

新方式の熱機関と船用動力の探究

— 色 尚 次*

Exploration into New Heat-Engine and Marine Power System

By

Naotsugu Isshiki

From the point of view of how to get higher thermal efficiency and power output, heat engine and marine power system are freshly analysed through their three elements, the cycle fluid, heat-input method, power output method.

Through the above analysis, several imaginative types of future heat engines and marine engine system are introduced here by the author.

The most promising future heat engine is thought to be on the line of "linear engines", which is actually realized today as rocket and MHD engine for examples.

These new engines would be understood by so many figures and sketches in this report.

第1章 まえがき

人類第三の火となった原子力エネルギーの発見に続く宇宙開発や、また一方における、人類のエネルギー需給問題の深刻化の予想とに刺げきされて、各種直接発電、新方式熱機関等を含めるあらゆる形のエネルギー開発及びエネルギー変換方式の研究が活発になつてきている。

とくにわが国は、各種エネルギー資源が貧困なことから、いかにその将来のエネルギーを開発するかは他国よりさらに重要な問題であり、またわれわれの特に関心のある船用動力の資源とその動力方式についても同様である。

そもそも熱機関は、エネルギー変換方式の単なる一項目に過ぎない。しかし熱機関はそれ独特の長所もあり現在船用はいうにおよばず、火力発電、自動車、ロケット等に圧倒的に使用され、その実績はゆるがすことができないし、かつ、熱機関は他のすぐれた変換方式の実用化にいたるまで、かなり長くそのエネルギー変換の主力の地位を占めるものと予想される。

この熱機関を進歩させるためには、もちろん、在来の熱機関諸型式の改良や複合を図ることも重要であるが、多くのエネルギー開発問題が論じられている現時点

において、熱機関を単に船用に止まらず、広い立場よりエネルギー変換方式の一つとして見直し、在来のもの以外にその残された方式とその可能性を考慮し、まず一般熱機関について考えた後、ひいては今後の船用機関についても考察しておくことは大いに意義があるものと思う。

本論に述べようとしている考察や試案の多くは、筆者の未完成の私見を主としており、ほとんど実験を伴わず、また誤った方向を示しているかも知れないし、種々異論を持たれる方も多と思われるが、本論説が何らかの今後の新熱機関開発への刺げきとなれば誠に幸いである。

第2章 エネルギー変換の一方式としての熱機関

2.1 熱機関の位置

現在、地上とその近傍に存在し、また人類の利用する範囲のエネルギーには、力学エネルギー、熱エネルギー、化学エネルギー、光・放射線エネルギー、電磁気エネルギーの6種があり、力学～力学の変換を行う一般機械や水力タービンを別とすると、現在考えられるエネルギー変換方式は、天然資源として存在する化学、核、光・放射線エネルギーを、直接または間接的に人類の使用形態である力学エネルギーに変換しようとするものである。

* 機関開発部第二部

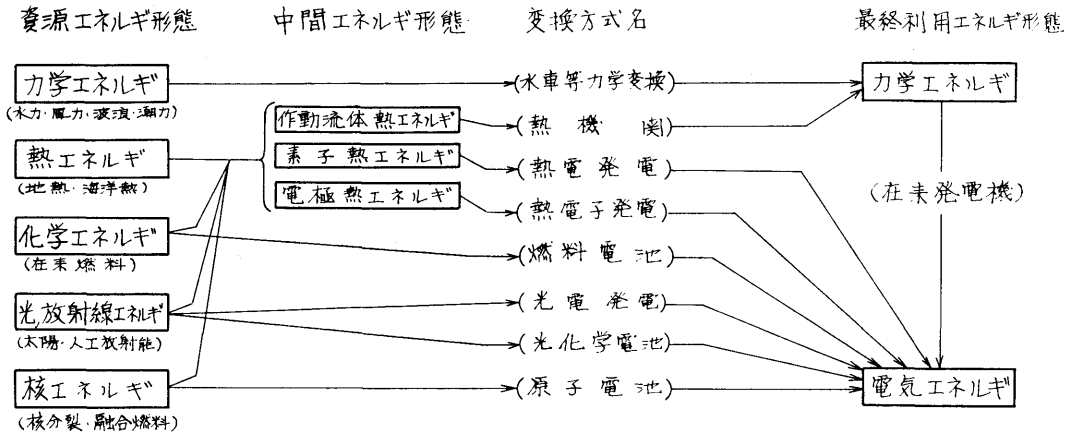


図1 一般エネルギー変換線図

その主な変換方式を概念的に図示すると図1のようになる。

熱機関はこれらのエネルギー変換方式のうち、原料資源の出すエネルギーを一度すべて熱エネルギーの形にした後、力学的エネルギーに変換する面を受けもっていて、いま、今後の大出力発電や大出力船用機関に重要な電気エネルギーを最終目的とするときには、他の多くの直接発電方式が見かけ上ははるかに簡単なルートをとっている。

このように、熱機関自体はどちらかという、回り道をとった複雑なシステムであり、かつ他の用途に再利用が可能であるかもしれない化学エネルギーや、核的エネルギー等をすべて熱エネルギーに落してから使用しなければならない点に欠点があり、かつ、カルノーの原理により低温に移動するさいエントロピーの増大を伴う宿命もっている。

このように熱機関は、本来、複雑かつ低効率のシステムである。しかし、他の直接方式の高効率化と大出力化が、まだ達成されていない現在では、熱機関はやはり相対的に最も簡単で高効率の変換方式である。

エネルギー資源の面から見て、化石燃料のうちの石油系資源が世界的にあと数十年で枯渇し、また高品位のウラン鉱もその程度で枯渇するといわれている今日、単に短い期間だけの目先を考えず、将来のことも考慮した広い意味のエネルギー変換方式を考えることは極めて重要であり、熱機関開発にたずさわっているわれわれとしては、現在最高約40%に過ぎない熱機関の効率をさらに飛躍的に上昇させて、石油燃料やウラン235等で代表される稀少資源の利用度を増すこと、また石炭、増殖炉、太陽熱、地熱、核融合のように息の長い

資源の利用の可能な形式を考えるとがいずれも重要な責務である。

また一方において、エネルギー源の問題とは無関係にエネルギー需給の巨大化とそれに伴う火力プラントや、船舶の大型化により熱機関の単機あたりの容量が大きくなって行くことは現在のさう勢であり、この傾向は将来も長く続くものと思われるので、大出力を扱い得る熱機関方式の探究ということも極めて重要な問題となるであろう。

第3章 熱機関論 (一般熱機関)

3.1 熱機関の三主要素

前章に述べたように、熱機関はエネルギー変換方式のごく一項目に過ぎない。熱機関自体にはすでに極めて多種の方式がある上、どの方式も過去の実績よりして今後も限り無く前進して行く可能性を含むものと考えられる。

いまここで、熱機関の効率を上げるという点に第一主眼点において、今後の諸方式について考察してみよう。高効率であるということは、一つは高温側温度が高いということ、他はサイクルを改良し低温側の排熱を減らすという二方法があるが、後者はたとえば高温ガスタービン、蒸気タービンの組み合わせのような諸熱機関の複合を考えればよい場合が多いので、ここでは前者の高温作動をすることを最も重点をおくものとする。

第二の主眼としては、前章に述べた大出力を扱うという点におくものとする。

さて、本論文では熱機関の主要素としては、図2のように 1. 作動流体、2. 熱入力部 (給熱・排熱)、

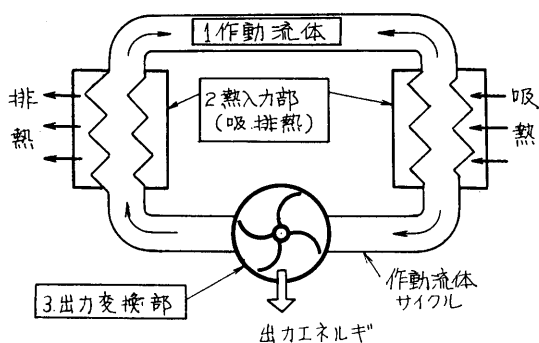


図2 熱機関の基本構成と三主要素

3. 出力変換部の三つを考えてみよう。勿論、熱機関を論ずるにはサイクル論、在来既存形式、資源種類等による見方や分類、また用途的な見方、出力の大きさによる見方等多くの観点や分類法がある。しかし、それらは多くすでに論じられているので、ここではむしろ従来と見方を変えて、上の主要素を通して熱機関を考察したい。

3.2 作動流体の選定

原子力の利用開始以来、きわめて広範囲の作動流体探索が行なわれている。とくにエネルギー開発の面からは、内燃機関は燃焼ガスが作動流体であり、蒸気機関は水がそれであるというような固定観念を去って、広い柔軟な眼で作動流体を見直す必要がある。

作動流体の種類範囲は単にガス相ばかりでなく、液相でもまた適当なものであれば固相でも、混相でも考慮する必要がある。

また、完全なサイクルを形成する作動流体ばかりでなく、中間熱担体、もしくは第4章で示される運動エネルギーや重力ポテンシャルの担体としての流体も同時に考慮し、それらも作動流体のはんちゅうに含める必要がある。

3.2.1 ガス

全サイクルを気相で行う作動流体としてのガスには、その種類としては、内燃機関に使用される空気燃焼ガス系をもっとも普通のものとし、他に空気、 C_2 、 CO_2 、He、ふっ化ウランガス等のガスが考えられる。内燃機関を除いては、一般にガスはその圧縮や輸送の所要動力の大きい点と、熱伝達率の低い点や漏洩の防止し難い点等に欠点があるが、高い流速で大出力を扱い得る点や、それ自体が圧力に無関係に高温になり得ること、他の材料との共存性やふ食性、耐放射線の良好な点、比熱比の大きい点にすぐれている。

3.2.2 液-蒸気系

ランキンサイクルを主体とする液相-気相変化を使用するさいの作動流体としては、蒸気プラントに使用される水-蒸気系を最も普通のものとし、他にアンモニアや CO_2 、Br 等の無機液体~同蒸気系、フロン、デフエニール等の有機液~同蒸気系、水銀、亜鉛、Na、NaK 等の熔融金属~同蒸気系がいずれも考えられ、また有機無機の水溶液による液~蒸気系が考えられる。これらの系統はコンデンサの使用による低温での等温熱放出をするランキンサイクルの熱効率が良い点、圧縮に対する所要動力の低い点、液沸とう熱伝達の良好な点等が優れているが、飽和温度と圧力とに一定の関係のある点に種々の制約を生じ、またふ食性や純化装置などの点に難点がある。

最近は特に宇宙航行機関用に種々の液体金属機関が研究されており、かつ、今後の一般熱機関の作動流体としてきわめて有望である(第4、5章参照)ので、参考として図3に現在考えられる各種金属の常圧における溶融点と沸点の間の液相範囲を示す。

同図の上方には蒸気プラント、各種現存熱機関やMHD機関等の作動温度範囲を示す。同図による興味ある事実は、流体種類が液と蒸気の両相が使用できる(沸点近傍)温度が $500^{\circ}C$ 以下のもの、 $700\sim 900^{\circ}C$ のもの、 $1400^{\circ}C$ 附近のもの、それ以上のものの四つのグループに分けられてしまうことで、第1のグループに水、水銀、第2のグループにNa、K、NaK、Cs、Rb、Cd、第3のグループにLi、Bi、Zn、Sb、Mg、第4のグループに残りが属する。現在までは水、水銀が使用されたが、最近原子力、宇宙動力に第2のグループが盛にとり上げられ、更に第3のグループまでおよんでいる(例えばZn)。将来の熱機関としては、まずこの第2第3のグループの順に考慮されることとなる。

3.2.3 二相又は三相系

全サイクル、または一部の作動流体には、ゾル、ゲル、噴霧流、ほう状流体等を含む気相二相系が考えられる。また、固体の微粉等を含むスラリーのような固-液二相系、三者を含む三相流系が広く考えられるべきであり、この系統は後記の運動エネルギー変換方式に向いている。

3.2.4 純液体および純固体系

一部の熱担体、または運動エネルギー、もしくは重力ポテンシャル等の機械エネルギーの担体としては、水、水銀、熔融スラグ、ドーサム液のような純液体ばかりでなく、微粉、粒体、ビレット、散弾、連続状物体の

ような純固体も当然考えられる。とくに強い可逆熱膨張や変形を生ずるものであれば、固体でもガス同様な直接作動流体となり得るであろう。固体が果して作動流体となり得るかという疑問に対する興味ある一つの回答として、図4にバイメタルを一種の作動流体とする太陽熱機関案を示す。その作動方式は図より明らか

であろう。

3.2.5 作動流体に要望される性質

さて、熱機関の作動流体として望まれる性質を列挙すると

- (1) あまり過大な圧力となることなく高効率のサイクルの全部、もしくは一部を構成し得ること。

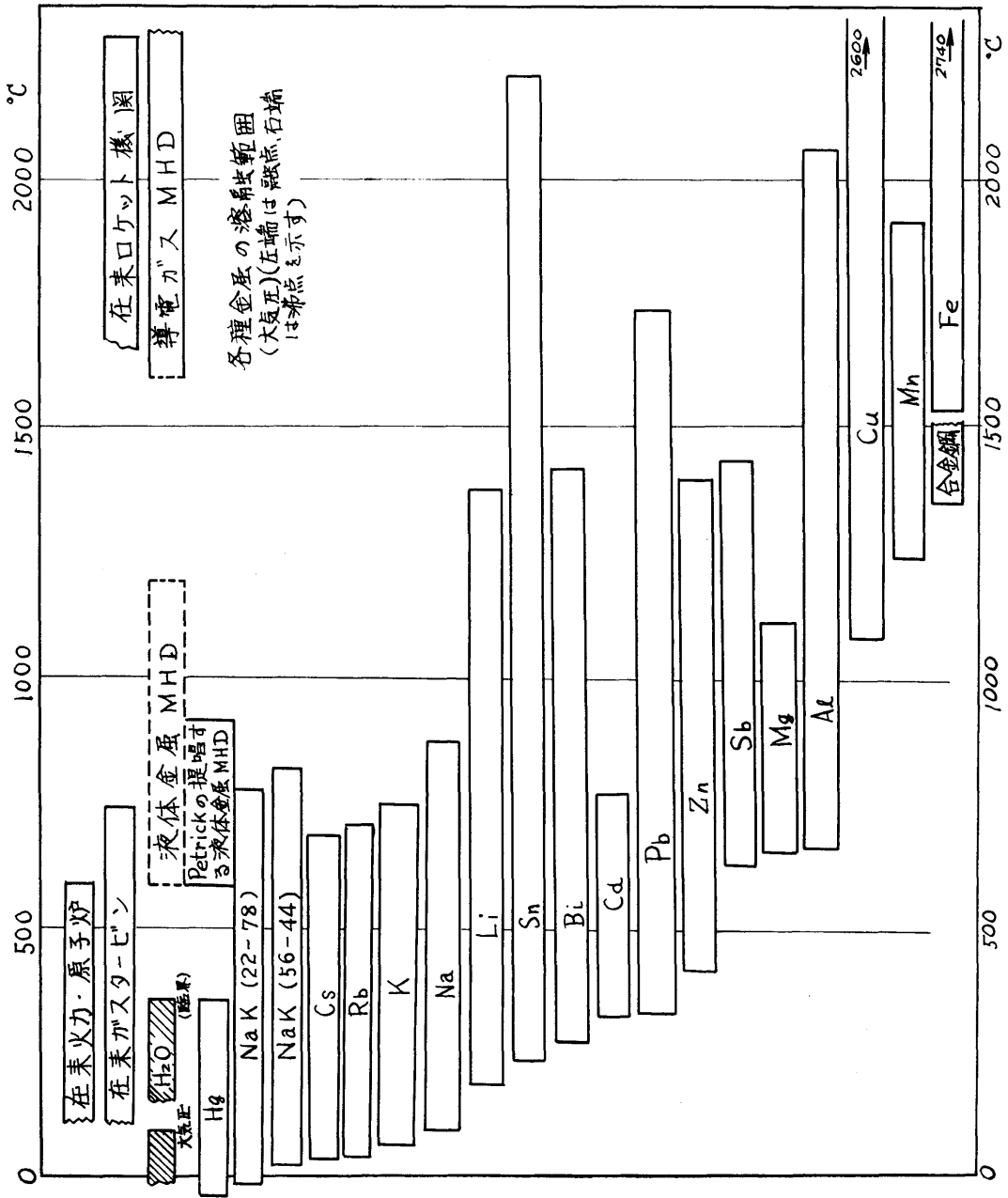


図3 各種金属の溶解温度範囲

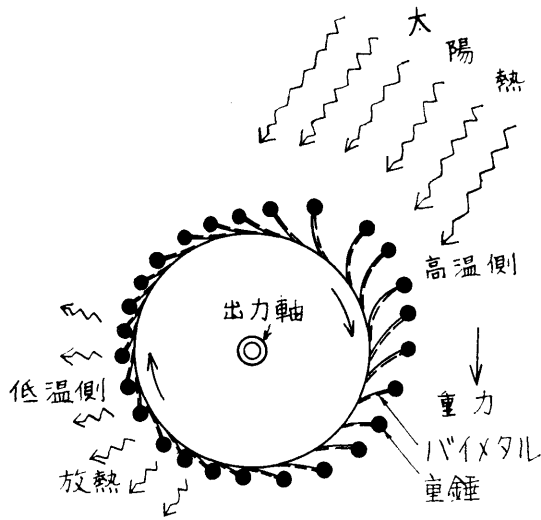


図4 バイメタル太陽熱機関案

(2) 高温、高圧において安定であり、許容最高使用温度の高いこと。

(3) 熱容量、および同一圧力降下に対するエンタルピ落差、および作動状態での重量速度の大きいこと。

(4) 蒸気、ガスに対しては比熱比の大きいこと。

(5) 各熱機関部分に対応する伝熱機構に対し熱伝達率の高いこと（熱損失を防ぐ点より場合によっては低いことを必要とすることがある）。

(6) 純化が容易で、また劣化することが少ないこと。

(7) 腐食、侵食性、活性、変質性の小さいこと。

(8) 有毒性、引火性、誘導放射能性の小さいこと。

(9) 漏洩性、浸出性の小さいこと。

(10) 安価で入手しやすいこと。

(11) 輸送が簡単で所要動力の小さいこと。

(12) MHD方式に対しては、導電率の大きいこと。

(13) 入力形式や出力方式との関連から、高温作動流体としては内部発熱による入力をとり得る方が望ましいこと。またその場合到達し得る最高温度が出来るだけ高いこと。

さて、従来の熱機関の作動流体としては、何よりも安価で入手しやすい点から、水、空気、燃焼ガス系の作動流体が圧倒的に優勢に利用されてきているし、とくに内燃機関、ガスタービン等の燃焼ガス系は内部発熱による熱入力を取り得る特長を有するばかりでなく、他のほとんどすべての所要条件を満足するので、現在の優勢な地位を占めているだけの理由を持っている。

しかし原子力も開発され、また各種エネルギー資源が変化して行く将来の熱機関に対しては、単に従来の流体種類の範囲だけで満足しているわけにはゆかない。

3.2.6 大出力に対する作動流体の適性

大出力を扱い得るといふ点から、作動流体を与えてみよう。

いま、簡単なモデルとして単純噴射ノズルを考えてみる。高圧側圧力を p_0 、出口側圧力を p_2 、 p_2 の p_0 に対する比を $r (=p_2/p_0)$ とし、作動流体の平均密度を ρ 、最大流速を u とすると、ノズルで単位面積当りに通過させ得る運動エネルギー（出力） E_n は近似的に

$$E_n \doteq (\rho u) \cdot \left(\frac{1}{2} u^2 \right) \dots \dots \dots (1)$$

