

持続可能な社会の建設 (V)

- 水素の液化 —
- 水素社会 —
- 洋上太陽光発電基地 —

*草 野 清 信

Construction of a sustainable society (V)

- Liquefaction of hydrogen —
- Hydrogen society —
- Ocean photovoltaic power generation base —

KUSANO Kiyonobu

Abstract

A new method to construct an electric power generation unit (12km²) which is made up by 6 basic power units, has been proposed in this paper. Moreover, the energy required to maintain and operate the Ocean photovoltaic power generation base has been revealed to be approximately 25% of the available energy that is brought out from the produced electrolysis hydrogen. This numerical value 25% is the same as an oil field, so that, shows that "the hydrogen society" which is composed by both the ocean photovoltaic power generation base and the fuel cell is feasible. This society is being a CO₂-free society enabling prevention of global warming, and a de-nuclear power society, and a sustainable society, which possesses all characteristics demanded in the 21st century.

Key words : 水素の液化 (Liquefaction of hydrogen)

洋上太陽光発電基地 (Ocean photovoltaic power generation base)

持続可能な社会 (Sustainable society)

水素社会 (Hydrogen society)

CO₂フリー社会 (CO₂ free society)

脱原発社会 (De-nuclear power society)

1. はじめに

2015年の東北地方南部と北部の梅雨入りはともに6月26日とかなり遅く、そして梅雨明けはそれぞれ、7月26日と7月29日であってやや遅かったように思われる。梅雨明け後は暑い日が続き、仙台では猛暑日(35℃以上)が4日連続という最長記録が樹立された。

東京でも猛暑日連続11日間の記録を作った。

仙台では8月11日からは一転して雨空になり、9月13日まで続いた。そして9月10日夜半から11日未明にかけて集中豪雨となって市内にかけ崩れなどを引き起こして大きな災害をもたらしている。茨城県・栃木県と同様、宮城県北部の大崎地方では堤防決壊に伴う甚大な水害が発生している。

* 技術教育講座

いずれの現象も温暖化の結果である。比熱の小さい大気の温度は容易に上昇して、早い時期から日本国中に酷暑をもたらしていた。比熱の大きな海水は水温をゆっくり上昇させて台風を大型化させた。そして南日本・西日本を越えて、ようやく、それを東北・北海道まで送り届けるまでになってきたのだ。

このような現象は1970年代に予想されていたことである¹⁾。大気中のCO₂の増加が温暖化の要因であることがこの時点で指摘されていた。人間の経済活動に伴う化石燃料消費が、その原因であることが広く認識されるようになったのは、1990年代である。心ある人々の危機感と熱意は、155ヵ国の賛同のもと、国際連合気候変動枠組条約が1992年2月採択・発効という形で結実している。

1997年12月に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3、京都会議)では、温室効果ガス削減の数値目標も提示され、日本には2013年までに1990年比で6(%)減が義務付けられた。

COP15(コペンハーゲン、2009年)では、先立つラクイラサミット(2009年、イタリア)で2050年までに温室効果ガスの80%削減が決まっていたが、2013年以降の各国の削減目標値を決定するに至らなかった。その後、COP20までこの状態が続いており、2015年のCOP21(パリ)を迎える。世界の気温上昇を産業革命から2℃未満に抑えるという国際目標を実現するためのタイムリミットは目前であり、COP21がラストチャンスと言われている。

このような中、日本政府は、2030年の温室効果ガス排出量について2013年比で26.0%削減とする目標を、G7サミット(2015年6月)で表明した。これは1990年比に換算すると18%減に過ぎず、40~50%減が期待されるどころ、消極的と言わなければならない。

2015年3月7日、地球温暖化の原因である二酸化炭素濃度の1ヵ月あたり平均濃度が、観測史上初めて400ppmを超えたと米海洋大気局(NOAA)が発表した²⁾。CO₂の増加率が2.25ppm/年であることを考慮すると、450ppmに達するのは22.2年後、すなわち2038年である。

一方、地球環境戦略機関IGES(Institute for Global Environmental Strategies)が2015年4月24日付で、2015年3月、国際エネルギー機関(IEA)は、2014年の世界におけるエネルギー起源のCO₂排出

量が前年と同量の323億トンに留まり、排出量増加が停止したと伝えている³⁾。喜ばしいことであるが、このCO₂排出量が毎年大気中に加わり続けると、22.2年後(2038年)までの累積排出量は0.717兆トンとなる。400ppmでのCO₂の総質量は3.25兆トンであるので、22.2年後には22(%)増の4兆トンに達することになる。

