

## 市民の立場からの寄稿

## エネルギー問題を俯瞰的に捉えるとは

松永 健一

技術士事務所PMPE 代表、技術士（機械、原子力・放射線、総合技術監理部門）

〒651-2102 兵庫県神戸市西区学園東町7-24-12

## 1. はじめに

世界の人口が、平成23年10月31日に70億人を突破したという。莫大なエネルギーを費やして得られる水と食糧の問題を含めて、エネルギー問題が21世紀の人類が直面するますます重要な課題になったといえよう。文明の基盤を担うエネルギー問題の解決には、科学技術の知識だけでなく、人文・社会科学が蓄積した視点や考察が必要であり、俯瞰的に捉える「エネルギー学」が求められている。

水素エネルギールネッサンス横浜宣言（平成16年7月1日）によれば、『人類の持続型成長を維持できるのは、再生可能エネルギーによって、水から水素を作り、利用する水素エネルギーシステム以外には考えられない。

（中略）水素エネルギーシステムは理論的に見れば理想的なシステムであろう。（中略）今こそ水素エネルギールネッサンスが必要である』[1]。

一方、原子力エネルギーは、質量からエネルギーを取り出す「理論的に見れば理想的なシステム」と言われ、東日本大震災（平成23年3月）の前には「原子力ルネッサンス」とも喧伝されていたが、大震災直後の福島第一原子力発電所事故の影響により、原子力発電所の新設や定期点検後の再開が不透明になり、社会的な受容が厳しい状況にある。本稿では「理論的に理想的なシステムとは何か」について、水素エネルギーと原子力エネルギーを例に、俯瞰的視点から、そもそも論を考えてみた。今後の水素エネルギー技術開発の方向性検討の一助となれば幸いである。

## 2. エネルギー、物質とは

総合科学技術会議の「環境エネルギー技術革新計画」WG中間とりまとめ（平成20年4月10日）における「我が国の革新的環境エネルギー技術の普及見通し」（図1.）によれば、革新的技術として2020年頃に「水素製造・輸送等」が、2030～2040年に「水素還元製鉄」と「水素燃

料飛行機」が、2050年頃に「高速増殖炉サイクル」とさらにその先に「核融合」が実現する見通しと書かれている[2]。この計画は、世界のCO<sub>2</sub>排出量半減（Cool Earth 50）を目標としたものであるが、水素と原子力エネルギーに関する技術が中長期的に期待されている。

そもそもエネルギーとは、物質とは何であろうか。エネルギーといえば、宇宙には「ダークエネルギー」という何かを満たしており、それにより宇宙の膨張は加速しているという。その発見は、平成23年のノーベル物理学賞に繋がった。

エネルギーと物質とは何かを、宇宙の誕生という視点から考えてみたい。宇宙の始まりは、物質も空間も時間もない「無」であったという説がある。そこから「真空のエネルギー」によって猛烈な加速膨張（インフレーション）が生じた後、超高温・超高密度の灼熱のビックバンが始まったという。その中で光子を含む大量の素粒子が生まれ、素粒子の中の「粒子」と「反粒子」（電子・陽電子、陽子・反陽子、中性子・反中性子）が互いに対生成と対消滅を繰り返す、エネルギーと物質は変換され合っていた。温度低下とともに対生成より対消滅が多くなって、反粒子は次第に消滅していき、反粒子より粒子の方が10億個に1個ほど多かったために、わずかに残った粒子が現在の物質（原子）の元となった。こうして、宇宙が持っていたエネルギーは、粒子の質量の形で物質の内部に蓄えられたのである。が、その物質も宇宙全体の4%程度に過ぎず、その他のほとんどは「ダークエネルギー」（全体の約73%）や「ダーク物質」（同約23%）という未知のものであるという。

宇宙は急激に膨張しながら冷えていき、ビックバンから約3分経って数億度になった時に、素粒子のうちクォークが集まった陽子や中性子が、さらに集まって水素やヘリウムの原子核がプラズマ状態で創られ始めた。この時期は、まだ高温なために大量の電子が自由に飛び回っていた。そのため、光（光子）はこの電子と衝突してま

つすぐに進めず、宇宙は不透明だったが、ビッグバンから約38万年後に3000度まで下がると電子は原子核に捉えられて、宇宙が電氣的に中性の水素原子とヘリウム原子で満たされ始めた。この結果、光は直進できるようになり、宇宙は透明度を増して「宇宙の晴れ上がり」が起こったという。この頃になると、引力により物質が集まって星や銀河を創ることが可能になった。原子力エネルギーのうち核融合反応の燃料や水素エネルギーの元となる水素原子は、このようにして生まれたのである。

