

# 文明と動力エネルギーの私的総論

Private Review on Civilization and Power

一 色 尚 次\*

Naotsugu Isshiki

## 1. はじめに

文明の発達とは動力の発達そのものであるとよい。古代のナイルや黄河文明の特長は人畜の動力の集中利用にあって、ピラミッドや長城の上にその跡をとどめている。現在においては、発電と輸送の動力がその国の文明の度合いを示すようである。

しかし真の文明とは何かを問うときはまた別の問題が生じよう。そしてここでは、筆者が過去50年に経験した動力とそのエネルギーの技術の栄枯盛衰、そして資源、環境、人口の三つのショックの待つ未来への展望に関して、とくに新エネルギー動力の開発に努力を続ける一人の研究者兼教育者の私的、経験的立場からの感想と抱負を述べてみたい。

## 2. 私の動力とエネルギー技術自分史

筆者は戦中から現在に到る五十年以上を、国立研究所・大学を経て、身をもって動力とエネルギーの変遷を体験して来た。勿論多くの先輩を措いて筆者が語るのは潜越の到りであるが、自分で取り組んできた動力・エネルギー技術について語ってみたい。それは、それ自体が日本の動力・エネルギーの技術変遷史の一つになるからである。実際に手で触れたものばかりでなく、深く調査研究したもの、専門委員会を構成したもの等を含めると次のようになる。

まず1940年代の戦時中は航空学科学生としてレシプロ航空エンジン、V-1 パルスジェットエンジン（松根油）、航空スーパーチャージャー、戦後の石炭技術期、レシプロ蒸気機関、蒸気タービン、低質石炭ボイラー、超臨界ボイラー、過給ターボボイラー、等を扱い実物も作った。また留学中にはガスタービンとサーモプレッサーに触れ、原子力高揚期には特に船用原子

炉とその機関の発達に力を注いだ。

1960年代はまた石油高揚期であって油焚きボイラからコンバインドサイクル機関、旋回ピストン機関（一色式）\*、ついで加圧水型原子炉、高温ガス冷却原子炉、放射型サーモプレッサー機関（一色式）\*製鉄用原子炉、等の原子炉の研究や委員会が続いた。ついでプルトニウム燃料サイクルを土台とするナトリウム冷却原子炉やMHD機関の研究が始まり、私もナトリウムタービン（一色式）\*などの各種の研究に従事した。そこまでの動力・エネルギーとその研究の趨勢は高温、高密度、高出力を追求することが狙いであってすべてその方向の研究が主であった。なお上記のうち（一色式）\*とあるのは我流の試作エンジンであってうまく行かず研究中止としてあるものであるが、決して放棄したものではない。

1970年代の中期に動力・エネルギー技術上大きなショックがやって来た。それは中東戦争に端を発するエネルギーショックと、環七大原交差点のNOx公害等々から急激に世に認められるものとなったエネルギー消費に付随する環境ショックである。

それで研究対象も一転して、ガスや石油焚きスターリングエンジンが始まり、またフロンサイクルの廃熱動力化機関の研究が始まり、また筆者らの独特のものとして低温度差用の濃度差（CDE）機関の実験も開始して世の耳目を集めた。

1980年代以降となるとともに自然エネルギーへの傾向が強まり、貫流風車、ソーラースターリングエンジン、ソーラー濃度差機関、低温度差ターボタービン機関等を研究し、また多くのディーゼル用代替燃料機関と熱再生内燃機関を試みている。また動力ではないがエネルギーに深い関連のあるクーラー技術については、純フロンレスのクーラーとしての吸収冷凍機、スターリングサイクルクーラーに取り組み、1990年代中期の今日にいたるも止むことなく研究を継続している。

結局、筆者が触れていないのは核融合機関、熱電子

\*東京工業大学 名誉教授

〒156 東京都世田谷区経堂 2-29-6 (自宅)

機関、光発色機関、等であるが、逆に世の中にも多く入っているのも、少くとも実際タッチしたエンジンの種類の数についてはギネスブックのものであると自負している。

そのようなことは別として、この50年間に動力技術文明は怒濤のように前進した。そしてその指導哲学も三転した、これが更にどう進むか、幾つもの予測はできるが、真実は神のみぞ知るであろう。

