



KOIDE,Hitoshi (2010): From mitigation of CO<sub>2</sub> emissions to air capture: climate geoengineering, The 257<sup>th</sup> Lecture of the Earth Sciences Club, The Tokyo Geographical Society, Tokyo

小出 仁 (2010): 排出削減から大気 CO<sub>2</sub> 吸収へー温暖化防止ジオエンジニアリングの話, 第 257 回地学クラブ講演会, 東京地学協会 講堂, 東京

### 第 257 回地学クラブ講演会

排出削減から大気 CO<sub>2</sub> 吸収へー温暖化防止ジオエンジニアリングの話

小出 仁 氏 (早稲田大学理工学研究所 客員教授)

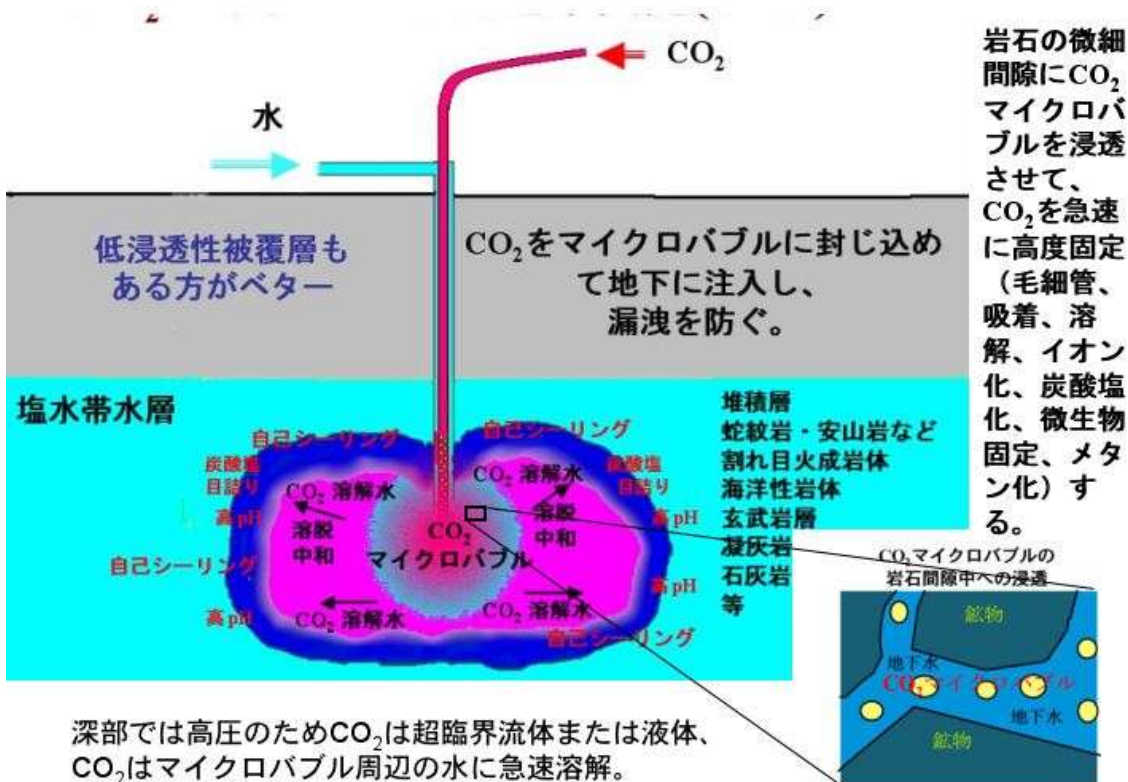
平成 22 年 3 月 19 日 (金) 午後 2 時より

東京地学協会 講堂

要旨：地球温暖化防止のための緊急手段として、大規模なジオエンジニアリング（地球工学）が最近見直されている。コペンハーゲン会議の失敗に象徴されるように、温暖化防止の難しさがますます明らかになっているためである。ジオエンジニアリングが想定外の悪影響をもたらす懸念も大きい。人類は既に意図しないでジオエンジニアリングを実施してしまっている。温室効果ガス CO<sub>2</sub> の大量排出はその典型例である。このような場合に自然からの逸脱を抑制し、さらに矯正するような温暖化防止（“抗”）ジオエンジニアリングは許容されるであろう。温室効果ガス CO<sub>2</sub> の排出を抑制するための CO<sub>2</sub> 回収・貯留(CCS)は、年 100 万トン以上の規模の CO<sub>2</sub> 地中貯留が世界で 5 箇所になり、北海海底下の帯水層には既に 1000 万トン以上の CO<sub>2</sub> が貯留されている。しかし、コスト低減や長期安全性など課題は多く、日本など世界各国で最重点研究課題になっている。CO<sub>2</sub> 排出源近くに貯留適地が存在しないことが多い。CO<sub>2</sub> を微細泡（マイクロバブル）化して、地質構造によらずに安全かつ経済的に分散貯留する技術を開発している（図 1）。

