

“カーボンニュートラル、水素社会” 雑感

鈴木 俊光

1. はじめに

わが国は、2040年までに二酸化炭素排出量を2013年（12.3億トン）比で40%削減する目標を発表した。バイデン大統領のパリ協定復帰にのぞむオンライン環境サミット開催（2021年4月）に合わせてのことであつた。二酸化炭素削減と経済発展の両立は困難な中でどのような施策が提案されているか検索してみた。

最初に、20世紀後半のエネルギー・環境問題に関する、主な内外の出来事を振り返ってみたい。1960年代に戦後の復興が一段落し、石油化学、鉄鋼産業を中心とする重化学工業コンビナートが各地に建設され日本経済の著しい発展に貢献した。安価な硫黄分の多い重油を熱源に使用したために、環境汚染が生じ、1967年に公害基本法が制定され、有害物質の排出が規制されることになった。この法は1993年に環境基本法に引き継がれている。1970年には自動車排気ガスに対する規制（マスキー法）が米自動車会社の激しい反対を押し切って米国で制定された。確かに、当時都市部の交差点にCOの濃度が数十ppmと表示されていた記憶がある。1972年にローマ倶楽部による“成長の限界”が発表され、「人口の増加と環境汚染の拡大などの問題から100年以内に地球

上の成長は限界に達する」と警鐘を鳴らされ話題を呼んだ。1973年に第4次中東戦争が勃発し、OPEC諸国による親イスラエル諸国に対する石油の禁輸措置が行なわれ、石油資源が戦略物資になることを知らされた。原油価格が高騰、エネルギー・資源問題が成長のネックになることを日本では痛感された。1978年のイラン政変によりこの問題はさらに緊張を増した。

この際、サンシャイン計画、ムーンライト計画などの施策が講じられ、1980年にNEDO（新エネルギー（産業技術）総合開発機構）が発足し国を挙げてエネルギー資源の多様化、高効率利用（省エネルギー）に取り組むことになった。ここでは、長らくエネルギー資源として主役の座を降りていた石炭の有効利用などが脚光を浴びた。

1988年に産業革命以降化石資源の大量消費により大気中の二酸化炭素濃度が増加し、それに対応して地表付近の大気温度が上昇している、このまま二酸化炭素濃度が増加すると将来的に気温の上昇とともに南極大陸の氷が溶け海面が上昇するとの論文が発表された。従来環境汚染が局地的な問題であつたのに対して、地球規模の国際問題になった。

政府間パネル（IPCC）が組織され、世界

の気象学者が集められ、さまざまな視点と観測値(推定値)などを用いて地球気候モデルが提案され、二酸化炭素などの増加が地球規模の気候変動の予測が定量的に行われるようになった。それを実行に移すために、国連傘下に気候変動枠組条約締約国会議が組織され温室効果ガスの地球規模での削減の目標を定める仕組みが作られた。2007年の京都議定書(COP3)、そして2017年にパリ協定(COP21)としてまとまったのがその最新のものである。

問題は、これまでの、環境問題は局地的(特定の排出源)であることと、全排出物中の少量あるいは微量成分であったことに対して、二酸化炭素は排出物の主要成分であることに帰せられる。

排出物中の有害成分のみを除去するために触媒技術は極めて有効で驚くべき役割を果たしてきた。有用な物質を製造するために開発された触媒が、有害物質を無害化するのにも計り知れない力を発揮したのである。

2. 二酸化炭素を資源に換える

世界各地で異常気象が続いている、気温の上昇と共に天候の変化が激しくなるとの予測は、当初から一部の気象関係者から唱えられていたことで、まさに現実になった。海面の上昇については未だ世界的に一部の島嶼諸島を除き観測されていない。

二酸化炭素の削減に関して、少し前までは CCS (Carbon Capture and Sequestration) が固定排出源からの二酸化炭素削減の技術として実証実験が行われてきた。得られた二酸化炭素は油田の2次回収に利用されるなど一部実用化されている

