CO₂ 海洋隔離と CO₂ ハイドレート

CO₂ Ocean Sequestration and CO₂ Hydrate

綾 威雄

Izuo AYA

山根 健次

Kenji YAMANE

小島 隆志

Ryuji KOJIMA

波江 貞弘

Sadahiro NAMIE

CO₂ ocean sequestration, which is thought to be a promising measure to mitigate global warming, can be classified mainly into the dissolution and the storage methods. On the evaluation of these measures, CO₂ hydrate plays an important role, because CO₂ becomes a hydrate in the ocean deeper than 500 m (North Pacific Ocean) ~ 900 m (North Atlantic Ocean). The solubility of CO₂ shows a dual nature (solid and liquid solubilities) in the hydrate forming region. Two types of unexpected hydrate membrane strength just below the dissociation temperature and in a CO₂ saturated solution, and the rebuilding process under stressed conditions greatly influence the above two CO₂ ocean sequestration methods.

[CO₂, ocean sequestration, dissolution method, storage method, solubility in hydrate region, hydrate membrane strength, rebuilding of hydrate]

1. はじめに

1988 年の米国上院における気象学者の「地球温暖化に関する証言」を契機とする地球温暖化への国際的な関心の高まりとともに、1978 年に米国の Marchetti [1] が既に提案していた「回収 CO₂ の海洋隔離法」に関心が持たれるようになった。その後、しばらくは、この隔離法に関する内外の関心度は必ずしも一定ではなく、時期尚早と見る向きもあった。しかしながら、1997 年 12 月に京都で開かれた気候変動枠組条約第 3 回締約国会議(COP3)において、先進工業国に課せられる温室効果ガスの排出削減率は、我が国が当初主張していた 1990 年レベル±0 を大幅に上回る高い水準(我が国の場合、1990 年実績の - 6 %)に設定され、その実現を 2008 ~ 2012 年までに達成するとの議定書が採択された。その厳しい削減率を達成するためには、省エネルギーやライフスタイルの変更といった従来型の方法のみでは不十分との認識が広まり、1998 年 6 月 19 日に決定された温暖化対策推進大綱には、CO₂ の深海貯留技術が今後「推進すべき革新的技術」の一つとして掲げられるに至った。

一方、CO₂ を海洋で処理しようとする、500 m

~ 900 m 以深では海水と反応して、クラスレート・ハイドレート(以下、ハイドレート)となるが、我が国において CO₂ 海洋隔離研究が始まった 1990 年頃には、CO₂ ハイドレートの物性値、特に時間項の含まれる物性値がほとんど整備されておらず、その解明が CO₂ 海洋隔離法を評価する上で必須の要件と考えられた。また、我が国に遅れて CO₂ 海洋隔離研究が始められた米国では、2001 年 2 月に DoE 主催で開かれた "Expert's Workshop on Direct Ocean Sequestration of CO₂" の化学分野報告書の冒頭に、「CO₂ と海水との界面に生成する CO₂ ハイドレートの性質の解明が、化学分野の中心的課題である」と述べられている。

そこで、CO₂ 海洋隔離の要件、種類、投入法と海洋生態系への影響評価から見た特徴について述べるとともに、CO₂ ハイドレートの性質との関連について私見を交えて解説することとする。

2. CO₂ 海洋隔離の特徴

2.1 求められる処理量

原油の燃焼により生じる CO₂ は、1 個の炭素原子に 2 個の酸素原子が加わることにより、Fig. 1 に示す

Fig. 1. Weight ratio of carbon dioxide and hydrocarbon.

ように、重量が元の 3 倍強となる。従って、毎日 20 万トンタンカー 3 隻弱分の原油を輸入している我が国が大気に排出し続けている原油起源の CO_2 は 8 隻分にもなる。LNG や石炭起源の CO_2 を含めると、10 隻分を越える。もちろん、これらを全て処理する必要はないが、温暖化傾向を緩和させるに要する処理量は極めて大量となる。

