

Hitoshi Koide (2011) Air-CCS as a secure counter-geoengineering, *Proceedings of MMIJ Annual Meeting (2011)*, 1-4. [小出 仁 (2011) 大気 CCS : カウンター・ジオエンジニアリングの考え方, 資源・素材学会春季大会講演集, 1-4]

大気 CCS : カウンター・ジオエンジニアリングの考え方

産総研/温暖化防止地球システム 小出 仁

<http://co2.eco.coocan.jp/>

1. ジオエンジニアリング (地球工学) の役割

地球にマクロな影響を与える可能性のあるような大規模工学技術を広くジオエンジニアリング (地球工学) と呼んでいる。多種多様な技術を含み、体系化はされていない。SF (Scientific Fiction) と言うべきものも多く、「とんでも技術」などと言われ、物笑いの種にさえなっていた。しかし、好むと好まざるに関わらず、ジオエンジニアリングはしだいに重要な分野になりつつある。「世界は神様が造りたもうたが、オランダはオランダ人が造った」と言われるオランダはジオエンジニアリングの元祖といっても良いであろう。旧ソ連の「自然改造計画」は、おそらく初めて意識して実施されたジオエンジニアリングと思われるが、中央アジアでの大規模な灌漑事業はアラル海の縮小と沙漠化を招いた。安易な

ジオエンジニアリングの悪影響の格好の例である。現在提案されているジオエンジニアリング案でも、実用不可能な技術や目的外の悪影響の危険がある技術が多い。しかし、反対する人が多くても、実は人類は意図せずにジオエンジニアリングの壮大な実験を既に実施している (表 1)。産業革命以来、CO₂ やメタンのような温室効果ガスを大量に排出し、地球を温暖化しつつあるのが、「意図しないジオエンジニアリング」の好例である。世界中で、森林を破壊して、耕地や放牧地を作り、都市を建設することも、意図しないジオエンジニアリングと言える (表 1)。人類最古の物語「ギルガメシュ叙事詩」では、「都市の神」が「森の神」を征伐するが、5,000年前に既に「意図しないジオエンジニアリング」とその恐ろしい結末を物語っている。

表1. 主な温暖化防止 (気候) ジオエンジニアリング

温暖化防止ジオエンジニアリングの種類	類似天然現象	意図しないジオエンジニアリング	提案されているジオエンジニアリング
太陽放射管理 (SRM) (Solar Radiation Management)	火山噴火による硫酸エアロゾル放出 永冠 (南極、北極、グリーンランド) 雲海	温暖化による氷冠縮小 温暖化による氷河縮小 人為的植生変化 人為的砂漠化 (アラル海縮小)	火山活動増進 硫酸エアロゾル成層圏散布 宇宙太陽光シールド (地球に日傘) 雲を増やす 反射シート (氷河、沙漠)
二酸化炭素 (CO ₂) 除去 (CDR) (Carbon Dioxide Removal) 大気中温室効果ガス (CO ₂) 濃度調節	海洋 CO ₂ 吸収 生物の光合成 化学合成独立栄養生物 有機物埋没 生物による炭酸カルシウム沈殿 岩石風化による CO ₂ 吸収 火山 (マグマ) CO ₂ 放出 沼地・湿地からメタン放出 凍土溶解・ハイドレート解離によるメタン放出	化石燃料大量燃焼による CO ₂ 放出 森林伐採 海洋汚染による藻類等変化 (赤潮など) 珊瑚礁縮小	化石燃料燃焼排ガスから CO ₂ 回収・貯留 (CCS) 森林保全・大規模植林 岩石風化促進 バイオチャー、土壌 CO ₂ 吸収増進 珊瑚礁保全・育成 海洋施肥 (鉄・炭酸塩) 海洋 CO ₂ 吸収促進/湧昇流 CO ₂ 注入による藻類育成 バイオ燃料 CCS 大気 CO ₂ 吸収・貯留 (大気 CCS) エコセメント