400ppmは危険水域とされており、地球環境は深刻な状況に置かれているのだ。日本を脅かしているのは近隣諸国などではなく、増大を続ける見えないCO₂なのだ。その削減にこそ、時間と資金そしてマンパワーを投入すべきである。

著者は大気中へのCO₂排出量を削減する方策として電気自動車の普及を考え、その研究を1999年から行ってきた⁴⁾⁻¹⁶⁾。駆動源として取り上げたものは、3種類の実用的な電動機、すなわち、永久磁石界磁型直流モータ、直流直巻モータそして三相誘導モータである。電動機の特徴が電気自動車の走行特性に大きな影響を与えることを理論的に明らかにしている。電子式のアクセルそして電子式回生ブレーキの特性も理論的に明らかにしている。幸いこの間にリチウム電池で動く純粋な電気自動車であるi-MiEV(三菱自動車)が2006年発売開始、そして2009年には量産車の販売が開始されている。また、2014年12月からは燃料電池自動車(MIRAI、トヨタ)が販売開始されている。とりわけ、トヨタはその技術を全面公開するとしており、水素社会を大きく開く可能性が出てきた。

著者は洋上太陽光発電基地と燃料電池を物理基盤とする水素社会を提唱している^{17), 21)}。南鳥島近海の経済的排他水域に12700km²のメガフロートを敷設、その上に太陽電池を設置する。太陽電池のエネルギー変換効率を18(%)とすると、2.74億kWの電力を発生できる。この電力を使って、本土から送り届けられた真水を電気分解して、水素を取り出す。これを液化して、タンカーで、本土の各地に分散する燃料電池発電所まで輸送する。ここでは電気と若干の熱そして水が発生する。電気は送電網を通して各消費者に届けられ、排気ガスである水は回収されてタンカーを使って再度南鳥島に輸送する。この循環を繰り返せばCO₂の発生なしに電気を発生できるので、CO₂フリーの持続可能な社会である水素社会が実現できる。

著者は、この構想が単なるアイディアに留まるのか

否かを、数量的に明らかにする作業を続けてきた。そして

- ① 洋上太陽光発電基地建設は原発の建設費用とほぼ同額で可能である¹⁷⁾。
- ② 火力発電所のエネルギー変換効率を40(%)から60(%)に引き上げることによって、原発に頼らずに現状の発電電力を今までと同じ燃料を使って発生できる¹⁹⁾。
- ③ 面積が5000m²である正三角形の形をしたサブユニットを使って正三角形の形をした面積が2km²である基本ユニットの建造方法を提案した²⁰⁾。
- ④ 基本ユニット6基で構成される発電ユニットを、短冊状に区切られた南鳥島近海に1000基配置して基地を構成する。発電ユニットで生産された水素を液化して本土に送るのであるが、そのためのタンカーの種類と隻数を明らかにしている。タンカーの動力発生用に使用される水素の量が生産量の6%から9%であること、海流で流される発電ユニットの位置修正用には1%が使用されることなどを明らかにしている²¹⁾。

洋上太陽光発電基地構想が単なるアイディアに留まらないことを示すために残された課題は、水素の液化に要するエネルギーを評価することである。本論文はこの点を明らかにする。

まず、水素の液化に必要な水素と窒素の熱容量と液化熱量について述べる。

2. 水素および窒素の熱容量と液化するために取り除かなければならない熱量

絶対温度 $T(K)$ の気体を $T_0(K)$ に冷却するためには、この温度差に対応する気体の熱量 $Q_g(T, T_0)$ を系外に取り去らなければならない。それは定圧熱容量 $C_p(T)$ を使って、式(1)のように計算できる。

$$Q_g(T, T_0) = \int_{T_0}^T C_p(T) dT \quad (1)$$

液化には沸点 T_0 を基点としたこの熱量に加え、沸点での気化熱 Q_v を加えた熱量を系外に取り去らなければならない。 $Q_g(T, T_0)$ の添え字 g は気体を意味する。

次に、これらを水素と窒素に適用するが、水素から始める。

詳細な定圧熱容量は文献22)に見出されるのでこれを用いるが、それを $C_{p(H_2)}(T)$ と表す。また、 T_0 を水

素の液化温度20.268(K)としたときの $Q_{g(H_2)}(T, 20.268)$ は式(1)に従って計算する。この計算にあたって、 $C_{p(H_2)}(T)$ を絶対温度 T の多項式で近似する。結果は図1に示す。

