

## ■ 論 説 ■

## 人類社会の発展とエネルギー利用

A Historical View of Technological Revolution  
and the Impact of Energy Use

鈴木 篤 之\*

Atsuyuki Suzuki

## 1. エネルギーと技術革新

人類がいわゆるエネルギーを利用しはじめたのは火の発見以来とするのが通説である。数十万年前とも百数十万年前ともいわれる。火を利用するようになり人類は他の種に対し決定的な優位性をもつことになった。人類社会の発展はエネルギー利用の進歩とともにあったといっても過言ではない。

本稿では、そのような人類社会の発展とエネルギー利用との関係を、科学技術の発展の流れとの関連に着目しながら論じてみたい。

人類の文化史では、石器時代から青銅器時代を経て鉄器時代に至ると、普通、されているが、冶金学的立場からすれば、青銅器時代の以前から鉄や銅の技術はあったと考える方が自然であるといわれている。青銅つまり銅と錫の合金をつくるためには銅そのものを製錬する必要があり、鉱石の還元に必要な温度が銅に比べてずっと低くてすむ鉄の製錬技術はその頃既にあったはずであると考えられている。実際、紀元前4000年から3000年頃には鉄が利用されていたと考えられる遺跡も残されている。

石器時代の石や骨にかわって鉄という金属が登場したことは、人類の文化史においてきわめて重要な意味をもっている。農具の性能向上により農業の生産性が著しく上がり、狩猟の技術も格段に進歩した。また、剣や槍、大砲として戦いの道具に利用され、鉄は人類にとって欠かせない物となった。

ところが、古代や中世の製鉄技術では十分に高い温度が得られず、高品位の鉄はつくりにくかった。鉱石を完全に溶かすことができないので、必要な純度の鉄をつくるためには加熱と鍛錬を繰り返す必要があり、量的にも質的にも限界があった。

いわゆる溶鉱炉による銑鉄の量産が可能になったの

は14世紀になり、送風用ふいごに水力を用いるようになってからである。その後、イギリスを中心に急速に製鉄業が進んだ。燃料と還元剤には木炭が使われ、動力源として河川を必要としていた。イギリスでは、17世紀には、このため森林資源が枯渇し、製鉄業は危機に陥っていたといわれている。

この危機を救ったのが、産業革命の発端となったワットの蒸気機関とダービー父子のコークス高炉法の発明であった。水車にかわって蒸気機関が送風用動力に用いられ、木炭にかわって石炭が燃料及び還元剤として利用されるようになり、製鉄業は、森林資源と水質源の制約から解放され、世界中に一気に広がっていった。蒸気機関の普及と石炭の利用拡大は産業革命の世界的浸透にとっていわば車の両輪のようなものであった。製鉄技術の発展の歴史は、エネルギーの利用が技術の発展とその社会への浸透にとっていかに重要な役割を担っているかを示している点できわめて例示的である。

## 2. 技術パラダイムと石油文明

アメリカの科学思想家であるクーンは、科学の発展過程には、単に連続的な経験や積み重ねに基づくばかりでなくそれらの枠を越えた不連続的なものがあることを指摘し、その不連続的变化を旧パラダイムから新パラダイムへの変化として科学革命におけるパラダイム概念を初めて提唱した。クーンのパラダイム概念は、専ら科学の分野についてであったが、それを技術分野に拡張するならば、ワットの蒸気機関は、その代表的事例ということになる。

新しい技術パラダイムを形成したのもとして自動車もあげられる。自動車文明が本格化したのは今世紀に入ってからであるが、その革命的普及を可能にした要因には、勿論、石油の利便性がある。石油がなければ今日程の自動車の隆盛は期待できなかったのではない。石油は、自動車ばかりか空や海の交通を日常化さ

\* 東京大学工学部原子力工学科教授

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

せ、さらには化学工業に決定的インパクトを与えた。石油文明もまた新しいパラダイムを創成したといつてよいであろう。石油が人類社会の発展に与えた影響の大きさは計り知れないものがある。