で表わされる。いまきわめて近似的にノズル全流路についてベルヌイの定理により

$$\frac{1}{2} \rho u^2 = p_0 - p_2 = p_0(1-r) \dots \dots \dots (2)$$

が成立つものとする (1)、(2) より

$$\begin{aligned} E_n &= \frac{\rho u^3}{2} = \frac{\rho}{2} \left(\frac{2p_0(1-r)}{\rho} \right)^{3/2} \\ &= \frac{\sqrt{2} \cdot p_0^{3/2} \cdot (1-r)^{3/2}}{\rho^{1/2}} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

となり、同一圧力比 r に対しては作動部の平均密度 ρ の小さいものほど、また入口圧力の高いものほど大出力が扱い得ることになる。

この点から、同一入口圧力に対しては固体や液体よりもガスまたは蒸気の方が ρ が小なる点ですぐれている。

また、作動流体がガス又は蒸気ของときには、近似的に完全ガスの性質が成立するものとし、 ρ_{00} をある比較基準状態での蒸気またはガス密度とすると

$$\rho \propto \rho_{00} p_0 / T \dots \dots \dots (4)$$

したがって (3) 式は

$$E_n \propto p_0 \cdot T^{1/2} \cdot (1-r)^{3/2} \cdot \rho_{00}^{-1/2} \dots \dots \dots (5)$$

となり、蒸気またはガスであればやはり基準状態密度の小さいほどよく、かつ、入口圧力が大きくなるほどよいばかりでなく、作動温度が大であるほどよいことになる。

この点より、たとえば水素、ヘリウム、リチウム蒸気のような軽いガスや蒸気が大出力熱機関に向くことになる。

3.3 熱入力形式

熱機関における熱入力（もしくは放熱）の形式は図

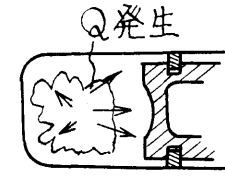
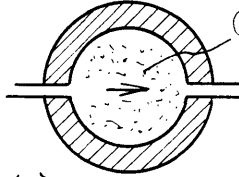
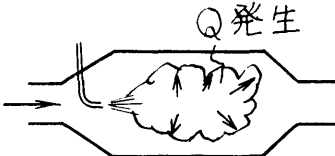
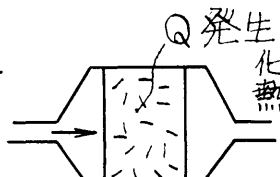
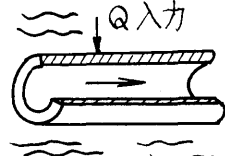
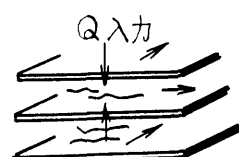
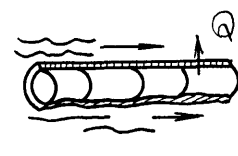
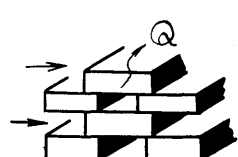
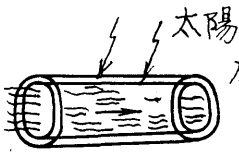


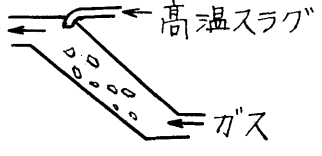
| 形式名 | 実 | 例 |
|-------------------------|---|---|
| <p>作動流体 内部熱発生形式</p> | <p>Q発生</p>  <p>(内燃機等)</p>  <p>(流動燃料原子炉)</p> | <p>Q発生</p>  <p>(ガスタービン燃焼器)</p> <p>Q発生</p> <p>化合 熱解離等</p>  <p>(化学反応装置)</p> |
| <p>固体壁 形式</p> | <p>Q入力</p>  <p>(ボイラ等伝熱面)</p> <p>Q入力</p>  <p>(一般熱交換器)</p> | <p>Q入力</p>  <p>(固体燃料原子炉)</p> <p>Q</p>  <p>(蓄熱式熱交換器)</p> |
| <p>ふくしゃ 形式</p> | <p>太陽光線</p>  <p>石英ガラス</p> <p>(太陽熱加熱管)</p> | <p>熱ふくしゃ</p>  <p>(流動反射炉)</p> |
| <p>混合形式</p> | <p>蒸気</p>  <p>冷水</p> <p>(インゼクタ)</p> | <p>高温スラグ</p>  <p>ガス</p> <p>(スラグ熱交換器)</p> |

図5 熱入力形式の実例図

5に示すように、1. 内部熱発生形式、2. 固体壁よりの熱伝達形式、3. ふく射と放射線形式、4. 混合形式、の四つに大別される。

1) 内部熱発生形式 本形式は容器の存在の有無に無関係に作動流体自体の内部に熱入力が発生するもので、内燃機関やガスタービンの燃焼ガスで代表されるような燃焼による非可逆化学反応型や、解離による可逆化学反応型も考えられ、また流動核燃料（液状、ガス状、スラリー等）内の核分裂反応による核反応型等が考えられる。

内部入力形式は、容器壁とは無関係に反応しうる場合が多いので、容器を冷却しておくことにより容器自体の温度制限値よりも高い流体温度を得られる。ただし3.5節の熱限界条件による制約がある点と、その過渡的時定数が小さく、負荷変動に急速に応答できる点がきわめて大きな利点である。

しかし、化学反応形式はその最高温度が理論的に制限されること、流動核燃料による核反応形式は一般に流体がきわめて活性および放射性に富んでいること等が欠点であるが、中性子束を増せば反応をいくらかでも増せるので、理論的最高制限温度がきわめて高い利点がある。

2) 固体壁形式 本形式は固体核燃料要素被覆壁、ボイラの水管、熱交換器、コンデンサ等に見られるように、熱源もしくは高温体からの熱を静止（もしくは運動）している固体壁を通しての熱伝導で作動流体に出入させるものである。

本形式は最も好ましい作動流体を他の熱担体や作動流体と分離して選択使用できる点等に大きな利点があるが、固体壁の許容強度、耐食性、熱疲労性等によってその温度と通過する熱流束の制限を受け、ために作動流体自体の温度が制限を受ける点等に大きな欠点がある。

固体壁入力形式を高温に対して設計することは、3.5節でさらに詳細に述べるようにまずクリープをも考慮した許容応力の高いことがなんといっても必要であり、ついで圧力差を小さくし、単位セルの直径を小さくすることがきいてくる。

現在の耐熱金属材料では、その許容応力が700°C～800°C以上で急に減少する。一方、セラミック系の非金属材料には高温での機械的温度がかなり高いものが開発されつつあるが、熱衝撃に弱い欠点が残っているので、高温で高負荷伝熱面を形成するにはまだかなり研究の余地がある。そのさい伝熱面両側の圧力差を小

さくするサイクルを選定すれば、かなりの性能向上が予想できよう。

またカーボン材はすぐれた耐熱性や耐熱衝撃性を有するが、高温での酸化や侵食に弱く、燃焼ガス、空気等の流体には不適である。しかし He, Ne 等の非活性ガスを作動流体に選べば高温に対しかなり有望であるといわれているので、大いに研究されるべきであろう。

3) ふく射と放射形式 ふく射形式は、 γ 線加熱される液体金属や、太陽よりの熱放射を吸収する太陽熱ボイラのように、外部よりの光、熱放射線、 γ 線、等のエネルギーを作動流体が内部で吸収する形式であって壁が存在しないか透明のときは本形式は内部入力形式と全く同様な特色を有するが、少くとも固体壁を有する形式のさいは放射線の透過力と熱損失が小さい隔壁の選択が困難で、一般にこの壁の制限より本形式は温度と圧力の高い作動流体は扱い難い。また本形式は、作動流体種類も当の光や放射線の吸収断面積の大きいものに限られる点に欠点がある。しかし、この形式による伝熱は流体熱伝達におけるレイノルズのアナロジーのような必然的な摩擦損失とは無関係に、直接伝達されることに大きな利点がある。




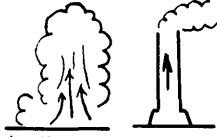
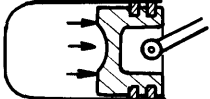

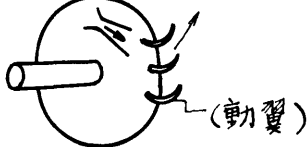

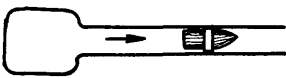




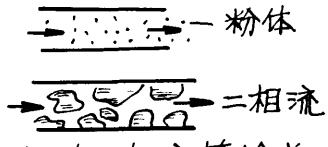
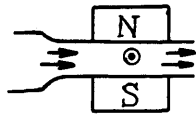
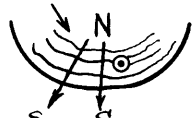
また固体壁を全く有しない無隔壁ふく射伝熱方式のアイデアもある。⁽¹⁾

4) 混合形式 本形式は、フラグや液体金属を熱担体として作動流体内に噴射する形式の熱交換器や、一般の蒸気エゼクター、インゼクターのように高温流体の吹き込み等のように、作動流体内に高温流動体の混合を行なって熱を入力するもので、作動流体及び熱入力部の容器は冷却できるが、容器や弁などの高温問題は高温側熱担体の取り扱い側に移行する。また混合したものを再び使用するために分離システムを必要とする点も欠点である。

ガスMHD方式における流動スラグによる熱交換方式の考え（ソビエト）はこれに沿っている。

3.4 出力変換方式

熱機関の出力変換部分は高温の作動流体エネルギーを有効出力に変換する部分であって、エネルギー変換論的には最も重要な部分である。在来熱機関の分類はタービンとか往復機関など、主としてこの出力部分の形式によって行われている。ここでは若干おもむきを変えて図6のように主作動流体より見た出力変換形式を(1)自己内の力学エネルギー変換、(2)固体（機械）への力学エネルギー変換、(3)他流体への力学エネルギー変換、

| 形式名 | 実 | 例 |
|-----------------------|---|--|
| 自己内での 力学エネルギー変換 |  ノズル * (加熱・冷却の存在も含む) |  デフューザ * (今左) |
| |  ボルトドゥスチューブ ** |  自然対流 * |
| 固体(機械)への 力学エネルギー変換 |  往復機関 *** (内燃機関を含む) |  ロータリ-機関 ** |
| |  タービン機関 ** (動翼) |  容積型ポンプ ** |
| |  火炮 * |  ロケット * |
| |  熱気球 *** |  バイメタル *** |
| |  エゼクタ・インゼクタ * |  粉体 二相流 粉体・二相流等輸送 |
| 電気エネルギー直接 変換 |  直線流路MHD * 作動部 |  旋回流路MHD ** 作動部 |

*直線 **回転 ***往復 ****電力ポテンシャル

図6 熱機関の出力変換方式の各種

(4)電気エネルギーへの直接変換、の四つに分けてみる。

またそれらは別に主な運動方向より見て、(a)直線形式、(b)回転形式、(c)往復形式、の三つに分けることができる。それらについてさらに詳説すると次のようになる。

(1) 自己内での力学エネルギー変換

ノズルにおけるエンタルピの運動エネルギーへの変換、ディフューザでの逆変換、ジュールトムソンバルブでの熱力学変換等を主とするもので、ノズルやディフューザではその過程に熱入力、もしくは熱除去も重合させることができる。他にボルテックスチューブによる高温部分と低温部分への温度分離、重分子と軽分子部分の分子分離、また煙突や大気の流れ、沸騰液体流の自己対流による上昇等のように熱エネルギーの自己重力ポテンシャルへの変換等が含まれる。

この種の自己変換は熱機関の全サイクルをこれだけで完了させることは少いが、熱機関サイクルの一部におけるエネルギー変換過程としては、きわめて重要である。

(2) 固体壁への力学エネルギー変換

固体壁への力学エネルギー変換には図に例示するように、往復機関やロータリー機関、容積型機関、火砲等のピストン方式、タービン機関の動翼方式、ロケット方式、その他重力方式、バイメタル方式等の形式が含まれる。

ピストン形式は、容積壁の一部が準静的な容積変化を行ってその移動仕事をただちに機械エネルギーとして取り出すもので、この形式は、圧縮や膨張過程での空力損失、流動損失が少く、かつピストンリングを使用するときは漏洩も少い利点があるが、一定容積内流体の入れ替えを行うため、機関の容積あたり処理できるエネルギー量が少なく、また必ず弁機構もしくはそれに準ずるものを必要とし、かつ漏洩を防ぐための機械損失が大きく、膨張比が有限となる等の欠点がある。内部発熱作動流体である燃焼ガスを使用する内燃機関での大型の場合の温度、熱負荷、回転数等についての限界は、ガス自体の温度によるよりもピストン頂部及びシリンダヘッド附近の熱応力、およびピストンリングの油滑、フランジの機械応力等による場合が多く、シリンダ径を大きくすれば熱応力と熱衝撃の存在による強度劣化が顕著になるので、あまり大直径の内燃機関の存在は困難になることが明らかである。

ピストン形式の特殊例である火砲は、数万気圧以上の最高圧力を有する内燃機関の一種であって、熱機関

では最高の温度と圧力を達成しているものであるが、連続作動に対してはやはり冷却の問題が生じ、また気密に対処するための摩擦が大きい。

動翼形式は作動流体がまず保存エネルギーを流体自らの運動エネルギーに変換した後、その流動の運動エネルギーを動翼によって吸収した機械エネルギーに変換するもので、通常の蒸気タービン、ガスタービン、空気タービン等はすべてこの形式に属する。

この方式は動作が連続的でガス流方向が一定であるためエネルギー処理量が多いが、通常動翼はロータの回転運動で規制されるので、そのため動翼が遠心力による強い応力を受け、動翼根元の許容応力によって動翼速度やエネルギーの処理量が制限され、ひいては熱効率も制限を受ける。

ロケット形式は、作動流体の内部エネルギーをその運動エネルギーに転換して、ノズル自体に推力を与えるもので、機構としては熱機関中で最も簡単であり、かつ短時間でも、とにかく連続で作動する熱機関では最も温度が高い。ロケットではノズル室の冷却とその大型化における各部熱衝撃の問題が限界を与えるが、使用時間が短いので、強制冷却壁、浸出冷却、表面熔融冷却等の対策で対処されている。温度限界はむしろ熱源自体の化学成分選定にあるようである。

熱エネルギーを固体の力学エネルギーに変換する一方式として、固体の重力ポテンシャルエネルギーを増加させるものがあり、図6では熱気球で例示される。一般にこの種の重力ポテンシャル利用の熱機関も種々考えられるが、木星や土星上は別として、この地球上の自然重力では機関の出力密度が小さ過ぎる。また、純粋に固体だけで力学的に行わせるものの特例として、さきの図4に示したようなバイメタルの変形によるものなどがあるが、金属の熱膨張では、ガスの比熱比に相当する値が、ほとんど1.0に近いので熱効率が極めて小さくなる欠点がある。

(3) 他流体への力学エネルギー変換

この方式は例図のエゼクタや粉体、二相流輸送のように、作動流体の内部エネルギーをその膨張によって他の流体(固体を含む)の運動エネルギーに変換するもので、一般に、この他流体が連続ピストン状固体であるときを除いては、必ず漏洩や混合、加速等による運動エネルギーの損失がある。しかし、このような他流体への力学エネルギー変換方式は、高温サイクルの一部として一度は考慮される必要がある。

運動エネルギーに変換された力学エネルギーをそのまま

の形で利用できる時(例えばサントブラスト)はそれでよいが、さもないときはさらにそれを動翼方式やMHD方式により、力学もしくは電気的工作とするか、またはディフューザで圧力上昇させた後、同様の仕事をさせる。

(4) MHD方式

MHD方式にはガスを使用するものと、液体金属を使用するものの二種がある。

まずガスMHD方式は、高温燃焼ガスやヘリウムにカリウムやセシウムを加えて導電性を増した高温ガスを、強力磁場を通過させて流れた直角に生ずる電力を出力として取り出すもので、本方式の利点は全く可動部分を必要としないことであり、その熱的条件はロケットノズルに似ていて、高温熱機関としては極めて魅力的である。しかし、ガスMHD方式の技術的難点は今までの所、作動ガスが極めて高温領域でなければならないこと(2000°C以上)、およびまだかなり困難な点を持つ強力な磁場を必要とすること、添加剤を必要とすること、またサイクル的にも作動部は完全な断熱膨張ではなくかなりの内部損失を伴うこと等である。

また液体金属二相流を使用する液体金属MHD方式は、MHD作動部にガスの代りに導電性の高い液体金属を通過させようとするものであって、ガスMHDにくらべて作動温度が低くてよい利点がある(図3参照)が、そのサイクル内に内記の「他流体への力学エネルギー変換」の過程を必要とし、気相金属のエンタルピを液体金属の運動エネルギーに転換しなければならない。しかし、その過程はいまのところ多くの流力損失を伴い、後章でとりあげるようにその流路のエネルギー変換効率が問題となる。

また液体金属は、壁材料へのふ食および侵食性が強い欠点があり、ガスとは違った面で多くの難点と不明点を持つ。しかしMHD方式はガス、液体金属のいずれについても大いに興味ある熱機関方式である。

(5) 運動方向による出力形式の分類

さて以上の出力形式はまた、運動固定壁や運動エネルギー担体の存在する場合は、それらの固体壁の運動方向、存在しない場合は作動流体の主運動方向によって直線形式、回転形式、往復形式の三者に分けることができ、図6には*印、**印等でその分類を行っている。

この三形式について考えてみると、在来熱機関の主流であるタービンで代表される回転形式は、遠心力の存在による難点があり、往復形式ではエネルギー処理量

の小さいことと、機械的強度の点で難点があるのに比べ、ノズル、ロケット、火砲、エゼクタ、MHD等が属する直線形式は流体もしくは固体の運動に対する諸難点が最も少く、かつ最も高温の実績を有し、多くの特長がある。そのため将来の熱機関としてはこの直線形式が残された方向として大いに考慮されるべきであろう。

このように直線形式を主要出力変換部とする熱機関を「直線機関」と仮称することにする。第4章に各種の直線機関に関する提案を行う。

3.5 熱機関の熱限界の考察

3.5.1 熱機関の熱限界

いわゆる各種機関のリミットデザインにおいてよく論ぜられるように、どのような熱機関も無限の出力を出し得るものではなく、かならずその比出力限界およびその方式による最大出力容量限界など種々の制限が存在する。

その諸限界を大別すると

(1) 熱源、燃料、資源に内在する原因に基くもの(発熱量、燃焼速度、理論最高温度)

(2) 低温部分の純機械工学的諸問題による限界(くり返し応力、耐圧、振動、自重、潤滑、歯面圧力等)

(3) 高温部分の材料内に生ずる諸問題による限界(熱応力、熱衝撃、クリープ、熱疲労等)

(4) 高温部分の熱伝達によって生ずる諸限界(冷却問題、バーンアウト等)

(5) 流力学的限界(衝撃波、二相流のキャリオオーバー、キャリアンダー、キャピテーション、掃気、速度、拡散速度、流動、安定性等)

(6) 高・低温部のふ食、侵食、汚損による諸問題等があり、そのうち(1)と(2)(5)については従来より機械工学全般にわたる多数の研究があり、また(6)は主として化学的問題であるので、いずれもここでは触れないものとし、高温と大出力問題に関連する(3)と(4)を取り上げて熱機関の熱限界としてまとめてみよう。

(3)と(4)とは互いに深い関連がある。しかし、従来はクリープ、熱疲労、熱応力の材料的諸問題が材料力学関係者により、また熱伝達による諸問題、とくに熱伝達係数やバーンアウトの問題は伝熱関係者によって別個に研究されていて、その中間に行く熱限界問題については、在来機関の個々に関して設計の段階でかなり考慮されてはいるものの、決して熱機関全般としての統一的な考え方や理論が出されていない。

