

論文

エネルギーと人類 —東日本大震災と原子力災害を踏まえて—

吉村高男*1

キーワード：エネルギー革命、東日本大震災、原子力災害、原子力平和利用、深宇宙

1. はじめに

エネルギー革命の歴史が、新たな科学技術の進展を促し、豊かな人類の文明を築いてきたと言える。その一方で、科学技術の進展は公害や環境汚染を引き起こし、地球有限系における持続可能なエネルギー資源の活用方法が現在模索されている。東日本大震災による原子力災害は、原子力発電の商業用スケールアップが、この地球上において、いかに馴染まないものであるかという原子力の本質を人類に見せつけたと言っても過言ではない。原子力の平和利用は、人類が将来、「深宇宙」に進出した際に本質的になるものである。

2. エネルギーとエネルギー革命

地震のエネルギーはマグニチュード (M) の単位で示される。エネルギーを E 、マグニチュードの大きさを M で示すと、それらの関係は次の通りである。

$$\log_{10} E = 4.8 + 1.5 M$$

東日本大震災は $M9.0$ であった。よって、上式より $2.0 \times 10^{18} \text{J}$ (1Mt 級水爆 480 個分) のエネルギーが生じたことになる。このエネルギー源は、地球内部におけるマントル対流の動きによって、地球表面を覆う太平洋プレートと北米プレートとの間に長年にわたり蓄えられたものである。東日本大震災は、そのエネルギーが一気に震源の深さ 24km で、東西 200km、南北 500km に渡り解放され、巨大な津波を引き起こし、太平洋沿岸部の大災害と福島原発における深刻な原子力災害を

もたらした。福島原発から環境中に放出された放射能の除染から、原子炉本体の廃炉に至るまでの過程には今後取り組むべき多くの難問が山積しており、科学技術の新たな挑戦が必要とされている。

ところで、エネルギー革命の変遷は、人間の生活水準と文明の進展に密接な関係がある。数百万年前に誕生した人類は自然環境に順応しながら生きていたが、約 50 万年前に火を手に入れた人類は、夜は明るく冬は暖かくでき、調理も多様化し、摂取するエネルギーが高まり、脳も必然的に発達した。木や木炭の積極的な使用は青銅や鉄の鑄造を可能にしたが、同時に森林、原生林の破壊につながった。1500 年代からイギリスを中心に、製塩、醸造、造船等の工場で石炭を用いたエネルギー転換が起こり、経済活動は飛躍的に発展した。1700 年代に入ると、コークスを使ったイギリスの製鉄業が飛躍的に伸び、ヨーロッパの森林乱伐の危機も救われた。1781 年には、ジェームス・ワットがピストンの上下運動を回転運動に変える画期的な蒸気機関を発明する。この蒸気エネルギーは、今日まで現代文明の象徴である電気をつくり出す主要なエネルギー媒体にもなっている。

さらに、電気の発明は、夜の照明、工場作業の効率化、電気鉄道等の出現をもたらした。電気と石油・ガスを組み合わせた新エネルギーシステムは、人類の生活様式や行動範囲を劇的に進展させた。石油製品は動力源だけでなく、ナイロン、テトロン、ポリエチレン、塩化ビニールなどに姿を変え、豊かな物質文明を築いている。

*1 山口福祉文化大学 ライフデザイン学部

しかし、石油、石炭などの化石エネルギーの使用は、温室効果や酸性雨等の原因となる環境汚染物質の発生に繋がり、また、それらの埋蔵量、可採年数は有限で、やがて枯渇する運命にある。原子力発電についても、現在の軽水炉を世界的に使い続けると、ウラン資源に限りがあり、可採年数は数十年と言われている。

原子力の活用に至った経緯は次の通りである。1930年代に原子核物理学が大いに進展し、中性子による核分裂の連鎖反応で、核分裂エネルギーが取り出せることが分かった。1940年代に入り原子爆弾が製造され、広島、長崎に投下される。この惨劇を通して、核兵器廃絶の世界的な運動が始まる。1946年、米国のトルーマン大統領は原爆の国際管理の構想を打ち出すが、米ソの冷戦構造の始まりで無と帰す。1949年、ソ連の原爆実験成功により、米国の原爆独占は4年で終わる。その後、他国でも原爆製造が始まる。さらに、1953年にはソ連による初の水爆実験が成功する。水爆の登場により、原爆製造で必要であった多量の軍事用ウランが不要となった。そこで、米国のアイゼンハワー大統領はウランを有効に消費するために、平和的な利用に切り替え、国連本部で1953年、歴史に残る「Atoms for Peace」の演説を行う。 ^{235}U は1gの核分裂で石炭約3t分、石油約2t分のエネルギーを生み出すという優れた面がある。しかし、核分裂反応を通して必然的に高い放射能を持った核分裂生成物質（死の灰）が産出される。後に述べるように、ここに大きな課題が生じる。

