

人工湧昇による気候緩和の試みに関する最近の研究動向について

NPO法人海ロマン 21 理事長 小池勲夫

要約

地球温暖化が進行する中で、その緩和策として大規模な海洋域を利用した人為的な技術である地球工学的な手法が様々提案されており、2019年に国連の諸機関等の下部専門家委員会である海洋環境保護の科学的側面に関する専門家会合：GESAMPが報告書をまとめた。その中にこれまで表層での生物生産の促進や、海洋温度差発電（OTEC）のために行われて来た人工湧昇の技術が気候変動の緩和策の1つとして取り上げられている。人工湧昇に関しては、これまで小規模なものは色々な海域で行われているが、全海洋の環境に影響を与えるスケールのものは無い。一方、21世紀に入って大きく進展した海洋循環モデル(OGCM)やそれと結合した生物地球科学的モデルによって、全球規模での人工湧昇による気候変動緩和への効果や、海洋大循環や生態系などへの影響などが研究されてきた。

これらの研究をまとめると、全球スケールでの中・低緯度海域における長期にわたる人工湧昇は、これらの海域における表層水温を強制的に低下させ、その結果として短期的（数10年規模）には顕著な全球での平均気温の低下が生じる。一方、長期的には数10年のタイムラグを持って平均気温はコントロールと同じように増加する。さらに、途中で人工湧昇の操作を中止するとその後の気温上昇はコントロールを上回る可能性が指摘された。また、大規模な人工湧昇は、主に低緯度海域での表層での一次生産を増大させまた中層における貧酸素水塊を拡大させるなど、全球での物質循環や生態系に大きな影響をもたらすことも示された。さらに、低緯度域を中心とした表面海水温の低下により陸域での気温低下が生じ、モデル結果では陸域生態系での呼吸速度の低下から陸域での炭素循環にも大きな影響がある可能性も示された。

1. はじめに

海洋における湧昇域は、ペルー沖や東部赤道海域などの大規模なものから沿岸域の島周りで見られる小規模なものまで存在するが、いずれも湧昇流によって表層下の水塊が表層に運ばれる現象である。海洋では栄養塩濃度が中層以下に豊富である海域が多いため、このような湧昇域では栄養塩の供給によって生物生産が高い海域であることが知られている。従って、小規模な人工湧昇については、古くから主に表層への有光層の下からの栄養塩の供給による生物生産の拡大を狙って沿岸域を中心に検討してきた(1,2)。また、低緯度海域における海洋温度差発電による深層水くみ上げについてもその副次的な効果として栄養塩濃度の高い深層水の海藻類などの生産への利用が考えられてきた(3)。これは、多くの海域での生物生産が表層における窒素やリンなどの主要栄養塩や鉄などのマイクロ栄養塩で制限されていることによる。特に熱帯・亜熱帯域では通年表層に密度躍層が発達し、下層からの栄養塩が供給されにくい物理環境になっていることから、人工湧昇による表層への栄養塩供給は生産力の向上に大きな寄与があると考えられた。

一方、21世紀になって温室効果ガスによる地球温暖化が現実のものとして現れ、それへの緩和策としていくつかの地球工学的な手法が提案されており、その中に人工湧昇による海洋への二酸

化炭素の取り込み・貯留の促進が挙げられている(4,5)。これは、海洋深層水の表層への供給により生物生産が高くなると同時に、その一部が海洋中・深層に沈降して隔離される効果を狙ったものである。海洋はこれまでに人間活動で大気に放出される二酸化炭素の約40%を吸収・隔離していると推定され、その多くが表層で生産された粒状の有機炭素の沈降等によるいわゆる生物ポンプの働きに依存していると考えられている。そこで、Lovelock & Rapley(2007)は海洋に無数の直径10m、深さ200mのパイプを設置し光合成層以下の栄養塩に富んだ海水を表層にくみ上げ生物ポンプを促進させることを提案した(4)。この場合、ポンプとしては表面での波のエネルギーの利用を考えている。