しかし、その石油文明がこのまま続いてくれるか？というほとんどの人がそれに疑問をはさむであろう。続くべきではないというべきかも知れない。

その最初の兆しが、既に、70年代の2度の石油危機となって表われた。石油の飛び抜けた利便性は世界的消費量をあまりに急速に増大させ、それにブレーキをかけるためには不連続的価格上昇によるほかはなかったというのが石油危機であった。それは、また、石油価格とコストの決定的乖離を招き、石油価格を国際政治の場にひきずり出した。

しかし、長期的視野からすれば、「資源はあるから使うのではなくいつでも大切に使う」ことの重要性を価格という信号にのせて世界中に周知させたという点で、石油危機はまことに教訓的であった。石油価格は市場経済メカニズムが作用し難く政治的に設定され易いことからその非合理性の指摘されることがむしろ多いが、資源の希少性というより貴重性を反映しているという点ではむしろ合理的といえるかも知れない。

第2の兆しは、最近の地球環境問題に対する関心の高まりである。炭酸ガスによる地球温暖化の可能性が科学者達によって指摘されたのは何も最近のことではない。もう数10年以上も前からである。炭酸ガスの地球循環現象に関する研究には長時間を要し、なお不明の点が少なくないので、最近になって温暖化の可能性が高まったということではなさそうである。にもかかわらず、その問題の重要性が広く認識され始めた背景の一つには、地球温暖化現象の時定数が長く、その現象の進行がゆっくりであると同時に解決にも時間がかかり出来るだけ早く何らかの行動をおこした方が得策であると思われ出したことがあるようにみうけられる。

炭酸ガス・サイクルの時定数は確かに長い。今日の大気中炭酸ガスの数10%は産業革命来のものであると推定されている。産業革命以来の石炭の大量利用と自動車文明の勃興以来の石油の爆発的利用の長期的つけが、今、大気中に貯まっていることだけは確かである。

炭酸ガスの生成が炭素の燃焼反応によることを考えれば、その成因は、石炭の前の木炭や薪の利用にまでさかのぼらなければならない。それは数10万年前の「火の発見」にまでさかのぼることになる。

つまり、人類は、薪・木炭・石炭・石油・天然ガスとエネルギー源を変え、多様化することによって新しいパラダイムともいえる技術文明を創成してきたが、炭素を燃やしてエネルギーを得ているという点では、数10万年来何ら変わることがなかったのである。その結果、地球環境をいかに護るかという大きな宿題を与えられているのである。来世紀は、この宿題に何らかの解答を用意せざるを得ないのではなからうか。

この点でまず第一に指摘されていることは省エネルギーである。エネルギー消費を出来るだけ抑え環境に与える影響を出来るだけ低減化する努力はいつの時代にも重要であるが、今後は益々その重要性が増して来る。

ところで、わが国の現在のエネルギー消費水準は、おおよそ、石炭に換算して国民1人当たり日量約10リットルである。車の走行距離に換算すると100キロメートル程度にすぎない。したがって、この水準を大幅に節減することは決して容易ではない。世界の消費水準はこの値よりさらに低いところであるから、省エネルギーにより世界全体のエネルギー消費を抑え、それによって地球環境問題を解決するとの考え方には自ずと限界がありそうである。

需要面からの解決だけでは不十分であるとすれば、次は供給面である。この点からまず考慮されるべき選択は、太陽エネルギーという循環型の自然エネルギーを利用していくことである。その場合の太陽エネルギーとは、太陽熱や太陽光などの直接的エネルギーはもとより、水力、風力、海洋温度差などの間接的エネルギーもすべて含まれることになる。

これらのエネルギー利用はこれまでも考えられて来ていた。農耕文明以来とすれば約1万年前からである。しかし、製鉄業の例をみるまでもなく、それには限界があることが歴史的に明らかにされている。太陽電池などの新技術によって新しい利用形態を開発していくことは重要であるが、単位土地面積当たりのエネルギー密度が低く気紛れであるという点は、いつでも必要なときに必要な量を必要な形で供給してほしいとする需要家の要求を満たす上で本質的かつ致命的弱点といわざるを得ないであろう。