が、地中深くの貯蔵や深海への貯留などは予期せぬ2次災害の問題から実際には見送られている。

最近では CCUR (Carbon Capture Utilization and Reduce) ということ、固定化した二酸化炭素を再び有用な物質に戻すという施策に代わった。そして、できるだけ炭素を利用しない水素社会の実現に向かう、水素製造は現行の炭化水素の水蒸気改質から、太陽光、風力発電の余剰電力による水の電気分解によって得るとのことである。回収した二酸化炭素の良い処理法が見つからないので資源化という案に至ったと思うがこれがどのようなものか？

熱力学的に、CO₂やH₂Oはエネルギーとしての有機物質に含まれる炭素や水素がその持つエネルギーを放出した後の姿であるから、これを元に戻すためには放出したエネルギー以上のエネルギーを加えなければならない。言い換えれば、高い位置のエネルギーを持っていた山間部のダムの水が発電し、位置のエネルギーを失って海に注ぐ水をダムに戻すことと同じことを行おうとしている(もっとも揚水発電としてこのようなものも存在はする)。従ってあえて以下のような計算をするまでも無いが、実体としてこのような計画が如何に無謀なものか一例をとって数値をあげて見積もってみた(物質収支とエネルギー収支)¹⁾。

資源エネルギー庁のHPにいろいろな計画があげられているが、触媒開発・プロセス技術改良が関与するものとしてCO₂を合成ガス、メタノール、燃料(メタン、液体燃料)へ転換するとある。そして、その前段としてCO₂分離・回収技術の開発と化学回収法の低コスト化(1000~2000円/t-CO₂)とある。

ここで、100 MW の天然ガス(メタン) 燃焼のコンバインドサイクル発電所を考え、そのエネルギー効率を 60% とし、実際にどの程度の量の CO₂ が発生し、その CO₂ を水素で還元しメタンに戻すと (まるで永久機関のようなアイデア) どの程度の量の物質を処理するかを計算した。実機は 500 MW 規模であるが、風力発電などとの比較の意味であえてこのサイズで見積もった。

100 MW がメタンの燃焼熱の 60% であるから、メタンを 167 MJ/s 供給する。

メタン (39 MJ/m³ (H)) 4.3 m³/s (191 mol/s)

空気 (理論量) 43 m³/s、

排ガス量 43 m³/s

発生 CO₂ 4.3 m³/s (10vol%)

1 時間当りにすると

メタン 装入量 15480 m³/h

CO₂ 発生量 15480 m³/h

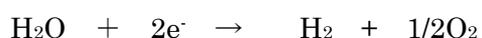
30.25 t/h

廃ガス総量は 154800 m³/h

回収にはエタノールアミン水溶液 (HOCH₂CH₂NH₂) を用いるようであるが、10% 濃度 CO₂ の低温での吸収、高温でのストリップング、吸収液の劣化や回収ロスなどを考えて、1000 円/t の回収は実現可能だろうか? 回収塔での接触時間を 100 s としても、塔の体積は 4300m³ となる。塔径 10 m としたら、高さは 50 m に達する³⁾。

次に回収した CO₂ のメタン化について

ここでは水素源は水の電気分解を考える、



の理論エネルギー消費量は、水素 1m³ につき 3.54 kWh であるが、実際には 4 kWh 以

上になる。ここでは 4 kWh/m³ として計算してみよう。



CO₂ 15480 m³/h

4H₂ 61920 m³/h

水素を得るに必要な電力は 247700

kWh(247 MWh) である、100 MWh の発電

で生じた CO₂ を固定化し、燃料のメタンに

戻すと、回収エネルギーを考慮しなくても、

2.5 倍の電力を消費することになる。これが、

二酸化炭素排出ゼロの社会の図である。こ

の電力を太陽光、風力発電の余剰電力で賄

うことが可能か否か?

