

【ムーンショット目標4】

「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」

研究開発構想

令和2年2月

令和4年4月一部改正

経済産業省

1. ムーンショット目標

経済産業省は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）を研究推進法人として、ムーンショット目標（令和2年1月23日総合科学技術・イノベーション会議決定）のうち、以下の目標の達成に向けて研究開発に取り組む。

＜ムーンショット目標＞

「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」

具体的には、地球環境再生に向け、持続可能な資源循環の実現による、地球温暖化問題の解決（クールアース）及び環境汚染問題の解決（クリーンアース）を目指し、2050年までに、資源循環技術を用いた商業規模のプラントや製品を世界的に普及させる。

○クールアース

2030年までに、温室効果ガスに係る循環技術を開発し、ライフサイクルアセスメント（LCA）の観点からも有効であることをパイロット規模で確認する。

○クリーンアース

2030年までに、環境汚染物質を有益な資源に変換又は無害化する技術を開発し、パイロット規模または試作品レベルで有効であることを確認する。

2. 関連する政府方針

（1）「革新的環境イノベーション戦略」

- ①政府は、気候変動問題に規制ではなくビジネスベースで対応する「環境と成長の好循環」を提唱した「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（令和元年6月11日閣議決定）及び「統合イノベーション戦略2019」（令和元年6月21日閣議決定）に基づき、我が国が強みを有するエネルギー・環境分野において革新的なイノベーションを創出し、社会実装可能なコストを実現の上、これを世界に広めていくことで、温室効果ガス（GHG）

Green House Gas) の国内での大幅削減とともに、世界全体での排出削減に最大限貢献することを目的とした革新的環境イノベーション戦略を 2020 年 1 月に策定した。

- ②今後 GHG の排出が増大していくことが見込まれる新興国で、パリ協定の目標に向けて必要な投資を実行していくための最大の課題は、このコストをいかに引き下げていくかであるとし、非連続なイノベーションにより社会実装可能なコストを可能な限り早期に実現することが、世界全体での GHG の排出削減には決定的に重要であることが示された。

(2) 「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」

- ①2020 年 10 月、日本は、「2050 年カーボンニュートラル」を宣言した。また、2021 年 4 月には、2030 年度の新たな温室効果ガス削減目標として、2013 年度から 46%削減することを目指し、さらに 50%の高みに向けて挑戦を続けるとの新たな方針も示された。
- ②2021 年 10 月 22 日に閣議決定された「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」(以下、「長期戦略」という。)においては、我が国の長期的なビジョンとして、2050 年を見据えた様々な技術開発・イノベーションの成否を現時点で正確に予測することは困難であり、2050 年に向けては、カーボンニュートラルという野心的な目標を掲げつつ、常に最新の情報に基づき施策、技術開発等の重点を決めていくことが求められる。2030 年度の新たな削減目標や 2050 年カーボンニュートラルという野心的な目標の実現を目指し、あらゆる可能性を排除せず、使える技術は全て使うとの発想に立つことが重要であることが示された。また、ビジネス主導の国際展開・国際協力においては、2050 年を見据え、長期に渡るストック型の排出源となる建築物の脱炭素化及びネガティブエミッション技術の普及も念頭におくことが明記された。

(3) 「海洋プラスチックごみ対策アクションプラン」

- ①プラスチックは軽量かつ丈夫であり加工性に優れるといった特性を持ち、日常生活に利便性等をもたらす素材としてこれまで幅広く活用されてきた。一方で、新興国の経済発展と世界的な生産量の増加に伴い、近年、プラスチックごみによる海洋汚染が問題視されるようになっており、地球規模の海洋プラスチックごみ問題に対する世界的な関心の高まりを背景に、2019 年 3 月の国連環境総会では「海洋プラスチックごみ及びマイクロプラスチック」に関する決議等が採択された。海洋プラスチックごみ及びマイ

クロプラスチックに対処するための科学的・技術的知見の集積、ワンウェイ（シングルユース）のプラスチックの排出削減や産学官連携による代替素材の開発に向けたイノベーションの促進強化等、国際的な取組が求められることとなってきた。

- ②こうした中で我が国は、「海洋プラスチックごみ対策アクションプラン」（令和元年5月31日閣議決定。以下、「海プラ対策アクションプラン」という）及び「海洋生分解性プラスチック開発・導入普及ロードマップ」（令和元年5月7日経済産業省。以下、「海洋生分解性プラ開発・普及ロードマップ」という）を策定している。
- ③海プラ対策アクションプランでは、経済活動の制約ではなくイノベーションを通じた環境と成長の好循環の創出という考えの下、プラスチックを有効利用することを前提としつつ、新たな汚染を生み出さない世界の実現を目指している。例えば、海洋流出しても影響の少ない素材（海洋生分解性プラスチック、紙等）の開発やこうした素材への転換など、イノベーションを促進していき、世界的に海洋プラスチックごみ対策を進めていくための基盤となるものとして、海洋プラスチックごみの実態把握や科学的知見の充実にも取り組むこと等が示されている。また、海洋生分解性プラ開発・普及ロードマップにおいては、実用化技術の社会実装、複合素材の技術開発による多用途化、革新的素材の研究開発の3段階が示されている。

（４）政府方針から導かれる方向性

ムーンショット目標である「2050年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」（以下、「MS目標」という。）のうち、クールアースは長期戦略の目標と方向性を同一にしており、当該目標の達成を目指すムーンショット型研究開発事業においては、パリ協定に基づく目標の達成に寄与することが求められる。

2050年カーボンニュートラルを達成するためには、どうしても避けられないGHG排出を安価かつ大量に回収・吸収し、その後貯留するネガティブエミッション技術など、脱炭素に向けた破壊的イノベーション創出が不可欠である。クールアースの実現のため、GHG回収・吸収（ネガティブエミッションのコア技術）から回収・吸収後の利活用までを含めた循環システムの構築に向けた研究開発の強化が必要。その評価は循環システム全体で検討が必要であり、当初からシステム全体を想定した技術開発が必要である。

また、MS目標のうち、クリーンアースの実現に向けて、海洋プラスチックごみ対策に関しては、さらなるプラスチックの回収・再利用など従来の

リサイクル技術や市民による取組の強化が有効であるが、こうした取組を超える部分、具体的には回収が困難な場合を想定した素材の開発が重要かつ必要となる。

3. 研究開発の方向性

ムーンショット国際シンポジウム（令和元年12月17、18日開催）^[1]及びグリーンイノベーション戦略推進会議・ワーキンググループ^[2]での議論を踏まえ、現時点での研究開発の方向性を以下のとおりとする。

（1）挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域

クールアース・クリーンアースに貢献するいくつかの技術を、マトリックスで図1にマッピングする。

横軸は、循環する資源の状態を濃度が高いか低いか、または回収が容易か困難かで示している。マトリックスの左側は、対象物質が広く拡散されているか希薄な状態であるため、現在はその回収が難しいものを対象とした技術である。その課題を解決して地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現するためには、主に二つの方法が挙げられる。一つは対象物質を回収し有益な資源に変換する方法であり、もう一つは対象物質を分解または無害化する方法である。

