

UDC 662.613

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-421

炭化水素・酸素・空気系燃焼生成ガスの物性値

鈴木和雄・豊川光雄・毛呂明夫

1980年9月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

炭化水素・酸素・空気系燃焼生成ガスの物性値*

鈴木和雄** 豊川光雄** 毛呂明夫**

要 約

JP 4, RJ 5等の炭化水素燃料の燃焼生成物の熱力学物性値及び輸送物性値を計算し比較を行なった。

この結果、全般に断熱火炎温度(常温燃料酸化剤での)以下の領域では、燃料過剰の領域を除き、JP 4の燃焼生成ガスの物性値でRJ 5のそれを推定してもよい事、又比熱-平衡、熱伝導率-平衡等温度を横軸にして表示した場合にピークを有する物性値では、H/C比(水素・炭素原子比)の大きな炭化水素燃料の燃焼生成物ほどピーク値が大きく、且つメタン、JP 4, RJ 5の燃焼生成物のピーク値間の差が大きい事を示した。

このうちロケットプロペラントとして航技研で実験的検討を行なったJP 4については、JP 4-酸素、JP 4-空気、JP 4-酸素-空気の燃焼生成物の物性値を温度、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が読みとりにくい、温度を横軸に圧力を助変数とする付録に与えたJP 4燃焼生成物の物性値に関する平面図からこれらの値は容易に読みとれる。又物性値と組成の関係を理解する補助となるよう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。JP 4の計算点は、圧力0.001~1000atm、温度600~5000Kとし、組成は燃料過剰から酸化剤過剰まで広範囲に選んだ。

1. ま え が き

近年、炭化水素燃料が混合モード推進等の概念と結びつき見直されてきた。¹⁾炭化水素系燃料は、比推力が水素燃料に比較して低い事を除けば密度が10倍以上大きい事、RP 1等を燃料とする大型エンジンが既に開発され性能が実証されている事を考慮すると、このような気運はうなずけるものである。石油以外に原料を求める事も含め、安価でロケット燃料として優れた物性を有する高密度炭化水素燃料の探求が再び行なわれている。²⁾

この小論では、これら炭化水素燃料と酸素及び酸素・空気混合物の燃焼生成物について熱力学物性値、輸送物性値の簡単な比較を行ない、続いて比較の基準として用いたJP 4(燃焼生成物についてはRP 1と同一と見なせる)³⁾、酸素及び酸素・空気混合物の物性値の温度・圧力・混合比等による変動傾向の検討を行なう。

物性値は、定性的な変動傾向を見るための温度・圧力を変数とする立体図と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示した。燃焼生成物の平衡組成については、温度を横軸に代表的な圧力・

混合比(当量比)について示した。又これらのデータを用いる事により、先に著者等が報告⁴⁾したと同様に、角田支所計算センターのキャラクタディスプレイとの対話で容易に物性値が得られるシステムを構成した。

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) 燃焼生成物は、熱化学的に平衡状態にある。
- (3) 固体炭素の容積は、無視できる。
- (4) 火炎温度の計算にあたっては、断熱状態を仮定する。
- (5) 空気は、以下の組成を持つものとする。

N_2 78.0945 O_2 20.9730
 Ar 0.9325 (容積%)

- (6) 炭化水素-酸素系の平衡組成計算においては、以下の27種の化学種を考慮する。

$C(s)$, C , CH , CH_2 , CH_2O , CH_3 , CH_4 ,
 CO , CO_2 , C_2 , C_2H , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2O ,
 C_3 , C_3O_2 , C_4 , C_5 , H , HCO , H_2 , H_2O ,
 H_2O_2 , HO_2 , O , OH , O_2

* 昭和55年8月6日受付

** 角田支所

(7) 炭化水素-空気, 炭化水素-酸素-空気系の平衡組成計算においては, 以下の 45 種の化学種を考慮する。

Ar, C(s), C, CH, CH₂, CH₂O, CH₃, CH₄, CN, CN₂, CO, CO₂, C₂, C₂H, C₂H₂, C₂H₄, C₂N, C₂N₂, C₂O, C₃, C₃O₂, C₄, C₅, H, HCN, HCO, H₂, H₂O, H₂O₂, HNO, HO₂, N, NH, NH₂, NH₃, NO, NO₂, N₂, N₂C, N₂H₄, N₂O, N₂O₄, O, OH, O₂

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。^{3),5)}

断熱火炎温度の計算にあたっては, 定圧でエンタルピ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。(6), (7)の化学種の熱力学データは参考文献³⁾による。JP 4 の組成及び生成熱値の平衡組成計算での効果等は, NAL TM-354 を参照されたい。

2.2 輸送物性計算の仮定と方法

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。⁶⁾
- (4) 平衡組成の計算では, C(s)等の凝縮物を考慮したが, 混合気体の輸送物性には影響しないとする。

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⁷⁾を用いた。計算式の詳細は, 参考文献^{7),8)}を参照されたい。

3. 炭化水素系燃焼生成ガスの物性値の比較

ロケット推進薬として興味のある炭化水素系燃料の燃焼生成ガスについて, 物性値の比較検討を試みた。

近年, 炭化水素系燃料はデュアルモード推進と関連して推進薬密度が水素に比し大であるという面から, 又開発実績が既にあるという面からも, その利点が再び見直されつつある^{1),2)}事は, まえがきにも述べた。

表 1 は, このような高密度炭化水素燃料の例である。

同表の RJ 5 は高密度炭化水素燃料の代表的なものであるが, 液体酸素と組合せた場合の当量比対 (密度×比

推力) を図 1 に示す。同図には, JP 4 (RP 1) と液体酸素の組合せについても示したが, 密度×比推力のピーク値を比較すると約 1 割, RJ 5 が高い値を示す。

今後とも, 種々の炭化水素燃料がロケットプロペラントとして検討の対象とされようが, これら炭化水素系燃料の燃焼生成ガスの物性についての報告例は意外に少ない。メタン・酸素・空気系燃焼生成ガスの物性値については, G.F.Klich⁹⁾の報告が参考になる。

又, 著者等¹⁰⁾は, 先に飽和炭化水素系燃料を対象に炭素・水素・酸素・窒素系燃焼生成ガスの輸送物性値につ

表 1 高密度炭化水素燃料の例

Fuel	Density (g/cc)	H/C Ratio
Shellodyne-H (RJ-5)	1.08	1.29
Tetrahydrotricyclo-Pentadiene	1.04	1.47
exo-Tetrahydrodicyclo-Pentadiene (JP-10)	0.94	1.50
Decahydroacenaphthene	0.94	1.67
1, 7-Octadiyne	0.81	1.25

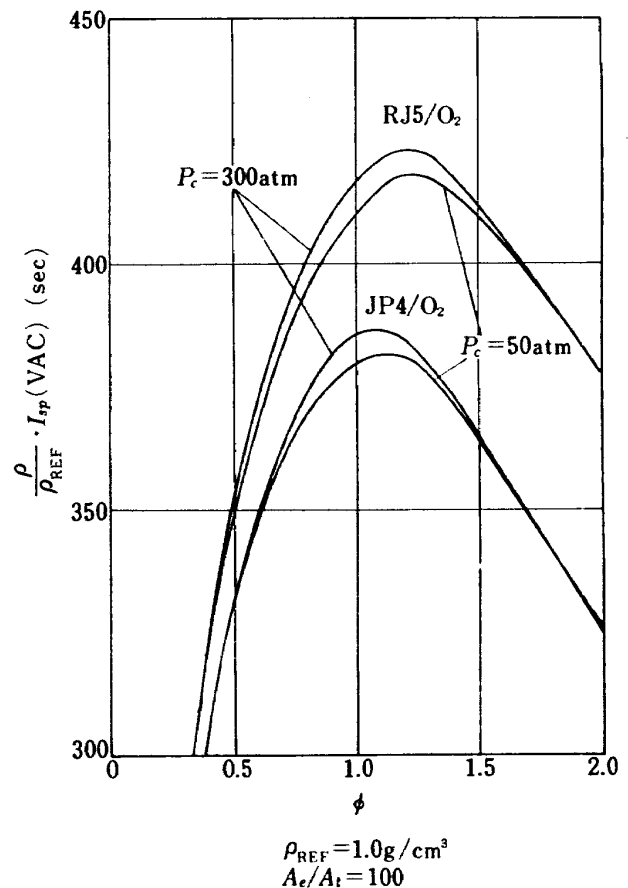


図 1 真空比推力×密度の比較図

いて、成分ガスの分子間力パラメータ等についてのパラメータスタディの結果を発表している。

この節では、後で詳述するJP4 (RP1)系燃焼生成ガスの物性値に対比する形で、高密度炭化水素燃料 (RJ5) との比較を主に試みる。酸化剤としては、炭化水素燃料の種類による特徴が比較的明らかな、酸素・炭化水素の組合せを例にとったが、参考のため空気・炭化水素の組合せをも併せて図示した。

3.1 比熱-平衡

図2は、比熱-平衡 ($C_{p,eq.}$) の比較例である。CH₄, JP4, RJ5間の差はピーク値近傍で大きくなり、H/C比が大きくなるとピークは高くなる傾向にある。

CH₄の燃焼生成ガスの $C_{p,eq.}$ 値は、RJ5と比較すると約1.6倍高い値を示す。高圧になるとH/C比による $C_{p,eq.}$ の差は小さくなる傾向にある。

JP4, RJ5間の当量比による影響を調べた例を図3~図5に示す。一般にJP4の燃焼生成ガスの $C_{p,eq.}$ 値はRJ5より高い値を示す。低温では当量比の増加に伴い $C_{p,eq.}$ 値は増加する。しかし、高温になると $C_{p,eq.}$ 値は逆に減少傾向を示す。解離に伴う組成変動の大きい3000Kでは量論比近傍でピークを示す。

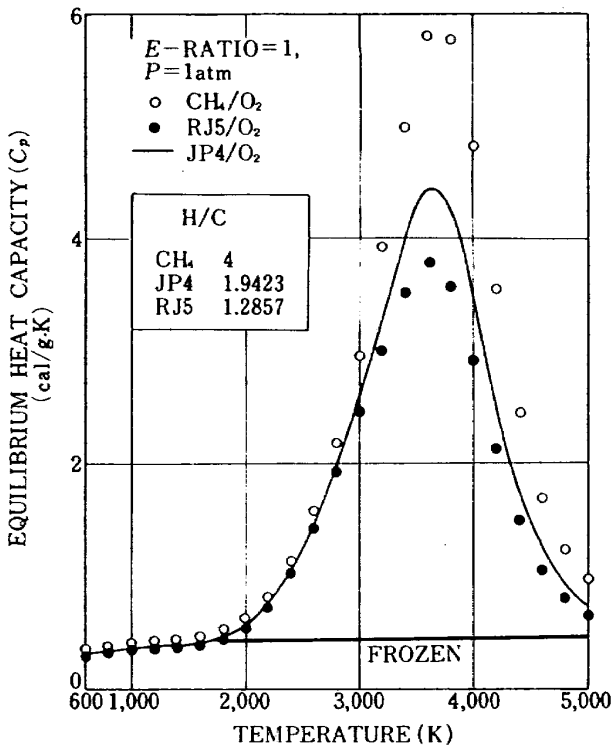


図2 H/C比による比熱-平衡の差異

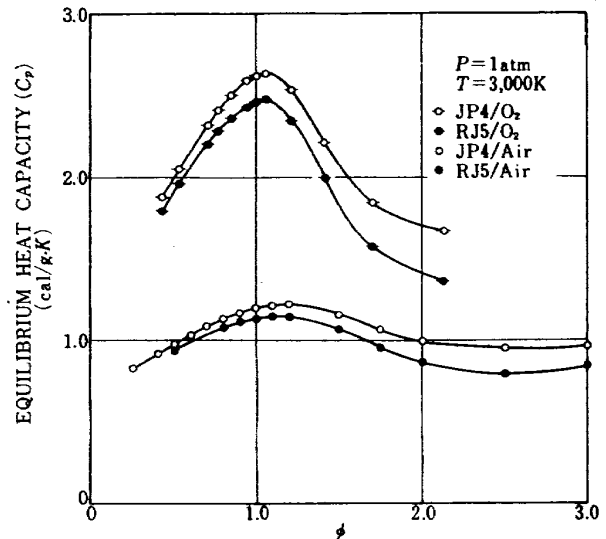


図4 当量比に対する比熱-平衡 (P=1atm, T=3000K)

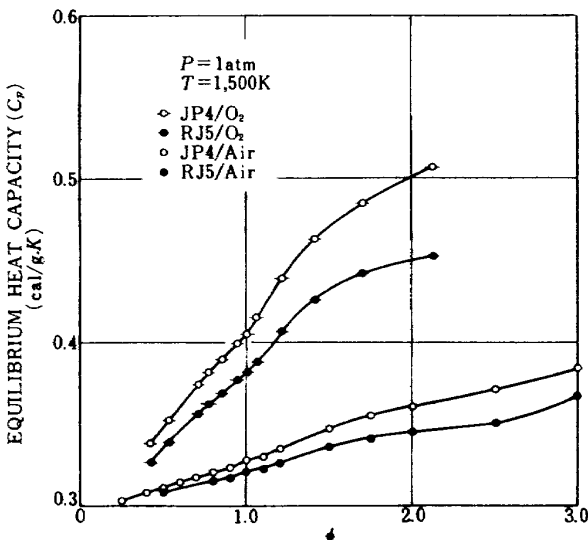


図3 当量比に対する比熱-平衡 (P=1atm, T=1500K)

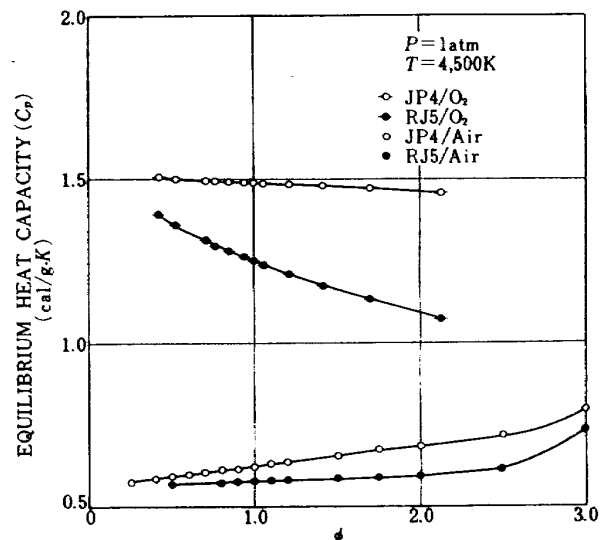


図5 当量比に対する比熱-平衡 (P=1atm, T=4500K)

3.2 比熱比

図6は、比熱比(γ)の比較例である。CH₄、JP4、RJ5間の差は低温及び3800K近傍で若干大きくなる。圧力の影響については、高圧になっても低温部でのこ

のような差は変わらないが、高温部では高圧になると差が小さくなる傾向にある。

当量比による影響を調べた例を図7～図9に示す。

低温では量論比近傍で極値を持ち、高温では当量比の増加に伴い γ 値は増加する傾向にある。しかし、全般的にJP4、RJ5間の差は小さい。

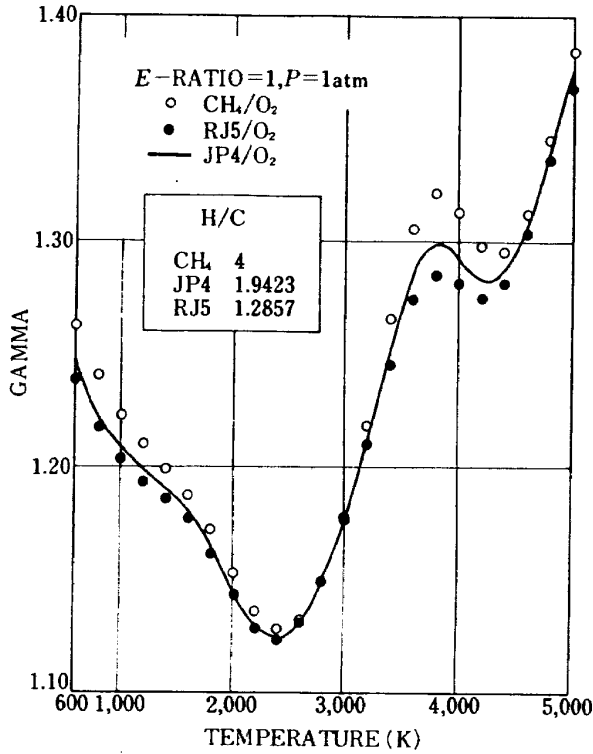


図6 H/C比による比熱比の差異

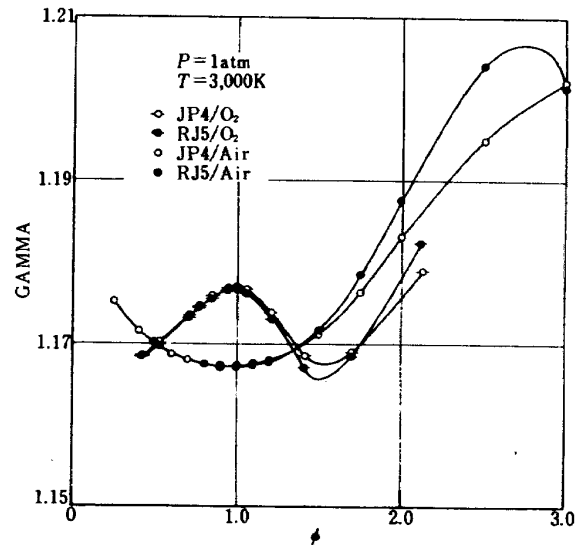


図8 当量比に対する比熱比
($P=1 \text{ atm}$, $T=3000 \text{ K}$)

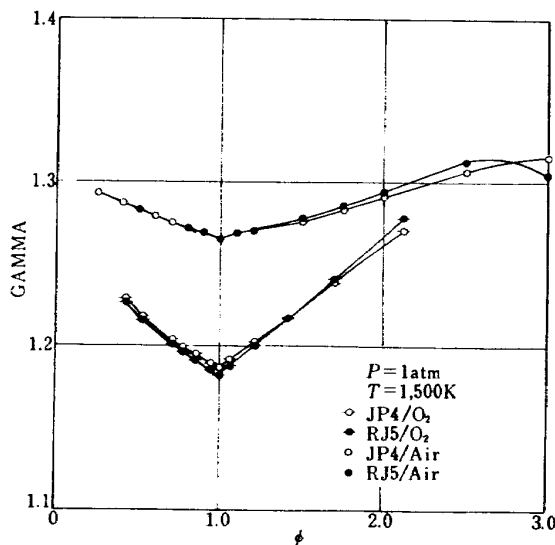


図7 当量比に対する比熱比
($P=1 \text{ atm}$, $T=1500 \text{ K}$)

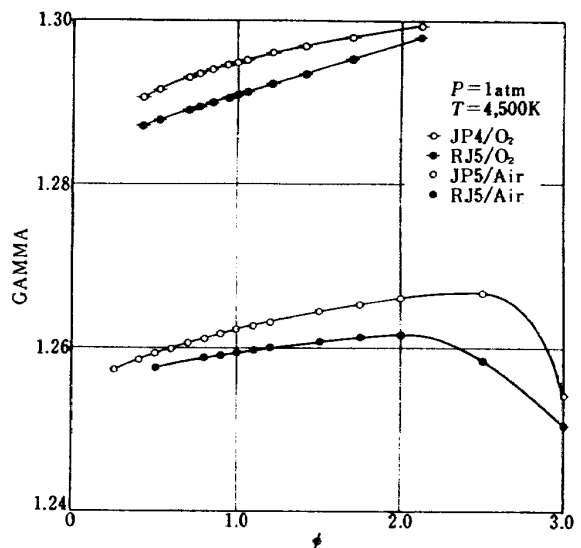


図9 当量比に対する比熱比
($P=1 \text{ atm}$, $T=4500 \text{ K}$)

3.3 粘度

図10は、粘度の比較例である。CH₄、JP4、RJ5間の差は小さい。圧力の影響については、高压になると

高温で差は若干大きくなる傾向にある。

JP4、RJ5間の当量比による影響を調べた例を図11～図13に示す。一般に当量比の増加に伴い粘度値は小さくなる。高温になるとどの当量比でもRJ5の方が、JP4より若干高い値を示す。

しかし、全般的に量論比から余りずれない範囲では、JP4の燃焼生成ガスの粘度で他の炭化水素の燃焼生成ガスの粘度を代表させうる。

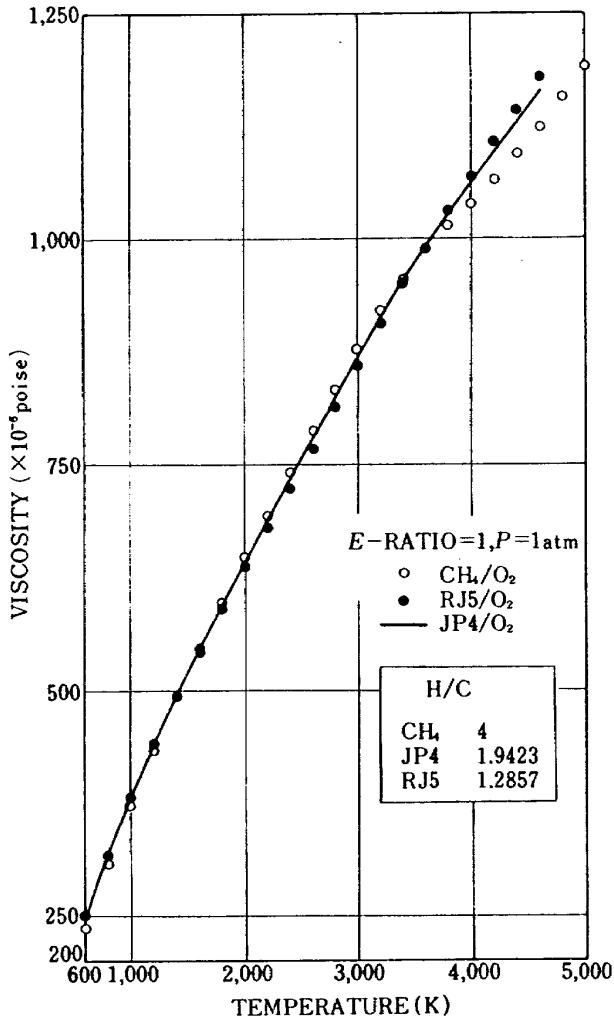


図10 H/C比による粘度の差異

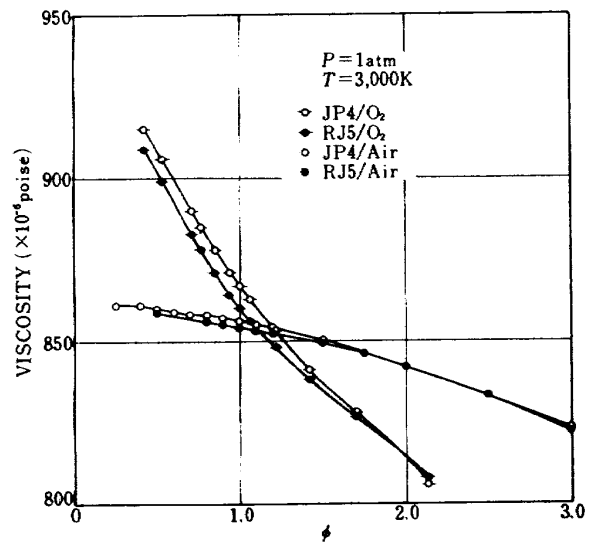


図12 当量比に対する粘度 (P=1 atm, T=3000 K)

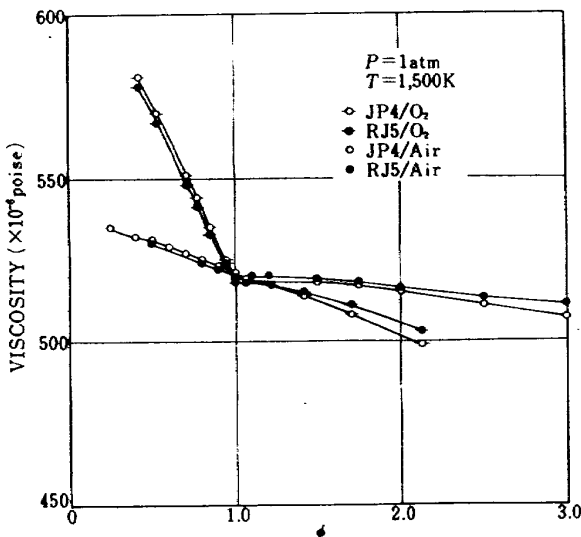


図11 当量比に対する粘度 (P=1 atm, T=1500 K)

