

微細藻によるCO₂固定 技術とその利用

(財)電力中央研究所 生物部
バイオ技術研究室長 齊木博

CO₂の増加による地球温暖化を防ぐため、CO₂を回収・固定、処分しようとする研究が数多く行われるようになってきている。ここでは生物的なCO₂固定法の中でも、(1)淡水性の微細藻類を用いたCO₂の固定技術と(2)海洋性のものを用いたCO₂固定の研究について紹介する。

1. 淡水性微細緑藻、クロレラを用いたCO₂の固定

1. 1. 微生物を用いたCO₂の固定

植物と微生物の光合成による炭酸同化を較べた場合、いくつかの点で微生物の方が優れている。一般に植物は微生物の進化した形なので、植物の方が光合成の効率が良いと思われがちであるが、光合成の基本的な機能は同一である。植物の進化はその生き残りを賭けて発達してきたものである故、劣悪な環境や、競争相手である他の生物に対して生き残れるような仕組みで働いている。従って、根や葉や茎を作る必要の無い微生物は全身が光合成の器官であり、同時に増殖する体でもあることは有利に働く。光合成の基本的な効率が同一である以上、体の構造が単純である微生物の方が、CO₂を固定して同化する速度では明らかに優れている。植物と微生物における光合成の効率を太陽エネルギーの変換効率で表した場合、植物では気候に恵まれても年間1-2%であるのに対して、光合成で生育する微生物の場合は微生物の培養に適している条件では年間2-3%となる。このような微生物としては緑藻と藍藻が知られている。緑藻は健康食品でしられるクロレラの属する微生物集団である。後に述べる理由から、栄養価の高いクロレラの仲間がCO₂を固定する微生物としては優れていると考えられる。

この様な微生物を利用したCO₂の固定を行う場合、問題点として、希薄な太陽エネルギーのそのまた一部しか利用できないので、広大な土地、面積を必要とすることである。

1. 2. CO₂固定のシナリオ代替効果の見積り

微生物のCO₂固定によりどの程度の効果が見込まれるだろうか？ CO₂の固定産物である微生物の体は放置すれば死んで、腐敗して、再びCO₂に戻ってしまう。従って、これを有効利用する必要がある。クロレラは健康食品として有名であるが、微生物の体は一般にアミノ酸含量が高く、高品質食物に分類される。従って、人間の食物か、少なくとも家畜の飼料ぐらいには利用可能である。仮に家畜の飼料とした場合、微生物の体は部分的には家畜の血や肉になるが、大部分は分解して呼吸などにより再びCO₂に戻ってしまう。また家畜自体もいずれは死んでCO₂に戻ってしまう。このように考えると微生物によるCO₂の固定は直接固定する効果はない。

しかし、間接的に温室効果ガスを抑制する効果はある。

畜産飼料は通常畑でとれる大豆やトウモロコシを利用している。畑には機械や動力のためにかなりのエネルギーをつぎ込んでいる。また生産性を上げるための窒素肥料は畑の中で一部分解して強力な温室効果ガスである亜酸化窒素ガス (N_2O) へと変わっていく、また耕地には有機肥料として堆肥をまく。この堆肥をつくる過程でやはり強力な温室効果ガスであるメタンが発生する。例えば、大気中の4トンの CO_2 を1.23トンの

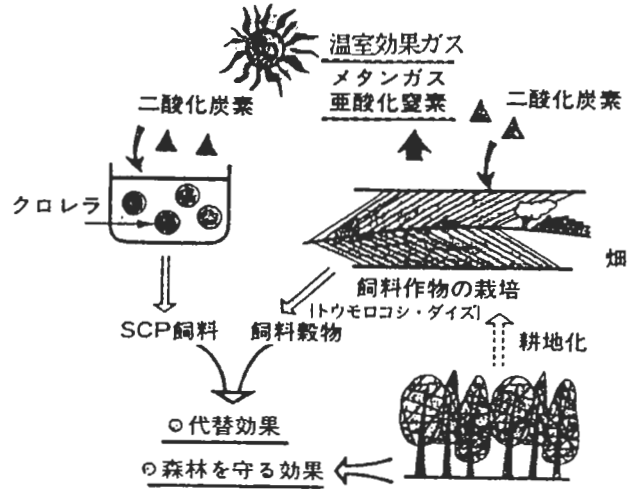


図1 微細藻類SCP利用の意義

の耕地で固定した場合、2トンの穀物と2トンの残査が生じ、この残査が再び堆肥として、耕地に還元される過程で、0.4トンのメタンが発生するわけである。また耕地からは窒素肥料に由来する亜酸化窒素も発生する。一方微生物を用いた飼料の生産の場合はこのような温室効果ガスを出す恐れはない。従って、微生物の菌体で畜産飼料の代替を行うことによる温室効果ガスの削減の効果が大きいことが判る。

