

ネット・ゼロの定義と背景

ネット・ゼロとは

「ネット・ゼロ」は、人間活動による大気への二酸化炭素排出を正味でゼロにすることです。排出を完全に無くすことができない時、その分を大気から捕集することで収支をゼロにするのです。このネット・ゼロの考えに似たものが様々な言葉で表現されています。たとえば、ゼロ・カーボン、実質ゼロ、正味ゼロ、カーボン・ニュートラル、ゼロ・エミッション、排出量ゼロ、ネット・ゼロ・カーボンなどです。これらの言葉には、それを使う人たちの思いがそれぞれにこもっていて微妙な違いがあるのです。しかし、聞く側では混乱してしまいます。そこでここでは、どれも同じ内容（＝人間活動による大気への二酸化炭素排出を正味でゼロにする）を指しているものとし、ネット・ゼロを統一して使うことにしました。ネット・ゼロ（＝Net Zero）は海外でも同じ意味で広く使われています。

さて、二酸化炭素の排出を完全にストップしたい方にとって、ネット・ゼロは「そんなのゴマカシだ!」、「二酸化炭素削減の努力に水をさすインチキだ!」と感じられるかも知れません。しかし、数十年という社会インフラの寿命を考えると、幾ら頑張っても二酸化炭素の排出を完全に無くすには時間がかかります。たとえば現在の航空機は、二酸化炭素を排出する液体燃料をどうしても必要とします。大型輸送機や高性能機もふくめた全部の航空機を 100%再生可能な電気飛行機に置き換えるのには相当時間がかかります。2050 年までに実現するとは言い切れません。また、現在の製法ではセメントや鉄の生産でも大量の二酸化炭素が排出されます。ですから、いくら二酸化炭素の排出を減らしても完全に無くすことは直ぐにはできないのです。気候危機の今、そんなに時間は無いのです。

ここで誤解してならないのは、排出を可能な限りゼロに近づけることをネット・ゼロが否定してはいないことです。そうではなく、どうしても完全に排出を無くすことができずに残った分を大気からの捕集隔離でネット・ゼロが補うのです。

実は、二酸化炭素の収支を「正味でマイナス（＝Net Negative）」にすれば、産業革命以降大量に大気に排出した二酸化炭素を捕集隔離して気候を回復させることにも使えます。その一例にソフトウェアを開発・販売する大企業であるマイクロソフトが今年 2020 年の 1 月におこなった宣言があります。マイクロソフトは、1975 年の同社創業以来排出したものと同量の二酸化炭素を 2050 年までには大気から捕集して取り戻し、気候の回復に寄与すると発表しています。

その上、二酸化炭素の捕集には、二酸化炭素をリサイクルすることで人類圏の自立を促すというメリットもあります。人類圏が過度に地球に依存しているのが、そもそも一連の

環境問題の根本原因だからです。この詳細については、本付属資料の「付録：人類圏循環の構築」の項で後述します。

捕集隔離とは

二酸化炭素の捕集には、植物の光合成を利用する「造林・再植林」、ケイ酸塩の岩石が風化するときに二酸化炭素を取り込むのを利用する「風化促進」、二酸化炭素を化学薬品で取り込む「直接空気捕集」、海の藻類の光合成を利用する「海洋肥沃化」など様々です。

こうして大気から捕集した二酸化炭素が大気に戻ってしまえば台無しです。そこで、大気の循環*から除くことをしなければなりません。これが隔離です。

*：循環の基本的視点については後掲の「付録：物質循環その1」「同その2」を参照ください。

隔離の分かりやすい例は、二酸化炭素を石灰岩にしてしまうことです。石にしてしまうのですから、これは長持ちします。炭にするのも隔離になります。意外に思われるかも知れませんが、縄文土器に黒い煤が付いている様を思い出してください。炭は壊れもせず循環にも取り込まれず、長い間じっとしていることができるのです。

地下に閉じ込めるのも隔離になります。化石燃料がいい例です。石油や天然ガスは循環から外れて長い間地下に眠っていました。だからこそ「化石燃料」なんです。地下に埋めてしまえば、有機物でも隔離できるのです。

