

境界層流れとターボ機械

妹尾 泰利*¹

SENOO Yasutoshi

前書き

去る6月9日「遠心式ターボ機械内の流れに関する流体力学的研究」に、学士院賞が授与されました。対象は二十数年間にわたる研究のほぼ全体に亘っており、関係する主要論文の課題は別誌⁽¹⁾に記載されています。

この度編集部から、この件に関連して執筆を依頼されましたので、それらの研究の多くに共通する境界層を話題の中心に据えて、まずその一般的性質を概観し、それがターボ機械ではどのような状態で現れるか、更に何が解明されどのような対策が取られたかを考える、技術解説的な随筆にしました。

1. 境界層流れ

流体は圧力の低い方向に流れようとするが、ポンプや圧縮機は流体を高い圧力に向けて流す機械であるから、運転条件が変わっても安定で優れた性能を発揮する機械を作るには、多くの困難を克服しなければならない。

非圧縮性非粘性の理想流体ならば、圧力に抗して思う存分に流す事はさほど難しい事ではない。しかし粘性によって現象は一変する。すなわち流れの一部は、粘性力によって直接或いは間接的に主流よりも力学的エネルギーが少なくなる為に、主流が作り出した圧力勾配に対抗して流れることが困難になり、局所的に逆流が起きるとか、低い圧力を求めてあらぬ方向に流れて集積し、そのために主流の挙動が妨げられる。Prandtlはこのような、全圧が減少した部分の流れを境界層と名付けて主流と区別し、その特性を調べて主流との相互干渉を考慮すれば、全体の流れを合理的に解明できる事を示した。

最近では、与えられた形状での複雑な流れ現象も、数値流体力学的手法によって解明できる様になった。しかしながら、境界層の性質を理解して、場合に依じた境界層の制御方法を探究することは、新しい発想に基づいて優れた設計を生み出す原動力になろう。

1.1 圧力勾配と境界層の発達

壁面に沿う流れにおいては、壁面での速度を0とする摩擦力及び主流方向の圧力勾配に対抗して、境界層を含む流れ方向の運動量の変化がこれと釣り合うように、主流と境界層内部の速度分布が変化する。

二次元流れについて、このようにして発達する境界層

内の速度分布と、仮にその部分の速度が主流と同じ速度 U であった場合とを比較して、その断面全体での流量の差を $\delta \cdot U$ と表す排除厚さ δ と、運動量の差を $\rho \theta U^2$ と表す運動量厚さ θ とが、境界層の特徴を表す主要なパラメータである。両者の比 $\delta^*/\theta = H$ は形状係数と呼ばれ、圧力勾配のある流れにおいて境界層の発達に大きな影響を及ぼす。

主流については圧力勾配と釣り合うように運動量が減少するが、境界層については流れの無い部分に相当する排除厚さでは圧力勾配に対抗して釣り合う力がないから外部からの援助が必要であり、主流が援助すればその分だけ主流の運動量は減少しそれだけ運動量厚さが増加することになる⁽²⁾。このことから、圧力勾配の場で運動量厚さ θ が増加する割合は、排除厚さ δ と運動量厚さ θ との比 H が大きいほど、また圧力勾配が厳しいほど大きい関係が導かれる⁽²⁾。

一定の運動量厚さの流れが圧力勾配に対抗して流れる場合には、形状係数が大きいほど下流での境界層運動量厚さの増加量が大きいから、上流で境界層を攪拌して、なるべく壁面の近くまで大きな速度が保たれた速度分布即ち小さい形状係数にすることが望ましい。

1.2 乱れによる境界層速度分布の改良

層流では粘性摩擦力によって隣接する流れから運動量が補給されるが、粘性は小さいから比較的薄い境界層でさえも弱い圧力勾配によって逆流が生じやすい。しかし境界層のレイノルズ数が大きくなれば乱れが発生して、速度差のある流れの層の間では乱れによって運動量の交換が行われるから、境界層の流れは壁面からやや離れた主流からも運動量の補給を受ける様になる。これが乱流であって、層流境界層に比べてかなりの強さの圧力勾配に対しても逆流しない耐力が期待できる。

一定のレイノルズ数以上の層流境界層であれば、壁面に沿って流れに垂直に針金を張って流れに擾乱を与えれば、境界層内部に乱れが広がり、圧力勾配に強い乱流境界層に遷移する事は良く知られている。

比較的ゆるやかな圧力勾配であっても、長い区間減速が続けば運動量厚さ θ と共に次第に形状係数 H も増加して、境界層内に逆流が生じれば壁面から離れた主流にも大きな影響が及ぶので、過度の速度比までの減速は困難で、通常の乱流境界層では下流の主流速度が上流速度の約半分が一応安全な減速限界の目安と見られている。

乱流境界層においても、乱れを更に強めれば境界層内

原稿受付 2003年9月24日

* 1 榊三浦研究所

〒799-2696 松山市堀江町7

の速度が主流に近付いて形状係数が小さくなるから、それだけ強い圧力勾配に対抗しても逆流しないで流れる事が可能になり、下流まで運動量厚さの増加を削減できる。尤も其の際に擾乱を誘発する為に加えた力の一部は抵抗となつて、直後の境界層運動量厚さが増すことは避けられない。

1.3 湾曲通路の境界層

円弧状に曲がった長方形断面ダクト内の二次元流れの場合、湾曲部において圧力が半径方向に変化するの、各流線上で慣性を持つ流れの方向を変換させる為に必要な半径方向の力（俗に言う遠心力に釣り合う力）として、静圧が凸面から凹面に向かって上昇している。

曲がった壁面近くの速度分布は主流の速度分布に境界層の速度分布が加わるので、凹面上の境界層内には慣性力の強い主流が侵入し、乱れは強くなって形状係数は小さくなるが、凸面上では速度勾配が逆なので主流による攪乱は起き難くて形状係数が増大し、流れ方向の圧力勾配に対して抵抗力が弱いことは容易に納得できる。

曲がりダクト両側の端面に発達する境界層内の流体に働く慣性（いわゆる遠心力）は、主流の速度に釣り合う半径方向の圧力分布と釣り合うことが出来ないから、両側の端面境界層内には凸面に向かう二次流れが生じる。

側壁面境界層内で凸壁面に向かう二次流れは凸面壁で塞き止められる。境界層が薄ければ境界層二次流れは主流を巻き込みながら⁽³⁾下流に流れるが、厚い境界層の二次流れは凸壁面の隅に集積し主流から運動量が補給されることが少ない。その為に主流が強く減速されれば、凸壁面隅の低速領域は不安定な逆流や変動が起きながら広がり続け、主流に影響を及ぼすことになる。

1.4 回転の影響⁽⁴⁾

角速度 Ω で回転する遠心羽根車の場合には、羽根車に相対的な流れに対する通常の加速度の外に、二種類の加速度が働いている。一つは流れの有無に拘わらず回転に基づく遠心加速度で総ての流体に一樣に働いて半径方向の圧力上昇に寄与するが、流れの様子に直接影響を及ぼすことはない。第二の加速度はコリオリ加速度で、相対速度 w と回転角速度 Ω の積の2倍に比例し w に垂直な加速度で、外向き流れでは回転の逆方向即ち翼の前進面に向かい、主流にも境界層にもそれぞれの速度に応じた影響を及ぼす。

1.4.1 遠心羽根車の境界層 (a) 両側板上の境界層

境界層に働くコリオリ加速度は主流に働くよりも弱いから、半径方向分速度に働く力は主流の加速度に釣り合う円周方向の圧力勾配に対抗出来ず、回転方向に向かう二次流れが生じる。一方、周方向分速度の違いによるコリオリ加速度の差は、半径方向即ち翼間の速い流れに働くので目立つ程の影響は見られない。

(b) 翼の前面と後面の境界層 翼の両面では境界層の速度勾配が逆である為にコリオリ加速度による乱れの安定性には差異がある。それは曲がり通路の遠心加速度と

同様に圧力の低い方の翼面では乱れは弱まる。その上に、側壁面境界層内の遅い流れが二次流れによって翼の負圧面（後退面）に加われば、その面の境界層は厚くて形状係数は大きく、乱れは弱い。其の為にこの翼面に沿う外向き流れの境界層は圧力勾配に対抗する力が弱い。

1.4.2 軸流部の羽根面境界層

遠心羽根車の前半を占めるインデューサー部分は軸流羽根車と同様に、翼面に沿って出来る境界層の内部では翼面に近いほど回転速度が大きいため、それに働く遠心加速度は大きく境界層内には外向きの流れが生じる。プロペラの根元で揚力係数が3にも達するのはこの為である。しかし外周にシュラウドがあれば、翼に沿って半径方向に流れてきた境界層の二次流れは翼の先端に集積しシュラウドに広がる。このシュラウドに沿った厚い境界層が羽根車の遠心部分に送り込まれるので、圧力上昇を妨げる原因になりかねない。

2. 遠心羽根車出口付近の流れ

2.1 羽根車内部の流れ

高性能の羽根車を設計するには、要求される運転状態において境界層がなるべく薄くて、主流がその影響を受ける事が少ないように努めなければならない。

圧縮機の圧力上昇は、羽根車の回転による遠心力によるもの、羽根車内での相対速度の減速によるもの、及び羽根車出口の動圧をディフューザ等で静圧に回復するものの3部からなる。この内遠心力によるものは出入口の直径比と回転数で一義的に決まり流れに関係しない。

羽根車に相対的な流れは三次元的に方向を変えるので、流線の曲がりに基づいて主流とは異なる方向に圧力勾配ができており、子午面内の流速についてはシュラウド面に近いほど曲がりの影響によって流速が大きい。一方翼両面の圧力差は主として翼間流れに働くコリオリ力によるものである。そのために羽根車の入口から出口までの両翼面上の圧力分布、従がって翼間及び翼面に沿う速度分布は著しく回転の影響を受ける。

羽根車の入口から出口まで翼面に沿う流れの速度分布が、局所的に過度の減速部を含んでいれば、翼面や側壁面上の境界層に逆流が起きて流動状態が激変し大きな全圧損失が起きる。大きな圧力勾配が生じ易いシュラウドに近い翼の負圧面は、1.3節1.4節で述べたように、翼面とシュラウド面の境界層が共に集積する場所であり、しかも乱れは弱まって圧力勾配に対する抵抗力が弱い事についての配慮が必要である。

羽根車出口においては翼両面の圧力が略等しいから、翼の負圧面では出口に向かってかなり急な圧力勾配ができるので、境界層の排除厚さは急速に厚くなる。特に流量が減少した運転では流れが翼面から剥離し逆流域が拡大して圧力上昇が妨げられて、サージングの誘因になり易い。

2.2 出口直後の流れ

翼負圧面に集積する境界層が、羽根車の出口でも円周方向にかなりの広がりを持つ場合について、羽根車の下流は羽根車と同じ通路幅の環状羽根なしディフューザ内の二次元流れとして、境界層の流れの様子を考える。

羽根車から流出する集積した境界層部と主流部の流れを羽根車と共に回転する座標系で見れば、両者は翼のピッチ間に互いに隣接して、速度は異なるが夫々互いに平行に流出するとし、その後は仮に夫々が角運動量を保ちながら移動するとして夫々の流れの軌跡を同じ回転系の図に描けば、明らかに両者の境界となるべき流線は交叉する。

実際には、回転系から見れば流出後も流れは定常流れで、主流部と境界層部は交叉することなく隣接して互いに力を及ぼしあい、旋回しながら出口に向かって進む。解析結果によれば⁽⁵⁾、境界層部が翼ピッチ間に占める割合が大きくても、またその流速の有無に拘わらず、半径比が1.1~1.3迄の間に急速に一樣な軸対称の速度分布に近付き、その間に静圧は急速に上昇する。したがって、渦巻きポンプケーシング内の舌部の位置やディフューザ翼の前縁はこの半径より外に定めることによって振動や騒音を避けることが出来る。

この現象によるディフューザの全圧損失には、壁面の摩擦損失の外に、主流と境界層の半径方向分速度が均一になることに基づく全圧損失が大きく関わっている。

3. 羽根なしディフューザ

羽根車からやや離れた位置では流れが軸対称になるが、其の絶対速度の方向（平均流出角）は羽根車からの吐出量と共に変化する。したがって、その位置に翼列或いは広がり通路を多数円周上に並べたディフューザによって流れを導き減速しようとするれば、流量が少ない場合には翼等の先端に過大な負荷が掛かって流れが負圧面から剥離し、流量が多ければディフューザ翼先端と隣接翼との距離で定まる通路面積が喉となって流れが一旦絞られ、それから減速するので圧力損失が増大する。そのために、使用流量が広い範囲で変化する遠心圧縮機にはこのようなディフューザは適しない。

単純な旋回流は、流量が変化し流れ角が変化しても、自由渦巻き流れとして半径とともに減速され圧力が上昇する。従って、羽根車出口には、単純な平行平板またはやや先狭まりの環状通路形状の、羽根なしディフューザが産業用遠心圧縮機には専ら用いられていた。

この場合には軸対称な側壁面の境界層内に生じる乱れは、主流速度と壁面との間の速度勾配によるもので、半径方向速度成分に基づく乱れよりもかなり強い。しかし半径方向の圧力上昇は主流の動圧の減少によるものであるから、半径方向の圧力勾配は主流の半径方向分速度の動圧に比べて厳しく、境界層の急生長や逆流をこの強さの乱れだけで防止できるものではない。

3.1 壁面境界層の逆流

羽根なしディフューザにおいて圧力損失が大きいのは、両側壁間で流れは一樣とした二次元流れが描く経路が流入角 α の減少と共に $1/\sin\alpha$ に比例して長くなることによって壁面摩擦損失が増大する為とした説明もあるが、それは流れの実態を表すものではない。

壁面上の境界層内では旋回速度が主流よりも遅いから、境界層流の遅い旋回による所謂遠心力の不足分を補うために主流の一部が半径方向の運動量を与えて圧力勾配に対抗する。しかし主流の半径方向分速度は半径方向の圧力勾配に比べて甚だ小さいから、半径方向の力の不足分を補うにはかなりの量が必要で、その為に境界層が急速に厚くなる事が損失の主要部分である。

実験によれば、ディフューザの通路幅と羽根車の半径との比が0.15以上⁽⁶⁾であれば、ディフューザへの平均流入角 α が13度以下になると振動が発生している。通路幅/半径比がこれ以下では、境界層排除厚さの増加によって通路幅中央の半径方向分速度が増す効果によって、壁面付近でも半径方向分速度が大きくなって逆流が起き難くなり、幅比が0.05においては平均流入角が8度までは安定な運転ができる⁽⁶⁾。

境界層内部に逆流が発生するときの平均流入角を解析によって求め、実験で振動の発生が認められるときの平均流入角と比較した多数の結果によれば⁽⁶⁾、逆流が始まる流入角よりも約0.5度小さい流入角すなわち弱い逆流が起きると振動が始まることになる。

4. 境界層の減速流れ対策と二次流れ

減速流れの場で乱流境界層が厚くなることは圧力損失の増大を意味するし、流れが壁面から剥離すれば、その下流では圧力上昇が実現し難くなるので、場合に依じていろいろの対策が講じられている。

4.1 上流の境界層

下流の境界層厚さは上流での厚さに略比例し、境界層の発達の上流境界層の形状係数及び主流の圧力勾配の影響を受ける⁽²⁾⁽⁷⁾。その際の距離は境界層厚さが尺度となるから、上流の境界層が薄ければ短い区間で減速できて好都合である。その為に上流で境界層を吸い出す事を始めとして、各種の改質方法が実施されている。

4.2 境界層に運動量を供給

4.2.1 渦誘起装置⁽⁸⁾ これは短い翼を壁面に垂直に、主流に対して約15度の正負又は同相の迎い角で交互に横一列に並べて取り付け、翼の先端を境界層のやや外に突き出したもので、翼の揚力に比例する強さの渦が翼端から壁面に沿って下流に向かって流出する。

この渦の列は主流と境界層の流れを入れ替え攪拌するので、壁面近くの境界層の運動量が増加して境界層の形状係数が大幅に減少するから、主流の減速による境界層運動量厚さの増加が少なくなり、境界層の剥離が防止される。勿論この翼の抵抗による運動量の損失は無視出来

ないが、減速流れにおいては形状係数の減少によって境界層の発達を低減する利益が格段に大きい。

4.2.2 スリット翼 一般に翼の負圧面では大きな減速が要求されるから、下流では境界層は厚く形状係数は大きくなっている。一方翼の圧力面に沿う流れは増速気味であるから境界層は薄い。圧力面の境界層を含む主流の一部を、翼の中に設けた溝を通して翼の負圧面に導いて下流に向けて吹き出せば、負圧面境界層の底部の流速が増加し、形状係数が小さくなる。飛行機のフラップと主翼との隙間はこのための通路になっているし、ターボ機械で用いられる二重翼列はこの効果を狙う物である。

4.3 二次流れと集積

4.3.1 羽根車内の二次流れ 主流に対して直角方向に圧力勾配がある場合、圧力勾配は主流に働く慣性力(遠心力とコリオリ力)と釣り合うが、速度が遅い側面上の境界層では慣性力が弱いので二次流れが起きる。その慣性力が流れの湾曲によるものであっても羽根車の回転に基づくものであっても、1.3節や1.4節で示されるように、羽根車の翼面境界層では二次流れはハブからシュラウドへ、側壁面境界層では翼の圧力面から隣接翼の負圧面に向かう。したがって、遠心羽根車のハブや翼の圧力面の境界層は二次流れによって薄くなるが、それがシュラウドや翼の負圧面の近くに集まる。

このように境界層の流体が集積するのは断面内で速度が最大の位置であって、主流の様な出口速度まで減速するから、この部分での減速比は最も厳しく流れが剥離しやすい。その対策として、集積する場所から早めに境界層流体の一部を吸い出せば顕著な効果が期待できる。

4.3.2 ディフューザ壁面の二次流れ 3.1節では羽根なしディフューザ内を旋回する外向き流れの側壁面境界層について半径方向の力の釣り合いを考察した。現象は軸対称で半径方向の圧力勾配は主流にも流速の遅い境界層にも一様に掛かる。境界層内部の流れはこの圧力勾配に耐えられず、主流が助けに加わるので境界層は半径と共に厚くなるばかりでなく、境界層内部の半径方向の運動量は急速に減少する結果、流れ角は主流よりも小さくなり、負の流れ角(逆流層)になることも有る。

右廻りに旋回する外向きの主流に沿って薄翼を側壁面に取り付けば、側壁面の境界層内に生じた二次流れは翼面の左では翼面に遮られて翼面に沿って下流や上流に向かって流れる。一方薄翼のすぐ右側には左から流入する二次流れの境界層はないが、摩擦抵抗によって主流の側壁面上には境界層が発生し二次流れが始まるので、翼面から円周方向に離れるほど境界層は厚くなりその流れ角は小さくなる。

隣接する2本の主流の流線と2本の同心円弧で区切られる筒型の検査域を通過する境界層の流れだけを考える。左の面から流入するよりも右の面から流出する平均流れが主流となす角が大きくなれば、境界層内の流れは、軸対称(羽根なしディフューザ)の場合に比べて、半径方向の

運動量をそれだけ多く失うことになる。その結果として、半径方向の圧力勾配を支える為に主流が境界層に加わって運動量を失う量は少なく済むから、半径方向に境界層が厚さを増す程度は軸対称の場合よりも少ない。

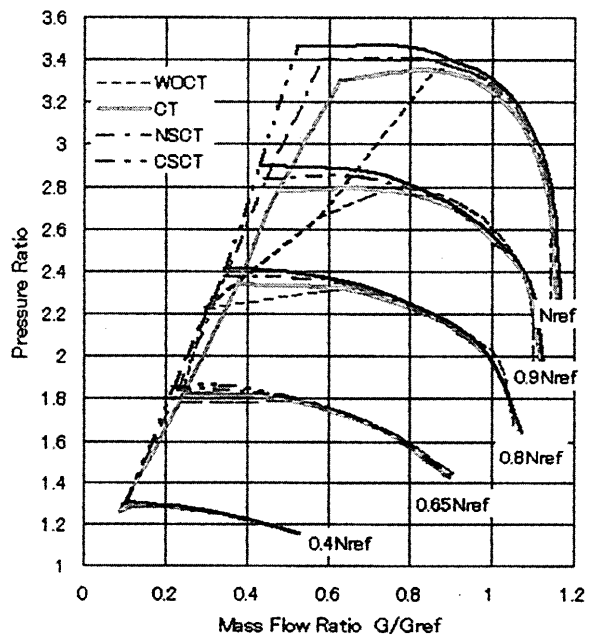
このことは、翼を主流に沿って設けることによって、側壁面の境界層は翼から離れた位置でも薄く、半径方向の圧力勾配に対抗する為の圧力損失を減らす効果が大きいことを示している。ただ、翼の左側には隣の翼間通路側壁面の境界層二次流れが集積するから、6.2節に述べるように適切な処置が必要である。

5. 遠心羽根車の境界層の除去

開放型の遠心羽根車について、羽根車のインデューサ後部即ちシュラウドに沿って入口から遠くない位置においてシュラウド境界層の一部を吸い出して羽根車の直ぐ上流に戻すことによって、運転可能な流量を低流量側に広げる試み、いわゆるケーシングトリートメントと称する技術がある。この直接の目的は、流量係数(流量(入口状態)/回転数)が小さい時はインデューサ部の流量だけを增加させ、インデューサへの入射角を増してインデューサがストールするのを防ぐ事である。

抽気された流体は羽根車の回転方向の旋回速度をもっているし、それがインデューサの上流に送り込まれるときの軸流速度は主流よりも小さいから、この循環流によってインデューサに対する迎い角は半径に沿って複雑に変化しており、その効果は単純ではない。

後藤等⁽⁹⁾は、循環流の有無、および循環流の予旋回を正負に変えた実験を遂行した。図1によれば、低速回転では循環流がサージング限界の流量係数に及ぼす影響は



WOCT: 抽気なし CT: 抽気予旋回
NSCT: 抽気無旋回 CSCT: 抽気逆旋回

図1 抽気によるサージング防止効果

殆ど認められないから、サージングの原因はインデューサのストールに依るものではないと思われる。

また抽気しない場合を除けば、循環流の予旋回方向に関わりなく、回転数の増加に伴って圧縮比が増加すると共にサージング限界の流量係数（質量流量と回転数の比）は増加している。これらの場合、回転数とともに流量係数が増加しても圧縮が進んだ為に羽根車出口の体積流量はさほど増加せず、ディフューザへの流入角が低速回転の場合と殆ど変わっていないから、サージングが起きた原因はディフューザのストールであろう。

シュラウドからの抽気がない場合に限って、回転数すなわち圧力比の増加に伴ってサージングの限界流量係数が急激に増加している。一定の回転数では流量が変化しても羽根車への相対流入速度の変化は比較的になので、出入口間の速度比はほぼ出口の体積流量係数と共に変化する。圧力比の増加に伴って羽根車内部では下流に進むほど体積流量が減少するので、出入口間の速度比が低下して羽根車内部で逆流が起き易い。

抽気しない場合には、この羽根車が正常に働く限界の出入口速度比は、低速回転で実現されたサージング限界での値に近いものであるとすれば、回転数が増加した時に、この限界速度比を維持する為には出口流量係数（出口体積流量と回転数の比）の減少を補うことが必要で、そのための流量増加が、限界の流量係数（入口体積流量と回転数の比）の増大として現れたものと思われる。

一方抽気された場合には、シュラウド面に集積した境界層の遅い流れの多くが除去された為に、その下流での境界層の発達が大幅に少なくなって、最高回転数で出入口体積流量比がかなり小さい場合でも羽根車の内部で境界層の剥離が起きなかったものと推察される。

ガスタービンではタービン等の高温部の冷却に圧縮空気を利用することが多い。その際に圧縮機のシュラウドから空気を抽出する方法を用いれば、圧縮機の性能向上を兼ねた一石二鳥の効果がある。

6. 遠心圧縮機の小弦節比ディフューザ⁽¹⁰⁾

遠心圧縮機の羽根車を出た流れは、2章に述べた作用によってディフューザに入ると殆ど軸対称の旋回流となるが、流入角は流量と共に変化するから、広い範囲の流量変化が求められる産業用遠心圧縮機では固定した翼角のディフューザは適当でないとして、専ら羽根なしディフューザが用いられていた。その場合には自由渦巻き流れによる自然な圧力回復が期待されるが、3.1節に述べたように側壁面では境界層が急速に厚くなって大きな圧力損失を伴うから、圧力回復率を高めるには側壁面に発達する境界層に対して適切な対策が必要である。

4.3.2節では、主流に沿って翼を設ければ側壁面の境界層二次流れの流入が翼によって妨げられるので、翼から円周方向に広い範囲で境界層は薄い事を述べたが、その際に隣の翼面に集積する境界層を適切に処理しなければ、高い圧力回復率のディフューザは実現しない。

6.1 翼列ディフューザの最大流量

ディフューザとして特定の流出方向に合わせて翼列や傾斜した減速通路を設ければ、大きな圧力損失なしで通過できる最大流量は翼列の翼先端と隣接翼との間に形成される喉によって制限される。翼角に適合した流量よりもなるべく多い流量でも実質的に喉が形成されないためには、食い違い角の大きい翼列とし、弦節比を0.9程度以下にする必要がある。

6.2 円形翼列ディフューザの側壁面境界層

羽根なしディフューザに円形翼列を設けて旋回を弱めれば、側壁面の境界層は旋回流と翼列とが組み合わされた圧力場の影響を受ける。この内、旋回流によって半径方向に高くなる圧力勾配は境界層に内向きの二次流れを起し境界層の逆流の原因となるが、翼は揚力を得る為に下面の圧力が低下しているから、翼間ピッチの前半では翼に面した半径方向の圧力勾配が弱められる。従って食い違い角が大きい翼列では、翼面に近い部分には二次流れの逆流が起き難い効果が期待できる。

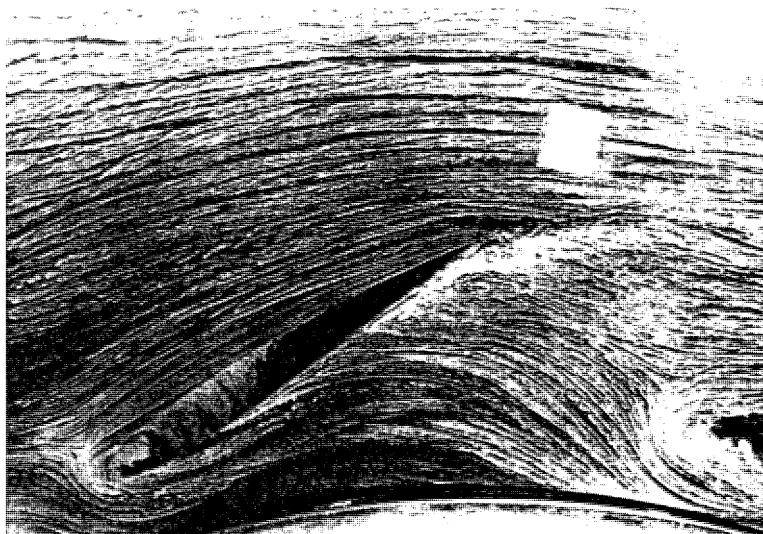


図2 小弦節比ディフューザによる境界層の再生

弦節比が小さい翼列によって誘起される境界層の二次流れは、壁面に残された流跡として図2に見られるように山形を描いて翼の負圧面から隣接した翼の圧力面に向かう。翼の負圧面の近くでは壁面境界層は4.3.2節に詳述した力学的関係に基づいて薄い上に、半径方向の圧力勾配が弱い効果も加わっており、一方隣接翼の圧力面に近付くほど半径方向の圧力勾配が強くなることも加わって境界層は次第に厚くなり、隣接翼に近付くとともに同一円周上では壁面流跡の傾斜角が正から負まで急激に減少している。

この図のように翼の後端から始まる二次流れの流跡が隣接翼の前端に達するようであれば、壁面近くの運動量が小さい流れの大部分は隣接翼の近くでディフューザ入口付近迄戻されて、羽根車から吐出された主流によって大きな運動量を与えられ、隣の翼の前縁を通り抜けて隣の翼間に流入する様子が認められる。

6.3 境界層の排出と再生

翼間の側壁面境界層の多くは二次流れとなってディフューザ入口近くまで逆流し、隣接翼付近に集まっており、そこでの流跡は大きな内向きの流れ角になっている。この部分での流れが主流から著しく振じれていることは境界層が集って厚くなっている事を示している。その流跡が翼の前縁と羽根車の外周との間で殆ど円周方向まで流れ角を変えていることは、この流れが羽根車を出たばかりの厚い層の多量の主流に混じって半径外向き及び円周方向の運動量を与えられて殆ど主流に同化し、隣接する翼間に抵抗無く流入して外向き流れとなるので、それが主流となって出来る壁面境界層は、羽根車からの流れを主流とする新しい境界層と同様に、排除厚さは甚だ薄くて、この下流で圧力勾配に対抗して流れても失う運動量は少ない。これは左の翼間側壁面から吸い出した境界層を理想的に処理している状態と言えよう。

弦節比が過度に小さくて隣接翼が離れていると、側壁面の境界層は翼の負圧面から離れるほど厚くなって次第に羽根なしディフューザの場合に近づくばかりでなく、翼によって集められた逆流境界層を再生する機会が失われるのではないと思われる。一方弦節比が大きいと、逆流した境界層二次流れの多くが隣接した翼の圧力面に捉えられて圧力面に沿って翼列出口に向かうことになるので、翼の圧力面に沿った厚い境界層の流れを維持する為に主流が失う運動量は大きい。

6.4 その他の効果

翼の働きによって翼列の下流では主流の旋回が弱められ減速されるから、主流の旋回動圧の一部が静圧として回収されるし、下流では流れ角の増加によって側壁面上の境界層の発達はやや緩やかで圧力損失が少ない。

翼の負圧面に成長する境界層の一部は側壁面の二次流れに吸引されて除去される様で、流量が減少して翼に対する迎え角が増大した場合、翼の最大揚力係数は単独翼の二次元流れでの限界値である1.7以上にまで到達する

事が認められている。

6.5 実績

従来用いられている羽根なしディフューザでは流入動圧の圧力回復率が0.3程度であった。このディフューザでは、翼列によって側壁面の境界層が薄くなり、吸い出された境界層は主流によって活性化されて隣の翼間に主流と混合して流入し、理想的な処理がなされている。その上効率のよい翼列の減速効果に加わるので、圧力回復率が約0.7にも達し、圧縮機全体としてのヘッドや効率が10%程度向上している。

Osborne & Sorokes⁽¹⁾は筆者等の小弦節比円形翼列ディフューザの実験を克明に検証した上で実機に適用した結果、ヘッドや効率が従来の製品に比べて約10%高い1~4.4万kWの圧縮機等を数年間で100台以上製造した顛末を詳細に記述している。

7. まとめ

圧力勾配のある流れ場において、境界層を維持するには力が必要である。通常の境界層流れではその力として主流は運動量の一部が削られて境界層に取込まれるので、境界層は下流に向かって成長している。その成長の割合は境界層の排除厚さに比例し、出口/入口の速度比が小さいほど、また圧力勾配が厳しいほど顕著である。

したがって減速流れにおいては「厚くなった境界層を攪乱して壁面近くの速度を高め、排除厚さを薄くする」「外部から運動量を与えて境界層を活性化する」「厚く集積した境界層の流体を排除し、所を変えて主流に混入する」等の対策によって、下流における境界層の成長を弱めれば、全体の流動状態は大幅に改善される。

境界層を活性化した実例を、遠心羽根車の場合についてはケーシングトリートメント、ディフューザについては小弦節比円形翼列ディフューザによって示した。

参考文献

- (1) 速水 洋, ターボ機械, 31-5(平15-5), p.257.
- (2) 妹尾泰利, 内部流れの力学(2), (平6), p.35. 養賢堂
- (3) 同上, p.84.
- (4) 同上, p.50.
- (5) Dean, R. C. Jr., Y. Senoo, Trans. ASME, Ser. D, 82-3 (1960-9), p.563.
- (6) 妹尾泰利, 木下凱文, ターボ機械, 6-4(昭53-4), p.219.
- (7) 文献(2)のp.42.
- (8) 妹尾泰利, 西 道弘, 機械学会論文集, 37-303(昭46-11), p.2153.
- (9) 後藤信也, 山口 論, 中尾秀史, 山口 広, 中村房芳, ターボ機械, 11-8(平15-8), p.482.
- (10) 妹尾泰利, 河野政典, 速水 洋, 機械学会論文集, 45-396(昭54-8), p.1099.
- (11) Rohatgi, U. S., Hamed, A., Kim, J. H.(ed), Flows in Non-Rotating Turbomachinery Components.(1988). ASME, p.89.

特集：新燃料

わが国の資源としてのメタンハイドレート研究の現状

安田 優人*1

YASUDA Masato

キーワード：メタンハイドレート，開発計画，南海トラフ

Methane Hydrate, Research Program, Nankai Trough

1. はじめに

ガスハイドレートとは包接化合物の一種であり，この包接化合物とは一方の分子がつくる包接格子（トンネル型，層状あるいは立体網状構造をもつ格子）の隙間に他方の分子が入りこんでできる構造のことを言う。ガスハイドレートは水の分子が作る籠が複数組合わされて構造を形成し，それぞれの籠の中にガスの分子が一個閉じ込められている。水分子の数オンゲストロームの隙間を占めるガスがメタンであれば，それがメタンハイドレートであり氷状の固体である。メタンハイドレートは水分子が各頂点にある五角形が12個集まってできた籠2個と五角形が12個と六角形が2個集まってできた籠6個からなる構造I型と呼ばれるハイドレートに属する。

メタンハイドレートの分解は吸熱反応で，1立方メートルのメタンハイドレートが分解すると標準状態で0.8立方メートルの水と172立方メートルのメタンガスが得られる。メタンハイドレートが安定して存在するには一定の温度圧力条件があり，温度が摂氏0度では2.3MPa以下の圧力では分解が生じ，圧力5MPaでは温度が摂氏7度以上では分解が生じる。この条件から地下においてメタンハイドレートが安定に存在しうる深度を推定することができる。

従来ガスハイドレートは天然ガス生産施設のパイプ等を閉塞させる厄介物として扱われていたが，1972年にはロシアのメソヤハガス田の天然ガス生産にガスハイドレート層が貢献しているとの発表があったからは，ガス資源としての可能性が注目されはじめた。日本では1990年代になって通商産業省（現，経済産業省）の主導により本邦周辺に存在するメタンハイドレートの資源化を目的とした調査研究が開始された。

メタンハイドレートの地下での存在は試料を直接採取してそれが確認された地域もあれば，地震探査という地表から人工的に発振する弾性波の分析による間接的な手法によりその存在が推定された地域もある。陸域においては極地帯の永久凍土層下に，海域では世界各地の大陸棚から大陸棚斜面に存在しているといわれている。日本

周辺においてはこの地震探査により，南海トラフ，南西諸島，房総半島東方，千島海溝，日本海，オホーツク海にてハイドレートの存在を示唆するデータが得られており，このうち南海トラフ四国沖及び東海沖と日本海奥尻海嶺ではメタンハイドレートの採取に成功している。このハイドレート分布面積は日本周辺で推定約6万平方キロメートルにも上る。

（独）産業技術総合研究所の佐藤は日本周辺海域のメタンハイドレート中のメタン量を4.13～20.64兆立方メートルと推定している。仮にこの量が全て資源として利用可能とすれば，これは2000年の国内天然ガス供給量742億立方メートルの55～278年分に相当する値である。し

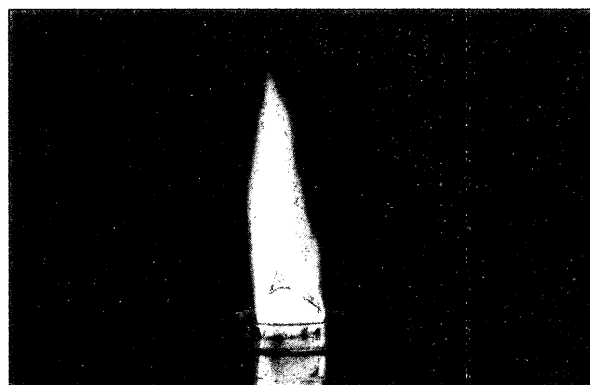


図1 燃えるメタンハイドレート

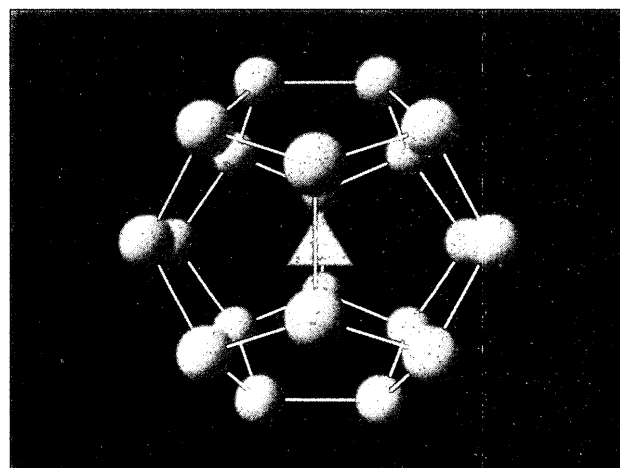


図2 メタンハイドレートの構造

原稿受付 2003年10月14日

*1 石油公団 石油開発技術センター
〒261-0025 千葉市美浜区1-2-2

かしこのメタンハイドレートを資源化する手段は研究途上であり、経済的に利用できる資源量を評価できる段階には至っていない。このハイドレートを資源化するにあたっては地下でハイドレートを分解してガスを分離し、このガスを地上に取り出す方法が今研究の対象となっている。

2. 我が国のメタンハイドレート研究のこれまで

2.1 石油公団 特別研究「メタンハイドレート開発技術」

通商産業省に設けられた石油審議会の1994年の答申で示された「第8次国内石油及び可燃性天然ガス資源開発5カ年計画(1995年度~1999年度)」に基づき、通商産業省は世界で初めての試みとなる海洋でのメタンハイドレート調査を組み込んだ、基礎試錐「南海トラフ」を計画した。1995年から1999年にかけて石油公団及び民間石油ガス関連会社10社は、特別研究「メタンハイドレート開発技術」を実施した。この研究は調査掘削を成功に導くと共に、メタンハイドレートの資源として評価するための研究基盤を整えること狙いであった。以下にその内容を紹介する。

メタンハイドレート基礎物性の検討

- ・堆積物中のメタンハイドレートの生成メカニズムを推定するために、ガラスビーズなどの模擬堆積試料を用いた生成実験を実施し、ハイドレート結晶の成長過程の観察を行った。
- ・人工及び天然のハイドレートを含む堆積試料を用いたハイドレート生成分解実験装置を開発し、ハイドレートの生成分解速度の温度、圧力依存性を測定した。
- ・ハイドレート存在域の推定とハイドレートを分解させてガス化させた場合の生産挙動をモデル化するための基礎データとして、熱伝導度、電気抵抗、弾性波伝播速度、密度、電気抵抗等の基礎物性を測定した。

メタンハイドレートの存在形態

- ・基礎試錐「南海トラフ」で得られた試料について、X線CT、NMR、地化学分析を行い、試料を採取した坑井周辺のメタンハイドレートは、砂質層の孔隙を充填するかたちで連続して存在していること、生物分解起源のメタンを主体とする構造I型であることを確認した。
- ・ハイドレート層に含まれる水の塩分濃度分析及び温度測定から、孔隙中のメタンハイドレートの飽和率は最大で80%に及ぶ事を確認した。
- ・基礎試錐「南海トラフ」で得た結果をもとに、坑井周辺の資源量を試算した結果、坑井近傍一万平方メートルの域内に存在するメタンハイドレート中のメタンガス量は2.8~9.9百万立方メートルであると試算された。

メタンハイドレート掘削技術の開発

- ・基礎試錐「南海トラフ」をはじめとするメタンハイドレートを含む層を効率良くかつ安全に掘削できる技術を構築するために、坑内温度圧力シミュレーション、キックコントロール、ケーシングデザイン、セメンチ

ング、泥水、泥水冷却、コアリングシステムに関する研究開発を実施した。

- ・圧力と温度を原位置状態に維持したままコア採取が可能となるワイヤライン回収式コアサンプラーPTCS (Pressure Temperature Core Sampler) を開発した。この装置により外径2-5/8インチ、長さ3mのコアサンプルが採集できる。

メタンハイドレートの生産挙動の研究

メタンハイドレート層の生産挙動をモデル化しシミュレーションする技術の基礎として

- ・3相(水、メタンガス、ハイドレート)、3成分(水、メタン、二酸化炭素あるいは窒素)の計算に対応する、相平衡論に基づく状態方程式を構築した。
- ・2成分系(メタン、水)に対しては相平衡論に加えてハイドレート分解速度論を考慮した、一次元流動計算モデルを試作した。両モデルについて、ハイドレート分解実験結果との比較を行い、実際のフィールド規模に対応する実用的なシミュレータ開発の基礎を築いた。

2.2 基礎試錐「南海トラフ」の概要

メタンハイドレートの調査を目的とした基礎試錐「南海トラフ」は、1996年と1997年に同海域で取得された地震探査データの解釈の結果、静岡県天竜川河口沖合約50km、水深950mの地点が選定された。これは震探断面図においてハイドレートの存在を示唆するとされる反射面であるBSR (Bottom Simulating Reflector) が海面下1,240m相当のところに明瞭に出現していた場所で、1999年11月10日から2000年2月5日にかけて、大水深掘削リグ「M. G. Hulme Jr.」により作業は実施された。

大量の遊離ガスが噴出する可能性を探るため、メインホールの掘削開始前に小径(8-1/2")のパイロット坑をBSRの十分下まで掘削した。掘削中は、ROV (Remotely Operated Vehicle) という遠隔操作探査機ソナーで坑口を観察し続けたが、深度1,600mに至るまでガス噴出の兆候は確認されなかった。

続く2坑目のパイロット坑掘削後のメインホールは、996m(海底面下51m)に30"ケーシングをセットした後、10-5/8"坑を1,110mまで掘進し幾度かコア採取を行った。特に1,175mから1,254mまでの区間は地下の温度圧力を保持したままコアの回収が可能でPTCSを用いた27回にもおよぶコアリング作業を実施した。PTCSで回収したコアの多くはシルトと粘土であるが、それらに挟まれた何枚かの薄い砂層には、気泡、温度低下、低塩分濃度などの非常に興味深い特徴が観察された。ガスバブルのガスがメタンであること、コアの内部の温度(-2℃から-3℃)から吸熱反応が進行していること、さらに砂サンプルの孔隙中に含まれる水の塩分濃度が異常に低い値を示したことから、これらはメタンハイドレートの存在を示していると判断した。特にその塩分濃度の値から、場所によってはハイドレートは孔隙の80%を占めていた形で存在することが推定された。

3. 外国のメタンハイドレート研究の状況

米国では1990年代前半まで、米国エネルギー省（以下、DOE）のMorgantown Energy Technology Center（当時）において、ハイドレートの物理的・科学的特性、ハイドレートの形成・分解のメカニズムそして海洋と極地のハイドレート層の地質特性に焦点をあてた研究が実施されてきた。その後国際深海掘削計画（Ocean Drilling Program）や日本等米国外でのメタンハイドレートの研究開発の影響を受けて、1998年8月に「メタンハイドレート研究開発の方針（A Strategy for Methane Hydrate Research and Development）」を、1999年6月には「国家メタンハイドレート長期研究開発計画（National Methane Hydrate Multi-Year R & D Program Plan）」をDOEが定めている。同計画では4つの課題、すなわち、資源としての特性、掘削の安全性と海底面の安定性、地球環境問題そして生産について焦点をあてている。

現在、ハイドレートコア回収機器の開発、メキシコ湾のハイドレート層掘削実験、ハイドレート生産挙動予測シミュレータ開発、アラスカでの産出試験などのプロジェクトがDOEの支援の元で大学、研究機関そして石油会社が主体となり実施中である。

インドでも1999年に長期計画（National Gas Hydrate Program）を策定し、ボンベイ沖アラビア湾やベンガル湾を対象地域とした地震探査及び坑井掘削作業からなる研究開発を開始している。既にBSRの分布は確認されており、メタンハイドレート層を対象とした調査掘削の計画が検討されている。

カナダではカナダ地質調査所が中心となり、マッケンジーデルタの永久凍土地帯において坑井を掘削し、メタンハイドレートの資源量評価に関する調査、研究を行っている。

その他、韓国、中国、台湾、フランスにおいても将来のエネルギー資源としてメタンハイドレートに注目し、基礎的な研究開発を行っている。また、ODPの活動を引き継ぎ、2004年から開始されるIODP（統合国際深海掘削計画）においても、メタンハイドレートは重要な研究対象と位置付けられている。

4. 我が国の新たな研究の取り組み

資源小国の日本にとっては、将来のエネルギー資源として近海に存在するメタンハイドレート資源の開発可能性を追求することの重要性は論を待たない。これまで実施してきた研究開発の結果、メタンハイドレートに関する知見は大幅に増したものの解明すべき課題はまだ数多く残されている。

研究計画「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」は、このような認識のもと2000年6月に、通産省（当時）に組織された開発検討委員会が、今後のメタンハイドレートの経済的な開発に向け、資源量評価、生産性評価、環境影響評価などの取り組みについて検討し、

中長期的視点に立って策定した計画である。この計画は、2001年7月に発表されている。

同計画は以下を目標としている。

- ・日本周辺海域におけるメタンハイドレートの賦存状況と特性の明確化
- ・有望メタンハイドレート賦存海域のメタンガス賦存量の推定
- ・有望賦存海域からのメタンハイドレート資源フィールドの選択並びに経済性の検討
- ・選択されたメタンハイドレート資源フィールドでの産出試験の実施
- ・商業的産出のための技術の整備
- ・環境保全に配慮した開発システムの確立

そしてこの計画は3フェーズに区分されている。

フェーズ1（2001～2006年度）の目標は、基礎的な研究（探査技術、基礎物性、分解生成技術等）を推進しつつ、探査技術の最適化、ハイドレート賦存海域と賦存量の把握、海洋産出試験対象フィールドを選択、連続的な生産技術を検証することにある。

フェーズ2（2007～2011年度）の目標は、基礎的な研究（生産技術、環境影響評価等）を推進しつつ、選択されたフィールドの資源量把握、日本近海での海洋産出試験の実施と生産技術等を検証することにある。

フェーズ3（2012～2016年度）の目標は、商業的産出のための技術を整備し、経済性及び環境影響等を検証することにある。

この3フェーズにおよぶ研究は、石油公団、(独)産業技術総合研究所そして(財)エンジニアリング振興協会からなる「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム」が中心となり推進している。石油公団、(独)産業技術総合研究所、(財)エンジニアリング振興協会はそれぞれ、資源量評価に関する研究開発、生産手法開発に関する研究開発、環境影響評価に関する研究開発を担当している。

資源量評価に関する研究開発のフェーズ1では、メタンハイドレートの探査技術を向上させ、我が国周辺海域、特に南海トラフにおけるメタンハイドレートの賦存海域と賦存量の把握を行う。探査活動は、2次元及び3次元の地震探査と掘削調査に加えて、地下構造の詳細検討のため深海曳航方式地震探査手法や海上電磁探査手法など新たな物理探査手法の適用検討、海底状況把握のためサイドスキャンソナー探査やガス漏洩点探査など地化学探査手法の有効性検討、詳細速度解析やアトリビュート解析など地震探査データ処理解析技術の開発、メタンガスの生成・移動・集積からメタンハイドレート層形成までの過程を示すメタンハイドレート集積メカニズムの検討を行う。

一方、開発技術については北米陸上にてハイドレート産出試験を実施し、その結果を用いて産出挙動予測シミュレーターの性能を向上させる。また大水深海域での在来型の石油天然ガスの探鉱開発に用いる、掘削・仕上

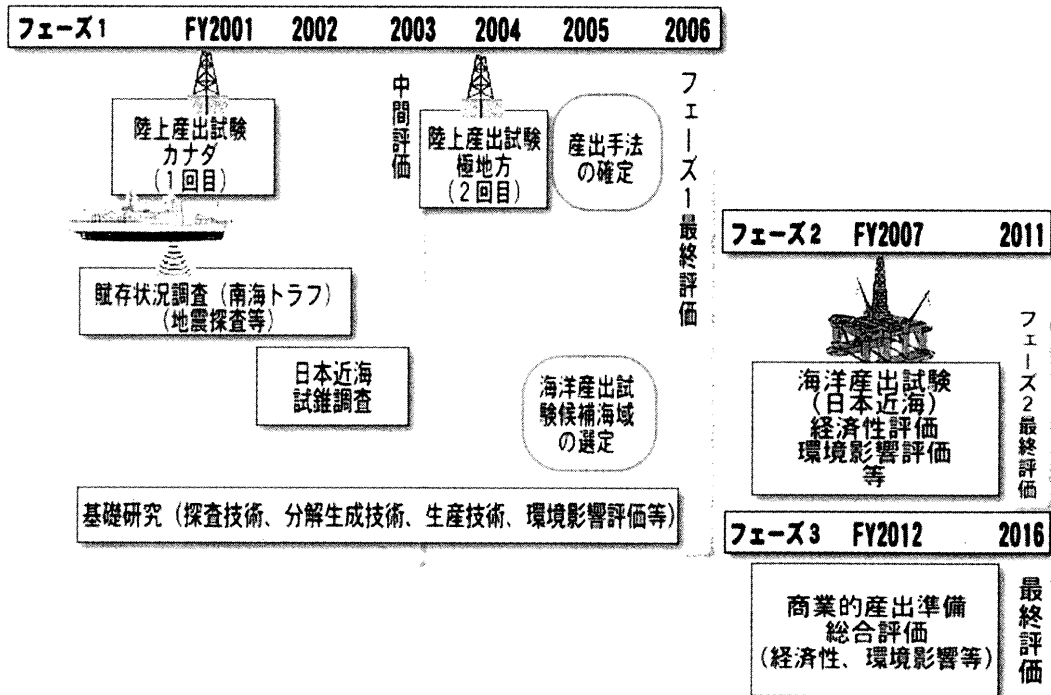


図3 研究計画「我が国におけるメタンハイドレート開発計画」スケジュール

げ・生産技術を改良して、フェーズ2に移行する場合に予定される本邦近海での海洋ハイドレート産出試験計画の立案を進める。また、メタンハイドレートの開発可能性をより具体的にイメージすることができるよう、メタンハイドレート開発システムの概念設計と感度分析を実施する。

以上の結果を用いて、資源化に向けて有望と考えられるメタンハイドレート資源フィールド候補地を選定する。

生産手法開発に関する研究開発のフェーズ1では、メタンハイドレートを含む地層から天然ガスを効率的に生産する技術を確認することを目標に、メタンハイドレート堆積層中のハイドレートの分解・採取技術の研究開発を行う。このため、メタンハイドレートの堆積層の基礎物性、機械的特性などの解析とその分解時の動特性の解明を通じ、その態様と挙動を明らかにする。また、メタンハイドレートの堆積層の挙動と分解動特性のモデル化を進め実フィールドスケールに対応可能なシミュレータを開発する。

環境影響評価に関する研究開発のフェーズ1では、フェーズ2で予定されるメタンハイドレートの海洋生産試験に備えて、メタンハイドレート資源フィールドの環境ベースライン調査（環境、生態系）を実施するとともに、環境に調和したメタンハイドレート開発に関する課題について調査、研究開発に取り組む。メタンガスの生産に伴い発生する低温水の影響を評価する手法、メタンガスの漏洩と地層変形をモニタリングする要素技術の開発、地層変形を予測するシミュレータの開発に取り組む。HSE マネジメントシステムについても調査研究を行う。

