると考えられている。廃棄物を利用するテーマが多い。

＜予算配付額の大きいグラントの事例（グラント主体、研究期間）＞

- ・地域の固形廃棄物の中で最も回収率の低い食品廃棄物を肥料化する研究（EU、2021～2024年）
- ・処理の難しい農業廃棄物を熱分解と熱堆肥化によりバイオ炭と堆肥を生成し農家の地域特性に応じた解決策の研究（EU、2024～2027年）
- ・食品廃棄物を持続可能な土壌改良剤に変え土壌健全性と食料システム改善を図る研究（EU、2023～2027年）
- ・バイオ炭の安定性とGHGの土壌排出への影響に関する英国初の包括的評価（英国、2021～2025年）

【米国】

米国農務省(USDA)の研究機関である農業研究局(ARS) が運営する“ARS National Programs”において2020年以降に報告されたバイオ炭に関する研究報告の中で重要性の高いテーマを以下に示す。個別具体的テーマが多い。

＜研究事例（報告年）＞

- ・綿繰り機からの廃棄物とクルミの殻の熱分解に由来するバイオ炭の物理化学的特性（2023年）
- ・バイオ炭と土壌中ミネラルや有機物との反応および相互作用の経年変化（2023年）
- ・バイオ炭が土壌に取り込まれた後の微生物の存在量と活動に与える影響（2020年）
- ・バイオ炭の土壌導入が窒素の形質転換プロセスとその基礎となる微生物メカニズムに与える影響（2020年）
- ・バイオ炭が保有する栄養素、高い多孔性と保水能力が土壌微生物の生存率を向上させる特性（2023年）
- ・サトウキビ残渣由来のバイオ炭が土壌の性質とサトウキビの収穫に及ぼす影響（2022年）
- ・バイオ炭との共堆肥化によるメタンなどのガス排出量の削減効果（2023年）
- ・高湿度のミシシッピデルタにおけるバイオ炭の効果：トウモロコシの成長、収量、経済性（2023年）

2. バイオ炭（3）課題と今後の研究開発の方向性 -1-

○バイオ炭は、炭素の長期固定作用を持つ一方で多孔質構造による保水性・保肥性・通気性を備えており
土壌改善効果を有するが、作物収量の向上やバイオ炭の利用拡大に向けた研究課題の重要性が高まっている。

現状

温暖化防止活動を進展させる仕組みが構築されている

- ・J-クレジット制度導入
- ・クルベジ協会の活動

普及活動が拡大している

- ・4パーミル活動
- ・立命大バイオ炭コンソーシアム会員によるビジネス・エコシステム形成

研究開発が展開されている

- ・国プロ
- ・大学研究機関等の独自研究

バイオ炭の未解明分野の存在 バイオ炭の広がりが不十分な原因

1. 原料・製造条件・製造方法等に関する未解明事象
2. 効果面の未解明事象
 - * バイオ炭の種類・対象作物
 - ・ 土壌性質・気候・作物種類毎の施用量・効果の関係
 - * 長期試験や実証試験が少ない
3. リスク面の未解明事象
 - * 有害事象
 - * 潜在リスク
4. 経済メリットの不透明さ
 - * 製造業者
 - * 農家
5. バイオ炭の普及拡大と資源循環システム構築における問題
 - * 残渣を含む原料の確保・利用
 - * 継続性を有する循環システム

課題

【課題 1】

バイオ炭の原料や製造条件に関する研究開発

【課題 2】

バイオ炭による効果の更なる解明

【課題 3】

バイオ炭による弊害事象や潜在リスクの回避

【課題 4】

農家・製造業者の経済メリットの明確化

【課題 5】

バイオ炭による資源循環システムの構築

【課題1】バイオ炭の原料や製造条件に関する研究開発

背景に、原料の多様性への対応、生産過程でのGHG発生、炭化炉の劣化などがある。研究開発の方向性として、最適な製造条件や製造方法、炭化炉の改良、作物の収量向上などの効果をもたらす高機能バイオ炭などの研究が挙げられる。

<背景>

- ①日本には、白炭、黒炭、オガ炭、粉炭、竹炭の他に、家畜糞尿、木材、草本、もみ殻・稲わら、木の実、汚泥、ガス化発電残渣などに由来する様々なバイオ炭が存在する。このことから、バイオ炭分析用の独自の規格が必要との指摘がある¹⁰⁾。
- ②バイオ炭はその生産の過程で、CO₂の他に、CH₄とN₂OなどのGHGを発生させることが知られており、炭化炉にGHG発生を抑える機能を備え付けることが重要である。
- ③炭化炉については、バイオ炭の製造過程で炭化炉からクロムが溶出しバイオ炭に混入するものがあるとの指摘があり、究明が必要である。他方で、東北大学ではクロム検出技術を開発中である¹¹⁾。また、炭化炉は高温に晒されることから劣化が早い傾向がある。
- ④バイオ炭の施用目的の一つに作物の収量や品質の向上が挙げられる。バイオ炭の肥料作用を高めるため、バイオ炭への土壌微生物の定着や堆肥の混合、家畜糞尿由来のバイオ炭などの開発を進める必要がある。
- ⑤バイオ炭を日本から世界へ広める活動が日本バイオ炭普及会等により展開されており¹²⁾、これからの研究が望まれるアジアなど熱帯地域に関しては、原料・標準品の作成・高温多湿の影響・土壌環境の影響などの研究が必要とされている。

<研究開発の方向性案>

- ・バイオ炭原料の種類に応じた最適な製造条件や製造方法の研究 ①
- ・バイオ炭製造過程において発生するCH₄などGHGと炭化炉・炭化方法の調査 ②
- ・炭化炉の改良研究（GHGの吸収と燃焼機能を備えた炭化炉、炭化炉の耐性強化） ②③
- ・高機能バイオ炭の研究開発（微生物群定着・堆肥混合などによる作物の生育促進や耐病性の向上） ④
- ・熱帯地域にバイオ炭施用を広めるための研究（原料、高温多湿・土壌・微生物等熱帯環境の影響） ⑤

【課題2】バイオ炭による効果の更なる解明

背景に、土壌の性質等条件の多様性、大規模・長期試験の少なさ、NETs技術の組合せ利用などがある。研究開発の方向性として、多様な条件毎の効用、大規模・連用・長期、組合せ効果の研究が挙げられる。

<背景>

- ①農家が圃場にバイオ炭を施用する上では、気候風土・土壌性質・対象作物・バイオ炭の性能・バイオ炭の施用量および効果の関係が明確にされていることが望ましい。
地域毎のバイオ炭施用効果の確認と農地への最適なバイオ炭施用条件に関する研究が、みどりの食料システム戦略実現技術開発・実証事業⁷⁾（R2-6）の中で実施されている。
なお、日本バイオ炭普及会により、農業者・園芸愛好家向けにバイオ炭の施用目安¹³⁾が示されている。
- ②バイオ炭が土壌の健康、作物の生産性、土地の再生、気候変動の緩和を改善する効果は、これまでに広く研究されてきた。他方、これらの研究では、土壌の種類、作物、バイオ炭の種類、環境に応じて、土壌が明らかに改善された結果から対照群と比較してほとんど差がない結果まで様々であるとFAOは指摘している¹⁴⁾。
- ③現在適用されているバイオ炭の効果などを確認するためには長期的な研究が必要である。人工条件を用いたバイオ炭の研究が行われているが、実際のフィールド条件は異なる場合があるため、長期的なフィールド調査が必要になるとの指摘がある⁵⁾。
他方、バイオ炭の特性と効用との関係をより体系的よりメカニズム的に解明すること、バイオ炭の農地施用における大規模や長期連用効果の解明の重要性が指摘されている。¹⁵⁾
- ④バイオ炭単独の施用のみならず、果樹園での下草管理（草生栽培）など他のNETs技術を組み合わせた利用¹⁶⁾が行われている。

<研究開発の方向性案>

- ・原料や熱分解条件により相違が生じるバイオ炭の特性と効用効果の定量化、バイオ炭の特性と効用との関係性のより体系的解明及びそれらの整理。バイオ炭施用と作物の品質向上の検証研究 ①
- ・バイオ炭の大規模施用、長期連用、長期実証試験によるバイオ炭の効果検証や環境影響の解明 ②③
- ・複数のGHG削減技術の組み合わせに関する技術の確立 ④

【課題3】バイオ炭による弊害事象や潜在リスクの回避

背景に、バイオ炭や土壌条件によっては有害作用が起こる可能性、バイオ炭の施用による CH_4 、 N_2O などの収支に与える影響の把握が不十分などがある。

研究開発の方向性として、バイオ炭が及ぼす種々の影響に関する情報の収集・分析・整理、環境への影響を総合的に評価するLCAに関する研究が挙げられる。

<背景>

- ①バイオ炭や土壌の組み合わせによっては有害な作用を及ぼす場合もあり、どのような使用においても有用になるとは限らないこと¹⁷⁾、バイオ炭の効果は、土壌の種類や健康状態（劣化または健全）、土壌温度、土壌水分などに依存すること¹⁸⁾、効果やその発現メカニズム等未だ科学的ではないもしくは解明されていない部分が相当存在すること¹⁹⁾、が指摘されている。
- ②いずれも海外の報告であるが、バイオ炭施用が作物の収穫量を減少させた事例²⁰⁾、土中のバイオ炭が農薬を吸収し農薬の効果を低下させる事象²¹⁾、不適切な種類のバイオ炭による土壌微生物叢への悪影響や炭素貯蔵能力を低下させる可能性²²⁾の指摘がある。
なお、バイオ炭の過剰施用による土壌pHの上昇については、バイオ炭の使用目安が示されている²³⁾。
- ③バイオ炭に存在する潜在的な汚染物質による土壌汚染のリスクや、バイオ炭を生産する際の全球的なGHG排出のリスクを回避するためには、適切な規制メカニズムが必要であるとFAOが指摘している¹⁴⁾。
- ④バイオ炭の圃場への施用効果の体系的理解（施肥的效果、副次的効果などを網羅）を深める上で、 CH_4 、 N_2O などの収支に与える影響の把握に関する研究の必要性が指摘されている¹⁰⁾。

<研究開発の方向性案>

- ・バイオ炭が及ぼす種々の影響に関する情報の収集・分析・整理
（農薬吸収、土壌の微生物叢など生態系への影響、土壌汚染リスク、
バイオ炭を生産する際のGHG排出リスク） ①②③
- ・LCA（長期施用時の炭素固定効果、施用後の流出による影響、バイオマス資源の利用可能性など） ④

【課題4】利用農家、製造業者におけるバイオ炭の経済メリットの明確化

背景に、バイオ炭の価格が高く補助金なしでは施用する農家に経済メリットがないこと、バイオ炭の生産側の経済メリットも小さいことがある。研究開発の方向性として、経済成立条件、ビジネスモデル、欧米のインセンティブ策、費用対効果の高い製造方法・製造システムの研究が挙げられる。

<背景>

- ①バイオ炭は、ある種の肥料と同程度か多くの堆肥より価格が高い。バイオ炭の大規模生産が経済的に成り立つのは、補助金の支給や炭素排出量削減政策による化石燃料の価格上昇の場合に限られるとの指摘がある²⁴⁾。
- ②利用農家にとり、バイオ炭の施用が経済的に成立するか不明確である。バイオ炭の農地施用に対するインセンティブである環境保全型農業直接支払交付金（5,000円/10a）が終了すると生産者はインセンティブを失うことになる。

参考：1haの収益試算（生物系特定産業技術研究支援センター）

- | | |
|----------------|--|
| a. 交付金 | 50,000円 |
| b. J-クレジットの売却益 | 4,058円（2023年5月再エネ発電のクレジット平均販売価格3,246円/tx1.25*） |
| c. バイオ炭等資材購入費 | 40,000円（800円/10kgx0.5t/ha） |
| d. 収益（a+b-c） | 14,058円 |

* バイオ炭1t当たり炭素貯留量=1tx0.77(炭素含有率)x0.89(100年後炭素残存率)x44/12x0.5 /ha=1.25

- ③バイオ炭製造による利益確保を目指した取り組みや研究が行われている。
 - ・ガス化発電の副産物となるバイオ炭の活用（乳牛の敷料、バイオ炭牛糞たい肥）²⁵⁾
 - ・バイオ炭生産と排熱を利用した発電を組み合わせたコプロダクションシステムの構築²⁶⁾上記2事例により、日本各地の未利用バイオマスの有効活用、地域分散型エネルギー生産および炭素隔離を同時に実現できる可能性が示唆される。

<研究開発の方向性案>

- ・バイオ炭の製造・流通・施用が経済的に成立する条件、ビジネスモデル等の研究 ①②③
- ・欧米のバイオ炭施用インセンティブ策の研究 ①②
- ・費用対効果の高いバイオ炭の製造方法・製造システムの研究 ③

【課題5】バイオ炭による資源循環型エコシステムの構築

背景に、バイオ炭の施用拡大に大量かつ継続的な原料確保が必要なこと、未利用かつ多様なバイオマスの存在などがある。

研究開発の方向性として、新たなバイオマスの探索、バイオ炭製造と組み合わせが可能な発電などのシステム、継続性の高い資源循環型エコシステムの研究が挙げられる。

<背景>

- ①バイオ炭の施用を拡大するためには、大量のバイオ炭原料の確保と製造施設の建設、および継続性を保つ基盤となる地域に根差した資源循環型エコシステムの構築が重要となる。他方、GHG削減による気候温暖化効果を積極的に獲得するためには、バイオ炭の施用場所を農地に限らず、緑地や林地へ拡大することが必要となる。
- ②大規模なフィールド試験からの情報はまだ限られているが、これは市場に出回っているバイオ炭のコストが高いことが原因と推測される。あらゆる種類の有機廃棄物からバイオ炭を大規模に生産することはコスト削減に役立つ可能性がある（FAOは指摘している¹⁴⁾）。
- ③バイオ炭の施用は地力を向上させ、持続可能な農業の構築に役立つだけでなく、同じ地域の林地残材や畜産排せつ物など「未利用バイオマス」をバイオ炭の原料とすることで、地域全体の活性化や環境の改善に貢献できるとの指摘がある²⁷⁾）。
- ④低コストでバイオ炭を生産するのに役立つ技術に関する研究が必要である。大きな課題の1つは、多くの大規模なバイオ炭製造会社がビジネスの維持に苦労している。エネルギーのリサイクルを含む可能な限りすべての利益を集約する努力の重要性、持続可能なバイオマス源を得ることの必要性、廃棄物バイオマス（都市ごみ）の利用も選択肢の一つであること、ただし多様なバイオマスを扱うには適切な技術が必要との指摘がある⁵⁾）。

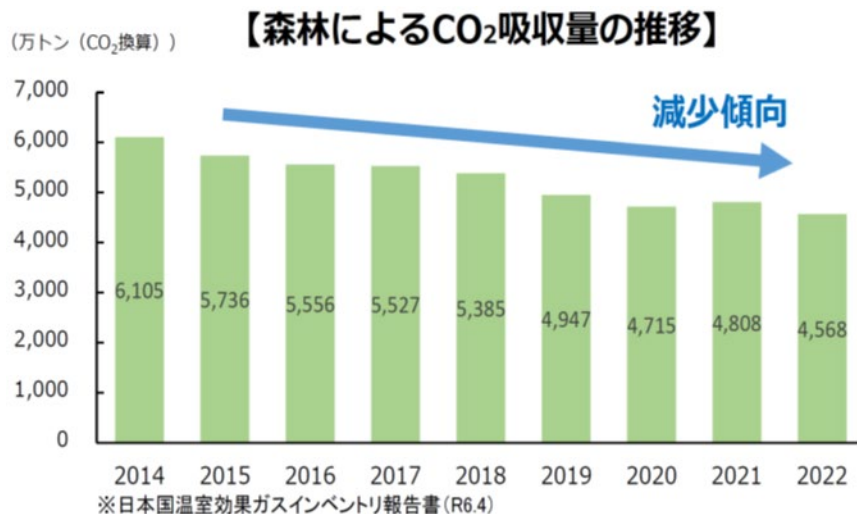
<研究開発の方向性案>

- ・持続可能で大量確保が可能な原料（バイオマス）の探索および確保方法の研究 ①②③
- ・バイオマス発電などバイオ炭製造と組み合わせが可能なシステムの研究 ①
- ・日本に適した地域に根差した資源循環型エコシステムの研究と構築 ①④

3. 森林の循環利用（1）技術の概要 -1-

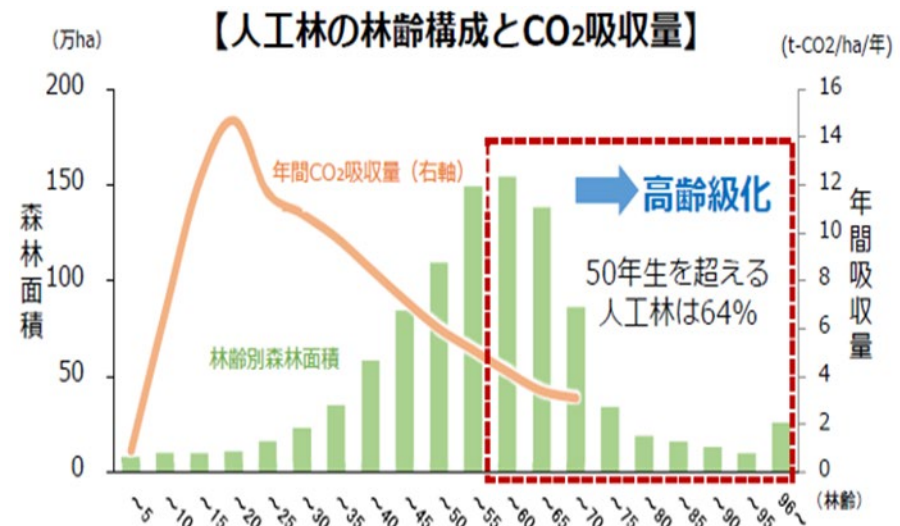
①日本の森林・林業の実情と変遷

- ✓日本の森林面積は国土面積の約7割
→自然プロセスを利用したNETsとして、森林の役割は極めて大きい。
- ✓日本の森林の約4割（1,020万ha）を占める人工林は**高齢化(64%が50年生超)**が進んでおり、**本格的な利用期**を迎えている。
- ✓日本の森林の**CO₂吸収量は年々減少**傾向にあり、**高齢林ほど少ない**傾向にある。
- ✓日本の森林では木材価格の低迷や造林等の費用負担が大きいことなどから森林所有者等が林業経営に関心を持ってない状況にあり、**主伐後の再造林率が低い(3~4割)**



