

■ 報 文 ■

メタノールを燃料とするガスタービンの性能解析

Performance Analysis of Gas Turbine Fueled with Methanol

檀 上 旭 雄*・沢 田 照 夫**
Kyokuo Danjo Teruo Sawada

1. まえがき

石油代替燃料として、現在最も有望なものにアルコール（特にメタノール）がある^{1,2)}。すでにアルコール類は自動車用燃料として世界各国で使用されており³⁻⁵⁾、近い将来には、ガスタービンへの利用も実現するものと思われる⁵⁻⁸⁾。

アルコール類燃料は石油系燃料に比べ低位発熱量が小さく、蒸発潜熱が大きい²⁾。ガスタービン排ガスの排熱によりメタノールの特性である、ある種の触媒を用いてメタノールと排熱を接触させると、メタノールは分解、または水を添加すれば改質が行われ、これらは吸熱反応でありガスタービンの排熱を回収することになる。ひいてはこれらによりメタノールの低位熱効量の増加をはかることが可能となる⁶⁾。このアルコール燃料の特性を有効に利用すれば、ガスタービンの熱効率は非常に高いものを得ることができる。この意味においてアルコール燃料は脱石油、代替燃料としてその利用度は大きくクローズアップされる^{4,9,11)}。

Bardon¹⁰⁾はアルコール類の蒸発潜熱が大きいことを利用する方法として、圧縮機への吸入空気中へアルコールを気化する方法や圧縮機の間段に噴射してガスタービンの熱効率の向上をはかることを提案している。

本研究では比較的低温でメタノールが、ガスタービン排熱により分解、改質を行うことが可能であり、ガスタービンの排熱を有効に利用し回収する方法について述べており、石油系燃料では利用できない再生式サイクルにおいても有効であることを述べ、極めて高い熱効率のガスタービンの出現が可能となる。

以上のような観点から、先ず通常ガスタービンサイクルについて、燃料にメタノールと灯油を用いた場合

の比較を行い、メタノールの有利性を示した。さらに分解、改質器付きのメタノールガスタービンサイクルについてもそれらの性能解析を実施し極めて熱効率の向上の著しいことを明らかにした。

2. 燃料メタノールの特性

メタノールは石油に代わる燃料として次のような特長がある。

①天然ガス、石炭など原料となる資源は豊富に存在する。②燃焼排ガスがクリーンである。③液体であるため、取り扱いが容易かつ効率的である。④製造法が確立している。さらに石油系燃料と比較すると次のような特質がある。⑤理論空燃比が小さい。⑥低位発熱量が小さい。⑦蒸発潜熱が大きい。⑧オクタン価が高い。⑨ガソリンに比較して引火点が高い。⑩火災が不輝炎である。⑪低温での分解、改質が可能である。

メタノールをガスタービンに用いた場合、②③および⑨は有利な点であり、⑥は一見不利に思われるが、②との関連において、定置式ガスタービンの場合は比出力の増大になり、必ずしも不利ではない。ただアルコールは、ある種の金属、プラスチックおよび塗料等を腐食させる恐れがあるので、実用化の段階ではこの方面における考慮と対策が必要になる。表1にメタノールと灯油(*n*-ドデカン)の物性値¹²⁾の比較を示す。

表1 メタノールの物性¹²⁾

	メタノール	ケロシン**
分子式 (分子量)	CH ₃ OH (32)	C ₁₂ H ₂₆ (170)
標準沸点 (°C)	64.7	214.5
蒸発潜熱 (J/mol)*	37,489	61,200
低位発熱量 (J/mol)*	639,040	7,493,600
理論空燃比	0.155	0.0665

* 101.3kPa, 25°C

**ケロシンの組成は*n*-ドデカンと等しいものとする

* 大阪府立大学工学部航空工学科助手

〒591 堺市百舌鳥梅町4-803

** 岡山理科大学工学部機械工学科教授

(註) 本研究会第3回研究発表会(59/4/26)にて講演
原稿受理(62/4/19)

