

戦略プロポーザル

バイオマス・ ネガティブエミッション技術の 実用化加速基盤研究

STRATEGIC PROPOSAL

**Paving the way to deliver nature
based negative emission via
deciphering carbon cycle**

エグゼクティブサマリー

本戦略プロポーザルは、ネットゼロエミッションを達成していくために不可欠とされているネガティブエミッション技術（Negative Emission Technologies: NETs）のうち、バイオマスを活用したネガティブエミッション技術に関する研究開発戦略を提言する。具体的にはその基礎科学となるバイオマスの炭素循環・動態、特にこれまで知見が十分とは言えないバイオマスの分解過程にも着目した上で、炭素循環・動態に関する観測・計測技術、モデル評価技術、制御技術・方法、さらには今後普及を加速する上で必要となる技術的課題や社会的課題も対象とした研究開発を提案するものである。

気候変動への取組がますます重要となっている昨今、温室効果ガス（Green House Gas: GHG）排出量を抑制していくだけではなく、大気中CO₂を除去するための技術、すなわちネガティブエミッション技術が不可欠である。我が国だけでもカーボンニュートラルの実現のためには、2050年までに2億トン以上の吸収・除去量の達成が必要と言われている。ネガティブエミッション技術は、工学的な手法や自然を活用した解決策（Nature-based Solutions: NbS）としての手法などがあり、その中でもバイオマスを活用したネガティブエミッション技術は、陸域の農地、森林、および海洋におけるバイオマスによるCO₂吸収・貯留能を活用したものである。

全球でのバイオマスの炭素循環過程でのCO₂吸収量および分解によるCO₂排出量は、フロー量で見ると世界の化石資源燃焼によるCO₂排出量よりも一桁近く大きな値となっている。このことから吸収フロー量の増大または分解フロー量の抑止の制御ができればバイオマスによる炭素貯留量の大幅増加が期待できる。しかし現状ではバイオマスによる分解過程を含む炭素循環・動態の知見は不足しており、基礎科学的観点からの検討が必要である。特に分解フローの過程は、農業生産増大と直結する光合成による吸収フロー過程と比較すると、その知見は技術的困難も相まって十分とはいえない。このためネガティブエミッション技術の視点からは炭素循環・動態において、特に陸域の地下部や海域における知見の拡充が求められる。

以上のことからバイオマスを活用したネガティブエミッション技術の実用化を加速するための研究開発課題としては、炭素循環・動態の解明、CO₂吸収・固定のメカニズムや計測データの不足による吸収・固定量予測の不確かさの解消が挙げられる。また、実用化に向けては食料や木材生産等と両立させながら、CO₂吸収・固定量を増加させていく制御技術、方策が必要である。このためには、研究開発の推進のみならず、制度・ルール作りや体制整備なども重要となる。

本戦略プロポーザルでは、今後求められる具体的な研究開発課題について、以下の3つの課題に分けて整理した。

- バイオマス由来の炭素循環・動態の解明（課題1）
- 吸収量増大・分解抑止のための対策技術（課題2）
- 炭素市場価値と付加価値の評価（課題3）

課題1は、農地・森林・海洋それぞれでのバイオマス由来の炭素循環及び動態の解明に向けた基礎的科学技術の課題である。課題2は、バイオマスを活用したネガティブエミッション技術の実用化加速のために必要な技術開発である。課題3は、炭素の価値、すなわち「大気中CO₂除去の価値」+「バイオマス特有の付加価値」を定めていくにあたり必要となる知見やガバナンス体制に関する課題である。課題1および課題2で明らかになった知見を課題3では価格として評価し、炭素クレジット市場などに落とし込んでいくことで社会実装の加速に向けた検討を進めることが可能となる。

また研究開発の推進にあたっては、バイオマスの管理は長期に渡るものが多いことから、目標とその課題を短期（～5年）・中期（5～10年）・長期（10～20年）・超長期（2050年以降）に分けて推進する必要がある。炭素クレジット市場で得られた資金が研究開発やその実装などに配分され、研究と資金が好循環する

ような仕組みづくりが求められる。

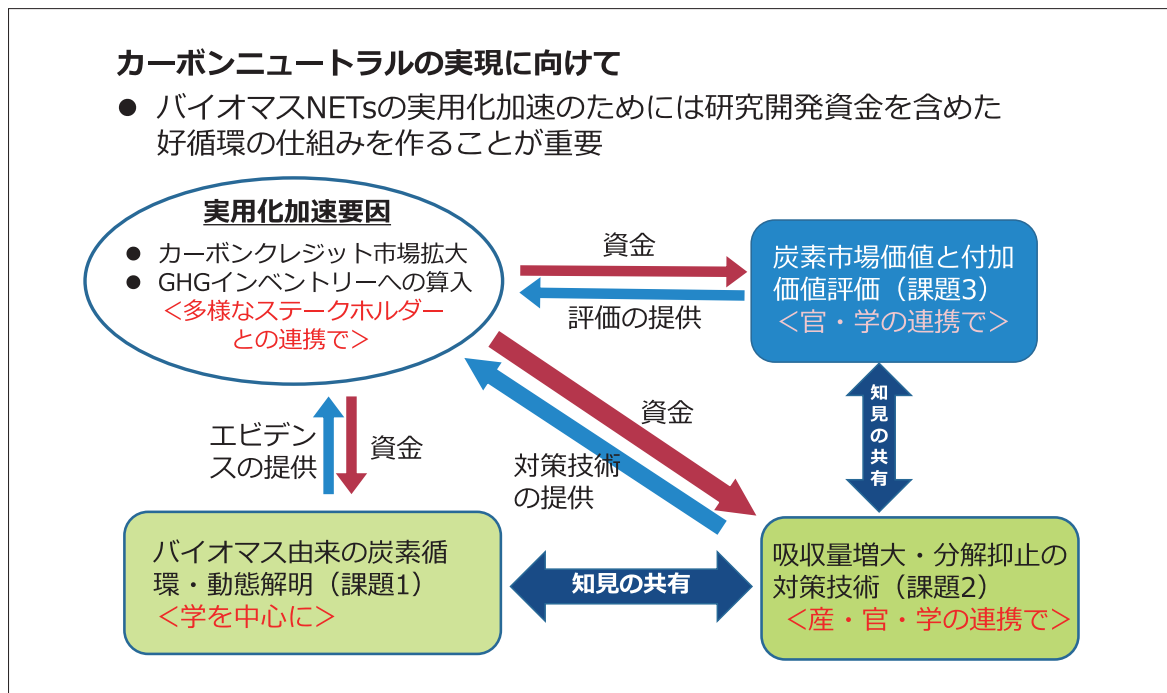


図 ES-1 科学的知見と資金の循環による実用化加速イメージ

本戦略プロポーザルで提案する研究開発の推進により、これらの基礎科学および対策技術に関する研究開発基盤が確立し、さらにはバイオマスによる炭素クレジットのより正確な評価法・推定法に反映できると考えられる。また国際的にもバイオマスを活用したネガティブエミッション技術に関する知見は注目を集めており、排出量取引や炭素税などの国際的なスキームを活性化しうると考える。加えて、これらはグローバルでの温室効果ガス削減への多大なる貢献だけでなく、持続可能な農林水産業への貢献も併せて期待される。

Executive Summary

This strategy proposal outlines a research and development (R&D) strategy for biomass-based negative emission technologies (NETs)—one of category of NETs regarded as essential for achieving net zero emissions. More specifically, it proposes R&D focusing on: the carbon cycle/dynamics of biomass which will serve as the underlying basic science; observation/measurement technologies, model evaluation technologies, and control technologies/methods pertaining to the carbon cycle/dynamics, with particular attention to the decomposition process of biomass where insufficient knowledge has been accumulated thus far; and technical issues and social issues which must be addressed to accelerate dissemination of the relevant technologies going forward.

In recent years, efforts to deal with climate change have become increasingly important. It is essential to not just suppress greenhouse gas (GHG) emissions, but also to employ NETs for removing CO₂ in the atmosphere. It is thought that realizing carbon neutrality, even just in Japan, will require absorption/removal of at least 200 million tons of CO₂ by 2050. NETs include engineering-based techniques and nature-based solutions (NbS), and among NbS, biomass-based NETs exploit the ability of biomass to absorb and store CO₂ in farmland especially for the soil and forests on land, and in the oceans.

On a global basis, the amount of CO₂ absorbed in the carbon cycle process of biomass, and the amount of CO₂ emitted due to decomposition of biomass, are about one order of magnitude larger than CO₂ emissions due to global fossil resource combustion. Therefore, if control is possible to increase absorption rate of CO₂, or suppress decomposition rate of biomass, we can expect a major increase in the amount of carbon stored by biomass. However, at present, there is insufficient knowledge of the carbon cycle/dynamics due to biomass, including its decomposition, and more examination is necessary from the standpoint of basic science. Knowledge of the process of decomposition rate of biomass is especially inadequate, and there are also technical difficulties, in comparison to the absorption process by the photosynthesis that is directly linked with increased agricultural production. Therefore, from the perspective of NETs, there is a need to bolster knowledge, particularly for the underground portion on land and for the oceans, regarding the carbon cycle/dynamics.

In light of the above, we can mention—as R&D issues for accelerating practical application of NETs using biomass—elucidating the carbon cycle/dynamics, and resolving the uncertainty of predictions of the amount of absorption/fixation due to insufficient understanding of CO₂ absorption/fixation mechanisms and lack of measurement data. Also control technologies and measures are needed to increase CO₂ absorption/fixation volumes, while securing production of foodstuffs and lumber, etc., as we move toward practical application. For this purpose, it is crucial to not only promote R&D, but also link research organisations and organise social rules and rules, establish a system, and so forth.

In this strategy proposal, the specific R&D topics that must be addressed going forward are divided into the following three issues.

- Elucidation of the carbon cycle/dynamics attributable to biomass (Issue 1)
- Countermeasure technologies for increasing absorption and suppressing decomposition

of biomass (Issue 2)

● Evaluation of carbon market value and added value (Issue 3)

Issue 1 involves basic science and technology for elucidating the carbon cycle and dynamics attributable to biomass for farmland, forests, and oceans, respectively. Issue 2 is developing the technologies needed to accelerate practical application of biomass-based NETs. Issue 3 relates to the knowledge and governance system needed for establishing a value of carbon, i.e., “the value of removing atmospheric carbon CO₂” + “the added value specific to biomass.” Knowledge found through Issue 1 and Issue 2 will be evaluated in Issue 3 in terms of costs and prices, and by applying this to things like the carbon credits market, it will be possible to proceed with studies to accelerate social implementation.

In promoting R&D, there are many elements of biomass management which extend over the long term, and thus there is a need to advance goals and related issues by dividing into time frames: short term (up to 5 years), medium term (5 to 10 years), long term (10 to 20 years), and ultra-long term (year 2050 and beyond). There is a need for funds obtained through the carbon credit market to be allocated in areas such as R&D and related implementation, and for creation of a system where research and funding can function in a virtuous cycle.

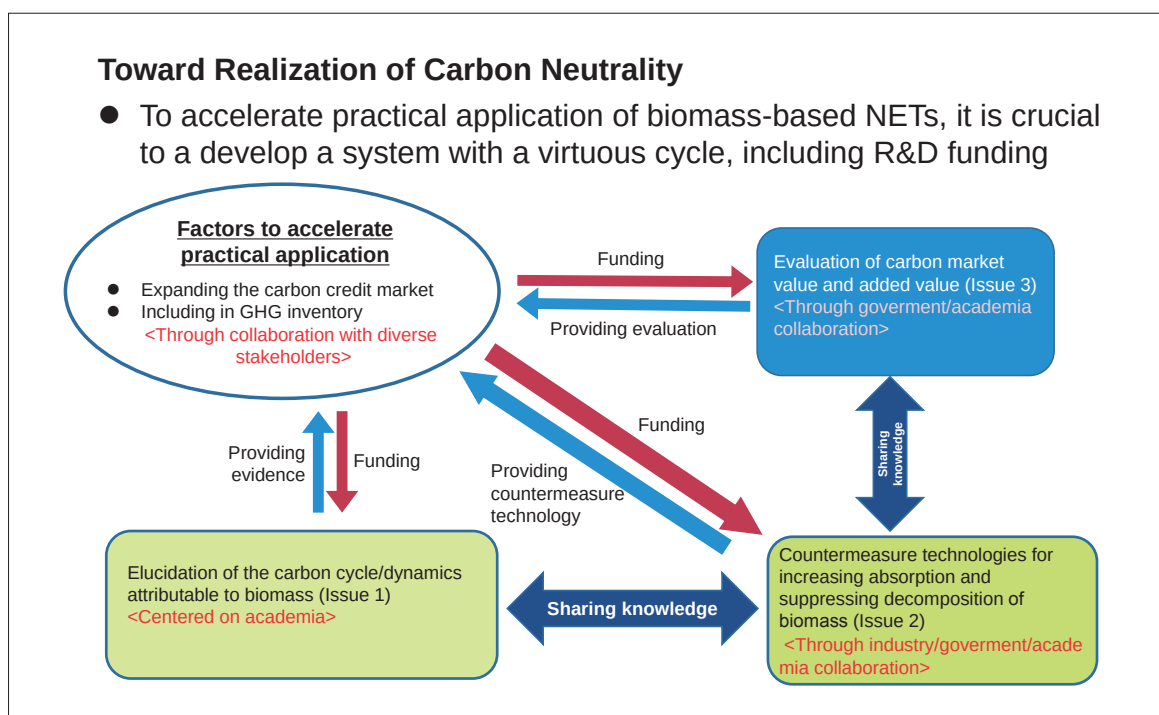


Fig.ES-1 Conceptual illustration of accelerating practical application through a cycle of scientific knowledge and funding

Through the promotion of R&D outlined in this strategy proposal, an R&D foundation will be established relating to these basic sciences and countermeasure technologies, and it is likely that this can be incorporated into more accurate methods of evaluation and estimation of biomass-based carbon credits. Internationally too, knowledge relating to biomass-based NETs is

garnering attention, and we believe it will be possible to energize international schemes such as emissions trading and carbon taxes. These efforts are expected to not only make a tremendous contribution to global reduction of greenhouse gases, but also to contribute to achieving sustainable agriculture, forestry, and fishery industries not only in Japan but also in the world.

目次

1	研究開発の内容	1
2	研究開発を実施する意義	3
2.1	現状認識及び問題点	3
2.1.1	背景と目的	3
2.1.2	ネガティブエミッション技術	4
2.1.3	本プロポーザルの対象範囲	5
2.1.4	問題点と課題	6
2.2	社会・経済的効果	8
2.2.1	炭素除去および環境改善・保全のための資金流入・ 研究開発推進などの好循環創出	8
2.2.2	地域産業の活性化	9
2.3	科学技術上の効果	9
2.3.1	ネガティブエミッション技術の評価	9
2.3.2	全球での炭素循環の現象解明	10
3	具体的な研究開発課題	12
3.1	バイオマス由来の炭素循環・動態の解明（課題1）	13
3.1.1	陸域	13
3.1.2	海域	14
3.2	吸収量増大・分解抑止のための対策技術（課題2）	15
3.2.1	陸域	15
3.2.2	海域	16
3.3	炭素市場価値と付加価値の評価	17
4	研究開発の推進方法および時間軸	19
4.1	カーボンニュートラルの実現に向けた産官学の推進方策	19
4.2	インセンティブ制度の確立に向けた産官学の役割	21
4.2.1	産：資金の循環	21
4.2.2	官：炭素の価値の評価	22

4.2.3	学：バイオマスによる炭素循環・動態をより詳細に把握するための現象解明	22
4.3	倫理的・法的・社会的課題（ELSI）に関する議論	22
付録 1	検討の経緯	24
付録 1.1	ヒアリング調査（国内）	24
付録 1.2	ヒアリング調査（海外）	25
付録 1.3	現地調査	26
付録 1.4	ワークショップの開催	26
付録 1.4.1	開催概要	26
付録 1.4.2	プログラム（敬称略）	27
付録 1.4.3	参加者一覧（敬称略）	28
付録 2	国内外の状況	30
付録 2.1	日本の状況	30
付録 2.1.1	日本の陸域での取り組み	30
付録 2.1.2	日本の海洋での取り組み	31
付録 2.2	米国の状況	32
付録 2.2.1	米国の陸域での取り組み	33
付録 2.2.2	米国の海洋での取り組み	33
付録 2.3	欧州の状況	34
付録 2.3.1	欧州の陸域での取り組み	34
付録 2.3.2	欧州の海洋での取り組み	35
付録 2.4	文献からみた研究動向	35
付録 3	専門用語説明	38
謝辞		39

1 | 研究開発の内容

本戦略プロポーザルでは、ネガティブエミッション技術（NETs：Negative Emission Technologies）の基礎科学となるバイオマスの炭素循環・動態、特にこれまで知見が十分とは言えないバイオマスの分解過程にも着目した上で、炭素循環・動態に関する観測・計測技術、モデル評価技術、制御技術・方法、さらには今後普及を加速する上で必要となる技術的課題や社会的課題も対象とした研究開発を提案するものである。

我が国では、2050年カーボンニュートラルの実現を達成するために様々な取組がなされている。そのような中、本戦略プロポーザルで取り扱うNETsは、産業分野などのどうしても避けられないCO₂排出量をマイナスにするための技術開発として非常に重要な役割を果たす。

