

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-381

水素-酸素-空気系燃焼生成ガスの物性値

豊川光雄・鈴木和雄・毛呂明夫

1979 年 5 月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 水素-酸素-空気系燃焼生成ガスの物性値\*

豊川光雄\*\* 鈴木和雄\*\* 毛呂明夫\*\*

## 要 約

水素-酸素, 水素-空気, 水素-酸素-空気の燃焼生成ガスの熱力学物性値および輸送物性値を計算した。

計算点は, 圧力 0.001 ~ 1000 atm, 温度 600 ~ 5000 K とし, 組成は酸素・水素混合比 2, 4, 6, 8, 10 および酸素+空気中の酸素・水素混合比がこれに相当するものを選んだ。水素-空気については, 量論比 ( $\rho_F = 34.24$ ) を中心に 1.0 ~ 68.48 までの数点を選んだ。

計算結果を温度, 圧力を変数とする立体図に描き, 物性値の変動傾向を調べた。立体図からは物性値の値を読みとりにくい, 温度を横軸に圧力を助変数とする付録の物性値の平面図からこれらの値は読みとることができる。又物性値と組成の関係を示すため同図の圧力数点について温度を横軸とする平衡組成図を与えた。

空気温度を常温から 800 °C まで変えて断熱火炎温度を計算したが, 断熱火炎温度以下では粘度・熱伝導率・比熱等は, 圧力および温度による変化が比較的ゆるやかである。これ以上の高温では, これらの物性値は大きく変化する。プラントル数については, 断熱火炎温度以下でも変化は大きい。

## 1. ま え が き

近年, 水素を燃料とする種々のロケットおよびジェットエンジンの研究開発が行われてきた。これらエンジンの排気ガスの大気中への拡散の問題, 空気吸込型ロケットの燃焼<sup>1)</sup>の問題等において, 水素を燃料とする燃焼生成物の物性値が必要となっている。

水素-酸素系燃焼生成物の物性値については, R. A. Svehla の報告<sup>2)</sup>があり, 又空気を酸化剤に含む燃料系に関しては, G. F. Klich のメタン-空気-酸素系燃焼生成物の物性値についての報告<sup>3)</sup>等がある。

\* 昭和54年4月10日受付

\*\* 角田支所

本報告は, 水素を燃料とし, 酸素, 空気, 酸素+空気を酸化剤とする燃焼生成物の物性値に関して温度・圧力を変数とする立体図を描き, 物性値の定性的な変化傾向を検討している。立体図からは物性値が読みとりにくいので, 別途代表的な混合比について温度を横軸に, 圧力を助変数とする定量的な図を与えた。

これらのデータを用いて, 角田支所計算センターのキャラクタディスプレイを使い, 容易に物性値が得られるシステムを構成したので, その概要をも併せて示す。

## 2. 計算における仮定と方法

### 2.1 平衡組成計算の仮定と方法

平衡組成の計算にあたっては, 以下の仮定を行なった。

- (1) 燃焼生成ガスは, 理想気体とする。
- (2) 燃焼生成ガスは, 熱化学的に平衡状態にある。
- (3) 火炎温度の計算にあたっては, 断熱状態を仮定する。
- (4) 空気は, 以下の組成を持つものとした。

$N_2$  ..... 78.0945       $O_2$  ..... 20.9730  
 $Ar$  ..... 0.9325      (容積%)

- (5) 水素-酸素系の平衡組成計算においては, 以下の8種の化学種を考慮する。

$H, H_2, H_2O, H_2O_2, HO_2, O, OH, O_2$

- (6) 水素-空気系および水素-酸素-空気系の平衡組成計算においては, 以下の20種の化学種を考慮する。

$Ar, H, H_2, H_2O, H_2O_2, HNO, HO_2, N, NH, NH_2, NH_3, NO, NO_2, N_2, N_2H_4, N_2O, N_2O_4, O, OH, O_2$

定温・定圧下での平衡組成の計算にあたっては, Gibbs の自由エネルギーが最小条件を満足するように, Newton-Raphson法を用いた繰返し計算を行なった。<sup>4), 5)</sup>

断熱火炎温度の計算にあたっては, 定圧でエンタルピー一定なる拘束条件下のもとに, 同様に Newton-Raphson

法を用いて組成を得た。(5), (6)の化学種の熱力学データは参考文献<sup>5)</sup>による。

## 2.2 輸送物性の計算の仮定と方法

輸送物性の計算では、次の仮定を用いた。

- (1) 二体粒子間衝突のみを考慮するいわゆる希薄気体モデルを仮定する。圧力の効果は平衡組成の決定に際してのみ考慮される。
- (2) 多原子分子の内部エネルギーの緩和等は考慮しない。
- (3) 化学種間の分子間ポテンシャルは、推奨値のある輸送物性値については、これと一貫性のある値を選ぶ。<sup>6)</sup>

以上のような仮定に基づき、Chapman-Enskogの理論式を多成分系に拡張したCurtiss-Hirschfelderの式<sup>7)</sup>を用いた。計算式の詳細は、参考文献<sup>7), 8)</sup>を参照されたい。

## 3 物性値と計算点

### 3.1 物性値の種類

計算を行なった物性値の種類を表1、表2に示す。

番号	名 称	記号	単 位
1	Density	$\rho$	g/cc
2	Enthalpy	H	cal/g
3	Entropy	S	cal/g · k
4	Molecular Weight	$\bar{M}$	g/g · mol
5	Specific Heat Capacity	$c_p$	cal/g · k
6	Isentropic Exponent	$\gamma_s$	
7	Specific Heat Ratio	r	
8	Sound Velocity	a	m/s

表1 熱力学物性値

番号	名 称	記 号	単 位
9	Viscosity	$\mu$	poises
10	Thermal Conductivity Translational	$\lambda_{tra.}$	cal/cm · s · k
11	" " Internal	$\lambda_{int.}$	"
12	" " Frozen	$\lambda_{fro.}$	"
13	" " Reaction	$\lambda_{rea.}$	"
14	" " Equilibrium	$\lambda_{eq.}$	"
*15	Specific Heat Capacity Frozen	$c_{p, fro.}$	cal/g · k
*16	" " Equilibrium	$c_{p, eq.}$	"
17	Prandtl Number Frozen	$Pr, fro.$	
18	" " Equilibrium	$Pr, eq.$	
19	Lewis Number	Le	

表2 輸 送 物 性 値

注) \*印の物性値は熱力学物性値であるが17～19の物性値を求めるためにここに再掲した。

熱力学物性値は密度・エンタルピ・エントロピ等8種類、輸送物性値は粘度・熱伝導率等9種類である。

比熱・熱伝導率・プラントル数については、平衡値(添字 eq. で示す)と凍結値(添字 fro. で示す)を示した。

一般的に温度、圧力等が変動する場合において、局所平衡を仮定すると平衡化学組成は移動する。このため比熱、熱伝導率等の熱エネルギーが関与する量およびこれらの諸量を含む物性値では、化学種のエンタルピの寄与を考慮しなければならない。組成の変動が無視しうる場合、例えば低温においては平衡値と凍結値は一致する。

### 3.2 物性値間の関係

音速 a と等エントロピ指数  $\gamma_s$  の間には、次式の関係がある。

$$a = \sqrt{\gamma_s R T}$$

ここで R : 気体定数, T : 温度 (K)

各熱伝導率の間には次の関係が成立する。

$$\lambda_{eq.} = \lambda_{tra.} + \lambda_{int.} + \lambda_{rea.} = \lambda_{fro.} + \lambda_{rea.}$$

比熱については次の関係が成立する。

$$c_{p, eq.} = c_{p, fro.} + c_{p, rea.}$$

プラントル数については次の関係が成立する。

$$Pr, fro. = \mu \times c_{p, fro.} / \lambda_{fro.}$$

$$Pr, eq. = \mu \times c_{p, eq.} / \lambda_{eq.}$$

ルイス数<sup>9)</sup>は次の関係式から求めた。

$$Le = \lambda_{rea.} \times c_{p, fro.} / (\lambda_{fro.} \times c_{p, rea.})$$

## 3.3 温度・圧力・混合比の計算点

温度および圧力の計算点を表3に示す。温度は600～5000Kで100度間隔で45点とした。圧力は0.001～1000 atmで13点とした。

水素を燃料として、酸化剤により次の3つの系に分けた。

- (1)  $H_2-O_2$ 系
- (2)  $H_2-Air$ 系
- (3)  $H_2-O_2-Air$ 系

混合比の計算点を表4～6に示す。

$H_2-O_2$ 系については、表4に示すように $\%F = 0.5 \sim 100$ までと $H_2$  100%,  $O_2$  100%の計27点とした。

$H_2-Air$ 系では、表5に示すように量論比( $\%F =$

34.24)を含む1.0～68.48までと $H_2$  100%,  $Air$  100%の12点とした。

$H_2-O_2-Air$ 系では、表6に示すように $H_2-O_2$ 系の( $\%F$ ) Primary = 2～10に空気を加えた $H_2-O_2-Air$ 系の( $\%F$ ) Final = 2～20の15点とした。

巻末付録の図は、 $H_2-O_2$ 系では $\%F = 2, 4, 6, 8, 10$ ,  $H_2-Air$ 系では、 $\%F = 4, 7.94, 34.24, 68.48$ ,  $H_2-O_2-Air$ 系では、表6の( $\%F$ ) F = 20を除いた点について示した。

予熱空気による断熱火炎温度の計算点を表7に示す。

$H_2-Air$ 系では常温から800℃までの5点,  $H_2-O_2-Air$ 系は常温から600℃までである。

T (K)	600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700, 2800, 2900, 3000, 3100, 3200, 3300, 3400, 3500, 3600, 3700, 3800, 3900, 4000, 4100, 4200, 4300, 4400, 4500, 4600, 4700, 4800, 4900, 5000,
P (atm)	0.001, 0.003, 0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 1., 3., 10., 30., 100., 300., 1000.

表3 温度・圧力計算点

( $H_2-O_2$ ) $\%F$	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10., 15., 20., 40., 60., 100., $H_2$ (100%), $O_2$ (100%)
------------------------	--

表4  $H_2-O_2$ 系混合比計算点

( $H_2-Air$ ) $\%F$	1.0, 4.0, 7.0, 7.94, 10.76, 15.87, 21.22, 34.24, 49.0, 68.48, $H_2$ (100%), $Air$ (100%)
------------------------	--

表5  $H_2-Air$ 系混合比計算点

$(\frac{\%}{F})_P \backslash (\frac{\%}{F})_F$	2	4	6	8	10	20
2	△	○	○	○	○	○
4	—	△	○	○	○	○
6	—	—	△	○	○	○
8	—	—	—	△	○	○
10	—	—	—	—	△	○

表6  $H_2-O_2$ -Air系 混合比 計算点

予熱空気温度(℃)	25	200	400	600	800
$H_2$ -Air系	○	○	○	○	○
$H_2-O_2$ -Air系	○	○	○	○	—

表7 予熱空気による断熱火炎温度計算点

## 4 計算結果

### 4.1 計算結果の表示法

計算結果は立体図、平面図、平衡組成図で示した。図番号の表示は原則として下記のようにした。立体図をA、平面図をB、平衡組成図をCとし、続く数字1~3で $H_2-O_2$ 系、 $H_2$ -Air系、 $H_2-O_2$ -Air系を分類した。「—」記号に続く数字は物性値を表わし、表1、表2の左側の番号を示す。計算条件(混合比・圧力)による違いは「—」記号に続く一連の数字で区別した。又( )内に計算条件の数値をも示した。

例 図A-1-2

$H_2-O_2$ 系、エンタルピの立体図

$(\frac{\%}{F})_P$  :  $H_2-O_2$ 系の混合比

$(\frac{\%}{F})_F$  :  $H_2-O_2$ 系にAirを加えた最終的な混合比

△ :  $H_2-O_2$ 系

○ :  $H_2-O_2$ -Air系

例 図B-2-7-1 ( $\frac{\%}{F}=4$ )

$H_2$ -Air系、比熱比,  $\frac{\%}{F}=4$ の平面図

例 図C-3-2 [( $\frac{\%}{F})_P=2 \rightarrow (\frac{\%}{F})_F=4, 1 \text{ atm}$ ]

$H_2-O_2$ -Air系, ( $\frac{\%}{F})_P=2 \rightarrow (\frac{\%}{F})_F=4, 1 \text{ atm}$ の平衡組成図

図で示した物性値は $H, \bar{M}, \gamma, \mu, \lambda_{fro.}, \lambda_{eq.}, c_{p,fro.}, c_{p,eq.}, Pr_{fro.}, Pr_{eq.}$ の10種である。立体図は、温度と圧力を横軸にし同一スケールで4種の混合比を1組として表示した。温度軸は、600~5000 Kまで44等分した。これは100度間隔に相当する。圧力軸は、0.001~1000 atmまでを対数スケールで12等分した。立体図中の「×-×-×」印等は、断熱火炎温度を表わす。

平面図は、温度を横軸にとり範囲は立体図と同一とした。助変数の圧力は0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000 atmの7種とした。

平衡組成図は、温度を横軸にとり範囲は立体図と同一とした。組成は、モル分率で表わし $10^{-4}$ まで対数スケールで表示した。圧力は、代表的な0.01, 1, 100 atmの3点を選んだ。

4.2  $H_2-O_2$ 系

立体図の混合比（酸素・水素重量比）は、ロケットエンジンでよく使用される $O/F=4, 6$ ，量論比に近い $O/F=$

8および酸素過剰の $O/F=10$ を選んだ。

— 立体図による傾向の把握 —

## エンタルピ (H)

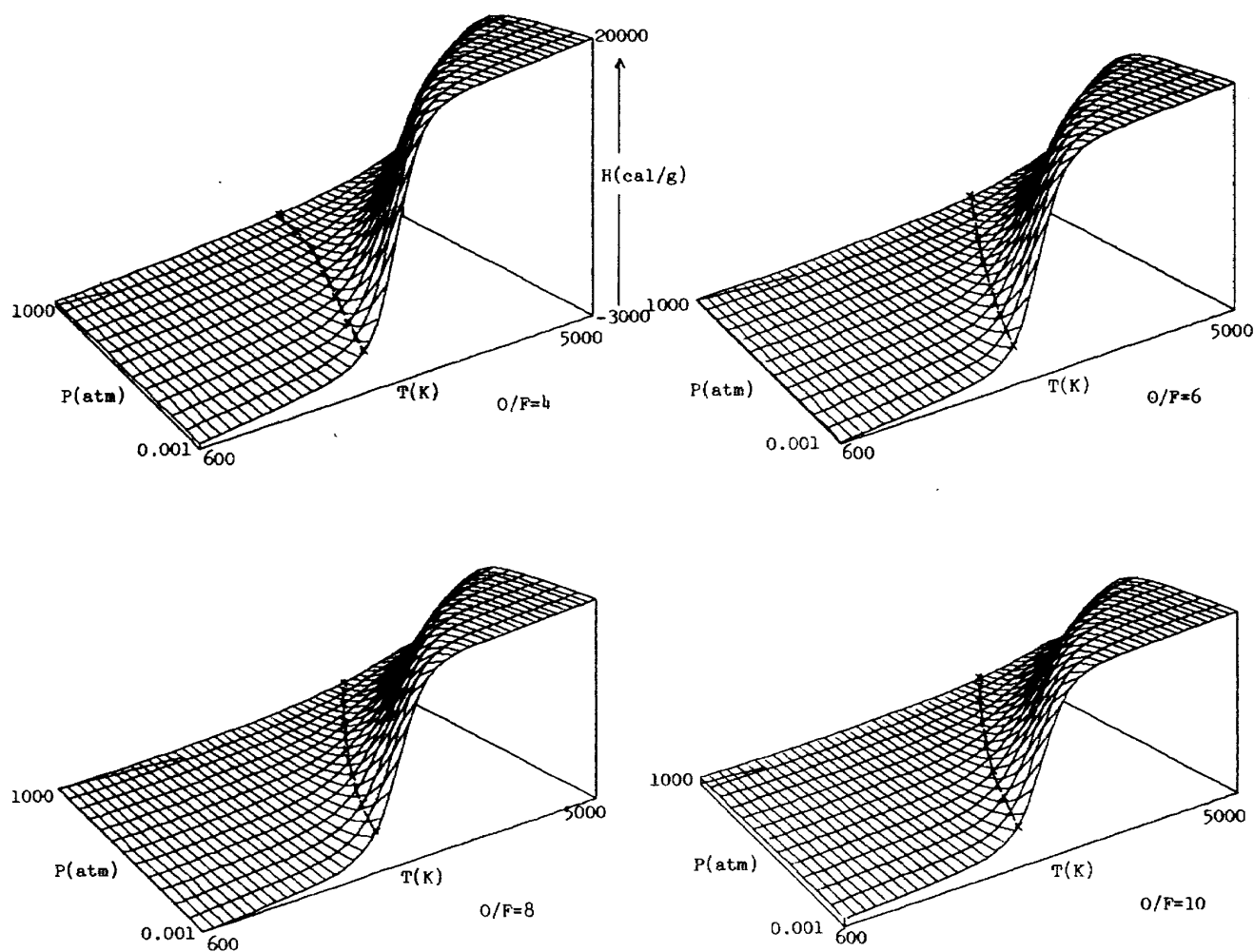


図 A - 1 - 2

エンタルピ (H) は、低圧高温になるに従い大きくなる。 $O/F$ の増加とともにHの変化の幅は小さくなる。Hが激しく変化している個所の温度・圧力は、 $O/F$ に関係なくほぼ一定である。Hと断熱火炎温度の関係は、例えば $GH_2(25^\circ C) - GO_2(25^\circ C)$ ではHが0であるから任意の圧力との交点が断熱火炎温度を示す。これらの点を結ぶことにより断熱火炎温度の圧力による変化がわかる。

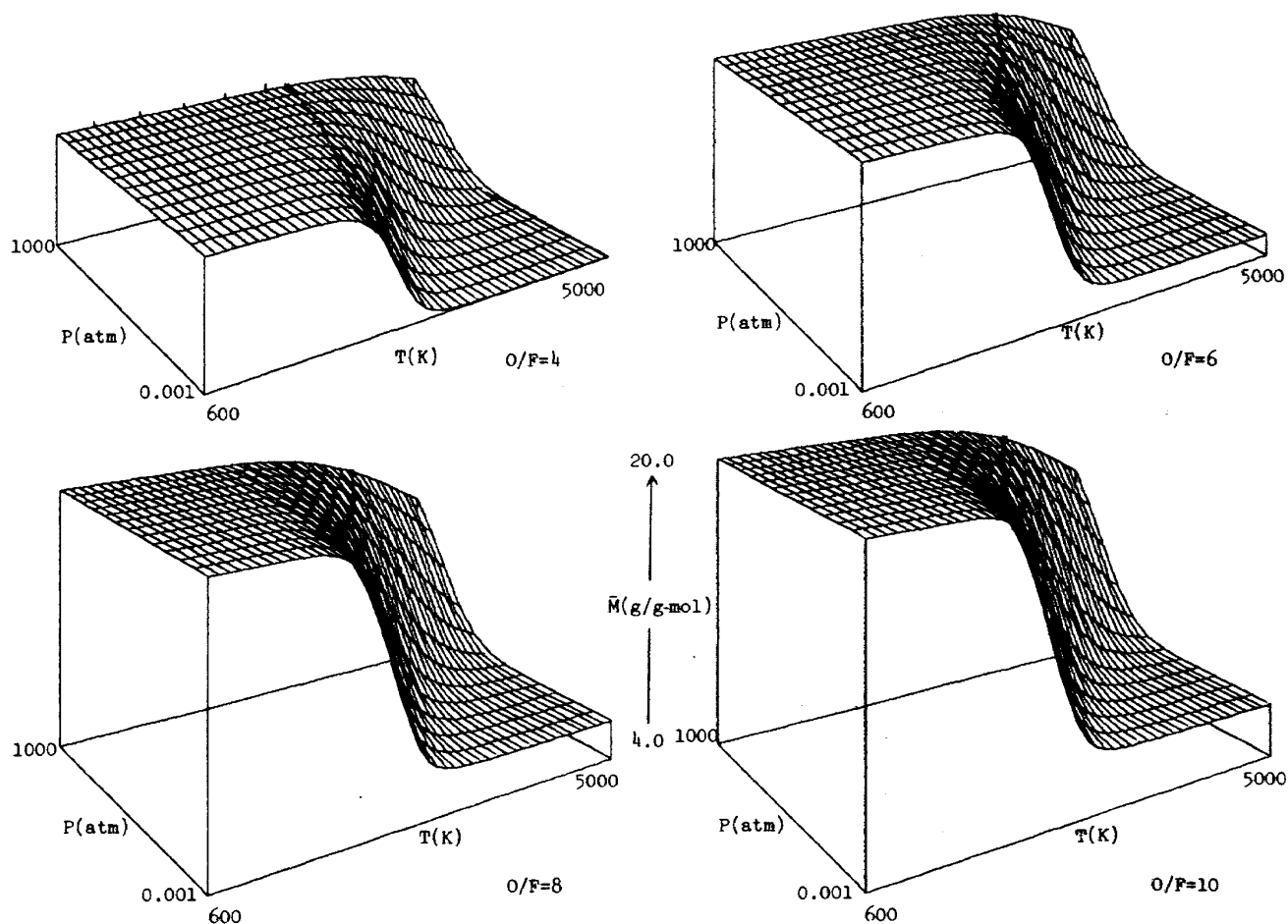
平均分子量 ( $\bar{M}$ )

図 A - 1 - 4

平均分子量 ( $\bar{M}$ ) は、 $O/F$ が増加するとともに大きくなる。各 $O/F$ において $\bar{M}$ が急激に変化する温度・圧力がある。この温度・圧力は $O/F$ に無関係ではば一定値をとる。これらの $\bar{M}$ の変化は、図 C-1-4～図 C-1-15に示した主要生成物の変化に対応している。 $O/F=4\sim6$ では低温領域の主要生成物は $H_2O$ と $H_2$ で高温になると $H_2O$ は $H$ と $O$ に解離し、 $H_2$ は $H$ に解離している。 $O/F=8$ では主要生成物は $H_2O$ で高温になると $H$ と $O$ に解離する。 $O/F=10$ では主要生成物は $H_2O$ と $O_2$ で高温になるとそれぞれ $H$ と $O$ および $O$ に解離する。

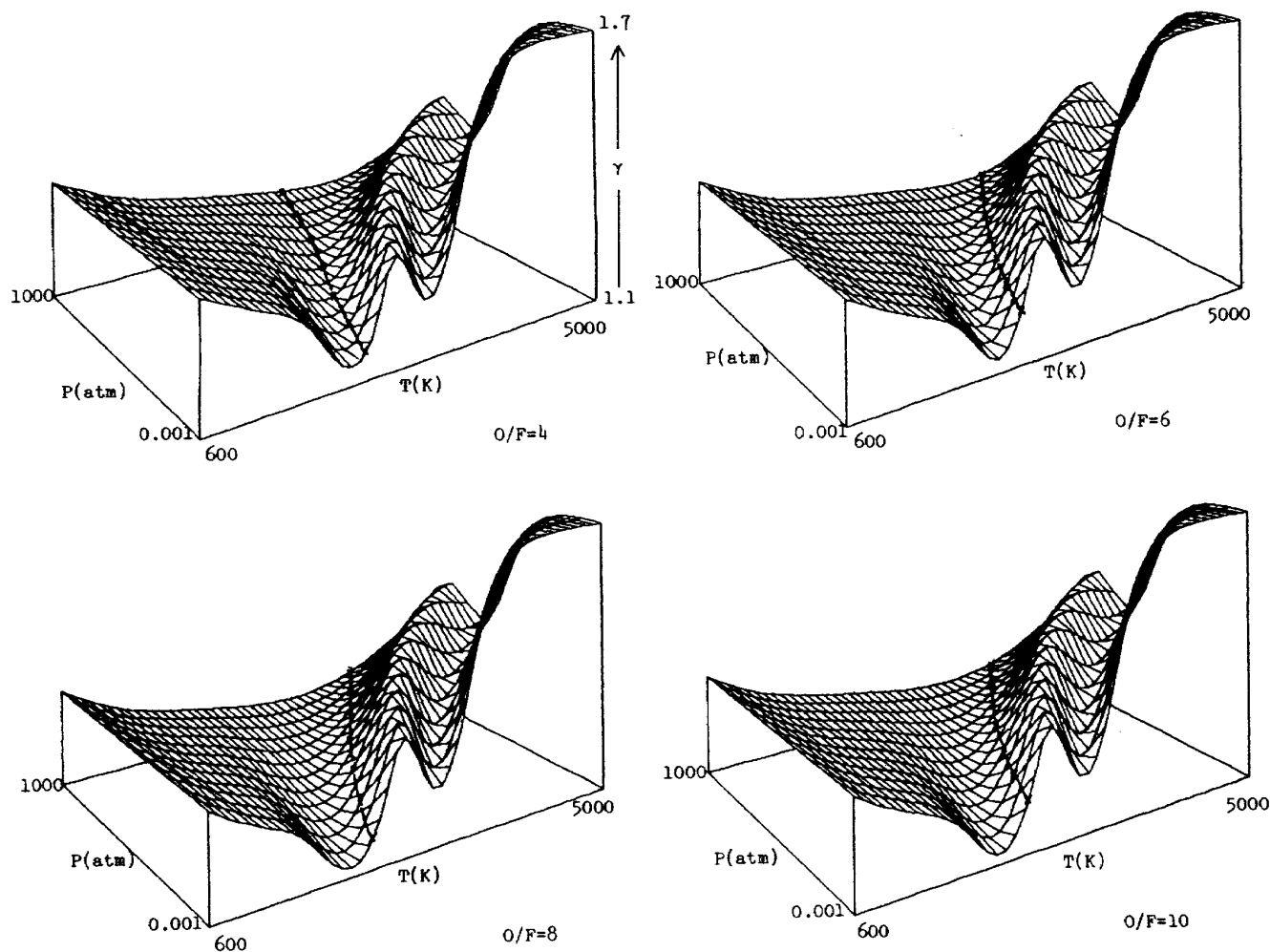
比 熱 比 ( $\gamma$ )

図 A - 1 - 7

比熱比 ( $\gamma$ ) は、温度の上昇とともに一旦減少し、つづいて小さな鞍部を経て増加に転ずる。この傾向は各  $O/F$  についてはほぼ同一である。この鞍部は断熱火炎温度よりも高い温度で表われるが  $\gamma = \text{const.}$  の解析は注意を要する。断熱火炎温度以下での  $\gamma$  は、最小値に対してはほぼ 1.2 倍変化する。 $\gamma$  のこのような変化は図 C-1-4 ~ 図 C-1-15 に示すように  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$  の解離温度の違いに起因する。



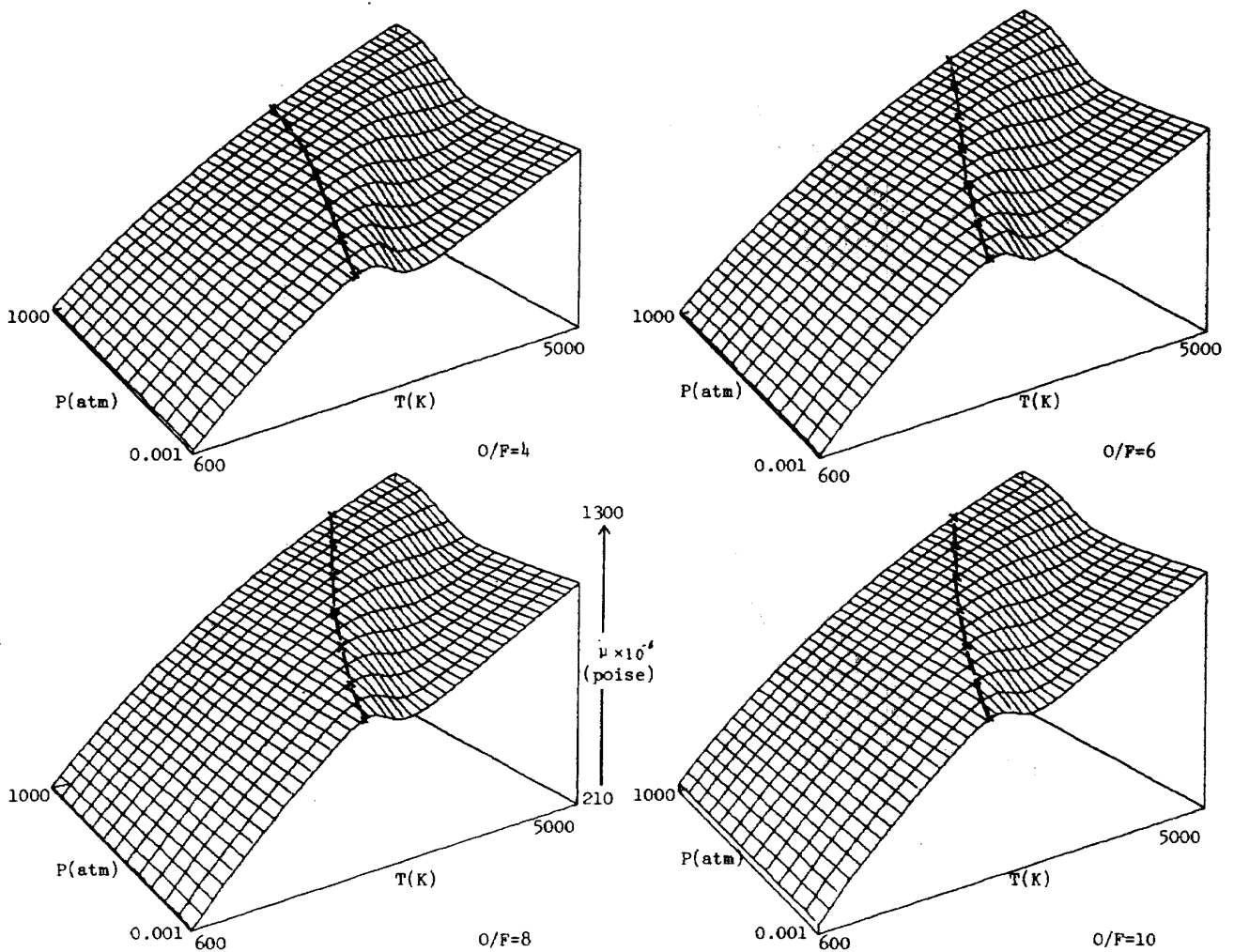
粘 度 ( $\mu$ )

図 A - 1 - 9

粘度 ( $\mu$ ) は、低圧の場合温度が高くなるに従い一旦減少し単調増加に転ずる。減少開始温度は、図 C-1-4～図 C-1-15 で示すように H や O の生成する解離温度に相当する。圧力が高くなると解離温度が高くなるため減少傾向は図の範囲では見られない。 $O/F$  の変化によるパターンの変化はあまりない。絶対値は、 $O/F$  とともに増加する傾向にあるがオーダーの変るほどのものではない。

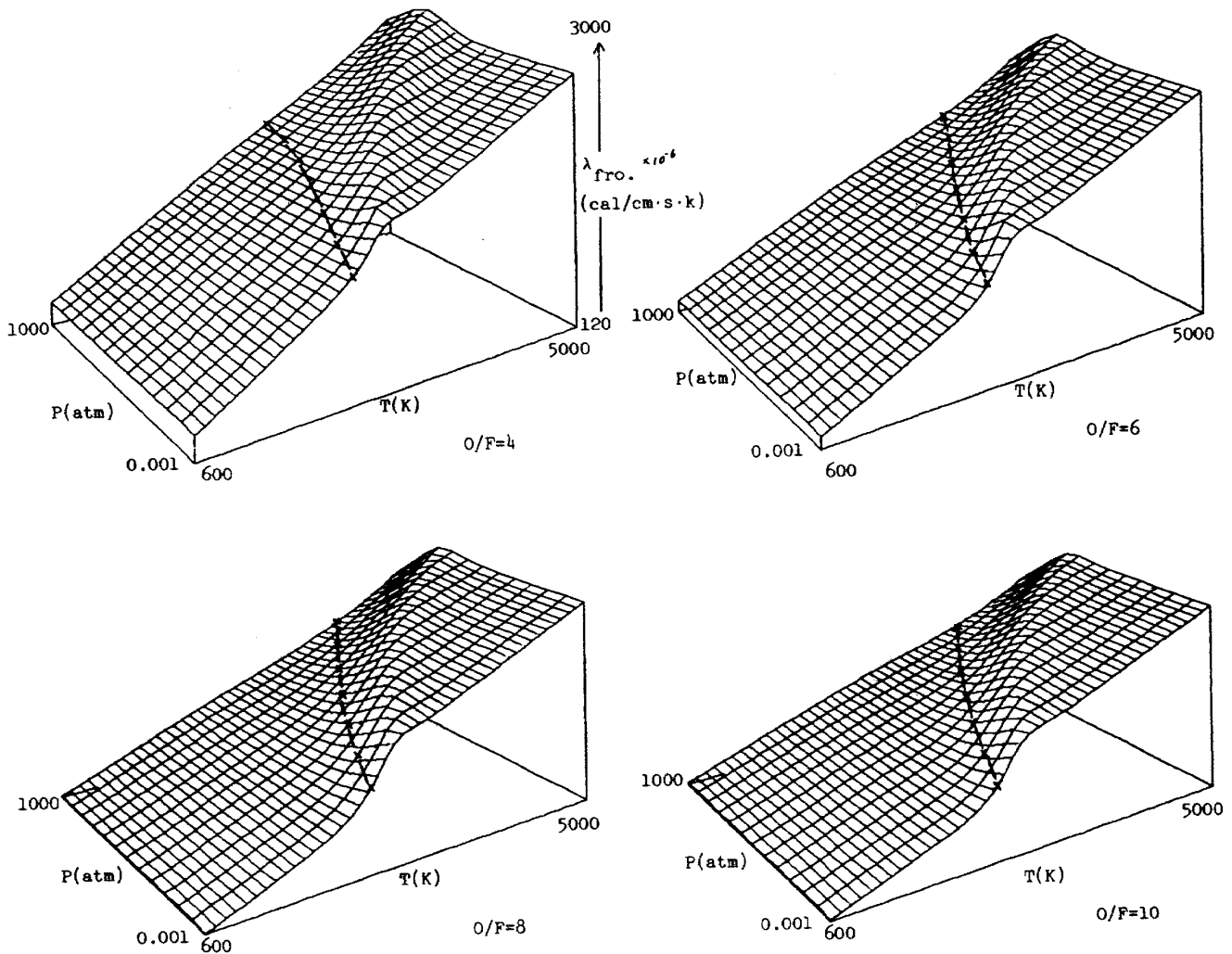
熱伝導率 - 凍結 ( $\lambda_{fro.}$ )


図 A - 1 - 12

熱伝導率-凍結 ( $\lambda_{fro.}$ )は、断熱火炎温度以下では圧力に関してはほぼフラットな面をもつ。圧力に関して3つの領域に分けられる。低温領域、中間領域、低圧高温領域である。図 C-1-4 ~ 図 C-1-15 をみると低温領域の主要生成物は  $H_2O$  と  $H_2$  か  $O_2$  である。低圧高温領域では  $H$ 、 $O$  である。中間領域は両方の生成物がみられる。このような生成物の違いが  $\lambda_{fro.}$  を3つの領域に分けている。

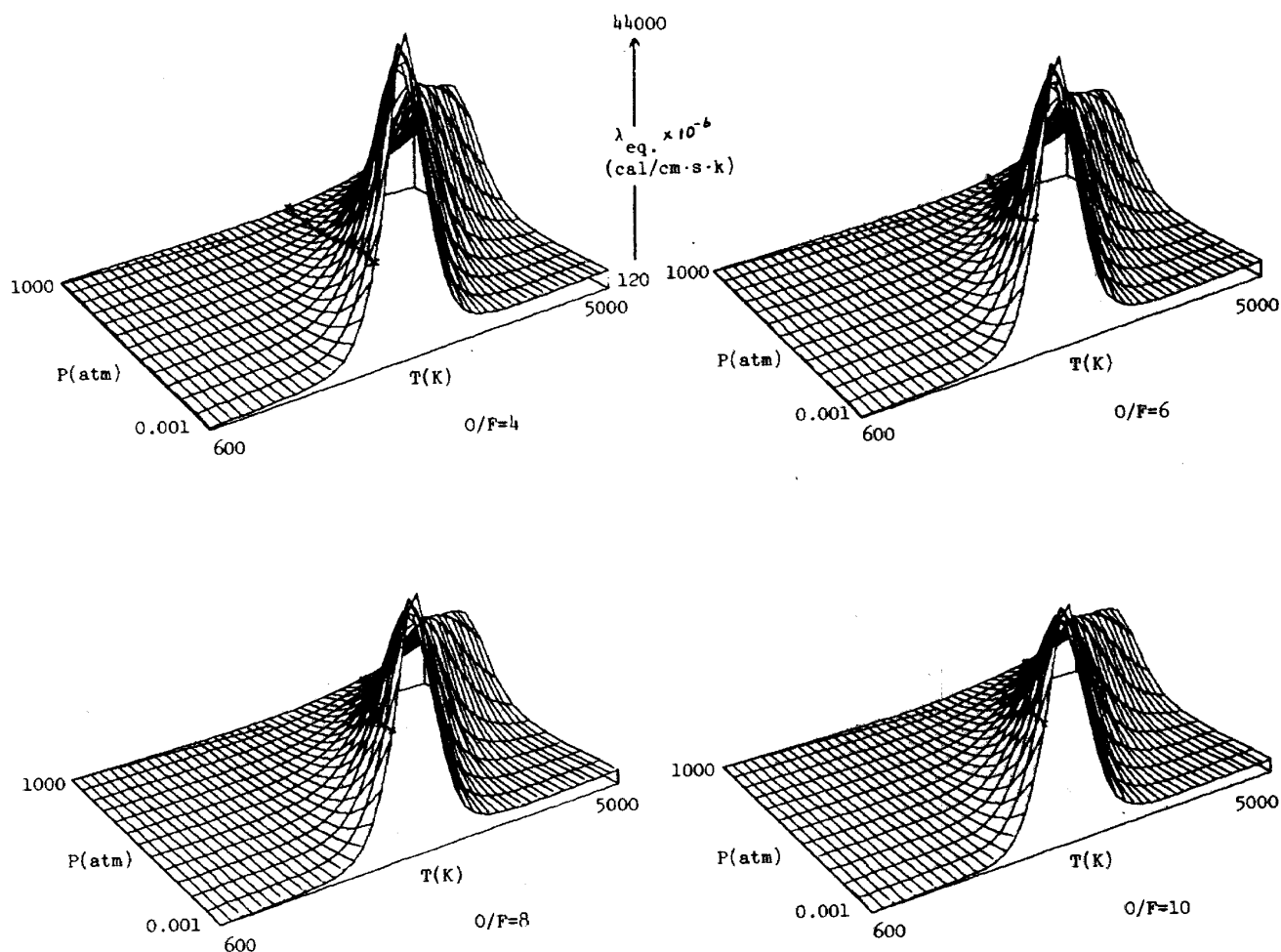
熱伝導率 - 平衡 ( $\lambda_{eq.}$ )

図 A - 1 - 14

熱伝導率-平衡 ( $\lambda_{eq.}$ ) は、3.2節で述べたように  $\lambda_{fro.} + \lambda_{rea.}$  という形で求められる。 $\lambda_{fro.}$  に対し  $\lambda_{rea.}$  の絶対値の方がはるかに大きいため  $\lambda_{fro.}$  とまったく異なった傾向を示している。 $\lambda_{rea.}$  は組成変化の激しいところで大きくなる。これは前述の  $\lambda_{fro.}$  の中間領域に相当する。低温では  $\lambda_{eq.}$  は  $\lambda_{fro.}$  と一致する。ピークの位置は圧力が高くなるにつれて高温側へ移動しているがこれは解離温度が高くなったためである。 $\lambda_{eq.}$  の平面図では  $\lambda_{fro.}$  の 0.001, 1000 atm の値を併せて示した。

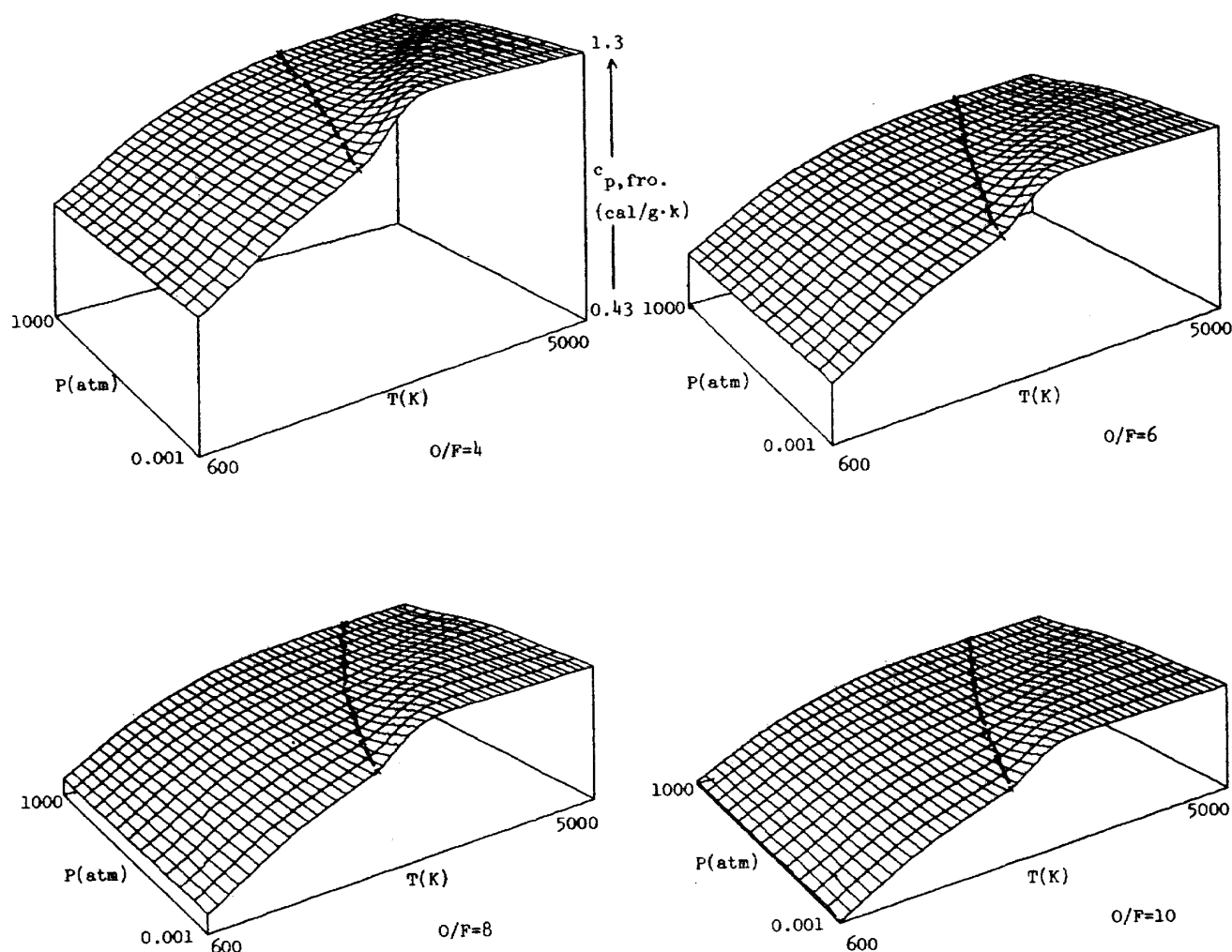
比熱－凍結 ( $c_{p, \text{fro.}}$ )


図 A-1-15

比熱－凍結 ( $c_{p, \text{fro.}}$ ) は、 $\frac{O}{F}$  の増加とともに減少している。1 atm での断熱火炎温度における  $c_{p, \text{fro.}}$  を  $\frac{O}{F}=4$  と 10 で比較すると 1.095 から 0.661 ( $\text{cal/g}\cdot\text{K}$ ) へと減少している。単位を  $\text{cal/mol}\cdot\text{K}$  に変換すると量論比 ( $\frac{O}{F}=7.94$ ) で最大値をとり図 A-1-15 と異なる傾向を示す。単位変換を行なうには燃焼ガスの平均分子量図、図 B-1-4-2 ～図 B-1-4-5 を用いればよい。

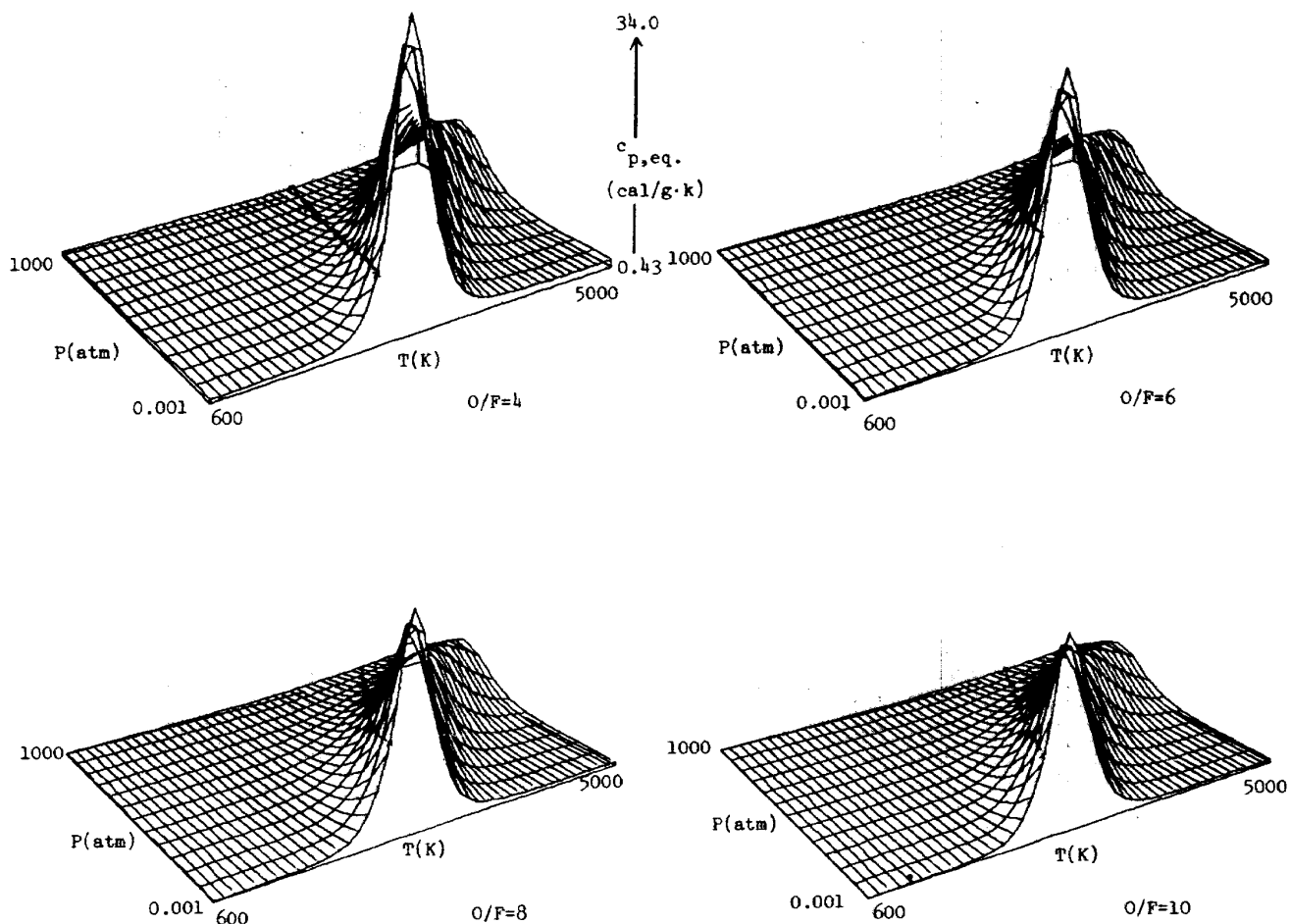
比熱 - 平衡 ( $c_{p,eq.}$ )

図 A - 1 - 16

比熱—平衡 ( $c_{p,eq.}$ ) は、3.2 節で述べたように  $c_{p,fro.} + c_{p,rea.}$  の形で表わされる。低温において  $c_{p,eq.}$  は  $c_{p,fro.}$  と一致する。 $c_{p,eq.}$  は、 $O/F$  の増加とともに減少している。特にピーク値の減少が著しい。図 B-1-16-4 で示すように  $O/F = 8$ 、0.001 atm、2600 K では約  $23.5 (\text{cal/g} \cdot \text{K})$  である。同状態での  $c_{p,fro.}$  は約  $0.77 (\text{cal/g} \cdot \text{K})$  である。 $c_{p,eq.}$  の平面図では  $c_{p,fro.}$  の 0.001、1000 atm の値を併せて示した。

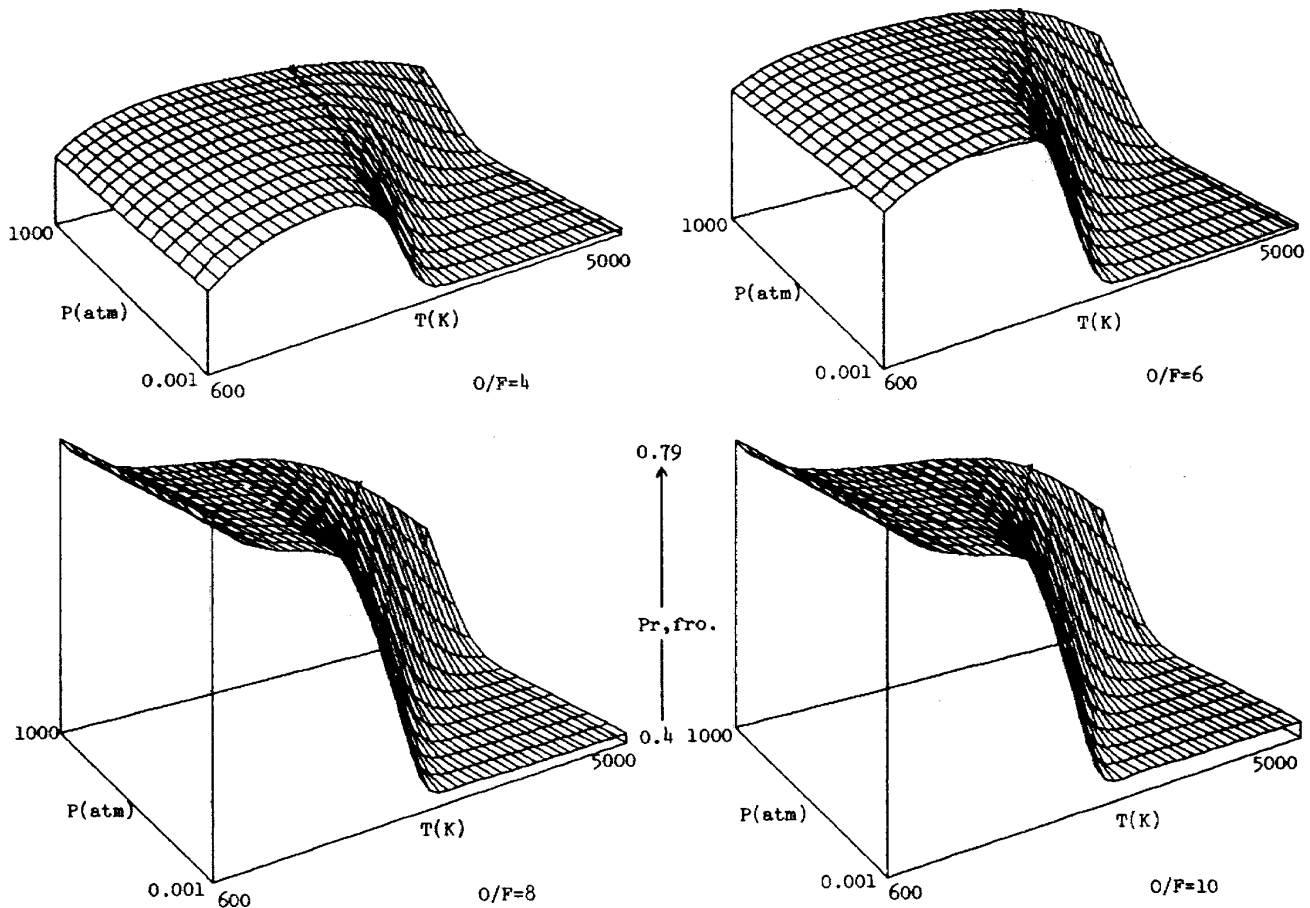
プラントル数 - 凍結 ( $Pr_{fro.}$ )


図 A - 1 - 17

プラントル数-凍結 ( $Pr_{fro.}$ )は、低圧側において $O/F = 4 \sim 6$ と $O/F = 8 \sim 10$ の間で傾向の違いが認められる。前者は温度の上昇とともに $Pr_{fro.}$ が増加しているのに対し、後者は減少している。 $O/F$ の増加とともに絶対値は大きくなる。低圧高温の領域では、 $O/F$ に関係なくほぼフラットな面をもっている。例えば図 B-1-17-4 に示すようにこの平面の $Pr_{fro.}$ は、 $O/F = 8$ において0.42と一定値をとる。

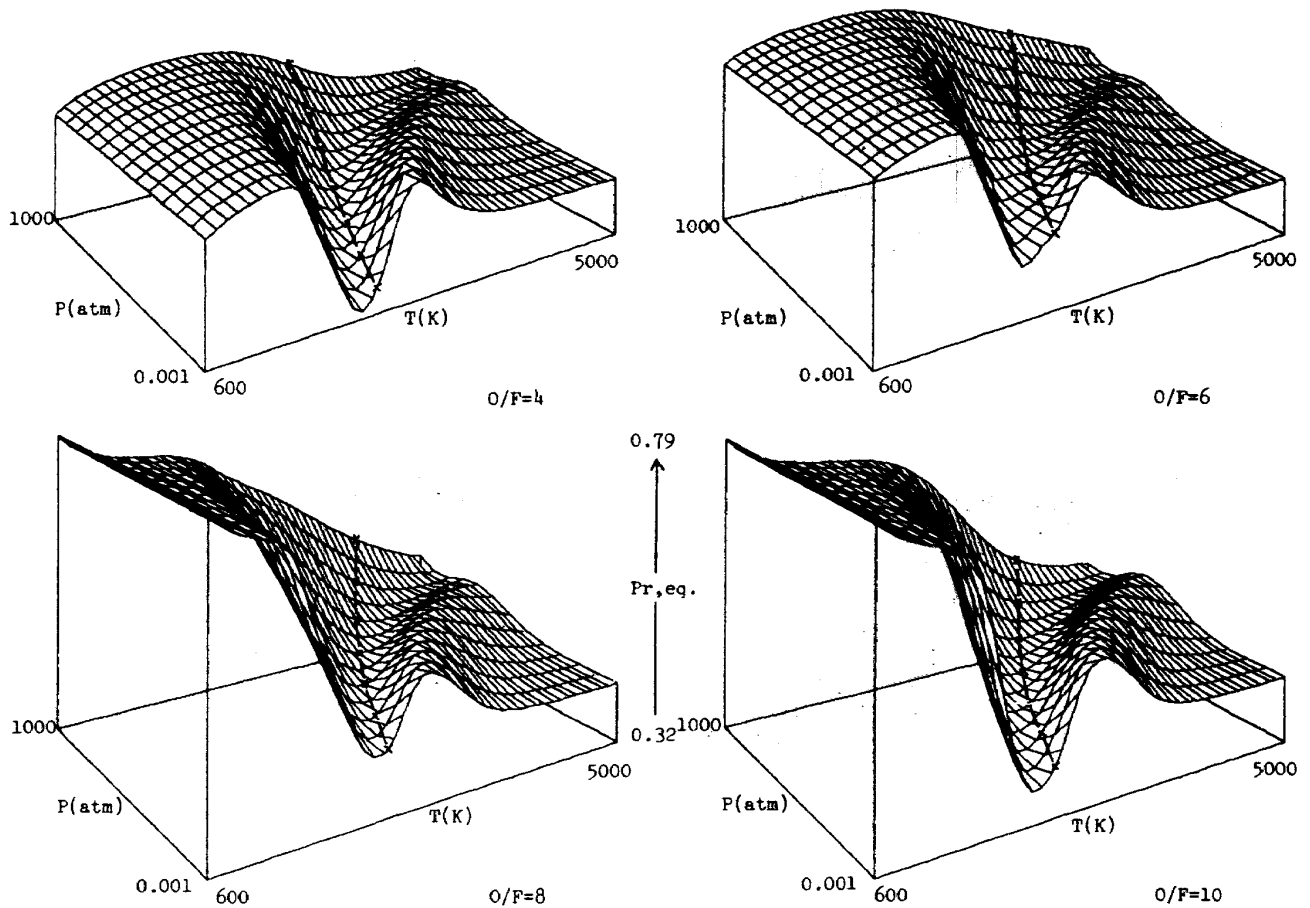
プラントル数 - 平衡 ( $Pr, eq.$ )

図 A - 1 - 18

プラントル数-平衡 ( $Pr, eq.$ ) は、 $\mu$ 、 $\lambda$ 、 $c_p$  等の物性値と異なり断熱火炎温度以下でも変化は大きい。例えば変化の一番小さい  $O/F = 4$ 、1 atm において  $Pr, eq.$  の最大値と最小値は 0.534 と 0.378 である。低温において  $Pr, eq.$  は  $Pr, fro.$  と一致する。 $Pr, fro.$  で述べた低圧高温の領域でのフラットな面は消え小さな山が認められる。

## — 平面図による物性値の読みとり —

物性値は、温度を横軸に圧力を補助パラメータとする  
付録 1 の平面図から精度よく読みとることができる。

物性値は、平衡組成と密接に関係するため代表的な圧

力 3 点を選んで平衡組成図も示した。

付録 1 の平面図および平衡組成図は下記の表 8 に示した。

ページ	図 番 号	系	物 性 値	混合比 (%)
45	B-1- 2-1	H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	H	2
"	B-1- 4-1	"	$\bar{M}$	"
46	B-1- 7-1	"	$\gamma$	"
"	B-1- 9-1	"	$\mu$	"
47	B-1-14-1	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-1-16-1	"	$c_{p,eq.}$	"
48	B-1-17-1	"	Pr, fro.	"
"	B-1-18-1	"	Pr, eq.	"
49	B-1- 2-2	"	H	4
"	B-1- 4-2	"	$\bar{M}$	"
50	B-1- 7-2	"	$\gamma$	"
"	B-1- 9-2	"	$\mu$	"
51	B-1-14-2	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-1-16-2	"	$c_{p,eq.}$	"
52	B-1-17-2	"	Pr, fro.	"
"	B-1-18-2	"	Pr, eq.	"
53	B-1- 2-3	"	H	6
"	B-1- 4-3	"	$\bar{M}$	"
54	B-1- 7-3	"	$\gamma$	"
"	B-1- 9-3	"	$\mu$	"
55	B-1-14-3	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-1-16-3	"	$c_{p,eq.}$	"
56	B-1-17-3	"	Pr, fro.	"
"	B-1-18-3	"	Pr, eq.	"
57	B-1- 2-4	"	H	8
"	B-1- 4-4	"	$\bar{M}$	"
58	B-1- 7-4	"	$\gamma$	"
"	B-1- 9-4	"	$\mu$	"
59	B-1-14-4	"	$\lambda$ eq.	"

ページ	図 番 号	系	物 性 値	混合比 (%)
59	B-1-16-4	H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	$c_{p,eq.}$	8
60	B-1-17-4	"	Pr, fro.	"
"	B-1-18-4	"	Pr, eq.	"
61	B-1- 2-5	"	H	10
"	B-1- 4-5	"	$\bar{M}$	"
62	B-1- 7-5	"	$\gamma$	"
"	B-1- 9-5	"	$\mu$	"
63	B-1-14-5	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-1-16-5	"	$c_{p,eq.}$	"
64	B-1-17-5	"	Pr, fro.	"
"	B-1-18-5	"	Pr, eq.	"

ページ	図 番 号	系	混合比 (%)	圧 力 (atm)
65	C-1-1	H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	2	0.01
"	C-1-2	"	"	1
"	C-1-3	"	"	100
66	C-1-4	"	4	0.01
"	C-1-5	"	"	1
"	C-1-6	"	"	100
67	C-1-7	"	6	0.01
"	C-1-8	"	"	1
"	C-1-9	"	"	100
68	C-1-10	"	8	0.01
"	C-1-11	"	"	1
"	C-1-12	"	"	100
69	C-1-13	"	10	0.01
"	C-1-14	"	"	1
"	C-1-15	"	"	100

表 8



4.3  $H_2$  - Air 系

立体図の混合比(空気・水素重量比)は、水素過剰を2点( $O/F=4, 7.94$ )と量論比( $O/F=34.24$ )および酸素過剰を1点( $O/F=68.48$ )を選んだ。

エンタルピーの立体図には表7の予熱空気(600℃)による断熱火炎温度を「○-○-○」印で示した。

— 立体図による傾向の把握 —

## エンタルピー (H)

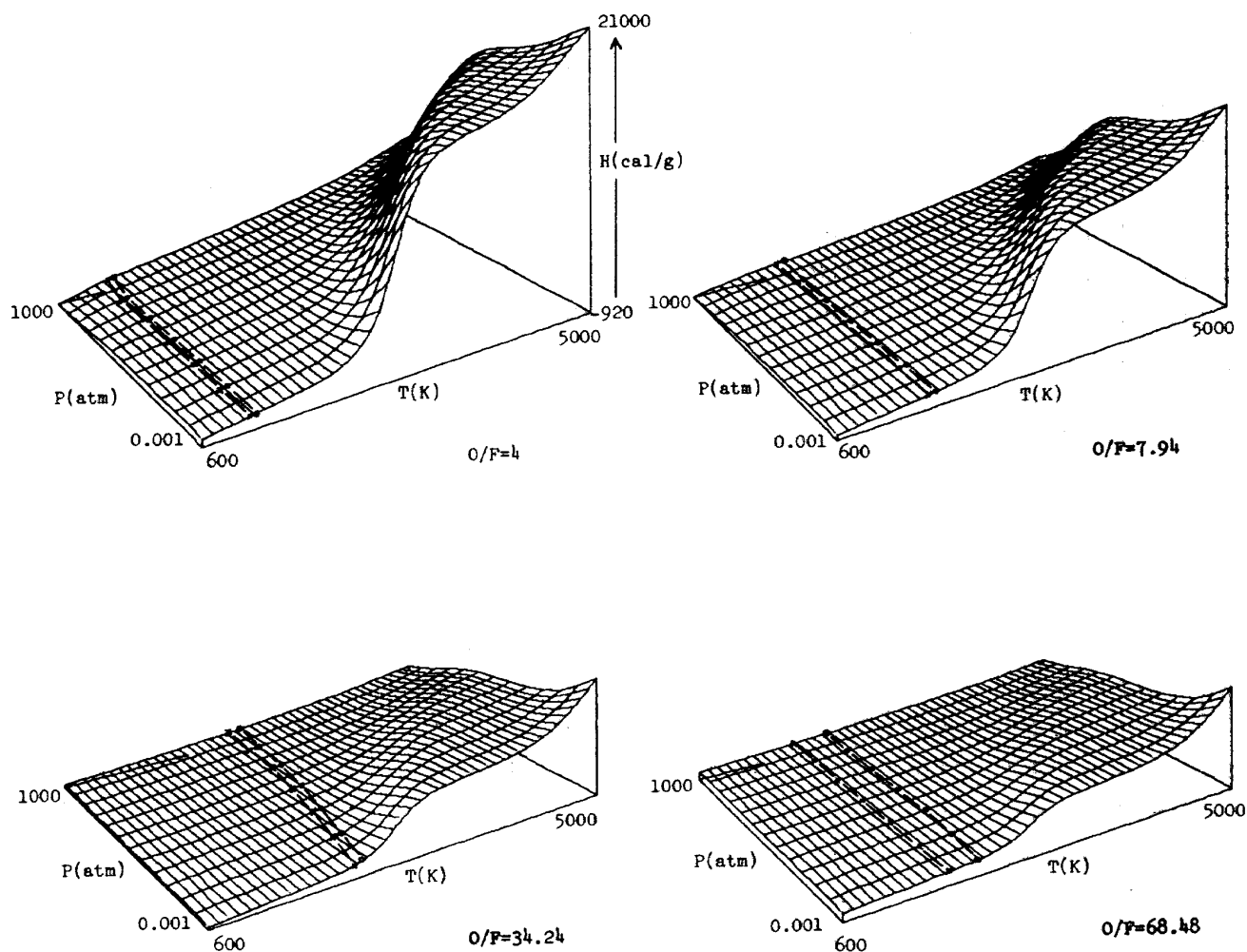


図 A - 2 - 2

エンタルピー (H) は、低圧高温になるに従い大きくなる。 $O/F$ の増加とともにH変化の幅は小さくなる。 $O/F=4$ と68.48の最大値は21000と6800 ( $\text{cal/g}$ )である。 $O/F$ が大きくなるにつれ、空気を予熱した場合と常温の場合の断熱火炎温度の差が大きくなる。600℃の空気のHは、 $O/F$ とともに大きくなっているが100( $\text{cal/g}$ )強とあまり変りがない。これは温度の上昇に対するHの増加の割合が $O/F$ が大きくなるに従って小さくなるためである。

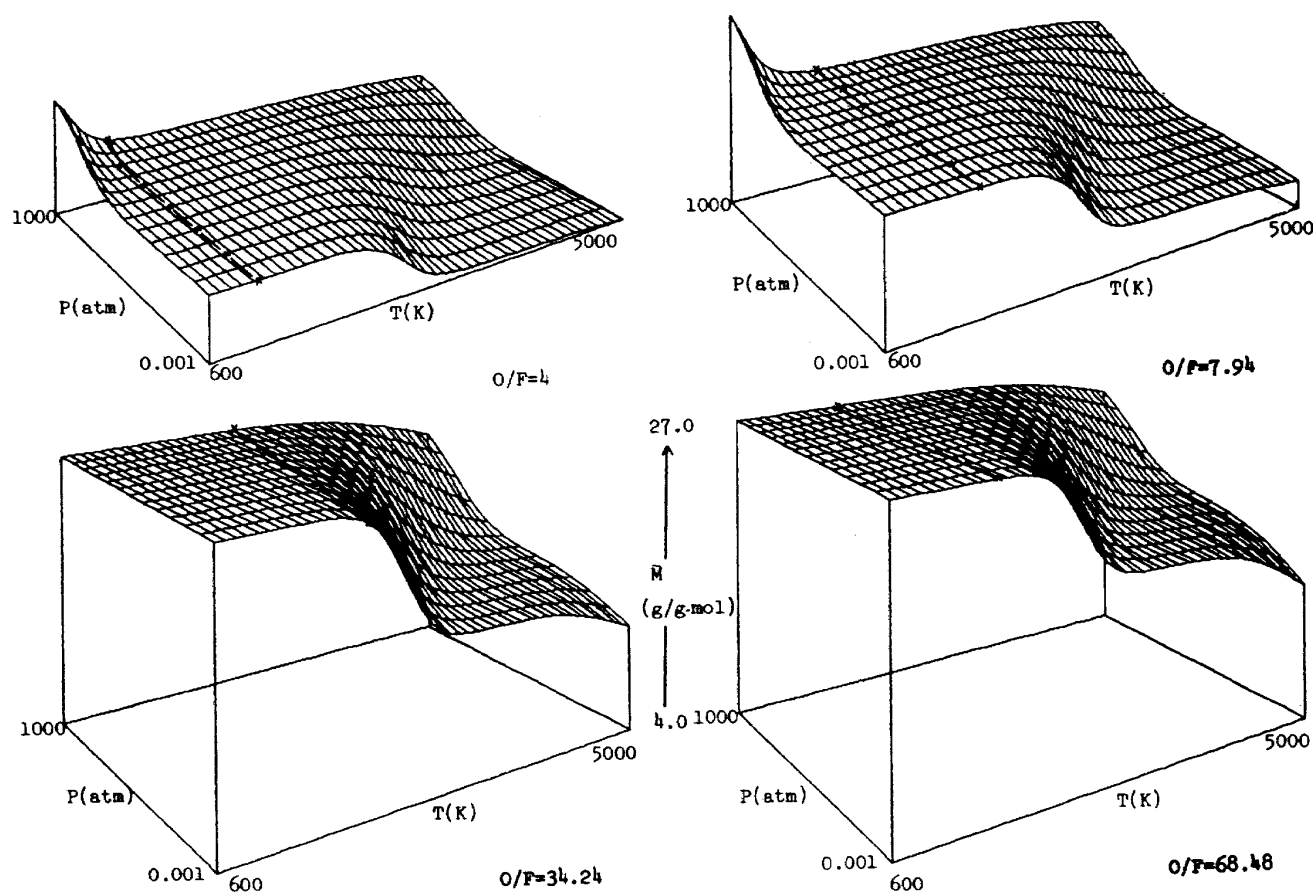
平均分子量 ( $\bar{M}$ )

図 A - 2 - 4

平均分子量 ( $\bar{M}$ ) は、 $O/F$  の増加とともに大きくなる。低圧側で  $\bar{M}$  の著しく変化する温度があり、これは  $O/F$  に無関係では一定値を示す。この温度は 0.001 atm で約 2400 K である。 $O/F = 4, 7.94$  の高圧の 1000 K 以下の領域で  $\bar{M}$  のピークがある。これは図 C-2-3, 図 C-2-6 より  $NH_3$  の生成があり  $H_2$  が減少するためである。低圧の 4500 K 以上の領域で  $\bar{M}$  が低下する。 $O/F$  が増加するにつれこの傾向は顕著となる。図 C-2-1 ~ 図 C-2-10 によると、ここで  $N_2$  の解離による N の生成がある。

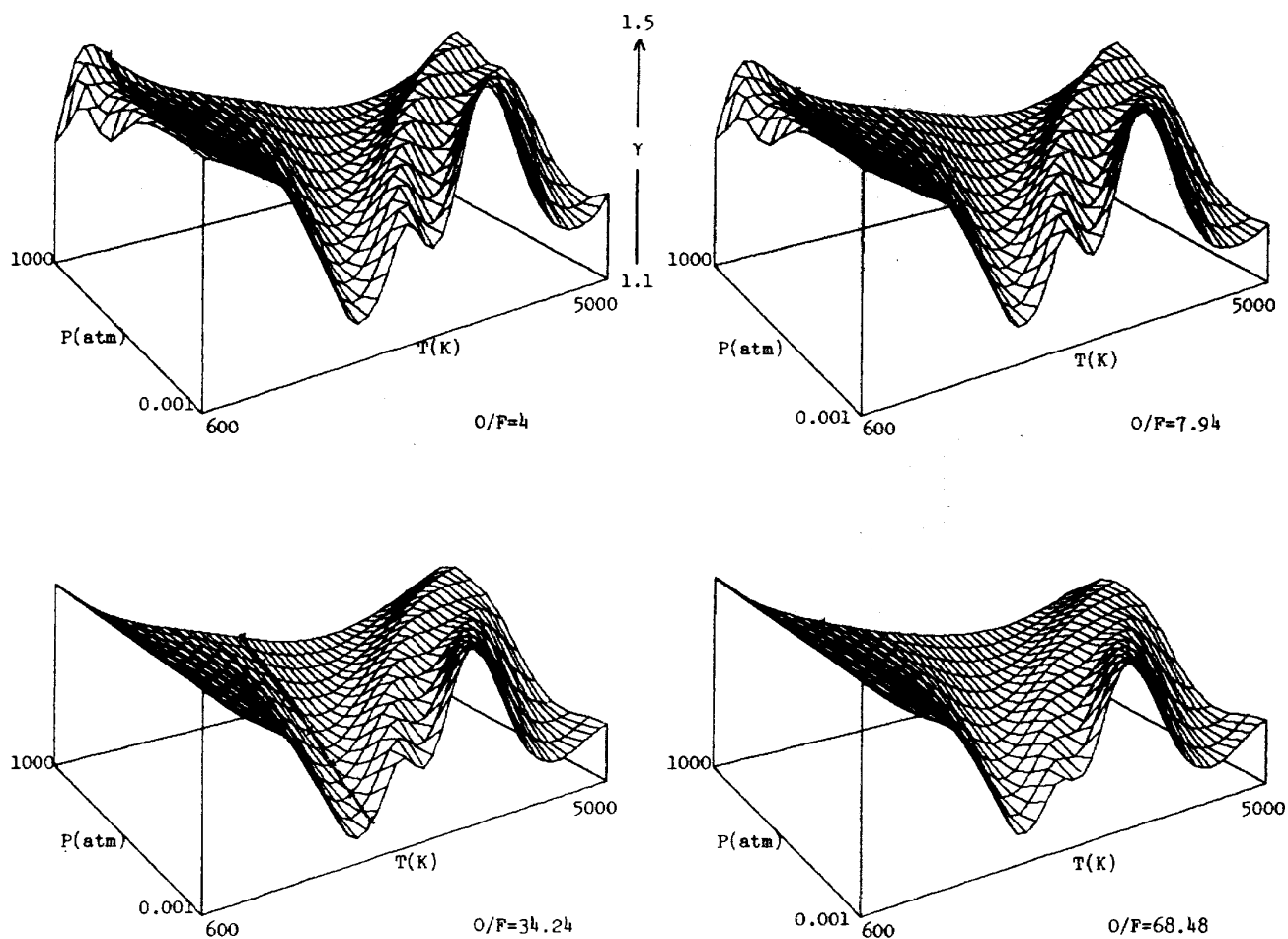
比熱比 ( $\gamma$ )

図 A - 2 - 7

比熱比 ( $\gamma$ ) は、温度の上昇とともに一旦減少し、続いて小さな鞍部、さらに大きな鞍部を経て減少する。 $O/F = 4$ ,  $7.94$  の高圧の  $1000\text{ K}$  以下の領域にも鞍部があるが  $O/F = 34.24$ ,  $68.48$  ではみられない。図 C-2-1 ~ 図 C-2-12 を比較すると  $\text{NH}_3$  の生成に関係していることがわかる。他の鞍部は断熱火炎温度以上で表われる。断熱火炎温度以下での  $\gamma$  の変化は、量論比で最も大きくその変動幅はほぼ  $20\%$  である。

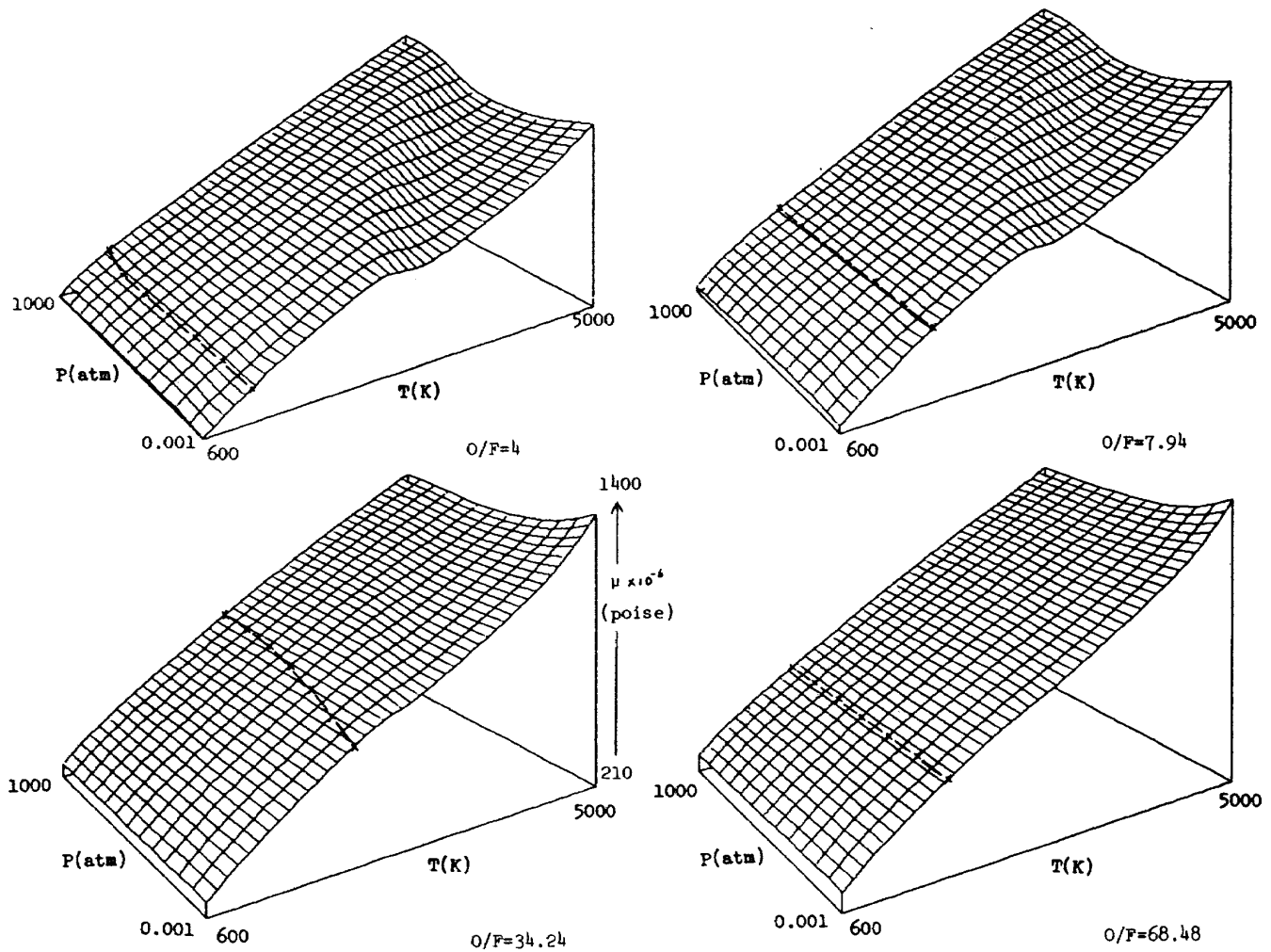
粘 度 ( $\mu$ )


図 A - 2 - 9

粘度 ( $\mu$ ) は,  $O/F$  の増加とともに大きくなる傾向にある。温度の上昇とともに  $\mu$  は大きくなるが  $O/F = 4, 7.94$  のように  $O/F$  が小さい場合, 低圧の約 2600 K 近傍で一旦とまり再び増加する。これは  $H_2$  の解離に起因する。 $O/F$  が大きい場合, 低圧高温での明らかな  $\mu$  の増大がある。これは空気中の  $N_2$  の解離による。

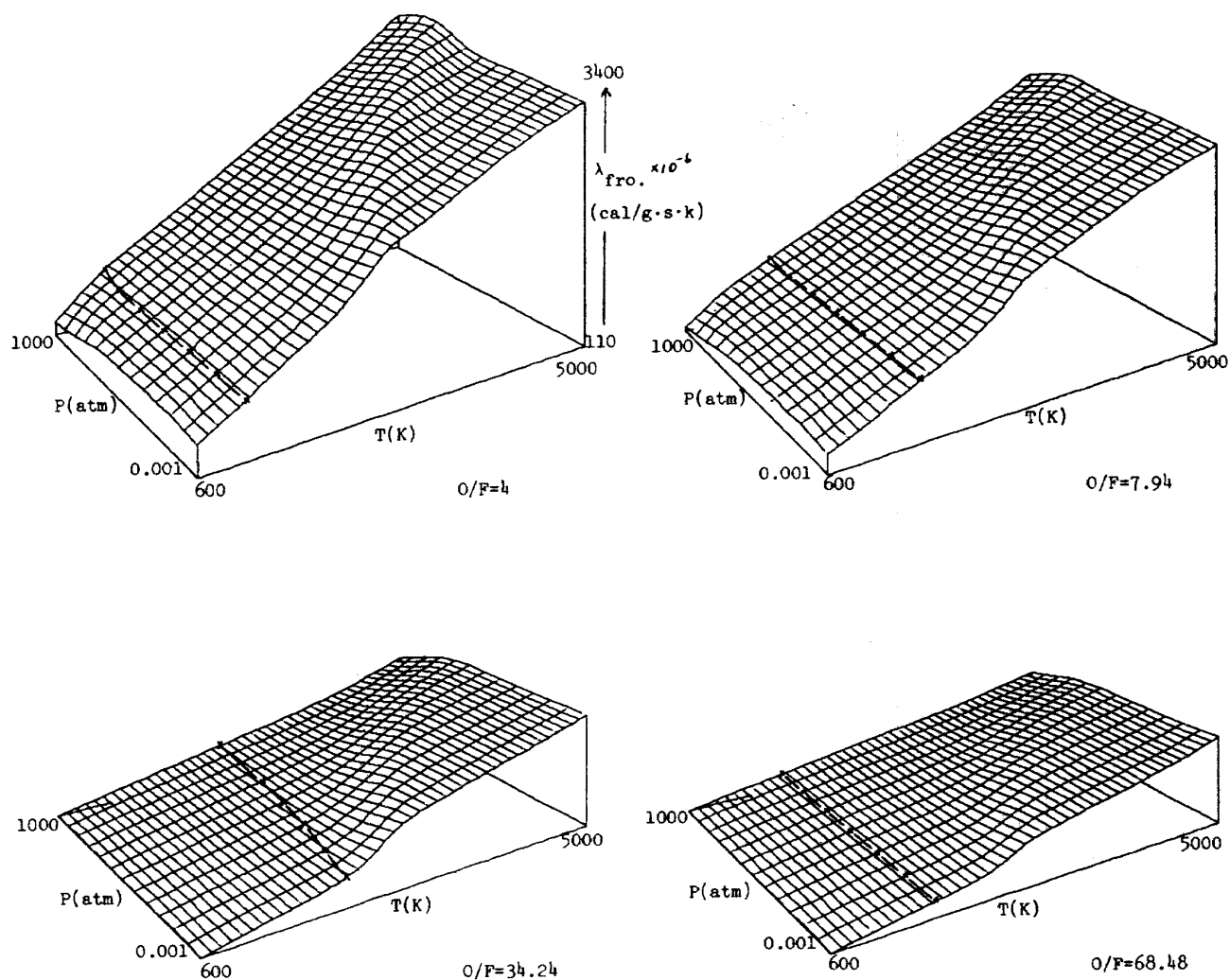
熱伝導率 - 凍結 ( $\lambda_{fro.}$ )

図 A - 2 - 12

熱伝導率-凍結 ( $\lambda_{fro.}$ )は、 $O/F$ の増加とともに小さくなる。温度の上昇とともに $\lambda_{fro.}$ は大きくなり温度・圧力による変化のパターンは、どの $O/F$ においてもほぼ同一である。 $O/F = 4, 7.94$ の高圧の1000 K以下の領域で $\lambda_{fro.}$ はやや減少する。これは図C-2-3, 図C-2-6で示すように $NH_3$ が生成するためである。

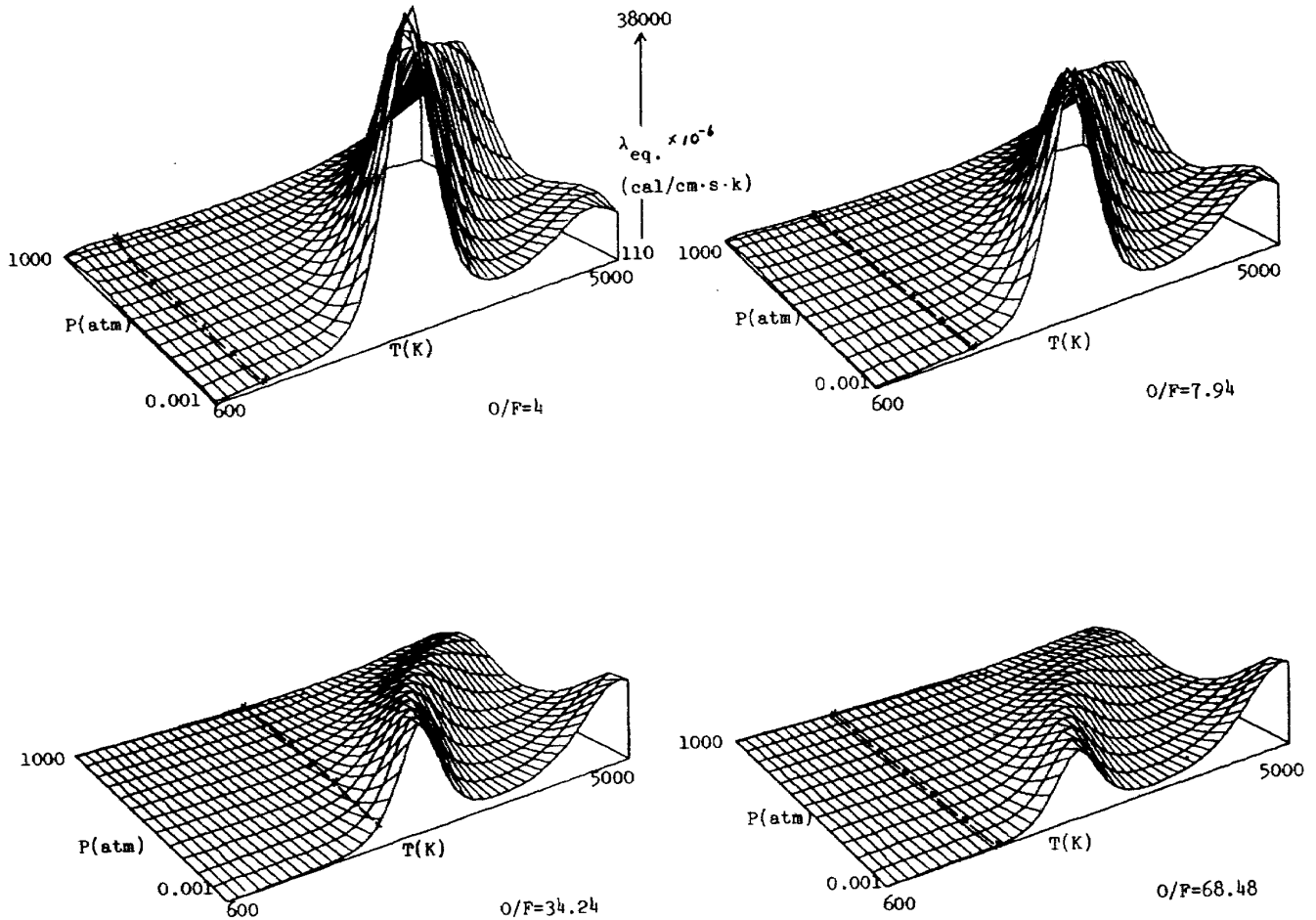
熱伝導率 - 平衡 ( $\lambda_{eq.}$ )


図 A - 2 - 14

熱伝導率-平衡 ( $\lambda_{eq.}$ ) は、 $O/F$  の増加とともに減少する。 $O/F = 4$  の低圧では、 $H_2$  の解離および  $N_2$  の解離による2つの山がある。これに対し  $O/F = 68.48$  では、同様に2つの山があるが最初の山は  $H_2O$  と  $O_2$  の解離によるものになっている。各  $O/F$  について  $N_2$  の解離に伴う山はほぼ一定なのに対し、 $H_2$  あるいは  $H_2O$  と  $O_2$  の解離に伴う山の高さは著しく変化している。これらの山はすべて断熱火炎温度以上にあらわれる。