在来形式を種々比較し、その改善を行い、また、高

温，大容量，大比出力の新形式熱機関を打ち出すためには，高温部分の材料と熱伝達の両者にまたがる領域の熱限界に関する深い考察が必要であり，その意味より，筆者はいわゆるリミットデザインを横につないだ熱限界工学なる新しい分野の開拓されることを希望するものである。

3.5.2 材料熱限界への私見 ($\sigma_m \sim \sigma_{th}$ 平面)

沸騰におけるバーンアウト問題のように純粋な流体内部熱伝達機構に関連する熱限界はさておいて，材料と

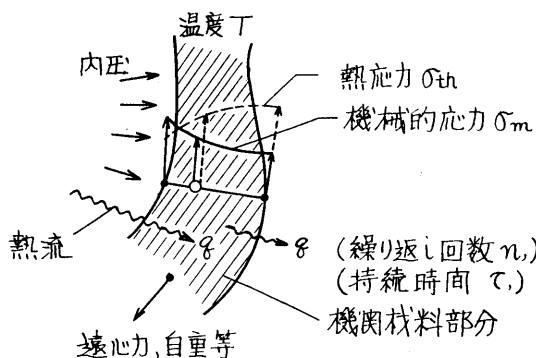


図7 任意の機関材料部分に加わる熱応力と機械的応力の存在

熱（温度）の両者が直接関連する分野での基本法則はまだ必ずしも確立されていないと考えられる。

この分野に関する説は多数あって，一般には極めて複雑であるが，単純化した考えによる筆者の私見によると，その熱限界は図7のように任意の与えられた機関材料の作動温度 T において，その材料がある場所での圧力差，遠心力，自重，慣性力，構造内力，電磁体力 (Body force)，流体による圧力，焼きばめ力等，およびそれらの複合による機械的応力（もしくは相当主応力）を σ_m とし，定常時での熱流による定常熱応力，または発停や負荷変動時の熱衝撃による非定常応力を σ_{th} とし，その機関の発停繰り返し回数を n ，高温保持時間を τ とするとき同一材料を使用するすべての熱機関に共通な熱限界は，図8に略示するように σ_m と σ_{th} の値がその機関の n と τ に対応する $\sigma_m \sim \sigma_{th}$ 平面内のある限界線内に存在しなければならないという概念で表現できるのではないかと考える。

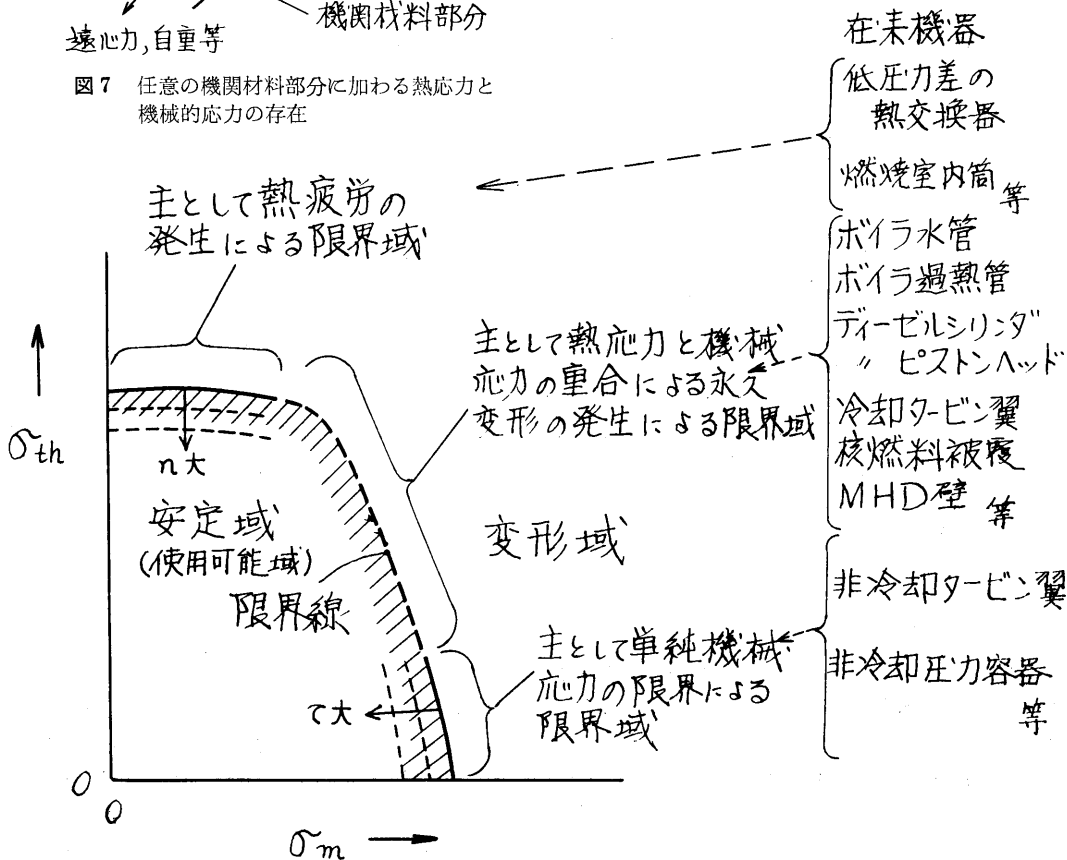


図8 $\sigma_m \sim \sigma_{th}$ 平面と限界線の存在

在来機器

低圧力差の熱交換器

燃焼室内筒等

ボイラ水管

ボイラ過熱管

ディーゼルシリンダ

クピストンヘッド

冷却タービン翼

核燃料被覆

MHD壁等

非冷却タービン翼

非冷却圧力容器等

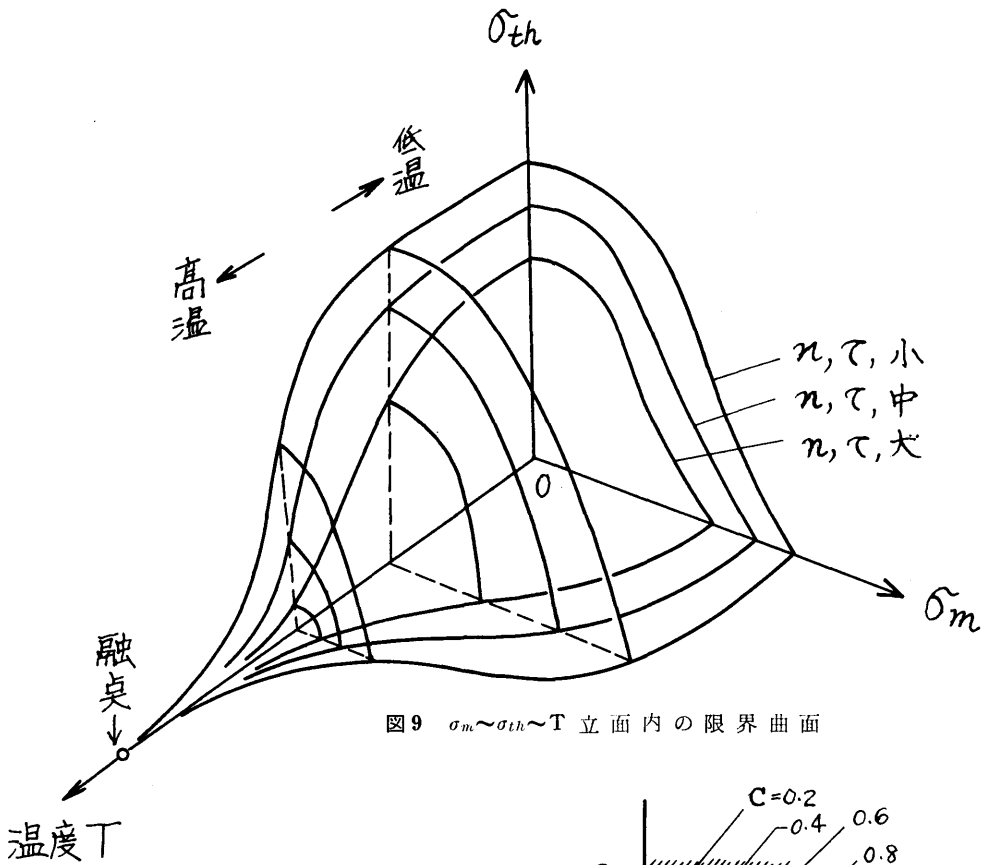


図9 $\sigma_m \sim \sigma_{th} \sim T$ 立面内の限界曲面

この限界線はほぼ三種の領域から成立している。同図に示すように、右方の σ_{th} が小さく σ_m の大きい部分は、主として単純機械応力 σ_m の上限が許容引張応力などで制限される領域であり、繰返し回数 n 、応力保持時間 τ の増大による疲労とクリープの存在によりこの附近の限界は縮小される方向に移動する。また同図上方の σ_m が小さく σ_{th} が大きい所は、繰返し熱疲労の存在や、熱衝撃による単純引張応力の制限によって σ_{th} の上限が制限され、繰返し回数 n の増大によって下降する。

両領域の中間域は熱応力と機械応力の重合により、展性材料では繰返しによる塑性変形の増大、非展性材料では重合引張応力等により制限を受ける領域である。

この限界線はさらに温度 T を考えるときは $T \sim \sigma_m \sim \sigma_{th}$ 空間において定性的に図9に示すように、限界面の変化として表現できる。

熱機関の熱限界を論ずることは、各種材料、温度、

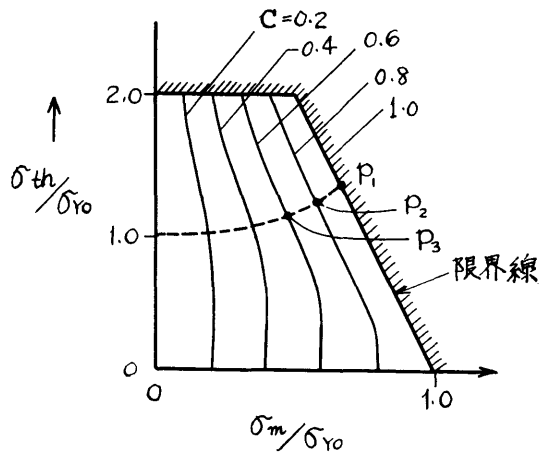


図10 円管における理論的 $\sigma_{th} \sim \sigma_m$ の限界線

n, τ , に対応するこの限界線、もしくは限界面を決定することになり、もし限界線が定められれば、各種機関の熱限界の表示、計算、比較等がある程度統一化されられると思われる。

この限界線(面)についての代表的かつ簡単な一例は在来ボイラの均一加熱管の問題であり、ある仮定に

基く筆者の考え⁽²⁾によると、展性材料での定常熱負荷によって生ずる熱応力 σ_{th} と、内部圧力によって生ずる機械応力 σ_m とは図10のような限界範囲内に入っていないなければならない。

ここで σ_{Y0} はクリープを考慮しないときのその材料の許容引張り応力であり、 C の値は高温保持時間 τ の増大によるクリープを考慮したときの許容引張り応力の低下割合である。

σ_m は管の内径 d と内外圧力差 Δp 、および肉厚によってきまり、また熱応力 σ_{th} は最大熱負荷 q_{max} と肉厚によってきまるので、同図10の限界線上に σ_m と σ_{th} が存在し、しかも q_{max} が最大となるように選ぶときは、肉厚は自動的に定められて消去され、そのさいの σ_m と σ_{th} の値は同図の P_1 P_2 P_3 …等の点上に存在することになり、各点の位置より最大熱負荷限界が決定される。そのようにして求められた q_{max} の値はつぎの(6)式である。

$$q_{max} = \text{常数} \frac{\sigma_Y^2}{d \cdot \Delta p} \dots\dots\dots (6)$$

ここで σ_Y はクリープを考慮しないときは σ_{Y0} 、クリープを考慮する時はその C 倍に下がる値である。

q_{max} はボイラ水管の最大比出力(熱負荷)を与えるもので、(1)式より明らかなように、 q_{max} は管の大きさ、内在及び材料の許容応力等によってきまり、最大比出力は材料の応力の低下によって急激に減少する。

同様な考え方は内燃機関のシリンダ壁やフリーピストンの中央シリンダ壁等にも適用でき、ボイラの場合の q_{max} が内燃機関ではシリンダの内部燃焼と回転数によってきまる熱伝達によって与えられてくる。

この場合には(6)式より

$$d \cdot \Delta p \leq K \frac{\sigma_Y^2}{q_{max}} \dots\dots\dots (7)$$

となり、必ずしも一概には云えないが回転数が早い機関ほど q_{max} が大きいので $(d \cdot \Delta p)$ の値は低い制限値を持つことになり、逆に $(d \cdot \Delta p)$ の大きい大型機関であるほど q_{max} に(すなわち回転数に)制限が生ずる。

以上のようにボイラ水管でも内燃機関でも、単管または単筒当りの最大出力大きさに熱的制限が生ずるが、ボイラ水管の並列可能管数の方が内燃機関の並列可能気筒数よりはるかに多数であるので、ボイラの方が単缶当りの最大容量を内燃機関の1台当りの最大容

量より大きくすることができる。

同様な考え方は外部より冷却するロケットノズル、MHD作動部やノズル、燃焼器容器、ガスタービン翼、原子炉の燃料被覆壁、原子炉の圧力容器、等にそれぞれ σ_m と σ_{th} のとり方は異なるが同様に適用できる。

ガスタービン翼の場合には、冷却を行わないときは、 σ_{th} は小さいが σ_m の値が問題となる場合であり、冷却を行う時は σ_{th} と σ_m の両者が問題となる。

またセラミックやカーボン製の無圧力差高温熱交換器の場合などは主として熱衝撃による σ_{th} が問題となり σ_m は小さい。

参考としてさきの図8の σ_m 、 σ_{th} 平面上に各種熱機関のこの種類の熱限界が与えられると考える領域を示しておく。

3.5.3 比出力と最大出力の増大

さて熱機関の熱限界は決して上記の $\sigma_m \sim \sigma_{th}$ 平面だけできまるものではなく、すでに述べたように他にも多くの因子があって、各種の熱入力方式、出力変換方式の各々に個有の熱限界が生じて機関の最大比出力と単機最大出力がきまってくる。

最大比出力を増大するためにはどのような形式の熱機関がよいかについては、さきの $\sigma_m \sim \sigma_{th}$ 関係や熱伝達の知識等を足場として、さらに定量的な解析が今後可能になるものと思う。

その定量的解析については将来にまつものとし、現在の段階で定性的に考えられることは極めて常識的な線であり、つぎのように考えられよう。すなわち、比出力を大とするためにはさきの3.2.3節の作動流体に要求される特性以外に熱入力及び出力変換形式に関し

- (1) 使用材料の許容応力が大きいこと。
- (2) 主要作動部の圧力差、遠心力等に基づく σ_m が小なること。
- (3) 主要作動部の材料内に生ずる熱応力が σ_{th} 小さいこと。(肉厚が薄いこと、熱伝導率が高いこと、熱膨張係数の小さいこと等)

(4) 単位セル(管、容器、ノズル等)の寸表寸法が小さいこと。

であって、比出力が大きい上にさらに単機当りの最大出力が大きいためには、上の条件すべてが適用される上に、さらにその熱機関が単位セル(管、容器、ノズル等)の並列合成で成立可能な場合は、その単位セルができるだけ単純で並列可能なものである必要がある(例えば水管ボイラの水管)。

以上の三要素についての要求を総合して、比出力と

単機最大容量の大きな熱機関の概念的な姿を描くと、「全く運動部分を有せず、簡単かつ小型の円管のような形状の単位セルの並列より形成され、その中を高压、高密度の作動ガスが高速で直線的に流動し、外部冷却による熱流はできるだけ小さく、全体が許容温度まで高められている」というようなものとなり、この姿からはさきの「直線機関」に類するもの、例えばランキンサイクル液体金属MHD機関（後述）などが最もそれに近いものとして浮び上がってくる。

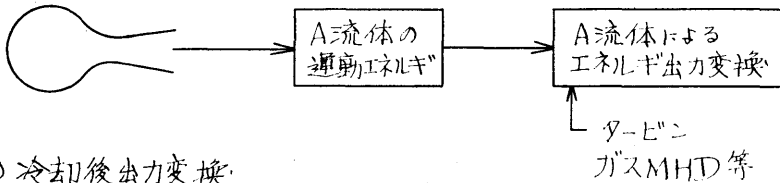
第4章 熱機関方式の探究（一般熱機関）

4.1 その方向

熱機関の開発には勿論在来機関個々の改良開発が必要であるが、それらは他にゆずりまづ夢を大きく伸ばして、大きさ、用途等に促われない自由な新方式の熱機関形式によるエネルギー変換を考えよう。この場合、

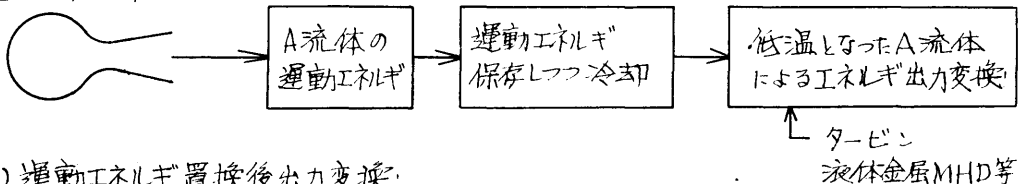
(a) 直接出力変換

高温A流体



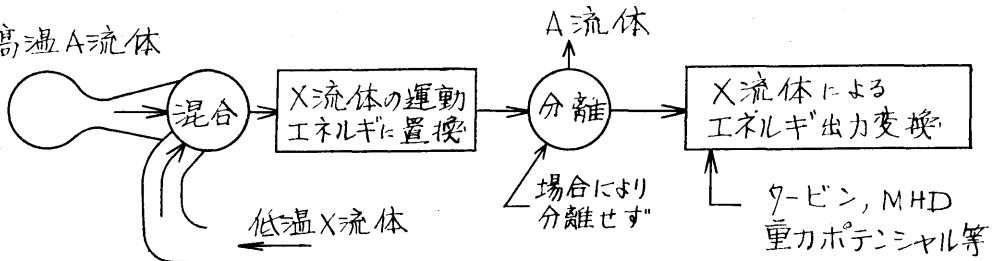
(b) 冷却後出力変換

高温A流体



(c) 運動エネルギー置換後出力変換

高温A流体



われわれは何等在来の形式にとらわれることなく、さきの作動流体、熱入力、出力変換形式の三者を任意に組み合わせた多くの新熱機関を構成させてみる事ができる。

またさらに作動流体を二種以上とし、二つ以上のサイクルを複合させるとすると、さらに無数の変化が生ずるのである。

このさい資源と作動流体種類をさておいて、大出力かつ高温作動をするという理想論からすると、すでにのべたように熱入力形式としては作動流体内部発熱形式のものが最も高温となり得ることと応答性のよいこととですぐれている。また出力変換形式としては大出力を処理できる点と、遠心力等による応力のかからない点、可動部分のない点から直線機関形式をとるものが最も魅力的である。

4.2 エネルギーを二段変換する高温熱機関

以上の線に基く直線的な熱機関は果して可能であるかという点、ロケット、火砲のような特殊目的を除いては、そのままでは簡単ではない。ここでさらに考えられることは、高温作動流体は、高温の状態ではその

図 11 高温作動流体よりの二段式出力取り出し方式の各種

作動が楽な何らかの高温直線出力変換方式で作動し、そのエネルギーを何らかの形で、低温で作動する在来形式タービン、またはMHDで低温状態で最終的に取り出すというエネルギー二段変換方式の考え方の導入であろう。