なお、水素にはパラ水素とオルト水素があるが、常温ではパラ水素1/4、オルト水素3/4の割合で存在する。これをノーマル水素($n\text{-H}_2$)と呼んでいる。沸点ではパラ水素100%である。各温度において混合割合は決まっており、図中の(平衡 -H_2)は混合割合を加味した熱容量であることを示している。

$T(K)$ である水素を液化するために取り除かなければならない熱量 $Q_{L(H_2)}(T)$ は $Q_{g(H_2)}(T, 20.268)$ と気化熱 $Q_{v(H_2)}$ の和である。水素の気化熱は898.3(J/mol)であるから²³⁾、 $Q_{L(H_2)}(T)$ はつぎのように計算できる。

$$\begin{aligned} Q_{L(H_2)}(T) &= Q_{g(H_2)}(T, 20.268) + Q_{v(H_2)} \\ &= Q_{g(H_2)}(T, 20.268) + 898.3 \text{ (J/mol)} \end{aligned} \quad (2)$$

窒素の沸点である $T=77.35(K)$ のときの $Q_{L(H_2)}(T)$ は、 $Q_{g(H_2)}(77.35, 20.268)=1888.3(J/mol)$ であるので、2786.8(J/mol)となる。また、 $T=298.15(K)$ (摂氏25度)のときは、 $Q_{g(H_2)}(298.15, 20.268)=7977.5(J/mol)$ であるから、水素の $Q_{L(H_2)}(T)$ は8875.8(J/mol)となる。

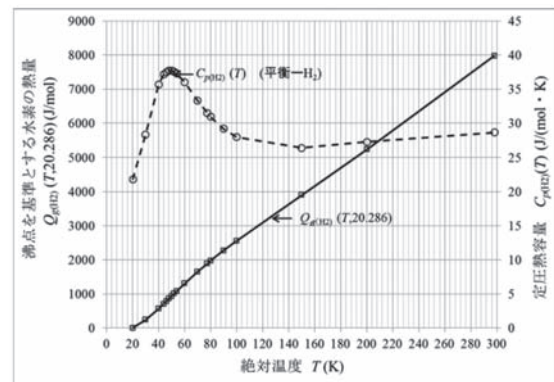


図1 水素の熱容量と沸点を基準とする気体熱量

窒素に移ろう。その定圧熱容量も文献22)に見出されるのでこれを用いるが、それを $C_{p(N_2)}(T)$ と表す。また、 T_0 を窒素の液化温度77.35(K)としたときの $Q_{g(N_2)}(T, 77.35)$ を式(1)に従って計算する。結果は図2に示す。水素と比較すると、その特性は単純である。

$T(K)$ である窒素を液化するために取り除かなければならない熱量 $Q_{L(N_2)}(T)$ は $Q_{g(N_2)}(T, 77.35)$ と気化熱 $Q_{v(N_2)}$ の和である。窒素の気化熱は5577.5(J/mol)であるか

ら、 $Q_{L(N_2)}(T)$ はつぎのように計算できる。

$$Q_{L(N_2)}(T) = Q_{g(N_2)}(T, 77.35) + Q_{v(N_2)} \quad (3)$$

$$= Q_{g(N_2)}(T, 77.35) + 5577.5 \text{ (J/mol)}$$

$T=298.15\text{(K)}$ (摂氏25度)のときは $Q_{g(N_2)}(298.15, 77.35) = 6385.6 \text{ (J/mol)}$ であるから、窒素の $Q_{L(N_2)}(T)$ は11963.1 (J/mol)である。