増えすぎた大気中の CO<sub>2</sub> を直接吸収する大気 CCS は、経済活動に影響を与えない長所がある。CO<sub>2</sub> 大量排出源から遠い遠隔地でも実施できるので、遠隔地に残る未活用の自然エネルギー（風力、太陽、温度差、天然ガスなど）を利用して、エネルギー消費が大きい大気 CO<sub>2</sub> 直接削減技術の欠点を補うことが出来る。極地・高緯度地域・高標高地・海底下の低温高圧の帯水層中では、CO<sub>2</sub> マイクロバブル注入により CO<sub>2</sub> ハイドレート人工キャップ層を形成できるので、安全かつ無尽蔵の CO<sub>2</sub> 貯留が可能である（図 2）。

関連ホームページ：<http://co2.eco.coocan.jp/>



岩石の微細間隙にCO<sub>2</sub>マイクロバブルを浸透させて、CO<sub>2</sub>を急速に高度固定（毛細管、吸着、溶解、イオン化、炭酸塩化、微生物固定、メタン化）する。

深部では高圧のためCO<sub>2</sub>は超臨界流体または液体、CO<sub>2</sub>はマイクロバブル周辺の水に急速溶解。

図1. CO<sub>2</sub>マイクロバブル地中貯留(CMS): CO<sub>2</sub>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。

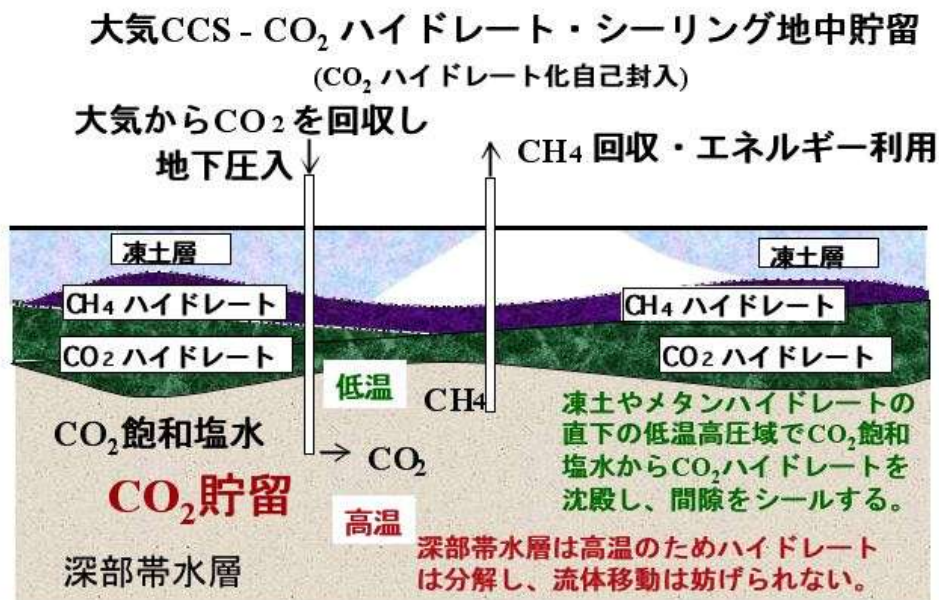


図2. 約300mより深い海底の下や高緯度・高標高地の地下約300mより深い帯水層は高圧・低温でハイドレート・シールが形成されるため、漏洩の無い無尽蔵のCO<sub>2</sub>地中貯留が可能である。しかし、排出源から遠い。そこで自然エネルギーやメタンのエネルギーにより大気からCO<sub>2</sub>を回収し、地下注入する。