2001年度末から2003年度前半にかけての主な実績は

以下の通りである。

まず最初に経済産業省の委託を受けて石油公団が実施した南海トラフでのメタンハイドレート層を対象とした基礎物理探査「東海沖～熊野灘」があげられる。2001年度には2次元地震探査を、伊豆半島の西側から潮岬沖に亘る東西約200km、南北50kmの海域で、水深は500mから2,000mまでの範囲を対象に実施した。測線長は約2800kmである。解釈作業は、BSRの分布域の把握、BSRに関連する地層境界面（Horizon）の追跡、及び近傍の坑井データとの対比による当該地域の地質環境の推定を中心を実施した。さらに、2002年度には、2次元地震探査の結果から、メタンハイドレートが広範囲に分布する「東海沖（調査面積：1125km²）」、「第二渥美海丘（同：625km²）」及び「熊野海盆（同：210km²）」を選定し、より詳細なBSR分布の把握を行うべく高分解能の3次元地震探査を実施した。メタンハイドレートの存在域の確認とBSRを主体とした地震探査断面上に認められるメタンハイドレート賦存様式に特徴的な現象の確認を目的とした、基礎試錐「東海沖～熊野灘」はダイナミックポジショニング機能を有するドリルシップを用いて、2004年1月から約100日間の期間をかけて実施する予定である。その際には将来の海洋産出試験に必要な掘削仕上げ技術の実証実験とメタンハイドレート層の温度測定を細かく行う坑井内地層温度測定も実施する計画である。本作業の結果から、BSR分布域の再評価とハイドレート飽和率の分布に関する情報を入手し、メタンハイドレート資源量のより高い精度での評価が可能となる。

第二に、メタンハイドレート産出挙動予測シミュレー

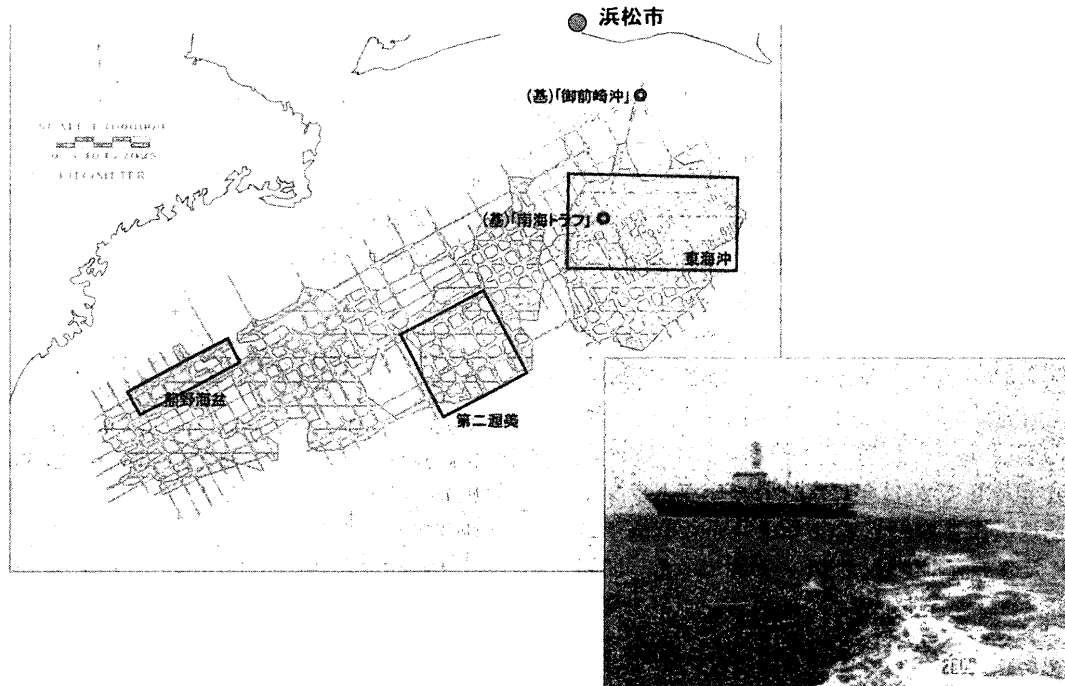


図4 基礎物理探査「東海沖～熊野灘」の調査海域と物理探査船

タの開発があげられる。多孔質媒体中のハイドレート分解に伴うガスと水の流動を予測する3次元シミュレータの試作終えており、今後は実際の産出挙動データに基づくシミュレータの実証と改良の段階に入っている。

第三に、2001年末から2002年初頭にかけてのカナダ北西準州マッケンジーデルタにて実施したメタンハイドレートの生産能力調査研究があげられる。同調査研究は、日本、カナダ、ドイツ、アメリカ、インドの5カ国から、石油公団、カナダ地質調査所、ドイツ地球科学研究所、米国地質調査所、米国エネルギー省、ONGC、GAIL、BP/Chevron/Burlington、ICDPが参加し、国際共同研究として実施された。石油公団とカナダ地質調査所との共同研究により1998年に掘削した深度1200mの坑井によりメタンハイドレート濃集層の確認を終えており、その結果をもとに同国際共同研究は企画された。この研究にかかわる作業は2001年12月25日から2002年3月14日にかけて実施された。実施期間は、資機材の運搬を氷結したマッケンジー川を利用して行うため、十分な氷の厚さを維持できる厳冬季に限定された。テスト井での産出試験においては、メタンハイドレート層の分解を促進するために、減圧法と加熱法の2種類の方法を用いた。産出試験の実施期間は、2002年2月27日から3月10日までの12日間であった。減圧法は検層ツールのModular Dynamic Formation Tester（以下、MDT）を用いて実施した。次に、MDTの対象層の上にブリッジプラグを設置し、上部のメタンハイドレート層を対象に加熱法を実施した。加熱法は、地上から90℃の温水を坑内に送り、メタンハイドレート層を加熱し、メタンハイドレート層の分解を促進しようというものである。メ



図5 カナダの産出試験で燃えるハイドレートガス

(資料提供：石油公団)

タンハイドレート層を50℃まで加熱維持でき、メタンハイドレート層から分解して生じたメタンガスを地表にて回収した。これら新たに得た知見を踏まえ、2004年度には第2回陸上産出試験を実施すべく計画中である。

5. まとめ

- ・日本で1995年から1999年に実施された特別研究「メタンハイドレート開発技術」により、メタンハイドレートの資源化にむけての基礎的な準備が進められた。同特別研究で得られた研究成果の多くは、1999年度に掘削された基礎試錐「南海トラフ」にて実証されると同時に、その後の研究計画立案の基礎となった。
- ・基礎試錐「南海トラフ」では、海底面下200mから260mに砂質層のメタンハイドレート層を確認した。

- ・カナダマッケンジーデルタでの産出試験から、メタンハイドレート層の生産挙動予測のための基礎データを取得した。
- ・メタンハイドレートの資源化に向けた研究開発は世界各所で実施されている。なかでも米国、日本そしてインドが積極的である。
- ・日本は、特別研究「メタンハイドレート開発技術」そして基礎試錐「南海トラフ」の実績をもとに、現在「メタンハイドレート資源開発研究」のフェーズ1を実施中である。同計画は、資源量評価、生産手法開発、環境影響評価の3分野から構成され、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムが研究開発を推進している。
- ・今後、2001年そして2002年に実施した南海トラフでの高分解能地震探査結果と2004年1月から実施予定の数十坑に及ぶ調査掘削を実施する計画である。同調査結果は、メタンハイドレート資源フィールドの選定とメタンハイドレートの資源量推定に資する計画である。

6. 今後は

我が国周辺に賦存するメタンハイドレートの資源化の検討は、資源量の把握、生産挙動の予測そして開発システム構築の観点から考えると、依然として初期段階にある。資源化の可能性を正しく評価するためには、2004年初頭に計画する南海トラフでの調査掘削を成功させ、それから得られる同海域のメタンハイドレートの賦存状況に関する情報が大きなキーポイントとなる。このメタンハイドレートの賦存状況がある程度明らかになれば、次なるステップとして最も重要なことは、フェーズ2に

計画されている本邦近海の海洋産出試験を経てメタンハイドレート開発の商業化の課題を浮き彫りにさせることである。

参考文献

- ・ Tetsuo Yonezawa et al., Explore Natural Methane Hydrate Utilization as Energy Resource at Nankai Trough in Japan - Past History and Current Activity -, 2003, 22nd World Gas Conference Tokyo
- ・ 佐藤幹夫他, 1996, 天然ガスハイドレートのメタン量と資源量の推定, 地質学雑誌 第102巻 第11号
- ・ Satoh, M., 2002: Distribution and Resources of marine Natural Gas Hydrates around Japan, Proceeding of The Fourth International Conference on Gas Hydrates, Vol. 1.
- ・ 高橋秀明・米澤哲夫・武富義和, 2001: 基礎試錐「南海トラフ」におけるメタンハイドレート探査, 石油技術協会誌, 66(6)
- ・ 経済産業省, 2001: 我が国におけるメタンハイドレート開発計画「メタンハイドレート開発検討委員会報告書」
- ・ メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム, 2001: メタンハイドレート資源開発研究実行計画書(フェーズ1)
- ・ Takahashi, H. et al., 2003: Operation Overview of the 2002 Mallik Gas Hydrate Production Well Program at the Mackenzie Delta in the Canadian Arctic, OTC 15124
- ・ 高橋秀明, 2003: メタンハイドレート層からの生産に向けた極地での挑戦, 石油技術協会誌, 68(2・3)
- ・ 石油公団, 2000, 平成11年度 国内石油・天然ガス基礎調査海上基礎試錐「南海トラフ」調査報告書
- ・ 石油公団他, 2000, 特別研究「メタンハイドレート開発技術」総括報告書
- ・ 石油公団, 2002, 平成13年度基礎物理探査「東海沖」熊野灘」調査報告書

特集：新燃料

メタンハイドレートの研究および利用に関する最近の進展

綾 威雄*¹

AYA Izuo

キーワード：メタンハイドレート，埋蔵量，ガスの起源，斜面安定性，採掘法，輸送法，ハイドレート物性，生成技術，生成形態の分類，温暖化

1. はじめに

クリーンでCO₂排出量の少ないメタンが，“燃える氷”（図1）と呼ばれるガスハイドレートとして大陸縁辺の海域とツンドラ地帯に大量に分布していることが分かり，新エネルギー源・石油代替資源として，世界各国から熱いまなざしが注がれるようになった⁽¹⁾⁽²⁾。特に，エネルギー資源の乏しい我が国では，南海トラフを始めとする近海でも埋蔵が確認され，実用化への期待を込めた大型プロジェクトが目白押しとなっている。メタンハイドレートの埋蔵総量は石油を凌ぐほど大量であるが，極寒の地や高圧の海底に分布していることから，その開発は必ずしも容易ではない。また，採掘に伴う海底斜面の崩壊とそれに伴うメタンガスの大気放出が温暖化を加速させるのではないかなどの懸念がある。そこで，この機会にガスハイドレート研究の歴史と現状を概観し，メタンハイドレートの採掘法など，実用化に向けた技術開発の進展を解説するとともに，問題点を整理することとする。

2. ガスハイドレート研究の歴史と現状

新聞等のマスコミでは，ハイドレートの性状をシャーベット状と表現することが多い。水との混合物は確かにその様に見えるが，ハイドレートそのものは水に似ている。そのため，1811年にハイドレートを発見した英国のDavy卿は，Royal Society誌に「塩素水は，凝固点降下の原理に合わず，清水より高温で凍る」と主張している⁽³⁾。そして，1823年にFaradayにより，Davy卿の発見したものがハイドレートであると認定された。

それからの1世紀余りは，ハイドレートを生成するゲスト分子の特定とその組成に関心が集まり，ハイドレート研究の基礎が築かれた。1930年代に入り，ガスハイドレートが天然ガス輸送パイプラインを閉塞するという問題がクローズアップされ，ハイドレートが成長しない条件を明らかにするため，多くの天然ガスとそれらの混合ガスについての詳細なハイドレート相平衡図を求める努力がなされた。その結果，産業上の要請に応えるとともに，

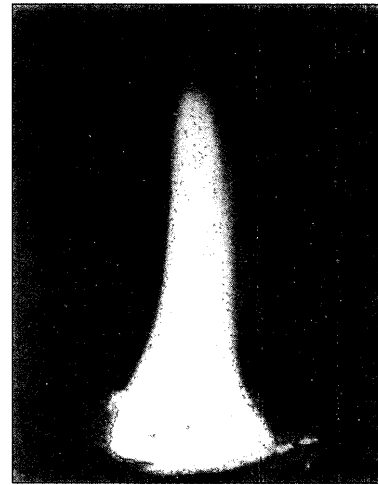


図1 メタンハイドレートが燃焼する様子

ハイドレート構造など，理論面も大きく進展した。20世紀半ばからは，自然界に多く存在するメタンハイドレートが新エネルギー源となり得るとの観点からの研究が，旧ソ連を中心に始まり，北米・欧州へと関心が広まった。また，1990年代になると，温暖化対策としてのCO₂海洋隔離が注目されるようになり，天然ガスと性状の異なるCO₂もまたハイドレート研究のターゲットの一つとなった。

我が国におけるハイドレート研究は，天然ガス輸送パイプラインの閉塞防止という大きな産業上の目標が希薄であったこともあり，旧ソ連や欧米ほど盛んではなかったが，メタンハイドレート開発への期待が高まるとともに，一つのブームのようになっている。

歴史的には，ハイドレート相平衡図を求めることが大きな目標であったことから，筆者が1990年にCO₂海洋隔離研究を始めた頃には，工業的に重要な時間項の含まれる物性値データがほとんどない状況であった。以来，広範な圧力・温度範囲における精緻な相平衡図を求める努力とともに，時間項の含まれる物性値も調べられるようになった。

ハイドレートは，図2に示されるような水分子からなる幾つかの基本籠状構造の中にメタンなどのゲスト分子が1個づつ入った連続結晶体である⁽⁴⁾。籠構造を安定化させる結合力は弱いvan der Waals力であるため，ハイ

原稿受付 2003年9月29日

*1 海上技術安全研究所 客員研究員

〒576-0034 大阪府交野市天野が原町 3-5-10

ドレートには、従来理論からは予測しがたい特異な性質が現れやすい⁽⁵⁾。その特異性が広範囲に亘っており、未発見の現象や物性の宝庫となっている。

3. メタンハイドレートの分布・埋蔵量と利用例

3.1 広範囲な分布

図3に示すメタンハイドレートの相平衡図⁽⁴⁾から分かるように、低温ほど平衡(分解)圧力は下がる。そのため、ハイドレートは、ツンドラ地帯のような高緯度では地表近くに存在するが、中・低緯度では深海底に存在する。

図4⁽⁴⁾は、ツンドラ地帯と海洋堆積層におけるハイドレートの鉛直分布を概念的に示している。折れ線で示される温度鉛直分布が曲線で示される平衡温度より低温側の領域(灰色部分)が、ハイドレート存在可能領域である。この図から、ハイドレートはある限られた範囲で存在可能であり、それより上方ではガス領域(ツンドラ地帯)あるいは海水(中・低緯度)となる。また存在下限(Base of Gas Hydrate)より高深度ではガス層が存在し、さらにその下には石油層と水層が続くことがある。図4から予測されるように、ハイドレート層(GHSZ: Gas Hydrate Stability Zone)の厚みは、ハイドレート層上

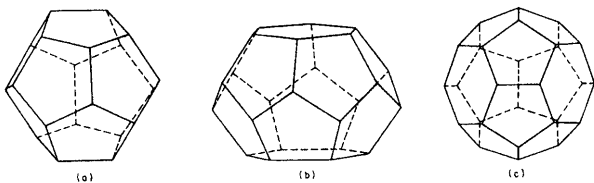


図2 ハイドレートを構成する基本籠構造⁽⁴⁾。各頂点に水分子が存在し、各頂点を結ぶ線は水素結合を表す。
 (a) 正12面体(正多面体中容積最大)
 (b) 王冠型14面体(正5角形×12+正6角形×2)
 (c) 16面体(正5角形×12+正6角形×4)

端の温度が低温ほど、また高压(高深度)ほど大きくなる傾向にあり、ツンドラ地帯の場合、500 mを越す場合もある。海底下のハイドレート層は、図5⁽⁶⁾に示すように、高深度ほど厚くなる。下方が気体であるハイドレート層の下端は、地震波や音波の反射層となるBSR(Bottom-Simulating Reflector)として探知でき、ハイドレート探査の有力な手法として活用されている。図6⁽⁶⁾に、典型的なBSR地震波データを示す。

図7⁽⁷⁾は、ボーリングなどの直接的な方法、或いはBSRの存在から推定されるメタンハイドレートの埋蔵地域を世界地図上に示したものである。この図から、シベリアやカナダ北方地域(ツンドラ地帯)を除けば、大陸

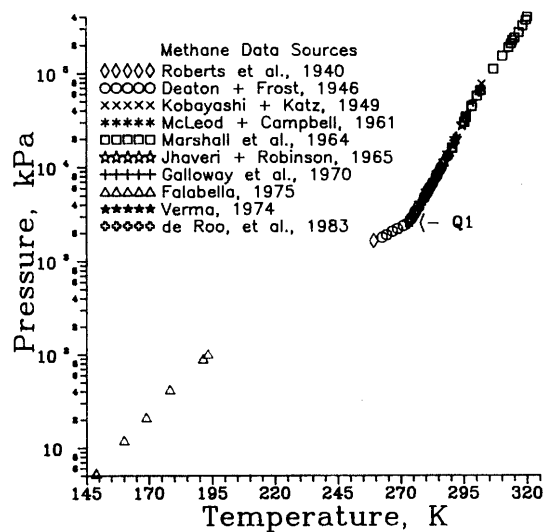


図3 メタンハイドレートの相平衡データ⁽⁴⁾。データより低温側(高温側)がハイドレート生成域。Q1は4重点で、水-水-ハイドレート-ガスの4相が共存する。Q1点より右上のデータ点では、水-ハイドレート-ガスの3相が共存する。

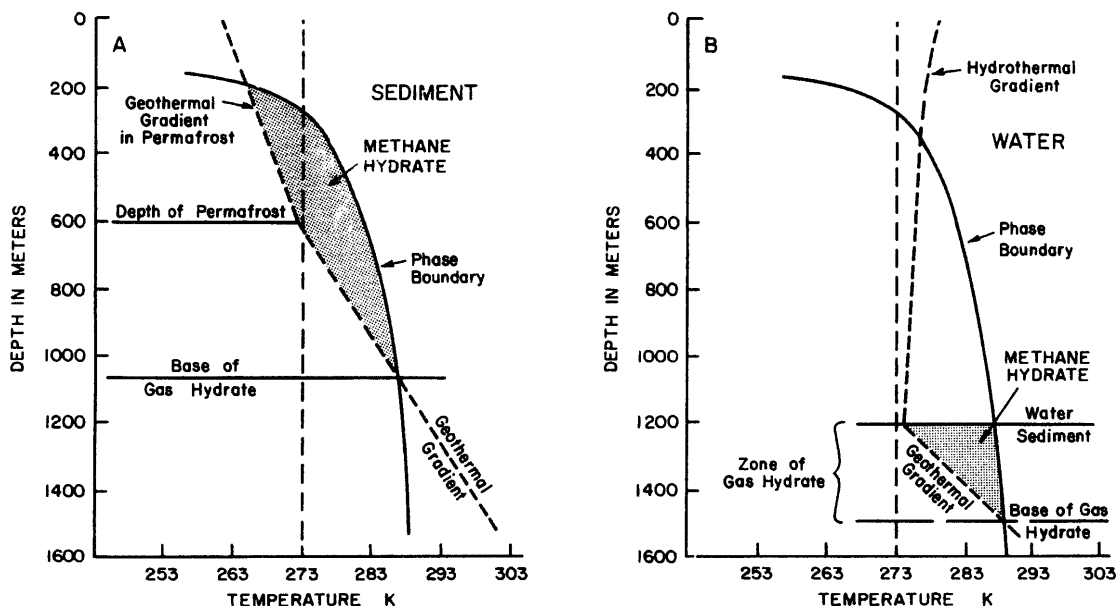


図4 ハイドレートの鉛直分布(灰色部分が安定領域)[A: ツンドラ地帯, B: 海底堆積層]⁽⁴⁾

縁辺の海域に広く分布しており、分布が偏する石油とは異なる特徴がある。また、図8⁽⁶⁾は、日本近海のハイドレート分布を示しているが、埋蔵量の指標となる分布

面積が広く消費地に近い南海トラフに注目が集まる理由が理解できる。

3.2 推定埋蔵量

表1⁽⁷⁾に、メタンハイドレートの推定埋蔵量（炭素換算値）を示す。メタンハイドレート鉱床の確認はBSR法に基づいていることが多いため、埋蔵量の推定は推定者により大きな開きがあるが、最小値の5,000億トンでも、原油の究極可採量とされる500億トン⁽⁸⁾の10倍も

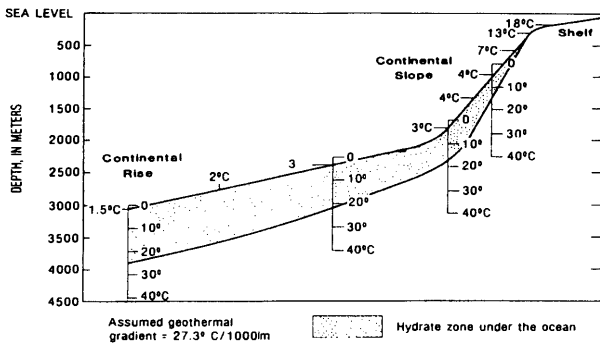


図5 大陸棚堆積層中のハイドレート層の厚み (高深度ほど海水温度が低下するため厚くなる)⁽⁶⁾

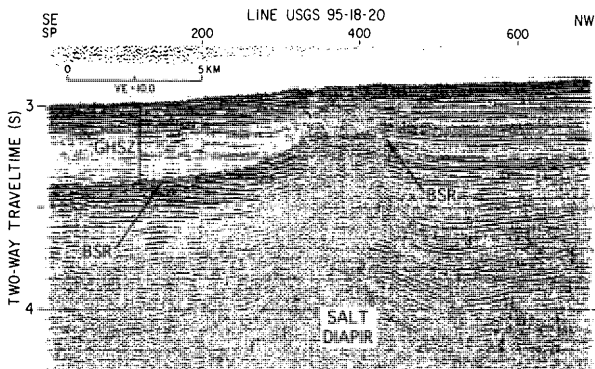


図6 ハイドレート層の存在予測に使われる BSR 地震波データ例⁽⁶⁾

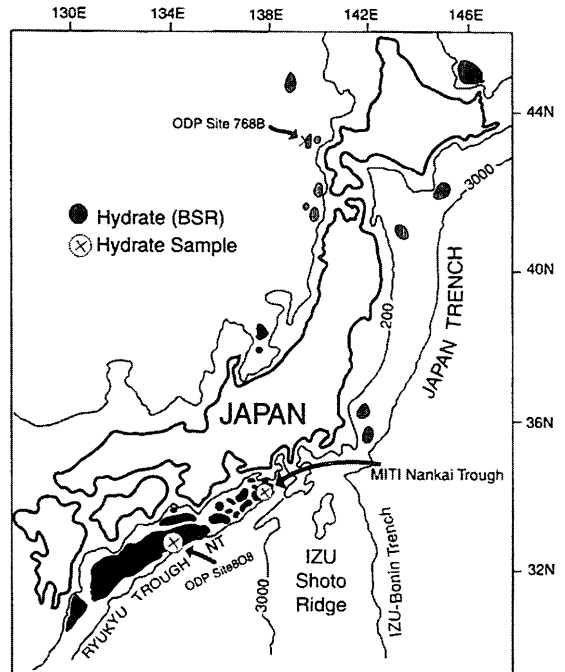


図8 日本近海のハイドレート分布⁽⁶⁾

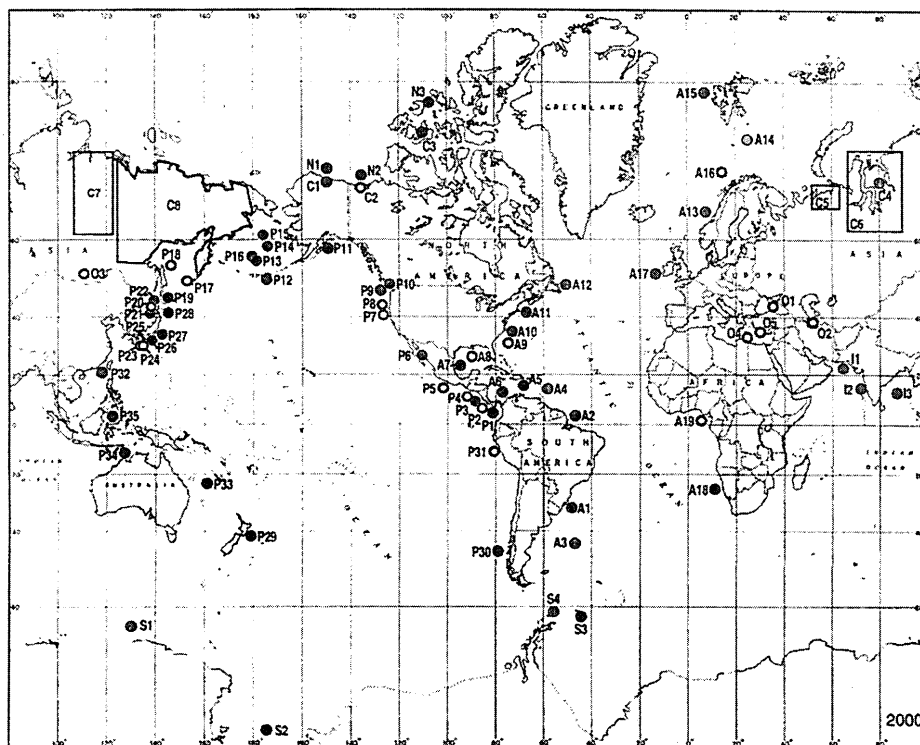


図7 BSR の存在などから推定されるメタンハイドレートの埋蔵地域 (我が国近海にも分布が広がる)⁽⁷⁾

表1 1990年代における天然ガスハイドレート中のメタン炭素の推定⁷⁾

推定範囲	推定値 (兆トン)		方法	推定者
	推定範囲	最適値		
14 - 75	14		GCM	Gornitz & Fung (1994)
15 - 49	24		GCM	Harvey & Huang (1995)
		~3	外挿	Holbrook et al. (1996)
1 - 10			外挿	Dickens et al. (1997)
		8	理論	Makogon (1997)
		0.5	経験則	Ginsburg & Soloviev (1995)

GCM : General Circulation Models, 外挿 : ある調査地点データからの全世界への外挿

ある。埋蔵量の内、コスト的に採取可能な量は、後述の開発途上の技術的課題に深く関わるため、現時点での正確な推定は容易ではない。しかし、将来、少なくとも石油に匹敵する量のメタンがハイドレートから供給できる可能性があると言えよう。

3.3 メタンガスの起源

ハイドレートを構成するメタンガスの起源を特定することは、ハイドレートの分布予測や埋蔵量を推定する上で重要な情報となる。そこで、ハイドレート分解ガスの同位体組成と炭化水素組成データに基づくガス起源の研究が盛んになり、その結果、海洋が主に微生物起源、ツンドラ地帯が熱分解起源と推定されるようになった⁹⁾。

3.4 メタンハイドレートの利用例

メタンハイドレートの利用は基本的には今後の課題であるが、既にメタンハイドレートからメタンガスを知らず知らずの内に商用産出していた例がある。

西シベリアのツンドラ地帯にあるメソヤハ・ガス田(図7のC4)では、1970年に天然ガスの生産を始め、1978年にガス圧が低下して生産を終了した。しかし、その後ガス圧が徐々に回復し、1980年から生産を再開し、今日に至っている¹⁰⁾。通常、ガス田の圧力はガスの生産とともに減少し回復することはないことから、ガス圧の履歴が詳細に調べられた。その結果、ガス空間の上部に層をなすハイドレートの一部が、ガス圧がハイドレート平衡圧力(図3参照)以下になることにより分解したことが判明した¹¹⁾。そして、1978年までの1次生産時代のガス圧の低下が理論値より遅いことから、この時期からハイドレートからのガス供給が始まっていたことが判明した。

この例は、メタンハイドレートの利用が可能であることと将来の利用法を示唆しているという点で、極めて重要である。

4. メタンハイドレート開発の諸課題

メタンハイドレートの開発には以下のような技術的課題の他、環境問題や災害防止の克服が求められている。

4.1 地質学的データの集積

実際にメタンハイドレートを開発するとなると、開発鉱区の特定期や採掘法を選定する必要があるが、そのためには埋蔵量や分布形態などの地質学的データの蓄積が重

要である。地殻深部の探査用に建造が進められている科学ライザー船「ちきゅう」¹²⁾など、最新鋭深海調査船の活躍を期待したい。

4.2 採掘法

最も現実的な方法として、上述したメソヤハ・ガス田のように、先ずハイドレート下方のガス層からガスを採取し、圧力低下に伴うハイドレートの分解ガスを間欠的に回収することが考えられている。この方法の問題点は、ハイドレートの分解速度が拡散に支配され遅いということである。

そこで、ハイドレートの分解を促進する方法として、①酸素を供給してハイドレートの一部を燃焼させることにより周りの温度を平衡温度より上げる方法、②アルコール類を送り込み平衡温度を下げる方法、③ハイドレートを生成しやすいCO₂と接触させ、メタンガスとCO₂分子を入れ替える「ゲスト分子置換法」¹³⁾¹⁴⁾など、様々なアイデアが提案されている。

4.3 輸送法

メタンをガスで輸送するのか固体であるハイドレートとして輸送するのかで、方法は異なる。ガス輸送の場合は、技術の確立したパイプ輸送技術がそのまま使える。しかし、固体輸送の場合は、石炭が石油に駆逐されたように、バッチ式ではコスト的に難しい。そこで、ハイドレートと(海)水とのスラリー輸送が考えられているが、高压低温でない限り、海水との熱交換によりハイドレートが分解するため、最終的には固気液3相流或いは気液2相流となる。これらの流動様式に対し、それぞれ輸送動力が試算¹⁵⁾¹⁶⁾されている。いずれにせよ、解決は困難ではない。

4.4 集積法

確かに、メタンハイドレートの埋蔵量は膨大であるが、広範囲に薄く分布しているため、石油や天然ガスに比べてそれ自身の集積度が小さいことが、ハイドレートからの天然ガスを効率的に採掘することを難しくしている。そのため、ハイドレート層の褶曲性と上述の気化法を併用してドーム状空間に分解ガスを集積させるなどの方法を開発する必要があるだろう。

4.5 海底斜面崩壊の危険

海洋ハイドレートは海底斜面中に分布していることが多いが、そのような斜面は微妙な力の釣り合いによって存在している。そこへ、大規模にハイドレート層を掘削

すると力のバランスが崩れ、一気に斜面崩壊に至るのではないかとの懸念⁽¹¹⁾が多くの地質研究者からなされている。この問題に対処するため、ハイドレート層の力学的特性⁽¹⁷⁾や海底地盤変形⁽¹⁸⁾などが精力的に研究されている。上述のゲスト分子置換法をうまく活用すれば、ガス空間の圧力を余り下げずにメタンガスが生産できる可能性がある。

4.6 温暖化の加速

メタン分子1個当たりの温室効果はCO₂分子の約20倍⁽¹⁹⁾と大きいので、メタンを主成分とする大量の天然ガスが大気中に放出されると、温暖化が加速される。従って、ハイドレートからのメタンガスの生産・輸送・消費の各過程でメタンガスの漏洩を極力抑えることが求められる。中でも、4.5節の斜面崩壊は、大量の放出メタンとその温室効果が温暖化を暴走させるという最悪のシナリオにはまる危険をはらんでいるため、絶対に起こしてはならない災害である。

4.7 ハイドレート起因空想災害

ここで息抜きも兼ね、おもしろい話を紹介したい。1997年の秋、筆者がハイドレート研究の大御所、E. D. Sloan, Jr. 教授（コロラド鉱山大学）を始めて訪問した際、ハイドレート起因の空想災害ビデオを見せられた。ビデオでは、船員の間で「魔の三角海域」と恐れられてきたバミューダ島沖で海難事故と航空機事故が多い理由を次のように説明している。

この海域の海底は緩やかな大陸棚で、世界最大規模のメタンハイドレートが眠っている（これは真実）。それが何らかの理由で急速に分解すると、メタンガスが気泡となって海中を上昇する。低密度の気泡を大量に含んだ海水の見かけ密度は低下するため、そこを通りかかる船舶の浮力が失われ沈没するというのである。その後、空気泡が含まれる水中では浮力が失われる確認実験がテキサス A & M 大学で行われた。さらに、大気中に出たメタンガスは、空気より軽いので大気中を上昇し、たまたまその上空を飛行する航空機のエンジンにより着火爆発し、航空機が遭難するという話である。

ハイドレートの分解には氷の融解熱に匹敵する熱が必要であることから、ハイドレートがこれほど急激に分解することは考えにくく、一つの空想災害と思われるが、メタンハイドレートの開発は慎重になされるべきとの教訓ともとれる。

5. ハイドレート関連技術

5.1 ハイドレート輸送船

ハイドレートは一般に高圧・低温下で生成するが、低温であれば低圧下（大気圧中）でも直ぐには分解しない。この性質を利用し、東南アジアなどの中小ガス田からの天然ガスをハイドレート化して消費地へ輸送するためのハイドレート（NGH：Natural Gas Hydrate）輸送船開発が活発化している⁽²⁰⁾⁽²¹⁾。つまり、低温といっても、天

然ガスをLNGとして輸送する際の氷点下160℃以下という温度に比べ、氷点下数10℃程度と大幅に緩和されるところが魅力であり、LNG船方式よりコスト的に有利となる場合があるという⁽²²⁾。さらに最近、ハイドレートには氷点下数℃の温度範囲で分解が大きく抑制されるという自己保存性⁽²³⁾が発見され、この現象がハイドレート輸送温度を氷点下数℃まで引き上げることができるのではないかと期待が高まっている⁽²⁴⁾。図9⁽²⁵⁾はハイドレート自己保存性を示すデータであるが、この不思議な現象を説明するモデルが提案された⁽²⁶⁾。

なお、ハイドレートを生成条件外の状態に輸送するため、一部のハイドレートが分解することは避けられないが、分解ガスはLNG船におけるボイルオフガスと同様、ボイラ等の燃料として利用される。つまり、NGH船におけるハイドレート分解速度をLNG船のボイルオフガス程度に抑える限界条件を如何に緩和できるかがポイントとなっている。また、ハイドレートの構造から分かるように、1ゲスト分子当たり、少なくとも5.75個の水分子が必要となるので、最低でも重量にして6.47(=5.75×18÷16)倍の水を運ばなければならないという原理的な弱点もある。

5.2 都市ガス貯蔵

理想的なハイドレートに閉じこめられたメタンガスを同容積の容器に閉じこめると、16MPaを越える。これは、大気圧下の容積にして160倍もの天然ガスを低圧下で貯蔵することができることを意味しており、都市ガスなどの貯蔵容器の低圧化と大幅な小型化を可能とする。このアイディアの実用化には、ゲスト分子当たりの水分子数が理想的な5.75個に近いハイドレートを効率よく生産する技術と、速やかな分解法の確立が求められる。

5.3 メタン以外のハイドレートの利用

メタンに限らず、様々な分子がハイドレートのゲスト分子となり得ることが知られており、ハイドレートの利用について様々な角度からの研究がなされている。

5.3.1 蓄熱

ハイドレートの生成熱は水に匹敵する

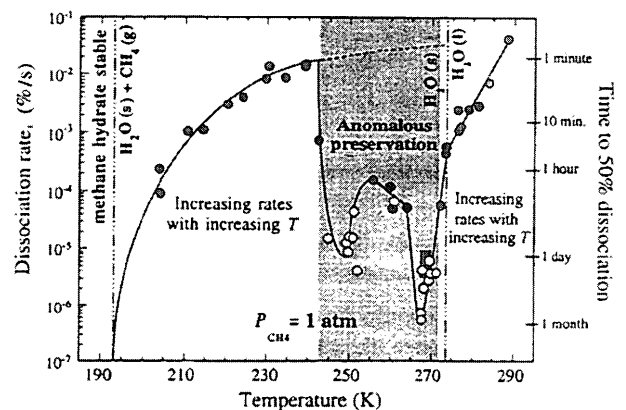


図9 メタンハイドレートの自己保存性データ⁽²⁵⁾250 Kと267 K付近に自己保存性が見られる。特に、267 K付近は1000~10000倍の保存性を示している。

ほど大きい。これを利用すると、氷点より高温での蓄熱技術に活用でき、廃熱や冷熱の利用範囲が広がり、省エネルギーや環境保全に役立たせることが期待できる。

5.3.2 CO₂ 海洋隔離 最大の温室効果ガスであるCO₂は深度500~600 m以深の圧力・温度条件でハイドレートとなるため、CO₂海洋隔離評価を目的として、1990年以降CO₂ハイドレートの物性研究が盛んになされ、次章で述べる特異なハイドレート物性が明らかとなった。

5.3.3 海水の清水化・有害物質の除去 ハイドレート構造には分子量の大きな分子が入り込みにくいという性質を利用し、海水をハイドレート化した後に分解させることにより清水を得たり、有害物質をゲスト分子として除去する方法などの研究にも期待が持たれている。

5.3.4 衛星・彗星の構造理解 氷で覆われていると考えられてきた木星や土星の衛星と彗星の中には、CO₂ハイドレートで覆われているものがあることが最近の研究で分かってきており、ハイドレート研究は巨大惑星の衛星や彗星の構造を解き明かす天文学の分野でも欠かせないテーマとなってきている。

6. ハイドレートの特異な物性

最後に、これまで述べてきたメタンハイドレートの開発やその他の研究分野の進展に不可欠と考えられる、ハイドレートの特異な物性の幾つかを紹介したい。

6.1 二つの溶解度 (溶解度の2元性)

相平衡図において、ハイドレートが生成する圧力温度範囲にあってもハイドレートが生成しないことが多く、その場合、溶解度はゲスト分子そのものの溶解度(ハイドレート非共存溶解度)を示す。ところが、何らかのきっかけでハイドレートが生成すると、一気にハイドレートの溶解度(ハイドレート共存溶解度)となる。ハイドレート生成条件下にあることから、後者のハイドレート溶解度が真の溶解度であり、前者のゲスト分子溶解度は準安定状態と考えられるが、それが相当安定であり、事実上二つの溶解度が存在する。このような溶解度の2元性は、先ずCO₂について発見され⁽²⁷⁾、続いてメタンについても同様の結果が報告された⁽²⁸⁾。ハイドレート溶解度は温度の低下とともに減少するという、固体の溶解度の性質を示すが、このデータが公表された当時は「ハイドレート生成域の溶解度はゲスト分子、即ちガスの溶解度」との理解が一般的であり、この温度依存性をいかに説明するかが問題となった。図10⁽²⁸⁾にメタンについての二つの溶解度を示す。

その後の研究から、ハイドレート生成域における溶解度の2元性は次章に述べるハイドレート物性の特異性と深く関わっていることが分かってきた⁽⁵⁾。

6.2 メモリー効果

ハイドレートの生成は確率現象であるという考えに基づけば、対象容積が大きいほど確率が大きくなり、ハイ

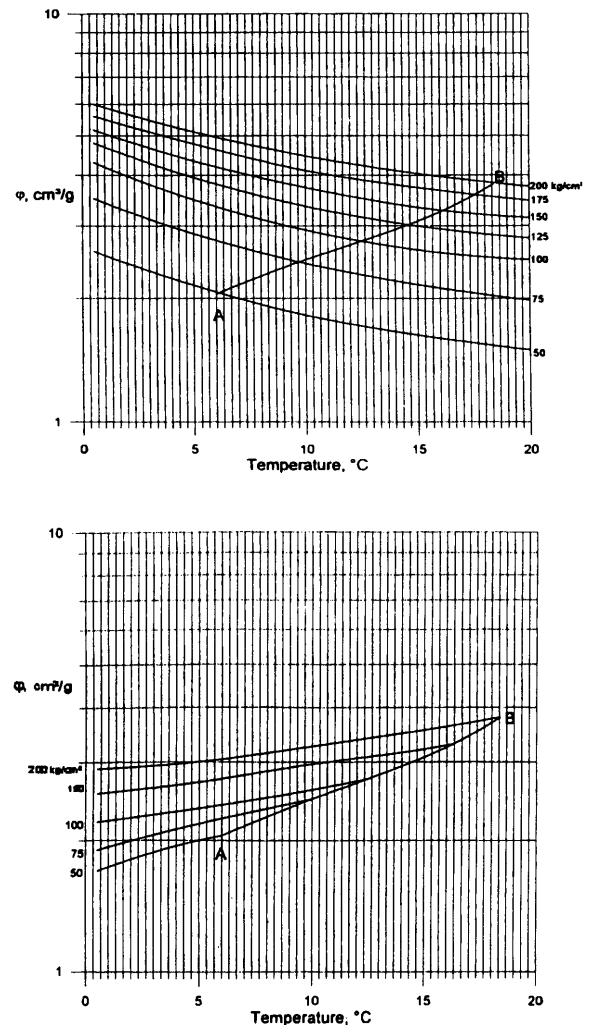


図10 メタンにおける溶解度の2元性データ⁽²⁸⁾

上図：ハイドレート非共存溶解度。ゲスト分子(メタンガス)の溶解度がハイドレート平衡曲線ABより低温側へ連続的に伸びている。

下図：ハイドレート共存溶解度。ハイドレート生成域である平衡曲線ABより低温側のみに存在。低温ほど溶解度が増加するという、固体の性質を示す。

ドレート生成開始までの時間が短くなる筈だが、これまで実験により確認されたことはない。一方、サブクール度やゲスト分子と水分子との接触方法(静的接触か乱流接触かなど)の影響があるだけでなく、「過去にハイドレートを生成した履歴のある水は、生成条件が整うと速やかにハイドレートが生成する」という顕著なメモリー効果がある。この効果は、ハイドレートの研究や工業生産にとって重要な特性であるが、そのメカニズムはよく分かっていない。ゲスト分子溶解水とハイドレート溶解水の構造が違うらしいこと⁽²⁹⁾と関連がありそうである。

6.3 強度異常

メタンハイドレート粒子塊の強度が、自己保存性が表れる温度範囲で、他の温度領域と比較して10倍以上となることが示され⁽³⁰⁾、ハイドレート輸送船の実現に有利な性質として注目されている。

また、CO₂ 海洋隔離の安定性評価に直結する物性として、CO₂ ハイドレート膜の機械的強度（膜厚不明であるため、界面張力と同単位の N/m で表示）が計測された結果、分解温度近傍で低温時の約 10 倍に、CO₂ 飽和水中で 10 数倍に達することが明らかとなった。前者の膜強度異常については、分解温度近傍での水素結合の解離確率に着目した解析例がある⁽³¹⁾（後者については、6.4 節参照）。同様の特性がメタンなどのハイドレートにも共通するものと考えられ、更なる研究が望まれる。

6.4 自己再生成

CO₂ 飽和水中では、ハイドレート膜強度が異常に強くなるだけでなく、ストレスが増加しても殆ど変形せず、限界ストレスに達していきなり破断するという脆性的性質を示す。これに対し、未飽和水中では、ストレスとともに膜がどんどん伸びるという、際だった違いを見せる。この現象を説明するため、「自由水分子モデル」が提案された⁽³²⁾。このモデルによると、飽和水中ではハイドレート膜の再生成に必要な余剰の水分子（自由水分子）が存在せず、真の膜強度に達したところで破断し、余剰の水分子が多く存在する未飽和水中では、ストレスに応じて膜の再生成が連続的に起こり、あたかもいくらかでも伸びるように見えることが矛盾なく説明できる。この再生成速度は、ハイドレート膜の成長速度とほぼ一致することが実験により明らかにされている⁽³³⁾。

以上の数々の不思議な物性は、詰まるところ、ゲスト分子を閉じこめている van der Waals 力が、イオン結合や共有結合といった通常の化合物の結合力より遙かに弱く、外的条件の影響を受けやすいことに起因するためと考えられる。

7. ハイドレート生成の分類

溶解度の 2 元性を化学ポテンシャル論から見ると、ゲスト分子飽和水（非ハイドレート共存溶解度）の化学ポテンシャルはゲスト分子の化学ポテンシャルに等しく、ハイドレート飽和水（ハイドレート共存溶解度）の化学ポテンシャルはハイドレートの化学ポテンシャルに等しい。そして、化学的により安定なハイドレート共存状態の方が低いポテンシャル状態にあるため、ゲスト分子単体とハイドレート飽和水が共存する系は常に化学的に非平衡となる。このポテンシャル差がハイドレート生成の

基本的ドライビングフォースであることを念頭に、これまでに観察されたハイドレートの生成形態⁽³⁴⁾を分類すると、表 2 の様になる。

7.1 静的生成 (Static Formation)

ゲスト分子とハイドレート共存水がハイドレート膜を介して隔てられている状況下でハイドレートが生成する場合は静的生成である。この生成は水側の乱流輸送が大きい場合と小さい場合とに分けられ⁽³⁵⁾、それぞれ「水側乱流支配」と「ハイドレート内拡散支配」と名付けることができる。水側乱流支配では、ハイドレート膜は水側乱流による溶解フラックスとハイドレート内拡散フラックスが等しくなるような厚みに保たれる（乱流拡散が強くなるほど、膜厚が薄くなる）⁽³⁶⁾。

これに対し、水側の流れが非常に弱くなると界面水は飽和状態となり、流れによる輸送が事実上ゼロとなる。そして、大きな化学ポテンシャル差による膜内拡散が勝るようになり、流れにより持ち去られる量を超えるゲスト分子が水側でハイドレートとして析出し、膜厚はゆっくりと増加する。

7.2 動的生成 (Dynamic Formation)

ゲスト分子と水との直接接触が持続される場合の生成形態で、大きなポテンシャル差によりハイドレートが様々な形状で急速に成長する。両相の接触が持続されるメカニズムは不明であるが、ハイドレートの工業生産に道を開く動的生成の制御法の確立が待たれる。図 11⁽³⁴⁾に動的生成の典型例として、ウイスキー状に急成長する CO₂ ハイドレートの様相を示す。

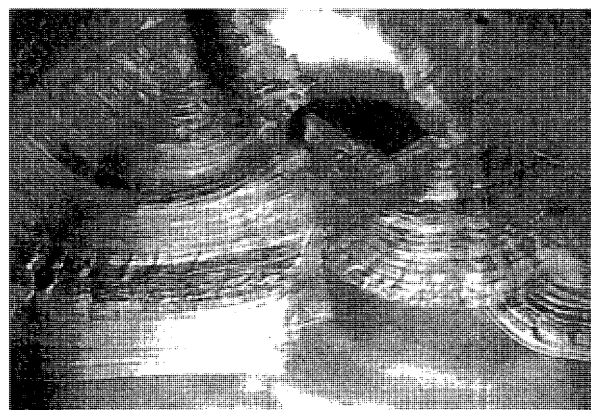


図 11 CO₂ ハイドレートの動的生成の様子⁽³⁴⁾

表 2 ハイドレート生成の分類

分類名		支配因子	形態的特徴
静的生成	水側乱流支配	水側乱流輸送	ハイドレート膜厚一定
	ハイドレート内拡散支配	ハイドレート内拡散	ハイドレート膜厚増加
動的生成		ゲスト分子と水分子の直接接触（化学ポテンシャル差）	ハイドレートの急速成長

8. おわりに

天然ガス輸送パイプラインの閉塞回避という工学的目的に始まった近年のハイドレート研究は、新エネルギー源として期待されるメタンハイドレート開発に大きくシフトしてきた。本稿では、海底下とツンドラ地帯に大量に眠るメタンハイドレートの開発研究の現状と課題を中心に解説した。また、メタンハイドレート輸送船、ハイドレート化ガス貯蔵、氷点より高温での蓄熱や海水の清水化、CO₂海洋隔離など、広範な分野への応用研究を併せて紹介した。未だ不思議な物性の宝庫であるハイドレートには、想像もできないような素晴らしい応用分野が隠されているに違いない。そのような宝を探し当てるには、これまでにも増して工学的な立場からの研究が重要となる。本解説が、少しでも多くの技術者と研究者にハイドレートへの関心を持って貰う機会となれば幸いである。

参考文献

- (1) Masutani S. M. and Coffin R. B.(eds.), 1st Int. Workshop on Methane Hydrates, Honolulu, 2001.
- (2) Coffin R. B. et al.(eds.), 2nd Int. Workshop on Methane Hydrates R & D, Washington, 2002.
- (3) Davy, H., Philosophy Trans. Royal Society London, Vol. 101, (1811), p. 1.
- (4) Sloan, E. D. Jr., Clathrate Hydrates of Natural Gases,(1990), Marcel Dekker.
- (5) 綾威雄, 混相流学会誌 16-3, (2002), pp. 223-231.
- (6) Max, M. D.(ed.), Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments,(2000), p. 64, Kluwer Academic Publishers.
- (7) Kvenvolden, K. A. and Lorenson, T. D., 11th Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger,(2001), pp. 462-467.
- (8) 科学技術広報財団編集, '77 産業資源, (1977), p. 554.
- (9) 早稲田周, 内田隆, 日本機械学会 2003 年度年次大会 講演論文集Ⅲ, (2003), p. 333-334.
- (10) 産総研ホームページ, <http://www.aist.go.jp/GSJ/dMG/dMGGold/hydrate/Messoyakha.html>
- (11) Makogon, Y. F., Trebin, F. A., Trofimuk, A. A., and Cherskii, V. P., Doklady Akademii Nauk SSSR, 196-1,(1971), pp. 197-200.
- (12) 海洋科学技術センターパンフレット, OD 21: 深海 地球ドリリング計画, (2002).
- (13) 大垣一成, 菅原武, 化学工学論文集, 32-2, (1999), pp. 807-810.
- (14) Komai, T., Int. Symposium on Ocean Space Utilization Technology, Tokyo,(2003), p. 381-384.
- (15) 北村隆宏 他 6 名, 文献(9)に同じ, p. 345-346.
- (16) Kobayashi, Y., *the same as ref. (7)*, pp. 477-482.
- (17) 兵頭正幸 他 4 名, 文献(9)に同じ, p. 337-338.
- (18) 西尾伸也, 荻迫栄治, 傳田篤, 文献(9)に同じ, p. 335.
- (19) 小島紀徳, 二酸化炭素問題 ウソとホント, p. 35, (1994), アグネ承風社.
- (20) 岩崎徹, 高橋正浩, 加藤祐一, 板東克彦, 末廣能吏, 奥井智治, 井原賢, 文献(9)に同じ, p. 343-344.
- (21) 太田進, 他 8 名, 第 2 回海技研研究発表会講演集, (2002), p. 121-126.
- (22) Gudmundsson, J. S. and Borrehaug, A., 2nd Int. Conf. on Natural Gas Hydrate, 1996, pp. 415-422.
- (23) Yakushev, V. and Istomin, V., Physics and Chemistry of Ice, Hokkaido Univ. Press, Sapporo,(1992), pp. 136-139.
- (24) Shiota, H., Aya, I., Namie, S., Bollavaram, P., Turner, D. and Sloan, E. D., Jr, 4th Int. Conf. on Gas Hydrate, Yokohama, (2002), p. 972-977.
- (25) Stern, L. A., Circone, S., Kirby, S. and Durham, W. J. of Physical Chemistry B, 105,(2001), pp. 1756-1762.
- (26) 綾威雄, 城田英之, 中島康晴, 波江貞弘, 山根健次, 文献(9)に同じ, p. 369-370.
- (27) Aya, I., Yamane, K. and Nariai, H., Energy Vol. 22-2/3, (1997), pp. 263-271.
- (28) Makogon, Y. F., Offshore Technology Conference,(OTC)8235, Houston,(1996), pp. 749-756.
- (29) Uchida T., Takagi, A., Mae, S. and Kawabata, J., Energy Convers Mgmt., Vol. 38,(1997), pp. S 307-S 312.
- (30) Stern, L. A., Kirby, S., Durham, W., Circone, S. and Waite, W., Chapter 25, Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments, Kluwer Academic Publishers,(2000), pp. 323-348.
- (31) Yamane, K., Aya, I., Kojima, R. and Nariai, H., 5th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technologies, CSIRO Publishing, Australia,(2000), p. 492-498.
- (32) Aya, I., Yamane, K., Kojima, R., Yamamoto, T., and Nariai, H., *same as ref. (7)*, pp. 495-497.
- (33) 山本敬之, 中村香幸, 成合英樹, 阿部豊, 山根健次, 小島隆志, 綾威雄, 第 38 回日本伝熱シンポジウム F 325, (2001), pp. 811-812.
- (34) Makogon, Y. F., Hydrates of Hydrocarbons, Capter 3,(1997), Penn Well Books, Tulsa, Oakland.
- (35) Kojima, R., Yamane, K. and Aya, I., 4th Int. Conf. on Gas Hydrates, Vol. 1, Yokohama,(2002), pp. 286-289.
- (36) Tabe, Y., Hirai, S. and Okazaki, K., Eliasson, B., Riemer, P. W. F. and Wokaun, A.(eds.), Greenhouse Gas Control Technologies,(1999), p. 311-315, Pergamon.