次節では液化機、冷凍機の熱力学を紹介する。

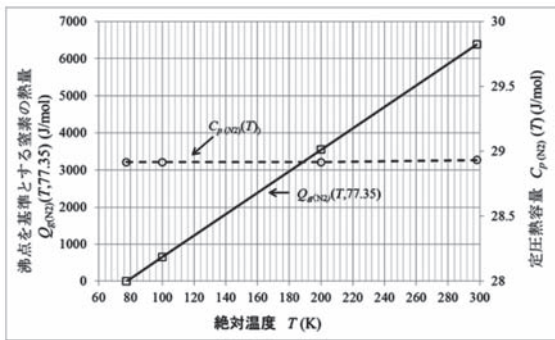


図2 窒素の熱容量と沸点を基準とする気体熱量

3. 液化機、冷凍機の熱力学

液化機、冷凍機は熱機関の一種である。それは、図3のように、外部から仕事(W_R)を与えて絶対温度 T_L の低熱源から熱(Q_L)を吸収して、絶対温度 T_H の高熱源へそれ(Q_H)を放出する。これら数量間には次の関係がある。熱力学第一法則 (エネルギー保存の法則) より、

$$Q_H = Q_L + W_R \quad (4)$$

となる。熱力学第二法則 (エントロピー増大の法則) から、

$$Q_H / T_H \geq Q_L / T_L \quad (5)$$

である。式(4)を式(5)に代入すると、次式が得られる。

$$W_R \geq Q_L \{ (T_H / T_L) - 1 \} \quad (6)$$

この式は次のように変形できる。

$$W_R / Q_L \geq (T_H / T_L) - 1 \quad (7)$$

等号は可逆サイクルの場合に成り立つ。通常は非可逆サイクルであるから、不等号である。

摂氏25度(298.15(K))の水素の $Q_{L(H_2)}(T)$ は、第2節

で明らかにしたように、8.8758 (kJ/mol)である。また、液化温度は20.268(K)である。そこで、 $T_H = 298.15\text{(K)}$ 、 $T_L = 20.268\text{(K)}$ および $Q_L = 8.8758 \text{ (kJ/mol)}$ とにおいて、式(7)に代入する。すると、 $W_R \geq 121.57\text{(kJ/mol)}$ が得られる。これ以上の熱量を注入して水素の液化が実現する。この熱量は、液化した水素から取り出せる利用可能なエネルギーが237.14(kJ/mol)であるから²¹⁾、その51.265% (=121.57/237.14)に相当する。

折角生産した水素エネルギーの半分以上が液化に使われてしまうことになる。これでは洋上太陽光発電基地構想は単なるアイディアに終わってしまう。そこで、この事態を回避するために2段階式液化機を導入するが、その解説を次節で行う。

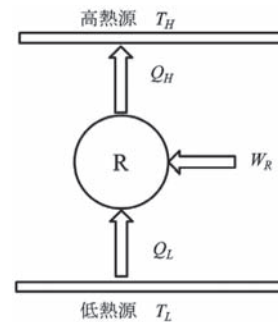


図3 冷凍機の原理

4. 2段階式水素液化機

1段階式の水素液化機の実効率は第3で明らかにした。本節では、図4に示す液化窒素冷凍機を加えた2段階式水素液化機について解説する。

まず、液化窒素冷凍機を説明する。それは窒素溜、圧縮機A、膨張弁A、液化窒素容器および熱交換器で構成されている。窒素溜から窒素が圧縮機Aに供給される。シリンダーを左側に押し込んでこれを加圧する。膨張弁Aを適切に開くと、窒素が液化窒素容器に向かって勢いよく断熱膨張をはじめ。すると窒素の温度が液化温度である77.35(K)に達し、液化窒素が容器内に生成される。液化窒素の体積は気体のその約1/650であるから、容器内の気圧はほぼ0気圧、すなわち真空になる。そのため、気体窒素の噴出が続き、液化窒素が継続して容器内に生成される。

容器および熱交換器内の温度は77.35(K)に保たれる。この空間を通るパイプに供給されている水素が、

窒素の気化熱によって、77.35(K)まで冷却される。気化された窒素はポンプを使って窒素溜りに集積される。これで窒素サイクルが一巡したことになり、窒素は循環して使用される。その機能は気体水素の冷却（予冷）であって、冷凍機なのである。

次に水素液化機の説明に移る。これは水素原料タンク、圧縮機B、膨張弁Bおよび液化水素容器で構成されている。熱交換器内で77.35(K)に冷却された水素は圧縮機Bで加圧されているので、膨張弁Bを適切に開くと、水素が液化水素容器に向かって勢いよく断熱膨張をはじめる。すると水素の温度が液化温度である20.268(K)に達し、液化水素が容器内に生成される。液化水素の体積は気体のその約1/780であるから、容器内の気圧はほぼ0気圧、すなわち真空になる。そのため、気体水素の噴出が続き、液化水素が継続して容器内に生成される。液化機では冷媒である水素を循環使用せず、系外にこれを取り出す。ここが窒素冷凍機と違っている。

