機械技術の発達において
ブレークスルーとなった技術

ガスタービンの開発と機械技術

Development on Gas Turbine and Mechanical Technology

松 木 正 勝
Masakatsu MATSUKI

●1923年 9 月 4 日生
●ジェットエンジンおよびガスタービンの研究開発、構成要素の軸流圧縮機、軸流タービンの研究等、現在、流体機械、ガスタービンの教育研究に従事
●正員、日本工業大学工学部（〒345 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1）

Key Words : Development, Gas Turbine, Mechanical Technology, Jet Engine, Compressor, Combustor, Turbine

1. はじめに

人類の歴史は自らの生活または目的に必要とされる各種の物を作り利用して来た歴史とも言える。

二足歩行を始めた人類はその自由になった両手で枝や棒を使うことによって、より大きな衝撃力と到達距離を得て大きな力を得た。つまり道具の使用である。その後道具は木から石へ、更に青銅、鉄へとその材料を変えて発展して行った。

一方これと共に火の利用が始まり、食物の加熱、採暖に始まり材料の熱加工、金属の溶解へと発展した。

上記の二つが進行するにつれて、個体間の意志の伝達のために言語が発達し、これは文字の発明と使用、更にその記録法の発達によって人類の知識の集積と保存、伝達が行われるようになり文化は着実に進歩して来た。

以上は産業革命以前までのゆるやかな発達の過程であったが、産業革命以降は動力機械によってエネルギーの変換が出来るようになり人類は新たな力を得、急速な発達を始め、現在の自動車による移動の自由の獲得、ジャンボジェットによる遠隔大量輸送や月へ上陸することも可能になった。またコンピュータが発展を始めた 20 世紀後半以降から、知識は集積伝達されるのみならず、

CAD/CAM というプロセスによって知識が自らハードを作り出せるまでになって来た。

このように人類はその時に利用出来る材料とエネルギーを用いて、目的物を作り上げ生活を向上させて来たが、これらの多くは機械技術と言われるものに依存している。つまり既存の材料を使って目的物を作っていくと言う機械技術は人類の歴史と共にあったと言える。

従って機械技術は古い技術であると共にまた今日における最も新しい技術とも言える。

現在、先端技術と言われている宇宙航空、原子力、バイオなどでも、その目的とするものを作り上げるためには機械技術が不可欠でありそれに依存している。

このような道具から機械へ、また動力機械の発明とその発展、自動機械の出現とソフトのハード化の進歩と機械技術はたえまなく発展しつづけているが、これを歴史家が記述する場合、ある特定の時期と人物によってその技術が実現したと表現していることが大部分である。これは時期を明らかにすると言う意味では有用であるが技術の進歩発展を追うと言う点では不十分である。

ある技術がある人物によって実用化されたと記述されていることを知っても、そのことは技術的にはあまり意味がない。むしろなぜ、またどのようなバックグラウンド（当時の利用可能技術の集団）によってその技術が実用化されたのかがたい

せつである。つまり社会のニーズによって求められた機械は当時の利用可能技術から早晚作り上げられるもので、その人物がいなくても他の人が行っているはずである。なぜなら一つの技術が実現化されるとその技術が急速に一般化するのはいくらもその段階に達していたことを意味するからである。

つまり人類の技術の飛躍と見えるものも、その背景を詳しく調べると、広範囲の関連技術の発達の結果であり、むしろそれらを利用してある目的を達成させようとする思想に新しい考えを見いだすことが出来よう。しかしこれもその人物の個人の思想というよりも、その時代が到達した思想といえる。これらのことを私の関係したガスタービンエンジンの開発に関連して述べると共に、今後の機械技術の発展のための方策について考えて見る。

2. ジェットエンジンの出現

航空機用原動機としては、往復動エンジンで、これがプロペラを駆動し推進力を発生するというライト以来の方式が約40年間続いた。その間エンジン出力は3500 PS程度までが作られていたが、プロペラ先端の相対速度が音速を越えるとプロペラ効率が急速に低下するため、遷超音速飛行を実現するための新しい方策が求められる段階に達していた。初期には往復動エンジンの出力を増すことは、すなわち吸入空気量を増すことであるから、まず第一にエンジン行程容積を増す方法が行われ、次いで多弁化し吸入効率の向上が計られた。更に積極的に吸入空気密度を上げることが計られ過給機の使用が始まった。中間冷却器付き二段過給が使用されるまでになった。航空機は高高度すなわち成層圏を飛行することは揚抗比の向上、低密度により高速飛行が可能、また吸入空気温度の低下によるエンジン熱効率の向上など多くの利点がある。これを利用するため高高度でのエンジン出力を増し、効率を向上させる方法として排気エネルギーを利用する排気タービン過給機の使用が始まった。一部では排気タービンの余剰出力を軸出力に加えるものも出来て来た。かくして