縦軸は現在の技術開発の進捗度を表している。下側は、現在はまだ開発が初期段階で社会実装には道のりが遠いことを示している。従って、マトリックスの左下がムーンショット型研究開発事業において推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域である。

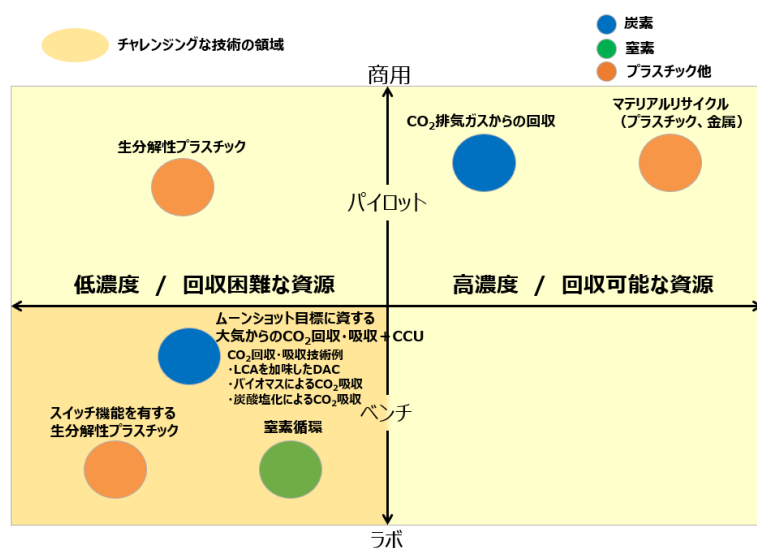


図1 クールアース・クリーンアースのテクノロジーマップ

（２）目標達成に当たっての研究課題

ムーンショット型研究開発事業においては、図１の左下に位置する部分を推進すべき挑戦的な研究開発の分野・領域として定め、以下の点に留意して研究開発を進める。なお、最も効率的かつ効果的な手段を取り得るよう、国内外の最新の科学的動向を調査し、研究開発に活かす。研究開発に当たっては、国内外の様々な知見やアイデアを念頭に、海外有識者の定期的なレビューを実施する。また、ステージゲートを設けて評価をすることで、目標の達成に向けた研究開発を推進することとする。

また、研究成果を円滑に社会実装する観点から、倫理的・法制度的・社会的課題について様々な分野の研究者が参画できるような体制を検討することとし、幅広い技術分野・適応エリアにまたがる技術については、産学官の連携はもとより、海外研究機関との連携を促していく。

<クールアース>

- ・MS 目標である地球環境の再生に貢献する技術開発であり、現在実施中のプロジェクト（NEDO 先導研究プログラムを除く）で取り組まれていない挑戦的な課題であること。
- ・GHG の回収・吸収技術及び回収・吸収した GHG の利活用技術の高度化とともに、不確実性・課題（コスト・ポテンシャル・環境負荷・社会的受容性・LCA 等）を適切に評価・分析するための技術開発・データ収集が必要である。また、回収した GHG の利活用やエネルギー源を含めたシステム全体での評価を伴う研究開発であることが必要である。

CO₂対策については、CO₂回収・吸収技術（ネガティブエミッションのコア技術（後述の図６参照））を中心とした研究開発が重要である。ネガティブエミッションのコア技術として、DAC は自然環境に対して影響がない技術的な経路であり、重要な技術である。また、自然プロセスを人為的に加速した CO₂回収・吸収技術については、削減コストや削減ポテンシャルの不確実性が DAC に比べて大きく、また削減効果の確認が必要な技術がある。そのため、その不確実性・課題を適切に評価・分析するための技術開発・データ収集を行い、技術を見極めることが重要である。

（CO₂回収・吸収技術（ネガティブエミッションのコア技術）例）

○DAC：大気中の CO₂ を直接回収する技術。

○バイオマスによる CO₂ 吸収：大量 CO₂ 吸収が可能な植物等（樹木・草類（革新的バイオマス）、海藻・海草類（ブルーカーボン）等）による CO₂ の吸収を人為的に加速させる技術。

○炭酸塩化による CO₂ 吸収：玄武岩などの岩石を粉砕・散布し、風化を人

為的に加速させる技術（風化促進）等。

- ・また、GHG 削減の視点から CO₂ の他にも温暖化係数が大きく、排出量が多い N₂O 等を対象とした研究開発が考えられる。
- ・システム全体を想定し、コスト、エネルギー収支を考慮して、開発課題における KPI を設定すること。

<クリーンアース>

- ・MS 目標である地球環境の再生に貢献する技術開発であり、現在実施中のプロジェクト（NEDO 先導研究プログラムを除く）で取り組まれていない挑戦的な課題であること。
- ・一例として、海洋生分解性プラスチックが挙げられる。海洋生分解性プラスチック・普及ロードマップを踏まえ、海洋生分解性を備え、多様な用途に利用されているプラスチックと比較し同等又はそれ以上の性能を持つ新素材の開発が対象となる。その際、現状実現できていない機能（生分解のタイミングをコントロールする機能、多様な海洋環境でも適切に分解する機能、分解による中間生成物も含めた生物への安全性等）を付加すること。

（３）目標達成に向けた研究開発の方向性

○2030 年（アウトプット目標）

<クールアース>

温室効果ガスに係る循環技術を開発し、ライフサイクルアセスメント（LCA）の観点からも有効であることをパイロット規模で確認する。

<クリーンアース>

環境汚染物質を有益な資源に変換又は無害化する技術を開発し、パイロット規模又は試作品レベルで有効であることを確認する。

○2050 年（アウトカム目標）

<クールアース・クリーンアース>

地球環境を再生させる持続的な資源循環技術を実現する。これは即ち、資源循環技術を用いた商業規模のプラントや製品が世界的に普及することを意味する。

2050 年における資源循環を大規模に実行するためには、実証設備やパイロット設備の設立、各段階における次に必要となる技術開発課題の解決を経て、大規

模設備の普及期間を確保する必要がある。従って、2030 年時点における目標は、パイロット規模や試作品レベルでの技術の確立となる。図 2 は、2030 年、2040 年、2050 年及びそれ以降のムーンショットプロジェクトを通じて実現すべきスケジュールを示す。

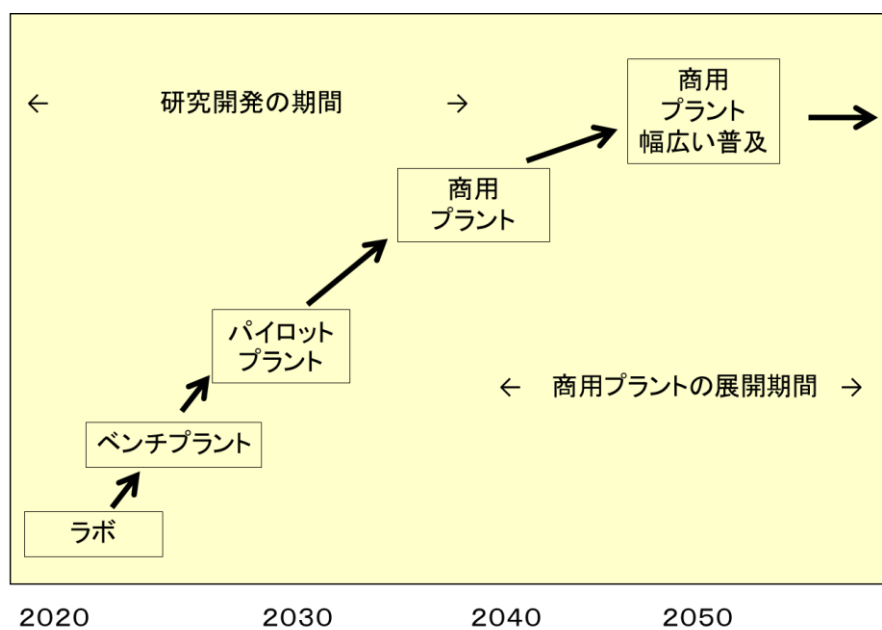


図 2 MS 目標達成に向けた計画

＜参考：目標達成に向けた分析＞

ムーンショット国際シンポジウム の Initiative Report において分析された内容とグリーンイノベーション戦略推進会議・ワーキンググループでの議論を、要約して以下に示す。

