

# 物質循環から考える水素エネルギーシステム

藤井光貴、石原顕光\*、光島重徳、神谷信行、太田健一郎

横浜国立大学大学院工学研究院

240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

\*独立行政法人 科学技術振興機構

## Hydrogen energy system based on materials recycle

M.Fujii, A.Ishihara\*, S.Mitsushima, N.Kamiya and K.Ota

Department of Safety and Energy Engineering, Yokohama National University

76-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501, Japan

\*Japan Science and Technology Agency

In order to attain the sustainable growth of human beings, the clean energy system should be constructed. The system should not destroy the global environment. However, CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere is increasing and the green house effect is expected. In the paper, the global recycles of carbon and water were compared quantitatively. The existence of water is 27,000 times larger than that of carbon. The transportation of water is 3,160 times faster than that of carbon. These figures should show that the hydrogen from water might be a superior energy carrier, compared to the carbon.

**Key words** : hydrogen energy, entropy, water cycle

### 1. はじめに

21世紀になり地球規模で考えると環境破壊、人工爆発、資源枯渇と人類は大きな課題を抱えている。中でもクリーンエネルギーシステムの確立は緊急の課題である。このクリーンエネルギーシステムとして水素エネルギーシステムが期待されている。現在は一次エネルギーとして化石燃料が主に用いられている。太陽エネルギーが過去数十億年かかって地球に蓄積していった化石エネルギーを数百年のレベルで消費してしまうことは資源の面から許されることではない。また、化石エネルギーの大量消費は空気中のCO<sub>2</sub>濃度上昇をもたらし、地球温暖化に結びつくと言われている。人類の持続的成長を考えると脱化石エネルギーは、いずれは達成しなければならない課題である。また、エネルギー危機が叫ばれるときは、多くは化石エネルギー資源が枯渇することが議論される。石油の可採年数の話題はそれである。しかし、熱力学第一法則を考えるとエネルギーは保存されるはずである。エネルギー資源

の問題は真にはエントロピーの問題として捉える必要がある。熱力学第二法則によると全ての過程においてエントロピーは増大する。人類としてはこの増大するエントロピーにどう立ち向かうかを考える必要がある。

本研究においては人類の持続的成長のための究極のエネルギー像をエントロピーを基準に考えた。さらに、物質循環の立場から炭素と水の地球規模での循環を検討し、水素エネルギーシステムへの適合性を検討することを目的とした。

### 2. 物質循環とエントロピー

地球規模でのエネルギー問題はエントロピー増大の問題であると考えたとき、エントロピーの流れを検討することは重要である。ここで、熱力学的な観点から、エントロピーを用いて物質循環を考える。人類は、低エントロピー資源を消費することで活動している。消費の結果として、廃物、廃熱（高エントロピー）が生成される。ここで、低エントロピー資源とは、その資

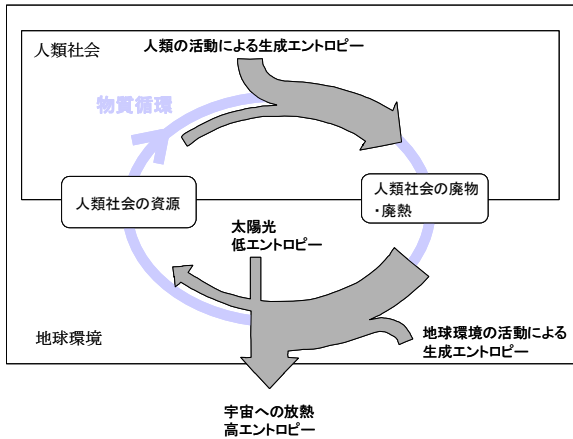


Fig.1 Entropy flow and materials cycle between human society and global environment.