特集：新燃料

DME（ジメチルエーテル）の低 NO_x 燃焼技術小林 成嘉*¹
KOBAYASHI井上 洋*¹
INOUE小泉 浩美*¹
KOIZUMI斉藤 武雄*¹
SAITOU渡邊 朋子*²
WATANABEキーワード：DME，低 NO_x 燃焼，同軸噴流，クラスターノズル，マルチ燃料

1. はじめに

DME (Dimethyl Ether, CH₃OCH₃) は多様な炭化水素系原料からの製造が可能であるとともに、燃焼の際に硫黄酸化物、煤などの生成が少なく環境負荷の低いクリーンな燃料で、毒性も低く、加圧すると容易に液化、ハンドリング性にも優れていることから、民生用燃料 (LPG 代替燃料)、輸送用燃料 (ディーゼル自動車など)、発電用燃料 (火力プラント、燃料電池) など、幅広い分野から注目されている。しかしながら、現状は、DME のガスタービン燃焼に関する報告は少なく、本報では、DME 焚きガスタービンの高効率、低 NO_x 燃焼技術について、平成 13、14 年度の石油公団提案公募事業として実施した「燃料グレード DME (ジメチルエーテル) 高効率燃焼システム」の研究成果を中心に報告する。

2. DME の物性、燃焼特性

ガスタービンの特徴として、その構造がシンプル、かつロバストであり、燃焼システムが多種類の燃料に対応できるなどがあり、最近の電力自由化の流れも影響し、ガスタービンの燃料多様化が一つの開発課題となっている。ガスタービン用燃料として一般的に要求される項目をまとめれば表 1 のようになる。

DME の燃焼特性を表 2 に示す。DME の分子量は 46

表 1 ガスタービン燃料としての要求項目

- ・可燃範囲が広い
- ・大気汚染物質の発生が無い (あっても少ない)
- ・金属腐食物質を含まない
- ・化学的に安定
- ・安価で取り扱いが容易
- ・燃焼速度的には適度に速い

原稿受付 2003 年 10 月 8 日

* 1 (株)日立製作所 電力・電機開発研究所
〒312-0034 茨城県ひたちなか市堀口 832-2

* 2 : 石油公団 石油開発技術センター

g/mol と空気より重く、密度は 2.06 kg/Nm³ でプロパンと同等である。燃料の低位発熱量は 28.9 MJ/kg でメタンの 0.58 倍、プロパンの 0.62 倍に相当する。また、常温・常圧状態における理論火炎温度はメタン、プロパンとほぼ同等であり、拡散燃焼においてはメタン、プロパンと同等の NO_x が排出される¹⁾。DME の燃焼特性でメタン、プロパンと大きく異なる点は、自発火温度が 350℃ とそれらの発火温度よりも約 150~250℃ 低いことである。NO_x 低減のために予混合燃焼を採用した場合、夏季の運転では圧縮機からの燃焼用空気は 400℃ を超え、燃料と空気の予混合気は自発火温度になる可能性が有り、予混合器内で発火するポテンシャルが高くなる。

DME についてはディーゼルエンジンでの燃焼データは数多く報告されているが、ガスタービンに関しては実機構造での燃焼試験結果が 1、2 件報告²⁾されている程度である。

3. DME 供給システム

ガスタービンは起動から定格負荷の間で大気圧から 2.0 Mpa 以上までと大きく運転圧力が変化するが、安定燃焼確保のためには、全運転領域において DME を相変化させることなく、液体、気体のいずれかの状態で安定に燃料を供給しなければならない。図 1 は DME 飽和蒸気圧線図を示すが、液相、あるいは気相のどちらかだけ

表 2 DME の燃焼特性

	DME (CH ₃ OCH ₃)	メタン (CH ₄)	プロパン (C ₃ H ₈)
沸点 (°C)	- 23.8	- 161	- 42.1
理論混合比 (vol. %)	6.52	9.47	4.02
可燃範囲 (vol. %)	3.4 ~ 27	5 ~ 15	2.1 ~ 9.5
低位発熱量 (MJ/m ³)	59.4	36.0	91.3
低位発熱量 (MJ/kg)	28.9	50.2	46.5
自発火温度 (°C)	350	632	504
燃焼速度 (cm/s)	50	37	43
断熱火炎温度 (°C)	1.954	1.963	1.977

の領域で燃料を供給するためには、液相の場合には保冷、気相の場合には加温が必要となる。液相、気相のどちらの状態でもDMEを供給するのがコスト、運用面で優れているかを検討した結果、LPG供給システムの実績、環境対応、特に、予混合燃焼技術の採用によるNOx低減、起動、停止時の燃料パージシステムの簡便性などの点から、平成13年度石油公団提案公募事業では図2に示すような気相でのDME供給、燃焼システムを提案し、DMEガス焼き燃料供給設備を製作した。

4. DMEの低NOx燃焼方式

燃焼方式には図3に示すように、大きく2つの方式に分けられる。拡散燃焼は燃焼室内で燃料と酸化剤である空気とが混合しながら、燃焼速度の速い当量比近くで燃焼するため、火炎温度が高く、サーマルNOxを大量に発生するという問題点がある。しかし、燃焼室内でのみ可燃状態となるため、燃焼室上流へ火炎が戻るフラッシュバックや燃焼室以外での発火などは無く、信頼性の高い燃焼方式である。

一方、予混合燃焼はLNG焼き大型コンバインドサイクルプラントに採用され、NOx低減効果は実証済みである。しかし、DMEの自発火温度はLNGと比較し、約250℃も低い350℃であり、しかも夏季の運転条件ではガスタービン圧縮機から供給される燃焼用空気温度は

その温度よりも高温となることから、予混合器内で自発火する可能性が高い。したがって、DMEをガスタービン燃料として実用化するにあたっては、自発火が発生しない低NOx燃焼技術の開発が必要とされる。自発火温度の低い燃料を安全に予混合燃焼させるためには、予混合器内の滞留時間を短くし、自発火温度に達する前に予混合気を燃焼室に供給することになるが、一般に予混合時間(距離)が短くなると、燃料と空気の混合が悪くなり、大きな不均一濃度分布が形成され、燃空比の大きな部分から多量のNOxを発生することになり、目的とする低NOx燃焼を達成できないことになる。

そこで、DMEの低NOx燃焼実現に伴う問題点を解決するため、DME低NOx燃焼バーナーとして、図4に示す急速混合特性に優れ、予混合器内での自発火ポテンシャルが非常に小さく、マルチ燃料対応性にも優れた同軸噴流クラスターバーナー³⁾を提案し、平成13、14年度石油公団提案公募事業でDME焼き低NOx燃焼システムを開発した。

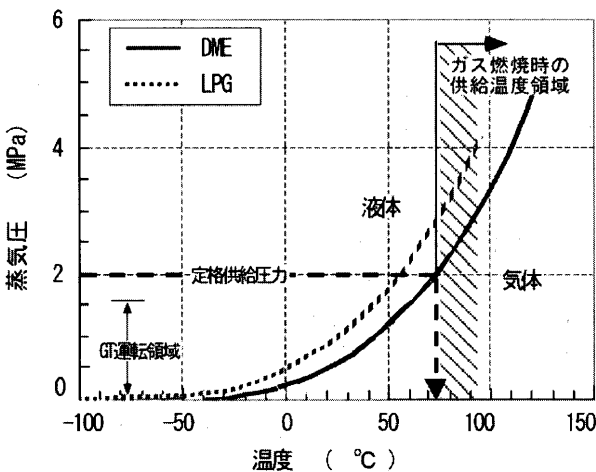


図1 DMEの飽和蒸気量とガスタービン運転試験

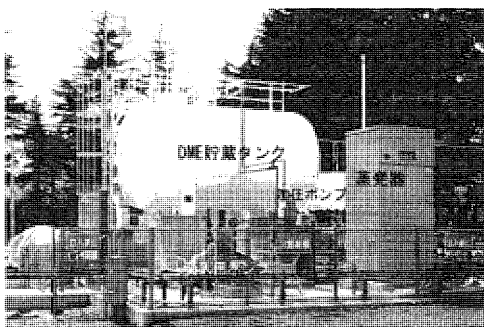


図2 DME供給システム

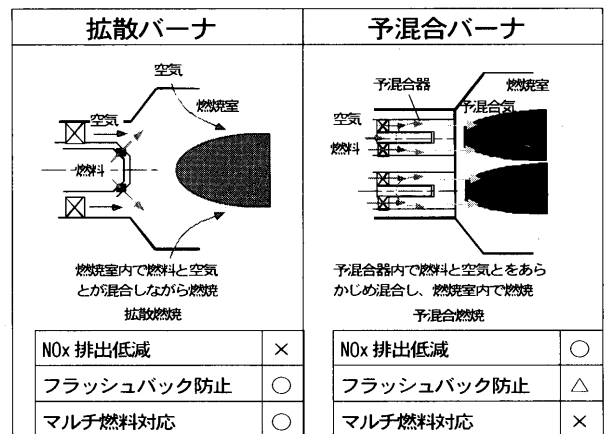


図3 拡散、予混合燃焼の特徴と課題

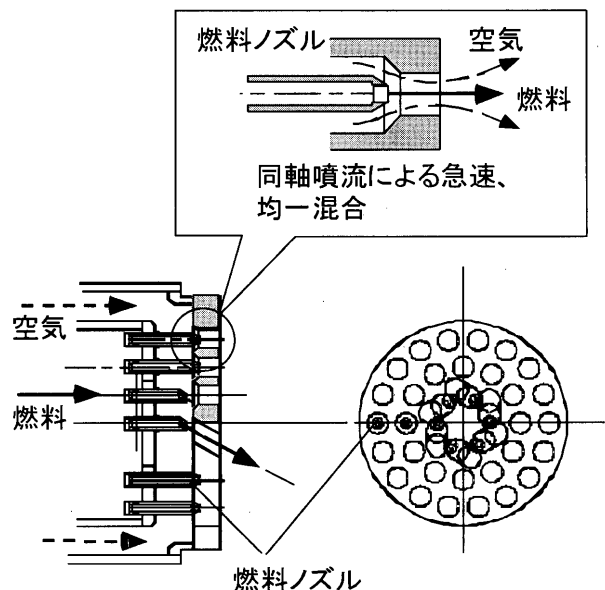


図4 同軸噴流クラスターバーナー

5. DME 焚き低 NO_x バーナー

5.1 同軸噴流クラスターバーナー

同軸噴流ノズル構造は液体燃料用アトマイザーとして多くの研究開発^{4,5)}がなされているが、気体燃料用ノズルとしての研究報告⁶⁾は少ない。図5は同軸噴流ノズルをクラスター状に配置したバーナー正面写真と構造最適化で取り上げたロバスト設計でのパラメーターを示す。クラスターバーナーの外径はφ72 mm、空気噴孔径には従来燃焼器で実績のある流速範囲を目標に個数、配列を検討し、中心部の噴孔にはパイロットバーナー的な役割を持たせるため、旋回角度を設けている。また、燃料ノズル径については加工精度、燃料中の異物による閉塞回避などを考慮し、1 mm 以上とした。同図に示す8個の設計パラメーターをロバスト設計で使用されている組合せ方法にもとづき、18通りのバーナー構造を製作し、燃焼試験による感度解析を実施し、その結果をもとに最適構造を検討⁷⁾した。

図6に試験設備の系統および装置断面を示す。DMEは25.3 m³の貯蔵タンクに液体状態で貯蔵し、加圧ポンプによって昇圧後、蒸発器に供給され、ボイラーからの

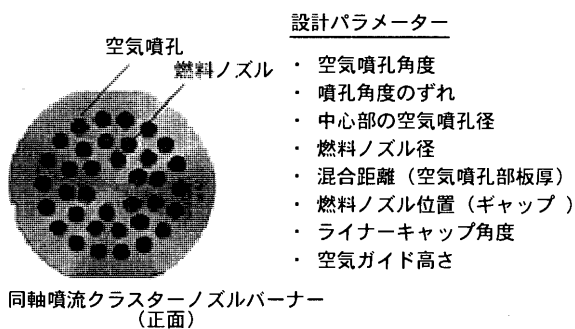


図5 同軸噴流クラスターノズルバーナーと設計パラメーター

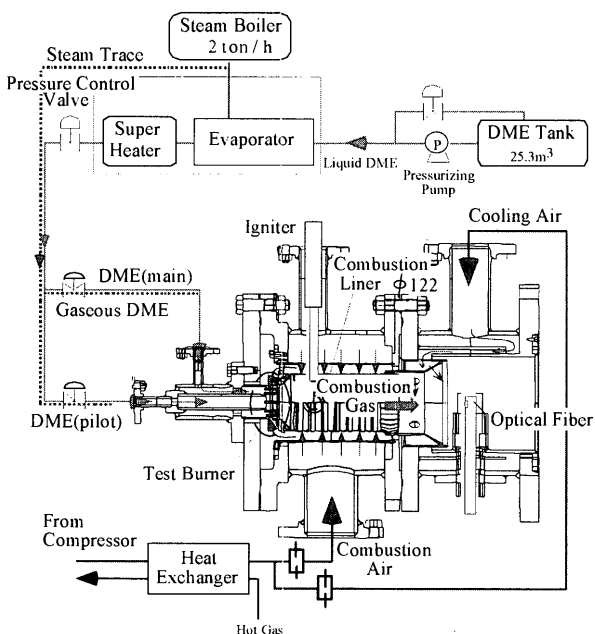


図6 試験設備系統と装置断面

蒸気(約120℃)によって気化され、蒸発器出口の圧力調整弁によって燃料供給圧力に調整されている。試験装置までの燃料配管は蒸気トレースされ、DMEの温度を90℃以上に保持することで、DMEの再液化を防止している。一方、燃焼に必要な空気は圧縮機で必要な圧力まで昇圧された後、約350℃まで予熱され、試験装置の前側外筒と後側外筒に供給される。前側外筒はバーナーおよびライナー等で構成され、後側外筒には火炎観察用の光学筒が設置されている。

5.2 クラスターノズルバーナーの燃焼特性

ロバスト設計で製作した18通りのバーナーに対するNO_x排出特性試験結果を図7に示す。図中の横軸は燃空比を示す。いずれのバーナーでも燃空比が高くなるにつれ、NO_x濃度は増加しているが、例えば、燃空比0.05の条件でみると、NO_x濃度は5 ppmから50 ppmの間に分散しており、設計パラメータの中にNO_x発生に強く影響するものが含まれていることを示している。一方、燃空比に対するCO濃度は図8のように、NO_x濃度とは逆に燃空比が高くなるほど減少し、燃空比に対してNO_x濃度とはトレードオフの関係となっている。また、

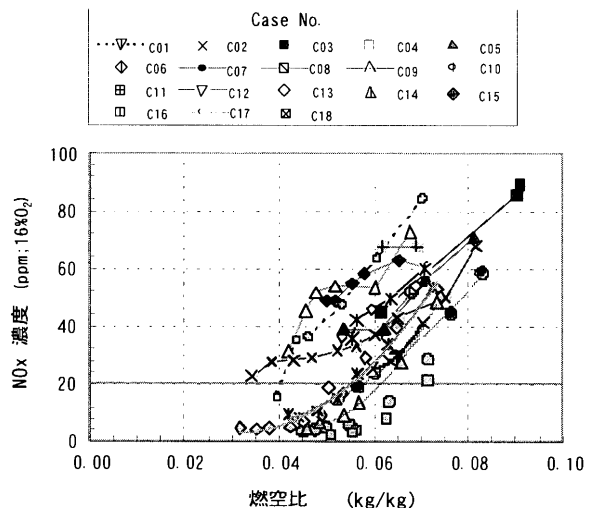


図7 クラスターノズルバーナーのNO_x排出特性

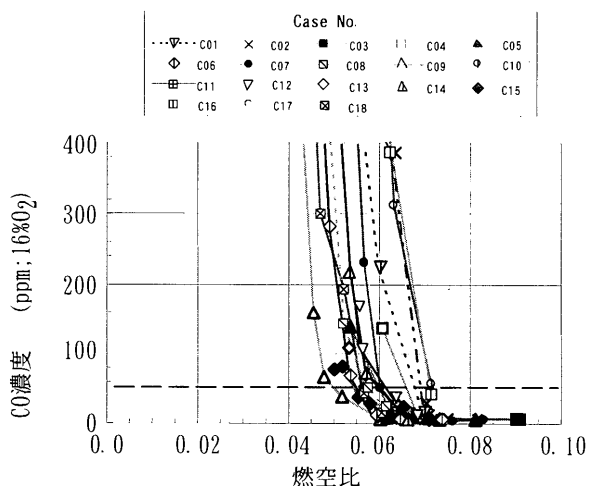


図8 クラスターノズルバーナーのCO排出特性

CO 濃度の結果からも、NOx と同様に強く影響を与える設計パラメーターが含まれていることを示している。

各設計パラメーターごとの NOx, CO 濃度に関する感度 (S/N 比) 解析結果を図 9 に示す。同図は中心、外周ノズルの燃料濃度が一樣な試験条件での結果であり、各設計パラメーターで S/N 比が最も大きなパラメータ値が NOx, CO 濃度の低減に大きく寄与し、また、その S/N 比変化が大きいほど、感度が高いことを示している。NOx を最も低減できるクラスターノズルバーナー構造は、同図で○印が付けられたパラメータ値、すなわち噴孔角ずれあり、予混合器長さ 15 mm、燃料ノズル/空気噴孔ギャップ-3 mm、燃料ノズル径 1.5 mm、空気噴孔径 7 mm、中央部空気噴孔角度 15°、空気ガイド高さ 5 mm、ライナーキャップ角度 45° の組み合わせとなる。なかでも感度の高いパラメーターは、燃料ノズル径、燃料ノズル/空気噴孔ギャップであり、燃料の噴出流速を速くし、燃料ノズルと空気噴孔入り口部との間

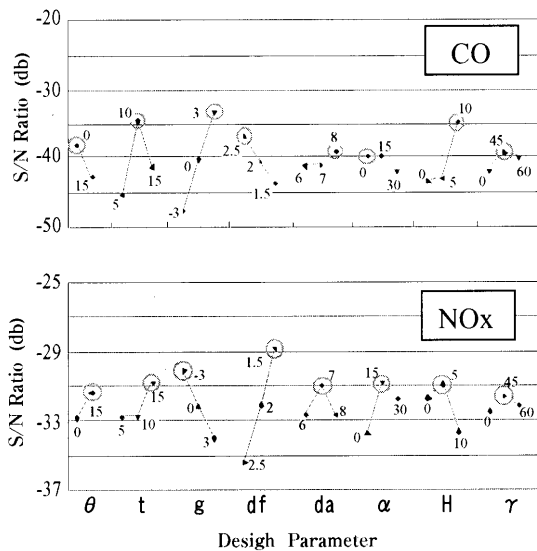
にギャップを持たせることが NOx 低減に効果的である。

一方、CO 排出特性の S/N 比解析結果からは、最適な組合せは (○印) 噴孔角ずれなし、予混合器長さ 10 mm、燃料ノズル 空気噴孔ギャップ 3 mm、燃料ノズル径 2.5 mm、空気噴孔径 8 mm、中心部空気噴孔角度 0°、空気ガイド高さ 10 mm、ライナーキャップ角度 45° となる。この結果から CO 低減と NOx 低減は燃料ノズル径とギャップに関してトレードオフの関係となっている。

5.3 NOx, CO 排出特性に及ぼす燃料流速の影響

NOx, CO 濃度の感度 (S/N 比) 解析結果より、NOx, CO 低減には燃料ノズル径が強く影響していることから、燃料噴出流速による NOx, CO 排出特性変化について検討した。

燃空比約 0.05 での燃料噴出流速による NOx, CO 濃度変化を図 10 に示す。ここで、燃料噴出流速は燃料ノズル出口における平均流速 (計算値) で、流速が速くなるほど NOx 濃度は減少し、流速 10 m/s では NOx 濃度は 42 ppm であるのに対し、流速が 30 m/s になると 4 ppm まで減少している。一方、CO 濃度は、NOx 濃度とは逆に、燃料流速が速くなるにつれて増加している。現状、NOx 低減の理由は明らかではなく、今後、燃料と空気の混合状態に関する可視化等による現象解明が必要であり、このような情報が得られることで、一層の NOx 低減と同時に CO 濃度低減との両立も可能になるものと考えられる。



設計パラメーター

- θ : 噴孔角度のずれ
- t : 混合距離
- g : ギャップ
- df : 燃料ノズル径
- da : 中心部空気噴孔径
- α : 噴孔角度
- H : 空気ガイド高さ
- γ : ライナーキャップ角度

図 9 感度 (S/N 比) 解析結果

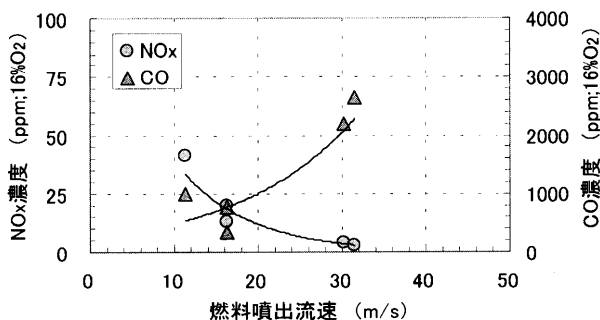


図 10 燃料流速に対する NOx, CO 特性

6. マルチクラスターバーナー燃焼器

6.1 燃焼器構造

平成 13 年度石油公団提案公募事業の研究成果をもとに、平成 14 年度ではクラスターノズルバーナーをマルチに配置した、図 11 に示すマルチクラスターバーナー燃焼器の開発を実施した。クラスターノズルバーナーと同様にロバスト設計を適用し、NOx 低減/燃焼効率向上/燃焼振動抑制という 3 つの課題に対する構造最適化と同時にマルチ燃料対応の点から LNG による燃焼性能についても検討した。

ロバスト設計では設計パラメーターとして、図 11 に示す①外周バーナー本数、②隣接バーナー間の軸方向オフセット、③中央バーナー旋回角度、④冷却孔径の 4 つを選び、それぞれに 3 つの水準を設定し、9 種類の燃焼器を製作した。

6.2 燃焼試験

燃焼試験は図 12 に示す実寸燃焼器試験装置で実施した。図 13, 14 の NOx, CO 排出特性結果では、試験品の間で排出濃度に大きな差がみられ、両者に強く影響を及ぼす設計パラメータが含まれていることが分かる。

燃焼振動に関しては、どの燃焼器構造についても燃焼振動レベルは小さく、燃焼振動の発生は見られなかった。

6.3 燃焼器構造の検討

NOx, CO, 燃焼振動の燃焼試験結果より実施した各

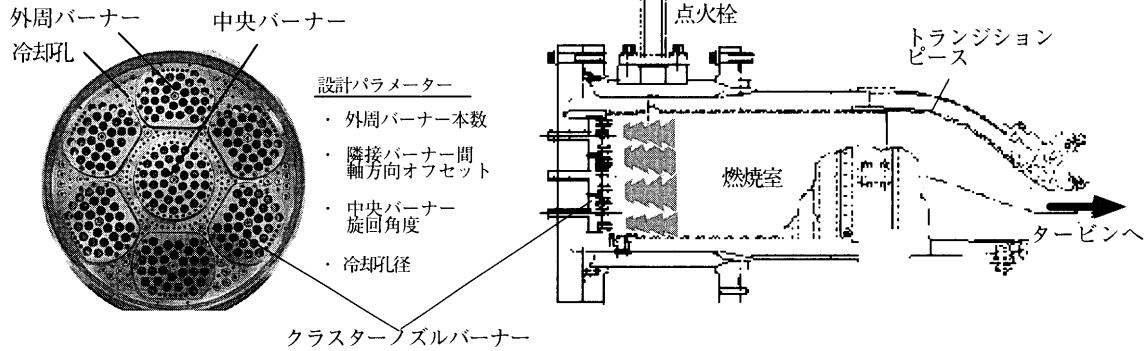


図 11 マルチクラスターノズル燃焼器のロバスト設計

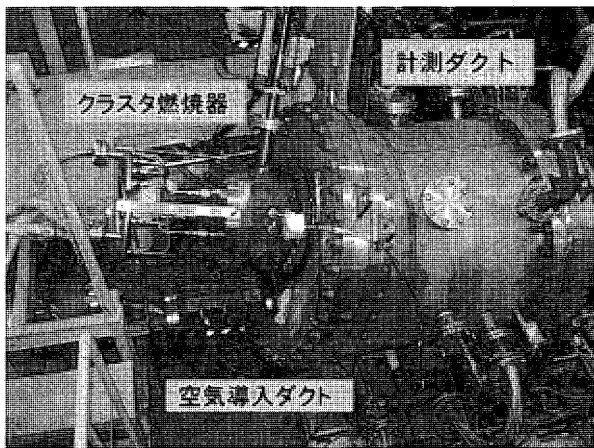


図 12 試験スタンド

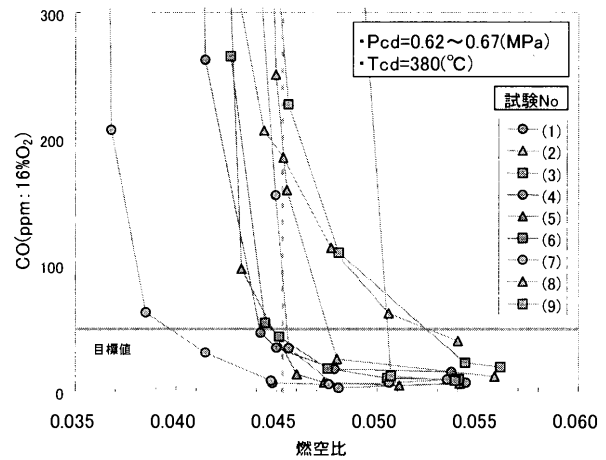


図 14 CO 排出特性

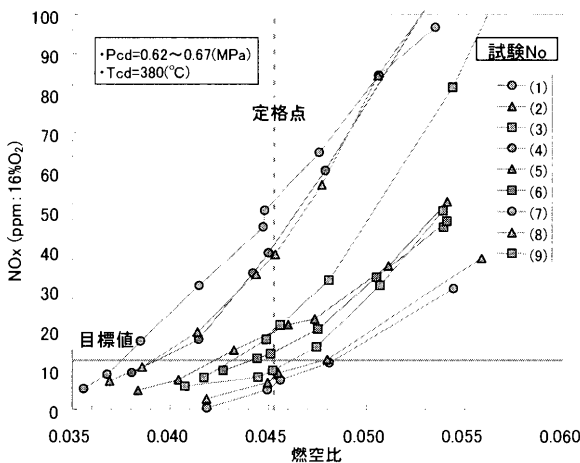


図 13 NOx 排出特性

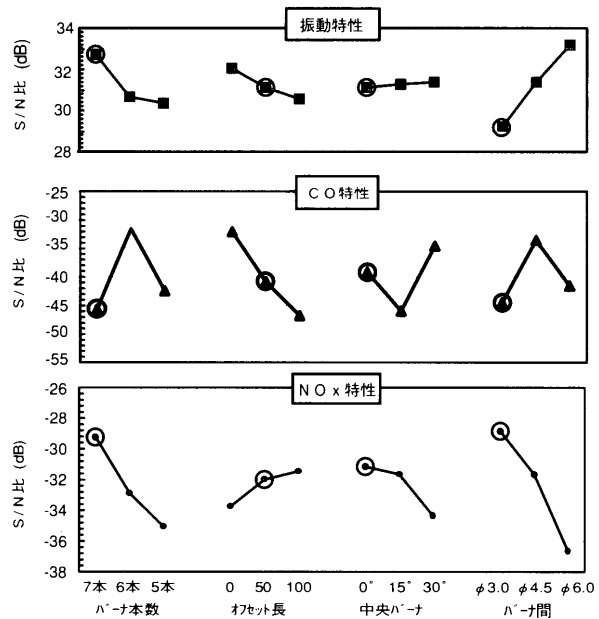


図 15 マルチクラスターバーナーの感度解析結果

設計パラメータの感度解析結果を図 15 に示す。同図中の縦軸は S/N 比であり、その値が大きいほど NOx/CO/燃焼振動などの値は小さくなる。

S/N 比 (感度) 解析結果より、外周バーナ本数が多いほど NOx、燃焼振動は低減傾向にあるが、CO についてはバーナ本数との間には特定の関係は見られず、6 本の場合に排出量が最も少なくなっている。隣接

バーナ間の軸方向オフセットについては、オフセットが大きくなることで、僅かではあるが NOx 性能は向上し、

CO, 燃焼振動については NO_x とは逆に, 性能が低下している。中央バーナの旋回角度は, 旋回角の小さい方が NO_x 性能は良く, CO について逆の傾向が見られる。燃焼振動についてはそのレベルも小さいが, 試験範囲内の旋回角度変化では燃焼振動にほとんど影響を与えていない。冷却孔径は NO_x と燃焼振動に関し, 明らかに逆の影響を与えている。

6.4 マルチ燃料対応燃焼特性

DME を発電用燃料として導入するにあたって, 電気という商品がもつ高信頼性を確保するためには, LNG, LPG などをバックアップ燃料とした運用が必要とされることから, LNG を燃料としたマルチクラスターバーナー燃焼器の燃焼試験を行い, マルチ燃料対応性について検討した。

LNG での燃焼試験結果 (NO_x 排出特性) を図 16 に示す。同図には比較のため, DME 燃料での試験結果を示してあるが, LNG は DME に比較し, NO_x 濃度は 10~20 ppm 下がっている。また, LNG の場合, ガス温度 1280℃ 以下では CO 排出量が 50 ppm (目標値) 以上となり, 燃焼効率の改善が必要である。LNG が DME と比較し, NO_x が大幅に下がっている理由は明らかではないが, DME と LNG の燃焼特性, 特に, 燃焼速度, 発火温度, 及び, 可燃範囲などの違いが燃焼領域でのガス温度分布に影響しているためと考えている。

マルチクラスターバーナー燃焼器をマルチ燃料対応, 少なくとも LNG との併用を可能とするためには, DME 燃焼時の NO_x 排出量を一層低減すると同時に, LNG 燃焼時の CO 濃度低減が必要である。

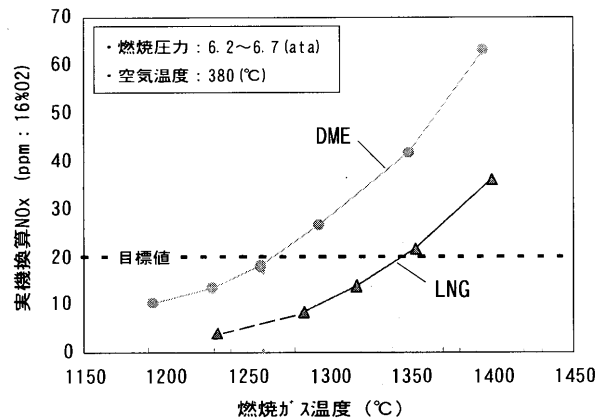


図 16 マルチクラスターバーナーの LNG 燃焼特性

7. おわりに

平成 15 年度石油公団提案公募事業として, 「燃料グレード DME 高効率・低 NO_x 燃焼技術の実証」が採択され, 現在, 本稿で紹介したマルチクラスターバーナー燃焼器による燃焼技術の実証試験に取り組んでいる。

参考文献

- (1) 小泉浩美, 井上 洋, 小林成嘉, 渡邊朋子, 第 28 回ガスタービン定期講演会論文集, (平 12-6), p.105
- (2) 後藤新一, 梶谷修一, 後藤雄一, ENGINE TECHNOLOGY, 1-3, (平 11-8), p.12
- (3) Inoue, H., Kobayashi, N., 2001 23rd CIMAC World Congress, (2001-5)
- (4) Rahman, S. A., AIAA, 94-2772
- (5) O'shaughnessy, P. J., ASME Turbo-Expo, 98-GT-445
- (6) 橋本 孝, 小山和仁, 山岸雅彦, 第 33 回燃焼シンポジウム講演論文集, (平 7-11)
- (7) Kobayashi, N., Inoue, H., Koizumi, H., Watanabe, T., ASME TURBO EXPO 2003, GT 2003-38410

特集：新燃料

「八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクト」 — バイオマスを用いた分散型エネルギー供給システム 実証研究の概要 —

藤岡 康*¹
FUJIOKA Yasushi

キーワード：バイオマス、新エネルギー、分散型電源、電力系統、分散型エネルギー供給システム、マイクログリッド
Biomass, New Energy, Distributed Energy Resources, Electric Power System, Distributed Energy Supply System, Micro Grid

1. はじめに

現在青森県八戸市では、水の流れを電気で返すべく、様々な人間が様々な任務に取り組んでいる。下水汚泥から発生するバイオガスを発電に供し、他設備を加えて全体を制御するシステムを開発、付近施設に自営線供給を行ってなお、一点連系する電力会社系統には影響を及ぼさないという「分散型エネルギー供給システム」構築に向け、後戻りの効かない行進が号砲一発、開始されたのである。

タイトルでもある「八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクト」とは、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）の「新エネルギー等地域集中実証研究」公募に対する、八戸グループ提案の名称である。本年7月に提案が採択されたことを受けて、大まじめに「八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクト」という件名で契約も結ぶ予定となっている。

本稿はこの「八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクト」について、その目的、研究概要、期待される効果などについて紹介するものである。紙幅さえ許せば、新エネルギーを地域政策の柱に据える八戸市がどれほど本件に対して真剣に取り組んでいるか、あるいはイカ・ウニをはじめとした八戸市自慢の魚介類がどれほど自慢に値するかについても割とじっくり説明したかったが、それはまた本稿を読んで興味を持って下さった方の後押しを待つこととする。

2. 目的

本年3月に、NEDOより「新エネルギー等地域集中実証研究」の公募が告示された。公募要項の一節を借りれば『風力、太陽光といった自然エネルギーにおいては、

発電量が安定しない為、系統側に影響を与える可能性があるという課題を抱えており、本格的に導入が図られるためには、この課題の克服が必要となる』ことが研究の目的となっている。

再生可能エネルギー、ひいては新エネルギーの代表格である太陽光発電及び風力発電は、その普及が国是となつてはいるものの、未だ本格的な普及に至っていない。本実証研究は普及を阻む要因のうち、既存電力系統への影響という技術面の課題克服を狙うものである。

以下、この太陽光及び風力発電と電力系統という問題と何故「新エネルギー等地域集中実証研究」が必要なのかを、誰よりもまず私自身が理解するために、電力系統を「流しそめん」に例えて説明する。

2.1 そうめんオペレータの活躍

現在の電力系統を流しそめんになぞらえると、そうめんの流れる樋が電線、そうめんを食べるお客さんが需要家、そうめんを流す役が電力会社、ということになる。ここではそうめんを流す役を「そうめんオペレータ」と呼ぶことにする。

我が国そうめんオペレータの精度の高さは世界的にも類を見ない。そこには「一人前」などといった大まかな単位の概念はなく、そうめん一本いっぽんの長さまで把握した上で瞬時瞬時の必要となるそうめん量を計算し、

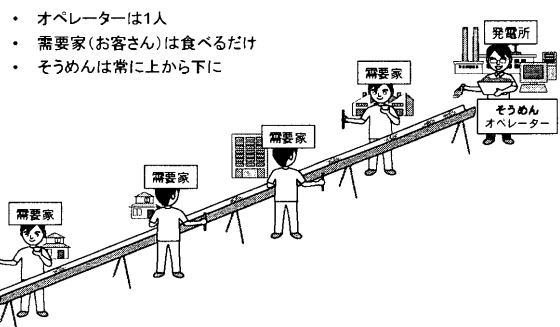


図1 そうめんオペレータの活躍

原稿受付 2003年9月30日

*1 株式会社三菱総合研究所 エネルギー研究本部
エネルギー技術研究部 エネルギーシステム研究チーム
〒100-8141 東京都千代田区大手町 2-3-6

まさにお客さんが食べたい時に食べただけのそうめんを供給するという世界が繰り返されている。多少高いという問題にさえ目をつむれば、他国でたまに見聞きするような、食べたい時に全然そうめんが流れてこなかったり、そうめんを流しすぎて樋からあふれてしまったりといった事故はほぼ皆無で、まずはそうめんオペレータ活躍中と呼んでいい状況である。

2.2 そうめんオペレータの憂鬱

ただし、上記そうめんオペレータの活躍には前提となる以下2つの条件がある。

- ・そうめんは、投入口を最高地点としてからお客さんまで上から下に、一方通行で流れていくこと。
- ・そうめんオペレータ以外にそうめんを流す者がいないこと（お客さんはそうめんを食べるだけであること）。

ここでそうめんオペレータを悩ますのが新参の「太陽光そうめん」と「風力そうめん」である。彼等は環境に優しいそうめんという売り文句の下、それなりに高い人気を誇っている。しかし何しろ材料の入荷がお天道様まかせ・風まかせで、そうめんオペレータが需給に寸分の狂いもないよう、予測に予測を重ねて営業しているところに、天気に合わせてそうめんを流したり流さなかったりという気ままな商売を展開している。石油代替とか環境負荷低減にとっては良いものでも、そうめんオペレータにとってはちょっと困った存在となってしまっているのだ。

ただし現段階では、全体量に占める割合が小さいことや、そうめんオペレータ自身も太陽光・風力の意義を鑑みて、これらと協調する姿勢を取っているため、顕在化した問題とはなっていない。ただし今後一層の普及、ということを考えて、いつの日かそうめんオペレータ活躍の条件と折り合いがつかなくなってしまう可能性が、どうしても否定できない。

ここで登場するのが「新エネルギー等地域集中実証研究」で、ならばあらかじめ問題を解決しておきましょうよというのが実施の目的となっている。

2.3 「新エネルギー等地域集中実証研究」の意義

前節で挙げた問題に対して、現在とられている一般的

- ・ 太陽光そうめん、風力そうめんがオペレーターを介さず素麺を流してしまう
- ・ 今はまだ量が少ないため問題になっていないが…

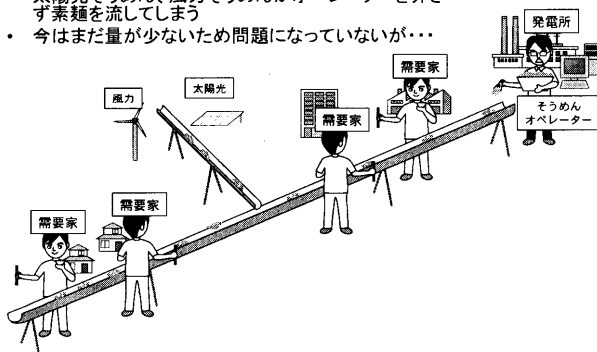


図2 そうめんオペレータの憂鬱

な方策は、太陽光及び風力発電（自然変動電源）を制御し、必要に応じて系統に流入する電力量を抑制するというものである。しかし、せっかく発電できるものを抑えてしまうという点や、今後自然変動電源の普及が進めば進むほど抑制すべき量も増えていくという点から、自然変動電源の発電量を抑えることなく、かつ系統に対しても影響を与えないという形での新しい方策が求められている。

この要請を受けた新しい方策としては、現在大きく二種類のものがある。一つは太陽光や風力発電と電力系統との間に電力貯蔵装置を置くもので、既に「蓄電池併設風力発電導入可能性調査」「風力発電電力系統安定化調査」「集中連系型太陽光発電システム実証研究」などの実証研究が行われているところである。

もう一つがまさに「新エネルギー等地域集中実証研究」であり、公募要項から引用すれば『太陽光発電及び風力発電設備とその他の新エネルギー等を適正に組み合わせ、—中略— 実証研究地域内で安定した電力・熱供給を行うと同時に連系する電力系統へ極力影響を与えず、かつコスト的にも適正な「新エネルギーによる分散型エネルギー供給システム」を構築』する方法である。

再度流しそうめんにお出まし願おう。つまり「新エネルギー等地域集中実証研究」とは、図3にあるように、流しそうめんに支流を設け「ミニそうめんオペレータ」を登場させる、というものである。図中において、ミニそうめんオペレータは制御可能な新エネルギーを用いて太陽光や風力による変動分を吸収し、本流から支流に流れるそうめんの量を一定に保つという仕事をしている。この方式であれば、本家そうめんオペレータの仕事に影響は出ないため、その憂鬱も晴れて解決ということになる。

図中の点線で囲った部分をご覧ください。これが「新エネルギー等地域集中実証研究」の範囲であり、すなわちミニそうめんオペレータの制御対象範囲である。しかしこれをもし米 CERTS (Consortium for Electric Reliability Technology Solutions) のメンバーが見れば、「これはマイクログリッドに似たものである」と言うで

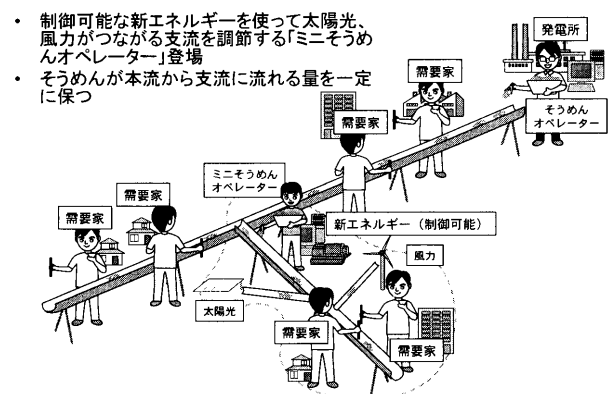


図3 ミニそうめんオペレータ登場

あろう。同様に、筆者に本稿発表の場を与えて下さった毛利邦彦氏(八戸インテリジェント・プラザ)ならば「線電源の思想と共通する部分もある」とおっしゃるかもしれない。さらに弊社も参加している FRIENDS (Flexible, Reliable and Intelligent Electric eNergy Delivery System) 研究会の会員各位であれば「将来的に電力品質の概念も取り入れれば、FRIENDSにつながる可能性もある」と言ってくれるかもしれない。近年、エネルギーの分野でも中央制御から分散制御への流れを模索する動きがあり、上述をはじめとした分散型エネルギー供給システムの構想も内外で発表されている。ただし残念ながらこれら構想が実現したという例はもちろん、実需要を用いた本格的な実証研究が行われたという報告もされていない。今回の「新エネルギー等地域集中実証研究」は、厳密にはこれまで発表されてきた各構想と異なるものであり、それぞれがカバーする内容、導入目的、根底の思想も異なっている。しかし大きく「複数の設備を組み合わせて、複数の需要家に供給する分散型エネルギー供給システム」という意味で、世界初の実証研究になると考えている。

3. 「八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクト」の概要

「新エネルギー等地域集中実証研究」は本年3月の公募開始後、5月の公募締め切りや提案者ヒアリングを経て、7月に3件の採択が決定した。一つが2005年愛知県科学万博の会場を実施地域とする中部電力を統括組織としたチームによる提案、もう一つが京都府弥栄町を実施地域とする富士電機を統括組織としたチームによる提案、そして本稿でご紹介する八戸市を舞台とした提案である。ここからは「八戸市 水の流れを電気で返すプロ

ジェクト」と名付けられた実証研究の計画概要について述べる。

3.1 計画全体像とプロジェクト名の由来

図4に計画の全体像を示した。言葉を添えれば、八戸市の東部終末処理場(下水処理場)から発生する汚泥消化ガスを用いたガスエンジンと二次電池を用いて太陽光発電や風力発電による変動分を調節し、自営線を通じて市庁舎本館、八戸圏域水道企業団、及び付近小中学校(計4校)に電力を、東部終末処理場には熱をそれぞれ供給するものである。

冒頭で「八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクト」が正式名称であるをご紹介したが、供給先に上水道の管理組織である八戸圏域水道企業団があることに注目していただきたい。つまり上水道から下水道に流れてきた水が、電気に姿を変えて、また上水道に返ってくるという意味を込めたものである。

表1. 導入予定のエネルギー供給設備

	予定容量	役割
太陽光発電	80 kW (50.10×3)	非制御対象
風力発電	20 kW (8×2、4)	
バイオマスガスエンジン	510 kW (170×3)	制御対象。電力供給の大部分と、需給変動の調整を行う。排熱は消化槽加温に利用
二次電池	100 kW (50×2)	制御対象。ガスエンジンで賄いきれない時の電力供給及び需給の急峻な変動に対応する
木質バイオマス(木屑)ボイラ	1.5t/h	消化槽加温用の熱を供給(ガスエンジン排熱で賄いきれない分)

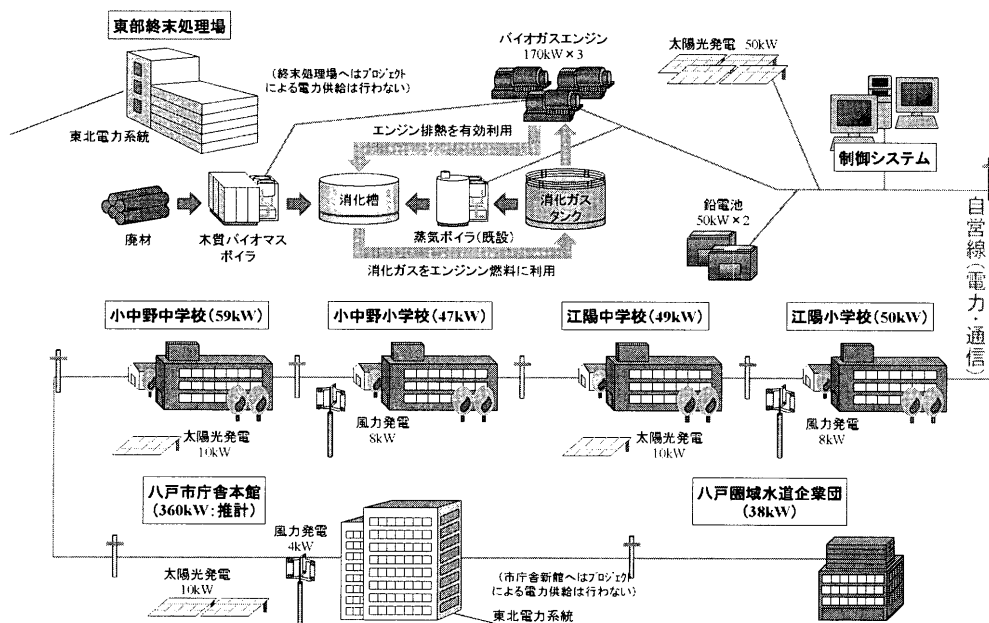


図4 「八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクト」全体像

3.2 バイオマスの利用形態

本プロジェクトでは制御対象となる発電機として、バイオガスを用いたガスエンジンを採用している。研究開発上の主な役割は太陽光や風力による発電量変動や需要変動への対応であるが、容量的にも全体で710 kWのうち510 kWと、エネルギー供給の中核を担っている。なお八戸での提案に限らず、愛知や京都の提案でもバイオガス発電が取り入れられており、新エネルギーとしての分散型電源を考える際の、バイオガスに対する注目の高さが窺える結果になったと考えている。

バイオガスの発生元となるのは八戸市東部終末処理場における汚泥である。同処理場では汚泥減量化の手段として加温発酵を行っており、現在は発生したガスをボイラの燃料とし、再び発酵のための熱源に利用するサイクルを敷いている。本件ではそのガスを発電に用いて、排熱を再び加温に回すというコージェネレーションシステムを組む予定である。現在一日に発生するガス量は平均3,000 m³程度で、定期実施しているガス性状調査からメタンガスが安定して60%ほど得られることも判明しており、合計510 kWのガスエンジンを運転させるに足る量となっている。

また汚泥消化ガスに加えてもう一つ木質バイオマスも使用する予定である。本件ではもともと消化槽の加温に用いていたバイオガスをガスエンジン発電に利用することになるため、消化槽加温用の熱を新たに確保する必要がある。そこで上述のコージェネ化で補い切れない分について木質バイオマス（木屑）ボイラを用いることとした。燃料となる木屑は付近工場等から得られる廃材を利用する予定になっており、地域リサイクルという観点からの意義もあるものと考えている。

筆者の私見であるが、新燃料としてのバイオマスは、今回利用する下水汚泥及び木質に畜糞を加えた3つが核になると考えている。そのうち下水汚泥と畜糞に関してはバイオ（メタン）ガスを利用することになるが、今回機器選定を行うに当たり、耐用年数やメンテナンスも含めてバイオガスを適用可能と判断できる発電機の種類が非常に少なかった。関係者の皆様には、この場を借りて開発をお願いする次第である。

3.3 電力供給パターン

現在想定している電力供給パターンのイメージを、図5及び図6に示した。現時点では各電力供給予定先の正確な電力デマンドを把握していないため、今後詳細を詰める必要があるが、現時点では以下を念頭に置いている。

- ・太陽光及び風力発電は制御せず、出なりの運転を行う（風力発電は導入容量が小さいため、図にほとんど現れていない）。
- ・電力会社からは一定量を購入する。購入量を事前計画値通りに守れるかが、実証研究における目標達成の尺度となる。
- ・電力供給の主役となるのはバイオガスエンジン（GE）で、需要や太陽光・風力発電の変化に対応して運転を制御する。
- ・二次電池はガスエンジンでは賄いきれない需要への対応を行う。具体的には、平日は全てのガスエンジンを運転しても対応できない昼間ピークへの対応を、休日は部分負荷効率の問題からガスエンジンを運転しない夜間への対応をそれぞれ行う。
- ・二次電池には上記に加えて需要や発電量の急峻な変動への対応（図には示されていない）という役割も担う。

3.4 制御方法

研究の目玉である「分散型エネルギー供給システム用の制御技術（=ミニそうめんオペレータ）」の開発に当たっては、電力および熱の需給変動や連系点での潮流はもちろん、消化ガスタンクにおけるガス残存容量、二次電池の充放電パターン、祝祭日や催しものなどの情報、天候・気象など様々な事項が混在する中で、経済的にも環境的にも最適となる解を導く必要がある。

本件では開発予定の制御技術に関して、同時同量供給6分±3%（6分間での同時同量は±3%で行う）という目標を掲げている。この数値自体、現在の電力小売りに適用される30分±3%に比較して高精度なものだが、開発に当たっては「一定期間の偏差をゼロにする」ことのみを目指すのではなく「1秒周期で実需用との差を調整していく」という制御を実現する計画となっている。また、電力だけでなく熱も含めた供給最適化達成を図る

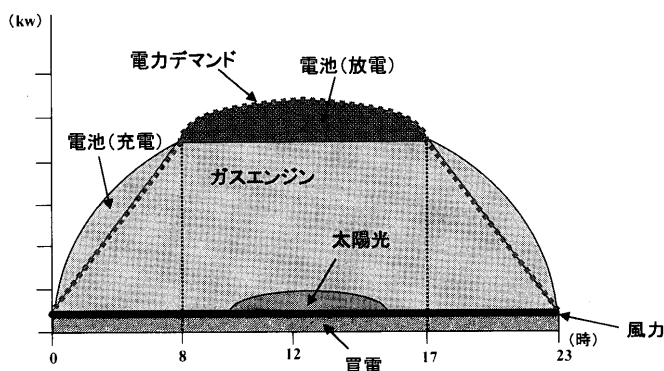


図5 電力供給パターン（平日）

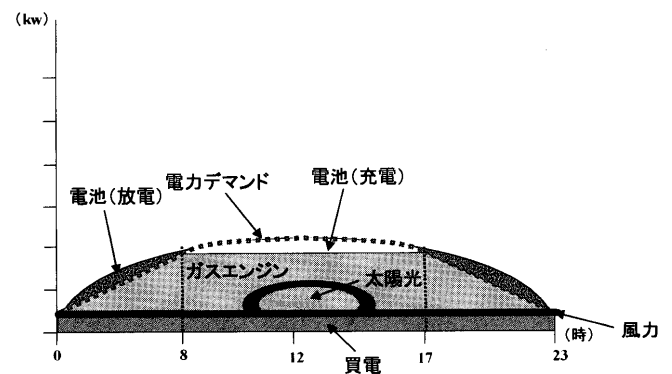


図6 電力供給パターン（休日）

という点も本件の特徴と考えている。

3.5 参加組織と役割

「八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクト」は三菱総合研究所を統括として、三菱電機、八戸市、青森県の四者による共同提案の形式を取っている。それぞれの主な役割は以下の通りである。