表2. ジオエンジニアリングの15原則（案）

（ジオエンジニアリングは、副作用をミニマムにするため、厳密な原則に即して実施する、あるいは原則から外れる怖れがある場合は実施しない必要がある。）

1. 「絶対」は無い。絶対安全と思えることにこそ注意が必要である。
2. 安全と安心は異なることを注意する。大事故は安心しきっている時に起きる。警告があっても聞く耳を持たない組織は危険である。
3. 研究は積極的かつ徹底的に、実施は慎重に。研究しても、実施しないで済めば、最善である。
4. やむを得ず実施する場合は、その前にまず自然の状態を徹底的に調べる（ベースライン調査）。関係ないと思われることも含めて総合的な調査をする。
5. 実施前に、実施した場合の影響を細大漏らさず予測する。可能性の小さいことも含めて、予測すること。
6. 過去は未来の鍵である。
7. 自然からの逸脱（逸脱の程度及び範囲）を出来るだけ小さくする。
8. 既に自然から逸脱している場合、あるいはやむを得ず逸脱してしまった場合には、自然の状態に戻す方向で対処する。
9. 可能な限り自然のプロセスを利用あるいは模倣する。
10. 実施中及び実施後も十分な期間と範囲で観測・監視するし、悪影響が無いことを確認する。
11. 計画、実施したこと、観測したことを細大漏らさず記録し、記録を保存し、公開する。
12. 地域との共生が最重要である。NIMBY (Not In My Back Yard) は当然の感情であり、それだからこそ住民参加が必要である。
13. 他の国あるいは世界全体に影響を及ぼす可能性がわずかでもあれば、国際合意が必要である。
14. ジオエンジニアリングに関する国際ルールまたは国際ガイドラインが必要である。
15. 実施機関と独立の国際管理組織が必要である。

人類にとって、地球は小さくなりつつあるとはいっても、やはり地球は大きく複雑である。ジオエンジニアリングの基盤になるのは、地球科学であるが、地球については未知の部分が多く残っている。未知の自然を不用意に変えないように注意すべきであるが、世界で70億人近い人類にとって自然を変えないようにすることが困難になっているのが現実である。自然の状態を守るためには、意図しないジオエンジニアリングは止めるべきであるが、実際には止める事が難しい場合が多い。ご承知のように産業革命以後、自然状態の280ppmから36%も増えているCO₂濃度のさらなる増加をくい止めることすら、世界の首脳達が集まっても難しいのが現実である。

意図しない誤ったジオエンジニアリングに対抗するためのジオエンジニアリングが必要になっている。地球規模の破壊には、地球規模の対策が必要である。人類が無意識に破壊した地球を修復するための新しいジオエンジニアリングを「カウンター・ジオエンジニアリング」と呼ぶことにする。大気中のCO₂濃度増加を止めるためのカウンター・ジオエンジニアリングの候補として、CO₂回収・貯留(CCS)

がクローズアップされている。CO₂回収・貯留(CCS)は、大気中に増えすぎたCO₂をこれ以上増やさないようにしようとする技術であるが、さらに、大気中のCO₂濃度を減らして産業革命前の自然の濃度(280ppm)に向けて「少しでも戻そうとするカウンター・ジオエンジニアリングがCO₂除去 (Carbon Dioxide Removal:CDR) ジオエンジニアリングである(表1)。

しかし、かけがえの無い地球にマクロな影響を与えるだけに、ジオエンジニアリングの実施には細心の慎重さが必要である。「石橋を叩いて渡らない」のが原則である。それでもジオエンジニアリングを実施するには、厳格な原則を守る必要がある(Commons Science and Technology committee,2010)。ジオエンジニアリングの原則案を表2に示す(小出,2009を増補)。この原則案はたたき台であり、詳しい説明は省略するが、自然からの逸脱を小さくし、逸脱した場合は自然状態に戻す努力をし、自然を利用あるいは模倣することがジオエンジニアリングに特に重要である。ジオエンジニアリングを実施するには、地球を良く理解していなければならないが、

地球について未知の部分が多く残っている科学の現状でのジオエンジニアリングは、自然状態の保全が原則になる。ジオエンジニアリングは、原則に沿った事業でなければならないが、また、ジオエンジニアリングの原則に沿っていることを住民に周知し、情報を共有する必要がある。

典型的なカウンター・ジオエンジニアリングと言える CO₂除去 (Carbon Dioxide Removal:CDR) ジオエンジニアリングは現在利用しうる可能性のある唯一の温暖化防止ジオエンジニアリングであると思われる。ただし、予期しない副作用が無い事を、ナチュラル・アナログ (類似天然現象) や現場実験で確かめなければならない。それに対し、太陽光放射管理(SRM)ジオエンジニアリング (表1) は、安価な温暖化防止技術と言う期待があるが、自然の状態を変える方向になる場合が多く、予期しない影響を招くという研究報告も示されている (Ricke et al.,2010)。CO₂除去ジオエンジニアリングは海洋酸性化の防止にも役立つが、太陽光放射管理ジオエンジニアリングは海洋酸性化防止には無効である。太陽光放射管理ジオエンジニアリングは研究の対象としては重要であるが、大規模実施は現時点では控えるべきであろう (Royal Society,2009; 杉山,2010)。