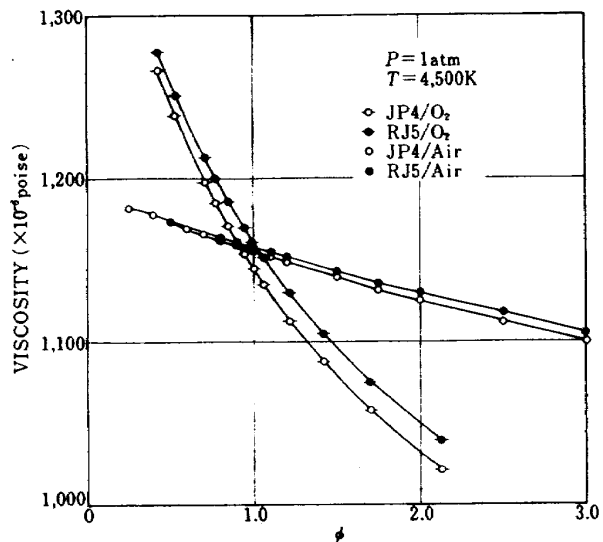


図13 当量比に対する粘度 (P=1 atm, T=4500 K)

3.4 熱伝導率-平衡

図 14 は、熱伝導率-平衡 ($\lambda_{eq.}$) の比較例である。ピーク値近傍で、 CH_4 、JP4、RJ5 間の差は大きくなり、H/C比が大きくなるとピーク値が高くなる傾向がある。 CH_4 の燃焼生成ガスは、RJ5のそれに比較すると約 1.6 倍高い値を示す。高圧になるとこのような差は小さくなる傾向にある。当量比による影響を調べた例を図 15 ~ 図 17 に示す。当量比が増加すると、JP4、RJ5間の差は若干大きくなる。低温及び高温では当量比の増加に伴って $\lambda_{eq.}$ も増加する。しかし、解離に伴う組成変動が大きい 3000K 近傍では、当量比の増加と $\lambda_{eq.}$ の関係は、図 16 に示すように単純ではない。RJ5 は JP4 の燃焼生成ガスの $\lambda_{eq.}$ よりも全般に低い値を示す。

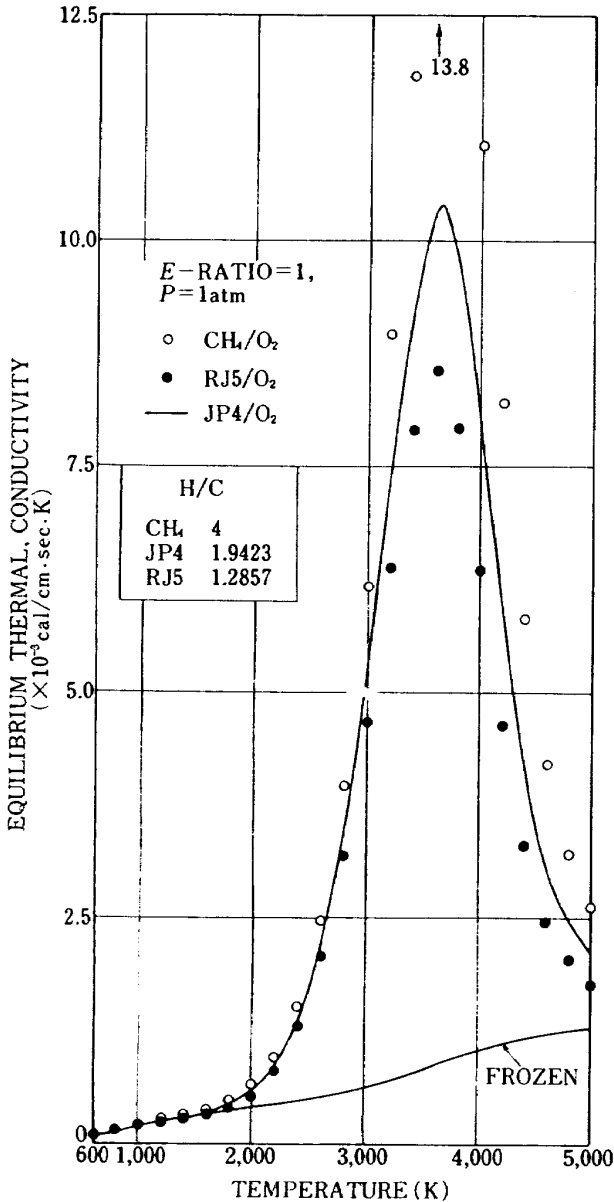


図 14 H/C比による熱伝導率-平衡

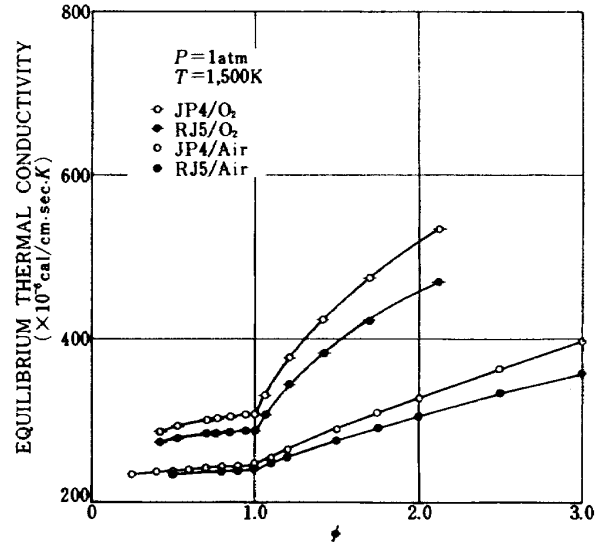


図 15 当量比に対する熱伝導率-平衡 (P=1 atm, T=1500 K)

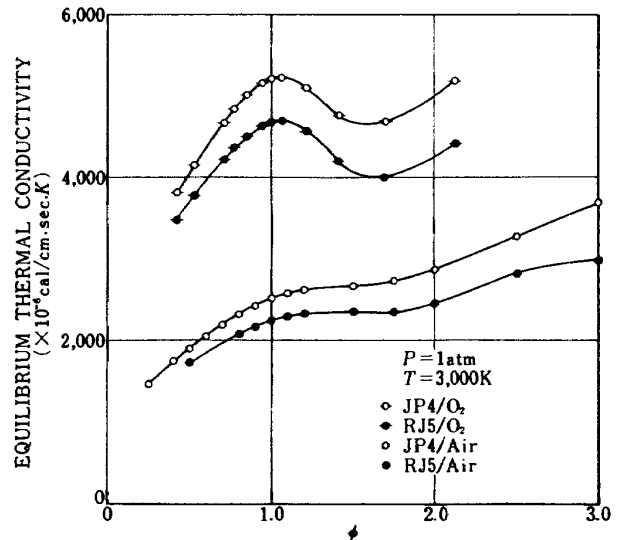


図 16 当量比に対する熱伝導率-平衡 (P=1 atm, T=3000 K)

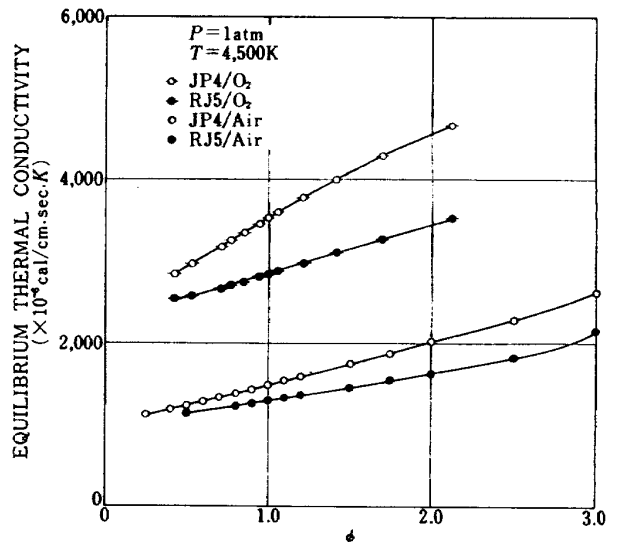


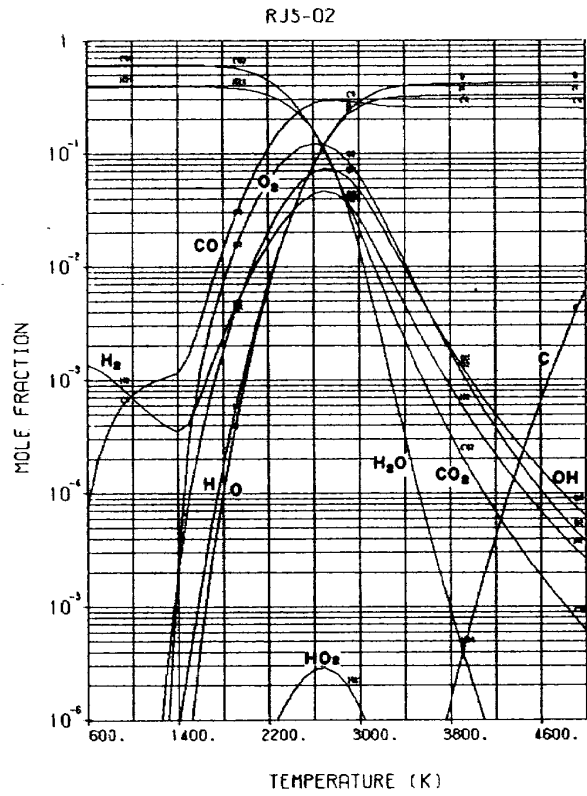
図 17 当量比に対する熱伝導率-平衡 (P=1 atm, T=4500 K)

3.5 平衡組成

図18～図23は、JP4-O₂、RJ5-O₂系の当量比1での平衡組成図である。両者に共通に言える事として、当量比1では燃焼生成物は本来CO₂とH₂Oのみが期待されるわけだが、高温では解離が無視できないためC_{p,eq.}、λ_{eq.}等(図2、図14)がピーク域を示す3000～4000Kにおいて組成変動が著しい事が図20、図21から分る。これは解離に伴うものであるから、この領域は図18、図19に示すように圧力が低い場合には若干低温域に移動し、圧力が高い場合には図22、図23から分るように高温側に移動している。

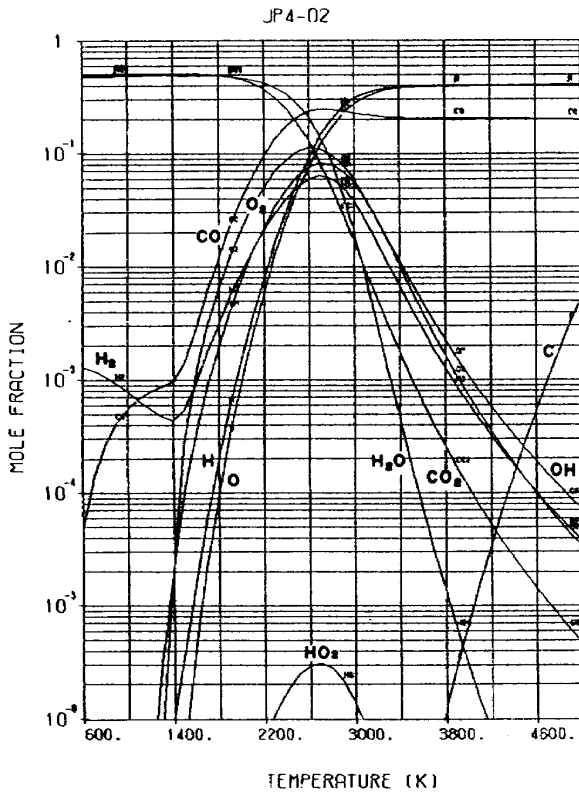
同図でJP4とRJ5の燃焼生成物を比較すると、RJ5はH/C比が小さいためH₂O等の割合が若干JP4よりも少なく、その分CO₂、CO等が多くでている。

当量比が1以外の場合の平衡組成図は、JP4については付録図に示した。紙面の都合上図は示していないが、RJ5についても同様な図を描いた結果、当量比を変えた場合酸化剤過剰側では平衡組成図上の差異は小さく、燃料過剰側では差異が大きくなる傾向にある事が分かった。これが、JP4、RJ5間のλ_{eq.}等での差が当量比が大になるとひらいてくる理由であろう。



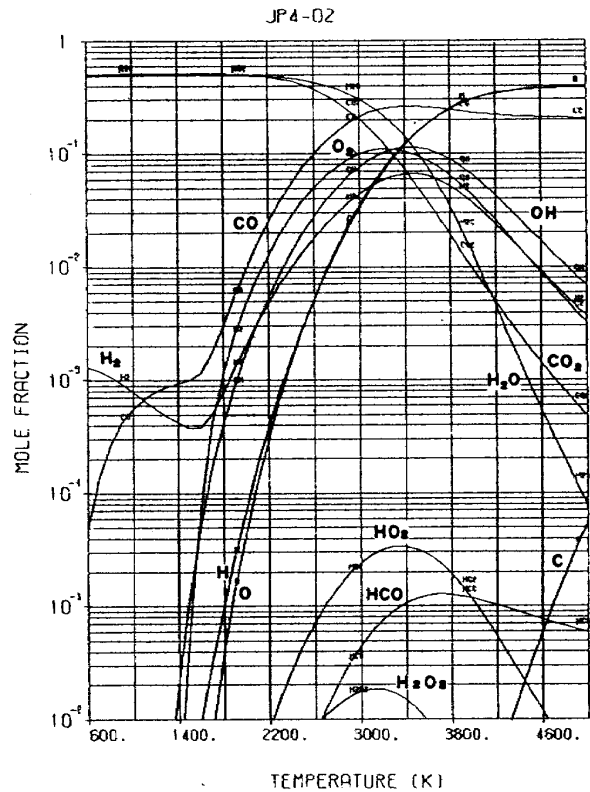
RJ5-O₂, φ=1.0, P=0.01atm

図19 RJ5-O₂系の平衡組成図



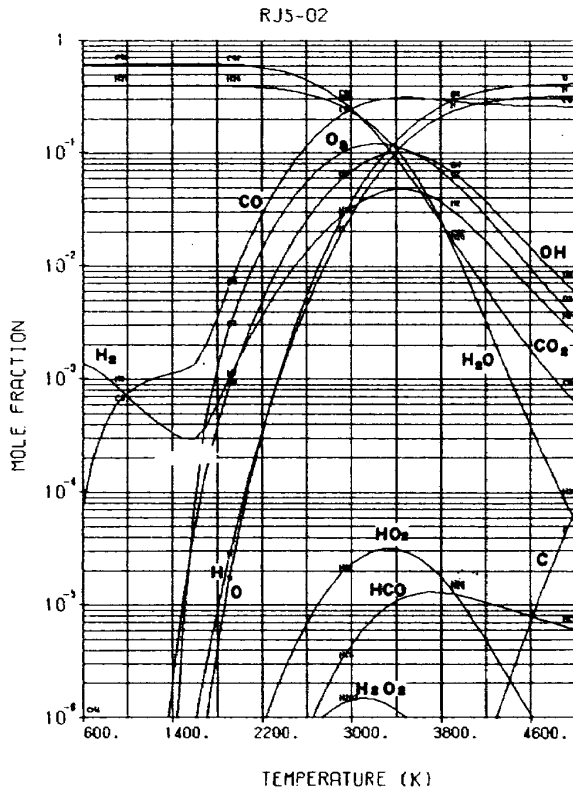
JP4-O₂, φ=1.0, P=0.01atm

図18 JP4-O₂系の平衡組成図



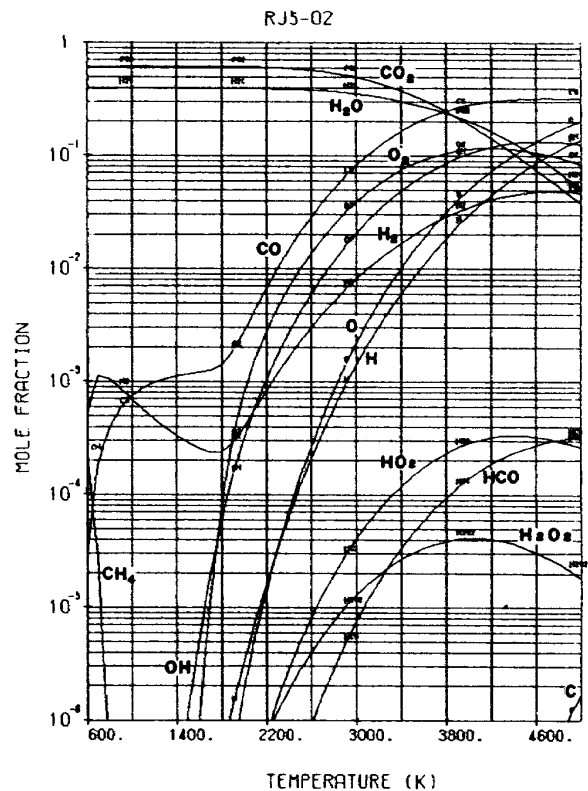
JP4-O₂, φ=1.0, P=1atm

図20 JP4-O₂系の平衡組成図



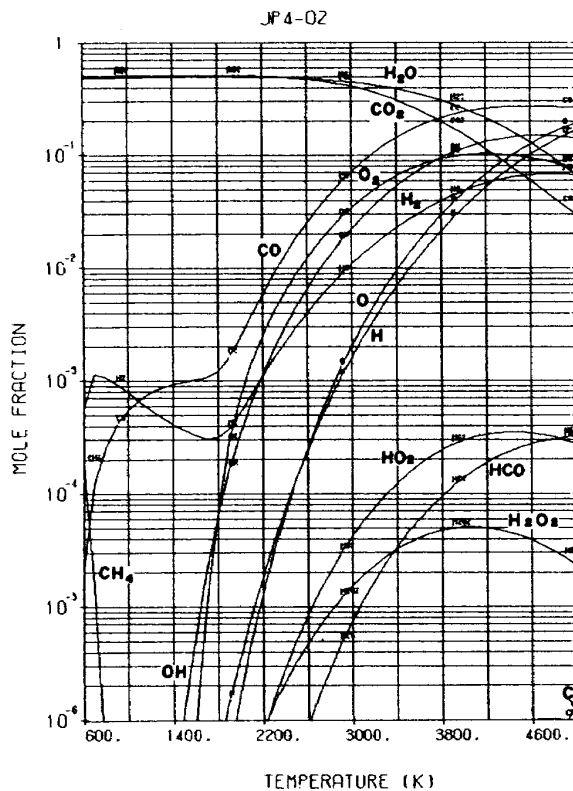
RJ5-O₂, φ=1.0, P=1 atm

図 21 RJ5 - O₂系の平衡組成図



RJ5-O₂, φ=1.0, P=100 atm

図 23 RJ5 - O₂系の平衡組成図



JP4-O₂, φ=1.0, P=100 atm

図 22 JP4 - O₂系の平衡組成図

我々が実際興味のあるのは、断熱火炎温度以下の領域での物性である。図 24 は、炭化水素系燃料の断熱火炎温度を示したものである。諸図とこの図から断熱火炎温度以下の領域では、燃料過剰側を除くと、JP4 の燃焼生成物の物性値の変動傾向を見る事によって、RJ5 の物性値がおおよそ推定できる。更に、JP4 は、航技研においても炭化水素系燃料として、実際に用いてきたものであり、又炭化水素系ロケット燃料として一般的な RP1 と H/C 比及び生成エンタルピがほぼ同一であるため、炭化水素系燃料の燃焼生成ガスの物性値を表示するための標準として選んだ。

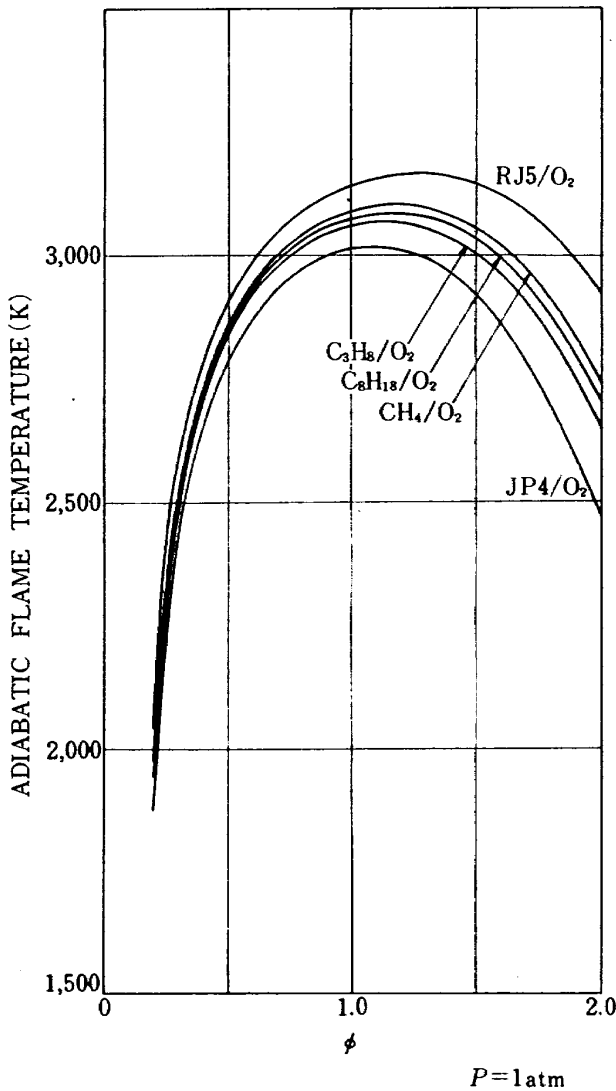


図24 炭化水素系燃料の断熱火炎温度

4. 物性値と計算点

4.1 物性値の種類

計算を行なった物性値の種類を表2、表3に示す。

熱力学物性値は密度・エンタルピ・エントロピ等9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。一般に温度、圧力等が変動する場では局所平衡を仮定すると平衡化学組成は移動するため比熱、熱伝導率等の熱エネルギーが関与する量及びこれらの諸量を含む物性値については、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、例えば低温においては平衡値と凍結値は一致する。

4.2 物性値間の関係

音速 a と等エントロピ指数 γ_s との間には、次式の関係がある。

$$a = \sqrt{\gamma_s RT}$$

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¹¹⁾は次の関係式から求めた。

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

表2 熱力学物性値

番号	名称	記号	単位
1	Density	ρ	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 Frozen	$C_{p,fro.}$	cal/g·k
6	" " Equilibrium	$C_{p,eq.}$	"
7	Isentropic Exponent	γ_s	-
8	Specific Heat Ratio	γ	-
9	Sound Velocity	a	m/s

表3 輸送物性値

番号	名称	記号	単位
10	Viscosity	//	poise
11	Thermal Conductivity Translational	$\lambda_{tra.}$	cal/cm · s · k
12	" " Internal	$\lambda_{int.}$	"
13	" " Frozen	$\lambda_{fro.}$	"
14	" " Reaction	$\lambda_{rea.}$	"
15	" " Equilibrium	$\lambda_{eq.}$	"
16	Prandtl Number Frozen	$Pr_{,fro.}$	-
17	" " Equilibrium	$Pr_{,eq.}$	-
18	Lewis Number	Le	-

4.3 温度・圧力・混合比の計算点

温度及び圧力の計算点を表4に示す。温度は600～5000Kで100度間隔の45点とした。圧力は0.001～1000 atmで13点とした。

JP4を燃料として、酸化剤により次の3つの系に分けた。

- (1) JP4 - O₂系
- (2) JP4 - Air系
- (3) JP4 - O₂ - Air系

混合比及び当量比の計算点を表5～表7に示す。

JP4 - O₂系については、表5に示すようにO/F(混合比) = 1.6～8.0までとJP4 100%, O₂ 100%の計14点とした。

JP4 - Air系では、表6に示すように ϕ (当量比) = 0.25～3.0までとJP4 100%, Air 100%の17点とした。

JP4 - O₂ - Air系では、表7に示すようにJP4 - O₂系の(ϕ) primary (初期当量比) = 1.8～0.6に空気を加えたJP4 - O₂ - Air系の(ϕ) final (最終当量比) = 1.8～0.4の15点とした。

巻末付録の図は、JP4 - O₂系では、O/F = 1.6, 2.4, 3.4, 4.8, 8.0, JP4 - Air系では、 ϕ = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, JP4 - O₂ - Air系では、(ϕ) p = 1.8に空気を加えた(ϕ) f = 1.4, 1.0, 0.8, 0.4について示した。

表4 温度・圧力計算点

T (K)	600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100, 2200, 2400, 2500, 2600, 2700, 2800, 2900, 3000, 3100, 3200, 3400, 3500, 3600, 3700, 3800, 3900, 4000, 4100, 4200, 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5 JP4 - O₂系混合比計算点