この効果を定量的に見積ったのが表1である。飼料1トンあたりの生産する時に放出される温室効果ガスの量は飼料作物で投入エネルギーに由来する量が0.2トン、畑から出てくる量が6.3トン、で計6.5トンとなる。ここでメタン及び亜酸化窒素に由来する温室効果をそれぞれ、 CO_2 の80倍、270倍と算定して、 CO_2 の炭素の量で表した。一方、クロレラのような緑藻類を生産するのに伴って出てくる温室効果ガスは、培養液の調整や攪拌などに必要なエネルギーに由来するもので1.1トンと推定される。この結果から、緑藻類1トンあたり、温室効果ガス5.4トンの削減の効果があることになる。すなわち、緑藻類を用いた CO_2 固定では1トンあたりの CO_2 固定が5.4トンの CO_2 固定に相当するということである。

表1. 年間1トンの飼料生産を行った際の温室効果ガス放出量[単位tC]

飼料の種類	投入エネルギー (燃料、電気等)	耕地由来の温室 効果ガス*	総放出量 (CO_2 換算)	代替効果
飼料作物	0.2	6.3	6.5	-
微細藻類	1.1	0	1.1	5.4

*一酸化二窒素、およびメタンガスの温室効果を CO_2 の270倍、57倍と見積った。

ただし、この場合固定産物である微生物の菌体が畜産飼料に直接利用されることが必要であり、このためにはクロレラのように栄養価が充分高い微生物であることが必要である。

1. 3. CO₂削減に関する副次的な効果

微生物によるCO₂固定では別の見方をすれば畑を必要としない農業であることから、耕地をつくるために森林を開拓しなくて済むという効果がある。森林は土壌中に有機物を蓄積した潜在的に良質の耕地ではあるが、一方ではCO₂を有機物の形で貯蔵する貯蔵庫となっている。森林の炭素の貯蔵庫としての大きさを成熟した熱帯林で地上部、地下部併せて平均1畝あたり280トCと仮定すると、飼料生産が1トCあたり0.7畝と推定されるので、微生物による飼料生産は年間1トCあたり0.7畝の森林を耕地化から守ることになり、約200トCの炭素の貯蔵庫を守ることになる。

1. 4. 高濃度CO₂条件下で生育するクロレラの単離

以上のようなシナリオが成り立つためには、火力発電所のような安価なCO₂を利用して栄養価の高い緑藻類を培養する必要がある。通常、緑藻類はCO₂濃度が空気中の濃度である0.03%以上が望ましく、CO₂濃度が上昇するにしたがって、CO₂の固定効率は上がっていくが、4%位を最大値として、これを越えると急激に固定効率が悪くなり、死滅するものもでてくる。

そこで、火力発電所排ガスのガス組成であるCO₂10-15%、O₂2%程度の条件で生息する緑藻類を探索した。千葉北総、茨城南部、九州筑後地方、香川県讃岐平野の田水やため池でサンプリングを行い、CO₂濃度15%で生育するクロレラ6株を得た。この中でも茨城の蓮田から単離したHA-1株は最もCO₂固定能が高く、最適CO₂濃度は約10%のところにあるが、15%以上の濃度でも旺盛な成長を示した。

表2. 分離クロレラ株の最適CO₂条件下における増殖比、光合成効率

供試株	最適CO ₂ 濃度 (% v/v)	増殖比 (倍/週)	面積当り生長速度 (g 乾物/m ² /日)	面積当りCO ₂ 固定速度 (g-炭素/m ² /日)	光合成効率 (P. E.) (%)
分離株					
<i>Chlorella</i> sp. HA-1株	10	5.90	17.1	7.80	3.62
<i>Chlorella</i> sp. HA-2株	5	4.63	10.6	4.44	2.06
<i>Chlorella</i> sp. HC-1株	10	4.86	14.0	6.29	2.92
<i>Chlorella</i> sp. HC-2株	10	3.61	11.7	4.98	2.31
<i>Chlorella</i> sp. HT-1株	15	5.74	12.9	6.10	2.83
<i>Chlorella</i> sp. HT-2株	10	5.52	12.6	5.69	2.64
対照株					
<i>Chlorella pyrenoidosa</i> NIES-226株	5	4.74	15.4	6.83	3.17