## 第257回地学クラブ講演会資料

# 排出削減から大気CO<sub>2</sub>吸収へー 温暖化防止ジオエンジニアリングの話

小出 仁（早稲田大学理工学研究所 客員教授）

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

平成22年3月19日（金）午後2時

東京地学協会 講堂

**要旨：**地球温暖化防止のための緊急手段として、大規模なジオエンジニアリング（地球工学）技術が見直されている。コペンハーゲン会議の失敗に象徴されるように、温暖化防止の難しさがますます明らかになっているためである。CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)は、年100万トン以上の規模のCO<sub>2</sub>地中貯留が世界で5箇所になり、北海海底下の帯水層には既に1000万トン以上のCO<sub>2</sub>が貯留されている。しかし、コスト低減や長期安全性など課題は多く、日本など世界各国で最重点研究課題になっている。

海外では、大気中のCO<sub>2</sub>を直接吸収する技術が最近注目されている。大気は何処でも存在しているために、場所を選ばずに実施できる。温室効果ガス排出源とは関係なく、既存の産業施設に影響されない。このため、経済活動に影響を与えないという長所がある。

これまでに提案されている様々な物理化学的大気 CO<sub>2</sub>直接削減技術はいずれもエネルギー消費が大きすぎる。しかし、植物は太陽光エネルギーを利用して、巧妙に大気 CO<sub>2</sub>直接削減を実現している。未利用の自然エネルギーを活用できるマイクロバブル法大気 CO<sub>2</sub>直接削減技術を提案する。

## 1. 温暖化防止ジオエンジニアリング

地球温暖化防止のための緊急手段として、大規模な温暖化防止ジオエンジニアリング（環境地球工学）技術が最近注目されている。コペンハーゲン会議では、すべての大排出国が地球温暖化防止の必要性は認めたことに大きな意義があった<sup>1)</sup>。しかし、米国や中国等の新興国が温室効果ガス排出削減の義務を負うことを拒否したのは、環境より経済開発を優先した結果であるが、化石燃料にまだ当分は頼らざるをえないことの現れでもある。比較的小幅な温室効果ガス削減ですら合意できないようでは、温暖化対策が手遅れになることが既に避けられなくなっているときえ思える<sup>2)</sup>。このような情勢から、より直接的で顕著な効果のある温暖化防止技術が求められるようになってきて、大規模な温暖化防止ジオエンジニアリングが、にわかに注目されている<sup>3-6)</sup>。

温暖化防止ジオエンジニアリングは、地球に傘をさすとか、雲を増やすとか、海洋に鉄などの養分を散布して藻類を増殖させるなど様々な提案がされているが、中には火山活動を活性化させる等のような過激な案も真面目に提案されている状況である。巨大規模火山噴火が世界的な大規模な世界的な寒冷化をもたらすことはよく知られているが、火山のコントロールは未だ困難で、災害をもたらす危険がある。

地球の巨大で複雑な天然のシステムを十分に理解できていない現状で、大規模なジオエンジニアリングを余儀なくされた場合には、自然の状態を変えない—または既に自然の状態から既に変更ってしまった場合には、自然の状態に戻す方向でジオエンジニアリング技術を用いるべきであろう<sup>7)</sup>。大気CO<sub>2</sub>濃度をコントロールするジオエンジニアリングとしては、自然の状態を変えないための技術がCO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)（図1）であり、自然の状態に戻すための技術が大気CO<sub>2</sub>直接削減技術である。

## 2. CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)ジオエンジニアリング

CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)は、CO<sub>2</sub>排出を大幅に削減して、大気中のCO<sub>2</sub>濃度増加を抑制するため、自然の状態を変えないことを目指すジオエンジニアリング技術である。CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)は、年100万トン以上の規模のCO<sub>2</sub>地中貯留が世界で5箇所になり、北海海底下の帯水層には既に1,000万トン以上のCO<sub>2</sub>が貯留されている。しかし、コスト低減や長期安全性など課題は多く、日本など世界各国で最重点研究課題になっている<sup>8,9)</sup>。

