

CO₂海洋隔離の役割

尾崎 雅彦

東京大学大学院新領域創成科学研究科
〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5

CO₂ Ocean Storage in Overshoot Scenarios

Masahiko Ozaki

Graduate School of Frontier Sciences, the University of Tokyo
5-1-5, Kashiwa-no-ha, Kashiwa City, Chiba, 277-8561 Japan

Abstract: CO₂ ocean storage is one of CCS schemes. However, its role on the mitigation of atmospheric CO₂ would be some different from geological storage, because a part of CO₂ injected into deep ocean would become released to the air after several hundred years due to the global carbon circulation. In this paper, the equilibrium conditions in the low-carbon ages and the carbon-free ages are separately defined and the possible contribution of ocean storage in the low-carbon ages is pointed, especially in the case of overshoot scenarios in the near future. In the next, a result of case study is presented in order to show the technological potential of the moving ship type of ocean storage for example. In this case study, 50 million ton CO₂ per year is assumed released in a deep water area of 103km by 333km. And the feasibility of engineering, the durability of the project for 30 years, the impact assessment on marine organization, *etc* are briefly presented.

Keywords: CCS, ocean storage, moving ship, overshoot scenario

1. 緒言

世界気象機関 (WMO) によると、大気中CO₂の2007年の世界平均濃度は過去最高の383.1ppmとなり、最近10年間の濃度増加量2.0ppm/年がほぼ維持された[1]。IPCC第四次評価報告書[2]が示す、気温上昇2°Cに対応するCO₂濃度350ppmはすでに超過し、このペースのままに行けば2050年には3°Cに対応する460ppmをも超えることになる。気候システムに危険な影響が及ばない濃度のレベルについては、未だコンセンサスが得られていないものの、現在も増え続けるCO₂年間総排出量の増加を止めて減少に転じさせ、その効果によってCO₂濃度上昇が緩和し、できるだけ低いレベルで安定するようになるには、IPCC報告書が示すように今後20~30年間の削減努力が大きな影響を持つ。

第34回主要国首脳会議 (北海道洞爺湖サミット) では

2050年に世界の総排出量を半減する目標が合意され、その達成に向けて先進各国が設定する中期目標 (2020年頃)・長期目標 (2050年) について数値が出そろい始めている。中期目標や長期目標は、排出量を減らしていく時間軸上の経路 (排出経路) のマイルストーンを意味しており、これの未達成は即ち、計画よりも多い量のCO₂が大気中に蓄積されることになるので、それより先の削減目標を計画より厳しくしなければならなくなるのが原則である。元の排出経路に復旧しただけでは不十分である。

さて、CO₂排出量を速やかに大幅削減する必要性は国際的に理解されるようになったにも関わらず、現実にはエネルギー需要の伸びおよび脱化石燃料の困難さという高い障壁がある。CCS (CO₂回収貯留、CO₂ Capture and Storage) は、化石燃料を使用しつつ、発生したCO₂を大気から隔離できる点で期待が高まっている。

この文脈において、地中貯留は、サイトを適切に選べば

非常に長い期間（千年以上）にわたってCO₂を大気から隔離できるとみなされている。しかし、本稿で採り上げる海洋隔離は、部分的な隔離でしかないことに留意が必要である。すなわち、大気と海洋は相互に物質や熱の交換を行っている一つの系であって、いずれ平衡状態になろうとするダイナミクスを有するため、その系に人為的に加えたCO₂は、たとえ深層に入れたにしても長期的（数百年程度後）には応分の比率（2～3割程度と推測される）で大気中に追加したと等価になると推定されている[3]。

したがって、海洋隔離は、技術的にはCCSで括られ、ポテンシャルが膨大と言われるものの、化石燃料を使いつくすための手段ではない。地中貯留とはカテゴリーが異なることを認識し、海洋隔離の果しうる役割を明らかにする作業が必要である。