その方法には三つ考えられる。図11に示すように従来は同図(a)のように、高温流体(A流体)を直接、タービンまたはガスMHDのような出力変換部に導いていたが、二段変換方式の一つは同図(b)のように、高温流体を一たん同一流体の運動エネルギーに置換してからそのエネルギーを保存しつつその流体を冷却し、低温となった流体を作動部に導く考え方であり、その二は同図(c)のように、高温流体のエンタルピを第二の流体(X流体)の運動エネルギーに変換し、(X流体の高温化が望ましくないときはX流体があまりその温度を上

昇しないうちに変換を完了する)そのX流体を作動部に導く考え方で、その三は(b)(c)の複合である。

4.3 直接出力変換に属する新熱機関

さて、以上の考え方に基いて新しい熱機関方式をいくつか提案してみよう。まず二段変換に入る前に在来の直接変換〔図11(a)〕に属するものとしてどのようなものが、さらに前進的に考えられるか例示してみよう。

4.3.1 フリーピストンMHD内燃機関案

まず作動流体内部熱入力 の代表形式として従来の往復内燃機関を取り上げ、それと直線出力方式のMHD形式とを組み合わせるものの私案を示すと図12のような双子シリンダのフリーピストン機関状の熱機関が考えられる。

この機関は左右のシリンダが対称で中央に掃気孔が

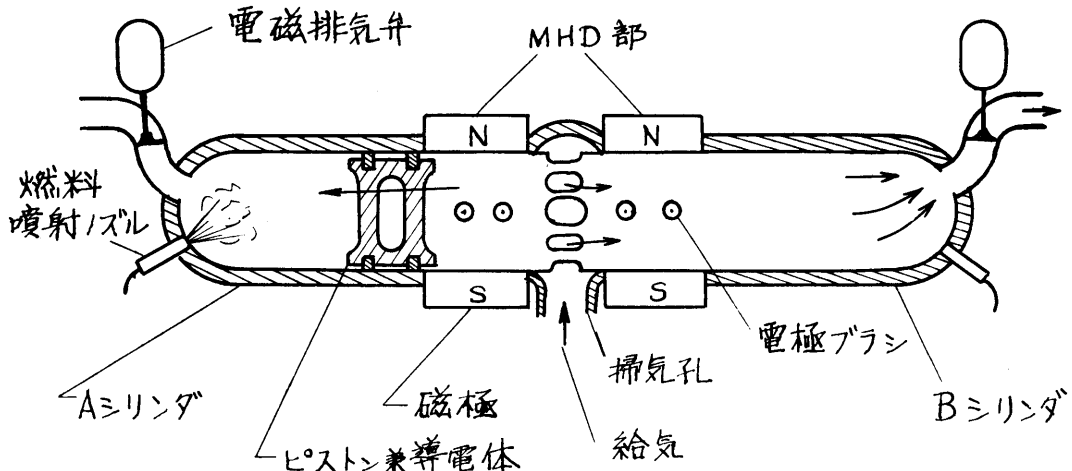


図12 フリーピストンMHD内燃機関案(二サイクル単流掃気ディーゼル型)(左右交互爆発)

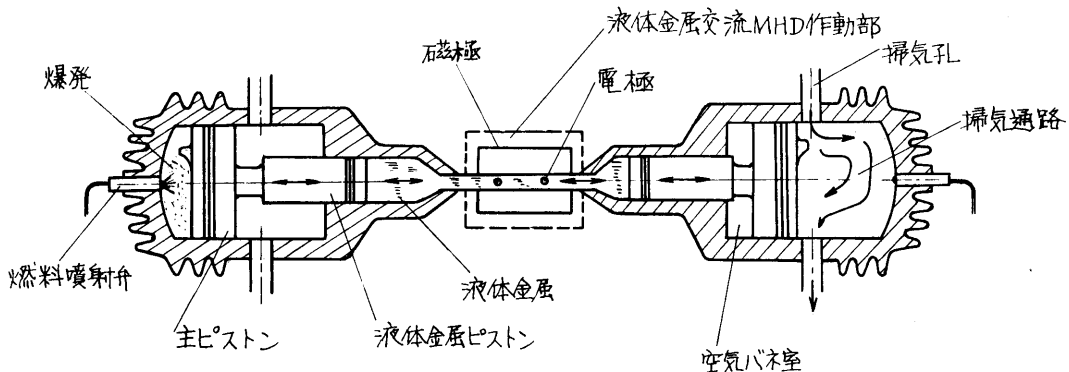


図13 液体金属MHD作動部を有する双子MHD内燃機関案(左右ピストンは同一方向に動き往復運動)

あり、両頂部に電磁排気弁があつて交互爆発による二サイクル単流掃気を行い、中央附近に磁極があつて、ピストン兼導電体が往復通過するとき、紙面に直角方向に交流電気出力を生ずる。(発生電流がピストンを直接流れる)

この形式はピストンが軽いほど比出力が大きくなるが、簡単な計算によると通常の強力磁場ではピストンは極めて軽い必要があり、かつ気密と摩擦と導電と冷却の四つの問題が全部ピストンおよびピストンリングにかかってくる点が難点となる。

4.3.2 液体金属フリーピストンMHD機関案

先のピストンの難点を、もし、あくまでピストンを有するという前提で解決しようとする、例えば図13に示すように、二つの同一方向往復運動を行う二つのフリーピストンの間に Bi, NaK のような低温で軽い液体金属をはさんでそれを往復しMHD作動部で出力を取り出すものも考えられる。このさいMHD部では流路を絞り最大約 60m/s くらいの流速にして磁場を小さくする。

このようにすれば図12の機関におけるピストンの問題はかなり軽減されるはずである。しかし、ピストン

部分が液体金属の部分だけさらに重くなり、機関全体としての比出力が低下する欠点はいぜんとして残るわけである。

4.3.3 双子パルスジェットMHD機関案

上のフリーピストン方式の比出力低下の欠点であるピストンを完全に除くものとして純流体を考えよう。

まずさきの図12, 13のものの改良案として、図14に示すようにパルスジェット (V-1号) 装置を2ヶ対向するように置き、衝撃波の往復だけで燃焼ガスによるMHD作動を行わせる開放サイクル対向パルスジェットMHD機関が提案できる。このさい、対向式とせず一方だけのパルスジェットでも発電できるが、MHD制動によるガス慣性の低下があるので対向式の方がよいと思われる。

4.3.4 密閉流体双子MHD機関案

さて、燃焼ガスによる上記のような開放サイクルでは、導電性増加用の添加剤の回収を必要とするので、密閉流体サイクルを考えよう。

そのうち作動流体自体の発熱方式をとるものの私案の一例として、ガス状核燃料を使用する双子ガス原子炉MHD機関を示すと図15のようになり、また作動

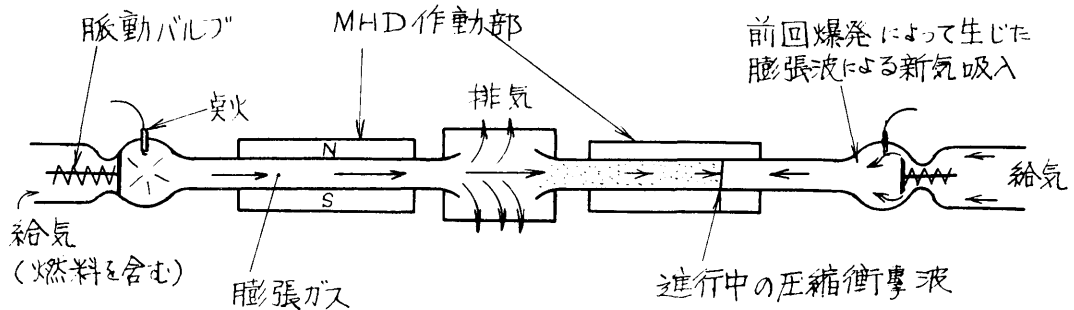


図14 対向パルスジェット型式MHD機関案 (左右交互爆発)

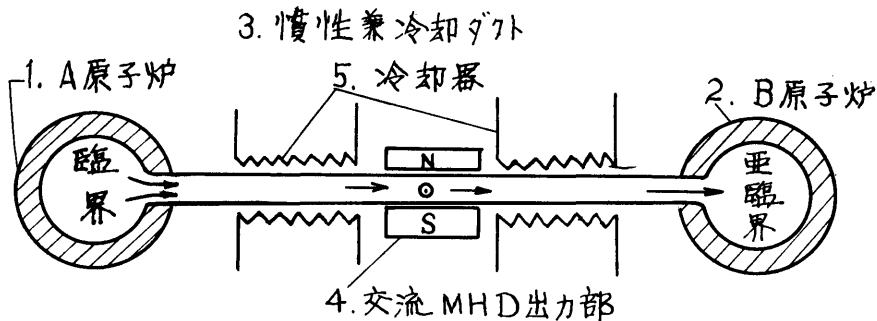


図15 ガス状核燃料を使用する双子原子炉MHD機関案 (左右交互に臨界)

流体の固体壁加熱式をとるものの例として気液二相流形式炉を考えると、図16のようになる。

いずれも左右の原子炉が交互に臨界となって中間流体を左右に運動させ中央のMHD作動部から交流電気出力を取り出す。

この両者のうちとくに図15のものは超高温作動ができるが、臨界条件の達成と慣性ダクトの冷却に問題があり、また図16のものは、液の慣性が大きいので比出力を大きくするためには全体をかなり小さくしなければならないという往復式の固有の欠点が生じてくる。

いずれにせよ上記の諸形式は内燃機関の延長と見るべきであって、このままでは勿論不十分であるが、その小型では比出力が大きいことを生かして、特に移動体（船舶、自動車等）用などに考えてみるのも興味あることと思う。また流れの方向を旋回流とするものも考えられよう。

4.4 冷却後出力変換に属するもの

冷却後出力変換方式の一種として最も早く発表され

たものは図17にその原理図を示すシャピロ⁽³⁾のサーモプレッサである。

同図に示すようにサーモプレッサは仮りに約 0.8~0.5 kg/cm² abs, 400°C~600°C 程度の高温度低圧ガスをノズルでさらに膨張させ、その中に冷却用の水を噴射して急速にガスを 100°C 程度に冷却すると、ガスの密度の増大によってガスの動圧分が増加し、ディフューザで動圧を回収すると出力側に 1 kg/cm² abs の低温高圧（入口側よりも高圧）ガスが出てくる予測のもとに、ガスタービンや内燃機関の排気出口に使用して排気圧力を低下させ出力の増大を計ろうと考えたものである。

この方式は実験によって噴射水のアトマイゼーションに要する加速損失および流路の流力損失が大き過ぎて実用に供するほどの効果は上らなかった。しかしこのように冷却によってガスの自己エネルギー変換を行うことができることを始めて示唆したものとして注目し値する。

この変換方式を発展し、適当な作動流体を選び高温

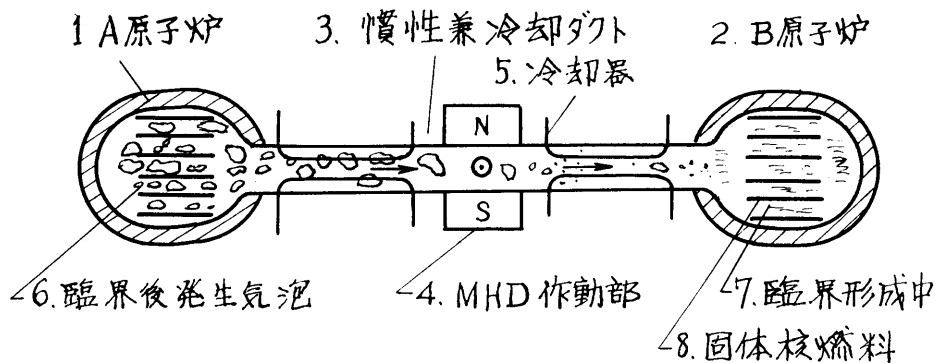


図 16 液体金属使用固体燃料双子原子炉MHD機関案（左右交互に臨界）

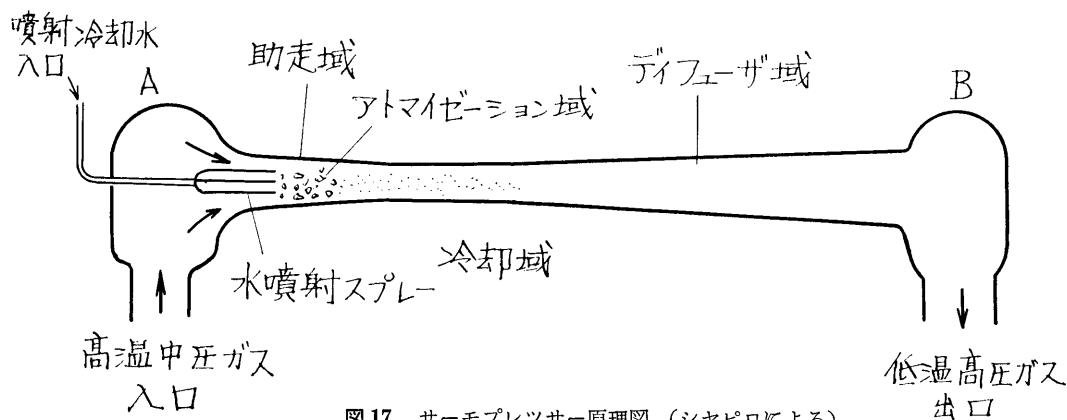


図 17 サーモプレッサ原理図（シャピロによる）

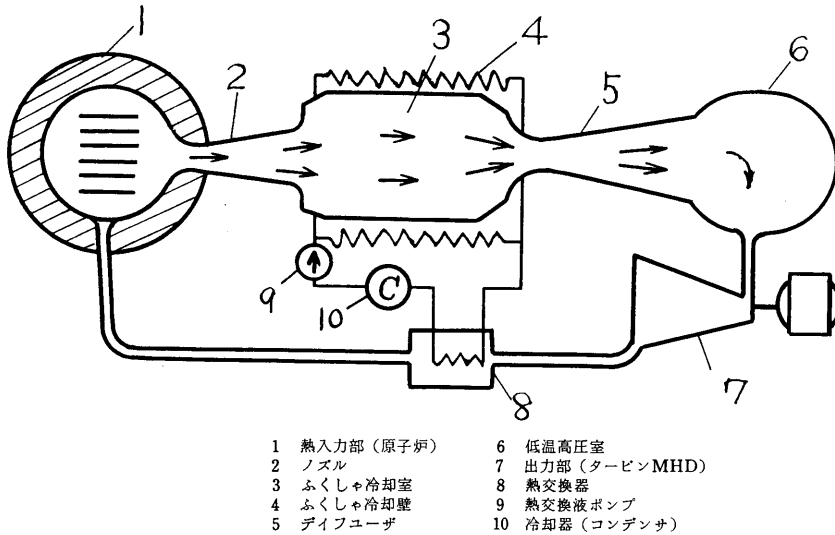


図 18 仮想ふく射サーモプレッサ機関案

熱機関を組んでみよう。そのさい問題となるのは冷却方法であって、流体内部摩擦および管路摩擦を避けるためには、固体壁に関係しない熱入力方式（この場合は高速流の熱放出）の一つであるふく射熱伝達を使用するか、もしくは熱伝達率のきわめて高い凝縮熱伝達を使用するかであって、内部摩擦の少ない点からは前者の方が理想的である。

(a) ふく射サーモプレッサ機関案

ふく射熱伝達を使用するものの私案は、図18に示す仮想ふく射サーモプレッサ機関であって、任意の高温ガスは2のノズルを出て高速となった後3のふく射冷却室を通り、運動エネルギーを保存しつつ急冷され5のデイフューザで圧力上昇を行って6のタンクで高温低温（1にくらべて低温の意味）となり、再び1に戻る間にタービン7（もしくはMHD）で出力を取り出す。

このようにすると、もし他の損失がなければ取り出し得る効率は1の温度を高温側とし、6の温度を低温側とするガスタービンサイクルと同一となり、ガスタービン入口では実用上さしつえない低温でも実際は高温ガスを入れたときと同様な超高温熱機関を得ることができるわけである。

しかしこの方式はふく射冷却がほぼ温度と伝熱面積だけによってきまってくることに制限を受け、実用的にある限度の大きさで実現するためには高温側温度を4000°C程度にし、かつ高温室を巨大化する必要がある点に難点がある。しかし将来制御核融合反応などが

実現した時は MHD と組み合わせて考慮できるであろう。

(b) 凝縮インゼクタMHD機関 (ジャクソン・ブラウン)

凝縮熱伝達を使用するさいの冷却後出力変換方式の一例は、図19に示すようなジャクソン・ブラウン (Jackson & Brown)⁽⁴⁾等によるコンデensingインゼクタ (凝縮インゼクタ) を使用する液体金属MHD機関であり、原子炉1で高温蒸気となった蒸気相の液体金属はノズルを出し、出力付近で周囲から吹き込まれるサブクールされた (飽和温度以下に冷却された) 液相を吹き込み、蒸気相を凝縮して全部液相にする。

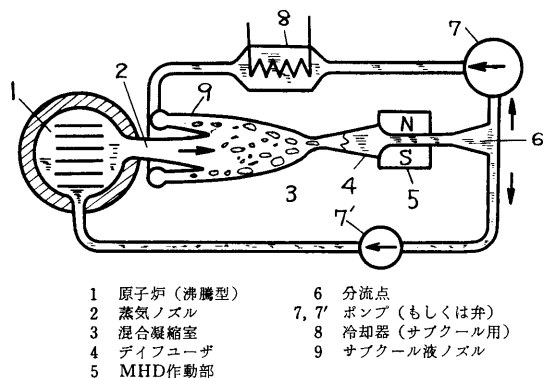


図 19 コンデensingインゼクタ使用の液体金属MHD機関 (ジャクソン・ブラウンによるものを変形したもの)

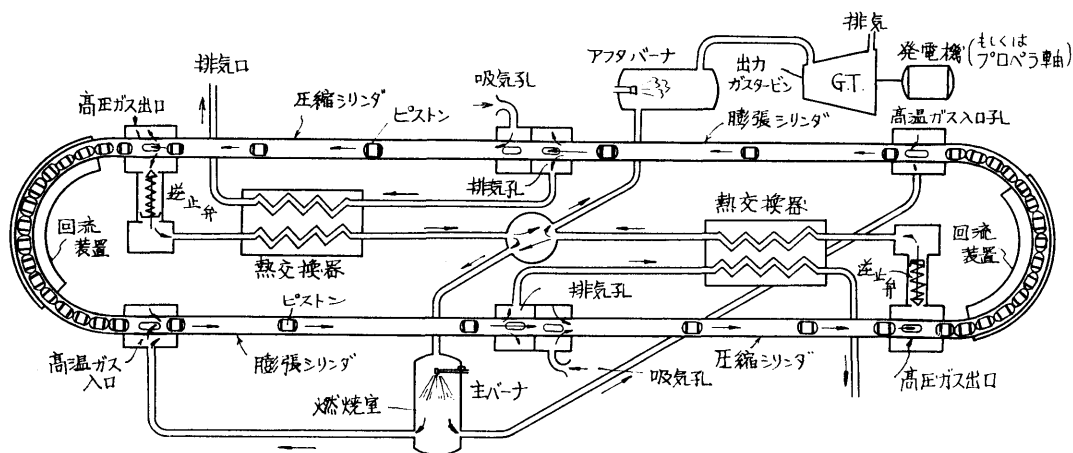


図20 回流ピストン機関本体配置図・案

このようにすると蒸気相の持つ運動エネルギーはディフューザ4の出力の液相の全圧上昇の形に変換される。その圧力を利用し、5のMHD作動部で出力を取り出すわけである。

この方式は在来のボイラ用インゼクタと同様なものと考えられ、そのままでは凝縮時やディフューザでの内部損失が大きいため、あまり効率は高くないと考えられる。しかしいずれにせよ、高温蒸気の出力を二次低温で外部に出力として出す直線機関方式である点で特色があり、今後大いに研究されるべきであろう。この方式に関連する考察は次節を含めてさらに4.6節に示す。