2010年2月3日オバマ米大統領が包括的CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)連邦戦略大統領覚書(Presidential Memorandum—A Comprehensive Federal Strategy on Carbon Capture and Storage)<sup>10)</sup>を公表し、新省際CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)タスクフォース(Interagency Task Force on Carbon Capture and Storage)を作り、10年以内に経済効率の良いCO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)の広範な実施を目指すことを宣言した。やはり、コスト低減と安全性の確保が主な課題になると考えられる。





図1、CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)の最初の構想図 (CO<sub>2</sub>地中処理検討会、1993)

### 3. マイクロバブル法 CO<sub>2</sub>固定(CCS)<sup>11)</sup>

CO<sub>2</sub>は地下浅所までは気体であるが、800m程度より深い地下では通常超臨界流体状態になるが、ごく低温の地下では液体状になる。さらに、水に溶解し、ハイドレートや炭酸塩を形成して固体状になる場合がある。地下の空隙は、通常地下水で満たされているが、気体状や超臨界流体状のCO<sub>2</sub>は水より軽い為、地表に向かって浮上する性質がある。そのため、CO<sub>2</sub>を気体状や超臨界流体状で大量に地下に注入するためには、ドーム状のキャップロックなどの封じ込めのための特殊な地質構造が必要になる。このような封じ込めのための地質構造があるのは、産油・産ガス地帯など一部の地質地域に限られる。

温室効果ガスは世界中で大量に発生しているため、地球温暖化防止に貢献するためには多様な地質構造地域で利用できる汎用のCO<sub>2</sub>地中貯留・固定(CCS)技術が必要である。径数十ミクロン程度以下のいわゆるマイクロバブルは、合体して大きなバブルを形成するより、むしろ縮小して急速に溶解消滅する傾向がある。マイクロバブルの性質はまだよく解明されていないが、大きな気体または超臨界流体のバブルに比べて、浮力が小さいので、地下に注入しても、地表に浮上する心配が少ない(図2)。さらに、地下岩石の微細な空隙中に入り込んで、吸着や界面張力などにより閉じ込められ、残留ガスとして留まり易い。微細泡(マイクロバブル)の岩石への浸透性については、注意深い実験を行う必要があるが、岩石の間隙径より微細泡の径が十分に小さければ、マイクロバブル水の浸透性は良いが、間隙径より大きい微細泡が混入すると浸透性が著しく低下すると考えられる。微細泡の径は貯留層になる砂岩等の間隙より小さく、キャップロックとして期待される頁岩層・粘土層等の間隙より大きいことが望ましい。残留ガスとして岩石間