2. CO₂海洋隔離の役割に関する論考

(1) 大気中CO₂濃度安定とは？

海水中にはもともとCO₂が溶けていて、大気中のCO₂濃度が上昇したり表層の海水温度が低くなるとCO₂は海面を通じて海に吸収され、その逆の時にはCO₂が海から大気へ放出される。産業革命以前は、海域や季節などによって違いはあるものの、地球全体としてほぼ平衡状態が保たれ、大気中CO₂濃度の平均値は安定していた（およそ280ppm）。人為的にCO₂が大量に大気中へ排出されるようになると、海はCO₂を正味として吸収するようになった。しかし、その時々で大気と海洋全体が平衡状態に達した場合に期待される濃度に比べると、大気中および海洋表層水中のCO₂濃度はかなり高めに推移し、その一方で、深層の海水中のCO₂濃度上昇は追従していない。これは、大洋では一般に表層付近（温度躍層より上の混合層）や局所的な湧昇流域・沈降流域を除くと海水の鉛直方向の混合が極めて遅く、深層へのCO₂の移行が徐々にしか進まないためであると考えられている。

人類が将来、CO₂を大気中へ（もちろん海洋中へも）排出しない時代が到来すれば、それ以降もしばらく続く海によるCO₂の吸収によって大気中CO₂濃度は自然に減少し、やがて平衡状態になり、産業革命前よりは高いもののその水準で安定するものと考えられる。この安定の状態を、ここでは「ゼロ排出時代の平衡安定（Equilibrium in Carbon Free Days）」と呼ぶものとしておく。

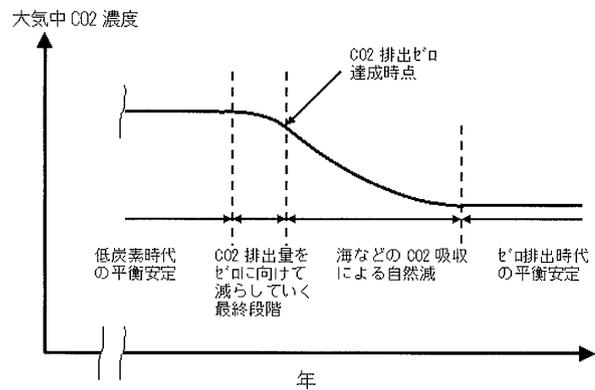


図1. CO₂排出ゼロ達成時点前後の大気中CO₂濃度履歴のイメージ

仮にCO₂を大気中へ排出しなくなった時点を明確に特定できたとしても、その前後の大気中CO₂濃度の履歴のイメージは図1のように示される。すなわち、排出しなくなった時点から先は「ゼロ排出時代の平衡安定」の濃度レベルに向けて通減していく。一方、排出しなくなった時点よりも前においては、CO₂排出量がゼロに向けて減っていく期間、すなわち年間あたりの大気への排出量が海（およびその他の吸収源）による吸収量よりも少なくCO₂濃度が年々低下する期間があり、さらにその前には、現在国際社会が協議しながら目指している「CO₂濃度の安定」の状態があると考えられる。この段階では、現状の2割程度のCO₂がまだ排出されていることが想定される。本来期待される平衡状態に比べて海よりも大気側に余分にCO₂があって、その差を駆動力として生じる「正味の」吸収量が、（現状の2割程度の）人為的排出量と平衡している状態と解釈される。この安定の状態を、ここでは「低炭素時代の平衡安定（Equilibrium in Low-Carbon Days）」と呼ぶものとしておく。

ところでもし化石燃料が地球上から尽きることがなければ、この国際社会が目指している「低炭素時代の平衡安定」は未来永劫つづくのであろうか？

海による吸収の観点で見ると、この平衡安定が長く続くことは、将来の「ゼロ排出時代の平衡安定」における濃度レベルを上げつつけていることに相当する（図2のイメージ）。いずれ両方の平衡安定のレベルが接近し、海が正味の吸収を行わなくなる時が来る。それまでには排出量をゼロにしなければならないはずである。