3. 燃料メタノールを用いたガスタービンの作動流体の特性

3.1 ガス特性

サイクルの各点における状態を決定するために、ガス特性として次の仮定を設ける。

- ① ガス中の各成分は表 2 に示すような温度に依存する比熱をもつ理想ガスとする。
- ② 空気は、酸素と窒素から構成されており、重量比が 23.3% と 76.7% とする。
- ③ 燃焼は完全燃焼とし、燃焼ガスの成分は二酸化炭素と水蒸気、窒素及び酸素よりなる。

以上の仮定により、作動ガスの比エンタルピ (h') と比エントロピ (s) の変化量は、温度変化 T_1 から T_2 に対して、ガス中の各成分の質量比 (m) を用いて次のように表される。

$$h_2 - h_1 = \sum_{i=1}^j m_i \int_{T_1}^{T_2} c_{p,i} dT \quad \dots\dots(1)$$

$$S_2 - S_1 = \sum_{i=1}^j m_i \left[\int_{T_1}^{T_2} \frac{c_{p,i} dT}{T} - R \ln \left(\frac{p_{i2}}{p_{i1}} \right) \right] \quad \dots\dots(2)$$

表 2 気体の定圧比熱 C_p ($J/mol \cdot K$)¹²⁻¹⁴⁾

a) $C_p = a + bT + cT^{-1} + dT^{-1/2} + eT^{-2}$

	a	b	c	d	e
O ₂	47.178	0	3556	-536	0
N ₂	39.60	0	-8066	0	1498000
CO ₂	67.80	0	-15200	0	1821000
H ₂ O	83.09	0	17400	-1860	0

b) $C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$

	a	b × 10 ³	c × 10 ⁶	d × 10 ⁹	e × 10 ¹²
CH ₃ OH	15.157	104.256	-29.518	0	0
H ₂	25.776	19.5	-40.498	36.776	-11.323
CO	31.819	-20.374	48.316	-35.623	9.072

3.2 液体特性

液体メタノールは表 3 に示す一定の比熱 (C_{p1}) をもち、その比エンタルピ及び比エントロピは次式で表される。

$$h_2 - h_1 = C_{p1} (T_2 - T_1) \quad \dots\dots(3)$$

$$S_2 - S_1 = C_{p1} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad \dots\dots(4)$$

表 3 液体の比熱 C_{p1} 及び蒸発潜熱 r_s ¹²⁾

	$C_{p1}(J/mol \cdot K)$	$r_s(J/mol)$
CH ₃ OH	82.220	37489*
H ₂ O	75.222	73974*

* 101.3 kPa · 25°C

3.3 蒸発潜熱

温度 (T) における蒸発潜熱 (r_s) は標準状態 (25°C, 101.3 kPa) における値を (r_{s0}) とすると次のように表される。

$$r_s = h'' - h' = r_{s0} + \int_{T_0}^T c_{p,d} T - c_{p,e} (T - T_0) \quad \dots\dots(5)$$

ここで h'' , h' は温度 (T) における飽和蒸気圧並びに飽和液体の比エンタルピである。また蒸発における比エントロピの変化は次のようになる。

$$s_r = s'' - s' = r_s / T \quad \dots\dots(6)$$

3.4 飽和蒸気圧

飽和蒸気圧は次に示す Antoine の式¹⁵⁾ に従うものとする。

$$\log_{10} P = A - B / (C + T) \quad \dots\dots(7)$$

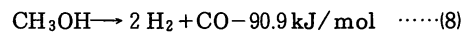
ここで P (kPa) は温度 T (K) における飽和蒸気圧であり、定数は表 4 に示す。

表 4 Antoine の方程式の係数¹⁵⁾

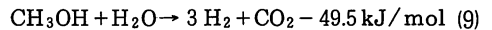
	A	B	C
CH ₃ OH	7.0224	1474.08	-44.02
H ₂ O	7.079	1663.12	-45.29

3.5 メタノールの分解、改質における発熱量の増加

メタノールを 200°C - 350°C のもとで、ある触媒を用いて加熱すると水素 (H₂) と一酸化炭素 (CO) に分解し、低位発熱量は約 20% 増大する。分解における反応式は次のようになる。



次にメタノールを 250 ~ 300°C のもとで、水または水蒸気と反応させることにより、水素 (H₂) と二酸化炭素 (CO₂) が生成され、発生した水素の発熱量はメタノールのその約 14% 増となる。改質における反応式は次のようになる。