エンジンの出力は増加したが複雑化が激しく信頼性の向上が困難になって来ていた。しかし、この排気タービン利用のエンジンは、過給段としての低圧系（排気タービン+遠心圧縮機）ガスタービンを持ち、高圧系から出力を得るエンジンとも言えるもので、低圧系の割合が増加し、往復動エンジンの吸入圧力が増加するにつれて多くの障害が出るようになって来た。そこで、これを乗り越える方法として、高圧系の往復動エンジンを圧縮機、燃焼器、膨張機（タービン）で置き換えることを考えるのは自然であろう。すなわちジェットエンジンの出現である。

3. ジェットエンジンの構成と実現の契機

ジェットエンジンは図1に示す構成であり、(a) 吸入空気を圧縮機で圧縮し、(b) 燃焼器で加熱して高温ガスとし、(c) 膨張機（タービン）で出力を発生し、これで圧縮器を駆動し、(d) タービン出口の高温高压ガスはノズルによって速度エネルギーに変換され推力を発生する、(e) 以上の4部を作動させるための制御器と補機（燃料ポンプ、油ポンプなど）からなっている。

ジェットエンジンは、(1) 簡素で単純な回転体と円筒状静止部から出来ているため軽量である。(2) 飛行速度に無関係に圧縮機を亜音速で作動させることが出来る。(3) ジェットノズルからの噴出速度は超音速可能でかつ高温であるため超音速飛行機の推進用としても利用出来る。(4) つまり推進用媒体としてエンジンの吸入空気を用いることによりプロペラを不用にした。

つまり航空機推進用としての簡素軽量大出力と言う利点を多くもったものである。しかし、これ

図1 高バイパス比ターボファンエンジンの構成

が容易に実現しなかったのは、(i) 圧縮行程で空気を圧縮するために大きな動力を必要とするので効率の高いことが必要である。(ii) この圧縮機を駆動して、かつ排気を高温、高压に保つためには、タービン効率が高いと共にタービン入口温度が高くなければならないが、それはタービン翼、ディスク材料の耐熱性によってきまる。にもかかわらず、これらを満足する技術が発達していなかったからである。

最初のジェットエンジンと言われたホイットル(イギリス)のエンジンは、遠心圧縮機、多缶形燃焼機、軸流タービン、ノズルから成り立っていたが、これが実現したのは次の理由が考えられる。

3・1 圧縮機 圧縮機として既に実用されている往復動エンジン過給用の遠心圧縮機を用い、これを大形化、高速化し、大流量、高圧力比を実現した。インペラとしてインデューサ付径向き羽根を用い周速 400 m/s 以上を実現した。この形式は遠心力に強く高速化に向くが、インペラでは入力約 1/2 しか静圧に変換せず、残りは運動エネルギーになっているので、これを静圧に変換するディフューザが圧縮機効率に大きく影響して来ることになる。

このような条件の遠心圧縮機の効率を約 80% 近くまで上げることができて初めてジェットエンジンが実用化出来ることになる。

つまりそれは当時の技術を発展させて

(a) 羽根車効率を上げるために

- (1) 回転方向に予旋回を与えてインデューサ流入相対マッハ数を下げると共に回転数を上げ周速を大きくし、必要な圧力比を得ることが出来た。
- (2) 長い翼弦長のインデューサを用いインペラ効率を向上させた。
- (3) 中間翼を設けて翼枚数を増加させ滑りを小さくし、羽根車の仕事を増し、羽根車効率を向上させた。一方、

(b) ディフューザ効率を向上させるために

- (1) 羽根車出口の絶対速度が音速を越すのでこれを羽根無しディフューザで高亜音速まで効率よく減速し、
- (2) これを十分な羽根枚数を有する羽根付ディフューザで減速し、静圧に変換した後燃

