

村上信明「昨日今日いつかくる明日―読み切りエネルギー・環境―」（2008年刊）より

第三講 CO₂低減と化石燃料枯渇対策

第三講 CO₂低減と化石燃料枯渇対策

化石燃料の燃焼によって生成するCO₂は途方もなく膨大な量になる。従って、出来れば回収して有効に利用したいという希望は、CO₂が地球温暖化の主因とされその抑制が大きな課題になる以前よりあった。例えば、天然ガスを燃料として用いる発電所の排ガス中のCO₂を回収し、クロレラやスピルリナなどの微細藻栄養食品の養殖促進に利用したり、あるいは高分子樹脂の原料とするための研究等が実施された。関連の研究にいくらか従事したが、CO₂を大気中に無駄に出してしまつては「もつたいない」という、切迫化した温暖化問題で悩む今から思えば、なんとも余裕のある発想の時代もあつたのである。

CO₂の低減策

現在世界で化石燃料の燃焼によって放出される二酸化炭素（CO₂）は年間約五〇億トン（炭素換算）であり、人類の文明の進歩のバロメータであるエネルギー消費量と直接的に結びついている。石炭・石油・天然ガスは炭素と水素を主成分としており、それらを燃やすことによつて我々は熱・電気などを生得ることができるが、その結果として一般には利用価値がなく、かつ地球温暖化の原因となるCO₂を生成する。特に埋蔵量が多く、石油・天然ガスが欠乏するとみられる五〇～一〇〇年後も電力、あるいは液体燃料などのエネルギー源として相当量を頼らざるを得ない石炭は、石油・天然ガスに比べ発熱量当たりの含有炭素量が多く、従つてCO₂の発生量も多い。

CO₂の大気への放出量削減のためには、エネルギー消費量を抑えること、すなわち我々の節約が最も

効果的で基本的な対策であるが、技術的手法としては、大別すれば、第一に化石燃料の最終利用までのエネルギーの変換効率を高めること、第二に化石燃料以外の自然（再生可能）エネルギー、或いは原子力を利用すること、最後に生成したCO₂を回収処分ないし利用すること、に分類できる。最初の二項目については、現在のエネルギー・環境対策の最重要課題であり、本講義全体のメインストリームのテーマでもあるから、次講以下に譲り、ここでは最後のCO₂の回収利用など、CO₂そのものを扱う方法について解説しよう。

CO₂対策と化石燃料枯渇対策の優先順位

昨今、エネルギー・環境問題は、政治課題の一点となり、色々な思惑もあって状況は大きく揺れるようになった。時の勢いで現在は温暖化対策に比重が極めて大きく、石油などの資源枯渇の問題は下火になっているが、勿論解決されたわけでも、その重要度が低下したわけでもない。CO₂濃度をいきなり数倍に上げるほど潤沢に化石燃料がある筈もないから、遠くない将来、主副は逆転して後者の方が課題として卓越するに決まっている、と考える人がいても不思議ではない。

ここで、CO₂による地球温暖化と、先の講義の化石燃料の枯渇、この二つの対策の優先順位を考えてみよう。両者は一般的な見解では直截に結びついている。そして幸いなことに対策の方向は同じである。即ち、化石燃料の使用量を減らしてその延命をはかることが、CO₂による地球温暖化を抑制することにつながる。もし、逆に地球が寒冷期に向かっていて、例えば作物の収量を維持するために、温暖化が望ましく、その方法として化石燃料を早急に消費して大気中のCO₂濃度をあげることが必要であれ

ば、対策としては化石燃料の枯渇抑止とは逆になり、それこそ世界の一大事である。これは単なることじつけではない。三十年前には、地球は寒冷化へ向かっているとされていたのであり、また前述の宮沢賢治の「ガスコーブドリ」も、凶作を避けるためにCO₂濃度をあげ、気温を上昇させる対策を題材にしている。もつとも、ガスコーブドリでは、化石燃料の燃焼ではなく火山の爆発によるCO₂の増大であった、この場合、実際には噴火物中の微粒子の太陽光線遮蔽効果により気温は下がる効果もあるのであるが、言い換えれば、化石燃料の枯渇は、将来、地球を温暖化させる単純で確実な手段を失うことにもなる。