1. クールアース

(1) 現状

地球温暖化の要因である温室効果ガスと呼ばれるガスは多数ある。報告対象となっている主要な7つの温室効果ガスを表1に示す。

良く知られているように、CO₂ が温暖化に最も影響を及ぼしているが、CH₄ や N₂O も一定の影響がある。

表 1 7種の主要温室効果ガスの特性

		排出量:V 億t/年・世界	温暖化係数:K (CO ₂ =1) [2]	温暖化影響度 =V×K
① CO ₂		350	1	350
② CH ₄		3	28	63
③ N ₂ O		0.1	265	31
④ フッ素 化合物	HFCs	0.1>	12,400>	-
	PFCs	0.1>	11,100>	-
	SF ₆	0.1>	23,500	-
	NF ₃	0.1>	16,100	-

図3、4、5は、温室効果ガスの年間排出量の推移、温室効果ガスの大気中濃度の推移、気温上昇の状況を示したものである。気温は一貫して上昇を続けており、そのスピードは、概ね10年で0.1℃程度である。

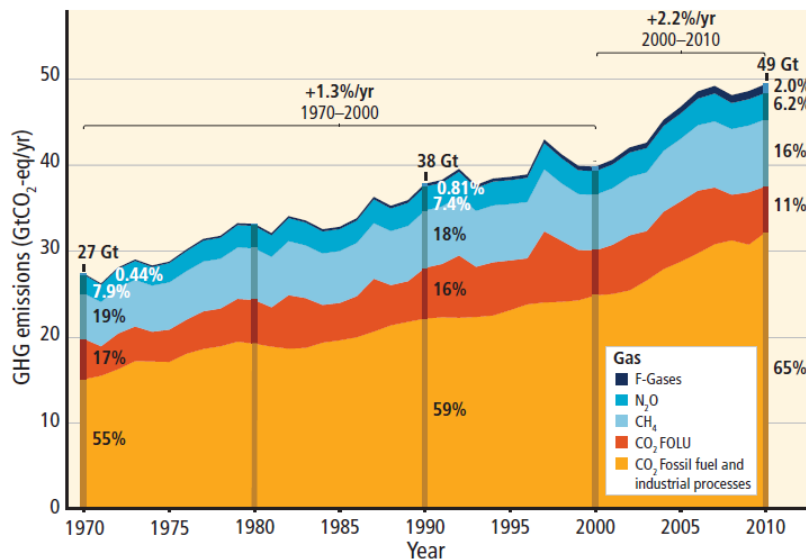


図3 温室効果ガス排出状況 [3]

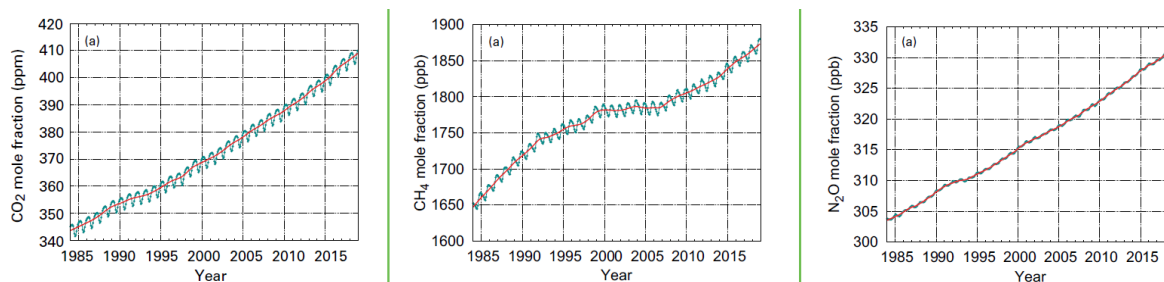


図4 温室効果ガスの大気中濃度 [4]

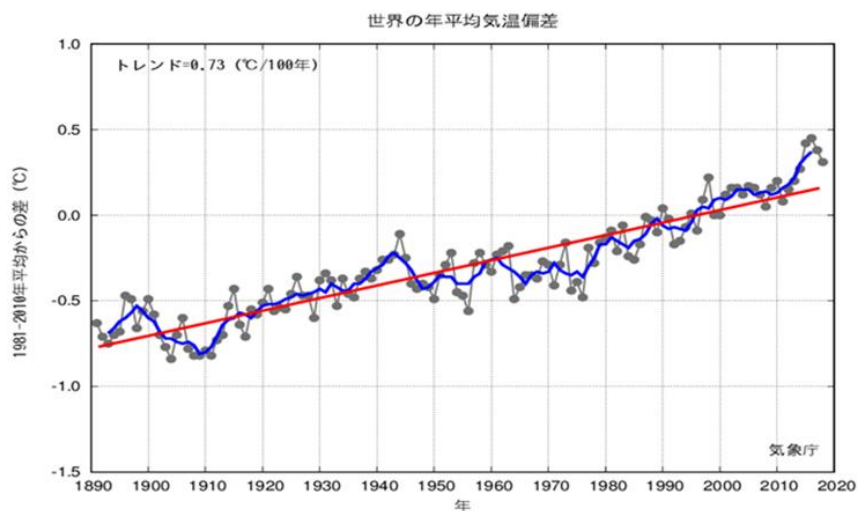


図5 気温上昇の状況 [5]

(2) 対策

それぞれの温室効果ガスに対する対策を以下に述べる。2050 年カーボンニュートラル達成のためには、CO₂ 対策とともに温室効果ガス全体の約 24%を占める CO₂ 以外の温室効果ガスに対する対策も必要である。