(出典) 林野庁HP(<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kouhou/kyushuryo.html>)

日本の森林によるCO₂吸収量の推移



人工林の齢級構成とCO₂吸収量の変化

3. 森林の循環利用（1）技術の概要 -2-

② 森林の循環利用の概要¹⁾

・ IPCC等では自然プロセスによるNETs（森林分野）→「**植林・再生林**」を提唱

✓「**植林**」は日本には不適 ✕ ←日本の森林面積の純増は現実的に困難

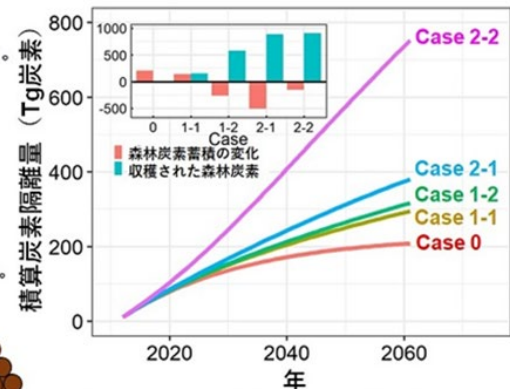
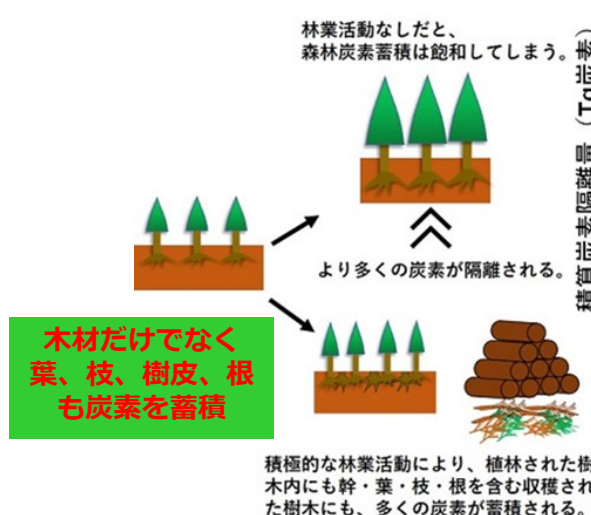
✓「**再生林**」率は向上可能 ○ **高齢木の伐採・利用**→ **積極的な林業活動**→ **木材の利用拡大**
木を植える→若齢木増加→ **CO₂吸収・蓄積量の最大化**へ **CO₂貯蔵量が増加!!**

日本の森林・林業事情を考慮し、

「森林の循環利用」
「刈って、使って、植える」を提案



森林の循環利用のイメージ



Case 0: 林業活動無し、Case 1-1: 現況（森林白書ベース）の伐採・植林、Case 1-2: 現況（森林・林業統計要覧ベース）の伐採・植林、Case 2-1: Case1-2の2倍の伐採率、Case1-2と同じ植林率、Case 2-2: Case1-2の2倍の伐採率、植林率100%

図.森林は、たくさん伐ってたくさん植えたら、たくさん炭素を蓄える

出典：東京大学大学院農学生命科学研究科・農学部HPより

(https://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/topics_20240422-1.html)

③森林の炭素蓄積について^{2,3)}

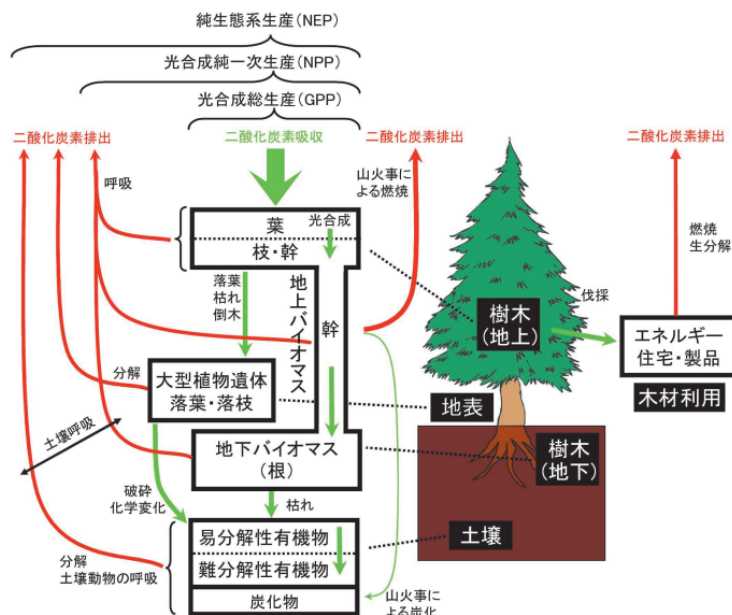


図2 森林生態系における炭素の流れ

✓炭素は、樹木、地表の堆積有機物、土壌中の有機物、木材利用の4形態で貯留

出典：農林水産省農林水産技術会議、農林水産研究開発レポート,8,(2003)

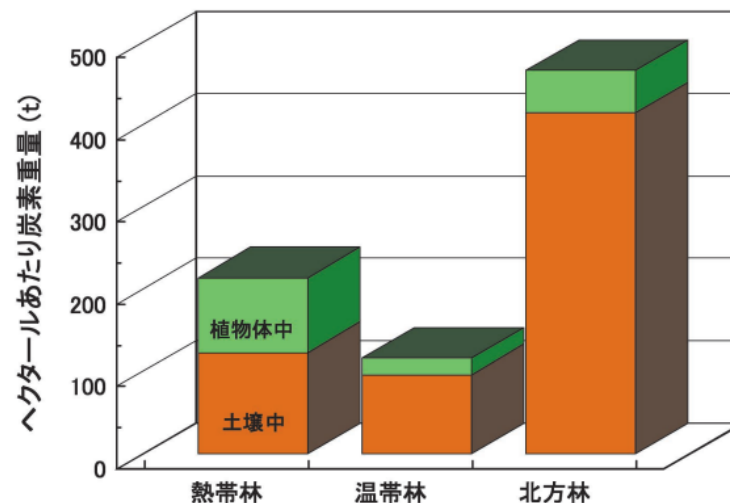


図3 世界の森林の土壌中と植物体中の炭素量

✓炭素蓄積量は土壌＞植物体。
データはEric S.Kasischke et al (2000)による

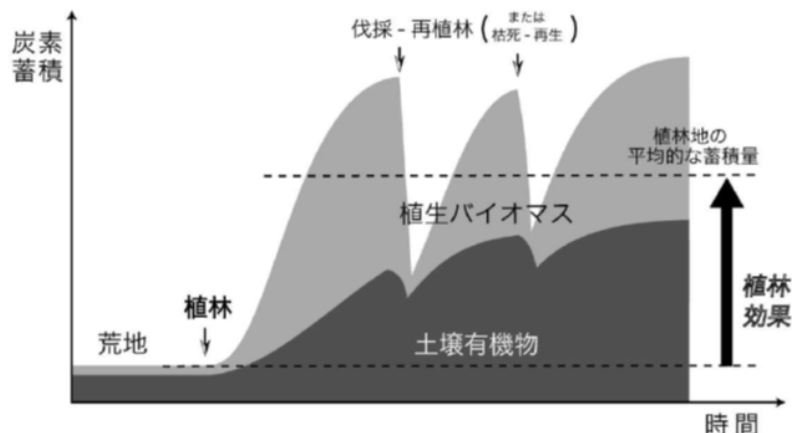


図.植林の実施前後における炭素蓄積量の変化

出典：国立環境研究所地球環境研究センターHP

(https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/3/3-2/qa_3-2-j.html)

✓長期的には土壌中に蓄積される炭素は着実に増加

④森林の循環利用の概要2

日本の森林・林業の事情を考慮し、自然プロセスによるNETsの一手段である「森林の循環利用」を推進するために高齢化する森林の伐採によって生産される木材を供給し、建築物等としての**木材等の利用拡大**を推進すると共に、森林・林業基本計画に基づき、間伐の適切な実施や、再造林等の森林整備(**森林の早期再生・回復**)を併せて実施することが必要となる。

この取り組みを成立させる上で重要な条件！！^{4,5)}

★「木材を消費する速度が森林の成長速度を超えないこと」

★「国産材の供給拡大と再造林は必須であり、
木材等の利用・国産材供給・再造林を同時に進めること」

森林の循環利用

「森林の早期再生・回復」に係る技術

- ・「森林経営の基礎となる資源量の把握」
- ・「新技術を活用した「スマート林業」
ハーベスタ等の作業機械の自動化・半自動化
伐採後の植林のためのアシストスーツの開発など
- ・「早生樹・無花粉樹やエリートツリーの育成」

森林の早期再生・回復



木材生産流通管理システム

木材等の利用拡大

「木材等の利用拡大」に係る技術

- ・「中高層建築物等での木質化の促進に向けた技術開発」
- ・「木材を利用することのメリットの評価方法」
- ・「化石資源の代替と成り得るマテリアルとしての利用技術の開発」
- ・「カーボンニュートラルな燃料の開発」

「ICT活用による木材の生産流通管理システムの開発」

①「森林の早期再生・回復」に係る技術

A 最新の技術を用いた森林資源量の把握技術^{6,7)}

近年は、ドローン等による計測が容易になったため、成長初期から複数回にわたり行われるアナログによる調査を実施するという方向ではなく、その都度、最新の森林計測技術により簡便にコストを低く計測するという方向に向かっている。

B スマート林業に関する研究^{8~13)}

高性能林業機械が日本へ輸入されてから30~35年が経過し、この間、林業機械の研究は機械の開発というよりは、どの様に機械を使用するか、生産性は改善されたか、安全性は高まったかななどの問題に対応するものが多かった。



林野庁HPより

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaihatu/kikai/kikai.html>

植林は従来多くの人手により苗木を1本1本植えるという作業であるため造林作業者へ多大な負担をかけてきた。近年、クラッシャによる地拵えによる雑草木の抑制効果の実証、刈り払い機能と根株切削機能を併せ持った乗用型造林作業機械などの開発が進められてきている。

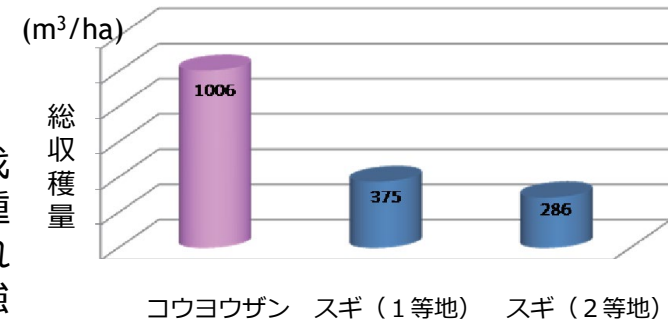
3. 森林の循環利用（2）研究動向 -2-

C 早生樹・無花粉樹・エリートツリーの開発・育成技術^{14~17)}

早生樹とは、一般的にはスギやヒノキより初期の樹高成長や伐期までの材積成長の大きな樹種で比較的短伐期で収穫可能な樹種をいう。特に、コウヨウザンは比較的早い時期から試験が行われてきた。コウヨウザンはスギのような優れた成長とヒノキの材強度を兼ね備えた樹種として注目されている。

無花粉樹は、近年、大きな問題となっているスギ花粉症対策に関する研究として進んでいる。富山県で発見された無花粉スギは実用化に向け遺伝的改良が行われている。特に、成長や材積などで遺伝的に優れた無花粉スギを作出するため、各地域の主要品種や精英樹の中で雄性不稔遺伝子を保有するクローンを探索し、それらを交配親とした研究が行われている。

エリートツリーとは第2世代以降の優良樹の総称で、全国から選抜された第1世代優良樹から、特に優れた系統等を交配し作出している。成長に優れるものから選抜していることから、その活用により、下刈り回数の削減等の造林・育林コストの低減効果が期待される。



コウヨウザンと同一地域のスギの早秋閣僚の比較
林木育種情報 No.23(2017)



植栽後4年のエリートツリー「スギ九育2-203」（左6m）
と従来のスギ品種で少花粉スギの「県唐津8号」（右3m）

（国研）森林研究・整備機構HPより

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/business/sinhijnnsyu/seicyou.html>

②「木材等の利用拡大」に係る技術

A 非住宅・中高層建築物での木質化・木造化の拡大に向けた技術開発^{18~26)}

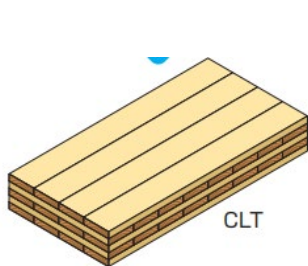
日本では建築資材等として木材が多用されており、R5の建築着工床面積の木造率は44.7%である。この内1～3階の低層の住宅等の木造率は80%を超えているが、木造率の最も多い低層住宅の着工数は今後人口減少等により、長期的には減少する傾向にある。一方で、低層の非住宅建築物での木造率は15%程度、4階以上の中高層建築物では1%以下と非常に低い傾向にある。

→利用率の低い非住宅・中高層建築物での木造化を進めることが重要。

✓強度等に優れた建築用木材であるCLT（直交集成板）、LVL（単板積層材）に関する開発・普及も進み、中高層建築物に木造を採用できる可能性が広がっている。また大径材の利用に係る研究、木構造と非木構造とを採用した構造形式である混構造など、木の質感を出すことができる木質ハイブリッド構造などの開発が行われている。

✓火災が発生し鎮火するまでの間、倒壊・延焼を防止するために必要な耐火性能を有する部材の開発や木質部材の気象劣化等のメカニズムの解明や耐腐朽等耐久性に係る技術の開発等が行われている。

✓建築物等への木材利用を促進させるための方法として、建築物中の木材による炭素貯蔵量の推定法が開発されている。



CLT

出典：森林総合研究所、季刊森林総研No.27

CLT



出典：全国LVL協会HPより

LVL



出典：2024ウッドデザイン
賞受賞作品データベースより
<https://www.wooddesign.jp/db/production/2241/>

木質ハイブリッド集成材部材



木質耐火部材

出典：森林総合研究所

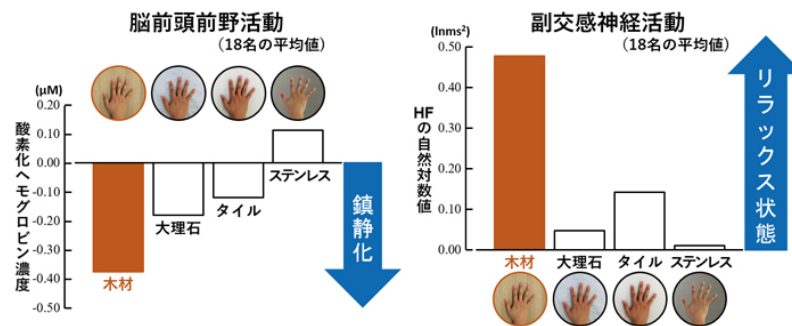
木材は炭素を
長期貯蔵

B 木材を利用することのメリットの評価方法^{27~32)}

木材は他材料に比べて環境的に優位であることが科学的に解明されている。一方で木材は人間に身近な材料であり、「あたたかみ」や「やすらぎ」を感じさせ、「人への親和性」があるというイメージがもたれている。このようなイメージに頼ることで木材利用の促進を図ることはできるが、他方、科学的根拠に基づいた「木材の良さ」をPRしていきたいという要望が高まっている。

木材の様々な要素が人間に与える影響を評価する手法の開発が行われ、木材を見たり触ったり、香りを嗅いだりすると、心拍数や血圧を下げ、副交感神経の働きを活性化することなど、人の健康に影響があることがわかってきている。

人の反応を観察、測定するための手法として、**心理的手法**（対象者の主観的申告に基づくもの）、**パフォーマンス評価法**（作業の生産性等を指標とするもの）、**動作観察的手法**（行動や視線を観察するもの）、**生理的手法**（血圧変化等を測定するもの）、**疫学的手法**（統計値等に基づくもの）などが開発されている。



【出典】 H. Ikei, C. Song, Y. Miyazaki. Int J Environ Res Public Health 14(7)801, 2017を改変

木材には人の健康増進
効果あり

図. 木材に手で触ると、脳も体もリラックスする。

3. 森林の循環利用（2）研究動向 - 5 -

C 化石資源の代替と成り得るマテリアルとしての利用技術の開発^{33~42)}

木材はセルロース、リグニン、ヘミセルロース、抽出成分等から構成された素材であり、従来はそれらの化学的特性や機能性に係る基礎研究が主体であった。最近では、基礎研究の知見をもとに、マテリアルやエネルギーとして利用する方法に係る研究が盛んになっている。

✓セルロースナノファイバー(CNF)、改質リグニンなど優れた素材が開発されている。普及を図るための利用技術や製造法の開発が行われている。

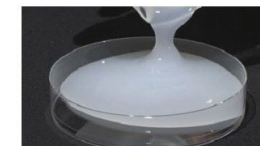
✓抽出成分は、付加価値の高い物質（精油等）の探索、基礎物性、機能性に係る研究開発が行われている。