表2に示したように国立環境研究所の保存株で唯一CO₂濃度15%で生き延びたクロレラよりも、HA-1は光合成効率が良かった。また最適pH、培養温度、流速等の培養条件にたいしても適用範囲が広く、あまり厳密な培養条件を設定しなくとも良いことが判った。

1. 5. 微生物を用いたCO₂固定、温室効果ガス削減の方策

クロレラのような緑藻類を用いたCO₂の固定は畜産飼料や食物として利用されて初めて意味を持つ。従って、この方策は従来の農業形態の変革をも促すものであ

る。ところで、微生物に由来する畜産飼料としては、配合飼料として天然ガス等からつくられた酵母が市場に出回っている。最大の供給者は石油メジャーのBP (British Petroleum) であり、主に欧州で生産し、欧州を市場としている。

クロレラを生産して飼料として利用することはこのような流れの延長線上にある。

クロレラのような緑藻類を用いたCO₂の固定は畑を必要としないが、太陽光を必要とするため、広大な面積を必要とする。また、大気中のCO₂濃度では0.03%と低すぎるので、火力発電所排ガスのようにCO₂濃度が10-15%のものを使い、発電所敷地や火力発電所の前面にある海面を利用してクロレラを培養する方法が考えられる。図に示したように排ガスをチューブ状の反応器に導き、海面に筏のようなものを浮かべて、これにチューブを設置してCO₂を固定することができる。

5 km²の土地を使い、30万kwのLNG火力の排ガスを固定した場合は30g C / m²・年の生産性で排ガス中のCO₂の5%程度を固定することになり、15,000トンの飼料の生産が可能となる。これは畑から由来する温室効果ガスを約8万トン削減することになる。日本を例にとった場合、平成1年における輸入飼料は約5百万トンであり、この1/5を微生物飼料で代替した場合、約5百万トンの温室効果ガスの削減となる。

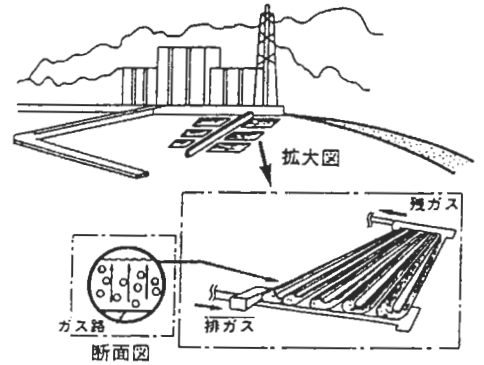


図2 微細藻類を用いたCO₂固定光リアクターのイメージ図

CO₂固定に関わるコストは排出ガスを用いて試算したものは無いが、最も経済的にクロレラ生産を行い、粗放的な池を用いて生産をした場合のコストを計算した例では、表3に示したように約27万円/トンとなっている。輸入飼料である大豆・トウモロコシが12-15万円/トン(1990年)と比べて割高となっているが、栄養価が高いので引き合うとされている。排ガスを利用して生産する場合はもう少し安価になった場合、輸入飼料穀物をクロレラで代替する可能性は大きくなる。

表3. 安価なクロレラの生産例

	10%システム	100%システム
クロレラの生産物 価格	\$3.25/Kg乾物 (約100万円強/トン)	\$0.82/Kg乾物 (約27万円/トン)
日本の米の価格	92万円強/トン	

(出典: J.R.Benemann et al. TIBTECH 5, pp47-53, 1987)

このような微生物を用いた飼料生産は農業のあり方を抜本的に変える可能性を含んでいるので、ただちに実行に移せて効果が期待できるようなものではないが、実際に行われればCO₂問題を根本的に解決できる数少ない方策の一つと考えられる。

2. 海洋性プランクトンを利用したCO₂の固定

海洋は陸上に対して約3倍の面積を持っているにもかかわらず、その全一次生産量は陸上全体の約半分と言われている。これは一つには海洋の水がきれいであるから、つまり生物にとって栄養が足りないからである。もし、海洋が大きな生産力を持っていれば、つまりCO₂を固定する能力が現在以上に大きければ海洋はCO₂をとりこむ巨大な貯留槽として働くはずである。事実、陸上から種々の栄養塩類が流れ込んでいる沿岸域での生産性は外洋に較べて、クロロフィル換算で30倍から50倍の大きさで見積られている。