全球レベルでの海洋における人工湧昇が二酸化炭素の海洋貯留の促進による気候緩和にどのような影響を与えるかに関しては、実験的に確認する方法はないので、このような提案を受けて、地球システムモデルを使ってこのような試みによる海洋への大気の二酸化炭素の貯留効果を評価した論文がいくつか報告されている。ここでは、全球での海洋を対象とした人工湧昇のモデル研究を中心にその効果および考えられる副作用などについての研究をまとめる。なお、広域な海域での深層水くみ上げによる海洋温度差発電(OTEC)の構想に関しても、全球的な海洋でのモデル計算によって、発電ポテンシャルの推定や広域での深層水のくみ上げによる海洋循環の変化なども研究されている。これらの研究結果についても大規模な人工湧昇の海洋環境への影響の面から評価を行う。

2. 海洋循環モデルでの人工湧昇による気候緩和の評価

Yool et al. (2009)は初めて窒素ベースの生態系と炭素循環の生物地球化学モデルを含んだ Ocean Circulation and Climate Advanced Modeling (OCCAM) physical model を使い、このような人工湧昇による大気中の二酸化炭素の吸収・貯留への効果を調べた(6)。ここで計算では人工湧昇のパイプの機能として水深が1000m以深の全海洋での中・深層の海水が上方への輸送速度が2 cm/day(全球で70 Sv)になる規模で湧昇するように設定した。すなわち、このモデルでは各層(200m、500m、1000m層)の水を一定の速度で表層(5-10m)に置き換える操作を行っている。なお、この場合、湧昇するのは溶存成分のみとしている。

得られた結果は、一次生産及び有機炭素の200m以深への沈降フラックスはパイプ設置によってコントロールに比べて40-50%促進されたが、一方、大気からの二酸化炭素の吸収については実験開始からほぼ10年後でも全球で5-10%程度の促進に留まった。また、この実験では当初の数年間は二酸化炭素の海洋からの放出がその吸収を上回るため、10年間の積算ではコントロールに比べて、パイプ設置の方が二酸化炭素の吸収量では劣る結果となった。この実験では全球の海洋にパイプを設置する設定であるが亜寒帯等ではその効果は低く、また、当然予想されるように二酸化炭素に関しては逆効果になることがわかる。さらに、このモデルでの結果では沈降フラックスの多くが200m以深でも比較的浅い水深で分解され、中・深層に到達するのは一次生産の2-3%に留まっているとしている。なお、海洋での大規模な湧昇海域では一般的に二酸化炭素の排出域になっている理由は、これらの湧昇した中層水の栄養塩の多くは再生産栄養塩(Regenerated Nutrients)であり、表層から沈降した有機物が分解した二酸化炭素を豊富に保持しているからである(7)。

翌2010年に同じ研究グループから人工湧昇の気候緩和に関する効果を更に評価する論文が出された(8)。Oschlies, et al. (2010)はこれまで約10年間しか行っていなかったモデル実験を2100

年までの一世纪にわたって行い、さらに湧昇する海水の深度を 130m から 1000m まで何段階かにとり、また、湧昇速度も 0.1cm/day から 5cm/day まで変化させている。計算結果によれば最適な条件下では、全球でのパイプ設置による人工湧昇は 2100 年において約 0.9PgC/year の二酸化炭素の海洋への貯留を促進することが推定された。一方でこのモデル実験では想定外の計算結果として、パイプによる湧昇は海洋表層の水温を低下させることで、陸域も含めて 1°C 程度の気温低下を引き起こすことになった。その結果、陸域での光合成よりも呼吸の抑制が寄与して陸域での蓄積が海域での炭素蓄積の 4 倍も生じる結果となった。その一方で、実験の途中でパイプによる人工湧昇を停止することで表面水温と大気中の二酸化炭素濃度は急激に上昇し、数 10 年から数百年にわたって、人工湧昇を行わなかった条件よりも高くなり得ることも示された。

これらの先駆的なモデル解析の論文を受けて 2014 年には、陸域/海洋での人工湧昇を含む地球工学的な手法の地球温暖化への緩和の効果やその副作用などを、同じ地球システムモデルで比較する研究が同じ研究グループで発表された (9)。この研究で比較した海域での操作実験は、1) 鉄散布実験、2) 人工湧昇実験、3) 海洋アルカリ化実験、4) 海洋表面での太陽光反射を強化するアルベド操作実験である。また、比較実験として陸域での大規模な植林が挙げられている。初めに、現在の全球での炭素循環モデルではモデル間での違いがまだ大きく特に海洋では酸素極小層の規模の変化や、陸域での炭素貯留の推移などの生物群集が関与した場合での 2100 年における推定幅が大きいことが述べられており、このような不確実性を前提としての検討と断っている。しかし、これまで地球工学的な手法の評価には様々なモデルが使われてきたので同一モデルを使って地球工学的な炭素循環への効果を評価する意義は大きい。

