海洋表層酸性化に対する CO₂ 海洋隔離の Triple I

正員 佐藤 徹*

大宮 俊孝**

Triple I of CO₂ Ocean Sequestration against Ocean Surface Acidification

by Toru Sato, *Member*

Toshitaka Omiya

Summary

To mitigate the global warming and ocean surface acidification caused by increase of atmospheric CO₂ concentration, ocean sequestration of CO₂ has been proposed. Because the technology has risks on deep-ocean ecosystems, its implementation needs public acceptance. In such a process, environment assessment indices are useful for making decisions. Recently, the Triple I was developed to show totally inclusive index for environmental and economical matters, consisting of ecological footprint, ecological risk, human risk, cost, and financial benefit. The present paper presents the Triple I for CO₂ ocean sequestration, where the object of comparison was set to be the effects of ocean surface acidification and its consequent impacts in the deep ocean. Particularly focused on in this study was the calculation of ecological risk. In general, risk is represented by the products of probability and hazard. Here, the former was obtained by a semi-quantitative probability method based on the results of expert enquiry; the latter was converted to land area by using the species-area relationship. The resultant Triple I became negative and indicated that the technology is worth to implement. Also elucidated is that the ecological footprint and the ecological risk had the largest and the smallest portions, respectively, in the index.

1. 緒 言

大気中の温室効果ガス濃度増加に伴う気候変動のリスク削減が国際的な課題となっている¹⁾。特に人為的な要因で急激に大気中濃度が上昇している CO₂ は、温暖化のみならず海洋表層酸性化も引き起し、陸海の生態系に大きな影響を及ぼすことが示唆されている²⁾。その対策として、大規模排出源から分離回収した CO₂ を海洋に隔離する方法が提案されている^{3,4)}。

海洋隔離方法としては 3000m 以深の海底部に浮体構造物から海底まで垂下したパイプを介して貯留する方法や、移動する船舶から 2000m 程度のパイプを垂下し移動しながら CO₂ を海中に拡散させる Moving Ship などが研究されている。Moving Ship 方式による CO₂ 海洋隔離のベネフィットとして「海洋表層酸性化の緩和」、「海洋の炭素固定プロセスの人為的な促進」の 2 点がある^{3,4)}一方、リスクとして「CO₂ 暴露に伴う中深層生物への影響」が指摘されており^{3,4,5,6,7)}、環境影響評価手法の開発が、国からの委託を受けた(財)地

球環境産業技術研究機構 (RITE) を中心に行われている³⁾。

一方で、地球温暖化の緊急性や省エネ・新エネの普及速度を考慮して、限られた情報の中でも CO₂ 海洋隔離のベネフィットとリスクの評価が求められており、技術の社会的受容性や、実施に際しての意思決定の判断材料として環境影響指標の必要性が高まっている。

そこで本研究では、(社)日本船舶海洋工学会「海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価」委員会が提案している、エコロジカルフットプリント^{8,9)}と環境リスク¹⁰⁾の概念を統合した環境影響評価指標 Triple I¹¹⁾に基づいて、CO₂ 海洋隔離の生態リスクと人間リスクを考慮した指標を算出し、今後の技術開発の方向性に関する議論の一助とすることを目的とする。

2. Triple I の概要

包括的環境影響指標として提案されている Triple I は次式で表される¹¹⁾。

$$III = \Delta EF + \Delta ER + \frac{\Sigma EF}{\Sigma GDP} [\Delta HR + \Delta (C - B)] \quad (1)$$

ここで EF はエコロジカルフットプリント (単位 : gha) ,

* 東京大学海洋技術環境学専攻

** 東京大学環境システム学専攻 (研究当時)

ERはフットプリントで表現される生態リスク(単位:gha), $\Sigma EF/\Sigma GDP$ は世界の総EFと総GDPの比(EF-経済価値換算係数), HRは金銭価値に換算された健康リスクや社会資産リスクなどの人間リスク(単位:円), C-Bは金銭的なコストとベネフィットの差(単位:円)である。 Δ は, 想定する開発を行ったときと行わないときの差を意味する。従って Triple I が負値であれば, 当該開発を行うべきという意味決定の判断指標となる。

従来は経済性(C-B)一辺倒で開発を実施するか否かの判断が行われてきたが, 近年HRとC-Bを金銭的に比較し, コストが高くて将来のリスクの方が小さければ, 当該技術開発およびその実施はなされるべきという判断をすることも行われつつある(例えば文献¹²⁾)。但し, 多くの場合ERを無視してきたため, このことが現在の環境問題を引き起こしたとも言える。そこでERを含めて開発の有効性を評価する指標が必要となる。しかしERを, HRやC-Bと同じ判断基準である経済的指標, すなわち金銭で求めることはこれまで困難とされてきた¹⁰⁾。