### 3. 石炭・石油・石炭

戦後の日本の復興は「傾斜生産」なる言葉で示された石炭産出第一主義から始まった。主として微粉炭の石炭火力発電所が各地に作られ、それまでの「水主火従」が「火主水従」に変換された。陸上では蒸気機関車、海上ではスチーマーが主力となった。また諸産業は石炭ボイラーの増設に追われた。

筆者は戦後、鉄道技術第七部の連絡船部に入ったばかりで、第一次、第二次計画造船の多くを占めた連絡船の改良研究に従事した。そこでは後に南極調査船となった連絡船「宗谷丸」のレンツ式大型レシプロ蒸気機関を運転したり、古い連絡船「関釜丸」の全くボロボロになったタービンブレードとラビリンスシールに驚嘆したものである。

その頃の石炭動力の状況を一目で示す写真が図-1の走る「洞爺丸」である。図のように煙突から真黒い煙が吹き出されて灰は船上に降っている。陸上のもも同じであった。私達はまずどのようにしてこの黒煙を減らすかに専念した。それは現在に至る公害対策の第一歩であった。そして、それまでの一斉手焚きの軍隊方式から連続的なメカニカルスターカーに改良し、オーバーファイアジェットを導入するなどして減煙に成功

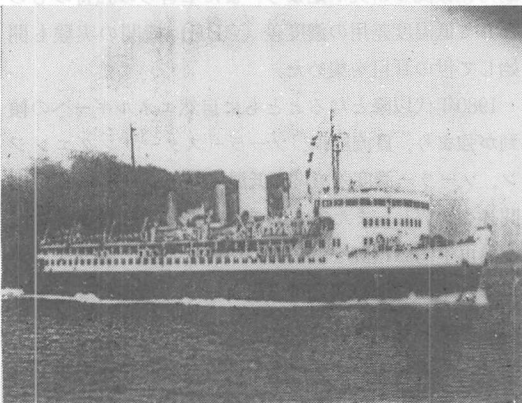


図-1 石炭焼きタービン船の洞爺丸 (1994)

した。しかし洞爺丸は1954年夏、お召船となった後9月、有名な洞爺丸台風の名を残す台風で沈没した。

丁度その頃から「石油転換」が始まった、私にとっても、日本にとっても洞爺丸の沈没は石炭からの脱皮の頂点であったのである。発電所は石油火力へ、列車はディーゼル車へ、船は石油ボイラースチーマーに、産業は石油バーナーボイラーへ変貌した。日本は石油消費国に入ったのである。

石油の方が取り扱いは楽であり、カロリーも安定しているし煙も小さい。石炭にくらべるとまさに「文明」の燃料であった。

それから現在まで30余年、石油時代はますます続いている。しかし過ぎたるは及ばざるが如し、の通り、過剰石油消費は、まず石油ショックに示される、石油の供給不安定と枯渇の必至、NOx、SOx、黒煙等排出物の大気汚染、酸性雨の拡大、さらにはCO<sub>2</sub>増大による地球温暖化、というような環境ショックを引き起す元凶となった。それらについてはここで詳述することもなくよく知られている通りである。

しかし舞台は再転した第一次、第二次石油ショック以来、石炭が再び見直されて第二の石炭時代が来つつある。しかもかつてのように単純な焚き捨てはできない。まず燃やし方としてはCOM、CWMのようなオイルや水スラリー法が進展し、また石炭のガス化、液化の研究は執念深く続けられている。また排ガス浄化も進んだ。

私は「技術はねじの螺旋のように、繰り返えされるが、必ず前より進んだ高い位置に来る」という格言が好きであるが、石炭技術はたしかに螺旋のように再びやって来た、しかも前とは進んだすぐれた低公害技術の上に乗っている。そこに技術だけではなく人間文明の進歩があると思う。

21世紀はかなり石炭が存続する。再び原料「石炭」で走る自動車が出てくるであろう。その実現形式は予測できないが技術螺旋はかならず回ってくる。

### 4. 原子力と巨大技術

筆者は前記のように原子力船用用炉から始めて、ヘリウム冷却高温原子炉から高速炉用ナトリウムの安全性研究にいたるまでの多くの原子力関連研究チームに所属した。そもそも私は、1950年代中期に米国のMITに留学し、MITの原子力学科創設時の最初の日本人修士学生であって、MITの実験用原子炉の黒鉛切断と積み上げが実験題目に入っていたものであり、米国内で

