

【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
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）「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」

①政府は、「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。以下、「長期戦略」という）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標としている。

- ②長期戦略では、世界の喫緊の課題である気候変動問題に、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」が提唱され、あわせて1.5℃努力目標を含むパリ協定の長期目標の実現に貢献することも明記された。長期戦略に示された目標を実現するため、我が国においては、2050年に向けて様々な実用化技術開発・実証事業を進めている。しかしながら、これを実現するためには、製品製造工程、エネルギー供給等から排出されるGHG排出抑制だけでは達成不可能であり、一旦、大気中にやむなく排出されたGHGを回収・無害化する技術が重要かつ必要となる。
- ③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）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。例えば、DAC（Direct Air Capture）による炭素循環、工業的な窒素循環などがMS目標を実現するものとして挙げられる。また、GHG排出、GHG排出コストの削減等は、GHG回収のみでなく回収後の利活用までを含めたシステム全体での削減の検討が必要であり、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。

（２）「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ている。
- 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]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資源循環技術を、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。

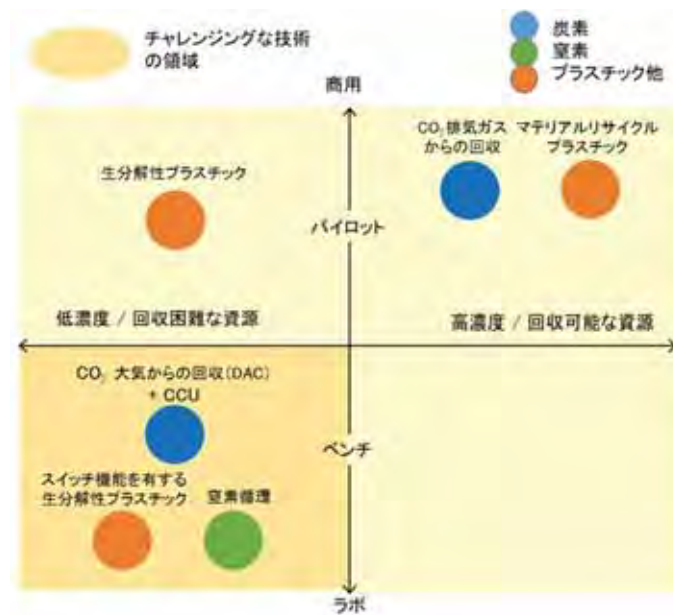


図1. クールアース・クリーンアースのテクノロジーマップ

(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、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、様々な知見やアイデアを採り入れ、ステージゲートを設けて評価をしながら、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する。

<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。
- ・一例として DAC が挙げられる。その際、回収した CO₂ の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。
- ・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、開発課題における目標を設定すること。

<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の開発・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。