三菱総研：研究統括，全体計画の策定・管理，各種データの取得，非制御対象機器の導入

三菱電機：制御技術開発，機器導入に伴うエンジニアリング，制御対象機器の導入

八戸市：地元調整，運転管理，自営線敷設

青森県：地元調整

本件には技術開発という側面に加えて，社会実験としての色合いも強い。その点を強く鑑みて，今回地元自治体に関して「協力」という枠を超えた「共同提案・共同実施」という形での参加形態を採った。中でも八戸市は研究実施体としてNEDOとも契約する予定であり，地域分散型エネルギーの普及及び定着に向け，推進力となるべき地元政府がどう行動すべきかという点に関しても，まさに実証例となればと考えている。

3.6 その他の特徴

その他，ここまで挙げきれなかった特徴を列挙する。

◎熱と電力の非同一施設での利用

コージェネレーション普及を阻む最大の問題として，導入先における熱と電気の需要量バランスと供給量のそれとが適合しないことがある。本件では東部終末処理場に対して消化槽加温用の熱を供給するが，電力は供給しない。熱と電力を同一施設に供給しなければならないという制約から逃れ，熱需要供給によるメリットが大きい箇所へは熱のみを，電力供給によるメリットが大きい箇所へは電力のみを供給するという形態を採る予定である。

◎自営線による電力供給

電力供給と通信には自営線を用いる予定である。一義的には実証研究中に電力系統から一時的に切り離し，独立系統として成り立つかどうかの試験を行うためだが，自営線を利用した供給による経済性も研究成果として示すことにより，将来的な電力供給形態の可能性と考えられてはいるものの，情報の少ない自営線供給についての基礎資料としたい。

◎再生可能エネルギーのみによる設備構成

本件で導入するエネルギーは太陽光発電，風力発電，バイオマス発電，バイオマス熱供給と全て再生可能エネルギーである。供給先の内，電力会社からの供給を受けない各小中学校および水道企業団は，全て再生可能エネルギーによって電力が賄われることになる。情報が少ないため断言できないが，需要変動のしわ取り対応も含めて全て再生可能エネルギーで電力を賄うという例は，おそらく世界初と思われる。

4. スケジュール

想定するスケジュールを図7に示す。本件はNEDOからの委託業務であり，現在は17年度までの契約締結に向けた実施計画書を作成している段階であるため，スケジュールに限らず本稿記載内容について変更の可能性のある点を，あらかじめご了承ください。

15年度は基本的にシステム構築に向けた，実施地域における詳細調査を行う予定である。そのため本格的な設備導入は行わないが，発電量を把握しておく必要のある太陽光発電及び風力発電については15年度中に導入する予定である。

システムの運転開始は17年度中を予定しており，それまでに自営線を含めた各種設備の導入と制御技術開発を終了させる予定である。

18年度及び19年度は基本的にデータ取得・分析・評価を行う予定だが，もしも早々に各種数値目標を達成した場合は，新たに太陽光あるいは風力発電設備を導入するなど設備構成の見直しを行うことも検討している。

5. 期待される効果

そもそも定義からして「経済性の面から普及が十分でない」新エネルギーを今後普及させるためには，金か知恵を出すしか方策はない。本件に期待される効果を一口で表せば，新エネ普及のための知恵を捻り出すことだと心得ている。

5.1 太陽光および風力発電の課題克服

「新エネルギー等地域集中実証研究」の公式な研究成果として期待されるのは，前述の通り太陽光や風力などの自然変動電源が系統に与える影響という課題の克服である。我々としても本件で開発された分散型エネルギー供給システムの制御技術，つまりミニそうめんオペレータが太陽光や風力発電の本格普及のために一働きしてくれると思えば，これ以上のやりがいはない。

5.2 新燃料としての汚泥バイオマス

下水処理場における汚泥消化ガスの有効利用については以前から注目されているところではあるが，本件がさらなる普及の一助となればと考えている。200kW以上の発電が見込める下水処理場は全国で少なくとも50箇所以上存在すると考えられ，他地域への拡大も十分にあ



図7 予定スケジュール

ると期待する次第である。また下水処理場に限らず消化ガス一般ということになれば、食品工場排水、畜産糞尿、生ゴミ処理など、今後増加すると思われる嫌気処理施設での未利用エネルギー活用にも適用可能であろう。

5.3 組み合わせとしての新エネルギー導入

現在、単体の設備から単体の需要への供給を基本とする新エネルギーの導入形態に対して、本件で構築される分散型エネルギー供給システムでは、制御できない電源と制御可能な電源の供給設備構成と、熱需要のみと電力需要のみの需要構成という、それぞれ組み合わせとしての導入形態を採っている。制御の難しさに加えて熱電の需要バランスという制約がある新エネルギーの導入に対して、供給と需要の組み合わせという解を示したい。

5.4 実施地域への新エネルギー浸透及び新エネルギーによる地域政策のあり方

再掲になるが、本件は分散型電源制御技術の研究開発という側面と共に、新エネルギーの社会実験としての側面も強いものである。そのため研究期間終了後も八戸市がシステムを運営していくことを前提に、一過性でない仕組みを構築することを、実施に当たっての基本姿勢と

している。

この点に関しては地元自治体であり、且つ研究の共同実施者でもある八戸市が黙っているはずがないため筆者としても安心しているところであるが、市民への啓発や電力供給先である小中学校へのエネルギー教育なども含め、積極的に対応したいと考えている。また本件に関する八戸市の取り組みが全国に広がっていけば、我が国エネルギー政策上も、新エネルギーのさらなる普及という意味からも、もちろん先鞭を付けた八戸市としても、望んだ結末につながるものと信じている。

6. おわりに

現在青森県八戸市では、様々な立場の人間が様々な任務を担って、本件に取り組んでいる。プロジェクトの大きさ、複雑さからして、流しそめんに支流を設けるのとは訳が違うことは明白である。実施過程においては大小織り交ぜた上、四季折々の苦労があるだろうが、本件の成否に分散型電源の明日が懸かっているとあくまで大げさに捉え、水の流れを電気で返す試みを成功させたいと考えている。

特集：新燃料

上湧別バイオガス畜産標準モデル実証プラント事業

須賀 正*¹
SUGA Tadashi工藤 修*²
KUDO Osamu白石 雅美*³
SHIRAIISHI Masami

キーワード：マイクロガスタービン、バイオガス、畜産、標準モデル、コンパクト

1. 事業提案の主旨

清水建設は、地球環境の保全が企業として配慮しなければならない最重要課題の一つであることを認識し、建設事業全ての段階における「環境負荷の少ない事業活動の実践」と「環境の創造と修復」の二つの軸に沿った環境行動を展開しています。

循環型社会の構築を目指し、再資源化や新エネルギー利用による環境負荷の低減に計画・設計段階から取り組み、地域社会に密着した環境保全活動を推進しています。

北海道の主産業である酪農を取り巻く環境は、乳価の引下げや生産調整による収入の低下、後継者不足、大型機械の導入による経費の増大、多頭飼育による家畜糞尿の増大に起因する環境汚染問題など深刻な課題を多く抱えています。

中でも家畜糞尿による土壌や地下水の汚染、悪臭の発生などは、地域社会の環境悪化への影響は大きく、平成11年11月1日「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律（家畜排せつ物法）」の施行に伴い、家畜排せつ物を有機性資源として適正に管理し、利用を促進するための施設整備及び支援措置が図られています。

家畜排せつ物を有機性資源として再利用する有力な方法として、バイオガスプラントによる嫌気性発酵があります。バイオガスプラントは密閉した装置により発酵させるため、悪臭を発生させることなくバイオガスを生産し、その主成分のメタンガスを利用しコージェネレーションシステムなどにより電気や熱エネルギーを回収することができます。また、北海道においては消化液を液肥として利用できることも利点のひとつであり、環境へ配慮した資源循環型酪農への重要な取り組みであると言えます。

現在、バイオガスプラントは実証レベルや実機として設置されてきていますが、発電機によるコージェネレーションシステムやガスボイラーなどによるエネルギー回収方法をはじめ、酪農家の視点から効率よく利用する方法や故障が少なく簡便に利用できるハード＆ソフトのシステムについて本格的に検討された事例は少なく、これに代る技術の確立が急務である。特に各酪農家がメンテナンスフリーに近い形で運転でき、エネルギーの回収・利用をはじめ、液肥の利用を含めた最適なトータルシステムの確立が不可欠であると考え、本事業の提案に至りました。

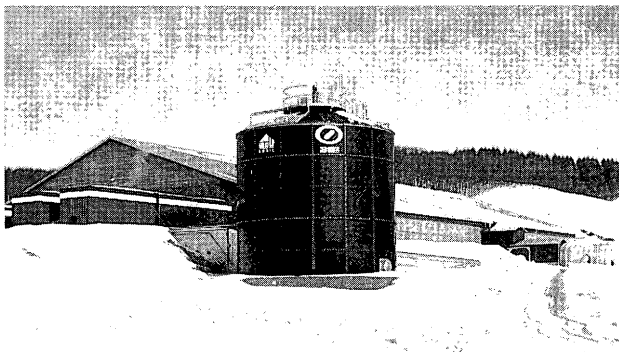


写真-1 プラント運転写真（平成15年2月）

原稿受付 2003年10月7日

- * 1 清水建設株式会社 土木事業本部 技術第一部
〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンスS館
- * 2 清水建設株式会社 北海道支店 土木技術部
- * 3 清水建設株式会社 技術研究所 社会基盤技術センター
環境バイオグループ

2. 事業概要

前述のとおり、本事業の目的は乳牛等の家畜のふん尿をもとに電気と熱を生み出すバイオガス利用コージェネレーション方式について、酪農家自らが最小限のメンテナンスで簡便に稼働でき自家のエネルギー需要を賄うことができるスタンドアローンの最適システムを構築し、普及展開を目指すために行うものです。この目的を達成するため、実証プラントを設置しエネルギーの回収と利用について最適な方法を確立するものであります。

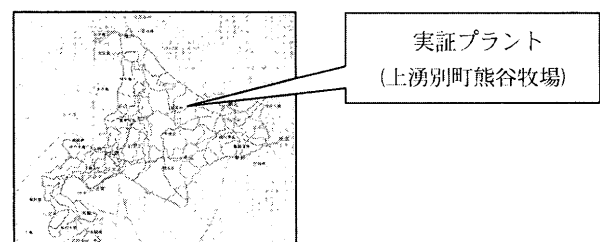


図-1 プラント建設場所

酪農地域全般へのシステムの普及展開を図るためには、エネルギー需要において最も厳しい条件となる寒冷気候で、かつ飼育頭数が多い地域での技術を確立しておくことが最も効果的であると考えます。今回は北海道上湧別町で搾乳牛 150 頭（育成牛 150 頭）を飼養する熊谷牧場の協力のもと、バイオガス実証プラントを設置し、マイクロガスタービン発電機等のコージェネレーションシステムを用いた実証稼働により、経済性を含めエネルギーの最適な回収方法と利用方法の検討を行い、バイオガスプラントの標準モデルの構築を目指します。

具体的には、バイオガスで稼働するマイクロガスタービン発電機などによる電気や熱エネルギーの回収効率や利用方式、利用場所を主題に、硫化水素の除去技術、ガス発生効率、経済性を含めた観点から検討します。

3. 実証プラントの計画概要

3.1 システムフロー図

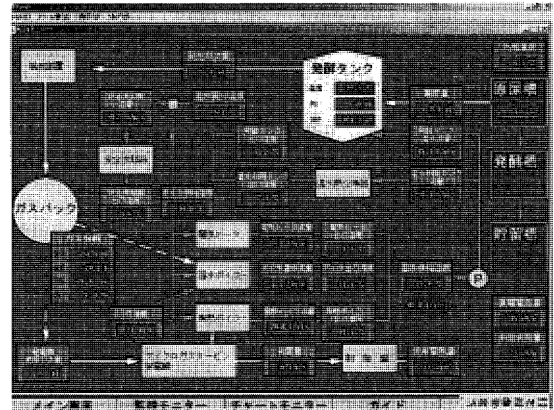


写真-2 プラント遠隔監視

パソコンにプラント運転状況を表示（遠隔地でも確認可能）

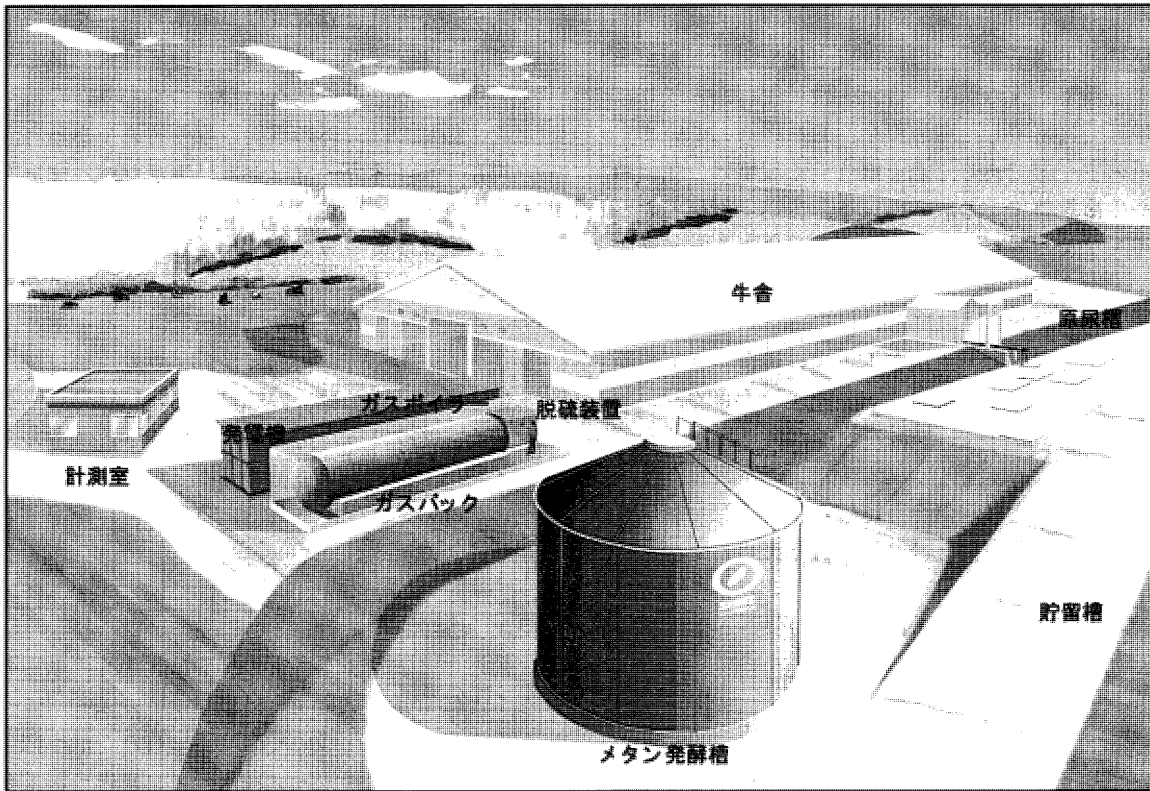


図-2 プラント鳥瞰図

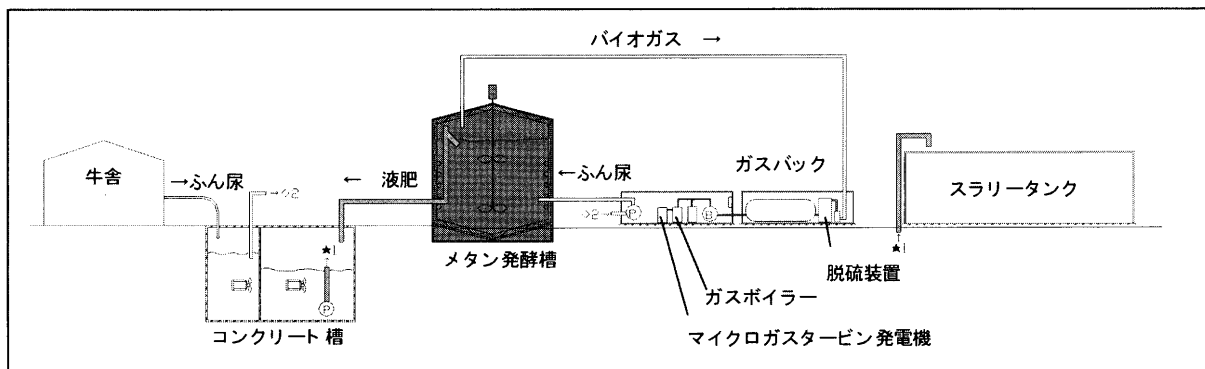


図-3 システムフロー図

3.2 プラントの概要

主要機器名	仕様	備考
原尿槽	コンクリート槽	他事業
移送ポンプ	定格出力7.5kW	モノポンプタイプ
発酵槽	φ8.00m×H9.00 縦型円筒形 グラスライニング タンク 容量 330 m ³	下部コン有り 25 日分 内断熱及び 加温設備
脱硫設備	生物脱硫 化学脱硫	併用
ガスバッグ	メンブレン樹脂 (仮型) 容積20m ³	
発電機	マイクロガスタービン 電気出力 29kW 発電効率 26% 排熱回収効率 49%	アクティブパワー 社バイオガスモデル (遠隔監視付き)
ガスボイラー	熱出力33kW エネルギー変換効率85%	デュアルフュエル タイプ (バーナー交換式) 灯油タンク490 ㍓
スラリータンク	グラスライニング タンク φ28.00m, 2,000m ³	他事業
その他	温水利用システム 熱交換タンク 安全冷却機 ガス漏れ警報装置 遠隔監視装置	

3.3 基本設計条件

3.3.1 バイオマスの種類、発生量

- ・乳牛糞尿 13.2 t/日含水率 90% 想定
成牛：150 頭×65 kg×1,000=9.75 t/日
育成牛：150 頭×23 kg×1,000=3.45 t/日
- ・入手方法：既設牛舎にバイオガス施設を併設。農場主の除糞作業により原尿槽に搬入された糞尿を移送ポンプにて発酵槽へ送る。

3.3.2 システム種別

生物化学的変換技術によるバイオガス発生システム
(嫌気性中温菌発酵)

3.3.3 燃料化設備の能力等

- ・バイオマス処理能力
13.2 t/日処理発酵滞留日数 25 日間
メタンガス濃度 55~60%
- ・発生燃料種別
バイオガス炭酸ガス濃度 35~40%
窒素ガス濃度 4% 程度
硫化水素濃度 2,000 ppm 程度

- ・発生燃料熱量：21.60 MJ/m³
計算根拠 CH₄
低位発熱量×メタンガス濃度
= 36.01 MJ/m³×60%=21.60 MJ/m³
- ・燃料発生予定量：371 m³/日
計算根拠
TS(全固形物)=13.2 t/日×10%=1.32 t/日
VS(有機物)=1.32 t/日×80%=1.06 t/日
ここで、乳牛糞尿のガス発生量は 80~350 m³/vs-t
であるので新鮮糞尿の投入を条件とした場合
350 m³/vs-t×1.06 t/日=371 m³/日
- ・年間稼働時間：8,760 時間/年
計算根拠 365 日×24 時/日=8,760 時間/年

3.3.4 発生させたバイオガスの用途

マイクロガスタービン発電機（コージェネレーションシステム）の燃料として使用し、発生した電気と熱は牛舎等の施設に供給する。

3.3.5 マイクロガスタービン発電機の仕様

- ISO 海拔 0 m, 外気温 15℃ 時
- ・定格発電出力：29 kW
- ・総エネルギー変換効率：75%
発電効率：26%
排熱回収効率：49%
- ・環境性能
NO_x(15% O₂)排出量：9 ppm 未満
騒音：65 dBA/10 m
振動：超低振動

3.3.6 コージェネ年間発電量

- ・年間発電量：211,700 kWh/年
計算根拠
371 m³/日×21.60 MJ/m³÷3.6 MJ/kWh
=2,226 kW/日
2,226 kW/日×26%(発電効率)÷29 kW=20 h/日稼働
20 h/日×29 kW×365 日/年=211,700 kWh/年

3.3.7 コージェネ熱出力、年間熱生産量

- ・コージェネ熱出力：196 MJ/h(29 kW 発電出力時)
計算根拠 2,226 kW×49%(排熱回収効率)÷20 h
=54.5 kW=196 MJ/h
- ・年間熱生産量：1,431 GJ
(ガスタービン 29 kW, 20 h/日稼働時)
計算根拠 54.5 kW×20 h×365 日=397,850 kW/年
=1,431 GJ

3.4 実証プラントでのエネルギー利用計画

本実証プラントは、電気・熱エネルギーを有効かつ効率的に利用するシステムの確立を図る。その為、電気・熱エネルギーの利用計画を定め、個々の利用状況を把握し解析していく。

3.4.1 電気エネルギー利用計画

電気エネルギー利用計画は、回収電力の利用効率を高め、購入電力量を極力削減する。電力会社との系統連係

は行うが、電力は売却しない。

電力利用箇所

- ① プラント使用電力：発酵槽攪拌機，移送ポンプ等
- ② 畜舎使用電力：搾乳機，除糞機等
- ③ その他付帯施設：堆肥化施設，住宅等
- ④ 新規利用場所の創出検討：畜舎冷暖房等

3.4.2 熱エネルギー利用計画

熱エネルギー利用計画は，回収熱量の利用効率を高め，灯油等の燃料購入を極力削減する。

熱量利用箇所

- ① プラント使用熱：発酵維持
- ② 畜舎使用熱：搾乳機洗浄温水，処理室洗浄温水
- ③ その他付帯施設：牛舎床暖房，住宅等
- ④ 新規利用場所の創出検討：畜舎冷暖房等

4. 標準モデル規模の設定

今回の実証では，中・大規模酪農家向けのバイオガス標準モデルを構築することを目的としていることから，ここでは標準モデルの規模を検証します。

近年，北海道の酪農は，酪農家の減少に相反して多頭飼育の傾向があり，酪農家1戸当りの飼養頭数は平均約90頭となっています。加えて，搾乳牛300頭以上を飼育するメガファームも年々増加傾向を示しています。

熊谷牧場のように搾乳牛100頭から150頭程度を飼養している酪農家は，中堅の上の規模に位置しており，圃場規模・飼養体系・投資規模などを勘案すると，今後この規模の酪農家が多くなると考えられます。

ここで，

搾乳牛100頭規模 = 搾乳牛頭 + 育成牛約100頭
= 成牛換算150頭

搾乳牛150頭規模 = 搾乳牛150頭 + 育成牛約150頭
= 成牛換算225頭

とします。

4.1 圃場規模の検証

デンマーク基準では，1ha当り乳牛飼養頭数上限を2.3頭としており，搾乳牛100～150頭規模の酪農家では約65～100haの圃場が必要となります。道内では30ha以上の耕地を有する農家が1万戸程度あり，50ha以上の農家は4千戸程度となっています。バイオガスプラントから発生した消化液の圃場への液肥散布還元は，バイオガスプラントを導入する上での重要項目であります。しかしながら，購入飼料での多頭飼育が大半を占めることから，圃場保有面積に対する飼育頭数のバランスがとれている酪農家は限定され，搾乳牛150頭規模を上回る酪農家で飼養頭数と圃場面積のバランスがとれている酪農家は少数となっています。

4.2 飼養体系の検証

バイオガス原料（糞尿）の適合性からみると，現在酪農家の飼養体系にはフリーストール方式とスタンション方式の二通りがありますが，フリーストール方式で排出

される糞尿は，敷藁等の混入量が少なくバイオガスプラントの原料として適していると言われていています。現在フリーストール方式を採用している酪農家は全数の10%程度であるため，9,000戸×10%=900戸が適合すると考えられます。

5. プラント設備の概要

5.1 マテリアルフロー

牛舎から醗酵槽を経て貯留槽に至る流れを下図に示す。

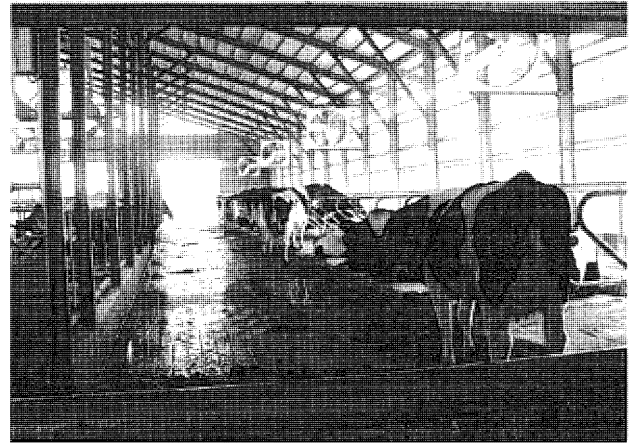


写真-3 フリーストール牛舎

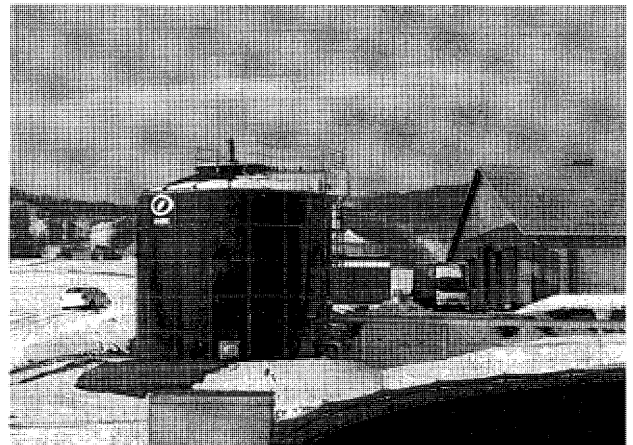


写真-4 発酵槽 (中温35℃, 25日間)

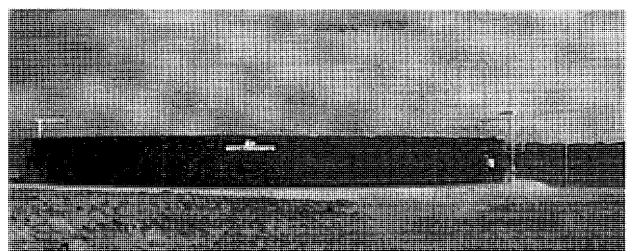


写真-5 貯留槽 (液肥, 180日分)

5.2 エネルギーフロー

醗酵槽からマイクロガスタービンに至るバイオガスの流れを下図に示す。

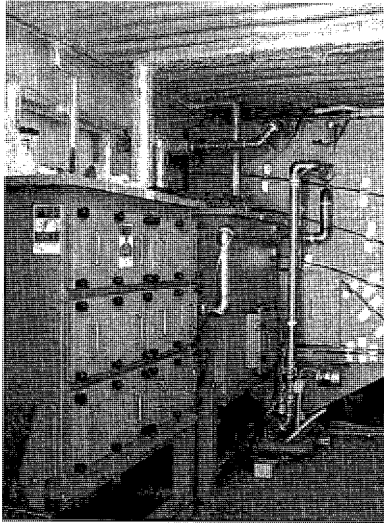


写真-6 脱硫装置

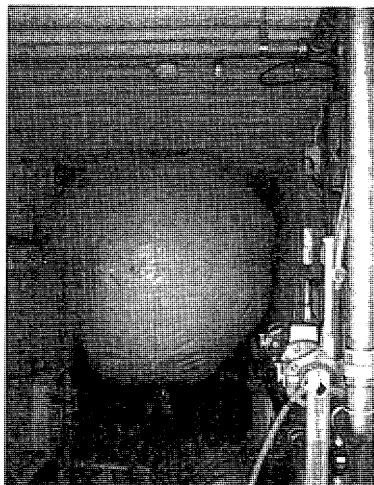


写真-7 ガスバッグ 20 m³

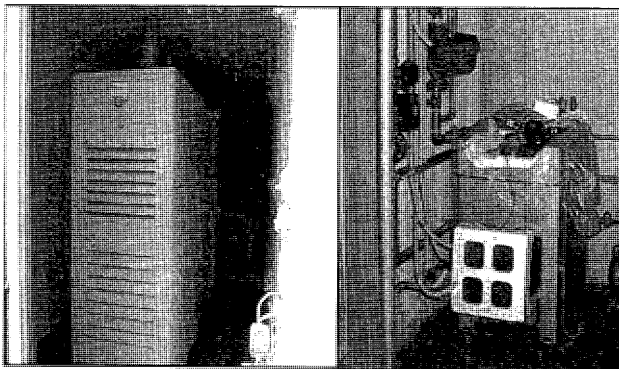


写真-8 マイクロガスタービン発電機 29 kw
写真-9 ガスボイラー 33kw
バイオガス、灯油切替式

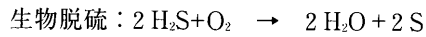
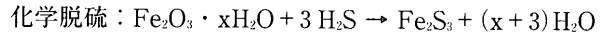
6. 実証試験の成果

6.1 バイオガスの安定発生

平成 14 年 12 月、最低気温マイナス 20℃ の厳冬期に立ち上げ運転を開始。発生したバイオガスを利用し、平成 15 年 2 月から給湯、4 月からは発電も開始した。

6.2 バイオガスの脱硫

バイオガスの脱硫は、酸化鉄による化学脱硫と、微生物による生物脱硫を併用した。



(発生バイオガス量の約 5% の空気を連続注入)

6.3 エネルギー収支

脱硫後のメタン濃度約 60% のバイオガスで、マイク

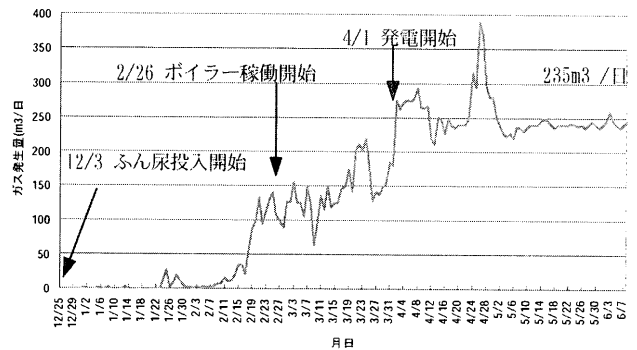


図-4 バイオガス発生量 (メタン濃度は、約 60%)

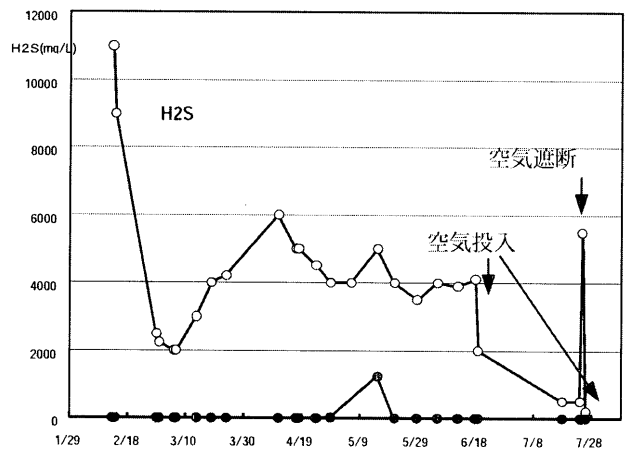


図-5 硫化水素濃度の推移
(上段：化学脱硫前、下段：化学脱硫後)

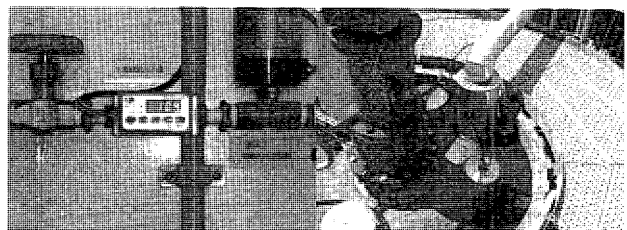


写真-10 空気流量計
写真-11 醗酵槽天井部の給気部

ロガスタービン発電機を順調に連続運転中です。排熱回収ボイラーで、お湯を生産している。電気はプラントの稼働や、余剰分を牛舎の各種設備機器の動力に、お湯は乳牛や搾乳舎の洗浄に利用している。

約半年間の稼働で、下記の事が解った。

- ・熱利用 → ◎(牛舎でも十分利用可能)
- ・電気利用 → △(ピーク時以外の需要開拓が必要)
- ・作業軽減 → ◎(朝のボタン1つで完了)
- ・導入メリット → 電気, 熱 130万円/年削減
(電気需要の開拓で+100万円追加削減可能)
- ・作業負担軽減, 環境貢献, 耕種農家と連携, 地域活性化
→ 金額換算は難しいが, メリットが多い

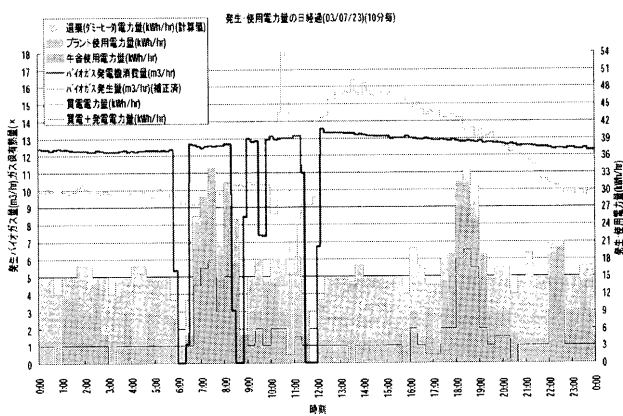


図-6 エネルギー収支 (青線: ガス発生量, 赤線: 発電機ガス消費量, 棒グラフ: 発電量)

6.4 今後の課題

バイオガスの安定発生, 脱硫効果及びマイクロガスタービン発電機の順調な稼働が確認されたが, 今後の課題として以下の事項がある。

- ・滞留日数等の運転条件変更による影響把握
- ・発電機をフル運転するための改良検討
- ・売電の検討
- ・液肥の圃場散布効果の確認
- ・耕種農家との連携による液肥の有効利用等

酪農家にとって経済メリットが多く, 運転・メンテナンスが簡便な「バイオガス畜産標準モデル」として, 一層の改善を推進していきたい。

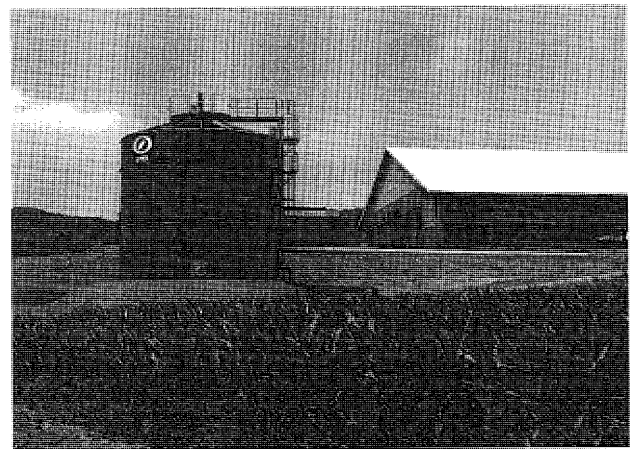


写真-14 消化液を散布した飼料畑(デントコーン)の生育状況 (平成15年7月)

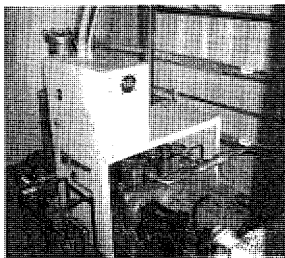


写真-12 ガス
コンプレッサー

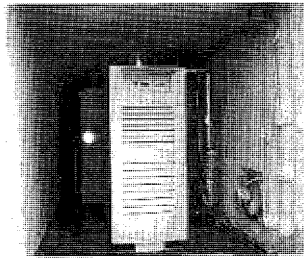


写真-13 マイクロガス
タービン発電機室

特集：新燃料

消化ガスの有効利用

山田 勇治*1

YAMADA Yuji

キーワード：消化ガスの有効利用

1. はじめに

北見市は北海道の東部、網走支庁管内のほぼ中央に位置し、総面積 421.08 km²、人口 11.1 万人のオホーツク地域における経済、産業、文化の中心都市である。

気候は、内陸性気候で年間の降水量は少なく、全国有数の日照時間を有している。

また、夏季の最高気温が 30℃ を越え、冬季の最低気温は -20℃ 以下となるなど、1 年を通して寒暖の差が大きい特徴がある。

下水道事業は、昭和 37 年度に公共下水道事業に着手し、昭和 38 年度より一部供用開始し現在に至っている。平成 14 年度末の下水道普及率（処理人口／行政人口）は 96.31% である。

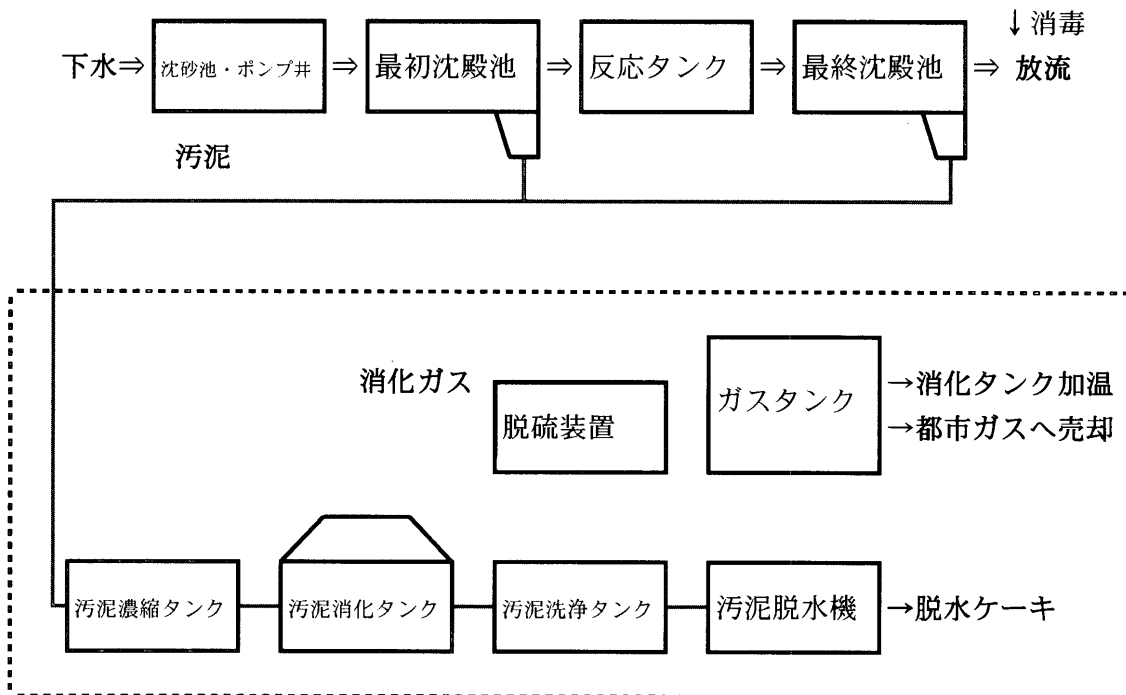
北見市浄化センターにおいて、下水処理は活性汚泥法

による高級処理、汚泥処理は濃縮・嫌気性消化・機械脱水で行っている。

汚泥処理過程で発生した汚泥脱水ケーキは昭和 56 年より全量農地還元し、嫌気性消化により発生する消化ガスは、消化タンクの加温用として利用している。また、余剰ガスについては昭和 50 年より試験的に都市ガスへ供給を開始し、昭和 58 年からは年間約 160 万 m³ 発生する消化ガスのうち約 60 万 m³ を本格的に売却している。

2. 北見市浄化センター施設概要

水処理過程で発生する汚泥は、産業廃棄物として廃掃法の適用を受けるため、汚泥の効率的処理及び有効利用等の減量化を推進することが必要である。



※破線内は汚泥処理施設

図1 処理施設フロー

原稿受付 2003年9月29日

*1 北見市企業局浄化センター

〒090-0801 北海道北見市春光町6丁目8番35号

表1 汚泥処理施設概要

汚泥濃縮タンク	構造寸法： 内径14.5m×有効水深4.0m×2池
汚泥消化タンク	型式：嫌気性加温式2段消化 消化日数：30日 構造寸法： 内径16.0m×側深8.2m×2槽 内径16.0m×側深10.0m×2槽
汚泥洗浄タンク	構造寸法： 内径11.5m×有効水深4.0m×2槽
汚泥脱水	型式：ベルトプレス脱水機 ベルト巾2.0m×1台 ベルト巾3.0m×2台
脱硫装置	型式：連続型乾式脱硫塔 構造寸法：内径2.3m×高さ4.7m ×2基（うち1基予備） 処理ガス量：5,000Nm ³ /日
ガスホルダ	型式：乾式ガスホルダ 構造寸法：内径17.44m×17.82m×1槽 容量：3,100m ³

北見市浄化センターでは、汚泥を汚泥濃縮タンクで固液分離により固形物濃度を高めて減量化し、後段の汚泥消化タンクにおいて、嫌気性微生物の働きで汚泥中の有機物を低分子化、液化、ガス化して、汚泥量の減少と質の安定化、また衛生面の安全が図られている。

また、嫌気性消化の副産物として生成する消化ガス(メタン約60%)は脱硫後消化タンクの加温用として利用、余剰ガスを都市ガスに売却することにより有効利用を図っている。

3. 消化ガスの都市ガス利用について

現在、国内の約25%の下水処理場(約300ヶ所)で汚泥の消化処理が行われており、約2億6千万m³の消化ガスが発生している。そのうち1/3程度は余剰ガス燃焼装置で焼却処分されている。

消化ガスの有効利用については、早くからガスエンジン発電システムが実用化され、現在、燃料電池発電システムやマイクロガスタービン発電システムの実証試験などが数箇所の下水処理場で行われている。

表2に北見市浄化センターの消化ガス発生量、都市ガス売却量を示す。

汚泥消化タンクからは、年間約160万m³の消化ガスが発生するが、四季を通して比較の変動は少ないが、冬季においては外気温が最低-20℃となるため、汚泥消化タンクの加温に多大の熱量が必要となるため、冬季間の都市ガス売却量は減少している。

北見市の都市ガスは、4Bで北見市内に供給されている。4Bのガスは、経済産業省告示によりWI(ウオッペ指数:3770~4330)、CP(燃焼速度指数:38~66)と定められている。都市ガス製造量に占める浄化センターからの消化ガスの割合は約5%である。供給単価については、都市ガス燃料がLPGであるため下記により算

表2 平成14年度消化ガス発生量

月	ガス発生量 月量(m ³)	都市ガス売却量 月量(m ³)	発生倍率 倍
4	131,377	47,333	17.8
5	145,625	64,445	18.2
6	137,798	68,037	17.4
7	136,384	69,045	17.6
8	120,874	60,591	17.4
9	125,412	62,570	18.4
10	127,028	61,302	21.8
11	146,214	57,619	18.0
12	137,663	49,682	16.5
1	135,726	46,706	15.1
2	112,260	42,518	14.0
3	138,649	48,399	15.4
合計	1,595,010	678,247	

※ガス発生倍率=ガス発生量/汚泥消化タンク投入量

出している。

消化ガスの発熱量:23.4MJ/m³(5,600kcal/m³)

都市ガスの発熱量:15.1MJ/m³(3,600kcal/m³)

LPG1kgは都市ガス発熱量換算で3.277m³

消化ガス1m³当りの価格

$$= \frac{\text{LPGのkg単価} \times 5,600 \text{ kcal/m}^3}{3.277 \text{ m}^3 \times 3,600 \text{ kcal/m}^3}$$

平成14年度単価は10円で、契約量が年間55万m³であるため、年間売却収益は550万円となった。

4. 消化ガスの主成分について

表3に汚泥消化タンクから発生する消化ガスの主成分である、CH₄、CO₂、H₂S濃度測定結果を示す。

脱硫前のCH₄については、8月および2月にやや低いものの平均値は58.5%、平均発熱量は23.8MJ/m³であり年間の変動も少ない。8月から10月にかけて脱硫前のH₂Sが低いのは、下水道計画区域内の未水洗化し尿受入を、夏季における浄化センター周辺地域への臭気放出防止のため受入れていないためである。脱硫後のH₂Sについては都市ガスとの協議によりH₂Sを1ppm以下にすることになっている。そのため、H₂S(0.2~6ppm)検知管により毎週測定し、検知次第脱硫剤の交換をしている。

5. 消化ガス有効利用の新たな取組みについて

都市ガス事業者では、環境特性や供給安定性に優れているとともに、保安面でも著しく有利な天然ガスの導入が課題であり、IGF計画(ガス種統一計画)に沿って可能な限り2010年を目標に推進していくこととしている。北見市都市ガスにおいても平成20年に天然ガス化を図る予定である。

都市ガスの天然ガス化に伴い、従来通りの消化ガス売却が困難であるため、平成14年度より3ヶ年の予定で国立北見工業大学地域共同研究センターと「消化ガスの有効利用」に関する共同研究を実施している。

表3 平成14年度消化ガス成分表

月	脱 硫 前				
	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	その他 (%)	H ₂ S (ppm)	熱量 (MJ/m ³)
5	38.2	60.4	1.3	500	24.1
6	37.5	60.9	1.6	490	24.3
7	39.3	60.4	0.3	400	24.0
8	39.5	51.9	5.6	200	21.8
9	38.9	60.0	1.2	150	23.9
10	38.1	60.5	1.1	250	21.1
11	39.4	59.1	1.5	425	23.5
12	39.8	58.6	1.7	600	23.3
1	39.9	58.8	1.3	750	23.4
2	40.7	53.7	5.6	850	21.4
3	42.0	56.6	1.5	550	22.5
平均	39.3	58.5	2.1	470	23.3

月	脱 硫 後				
	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	その他 (%)	H ₂ S (ppm)	熱量 (MJ/m ³)
5					
6	38.3	61.6	0.1	0	24.5
7	38.5	61.5	0.1	0	24.5
8	39.1	58.2	2.7	0	23.2
9	38.4	60.4	1.2	0	24.1
10	38.0	61.8	0.2	0	24.6
11	39.1	60.1	0.8	0	23.9
12	40.1	58.8	1.2	0	23.4
1	40.2	59.3	0.6	0	23.6
2	42.4	57.6	0.0	0	23.0
3	41.6	58.1	0.4	0	23.1
平均	39.6	59.7	0.7	0	23.8

研究内容としては、

- ①都市ガスの天然ガス化後も、都市ガスへの売却が可能となるための消化ガスの高カロリー化および不純物の除去についての検討
- ②都市ガスへの消化ガス売却ができない場合、コージェネレーションシステムによる有効利用の検討
- ③四季を通して消化ガスを安定利用するための効率的な消化ガス貯蔵方法の検討
- ④コージェネレーションシステムにより得られる熱の利用方法の検討

以上、4項目である。

6. おわりに

消化ガスの持つエネルギーを有効に活用することは、システム全体の省エネルギー化、温室効果ガスの排出抑制対策にも寄与するものである。しかし、消化ガスの高カロリー化、効率的貯蔵およびコージェネレーションシステムの安全・安定性ならびに建設コスト、維持管理コストの面で克服しなければならない問題が多々ある。マイクロガスタービン発電システムについては、消化ガス中のシロキサン・水分・硫化水素・その他不純物除去対策も必要である。国内メーカーにおいても消化ガス用マイクロガスタービンの積極的な開発を期待するものである。

参考文献

- 1) 下水道施設計画・設計指針と解説、(社)日本下水道協会、2001年版
- 2) 第29回下水道研究発表会講演集、北見市

特集：新燃料

EAGLEの開発とエネルギー併産システムへの応用

早川 宏*¹

HAYAKAWA Hiroshi

キーワード：Coal Gasification, Fuel Cell, Gas clean up, Efficiency, oxygen-blown, Gas To liquid, Co-production

1. はじめに

石炭はエネルギーの将来を見た場合、埋蔵量の豊富さ、地域的偏在性の少なさ、エネルギーセキュリティ確保の観点などから重要なエネルギー資源であり石炭の利用は必要不可欠になるものと想定される。しかし、石炭の利用に際してはCO₂問題をはじめとする地球環境保全・環境負荷低減等の対策が極めて重要になってきている。

石炭をガス化して発電するIGCCおよびIGFCシステムなどの石炭高効率発電システムはこれを実現するシステムである。電源開発では石炭ガス化燃料電池複合発電システムIGFC (Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle) の技術検証を最終目的として位置付けた石炭ガス化設備と、発生した石炭ガスを燃料電池に供給するのに必要な高度精製ガス処理設備から構成されるパイロット試験設備により燃料電池用石炭ガス製造技術 (EAGLE: Coal Energy Application for Gas, Liquid & Electricity) の技術開発に取り組んでいる。

また、このガス化炉から得られる石炭ガスは水素・化学原料・合成燃料など多様な価値を生み出すことにより、石炭高度利用システムの可能性が広がるものとして期待される。

ここでは、EAGLE開発の状況とエネルギー併産型石炭ガス化システムなどの紹介をしたい。

2. IGFCとは

原料に石炭を使用した石炭ガス化燃料電池複合発電システムがIGFCであり、石炭ガス化およびガス精製設備に燃料電池発電、ガスタービン発電及び蒸気タービン発電の3つの発電システムを組合せたトリプルコンバインド発電システムである。

燃料電池の燃料として石炭を利用する場合、石炭に含まれている灰分や硫黄分等の不純物が支障となるため、石炭を無灰ガス体燃料にして、さらに精製した上で燃料電池に供給される。ガスタービン及び蒸気タービンと燃料電池を組み合わせることにより飛躍的な効率向上が可能であるため、IGFCは石炭利用による次世代発電技術

として、その実用化が期待されている。

IGFCは、これが実現した場合、その送電端効率は53～55%と試算されており、CO₂排出量も従来の新鋭微粉炭火力比較で30%程度の低減が見込まれており、石炭利用発電システムとしては究極の高効率発電システムである。

3. EAGLEについて

電源開発株[J-POWER]では北九州市の若松研究所構内において、石炭処理量150t/dのパイロット試験設備を設置し技術開発を進めている。本技術開発は、国の補助事業・NEDOとの共同研究により進められている。以下にそのシステム概要を紹介する。尚、このパイロット試験設備には蒸気タービン設備と燃料電池設備 (FC) は設置されていない。

EAGLEパイロット試験設備は平成7年にFS及び要素試験、平成8年は基本設計及び要素試験、平成9年は詳細設計を実施、平成10年8月より建設工事を開始しすでに建設工事を完了し、その後機器単体調整を行ない平成14年2月に火入れ、3月からガス化試験運転を開始している。

表1にEAGLEパイロット試験設備の基本仕様、図1にEAGLEパイロット試験設備のフロー図を示す。

3.1 石炭ガス化設備

図2にガス化部概念およびガス化炉鳥瞰図を示す。

石炭は石炭前処理装置の微粉炭機で乾燥微粉化し、ログホップ式石炭供給装置を経て石炭ガス化炉へ供給される。石炭ガス化炉は、ドライフィード酸素吹1室2

表1 EAGLEパイロット試験設備基本仕様

石炭処理量	150 t/day
石炭ガス化炉	酸素吹1室2段旋回型 噴流床方式
石炭ガス化圧力	2.5 MPa
ガス精製設備	湿式吸収法(MDEA)
空気分離設備	加圧深冷分離法 (O ₂ , 95%)
ガスタービン	1,100℃級 8,000kw

原稿受付 2003年10月9日

*1 電源開発株 若松研究所 新技術調査グループ
〒808-0111 福岡県北九州市若松区柳崎町1番

段旋回型噴流床方式を採用している。石炭微粉は窒素により搬送し、上下段バーナから炉内に吹き込まれ、各段バーナにガス化剤である酸素が同時に供給され旋回流が形成される。本ガス化炉では、石炭粒子に旋回流を与えるので、石炭粒子のガス化反応に必要な炉内滞留時間を長くすることができる。上下段の酸素比を適正に調整することにより、上段バーナでは反応性に富む活性チャーを生成させ、下段バーナでは熔融スラグの温度調整が可能であり、高ガス化効率と安定運転の両立が可能である。ガス化炉の絞り部には、スラッキング防止のため発生した石炭ガス（生成ガス）の一部をシールガスとして再循環供給している。本シールガスは後段のガス精製装置の水洗塔出口部より部分抜出しており、圧縮機により加圧されストブロー用としても使用される。ガ

ス化炉を出た高温の石炭ガスは、ガス化炉熱回収部及びシンガスクーラを通して約 400℃ まで冷却される。ここで、石炭ガスに含まれるチャーは、サイクロン及びキャンドル式のメタルフィルタにより回収され、ガス化炉下段部のチャーバーナによりガス化炉内に再循環される。一方、熔融スラグ（石炭灰）は、ガス化炉底部のスリット型スラグタップから水の入ったスラグクエンチ部に流下し、クラッシャーにより粉碎された後、系外に排出される。