海洋で不足している栄養分はおもに窒素と磷である、特に窒素不足が海洋の生産力を制限していると言われている。畑に肥料をやるように、海にも窒素、磷酸肥料をまくことは可能である。しかし、畑の場合と異なることは、海からは畑のような収穫物が得られないことである。従って、海に肥料をやることは経済的に大変高価につく方策となる。それでは、どのような方策が可能であろうか？

2. 1. 湧昇流を利用する

広い海洋の中には海底から海面に向かう水の流れをもつ所がある。これを湧昇流と呼んでいる。このような湧昇流は通常、海底に溜っている窒素や磷を含む栄養塩類を巻き込むので、栄養分を多く含む海水となる。このような場所では、生物生産の活発な場所として、植物プランクトンがまづ繁殖し、これを補食する動物が繁殖し、最終補食者である魚類が繁殖するので、よい漁場として知られているところが多い。

カリフォルニア沖のように、湧昇流が沿岸域に近いところで発生している場合は、陸上からの栄養塩類の流れ込みとの相乗効果により、生物の生産性が広い面積にわたり、大変高くなっている。これに対して湧昇流が外洋で生じている場合は、生物の生産性がそれほど小さくなく、水質分析の結果によれば栄養塩類のかなりの部分が使われずに残っている。湧昇流は海洋の循環の中でまた海底へと流れ込んで行くので、残された栄養塩類はそのまま海底へと再び運ばれている。

外洋の湧昇流のあるところではこのように未だ生産性を向上させる余地が残っている。海洋のように僅かな栄養分をそこに住む生物が競い合っているところで、なぜこのような栄養分の使い残しがでるのか完全に解明されたわけではない。現在検討されている原因の中で最も有

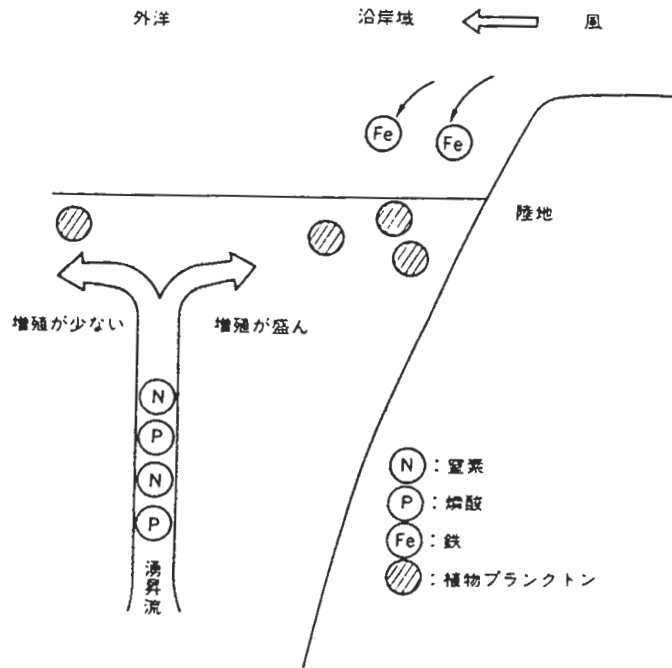


図 3 湧昇流を利用した生物生産

力なものが、微量元素の一つである鉄分の不足である。鉄分は、窒素や磷のように生物にとって大量に必要とされる元素ではないが、生物にとっては無くてはならない必須元素である。鉄分は通常3価のイオンとして存在しているが、3価のイオン化合物は、特殊な形態を取らない限り、水に不溶の化合物である。従って海水中の濃度は極めて低く6 ng/l程度と言われている。鉄分は微量元素なので栄養塩類が少ないときには、生物の増殖を制限する要因となることはないが、栄養分が充分にあるときは生物の生産性が阻害されるわけである。外洋と沿岸域を較べた場合、この鉄分の濃度が約10倍から1000倍沿岸域の方が高い。沿岸域では大陸からの風がダストや塵の一部として鉄分を海洋に運んで、常に供給している。これに対して外洋では鉄分の供給源が無いわけである。これが外洋と沿岸域の生物生産の差となっている。