正確には、陸の吸収源や海の生物ポンプの影響など、他の要因を考慮して十分に検討する必要があるが、大すじのところは、以上のようなことであろうと思われる。

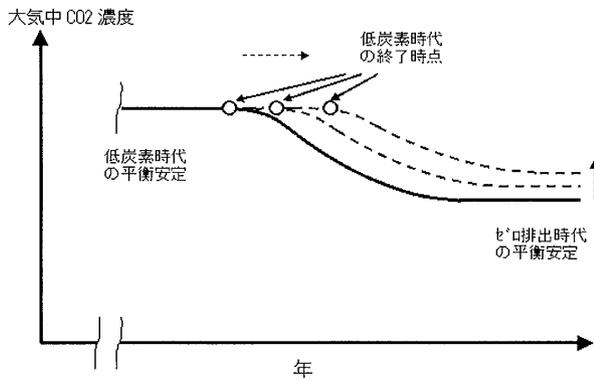


図2. 低炭素時代の終了時点が長引いたときのゼロ排出時代への影響のイメージ

なお、気候変動など、いわゆる温暖化影響の観点では「低炭素時代の平衡安定」における濃度レベルを抑制することが重要であるが、海水中のCO₂濃度が上昇して海の生態系に影響を及ぼす「海水酸性化」の観点で見ると、「ゼロ排出時代の平衡安定」における濃度レベルの上昇の許容は即ち、将来の中深層水の酸性化を進めていることになる。「低炭素時代の平衡安定」と「ゼロ排出時代の平衡安定」の両方のレベルがどうあるべきか、定まる必要がある。

(2) 現在から「低炭素時代の平衡安定」まで

喫緊の課題としては、まず「低炭素時代の平衡安定」の濃度レベルが、「気候システムに危険な影響が及ばない濃度のレベル」よりも低くなるように国際的な努力がなされていかなければならないが、現実味のある排出経路を設定する作業の中で、大気中CO₂濃度のオーバーシュート・シナリオが論じられるようになってきている。現時点で、気温上昇2°Cに対応するCO₂濃度350ppmはすでに超過しており（実際には平均気温は0.7°Cしか上昇していないが）、また今後20～30年間の国別の削減目標には調整の限界もありそうである。したがって、しかるべきレベルで平衡する前に過渡的な過大濃度が生じることを議論の選択肢に入れざるをえなくなっている。（図3参照）

非可逆的な悪影響が出現する現象にとって、許容レベルからのオーバーシュートは危険である。しかしその程度と期間がわずかであると予想される場合、それを厳密に規制できるほどに各種の予測が確実でないのも事実であろう。では、どこまでなら猶予でき、それを誰が何を根拠に決めるのか？ なし崩しに規制を甘くすることにならないのだろうか？

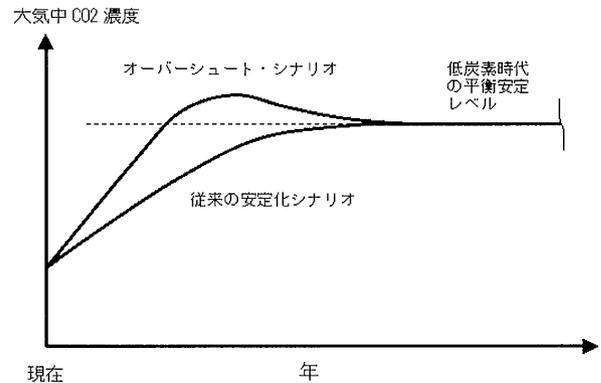


図3. 大気中CO₂濃度のオーバーシュート・シナリオのイメージ

CO₂濃度安定化のレベルだけでなく、そこに至るプロセスの理解と協議も重要になってきたと言える。

(3) 海洋隔離の果せる役割

海洋隔離が検討に値するのは、深海に入れるCO₂の一部が大気中に再放出されるまでに数百年以上の長時間がかかることと、扱える量の膨大さにあると考えられる。これらを利用することによって、オーバーシュートのリスクを回避しようという点で、海洋隔離の役割が正当に与えられるのではないだろうか。