具体的な研究開発課題は、基礎科学となる技術課題として陸域と海域に分け、課題1から課題3まで、3つの課題として整理した。また農地、森林、海洋の領域の違いでバイオマスの環境・生態などの技術に関連する課題や知見が大きく異なるため、表1-1に領域として農地、森林、海洋に分け、課題毎に整理した。

表1-1 本戦略プロポーザルで提言する具体的な研究開発課題

	陸域		海域
	農地	森林	海洋
バイオマス由来の炭素循環・動態の解明（課題1）	✓ 土壌中での有機物の分解機構や土壌の性質ごとの分解特性の違いの詳細解明	✓ 森林地下部や地表部での分解特性の解明と陸域での炭素循環の解明 ✓ 土壌炭素の分解 ✓ 老齢木の特性把握	✓ 海草・藻類の動態解明 ⇒ 堆積作用の解明、難分解性粒子状有機炭素の解明、深海輸送の解明、難分解性溶存態有機炭素の解明など
吸収量増大・分解抑制のための対策技術（課題2）	✓ 大規模展開に向けた栽培技術の効果の実証 ✓ 作物育種・材木育種のネガティブエミッション技術としての効果の実証 ✓ 植物のCO ₂ 吸収に関する技術開発と効果の実証		✓ 海草・海藻の生活史（産まれてから死ぬまでの過程）制御の解明 ✓ 沿岸から沖合、外洋への拡大展開に必要な技術開発
炭素市場価値と付加価値の評価（課題3）	✓ ガバナンスの観点からの炭素価格の検討 ✓ LCA（Life Cycle Assessment）の観点からのバイオマスを活用したネガティブエミッション技術の総合的な評価 ✓ バイオマス特有の付加価値の定量化炭素クレジット制度のオプションを増やす取組み		

● バイオマス由来の炭素循環・動態の解明（課題1）

課題1は、バイオマス由来の炭素循環・動態の解明である。特に陸域では、地上の炭素循環・動態については多くの研究がなされているものの、地下部での炭素循環・動態についての知見は不十分である。地下部での有機物やバイオマスの分解特性を解明することで、関連分野の研究が大きく進展する可能性がある。このために求められる技術は、土壌特性の非破壊計測技術や、3Dでの実地計測や地下30cmより深部の土壌データ計測などが挙げられる。日本は炭素貯留に適していると言われている黒ボク土の割合が多いという特徴があり、土壌毎・深度毎の体系的な整理が重要となる。

海域での、バイオマスを活用したネガティブエミッション技術としては、沿岸部ブルーカーボンが挙げられる。ブルーカーボンとは、海藻・海草等によって、海洋生態系に隔離・貯留される炭素のことである。海藻や海草の海中での分解特性を解明することで、より正確な炭素貯留量の評価が可能となる。求められている技術は海藻由来の物質のトレーサー技術などである。この技術があることで、海中での藻類の分解特性をより詳

細に把握することができ、ブルーカーボンの深海輸送のプロセスの解明なども含め、科学的に明らかにできることが大幅に増える。

●吸収量増大・分解抑止のための対策技術（課題2）

課題2は、バイオマスを活用したネガティブエミッション技術の実用化を加速させていくための、具体的な吸収量増大・分解抑止のための対策技術である。陸域は農地・森林などがあり、大規模展開に向けては栽培技術の効果の実証、植物のネガティブエミッション技術としての効果の実証などがある。栽培技術としては、不耕起栽培などが挙げられる。植物に関する研究は、例えば早生樹などの光合成能や木質生産能の増強を目的とした研究が国内外で盛んに行われている。一方、分解抑止のために有効であると言われている不耕起栽培などの栽培技術については、研究事例としては少ない。植物がCO₂を吸収する効果だけではなく、バイオマスの分解を抑える栽培技術のより詳細な評価技術なども不可欠である。

海域での取組としては、国内では既存の生態系を使いブルーカーボンを人為的に増やしていく技術が進んでいるが、国内の沿岸部だけでは貯留できる炭素の量が少ないことが懸念されている。このため、海外も視野に入れた大規模な展開技術などが必要である。国際的な連携が必要となる分野であるが、法整備が充分であるとはいえず、ルールメイキングも含めた議論が重要である。

●炭素市場価値と付加価値の評価（課題3）

課題3は、炭素の市場価値と付加価値を評価していくことの重要性とその課題について示すことである。本戦略プロポーザルで示しているバイオマスを活用したネガティブエミッション技術を普及させていくためには、企業も含めた多様なステークホルダーの活動が不可欠である。温室効果ガス（Green House Gas：GHG）排出削減と経済活動を両立させるための一助として、排出権取引や炭素クレジットなどがある。これらは、産業界などからの経済的な参入障壁を下げる可能性があるため、炭素に価格を定めていくことが重要となる。

炭素の価格の中には、環境価値と呼ばれる見えない付加価値が含まれている必要があり、それらの評価を定めていくことが必要である。

2 | 研究開発を実施する意義

2.1 現状認識及び問題点

2.1.1 背景と目的

気候変動の影響は年々深刻な問題となっており、グローバルでネットゼロエミッションを達成していくこと、すなわち、大気中に排出される温室効果ガスと大気中から除去される温室効果ガスが同量程度でバランスが取れている状況にすることが不可欠である。気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC）の報告書によると、平均気温上昇を1.5度以下に抑えるためには今後数十年で、人為的なCO₂排出量を急速に減らし、正味ゼロを目指す必要がある。また、これを実現するためには、大気中CO₂を年間数十億トンのオーダーで除去する必要がある。図2-1は全米アカデミーによるIPCCのシナリオをベースにした図であるが、エネルギー消費量削減による温室効果ガス排出量削減では正味ゼロを達成することはできず、どうしても避けられない温室効果ガス排出を吸収するためにはネガティブエミッション技術が必要とされている。

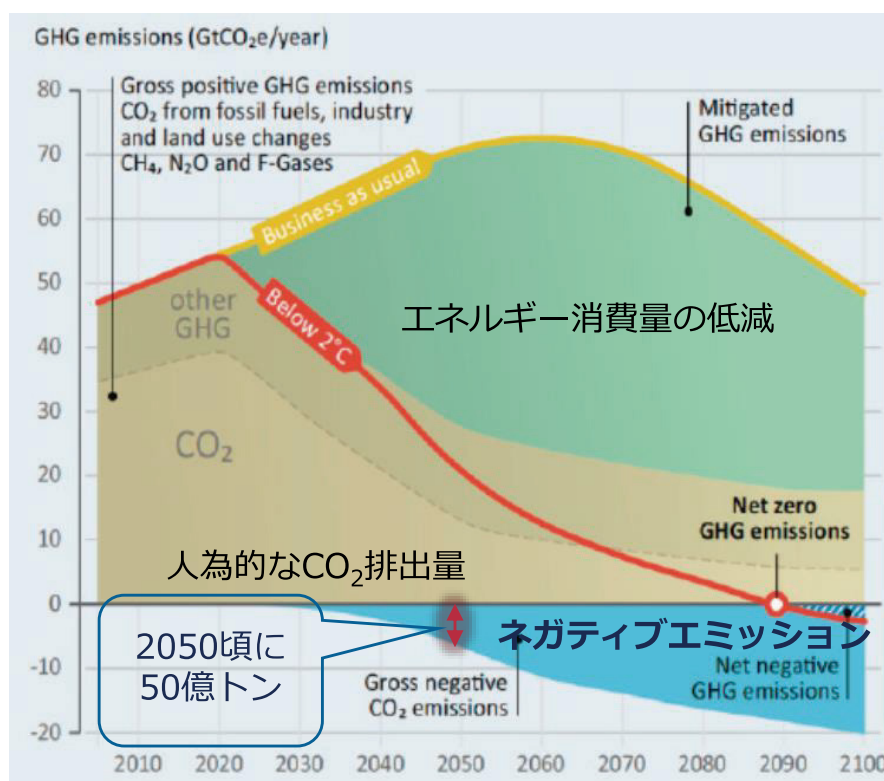


図2-1 ネットグローバルゼロエミッションに向けて¹

¹ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press. FIGURE S.1. Scenario of the role of negative emissions technologies in reaching net zero emissions. をもとにCRDSが日本語追記

2.1.2 ネガティブエミッション技術

ネガティブエミッション技術とはCO₂排出量を負にする技術、すなわち大気中CO₂の除去（吸収・固定）技術である。これは、温室効果ガス排出量を正味ゼロにするための対策技術であり、大気中CO₂濃度を人的関与・管理等を介して積極的に低減させるための技術である。ネガティブエミッション技術には、森林等の自然を活用した解決策（Nature-based Solutions：NbS）としての技術や工学的手法などさまざまな方法が検討されている。表2-1にネガティブエミッション技術の種類、技術成熟度レベル（Technology Readiness Levels：TRL）、コスト、緩和効果と考慮すべき事項の一覧を示す。各々の技術には考慮すべき負の側面が存在し、コストと期待する緩和効果を併せて考慮しながら活用する必要がある。

なおバイオマスに関連した技術を見ると、陸域における技術はTRLが高く、海域における技術はTRLが低い。これは、陸域ではこれまで程度管理がされてきたのに対して、海域は今後管理方法が確立されていくためだと言える。また陸域においても現状の管理方法をベースにした技術となっており、今後の研究開発により新たな手法が生まれてくると考えられる。

表 2-1 ネガティブエミッション技術の種類

ネガティブエミッション技術の種類	概要	TRL	費用 (米ドル/ tCO ₂)	緩和効果 (GtCO ₂ / yr)	考慮すべき事項
植林/森林再生	植林：人工林とするための、伐採跡地や平地などへの、苗木の植栽や播種。 森林再生：森林破壊や森林伐採によって失われた森林を回復させること。	8-9	0-240	0.5-10	山火事、病気、害虫により、排出源ともなりえる。樹種の選定が不適切な場合、水が不足し、地下水位が低下する可能性がある。生物多様性の保全と食料生産を伴う土地の競合に繋がる可能性がある。
耕作地および草地での土壌炭素隔離	農地管理技術の一環で行われる不耕起や省耕起技術、有機肥料の施用など。	8-9	45-100	0.6-9.3	土壌中の有機窒素レベルが高いと、亜酸化窒素の排出が増加するリスクがあり、排出源ともなりえる。生産性を犠牲にして炭素隔離量を増やすかどうか。モニタリングが困難。
泥炭地と沿岸湿地の再生	気候変動の影響や自然災害、土地開発などで失われた泥炭地と沿岸湿地を回復させること。	8-9	—	0.5-2.1	干ばつや洪水などで、将来的に排出源になりえる。メタン排出量が増加する可能性がある。食糧生産に使用される泥炭地での土地の競合。
アグロフォレストリー（森林農業）	農業（Agriculture）と林業（Forestry）を組み合わせたもの。	8-9	—	0.3-9.4	一部の土地が食糧生産によって失われる。高い技術が必要。農作物の生産とトレードオフするものもあるが、生物多様性とレジリエンスが向上する。
森林管理の改善	木材の生産性を高めるための森林管理の方法を向上させていくこと。	8-9	—	0.1-2.1	生物多様性を減らし、富栄養化を促進させる可能性がある。肥料の使用量の増加や外来種が増加した場合、生物多様性を減らし、富栄養化とGHG排出量を増やす可能性がある。
バイオ炭	生物資源を材料とした、バイオマスの熱分解後に残る灰。農地土壌の改良や環境改善のために用いられる。	6-7	10-345	0.3-6.6	生産に伴う粒子状物質とGHG排出量の増加。持続不可能なバイオマス収穫による生物多様性と炭素貯蔵量への影響。粒子状物質に関連する環境への影響。バイオマス資源をめぐる競争。

DACCS (Direct Air Carbon Capture and Storage)	直接空気回収 (DAC) によって、二酸化炭素を地層の深い部分へ埋める CCS (Carbon Capture and Storage) 技術。	6	100-300	5-40	エネルギーと水の使用量の増加。水の供給などに伴い、エネルギー消費量が增大する可能性がある。
BECCS (BioEnergy with Carbon Capture and Storage)	バイオマス燃料の燃焼排ガス (BioEnergy) に対し、CCS を行う。	5-6	15-400	0.5-11	バイオマス原料を成長させるために、さらなる土地と水の使用が必要となる。持続不可能なバイオマス収穫による生物多様性と炭素貯蔵量への影響。生物多様性保全と食糧生産を伴う土地の競合。
岩石の風化促進	鉱物を粉砕し、風化作用を促進させること。玄武岩などが使われている。	3-4	50-200	2-4	鉱業への影響、土壌に広がるときの岩粉の空気質への影響。
沿岸部ブルーカーボン	海藻・海草等によって、海洋生態系に隔離・貯留される炭素。主として沿岸部で施用される。	2-3	—	<1	沿岸部ブルーカーボンが劣化した場合、炭素の大部分が大気に放出すると予想されている。底質汚染物質、毒性、生物蓄積および生物濃縮の可能性もある。沿岸植物の分解性の変化に関連する問題。潮汐湿地の炭素除去のための潮汐下地域の使用。堆積物の再堆積と自然の湿地の堆積に対する海岸線の変化に伴う影響。
海洋施肥	植物の栄養素を海洋表層に意図的に導入することにより海洋を肥沃化させ、海洋生物を増加させることにより、大気から二酸化炭素を除去すること。	1-2	50-500	1-3	生態系の再構築、深海での酸素消費と酸性化、数十年から数千年規模で再び大気中に炭素が放出される可能性、意図しない副作用へのリスクなど。地下の海洋酸性化、貧酸素化、食物網の根本的な変化、生物多様性保全のために従来の食糧供給網が利用できなくなる等。
海洋アルカリ性の強化	人工的に海洋のアルカリ化を促進し、海に二酸化炭素を吸収させる方法。石灰岩や炭酸カルシウムなど、水に溶けるとアルカリ性を示す岩などが用いられる。	1-2	40-260	1-100	海水の pH が上昇して飽和状態となり、海洋生物に影響を与える可能性。有毒な元素や化合物が放出される可能性。鉱業への影響など。採掘、輸送など、作業に伴い CO ₂ および粉塵の排出量が増加する可能性がある。

IPCC の資料²を元に CRDS が作成

2.1.3 本プロポーザルの対象範囲

ネガティブエミッション技術には前節で示したように様々なものがあり、本戦略プロポーザルでは、図 2-2 に示す図のうち赤枠部分を対象としている。

2 IPCC AR6 WG III: Climate Change 2022, Mitigation of Climate Change, Table TS.7 Summary of status, costs, potentials, risk and impacts, co-benefits, trade-offs and spill over effects and the role in mitigation pathways for CDR 1 methods

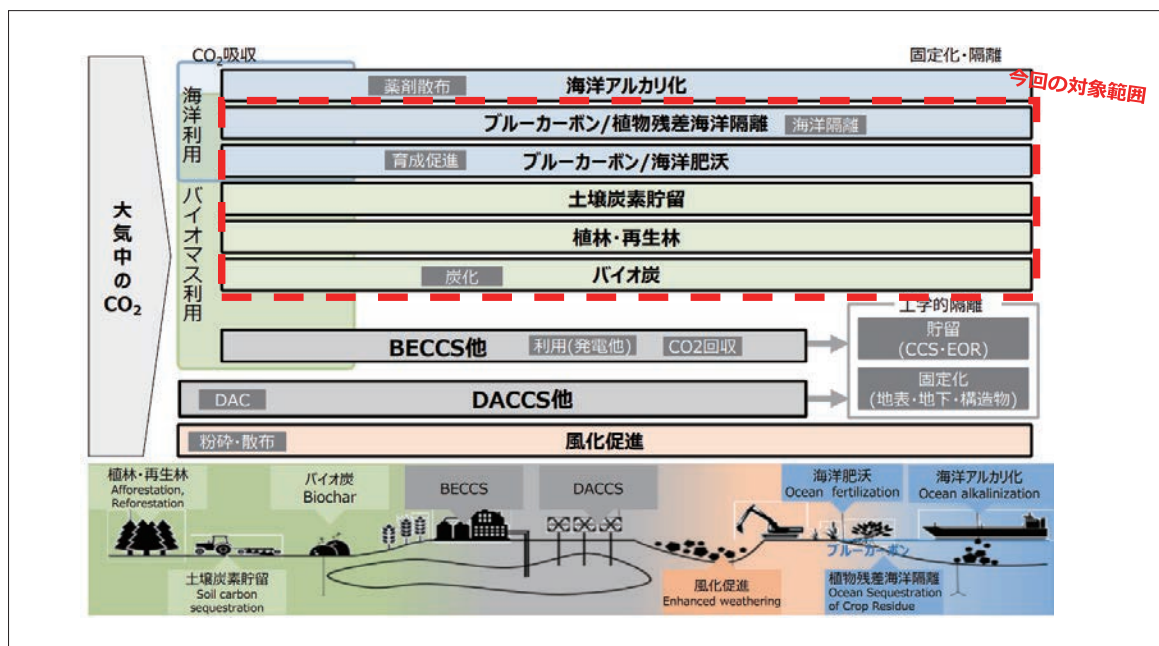


図2-2 本プロポーザルの対象範囲³

陸域では土壌炭素貯留、植林、バイオ炭、海域ではブルーカーボンなどがあり、これらは「バイオマスを活用したネガティブエミッション技術」とも言える。またこのうちの一部は、食糧や森林資源の生産性拡大の観点から古くから農林水産業の一環としても取り組まれてきた技術である。このことから技術・知識・経験に蓄積があることに加え、光合成によりCO₂吸収が行われるため化石燃料資源由来のエネルギーを追加投入する必要性が低いことなどが、他の工学的なネガティブエミッション技術と比べて利点として挙げられる。なお、風化促進や海洋アルカリ化については、CO₂の吸収・固定能は大きいとも考えられているが、科学的に未解明な部分は非常に多く、その検証方法についても議論をしていくことが期待されている。