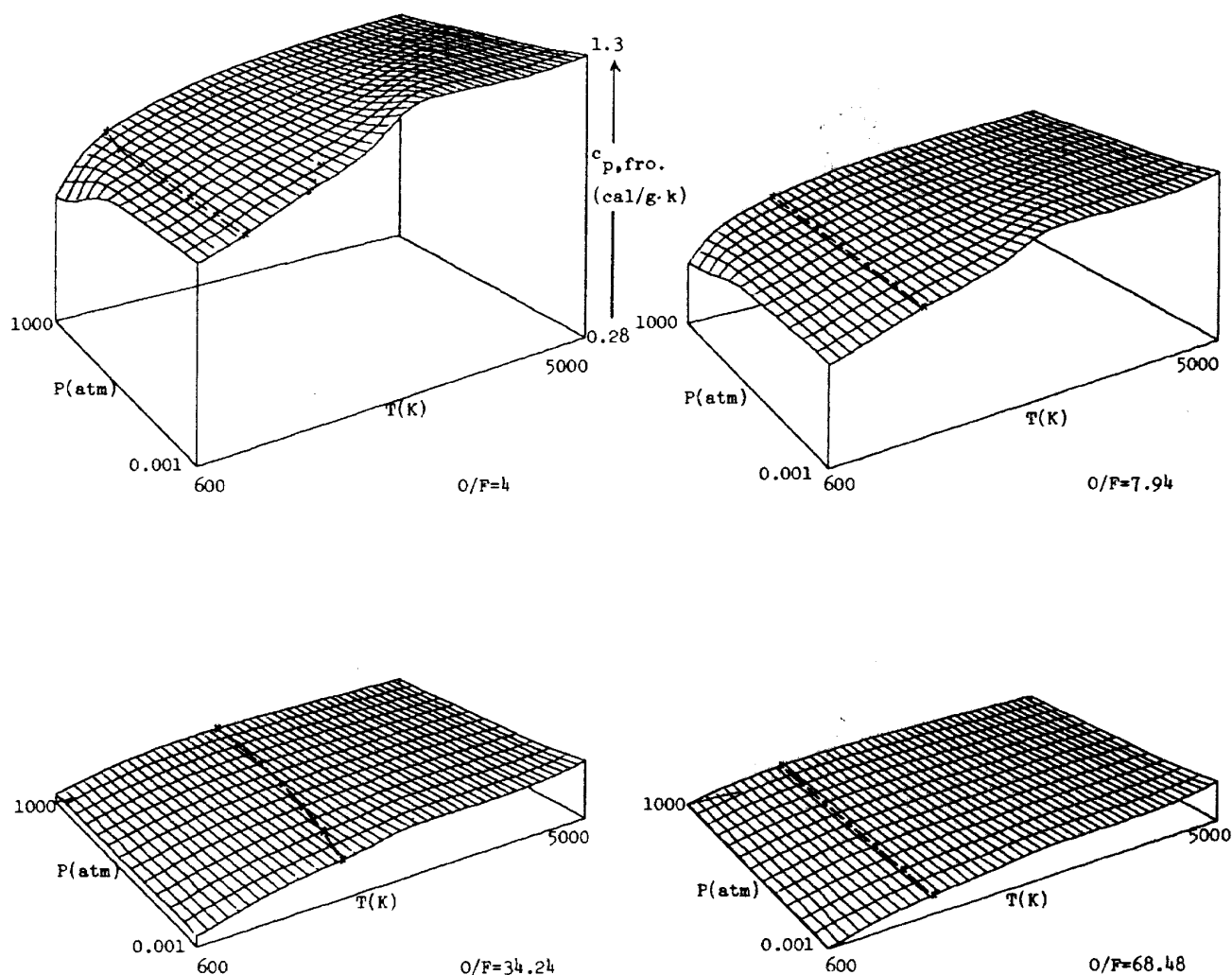
比熱 - 凍結 ( $c_{p, \text{fro.}}$ )

図 A - 2 - 15

比熱-凍結 ( $c_{p, \text{fro.}}$ ) は、 $\frac{O}{F}$  の増加とともに減少する。単位を  $\frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$  に変換すると量論比 ( $\frac{O}{F} = 34.24$ ) で最大値をとり図 A-2-15 と異なった傾向を示す。単位変換を行なうには燃焼ガスの平均分子量図、図 B-2-4-1 ~ 図 B-2-4-4 を用いればよい。 $\frac{O}{F} = 34.24, 68.48$  では圧力に対してほぼフラットな面となる。 $\frac{O}{F} = 4, 7.94$  の高圧の 1000 K 以下の領域で  $c_{p, \text{fro.}}$  が低下する。これは図 C-2-3, 図 C-2-6 で示すように  $\text{NH}_3$  が生成するためである。

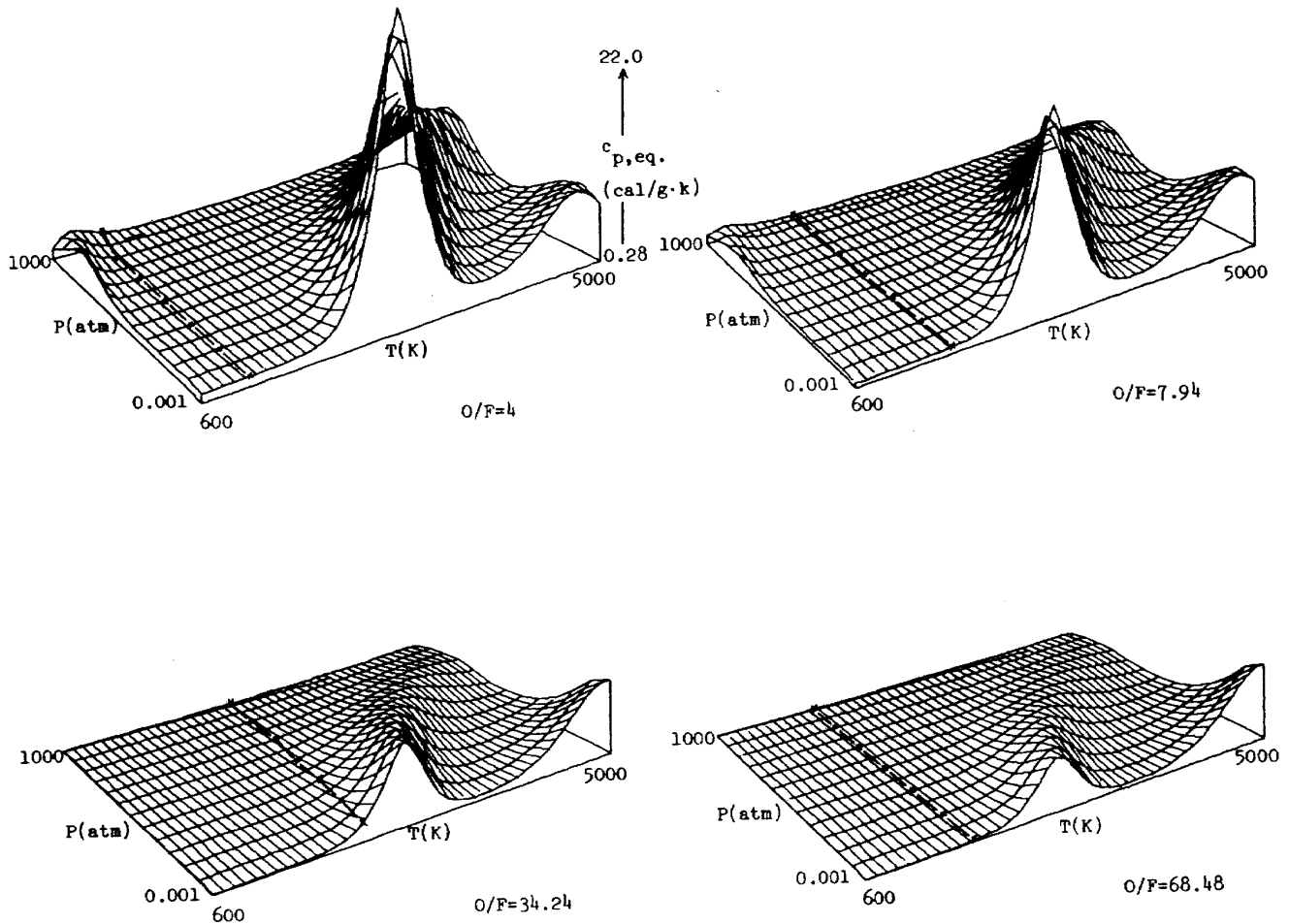
比熱 - 平衡 ( $c_{p,eq.}$ )

図 A - 2 - 16

比熱—平衡 ( $c_{p,eq.}$ ) は、 $O/F$  の増加とともに減少する。低圧では2つのピークが顕著である。 $O/F = 4, 7.94$  の最初のピークは  $H_2$  の解離によるもので、 $O/F = 34.24, 68.48$  の最初のピークは  $H_2O$  と  $O_2$  の解離によるものである。低圧における第2のピークはともに  $N_2$  の解離によるものである。 $O/F = 4, 7.94$  の高圧の1000 K以下の領域でも比較的小さな山がみられる。これは  $NH_3$  の生成に起因する。この部分を除くと、断熱火炎温度以下では変化が少ない。



## プラントル数 - 凍結 (Pr,fro.)

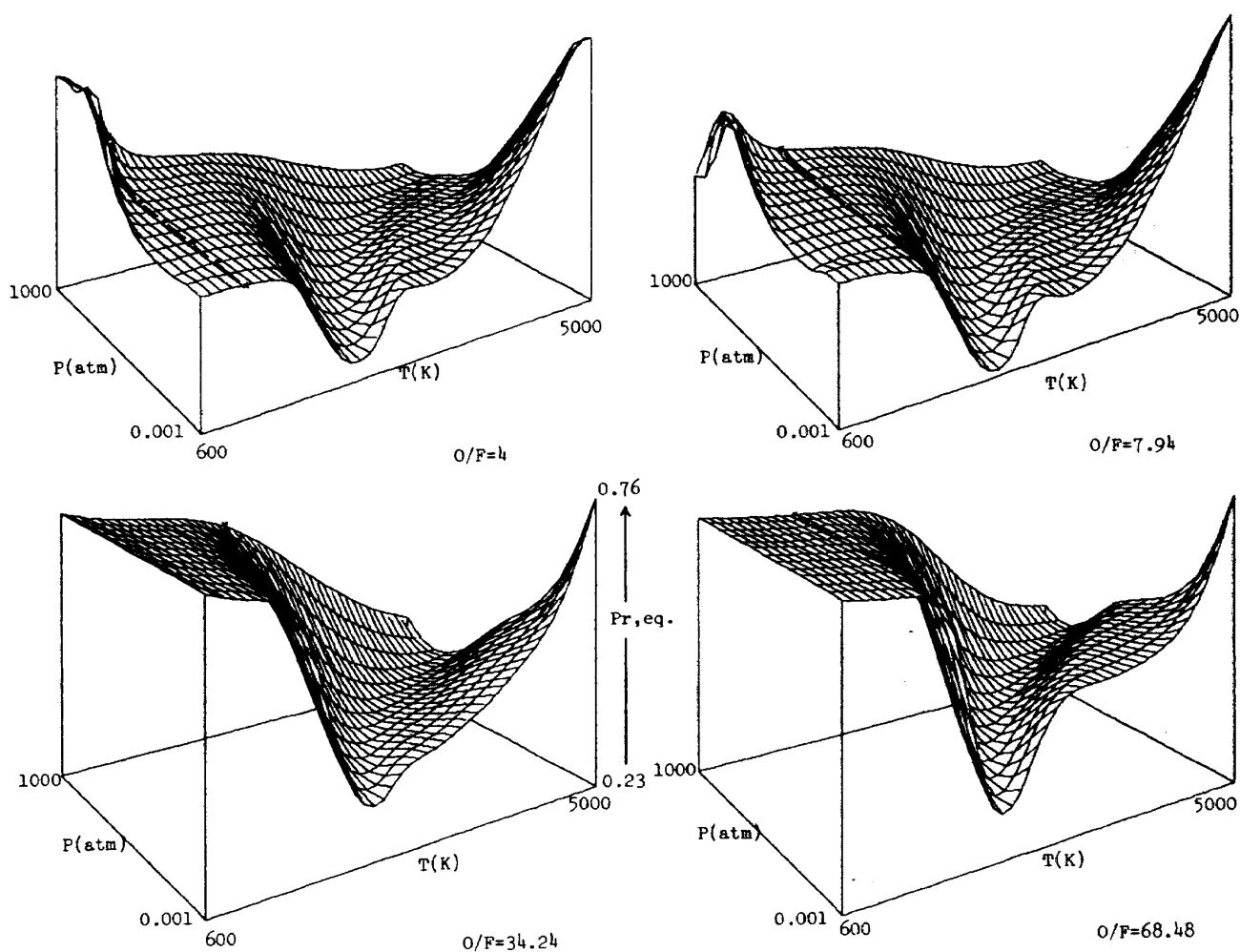


図 A - 2 - 17

プラントル数-凍結 (Pr,fro.)は、 $\frac{O}{F}$ の増加とともに大きくなる。 $\frac{O}{F} = 4, 7.94$ の高圧の1000 K以下の領域で Pr,fro. は急激に上昇する。又低圧高温ではゆるやかに Pr,fro. が上昇している。後者は $N_2$ の解離によるもので各  $\frac{O}{F}$ で共通である。前者は $NH_3$ の生成によるもので  $\frac{O}{F}$ が大きくなると消える。 $\frac{O}{F} = 4, 7.94$ で低温(高圧の1000K以下を除く)で、Pr,fro. が低いのは $H_2$ の割合が高いためである。

## プラントル数 - 平衡 (Pr,eq.)

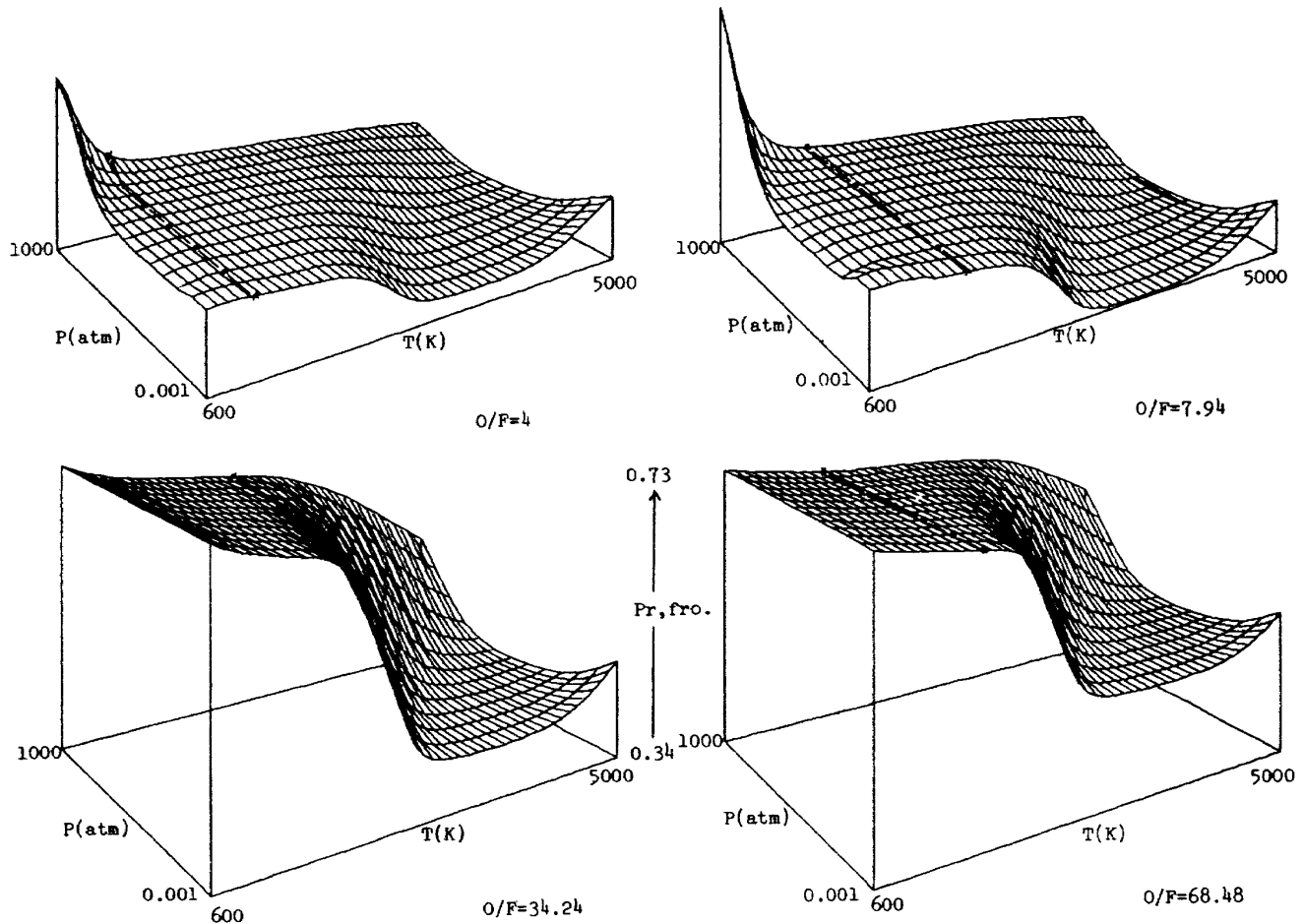


図 A - 2 - 18

プラントル数-平衡 (Pr,eq.) は、低温の領域を除き  $\frac{O}{F}$  の変化に対してパターンはほぼ同一である。低圧高温の Pr,eq. は、 $N_2$  の解離に伴い急激に上昇する。 $\frac{O}{F}=4, 7.94$  で低温 (高圧の 1000 K 以下を除く) で Pr,eq. が低い。これは  $H_2$  の割合が高いためである。断熱火炎温度以下での Pr,eq. の変化は、量論比で最も大きい。0.001 atm で Pr,eq. は、温度が下がると断熱火炎温度値のほぼ 2.3 倍になる。

## — 平面図による物性値の読みとり —

物性値は、温度を横軸に圧力を補助パラメータとする  
付録 2 の平面図から精度よく読みとることができる。

物性値は、平衡組成と密接に関係するため代表的な圧

力 3 点を選んで平衡組成図も示した。

付録 2 の平面図および平衡組成図は下記の表 9 に示した。

ページ	図 番 号	系	物 性 値	混 合 比 (%)
73	B-2- 2-1	H <sub>2</sub> -Air	H	4
"	B-2- 4-1	"	$\bar{M}$	"
74	B-2- 7-1	"	$\gamma$	"
"	B-2- 9-1	"	$\mu$	"
75	B-2-14-1	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-2-16-1	"	$c_{p,eq.}$	"
76	B-2-17-1	"	Pr, fro.	"
"	B-2-18-1	"	Pr, eq.	"
77	B-2- 2-2	"	H	7.94
"	B-2- 4-2	"	$\bar{M}$	"
78	B-2- 7-2	"	$\gamma$	"
"	B-2- 9-2	"	$\mu$	"
79	B-2-14-2	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-2-16-2	"	$c_{p,eq.}$	"
80	B-2-17-2	"	Pr, fro.	"
"	B-2-18-2	"	Pr, eq.	"
81	B-2- 2-3	"	H	34.24
"	B-2- 4-3	"	$\bar{M}$	"
82	B-2- 7-3	"	$\gamma$	"
"	B-2- 9-3	"	$\mu$	"
83	B-2-14-3	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-2-16-3	"	$c_{p,eq.}$	"
84	B-2-17-3	"	Pr, fro.	"
"	B-2-18-3	"	Pr, eq.	"

ページ	図 番 号	系	物 性 値	混 合 比 (%)
85	B-2- 2-4	H <sub>2</sub> -Air	H	68.48
"	B-2- 4-4	"	$\bar{M}$	"
86	B-2- 7-4	"	$\gamma$	"
"	B-2- 9-4	"	$\mu$	"
87	B-2-14-4	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-2-16-4	"	$c_{p,eq.}$	"
88	B-2-17-4	"	Pr, fro.	"
"	B-2-18-4	"	Pr, eq.	"

ページ	図 番 号	系	混 合 比 (%)	圧 力 (atm)
89	C-2-1	H <sub>2</sub> -Air	4	0.01
"	C-2-2	"	"	1
"	C-2-3	"	"	100
90	C-2-4	"	7.94	0.01
"	C-2-5	"	"	1
"	C-2-6	"	"	100
91	C-2-7	"	34.24	0.01
"	C-2-8	"	"	1
"	C-2-9	"	"	100
92	C-2-10	"	68.48	0.01
"	C-2-11	"	"	1
"	C-2-12	"	"	100

表 9

4.4  $H_2-O_2-Air$  系

立体図の混合比（酸素+空気中の酸素・水素重量比）は、3.3節で説明したように $H_2-O_2$ 系の $(\frac{O}{F})_{Primary}=2$ に空気を加えた $H_2-O_2-Air$ 系の $(\frac{O}{F})_{Final}$ が水素過剰な2点 $(\frac{O}{F})_F=4, 6$ 、量論比に近い $(\frac{O}{F})_F=8$ および酸素過剰な $(\frac{O}{F})_F=10$ を選んだ。空気を加えることに

より $(\frac{O}{F})_P=4, 6 \dots\dots$ でも、この場合とはほぼ同様の効果を示している。

エンタルピーの立体図には表7の予熱空気（600℃）による断熱火炎温度を「○-○-○」印で示した。

— 立体図による傾向の把握 —

## エンタルピー (H)

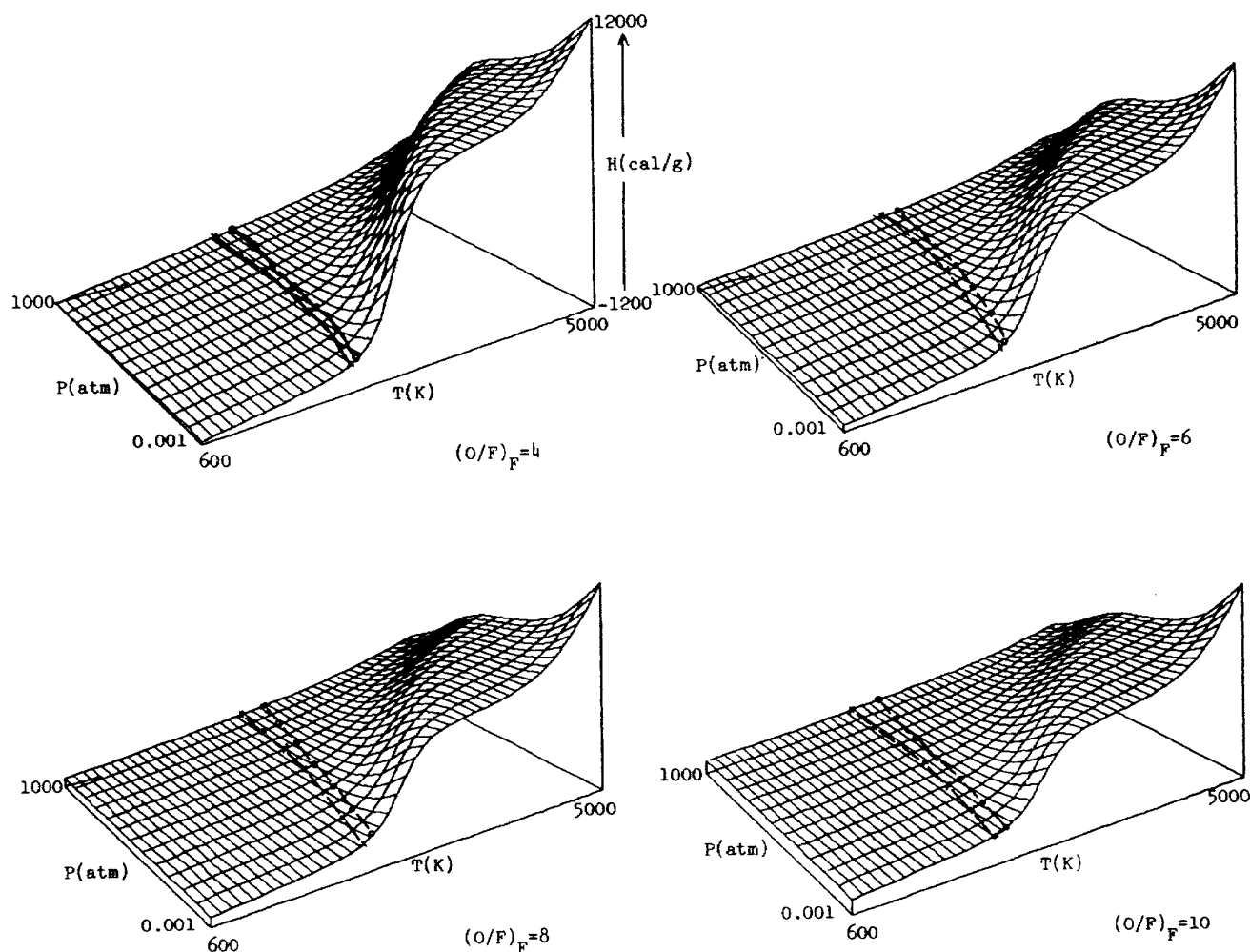


図 A - 3 - 2

エンタルピー (H) は、低圧高温になるに従って大きくなる。 $(\frac{O}{F})_F$ の増加とともにHの変化の幅は小さくなるが変化のパターンは変わらない。Hが激しく変化する個所の温度・圧力は $(\frac{O}{F})_F$ に関係なくほぼ一定である。同図から常温以上の加熱系では、Hの増分に対する断熱火炎温度の上昇率は圧力が低いほど、又 $(\frac{O}{F})_F$ が小さいほど大きい事がわかる。

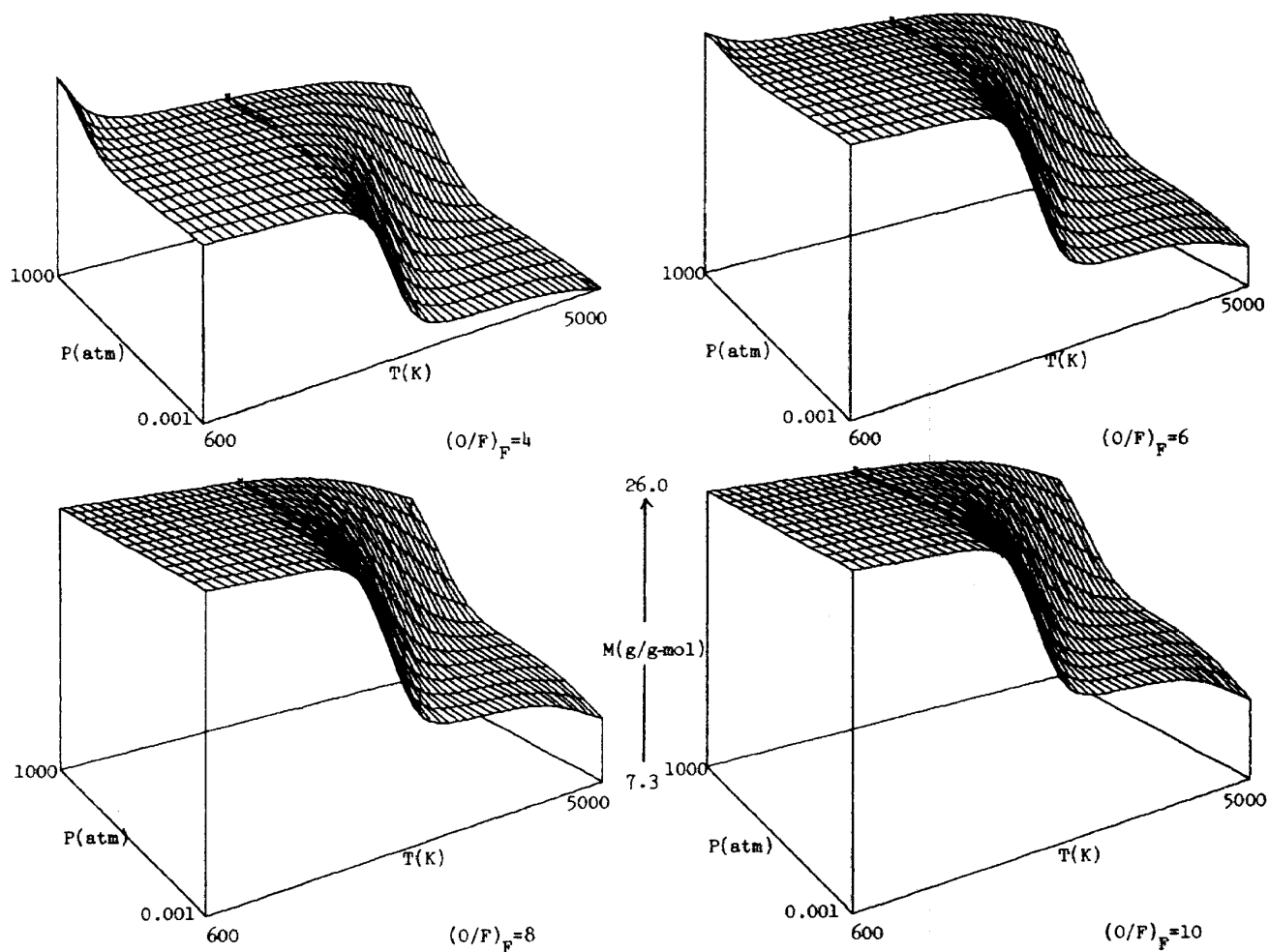
平均分子量 ( $\bar{M}$ )

図 A - 3 - 4

平均分子量 ( $\bar{M}$ ) は,  $(\text{O}/\text{F})_{\text{F}}$  が増加するとともに大きくなる。低温側では圧力に関係なく一定値をとる。例えば  $(\text{O}/\text{F})_{\text{F}} = 8$  における  $\bar{M}$  は, 図 B-3-4-3 より約  $24.3 (\text{g/g-mol})$  である。ただし  $(\text{O}/\text{F})_{\text{F}}$  の小さい高圧の 1000 K 以下で  $\bar{M}$  の上昇がみられる。これは図 C-3-3, 図 C-3-6 より  $\text{NH}_3$  が生成し,  $\text{H}_2$  が減少しているためである。高温低圧で  $\bar{M}$  が低下している。これは図 C-3-1 ~ 図 C-3-10 をみると H, O 等が生成しているためである。

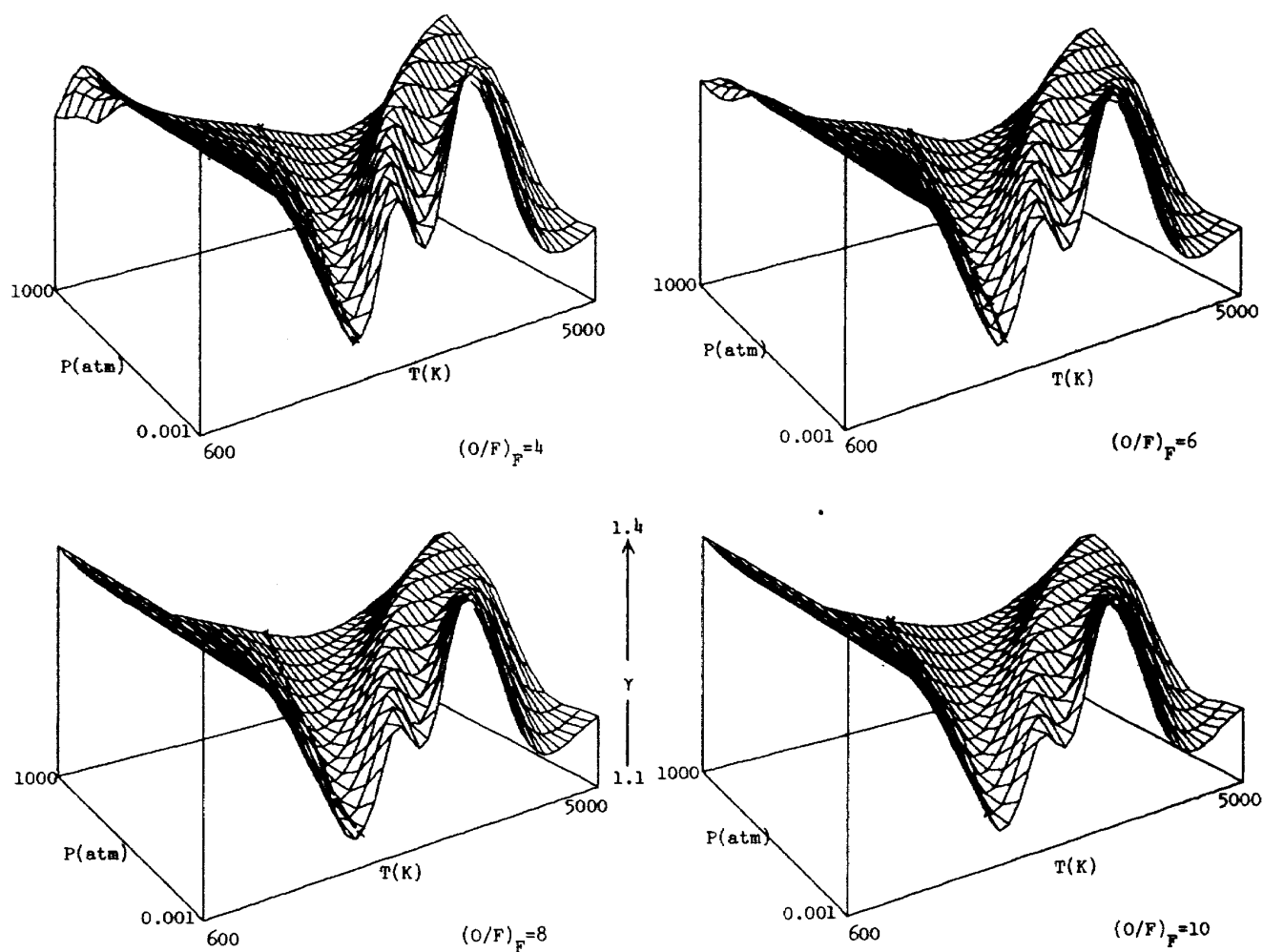
比熱比 ( $\gamma$ )


図 A - 3 - 7

比熱比 ( $\gamma$ ) は、温度の上昇とともに一旦減少し、続いて小さな鞍部さらに大きな鞍部を経て減少する。 $(\text{O}/\text{F})_{\text{F}}$  の小さな高圧の 1000 K 以下の領域にも鞍部があるが  $(\text{O}/\text{F})_{\text{F}}$  の大きなところではみられない。図 C-3-3, 図 C-3-6 をみると  $\text{NH}_3$  が生成している。他の鞍部は断熱火炎温度以上で表われている。断熱火炎温度以下での  $\gamma$  は、 $(\text{O}/\text{F})_{\text{F}}$  に関係なく最小値に対しほぼ 1.2 倍変化する。

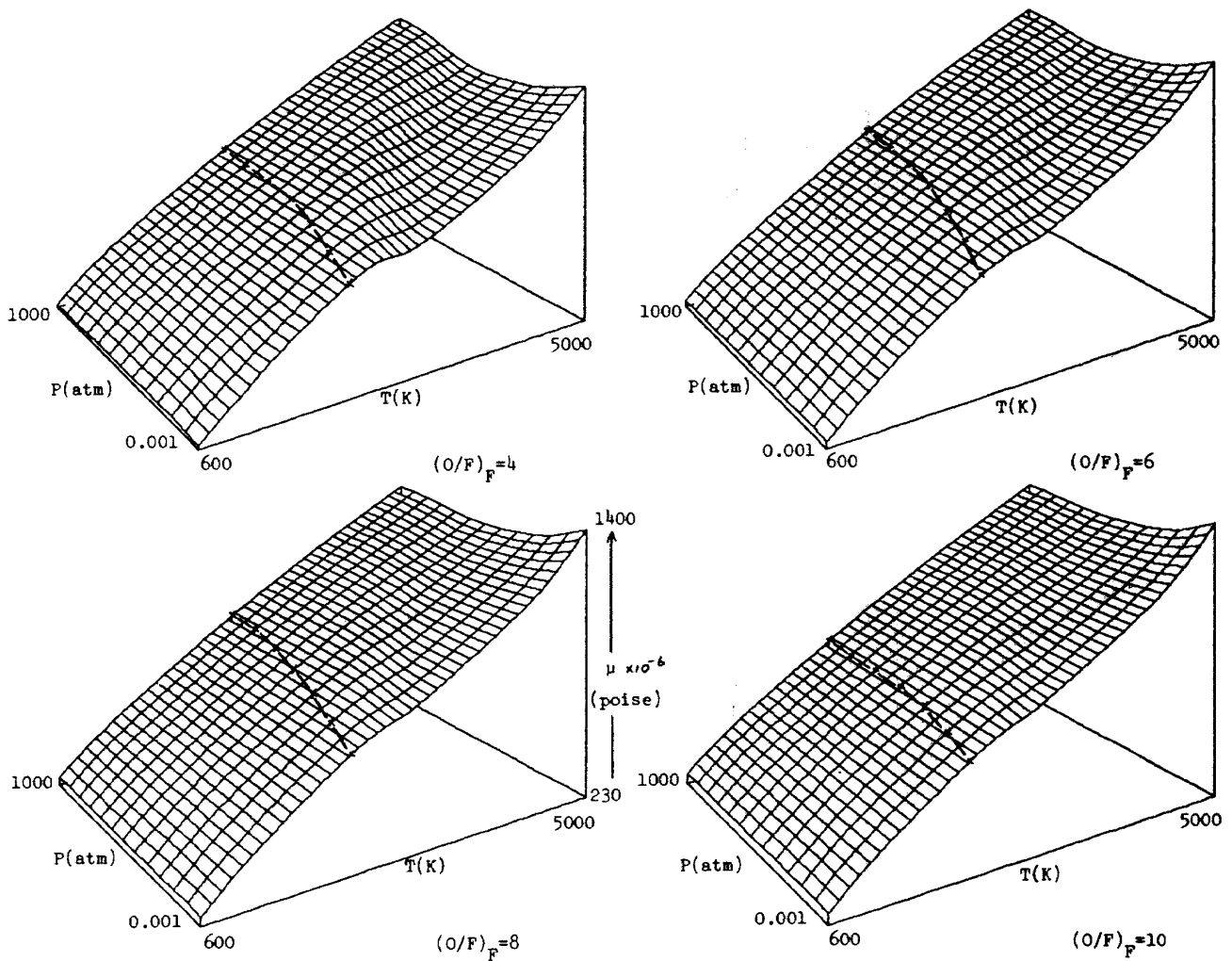
粘 度 ( $\mu$ )

図 A - 3 - 9

粘度 ( $\mu$ ) は,  $(O/F)_F$  の増加とともに大きくなる傾向にある。低圧の場合,  $\mu$  は温度の上昇とともに大きくなるが約 2600 K 近傍で一旦とまり再び増加する。これは図 C-3-1 ~ 図 C-3-10 からわかるように  $H_2$  の解離による組成変化に起因する。高温で圧力が低下するにつれて  $\mu$  が若干増加している。これは空気中の  $N_2$  の解離によるものである。圧力が高くなると解離温度が高くなるため、図の範囲では単調増加となっている。

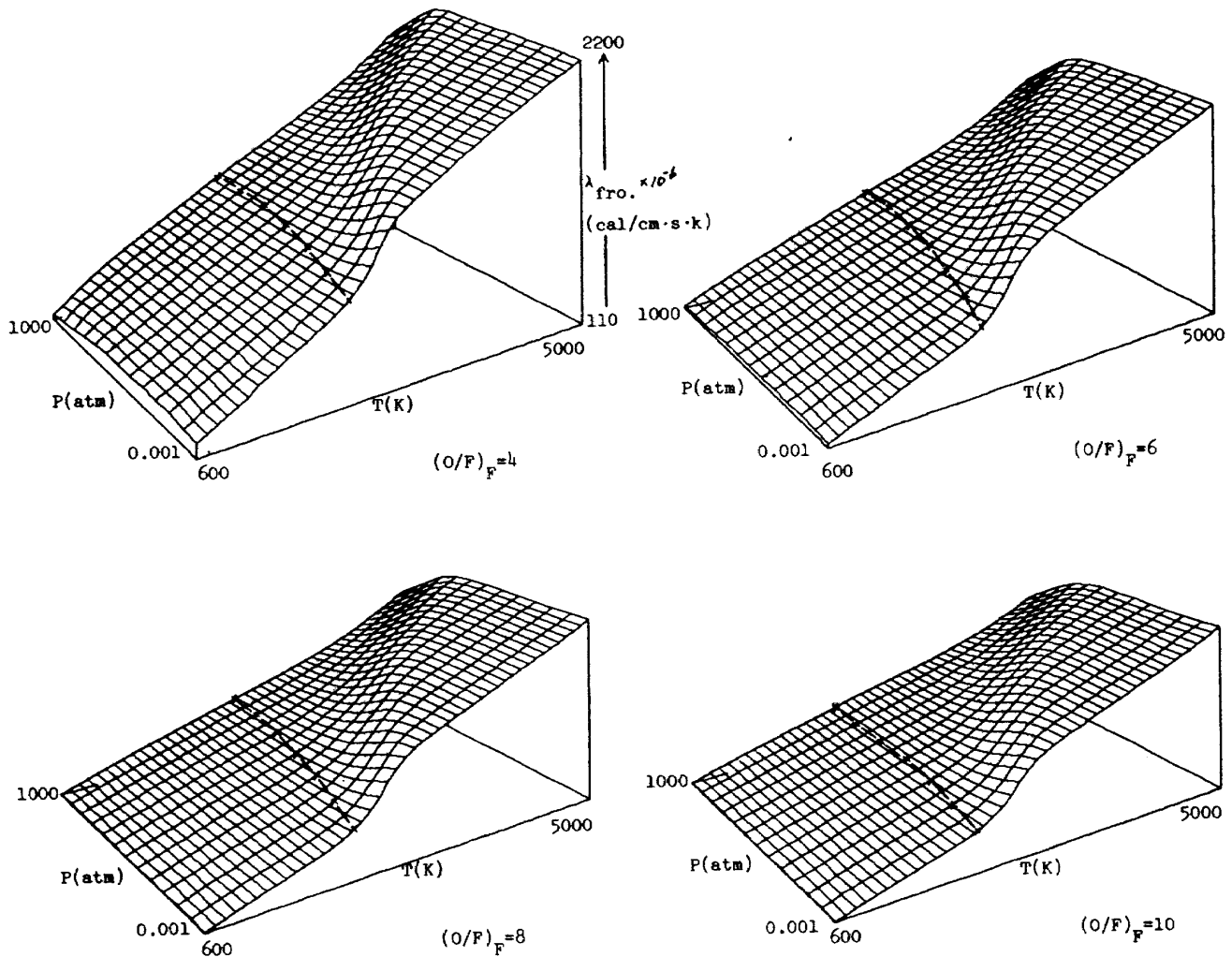
熱伝導率 - 凍結 ( $\lambda_{fro.}$ )


図 A - 3 - 12

熱伝導率-凍結 ( $\lambda_{fro.}$ ) は,  $(O/F)_F$  の増加とともに小さくなる。温度の上昇とともに  $\lambda_{fro.}$  は, 大きくなり変化のパターンはどの  $(O/F)_F$  においてもほぼ同様である。低温側では圧力に関してはほぼフラットな面をもっている。ただし  $(O/F)_F$  の小さい高圧の 1000 K 以下で  $\lambda_{fro.}$  は, やや減少している。これは  $NH_3$  の生成によるものである。



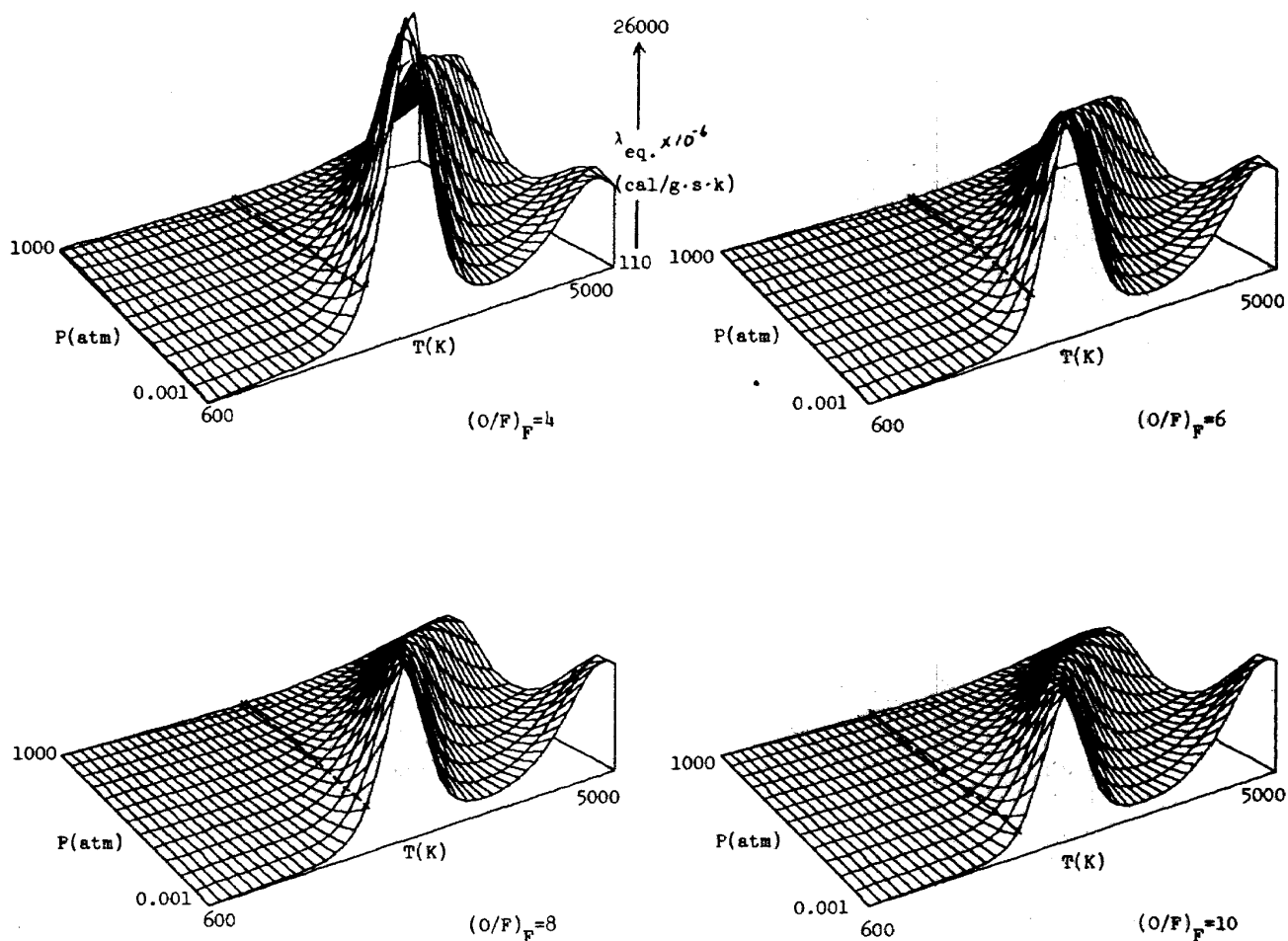
熱伝導率 - 平衡 ( $\lambda_{eq.}$ )

図 A - 3 - 14

熱伝導率—平衡 ( $\lambda_{eq.}$ )は、 $(\frac{O}{F})_F$ の増加とともに減少する。低圧側で2つのピークが顕著である。最初のピークは $(\frac{O}{F})_F$ が小の場合は $H_2$ と $H_2O$ の解離によるもので、 $(\frac{O}{F})_F$ が大になると $H_2O$ と $O_2$ の解離によるものに転じている。ピーク値は $(\frac{O}{F})_F$ が小の場合の方が高い。例えば0.001 atmにおいて $(\frac{O}{F})_F = 4$ と10では、図B-3-14-1と図B-3-14-4よりそれぞれ $25000 \times 10^{-8}$ と $11700 \times 10^{-8} (\frac{cal}{cm \cdot s \cdot K})$ である。後のピークは $N_2$ の解離に伴うものでピーク値の変動は少ない。図B-3-14-1～図B-3-14-4でも明らかなように低温側では、 $\lambda_{fro.}$ と $\lambda_{eq.}$ は一致する。

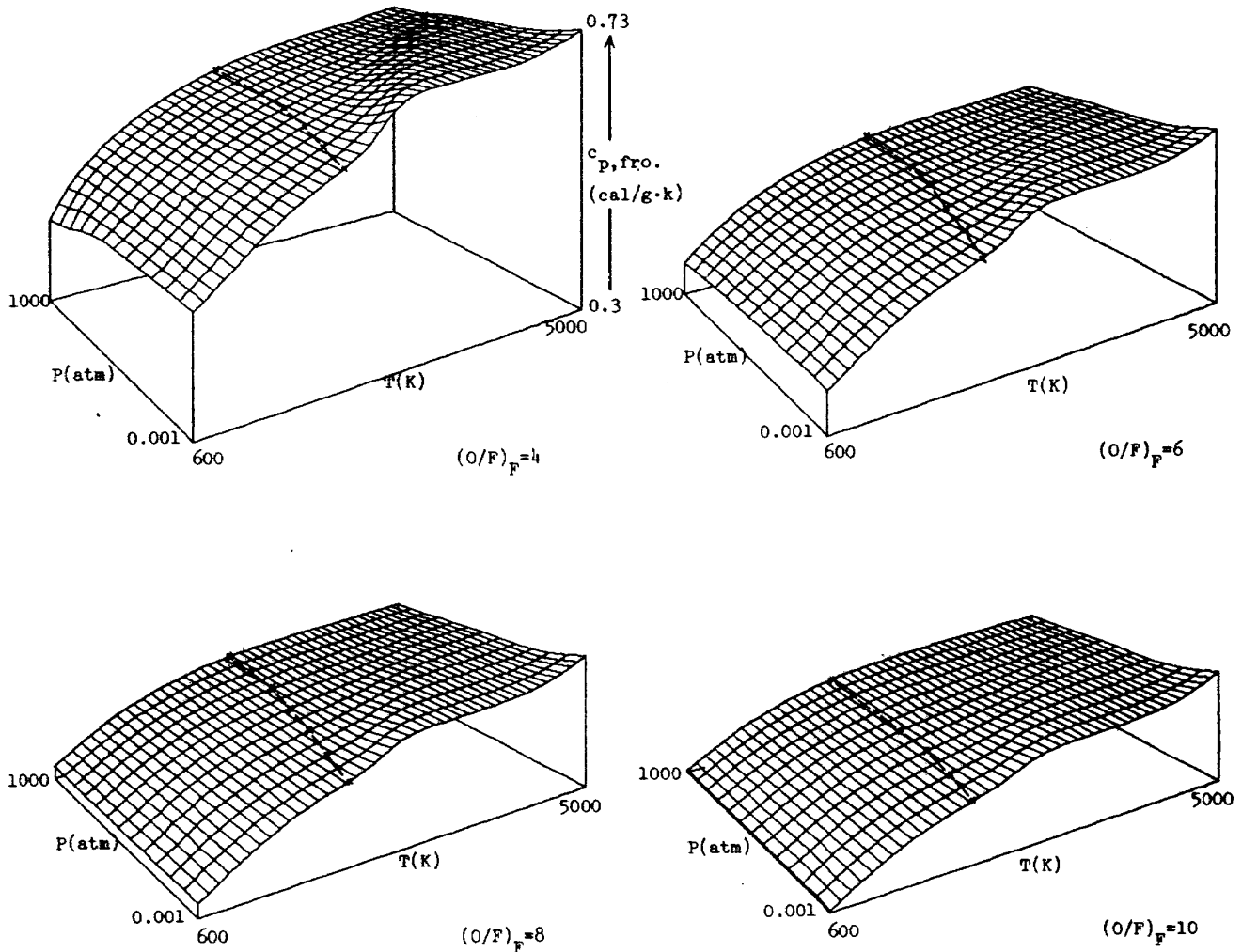
比熱 - 凍結 ( $c_{p, \text{fro.}}$ )


図 A - 3 - 15

比熱-凍結 ( $c_{p, \text{fro.}}$ ) は,  $(\text{O/F})_F$  の増加とともに減少している。 $(\text{O/F})_F$  の変化に対し  $c_{p, \text{fro.}}$  の変化のパターンはほぼ同一である。ただし  $(\text{O/F})_F$  の小さい高圧の1000K以下では  $\text{NH}_3$  の生成がみられここで  $c_{p, \text{fro.}}$  が低下している。単位を  $\frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$  に変換すると量論比で最大値をとり図 A-3-15と異なった傾向を示す。単位変換を行なうには燃焼ガスの平均分子量図, 図 B-3-4-1 ~ 図 B-3-4-4 を用いればよい。

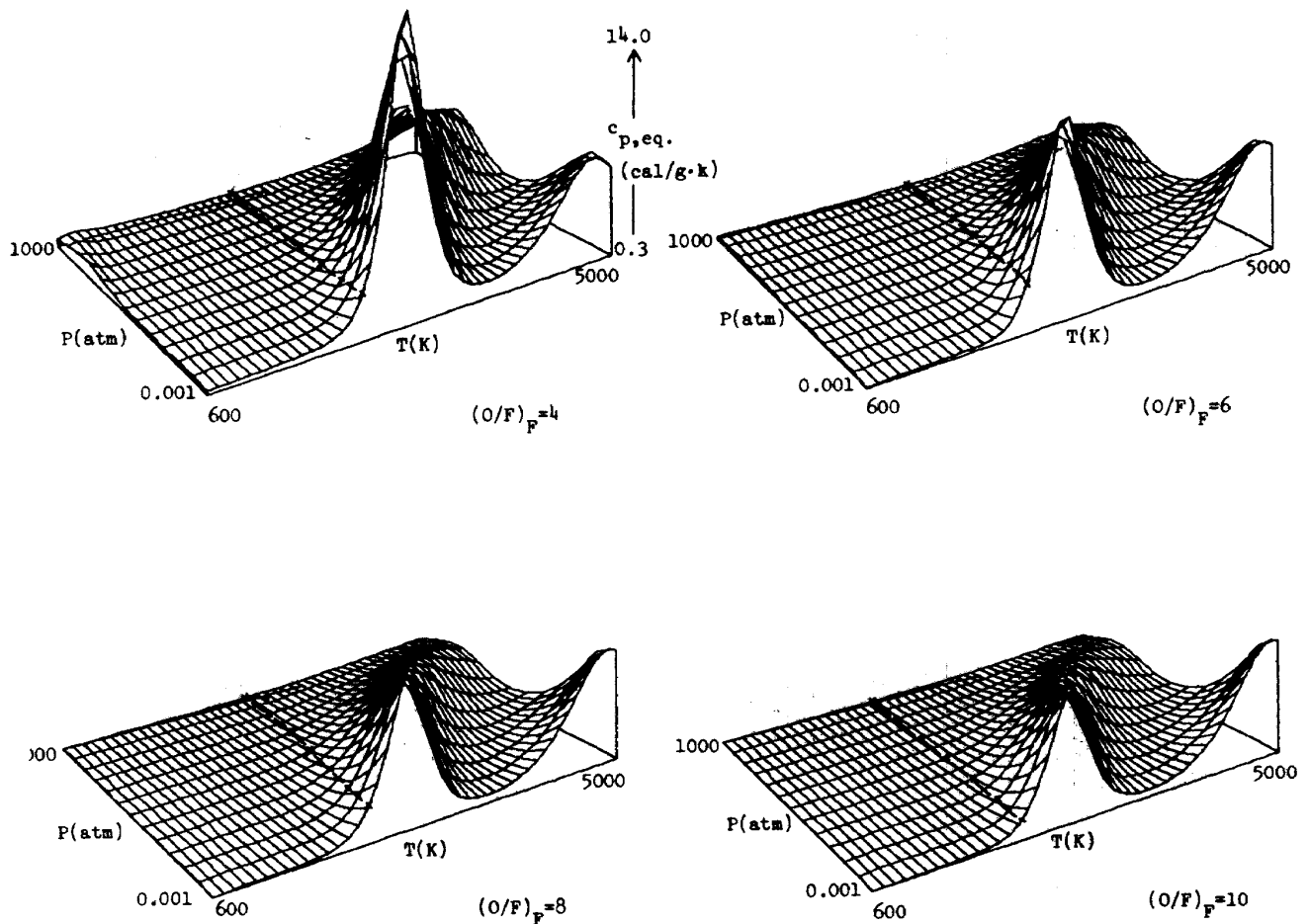
比熱 - 平衡 ( $c_{p,eq.}$ )

図 A - 3 - 16

比熱—平衡 ( $c_{p,eq.}$ ) は,  $(\frac{O}{F})_F$  の増加とともに減少する。低圧側で2つのピークが顕著である。最初のピークは  $(\frac{O}{F})_F$  が小の場合は  $H_2$  と  $H_2O$  の解離によるもので,  $(\frac{O}{F})_F$  が大になると  $H_2O$  と  $O_2$  の解離によるものに転じている。ピーク値は  $(\frac{O}{F})_F$  が小の場合の方が高い。例えば 0.001 atm において  $(\frac{O}{F})_F = 4$  と 10 では, 図 B-3-16-1 と 図 B-3-16-4 よりそれぞれ 13.2 と 5.5 ( $\frac{cal}{g \cdot K}$ ) である。後のピークは  $N_2$  の解離に伴うものでピーク値の変動は少ない。図 B-3-16-1 ~ 図 B-3-16-4 でも明らかなように低温側で  $c_{p,eq.}$  は,  $(\frac{O}{F})_F$  の小さい高圧の 1000K 以下を除き  $c_{p, fro.}$  とほぼ一致する。断熱火炎温度以下では  $c_{p,eq.}$  の変化は少ない。

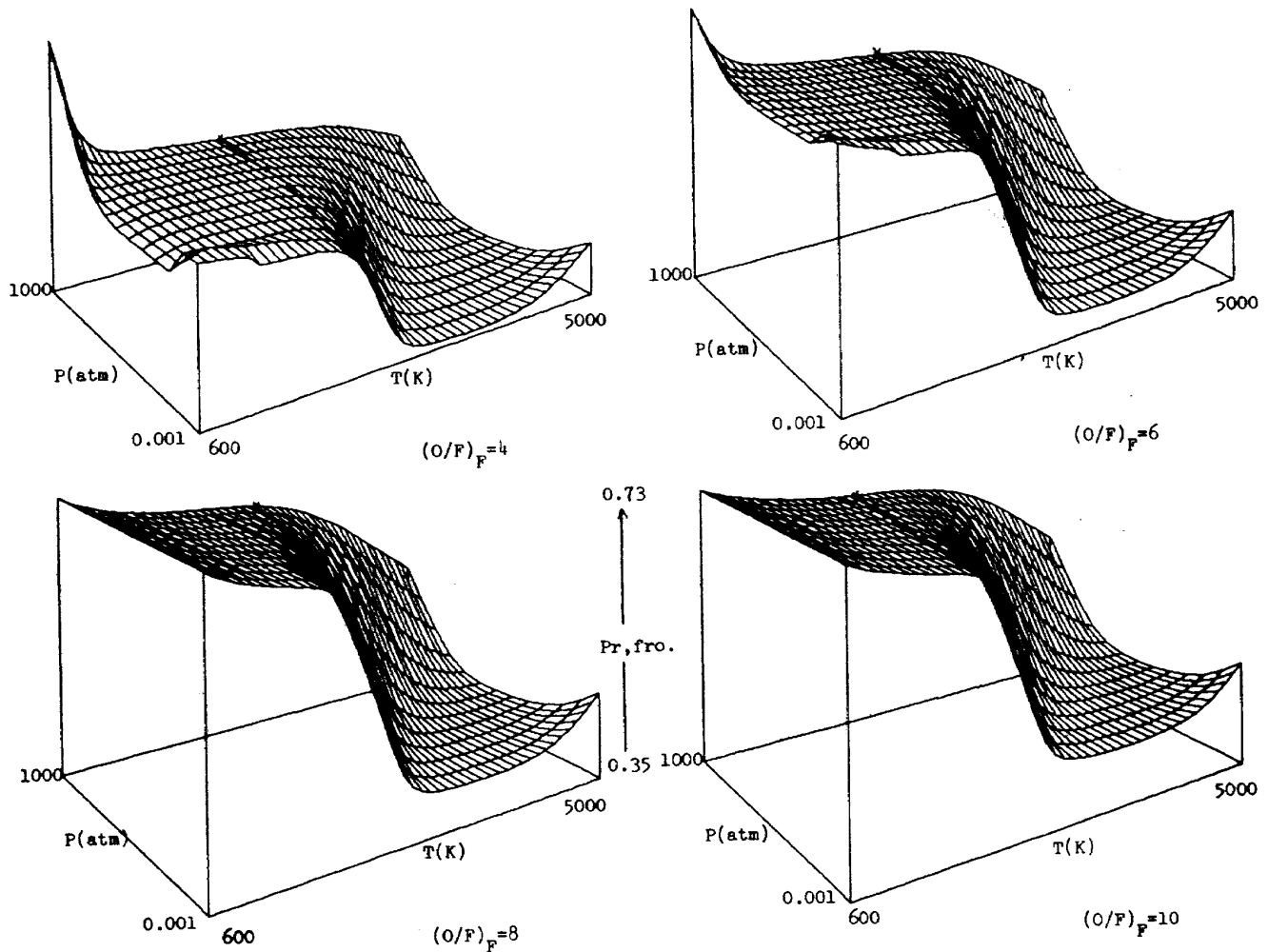
プラントル数 - 凍結 ( $Pr, fro.$ )


図 A - 3 - 17

プラントル数-凍結 ( $Pr, fro.$ )は,  $(\frac{O}{F})_F$ の増加とともに大きくなる。 $(\frac{O}{F})_F$ の小さい高圧の1000 K以下の領域で $Pr, fro.$ は急激に上昇する。 $NH_3$ の生成によるもので $(\frac{O}{F})_F$ が大きくなるとこの傾向は消える。低圧高温の領域で $Pr, fro.$ は低下している。これは図C-3-1~図C-3-10をみるとH, Oが生成しているためである。断熱火炎温度以下のほぼ平坦な面の値は, 図B-3-17-1~図B-3-17-4から各 $(\frac{O}{F})_F$ について0.51, 0.61, 0.69, 0.69である。

## プラントル数 - 平衡 (Pr,eq.)

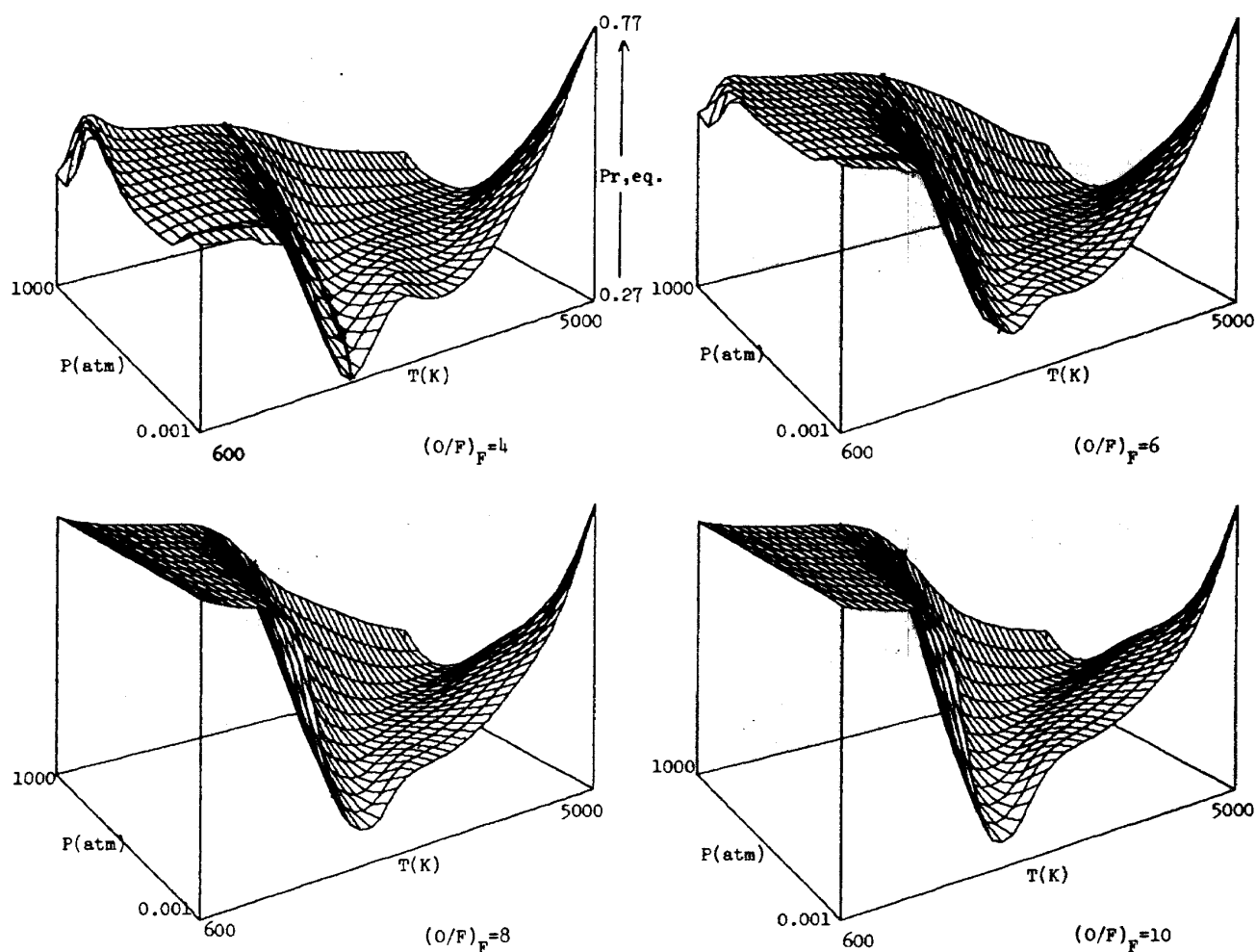


図 A - 3 - 18

プラントル数-平衡 (Pr,eq.) は、低温の領域を除き各  $(\text{O/F})_F$  とほぼ同様のパターンである。低圧高温では  $\text{N}_2$  の解離による Pr,eq. の急激な上昇がある。Pr,eq. は  $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $c_p$  等の物性値と異なり断熱火炎温度以下でも変化は大きい。変化の最も大きい  $(\text{O/F})_F = 8$  において図 B-3-18-3 より 0.001 atm の Pr,eq. は、温度が下がると断熱火炎温度での Pr,eq. のほぼ 2.2 倍になる。 $(\text{O/F})_F$  の小さい低温 (高圧の 1000 K 以下を除く) で Pr,eq. が低いのは  $\text{H}_2$  の割合が高いためである。低温側では高圧の 1000 K 以下を除き Pr,eq. と Pr,fro. は一致する。

— 平面図による物性値の読みとり —

物性値は、温度を横軸に圧力を補助パラメータとする  
付録3の平面図から精度よく読みとることができる。

物性値は、平衡組成と密接に関係するため代表的な圧  
力3点を選んで平衡組成図も示した。

付録3の平面図および平衡組成図は下記の表10に示した。

ページ	図番号	系	物性値	混合比 ( $\frac{O}{F}P \rightarrow \frac{O}{F}F$ )
95	B-3- 2-1	H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> -Air	H	2 → 4
"	B-3- 4-1	"	$\bar{M}$	"
96	B-3- 7-1	"	$\gamma$	"
"	B-3- 9-1	"	$\mu$	"
97	B-3-14-1	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-3-16-1	"	$c_{p,eq.}$	"
98	B-3-17-1	"	Pr, fro.	"
"	B-3-18-1	"	Pr, eq.	"
99	B-3- 2-2	"	H	2 → 6
"	B-3- 4-2	"	$\bar{M}$	"
100	B-3- 7-2	"	$\gamma$	"
"	B-3- 9-2	"	$\mu$	"
101	B-3-14-2	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-3-16-2	"	$c_{p,eq.}$	"
102	B-3-17-2	"	Pr, fro.	"
"	B-3-18-2	"	Pr, eq.	"
103	B-3- 2-3	"	H	2 → 8
"	B-3- 4-3	"	$\bar{M}$	"
104	B-3- 7-3	"	$\gamma$	"
"	B-3- 9-3	"	$\mu$	"
105	B-3-14-3	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-3-16-3	"	$c_{p,eq.}$	"
106	B-3-17-3	"	Pr, fro.	"
"	B-3-18-3	"	Pr, eq.	"
107	B-3- 2-4	"	H	2 → 10
"	B-3- 4-4	"	$\bar{M}$	"
108	B-3- 7-4	"	$\gamma$	"
"	B-3- 9-4	"	$\mu$	"
109	B-3-14-4	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-3-16-4	"	$c_{p,eq.}$	"
110	B-3-17-4	"	Pr, fro.	"
"	B-3-18-4	"	Pr, eq.	"
111	B-3- 2-5	"	H	4 → 6
"	B-3- 4-5	"	$\bar{M}$	"
112	B-3- 7-5	"	$\gamma$	"
"	B-3- 9-5	"	$\mu$	"
113	B-3-14-5	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-3-16-5	"	$c_{p,eq.}$	"
114	B-3-17-5	"	Pr, fro.	"
"	B-3-18-5	"	Pr, eq.	"

ページ	図番号	系	物性値	混合比 ( $\frac{O}{F}P \rightarrow \frac{O}{F}F$ )
115	B-3- 2-6	H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> -Air	H	4 → 8
"	B-3- 4-6	"	$\bar{M}$	"
116	B-3- 7-6	"	$\gamma$	"
"	B-3- 9-6	"	$\mu$	"
117	B-3-14-6	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-3-16-6	"	$c_{p,eq.}$	"
118	B-3-17-6	"	Pr, fro.	"
"	B-3-18-6	"	Pr, eq.	"
119	B-3- 2-7	"	H	4 → 10
"	B-3- 4-7	"	$\bar{M}$	"
120	B-3- 7-7	"	$\gamma$	"
"	B-3- 9-7	"	$\mu$	"
121	B-3-14-7	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-3-16-7	"	$c_{p,eq.}$	"
122	B-3-17-7	"	Pr, fro.	"
"	B-3-18-7	"	Pr, eq.	"
123	B-3- 2-8	"	H	6 → 8
"	B-3- 4-8	"	$\bar{M}$	"
124	B-3- 7-8	"	$\gamma$	"
"	B-3- 9-8	"	$\mu$	"
125	B-3-14-8	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-3-16-8	"	$c_{p,eq.}$	"
126	B-3-17-8	"	Pr, fro.	"
"	B-3-18-8	"	Pr, eq.	"
127	B-3- 2-9	"	H	6 → 10
"	B-3- 4-9	"	$\bar{M}$	"
128	B-3- 7-9	"	$\gamma$	"
"	B-3- 9-9	"	$\mu$	"
129	B-3-14-9	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-3-16-9	"	$c_{p,eq.}$	"
130	B-3-17-9	"	Pr, fro.	"
"	B-3-18-9	"	Pr, eq.	"
131	B-3- 2-10	"	H	8 → 10
"	B-3- 4-10	"	$\bar{M}$	"
132	B-3- 7-10	"	$\gamma$	"
"	B-3- 9-10	"	$\mu$	"
133	B-3-14-10	"	$\lambda$ eq.	"
"	B-3-16-10	"	$c_{p,eq.}$	"
134	B-3-17-10	"	Pr, fro.	"
"	B-3-18-10	"	Pr, eq.	"

ページ	図番号	系	混合比 $\phi_P \rightarrow \phi_F$	圧力 (atm)
135	C-3-1	H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> -Air	2 → 4	0.01
"	C-3-2	"	"	1
"	C-3-3	"	"	100
136	C-3-4	"	2 → 6	0.01
"	C-3-5	"	"	1
"	C-3-6	"	"	100
137	C-3-7	"	2 → 8	0.01
"	C-3-8	"	"	1
"	C-3-9	"	"	100
138	C-3-10	"	2 → 10	0.01
"	C-3-11	"	"	1
"	C-3-12	"	"	100
139	C-3-13	"	4 → 6	0.01
"	C-3-14	"	"	1
"	C-3-15	"	"	100
140	C-3-16	"	4 → 8	0.01
"	C-3-17	"	"	1
"	C-3-18	"	"	100
141	C-3-19	"	4 → 10	0.01
"	C-3-20	"	"	1
"	C-3-21	"	"	100
142	C-3-22	"	6 → 8	0.01
"	C-3-23	"	"	1
"	C-3-24	"	"	100
143	C-3-25	"	6 → 10	0.01
"	C-3-26	"	"	1
"	C-3-27	"	"	100
144	C-3-28	"	8 → 10	0.01
"	C-3-29	"	"	1
"	C-3-30	"	"	100

表 10

## 5 データファイルを利用して物性値を得る方法

物性値は、付録1～3の平面図から読みとることが出来る。表1～6に示すさらに広範囲な物性値および計算領域は、計算機のデータファイルとして収録することにより迅速かつ容易に物性値が得られる。以下に著者等が構成した物性値を得るためのシステムの構成例を示す。

3本の磁気テープに物性値をファイルした。

補間方式は、圧力を対数にとった3次元3次ラグランジュ補間法を採用した。

キャラクタディスプレイターミナルからの指示により結果は、キャラクタディスプレイ上に表示され、かつラインプリンタにも出力される。

## — 補間方式 —

データファイルにおさめられている物性値より、任意の条件における値を求めるためにラグランジュ補間法を用いた。各系について物性値は、混合比、圧力、温度の関数である。

補間方式は、計算に要する時間と補間の精度から試行の結果、圧力の項を対数にとった3次元3次ラグランジュ補間法を用いた。すなわち3次元の直方体領域の格子点上の点( $x_i, y_j, z_k$ )における関数値 $f(x_i, y_j, z_k) = f_{i,j,k}$ が与えられている時、すべての格子点において $f$ の値に一致するような多項式は、次式で与えられる。

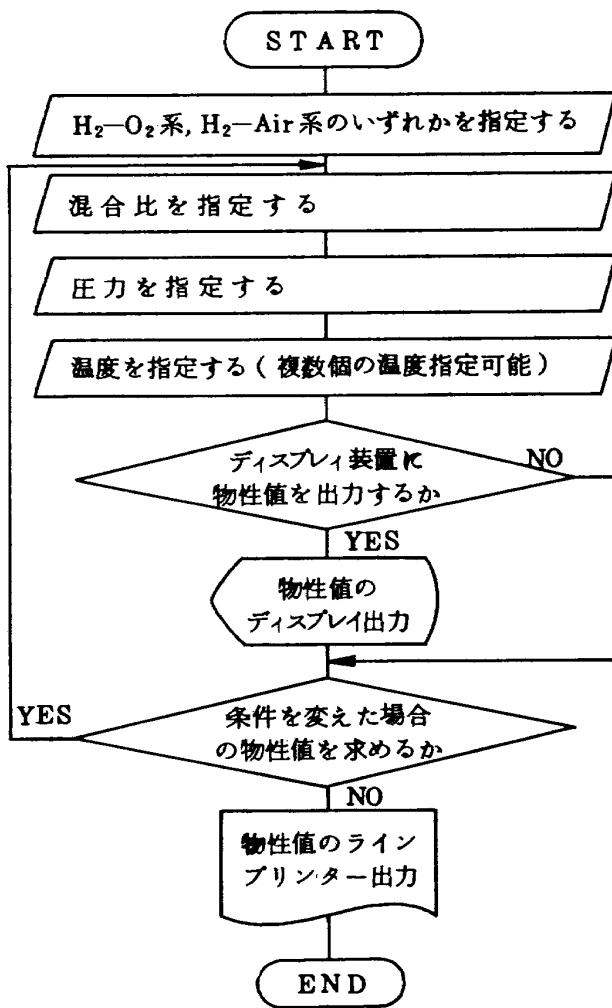
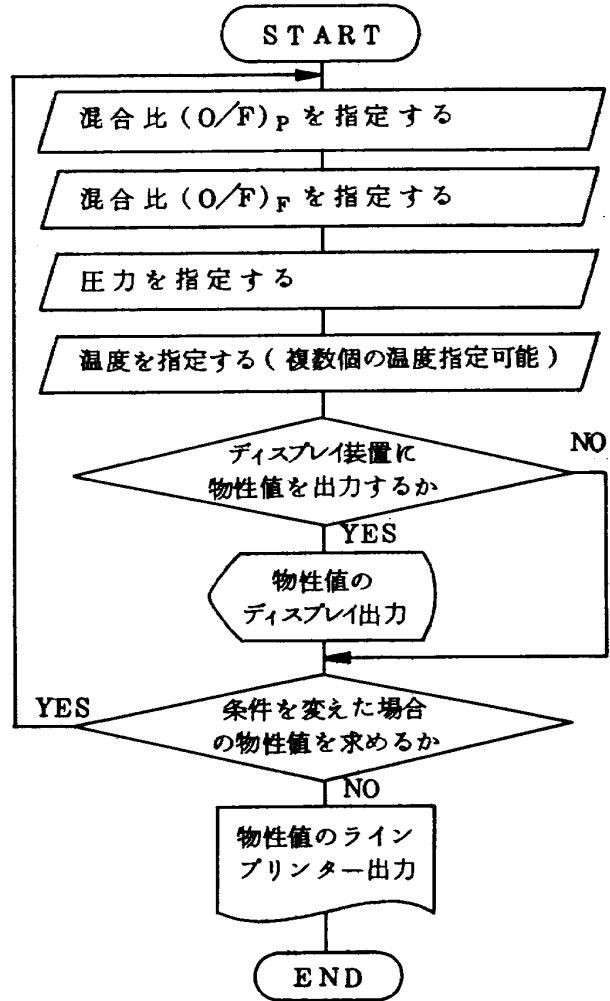
$$P(x,y,z) = \sum_{i=0}^8 \sum_{j=0}^8 \sum_{k=0}^8 \left( \prod_{l=0}^8 \frac{x - x_l}{x_i - x_l} \right)$$

$$\log \left( \prod_{l=0}^8 \frac{y - y_l}{y_j - y_l} \right) \left( \prod_{l=0}^8 \frac{z - z_l}{z_k - z_l} \right) f_{i,j,k}$$

## —使用例—

$H_2-O_2$ 系,  $H_2-Air$ 系,  $H_2-O_2-Air$ 系の物性値のデータファイルが, 3本の磁気テープに収録されている。

このデータファイルを用い図1, 図2の手順図に示すディスプレイとの対話方式で, 先に述べた補間法により各物性値が求められる。ディスプレイとの対話例を図3およびそのラインプリンタ出力例を図4に示す。

図1  $H_2-O_2$ 系,  $H_2-Air$ 系 手順図図2  $H_2-O_2-Air$ 系 手順図



```

M002 0045 H2/AIR  START
M031 0045 H2/AIR  FTC
MU31 0045 H2/AIR  LED
Q03  M520 0045 H2/AIR  FIN=0300      FIT IN T0, T1, T2, T3, T4,
R03  T3
M031 0045 H2/AIR  LOAD
      0045 H2/AIR  TRANSPORT AND THERMODYNAMIC PROPERTIES
Q03  0045 H2/AIR  ASSIGN FUEL AND OXIDE SYSTEM ?
R03  H2/AIR
Q03  0045 H2/AIR  MIXTURE RATIO O/F ?
R03  7.94
Q03  0045 H2/AIR  PRESSURE (ATM) ?
R03  1.
Q03  0045 H2/AIR  TEMPERATURE (K) ?
R03  1000.
Q03  0045 H2/AIR  DO TEMP YES OR NO ?
R03  YES
Q03  0045 H2/AIR  INTVL ?
R03  100.
Q03  0045 H2/AIR  N ?
R03  3
Q03  0045 H2/AIR  DISPLAY OUT YES OR NO ?
R03  YES
      0045 H2/AIR  TEMP      .      1000.      1100.      1200.
      0045 H2/AIR  VISC      .      356.      380.      404.
      0045 H2/AIR  M-COND .      326.      349.      371.
      0045 H2/AIR  I-COND .      177.      199.      223.
      0045 H2/AIR  F-COND .      502.      548.      594.
      0045 H2/AIR  R-COND .        0.        0.        0.
      0045 H2/AIR  E-COND .      503.      548.      594.
      0045 H2/AIR  F-CP      .      0.6231    0.6345    0.6453
      0045 H2/AIR  E-CP      .      0.6240    0.6349    0.6455
      0045 H2/AIR  F-PR      .      0.4410    0.4404    0.4395
      0045 H2/AIR  E-PR      .      0.4413    0.4405    0.4396
      0045 H2/AIR  LEWIS    .      0.5734    0.5797    0.6685
Q03  0045 H2/AIR  WAIT OR GO DISPLAY OUT
R03  GO
      0045 H2/AIR  DENS      .      1.529E-04 1.389E-04 1.274E-04
      0045 H2/AIR  ENTH      .      -329.0   -266.1   -202.0
      0045 H2/AIR  ENTR      .      3.8858    3.9458    4.0015
      0045 H2/AIR  M-WT      .      12.542    12.541    12.541
      0045 H2/AIR  GAMMA S.   .      1.3409    1.3328    1.3254
      0045 H2/AIR  GAMMA      .      1.3410    1.3329    1.3255
      0045 H2/AIR  SONIC V.   .      942.8     985.9    1026.9
Q03  0045 H2/AIR  CONT OR END
R03  END
      0045 H2/AIR  STOP      00000
M521 0045 H2/AIR  FREE T3 FROM FIN=0300
M062 0045 H2/AIR  END

```

図3 対 話 例

TRANSPORT AND THERMODYNAMIC PROPERTIES (H2 - AIR)

		O/F= 7.940		ATM= 1.0000																			
TEMP DEG K		VISCOSITY		MONATOMIC COND		INTERNAL COND		FROZEN COND		REACTION COND		EQUILIBRIUM COND		CP FROZ		CP EQ		PRANDTL FROZ		PRANDTL EQ		LEWIS NUMBER	
		POISE						X10-6 CAL/(CM)(SEC)(K)						CAL/(G)(K)				CAL/(G)(K)		DIMENSIONLESS			
1000.		356.		326.		177.		502.		0.		503.		0.6231		0.6240		0.4410		0.4413		0.5734	
1100.		380.		349.		199.		548.		0.		548.		0.6345		0.6349		0.4404		0.4405		0.5797	
1200.		404.		371.		227.		594.		0.		594.		0.6453		0.6455		0.4395		0.4396		0.6085	
TEMP DEG K		DENSITY		ENTHALPY		ENTROPY		MOLE WEIGHT		GAMMA S		GAMMA		SONIC VELOCITY									
		G/CC		CAL/G		CAL/(G)(K)								M/SEC									
1000.		0.15285E-03		-329.0		3.8858		12.542		1.3409		1.3410		942.8									
1100.		0.13894E-03		-266.3		3.9458		12.541		1.3328		1.3329		985.9									
1200.		0.12736E-03		-202.0		4.0015		12.541		1.3254		1.3255		1026.9									

図4 ラインプリンタ出力例

## 6 あとがき

水素を燃料とし、酸素および空気を酸化剤とする、ロケットエンジンの燃焼関連の諸問題の解析および設計等に利用するため、H-N-O-Ar系混合ガスの熱力学および輸送物性値を計算した。結果は、全体の傾向を示す立体図および数値が読みとりやすいためこの種のデータ集でよく使われている補助パラメータを用いた平面図および平衡組成図にまとめた。しかしながらこの報告での図の数をできるだけ圧縮するよう心掛けたため計算機で利用できるようにした全ての範囲について図を示すことができなかった。このため使いづらいものとなったことを恐れる。

## 参 考 文 献

- 1) 石井他；空気吸込式ロケットの超音速モード燃焼実験，航技研ニュース 第236(1979)。
- 2) R.A.Svehla；Thermodynamic and Transport Properties for the Hydrogen-Oxygen System, NASA SP-3011(1964)。
- 3) G.F.Klich；Thermodynamic, Transport, and Flow Properties of Gaseous Products Resulting from Combustion of Methane-Air-Oxygen Mixtures, NASA TN D-8153 (1976)。
- 4) 毛呂，鈴木；JP-4/Lox, JP-4/AIR の平衡組成と燃焼特性値の検討，航技研資料 TM-354 (1978)。
- 5) S.Gordon & B.J.McBride；Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations, NASA SP-273 (1971)。
- 6) 毛呂，鈴木；ロケットプロペラント燃焼ガスの輸送特性値，第21回宇宙科学技術連合講演会講演集 (1977) pp 218～221。
- 7) J.O.Hirschfelder, C.F.Curtiss & R.B.Bird；Molecular Theory of Gases and Liquids, John Wiley & Sons, Inc. (1964)。
- 8) R.A.Svehla & B.J.McBride；Fortran N Computer Program for Calculation of Thermodynamic and Transport Properties of Complex Chemical Systems, NASA TN D-7056 (1973)。
- 9) R.A.Svehla & R.S.Brokawn；Heat Capacity and the Lewis Number of a Reacting Gas, AIAA Journal Vol4 Nov.1966 pp182～184。