では、原子力エネルギーのうち核分裂反応の燃料となるウラン等の重い物質は、どのようにして生まれたのであろうか。「宇宙の晴れ上がり」の後、恒星はその内部で水素の核融合反応によりヘリウムを生成し、その際に放出されるエネルギーで光り輝き、膨張しようとする圧力と星を縮めようとする重力が均衡して平衡を保つことになる。その後、星は周りの惑星を飲み込むほどに膨らみ、水素が燃え尽きると、星の中心部は重力を支えきれなくなり、自重で収縮して密度が高くなった結果、温度が上昇して、今度はヘリウムが核融合反応をして炭素や酸素ができることになる。太陽よりずっと重い星の場合、その中心部ではさらに核融合反応が進み、より重い元素ができる。このような繰り返しにより、重い星の中心部では核子の結合エネルギーが最も大きく、安定している鉄までは核融合反応で生まれた元素を次の燃料として、星は次々に新しい、より重い元素を生み出していた。ただし、太陽のような比較的軽い星の場合は、寿命が来るとゆっくりと自らの物質を宇宙空間に放出し、広がっていくことになる。

星は大きいほどその進化が早く、内部で核反応を急速に起こして短時間にエネルギーを使い果たし、不安定になって大爆発（超新星爆発）を起こす。鉄よりも重い物質は、超新星爆発のような大きなエネルギーによって、吸熱反応が起こらなければ、生まれなかった。地球を含む太陽系が誕生した約46億年前、その材料となった「かけら」を創り出し、宇宙にばら撒いた原因の一つは、この超新星爆発であった。

原子力エネルギーのうち核分裂反応の燃料となるウラン等の重い物質は、宇宙のビッグバンや超新星爆発の膨大なエネルギーを「質量」の形で蓄えたものであり、核分裂反応とは、平たく言えば、蓄えた「質量」から膨大なエネルギーを取り出すことである。したがって、化学反応でエネルギーを取り出す化石燃料や水素エネル

ギーとは、エネルギー密度の点で雲泥の差がある。その分、本質的に危険なものともいえる。それを人知の及ぶ範囲と判断するか否かが分かれ道である。ウラン等の重い元素の中に蓄えられたエネルギーも、惑星の中で核分裂反応によって解放される。地球の過去にも天然原子炉があった。結局のところ、現在行われている原子力発電は、自然から学び、自然を真似たものなのである [3]。

このような宇宙の歴史の結果、宇宙や地球はどのような元素でできているのであろうか。その元素の存在比（重量%）をみてみよう。宇宙（太陽も同じ）では、H 71%、He 27%、その他 2%であり、水素の量が圧倒的であるが、地球では、Fe 35%、O 28%、Mg 17%、Si 13%、Ni 2.7%、S 2.7%、Ca 0.6%、Al 0.4%、その他 0.6%であり、地球上にはH<sub>2</sub>ガスはほとんど存在しない[4]。これは、地球が太陽から離れた後、太陽からの熱で軽い元素の大半が吹き飛ばされたためと考えられている [3]。

さて、発電エネルギー資源を、その源泉（a. 1次エネルギー源、b. エネルギー発生原理）と資源由来（c.）で分類すると次のようになる。例えば、石炭、石油および天然ガスは過去の太陽エネルギーを蓄えたものであり、数億年～数千年をかけて蓄積した資源を、現在の世代だけで使い切って良いのかという課題があり、転換を図る必要がある。

#### (1) 地球以外の保有資源

- a. エネルギー源：① 過去の太陽光、② 現在の太陽光
- b. 発生原理：核融合
- c. 資源①：石炭、石油、天然ガス（火力発電）  
資源②：水、風、太陽光（各発電）

#### (2) 地球の保有資源 A, B

- A) a. エネルギー源：原始放射性物質
- b. 発生原理：③ 核分裂反応、④ 放射性崩壊
- c. 資源：③ U、Pu（原子炉）、④ 地熱（地熱発電）
- B) a. エネルギー源：資源物質
- b. 発生原理：⑤ 核融合、⑥ 化学反応
- c. 資源：⑤ 水素（核融合炉）、⑥ 水素（燃料電池）

### 3. なぜ水素や原子力エネルギーを選択するのか

エネルギーを選択する際に考慮すべき指標は、「パワー密度」「エネルギー密度」「コスト」「規模」の4つといわれる。「パワー・ハングリー」の著者ロバート・ブライスは「密度は環境にやさしい（グリーンである）」と繰り返し指摘する [5]。