もちろん、他の手段（省エネ・高効率化・再生可能エネルギー・原子力・地中貯留など）を駆使して、オーバーシュート無しで「低炭素時代の平衡安定」に到達できるのが望ましい。しかしオーバーシュートを回避できない場合に、大規模な海洋隔離の実施は、過渡的な過大濃度を抑制することに貢献できる。

このような「海洋隔離の使い方」をもって温暖化対策のポートフォリオを描く場合、まずはオーバーシュートさせないための排出経路を計画し、現実にはその計画を超過せざるをえないCO₂を対象として海洋隔離することに効用が認められると考えられる。

また一方、「低炭素時代の平衡安定」の期間中においても、平衡を保つために許容されるCO₂排出量を超える分につき海洋隔離することは有効である。ただし、海洋隔離したCO₂の一部が再放出されるであろう数百年先よりも前に、人類がCO₂の排出を停止できることが前提である。そして、いずれにしても海洋隔離は、「ゼロ排出時代の平衡安定」レベルを下げるものではないことに留意が必要である。

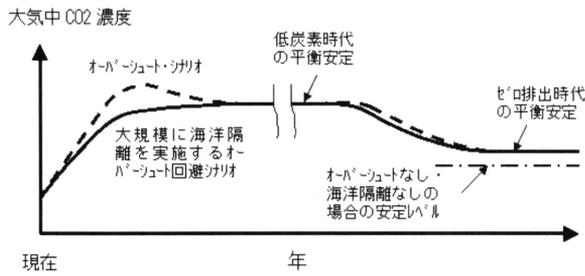


図4. 大規模に海洋隔離を実施するオーバーシュート回避シナリオのイメージ

図4に、海洋隔離を実施することでオーバーシュートのリスクを回避する場合の、現在から低炭素時代、ゼロ排出時代まで通して概観した大気中CO₂濃度の履歴を示す。

3. 海洋隔離技術

(1) Moving shipによるCO₂希釈放流

CO₂が海水に溶けると、CO₂は海水中の水と反応し、溶解二酸化炭素 (CO₂)、重炭酸イオン (HCO₃⁻)、炭酸イオン (CO₃²⁻) の三態並存状態となる。海洋隔離によってCO₂を深海の海水中に追加的に溶かし込むと、単位重量あたりの海水中に含まれるCO₂の全重量 (全炭酸) が増え、

平衡状態が変化して水素イオンが放出されて海水は酸性化 (pHが低下) し、また溶解態として存在するCO₂も増えるので海水のCO₂分圧が高くなる。それらの程度に応じて海洋生物の生残や成長に何らかの影響を与える可能性がある。

CO₂を深海の大量の海水中に薄く溶け込ませることによって生物影響を小さくしようとする海洋隔離の技術構想が、以下に述べるMoving shipによるCO₂希釈放流である。図5に技術的な実行手段の概要を示す。火力発電所や製鉄所などの大規模発生源で排ガスからCO₂を分離回収し、圧縮・液化後、船で隔離地点まで海上輸送する。隔離海域では長いパイプを吊り下げた放流船がCO₂を受け取り、低速で航走しながらパイプを介してCO₂を深度1500~2500mの深海へ放流する。放流されたCO₂は表面がハイドレート (低温・加圧条件下で生成されるCO₂と水の化合物) の膜で覆われた多数の液滴となり、海水中に徐々に溶け出しながら、ゆるやかに浮上する。

浮上する液滴から少しずつCO₂が周囲の海水に溶ける過程 (鉛直方向への分散) と、CO₂放流点の移動 (水平方向への分散) の組み合わせによって、CO₂を大容量の海水中に分布させ、単位体積あたりの海水中に追加されるCO₂の量を抑える点に特徴がある[4][5]。