南鳥島近海に設置される洋上太陽光発電基地ではこのようにして液化水素が生産されるが、それはタンカーで本土まで輸送される。

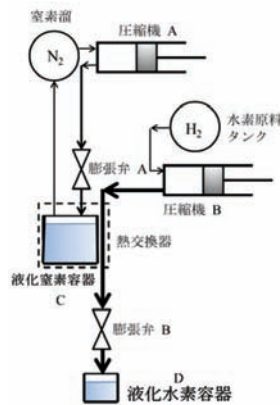


図4 2 段階水素液化機

5. 水素の液化

本節では、図4に示す2段階水素液化機を前提にして水素を液化するために必要な熱量を計算する。そのために必要な数値は第2節で明らかにされており、計算法は第3節に述べられているので、それに沿って計算を進める。

5.1 水素の液化熱量を計算するために必要な諸量

(窒素に関する量)

- ① 298.15(K)の窒素をその沸点温度である77.35(K)まで冷却するために取り除かなければならない熱量 $Q_{g(N_2)}(298.15, 77.35) = 6.3856 \text{ (kJ/mol)}$
- ② 窒素の気化熱 $Q_{v(N_2)} = 5.5775 \text{ (kJ/mol)}$
- ③ 298.15(K)の窒素をその沸点である77.35(K)まで冷却するために取り除かなければならない熱量 $Q_{L(N_2)}(298.15) = Q_{g(N_2)}(298.15, 77.35) + Q_{v(N_2)} = 11.9631 \text{ (kJ/mol)}$

(水素に関する量)

- ① 窒素の沸点温度($T = 77.35 \text{ (K)}$)まで冷却された水素をその沸点温度である20.268(K)まで冷却するために取り除かなければならない熱量 $Q_{g(H_2)}(77.35, 20.268) = 1.8883 \text{ (kJ/mol)}$
- ② 水素の気化熱(パラ水素) $Q_{v(H_2)} = 0.8983 \text{ (kJ/mol)}$
- ③ 77.35(K)から沸点である20.268(K)の液体水素にするまでに取り除かなければならない熱量 $Q_{L(H_2)}(77.35) = Q_{g(H_2)}(77.35, 20.268) + Q_{v(H_2)} = 2.7866 \text{ (kJ/mol)}$

(水素と窒素間に関する量)

- ① 298.15(K)の水素を窒素の沸点温度である77.35(K)まで冷却するために取り除かなければならない熱量 $Q_{g(H_2)}(298.15, 77.35) = 6.0892 \text{ (kJ/mol)}$
- ② 窒素の気化熱を使って水素1(mol)を298.15(K)から77.35(K)まで冷却するために必要な液体窒素のモル数 $= Q_{g(H_2)}(298.15, 77.35) / Q_{v(N_2)} = 6.0892 \text{ (kJ/mol)} / 5.5775 \text{ (kJ/mol)} = 1.0917$

5.2 水素の液化熱量

本節では第3節で得た知識を基にして議論する。図4を見れば、水素の液化には窒素の液化も同時に行わなければならない。必要な熱量は次の3つの部分に分けられる。

(1) 窒素の液化部分 (冷凍機部分)

298.15(K)の窒素を液化するために必要な熱量 $W_{R(N_2)}$ は $T_H = 298.1 \text{ (K)}$ 、 $T_L = 77.35 \text{ (K)}$ および $Q_L = Q_{L(N_2)}(298.15) = 11.963 \text{ (kJ/mol)}$ を式(7)に代入すれば得られる。

$$W_{R(N_2)} = 11.963 \times \{298.15 / 77.35 - 1\} = 34.149 \text{ (kJ/mol)}$$

(2) 水素の液化部分

77.35(K)の水素の液化に必要な熱量 $W_{R(H2)}$ は、 $T_H=77.35(K)$ 、 $T_L=20.268(K)$ および $Q_L=Q_{L(H2)}(77.35)=2.7866(kJ/mol)$ と置いて、式(7)に代入する。次の結果が得られる。

$$W_{R(H2)} = 7.8481(kJ/mol)$$

(3) 熱交換器部分

この部分では液化窒素の気化熱(5.5775(kJ/mol))を使って水素を298.15(K)から77.35(K)まで冷却する。そのために必要な液化窒素の必要モル数は、水素1(mol)あたり、第5.1節のとおり、1.0917(mol)である。