改質リグニン



精油成分



セルロースナノファイバー

化石資源代替プラスチック
等の原料として

D カーボンニュートラルな燃料の開発^{43~49)}

石油代替のエネルギーとしては、以下のような3種類の本質系燃料の研究が展開されている。

✓固体燃料は、ペレット等の実証研究や規格化等が行われている。

✓液体燃料は、バイオエタノール、バイオディーゼル、バイオオイル、軽油、SAF（ナフサ含）等の基礎物性、製造法に関する研究が行われている。

✓気体燃料は、基礎物性、製造法、高品位化等の研究が行われている。

化石燃料の代替と成り得る
エネルギー源として

表 木質系バイオ燃料の分類

	燃料形態	燃料製造法・改質方式
固体燃料	・ペレット、 ブリケット、 ・木粉、チップ、炭	ペレタイザー、ミル、チップパー、炭化炉、ガス化炉
液体燃料 ¹⁾	木質液化油、 バイオオイル、黒液、 軽油、SAF（ナフサ含）	液化プロセス（PERC, LBL法等）、オートクレーブ法、急速熱分解法
気体燃料	バイオガス	熱分解炉・ガス化炉（固定床方式、流動床方式、噴流床方式、キルン方式）

永橋ら、日本燃焼学会誌、51, 158, 310-317 (2009) を参考に一部改変。

1) 廃食油改質油、バイオエタノールなどは情報量が多いため省略。

③ ICT活用による木材の生産流通管理システムの開発⁵⁰⁾

✓現状の木材の流通は川上の生産現場である林業事業者から川下の建築業者に供給されるまでに、多くの事業者を経由するので、需要動向の情報が行き渡りにくい。

➡ タイムラグやニーズのミスマッチが発生。

✓原木の生産現場では高性能林業機械を導入。

➡ 機械の償却を行うために年間を通じて生産を行い、素材生産量が増加するも、市場では入荷の急増を受け入れられない事態が発生。

✓川中に位置する製材事業者でも、現場の情報が見えないため安定的な仕入ができず、入札による買い付けで在庫に余裕を持たせたことで、原木市場の在庫滞留が発生

➡ 原木市場入荷停止。

**国産材の流通が必ずしもスムーズではなく、結果的に国産材のコスト高の要因になっている。
また、煩雑な作業等が必要となり、CO₂の排出を招いている。**

そこで、林業の作業工程（伐倒-造材-集材-山土場はい積み-運材-木材工場）において、各工程での木材に関連するデータ（伐採場所、林齢、材質、流通量等）を一元管理し在庫管理・進捗管理を行うシステムの開発が行われている。

今後の方向性：現場に最適なシステムとして事業展開



【課題1】最新の技術を用いた森林資源量の把握技術

＜背景＞

- ・森林はバイオマス資源として、また、CO₂の吸収源として重要な役割を担っている。森林を適切に管理・利用するためには、最新の技術を用いた森林資源量の適切な把握による森林経営計画の作成、それに基づき伐採・収穫・造林などの林業作業を実施することが必要である。このため、最新の計測機器を使用し、AIを活用して森林資源量の把握を行うことが必要である。

＜研究開発の方向性案＞

- ・ Lidar・ドローンなどによる森林計測技術
（ハードウェア、ソフトウェア）
- ・ AIなどを活用した森林資源量の把握技術



林野庁HPより

https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/smartforest/smart_forestry.html

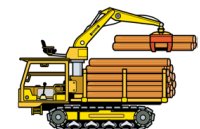
【課題2】スマート林業に関する研究

＜背景＞

- ・林業における造材・運搬作業は急傾斜地・不整地で重量物を扱うことから労働負荷が大きく労働災害の発生率が非常に高い⁸⁾。また、木材生産の労働生産性は欧米に比べ非常に低く、生産コストも高い。このような状況からスマート林業を推進し、効率的で安全な木材生産を実現することが急務となっている^{9,10)}。これらを実現するためには、各種作業機械に最新のセンサーを導入し、新たなソフトウェアを開発することにより林業機械を製作することが必要である。さらに今後は、日本の林業現場に対応したベースマシンの開発と作業を効率化するためのアタッチメントを開発することが重要になる。その先にはEV化への取り組みも必要となるだろう。

＜研究開発の方向性案＞

- ・ 造材・運搬作業の自動化・半自動化
に向けたセンサーと制御ソフト搭載
林業機械の開発
- ・ 小型の造林機械の開発
- ・ ベースマシン、アタッチメントの開発



林野庁HPより

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kaihatu/kikai/kikai.html>

【課題3】早生樹・無花粉樹、エリートツリーの開発・育成技術

＜背景＞

- CO₂の吸収源として森林は重要な役割を担っている。このため、伐採後の林地に植栽する成長の早い早生樹の開発¹⁴⁾やエリートツリーの改良などにより吸収源の拡大や生産性の向上が求められている。早生樹の開発では、材質等がまだ知られていなくどのような利用に適しているのかを探ることが重要である。また、近年、花粉症により引き起こされる様々な症状が問題となっており、これに対応した造林木の重要性が高まっている。エリートツリーの改良では、エリートツリーの2倍の成長速度を持つハイパーエリートツリーを作出する方向となる。これらを実現するためには、林木育種期間の大幅短縮に向けたゲノム編集をはじめとする先進的技術開発が必要となる。

＜研究開発の方向性案＞

- 早生樹の開発と材質、利用適性の探索
- 成長や形質のよい無花粉樹の開発
- エリートツリーの2倍の成長速度を持つハイパーエリートツリーの開発
- ゲノム編集をはじめとする先端技術の開発



林木育種センターHPより

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/ftbc/business/sinhijnnsyu/seicyou.html>

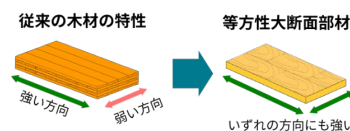
【課題4】非住宅・中高層建築物での木質化・木造化の拡大に向けた技術開発

＜背景＞

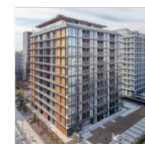
非住宅・中高層建築物等の木質化・木造化を加速するため、従来とは異なる性能を有する部材の開発が必要である。また木材によるCO₂の長期固定を進めるため、木質建築物の長寿命化に係る技術や長期間利用した木造部材を再利用に資する研究開発が必要である。

＜研究開発の方向性案＞

- ・木質建築物を長期間利用可能にするための**耐久性に優れた部材の開発**や**維持管理技術など長寿命化に係る技術**の開発並びに**長期間利用木造部材の再利用化のための性能評価技術や再利用技術の開発**。
- ・従来と異なる性能（長さと幅の両方からの荷重に強い）を有する**等方性大断面部材**の開発やそれらを歩留まりが高く効率的に製造する技術の開発。



等方性大断面部材



木造ビル

出典：NEDO グリーンイノベーション基金
HPより、<https://green-innovation.nedo.go.jp/project/agriculture-forestry-fisheries-industries/>

【課題5】木材等自然素材がもたらすセラピー効果の科学的解明

＜背景＞

様々な分野でウェルビーイング(well-being)の取り組みが行われるようになり、木材等の自然の素材を活用した空間や施設が注目されている。そのような風潮の中、木材等自然素材が人にもたらすウェルビーイング効果に関する関心が高まっており、そのエビデンスの蓄積と効果の科学的解明が必要となっている。ここで得られた知見は、木材利用の拡大に大きく貢献できると考えられる。

＜研究開発の方向性案＞

- ・木材等の自然素材が人の睡眠や作業性に与える効果等**セラピー効果**に関する研究
- ・オフィス、教育施設、医療施設などを木質化した時の**セラピー効果**に関する研究



医療施設の木質化

出典：林野庁、中大規模木造公共建築物事例集より
https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/kidukai/zirei_sankou/index.html



科学的視点から木材利用のメリットをPR

→木材利用の拡大へ

【課題6】木材等の新規利用技術の開発 1^{51~56}

マテリアル

<背景>

- ・ 建築資材に不適な未利用材や長期利用され再利用に適さない木材等も重要な炭素蓄積源であり、それらの有効な利用法の開発は重要な課題である。一方で脱化石資源化の必要性から石油代替素材として木材等のバイオマスの利用法の開発が急務となっている。そのためこれまでの研究蓄積を活かし、高機能性素材や化石資源代替工業材料の開発並びに森林資源フル活用のための総合利用システムの開発が必要である。

<研究開発の方向性案>

- ・ 「**CNF,改質リグニン**の新規用途開発並びに事業化」
樹脂複合材料、有機無機ハイブリッド材料等の開発、大量製造システムの開発
- ・ 「**化石資源代替工業材料**」等の開発
セルロースから高性能繊維、液晶材料、バイオプラスチック等の開発、微生物代謝機能を利用して機能性バイオプラスチック基幹物質の製造に係る技術開発、
- ・ 「**木材成分総合利用システム**」の開発
森林資源フル活用のためのサーキュラーエコノミーを志向した木材成分総合利用システムの開発



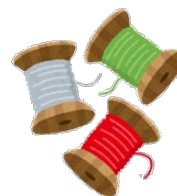
出典：森林総合研究所
微生物機能を利用してリグニンから製造した機能性バイオプラスチック基幹物質



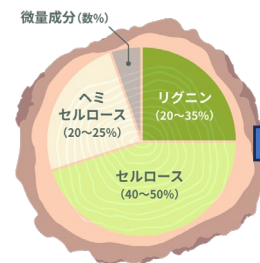
各種樹脂製品



セルロース由来
撥水性繊維



セルロース由来
発色性繊維



森林資源

サーキュラーエコノミー
を志向



総合利用システム



工業材料、化成品、医薬品原料等



カーボン
繊維強化材へ

出典：農林水産省HP,
https://www.maff.go.jp/j/pr/aff/2209/spe1_03.html

改質リグニン樹脂複合材料



出典：森林総合研究所

セルロースナノファイバーを利用した成形品

3. 森林の循環利用（3）課題と今後の研究開発の方向性- 5 -

【課題7】木材等の新規利用技術の開発^{257~65)} -森林循環利用に必要なカーボンニュートラルな燃料等-

エネルギー

<背景>

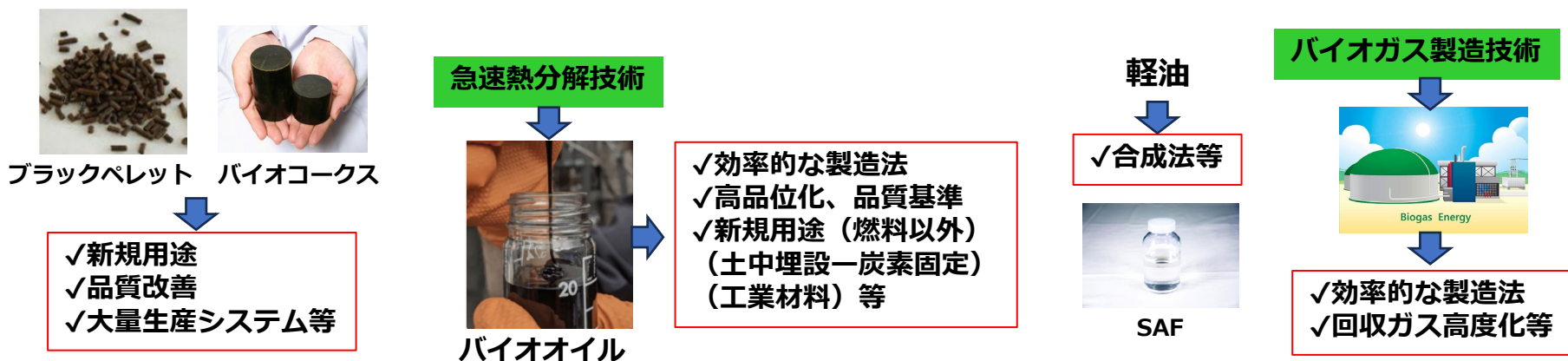
「森林の循環利用」の各工程ではエネルギー必要である。それらのエネルギーは、現状石油資源に依存している。循環利用のサイクルを円滑に回し、NETsに貢献するためには、石油代替と成り得る森林資源を原料とする**カーボンニュートラルな燃料**が必要となっている。また、エネルギー利用のための**国産材に適した「熱電併給システム(CHP)」**の開発も急務となっている。

<研究開発の方向性案>

カーボンニュートラルな燃料

- ・ 固体燃料：トレファクション技術を活用した**ブラックペレット**、**バイオコークス**の品質改善、新規用途並びに大量生産システムの開発等。
- ・ 液体燃料：**バイオオイル**[収率向上を目指した製造法（マイクロ波超高速熱分解技術等）、原料調達～製造までを含めたシステム開発、オイルの高品位化（脱酸素反応触媒の利用）、新規用途（土中埋設による炭素固定、工業材料の開発等）]等。
軽油[木材ガス化-精製-反応等連続合成システムの開発]等。
(参考) ***SAF**（ナフサ含）[原料供給、製造技術・プロセスの最適化、製造コスト低減化、経済性評価]
* SAFは需要が多く注目度が極めて高いが、森林の循環利用とは直接関連性が低いため、(参考)とした。
- ・ 気体燃料：**バイオガス**[効率的な製造法開発（タール発生低減技術）、回収ガス高度利用（水素をリッチな状態にする研究）] 。
- ・ 国産材に適した**熱電併給システム（CHP）**の開発。

等



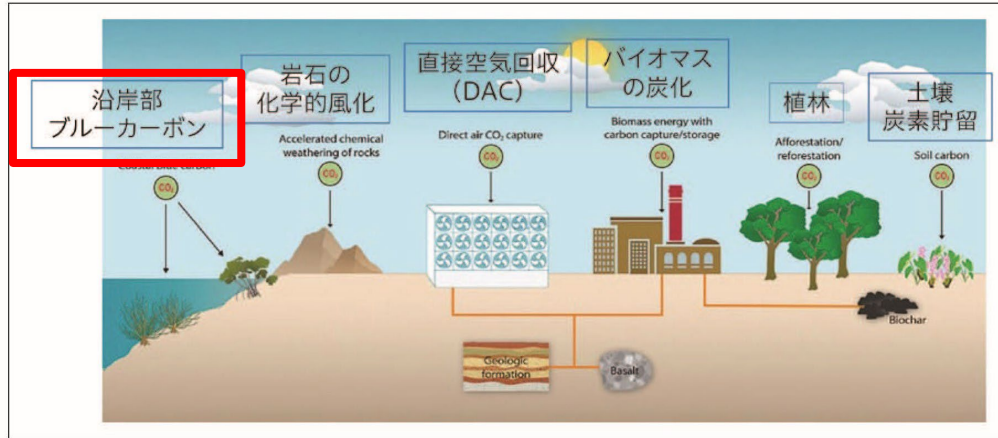


図1 ネガティブエミッション技術の例

（出典）バイオマスとCO₂吸収源としたネガティブエミッション技術（JST 2021）²⁾

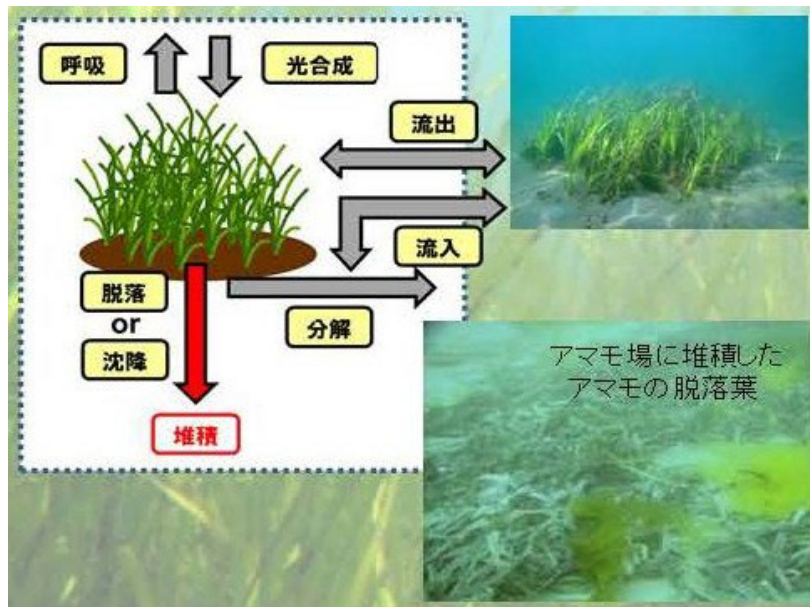


図2 アマモ場における炭素固定とフロー

（出典）藻場・干潟の二酸化炭素吸収・固定のしくみ（水産庁 2014）³⁾

【ブルーカーボン】

2009年に国連環境計画（UNEP）の報告書において、海草（アマモ類等）藻場、塩性湿地、マングローブ林に取り込まれた炭素が「ブルーカーボン」と定義され（図1）、ブルーカーボン生態系は新たなCO₂吸収源としてネガティブエミッション技術（NETs）要素の一つとなった¹⁾。

【ブルーカーボン生態系の炭素貯留】

アマモ藻場では、光合成総生産量の33%が分解され、45%がアマモ場内に堆積し、22%がアマモ藻場外に流出する（図2）。また、アマモ藻場の堆積物の調査から、アマモ由来の有機炭素が数千年もの間、貯留されていることが明らかになっている³⁾。