3.2 ガス化炉設備における課題¹⁾

ガス化炉では、これまでにガス化炉絞り部でのスラッキングや炉底からのスラグ排出不良などの問題が明らかになっている。本プロジェクトでは、これらの問題を解決して信頼性の高いガス化炉を開発するとともに、ガス化効率の向上を目指している。また、商用機の設計に反映させるため、炭種特性やスケールアップに関するデータの取得を行う。表 2 に石炭ガス化性能目標、図 3 にガス化設備における課題を示す。

3.3 ガス精製設備

本プラントでは、燃料電池の厳しい不純物許容値を満足するために、湿式ガス精製を採用している。石炭ガス化設備を出た粗精製ガスは、GGH で熱交換された後、水洗塔でハロゲン・アンモニア等の水溶性ガスが除去される。また、硫黄化合物は吸収塔で MDEA（メチルジエタノールアミン）により除去される。ここで、MDEA は COS（硫化カルボニル）の吸収率が低いため、COS は事前に COS コンバータで触媒により H₂S（硫化水素）に転換される。吸収塔を出た精製ガス（約 45℃）は、

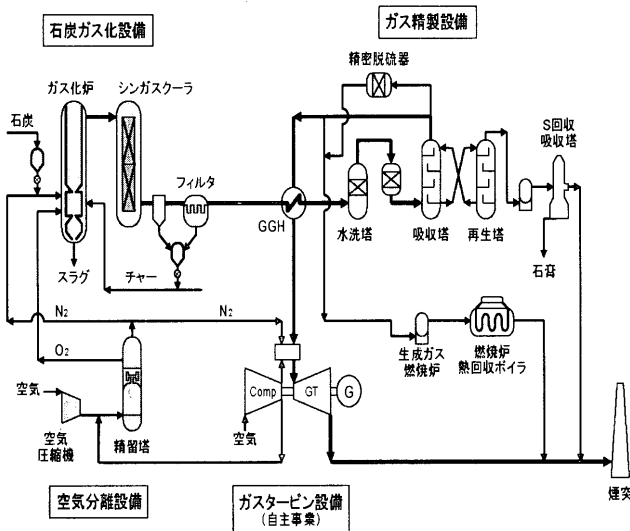


図 1 EAGLE パイロット試験設備フロー図

表 2 石炭ガス化性能目標

カーボン転換率	> 98%
冷ガス効率	> 78%
ガス発熱量	> 10,000kJ/m ³ N

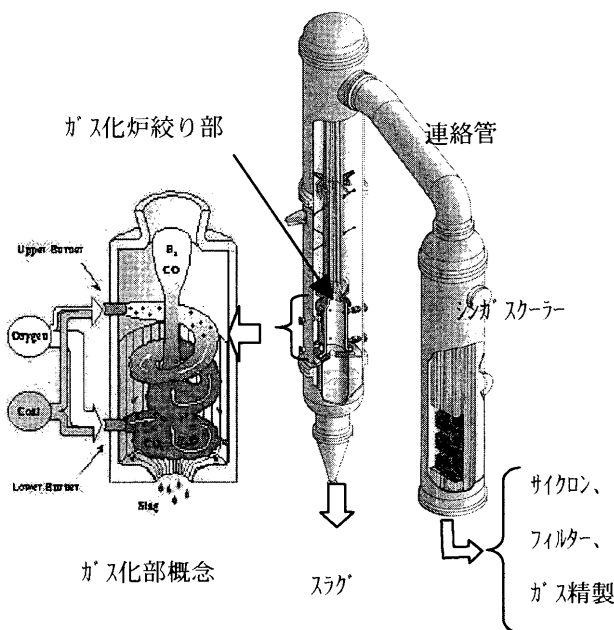


図 2 ガス化部概念およびガス化炉鳥瞰図

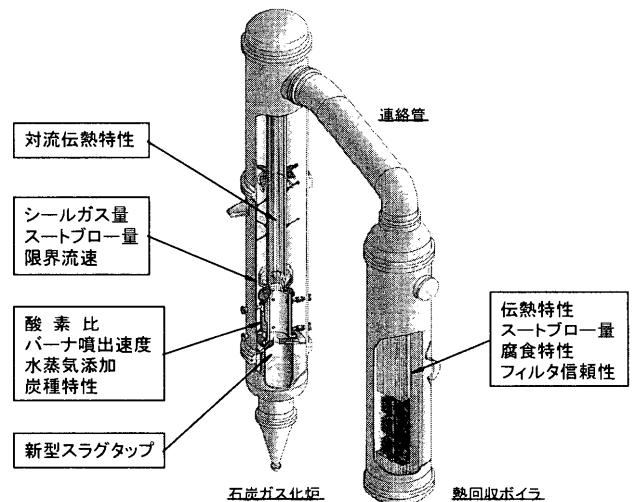


図 3 ガス化設備における課題

スチームヒータ及びGGHにより約200℃まで加熱され、ガスタービンに供給される。また、精製ガスの一部は精密脱硫器に送られ、さらに燃料電池のS分許容値以下まで高度に脱硫される。一方、除去されたH₂Sは空気で燃焼してSO₂に変換した後、石灰石石膏法により石膏として回収される。H₂Sを空気で燃焼する際、一部はSO₃まで酸化されるため、S回収吸収塔の前にはSO₃ミストセパレータが設置されている。

3.4 ガス精製設備における課題¹⁾

湿式ガス精製技術は、石油精製などの分野において既に実用化されているが、燃料電池では低濃度硫黄化合物やハロゲン等の微量成分による劣化が指摘されているため、本プロジェクトでは燃料電池に適用可能な高度ガス精製技術を確立する。表3にガス精製性能目標、図4にガス精製設備における課題を示す。

3.5 ガスタービン設備及び空気分離設備

ガスタービン設備は、パイロットプラントの運転に必要な所内電力を供給する。一方、空気分離設備で製造された酸素(95%)はガス化剤、窒素(99%)は石炭搬送ガスやバージ用ガスとして用いられ、余剰窒素はNO_x低減のためにガスタービンに供給される。また、空気分離設備に必要な原料空気は、独立した空気圧縮機の他、ガスタービン圧縮機からも供給できるようになっている。空気分離設備は加圧深冷分離法を採用している。

表3 ガス精製性能目標

硫黄化合物	<1ppm
ハロゲン化物	<1ppm
アンモニア	<1ppm
ばいじん	<1mg/m ³ N

4. EAGLE ガス化試験運転状況

EAGLEは平成14年3月よりガス化試験を開始しており平成15年7月現在のガス化運転時間、連続運転時間、石炭使用量は表4の実績が得られている。

また、この間の起動停止回数は18回に達し、ガス化設備の起動停止操作手順の確認・見直しブラッシュアップ、監視ポイント抽出、起動・停止データ採取、各負荷帯での各種データ採取を行なった。試験運転進捗により、酸素比等のパラメータ調整試験、シールガス低減試験等を実施した。現在までに得られたガス化炉設備の取得性能を表5に、ガス精製設備の取得性能を表6にそれぞれ示す。

表4 試験運転実績

石炭ガス化時間総計	約880(h)
連続運転時間	約3000(h)
石炭使用量総計	約3500(ton)

表5 ガス化炉性能実績

カーボン転換率	99%
冷ガス効率	76%
ガス発熱量	9,540 kJ / m ³ N

表6 ガス精製性能実績

硫黄化合物	N.D.(<0.1ppm)
ハロゲン化物	4ppm
アンモニア	参考値(吸収塔出口): 2ppm
ばいじん	参考値(第一水洗塔出口): <1mg/m ³ N

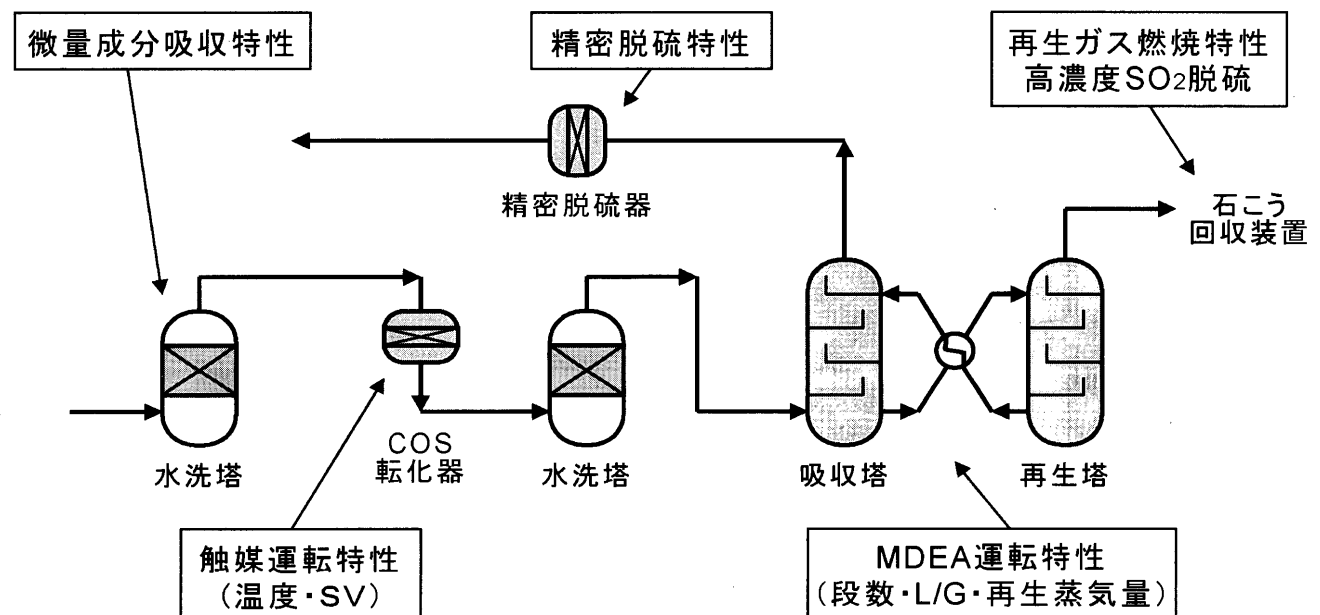


図4 ガス精製設備における課題

5. エネルギー併産型石炭ガス化システム

EAGLE 開発はこれまで IGFC という高効率発電システムを目標に進められてきた技術開発であることは言をまたない。一方で、技術革新により新燃料や水素などの多様なエネルギーニーズが高まっている中、これらの製造プロセスを EAGLE と組合せることにより、多様な価値製品を産み出すことが可能である。

酸素吹き石炭ガス化炉である EAGLE から得られる石炭ガス化ガスは、CO と H₂ 以外の成分 (N₂ 等) の比率が非常に少ないという特徴を活かして、IGFC 以外のシステム構築も可能である。CO と H₂ の合成ガスから直接、またはメタノールを経由して間接的に化学原料を得ることや、シフトコンバータにより水素を得ることもできる。ここでは GTL (Gas To Liquid) 技術に着目し、FT (Fischer-Tropsch) 合成油、DME などの合成燃料製造プロセスを組合せた GTL 併産型石炭ガス化発電システムについて述べることにする。

5.1 GTL (Gas To Liquid) 技術

GTL は天然ガスなどの合成ガス (CO および H₂) から触媒を利用して液体燃料を製造する技術である。エネルギーチェーンの上流側から見た中小ガス田の開発などのニーズ、下流側から見たクリーン燃料を求めるニーズなどにより、GTL の技術開発が最近、活発になっている。海外ではディーゼル燃料を主目的とした FT 合成による商用プラントが計画されているほか、国内でも北海道において、DME 実証研究、FT 合成パイロット研究がそれぞれ実施されている。

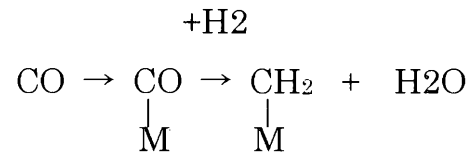
FT 合成は触媒を用いて直鎖型炭化水素燃料へ転換する反応である。その反応機構はおおむね図 5 のように示される³⁾。触媒としては Fe、Co が一般的であり、H₂/CO 比の大きい天然ガス系の合成ガスには Co 系が、石炭ガス系の合成ガスには水性ガス反応活性がある Fe 系が使用される傾向がある。また、この反応の特徴として、特定の留分を選択的に合成することができないため、そのガソリンを多く製造するか、軽油を多く製造するかの目的に応じて、合成プロセスが決定される。FT 合成によって得られる軽油は硫黄含有量が極めて低いため、クリーンな新燃料として注目を浴びている。

DME は LPG に似た性質を持つエーテル (CH₃OCH₃) であり、触媒を用いて、合成ガスから直接、DME を合成する反応とメタノールを経由してから、脱水反応により DME を合成する反応である。DME は現在、スプレー噴射剤などの化学原料としての用途であるが、主として LPG 代替のクリーン燃料として期待されている。

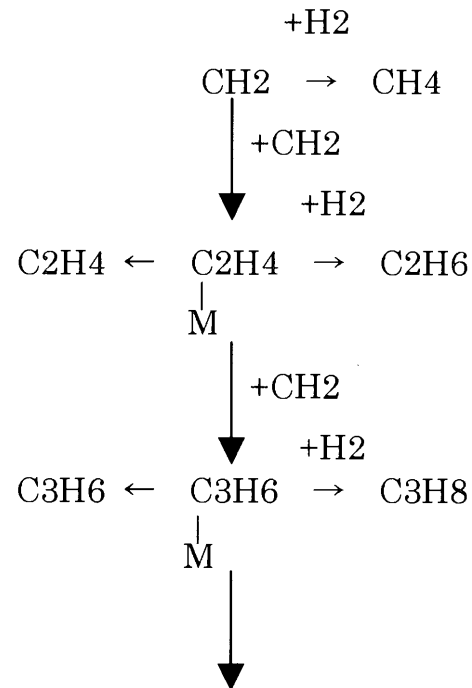
5.2 GTL 併産型石炭ガス化発電システム

石炭ガス化ガスを利用して、これら合成燃料を製造する場合、まず、燃料合成を行う触媒が被毒しないレベルまで精密脱硫を行わなければならない。また、最適な合成を行うためには、H₂/CO の比を一般的には 2~3 程度にあらかじめ調整しておく必要があり、石炭ガス化ガス

Initiation:



Chain growth and termination:



※M :catalyst surface site

図 5 提案されている FT 合成反応機構

を合成ガスとして利用する場合、シフトコンバータにより CO を H₂ に転換することで、H₂/CO 比を調整する。ただし、比が 2 以下でも合成可能な反応プロセスもあり、石炭ガス化と組合せる場合はシフトコンバータの省略などによる経済的メリットを考慮してシステムを構築すべきである。

本システムの一例として、FT 合成油併産型石炭ガス化発電システムのプロセスフローを図 6 に示す。ガス化炉で生成する石炭ガス化ガスはガス精製設備を経て、ガスタービンと GTL 製造プロセスへ分岐される。ガスタービンへ送出される合成ガスは MDEA によるガス精製のみを行い、一方、GTL 製造プロセスへ送られる合成ガスは燃料電池用と同様、精密脱硫まで行う。触媒被毒の主因子である硫黄化合物濃度は <0.1 ppm (表 6 参照) であることから、FT 合成触媒反応許容限度内と想定すれば、EAGLE パイロットプラントにおけるガス精製技術の確立により、FT 合成油併産が可能となる。また、FT 合成反応器から排出される未反応ガスは一般的な

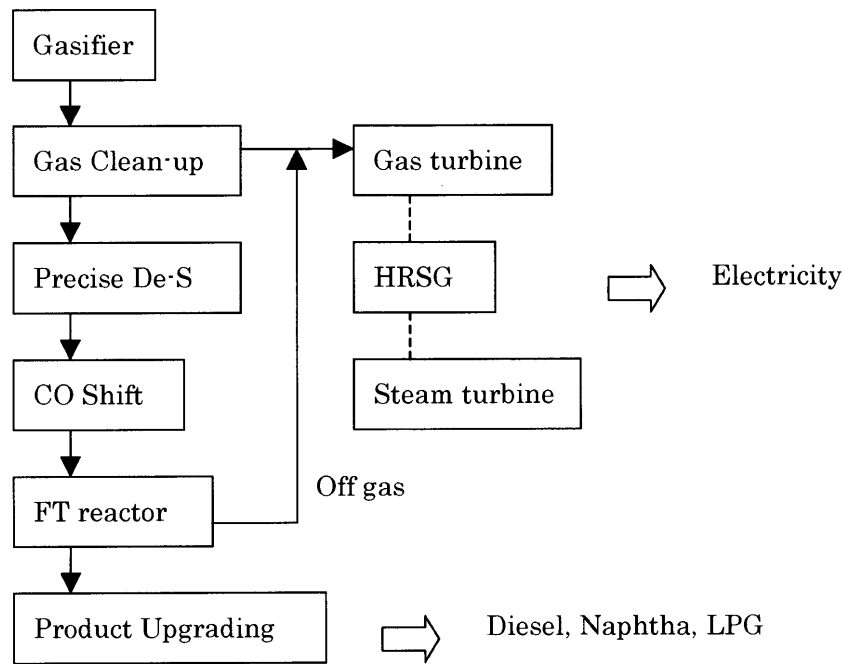


図6 FT合成油併産型石炭ガス化発電システム

GTLプラントでは、合成油収率を向上させるために反応器へリサイクルされるが、発電システムとの組合せの場合、リサイクルせず、ガスタービンへ供給することにより、GTL製造プロセスを簡略化できるため設備コストを小さくする経済的メリットを有する。

さらに、発電側とGTL製造側のガス分配率を変更することにより、電気とGTL燃料（FT合成の場合、軽油など）の製造量を変動することが可能となる。例えば、ガス化負荷を一定に維持した運用下において、電力需要の変動、あるいは原油需給の変動の影響を考慮して、発電量または軽油製造量のコントロールが可能となる。このような製品需給変動による収益リスク低減が可能な燃料併産型石炭ガス化発電システムは事業者にとって、最大のメリットであると考えられる。

6. おわりに

IGFCシステムの実用化にはここで紹介したEAGLE開発とともに、石炭ガス化ガス用燃料電池の開発なども必要であり、商用化のメドは、事業用燃料電池の開発が今後10数年レベルの開発期間がかかるものと想定され、平成20年代になるものと思われる。

一方、国内における自動車排出ガスの環境規制強化は

さらに厳しくなっており、クリーンな水素やGTLなどの新燃料が将来的に普及することはまず間違いないであろう。これらの市場ニーズが拡大すれば、多種エネルギー併産型システムの商用化が早期に実現される可能性が高い。石炭利用は日本のエネルギーセキュリティにとって必要不可欠であり、21世紀における石炭高度利用技術として、EAGLEは多様なエネルギーニーズに対応するキーテクノロジーである。

最後に、EAGLEプロジェクトは、国の補助事業並びに新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）との共同研究として電源開発㈱が実施しているものであり、資源エネルギー庁資源・燃料部石炭課、省エネルギー・新エネルギー部新エネルギー対策課をはじめとする関係各位のご支援、ご指導に深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 燃料電池用石炭ガス製造技術開発（EAGLE）、小俣浩次、日本エネルギー学会ガス化部会シンポジウム、平成12年11月15日発表資料
- 2) 平成14年度「高温形燃料電池発電技術開発」研究成果 NEDO
- 3) BIAN Guozhu, 小泉直人, 山田宗慶, 日本エネルギー学会誌, 81-907, (2002-11) p.975

特集：新燃料

高温ガス炉を利用した水素製造研究の現状

稲垣 嘉之*¹
INAGAKI Yoshiyuki

小貫 薫*¹
ONUKI Kaoru

西原 哲夫*¹
NISHIHARA Tetsuo

久保 真治*¹
KUBO Shinji

大橋 弘史*¹
OHASHI Hirofumi

武田 哲明*¹
TAKEDA Tetsuaki

小川 益郎*¹
OGAWA Masuro

塩沢 周策*¹
SHIOZAWA Shusaku

キーワード：高温ガス炉，HTTR，水素製造，メタンの水蒸気改質，熱化学分解，IS プロセス

1. はじめに

現在、我が国では、1次エネルギーの約83%を石炭、石油、天然ガスなどの化石資源に依存しており、大量の化石燃料を燃やして発電あるいは直接熱利用を行っているために、2000年度には全世界の約5%を占める約12億t（世界4位）の二酸化炭素を排出した。今後の地球温暖化防止のため、我が国では、徹底した省エネルギーの推進と、二酸化炭素排出量の少ない自然エネルギー開発・導入の促進や原子力発電の利用推進の政策を掲げている。また、近年、燃料電池自動車や家庭・オフィスビル用の定置型燃料電池の実用化が始まり、水素をエネルギー媒体として利用する水素社会の到来が間近に迫っている。我が国では、経済産業省の燃料電池実用化戦略研究会により2020年に燃料電池自動車500万台、定置型燃料電池1,000万kWの導入目標が示されている。このときの水素需要量は、386.7億m³/年と見積もられており、この量は現在の需要量（用途は主に化学工業）の約2倍に相当する。自然界において単独で存在する水素は微量で、ほとんどが水や化石燃料などの化合物の状態が存在しているため、2次エネルギーである水素を得るためには、熱や電気などの何らかのエネルギーが必要となる。ちなみに、386.7億m³/年の水素を電気分解で製造した場合、必要電力は総発電量（電力10社の合計）の約20%に相当する。このエネルギーを化石燃料の火力発電で得た電気、あるいは化石燃料の燃焼熱で与えた場合には水素製造の過程で大量の二酸化炭素が発生し、水素利用による環境効果は著しく低下する。したがって、水素利用によるクリーンエネルギー社会構築のためには、水素製造時に必要となる大量のエネルギーを環境へ負荷をかけずに確保することが重要な課題である。このような状況下において、二酸化炭素を排出しない原子力は水素製造のエネルギー源として有望と考えられる⁽¹⁾。日本原子力研究所（以下、「原研」と呼ぶ）は、原子力によ

る将来の水素利用社会への貢献を目指し、高温ガス炉を熱源とした水素製造システムの研究開発を文部科学省からの受託研究として進めている。高温ガス炉を用いた水素製造を実用化する上での技術課題は、①原子炉技術、②原子炉と水素製造設備の接続技術、③二酸化炭素を排出しない水素製造技術、に分けられる。本稿では、これら研究開発の現状、並びに海外の動向について紹介する。

2. 原子炉技術—水素製造の熱源となる高温ガス炉

工業界で最も大量に水素が製造されているメタンの水蒸気改質法（反応式： $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ ）や後述する水の熱化学分解水素製造法などを用いて、熱エネルギーで水素を製造するためには、1000℃近い温度が必要となる。この高温の熱エネルギーを供給できる原子炉が高温ガス炉であり、冷却材にヘリウムガス、主要構造材並びに減速材に黒鉛を用いることにより、約1000℃の原子炉出口冷却材温度を可能にしている（現在の軽水炉で約300℃、高速増殖炉で約600℃である）。高温ガス炉の利点としては、①原子炉出口の冷却材が高温のために高い熱効率、②黒鉛の耐熱性が高いために炉心溶融の可能性がなく、安全を担保する設備の簡素化が可能、③発電以外にも水素製造などの多様な用途が可能、が挙げられる。

原研では、我が国初の高温ガス炉である高温工学試験研究炉（HTTR：High Temperature Engineering Test Reactor）を用いて原子炉技術に関する研究開発を進めている。HTTR⁽²⁾（図1）の熱出力は30MWで、1次ヘリウム系と2次ヘリウム系の熱交換を行うために中間熱交換器（IHX）が設置されており、2次ヘリウム系に世界で初めて水素製造設備を接続することを計画している（図2、以下、HTTRと水素製造設備を接続したものを「HTTR水素製造システム」と呼ぶ）。HTTRは1998年11月に初臨界⁽³⁾となり、2001年12月に全出力運転（熱出力30MW、原子炉出口の冷却材温度850℃）を達成した。現在、高温ガス炉の安全性を実証するための各種試験を進めており、2003年度には原子炉出口の冷却材温度950℃の運転を行う計画である。

原稿受付 2003年10月10日

* 1 日本原子力研究所 大洗研究所 核熱利用研究部
〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

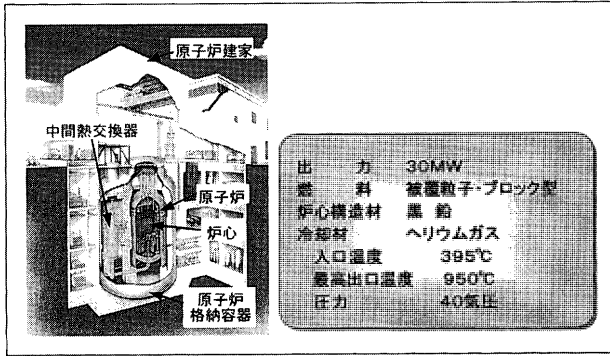


図1 HTTRの構造および主な仕様

3. 原子炉と水素製造設備の接続技術

3.1 開発の目的

原研では、原子炉と水素製造設備の接続技術の開発・実証を目的として、HTTR水素製造システムの研究開発を進めている。水素の製造方法としては、工業界で技術の確立しているメタンの水蒸気改質法を選定した。これにより、HTTRを用いて早期に世界初の原子炉からの熱を直接利用した水素製造の実証試験を行い、原子炉と水素製造設備を安定に運転する制御技術、可燃性ガスの火災・爆発に対する原子炉の安全技術、原子炉からの熱を直接利用した化学反応技術など、水の熱化学分解や石炭ガス化などの他の水素製造法にも適用できる汎用性の高い技術の確立・実証を行う計画である。原研は、1990年度からHTTR水素製造システムの検討を開始し、1996年度からは文部科学省からの受託研究として、2008年頃の実証試験を目指して研究開発を進めている(図3)。

3.2 研究開発の現状

HTTR水素製造システム(水素製造量：毎時4200m³)の基本システムを図4に示す。原子炉で950°Cに加熱された1次ヘリウムガスの熱は、IHXで2次ヘリウムガスへ熱交換(熱交換量10MW)された後、高温化学反応器(水蒸気改質器)で反応熱および蒸気発生器で蒸気製造に必要な熱を供給する⁽⁴⁾。HTTR水素製造システムにおける水蒸気改質器(図5)はヘリウムガスとの熱交換型であり、触媒が充填された反応管を30本収納している。各反応管の外側を2次ヘリウムガス、内側をプロセスガス(原料であるメタンおよび水蒸気、製品である水素の総

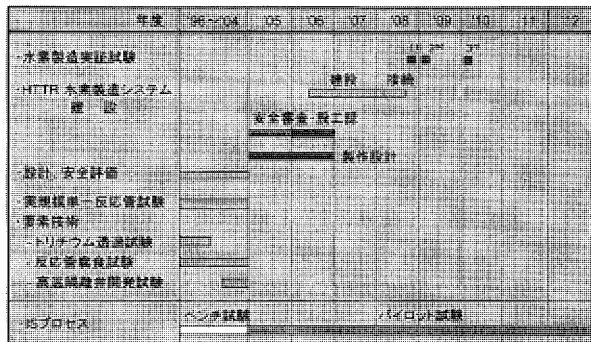


図3 研究開発スケジュール

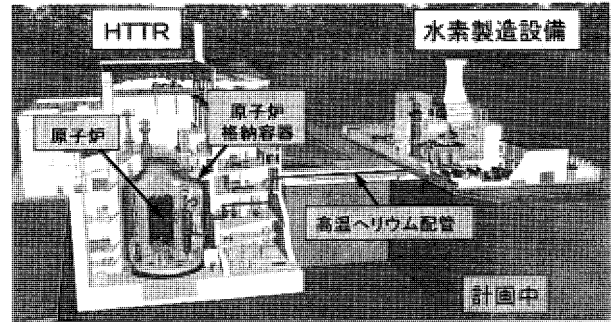


図2 HTTR水素製造システム概念図

称)が流れ、高温の2次ヘリウムガスから熱が供給されて水素を製造する。この高温化学反応器の技術は、後述するISプロセスの硫酸分解の反応器に応用できる。原研では、接続に関する技術課題を、①制御技術、②安全技術、③その他の要素技術に分類し、以下に示す研究開発を進めている⁽⁵⁾。

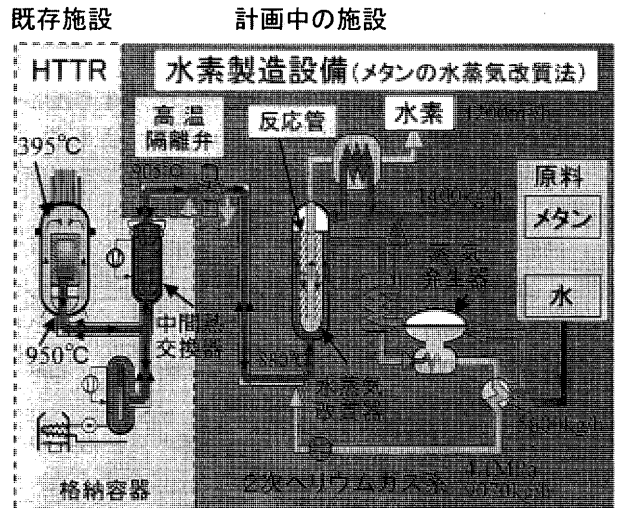


図4 HTTR水素製造システムの基本システム

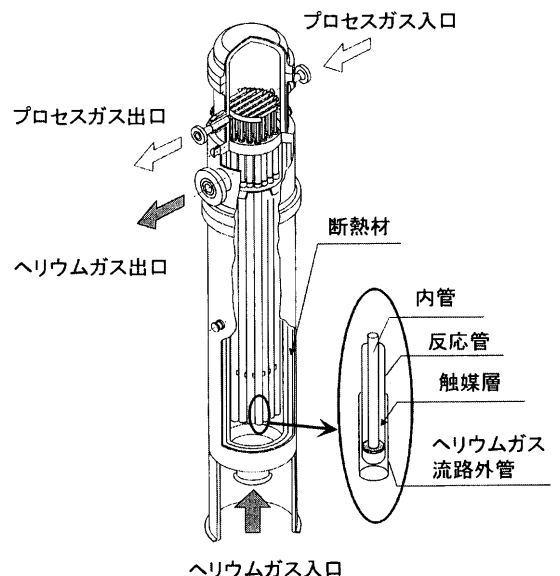


図5 高温化学反応器(水蒸気改質器)構造図

3.2.1 制御技術

化石燃料の燃焼熱を用いる工業界での水素製造（メタンの水蒸気改質）の熱源が開放系であるのに対して、HTTR 水素製造システムでは、熱源となる1次・2次のヘリウムガスが原子炉と水素製造設備との間を循環する閉ループを形成することが、システム上の大きな相違点である。このため、HTTR 水素製造システムでは、水素製造設備の原料メタンの供給量が変動した場合、水蒸気改質器による2次ヘリウムガスからの吸熱量が急速に変化し、水蒸気改質器出口で2次ヘリウムガスの大きな温度変動が発生する。この温度変動が原子炉へ伝播した場合には原子炉をスクラム停止させる可能性がある。この現象は、水の熱化学分解などの他の水素製造設備においても同様である。そこで、システム設計において、蒸気発生器を2次ヘリウムガス系の水蒸気改質器の下流に配置し、水蒸気改質器で2次ヘリウムガスの温度変動が発生したとしても蒸気発生器で温度変動を緩和し、原子炉の運転に影響を及ぼさないようにした。

原子炉と水素製造設備のような化学プラントとの接続は世界的に例がないため、HTTRとの接続の前に、蒸気発生器による温度変動緩和効果のほか、原子炉の起動停止に連動した運転方法の確立、動特性解析コードの検証用データ取得などを目的として、模擬試験装置（図6、図7、水素製造量：毎時120m³）を用いた実規模単一反応管試験を進めている^{(4),(6),(7)}。本試験装置は、HTTR 水素製造システムの水蒸気改質器の反応管1本を実寸大で模擬しており、原子炉の代わりに電気ヒータを設置している。本試験は2002年3月に開始し、2004年度まで試験を行う計画である。これまでに、化学反応停止の異常時を想定した試験において、水蒸気改質器出口ヘリウムガス温度が急激に変動しても、蒸気発生器出口でのヘリ

ウムガス温度変動を目標値である±10℃以内に抑制できることを確認し、原子炉の運転に影響を及ぼさない見通しを得ている。

3.2.2 安全技術

原子力発電プラントとHTTR 水素製造システムとの大きな相違点の1つとして、原子炉の近傍で可燃性物質である大量の水素およびメタンを取り扱うことが挙げられる。この可燃性ガスの火災・爆発に対する原子炉の安全確保については、①可燃性ガスの漏洩防止、②漏洩の拡大防止、③火災・爆発時の影響低減、の観点からシステム設計を行っている。①については、原子炉近傍の配管を二重管構造とする他、水素製造の原料であるLNG（液化天然ガス）の貯蔵タンクを地下方式とするなど、漏洩を極力防止する対策を考慮している。②については、可燃性ガスの流れる配管に適宜遮断弁を設置し、漏洩を検知した場合には遮断弁を閉じることにより、漏洩量を限定する設計としている。③については、可燃性ガスを内蔵する機器・配管の配置検討を行い、原子炉とこれらの機器・配管との適切な隔離距離の設定を行うこととし

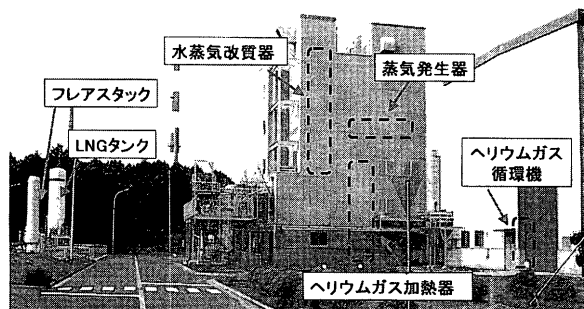


図7 実規模単一反応管試験装置（水素製造量：120 m³/h）
（HTTR 水素製造システムの模擬試験装置）

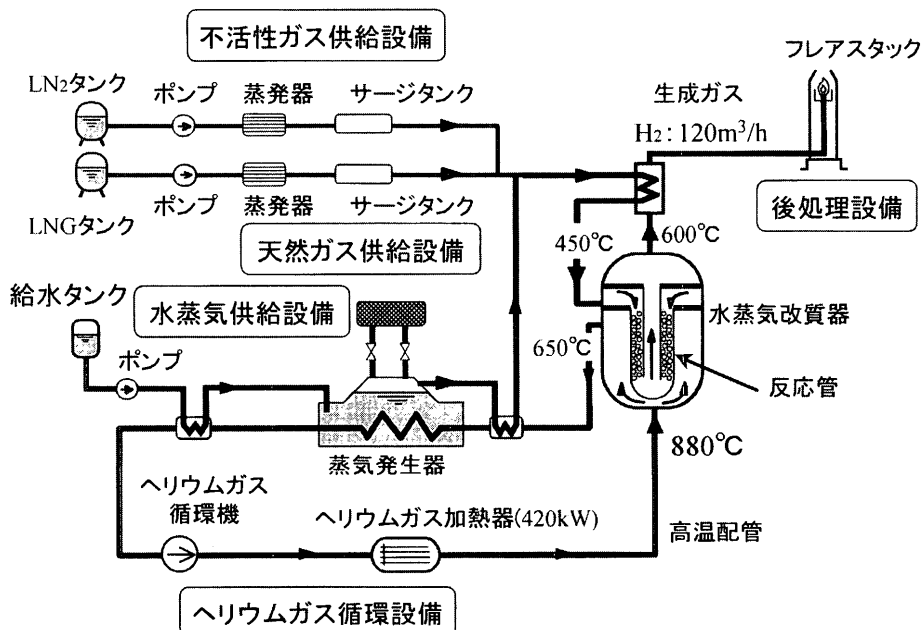


図6 実規模単一反応管試験装置の系統図（HTTR 水素製造システムの模擬試験装置）

た。そして、今後予定している HTTR 水素製造システムの安全審査において、可燃性ガスの火災・爆発に対する安全設計・安全評価の手法を確立する計画である。

3.2.3 要素技術

要素技術としては、①原子炉格納容器の圧力境界の健全性確保、②2次ヘリウムガスとプロセスガスの圧力境界の健全性確保、③原子炉で生成するトリチウムの製品水素への移行抑制について研究開発を行っている。①については、2次ヘリウムガス配管へ設置する高温隔離弁の開発を進めている。これまで、高温下（約900℃）で使用できる隔離弁は実用化されていないため、シール性能および耐久性に優れた高温隔離弁を2004年度までに開発する計画である。②については、水蒸気改質器の反応管について、その材料である Hastelloy XR の酸化や水素脆化などの特性を明らかにする反応管腐食試験を行っている。Hastelloy XR に関するプロセスガス環境（高濃度の水蒸気、水素雰囲気）下での材料データは取得されていないため、2004年度までに本試験によりデータを取得し、反応管肉厚の設定など、詳細な反応管設計に反映する計画である。③では、水素およびトリチウムの代わりに重水素を用いた試験により、移行挙動を明らかにして、移行量の評価手法を確立することができた⁽⁸⁾。そして、実験並びに解析評価により安全上、問題ない範囲まで移行量を低減できる見通しを得て、2000年度に試験を終了した。

4. 二酸化炭素を排出しない水素製造技術

4.1 開発の目的

熱化学分解水素製造法^{(9),(10)}は、2つ以上の化学反応のサイクルを組み合わせるにより、4000℃以上の温度が必要な水の熱分解を高温ガス炉で供給可能な1000℃程度で行い、水素を製造する方法である。熱化学分解水素製造法の研究は、1960年代から始まり、70年代から80年代には数百を超えるサイクルが研究された。IS (Iodine-Sulfur) プロセス^{(11),(12)} (図8) は熱化学分解水素製造法の1つであり、70年代以来、米国 General Atomics (GA) 社をはじめとする各国の研究機関で研究されたものである。その後、高温ガス炉開発の停滞などのため、他国での IS プロセスの研究開発は停滞したが、原研では研究開発を進めてきた。IS プロセスは、

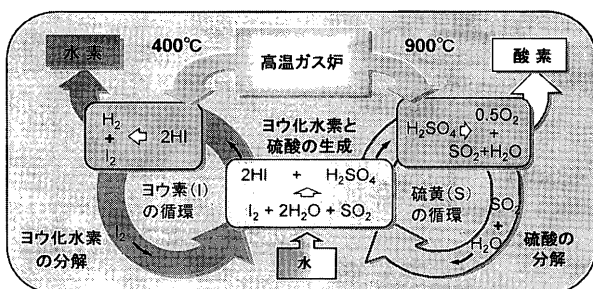
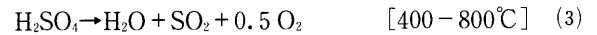
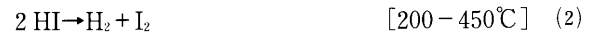


図8 ISプロセスの反応構成

以下の3つの要素反応から構成される。



(1)式のブンゼン反応において、水の成分である水素をヨウ素(I)と反応させてヨウ化水素(HI)を、酸素を二酸化硫黄(SO₂)と反応させて硫酸(H₂SO₄)を生成する。ヨウ化水素は(2)式に示す分解反応により、ヨウ素と水素に分解されて水素を生成する。また、酸素は(3)式により硫酸を分解して生成する。このとき、ヨウ素は(1)式と(2)式の反応の間で、二酸化硫黄は(1)式と(3)式の反応の間で循環する。(2)式および(3)式の反応は吸熱反応であり、高温ガス炉からの熱をこれらの反応に供給する。本プロセスは、反応物質に固体を含まないため原理的に大規模化に適している。一方、生成物分離には工夫を要し、ブンゼン反応についてはGA社で見いだされた液液分離法が効果的である。これは、ヨウ素過剰の条件下で反応を行わせて硫酸とヨウ化水素酸を2液相に分離させる方法である。液液分離法を採用したプロセス構成(図9)について、徹底的な熱回収を行ったフローシート解析が行われ、45-50%の熱効率が推算されている⁽¹¹⁾。高温ガス炉-ISプロセスの実現により、二酸化炭素を全く排出しない、高効率な大規模水素製造が可能となる。

4.2 研究開発の現状⁽¹³⁾

熱化学分解水素製造法は、他の多くの化学プロセスと異なり、副反応などによる損耗を起こすことなくプロセス物質を繰り返し用いる閉サイクル性が大きな特徴である。ISプロセスは優れた水素製造法となるポテンシャルを持つが、上記3つの要素反応とそれに伴う生成物分離操作を組み合わせた閉サイクル連続水素製造を示した例はなかった。原研は、安定運転に必要な溶融ヨウ素の定量輸送法などを工夫し、工学的な開発段階へ進むことを目指して、以下の研究を進めている。

4.2.1 閉サイクル運転技術

現在、文部科学省からの受託研究として、循環物質を損なうことなく安定した連続運転を行うための基本技術の確立を目指し、ガラス製装置(図10、水素発生量：

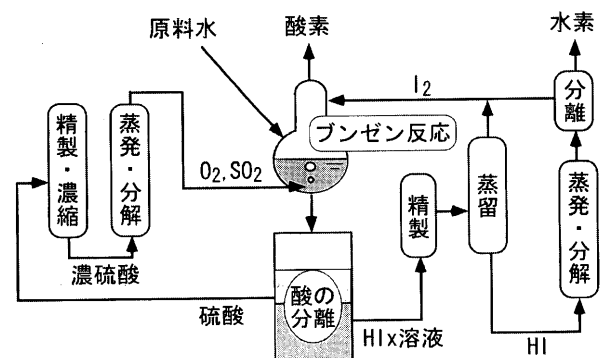


図9 液液分離法に基づくISプロセスの基本システム

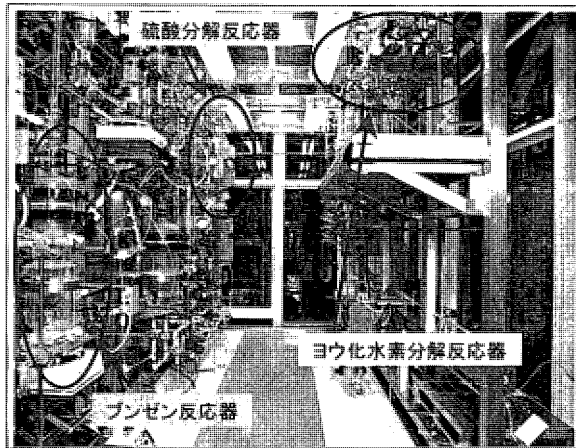


図 10 IS プロセスの試験装置(水素製造量 0.05 m³/h)

毎時 50 リッター規模)を用いた連続水素製造試験を行っている⁽¹⁴⁾。本装置では、未反応物質の工程内リサイクルなどのプロセスフロー改良を行うとともに、流量計や液面計などの計測機器を組み込み、効率化やプロセス制御の検討に配慮した。2003 年 8 月に実施した予備的運転において、安定した連続水素製造(毎時 35 リッター)に成功したところである。

4.2.2 高効率化要素技術

プロセスの高効率化については、①ブンゼン反応後の液液相分離で得られるヨウ化水素酸とヨウ素の混合溶液(HI_x 溶液と呼ばれている)からのヨウ化水素分離の高効率化、②平衡分解率が比較的小さいヨウ化水素分解反応(400℃で約 20%)の高効率化、が課題である。原研では、この問題に対して、電気透析法や膜反応器などの分離膜を活用した技術の適用を検討している。

4.2.3 耐食性装置材料

IS プロセスでは、硫黄やヨウ素などの腐食性の高い物質を扱うため、プロセスの代表的雰囲気における腐食試験を行い、耐食性を有する候補材料の選定を行ってきた⁽¹⁵⁾。最も高温の硫酸分解環境では、従来の化学プラントで用いられてきた耐熱合金の多くが、また、ヨウ素系気相環境では、Ni-Cr-Mo 系合金が耐食性を示すことが明らかとなっており、装置設計上、材料の面からの制約は少ないと考えられる。一方、液相のブンゼン反応環境および HI_x 溶液の蒸留塔環境で耐食性を有するのはガラス、Zr、Ta などであり、また、硫酸の濃縮および蒸発環境では、酸化ケイ素皮膜を形成するケイ素系セラミックスのみであった。これらの材料は、いずれも高価あるいは脆いといった難点があり、単独で構造材料として使うことは困難である。このため、現在、ライニング材などとしての利用を想定した容器構造の検討を始めたところである。

原研では、図 3 の研究開発スケジュールに示すように、2004 年度を目処に上記の研究開発を完了させ、実用材料を用いたパイロット試験へ展開する計画である。

5. 海外の動向

1960~70 年代にかけて、欧州共同体、米国およびドイツで 5 基の高温ガス炉の建設が行われたが、経済性の理由で開発が中止され、実験炉および原型炉の段階で 1980 年代末までに運転を終了した。しかし、近年、世界的に小型出力の原子炉の需要が高まっていること、高温ガス炉の利点①に述べた高い熱効率、利点②に述べた設備の簡素化や原子炉のモジュール化などの設計により建設費・維持費の低減が見込まれることから、軽水炉と同等以上の経済性が見込まれるとの試算が示されている。このことから、南アフリカではヘリウムガスタービンを用いた商用発電炉(PBMR 炉)の計画が進んでいる。中国においても高温ガス炉 HTR-10(熱出力 10 MW)を建設し、2001 年に初臨界、2003 年に全出力運転(原子炉出口の冷却材温度 700℃)を達成している。

また、国際協力の下に次世代原子力システムの研究開発を進めることを目的に 10 カ国が参加して作られた第 4 世代炉原子力システム国際フォーラム(GIF)では、高温ガス炉は、発電、水素生産、海水淡水化や熱利用などの用途を含む、持続可能性、経済性、安全性、信頼性などの特徴を有する炉型の一つに選ばれており、国際協力および産業界協力で開発する次世代の原子力システムとして期待されている。そこでは、水素製造技術プロジェクトが設けられており、国際協力可能な R&D 項目について検討されているが、なかでも IS プロセスの研究は世界的に注目されている。米国は、GIF の参加国であるが、電力水素併産の先進原子炉を 2010 年までに建設し、2015 年頃には水素製造を実証するという内容の開発研究計画の検討を独自に進めている。IS プロセスの研究では、GA 社、サンディア国立研究所(米)、仏国原子力庁(仏)の 3 機関による国際共同研究が開始されているが、前述の 3 つの反応をそれぞれの機関が個別の反応試験装置の設計に着手したところであり、2006 年から原研と同様な連続水素製造試験を目指している。仏国においても、水素製造に関して独自の研究開発を進めているが、IS プロセスによる水素製造の実証に関しては、この国際共同研究を基に計画されている。このように、近年、原子力を利用した水素製造の研究開発活動は、世界的に活発化しているが、IS プロセスの研究については日本(原研)が世界をリードしている。

6. まとめ

温室効果ガス排出による地球温暖化問題解決の一助となる燃料電池の実用化が始まり、水素利用社会の到来が間近に迫っている。しかし、水素を製造する際に必要となるエネルギー源および原料は、現在、主に化石燃料に依存しており、真の意味で水素利用によるクリーンエネルギー社会を構築するという観点からは、二酸化炭素を排出しないエネルギー源の確保、並びに水を原料とした高効率の水素製造技術の確立が今後の重要な課題といえ

る。二酸化炭素を排出せず大量のエネルギー供給が可能な原子力は、水素製造の有望なエネルギー源として、世界的に注目を受け始めている。本稿で概説した高温ガス炉とISプロセスによる水素製造システムは、二酸化炭素を全く排出せず、高効率かつ経済的に大規模の水素製造が可能であることから、今後の水素利用社会の重要な位置を占めると考えられる。原研は、今後も世界のトップリーダーとしての役割を果たし、水素利用によるクリーンエネルギー社会の構築に貢献したいと考えている。

参考文献

- (1) 小川益郎, エネルギー(日刊工業新聞社), 34-5, (2001-5), p. 81
- (2) Saito, S., et al., Report of the Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI 1332(1994)
- (3) 山下清信, 他, 日本原子力学会誌, 42-1(2000-1), p. 30
- (4) Inagaki, Y., et al., Proc. 7th Int. Conf. Nucl. Engineering, Tokyo, Japan,(1999), ICONE-7101
- (5) 塩沢周策, 原子力 eye, 49-1(2003-1), p. 16
- (6) 稲垣嘉之, 他, 日本原子力学会誌, 41-3(1999-3), p. 250
- (7) Ohashi, H., et al., Proc. 11th Int. Conf. Nucl. Engineering, Tokyo, Japan,(2003), ICONE-36059
- (8) 武田哲明, 他, 日本原子力学会誌, 43-8(2001-8), p. 823
- (9) Ohta, T., Solar-Hydrogen Energy Systems,(1979), Oxford Pergamon Press
- (10) Funk, J. E., Int. J. Hydrogen Energy, 26-3,(2001-3), p. 185
- (11) Norman, J. H., GA-A 16713,(1982)
- (12) Nakajima, H., et al., Proc. 7th Int. Conf. Nucl. Engineering, Tokyo, Japan,(1999), ICONE-7104
- (13) 小貫薫, 化学装置, (2003-4), p. 114
- (14) Kubo, S., et al., Proc. 11th Canadian Hydrogen Conf., Victoria, Canada,(2001), session 5 A
- (15) Onuki, K., et al., Proc. 14th World Hydrogen Energy Conference, Montreal, Canada (2002), session C 1.4

小形ガスタービン用水素燃焼器の開発

Development of a Hydrogen-fueled Combustor for a Gas Turbine at Micro-scale

高橋 克昌*¹
TAKAHASHI Katsuyoshi

村山 元英*¹
MURAYAMA Motohide

磯村 浩介*¹
ISOMURA Kousuke

田中 秀治*²
TANAKA Shuji

キーワード：マイクロマシーン，ガスタービン，発電機，燃焼器，水素燃料
micro-machine, gas turbine, power generator, combustor, hydrogen fuel

Abstract

A hydrogen-fueled micro-combustor for a palm-top gas turbine has been developed. The liner volume of the combustor is 2 cm^3 that is 4 to 5 order smaller than that of conventional gas turbine combustors. The basic structure is the same as conventional combustors, because the length scale of the combustor is two orders larger than the quenching distance of hydrogen, and gas-phase reaction is predominant. The 10 mJ piezo-electric element was applied as an energy source of ignition spark, and stable ignition was achieved. The ranges of ignition and stable combustion were wide enough to the practical operations. The combustion efficiency was almost 100% through the operation conditions. The liner and fuel nozzle of the combustor did not have a remarkable heat-mark after the combustion tests, so the combustor can apply to the practical use.