水素や原子力エネルギーを選択する主な理由は、潜在的な資源量が多く、かつ取り出せるエネルギー量が大きい、もしくはエネルギー密度が高いことを基本として、取り出した後の環境負荷が少ないということであろう。

水素エネルギー源は、上述のように、天然の $H_2$ ガスが地球上にほとんど存在しない（大部分は水として存在する）ため、 $H$ を含む化合物から生成することになるが、 $H_2$ を酸化して水になる時に取り出せるエネルギーは化学反応の中では大きく、 $H_2$ も生成物も生物に無害であり、環境汚染物質を排出しない。さらに、人為的な活動による排出量は自然循環量（大気からの年間移動量とする）に対して0.0001程度で、自然の水循環にほとんど影響せず、また炭素の0.035に比べても優位である。

一方、原子力エネルギー源は、宇宙エネルギーを蓄えたものであるから、化学反応とはエネルギー密度の点で雲泥の差がある。潜在的な資源量としては、核分裂反応に必要な量は高速炉時代には数千年の利用が可能であり、核融合反応に必要な水素源の量は豊富にある。なお、核分裂については廃棄物の処理・処分の課題があるが、元々地殻は「原始放射性物質」（U-238等）やその娘核種で満ちており、現在でも放射線や崩壊熱（地熱の源）を出し続けているのであるから、本質的に解決策はあるはずである。『放射線という言葉は、おそらく最も誤解されている言葉の一つである。放射線は地球誕生の太古より存在している自然の一部であると科学者や技術者は認識しているが、多くの人々にとって放射線とは、近年の原子力時代がもたらした、20世紀の新しい力を象徴するものと思われることが多い』[6]。このことは、最近、原子力発電所事故に由来しない放射線が各地で見られて大きなニュースになっていることから推察される。

水素エネルギーも原子力エネルギーも、各々の専門家からは「理論的には理想的なエネルギーシステム」と考えられているようである。技術的にはそれなりの根拠もある。問題は、社会的受容という点ではなかろうか。悪貨は良貨を駆逐する。報道や教育のあり方は再考されねばならないが、技術面だけでは勝負にならないようにも思われる。

この項の最後に、忘れないように付け加えておく。冒頭に紹介した「人類の持続型成長を維持できるのは、再生可能エネルギーによって、水から水素を作り、利用する水素エネルギーシステム以外には考えられない」とい

う主張と、水素エネルギーで前提となっている「酸素はタダ」ということについてである。前者は、特に太陽光発電に対して発せられたものであろうが、「太陽エネルギーはタダで無尽蔵であるから、 $CO_2$ 問題、資源問題から脱原子力に至るまで、すべての問題は一挙に解決する」という思い込みはないだろうか。太陽エネルギーの総量は、人類が使うエネルギーの1万倍以上であるが、総量だけの視点からの『こうした楽観論に潜む根本的な誤りは、エネルギーの量と質の議論を混同し、それがもたらす環境負荷の存在を無視しているところにある。

（中略）地球に降り注ぐ太陽エネルギーは、地表を温め、大気を対流させ、水を循環させるだけでなく、ほとんどすべての生物が生きるためのエネルギーをも供給している。使われていないタダの太陽エネルギーなど本来存在しない。（中略）化石燃料と原子力に依存している現在以上に、大きく自然環境を損なう可能性も否定できない』[5]。

後者では、原始地球の大気は $CO_2$ であり、酸素は存在しなかったことを指摘したい。46億年の地球の歴史において、光化学細菌が浅海に出現し好気性の光化学生物に進化した約20億年前から大気中に酸素が出現した、すなわち生物が地球環境を大きく変えたのであって、酸素大気も変動する環境の一部であることに留意すべきである。

#### 4. エネルギー問題をめぐる「正義」とは

技術論だけでは勝負にならないとすれば、さらに根源となる「正義」や道徳的意味をはっきりさせる必要があるかも知れない。『これからの「正義」の話をしよう』の著者マイケル・サンデルが提示する「正義」へのアプローチは、幸福の最大化、自由の尊重、美德の促進の3つである。この著者の分析でも何が正義であるかを確定できていないが、選択肢の道徳的意味を明確にすることはできる[7]。

「幸福の最大化」については、エネルギーを使用することによる効用は明確だが、それによる悪影響（苦痛）の予測が難しいため過小評価されやすい。この評価と苦痛に対する現在と未来の分担割合が対立軸となる。

「自由の尊重」については、「正義とは、自由および個人の権利の尊重を意味する」と著者は言う。選択の自由を制限し、消費の抑制を強いることは、当該技術の革新を制限し経済を減速させる要因となり得る。エネルギー密度に劣る再生可能エネルギーの普及には、再生可能