同様に、塩性湿地、マングローブ林においても、植物体由来の有機炭素が長期間にわたり堆積していることが知られている¹⁾。

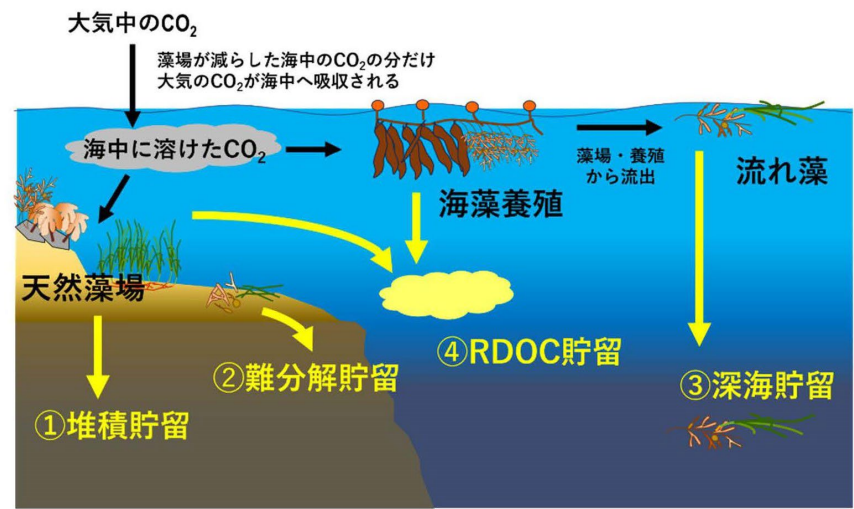


図3 ブルーカーボン生態系における有機炭素の貯留プロセス
(出典) 海草・海藻のCO₂貯留量算定ガイドブック
(水産研究・教育機構 2023) 4)

表1 藻場タイプ別の算定対象貯留プロセス
(出典) 我が国インベントリにおける藻場（海草・海藻）の算定方法について（環境省 2024） 5)

藻場タイプ		主要種	貯留プロセス			
			堆積貯留	深海貯留	RPOC貯留	RDOC貯留
海草藻場	アマモ型	アマモ、スゲアマモ、コアマモなど	○	○	○	○
	タチアマモ型	タチアマモ	○	○	○	○
	スガモ型	スガモ、エビアマモなど		○	○	○
	垂熱帯小型	ウミヒルモ類、マツバウミシジサ、コアマモ（垂熱帯型）など	○	○	○	○
	垂熱帯中型	リュウキュウスガモ、ベニアマモリュウキュウアマモなど	○	○	○	○
	垂熱帯大型	ウミシヨウブ	○	○	○	○
海藻藻場	コンブ類	マコンブ型		○	○	○
		ナガコンブ型		○	○	○
	アラメ・カジメ類	アラメ型		○	○	○
		カジメ型		○	○	○
		ワカメ、ヒロメなど		○	○	○
	ガラモ類	温帯性ホンダワラ型	○	○	○	○
		亜熱帯性ホンダワラ型		○	○	○
	小型海藻類	小型緑藻型		○	○	○
		小型紅藻型		○	○	○
		小型褐藻型		○	○	○

【海藻・海草藻場及び増養殖と炭素貯留】

顕花植物であるアマモなどの海草類は、陸上植物と同様に堆積物中に根を張って生育し、枯れた部分がさらに堆積していく。そのため、海草藻場では、固定された炭素の多くが藻場内に堆積貯留される（図3の①）。ワカメなどの海藻類は、露出した岩盤等に固着して生育するため、堆積物のない海底で藻場を形成する。枯れた部分や分泌有機物等は、図3の②～④の形で海底や海中に貯留されると考えられる。

海藻・海草藻場は表1のように炭素貯留に貢献していると考えられ、我が国ではその貯留量の算定方法を確認し、2024年のGHGインベントリに反映することになった⁵⁾。

また、海藻養殖の場合も、藻場と同様に一定量の有機炭素が海底・海水中に貯留されると考えられる（図3の②～④）。

以上より、海藻・海草の藻場の維持・造成や養殖は、大気中のCO₂の吸収・貯留の役割を持つが、これらをNETsとして位置づけるためには、さらなる研究・技術開発が必要である。

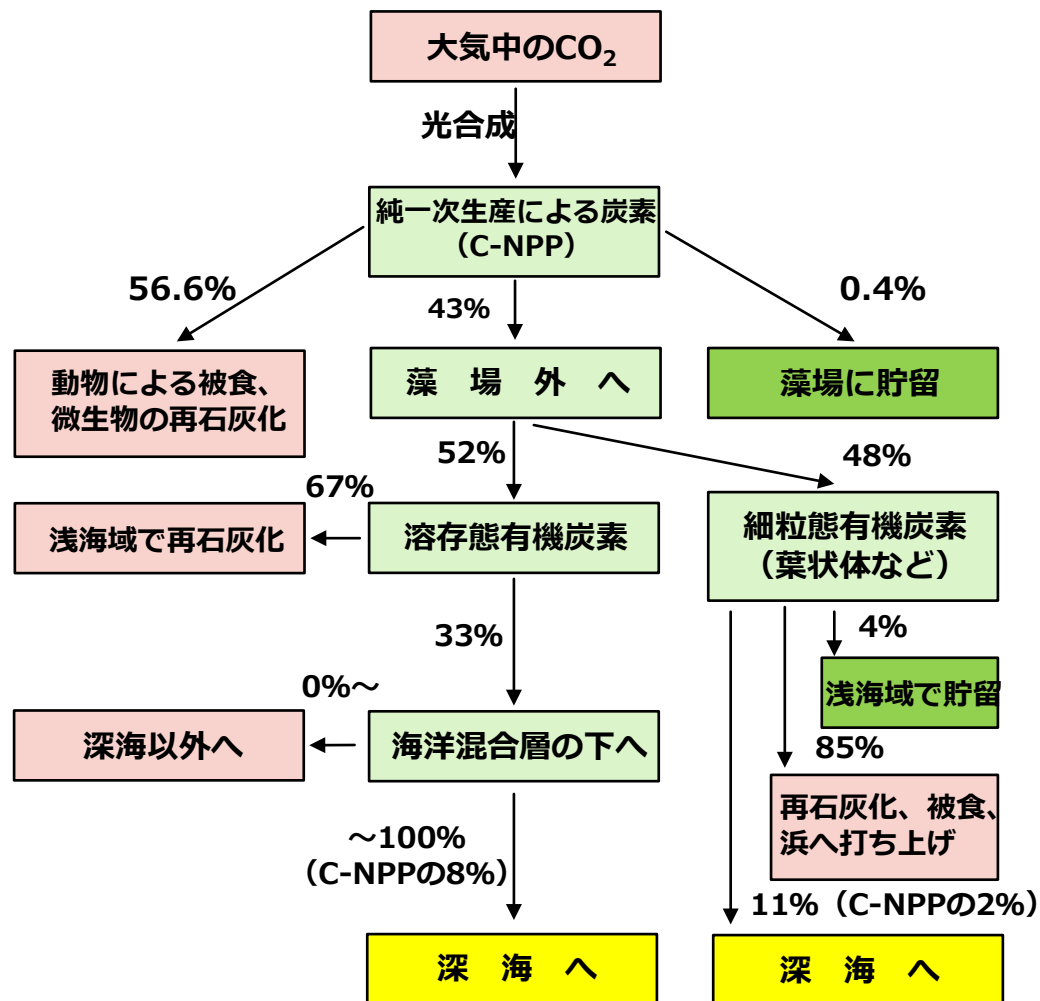


図4 海藻由来の有機炭素フロー

出典 Krause-Jensen & Duarte (2016)⁶⁾・Cage (2018)⁷⁾より作成

【海藻・海草由来炭素の長期貯留実態に関する研究動向】

藻場や養殖場において光合成で固定された有機炭素のフローは、図4のように推定されており^{6),7)}、その実態は複数の手法を組み合わせることで明らかになる可能性が示唆されている⁸⁾。各貯留プロセス（堆積貯留、難分解貯留、深海貯留、RDOC貯留）を定量的に把握することがNETs開発の基本となることから、天然海域で実際に有機炭素の動態を調べる試みや^{9),10)}プロジェクト研究が進められている¹¹⁾。

【藻場調査手法に関する研究動向】

磯焼けの状況を把握するため、広域の藻場調査を行う手法を整理した手引きが作成されている¹²⁾。またGHGインベントリに藻場や海藻養殖によるCO₂貯留量を反映させるため、ブルーカーボンの評価に関する研究が進められ、藻場タイプ・海域区分別CO₂貯留量の算定・調査手法が示されている^{4),13)}。しかし、フィールドでは潜水による調査が多く、各種観測機器の導入やリモートセンシングデータの利用は遅れている。

【大規模海藻養殖に関する研究動向】

世界的に海藻養殖生産量は増加してきており（図5）、欧米でも海藻養殖によりCO₂吸収量を増大させる計画が増えている。北海では、大規模な洋上風力発電施設の海域を利用した海藻養殖場を造る事業が始まり、風力発電による電力を利用し、生産した海藻を食品、包装材、化粧品、農業資材等の原料とすることで、化石燃料に頼らない地域産業の創出を目指している¹⁵⁾。

【海洋環境変動に強靱な海藻・海草に関する研究動向】

今後も続くと考えられる海水温上昇等を見据え、海洋環境変動に強靱なブルーカーボン素材を用意しておく必要がある。神奈川県等では天然海域由来で世代交代が早い早熟カジメに関する研究を進め¹⁶⁾、海水温上昇による植食魚類や荒天増加への対応として注目されている。また、ノリでは高温耐性系統が作出されている¹⁷⁾。

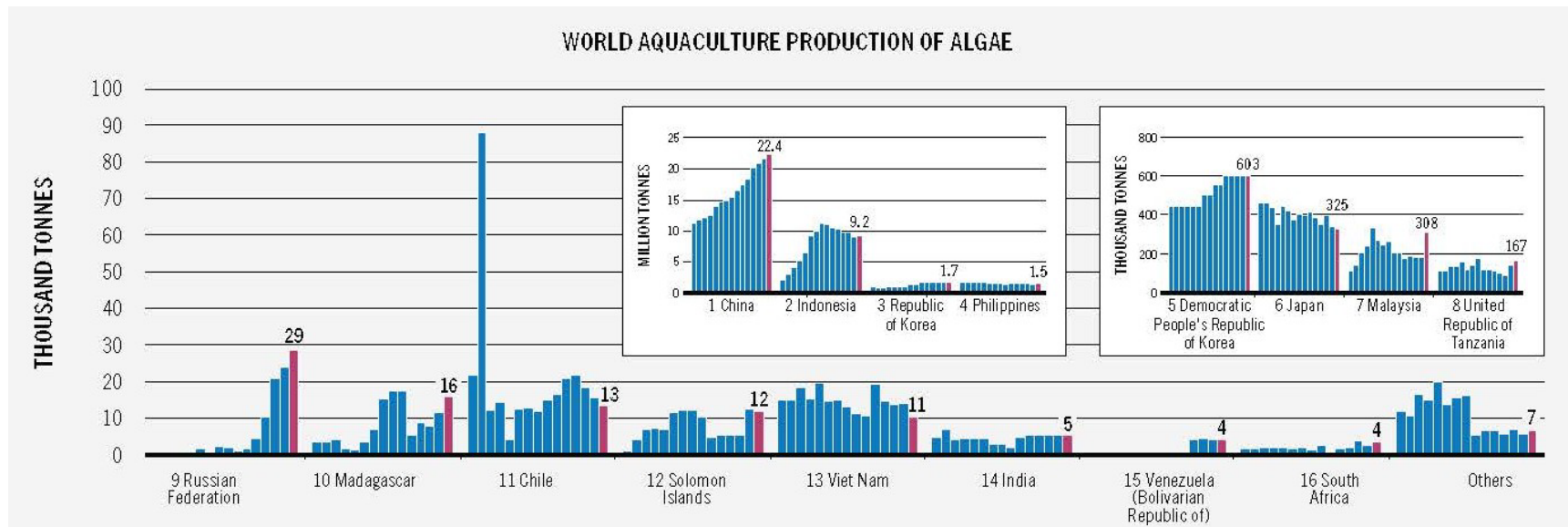


図5 世界の海藻養殖生産量（湿重）

（出典）The state of world fisheries and aquaculture (FAO 2024) ¹⁴⁾

【課題1】海藻・海草由来炭素の長期貯留実態の定性・定量的把握

＜背景＞

藻場や養殖場に由来する有機炭素の動態や貯留の実態を明らかにするため、有機炭素成分や環境DNA等の分析手法を開発し、定性・定量的解析を可能にするとともに、各炭素貯留の実態と貯留期間を把握する必要がある。

＜研究開発の方向性案＞

- ・藻場・養殖場に由来する有機炭素成分等の分析手法の開発
- ・藻場・養殖場に由来する有機炭素成分等のフロー・貯留実態と貯留期間の把握

【課題2】藻場調査手法の高度化

＜背景＞

炭素貯留量の精確な算定のため、藻場の状況を定期的かつ高精度に調査する必要がある、ドローン空撮、水中ドローン、音響機器、各種リモートセンシング技術等の高度化・簡便化を進め、現場での利用を促進する必要がある。

＜研究開発の方向性案＞

- ・ドローンや音響調査機器を用いたフィールド調査手法の高度化
- ・光学・音響技術や衛星データを用いた藻場生態系センシング技術の高度化

【課題3】海藻の大規模養殖技術開発と新たな「海業」の場の創出

＜背景＞

NETs技術開発とともにCO₂排出削減にも取り組む必要があり、洋上風力発電施設の海域及び電力を利用した大規模藻類養殖産業の創出は、これら二つの問題を同時に解決できる可能性を秘めている。一方、その開発に当たっては、海域生態系・漁業生産のモニタリングを行い、周辺域において藻場の維持・造成による魚介類稚仔のナーサリー化も進めるなど、「海業」の場としての多面的機能の定量化も推進する。

＜研究開発の方向性案＞

- ・海上施設等を利用した海藻養殖及び総合的利用・加工システム開発に向けた海域特性把握と技術開発
- ・周辺海域の生態系モニタリングと藻場の維持・造成による魚介類稚仔のナーサリー化
- ・NETsを基盤とした新たな「海業」の場の創生に必要な総合的社会科学的研究

【課題4】海洋環境変動に強靱な藻場の維持・造成と養殖技術の開発

＜背景＞

海洋環境変動に強靱なブルーカーボン素材を用意しておく必要があり、その候補として早熟カジメや高温耐性系統ノリ等の研究が進められている。素材のさらなる探索や、耐性のゲノムレベルでの解析と他種への応用等の可能性を検討する。

＜研究開発の方向性案＞

- ・海洋環境変動耐性をもつ海藻・海草類の探索と高水温耐性藻場造成技術の開発
- ・海藻・海草類の高温耐性分子メカニズムの解明と他種への応用手法の検討

【海洋肥沃化（Ocean Fertilization）】

●考え方 1,2)

- 海洋生物ポンプ（Ocean biological pump）：炭素を海洋表層（有光層）から海洋内部へ生物学的に輸送する経路。植物プランクトンの一次生産で取り込まれたCO₂の一部が長い時間をかけて深海に沈殿
- 栄養塩が十分にあれば、大気中のCO₂を海洋に取り込み、海底に貯留する機能を促進できるとの考え方

●手法と現状 1,2)

➤ 鉄散布 3,4)

手法： ①船上からの鉄・硫化鉄等の散布、②陸上から塩化鉄を含む粉塵等の散布、③鉄鋼スラグ等の投下

現状： 最も研究されているが、栄養塩バランスを崩す、窒素酸化物の放出の可能性など、科学的検証は不十分

➤ リン・窒素添加 2,5-9)

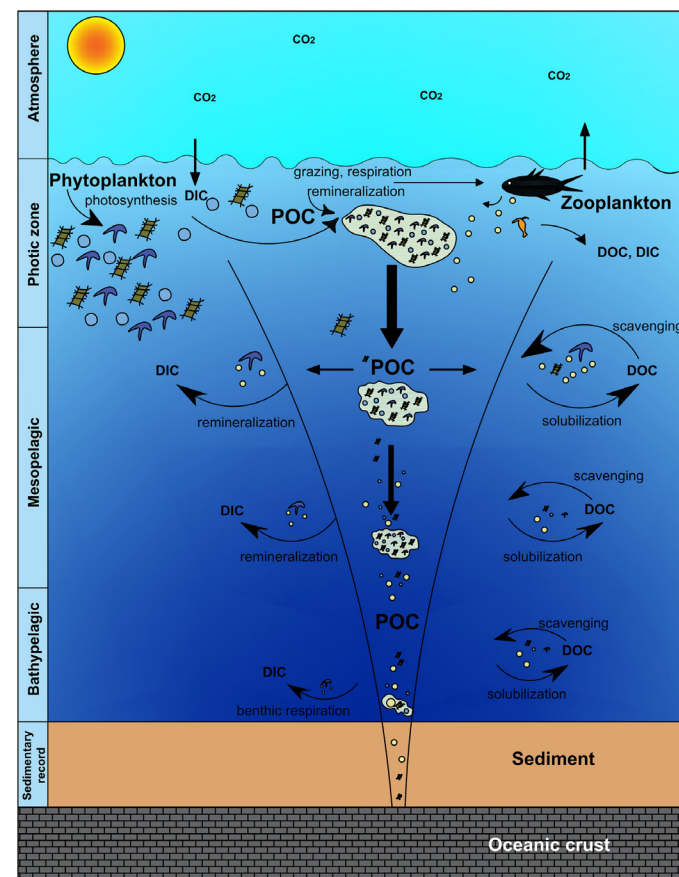
手法： 有機・無機肥料、かいぼり、海底耕運、排水管理など

現状： 水産分野では、海藻に不足する栄養塩を補う目的で海洋施肥が実施。過剰なリンは、赤潮、有機汚濁、貧酸素化などの要因となる可能性

➤ 海洋深層水揚水 10-12)

手法： 栄養塩豊富な海洋深層水を汲み上げて有光層に供給（拓海PJ）

現状： 植物プランクトンの増殖効果は限定的



“Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change” the 6th Assessment Report of IPCC (2022)

【海洋アルカリ化】 15-20)