源のエントロピーが小さく、拡散後のエントロピーが大きく、しかも使用が簡単という三条件をそなえた資源のことである<sup>1)</sup>。人類社会が定常状態を維持していくためには、この廃物、廃熱を定期的に外界に廃棄する必要がある。熱力学第二法則に基づき、全ての人類活動は必ずエントロピーを生成する。そして、生成したエントロピーは、必ず廃物、廃熱の形態をとる。地球環境は、熱に対しては常に開放状態にあるため、高エントロピーの廃熱に関しては、宇宙空間へ放熱として廃棄できる。一方、地球環境は物質に関してはほぼ閉じている。しかし、エントロピーは物質と熱の間で相互に変換可能であるため、高いエントロピーの廃物を熱に変換し、宇宙空間に廃棄することができる。この様子を模式的に Fig.1 に示す。廃棄場所が存在しないのに、廃物、廃熱を生産しつづければ、環境に残ることになる。物質は循環し、生成したエントロピーは全て熱の形で宇宙空間に放出する。これが人類社会を含めた理想の定常的な地球環境のあり方である。

ここで、現在の地球が廃棄しているエントロピー量  $\Delta S$  を求めてみる。太陽から地球に流入する熱量と地球から宇宙空間に放出される熱量は等しく、その熱量  $Q$  は  $1.24 \times 10^{14} \text{ kW}$  である。しかし温度は異なり、太陽表面温度  $T_H$  は  $5780 \text{ K}$ 、地球大気表面温度  $T_L$  は  $250 \text{ K}$  である。流入時のエントロピー量は  $\frac{Q}{T_H}$ 、放出時のエントロピー量は  $\frac{Q}{T_L}$  から得られ、地球に流入、放出さ

れるエントロピー量の差  $\Delta S$  は、

$$\Delta S = Q \left( \frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_H} \right) = 1.24 \times 10^{14} \left( \frac{1}{250} - \frac{1}{5780} \right) = 4.7 \times 10^{11} \text{ kJ/K} \cdot \text{s}$$

となる。これが現在の状態の地球環境が廃棄しているエントロピー量であり、また上限でもある。

### 3. 炭素の循環と水循環

現在、一次エネルギーとして化石エネルギーの中でも主に石油が使用されている。石油は低エントロピー物質であるが、それを燃焼、消費し最終的には、廃物、廃熱（高エントロピー）となる。これら廃物、廃熱を定期的に外界へ廃棄することで、人類社会は定常状態を維持しようとする。ここで地球上の炭素循環に注目する。Fig.2 に地球上の炭素循環の模式図を示す<sup>2)</sup>。化石燃料の燃焼により、年間  $5.5 \text{ Gt}$  の炭素が放出され、大気中の炭素は年間  $3.2 \text{ Gt}$  増加している。大気中の炭素存在量  $750 \text{ Gt}$  との比は、それぞれ  $0.7\%$ 、 $0.4\%$  と微小である。この増加が、地球温暖化に結びつくかどうかは必ずしも明らかでないが<sup>3)</sup>、化石燃料の消費によるものと仮定すると、高エントロピーの廃物 ( $\text{CO}_2$ ) が地球環境中に滞留していることとなる。数百年程度のスケールで考えた場合、炭素循環は定常状態を維持していないことになる。つまり、化石燃料を消費する社会は、エントロピーを定期的に廃棄する機能を持っていないシステムと言える。

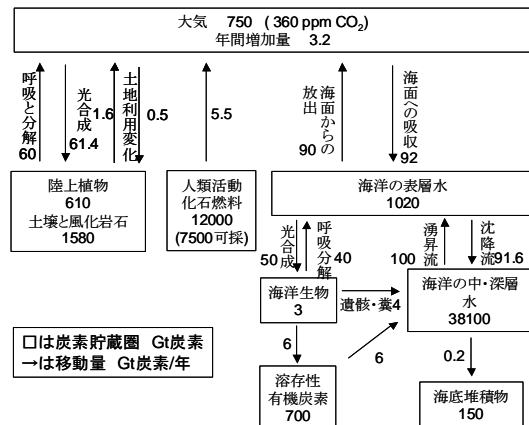


Fig.2 Schematic diagram of carbon cycle on the earth.