## 付 録 1      $\text{H}_2\text{-O}_2$ 系



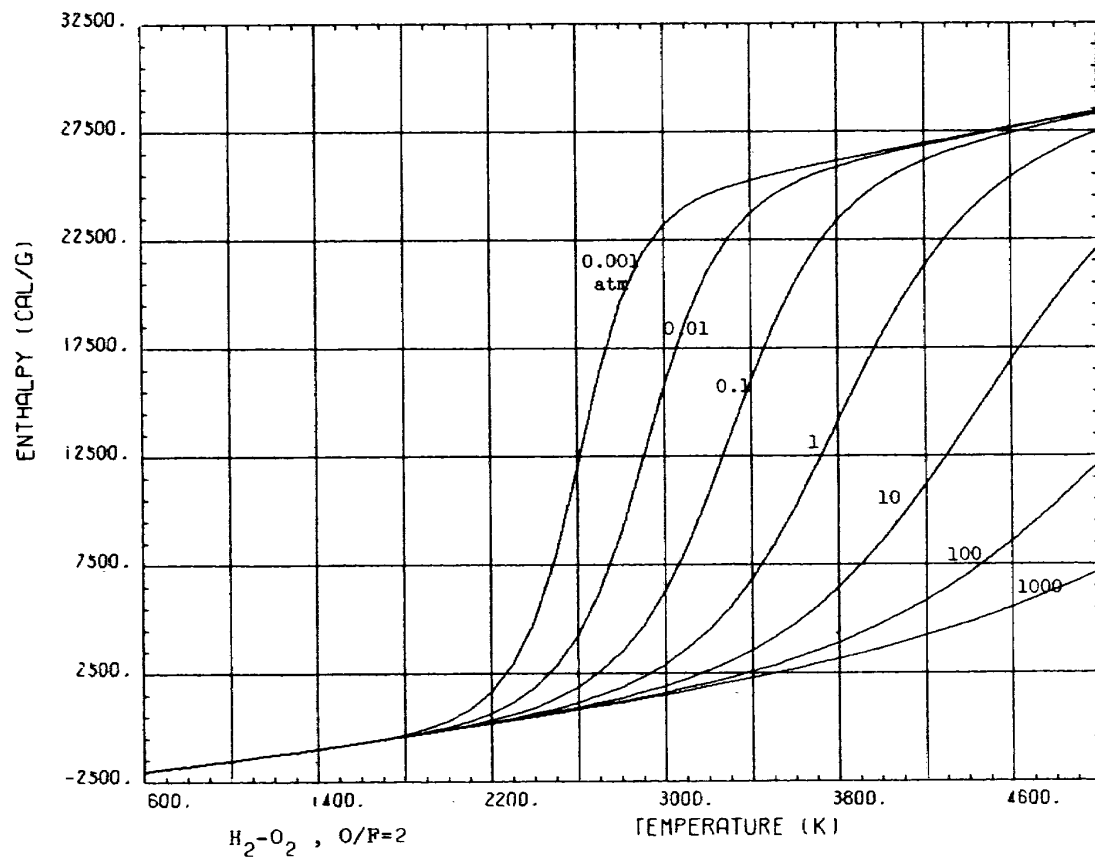


図 B-1-2-1

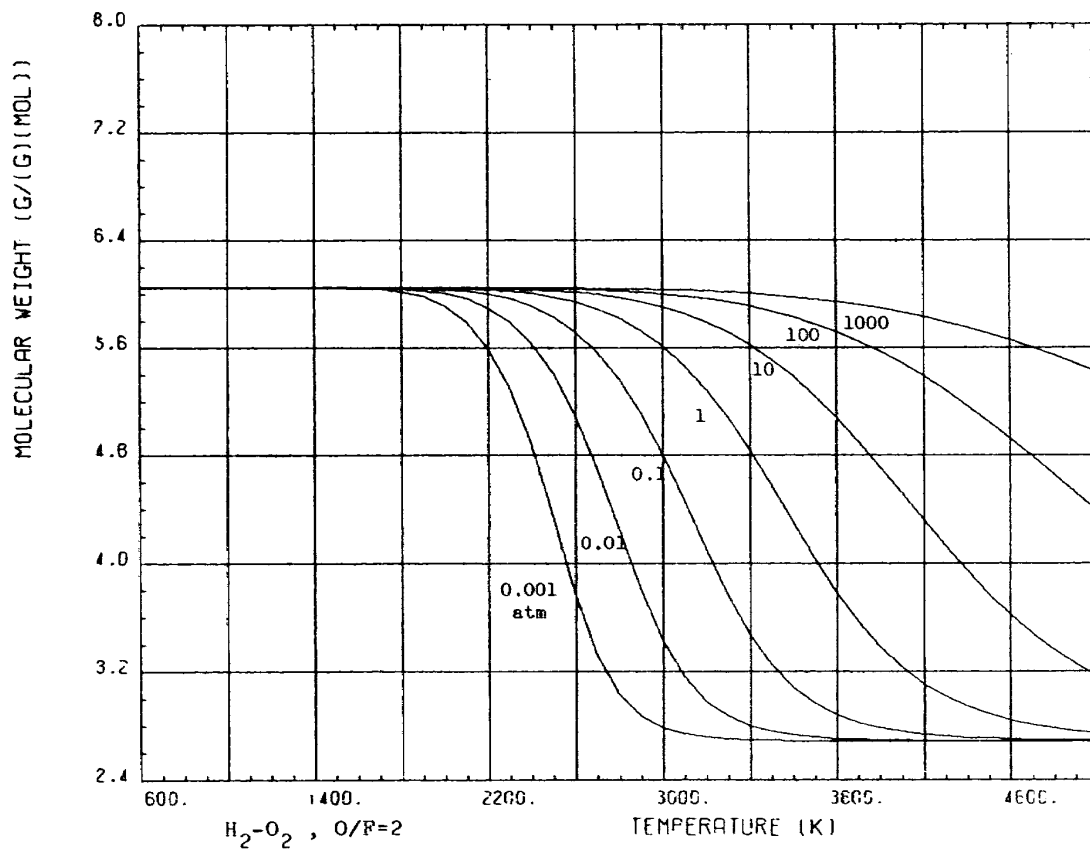


図 B-1-4-1

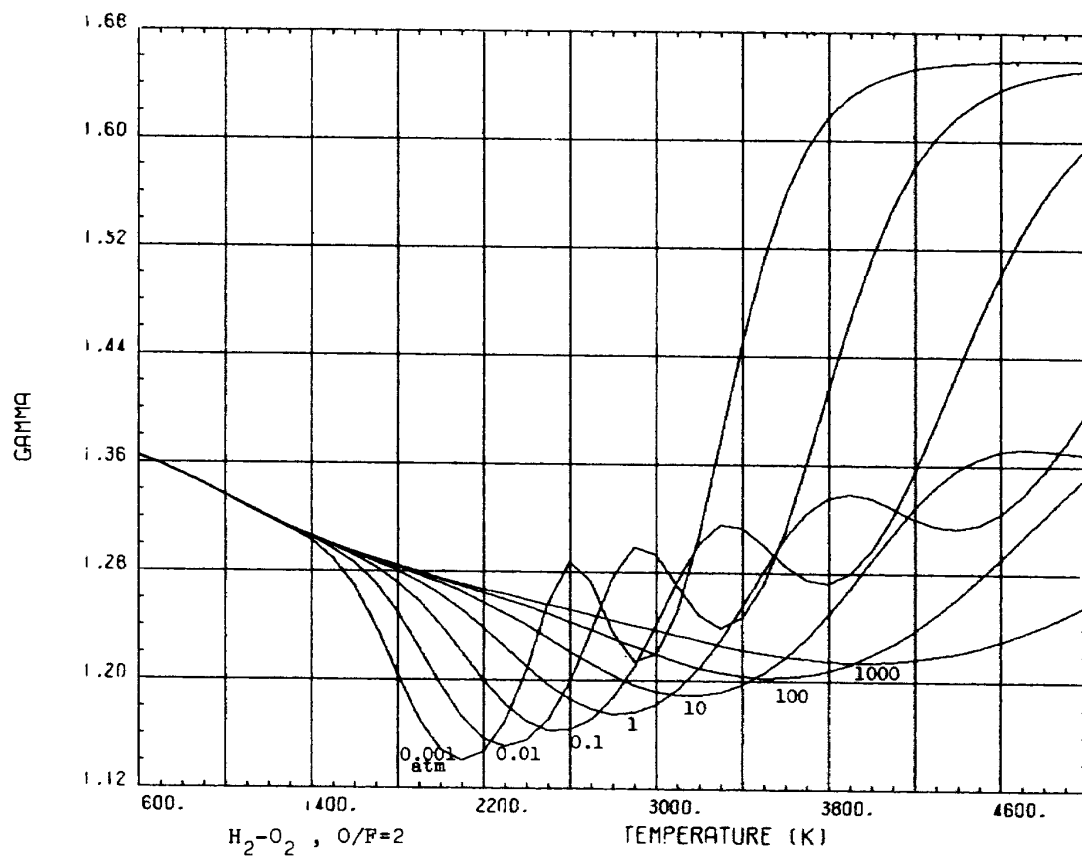


図 B-1-7-1

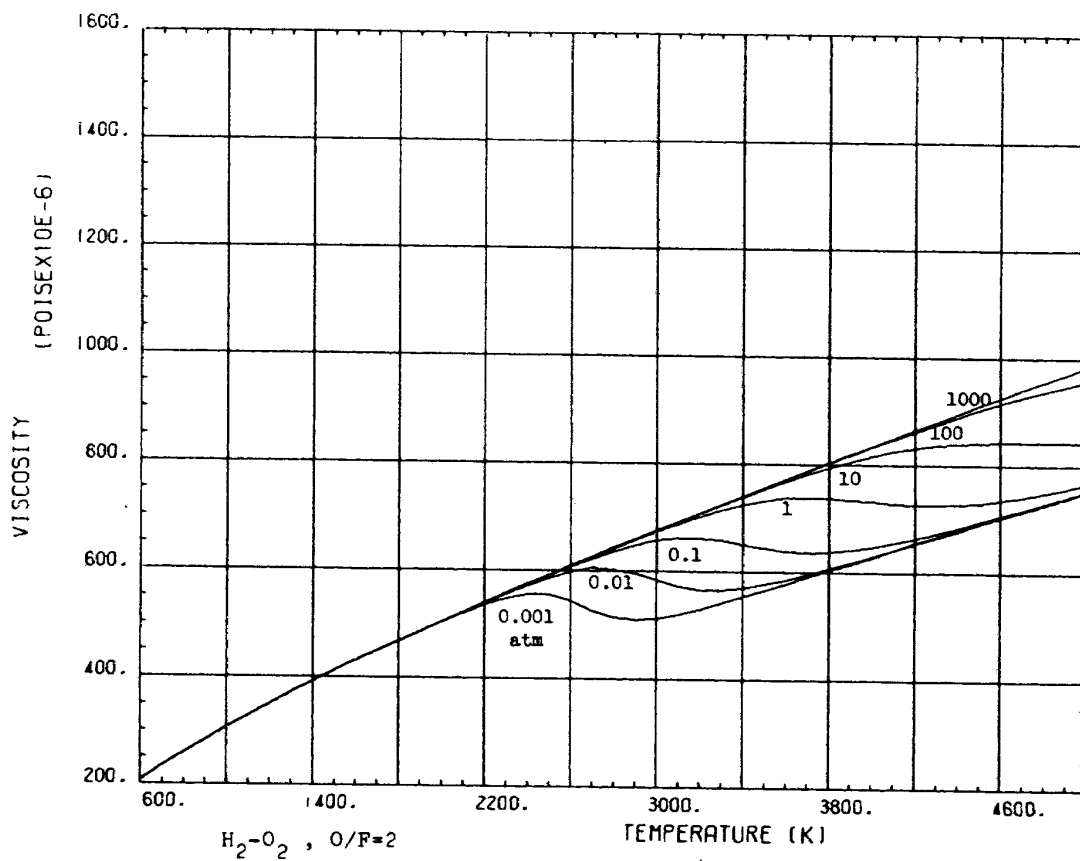


図 B-1-9-1

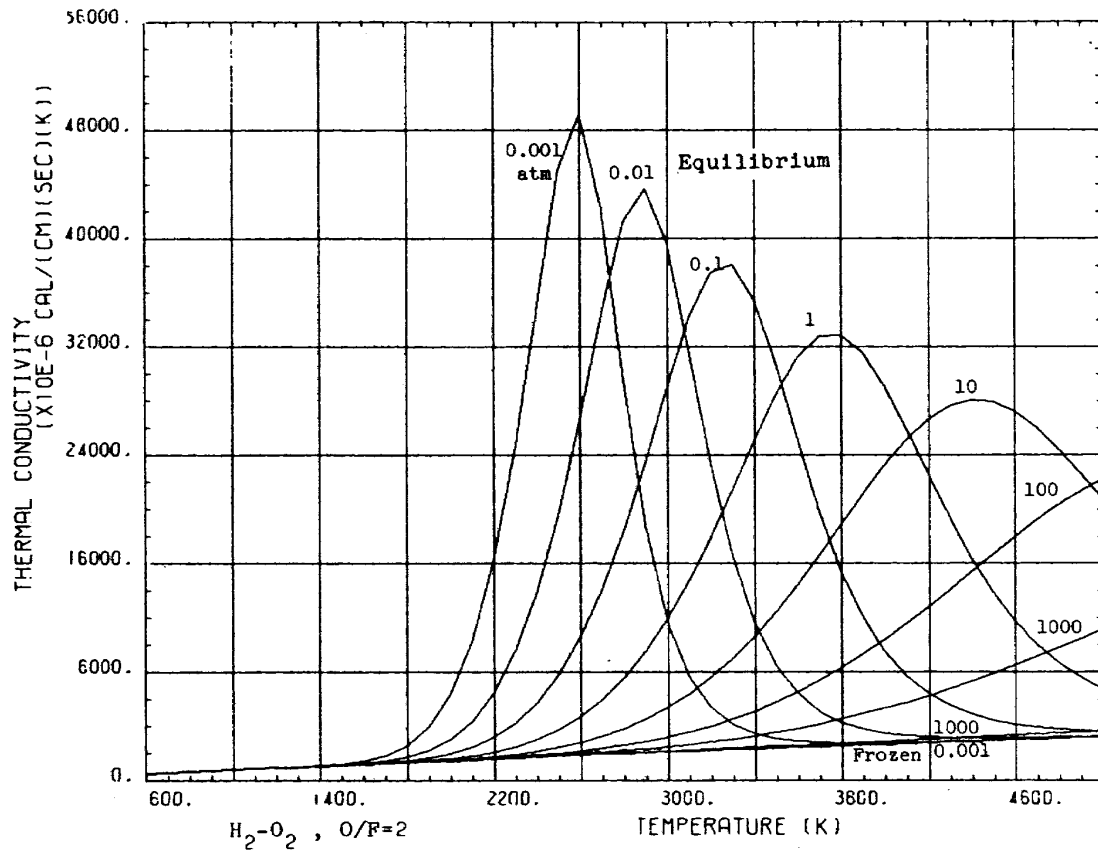


図 B-1-14-1

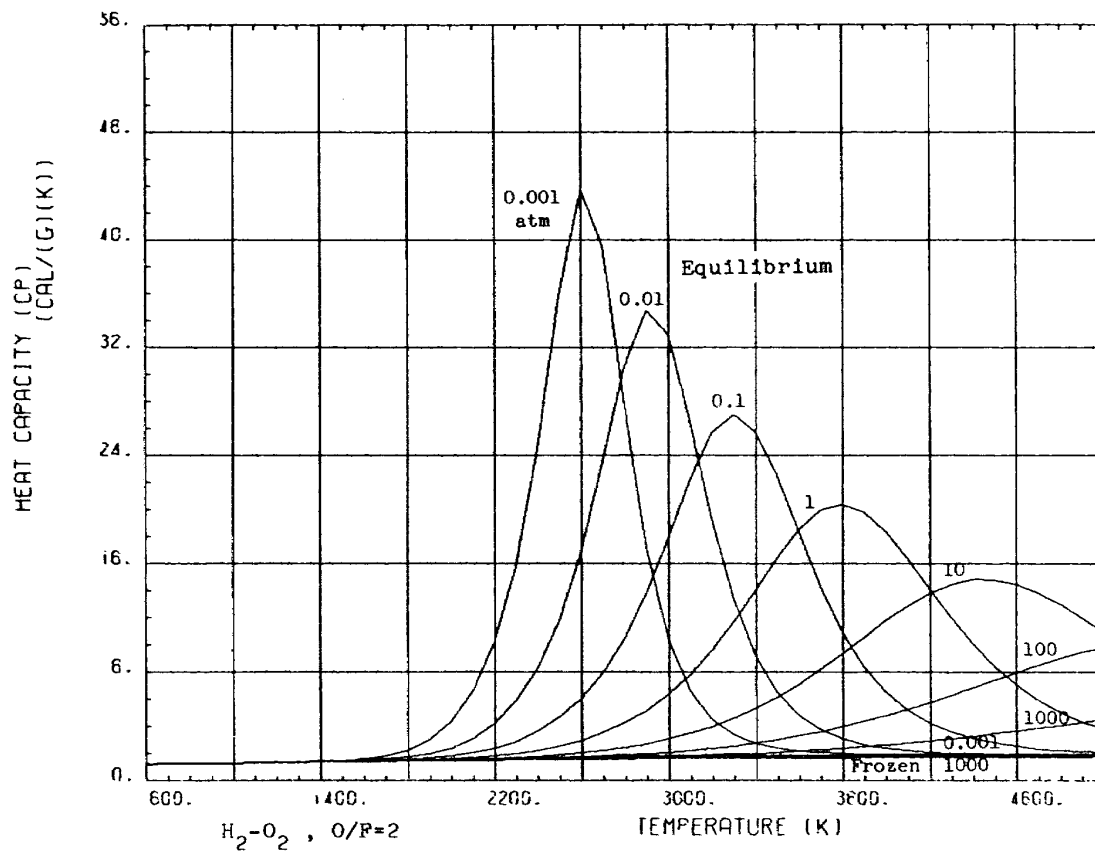


図 B-1-16-1



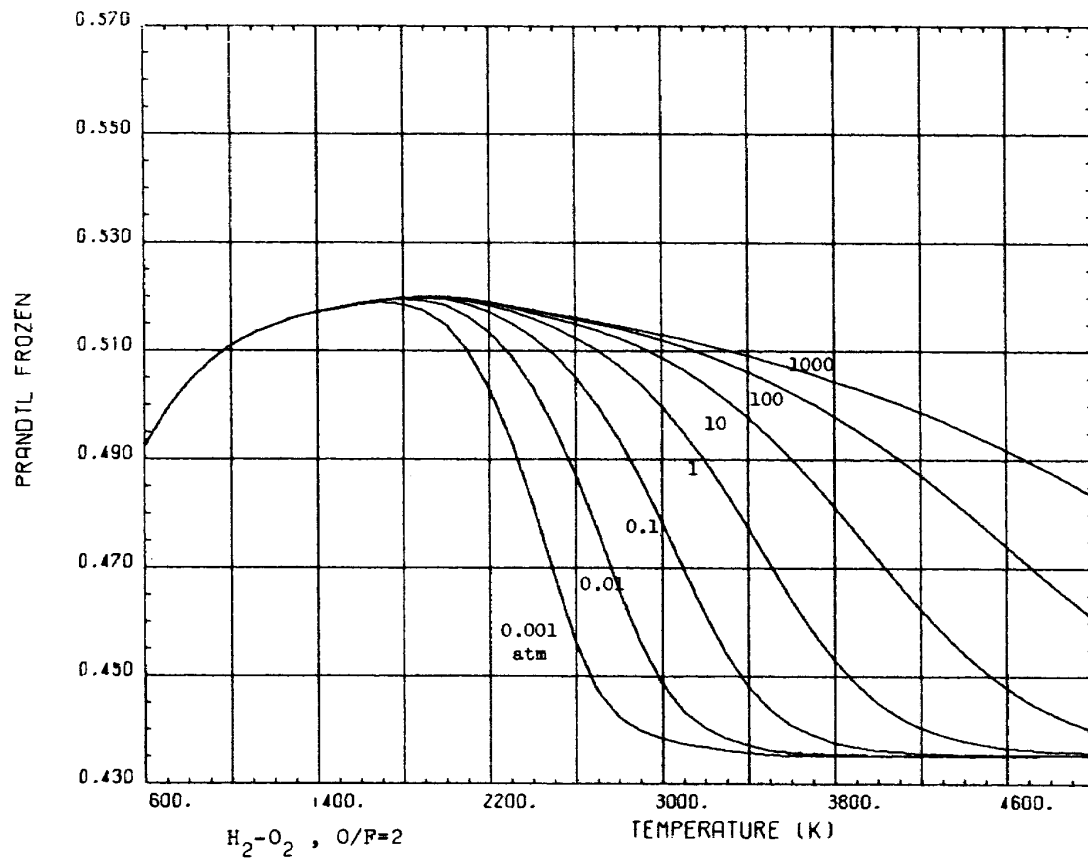


図 B-1-17-1

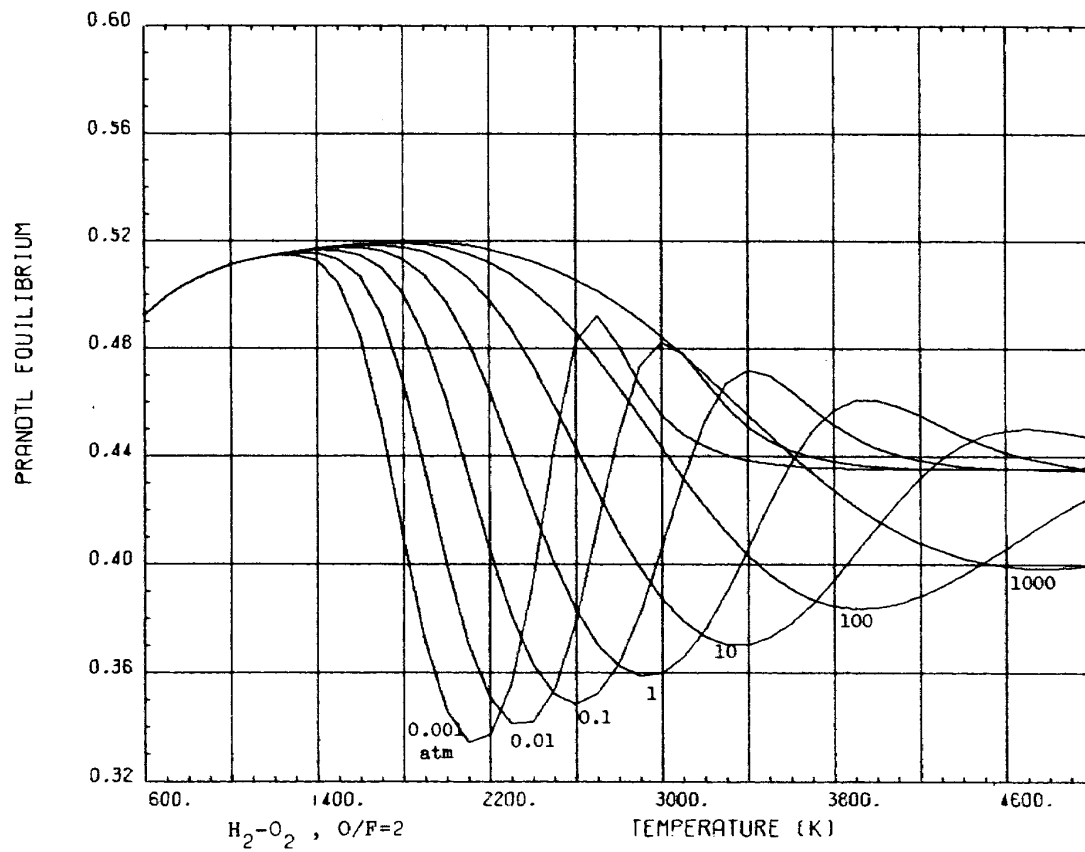


図 B-1-18-1

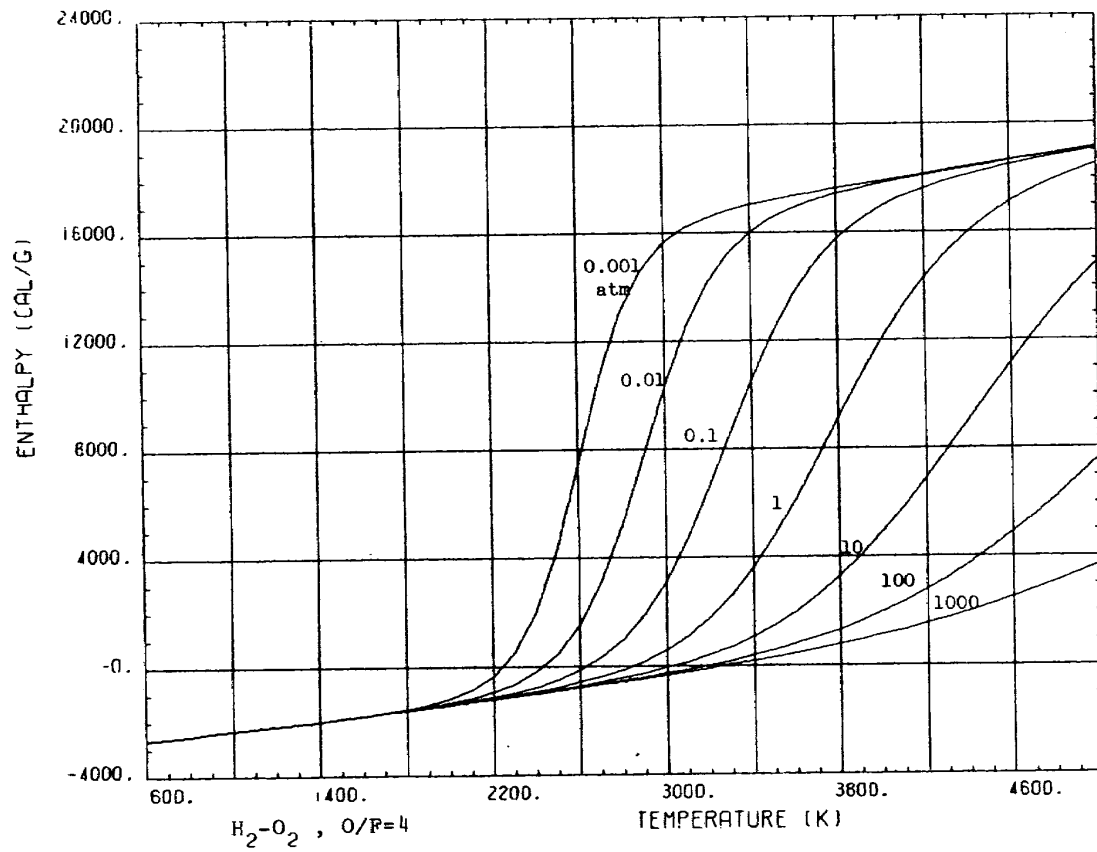


図 B-1-2-2

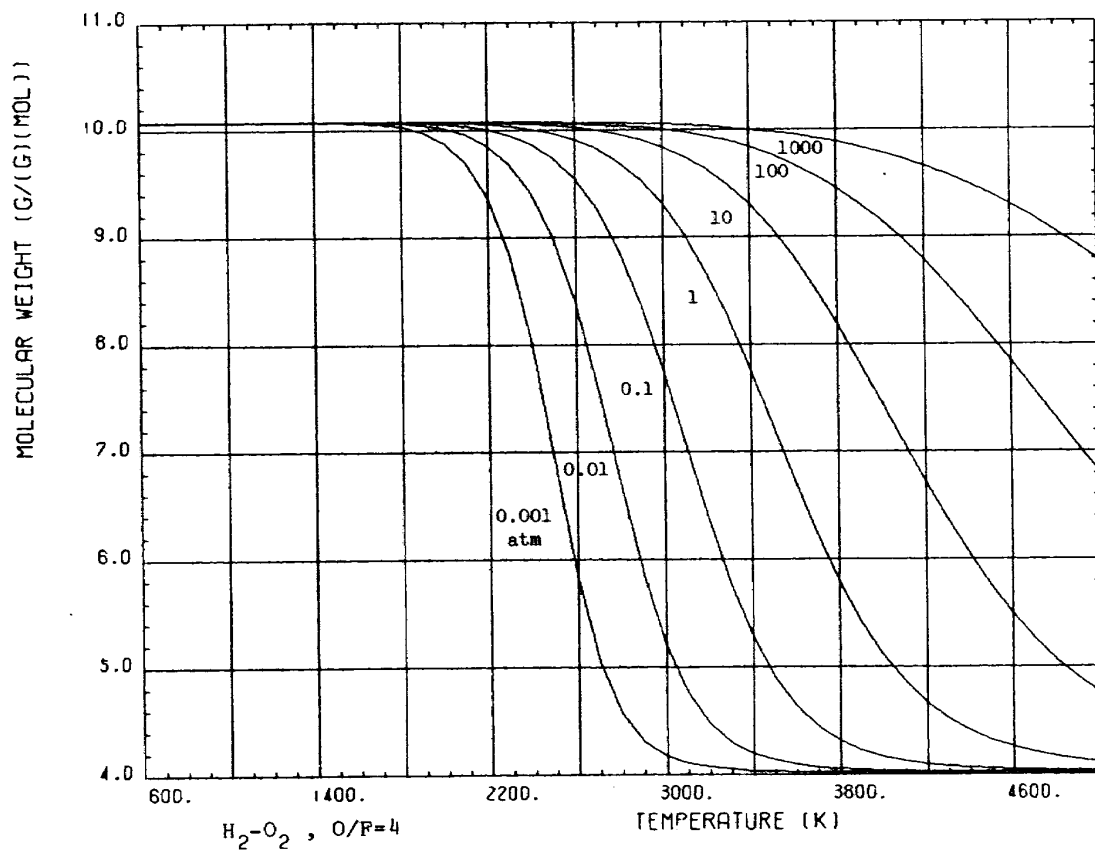


図 B-1-4-2

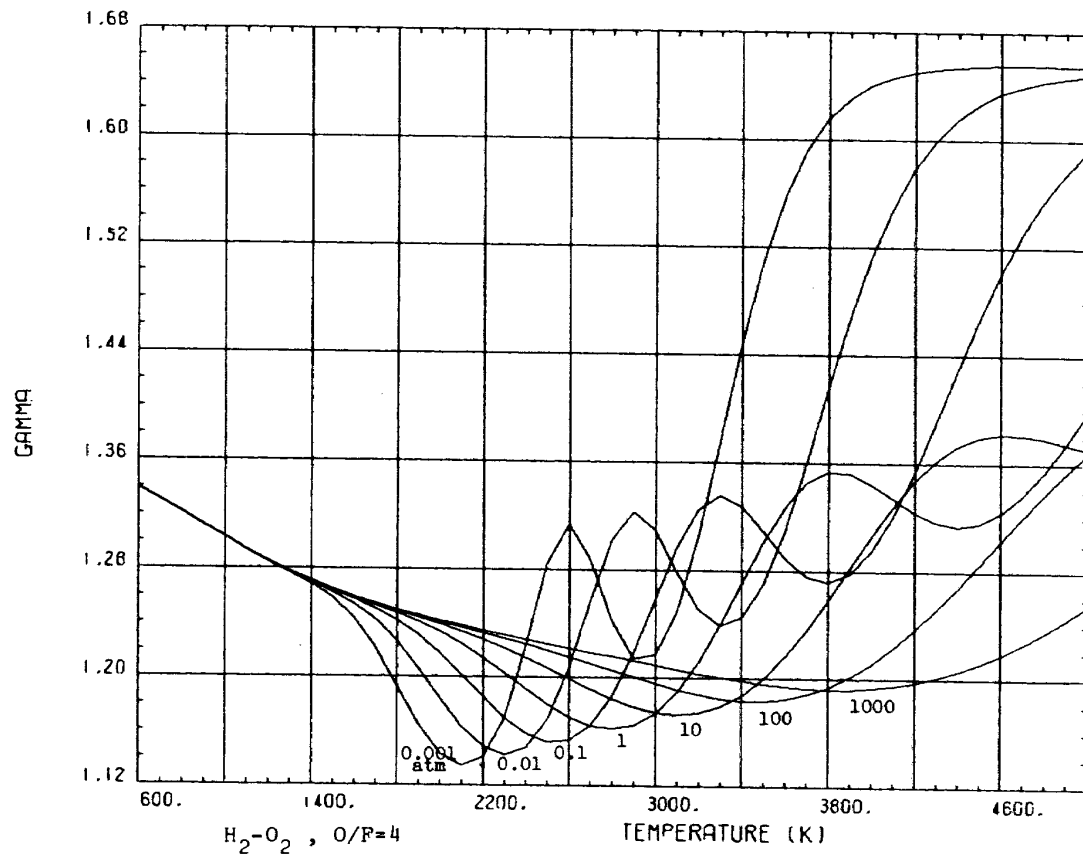


図 B-1-7-2

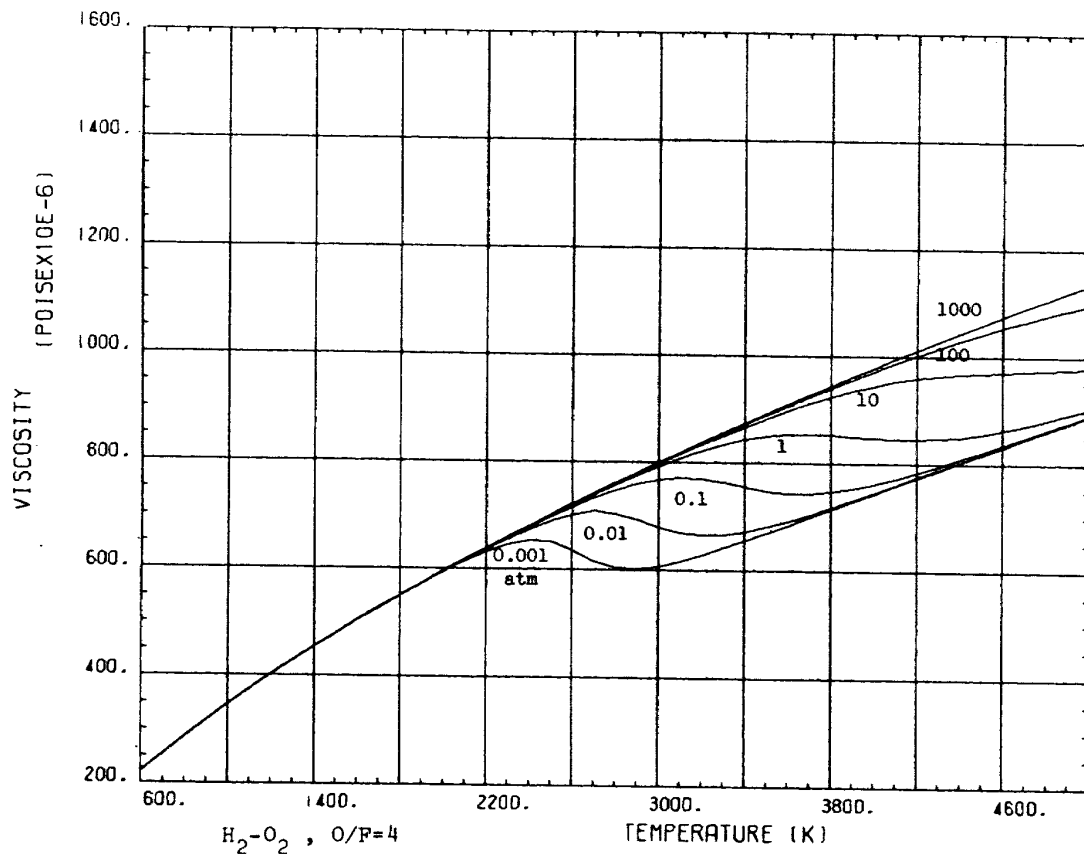


図 B-1-9-2

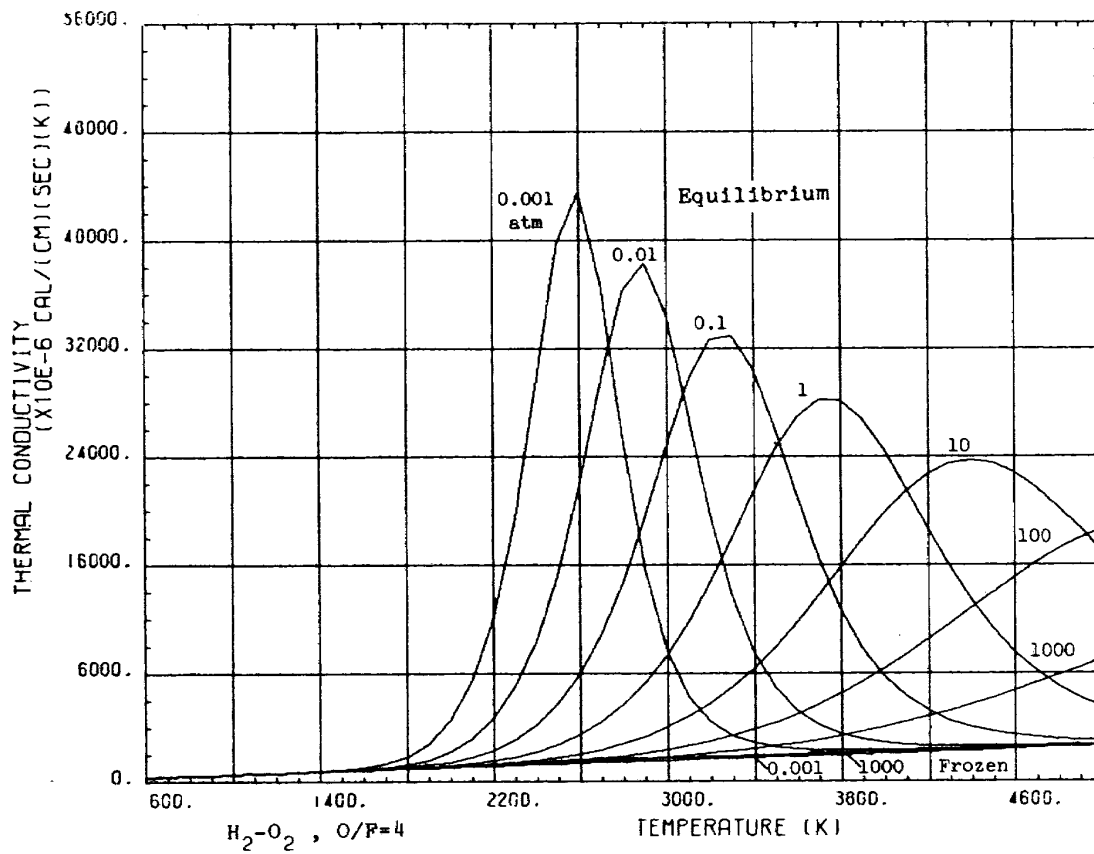


図 B-1-14-2

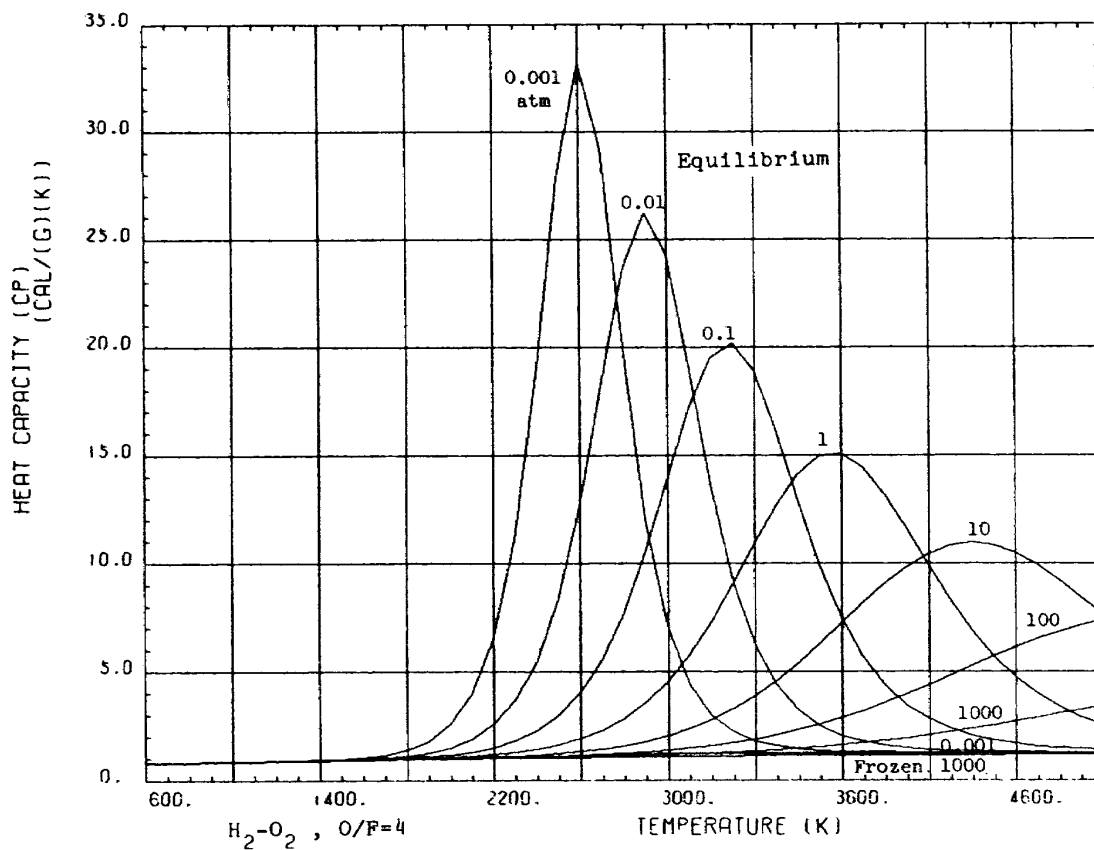


図 B-1-16-2

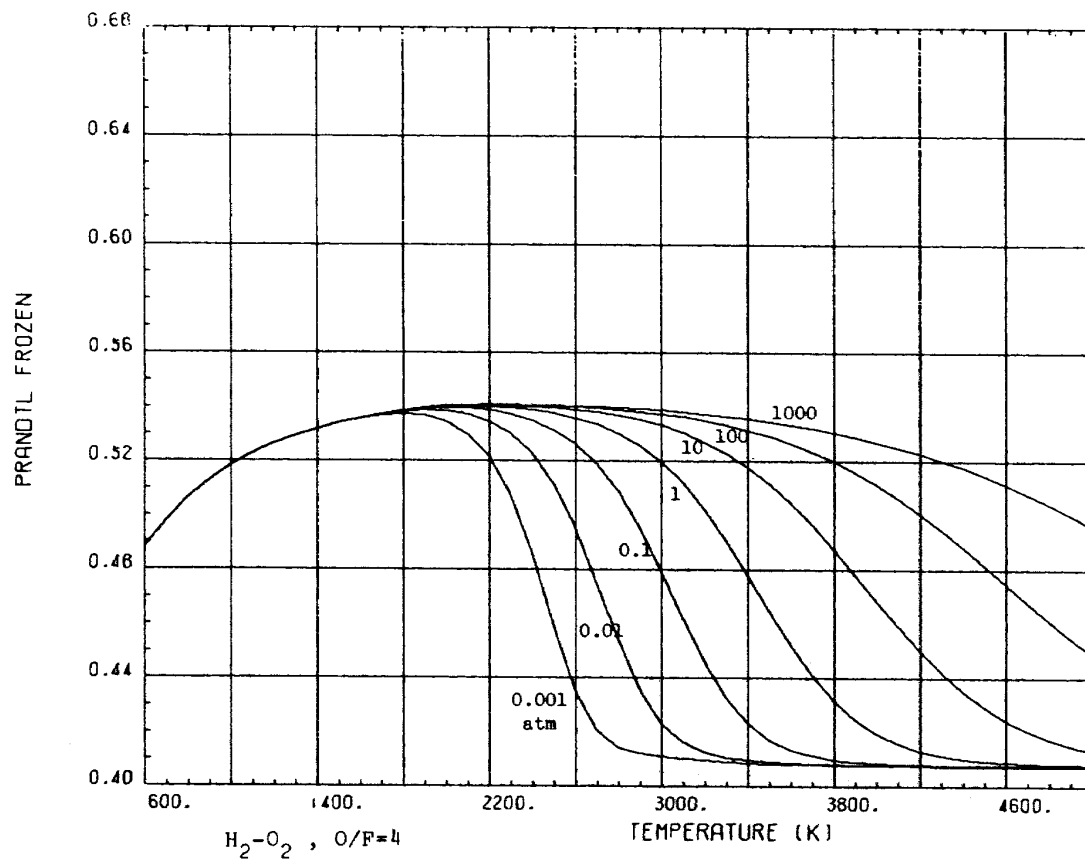


図 B-1-17-2

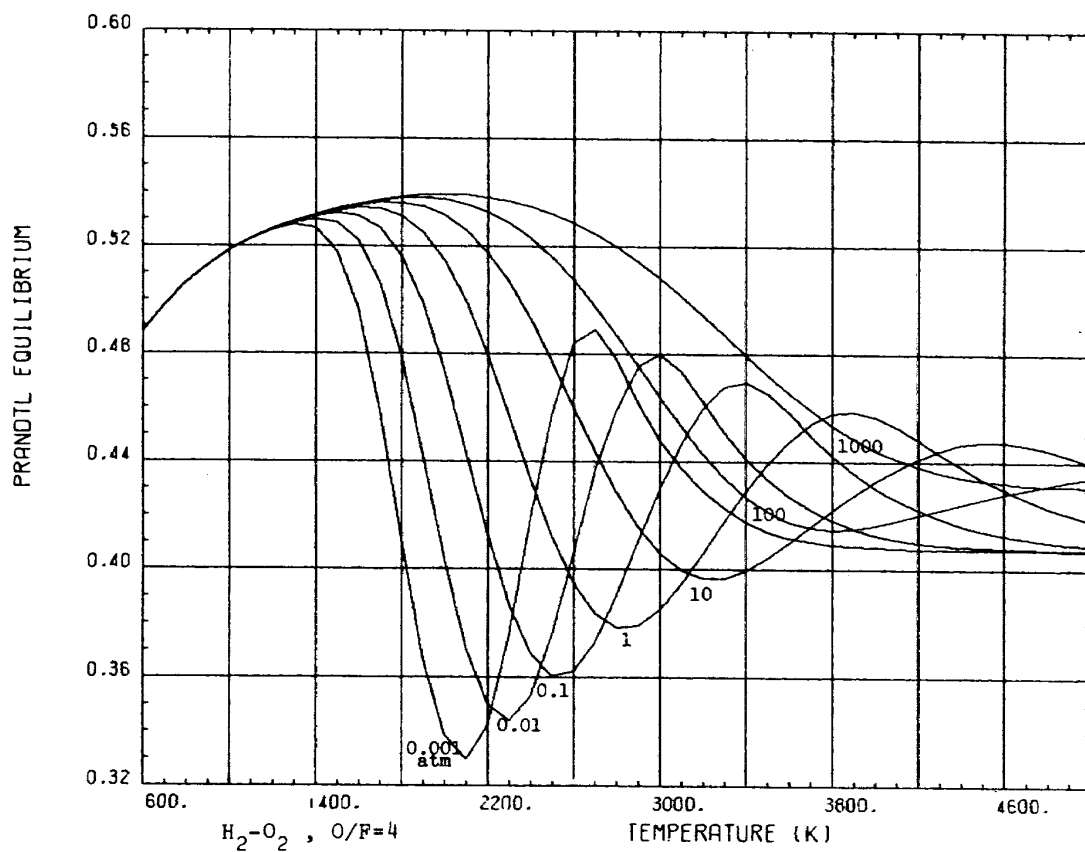


図 B-1-18-2

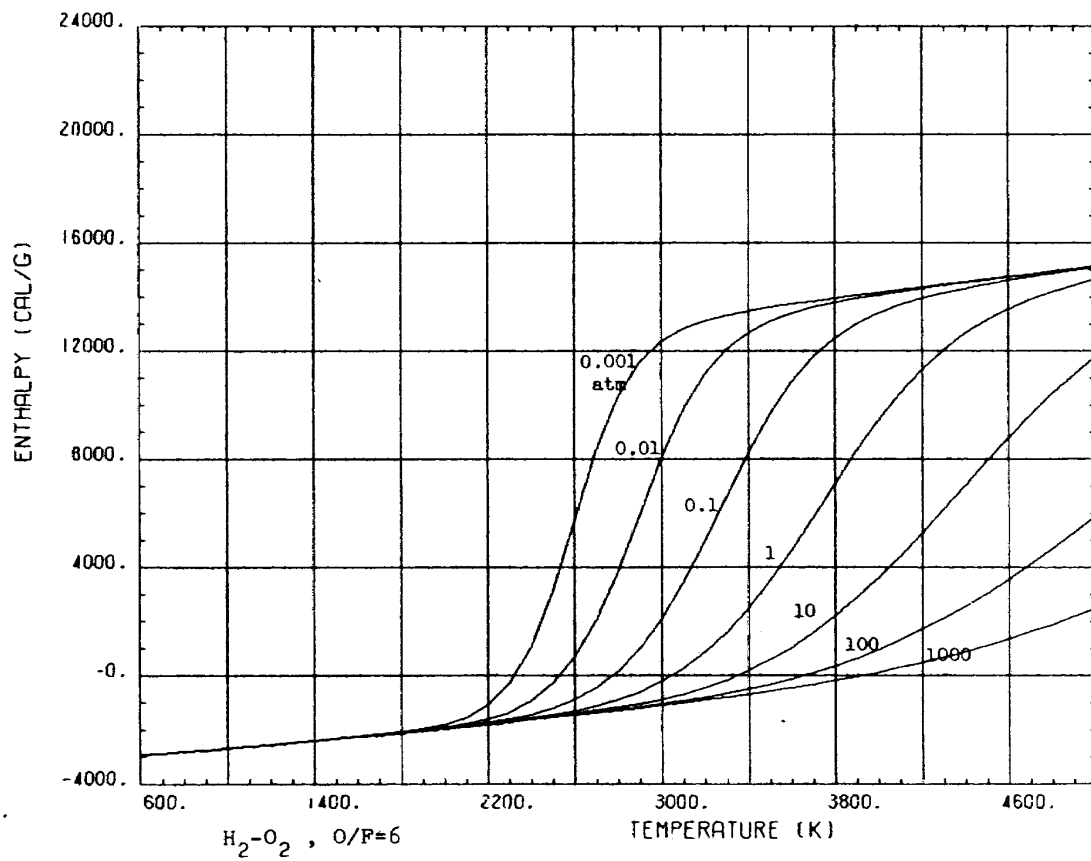


図 B-1-2-3

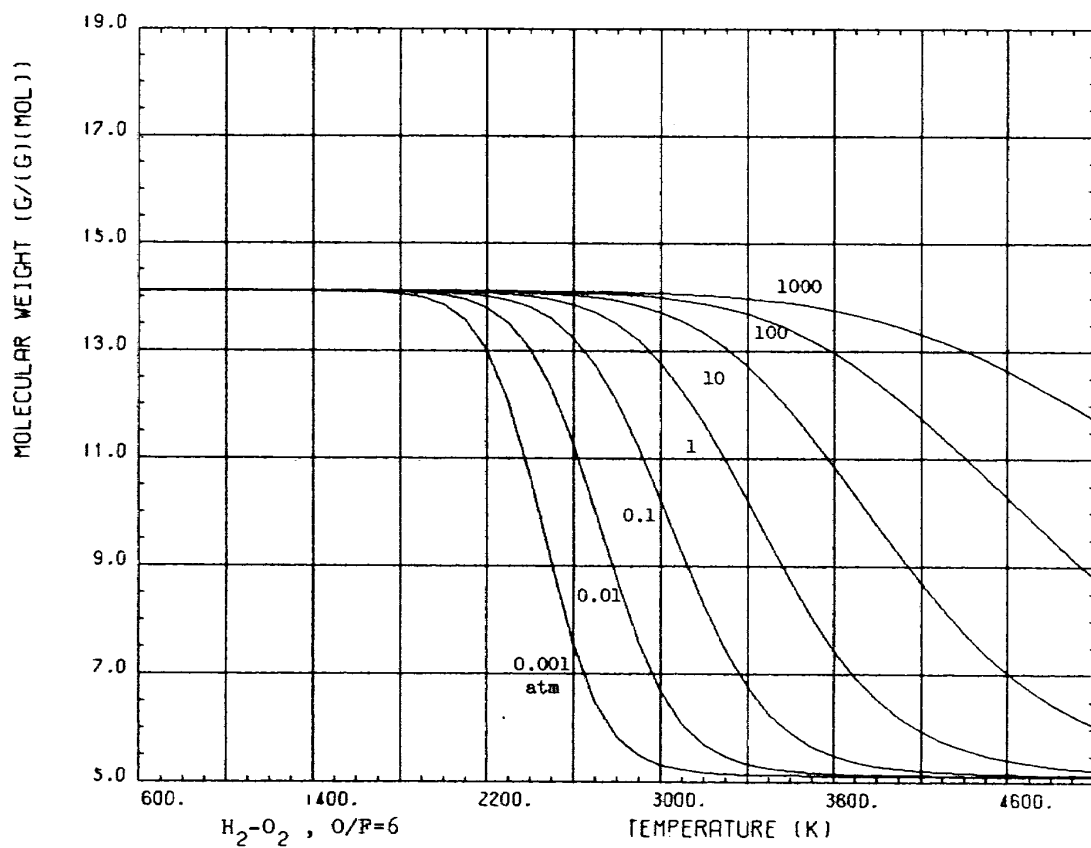


図 B-1-4-3

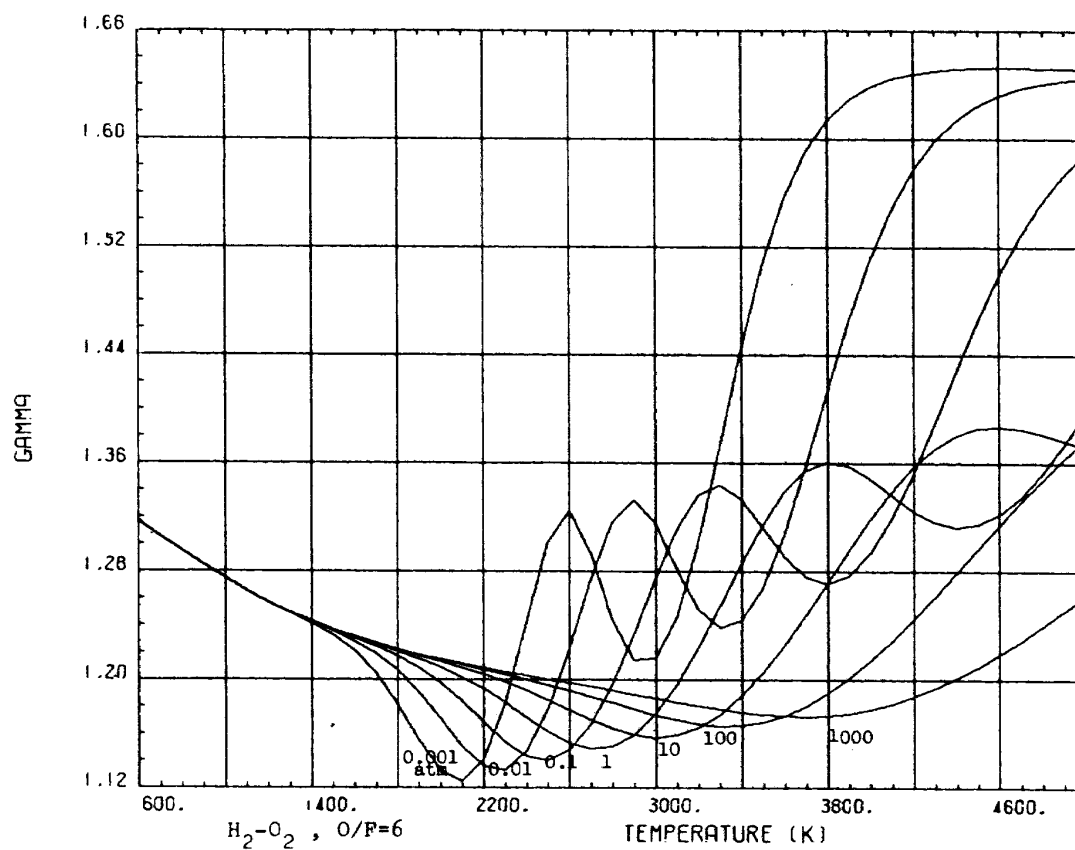


図 B-1-7-3

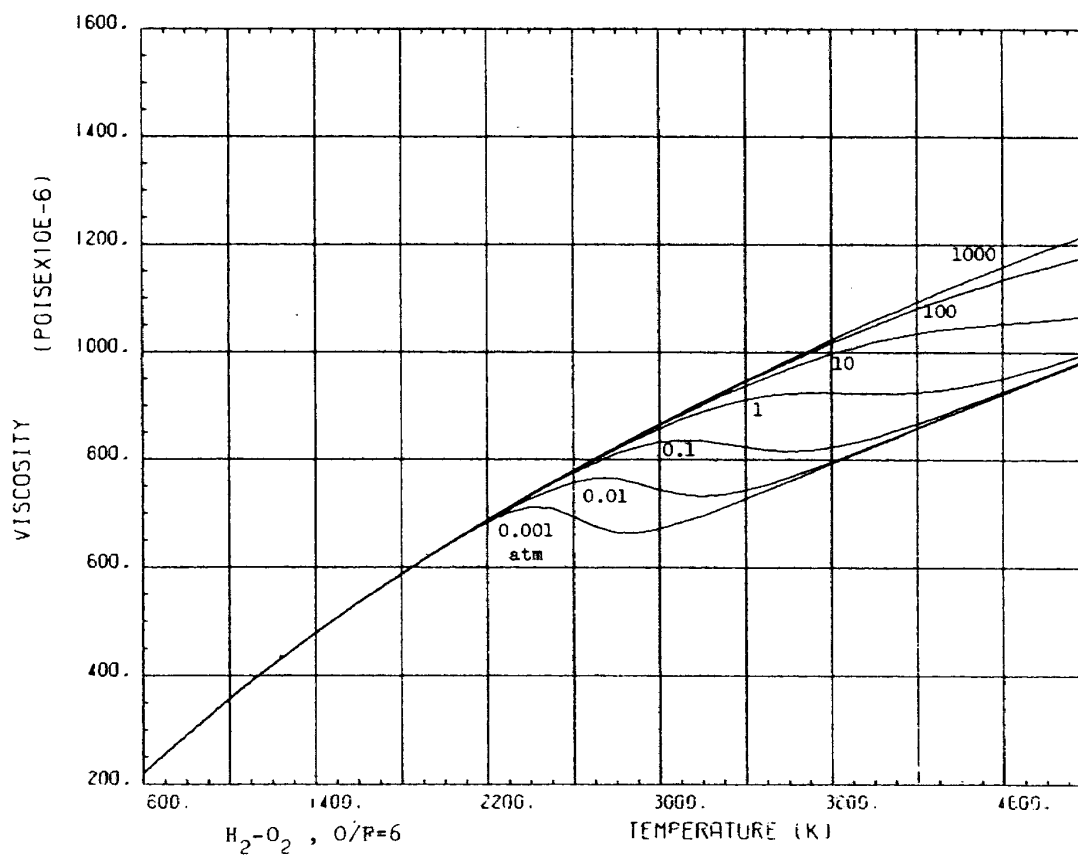


図 B-1-9-3

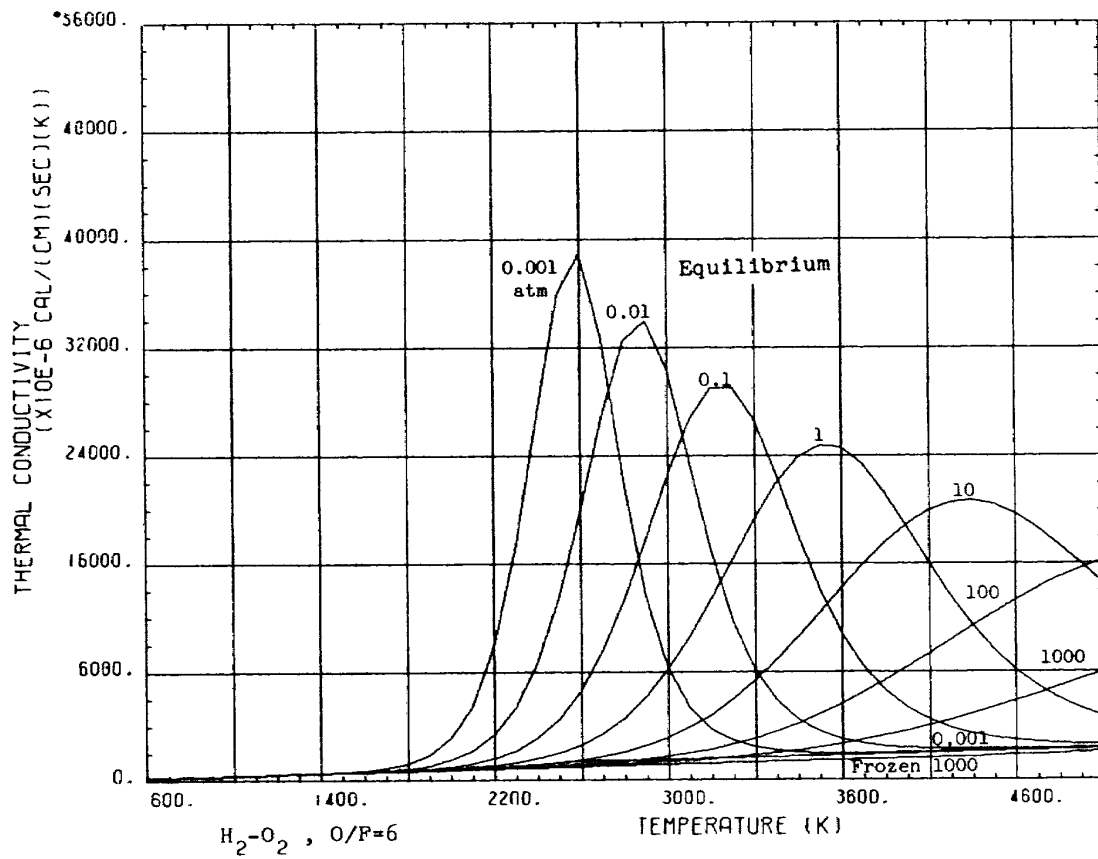


図 B-1-14-3

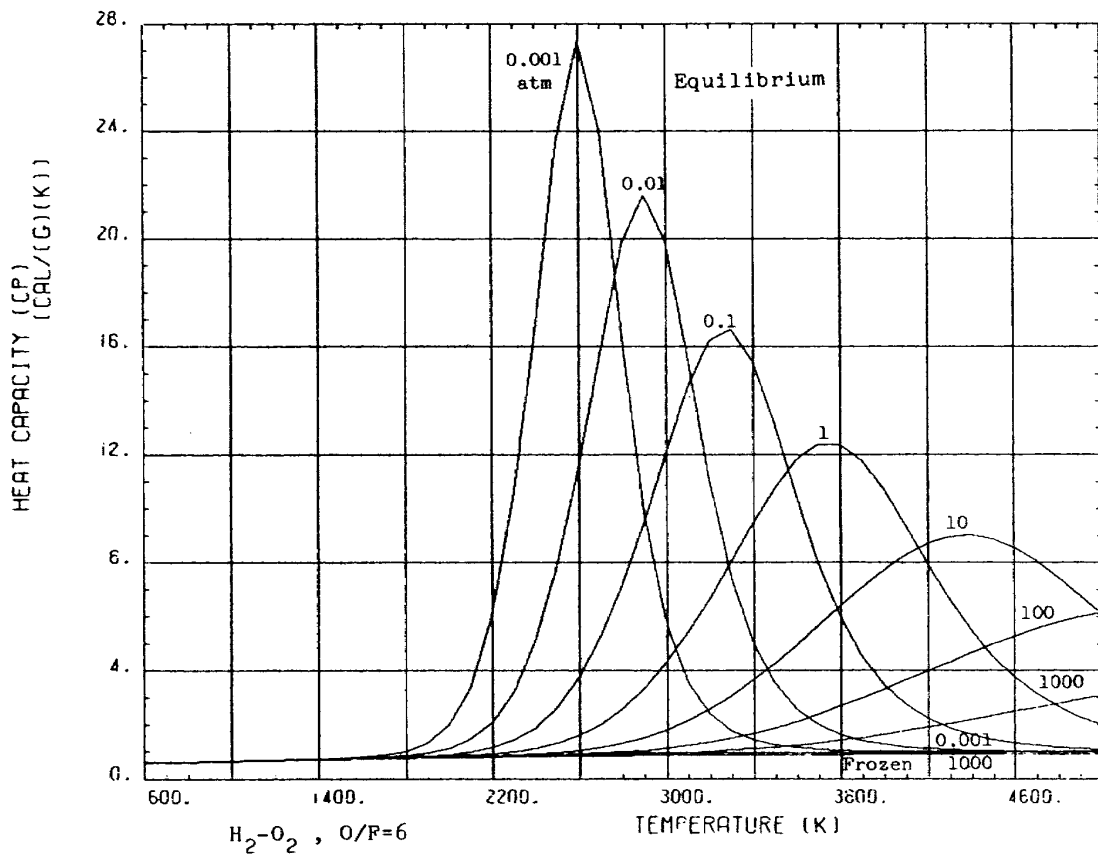


図 B-1-16-3



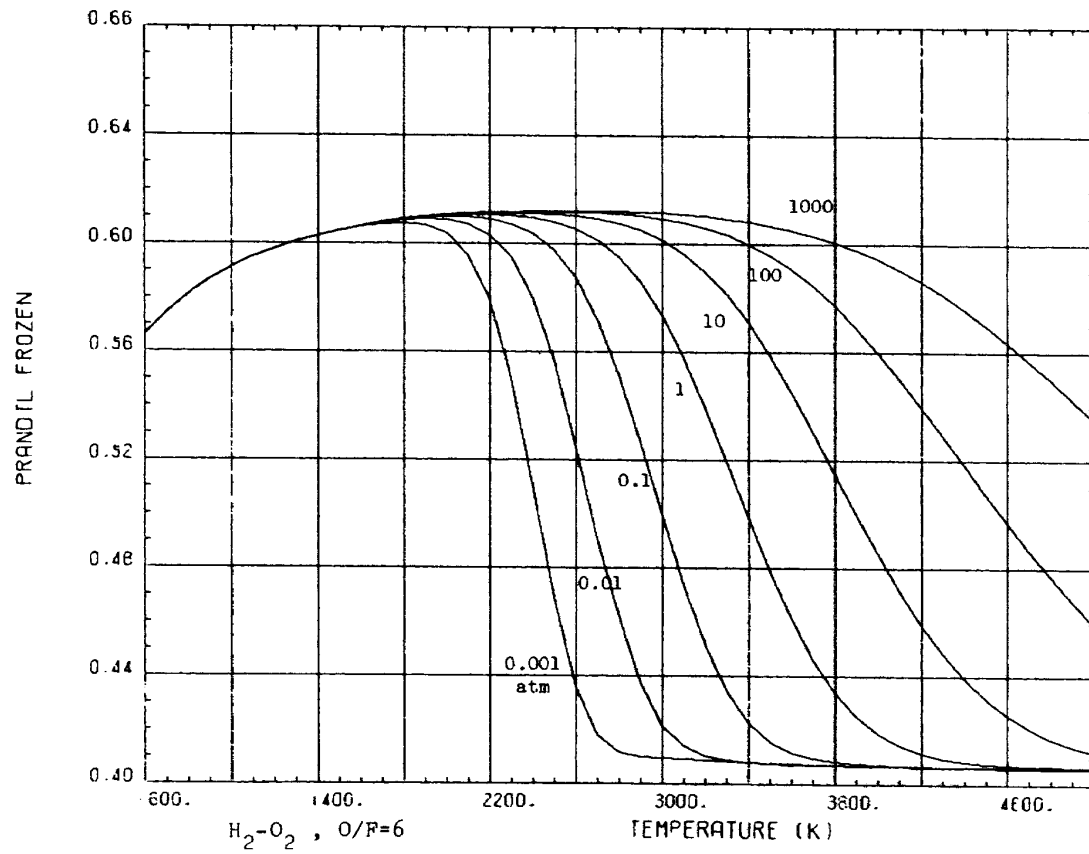


図 B-1-17-3

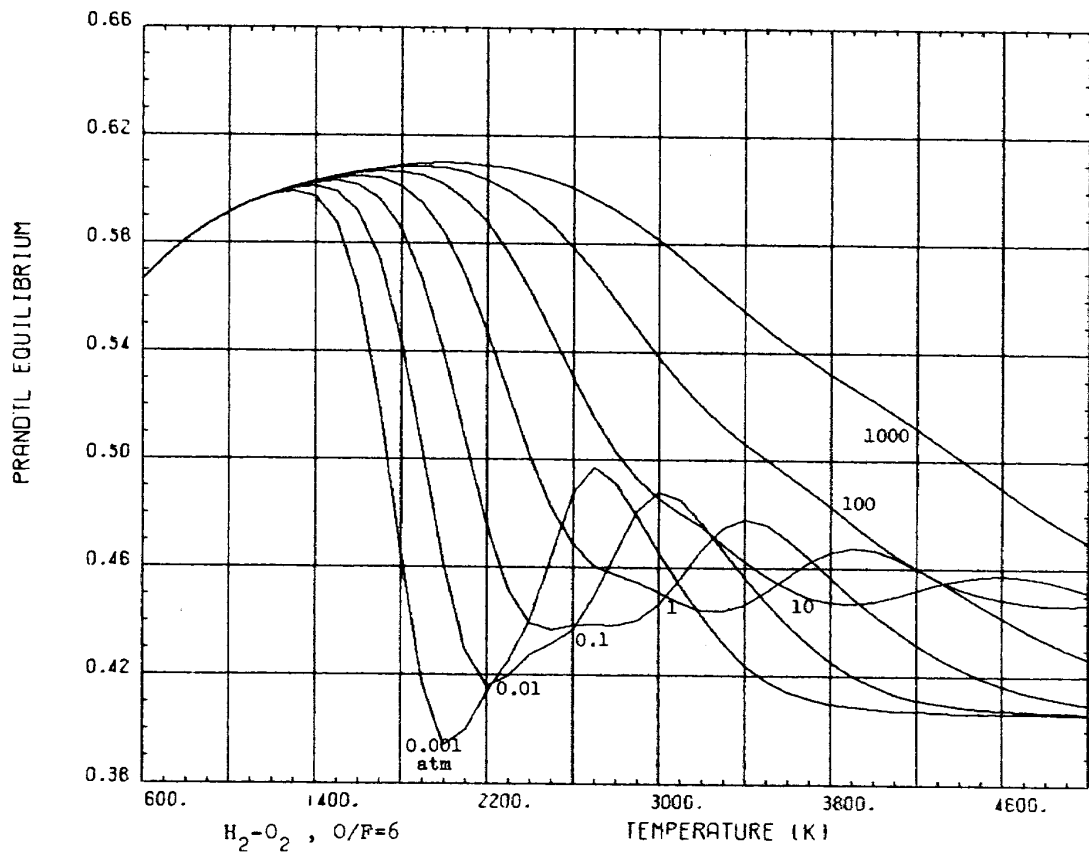


図 B-1-18-3

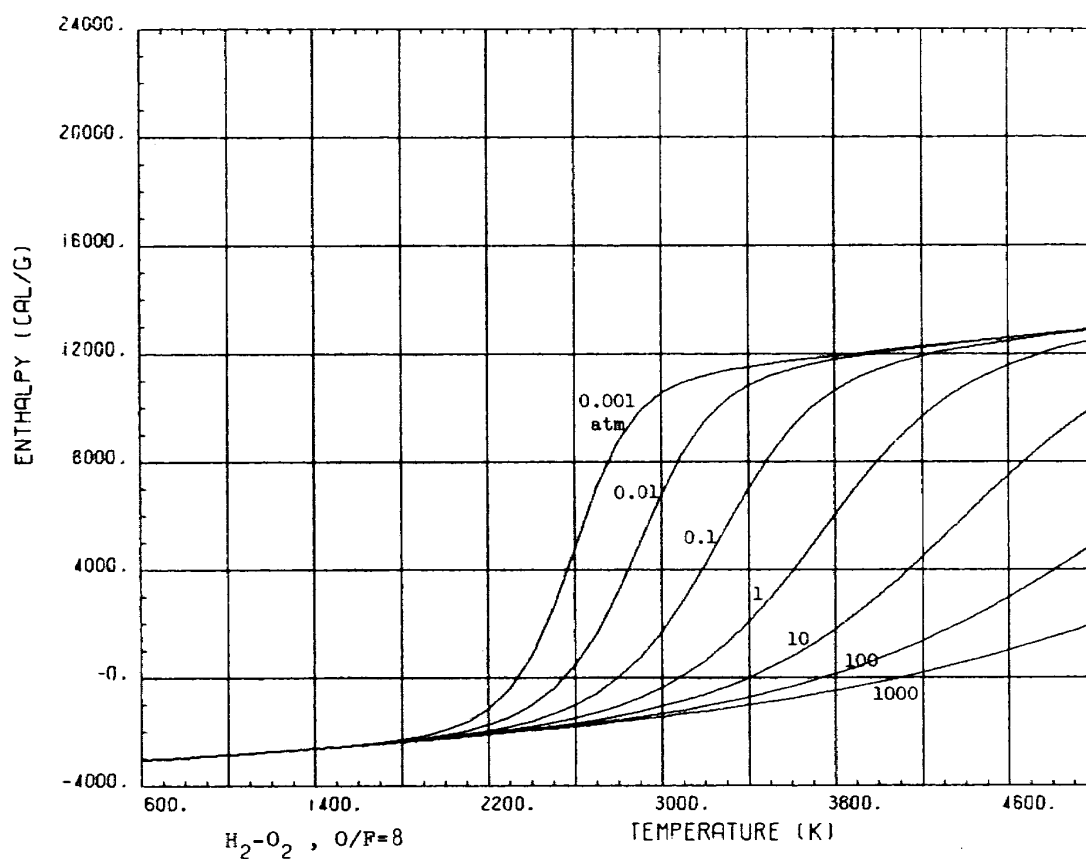


図 B-1-2-4

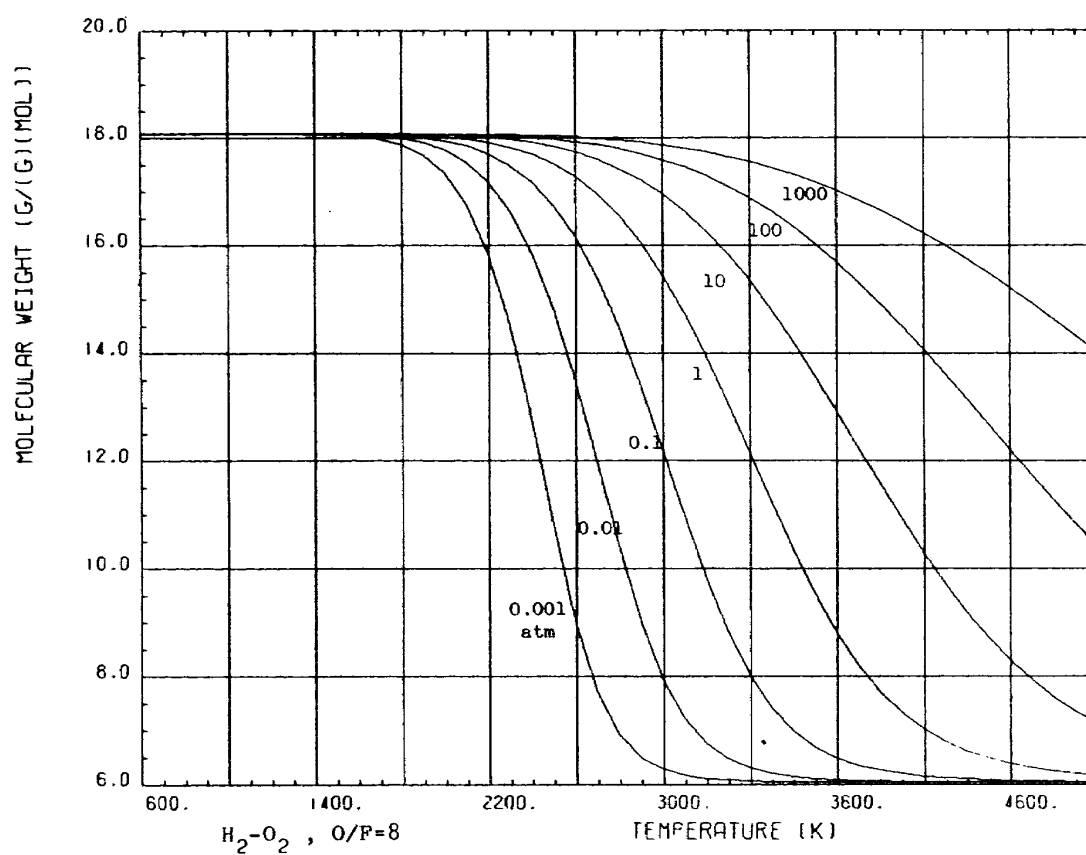


図 B-1-4-4

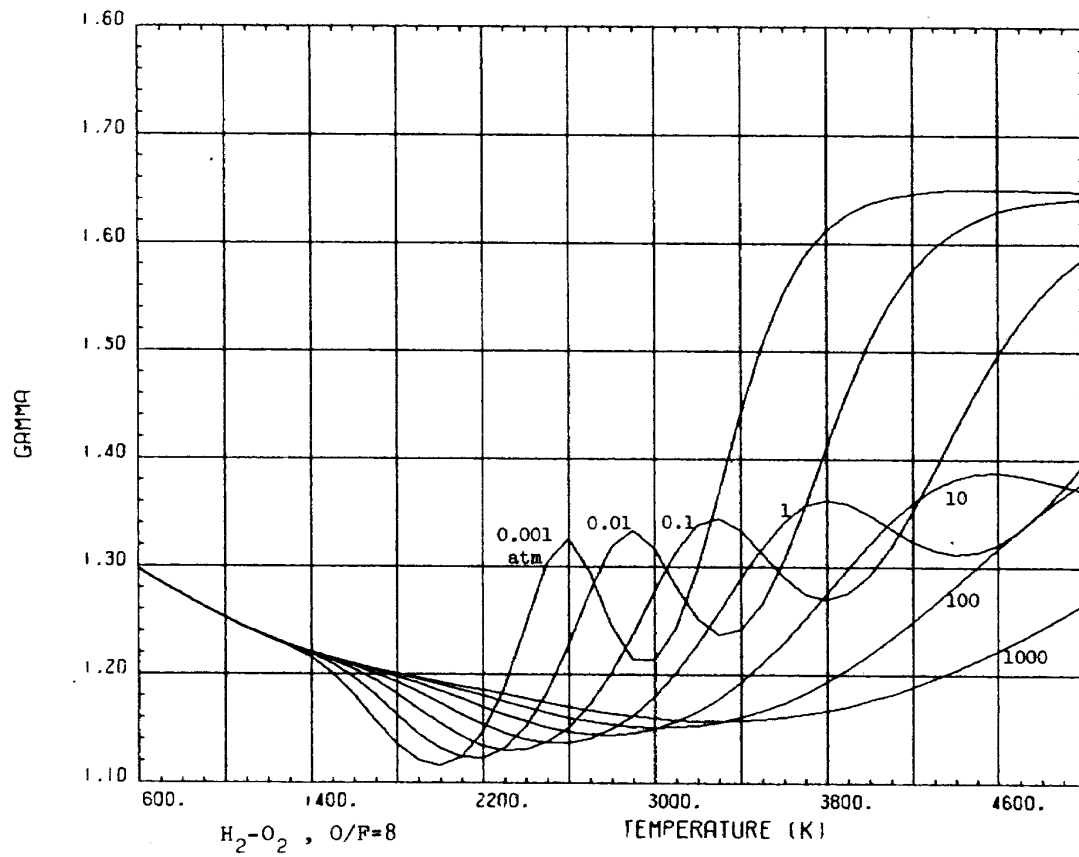


図 B-1-7-4

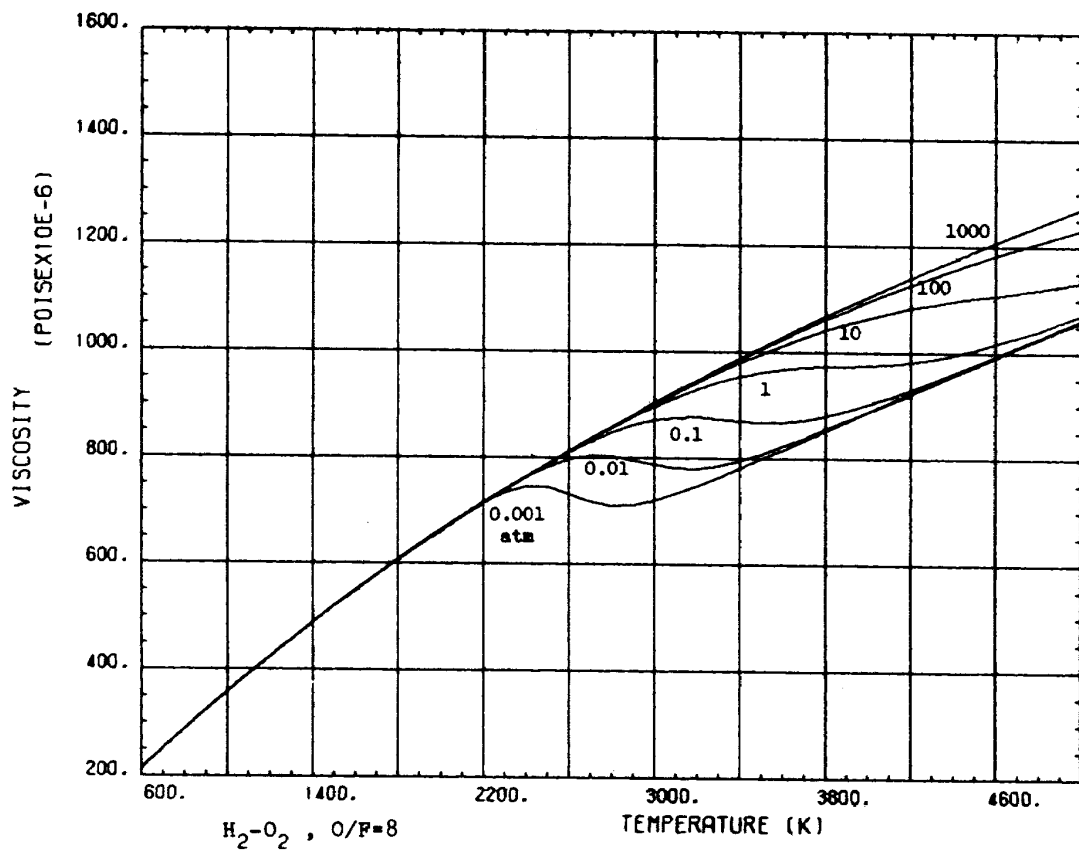


図 B-1-9-4

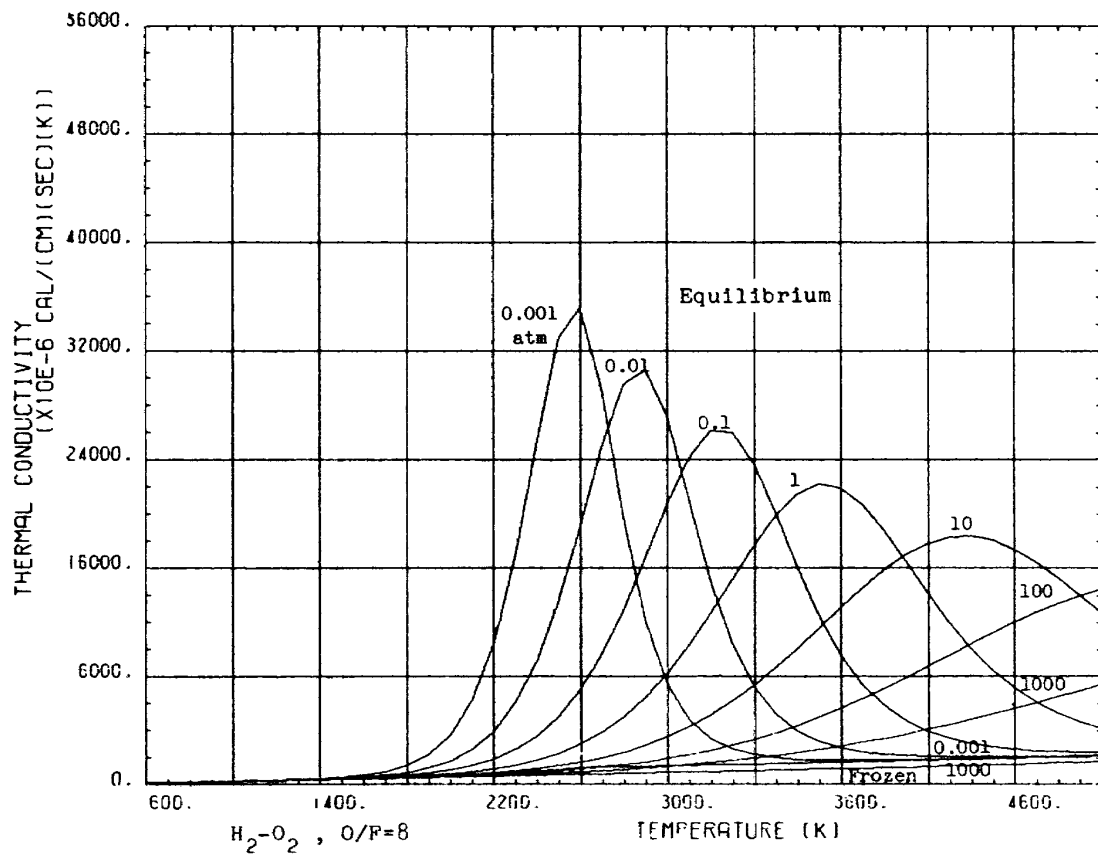


図 B-1-14-4

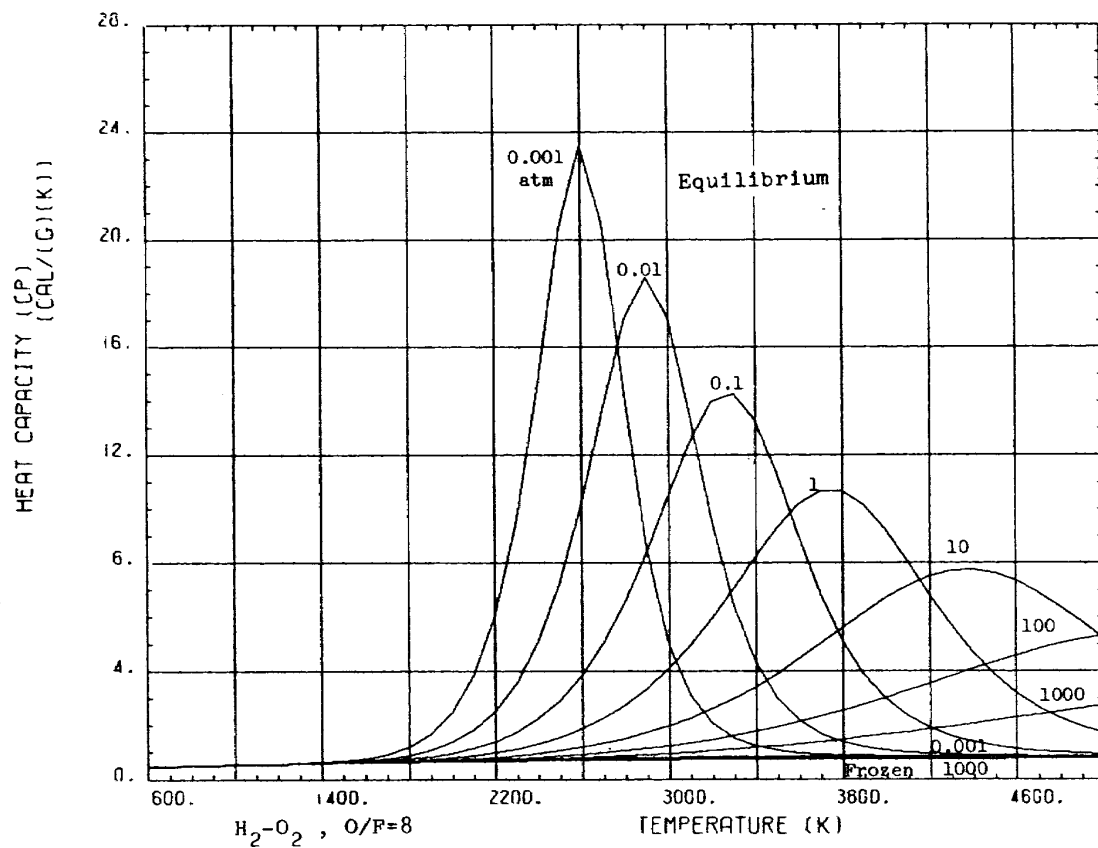


図 B-1-16-4

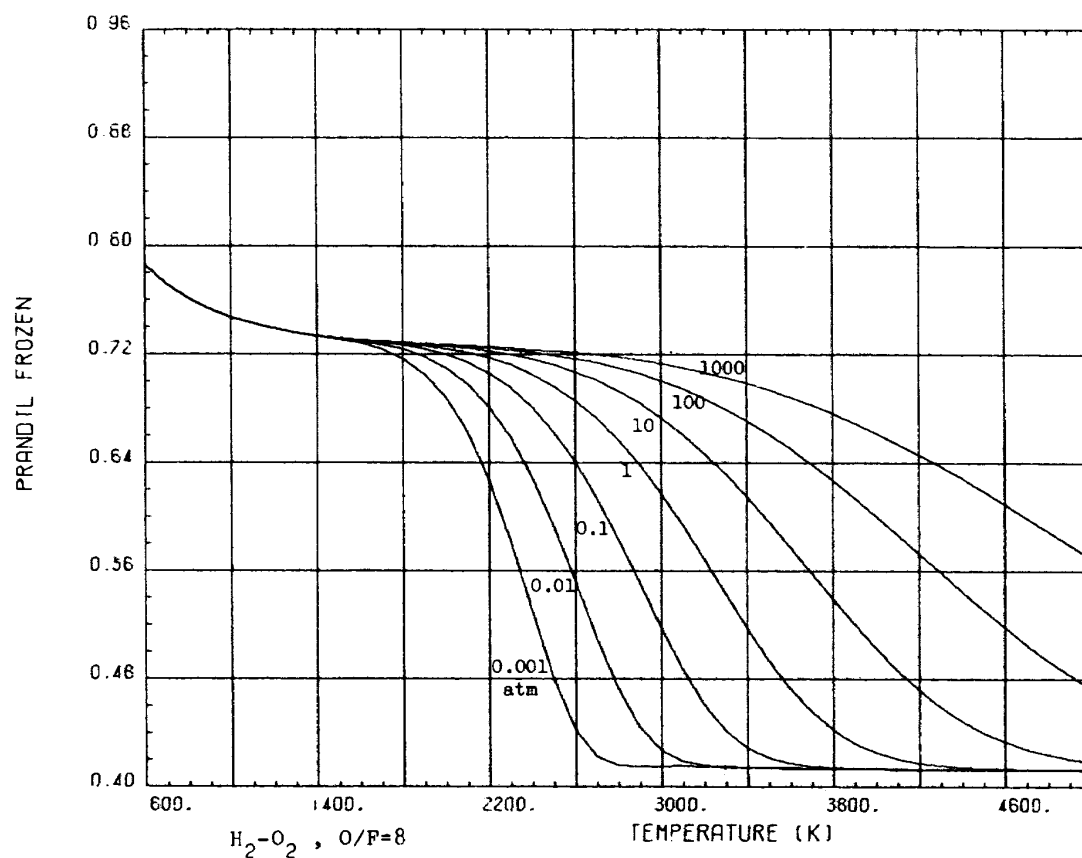


図 B-1-17-4

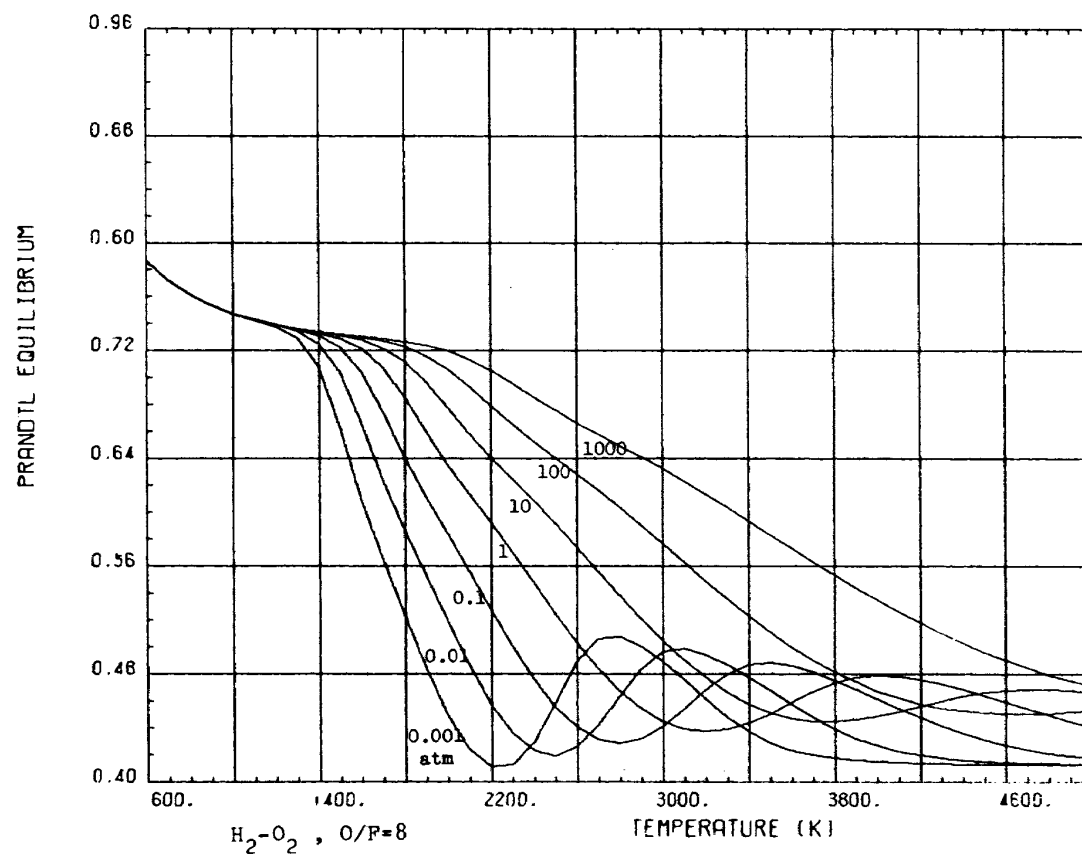


図 B-1-18-4

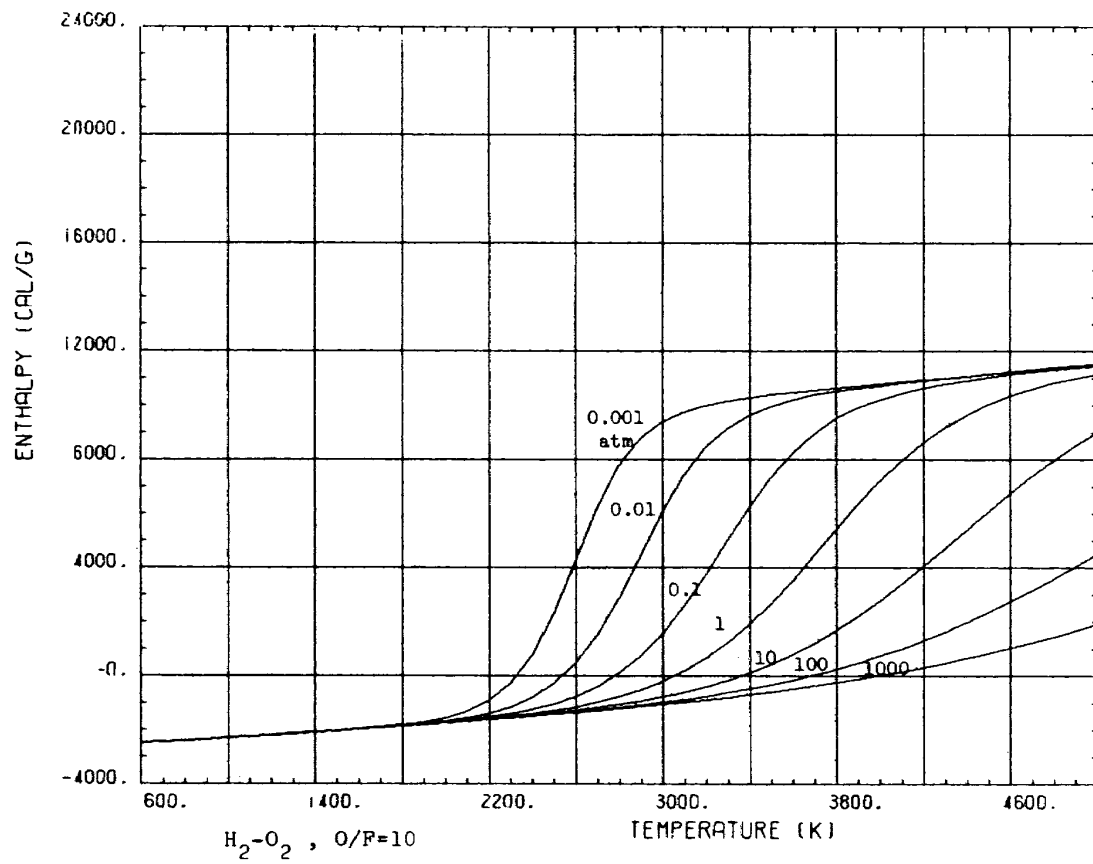


図 B-1-2-5

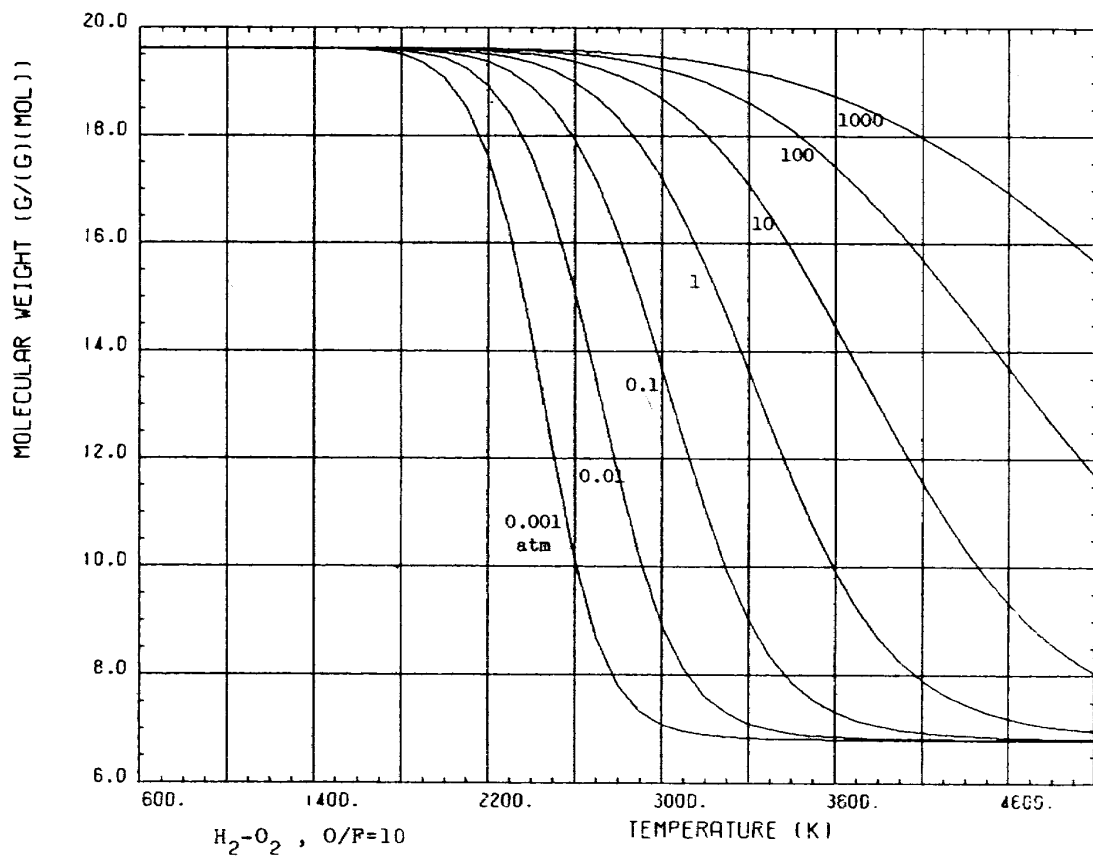


図 B-1-4-5

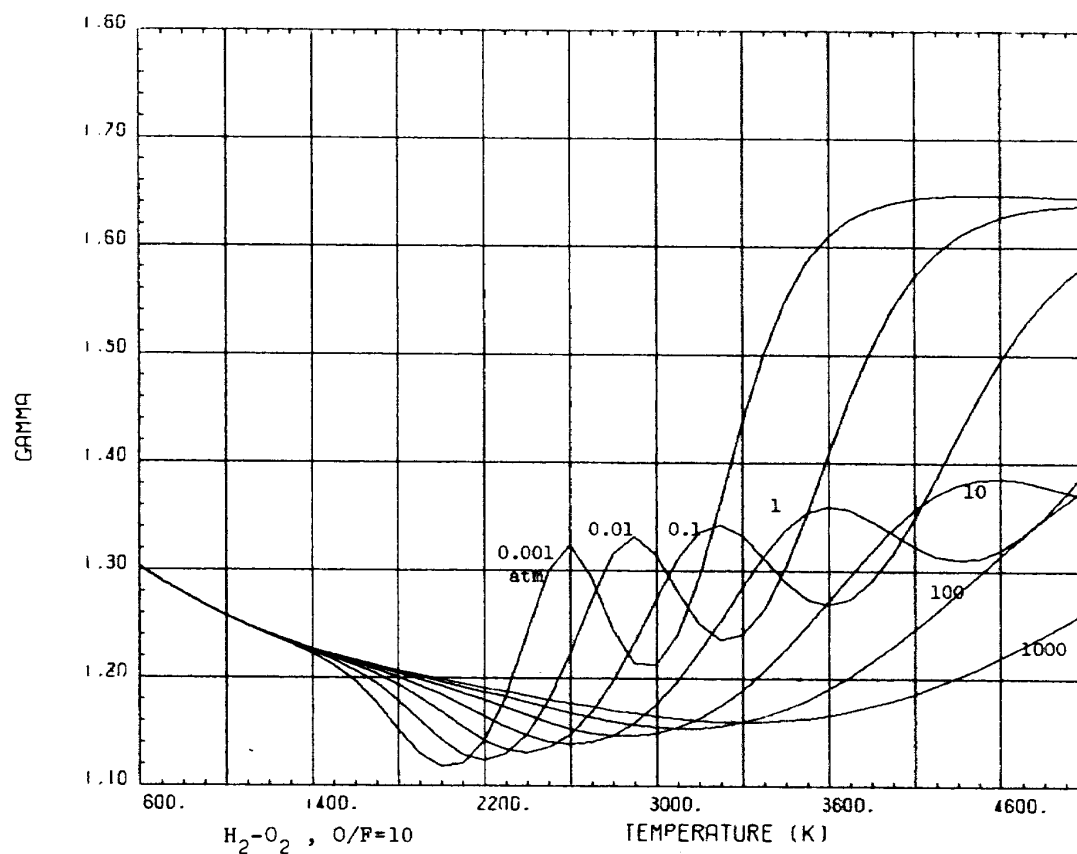


図 B-1-7-5

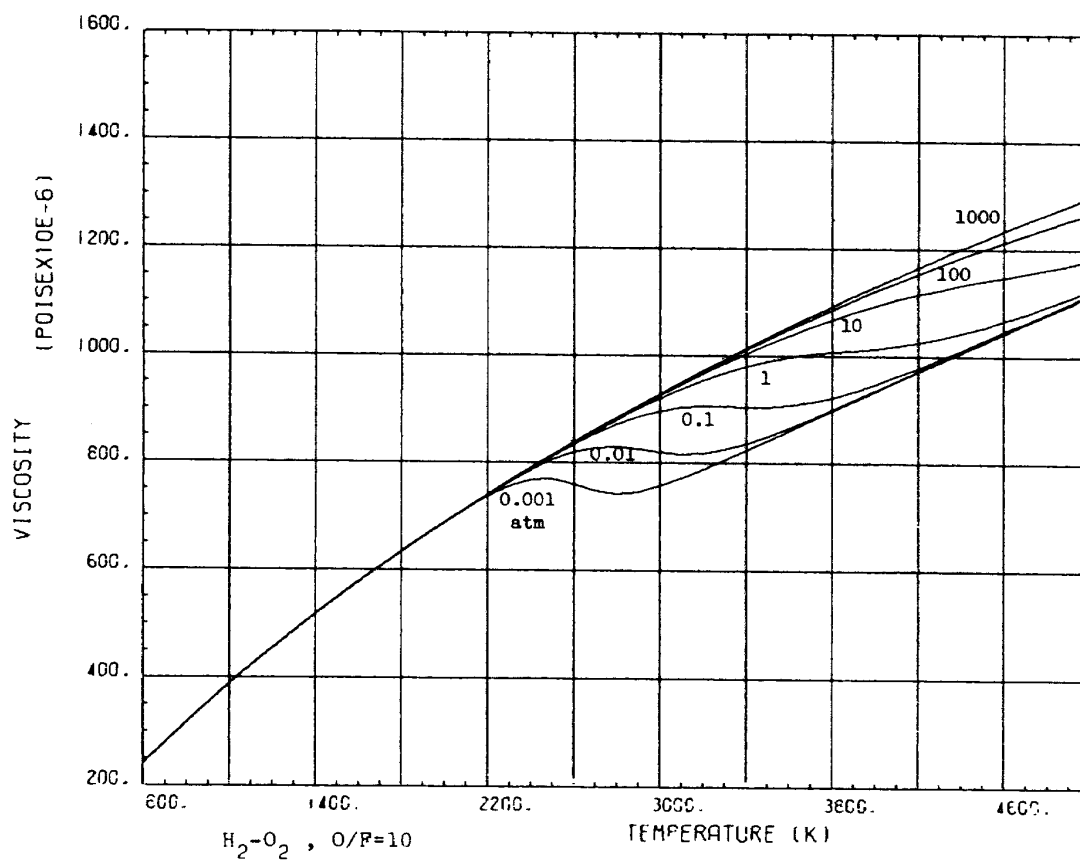


図 B-1-9-5

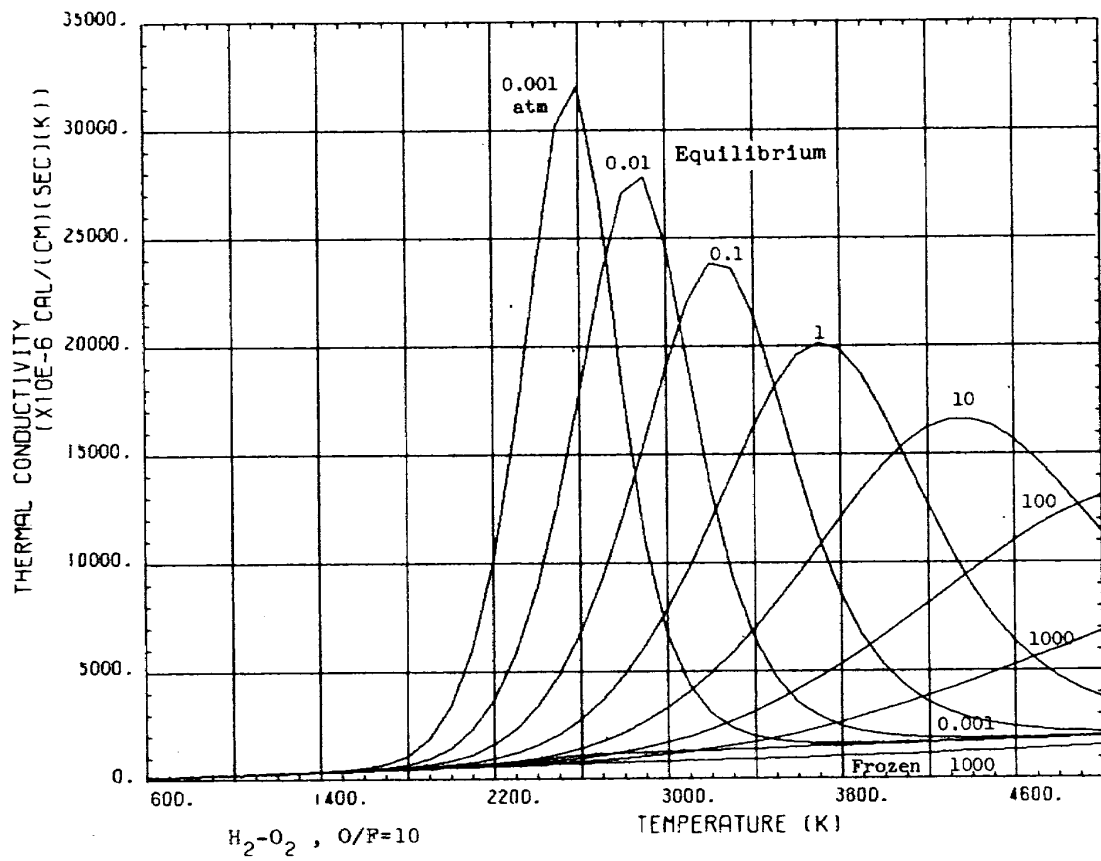


図 B-1-14-5

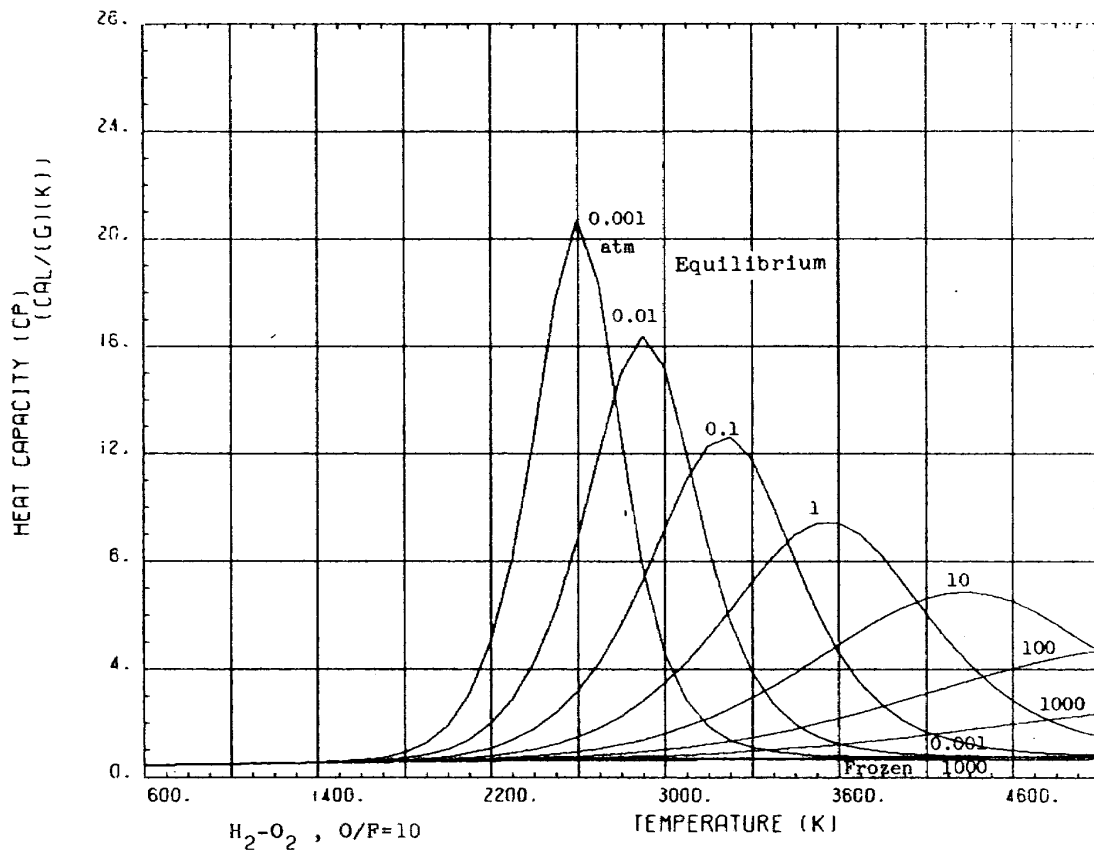


図 B-1-16-5



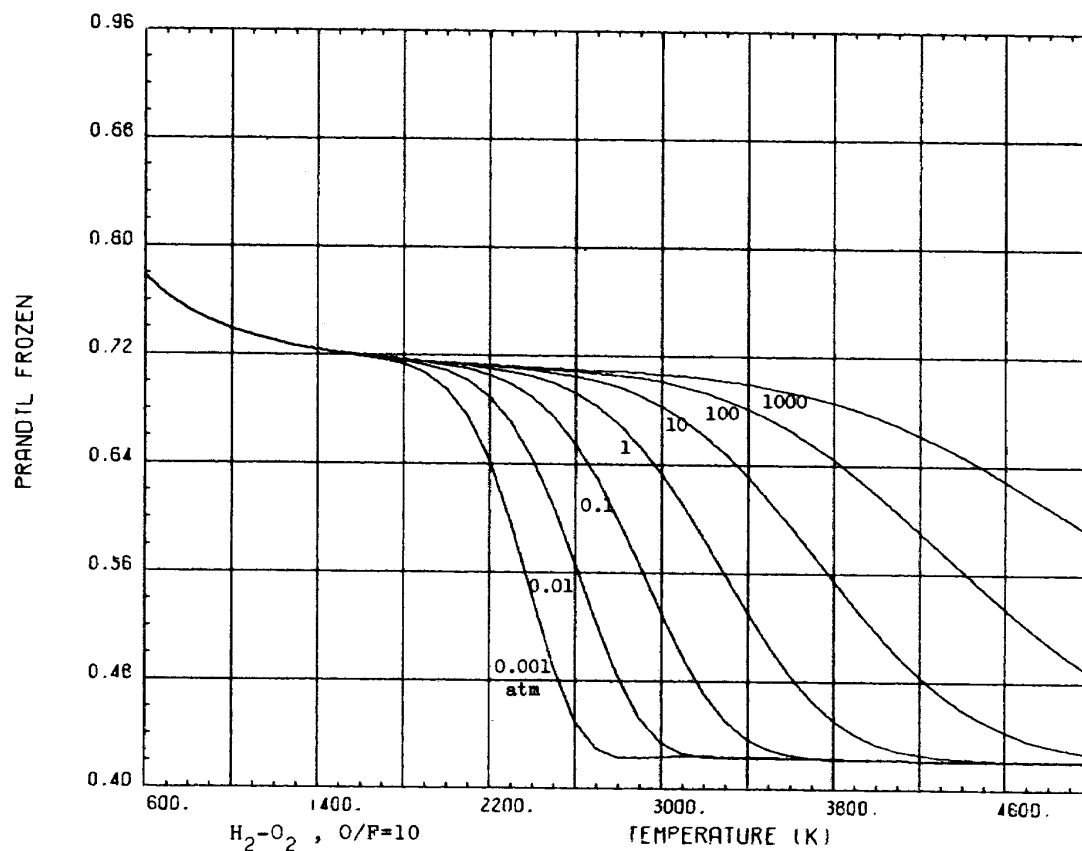


図 B-1-17-5

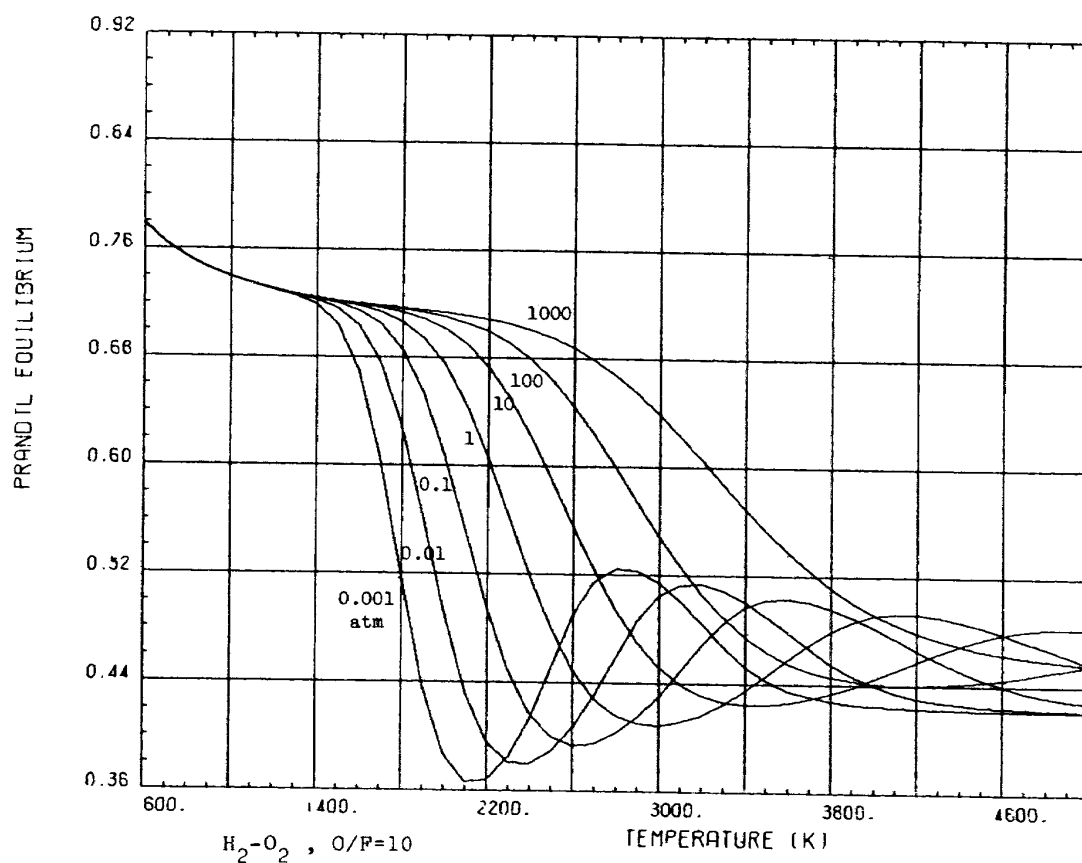
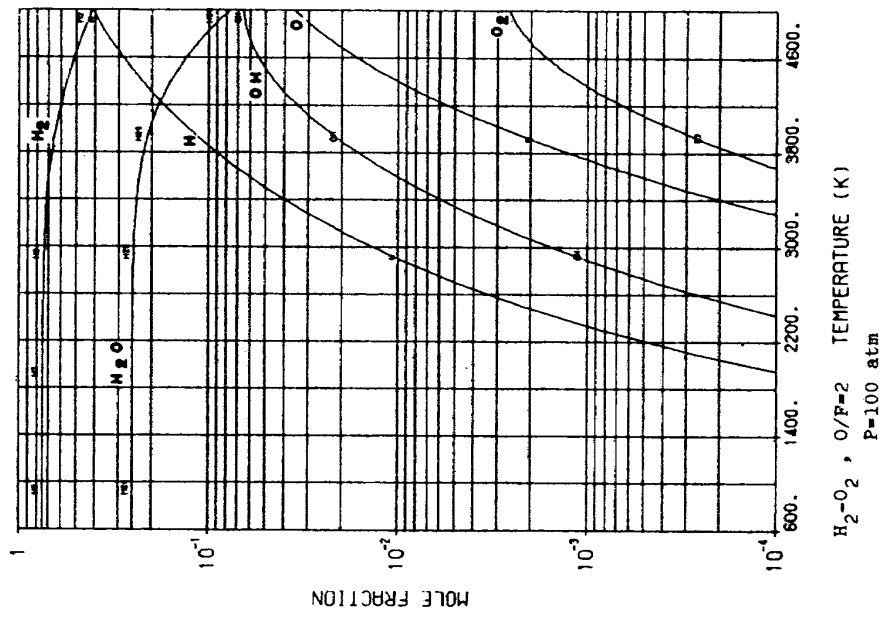
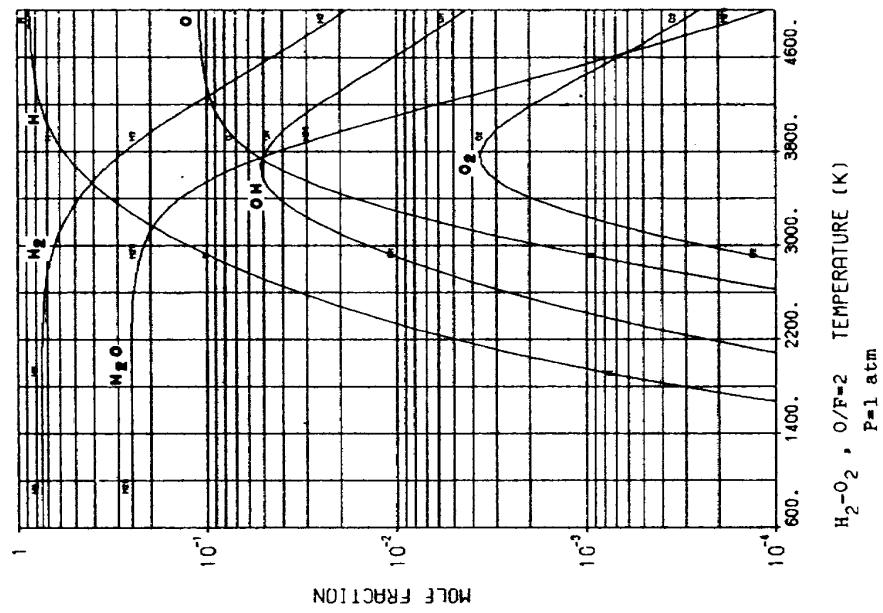


