

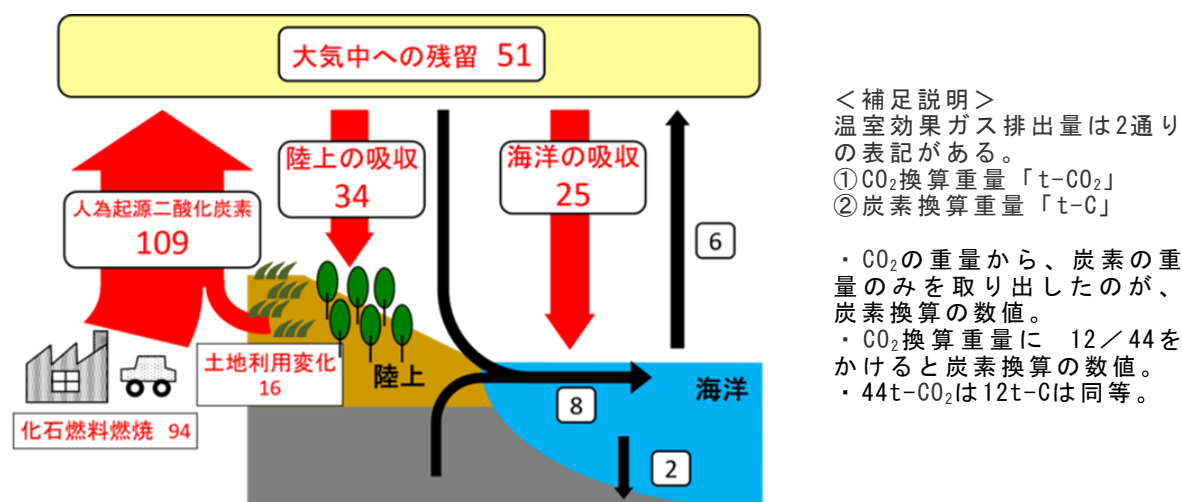
海水から直接CO₂を回収する新しい技術

◆地球の炭素循環の変化と近年の海洋状態の変化

最終氷河期が終了してから産業革命までは、大気中のCO₂濃度の変化速度がゆっくりしていたので炭素循環もあまり変化がなかったと推定されている。陸上では、森林の光合成で大気中のCO₂が有機物として固定化されるとともに、有機物が土壌から河川へと流出し、海洋や湖沼から大気へと放出され均衡が保たれていた。図1の模式図の黒矢印で示されるように、河川を通じて1年あたり約8億t-Cが流出し、約2億t-Cが堆積物として沈殿し、約6億t-Cが大気へCO₂として放出され、均衡が保たれていた。

2010年代の炭素循環を図1の模式図の赤矢印で示した。大気中へ残留するCO₂は、地球温暖化を引き起こしている。

図1 人為起源炭素収支の模式図(2010年代) 出所：気象庁(炭素収支)



産業革命以降(1750年～)は工業化の進展に伴い、多くのCO₂が大気中へ放出されるようになった。IPCC(2021年)では、化石燃料燃焼等により排出されるCO₂と、農地拡大など土地利用変化(森林破壊)により排出されるCO₂を合わせて、人為起源二酸化炭素と呼んでいる。2010年代の平均で、1年あたり約109億t-Cの人為起源二酸化炭素が排出された。