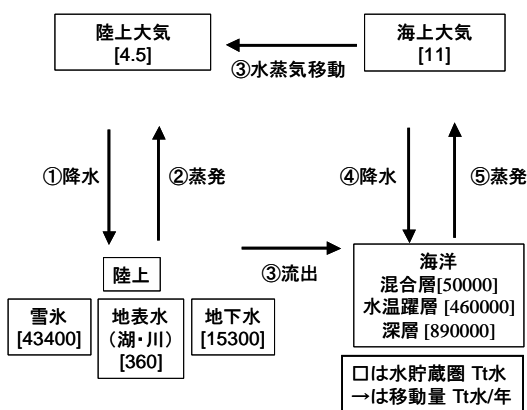


Fig.3 Schematic diagram of water cycle on the earth.

Table.1 Comparison of water and carbon cycle.

	炭素	水
全量	54000Gt炭素	1460000Tt水
大気中存在量	750Gt炭素	15500Gt水
大気からの年間移動量	157Gt炭素	496000Gt水
大気中の平均滞留時間	5年	10日

一方、人類社会の理想のエネルギーシステムを考えたとき、物質は必ず完全に循環して利用する必要がある。この際にはエネルギーが大なり小なり消費されるが、そのことから必ずエントロピーが生み出される。炭素に替わる物質循環として水を考えてみる。Fig.3に地球上の水循環の模式図を示す<sup>6)</sup>。図中の陸地・海洋降水量、陸地・海洋蒸発量、海洋-陸地間水蒸気移動量、陸地-海洋間流出量はTable.2に示す<sup>7)</sup>。現在の水の蒸発量は年間  $4.96 \times 10^{14}t$  であり<sup>10)</sup>、これらは当然降水量と等しい。平均滞留時間  $t_m$  は、領域内に存在する対象物質の全量  $M$  を単位時間あたりの供給量  $D$  で割

Table.2 Amount of flow of water on the earth<sup>7)</sup>.

研究者	発表年	①陸地降水量	②陸地蒸発量	③ 海洋-陸地間水蒸気移動 陸地-海洋間流出	④海洋降水量	⑤海洋蒸発量
		Tt/年	Tt/年	Tt/年	Tt/年	Tt/年
Budyko <sup>9)</sup>	1963	107	61	46/48	404	452
Mira Atlas <sup>9)</sup>	1964	108	72	36	412	448
Nace <sup>9)</sup>	1968	100	69	31	319	350
Lvovich <sup>9)</sup>	1969	109	72	37	411	448
Mather <sup>9)</sup>	1970	106	69	37	382	419
Baumgartner/Reichel <sup>9)</sup>	1973	111	71	40	385	425
Korzun <sup>9)</sup>	1974	119	72	47	459	506
Berner etal <sup>10)</sup>	1987	110	73	37	386	423
Riviere <sup>11)</sup>	1989	111	71	40	385	425
Jones <sup>12)</sup>	1997	111	71	40	-	-

ったもの、

$$t_m = \frac{M}{D} \text{ (s)}$$

で求めることができる。大気中の水は約10日で循環しており、炭素の場合は約5年である。

炭素と水循環の比較をTable.1に示す。まず炭素に比べて水の存在量は莫大に大きいことがわかる。全量での重量比で27,000倍、大気中の存在量も水の方が21倍多い。大気からの年間移動量(移動速度)は水の方が3160倍も大きく、このことから大気中の平均滞留時間に大きな違いが生じる。自然界における存在量、年間移動量が大きいことは、自然の循環に対して人類活動の影響を受けにくいといえるであろう。人類がエネルギーシステムに利用できる物質循環として、水循環がある。水は蒸発、降水の過程で人類活動の結果、生成した高エントロピーの廃熱を宇宙空間に放出でき、地球のエントロピー廃棄に重要な役割を果たしている<sup>4)</sup>。地球上に無尽蔵に存在する水は、エネルギー媒体としても重要である。