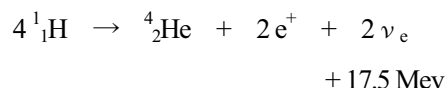
3. 電気エネルギーと物質の階層性

すでに述べてきたように、電気の発明は、夜の照明、工場作業の効率化、電気鉄道等の出現をもたらすと同時に、電気と石油・ガスを組み合わせた新エネルギーシステムは、人類の生活様式や行動範囲を劇的に進展させた。水力発電は水の位置エネルギーを運動エネルギーに変え、タービンを回転させることで発電を起こさせるという力学的エネルギーを活用するものである。火力発電は、石油・石炭・天然ガス等を燃焼させ、即

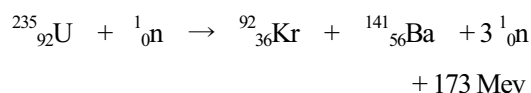
ち、燃焼による化学エネルギーを利用して水を水蒸気に変えて、それをタービンに吹き付けて回転させ発電を行うものである。原子力発電は水を水蒸気に変えるエネルギーとして核分裂エネルギーを利用するものである。一般に、物質の奥深いところの反応ほどエネルギー密度が増してくる。化学反応の素過程において発生するエネルギーは、例えば二酸化炭素が生じる際は次の通りである。



一方、原子核反応の素過程において発生するエネルギーについては、太陽など星の中で起こっている核融合反応がまず考えられる。その例として、4つ水素原子核が融合してヘリウムの原子核を生成する場合に発生するエネルギーは、次の通りである。



さらに、原子炉の中で起こっている核分裂反応について述べる。ウランの原子核が中性子を吸収して不安定になり、核分裂反応が起こる例について考える。核分裂は、一般に真っ二つに分裂しにくく、質量が非対称に分裂し易い（図1）。その際、2~3個の中性子を放出することが特徴的で、これが核分裂の連鎖反応を生じさせるもととなる。この中性子を制御棒等でコントロールして電力を取り出すものが原子力発電である。分裂した原子核は一般に放射能を帯びており、この核分裂生成物質が、俗に「死の灰」と呼ばれる。