捕集から隔離までの途中には、回収、貯留、輸送の3つの段階があります。右図は、二酸化炭素を捕集した樹木を炭にして地下に隔離する場合を例に、これを示しています。

すなわち、大気中の二酸化炭素を捕集し生長した樹木を炭化して炭素を回収し、隔離施設への輸送に備え一時保管(=貯留)します。その後、安全に隔離できる場所に輸送し、そこで隔離するのです。



捕集隔離の五段階
(樹木の炭化を例として)

「炭素捕集と生働工学」、生働工学ハンドブックvol.3(2015)の図2を一部改変

炭素の捕集

大気から二酸化炭素を捕集隔離する最初の一步は空気中に漂っている二酸化炭素分子の捕集です。大量に二酸化炭素が漂っている場所と言えば、化石燃料を大量に燃やす火力発電所や製鉄所が頭に浮かびます。しかし他にも、石灰岩を焼いてセメントをつくる時、あるいは油田から天然ガスを採取する時にも、大量の二酸化炭素が発生します。

人間活動で排出される二酸化炭素の半分以上が、こういった大量排出源から出てきます。これは「スポット発生源」と呼ばれています。スポット発生源で大気に廃棄される二酸化

炭素は濃度が高く、高温であることが多いので、水酸化ナトリウム、炭酸カリウム、アミン類を用いた化学的な捕集の研究が主流です。この技術は、火力発電所などからの排気ガス処理などでの経験があり比較的成熟したものといえます。

一方、大気に広がって薄まってしまった二酸化炭素を集めるのは一苦労ですが、他方で、地表のどこでもできるという長所があります。これには、スポット発生源での経験を生かした化学的な捕集に加えて、生物による光合成を利用した植林や農業、海の藻類を育てるものなど様々に提案されています。

炭素の隔離

次は隔離です。炭にするのは炭素を単体で隔離する方法です。アクションプラン 14、15、31、32、33、34、35 が、これを採用しています。一方、アクションプラン 37 は炭素を無機の炭酸塩として隔離します。二酸化炭素を石にしてしまう「風化促進」です。

また、アクションプラン 36（農地に炭素を溜める）は滞留時間*が長い土壌中有機炭素にすることで二酸化炭素排出削減としています。このような方法は、炭や石にするのとは異なり、長期に亘って大気へ戻ることが本当に無いのかが多少不安です。そこで、このようなケースを本リポートでは隔離とせず貯留と呼んでいます。この不安を如何に克服するかは今後の課題になります。

*滞留時間については、後掲の「付録：物質循環その2」を参照ください。

これらの他に、庭・公園・街路・林地などで生きた樹木のまま保全するもの、木造の建築や構造物として利用するものなどがありますが、土壌有機物同様、長期に亘って大気へ戻ることがないという保証を確保できるのかが課題です。このため、今回のアクションプランでは取り入れませんでした。また捕集した二酸化炭素をそのまま地下に埋める方法があります。その中でも、石油や天然ガスを掘り出した跡などに埋め戻す方法は、たとえば近くの北海に適当な場所があるイギリスで、これを使った隔離計画が進められています。この方法は、しかし、残念ながら藤沢市には向いていません。油田が市内にも近くにもないからです。二酸化炭素は常温常圧では気体であり、濃度数%で中毒症状を起こす危険なガスです。しかも、化石燃料で発生する二酸化炭素は化石燃料の倍を越える重さになります。埋設目的での大量長距離輸送は望ましくないのです。

藤沢市の選択

「2050 ネット・ゼロ藤沢」では、捕集した二酸化炭素を炭酸塩、炭、土壌炭素として隔離・貯留することにしました。

中でも炭で隔離する方法を広く採用しました。炭は石炭に似ています。主成分はどちらも単体の炭素です。ですから炭は、人工石炭 (human-made coal) と呼ぶことができます。