図 1 は地球システムモデルでの各操作における 2020 年から 2100 までの二酸化炭素濃度と気温の推移を見たものであり、さらに 50 年後に操作を中止した後の推移も示されている。

この図から明らかなように、大気中の二酸化炭素濃度に対しての各操作の効果はコントロールに比べてどの操作でも減少するがその減少幅は大きくない。平均気温に対しては、海洋表面での太陽光の操作（アルベド変化）は極めて効果的であり、さらに人工湧昇でも顕著な効果が操作を始めた 10-20 年は生じることが推定された。モデル実験で人工湧昇での操作が気温の低下にかなり寄与している結果となったのは、これまでの実験のようにパイプを全海洋に配置するのではなく、深層水を表層に出した時に二酸化炭素をネットで吸収できる海域を選択してパイプを設置している点が大きいと考えられる。

しかし、図 1 はアルベド操作が持続的であるのに対し、人工湧昇での平均気温の低下は一時的であり約 40 年のタイムラグを経てコントロールと同じ勾配で気温の上昇が生じる結果を示している。さらに、このシミュレーション結果では人工湧昇による気候操作は途中で操作を中止した場合には、操作をしなかった場合の推移に比較的短期間で戻りさらにその後気温がコントロールよりも高くなってしまう可能性が指摘されている。

なお、この論文では地球工学の 1 つに挙げられている鉄散布に関する検討している。鉄散布は 1990 年にアメリカの J. H. Martin が有名な“鉄仮説”を発表し (10)、それを受け表層で硝酸塩濃度が高いが一次生産が低く、鉄が律速していると考えられるいわゆる高硝酸塩・低一次生産 (HNLC) 海域の海洋現場で鉄散布実験が行われた。その結果、多くの実験でこれらの海域での一次生産の律速因子は鉄であることが証明された。全海洋の約 1/4-1/3 の海域が鉄律速であることから、これらの海域に鉄散布を行うことで生物生産を促進し、生物ポンプによって大気中の二酸化炭素隔離を増加させる地球工学的な手法も提案された。しかし、この手法が海洋生態系に与

える影響に関する予測が難しいことから、慎重な議論が行われている(11)。なお、この論文でのモデル計算では鉄散布の効果が最も大きい海域として南大洋を想定しているが、鉄散布の効果はむしろネガティブな結果を与えていた。

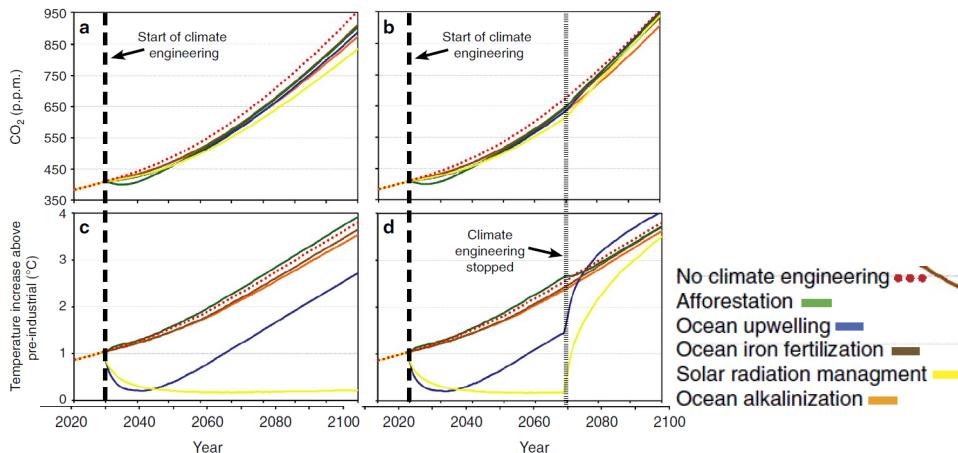


図1. 5つの気候緩和技術の全球的な操作による大気中の二酸化炭素濃度(図a)と平均大気気温(図c)の推移、なお図b,dは50年後に操作を中止した後の推移である(Keller, et al., 2014)。