本戦略プロポーザルで対象とするバイオマスを活用したネガティブエミッション技術は、自然を活用した技術（NbS）の一部であり、これまでも農地、森林、海洋において、食糧や森林資源の生産性拡大の観点からバイオマスによるCO₂吸収・固定化は行われてきた。しかし、CO₂吸収・固定化を主目的としたネガティブエミッションの観点からは社会実装が行われているとは言い難く、グローバルレベルで大気中CO₂濃度を低減していくためには、大規模なネガティブエミッション技術の実用化加速が求められている。

2.1.4 問題点と課題

2022年10月、日本政府は2050年までにGHGの排出を実質ゼロにする、カーボンニュートラルを目指すことを宣言した。これを実現するためには、エネルギー消費量を抑制することに加えて、どうしても避けられないGHG排出量を吸収するためのネガティブエミッション技術が不可欠である。

我が国における2050年カーボンニュートラル達成を実現するシナリオについてのモデルを用いた評価⁴に

3 NEDO・TSC, ネガティブエミッション技術（NETs）について, 第6回グリーンイノベーション戦略推進会議WG 2021.1.21, (https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/006_03_01.pdf) (2023年2月28日アクセス) をもとにCRDSが追記

4 2050年カーボンニュートラルのシナリオ分析（中間報告）RITE 資料, 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会, 2021.5 (<https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/202106analysisaddver.pdf>) ,P46 (2023年2月28日アクセス)

よれば、大気中CO₂の除去量（ネガティブエミッション）として年間2億トン以上が必要になるとされる。これに対応するためにはDACCS、バイオマスを利用するBECCS、さらには国内バイオマス資源による吸収を活用するなどが考えられる。特にDACCSは工学的手法として期待されているもののコスト等の観点から2050年時点の導入量は不確実な状況にある。そのためまずは大気中CO₂吸収・固定量として年間約5,000万トンとされる国内バイオマス資源によるポテンシャルを着実に増加させることが肝要である。

現状のCO₂吸収量は、表2-2に示す通り、森林が大半を占めているが、森林の高齢化に伴いこの値は年々減少傾向であることが懸念されている。また農地の土壌貯留は800万トン前後であり、海洋は現在のところGHGインベントリとして含まれていない。これらの量をいかにして実際に増大させるか、またインベントリとして認められるデータとしていくかが今後の課題であり、そのためには研究開発および適切な施策の策定が重要である。

表2-2 国内の炭素固定量⁵[万t-CO₂]

	2013	2020	2030
農地	757	708～828	696～890
森林	5,166	3,800	2,780 (3,900*)
海洋（浅海生態系 ⁶ ）	132	—	157

*目標値

これまで農地、森林、海洋におけるバイオマスは、農林水産業の一環として取り扱われており、食糧・木材生産等を目的として研究開発や政策が進められてきた。このため、大気中のCO₂をより長期に吸収・固定化するためという観点からの科学技術の知的基盤、科学的な視点からの知見は必ずしも十分ではない。このためバイオマスによるCO₂吸収・固定化のメカニズムをこれらの知見を明らかにしていくことで、ネガティブエミッション技術の効果を高めるために必要な対策技術を特定していくことが可能となる。図2-3は全球での陸域バイオマスにおける炭素フロー・ストックについてCO₂換算で示したものである。

5 環境省：地球温暖化対策計画（<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/beppyou.pdf>（2023年2月28日アクセス））をもとに、CRDSが作成

6 桑江 朝比呂他：浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計，土木学会論文集B2（海岸工学）75(1)，10-20，2019

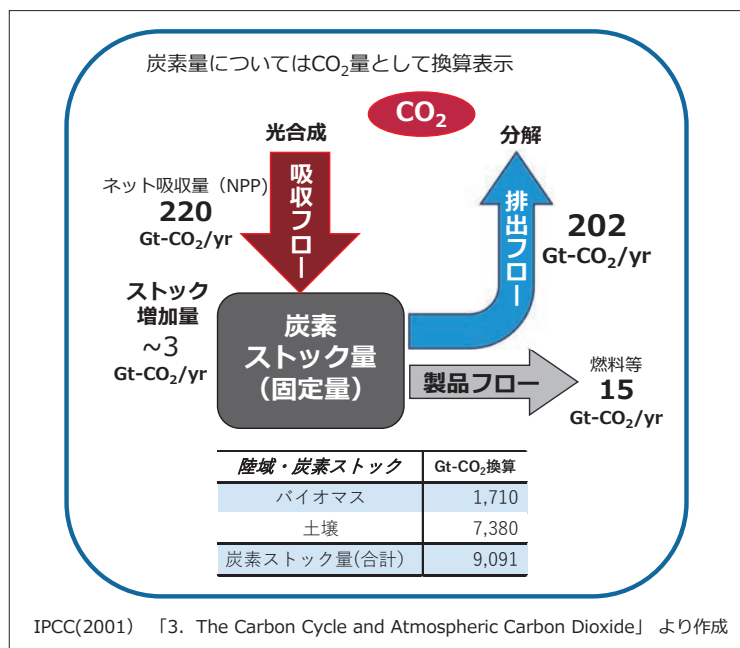


図2-3 陸域バイオマスの炭素フロー・ストック（IPCC（2001）資料より作成）

全球における陸域バイオマスの炭素循環を見ると陸域バイオマスの成長による炭素（CO₂）吸収量（吸収フロー）は年間約220Gtである。これは2019年の世界のエネルギー起源CO₂排出量約33.5Gt-CO₂/yrと比較すると7倍に近いレベルであり極めて膨大である。植物によって吸収・固定された炭素は、微生物などによる分解を通じて再び大気に放出される「排出フロー」と、木材などとして製品等に利用される「製品フロー」に分かれる。これらを差し引いた分が実質的な炭素ストック（固定）増加量となるが、その炭素ストック増加量のオーダーは吸収フローの10分の1程度にまで小さくなる。この図から示唆されることは数%レベルでも吸収フローを増やし、排出フローを抑制することができれば、炭素ストック増加量が大きなものになることがわかる。すなわちバイオマスによるネガティブエミッション技術を進めるためには、まずそもそもの炭素循環の実態を詳細に理解し、吸収フロー・排出フローのどの部分にどのような働きかけを行うとフローに大きな変化が生じ得るのかを明らかにする必要がある。その上で、吸収フローの増大と排出フローの抑制に繋がる方策の開発が必要である。吸収フローを増大させるための方法として、これまでもエリートツリーの開発など複数の方策が精力的に進められてきている。しかし分解が原因である排出フローについては、バイオマスの分解過程や微生物の影響など土壌中での炭素動態の詳細には未解明の部分も多く、これを抑制するための知見は充分とはいえない。このため、研究開発を推進していくことが重要である。

2.2 社会・経済的效果

2.2.1 炭素除去および環境改善・保全のための資金流入・研究開発推進などの好循環創出

ネガティブエミッション技術は産業界等で排出するCO₂などのGHG排出分を埋め合わせる、すなわち本来の炭素除去（大気中CO₂除去）の観点からカーボンオフセットとしての市場価値を持つ。バイオマスを活用する場合は、炭素除去というベネフィットに加え、コベネフィットとして生物多様性、環境保全などの環境価

値向上や作物収量の向上、災害等へのレジリエントの向上など、土壌やバイオマスへの炭素固定等に基づいた固有の付加価値が生まれる。以下に例を示す。

- 土壌炭素貯留/バイオ炭・・・作物収量の増加、干ばつへの耐性
- 植林/森林再生/森林管理の改善・・・その地域での雇用創出や生活の質の向上、森林資源の生産性の向上、持続的な木材製品の供給、土壌炭素や養分循環の改善、生物多様性の向上
- 沿岸部ブルーカーボン・・・沿岸域の環境保護、生物多様性の向上、上層海洋酸性化の抑制、栄養価の高い食糧生産、陸生農業用の肥料、メタン生成菌の飼料添加物や工業用材料の原料生産など

これらのことからバイオマスを活用したネガティブエミッション技術による価値は炭素除去の価値のみならず付加価値を含めた価格で市場取引できる可能性がある。この実現のためには付加価値を可視化するための工夫・評価法開発も必要になるが、これによりさらに多くの資金調達ができれば、カーボンニュートラルへの貢献のみならず、これまで産業界からの資金投入のモチベーションが低い生物多様性や環境保全等への資金流入も期待できる。

以上のようにバイオマスを活用したネガティブエミッション技術はカーボンニュートラルに留まらない広い範囲の研究開発や対策技術に対して資金を含めた好循環を生み出す可能性がある。

2.2.2 地域産業の活性化

バイオマスを活用したネガティブエミッション技術の普及に向けては、農林水産資源の有効活用が進むことで、当該地域の活性化に繋がると考えられる⁷。国内で認証制度を導入している事例として、山梨県での4パーミルイニシアチブ（世界の土壌表層の炭素量を年間4パーミル増加させることができれば、人間の経済活動などによって増加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）への取組みに対する果樹園を中心としたものや、バイオ炭を施用した農作物に対するクルベジ（サイクル&クールベジタブル）認証制度などがある。これらの認証制度の取組みは、生産者や消費者も含めて積極的に環境問題への取組みを認知し、かつ地域産業が活性化するなどのメリットがある。

2.3 科学技術上の効果

2.3.1 ネガティブエミッション技術の評価

ネガティブエミッション技術の実用化加速のためには、統合的な評価指標が不可欠である。統合的とは、各々の技術での施用にかかるエネルギーとバイオマスの分解速度の統一的な算出である。これが実現することで、種々のバイオマスを活用したネガティブエミッション技術の比較および地域毎の設計が可能となる。

施用にかかるエネルギーについては、温室効果ガス削減に関するライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment：LCA）ガイドラインをはじめとした評価方法の検討が進められている。一方バイオマスの分解については、バイオ炭は具体的な評価方法の検討が進められているものの、その他の有機物については未解明な部分も多い。

7 Quevedo et al. 2021. A blue carbon ecosystems qualitative assessment applying the DPSIR framework: Local perspective of global benefits and contributions. doi: 10.1016/j.marpol.2021.104462

種々のバイオマスについて、炭素動態のより詳細な現象解明を行うことで、人為的な取組としてのネガティブエミッション技術が将来にわたりどの程度大気中のCO₂削減に寄与するか、評価をより正確に定めることができるようになる。これは、炭素価格の決定など政策的な課題にも繋がる。

ネガティブエミッション技術の評価は、具体的には初期のCO₂排出量、炭素固定量のフロー、残存率を用いて、時間ごとに算出できると考えられ、トータルでの評価が重要となる。これらの評価ができるようになることで、LCAやバイオマスを活用したネガティブエミッション技術の選定・設計方法に対して新たな検討を行うことができるようになる。

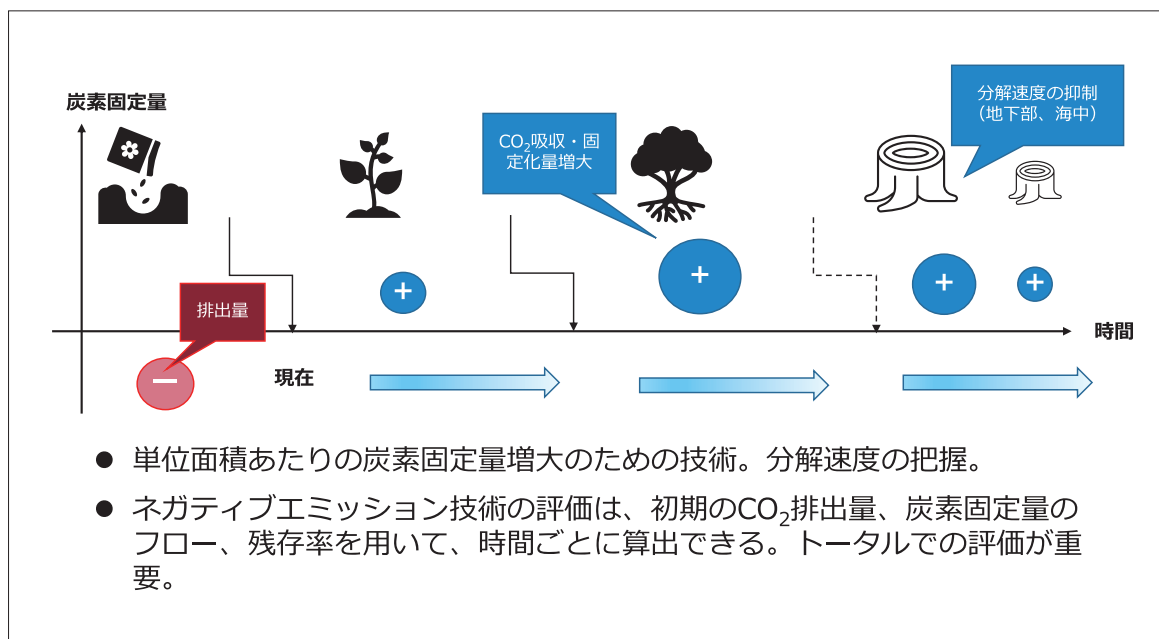


図2-4 ネガティブエミッション技術の評価のイメージ図

2.3.2 全球での炭素循環の現象解明

炭素循環は、地球上の生物圏、岩石圏、土壌圏、水圏、大気圏の間で交換される炭素の動きを知ろうとする研究開発領域である。これら四つの環境で交換される炭素のフローや貯蓄量などについて、近年、地球規模の炭素循環モデルを構築し、その生物地球化学的な循環について、それぞれのモデルを相互連結することによって、その全体像をつかむ動きが加速している。特に、近年の気候変動の最大要因となっている大気中のCO₂を削減して別の環境中に貯蔵させる際には、この炭素循環のどのような要因にアプローチすることが効果的であるかを見出すことが重要である。海洋と生物圏等の炭素循環の相互作用をリンクさせて全球気候モデルに組み込み、将来のCO₂レベルをモデル予測できるようになると考えられている⁸。

最近の研究によれば⁹、生物圏に存在する炭素量は550Gtであり、そのうち植物に450Gtが貯蔵されている。陸上植物による毎年の炭素固定量は約3.4Gtであると推定され、これは海洋による炭素吸収より大きいとされている。

このように全球での炭素循環の解明は、大きな科学技術の課題であり、これをより詳細に明らかにしていく

⁸ Friedlingstein P. et al., Global Carbon Budget 2020. Earth Syst. Sci. Data, 12, 3269–3340, 2020

⁹ Bar-on, Y. N., Phillips R., and Milo, R. The biomass distribution on Earth. PNAS (2018) 115: 6506–6511.