(JP4 - O ₂) O/F	1.6, 2.0, 2.4, 2.8, 3.2, 3.4, 3.6, 4.0, 4.4, 4.8, 6.4, 8.0, JP4(100%), O ₂ (100%)
--------------------------------	---

表6 JP4 - Air系当量比計算点

(JP4 - Air) ϕ	0.25, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.5, 1.75, 2.0, 2.5, 3.0, JP4(100%), O ₂ (100%)
-----------------------	--

表7 JP4-O₂-Air系当量比計算点

$(\phi)_f \backslash (\phi)_p$	1.8	1.4	1.0	0.8	0.6	0.4
1.8	△	○	○	○	○	○
1.4	—	△	○	○	○	○
1.0	—	—	△	○	○	○
0.8	—	—	—	△	○	○
0.6	—	—	—	—	△	○

$(\phi)_p$: JP4-O₂系の当量比

$(\phi)_f$: JP4-O₂系にAirを加えた最終的な当量比

△ : JP4-O₂系

○ : JP4-O₂-Air系

5. 計算結果

5.1 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JP4-O₂系、JP4-Air系、JP4-O₂-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。立体図では各混合比又は当量比についての物性値の最大及び最小値を付記した。

例 図A-1-2

JP4-O₂系、エンタルピの立体図

例 図B-2-6-1

JP4-Air系、比熱-平衡、 $\phi = 0.5$ の平面図

例 図C-3-2

JP4-O₂-Air系、 $(\phi)_p = 1.8 \rightarrow (\phi)_f = 0.4$, 1 atmの平衡組成図

図で示した物性値はH, \bar{M} , $C_{p,eq.}$, τ , μ , $\lambda_{eq.}$, $Pr_{fro.}$, $Pr_{eq.}$ の8種である。立体図は、温度と圧力を横軸にし同スケールで4種の混合比又は当量比を1組として表示した。温度軸は、600~5000K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。立体図中の太い実線は、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。

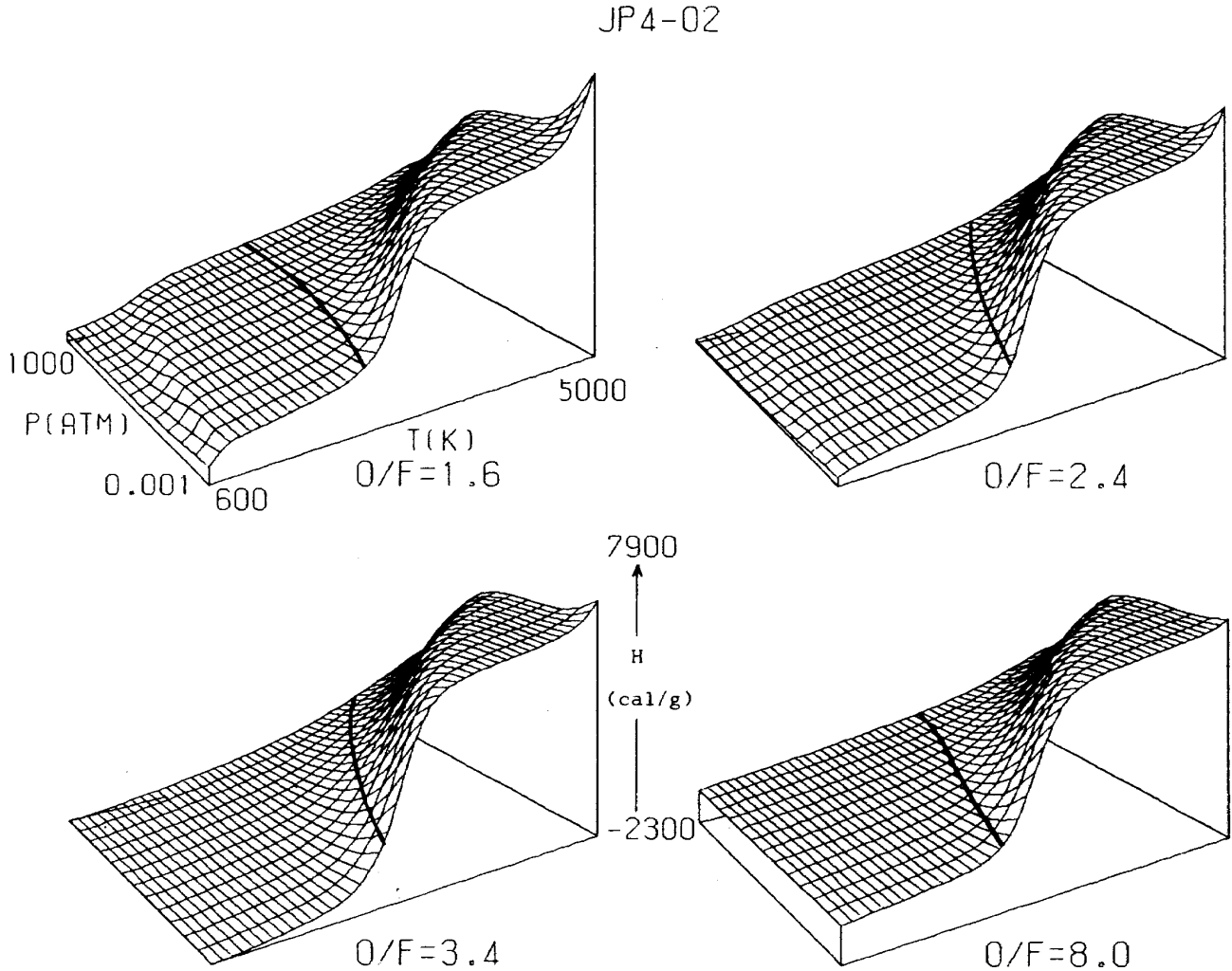
平衡組成図は、温度を横軸にとり範囲は立体図と同一とした。組成は、モル分率で表わし 10^{-6} まで対数スケールで表示した。圧力は、代表的な0.01, 1, 100 atmの3点を選んだ。

5.2 JP 4-O₂系

立体図の混合比は、ロケットエンジンで関心のある領域を対象とし燃料過剰側ではO/F = 1.6, 2.4, 量論比に近いO/F = 3.4, 酸化剤過剰側のO/F = 8.0を選んだ。

—立体図による傾向の把握—

エンタルピ (H)



O/F	maximum H (cal/g)			minimum H (cal/g)			O/F	maximum H (cal/g)			minimum H (cal/g)		
	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)			P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	
1.6	7866	0.001	5000	-1978	1000	600	2.4	6723	0.001	5000	-2191	1000	600
3.4	6151	0.001	5000	-2351	300 ~ 1000	600	8.0	5531	0.001	5000	-1115	0.001 ~ 1000	600

図 A-1-2

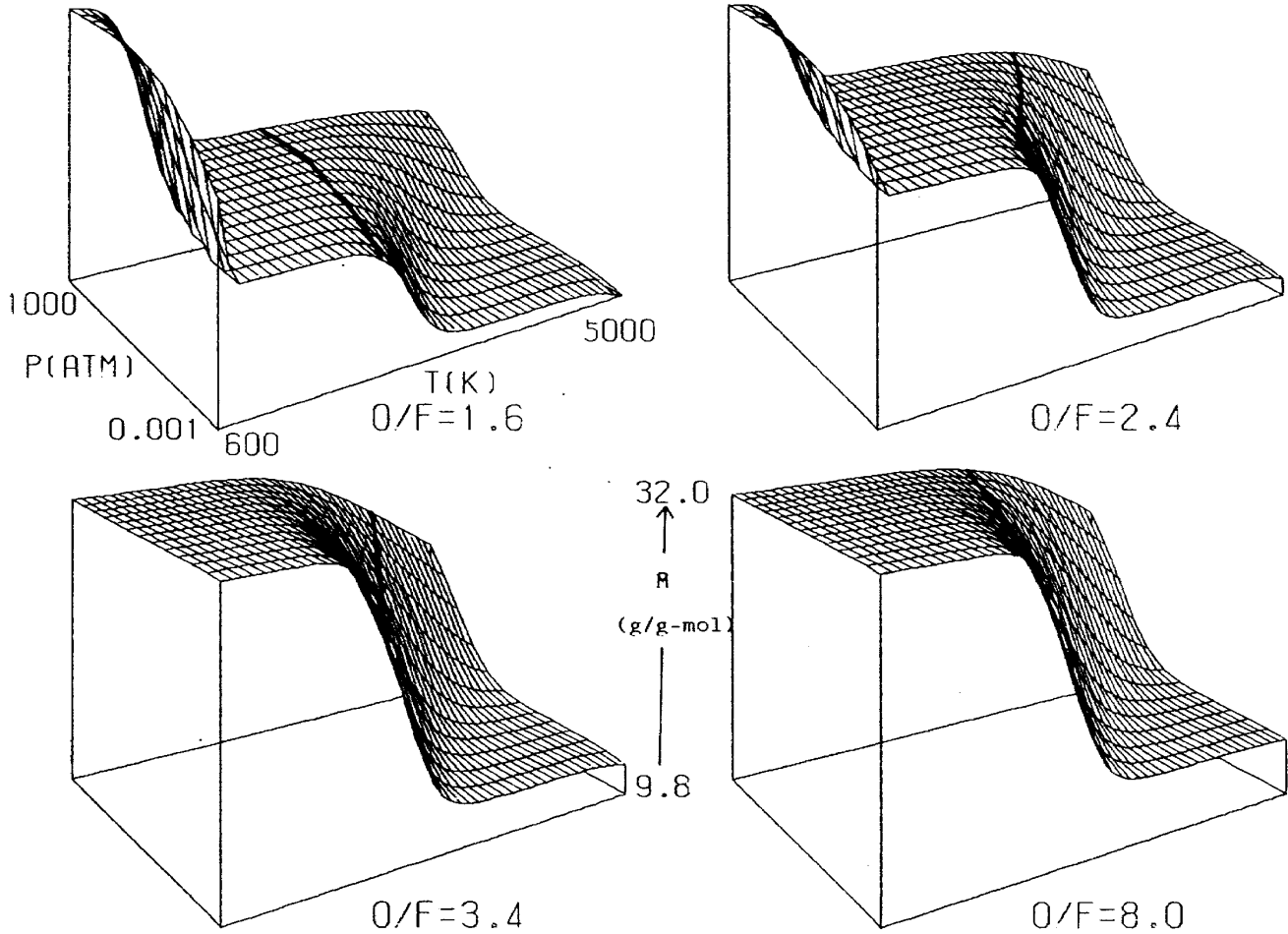
エンタルピ (H) は、温度の上昇と共にどの混合比でも、最初は比較的ゆるやかな傾きで増加を続け、一旦、急激な増加を経て(この急激な増加部分は、圧力の上昇に伴い傾きが小さくなり、高温側に移動する。)、更に高温になると再びゆるやかな増加に転ずる。

しかし、燃料過剰側の高温・低圧領域では、再度急激に増加する。断熱火炎温度は、量論比近傍で最初の急激に増加する領域に最も接近する。

Hの変動幅は、混合比の減少に従って大きくなる。この図では、O/F = 1.6は、O/F = 8.0に対し約1.5倍の変動幅を持つ。最大値は、混合比の小さい高温・低圧領域にある。

平均分子量 (\bar{M})

JP4-02



O/F	maximum \bar{M} (g/g·mol)			minimum \bar{M} (g/g·mol)			O/F	maximum \bar{M} (g/g·mol)			minimum \bar{M} (g/g·mol)		
	P (atm)	T (K)	\bar{M}	P (atm)	T (K)	\bar{M}		P (atm)	T (K)	\bar{M}	P (atm)	T (K)	\bar{M}
1.6	30.66	1000	600	9.849	0.001	5000	2.4	30.96	1000	600	11.06	0.001	5000
3.4	31.20	1000	600	12.02	0.001	5000	8.0	31.11	0.001/1000	600	13.87	0.001	5000

図A-1-4

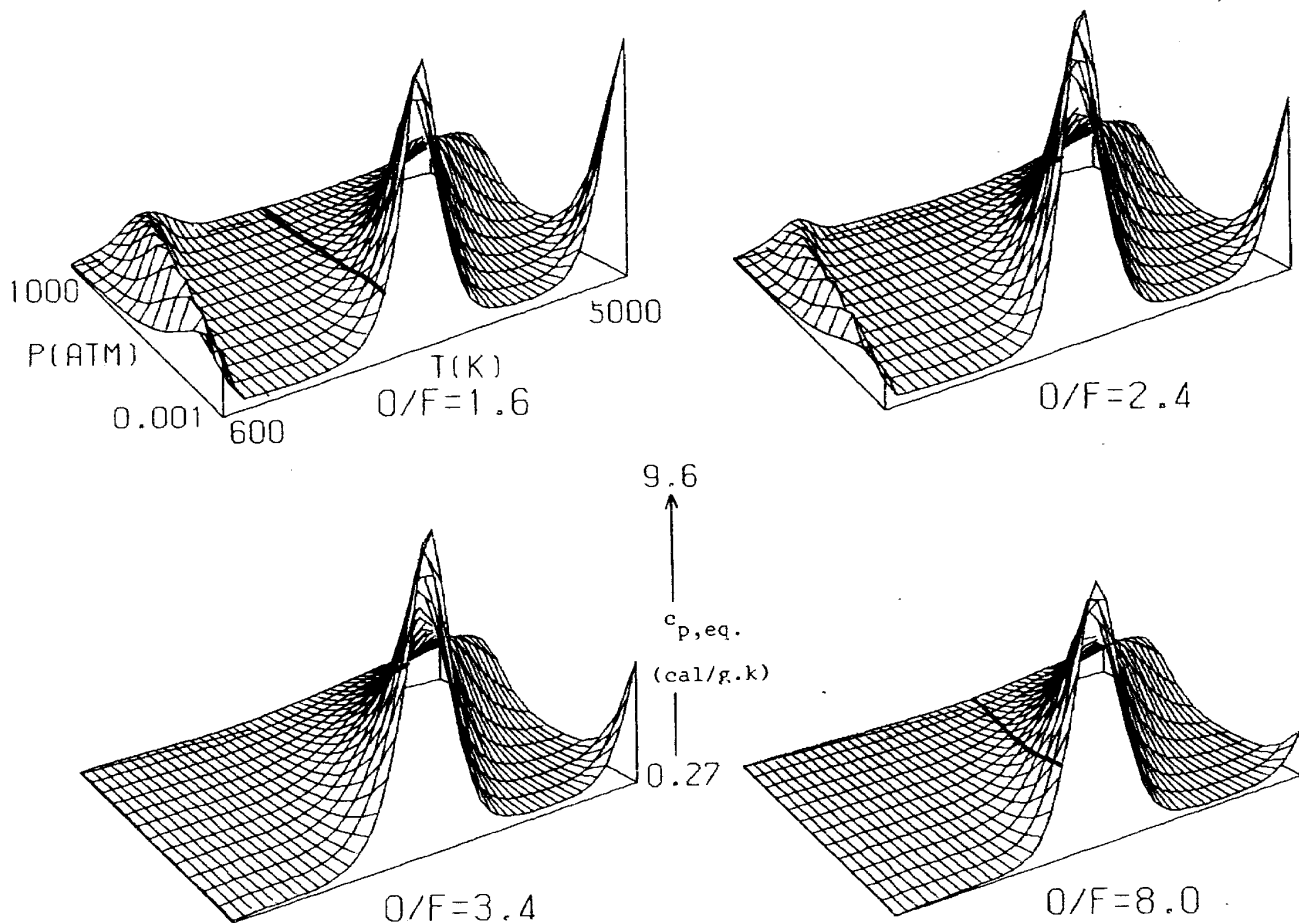
平均分子量 (\bar{M}) は、燃料過剰側の低温領域を除くと温度・圧力に対して変動はしないが、温度が上昇すると圧力の低い方から順次急激に減少し始める。しかし、高温・低圧領域になると温度・圧力に対し再び変動は少なくなる。急激な減少傾向は、解離反応による組成変動が著しい所で現われる。例えば、O/F = 8.0の平衡組成図 (C-1-13 ~ C-1-15) を見ると主要生成物のO₂, H₂O, CO₂は、O, H, COに解離している、そのため、 \bar{M} は約40%まで減少する。

燃料過剰側で、低温領域における \bar{M} の著しい低下がある。これは、低温ではH₂O, CO₂, C(s)が主要生成物であるが、温度の上昇と共にC(s)の存在により水性ガス反応を生じ、主要生成物がCO, H₂に変わるためである。混合比が増すとこの減少割合は小さくなる。

断熱火炎温度以下で温度・圧力に対してほぼ一定値となる \bar{M} は、O/F = 1.6, 2.4, 3.4, 8.0で各々、18.4, 24.1, 31.2, 31.6 g/g·molである。

比熱一平衡 (Cp,eq.)

JP4-02



O/F	maximum Cp,eq. (cal/g.k)			minimum Cp,eq. (cal/g.k)			O/F	maximum Cp,eq. (cal/g.k)			minimum Cp,eq. (cal/g.k)			
	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)			P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)		
1.6	8.339	0.001	2600	0.394	1000	600	2.4	9.511	0.001	2600	0.350	1000	600	
3.4	9.325	0.001	2600	0.321	0.001	600	8.0	7.692	0.001	2600	0.279	0.001	1000	600

図 A-1-6

比熱一平衡 (Cp,eq.) は、燃料過剰側の低温領域を除くと、約 2000 K 近傍まで温度及び圧力による変動幅は小さい。断熱火炎温度以上で、Cp,eq. 値は急峻なピークを形成し、低圧での C(g) の生成に伴う Cp,eq. 値の増加域につながる。ピークを示す温度は圧力の増加に従って高温側に移動するが、これは解離反応の圧力依存性に対応している。ピーク値は、最小値の 20 ~ 30 倍程度である。温度・圧力による組成の変動傾向については、付録の平衡組成図を参照されたい。燃料過剰側の低温領域に見られる Cp,eq. 値の小さな山は、水性ガス反応による組成変動に対応している。

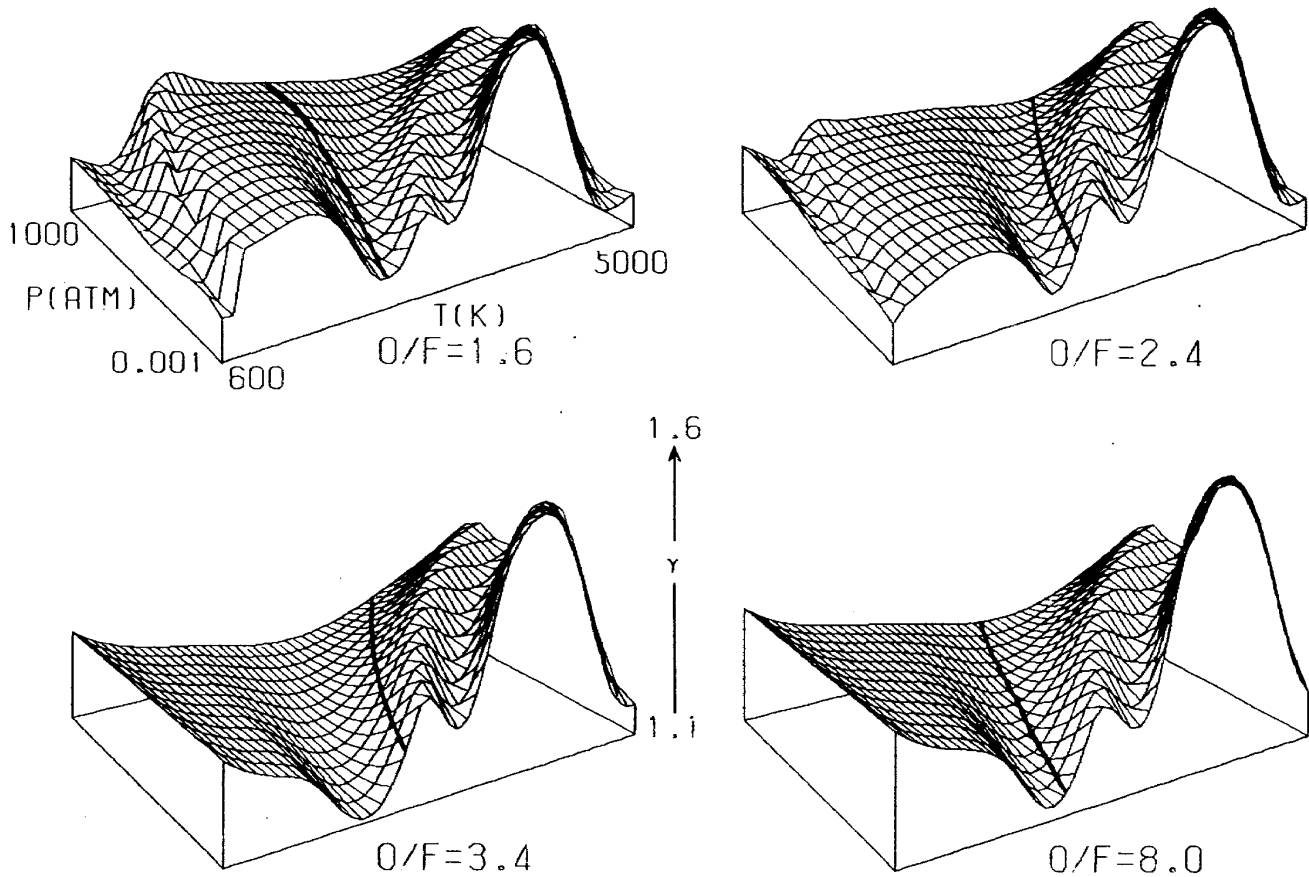
断熱火炎温度は、量論比近傍でピークに最も近づく。

断熱火炎温度以下での Cp,eq. 値を見ると、O/F = 1.6 の場合には低温の山部に最大値を持つが、他の混合比では断熱火炎温度での Cp,eq. 値が最大値となる。変動幅は量論比近傍で大きい。各混合比での変動幅は、O/F = 1.6, 2.4, 3.4, 8.0 で各々、0.394 ~ 2.50, 0.350 ~ 6.32, 0.321 ~ 6.70, 0.279 ~ 3.15 cal/g.k である。

Cp,eq. の平面図では、Cp,fro. の 0.001, 1000 atm の値を併せて示した。

比熱比(γ)

JP4-02



O/F	maximum γ			minimum γ			O/F	maximum γ			minimum γ		
	P (atm)	T (K)	γ	P (atm)	T (K)	γ		P (atm)	T (K)	γ	P (atm)	T (K)	γ
1.6	1.450	0.001	3700	1.141	0.001	4700	2.4	1.476	0.001	3800	1.126	0.001	2100
3.4	1.496	0.001	3900	1.106	0.001	1900	8.0	1.544	0.001	4000	1.118	0.001	2100

図A-1-8

比熱比(γ)は、低温領域を除くと各混合比とも同様な変動傾向を示し、温度の上昇に伴って一旦減少し小さなピークを経て、更に大きなピークに至る。この小さなピークは、 H_2O 、 CO_2 、 H_2 、 O_2 等の解離する領域にあり、圧力の上昇に伴い高温側に移動する。