一方でEFは, 人間経済によるサービス需要量が地球の供給能力とバランスがとれたものになっているか比較するために開発されたもの^{8,9)}で, 人類が消費しているものを生産するのに必要な土地面積を, 実際の面積に, 土地の生産性の高さに応じた等価係数を乗じて表現する。EFの単位はグローバルヘクタール(gha)と呼ばれる。EFは地球あるいは人類の持続性を評価するとして近年注目を集めているが, その対象の範囲はあくまで経済的生産活動に止まり, 広く様々な人間活動を対象とし, コストや将来のリスクと合わせて総合的・包括的に評価することはできない。

Triple I は, 従来金銭的に求めることが困難であったERをフットプリント(土地面積)にしてEFに加えた点, 金銭的に表現可能なHRとC-Bを, 係数 $\Sigma EF/\Sigma GDP$ を用いてEF+ERに統合した点において, 対象とする人間活動の実施の是非を判断する指標として新規性がある。

3. シナリオの設定

近年, 大気中のCO₂濃度の上昇に伴って海洋表層のCO₂濃度が上昇し, いわゆる海洋表層酸性化が起り, その環境への影響が危惧されている。表層が酸性化し生態系が影響を受けると, 主に表層からの沈降フラックスによって成り立っている中深層の生態系も何らかのダメージがあると考えられている。CO₂の海洋隔離はCO₂を直接深層に注入することで, 深層の生態系への影響がリスクとしてあることは1節で述べたとおりであるが, 海洋隔離をしなくても, 大気中CO₂濃度が上昇し続ければ, 表層はもちろん, 深層にも環境リス

クがあることになる。

本研究では, 大気中CO₂濃度上昇による海洋表層酸性化とCO₂の海洋隔離を対象としてTriple Iを求める。そのためまず始めに本研究におけるシナリオを作成した。CO₂海洋隔離のベネフィットやリスクを評価するには, 上述したように, このまま化石燃料を使い続け, 大気にCO₂を放出し続けた場合の海洋表層酸性化およびその深層への影響との比較が重要である。そこで以下の2つのシナリオを考えた。

- ① Business-as-usual (BaU) にCO₂を大気に出し続け, 2100年に大気中CO₂濃度が1000ppmになる(IPCC A1F1シナリオ¹⁾に準拠, 2000年を基準としたBaU)。
- ② 全世界でCO₂海洋隔離を行い, 2100年の大気中のCO₂濃度を550ppmにする。また深海に隔離したCO₂濃度は, ΔPCO_2 (もとの当該海域の海水中のCO₂分圧PCO₂に新たに加わる分)で500ppm以下に抑制する⁶⁾。

中央環境審議会¹³⁾によると2100年時点での550ppm安定化のためには, 世界の排出量を2000年から2100年の間にBaUケース対比710 Gt-C減少させねばならない。これを単純に100年で平均化すると 2.7×10^{10} t-CO₂/yrとなる。さらに4.1節で示すようにCO₂の分離回収と海洋隔離にかかるエネルギー源からのCO₂排出量(エネルギーペナルティー)は隔離量の18%であることから, ネットのCO₂削減量を 2.7×10^{10} t-CO₂/yrにするため世界の隔離量を 3.3×10^{10} t-CO₂/yrとし, シナリオ②ではこれを全て海洋隔離で対応することとする。BaUであれば1000ppmとなる大気濃度を, 海洋隔離だけで550ppmに抑制するということの現実性は無いが, 本研究ではあえて極端ケースとして取り上げた。

大気中CO₂濃度が2100年に1000ppmと550ppmの時の海洋表層や深層のPCO₂やpHの予測値を著者らは知らないが, Caldeira and Wicket¹⁴⁾は2300年に2000ppmでピークとなる場合の海洋のpHを計算しており, pHは表層で0.7, 深層で0.1下がると予測している。

4. エコロジカルフットプリント (EF)

4.1 CO₂輸送・放出に伴う簡易LCA

液化CO₂運搬船・放出船には現行のLNG船とほぼ同じタイプの船舶を用いると仮定し, 平岡ら¹⁵⁾によるLNG127船の環境負荷量のデータを用いてCO₂海洋隔離のLCAを行う。