は発電用ばかりでなく機関車、船舶、航空機、ロケット、海峡工事、にいたる原子力利用の研究が一斉に出そろった。

1959年に私は原子力船「サバンナ号」の造機研修のための長期視察員となった。その見聞は「一色レポート」として日本の原子力船「むつ」に継がれたと思う。その「むつ」は船内放射性漏洩事故のため挫折し、有為転変を繰り返して、やっと外洋実験が完了したのは最近の1992年のことである。まさに「むつ」は「原子力文明の変遷」の一断面を鋭敏にうっし出している。

原子力発電が総発電の30%を超えた我が国では、幸い巨大事故は無かったが、世界ではスリーマイル島の事故や、今も跡を引く有名なチェルノブイリの原子炉事故など巨大事故が発生している。

最近になってようやく完成し、臨界を越えたとされる高速増殖炉「もんじゅ」は、それが「ナトリウム・水反応」という危険性をもつナトリウム冷却である点と、北朝鮮の核問題で知られているように、プルトニウム自体は「核拡散」につながる恐れがあるという二つの点で論議的となっている。

とくに私は「ナトリウム・水反応」について動燃と日本機械学会の協力した委員会の委員長を、1970年代後期に長くつとめ、多くの研究にも参加した。ナトリウム管は水中で小リーク、大リークを生じ、場合によって大事故に通ずる。幾多の対策とセンサーの配置等によって、幸い「もんじゅ」完成までには、ナトリウム事故は伝えられていないが、将来もし生じればやっかいな事となる。

またプルトニウムはそれ自体が高発がん性であるばかりでなく、原子爆弾の材料となるので、発電はするが、一方では「人間文明の敵」とも言えるものになるおそれがある。

最近の新聞によれば、2015年までに中国は日本の10倍の原子力発電を行う計画であるということである。中国でもし原子力巨大事故が発生すればその放射雲は日本を覆うことであろう。

たしかに原子力は現在の先進国の巨大文明を支えて来た。しかしそれは常に恐ろしい「巨大事故」の影を引きずっている。

小リークとは細管の小さなひびわれからのナトリウム流が隣の細管に孔をあけ、つぎつぎと拡大する水ナトリウム反応をいう。

巨大な堤防も「ありの穴」から崩れる。

## 5. 「ディゼルエンジンと文明」論

私は数年前、ディゼルエンジンの排出物（エミッション）の低減困難性を論じて、「ディゼルエンジンに未来はあるか」という意味の文を機械学会誌に出して、多くの反響があった。それには二通りあって、一つは転進しよう、一つは更に改良研究をしよう、というものであった。

そもそも「20世紀はディゼルエンジンの世紀」であるといわれるくらい、電力以外の単純動力（輸送・土建・農水産等）にはディゼルエンジンが広くかつ強力に使用しようとされ、止まる所を知らない。

先日、私はタイ国へ行ったが、そこの農民のディゼル機関への欲求は極めて強く、現地では石油の値段が高く、かつエンジンも高価であるにもかかわらず、いかなるリスクを冒してもエンジンを買うのが増産と収益につながるということで、一種のブームであった。この現象はタイ国ばかりでなく、中国、マレーシア、インドネシア等、すべて離陸（テイクオフ）を始めた開発途上国に共通する姿である。また日本では主要道路は大型ディゼル車で満ちあふれている。すなわち、いわゆる物質的形而下文明はディゼルエンジンで支えられていて、全く怒濤の進展が行なわれている。

たしかにディゼルエンジンは熱効率は飛び抜けて良く、燃料範囲も広く、中小の動力にこれ以上のものはない。1960年代から1980年代にかけての20年間は、ディゼルの高過給と高圧縮比と高圧瞬時噴射による高出力比、高効率で急速に伸びた時代であった。

しかしディゼルは基本的に燃料噴霧燃焼であるので、核からの媒による黒煙も多く、かつ高温・高圧燃焼であるので原理的にNO<sub>x</sub>が多くなる。最近では自動車ディゼルからの微粒生成物（パティキュレート）の発がん性が強く指摘されている。

私は空路で世界各都市を回ることが多いが、どの大都市も上空から近づくにつれ、約400メートルほどの高さに褐色の煙霧が都市を覆っているのにすぐ気が付く。我が国では東京・大阪・札幌がひどく、韓国のソウル・大邱もひどい。CO<sub>2</sub>は無色であるので、この褐色の色はカーボン微粒子と窒素酸化物蒸気から来ると考えられ、その発生源のかなり多くはディゼルエンジンによる所であろう。すでに欧米の数都市ではディゼルトラックの中心部進入の規制が始まっている。我が国は全く放任であり、逆にディゼルトラックは産業工程そのものに益々入っていく傾向が強い。考えもので