地球システムモデルを使った全球レベルでの人工湧昇の地球温暖化に対する効果の実験は以上に紹介したものが主なもので、結果に対する解釈はこれまであまり変わっていない。ただ注意すべきは地球システムモデルを使って海洋での地球工学的なアプローチの評価を行っている研究グループが世界でも限定されていることである。従って、使っているモデルや実験の設定などが似通っており、同様な結果が導かれているとも言える。異なる地球システムモデルや条件設定をした時に同じような結果になるかの検証が必要であろう。

3. 海洋循環モデルによる大規模な人工湧昇が海洋環境に与える影響

貧栄養の亜熱帯海域に深層の栄養塩に富んだ海水を付加することにより微細なプランクトン群衆からなる海洋表層の生態系を大きく変える可能性のあることは、多くの研究者が指摘しているが、海洋学の視点からの批判的な議論も出されている(12)。すなわち、1000年以上の二酸化炭素の貯留を期待するなら太平洋では2000m水深まで有機物は沈降する必要があること、インド洋や大西洋ではこれより深くてもその深度の水塊はかなり早く表層に戻ることが知られている。また、表層でモデルのように均一に栄養塩を付加するのは技術的に困難であり深層からの添加水塊の水平的な拡散速度を考えると、増殖に数日間かかる植物プランクトンにより栄養塩が全て利用されるのは難しい。さらに、生物地球化学的な変化で大きいのは下層への有機物の沈降による溶存酸素の減少と、それに伴う脱窒素、N₂O、メタンの増加であるが、これらは二酸化炭素よりも一桁も二桁も地球温暖化係数が大きい温室効果気体である。

地球システムモデルを使った全海洋規模での気候緩和のための人工湧昇の影響評価にも上記と類似した環境や生物への影響が指摘されている(9)。一つは人工湧昇による海洋表層での一次生産の顕著な増加であり、操作開始後10年の2030年では、全海洋での一次生産はコント

ロールに比べて約 1.6 倍、また 2100 年には約 1.8 倍に増加する。また、海域では赤道周辺海域での増加が顕著である。一方、表層での一次生産の増加は、沈降有機物のフラックスを増加させることから海洋中層での貧酸素化を促進させる。2100 年には溶存酸素濃度が $10 \mu\text{M}$ 以下の貧酸素海域はコントロールに比べて 265% に増加すると推定されており、このような貧酸素水塊で生成されると考えられる N_2O 、メタンと言った温室効果気体への影響は大きい。図 2 は 300m 層における溶存酸素濃度の人工湧昇による影響を見たものであるが、一次生産が大きく促進される低緯度域で広く溶存酸素濃度の減少が起こっていることを示している。

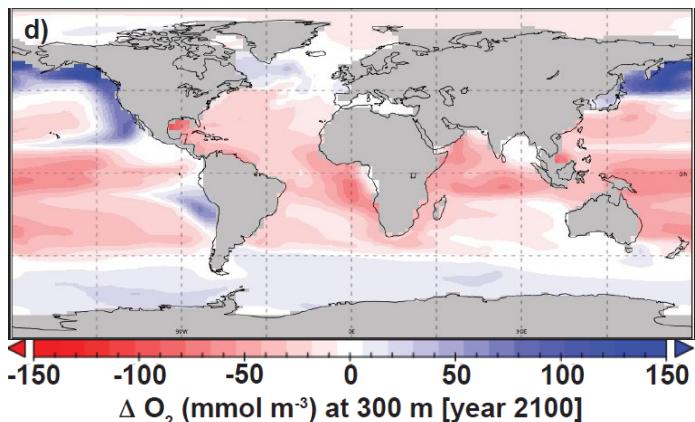


図 2 人工湧昇による海洋の貧酸素化の増加。人工湧昇を継続した時の 2010 年における、水深 300m 層における溶存酸素濃度の増減を示した (Keller, et al., 2014)。

全球レベルでの人工湧昇は海洋の物理構造にも大きな影響をもたらす。ハワイの研究者たちは深層水のくみ上げによる海洋温度差発電 (OTEC) が全球でどれだけの発電ポテンシャルがあるかを一連の研究で推定している。大気との相互作用も考慮した 2018 年の論文では、OTEC での発電ポテンシャルは深層水くみ上げの海洋の物理循環への影響により、影響を無視した場合に比べて 72-56% 減少する可能性を示した (13)。なお、ここでの OTEC に適した海域とは、通年で表層 20m と深層 1000m との水温差が 18°C 以上ある海域としており、全海洋での面積の約 1/3 にある。