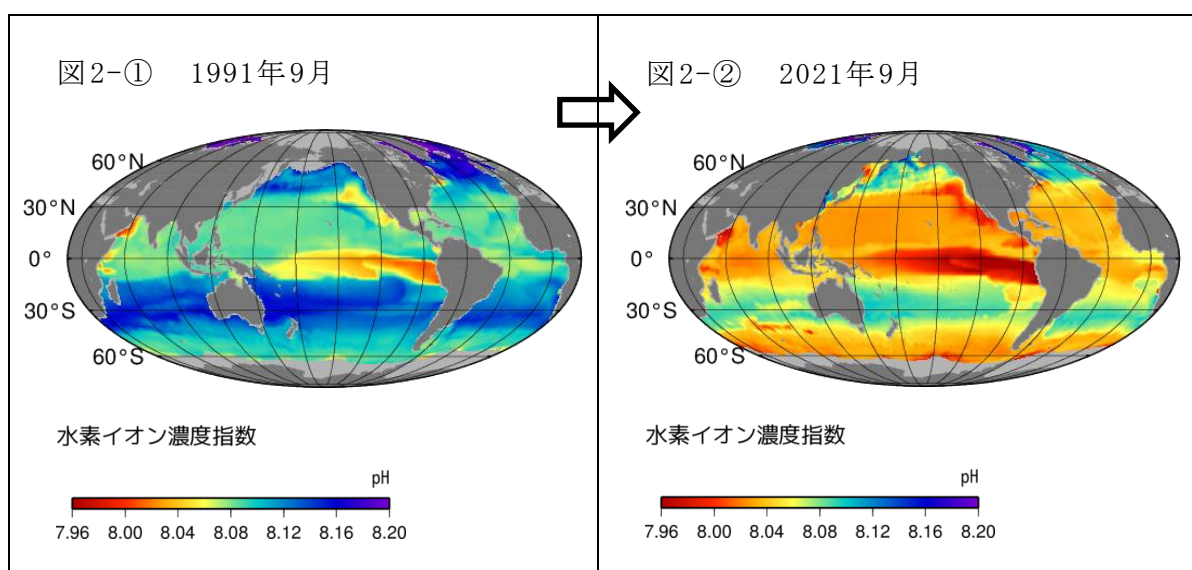
同じように海洋は、2010年代の平均で、産業革命以前に比べて1年あたり約25億t-C吸収量が増加した。吸収されたCO₂は、海洋の循環に伴い、より深い海へと運ばれる。表層では、生物活動、特に植物プランクトンの光合成によってCO₂が

有機物として取り込まれ、これら生物の死骸や排泄物が沈降・分解し、海洋内部へと運ばれる。海洋の生物によって炭素が海洋内部へと運ばれるこの働きは、「生物ポンプ」と呼ばれている。

◆CO₂の排出量増加により海洋酸性化は進行

大気中に放出されたCO₂を海洋が吸収することで、海水のpHが長期間にわたって低下する傾向は「海洋酸性化」といわれる。

図2 1991年と2021年「9月」の海面pH分布図 出所：気象庁pHの分布図



海洋によるCO₂吸収は季節変動の影響もあるので、「9月」の分布図で比較したところ、1991年（図2-①）では赤道付近以外は、酸性度の低い青色の海域が大半を占めているが、2021年（図2-②）では青色の海域が少なくなりpHが低い部分が大幅に拡大しており、30年間で海洋の酸性化は確実に進んでいる。

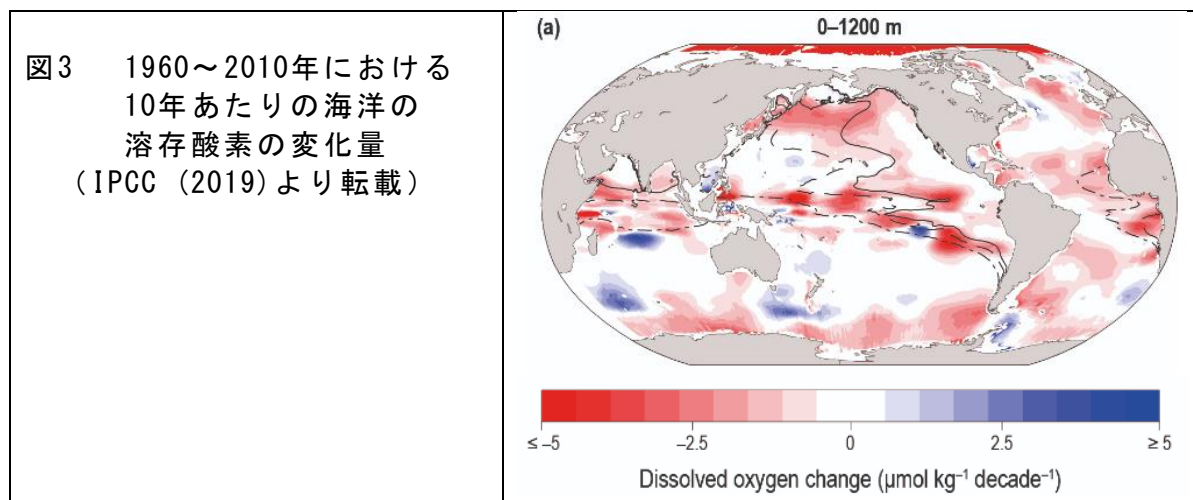
海洋酸性化により、浅い海洋のpH低下と海面温度の上昇で、海洋が大気中のCO₂を吸収する能力が低下し、海水のCO₂の季節変動幅が拡大することがIPCC（2021年）で指摘されている。海洋のCO₂吸収が低下すると大気中のCO₂が増加し、地球温暖化が加速される可能性がある。また、海洋のpH低下で多くの海洋生物（植物プランクトンやサンゴなど）の生態系への影響が懸念される。