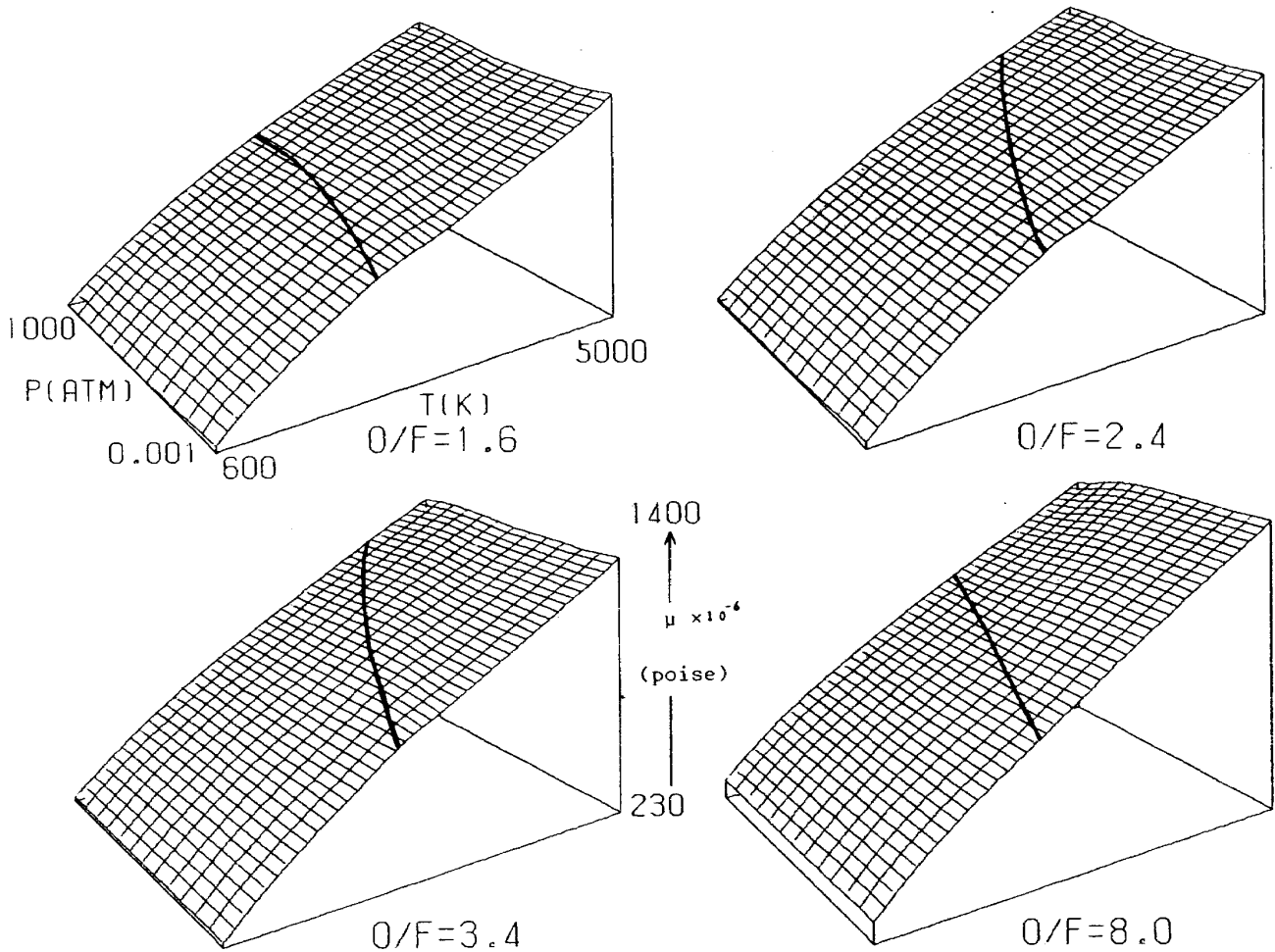
断熱火炎温度は、量論比近傍でこのピークに近づき、燃料過剰及び酸化剤過剰側ではほぼ窪みに位置する。

低温領域を見ると燃料過剰側では窪みを持つが、量論比及び酸化剤過剰側では温度の上昇に伴い単調に減少している。燃料過剰側のこのような傾向は、水性ガス反応による組成変動に対応する。

混合比が大きくなると、最大値及び変動幅は若干大きくなる。断熱火炎温度以下に限定すると、 γ 値の変動幅は、O/F=1.6, 2.4, 3.4, 8.0で各々、1.14~1.31, 1.13~1.23, 1.11~1.25, 1.12~1.29である。

粘度 (μ)

JP4-O2



O/F	maximum μ ($\times 10^{-6}$ poise)			minimum μ ($\times 10^{-6}$ poise)			O/F	maximum μ ($\times 10^{-6}$ poise)			minimum μ ($\times 10^{-6}$ poise)		
	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)			P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	
1.6	1143	1000	5000	233	300~ 1000	600	2.4	1200	300	5000	242	100~ 1000	600
3.4	1248	30, 1000	5000	247	0.001~ 1000	600	8.0	1379	0.001	5000	304	0.001~ 1000	600

図 A-1-10

粘度 (μ) は、温度の上昇と共に増加する。又、混合比が大きくなると若干増加する。解離による組成変動に伴った μ の変動はきわめて小さいが、解離反応の生ずる領域で小さなウェーブが見られる。

断熱火炎温度に沿っての μ の変動を見ると、量論比で変動幅が一番大きく約 1.5 倍である。これは、断熱火炎温度の圧力による変動が量論比近傍で最も大きいためである。量論比での断熱火炎温度は、圧力 0.001, 1000 atm で各々、2360, 4130 K である。

量論比をずれると断熱火炎温度に沿う μ の変動幅は小さくなり、O/F = 1.6, 8.0 では、各々、 $648 \sim 763 \times 10^{-6}$ poise である。

量論比において、700 ~ 3000 K までの μ 値は次式で近似的に与えられる。単位は 10^{-6} poise である。

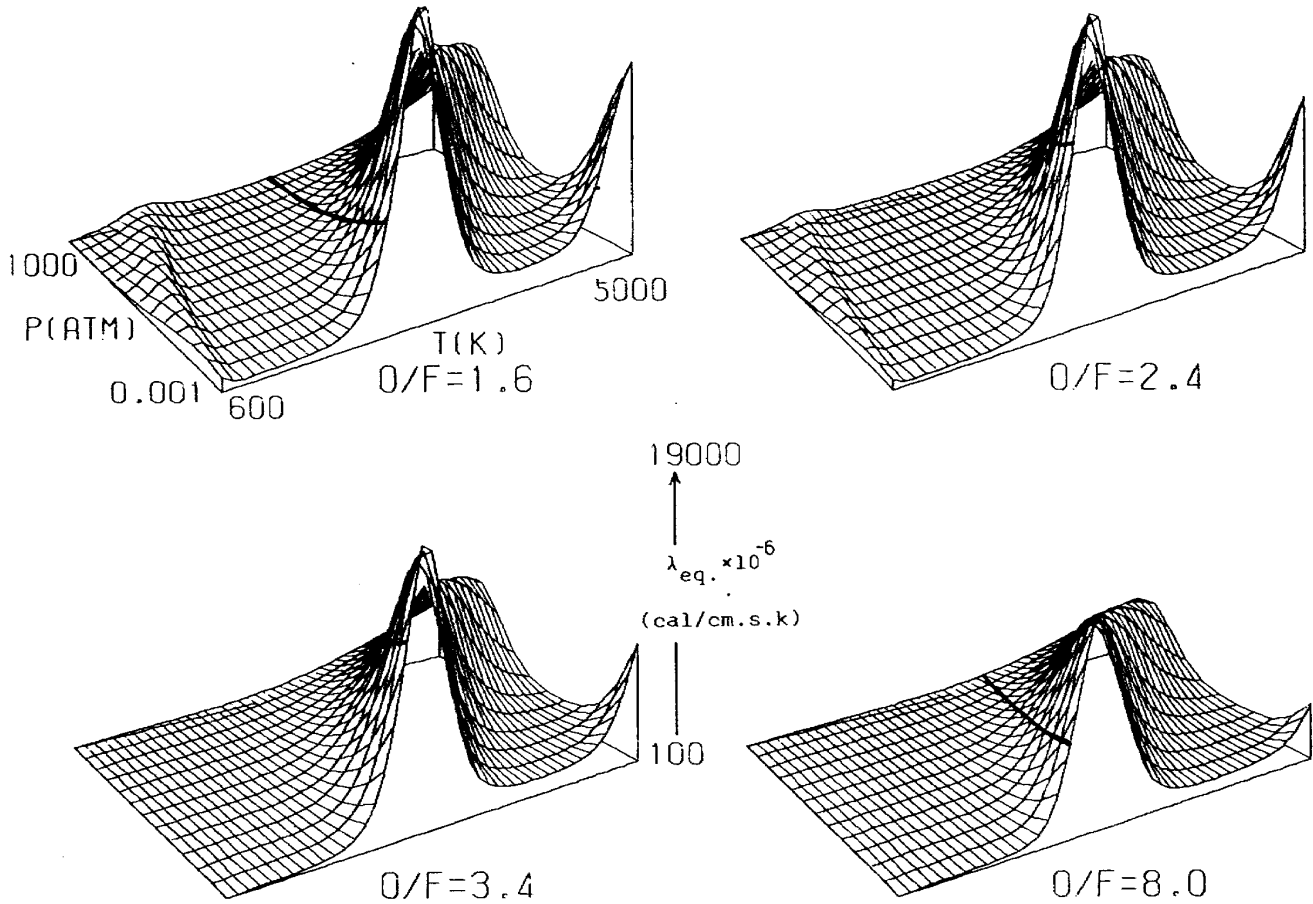
$$\mu = A \cdot \sqrt{T} + B$$

A ; 20.36016286, B ; -264.3037322

この近似式では、3%程度の精度で近似できる。

熱伝導率-平衡 ($\lambda_{eq.}$)

JP4-02



O/F	maximum $\lambda_{eq.}$ ($\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k)		minimum $\lambda_{eq.}$ ($\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k)		O/F	maximum $\lambda_{eq.}$ ($\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k)		minimum $\lambda_{eq.}$ ($\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k)					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
1.6	18070	0.001	2600	134	1000	600	2.4	17630	0.001	2500	124	1000	600
3.4	16370	0.001	2500	109	0.001~ J	600	8.0	11990	0.001	2500	119	0.001~ 1000	600

図A-1-15

熱伝導率-平衡 ($\lambda_{eq.}$) は、燃料過剰側の低温領域に見られる小さな山を除き、温度の上昇に伴いゆるやかに増加し急激な増加に転じ大きなピークを形成する。

高温・低圧領域では、再び増加に転ずる。混合比が小さくなるとピーク値は高くなる。O/F = 1.6 と O/F = 8.0 の最大値を比較すると約 1.5 倍異なる。混合比による $\lambda_{eq.}$ のピーク値の差は、 H_2 の解離と O_2 の解離による寄与分の差である。このことは、O/F = 1.6 の平衡組成図 (C-1-1 ~ C-1-3) と O/F = 8.0 の平衡組成図 (C-1-13 ~ C-1-15) から明らかである。

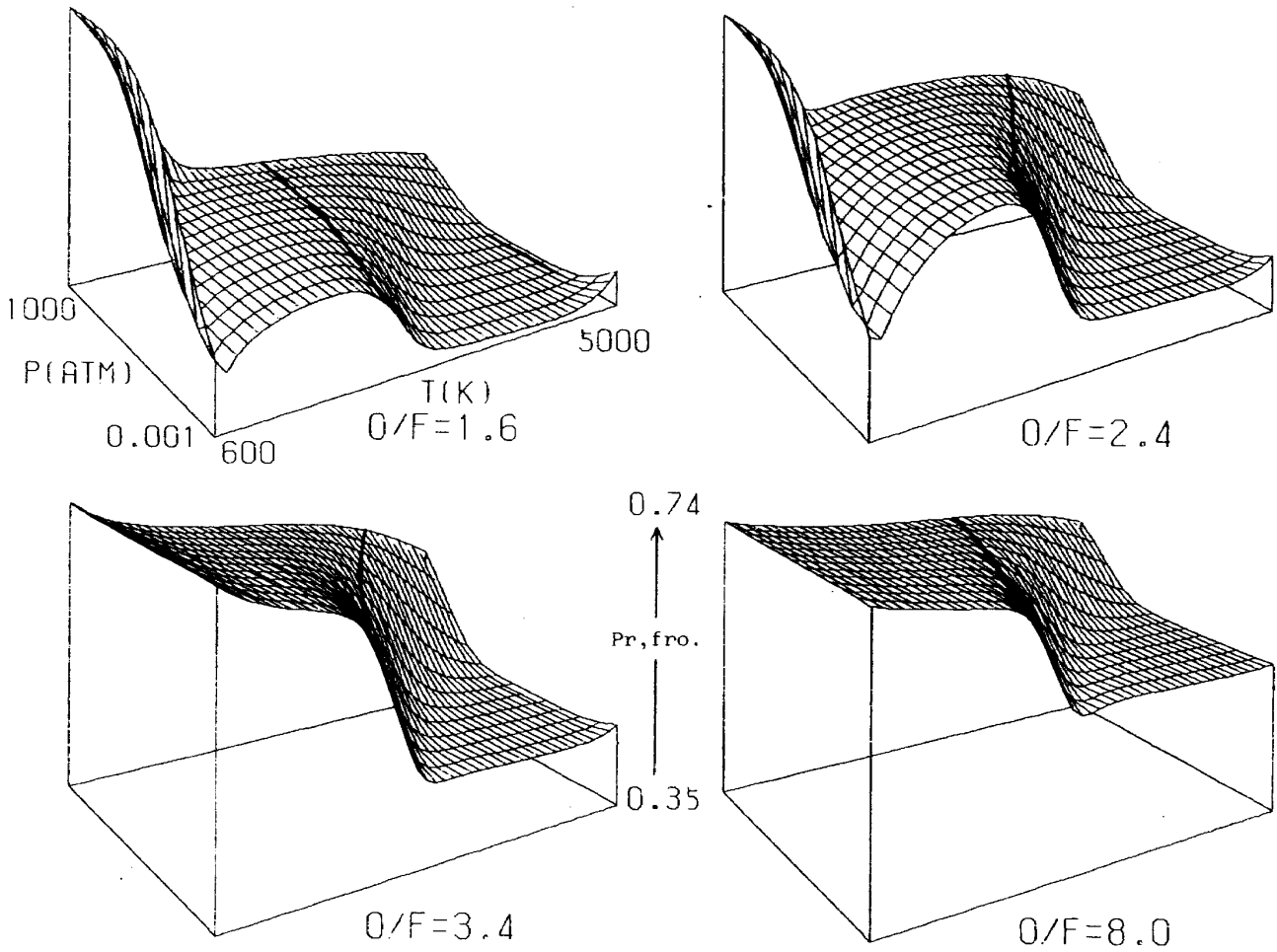
組成変動が少ない場合には、 $\lambda_{eq.}$ と $\lambda_{fro.}$ はほぼ同じ値をとる。しかし、燃料過剰側の低温領域で見られた小さな山では、水性ガス反応による組成変動が生じたため、 $\lambda_{eq.}$ と $\lambda_{fro.}$ の値は異なる。

断熱火炎温度は、量論比近傍でピークに近づく。

断熱火炎温度以下に限定すると、 $\lambda_{eq.}$ 値の変動幅は、O/F = 1.6, 2.4, 3.4, 8.0 で各々、134 ~ 7050, 123 ~ 12200, 109 ~ 12200, 119 ~ 5940 $\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k である。

プラントル数-凍結 (Pr, fro.)

JP4-02



O/F	maximum Pr, fro.		minimum Pr, fro.		O/F	maximum Pr, fro.		minimum Pr, fro.					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
1.6	0.725	1000	600	0.355	0.3	5000	2.4	0.723	1000	600	0.399	0.3	5000
3.4	0.731	1000	600	0.441	0.1	5000	8.0	0.712	0.001~1000	600	0.538	0.001	2800

図 A - 1 - 16

プラントル数-凍結 (Pr, fro.) は、低温領域で燃料過剰側と量論比・酸化剤過剰側の変動傾向が異なる。

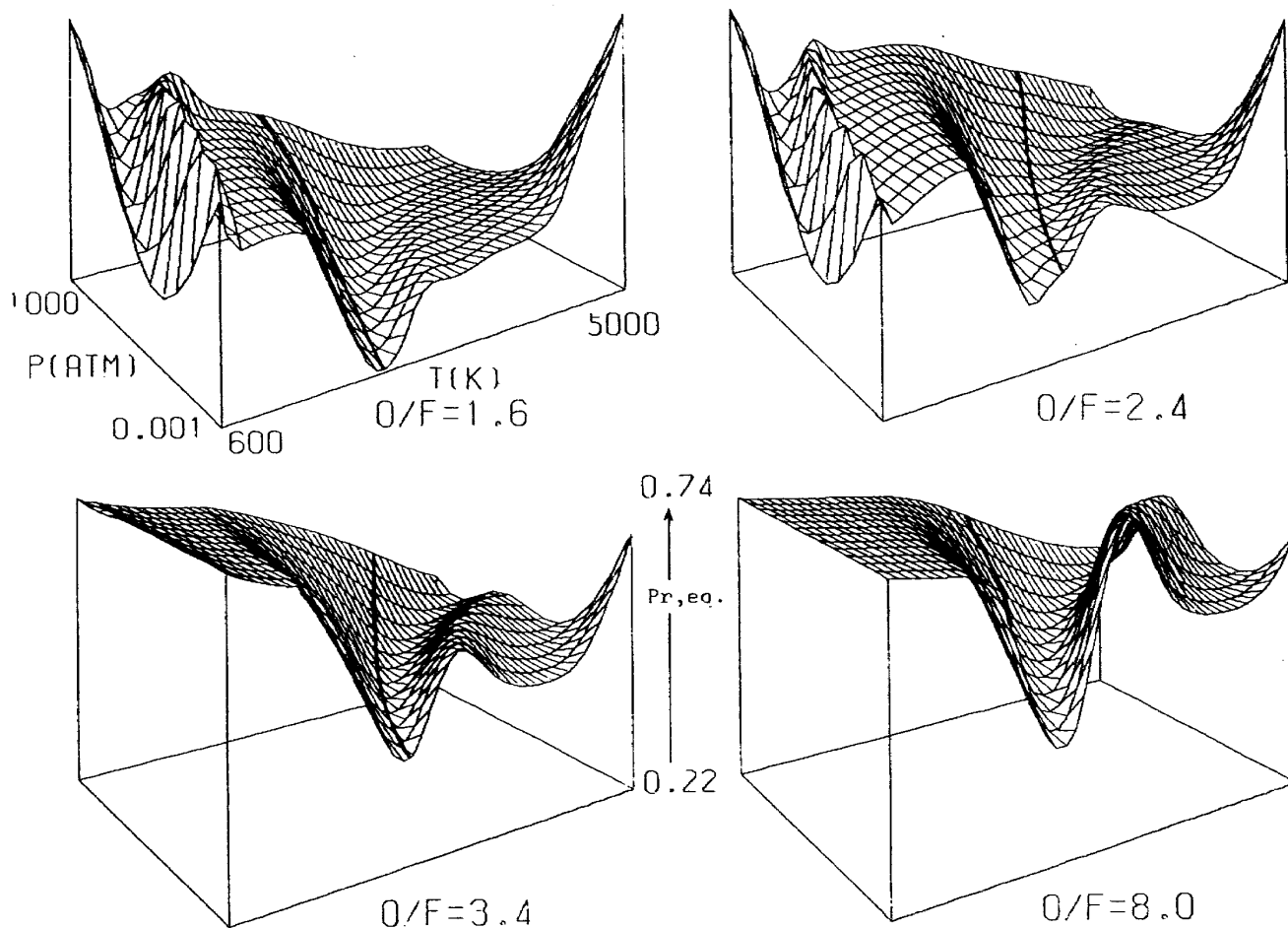
前者は、低温で一旦急激に減少し温度の上昇に伴いゆるやかに増加を続ける。後者は、温度の上昇に伴って単調に減少する。Pr, fro. 値は燃料過剰側を除くと、約 1800K 以下では圧力によらずほぼ一定である。

燃料過剰側では圧力の変化に伴い 0.432 ~ 0.725 の値をとる。高温になると Pr, fro. 値が急激に減少する温度領域がある。この領域は、圧力の上昇に伴い高温側に移動する。この領域を過ぎると再び Pr, fro. 値の変動幅は小さくなる。低温領域を除くと Pr, fro. 値の変動幅は、量論比で大きくなる。

Pr, fro. 値の最大値は、約 0.72 でどの混合比でもほぼ変わらない。しかし、最小値は混合比の増加に伴い大きくなり、O/F = 8.0 は O/F = 1.6 の約 1.5 倍である。

プラントル数-平衡 (Pr,eq.)

JP4-02



O/F	maximum Pr,eq.		minimum Pr,eq.		O/F	maximum Pr,eq.		minimum Pr,eq.					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
1.6	0.701	0.001	5000	0.225	0.001	2200	2.4	0.692	1000	600	0.321	0.001	2000
3.4	0.729	0.001/0.3	600	0.387	0.001	2300	8.0	0.739	0.001	3000	0.399	0.001	2300

図A-1-17

低温領域のプラントル数-平衡 (Pr,eq.) は、酸化剤過剰側で圧力によって変動しない。燃料過剰側では、水性ガス反応による組成変動に伴った寄与分が $C_{p,eq.}$, $\lambda_{eq.}$ に影響するため、Pr,eq. 値は圧力によって変動する。 $C_{p,eq.}$ 及び $\lambda_{eq.}$ は、図A-1-6, 図A-1-15を参照されたい。温度の上昇に伴いPr,eq. 値は断熱火炎温度近傍の窪みを経て、O/F = 1.6ではゆるやかに増加を続けるが、他の混合比では山を形成する。その山は、混合比の増加に伴い高くなる。高温・低圧になると、Pr,eq. 値は再び大きくなる。

断熱火炎温度は、どの混合比でも窪みの底部に位置する。断熱火炎温度以下のPr,eq. 値の変動幅は、O/F = 1.6, 2.4, 3.4, 8.0で各々、0.22 ~ 0.69, 0.32 ~ 0.69, 0.39 ~ 0.73, 0.40 ~ 0.71である。

—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を示した。

付録 1 の平面図及び平衡組成図は下記の表 8、表 9 に示した。

表 8 JP4-O₂系の平面図一覧表

ページ	図 番 号	物性値	混合比 (O/F)	ページ	図 番 号	物性値	混合比 (O/F)
44	B-1-2-1	H	1.6	54	B-1-10-3	μ	3.4
"	B-1-4-1	\bar{M}	"	"	B-1-15-3	$\lambda_{eq.}$	"
45	B-1-6-1	$C_{p,eq.}$	"	55	B-1-16-3	$Pr, fro.$	"
"	B-1-8-1	γ	"	"	B-1-17-3	$Pr, eq.$	"
46	B-1-10-1	μ	"	56	B-1-2-4	H	4.8
"	B-1-15-1	$\lambda_{eq.}$	"	"	B-1-4-4	\bar{M}	"
47	B-1-16-1	$Pr, fro.$	"	57	B-1-6-4	$C_{p,eq.}$	"
"	B-1-17-1	$Pr, eq.$	"	"	B-1-8-4	γ	"
48	B-1-2-2	H	2.4	58	B-1-10-4	μ	"
"	B-1-4-2	\bar{M}	"	"	B-1-15-4	$\lambda_{eq.}$	"
49	B-1-6-2	$C_{p,eq.}$	"	59	B-1-16-4	$Pr, fro.$	"
"	B-1-8-2	γ	"	"	B-1-17-4	$Pr, eq.$	"
50	B-1-10-2	μ	"	60	B-1-2-5	H	8.0
"	B-1-15-2	$\lambda_{eq.}$	"	"	B-1-4-5	\bar{M}	"
51	B-1-16-2	$Pr, fro.$	"	61	B-1-6-5	$C_{p,eq.}$	"
"	B-1-17-2	$Pr, eq.$	"	"	B-1-8-5	γ	"
52	B-1-2-3	H	3.4	62	B-1-10-5	μ	"
"	B-1-4-3	\bar{M}	"	"	B-1-15-5	$\lambda_{eq.}$	"
53	B-1-6-3	$C_{p,eq.}$	"	63	B-1-16-5	$Pr, fro.$	"
"	B-1-8-3	γ	"	"	B-1-17-5	$Pr, eq.$	"