ただ、対策の方向性は同一でも、温暖化防止と、化石燃料枯渇対策の緊急度・優先順位となると考察の対象になる。何事も粛々と進んで現在の状態があるのではない。地球温暖化と化石燃料からのCO₂排出は、今では判りきった因果関係のように世界は動きだしたが、そのような状況となったのはここ数年である。実際、CO₂主犯地球温暖化説に疑問を呈していた一部の論者は、今では圧倒的に劣勢である。そして温暖化対策の優先度が日ごとに高まってきており、夏の冷房温度を二℃下げるとCO₂として何百万トンの削減になるという方が、石油の何百万^キリットルの節約になるという表現よりも多用されるようになってきた。

しかし一時期は、極論すれば、化石燃料は数百年供給可能であり、温暖化と環境問題こそが喫緊の課題という論者と、全く逆に温暖化は幻影・暴論であり、化石燃料の枯渇・奪い合いこそ地球滅亡の因、という人がいて、どちらもそれなりのデータを並べレトリックを弄して、殺伐とした風景のインターネット合戦等を繰り返していたのである。

さてこの二つの極論は具体的な対応策としては何か異なるだろうか？ 例えば太陽光、風力などの再生可能エネルギーの利用拡大、省エネルギーの推進、発電プラントの高効率化などは、双方の問題の緩和に資するから、程度の差こそあれ両者に異論はないはずである。評価に差がでる第一は、CO₂の生成量に歴然とした差のある石炭と、石油、天然ガスとの対比であり、温暖化の脅威を重視しなければ、石炭は中期的にもより柔軟に使用できるだろう。第二に、燃焼排ガスからCO₂を回収して有効利用したり、あるいは地中や海洋に貯留したりする技術は、余分なエネルギーを必ず必要とするから、CO₂による温暖化を疑う人には全く無用の対策になってしまうことになる。

CO₂量の膨大さ

温暖化の原因である大気中三八〇ppm（〇・〇三八％）の低濃度のCO₂を、例えば目前の空気中から何らかの方法で、直接回収することが困難であろうことは誰にでも判る。しかし、発電設備や製鉄所、或いは自動車から排出されるCO₂はどうか。ガソリンや石炭を燃やしてCO₂が出てくるのは致し方ないが、その場で回収なり分解して大気中に出ないようにすればいいではないか、他の公害防止技術、例えば窒素酸化物や硫酸酸化物に対する発電所の排煙脱硫・脱硝技術と同様に何故処理できないのか、とは誰しも思うことである。

工業的に扱う場合のCO₂処理の難しさは、その膨大さにある。例えば、ほぼ一〇〇万都市の需要に相当する一〇〇万kWの火力発電所を一年間運転するには石炭では約二〇〇万トンが必要であるが、CO₂の排出量としてはその約三倍の六〇〇万トン近くになる。そのCO₂ガスは野球用のドームを四時間で一杯にする。加圧して液体のCO₂、或いは冷やして固体のドライアイスにしても、ドームは一〇〇日で満たされてしまう。これが日本だけで一〇〇個分以上ある訳であるから、排出量を減じるにせよ、排出したものを回収するにせよ、さらにそれを利用・処分するにせよ、困難性の高さが理解されよう。燃焼排ガス中のppm濃度のNO_x、SO_xと一〇％も含まれるCO₂とでは話が違うのである。

CO₂処理利用技術の百花繚乱？

少し時代を遡ると、冒頭に述べたCO₂の有効利用に重点があつた短い期間のあと、温暖化の原因としてのCO₂に対して、排出抑制の要請が急速に高まり、一斉に対応技術の提案がなされたのは一九九〇年代初めである。日本の高度成長期でもあり、まだ意気軒高な多くの技術者が、新しい研究分野として注目したのである。