¹⁰ デジタルバイオスフェア HP : <https://digital-biosphere.jp/overview> (2023年3月1日アクセス)

ためには、陸域地下部や海洋での炭素循環をより詳細に明らかにしていく必要がある。陸域での地下部のバイオマスの分解特性を解明することで、バイオマスの分解フローのより詳細な解明が可能となり、全球での炭素循環の現象解明への貢献に繋がる。現在、国内では「デジタルバイオスフェア¹⁰：地球環境を守るための統合生物圏科学」を中心に、全球での生物圏機能の解明に取り組んでいる。この中の一部には炭素貯留を最大にする最適な森林の予測などが含まれており、本戦略プロポーザルで提言する研究開発課題が進展することで、このような研究分野の進展にも貢献するとともに、陸域での生物圏科学の解明に寄与するものと考えられる。全球での炭素循環の解明のためには衛星データと地上付近からのデータを統合的に評価し、予測していくことが不可欠であるが、両者には未だ不確実性が大きいことがある。森林や土壌の地下部のデータを正確に予測することができれば、全球でのモデルの精度も高まることが考えられる。

2

意義
研究開発を実施する

3 | 具体的な研究開発課題

バイオマスを活用したネガティブエミッションの拡大に向けて科学的・技術的にボトルネックとなっているのは、大別すると炭素循環・動態の解明および炭素固定量増大の方策についての2点である。

・炭素循環・動態の解明

炭素の固定・貯蔵のメカニズムの理解が不足している。特に陸域であれば地下部（バイオマス地下部、微生物、土壌などの相互関係を含む）、海域であれば海洋中での炭素の動態に関する定性的・定量的な知見が不足している。そのためこれらの詳細解明に繋がる研究開発が必要である。また地下部あるいは海洋中の知見の不足には計測の困難さという技術的要因もある。そのためメカニズム解明と合わせて計測手法等に関する研究開発も必要である。これらを通じて炭素循環・動態の把握・予測に関する不確かさを解消していく必要がある。これらの知見は、バイオマスを活用したネガティブエミッション技術の効果を定量的に評価することや、国際的なルールメイキングの根拠情報としての活用に繋げることができると期待できる。

・炭素固定量増大の方策

CO₂吸収・固定量増加のための技術が十分ではない。また、食糧・木材生産との競合が課題となっており、経済と両立しながら、CO₂吸収・固定量を増加させていく技術が必要である。研究開発や社会実装への施策推進が求められており、技術開発、および適切な施策策定が重要である。

本章では、これらを解決するため、バイオマス由来の炭素循環・動態の解明（課題1）、吸収量増大・分解抑止のための対策（課題2）、炭素市場価値と付加価値の評価（課題3）の3つの課題を挙げて整理した。

炭素ストック（固定）量を増やしていくためには、炭素の吸収フローを増やし、排出フローを抑制することが重要である。これを実践するためには、まずは地球上のどのタイプの土地や生態系に吸収フローを増やすポテンシャルがあるのか、また排出フローを抑制できる可能性があるのかを定量的に把握・予測することが必要である。しかしながら、炭素循環の把握は世界的に研究が精力的に進められているものの、その精度や解像度は依然として粗く、今後の気候変動による影響も十分に理解できていないため、バイオマスを活用したネガティブエミッションの拡大のための検討に資する情報としては十分でない。そのため今後は、地球規模の炭素循環の科学的理解を、ローカルなスケールの炭素の動態の把握も含めて、より詳細に深めていく必要がある。

炭素循環の詳細解明と並行し、炭素ストック（固定）量を増大させるための方策検討も必要である。具体的には吸収フローを増やし、排出フローを抑制するための方策である。植物によるCO₂吸収、ならびに微生物の有機物分解や呼吸によるCO₂放出に関する研究は多くあるが、ネガティブエミッションの拡大という観点からの大規模展開を考えると、今後取り組むべき課題は多く残されている。特に植物や微生物などに関する研究開発の他、社会との関わりに焦点を当てた研究も必要である。

カーボンニュートラルの実現にはネガティブエミッションが不可欠であるとの見方が一般的となりつつあり、その社会的な意義は明白だが、経済的には大気中のCO₂を除去する技術の価値は確立していない。排出権取引や炭素クレジットなどの仕組みを作ることによってその価値を見える化させる試みが続けられているが、これに関する研究開発や制度の普及が引き続き必要である。

3.1 バイオマス由来の炭素循環・動態の解明（課題1）

3.1.1 陸域

陸域の炭素循環についての主な課題には、地下深部や地表部でのバイオマスの分解特性を中心とした陸域生態系全体の炭素循環のより詳細な解明が挙げられる。

地下部には、地上部に準ずる量のバイオマスがあると考えられているが、その生成・分解過程の詳細は明らかになっていない。原因の一つは土壌中の有機物を計測することが、技術的に困難であることである。また、有機物の分解には土壌微生物叢や土壌そのものの物理的・化学的性質も大きく影響するため、季節変化や地理的特性などによって大きく変化することも全体的な把握を困難にしている。

農地に関しては、土壌中での有機物（作物の根など）の分解機構や土壌の性質ごとの分解特性の違いの詳細解明を進め、炭素循環モデルなどの関連モデルの高度化につなげていくことが課題である。分解機構の解明では植物根、土壌微生物叢、土壌そのものの物理的・化学的性質の間の複雑な相互作用関係も含めた解明が必要である。作物生産に用いられる窒素やリンなどの影響や土壌有機物の中に含まれる元素の影響の解明、ミクロ団粒などによって蓄積される炭素の複合体の積極的な形成等が基礎研究としても重要である。

また有機物の分解速度は、地上部と地下部で異なり、さらに地下部においてもより深部になるほど分解速度は遅くなることが知られているが、炭素循環の推定ではそれが十分に考慮されていない。このため、地上部と同じ精度での観測データが必ずしも必要ではないが、土壌深部の有機物分解については土壌の性質毎に体系的なデータの収集と整理が必要となる。土壌の性質に関しては、例えば炭素貯留に適している黒ボク土は世界で0.6%程度だが、日本では国土面積の30%以上に分布していると言われている。そのため黒ボク土に注目するなど日本の地質学的な特性を生かした土壌炭素隔離について、より詳細に検討していくことは重要である¹¹。

森林に関しては、森林地下部や地表部での分解特性の解明を進め、陸域生態系全体での炭素循環の解明に繋げていくことが課題である。森林は、地上部においては上空からの計測などによる炭素動態の解明などが進んでいるが、それに比べると森林地下部でのバイオマス（木の根など）や地表面でのリターと呼ばれる枯死物、落葉、落枝などの分解特性の解明は限定的である。

なお地上部に関しても未解明な点があり、例えば老齢木は二酸化炭素の吸収能力が低いものと考えられてきたが、近年では想定よりも多くのポテンシャルがあるのではないかという検討もなされており¹²、長期的かつ継続的な観測や各種観測データの解析が必要である。

11 微生物による地球冷却： <https://dsoil.jp/cool-earth/column/detail/---id-52.html>, (2023年3月1日アクセス)

12 Tomohiro Egusa et.al : Carbon stock in Japanese forests has been greatly underestimated, Scientific Reports volume 10, Article number: 7895 (2020) , 2020.5

具体的な研究開発課題：課題1(陸域)

課題1：バイオマス由来の炭素循環・動態の解明（陸域）

◆ 課題例：農地

- ✓ 土壌中での有機物（作物の根など）の分解機構や土壌の性質（黒ボク土など）ごとの分解特性の違いの詳細解明
- ✓ 分解特性を踏まえたモデルの高度化：有機物の分解、土壌微生物叢、土壌特性の相互作用

◆ 課題例：森林

- ✓ 森林の根やリター（枯死物、落葉、落枝等）などの分解特性の解明
- ✓ 樹齢や種構成なども踏まえた森林の炭素固定貯蔵能の詳細理解

共通する技術的な課題：地下部有機物の非破壊計測、温暖化の影響を考慮した長期的な観測・予測

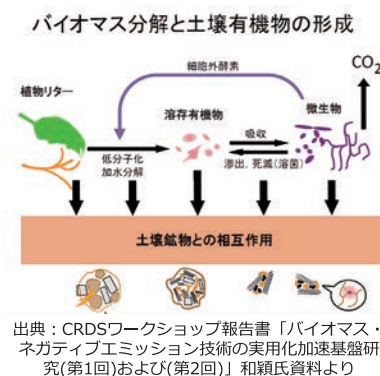


図3-1 バイオマス由来の炭素循環・動態の解明（陸域）

3.1.2 海域

海域でのバイオマスを活用したネガティブエミッション技術については、現在は沿岸部ブルーカーボン（海藻や海草による炭素の固定・貯蔵）の拡大に向けた検討が進められている。炭素循環の観点からは海中における、海藻や海草の動態解明が課題となっている¹³。具体的には生息地周辺の海底にどの程度堆積するのか、植物体の一部が海洋中をどのように移動していくのか等についての詳細解明が必要となっている。対象としては比較的長期にわたって残存することになる難分解性の有機炭素であるが、海藻や海草由来の有機炭素を判別することは現状困難であり、高い識別性を持った炭素動態把握が必要となっている。

以上を踏まえた具体的な研究開発課題は、堆積作用、難分解性粒子状有機炭素（RPOC：Refractory Particle Organic Carbon）、深海輸送、難分解性溶存態有機炭素（RDOC：Refractory Dissolved Organic Carbon）の解明などである。このために求められている技術は、大気・海洋間のガスフラックス計測、海中での藻類の分解特性に関連する計測などが挙げられる。なかでも海中での藻類の分解特性を把握するための海草由来の物質のトレーサー技術が進むことで、藻場における植物によって隔離された大気中CO₂のうち分解されずに貯留される割合、すなわち残存率をより正確に算出することが可能となる。藻場でのCO₂吸収量・貯留量は残存率のパラメータが含まれるため、これを特定するための技術が重要となる。

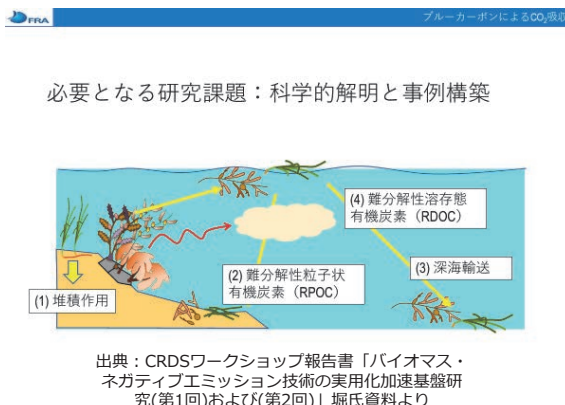
13 ブルーカーボンとしての藻場の評価に関する最新動向：https://www.jfa.maff.go.jp/j/seibi/attach/pdf/R2_isoyake_kyogikai-14.pdf（2023年3月1日アクセス）

具体的な研究開発課題：課題1（海域）

課題1：バイオマス由来の炭素循環・動態の解明（海域）

◆ 課題例：海草の海中での動態の解明

- 海藻・海草の海中での動態（バイオマスの分解挙動）
- 近海部分の海表面での観測結果はあるが、深海輸送での研究はほとんどない。インベントリ追加のためには必須の知見
- 化学的トレーサの検討および低濃度分析方法



- 国内ではネガティブエミッション技術に特化したプロジェクトはない。
海中での藻類の動態解明が進むことで、研究が大きく進展する可能性があり。国際的な標準化に向けてリードできる可能性があり。

図3-2 バイオマス由来の炭素循環・動態の解明（海域）

3.2 吸収量増大・分解抑止のための対策技術（課題2）

3.2.1 陸域

バイオマスを活用したネガティブエミッション技術の実用化を加速させていくためには、大規模展開を見据えた技術開発が必要である。

具体的な研究開発課題は、陸域では大規模展開に向けた栽培技術（不耕起栽培やバイオ炭など）の効果の実証、作物育種・材木育種（深根性植物、多年生植物、早生樹など）のネガティブエミッション技術としての効果の実証などがある。

不耕起栽培は、農地を耕さないことで微生物による土壌中の有機物分解が抑えられるため、農地での作物の栽培過程の中では分解抑止策として、海外でも注目を集めている。ただし、高温多湿な環境では分解が促進されるため効果が薄く、日本の一部地域では管理が難しいなどの課題もある。従って各地域の気候特性に応じた取組とデータの蓄積が必要である。また雑草や病害虫など、不耕起にすることによる作物などの収穫物への影響についても同様に検討する必要がある。

バイオ炭は土壌中での分解速度が非常に遅く、手法の簡便さもあり、農地を中心にネガティブエミッション技術の1つとして活用されており日本でも普及に向けた取り組みが活発化している。しかし今後の大規模展開に当たっては、原料となるバイオマスの安定的かつ量的な確保の問題、農業へのメリット（収量やコスト等）、LCA的観点からの精査（例えば地域レベルでの利用でトータルでネガティブエミッションになっているか）等、バイオ炭の生成・施用に関して検証すべき課題が残されている。

植物のポテンシャルを活かしたネガティブエミッション技術、すなわちより炭素含有量の多い品種の開発（育種）については、活発に光合成を行う葉などのソース器官と、花や幹などのシンク器官のそれぞれで、CO₂固定能を高めるための取組みが行われている。前者については光合成能の強化、後者については木質生産の強化などがある。作物ではその他にも穀物や油糧種子作物などの多年生化や一年生植物の根などの炭素固定

能増強を目指した育種なども検討されている¹⁴。一方、材木に関しては早生樹等、国内でもいくつかプロジェクトが進行中であるが、木質増強技術の課題として、①生育への悪影響が出やすいこと、②栄養や水の要求性が高まる可能性があること、③ゲノム編集技術の適用可能性と社会受容（森林認証への課題も含む）、④劇的に生育が早まるわけではないことなどが挙げられている¹⁵。これらの一部は作物でも同様と考えられる。従ってこういった課題を考慮しながら、育種を通じたネガティブエミッションの実現可能性の検証を行う必要がある。また、本戦略プロポーザルでは炭素を中心に記述しているが、GHGには二酸化炭素以外のものも多々あり、メタンやN₂Oについても検討していく必要があり、農林業に伴う窒素循環も併せて検討していく必要がある。

3.2.2 海域

海域でのネガティブエミッションとしては沿岸部ブルーカーボンが現在精力的に検討されている。主には海草藻場（アマモ場など）やマングローブ林、塩性湿地などがある浅海域生態系と、岩礁や港湾構造物に生息する大型海藻（コンブやホンダワラなど）が含まれる。沿岸部ブルーカーボンは、吸収係数（生態系の単位面積当たりの炭素増加量/年（CO₂換算））の増加と活動面積（生態系の面積）の増加が、藻場でのCO₂吸収量（貯留量）増大に寄与すると考えられている。藻場の既存の生態系を活かしながら貯留量を増やす技術やノウハウなどについては日本が世界に一部先行している。そのため自国の沿岸域に加えて、国際連携によって例えば東南アジア地域の複数の国々の沿岸部ブルーカーボンの増大にも積極的に関与していく方向性が考えられる。ただしその際には沿岸部は社会との接点も多いため、異なる文化や社会システムへの対応、漁業権との兼ね合いなど倫理的・法的・社会的課題（Ethical, Legal and Social Issues：ELSI）への取り組みも重要になる。またこのような沿岸域でのブルーカーボン増大に加え、現在は、初期段階ではあるものの、沖合での大規模な養殖の可能性についても検討が始まっている。しかし大規模養殖技術については、海外でも事例はあるが、海藻類の産まれてから死ぬまでの過程（生活史）が十分に分かっていないため人為的に殖やしていく技術が確立していない。また沖合は一般的に貧栄養な環境にあるがそうした場所で養殖を行うことにより従来の生態系にどのような影響が及ぶかも明らかにはなっていない。更に養殖業としての成立可能性、社会的・倫理的な検討、国間のルールメイキングや国際的な協力体制の構築なども未整理である。こうした諸課題に科学的な側面から取り組み、客観的な知見を積み重ねることができれば、ネガティブエミッション技術としての可能性を評価することができ、社会実装に向けた技術開発がより一層進むことが期待される。

14 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press.

15 CRDSワークショップ報告書：バイオマス・ネガティブエミッション技術の実用化加速基盤研究（第1回）および（第2回）,2023.3

具体的な研究開発課題：課題2

課題2：吸収量増大・分解抑止のための対策技術

◆ 課題例：農地、森林（陸域）

- ✓ 植物による吸収量増大：深根性植物、多年生植物、早生樹
- ✓ 栽培方法による分解抑止：不耕起栽培

◆ 課題例：海洋（海域）

- ✓ 人工的岩礁の設置、
- ✓ 沖合構造物（洋上風力など）の活用
- ✓ 生活史制御
- ✓ 栄養塩の検討

共通する課題：LCAやELSIへの取組

出典：CRDSワークショップ報告書「バイオマス・ネガティブエミッション技術の実用化加速基盤研究(第1回)および(第2回)」光田氏資料より

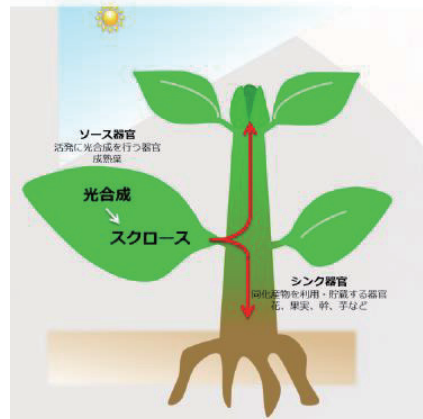


図3-3 陸域・海域での吸収量増大のための対策技術の課題

3.3 炭素市場価値と付加価値の評価

バイオマスを活用したネガティブエミッション技術の大規模に展開していくにあたっては、企業も含めた多様なステークホルダーの活動が不可欠である。温室効果ガスの排出削減と経済活動を両立させるための一助として、排出権取引や炭素クレジットなどがある。これらは温室効果ガスの削減効果（削減量や吸収量）に価格をつけ、排出権あるいはクレジットとして発行、取引できるようにする仕組みである。このような動きに対し、今後は炭素の価値の評価の在り方やその仕組みについて更なる検討が必要である。すなわち「炭素除去（大気中CO₂除去）の価値」と「バイオマス特有の付加価値」について検討していかなければならない。ここで言う「バイオマス特有の付加価値」とは、森林、農地、沿岸生態系の管理・活用などを通じたネガティブエミッションがもたらす防災・減災、環境保全、物質生産や作物生産、景観や観光などを含む多面的な価値を指す。

具体的な研究開発課題は、官・学との連携による炭素価格の検討、LCAの観点からのバイオマスを活用したネガティブエミッション技術の総合的な評価、バイオマス特有の付加価値の定量化などがある。

IPCCでは、様々な手法による二酸化炭素1トンあたりの炭素隔離の効果を炭素価格毎に試算している。表3-1では、炭素価格を30米ドル、50米ドル、100米ドルに定めた場合において、それぞれどのくらいの炭素隔離の効果が期待できるかという試算結果を示している。その結果は、炭素価格が高いほど、農地、森林においてもその効果は高くなると見込まれている。このため、バイオマスを活用したネガティブエミッション技術の価値を、付加価値を含めて最大限、炭素価格として評価できれば、大規模な普及に繋がると考えられる。従って大気中CO₂の回収・貯留のみならず、森林や農地、沿岸海洋生態系がもたらす多面的な価値を「環境