ある。

現在多くの研究者・メーカーがいかにディーゼルエンジンの排ガスを改善するかに日夜努力していることは事実であり、そのためのセラミックフィルター、再燃触媒、電子噴射による低NOx燃焼、等の発表も極めて多い。いずれの日かの、かなりの改善は十分期待できる状況である。

しかし排ガス公害が減少しても、「ディーゼル車やディーゼルエンジンを備えることが文明である」、という現在の開発途上国やすべての生産工場の考え方が止まらない限り、世界の石油消費に大きな危機が来るのも事実であり、「資源・環境・開発途上国」といえ互いにかみ合った近未来三大ショックに直結するのはディーゼルエンジンであろう。

いま南方諸国の森林を急速に伐採しているのはディーゼル機関であり、一方で水路を掘って砂漠を緑化するのもディーゼル機関である。今のうちにディーゼルエンジンが、ほんとうに地球と環境と食料資源の改善に対する有効な仕事をする事が強く望まれる。

6. 自然エネルギー

原子力船「むつ」の設計研究のため、北太平洋上での実船の動揺実験が船研でくり返されたのは1960年代の中期である。そこから出てくる大波のデータ、写真、そして私自身の北太平洋の船上経験の総括をしているうちに、このような波浪のある所で、何故に放射性危

険の大きい原子力を使う必要があるだろうかという感がよぎった。海洋には波ばかりでなく無限の自然エネルギーがある。これはまさに私の原子力から原始力への転換のよすがであった。

海洋には8種類の自然エネルギーがある。と私は常に述べている。そんなにあるのかと人は言う。

それは、①太陽光エネルギー、②風力エネルギー、③波浪エネルギー、④海流エネルギー、⑤潮汐・潮流エネルギー、⑥海洋温度差エネルギー（海水の表層と深層、および冷大気と海水の温度差）、⑦温度差エネルギー（海水と淡水）、⑧バイオエネルギー（燃料としてのバイオマスと生物自体のエネルギー）

の8ヶであると私は答える。

陸上には更に①地熱（浅層熱水、深層熱岩）、②水力エネルギー、③空電（雷）エネルギー、④自然低温度差エネルギー、⑤非自然エネルギーとして工場排熱、都市熱、等が加えられよう。もちろんの中には台風、地震、津波といった非定常のエネルギーを除いての話である。毎年数センチのオーダーで移動する太平洋プレートも別である。

これらの自然エネルギーの特長は、エネルギー密度は極めて低いが、その総量は極めて大きいということ、使っても減らないという三点である。この第三の特長からこれらは再生可能エネルギー（penew-able energy）とも名付けられている。