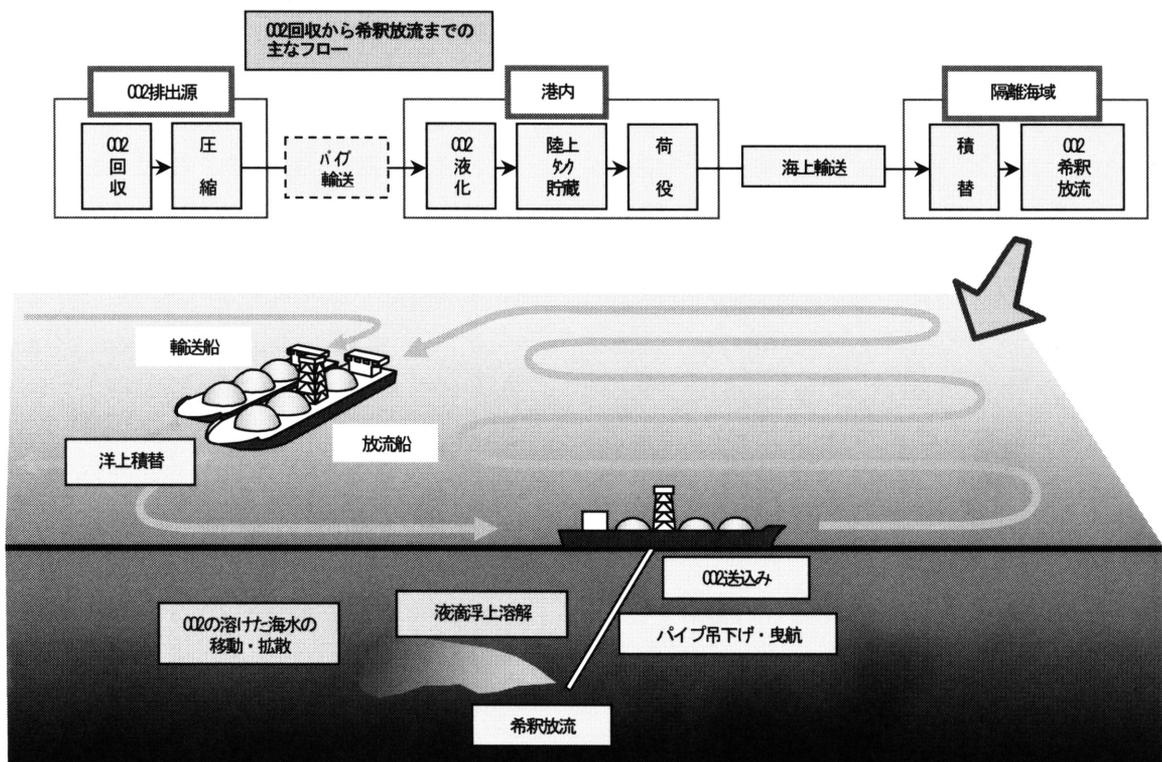


図5. Moving shipによるCO₂希釈放流の技術概念

これまでの研究開発の結果、CO₂希釈放流に関する工学的可能性の結論は以下のように表すことができる[6]。

- ・温暖化対策としてのCO₂削減効果に意味の生じる、年間数百万トン以上のCO₂を、海上輸送し、2000m以上の深海へ放流することは、造船や海洋石油・ガス開発の分野で成熟している技術の応用で実用化が可能である。
- ・1隻あたりの注入流量0.1トン/秒(360トン/時)で、4~5ノット程度(時速7~9km)で移動しながら、初期の液滴サイズ15mm前後にてCO₂を連続放流することにより、浮上していくCO₂液滴に随伴するわずかな時空間領域を除けば、CO₂を重量で10万倍以上の海水中にごく短時間のうちに溶かし込める。その後、海洋の自然な混合拡散で希釈が進行する。