### 3. 量子時代と原子力

炭素資源にかわる新しいエネルギー源を太陽エネルギー以外にも求めざるを得ないとすれば、現在のところ原子力が最も有力なエネルギーである。今回のヒュ

表1 電気工学, エネルギー工学, 機械工学における科学技術革命の歴史

技術革命	第1次 (18世紀末~19世紀)	第2次 (19世紀末~20世紀半)	第3次 (20世紀後半)	第4次 (20世紀末~21世紀)
基礎科学	古典力学 (ニュートン) — 熱力学 (ケルビン) — 電磁気学 (マクスウェル) — 原子 (ドルトン) — 周期表 (メンデレーエフ)	—— 相対性理論 (アインシュタイン) — 統計熱力学 (ボルツマン) — —— 電子 (トムソン) ——	—— 非平衡熱力学 (オンサーガー) —— 量子力学 (ハイゼンベルグ) (シュレジンガー) — —— 中性子 (チャドウィック) ——	統一理論  素粒子・基本粒子
電気工学 電子工学	電池・電磁石	真空管 電信・電話 ラジオ 水銀灯	半導体・IC コンピュータ テレビ・レーダー レーザー	量子化素子 スーパーコンピュータ 光通信
エネルギー工学	[石炭] 蒸気機関	[石油・天然ガス] 内燃機関	超伝導 (核融合) 原子力 (軽水炉) ジェットエンジン	高温超伝導 (常温核融合?) 原子力 (高速炉) 磁気浮上
機械工学 生産工学	蒸気機関車 鉱山機械・紡織機	自動車・プロペラ機 工作機械	ジェット機・ロケット ロボット 数値制御	スペースシャトル 超精密加工 自律機械

ーストン・サミットの合意においてもそのことが指摘されている。今後の原子力開発に取り組んで行くに当たっては、このようなグローバルな視点が重要であるように思う。

石油文明にかわって原子力文明が自然に来るという発想は単純すぎる。原子力には、石油とはちがった意味でいくつかの困難があり、また、石油が今日果たしている役割を現在の原子力がそのまま果たしてくれるとも思えないからである。原子力の発見とその社会的利用が、今日の石油文明ほどの社会的インパクトを将来的に与えられるかどうかは、それが新しい技術パラダイムを創成できるかどうかにかかっているのである。

表1を見てほしい。17世紀末から18世紀にかけての産業革命以降、それまでの科学技術分野における理論及び工学的技術の変遷をごく要約的にまとめたものである。ここ200~300年間の間に科学技術が目まぐるしいほどの発展を示して来ていることを読みとることができる。この発展の流れを基礎科学的にみれば、ニュートンの古典力学からアインシュタインの相対論やハイゼンベルグの量子力学へと転回し、量子時代を迎えたことになる。そしてその転回のきっかけとなったのが前世紀末のベクレルやキュリー夫人による放射線や放射能の発見であり、トムソンによる電子の発見であった。これらの発見は、相対性理論や量子力学の誕生につながり、それまでの自然科学観を根底から変えてしまった。それによって、電気・電子工学や機械工学の分野はもとより、物質科学や材料科学などの面でも

目覚ましい革新的技術が開発されるようになった。まさに新しい一大パラダイムの誕生である。

たとえば、半導体やレーザーは量子時代の代表的革新技術である。真空管から半導体への転換や水銀灯からレーザーへの転換は、その性能において桁違いの向上をもたらすまことに不連続的な革命的進歩、つまり新しい技術パラダイムを創成しつつある。原子力も同じように、相対性理論や量子力学に基づくエネルギーである。そして、それは、少なくとも潜在的には、同じような新しい技術パラダイムを生む可能性がある。火力から原子力への転換もまた、エネルギーの生産性という点で火力とは比較できないほどの飛躍的な進歩であるからである。このことは、火力に比べて、消費する資源量も発生する廃棄物量も圧倒的に少なく、「資源を大切に環境も護る」という来世紀に向けての時代的要請に正に適合していることを意味している。

原子力のこの潜在性をいかしきれないでいる根源は、いうまでもなく放射能問題にある。火力に比べて放射能もまた桁違いに高いからである。しかし、放射能はもともと地球上に広く存在するものであり、その性質がよくわかっていること、測定精度が高くその存在を検知し易いこと、放射能は高くともその量はごくわずかであること、などからすれば技術的に十分対応できるものである。