2. 大気 CCS

化石燃料の燃焼排ガスのCO₂濃度は10%程度以上であるが、大気は0.04%弱と極めて薄い (図1)。このため大気CCS (CO₂回収・貯留) は、大量の窒素ガスや酸素ガスに邪魔されて、化石燃料燃焼排ガスからのCO₂回収・貯留

に比較しても、エネルギーロスが大きい欠点がある。その代わりに、大気は無害で、貯留の安全性が高い利点がある。

大気から膜分離法や吸着法でCO₂濃度を若干高めても、数%程度の濃度までは人間の健康に悪影響はほとんど無い (図1)。若干CO₂濃度を高めた空気を微細泡化して比較的浅い地下や海中に注入する大気マイクロバブル地中貯留・海洋貯留やCO₂マイクロバブル地中貯留は、CO₂の高度固定へ導く導入技術として期待される (図2、小出、2010)。

現代世界の問題の一つである都市への人口・経済活動集中のため、エネルギー需要が都市域近くに集中し、したがってCO₂排出源も都市域近くに集中している。エネルギー需要が都市域近くに集中するた

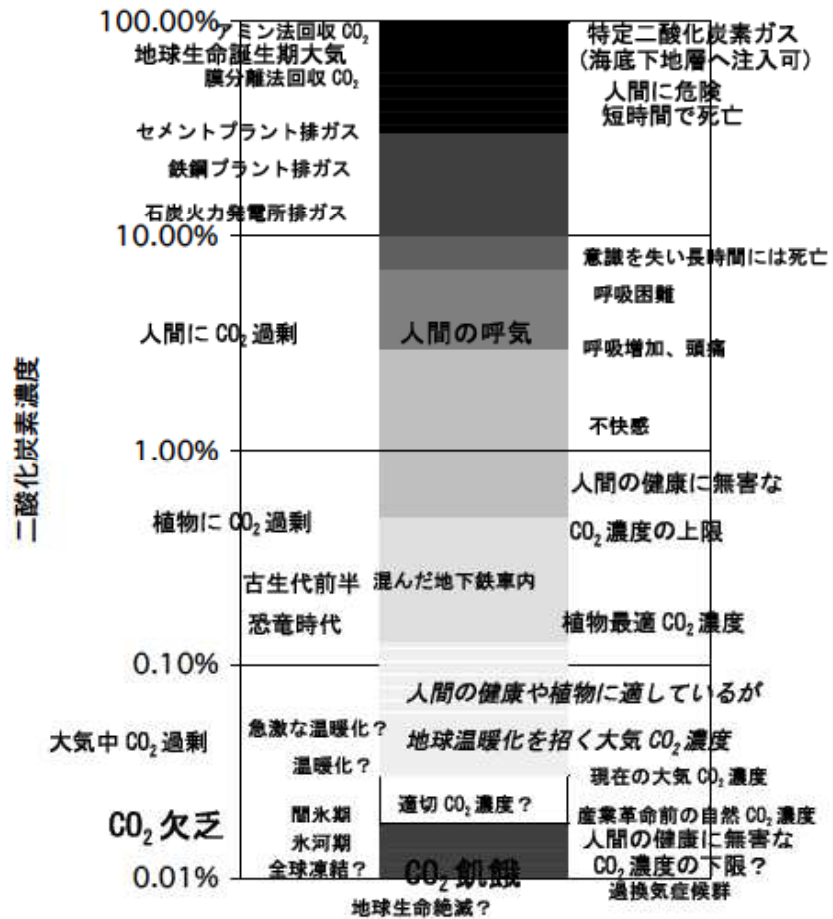


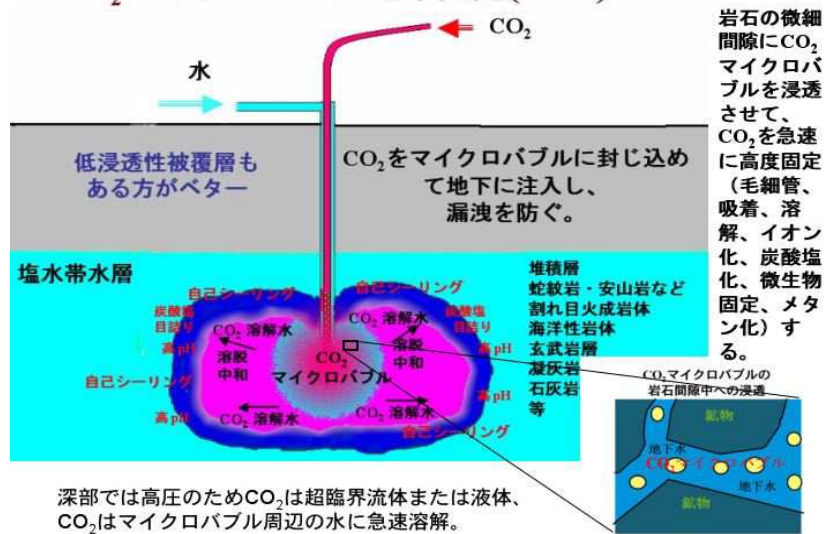
図1. CO₂濃度とリスク及びベネフィットの関係、低濃度のCO₂濃度は、生命に不可欠であるが、高濃度では有害になる。気候にも適度のCO₂濃度が必要である。