価値」として定量化し価格に反映させるための検討が重要である。一部の地域では、沿岸部における環境価値の得点化、経済価値化などが試みられている¹⁶。これは地域毎に異なるデータを統一的な指標で評価していくための取組みである。その推進にあたっては指標の開発と同時に評価のための地域ごとのデータを積み重ねていくことも重要である。

表 3-1 炭素価格と実現可能性への試算（GtCO₂-eq/yr カッコ内は考えられうる範囲）

	<米 20ドル/ tCO ₂ -eq	<米 50ドル/ tCO ₂ -eq	<米 100ドル/ tCO ₂ -eq	技術的に可能な範囲
農地	0.9（0.5-1.4）	1.6（1-2.4）	4.1（1.7-6.7）	11.2（1.6-28.5）
森林	2.9（2.2-3.5）	3.1（1.4-5.1）	7.3（3.9-13.1）	13（5-29.5）
需要側	—	—	2.2（1.1-3.6）	4.2（2.2-7.1）
BECCS	—	—	1.6（0.5-3.5）	5.9（0.5-11.3）

IPCC 資料¹⁷を元に CRDS が作成

国際的な排出量取引を見据えた具体的な炭素の価値の提示が求められている。例えば、J-クレジットではまだカウントされない技術についても、ネガティブエミッション技術としての効果の実証を進めていく必要がある。合意形成への取組み材料としてもデータの蓄積が重要である。

欧州では EU 排出量取引市場、米国では米カリフォルニア州排出量取引制度などがあり、またボランタリー市場としても Verra（米国）、Gold Standard（スイス）、Plan Vivo（英国）などがある。日本国内でも、自治体によるカーボンオフセット制度や、J ブルークレジットなどがあり、特に海草・海藻のブルーカーボン算定、認証・販売を行っている部分については、世界的にも先行している。

炭素の価値を貨幣価値として提示することが重要である一方で、生態系サービスへの影響を含めたいわゆる「環境価値」についても、付加価値の定量化として議論を進めていく必要がある。沿岸部の一部の地域では、環境価値の得点化、経済価値化などを試みている¹⁶。これらは地域毎によって異なるデータを統一的な指標で評価していくための取組として、データを重ねていくことが重要となる。

16 生物研究社：沿岸域における環境価値の定量化ハンドブック，2020.3

17 IPCC AR6 WG III: Climate Change 2022, Mitigation of Climate Change, Table7.3, P1204

4 | 研究開発の推進方法および時間軸

4.1 カーボンニュートラルの実現に向けた産官学の推進方策

本戦略プロポーザルで示した研究開発を進めるにあたり、具体的な推進方法と時間軸について述べる。2050年カーボンニュートラルの目標を達成するためには、それまでにネガティブエミッション技術が大規模に実装されていることが不可欠である。

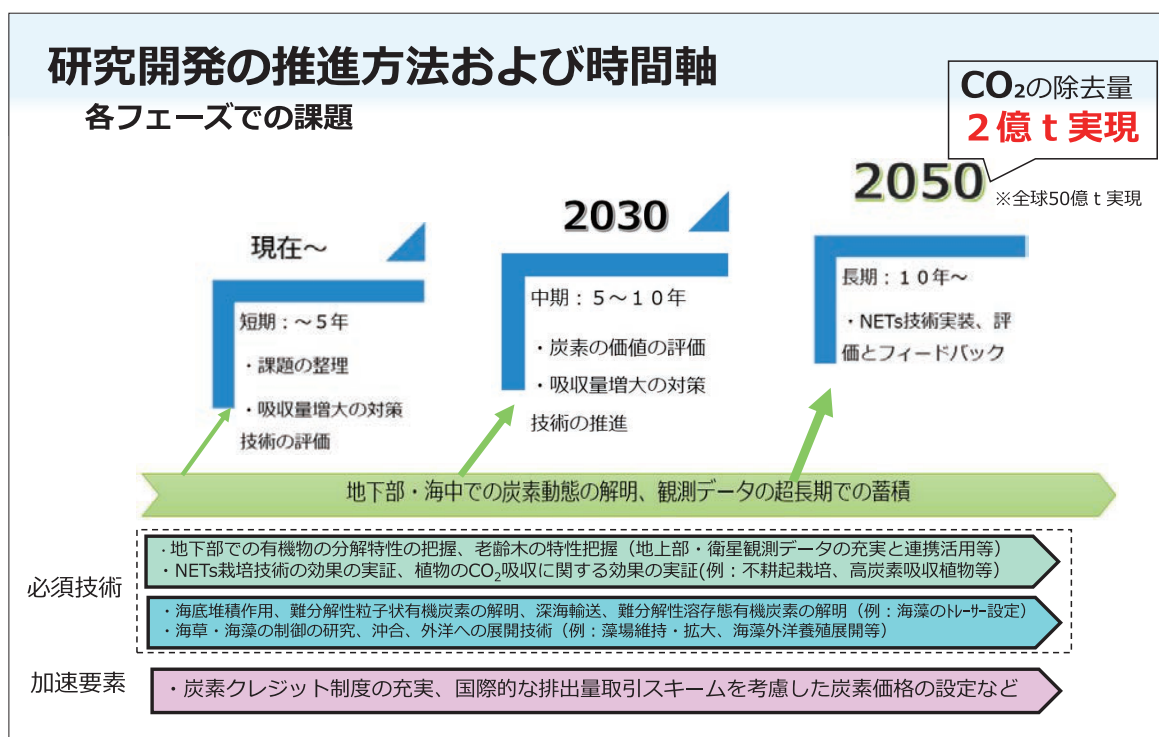


図4-1 各フェーズでの課題

【短期】現在～5年程度

課題1で示したバイオマスの分解特性解明には、基本的には様々な農地や森林などを対象とした長期にわたる観察や分析およびそのデータの蓄積・解析が必要である。しかしデータ収集のために必要な人材や予算の確保において現状は数年程度の期間の競争的資金に依存することが多く、中長期的な資源確保が難しいと言われている。そのため中長期的な計画を立てにくくなっている。したがって長期観測や体系的なデータ収集に対しては、データインフラ整備のような形でのより長期間の公的支援が求められている。その実現に向けた取り組みが短期的な課題の1つである。一方、長期にわたるデータ収集をいつどのように活用するかということについて、2050年カーボンニュートラル実現に向けて残された時間を考慮した場合、2030年、2050年などの区切りの中でそれを反映していくことが望ましい。

また、ここでの「課題の整理」には、研究課題の優先順位付けの議論が含まれている。例えば海域における炭素循環解明では深海を含めたすべてを対象とした海草・海藻の輸送プロセスを解明していくことは非常に長い時間が必要になることから難しいが、ネガティブエミッション技術としての量的ポテンシャルや信頼性等

の評価という観点から、どこまでを科学的に解明する必要があるのかということを専門家らの議論などを通じて、数年程度で整理する必要がある。地下部での有機物の分解特性を測定出来る機器の開発は今後数年程度での技術開発が必要である。これにより地下部での炭素動態の解明が進み、農林業でのネガティブエミッション技術に関する評価方法も確立されていくことが期待できる。特に土壌炭素貯留の研究が大きく進むことが予想され、例えば分解速度の遅い有機物の検討や不耕起栽培などの技術評価は中期（10年以内）に大きく進展するだろう。また、海中での藻場のトレーサー技術についても数年以内に開発されれば、深海輸送や難分解性溶存有機炭素の解明が進むと考えられる。

【中期】5～10年 2030年に向けて

中期的に取り組むべき課題としては、具体的な吸収量増大の対策技術の推進と、炭素の価値の評価が挙げられる。吸収量増大の対策技術（課題2）の推進については、課題1から抽出されたネガティブエミッション技術の評価をもとに、社会実装を加速させていく段階にある。なお、課題1については先述したように、長期的な取組が必要であるものの、5年程度の区切りで、科学的知見を総合した一定の結論やネガティブエミッション技術への示唆を明らかにしていく必要がある。

炭素の価値の評価（課題3）については、短期的な目標であげた検討課題を反映させながら、連続的に検討を進めていくべきものであり、政府を中心に具体的な価格を決定していく必要がある。例えば、農林水産業に関連する具体的な技術に対して、具体的に数年～数十年スパンでのネガティブエミッション技術としてどのくらいの効果があるかという評価をELSIの観点や環境価値などを踏まえて定めていく。土壌や沿岸部でのバイオマスの分解特性を解明することができれば、各技術に対して具体的な評価ができるようになる。LCAや、各要素技術の統一的な評価については、他分野の専門家を交えた議論を行い、決定していくことが不可欠である。

【長期】10～20年 2050年に向けて

大規模な社会実装加速に向けた取組を進めて行く。課題1で行っている取組と、課題2で取り組む実装段階での結果を合わせて次のステップに向けてさらなる検討が必要になっていくことが予想される。また、社会実装の過程で生じる様々な課題の整理が必要であり、産官学による多様なステークホルダーとの連携が求められる。また2050年以降もネガティブエミッション技術の実装・普及を継続的に拡大させていくことが重要となる。課題3で取り組む炭素の価値の評価については国際的な動向も考慮しながら、国内外での炭素関連の取引について、法整備なども進めていく必要がある。

【超長期】2050年以降

2050年を見据えてネガティブエミッション技術を進めていく上では、正確な評価とより効果的な技術開発が重要である。また、評価の根拠となるデータについては「欠損がないこと」と「より広範・詳細・正確」であることが両立できる計測技術とその体制が必要である。温室効果ガスの計測については、超長期での継続した取組が求められている。また、バイオマスの分解特性の解明が進んでいくことで、長期的な観点からバイオマスを活用したネガティブエミッション技術の選定を行うことができる。2050年に向けた取り組みの中で得られたデータや知見からのフィードバックとそれに基づく改良の繰り返しが重要である。課題1で挙げたような老齢木の特性解明には非常に長い期間でのデータ計測が可能な仕組み作りが必要であり、短期的なプロジェクトよりも超長期を想定したデータインフラのような体制整備が必要となるだろう。

図4-2には、課題1～3で示した取組と、カーボンニュートラルへの具体的な貢献について示している。各課題は、研究開発課題であり、大学や国研などの研究開発機関が取り組むものが多いものの、産業界や政府と連携をしながら取り組むべき課題でもある。

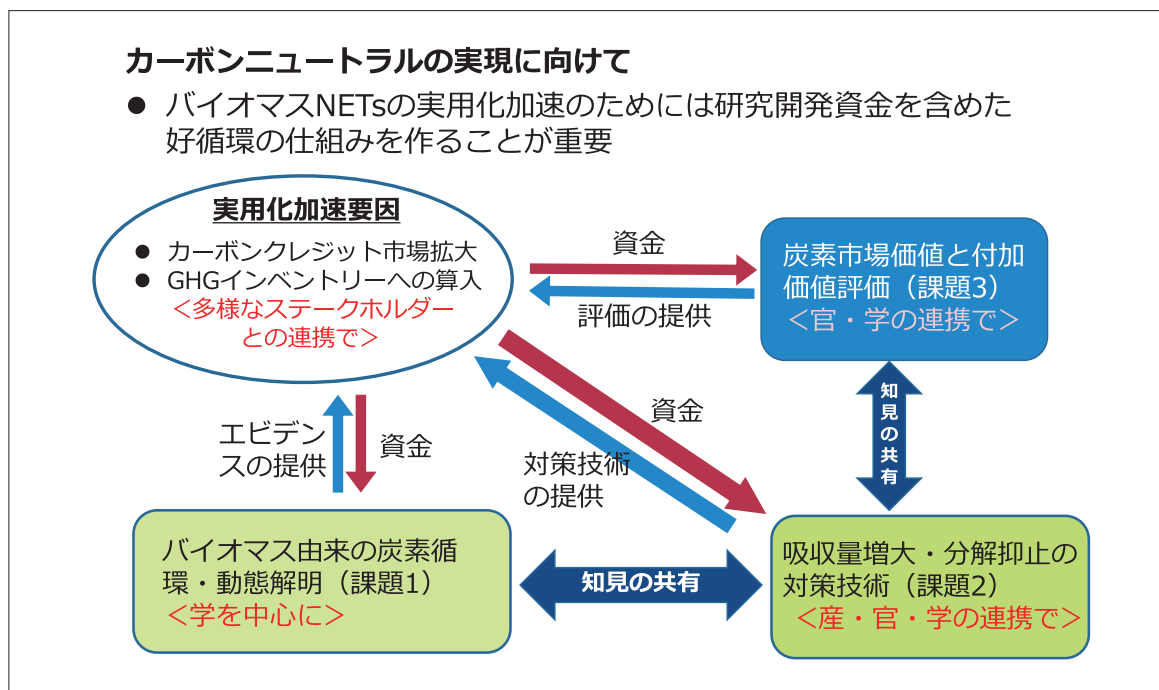


図 4-2 カーボンニュートラルの実現に向けて

4.2 インセンティブ制度の確立に向けた産官学の役割

4.2.1 産：資金の循環

産、すなわち企業等の民間セクターの役割は、資金循環を促すことにある。炭素の購入者であれば、炭素の販売者から炭素クレジットなどの形で購入し、企業の社会的責任（Corporate Social Responsibility：CSR）としての役割を果たすことなどに貢献する。炭素の販売者であれば、売買益を用いてネガティブエミッション技術の社会実装加速に向けた技術の導入などに投資することが求められる。バイオマスを活用したネガティブエミッション技術を大規模に普及させるにあたり、経済的合理性が低いことがボトルネックになってしまいうることがありうるため、資金の循環を促す仕組みが必要である。

経済的側面では、生物多様性、環境保全などこれまで経済的評価が難しい環境施策に対して、炭素クレジット市場で付加価値を与えることで、外部資金を調達できる可能性があり、これによってGHGの排出抑制に加えて大きな環境改善効果が期待できる。

国内では、J-クレジット制度がその一角を担っており、バイオマスを活用したネガティブエミッション技術に関連する部分については、陸域での一部の技術が対象となっている。具体的には、農業の分野でのバイオ炭の農地施用、森林の分野では森林経営活動、植林活動などである。農地では現在までのところバイオ炭のみが対象となっており、今後対象範囲の拡大が期待されている。

なお、J-クレジットは海洋の分野については対象となっておらず、海洋での沿岸部ブルーカーボンでの炭素クレジットについては、ジャパンプルーエコノミー技術研究組合の発行するJブルークレジットがその役割を担っている。藻場でのブルーカーボンを炭素クレジットとして取引する取組については、国際的にも日本が先行している状況である。

4.2.2 官：炭素の価値の評価

バイオマスを活用したネガティブエミッション技術の普及に向けて、農林水産資源を有効活用が進むことで、当該地域の活性化に繋がると考えられる。国内で、認証制度を導入している事例としては、山梨県での4パーミルイニシアチブへの取組に対する果樹園を中心としたものや、バイオ炭を施用した農作物に対するクルベジ認証制度などがある。これらの認証制度の取組は、生産者や消費者も含めて積極的に環境問題への取組を認知することができるなどのメリットがある。

大規模な社会実装に向けては、炭素クレジットなど、インセンティブに繋がる制度がそれを後押しする可能性がある。バイオマスを活用したネガティブエミッション技術の中では、現在までのところJ-クレジットの対象となっているのは農地ではバイオ炭のみ、他には森林管理などがある。オプションとして確立されていない技術も多くあり、学との連携によって、より多様な技術について評価していく必要がある。国際的な排出量取引スキームの動向なども考慮した上で、市場価格と環境価値も含めた炭素の価値の評価を行う。

4.2.3 学：バイオマスによる炭素循環・動態をより詳細に把握するための現象解明

学、すなわちアカデミアの役割は、炭素循環・動態をより詳細に把握するための現象解明である。これらの知見は、課題2で示したような、吸収量増大や分解抑止策の具体的な例示に繋がる他、公的セクターとの連携によって、より詳細かつ正確な評価方法への反映が可能となる。その他、カーボンニュートラルの実現のために必要な具体的な技術開発を進展させていくことや、より大気中のCO₂を吸収・固定するために効果的な技術の開発などに繋がる。

4.3 倫理的・法的・社会的課題（ELSI）に関する議論

社会実装を加速させる上では、科学技術的な課題の他にも、社会・経済的な課題にも取り組む必要がある。大規模な普及を進めていく上では、多様なステークホルダーとの連携が不可欠である。大学や研究機関だけではなく、政府（官）や企業（産）との様々な関わりの中で、多角的な議論を行っていく必要がある。

陸域でのELSIに関する議論としては、土地利用に伴う食料との競合や土地所有者との合意形成などが挙げられる。特に森林では土地を利用することによる水不足への懸念、所有者不明の民有林の問題がある。日本では、民有林の所有者は高齢化しており、植林や森林再生の大規模実装のボトルネックになることが予想される。所有者不明の森林については、林野庁が「森林経営管理制度（森林経営管理法）」などが進められているが、例えば温室効果ガスの削減のための特例の創設など、制度の見直しと議論を行った上で、森林を活用したネガティブエミッション技術を進めていくことができる体制が必要である。農地では、ネガティブエミッション技術と作物への影響や農業従事者へのインセンティブに関する議論などが考えられる。例えば、バイオ炭が作物に与える影響の検討や、J-クレジットなどの仕組みがあったとしても依然として経済的なインセンティブが低い状況をどのように改善していく必要があるか等である。また、ゲノム編集や育種の技術については、社会受容がなされるかの議論、大規模実装にかかる時間が長期化するのではないか、等の議論がある。