① CO₂

地球温暖化に最も影響を及ぼしている CO₂ の回収・吸収から利用に至るまでのフローチャートを図 6 に示す。

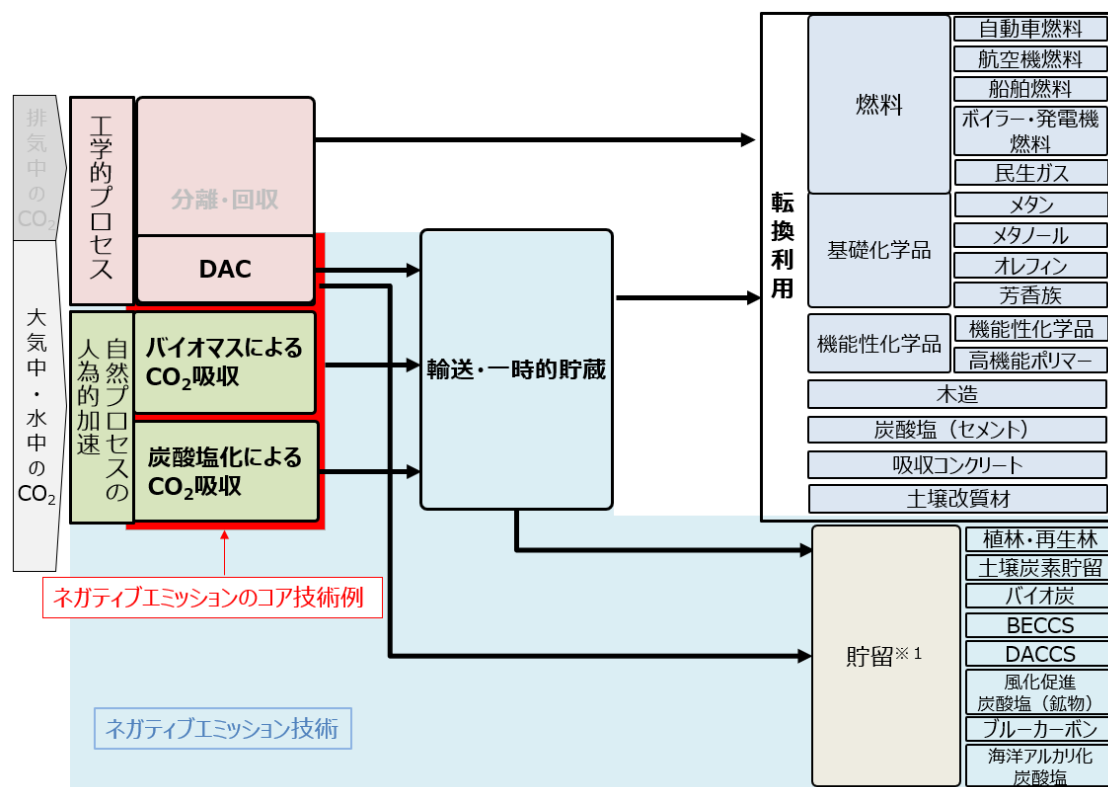


図 6 CO₂ の回収・吸収から利用までのフローチャート[6]

高濃度 CO₂ を含有する燃料燃焼の排ガスの回収は、既に吸収・吸着・膜分離などの技術によって行われている。

一方で、大気中の CO₂ はその濃度が 400ppm と薄いため、大気からの CO₂ 回収に関しては、いくつかの研究開発が行われ始めた段階である。

回収された CO₂ は、地下に貯留（CCS）する、あるいは燃料や様々な化学品に転換合成（CCU）する。CO₂ が燃料に転換され燃焼されれば（化石）燃料の消費が循環によって削減される。化学品に転換合成された様々な化学品が市場に投入されれば、従来の化石資源の原料消費も減る。現時点で商業化されたものも存在するが、多くの CCU は研究開発段階であり、更に推進されるべき領域である。

ICEF ロードマップにおいては、CO₂ 除去 (CDR, Carbon Dioxide Removal) 要約表 (表 2) がまとめられた^[7]。Initiative Report では、この要約表を例示し、これらの技術の中で、DAC は自然環境に対して影響がない技術的な経路であり、また、DAC 以外の他の手法は、いずれも自然環境に対して何らかの不安定あるいは予期せぬ結果を招き得ると分析された。それ故、DAC は技術開発の対象として選択されるべき重要な技術である。

表 2 CO₂ 除去 (CDR, Carbon Dioxide Removal) 技術の要約表

		 Cost	 Energy Requirements	 Land Use	 Water Consumption	 Risk of Reversal	 Verifiability	 Implement Readiness
 NATURAL	Reforestation & Enhanced Forest Management							
	Wetland & Coastal Restoration							
	Soil Carbon Restoration							
 TECHNOLOGICAL	DACS							
	Terrestrial Enhanced Weathering							
	Ocean Alkalinity Modification							
 HYBRID	Hybrid Bioenergy with CCS (BECCS)							
	Bioenergy with Biochar Sequestration (BEBCS)							

LEGEND  Generally Acceptable/ Available  Exercise Caution  Potentially Unacceptable/ Unavailable

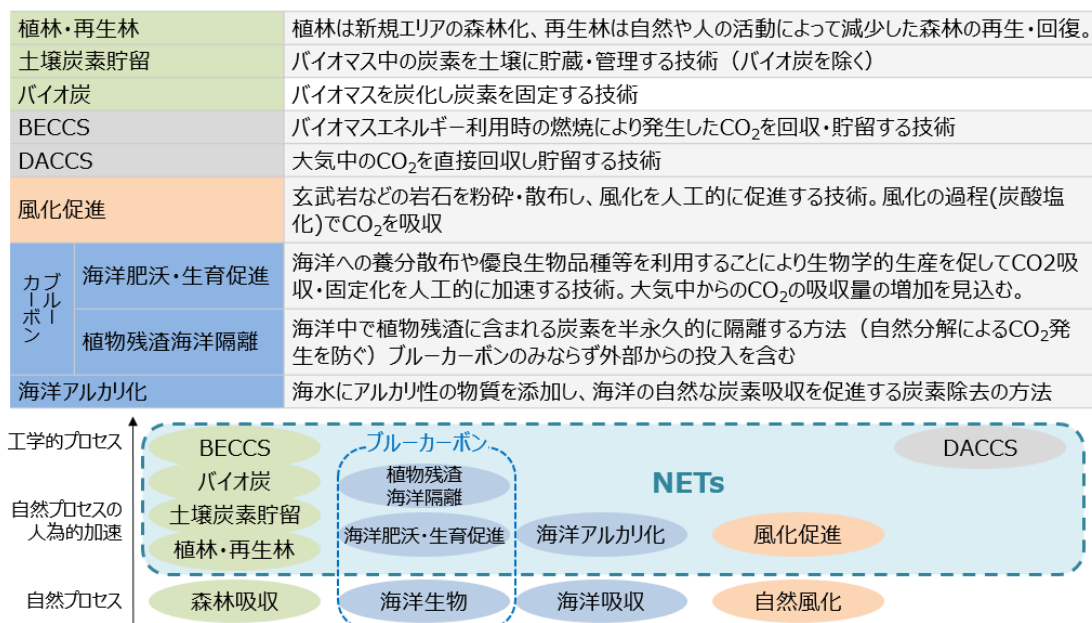


図7 ネガティブエミッション技術の定義[8]

グリーンイノベーション戦略推進会議・ワーキンググループでは、ネガティブエミッション技術について、図7のように定義が示され議論された。ネガティブエミッション技術は大気中のCO₂を回収・吸収し、貯留することで大気中のCO₂除去(CDR, Carbon Dioxide Removal)に資する技術である。これらの例の中で、DACCSとBECCSは削減効果の検証が容易である工学的プロセスを用いた技術である。ネガティブエミッション技術の中でDACCSとBECCSは重要な位置づけにある。DACCSやBECCS以外の他の手法は、いずれも自然プロセスを組み合わせた技術であり、自然環境に対して何らかの不安定あるいは予期せぬ結果を招き得る。