それでは外洋に鉄を散布すれば、海洋の生産性を高めることができるのではないか？そして、CO₂の吸収能力が高まるのではないか？

2. 2. 海洋の生産性とCO₂吸収の効果

鉄を散布することにより海洋における一次生産力である植物プランクトンの増殖が促進された場合、これによりCO₂吸収の効果が高められるであろうか？

植物プランクトンは光合成により増殖するので、増殖の過程で海水中のCO₂を消費する。消費された分に相当するだけ空気中からCO₂が供給されるので、植物プランクトンが増殖した分だけ空気中のCO₂を海洋中に吸収したことになる。しかし、植物プランクトンは通常数日のオーダーで増殖、死滅を繰り返しており、死んだ植物プランクトンは再びCO₂へと戻って行く。従って、植物プランクトンの増殖そのものが海洋におけるCO₂の吸収に直接利いているとは考えられない。海洋におけるCO₂の吸収機構は植物プランクトンの増殖を通して生産された有機物がどこで分解されるかによっている。すなわち、植物や動物プランクトンの死骸が集まって塊をつくり、これが海の中を沈降して行くことが知られている。また、植物プランクトンは一次生産者であるから、植物連鎖により、動物プランクトンに捕食され、更に上位の動物、最終的には大型魚類へと捕食されていく。この間に動物が排せつする糞もやはり沈降して行く。このような有機物は海底に到着するずっと以前に分解してCO₂に戻ってしまうが、一部は1000m以深にも到達するといわれている。海洋における鉛直方向の物質の移動は小さく、やく1m上昇するのに1年かかるとされているので、1000m以深にまで沈降した有機物は再びCO₂として大気中に現れるまで1000年以上かかるわけである。

この1000m以深まで届く有機物の総量は海面付近で生産された植物プランクトンの量の2%とも5%とも言われている。

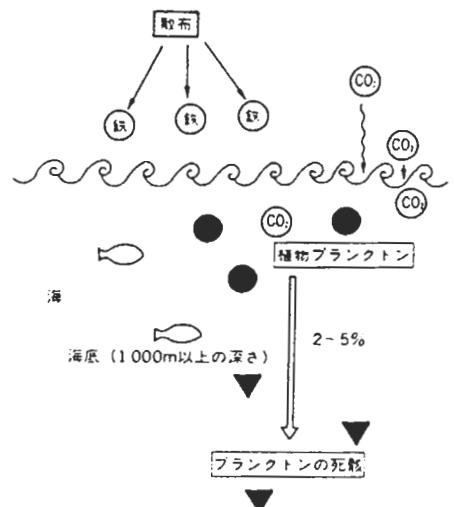


図 4 プランクトンの増殖によるCO₂の固定

2. 3. 南極に鉄をまく

南極は年平均気温 -10°C 、夏でも月平均気温 $3-4^{\circ}\text{C}$ という極寒の地でありながら、その生物生産が高いことで知られている。これは南極大陸の周囲に湧昇流が発生しているからである。南極の場合一年の半分を占める冬の時代には殆ど生産性が無く、春から夏にかけての僅かな期間に一年間の生産の大部分を行っている。これは冬には気温が大変低いことと、殆ど日が射さない夜の時代であるからである。南極の場合もその生産性は沿岸部に偏っており、南極海における生産性は低く、湧昇流により供給された栄養分は大部分使われることなく、また深海へと戻って行ってしまふことが知られている。

この南極海に鉄をまいて植物プランクトンを増殖させ、南極における生産性を増大させると共に、 CO_2 の吸収の効果を高めようという研究が開始されている。南極海の場合南緯 65° の近辺の南極発散線から湧昇流があがり、一部は南極大陸に向かっていき、一部は南極海へと向い、南緯 $50-60^{\circ}$ の南極収束線で海底に潜ることが知られている。従って、南極海上で増殖した植物プランクトンがかなりの割合で海底に持ち込まれることが期待されているわけである。

南極に鉄を散布することを最初に提案したのは米国 Moss Landing海洋研究所のMartin博士である。一つの試算によれば南極海に20万トンの鉄を散布することにより最大20億トンの炭素を余分に吸収することができるという。このための費用は10億ドルと試算している。この吸収量は全世界で排出している化石燃料由来の CO_2 の量57億トン(1989)の約1/3に相当し、また試算された費用は CO_2 の処理コスト1トンCにつき50ドル(60円)を意味し、 CO_2 の処理方法の中ではコストの面では1桁以上も安価な方法となっている。この試算の結果は暫定的なものであって、その精度は必ずしも充分なものではないと思われるが、その効果、コストともに1桁程度の誤差であれば、 CO_2 の処理方法として充分通用するものと考えられる。