(2) ケーススタディ

Moving ship方式によってCO₂を海洋隔離する場合の環境影響評価技術の構築を主な目的として、経済産業省主導による研究開発プロジェクトが実施されている。そのフェーズ1(平成9年度~13年度)、フェーズ2(14~18年度)を通じて、海洋観測による実海域データの取得、生物影響に関する実験的研究、環境影響評価法の検討、深海の温度・圧力環境下におけるCO₂と海水の物理・化学的データの収集、放流されたCO₂やCO₂溶解海水の挙動シミュレーション法の開発(液滴レベルから大洋スケールまで)、CO₂海上輸送・希釈放流システムの構想および要素技術の開発、モニタリング技術の開発など、幅広い範囲のテーマが対象とされ、多岐にわたる専門分野の研究者・技術者が参加して、調査・研究・開発が行われた。平成18年度でフェーズ2が終了するにあたり、個々の研究の成果を適用して、統一条件の下で一貫したケーススタディが行われた。

ケーススタディの全体検討フローを図6に示す。それまでに得られたデータや知見にもとづき前提条件・評価基準を設定し、海洋隔離の仕様の計画・検討を行い、開発されたシミュレーション法などを用いて予測・評価を行うというフローになっている。主な結果は次のようになった[7]。なお、本来ならば予測結果を用いて計画の修正をすべきであるが、一部のシミュレーション法の開発や修正が並行作業で進められたため、計画の適正化・合理化が十分に図られずに終わったことを付記しておく。

1) 想定課題

日本国内で回収されるCO₂を、日本の排他的経済水域内の1ヶ所の海域で、毎年連続して5000万トンずつ放

流して海洋隔離することは可能か?(注;5000万トン・CO₂/年は、日本の現在の排出量の約4%に相当する)

2) CO₂放流海域

- ・広さ・形状;東西方向1度(約103km)×南北方向3度(約333km)の四辺形
- ・位置;北緯19度~22度、東経133度~134度

3) CO₂回収源

- ・回収源;国内3ヶ所の集中排出源を想定
- ・放流海域までの輸送距離;1500km(片道)
- ・回収量;一日あたり計15.3万トン
(ただし定期点検時期3ヶ月間は9.0万トン)

4) 海上輸送・放流システム

- ・輸送船;積載量56000トン(実質輸送量53280トン/回)
速力32km/hour(17.3ノット)
隻数20
- ・放流船;積載量56000トン(実質放流量53280トン/回)
放流時の船速9km/hour(4.9ノット)
隻数30
- ・陸上タンクの貯蔵容量;計80万トン
- ・運行要領;

放流船は放流海域の北縁近くで輸送船からCO₂を受け取り、海域の西側半分を北から南、東側半分を南から北へ航走してCO₂を放流するものとする。

5) 希釈放流仕様

- ・1隻の放流船からのCO₂放流流量;0.1ton/sec
- ・放流船の前進速度;2.5m/sec
- ・放流時のCO₂液滴サイズ;直径14mm
- ・放流ノズルを放流船の幅方向へ展開する長さ;15m
- ・パイプ;内径180mm、肉厚10mmの鋼管
- ・放流深度;以下の深度への6層等分放流
1640m, 1830m, 1970m, 2080m, 2290m, 2500m