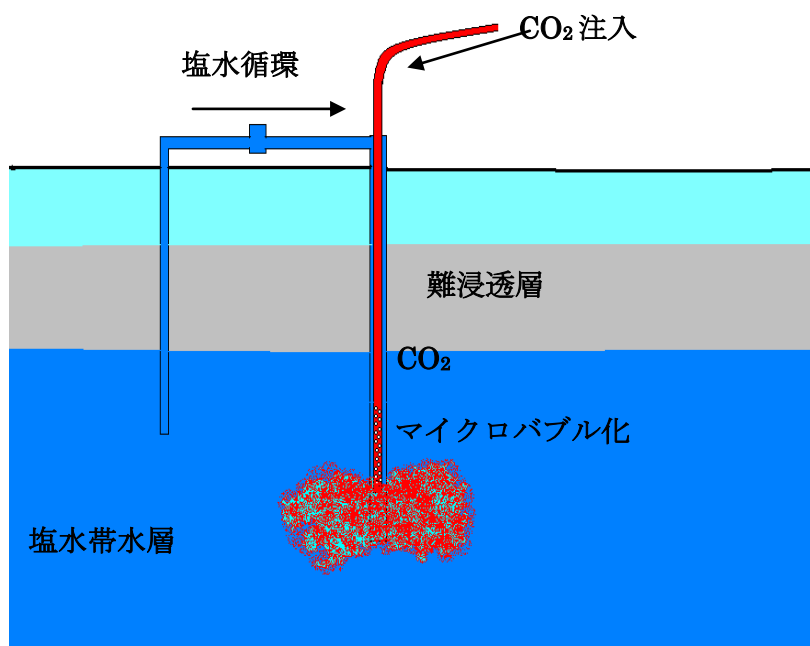


図2. CO<sub>2</sub>マイクロバブル帯水層注入

隙中に留まっている間に、さらに溶解・イオン化・炭酸塩化、ハイドレート化、微生物による有機物化やメタン化などの固定メカニズムが進行し、長期安定化すると期待される。マイクロバブル法CO<sub>2</sub>固定(CCS)は、残留ガス化から溶解への固定プロセスを促進し、苦鉄質岩などへの地化学固定や微生物固定などの高度固定法を効率的に実現できる(図3)。また、極微細なマイクロバブルの注入により、岩石の微細な間隙の奥にCO<sub>2</sub>注入が可能であるので、CO<sub>2</sub>-EOR(原油増進回収法)としても微細泡(マイクロバブル)CO<sub>2</sub>注入法は有望である。特に、原油増進回収が技術的に難しい水押し型の油層に適している。

マイクロバブル法CO<sub>2</sub>地中固定技術は安全性が高く、非構造的帯水層や玄武岩や蛇紋岩・カンラン岩や海洋性地殻などへの高度CO<sub>2</sub>地中固定化を迅速かつ安全に実行できる温暖化防止ジオエンジニアリング技術として有望である。