表3は各種情報を元にまとめたネガティブエミッション技術の比較を示している。削減コストや削減ポテンシャルには、データ数の不足や地域性等の不確実性から現時点では大きな幅を持っている。また、削減効果の確認が必要な技術がある。その不確実性・課題を適切に評価・分析するための技術開発・データ収集を行い、技術を見極めることが重要である。幅広い技術分野・適応エリアにまたがる技術については、産学官の連携はもとより、海外研究機関との連携も図っていくことが重要である。

表3 ネガティブエミッション技術の特徴と技術ポテンシャル [8]

分類	TRL	削減コスト \$/tCO ₂ *1		削減ポテンシャル GtCO ₂ /年 *2		土地利用 *3 m ² /tCO ₂ /年	削減効果 の確認 *4	日本での実 施の優劣 *5
海洋アルカリ化	3	305	10~600	11.0	2~20	0	要	○
海洋肥沃化	3	67	23~111	4.4	2.6~6.2	0	要	○
植物残渣海洋隔離	2	72	50~94	0.9	0.7~1	0	済	○
風化促進	4	128	50~200	3.0	2~4	29	要	○
DACCS	6	172	30~600	3.5	1~6	4	済	△
BECCS	7	135	60~200	5.6	0.5~15	379	済	△
植林・再生林	9	28	5~50	2.3	0.5~3.6	978	済	○
土壌炭素貯留	7	28	-45~100	4.1	0.4~8.6	0	要	○
バイオ炭	6	75	30~120	2.6	0.3~75	580	済	○
マテリアルとしての固定化 (DAC+炭酸塩化+土木・建築利用、木造建築、木質素材の循環利用)								

*1:2050 年想定 of CO₂ 削減コストの中央値

*2:2050 年の世界の削減ポテンシャルの中央値、陸上バイオ系は重複あり。

*3:年間 1 トンの CO₂ 削減に必要な面積、植林・再生林 978 は北海道全体(8.3 万 km²)で 0.85 億 tCO₂/年の削減に相当、PV は 10 程度(効率 18%, 稼働率 12%, 0.5kgCO₂/kWh の電力を代替の場合)

*4:CO₂ 削減効果が確認されコンセンサスを得ているか

*5:諸外国との比較で日本での実施の優劣、DACCS と BECCS は CCS が必須で CCS 適地の点で日本は劣後

2050 年カーボンニュートラルの達成に向けて、技術的な制約やコスト制約から、すべての CO₂ 排出を止めることはできず、一定量の CO₂ 排出は避けられない状況であり、ネガティブエミッション技術の早急な開発が期待される。ムーンショット目標である「2050 年までに、地球環境再生に向けた持続可能な資源循環を実現」に向けては、CO₂ を回収・吸収する技術（ネガティブエミッションのコア技術）を中心に、ネガティブエミッション技術への展開を念頭に置きつつ、ビジネス像を描くために CO₂ の回収・吸収のみでなく回収・吸収後の利活用までを含めた循環システムを考慮した研究開発が重要である。

＜ネガティブエミッションのコア技術例の開発方向性＞

(DAC)

DAC は、表 4、5 に示されるような技術開発が取り組まれている。いくつかの CO₂ 変換と利用に関する様々な研究開発が行われており、いくつかの実施もされている。^[9] しかしながらこれらは、まだ回収効率が低く、回収のためのエネルギー消費が多い。これらの課題の改善によって、DAC と CO₂ 利用は、普及を可能とするコストで実現されるべきであるし、効率を上げてエネルギー的にも LCA を満足するものにしなければならない。

表 4 DAC 技術開発の一例 [10][11][12]

対象	現状	技術例
DAC	ラボ ～ パイロット プラント	✓ CO₂をアルカリ液に吸収→炭酸塩固定化→焼成により高濃度CO₂回収 ✓ アミンを担持させたハニカムセラミックス吸着剤でCO₂を吸脱着させる ✓ 活性炭とK₂CO₃の吸着剤でCO₂を吸脱着させる

表 5 DAC パイロットプラントの特性 [7][11][13][14]

Company	Thermal energy/ tCO ₂ (GJ)	Power/ tCO ₂ (kWh)	Heat: Power ratio	Reference
Climeworks	9.0	450	5.6	Ishimoto 2017
Carbon Engineering	5.3	366	4.0	Keith 2018
Global Thermostat	4.4	160	7.6	Ishimoto 2017
APS 2011 NaOH case	6.1	194	8.7	APS 2011

(バイオマスによる CO₂ 吸収)

炭素吸収速度を速める植物などの革新的バイオマス研究が進められている。CO₂ 吸収の効果および環境影響評価が重要である。蓄積量の飽和に伴う適切な処理（利用・CCS・バイオ炭等）も重要であり、ゲノム編集技術の活用により、早生かつ CO₂ を大量吸収するとともに、利用を想定し、自由に機能を付与した植物の開発などの技術シーズがある。

UNEP においてブルーカーボンシンク（吸収源）とされるのは、マングローブ、塩性湿地、海草の 3 つである。海藻は現時点ではブルーカーボンシンク（吸収源）とされていないが、海外および日本において、ブルーカーボン吸収ポテンシャルは大型海藻がメインと考えられている。米国、豪州では生態系保全の観点からブルーカーボン分野の研究が積極的に行われ、インベントリへの算定や独自の評価手法開発にも着手。我が国においても、ブルーカーボン分野の CO₂ の貯留、環

境影響等の評価方法の確立が必要である。

(炭酸塩化による CO₂ 吸収)

炭酸塩化による CO₂ 吸収を利用する風化促進技術は、玄武岩などケイ酸塩を含む岩石を粉砕・散布し、千年～万年スケールの自然の風化を人工的に促進する技術である。玄武岩等の鉱物資源、実施場所としての耕作地・森林・海岸など、日本国内で要件が揃っている。

近年、海外での研究開発、実証試験が活発に行われている。日本においては、必要な地質、地球科学情報、かつ関連する技術分野の専門家は豊富であるが特化した研究は少ない。CO₂ 削減効果、環境影響(リスク評価)、モニタリング、シミュレーションなどの評価技術開発が必要である。

②CH₄

CH₄ は CO₂ の次に地球温暖化への影響が大きい。この CH₄ の主な排出源は、化石燃料の採掘時の随伴ガス、畜産、埋め立て地、廃棄物、農業などである。^[13] 天然ガス採掘時の随伴ガスについては、これを回収する試みが行われている。畜産については、一定量を占める牛の胃からの排出がある。こうした畜産からの排出に対する対策としてバイオ技術の利用可能性がある。埋立地廃棄物や農業に対してはバイオ技術の活用可能性はあるが、現時点では有効な解決策が見いだせてはいない。