4.5 運動エネルギー置換出力変換方式に属するもの

この方式は図11(c)で述べたように、高温ガスをノズル等で膨張させるとき、その運動エネルギーを他の第二流体に置換して、二次的に低温で最終出力を取り出そうとするもので、広い意味では在来の内燃機関のピストンは、いわばその第二流体として往復または回転運動の、単一金属ピストンを使用しているともいえる。

4.5.1 回流ピストン機関案

在来の内燃機関を直線機関化して、この方式に延長するとして熱機関を組んでみると、図20のような回流ピストン機関が提案できる

同図は陸上競技のトラック走路状に回路を組んだシリンダ内を、図21に示すようなラグビーボール状の軽いピストンを多数、流体のように連続的に一方に回流させるものであって、往復運動を基幹とした在来の

内燃機関とは全くおもむきを異にしている。主要作動部を説明すると高温ガスは高温ガス入口より入り、直線部分の膨張シリンダでピストンに運動エネルギーを与えて高速した後、ガスは排気孔より排出される。新給気は掃気孔より入って連続する二つのピストン間の空間のガスを掃気置換し、給気は連続的に入って来るピストンにより圧縮シリンダ内で圧縮されて、逆止弁より排出され、同時にピストンは低速となり低速で回流曲管部を回り再び直線部分の作動をくり返す。圧縮された給気の一部はピストン運動に、他は外部出力タービンによって出力を取り出せる。

この機関のサイクル効率は、丁度フリーピストン機関のそれに似ている。

ピストンは直線部分走行用に、シリンダと微小間隙を有し、微小漏洩を許容するガス軸受形式の無接触ピストンリングを使用してピストン全体を浮遊させ、また曲管部では前後のピストンヘッド曲面を軸受とするようにする。このようなリングに関しては当所で若

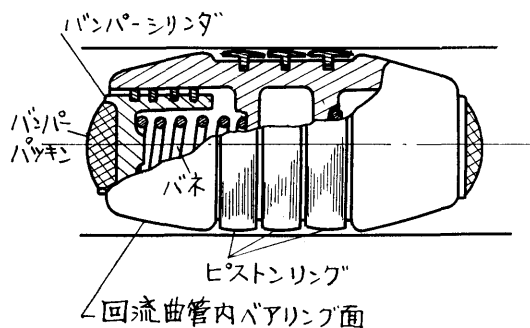


図21 回流ピストン機関ピストン概念図

干の実験を行い好成績を得ている⁽⁹⁾。

この方式はまたいわば在来の内燃機関の各行程をばらばらにして直列に組み立てたものと考えられ、多くの点で内燃機関に似ているが、そのピストン運動が直線状で連続作動すること、その速度の大きいこと（最大 100 m/s 以上）とで在来の内燃機関より比出力が大きく、かつ単シリンダあたりに処理し得る最大出力限界が在来のものより飛躍的に大きく取れ、十数万kWでも可能と考えられる点に特徴がある。しかしピストン運動の制御が困難で、とくに圧縮終り部でのピストンどうしの追突に対する緩衝に最も難点がある。

この方式は、圧縮シリンダの代りにMHDによるピストン兼電気出力取り出しを行う組み合わせも考えられる。とくに密閉蒸気相を使用し、直接MHDで出力変換する密閉サイクル回流ピストン機関案を図22に示す。

4.5.2 X流体運動エネルギー置換機関

運動エネルギー置換後出力変換方式のさらに正統的なものは、上記の連続ピストンの代りに任意の流体（X

流体と呼ぼう）を運動エネルギー担体として利用するものである。わかり易くするため燃焼ガスを一次高温流体とし燃焼ガス側は開放サイクルを行う場合の正統的な本方式機関の原理図を図23に示す。

同図よりわかるように本機関は回流ピストン機関の連続ピストンの果した高温ガス膨脹による高速化と新給気圧縮の役目をX流体に行わせるもので、固体ピストンと異り、さらに連続的であること、流路断面積が適当に変化できる点が異なる。

X流体としては、さきの作動流体の章で述べたものがすべてあてはめ得るが、その効率が良好なためにはX流体は、(1)密度の小さいこと、(2)一次流体に対する流力抵抗の大きいこと、(3)分離効率の良好なこと等が重要な要素となり、もし粉体を使用するとすると、重量あたり比抵抗の極めて大きい「ちり」のようなものがよいことになる。また液体を使用するとすると、次節で論ずるような特別な二相流の状態制御を行う必要が考えられる。

この方式はもちろん密閉サイクルでもよく、また出

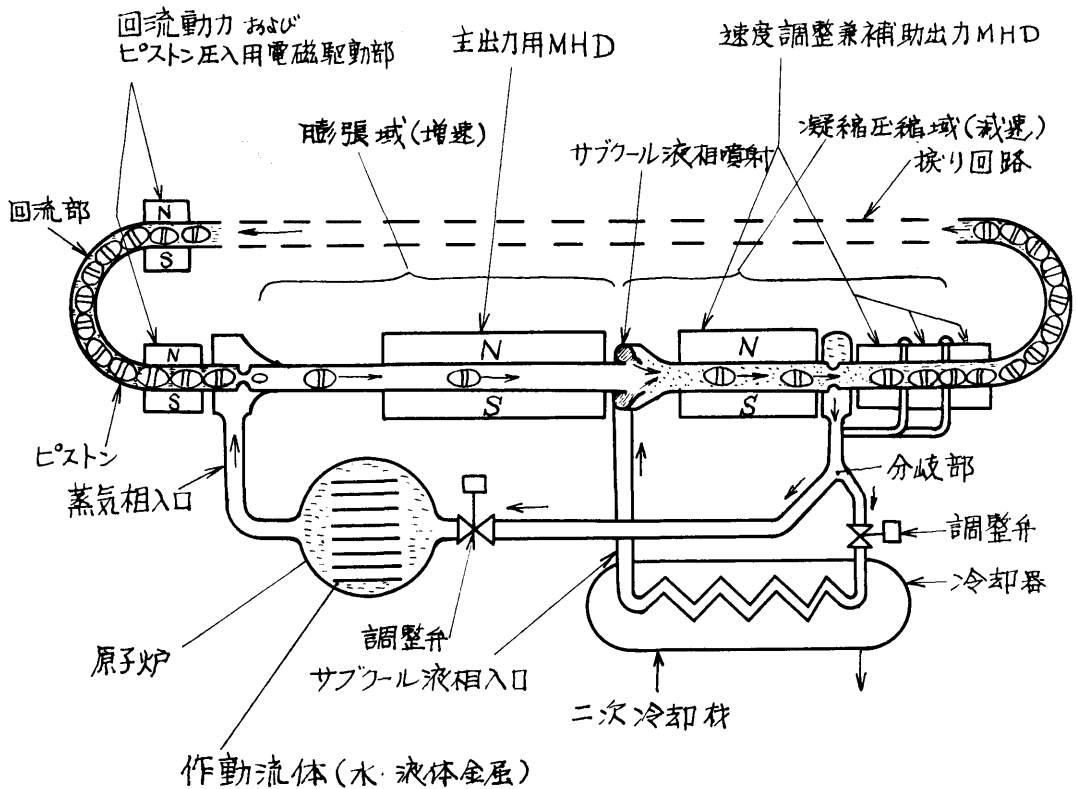


図22 密閉ランキンサイクル回流ピストンMHD機関案

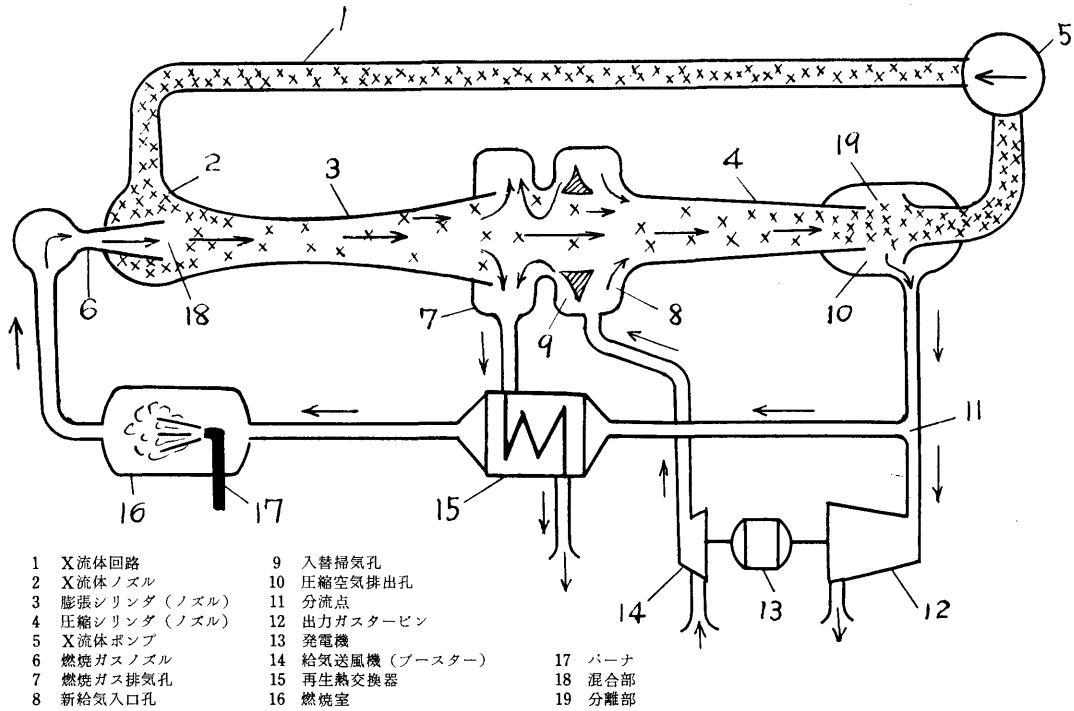


図 23 運動エネルギー変換流体を使用する熱機関案 (開放サイクルの場合の例図)

力作動部として圧縮筒 4 の代りに MHD を使用してもよい。

この方式は流体選定に難点があり、また X 流体の高温化を避けるには熱損失が増す欠点があるが、やはり高温熱機関の一つの方式としてある種の可能性を含むものと思う。その点についてはさらに次節で詳論したい。

4.6 運動エネルギー変換効率の向上策

4.6.1 運動エネルギー変換効率について

さて以上の二種の二段出力変換作動方式に共通する最大の問題は、主として気相が考えられる一次流体のエンタルピを、いかに有効に二次流体 (気相、液相または固相)、または二者の混合物の運動エネルギーに変換するかということであり、その運動エネルギー変換効率が熱効率や、比出力に関連する最も重要な事項である。

従来のそれに類するものや、今まで述べた各種機関での基本的な変換ノズル形式を列挙すると図 24 のようになる。

ここでノズルが、全く単相の一次流体だけを噴射するときは (a) の単純ノズルであり、二次流体が液体及び粉・粒体の場合は同図に略示するように (b) ノズル

前混合エゼクタ、(c) ノズル後混合エゼクタ (熱の出入なし)、(d) インゼクタ (同一種流体での凝縮による熱の出入あり)、(e) サーマプレッサ (他種流体による熱の出入あり)。図 17 参照)、であり、また二次流体が固体の場合は連続ピストン流ノズル (図 22 参照) がある。

いま運動エネルギー変換効率を η_m とし η_m を

$$\eta_m = \frac{\Delta E_m}{\Delta i} \dots\dots\dots (8)$$

で定義する。ここで Δi はシステム内に生ずる最大圧力降下に対応する両流体のエンタルピ落差の総計であり、 ΔE_m は両流体の運動エネルギー及び圧力エンタルピの増加分の総計である。もし (a) のように一次流体だけをノズルから単純噴射させたとすると、 η_m は単純ノズルの運動エネルギー効率に一致し、通常ガスや蒸気を適正なノズルから単純噴射させるときの運動エネルギー効率は摩擦損失がないときは理論上 100% であり、壁摩擦損失があったとしても 95% 以上である。

二次流体 (またはピストン) が存在する場合、最も理論的な η_m が高いのは (f) の連続ピストン方式であって、もしピストンに全く摩擦や漏洩がないとし、かつノズル出口で内部ガスが背圧に一致した完全膨脹を

行うような適正設計であるとするときは η_m は理論的にやはり 100% となり得る。

他の (b) (c) (d) (e) はいずれも混合と加速時に両流体の衝突、スリップが存在するため仮りに壁摩擦が全く存在しないとしても η_m は必ず低下する。

最も η_m の低い場合は (c) のノズル後混合エゼクタの場合であって、両者の混合および加速は全く「モーメント一定」の方則によって支配され運動量は保存されるが運動エネルギーは散逸する。

完全膨脹後混合を行うエゼクタにおける簡単な計算によると、いま両流体入口における一次流体対二次流体の重量流量比を $1 : \alpha$ 、両者の混合前最大速度比を $1 : \beta$ とすると、モーメント保存則より η_m は

$$\eta_m = \frac{(1 + \alpha\beta)^2}{(1 + \alpha)(1 + \alpha\beta^2)} \dots \dots \dots (9)$$

で表わされる。

本式に従う η_m の値を α 、 β の関数として図25に示す。

同図のように速度比 β が小さい時は η_m は流量比 α が大となるほど低くなり、速度比 β が大きいときは、 α のある位置で η_m は極小となり、それ以上の α に対して再び上昇する。

通常流量比 α が5以下のときが使用されることが多いので、そのさいは流量比が小さいほど、また二次流体の噴射速度が大きいほど η_m は大きい。

他の図24 (b) (d) (e) について考えると、ノズル前混合時の (b) は、もし両流がガスまたはそれに準ずるホモジェニアスな流体のときは (a) の場合と等しく、理論的に η_m は 100% となり得る。しかし、1次流体が気相で2次流体が液相のときは、(b) は二相流ノズルとなり、両者が同一流体の蒸気相および液相のときは中間で蒸発、または凝縮現象が重合される。

このような二相流ノズルは図26に略示するように膨脹過程における衝突と加速および気液間のスリップが存在し、そのため η_m は低下してノズル後混合の図24 (c) の場合の $\beta=0$ に近づき η_m は (a) と (c) の中間となる。

また (d) のサーモプレッサの場合も全く同様で、噴射位置にもよるが、やはり (c) のモーメント保存の場合に近い。

(d) のインゼクタの場合には、もし両者混合物がホモジェニアスであるときは η_m は理論的に 100% となり得るが、実際は凝縮により図27のような生成液面による一種の衝撃波（コンデンセーション・ショックに類する）が発生するためかなり運動エネルギーの損失が生じ η_m はやはり低効率の (c) の場合に近づく。現実には在来ボイラ給水用インゼクタでは η_m は数パーセント以下の低率である。

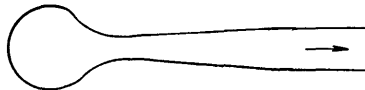
このように η_m は (a) と (f) の時は高いが他の場合必ず低下を示している。

さきの図19に示した凝縮インゼクタ機関の効率についてのジャクソン・ブラウンらの報告はインゼクタ効率をいささか過大評価していると考えられる (η_m が 80% 出しうるのではないかと見ている)。

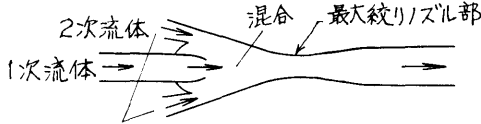
4.6.2 望ましい二次流体の種類

さて実際問題として η_m を上昇するため二次流体と

(a) 単純ノズル



(b) ノズル前混合エゼクタ (ノズル)



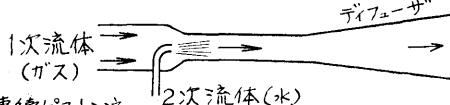
(c) ノズル後混合エゼクタ



(d) インゼクタ



(e) サーモプレッサ



(f) 連続ピストン流ノズル

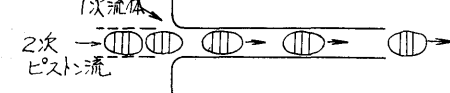


図24 エンタルピーを運動エネルギーに変換するノズルの諸基本形式

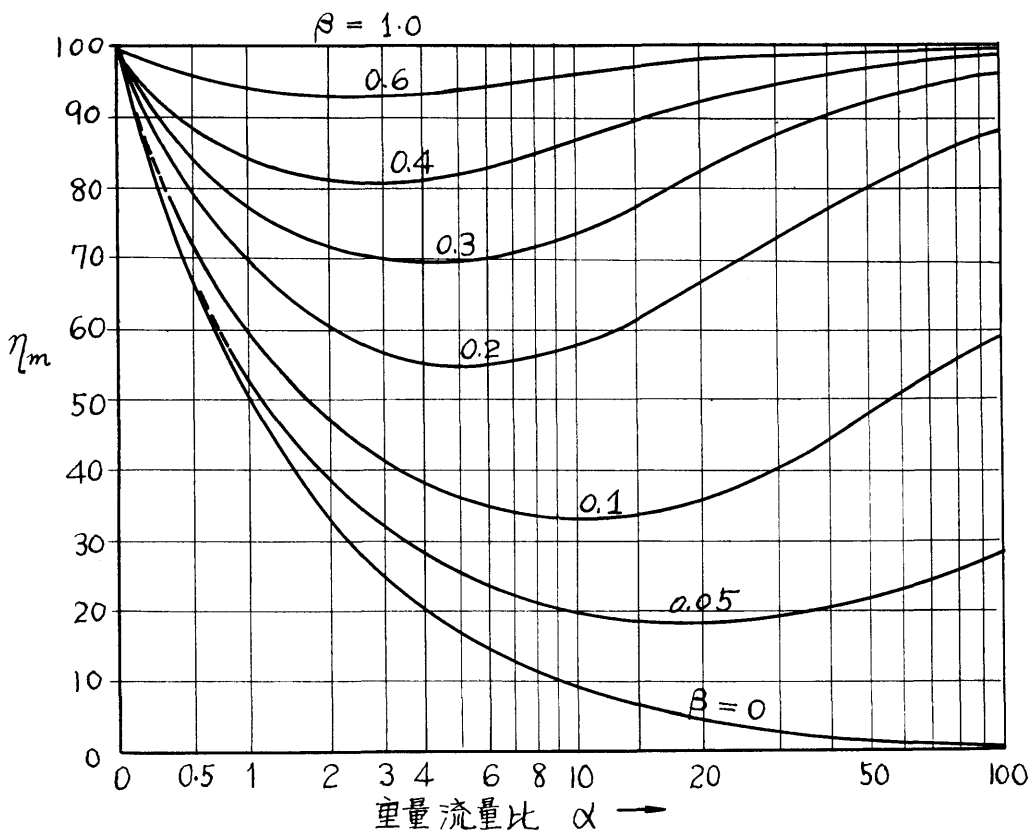
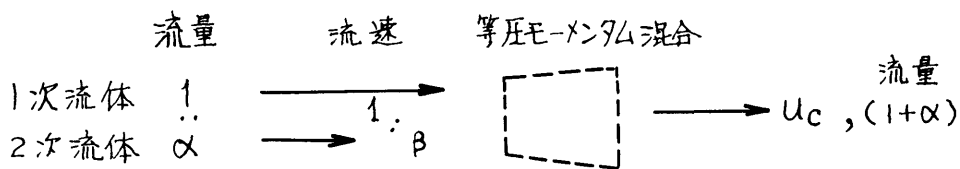