#### 4. 物質循環を満たした水素エネルギーシステム

自然の水循環に基づいたエネルギーシステムとして水素エネルギーシステムが持続的社会的実現のための優れたシステムに成り得ることが定量的に示される。このシステムは、理想的には太陽光エネルギーを元とする自然エネルギーを1次エネルギー(加工前のエネルギー資源)として利用し、水から水素と酸素を作り、その水素を2次エネルギー(加工・変換後のエネルギー)として利用することである。利用後は再び水あるいは水蒸気となり、自然の循環の一部をなす。廃物(高エントロピー)を廃棄、再生できる機能を持ったシス

テムである。理想の水素エネルギー社会とは水循環社会に他ならない。

ここで、人類のエネルギー消費が炭素、水循環に与える影響を比較する。炭素循環において、人類の化石燃料の消費による増加は 5.5Gt 炭素であり、これは大気中に存在する炭素量の 0.7%、大気からの年間移動量の 3.5%となる。

水循環と比較するために、水素の燃焼熱（高値）を 141.86kJ/g とする。Table.3 に太陽光エネルギー量と人類のエネルギー消費量を示す。人類のエネルギー消費量は  $1.9\sim 2.6 \times 10^{10}$  kW(2000 年)であるので、これに基づく水の生成は 38~52Gt となる。これは大気中に存在する水蒸気量 (15,500Gt) に対して約 0.3%と炭素の場合(0.7%)と同レベルであるが、大気からの年間移動量 (496,000Gt) に対しては約 0.01%と極めて微小な値となる。水の循環は、人類活動の影響は受けにくいと考えられる。

また、水は蒸発により地表の熱を奪うことができる。そこで、人類のエネルギー消費量と水の蒸発による地熱からの熱吸収とを比較する。蒸発による地表からの熱吸収は、 $0.83 \times 10^{14}$  kW なので、人類のエネルギー消費に基づく発熱量はその 0.02~0.03%に過ぎず、この場合も自然の水循環は、人類活動の影響を受けにくいことがわかる。したがって、人類は廃物として水を廃棄し、それが蒸発しても、それは地球環境における水循環の一部として取り込まれ、定常性は保証されるであろう。ただし、人類のエネルギー消費量から求めた水の生成量は、自然の水循環に比べて非常に微小であることを上記で述べたが、このことは必ずしも局所的な定常性を保証するものではない。陸地における局所的な気候・生態系にどのような影響を与えるかは未知数であり、今後の調査研究・予測が必要である。

太陽から地球表面に到達するエネルギーは  $1.24 \times 10^{14}$  kW であり、2000 年の人類のエネルギー消費量は、その 0.02%となる。従って量で考える限り、人類の利用するエネルギーは、太陽光に基づく自然エネルギーで十分賄えるはずである。例えば、効率 10%でエネルギー変換を行い、2000 年の人類のエネルギー消費量を賄うとする。平均日射量を  $0.16$  kW/m<sup>2</sup>すると<sup>7)</sup>、設置面積は  $2 \times 10^{12}$  m<sup>2</sup> となり、陸地面積の約 1%で足りる<sup>8)</sup>。しかし、自然エネルギーは、その低密度性や局在性、季節・時間変動性により、現段階で人類社会に必要な

Table.3 Energy of solar light and energy consumption of the mankind.