③N₂O

N₂O の主な人為起源の排出源は、農業で用いられる窒素化学肥料を起源とするものである。(図 8) 世界人口の増加に応じて化学肥料は効率的な食糧生産に用いられており、植物による吸収量を超えて農地に散布されている。農地に残った過剰な肥料は、雨水や地下水によって農地から河川に流出し、その後湖沼や海域に広く流れ出る。N₂O の発生源は広範囲にわたるが、地球規模では CH₄ の発生源ほど薄く広くは拡散していない。それ故に、例えば、農地の化学肥料を起源とする湖底のような環境に排出された N₂O の発生を制御することで窒素に循環させる可能性もある。これらの技術開発はまだ実施されていないが、表 5 に示すような研究開発も行われている。

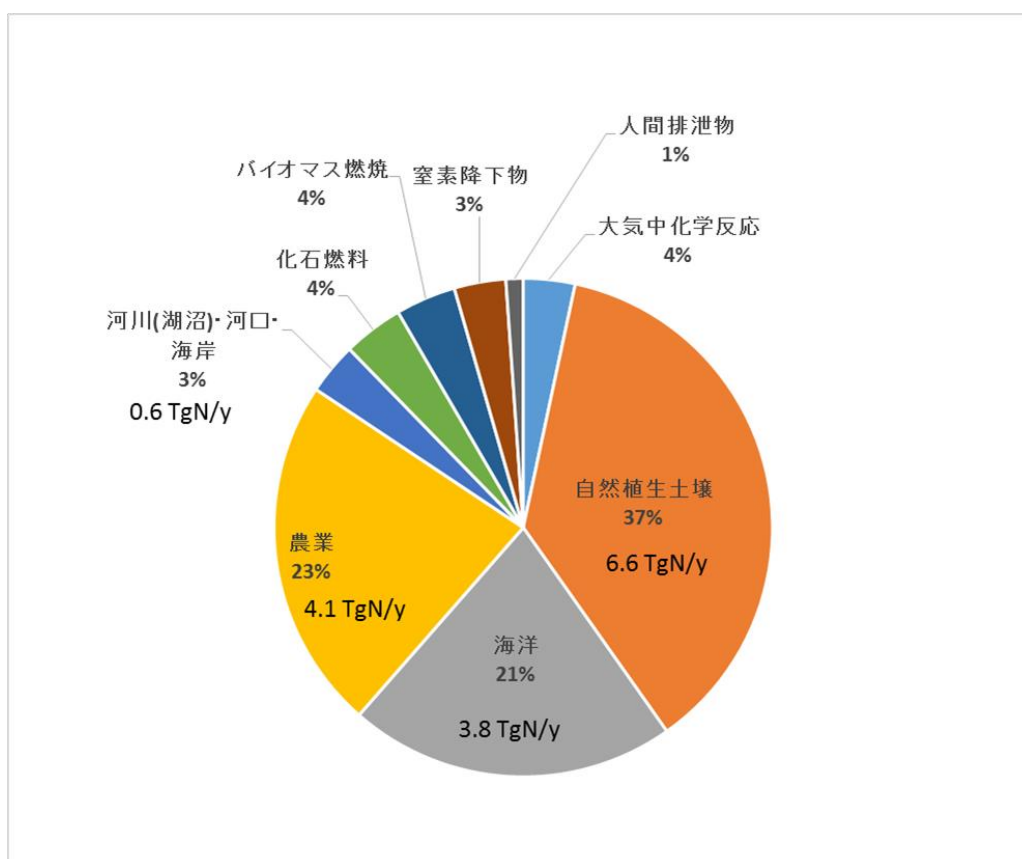


図 8. N₂O 発生源 [15]

表 5. N₂O 抑制技術開発の一例 [16][17][18][19]

対象	現状	技術例
N ₂ O	ラボ	✓ 天然酵素または人為改変酵素により、N₂OをN₂に還元 ✓ 触媒を通した化学反応により、N₂OをN₂に還元 ✓ 微生物を利用し、N₂OをN₂に還元 ✓ 吸着剤にNH₃とNO₃を吸着させ、N₂Oの発生を抑制

④フッ素化合物

7大温室効果ガスの中で、フッ素化合物は4種ある。これらフッ素化合物は温暖化係数が非常に大きい、(その絶対量が僅かであるため、)温暖化に対する影響は比較的小さい。これらのフッ素化合物は人為的に合成されるものであり、排出源は冷凍機の冷媒のようなものに限られる。これらの特性から、フッ素化合物は、大気に放出される前の適切な回収処理を行うことが合理的である。従って、法規制などによる管理が適切である。

2. クリーンアース

(1) 現状

日本の現状を見ると、排ガス（ NO_x 、 SO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ など）、廃水（油、窒素、リン、有機物等）、土壌汚染（メタル、有機汚染物質等）は法で規制されている。しかしながら、窒素化合物は、法規制下にあっても、一部が環境に流出している。これが、窒素が既にプラネタリーバウンダリーでハイリスク限界値を超えた理由の一つである。図9に示すとおり、化学肥料から生成された N_2O や、排ガス中の NO_x や産業排水に含まれる窒素化合物は、環境に流出している。

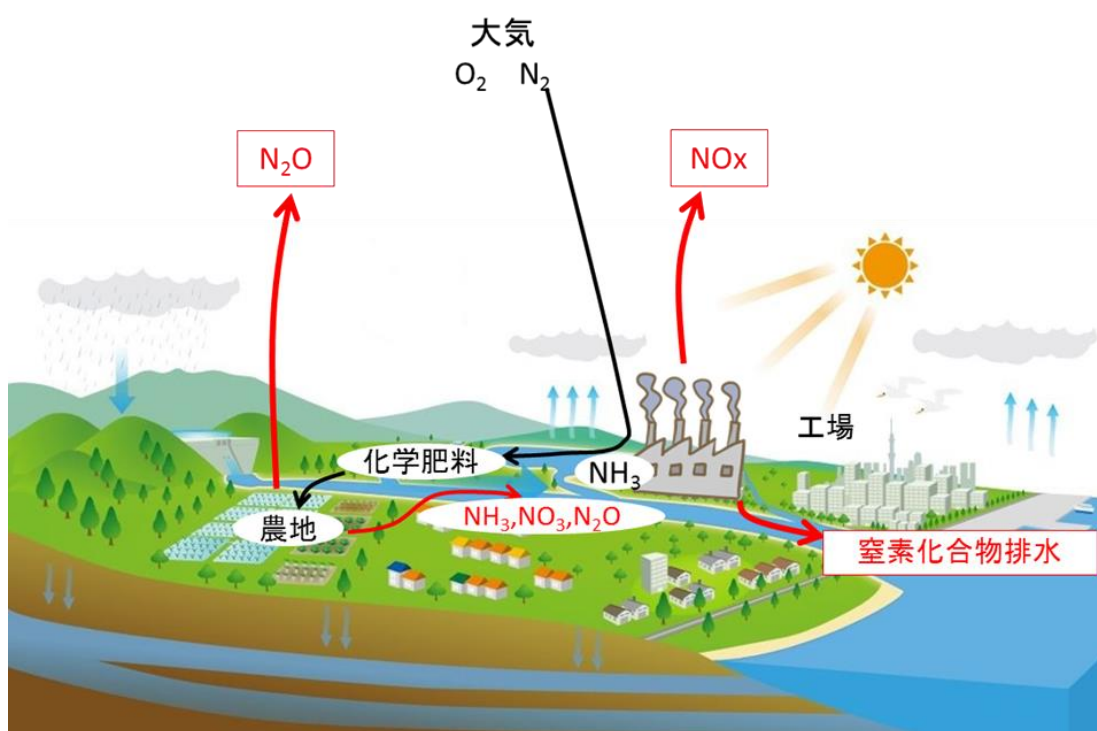


図9 窒素循環模式図

環境中に流出し、社会問題となっているものとして、プラスチックごみが挙げられる。日本のプラスチックの排出状況を図10に示す。

陸から海洋に流出するプラスチックごみは、世界的問題になっている。United Nations Environment Programme (UNEP)は、河川や土地からだけでも年間900万トンのプラスチックごみが海に流出すると推定している（表6）。絶滅危惧種も含め海の700種もの生物がプラスチック製品に絡まったり、意図せず摂取してしまうことによりダメージを受けていると言われており、食物連鎖等を通じた自然界への負の影響への懸念がある。海の豊かさを守ることは、持続可能な開発目標 (SDGs) の1つでもある。従って、この問題を解決する技術開発が求められる。