これらの反応における発熱量の変化を表 5 に示す。

表 5 各反応における低位発熱量の増加量¹²⁾

	低位発熱量 (kJ/kg)	LHV/LHVCH ₃ OH
CH ₃ OH _(l)	19970	1.0
CH ₃ OH _(g)	21140	1.06
2 H ₂ + CO (4 × 121000 + 28 × 10110) / 32 = 23970	23970	1.20
3 H ₂ (6 × 121000) / 32 = 22690	22690	1.14

3.6 比出力と熱効率

比出力、熱効率は次のように求める。ただし添字等は図-1 に示す各点に対応している。

$$\text{圧縮仕事 } -L_c = (h_2 - h_1)_a = (h_{2s} - h_1)_a$$

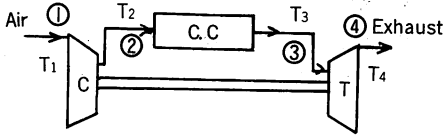


図-1 単準サイクルの配置図

$$/ \eta_c \dots\dots\dots (10)$$

$$\begin{aligned} \text{タービン仕事 } L_T &= (1+f)(h_3-h_4)_g \\ &= (1+f)(h_3-h_4)_g \cdot \eta_T \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{比出力 } L = \eta_m(L_T + L_c) \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{熱効率 } \eta_{th} = L / (f \cdot \text{LHV}) \dots\dots\dots (13)$$

ここで η_c , η_T は圧縮機, タービンの断熱効率を示し, η_m は機械効率である。 f は燃空比(= g_f/g_a)である。燃料流量(g_f)は、燃焼器入口と出口のヒートバランスより求める。

$$\begin{aligned} (h_2-h_0)_a + f\{(h_{1f}-h_0)_f + \eta_B \cdot \text{LHV}\} \\ = (1+f)(h_3-h_0)_g \end{aligned} \dots\dots\dots (14)$$

ここに η_B は燃焼器効率である。燃焼ガスの比エンタルピは、燃料流量によって変わるので空気と燃焼ガスのモル組成ごとにエンタルピ変化を計算し、式(14)より求められる。同様に等エントロピ過程後の温度および比エンタルピ変化量が決まっている過程後の温度は、式(2)および(1)より反復計算によって算出する。反復計算にはニュートン・ラプソン法¹⁶⁾を用いた。

再生サイクルについては、燃焼器入口状態を次式より求める。図-2に再生サイクルの配置図を示す。

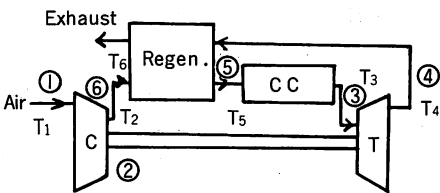


図-2 再生サイクルの配置図

$$(h_5-h_2) = \eta_R \cdot (h_4-h_2) \dots\dots\dots (15)$$

ここに η_R は再生器の温度効率である。再生サイクルでは、燃焼ガス中のモル組成と燃料流量が単純サイクルの時と異なるので、タービン出口温度(T_4)の決定は単純サイクルの T_4 の値を第1近似値として式(14)より空気側再生器出口温度(T_5)、すなわち空気の燃焼器入口温度を求める。したがって式(13)は次のようになる。

$$\begin{aligned} (h_5-h_0)_a + f\{(h_{1f}-h_0)_f + \eta_B \cdot \text{LHV}\} \\ = (1+f)(h_3-h_0)_g \end{aligned} \dots\dots\dots (16)$$