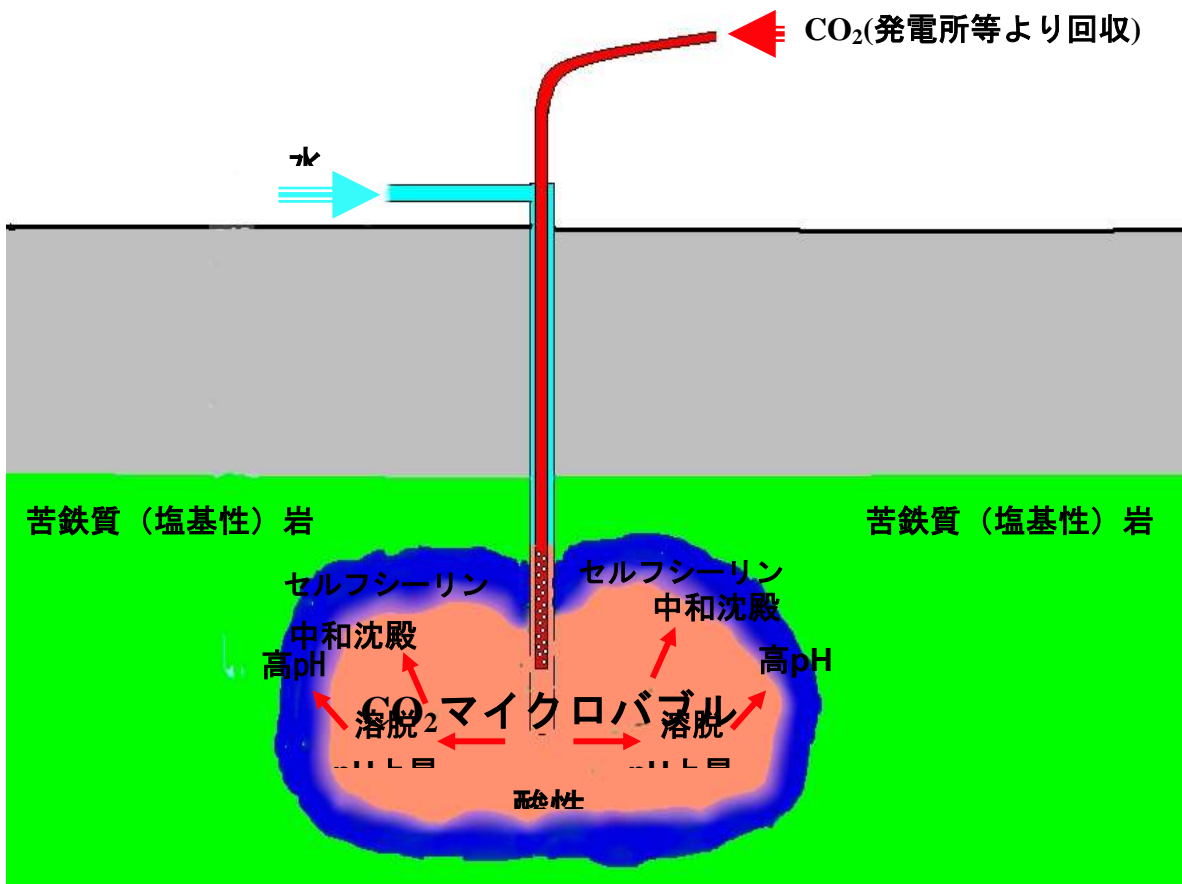


図3、CO<sub>2</sub>マイクロバブル地下注入とCO<sub>2</sub>セルフシーリング

#### 4. 大気CO<sub>2</sub>直接削減技術

大気中のCO<sub>2</sub>濃度増加を抑制するだけでなく、すでに自然状態の三分の一増になっている大気CO<sub>2</sub>濃度を低下させようとするのが大気CO<sub>2</sub>直接削減技術である。地球温暖化防止が手遅れになりそうな情勢から、従来荒唐無稽なトンデモ技術と思われて来た大気CO<sub>2</sub>直接削減技術が真剣に取り上げられるようになってきた。大気は何処でも存在しているために、場所を選ばずに実施できる。発電所や大工場から遠い、いかなる遠隔地でも実施できる。排出源とは関係がないので、排出責任と直結せず、国や企業の思惑や国際政治上の争いに巻き込まれ難いという隠れた利点もある。



図4、大気CO<sub>2</sub>直接削減ジオエンジニアリングの例：Lacknerの人工林構想<sup>3)</sup>

これまでに提案されている様々な物理化学的大気CO<sub>2</sub>直接削減技術はいずれもエネルギー消費が大きすぎる。大気中のCO<sub>2</sub>濃度は増加したとは言っても、空気の分子1万個中にCO<sub>2</sub>分子は4個以下しか含まれていないため、いかなる方法をとるにしても抽出にはエネルギーを浪費する。しかし、植物は太陽光エネルギーを利用して、巧妙に大気CO<sub>2</sub>直接削減を実現している。エネルギー利用を効率化するか、未利用の自然エネルギーを活用する工夫が必要になる。CO<sub>2</sub>を石灰すなわち酸化カルシウムや水酸化カルシウムに吸収させ、炭酸カルシウムとして固定する方法が大気CO<sub>2</sub>直接削減ジオエンジニアリング技術として提案されているが（例えば図4のLacknerの人工林構想）<sup>3)</sup>、炭酸カルシウムは元のCO<sub>2</sub>の倍以上の重量の固体であるため、運搬が困難になり、運搬や取り扱いに大きなエネルギーを浪費する。これまでに提案されている物理化学的大気CO<sub>2</sub>直接削減技術は、大気からのCO<sub>2</sub>回収に大量のエネルギーを消費するだけでなく、運搬や大気からの長期隔離がほとんど考慮されていないケースもあり、実用化は困難である。森林固定や藻類・サンゴ増殖などの生物利用は大気CO<sub>2</sub>直接削減を実現しているが、太陽光と生態系を利用しているため、長期的視野のCO<sub>2</sub>削減に適しているが、大規模-急速なCO<sub>2</sub>削減に用いるには制約がある。

地球温暖化防止が手遅れになりつつあるにも関わらず、国際的協力による有効な防止策を採れない世界情勢から、現在の国際政治・経済にあまり影響を与えずに緊急の大規模工学的実施ができるジオエンジニアリングに適した大気CO<sub>2</sub>直接削減技術の開発が喫緊の課題になっている。このため、物理化学的方法と生物学的方法の長所を兼ね備えた大気CO<sub>2</sub>直接削減技術を提案する。