海洋プラスチックごみの削減のためには、リサイクルシステムを含む廃棄物管理が必要である。加えて、生分解性プラスチックの導入が効果的である。

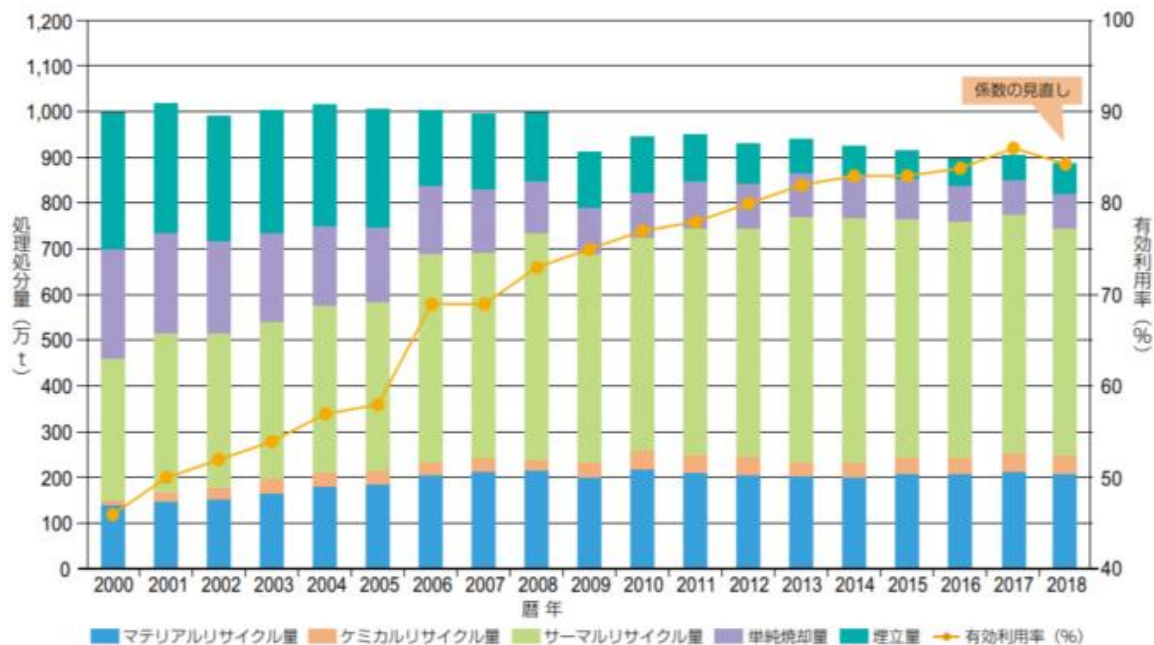


図 10. 日本におけるプラスチックごみ廃棄処理状況 [20]

表 6 海洋プラチックごみの流出状況 [21]

(千メートルトン/年)

発生源	生態系に入り込むプラスチックの 想定トン数
河川/土地からの流出、土地起源	9,000
直接投棄	1,500
釣り用具	640
船荷の紛失	600
自動車タイヤゴミ	270
産業粒子の流出	230
道路や建物の塗料	210
織物	190
化粧品	35
海洋塗料	16

(2) 対策

①窒素化合物

従来、排気ガス中の NO_x の多くはアンモニアにより脱硝される。残りの NO_x は低濃度で大気中に放出される。

産業界からの排水に含まれる窒素化合物も低濃度で排出されている。

NO_x や排水中の窒素化合物について、低濃度でも有効な循環技術が期待される。それは未だ研究段階のため、社会実装された例はない。可能性のある循環技術の例を表 7 に示す。

表 7 NO_x 排水中窒素化合物の回収利用研究開発の一例 [22] [23] [24] [25] [26] [27]

対象	現状	技術例
NO_x	ラボ	✓ 排ガス中の NO_x を、触媒を利用した化学反応により、アンモニアに転換 ✓ NO_x より化学反応により硝酸に転換
窒素化合物 (排水中)	ラボ	✓ 窒素有機物を触媒反応でアンモニアに変換 ✓ 窒素有機物を微生物を利用しアンモニアに変換

② 海洋プラスチックごみ

海洋プラスチックごみ対策の取組について、図 11 に生分解性プラスチックを使った資源フローを示す。一般的な難分解性プラスチックのすべてを生分解性プラスチックに置き換える必要はない。難分解性であっても適切な回収と処理がなされ、海洋に流出させない規制や管理が行われればよいからである。一方で、海洋への流出可能性が高い用途やそもそも河川・湖沼・海洋で使用する場合など、生分解性という性質が適する用途には優先して導入を図ることが必要である。