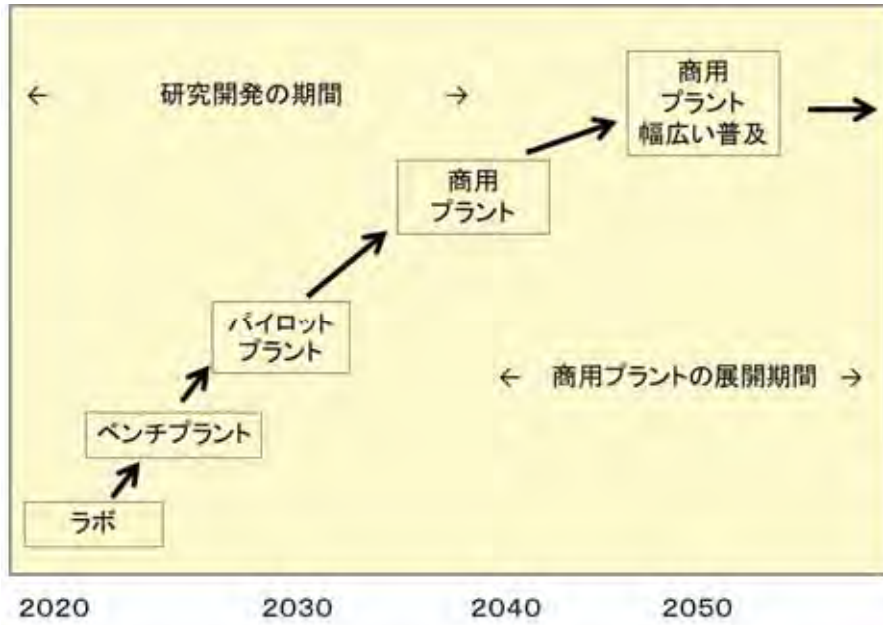


図 2. MS 目標達成に向けた計画

<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を、要約して以下に示す。

①クールアース

a) 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。

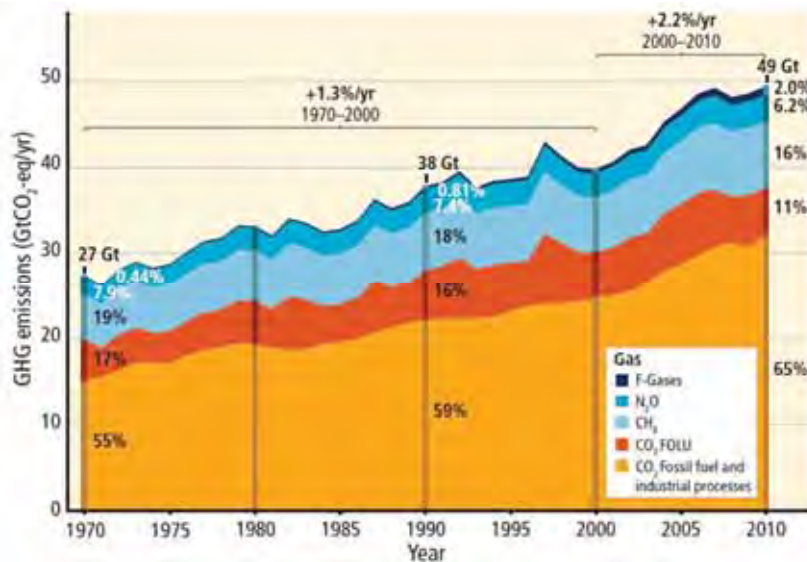


図3. 温室効果ガス排出状況 [2]

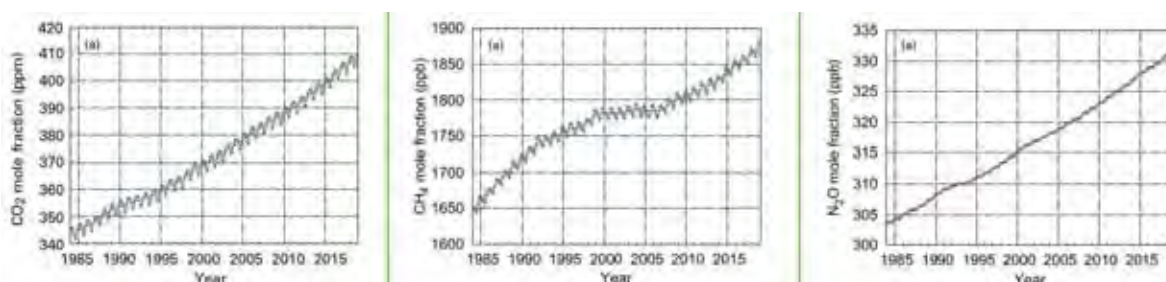


図4. 温室効果ガスの大気中濃度 [3]