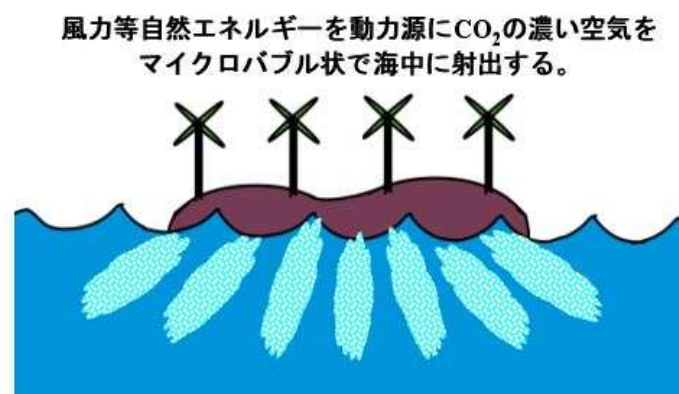
## 5. マイクロバブル法大気 CO<sub>2</sub> 直接削減

新しく提案するマイクロバブル法大気 CO<sub>2</sub> 直接削減技術は、マイクロバブル法 CO<sub>2</sub> 地中固定技術の大気への応用である。マイクロバブル法 CO<sub>2</sub> 地中固定技術では、発電所等の燃焼排ガスから回収した CO<sub>2</sub> をマイクロバブル状にして地中に注入したが、マイクロバブル法大気 CO<sub>2</sub> 直接削減技術は大気そのまま、あるいは大気から膜分離法や吸着法で CO<sub>2</sub> 濃度を高めた空気を用いる。大気は廃棄物ではない。また、CO<sub>2</sub> は低濃度であれば、植物には有益で、人間・動物の健康にも害は無い。数%以下の低濃度の CO<sub>2</sub> を含む空気は、浅い

海中や地中に注入しても安全であるだけでなく、植物や藻類や植物プランクトンには有益である。

しかし、温室効果ガス削減のためには CO<sub>2</sub> が大気中に湧出することは、できるだけ抑制したい。そのためには、浅い海中や地中でも長期的に CO<sub>2</sub> を大気から隔離するメカニズムが必要になる。

このため、未



**CO<sub>2</sub>の濃い空気を海洋に射出し、CO<sub>2</sub>と酸素を海水に吸収させ、藻類・植物プランクトンを増殖して、CO<sub>2</sub>を固定する。**

図5. 海洋自然エネルギー活用による浮体式大気 CO<sub>2</sub> 削減基地案

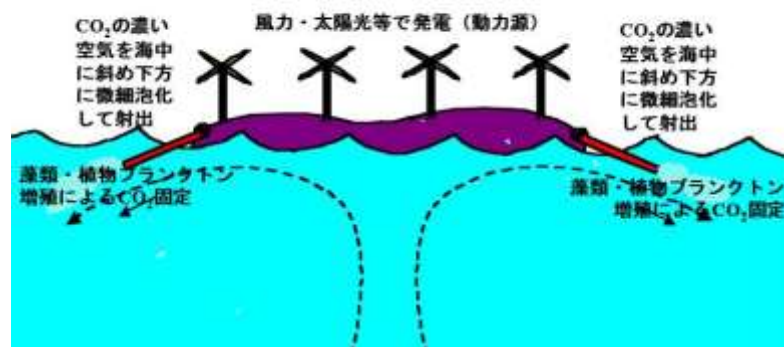


図6. 海洋自然エネルギー活用による浮体式大気 CO<sub>2</sub> 削減基地断面図

利用の海洋自然エネルギーを活用して、大気から膜分離や吸着法により CO<sub>2</sub> 濃度を高めた空気を取り込み、遠洋海面下数メートルないし十数メートルの深さにマイクロバブル状で注入する浮体式大気 CO<sub>2</sub> 削減基地を提案する（図5、図6）。CO<sub>2</sub> と酸素を含む空気を数メートル以上の深さの海水中にマイクロバブル状で注入すれば、高圧の水への溶解度の高い CO<sub>2</sub> が海水に多く溶解し、酸素もかなり溶解する。海水中に CO<sub>2</sub> と酸素の濃度が高まることにより藻類・植物プランクトンを増殖し、CO<sub>2</sub> 固定をすることが期待されるが、養分の添加や石灰等による中和の必要性和海洋環境への影響についても検討が必要である。

マイクロバブル法大気 CO<sub>2</sub> 直接削減技術は、未利用の海洋自然エネルギーを活用して、大規模かつ経済的に温室効果ガス削減ができる可能性がある新しい温暖化防止ジオエンジニアリング技術になる可能性がある。海洋生物の増殖効果も期待されるが、海洋環境への長期的影響を検討する必要がある。