焼器に流入させる。

これら一項目ではわずかの改善であるものを多数項目を取入れそれらを合理的に組合せることによって数%の効率の向上を得て実用出来る圧縮機を実現した。

3・2 燃焼器 燃焼器は円筒内に一次燃焼領域、二次燃焼領域、希釈混合領域を有し、圧力噴霧ノズルと逆流域を組合せ、強い混合を行うことによって高い燃焼負荷率を得るもので、多缶形(N 本)としてエンジン流量の $1/N$ の流量で燃焼試験が行えるようにした。燃焼機は実圧、実温、実流量、実寸で試験を行わなければならないからである。低負荷時の燃料噴霧の悪化を防ぐため、低流量用ノズルを中に持つデュプレックスノズルや噴霧圧力を下げず環流によって流量を制御するスピルノズルなどが開発された。

また内筒は空気冷却し、ふく射などの大きい一次燃焼領域を保持させた。

燃焼器はたゆまない数多くの実験により現象を把握し一步一步と改善して行ったもので多くの時間と労力が投入された。

3・3 タービン タービンは蒸気タービンの知識が利用されたが、流入ガス温度が 800°C 以上と高い点が問題であったが、材料の耐熱特性に適応する翼の応力レベルを保つため、翼付根を厚翼として先端部は薄翼としたり、クリスマスツリー形翼取付け部を用いたりした。

以上のごとく圧縮機、燃焼器、タービンと言う構成要素がおのおのあるレベルに達したのを契機としてそれらを合理的に結合することによって最初のジェットエンジンが完成した。

4. その後のジェットエンジン発達の契機となった技術

ジェットエンジンの出現以来、はや半世紀が過ぎようとしているが、ジェットエンジンの性能は画期的に進歩し、大推力低燃費のジャンボジェット機用エンジン、超音速機用エンジンはもちろん、ヘリコプタ用エンジンもガスタービン化するまでに至っている。

その発達をふり返って見ると発達の契機となった技術は(a)ハード技術と(b)ソフト技術の二つに

分けて考えられる。

(a) ハード技術 サイクル効率向上と推進効率の向上のためのサイクル圧力比の上昇とサイクル最高温度の上昇とバイパス比の増大を計るため、その構成要素である(1)圧縮機、(2)燃焼器、(3)タービン、(4)ファンの性能向上技術とそれを可能とする、(5)制御技術、(6)加工技術、(7)構造技術などの技術である。

(b) ソフト技術 設計思想の具体化であり(1)信頼性設計に重点がおかれ、セーフライフ、フェイルセーフ、損傷許容設計などの思想の導入(2)モジュール構造とオンコンディションメンテナンスの導入により常時その状態を知って運転できる方式の確立。(3)十分な性能、耐久性、耐環境性試験の施行法の確立。すなわち運用中に遭遇する状態をシミュレートした試験を十分に行い、信頼性を確保する方法について過去のデータのみならず破損波及関連システム分析なども利用し、方式を確立した。また不測の事態が起きないような品質管理方法も確立した。

5. ジェットエンジンの進歩をもたらしたハード技術

ジェットエンジンが航空機を推進する効率はガスタービンであるコアエンジン（燃料エネルギーを機械エネルギーに変える部分）の熱効率とジェット噴射による推進効率の積であり、従ってガスタービンの熱効率の向上と大形ファンによるバイパス比の向上が計られた。

ガスタービンエンジンの効率はサイクル圧力比、サイクル最高温度、要素効率によって定まる。又サイクル最高温度が高いほど軽量で大出力となるので高温化に多くの努力がなされた。従って、(a)圧縮機の高圧化と高効率化、(b)タービン入口温度の上昇とタービンの高効率化、(c)これら高性能機を最適に制御することがハード技術として重要なことになる。

5.1 圧縮機の高圧化と高効率化 軸流圧縮機のほうが遠心圧縮機より約10%効率が良くなる可能性がある上に、多段により圧力比も大きく出きるし、何と言っても前面面積当たり流量は格段に大きくなるので、航空用としては最も適した

形となるので、軸流圧縮機の研究は各国で進められた。1940年代には、イギリスで二次元翼列試験を基礎とする翼列理論が発足し、二次元翼列の性質が明らかになると共に回転翼列の研究も進み、軸流圧縮機の性能が向上すると共に性能の高い設計が出来るようになった。

次いでアメリカで、臨界マッハ数の高い翼列の膨大なデータが集積され、一段当たりの負荷が上昇すると共に負荷限界も明らかとなった。また多段となった場合の有効通路面積の算定法も改良され、多段のマッチングが良くなった。