問題は、技術的というよりむしろ社会的なものである。放射線や放射能に対しては、もともと、心理的な恐怖感があるからである。たとえば、86年のチェルノ

ブイル事故が88年の北海油田の事故などと比較してその実際の直接的被害の大きさ以上に大きな事故として扱われたのも、その背景にこのことがあるからである。原子力の事故では、放射線安全の観点から将来の晩発的影響等についても議論されるが、それは安全上の保守的仮説に基づき推論されているのであって、実際にそうなると予測されているのではない。このような専門的議論が、原子力では一般の人々に誇大に伝聞され易いこともこのことと密接に関連している。原子力が真に社会に定着して行くためには、この心理的恐怖感が解消される必要がある。原子力施設で働いている人々など放射線や放射能と実際につきあったことのある人々の多くはそのような恐怖感を抱かなくなっていることや、病院などの医療機関において放射線や放射能をつかった診療を受けている人々が年々増えていることなどを考えると、そのような時期がいずれ来る可能性は十分あるように思われる。

#### 4. 環境主義と構造変化

科学技術が進歩した結果、目覚ましい経済的繁栄を遂げつつある。反面、地球環境問題のような深刻な問題を惹き起こしむしろ世界は終焉に向かってしていると警告する識者もないわけではない。ワットの蒸気機関やダービー父子のークス高炉法は石炭の利用を可能にし森林資源の枯渇問題を救ったが、また別の環境問題を惹き起こした。今後の技術開発に当たってはこの轍を踏まないようにすることが大切である。

アメリカの経済学者、ガルブレイスは、これからは資本主義でも社会主義でもない環境主義であると唱える。経済的に恵まれてくるにつれ人々の関心は環境保護に向けられるようになる。森林資源の保護にGNPの1%をつぎ込むべきだと主張する党首がいるほどである。

いま、一つの仮説として、一人当たりエネルギー消費量はそれぞれの人の生活水準の程度を表わし、それが高い程環境保全への関心が高かったがってそのためのコストを社会的費用としてより多く負担せざるを得

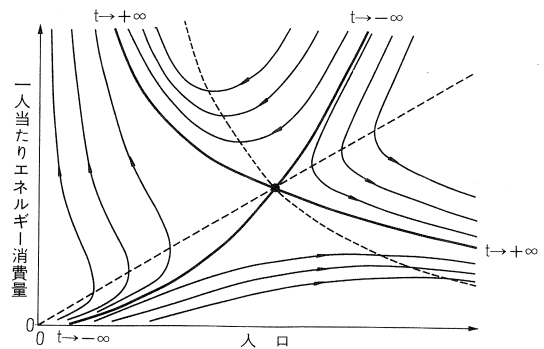


図-1 エネルギー先進国の長期エネルギー・システム・ダイナミックス

なくなると考えてみよう。と同時に、最近の先進国における人口の伸びの停滞も一人当たりエネルギー消費量の水準の高さと関連があると考えてみよう。図-1は、そのような仮定の下に先進国のエネルギーシステムの長期的ダイナミックスをモデル化した結果であり、興味あるシステム構造を示している。つまり、これらの国々や社会が行き着くところは、結局、個々の人のエネルギー消費量を抑えつつ人口の伸びを維持するか、個人個人の生活水準を高くするために人口を減らすかのいずれかに向かわざるを得ないことになる。いわゆる共存共栄社会を維持することは難しい。

もとより、これは一つのモデルにすぎないが、今後の人類社会の発展にとっては、これまでのエネルギーシステムの構造そのものを変えて行く必要があることを示唆している点で注目し値する。環境主義は人口の伸びやエネルギー消費の伸びを抑える。しかし、全球的に考えるならば、一人当たりのエネルギー消費量を伸ばしつつ人口も適度に増加して行くことが望ましい。そのためには、資源と環境を保護しつつそれらを達成する技術の開発が不可欠であるように思われる。

「地球に優しい…」が最近のはやり言葉である。それを単なるはやりには終わらせないためには、革新的技術による構造的変革が必要であり、その点でのエネルギー技術者への期待はまことに大きいものがある。