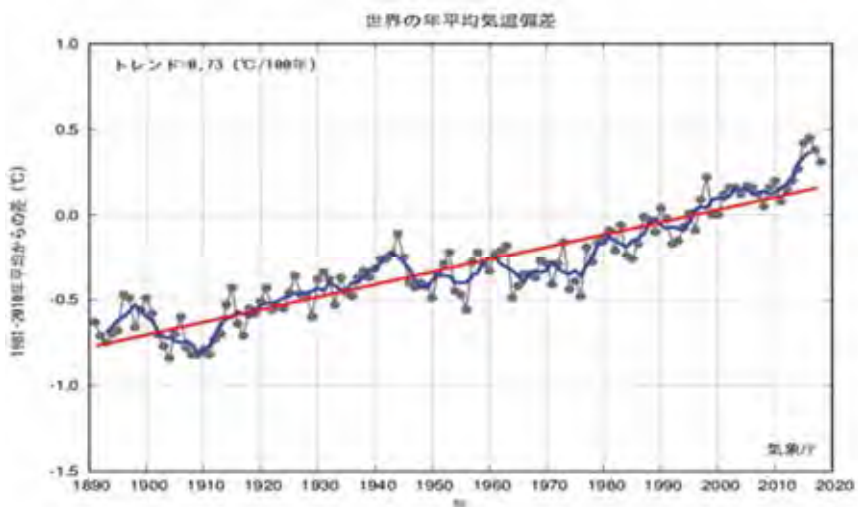


図5. 気温上昇の状況 [4]

b) 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。

○CO₂

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

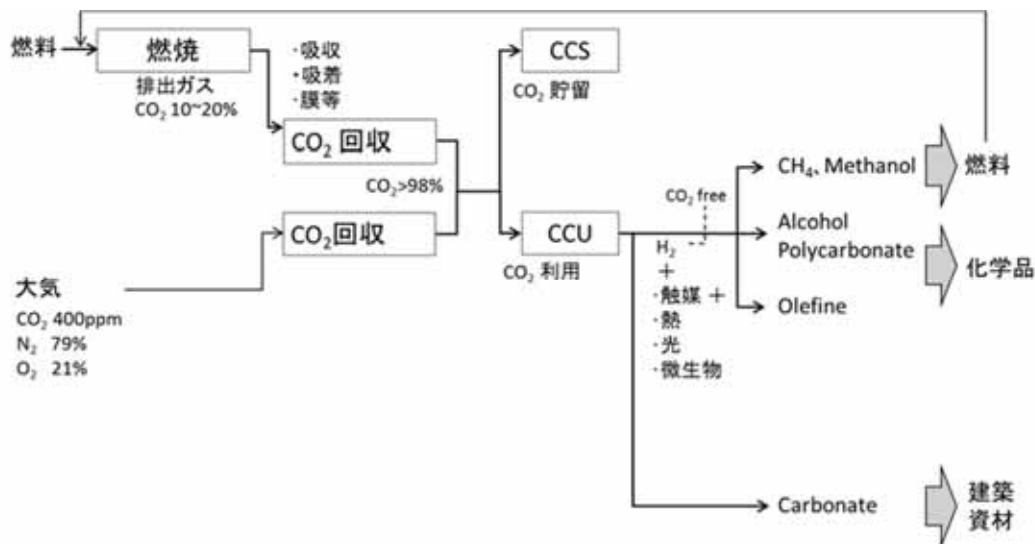


図6. CO₂ の回収・利用のフローチャート

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。

大気からの CO₂ の除去技術 (ネガティブエミッション技術) について、表 2 に示されるようにいくつかの事例が存在する。これらの例の中で、DAC は自然環境に対して影響がない技術的な経路である。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。それ故、DAC は技術開発の対象として選択されるべきである。

表 2. CO₂回収技術の特徴と技術ポテンシャル [5]

								
		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

2050年においても、CO₂排出は削減されなければならない。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。それでもIPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2°Cシナリオで述べられる今世紀後半における温室効果ガスの正味ゼロ排出を実現するためには、残る排出量に相当するネガティブエミッションが必要である。よって相応の規模のDACが期待される。

DACは、表3、4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。^[6]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 3. DAC 技術開発の一例 [7][8][9]

対象	現状	技術例
DAC	ラボ ～ パイロット プラント	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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 4. DAC パイロットプラントの特性 [5][8][10][11]

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

ここまで、CO₂について述べてきたが、IPCC 2°Cシナリオ達成のためには、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。

○CH₄

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。^[12]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があるが、現時点では有効な解決策が見いだせてはいない。

○N₂O

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7) 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。