LNG127船1隻の載貨重量は67554 t, LNG127の平均積載率が87%であること¹⁵⁾から輸送CO₂量を58800 tとして, CO₂の分離回収施設から隔離サイトまでの距離は片道1500 km, 放流船のCO₂放流量は360 t/hr, 放流船速10.8 km/hrと仮定し, 輸送1回+隔離1回当たりの環境負荷量を求める。58800 tのCO₂を放出するのに, 放出船は163 hr, 1760 km航

走する。この放出船に CO₂ を供給するため、輸送船は往復 3000 km を走る。世界の年間隔離量は 3.3×10^{10} t-CO₂/yr であるから、輸送 1 回+隔離 1 回を 561000 セット行う必要がある。

これらより全世界の CO₂ 海洋隔離に伴う資源消費及び環境負荷物質量は Table 1, 2 のようになる。ここで平岡ら¹⁵⁾の輸送量 (t・km) 当たりの消費量、排出量には積載航海割合 (LNG127 で約 50%) も考慮されている。放出船の CO₂ 輸送量は航走中に減少していくが、本研究ではこれも積載航海割合 50% として扱っている。

このほか温暖化ガスとしては主要なものにメタン CH₄ や亜酸化窒素、HFC 類などがあるが、それらの排出量と CO₂ に対する地球温暖化係数を乗じて CO₂ 換算すると、CH₄, N₂O それぞれの温暖化係数は 21, 310 であり、 4.3×10^6 t-CO₂/yr, 7.3×10^6 t-CO₂/yr となり、CO₂ 自体より 3 オーダー小さくなり、無視し得る。

一方、 3.3×10^{10} t-CO₂/yr の CO₂ 分離回収プロセス¹⁷⁾における CO₂ 排出量は、電力に関する排出原単位を 0.555 kg-CO₂/kWh, 出力低下率を 10% とすると、 3.6×10^9 t-CO₂/yr である。以上より、CO₂ の分離・回収・輸送にかかる CO₂ 排出量は 6.1×10^9 t-CO₂/yr であり、エネルギーペナルティーは 18% となる。

Table 1 LNG127 船からの資源消費量

	ボーキ サイト	石炭	石油	天然 ガス
輸送量 (t・km) 当 たり (kg) ¹⁵⁾	1.1×10^{-6}	1.8×10^{-5}	3.0×10^{-3}	2.5×10^{-3}
CO ₂ 輸送 1 回+隔離 1 回当たり (kg)	3.2×10^2	5.1×10^3	8.3×10^5	7.1×10^5
全世界の CO ₂ 海洋 隔離 当 たり (kg/yr)	1.77×10^8	2.87×10^9	4.67×10^{11}	3.96×10^{11}

Table 2 LNG127 船の大気環境負荷物質の排出量

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO ₂	SO ₂	VOC
輸送量 (t・km) 当たり (kg) ¹⁵⁾	1.6×10^{-2}	1.3×10^{-5}	1.5×10^{-7}	7.6×10^{-5}	1.7×10^{-4}	3.5×10^{-13}
CO ₂ 輸送 1 回+ 隔離 1 回当たり (kg)	4.5×10^6	3.6×10^2	4.2×10^1	2.1×10^4	4.8×10^4	9.8×10^{-5}
全世界の CO ₂ 海 洋隔離 当 たり (kg/yr)	2.5×10^{12}	2.0×10^8	2.4×10^5	1.2×10^{10}	2.7×10^9	5.5×10^1

4.2 EF の算出

EF では CO₂ に関して、森林の CO₂ 吸収量を 5.2 t-CO₂/ha/yr, 等価係数を 1.34 である¹⁶⁾として、それを吸収し得る森林面

積として表す。

CO₂ 海洋隔離の分離・回収・輸送に伴う EF は、CO₂ に換算した温室効果ガス排出量が 6.1×10^9 t-CO₂/yr であることより 1.6×10^9 gha/yr となる。また回収液化施設の面積は、245 t-CO₂/hr の回収液化能力のある施設で 4.2 ha であること¹⁷⁾から、回収量と施設面積の比例計算より、全世界に必要な回収液化施設の面積は 6.0×10^4 ha となる。生産地阻害地 (建築物によって使用されている土地) の等価係数は 2.21 である¹⁶⁾ので、分離回収施設の生産地阻害による EF は、 1.3×10^5 gha となる。