●考え方

- アルカリ性物質（石灰岩等）を海に投入し、海水のアルカリ度を上げることで、大気中CO₂を吸収しやすくなる（自然の風化作用を人工的に加速させる）
- 陸上で「風化促進」のために粉碎された岩石が海洋に流れ込むことでも、海洋アルカリ化に寄与

●手法と現状

- アルカリ化剤投入の技術開発： ①海岸埋設、②海底投下
 - ✓ モニタリング、生物相との相互作用の検証、シミュレーションモデル開発
- 海洋pHの変動による海洋生物への影響
 - ✓ 日本近海でも、世界と同程度の速さで海洋酸性化が進行している（pHが10年で約0.02低下）
 - ✓ 海洋酸性化による、プランクトン・サンゴ・貝類・甲殻類・棘皮動物等、炭酸カルシウムで殻をつくる海の生き物たちの成長・繁殖への影響評価 → 特に水産重要資源の変動への影響評価
 - ✓ サンゴの石灰化にともなうCO₂の吸収効果の検証 → 吸収・放出の両方の説あり

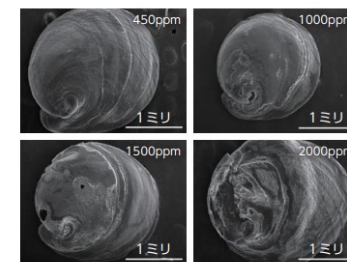
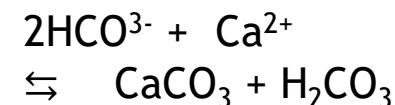


写真1 エゾアビの幼生から稚貝に成長するまで33日間、異なる二酸化炭素濃度の海水で飼育したときの電子顕微鏡写真
数字は二酸化炭素濃度

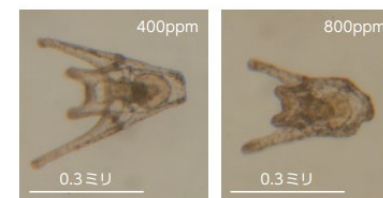


写真2 受精から3日間異なる二酸化炭素濃度の海水で飼育したキタムラサキウニ幼生
数字は二酸化炭素濃度

<https://www.fra.go.jp/home/kenkyushokai/book/franews/files/fnews73.pdf>

5. その他の海洋CDRs（2）研究動向 -1-

【海洋肥沃化：リン・窒素】 1-3,6-11)

- 国内沿岸域：
 - 公害問題が表面化した1960年代以降の富栄養化対策により水質は改善
→「貧栄養化」によるノリ品質低下や貝類等の漁獲量減少等が指摘
→「きれいで豊かな海」「栄養塩類管理」という概念が制度的に取り込まれる
 - 海洋施肥は、CDRとしてより、磯焼け対策、ノリの色落ち防止対策として研究される
- 液肥の事例： 北海道のホソメコンブを対象にした液肥試験（2009-2012）
 - $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ を海水に溶かし、防波堤背後の静穏域（施肥区）に供給し、窒素濃度分布と回想現存量を比較検討 → ホソメコンブの生長促進効果が見られたが、胞子供給源が無く繁茂せず
→ ウニ除去とコンブの胞子の供給源確保が必要
- 固形肥料の事例：
 - 水産加工残渣や発酵木材チップ等を利用した施肥材の開発及び海域への投入による水質改善（北海道寿都町：2007年～）→ 海域周辺の空撮で藻場分布範囲を調査、効果検証
- 表層と海底で起こる現象が異なる
 - 表層の富栄養化で有機物が海底に沈降、それを分解する微生物により、海底付近の貧酸素・無酸素化が進行し、GHGであるメタンが発生
- 外洋域
 - 国際統合データベースによる海洋表層 CO_2 分圧と栄養塩類のマッピングに関する研究（環境省：2014-2016）
 - 衛星画像データによる全球の海色のモニタリング、海洋環境データの直接観測による生物ポンプのメカニズム解明に資する研究、
 - 生物ポンプのシミュレーションモデルの開発

5. その他の海洋CDRs（2）研究動向 -2-

【海洋肥沃化：鉄分】 1-5)

- HNLC海域に人為的に鉄を供給することによって植物プランクトンの光合成を促進できれば、海洋のCO₂吸収能を高めることが可能になるのでは？（John Martin 1988）
 - HNLC（High-nutrient, low-chlorophyll）海域：表層水の栄養塩濃度は十分高いが、鉄の欠乏によって植物プランクトンの増殖が制限されているとされる海域（海洋全体の20~40%）
 - 1990年以降、13件の大規模な鉄添加実験が実施された結果、海底へのCO₂取り込みは限定的な一方で、赤潮の発生などへの懸念が表明された（Tollefson, 2017）
 - ・北太平洋亜寒帯域鉄散布実験（SEEDS、SEEDS-II）は、日本が中心となって実施
- 国際：規制の動き：
 - ロンドン議定書（2008年）、生物多様性条約締約国会議（2008年）
- 国内：鉄鋼スラグ等を用いた磯焼け対策・回復技術試験
 - 北海道増毛町における藻場再生実証試験（2004）ほか国内で20カ所以上実施
 - 施肥材は単独や有機質との混合で検討

【海洋肥沃化：湧昇流、その他】 1-3,12-14)

- 湧昇流： 深層水汲み上げによる海洋肥沃化 → 栄養塩豊富な海洋深層水が有光層に供給する
 - 拓海プロジェクト（（社）マリノフォーラム21、民間企業10社）：人工湧昇流漁場の世界初の実海域実証試験（相模湾：2000年～2004年）
 - カキ養殖場で餌の植物プランクトン増殖目的に揚水装置を使う事例がある
 - 揚水によって栄養塩と共に沈降していたCO₂も表層に戻ってくる可能性がある
- 火山灰： 人為コントロール不可能
 - 特に栄養塩が限定的な海域では、火山灰からの複数の栄養塩添加により、植物プランクトンが一時的に増加することがある（2008年のアリューシャン列島カサトチ火山など）

【海洋アルカリ化】

- CO₂ から変換した炭酸塩の海洋投下、排水添加
- アルカリ化剤によらない研究開発
 - ・電気化学的酸隔離、波力エネルギーの電気分解駆動等の活用
- ホタテ、カキ等の貝殻（主成分CaCO₃）の活用法の検討

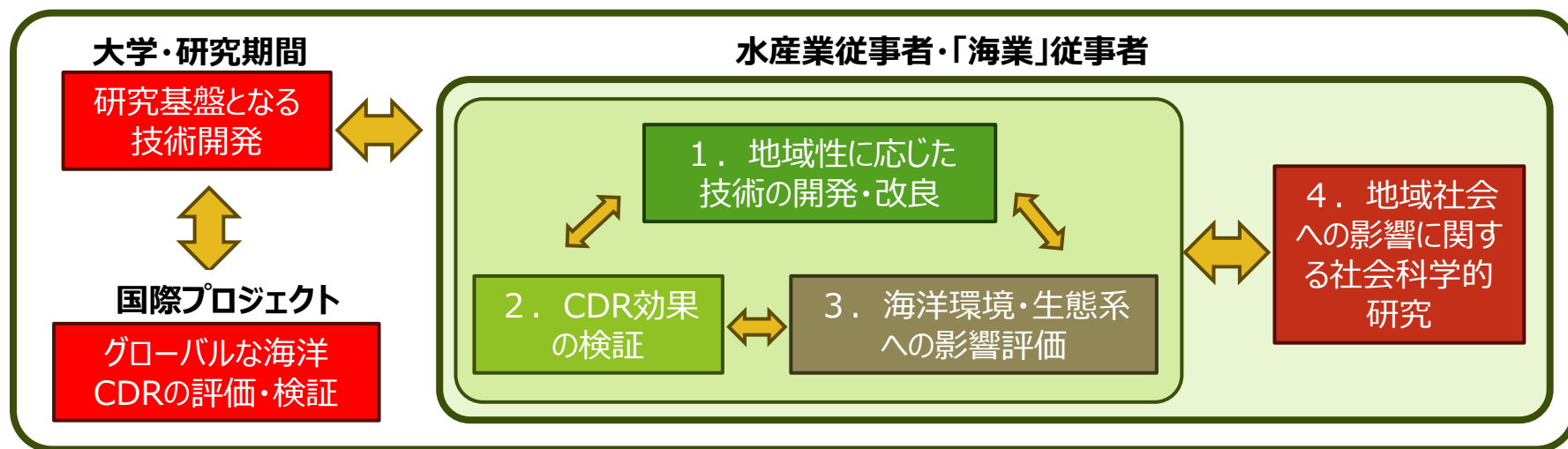
＜背景＞ 【海洋肥沃化】 【海洋アルカリ化】

●本研究開発構想で提案する研究開発課題の考え方

- ・ **実施主体は、水産業従事者、および「海業※」従事者を想定**し、地先の海を生活の場として活用しようとする者が、**地先の海で取り組める**研究開発内容とする（下図の黄緑色部分）

★海洋環境データの取得に必要な高精度センサーや観測システムの開発、データを分析し、CDR効果を評価するためのモデルやシミュレーションなどの研究基盤となる技術開発については、**大学や研究機関等との連携**を想定

★大規模かつ学術的な調査研究は、**国際連携**の下で大規模なプロジェクトを想定し、国際的な合意、国内規制・ガイドラインに則って研究課題を設定



※「海業」：近年、水産庁の推進する概念で、「漁村の人々が、海や漁村に関する地域資源の価値や魅力を活用して所得機会の増大等を図る取組」をいう。

<https://www.jfa.maff.go.jp/j/keikaku/230718.html>

【課題1】地域性に応じた技術の開発・改良

<背景>

対象海域には地域ごとの特性（気候、地形、海流、潮汐、陸水の影響等）があり、また生息する生物にも地域特性があるため、其々に即した海洋肥沃化・アルカリ化及び関連技術の開発が必要である。その際には、「どこをどれだけ」肥沃化・アルカリ化するかを目標を明確にして、その目標を達成するための技術開発（投入物質の種類や形態・時期・場所・量等）に取り組むことが必要になる。新たな肥沃化・アルカリ化素材の開発に際しては、科学的合理性の検証が不可欠である。また、投入後の物質の動態と海域特性との関連、目標達成度や持続性などを把握して問題点を抽出し、技術改良を図ること必要になる。陸水の影響に関しては、農林地からの土壌侵食や排水管理等による栄養塩類の流入や、風化した石灰岩等のアルカリ化物質の流入も考慮する必要がある。【海洋肥沃化】では、増殖対象となるターゲットの栄養塩要求性、【海洋アルカリ化】では、pH変動に伴う海洋生物への影響を念頭に目標を設定することが重要である。

<研究開発の方向性案>

【海洋肥沃化】

- ・ 増殖ターゲット（植物プランクトンや海藻・海草等）の栄養塩要求性を踏まえた目標濃度の把握
- ・ 対象区域内外の栄養塩等環境把握のための調査手法の高度化
- ・ 対象区域での目標濃度達成のための海洋肥沃化技術・素材の開発・改良

【海洋アルカリ化】

- ・ 対象海域に生息する生物へのpH変動の影響を踏まえた目標濃度の把握
- ・ 対象区域内外のpH、 $p\text{CO}_2$ 等環境把握のための調査手法の高度化
- ・ 対象区域での目標pH達成のための海洋アルカリ化技術・素材の開発・改良

【課題2】CDR効果の検証

<背景>

海洋肥沃化・アルカリ化の何れも、CDR効果が科学的に十分検証されておらず、効果が不明確か限定的である。時間スケールが長く、空間スケールが大きく連続的である点、CO₂以外のGHGによる影響が不明瞭であることも問題である。そのため、対象区域内外で適切な対照区域を設定し、【海洋肥沃化】では栄養塩の動態と、ターゲット種の生活史（成長・繁殖・死亡等）に伴う生物量の変動、食物連鎖・腐食連鎖・域内外への分散等、有機炭素化合物の挙動を量的・質的に把握し、CDR効果を算定する技術開発が必要である。【海洋アルカリ化】では、アルカリ化剤の溶出等の挙動やpH等の変動を把握し、CO₂や炭素化合物、Ca²⁺等の挙動との関連を量的・質的に把握し、CDR効果を算定する技術開発が必要である。

<研究開発の方向性案>

【海洋肥沃化】

- ・対象区域内外のターゲット種の生物量の動態やその他の環境変動の関連を分析する技術開発
- ・対象区域内外のターゲット種の生物量の動態やその他の環境変動からCDR効果を算定する技術開発

【海洋アルカリ化】

- ・対象区域内外のpHやCO₂やその他の環境変動の関連を分析する技術開発
- ・対象区域内外のpHやCO₂やその他の環境変動からCDR効果を算定する技術開発

【課題3】海洋環境・生態系への影響評価

＜背景＞

海洋肥沃化や海洋アルカリ化は、海水成分のバランスを動かす試みであり、生態系への影響について科学的に十分検証されていない。そのため、CO₂以外のGHGの発生や生物多様性への影響等、様々な想定できないリスクが発生する懸念がある。また、栄養塩やアルカリの対象区域外へのしみだしも想定される。実施場所は公的な海域であることから、対象海域および周辺海域の海洋環境への影響については十分配慮する必要がある。特に地域経済への影響が大きい水産資源や観光資源となる生物等については慎重な評価が必要になる。【海洋肥沃化】では植物プランクトンの種組成変化、【海洋アルカリ化】ではpH変動に伴い、海洋生物の生活史への影響が懸念される。海洋に何らかの物質を投入することについては、国内法規や国際合意等との整合性を踏まえて取り組む必要がある。

＜研究開発の方向性案＞

【海洋肥沃化】

- ・ CO₂以外のGHGの挙動を把握するための技術開発
- ・ 対象区域内外の生物多様性、海洋生物の生活史への影響を把握するための技術開発

【海洋アルカリ化】

- ・ CO₂以外のGHGの挙動を把握するための技術開発
- ・ 対象区域内外の生物多様性、海洋生物の生活史への影響を把握するための技術開発

【課題4】地域社会への影響に関する社会科学的研究

<背景>

海洋肥沃化・海洋アルカリ化の実施場所は公的な海域であるため、対象海域および周辺海域の海洋環境への影響については十分検討する必要がある。実施内容やCDR効果、費用対効果、地域社会への影響について関係者間で慎重に協議し、事前に地域社会での合意形成プロセスを踏むことが必要である。海洋肥沃化・海洋アルカリ化は海洋に何らかの物質を投入する技術であるため、国際合意や国内法と整合性を確認することが不可欠である。新素材の開発・適用を進める際には、コストやエネルギー等の費用対効果を含めた科学的合理性と法的規制の妥当性検討も視野に入れる必要がある。また、成果を地域社会に還元し、持続的な活動にするための体制作りも必要である。そのためには、陸域の関係者を含めて、社会科学的なアプローチによる社会システムの検討や、活動を経済的に成立させるための社会経済学的な研究が必要である。経済性に関しては、Jブルークレジットへの申請可能性について、活動内容と申請条件を精査が必要である。

<研究開発の方向性案>

【海洋肥沃化】 【海洋アルカリ化】

- ・ 地域社会の合意形成プロセスを確立し、活動を定着させる社会システムを検討するための社会科学的研究
- ・ 活動を経済的に成立させるための社会経済学的な研究
- ・ 新素材の科学的合理性と法的規制の妥当性検討

【現在の動向】

NETsは、大気からのCO₂の回収・貯留の過程でエネルギー等を消費してGHGを排出したり、生じる副産物が自然界に影響を及ぼす等のケースが考えられ、ライフサイクル全体で見たときの有効性が明確になっていないため、各NETsの共通の課題として、ライフサイクルアセスメント（LCA）の研究が重要。

国内では、LCAに関わる産業界、学界、国公立研究機関の関係者が集うプラットフォーム「LCA日本フォーラム」において、カーボンリムーバル&リサイクル（CR2）技術のGHG排出量算定に関するガイドラインが2020年に作成・公開¹⁾。

【今後の研究開発における課題】

NETsのLCA研究を俯瞰したレビュー論文^{2) 3)}によれば、以下の課題がある。

- ① NETsによって回避されるGHG排出（例：バイオ炭製造の副産物を利用した電気や熱の生産回避、バイオ炭の土壌改良効果に伴う肥料消費の回避）と、大気からのGHG除去の効果を区別すること。
- ② 土地利用変化、食料や水の競争、生物多様性の変化、生態系の攪乱等の副作用を考慮すること。
- ③ 様々なCDR技術を比較できる共通の機能単位（除去されたCO₂トン）を適用すること
- ④ LCAの目的と範囲の設定において、次の点を踏まえること。
 - ・ CO₂の回収から最終的な貯留まで全てのプロセスを含み、エネルギー生成に関する間接的な影響やライフサイクルの中で利用される他の製品・サービスに及ぼす影響も含むシステム境界の定義、
 - ・ 適切なベースライン（CDR技術が導入されない場合における最も可能性の高いシナリオ）の定義、
 - ・ CO₂除去によるコベネフィットやトレードオフについても捉えること

また、森林の循環利用に係るLCA研究では、前提として、システム境界内プロセスのスタート地点をどこに定めるか（苗木生産、植林、伐採、製材、各種製品製造等）という論点の整理が必要⁴⁾。