我が国の総発電量は最近の 10 年では、毎年 1 兆 kWh を少し超える位で推移している、内化石燃料を利用するものが 65% 程度である。電力業界の二酸化炭素排出量は毎年 3.4 億トン。わが国の二酸化炭素排出量のおよそ 30% に相当する。この CO₂ の 1/10 を回収してメタンに転換すると、上述の計算に基づけば総発電量のおよそ 1/4 強の電力が必要になる。

3. 大気中の二酸化炭素の回収

驚くべきは、大気中の温室効果ガスを回収、資源転換無害化する技術開発 なるプロジェクトが NEDO により実施されている。400 v/v ppm の濃度の CO₂ を大気から 1 t 回収するためにはどれだけ多量の大気を吸収剤と接触させる必要があるか? そのために必要な動力は? 1 m³ の大気中の CO₂ は 0.4 L、0.786 g に過ぎない。1 kg 回収するために 1200 m³ の大気を吸収剤と接触させなければならない、1 t の CO₂ ではこの千倍である。このようなことを行っても、地球上の、あるいは毎日日本中で排出さ

れる CO₂ の 1 ppb (大気中の CO₂ は 3 兆トン程度) も減少しない。

これは DAC(Direct Air Capture) Negative Emission として、毎年世界の GDP の 1.2~1.9% を投入し 2~3 Gt の CO₂ を回収することによって 2100 年の気温上昇を 2.4-5 °C に抑え得るというシミュレーションが発表されている²⁾、わが国もこの方面の研究に多額の資金を投入するらしい。その理由として、いずれの場所でも実行可能なことがあげられている。ここで疑問 可能(科学的、技術的)と実現できる(経済的、社会的意義がある) は別ではないかということである。確かに KOH を用いれば、低濃度の CO₂ と反応させて KHCO₃ として回収できる。回収した炭酸塩をどのように処理するか? しかも何億トンも、またそれだけのカリウム資源があるか?

太陽光、風力発電といっても建設にはいろいろ制約がある、クリーンなエネルギーが無限に得られるような二酸化炭素削減策は考えなければならない。

4. いかなる方法が考えられるか

電力が、化石燃料を用いず得られるなら、電力のまま有効に利用することが最善であろう。たとえ、長距離の送電に損失があろうとも、水素に変換して二酸化炭素を変換するよりはるかにエネルギー損失は総合的に小さい。

(イ) キャパシタ

変動の時定数の小さい自然エネルギーを用いる太陽光・風力発電の平準化には、蓄電器(キャパシタ)の開発が有効であると考えられる。すでに、小電力であるが、マツダの自動車では減速時のエネルギー回収用に実用化

されている(マツダ社 HP、カタログ)。

キャパシタの電力貯蔵量の増大にはキャパシタの耐電圧を高くすることが必須であり、誘電材料の開発には期待が持たれると素人ながら思量する。電解液に水系を用いると耐圧は 1.1V に抑えられる。言わずもがなであるが、キャパシタの貯蔵エネルギーは電圧の二乗に比例し容量には比例するからである。

(ロ) 二次電池

電池の利用が期待される、中でもレドックスフロー電池は住友電気(株)によって商品化されている(住友電気 HP より)。装置はいささか大型になるが、この電池はイオン交換膜で隔離された陽極と陰極との間で充放電に際して H⁺ がイオン交換膜を通して移動し、陽極と陰極において硫酸バナジウムの酸化・還元反応が独立に起こる。電解液は陽極側と陰極側で別々にタンクに蓄えられ。電極室のサイズと電解液のタンクのサイズにより独立に出力と容量が選べる。原料もバナジウムであれば、リチウムやコバルトのように資源問題が多量生産の隘路になる心配も無い。硫酸バナジウムの溶解度が問題で、これが、電池サイズの小型化を制限する。また、この電池は常温で作動し、水溶液であるので火災の心配もない。出力 15 MW, 容量 60 MWh 程度のものがカタログに記載されている。Na-S (NAS) 電池もあるが、こちらは常温で作動しない。

(ハ) 電気自動車

自動車の電気自動車・EV 化が脚光を浴びてきた。テスラが発売されたときは趣味的な車くらいにしか見られていなかったが、すでに日本でも走っている。EU では内燃機関車の販売が 10 数年後に禁止になる。エン

ジンでリードしていたホンダも 2040 年には内燃機関自動車を製造中止する。日本では現在ガソリンは毎年 5 千万キロリットル程度生産消費されている。その CO₂ 排出量は、およそ 1.2 億トンに達し、火力発電所からの排出量の 1/3 に相当する。