本稿で述べる海洋隔離法は、温暖化対策技術に求められる、処理量の超大量性を満足している。

2.2 CO_2 ハイドレート

Fig. 2 は、水 - CO_2 系の相平衡図[2]を示している。 CO_2 は 'Hydrate' と表示された領域において、水と反応してハイドレートと呼ばれる包接化合物になる。ハイドレートは、水素結合で結ばれた水分子からなるかごの中に、ゲスト分子(今の場合、 CO_2)が分子間力により閉じこめられることにより、かご構造自体が安定化した結晶性の固体である。4 重点 Q_2 では、水 - ハイドレート - 液体 CO_2 - 気体 CO_2 の 4 相が共存できる。 Q_2 (10.15 , 4.47 MPa) [3]より低温・高圧領域では、液体 CO_2 は水と反応してハイドレートとなる。

Fig. 3 は、深度を圧力と見立てて CO_2 の相平衡図を描き直したものである。海水の場合、 Q_2 点は、塩類の存在により 1.0 K ほど低下し、9.1 程度となる[4]。Fig. 3 には、太平洋と大西洋の南北断面等温線図[5]から選んだ代表的な 2 海域の鉛直温度分布例が記載されている。海水温度は海域によりかなり異なり、ハイドレート生成域は、北太平洋では 500 m 以深、北大西洋では 900 m 以深となる。気体 CO_2 - 海水間でハイドレートが生成する海域(Q_2 から左上に伸びる平衡曲線と温度分布曲線が交わる海域)は極めて限られている。

Fig. 2. Phase diagram of water- CO_2 system [2].

Fig. 3. State of CO_2 at equivalent pressures of deep ocean and vertical temperature distributions [10].

2.3 CO_2 の密度

CO_2 と海水との密度の関係も、 CO_2 海洋隔離を検討する上で重要である。Fig. 4 は、深度に換算した圧力における海水と CO_2 の密度を比較したものである。密度計算には、圧力だけでなく Fig. 3 に示される温度分布も考慮したが、その影響は海水ではほと

んどなく, CO_2 で少しある。Fig. 4 から, 液体 CO_2 は水と比べて圧縮性に富み, 深度 2700 m 付近で海水と同密度となることが分る。

3. CO_2 海洋隔離法の種類と特徴

これまでに提案されている多くの CO_2 海洋隔離法は, 以下に述べる「溶解法」と「貯留法」に大きく分類することができる。Fig. 5 は, これらの代表例を示している[6]。

3.1 溶解法

溶解法は, 海洋が分子数で大気の約 430 倍を有するという広大さを利用し, 均質に溶解した後の海洋の CO_2 濃度増加はほとんど無視できることを基本原理としている。

CO_2 ハイドレートが非溶解と期待されていた 10 年前までは, 溶解法の適用範囲は, CO_2 がハイドレートとならない上述の深度以浅と考えられていた。しかし, 一旦生成した CO_2 ハイドレートも, 海水中 CO_2 濃度が飽和に達していない場合には徐々に溶解すること, 及び, ハイドレート生成に要する時間が放出 CO_2 液泡の溶解時間より長くなる可能性のあることが高圧ループによる実験[7]から明らかとなった結果, 溶解法の適用深度は, 液体 CO_2 が海水より軽く,

Fig. 4. Densities of seawater and CO_2 in deep ocean [10].

CO_2 液泡が上昇する深度 (2700 m 以浅) と考えられるようになった。溶解法は, 気体溶解法と液体溶解法に細分できる。

3.1.1 気体溶解法

気体溶解法は, 相変化深度, 即ち, 北太平洋では 450 m 以浅, 北大西洋では 500 m 以浅の海域に適用でき,

(a) Liquid dissolution method

(b) Storage method

Fig. 5. Typical two types of CO_2 ocean sequestration methods proposed so far.

他の海洋隔離技術と比較して経済的に有利と考えられ、ノルエーや我が国などで基礎的[8]及び開発的研究[9]が行われている。

500 m 以浅は自由対流圏であるため、溶解した CO_2 が浅海に留まっていると、やがて、 CO_2 の海中濃度と大気中濃度とがほぼ分圧平衡にある海面にまで達し、溶解させた CO_2 が大気へ環流する恐れがある。これを妨げる現象として、回りの海水より重い CO_2 溶解海水が重力沈降により、対流圏より深い海域へ運ばれることが期待されている。