このような、全球的な OTEC の発電ポテンシャル低下が生じるのは、海洋の物理構造が変化するためであり、低緯度域の表層の冷却の影響は周辺海域での表層水温上昇のみならず、海洋の内部に熱の取り込みを生じさせる。このような表層の変化は、海洋大循環で大きな役割を果たしている大西洋の南北循環 (Atlantic Meridional Overturning Circulation : AMOC) を強化し、北太平洋でも同様の南北循環が生じるなど、中・深層の循環への影響が次第に現れる。図 3 には、全球規模での OTEC を 10 年間稼働させた時と、1000 年間稼働させた時における表層 5m のコントロールとの水温差を示した。赤道周辺海域を中心とした中緯度域までの水温低下は 10 年で顕著であり、一方、10 年目には高緯度の温暖化が北太平洋、南太平洋などで始まっていることが分かる。この高緯度域の温暖化は次第に拡大し、1000 年もすると表層の海洋構造は全く変わってしまう結果となっている。このように大規模な海洋の物理構造の人為的な改変は、大気循環に比べればその伝播速度ははるかに遅いが、全球海洋での物理構造を大きく変えることになり、その結果として、炭素、窒素、酸素などの生物地球化学的循環も大きく変化することで生態系への影響が生じる

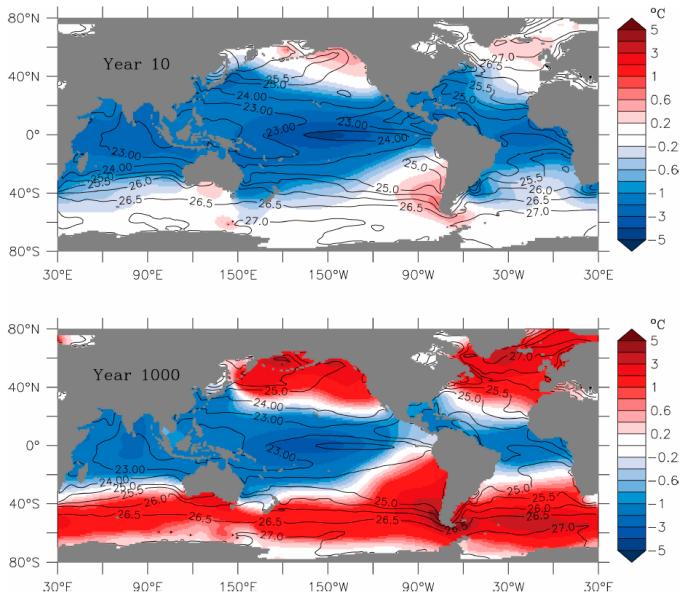


図3. 全球的な OTEC 稼働による表層（5 m）のコントロールとの水温差の 10 年後および 1000 年後の推移 (Yanli Jia, et al., 2018)。

4. 西部太平洋沿海での観測データによる人工湧昇の温暖化緩和への効果

温暖化の緩和を目的とした人工湧昇に関しても、台湾や中国の研究者は実際の海洋での炭酸系や栄養塩の観測データを基にして、人工湧昇による大気からの二酸化炭素の貯留効果に関して、海域や季節を分けて検討を行っている (14, 15)。Pan ら (2015) は北緯 21 度から 43 度のフィリピン海や東シナ海などの 14 観測点における鉛直的な炭酸系を含む海洋観測の結果を基に、深層水を表層に上げた時にどれだけの二酸化炭素を吸収できるかを推定している。得られた結果では、栄養塩が効率的に利用されることによって人工湧昇によって表層では大気との間に大きな海洋側が負の二酸化炭素分圧が生じることが多いことを示した (14)。

また、季節と海域によって大きなポテンシャルの違いがあり、さらに表層への深層水の供給に仕方によっても影響を受けることも示された。これは、供給する深層水と表層水の密度差を考慮してなるべく深層水の栄養塩濃度を下げないようにする放出する深度やノズルなどに関する工夫を意味している。さらにここでの計算では深層水中に含まれる栄養塩のリンはすべて表層で植物プランクトンに取りこまれて有光層以下に輸送されるとしているが、実際はかなりの部分が有光層内で分解され二酸化炭素に戻る可能性はあるとも述べている。