EV 車のエネルギー効率は果たしてガソリン車と比較してどの程度優れているのか？ ニッサンリーフのカタログを見ると電池の容量が 40 kWh のものと 62 kWh の 2 車種あり航続距離は 400 km、570 km となっている。単純に割り付けると 6.4, 6.2 km/kWh となるが、空調なしのデータであるから、この 8 割程度として 5 km/kWh と仮定してみると、1.38 km/MJ と見積もられる。ただし、充電の際の電力は現在平均して熱効率 40% 程度のエネルギー効率で供給されているから、大幅に下がって 0.552 km/MJ となる。ガソリン車ではニッサンリーフと同じサイズの車では 15 km/L 程度であろうから、ガソリンの発熱量を 33.6 MJ/L(L) とすると、0.450 km/MJ と見積もられる。HV 車では 22 km/L らしいので 0.66 km/MJ となる。

さて、水素社会のエースとみられる FCV ミライのデータを見ると、70 MPa の圧縮水素を 5.6kg(62 m³)搭載しているので、そのエネルギーは(12.79 MJ/m³(H) x 62 m³) 航続距離は 750km とあるので、0.75 km/MJ となり確かに水素の優位性が示される。しかし、水素を得るには、製造過程の消費エネルギーに加えて 70 MPa への圧縮エネルギーとして 10%ロスが生じることなどを考慮すると、HV 車との差はさらに縮まる。

おわりに

二酸化炭素回収・再利用が概念的にエネルギーの無駄と分かっていることであるが、実行可能かとあえて、一例を挙げてみた。活性化エネルギー E_a はイノベーションで下げられるが、 $\Delta H, \Delta G$ は反応に固有で人知では如何ともしがたい。

先刻ご承知の皆様にはあえてこのようにことを記す必要の無いことと思う。浅学菲才の身勘違い間違いがあれば、ご指摘ご叱責戴きたい。

いま、行なうべきは省エネルギーではないか、6 ヶ月の期間限定の万国博、リニア新幹線(大電力の消費、最低でも現行の新幹線の 4 倍とヘリウムの再液化)などの再考。老朽化した効率の低い火力発電の更新などでもかなり二酸化炭素排出を削減できる。

過去にも大気中の二酸化炭素の高い時期も何度もあったらしい。現在の大気中の二酸化炭素濃度の増加傾向と地表付近の気温上昇と一義的相関関係は本当にあるのか。もう少し冷静にあらゆる物理現象と気温上昇の相関関係を見直す必要があると思われる^{4,5)}。

物理的に温度は K で考えるものであり、常温において、1 K の変化は 0.3% であるが、1 °C では 5% にもなる。感覚的に大きな違いととらえられる。

最近スーパーコンピューターでシミュレーションしたから証明されたというような報道が散見される。パソコンで行なおうがスーパーコンピューターで行なおうが、同じモデルを用いてもパラメーターの設定によりシミュレーション結果は変わる。スーパーコンピューターでシミュレーションしたら正しい結果が得られるものではない。

注と文献

水素社会について検索したところ、本内容より詳しい村井正治氏のレポートが見つかった (<http://wwr7.ucom.ne.jp/mmurai3/003.pdf>) 内容は酷似しているが、より具体例を示し実感していただくためにあえて筆をとった。村井氏に謝意を表したい。

文中一般論のときは二酸化炭素と、化学式に関するときには CO_2 と表記した。

有効数字については統一が欠けるが、あまり雑にならないように留意した。

1) 御園生 誠 温暖化と資源問題の現実的解法 丸善 2009 東京

2) Hanna, R 他 "Emergency development of direct air capture as a response to climate Nature Communications doi.org/10.1038/s41467-020-20437-0

3) 排煙脱硫や脱硝でははるかに大きな廃ガス量ものが実用化されているが、 CO_2 のアミンへの吸収速度（弱酸と弱塩基の反応）などの面から課題は多い。回収率を低くすればサイズは小さくできる。

4) 赤祖父俊一, 正しく知る地球温暖化 誠文堂新光社, 2008 東京

5) S. F. シンガー他、山形浩生、守岡桜 訳 地球温暖化はとまらない, 東洋経済新社, 2008 東京