海域においては沿岸部での漁業権との兼ね合いなどが挙げられる。また、海外での大規模展開を実行する場合、日本と相手国との条約、法律などに基づき実行していく必要がある。加えて、外洋や公海などで大規模なネガティブエミッション技術を進めていく場合に、海洋投棄に関わる「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」（通称：ロンドン条約）や国際的な市場メカニズムに関わるパリ協定6条などの一部がネックになる場合があるため、国際的な議論が必要であり、日本としての見解を世界に発信していくこ

とが求められるだろう。

陸域、海域での共通事項ではあるが、具体的な技術に落とし込む段階にはないものであっても、現在予想されているシナリオなどをベースに、ELSIとして検討するべき取組、各段階で考えられる懸念点などを明らかにしていく必要がある。一方、具体的な土地や場所を想定した取組も、地域に適合するための具体的な想定が求められており、地域でのバイオマスの賦存量や実現可能性と課題について議論を進めていくことが重要である。

付録1 検討の経緯

国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）では、2022年度の戦略スコープ策定委員会において、戦略プロポーザルを作成すべきテーマの候補として、本テーマを選定し、検討チームを発足させた。本検討チームは2022年4月から活動を開始し、2023年3月まで検討を進めてきた。

その間、有識者へのインタビューや、有識者を招いてのワークショップを開催し、本テーマの研究開発状況の把握や研究開発課題・方向性の議論を進めてきた。以下に、その概要を示す。

付録1.1 ヒアリング調査（国内）

本プロポーザルの作成にあたり、国内の大学、研究機関、企業の方々にヒアリング調査を行った。
(敬称略)

氏名	所属	役職
市井 和仁	千葉大学 環境リモートセンシング研究センター	教授
市橋 泰範	理化学研究所 バイオリソース研究センター植物-微生物共生研究開発チーム	チームリーダー
伊藤 昭彦	国立研究開発法人国立環境研究所 地球環境研究センター	室長
井上 昭夫	近畿大学 農学部・大学院 農学研究科	教授
宇賀 優作	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 作物研究部門 作物デザイン研究領域 作物デザイン開発グループ	グループ長
小黑 芳生	国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所	主任研究員
小原 聡	東京大学 未来ビジョン研究センター	特任准教授
小埜 恒夫	国立研究開発法人水産研究・教育機構 水産資源研究所（横浜）	主幹研究員
加藤 顕	千葉大学 大学院 園芸学研究院 先端園芸工学講座	准教授
加藤 悦史	一般財団法人エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 地球環境グループ	主管研究員 / 副部長
加藤 拓	東京農業大学 応用生物科学部 農芸化学科 土壌肥料科学研究室	准教授
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 農業環境変動研究部門 気候変動緩和策研究領域	上級研究員
木邑 敏章	トヨタ自動車株式会社 アグリバイオ事業部 土壌センシング推進グループ	主幹
熊谷 朝臣	東京大学 大学院農学生命科学研究科（農学部）	教授
黒沢 厚志	一般財団法人エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部	研究理事 / 主席研究員
桑江 朝比呂	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究グループ	グループ長
三枝 信子	国立研究開発法人国立環境研究所 地球システム領域	領域長
佐々井 崇博	東北大学 大学院理学研究科・理学部 地球物理学専攻 流体地球物理学講座 気象学・大気力学分野	助教

佐々木 淳	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻	教授
柴田 晃	立命館大学 OIC 総合研究機構 / OIC 総合研究機構 サステナビリティ学研究センター	教授
須藤 重人	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
高田 裕介	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 土壌環境管理研究領域 土壌資源・管理グループ	上級研究員
津田 久美子	草津市 環境経済部 温暖化対策室	係長
坪井 俊輔	サグリ株式会社	代表取締役 CEO
永井 祐二	早稲田大学 理工学術院 環境総合研究センター	上級研究員 (研究院教授)
長坂 克彦	山梨県農政部 農業技術課	新技術推進監
中村 隆俊	東京農業大学 生物産業学部 北方圏農学科 生態系保全学研究室	准教授
丹羽 洋介	国立研究開発法人国立環境研究所 地球環境研究センター	主任研究員
橋本 昌司	国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所立地環境研究領域 / 東京大学 大学院農学生命科学研究科 森林科学専攻	主任研究員 / 准教授
平舘 俊太郎	九州大学 大学院農学研究院 生産環境科学講座 土壌学分野	教授
平野 高司	北海道大学 大学院農学院	教授
松本 光朗	近畿大学農学部 環境管理学科 森林資源学研究室	教授
村田 穰	NEDO 新領域・ムーンショット部 ムーンショット型研究開発事業推進室	主任
森田 香菜子	国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所 生物多様性・気候変動研究拠点 気候変動研究室	主任研究員
吉竹 晋平	早稲田大学 教育・総合科学学術院	准教授
吉田 朋央	NEDO 新領域・ムーンショット部 ムーンショット型研究開発事業推進室	室長代理
和穎 朗太	農業・食品産業技術総合研究機構 農業環境変動研究部門 気候変動緩和策研究領域	上級研究員
和田 茂樹	筑波大学下田臨海実験センター	助教
渡邊 敦	公益財団法人笹川平和財団 海洋政策研究所 海洋政策研究部	上席研究員
渡辺 謙太	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究グループ	主任研究官
渡邊 学	東京電機大学 理工学部	研究員

付録 1.2 ヒアリング調査（海外）

海外のプロジェクトや研究開発動向調査にあたり、海外の大学および研究機関の方々にヒアリング調査を行った。

（敬称略）

氏名	所属	役職
Åsa Stam	Finnish Meteorological Institute	Research Coordinator

Elisa Vainio	Regenerative Agriculture, International Soil Collaboration, Baltic Sea Action Group	Project Manager
Jari Liski	Finnish Meteorological Institute	Research professor
Lehtonen Aleks	Natural Resources Institute Finland	Research professor
Manuel Schwabl	BEST - Bioenergy and Sustainable Technolo-gies GmbH	Area Manager

付録 1.3 現地調査

農地での技術的な取組などの検討を行うにあたり、現地調査を行った。

- 住友化学株式会社 真壁試験農場
- 国立大学法人 高知大学 IoP 共創センター
- 高知県立森林技術センター
- 高知県立林業大学校

付録 1.4 ワークショップの開催

付録 1.4.1 開催概要

バイオマスを活用したネガティブエミッション技術に関する科学技術未来戦略ワークショップを開催した。専門家の方々に最新の研究開発動向などに関する話題提供、および今後の炭素固定を加速させていくために求められている科学技術上の課題や推進策等について議論した。

主な検討項目は、農地・森林・海洋のバイオマスにおける温室効果ガスの排出・吸収・固定プロセスに関する詳細な現象解明とそのための観測・計測技術、モデル評価技術、制御技術等である。また、経済的な課題や社会的、倫理的、法的課題（ELSI）についても議論を行い、大規模な社会実装に向けた具体的な道筋・推進策についても議論した。

なお、基礎となる研究開発分野が異なるため、ワークショップは陸域と海域での2回に分けて開催した。第1回は、農地、森林での技術について取り扱い、土壌炭素貯留、森林資源管理など、陸域でのネガティブエミッション技術が対象である。また、第2回では沿岸部での技術について取り扱い、海藻・海草などのブルーカーボンなど、海域でのネガティブエミッション技術が対象である。

主な検討項目は、農地・森林・海洋のバイオマスにおける温室効果ガスの排出・吸収・固定プロセスに関する詳細な現象解明とそのための観測・計測技術、モデル評価技術、制御技術等である。また、経済的な課題や社会的、倫理的、法的課題（ELSI）についても議論を行い、大規模な社会実装に向けた具体的な道筋・推進策についても議論した。

なお、基礎となる研究開発分野が異なるため、ワークショップは陸域と海域での2回に分けて開催した。第1回は、農地、森林での技術について取り扱い、土壌炭素貯留、森林資源管理など、陸域でのネガティブエミッション技術が対象である。また、第2回では沿岸部での技術について取り扱い、海藻・海草などのブルーカーボンなど、海域でのネガティブエミッション技術が対象である。

付録1.4.2 プログラム（敬称略）

第1回および第2回のプログラムは以下のとおりである。

●第1回：＜陸域＞ 2022年11月18日（金）13:30～18:00

時間	内容
< 20分 > 13:30～13:50	挨拶（佐藤）、趣旨説明（徳永）
< 160分 > 13:50～16:30 (20分発表+10分質疑) × 5人 = 150分 (※途中10分休憩)	第一部 有識者によるプレゼンテーション 1. 伊藤 昭彦（国立研究開発法人国立環境研究所 地球システム領域 物質循環モデリング・解析研究室・室長）「陸域生態系モデルによるネガティブエミッション研究について」 2. 市井 和仁（千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・教授）「地上観測・衛星観測・モデリングを統合した陸域における温室効果ガス吸収・排出量の把握」 3. 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・副研究部門長）「陸域でのバイオマス吸収量を増やすための技術的課題検討」 4. 和穎 朗太（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・上級研究員）「土壌炭素（土壌有機物）の役割、存在形態、貯留ポテンシャル」 5. 加藤 拓（東京農業大学 応用生物科学部 農芸化学科・准教授）「農業におけるこれまでの土壌への有機物施用技術とこれからの土壌炭素貯留技術」
< 10分 > 16:30～16:40	休憩
< 80分 > 16:40～18:00	第二部 全体討論 ●今後求められている科学技術上の課題 ●社会実装に向けた課題
18:00	閉会

●第2回：＜海域＞ 2022年11月21日（月）13:30～18:00

時間	内容
< 15分 > 13:30～13:50	挨拶（佐藤）、趣旨説明（徳永）
< 130分 > 13:50～16:00 (20分発表+10分質疑) × 4人 = 120分 (※途中10分休憩)	第一部 有識者によるプレゼンテーション 1. 渡辺 謙太（国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究グループ・主任研究官）「藻場のCO ₂ 隔離過程に関する研究と港湾分野における動向」 2. 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 水産資源研究センター 社会・生態系システム部・沿岸生態系暖流域グループ長）「研究課題探索：ブルーカーボン生態系のCO ₂ 吸収源算定と生態特性」 3. 和田 茂樹（筑波大学 下田臨海実験センター 生物海洋学研究室・助教）「ブルーカーボンの将来予測-未来の生態系を用いた試み-」 4. 渡邊 敦（笹川平和財団 海洋政策研究所 海洋政策研究部・上席研究員）「ブルーカーボンを推進する上での政策的課題 海外との比較、普及に向けてボトルネックとなっている科学技術的な課題」
< 10分 > 16:00～16:10	休憩
< 110分 > 16:10～18:00	第二部 全体討論 ●今後求められている科学技術上の課題 ●社会実装に向けた課題
18:00	閉会

付録1.4.3 参加者一覧（敬称略）

<第1回>

招聘有識者

伊藤 昭彦	国立研究開発法人国立環境研究所 地球システム領域・室長
市井 和仁	千葉大学 環境リモートセンシング研究センター・教授
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・副研究部門長
和穎 朗太	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・上級研究員
加藤 拓	東京農業大学 応用生物科学部 農芸化学科・准教授

バイオNETsチームメンバー（主催）

佐藤 順一	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・上席フェロー
徳永 友花	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
池元 英樹	九州大学先端医療オープンイノベーションセンター・学術研究員
上野 伸子	研究開発戦略センター 連携担当 / 環境・エネルギーユニット・フェロー
尾山 宏次	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
河原崎 里子	低炭素社会戦略センター・研究員
菊池 邦生	未来創造研究開発推進部 低炭素研究推進グループ・主幹
菊地 乃依瑠	研究開発戦略センター 科学技術イノベーション政策ユニット・フェロー
中村 亮二	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
西田 勇一	研究プロジェクト推進部 グリーンイノベーショングループ・主任専門員
用貝 広幸	研究開発戦略センター ライフサイエンス・臨床医学ユニット・フェロー

JST 内部関係者

省庁関係者

石川 有希	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課・行政調査員
小野山 吾郎	文部科学省 政策科学推進室・室長
田端 千夏	文部科学省 科学技術・学術政策局 研究開発戦略課 戦略研究推進室・行政調査員
田村 嘉章	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課・課長補佐

<第2回>

招聘有識者

渡辺 謙太	国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所・主任研究官
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・沿岸生態系暖流域グループ長
和田 茂樹	筑波大学 下田臨海実験センター 生物海洋学研究室・助教
渡邊 敦	笹川平和財団 海洋政策研究所 海洋政策研究部・上席研究員

バイオNETsチームメンバー（主催）

佐藤 順一	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・上席フェロー
徳永 友花	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
上野 伸子	研究開発戦略センター 連携担当 / 環境・エネルギーユニット・フェロー
尾山 宏次	研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
河原崎 里子	低炭素社会戦略センター・研究員
菊池 邦生	未来創造研究開発推進部 低炭素研究推進グループ・主幹
菊地 乃依瑠	研究開発戦略センター 科学技術イノベーション政策ユニット・フェロー
桑原 明日香	研究開発戦略センター ライフサイエンス・臨床医学ユニット・フェロー

中村 亮二 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット・フェロー
西田 勇一 研究プロジェクト推進部 グリーンイノベーショングループ・主任専門員
用貝 広幸 研究開発戦略センター ライフサイエンス・臨床医学ユニット・フェロー
吉田 修一郎 東京大学大学院農学生命科学研究科・教授

JST 内部関係者

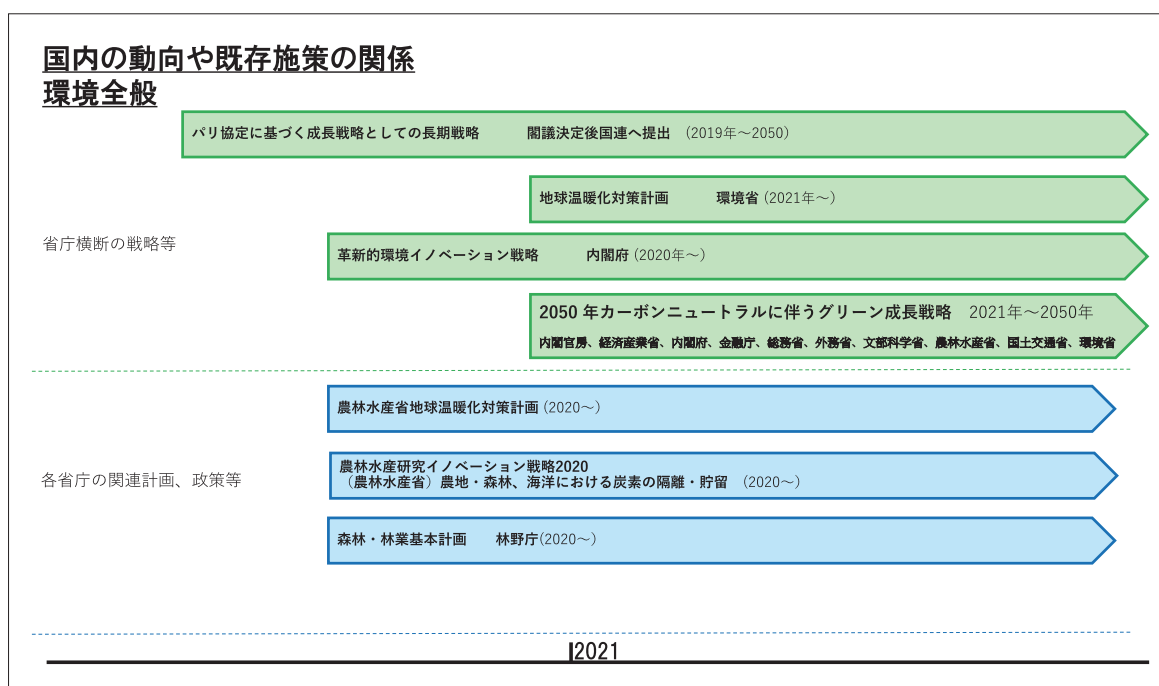
省庁関係者

尾崎 翔美 文部科学省 研究開発局 海洋地球課・係員
小野山 吾郎 文部科学省 政策科学推進室・室長
高橋 可江 文部科学省 研究開発局 海洋地球課・行政調査員
田端 千夏 文部科学省 科学技術・学術政策局 研究開発戦略課 戦略研究推進室・行政調査員
田村 嘉章 文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課・課長補佐

付録2 国内外の状況

付録2.1 日本の状況

我が国でも2020年前後から二酸化炭素のネガティブ・エミッション技術が政府の各種の戦略を実現する手段の一つとして注目されている。2020年に統合イノベーション戦略会議が決定した「**革新的環境イノベーション戦略**」では最新のバイオ技術等を活用した資源利用及び農地・森林・海洋へのCO₂固定が目標に置かれ、スマート林業の推進や農地でのバイオ炭活用、ブルーカーボンが重要な吸収手段として位置づけられた。これを受け、関連する省庁の計画や戦略でも積極的な研究開発を行うこととされている。2021年には多くの省庁が連携し、「**2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略**」が決定された。「**農林水産研究イノベーション戦略2020**」では諸外国のネガティブエミッション関連政策や技術開発の進展を背景に、国内でも温室効果ガスの削減量・吸収量を可視化するシステムの開発や、炭素隔離・貯留技術を推進すると記載されている。以下、国内での関連政策や取り組みを概観する。