2016 年には中国から人工湧昇に関する研究の進展とその海洋環境への影響に関する総説が出されている (15)。この総説は、主に水産業のための小規模な人工湧昇の装置の開発に関わって來た著者らが、これまでの人工湧昇の研究の進展に関してまとめたものであり、わが国で行われた表層への栄養塩供給を目的とした「たくみ」や東北大の研究者による塩分差を利用したストンメルの永久泉（塩分差を利用）の実海域でのテストも挙げている (2,16)。しかし、永久泉の構想は効率が悪く表層での栄養塩の付加率は 0.1% に留まり、海洋牧場構想には物足りないと述べている。また、総説では OTEC も取り上げているが、安定した深層水を多量に表層に供給する必要がある OTEC と栄養塩の局地的な供給を狙う目的での人工湧昇とはかなり、目的による基本技術、

投資額、環境への影響評価などが異なるとしている。なお、この総説では Zhejiang University で開発している圧縮空気を用いた深層水の汲み上げ装置についてのフィールド実験の結果などを紹介し技術開発として順調に進展していると述べている。

5. GESAMP 報告書による人工湧昇の気候変動緩和への評価

以上は主に 2018 年までの研究の進展をまとめたものであるが、2019 年に IMO (国際海事機関)、FAO (国連食糧農業機関)、UNEP (国連環境計画)、UNESCO-IOC (ユネスコ政府間海洋学委員会)等 8 つの国連機関の支援をもとに活動している科学者の集まりである「海洋環境保護の科学的側面に関する専門家会合：Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (GESAMP)」が「海洋での提案されている地球工学的な技術のレビュー」を出している(5)。この中で海洋を対象とした地球工学的手法として人工湧昇も取り上げられているので、そこで議論を最後に紹介する。

この報告書で取り上げている海洋における地球工学的な手法は大別すると 2 つに分けられる。すなわち、生物的あるいは化学的な手法で大気中の二酸化炭素濃度を減少させる Carbon Dioxide Removal (CDR) 法と、太陽から地球に入ってくる短波長の放射を減少させる Solar Radiation Management (SRM) 法あるいは Albedo Modification (AM) 法である。前者には、既に述べた鉄散布による表層での一次生産の増加させる海洋富栄養化の手法や、海洋に炭酸塩化合物などを散布することで海洋のアルカリ度を増加させて大気中の二酸化炭素の減少を図る手法が提案されている。また後者には、海洋表面にマイクロバルブを発生させる等で、海洋表面のアルベドを変化させ太陽のエネルギーの入射を削減させる技術がそれにあたる。図 4 に GESAMP 報告書で取り上げている地球工学的な手法を示した。

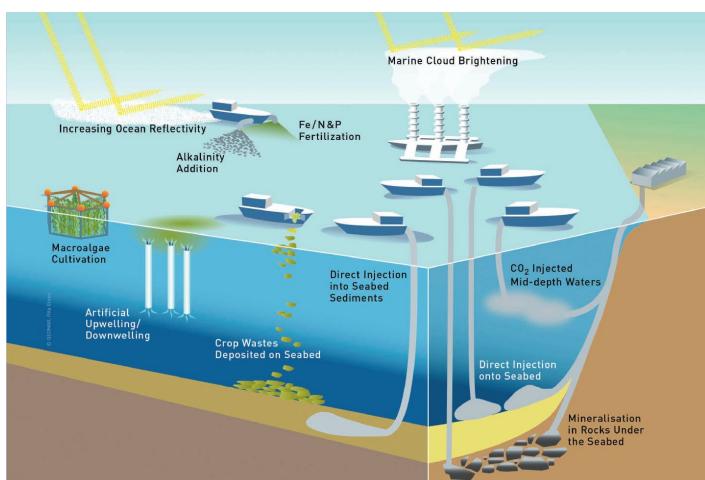


図 4 GESAMP 報告書で取り上げている多様な気候緩和のための地球工学的手法

この中で人工湧昇に関しては、これまで OTEC のような海洋エネルギーの開発や水産振興、あるいはサンゴ礁の冷却などの気候の緩和以外の目的で計画されており、広い意味での CDR や AM と言ったカテゴリーにも必ずしも合致しない。しかし、広域で長期間実施すれば海洋環境に負の影響を与えるものとして海洋汚染に関する国際条約であるロンドン条約における海洋での地球工学的手法の範疇に入るるものとここでは考えている。一方で人工湧昇や OTEC は大規模に行われた