続いて、前置静翼および前方数段の静翼を運転回転数に対応して可変とする方式が開発され一軸の圧力比は20以上が可能となった。

これはコンピュータが未発達の時期であったが、設計者の慧眼^{けい}によって実現されたものである。これはその後、我が国で更に発展し全静翼可変圧縮機として溶鉱炉用送風機として多用されると共に、ガスタービン用圧縮機としても使われ始めている。

現在は、更に二次流れを制御して効率の向上を計るべくコンピュータを使って研究が進められている。

これらはたゆまなく行われた膨大な実験の結果得られたものであり、遅々としているが一步一步確実に昇っている状況である。

5.2 燃焼器の進歩 初期の多管形燃焼器では、燃焼器外筒はそれ自身が構造部材となり得ないのみならず、重いし、点火時の火移りのための連結管を心要とするし、タービンノズル部との結合部が複雑になるなど構造上不利な点が多かった。

これが改良されたのがキャニューラー形と言われるもので、圧縮機とタービンを結ぶ構造材としての二重の円環形の空気通路内に円形の多数の内筒を設けた燃焼器である。

これは1個の内筒を開発すればよいので、開発が容易であるのは多缶形と同一でありながら構造的に有利である。

次に更にサイクル温度の上昇が計られるにつれて環状多筒形燃焼器へと発展してきた。

これは、円環形の二重円筒からなる燃焼器外筒の中に円環形の燃焼器ライナを設け、この中で燃焼を行わせるもので、高温化に伴って増加する冷

却すべきライナ面積を最少に保てるし、構造的にも剛性の高い構造にできるし、軽量化が計れる。

しかし、実圧、実温、実流量の試験装置が必要であり、開発費は増大した。これは高バイパス比エンジンに用いられた。その後は排気公害が問題になり、煙、CO、炭化水素、NO_xなどの低減に努力が払われた。

現在は、二段燃焼式で予混合希薄混合気を利用する環状多筒形燃焼器が高効率であると共に低排気汚染で耐久性も優れているものとして用いられ始めている。

5・3 高温タービンの開発 前述のようにガスタービンの熱効率の向上と出力の増大は、サイクル最高温度の上昇に大きく依存している。

初期はタービン翼に使用されている耐熱材料のクリープ限界内の温度、応力になるよう翼厚分布など構造上の配慮をして設計し、翼の伸びで使用限界を定めていた。

しかし、材料は金属材料であり既に極限に近い状態で使用しているため、性能の改善はエンジンの性能の改善に対する要求に追随出来なくなってきた。

そこで、翼材温度を保ったまま高いガス温度の流れを扱うために翼材を圧縮機出口空気で冷却する方法が考えられた。つまり空冷タービン翼の出現である。

(a) 内部対流冷却翼 翼内に空気通路を作り冷却空気を翼根本から導入することによって冷却する方法である。初期には放電加工、電解加工、線を入れた鍛造、セラミック棒を入れた鋳造など、多数の丸孔を翼内部に設けたものが使われたが、熱伝達面積としての孔の面積を大きくしにくい、孔の中の流速を上げられないなど冷却能力が低かった。それでも1000°Cぐらいのガス温度までは使えた。

(b) 内部吹付け冷却翼 次に採られた手段は翼内部の冷却能力を増すために内部の熱伝達面積を増すため精密鋳造によって内部に冷却フィンを持つ中空翼を製作し、またこの中空翼に冷却空気導入管を挿入し、この管に設けた小孔から冷却空気を噴出させ翼内面に吹付け、冷却する方法である。吹付け冷却は熱伝達率が非常に大きくなるので冷却効率が非常に良くなった。

またこの孔の分布や冷却フィンの分布を翼外面からの熱の流入に対応させて選ぶことによって、翼温度を限界内に一様に保つことが出来るようになり、ガス温度は1200°C程度まで使えるようになった。この場合、中空部を形成するためのセラミックス中子（十分な耐熱性、溶出させやすくするためポーラスであること、金属面に欠陥を生じないことなどの性能が必要）、ロストワック法を用いるが金属と接触するセラミックス砂の性能、溶湯を保持出来る耐熱性と強度を有する結合材、真空溶解、真空注入のプロセス管理など精密鋳造関連の技術の進歩に大きく依存している。