これは米国発信だったが、例えば、石炭から水素のみを取り出すアイデアが提案された。石炭の有機分は複雑な芳香族炭化水素で、元素としては炭素だけでなく水素も一部含んでいる。そこで、発電所などで使う前の処理として、水素が多い部分だけを分離して利用し、残りの大半の炭素分は地中に埋め戻し、何十年あるいは何百年後の温暖化が収まった時に再び掘り出して利用しようというものである。折角掘り出した石炭のエネルギーの七割以上は、一旦地中に戻すことになる。確かに大気中への排出CO₂は少なくともはなるが、従来の常識からいえば誠に大胆な案であり、一瞬氣息を失うものであつた。CO₂等による温室効果を相殺するため、人工的に成層圏に大量の硫酸を散布し太陽からの入射エネルギーを遮るとなると、誰しも人類を含む生態系に対する副作用が激越に過ぎて無理と思うだろうが、

規模からすると、CO₂対策はこのようなレベルにならざるを得ないともいえる。

また、回収したCO₂の有効利用についても数多い提案があった。例えば、CO₂をプラズマで分解して一酸化炭素(CO)ガスに変換して燃料として利用するようなものである。エネルギーを放出しきった形態であるCO₂を高分子材料などの「モノ」として利用するのではなく、これをエネルギーとして再利用できる形にするには、当然ながら外から別のエネルギーを加える必要がある。エネルギー保存則からの要請である。一般にプラズマを作るには多大のエネルギーを要し、それに比し得られるCOのエネルギーは小さいから、この提案の実用化は一般には困難である。

現在は淘汰されて、CO₂利用の手法は限定されてきたが、当時は趣向を凝らした謳い文句とともに、経済的メリットなど問題以前の単純な物質収支、エネルギー収支すら無視してはばからない研究提案が現実に多々あったことを思い出す人も多いだろう。

ただ、エネルギー的にロスがあるからといって全てが無意味かというところでもないから複雑である。全体システムとして利点や効用があれば、それはそれで有用である。例えばCO₂をエネルギー輸送の媒体とする方法、具体的には水素をなんらかの方法で得て、CO₂と反応させ、輸送しやすい液体であるメタノール等の形にして自動車などの燃料として利用する方法は、現在も重要な検討対象である。CO₂はエネルギーとしては利用できないが、物質としての炭素(C)を利用するわけで、全体として他の方法に対して優位性があればそれでいいのである。

燃焼排ガスからのCO₂回収

さてCO₂を回収するには、燃やす前にガス化して出来たガス中の濃厚な状態のCO₂を分離したり、ある種の燃料電池を用いるとCO₂と水だけが燃料極側にてできて分離が容易になることを利用したり、いろいろの方法が考えられるが、もっとも一般的な方法は燃焼排ガス中からCO₂のみを選択的に分離することである。

石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料を空気で燃焼させると、その排ガス中には体積にして五〜一五％のCO₂と窒素、水蒸気、酸素が含まれる。このうち、CO₂だけを煙突から大気中へ放出・拡散させる前に分離し回収する方法を「排煙脱炭法」とよぶ。石炭や重質油など、硫黄と灰を含む燃料を用いる場合には、窒素酸化物、硫黄酸化物、煤塵が生じるから、排煙脱硝、排煙脱硫と集塵機の三点セットが排ガス浄化のために用いられるが、これに脱炭装置が加わるわけである。排煙脱炭法には、ゼオライトなどの吸着剤を用いる吸着法、アミンなどのアルカリ性水溶液を用いる化学吸収法などがあり、最近では実証プラントも稼動するようになってきた。これらの方法は自動車などの移動発生源や小型の燃焼器への適用は困難であり、また主対象となる大型の火力発電所排ガスの場合には発電効率の低下、装置費増大などの課題があるが、大気への排出CO₂量を直接的に削減できる手法として検討がなされている。