海洋に隔離された CO₂ に関しては、その分を EF の負値として考え、CO₂ 年間隔離量が 3.3×10^{10} t-CO₂/yr であることから -8.5×10^9 gha/yr となる。従って ΔEF は -6.9×10^9 gha/yr となる。生産地阻害地はほとんど寄与しないことがわかる。

5. 生態リスク (ER)

環境リスクは、一般に、エンドポイントのハザードの大きさにその生起確率をかけたもので表される¹⁰⁾。通常 ER のエンドポイントは生物種の絶滅とされる¹⁰⁾。そこで海洋表層酸性化および CO₂ 海洋隔離の ER のエンドポイントとして、それぞれの対象海域、水深における海洋生物の種の絶滅を考える。しかし、現在行われている海洋生物への CO₂ 暴露実験は、生物個体の死亡率を測定するものであり、絶滅の生起確率を与えるものではない。まして絶滅のハザードを土地面積で表すものでもない。そこで本研究では、陸上の例を参考に、ハザードとして種数の減少比から土地の環境改変面積を求めることにした。絶滅確率は、準定量的手法を用い、専門家アンケートをベースに海洋表層酸性化と CO₂ 海洋隔離による生物多様性の減少の生起確率を求める。最後にそれらをかけ合わせることで ER を導く。

5.1 ハザードマップの作成

3 節のシナリオに基づいて、「CO₂ 海洋隔離を行う」という事象から始まって、エンドポイントである「生物多様性が減少する」に至るハザードマップを作成する。このときエンドポイントは「沿岸域」、「外洋表層」、「深層」の 3 つの区域に分けた。対象とする生物種は、植物プランクトン (沿岸域と外洋表層のみ)、ベントス (沿岸域のみ)、動物プランクトン、魚類とした。

ハザードマップとは因果の関係図である。出発点からエンドポイントに至る因果の道筋に存在する事象について、様々な可能性を考えねばならない。一方で、専門家アンケートを依頼する際、事象があまり多いとアンケート回収率が確実に落ちるので、やみくもに複雑化してもいけない。マップ原案

Fig. 1 海洋表層酸性化と CO₂ 海洋隔離に関するハザードマップ

を海洋生物の専門家 2 名の助言により, 不要な事象や因果関係の有無を示す矢印の削除や, 必要なものを加え訂正したハザードマップが Fig. 1 である。

事象の表現は, 具体的な数量などを入れると場合分けが多くなり回答者の負担となるため, 定性的な表現に止めた。深層と表層の環境変化を相互につなぐ事象として「深層への沈降粒子の減少」と「湧昇流に含まれる栄養塩の減少」を, 深層により豊富になるバクテリアの変化を考慮するために「バクテリアの組成の変化」などを設定し, 計 21 の事象を考えている。

5.2 専門家アンケート

Table 3 専門家アンケート被験者の専門分野

分野	人数
海洋生物学	6
海洋物質循環	2
海洋生態学	2
海洋化学	1
計	11

得られたハザードマップを基に専門家アンケートを行った。被験者の専門 (回答者本人が選択) を Table 3 に分類した。回答者の総数は 11 名であった。専門家アンケートであるため, 被験者数はこの程度で十分であると判断した。

Table 4 事象 P_i の選択肢と対応させた生起確率

選択肢	判断表現	一時的生起確率
1	確実に生じる。	0.9~1.0
2	生じると思われる。	0.7~0.9
3	どちらかといえば生じるかもしれない。	0.5~0.7
4	どちらかといえば生じないかもしれない。	0.3~0.5
5	生じないと思われる。	0.1~0.3
6	確実に生じない。	0.0~0.1

被験者は, 事象 P_i の回答にあたっては, 生起確率を Table 4 のように 6 つの選択肢から選択するという形式にした。表の右端には, 選択肢に対応するおおよその生起確率の範囲を与える (これはアンケートには書かれていない)。各回答者

の選択結果は、このおおよその生起確率の範囲内で一様乱数を用いて一時的な生起確率とした。

事象 j が生起するとしたときに事象 i の生起に与える一時的なインパクト確率 $\alpha_{j \rightarrow i}$ に関しても同様に Table 5 のように表現した。

Table 5 $\alpha_{j \rightarrow i}$ の選択肢と対応するインパクト値

選択肢	判断表現	一時的インパクト値
-4	非常に強く抑制	-0.4
-3	かなり抑制	-0.3
-2	ある程度抑制	-0.2
-1	わずかに抑制	-0.1
0	影響なし	0
1	わずかに促進	0.1
2	ある程度促進	0.2
3	かなり促進	0.3
4	非常に強く促進	0.4