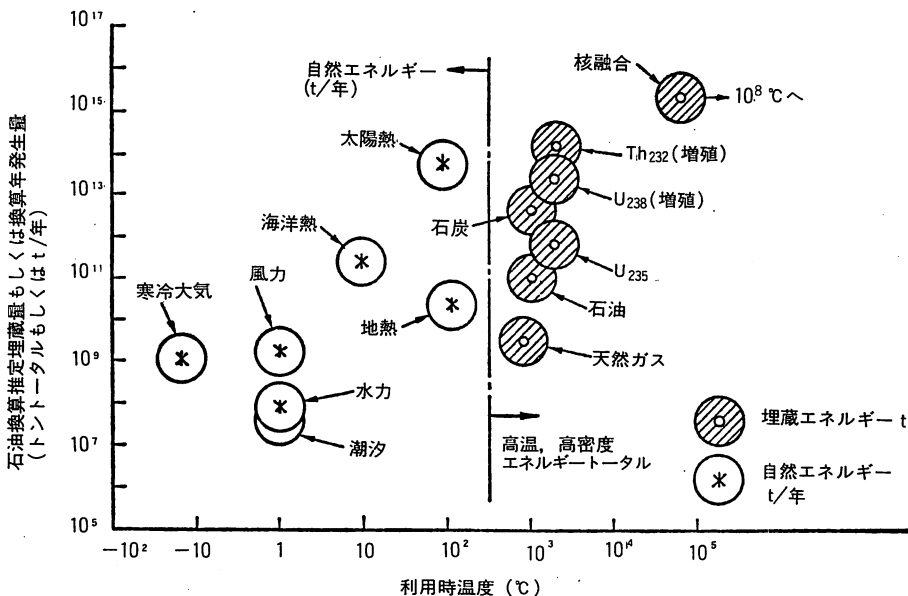


図-2 各種エネルギー資源の推定埋蔵量と換算年発生量の概略

図-2に、エネルギーの密度の代わりに利用時温度を横軸にとったときの、縦軸には、在来エネルギーに対してはその推定埋蔵エネルギー量、また自然エネルギーに対しては年間発生量を石油換算で示す。図のように自然エネルギーは温度、つまり密度が低くて量が多いという特色はよく表わされている。

1970年中期のオイルショック以来、無数の自然エネルギー研究が行なわれてしのぎを削った。その結果、動力エネルギー用として事実上生き残ったのは、①太陽光発電 (photovoltaic)、②風力発電、③バイオマス代替燃料、④地熱発電、の4つであり、それをつぐものとして太陽熱発電、波浪、潮汐発電等が位置づけられよう。なお先進国では非自然エネルギーとしての工場排熱動力化も行なわれている。

まず太陽熱光発電は、価格は高くとも、平板素子さえあればかなりの効率(10%オーダー)で安定して発電でき、集光のための補機も殆んど不要の上スタート・ストップと修理等のメンテナンスもあまりいらぬという安定した簡便さが受けたもので、その逆の欠点をもつ太陽熱発電に対して優位を保っている。

風力発電はまず年間平均風速6m~7m以上という強風地点さえあれば、いくらでも大型化(メガワット級)した風車を、しかも多数設置できるというスケールメリットにあると思われる。現在は陸上だけであるが将来は海上の風力船や係留体も実現するであろう。

第三のバイオマス燃料は、多くは農業廃棄物であって、発熱量や燃焼温度も1000℃を越すので、蒸気機関やスターリング機関に十分適用できるし、またバイオマス液体燃料(大豆油その他の植物油及びさとうきび、甘蔗などからのエタノール)直接にディーゼルやガソリン機関の燃料となり得るし、動物の排泄物からはメ



図-3 タイにおける豚舎からの排泄物によるメタンガス発生タンク

タンガスが出て、ガスエンジンの燃料となる。

東南アジアや東欧諸国では農業用バイオマス燃料の使用研究が盛んである。これはそれらの国が在来形式ディーゼルエンジンとその石油の単純導入に幾多の危機感を持っているからである。図-3に小生がタイ国で見た豚舎からのメタンガス製造テスト装置を示す。これで数十kWのガスエンジン発電ができる。

太陽熱発電は、現在、かなり高度の集光率と自動追尾を要する集光装置が必要な点が色々の点でネックとなる。それは筆者自身が東北電力(株)、東北学院大の協力を経てソーラースターリングエンジンの研究と、濃度差スチームエンジンの研究を行った経験からも明らかである。

図-4に日大ソーラーディッシュ(皿状反射鏡群集光装置と、それで加熱されている架台上的エンジン(図では濃度差スクーター)を示す。スターリングの被加熱ヘッドは僅か13cm直径のガラスヘッドであるため、図のソーラーディッシュの集光率では十分な加熱ができなかったが、濃度差スチームエンジンの被加熱ボイラ背面は約40cm角で十分集光加熱を行なうことができた。そのためマッチングが極めて重要なことがわかった。ボイラの熱入力太陽熱入射に対する効率は約50~60%であり、全体の動力化熱効率は約1%であった。これは小型であるためである。スターリングエンジンは、全熱効率10%以上を目指しているが達成は先のわけでかなり困難であると思われる。それでソーラースターリングエンジンとしては、平板式で無追尾集光器による低温度差スターリングエンジンが次の目標となるであろう。いずれにせよ筆者らの経験が後の人々に有益なものとして残ることを祈念するものである。