排煙脱炭法は既に尿素製造プラントで実用化されている。ただしこれは、CO₂の回収量として一日に数百トンと、発電プラントからの排出量の数十分の一以下であり、またCO₂は製品である尿素の成分の一部として有効に利用することが可能である。それに対し、発電所などからのCO₂回収には相当量の

エネルギーを消費し、かつ簡単に適当な利用先を想定できるような量ではない。このようにして回収したCO₂の有効利用法としては、生物を用いる方法と、化学的な方法に大別できる。生物的な方法は、例えば、微細藻の成長に、回収した高濃度のCO₂を利用し、これからクロレナなどの栄養食品やエタノールなどの液体燃料を得るものであり、化学的な方法は、電気化学、光化学などの反応を利用して、CO₂を水素などで還元し、メタン、アルコールなどの燃料や化学薬品に合成・転換するものである。しかし、化学製品の需要と燃料の使用量は一桁違うから、化学原料として利用する方法では量的に期待できない。やはり対象は燃料である。ただ、メタノールなどの燃料として、つまりCO₂をエネルギー輸送媒体として利用するための第一義の課題は、先述のようにその追加すべきエネルギーをいかに確保するかである。場合によっては、というよりそちらの方が正攻法であるが、無理にCO₂を利用せず、追加のエネルギーをそのままの形で使えばいいケースも多い。

一方、CO₂のまま処理する方法としては、廃油田、廃坑ないしガス田に注入貯留したり、地下の帯水層あるいは海洋中へ隔離する方法が検討されている。対象となるCO₂の膨大さを考えると、そのような空間として地中と海水中以外には想定が困難なのである。生産性の低下した油田にCO₂を圧入して、原油の生産量を回復させる方式(EOR)は国際石油資本が北米の数十箇所で現実に実施している。もつとも現在は排ガス中から回収したCO₂ではなく天然に産出するCO₂が使用されている。

CO₂の海洋隔離と評価

ここではCO₂に関する多くの技術開発のうち、一般の人々も具体的にイメージを結びやすいものの一つであろう海洋隔離について述べよう。このような「CO₂の封じ込め」は、CO₂そのものを直接対象とした数少ない対策技術の一つであり、他の再生可能エネルギーや高効率・省エネルギー技術開発と違って化石燃料枯渇対策などの効果はなく、また海洋環境など他の地球規模の環境問題への波及も大きい等、多くの意味で象徴的な存在でもある。地球温暖化の原因は「大気中にあるCO₂」であるから、大気とは別の所に隔離するというもので、従来、一般には保険或いは貯金的役割として認識されていたようであるが、最近になって関連の条約(海底地層中への貯留)が採択されるなど具体化の動きもでてきている。