(c) 外部フィルム冷却翼 更に高温ガスを利用するためには、ガスから翼への熱の流入を防ぐ方法が考えられる。これがフィルム冷却翼である。多数の小孔から冷却空気を噴出させて、翼面上を低温の冷却空気でも覆い、高温ガスから翼面への熱の伝達量を減少させるものである。

従って、翼前線を重点にして外部熱伝達率の高い場所に冷却孔を設ける。この方法によって1350°C程度までのガス温度が使用出来るようになった。

翼内部は(b)と同一であるが、翼壁に放電加工、電解加工またはレーザー加工によって冷却孔を設けるが、初期には面に直角な孔しかあけられなかったが、その後流出冷却空気が壁面に沿って流出しやすいように、壁面に対して40°以下の小さい角度で流出させる孔が加工出来るようになった。孔径は0.3 mm程度で止まっているが、これは孔径はこれより小さくすると目づまりを起こす恐れがあるためである。翼表面の圧力は翼面上では一様ではなく前縁では全圧であり背面では急速に低下し、腹側ではそれほどでもないが後流に向かって壁圧は低下する。従って冷却孔からの流出量を制御するためには翼表面の壁圧に対応した内部圧力から流出させねばならない。従って内部は内部冷却能力を持つと共に、孔前圧力を制御出来る構造とする必要がある。つまり翼面に沿って数個の室を設け、圧力を制御する方法である。

(d) 拡散接合翼 (c)の翼を作るのに中子入りの精密鋳造法では内部の構造に限界がある。そこで背面と腹面の二部分に分割して鋳造し、内面外面共必要な加工を行った後、これを拡散接合さ

せる方法が考えられ実行されている。これは最近の超塑性などの新しい技術を利用したものである。

(e) 一方向性凝固翼, 単結晶翼 これらは金属材料の先端技術を利用したもので, 一方向性凝固翼は半径方向に結晶を伸ばしたものでクリープ温度が 50°C 程度上昇出来た。

単結晶翼は単結晶で出来たもので, 更にクリープ温度を上げることが出来るがまだ十分には実用化されていない。

(f) 遮熱コーティング翼 翼表面に熱伝導率の小さいセラミックスのようなものをコーティングし, 金属表面温度を一定に保ちながら高い温度のガスを利用しようとするもので, 100°C 近く高温化を計ることが出来る。ただし起動停止や負荷変動によるガス温度の変化によって耐久性に問題が生ずる恐れがあるから, 補助手段または温度不均一率が長期使用の間に悪化した時の余裕の意味で使うぐらいが適当であろう。しかしコーティング壁は状況を監視しやすいから, その意味ではある程度は信頼して使用出来る手段である。

6. ジェットエンジンの進歩をもたらしたソフト技術

前述のように目に見えるハード技術は物として具体的に性能が向上し, 大形高性能で低燃費のエンジンが航空輸送を支えている。

しかし, このように高速大量の輸送が航空機で行われるようになると, その信頼性と環境に与える影響が大きな問題になってくる。

つまりこれらの社会のニーズに対応すべく考えられた設計思想, つまりソフト技術がハード技術の方向に支配力を持つようになった。

すなわち, (a) 信頼性設計, (b) 作動状況を知った運転保守, (c) 十分な事前の試験とフォローアップなどについてソフト技術として新しい考え方が導入された。

この考え方は原子力を初め, 他産業でも広く始まりかけていた時代であり, 航空エンジンがその先導となった。

(a) 信頼性設計 ロータ, 翼など重要部品は, その作動条件を詳しく調べ, 過去の例に照ら

して, 十分安全な応力レベルで設計 (セーフライフ) する。

一方損傷が発生しても急速に伝ばしない構造 (フェイルセーフ) とするようあらゆる段階で考慮する。

更に最近では材料欠陥を不可避なものとして, 最初から考慮にいった損傷許容設計も取入れられ始めている。

(b) 作動状況を知った運転保守 エンジンの作動状況を把握出来るのに十分な各種のセンサを設置し, エンジンの性能, 作動状況などの変化の様子を知りながら, それに対応した運転を行う。また高温部など現在はまだ運転中に状況を知り得ないものについては, 必要な時間間隔でボアスコープなどで点検するシステムと, それを可能にする構造を組込んでおくこと。これによって劣化の進行状況が把握出来, 安全な運転が継続出来る。