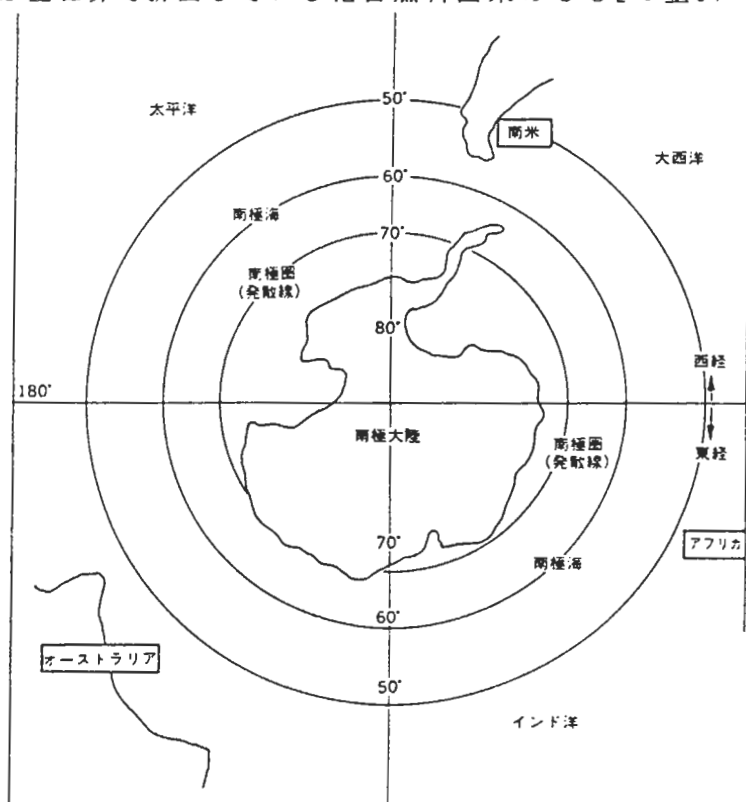


図5 南極大陸と南極海

2. 4. 鉄散布における環境問題

南極海に鉄をまくことによって、南極の生産性を高めて水産業における収穫を高めるといった副次的な効果も予想されるが、一方では他の面での環境問題が生じることが予想されている。まず、植物プランクトンが過剰に発生して赤潮が起きないだろうかという不安である。植物プランクトンが過剰に発生してその死骸が大量に蓄積された場合、有機物の腐敗・分解の課程で酸素が消費され酸素欠乏の海が生じ、この結果動物の生息できない死の海となる恐れがある。

植物プランクトンの発生は爆発的に起こることが知られており、これをブルームと呼んでいる。南極においても春から夏にかけてこのブルームが生じることが確かめられている。この大発生は必ずしも酸素欠乏に結びつくものではなく、南極においてはこれが南極の生産性を支える元となっている。鉄散布による過剰の植物プランクトンの増殖が酸素欠乏を引き起こす可能性は実際には無いとは言えないが、東京湾や瀬戸内海のように過剰の栄養分が区切られた海域にそそぎ込まれている場合は異なり、海流の存在する海洋での発生は可能性が極めて小さいと考えられる。

南極海を利用する一つの特徴として、予想に反して大きな被害がでた場合でも、約半年間続く冬の間、その影響が海洋の流れや拡散により薄められ、元の状態に復元される期待が持てることもある。

もう一つの大きな問題は地球上の炭素循環に、働きがよく判っていない海洋を利用して新たな炭素の巨大な流れを持ち込むことへの不安がある。地球規模での炭素の循環は全てが解明されたわけではなく、炭素の流れをかき乱した結果、予想もしなかったマイナスの影響が現れる可能性は存在する。これを避けるためには先ず小規模な実験から初めて、地球規模での環境影響の心配がないことを確認してから大規模な実験に移るべきであろう。

3. 参考文献

- 齊木博、「地球工学入門」小宮山宏編著、第7章、オーム社(1992)
- 嶋盛吾他、電力中央研究所報告 U90020(1990)
- 渡部良朋他、電力中央研究所報告 U92014(1992)
- 武田重信他、電力中央研究所報告 U91049(1991)