表 9 JP4-O₂系の平衡組成図一覧表

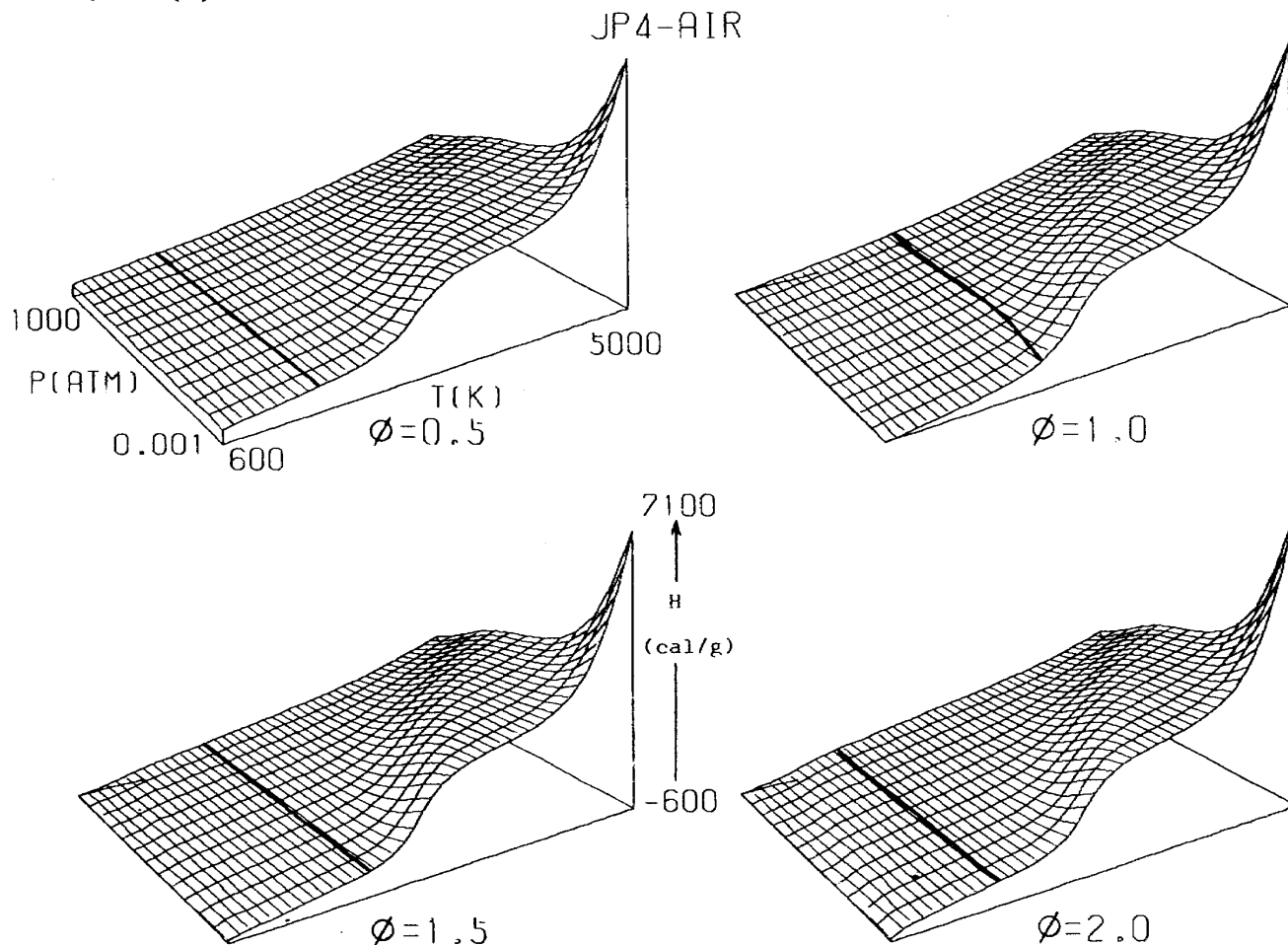
ページ	図 番 号	混合比 (O/F)	圧 力 (atm)
64	C-1-1	1.6	0.01
"	C-1-2	"	1
"	C-1-3	"	100
65	C-1-4	2.4	0.01
"	C-1-5	"	1
"	C-1-6	"	100
66	C-1-7	3.4	0.01
"	C-1-8	"	1
"	C-1-9	"	100
67	C-1-10	4.8	0.01
"	C-1-11	"	1
"	C-1-12	"	100
68	C-1-13	8.0	0.01
"	C-1-14	"	1
"	C-1-15	"	100

5.3 JP4-Air系

立体図の当量比は、空気過剰側を1点($\phi = 0.5$)と量論比($\phi = 1.0$)及び燃料過剰側の2点($\phi = 1.5, 2.0$)を選んだ。

—立体図による傾向の把握—

エンタルピ(H)



ϕ	maximum H (cal/g)			minimum H (cal/g)			ϕ	maximum H (cal/g)			minimum H (cal/g)		
	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)			P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	
0.5	5884	0.001	5000	-277	0.001~1000	600	1.0	6234	0.001	5000	-606	0.001~1000	600
1.5	6611	0.001	5000	-603	1000	600	2.0	7009	0.001	5000	-600	1000	600

図A-2-2

エンタルピ(H)は、どの混合比でも温度の上昇に伴い増加し解離温度領域で若干大きくなる。解離温度が圧力に依存するため、このHの増加域も高圧になるに従い高温側に移動する。高温・低圧領域では、N、C(g)による急激な増加を示す。

Hは断熱火炎温度以下では、どの当量比でもほぼ単調に増加する。量論比を除くと、断熱火炎温度に及ぼす圧力効果が少ないことは同図からも明らかである。

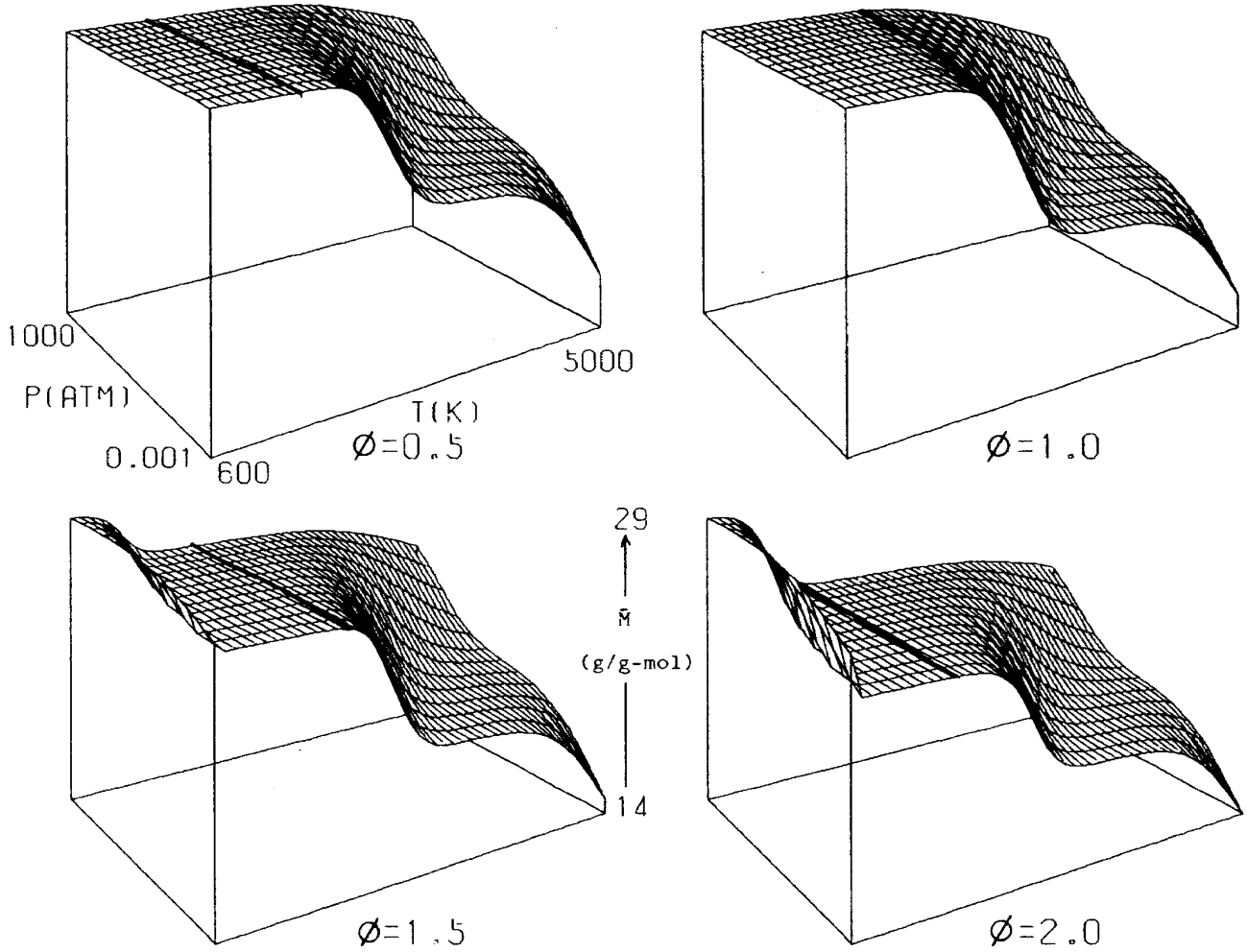
$\phi = 0.5, 1.5, 2.0$ で各々、約1510, 1980, 1630Kである。量論比での断熱火炎温度は、圧力0.001~1000 atmで2020~2390Kまで変動する。

空気、又は燃料を加熱して全エンタルピを大きくした場合、断熱火炎温度に及ぼす圧力効果が大きくなる。

500Kの空気を用いた場合の圧力効果を見ると、100 atm以上では差が小さいが、0.001~100 atmでは2060~2480Kの変動がある。 $\phi = 1$ の平面図(B-2-2-2)を参照されたい。

平均分子量 (\bar{M})

JP4-AIR



ϕ	maximum \bar{M} (g/g·mol)		minimum \bar{M} (g/g·mol)		ϕ	maximum \bar{M} (g/g·mol)		minimum \bar{M} (g/g·mol)					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
0.5	28.95	0.001~ 1000	600	16.73	0.001	5000	1.0	28.95	0.001~ 1000	600	15.70	0.001	5000
1.5	28.94	1000	600	14.80	0.001	5000	2.0	28.93	1000	600	14.01	0.001	5000

図 A-2-4

平均分子量 (\bar{M}) は、燃料過剰側の低温領域を除くと、約 1800K 近傍まで温度及び圧力による変動幅は小さい。
 $\phi = 0.5, 1.0$ では約 29 g/g·mol である。

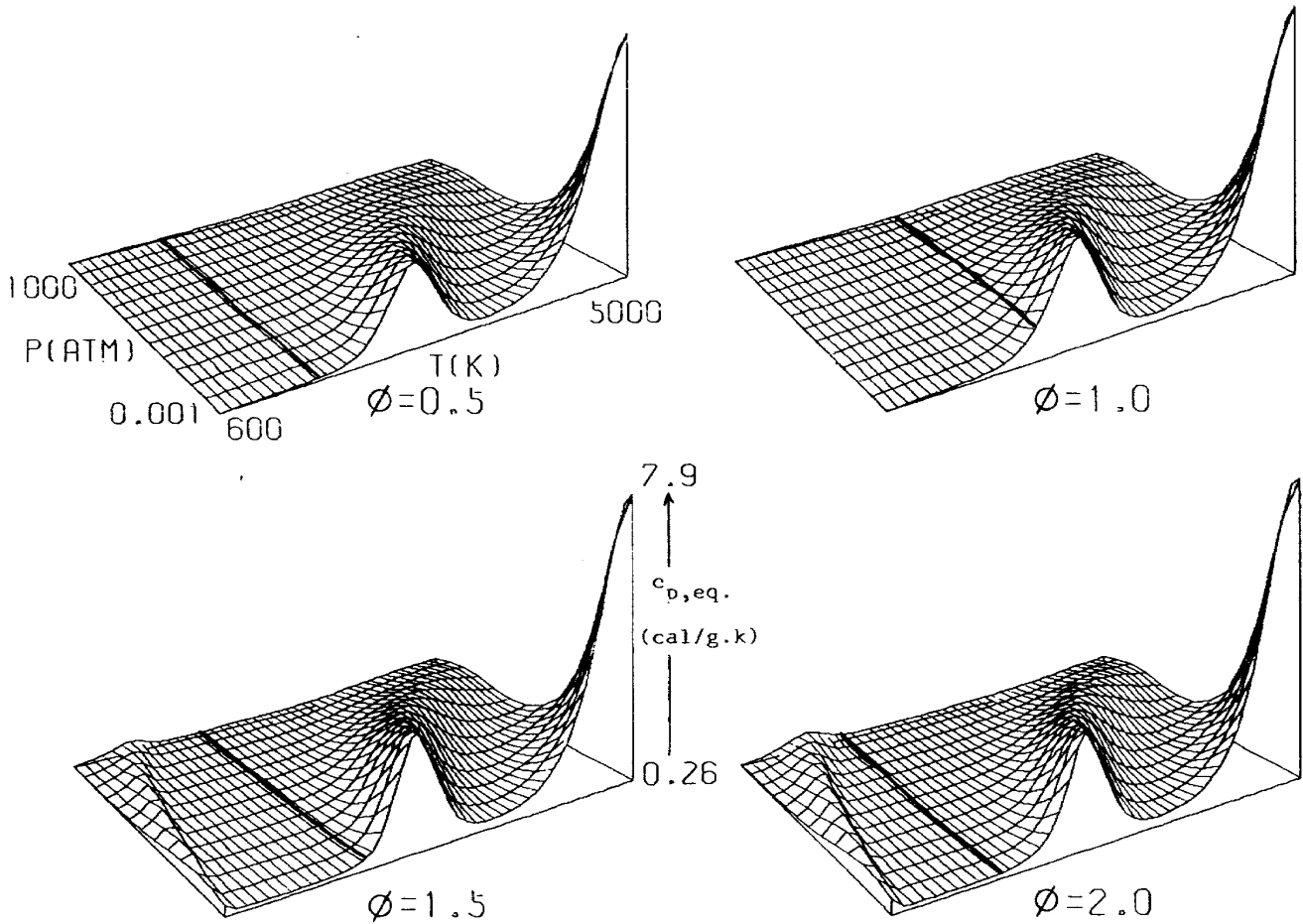
燃料過剰側になるに従って \bar{M} は若干小さくなり、 $\phi = 1.5, 2.0$ で各々、約 26, 24 g/g·mol となる。温度が約 2000K 以上になると \bar{M} が著しく減少する領域があるが、低温で生成した H_2O, CO_2, O_2, H_2 等が解離するため、圧力の上昇に伴い高温側に移動する。

N_2 の解離に伴う \bar{M} の減少は高温・低圧領域に現われる。

断熱火炎温度は、 \bar{M} の急減領域よりも低く、量論比で若干この領域に近づく。このため、断熱火炎温度以下での \bar{M} の変動幅は小さく、燃料過剰側の低温領域で約 1 割程度変動するにすぎない。

比熱平衡 (Cp,eq.)

JP4-AIR



ϕ	maximum Cp,eq. (cal/g.K)		minimum Cp,eq. (cal/g.K)		ϕ	maximum Cp,eq. (cal/g.K)		minimum Cp,eq. (cal/g.K)	
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)
0.5	1.459	0.001 / 5000	0.263	0.001~ / 1000 / 600	1.0	7.070	0.001 / 5000	0.273	0.001~ / 1000 / 600
1.5	7.559	0.001 / 5000	0.285	1000 / 600	2.0	7.895	0.001 / 5000	0.295	1000 / 600

図 A - 2 - 6

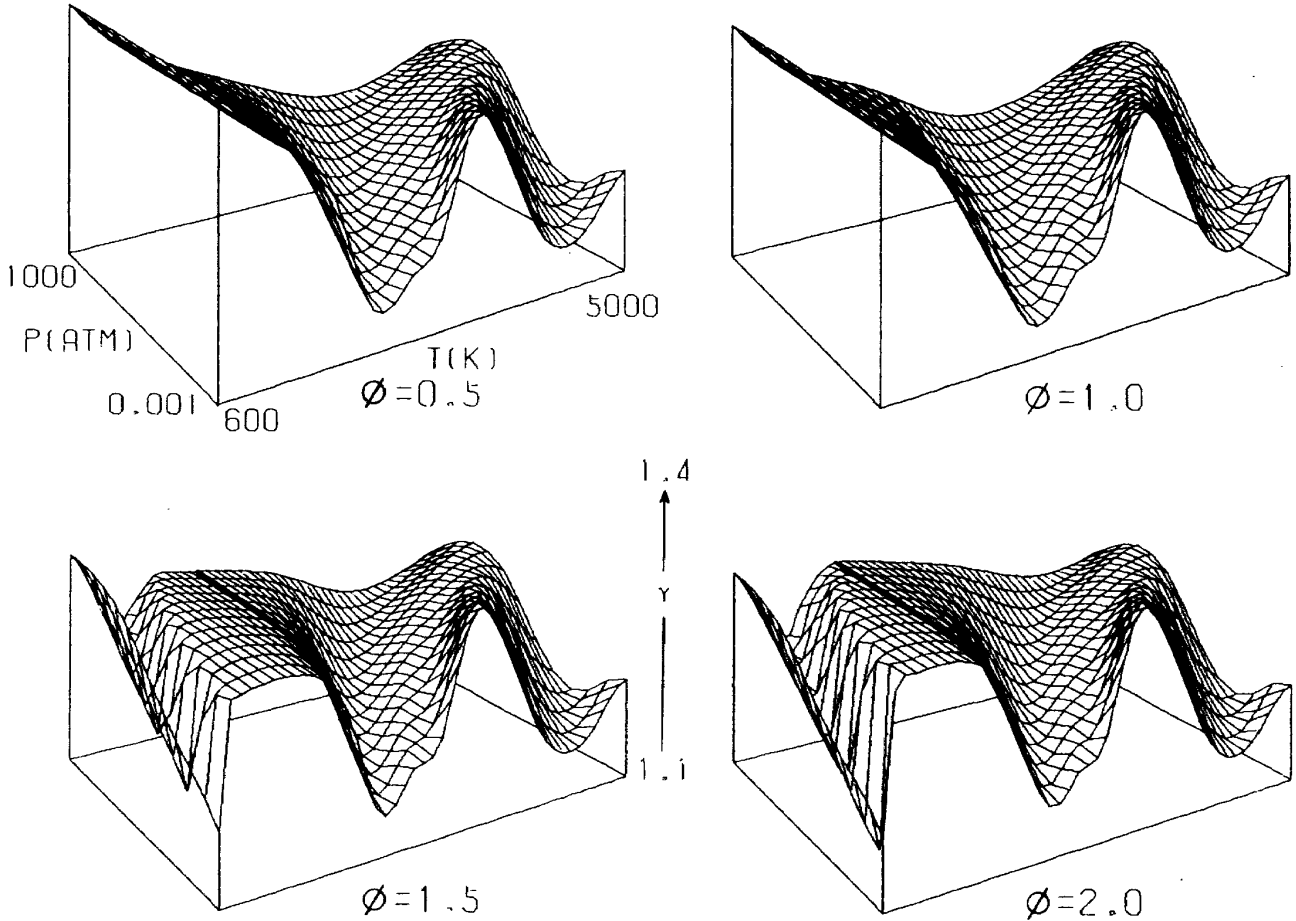
比熱平衡 (Cp,eq.) は、燃料過剰側の低温領域を除き、どの当量比でも傾向は同一である。約 2000K 以上でピークが現われる。この第 1 ピークは、主要生成物の解離によって生じ、圧力が高くなると高温側に移動する。更に高温になると、低圧で N₂ の解離及び C(g), CN 等の生成により Cp,eq. 値は大きくなり第 2 ピークを形成する。第 2 ピーク値は第 1 ピーク値の 2.6 倍程度である。一般に第 1 ピーク値は、最小値の 10 倍程度である。

燃料過剰側の低温領域の山は、水性ガス反応による組成変動に対応する。

断熱火炎温度は、どの当量比でも第 1 ピーク温度より低い。Cp,eq. の最大値は断熱火炎温度以下では、燃料過剰側で低温領域の山にあり、酸化剤過剰側及び量論比では断熱火炎温度域にある。Cp,eq. 値の変動幅は、 $\phi = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ で各々、0.26 ~ 0.32, 0.27 ~ 1.08, 0.29 ~ 0.72, 0.30 ~ 0.88 cal / g · k である。

比熱比 (γ)

JP4-AIR



ϕ	maximum γ		minimum γ		ϕ	maximum γ		minimum γ					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
0.5	1.354	0.001~1000	600	1.133	0.001	2200	1.0	1.336	0.001~1000	600	1.127	0.001	2100
1.5	1.309	1000	600	1.135	0.001	2200	2.0	1.306	0.001	3200	1.140	0.001	4300

図 A-2-8

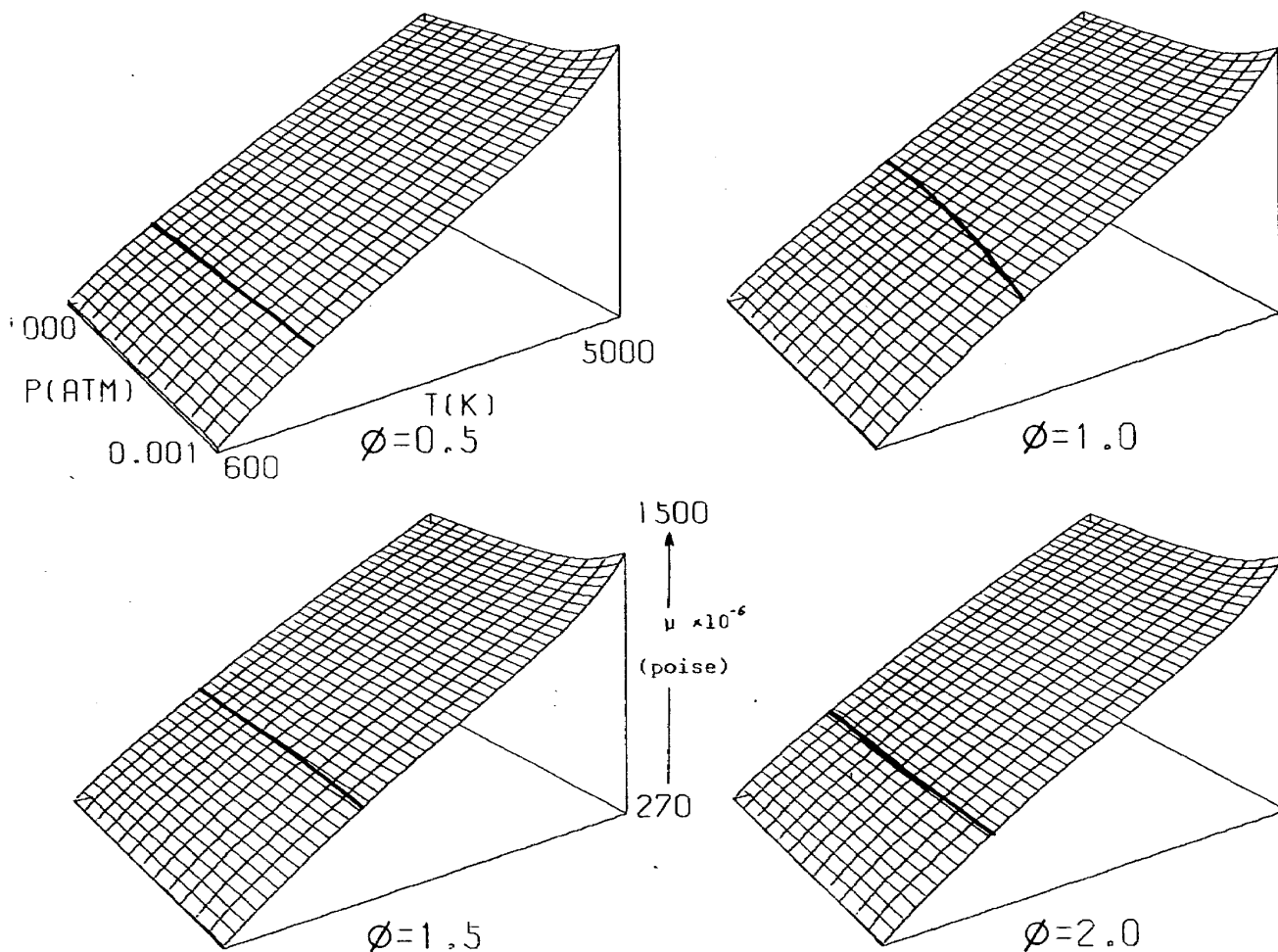
比熱比 (γ) は、全ての当量比で約 1600K 以上から高温側にかけて大きな窪みを持つ。低圧ではこの窪みの底部より高い温度で、 N_2 を除く主要生成物の解離に対応して γ 値の段差が若干現われる。解離に対する圧力効果に対応して窪みは高圧になるに従い浅く広がる。高温・低圧になると再び窪みを持つ。これは、主に N_2 の解離によるものである。

低温領域を見ると、酸化剤過剰側及び量論比では γ 値は、温度の上昇に伴い減少し圧力に対しては変動しない。 $\phi = 0.5, 1.0$ では約 1300K まで γ 値は圧力によって変動しない。(平面図 B-2-8-1, B-2-8-2 を参照) 燃料過剰側では、水性ガス反応による組成変動があるため γ 値は窪みを持つ。 γ 値の変動幅は、当量比が増加すると若干減少する。

断熱火炎温度以下に限定すると、 γ 値の変動幅は、 $\phi = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ で各々、1.28 ~ 1.35, 1.13 ~ 1.34, 1.16 ~ 1.31, 1.15 ~ 1.29 である。

粘度 (μ)

JP4-AIR



ϕ	maximum μ ($\times 10^{-6}$ poise)		minimum μ ($\times 10^{-6}$ poise)		ϕ	maximum μ ($\times 10^{-6}$ poise)		minimum μ ($\times 10^{-6}$ poise)					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
0.5	1401	0.001	5000	289	0.001 ~ 1000	600	1.0	1376	0.001	5000	278	0.001 ~ 1000	600
1.5	1353	0.001	5000	275	1 ~ 1000	600	2.0	1333	0.001	5000	272	3 ~ 1000	600