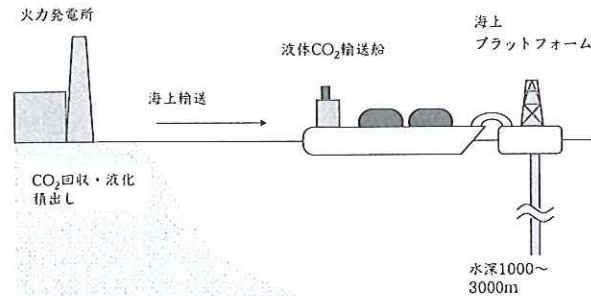


図3.1 CO₂の海洋隔離法
集中発生源からのCO₂を回収・液化し、船で海上輸送して1000m以深の海洋に隔離する方法が検討されている。

る。いわば、大気圏をバイパスして温暖化の危惧のある期間、深層海水中に留め置くのである。

具体的には、CO₂を液化したのち船で海上輸送して、洋上基地から三〇〇〇メートルよりも深い海へ送り込み深層に貯留する方式、船で長いパイプを曳航し、その先から迅速に水深一〇〇〇メートルほどの中層流へ拡散させる方式などが基礎実験段階である。前者は海洋への影響範囲を極力限定する方法、後者は逆にできるだけ速やかに拡散させる方式である。液体のCO₂は常温・常圧では海水よりも軽い、圧縮性が強いいため圧力が高くなると密度が大きくなって、水深三〇〇〇メートル以下では海水を自然に沈降していく。また、CO₂と水は深海のような高圧低温の条件では、メタンハイドレートと同様に、クラスレート（包摂化合物）と呼ばれる、シャーベット状の水和物をつくるなど、物性的にも特異な挙動を示すからその評価も必要である。

これらの方法は、いずれの場合も海洋生態系への影響評価が重要な課題となっている。深海には光が届かないから光合成植物は生存できないが、硫黄などを用いて化学合成を行う細菌が、陸上における緑色生物に相当する生産者の役割をもち、これらがつくる有機物を栄養源とした生物群が存在する。また、かれらとしては何億年もかけて立派に適合している姿なのだが、我々人間の勝手な主観からすると奇怪な姿態の魚などもいる。海は我々生命の故郷であり、本技術の実施に当たつての、事前評価の重要性はいうまでもない。

CO₂の回収・深海隔離は、エネルギーの多消費と生態系への配慮から、「やっつけてはいけない研究」とするいささか激しい評言を目にした記憶がある。確かに燃焼排ガスからのCO₂の回収・処理はその量の膨大さを考えると、容易ではない。回収に要する設備費用、消費される電力、環境への二次的影響などを考えれば、研究はともかく実際には実行しないで済めばそれに越したことはない。他の再生可能エネルギー開発や、省エネルギー技術開発とは意味が異なる。ただ目覚ましいCO₂対策技術が開発されても、それが順調に全球規模に拡大・実現するには時間を要し、温暖化の重篤な脅威がその前に訪れることになる可能性は今や否定できない状況になりつつある。諸般の比較考量は困難な議論となることであろう。

マイケル・フアラディは一八六一年、英国王立科学院の金曜講座として今も著名な講演会のもとになる科学者への講演で次のように述べている。「もし炭素というものが、いつかお目にかけた鉛または鉄のように、燃えたあとに固体の物質を生じるものだったら、どんなことが起こるでありましょうか。燃焼は進行する事ができないでありましょう。炭素が燃えるときには、それは気体となって、大気中に溶け込んでまいります。大気はそのものを、よそへ運ぶ偉大なる乗り物、偉大なる運搬者であります」⁽¹⁰⁾

CO₂は常温常圧では固体でも液体でもなく気体状であるが故に、人類は化石燃料の燃焼によって円滑にエネルギーを獲得・利用できるのである。石炭や石油の燃焼によつて熱は発生してもCO₂が固体として残るとすれば、今地球は、その固形燃焼廃棄物で埋まってしまうていただろう。そしてまた、燃焼技術を工業的に利用するには煙突からガス状のCO₂を河川や海水中でなく大気中に放出するのが、最も簡便で損失が少なかったのである。即ち、現在のCO₂問題も、CO₂がもっている物理化学的性質と、人類が選択した工業操作の歴史、その双方の上に立っているのである。フアラディは続けて、CO₂の動物、植物との親密な関わりについて述べたあと、「このようにして私たちは、ただ仲間の生物だけでなく、す

べて生きとし生けるもの同士の頼りあいをつくっているのです。すべて造化は一つの部分が他の部分の善として貢献するという法則によつて結びつけられているのであります」と締めくくっているが、CO₂は気体となつて大量に大気中へ排出拡散した結果、人類にとつて今や「善」ではなくなつてしまった。ロンドンの貧しい鍛冶屋の次男として生まれ、長しても高等教育を受けなかつたに拘らず、鋭敏な実験者として電磁誘導の発見を始め、科学の発展に間違いなく第一等級の貢献をしたファラデーは、現在のこのような事態は想像だにしていなかつたに相違ない。