このように、核エネルギーは化学エネルギーの一万倍から一億倍のエネルギーを放出する。

熱中性子による²³⁵Uの核分裂収率曲線

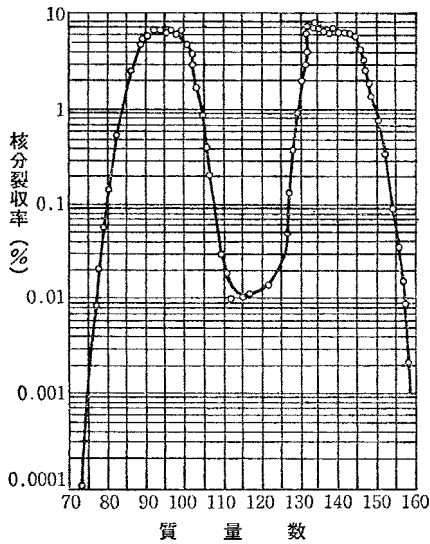


図1 核分裂生成物質の割合 (収率曲線)
 ~ ⁹⁰Sr と ¹³⁷Cs 周辺に2つの山がある。~

4. 原子力エネルギーの本質的課題

前章で述べてきた核融合と核分裂による原子力エネルギーの源は、図2に示しているように、原子核の結合エネルギーに起因する。

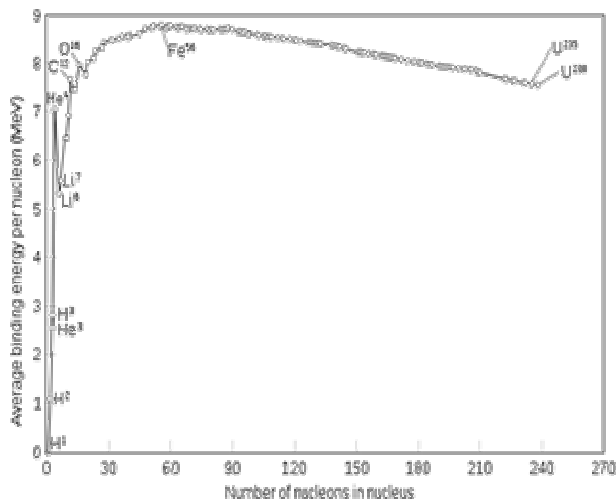


図2 原子核の結合エネルギー (一核子あたり)
 ~ ⁵⁶Fe が最も安定である。それより軽い方が核融合領域で、
 重い方が核分裂領域である。~

核融合エネルギーは、水素など軽い原子核が融合することでエネルギーが生じる現象で、太陽エネルギーをはじめ、宇宙における恒星の輝きはすべてこれである。地上では核融合反応を瞬時に起こさせる水爆は存在しているが、核融合炉で軽い原子核を制御して持続的に電力を取り出すことには成功していない。一方、核分裂エネルギーは、ウランなど重い原子核が分裂することによってエネルギーが生じる現象である。高濃縮された ²³⁵U や ²³⁹Pu などを瞬時のうちに核分裂による連鎖反応を起こさせるのが原爆である。低濃縮ウラン等を制御しながら核分裂させ、持続的にエネルギーを取り出すのが原子力発電である。核燃料、制御棒、減速材、冷却材、原子炉容器などの種類は多く存在しているが、日本をはじめ世界的に普及しているものは、減速材と冷却材に軽水を使用する軽水炉である。軽水炉には加圧水型と沸騰水型があり、今回事故のあった福島原発の型は沸騰水型であった。核分裂反応では必然的に高い放射能を持つ核分裂生成物質 (⁹⁰Sr、¹³¹I、¹³⁷Cs 等) や中性子を ²³⁸U が吸収して生じる超ウラン元素 (²³⁹Pu 等) が核燃料棒の中に貯まる。100 万 kw で 1 年間運転すると、広島原爆で生じた 1000 発分の放射能が核燃料棒の中に蓄積される。半減期も様々で、よく知られているように ²³⁹Pu は 24000 年にもなる。これらの放射能を的確に除去する技術を人類は持っておらず、長期間にわたりそれらを管理し続けることに大きな問題がある。さらに、すでに述べたように、現在の軽水炉を世界的に使い続けると、ウラン資源の可採年数にも限りがある。

よって、原子力エネルギーを太陽系の第三惑星である地球で使うことはもったいない。地球は太陽エネルギー密度が濃い軌道上に存在しているからである。太陽エネルギーを中心とした再生可能な持続性の優れたエネルギーの活用を積極的に図っていく必要がある。TMI (スリーマイルアイランド)、チェルノブイリ、福島での原発事故を経験した人類は、今こそ再生可能なエネルギー政策に地球的な規模で転換していく必要が

ある。地球は物質循環系において有限であるため、当然、化石燃料の使用も今後は控える必要がある。1977年に書かれた米国の Amory Lovins の著書「Soft Energy Path」^[1]が、今後の地球における一つの方向性を示していると言える。その中では、電力のエネルギー源として、石油不足を埋める石炭や原子力のハード・エネルギーに頼ると、廃棄物処理、核拡散、資本コストの異常な上昇等により結局行き詰まることになり、再生可能な太陽エネルギー、風力、海洋エネルギー等のソフト・エネルギーを基軸にして、供給増でなく省エネルギーによる需要減を目指すという「ソフト・エネルギー・パス」の選択が人類にとって最善の道であることが、エネルギー政策学、経済学、政治社会学等の総合的な立場から述べられている。

5. 宇宙における原子力の平和利用

すでに述べてきたように、アイゼンハワー大統領の演説「Atoms for Peace」は、地球上「on the Earth」における原子力の平和利用であり、このことは地球上に住む人類には基本的に相容れない議論である。宇宙的な視点から見た、地球軌道上におけるエネルギー資源は、あくまでも再生可能な太陽エネルギーが基本となる。将来的には「宇宙太陽光発電」^[2]が有効と考える。これについては、現在、日本が世界をリードしている。