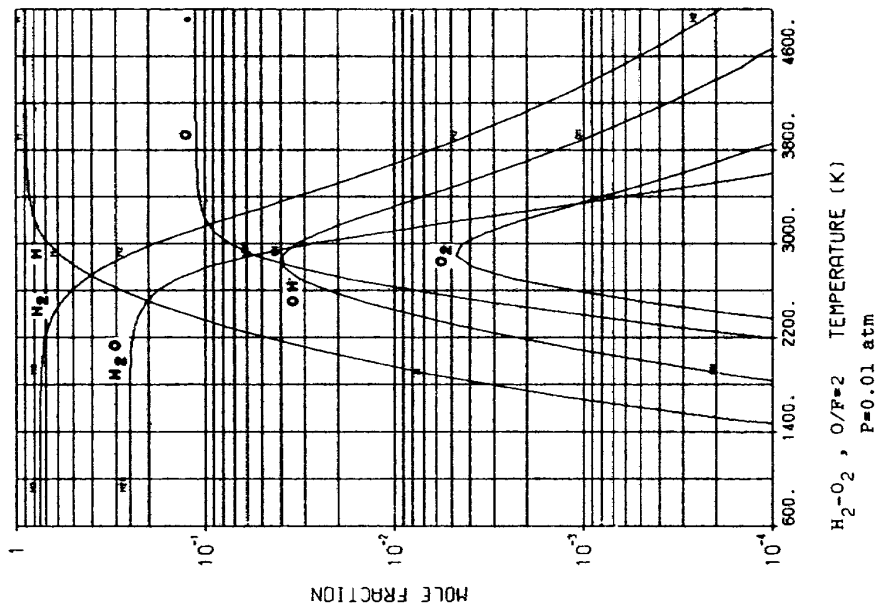
図 B-1-18-5



☒ C-1-3



☒ C-1-2



☒ C-1-1

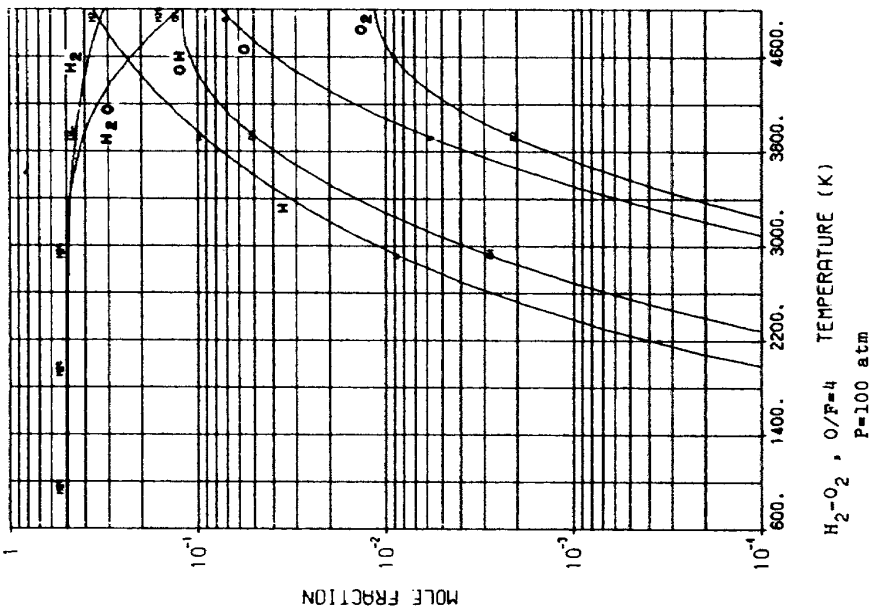


図 C-1-4

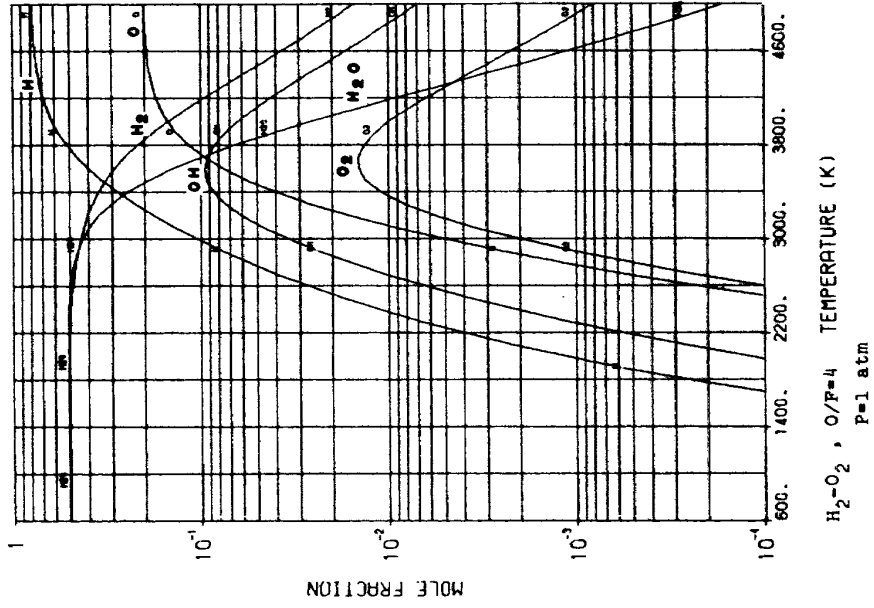


図 C-1-5

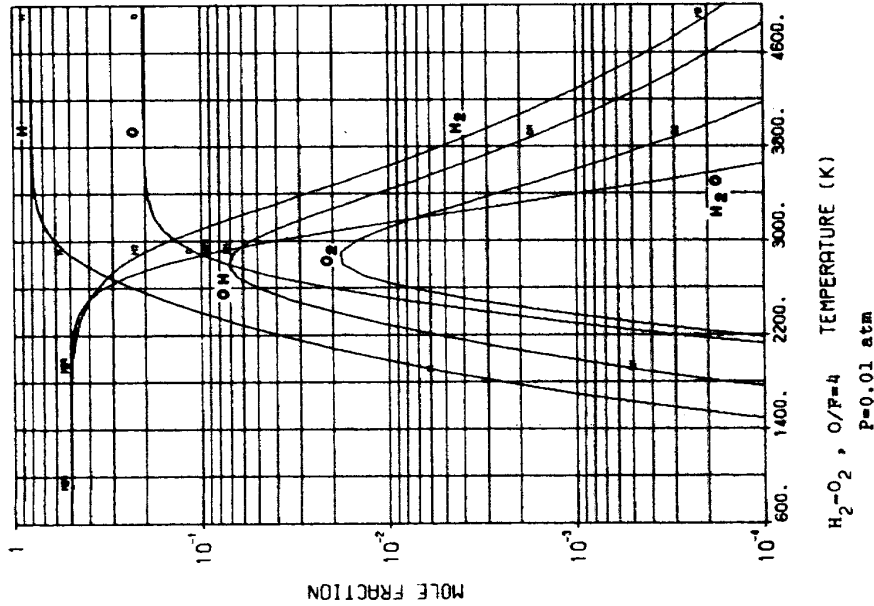


図 C-1-6

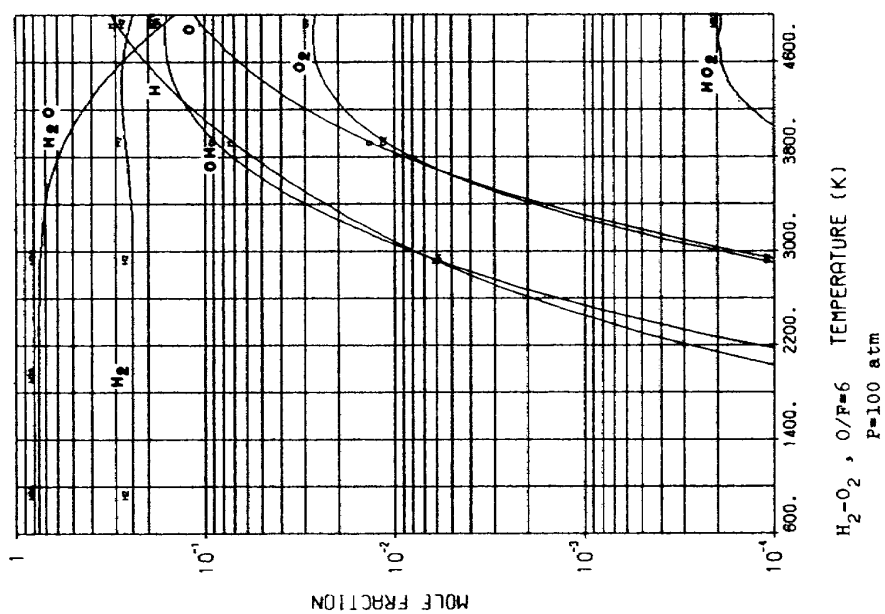


図 C-1-9

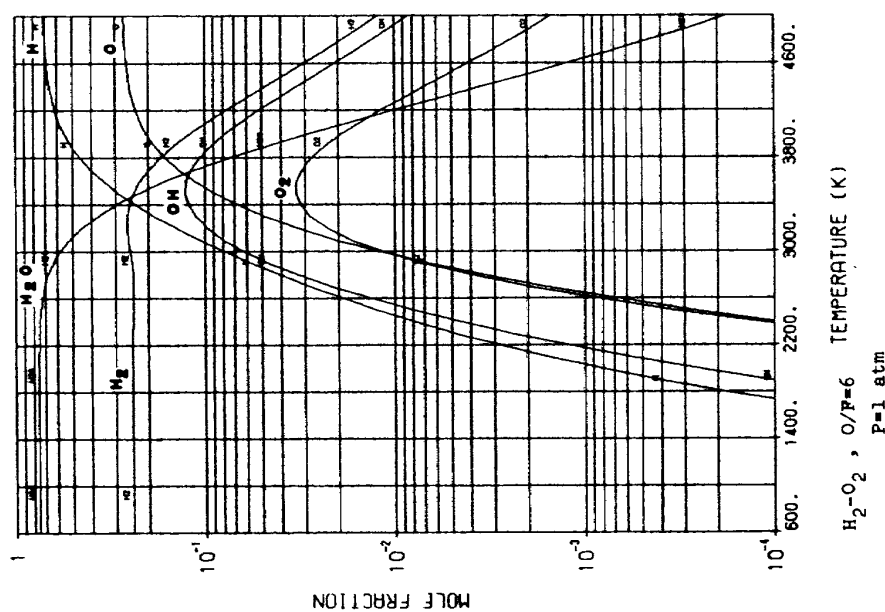


図 C-1-8

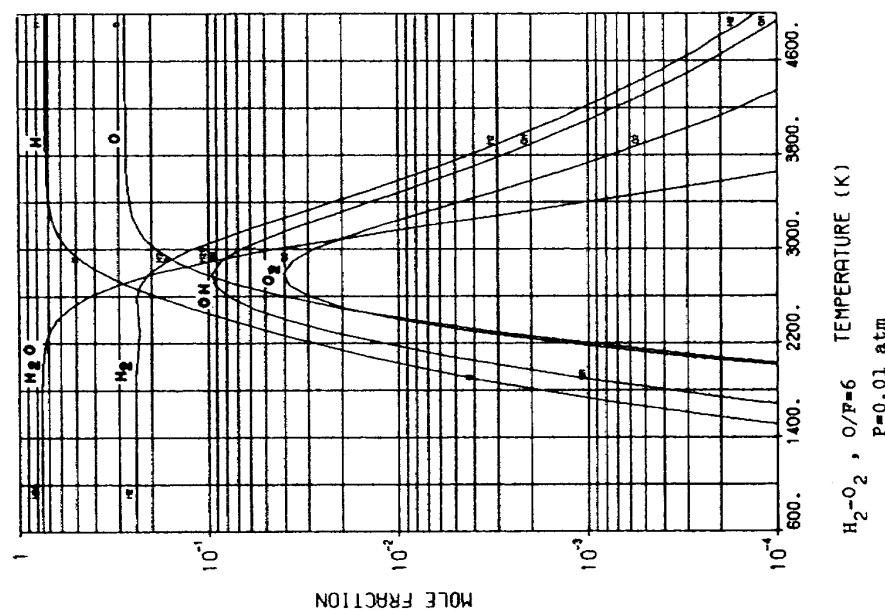


図 C-1-7

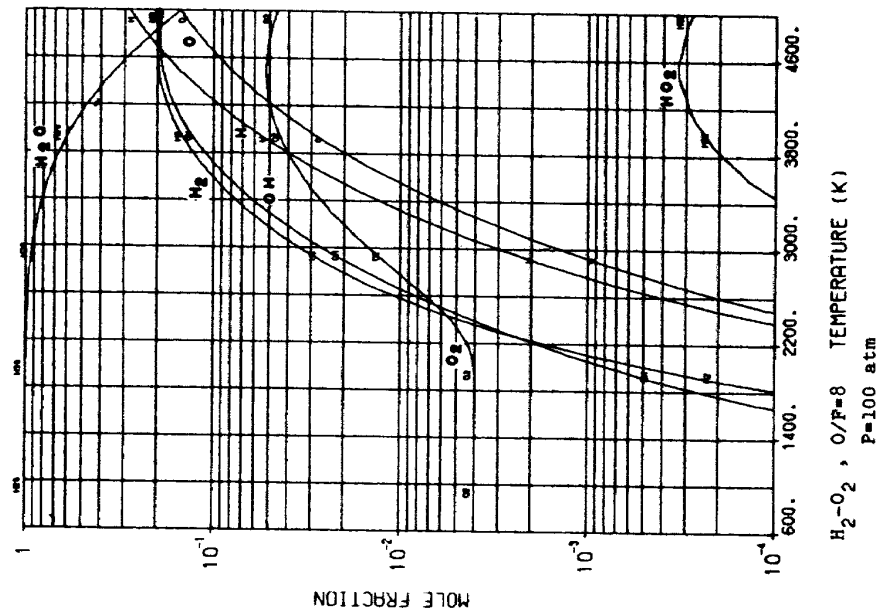


図 C-1-12

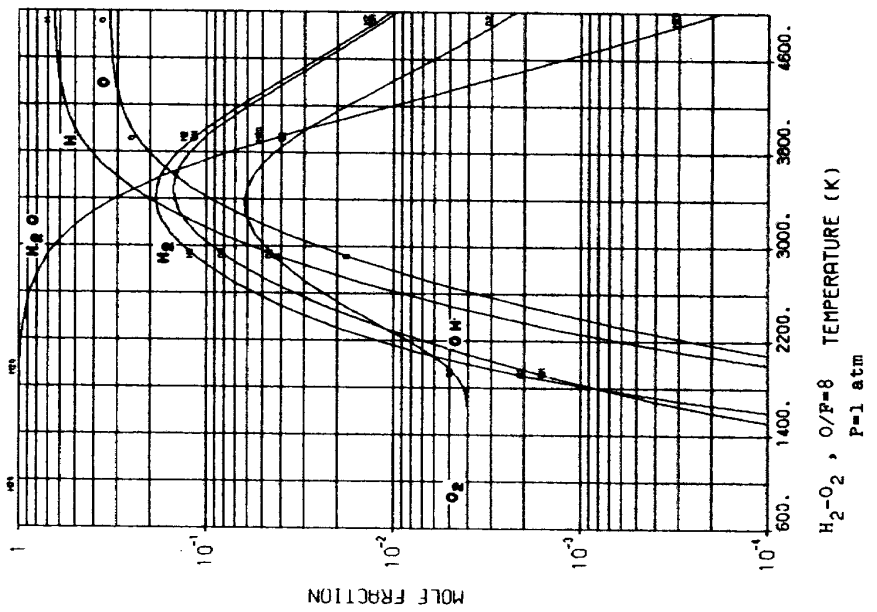


図 C-1-11

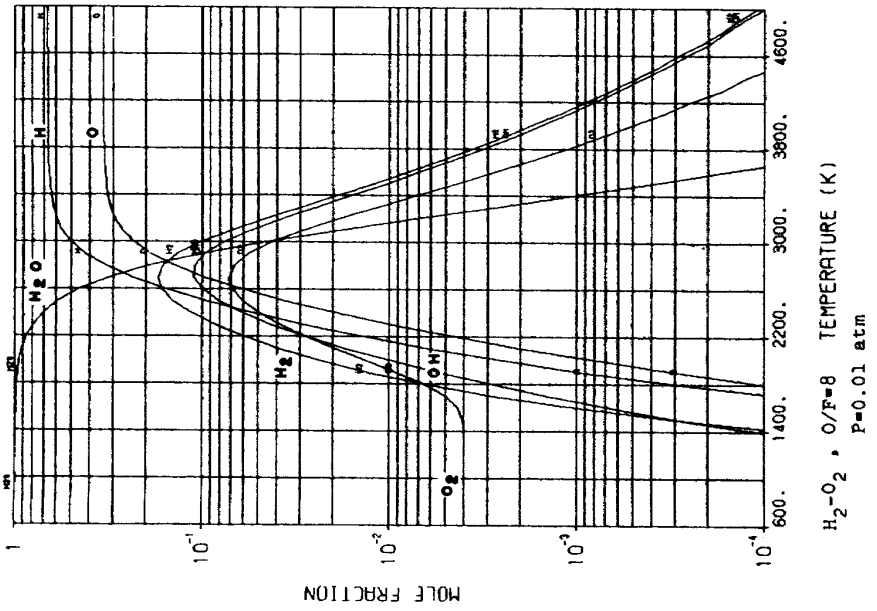


図 C-1-10

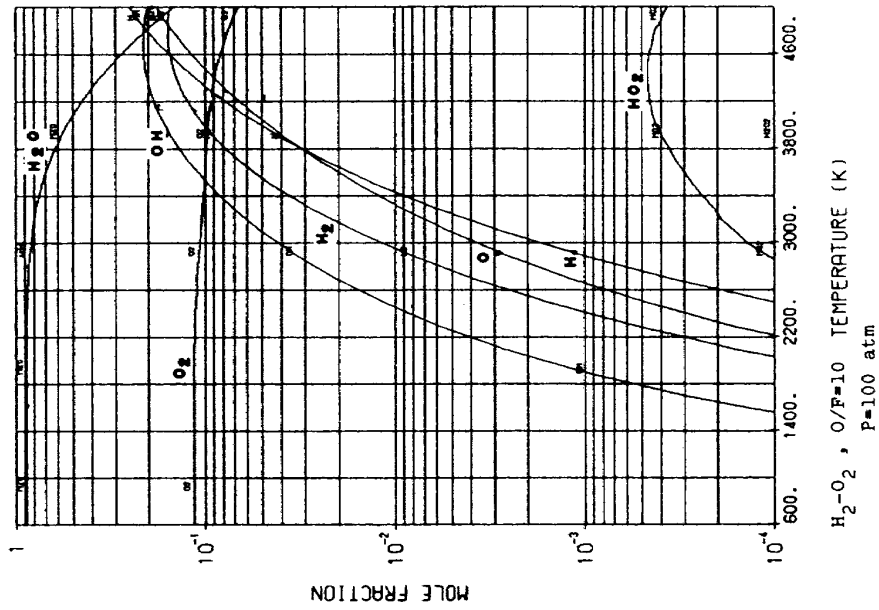


図 C-1-13

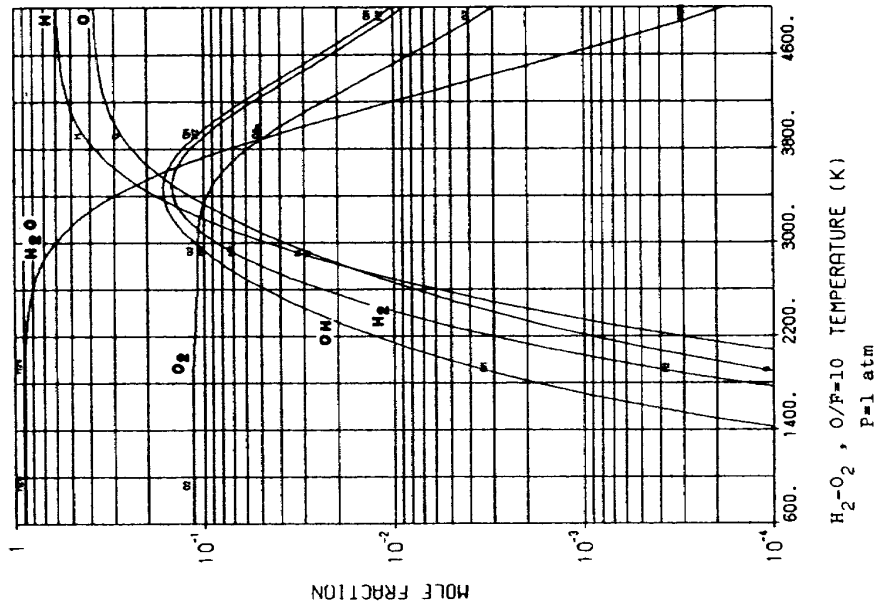


図 C-1-14

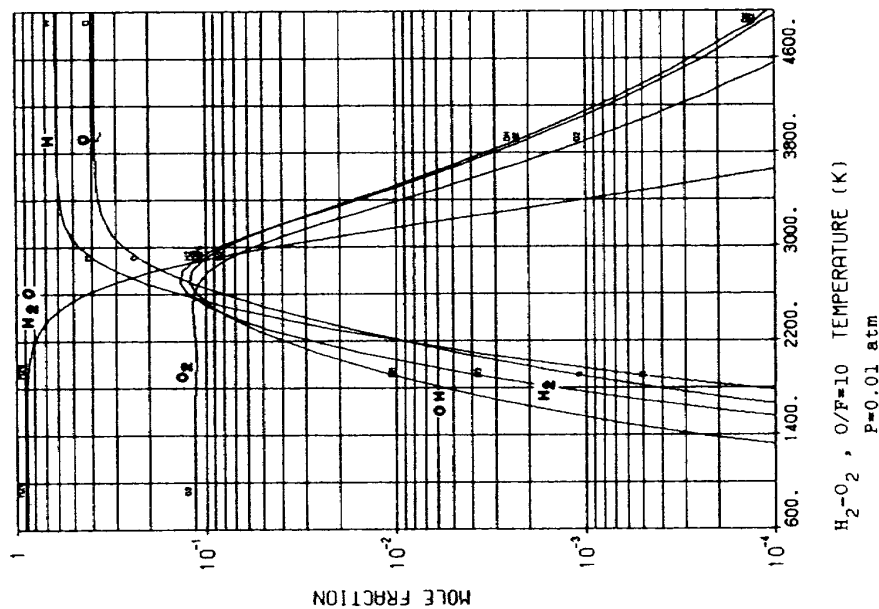


図 C-1-15



## 付 録 2      $\text{H}_2$ －Air 系





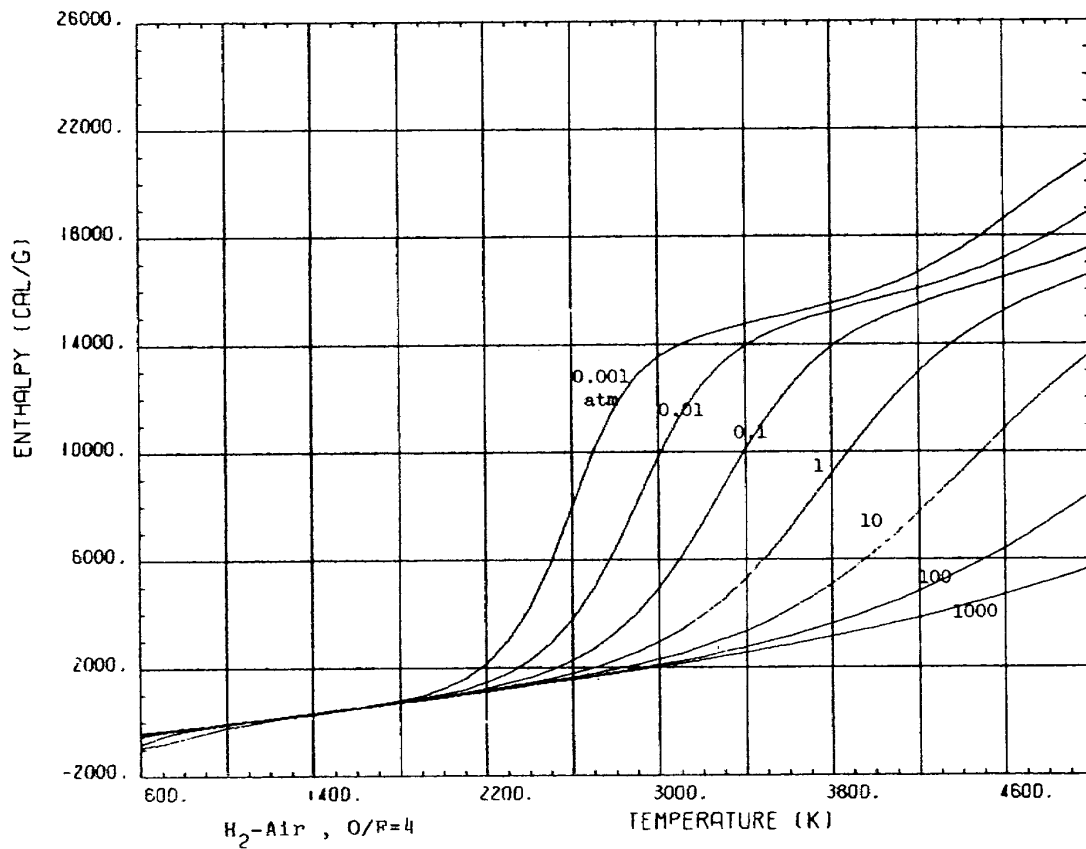


図 B-2-2-1

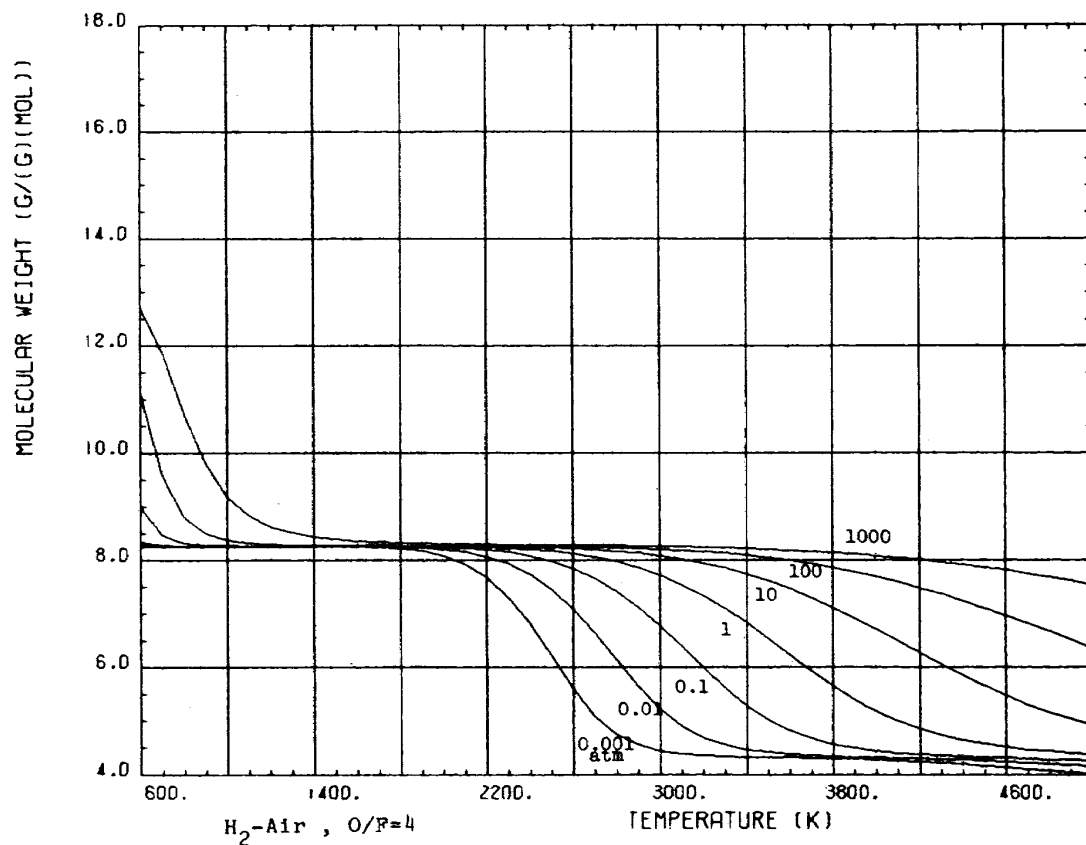


図 B-2-4-1

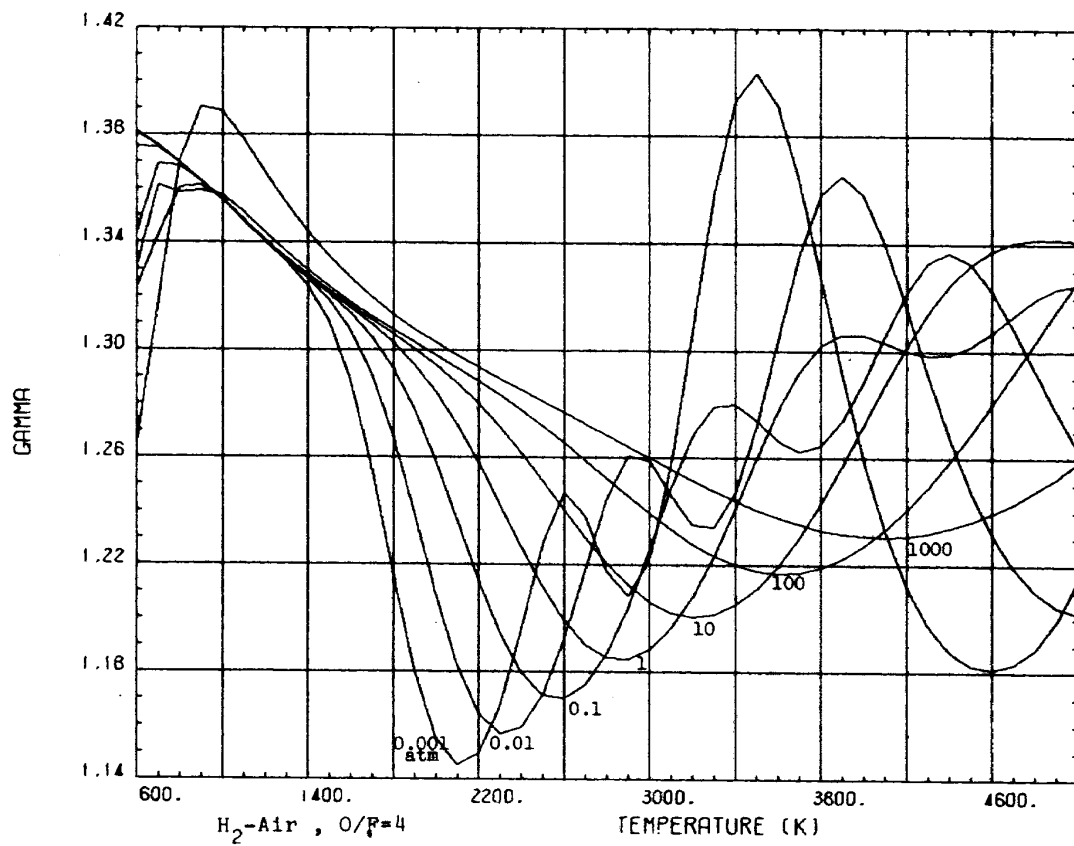


図 B-2-7-1

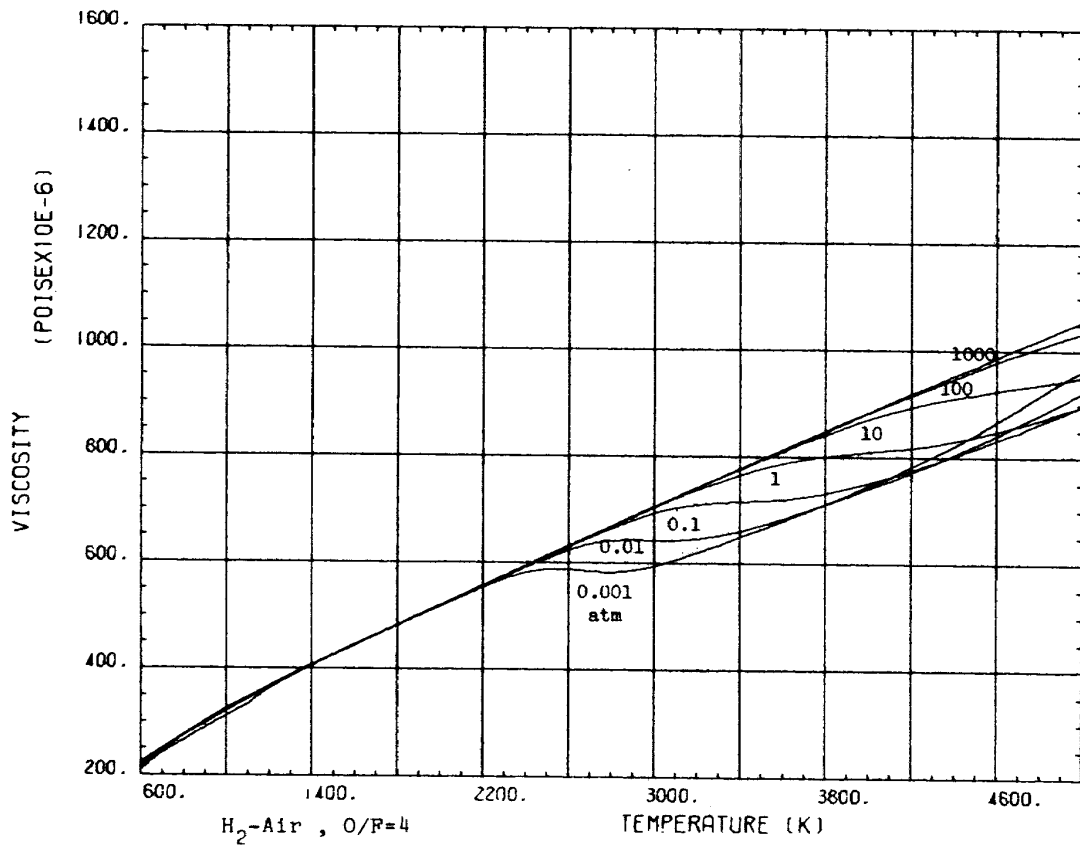


図 B-2-9-1

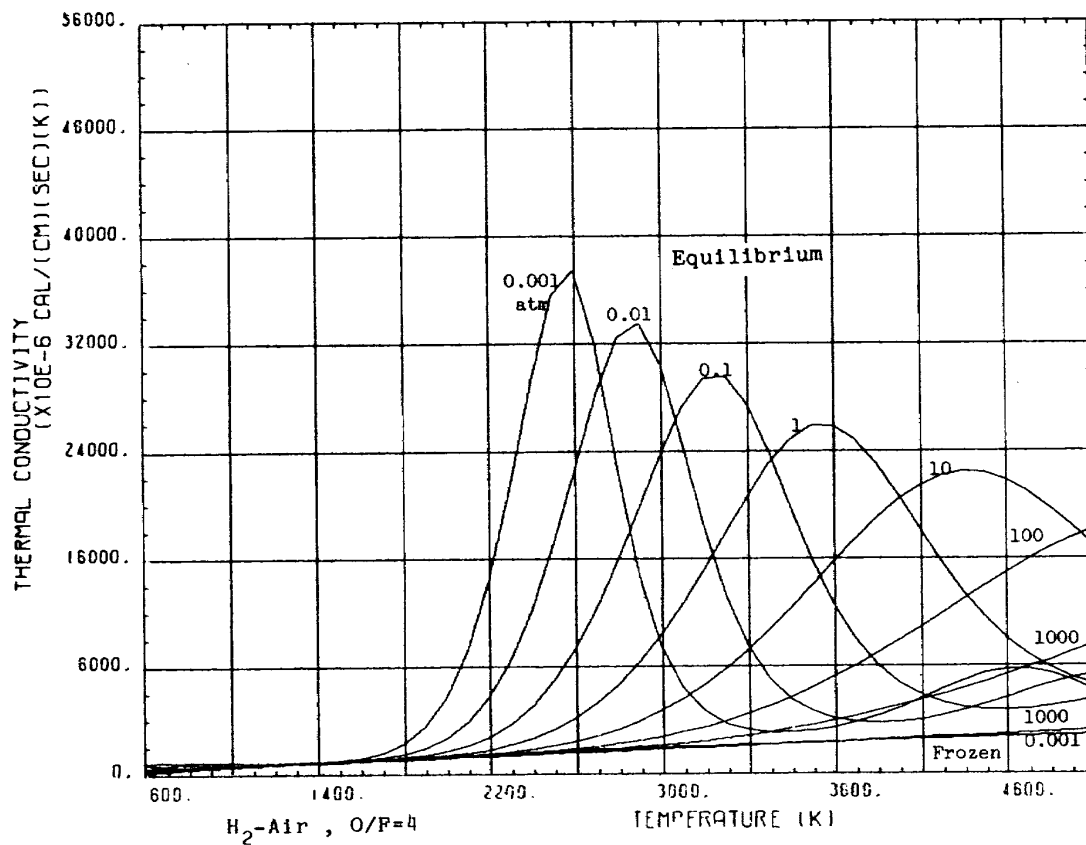


図 B-2-14-1

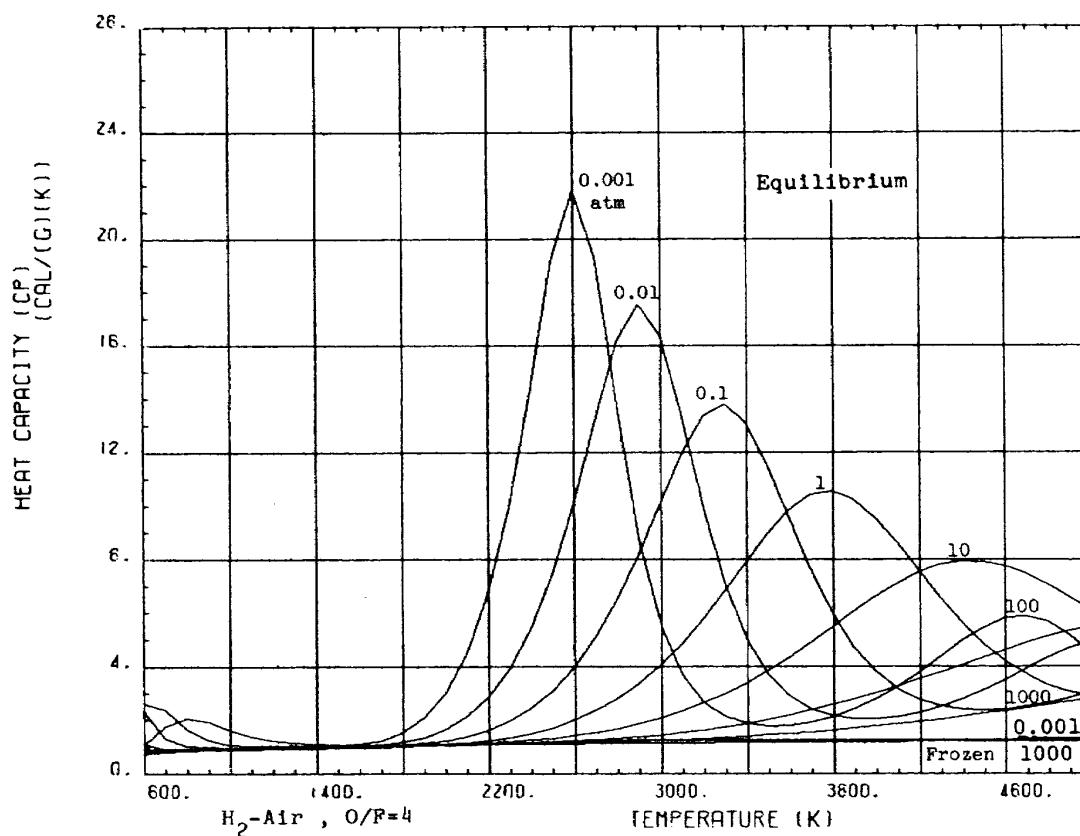


図 B-2-16-1

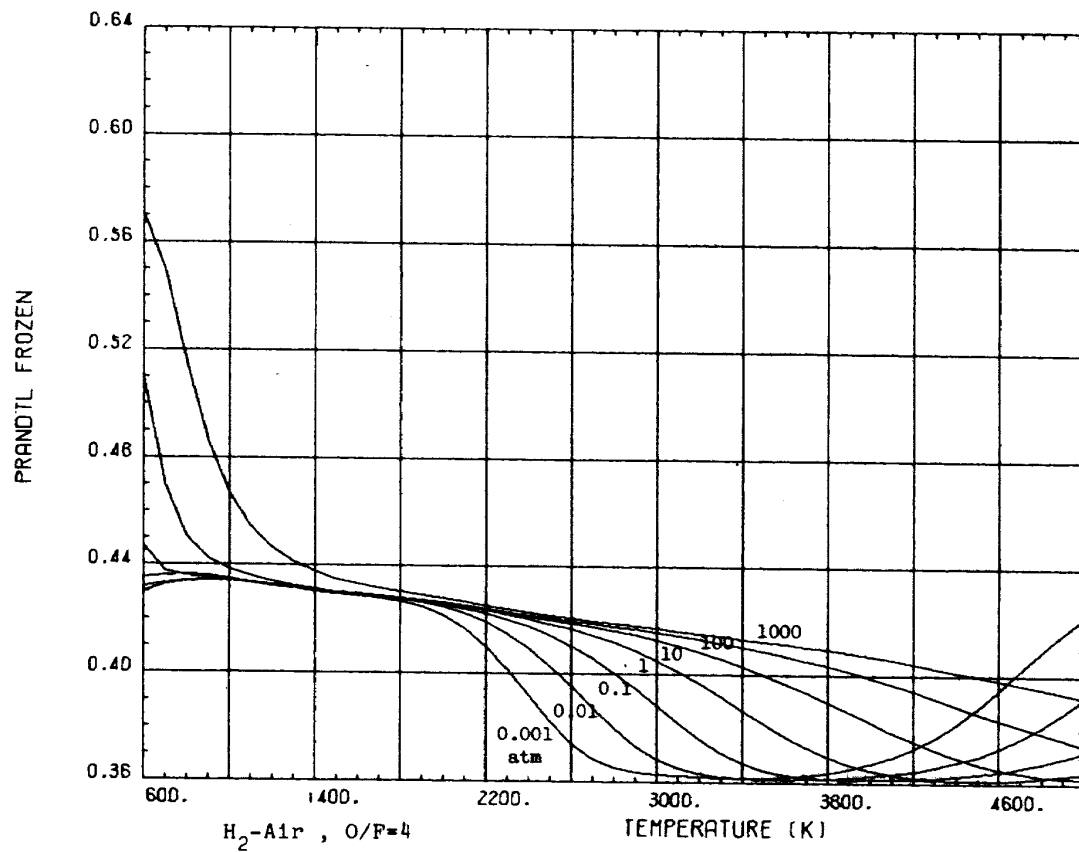


図 B-2-17-1

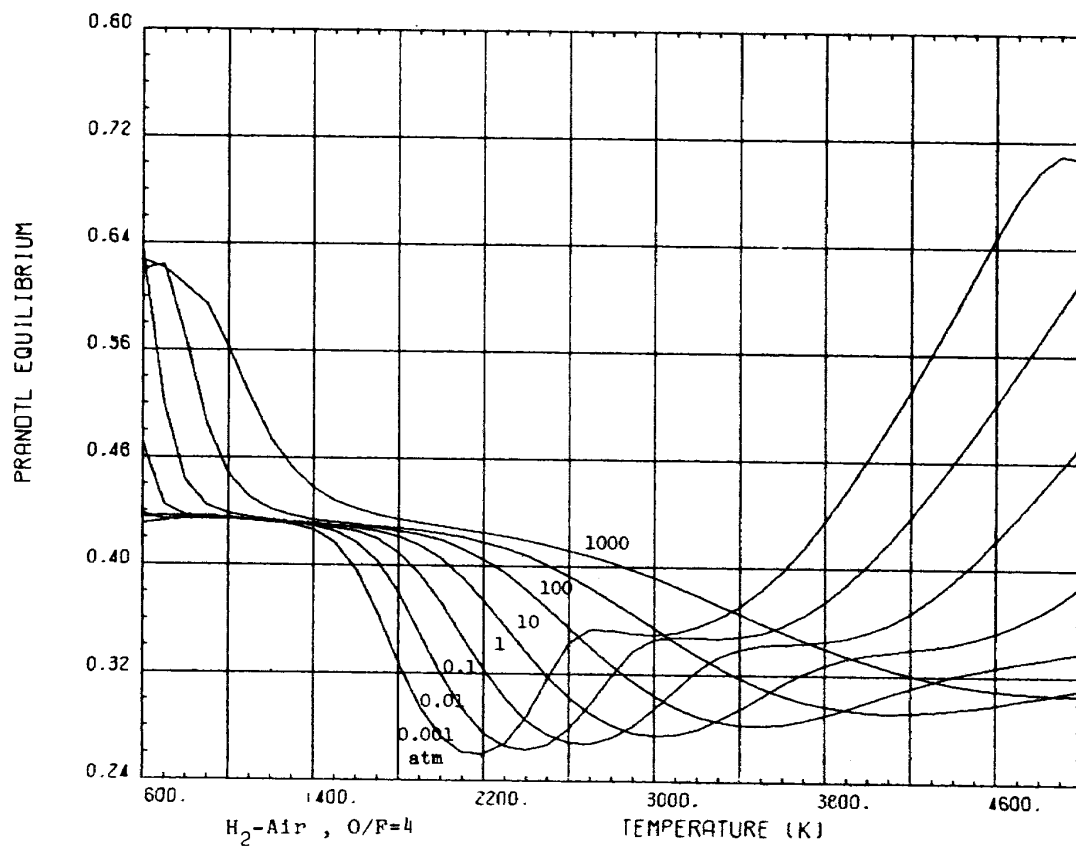


図 B-2-18-1

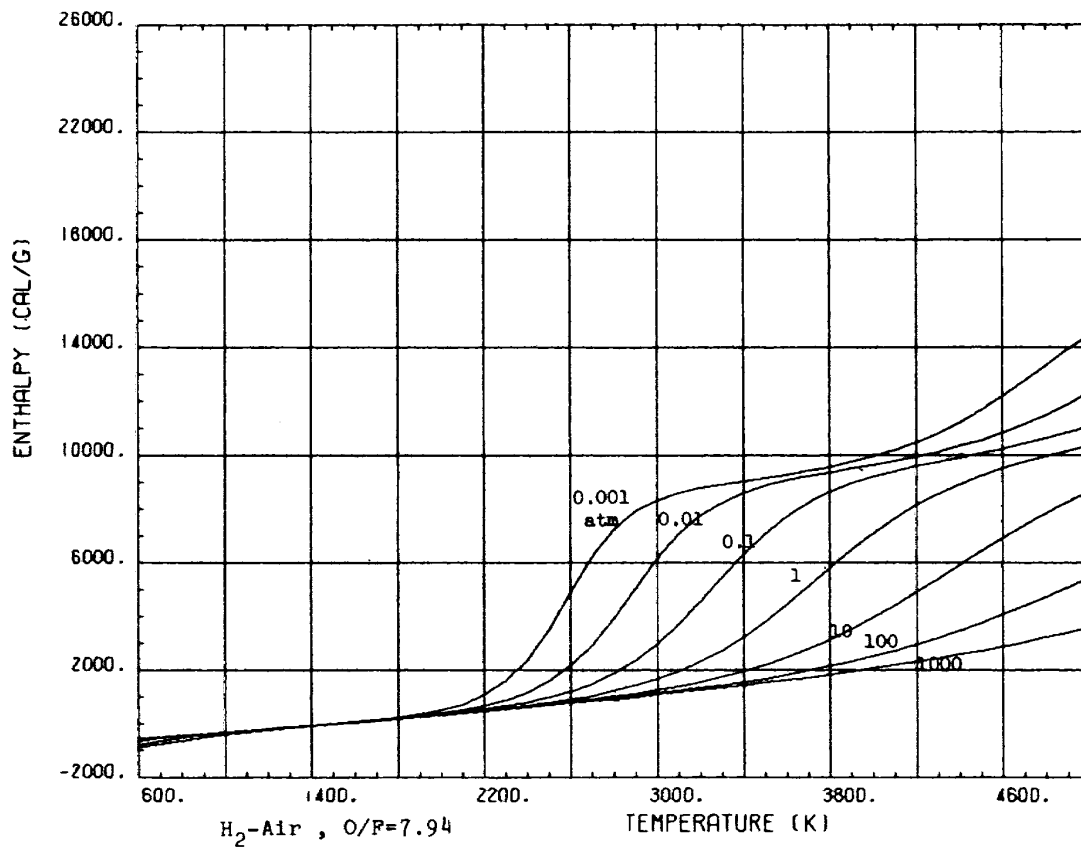


図 B-2-2-2

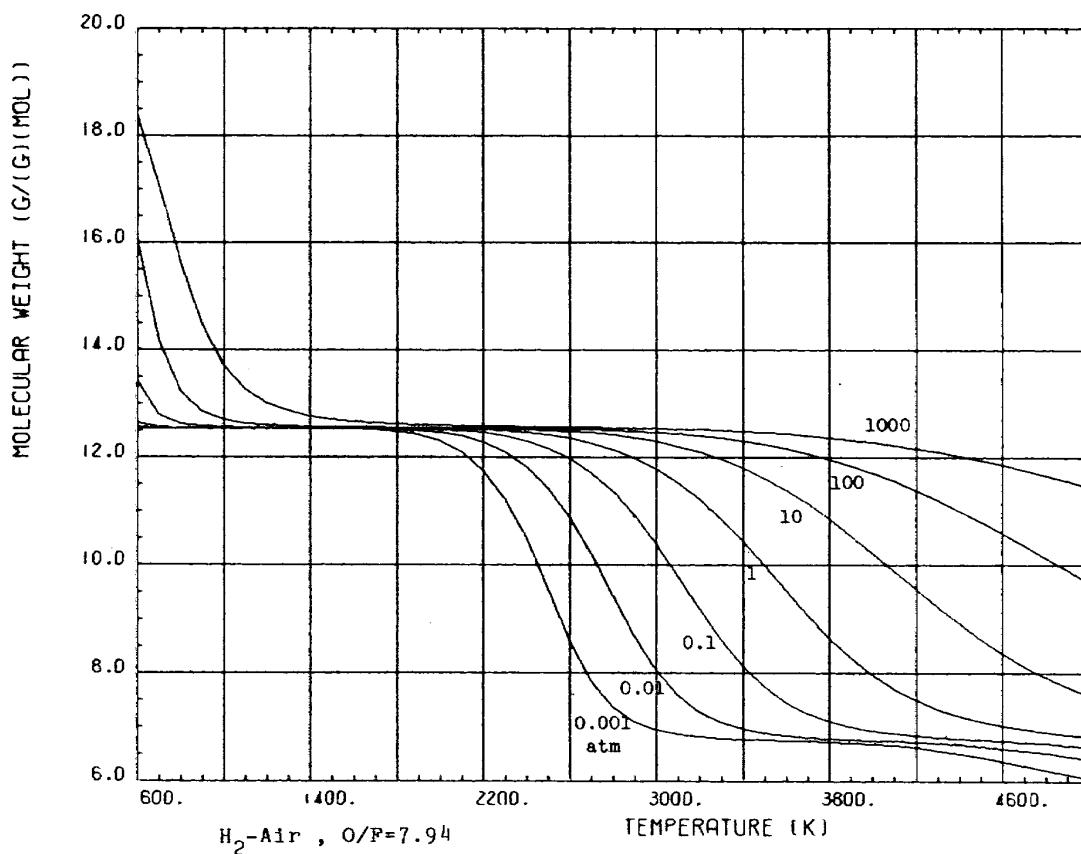


図 B-2-4-2

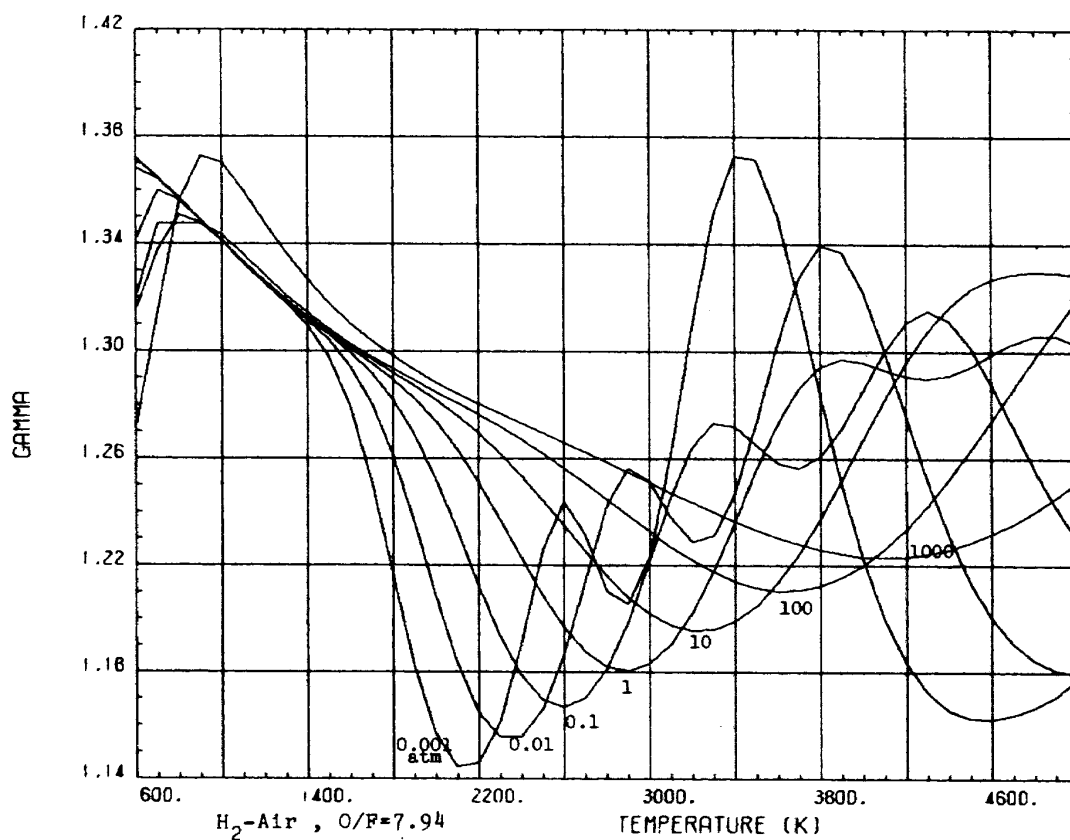


図 B-2-7-2

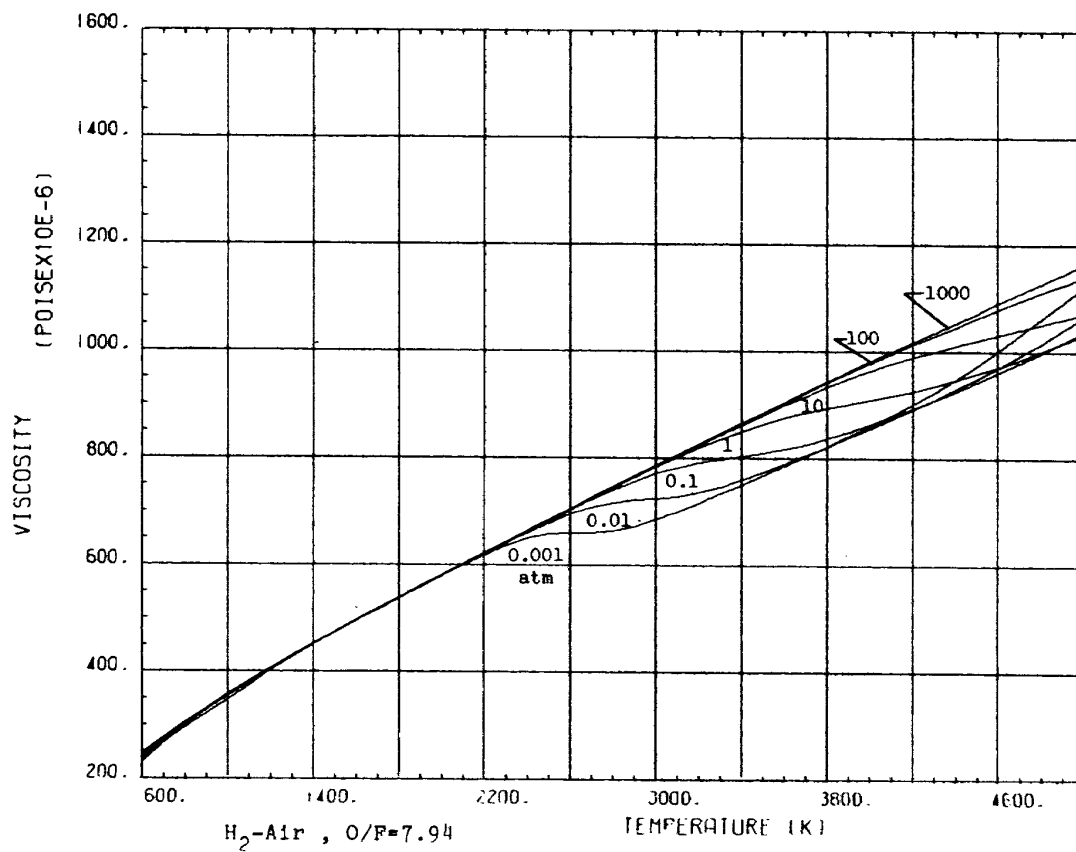


図 B-2-9-2

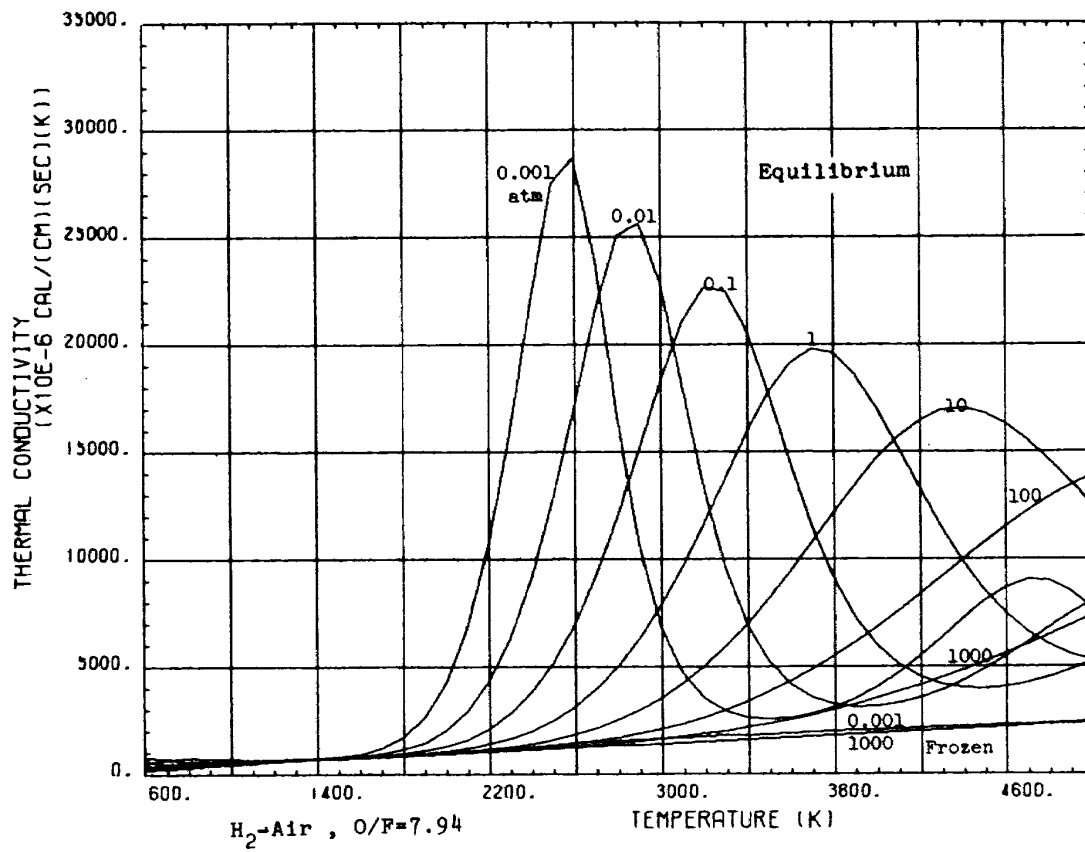