図25 等圧モーメント混合におけるエネルギー効率 η_m

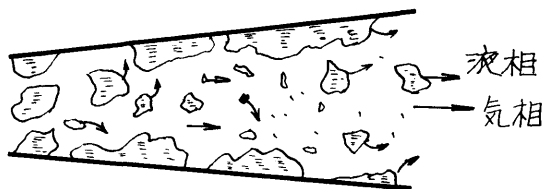


図26 二相流の流れの概念

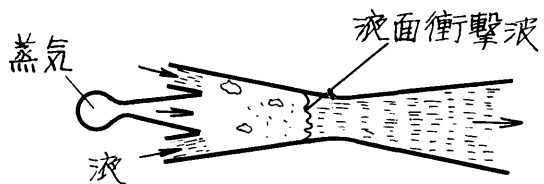


図27 インセクタにおける液面衝撃波の発生

して (f) のような固体ピストンを断続的に運動させることは決して不可能ではないが、技術的な難点を多く持っているし、また二次流体として粉体、粒体、ちりのような固体を利用することも理想的な粉体の選定もしくは製作に難点をもっている（それについてはさきの図23のX流体の選定の項参照のこと）。

そのため二次流体としてはガスもしくは液体を使用するのが技術的な難点も少く取り扱いも楽である利点を有している。

4.6.3 両者ともガスの場合

さて一次二次両流体ともガスである場合は、もし図24 (b) 形式のノズル前混合を行う限り η_m が 100% となり得るので、少くとも η_m については高効率であ

る。そのようなノズル前混合で作動する熱機関サイクルは、例えば在来ガスタービンでの燃焼ガスの温度を下げるため冷却空気を吹き込んで空気比を増すとか、または蒸気噴射を行うとかの場合や、またガスMHD機関でガス内に導電性向上のためセシウム、カリウム等の蒸気を混入するときのような特殊な場合にあってはまる。しかし純粋に高温かつ高効率とする目的でガス～ガスのノズル前混合する高温二重サイクルを組むことにはまだ良い考えが見出されていない。

両者ともガスで、しかも図24(c)のノズル後混合する場合はモーメント保存則のため η_m は低下するので問題にならない。

4.6.4 一次流体がガス（または蒸気）で二次流体が液相のとき

一次流体が、ガス又は蒸気で二次流体が液相の場合が、最も実際の直線機関サイクルとして考慮できる。

この場合は図24(b)のノズル前混合でも、また同図(c)のノズル後混合でも、また(d)のインゼクタ形式でも必

ず二相の衝突、スリップ、衝撃波等のため全部 η_m は100% となり得ず、ほとんどモーメント保存混合の場合（図25の η_m ）に近い。

このように従来から考えられている形式内では気～液の二相流ノズルはエネルギー的に損失が大きいわけである。

もちろん今後どのような在来形式が最も η_m が高いかを、きめるための実験と理論研究は大いに必要である。

しかし、このさい筆者としては図24(f)のようなピストン形式の η_m が高いということからの類推より気液混合系のノズルにおいてもその二相流の流動様式の御御によって、もしかりに図28のようなピストン流形式の流動が達成されるならば η_m は高くなるのではないかと考える。もし液膜が常に安定で周囲の壁と接触して気密を保ちつつ前後の圧力差によって前進し、かつ壁摩擦が全く存在しないならば液とガスの関係は図24(f)の場合や、回流ピストン機関のピストンとガスの関係に相似して η_m は100% ともなり得る。

しかし実際は液膜の安定性が低く、かつ壁摩擦が存在するため、低い圧力差で液膜は簡単に破壊され易く、安定なピストン液膜は成立し難い。液膜の安定をはかるためにはノズル直径を小さくし、かつ壁摩擦を小さくすることと液膜の厚さを増すこと等であるが、そのうち壁摩擦を減らすためには、例えば壁を高温にして表面で膜沸騰を生じさせて、液と壁との間に完全なスリップを生じさせる方法が考えられ、またMHD作動部のような電流と電磁場の下では、液膜の安定を増させる可能性も存在する。このような液膜ピストン流を

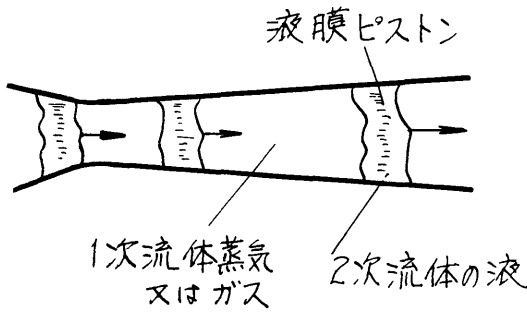


図28 二相流のピストン流動の概念図

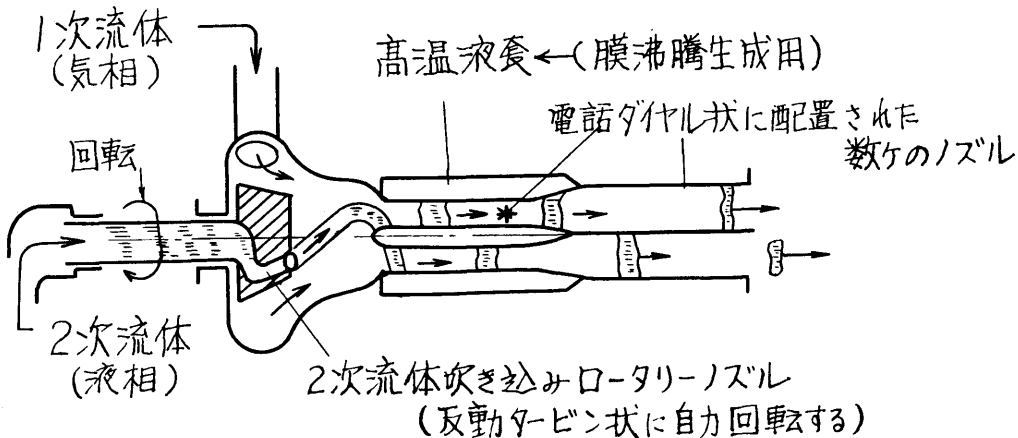


図29 ピストン流動を生成する二相流制御ノズル案 (ロータリーノズル吹込み、膜沸騰壁面形式)

作成するには、ノズルの入口に何らかの液体断続弁を設けなければならないが、その弁としては他からの駆動か、もしくは自己の噴出反作用によるロータリー弁により二個以上のノズルに液流を交互に吹き込む作動をさせればよいと考えられる。

以上の考えに基く液流ピストン生成用の二相流制御ノズル案を図29に示す。

このような液流ピストンノズルやその今後の改善に基く何らかの二相流の流動制御に基くノズル方式は、もし想定通り作動するならば他種類の気相、液相の場合ばかりでなく、同一種類の液気相において非凝縮作動のエゼクタ形式の場合も、また凝縮の生ずるインゼクタの場合も使用できるはずである。そのさいの仮想的実例として図30にこのような二相流制御ノズルを使用する不活性ガス～液体金属MHDサイクルの線図を、また図31に単一金属の蒸気、液相系のMHDサイクルの線図を示しておきたい。

η^m を増大するための二相流制御ノズルの形式としては、必ずしも図29の形式だけではなく、将来さらに

適切な方法が発見されるものとする。

4.7 重力ポテンシャル機関

さて以上のような高温流体のエンタルピを一度他の形のエネルギーに置換後最終出力に変換する他の変形の一つとして、高温流体のエンタルピを第二次流体の重力ポテンシャルに変換する考え方ができる。

この方式は運動エネルギー置換における大きな流力損失、とくに圧縮損失やディフューザ損失を防ぐことができるはずである。

図20の回流ピストン機関を重力ポテンシャル機関に変形すると図32 a)の砲弾機関が考えられる。これは同図を見ればわかるように、高温ガスを連続ピストンの重力ポテンシャルに置換するもので、高温ガス作動、二次低温出力の二段変換式熱機関の典型的なものとなり得る。しかし地球上の重力加速度では、大きさあたりの比出力は明らかにきわめて小さい。

図32 b)は(a)のピストン(砲弾)の代りに流体金属二相流を使用するもので、同図のように原子炉によりい

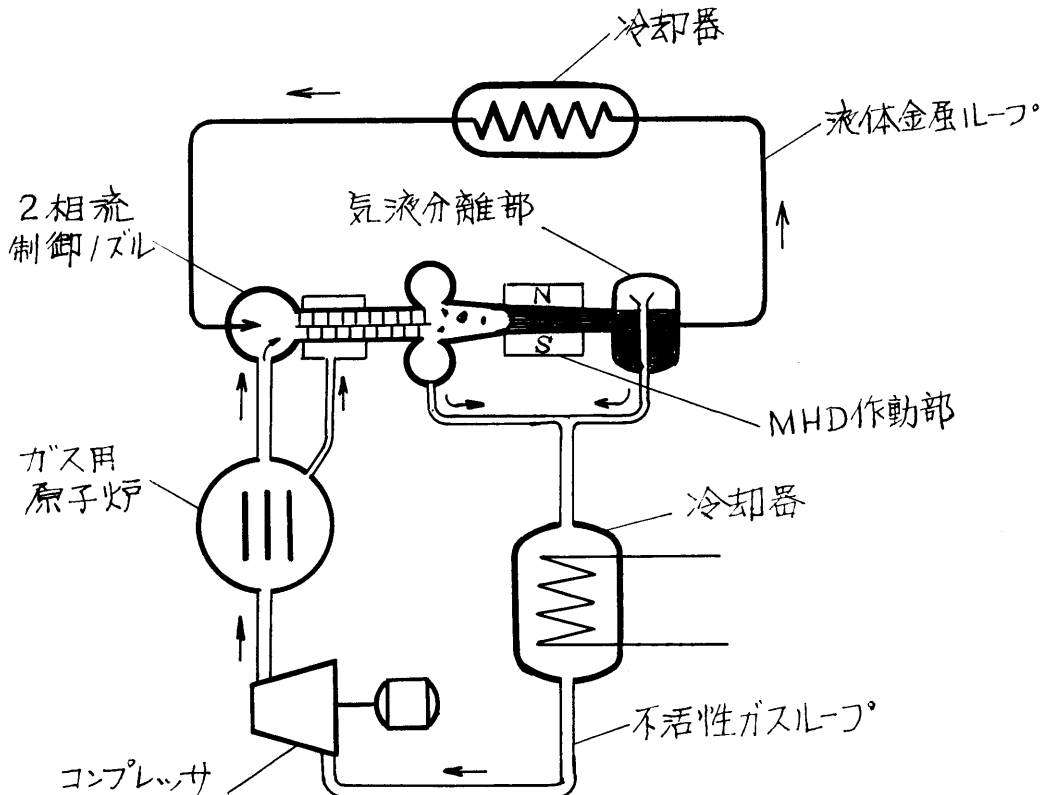


図30 二相流制御ノズルを使用するさいの不活性ガス～液体金属MHD機関サイクル線図案

による浮力によって生ずる循環力によって出力を取り出そうとするものである。

そのさい気泡の微細化による浮力の増大をはかるため多数の網状体を入れ、一種の二相流制御を行うが、かなり微細化してもやはり気泡のスリップの存在による流動損失が大きいのでポンプ効率が悪く、かつ通常の液体金属と地球重力利用ではやはりそのヘッド差と処理エネルギー量が小さすぎて、機関の大きさ当りの比出力が小さ過ぎる欠点がある。

しかしこのような重力方式は、少くとも重力を利用するという点では、最近の水力発電において注目されている可逆ポンプ水車によって、電力を水の重力ポテンシャルに置換するなどの方式と軌を一にするものであって、無視し去ることは望ましくない。例えば図32(b)の原子炉の代りに地下深くの地下熱を利用する時などに案外利用できるかも知れないと思われる。

第5章 新形式船用機関方式

5.1 その要求される性質

さて以上の新形式熱機関の追求は、最も一般的な立場から船用、陸用の用途を特に問題としないで論じてきた。本章では問題をわれわれの最も関心がある船用機関に絞って考えてみよう。

船用といっても船舶の大小や用途、形式によってき

わめて広い範囲の特性が考えられる。しかしここでは最も中核となる大出力大型高速船舶を対象とするものだけについて考えるものとする。そのような大型高速船舶の将来の船用機関として具備すべき性質にはつぎのような事柄が要求される。

- (1) 大出力(少くとも10万kW程度以上)を出し得ること。
- (2) 大出力を過大な伝達装置なしにプロペラに伝達しうること。
- (3) 大出力に対し、小型・軽量・コンパクトであること。またできれば工場内プレパッケージ化が望ましい。
- (4) 高効率であること。
- (5) 安全性の高いこと。
- (6) 負荷変動に耐え、かつ制御性のよいこと。
- (7) 経済性の高いこと。
- (8) 信頼性の高いこと。振動動揺に耐えること。
- (9) 修理・維持が容易で近接性のよいこと。
- (10) 流動化された石炭、増殖炉よりのプルトニウムといった将来の燃料を処理し得ること。

このように船用機関は、前章の自由な想定に基く熱機関よりもはるかに「实际的」なものであり、また動力伝達の問題もからんでいるので、単に効率が高ければ良いというものではなく、むしろ動力伝達性・信頼

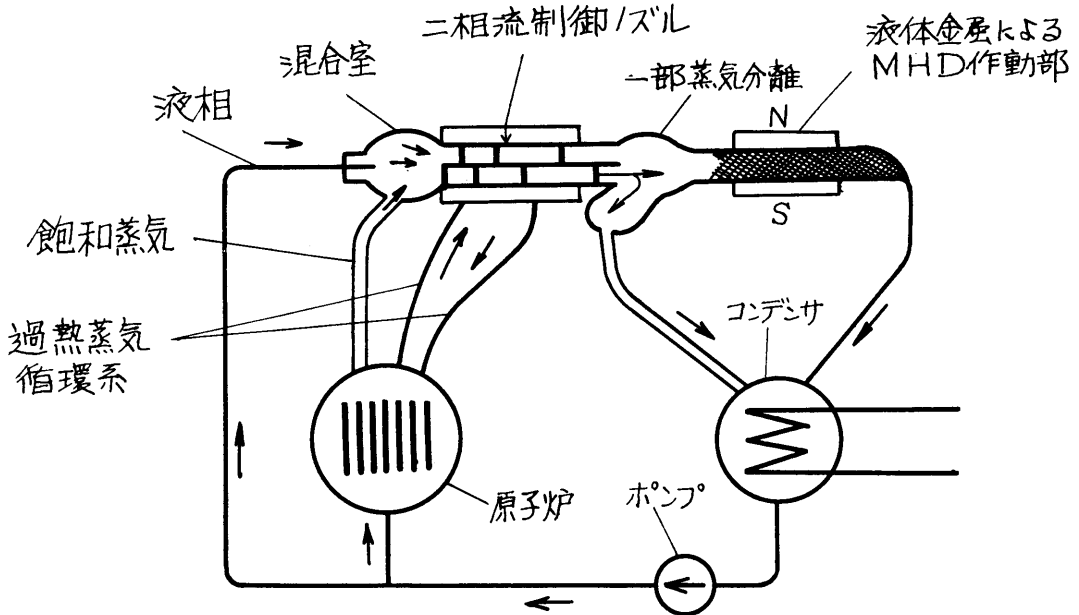
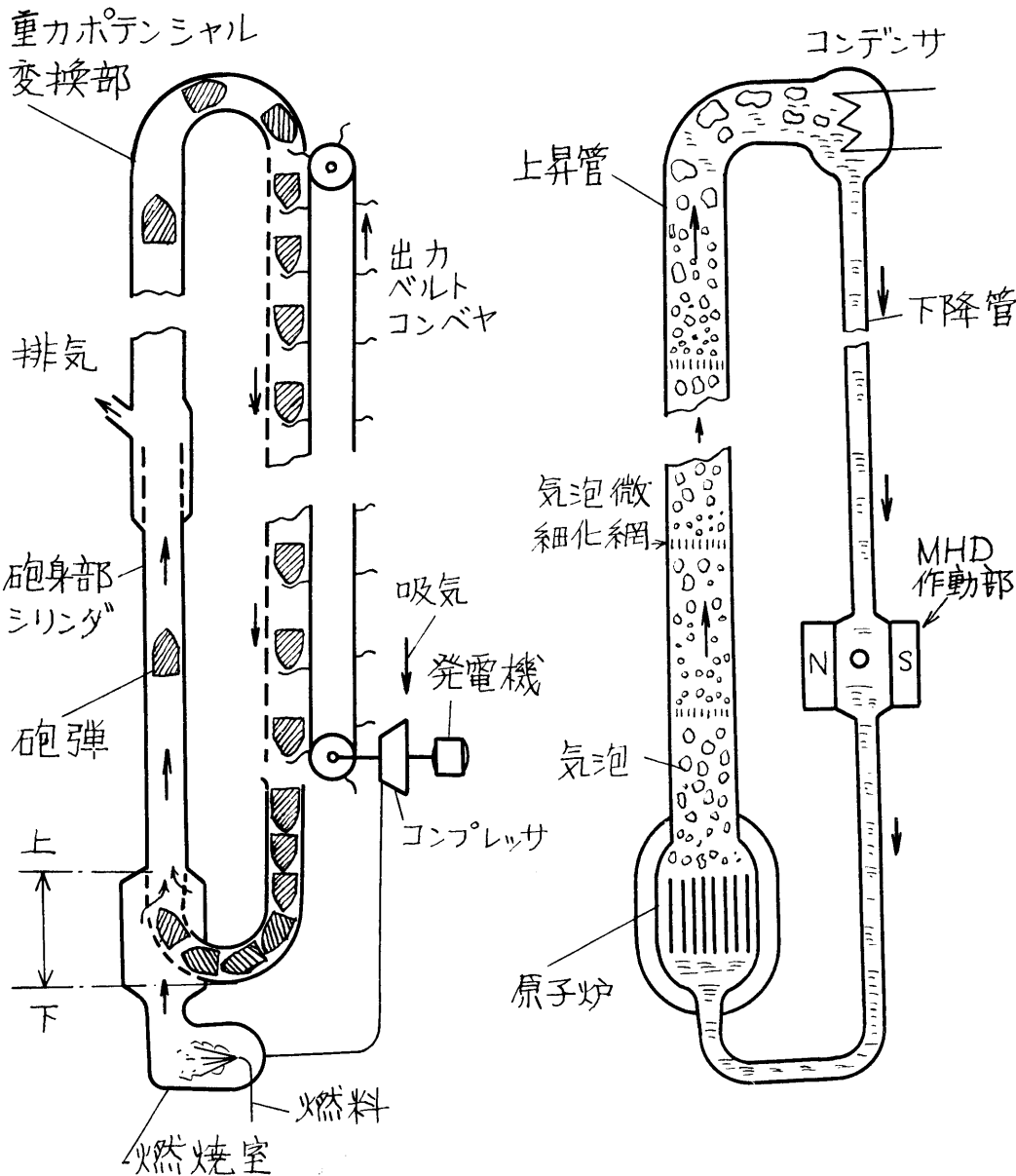


図31 二相流制御ノズルを使用するさいの単一金属蒸気～液相系のMHD機関サイクル線図・案

性・制御性・経済性といった面が強調されてくる。

最近盛んになっている信頼性工学の一面に示されているように、もしあくまで信頼性だけを強調するとすると、在来のディーゼル機関や低温低圧蒸気ボイラタ

ービン機関が最もすぐれたものになってくる。しかしそれではあまりに進歩がなすすぎるし、また信頼性は積極的に実際と経験とで、かちとるべきものであるの



(a) 仮想砲弾機関

(b) 仮想表体金属二相流
重力機関

図32 仮想重力ポテンシヤル機関案

さてこのような条件を備える船用機関を考えてみると、最も手近なものとしては、前章では全く触れなかった在来熱機関の改良と複合を行う形式であり、そのつぎに来るものとしては、原子炉を主熱入力となる超電導電気推進機関や液体金属MHD機関などであり、前章に示した直線形式熱機関はいずれも大出力船用機関の将来の候補としてあがってくると考えられる。