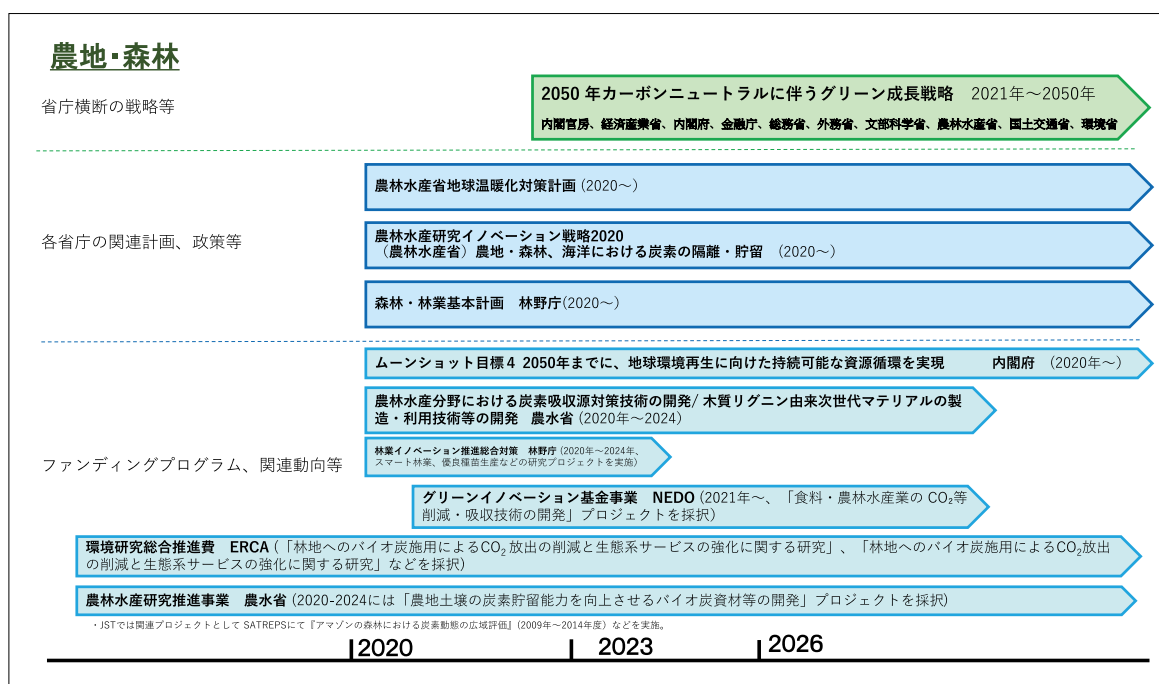
付図2-1 国内の動向や既存施策の関係：環境全般

付録2.1.1 日本の陸域での取り組み

農地での取り組みとしては、2014年から「**環境保全型農業直接支払交付金**」により、農業生産に由来する環境負荷を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を支援している。化学肥料、化学合成農薬を原則5割以上低減する取組（カバークロップ等）に対して交付金が支払われる制度が運用されている。また、2020年からは農水省の「**農林水産研究推進事業**」において、「**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**」プロジェクトが採択されている他、NEDOの

「グリーンイノベーション基金事業」では、「食料・農林水産業のCO₂等削減・吸収技術の開発」プロジェクトの中で、「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」（実施予定先、株式会社ぐるなび等）がテーマとして採択されている。

森林でのネガティブエミッションに関しては、前述の「農林水産研究イノベーション戦略2020」のほか、林野庁の「森林・林業基本計画」においてもカーボンニュートラルの実現向けエリートツリーの再造林やCO₂吸収量の定量的な把握のための調査、木材の利用拡大による炭素固定量の増加といった取り組みが行われている。「林業イノベーション推進総合対策」でも、早生樹やエリートツリーの生産拡大の他、ICT等先端技術を用いたスマート林業の推進や森林資源情報のデジタル化・オープン化を目標とした研究開発投資が行われている。また、「環境研究総合推進費」では森林へのバイオ炭施用によるCO₂放出の削減効果を検証する研究プロジェクトが採択されている。



付図2-2 国内の動向や既存施策：農地・森林

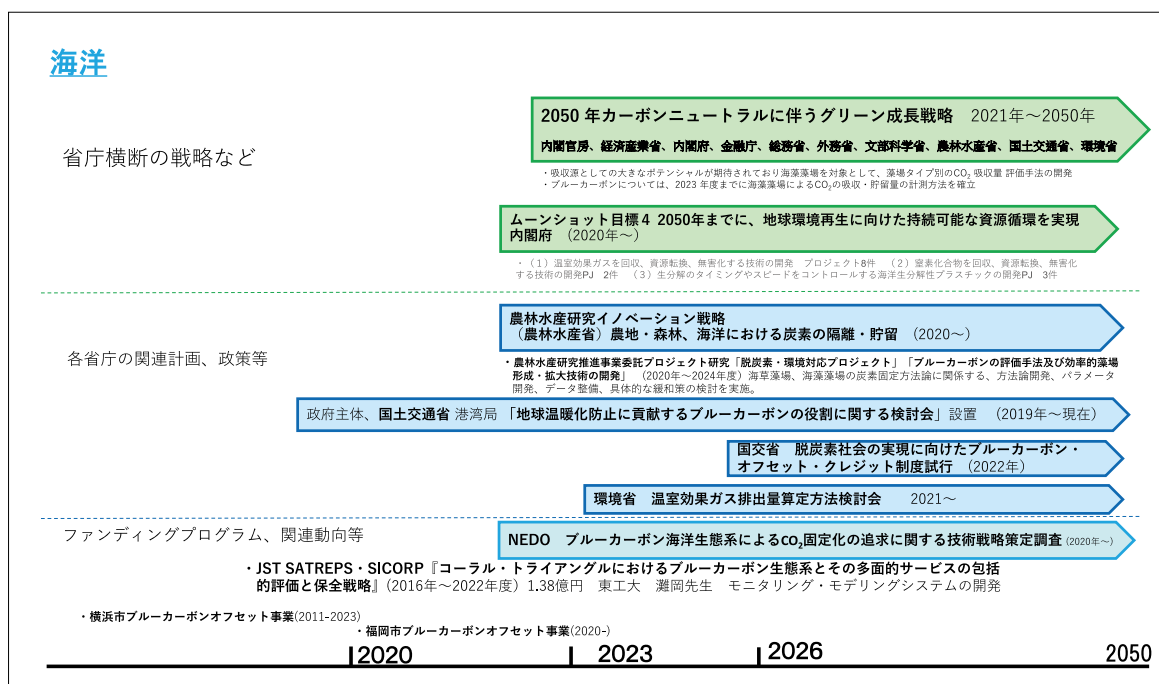
付録2.1.2 日本の海洋での取り組み

ブルーカーボンは「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」において温室効果ガスを固定する有効な手段の一つと位置づけられており、藻場で実際にどういった規模のCO₂が吸収されているのか、今後どれほどのポテンシャルがあるのか、といった点を計測・評価する手法の開発が行われている。

農林水産省では農林水産研究推進事業委託プロジェクト研究「脱炭素・環境対応プロジェクト」において「ブルーカーボンの評価手法及び効率的藻場形成・拡大技術の開発」が進められており、海草藻場、海藻藻場の炭素固定方法論に関係する方法論開発やパラメータ評価、データ整備、具体的な緩和策の検討を実施している。NEDOも2020年より「ブルーカーボン海洋生態系によるCO₂固定化の追求に関する技術戦略策定調査」が行っている。他には、JST SATREPS・SICORPのファンディングによって日本、フィリピン、インドネシアが共同で研究プロジェクト『コーラル・トライアングルにおけるブルーカーボン生態系とその多面的サービスの包括的評価と保全戦略』を実施し、モニタリングシステムや評価手法の開発を進めている。

制度面では、国土交通省港湾局が2019年に「地球温暖化防止に貢献するブルーカーボンの役割に関する

「検討会」を設置しており、「脱炭素社会の実現に向けたブルーカーボン・オフセット・クレジット制度」を試行している。加えて港湾を中心に臨海部のカーボンニュートラルを目指す「カーボンニュートラルポート」の一環として、ブルーカーボン生態系を活用した港湾・沿岸域における環境価値の創出に向けた検討を進めている。また、ブルーカーボンの取引については「ジャパンプルーエコノミー技術研究組合」が横浜港、神戸港など数力所で取り組みを進めている。藻場や干潟の保全活動により創出したCO₂吸収量を、第三者委員会による審査・検証を経て企業等との間で取引できることとなった。その他、地方自治体でも2011年より「横浜市ブルーカーボンオフセット事業*」が、2020年からは「福岡市ブルーカーボンオフセット事業」が動いている。

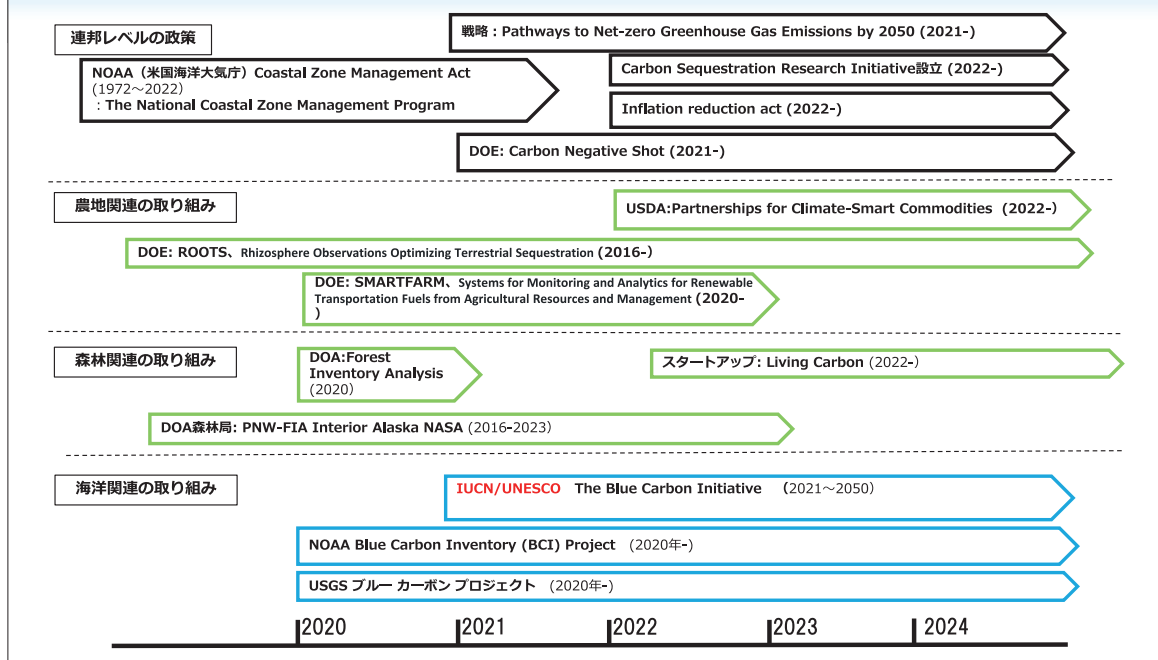


付図 2-3 国内の動向や既存施策：海洋

付録 2.2 米国の状況

米国では2021年に政府がネットゼロへ向けた長期戦略“The Long-Term Strategy of United States -Pathway to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050-”を発表し、植林やブルーカーボンといったネガティブネガティブエミッション技術も2050年までの必須のものとして位置づけられた。米国エネルギー省も安価なクリーンエネルギーのための研究開発やステークホルダーとの連携を目的とした“Energy Earthshots”の枠組みの中で、大気中のCO₂除去技術に焦点を当てた“Carbon Negative Shot”を開始し、関連する技術開発を進めている。また、2022年に可決されたInflation reduction 法案では、気候への影響が小さい不耕起栽培やカバークロップといった農法や、森林の拡大・保護などを推進するために、250億ドル以上の資金を提供することが盛り込まれている。

米国での推進政策、関連プロジェクトの状況



付図 2-4 米国での推進政策、関連プロジェクトの状況

付録 2.2.1 米国の陸域での取り組み

農地に関しては、農務省が2022年より、Climate-smartな生産方法（不耕起等）によって農作物を生産し、温室効果ガスのモニタリングや市場への影響、事業者への技術的支援も含め効果を検証する取り組み“Partnerships for Climate-Smart Commodities”を開始し、141プロジェクトに3.1億ドルを投資する予定である。エネルギー省が2020年に開始した“SMARTFARM: Systems for Monitoring and Analytics for Renewable Transportation Fuels from Agricultural Resources and Management”では、農地の地下にどの程度炭素が貯留されているのか計測するための技術開発や、CO₂のリモートセンシング技術の開発などに取り組んでいる。また、エネルギー省は2016年から“ROOTS: Rhizosphere Observations Optimizing Terrestrial Sequestration”というプログラムにて、植物が根に炭素をより多く貯留するための技術開発を行っている。

森林に関しては、CO₂の貯留量を評価するための取り組みが農務省森林局を中心として行われている。2016年から2023年にかけて“PNW-FIA Interior Alaska NASA”プロジェクトにて、これまで木材の資源量や植生と言った基本的なデータを取得できていなかった地域の観測を行うほか、2020年には米国全体の森林資源量を評価する“Forest Inventory Analysis”にて森林の炭素貯留量の予測方式の改訂を行った。こういった計測・評価に関する取り組みの他、スマート林業の促進、エリートツリーの開発、大規模な植林といった試みも進められており、The Conservation Internationalといった非営利団体や多くの財団、スタートアップも関与している。

付録 2.2.2 米国の海洋での取り組み

米国政府は1972年以降“National Coastal Zone Management Program”を通して沿岸部の様々な課題へ包括的に取り組んでおり、ブルーカーボンもこの枠内で取り扱われてきた。米国内に広く存在する塩性湿

地や沿岸部のブルーカーボンについても評価し、今後の温室効果ガス排出削減の数値目標を示している。近年ではRestore America's Estuaries (RAE) という非営利団体が多くの湿地再生プロジェクトを主導しており、アメリカ海洋大気庁 (NOAA) も協力して進められている。また、マサチューセッツ州・Herring River では河川の再生活動を通じた、カーボンオフセットプロジェクトによるボランティア・クレジット市場 (Voluntary carbon market) の実証試験等が実施されている。

NOAAが2020年に開始したBlue Carbon Inventory (BCI) プロジェクトでは、専門知識を活用して、海草やマングローブなどの沿岸ブルーカーボンを統合評価するためのツール、アプローチ、および能力の開発を進めており、一部の発展途上国に対しては温室効果ガスインベントリ (NGGI) の整備を行っている。また、CO₂の貯留と隔離における沿岸生態系の価値を反映する排出削減、沿岸資源管理、および回復力戦略の開発を促進することを目的としている。アメリカ地質調査所 (USGS) もブルーカーボンに関連するプロジェクトを行っており、パートナー組織と協力して各地でデータを収集、分析、統合し、沿岸湿地の炭素フラックスの推定値を改善することを目的としている。

付録2.3 欧州の状況

欧州では、2019年に欧州委員会が“The European Green Deal”報告書にて2050年のネットゼロ達成を目指した成長戦略を発表。EU加盟国へエネルギー・気候変動対応計画の策定を求めたほか、新たなテクノロジーや破壊的イノベーションが必要であり、そのために2021年に開始されたEUのフレームワークプログラムである“Horizon Europe”でも多くの研究課題が採択され、予算の内少なくとも35%を提供する。