5.3 クロスインパクト法による生起確率の算出

専門家アンケート結果の生起確率、インパクト値は一時的な数値であり、確率としての整合性を有さない。そこで次に説明するクロスインパクト法¹⁸⁾という準定量的手法を用いて、これらを定量化する。

クロスインパクト法は、対象とする事象の生起確率や事象間の相互影響に関する定量的なデータが存在しない場合に、専門家の意見をデータとして代用する準定量的手法である¹⁸⁾。専門家が推定した確率を、確率論の数学的条件に満たすように修正するプロセスを備えていることが特徴であり、単純に専門家の予測を集計するだけでは得られない高次の情報を得ることができるとされる。

アンケートから得られた一時的な P_i と $\alpha_{j \rightarrow i}$ を用いて、事象 i の生起確率 $P(i)$ と事象 j が生起したとするとときに i が生起するインパクト確率 $P(j \rightarrow i)$ を求める。

$$P(i) = P_i \times \prod_m (1 + \alpha_{m \rightarrow i}) \quad (0.1 \leq |\alpha_{m \rightarrow i}|) \quad (2)$$

$$P(j \rightarrow i) = P(i) + \alpha_{m \rightarrow i} \quad (0 \leq |P(j \rightarrow i)| \leq 1) \quad (3)$$

ここで m は、着目してるグループより下位のグループのクロスインパクト分析の結果、生起するとなった事象である。

次に、インパクト確率 $P(j \rightarrow i)$ を条件付確率 $P(j, i)$ にクロスインパクト法を用いて変換する。最後に、得られた $P(i)$ 、 $P(i, j)$ を、ある状態 k に対する N 次結合確率 π_k を変数として次の非線形最適化を解くことにより、確率論的に整合な値 $P^*(i)$ 、 $P^*(i, j)$ に修正する。

$$\left\{ \sum_i^n (P^*(i) - P(i))^2 + \sum_{i < j}^n (P^*(i, j) - P(i, j))^2 \right\} \rightarrow \text{最小化} \quad (4)$$

$$P^*(i) = \sum_{k=1}^N \theta_k^i \pi_k \quad (5)$$

$$P^*(i, j) = \sum_{k=1}^N \theta_k^i \theta_k^j \pi_k \quad (6)$$

$$\theta_k^i = \begin{cases} 1: \text{事象 } i \text{ がある状態 } k \text{ で生起} \\ 0: \text{事象 } i \text{ がある状態 } k \text{ で非生起} \end{cases} \quad (i, k = 1, 2, \dots, 21) \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^N \pi_k = 1 \quad (\pi_k \geq 0) \quad (8)$$

最終的に、クロスインパクト分析の結果から、生物多様性の減少（種の絶滅）が起こる確率は、Table 6 のようになった。深層、沿岸域、外洋表層全ての海域において、シナリオ①の方がシナリオ②よりも生物多様性の減少が起こる確率が高い値となっている。特に人為的に CO₂ を注入する深層についてもシナリオ②の方が値が小さくなったのは、シナリオ①の大気中 CO₂ 濃度が 1000 ppm へと上昇することにより引き起こされる海洋表層酸性化の影響で、深層への沈降粒子の減少が生じ、深海生物の食資源が減少することの方を、専門家は危惧したためと考えられる。シナリオ②で海洋隔離による CO₂ 濃度の上昇が 500 ppm に止まるとしたことで、その影響はそれほど大きいものでないと専門家は考えている可能性もある。

Table 6 クロスインパクト法によって得られた各海域におけるエンドポイントの生起確率

シナリオ	沿岸域	外洋表層	深層
①	0.40	0.35	0.38
②	0.33	0.29	0.31

5.4 エンドポイントの定量化 - 環境改変面積の導出 -

陸域での観測結果から、生物種数 S と生息地面積 A の間には次のような Species Area Relationship (SAR) があることがわかっている¹⁹⁾。

$$S = cA^z \quad (9)$$

ここで c はサイトに関わる係数（定数）で、 z は経験的に 0.25 とされる¹⁹⁾。式(9)において環境改変前を S_0 、 A_0 とし、環境改変後を S 、 A とすると、改変後の面積 A は、

$$A = A_0 (S/S_0)^{1/z} \quad (10)$$

となる。よって、ある地域の種数が環境改変によって S_0 から S に変化した際にその地域で改変された面積 ΔA は、

$$\Delta A = A_0 - A = A_0 \left[1 - (S/S_0)^{1/2} \right] \quad (11)$$

と表すことができる。つまり、改変前の生息地面積 A_0 と改変前後の種数の比 S/S_0 がわかれば、サイトに関わる係数 c を知ることなく仮想環境改変面積 ΔA を推定できる。