5.2 超電導電気機器による電気推進

各種熱機関を述べる前に、船用としては極めて重要であり、熱機関の新方式化にも関連する所が大きい動力伝達系の大出力化に対する新方式について述べたい。

もし在来のプロペラ推進器およびその改良されたものが、将来も効率の良い点で使用されるという前提に立つと、動力伝達、この場合は力学～力学エネルギー転換の大出力化の方策が必要である。

この種のものとしては、純力学的伝達形式として (a)歯車、(b)ベルト・鋼索・チェーン類、(c)摩擦車、(d)

フルカン形式流体接手、(e)油圧、水圧ポンプ形式の流体接手等があり、また純力学形式以外のものとしては (f)電気推進形式がある。

これらのうち大出力に対し、高効率でしかも高い変速比を取り得るといふ点からは絶対的に(a)の歯車と(f)の電気推進の両形式が残ってくる。

歯車形式は最も信頼性があるが、在来の延長ではその周速と歯車圧力との積に一定の限界があることよって大出力機関に対しては、きわめて大型化と同時に高い精度を要求され、その重量増大や製作面、また自己重量による歪みの増大等により多くの難点が生じてくる。

一方、電気推進方式はもし在来形式によるときは、歯車と同様な大型化の欠点を持ちきわめて膨大な装置となる。

このように船用機関の大出力化をさまたげる障壁の一つとして動力伝達の問題があるが、これを解決する有力な方式の一つとして、最近MHD機関等で取り上

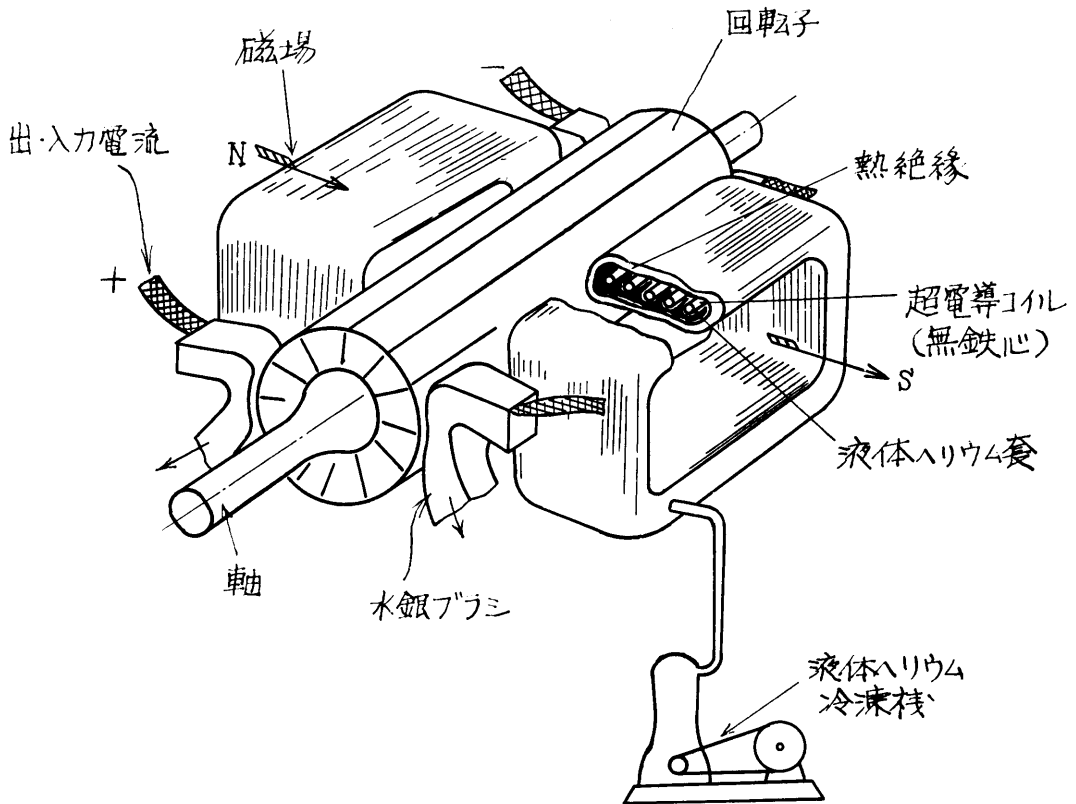


図33 超電導磁場使用回転電気機械概念図

げられて以来、脚光を浴びようとしている超電導現象を利用する超電導発電機、モーターによる電気推進系がある。

超電導現象とはネオビウム・鉛・錫等の金属が絶対零度附近の極低温で急激に電気抵抗を感じ、ほとんど消失する現象で、その状態ではその金属内（または表面）に超大電流を流すことができる。この際も磁場の強さにはやはり飽和現象によるある制限があるが、在来の鉄磁極のものに比べると約10倍程度の強磁場を発生できる。

そのため超電導磁極を使用する電気機器は、在来のものに比して飛躍的な軽量高出力化ができるわけである。しかしその成立のためには、磁極コイルをヘリウム沸点（約4°K）附近に、常に保たなければならない欠点がある。（この冷却動力は巧妙な設計によれば通過動力の1～2%以下でよいといわれているが、信頼性がまだ不足している。）

図33にこの方式を使用する回転機械（発電機もしくはモーター）の R. Mcfee による⁽⁹⁾概念図を示す。

図のように液体ヘリウム套で冷却された無鉄心磁極コイルにより強磁場（約10ウエバー）を作り、その中に銅製回転子を入れ、水銀ブラシ等で電流を流す。磁場が強いので、例えば直径約1m、長さ2m、回転数約3600rpmの回転子により約60万kWの出力を扱うことができ、その際冷却動力は約1%以内でよいといわれている。

船用の場合、発電機側はタービン回転数をかなり自由に上昇できるので超電導発電機はさらに小型化でき、タービンなみの大きさになるため、従来の発電機

や歯車減速機に比べて飛躍的に小型化できる。またプロペラ側モーターは回転数が遅いと考えられるので、飛躍的な小型化は望めないが、やはり従来のモーターにくらべると10分の1程度の小型化（特に重量）が可能であり、総合して従来は鋼鉄材のかたまりや銅材料のかたまりであった鋼歯車系、および電気推進系をきわめて小型軽量化できるわけであり、大出力船用機関動力伝達系としてきわめて魅力的かつ有望である。

この超電導電気推進系を使用する船用動力の一例として図34に高過給高速ディーゼル機関を多数パラレルに配置した超電導電気推進船を示す。

このシステムの使用により、従来より小型高速のディーゼル機関が使用でき、しかもその据付や配置が軸系や重量に捉われず、さらに自由になるので能率のよい大出力動力を設計できる。

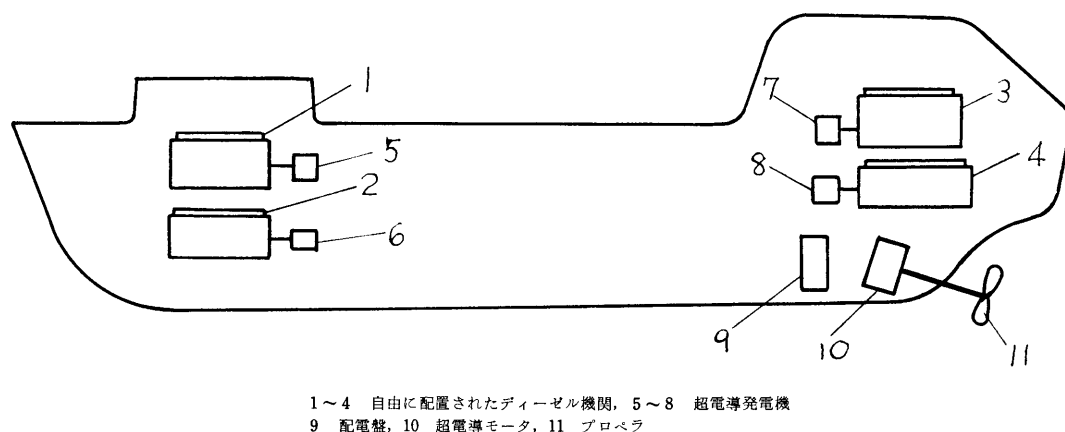
そのような特色は在来の蒸気タービン方式に対しても同様である。

また他の一例として図35に、1次流体（例えば液体金属）でMHD作動を行い、2次流体（蒸気）でMHD蒸気タービン作動を行う大出力船用機関に超電導電気機器を使用する場合を示す。

この場合もやはり伝達系の軽量化のため配置が楽となり、かつMHDと蒸気タービンの出力の結合がきわめて容易に行いうる利点がある。

このような超電導機器を頭において、以下さらに在来機関の改良や複合、新形式熱機関の導入等について考えてみる。

また高能率電気機器としては最近情報のある静電発電機や静電モーターなどがあるが、超電導機器と同様



1～4 自由に配置されたディーゼル機関、5～8 超電導発電機
9 配電盤、10 超電導モータ、11 プロペラ

図34 多数の高過給高速ディーゼルを自由に配置した超電導電気機器による電気推進船案

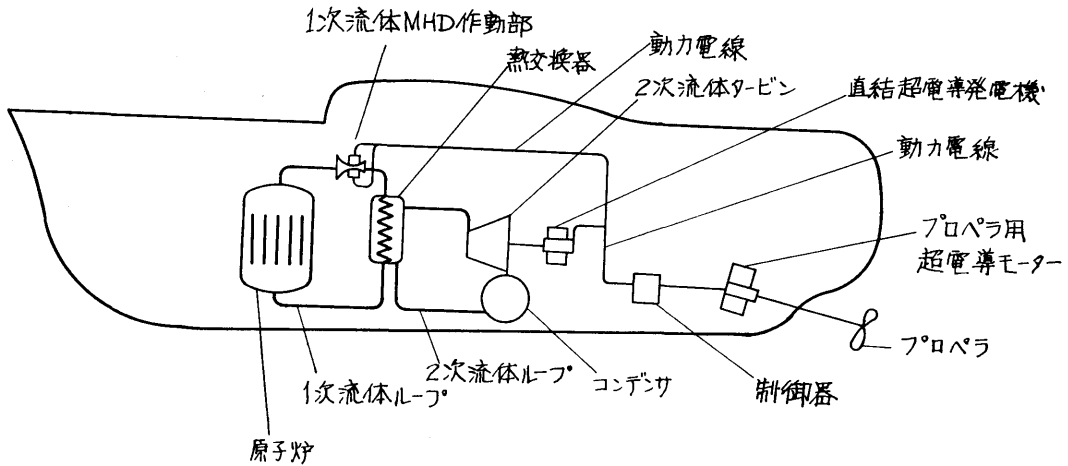


図 35 船用MHD・タービン・超電導電気推進機関案

な期待が持たれよう。

5.3 在来機関の改善と複合

船用機関という実際的な制約の中で新形式機関を論ずるには、ここでどうしても在来の機関の改善と複合について考察しておく必要がある。

在来の機関としては、蒸気ボイラ・タービン機関、ガスタービン機関、ディーゼル機関、フリーピストン機関等があげられ、そのいずれの二つの複合組み合わせも可能である。

その中でフリーピストン機関はそれ自体すでに一種の内燃機関とガスタービン機関との複合で成立していて、同機関はすでに幾多の実例がある。また過給ディーゼル機関もそれ自体内燃機関と過給ガスタービン機関との複合であって、やはり多くの実例がある。

この両者は、いずれもガスタービン出力の増大化、およびさらに蒸気サイクルとの結合等によって改善の余地があるが、往復機関を主体とするための最大出力限界が存在する。

ゆえに、ここではそれらについての詳論を省き、比較的新形式のものについて論ずることとする。

(a) 過給貫流ボイラ・再熱蒸気タービン・超電導発電機複合機関案

蒸気サイクルとガスタービンとの組み合わせで最も大出力に対し実際的であるのは図36に示すような、過給貫流ボイラと再熱蒸気タービンの組み合わせによる複合機関であると考えられる。

すでに当所の試作過給貫流ボイラ⁽⁶⁾によって実証されたように、ボイラはその燃焼ガス系を過給ターボブ

ローワによって加圧化し、かつ伝熱面を貫流ボイラ形式とすることにより、ただ単に小型軽量化できるばかりでなく、伝熱面やダクトの配置が在来ボイラよりはるかに自由となって、たとえば蒸気タービンのすぐ上に配置する等コンパクトな設計ができ、全機関室容積の制限のある船用としてきわめて有利となる。また蒸気タービンは陸上ではすでに一般化している再熱サイクルを採用することになる。

本方式は、在来減速歯車による動力伝達を行わせるときは船の後進時の再熱コイルの過熱防止や弁の切り換えに問題があったが、前節の超電導電気推進方式との結合を行えば、その点はまったく解決でき、かつ発生部全体の小型化にさらに寄与する。このような組み合わせにより全体をプレパッケージ化したコンパクトな蒸気機関設計が可能である。

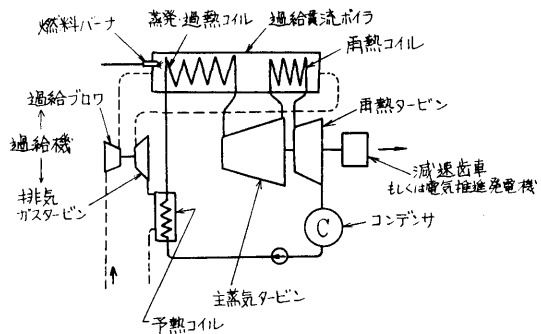


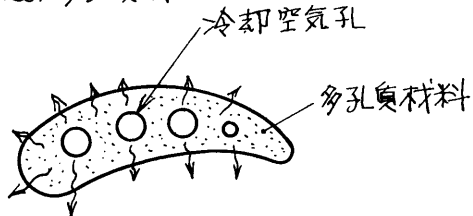
図 36 過給貫流ボイラと再熱蒸気タービンの複合コンパクト機関案

(b) 高温ガスタービンと蒸気サイクルの組み合わせ
 在来機関の近い将来における延長の一つとして高温
 ガスタービンと蒸気サイクルの複合機関がある。

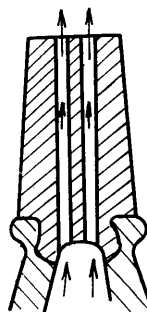
高温ガスタービンとは、作動ガス温度を在来より上
 昇させるため動翼を冷却したり、特殊材料の（セラミ
 ック、サーメットなど）の使用を計るなどの方策をと
 るもので、動翼冷却を行うときの従来より示されてい

る冷却方法としては、図37に示すように、(a)多孔質材
 料から冷却空気（または他の冷却機）を浸み出させて
 動翼を冷却する浸み出し冷却法、(b)翼の前後部等に設
 けたスリットもしくは孔から冷却空気を吹き出して冷
 却する吹き出し冷却法、(c)通路に冷却空気等を通過さ
 せる純内部冷却法、(d)動翼の内部を空洞とし水等の液
 体を入れて沸騰冷却法やサーモサイホン方式冷却法等

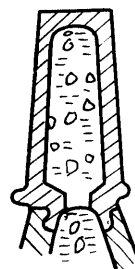
(a) 多孔質材料を使用するもの



(c) 貫通冷却孔を
 使用するもの



(d) 密閉液体の
 沸騰を使用
 するもの



(b) 空気吹き出し孔ヤスリットを使用するもの

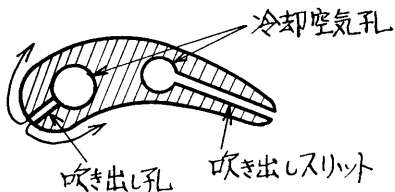


図 37 ガスタービンの作動温度を高温化するための動翼冷却方式の各種例

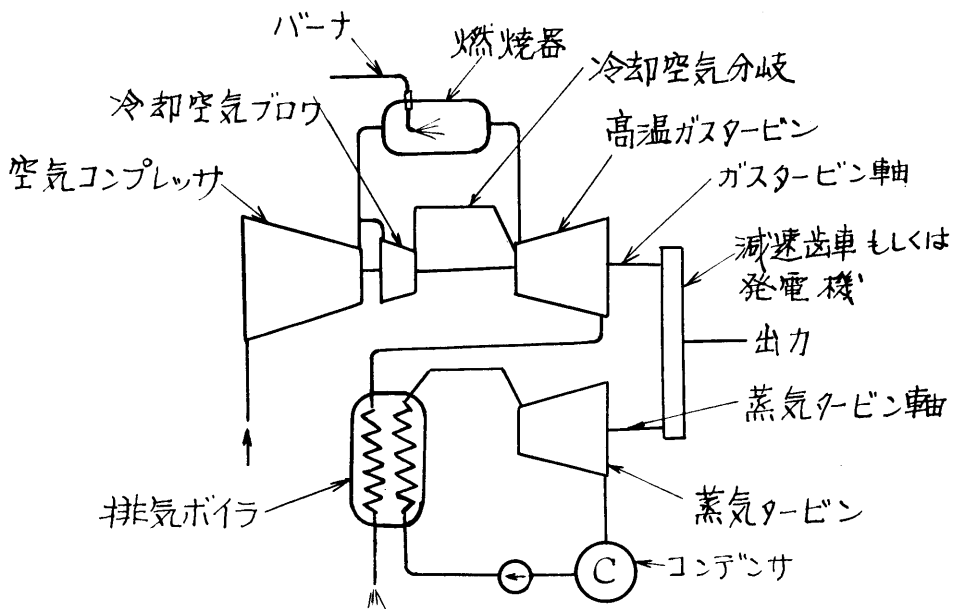


図 38 高温ガスタービンと蒸気タービンの複合機関（西協・平田氏らの案に基づく）

があり、わが国ではそのうちの吹き出し冷却法や空冷内部冷却法等が最も熱心に追求されており、かなりの実験的成果を収めている。同法によれば主流の2~3%以内の冷却空気で、ガス温度を1000°Cを超させることも可能性がある。

このような高温ガスタービンは排気ガス温度が高いため、低温で熱を放出する蒸気サイクルと複合させるときは効率が高い。

図38に西脇・平田氏らによる⁽⁷⁾この高温ガスタービン蒸気サイクルを複合した船用機関の線図を示し参考とする。

ガスタービンの高温化に伴う問題としては、単に冷却の問題に止まらず、他の熱機関でも実用上大きな問題となる燃焼ガスによる腐蝕の問題がある。それについては多くの研究があるのでここでは触れないが、それを根本的に避けるため燃焼ガスの代りに、純空気もしくは不活性ガスを使用する方法があり、それらのガスの温度を飛躍的に上昇するためセラミック材料で作られた熱交換器の利用などが考えられていることを述べておく。

なおこのような高温ガスタービンの効率上昇のためには、再生熱交換器による方法と蒸気サイクルとの組み合わせが考えられるが、ガス~ガス熱交換器よりガス~液体熱交換器(ボイラ)の方が伝熱面積が約1/2となり、かつ使用材料の耐熱性と価格が低くてよいばかりでなく、ランキンサイクルの特長としての低温放熱の利点もあるので、前者より後者の方がすぐれていると考えられる。

いま複合する相手側のボイラを貫流かつ高熱伝達率形式とするときは、複合機関は全体としてきわめて小型化され、プレパッケージ化も可能である。

5.4 船用原子炉についての提案

船用動力の出力変換部が蒸気タービンやガスタービンのような在来形式であっても、またMHD方式や直線機関のような将来形式であっても、その熱入力部の主要部を形成する船用原子炉がどのような形式がよいかは、また主要な事項である。

いま出力変換部はさておいて、熱入力部としての水冷却原子炉、液体冷却原子炉ガス冷却原子炉等の今後の形式について本論文内に論じておこう。

5.4.1 船用水冷却原子炉

船用水冷却原子炉は、その形式だけを取りあげるとき、図39(a)に示すような熱交換器と圧力容器とをまったく分離した形式がサバンナ号やわが国の原子力船事業団第一船の第一次案に採用されている。