現在、次に述べる3つのモデルについて研究が進められており、将来的には1つに絞られる予定である。2035年の実用化を目指しているが、我が国で原子力災害が起こった、このような状況なので、「宇宙太陽光発電」の実用化を早める必要がある。

まず、一つ目は、経済産業省所管の無人宇宙実験システム研究開発機構 (USEF) が考案したもので、発電電一体型パネルを使った宇宙太陽光発電システムである。発電電一体型パネルとは、太陽に向けた表側が太陽電池になっており、得られた直流電力をその裏側でマイクロ波に変換して、それを地上に向けて放射する装置である。

二つ目は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) に統合される前の宇宙開発事業団 (NASDA) 時代から設計されてきたもので、直径 8 km の反射鏡を 2 つ持ち、それらの間にある 2 枚の板状の太陽電池パネルに太陽光を集め、発電した電気をマイクロ波の送電アンテナから地上に送る装置である。

三つ目は、やはり宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が中心になって進めているもので、送電をレーザーで行うことが大きな特徴である。他のものに比べて小型化でき、レーザーをいかに効率よく生みだし、制御できるかにかかっていると見える。

ところで、化石燃料が存在せず、太陽エネルギーが薄くなるような「深宇宙」に人類が進出した際には、まさに、原子力エネルギーを活用することが本質的になる。地球軌道上における現在のような原子力の使用は、非常にもったいない。将来の人類のために、核燃料物質の国際的管理をすることを提案したい。核兵器の内部にある核物質も、核兵器解体を通して、将来において貴重な核燃料物質として有効に活用できる。そこで、「宇宙でこそ、原子力の平和利用を！」^[3]と提言をする。今後は「Atoms for Peace in Space」である。

なお、深宇宙における原子炉については、地上と同じ軽水炉では水の確保に問題がある。冷却の手法及び熱交換の循環媒体の物質を適切に選ぶ必要がある。宇宙での原子炉の型としては、核燃料としてウランのように猛毒のプルトニウムを生産しない、トリウムを活用による「熔融塩原子炉」や陽子加速器を利用し、制御が容易にできる「加速器駆動未臨界炉」などの活用が一つのヒントとなる。

6. 宇宙における核燃料物質の確保について

宇宙探査機や人工衛星には、半減期の長い放射性物質である ^{238}Pu や ^{210}Po の崩壊熱を熱電変換素子により電力に変換する原子力電池を利用しているものがある。最近では、人工衛星の打ち上げ失敗や墜落で放射性物質をまき散らすリスクがあるため、十分な太陽エネル

ギーが得られる地球軌道周辺では原子力電池を使用せず、太陽電池を使うことが一般的になっている。以前は、宇宙探査機が太陽エネルギー密度が薄くなる小惑星帯を越える軌道に入る場合には、原子力電池を搭載することが一般的であったが、最近では太陽電池の性能向上により、少なくとも木星軌道程度であれば、太陽電池で人工衛星の航行は可能になっている。

しかしながら、火星をはじめ、太陽系において太陽エネルギーの密度が薄くなる深宇宙に人類が進出して、宇宙移民地のスペースコロニーなどで生活を始める場合には、そこにおける生活基盤エネルギーを太陽エネルギーだけでは賄うことができない。そのような領域では、生命の歴史もなく化石燃料も期待できない。そのため、基本的に原子力エネルギーに頼らざるを得なくなる。原子力エネルギーの確保については、当初は地球から核燃料物質等を輸送・供給することも考えられるが、打ち上げ時の失敗において、放射性物質が地上へ落下して拡散する場合の危険性等を考えれば、太陽系内の各種天体におけるウラン等の核燃料物質の探査を積極的に行い、それらの確保に努めることが肝要である。

幸い、日本の種子島宇宙センターから、2007年9月に打ち上げた月探査機「かぐや」に搭載されたガンマ線スペクトロメーターにより、原子力発電の核燃料となるウランを月面において世界ではじめて検出した^[4]。月の重力は地球に比べて弱く、月面上から宇宙に向けた核燃料物質等の輸送・供給は比較的容易である。同様に、火星においても、旧ソ連が打ち上げた Mars5 号(1974年)や Phobos2 号(1989年)に搭載されたガンマ線スペクトロメーターによって、核燃料となるウランやトリウムを検出している^[5]。このように、将来的には、地球以外の天体で核燃料物質を発掘して、それらを深宇宙における人類の生活エネルギー源として活用することが期待できる。