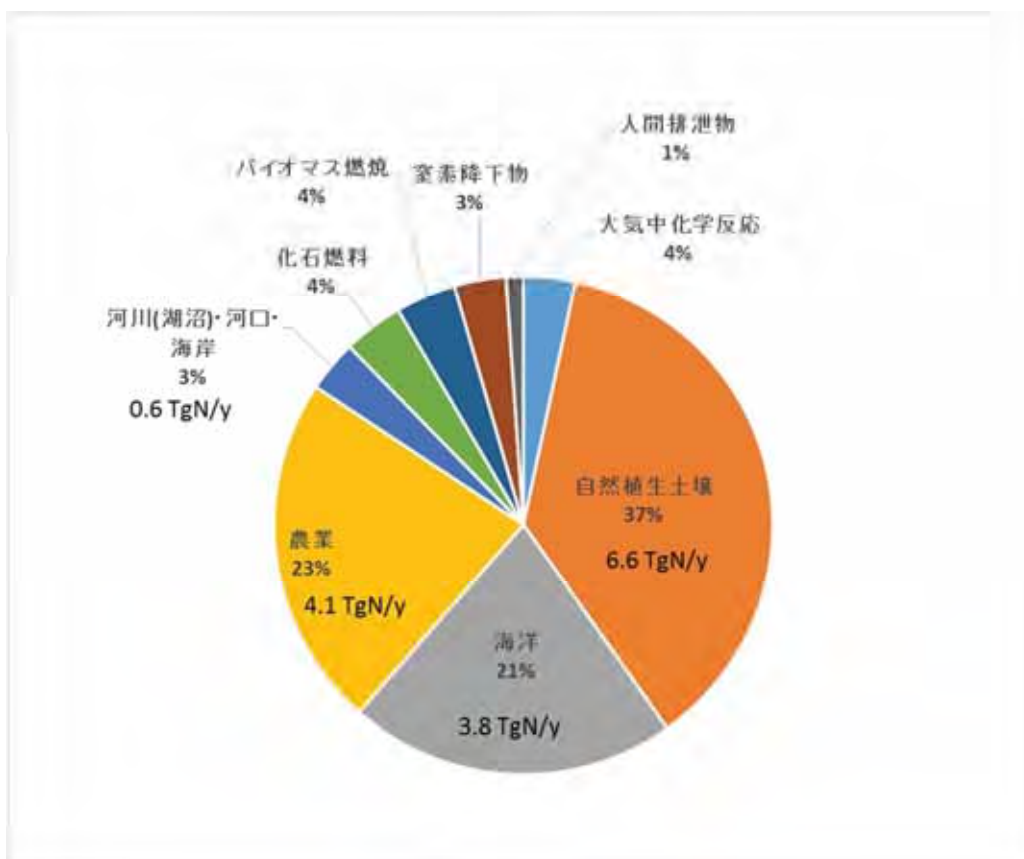


図 7. N₂O 発生源 [12]

表 5. N₂O 抑制技術開発の一例 [13][14][15][16]

対象	現状	技術例
N ₂ O	ラボ	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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

○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

a) 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8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。