図 B-2-14-2

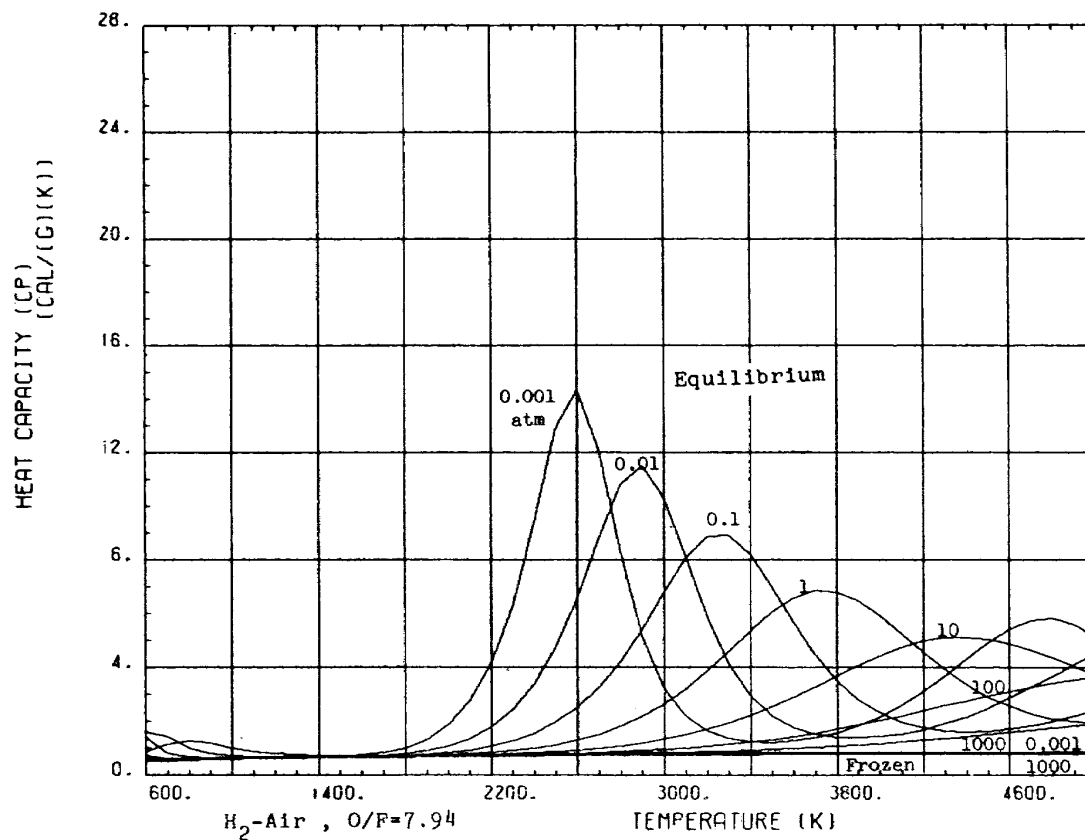


図 B-2-16-2



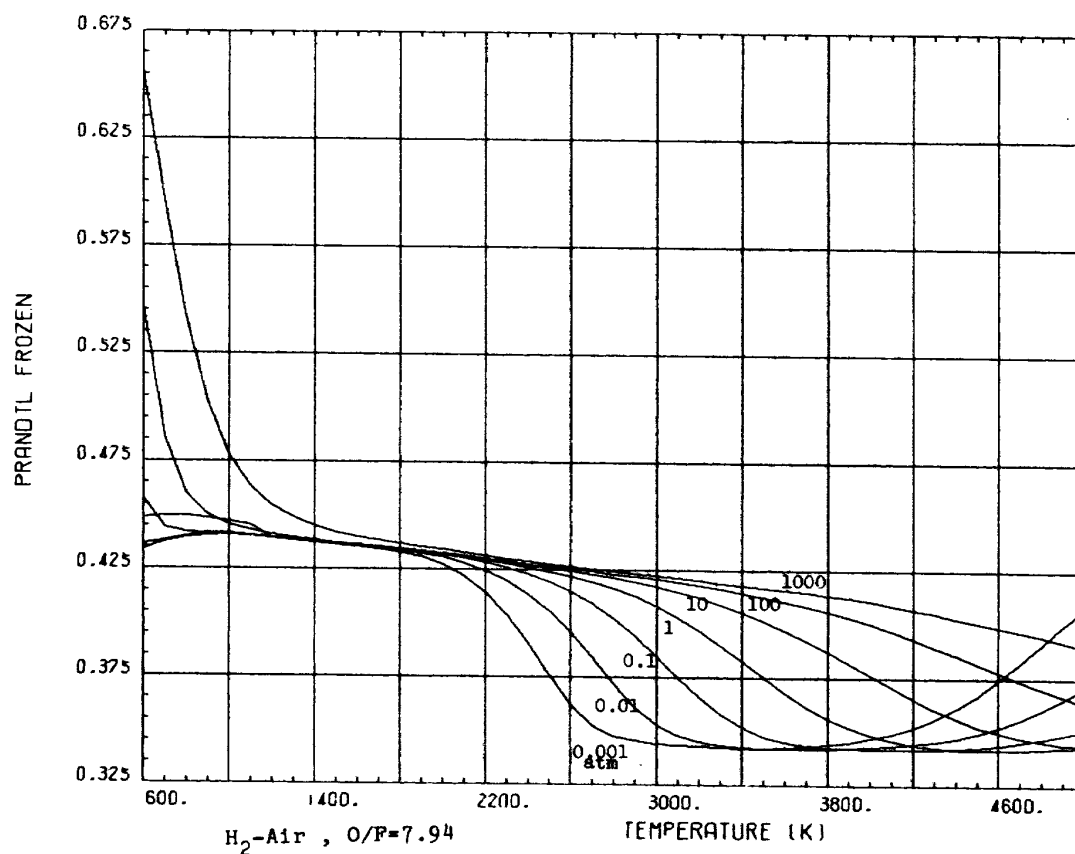


図 B-2-17-2

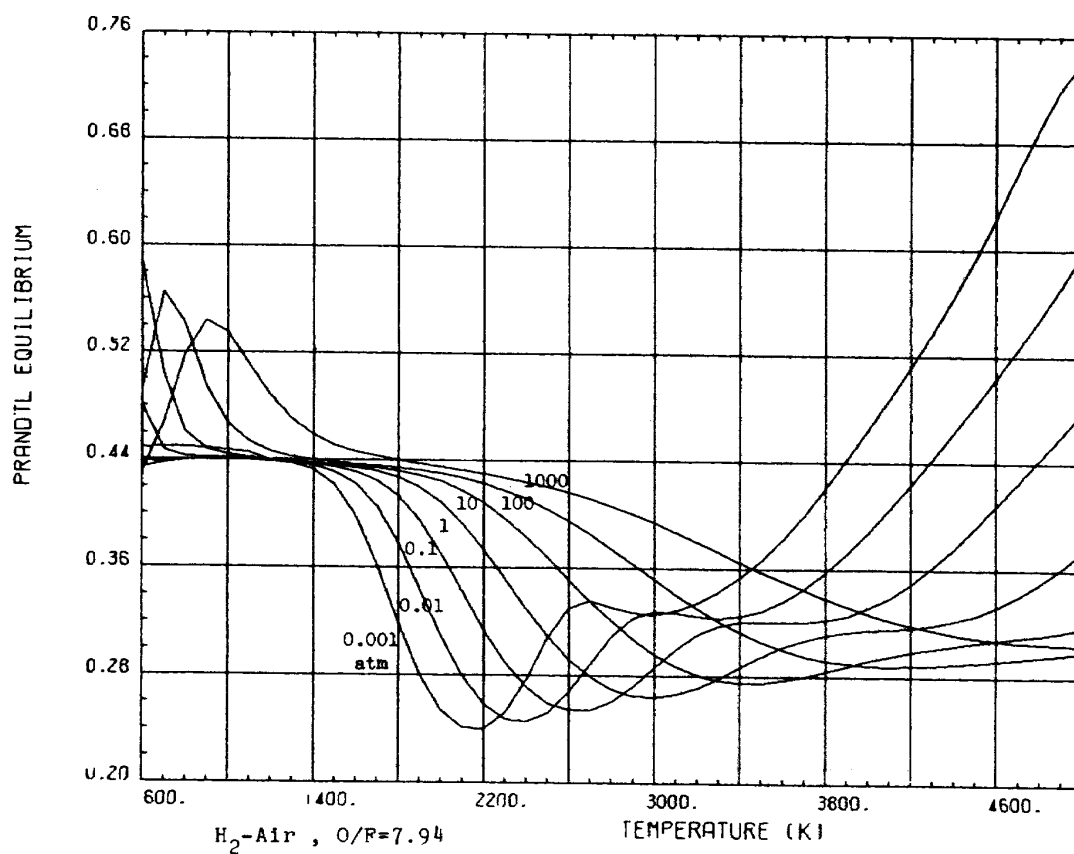


図 B-2-18-2

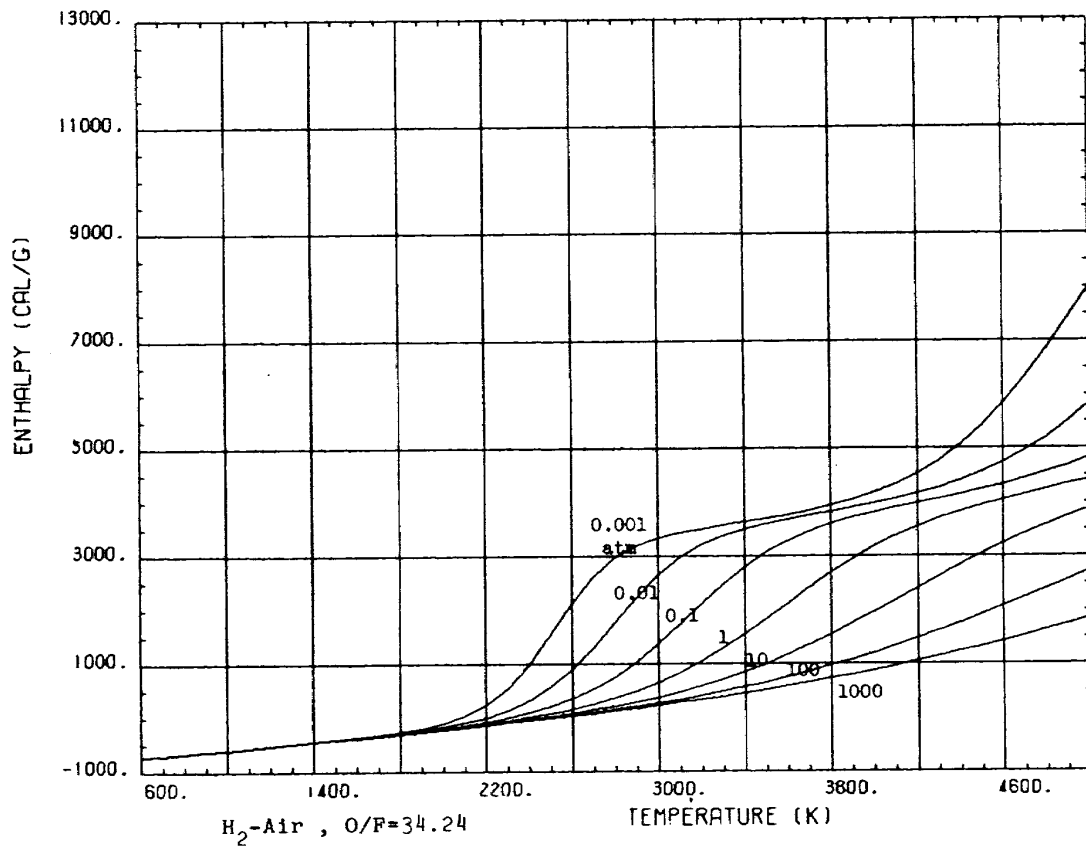


図 B-2-2-3

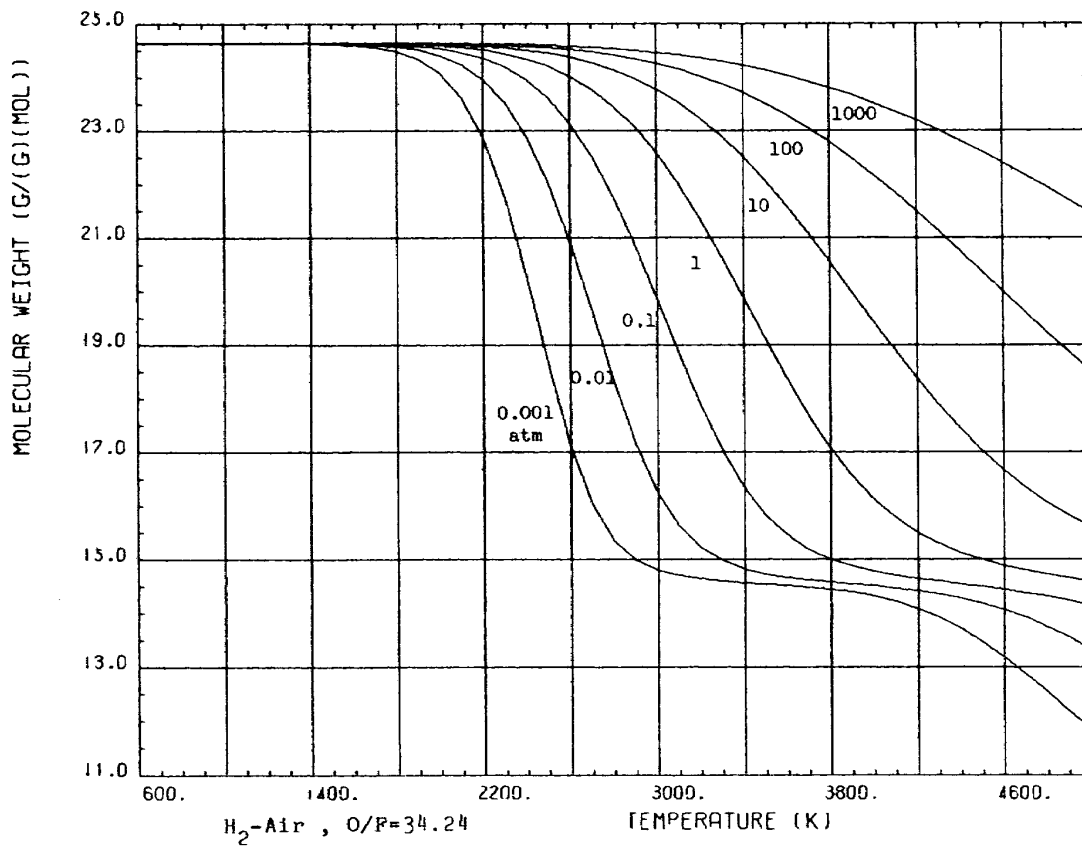


図 B-2-4-3

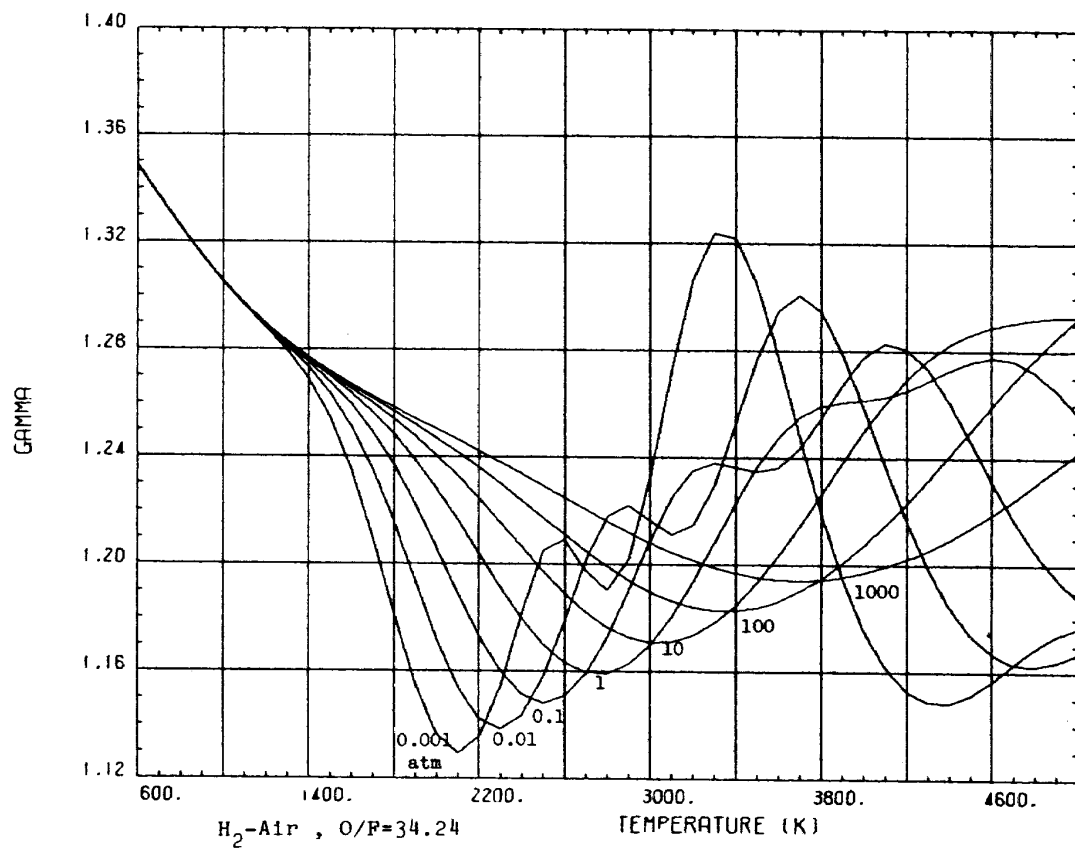


図 B-2-7-3

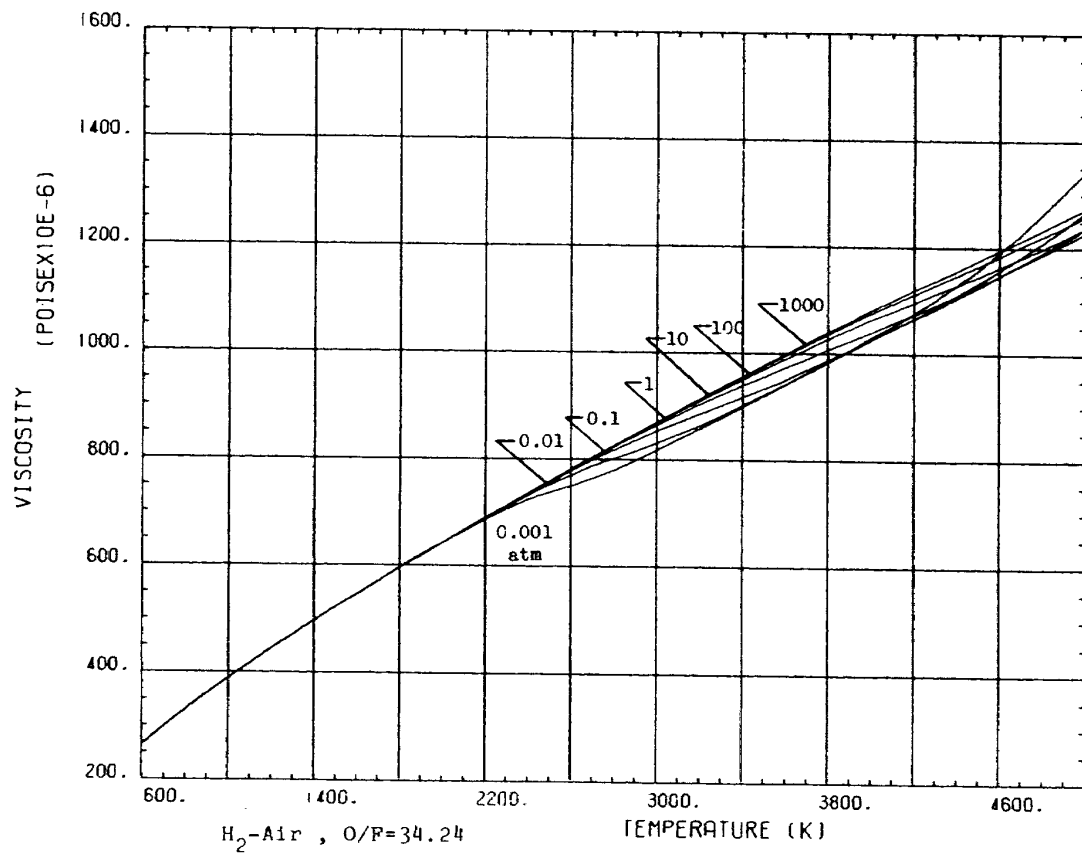


図 B-2-9-3

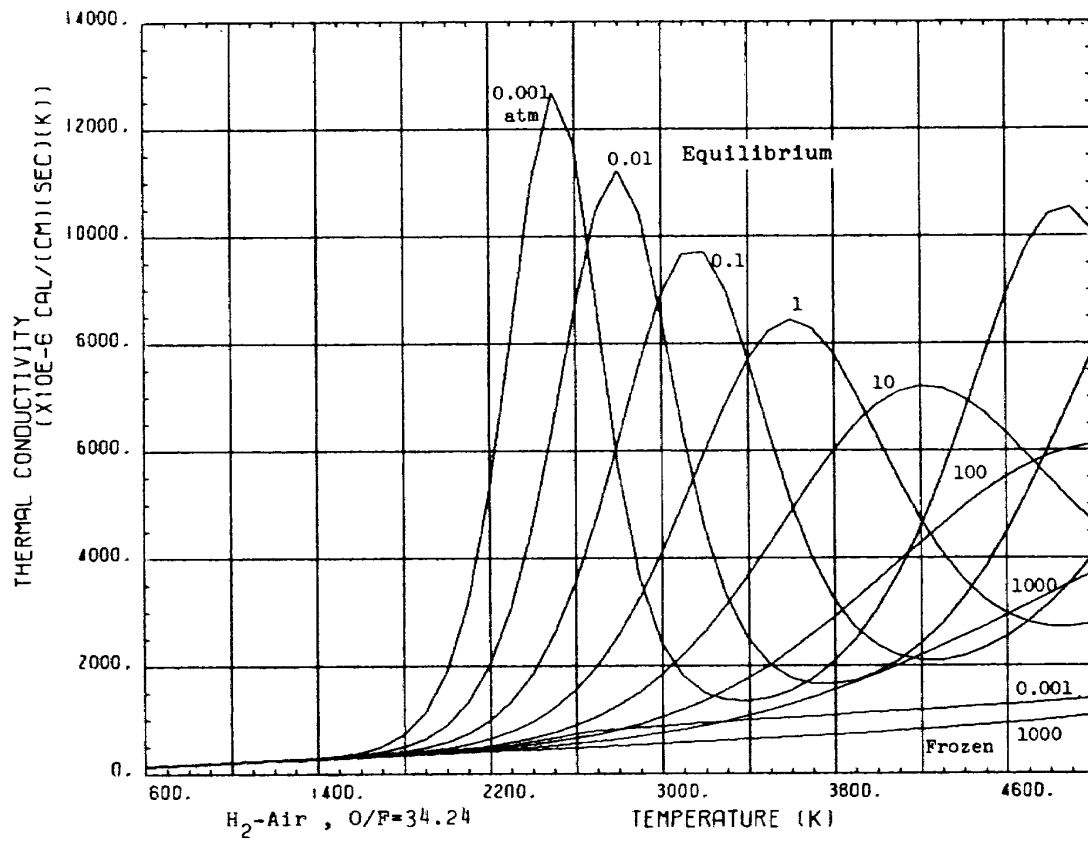


図 B-2-14-3

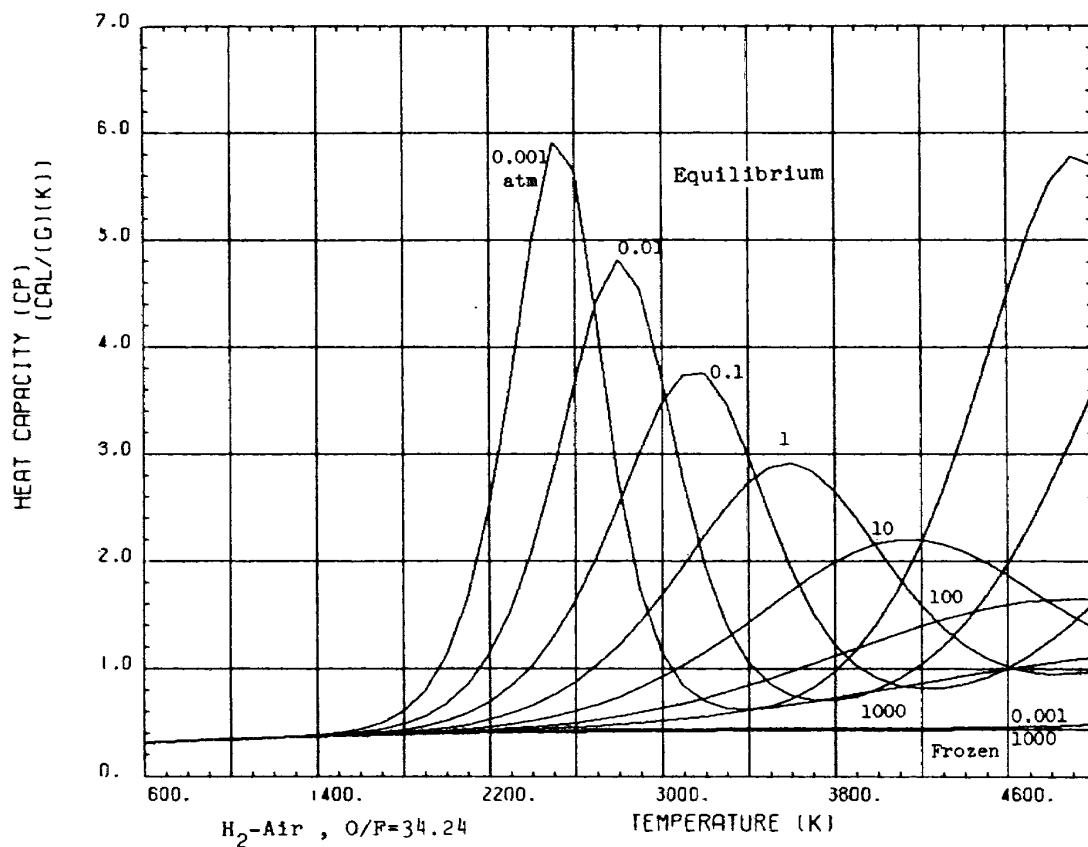


図 B-2-16-3

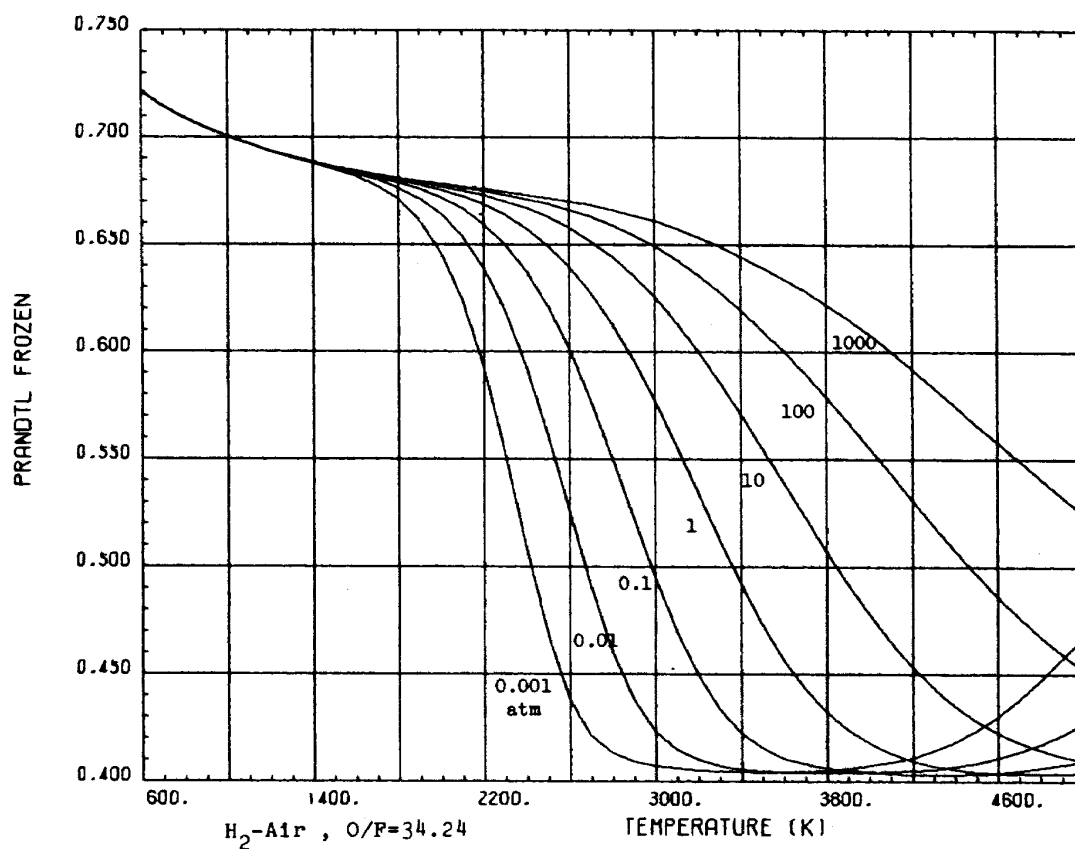


図 B-2-17-3

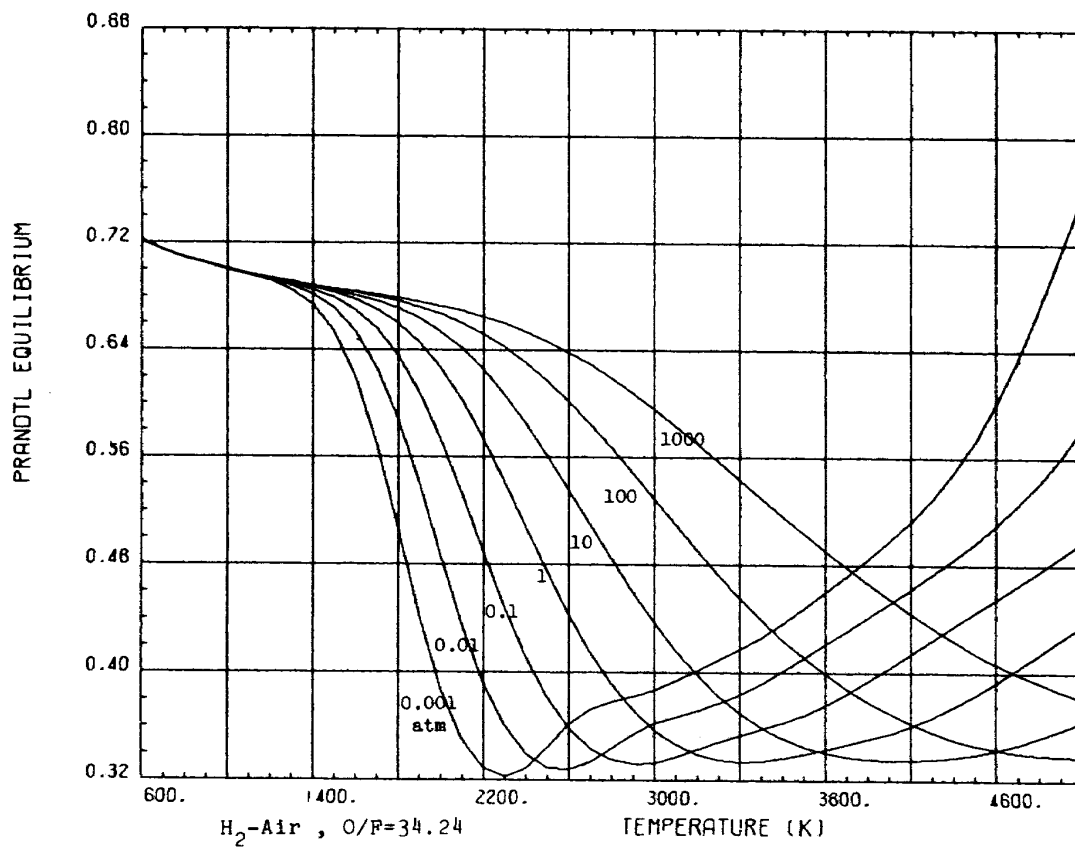


図 B-2-18-3

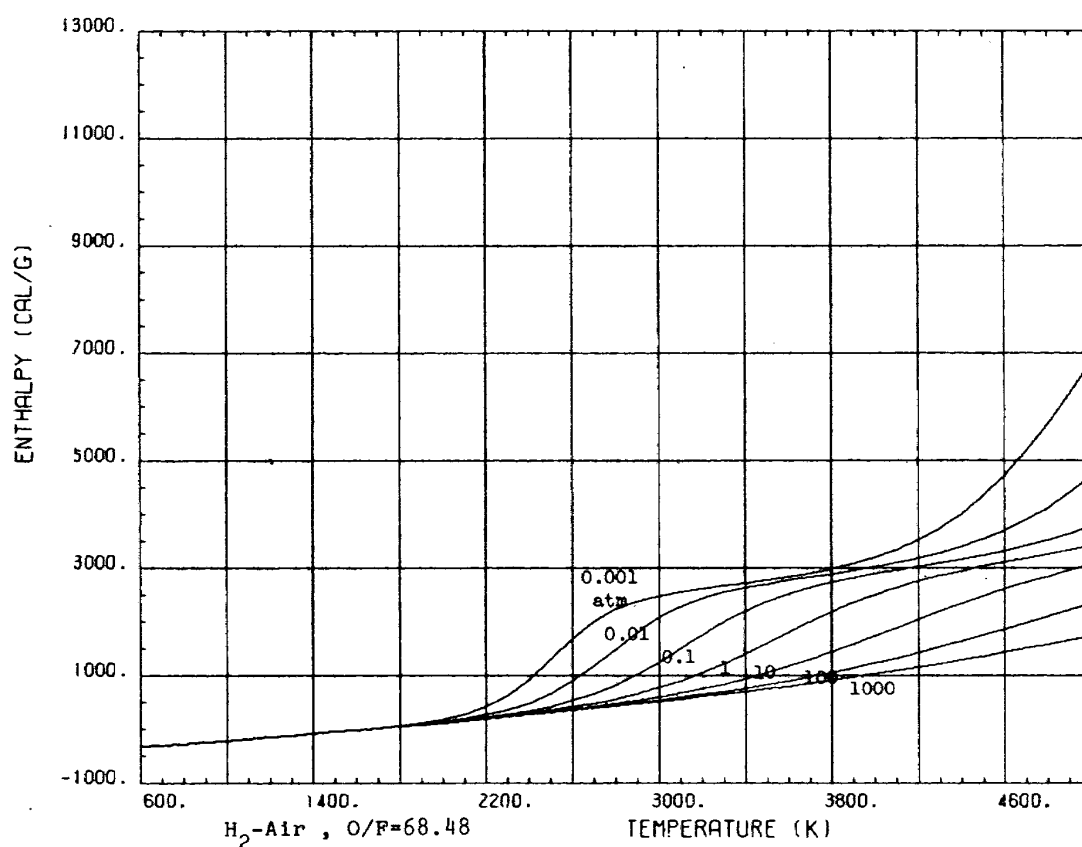


図 B-2-2-4

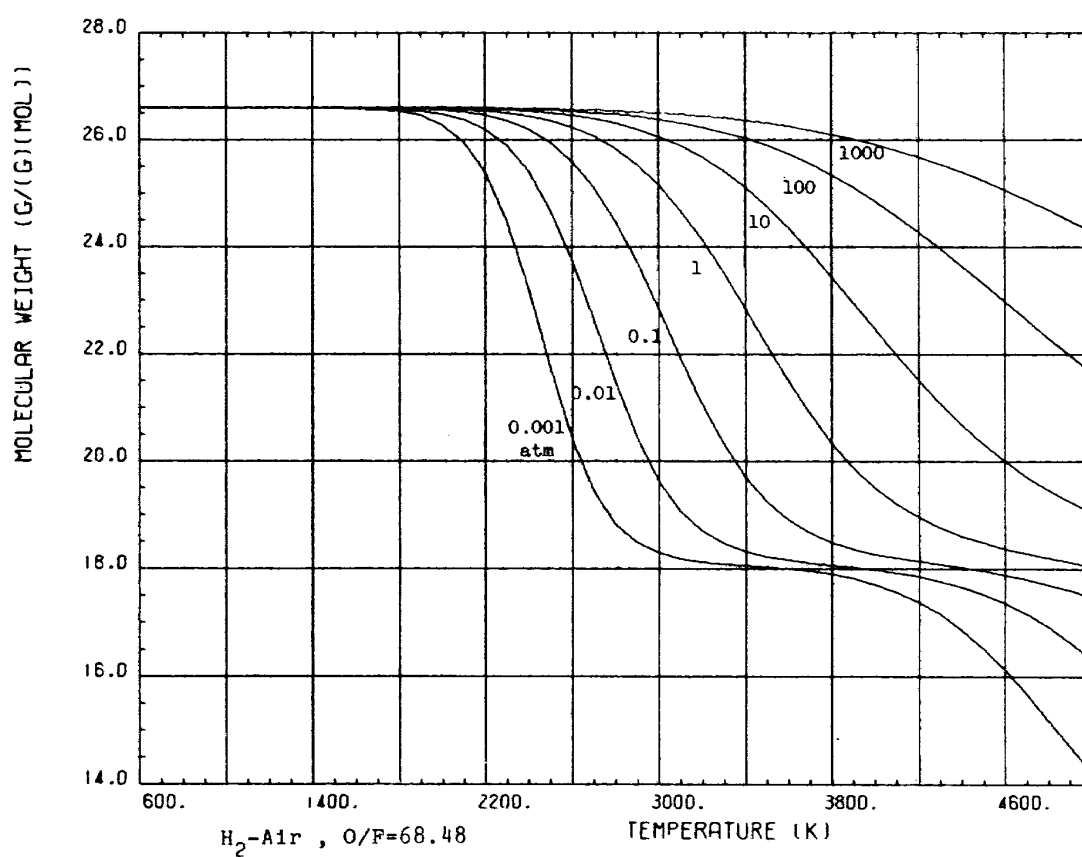


図 B-2-4-4

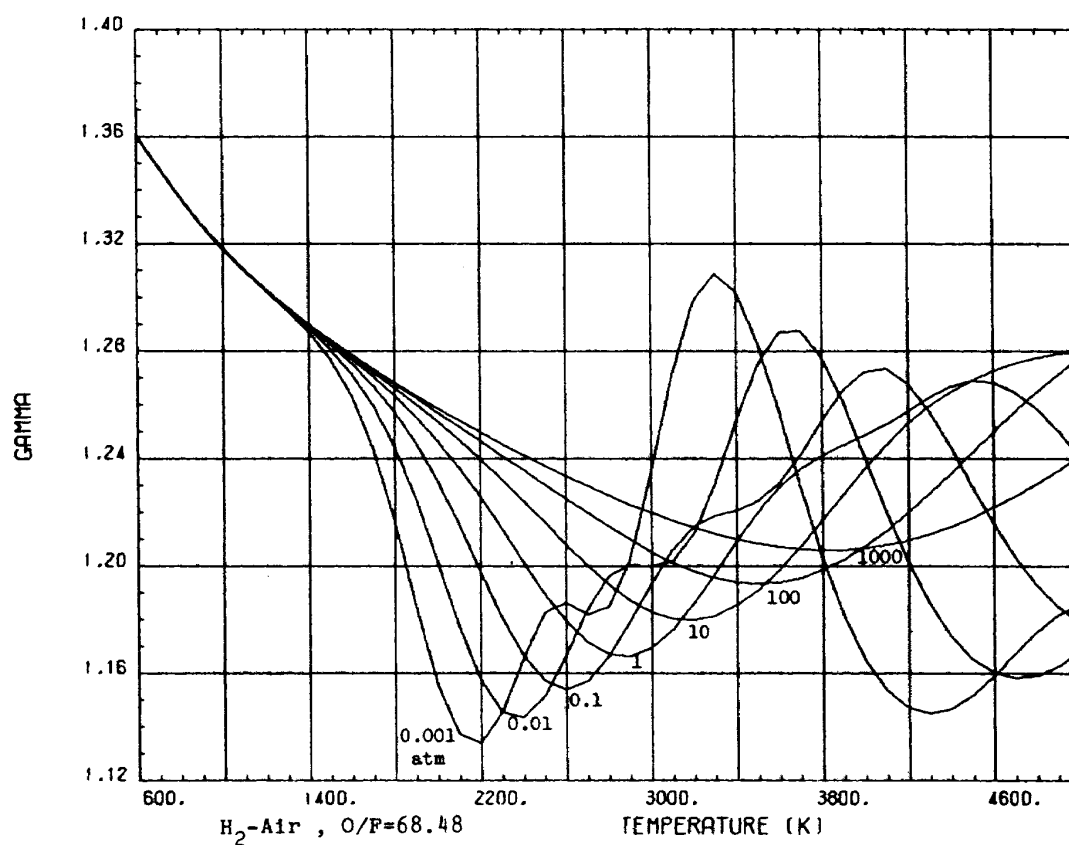


図 B-2-7-4

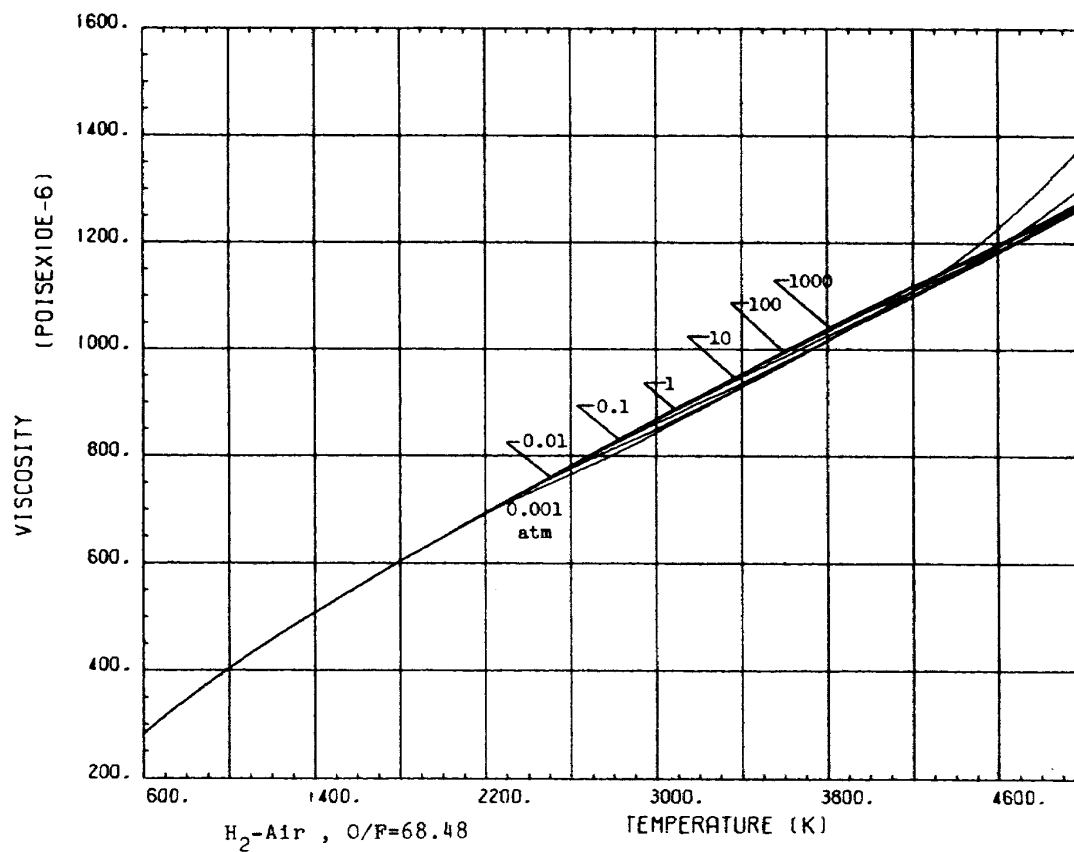


図 B-2-9-4

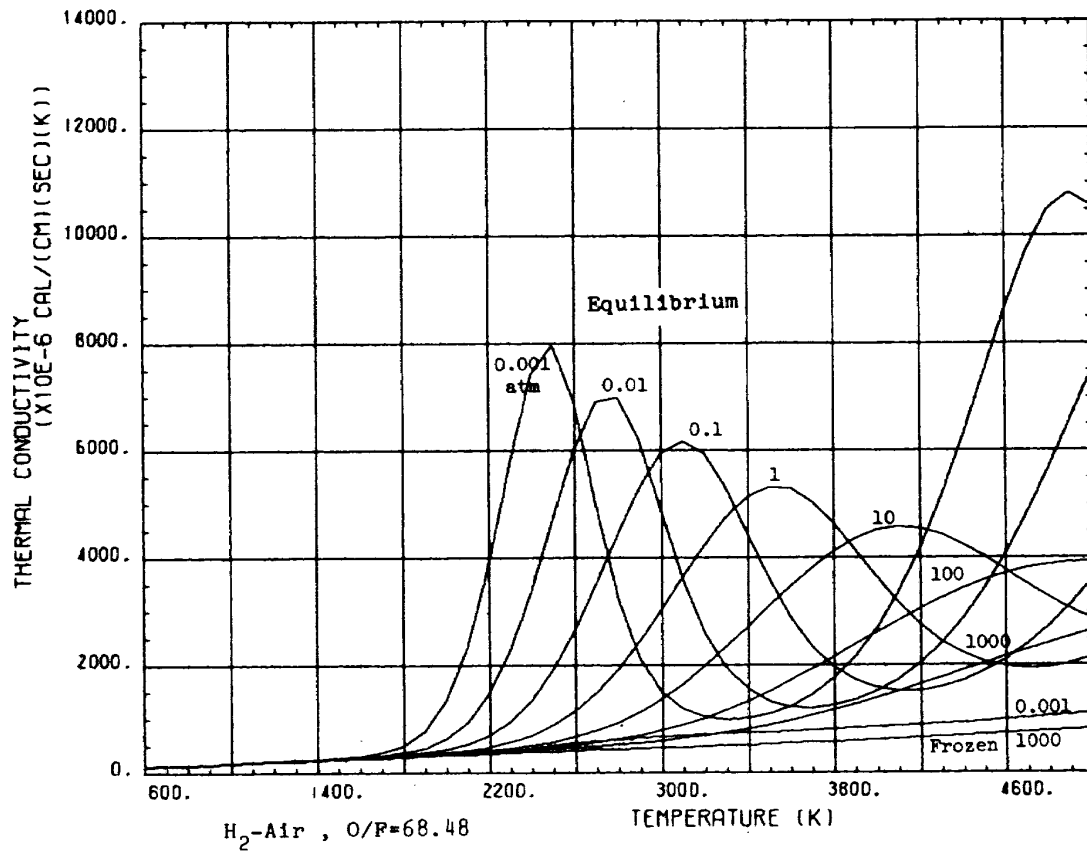


図 B-2-14-4

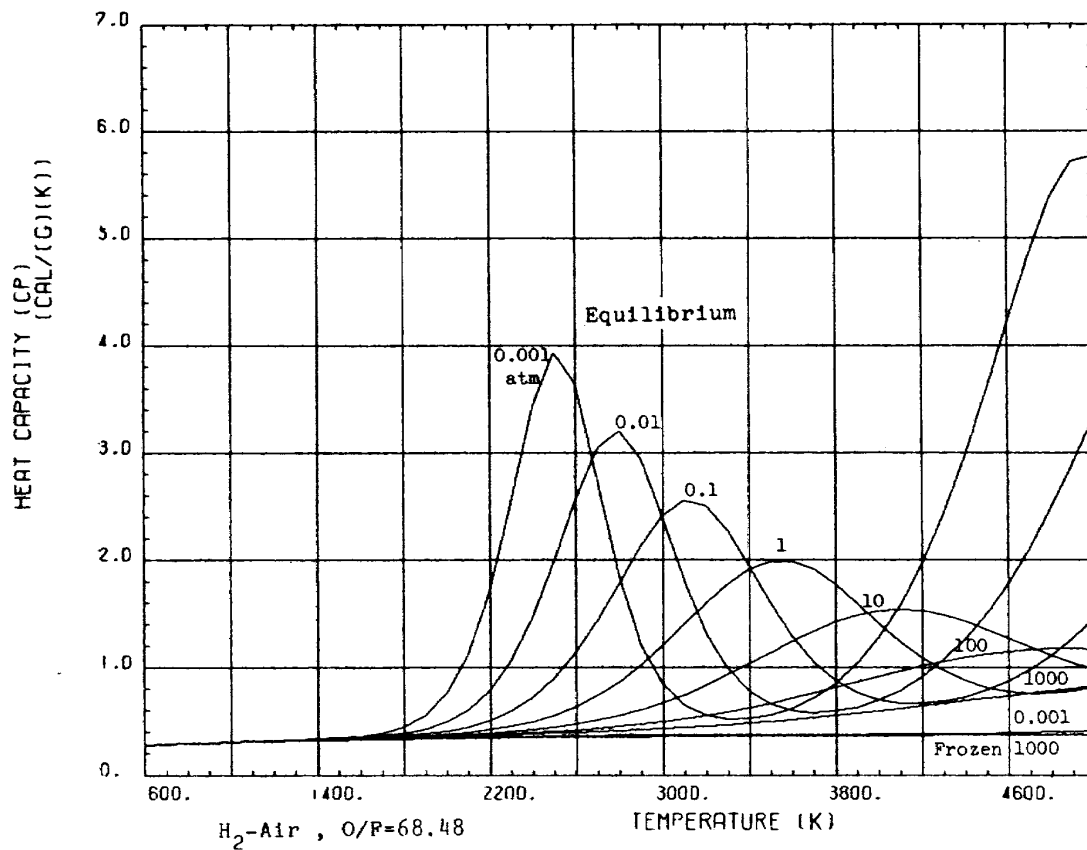


図 B-2-16-4



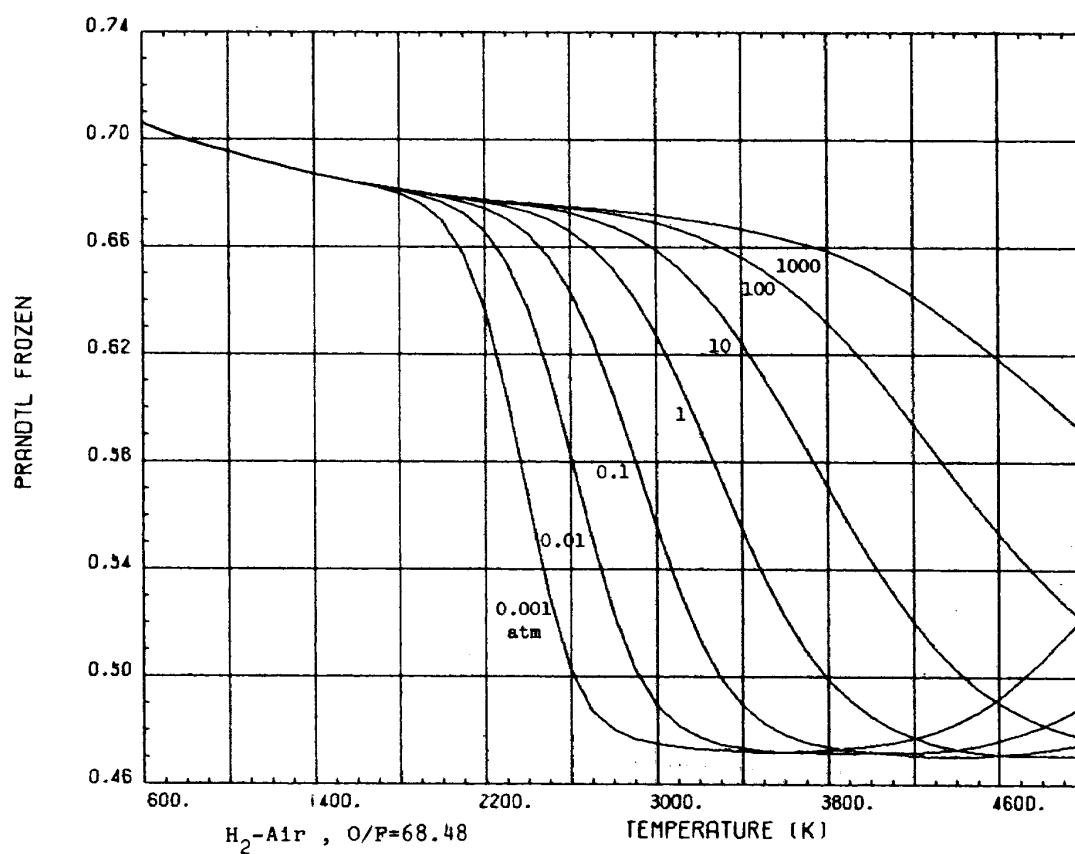


図 B-2-17-4

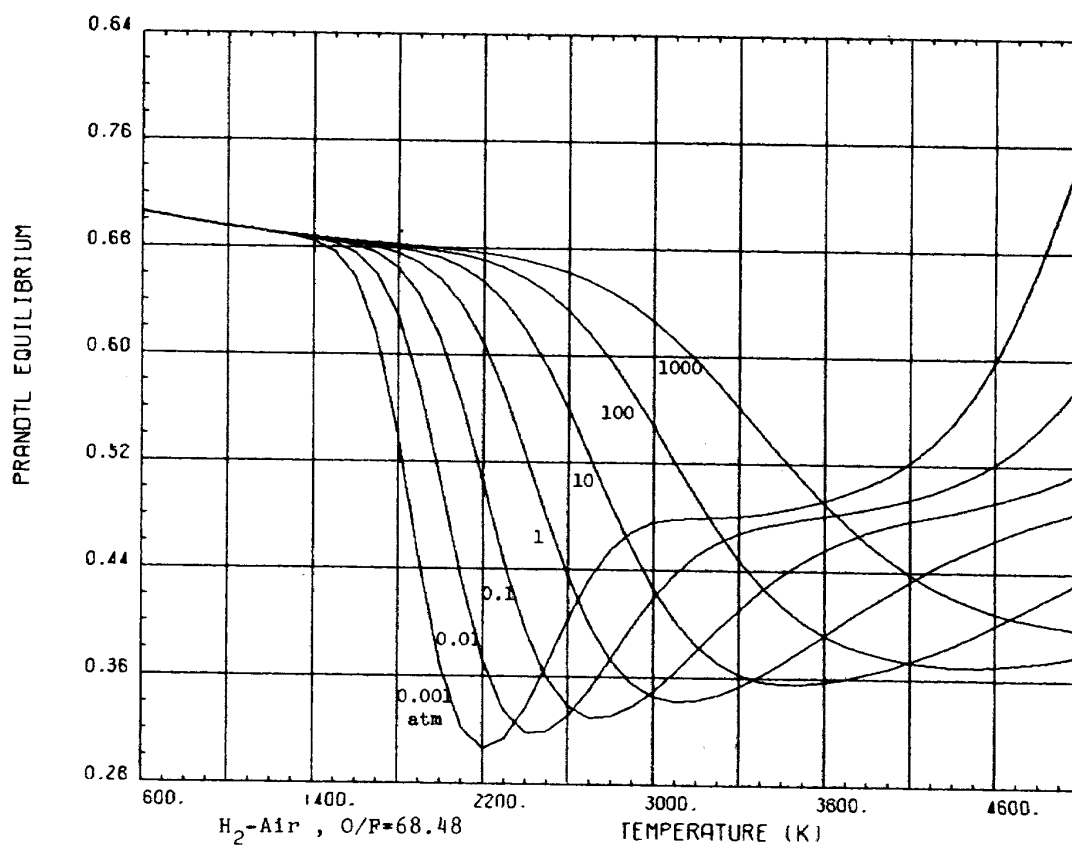
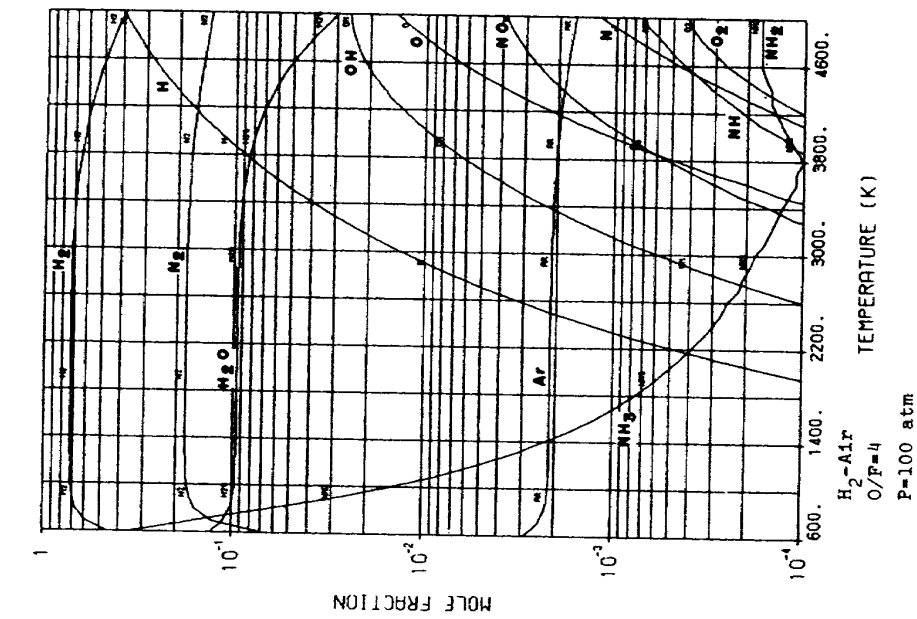
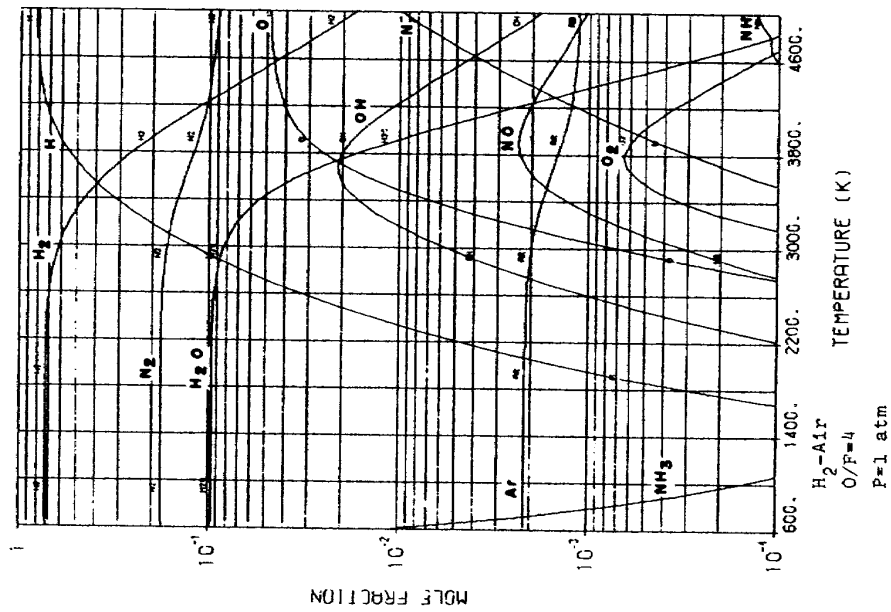


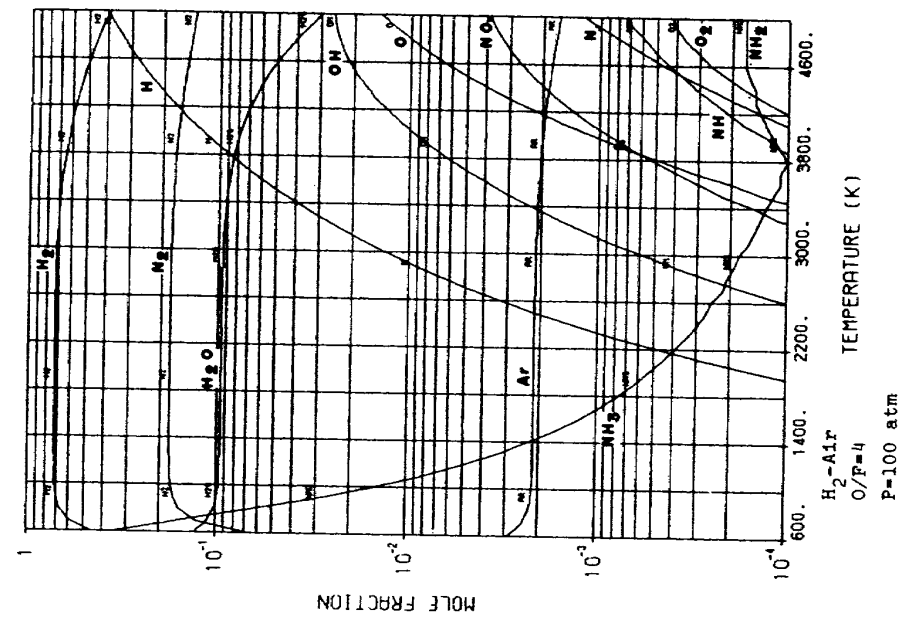
図 B-2-18-4



☒ C-2-1



☒ C-2-2



☒ C-2-3

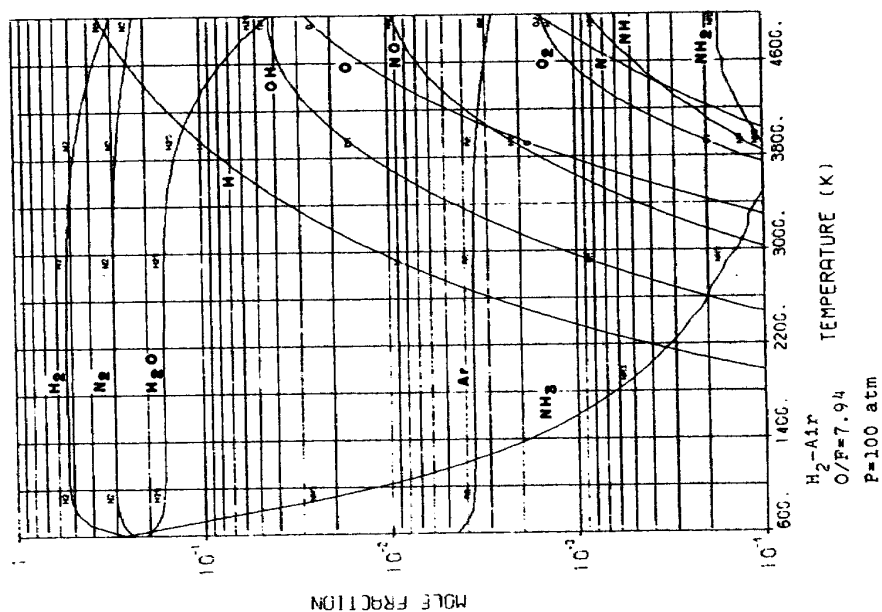


図 C-2-6

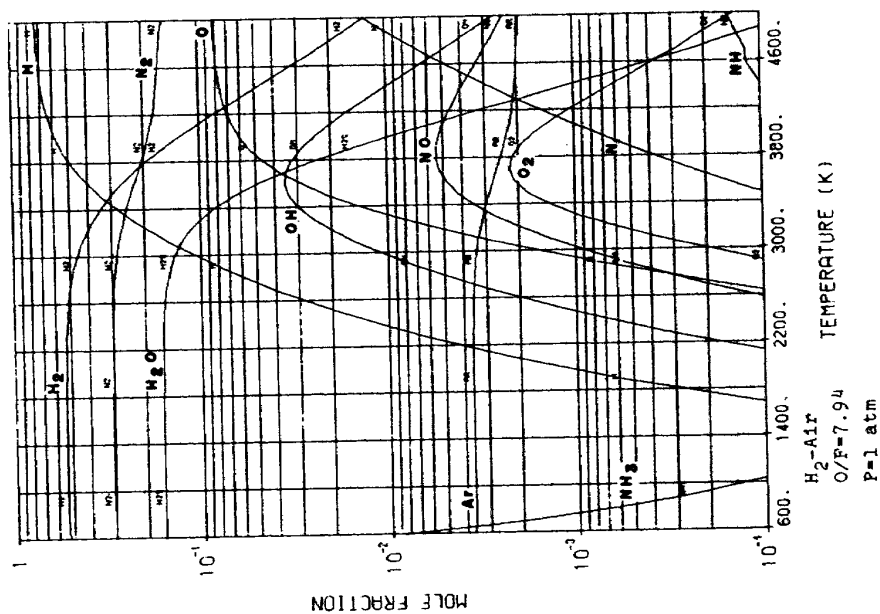


図 C-2-5

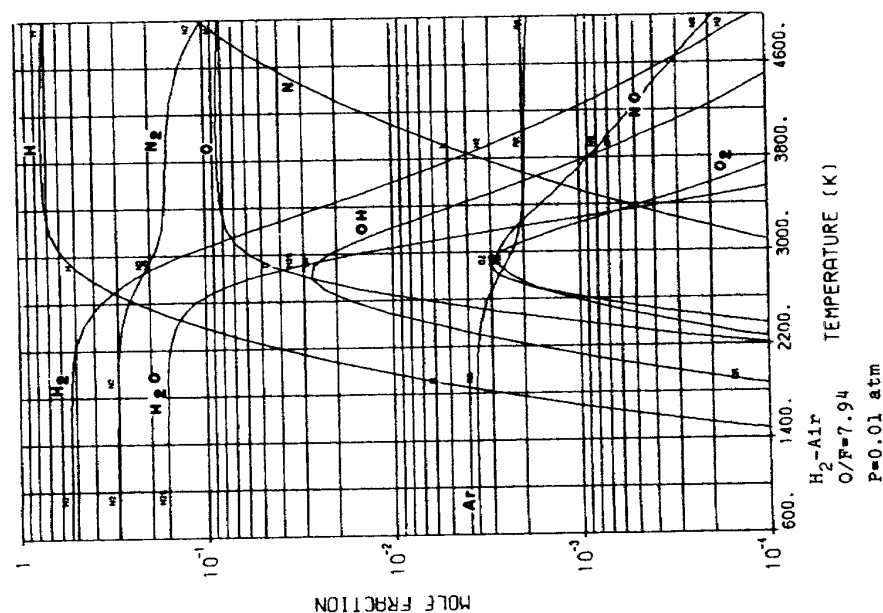
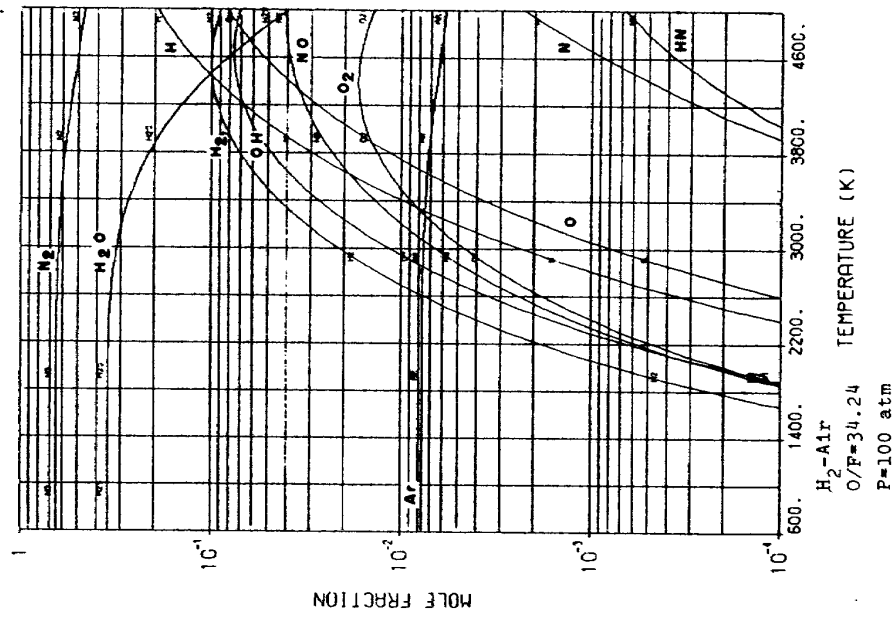
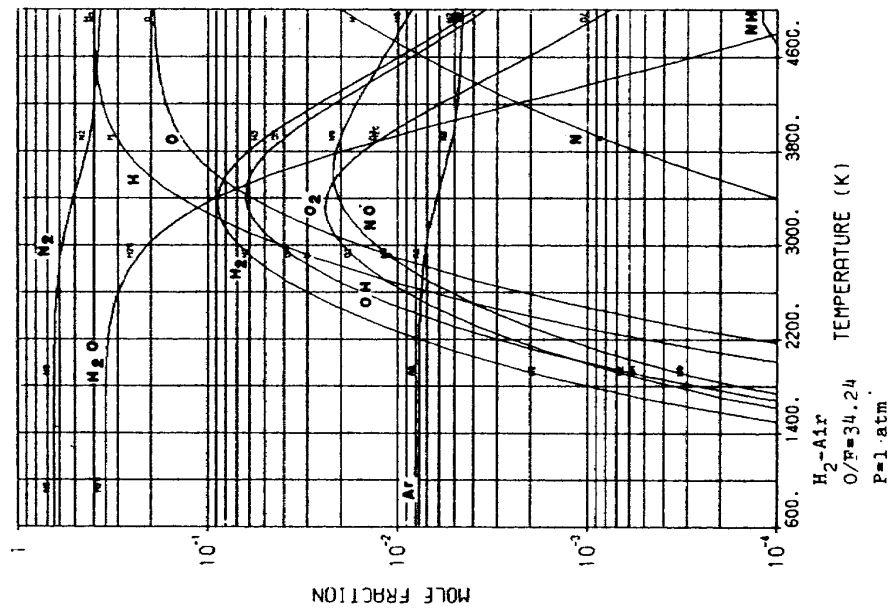