◆海水温上昇による貧酸素化（deoxygenation）の進行

貧酸素化とは、海水の酸素飽和度が約40%以下になった状態である。酸素飽和度とは、海水中に溶けることができる酸素量に対して、実際に溶けている酸素量

の割合（％）である。海底付近の生き物は、酸素飽和度が約40％以下（重量換算で約3mg/L）の貧酸素状態になると、正常に生活できなくなる。

長期の海洋観測から、広範囲の海洋で溶存酸素量が減少傾向にある。（図3）



貧酸素化は地球温暖化が原因と考えられている（IPCC, 2019）。1960年以降の約50年間に、海洋全体で溶存酸素量の約2％が減少したと報告されている。

貧酸素化の進行はゆっくりしていて、生物に影響がある貧酸素化状態に突然変化することはない。しかし、長期間にわたって溶存酸素量が徐々に減少することで海洋生物の生息域が変化するなど、海洋生態系への影響が懸念される。

貧酸素化は、海水温上昇や海洋酸性化と共に、気候変動が引き起こす海洋生態系への三大ストレスとなっている。

◆日本のネガティブエミッション技術開発の現状

2050年の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排出を吸収するネガティブエミッション技術（NETs）は不可欠である。

NETsとは、直接空気回収技術（Direct Air Capture：DAC）や生物機能の利用と、貯留または固定化などを組み合わせることで、正味としてマイナスのCO₂排出量を達成する技術である。

23年6月28日の経産省での「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」で、NETsの現状分析が報告された。（表1）

技術的要素の分析項目として、①TRL（技術成熟度レベルは1～9）、②除去コスト、③除去ポテンシャル、④研究開発力の国際比較の4項目で分析した。

研究開発力の国際比較からは、日本での NETs 開発は諸外国に比べて、開発が進んでいないことが示唆される。

表 1 現状分析の技術的要素 出所：230628-METI-NETs 市場創出とりまとめ

分類	TRL ¹⁾	除去コスト ¹⁾ \$/tCO ₂ ⁴⁾		除去ポテンシャル ¹⁾ GtCO ₂ /年 ⁵⁾		研究開発力の国際比較 ³⁾
	共通	世界		世界		共通
海洋アルカリ化	1-2	150	40~260	50.0	1~100	独が先行。豪、英、伊、米が続く。日本はなし。
海洋肥沃化	1-2	225	50~500	1.5	1~3	独、米が先行。英、豪が続く。日本は10位。
ブルーカーボン管理	2-3 (8-9) ²⁾	12680	240~30000 ⁶⁾	< 1	0.02~0.08	米が先行。豪、中、印が続く。日本は9位。
大型海藻養殖	-	-	-	-	-	中、米、豪が先行。日本は10位
植物残渣 海洋隔離	-	-	-	-	-	-
風化促進	3-4	125	50~200	3.0	2~4	英がリード、米国が続く。日本は18位。
DACCS	6	200	100~300	22.5	5~40	英、独、米が先行。日本は10位。
BECCS	5-6	208	15~400	5.8	0.5~11	英、米が先行。日本は10位。
植林・再生林	8-9	120	0~240	5.3	0.5~10	英、米、独が先行。日本は14位。
土壌炭素貯留	8-9	28	-45~100	5.0	0.6~9.3	米、独が先行。日本は12位。
バイオ炭	6-7	178	10~345	3.5	0.3~6.6	米、英、独が先行。日本は21位。

海洋中CO₂の直接回収技術（direct ocean capture: DOC）は、この現状分析では記載されていないが、22年2月18日に開催された「第7回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、DOCは研究開発事例として紹介された。

DOCの特徴は、海洋は大気中のCO₂を吸収しているので、DACでは必要なこの工程を省略できる。また、海洋中のCO₂濃度は大気中のCO₂濃度に比べて約50~100倍以上高いので、CO₂を効率的に除去できる可能性がある。

DOCの技術手法は、大きく2つある。①電気透析型として、海水のpHを下げてCO₂ガスを回収する手法で、膜の安定運用技術や異常検出技術の開発が行われている。②低エネルギー型として、自然の力や触媒を利用し、低エネルギー・低コストで海中からCO₂を回収する手法の開発が行われている。