式(16)によって新しく求めた燃料流量を用いて T_4 の

第2近似値を求める。この操作を T_4 の変化が十分に小さくなるまで続け、再生サイクルの状態を決定する。

4. メタノールを燃料とするガスタービンの性能解析

4.1 ガスタービンのサイクル解析の設定条件

以下のガスタービンの性能解析は表6に示す値を用いて行った。

表6 性能解析の設定値

圧縮機の断熱効率	$\eta_c = 0.85$
タービンの断熱効率	$\eta_T = 0.90$
燃 焼 効 率	$\eta_B = 0.98$
再生器温度効率	$\eta_R = 0.75$
機 械 効 率	$\eta_m = 1.00$
大 気 温 度	$T_1 = 288 \text{ K}$
大 気 圧	$P_1 = 101.3 \text{ kPa}$
タービン入口温度	$T_3 = 1000, 1400 \text{ K}$
圧 力 比	$r = 2 \sim 25$
燃料の初期温度	$T_{1f} = 288 \text{ K}$
燃料の低位発熱量 LHV (J/mol)	
CH ₃ OH (l)	= 639040
H ₂ (g)	= 242000
CO (g)	= 283080
C ₁₂ H ₂₆ (l)	= 7493600

4.2 通常サイクルにおけるメタノールと灯油の比較

表6の条件を用い単純サイクルと、再生器付サイクルに対して求めた比出力(L_{sp})と熱効率(η_{th})の圧力

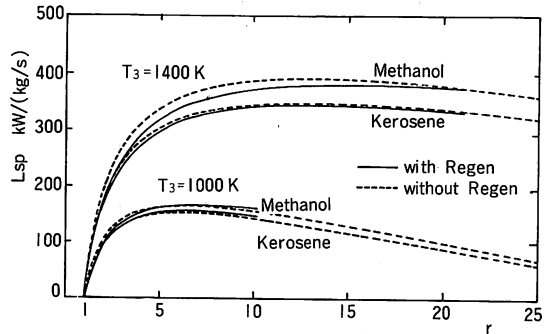


図-3 比出力の比較

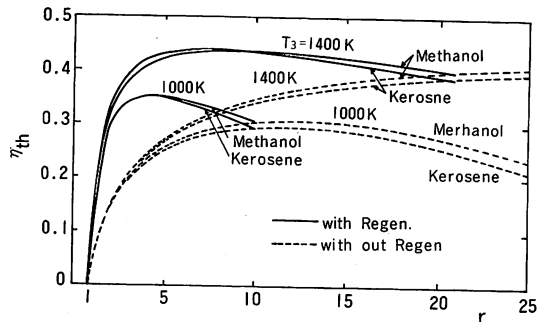


図-4 熱効率の比較

比 (r) に対する変化を図-3および図-4に示す。メタノールは灯油に比べ、同一タービン入口温度に対する燃空比 (f) の値が約 2 倍となるためタービンにおけるガス流量 (g_g) がその分だけ大になり、単位空気流量当りの比出力もその分だけ増加することになる。熱効率も比出力の増加が関係するため、低圧力比の再生器付の場合を除きわずかではあるが高くなる。

4.3 分解装置付ガスタービンサイクル

ガスタービンからの排熱により、メタノールの分解反応を利用するガスタービンサイクルの配置図を図-5に、またそのT-s線図を図-6に示す。また分解装置の概念図を図-7に示す。以下の計算はタービン入口温度 (T_3) = 1400K の場合を示す。

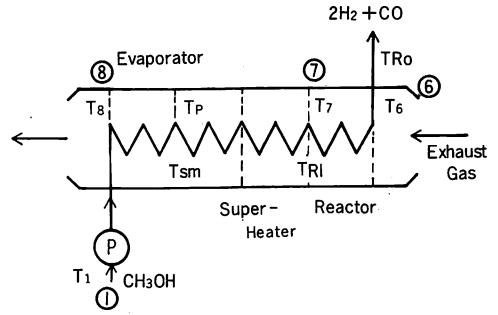


図-7 分解装置の概念図

行するので、分解率 (χ) を用いて考案した。

反応器においてメタノールがガスタービンの排気から受取る熱量は、単位メタノール当たり次のようになる。

$$Q_{re} = 0.125\chi(h_{R0} - h_s + LHV_s)_{H_2} + 0.875\chi(h_{R0} - h_s + LHV_s)_{CO} + (1 - \chi)(h_{R0} - h_s + LHV_s)_{CH_3OH} - (h_{R1} - h_s + LHV_s)_{CH_3OH} \quad (17)$$