7. おわりに

東日本大震災は、地震、津波、原発事故、放射能汚染等が複合した、人類が今まで経験したことのないプロセスを経た巨大な災害をもたらし、多くの犠牲者と避難民を出した。地球内部のエネルギーが集中する大きな4つのプレート境界域に日本列島は存在しており、今後とも巨大地震、津波は周期的に繰り返される。それぞれの地域の特性に合わせた、防災、減災対策を抜本的に行っていく必要がある。さらに、エネルギー政策についても、日本をはじめ、世界中の科学者・技術者の知恵を結集して、この地球上における持続可能なエネルギー源の効果的な確保と活用方法を早急に確立する必要がある。資源に限りがある化石燃料を、この地球上において今のペースで使用することは、地球環境にとっても問題がある。可採年数が比較的長い化石燃料の一つである石炭は深宇宙においても活用が可能である。すでに議論してきたように、限られたウラン燃料等をこのペースで使用することは、本当にもったいないことである^[6]。さらに、それらの使用によって生じる核廃棄物の処理・処分を、この地球上において、私達の子孫に委ねるということは極めて許し難いことである。

【参考文献】

- [1]Amory Lovins ; ソフト・エネルギー・パス, 時事通信社, 1977
- [2]NHK「サイエンス ZERO」取材班 ; 宇宙太陽光発電に挑む, NHK 出版, 2011
- [3]吉村高男 ; 核兵器解体と宇宙での原子力の平和利用, 日本天文学会誌「天文月報」 Vol.86, 6, 256, 1993
- [4]月面探査衛星「かぐや」 ; 月面からウランを検出 (<http://w.w.wsorae.jp/031007/3108.html>)
- [5]日本火山学会 月・惑星火山ワーキンググループ ; 惑星火山学入門, 日本火山学会, 1995
- [6]吉村高男 ; 深宇宙における原子力の平和利用, 日本物理学会中国・四国支部学術講演会講演予稿集, P125, 2012

The Development of Energy and Humankind —Based on the Huge Earthquake of East Japan and the Nuclear Disaster—

Takao YOSHIMURA

Abstract

The Great East Japan Earthquake, Mag. 9.0, occurred at 14:46 JST on Friday, March 11, 2011. It was the most powerful one ever hit Japan. The earthquake triggered powerful tsunami waves that reached the heights of up to 40.5 meters in Miyako, Iwate Prefecture. The tsunami caused a number of nuclear accidents, primarily level 7 meltdowns at three reactors in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants; at least three nuclear reactors suffered explosions due to the hydrogen gas generated after cooling system failures. The radioactive leakage from the power plants was occurred by nuclear disaster. Over 200,000 people were evacuated. When the normal operation of the power plant works, a great many radioactive wastes are generated in the nuclear fuel rods. When the big disaster of nuclear power plant breaks out, we can't avoid a great radioactive leakage.

We review a brief history of the development of energy. The sun is the oldest source of energy. It has provided heat and light. Plants and trees, which provide energy in numerous ways, gain their nourishment from the sun. Wood was burned for warmth, light, and for preparing food. By the sixteenth century, Great Britain having so few trees they began to use coal. Coal, oil and gas are called fossil fuels as they are extracted from fossilized plant and animal material from deep under the ground. The earth took 500 million years to produce fossil fuels. Humans have severely depleted them in just over one hundred years, a rate that is 50 million times greater than the rate at which they are formed. While fossil fuels are the main source of energy, another energy sources today is nuclear power. After ^{235}U which is nuclear fuel undergoes nuclear fission, however, it becomes a highly radioactive waste material that is extremely difficult to dispose it safely. So, we do not need atoms for peace “on the earth”. We need atoms for peace “in deep space” since there are no fossil fuels and few solar energy in deep space. Only nuclear fuel is valid for us when we live in deep space.

In future we must use a renewable energy on the earth. The renewable energy does not deplete natural resources and creates no or few pollution when generated. Today we are making a unique challenge to supply the renewable energy to entire populations.