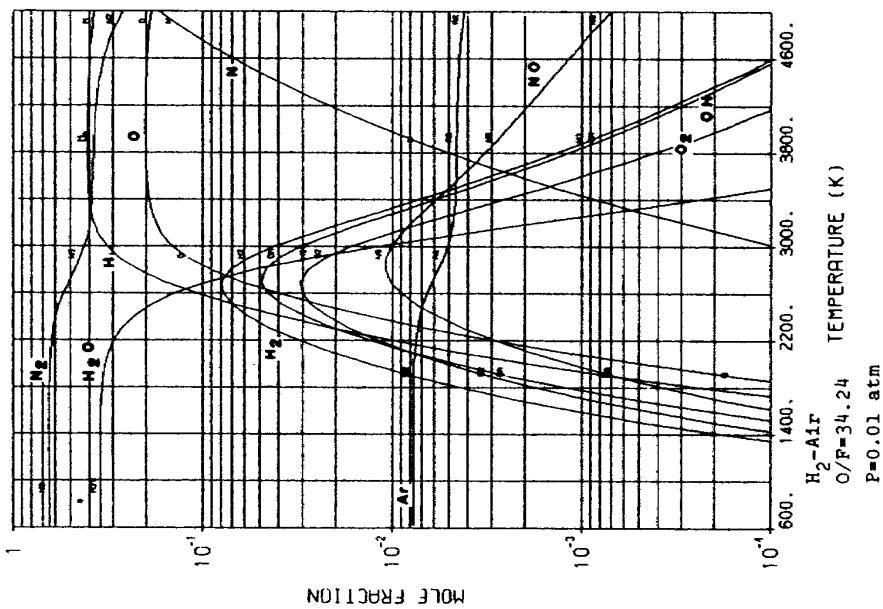
図 C-2-4



☒ C-2-9



☒ C-2-8



☒ C-2-7

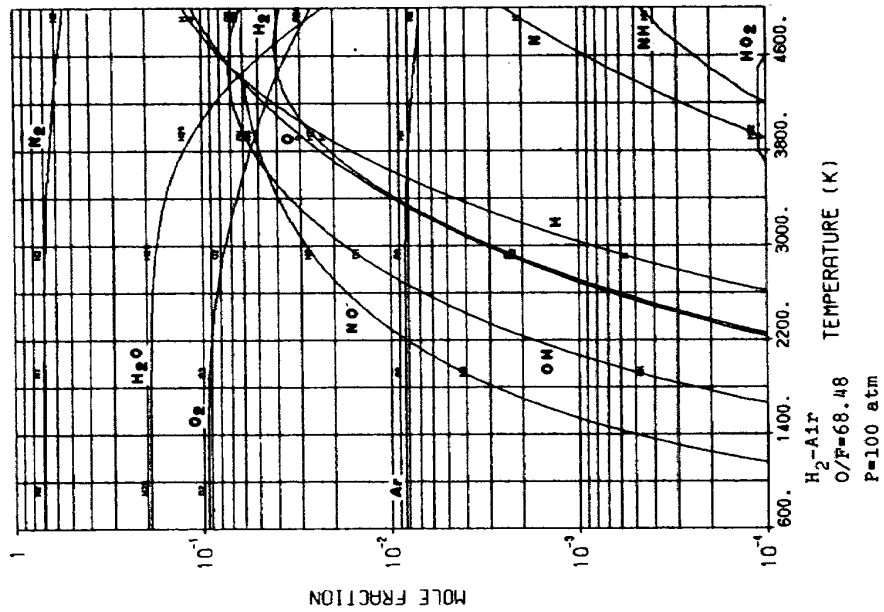


図 C-2-10

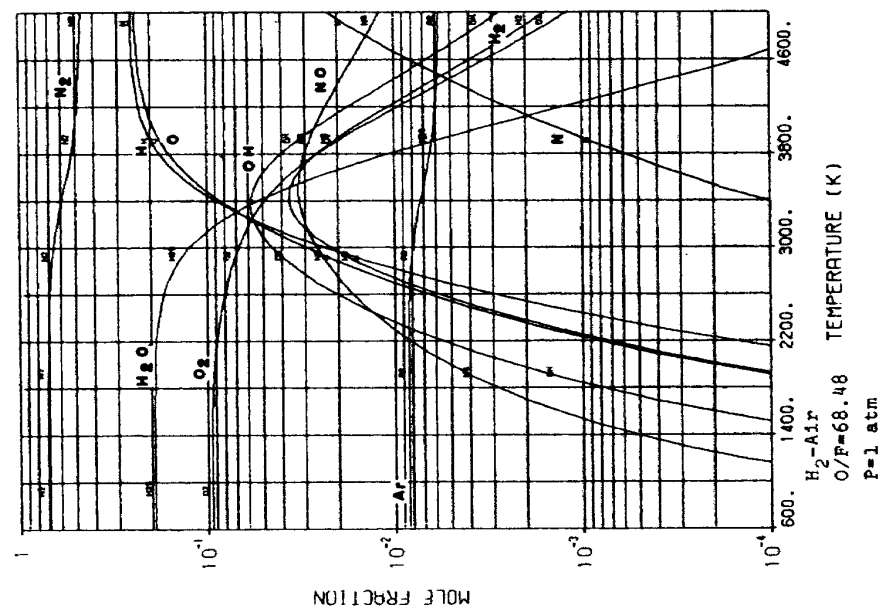


図 C-2-11

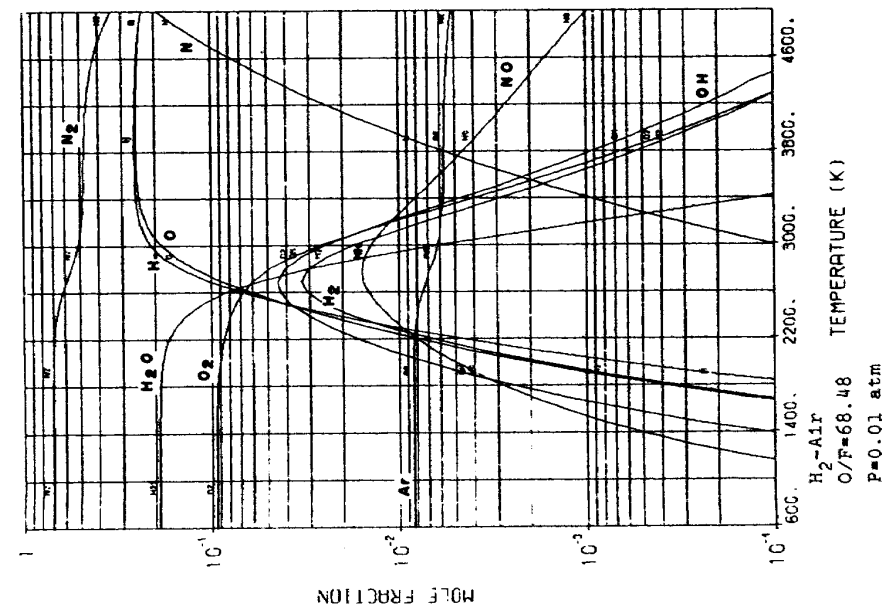


図 C-2-12

### 付 録 3      $\text{H}_2\text{-O}_2\text{-Air}$ 系



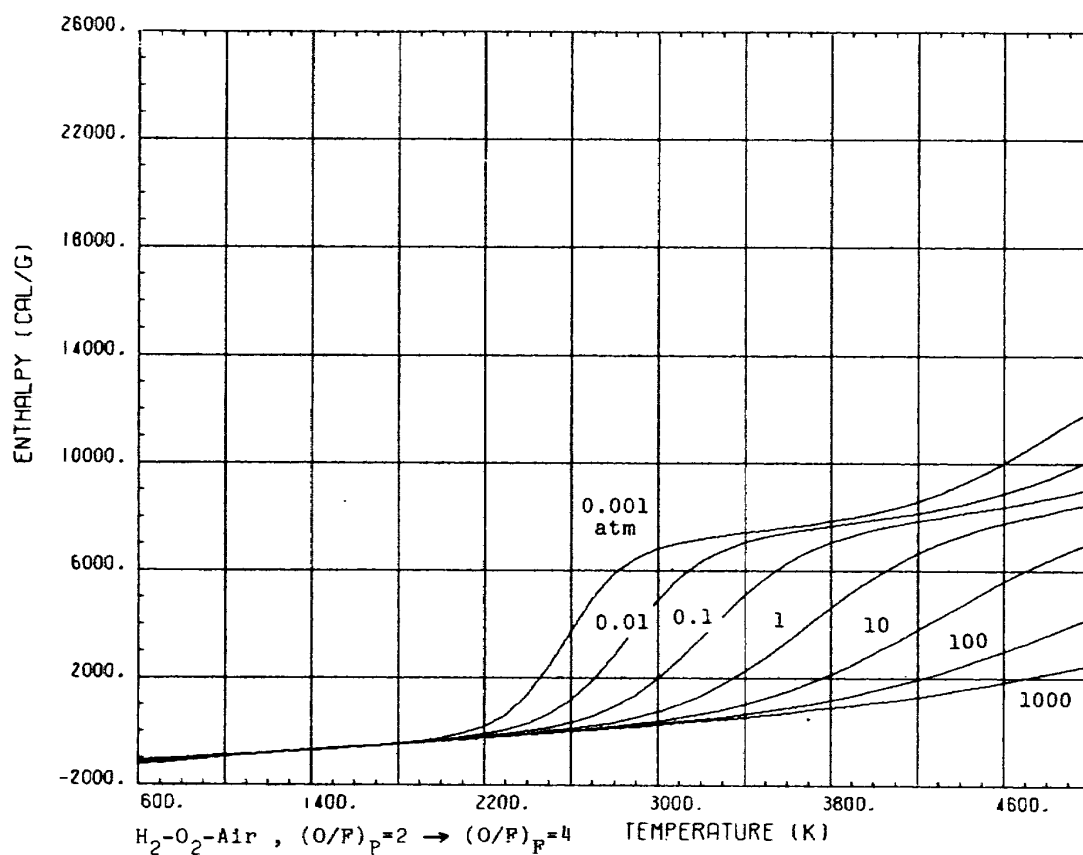


図 B-3-2-1

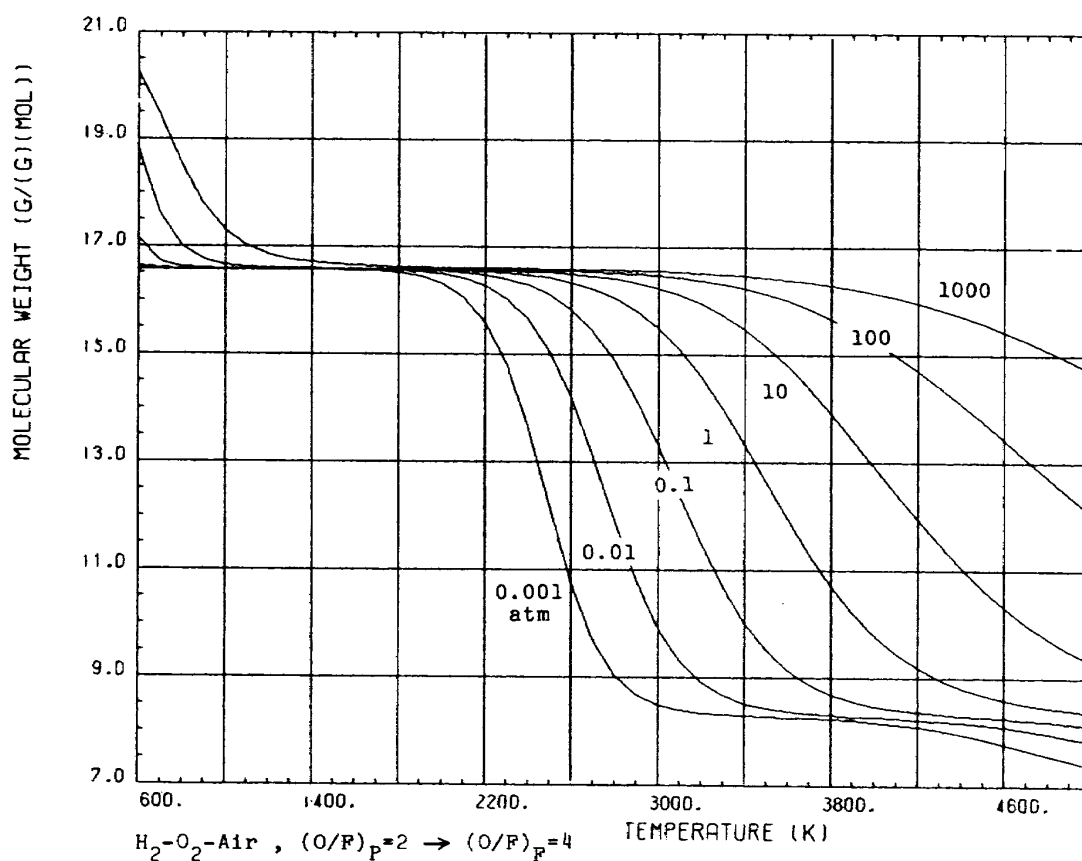


図 B-3-4-1



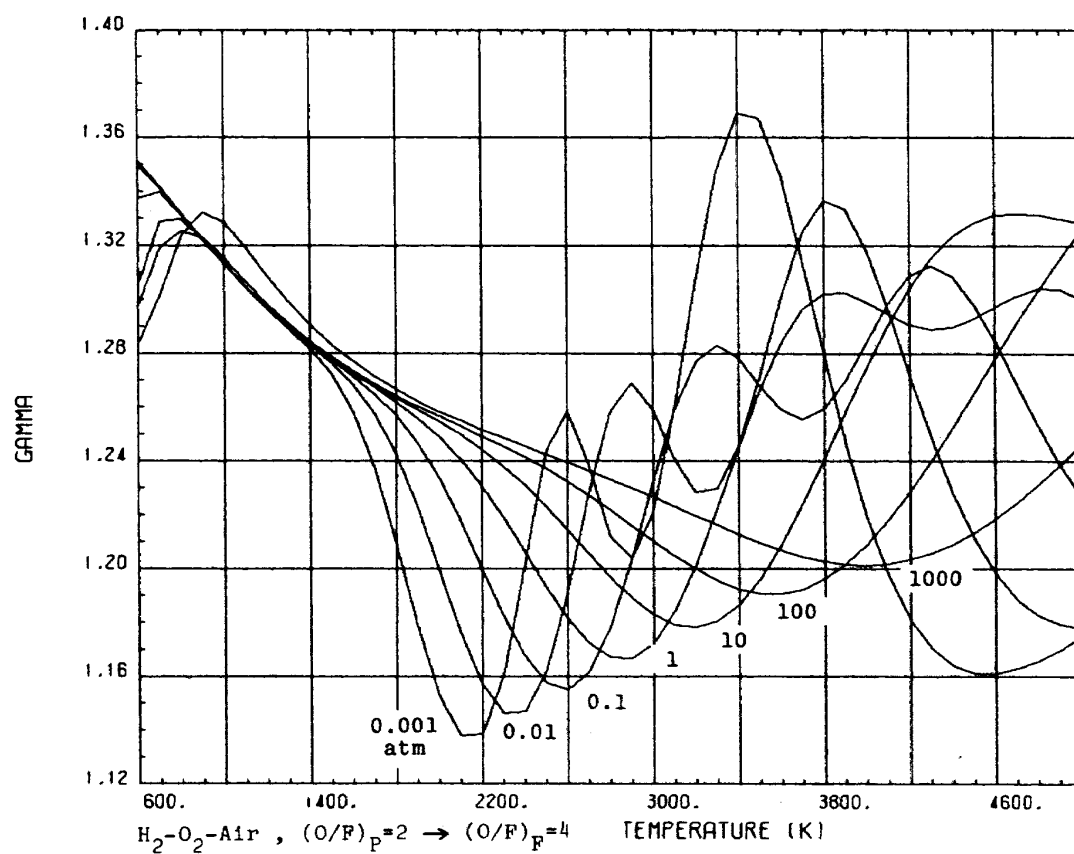


図 B-3-7-1

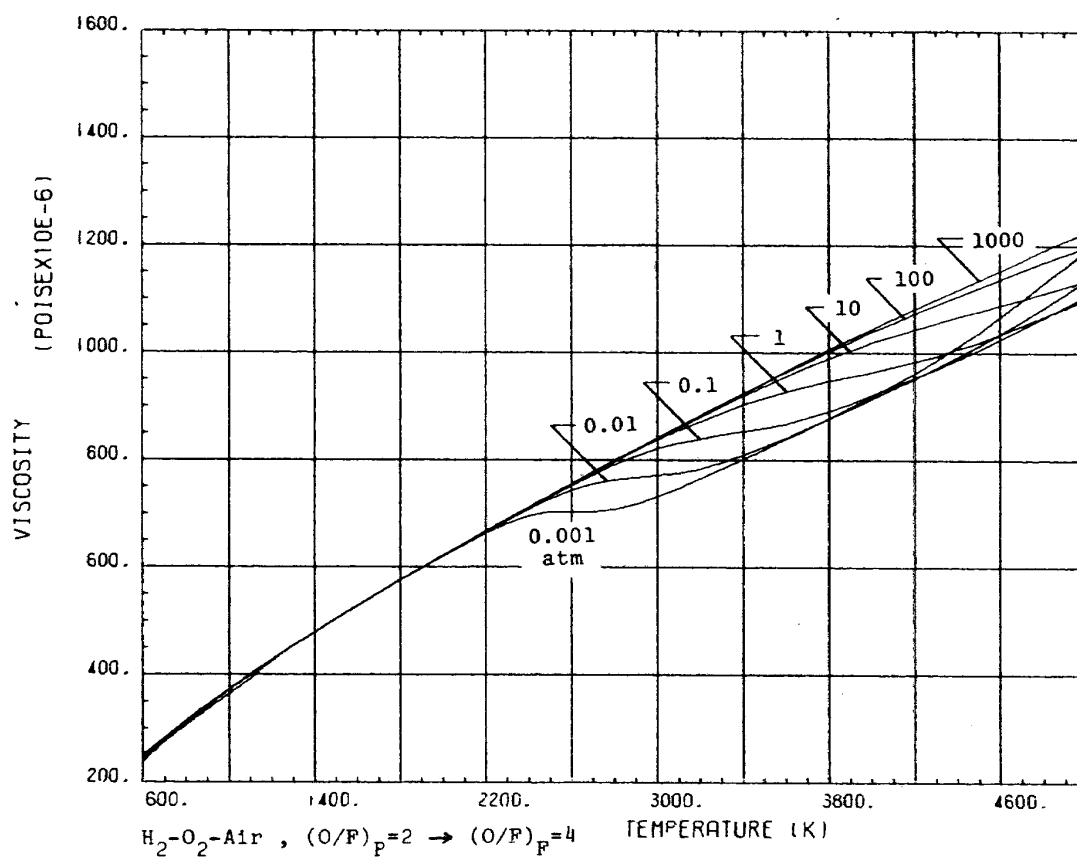


図 B-3-9-1

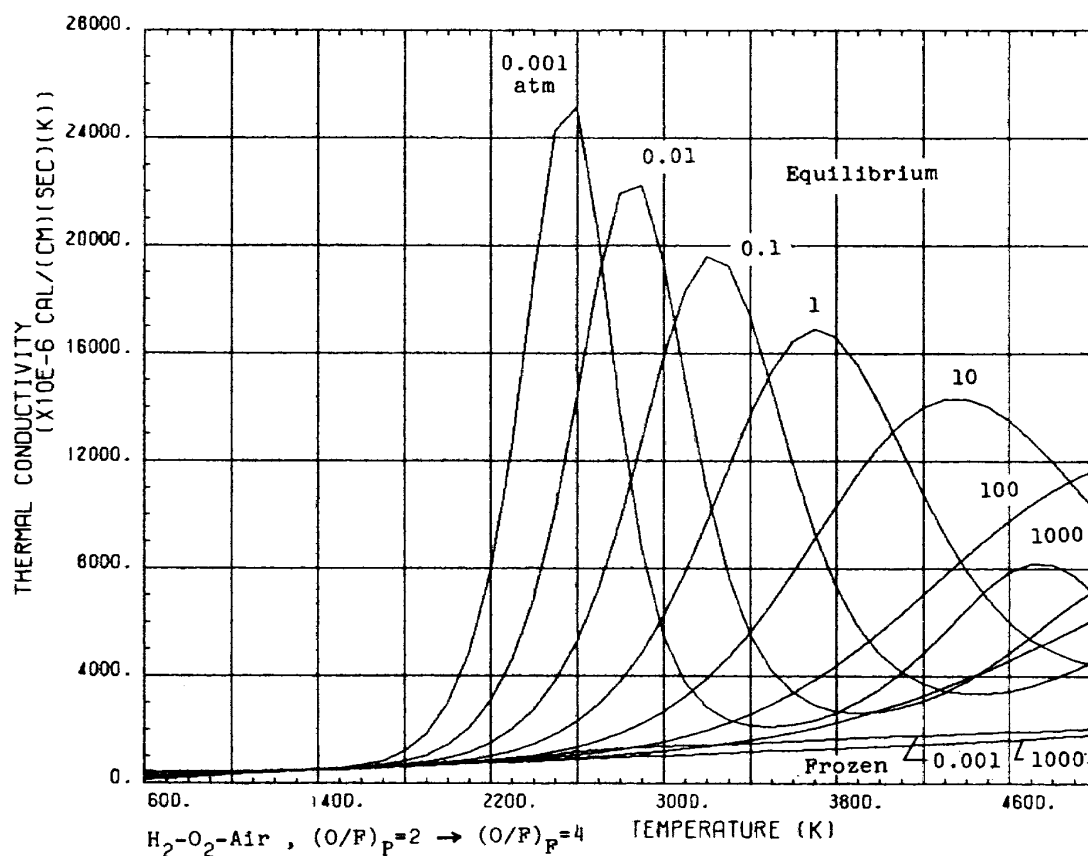


図 B-3-14-1

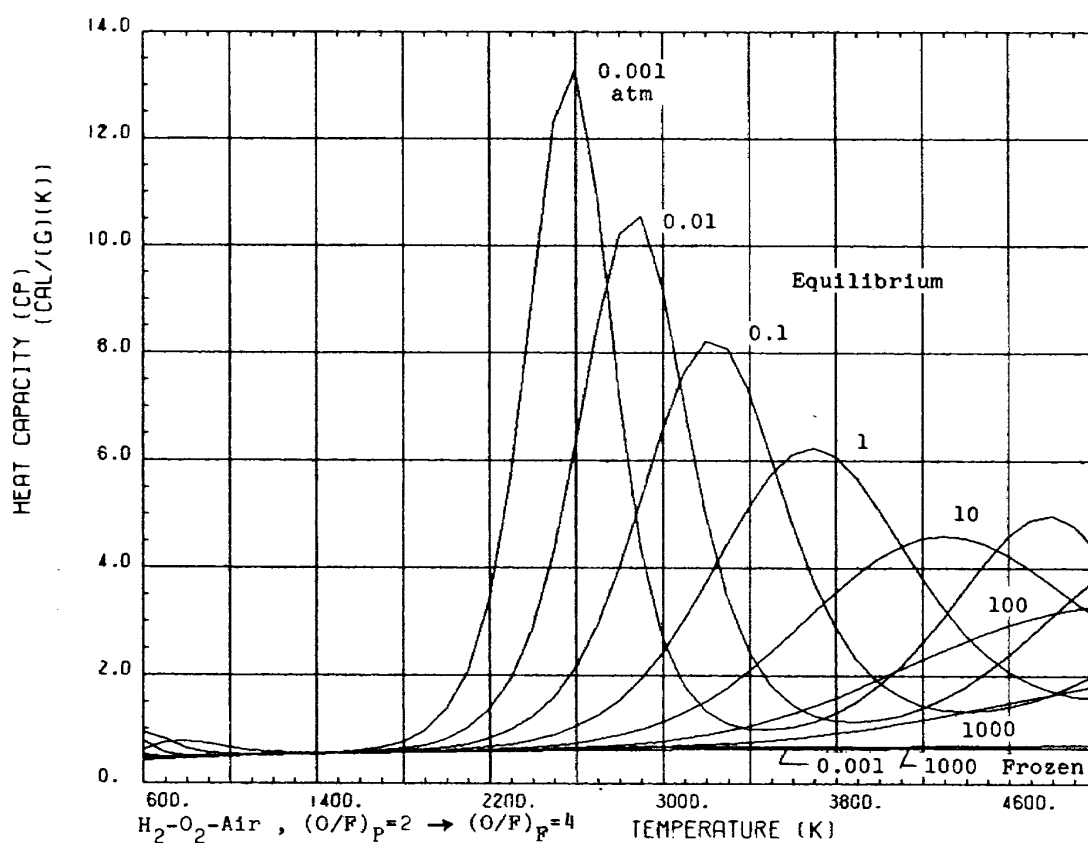


図 B-3-16-1

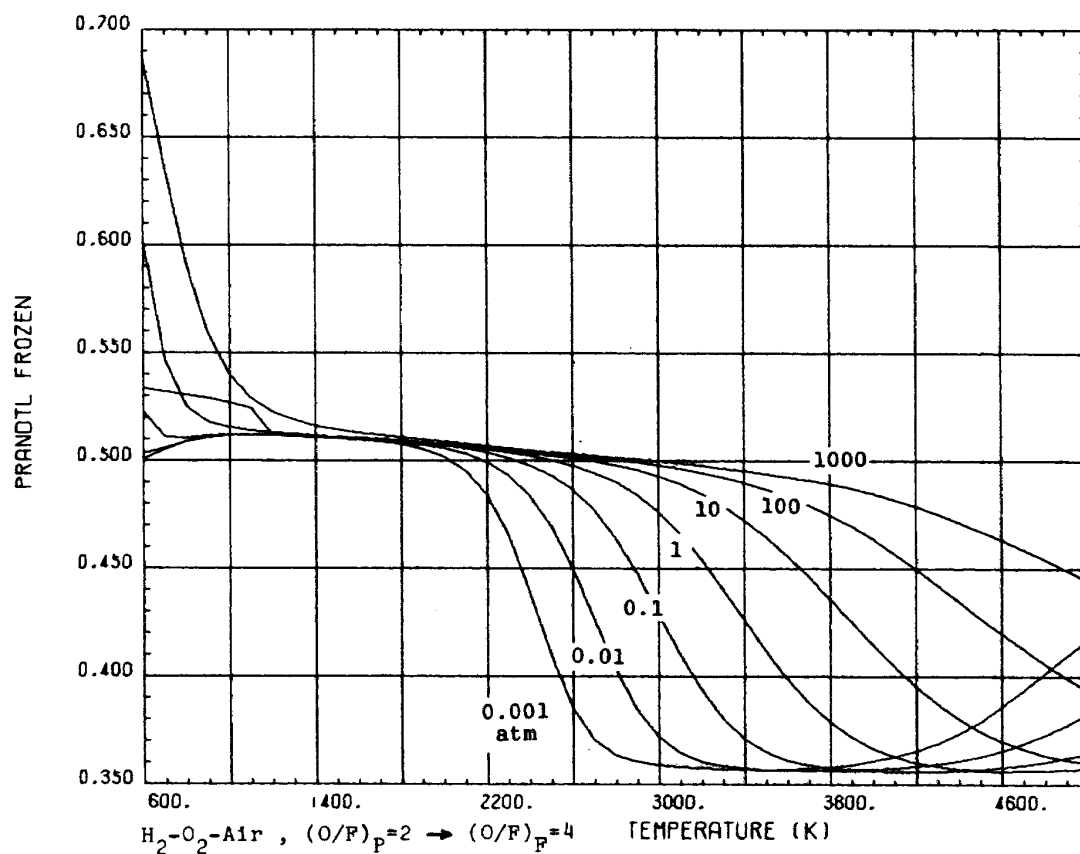


図 B-3-17-1

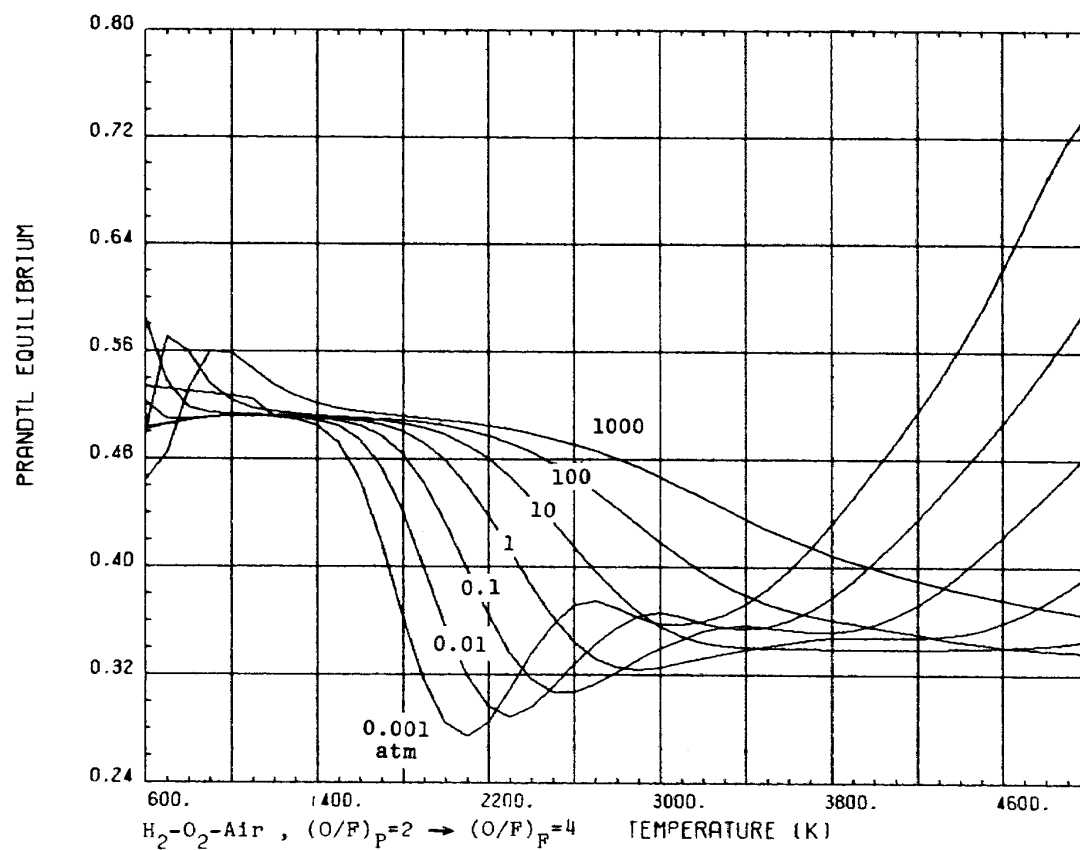


図 B-3-18-1

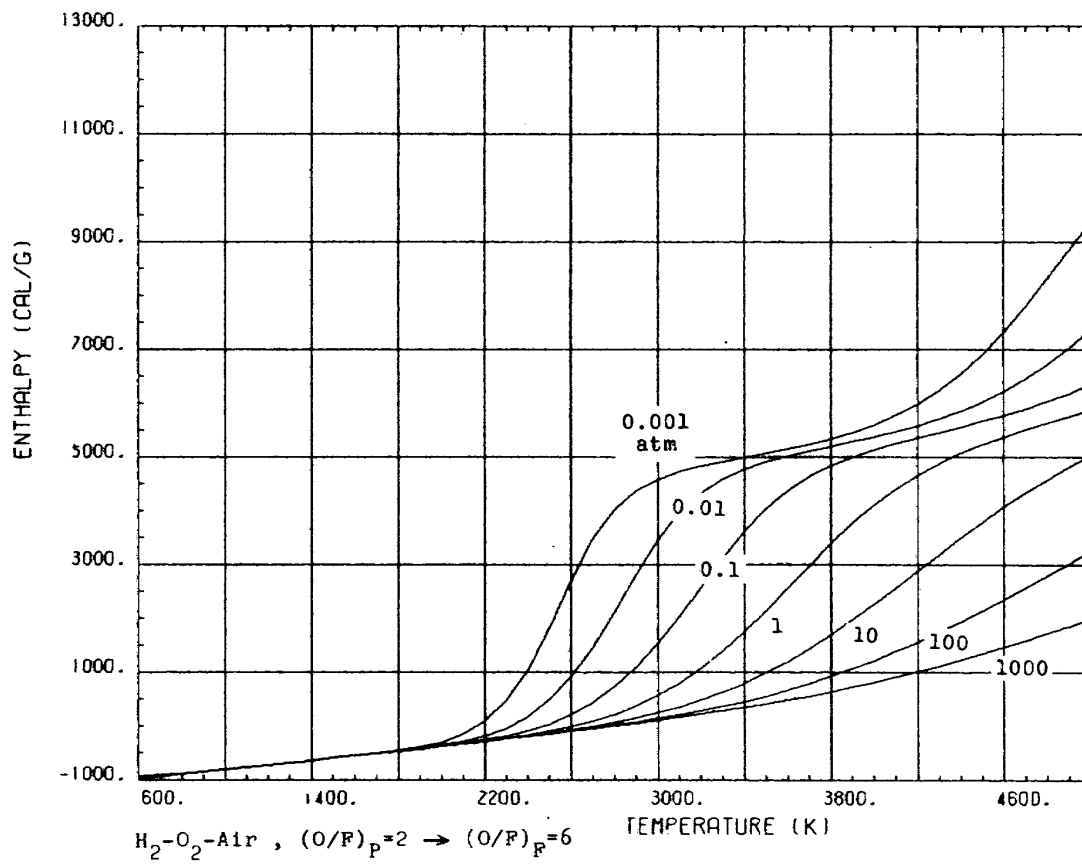


図 B-3-2-2

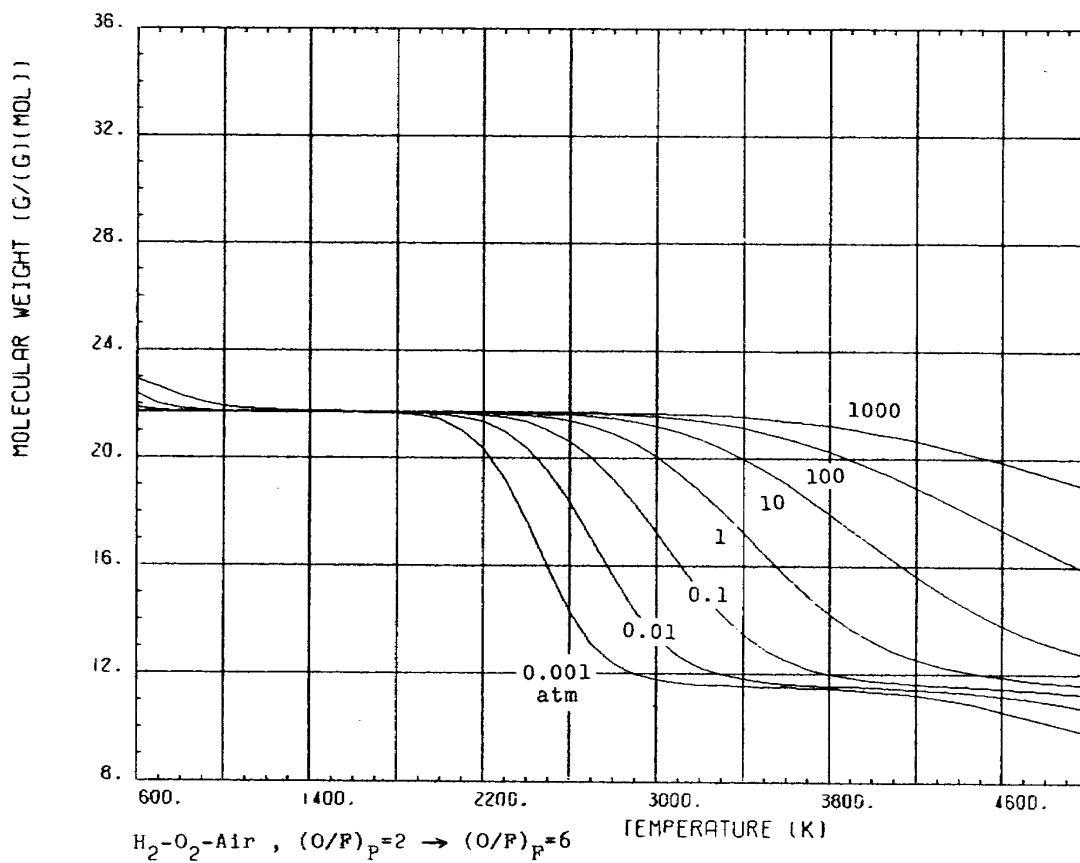


図 B-3-4-2

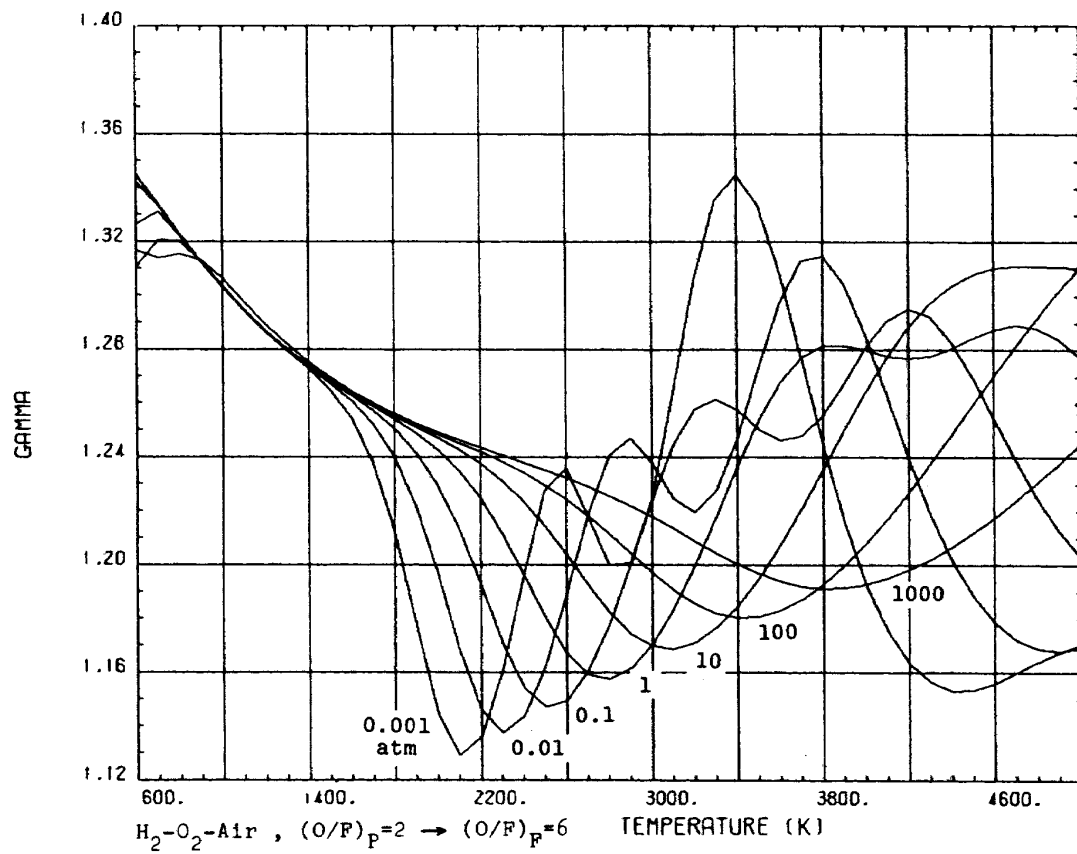


図 B-3-7-2

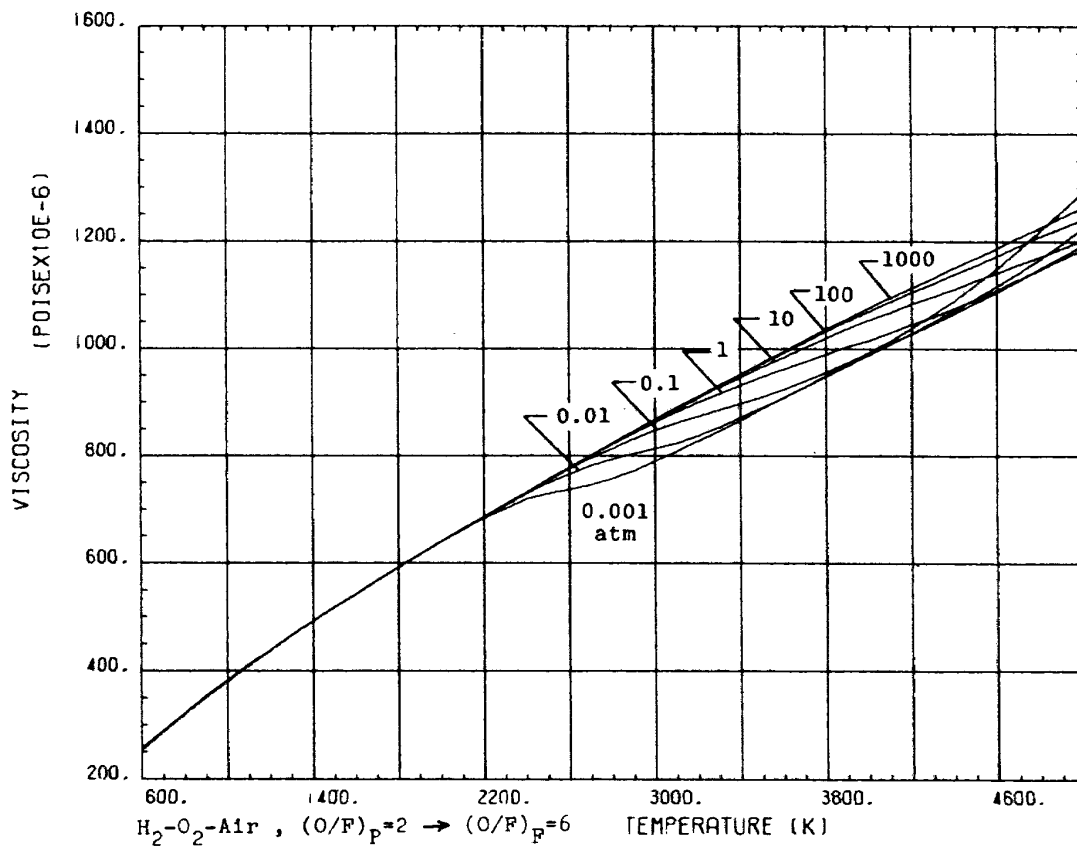


図 B-3-9-2

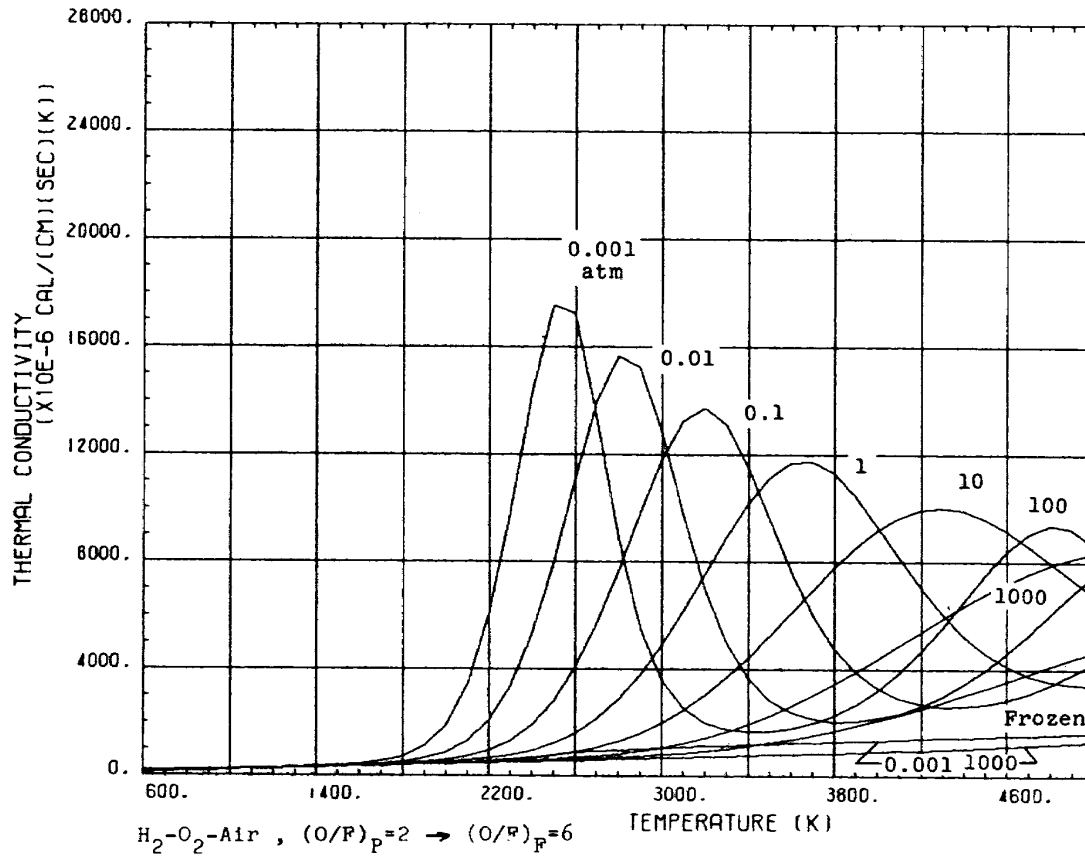


図 B-3-14-2

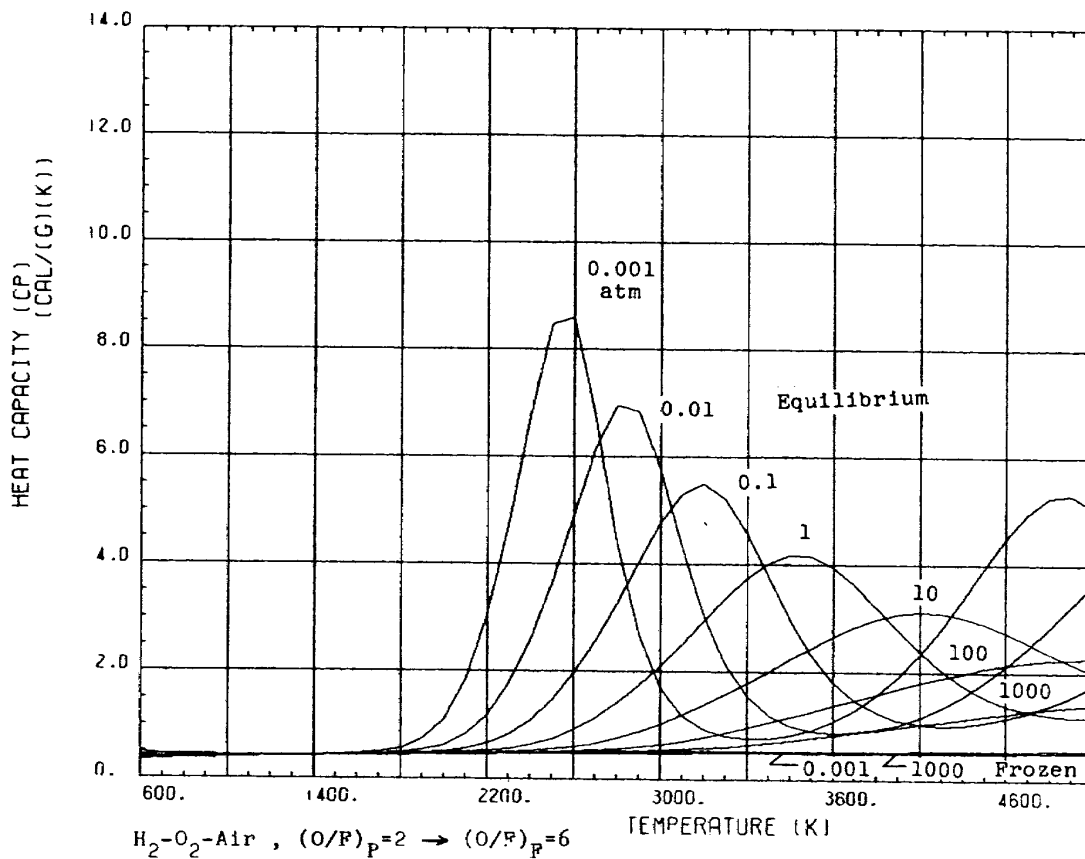


図 B-3-16-2

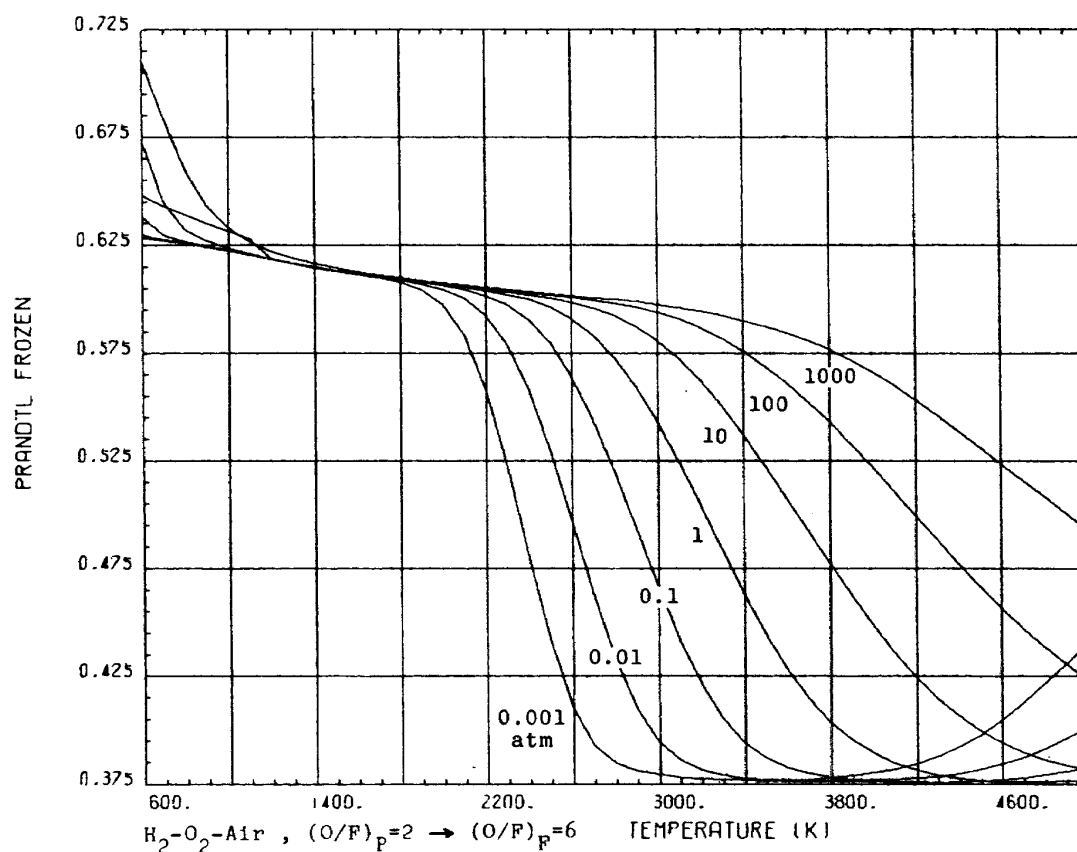


図 B-3-17-2

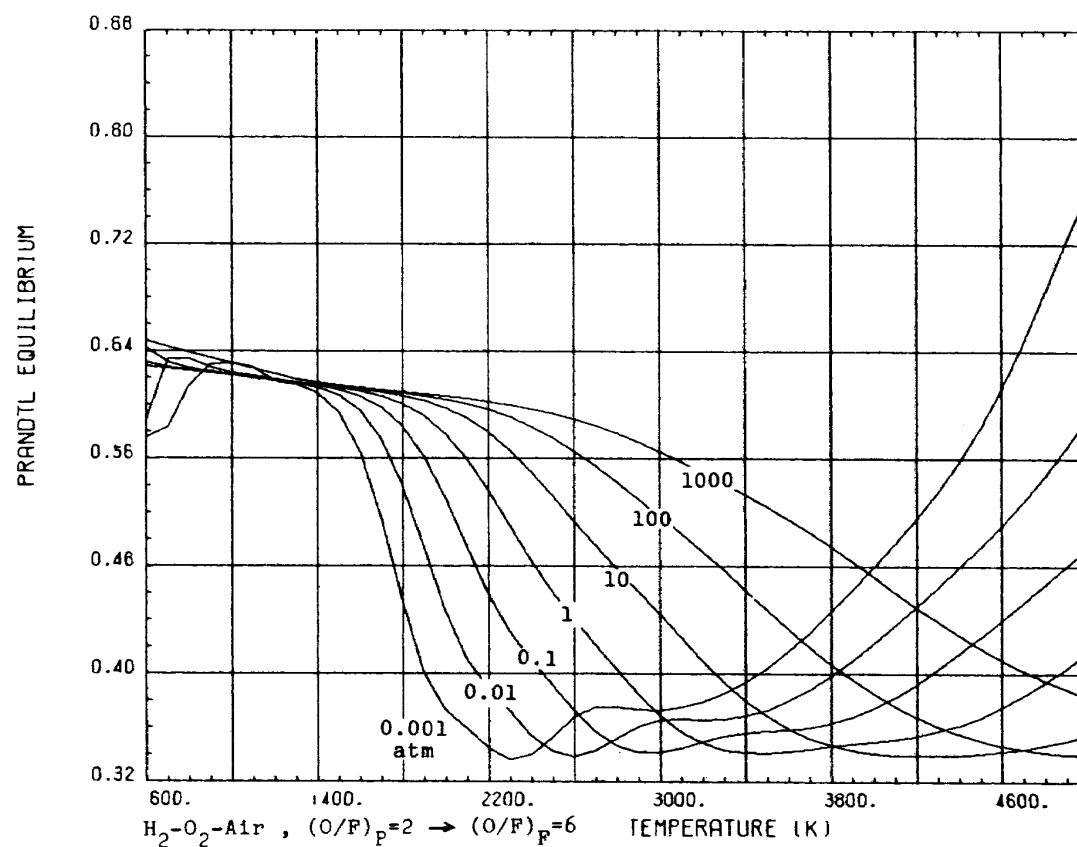


図 B-3-18-2

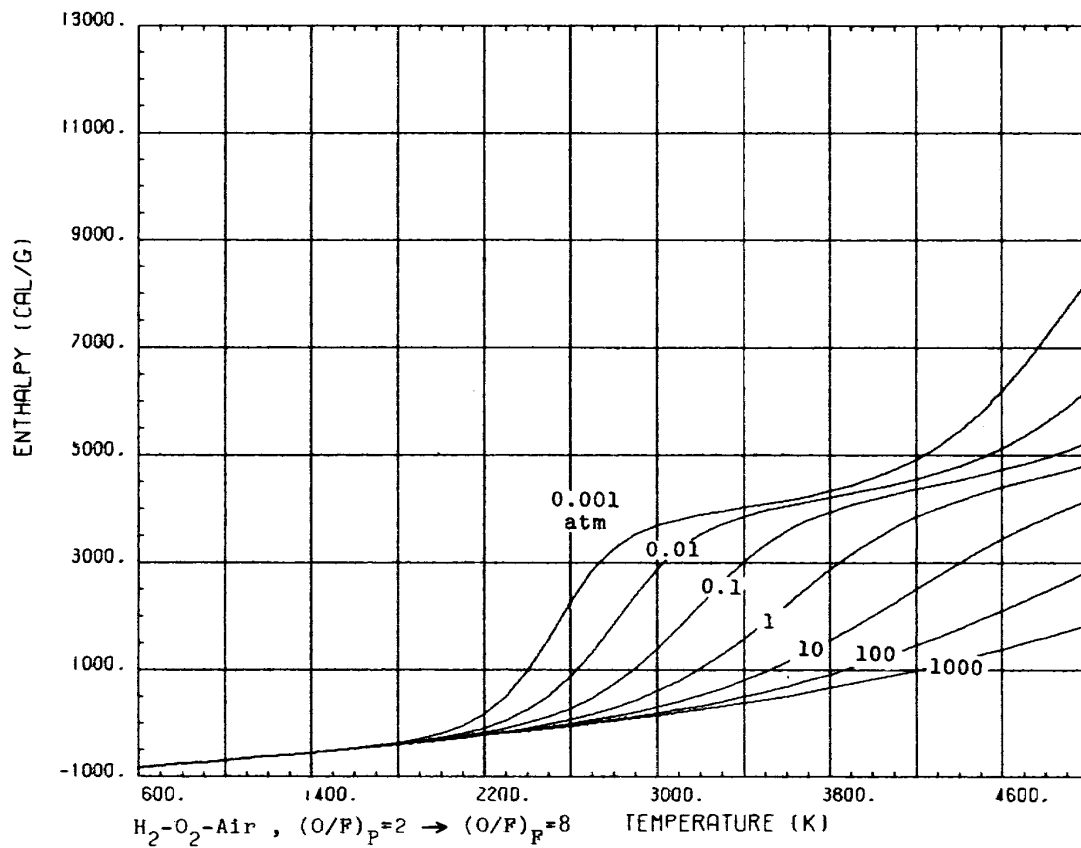


図 B-3-2-3

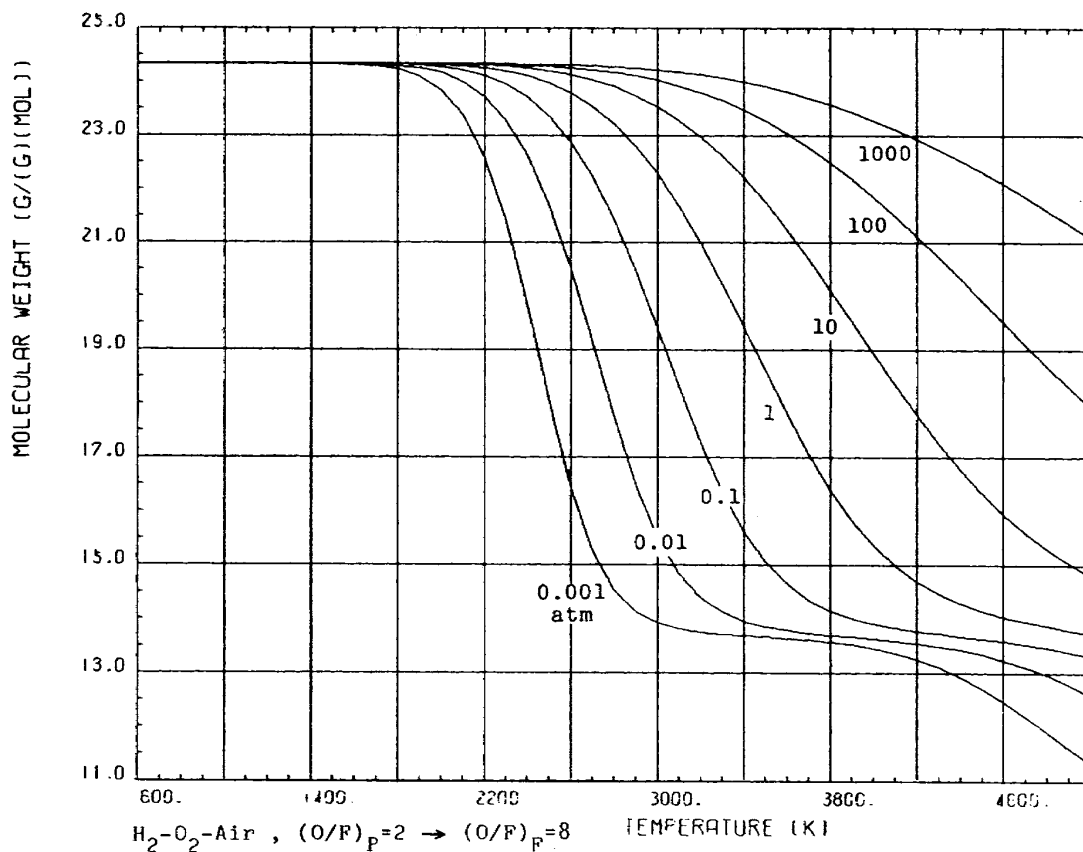


図 B-3-4-3



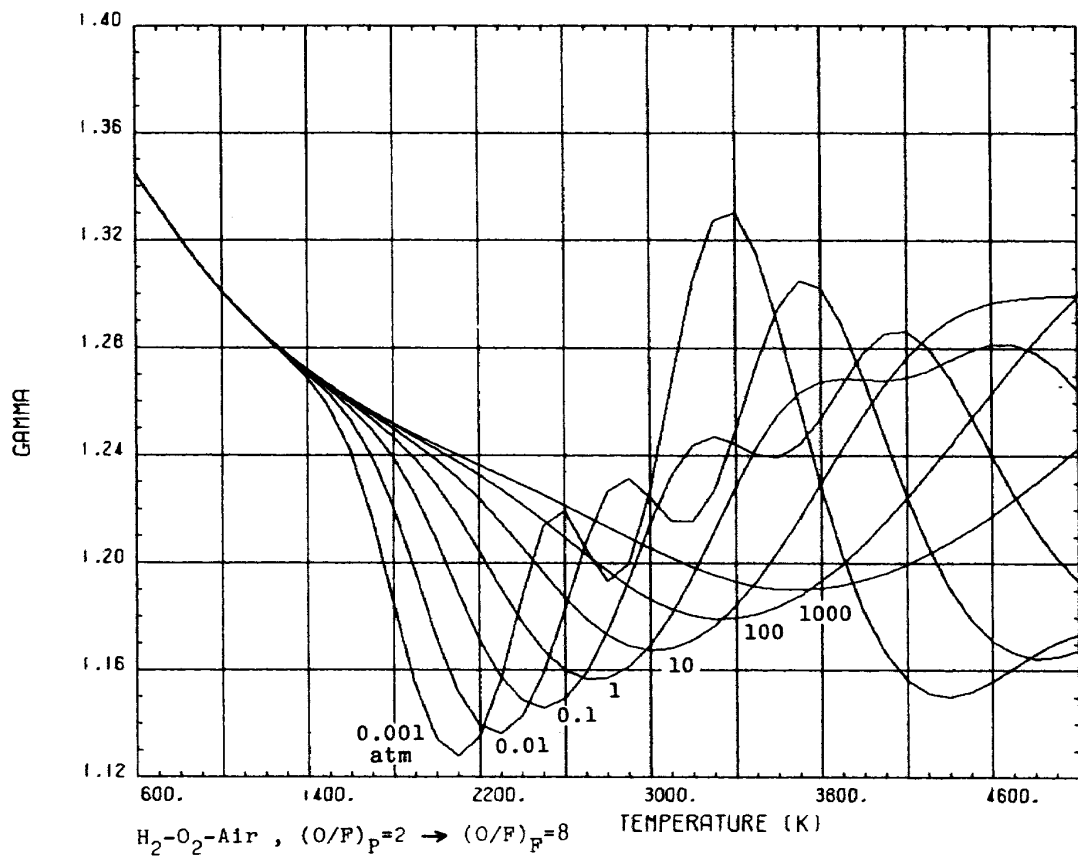


図 B-3-7-3

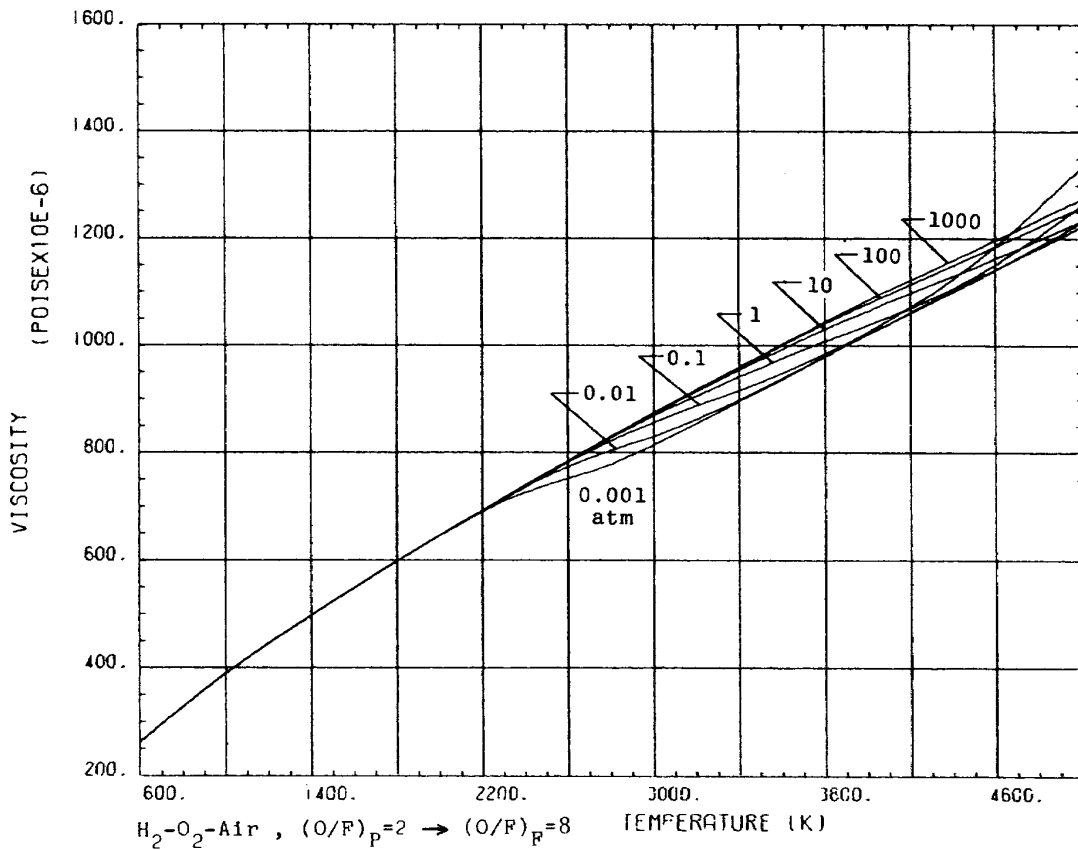


図 B-3-9-3

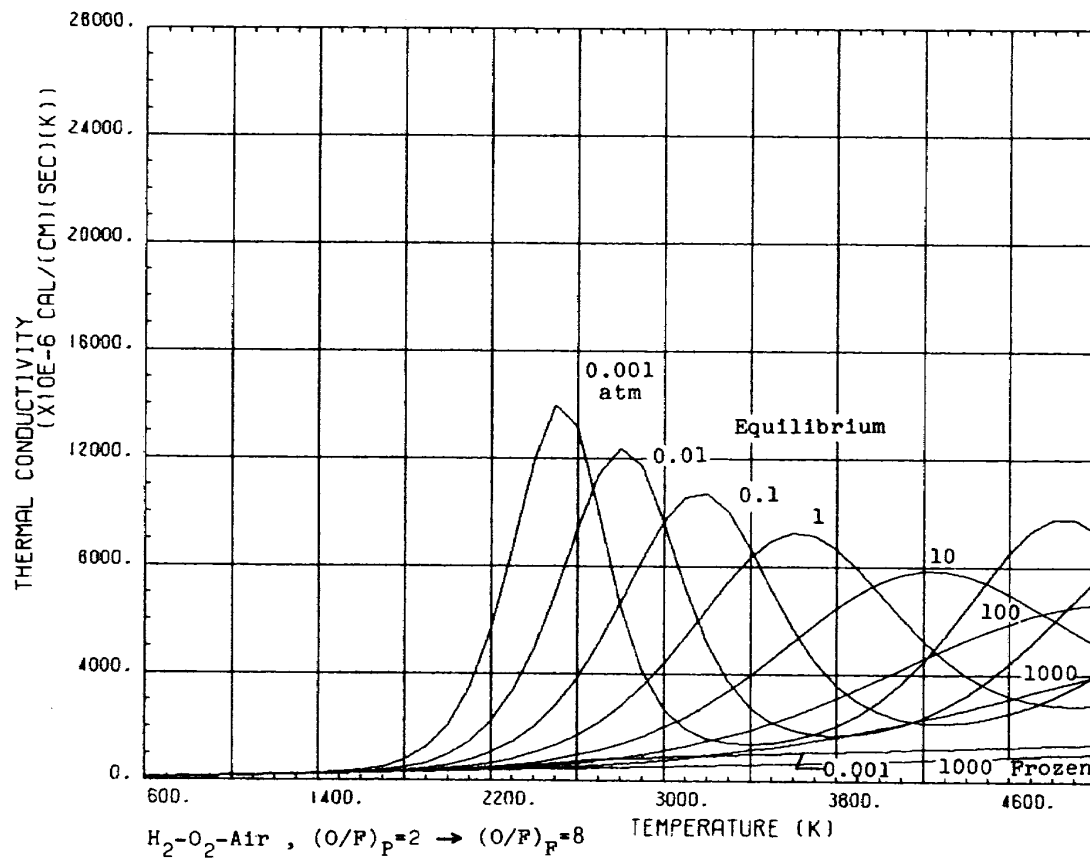


図 B-3-14-3

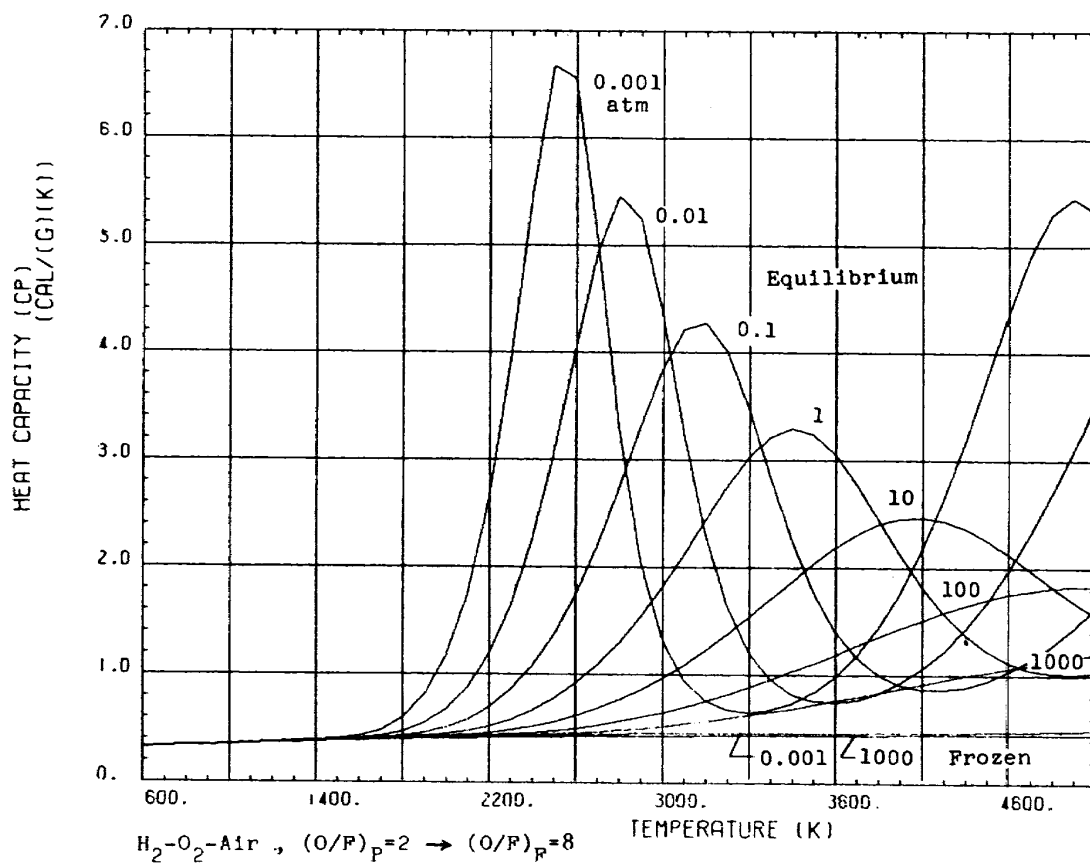


図 B-3-16-3

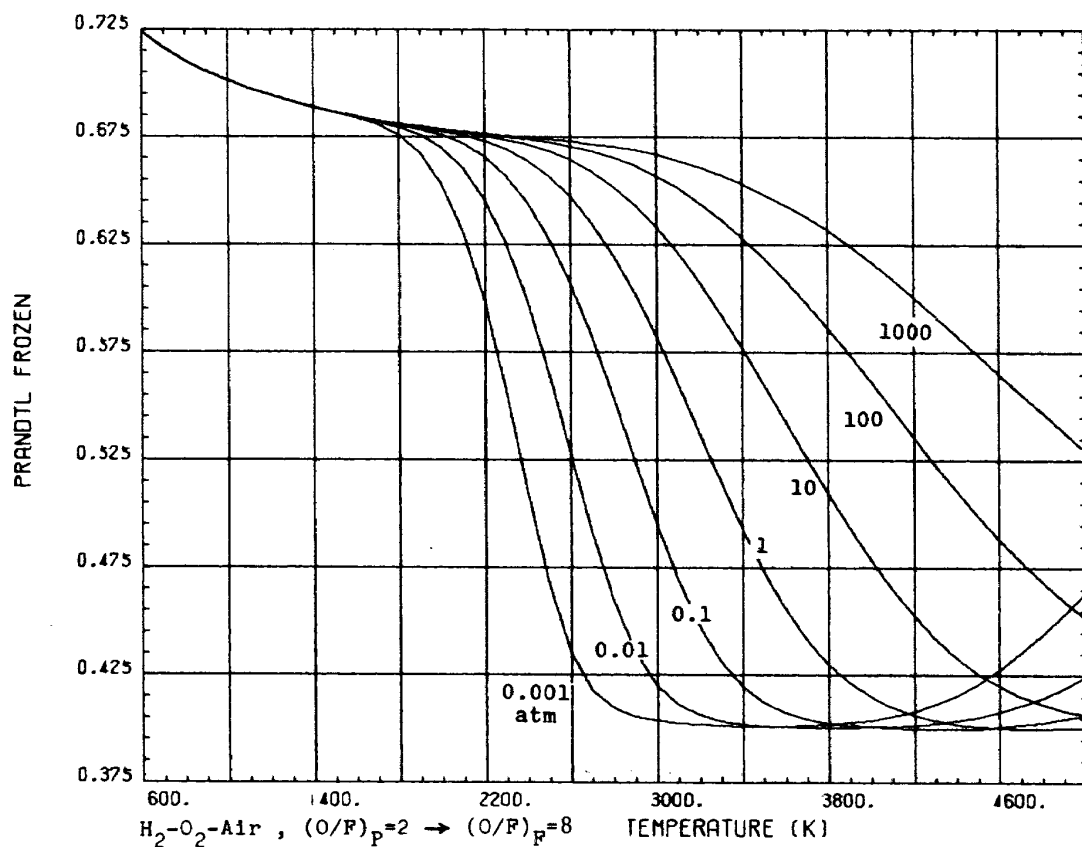


図 B-3-17-3

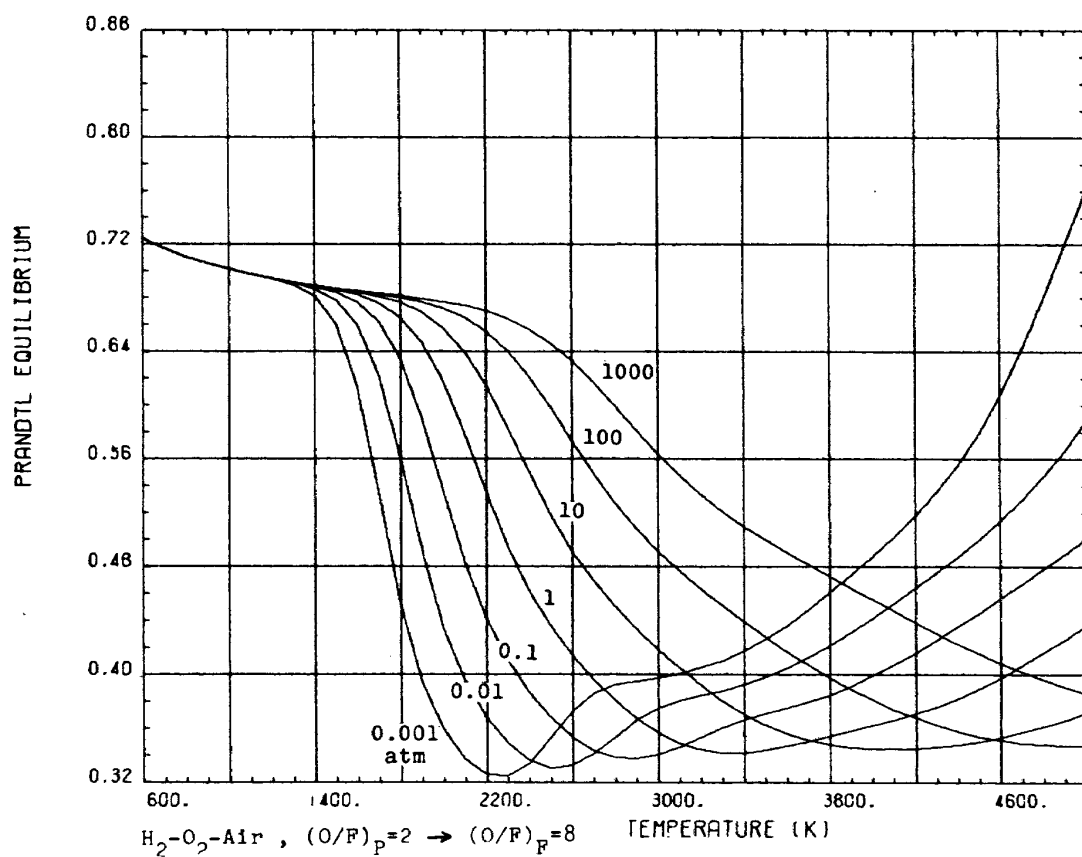


図 B-3-18-3

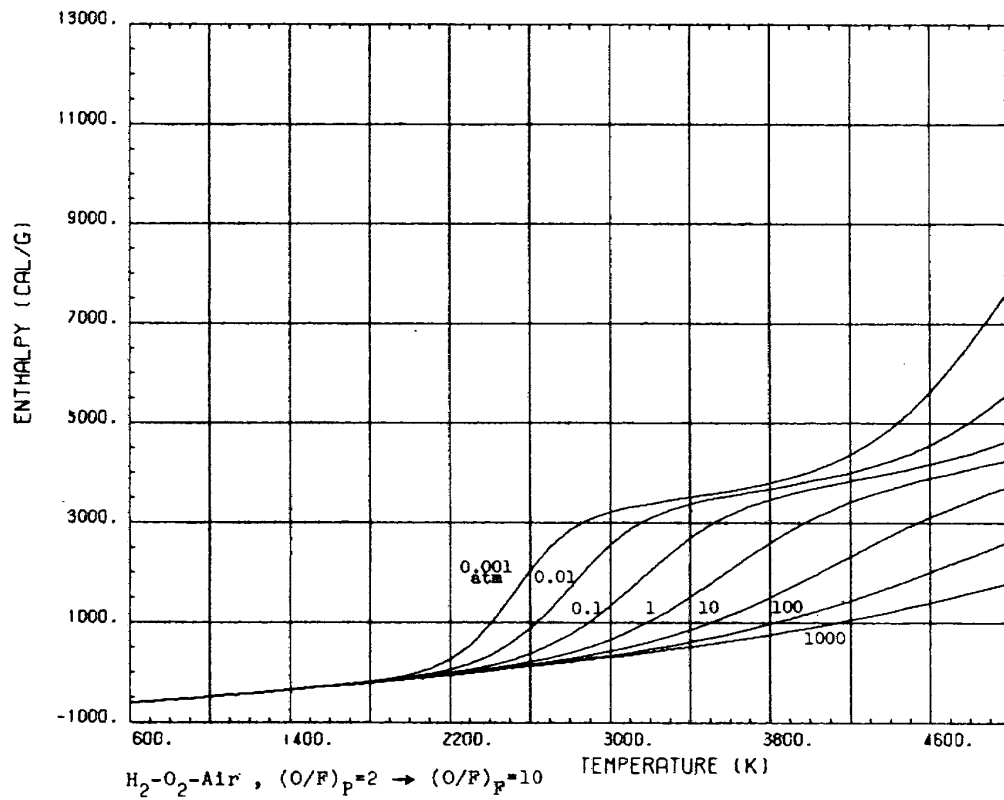


図 B-3-2-4

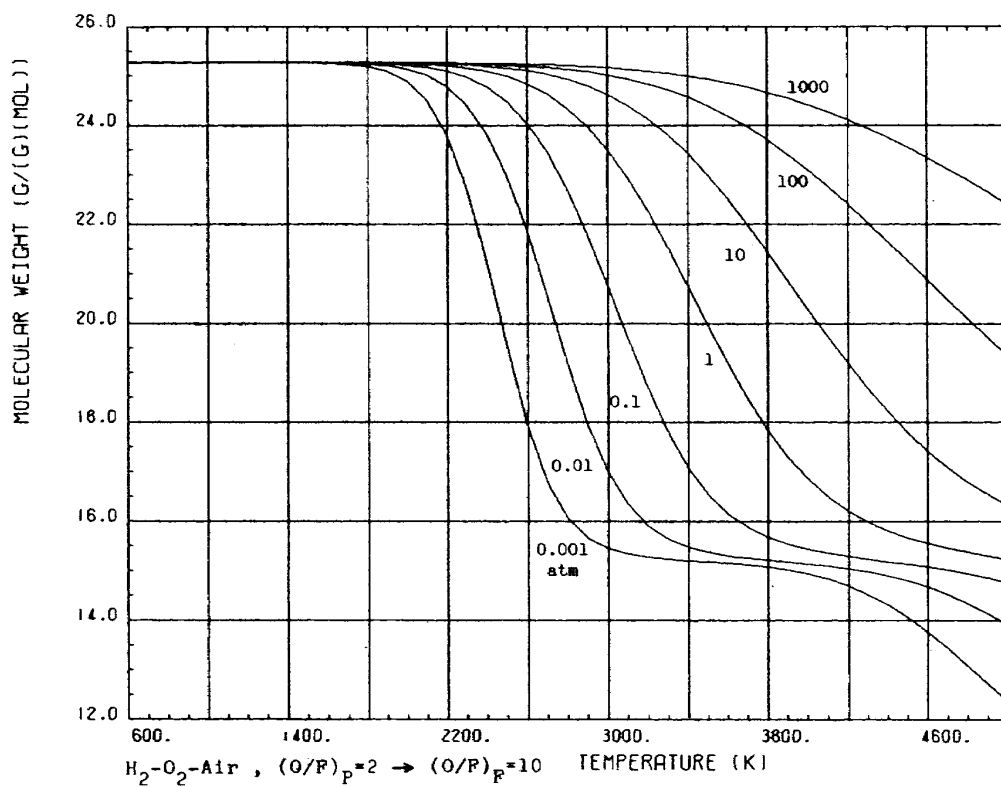


図 B-3-4-4

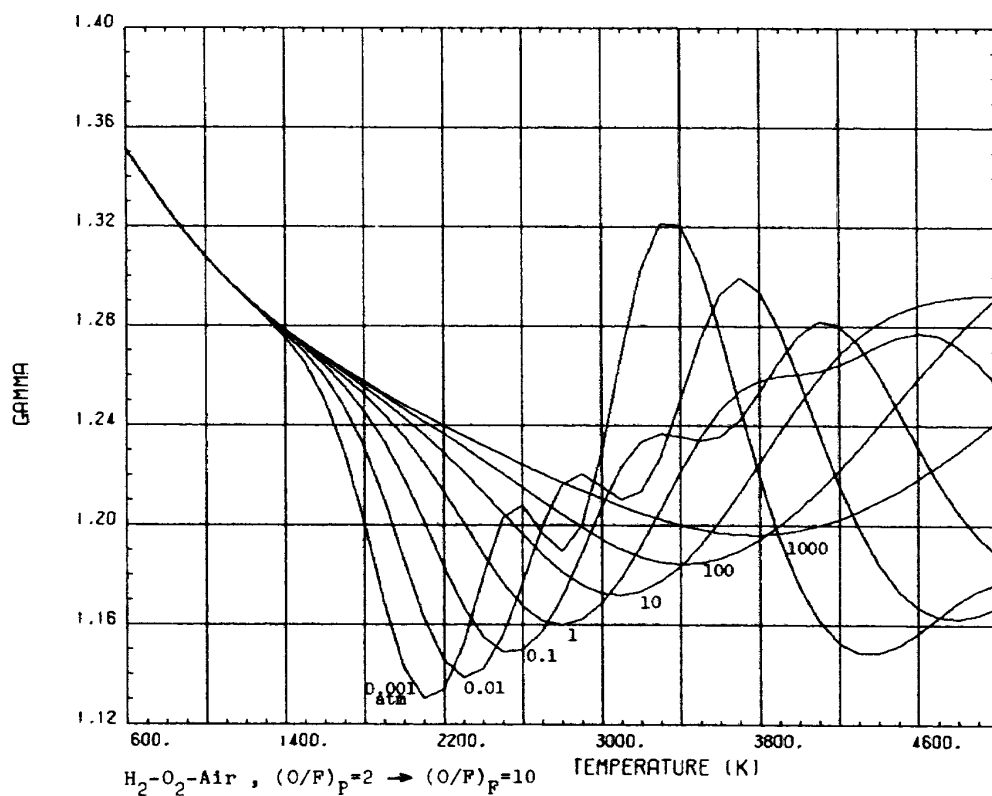


図 B-3-7-4

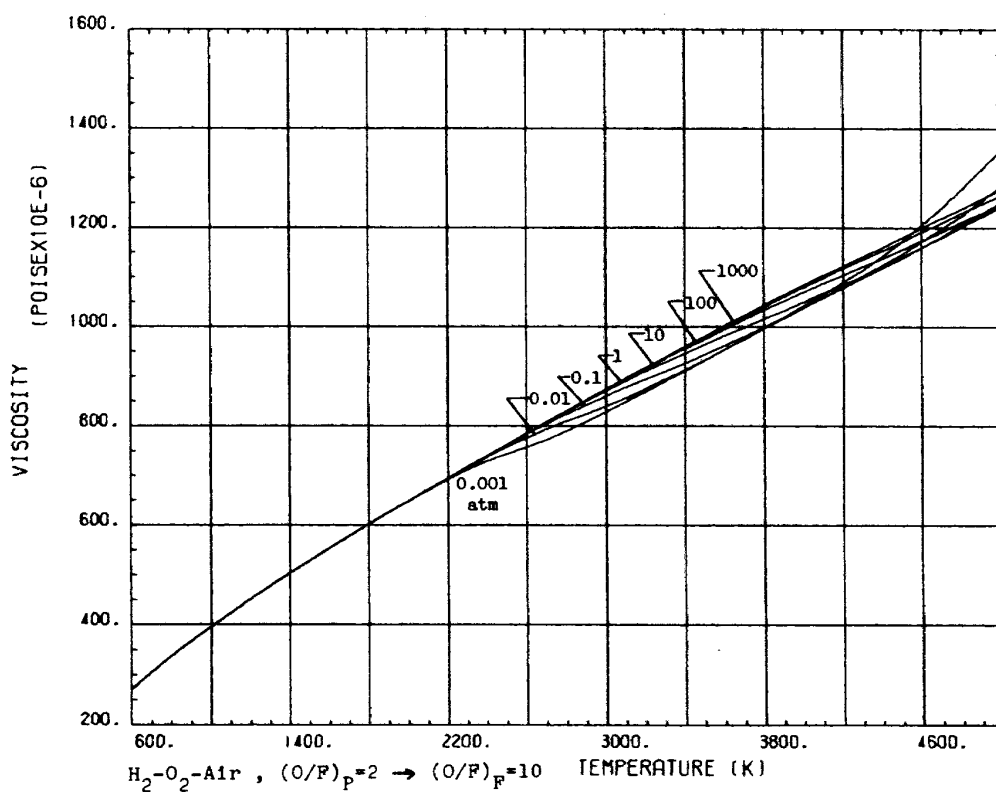


図 B-3-9-4

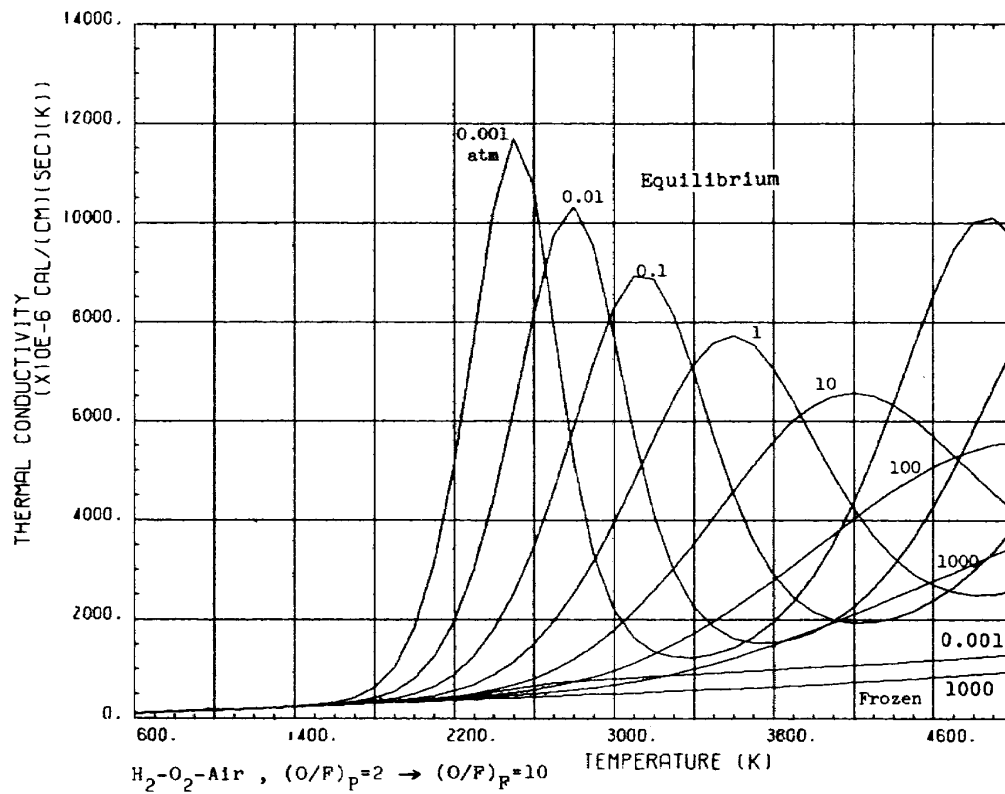


図 B-3-14-4

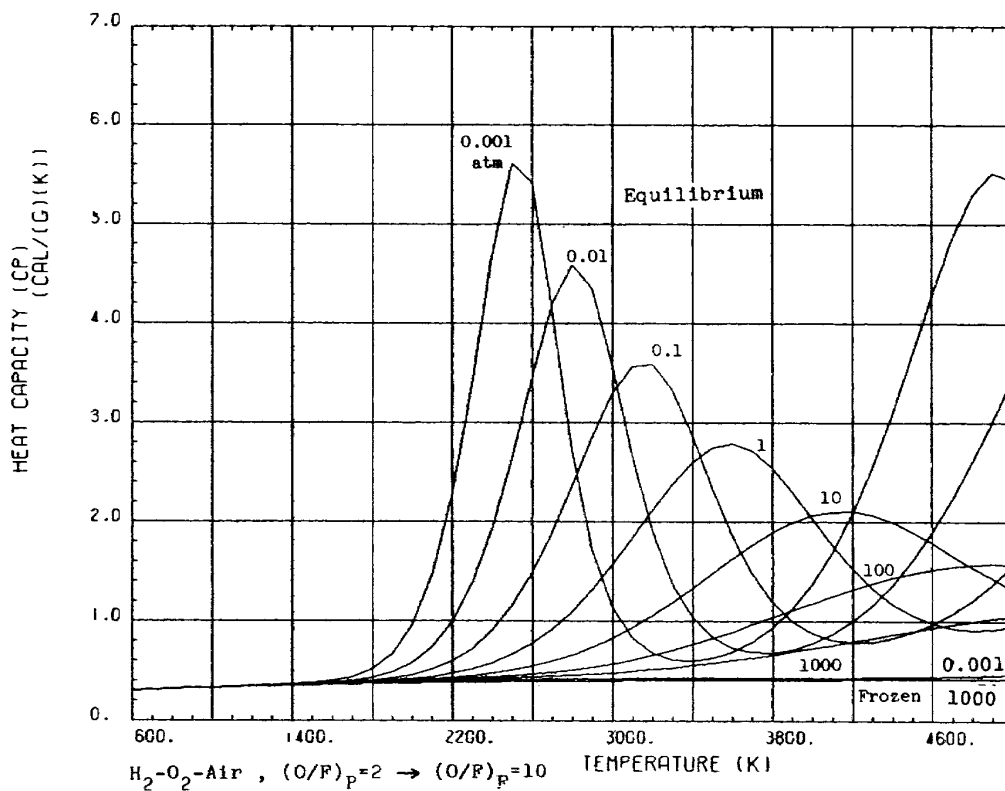


図 B-3-16-4

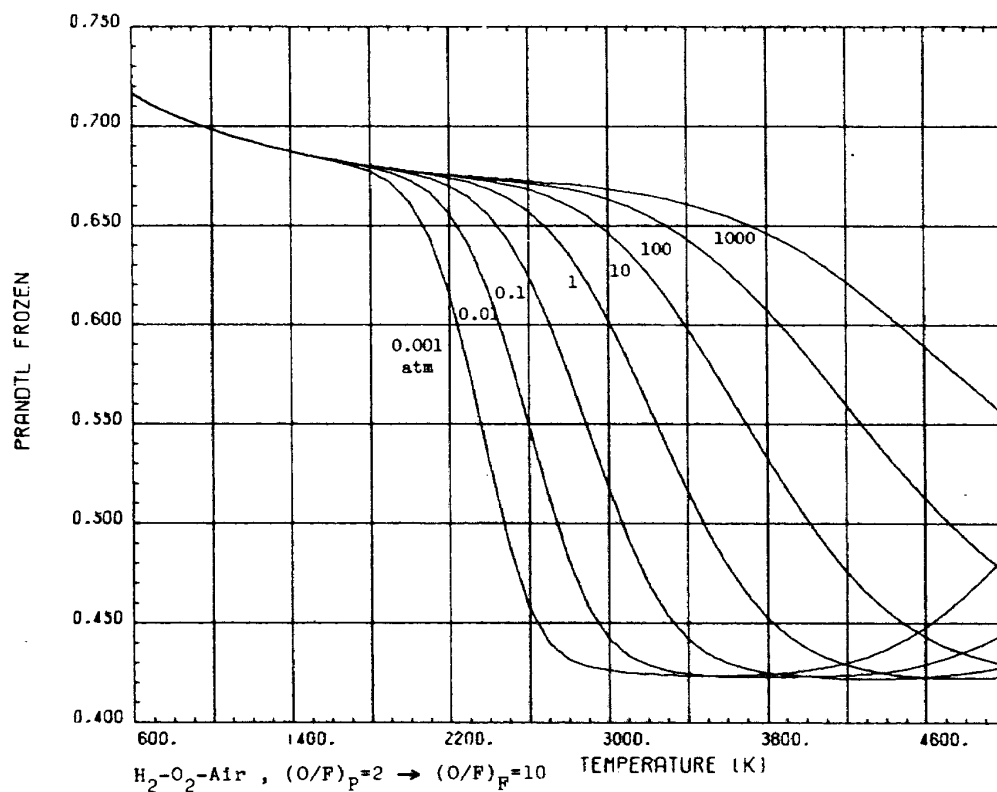


図 B-3-17-4

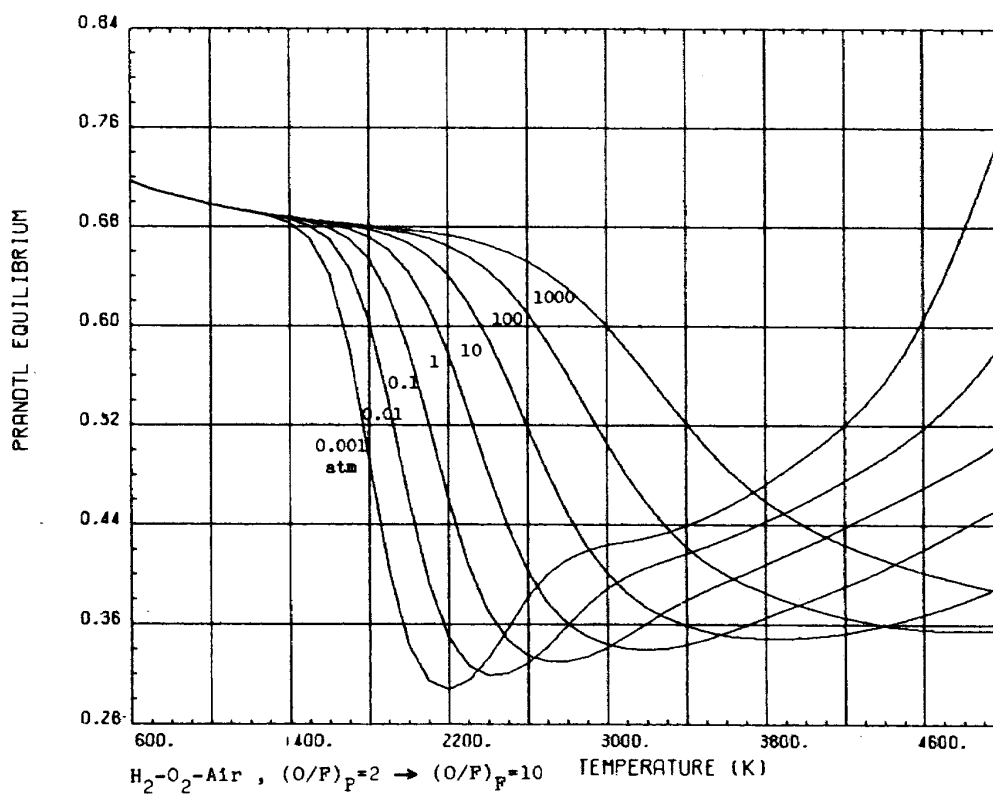


図 B-3-18-4

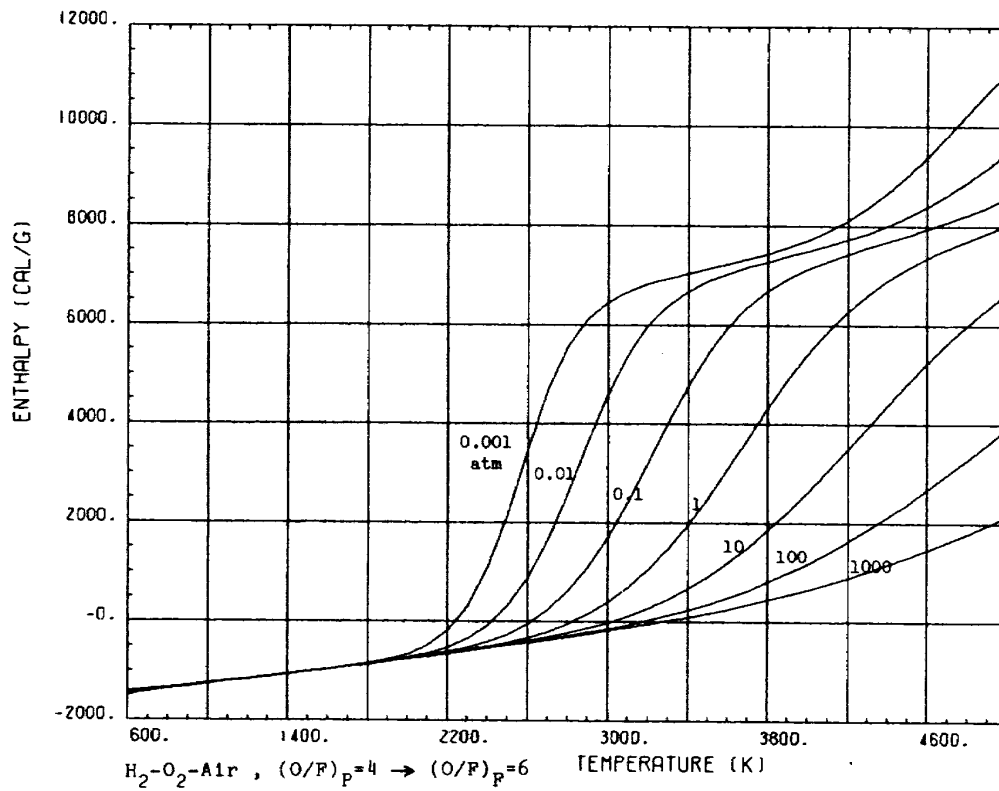


図 B-3-2-5

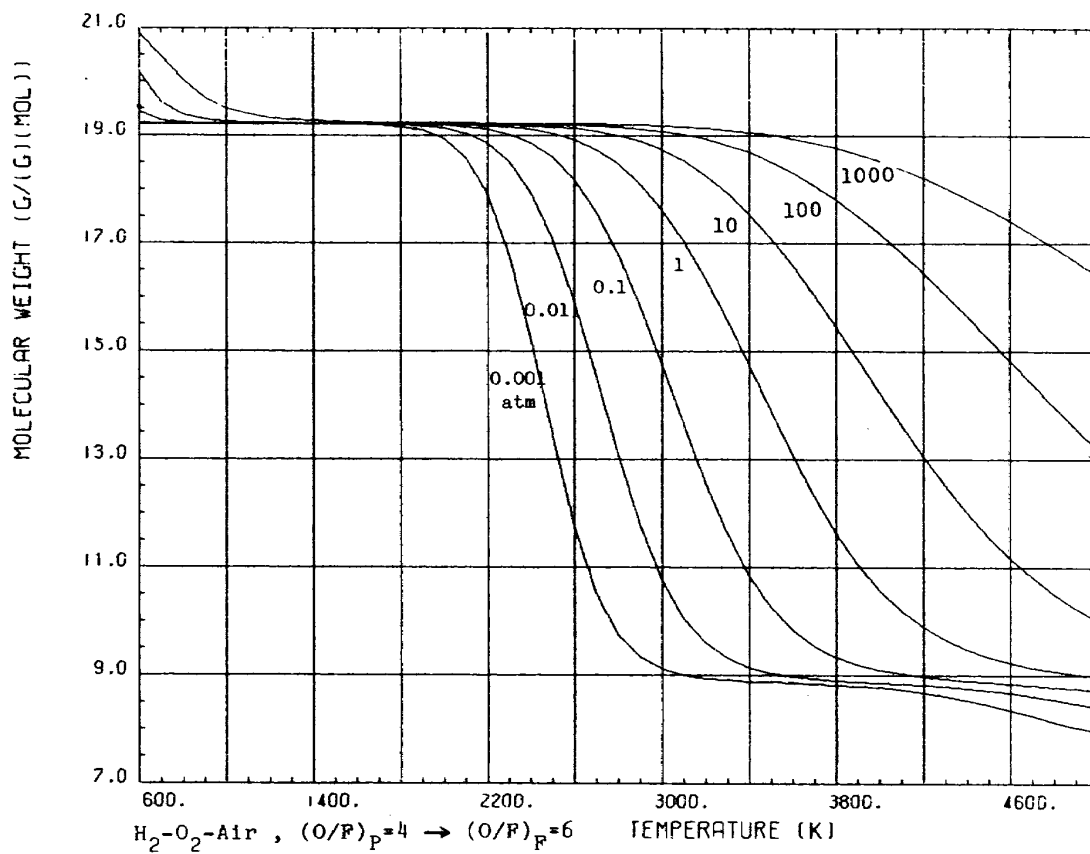