しかし、 CO_2 放出海域では、おびただしい数の CO_2 気泡の上昇により誘起される上昇流と濃度拡散が、 CO_2 溶解海水の沈降を妨げるという、複雑な現象の出現が予想され、その解明が気体溶解法評価のキーポイントとなっている。

3.1.2 液体溶解法 (中層放流)

液体 CO_2 を深度 500 m ~ 2000 m の海域に放出させることから、中層放流とも言われ、気体溶解法と比べて、放出深度は深くなるものの、 CO_2 の体積が少なくとも 1/6 以下となることから、投入設備の小型化による経済的メリットが考えられる。

液体溶解法に関して、これまでに、放出気泡径と上昇速度についての実験的検討[10]や解析的検討[11]がなされている。また、密度平衡深度付近で水平に拡散した CO_2 溶解海水は、海洋の鉛直循環流に乗ってやがて海面に達し、一旦溶解した CO_2 が大気に還流する。放出 CO_2 が海洋に留まる期間は、放出深度や海域にも依存するが、100 ~ 300 年程度と考えられており、海水の鉛直循環周期の 2000 年[12]よりはるかに短い。この意味から、溶解法は、 CO_2 をある期間、海洋に隔離する手段ということになり、その隔離期間がその有効性評価にとって重要である。この視点に立ち、太平洋など、大洋の 3 次元拡散シミュレーションから、隔離期間の検討[13]が試みられている。

3.2 貯留法

この方法は、深海底の窪地に CO_2 を液体として溜めることにより、海水への溶解をできるだけ抑制しようとする方法である。湖のように溜められた液体 CO_2 の上方には、 CO_2 溶解海水からなる密度成層が形成されるため、貯留される CO_2 が密度的に安定となるには、深度 3500 m 以深が求められる。貯留法は、溶解法より高深度を対象とするため、経済的には不利であるが、 CO_2 海洋隔離期間を、海洋鉛直循環周

期の 2000 年より長く設定することができるという大きな利点がある。

実験を伴う CO_2 海洋隔離研究が始まった 10 年前は、従来のハイドレート研究がメタンなどの天然ガス輸送配管の閉塞防止を目的として行われてきたという歴史的経緯もあり、相平衡図以外、貯留法の実現性検討に必要なデータは不十分であった。

また、ハイドレートは氷に似た結晶構造をしていることから、 CO_2 の完全固定化法として期待され、 CO_2 深海固定法などといった言葉が使われた時期もあった。しかし、回りの海水中の CO_2 濃度が低ければ、ハイドレート膜で被われた CO_2 液泡の溶解速度は、ハイドレート膜で被われていない場合より、高々 2 ~ 3 分の一程度に抑制されるに過ぎないことが明らかにされた (Fig. 9 参照)。そこで、 CO_2 ハイドレートの溶解性を前提に、貯留法の概念が直ちに修正された[14]。つまり、深海底の窪地の途中まで液体 CO_2 を満たし、窪地上方空間に CO_2 溶解海水からなる密度成層を形成させることにより、上方への CO_2 フラックスを極力抑えようとするものである。この密度成層が絶対安定であれば、 CO_2 フラックスは分子拡散程度が期待されるが、実際には密度成層中の鉛直方向の渦拡散係数が溶出速度を決定づけられる。しかしながら、 CO_2 界面が直接新鮮な深海水に触れる場合に比較して、溶解速度を大きく抑制することができる。また、 CO_2 フラックスを 0 にできない以上、一定流量で CO_2 を貯留サイトに供給し続ける場合、供給量に見合って貯留湖の界面積に限界が存在することも重要なポイントである。

3.3 その他の隔離技術

中和反応法[15]：徐々に溶解する CO_2 ハイドレートの性質を逆用し、溶解後の炭酸イオンを深海底に大量に沈殿している炭酸カルシウムなどのアルカリ土類塩と積極的に中和反応させ、無害な重炭酸イオンに変える。

ハイドレート貯留法[16]： CO_2 ハイドレートの密度 (1.1 gr/cm^3) は海水より大きいことから、 CO_2 ハイドレートが非溶解性であれば非常に望ましい貯留法である。しかし、 CO_2 ハイドレートの溶解性が明らかとなった今、その魅力は減少した。

ゲスト分子置換法[17]：ハイドレート生成圧力は、 CO_2 の方がメタンより低いことを利用して、メタン分子と CO_2 分子を置換させようとする方法で、メタンハイドレート鉱床[18]からの新エネルギーの確保