米国ではDOCの技術開発に大きな期待が寄せられている。

◆米国でのNETsの新しい動き

23年8月18日に、米国の上院で、法案「Carbon Removal, Efficient Agencies,

Technology Expertise Act (CREATE ACT) of 2020」が提出された。

本法案は、大統領府に属する国家科学技術会議 (NSTC) 内に「大規模炭素管理に関する委員会」とそのワーキンググループとして「炭素除去イニシアチブ」を創設することを目的としている。NSTC内に委員会を設置することで、省庁横断的な取り組みが可能となる。また、イニシアチブは、CO₂の貯留を伴うCO₂除去技術の開発と実証の実行を目的としている。具体的には6つの技術（①DAC+CO₂貯留、②炭素鉱物固定の促進、③BECCS、④森林修復、⑤土壌炭素管理、⑥DOC）を対象と定義付けている。

DOCが注目されていることが特徴である。後述する米国3社のDOC開発が成功すれば、削減ポテンシャルが多く（数十億トン規模のCO₂除去）、コストも安価になり、DOC技術は将来の海洋炭素除去技術のひとつとなる可能性がある。

◆米国でのDOC開発事例-1：Ebb Carbon（電気化学的手法）

23年8月21日、米国スタートアップの同社は、国立研究所などと連携し、初の海洋CO₂除去システム（CDR）および海洋脱酸システムを、ワシントン州スクイム湾の米国エネルギー省管轄のパシフィック・ノースウェスト国立研究所（PNNL）施設に設置し、実証を進めていると同社のホームページで発表した。同社の目標は、大気から数十億トンのCO₂を除去することである。

同社は、独自の電気化学的手法により海から酸を除去する取り組みを進めている。海水はCO₂濃度が高まるほど酸化する性質がある。同社の技術によって、海水を水酸化ナトリウム（NaOH）と塩酸（HCl）に分離する。その後、NaOHだけを海に戻すことで海水の酸性化を抑制し、海水が新たにCO₂を吸収できる。同社は、この手法で1トンのCO₂回収コストは、今後5年間の内に100ドルを下回ると見込んでいる。

◆米国でのDOC開発事例-2：Equatic（電気分解と炭酸塩などへの固定）

23年4月12日、米国のカルフォルニア大学ロサンゼルス校（UCLA）からスピンアウトした同社は、ロサンゼルス港でDOCの小規模パイロット（CO₂を除去能力100kg/日）を公開した。同社の技術は海水の電気分解により水素を発生させるとともに、CO₂を炭酸塩や溶存無機炭素に固定する。

さらに、処理過程で生成する水素を回収して有効活用する。処理に必要な電力は再生可能エネルギーなので、発生する水素はグリーン水素とみなせる。

同社は26年までに年間100,000トンのCO₂除去量に達し、28年までに1トンあたり100ドル未満までコストを削減すると予想している。

同社はロサンゼルス以外にシンガポールでもパイロットを運営している。この2つのパイロットで除去されたCO₂は、世界的な決済ソリューションプロバイダーであるStripeとの事前購入契約などを通じて販売される。

5月31日には、同社と航空宇宙大手のボーイングは、62,000トン以上のCO₂の除去と2,100トン以上のグリーン水素を供給する契約を締結した。

◆米国でのDOC開発事例3：Captura（電気透析）

21年に設立されたカリフォルニア工科大学のスピンオフ企業である同社は、薄膜複合中空糸膜を用いた、海水からの効率的なDOC技術を開発している。水ろ過用途に使われる低コストの中空糸膜を改良し、海水からCO₂を選択的に分離することを可能とした。CO₂回収に要するエネルギーとコストは、DACに比べて半分から4分の1程度になることを開発目標にしている。

22年8月からカリフォルニア州ニューポートビーチで最初のパイロット実験を開始した。23年5月5日に、ロサンゼルス港の官民海洋研究所アルタシーで2つ目のシステム実証試験を開始するとの発表があった。この2基目は、海水から年間100tのCO₂を回収できる。同社のテクノロジーの強みは、再生可能エネルギーの供給と海水があれば、場所の制約なく本技術を導入できることである。

◆海水からCO₂回収技術の検討について

日本は、海外に比べるとCCSの適地が不足している。一方、日本は国土面積の約12倍の排他的経済水域（世界6位）を有している。海洋からコスト競争力があり、多くのCO₂を除去できる回収技術を日本が持つことができれば、海洋酸性化、貧酸素化などの問題も改善し、海洋の生態系を保護する可能性も期待できる。小規模な開発段階から実証化を見据えたパイロット開発に移行した、DOC分野の研究開発に参入するか、近い将来に実証化された技術の導入などの検討を開始する必要があると思う。

【渡部徹】