この古典的形式は各個修理のし易い点では良いが、配管が複雑かつ長くなり、そのため全体の容積と重量が増す欠点がある。

同図(b)のものは米国 B & W 社などで提案している熱交器内蔵圧力容器を使用する炉で、全体としてコンパクトになるが、一方において圧力容器の高さと直径が増し、熱交換器のヘッダーが大きくなり、かつ各部の個々の修理が困難である難点を持つ。

ここに新たに提案する同図(c)のようなコンパクトタイプの分岐形式のものは、さらに図40で詳しく画くように分岐部分を冷却コイル壁で分けて、二重にして内

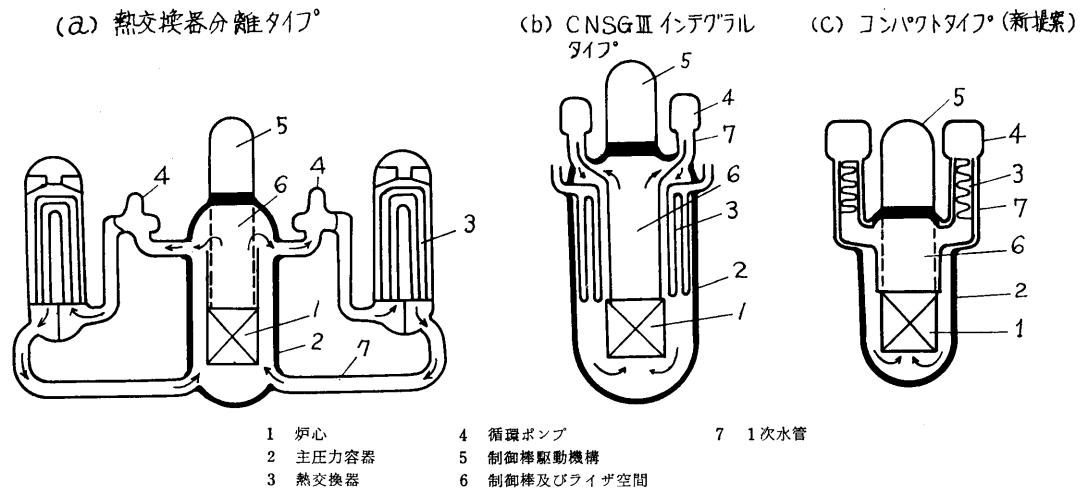


図39 水冷却原子炉の在来の二つの形式と新提案のコンパクト形式の比較図

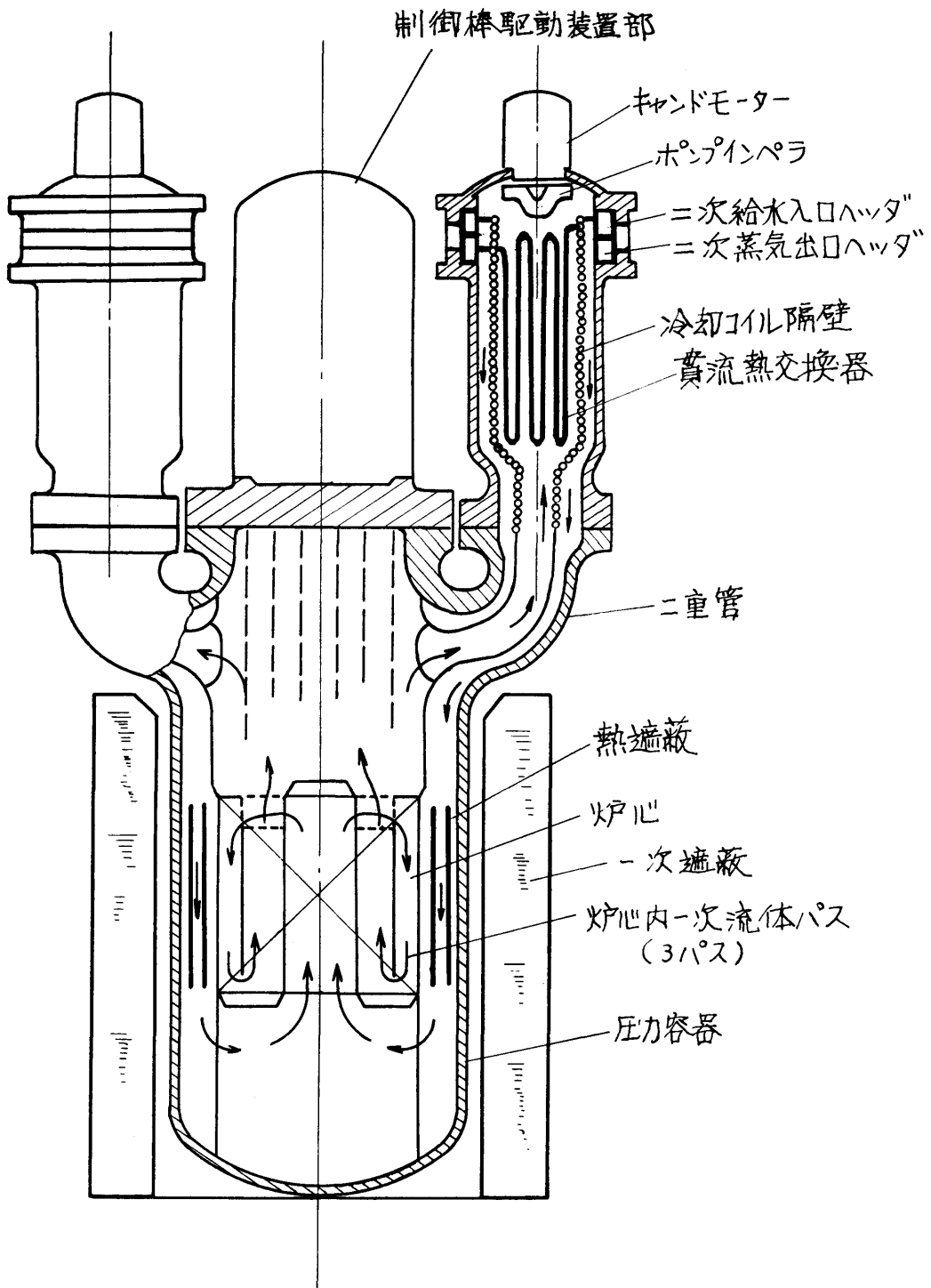


図40 コンパクトタイプの水冷却原子炉案
(筒状二重管式貫流熱交換器分岐管形式)

側に貫流形式の熱交換器を配置し、外側を振り流路とし上方には小口径のヘッダーを重ねた上に、さらに同軸に循環ポンプを配したもので、そのようにすると

- 1 圧力容器の主要部が小型軽量でよい。
- 2 熱交換器のヘッダーが小さくてよい。(熱衝撃に強い)
- 3 ポンプの循環水路と配管が短かくてよい。
- 4 ポンプ、熱交換器を分解修理するのにきわめて楽である。
- 5 全体としてきわめてコンパクトとなる。

6 シャヘい部分に十分なシャヘい用スペースが取れる。

7 二重流路になっているので圧力容器壁に過大な熱衝撃が生じない。

等の船用として実際的な特長と利点が増す。当所の研究⁽⁸⁾により水冷却船用炉としては、動揺に強い高圧力差強制循環PWRが向いていることがわかっていて、循環ポンプの流速を増し循環量を減じた設計とすると、炉心は図のように3パス、または4パス程度の冷却回路が良く、またライザ部分は最小限度の容積が

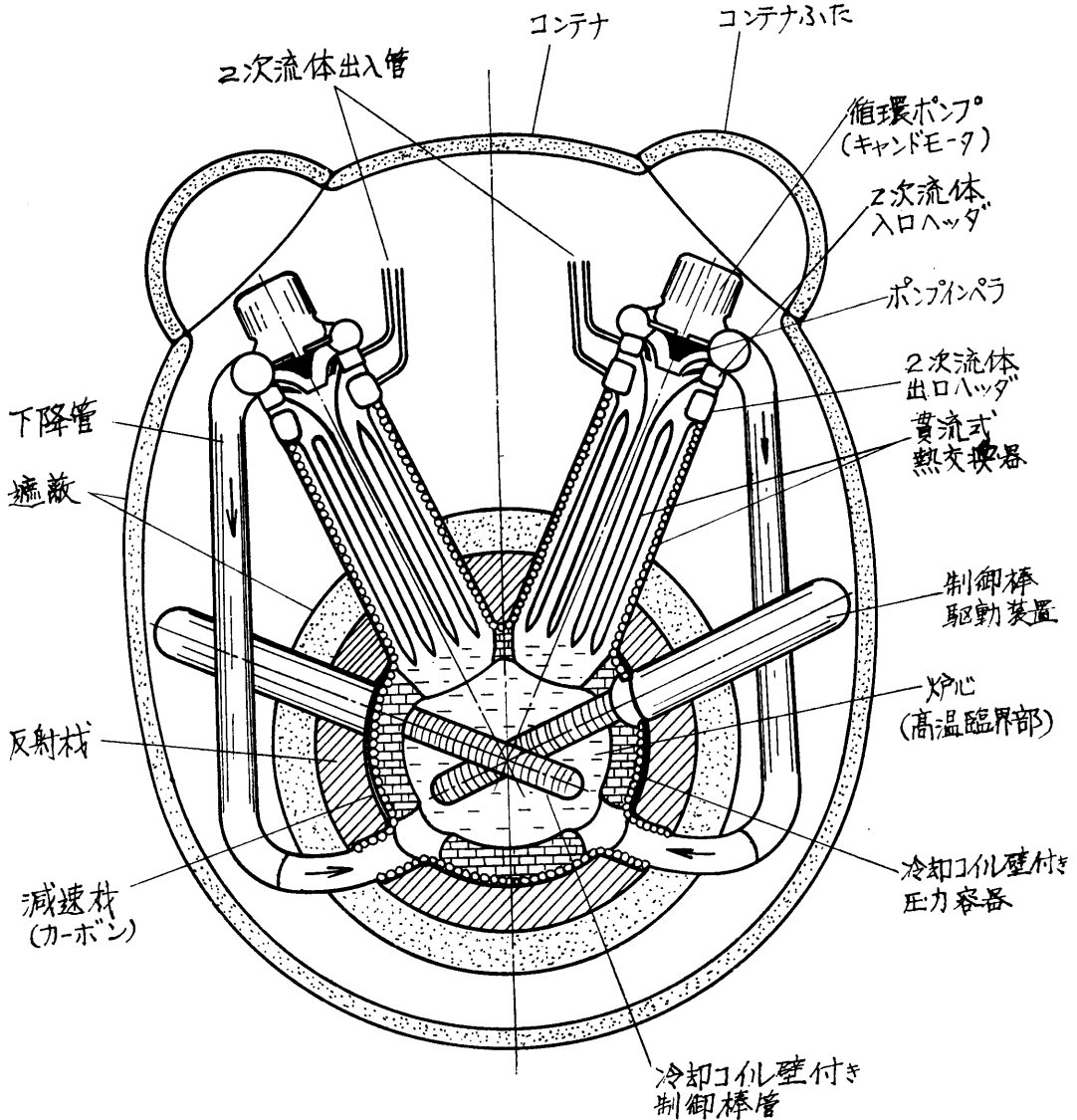


図 41 流動燃料型式・冷却壁・貫流ボイラ使用コンパクト船用原子炉案

あれば十分であるので压力容器の主要部分は、さらに小型とすることができる。

この新形状の水冷却原子炉の提案はきわめて現実的なものであり、決して新方式熱機関ではないが、その重要性からあえてこの論文の中に提案しておきたい。

5.4.2 流動燃料原子炉

上記の分岐二重管形式をさらに高温化するため、流動燃料形式の炉として概念設計を行うと、その一例は図41に示すような形状となる。同図のものは、スラリー状もしくは熔融金属状の流動燃料自体を流動させて中心付近で臨界として内部発熱し、分岐管の中で二次流体（水または液体金属）に熱を与えるものであり、熱交換器はやはり貫流水管ボイラ形式である。

同図のものは流動燃料の循環ポンプをもっているように示してあるが、自然循環でも、また電磁ポンプでも良い。またこの図のような球形の主压力容器と、それに垂直な分岐管を持つ形状は水冷却原子炉に対してもまったく同様に適用することができよう。このような形状とすることによって同一压力容器をさらに小型軽量化できる。しかし水冷却原子炉のさいは制御棒配置に若干の難点を生ずると思われる。

5.4.3 ガス冷却原子炉

ガス冷却原子炉は直接サイクルガスタービンと組み合わせたとき、少なくとも在来形式機関のはんちゅう内では最も軽量小型となり得ることは従来より十分論じられている。しかし燃料の耐蝕性や耐高温性、回転機械、とくに伝導軸における軸封と軸受けの問題、ガス補給の問題等に難点がある。

いま将来の組み合わせの一つとして、完全密閉の超電導発電機なるもの、および作動ガスによる軸受を考へて前記の漏洩と軸受の問題を解決するものとする、さらに軽量、コンパクト化された船用ガス冷却原子炉機関が組み立てられよう。

図42にそのような組み合わせに基づく機関の概念図を示す。図のように原子炉を横型とし、同一中心軸上にガスタービン、コンプレッサを配置し、外側に熱交換器を置くときは、全体として工場内組立の可能なパッケージ型式となる。燃料取換等に対してはコンテナぐるみ全体をそっくり別に用意した二号機に取りかえてしまえばよい。このような軽量原子力機関はたとえばホーバークラフトのような軽量高速船に向いていよう。

5.5 船用直線機関

さて前第4章では一般熱機関の残された将来形式を提案し、そのうちとくに二段出力変換方式について強調した。それらの船用への適用性について考察してみよう。

まず図18のふく射サーモプッサ機関は、その実現のためには、かなりの巨大化と超高温化を要するため船用としてはかなり逸脱するおそれがある。

ついで図19の凝縮インゼクタ機関は、ジャクソン、ブラウン等によって、それまでも宇宙航行体用に提案されたように、小型軽量大出力である特長を有しており、船用の最高温度機関として最も有望である、さきの図35のものはこの形式に基いたMHD船用動力概念図である。

ついで図20や、図22の回流ピストン機関は大出力、

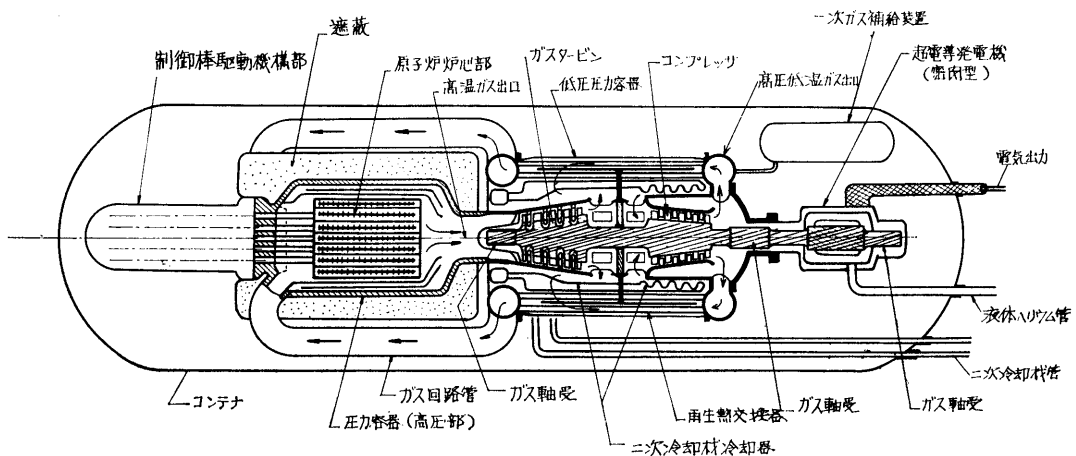


図42 船用ガス冷却原子炉・ガスタービン・超電導密閉発電機複合コンパクト機関案

高効率となり得るが、複雑で長大化する欠点があり、さらに改善の余地がある。

図23のX流体運動エネルギー置換機関は、それ自体まだ概念的であるが、ピストン流方式的によって効率を上昇させた場合の図30、図31等の液体金属MHD機関は、さきの凝縮インゼクタ機関とともに最も船用大出力機関に向いている。

図32等の重力ポテンシャル機関は、当然船用としては不向きである。

以上より、大出力を目的とする直線、二段変換機関としては、今後大いに研究の余地があるものの、液体金属を主作動流体とする出力二段変換機関が

1 原子炉および超電導電機器と組み合わせるとき
在来の機関では、出し得ない大出力の処理ができる。

2 全体が小型軽量となる。

の特長より、将来の超大型船および高速船用としてきわめて有望であり、大いに研究と開発がなされることが望まれる。

第6章 結 言

以上のように、高温作動をすること、大出力を扱うことを主眼点として、熱機関を三主要素に分けてまず新方式の一般熱機関および熱限界を論じ、ついで将来の船用機関について論じた。そして各論に伴ってたとえば水冷却原子炉の改良型のような極めて現実的なものから、砲弾重力機関のような非現実的なものまで、広い範囲にわたり筆者の考えによる多くの新方式の熱機関や動力方式を提案した。

それらの提案については、以上に述べている通りであるが、全体の骨子とするところは、今後の熱機関形式は本論に述べた多くの帰納的理由により、作動流体が直線作動をする直線機関および二段出力変換機関に属するもので、その組合せが将来に残された最も有望な形式ではないかということである。

本論の考察に基づく、新方式熱機関を開発するためには、今後多くの研究課題があるが個々の在来熱機関の研究開発以外に大きな方向として

- (1) 熱機関の熱限界工学(仮称)を前進させること。(熱伝達と材料力学の結合分野の開拓)
- (2) 作動流体の選定とそれに必要な基礎事項の研究

(たとえば諸金属の $i-s$ 線図、粘性等の測定)

(3) 大容量直線機関として最も有望な液体金属二相流の噴射流動における流力的熱力的、研究を前進し、とくに積極的に二相流の流動状況を制御するノズルを開発すること。

4 超電導機器、大容量動力伝達機器の開発を行うこと。

(5) MHD動力方式の船用としての開発を行うこと。
等が重要な開発対象であると考え。

そもそも、在来の機関に捉われないうまく新原理、新方式に基く高効率の熱機関や船用動力を生み出すことは、きわめてむずかしい仕事である。しかし、エネルギー利用上の変換期を迎えた現在の時代がそれを要求している。とくに資源が乏しい上に多数の人口を有し、科学技術だけを唯一の売りものとしていかなければならないわが国においてこそ、世界に先がけて新しい技術を協力開発して行かなければならない必要があると信ずる。

ここに多くの未完成の愚論を示したことが、なんらかの意味で基礎的な研究の活発化をうながし、また、ひいては真の理想的な新熱機関や新船用動力の研究と開発、発展に役立ち、それに携わる若い研究者の方々の熱意にいささかなりとも刺げきを与えるものであれば筆者の最も幸いとするところである。

参 考 文 献

- (1) 森, 一色 日本機械学会誌 68巻557号(1965-6) p.714
- (2) 一色 日本機械学会論文集 29巻 201号(1963-5) p.932
- (3) Shapiro 他 Trans. ASME Vol 78, No. 3 (1956-4) p.617
- (4) 日本機械学会MHD研究分科会資料 12-1, 2. (1965-7)
- (5) Richard Mcfee Elect. Engg. (1962-2) p.112
- (6) 一色, 寺野 他 日本機械学会誌 65巻, 591号(1962-4) p.505
- (7) 西脇, 平田 他 日本機械学会誌 67巻, 545号(1964-6) p.845
- (8) 一色 他 船研報告 第2巻 第1号(1965-1) p.1
- (9) 一色 他 日本機械学会第3期全国大会 前刷集 No. 143 (1965-10)

(原稿受付 1965.9.10)