と CO₂ 対策を同時に解決させようとする一石二鳥の狙いがある。

絶対安定貯留法[19]：液体 CO₂ の密度が、CO₂ ハイドレートの密度より大きくなれば、海水との界面に形成されるハイドレート膜がちぎれて沈降を繰り返す心配もない。この密度条件（海水 < CO₂ 飽和溶解海水 < CO₂ ハイドレート < 液体 CO₂）を満足する深度は、CO₂ ハイドレートの密度を上述の値と仮定すると、約 6000 m 以深となり、適用可能海域は海溝などに限られる。

4. 投入法

上述の海洋隔離の効果を増すため、あるいはコスト低減を目指し、さまざまな CO₂ 投入法が提案されている。ここでは、アイデア豊かな幾つかの方法を紹介する。

4.1 溶解法を目指す投入法

4.1.1 逆 U 字管(GLAD)[9]：気体溶解法では、Fig. 6 に示す GLAD (Gas Lift Advanced Dissolution) が注目される。逆 U 字管の途中から CO₂ ガスを気泡群として注入すると、浮力により管内を上昇しながら溶解するが、液泡径をうまくコントロールすると、頂部に達する時点で溶解を完了させることができる。すると、海水より重くなった CO₂ 溶解海水が溶解海水を下方に引き込み、良好な自然循環が成立し、CO₂ 溶解水を効果的に深海部へ送り込むことができる。

4.1.2 ムービングシップ[20]：液体溶解法への適応を目指すもので、ゆっくりと移動する CO₂ タンカーから 2000 m 程度の深度まで延ばしたパイプから CO₂ 液泡を放出する方法である。CO₂ 溶解後の濃度ピーク値を下げるのが可能となり、海洋生態系への影響を最小限にできるとの期待があり、我が国では最も実現が早い方法と考えられている。

4.1.3 ハイドレート沈降法[21]：CO₂ 液泡内に無数の微小海水粒を注入し、液泡内部からのハイドレート化を促進させ、CO₂ 液泡の平均密度を海水より重くすることにより、液泡を自由沈降させ、CO₂ 溶解深度範囲を深海底まで広げ、CO₂ 溶解後の濃度を低く押さえることを狙った方法であるが、実現には相当な技術的ブレークスルーが必要である。

4.2 貯留法を目指す投入法

4.2.1.ハイドレート晶析法[22]：CO₂ がハイドレート

Fig. 6. Concept of GLAD (Gas Lift Advanced Dissolution) system [9].

となる深度 500 m の傾斜海底にハイドレート生成槽を設置し、効率的にハイドレートを生成した後、深海底まで自由沈降させる方法で、沈降過程で一部のハイドレートが溶解することから、溶解法の要素も含まれる。ハイドレート生成槽の開発がポイントである。

4.2.2 ドライアイス法[23]：CO₂ を海水より重いドライアイス（気泡を含む市販品で、1.4 gr/cm³ 程度）として海上から投入する方法であるが、ドライアイス生成のためにエネルギーが必要となることや、固体を扱うための不便さがある。

4.2.3 低温液体 CO₂ 投入法(COSMOS)[6]：CO₂ を海上輸送する際には、タンク圧力をできるだけ低く押さえる必要があり、3 重点に近い - 55 程度の低温液体として輸送される。このような低温 CO₂ は、浅海でも海水より十分重いため、深度 500 m の海中に放出すると自由沈降する。液泡径を 1 m 程度以上にすると、取り巻く氷層の浮力と海水からの受熱にも関わらず、限界深度の 2700 m を通過し、深海底に到達する。この方法は COSMOS (CO₂ Sending Method for Ocean Storage) と称され、安定した大液泡を放出するノズル開発がブレークスルーとなっている。Fig. 7 に COSMOS の概念を示す。

4.2.4 スラリー投入法(新 COSMOS)[24]：米国のモンテレー湾で行われた小規模実海域実験から、CO₂ をスラリー塊として放出すると、氷層が素早く成長

Fig. 7. Concept of COSMOS (CO₂ Sending Method for Ocean Storage) [6].