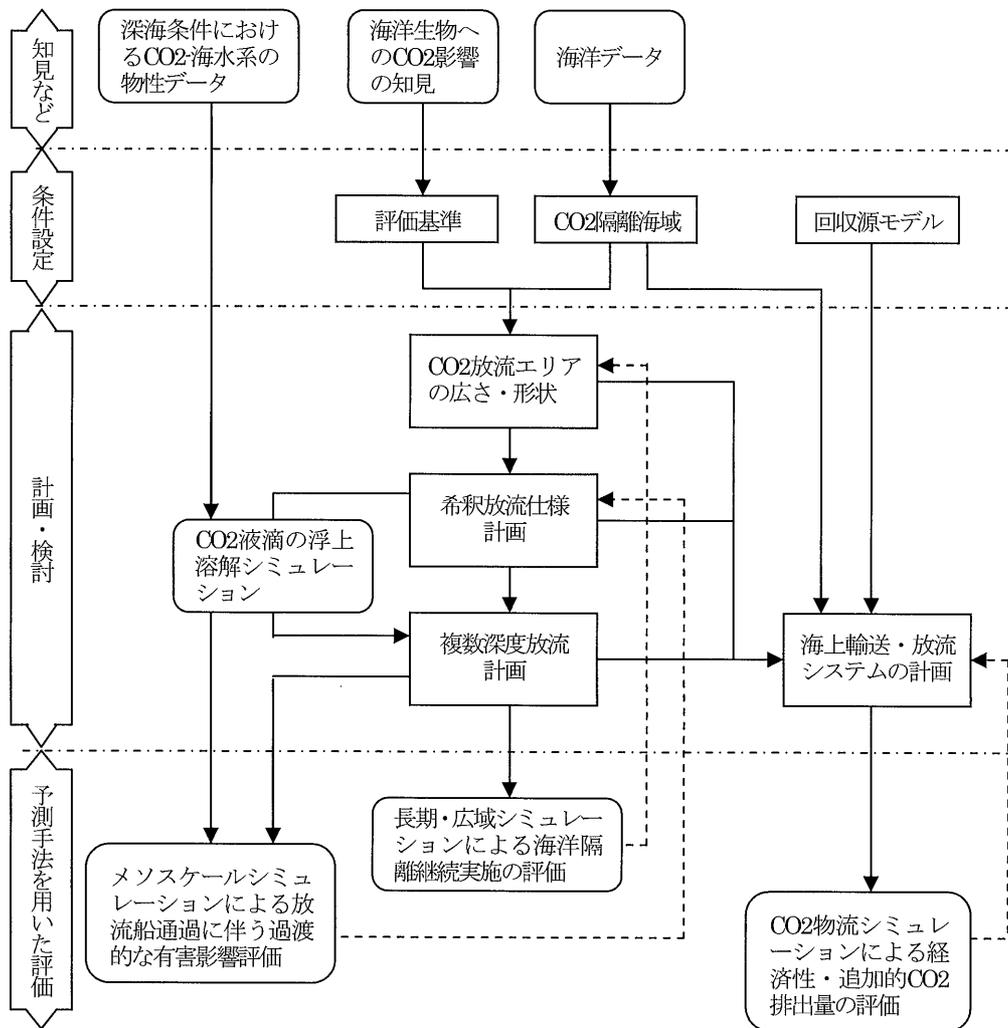
6) 経済性・追加的CO₂排出量の概略評価

- ・コスト;初期コスト7287億円
操業コスト890円/トン-CO₂(除く償却費)
- ・追加的CO₂排出量;取扱量の4.76%

7) 生物影響評価

- ・海洋隔離の継続実施による生態系への影響

広域シミュレーション[8]を実施した結果、30年間の継続的な放流により、CO₂放流海域内部および周辺における海水中CO₂濃度の上昇値が、生態系に影響のないレベルとして設定されたPNEC(予測無影響濃度)[9]を超過しないことがわかった。



注；今回検討では、破線表示のループは回されていない

図6. ケーススタディの検討フロー

・放流船通過に伴う過渡的なCO₂濃度上昇による生物個体への有害影響

CO₂液滴浮上・溶解シミュレーションの結果[10][11]をメソスケールモデルに組み込みシミュレーション[12]を実施した。その結果、①海洋隔離の継続実施による海水中CO₂濃度上昇、②放流船通過に伴う過渡的なCO₂濃度上昇、③隣接して航走する船からのCO₂や以前に放出されて漂っているCO₂の影響が重畳しても、中深層の生物に有害影響を与えないレベルとして設定されたNOEC(無影響濃度)[9]を超過しないことがわかった。