ここに h_{R0} は反応器出口の比エンタルピ、 h_{R1} は反応器入口の比エンタルピを示す。添字 s は標準状態を表し、化学式は各成分の値を示す。また発熱量は次のようになる。

$$LHV = 0.125\chi(LHV_s)_{H_2} + 0.875\chi(LHV_s)_{CO} + (1 - \chi)(LHV_s)_{CH_3OH} \quad (18)$$

分解反応はガスタービン排気に含まれる排熱量に依って行れるため排ガスと分解反応器の間には温度差が必要であり、ここでは次の制約を設定した。

- ① 加熱過程ならびに反応過程においては50℃以上、
- ② 飽和液体、すなわちピンチポイントは15℃以上の温度差が存在する。

以上の制約により分解装置への排ガスの流入温度 (T_6) は燃空比 (f) と分解率 (χ) の関数となる。

分解装置付ガスタービンの熱効率が圧力比、分解率

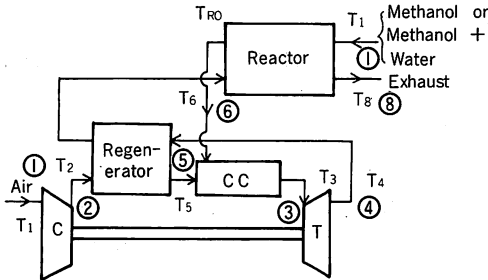


図-5 分解、改質装置付再生サイクル配置図

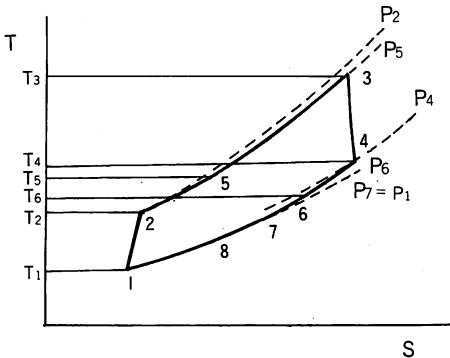


図-6 分解装置付再生サイクルのT-s線図

ポンプによりガスタービン燃焼器圧力まで昇圧されたメタノールは分解装置に流入し、ガスタービン排気によって加熱され蒸発した後反応器に入る。そして水素と一酸化炭素に分解されて燃焼器に噴射される。メタノールの分解反応の反応率は圧力と温度の関数であり、平衡状態では 506.5 kPa、300℃以上であればほぼ 100% 反応する。ここでは反応器入口温度 (T_{R1}) = 300℃、反応器出口温度 (T_{R0}) = 350℃とし、サイクルの圧力比は 5 以上としているので、平衡状態では完全に反応することになるが、実際には流動状態で反応が進

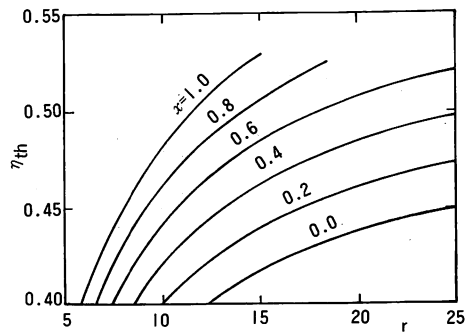


図-8 分解装置付非再生サイクルの熱効率

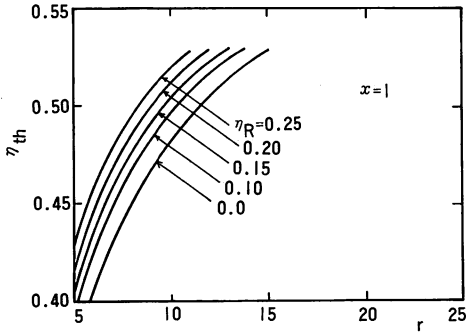


図-9 分解装置付再生サイクルの熱効率

をパラメータとしてその変化を図-8, 図-9に示す。再生サイクルにおいて、再生器の温度効率 (η_R) が高い場合には、分解装置における熱量が不足するため、ここでは η_R = 0.25 までとした。また熱効率 (η_{th}) に上限が存在するのは、分解装置入口温度 (T_{Ri}) に対する制限が原因している。

両図から明らかなように、分解装置付ガスタービンサイクルにおいては、最大熱効率は約53%にも達することがわかり、熱効率の向上に対し有効な方法である。なお比出力に関しては、分解装置の有無に対する変化はほとんど存在しない。