し、液泡が分裂しないことが判明した。この効果を利用すれば、COSMOS より浅い深度 200 m からの放出が可能となるほか、深海底に達する限界直径を 0.4 m と大幅に小さくできる。Fig. 8 にドライアイス率 = 0.5 の場合のスラリー塊の海中での運動が示されている。この図から、放出径をコントロールするだけで、深海底に送り込む貯留法にも、U ターンさせて溶解法にも適用できることが分かる。実海域実験から、U ターン前後で氷層が海水からの受熱でほぼ溶け、CO₂ 液泡が 1 ~ 2 cm の小液泡に分裂することが確認されており、深海底から相変化深度に至る全深度に亘って溶解に利用できる。また、放出深度が 200 m になると、洋上で放出管のつなぎ合わせが不要になる経済的メリットもある。

5. CO₂ ハイドレートの性質

5.1 溶解度の二元性

Fig. 9 に示されるハイドレート生成域における CO₂ の溶解度[25]は、温度の低下とともに減少するという固体の性質がある。実はこの溶解度は、CO₂ ハイドレートの溶解度であり、もう一つ非ハイドレート生成域から外挿される気体の溶解度が存在する。これらの溶解度の差は低温ほど大きくなり、2 気体溶解度はハイドレート溶解度の約 3 倍となる。

Fig. 8. Dynamic simulation of a CO₂ slurry mass [24].

Fig. 9. Dual nature of CO₂ solubility in hydrate forming region [25].

一旦ハイドレートが生成するとハイドレート溶解度が支配的となるが、ハイドレート生成深度に放出された(海水と同温の)CO₂ 液泡は、強い乱流場に置くなどの方法を探らない限り、容易にハイドレートが生成しないのが通例である。しかし、いずれはハイドレートが生成し、その領域が伝播・拡大するが、CO₂ 海洋隔離を正確に評価するにはこの溶解度の二元性は厄介な問題であり、これまでのところどのような条件でいずれの溶解度が現れるかについて明快な判断法は提示されていない。この問題は、貯留法よりも溶解法にとって大きな問題となる。

5.2 凝集性

米国モンテレー湾海洋研究所(MBARI)の Brewer は、CO₂ 液泡の実海域溶解実験において、2 個または 3 個の液泡が溶解しきるまで凝集し続ける現象を観察している[26]。これを受け、Yamane ら[27]は、衝突する液泡が凝集するとの仮定の下に、液泡放出密度をパラメータとして凝集確率を試算している。一方、粒状 CO₂ ハイドレートは、エタノール混合水

(a) 0 min (b) 9 min (c) 18 min (d) 40 min
Fig. 10. Expansion phenomenon similar to Brewer's *in situ* experiment [31].

(a) after 3 days (b) 6 days (c) 42 days (d) 100 days
Fig. 11. Stable storage of single CO₂ mass in a beaker [31].

中では攪拌と沈殿を繰り返しても凝集しないとの実験結果[28]も示されており、未だ結論が得られていない。いずれにしても、溶解法の場合、深度 1000 ~ 2000 m の海中に放出された大量の CO₂ 液泡が上昇する過程で凝集する性質があるか否かは、溶解速度の評価に大きな影響を与えることから、早期の解決が待たれている。

凝集性に関連することとして、ハイドレート膜で覆われた上昇中の CO₂ 液泡にはマリンスノーが降り注ぐと考えられているが、このマリンスノーがハイドレート膜に付着するか否かや、付着する場合、溶解速度に影響が現れるのかどうか、一部の研究者で関心が持たれている[29]。

5.3 あふれ現象

MBARI の Brewer ら[30]は、深度 3650 m の深海底に設置した 6 リットルのピーカーにハイドレート膜で覆われた CO₂ 液泡群を溜める実験を行い、ほぼ一体化した液体 CO₂ が間欠的にあふれる現象を観察した。この現象は貯留容積の大幅な増加をもたらす可能性のあることから、Aya ら[31]は、陸上模擬実験を行い、ピーカー底部に通じる通路が残されている場合には、底部で急速に成長するハイドレートに押し上げられ、あふれ現象が生じる(Fig. 10)が、通路ができないように CO₂ を塊として溜めると、100 日間を超えてあふれ現象が生じないことを観察した(Fig. 11)。この後、あふれ現象を生じさせない方法が実海域実験で確認された[32]。