場合、温暖化の緩和技術としても評価出来る事からこの2つの技術をこの報告書では検討の対象に加えている。

この報告書では、気候変動の緩和のための人為的な操作によって海洋表層と深層との循環を促進する手法を“Ocean Pumping”と呼び、人工湧昇とその逆プロセスである人工沈降流の2つの手法を取り上げている。後者は海洋で深層循環が生じる海域の1つである大西洋の高緯度域での二酸化炭素を豊富に含んでいる表層水の沈降による中・深層への二酸化炭素の隔離にヒントを得ている。例えば、Lenton and Vaughan (2009)は、北大西洋深層水の出来る海域での表面水温を1°C下げることが出来れば、2100年までに約1Gトンの炭素を隔離することが可能と試算している

(17)。表面水温を下げるには高緯度域での海水の利用などが提案されているが、あまり具体的でなくまたそのコストなどがはっきりしないなどから、報告書では地球工学的な手法としては更なる検討は行われていないとしている。なお、この報告書ではこの人工沈降流の技法が、ハリケーンの勢力削減にも機能する言う英国の研究者の提案を示している(18)。ここで提案されている技法は、ハリケーンの発生・発達する低緯度海域の表層に巨大な裾付きのリンクを多数設置するものである。裾の下部は数百m下の低温域に達しており下は解放されている。ここで下降流がリンクの中で生じる原理は、リンク周囲にある一方方向のバルブから暖かい表面水がリンク内に供給されることでリンク内の水面が周辺海域に比べて高くなり、圧力差が生じることで下降流が出来るというものである。このような下降流により、リンクの周辺海域を含めて表面水温の低下が期待出来る。この提案はショミレーションでの論文にはなっているが、海域での実証実験は行われていないようである。

この報告書では取り上げている地球工学的な手法に関しては、その理論的な根拠、学術的な論文としての原理の提示、自然の海洋で提案の事象が生じている根拠、提案する海域、その規模と実施する期間、気候緩和等へこの技術の実現可能性と有効性、モデリング、ラボあるいはパイロット実験の有無などの観点から評価している。人工湧昇の機能についてははっきりしているのは、栄養塩の表層への供給による一次生産と生物ポンプの促進、および表面水温低下による海洋と接する大気の冷却現象の2つであり、これらに関しては理論的な根拠やそれを支える学術的な論文等は多くある。しかし、人工湧昇で大気からの真の二酸化炭素の取り込みが生じるかはまだはっきりしていないと述べている。またKwiatkowski等 (2016) は、広域での海洋表層の冷却は地球から外に向かっての長波長放射の減少を引き起こし、その結果として海洋はその中層に熱を蓄積することになり、結果的には100年単位で見ると、全球の気温上昇を引き起こす可能性を指摘している(19)。

以上、人工湧昇に関しては既に述べたモデル実験での結果も含めてこの報告書でも色々な課題が指摘されているが、海洋での地球工学的な手法としては、全海洋に展開した場合の効果やその副作用などが地球システムモデルを使って既に研究されており、鉄散布実験などと並んである程度進展している技術として評価されている。しかし、鉄散布実験に関しても、ロンドン条約等の規制により規模を拡大した実験は停止状態になっているように、各国の経済水域を超えた海域をも対象にする地球工学による手法は政治的にも難しい点があることは確かである。従って、OTECを主目的とした人工湧昇では各国でコントロール出来る規模での実施を着実に進めることで、表層の生態系への影響等を評価していくことが当面の方向としては重要であると思われる。

なお、OTECに関してGESAMP報告書では、この技術は海洋の表層と深層の温度差が20°C以上の所では確実に正のエネルギーを生じさせること、100MWの発電を行うには、10,000トン/分で深層水をくみ上げる必要があること、生じたエネルギーは直接電力とする以外にも水素燃料化することも考えられると述べている。また、大規模な深層水のくみ上げは温暖化緩和策としての人工湧昇と同じ結果をもたらすことになるので、この報告書で取り上げたとしている。最後にこの温度差発電に関する理論は極めて普遍的であるが、海洋でのその光学的な応用は日本やハワイでのパイロット開発に留まっており、それらの発電量は、まだ商業ベースの数桁下であることを指摘している。