必要な数値はすべて揃ったので、水素1(mol)を液化するために必要な熱量 W_R をここで計算する。

$$W_R = W_{R(H2)} + 1.0917 \times W_{R(N2)} = 7.8481 + 1.0917 \times 34.149 = 45.129(kJ/mol)$$

これが所期の水素の液化熱量である。

図5には、図4に示す液化機各部の絶対温度が書き込んである。

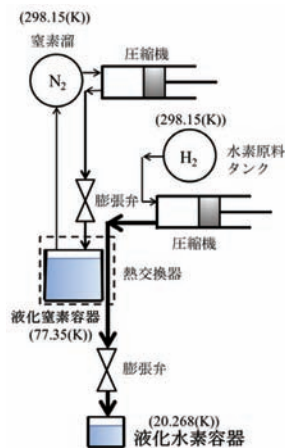


図5 2段階水素液化機と各部の絶対温度

5.3 水素の利用可能熱量に対する液化熱量の割合

298.15(K)での水素1(mol)から取り出せる利用可能な熱量は237.14(kJ/mol)であるから²¹⁾、水素1(mol)の液化に必要な液化熱量はその19.03(=45.129/237.14)(%)に相当する。18.7(%)という数値を見出すことができるので²⁴⁾、妥当な値と思われる。

図4の冷凍機部分を2段、3段とすれば、上記割合は減少するが、どの程度まで減少するであろうか。前述の文献には²⁴⁾、最小の割合として11.8(%)が示されているので、このあたりの割合まで低下させることが可能と考えられる。文献25)には実際的な数値として15(%)が上げられているので、本論文ではこの数値15(%)を採用することにする。

著者は洋上太陽光発電基地構想を提唱しているが²¹⁾、19.03(%)という数値はその実現可能性を支持していると考えられる。

6 洋上太陽光発電基地の維持・運用

6.1 洋上太陽光発電基地

洋上太陽光発電基地は、5000(m²)の正三角形サブユニットを図6のように2(km²)となるまで積み上げた(20段)強化プラスチック製のメガフロートを、基本ユニットとして構成する。これを南鳥島近海に設置するというのが、洋上太陽光発電基地構想である。サブユニット上には太陽電池パネルが敷き詰められていることは言うまでもない。

図7には最も実際的と考えられる6基の基本ユニットで構成された発電ユニット(12(km²))を示す。この構成は以前にも示したが²⁰⁾、相違点は各基本ユニットの先端部分に水の電気分解装置や水素の液化装置、そして貯留装置等を設置できる空間3(ha)を確保したことである。図7の中心部分は強固に造り上げて、これに太陽電池敷設部分を連結する。

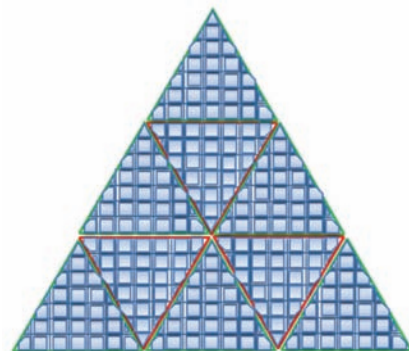


図6 サブユニットを3段積み上げた状態

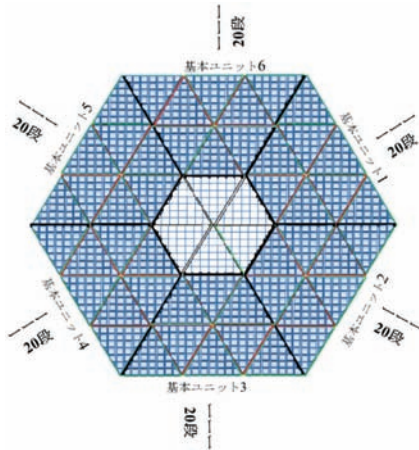


図7 基本ユニット6基で構成された発電ユニット

6.2 洋上太陽光発電基地の維持・運用に必要な熱量の、発生した水素から取り出せる熱量に対する割合

洋上太陽光発電基地構想の成否は、これを維持・運用のために消費する熱量が、発生した水素から取り出すことができる利用可能な熱量に比較して、実用的に十分に小さくなることである。