	エネルギー量	相対値	エントロピー量
太陽が放射するエネルギー	$3.85 \times 10^{25}$ kW	—	
地球の受ける太陽光エネルギー	$1.77 \times 10^{14}$ kW	143	$3.06 \times 10^{10}$ kW/K
地球表面に到達するエネルギー	$1.24 \times 10^{14}$ kW	100	$2.14 \times 10^{10}$ kW/K
地表で直接熱へ変換	$0.83 \times 10^{14}$ kW	67	$2.88 \times 10^{11}$ kW/K
海水や水による蓄熱	$0.41 \times 10^{14}$ kW	33	
光合成で固定されるエネルギー	$4\sim 5.3 \times 10^{10}$ kW	0.03~0.04	
人類のエネルギー消費量(2000年) (水生成量 38~52Gt)	$1.9\sim 2.6 \times 10^{10}$ kW	~0.02	$0.76\sim 1.04 \times 10^8$ kW/K
人類のエネルギー消費量(1998年) <sup>13)</sup> (水生成量 22Gt)	$1.1 \times 10^{10}$ kW	~0.01	$4.4 \times 10^7$ kW/K
人類のエネルギー消費量(1993年) <sup>14)</sup> (水生成量 22Gt)	$1.1 \times 10^{10}$ kW	~0.01	$4.4 \times 10^7$ kW/K

エネルギーを賄うことはできない。

人類のエネルギー消費量(2000 年)は、光合成で固定されるエネルギーに匹敵するほど大量に消費している。人類のエネルギー消費量が、すべて熱に変換され宇宙空間に廃棄される場合、そのエントロピー量  $\Delta S$  は  $0.76\sim 1.04 \times 10^8$  kW/K で、水蒸気により廃棄されるエントロピー量  $3.3 \times 10^{11}$  kW/K の 0.02~0.03 %と微小である。人類活動の規模は、エントロピー量で考えた場合は微小ではあるが、地表や大気物質の状況に影響するほど大きいと言われる<sup>9)</sup>。エネルギー消費は常に小さくしなければならない。

### 5. おわりに

今回、水循環による水素エネルギー社会の有益性を物質循環に基づいて検証した。まず、石油に代表される化石資源を消費した場合、生成される高エントロピーをもつ廃物は廃棄されず滞留し定常状態を維持していないと考えられる。廃棄場所の枯渇の問題も生じてくる。また、化石資源は、あと数十年で枯渇すると言われており、代替エネルギーシステムをその間に開発しなければならない。自然エネルギーを元にした水素エネルギーシステムは、廃物を廃棄、再生できる機能をもった理想的な代替エネルギーシステムであり、早い実現が望まれる。

### 参考文献

- 1) 資源物理学入門, 槌田敦, p161, 日本放送出版協会 (1982)

- 2) D.S.Schimel, Terrestrial ecosystems and the carbon cycle, *Global Change Biology*1, 77-91(1995)
- 3) 地球温暖化, 伊東公紀, 日本評論社 (2003)
- 4) 環境理解のための熱物理学, 白鳥紀一・中山正敏著, pp.197-199, 朝倉書店 (1995)
- 5) 基礎大気科学, 安田延壽 ,p.21, 朝倉書店 (1994)
- 6) 水の気象学, 武田喬男他, 東京大学出版会 (1992)
- 7) 地球環境工学ハンドブック編集委員会編, 地球環境工学ハンドブック, オーム社(1991)
- 8) 新エネルギーシステム—太陽エネルギーと水素への道—, J.O'M.Bockris, 技報堂出版(1975)
- 9) A.Baumgartner and E.Reichel, The World Water Balance, Elsevier Scientific Pub.co. (1975)
- 10) E.K.Berner and R.A.Berner, Global water cycle, Geochemistry and Environment, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1987)
- 11) J.W.M.La Riviere, 危機に瀕する水資源, サイエンス,19,52-60 (1989)
- 12) J.A.A.Jones, Global Hydrology:Processes, Resource and Environmental Management, p.399, Longman (1997)
- 13) United Nation Energy Statistics Yearbook (1998)
- 14) OECD/IEA World Energy Outlook 1996 Edition