現実の貯留サイトでは、一時的にハイドレート成長に必要な水分子供給通路が出現しても、Brewer らの実験より遙かに大きいヘッド差が通路を押しつぶすため、あふれ現象は生じないと考えられる。

5.4 膜強度

CO₂ - 海水界面に生成する CO₂ ハイドレート膜の強度も、深海流などの不安定要素に対する貯留 CO₂ の安定性や溶解速度に関わる上昇液泡の変形挙動に影響を与えることから関心が持たれてきた。Yamane らは、40 MPa 深海模擬装置に搭載した Du-Nouy 型界面張力計を使って計測し、2 種類の異常現象を発見した。Fig. 12 は、解離温度直近で膜強度(厚みが不明であるため、N/m の単位で評価)が低温時の 10 倍にも達するという第 1 強度異常を示している[33]。塩水中では、強度ピークの現れる温度が、濃度で決まる強固点降下分だけ低温側にシフトする。Fig.13 は、CO₂ 溶解水中における膜強を示している。ハイドレート共存溶解度が温度の低下とともに減少するため、一定濃度では、温度上昇とともに飽和から離れる。このことを念頭に Fig. 13 を見ると、それぞれの濃度において、左端の飽和状態に近づくとき急激に強度が増加していることが分かる(第 2 強度異常)。

第 1、第 2 の強度異常は、それぞれ、解離温度近傍における水素結合の緩みが相互拡散を促す効果、および飽和濃度では、ハイドレート膜の再生成(次項参照)が起こらないことから説明がなされているが、さらに基礎的な立場からの解明が待たれている。

Fig. 12. Strength of CO₂ hydrate membrane just below the dissociation temperature [33].

Fig. 13. Strength of CO₂ hydrate membrane in CO₂ rich water [25].

Fig. 14. Comparison of maximum rebuilding rate and lateral growth rate [25].

5.5 ハイドレート膜の再生成速度

前項で述べた第 2 強度異常では、ハイドレート膜はストレスを受けてもほとんど変形せず、ストレスが膜強度に達していきなり破断するという脆性的な

Fig. 15. Schematic view of rebuilding process of CO₂ hydrate membrane under stress [25].

性質を示す。ところが、未飽和水中では、ストレスにより大きく変形する。これらの相違を説明するには、未飽和水中での大変形は、通常の弾性変形や塑性変形ではなく、ハイドレート膜が再生成していると考えざるを得なくなった。Fig. 14 [25] は、膜が再生成するとの立場から計測した、最大再生成速度を示しており、CO₂ - 水界面をハイドレート膜が成長

する速度 (lateral growth rate) [34]と同じオーダーであることが分かる。飽和水中ではハイドレート膜が再生成しないことは、飽和水中には更に溶質を溶解させる水分子(自由水分子)が存在しないことから定性的説明がなされている。

Fig. 15 は、ハイドレート膜の再生成の様子を模式的に示したものである。

6. 生態系への影響から見た CO₂ 海洋隔離の特徴

6.1 可逆性

貯留法の隔離期間は 2000 年以上が期待され、貯留される CO₂ は 50 年や 100 年ではほとんど溶解せず窪地に残っており、万が一、貯留を続けることが不都合になれば、費用はかかるが回収が可能である。つまり、可逆性がある。言い換えれば、貯留法には安全弁が備わっている。

一方、溶解法は、溶解拡散させるという非可逆過程に立脚しており、一旦放流した CO₂ を回収することは事実上できないという、弱点がある。

6.2 「有限 × 有限」か「0 × ∞」か

貯留法の弱点は、なんと言っても、少なくとも CO₂ で埋め尽くされる貯留窪地内部では生物が一切住めず、そこに棲息していた有用種を失う危険性がある点である。これを緩和させる一つの方法として、窪地の途中まで CO₂ を溜め、上方に生成する CO₂ 溶解海水の密度成層により、CO₂ の溶解拡散を抑制する方法が提案されているが、この弱点が、貯留法に先立って溶解法が試験される理由と考えられる。ここで、海洋生態系への影響評価という観点から見た貯留法と溶解法の特徴を整理したい。