1. 緒言

近年の携帯型電子機器や自立型ロボットなどの技術進展にともない、従来の電池よりも軽量高出力かつ長時間作動可能な小形電源に対する要求が高まっており、新しいマイクロパワー源の研究が急速に立ち上がっている。これら新マイクロパワー源のなかで、ガスタービンを用いた小形電源は、化学燃料から電気エネルギーを発生させることで、高エネルギー密度と高出力密度の両立が可能であるため有望視されている。このような背景から、Massachusetts Institute of Technologyが提案したMicro-electromechanical Systems (MEMS) 技術によるボタンサイズガスタービン⁽¹⁻³⁾などの開発が開始されている。

これらに対して我々は、小形ターボチャージャを用いたガスタービンの開発を行っている⁽⁴⁻⁶⁾。図1に目標サイクルを示す。出力は100 W級であり、ロータ径10 mmの小形ターボチャージャと燃焼器の開発を並列して実施している。図中 W_a は空気流量、 P は圧力、 T は温度であり、添え字0は大気状態、3は燃焼器入口、4は燃焼器出口を表す。表1に燃焼器に対する定格条件の仕様を示す。燃焼器サイズを小さくするために燃焼性が優れる水素を燃料とした。まず本開発に先立ち、試作と試験計測の容易性を考慮して、ライナ体積 4.0 cm^3 の燃焼器

を試作し、大気圧試験を行った。その結果、定格相当条件ではほぼ100%の燃焼効率が達成され、小形ゆえに懸念された熱損失は、ライナによる断熱構造によって燃焼器入口エンタルピの1%程度に抑えられることから、マイクロ燃焼器成立の目処を得た^(7,8)。本開発では試作モデルの試験評価結果に基づき、目標仕様に対してライ

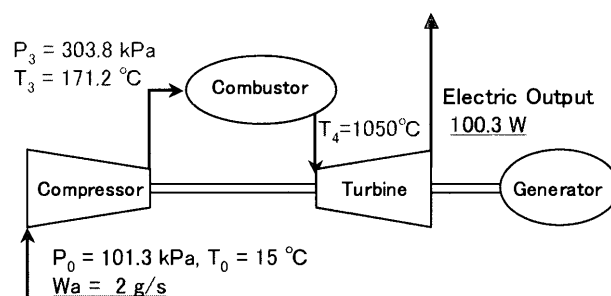


図1 小形ガスタービンの目標サイクル

表1 燃焼器仕様 (定格条件)

Fuel	hydrogen	
Air Flow Rate	g/s	2.0
Inlet Pressure	kPa	304
Inlet Temperature	°C	171
Exit Temperature	°C	1050
Equivalence Ratio		0.276

原稿受付 2003年10月7日

- * 1 石川島播磨重工業㈱
〒190-1297 東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷 229
* 2 東北大学

ナ体積 2.0 cm^3 の燃焼器を設計・試作し、実機条件での燃焼器性能試験により評価を実施した。

2. 供試燃焼器

図2に供試燃焼器断面を示す。燃焼器は単缶型であり、ケーシング、スワラ、燃料ノズル、ライナ、点火プラグで構成される。本燃焼器定格条件において、水素の消炎距離は 0.2 mm 以下であり、本燃焼器の代表サイズは水素の消炎距離よりも2桁大きく、気相反応が支配的と見なせるため、燃焼器基本構造は従来のものと同じとした。燃料ノズルは噴射孔ピッチサークル径 (PCD) が異なり、燃料分布の違う A, B 2種類を試作し、供試した。B 燃料ノズルの噴射孔 PCD は、A 燃料ノズルの 0.8 倍である。ライナは希釈孔径が異なる A, B の2種類を試作した。ライナ A の希釈孔面積はライナ B の 1.47 倍である。ライナ外面には対流冷却促進リブが付いており、ライナとスワラ差込部にはフィルム冷却スリットを設けた。点火プラグはセラミック碍子にニッケル線を挿入したものであり、圧電素子に接続しスパークを発生させる。スパークエネルギーは約 10 mJ である。

3. 試験装置および計測方法

図3に試験装置系統図を示す。空気はボンベから供給し、電気ヒータによって燃焼器入口温度を常温または $171 \pm 10^\circ\text{C}$ に設定した。燃料水素もボンベから供給した。

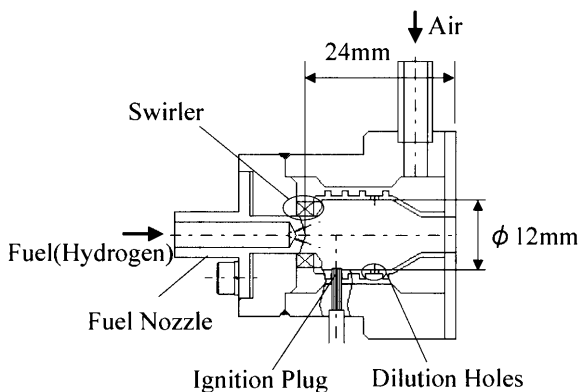


図2 燃焼器断面構造

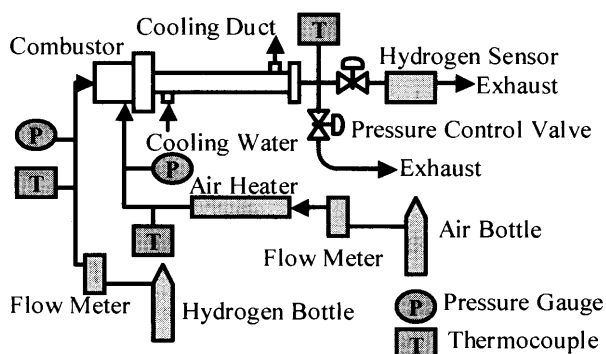


図3 試験装置系統図

燃焼ガスは下流部に設置したガス流路径 6 mm 長さ 1 m の水冷ダクトを通り、 $120^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ に冷却された後、調圧弁を通して排出される。水冷ダクト内では反応凍結とみなして排気の一部は水素センサー (接触燃焼方式: TM-9098 新コスモス電機株) に導き、未燃水素濃度を計測した。ただし、着火、安定範囲試験では下流ダクトを外し、大気開放にて実施した。

4. 試験結果

4.1 着火・安定範囲

図4に入口空気常温、出口開放条件での着火限界を示す。横軸は空気流速を定格条件で無次元化した値である。着火範囲内では、ほぼ1回目のスパークで安定な着火が可能であった。定格流速の $1/2$ 以下の流速条件では、当量比 0.2 以下で着火可能であり、実機での着火範囲を十分に満たす。燃料ノズルの比較では、噴射孔ピッチ径が大きく、噴射孔と点火プラグの距離が短い燃料ノズル A がやや着火範囲が広い。なお、試験後の点火プラグは、先端部に焼けが見られず良好な状態であった。

図5に入口空気常温、出口開放条件での吹き消え限界を示す。横軸は前図と同様に無次元空気流速である。定格流速の 1.5 倍以下では吹き消えは観測されず、それ以

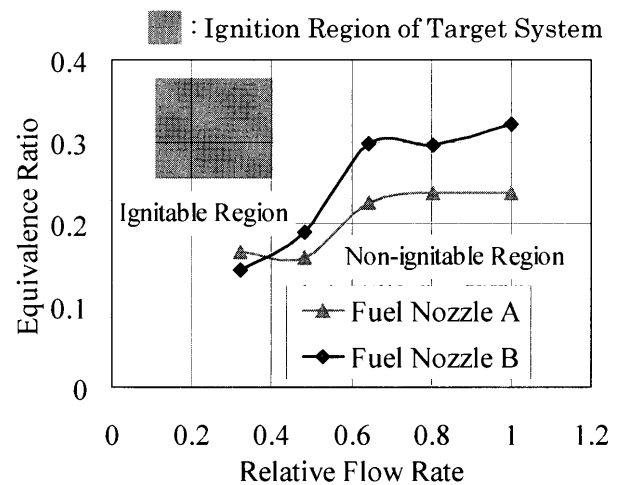


図4 着火範囲

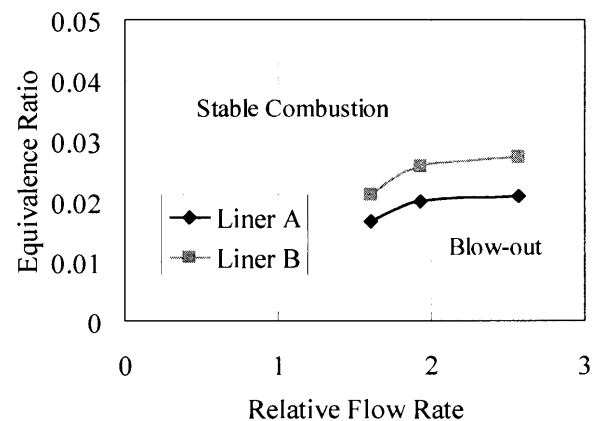


図5 安定燃焼範囲

上の流速で吹き消えが生じる。吹き消え当量比は定格当量比の1/10以下であり、十分な安定燃焼範囲を有する。ライナ A の安定範囲がやや広いが、これは希釈流が多く1次燃焼領域の空気配分が少ないためと考えられる。

4.2 残存ガス濃度および燃焼効率

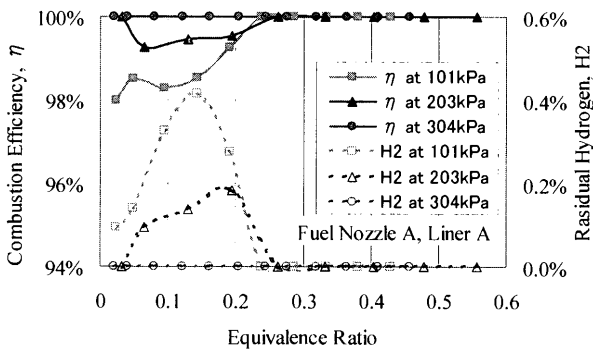
入口空気温度を $171 \pm 10^\circ\text{C}$ 、入口流速を一定とし、燃焼器入口空気圧力を変えて燃焼試験を行い、未燃水素濃度を計測した。図6に燃料ノズル A の未燃水素濃度および燃焼効率を示す。定格圧以下の条件では、低負荷時に未燃水素がやや出ており、燃焼効率が低下するが、定格当量比では未燃分はない。また、定格圧では試験した当量比全域にわたり、未燃分が計測されなかった。本ガス分析システムの水素ガス検出限界は0.01%であり、定格条件での燃焼効率に換算すると0.08%に相当する。したがって、燃焼効率は99.92%以上といえる。ライナで比較すると、1次燃焼領域の空気配分が少なく高温燃焼となるライナ A が、やや燃焼効率が高い。図7に燃焼効率を空気負荷率で整理した結果を、航空エンジン (JP-4 燃料) の値⁽⁹⁾と共に示す。ここで、空気負荷率は以下の定義による。

$$\text{空気負荷率} = \frac{W_a \times 10^9}{P_3^{1.8} V \exp((T_3 + 273)/300)}$$

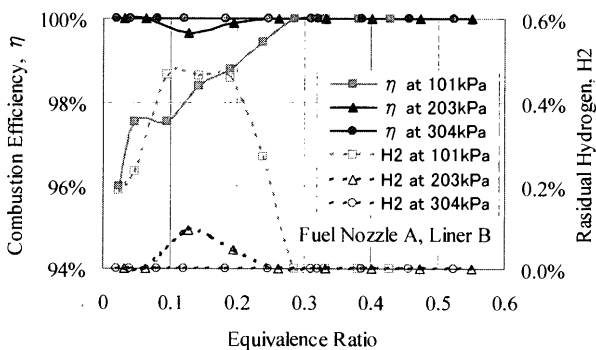
W_a : 空気質量流量 kg/s, P_3 : 入口空気圧力 Pa,

V : ライナ体積 m^3 , T_3 : 入口空気温度 $^\circ\text{C}$

水素試験データは当量比毎に分けて示したが、当量比 ϕ が定格よりも低い0.20以下の条件であっても、炭化



a) Liner A

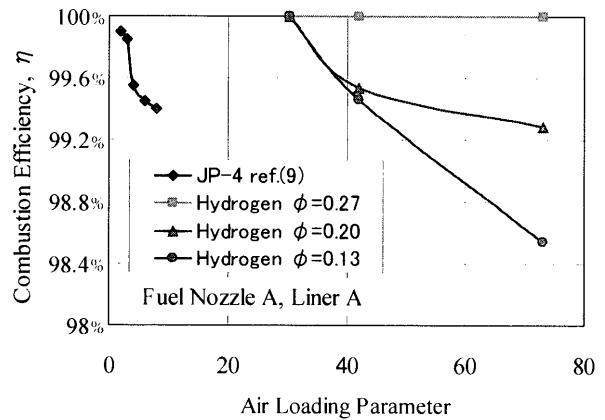


b) Liner B

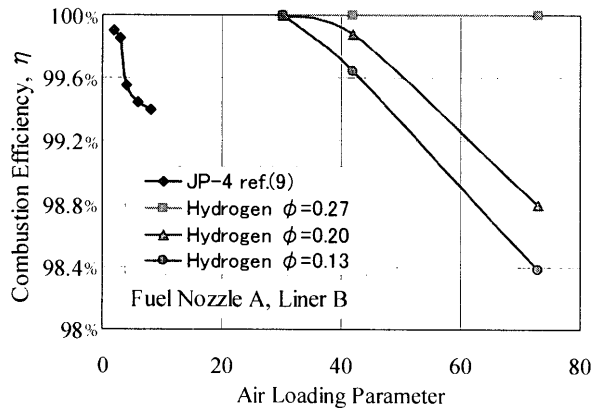
図6 未燃水素濃度および燃焼効率 (燃料ノズル A)

水素系燃料に較べて空気負荷率を1桁程度高くできる事がわかる。

図8に燃料ノズル B での燃焼試験結果を示す。本ノズルを用いた場合には、低圧低負荷条件においても未燃分が計測されず、燃焼効率ほぼ100%が達成されており、燃焼器作動範囲全域で高燃焼効率である。燃料ノズル B は噴射孔ピッチサークル径が小さいノズルであるが、ライナ中央部で燃焼が完了し、ライナ壁面でのクエンチングが微小であるため、高燃焼効率が得られたと考えられる。また、試験後の燃料ノズル、ライナに顕著な焼け跡はなく、実用に耐えうることを確認した。



a) Liner A



b) Liner B

図7 燃焼効率の比較 (燃料ノズル A)

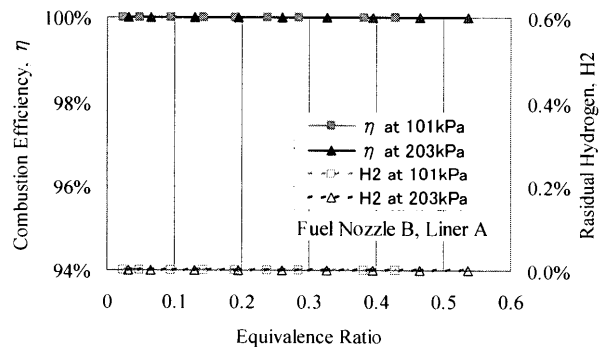


図8 未燃水素濃度および燃焼効率 (燃料ノズル B)

5. 結 言

小形ガスタービン開発の一環として、ライナ容積 2 cm^3 水素ガス燃焼器の試験評価を実施し、本試作燃焼器について以下の結果を得た。

- (1) スパークエネルギー約 10 mJ の圧電素子により、安定な着火が可能であり、着火範囲、安定範囲とも十分に広い。
- (2) ノズル適正化により、作動範囲全域にわたりほぼ 100% の燃焼効率を達成した。
- (3) 点火プラグ、燃料ノズル、ライナに顕著な焼け跡はなく、実用に耐えうる。

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の産業技術研究助成事業の一部として実施した。関係各位に感謝する。

参 考 文 献

- (1) I. A. Waitz et al., ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 120, 1998.
- (2) A. H. Epstein et al., Technical Digest, Workshop on PowerMEMS, ISRE 2000.
- (3) C. M. Spadaccini et al., ASME Paper No. GT-2002-30082, 2002.
- (4) S. Tanaka, Technical Digest, Workshop on PowerMEMS, ISRE 2000.
- (5) K. Isomura et al., Technical Digest, Workshop on PowerMEMS, ISRE 2000.
- (6) K. Isomura et al., ASME Paper No. 2001-GT-101, 2001.
- (7) K. Isomura et al., ASME Paper No. GT-2002-30580, 2002.
- (8) 村山元英他, 第16回ガスタービン秋季講演会講演論文集, (2001), p.173
- (9) Y. Sugiyama et al., ISABE-95-7099, 1995.

ガスタービン翼精密鑄造時のふく射伝熱解析高速化

Increase in Calculation Speed of Radiative Heat Transfer in Precision Casting Furnaces of Gas Turbine Blade

小原 伸哉*¹
OBARA Shin'ya

工藤 一彦*²
KUDO Kazuhiko

キーワード：ふく射，数値解析，形態係数，炉，ガスタービン翼

Thermal Radiation, Numerical Analysis, View factor, Furnace, Gas turbine blade

Abstract

A fast radiative heat transfer program is developed for the simulation of unidirectional precision casting of gas turbine blade. Calculation speed is increased by incorporating three new methods. View factors are calculated by introducing an approximation equation and simplified surface integral. The visibility at surface elements is judged by extended plane-sweep method. For radiosity calculation in the radiative heat transfer analysis, multiple reflection is neglected. As the result, the present algorithm reduces the computation time for a model with 700 elements from 300 sec to 4 sec within accuracy of 3%.

1. 緒 論

航空機や発電プラントで利用されているガスタービンの性能を向上する技術要素の1つとして、タービン翼の高温耐熱材料の開発が挙げられる。一方向凝固技術はその一つであるが、一方向凝固炉によってタービン翼のような複雑曲面を有する鑄型を鑄造する場合には、これまで経験に頼っていた部分が多く、低コスト及び効率化を実現する技術開発が望まれている。そこで、鑄型内部の湯流れ及び凝固過程を、高い精度でシミュレーションすることができるプログラム開発についてのプロジェクト⁽¹⁾が発足している。この開発プロジェクトが進むと、精密鑄造炉でのガスタービン翼の開発を先ず、数値実験で実施することが可能となり、開発の効率化が実現できるものと期待されている。

本研究は、一方向精密鑄造時の湯流れ及び凝固過程のシミュレーションプログラムの実現を目指すこのプロジェクトの一部として、ふく射伝熱解析を高速で高精度に行うアルゴリズムの開発に関するものである。本稿では、精密鑄造炉として円筒形の電気炉を取り上げ、炉の内壁（サセプタと称する）と炉内に設置した複雑形状のガスタービン翼の精密鑄造鑄型との間のふく射伝熱を高精度で高速に行うアルゴリズムの実現を目的としている。

一方向精密鑄造時の湯流れ及び凝固過程シミュレ-

ーションプログラムでは、湯流れ及び凝固中の結晶成長の計算を行うことから、鑄型の固体面を非常に細かく要素分割しており、その全てとサセプタ壁面要素の間のふく射形態係数を計算してさらに伝熱量の計算を行うと、非常に長い計算時間を要することとなる。そこで著者らは、形態係数の高速計算用近似式の導入⁽²⁾、鑄型壁面要素とサセプタ壁面要素との遮蔽判定に、平面走査法⁽³⁾を拡張した手法の導入、さらに、ゾーン法⁽⁴⁾の考え方による伝熱計算での大サイズのマトリクス計算の簡易化により、大幅な計算の簡素化を試みた。

試作したプログラムは、湯流れ及び凝固過程のシミュレーションプログラム本体から容易に呼び出せるように、ふく射伝熱解析アルゴリズムのサブルーチンパッケージとして供給する予定である。

以上のような特徴を持つふく射伝熱解析アルゴリズムを、単純形状のサセプタと鑄型で構成する簡易解析モデルに適用し、その解析精度と計算時間を調べた。

2. おもな記号

A : 面積 m^2

F : 形態係数

N : 法線

R : 壁面要素の重心間の距離 m

s : 壁面要素

U : 形態係数を計算するときの、近似式と簡易的な面積分とのしきい値

θ : 法線とのなす角度 deg

原稿受付 2003年7月31日

*1 苫小牧工業高等専門学校機械工学科
〒059-1275 苫小牧市字錦岡 443 番地

*2 北海道大学大学院工学研究科

3. 精密鑄造炉のモデルと解析プログラム

精密鑄造一方向凝固炉のモデルを図1に示す。円筒形に配置した電磁コイルから発する熱をサセプタを介してふく射により鑄型に供給する。運転中は炉内を真空引きし、鑄型を数時間から数十時間かけて徐々に下方に移動させ、内部の溶湯を下部から一方向凝固させる。

ふく射伝熱解析プログラムには、初期値として壁面要素（サセプタ内面及び鑄型外面）の幾何学的な形状、炉内で移動する要素か否か、及び壁面放射率の値を与える。サセプタと鑄型との壁面間の熱移動量の計算は、湯流れ及び凝固過程のシミュレーションプログラム本体（以下、MFSと称する）からふく射伝熱プログラムに鑄型壁面要素の温度データを渡し、コールすることで実行する。また、MFSにふく射伝熱解析プログラムで求めた伝熱量を渡すと、MFSでは鑄型内部の湯流れなどの状況から、次のタイムステップでの鑄型壁面要素の温度を計算して、再びふく射伝熱解析プログラムに渡す。

ふく射伝熱解析プログラムは主に、①表が向き合う壁面要素の組合せと、この壁面要素間の視線上に遮へいする壁面要素があるかないかの調査部分、②ふく射形態係数の計算部分、そして③鑄型壁面への流入出熱量の計算部分で構成される。

4. ふく射形態係数の計算と遮へい判定

4.1 近似式によるふく射形態係数の計算

微小面間のふく射形態係数は、微小面の重心間を結ぶ線分と、各面の法線とのなす角度 θ_1 及び θ_2 より、式(1)で定義される⁶⁾。これを式(2)のような面積分を行うことで、有限面積である壁面要素間での形態係数を計算することができる。しかしながら面積分の計算には時間がかかることから、重心間を結ぶ線分の長さ R と、各面の法線とのなす角度 (θ_1, θ_2) を用いて式(3)により行う。

$$dF_{1-2} = \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi R^2} dA_2 \dots\dots\dots(1)$$

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi R^2} dA_2 dA_1 \dots\dots\dots(2)$$

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi R^2} dA_2 dA_1 \approx \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi R^2} A_2 \dots\dots\dots(3)$$

図2は、その下に示す $\theta_1, \theta_2, A_1, A_2$ に関する6つのケースについて、近似式(3)を用いて要素間の距離 R を変化させて求めた結果と厳密解である Hottel による結果とを比較して求めた誤差を、プロットしたものである。横軸の値が大きくなるにつれて、すなわち壁面要素の面積 (A_1, A_2) が大きく、壁面要素間の距離 (R) が小さくなるに従って、近似式(3)による誤差は大きくなることわかる。したがって、誤差が数パーセントである領域（横軸の値が0.1以下、もしくは形態係数の値が0.03以下）では式(3)の近似式を用いることができるが、これよりも形態係数の値が大きくなるような領域では、何らかの方法で面積分を行うことが必要になる。本研究では、形態係数の値がしきい値 U （特に説明が無いときには、 $U = 0.03$ とする）を超える領域については、次節に述べる簡易的な面積分を用いて形態係数を計算することとした。

4.2 簡易的な面積分の導入

形態係数の値がしきい値を越える組み合わせについては、両方の面要素を m 分割して（特に説明が無いときには、 $m = 16$ ）、放射元となる要素と目的とする要素の各分割面の重心間の組合せについて、近似式(3)を導入した結果を加算するという面積分計算を行う。

4.3 目的とする壁面要素の表裏の判定

目的とする壁面要素の表が見えるかどうかの判定は、法線ベクトル法⁶⁾によって行う。形態係数計算では、表面が向き合う壁面要素の組合せについてのみ扱う。

4.4 遮へい判定の方法

3次元で、ある鑄型壁面要素から他の壁面要素を見たときに、その視線に視野を遮るような遮へい要素（中間要素）が存在するか否かを調査する。

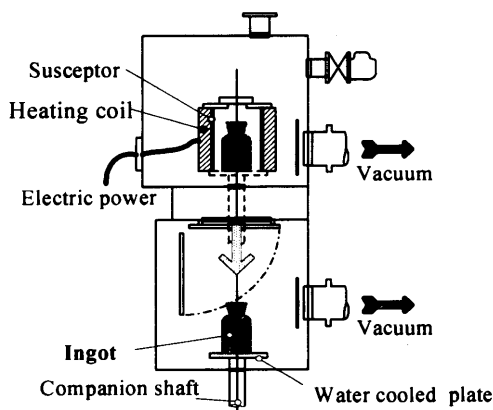


図1 一方向凝固炉のモデル

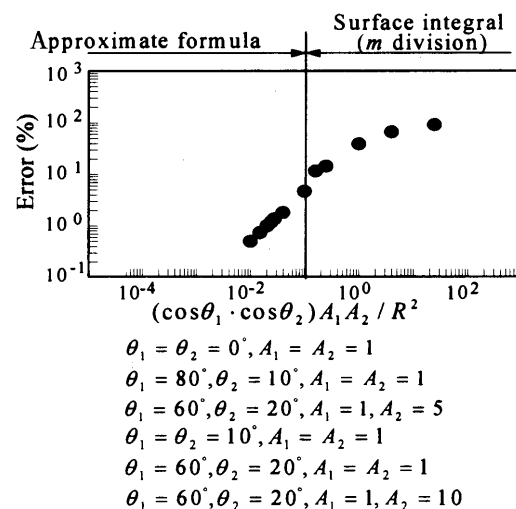


図2 形態係数の計算

4.4.1 原始的な遮へい要素の判定方法

3次元での簡易的な判定方法としては、全ての壁面要素について、当該2壁面要素の重心間を結ぶ線分を含む壁面要素を調べ、含む場合にこれを中間要素とする方法が挙げられる。このときの遮へい判定では、重心間を結ぶ線分上に中間要素の面上の交点Pが存在するか否かを調べることで行う⁽³⁾。この方法ではすべての壁面要素の数をMとすると、遮へい判定に要する計算回数は、 M^3 に比例することとなる。

4.4.2 平面走査法の考え方を3次元に拡張した遮へい判定法

前節で述べた遮へい判定法では計算時間が長くなり、中間要素の探索方法としては効率が悪い。そこで従来2次元系で用いられてきた平面走査法を後に述べるような方法で3次元系に対応できるアルゴリズムに拡張して、中間要素の検出を高効率で行うこととする。

(1) 従来の平面走査法⁽³⁾

以下に、従来からある平面走査法による可視性問題の解法について説明する。

①多数の線分が平面状にあるときの可視領域の探索

図3に示すn本の線分の集合体に関し、これらの線分の端点座標は既知で、かつ、すべての線分が式化されているものとする。これらの線分の2n個の端点を、視点Oを原点とする極座標系での偏角についてソートする。このときのソート列を $(v_0, v_1, \dots, v_{2n-1})$ とする。

いま、Oを視点として端点 v_0 を通る走査線を考える。 v_0 を通る走査線と交差する線分の集合を S_{v_0} （以下、 v_0 の交差リストと呼ぶ）とし、平衡2分探索木⁽³⁾などの動的探索問題を処理するプログラムを用いて、これらの S_{v_0} の要素を視点Oとの距離の近い順に並べる。この結果は、図3中に示す交差リスト S_{v_0} （要素は \bar{r}_1 ）となり、視点Oから最短距離にある \bar{r}_1 が視点Oからの可視線分となる。

同様にして、偏角のソート列にしたがって、順次、 v_i ($i=0, 1, \dots, 2n-1$)を通る走査線について考える。図3の例では、次に v_1 を通る走査線を考える。この場合の交差リスト S_{v_1} は、前回の S_{v_0} に対して \bar{r}_2 を加えたものとなる。この際に、新たに加えた \bar{r}_2 と前回のリストと変更のない要素(\bar{r}_1)を平衡2分探索木などで、再

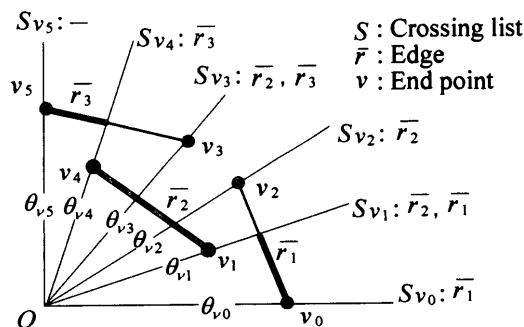


図3 平面走査法の導入による視線の遮りチェック⁽³⁾

度、視点Oからの距離順に並べる。この結果、 v_1 を通る走査線の方向では、視点Oからの最短距離にある \bar{r}_2 が見えることとなる。 v_2 を通る走査線では、前回の交差リスト S_{v_1} から \bar{r}_1 を除くことで S_{v_2} を作成し、 \bar{r}_2 が可視線分となる。このように、各線分の偏角の大きい側の端点に関する走査線の交差リスト(\bar{r}_1 についての S_{v_2})からは、その線分 \bar{r}_1 は除いておくこととする。このようにして、各線分の端点方向における可視線分のリストを求めておけば、視点Oからの全可視領域は、図3中の太線に示すように、偏角 $\theta_{v_0} \sim \theta_{v_1}$ までは S_{v_0} の可視線分 \bar{r}_1 、 $\theta_{v_1} \sim \theta_{v_2}$ の間は S_{v_1} の可視線分 \bar{r}_2 、 $\theta_{v_2} \sim \theta_{v_3}$ の間は S_{v_2} の可視線分 \bar{r}_2 、...として求められる。

後に述べる本稿での遮へい判定計算では、計算の高速化を図るために、上述の従来の平面走査法を単純化している。詳細な方法については(2)項②で述べるが、図4に示すように、本稿では線分の端点ではなく重心で扱うこととし、視点Oからある線分の重心に走査線を出して、これと交差する線分がある場合に遮へいありと判断する。例えば、図4に示す、視点Oから線分 \bar{r}_1 の重心 p_1 に至る走査線 L_1 は、途中で交差する線分がないことから、 \bar{r}_1 は可視線分であると判断する。また、視点Oから線分 \bar{r}_2 の重心 p_2 に至る走査線 L_2 は、途中で線分 \bar{r}_2 と交差することから、 \bar{r}_2 は見ることができないと判断する。したがって本稿では、図3の厳密な可視領域を、図4の太線のように簡易化して取り扱う。

②多数の多角形が平面上にあるときの可視領域の探索

従来の平面走査法を、同じ平面上にある、多数の多角形に対して導入するときは、最初に、多角形が単独にあるものと想定し、この多角形の各辺を線分の集合として、①の方法で視点Oからの可視領域を求める。次に、ここで求めたすべての「多角形単独の場合での辺の可視領域」の集合に対し、①で述べた方法を導入して、同一平面上に複数の多角形があるときの可視領域を求める。以下に、図5(a)を用いて具体的な計算方法を述べる。

いま、互いに交わらない、番号が1, 2, ..., m, ..., MのM個の多角形について、視点Oからの可視線分領域を求めることを考える。最初に、多角形 B_m のそれぞれについて単独に存在するものと想定して、①の方法を適用して視点Oから見ることができると見られる可視領域 $V_{m,i}$ を求める (i は、視点Oから多角形 B_m を見たときに見

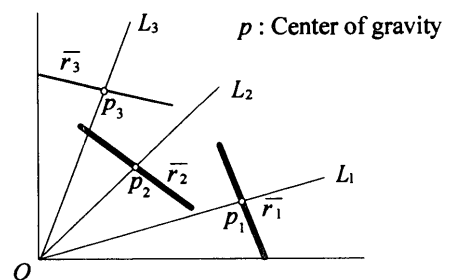


図4 可視領域の計算判定

ることができる辺の番号)。次に各 $V_{m,i}$ 上の端点を偏角順にソートして、再度①のアルゴリズムを適用することで、図 5(b)に示す視点 O からの可視領域を知ることができる。

②のアルゴリズムを実行するのに要する時間を検討する。まず、視点 O から、 M 個の多角形（全頂点数が n 個）の可視領域を調査するには、多角形のすべての頂点を偏角についてソートする必要がある。この作業については、クイックソートを用いると平均的に $(n \cdot \log M)$ に比例する計算時間で実施できることが知られている⁽³⁾。さらに、①のアルゴリズムで平衡二分探索木を用いている場合には、交差リスト S への線分の挿入と削除に、 $(\log M)$ に比例する計算時間を要することが知られている⁽³⁾。結局、平面走査に要する計算時間は $(n \cdot \log M)$ に比例するものとなる。

一方、前節による原始的な遮へい判定の方法では、すべての壁面要素数の 3 乗に比例する計算時間を要することから、本稿では平面走査法による多角形の可視領域の探索方法の考え方を導入して、可能な限り原始的な遮へい判定による計算回数を減らし、 $n \cdot \log M$ に比例、若しくはこれに近い計算時間で走査することを目標とする。

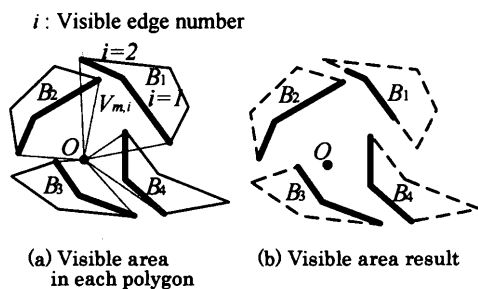
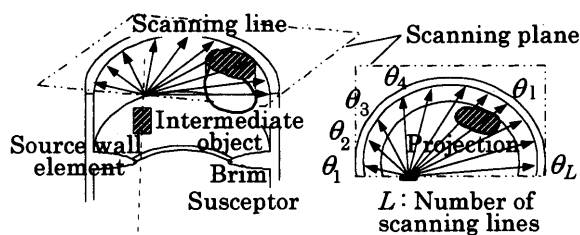
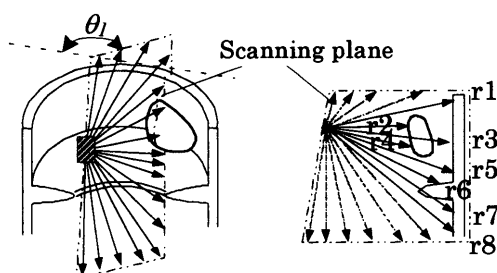


図 5 平面操作法の考え方による可視判定計算⁽³⁾



(a) Scanning on horizontal projection surfaces



(b) Scanning on vertical cross section

図 6 本稿で開発した 3 次元平面走査法

(2) 平面走査法の 3 次元系への拡張

①概念

壁面要素の番号は、鋳型、サセプタ円筒部分およびその他（上下のフタやつばなど）にグループ分けしておき、水平投影面に現れる物体を区別できるものとする。

図 6(a)に示すように、最初に 3 次元系中のすべての要素を適当な水平面上に投影し、水平投影面での走査を行う。図 7 に示すように、放射元である鋳型壁面要素の重心 (p_1) からサセプタ周方向に走査線を放射するが、本稿では、走査線の終点をサセプタ円筒部分の壁面要素の重心 (p_2) とする。角度 θ_l は、水平投影面上で、走査線 ($\overline{p_1 p_2}$) を出す鋳型壁面要素と終点であるサセプタ壁面要素との重心間を結んだ線分と、鋳型壁面とのなす角度である。

さらに、上下方向に並んでいるサセプタ壁面要素のように、 θ_l が同じものについては、それぞれグループ (G_{ml}) としてまとめておくこととし、本稿では、図 8 に示すサセプタ壁面要素の重心のずれの値 $\Delta\theta_s$ が、 $\theta_l \pm 0.5deg$ 以内であるものを G_{ml} としてまとめておく。したがって、図 6(a)右中に示した $l=1, 2, 3, \dots, L$ の L は、走査平面（水平投影面）上で走査線を出す壁面要素から表が見えるサセプタの壁面要素群 (G_{ml}) の数となる。

また、図 7 に示す、ある鋳型壁面要素 S_m が中間要素になるかどうかを調べるための走査では、水平投影面上で、放射元となる鋳型壁面要素とこの鋳型壁面 S_m の重心間を結ぶ線分の角度 θ_m と、上記の θ_l が、ほぼ同じ値となる（本稿では、 θ_m を $\theta_l \pm 0.5deg$ 以内とした）サセプタ壁面要素群 G_{ml} について、以下、これらを 1 セットのグループ (G_{lm}) として扱うこととする。

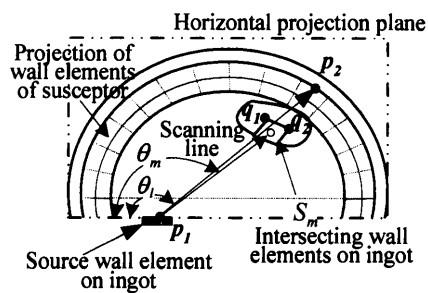


図 7 水平投影面での中間要素の走査

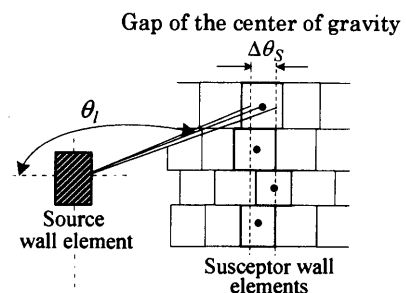


図 8 G_{ml} グループ

以上を踏まえて、以下のいずれかを満たすような G_{0m} については、角度 θ_m の中間要素によって遮へいされている可能性があるものと判断し、続いて③の垂直断面での走査を実施する。

(条件 a) 放射元である鋳型壁面要素と、目的とするサセプタ円筒部分の壁面要素以外に、 θ_m が $\theta_i \pm 0.5deg$ 以内である壁面要素がある場合。

(条件 b) 4.4.2 項② (図 5) で述べた平面走査法による多角形の可視領域の調査方法の考え方を水平投影面に導入して、放射元である鋳型壁面要素と、目的とするサセプタ円筒の壁面要素の重心間を結ぶ走査線が、他の壁面要素の辺と交わる場合 (計算の詳細は②に記す)。条件 a を満たさない場合 (図 7 に示す角度 θ_i と θ_m が $\pm 0.5deg$ 以内) でも、鋳型壁面要素 S_m の各辺の長さが大きいと、角度 θ_i の走査線を遮へいすることが考えられる。そこで本稿では、 θ_i と θ_m の差が $\pm 0.5deg$ を超える場合には、さらに条件 b の調査を実施することとした。

以上の 2 つの条件を調査して、中間要素によって「遮へいの可能性がある」と判断された場合には、角度の走査線について、図 6(b) に示す垂直断面についての走査を実施して最終的な遮へい判定を行う。

②水平投影面での走査計算の方法

水平投影面で、鋳型壁面要素から角度 θ_i で走査線を放射するときの中間要素の探索を考える。4.4.2 項②で述べた従来の平面走査法によると、水平投影面に現れる放射元となる鋳型壁面要素の重心を視点として、他の全ての壁面要素の端点を偏角についてソートし、その後、偏角の小さい順番に視点と端点を結ぶ走査線を放射して、交差リストを書き換えていく。本稿では簡単化による計算時間の短縮化をねらって、従来の方法に以下の変更を加える。

- ・水平投影面での走査線上に、他の壁面要素の辺 (線分) が 1 つでも存在するか否かだけを判定する。したがって従来の方法のように、走査線と交差する全ての線分について、視点からの距離順にソートする必要はない。
- ・4.4.2 項① (図 4) で述べたように、水平投影面に現れる放射元の鋳型壁面要素と目的とするサセプタ壁面要素については、辺の端点ではなく重心で扱う。しかし、遮りチェックを実施する壁面要素の辺については、以下に記すように線分で扱う。

以下に、水平投影面上での遮りチェックの具体的な計算方法を記す。

図 7 に示すように、鋳型やサセプタの凹凸のように、水平投影面上で中間要素になり得る任意の壁面要素のある辺の端点を q_1 および q_2 として、この辺を線分 $\overline{q_1q_2}$ で表わすこととする。このときの走査線 $\overline{p_1p_2}$ と任意の壁面要素のある辺との交差判定を式(4)で行う。

$$(q_1q_2p_1 \times q_1q_2p_2 < 0 \text{ AND } p_1p_2q_1 \times p_1p_2q_2 < 0)$$

ただし、

$$p_1p_2p_3 = (p_{1x} - p_{3x})(p_{2y} - p_{3y}) + (p_{2x} - p_{3x})(p_{3y} - p_{1y}) \dots\dots(4)$$

交差判定の結果、辺 $\overline{q_1q_2}$ での交差が認められない場合には、順次、この壁面要素の他の辺について同様な交差判定を行う。

このようにして、水平投影面で角度 θ_i の走査線との交差が認められると、この壁面要素が含まれるグループ G_{0m} を、走査線の始点である鋳型壁面要素の番号と、終点であるサセプタ壁面のグループ G_{0i} の番号との組合せで記憶しておく。同じ G_{0m} 内の要素が 1 つでもこのようにして中間要素になる可能性が生じたら、このグループ G_{0m} は中間要素の候補として上記のように登録するので、以後はこのグループに含まれる要素の走査線に関するチェックは行わない。

水平投影面での走査が終了したなら、続いて、図 6(b) に示すように、上記で記憶しておいた走査線の始点である鋳型壁面と終点であるサセプタ壁面のグループとの重心間を結ぶ水平投影面での走査線について垂直断面をとり、以下のような垂直断面での走査を実施する。

③垂直断面での走査計算の方法

図 6(b) に示すような、水平投影面で角度 θ_i である走査線の垂直断面を考える。グループ G_{0i} は水平投影面上で角度 θ_i を持つサセプタ壁面要素群であり、これを遮る中間要素の候補群はグループ G_{0m} として記憶されている。グループ G_{0i} とグループ G_{0m} を構成するすべての壁面要素 (= M 個) と、放射元である鋳型壁面要素との重心間を結ぶ線分との距離を r_i ($i=1, 2, \dots, M$) で表わす。いま、放射元である鋳型壁面要素 (視点) から、目的とするサセプタ壁面要素を見たときの距離を r_i とすると、その視野を遮へいする可能性のある壁面要素は r_i よりも短い距離を持つ壁面要素だけである。そこで、 r_i よりも視点との距離が短い壁面要素に限って、4.4.1 項の原始的な交差判定を実施することとする。

具体的な計算方法を述べる。まず、図 6(b) 右に示す、視点と他の壁面要素との距離 r_i (図に示しているのは、 $i=1, 2, \dots, 8$) について小さい順番にソートする (この場合は、 $r_2, r_4, r_3, r_6, r_1, r_5, \dots$)。ソートした順番 ($r_2, r_4, r_3, r_6, r_1, r_5, \dots$) に、4.4.1 項の原始的な交差判定を行う。この際に、当該の r_i よりも短い距離にある全ての壁面要素を中間要素として設定し、遮りのチェックを行う。例えば、視点と r_2 の間には他の要素がないので可視と判定する。次に、視点と r_4 の間では、 r_2 によって遮へいされる可能性があることから、 r_2 を中間要素として原始的な交差判定で遮へいのチェックをする。さらに、視点と r_3 の間では、 r_2 と r_4 によって遮へいされる可能性があることから、 r_2 と r_4 を中間要素として原始的な交差判定での遮へいチェックを行う。この際に、サセプタ円筒部分に属する壁面要素 (r_1, r_3, r_5, r_7, r_8) については、視点と目的とするサセプタ壁面要素との視線を遮ることはないことから、中間要素とはしない。以下同様にして遮へいチェックを行う。

以上で述べた方法によると、4.4.1 項による方法に比

べて、遮へいチェックに要する計算回数は遥かに少なくなることから、計算時間の短縮化が可能となる。6章で述べる解析事例（壁面要素の総数 700 個）での速度比はおよそ 1/30 であり、壁面要素の総数を 5000 個に増やすと、数百倍の計算時間の短縮化となる。

5. 鋳型壁面要素への流入出熱量の計算

5.1 直接交換面積の計算

4.1 節及び 4.2 節の方法で求めたふく射形態係数を直接交換面積に変換する。いま、壁面要素 i 及び j の間の形態係数を $F_{i \rightarrow j}$ で表し、要素 i の面積を A_{si} で表す。このときの i と j との間の直接交換面積 $D_{i \rightarrow j}$ を次式で計算する。

$$D_{i \rightarrow j} = A_{sj} \cdot F_{i \rightarrow j} \dots\dots\dots(5)$$

5.2 射度解析の簡易化と全交換面積の計算

直接交換面積から射度の概念を利用して、壁面での乱反射を考慮した全交換面積を求める。壁面要素（灰色）を n 個として通し番号 1~ n を与える。 ϵ を放射率、 ρ を反射率そして E_b を黒体での放射エネルギー量とする。このとき、壁要素 j における射度 W_j は、次式となる。

$$\sum_{i=1}^n \left(D_{i \rightarrow j} - \delta_{ij} \frac{A_{si}}{\rho_j} \right) W_j = - \frac{A_{sj} \cdot \epsilon_j \cdot E_{b,sj}}{\rho_j} \dots\dots\dots(6)$$

上式を各々の壁要素に適用して、式(8)に示す行列式で表示する。

$$\begin{bmatrix} D_{1 \rightarrow 1} - \frac{A_{s1}}{\rho_1} & D_{2 \rightarrow 1} & \dots & D_{n \rightarrow 1} \\ D_{1 \rightarrow 2} & D_{2 \rightarrow 2} - \frac{A_{s2}}{\rho_2} & \dots & D_{n \rightarrow 2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{1 \rightarrow n} & D_{2 \rightarrow n} & \dots & D_{n \rightarrow n} - \frac{A_{sn}}{\rho_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - \frac{A_{s1} \cdot \epsilon_1 \cdot E_{b,s1}}{\rho_1} \\ - \frac{A_{s2} \cdot \epsilon_2 \cdot E_{b,s2}}{\rho_2} \\ \vdots \\ - \frac{A_{sn} \cdot \epsilon_n \cdot E_{b,sn}}{\rho_n} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(7)$$

いま、壁要素 i が単独に放射する場合を考えて他の要素は絶対零度、即ち $E_{b,sj} = 0 (j = 1 \sim n, j \neq i)$ とすることで、目的の要素で吸収されるふく射エネルギーを調べることができる。上式の両辺を $E_{b,sj}$ で除した n 元の連立方程式の解を無次元射度 W_j とする。

ある壁面要素から放射されたふく射エネルギーは、直接あるいは他の壁面要素を経由して目的とする壁面要素に到達するが、このうち他の壁面を経由して目的とする壁面要素に到達するエネルギー量は、各々の壁面での放射率に比例して減衰する。そこで、壁面の放射率が高いときには多重反射による影響は小さくなることが予想される

ため、2 回以上の反射光を省略する。このように考えると式(7)の大きな行列式を直接解くことは行わずに、式(8)から $_{si}W_i$ で表される n 個の $_{si}W_j$ を式(9)に代入して、 $_{si}W_i$ について解くことで $_{si}W_i$ は求まり、この値を用いて式(8)を再度計算することで $_{si}W_j$ を得るという簡易化が可能となる。

$$\begin{aligned} (i \neq j \text{ のとき}) & A_{j \rightarrow si} W_j - (1 - \epsilon_j) \cdot D_{i \rightarrow j \rightarrow si} W_i = 0 \dots\dots\dots(8) \\ (i = j \text{ のとき}) & - (1 - \epsilon_i) \cdot D_{1 \rightarrow i \rightarrow si} W_1 - (1 - \epsilon_i) \cdot D_{2 \rightarrow i \rightarrow si} W_2 - \dots \\ & + A_{si} \cdot W_i - \dots - (1 - \epsilon_i) \cdot D_{n \rightarrow i \rightarrow si} W_n = A_i \epsilon_i \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

以上で決定した射度 $_{si}W_j$ を用いて、ふく射交換を表す全交換面積 $C_{i \rightarrow j}$ を次式で求める。

$$C_{i \rightarrow j} = \frac{A_{sj} \cdot \epsilon_j}{\rho_j} (i W_j - \delta_{ij} \cdot \epsilon_j) \dots\dots\dots(10)$$

5.3 エネルギー式

壁面要素 i から放射されるふく射エネルギーは、 $A_{si} \cdot \epsilon_i \cdot E_{b,si}$ で表され、全交換面積を導入したときのエネルギー式は以下ようになる。

$$\epsilon_i \cdot A_{si} \cdot E_{b,si} = \sum_{sj=1}^n C_{sj \rightarrow si} \cdot E_{b,sj} - q_{si} \cdot A_{si} \dots\dots\dots(11)$$

上式の $E_{b,si}$ 及び $E_{b,sj}$ に壁面要素の温度を与えると、鋳型の壁面熱流束 q_{si} について求めることができる。

6. 解析事例

6.1 解析モデル

図 9 に解析モデルを示す。鋳型は壁面要素数 40 個の直方体形状のものを 2 つとし、サセプタの壁面要素数は 620 個である。ここでは簡単のために鋳型の面要素をグループにまとめて、図 9 中に示すグループ番号で整理することとする。サセプタ壁面の表面温度は 1000 K で、鋳型壁面の温度は 600 K とした。実際の系での壁面放射率はほぼ黒体に近いが、ここではいくつかの値で計算する。使用したパーソナルコンピュータ及びソフトウェアは、DOS/V 機で OS は Windows 2000, CPU は Pentium III 800 MHz で、RAM は 384 MB, コンパイラは Microsoft 社の Visual C++ ver 6.0 である。

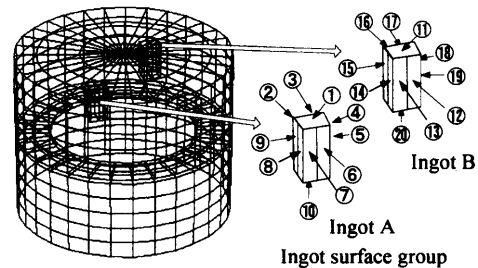


図 9 解析モデル

6.2 ふく射形態係数の解析精度と計算時間

図10は、4.1節での近似式による形態係数の計算方法と4.2節での面積分による方法とのしきい値 U をパラメータとしたときの形態係数の解析結果を、厳密解と見なせるモンテカルロ法による解と比較して求めた誤差を示す。しきい値 U の値が0.04では $10^{-2} \sim 10^{-1}$ での形態係数の誤差は大きくなるが、 U の値が0.01以下の誤差の結果については、大きな差は見られない。従って、 U の値は0.01~0.04で十分であると考えられる。

6.3 鋳型への流入出熱量の解析結果

図11は、サセプタ壁面要素から鋳型の上面と底面に流入する熱量を、モンテカルロ法による結果と比較して求めた誤差についてまとめたものである。いずれの壁面要素も黒体とした。解析モデル図9での、最も壁面要素間の距離の近い鋳型上面(図9中の①及び④)に属する壁面要素のグループでの熱量誤差は最大値をとることとなるが、その値はわずかに1.5%である。これより、4.1及び4.2節で述べた形態係数の簡易計算法が有効であることが示された。

図12は壁面放射率をパラメータとしたときの、鋳型に流入する熱量の誤差についてまとめたものである。壁面放射率が小さいと、射度計算の簡易化での多重反射の影響が大きくなることから精度は悪くなる。しかし、放射率が0.7以上の黒体に近い材料での解析であれば、3パーセント未満の誤差での解析が可能である。

図13は、開発したアルゴリズムで解析を行った際の、

計算に要した時間をまとめたもので、しきい値 U をパラメータとしている。面積分によるふく射形態係数の計算量を少なくするように、しきい値 U を大きくすると計算時間は短くなる。図中の黒丸は、ふく射形態係数の解析とそれを用いた伝熱計算のトータルの計算時間で、白丸はふく射形態係数のみの計算時間を表す。また、競合する米国製品の解析時間を基準とするために、この解析時間を1.0として図中に荒い破線(Targetと記す)で示す。Targetは、米国製品により同じ解析モデルについて解析したときの、ふく射形態係数と伝熱量のトータルでの計算時間である。競合する米国製品の解析アルゴリズムの詳細は開示されていないが、ふく射形態係数の解析結果と伝熱計算の評価結果から、壁面間の距離が遠く、壁面要素の面積が小さいものについては、ふく射形態係数、伝熱、遮蔽判断の各計算を大幅に簡略化していることがわかっている。したがって、解析モデルを細かく分割してふく射伝熱計算を行う場合には、解析誤差は大きくなる。一方、本稿による解析アルゴリズムでは、①ふく射形態係数の計算を近似式と簡易的な面積分を導入して行う、②放射要素から見える他の壁面要素の探索に平面走査法を3次元に拡張した手法を導入する、③射度解析の簡易化の考え方を導入して、伝熱計算に要する行列計算を簡略化する、といった3つの計算方法を導入することで、解析精度を3%以内にした。すでに一方向精密鋳造時の湯流れ及び凝固シミュレーションプログラムに、本稿によるふく射伝熱プログラムを搭載して、上で述べた解析性能を確認している⁽⁶⁾。

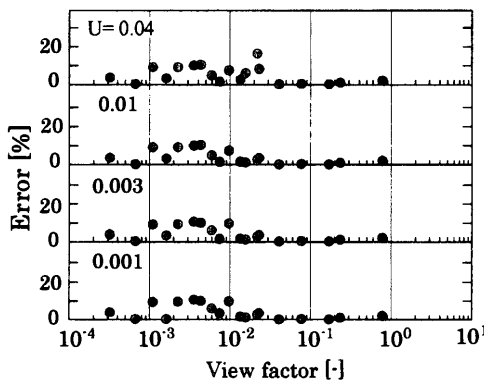


図10 形態係数の計算誤差

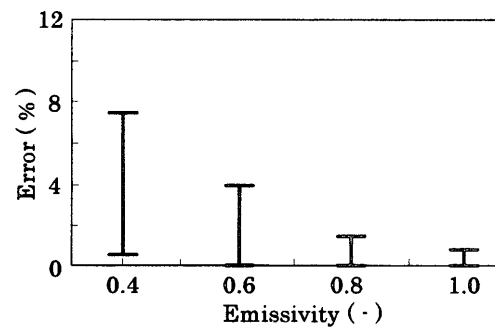


図12 放射率による熱量計算の誤差

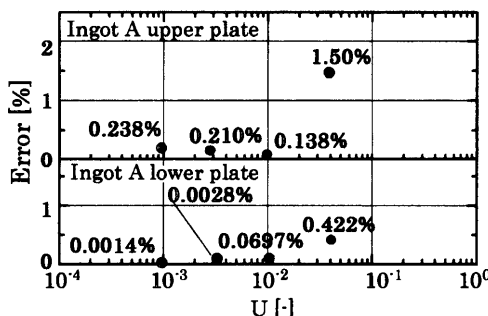


図11 熱量計算の誤差

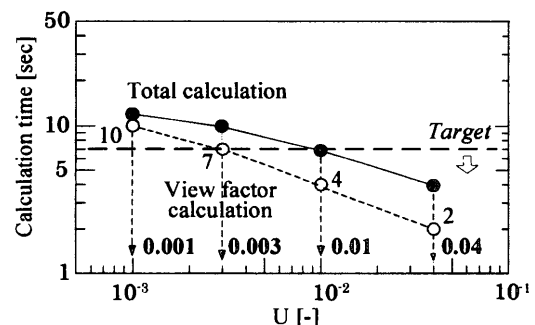


図13 解析時間

7. 結 言

ガスタービン翼精密鋳造時の湯流れ及び凝固過程のシミュレーションプログラムを導入するふく射伝熱解析アルゴリズムの開発を行い、高速で高精度な演算結果を達成するプログラムを実現した。

開発したアルゴリズムは、①ふく射形態係数の計算を近似式と簡易的な面積分を導入して行う、②放射元要素から見える他の壁面要素の探索に平面走査法を3次元に拡張した手法を導入する、③射度解析の簡易化の考え方を導入して、伝熱計算に要する行列計算を簡略化する、といった3つの計算方法を特徴としている。

また、このアルゴリズムを、精密鋳造炉を模擬した壁面要素数700個の簡単な解析系に適用すると、熱量の解析精度は3%以内で、計算時間はおよそ4秒であり、上記3手法導入前のおよそ300秒に比べ、大幅な計算時間削減効果を得た。また、競合する米国製品よりも高速であることを確認した。

本研究は、工業技術院新規産業創出型産業科学技術研究開発制度「革新的鋳造シミュレーション技術の研究開発」の一環として行われた。研究の一部は本制度の下にNEDOの委託を受けた。感謝の意を表する次第である。

文 献

- (1) 革新的鋳造シミュレーション技術の研究開発, 平成12年度新規産業創出型産業科学技術研究開発事業成果報告書, (2001), p.1, 財団法人素形材センター.
- (2) 小原伸哉, 工藤一彦, 第13回計算力学講演会講演論文集, (2000), p.102.
- (3) 浅野哲夫, 計算幾何学, (1995), p.208, 74, 44, 65, 朝倉書店.
- (4) Hottel, H. C. and Choen, E. S., A. I. Ch. E. J., 4-1, (1958), p. 3.
- (5) J. P. ホールマン著, 平田賢監訳, 伝熱工学(下), (1984), p.291, 295-298, プレイン図書.
- (6) 小笠原祐治, 三次元CG入門, (1999), p.72, 森北出版.
- (7) 青木由直, コンピュータグラフィックス講義, (1997), p.208, コロナ社.
- (8) Zhu, J. D., Ohnaka, I., Kudo, K., Obara, S., Kimatsuka, A., Wang, T. M., Kinoshita, S. and Murakami, T., Solidification Simulation with Consideration of Thermal Radiation by using a New Regular-Irregular-Mixed Mesh System, Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes X, Engineering Conferences International, No. 071, (2003), USA.