2020年頃となれば、ソーラーエネルギーをどこまで

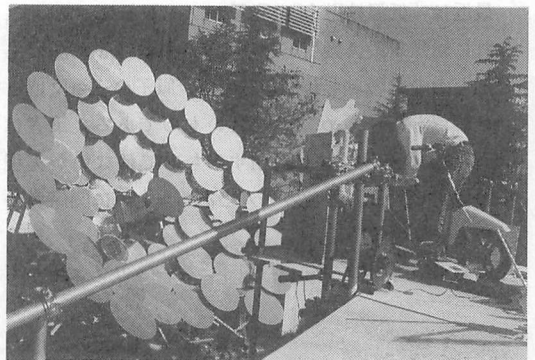


図-4 日大ソーラーディッシュ(左)と台上で加熱中の濃度差スチーム機関のスクーター

も常に利用することが必須となるであろう。その時に今の研究と経験が役立つであろう。

自然エネルギーといってもすべて過去に人類が使用したものである。帆船、風車、薪炭、ソーラー小水力といってもすべて人類史に残るものである。それが21世紀に再び高度技術の上で使われるということは、筆者が先に述べた「技術はねじ螺旋状に上に進む」という格言をまた実証するものであろう。

## 7. 再び高密度の巨大技術は来るか

21世紀のエネルギー、いや人類の究極のエネルギーとして冷戦時代から人々が挑戦して来たものに「核融合」がある。核融合は、すでに太陽の中の反応に存在するものであり、核分裂よりもむしろ大自然に近い。しかしその実現には「超高温」という大きな障壁がある。我々がいわゆる高温原子炉や高温ガスタービンで苦しんだ高温とはせいぜい1500Kである。それが核融合では一挙に数十億Kに上るのであるから文字通りケタが違う。現在は徐々に温度と存在時間が上昇しつつあるようであるが、まだ臨界には十分ではないようである。

核融合には「超高温」以外に「超巨大装置」と「トリチウム」という難点の影がある。それは現在の研究設備の進展からわかるように、超高温を達成するために、装置は数百トンを越す巨大なものになりつつあり、また放射性的の水をつくる「トリチウム」の発生が核融合のクリーン性を減少させる。そうなれば、とてもディーゼルエンジンやガスタービンのように手軽には使えないわけで、もし実現しても巨大先進国だけのものとなる恐れは十分にあり、またその炉の製作には大量の化石燃料があるので、燃料資源の涸渇はその発達を阻害するであろう。

最近では「低温核融合」の発見がブームとなっていて、それに対する毀誉褒貶がはげしい。これはまだ海のものと山のものともわからないが、原子の三重反応という解釈もあり極めて興味深いものである。筆者は「低温核融合をすぐには信用するものではないが実現を希望する」という者の一人である。大いに関係者の御努力を期待する。

最近では「宇宙エネルギー」「ニュートリノエネルギ

ー」、「磁力エネルギー」等の常温取り出しや「Nマシン」等の議論があり、やはり極めて興味あるものである。大きなエネルギーが在来物理学を超えて生ずるといのはなかなか困難であると思うが、三つの近未来ショックをかかえたエネルギーと動力界にとってはどんなものでも真の実現を希望することは変りない。

また別のトピックスとして「高温超伝導」があり、これはすでに不安定ながら一部は実現しているようである。これは動力とエネルギー界に、救世主ではなくても、多くの機器の省エネと省資源化（小形化）と質の変化をもたらすものであり大いに歓迎できる。レシプロエンジンのピストンは直接発電機になるし、自動車も高効率小型の電気推進方式に変えられるであろう。

## 8. おわりに

人間の文明の伸びを示す尺度として「情報」と「エネルギー」がある。「情報」の技術は文字通り日ごと伸びて細分化・小型化して、どんどん新技術が現れているが、「エネルギー」とそれを使う「動力機器」の方の伸びは決して多くはない。それは文字通りソフトとハードの違いであって、エネルギーと動力は文明におけるハードそのものである。そして人体を小型化できないようにハード機器も小形化できない。

この制限はまさに人間におけるエネルギーの原罪であって、そのため人口と文明の増大はほぼそれに比例するハードと消費量を増やし、有限の資源に対しては涸渇をもたらす。また付随する排出物は必ずエントロピー増大による環境影響を残す。

筆者は前章までに、全く私的・経験的立場から幾多のエネルギーと動力技術の過去の発達と将来についての感想を述べて来た。そこで言えることは、「技術は螺旋ねじのようにくり返されるが必ず前より前進する」ということであり、そこに将来への望みがある。

またもう一つは、化石燃料が存在する今のうちに、新技術の開発や地球環境の整備（たとえば砂漠の緑化）等をやっておく必要があるということである。

以上に述べた私や多くの方の今までの経験は、それが再びめぐって来たとき生かされるであろうことを信じて本論を了えたい。