・CO₂液滴との干渉による生物影響

CO₂海洋隔離の生物影響を評価する際の指標生物としたカイアシ類(代表的な動物プランクトン)の96%

はCO₂液滴の到達しない1000m以浅に生息している。CO₂が放流される海域内の深度1000~2500mに生息するカイアシ類のうち4~5%は、一年に1度、CO₂液滴に遭遇すると概算されるが、液滴が押しつけて進む海水とともに液滴の傍らを通り過ぎるものが多いなど各種要因により、死亡・損傷にいたる可能性はより小さいと考えられ、影響は非常に小さいと予想される。

4. 結 言

CO₂海洋隔離は、概念としてはCCSで括られるが、深海に入れたCO₂のうちの一部(2~3割)が数百年程度先には大気に追加されたのと等価になると推定される点で、地中貯留とカテゴリーが異なる。そこで、海洋隔離が果しうる

役割について論考し、現在から低炭素時代の平衡安定までの間に生じる、大気中CO₂濃度のオーバーシュート（過渡的な過大濃度）のリスク回避に対して貢献できることを示した。またそのためには、海洋隔離で扱える量が膨大である必要があるため、日本の排他的経済水域内の1ヶ所の海域で、毎年連続して5000万トンずつ海洋隔離するとしたケーススタディの結果を例示した。

オーバーシュート・シナリオにおいて海洋隔離の役割を位置づけるのであれば、海洋実験やパイロットテストを行うなど、早急に技術・環境影響評価法を確立して、準備を整える必要がある。また、目的から言っても、隔離後のCO₂の挙動の観点から考えても、排他的経済水域の中で議論はとどまらない。公海を含めて複数国が共同運営・管理する水域を設置し、毎年何億トンものCO₂を海洋隔離するといった構想の可能性を検討したいものである。

謝 辞

本稿における第3章の内容は、(財)地球環境産業技術研究機構がとりまとめる「CO₂海洋隔離に伴う環境影響評価技術の開発研究」の成果を利用したものである。

参考文献

1. WMO Greenhouse Gas Bulletin No.4 (2008)
2. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Cambridge Univ Press (2001)
3. IPCC Special Report on CO₂ Capture and Storage: Carbon dioxide Capture and Storage, Cambridge Univ Press (2005)
4. M. Ozaki, *et al*: Dilution of Released CO₂ in Mid Ocean Depth by Moving Ship, Greenhouse gas Control Technology (1999)
5. 尾崎雅彦、喜田潤; CO₂海洋隔離技術<Moving ship方式の開発>、配管技術 Vol.49 No.2 (2007)
6. 尾崎雅彦; CO₂回収貯留と海洋への隔離技術、月刊海洋 Vol.39, No.6 (2007)
7. 尾崎雅彦、南浦純一; 単一海域における年間5000万トン海洋隔離ケーススタディ、海洋理工学会平成19年度春季大会講演論文集 (2007)
8. Y. Masuda, *et al*: A Numerical Study with an Eddy-Resolving Model to Evaluate Chronic Impacts in CO₂ Ocean Sequestration, 8th Conf on Greenhouse Gas Control Tech, Trondheim (2006)
9. J. Kita, *et al*: Impact Assessment of High-CO₂ Environment on Marine Organization, 8th Conf on Greenhouse Gas Control Tech, Trondheim (2006)
10. S. Hirai, *et al*: Dissolution Rate of Liquid CO₂ in Pressurized Water Flows and the Effect of Clathrate Films, Energy, Vol.22, No.2/3 (1997)
11. B. Chen, *et al*: Modelling of CO₂ Dispersion from Direct Injection of CO₂ in the Water Column, J of Geophysical Research – Oceans 110 (2005)
12. SM Jeong, *et al*: Numerical Study on CO₂ Ocean Sequestration in Middle Scale Ocean by Using Moving/Nesting Grid Methods, 8th Conf on Greenhouse Gas Control Tech, Trondheim (2006)