VII まとめ

【研究開発の方向性一覧】

	研究開発の方向性
土壌炭素貯留	①飼料用トウモロコシの二期作や再生イネを利用したコメの二期作、温暖化に伴う新たな輪作体系や田畑輪換など新たな栽培方法に伴う土壌炭素貯留への影響等の定量化及び生産性向上と土壌炭素貯留を両立させる技術の確立、不耕起・省耕起やカバークロップなどの全国規模の実証試験による作物の収量・品質と土壌炭素貯留効果等の解明及び他のGHGや環境影響・経済性の評価と技術導入マニュアルの提示、遺伝的改変（光合成速度の増加、開花時期の調節、深根性、木質増進など）によりバイオマスが増大した作物や土壌中での分解が早い成分を多く含む作物の開発及び生育・収量・土壌炭素貯留効果の実証並びに他のGHG、水利用、土壌環境への影響を含む可能性評価 ②耕作放棄後の農地の環境変化や植生の遷移に伴う生態系の炭素動態及び炭素の各プールへの分配の解明による、耕作放棄地を活用した土壌炭素貯留の可能性の評価、耕作放棄後に耕作を再開した農地の土壌の炭素・窒素動態及び耕作放棄期間の最小限の管理（草刈り・耕うん等）が土壌炭素貯留に及ぼす影響の解明並びに耕作放棄期間に炭素量を保持・増加させ耕作を再開しやすくする管理法の開発、耕作放棄地の飼料作物栽培や粗放的利用に供した場合の土壌炭素貯留の定量化と貯留量向上のための管理技術の開発、耕作放棄地をバイオ炭原料の供給源として利用するための技術開発、荒廃農地を林地に転用した場合の生態系の炭素動態の解明及び林地転用に伴う土壌炭素貯留に加えて早生樹を利用した森林の循環利用を通じたカーボンニュートラルに寄与する技術の開発 ③土壌炭素貯留メカニズムのさらなる解明、気候変動に伴う地温上昇や土壌水分量の変化が土壌呼吸に及ぼす影響の解明及び農地の土壌炭素モデルの改良並びに日本土壌インベントリーの高度化、ほ場での簡易測定・長期モニタリング・カーボンクレジット用の検証などそれぞれの目的に応じた精度が得られ使いやすい土壌炭素量の測定法の開発（リモートセンシングを含む）、CH_4・N_2Oとのトレードオフ、生物多様性などその他の環境影響・環境保全効果、経済性を含む土壌炭素貯留技術のNETとしての有効性評価手法の標準化
バイオ炭	①原料の種類に応じた最適な製造条件・製造方法の研究、製造過程で発生するCH_4など他のGHGと炭化炉・炭化方法の調査、炭化炉の改良研究（GHGの吸収と燃焼機能を備えた炭化炉、炭化炉の耐性強化）、高機能バイオ炭の研究開発（微生物群定着・堆肥混合などによる作物の生育促進や耐病性の向上）、熱帯地域にバイオ炭施用を広めるための研究（原料、高温多湿・土壌・微生物等熱帯環境の影響） ②原料や熱分解条件により相違が生じるバイオ炭の特性と効用効果の定量化、同特性と効用との関係性のより体系的解明及びそれらの整理、バイオ炭施用と作物の品質向上の検証研究、バイオ炭の大規模施用・長期連用・長期実証試験による効果検証や環境影響の解明、複数のGHG削減技術の組み合わせに関する技術の確立 ③バイオ炭が及ぼす種々の影響に関する情報の収集・分析・整理（農薬吸収、土壌の微生物叢など生態系への影響、土壌汚染リスク、バイオ炭を生産する際のGHG排出リスク）、LCA（長期施用時の炭素固定効果、施用後の流出による影響、バイオマス資源の利用可能性など） ④バイオ炭の製造・流通・施用が経済的に成立する条件やビジネスモデル、欧米のバイオ炭施用インセンティブ策、費用対効果の高いバイオ炭の製造方法・製造システムの研究 ⑤持続可能で大量確保が可能な原料（バイオマス）の探索及び確保方法の研究、バイオマス発電などバイオ炭製造と組み合わせが可能なシステムの研究、日本に適した地域に根差した資源循環型エコシステムの研究と構築
森林の循環利用	①LiDAR・ドローンなどによる森林計測技術（ハードウェア、ソフトウェア）、AIなどを活用した森林資源量の把握技術 ②造材・運搬作業の自動化・半自動化に向けたセンサーと制御ソフト搭載林業機械の開発、小型の造材機械の開発、ベースマシン、アタッチメントの開発 ③早生樹の開発と材質・利用適性の探索、成長や形質のよい無花粉樹の開発、エリートツリーの2倍の成長速度を持つハイパーエリートツリーの開発、ゲノム編集をはじめとする先端的技術の開発 ④木質建築物を長期間利用可能にするための耐久性に優れた部材の開発や維持管理技術など長寿命化に係る技術の開発並びに長期間利用木造部材の再利用化のための性能評価技術や再利用技術の開発、従来と異なる性能（長さや幅の両方からの荷重に強い）を有する等方性大断面部材の開発やそれらを歩留まりが高く効率的に製造する技術の開発。 ⑤木材等の自然素材が人の睡眠や作業性に与える効果等セラピー効果に関する研究、オフィス・教育施設・医療施設などを木質化した時のセラピー効果に関する研究

【研究開発の方向性一覧（つづき）】

	研究開発の方向性
森林の循環利用(つづき)	⑥CNF及び改質リグニンの新規用途（樹脂複合材料、有機無機ハイブリッド材料等、大量製造システム）開発並びに事業化、化石資源代替工業材料等（セルロース由来の高性能繊維、液晶材料、バイオプラスチック等、微生物代謝機能を利用した機能性バイオプラスチック基幹物質の製造技術）の開発、森林資源フル活用のためのサーキュラーエコノミーを志向した木材成分総合利用システムの開発 ⑦固形燃料（トレファクション技術を活用したブラックペレット、バイオコークスの品質改善、新規用途並びに大量生産システムの開発等）、液体燃料（バイオオイル〔収率向上を目指した製造法（マイクロ波超高速熱分解技術等）、原料調達—製造までを含めたシステム開発、オイルの高品位化（脱酸素反応触媒の利用）、新規用途（土中埋設による炭素固定、工業材料の開発等）〕、軽油〔木材ガス化—精製—反応塔重統合システムの開発等〕、気体燃料（バイオガス〔効率的な製造法開発（タール発生低減技術）、回収ガス高度利用（水素をリッチな状態にする研究）〕、国産材に適した熱電併給システム（CHP）の開発
海藻・海草	①藻場・養殖場由来する有機炭素成分等の分析手法の開発、藻場・養殖場由来する有機炭素成分等のフロー・貯留実態と貯留期間の把握 ②ドローンや音響調査機器を用いたフィールド調査手法の高度化、光学・音響技術や衛星データを用いた藻場生態系センシング技術の高度化 ③海上施設等を利用した海藻養殖及び総合的利用・加工システム開発に向けた海域特性把握と技術開発、周辺海域の生態系モニタリングと藻場の維持・造成による魚介類稚仔のサナリ化、NEBを基盤とした新たな「海業」の場の創生に必要な総合的社会科学研究 ④海洋環境変動耐性を持つ海藻・海草類の探索と高水温体制藻場造成技術の開発、海藻・海草類の高温耐性メカニズムの解明と他種への応用手法の検討
その他の海洋CDRs	【海洋脱炭化】 ①増殖ターゲット（植物プランクトンや海藻・海草等）の栄養塩要求性を踏まえた目標濃度の把握、対象区域内外の栄養塩等環境把握のための調査手法の高度化、対象区域での目標濃度達成のための海洋脱炭化技術の開発・改良 ②対象区域内外のターゲット種の生物量の動態やその他の環境変動の関連を分析する技術開発、対象区域内外のターゲット種の生物量の動態やその他の環境変動からCDR効果を算定する技術開発 ③CO₂以外のGHGの挙動を把握するための技術開発、対象区域内外の生物多様性、海洋生物の生活史への影響を把握するための技術開発 【海洋アルカリ化】 ①対象海域に生息する生物へのpH変動の影響を踏まえた目標濃度の把握、対象区域内外のpH、pCO₂等環境把握のための調査手法の高度化、対象区域での目標pH達成のための海洋アルカリ化技術・素材の開発・改良 ②対象区域内外のpHやCO₂やその他の環境変動の関連を分析する技術開発、対象区域内外のpHやCO₂やその他の環境変動からCDR効果を算定する技術開発 ③CO₂以外のGHGの挙動を把握するための技術開発、対象区域内外の生物多様性・海洋生物の生活史への影響を把握するための技術開発 【海洋脱炭化・海洋アルカリ化共通】 ④地域社会の合意形成プロセスを確立し活動を定着させる社会システムを検討するための社会科学研究、活動を経済的に成立させるための社会経済学的な研究、新素材の科学的合理性と法的規制の妥当性検討

VII まとめ（つづき）

2050年のカーボンニュートラルの実現に向けて、農林水産分野のNETsは、GHGを農地・森林・海洋内に貯留できる大きなポテンシャル。

NETsやCDRを巡っては、近年、様々なグローバルな動きがみられる。

- ・ GHG排出量の測定・管理に係るフレームワークを検討・策定するイニシアチブ「GHGプロトコル」において、土地利用及び技術的なCO₂除去における排出量・除去量の計算に必要な手順、手法、データを著す新たなガイダンス「土地セクター・炭素除去ガイダンス（Land Sector and Removals Guidance）」が検討。この最終版の発出を契機に、企業によるCDRの取組が加速することが考えられる。¹⁾
- ・ IPCCは、2024年1月に、CDR技術及びCCUSに関する方法論報告書の作成について検討することを決定。同年7月に専門家会合、10月にスコーピング会合が開催され、当該報告書の範囲やCDR技術ごとの検討のアプローチ、報告書章立て等を検討。2025年2月のIPCC総会において、当該方法論報告書の作成を決定。2027年末までに作成される予定。^{2) 3)}
- ・ 2024年6月に、オックスフォード大学の研究所から、CDRの現状に関する報告書の第2版が発出⁴⁾。気候変動の緩和戦略として最も重要なのは排出削減であるとしつつ、大気からのCO₂除去も必要とした上で、CDRの研究開発に関して、助成金の件数や額など活動の規模は着実に拡大している一方、その活動は依然として特定の国・地域やCDR技術に集中しているとの問題提起。

グローバルな潮流に乗り、2050年カーボンニュートラルの実現に貢献すべく、本報告書において提案した研究開発が進展し、農林水産分野のNETsがさらに社会実装・普及していくことを強く期待。

VII まとめ（つづき）

【今後の研究開発を進めるにあたっての配慮すべき事項】

① GHG吸収・除去と生産性向上等のwin-winの関係を築くこと

現場に技術が浸透するかどうかは、生産性向上や廃棄物処理等、農林漁業者等がメリットを感じられるかどうかによって大きく影響を受けることから、GHGの吸収・除去の効果だけでなく、生産性向上等の効果も追求するとともに、農林漁業者等が技術を正しく使えるように展開することが重要。

② 自然（生物多様性）、気候（脱炭素化）、公平性（人権）のバランスをとること^{5) ~10)}

土壌炭素の管理や森林保全、持続可能な森林活動などは、生物多様性の回復や保全の効果も期待される一方、やり方によっては生物多様性には悪影響を及ぼすケースがありうる。

また、気候変動は人権問題とも大きく関係。気候変動対策を推進する場合、脱炭素社会の実現に伴う既存産業の衰退（＝雇用喪失）や地域住民の税負担増などの影響が起こりうる。

③ サーキュラーエコノミー（循環経済）を実現すること^{11) 12)}

サーキュラーエコノミーとは、あらゆる段階で資源の効率的・循環的な利用を図りつつ、付加価値の最大化を目指す社会経済システム。森林の循環利用は、伐って、使って、植えるという一連のサイクルの中でCO₂を吸収・固定。バイオ炭も、剪定枝、家畜糞尿、草木、籾殻等を炭化し農地に施用することで炭素を循環させる資源循環型エコシステムが期待。

④ CO₂以外のGHGについて、排出への影響評価や吸収・除去技術の開発に取り組むこと^{13) ~18)}

CH₄やN₂Oは、農業生産において大量に排出されているほか、海洋や湖沼の底層において地球温暖化が原因とされる溶存酸素量の減少（貧酸素化）が進行することによって、CH₄の発生量が多くなることが指摘。このため、CH₄とN₂Oの削減にも取り組むべく、NETsの適用がCH₄やN₂Oの排出に及ぼす影響の評価や、大気中のCH₄やN₂Oを吸収・除去する技術の開発に取り組んでいく必要。

⑤ 海外への技術展開も視野に入れること

海外では我が国への輸出向け農産物の生産のために大量のGHGが排出されており、我が国は国際的な貢献も求められていることや、NETsやCDRのグローバルな動きが活発であることを強く認識し、海外へ展開することも視野に入れながら技術開発を進めるべき。海外において技術が着実に根付くためには、現地の環境を適確に把握し、それに適合した悪影響が出ないアプローチをとることが重要。

参考文献等・用語解説

【Ⅱ テーマの背景と目的】

- 1) 「地球温暖化対策計画」（令和7年2月18日閣議決定）<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/250218.html>
- 2) 内閣官房・経済産業省・内閣府・金融庁・総務省・外務省・文部科学省・農林水産省・国土交通省・環境省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（令和3年6月18日）https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html
- 3) 「ネガティブエミッション市場創出に向けた検討会 とりまとめ」（令和5年6月）
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/negative_emission/20230628_report.html
- 4) 農林水産省「みどりの食料システム戦略」（令和3年5月）<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/index.html>
- 5) 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調査報告書「バイオマスをCO₂吸収源としたネガティブエミッション技術」（令和4年3月）<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-RR-05.html>

【Ⅲ 対象技術等】

- 1) 「ネガティブエミッション市場創出に向けた検討会 とりまとめ」（令和5年6月）
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/negative_emission/20230628_report.html

【Ⅴ ネガティブエミッション技術全体を巡る動向】

- 1) 「農業分野のカーボン・クレジットの取組推進に係る最終調査結果」（2024年4月）
https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/jcredit/240417_3.html
- 2) 「カーボン・クレジット・レポートを踏まえた政策動向」（2024年3月）
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_credit/pdf/006_03_00.pdf

- 1) 白戸康人, 2011. 農地管理による土壌炭素貯留効果と気候変動の緩和. 日本LCA学会誌, 7(1), 11-16.
- 2) 農林水産省, 2008. 「今後の環境保全型農業に関する検討会」報告書.
- 3) Batjes, N.S. et al., 2024. Towards a modular, multi-ecosystem monitoring, reporting and verification (MRV) framework for soil organic carbon stock change assessment. Carbon Management, 15(1), 2410812.
- 4) 和穎朗太, 2016. 陸域最大の炭素・窒素プールを制御する土壌微生物と土壌団粒構造. 土と微生物, 70(1), 3-9.
- 5) 波多野隆介, 2024. 採草地における炭素と温室効果ガス収支. 草地と気候変動, 99-103, 海青社.
- 6) 菅野勉ら, 2014. 関東地域におけるトウモロコシ (Zea mays L.) 二期作適地の近年の状況と今後の変化予測. 日本草地学会誌, 60(3), 161-166.
- 7) 農研機構, 2023. 良食味多収水稻品種「にじのきらめき」を活用した 再生二期作による画期的多収生産の実現. プレスリリース (2023年10月4日).
- 8) 日本学術会議 農学委員会 農業生産環境工学分科会, 2023. 見解 気候変動に対する国内農業の適応策と食料安定供給へ果たす農業生産環境工学の役割.
- 9) 西田瑞彦, 2022. 日本の農業生産力の要 水田土壌をめぐる問題とその管理の方向性. 農業, 1685(2022.1), 6-22.
- 10) 農研機構, 2020. 緑肥利用マニュアルー土づくりと減肥を目指してー.
- 11) 茨城大学, 2022. 気候変動・環境問題と不耕起農業&カバークロップ 約20年間の調査で実証 「耕さない農業」が土壌炭素を貯留し土壌微生物の多様性を高める 分解促進による潜在的な脆弱性にも注目. プレスリリース (2022年10月27日).
- 12) Yonemura, S. et al., 2014. Soil respiration, N₂O, and CH₄ emissions from an Andisol under conventional-tillage and no-tillage cultivation for 4 years. Biology and Fertility of Soils, 50(1), 63-74.
- 13) ROOTS (Rhizosphere Observations Optimizing Terrestrial Sequestration) プログラムウェブサイト. Advanced Research Projects Agency-Energy (APA-E), U.S. Department of Energy. <https://arpa-e.energy.gov/programs-and-initiatives/view-all-programs/roots>.
- 14) ムーンショット型研究開発事業「炭素超循環社会構築のためのDAC農業の実現」プロジェクトウェブサイト, <https://www.dac-agriculture.jp/>.

- 15) Shimoda, S., 2022. Soil carbon balance after the temporal cessation of cultivation under cool and subtropical humid climate in Japan. *Soil Use and Management*,38(1),331-340.
- 16) Shimoda, S., Wagai, R., 2020. Ecosystem dynamics after abandonment of rice paddy fields: does alien plant invasion enhance carbon storage?. *Ecosystems*, 23, 617-629
- 17) 石塚成宏ら, 2022. 土地利用が変化した場合の土壌炭素蓄積量変化を解明.森林総合研究所研究成果選集2022, 4-5.
- 18) 農林水産省ウェブサイト, 農地土壌炭素貯留等基礎調査事業について. https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/tuti_chyosa.html
- 19) Perennial社ウェブサイト. <https://www.perennial.earth/>
- 20) Yagasaki, Y., Shirato Y.,2014. Assessment on the rates and potentials of soil organic carbon sequestration in agricultural lands in Japan using a process-based model and spatially explicit land-use change inventories – Part 1: Historical trend and validation based on nation-wide soil monitoring. *Biogeosciences*,11,4429-4442.
- 21) Yagasaki, Y., Shirato Y.,2014. Assessment on the rates and potentials of soil organic carbon sequestration in agricultural lands in Japan using a process-based model and spatially explicit land-use change inventories – Part 2: Future potentials. *Biogeosciences*,11,4443-4447.
- 22) 農林水産省, 2024. 荒廃農地の現状と対策.
- 23) 農林水産省, 2022. 地方への人の流れを加速化させ持続的低密度社会を実現するための新しい農村政策の構築, 新しい農村政策の在り方に関する検討会・長期的な土地利用の在り方に関する検討会.
- 24) 農山漁村文化協会編, 2022. 使い切れない農地活用読本 荒らさない、手間をかけない、みんなで耕す.
- 25) 西廣淳ら, 2020. 「里山グリーンインフラ」による気候変動適応：印旛沼流域における谷津の耕作放棄田の多面的活用の可能性. *応用生態工学* 22 (2) , 175-185.
- 26) 佐野則子, 2022. 自然を利用した炭素貯留がもたらす「土壌炭素クレジット」 日本企業に求められるプレーヤーとしての参画. *知的資源創造*, 2022年9月号, 104-119.