レポート本体に記しましたように、炭は災害などの非常時には取り出して燃料にすることもできます。ちゃんと炭にしておけば天然の石炭とは違って人工石炭はクリーンな燃料

になります。災害時は、いろいろ不自由なので、クリーンな燃料は助かります。

また、隔離の時間が土の中では短くなるかも知れないことを覚悟すれば、土壌改良剤として畑や林に撒くこともできます。実際、2040年までに化石燃料に頼らない都市になると宣言しているストックホルム市では、2017年から家庭での芝の刈り屑や公園の剪定枝などを炭にして家庭の植木鉢や庭で利用しています。

さらに、炭が大量に得られるようになったら、製鉄に欠かせないコークスの代替として使っても良いのです。これには、不純物が多く環境汚染の元凶とされる石炭を使わなくて済むという大きな利点があります。しかも、循環型社会とって、私たちが暮らす人類圏の持続可能な未来に大事な要件である資源を循環させることにもなるのです。

捕集した二酸化炭素を、循環型社会を支える資源とするアイデアは他にもあります。木造建築の木材として利用するアイデアは既に述べました。これに似たアイデアに風化促進で得られた石をコンクリート製造時の骨材に利用する案があります。また、人工光合成で有機物をつくる原料に使うことも考えられています。余剰再生可能エネルギーを使って水から生産した水素との反応で燃料をつくるのもその一つです。

市外から流入する物質・エネルギーに伴う二酸化炭素の扱い

本レポートでは、藤沢市が排出しているとされる二酸化炭素の量は文献（2018年版 ふじさわ環境白書 藤沢市環境基本計画 平成29年度年次報告）に記載されている値を用い、その内容は詮索していません。そのため、市境を出入りする物質・エネルギーに伴う二酸化炭素の勘定が一致していない可能性があります。

これに関して良く知られた例は電力です。市外の火力発電所が電力を生産する時に生じた二酸化炭素を藤沢市による二酸化炭素排出とするのか否かです。逆に藤沢市で自動車を製造する時に生じた二酸化炭素は全量を藤沢市が排出したものとするのか否かです。ほとんどの自動車は市外に輸送されるにもかかわらず。

もっとややこしいのが、市外で栽培された食料品です。極端な例ですが、市外で栽培された野菜を考えてみましょう。野菜は二酸化炭素を吸収して育ちます。それが市内で消費され野菜屑まで全部腐って二酸化炭素にまで分解するのならば、市外も市内も関係なく二酸化炭素の収支はゼロと考えても良いでしょう。実際、そう考えるのが一般的です。しかし、この野菜屑を収集して炭化するとしたら、どうでしょうか。本レポートでは、市外・市内にかかわらず炭化され隔離された炭素の二酸化炭素相当分を排出削減としました。これには異論があるでしょう。どれが正しくどれが間違っているかではなく、これは算定ルールを決め方次第です。何らかの共通ルールが必要です。

アクションプラン26のアルミ缶のリサイクルで電力量が削減するのは新地金と再生地金製造法に地域による大きな違いが無ければそれはそれで良いのですが、二酸化炭素の削減量に換算する時には発電法によって大きな違いが生じます。アルミ地金は電力コストが低い地域で生産されることが多く、その排出係数は日本国内の電力排出係数よりも小さいも

のと思われますが数値は不明です。

以上は、象徴的な例を挙げたにすぎません。ボーダーレス化した現代社会では、すべての活動について多少とも係わる問題です。完璧な整理は實際上無理でしょうが、それなりの整理と合意形成が求められます。