図 A - 2 - 10

粘度 (μ) は、どの当量比でも同様な変動傾向を示し、温度に対して単調に増加する。圧力による効果は、 N_2 の解離する高温・低圧領域に若干現われる。

断熱火炎温度以下に限定すると、 μ は酸化剤過剰側及び量論比で圧力に対してほとんど変動せず、燃料過剰側でも約 2% の差があるのにすぎない。

600 K ~ 断熱火炎温度までは、 μ の温度・当量比依存性は次式で近似的に与えられる。単位は 10^{-6} poise である。

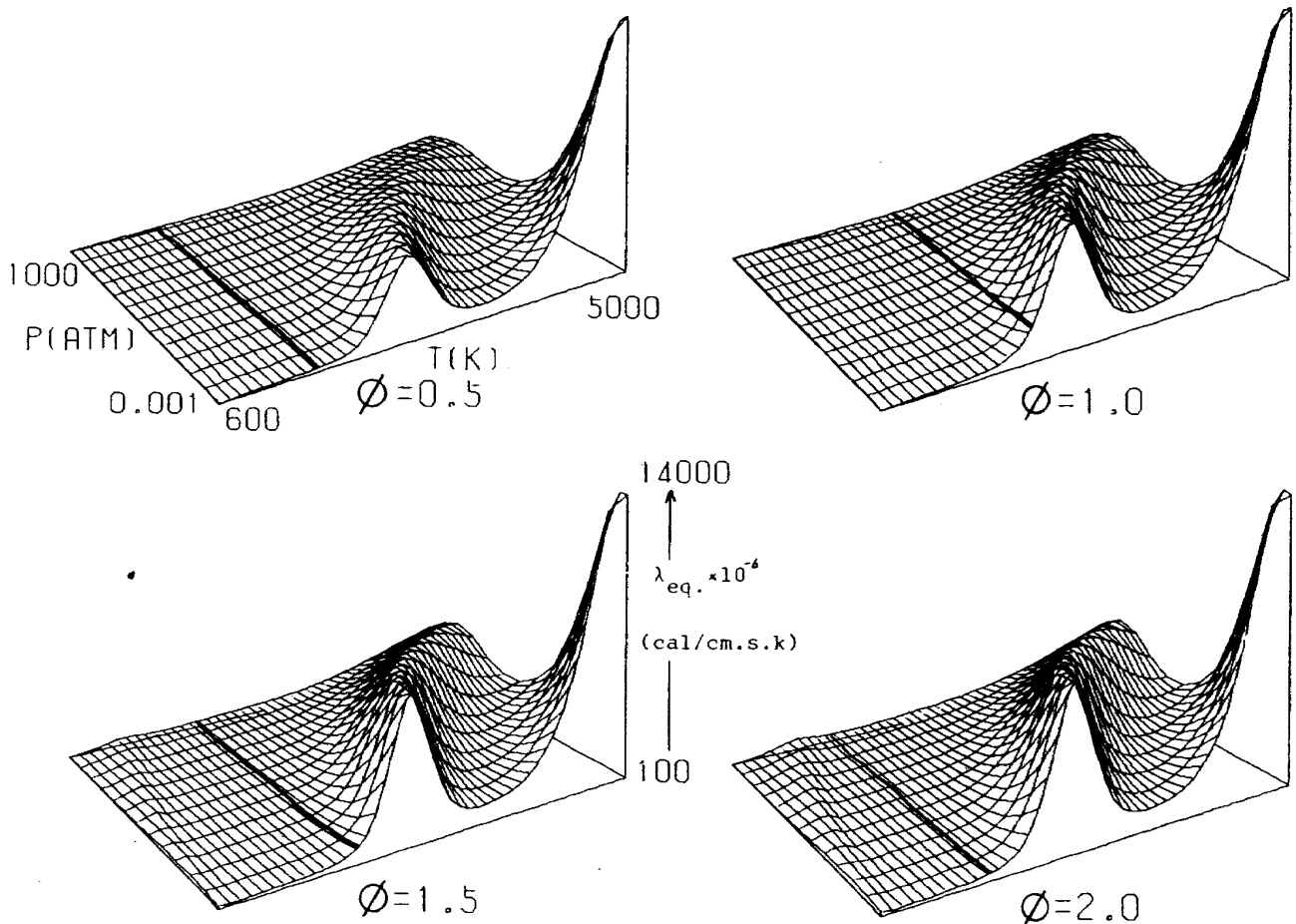
$$\mu = A \cdot \frac{1}{\phi} + B \cdot \sqrt{T} + C$$

A ; 9.63076923, B ; 17.9112189, C ; -178.257603

この近似式では、3% 程度の精度で近似できる。

熱伝導率—平衡 ($\lambda_{eq.}$)

JP4-AIR



ϕ	maximum $\lambda_{eq.}$ ($\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k)		minimum $\lambda_{eq.}$ ($\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k)		ϕ	maximum $\lambda_{eq.}$ ($\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k)		minimum $\lambda_{eq.}$ ($\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k)					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
0.5	11710	0.001	5000	109	0.001~ 1000	600	1.0	12680	0.001	4900	107	0.001~ 1000	600
1.5	13400	0.001	4900	114	1000	600	2.0	13870	0.001	4900	117	1000	600

図 A - 2 - 15

熱伝導率—平衡 ($\lambda_{eq.}$) は、燃料過剰側の低温領域を除くと、温度の上昇に伴い増加しピークを形成する。

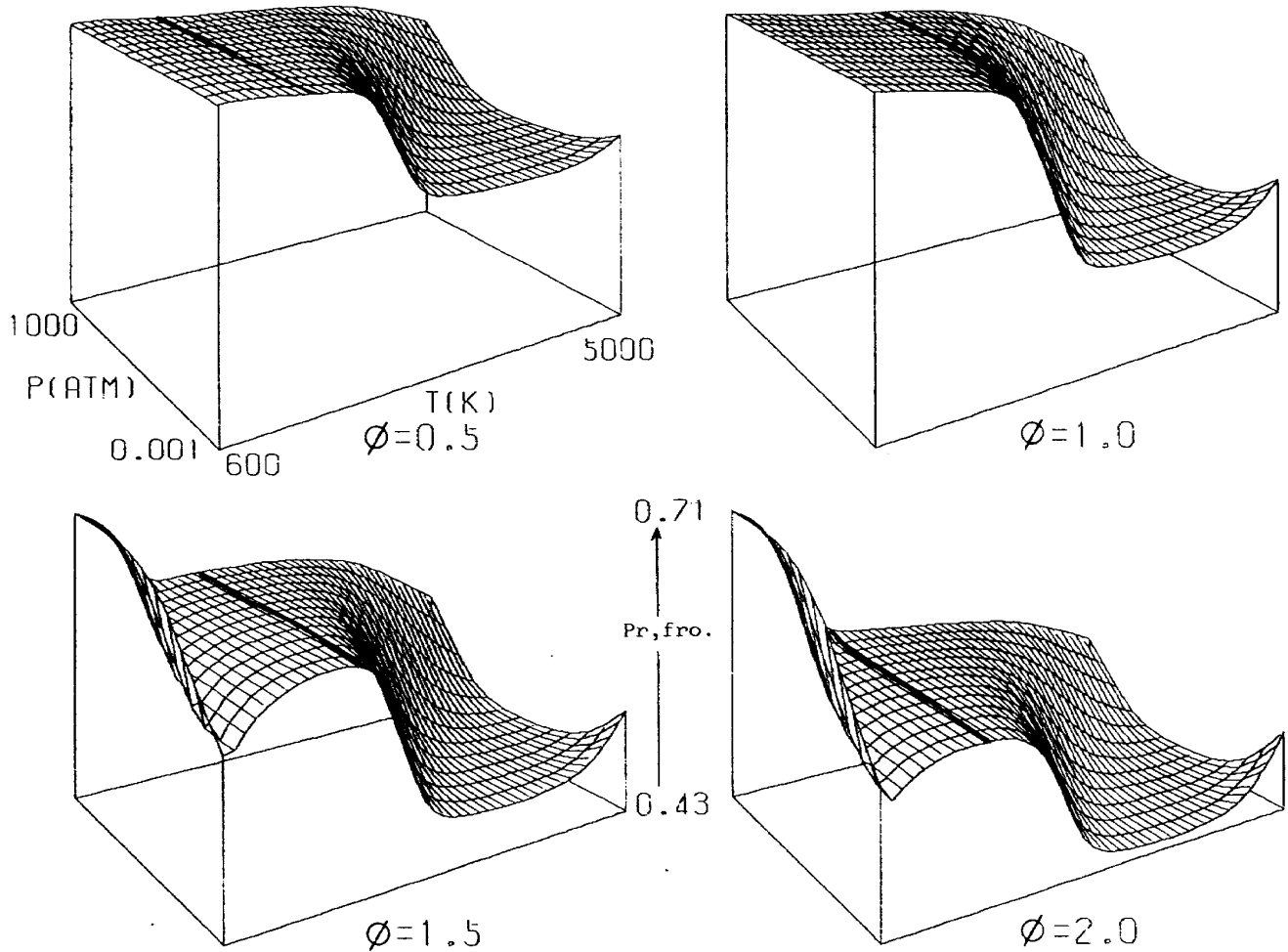
この第1ピークは、低温で生成した H_2O , CO_2 , O_2 , H_2 等の解離に伴う組成変動に対応している。高圧になるに従い解離温度が上昇するため、第1ピークは高温側に移動する。このピーク値は、当量比の増加に伴って大きくなる。例えば、 $\phi = 2.0$ のピーク値は約 7500×10^{-6} cal/cm.s.k であり、 $\phi = 1.5$ の約2倍である。

高温・低圧になると、主に空気中の N_2 の解離によって $\lambda_{eq.}$ 値は大きくなり第2ピークを形成する。 $\lambda_{eq.}$ の最大値は、第2ピークで現われる。燃料過剰側の低温領域では小さな山が現われる。これは、水性ガス反応による組成変動に対応している。

断熱火炎温度は、どの当量比でも第1ピーク温度より低い。断熱火炎温度以下に限定すると、 $\lambda_{eq.}$ 値の変動幅は、 $\phi = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ で各々、109 ~ 260, 107 ~ 1560, 114 ~ 920, 117 ~ 600 $\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k である。

プラントル数-凍結 (Pr, fro.)

JP4-AIR



ϕ	maximum Pr, fro.		minimum Pr, fro.		ϕ	maximum Pr, fro.		minimum Pr, fro.					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
0.5	0.699	0.001 ~ 1000	700	0.576	0.3	4600	1.0	0.707	0.001 ~ 1000	600	0.512	0.3	4600
1.5	0.706	1000	600	0.468	0.3	4500	2.0	0.707	1000	600	0.436	0.3	4500

図 A - 2 - 16

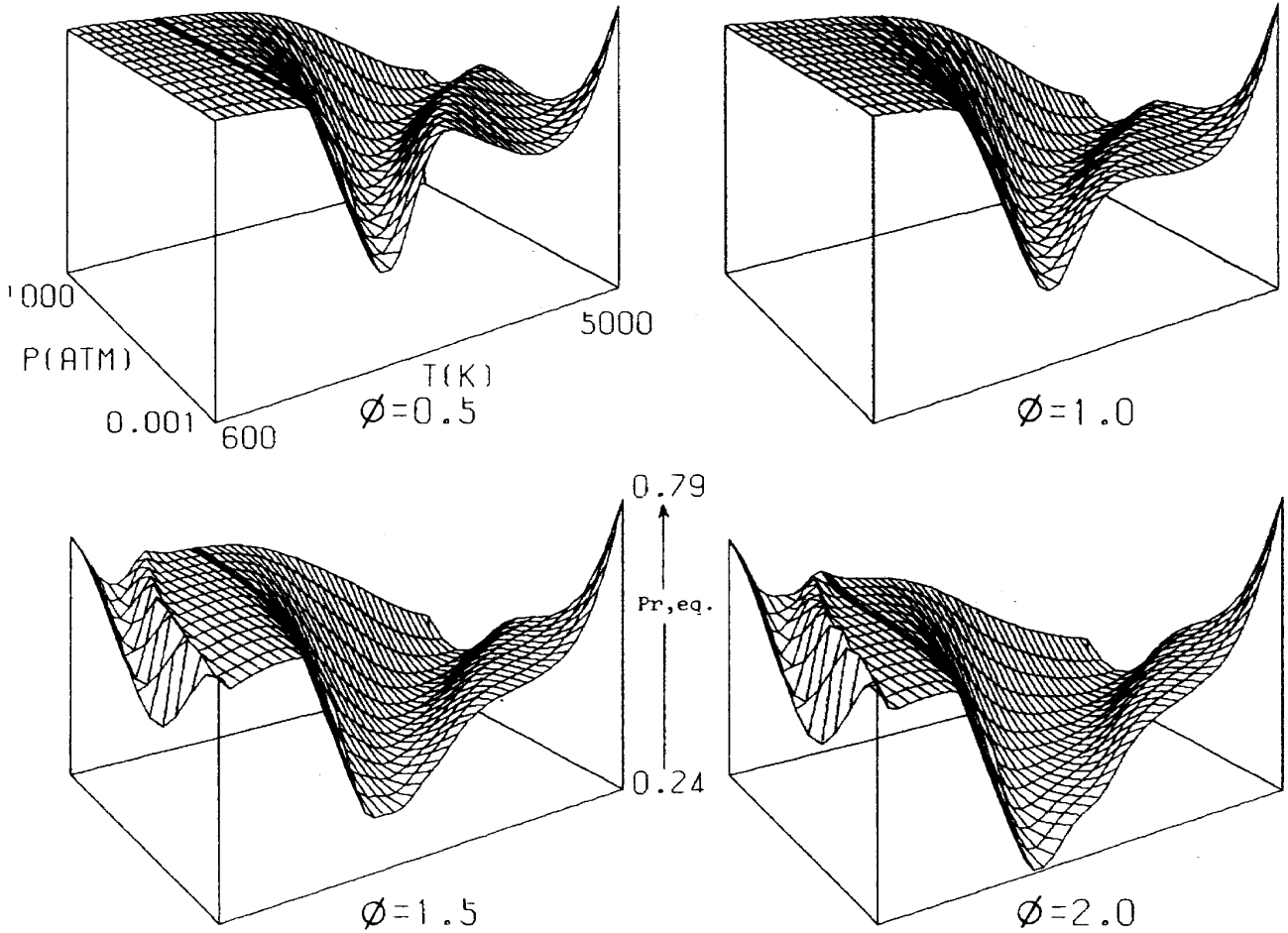
プラントル数-凍結 (Pr, fro.) は、低温領域で酸化剤過剰側・量論比と燃料過剰側の変動傾向が異なる。

前者では、Pr, fro. 値は約 1600K まで圧力によらずほぼ一定である。後者は、温度及び圧力による変動が著しい。圧力の増加に伴い Pr, fro. 値は、約 20 ~ 30 % 増加する。一般に約 2000K 以上で Pr, fro. 値が急激に減少する温度領域がある。この変動幅は低圧側で大きく、例えば、量論比では約 25 % 減少する。この領域を過ぎると再び Pr, fro. 値の変動幅は小さくなる。

Pr, fro. の最大値は、各当量比共約 0.71 である。最小値は、当量比が増加するのに伴って小さくなるため、当量比が大きいほど Pr, fro. の変動幅は大きい。以上 Pr, fro. 値の変動傾向は JP4 - O₂ 系とほぼ同様である。

プラントル数-平衡 (Pr, eq.)

JP4-AIR



ϕ	maximum $Pr_{eq.}$		minimum $Pr_{eq.}$		ϕ	maximum $Pr_{eq.}$		minimum $Pr_{eq.}$					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
0.5	0.760	0.001	5000	0.394	0.001	2200	1.0	0.768	0.001	5000	0.362	0.001	2300
1.5	0.775	0.001	5000	0.328	0.001	2300	2.0	0.781	0.001	5000	0.244	0.001	2200

図A-2-17

低温領域のプラントル数-平衡 (Pr, eq.) は、酸化剤過剰側及び量論比で変動幅は小さく、約 1200 K まではほぼ一定である。燃料過剰側では、水性ガス反応による組成変動に対応して小さな窪みを持つ。一般に約 1500 K 以上で Pr, eq. 値は窪みを持つ。窪みは、高圧になるに従って高温側に移動する。量論比近傍では低圧での断熱火炎温度がこの窪みの底部に近づく。

窪みより温度が上昇すると、酸化剤過剰側及び量論比では Pr, eq. 値は若干減少し、高温・低圧側での増加に至る。燃料過剰側では増加傾向のみである。Pr, eq. 値の変動幅は、当量比が増加すると大きくなる傾向にある。

断熱火炎温度以下の Pr, eq. 値の変動幅は、 $\phi = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ で各々、 $0.69 \sim 0.70, 0.45 \sim 0.70, 0.37 \sim 0.69, 0.44 \sim 0.69$ である。

—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の平面図及び平衡組成図は下記の表10、表11に示した。

表10 JP4-Air系の平面図一覧表

ページ	図番号	物性値	当量比 (ϕ)	ページ	図番号	物性値	当量比 (ϕ)
70	B-2-2-1	H	0.5	78	B-2-2-3	H	1.5
"	B-2-4-1	\bar{M}	"	"	B-2-4-3	\bar{M}	"
71	B-2-6-1	$C_{p,eq.}$	"	79	B-2-6-3	$C_{p,eq.}$	"
"	B-2-8-1	γ	"	"	B-2-8-3	γ	"
72	B-2-10-1	μ	"	80	B-2-10-3	μ	"
"	B-2-15-1	$\lambda_{eq.}$	"	"	B-2-15-3	$\lambda_{eq.}$	"
73	B-2-16-1	$Pr, fro.$	"	81	B-2-16-3	$Pr, fro.$	"
"	B-2-17-1	$Pr, eq.$	"	"	B-2-17-3	$Pr, eq.$	"
74	B-2-2-2	H	1.0	82	B-2-2-4	H	2.0
"	B-2-4-2	\bar{M}	"	"	B-2-4-4	\bar{M}	"
75	B-2-6-2	$C_{p,eq.}$	"	83	B-2-6-4	$C_{p,eq.}$	"
"	B-2-8-2	γ	"	"	B-2-8-4	γ	"
76	B-2-10-2	μ	"	84	B-2-10-4	μ	"
"	B-2-15-2	$\lambda_{eq.}$	"	"	B-2-15-4	$\lambda_{eq.}$	"
77	B-2-16-2	$Pr, fro.$	"	85	B-2-16-4	$Pr, fro.$	"
"	B-2-17-2	$Pr, eq.$	"	"	B-2-17-4	$Pr, eq.$	"

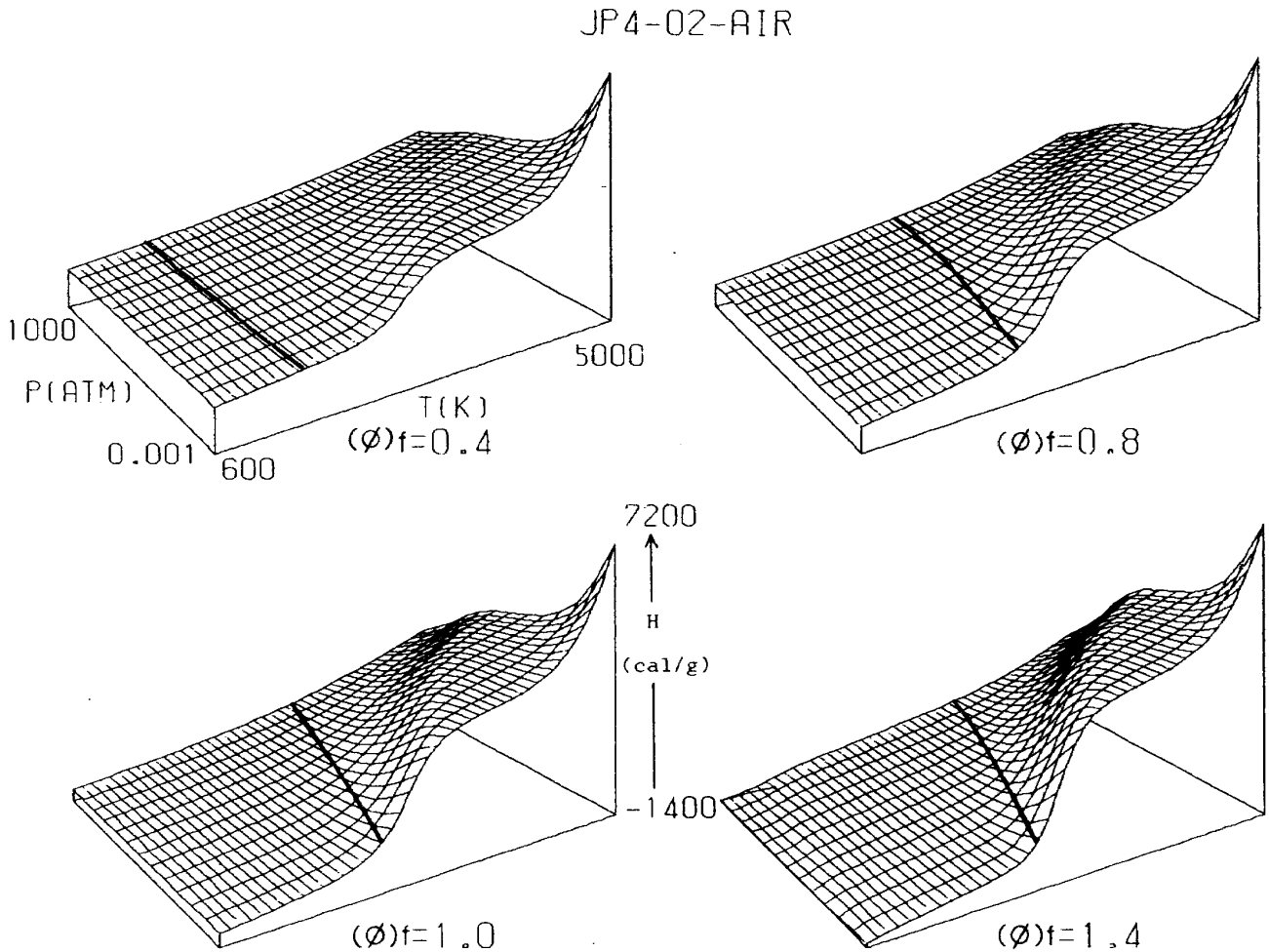
表11 JP4-Air系の平衡組成図一覧表

ページ	図番号	当量比 (ϕ)	圧力 (atm)
86	C-2-1	0.5	0.01
"	C-2-2	"	1
"	C-2-3	"	100
87	C-2-4	1.0	0.01
"	C-2-5	"	1
"	C-2-6	"	100
88	C-2-7	1.5	0.01
"	C-2-8	"	1
"	C-2-9	"	100
89	C-2-10	2.0	0.01
"	C-2-11	"	1
"	C-2-12	"	100

5.4 JP4-O₂-Air 系

立体図の当量比は、4.3節で説明したようにJP4-O₂系の(φ)primary = 1.8に空気を加えたJP4-O₂-Air系の(φ)final が酸化剤過剰な(φ)f = 0.4, 0.8, 量論比(φ)f = 1.0及び燃料過剰な(φ)f = 1.4を選んだ。

—立体図による傾向の把握—
エンタルピ(H)



(φ)f	maximum H (cal/g)		minimum H (cal/g)		(φ)f	maximum H (cal/g)		minimum H (cal/g)	
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)
0.4	5891	0.001 / 5000	-266	0.001~1000 / 600	0.8	6303	0.001 / 5000	-742	0.001~1000 / 600
1.0	6547	0.001 / 5000	-1060	0.001~1000 / 600	1.4	7102	0.001 / 5000	-1304	0.001 / 600