著者は、南鳥島・本土間の水・液化水素の輸送を担うタンカーの運航に要する熱量の割合は6(%)～9(%)程度、基地の潮流・風等による位置変動の修正に要する熱量の割合は1%程度であることを、明らかにしている²¹⁾。第5-3節において水素の液化に要する熱量は、生産される水素の利用可能熱量の15(%)であることを示した。基地の維持・運用に消費される熱量の生産される水素の利用可能熱量に対する割合は、これらを合算して、約25(%)であることが明らかになった。

いかにも大きな数値であるように思われるが、油田の採掘、精製、維持、輸送、分配などにも石油の有する熱量の約25(%)が消費されるといわれている²⁶⁾。洋上太陽光発電基地はこれと同程度なので、油田に取って代ることができるということになる。それどころか、CO₂を全く排出しないシステムが構成できるので、地球温暖化も防止できるというすぐれた特性も有している。洋上太陽光発電基地は21世紀を担う基盤技術足り得る資格を有している。

このようにして、洋上太陽光発電基地構想が単なるアイデアに留まらない内実を有していることを、本論文は数量的に明らかにした。

7. まとめ

本論文では、洋上太陽光発電基地構想が単なるアイデアではないことを示すために、水素の液化に要するエネルギーを評価している。

そのため、第2節では水素および窒素の熱容量と液化するために取り除かなければならない熱量を算出している。第3節では液化機、冷凍機が機能を果たすために最低投入しなければならない熱量の計算式を示している。第4節では、窒素冷凍機と水素液化機で構成される2段式水素液化機を取り上げているが、その働き方を解説している。第5節では、図4に示す2段式液化機を使用するときの、水素の液化熱量を計算している。気体状態での水素の温度が298.15(K)(=25(°C))であるとき、それが45.129(kJ/mol)であることを明らかにしている。温度が298.15(K)である水素1(mol)から取り出せる利用可能な熱量は237.14(kJ/mol)であるので、液化のために消費される熱量の割合は19.03(=45.129/237.14)(%)であることを明らかにしている。

水素液化のために消費される熱量の最小の割合を、11.8(%)と提示している文献もあるので、改善が期待できる。そこで、その割合を本論文では15(%)と想定した。

第6節では、基本ユニット6基で構成された発電ユニットの新しい構成を提案している。また、洋上太陽光発電基地の維持・運用するために必要な熱量は、生産された水素の利用可能熱量の約25(%)であることを明らかにしている。

この数値は、石油を基盤とする「石油社会」とほぼ同じである。この点からだけでも、洋上太陽光発電基地と燃料電池を物理基盤とする「水素社会」が「石油社会」に取って代わることができることを示している。それどころか、この社会は、温暖化防止を可能とするCO₂フリー社会であることそして脱原発社会であるとともに持続可能な社会であるという、21世紀に求められている諸特性をすべて具備している。付け加えるならば、油田は枯渇するが、洋上太陽光発電基地は、太陽がある限り、保守の作業が必要であるものの、枯渇しない。