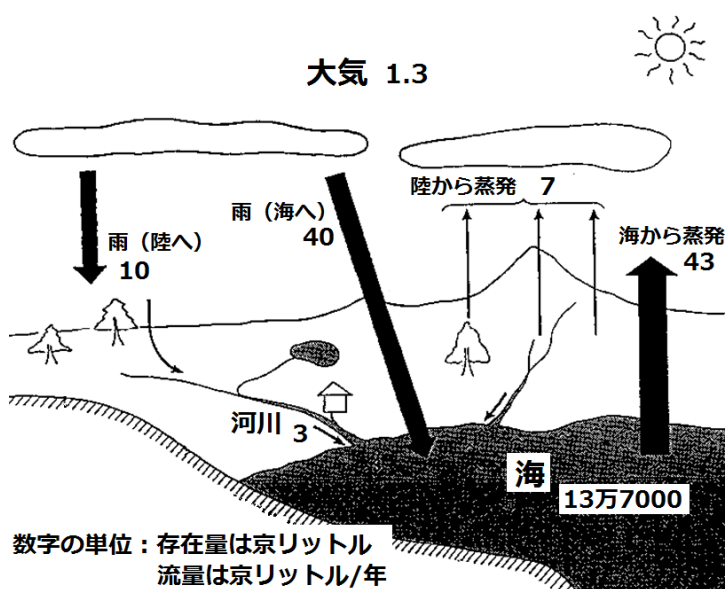
以下に記す6つの「付録」は、私たちが排出している二酸化炭素の削減を考え、その問題を整理する時に必要な時空間についての全体観を得る参考資料です。釈迦に説法、蛇足気味ではありますが、御笑覧くだされば幸いです。

付録：物質循環その1 流量と存在量

地球の表面では、太陽からの光を受けて様々なものが循環（＝物質循環）しています。たとえば海の水は蒸発して大気成分となり雲となって地上に雨を降らせます。こうやって海、大気、陸を水が巡っています。水の循環です。

この時、海、大気、陸のそれぞれに存在する水の量（＝存在量）と海から大気へ、大気から陸へ、と移動する量（＝流量）とが物質循環の様子を決めます。

数字で具体的に見てみましょう（右図）。図では、海水の量は非常に大きいので兆の一万倍である京（けい）を使って「京リットル」の単位で表わしています。そうすると、海水の量は13万7000京リットルになります。これに対して海から蒸発する水は年間で43京リットルです。一方、海に降る雨が40京リットル、川から海に流れ込むものが3京リットルです。結局、雨と川とで合計43京リットルが海に流入し、海から蒸発する量と等しくなっています。



付録：物質循環その2 流出と流入、滞留時間

流れには方向が異なる2つの種類があります。流入と流出です。水の循環では、海から流出する水の量と海に流入する水の量は変わりません。もし蒸発する量の方が雨と川からの流入水より多かったらどうでしょうか。海水は段々減って遂には無くなってしまおうでしょう。

二酸化炭素の場合は、大気へ流入する量の方が大気から流出する量より大きいのです。人間活動のためです。それで、大気中の二酸化炭素が年々増加しています。これについて詳しくは、次の項「付録：大気中二酸化炭素の収支」で述べます。

ところで、存在量を流量で割ると時間になります。これを滞留時間とよんでいます。そこに留まっている平均の時間を表わしているからです。たとえば、水が海に留まっている時間を上図から求めると、およそ 3200 年になります。一方、大気に水が留まっている時間は 10 日にもなりません。大気中の水の量は 1.3 京リットルであるのに雨は年間で陸と海あわせて 50 京リットルも地表に降るからです（上図参照）。水の滞留時間が海と大気という存在場所の違いで大きく異なることは、大気中二酸化炭素の貯留を考える時のポイントになります。