4.4 改質装置付きガスタービンサイクル

改質装置付きガスタービンの配置図は分解装置付きの場合と全く同様であり、改質反応器へはメタノールと共に水が供給される。改質装置の概念図を図-10に示す。燃焼器圧力まで昇圧されたメタノールと水はそれぞれの通路において加熱され蒸気になり、改質反応器に流入し水素と二酸化炭素となって流出する。ここでの反応温度範囲は250~300℃とし、ガスタービン排ガスと改質反応器の温度差は分解器の場合と同じとして解析した。以下はタービン入口温度 (T₃) = 1400K の場合である。

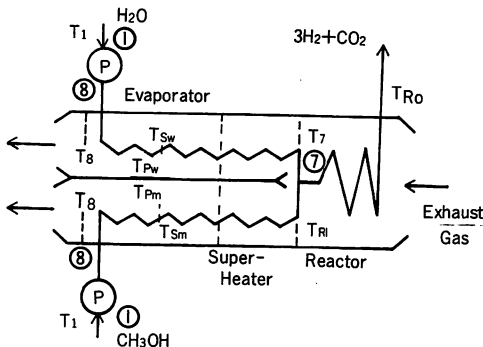


図-10 改質装置の概念図

改質反応を実行するためには、メタノールと共に水も加熱する必要がある。しかし、メタノールと水ではその蒸発特性が異なるため、水とメタノールのモル比 (W_R) も改質率 (y) とともに性能に関係する。改質装置によって回収される熱量は次のように表される。

$$Q_{re} = \{ 0.188y(h_{R0} - h_s + LHV_s)_{H_2} + 1.375y(h_{R0} - h_s)_{CO_2} + (1 - y)(h_{R0} - h_s + LHV_s)_{CH_3OH} + (W_R - 0.563y)(h_{R0} - h_s)_{H_2O} \} - \{ (h_{R1} - h_s + LHV_s)_{CH_3OH} + W_R(h_{R1} - h_s)_{H_2O} \} \dots\dots\dots(19)$$

次に燃焼器に入る燃料の低位発熱量は次のようになる。

$$LHV = 0.188y (LHV_s)_{H_2} + (1 - y)(LHV_s)_{CH_3OH} \dots\dots\dots(20)$$

改質装置に対する排ガスの温度差は前述の如く設定したので、分解の場合と同様に最低改質器入口温度が存在し、この温度は改質率 (y) と水・メタノール比 (W_R) の関数になる。その関係を水とメタノール比のモル比が1すなわち重量比で (W_R) = 0.563の場合の熱効率の試算結果を図-11に示す。実線は再生器、破線は非再生式を示す。改質率 y が0.2増加すると熱効率 η_{th} は約2%上昇する。y = 0は改質器を有しない時を示す。

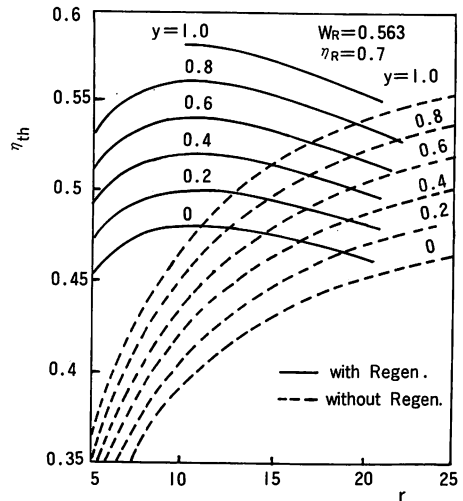


図-11 改質装置付の熱効率の比較

図-12は水・メタノール比の熱効率に及ぼす影響を示す。W_R = 0.563, 0.675, 0.844, 1.125および1.688はモル比でそれぞれ、1.0, 1.2, 1.5, 2.0および3.0に対応する。W_Rの変化による熱効率の変化はあまり大きくないが、W_Rの大きい場合には、熱効率 η_{th} は59%になり熱効率の向上が著しい。