参考文献

1. Kirke B.2003. Enhancing fish stocks with wave-powered artificial upwelling. Ocean Coast Manage,46:901-

2. Masuda T, Furuya K, Kohashi N, Sato M, Takeda S, Uchiyama M, Horimoto N, Ishimaru T. 2011. Lagrangian observation of phytoplankton dynamics at an artificially enriched subsurface water in Sagami Bay, Japan. *J.Oceanogr.*, 66: 801–813
3. Mencher F. M., Spencer R. B., Woessner J.W., Katase S.J., Barclay D.K. 1983. Growth of Nori(*Porphyra tenera*) in an experimental OTEC aquaculture system in Hawaii. *Journal of the World Mariculture Society*, 14,458-470
4. Lovelock J E, Rapley C G. 2007. Ocean pipes could help the earth to cure itself. *Nature*,449:403
5. GESAMP (2019). “High level review of a wide range of proposed marine geoengineering techniques”. (Boyd, P.W. and Vivian, C.M.G., eds.). IMO/FAO/UNESCO/IOC/UNIDO/ WMO/IAEA/UN/UN Environment/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection).Rep. Stud. GESAMP No. 98, 144 p.
6. Yool A, Shepherd J G, Bryden H L, Oschlies A. 2009. Low efficiency of nutrient translocation for oceanic uptake of carbon dioxide. *Geophys Res Lett*, 114, C08009, doi:10.1029/2008JC004792.
7. Takahashi, T., Sutherland, S. C., Wanninkhof, R., Sweeney, C., Feely, R. A., Chipman, D. W., de Baar, H. J. W. 2009. Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *DeepSea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(8–10), 554–577.
8. Oschlies A, Pahlow M, Yool A, Matear R. 2010. Climate engineering by artificial ocean upwelling: Channelling the Sorcerer’s apprentice. *Geophys. Res. Lett.*, 37, L04701, doi:10.1029/2009GL041961.
9. Keller D P, Feng E Y, Oschlies A. 2014. Potential climate engineering effectiveness and side effects during a high carbon dioxide emission scenario. *Nat Commun*, 5: 3304–3315
10. Martin J.H. Glacial-interglacial CO₂ change: The iron hypothesis. 1990, *Paleoceanography*, 5, 1-13
11. Williamson P, Wallace D WR, Law C S, Boyd P W, Collos Y, Croot P, Denman K, Riebesell U, Takeda S, Vivian C. 2012. Ocean fertilization for geoengineering: A review of effectiveness, environmental impacts and emerging governance. *Process Saf Environ*, 90: 475–488
12. Bauman S, Costa M, Fong M, House B, Perez E, Tan M, Thornton A, Franks P. 2014. Augmenting the biological pump: The shortcomings of geoengineered upwelling. *Oceanography*, 27: 17–23
13. Yanli Jia, Gérard C. Nihous and Krishnakumar Rajagopalan. 2018 An Evaluation of the Large-Scale Implementation of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Using an Ocean General Circulation Model with Low-Complexity Atmospheric Feedback Effects. *J. Mar. Sci. Eng.*, 6, 12; doi:10.3390/jmse6010012
14. Pan Y, Fan W, Huang T-H, Wang S-L, Chen C-T A. 2015. Evaluation of the sinks and sources of atmospheric CO₂ by artificial upwelling. *Sci Total Environ*, 511: 692–702
15. Pan Y W, Fan W, Zhang D H, Chen J W, Huang H C, Liu S X, Jiang Z P, Di Y N, Tong M M, Chen Y. 2016. Research progress in artificial upwelling and its potential environmental effects. *Sci China Earth Sci*, 59: 236–248.
16. Maruyama S, Yabuki T, Sato T, Tsubaki K, Komiya A, Watanabe M, Kawamura H, Tsukamoto K. 2011. Evidences of increasing primary production in the ocean by Stommel’s perpetual salt fountain. *Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 58: 567–574
17. Lenton, T. M., & Vaughan, N. E. (2009). The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(15), 5539–5561. <https://doi.org/10.5194/acp-9-5539-2009>
18. S. H. Salter. (2009)Wave-powered destratification for hurricane suppression, acidity reduction, carbon storage and enhanced phytoplankton, dimethyl sulphide and fish production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 6, 452012
19. Kwiatkowski, L., Ricke, K. L., & Caldeira, K. (2015). Atmospheric consequences of disruption of the ocean thermocline. *Environmental Research Letters*, 10(3), 034016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/3/034016>