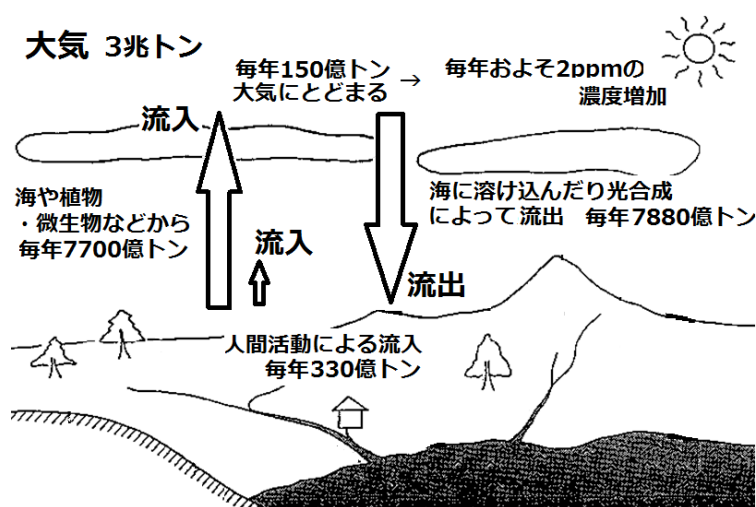
水を例にして物質循環の考えを紹介しましたが、これは水に限らず、どんなものにも当てはめることができます。水と同じ小さな分子である二酸化炭素でも良いし、大きな自動車でも OK です。逆に微小な粒が単位になっている元素についても、この考えを使うことができます。

付録：大気中二酸化炭素の収支

大気中の二酸化炭素について物質循環の考えを当てはめます。

右図を見てください。現在の大気には 3 兆トンの二酸化炭素があります。産業革命前は 2 兆トンでした。

ここに毎年、海や植物・微生物などから大気に 7700 億トンが加わります（＝流入）。これに加えて人間活動による流入が 330 億トンあり、流入量の合計は 8030 億トンになります。つまり、人間が排出している二酸化炭素は大気に流入する量全体のおよそ 4%であり、大部分を占める 96%は陸や海の生物による呼吸などからの流入です。



一方、海に溶け込んだり光合成によって大気から失われたりするもの（＝流出）が 7880 億トンになります。本来なら、流入と流出が共に 7700 億トンでバランスが取れているはずなのです。それが、これまでに大量に蓄積した人間活動由来の二酸化炭素 1 兆トンのために、180 億トンの二酸化炭素が大気から更に流出して 7880 億トンになっていると考えることができます。

この流入 8030 億トンと流出 7880 億トンとの差 150 億トンが毎年大気中に残り蓄積する

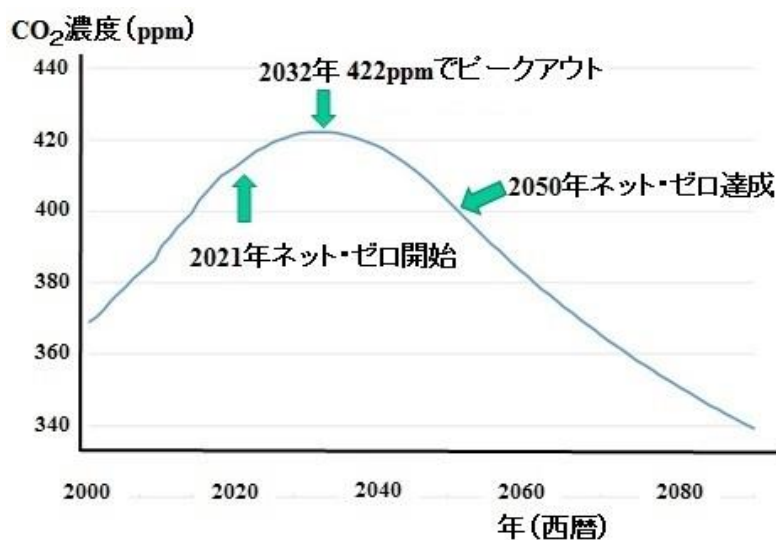
二酸化炭素です。大気中二酸化炭素の量 80 億トンが地表付近での濃度 1ppm に相当するので、二酸化炭素濃度は毎年およそ 2ppm 増加します。

ネット・ゼロは、人間活動によって生じる大気への流入量である年間 330 億トン进行切り減らした上で、減らしきれない分を大気から捕集隔離します。ここで誤解してならないのは、ネット・ゼロになったとって直ちに二酸化炭素の収支が全体でバランスが取れる訳ではないということです。ネット・ゼロ達成後も、これまでの人間活動で蓄積したおよそ 1 兆トンの余分な二酸化炭素が無くなるまで大気からの余分な流出は止まりません。