図 B-3-4-5



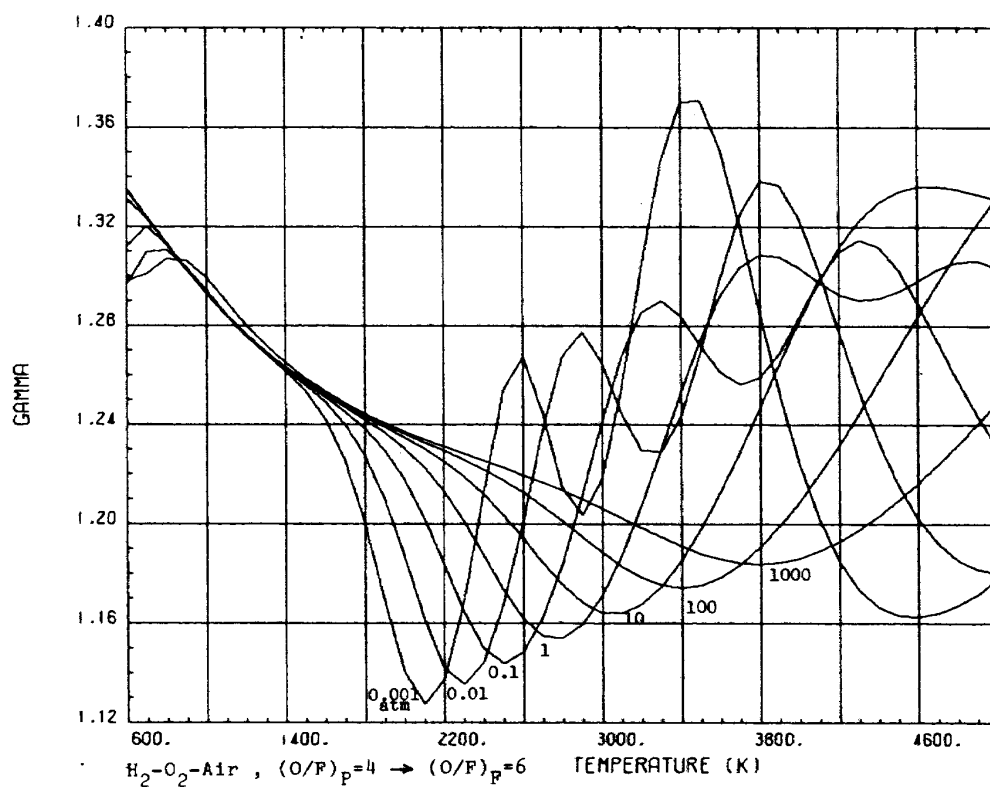


図 B-3-7-5

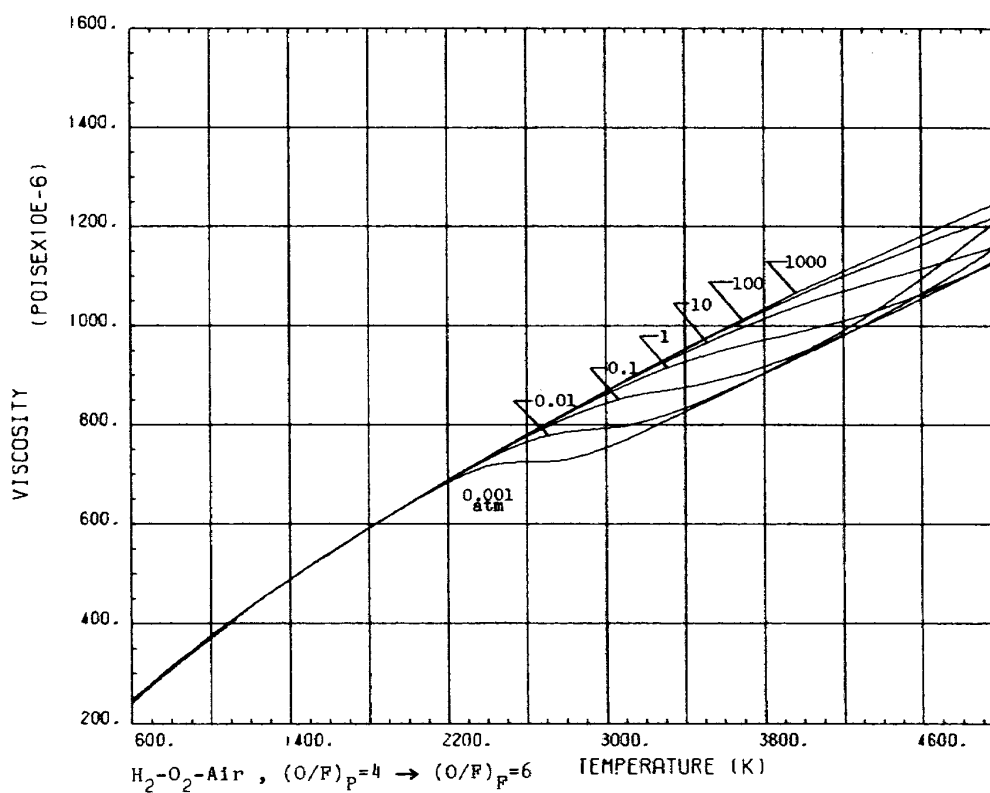


図 B-3-9-5

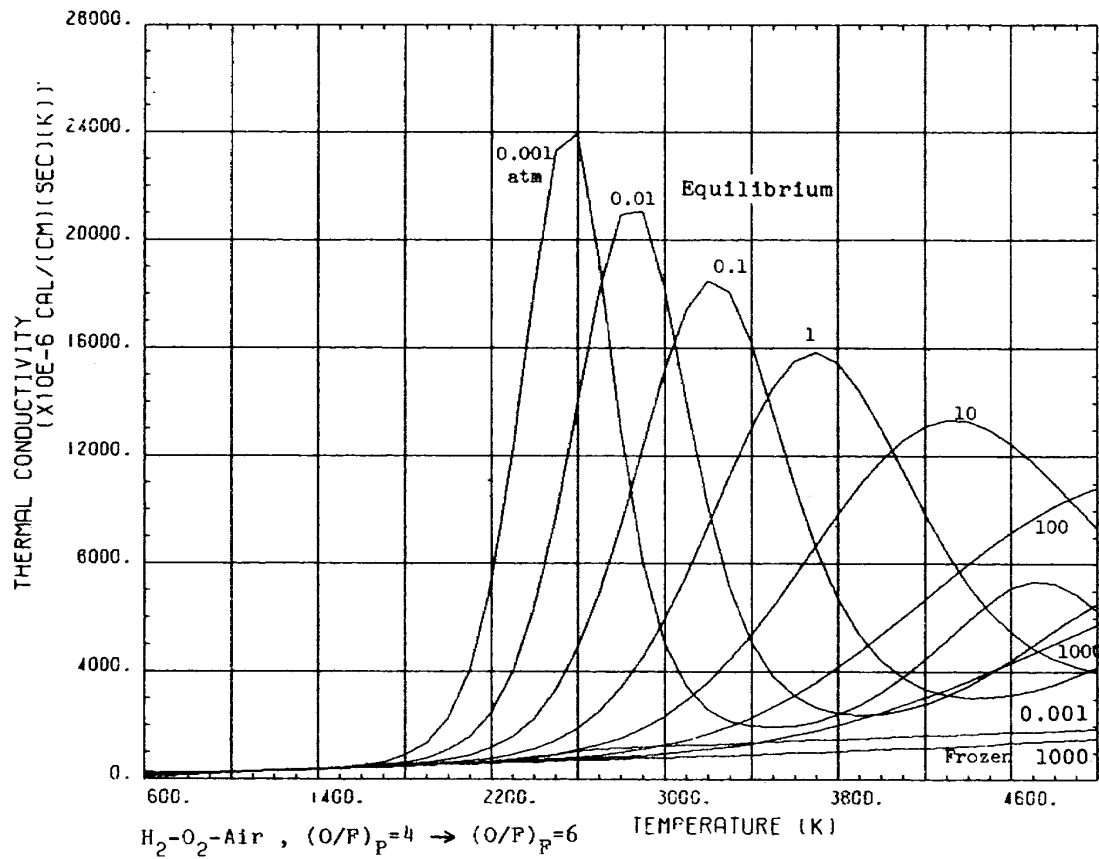


図 B-3-14-5

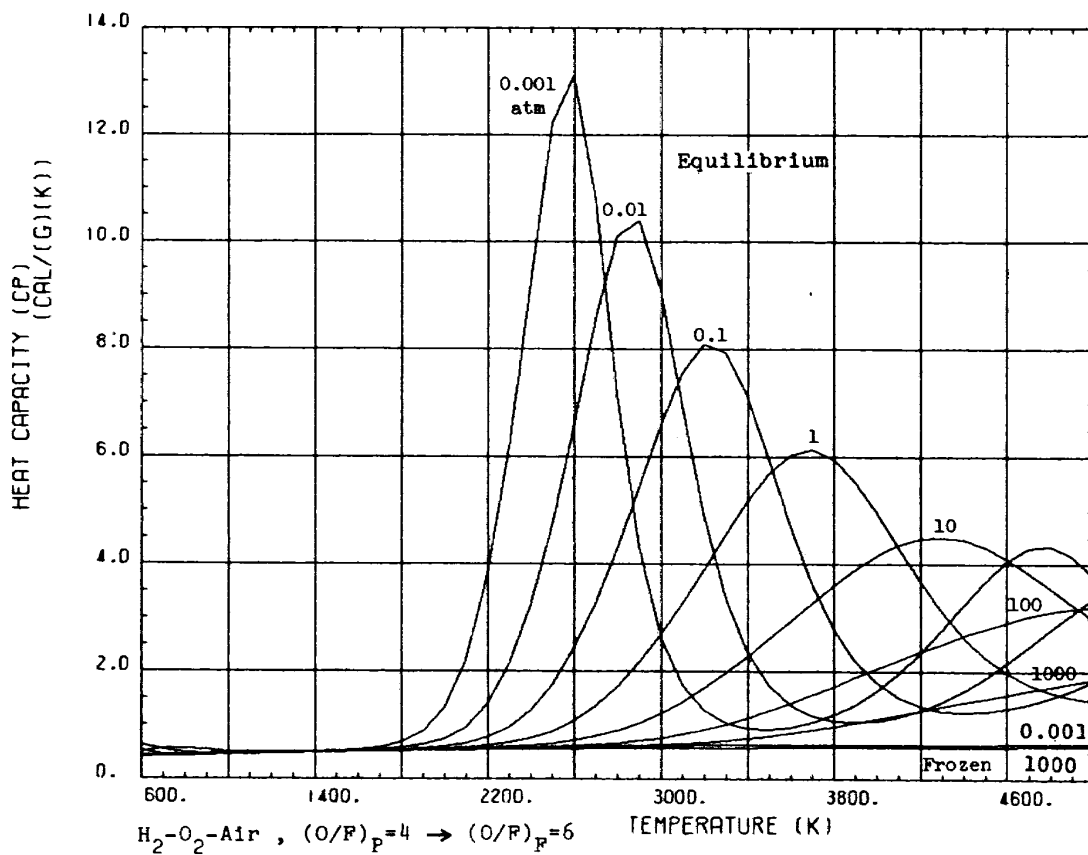


図 B-3-16-5

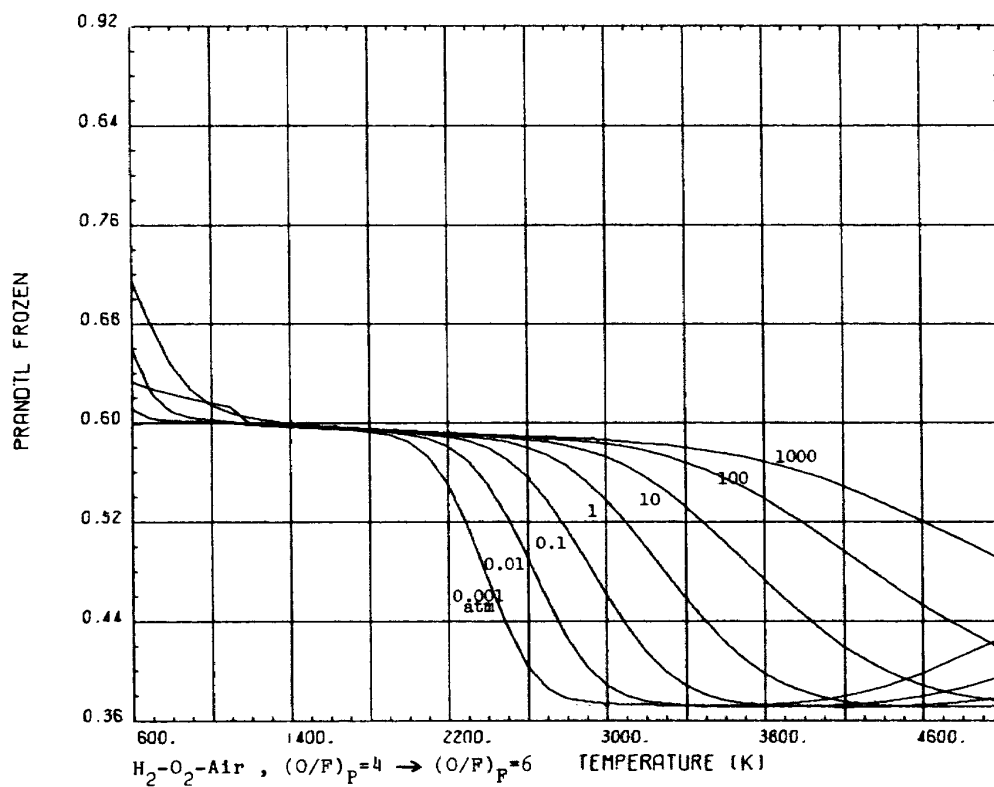


図 B-3-17-5

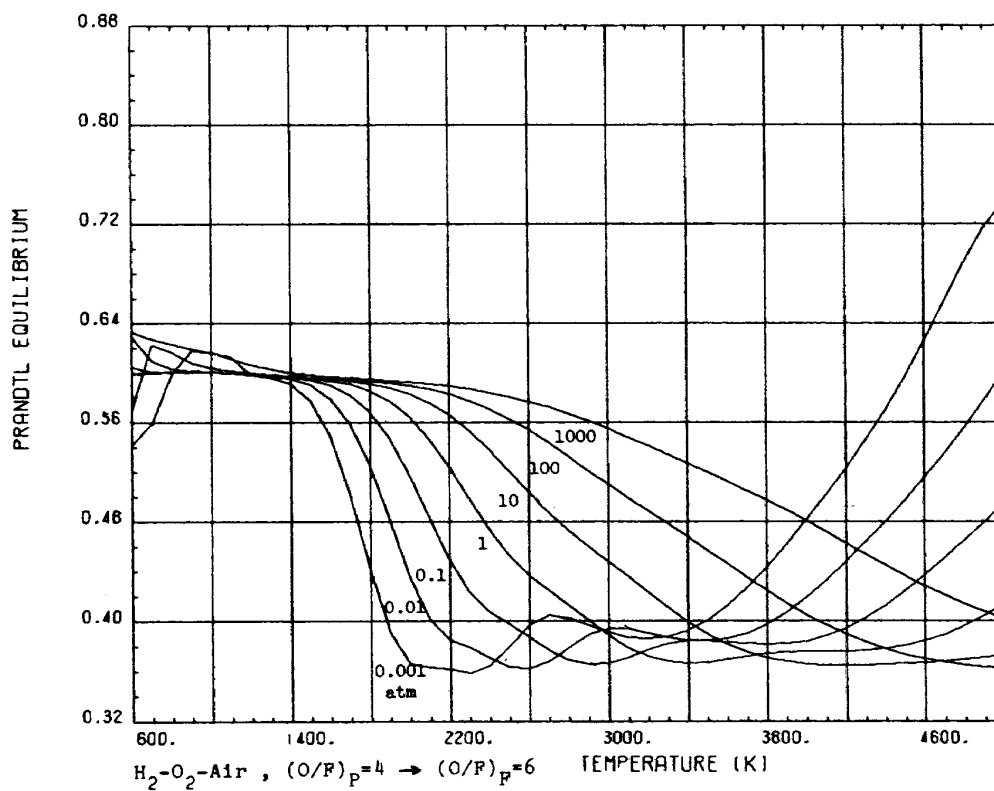


図 B-3-18-5

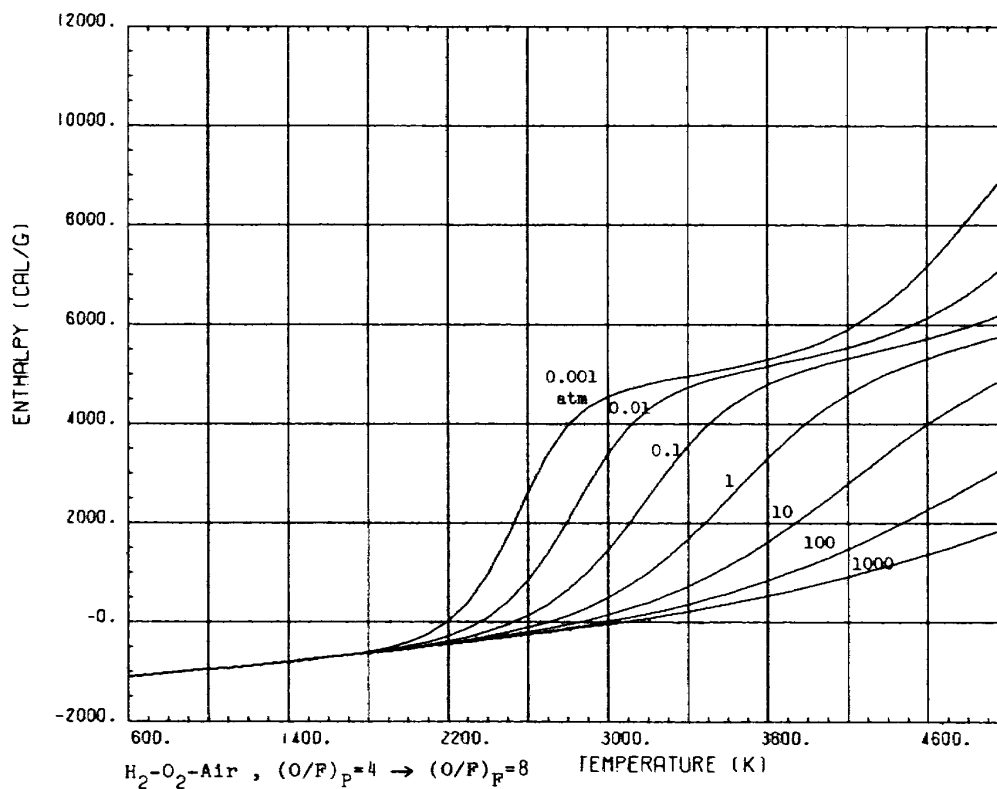


図 B-3-2-6

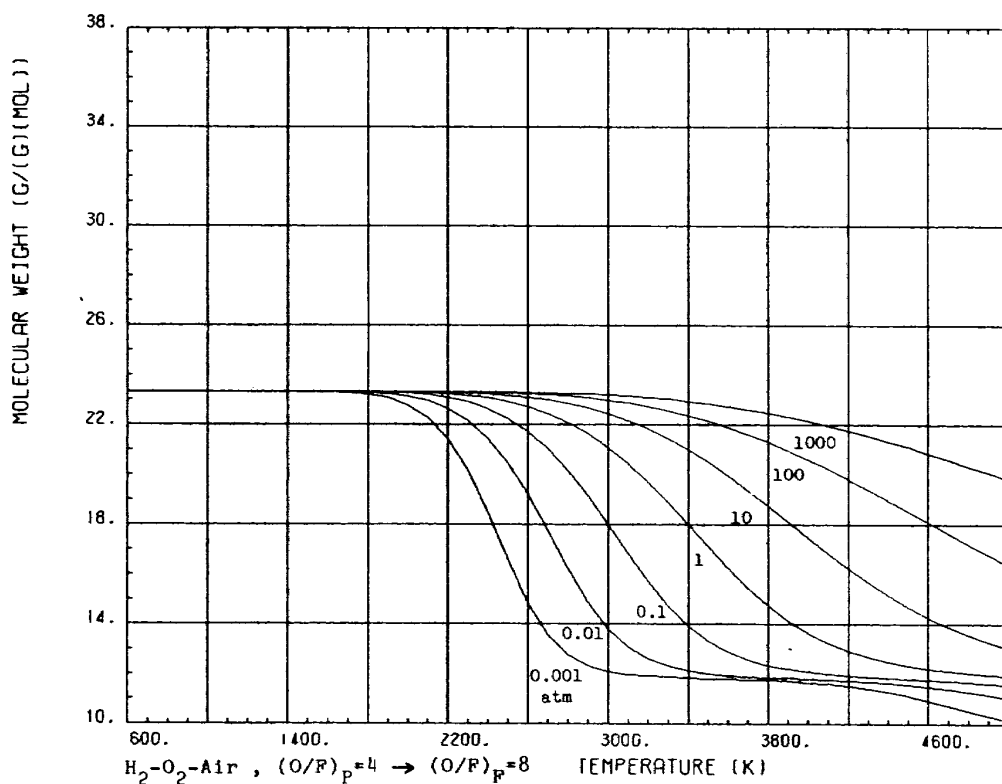


図 B-3-4-6

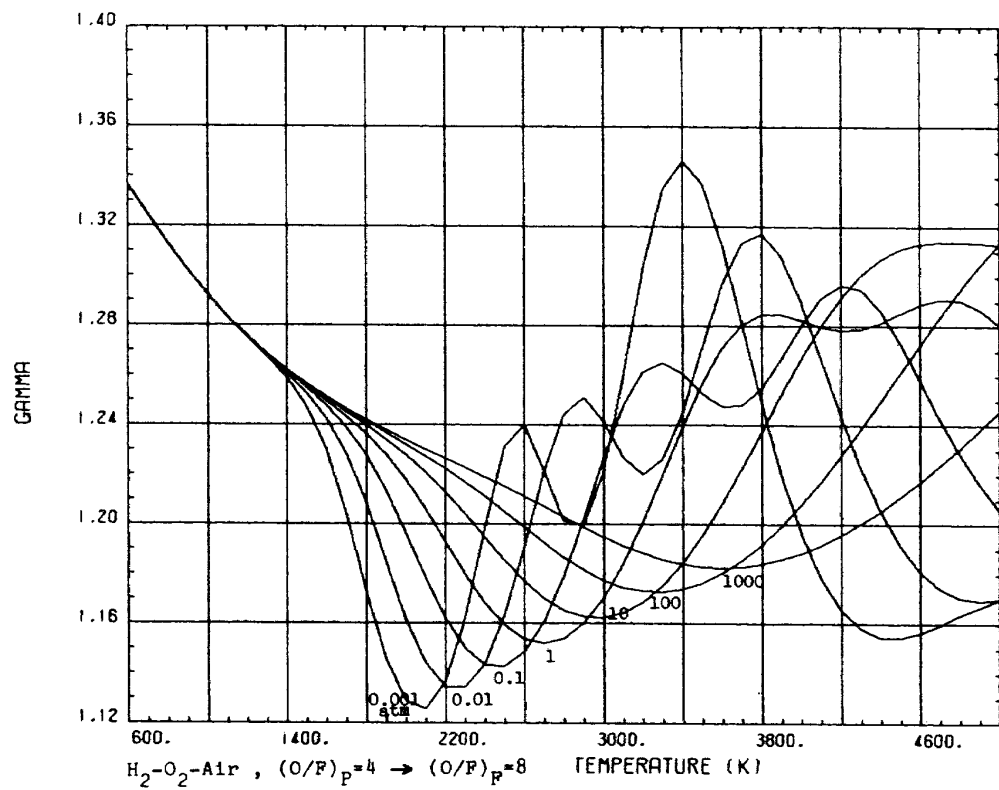


図 B-3-7-6

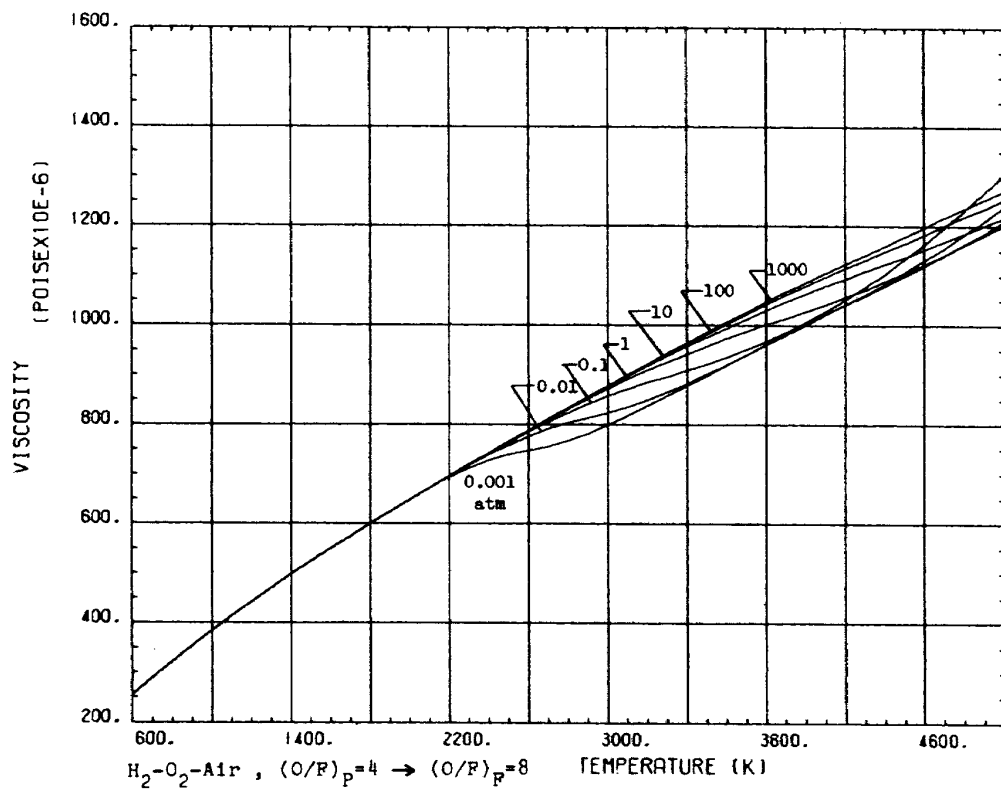


図 B-3-9-6

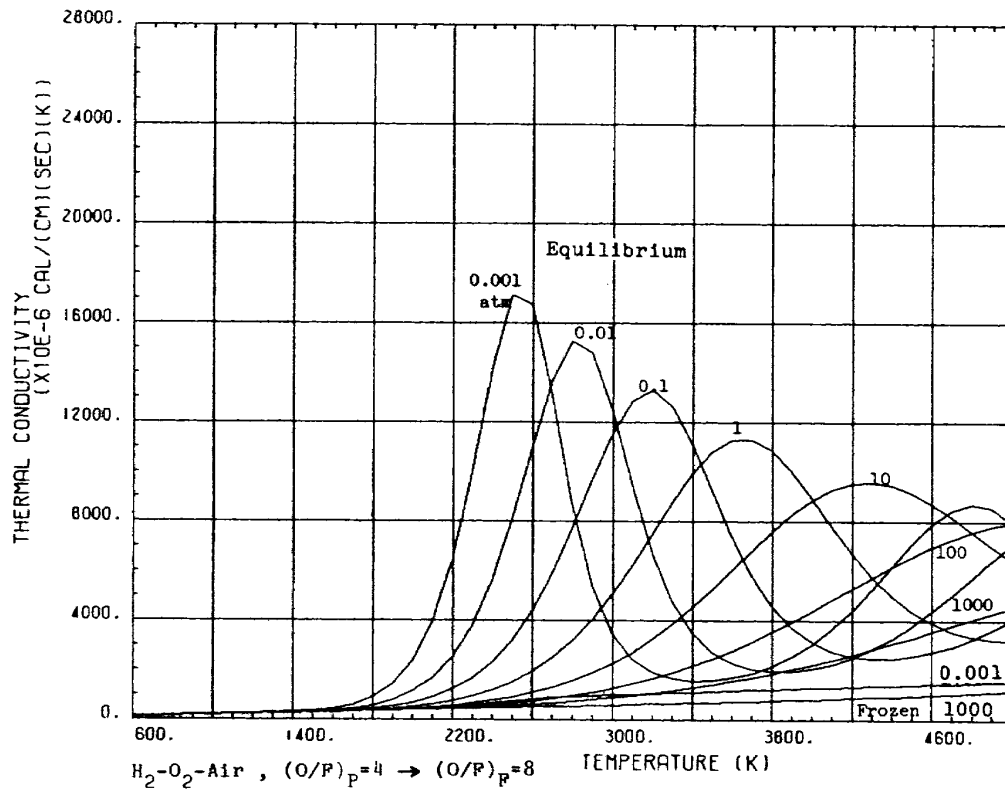


図 B-3-14-6

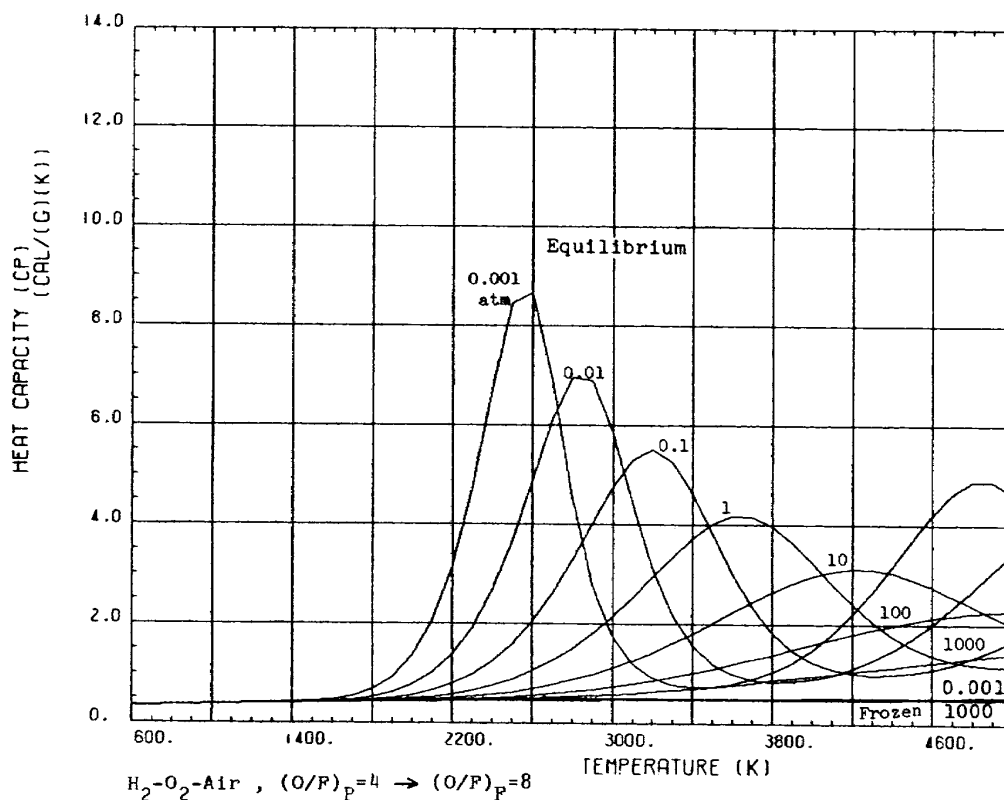


図 B-3-16-6

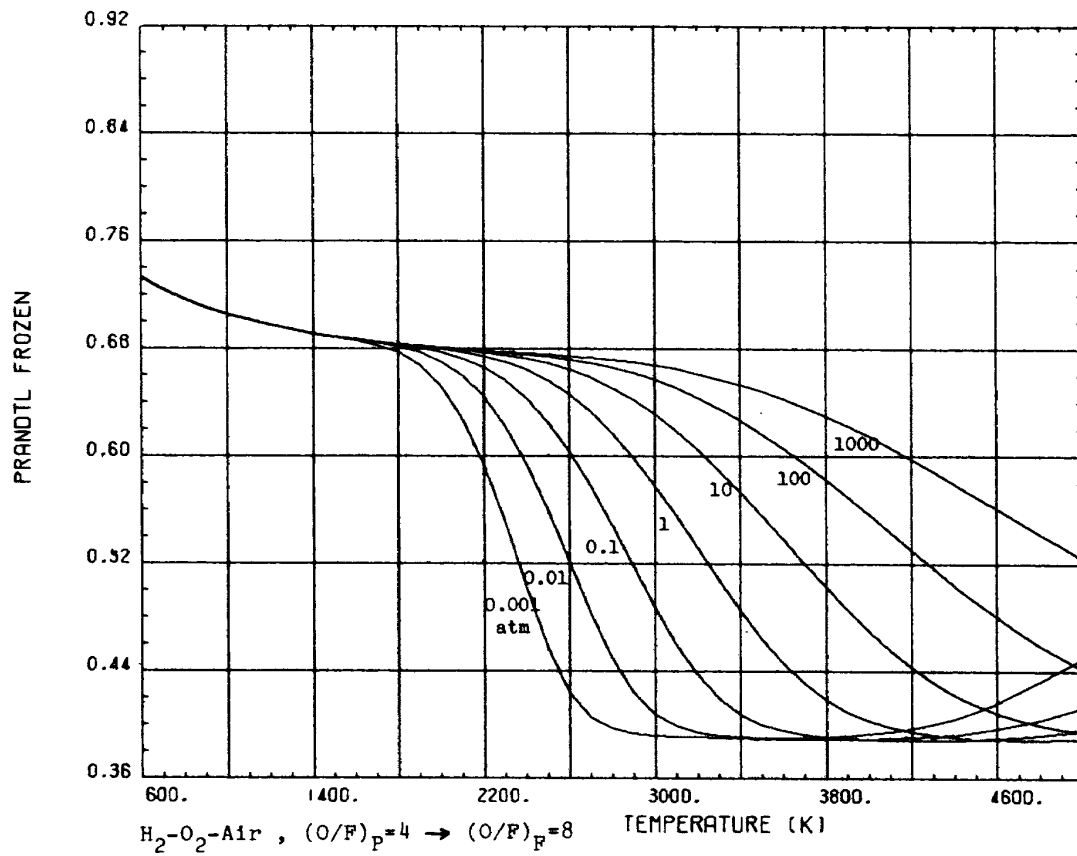


図 B-3-17-6

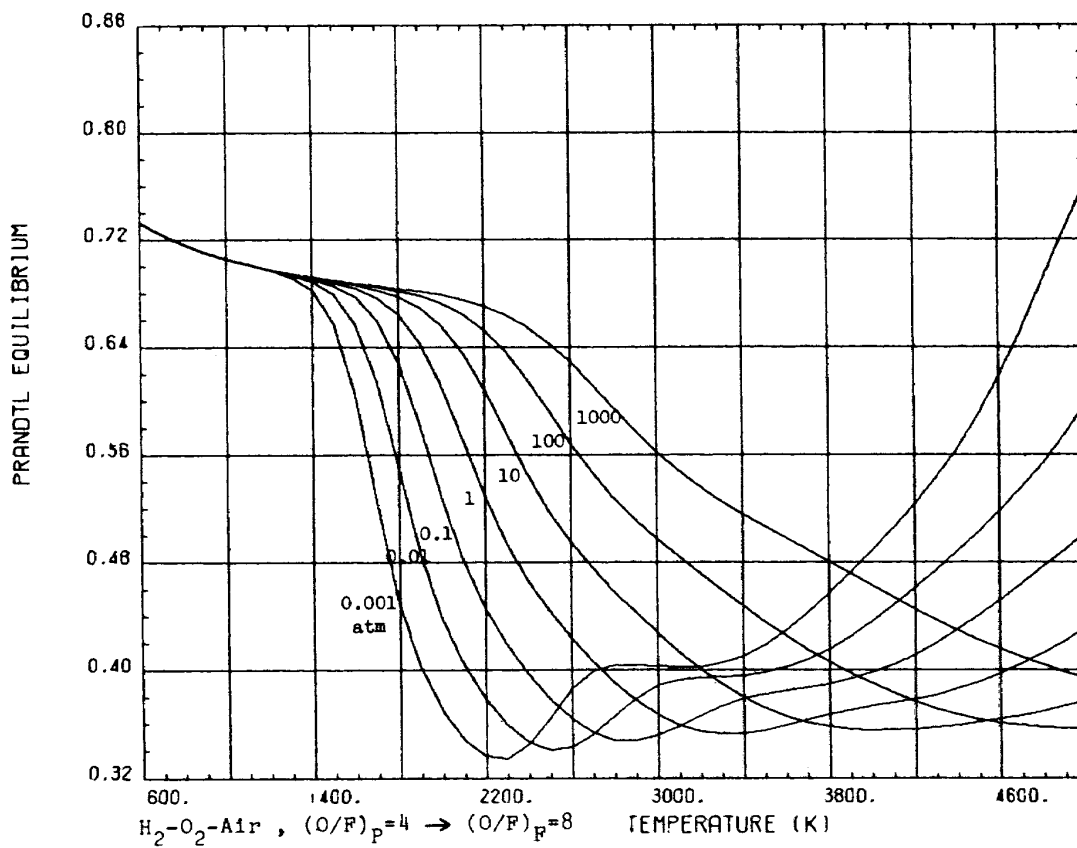


図 B-3-18-6

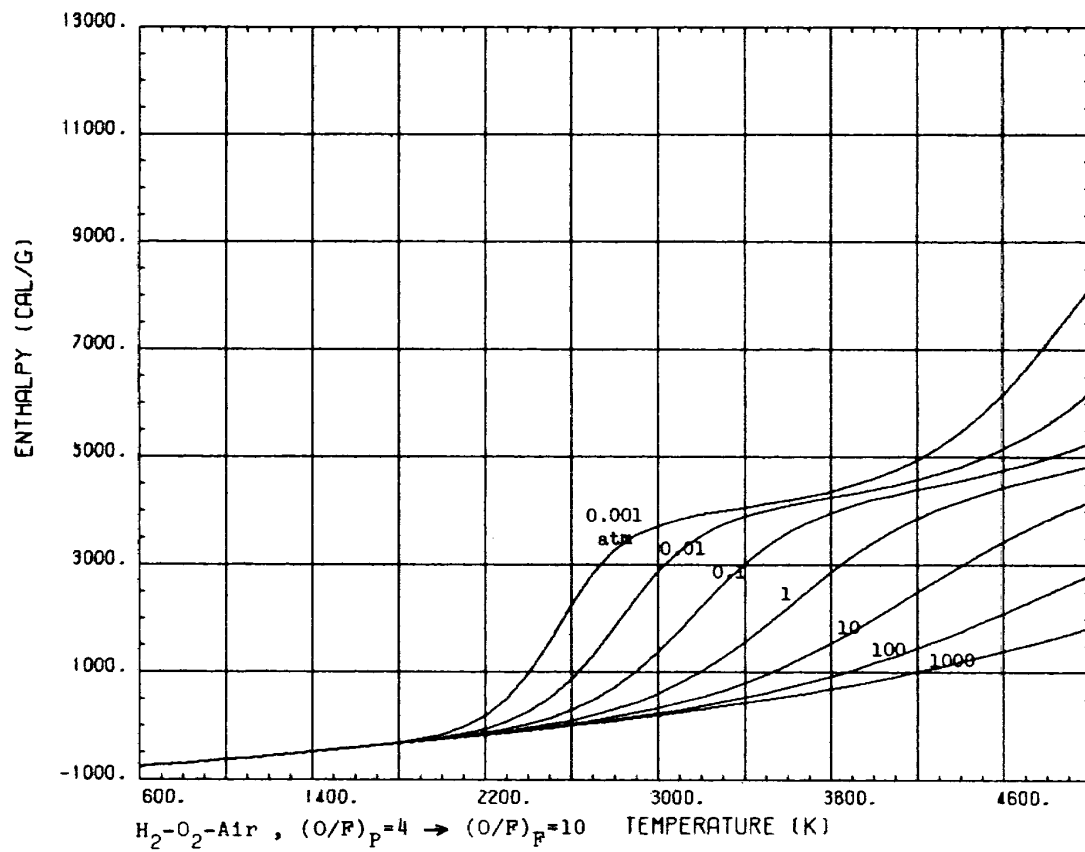


図 B-3-2-7

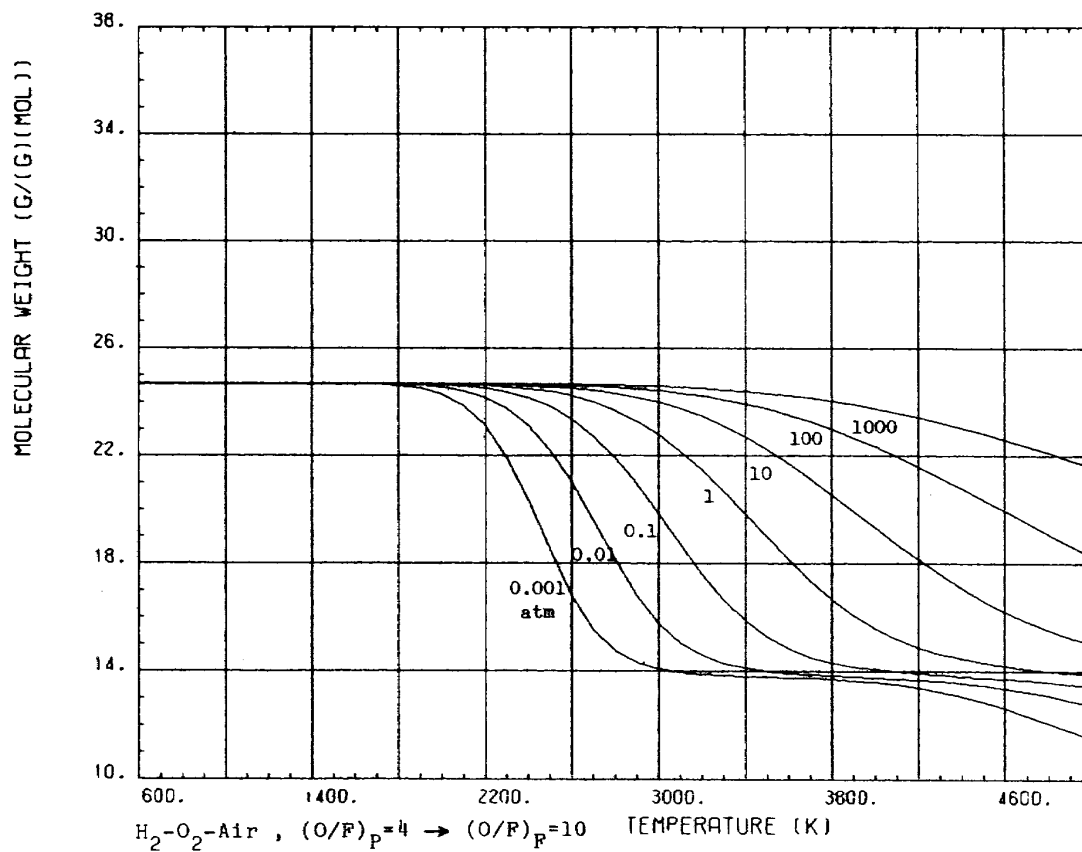


図 B-3-4-7



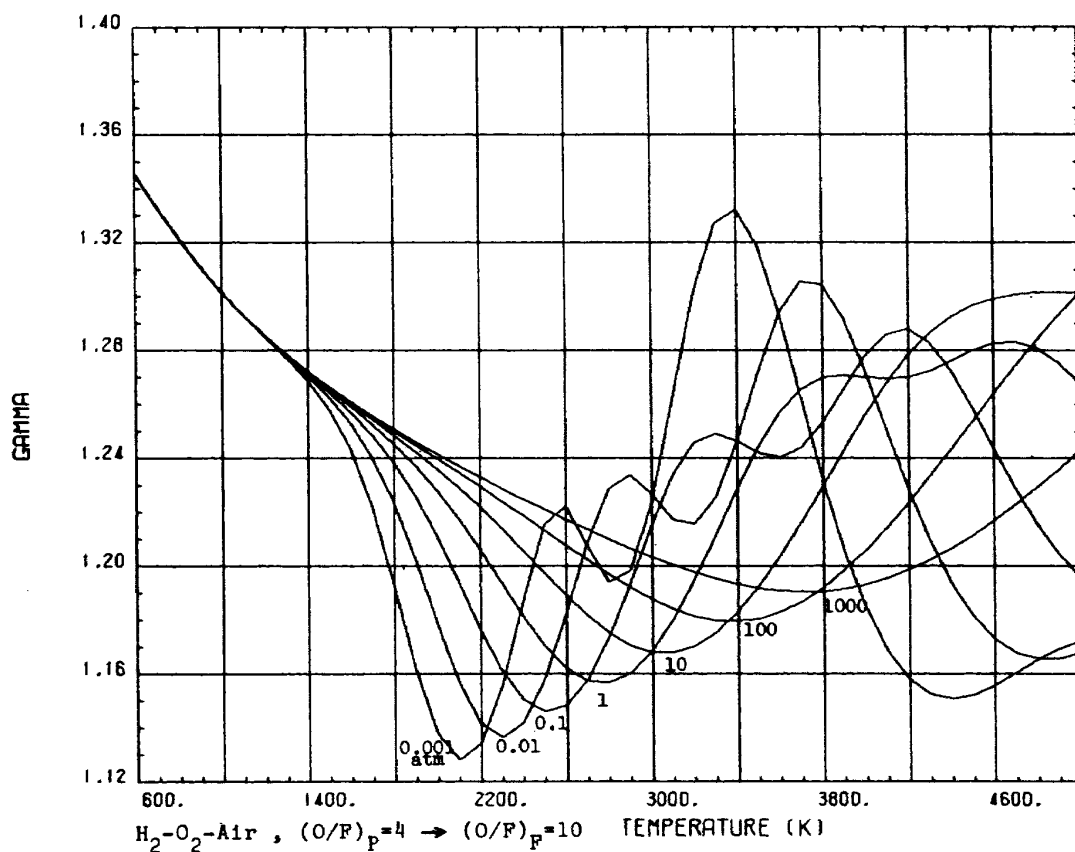


図 B-3-7-7

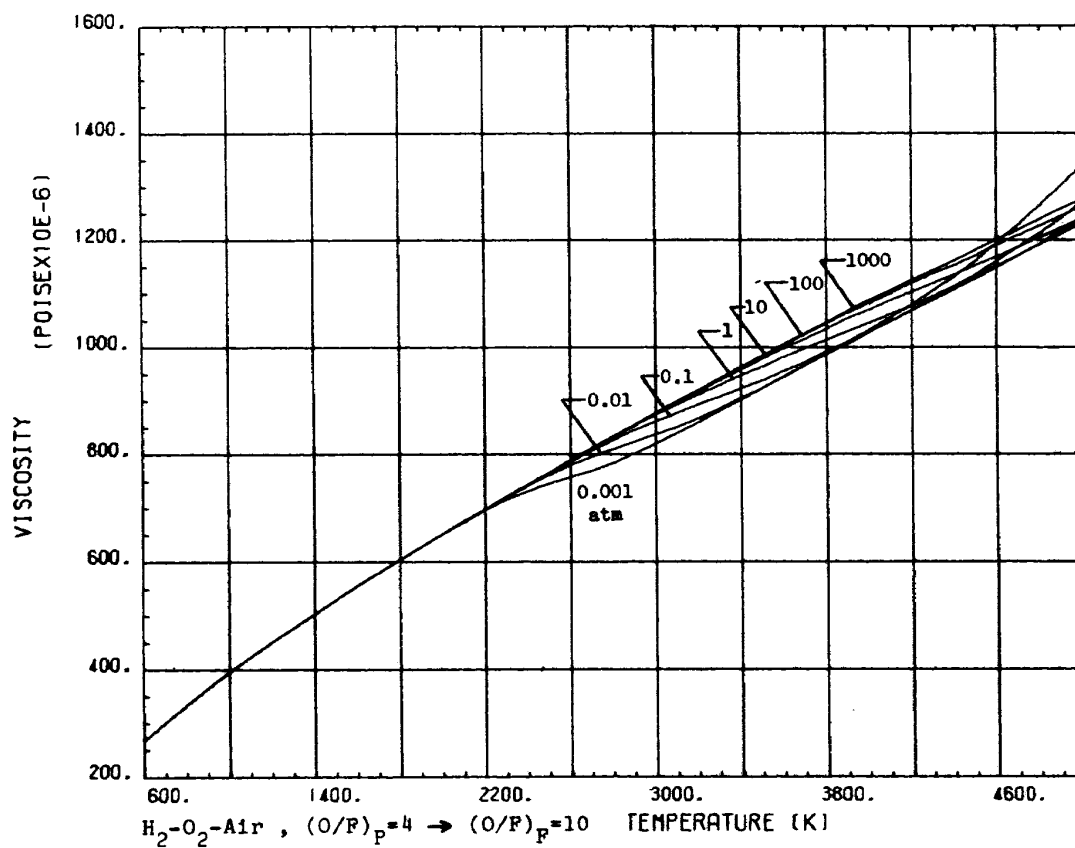


図 B-3-9-7

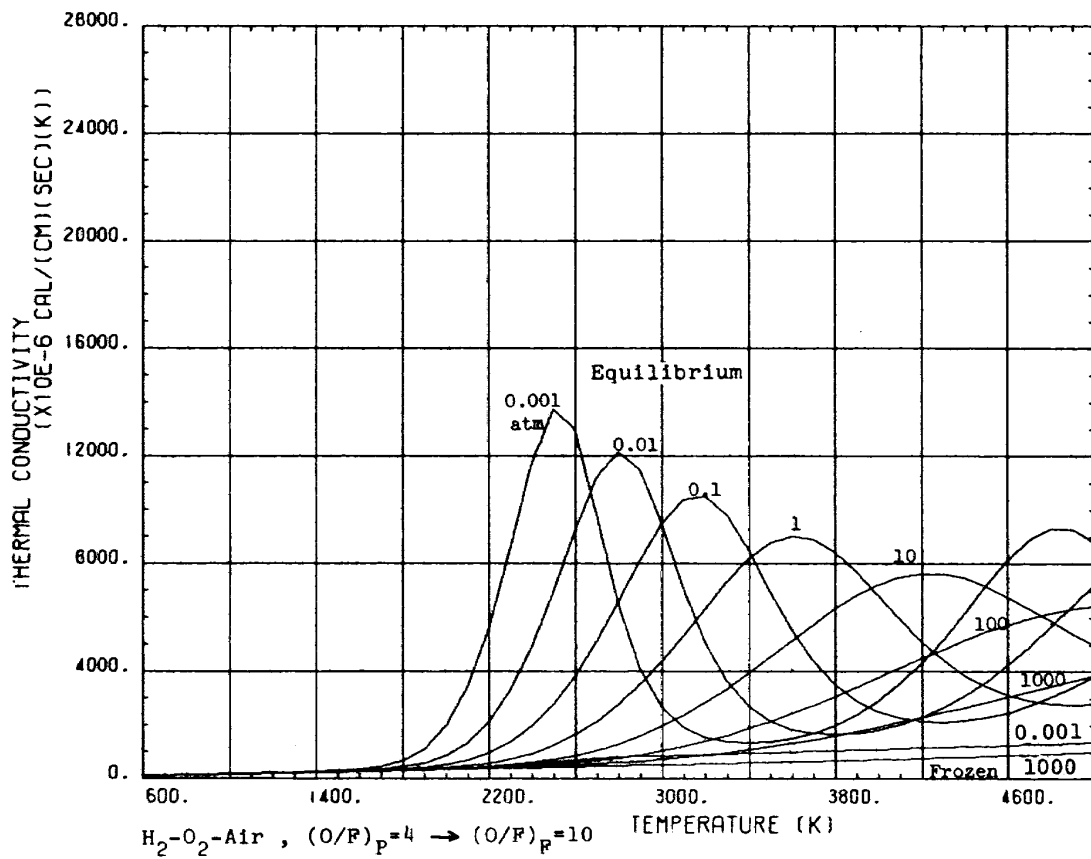


図 B-3-14-7

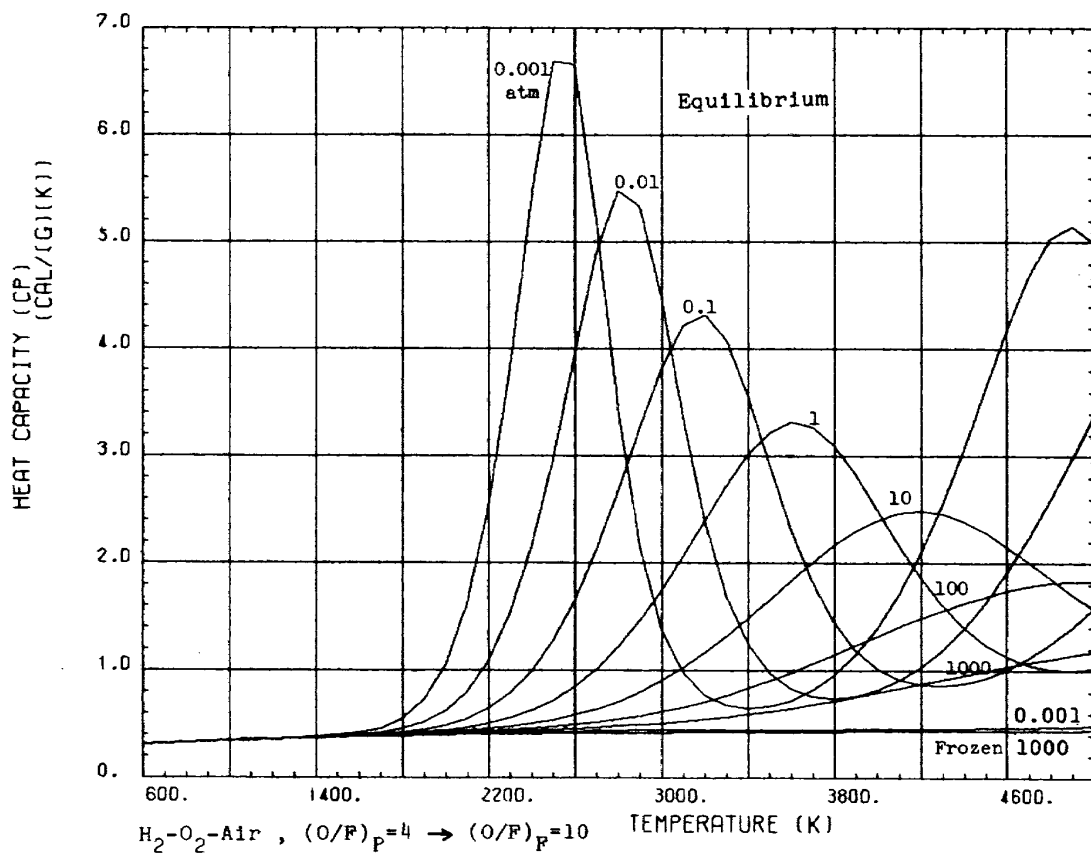


図 B-3-16-7

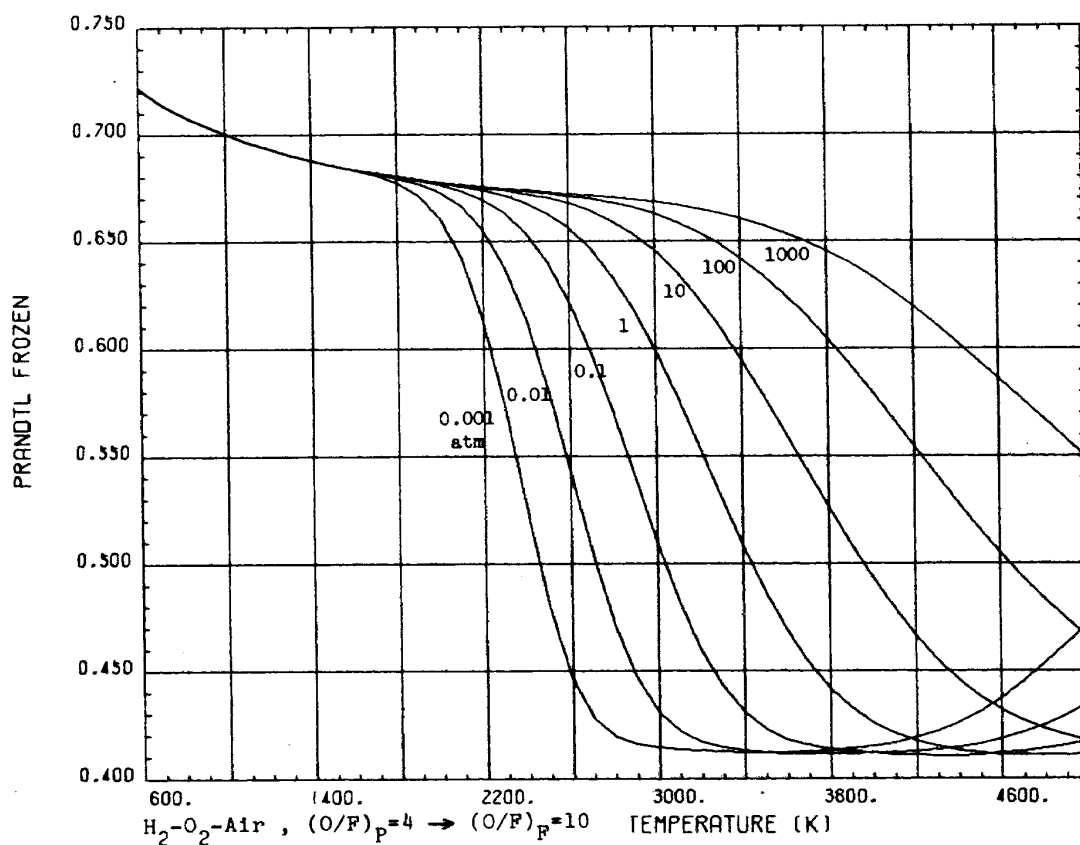


図 B-3-17-7

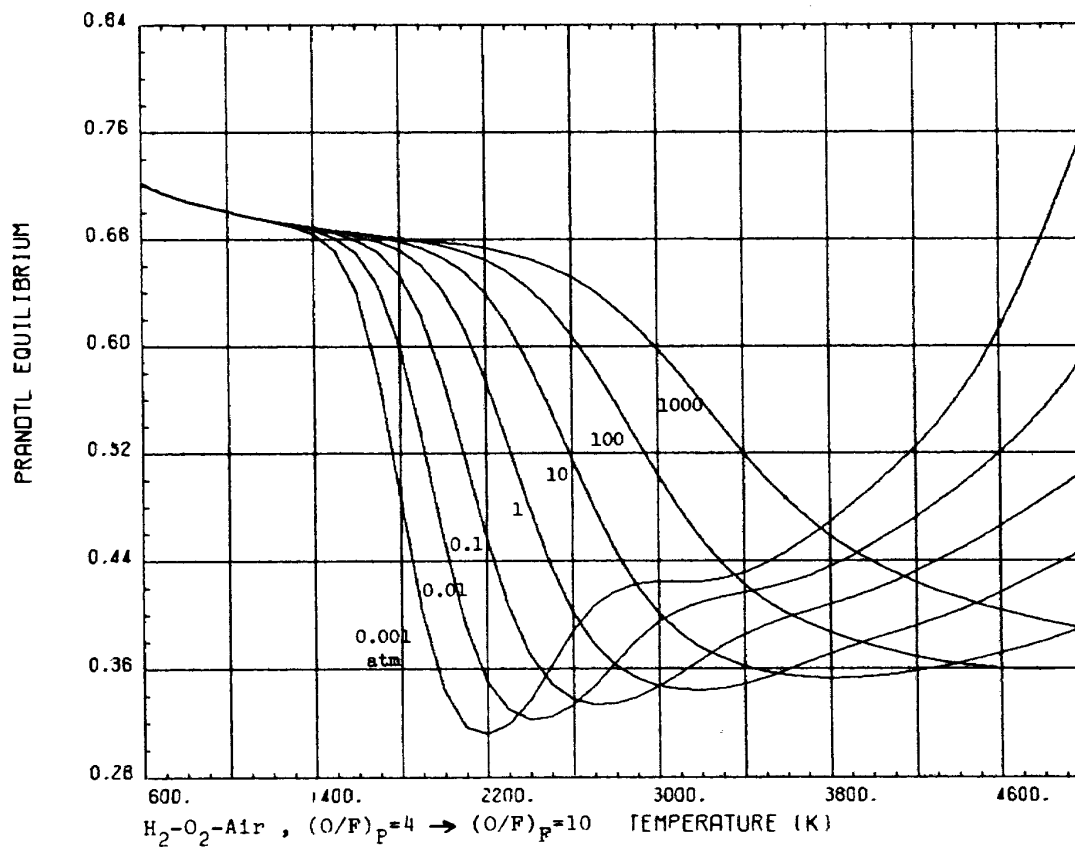


図 B-3-18-7

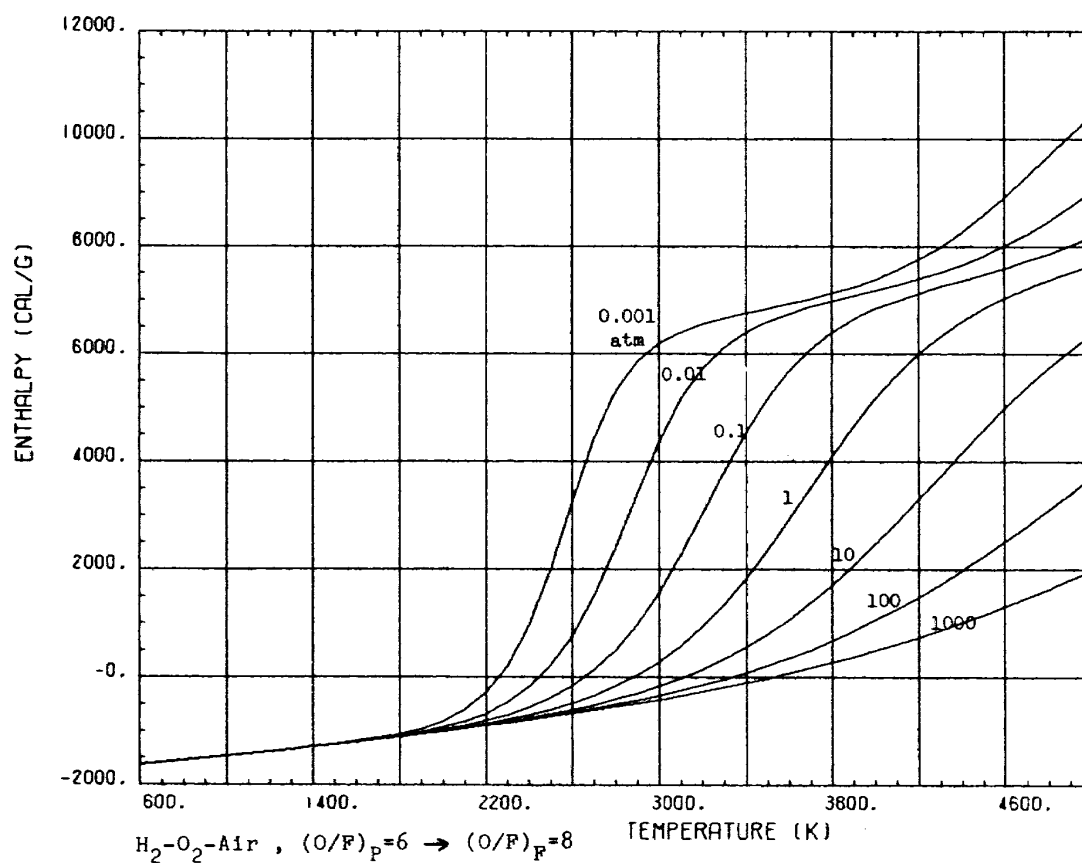


図 B-3-2-8

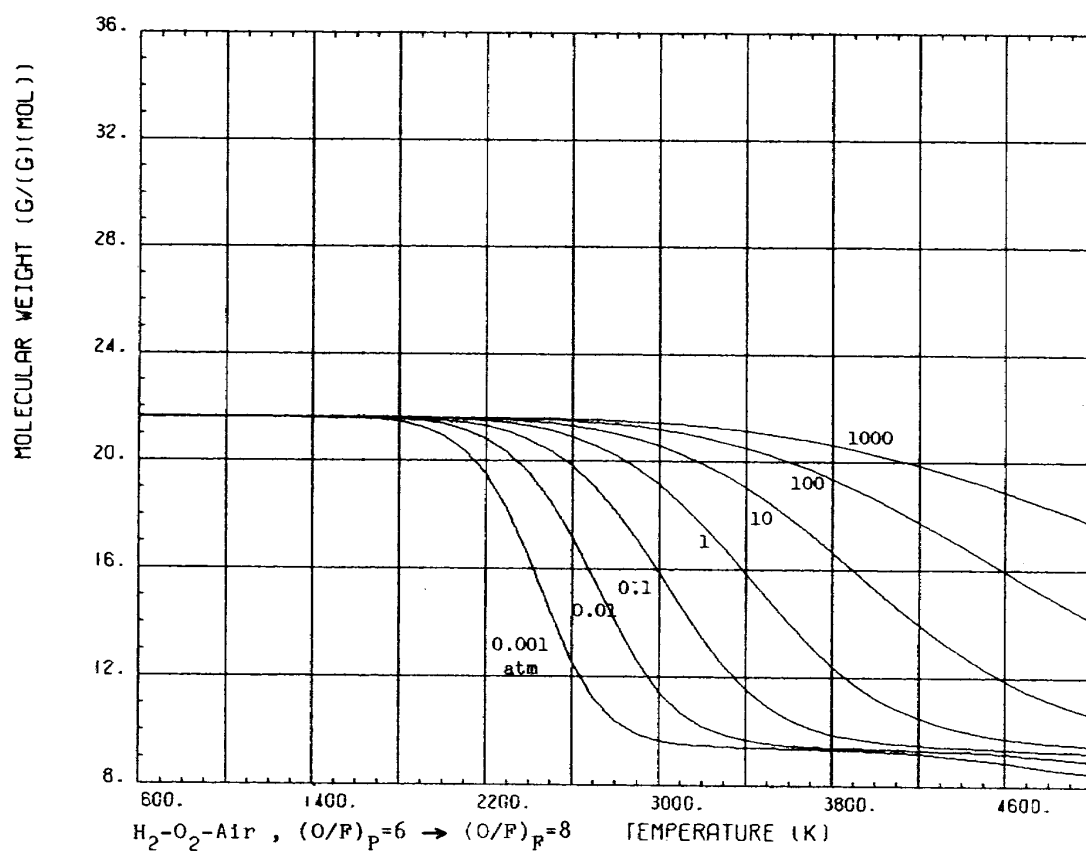


図 B-3-4-8

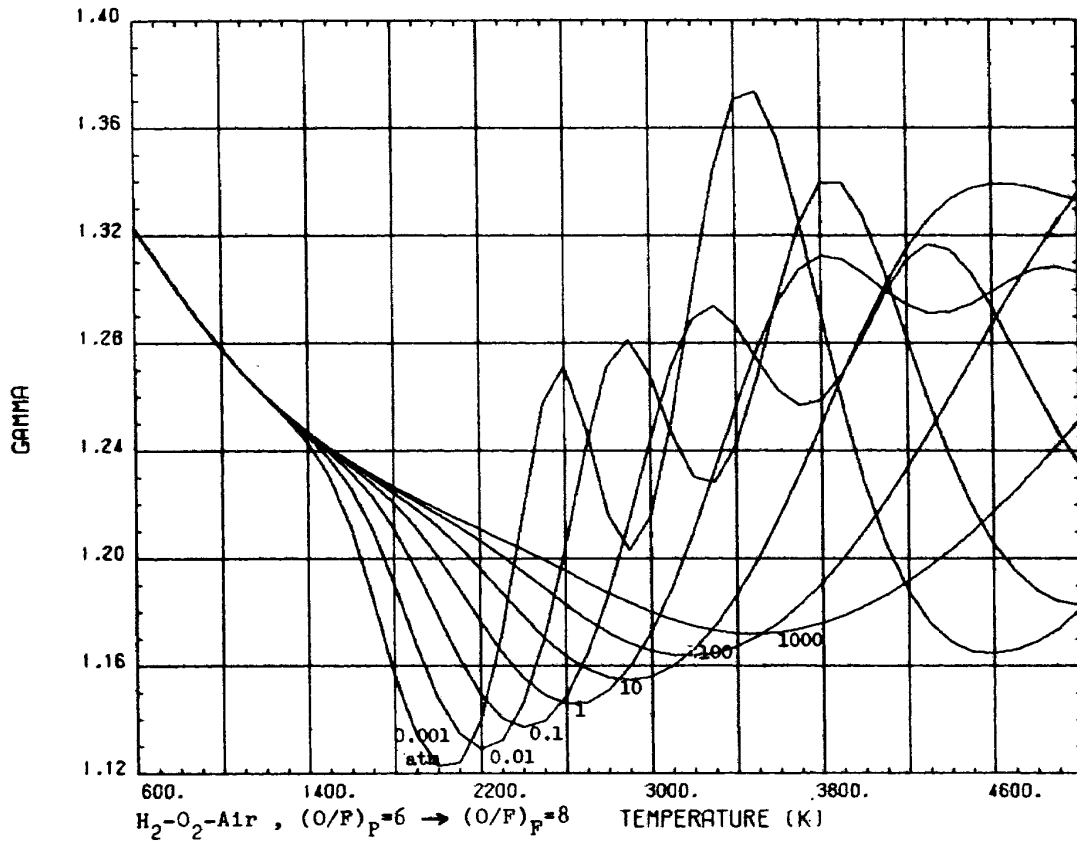


図 B-3-7-8

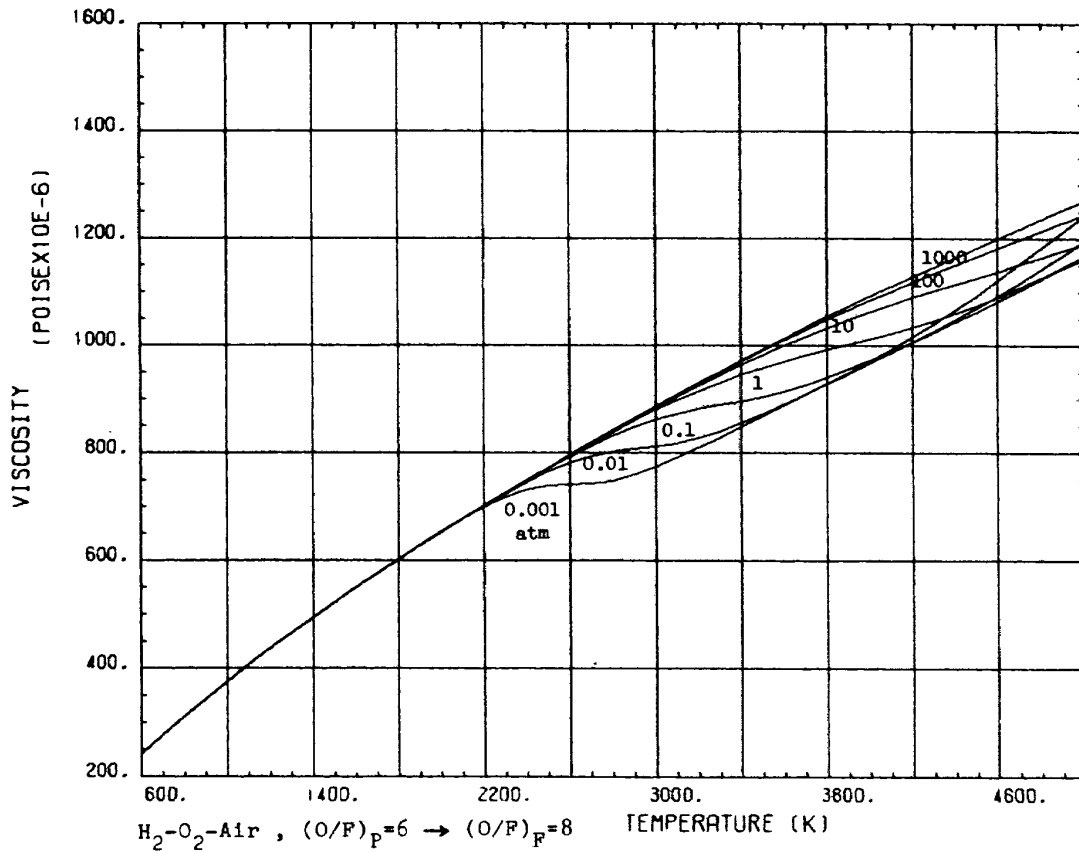


図 B-3-9-8

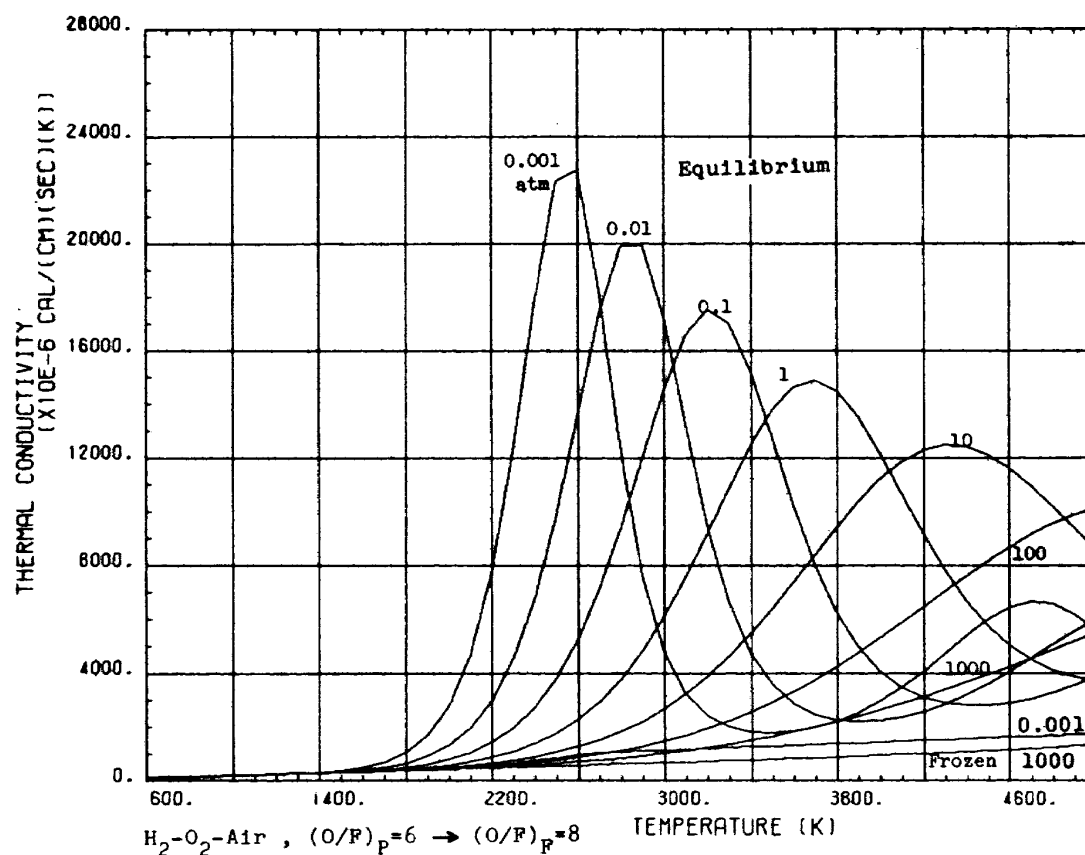


図 B-3-14-8

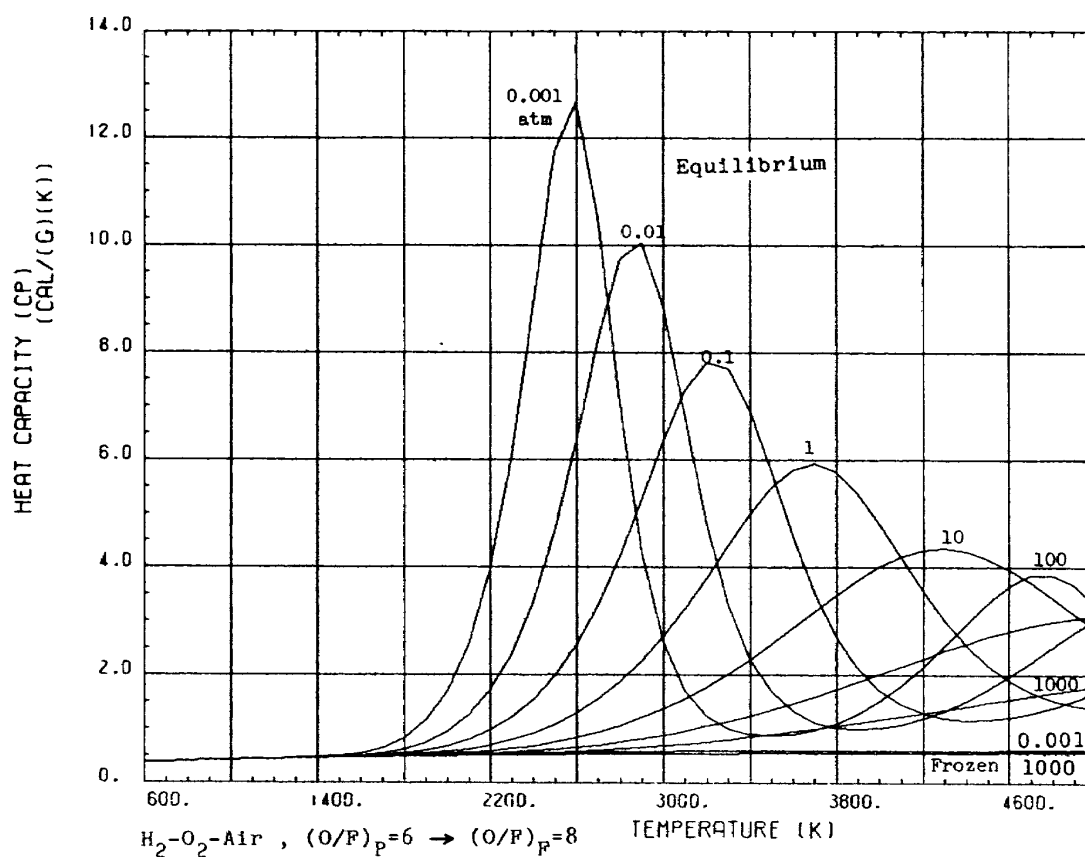


図 B-3-16-8

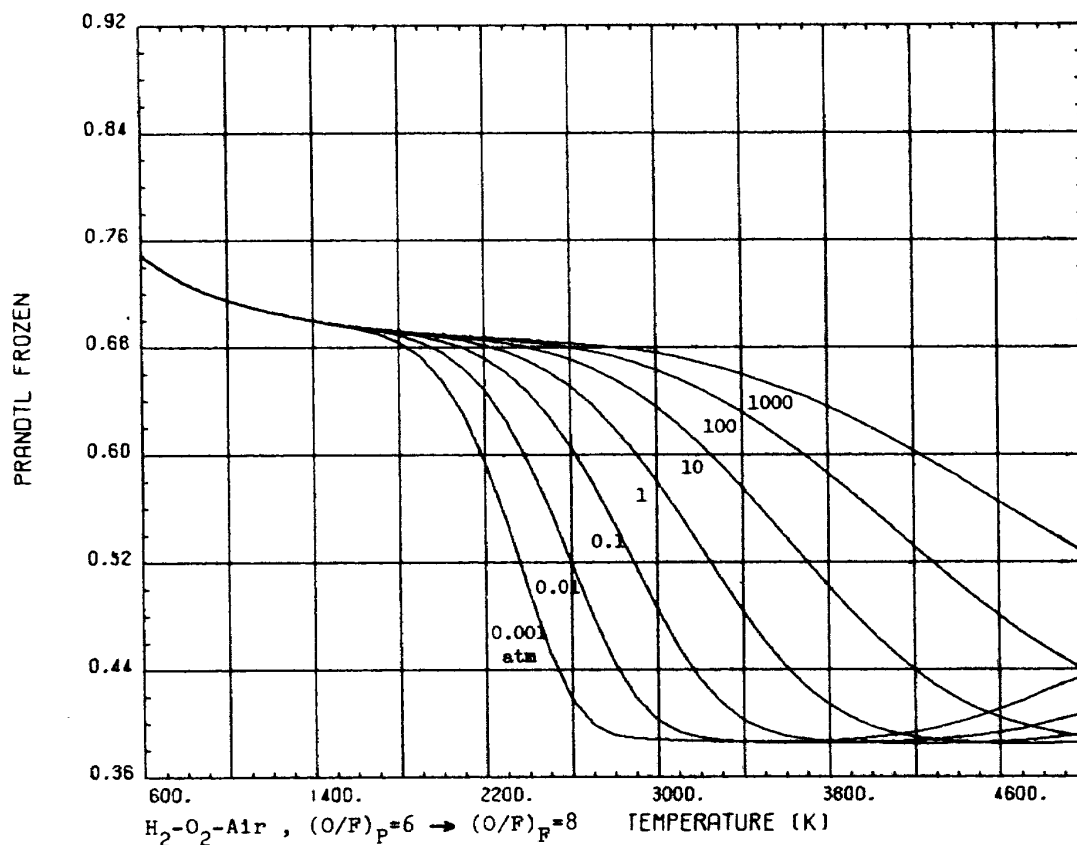


図 B-3-17-8

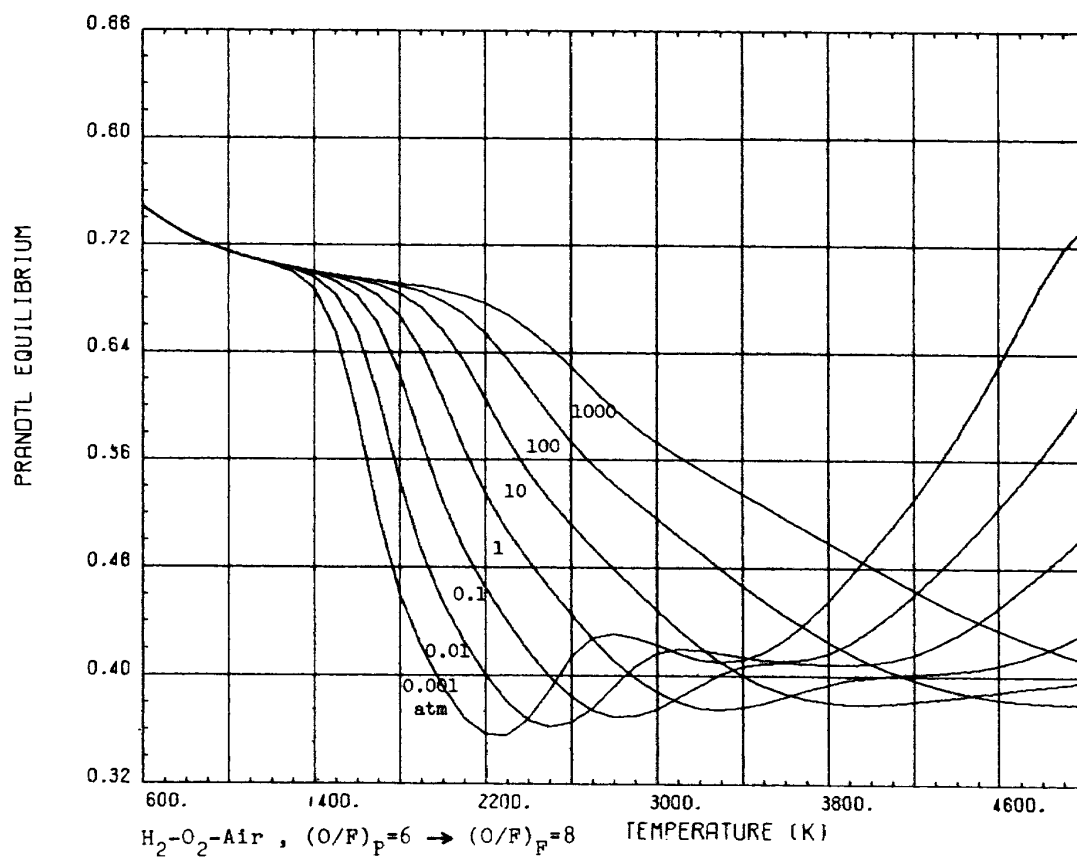


図 B-3-18-8

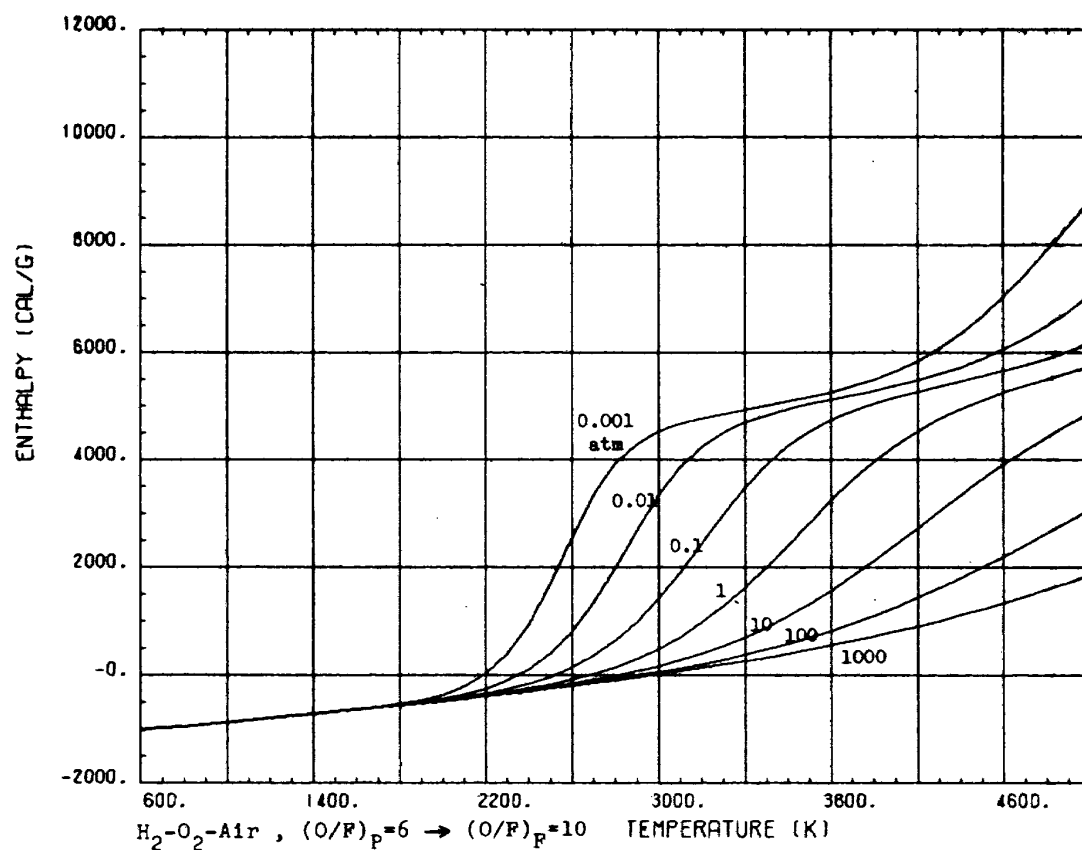


図 B-3-2-9

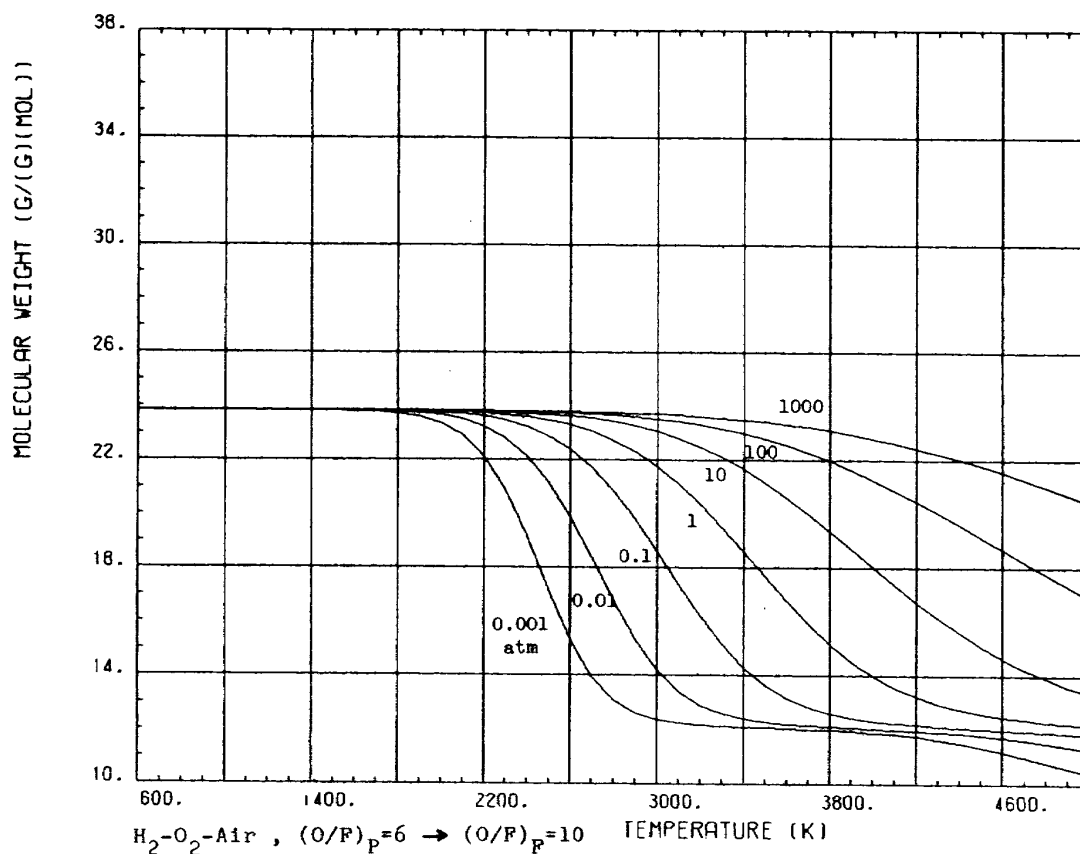


図 B-3-4-9



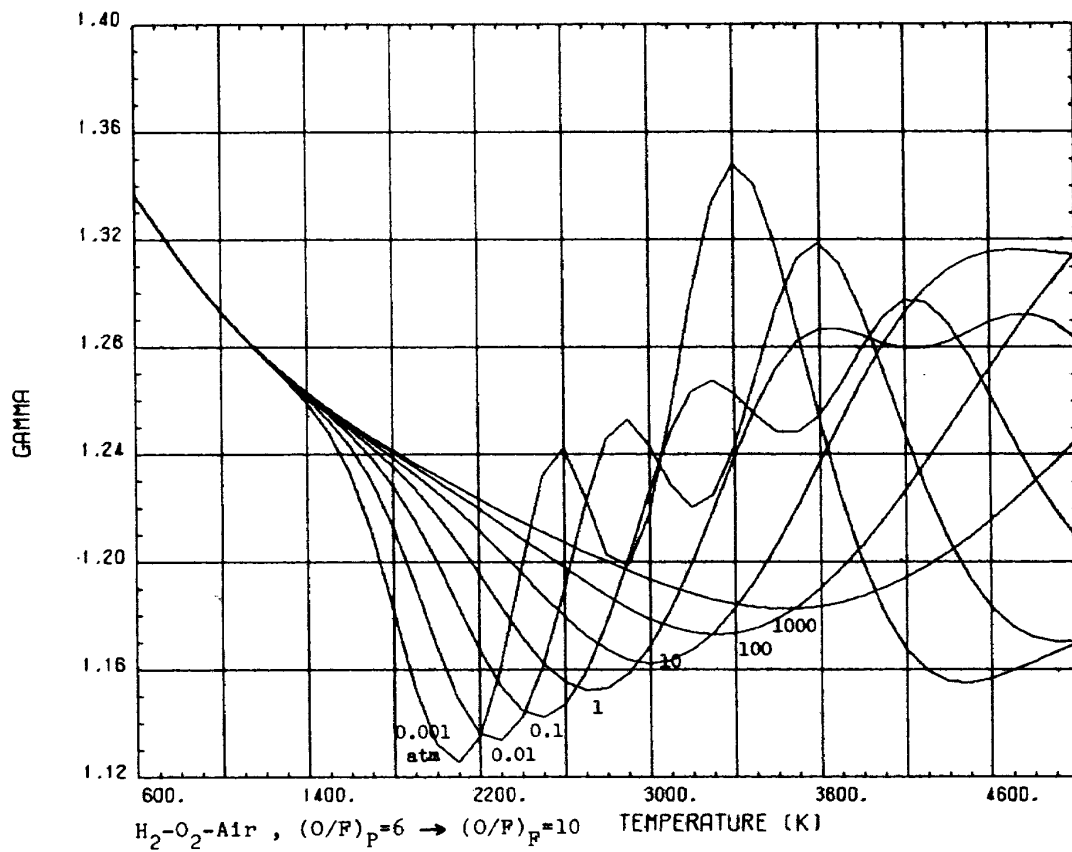


図 B-3-7-9

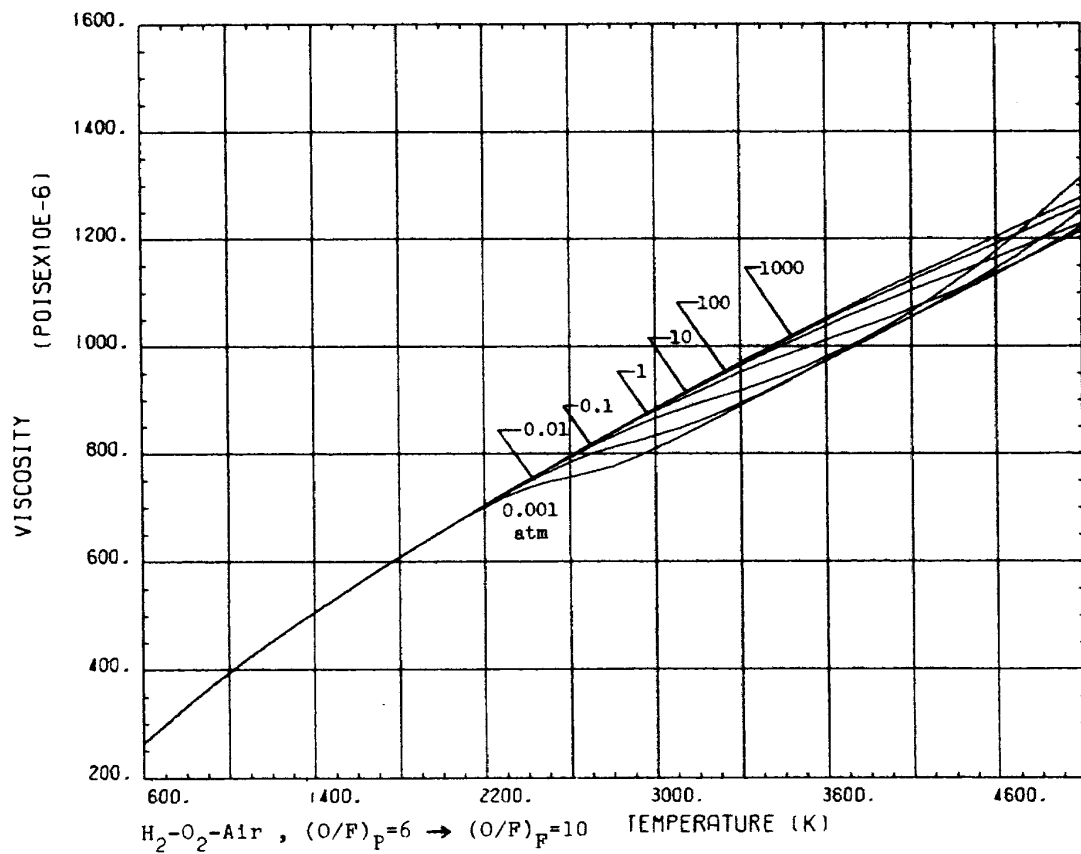


図 B-3-9-9

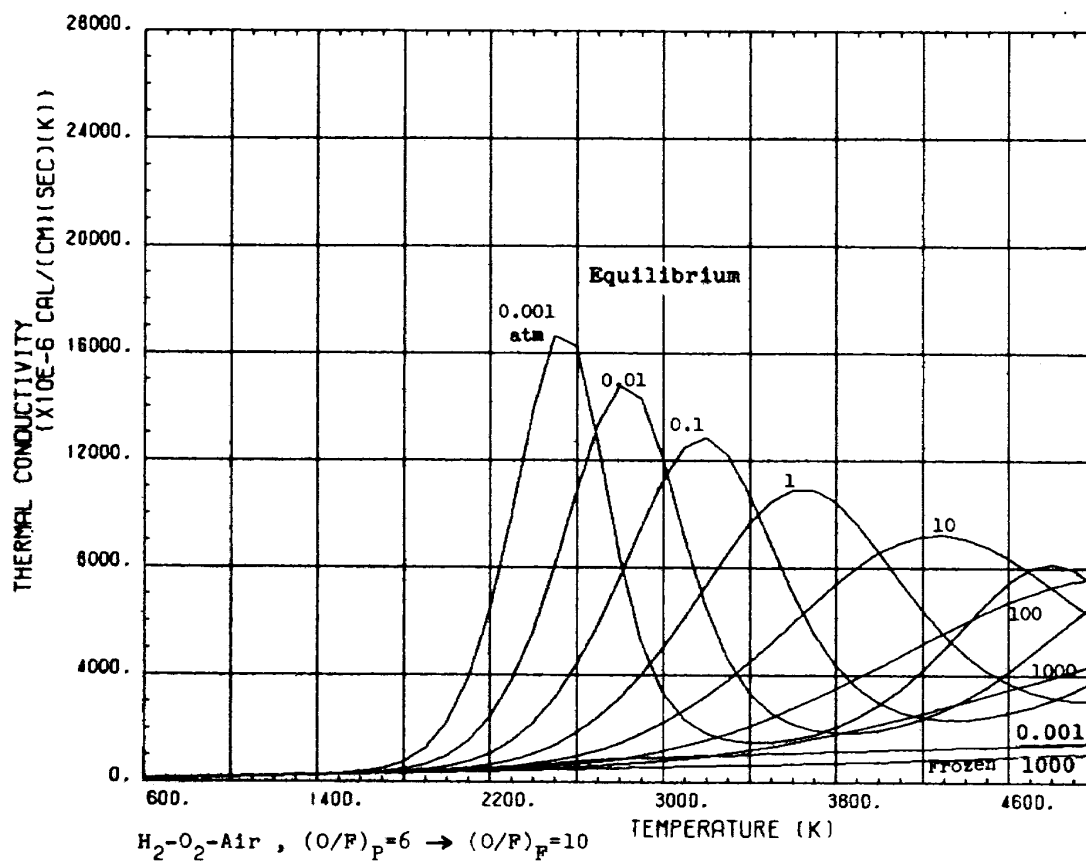


図 B-3-14-9

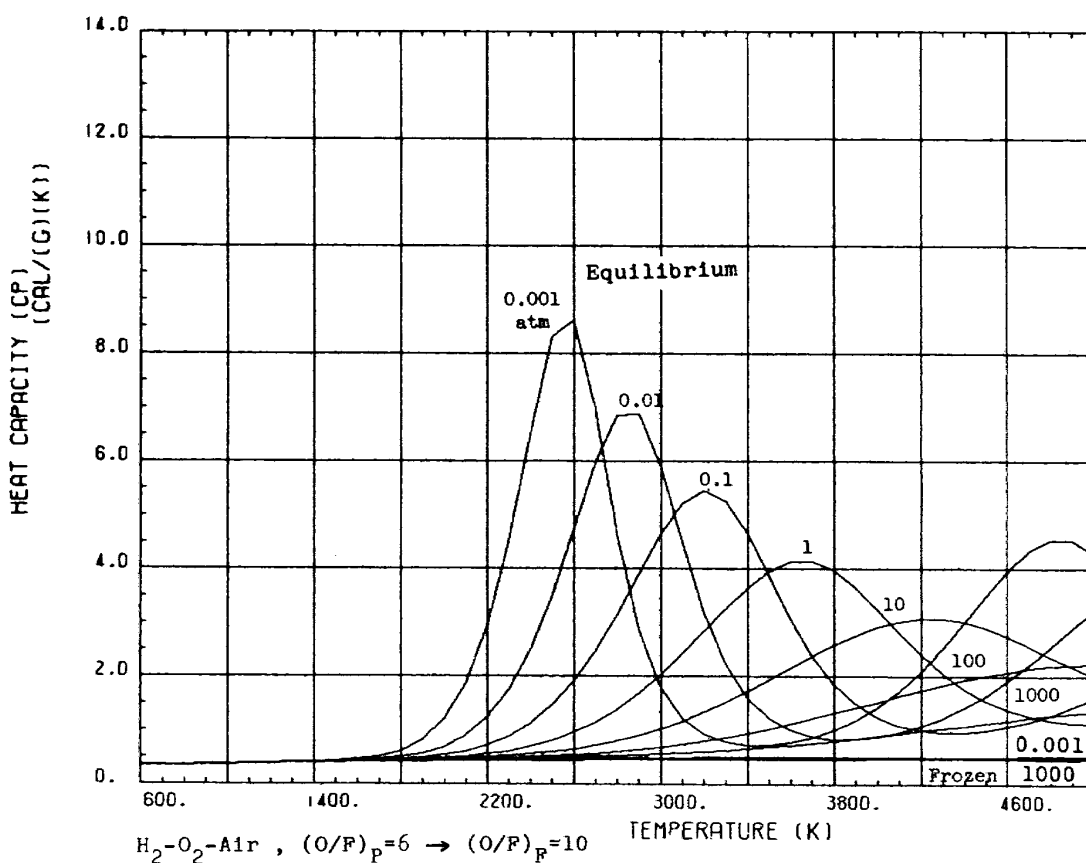


図 B-3-16-9

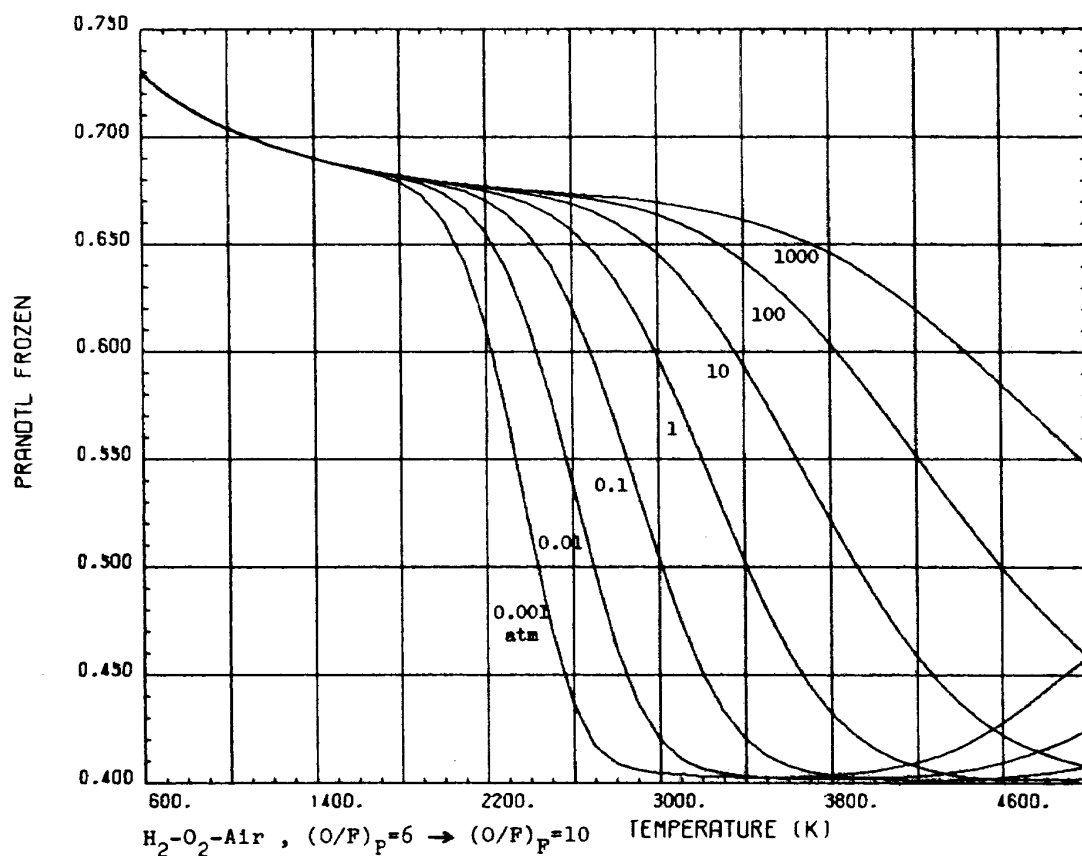


図 B-3-17-9

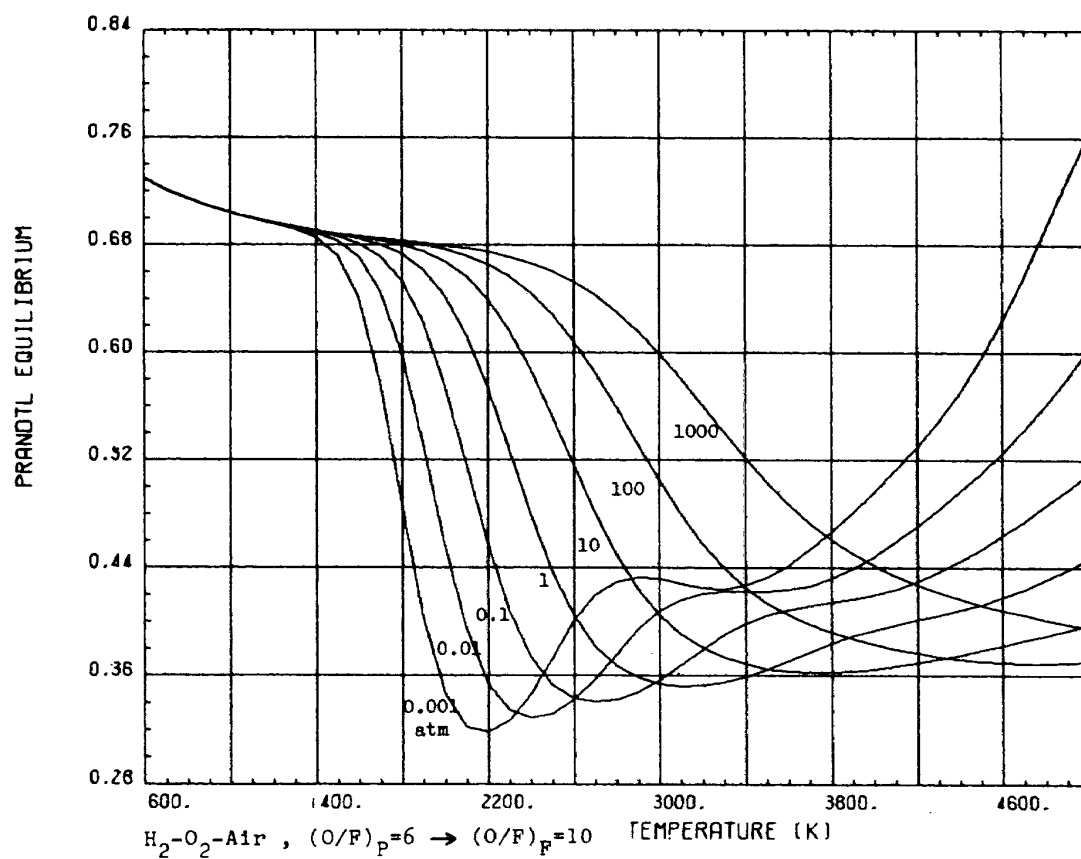


図 B-3-18-9

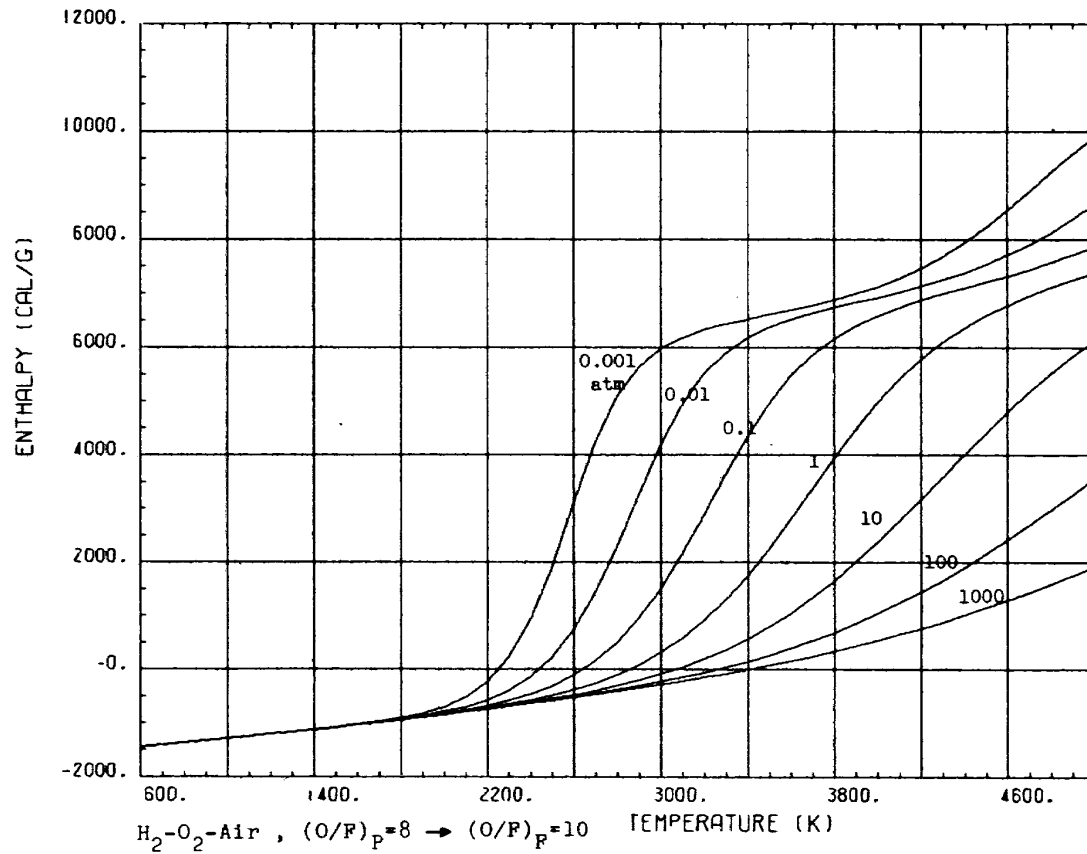


図 B-3-2-10