参考文献

- 1) Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, and William W. Behrens III : The Limits to Growth", Universe Books(1972) , 「成長の限界」ーローマ・クラブ「人類の危機」レポートー ドネラ・H・メドウズ著、大来佐武郎監訳ダイヤモンド社(1972)
- 2) 環境展望台(国立環境研究所 環境情報メディア) 2015/5/6、アメリカ海洋大気庁、世界平均大気中CO₂濃度が2015年3月に初めて400ppmを超えたと報告
<http://tenbou.nies.go.jp/news/fnews/detail.php?i=16182>
- 3) 鈴木暢大、小嶋公史：国際エネルギー機関が、エネルギー起源CO₂の排出量増加が停止したと発表ー COP21への追い風となるか？、Climate Updates 2015/4/24, 地球環境戦略機関 (IEGS)
http://www.iges.or.jp/jp/climate_update/201504_suzuki_kojima.html
- 4) 草野清信、高根靖友：直流モータで駆動されるソーラーカーの設計と製作, 宮城教育大学紀要第35巻, pp.175~190 (2000)
- 5) 草野清信：直流モータで駆動されるソーラーカーの設計, 日本産業技術教育学会誌 Vol.44, No.4, pp.181~190(2001)
- 6) 草野清信、渡部 晃： 時速30kmで走行可能なソーラーカーの設計と製作, 宮城教育大学紀要第37巻, pp. 233~258(2002)
- 7) 草野清信：直流モータで駆動される電気自動車の電池容量の設計, 日本産業技術教育学会誌 Vol.46, No.3, pp.113~121 (2004)
- 8) 草野清信、安孫子 啓：直流直巻モータで駆動される電気自動車の設計手順, 日本産業技術教育学会誌 Vol.47, No.2, pp.109~118(2005)
- 9) 草野清信：電気自動車用回生ブレーキの電気・機械特性の数値解析, 宮城教育大学紀要第41巻, pp.107~121 (2006)
- 10) 草野清信：空気抵抗を考慮に入れた直流モータで駆動される高速電気自動車の解析的設計理論, 日本産業技術教育学会誌 Vol.49, No. 1, pp.11~23(2007)
- 11) 草野清信：空気抵抗を考慮に入れた直流直巻モータで駆動される電気自動車の運動解析, 宮城教育大学紀要第42巻, pp.123~135(2007)
- 12) 草野清信、竹本匡志：簡単な構成の回生ブレーキを装備した直流モータで駆動される電気自動車の過渡制動特性, 日本産業技術教育学会誌 Vol.50, No. 3, pp.151~163(2008)
- 13) 草野清信：DCモータ駆動電気自動車用電子式アクセルの電気・機械特性の数値解析, 宮城教育大学紀要第43巻, pp.149~160(2008)
- 14) 草野清信：DCモータ駆動電気自動車用電子式アクセルの設計法, 宮城教育大学紀要第44巻, pp.143~154 (2009)
- 15) 草野清信：電動機、発電機およびブレーキの三位一体系としての直流モータ エネルギー教育のための教材として, 日本産業技術教育学会誌 Vol.52, No.3, pp. 215~227(2010)
- 16) 草野清信：空気抵抗を考慮した三相誘導モータで駆動される電気自動車の理論過渡速度特性, 宮城教育大学紀要第46巻, pp.133~144 (2011)
- 17) 草野清信：持続可能な社会の建設 (I) 洋上太陽光発電基地真の環境教育に向けて, 宮城教育大学紀要第45巻, pp.165-179(2010)
- 18) 草野清信：3.11大震災によって海水面下にある農地の復興事業から原発・CO₂フリー社会の建設事業へ, 日本の科学者, Vol.47, No.5, pp.40-46(2012)
- 19) 草野清信：持続可能な社会の建設 (II)
ーLNGコンバインドサイクル発電ー
ー化石エネルギーから自然エネルギーへの移行の必然性ー
ー洋上太陽光発電基地ー、
宮城教育大学紀要第47巻、pp.193-205(2012)
- 20) 草野清信：持続可能な社会の建設 (III)
ー実効大気透過率ー
ーメガフロートの建造方法の提案ー
ー洋上太陽光発電基地ー
宮城教育大学紀要第48巻、pp.181-197 (2013)
- 21) 草野清信：持続可能な社会の建設 (IV)
ー脱原発・CO₂フリー社会ー
ー水素社会ー
ー洋上太陽光発電基地ー
宮城教育大学紀要第49巻、pp.173-198 (2014)
- 22) Ralph Hultgren, Pramod D. Desai, Donald T. Hawkins, Molly Gleiser, Kenneth K. Kelley, and Donald D. Wagman, "Selected Values of the Thermodynamic Properties of Elements", Hydrogen, American Society For Metals (1973)
- 23) 阿部勲夫：水素の物性, 水素エネルギーシステム, Vol.27, No.1, pp48-50(2002)
- 24) 一般財団法人日本船舶技術研究協会：液化水素技術国際ワークショップ 報告書 ,p.13 (2015年3月)
5-1 ドレスデン工科大学におけるIDEALHY プロジェクト

及び水素動向 Dr. Christoph Haberstroh (ドレスデン工科大学機械工学部エネルギー技術研究所 准教授)

液化エネルギーは最適化条件下では6.2kWh/kg (水素のエネルギーの18.7%)、既存技術では12~15kWh/kg (同36~45%) である。さらに高効率化が必要である。

3.9(kWh/kg) (11.8%, 液化のための最小エネルギー)

25) 塩沢文朗：環境と経済を両立させた持続可能な社会のあり方を考える 水素社会を拓くエネルギー・キャリアー（9）, 国際環境経済研究所（2015年2月18日）

26) 電気自動車ハンドブック編集委員会：電気自動車ハンドブック, p278, 丸善(2001)

(平成27年9月30日受理)