- 1) 2019 REFINEMENT TO THE 2006 IPCC GUIDELINES FOR NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES
- 2) [炭化装置の仕組みとは？種類や炭化プロセスを徹底解説！ | 株式会社ZEエナジー](#)
- 3) 日本バイオ炭研究センター LCA手法の開発・事例研究
- 4) バイオ炭とは～農業分野での脱炭素～, 中部産業経済局ホームページ, Jクレコラム 第35回 2020年6月
- 5) Jackson Nkoh Nkoh et al., A Critical-Systematic Review of the Interactions of Biochar with Soils and the Observable Outcomes, Sustainability, 2021, 13(24), 13726
- 6) アスタミューゼ株式会社 レポート, バイオマスによる二酸化炭素固定技術, 2024年10月
- 7) 農地土壌の炭素貯留能力を向上させるバイオ炭資材等の開発（みどり戦略）
農業・食品産業技術総合研究機構、立命館、秋田県立大学、他
農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究令和2年度～令和6年度
- 8) 中谷 誠, 農業・食品産業技術総合研究機構,
グリーンイノベーション基金事業／食料・農林水産業のCO₂等削減・吸収技術の開発
／高機能バイオ炭等の供給・利用技術の確立／農業副産物を活用した高機能バイオ炭の製造・施用体系の確立
- 9) 本間千晶, 北海道立総合研究機構 林業試験所, バイオ炭の土壌中への炭素貯留などに関する最近の研究事例の紹介,
林産試だより 2024年5月号
- 10) 須藤重人, 農業・食品産業技術研究機構 農業環境変動研究センター, バイオ炭普及研究の今と、今後の展望,
於、フードサプライチェーンにおける脱炭素化の実践とその可視化の在り方等検討会 2021年
- 11) 東北発電工業, 東北大学, 木質バイオ炭を肥料に 東発・東北大が新技術開発へ 解決する課題,
日刊工業新聞 2024年10月14日
- 12) 日本バイオ炭普及会, [バイオ炭とは | 日本バイオ炭普及会](#)

- 13) 日本バイオ炭普及会, 土壌改良用バイオ炭の施用目安, 平成31年 1月31日起案
- 14) FAO, BIOCHAR IN SUSTAINABLE SOIL MANAGEMENT: POTENTIAL AND CONSTRAINTS, November 2023
- 15) 岸本文紅, 農業・食品産業技術研究機構, バイオ炭の農業利用と脱炭素～国内外の動向と今後の展望、
Journal of Life Cycle Assessment, Vol.18, No.1, January 2022
- 16) 山梨県, やまなし 4 パーミル・イニシアチブ農産物等認証制度実施要領、令和 3 年 5 月 7 日施行
- 17) CSIRO, “[Biochar fact sheet](#)”, Web: www.csiro.au
- 18) [バイオ炭 - Wikipedia](#)
- 19) 凌祥之, 九州大学大学院農学研究院, “バイオ炭, 歴史と期待”, JAHESシンポ（日本環境共生学会）, 2024年9月
- 20) Shelby Rajkovich et al., Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil,
Biol Fertil Soils, 2012
- 21) Brtnicky M., et al., A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment,
Science of the Total Environment, Vol.796, 20 November 2021, 148756
- 22) Zimmerman, A. R., Gao, B. & Ahn, M. -Y., Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of
biochar-amended soils, *Soil Biol. Biochem.* **43**, 1169–1179 (2011).
- 23) 土壌炭素貯留効果のある炭の施用による農作物の生育への影響の調査 令和元-2 年度 農地土壌炭素貯留等基盤調査事業
(研究実施主体：農研機構農業環境変動研究センター)
- 24) バイオ炭は地球と人類を救えるか, Nature ダイジェスト Vol. 12 No. 4, DOI: 10.1038/ndigest.2015.150424, 翻訳：三枝小夜子
- 25) 山梨県南部町バイオマスエナジー, 立命館大学カーボン・プロジェクトホームページ,
[立命館大学カーボンマイナスPJ - 生産サイド 南部町バイオマスエナジー](#)
- 26) 産総研, ネイチャーポジティブな循環型社会を創る発電型のバイオ炭生産技術, 産総研ホームページ, 2024年10月31日
- 27) 大曾根三緒, バイオ炭で収益アップ！ブランド構築やJ-クレジット活用などのメリットを紹介, minorasu 農業経営,
[バイオ炭で収益アップ！ブランド構築やJ-クレジット活用などのメリットを紹介 | minorasu\(ミノラス\) - 農業経営の課題を解決するメディア](#)

- 1) 東京大学大学院農学生命科学研究科・農学部HP (https://www.a.u-tokyo.ac.jp/topics/topics_20240422-1.html)
- 2) 農林水産省農林水産技術会議・農林水産研究開発レポート, 8, (2003)
- 3) 国立環境研究所地球環境研究センターHP (https://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/3/3-2/qa_3-2-j.html)
- 4) 恒次祐子, 木材利用によるカーボンニュートラル社会への貢献, 農業および園芸, 98, 1, 27-30(2023)
- 5) T.WATARI, N.YAMASHITA and A. C. Serrenho: Net-zero embodied carbon in building with today's available technologies, *Enviro. Sci. Technol.*, 58, 1793-1801(2024)
- 6) 田中和博: 森林の成長モデル, 森林科学 3 : 28-31, 1991
- 7) 溝上展也・太田徹志: 森林経営における画像・レーザー計測の研究動向, 森林遺伝育種 11 : 177-180, 2022
- 8) 毛綱昌弘: 特集「伐採搬出の道具と機械」にあたって, 森林利用学会誌 30 : 3-4, 2015
- 9) 板谷明美: 特集「路網を活用した伐出システム」にあたって 林内走行化路網活用か, 路網の限界と河川の活用, 森林利用学会誌 31 : 3, 2016
- 10) 有賀一広: 特集「主伐と更新」にあたって, 森林利用学会誌 33 : 3-4, 2018
- 11) 板谷明美: 特集「ICT導入による林業のスマート化」, 森林利用学会誌 36 : 3-4, 2021
- 12) 図子光太郎: 特集「林業の成長産業化に求められる技術と条件」にあたって, 森林利用学会誌 35 : 3-5, 2020
- 13) 鈴木保志: 特集「林内道路ネットワークの再考」にあたって, 森林利用学会誌 37 : 3-4, 2022
- 14) 松本 順司・井上 真由美・横尾 謙一郎・小田一幸: 高炭素固定樹を有する国産早生樹の育成と利用 (第1報) センダンの可能性, 木材学会誌 52 : 77-82, 2006
- 15) 近藤禎二: コウヨウザン研究の現状, 森林遺伝育種 6 : 143-147, 2017
- 16) 斎藤 真己: 無花粉スギの開発状況と今後の展望, 森林科学54 : 17-20, 2008
- 17) 栗田 学: エリートツリー, これまでの歩みと将来展望, 森林遺伝育種 12 : 123-128, 2023
- 18) 林野庁: 令和5年度森林・林業白書, 2 木材利用の動向, 129-148(2024)
- 19) 原田寿郎: 日本における木質耐火構造開発のあゆみ, 木材学会誌, 55, 1, 1-9(2009)
- 20) 服部順昭: 木質耐火部材を知る, 建材マンスリー, 657, 2-5(2020)
- 21) 林野庁: 加速化する建築物の木造化, 林野, 121, 3-7(2017)
- 22) ウッド・チェンジ協議会 高層ビルグループ: 高層木造ビル事例集 (令和3年版), URL (https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/cltmadoguchi/pdf/clt_20220601_jireisyu.pdf)
- 23) 林野庁: 高層木造ビル事例集, 令和3年版
- 24) 平井卓郎, 木質構造の現状と課題, 材料, 52, 12, 1502-1507(2003)
- 25) 柿谷 朋: 木造住宅部材における寿命予測のための加速試験とその実際, 木材保存, 35(1), 2-8(2009)
- 26) 片岡厚: 木材の気象劣化と表面保護, 木材保存, 43(2), 58-68(2017)
- 27) 一宮孝至他: 木造およびRC造非住宅建築の環境経済評価 (第1報) 積上法LCAによるGHG排出量の比較, 木材学会誌, 67, 1, 14-19(2021)
- 28) 河村奏瑛他: 木造およびRC造非住宅建築の環境経済評価 (第2報) 国産材利用および国内加工に着目した経済波及効果の比較分析, 木材学会誌, 67, 1, 1-6(2021)
- 29) 森井拓哉他: 木造およびRC造非住宅建築の環境経済評価 (第3報) 産業連関法によるLCAと環境効率指標, 木材学会誌, 67, 1, 7-13(2021)
- 30) 木村彰孝他: 室内空間への木材使用量の違いが二桁加算・減算の作業効率に与える影響, 木材学会誌, 57, 3, 160-168(2011)
- 31) 杉山真樹: 人間の快適性に及ぼす木材の触覚, 視覚及び嗅覚刺激の効果の解明, 森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果72, (2018)
- 32) 恒次祐子他: 木質居住環境が人間にもたらす影響の評価手法: 木材学会誌, 63, 1, 1-13(2017)

- 34)矢野浩之：セルロースナノファイバーとその利用、日本ゴム協会誌、85、12、376-381(2012)
- 35)藤澤秀次：TEMPO酸化セルロースナノファイバー/高分子複合材料の基礎物性、森林科学、81、15-18 (2017)
- 36)河崎雅行：セルロースナノファイバーの実用化に向けた検討、紙パ技協誌、69、1、54-57(2015)
- 37)木村肇他：グリコール改質リグニンによるフェノール樹脂の高性能化、ネットワークポリマー、44、2、76-83(2023)
- 38)日本発のリグニン産業の創出,<http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/matechem/about.html>
- 39)A.Kobayashi et al.:Effect of thermal base generators on the FRP fabrication with glycol-lignin., *J.Photopolym. Sci.Tech.*, 31(1)、101-106(2018)
- 40)谷田貝光克：樹木成分の生物活性とその利用、紙パ技協誌、55、11、1543-1549(2001)
- 41)大原誠資：樹木抽出成分利用の新展開、木材工業、61、8、339-344(2006)
- 42)大平辰朗、宮澤三雄監修：テルペン利用の新展開、シーエムシー出版（東京）、280pp(2016)
- 43)永橋優純、村上和彦、雑賀高、木質系バイオ燃料の利用形態と燃焼特性—研究・開発動向—、日本燃焼学会誌、51、158、310-317(2009)
- 44)農林水産省、JAS0030、木質ペレット燃料、2023
- 45)吉本康文、木下英二、植物油燃料のエンジン適用技術—バイオディーゼル燃料について—、日本燃焼学会誌、51、156、121-128(2009)
- 46)上田達巳：国産バイオエタノール生産の評価と今後の展望、農業農村工学会誌、77(1)、29-32(2009)
- 47)野尻昌信他：実用化に一步近づいたスギからのバイオエタノール製造技術、森林総合研究所平成25年度研究成果先集、26-27(2013)
- 48)本間正義、横山伸也、三石誠司、小島正美、アルコールで走る車が地球を救う、毎日新聞出版、242pp, 2024
- 49)山内康弘他、航空業界の脱炭素化に貢献するバイオマスガス化FT合成バイオジェット燃料の実証、三菱重工技報、59,4,1-8(2022)
- 50)生物系特定産業技術研究支援センターHP、革新的技術開発・緊急展開事業（うち地域戦略プロジェクト）、ICTを活用した木材SCMシステムの構築 (https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/h27kakushin/chiiki/research/files/subject6_06.pdf)
- 51)リグニンネットワーク事務局、リグニンネットワーク技術集2024、2024
- 52)図解よくわかるナノセルロース、ナノセルロースフォーラム 編、日刊工業新聞社、2015
- 53)毛利恵美子、セルロースナノクリスタル—液晶構造とその利用—、化学と教育、70,1,32-35(2022)
- 54)中村雅也他、2-ピロン-4,6-ジカルボン酸の製造方法、特許7392928
- 55)NEDO TSC、TSC Foresight、22、NEDO HP、<http://www.nedo.go.jp/content/100870192.pdf>
- 56)知財図鑑、樹木を“超穏和”に溶解して再構成する技術、<https://chizaizukan.com/property/373/>
- 57)澤井徹他：バイオマスの半炭化（トレファクション）改質技術と展望、*Netsu Sokutei*、51,2,70-77(2024)
- 58)近畿大学HP、次世代再生可能エネルギー「バイオコークス」夢の燃料で争いのない世界を！
<https://www.kindai.ac.jp/science-engineering/research/forefront-research/toprunner02/>
- 59)M.J.Watson et al., Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and , markets: A critical review,*J.Cleaner Prod.*,449,10,141472(2024)
- 60)S.Wandelt et al., *Sustainable aviation fuels: A meta-review of surveys and key challenges*, J.the Air transport research society, Available online 20 January 2025, <https://doi.org/10.1016/j.jatrs.2024.100056>
- 61)S.Tsubaki et al.,Process intensification of the ultra-rapid pyrolysis of bamboo by spatially separated microwave electric and magnetic fields,*Chemical Engineering J.*,499,Available online 28 September 2024,<https://doi.org/10.1016/j-cej.2024.156260>.
- 62)Charm Industrial HP , <https://charmindustrial.com/>
- 63)経済産業省HP,<https://www.meti.go.jp/press/2022/03/20230331010/20230331010.html>
- 64)一般社団法人プラチナ構想ネットワークプラチナ森林産業イニシアティブ、「ビジョン2050 日本が輝く、森林循環経済」2023、<https://platinum-network.jp/2023/05/23/16/26/>
- 65)笹内謙一：国内におけるバイオマス小規模ガス化発電の最近の動向と課題、日本エネルギー学会機関誌えねるみくす、101、660-668(2022)

- 1) Nellemann *et al.* (Eds) (2009) Blue carbon. A Rapid Response Assessment. UNEP, GRID-Arendal, www.grida.no
- 2) バイオマスをCO₂吸収源としたネガティブエミッション技術 (JST 研究開発戦略センター 2021) .
- 3) 水産庁 (2014) 藻場・干潟の二酸化炭素吸収・固定のしくみ.
- 4) 水産研究・教育機構 (2023) 海草・海藻藻場のCO₂貯留量算定ガイドブック.
- 5) 環境省 (2024) 我が国インベントリにおける藻場 (海草・海藻) の算定方法について.
- 6) Krause-Jensen & Duarte (2016) Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geosci*, 9, 737–742.
- 7) Cage (2018) Kelp and carbon sequestration: exporting terrestrial GHG accounting to the deep sea.
<https://ghginstitute.org/2018/09/06/kelp-and-carbon-sequestration-exporting-terrestrial-ghg-accounting-to-the-deep-sea>
- 8) North Sea Farmers. <https://www.northseafarmers.org>
- 9) FAO (2024) The state of world fisheries and aquaculture.
- 10) Geraldie *et al.* (2019) Fingerprinting blue carbon: rationale and tools to determine the source of organic carbon in marine depositional environment. *Front. Mar. Sci.*, 6:263.
- 11) 水産研究・教育機構 (2024) 海草・海藻藻場のCO₂貯留量算定ガイドブック<実践編 1> . 水産研究・教育機構 pp51.
- 12) 木下ら (2023) 早熟性カジメ群落の動態, 水産工学, 60(2), 53-61.
- 13) 水産研究・教育機構 (2014) 海草・海藻, FRA news, No.41.

- 1) Minx et al, 2018. Negative emissions - Part 1: Research landscape and Synthesis. Environ. Res. Lett. 13; 063001.
- 2) IPCC, 2022. "Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change" the 6th Assessment Report of IPCC.
- 3) Siegel et al, 2023. Quantifying the Ocean's Biological Pump and Its Carbon Cycle Impacts on Global Scales. Ann.Rev.Mar.Sci, 15:329–356.
- 4) Martin et al, 1989. Vertex: phytoplankton/iron studies in the Gulf of Alaska, Deep Sea Res, 36; 649-680.
- 5) 武田, 2007. 鉄による海洋一次生産の制御機構. 日本水産学会誌, 73;429-432.
- 6) 環境省, 2023. 我が国におけるブルーカーボン取組事例集～藻場干潟の保全・創出によるCO2吸収源対策～.
- 7) 水産庁, 2015. 磯焼け対策における施肥に関する技術資料.
- 8) 水産庁, 2015. 栄養塩類対策に関する研究.
- 9) 環境省, 2022. 栄養塩類管理計画策定に関するガイドライン
- 10) 国土交通省, 2023. 栄養塩類の能動的運転管理の効果的な実施に向けたガイドライン（案）.
- 11) 兵庫県, 2022. 豊かで美しい瀬戸内海の再生に向けた栄養塩類管理計画.
- 12) 大内（2007）深層水汲み上げによる海洋肥沃化実験—拓海プロジェクト—. 海洋開発論文集, 第23巻
- 13) 井関・大内, 2017. 海洋深層水の富栄養性を利用した海域肥沃化. Deep Ocean Water Research, 18(3), 166-167, 2017
- 14) 海洋深層資源の有効利用技術の開発に関する研究. <https://research-er.jp/projects/view/1086373>
- 15) Middelburg et al, 2020. Ocean Alkalinity, Buffering and Biogeochemical Processes. Reviews of Geophysics, 58, e2019RG000681.
- 16) Bach et al, 2023. Toward a consensus framework to evaluate air-sea CO2 equilibration for marine CO2 removal. Limnol. and Ocenogr. doi: 10.1002/lol2.10330.
- 17) Jones et al, 2014. Spatial and seasonal variability of the air-sea equilibration timescale of carbon dioxide. Global Biogeochem. Cycles, 28: 1163–1178.
- 18) He and Tyka, 2023. Limits and CO2 equilibration of near-coast alkalinity enhancement. Biogeoscience, 20; 27-43.
- 19) 藤井 2020. 地球温暖化・海洋酸性化が日本沿岸の海洋生態系や社会に及ぼす影響. 水産工学56;191-195.
- 20) Alter et al, 2024. Hidden impacts of ocean warming and acidification on biological responses of marine animals revealed through meta-analysis. Nature Communications, 15:2885.