図 A-3-2

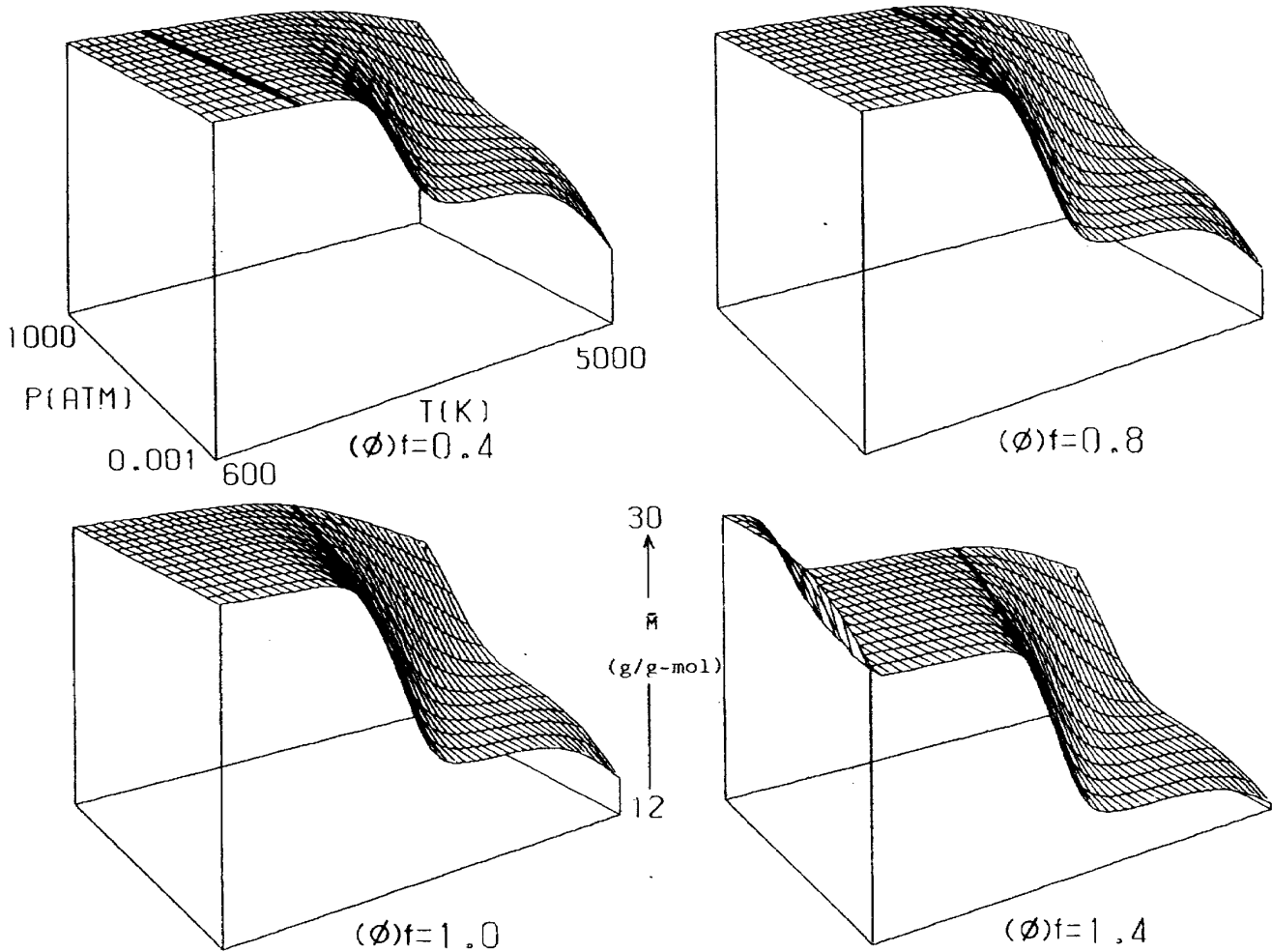
エンタルピ(H)は、どの当量比でも同様な変動傾向を示す。低温から断熱火炎温度近傍までは単調に増加し、酸化剤過剰側及び量論比では、約1300Kまで圧力によらずH値はほぼ一定である。燃料過剰側では、水性ガス反応による組成変動に対応しHは圧力によって若干変動する。一般に断熱火炎温度以上で、Hの増加が大きくなる温度領域がある。この領域は、高圧になるに従い高温側に移動する。これはN₂を除いた主要生成物の解離する温度領域に対応する。(平衡組成図C-3-1~C-3-12を参照)この領域でのHの変動幅は当量比の増加に伴い大きくなる。

これを過ぎるとHは再び単調増加を続け、高温・低圧で著しく増加する。

同図のHの変動幅は当量比の増加に伴い大きくなり、(φ)f = 1.4は、(φ)f = 0.4の1.4倍程度である。JP4-Air系の傾向がそのまま現われる。

平均分子量 (\bar{M})

JP4-O2-AIR



$(\phi)f$	maximum \bar{M} (g/g·mol)		minimum \bar{M} (g/g·mol)		$(\phi)f$	maximum \bar{M} (g/g·mol)		minimum \bar{M} (g/g·mol)					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
0.4	29.12	0.001~ 1000	600	18.61	0.001	5000	0.8	29.35	0.001~ 1000	600	15.09	0.001	5000
1.0	29.50	0.001~ 1000	600	14.25	0.001	5000	1.4	29.95	1000	600	12.38	0.001	5000

図 A-3-4

平均分子量 (\bar{M}) は、燃料過剰側の低温領域を除き、約 2000K まで温度及び圧力による変動が小さい。

約 2000K 以上では、 H_2O 、 CO_2 、 H_2 、 O_2 等の主要生成物の解離に伴い \bar{M} が減少する。この \bar{M} の減少域は、高圧になるに従い高温側に移動する。 $(\phi)f = 0.4$ を除く低圧での断熱火炎温度は、この減少域にある。温度が上昇すると、 \bar{M} の変動は再び小さくなり、更に高温では低圧で N_2 の解離により \bar{M} が減少する。燃料過剰側の低温領域では、 \bar{M} が最大値より約 15% 減少する。

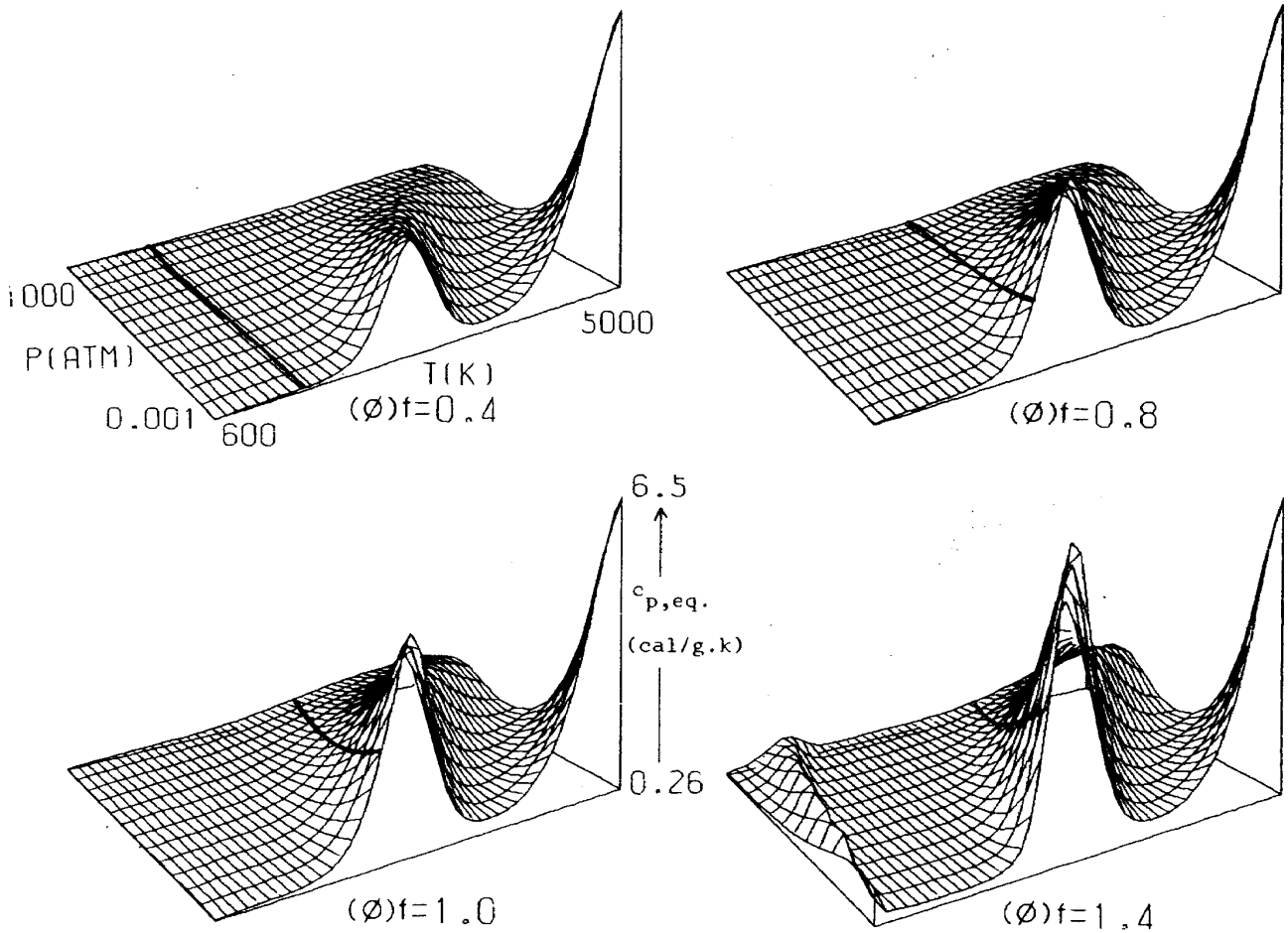
これは、水性ガス反応による組成変動に対応する。

組成変動は平衡組成図 (C-3-10 ~ C-3-12) を参照されたい。 \bar{M} の変動幅は当量比の増加に伴って大きくなり、 $(\phi)f = 1.4$ では $(\phi)f = 0.4$ の約 1.4 倍である。

断熱火炎温度以下に限定すると、 \bar{M} は $(\phi)f = 0.4$ で 29 g/g·mol とほぼ一定である。他の当量比での変動幅は、 $(\phi)f = 0.8, 1.0, 1.4$ で各々、 $29.4 \sim 28.0, 29.5 \sim 26.6, 30.0 \sim 23.1$ である。

比熱-平衡 (Cp,eq.)

JP4-O2-AIR



$(\phi)f$	maximum t		minimum t		$(\phi)f$	maximum t		minimum t					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
0.4	1.353	0.001 ~ 1000	600	1.132	0.001	2200	0.8	1.325	0.001 ~ 1000	600	1.122	0.001	2100
1.0	1.313	0.001	3300	1.119	0.001	2000	1.4	1.338	0.001	3400	1.129	0.001	2100

図 A-3-6

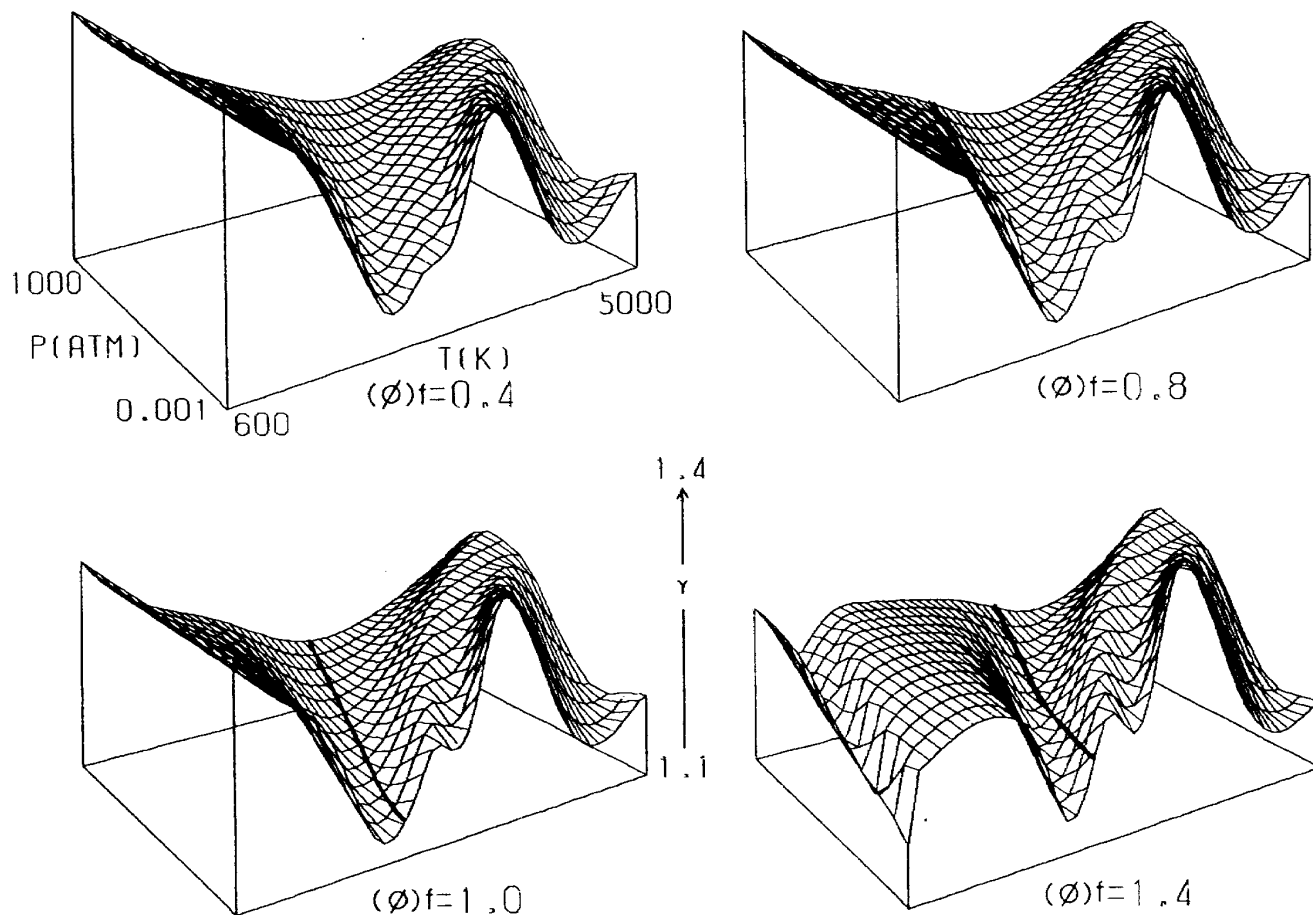
比熱-平衡 (Cp,eq.) は、燃料過剰側の低温領域の山を除き、約 1800K 以上でピークが現われる。この第 1 ピークは、高圧になるに従い高温側に移動し、ピーク値は減少する。当量比の増加に伴ってこのピーク値は大きくなり、 $(\phi)f = 1.4$ で Cp,eq. 値は 6.3 cal/g · k である。これは $(\phi)f = 0.4$ のピーク値の約 2.5 倍である。平衡組成図 (C-3-1 ~ C-3-12) から明らかなようにこのピーク域は、N₂ を除く主要生成物の解離する温度領域に対応する。 $(\phi)f = 0.4$ を除く低圧での断熱火炎温度は、このピーク域にある。高温・低圧では、第 2 ピークを形成する。このピーク値は、Cp,eq. の最大値となる。 $(\phi)f = 1.4$ では第 1 ピーク値と第 2 ピーク値はほぼ同じ値である。

燃料過剰側の低温領域の山は、水性ガス反応による組成変動に対応する。

断熱火炎温度以下の Cp,eq. 値の変動幅は、 $(\phi)f = 0.4, 0.8, 1.0, 1.4$ で各々、0.26 ~ 0.32, 0.28 ~ 1.6, 0.29 ~ 2.5, 0.32 ~ 3.7 cal/g · k である。

比熱比 (γ)

JP4-02-AIR



$(\phi)f$	maximum $C_{p,eq}$ (cal/g·K)		minimum $C_{p,eq}$ (cal/g·K)		$(\phi)f$	maximum $C_{p,eq}$ (cal/g·K)		minimum $C_{p,eq}$ (cal/g·K)	
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)
0.4	6.050	0.001 / 5000	0.262	0.001~1000 / 600	0.8	6.291	0.001 / 5000	0.276	0.001~1000 / 600
1.0	6.388	0.001 / 5000	0.286	0.001~1000 / 600	1.4	6.464	0.001 / 5000	0.317	1000 / 600

図 A-3-8

比熱比 (γ) は、酸化剤過剰側では約 1500 K 以上から高温側にかけて大きな窪みを持つ。この底部は低圧側で最小値となる。窪みの底部より高い温度では N_2 を除く主要生成物の解離に伴い γ に若干段差が現われる。量論比及び燃料過剰側では同様に約 1500 K から高温側にかけて同様な窪みと小さな窪みが現われる。

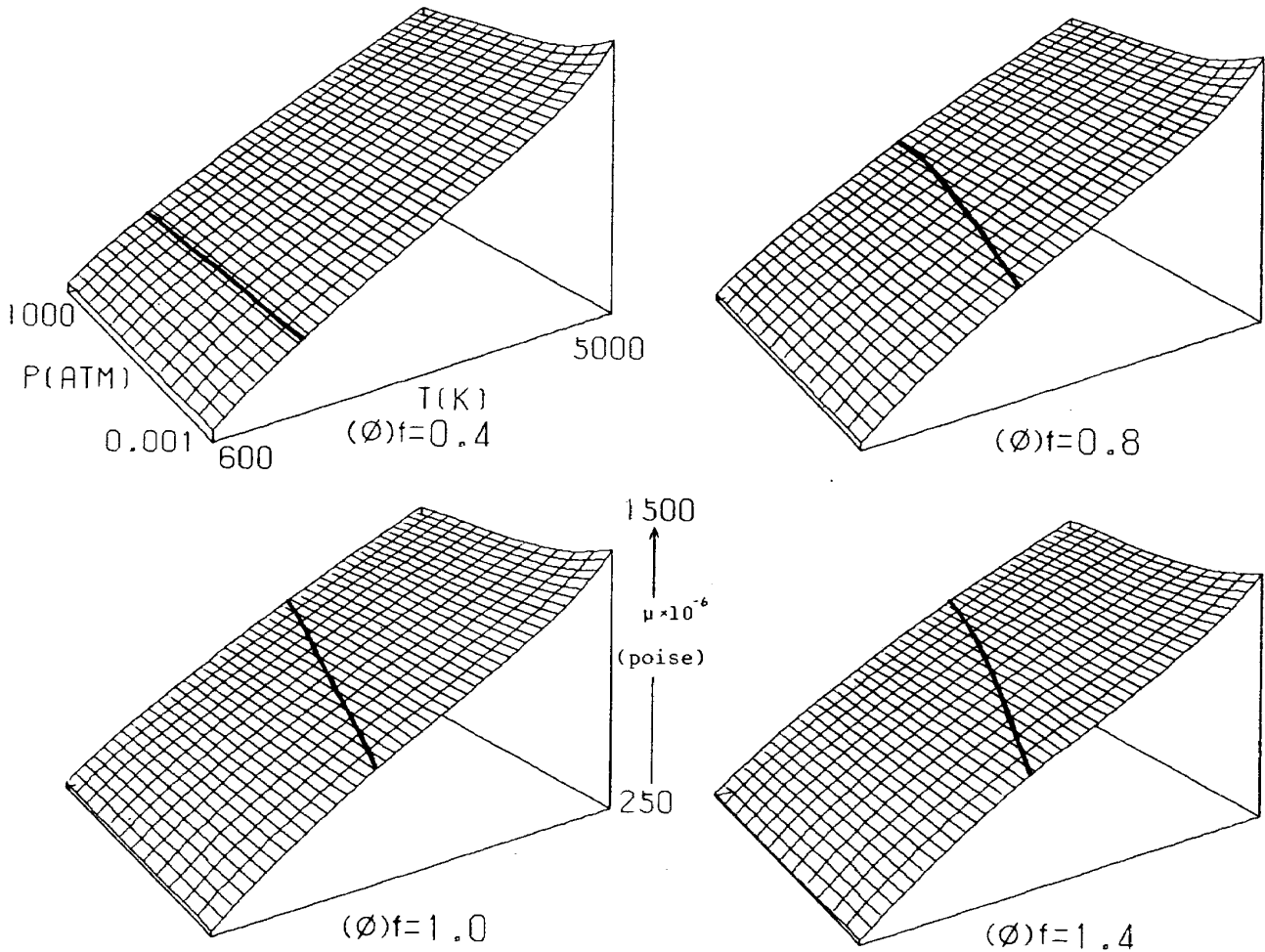
これらの窪みは、いずれも高圧になるに従い高温側に移動し、浅く広くなる。更に高温になると、低圧ではどの当量比でも γ は再び窪みを持つ。

低温領域を見ると、酸化剤過剰側及び量論比では γ 値は、温度の上昇に伴い減少し圧力によっては変化しない。 $(\phi)f = 0.4, 0.8, 1.0$ では約 1200 K まで圧力によらずほぼ一定である。(平面図 B-3-8-1 ~ B-3-8-3 参照) 燃料過剰側では水性ガス反応による組成変動に対応し γ は窪みを持つ。

断熱火炎温度は、量論比近傍で γ の大きな窪みの底部により近づく。断熱火炎温度以下の γ 値の変動幅は、 $(\phi)f = 0.4, 0.8, 1.0, 1.4$ で各々、1.35 ~ 1.28, 1.33 ~ 1.12, 1.31 ~ 1.12, 1.26 ~ 1.13 である。

粘度 (μ)

JP4-02-AIR



$(\phi)f$	maximum μ ($\times 10^{-6}$ poise)		minimum μ ($\times 10^{-6}$ poise)		$(\phi)f$	maximum μ ($\times 10^{-6}$ poise)		minimum μ ($\times 10^{-6}$ poise)	
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)
0.4	1408	0.001 / 5000	292	0.001~ 1000 / 600	0.8	1376	0.001 / 5000	279	0.001~ 1000 / 600
1.0	1354	0.001 / 5000	270	0.001~ 1000 / 600	1.4	1286	0.001 / 5000	259	1~ 1000 / 600

図 A-3-10

粘度 (μ) は、どの当量比に対しても同様な変動傾向を示し、温度が上昇すると単調増加する。JP4-Air 系と同様に圧力効果は、 N_2 の解離する高温の低圧領域で若干現われる。(平面図 B-3-10-1 を参照すると 5000K での μ 値は、圧力 0.001, 1000 atm で各々、1408, 1267×10^{-6} poise である。)

断熱火炎温度以下に限定すると、 μ は燃料過剰側の低温領域を除き圧力に対してほとんど変動しない。

燃料過剰側の低温領域では μ 値は約 3% の差があるのにすぎない。

同図 ($(\phi)_p = 1.8$) において、600 ~ 1800K の μ 値は次式で近似的に与えられる。単位は 10^{-6} poise である。

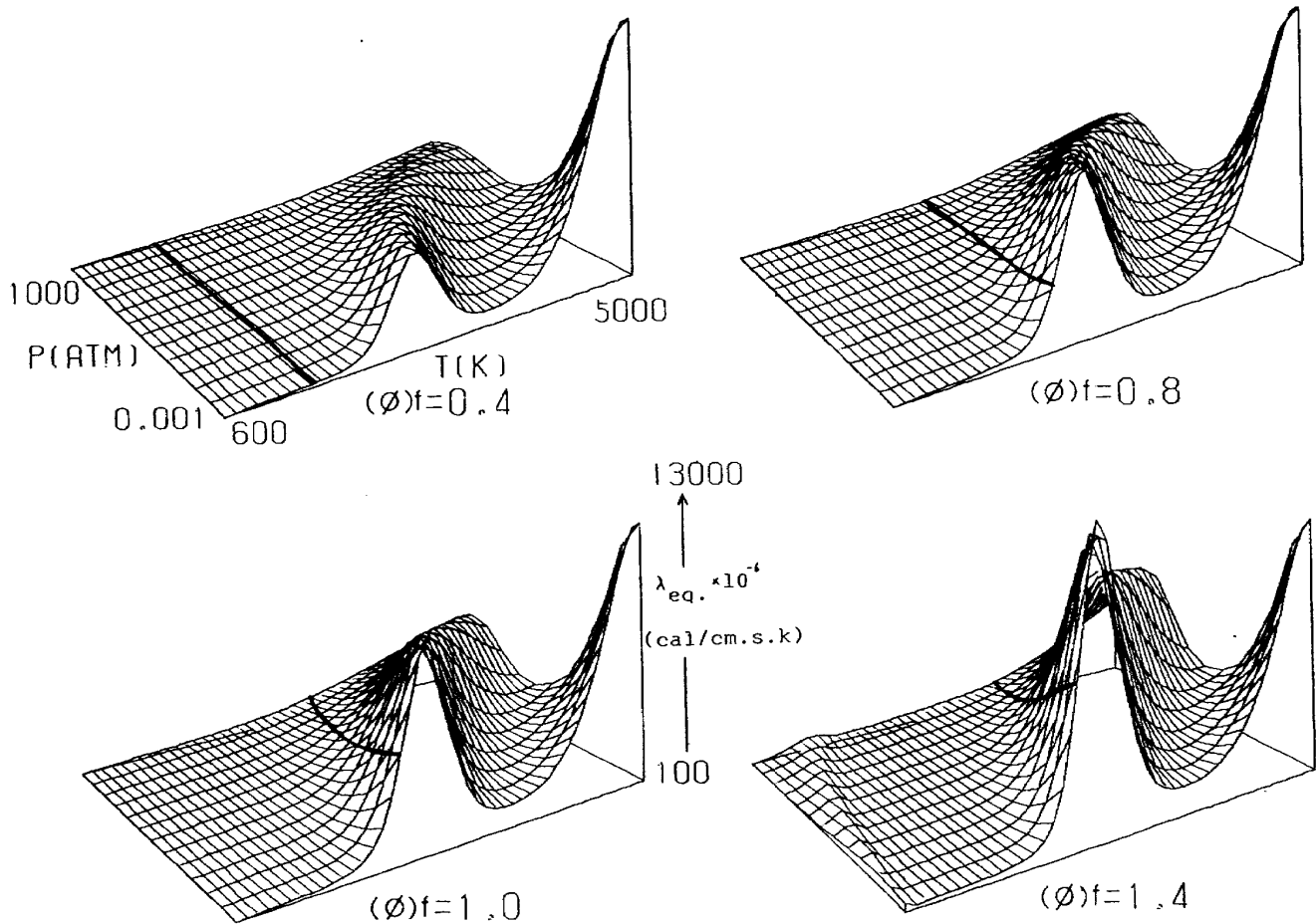
$$\mu = A \cdot (\phi)^3 f + B \cdot (\phi)^2 f + C \cdot (\phi) f + D \cdot \sqrt{T} + E$$