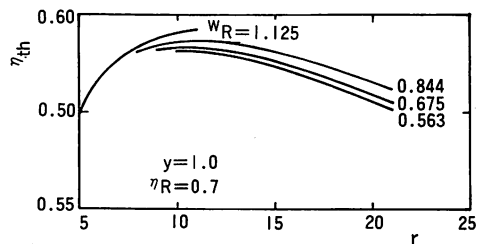


図-12 改質装置付再生サイクルの熱効率

5. まとめ

メタノールを燃料とするガスタービンサイクルの性能解析を行った結果、適当なサイクルを選ぶことにより、石油系燃料に比べ大幅な熱効率の改善の可能性のあることが明らかになった。以下に要点をまとめる。

- (1) 分解反応または改質反応を利用したガスタービンにおいては熱効率は著しく向上する。分解装置付きサイクルでは20%、改質装置付きサイクルにおいては34%の熱効率の向上があった。
- (2) 分解装置付きガスタービンでは、高圧力比にすることができない。また再生器を併用してもあまり効果がない。
- (3) 改質装置付きガスタービンでは、再生器との併用によって大きな効果がある。また低圧力比で高い熱効率を得るには、水・メタノールモル比を2程度にするとよい。

最後に本研究の計算は、当時本学部学生、寿朝義博(現在、トヨタ自工(株) 君の援助が大であった。また計算は大阪府立大学計算センターを利用させていただいた。あわせて謝意を表す。

参考文献

- 1) 平尾収; 代替エネルギーとしての燃料アルコールの問題 第1集(1980), 開発社.
- 2) 鍵谷勤; 代替燃料としてのアルコールとその経済性, エネルギー・資源, 1巻, 2号(1980), 23~30.
- 3) 田中泰一郎; 代替エネルギーとしての燃料アルコールの問題 第1集(1980), 開発社.
- 4) 平尾収, 鶴賀孝廣; 代替燃料としてのメタノール—その必要性と可能性—, 日本機械学会誌, 第35巻 第763号(1982), 593~598.
- 5) 金栄吉; メタノールの自動車への利用と性能, 排気エミッション, 燃料協会誌, 第56巻第605号(1977), 711~720.
- 6) 佐藤幸徳; アルコール燃料のガスタービンへの適用, 日本ガスタービン学会誌, Vol.9 No.35(1981), 22~32.
- 7) 檀上旭雄; 代替エネルギーとしての燃料アルコールの問題 第3集(1982), 開発社.
- 8) 檀上旭雄; 第5回アルコール燃料技術(AFT)国際シンポジウムに出席して, 日本ガスタービン学会誌10巻-40号(1983), 57~58.
- 9) 河野俊之; 新燃料油としてのアルコール, 自動車研究巻数(1980), 5~71.
- 10) M. F. Bardon, Trans. of the ASME, J-of Engineering for Power, Vol.104, (1982) 341-348.
- 11) 吉川彰一, 野村正勝; 石油代替エネルギーの研究開発動向, 機械の研究巻数(1980), 45~51.
- 12) 水谷幸夫; 燃焼工学(1977) 森北出版.
- 13) R. Wark; Thermodynamics, McGraw-Hill (1979).
- 14) 日本機械学会; 技術資料, 流体の熱物性値集(1983).
- 15) J. A. Deam; Handbook of Chemistry, 14th Edition, McGraw-Hill (1973).
- 16) マコーミック, サルパドリ共著, 清水留三郎訳; FORTRANによる数値計算プログラム(1970)サイエンス社.

洋書紹介

Natural Gas Markets and Contracts

天然ガス市場と契約

この20年間で OECD-ヨーロッパエネルギー総需要比率で2%から16%拡大した天然ガス市場の構造, 取引, 販売能力, 英国ガス企業民営化の影響予測, 産業需要代替選択変動性, 供給安定性などの分析とそれに基づく取引契約の企画, 交渉における問題点の検討を扱った総合論文集。

1. 書/誌名: Natural Gas Markets and Contracts
2. 著者/編者: Golombek, R. Hoel, M. & Vislie, J. (eds.)
3. 価 格: Dfl. 150
4. 発行所名: North-Holland, a division of Elsevier Science Publishers, Amsterdam
5. サ イ ズ: 15,5 × 23cm

お近くの洋書店にてお申し込み下さい。