アイスブレーキング(4)

毛利 邦彦*1

MOURI Kunihiko

今回はゴルフ英語について、紹介します。このアイスブレーキングは大学での講義や、就職説明会で使うのですが、困ったことは学生はゴルフをしないので、余り「良い受け」は期待できません。

1990年頃私は米国の深南部地方の南ミシシッピー大学に1年間ほど米国のビジネスとマネージメントについて留学しました。何もない田舎町で、午後3時の授業終了後は手持ち無沙汰で困っていた所、大学の付属のゴルフコースがあると聞き、100ドルでコースの会員となりました。会員になるとプレイ費は1.5ドルと格安です。雨の日以外は毎日の様にゴルフ場に通いましたが、会社にはエクササイズに行っていると報告していました。

さて、ゴルフのプレイには日本の様に4人で予約をするのではなく、当日チェックインをした順番(walk-in方式)でプレイするので、当然現地の人と一緒にプレイすることになります。

そこで、一緒にプレイをしながら、日本でよく使われるゴルフ用語が通じるか、また違うのであれば英語(米語)では何と言うのかを「聞きまくり」しました。

最初に紹介するのは「ダブル」です。英語の辞書には「ダブル」はありませんが、「Duffer」で下手のゴルファーとありますが、定かではありません。ダブルは英語では「fat shot」と言い、土を厚く取ったショットそのままを表現します。「トップ」は「thin shot」となります。

それではボールを池に入れるのを「池ポチャ」と言い、林に入れるのは「キンコンカン」といいますが、英語では「water trouble」「tree trouble」と言います。このように英語は見たままの現象を素直に表しますが、日本語は多分に心理的な要素を加えた擬音的な表現が多々あります。

さて、ホールに入る^{はい}(入れ)は英語では「in the hole」と言います。米国ツアーでのTV放送で良くギャラリイが叫んでいるので聞いた方も多いたと思いますが、それではホールをかすめて入らなかった時、日本では「おいしい」と言いますが、英語ではなんと言うのでしょうか。これは学校教育で教えてもらっていて、良く知っている単語ですが、なかなか出てきません。「almost」と言います。「close」ではありません。良くこの言葉は使いますので覚えていた方が良いでしょう。例えばボールが自分の近くに

飛んできた時に体には当たらないが近くを取りすぎたとき「誰かが当たりましたか?」と聞くと「almost」と答え、当りはしないが、かすめた感じが良く出ています。

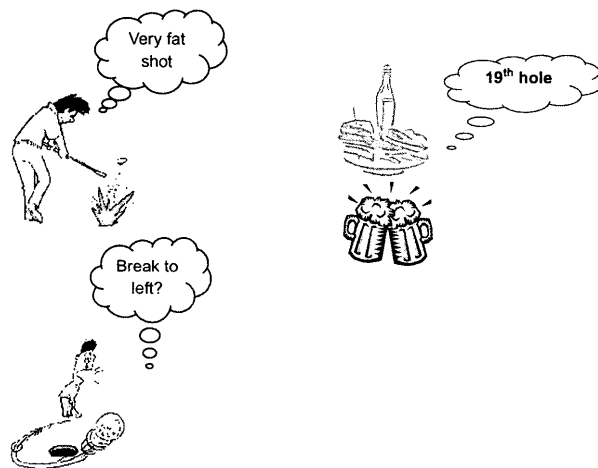
日本語と英語での文化の違いを感じたのはパットの表現です。グリーン上でスライズライン(右曲がり)、フックライン(左曲がり)を私たちは良く使いますが、英語は「break to the right」「break to the left」と言います。それではグリーンが速いかグリーンが遅いと良く使いますがこれは何と言うのでしょうか。私はこの事を一緒にプレイした現地の人に聞きましたが、「グリーンが速い」らしき言葉はなく、「あなたが強く打ったから」つまり「too much」がその回答でした。確かにスタート前にグリーンの状態は確認出来る筈ですので、後は自己管理・自己責任でパットをすべきであり、「グリーン^の所為」にしてはいけなそう思いました。

この文化の違いについてを大学での集中講義や講演会でアイスブレーキングとして、時々使用しますが、中年では好評でしたが、学生には余り受けませんでした。

このようにゴルフの用語を一つ一つ取り上げてみると、そこには何か文化の違いが出ていて楽しくなってきました。

蛇足ながら、日本人が間違えているゴルフ英語聞き慣れないゴルフ英語の例について、英語と日本語の意味を併記しておきますので、外国でのプレイ、または外国人とのプレイをする時にお使い下さい。

「19th hole : レストラン」「chip in : ノーズロ」
「pop up : てんぷら」「hit the green : ナイスオン」
「tee box : ティーランド」「Good ball (Good shot) : ナイスショット」
「frange : グリーンのカラー」



原稿受付 2003年10月31日

*1 (株)八戸インテリジェントプラザ 科学技術コーディネーター
〒039-2245 青森県八戸市北インター工業団地1-4-43

カワサキ L20A ガスタービン

寺内 晃司*¹

TERAUCHI Koji

キーワード：ガスタービン，効率，NO_x，信頼性，保守点検，ライフサイクルコスト
Gas Turbine, Efficiency, NO_x, Reliability, Maintenance, Life Cycle Cost

1. はじめに

近年，地球環境保全やエネルギーの有効利用の観点からエネルギーの分散配置が進む中で，中小型のガスタービン発電装置と排熱回収ボイラーを組合せたコージェネレーション（熱電併給）システムや蒸気タービンをボトムング・サイクルとした複合サイクル発電プラントが注目を集めており，当社は1983年以来この用途に合わせてPUCシリーズ（500 kW～7000 kW級）を販売してきた。

このたび新開発した20 MW級L20Aガスタービンは従来製品よりも大型の高効率コージェネレーションシステムを提供することができ，幅広い出力レンジでこの分野の需要増大に応えることができる。（図1）

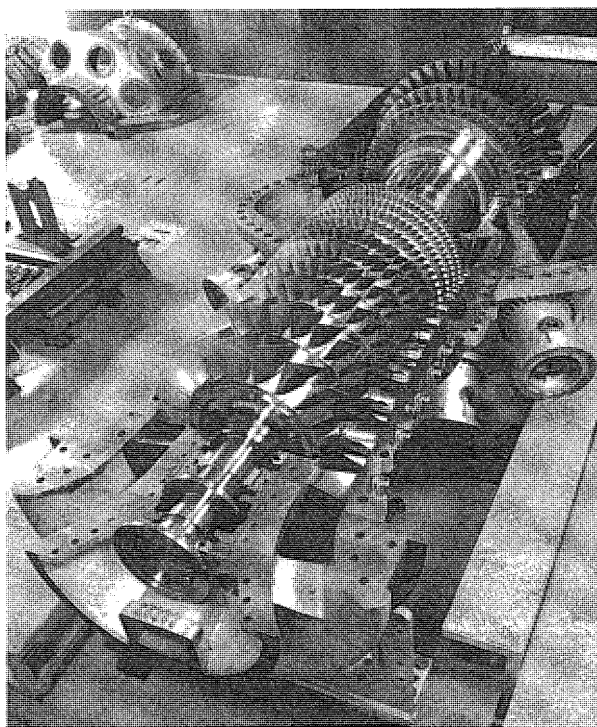


図1 L20A ガスタービン

さらにこのL20Aガスタービンは蒸気タービンと組み合わせる事により高効率の複合サイクル発電プラントを提供することが可能である。

2. 特徴

L20Aガスタービンは当社が長年培ってきた産業用の中小型ガスタービンの開発技術と航空用ジェットエンジンに関する高度な要素技術を結集して開発したものであり，主な特徴としては以下の6項目である。

2.1 高効率

ガスタービン単体の熱効率は産業用20 MW級ガスタービンとしては世界最高水準の35%を達成。さらにコージェネレーションシステムでの総合効率は80%以上，複合サイクル発電プラントでは47%を超える発電効率を実現する。

2.2 低NO_x

希薄予混合燃焼方式を採用したドライ低エミッション燃焼器を装備しており，NO_x排出値が23 ppm以下（O₂=15%）と極めて環境に優しい排ガスが得られる。

2.3 高い信頼性

既に多数の稼働実績がある当社7 MW級ガスタービンM7Aと相似のシンプルで頑丈な構造を採用することにより信頼性を高め，また設計オーバーホール寿命が4万時間と耐久性にも優れている。

2.4 保守点検が容易

車室は水平2分割構造のため上半開放が可能で，さらに圧縮機およびタービン部に設けられたボアスコープ点検孔から内部点検が容易に行える。

2.5 低ライフサイクルコスト

圧縮機・タービンの段数を減らす等の低コスト設計による低インシャルコストと，高効率を達成することによる低ランニングコストを実現。更に，長寿命化と点検の容易な構造を採用することによりメンテナンスコストも極力押さえている。

2.6 高度な制御・監視システム

ファジィ起動制御やNO_x低減制御システム，通信ネットワークを用いた遠隔監視・異常診断システムなど高度な運転支援システムを採用している。

原稿受付 2003年9月30日

*1 川崎重工業株式会社 ガスタービン・機械カンパニー
ガスタービンビジネスセンター 産業ガスタービン技術部
〒673-8666 明石市川崎町1-1

3. 要目・構造

3.1 性能

L20A ガスタービンの主要諸元を表1に示す。ISO条件における減速機軸端出力は18MW、熱効率は35%である。排気ガス温度は545℃と高く、排熱回収にも適した条件が得られるように設計されている。

3.2 構造

ガスタービンの断面を図2に示す。L20Aは発電用を目的とした重構造型の単純開放一軸式ガスタービンである。

軸流圧縮機は圧力比18を段数11段で達成し、部品点数を低減した。これは当社が開発した3次元MCA型ワイドコード翼を用いた遷音速圧縮機の採用により高負荷で高効率の空力性能が得られるようになったためである。

表1 L20A ガスタービン主要諸元

性能

出力	18,000kW
熱効率	35%
回転数	9,420rpm
空気流量	57kg/s
圧力比	18
タービン入口温度	1,250℃
排気温度	545℃
エミッション	NOx<23ppm (O2=15%換算)

* ISO条件：標準大気 吸気温度15℃

* 減速機出力端 燃料：天然ガス

構造

形式	単純開放一軸式
寸法	L6.6m×H2.7m×W2.2m
重量	14 Ton
圧縮機	軸流11段
燃焼器	8缶型
タービン	軸流3段

タービンは軸流3段構成で1,2段は冷却翼を採用している。材料はニッケル系の超耐熱合金を使用し、高性能冷却構造を採用するとともにTBC遮熱コーティングを採用して高温ガスにも十分耐えられる構造となっている。

燃焼器は高温化に有利な逆流の缶型燃焼器を環状に8個配置している。

ケーシングは図1に示すように完全水平2分割構造となっており、フィールドでの開放点検が可能である。ガスタービンは吸気側と排気側の2箇所支持されている。前者は固定支持、後者はトラニオン支持構造とすることにより、ケーシングの熱伸びを吸収している。

4. おわりに

L20A ガスタービンは当社の試験設備において各種改良・耐久試験を順調にこなし、開発を完了した後、商用1号機を使用したコージェネレーション発電設備を当社明石工場内に建設し、2001年10月より運用を開始し、順調に稼動中である。(図3)

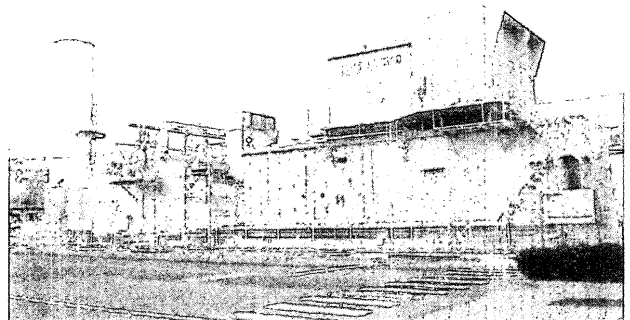


図3 明石工場L20A ガスタービン発電設備

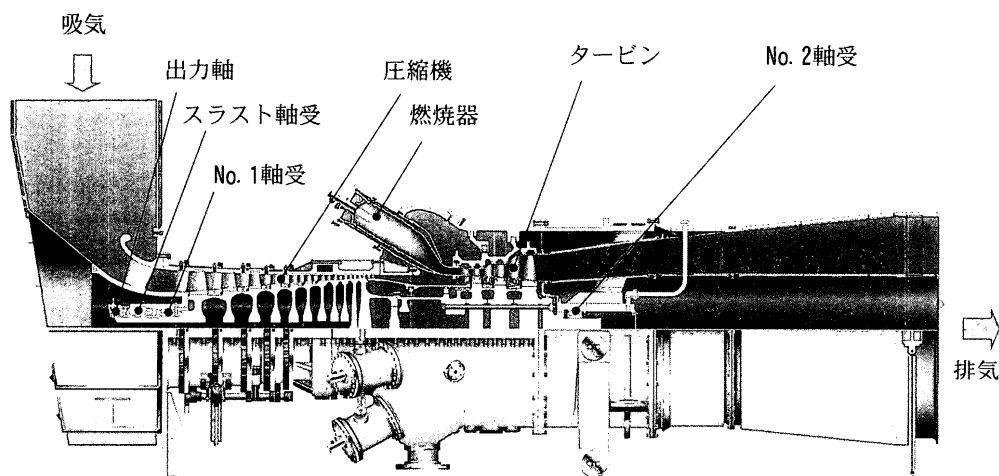


図2 L20A 断面

超小型ジェットエンジン

西 良正*1

NISHI Yoshimasa

中村 昌雄*2

NAKAMURA Masao

キーワード：Micro Jet Engine

1. まえがき

1930年英ホイットル卿によるジェットエンジンの成功後、ジェットエンジンは大発展をとげ、その小容積、軽量、大出力、信頼性により、現在では航空機用の外、艦船用、発電機用にも使用されている。

超小型ジェットエンジンは、仏の Michel SERRIER 氏が開発に成功(1988)し、仏の JPX 社がターボレック“T-240”として量産化し、すぐに日本に紹介された。

仏の特許申請書には、軸流タービンの図があったが、量産化されたものは輻流タービンであり、使用燃料は液体プロパンを気化したものであった。

日本に到来後、当社において JPX 社の諒解の下に国産化計画がなされ(1992)、JPX 社のものとの互換性を考えてモデル J 450 が作られ、その後種々の改善がなされてモデル J 850 となった。モデル J 450 と J 850 の性能比較を表 1 に示す。

表 1 J 450・J 850 性能比較表

型 式	J 450	J 850
最大静止推力 kgf	5.5	8.5
圧力比	2.3	2.7
最高回転速度 min ⁻¹	125,000	137,000
最大吸気量 kg/sec	0.10	0.15
最大排気温度 °C	700	750
重量 kg	1.8	1.4
推重比	3.1	6.1

両モデル共、圧縮機は遠心一段、燃焼器は環状、タービンは輻流一段である。

2. 主な改善点

2.1 液体燃料噴霧装置

当初のものは燃料ポンプ等を必要としないプロパンガスを燃料としていたが、我が国では高圧ガス取締法の規制により自由に使えないので、石油系の液体燃料の噴霧装置を考案し、予熱せずに始動時から直接燃焼器に噴霧、燃焼させる開発をおこなった。

(日本特許 No.2598875, 米国特許 No.5, 469, 706)

原稿受付 2003年10月2日

*1 (株)ソフィアプレジジョン 取締役技術部長

〒177-0051 東京都練馬区関町北 3-3-33

*2 早稲田大学理工学部機械工学科講師

2.2 燃料供給装置

プロパン燃料の場合はその蒸気圧が高いので、その圧をレギュレータで規制し、ニードルバルブでガス流量を加減したものを、液体燃料においては小型、軽量のギヤポンプを開発し、スロットルレバーによる直流モータの電圧制御により流量、圧力がコントロールされる様に改善された。

2.3 潤滑油ポンプ

当初はインペラーにより加圧されたエアを抽気して潤滑油タンクに送り、オイルを圧送し、オイルミストとして前部ベアリング通過後、後部ベアリングへと給油され、最後には燃やされていたが、専用の小型潤滑油ポンプを開発して前後のベアリングへ個々に給油され、又循環される様に改善された。

2.4 ローター部品

圧縮機インペラー及びディフューザー、タービン部のディフューザー、タービンノズル翼、タービン翼の設計改善により、吸気量の増加、圧縮比の向上、タービン効率の向上、推力の向上、重量軽減がなされた。

2.5 圧縮空気のシーリング

当初カーボンシールであったものを、ラビリンスシール、ピストンリングへの改善により、摩擦抵抗、パワーロスが減少し、スロットルレバーに対するレスポンスが良くなり、又構成部品の簡易化、軽量化がなされた。

2.6 電子コントロール

エンジンの挙動は、ローターの毎分回転数と、タービン出口の排気ガス温度をモニターする事により把握されるが、回転数は当初磁化された回転部品からの磁力線により検出されていた。しかし磁力の劣化や電子コントロール装置へのノイズ等の問題発生のため光センサーの使用により上記のトラブルがなくなった。

又当初運転後のタービン部の高熱による後部ベアリングの劣化がひどかったが、電子コントロール装置のプログラムよりエンジン運転後の温度を検出し、適正温度に下がるまで冷却空気を送る事(アフタークーリング)を可能とした。

2.7 ベアリング

当初 SUJ 材のアンギュラー玉軸受を、ハイブリッドアンギュラー玉軸受(高速度鋼の内外レースとセラミックボール)に変更することにより、耐熱性が向上し、イナーシャが小さくなって、スロットルレバーに対するレスポンスが良くなり、加減速の時間が短くなった。

2.8 燃 焼

燃焼室の空気導入穴数、穴位置配置の変更や燃料噴霧穴に対するそれらの位置の変更をし、更に液体燃料燃焼促進安定装置を開発（日本特許 3257610）して、回転数全域での安定した燃焼が得られる様にした。

2.9 部品の材質、形状

部品の贅肉の徹底的な削減、構成部品の削減や構造の簡素化、部品材質の変更等により軽量化がなされた。

以上の様な改善の結果、当初のJ450の大きさを殆んど変えずに表1に見られるような性能のJ850へと進歩した。

3. 超小型ジェットエンジンの利用

動力源として親しまれて来た蒸気機関、レシプロ機関にジェットエンジンが参入し、応用が広がっているが、超小型エンジンの特色として小型、軽量、大出力、振動のないこと、取扱の容易さ、安価なことなどから、様々な面に使われる様になって来た。

3.1 有翼ラジコン模型飛行機用

固定翼機の場合、垂直上昇は勿論可能であり水平飛行速度は時速 350 km 位も出ているものがあるが、そのコントロールには高度の技能と熟練、沉着、冷静さが求められ、外国では 1995 年以来 IJMC（本部：ドイツ）の下に JET WORLD MASTERS が開かれ、日本からも参加している様であるが、国内では飛行場が少なく固定翼のラジコンジェット機はあまり飛ばされていない。

3.2 大容量高温ガス発生機用

ビニールハウス暖房用、災害時の緊急汚物処理用等への利用が考えられるが未だ当社では実施していない。

3.3 学術研究、教材用試験装置

ジェットエンジンの発生する高周波音を消すことは容易のため、ターボジェットエンジンとして推力其の他の計測設備を備えた試験装置（図1）や、噴流ガスでフリータービンを回転させ、動力計又は発電機に連結させてその出力を計測する試験装置（図2）が内外の研究機関や

大学等に有益であり使用されている。

これらの場合、空気圧及び温度、ガス圧及び温度、回転数、推力又は出力、燃料消費量、潤滑油温度、流量その他の項目が自動的に計測記録される様になっている。

3.4 空撮用無人ヘリコプター

小型軽量、大出力、無振動というガスタービンのメリットを生かした空撮用無人ヘリコプターが求められ、当社では現在開発を進めている。

主な仕様としては J850 ガスジェネレーター 2 台、合計出力 20 kW、ペイロード 40 kg であり、現在実地試験中である。（図3）

4. 将来への課題

ジェットエンジンの高性能化には、高圧縮比と、タービン部の高耐熱性が要求されるが、これらのことは超小型ジェットエンジンでも同じである。

実機のジェットエンジン部品では、空冷タービンノズル翼とか、空冷タービン翼が使われたり、超耐熱新素材の研究がなされているが、超小型ジェットエンジンの場合は上記のことが無理と思われるので、部品のセラミックス化が考えられ、それによる性能の向上が望まれ、モバイル用あるいはロボット用の高密度エネルギーソースとしての数十～数百 W クラスガスタービン発電システムが実現される日も近いと思われる。

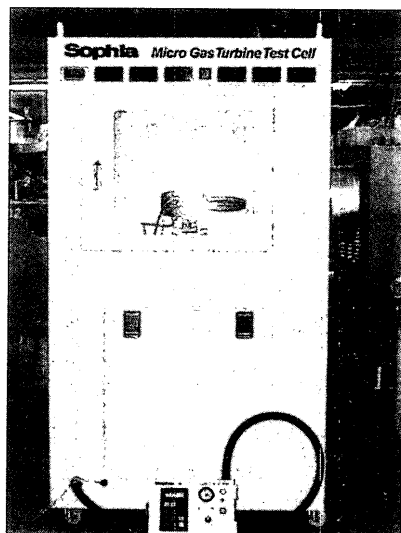


図1 推力試験装置

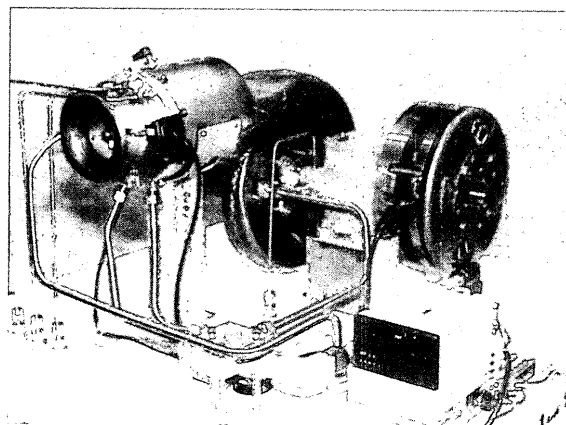


図2 出力試験装置

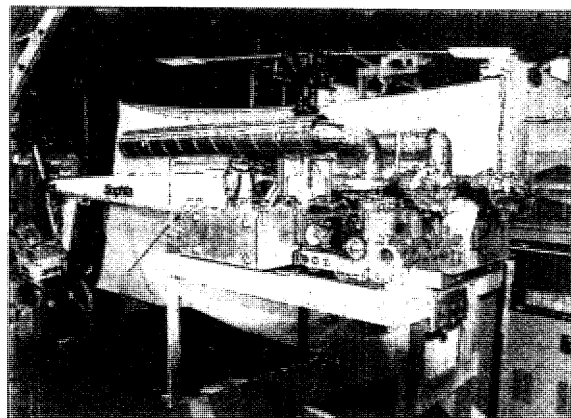


図3 空撮用無人ヘリコプター

2002年ガスタービン及び過給機生産統計

ガスタービン統計作成委員会

ガスタービン統計作成委員会（委員10名）は、関係各社の協力を得て2002年1月から12月の間におけるガスタービン及び過給機を生産状況を調査・集計し、生産統計資料を作成した。資料提供は、陸船用ガスタービンについては13社、航空用ガスタービンは4社、過給機は12社に依頼した。過給機はすべて排気タービン方式のターボチャージャであり、機械駆動によるものではない。

1. 2002年陸船用ガスタービン生産統計概要

(1) 総台数は前年に比べ、小型が61台、中型が59台、大型が14台と全ての区分にて減少し合計で134台の減少となった。前年の646台に対し本年の512台は8割の生産実績。出力でも全ての区分にて減少し、前年の5,078 MWに対し23%減少し、3,893 MWであった。これは、国内外、世界にまたがる経済の低迷等によるものと推測され、早い時期に日本を含めた世界経済の活性化が待ち望まれる。

ア) 小型（735 kW以下）は、台数が前年と比べて18%減少の281台、出力も前年比19%減の75 MWになった。

イ) 中型（736～22,064 kW）は、台数が前年と比べて22%減少の207台、出力も前年比27%減の555 MWになった。

ウ) 大型（22,065 kW以上）は台数が前年と比べて37%減少の24台、出力も前年比23%減の3,264 MWになった。これは、輸出向けの大型案件が減少したためである。

(2) 用途別にみると、台数では61%が非常用発電用、出力では89%がベースロード発電用である。これは前年度と同じ傾向であるが台数で非常用発電用は約5%減少している。

ア) 非常用は前年に比べ台数で112台減少の312台で27%の落ち込みとなっており出力でも同じ傾向を示している。小型、中型で比べると小型で30%減少、中型で22%の減少となっており、景気低迷に伴う設備計画の減少、設備予算圧縮に伴うディーゼルへの傾斜が原因かと考えられる。

イ) ベースロード発電用は、台数でほぼ横這いであったが、本年、ピークロード発電用は、実績無しとなった。

ウ) その他の用途では、ポンプ駆動用途が、台数で前年比30%増加の32台となったことが特徴である。

(3) 燃料の種類別にみると、生産台数の中のシェアでは、液体燃料が、ガス燃料に対し81.4%、出力では、ガス燃料が、液体燃料に対し87.5%を占めていることに変化は無い。

ア) 液体燃料の中では、台数で多いのが重油1種であり232台。全体台数の45.3%を占めている。出力でも重油1種が一番多く216 MWの5.5%を占めている。軽油は台数で前年に比較し、50台も減少したのにも拘わらず、出力では55%増加の201 MWとなっている。

イ) ガス燃料の中では、台数で多いのが都市ガスで53台。全体台数の中で10.4%を占めている。出力では、液化天然ガスが一番多く2,145 MWの55%を占めている。ほとんどの燃料で減少している中で液化天然ガスが、前年と比べ台数で22%。出力で60%の増加となったのが特徴。これは、輸出の大型案件の影響が大きい。

ウ) 燃料別の使用別比率を区分別でみると小型の台数では、多い順に重油1種・灯油・軽油が47・30・11%となり中型では重油1種・軽油・灯油が48・18・15%、大型では液化天然ガス・液化石油ガスが67・20%、全体では重油1種・灯油・軽油が45・23・13%の割合になった。この割合は前年とほぼ同じである。出力で見ると、小型は重油1種・灯油・軽油が64・25・6%となり中型では軽油・重油1種・都市ガスが31・30・21%、大型では液化天然ガス・天然ガス・高炉ガスが65・24・8%、全体では液化天然ガス・天然ガス・高炉ガスが55・20・7%の割合になった。この割合は台数と同じく前年とほぼ同じである。区分別の特徴としては全体区分では、液体燃料の比率が高いものの大型への移行に伴いガス燃料の比率が高くなっている。

(4) 地域別納入で見ると

ア) 国内向けは台数で、前年と比べ114台減少の482台。出力でも202 MW減少の1,018 MWと約20%の減少になった。区分別で見ると小型は台数で61台、出力でも17 MWの減少であった。関東で26台、9 MW。近畿で11台、5 MWの減少が大きく影響している。九州で8台、1 MW。東北で8台、1.5 MWの増加があった。中型は前年と比べ台数で

は54台、出力で202 MWの大幅な減少となった。国内の減少は中型の減少がほとんどを占めている。国内の長期的な景気低迷等が大きく影響している。地域的には、関東が18台、132 MW。近畿で5台、28 MWの減少であるが、関東は台数で56%、出力で47%を示し、前年統計より更に地域別シェアを伸ばしております。関東一極集中への傾向が見られる。大型は前年と比べ、台数で2台から3台へ、出力で394 MWから411 MWへと微増したが、納入地域は関東地区のみとなった。今年も電力自由化の風を受け、来年度以降の国内景気回復に期待したいと念じる次第。

イ) 輸出は総台数の5.9%、全出力の74%を占めているが、前年より台数で20台(40%)の減少、出力でも983 MW(25%)の減少となった。中型では台数5台減少し、出力で0.4 MW増加したものの、大型で15台、984 MW減少があり、ほとんどの原因が大型である。

この輸出の減少は、前年と同じ大幅な減少となっており世界レベルでの景気回復がまたれる。輸出仕向先別では、本年は前年トップに躍り出た北米が、凋落しほぼ実績皆無となった。代わってトップに躍り出たのが中南米で台数は6台増加の14台、出力は602 MW増加の11,781 MWと台数、出力ともトップとなった。前年トップを譲ったアジアも台数3台増加の14台、出力も799 MW増加の978 MWとなったが、その他の大洋州、旧ソ連、中東、アフリカは、実績皆無となった。輸出の特徴は、やはり北米の大幅な減少(台数で16台、出力で1,438 MWの減少)、および中東の減少(台数で5台、出力で575 MW)であり、本年統計の出力減少の主原因となっている。北米と中東に早く平和が訪れることを祈りたい。

(5) 被駆動機械別ではこれまでと同様に、台数、出力とも発電機がほとんどを占め、台数で90.4%、出力で96.6%であった。本年の特徴は、水ポンプが台数で17台増加し出力で35 MW増加したことであり、ガスタービンによるポンプの機械駆動が増えてきている。

表5に示す出力区分では、全ての出力区分で減少していることを示している。台数の多い順では、736~4,412 kW、147~367 kW、368~735 kW、出力の多い順では44,130 kW以上、736~4,412 kW、4,413~10,296 kWとなった。

(6) 発電用ガスタービンの台数と出力を前年と比較すると、事業用では国内(0→7台、113 MW)が復活となったが、輸出(28台/2,174 MW→11台/1,174 MW)は台数及び出力とも大幅に前年とは反対に減少となった。自家用では国内(552台/1,047 MW→433台/886 MW)が台数、出力とも減少した。これも前年と反対になったが、輸出(22台/1,685 MW→19台/1,701 MW)は台数減少。出力は微増となった。総計では台数(602台→463台)とともに出力でも、特に輸出の事業用の大幅な減少による影響を受け、出力合計も大幅減少(4,906 MW→3,762 MW)した。

2. 2002年航空用ガスタービンエンジン生産統計概要

- (1) ターボジェット/ターボファン・エンジンは、前年に比べて合計台数で約23%、合計推力でも約24%減少した。この台数の減少はターゲットドローン用のTJM3の台数は変化無かったものの、合計推力に寄与するF-2支援戦闘機用エンジンであるF100の台数が減少し、T-4中等練習機用エンジンであるF3エンジンの製造が前年度で終了したことによる。
- (2) ターボシャフト/ターボプロップ・エンジンは、前年に比べて合計台数で約8%減少したが、合計出力では約13%増加した。台数の減少は防衛庁の観測ヘリコプタ用エンジンのTS1と補助機関駆動用エンジンの減少によるが、大出力エンジンであるT700やT55の生産台数が増えたので、合計出力は増加した。
- (3) 5ヶ国共同開発エンジンであるV2500ターボファン・エンジンのファン部(日本担当部分)は、231台生産され、1988年の生産開始以来の累計は2105台になった。前年比で見れば65台の減少である。これは9.11テロの影響が2002年の統計に現れてきている。今年からGEとの共同開発エンジンであるCF34シリーズの生産台数も調査に含めることにした。なお、V2500、CF34はエンジン組立ではないため、生産統計には加えていない。

3. 2002年過給機生産統計概要

- (1) 生産されている形式数は、前年度とほぼ同様の186形式であった。
- (2) コンプレッサ翼車外形100 mm以下の過給機の生産台数は、前年比11%減少した。
- (3) コンプレッサ翼車外形100 mm以上の過給機の生産台数は、前年比9%増加した。

II. 統計

1. 最近6年間のガスタービン生産推移

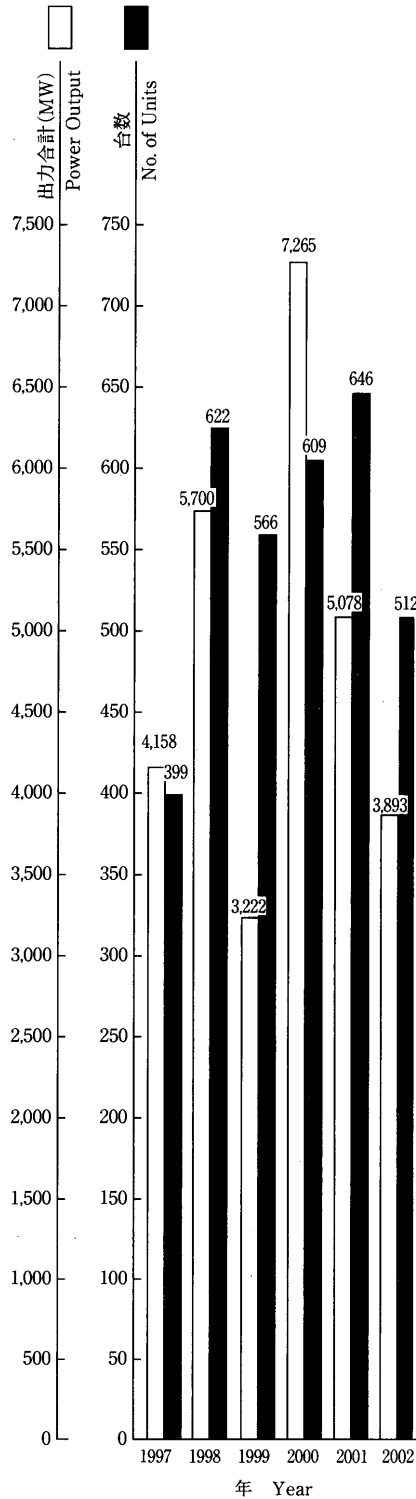


図1 陸船用ガスタービン

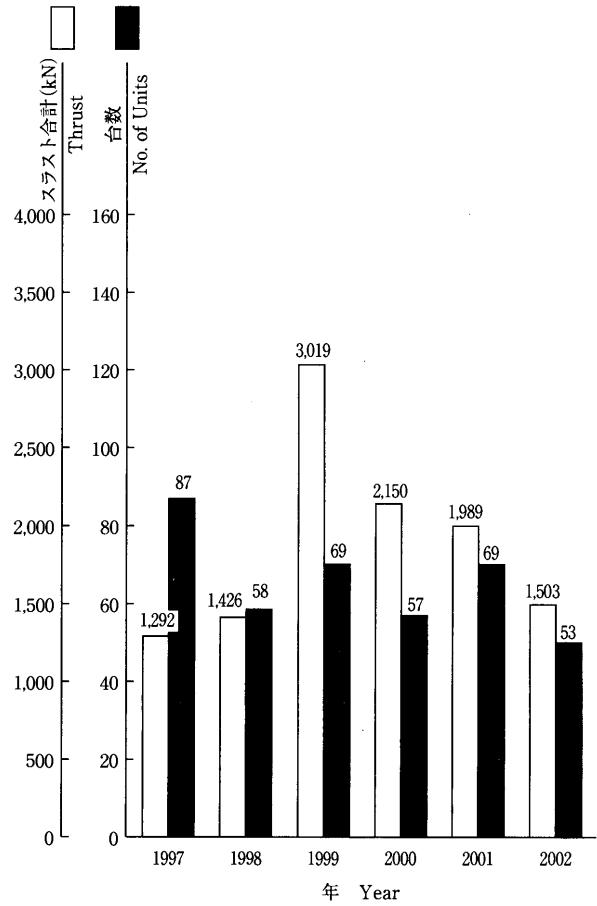


図2 ターボジェット/ターボファン・エンジン

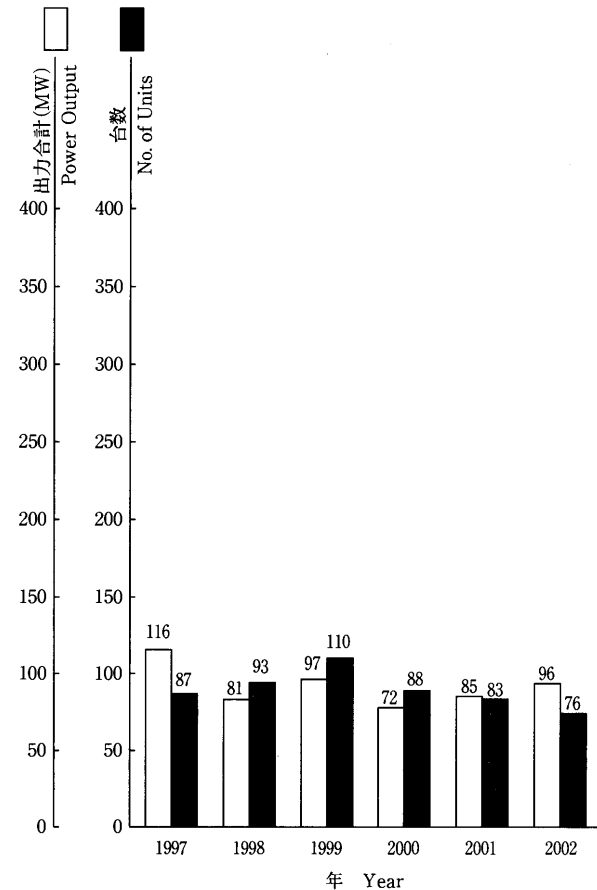


図3 ターボシャフト/ターボプロップ・エンジン

2. 陸船用ガスタービン

表1 2002年用途別生産台数及び出力 (kW)

用途 Application	区分 Code	小型 Small Unit 0~735 kW		中型 Medium Unit 736~22,064 kW		大型 Large Unit 22,065 kW~		全出力 Total	
		台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)
ベースロード発電用 Generator Drive for Base Load	BL	37	4,245	43	185,310	24	3,263,710	104	3,453,265
ピークロード発電用 Generator Drive for Peak Load	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
非常用発電用 Generator Drive for Emergency	EM	163	60,233	149	247,972	0	0	312	308,205
商船用 Merchant Marine	M	0	0	0	0	0	0	0	0
艦隊用 Military Marine	MM	0	0	15	121,520	0	0	15	121,520
その他プロセス用 Miscellaneous Chemical Process	PR	0	0	0	0	0	0	0	0
教育用 Education	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
空調用 Air Conditioning	ACD	2	630	0	0	0	0	2	630
その他 Miscellaneous	MC	79	9,787	0	0	0	0	79	9,787
合計 Total		281	74,895	207	554,802	24	3,263,710	512	3,893,407

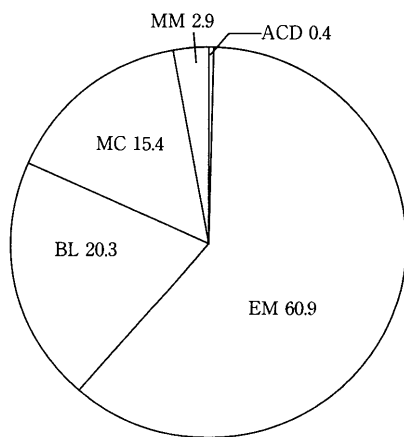


図4 2002年用途別生産台数割合 (%)

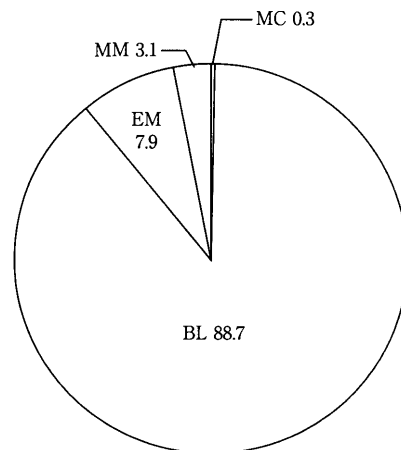


図5 2002年用途別出力割合 (%)

表2 2002年燃料別生産台数及び出力 (kW)

区分		Size	小型 Small Unit 0~735 kW	中型 Medium Unit 736~22,064 kW	大型 Large Unit 22,065 kW~	全出力 Total				
燃料種類 Kind of Fuel	コード Code		台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)		
ガス燃料 Gaseous Fuel	液化天然ガス Liquified Natural Gas	LNG	0	0	6	37,140	16	2,106,800	22	2,143,940
	天然ガス Natural Gas	GNG	0	0	0	0	5	789,400	5	789,400
	石炭(ガス化)ガス Cool gas or gasified coal gas	GCG	0	0	0	0	1	75,300	1	75,300
	液化石油ガス Liquified Petroleum Gas	LPG	8	440	5	8,490	0	0	13	8,930
	都市ガス Town Gas	GTW	25	3,173	28	119,080	0	0	53	122,253
	高炉ガス Blast Furnace Gas	GBF	0	0	0	0	1	268,000	1	268,000
	プロパンガス Propane Gas	GPR	0	0	0	0	0	0	0	0
小計 Sub Total			33	3,613	39	164,710	23	3,239,500	95	3,407,823
液体燃料 Liquid Fuel	灯油 Kerosene	T	85	18,920	31	49,927	0	0	116	68,847
	軽油 Gas Oil	K	31	4,776	37	171,720	1	24,210	69	200,706
	重油1種 Heavy Oil No. 1	H1	132	47,586	100	168,445	0	0	232	216,031
	ナフサ Naphtha	LN	0	0	0	0	0	0	0	0
	小計 Sub Total			248	71,282	168	390,092	1	24,210	417
合計 Total			281	74,895	207	554,802	24	3,263,710	512	3,893,407

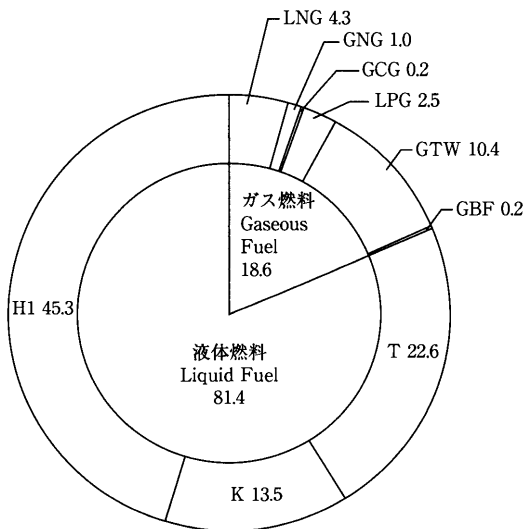


図6 2002年燃料別生産台数割合 (%)

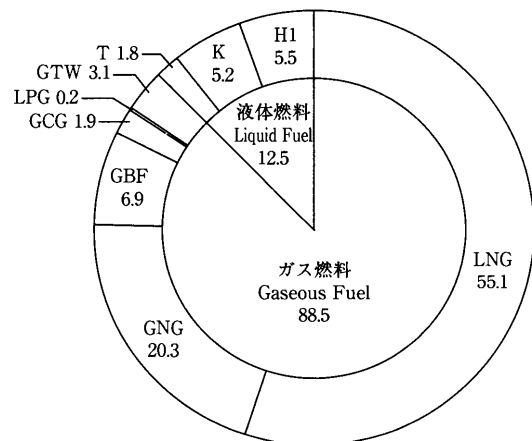


図7 2002年燃料別出力割合 (%)

表3 2002年地域別納入台数及び出力(kW)

地域 Location		区分 Size	小型 Small Unit 0~735 kW		中型 Medium Unit 736~22,064 kW		大型 Large Unit 22,065 kW~		全出力 Total	
			台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)
国内向け Domestic Use	北海道 Hokkaido		3	1,150	3	5,400	0	0	6	6,550
	東北 Tohoku		27	8,271	5	6,200	0	0	32	14,471
	関東 Kantoh		63	23,655	102	193,393	3	411,200	168	628,248
	中部 Chuubu		56	13,701	26	74,366	0	0	82	88,067
	近畿 Kinki		33	10,507	20	58,053	0	0	53	68,560
	中国 Chuugoku		10	2,526	9	38,300	0	0	19	40,826
	四国 Shikoku		8	3,096	1	1,600	0	0	9	4,696
	九州 Kyuushuu		32	10,693	12	26,780	0	0	44	37,473
	沖縄 Okinawa		2	1,200	3	4,400	0	0	5	5,600
	船用主機 Marine Propulsion		0	0	15	121,520	0	0	15	121,520
	船用補機 Marine Auxilliaries		0	0	0	0	0	0	0	0
	未定 Unknown		47	96	2	1,600	0	0	49	1,696
	小計 Sub Total			281	74,895	198	531,612	3	411,200	482
輸出向け For Export	北米 North America		0	0	1	1,500	0	0	1	1,500
	中南米 South and Central America		0	0	0	0	14	1,780,710	14	1,780,710
	アジア Asia		0	0	8	21,690	6	956,800	14	978,490
	大洋州 Oceania		0	0	0	0	0	0	0	0
	欧州 Europe		0	0	0	0	0	0	0	0
	旧ソ連 Former Soviet Union		0	0	0	0	0	0	0	0
	中東 Middle East		0	0	0	0	0	0	0	0
	アフリカ Africa		0	0	0	0	0	0	0	0
未定 Unknown		0	0	0	0	1	115,000	1	115,000	
小計 Sub Total			0	0	9	23,190	21	2,852,510	30	2,875,700
合計 Total			281	74,895	207	554,802	24	3,263,710	512	3,893,407

表4 2002年被駆動機械別生産台数及び出力(kW)

被駆動機械 Driven Machinery	区分 Code	小型 Small Unit 0~735 kW		中型 Medium Unit 736~22,064 kW		大型 Large Unit 22,065 kW~		全出力 Total	
		台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)
発電機 Electric Generator	G	247	64,574	192	433,282	24	3,263,710	463	3,761,566
推進機 Propeller	PRR	0	0	6	85,772	0	0	6	85,772
水ポンプ Water Pump	W	32	9,691	9	35,748	0	0	41	45,439
ガス圧縮機 Gas Compressor	GC	2	630	0	0	0	0	2	630
その他 Miscellaneous use	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
合計 Total		281	74,895	207	554,802	24	3,263,710	512	3,893,407

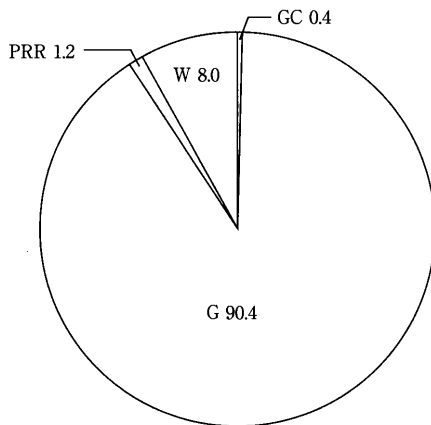


図8 2002年被駆動機械別生産台数割合 (%)

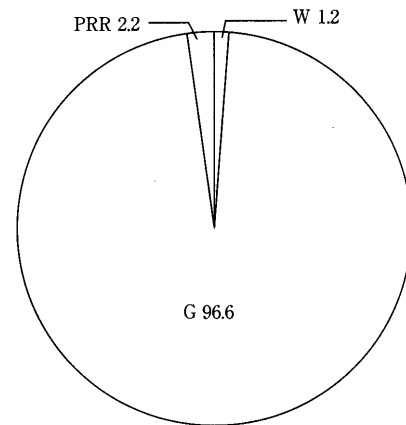


図9 2002年被駆動機械別出力割合 (%)

表5 2002年出力区分別生産台数及び出力(kW)

出力区分 (kW) Unit Output		台数 Units	出力 Output (kW)
小型 Small Units 0~735 kW	0~146	83	2,537
	147~367	106	27,117
	368~735	92	45,241
	小計 Sub Total	281	74,895
中型 Medium Units 736~22,064 kW	736~4,412	177	310,270
	4,413~10,296	23	141,760
	10,297~16,180	4	49,772
	16,181~22,064	3	53,000
小計 Sub Total	207	554,802	
大型 Large Units 22,065 kW~	22,065~44,129	1	24,210
	44,130~	23	3,239,500
	小計 Sub Total	24	3,263,710
合計 Total		512	3,893,407

表6 2002年発電用ガスタービン用途別生産台数及び出力(kW)

区分 Size		小型 Small Unit 0~735 kW	中型 Medium Unit 736~22,064 kW	大型 Large Unit 22,065 kW~	全出力 Total					
用途 Application	コード Code	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)			
国内 事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	6	38,070	1	75,300	7	113,370
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
Domestic/Public Use 小計 Sub Total			0	0	6	38,070	1	75,300	7	113,370
国内 自家用	ベースロード発電用	BL	37	4,245	32	130,650	2	335,900	71	470,795
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	210	60,329	145	241,372	0	0	355	301,701
Domestic/Private Use 小計 Sub Total			247	64,574	177	372,022	2	335,900	426	772,496
国内合計 Domestic Use Total			247	64,574	183	410,092	3	411,200	433	885,866
輸出 事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	11	1,174,210	11	1,174,210
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
For Export/Public Use 小計 Sub Total			0	0	0	0	11	1,174,210	11	1,174,210
輸出 自家用	ベースロード発電用	BL	0	0	5	16,590	10	1,678,300	15	1,694,890
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	4	6,600	0	0	4	6,600
For Export/Private Use 小計 Sub Total			0	0	9	23,190	10	1,678,300	19	1,701,490
輸出合計 For Export Total			0	0	9	23,190	21	2,852,510	30	2,875,700
事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	6	38,070	12	1,249,510	18	1,287,580
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
Public Use 合計 Total			0	0	6	38,070	12	1,249,510	18	1,287,580
自家用	ベースロード発電用	BL	37	4,245	37	147,240	12	2,014,200	86	2,165,685
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	210	60,329	149	247,972	0	0	359	308,301
Private Use 合計 Total			247	64,574	186	395,212	12	2,014,200	445	2,473,986
総計 Grand Total			247	64,574	192	433,282	24	3,263,710	463	3,761,566

Note: Code Explanation BL: for Base Load PL: for Peak Load EM: for Emergency

3. 航空用ガスタービン

表7 2002年ターボジェット/ターボファン・エンジン
生産台数及びスラスト(kN)

生産台数 No. of Units	53*1	スラスト合計*2 Thrust (kN)	1,501
----------------------	------	-------------------------	-------

- *1 V 2500 シリーズ (231 台), CF 34 シリーズ (109 台) は含まない。
Excluding 231 Units of V 2500 Modules and 109 Units of CF 34 Modules
- *2 海面上静止最大スラスト
Maximum Thrust at Sea Level Static Condition

表8 2002年ターボシャフト/ターボプロップ・エンジン
生産台数及び出力(kW)

区分 Size	0~735 kW		736 kW~		全出力(kW) Total Output	
	台数 Units	出力*3 Output	台数 Units	出力*3 Output	台数 Units	出力*3 Output
固定翼機用 Fixed Wing Aircraft	0	0	0	0	0	0
ヘリコプタ用 Helicopter	6	3,954	60	91,599	66	95,553
補助機関駆動 Aux. Drive Units	10	490	0	0	10	490
合計 Total	16	4,444	60	91,599	76	96,043

- *3 海面上静止常用出力
Normal Output at Sea Level Static Condition

- *6 圧縮機翼車外径 100 mm を越す分を示す
The figure shows the total number of superchargers over 100 mm in impeller diameter.