## 6. ジオエンジニアリング（地球工学）の今後

広範な地域の環境に影響を与える可能性のあるような大規模工学技術はジオエンジニアリング（地球工学）に含められる。「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。悪い例では、ソ連時代の中央アジアでの大規模な灌漑事業はアラル海の縮小を招いた。大規模に環境を変えようとするれば、想定外の悪影響がでることもあるという例である。

危険だからジオエンジニアリングに反対という人が多いのは事実である。確かに、ジオエンジニアリングと称する技術には、荒唐無稽なものも多く、実用不可能な技術や目的外の悪影響の危険がある技術も多いのが現状である。しかし、反対する人が多くても、実は人類は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。つまり、産業革命以来、CO<sub>2</sub> やメタンを大量に排出し、地球を温暖化する実験を行っている。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、地球環境を改造しつつある。70億人に達する人口増加自体が、無意識にジオエンジニアリングを実施していると言える。

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なのであるが、世界で66億人を越えた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、無意識のジオエンジニアリング実験は止めて、大気中のCO<sub>2</sub>濃度は産業革命前の280ppmに戻すべきであろう。しかし、ご承知のように産業革命以後100ppmも増加したCO<sub>2</sub>濃度の増加をくい止めることすら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に、ジオエンジニアリングが

必要になっている。つまり、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には、否応無く新しいジオエンジニアリングが必要になっている。新しいジオエンジニアリングの候補として、CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)が提案されている。CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)は、大気中に増えすぎたCO<sub>2</sub>をこれ以上増やさないようにしようとする技術であり、さらに、できれば大気中のCO<sub>2</sub>濃度を減らして産業革命前の自然の280ppmに戻そうとする技術が大気CO<sub>2</sub>直接削減技術である。

ただし、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。地球について未知の部分が多く残っている状況でのジオエンジニアリングには、次のような留意が重要である。このジオエンジニアリングの原則には、異論もあるであろうが、たたき台を以下に提示する。

#### ジオエンジニアリングの12原則（案）

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. 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。

以上は、ジオエンジニアリング一般の原則であるが、CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)にもほぼあてはまる。CO<sub>2</sub>回収・貯留(CCS)のプロジェクトは、ジオエンジニアリングの原則に沿った事業でなければならないが、さらに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。

## 参考文献

- 1) Nature Editorial: After Copenhagen, *Nature* **462**, 957 (24 December 2009)
- 2) Jackson, E.: The Coal Nightmare, [http://www.abc.net.au/4corners/special\\_ed/20090907/coal/](http://www.abc.net.au/4corners/special_ed/20090907/coal/)
- 3) Jones, N.: Sucking it up, *Nature* **458**, 1094-1097 (30 April 2009)
- 4) The Royal Society: Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty, RS Policy document 10/09 (2009)
- 5) Keith, D. W.: Why Capture CO<sub>2</sub> from the Atmosphere? *Science* **325**, 1654-1655 (2009)
- 6) Pielke, R. Jr.: Air Capture update, *Nature Geoscience* **2**, 811 (2009)
- 7) 小出 仁: 二酸化炭素地中貯留(CCS)の認知・社会受容について、資源素材学会春季大会 A-9 (2009)
- 8) Chu, S.: Carbon capture and sequestration, *Science* **325**, 1599 (2009)
- 9) IEA: Technology Roadmaps Carbon capture and storage, 52p. (2009)
- 10) Obama, B.: Presidential Memorandum -- A Comprehensive Federal Strategy on Carbon Capture and Storage, *Whitehouse* (2010)
- 11) 小出 仁、篠田淳二: 微細泡 (マイクロバブル) CO<sub>2</sub>注入による非構造的帯水層隔離法の提案, 資源・素材学会 春季大会(2007)

なお、最近、電力中央研究所から温暖化防止ジオエンジニアリングに関する詳細な文献調査の報告が公表されたので、参考にされたい。

杉山昌広 (2010) 気候工学 (ジオエンジニアリング) に関する文献調査、電力中央研究所報告Y09003、32p. <http://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/report/detail/Y09003.htm>