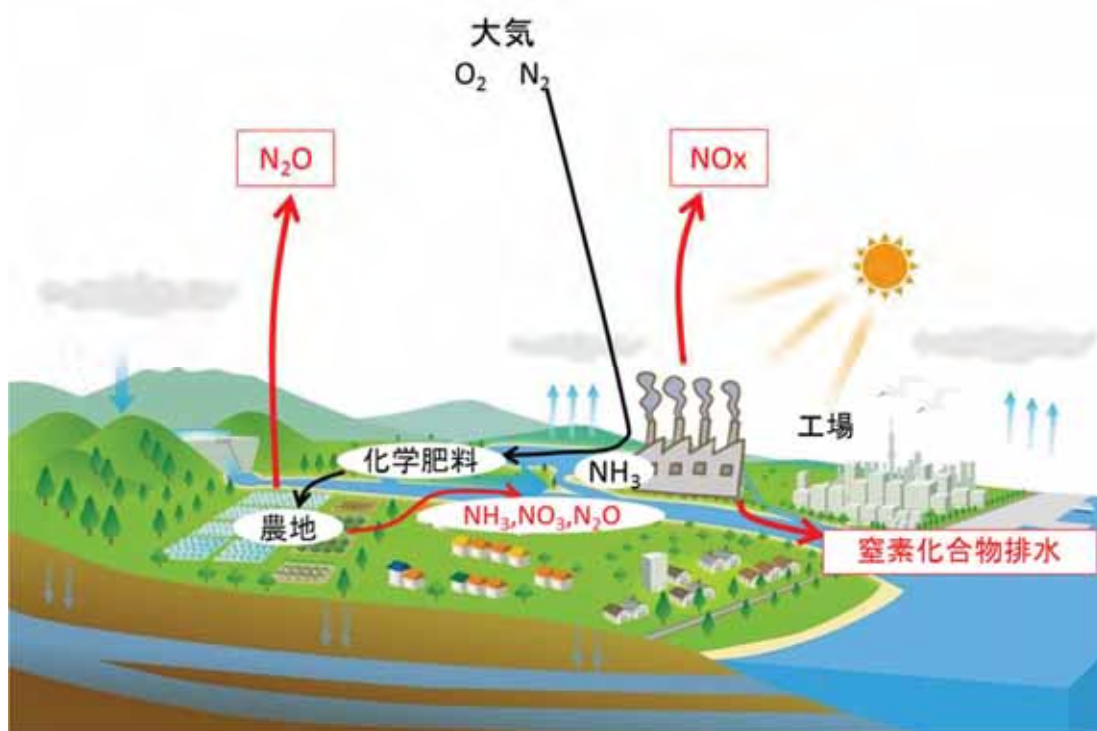


図8. 窒素循環模式図

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9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。

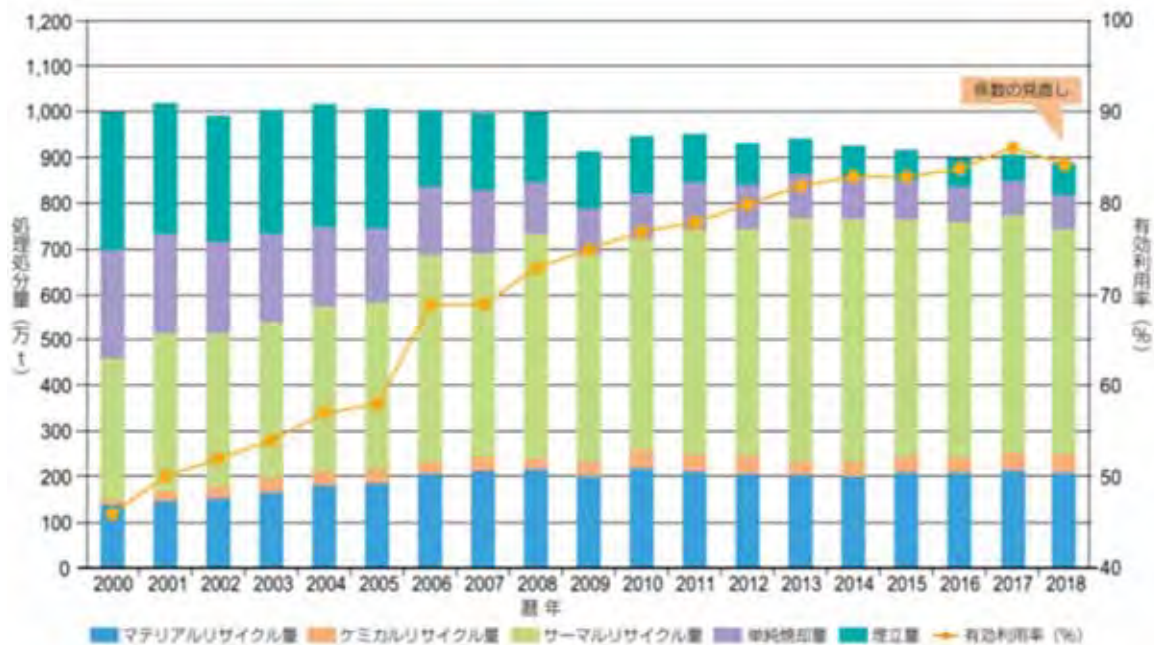


図9. 日本におけるプラスチックごみ廃棄処理状況 [17]

表6. 海洋プラスチックごみの流出状況 [18]