付録2.3.1 欧州の陸域での取り組み

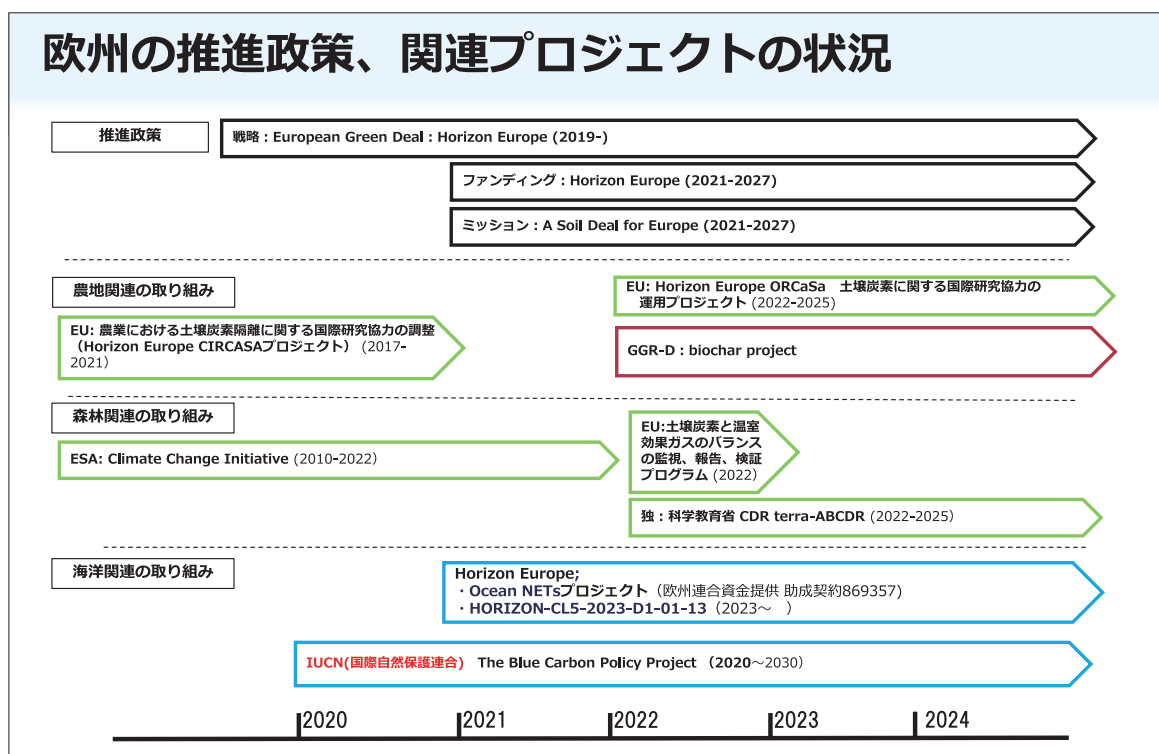
農地に関してはHorizon 2020でNEGEM、LANDMARCというプロジェクトが採択された。NEGEMプロジェクトでは、ネガティブエミッション技術の利用が技術的にリアリティを持ったものであるかどうかを評価しており、LANDMARCプロジェクトではネガティブエミッション技術を実際に利用する際に農業従事者が用いるツールキットの開発などを行っている。国際的なコミュニティ形成に関するプロジェクトも行われており、CIRCASAプロジェクトで作られた農業における土壌での炭素隔離についての研究ネットワークは、プロジェクト終了後もORCaSa (Operationalising International Research Cooperation on Soil carbon、土壌炭素に関する国際研究協力の運用) というプロジェクトに引き継がれた。

“Horizon Europe”ではヨーロッパの土壌の保護や回復が“A Soil Deal for Europe”としてミッションに設定されており、積極的な取り組みが進められている。上記のORCaSa (Operationalising International Research Co-operation on Soil carbon、土壌炭素に関する国際研究協力の運用) プロジェクトもその一つで、引き続き土壌での炭素貯留の現象解明に取り組んでいる。

森林の炭素固定量測定技術については、2010年から2022年にかけて欧州宇宙機関 (ESA) を中心とした“Climate Change Initiative Biomass Project”が実施されており、衛星観測技術を用いた森林のバイオマス量の評価が炭素循環モデルの基礎データとして用いられている。スマート林業についてはEUの研究開発プログラムの他EU加盟国それぞれに組み込みが進んでおり、2020年まで実施されていたフレームワークプログラム“Horizon 2020”内でもミュンヘン工科大を中心としたプロジェクト“Carbon smart forestry under climate change”では幅広い森林のタイプに応じて炭素フラックスをモデル化し、気候に応じてどのような森林管理手法が適切か検討し、森林管理者へのトレーニングを実施している。

付録2.3.2 欧州の海洋での取り組み

ブルーカーボンに関する Horizon Europe のプロジェクトとしては、まず Ocean NETs Project が挙げられる。このプロジェクトは、海洋ベースのネガティブエミッション技術が実際にどの程度効果的なのか評価を行うもので、マングローブや藻場、塩性湿地、ケルプの森などのブルーカーボン生態系を管理復元、沿岸堆積物に蓄えられる炭素量を増強するにはどのような取り組みが有効か検討を進めている。また、EU-China International Cooperation on Blue Carbon プロジェクトでは、文字通りブルーカーボンに関する EU と中国の国際協力に取り組んでいる。



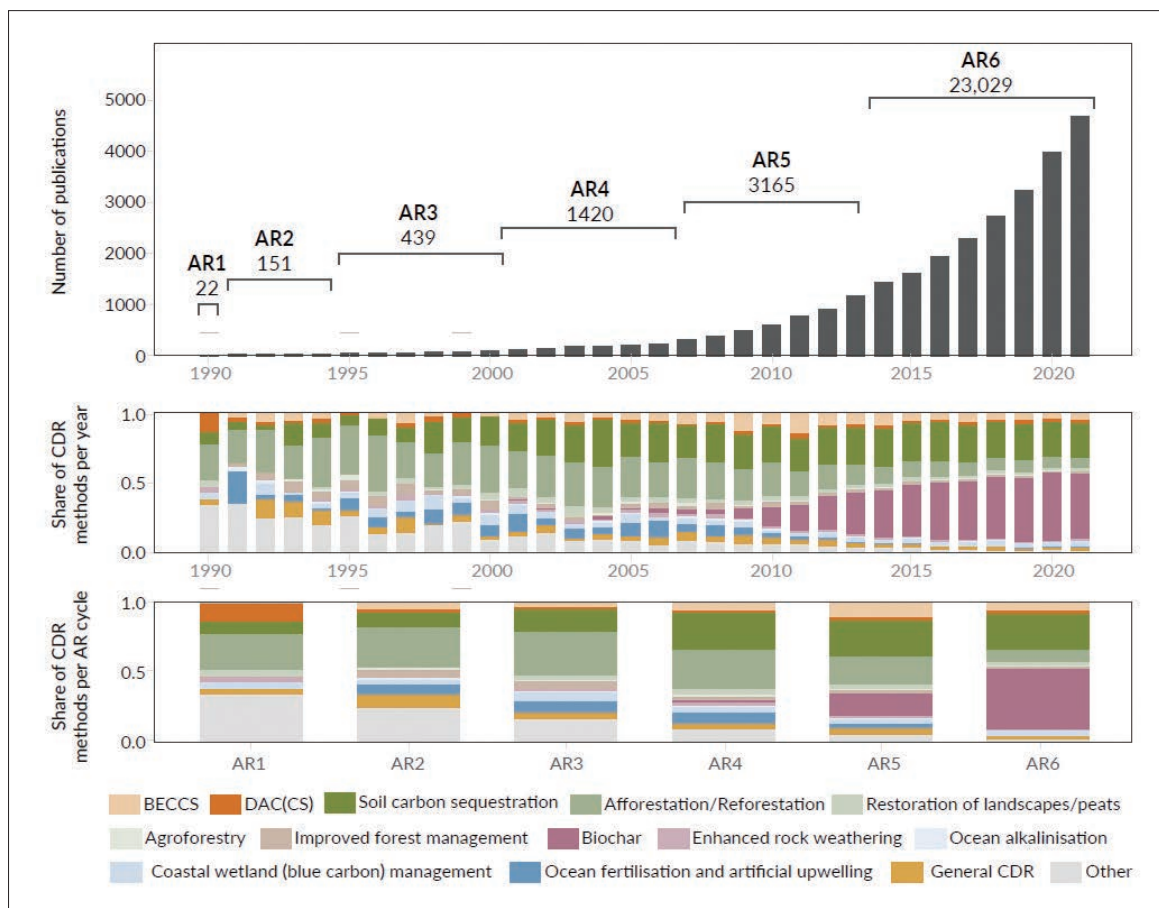
付図 2-5 欧州での推進政策、関連プロジェクトの状況

付録2.4 文献からみた研究動向

1990 年代初頭から CO₂ 除去に関する研究論文数は年間約 19% の割合で増加しており、伸び率で見ると気候変動分野全体の論文数よりも速いペースで増加する傾向にある。増加している論文の多くはバイオ炭に関連する研究論文である。

Web of Science と Scopus を用いた Minxi らの調査によると、1990 年から 2021 年にかけて CO₂ 除去について書かれた研究論文は約 28,000 報を数える¹⁸。

18 Smith, A, et al., *The State of Carbon Dioxide Removal -1st Edition-*, <https://static1.squarespace.com/static/633458017a1ae214f3772c76/t/63c8876b8b92bf2549e83ed5/1674086272412/SoCDR-1st-edition.pdf> (2023 年 3 月 1 日アクセス)



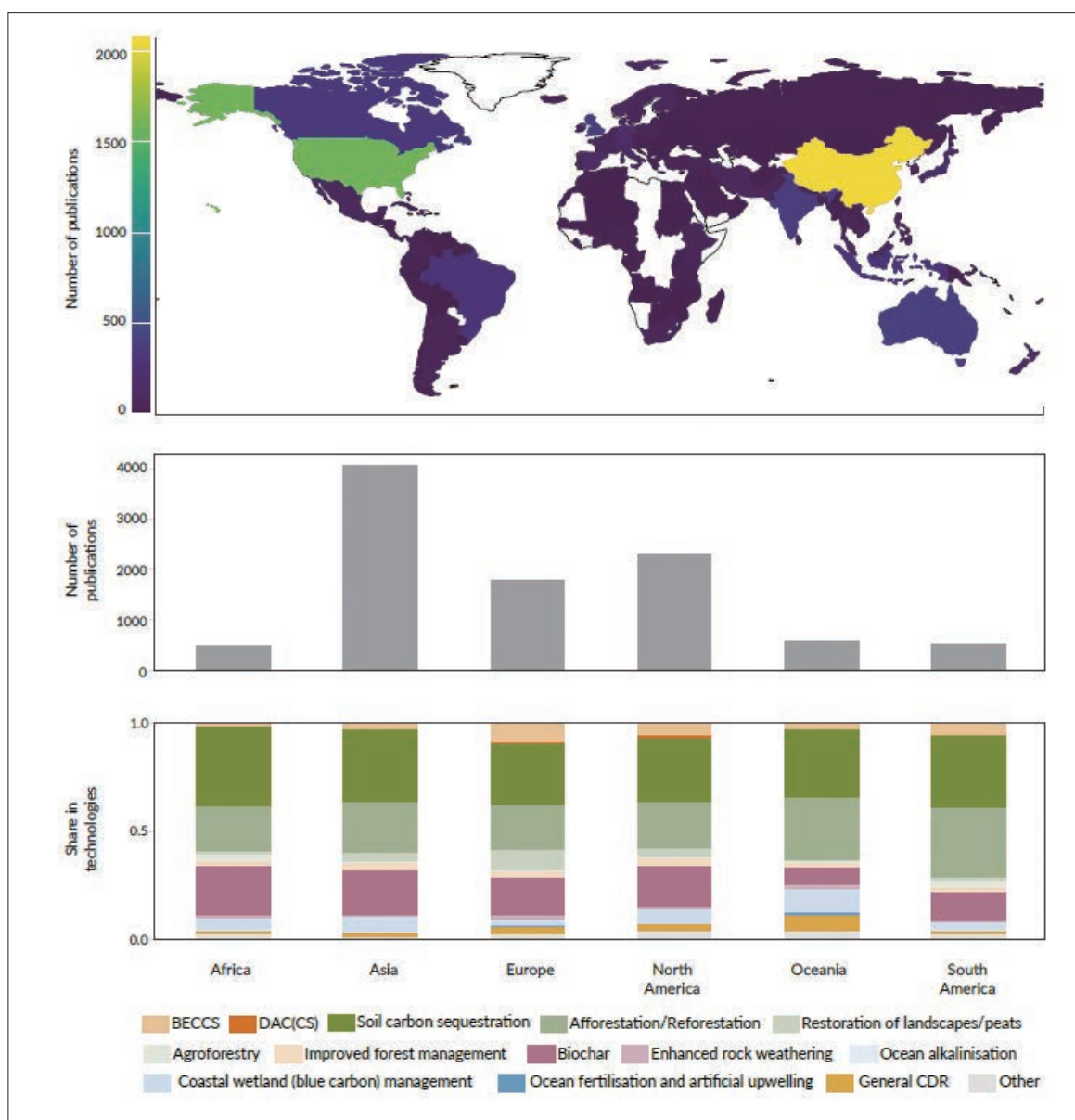
付図2-6 二酸化炭素除去（CDR）に関する科学文献の指数関数的増加¹⁸

Web of Science および Scopus における 1990 年～ 2021 年までの年間の CO₂ 除去技術に関する文献数推移（上図）。これらの文献でカバーされている CO₂ 除去手法の 1 年当たりの割合（中央図）。気候変動に関する政府の各評価報告書（AR）期間中に発表された文献で取り上げられた CO₂ 除去手法の割合（下図）。

2014 年から 2021 年にかけて CO₂ 除去技術について出版された約 28,000 件の研究論文のうち、バイオ炭に関する文献は、そのうち約 40% を占める。土壌炭素隔離は 26%、植林/森林再生は 12% を占めている。一方で BECCS に関する文献は CO₂ 除去手法全体の約 5% しかなく、ブルーカーボンに関しては 3% に留まっている。CO₂ 除去手法の中でも近年注目を集めている DACCS に関する論文数も 2% 程度であり、泥炭地や湿地の再生、海洋肥沃化、海洋アルカリ化などの手法に関する論文も大きなシェアを占めていない状況である。

2000 年前後のバイオ炭に関する研究論文は CO₂ 除去技術全体の論文のうち 3～5% に過ぎなかったが、その後急速にシェアが増加している。

CO₂ 除去技術に関する論文が扱っているフィールドは地理的に偏在しており、地域が特定できた論文のうち 40% 以上がアジアを対象としたものである。次いで北米が 24%、ヨーロッパが約 18% を占める。南米、オセアニア、およびアフリカに焦点を当てた論文は少なく、5-6% のシェアに留まる。



付図 2-7 場所に基づく二酸化炭素除去研究の分布は、世界の地域間で不均等¹⁸

アブストラクトまたはタイトルで地理的位置に言及している CO₂ 除去技術に関する論文数を、国（上）および地域（中）別に示す。それぞれの地域ごとに扱っている CO₂ 除去手法の割合は下図。

また、著者の国籍や所属をみるとアジア、特に中国が中心となっている。CO₂ 除去技術に関する論文全体の中で中国の研究者が責任著者である論文は約 8,900 報、次いで米国 2,600 報、オーストラリア 1,200 報と続く。

付録3 専門用語説明

- CDR (Carbon Dioxide Removal) : 二酸化炭素除去技術。温暖化対策の一環として注目されている。
- ネガティブエミッション技術 : 大気中のCO₂を人為的に回収・吸収することにより、貯留もしくは固定する技術。CDRに資する技術である。
- 土壌炭素隔離 : 土壌に二酸化炭素を貯蔵することで、二酸化炭素の大気中への排出を防ぐこと。
- アグロフォレスティ : 農業 (Agriculture) と林業 (Forestry) を組み合わせたもの。
- DACCS (Direct Air Capture Carbon dioxide Capture and Storage) : 直接空気回収 (DAC) によって、二酸化炭素を地層の深い部分へ埋める (CCS) 技術。
- BECCS (BioEnergy with Carbon Capture and Storage) : バイオマス燃料の燃焼排ガス (BioEnergy) に対し、CCSを行う。
- ブルーカーボン : 海洋生態系に隔離・貯留される炭素。2009年10月に国連環境計画 (UNEP) の報告書において示された用語であり、吸収源対策の新しい選択肢として提示された。
- 海洋施肥 : 植物の栄養素を海洋表層に意図的に導入することにより、海洋から二酸化炭素を除去するための技術。

謝辞

本戦略プロポーザル作成にあたり、ヒアリングや現地調査にご協力をいただいた大学、研究機関、企業の方々、ならびに、ワークショップにご参加いただきました皆様に、心より感謝申し上げます。

作成メンバー

統括責任者	佐藤 順一	上席フェロー	(研究開発戦略センター (CRDS) 環境・エネルギーユニット)
リーダー	徳永 友花	フェロー	(CRDS 環境・エネルギーユニット)
メンバー	上野 伸子	フェロー	(CRDS 環境・エネルギーユニット/連携担当)
	尾山 宏次	フェロー	(CRDS 環境・エネルギーユニット)
	河原崎 里子	研究員	(低炭素社会戦略センター (LCS))
	菊池 邦生	主幹	(未来創造研究開発推進部)
	菊地 乃依瑠	フェロー	(CRDS 科学技術イノベーション政策ユニット)
	桑原 明日香	フェロー	(CRDS ライフサイエンス・臨床医学ユニット)
	関根 泰	フェロー/教授	(CRDS 環境・エネルギーユニット/早稲田大学)
	中村 亮二	フェロー	(CRDS 環境・エネルギーユニット)
	西田 勇一	主任専門員	(研究プロジェクト推進部)
	用貝 広幸	フェロー	(CRDS ライフサイエンス・臨床医学ユニット)
	吉田 修一郎	特任フェロー/教授	(CRDS 環境・エネルギーユニット/東京大学)
	吉田 有希	主査	(CRDS* 企画運営室/人社基盤グループ)
	池元 英樹**	学術研究員	(九州大学)

*2022 年 9 月まで

**PM 研修生として

戦略プロポーザル

CRDS-FY2022-SP-08

バイオマス・ネガティブエミッション技術の 実用化加速基盤研究

STRATEGIC PROPOSAL

Paving the way to deliver nature based negative emission via deciphering carbon cycle

令和 5 年 3 月 March 2023

ISBN 978-4-88890-836-8

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

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



CRDS

<https://www.jst.go.jp/crds/>