この概念を用いることで、人類に直接的なサービスを提供しない生態系の価値を土地（海域）面積の変化として換算することが可能になる。今回、海を深層の CO_2 隔離の対象海域、地球上全ての外洋表層、地球上全ての沿岸域の3つに分けて考え、それぞれの A_0 を式(11)に代入して種数減少率を与えると Fig. 2 のようになる。

Fig. 2 環境改変面積と種の絶滅率の関係

5.5 ER の算出

最後に 5.3 節で得られたエンドポイント（生物多様性の減少、すなわち種の絶滅）が起こる生起確率と、5.4 節で求めたハザード（環境改変面積）を掛け合わせ、ER を求める。各海域の総面積は、沿岸域は全海洋面積の 7.6% の 27 億 ha とし、それ以外を外洋表層面積とした。深層の面積は CO_2 海洋隔離の行われる海域面積のみが影響を受けるとして、隔離 1 事業あたり 5000 万 t/yr を隔離するサイト面積を 100 km × 300 km とし³⁾、世界の年間海洋隔離量 3.3×10^{10} t- CO_2 /yr から面積を算出した。

準定量的手法による生起確率の解析では、種の全滅について、それが何種類の生物種であろうと、生起確率を予測することはできても、今回のアンケートの内容では絶滅する種数まで抽出することは不可能である。そこでケーススタディーとして、3つの海域における種数の絶滅率 $1-S/S_0$ を 40% にて固定した。40% の妥当性は特にないが、式(11)によると、これは 87% の海域面積を改変したことを意味する。従ってこ

のケーススタディーは、リスクをより大きく見積もる立場に立っていると考えることができる。

EF では沿岸・大陸棚の等価係数を 0.36 とし、地球上で 7.2 億 gha と見積もっている¹⁶⁾。一方で外洋や深層は生産がないと見なし、等価係数を 0 としている¹⁶⁾。沿岸・大陸棚の世界の生物生産力は全海洋の 95% であり、これらから外洋の等価係数を 0.0011 と強いて見積もることもできる。しかし EF はあくまで経済的活動を対象としているため、この等価係数を ER に適用するのは適切ではない。本研究では ER に関して、生物の種の絶滅に海域による価値の差はないと考え、等価係数を 1.0 とすることとした。

これらから求めた環境改変面積に Table 6 で求めた生起確率を掛け、求めた結果の ER を Table 7 に示す。100 年間のシナリオをアンケート時に提示したので、両シナリオの差を取って ΔER にする際に、1/100 にして単位を gha/yr にしている。

Table 7 ΔER の算出

海域	総面積 (億 ha)	改変 面積 (億 ha)	シナ リオ	生起 確率	ER (億 gha)	ΔER (百万 gha/yr)
沿岸 域	29	25.2	①	0.40	10.1	1.8
			②	0.33	8.3	
外洋 表層	362	315.1	①	0.35	110.3	18.9
			②	0.29	91.4	
深層	16	13.9	①	0.38	5.3	1.0
			②	0.31	4.3	
計						21.7

6. 人間リスク (HR)

Table 8 LIME²⁰⁾による単位量当たりの被害額

被害項目	当該物質	人間健康 (円/Kg)	社会資産 (円/Kg)	計 (円/Kg)
地球温暖化	CO_2 排出	1.19×10^0	5.48×10^{-1}	1.66×10^0
酸性化	SO_2 排出	—	6.08×10^1	6.08×10^1
	NO_2 排出	—	4.34×10^1	4.34×10^1
	ボーキサイト	—	4.67×10^{-3}	4.67×10^{-3}
資源消費 (利子 3%)	石炭	—	1.61×10^{-1}	1.61×10^{-1}
	原油	—	3.55×10^0	3.55×10^0
	天然ガス	—	2.11×10^0	2.11×10^0
光化学オキシ ダント	揮発性有機化 合物 (VOC) 排出 (平均)	6.78×10^1	2.72×10^1	9.50×10^1

HR（人間健康、社会資産に対するリスク）の算出には LIME²⁰⁾の結果を用いた。LIME ではコンジョイント分析によって、人間健康、社会資産、生物多様性、一次生産に対する単位被害量当たりの経済価値が算出されており、ここではそ