(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

b) 対策

○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 [19][20][21][22][23][24]

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

○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10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。

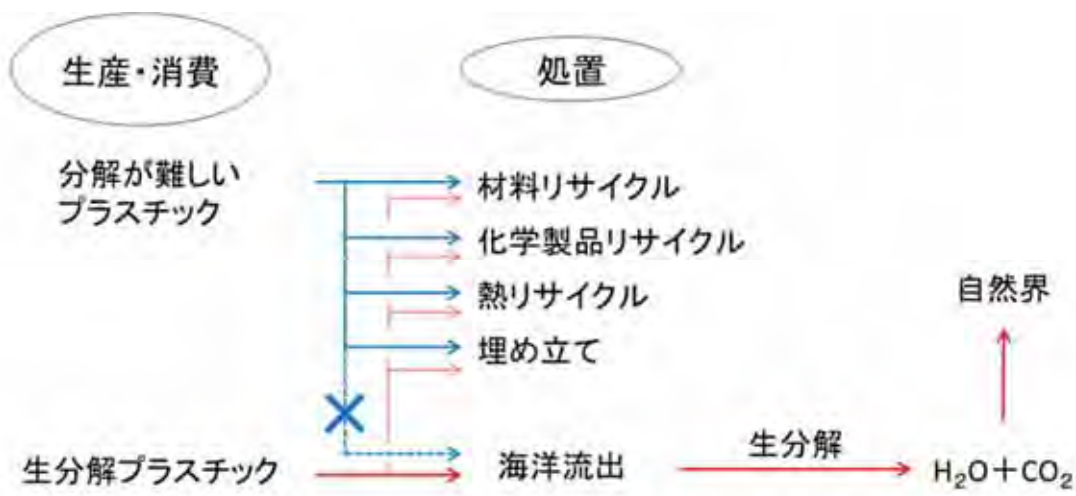


図10. プラスチック資源のフロー

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は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 [24][25][26][27]

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	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 分解開始のポイントを制御する技術 <ul style="list-style-type: none"> ・ 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 <ul style="list-style-type: none"> ・ 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] 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.
- [3] WMO Greenhouse Gas Bulletin No 15
- [4] 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)
- [5] ICEF2018 ロードマップ: Direct Air Capture of Carbon Dioxide (2018)
- [6] Direct Air Capture of Carbon Dioxide. David Sandalow, Julio Friedmann, Colin McCormick, and Sean McCoy (2019)
- [7] Sanz-Pérez et al., Chem. rev., 116, 19, 11840–11876, 2016
- [8] Keith et al., Joule 2, 1573–1594, (August 15, 2018)
- [9] Li et al., ChemSusChem, 399–903, 2010
- [10] Yuki Ishimoto et al. (2017) PUTTING COSTS OF DIRECT AIR CAPTURE IN CONTEXT
- [11] APS & POPA (2011) Direct Air Capture of CO₂ with Chemicals – A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs
- [12] Climate Change 2013: The Physical Science Basis, IPCC(2013)
- [13] Zhang et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 116(26), 12822–12827, 2019
- [14] Hinokuma et al., Chem. Lett., 45, 179–181, 2016
- [15] Akiyama et al., Scientific Reports 6:32869, 2016
- [16] Jiang et al., RSC Adv., 60, 34573–34581, 2018
- [17] 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)
- [18] Jenna R. Jambeck, Roland Geyer, Chris Wilcox, Theodore R. Sieglar, 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.
- [19] Nanba et al., Chem. Lett., 37(2008)710
- [20] Nanba et al., Catalysis Science & Technology., 9(2019)2898

- [21] 「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）
- [22] 北海道大学 大学院地球環境科学研究所 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
- [23] CHUTIVISUT et al., Journal of Water and Environment Technology, Vol. 12, No. 4, 2014
- [24] Nduko et al., BIOBASED MONOMERS, POLYMERS, AND MATERIALS, 1105, 213-235 (2012)
- [25] Iwasaki et al., Biomacromolecules, 17, 2466 (2016)
- [26] Gan et al., Polymer, 172, p7-12 (2019)
- [27] Morohoshi et al., Microbes and Environments, 33, 332-335 (2018)