めに、都市域から遠い遠隔地（僻地）の自然エネルギーは利用されずに残される。遠隔地（僻地）の大部分は、海洋や極地・高緯度地域・高標高地域や沙漠で、CO₂シンクとして適した地域であるが、人口は少なく、産業もほとんど無いので、エネルギー需要は無く、CO₂排出源もほとんど無い。CO₂排出源が無ければ、通常のCO₂回収・貯留(CCS)技術は成り立たない。遠方の大規模CO₂排出源から大量のCO₂を遠隔地に運ぶには、長大なCO₂パイプラインやCO₂タンカーに巨額のインフラストラクチャー投資が必要で、輸送エネルギー・ロスも大きくなる。しかし、遠隔地にも大気があるので、大気からCO₂を回収すれば、大気CO₂回収・貯留(大気CCS)が成り立つ。

大気中のCO₂濃度が現在でも約390ppmと薄いために必要な、CO₂濃縮のためのエネルギーは、遠隔地に残されている未利用の自然エネルギー（風力、太陽光、太陽熱、地熱、天然ガスなど）を利用する。大気CCS実施によるエネルギー・パナリティの実質的な補填になる。

極地（南極など）・高緯度地域（シベリア・カナダ・アラスカなど）・高標高地域（チベット高原など）の地下約300mより深い帯水層や、約300mより深い海洋底の下の岩石層にCO₂を貯留すれば、CO₂ハイドレートによるシール層が形成される（“自己シーリング”）ため、CO₂漏洩がほとんど無く、また余剰CO₂をすべて収容するに十分な容量が、カナダやシベリアの地下に広く賦存している（図3）。

3. まとめ



深部では高圧のためCO₂は超臨界流体または液体、CO₂はマイクロバブル周辺の水に急速溶解。

図2. CO₂マイクロバブル地中貯留(CMS): CO₂濃縮空気や燃焼排ガスを微細気泡化して地下数百メートルの岩石・堆積物の微細間隙中に分散注入する。

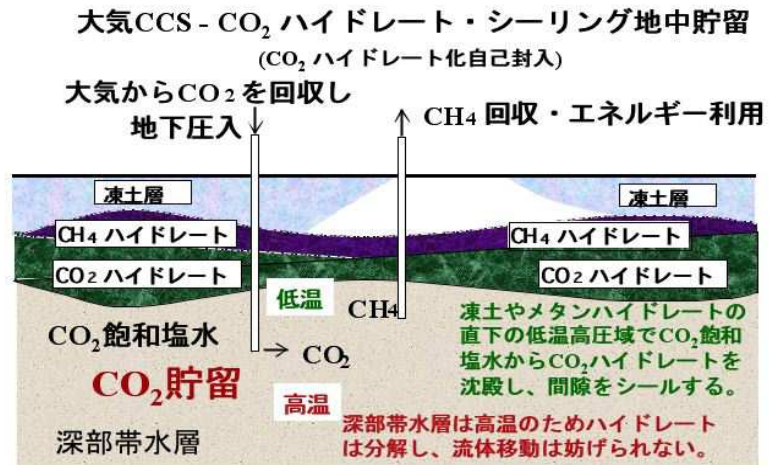


図3. 約300mより深い海底の下や高緯度・高標高地の地下約300mより深い帯水層は高圧・低温でハイドレート・シールが形成されるため、漏洩の無い無尽蔵のCO₂地中貯留が可能である。しかし、排出源から遠い。そこで自然エネルギーやメタンのエネルギーにより大気からCO₂を回収し、地下注入する。

CCSおよび大気CCSが温暖化防止カウンター・ジオエンジニアリングとして役立つためには、世界各地で膨大な量のCO₂を安定に処理でき、しかも厳しくコスト低減や長期安全性を求められる。大気CCSは、CO₂排出源に関係なく、大気のCO₂濃度を直接に低減できるので、産業構造や経済にほとんど影響なく温暖化防止が可能になる。大気は地球上にほぼ一様に存在するので、大気CCSはCO₂地中貯留に最適な地域で実施できる。大気CCSは、国際政治・経済のしがらみに関係なく実施できる温室効果ガス削減オプションである。