れらによって経済価値に換算された単位排出量あたりの被害額を用いる (Table 8)。

Table 8 に示した単位排出量あたりの被害額および Table 2 の排出量より、地球温暖化の HR は隔離する CO₂ 量から排出量を引いて -4.5×10^{13} 円となる。

SO₂, NO₂ 排出量より、それぞれの物質による被害額は 1.6×10^{10} 円, 5.2×10^{11} 円であるから、酸性化の HR は 5.4×10^{11} 円となる。なおここでの酸性化とは、酸性雨の効果も含んだ、SO_x, NO_x などが沈着して土壌などが酸性化することを意味する。

資源消費の HR は、Table 8 の単位消費量あたりの被害額および Table 1 の資源消費量より、利子率 3% のとき 2.6×10^{12} 円となる。光化学オキシダントの HR は、Table 2 の VOC 排出量より 5.2×10^3 円となる。

最終的に 6.1 節の LCA の結果と LIME により、地球温暖化、酸性化、資源消費、光化学オキシダントの人間健康と社会資産リスク ΔHR は、 -4.2×10^{13} 円/yr となる。

7. コスト (C-B)

年間平均隔離量 3.3×10^{10} t-CO₂/yr から、CO₂ 海洋隔離のコストとベネフィットを求める。CO₂ 海洋隔離の単位隔離量当たりのコストは RITE³⁾によると 7959 円/t-CO₂ である。また隔離によって削減された (大気中に放出されなかった) CO₂ 量をそのまま排出権として売却した価格の合計をベネフィットとして考えるので、CO₂ の排出権取引が行われている EU の 2006 年の市場価格を参考に、14 ユーロ (2310 円)/t-CO₂ (為替レートは 2006 年平均) を採用した。この結果、コストベネフィットである $\Delta(C-B)$ は、5649 円/t-CO₂ であり、年間隔離量を乗じると、 1.9×10^{14} 円/yr となる。

8. 包括的環境影響指標 (Triple I)

Table 9 Triple I の算出		
	円/yr	gha/yr
ΔEF	—	-6.9×10^9
ΔER	—	-2.2×10^7
ΔHR	-4.2×10^{13}	-1.2×10^8
$\Delta(C-B)$	$+1.9 \times 10^{14}$	$+5.2 \times 10^8$
Triple I	—	-6.5×10^9

以上から、種の絶滅率を 40% としたケーススタディーの場合の Triple I を求めると、Table 9 のようになる。ここで $\Sigma EF/\Sigma GDP$ は、2006 年の世界全体の EF と GDP を積算し 2.8×10^{-6} gha/円¹⁶⁾ とした (為替レートは 2007 年 1 月 29 日時

点)。Triple I を図示したのが Fig. 3 である。CO₂ 海洋隔離の Triple I の項で一番大きな値を占めているのは ΔEF であることがわかる。また Triple I の値は負になっているので、この場合 CO₂ 海洋隔離は有効な技術であるとの判断が可能になる。

Fig. 3 CO₂ 海洋隔離の Triple I の内訳

結果として ΔER は Triple I にしたとき、オーダーとして他の項と比べて小さなものとなった。特に ΔEF が他に比べて大きなものとなっており、その中で一番大きな要素を占めるのは CO₂ の EF (エネルギーフットプリント) である。一般に EF の計算において、CO₂ が大きな要素となり、他の要素が過小評価されることが多く見受けられる。また、 $\Delta(C-B)$ で CO₂ を排出権取引して利益を上げること考えているので、CO₂ の ΔEF とでダブルカウントしてしまっているとも考えられる。そこで ΔEF の項を除外してみると、Triple I は 3.5×10^8 となり、値は正となる。このとき $\Delta(C-B)$ が最も大きな割合を占め、CO₂ 海洋隔離を有効と判断するためには、約 50% のコストダウンが必要であることが示唆される。CO₂ 海洋隔離のコストはその約 80% が分離回収であり、現在このための研究開発が鋭意進められている³⁾。

9. 結論

本研究では、3 節に示した 2 つのシナリオを基に、専門家アンケート結果を確率的手法を用いて解析し、リスクのエンドポイントである種の絶滅確率を求め、さらに SAR を用いてハザードを定量化することで、これまで算定化が困難とされてきた ER をフットプリントとして表現し、Triple I を算定することを試みた。この結果、温暖化に関して何も対処せずに大気中の CO₂ 濃度が 1000ppm となった場合の海洋表層酸性化のリスクに対し、CO₂ 海洋隔離による深海生態系へのリスクやコストを考慮しても、大気中 CO₂ 濃度を 550ppm に抑えた場合の Triple I は負値となった。従って、BaU で 2100 年の大気中濃度が 1000ppm になるよりは、海洋隔離をしても 550ppm に抑えた方が良いという結果となった。また、こ