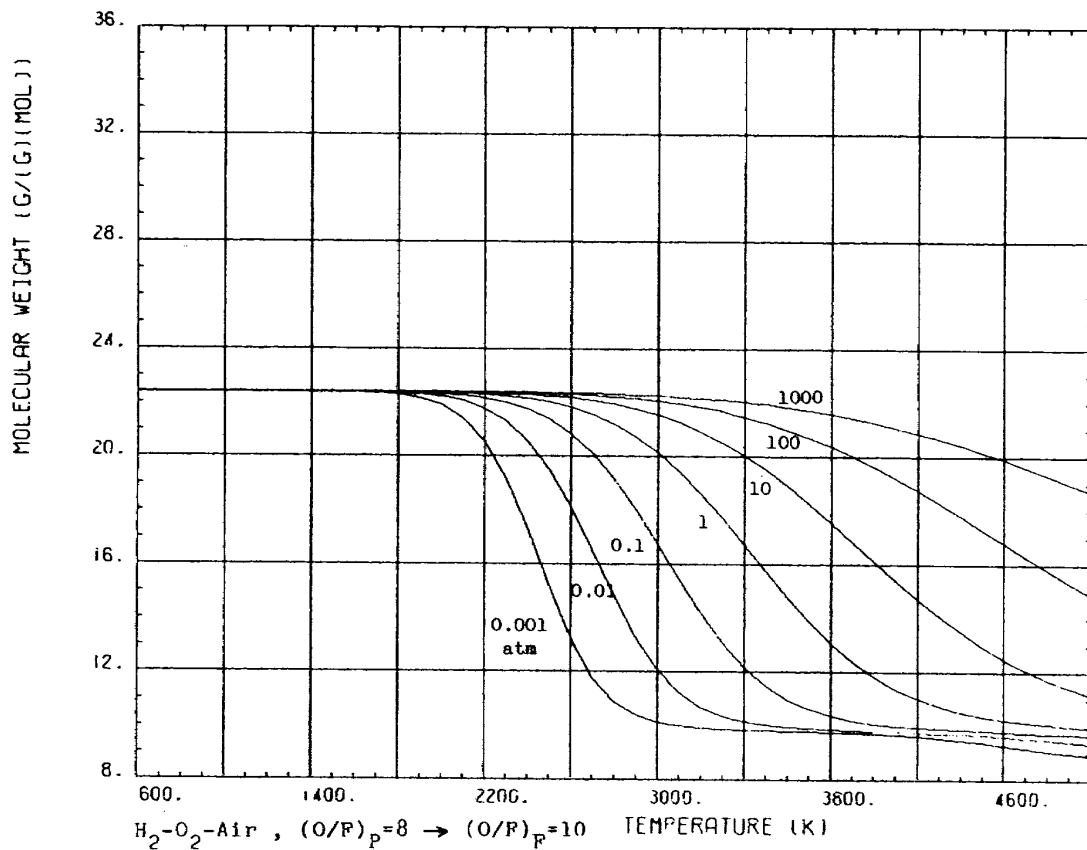


図 B-3-4-10

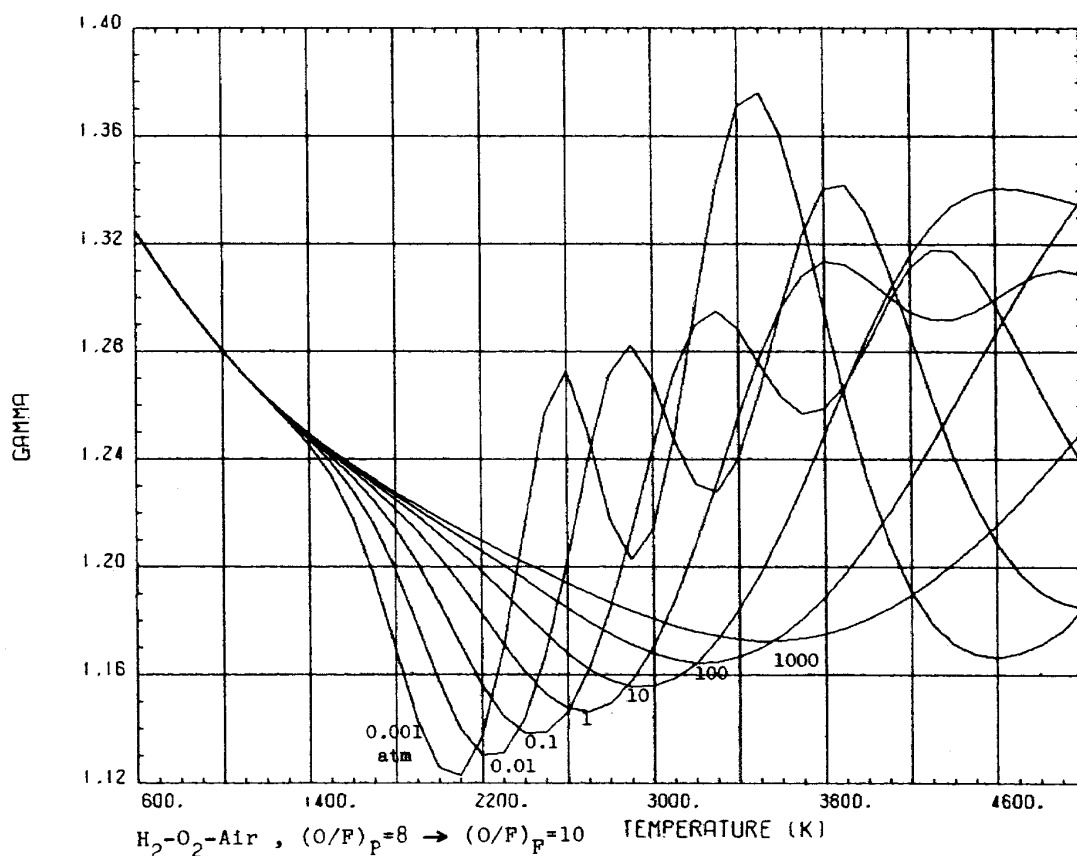


図 B-3-7-10

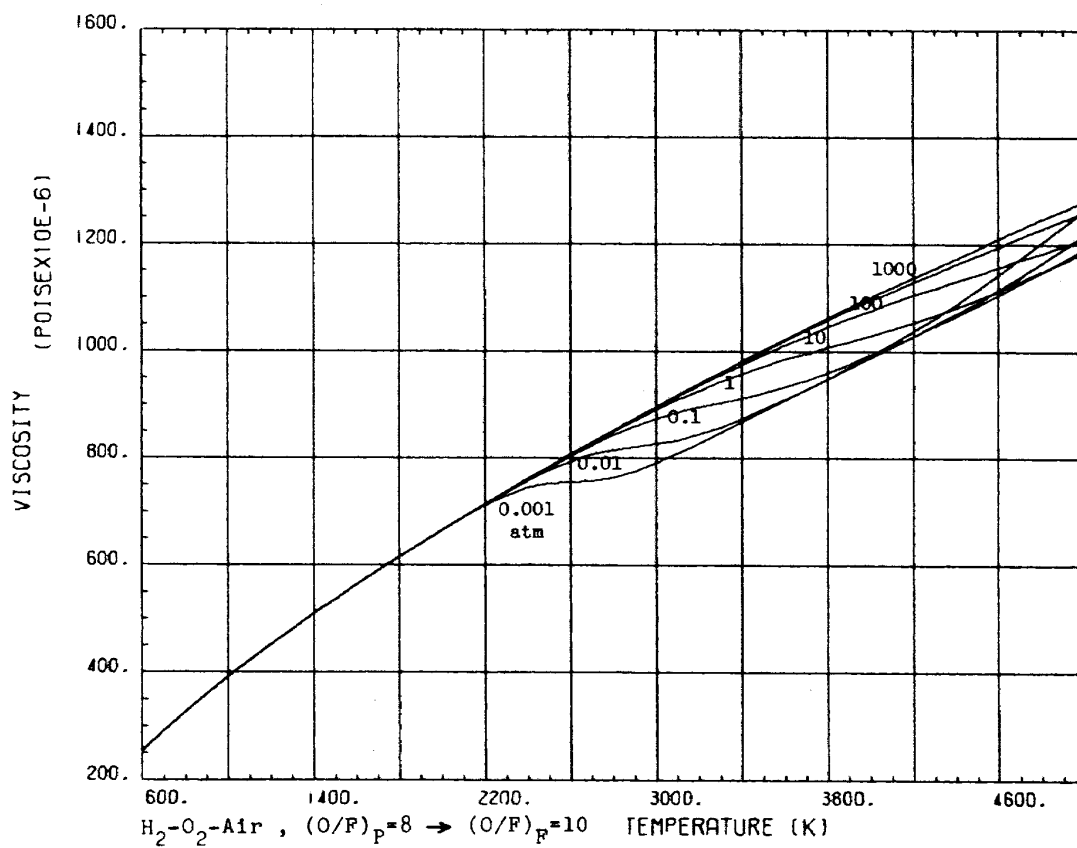


図 B-3-9-10

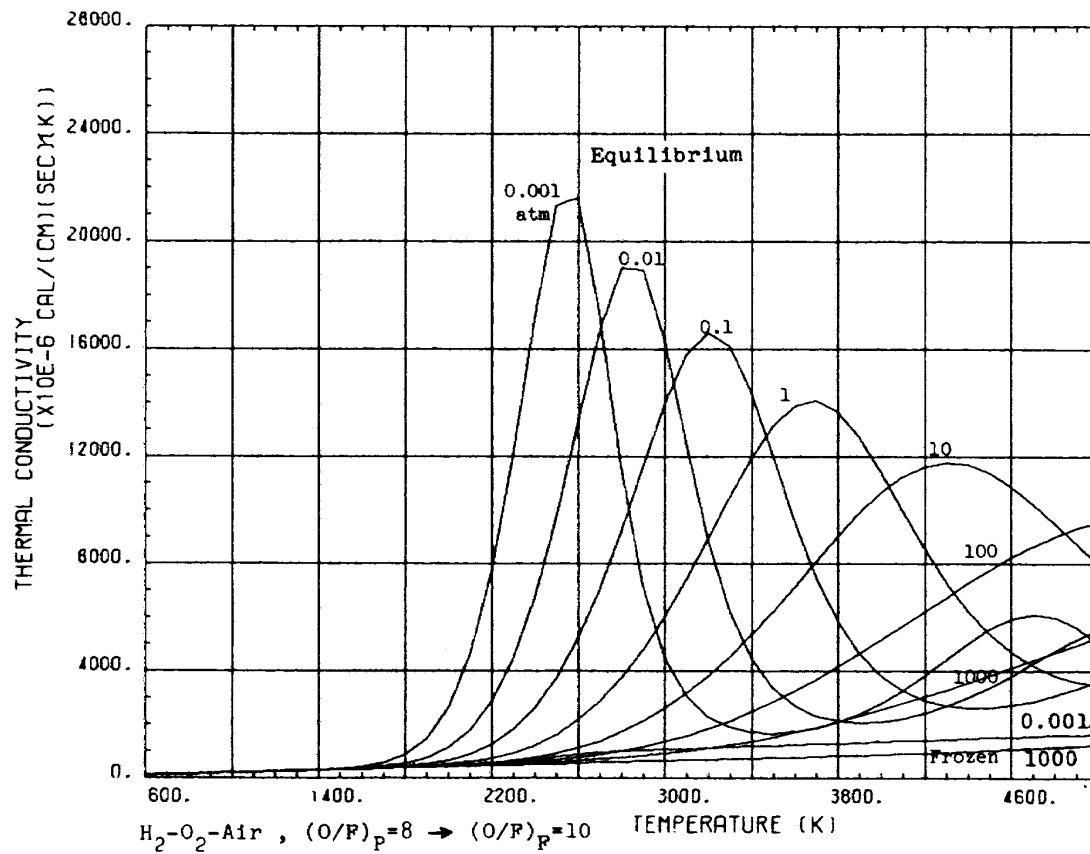


図 B-3-14-10

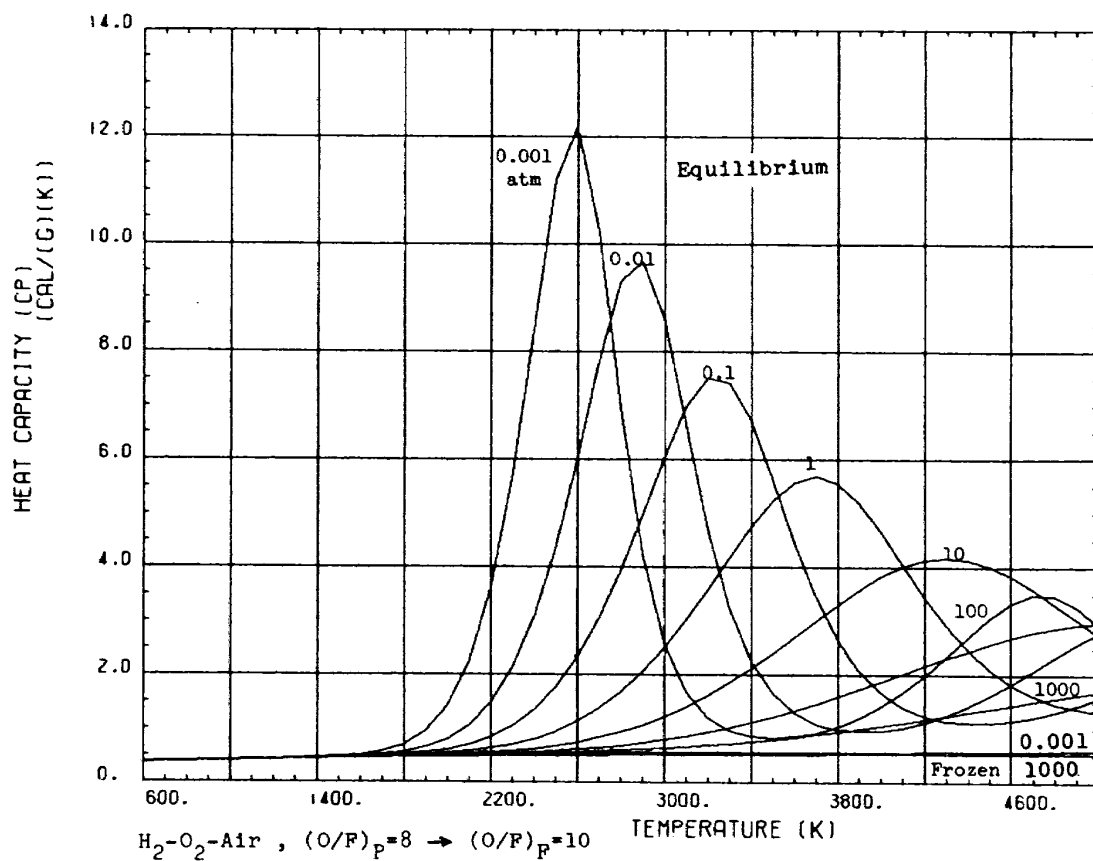


図 B-3-16-10

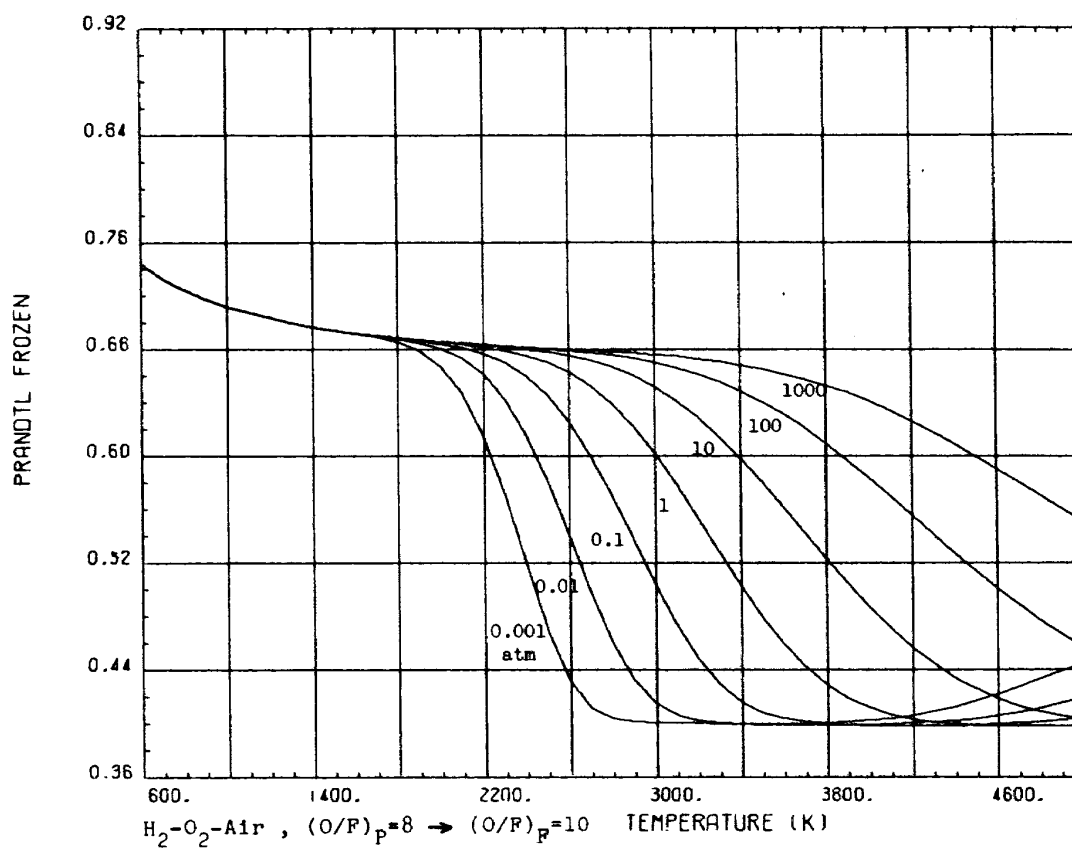


図 B-3-17-10

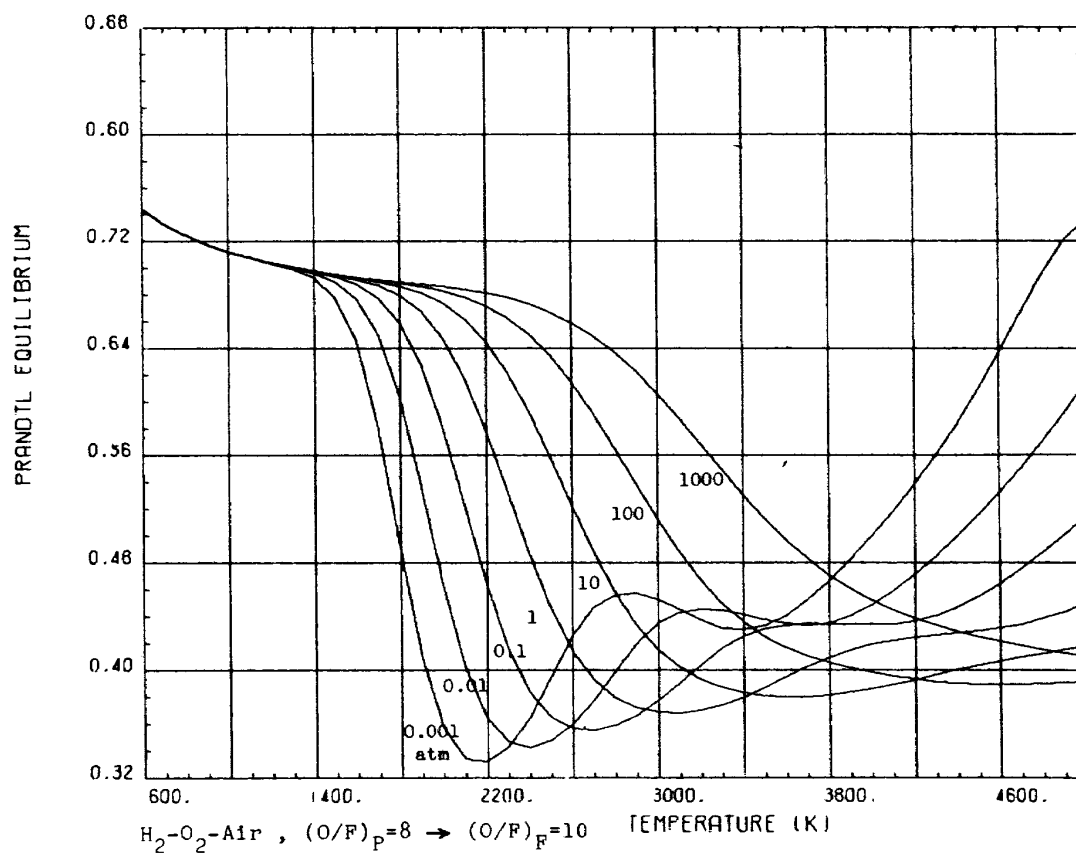


図 B-3-18-10

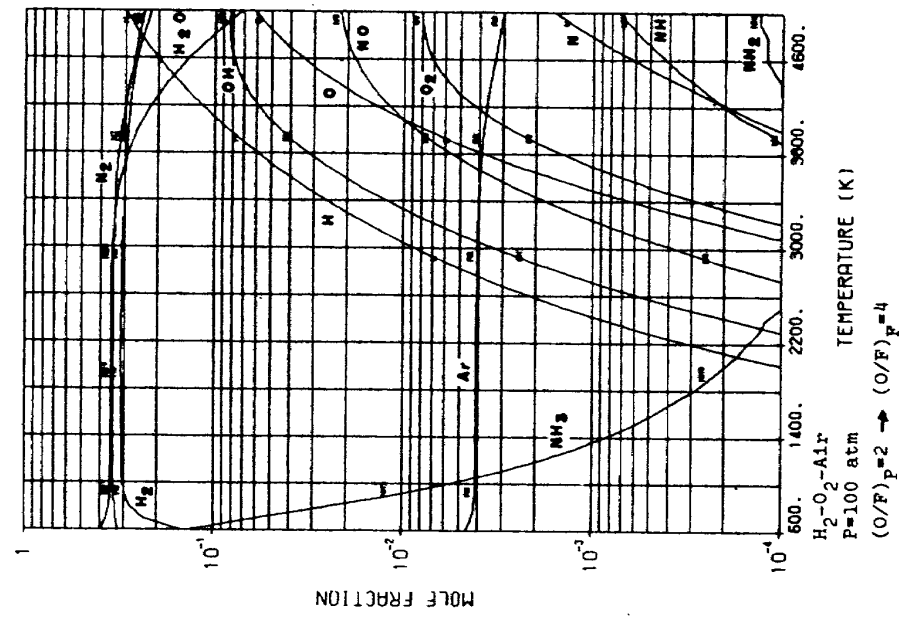


図 C-3-1

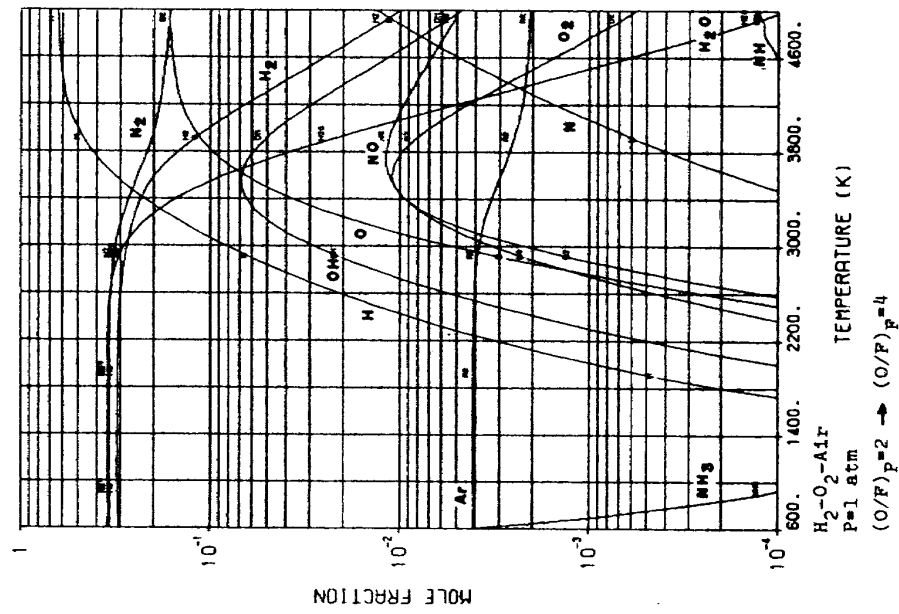


図 C-3-2

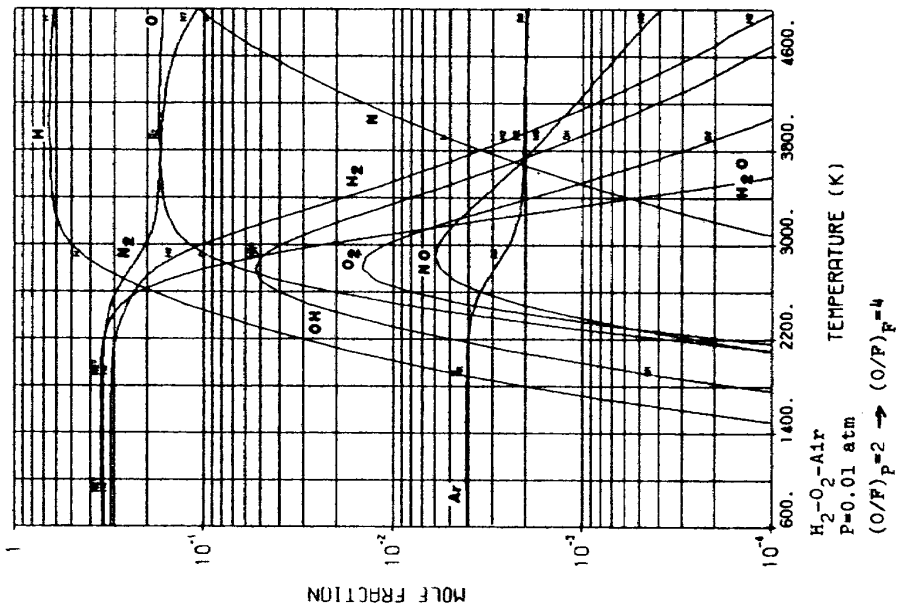
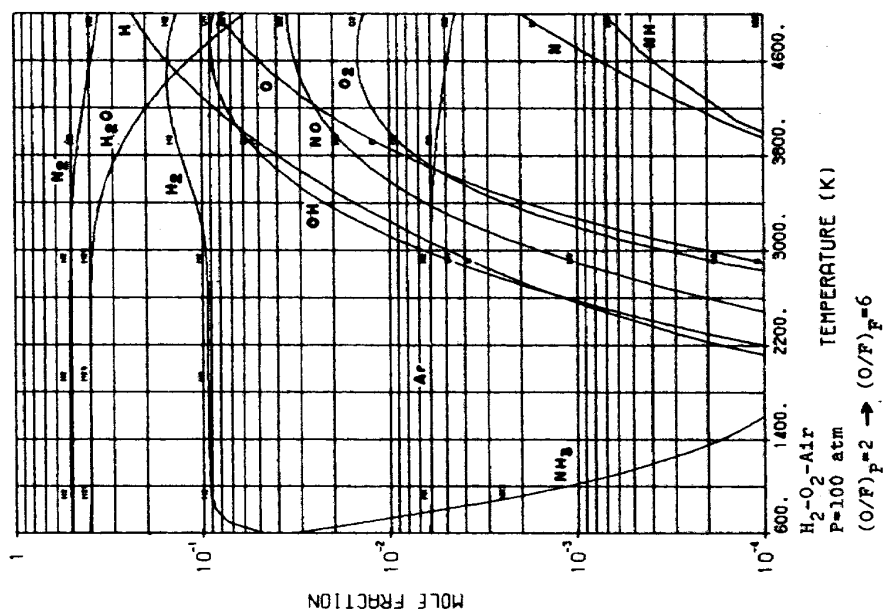
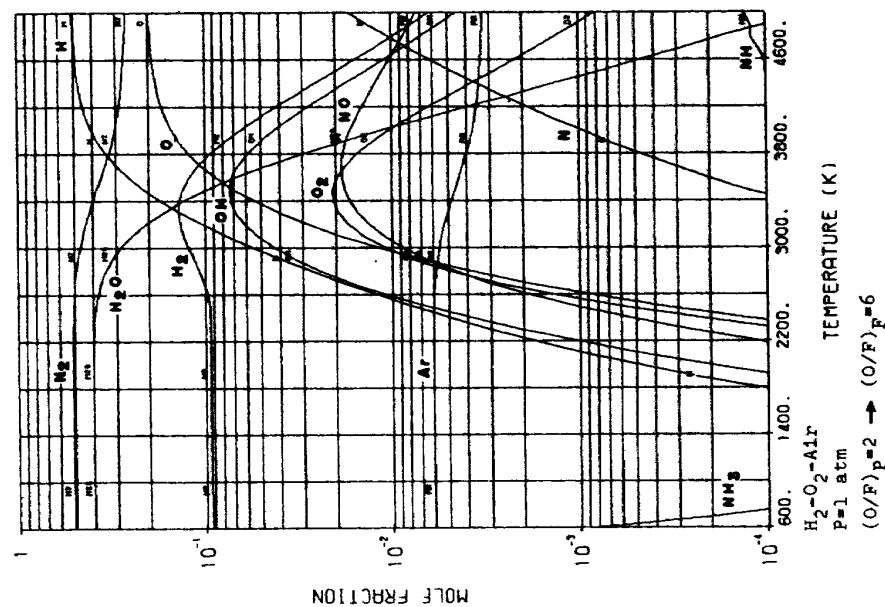


図 C-3-3

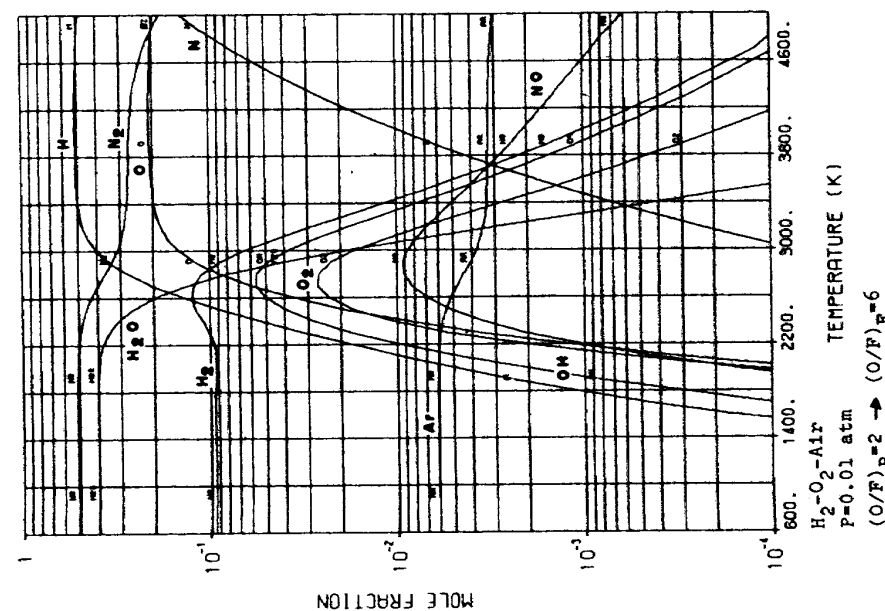




☒ C-3-6



☒ C-3-5



☒ C-3-4

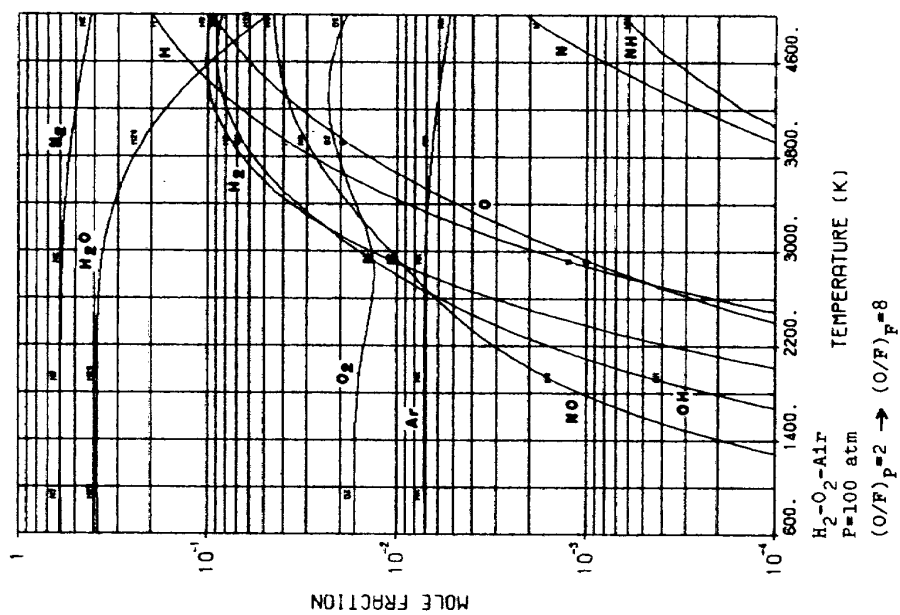


図 C-3-7

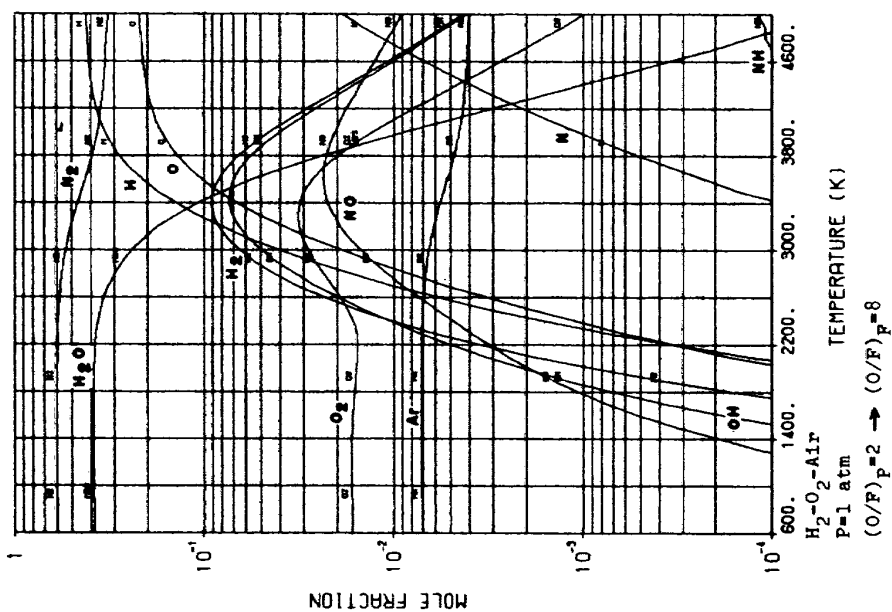


図 C-3-8

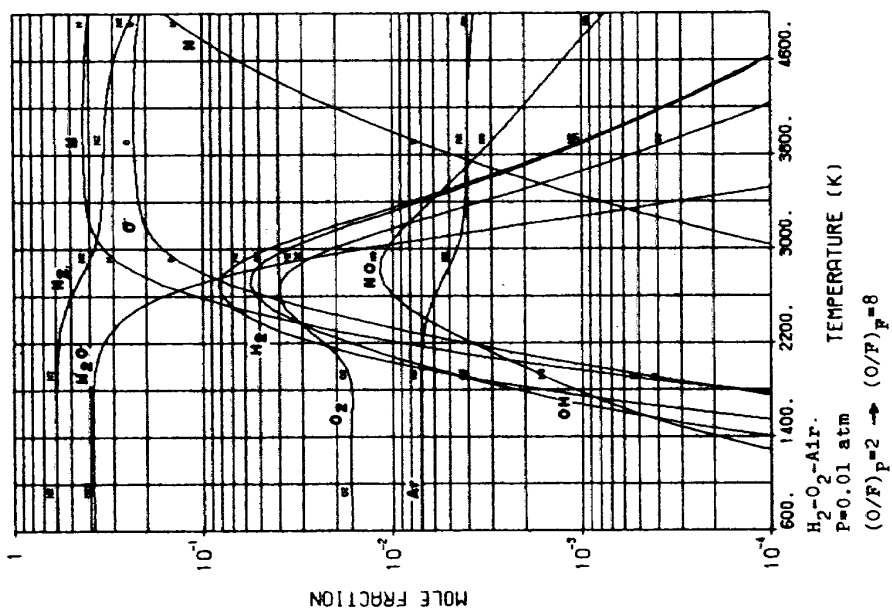
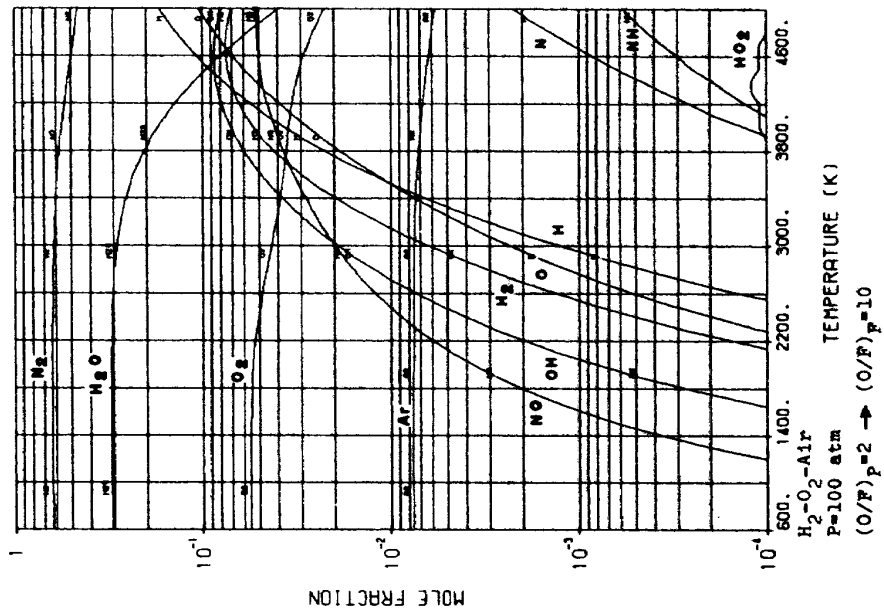
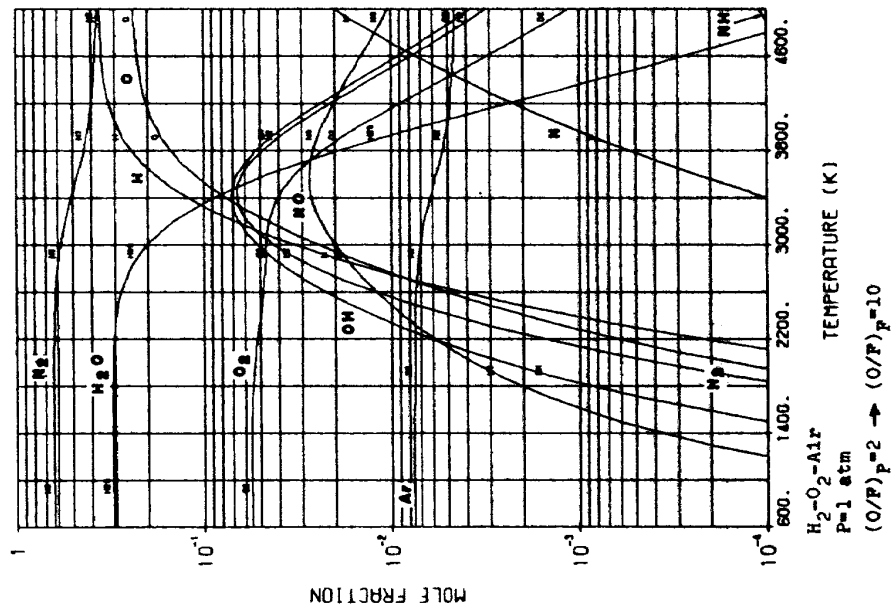


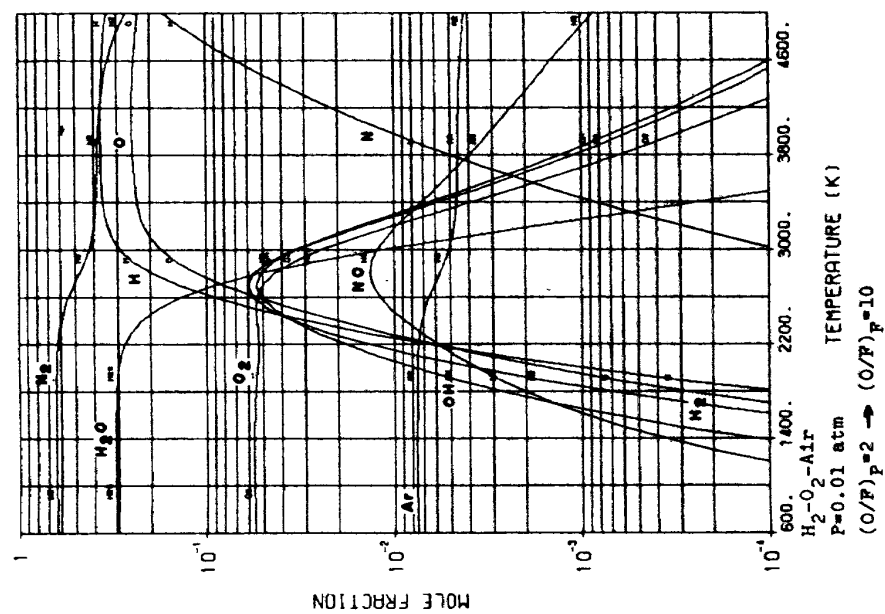
図 C-3-9



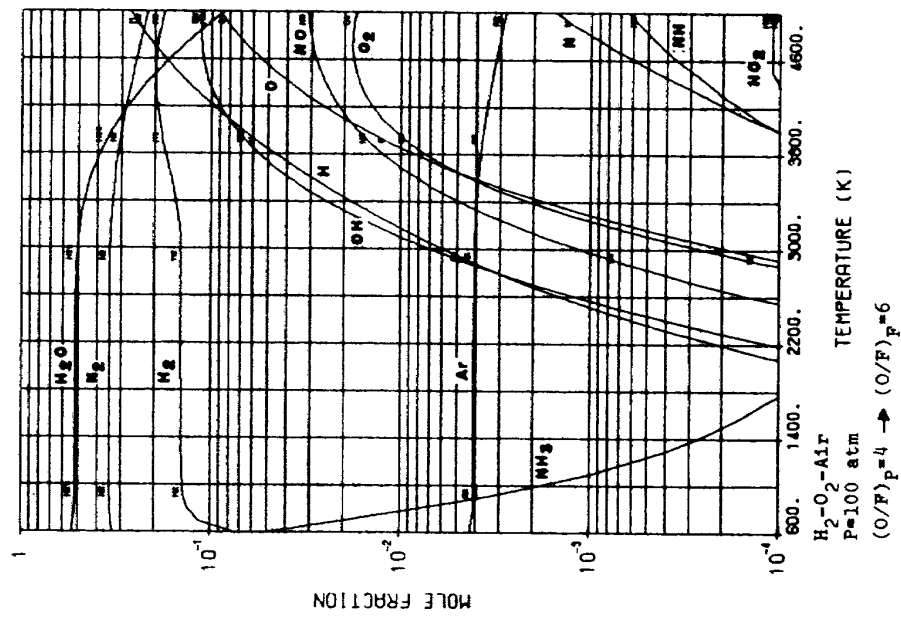
C-3-10



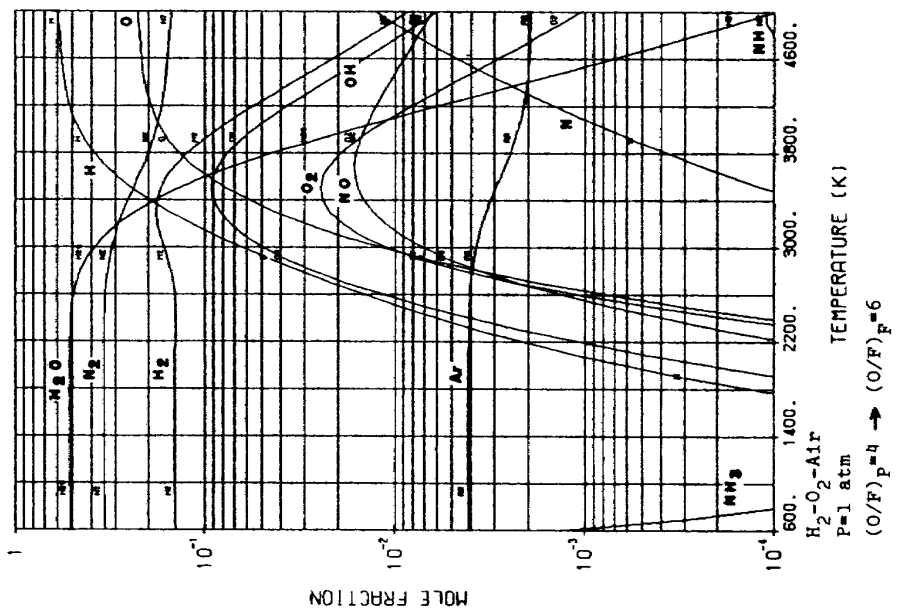
C-3-11



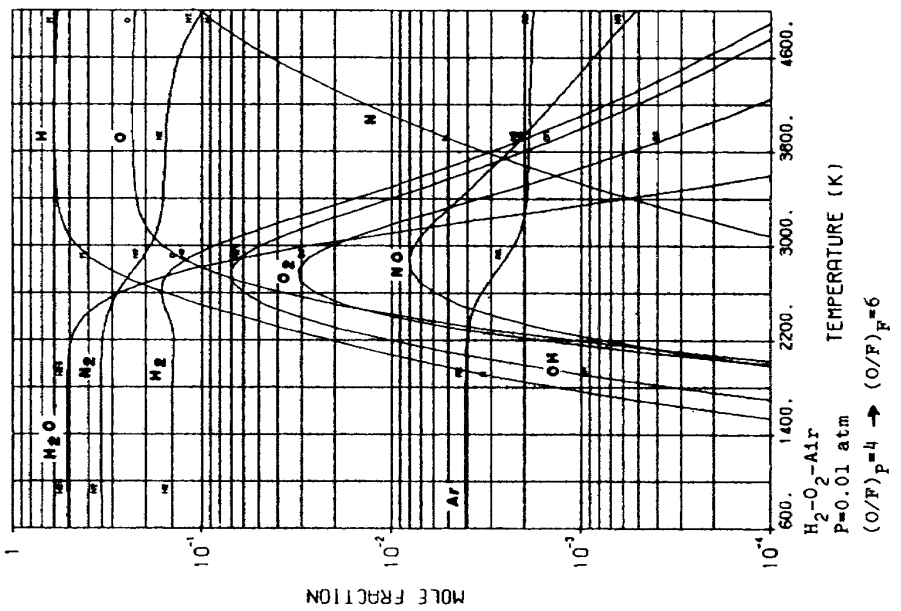
C-3-12



☒ C-3-15



☒ C-3-14



☒ C-3-13

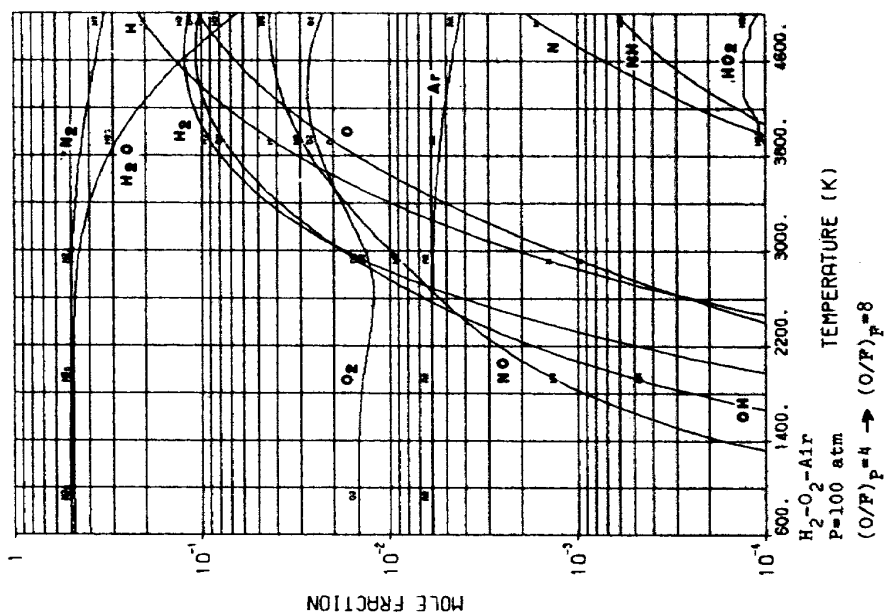


図 C-3-16

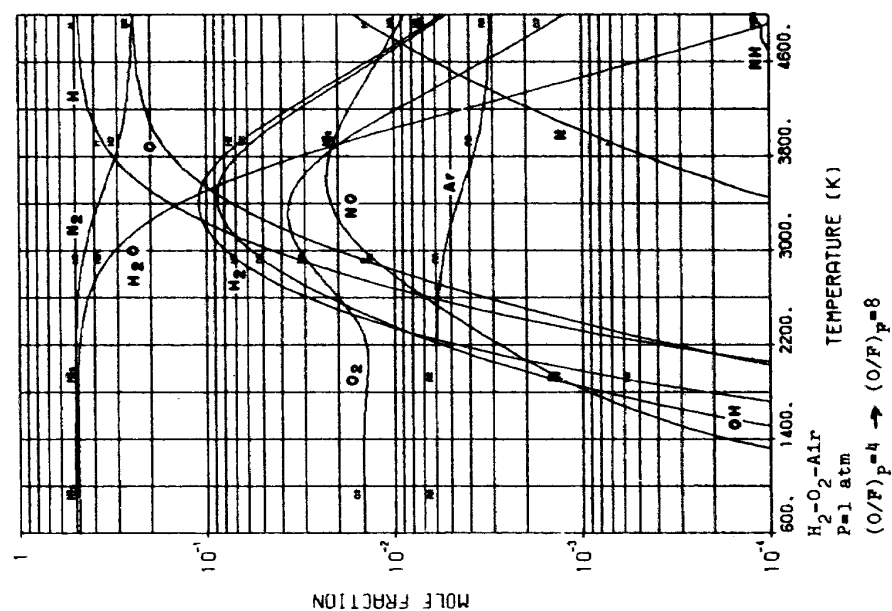


図 C-3-17

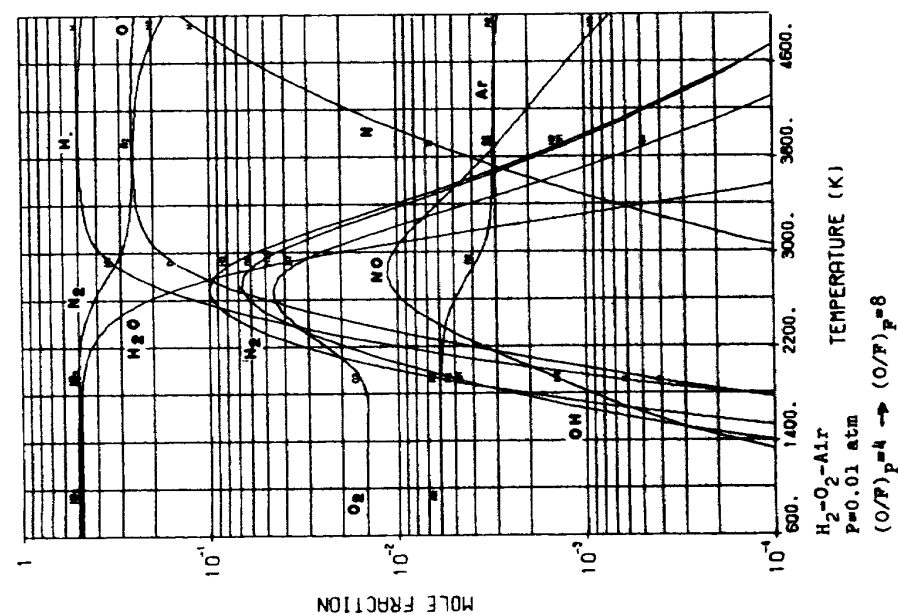
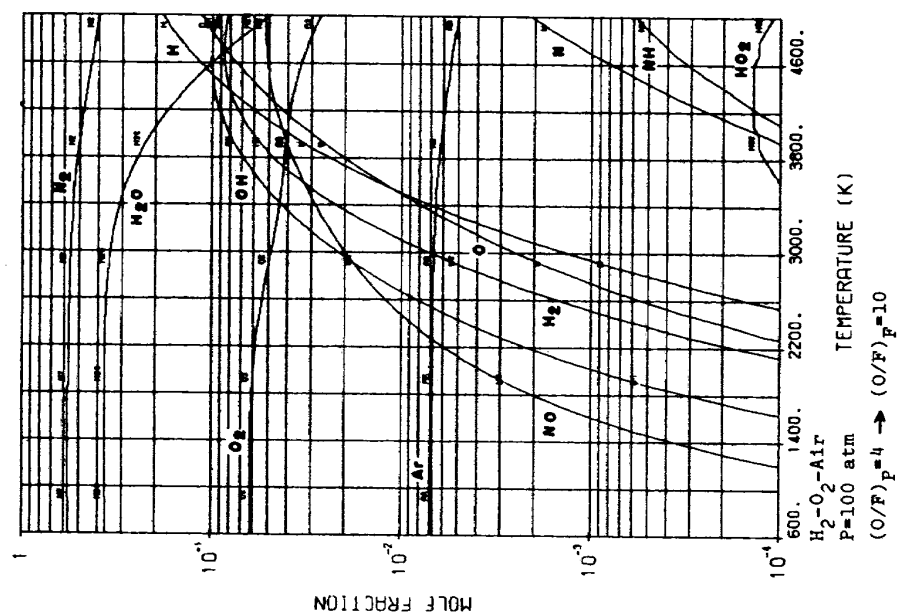
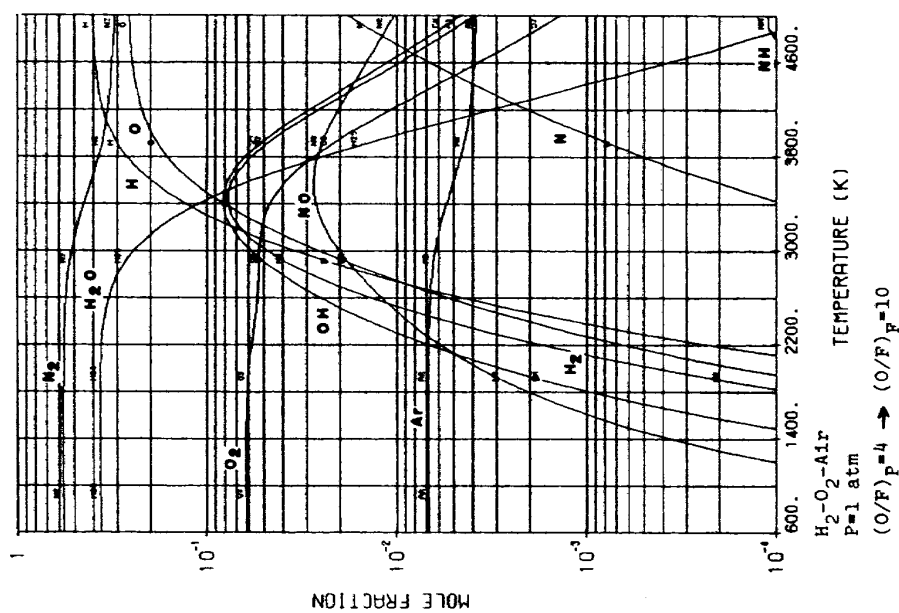


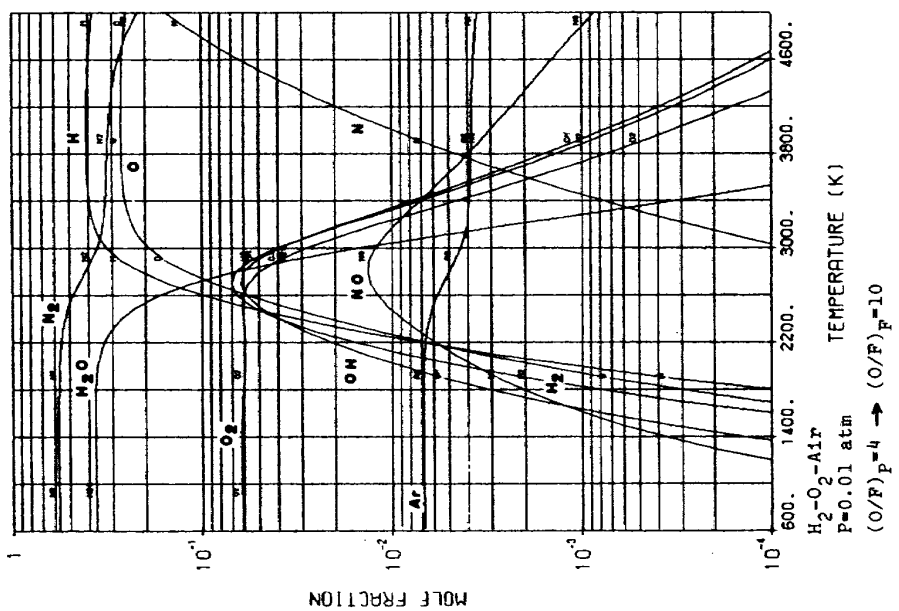
図 C-3-18



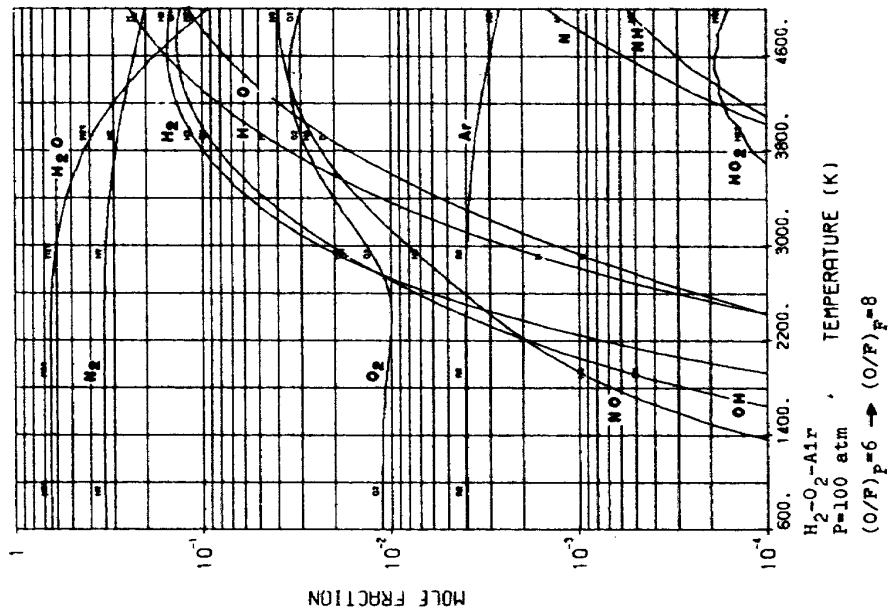
☒ C-3-21



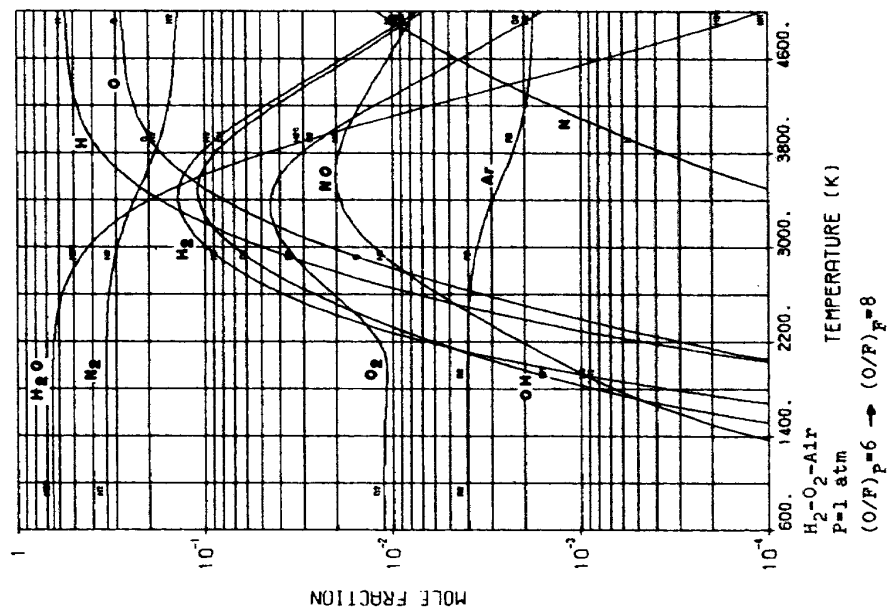
☒ C-3-20



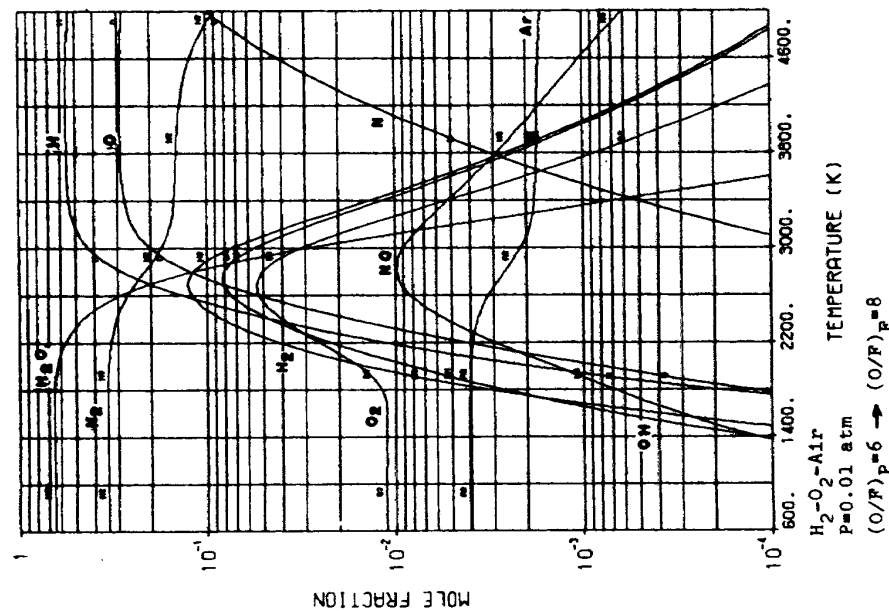
☒ C-3-19



☒ C-3-22



☒ C-3-23



☒ C-3-24

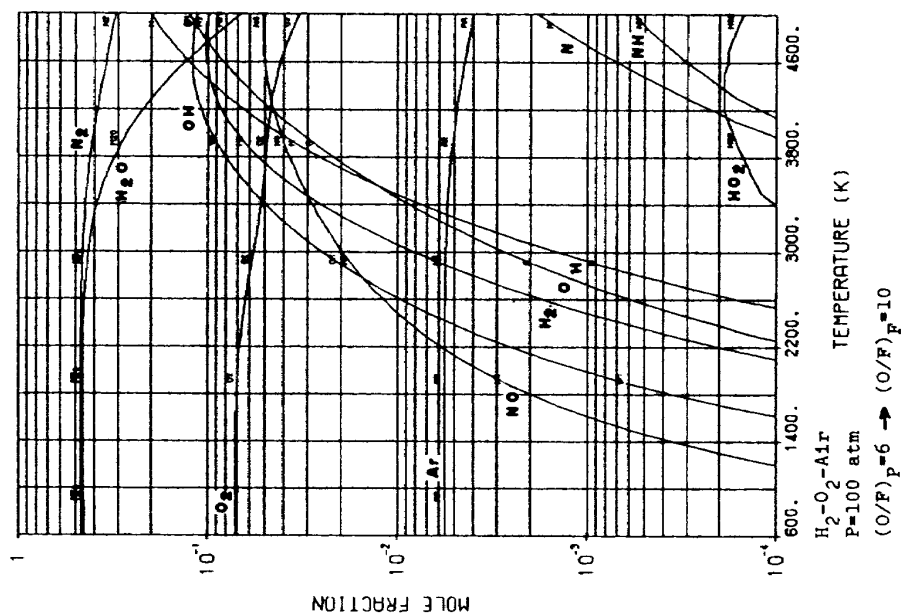


図 C-3-27

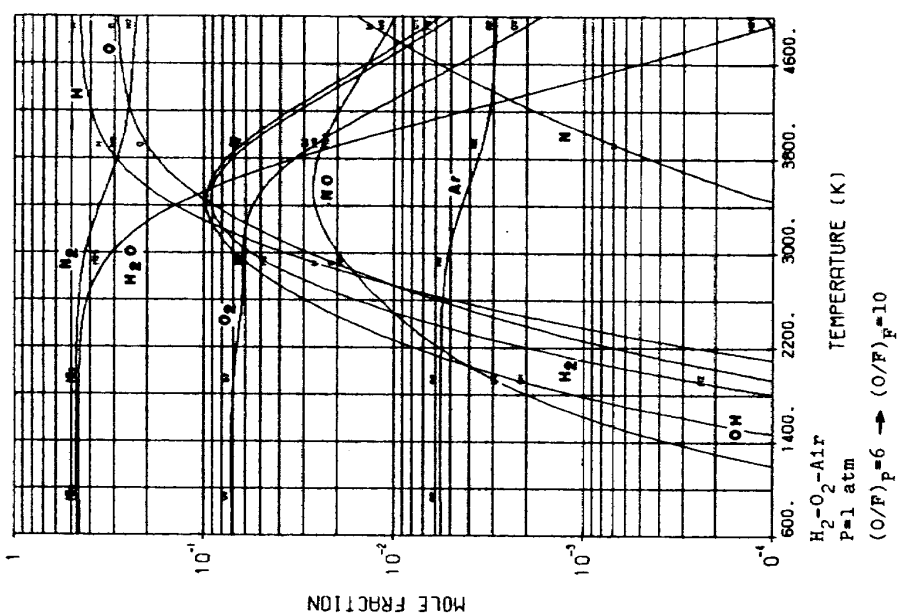


図 C-3-26

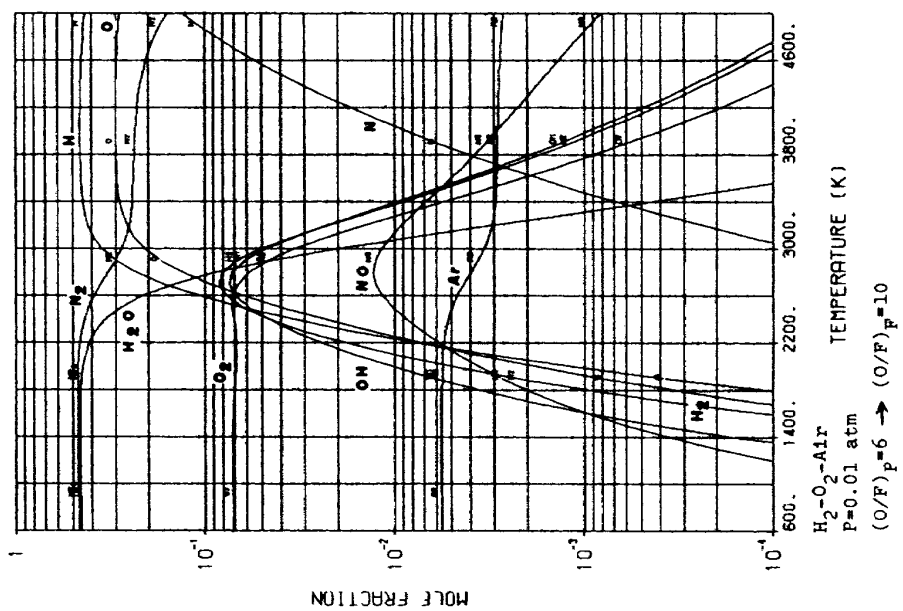
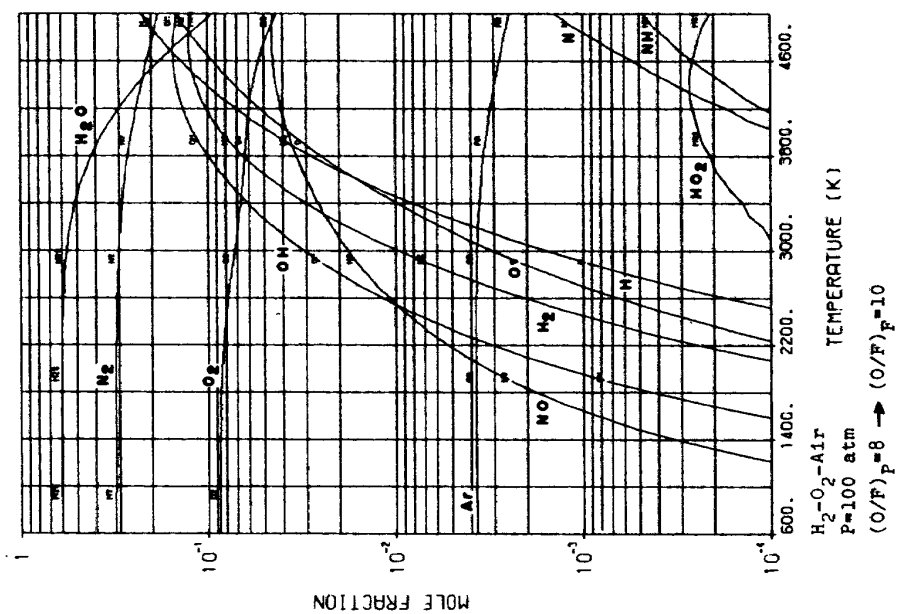
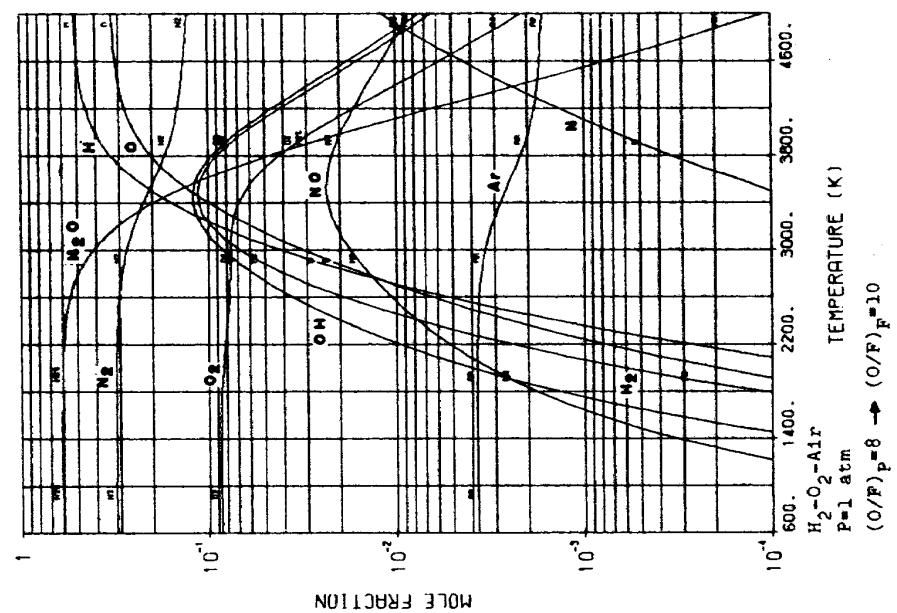


図 C-3-25

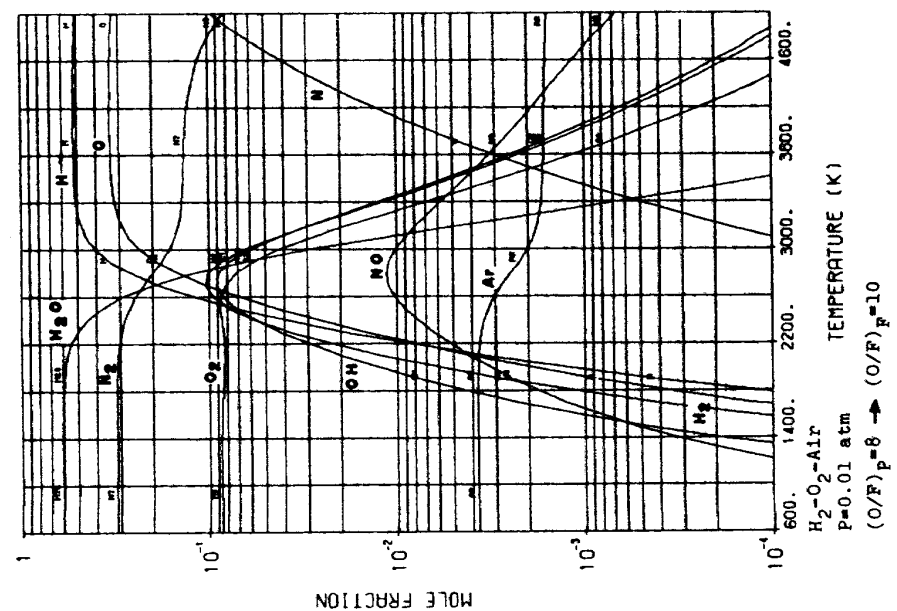




☒ C-3-30



☒ C-3-29



☒ C-3-28

---

## 航空宇宙技術研究所資料381号

昭和 54 年 5 月 発行

発行所	航空宇宙技術研究所
	東京都調布市深大寺町1880
	電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)☎182
印刷所	株式会社 三 興 印 刷
	東京都新宿区信濃町 12

---