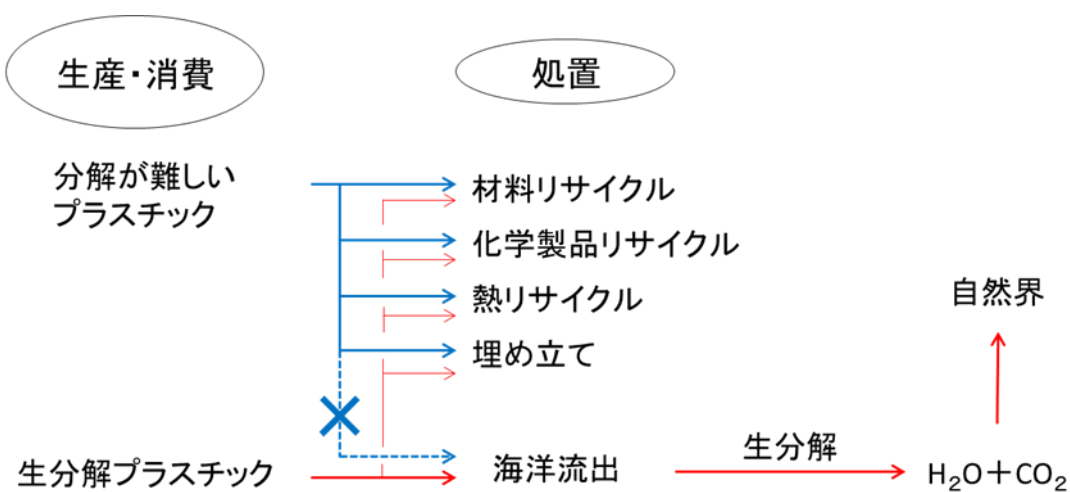


図 11 プラスチック資源のフロー

海洋生分解性プラスチックは、海洋で分解して CO₂、窒素及び酸素になることで環境に戻っていく、つまり、土、大気と海洋の大きな資源循環になる。

土壌中にいる微生物や酵素の量や種類と比べて、海中のそれは圧倒的に少ない。このために、土壌中よりも海中で分解するプラスチックの開発は難しい。そのような状況でも生分解性、プラスチックの無害化の研究開発は始まっているものの、海洋生分解性プラスチックの種類はまだ少ない。プラスチック製品は単体のプラスチックで製造されることもあるが、一般には、複数の種類のプラスチックのブレンドや、複層化することで必要な機能を満たしていることが多い。海洋生分解性を有するプラスチック種類を増やすことで様々な機能を発揮させることができれば、海洋生分解性プラスチックの適用範囲が拡張され、より広い用途に普及を促すことができることから、海洋生分解性を有するプラスチックを新たに開発することも必要である。また、プラスチック製品はプラスチック以外の有機物として添加剤、表面処理剤、顔料・塗料、接着剤等を使用しており、こうした原料についても海洋生分解性に留意した設計が必要である。

以下に既に商用化され市場に出ているプラスチックの例を示す。

- ・ポリ乳酸系
- ・脂肪酸ポリエステル系
- ・ポリビニルアルコール系

加えて、生分解の開始時期やスピードをコントロールする機能（スイッチ機能）を設計段階で追加する最新の取組も、近年開始された。

ここに、いわゆる目的別スイッチ機能を有した生分解性プラスチックの応用例がある。例えば、漁具は巻き取りなどの機械的に厳しい条件で取り扱われるが、網が損傷を受けると意図せず海洋流出することがある。こうした場合に、漁具として使用される間は生分解せずに製品としての機能を維持し、海洋に流出した後に分解が始まる機能を有していれば有益である。

これはまだ研究段階であり、社会実装の例はない。スイッチ機能を持つ生分解性プラスチックに関する研究開発の一例を、表 8 に示す。

表 8. スイッチ機能を有する生分解性プラスチックの開発一例 [27] [28] [29] [30]

対象	現状	技術例
スイッチ機能を有する生分解性プラスチック	ラボ	✓ 分解開始のポイントを制御する技術 - pHや塩濃度などの変化によって化学構造が変化することで分解開始 - 流出に伴う物理的刺激によって材料内の酵素が活性化することで分解開始 ✓ 分解のスピードを制御する技術 - 結晶化度や結晶厚を変えることで分解速度を制御するもの - バイオフィルムなど微生物による分解速度を制御するもの

<出典>

- [1] 内閣府ホームページ ムーンショット国際シンポジウム開催のお知らせ
<https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/20191018moonshot.html>
- [2] 経済産業省ホームページ グリーンイノベーション戦略推進会議 兼グリーンイノベーション戦略推進会議ワーキンググループ
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/index.html
- [3] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [4] WMO Greenhouse Gas Bulletin No 15
- [5] 気象庁ホームページ「世界の年平均気温」
(https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_wld.html)
- [6] グリーンイノベーション戦略推進会議・ワーキング NEDOTSC 発表資料 (2020) を元に一部追記・改変 (2022)
- [7] ICEF2018 ロードマップ: Direct Air Capture of Carbon Dioxide (2018)
- [8] グリーンイノベーション戦略推進会議・ワーキング NEDOTSC 発表資料 (2022) を一部修正
- [9] Direct Air Capture of Carbon Dioxide. David Sandalow, Julio Friedmann, Colin McCormick, and Sean McCoy (2019)
- [10] Sanz-Pérez et al., Chem. rev., 116, 19, 11840–11876, (2016)
- [11] Keith et al., Joule 2, 1573-1594, (August 15, 2018)
- [12] Li et al., ChemSusChem, 399–903, (2010)
- [13] Yuki Ishimoto et al. (2017) PUTTING COSTS OF DIRECT AIR CAPTURE IN CONTEXT
- [14] APS & POPA (2011) Direct Air Capture of CO₂ with Chemicals – A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs
- [15] Climate Change 2013: The Physical Science Basis, IPCC(2013)
- [16] Zhang et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 116(26), 12822–12827, (2019)
- [17] Hinokuma et al., Chem. Lett., 45, 179–181, (2016)
- [18] Akiyama et al., Scientific Reports 6:32869, (2016)
- [19] Jiang et al., RSC Adv., 60, 34573–34581, (2018)

- [20] 一般社団法人 プラスチック循環利用協会「2018 年 プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況」(2019)
- [21] Jenna R. Jambeck, Roland Geyer, Chris Wilcox, Theodore R. Siegler, Miriam Perryman, Anthony Andrady, Ramani Narayan, and Kara Lavender Law, “Plastic waste inputs from land into the ocean”, Science, vol. 347 Issue 6223, pp. 768–771, February (2015)
- [22] Nanba et al., Chem. Lett., 37(2008)710
- [23] Nanba et al., Catalysis Science & Technology., 9(2019)2898
- [24] 「NO_x の吸着・濃縮による 新規脱硝方法の提案と 濃縮 NO_x の水吸収による硝酸製造」安田昌弘、井上 隆（大阪府立大学）JST 新技術説明会資料（2014 年 1 月）
- [25] 北海道大学 大学院地球環境科学研究院 物質機能科学部門 機能材料化学分野 神谷裕一研究室ホームページ
https://www.ees.hokudai.ac.jp/ems/stuff/kamiya/index_En.html
- [26] CHUTIVISUT et al., Journal of Water and Environment Technology, Vol. 12, No. 4, (2014)
- [27] Nduko et al., BIOBASED MONOMERS, POLYMERS, AND MATERIALS, 1105, 213–235(2012)
- [28] Iwasaki et al., Biomacromolecules, 17, 2466 (2016)
- [29] Gan et al., Polymer, 172, p7–12(2019)
- [30] Morohoshi et al., Microbes and Environments, 33, 332–335, (2018)

改訂履歴

第1版 令和2年2月策定

第2版 令和4年3月改訂

改正箇所

2. 関連する政府方針

- (1) 革新的環境イノベーション戦略
- (2) 「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」
- (4) 政府方針から導かれる方向性

3. 研究開発の方向性

- (2) 目標達成に当たっての研究課題

＜参考：目標達成に向けた分析＞

- (2) 対策

①CO₂

改正のポイント

最新の政策動向の反映

- ✓ カーボンニュートラル宣言等の背景情報の追加
 - ① 2050年カーボンニュートラル及び2030年度46%という野心的目標を宣言。
 - ② 「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を2021年10月に閣議決定。
 - ③ 政府方針から導かれる方向性（＝ネガティブエミッション技術の重要性）。

● 研究開発の方向性の改正

- ✓ 技術開発の重点対象の拡充（DACに加えて、自然プロセスの人為的加速をしたCO₂回収・吸収技術も対象に追加）
- ✓ ネガティブエミッション技術の追記
- ✓ グリーンイノベーション戦略推進会議ワーキンググループにおけるネガティブエミッション技術関連の議論を踏まえた追記