の過程において、専門家は大気中 CO_2 濃度が 1000ppm となった場合の深海の ER の方が、海洋隔離による深海の ER より大きいと考えていることがわかった。

Triple I の中身を見ると、隔離した分の CO_2 による ΔEF が最も大きな割合を占め、 ΔER はそれより 2 桁小さいことがわかる。これはハザードの定量化の際に種の絶滅率を 40% としたケーススタディーの結果であるが、絶滅率を変化させても ER は Triple I の値を大きく変えることはないことを示唆する。但し、一般に EF に対する批判として、エネルギーフットプリントを大きく見積もる傾向があることが言われており、試みに ΔEF を除くと Triple I は正值となり、 CO_2 海洋隔離のコスト削減が必要であることを示唆する。

今後の課題として、より現実的なシナリオの設定や、深海での SAR の成立性の証明、種数減少率を個体群モデルなどを用いて自然科学的な見地から求める必要性等が挙げられる。

謝 辞

有意義な議論をさせていただいた日本船舶海洋工学会「海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価」委員会 (IMPACT 委員会) メンバー各位に感謝申し上げます。アンケート項目作成の際、丁寧なコメントをいただきました KANSO 渡辺雄二博士、長崎大学石松淳教授、海洋環境生物研究所喜田潤博士にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) IPCC: Climate change 2001. IPCC, 2001.
- 2) Orr, et al.: Anthropogenic acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437, pp. 681-686, 2005.
- 3) (財)地球環境産業技術研究機構: www.rite.or.jp.
- 4) IPCC: IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage. IPCC, 2005.
- 5) 上城功紘, 佐藤徹: CO_2 海洋隔離の社会受容性に関する研究—アンケート調査とリスクコミュニケーションの試行. 日本船舶海洋工学会論文集 4, pp. 9-19, 2007.
- 6) Sato, T.: Numerical simulation of biological impact caused by direct injection of carbon dioxide in the ocean. *J. Oceanogr.* 60, pp. 807-816, 2004.
- 7) Sato, T. et al.: Extended probit mortality model for zooplankton against transient change of PCO_2 . *Marine Pollut. Bull.* 50, pp. 975-979, 2005.
- 8) ワケナゲルら: エコロジカル・フットプリント地球環境持続のための実践プランニング・ツール. 合同出版, 2004.
- 9) チェンバースら: エコロジカル・フットプリントの活用 地球 1 コ分の暮らしへ. 合同出版, 2005.
- 10) 中西準子: 環境リスク論, 岩波書店, 1995.
- 11) 大塚耕司: 海洋の大規模利用に対する包括的環境影響評価指標の一提案. *Proc. Techno-Ocean 2006/19th JASNAOE Ocean Eng. Symp.*, CD-ROM, 2006.
- 12) 野尻智洋ら: 原油の供給障害リスクを考慮したメタンハイドレート開発の有効性評価. 資源エネルギー学会論文集 29(4), pp. 24-28, 2008.
- 13) 中央環境審議会地球環境部会気候変動に関する国際戦略専門委員会: 気候変動に関する今後の国際的な対応について (長期目標をめぐって) 第2次中間報告, 2005.
- 14) Caldeira K., Wickett M. E.: Anthropogenic carbon and ocean pH, *Nature* 425, pp. 365-365, 2003.
- 15) 平岡克英ら: LCA 解析のための外航貨物船の運航状況分析と海上輸送の大気環境負荷物質の排出係数. 海上技術安全研究所報告 5(3), pp.25-90, 2005.
- 16) Ecological Footprint Network: Ecological Footprint and Biocapacity Technical Notes 2006 Edition, 2006.
- 17) 横山隆壽ら: 化学吸収式 CO_2 回収技術の評価—モノエタノールアミンプロセスの運転特性及び LNG 焚き火力発電プラントへの適用に関するフィージビリティスタディー. 電力中央研究所研究報告 T94057, 1995.
- 18) 石谷久ら: 社会システム工学. pp. 33-65, 1992.
- 19) Rosenzweig, M. L.: Species diversity in space and time. Cambridge University Press, 1995.
- 20) 伊坪徳宏ら: ライフサイクル環境影響評価手法 LIME. 産業環境管理協会, 2005.