貯留法は貯留サイトとその近傍の影響度は明らかに有限であるが、影響範囲も有限であるため、トータルの影響は「有限 × 有限」で評価されることとなり、生態系への影響度が出れば、比較的容易に影響範囲との積を求めることが可能である。

一方、溶解法は限りなく薄めてゆくため影響度も限りなく 0 に近づく。しかし、影響範囲はどんどん無限大に近づく。このため、トータルの影響評価は $0 \times \infty$ の形、つまり、不定形の様相を呈する。これまでは、 $0 \times \infty$ の内の 0 の部分に研究の力点が置かれてきたように思われる。どんどん薄まれば影響度が 0 に近づくのは当たり前のことである。重要なのは、 $0 \times \infty$ がどのような値になるかということ

ある。例えば、1000 倍に希釈した際の影響度は少なくとも 1000 倍の精度がなければ、1000 倍の影響範囲を掛け合わせた時の精度・信頼度がでない。これはなかなか骨の折れる課題だと思われる。

6.3 晩生影響

もう一つ気になることは、遺伝を通しての晩生影響である。この影響の解明を待てば、CO₂ 海洋隔離技術の確立が温暖化対策技術としては手遅れになることが予想される。この点をどのように考えていけばよいのであろうか？

7. コストについて

CO₂ 海洋隔離を実現する際のコストも重要である。CO₂ の分離・回収から海洋隔離までの総コストは、非可逆過程である回収部分が大半を占め、そのコスト削減が全体のコストを下げる上でのポイントとなっている。しかし、海洋隔離そのものに要するコスト削減努力も続ける必要のあることはいうまでもない。

ところで、CO₂ 海洋隔離に要する総コストがいかほどかは、主要部を占める回収コストに依存するが、今、仮に発電コストの 20 % を要すると考えた場合、全ての CO₂ を処理する必要はなく、海洋隔離が負う割合はせいぜい総排出量の 5 % で十分と思われるため、平均すれば、コストアップは 1 % 程度となり、許容できるレベルと考えられる。

8. まとめ

温暖化対策技術としての CO₂ 海洋隔離技術について、基本的な考え方、その種類と特徴、CO₂ 投入法、CO₂ ハイドレートとの関わり、および海洋生態系への影響評価の立場から見た特徴について私見も交えて解説した。温暖化対策が実効をあげるには、国際的な合意と協力が必要なことは論を待たないが、COP3 の批准が未だはっきりしないばかりか、京都議定書に CO₂ 排出の大きなシェアを占める途上国が含まれていないなど、大きな政治的課題が山積している。しかしながら、技術としてどのような対策がどの程度有効であり、環境への負荷を含めてそのコストはいかほどかを明らかにしておくことは、研究者と技術者の一つの使命であろう。その意味からも、CO₂ 海洋隔離技術には CO₂ ハイドレートの物性や生態系

への影響の程度など、未だ解決されていない重要な課題もあるが、その処理能力の膨大さと、海洋隔離が自然の炭素循環を先回りさせる意味があることなどから、依然として有望な対策技術であることには変わりはない。未解決課題をじっくりと解決することが、結局は早道と考えている。その際、陸上実験で明らかにされた CO₂ ハイドレートの特異な性質については、実海域試験を通して隔離効果への影響を調べることが必要であろう。

また、温暖化自体、6.2 節で述べた「0 × 問題」そのものであるため、ゆっくりと進行する。そのため、日常生活からは危険性を感じにくいという特徴があり、国民に理解してもらいにくい側面を持っている。CO₂ 海洋隔離の提唱者の一人である、M. Steinberg 博士から、「暑いお湯に蛙を入れるとびっくりして飛び出すが、水の状態からゆっくりと暖めてゆくと、茹だって死ぬまで飛び出さない」[35]という話を聞いたことがある。我々の地球もこうならぬことを祈るばかりである。