(c) 十分な事前の試験とフォローアップ 使用開始以前に下記 (1)~(12) に記した, 性能試験, 耐久性試験, 耐環境性試験などを十分に行う方式を確立すると共に, 使用開始後も運用機以上の運転時間履歴を持つエンジンを持つように運転を継続する一方, 運用機からのデータを収集し, 各種環境下での運転データを分析し, 補用品の設計変更反映させる。つまりエンジンは使用期間中常に進歩し, 信頼性が高まって行くようなシステムの考えが開発使用されるようになっている。

(1) 性能試験, (2) 高空性能試験, (3) 横風試験, (4) 長時間耐久試験, (5) 低サイクル疲労試験, (6) 要素単体の低サイクル疲労試験, (7) 水吸込試験, (8) 氷板, 氷球吸込試験, (9) 鳥吸込試験, (10) 異物吸込試験, (11) 翼飛散防止能力試験, (12) 飛行試験機に搭載しての実飛行試験。

図2は高バイパス比ターボファンエンジン FJR 710 の着氷試験状況である。

7. 先端技術と基礎技術

以上述べたようなハード技術およびソフト技術の発展によってジェットエンジンは初期の純ジェットエンジンから低バイパス比ファンエンジン, 高バイパス比ファンエンジンと発達し, 燃料消費率は約 1/2 に低下し, 信頼性は 1 けた以上向上し

図 2 高バイパス比ターボファンエンジン
FJR 710 の着水試験

た。それは開発の時点で適切な先進技術が適用されたからであるが、一方から言えば、関連する基礎技術が適用可能な段階に達していたからである。

今後も華やかな先端技術のみが注目されるような情報や報道が多くなされるものと思われるが、それは花を見て根を見ないものであり、基礎技術無しには花は咲かないものである。

機械の基礎技術とは古くて新しいものであり自らの体験によって体得される所が大きい。しかし世の中はますますソフト化し、ソフトで物が出来ると考える人がふえている。ソフトはそれをハード化する基礎技術によってのみ有用に作用出来るものであることを心しなければならない。

8. 21 世紀は各国の全国民的技術総力の世界的な競争の時代となるのではないか

既述のようにジェットエンジンも単純なエネルギー変換・推力発生装置から、使用状態の複雑化から自らも多機能化し、各種の情報を受け、かつ出しながら高い信頼性で運用されるようになり、ますます知能化の方向に進んでいる。

このような例は先進国ではあらゆる方面で進んでおり、生産現場では、自動化・無人化、ソフト化として、また社会的な生活面ではコンピュータ化が銀行からスーパーマーケット、輸送機関を初めとして家庭内使用機器のインテリジェント化までも

進んでいる。

つまり、21 世紀はこのような生産から消費までの範囲に普及した知能化機器をどの程度まで製造、使用、維持していくことが出来るかによって、その文明の度合いがきめられることになる。それは全国民の知識水準をどこまで上げられるかにかかっており、それによってどの程度までの機械を利用できるか、またそのレベルを上げていくことが出来るかが決め手になる。つまり全国民の技術総力の世界的競争の時代とも言うべきもので、明らかに人類にとって新しい考え方をしなければ発展が考えられない時代になると思われる。

9. む す び

以上、ジェットエンジンを例として技術発展のプロセスを追って見た。技術の飛躍と見えるものも実はその周辺の関連基礎技術が発展した結果として結実したことを理解いただけたことと考える。今後ともプロセスに変化があるとは考えられず、根となる機械基礎技術の理解を深め、体で感じてもらえるようにする必要がある。それを忘れたソフト化（情報化とも言われている）は技術の空洞化を招き、花を枯らすことになる。

現在人類は、エネルギー革命であった産業革命以上に大きな影響を人類の運命に及ぼす変革の時期に到達している。それはコンピュータによる知識の蓄積と保存、無人化工場による生産の拡大、遠からず起きる自己再生機械の出現である。

人類は工業における無人化生産による技術の空洞化、生物における遺伝子操作による事故の危険性、生産物増加による地球規模の汚染など新たな局面に到達している。

つまり関連の技術が成熟したことであり、これからなにを生み出すかが問題であり、人類の英知が試される時代となった。

21 世紀と言わず更に長期間人類が発展存続出来る方途を見つけるべく総力を上げることを祈ってやまない。

(原稿受付 昭和 62 年 6 月 8 日)