付録：「2050 ネット・ゼロ」による二酸化炭素濃度の変化

世界全体が、人間活動による 330 億トンの大気への流入を 30 年かけてゼロにする「2050 ネット・ゼロ世界」を行つたとしましょう。それが二酸化炭素濃度にどのような影響をあたえるかを先の図に示した二酸化炭素の収支を基に、「毎年 11 億トンずつ削減量を増やし、2050 年にネット・ゼロを達成した後もネット・ゼロを継続する」など幾つかの仮定をして簡単なシミュレーションをした結果が右図です。

これによると、「2050 ネット・ゼロ世界」を来年 2021 年から始めると途端に二酸化炭素の増加は鈍り、開始 12 年後の 2032 年には増加が止まります。その後は濃度が減少し、ネット・ゼロが達成される 2050 年には 401ppm にまで下がります。2050 年を過ぎると減少は緩やかになります。2090 年には 340ppm になります。



「2050 ネット・ゼロ」は、気候の非常事態から脱出することが目的です。図のグラフから、それについて言えることは何でしょうか。実は、気候が非常事態になったのが何年かなのかは特定されていません。その中で、一つの考えとしてアメリカ合衆国で暴風災害の被害額が 10 億ドルを越える件数が 2011 年から顕著に増加し、1980 年から 2000 年までの平均に比べて 7 倍以上になっていることから 2010 年を非常事態になったとする考えがあります。図によると、2010 年の二酸化炭素濃度 390ppm を下回るのは 389ppm になる 2056 年です。世界全体が「2050 ネット・ゼロ」を開始して 36 年。ネット・ゼロ達成からは 6 年。その時の私たちの喜びは想像を超えるものでしょう。

付録：人類圏循環の構築

気候危機の原因は二酸化炭素の濃度が高すぎるのですが、その根本原因は私たち人間の活動が地球に過度に依存しているからです。化石燃料を燃やしたりセメントや鉄をつくり出すときに出てくる廃棄物である二酸化炭素を自然が処理できる以上に大気に捨てているからです。そこで、なるべく圏外の資源に頼らない私たち人類圏での循環の仕組みをつくることが求められています。循環型社会です。4R (Refuse、Reduce、Reuse、Recycle) です。

この循環型社会では、化石燃料ばかりでなく鉱物など地下に埋もれた再生不可能な資源の採取を極力減らし、廃棄物をださない産業と暮らしが実現しています。地球への過度な依存から脱した真に自立した人類圏です。今回の気候危機を乗り越える努力は同時に自立した人類圏の構築を目指すものでなくてはなりません。危機をもたらした根本原因を取り除かなければ危機は却って悪化するか繰り返すかだからです。

付録：循環の進化（廃棄するよりも二酸化炭素の有効利用を考える）

自立した人類圏には、お手本があります。生物圏です。生命も、その誕生時には必要な資源（特に有機炭素）を周囲の環境から得ていました。そのため、それが枯渇しそうな時に生命存続の危機を迎えました。それを何とか凌いだのが有機炭素を無機炭素から自分でつくり出す光合成だったのです。資源（＝有機炭素）を外部に依存しなくなり、生命は生きつづけることができたのです。その後、光合成の結果生じる廃棄物である酸素を捨てっぱなしにしていたために酸素の毒で再び生命は存続の危機を迎えました。そしてその時には、酸素を解毒し利用する仕組みを獲得して新たな飛躍をしたのです。

今の私たちが直面している問題も似たようなものです。周囲に過度に依存しない自立した人類圏をつくる時が来たといえるのです。ある時は「必要な資源の供給を外部に依存するのを止め」、またある時は「捨てていた有毒な酸素を活用する」ことで滅亡することなく進化を遂げた生物圏の歴史は、今の私たちに教訓を示しています。これから私たちが捕集隔離する二酸化炭素は歴大な量になります。これを人類圏の循環に取り込み活用する術をいずれ工夫しなくてはなりません。人工光合成の仕組みが求められているのです。