参 考 文 献

- [1] C. Machetti: *Climate Change*, **1**, 59 (1977).
- [2] M.W. Wadsley: in *Direct Ocean Disposal of Carbon Dioxide*, ed. N. Handa (TERABUB, 1995), pp.195-216.
- [3] E.D. Sloan, Jr.: *Clathrate Hydrate of Natural Gases* (Marcel Dekker, 1990), p.304.
- [4] Y.F. Makogon, S.A. Holditch: in *Offshore Technology Conference* (2001).
- [5] 西山勝暢: 海と安全, **87-9**, 9 (1987).
- [6] I. Aya, K. Yamane, K. Shiozaki: in *Greenhouse Gas Control Technol.*, ed. B. Eliasson (Elsevier Science, 1999), pp.269-274.
- [7] I. Aya, K. Yamane, N. Yamada: in *CO₂ Fixation and Efficient Utilization of Energy*, ed. Y. Tamamura (Tokyo Inst. of Technol., 1993), pp.351-360.
- [8] P.M. Haugan, H. Drange: *Nature*, **357**-28, 318 (1991).
- [9] T. Saito, T. Kajishima, R. Nagaosa: in *MARIENV'95* (Society of Naval Architects of Japan, Tokyo, 1995), pp.875-881.
- [10] 綾威雄, 山根健次, 山田信夫: 機論 B, **59**-560, 1210 (1993).
- [11] S. Hirai, K. Okazaki, H. Yazawa, H. Ito, Y. Tabe, K. Hijikata: *Energy*, **22**-2/3, 363 (1997).
- [12] 金子郁雄: 海と安全, **92**-2, 10 (1992).
- [13] N. Nakashiki, D. Tsumune, T. Ohsumi: (same as Ref. [9]), pp.888-895.
- [14] I. Aya, K. Yamane, N. Yamada: *Energy Convers. Mgmt.* **36**, 6-9, 485 (1995).
- [15] 電中研, 我孫子研要覧 (1993).
- [16] H. Teng, A. Yamazaki, Y. Shindo: *Int. J. Energy Res.*, **23**, 295 (1999).
- [17] 大垣一成, 高野清光, 守時正人: 化学工学論文集, **20**, 121 (1994).
- [18] 松本良, 奥田義久, 青木豊: メタンハイドレート (日経サイエンス, 1994), p.106.
- [19] 大垣一成, 井上義朗: 化学工学論文集, **17**-5, 1053 (1991).
- [20] M. Ozaki, T. Ohsumi, S. Masuda: (same as Ref. [6]) (1999), pp.275-280.
- [21] S. Hirai, Y. Tabe, K. Kuwano, K. Ogawa, K. Ozaki: *Annals of the New York Academy of Sciences*, **912**, 246 (2000).
- [22] A. Yamazaki, M. Wakatsuki, Y. Yanagisawa, K. Yamada: (same as Ref. [6]), pp.1065-1067.
- [23] 大隅多加志, 燃料協会誌 **70**-3, 1991, pp.233-244.
- [24] 山根健次, 綾威雄, 小島隆志, 汐崎浩毅: 第1回海上技術安全研究所研究発表会講演集 39 (2001), pp. 177-180.
- [25] I. Aya, K. Yamane, R. Kojima, T. Yamamoto, H. Nariai: in *11th ISOPE Conference* (Stavanger, Norway, 2001), Vol. 1, pp.495-497.
- [26] P.G. Brewer, *1st National Conf. on Carbon Sequestration*, Washington D.C. (2001).
- [27] K. Yamane, R. Kojima, I. Aya, A.M Masutani, L. Tang: (same as Ref. [25]), pp.490-494.
- [28] 海老沼孝郎, 成田英夫, 天然ガスの高度利用技術, 市川勝監修, NTS 出版, 2001, pp.155-156.
- [29] 佐藤徹, 研究者間情報交換, 2001-7.
- [30] P.G. Brewer, G. Friederich, E.T. Peltzer, F.M. Orr Jr.: *Science* **284**-5416, 943 (1999).
- [31] I. Aya, K. Yamane, R. Kojima: in *Proc. of 5th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technol.* (Cairns, 2000), pp.423-428.
- [32] P.G. Brewer, private communication, 2000-3.
- [33] K. Yamane, I. Aya, S. Namie, H. Nariai: (same as Ref. [21]), pp.254-260.
- [34] T. Uchida, T. Ebinuma, J. Kawabata, H. Narita: *Crystal Growth*, **204**, 348 (1999).
- [35] M. Steinberg: in *Discussions at Deep Sea and CO₂ 2000* (Ship Res. Inst., Tokyo, 2000).

[2001 年 10 月 12 日受理]