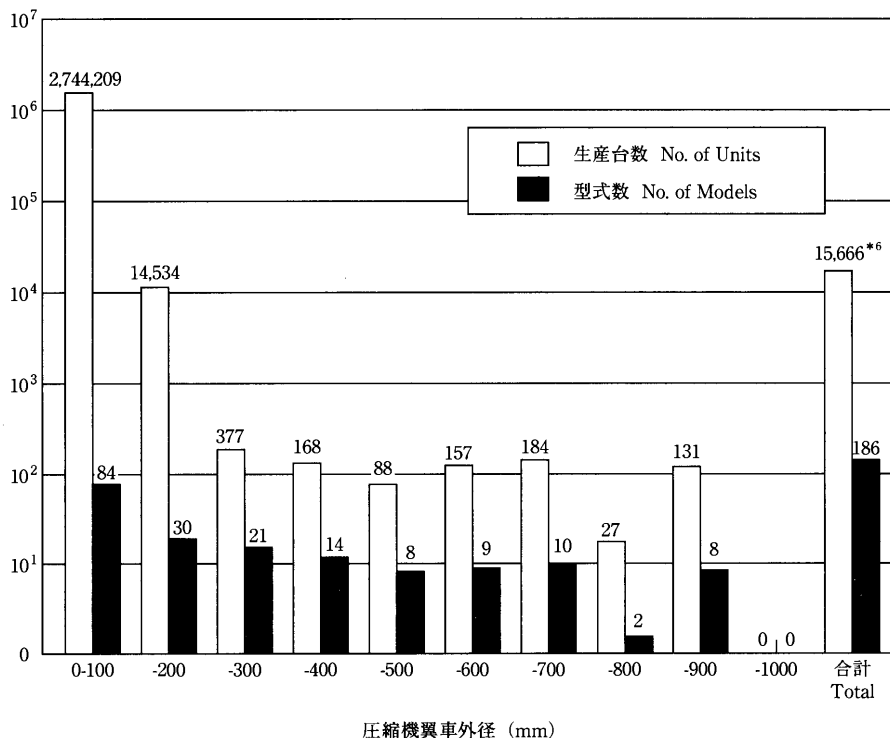


図10 2002年過給機生産台数及び型式数

4. 過給機

表9 2002年過給機生産台数及び形式数

区分 Class	Size	台数 No. of Units	型式数 No. of Models
	圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller		
Class 1	0~ 100	2,744,209	84
Class 2	101~ 200	14,534	30
Class 3	201~ 300	377	21
Class 4	301~ 400	168	14
Class 5	401~ 500	88	8
Class 6	501~ 600	157	9
Class 7	601~ 700	184	10
Class 8	701~ 800	27	2
Class 9	801~ 900	131	8
Class 10	901~1,000	0	0
合計*6 Total		15,666*5	102*4
資料提供社数 No. of Companies which supplied Data		12	

- *4 型式はいずれも排気タービン式である。
Every model is an exhaust turbine type supercharger.
- *5 圧縮機翼車外径 100 mm を越す分を示す。
The figure shows total number of superchargers over 100 mm in impeller diameter.

2003年度第2回見学会（中山共同発電(株)船町発電所） に参加して

平成15年9月12日に中山共同発電(株)船町発電所にてIPP用ガスタービンコンバインド発電設備の見学会は、約20名が参加して実施されました。

はじめに、船町発電所山下所長よりご挨拶があり、引き続き設備紹介・見学会と進み、休憩を挟んで設備納入メーカーである三菱重工業(株)殿よりガスタービンの説明があり、有意義な一日でした。

本発電設備は、蒸気タービン・発電機・ガスタービン・排熱回収ボイラーが一軸に並んだ構成で周囲に燃料ガス圧縮機・冷却塔・起動用ボイラー・変圧器・送受電設備等を配置し、非常にコンパクトにまとまっており、すっきりした印象を受けました。

本プラントは中央の操作室から運転・監視を全て行っておりますが、運用形態がDSSで有るために、起動時に一番気を遣うとのことで連続運転とは異なった意味での苦労が有るようでした。

三菱重工殿からは、本発電設備用ガスタービンの説明に留まらず、ガスタービンの開発の歴史から最新の技術まで説明していただきました。

燃焼器・動翼・静翼などの最新技術の説明には全員が静まりかえり、その後の質疑応答が活発になされました。

最後に、この度の見学会に際して、全面的に協力いただいた中山共同発電(株)船町発電所および三菱重工業(株)の方々には、紙上にてお礼申し上げます。

(記：ガスタービン学会地方委員会 大庭委員)

○ 本会協賛・共催行事 ○

会 合 名	開催日・会場	詳細問合せ先
第266回講習会 タグチメソッドとその有効活用法 - 演習つき -	H15/12/4-5 大阪科学技術センター 8階 中ホール	日本機械学会関西支部 TEL: 06-6443-2073 FAX: 06-6443-6049 E-MAIL: jsme@soleil.ocn.ne.jp
実験流体力学 - 流体実験・計測の基礎 -	H15/12/11-12 日本機械学会 会議室	日本機械学会 事務局 小阪雅裕 TEL: 03-5360-3505 FAX: 03-5360-3509 E-MAIL: kosaka@jsme.or.jp

▷ 入会者名簿 ◁

〔正会員〕

横山 隆 雄(三菱重工)
是松 康 弘(三菱重工)
水野 拓 哉(宇宙航空研究開発機構)
大倉 玉 圭(オークラ)
上村 眞 一(東北電力)

佐藤 裕 市(東北電力)
島 垣 康 行(東北電力)
塩 原 元 哲(東京電力)
藤 原 仁 志(宇宙航空研究開発機構)
小 林 一 幸(新潟原動機)

〔学生会員〕

中村 健 二(慶応大)
関口 達 也(慶応大)
葛西 広 嗣(岩手大)

〔賛助会員〕

(株)新潟原動機

2003 年度第 2 回見学会（中山共同発電(株)船町発電所） に参加して

平成 15 年 9 月 12 日に中山共同発電(株)船町発電所にて IPP 用ガスタービンコンバインド発電設備の見学会は、約 20 名が参加して実施されました。

はじめに、船町発電所山下所長よりご挨拶があり、引き続き設備紹介・見学会と進み、休憩を挟んで設備納入メーカーである三菱重工業(株)殿よりガスタービンの説明があり、有意義な一日でした。

本発電設備は、蒸気タービン・発電機・ガスタービン・排熱回収ボイラーが一軸に並んだ構成で周囲に燃料ガス圧縮機・冷却塔・起動用ボイラー・変圧器・送受電設備等を配置し、非常にコンパクトにまとまっており、すっきりした印象を受けました。

本プラントは中央の操作室から運転・監視を全て行っておりますが、運用形態が DSS で有るために、起動時に一番気を遣うとのことで連続運転とは異なった意味での苦勞が有るようでした。

三菱重工殿からは、本発電設備用ガスタービンの説明に留まらず、ガスタービンの開発の歴史から最新の技術まで説明していただきました。

燃焼器・動翼・静翼などの最新技術の説明には全員が静まりかえり、その後の質疑応答が活発になされました。

最後に、この度の見学会に際して、全面的に協力いただいた中山共同発電(株)船町発電所および三菱重工業(株)の方々には、紙上にてお礼申し上げます。

(記：ガスタービン学会地方委員会 大庭委員)

○ 本会協賛・共催行事 ○

会 合 名	開催日・会場	詳細問合せ先
第 266 回講習会 タグチメソッドとその有効活用法 - 演習つき -	H 15/12/4-5 大阪科学技術センター 8 階 中ホール	日本機械学会関西支部 TEL: 06-6443-2073 FAX: 06-6443-6049 E-MAIL: jsme@soleil.ocn.ne.jp
実験流体力学 - 流体実験・計測の基礎 -	H 15/12/11-12 日本機械学会 会議室	日本機械学会 事務局 小阪雅裕 TEL: 03-5360-3505 FAX: 03-5360-3509 E-MAIL: kosaka@jsme.or.jp

▷ 入会者名簿 ◁

〔正会員〕

横山 隆 雄(三菱重工)
是松 康 弘(三菱重工)
水野 拓 哉(宇宙航空研究開発機構)
大倉 玉 圭(オークラ)
上村 眞 一(東北電力)

佐藤 裕 市(東北電力)
島垣 康 行(東北電力)
塩原 元 哲(東京電力)
藤原 仁 志(宇宙航空研究開発機構)
小林 一 幸(新潟原動機)

〔学生会員〕

中村 健 二(慶応大)
関口 達 也(慶応大)
葛西 広 嗣(岩手大)

〔賛助会員〕

(株)新潟原動機

2003年度第2回見学会（中山共同発電(株)船町発電所） に参加して

平成15年9月12日に中山共同発電(株)船町発電所にてIPP用ガスタービンコンバインド発電設備の見学会は、約20名が参加して実施されました。

はじめに、船町発電所山下所長よりご挨拶があり、引き続き設備紹介・見学会と進み、休憩を挟んで設備納入メーカーである三菱重工業(株)殿よりガスタービンの説明があり、有意義な一日でした。

本発電設備は、蒸気タービン・発電機・ガスタービン・排熱回収ボイラーが一軸に並んだ構成で周囲に燃料ガス圧縮機・冷却塔・起動用ボイラー・変圧器・送受電設備等を配置し、非常にコンパクトにまとまっており、すっきりした印象を受けました。

本プラントは中央の操作室から運転・監視を全て行っておりますが、運用形態がDSSで有るために、起動時に一番気を遣うとのことで連続運転とは異なった意味での苦勞が有るようでした。

三菱重工殿からは、本発電設備用ガスタービンの説明に留まらず、ガスタービンの開発の歴史から最新の技術まで説明していただきました。

燃焼器・動翼・静翼などの最新技術の説明には全員が静まりかえり、その後の質疑応答が活発になされました。

最後に、この度の見学会に際して、全面的に協力いただいた中山共同発電(株)船町発電所および三菱重工業(株)の方々には、紙上にてお礼申し上げます。

(記：ガスタービン学会地方委員会 大庭委員)

○ 本会協賛・共催行事 ○

会 合 名	開催日・会場	詳細問合せ先
第266回講習会 タグチメソッドとその有効活用法 - 演習つき -	H15/12/4-5 大阪科学技術センター 8階 中ホール	日本機械学会関西支部 TEL: 06-6443-2073 FAX: 06-6443-6049 E-MAIL: jsme@soleil.ocn.ne.jp
実験流体力学 - 流体実験・計測の基礎 -	H15/12/11-12 日本機械学会 会議室	日本機械学会 事務局 小阪雅裕 TEL: 03-5360-3505 FAX: 03-5360-3509 E-MAIL: kosaka@jsme.or.jp

▷ 入会者名簿 ◁

〔正会員〕

横山 隆雄(三菱重工)
是松 康弘(三菱重工)
水野 拓哉(宇宙航空研究開発機構)
大倉 玉圭(オークラ)
上村 眞一(東北電力)

佐藤 裕市(東北電力)
島垣 康行(東北電力)
塩原 元哲(東京電力)
藤原 仁志(宇宙航空研究開発機構)
小林 一幸(新潟原動機)

〔学生会員〕

中村 健二(慶応大)
関口 達也(慶応大)
葛西 広嗣(岩手大)

〔賛助会員〕

(株)新潟原動機

日本ガスタービン学会賞候補募集のお知らせ

応募締切：2003年11月30日

日本ガスタービン学会では下記により、2年毎に学会賞（論文賞、技術賞および奨励賞）の贈呈を行っております。つきましては、今年度下記要領により第12回目の学会賞の募集を行うことになりましたのでお知らせ致します。

応募要領

1. 日本ガスタービン学会賞

本会はガスタービンおよび過給機に関連する工学および技術の発展を奨励することを目的として、優れた論文、技術ならびに新進会員個人の業績に対してそれぞれ日本ガスタービン学会論文賞、技術賞、奨励賞を贈り、表彰を行う。

2. 対象となる業績

- (1) 論文賞 日本ガスタービン学会誌に1999年12月以降2003年11月迄に公表された論文および2003年国際ガスタービン会議東京大会 Proceedings に掲載された論文で、独創性があり工学および技術に寄与したもの。
- (2) 技術賞 ガスタービンおよび過給機に関連し、同上期間に完成した新技術（画期的な新製品の開発、製品の品質または性能の向上あるいは生産性の向上、材料開発、制御計測および保守技術の向上に寄与したもの）。
- (3) 奨励賞 日本ガスタービン学会誌に1999年12月以降2003年11月迄に公表された論文および2003年国際ガスタービン会議東京大会 Proceedings に掲載された独創的な論文（いずれも本人が中心的役割

を果たしたもの）で萌芽的研究を含む。

3. 受賞者の資格

- (1) 論文賞 受賞者は本会会員（正会員、学生会員）とする。
- (2) 技術賞 受賞者は本会会員（正会員、学生会員、賛助会員）とする。
- (3) 奨励賞 受賞者は本会会員（正会員、学生会員）で1968年4月2日以降生まれの個人とする。ただし論文賞、技術賞あるいは奨励賞をすでに受けた者および今年度の論文賞、技術賞内定者は奨励賞を受けることはできない。

4. 授賞件数 論文賞2件、技術賞2件、奨励賞2名程度とする。

5. 表彰の方法 審査の上、表彰状および賞牌を授与する。

6. 表彰の時期 表彰は、2004年4月開催予定の日本ガスタービン学会総会において行う。

7. 応募の方法 公募によるものとし、論文賞、技術賞は推薦または本人より申請、奨励賞は推薦による。尚、一度申請して受賞しなかったものでも、再度応募して差し支えない。

8. 提出書類 推薦または申請には、本会の所定用紙（本会ホームページ掲載または事務局より送付）に必要事項を記載して、1件につき正1通、副2通（コピー可）の計3通を提出する。

9. 提出締切日 2003年11月30日 17時必着

10. 提出先 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
第3工新ビル402
(社)日本ガスタービン学会
学会賞審査委員会 宛

平成 15 年度見学会・技術懇談会のお知らせ

平成 15 年度の見学会・技術懇談会を下記の要領で開催いたします。

今回は航空機及びジェットエンジンの研究施設について見学しますので奮ってご参加下さい。

13:00~17:00 全般説明
研究設備の見学
技術懇談
17:00 解散

1. 日 時

平成 16 年 2 月 6 日(金)

2. 見学先

防衛庁技術研究本部第 3 研究所
東京都立川市栄町 1-2-10

3. 見学内容

- (1) エンジン試験設備
- (2) エンジン構造試験設備
- (3) 風洞試験設備
- (4) 機体強度試験設備 等

4. スケジュール

13:00 第 3 研究所講堂 集合
(正門で立ち入り手続きを行う)

5. 参加要領

- (1) 定 員 30 名
- (2) 参加費 ¥3,000
- (3) 参加資格 学会会員に限る
- (4) 申込方法 下記の申込用紙にご記入のうえ 1 月 16 日(金)までに FAX, 郵送または E-mail にて学会事務局にお送り下さい。
- (5) 交通手段 JR 立川駅北口 12 番乗り場
立川バス北町行き乗車,
「自衛隊正門前」下車
バス約 10 分, 間隔約 20 分

なお、詳細については学会ホームページをご覧ください。
(<http://www.soc.nii.ac.jp/gtsj/index.html>)

見学会参加申込書

申込締切日 平成 16 年 1 月 16 日(金)

開 催 日 平成 16 年 2 月 6 日(金)

(社)日本ガスタービン学会 行

FAX: 03-3365-0387 TEL: 03-3365-0095 E-mail: gtsj@pluto.dti.ne.jp

氏 名			G T S J 会員番号	
勤務先				
勤務先 住 所				
T E L			F A X	
連絡先	〒			
E - mail				

(社)日本ガスタービン学会刊行物のご紹介

* 学会誌特集号バックナンバー

- Vol. 31 No. 5 2003年9月
- Vol. 31 No. 4 2003年7月
- Vol. 31 No. 3 2003年5月
- Vol. 31 No. 2 2003年3月
- Vol. 31 No. 1 2003年1月
- Vol. 30 No. 6 2002年11月
- Vol. 30 No. 5 2002年9月
- Vol. 30 No. 4 2002年7月
- Vol. 30 No. 3 2002年5月
- Vol. 30 No. 2 2002年3月
- Vol. 29 No. 6 2001年11月
- Vol. 29 No. 5 2001年9月
- Vol. 29 No. 4 2001年7月
- Vol. 29 No. 3 2001年5月
- Vol. 29 No. 2 2001年3月
- Vol. 29 No. 1 2001年1月
- Vol. 28 No. 1 2000年1月

2000年以前のものはGTSJ事務局までお問い合わせください。

「マイクロガスタービンに関する周辺機器」

特集「ガスタービン利用高効率エネルギーシステムの動向」

特集「ガスタービン用先進材料・技術の現状と課題」

小特集「潤滑油と軸受に関する技術動向」

特集「ガスタービン用コーティング技術」

特集「燃焼の数値シミュレーション」

特集「ガスタービンの極小化に関する調査研究」

特集「先進材料利用ガスジェネレータ技術開発」

小特集「ターボ機器用軸受の最新動向について」

小特集「環境負荷低減技術」

特集「ガスタービン高温部品の保守管理技術」

小特集「ガスタービンの極超小型化に向けて」

特集「マイクロガスタービン」

小特集「ガスタービンにおけるモニタリング技術」

特集「ガスタービン最新運転管理（ユーザの立場から）」

特集「超音速輸送機用推進システム（HYPR）」

* その他刊行物

● 講演会講演論文集

- 第28回定期講演会講演論文集（155頁，2000年）
- 第15回秋季講演会講演論文集（北九州）（222頁，2000年）
- 第29回定期講演会講演論文集（142頁，2001年）
- 第16回秋季講演会講演論文集（秋田）（253頁，2001年）
- 第30回定期講演会講演論文集（334頁，2002年）
- 創立30周年記念ガスタービン講演会講演論文集（144頁，2002年）

● ガスタービンセミナー資料集

- 第28回 21世紀を担うガスタービンを目指して（110頁，2000年）
- 第29回 21世紀のガスタービンへの期待（85頁，2001年）
- 第30回ガスタービンの最新技術とシステムの展開（135頁，2002年）
- 第31回ガスタービンの最新技術と分散電源への展開（101頁，2003年）

● BULLETIN OF GTSJ（2000年版，2001年版，2002年版）

● 調査研究委員会成果報告書

第21期調査研究委員会

ガスタービンの高温化と冷却技術（256頁，1997年）

第26期調査研究委員会

ガスタービンにおけるモニタリング技術（172頁，2000年）

● 技術情報センター運営委員会調査報告書

第20，21期技術情報センター運営委員会

水素燃焼ガスタービンにおける水素利用に関連した物性値の調査（64頁，1997年）

● 国産ガスタービン・過給機資料集－統計・生産実績・仕様諸元－

1999年版（187頁，1999年）

● 日本のガスタービンの歩み－日本ガスタービン学会30周年記念写真集（155頁，2002年）

● ガスタービン教育シンポジウムテキスト

IGTCは、現地登録者が予想外に多く、参加者は500人を超え成功裏に終了しました。関係者のご苦労には、ただただ頭の下がる思いです。

さて、今号では論説・解説のテーマとして新燃料に関する記事を集めました。バイオガスについては北見市、上湧別、八戸市における実用化や技術実証プロジェクト、DME（ジメチルエーテル）についてはその物性や燃焼特性、低NOx燃焼技術、メタンハイドレートについては埋蔵量、掘削輸送、物性及び開発計画、石炭については石炭高効率発電システム、また、水素については高温ガス炉を利用した水素製造と、すでに実用化が始まっているものから今後のエネルギー需要の主力として期待されるものまで、それぞれの分野における専門家に執筆して頂いた。会員には極めて有益な情報になるであろう。随想は学士院賞を受けられました妹尾先生にお願いしました。ターボ機械における境界層流れのお話ですが、技術的にも高度な解説がなされております。この号の企画編集は木下委員（ダイハツディーゼル株）、刑部委員（東京海洋大）、服部委員（三井造船株）と林（宇宙航空技術研究開発機構）が担当しました。

（林 茂）

〈表紙写真〉

J850 マイクロターボジェットエンジン

説明：この写真は1992年（平成4年）から開発が開始された我が国最初のマイクロターボジェットエンジンシリーズ最新型J850のカットモデルである。量産型自動車用ターボチャージャの回転ロータを利用、コンプレッサは遠心式一段、タービンは輻流式一段である。ロータ中央部に軸を支える軸受と環状型燃焼器が組込まれている。吸入圧縮された空気が、燃焼昇温昇圧し、タービンを通過膨張したガスが軸方向に流れる構造となっている。

（提供 株式会社ソフィアプレジジョン）

だより

♣事務局

短い夏の名残りをしばし味わう間もなく、秋が何処からともなくやってきたというのがまさに実感のこの季節の移り変わり。

この微妙な気候の変化を感じる余裕さえなく、国際会議を2日後に控えて今まさに緊張、疲労もピークにさしかかっているところだ。

四年に一回の国際会議も今年で8回目となり、慣れているはずなのですが、やはり近づいてくると、アレやコレやとやっておかなければならないことを思い出したり、何か大きな忘れていないことがあるのではないかと気になりだして、夜も寝られない日が続いたりします。

特に今回は初めてのガスタービン学会主催ということで（今までは組織委員会主催）、学会事務局の関わり方

も今まで以上となりました。通常業務に加えての国際会議の仕事ですから、かなり精神的にも負担となっているようです。

この学会誌がみなさまのお手元に届くころには、結果が出ているのですからそれまで悔いのないよう準備に努めていくつもりです。そして晴れやかな気持ちで初日を迎え、大勢の方に参加していただいて会議が無事終了することを目標に日々がんばっております。

頭が国際会議のことで一杯で、うっかり忘れるところでしたが、今年は評議員選挙がひと月ほど早まっております。もう皆様のお手元に投票用紙が届いていることと思いますが、締切日（12月12日事務局必着）をお間違えなきよう投票をお願い致します。 [A]

IGTCは、現地登録者が予想外に多く、参加者は500人を超え成功裏に終了しました。関係者のご苦勞には、ただただ頭の下がる思いです。

さて、今号では論説・解説のテーマとして新燃料に関する記事を集めました。バイオガスについては北見市、上湧別、八戸市における実用化や技術実証プロジェクト、DME（ジメチルエーテル）についてはその物性や燃焼特性、低NO_x燃焼技術、メタンハイドレートについては埋蔵量、掘削輸送、物性及び開発計画、石炭については石炭高効率発電システム、また、水素については高温ガス炉を利用した水素製造と、すでに実用化が始まっているものから今後のエネルギー需要の主力として期待されるものまで、それぞれの分野における専門家に執筆して頂いた。会員には極めて有益な情報になるであろう。随想は学士院賞を受けられました妹尾先生にお願いしました。ターボ機械における境界層流れのお話ですが、技術的にも高度な解説がなされております。この号の企画編集は木下委員（ダイハツディーゼル株）、刑部委員（東京海洋大）、服部委員（三井造船株）と林（宇宙航空技術研究開発機構）が担当しました。

（林 茂）

〈表紙写真〉

J850 マイクロターボジェットエンジン

説明：この写真は1992年（平成4年）から開発が開始された我が国最初のマイクロターボジェットエンジンシリーズ最新型J850のカットモデルである。量産型自動車用ターボチャージャの回転ロータを利用、コンプレッサは遠心式一段、タービンは輻流式一段である。ロータ中央部に軸を支える軸受と環状型燃焼器が組込まれている。吸入圧縮された空気が、燃焼昇温昇圧し、タービンを通過膨張したガスが軸方向に流れる構造となっている。

（提供 株式会社ソフィアプレジジョン）

だより

♣事務局

短い夏の名残りをしばし味わう間もなく、秋が何処からともなくやってきたというのがまさに実感のこの季節の移り変わり。

この微妙な気候の変化を感じる余裕さえなく、国際会議を2日後に控えて今まさに緊張、疲労もピークにさしかかっているところだ。

四年に一回の国際会議も今年で8回目となり、慣れているはずなのですが、やはり近づいてくると、アレやコレやとやっておかなければならないことを思い出したり、何か大きな忘れていないことがあるのではないかと気になりだして、夜も寝られない日が続いたりします。

特に今回は初めてのガスタービン学会主催ということで（今までは組織委員会主催）、学会事務局の関わり方

も今まで以上となりました。通常業務に加えての国際会議の仕事ですから、かなり精神的にも負担となっているようです。

この学会誌がみなさまのお手元に届くころには、結果が出ているのですからそれまで悔いのないよう準備に努めていくつもりです。そして晴れやかな気持ちで初日を迎え、大勢の方に参加していただいて会議が無事終了することを目標に日々がんばっております。

頭が国際会議のことで一杯で、うっかり忘れるところでしたが、今年は評議員選挙がひと月ほど早まっております。もう皆様のお手元に投票用紙が届いていることと思いますが、締切日（12月12日事務局必着）をお間違えなきよう投票をお願い致します。 [A]

2003.8.29 改訂

2003.8.29 改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 投稿原稿会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - B. 依頼原稿本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
 - C. 学会原稿学会の運営・活動に関する記事(報告, 会告等)および学会による調査・研究活動の成果等の報告。
2. 依頼原稿および投稿原稿は, ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説, 講義, 技術論文, 速報(研究速報, 技術速報), 寄書(研究だより, 見聞記, 新製品・新設備紹介), 随筆, 書評, 情報欄記事, その他とする。刷り上がりページ数は原則として, 1編につき次のページ数以内とする。

論説・解説, 講義	6 ページ
技術論文	6 ページ
速報	4 ページ
寄書, 随筆	2 ページ
書評	1 ページ
情報欄記事	1/2 ページ

3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し, 編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は, 編集委員会が定める方法により審査され, 編集委員会の承認を得て, 学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては, 別に技術論文投稿規定を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても, 編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は, 査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。

但し, 著作者自身または著作者が帰属する法人等が, 自ら書いた記事・論文等の全文または一部を転載, 翻訳・翻案などの形で利用する場合, 本会は原則としてこれを妨げない。ただし, 著作者本人であっても学会誌を複製の形で全文を他の著作物に利用する場合は, 文書で本会に許諾を求めなければならない。

8. 著作者は, 学会または学会からの使用許諾を受けた者に対し著作者人格権を行使しない。
9. 本会発行の著作物に掲載された記事, 論文などの著作物について, 著作権侵害者, 名誉毀損, またはその他の紛争が生じた場合, 当該著作物の著作者自身又は著作者の帰属する法人等を当事者とする。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先
 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
 Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168
 ニッセイエプロ㈱ 制作部デジタル編集課
 E-mail: eblo_h3@mbr.sphere.ne.jp
 学会誌担当 佐藤孝憲

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。

- 1) 主たる著者は本学会会員であること。
- 2) 投稿原稿は著者の原著で, ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
- 3) 投稿原稿は, 一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし, 要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。

2. 使用言語は原則として日本語とする。ただし, 第一著者が日本語による論文執筆が困難な場合, および本学会主催の国際会議で発表した論文は英語による投稿を認める。なお, 原稿執筆は日本語の場合に準拠するものとする。
3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし, 1ページにつき12,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。

4. 図・写真等について, 著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。

5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し, 正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。

6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。

7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し, 編集委員会で採否を決定する。

8. 論文内容についての責任は, すべて著者が負う。

9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては, 学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガスタービン学会誌
 Vol.31 No.6 2003.11

発行日 2003年11月20日
 発行所 社団法人日本ガスタービン学会
 編集者 湯浅三郎
 発行者 吉岡英輔
 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
 第3工新ビル402
 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
 郵便振替 00170-9-179578
 印刷所 ニッセイエプロ㈱
 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
 Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2003, (株)日本ガスタービン学会

複写される方へ

本誌に掲載された著作物を複写したい方は, (株)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は, 著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は, 直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。

〒170-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル
 学術著作権協会
 TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619
 E-mail: naka-atsu@muj.biglobe.ne.jp

2003.8.29 改訂

2003.8.29 改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 投稿原稿会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - B. 依頼原稿本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
 - C. 学会原稿学会の運営・活動に関する記事(報告, 会告等)および学会による調査・研究活動の成果等の報告。
2. 依頼原稿および投稿原稿は, ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説, 講義, 技術論文, 速報(研究速報, 技術速報), 寄書(研究だより, 見聞記, 新製品・新設備紹介), 随筆, 書評, 情報欄記事, その他とする。刷り上がりページ数は原則として, 1編につき次のページ数以内とする。

論説・解説, 講義	6 ページ
技術論文	6 ページ
速報	4 ページ
寄書, 随筆	2 ページ
書評	1 ページ
情報欄記事	1/2 ページ

3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し, 編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は, 編集委員会が定める方法により審査され, 編集委員会の承認を得て, 学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては, 別に技術論文投稿規定を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても, 編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は, 査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。

但し, 著作者自身または著作者が帰属する法人等が, 自ら書いた記事・論文等の全文または一部を転載, 翻訳・翻案などの形で利用する場合, 本会は原則としてこれを妨げない。ただし, 著作者本人であっても学会誌を複製の形で全文を他の著作物に利用する場合は, 文書で本会に許諾を求めなければならない。

8. 著作者は, 学会または学会からの使用許諾を受けた者に対し著作者人格権を行使しない。
9. 本会発行の著作物に掲載された記事, 論文などの著作物について, 著作権侵害者, 名誉毀損, またはその他の紛争が生じた場合, 当該著作物の著作者自身又は著作者の帰属する法人等を当事者とする。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168
ニッセイエプロ㈱ 制作部デジタル編集課
E-mail: eblo_h3@mbr.sphere.ne.jp
学会誌担当 佐藤孝憲

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。

- 1) 主たる著者は本学会会員であること。
- 2) 投稿原稿は著者の原著で, ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
- 3) 投稿原稿は, 一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし, 要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。

2. 使用言語は原則として日本語とする。ただし, 第一著者が日本語による論文執筆が困難な場合, および本学会主催の国際会議で発表した論文は英語による投稿を認める。なお, 原稿執筆は日本語の場合に準拠するものとする。
3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし, 1ページにつき12,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。

4. 図・写真等について, 著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。

5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し, 正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し, 編集委員会で採否を決定する。
8. 論文内容についての責任は, すべて著者が負う。
9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては, 学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガスタービン学会誌
Vol.31 No.6 2003.11

発行日 2003年11月20日
発行所 社団法人日本ガスタービン学会
編集者 湯浅三郎
発行者 吉岡英輔
〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
第3工新ビル402
Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
郵便振替 00170-9-179578
印刷所 ニッセイエプロ㈱
〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2003, (株)日本ガスタービン学会

複写される方へ

本誌に掲載された著作物を複写したい方は, (株)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は, 著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は, 直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。

〒170-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル
学術著作権協会
TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619
E-mail: naka-atsu@muj.biglobe.ne.jp

2003.8.29 改訂

2003.8.29 改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 投稿原稿会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - B. 依頼原稿本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
 - C. 学会原稿学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および学会による調査・研究活動の成果等の報告。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説、講義、技術論文、速報（研究速報、技術速報）、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事、その他とする。刷り上がりページ数は原則として、1編につき次のページ数以内とする。

論説・解説、講義	6 ページ
技術論文	6 ページ
速報	4 ページ
寄書、随筆	2 ページ
書評	1 ページ
情報欄記事	1/2 ページ

3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は、編集委員会が定める方法により審査され、編集委員会の承認を得て、学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては、別に技術論文投稿規定を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても、編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は、査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。

但し、著作者自身または著作者が帰属する法人等が、自ら書いた記事・論文等の全文または一部を転載、翻訳・翻案などの形で利用する場合、本会は原則としてこれを妨げない。ただし、著作者本人であっても学会誌を複製の形で全文を他の著作物に利用する場合は、文書で本会に許諾を求めなければならない。

8. 著作者は、学会または学会からの使用許諾を受けた者に対し著作者人格権を行使しない。

9. 本会発行の著作物に掲載された記事、論文などの著作物について、著作権侵害者、名誉毀損、またはその他の紛争が生じた場合、当該著作物の著作者自身又は著作者の帰属する法人等を当事者とする。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先
 〒105-0004 東京都港区新橋 5-20-4
 Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168
 ニッセイエプロ㈱ 制作部デジタル編集課
 E-mail: eblo_h3@mbr.sphere.ne.jp
 学会誌担当 佐藤孝憲

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。

- 1) 主たる著者は本学会会員であること。
- 2) 投稿原稿は著者の原著で、ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
- 3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。

2. 使用言語は原則として日本語とする。ただし、第一著者が日本語による論文執筆が困難な場合、および本学会主催の国際会議で発表した論文は英語による投稿を認める。なお、原稿執筆は日本語の場合に準拠するものとする。

3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし、1ページにつき12,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。

4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。

5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。

6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。

7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。

8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。

9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガスタービン学会誌
 Vol.31 No.6 2003.11

発行日 2003年11月20日
 発行所 社団法人日本ガスタービン学会
 編集者 湯浅三郎
 発行者 吉岡英輔
 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-5-13
 第3工新ビル 402
 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
 郵便振替 00170-9-179578
 印刷所 ニッセイエプロ㈱
 〒105-0004 東京都港区新橋 5-20-4
 Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2003, (株)日本ガスタービン学会

複写される方へ

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(株)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。

〒170-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル
 学術著作権協会
 TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619
 E-mail: naka-atsu@muj.biglobe.ne.jp

2003.8.29 改訂

2003.8.29 改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 投稿原稿会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - B. 依頼原稿本学会編集委員会がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は会員外でもよい。
 - C. 学会原稿学会の運営・活動に関する記事(報告, 会告等)および学会による調査・研究活動の成果等の報告。
2. 依頼原稿および投稿原稿は, ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説, 講義, 技術論文, 速報(研究速報, 技術速報), 寄書(研究だより, 見聞記, 新製品・新設備紹介), 随筆, 書評, 情報欄記事, その他とする。刷り上がりページ数は原則として, 1編につき次のページ数以内とする。

論説・解説, 講義	6 ページ
技術論文	6 ページ
速報	4 ページ
寄書, 随筆	2 ページ
書評	1 ページ
情報欄記事	1/2 ページ

3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し, 編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は, 編集委員会が定める方法により審査され, 編集委員会の承認を得て, 学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては, 別に技術論文投稿規定を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても, 編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は, 査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。

但し, 著作者自身または著作者が帰属する法人等が, 自ら書いた記事・論文等の全文または一部を転載, 翻訳・翻案などの形で利用する場合, 本会は原則としてこれを妨げない。ただし, 著作者本人であっても学会誌を複製の形で全文を他の著作物に利用する場合は, 文書で本会に許諾を求めなければならない。

8. 著作者は, 学会または学会からの使用許諾を受けた者に対し著作者人格権を行使しない。
9. 本会発行の著作物に掲載された記事, 論文などの著作物について, 著作権侵害者, 名誉毀損, またはその他の紛争が生じた場合, 当該著作物の著作者自身又は著作者の帰属する法人等を当事者とする。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先
 〒105-0004 東京都港区新橋 5-20-4
 Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168
 ニッセイエプロ㈱ 制作部デジタル編集課
 E-mail: eblo_h3@mbr.sphere.ne.jp
 学会誌担当 佐藤孝憲

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。

- 1) 主たる著者は本学会会員であること。
- 2) 投稿原稿は著者の原著で, ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
- 3) 投稿原稿は, 一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし, 要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。

2. 使用言語は原則として日本語とする。ただし, 第一著者が日本語による論文執筆が困難な場合, および本学会主催の国際会議で発表した論文は英語による投稿を認める。なお, 原稿執筆は日本語の場合に準拠するものとする。
3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし, 1ページにつき12,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。

4. 図・写真等について, 著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。

5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し, 正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し, 編集委員会で採否を決定する。
8. 論文内容についての責任は, すべて著者が負う。
9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては, 学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガスタービン学会誌
 Vol.31 No.6 2003.11

発行日 2003年11月20日
 発行所 社団法人日本ガスタービン学会
 編集者 湯浅三郎
 発行者 吉岡英輔
 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
 第3工新ビル402
 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
 郵便振替 00170-9-179578
 印刷所 ニッセイエプロ㈱
 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
 Tel. 03-5733-5157 Fax. 03-5733-5168

©2003, (株)日本ガスタービン学会

複写される方へ

本誌に掲載された著作物を複写したい方は, (株)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は, 著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は, 直接日本ガスタービン学会へご連絡下さい。

〒170-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル
 学術著作権協会
 TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619
 E-mail: naka-atsu@muj.biglobe.ne.jp

GTSJ ガスタービンセミナー（第32回）のお知らせ

「ガスタービン複合発電の最新技術と分散電源への展望」をテーマに第32回ガスタービンセミナーを下記の通り開催いたしますので、奮ってご参加ください。

1. 日時：平成16年1月22日（木） 10:00～17:00（受付開始9:30）
1月23日（金） 9:30～16:30
2. 場所：東京ガス（株）本社2階大会議室（地図参照）
港区海岸1-5-20 Tel. 03-3433-2111（JR浜松町駅徒歩3分）
3. 主催：（社）日本ガスタービン学会
4. 協賛：エネルギー・資源学会、火力原子力発電技術協会、計測自動制御学会、自動車技術会、ターボ機械協会、電気学会、日本エネルギー学会、日本ガス協会、日本機械学会、日本金属学会、日本コージェネレーションセンター、日本航空宇宙学会、日本航空技術協会、日本セラミックス協会、日本材料学会、日本鉄鋼協会、日本内燃機関連合会、日本内燃力発電設備協会、日本マリンエンジニアリング学会、日本非破壊検査協会、日本品質管理学会、腐食防食協会、溶接学会

5. セミナープログラム テーマ：「ガスタービン複合発電の最新技術と分散電源への展望」

1月22日（木）「セッションⅠ：ガスタービン複合発電の最新技術」

※講演時間には質疑応答の時間を含む。

1	最新型コンバインドサイクルプラント用 1500℃級H型ガスタービン	10:00-10:45	(株)東芝 岡本浩明氏
2	シーメンス社3Aシリーズガスタービン複合発電 の最新技術動向	10:45-11:30	富士電機システムズ(株) 山本隆夫氏
3	大型事業用ガスタービン高稼働率運用のための アプローチ	13:00-13:45	三菱重工業(株) 六山亮昌氏
4	航空転用型ガスタービンを利用した発電設備技術	13:45-14:30	石川島播磨重工業(株) 米澤克夫氏
5	コンバインド型コージェネレーションシステム (カワサキ PUCS500)の最新技術	14:45-15:30	川崎重工業(株) 石垣淳氏
6	H25型ガスタービンの技術紹介と最新の適用事例 及び保守技術について	15:30-16:15	(株)日立製作所 竹原勲氏
7	中小型ガスタービン (Solar 機) によるコンバインド サイクルの最新技術	16:15-17:00	三井造船(株) 磯部信一氏

1月23日（金）「セッションⅡ：ガスタービン複合発電の運転および保守管理技術とガスエンジンの最新技術」

8	ガスタービン複合発電の運用事例	9:30-10:15	大阪ガス(株) 田中啓一氏
9	最新コンバインドガスタービン運転・保守管理	10:15-11:00	中部電力(株) 傍嶋正夫氏
10	高効率大型ガスエンジンの最新技術	11:00-11:45	三菱重工業(株) 角田明氏

「パネルディスカッション：今後の分散発電への展望」

11	テーマ「今後の分散発電への展望」	13:15-16:30	(座長) 東京農工大学 岡本洋三氏 (パネリスト) 三菱重工業(株) 六山亮昌氏 川崎重工業(株) 石垣淳氏 三菱重工業(株) 角田明氏 (株)エネット 西野光重氏 大阪ガス(株) 田中啓一氏
----	------------------	-------------	---

6. セミナーの内容

(1) 「最新型コンバインドサイクルプラント用1500℃級H型ガスタービン」

(株)東芝 岡本 浩明氏

最新型コンバインドサイクルプラント用パワートレイン”Hシステム”に使用されるガスタービンMS9001H(50Hz機)及びMS7001H(60Hz機)は、圧力比2.3の高性能圧縮機、回収式蒸気冷却方式のタービン動静翼を採用した1500℃級ガスタービンである。DLN2.5H予混合燃焼システムにより低NO_x化が図られている。英国バグランベイ発電所において50Hz用”Hシステム”が世界初の蒸気冷却ガスタービンコンバインドサイクルが商用運転に入っており、その事例も含め紹介する。

(2) 「シーメンス社3Aシリーズガスタービン複合発電の最新技術動向」

(富士電機システムズ(株) 山本 隆夫氏)

シーメンス社のオリジナルV形ガスタービンの最新形である3Aシリーズ機(V94.3A/V84.3A/V64.3A)は、1990年代に開発され、90年代後半から世界各地で商用運転を開始した。この3Aシリーズ機の開発経緯、特徴および運転、改良実績を紹介する。また、3Aシリーズ機を採用した標準コンバインドサイクルの特徴および運転実績を紹介し、今後の技術動向、コンバインドサイクルの高性能化についてもあわせて展望する。

(3) 「大型事業用ガスタービン高稼働率運用のためのアプローチ」

(三菱重工業(株) 六山 亮昌氏)

大型事業用ガスタービンの高効率化、大容量化の開発とボトムサイクルを加えたコンバインドサイクルの最適設計により今や熱効率60%(LHV)の性能達成も現実のものとなりつつある。当社ではタービン入口温度1500℃級のG型ガスタービンおよびタービン翼を蒸気冷却式としたH形ガスタービンの開発に成功し、G型ガスタービンについては国内ばかりでなく米国を初めとする海外においても高稼働率にて運用が開始された。

ここでは、これら大容量高温ガスタービンの高稼働率運用実現を支えている各要素開発設計の綿密な検証実績と、実運用時の異常の予兆検知および運転データをオンラインで解析評価し運転を支援する遠隔監視システムについて紹介する。

(4) 「航空転用型ガスタービンを利用した発電設備技術」

(石川島播磨重工業(株) 米澤 克夫氏)

当社で多数の納入実績のあるLM6000エンジンを中心に航空転用型ガスタービンおよび航空転用型ガスタービンを利用した発電設備について、その技術的特徴、事例を紹介する。

一般に航空転用型ガスタービンはガスタービン単体効率が高い、軽量、コンパクト等の特徴を有する。そのため、発電設備としては複合発電(コンバインドサイクル)以外の事例も多いので、コンバインドサイクル発電設備に併せて、それ以外の事例も紹介する。

(5) 「コンバインド型コージェネレーションシステム(カワサキPUCS500)の最新技術」

(川崎重工業(株) 石垣 淳氏)

中容量ガスタービン発電プラントでは、発電のみを行う単純コンバインド発電よりも熱・電併給型のコンバインド型コージェネレーションシステムが必要とされる傾向にある。このシステムの通常のコージェネレーションやコンバインドシステムとの相違点、特徴を、当社のL20Aガスタービンを用いたコンバインド型コージェネレーションプラント例に紹介する。また、電力・熱デマンド変動への対応および計画に際しての留意点を説明する。

(6) 「H25型ガスタービンの技術紹介と最新の適用事例及び保守技術について」

(株)日立製作所 竹原 勲氏

省エネルギーや地球温暖化防止の観点から発電設備の高効率化が、電力自由化への対応から発電コスト低減が求められている。

ここでは当社がその一つのソリューションとして提供している高効率中容量型ガスタービンのH25型について紹介する。H25ガスタービンはシンプルサイクルとしてもコンバインドサイクルとしても高効率で、また天然ガスからオフガス、A重油などまでの広範な燃料対応性及びガスと油の2重燃料対応など、多種燃料対応に優れた特徴がある。これら技術を紹介すると共に、H25を用いた最新の発電システム事例および保守技術についても紹介する。

(7) 「中小型ガスタービン(Solar機)によるコンバインドサイクルの最新技術」

(三井造船(株) 磯部 信一氏)

10MW程度の比較的小規模の電力需要家にて、一層の省エネルギー化を図るため、蒸気消費を主体とするコージェネから、電力消費を主体とする熱電可変型コンバインドサイクルを導入する例が増えてきている。

これらは、中小型ガスタービンの性能の向上やシステムの信頼性向上によって可能となってきているが、この代表的な機種としてSOLAR社製ガスタービンを主機とした一軸型発電システム及び機器の特徴・性能や幾つかの運用事例の紹介を行う。

(8) 「ガスタービン複合発電の運用事例」

(大阪ガス(株) 田中 啓一氏)

大阪ガスの電力ビジネス用発電設備である、西島エネルギーセンター(IPP事業用発電設備15万kW)、泉北製造所内発電設備(1.8万kW)、姫路製造所内発電設備(5万kW)について、設備概要を紹介するとともに、その特徴である、ガス圧力エネルギー回収発電設備、熱電可変型発電設備の運用方法、およびLNG冷熱を利用したガスタービンの吸気冷却について説明する。

(9) 「最新コンバインドガスタービン運転・保守管理」

(中部電力(株) 傍嶋 正夫氏)

コンバインドサイクル発電設備は、毎深夜の停止起動および大幅な負荷調整、高い熱効率が確保できることから、昼夜の大きな需要格差の対応として順次導入された。コンバインドサイクル発電設備の熱効率の向上はガスタービンの高温化に負うところが大きく、高温の燃焼ガスに曝されている高温部品は長時間の運転で劣化し、寿命が消費される。

本講では、運転の信頼性を確保するために実施している保守管理および運転状態の管理について述べる。

(10) 「高効率大型ガスエンジンの最新技術」

(三菱重工業(株) 角田 明氏)

MACH-30Gは2001年に市場投入した発電用ガスエンジン(5.75 MW/台)で、パイロット着火方式、独自のシリンダ個別燃焼制御技術(M-RICS)、希薄燃焼技術を駆使し、低NOx(100ppm以下、O₂=0%)、高効率(最高発電効率45.5%)を其々達成した。これまでに約50台を受注、うち19台が稼働中である。またバイオガス、廃棄物ガスなどの様々なガスにも対応可能であり、今後の資源の有効利用、環境改善の一役を担う高性能エンジンであり、その最新技術について紹介する。

(11) パネルディスカッション「今後の分散発電への展望」

最近では日本国内において、省エネルギー、地球環境、エネルギーセキュリティ、エネルギー規制緩和などの様々な観点から分散型電源への期待が高まりつつある。これら分散型電源への期待は海外においても同様であり、政府主導の導入促進施策や分散型電源を利用したビジネスモデルが展開しつつある。しかしながら、将来的に分散型発電が普及拡大するためには、高効率化等の技術進展だけでなく、運転・保守技術の向上や多様な発電出力ニーズに対応できる製品群の充実なども必要と考えられる。

今回は、分散型電源の旗手であるガスタービンが今後さらに発展するために必要な要件は何か?また、最近の技術進歩が目覚しく、小規模出力でガスタービンの競合と成り得るガスエンジンは、分散電源市場においてどこまでの地位を占めてくるのか?パネリストに特定規模電気事業者やガスタービン製造メーカー、ガスエンジン製造メーカー等から各分野の第一線で活躍の方々を迎え、分散発電への展望に関して幅広い切り口で討論していただきます。

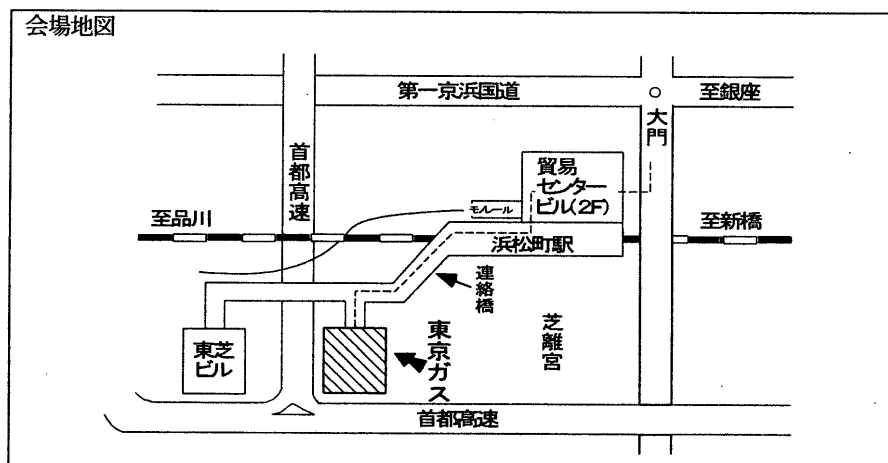
7. 参加要領

1) 参加費 :	◆主催および協賛団体会員	2日間 25,000円	1日のみ 18,000円
	◆学生会員	5,000円	
	◆会員外	2日間 35,000円	1日のみ 25,000円
	◆資料のみ	1冊 5,000円	(残部ある場合)

- 2) 申込方法: 申込書に所属、氏名、加入学協会名、GTSJ会員は会員番号等必要事項を明記の上、下記事務局宛平成16年1月16日(金)までにお送り下さい。
(ホームページからも申込ができます)
また、参加費につきましては平成16年1月21日(水)までに以下の方法にてお支払い下さい。
- ・郵便振替 00170-9-179578 (日本ガスタービン学会)
 - ・銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店 (普) 1703707 (日本ガスタービン学会)
 - ・現金書留

- 3) 事務局 : (社)日本ガスタービン学会
〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13-402
Tel.03-3365-0095 Fax.03-3365-0387
URL. <http://www.soc.nii.ac.jp/gtsj/> E-Mail gtsj@pluto.dti.ne.jp

資料集・ネームカードは当日受付にてお渡しします。



第32回ガスタービンセミナー

(平成16年1月22,23日)

申込書

(社)日本ガスタービン学会 行

FAX 03-3365-0387

TEL 03-3365-0095

会社名	
所在地	〒
TEL	
FAX	

参加者名 (所在地・連絡先が所属により異なる場合には、本用紙をコピーして別シートにご記入下さい。)

フリガナ 氏名	所 属	TEL FAX E-MAIL	所属学協会 GTSJの方は会員 No.をご記入下さい	参加日 0印をつけて下さい
				22・23
				22・23
				22・23
				22・23
				22・23

【事務局への連絡事項】

	2日間	人数	1日のみ	人数	合計金額
正会員	25,000円		18,000円		円
学生会員	5,000円		5,000円		円
会員外	35,000円		25,000円		円
支払予定日： 月 日				支払金額	円
払込方法：(○をつけてください。) <ol style="list-style-type: none"> 銀行振込 (みずほ銀行 新宿西口支店 普通 1703707) 郵便振替 (00170-9-179578) 現金書留 					
*口座名はいずれも「(社)日本ガスタービン学会」です。					
請求書の発行：	要 (宛名：)				不要
領収証の発行 (当日お渡しします)：	要 (宛名：)				不要