- 1) LCA日本フォーラム「ライフサイクルアセスメント（LCA）によるCarbon Removal and Recycling（CR2）Technologiesの温室効果ガス排出量算定ガイドライン」（第2.5版、2024年）
- 2) Tom Terlouw, Christian Bauer, Lorenzo Rosa, Marco Mazzotti. 2021. Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: a critical review. *Energy Environ. Sci.*, 14, 1701-1721.
- 3) Isabela Butnar et al. 2024. A Review of Life Cycle Assessment Methods to Inform the Scale-up of Carbon Dioxide Removal Interventions. *WIREs Energy and Environment*, Volume 13, Issue 6.
- 4) 服部順昭他、特集「木質材料・製品のLCA」、日本LCA学会誌、16,2,65-105(2020)

- 1) 環境省ホームページ「土地セクター・炭素除去ガイダンス パート1：算定・報告の要件およびガイダンスパイロットテストおよびレビュー用ドラフト（2022年9月）」（仮訳）https://www.env.go.jp/earth//ondanka/supply_chain/gvc/files/tools/1-10r_Land-Sector-and-Removals-Guidance-Pilot-Testing-and-Review-Draft-Part-1_JP.pdf
- 2) Task Force on National Greenhouse Gas Inventories「Report of the IPCC Expert Meeting 1-3 July 2024, Vienna, Austria」
https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/mtdocs/2407_CDR_CCUS.html
- 3) Task Force on National Greenhouse Gas Inventories「Report of the IPCC Scoping Meeting 14-16 October 2024, Copenhagen, Denmark」
https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/mtdocs/2410_CDR_CCUS_Scoping.html
- 4) the University of Oxford's Smith School of Enterprise and the Environment「The State of Carbon Dioxide Removal」2nd EDITION
<https://www.stateofcdr.org/>
- 5) 環境省ホームページ「ecojin's EYE ネイチャーポジティブ」<https://www.env.go.jp/guide/info/ecojin/eye/20240214.html>
- 6) IPCC第6次評価報告書第3作業部会報告書「気候変動2022：気候変動の緩和」政策決定者向け要約（SPM）
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/global2/about_ipcc/202310ipccwg3spmthirdversion.pdf
- 7) 亀山康子「気候変動をめぐるシナジーとトレードオフ」学術の動向 2023.1https://www.jstage.jst.go.jp/article/tits/28/1/28_1_34/_pdf/-char/ja
- 8) 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所「炭素中立と自然再興を結ぶ鍵」季刊森林総研No.66 2024
<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/kikan/kikan-66.html>
- 9) 「生物多様性×気候変動ー同時解決に向けた科学のいま」国立環境研究所地球環境研究センターニュース 2021年12月号、Vol.32 No.9
<https://cger.nies.go.jp/cgernews/202112/373001.html>
- 10) 環境省ホームページ「【有識者に聞く】気候変動と人権問題の関連性とは？「公正な移行」の重要性」
https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/topics/feature-09.html、
https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/topics/feature-09-2.html
- 11) 産総研マガジン、サーキュラーエコノミーとは https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20231011.html
- 12) 経済産業省「循環経済ビジョン2020」https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/junkai_keizai/20200522_report.html
- 13) 農林水産省「農業分野における気候変動・地球温暖化対策について」（令和6年1月）
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/pdf/ondanka_taisaku.pdf
- 14) 気象庁ホームページ「海洋内部の知識 貧酸素化」[気象庁 | 貧酸素化の知識 貧酸素化](#)
- 15) 国立研究開発法人国立環境研究所気候変動適応情報プラットフォーム「ココが知りたい地球温暖化 気候変動適応編 Q14」
[池や湖の中で暮らす生き物への温暖化の影響は？ | ココが知りたい地球温暖化 気候変動適応編 | 気候変動と適応 | 気候変動適応情報プラットフォーム \(A-PLAT\)](#)

- 16) 「二酸化炭素に次ぐ温室効果をもつ大気中メタンをアジアの森林はどの程度吸収しうるのか？」国立環境研究所地球環境研究センターニュース 2020年11月号、Vol.31 No.8
<https://cger.nies.go.jp/cgernews/202011/359002.html>
- 17) Vincent Gauci, Sunitha Rao Pangala, Alexander Shenkin, Josep Barba, David Bastviken, Viviane Figueiredo, Carla Gomez, Alex Enrich-Prast, Emma Sayer, Tainá Stauffer, Bertie Welch, Dafydd Elias, Niall McNamara, Myles Allen & Yadvinder Malhi. 2024. Global atmospheric methane uptake by upland tree woody surfaces. *Nature*, 631, 796-800.
- 18) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センターレポート「温室効果ガスN₂Oの抑制分野の技術戦略策定に向けて」（2021年6月）
<https://www.nedo.go.jp/content/100934250.pdf>

用語	解説
カーボンニュートラル	CO ₂ をはじめとするGHGの「排出量」から、植林、森林管理などによる「吸収量」を差し引いて、合計をゼロにすること。
ライフサイクルアセスメント（LCA）	原材料の取得から製造、使用及び使用後の処理、リサイクルおよび最終処分（すなわち、ゆりかごから墓場まで）に至るまでの製品のライフサイクルの全体を通じた環境側面及び潜在的な環境影響の評価。
温室効果ガス （Greenhouse Gas : GHG）	大気中の熱を吸収する性質のあるガス。大気中のGHGが増えたと地表を温める働きが強くなり、地表付近の温度が上昇する。増えすぎたGHGは地球温暖化の一因となる。二酸化炭素（CO ₂ ）、メタン（CH ₄ ）、一酸化二窒素（N ₂ O）のほか、ハイドロフルオロカーボン類（HFCs）、パーフルオロカーボン類（PFCs）、六フッ化硫黄（SF ₆ ）、三フッ化窒素（NF ₃ ）といった種類がある。
GX（グリーントランスフォーメーション）	化石燃料をできるだけ使わず、クリーンなエネルギーを活用していくための変革やその実現に向けた活動。
気候変動に関する政府間パネル （Intergovernmental Panel on Climate Change : IPCC）	1988年に世界気象機関（WMO）と国際環境計画（UNEP）によって設立された政府間組織。2022年3月時点で195の国・地域が参加。気候変動に関する最新の科学的知見について評価を行い、定期的に報告書を作成している。総会、ビューロー（議長団）、執行委員会の下に、3つのワーキンググループ及び1つのインベントリータスクフォース（TFI）が置かれている。
ネガティブエミッション技術（Negative Emissions Technologies : NETs）	大気中のCO ₂ を回収・吸収し、貯留・固定化することで大気中のCO ₂ 除去（CDR, Carbon Dioxide Removal）に資する技術
ブルーカーボン	沿岸・海洋生態系が光合成によりCO ₂ を取り込み、その後海底や深海に蓄積される炭素のこと。2009年に公表された国連環境計画（UNEP）の報告書「Blue Carbon」において紹介され、吸収源対策の新しい選択肢として世界的に注目が集まっている。ブルーカーボンの主要な吸収源としては、藻場（海草・海藻）や塩性湿地・干潟、マングローブ林があげられ、これらは「ブルーカーボン生態系」と呼ばれる。
バイオ炭	燃焼しない水準に管理された酸素濃度の下、350℃超の温度でバイオマスを加熱して作られる固形物
バイオマス	生物資源（bio）の量（mass）を表す概念で、再生可能な、生物由来の有機性資源で化石資源を除いたもの。 太陽エネルギーを使って水と二酸化炭素から生物が光合成によって生成した有機物であり、私たちのライフサイクルの中で生命と太陽エネルギーがある限り持続的に再生可能な資源。
草生栽培	果樹園などで、地力を維持するため、牧草や雑草などを生えさせて地表面を被覆保護して行う栽培法。
早生樹	成長の早い経済樹種。アカシア、ユーカリ等の熱帯性の造林樹種が代表的であるが、日本国内でも、近年、コウヨウゼン、センダン等が着目されている。
エリートツリー	地域の人工造林地において、最も成長が優れた木として選抜された「精英樹」のうち、優良なもの同士を人工交配によりかけ合わせ、その中からさらに優れた個体を選んだもの
CDR（Carbon Dioxide Removal）	二酸化炭素除去、すなわち大気中のCO ₂ を除去すること。
海洋肥沃化	海洋への養分散布や優良生物品種等を利用することにより生物学的生産を促してCO ₂ 吸収・固定化を人工的に加速する技術。
海洋アルカリ化	海水にアルカリ性の物質を添加し、海洋の自然な炭素吸収を促進する炭素除去の方法。
カーボン・クレジット	排出量見通し（ベースライン）に対し、実際の排出量が下回った場合、その差分を、MRV（モニタリング・レポート・検証）を経てクレジットとして認証するもの。
等方性大断面部材	長さや幅の両方向からの荷重に強い特性を持つ木質材料で、工期の短縮化や設計・意匠の自由度拡大など多くのメリットをもたらすと見込まれている。「グリーンイノベーション基金」では、国産材を原料として支点間距離8m、耐火2時間の等方性大断面部材を開発し、10万円/m ³ 以内で製造する技術を確認するとともに、開発した部材の日本農林規格（案）と、開発した部材を用いた一般的设计法の案を提示することを目指している。
DAC（Direct Air Capture）	直接空気回収技術。大気から直接、CO ₂ を分離・回収する技術のこと。
CCUS（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）	CO ₂ の回収・貯留・有効利用。火力発電所の排ガスなどに含まれるCO ₂ を分離・回収し、深い地層に貯留し、必要に応じて有効活用する技術を指す。
CCS（Carbon dioxide Capture and Storage）	CO ₂ 回収・貯留。発電所や化学工場などから排出されたCO ₂ を、ほかの気体から分離して集め、地中深くに貯留・圧入する技術。

用語	解説
IC-VCМ (Integrity Council for the Voluntary Carbon Market)	自主的炭素市場のための十全性評議会。元イングランド銀行総裁・金融安定理事会 (FSB) 議長であるマーク・カーニー氏を中心として設立されたTSVCM (自主的炭素市場拡大に関するタスクフォース) が2021年に創設したボランタリークレジットの品質評価基準等を策定するためのガバナンス機関。高品質なクレジット要件「コアカーボン原則 (CCPs: Core Carbon Principles)」及び制度レベルの評価枠組みを公表している。
追加性	IC-VCМが策定した「コアカーボン原則」の1つ。緩和活動によるGHG排出削減又は吸収は追加的でなければならない。つまりそれらは炭素クレジット収入による創出されるインセンティブがなければ発生しない。 J-クレジット制度では、追加性を「本制度がない場合に、排出削減・吸収活動が実施されないこと」と定義した上で、原則として、設備の投資回収年数が3年以上かどうかで追加性の有無を判断するほか、方法論によっては別途追加性の判断基準が示されている。
4パーミル・イニシアチブ	世界の土壌の表層の炭素量を年間0.4% (4パーミル) 増加させることで、人間の経済活動によって発生する大気中の二酸化炭素を実質ゼロにすることができるという考え方。
環境保全型農業直接支払	農業者の組織等が実施する化学肥料・化学合成農薬を原則5割以上低減する取組と合わせて行う、地球温暖化防止や生物多様性保全等に効果の高い農業生産活動等の取組を支援する制度。2015年度から実施されている。
クールベジ	クールベジタブルの略。意味合いは、二酸化炭素を減らすことで地球を冷やす野菜 (炭を入れた畑で作った野菜のこと)。
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nationsの略。国連食糧農業機関は、飢饉の撲滅を世界の食糧生産と分配の改善と生活向上を通して達成するのを目的とする、国際連合の専門機関の一つ。国連食糧農業機関ともいう。
乳牛の敷料	敷料は、牛の寝床に敷くもののことで、稲ワラやオガクズ、モミガラなどの総称。
エコシステム	本来は生態系を指す英語「ecosystem」を比喩的に用い、主に情報通信産業において、動植物の食物連鎖や物質循環といった生物群の循環系という元の意味から転化して、経済的な依存関係や協調関係、または強者を頂点とする新たな成長分野でのピラミッド型の産業構造といった、新規な産業体系を構成しつつある発展途上の分野での企業間の連携関係全体を表すのに用いられる用語。
ウェルビーイング	well-being、個人の権利や自己実現が保障され、身体的、精神的、社会的に良好な状態にあることを意味する概念。
エンジニアリングプラスチック	(Engineering plastic) とは、特に強度に優れ、耐熱性のような特定の機能を強化してあるプラスチックの一群を指す分類上の名称である。一般には、100℃以上の環境に長時間曝されても、49MPa以上の引っ張り強度と2.5GPa以上の曲げ弾性率を持ったものが該当する。「エンブラ」と略称されることが多い。
超緩和溶解	(超緩和溶解とも言う) 木材や農産廃棄物を室温から風呂温度程度の超緩和な条件で、有機酸などに可溶化し、紙とプラスチックの性質を合わせもつウッドペーパーや、その他のバイオマス成形体を創成するとともに、バイオマスが溶解した液体からセルロースやリグニンを常温で分離・利用する方法。
半炭化	別名「トレファクション」とも呼ばれ、木質バイオマスを200～300℃で加熱することで有機物を分解して炭素成分が多い物質にするための燃料化技術。
バイオコークス	光合成に起因する全ての植物から形成できる固形燃料の総称。従来のバイオマス燃料では困難であった、圧縮強度が高く、高温環境下での長時間燃焼が可能であり、製造時に廃棄物を出さない特性等を有しており、石炭コークスの代替燃料として使用可能な「ゼロエミッション燃料」。
ナフサ	原油を常圧蒸留装置によって蒸留分離して得られる製品のうち沸点範囲がおおむね30～180℃程度の炭化水素混合物。粗製ガソリン、直留ガソリンなどとも呼ばれる。主に炭素数C8からC10の範囲の芳香族炭化水素などから構成。
バイオオイル	木材などのバイオマスを425～600℃付近まで急速加熱後、得られた混合留分を急速冷却することで、気体 (合成ガスなど)、液体 (熱分解油)、固体 (チャー) を得ることができる。特に液体留分である熱分解油 (以下、バイオオイルと表記する) は、新しい液体燃料・新材料として期待されており、高収率でバイオオイルを製造可能な装置開発が進められている。
熱電併給システム	熱電併給システムはコージェネレーション (Cogeneration) / コージェネ (コージェネレーション / コージェネ) ともいい、発電と熱供給を同時に行うシステムのことである。“Combined Heat & Power”の頭文字をとって、CHPと呼ぶこともある。燃料は、天然ガス、石油、LPガスなどで、エンジン、タービン、燃料電池などを使って発電し、同時に発生する廃熱を回収する。この廃熱は蒸気や温水という形態で供給され、冷暖房や給湯などに使われる。

用語	解説
Synthetic Aperture Radar (SAR：合成開口レーダー)	実開口長が小さい人工衛星などのアンテナでも、大きな開口を持ったアンテナと等価な画像が得られるように、人工的に「開口」を「合成」する技術。SARの電波は雲を透過する性質があり、昼夜とも天候に左右されず観測できる。
Light Detection and Ranging (LiDAR)	レーザー光を照射して、その反射光の情報をもとに対象物までの距離や対象物の形などを計測する技術。計測精度が高いことから、航空測量や地形図作成などに使われてきた。
Multispectral Data	マルチスペクトルカメラからのデータ。被写体が放出する光のスペクトル情報（紫外線、可視光線、赤外線など）を観測できる。農作物の詳細データ把握、森林の状態のモニタリング、バイオマスの測定、海岸線のマッピングなどに利用される。
アルベド	天体における外部からの光エネルギー（太陽からの光）の入射に対する反射の比率。アルベドが大きくなると光エネルギーが地球の外に反射されることから地球の温度低下につながる。逆にアルベドが小さくなると温暖化へと進む。
システム境界	LCAの対象とする製品システムと、環境又は他の製品システムとの境界をいう。特に、LCI分析においては、分析の対象範囲を指す。
機能単位	GHG排出量を算定する技術及びシステムの機能を特定し、その機能のある単位で定量化したもの。
カーボンリムーバル&リサイクル（GR2）	ネガティブエミッション技術と、排出ガスから回収したCO ₂ を有効利用する技術（Carbon Capture and Utilization：CCU）を合わせた技術群。
GHGプロトコル	企業、非政府組織（NGO）、政府、その他世界資源研究所（WRI）及び持続可能な開発のための世界経済人会議（WBCSD）が呼びかけた、関係先を含めたマルチステークホルダーのパートナーシップ。
Scope 3 基準	事業活動に関係するあらゆる排出を合計した排出量（サプライチェーン排出量）のうち、自社事業の活動に関連する他社の排出をさす。なお、Scope 1 は自社による直接排出、Scope 2 は自社が購入・使用した電力・熱・蒸気などのエネルギー起源の間接排出をそれぞれ指す。
ブラックス	大気、海洋、森林等の炭素を貯蔵する各炭素プール間の炭素の移動量のこと。通常、単位面積（ha）当たり、単位時間（年）当たりの移動炭素重量（T）で表す（tC/ha/yr）。