A ; 66.66666667, B ; -167.5000000, C ; 98.83333335, D ; 17.07425914,
E ; -146.6141791

この近似式では 3% 程度の精度で近似できる。

熱伝導率—平衡 ($\lambda_{eq.}$)

JP4-02-AIR



$(\phi)f$	maximum $\lambda_{eq.}$ ($\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k)		minimum $\lambda_{eq.}$ ($\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k)		$(\phi)f$	maximum $\lambda_{eq.}$ ($\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k)		minimum $\lambda_{eq.}$ ($\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k)					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
0.4	11160	0.001	5000	109	0.001~ 1000	600	0.8	11220	0.001	5000	108	0.001~ 1000	600
1.0	11180	0.001	5000	108	0.001~ 1000	600	1.4	12650	0.001	2500	118	1000	600

図 A-3-15

熱伝導率—平衡 ($\lambda_{eq.}$)は、燃料過剰側の低温領域の小さな山を除き低温では変動が小さい。約 1800 K 以上で $\lambda_{eq.}$ はピークを形成する。この第 1 ピークは、高圧になるに従い高温側に移動し、ピーク値は減少する。当量比が増加するとこのピーク値は増大し、例えば $(\phi) f = 1.4$ では $\lambda_{eq.}$ 値は約 12700×10^{-6} cal/cm.s.k である。これは $(\phi) f = 0.4$ のピーク値の約 3 倍である。 $\lambda_{eq.}$ のピーク域は、 N_2 を除く主要生成物の解離する温度領域に対応する。高温になると、低圧では主に N_2 の解離に伴い $\lambda_{eq.}$ は増加し、第 2 ピークを形成する。

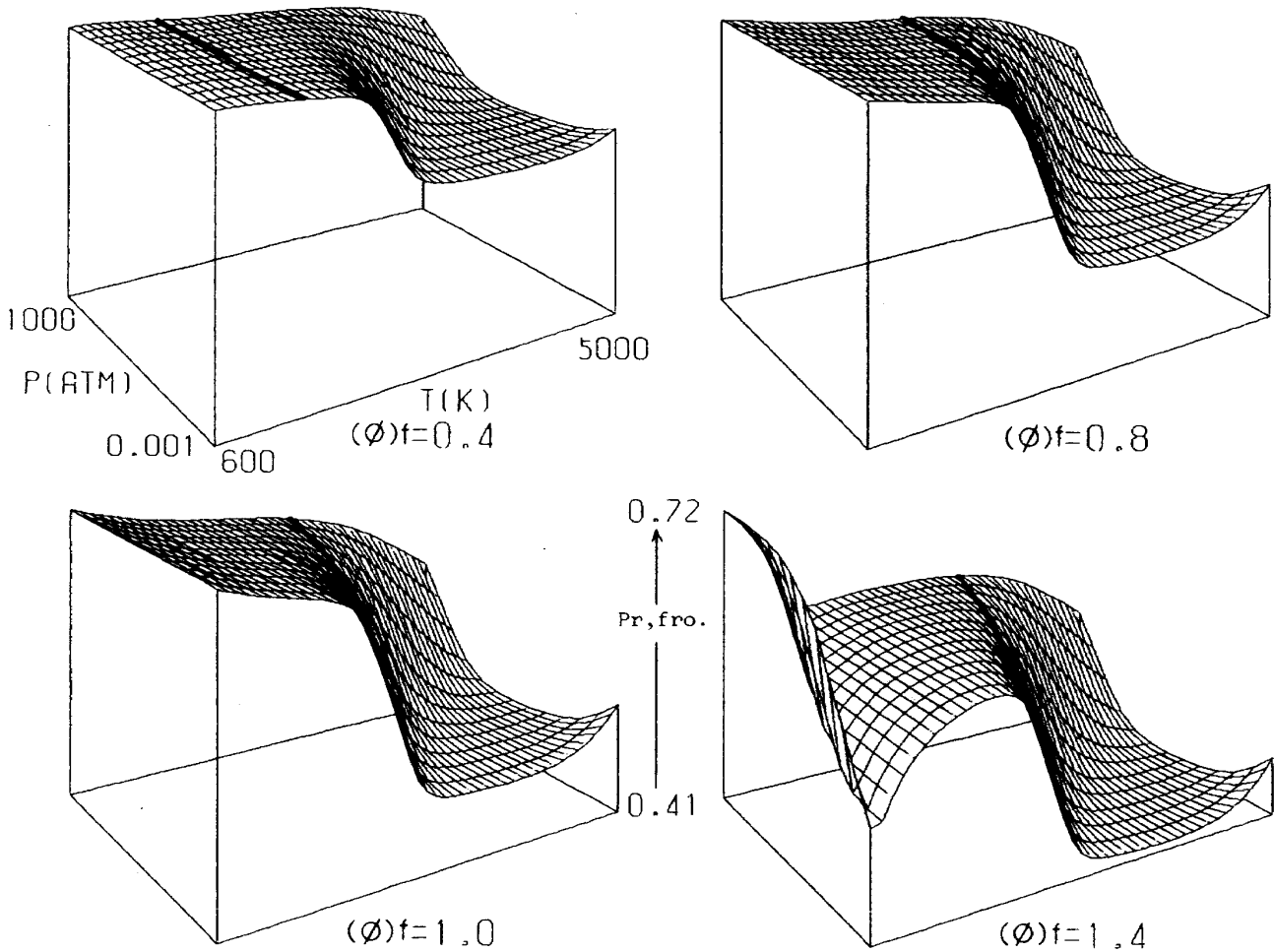
このピーク値は、酸化剤過剰側及び量論比で最大値となる。

燃料過剰側の低温領域に見られる $\lambda_{eq.}$ の小さな山は、水性ガス反応による組成変動に対応する。

断熱火炎温度は、 $\lambda_{eq.}$ の第 1 ピーク温度より低いが、当量比の増加に伴いピークに近づく。断熱火炎温度以下に限定すると、 $\lambda_{eq.}$ の変動幅は $(\phi) f = 0.4, 0.8, 1.0, 1.4$ で各々、109 - 220, 108 ~ 2740, 108 ~ 4560, 118 ~ 7440 $\times 10^{-6}$ cal/cm.s.k である。

プラントル数-凍結 (Pr, fro.)

JP4-02-AIR



(φ)f	maximum Pr, fro.		minimum Pr, fro.		(φ)f	maximum Pr, fro.		minimum Pr, fro.					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
0.4	0.699	0.001~ 1000	700~ 800	0.583	1	5000	0.8	0.709	0.001~ 1000	600	0.502	0.1	4400~ 4500
1.0	0.716	0.001~ 1000	600	0.472	0.3	4500~ 4600	1.4	0.718	1000	600	0.416	0.3	4500~ 4600

図 A-3-16

プラントル数-凍結 (Pr, fro.) は、低温領域で酸化剤過剰側・量論比と燃料過剰側の変動傾向が異なる。

前者は、Pr, fro. 値が約 1600K まで圧力によらずほぼ一定である。後者は、温度及び圧力による変動が低温での組成変動に対応し著しくなり低圧の場合を除くと、温度の上昇に伴い Pr, fro. 値は一旦減少し増加に転ずる。(平面図 B-3-16-4 参照)

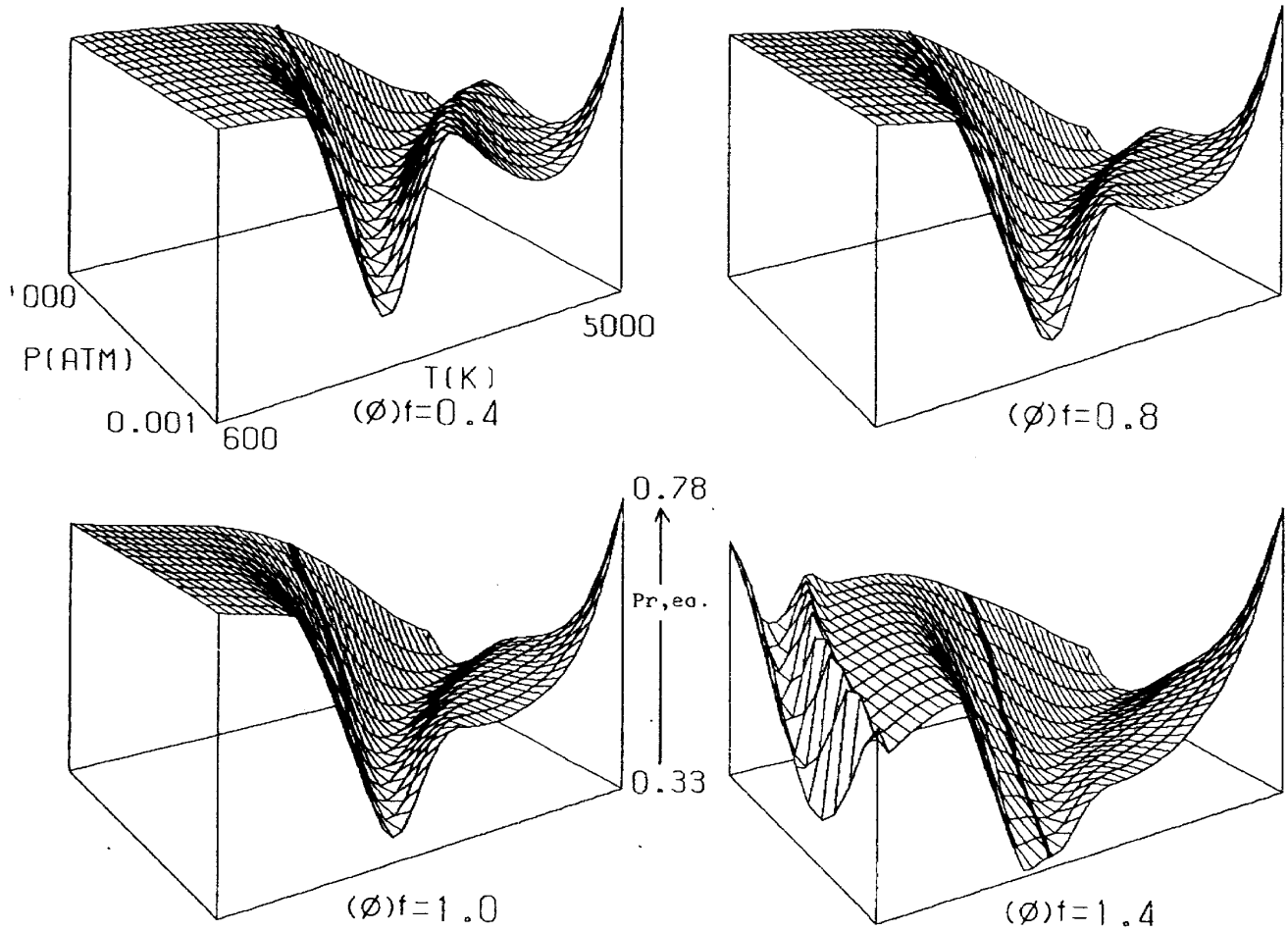
一般に約 2000K 以上で Pr, fro. が急激に減少する温度領域がある。この領域は、高圧になるに従い高温側に移動し、量論比近傍の低圧側では変動幅が最も大きくなる。例えば、(φ)f = 1.0, P = 0.001 atm では Pr, fro. 値は約 3 割減少する。この領域を過ぎると、再び Pr, fro. 値の変動幅は小さくなる。

Pr, fro. の最大値は、どの当量比でも 0.71 でほぼ一定である。最小値は、当量比の増加に伴い減少する。

このため Pr, fro. の変動幅は、当量比の増加に伴い大きく、(φ)f = 1.4 では (φ)f = 0.4 の約 2.6 倍である。

プラントル数-平衡 (Pr, eq.)

JP4-O2-AIR



$(\phi)f$	maximum Pr,eq.		minimum Pr,eq.		$(\phi)f$	maximum Pr,eq.		minimum Pr,eq.					
	P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)		P (atm)	T (K)	P (atm)	T (K)				
0.4	0.764	0.001	5000	0.401	0.001	2200	0.8	0.772	0.001	5000	0.370	0.001	2300
1.0	0.774	0.001	5000	0.365	0.001	2300	1.4	0.764	0.001	5000	0.337	0.001	2100

図 A-3-17

プラントル数-平衡 (Pr, eq.) は、低温領域では酸化剤過剰側及び量論比で温度及び圧力による変動が小さい。燃料過剰側では、水性ガス反応による組成変動に対応し窪みを持つ。一般に約 1400K 以上になると、Pr, eq. は大きな窪みを持つ。窪みは、高圧になるに従い高温側に移動し広がる。窪みの底部は、低圧で Pr, eq. の最小値となる。 $(\phi)f = 0.4$ を除くと、断熱火炎温度は低圧になるに従い窪みの底部に近づく。

窪みより温度が上昇すると、酸化剤過剰側及び量論比では Pr, eq. は、若干減少し高温側の増加に至る。

燃料過剰側では、増加傾向のみである。Pr, eq. の最大値は、どの当量比でも高温の低圧側で現われる。

断熱火炎温度以下の Pr, eq. 値の変動幅は、 $(\phi)f = 0.4, 0.8, 1.0, 1.4$ で各々、0.69 ~ 0.70, 0.40 ~ 0.71, 0.38 ~ 0.72, 0.34 ~ 0.69 である。

—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の平面図及び平衡組成図は下記の表12、表13に示した。

表12 JP4-O₂-Air系の平面図一覧表

ページ	図番号	物性値	当量比 (ϕ) _p →(ϕ) _f	ページ	図番号	物性値	当量比 (ϕ) _p →(ϕ) _f
92	B-3-2-1	H	1.8→0.4	100	B-3-2-3	H	1.8→1.0
"	B-3-4-1	\bar{M}	"	"	B-3-4-3	\bar{M}	"
93	B-3-6-1	C _{p,eq.}	"	101	B-3-6-3	C _{p,eq.}	"
"	B-3-8-1	γ	"	"	B-3-8-3	γ	"
94	B-3-10-1	μ	"	102	B-3-10-3	μ	"
"	B-3-15-1	$\lambda_{eq.}$	"	"	B-3-15-3	$\lambda_{eq.}$	"
95	B-3-16-1	Pr, fro.	"	103	B-3-16-3	Pr, fro.	"
"	B-3-17-1	Pr, eq.	"	"	B-3-17-3	Pr, eq.	"
96	B-3-2-2	H	1.8→0.8	104	B-3-2-4	H	1.8→1.4
"	B-3-4-2	\bar{M}	"	"	B-3-4-4	\bar{M}	"
97	B-3-6-2	C _{p,eq.}	"	105	B-3-6-4	C _{p,eq.}	"
"	B-3-8-2	γ	"	"	B-3-8-4	γ	"
98	B-3-10-2	μ	"	106	B-3-10-4	μ	"
"	B-3-15-2	$\lambda_{eq.}$	"	"	B-3-15-4	$\lambda_{eq.}$	"
99	B-3-16-2	Pr, fro.	"	107	B-3-16-4	Pr, fro.	"
"	B-3-17-2	Pr, eq.	"	"	B-3-17-4	Pr, eq.	"

表13 JP4-O₂-Air系の平衡組成図一覧表

ページ	図番号	当量比 (ϕ) _p →(ϕ) _f	圧力 (atm)
108	C-3-1	1.8→0.4	0.01
"	C-3-2	"	1
"	C-3-3	"	100
109	C-3-4	1.8→0.8	0.01
"	C-3-5	"	1
"	C-3-6	"	100
110	C-3-7	1.8→1.0	0.01
"	C-3-8	"	1
"	C-3-9	"	100
111	C-3-10	1.8→1.4	0.01
"	C-3-11	"	1
"	C-3-12	"	100

6. データファイルを利用して物性値を得る方法

前報⁴⁾と同様に物性値を3本の磁気テープに収録し、データファイルを作成した。このファイルから圧力を対数にとった3次元3次ラグランジュ補間法を用いて物性値が求まる。前報の $H_2 - O_2 - Air$ 系と異なりJP4 - Air, JP4 - $O_2 - Air$ 系では当量比で指定を行なう事にした。以下にその手順図を図25, 図26に示す。図27, 図28は使用例である。

図27の単位系は表2及び表3と同一である。但し、粘度及び熱伝導率は 10^{-6} を掛ける事が必要である。図27では諸物性値を略号で示したが、図28と対応させることにより容易に解っていただけるだろう。

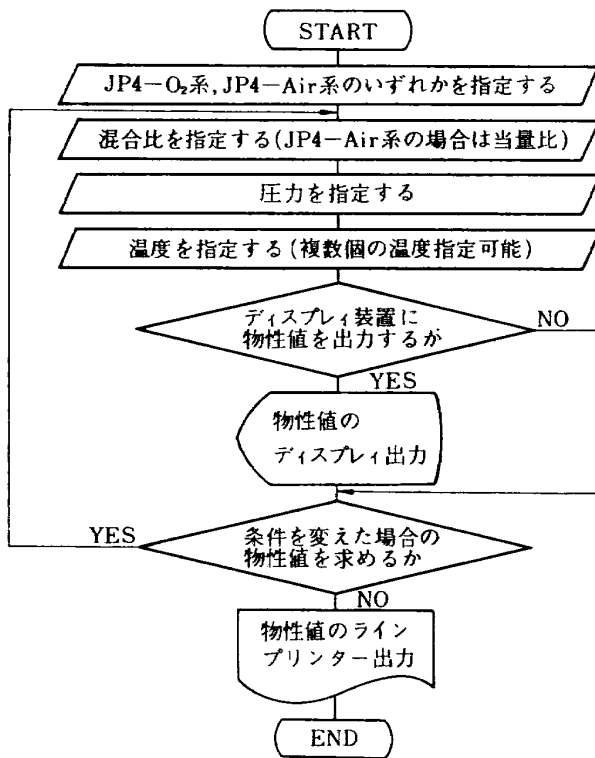


図25 JP4-O₂系, JP4-Air系手順図

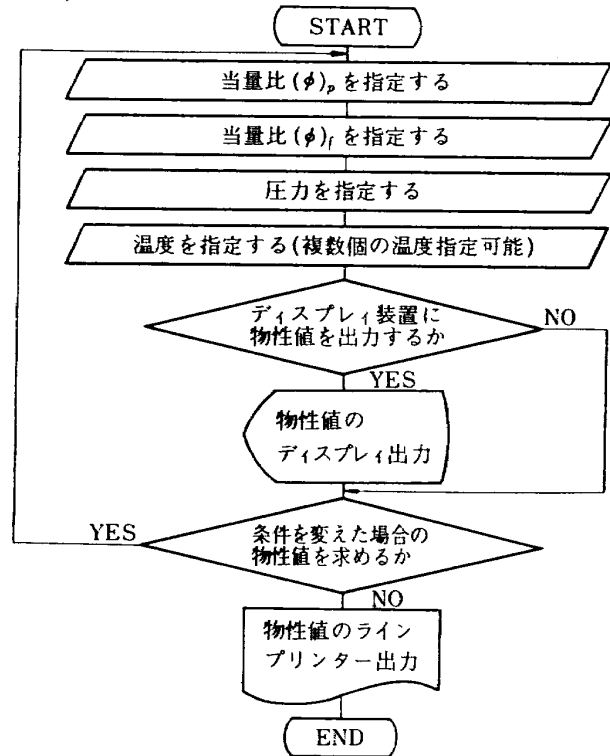


図26 JP4-O₂-Air系手順図

7. あとがき

炭化水素を燃料とし、酸素及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及び設計等に利用するため、C-H-N-O-Ar系混合ガスの熱力学及び輸送物性値を計算した。

最近ロケット燃料として注目されている高密度炭化水素燃料の燃焼生成物の物性が、JP4(RP1)等の在来燃料のそれとどのように違うかを簡単に述べ、航技研において実験的研究が行なわれているJP4の燃焼生成物の物性値について述べる事を主とした。結果は、全体の傾向を示す立体図及び数値が読みとり易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及び平衡組成図にまとめた。

この報告での図の数をできるだけ圧縮するように心掛けたため、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事ができなかった。このため、使いづらいものとなった事を恐れる。


```

M002 0034 JP4/AIR START
M031 0034 JP4/AIR FTC
M031 0034 JP4/AIR LED
Q03 M520 0034 JP4/AIR FIN=0300 FIT IN T0, T1, T2, T3, T4,
R03 T2
M031 0034 JP4/AIR LOAD
0034 JP4/AIR TRANSPORT AND THERMODYNAMIC PROPERTIES
Q03 0034 JP4/AIR ASSIGN FUEL AND OXIDE SYSTEM ?
R03 JP4/AIR
Q03 0034 JP4/AIR EQUIVALENCE RATIO E=RATIO ?
R03 0.95
Q03 0034 JP4/AIR PRESSURE (ATM) ?
R03 15,
Q03 0034 JP4/AIR TEMPERATURE (K) ?
R03 2500,
Q03 0034 JP4/AIR DO TEMP YES OR NO ?
R03 YES
Q03 0034 JP4/AIR INTVL ?
R03 150,
-----
Q03 0034 JP4/AIR N ?
R03 3
Q03 0034 JP4/AIR DISPLAY OUT YES OR NO ?
R03 YES
Q03 0034 JP4/AIR WAIT OR GO DISPLAY OUT
R03 GO
0034 JP4/AIR TEMP , 2500, 2650, 2800,
0034 JP4/AIR VISC , 746, 779, 812,
0034 JP4/AIR M=COND , 197, 208, 220,
0034 JP4/AIR I=COND , 179, 188, 197,
0034 JP4/AIR F=COND , 376, 396, 417,
0034 JP4/AIR R=COND , 218, 340, 497,
0034 JP4/AIR E=COND , 594, 736, 913,
0034 JP4/AIR F=CP , 0,3447 0,3461 0,3471
0034 JP4/AIR E=CP , 0,4984 0,5681 0,6446
Q03 0034 JP4/AIR WAIT OR GO DISPLAY OUT
R03 GO
0034 JP4/AIR F=PR , 0,6833 0,6803 0,6762
0034 JP4/AIR E=PR , 0,6258 0,6011 0,5726
0034 JP4/AIR LEWIS , 1,3014 1,3384 1,3925
0034 JP4/AIR DENS , 2,007E+03 1,882E+03 1,766E+03
0034 JP4/AIR ENTH , 69,7 149,6 240,5
0034 JP4/AIR ENTR , 2,1132 2,1442 2,1775
0034 JP4/AIR M=WT , 28,743 28,579 28,352
0034 JP4/AIR GAMMA S, 1,1882 1,1750 1,1654
0034 JP4/AIR GAMMA , 1,1916 1,1806 1,1738
0034 JP4/AIR SONIC V, 926,9 951,8 978,2
Q03 0034 JP4/AIR CONT OR END
R03 END
0034 JP4/AIR STOP 00000
M521 0034 JP4/AIR FREE T2 FROM FIN=0300
M062 0034 JP4/AIR END
    
```

プログラム
ロード手順

対話手順

プログラム
終了

図 27 対話例

TRANSPORT AND THERMODYNAMIC PROPERTIES (JP4 - AIR)

E-RATIO= 0.950 ATM= 15.0000

TEMP	VISCOSITY	MONATOMIC	INTERNAL	FROZEN	REACTION	EQUILIBRIUM	CP	CP	PRANDTL	PRANDTL	LEWIS
DEG K	POISE	COND	COND	COND	COND	COND	FROZ	EQ	FROZ	EQ	NUMBER
				X10=6 CAL/(CM)(SEC)(K)	(SEC)(K)		CAL/(G)(K)		DIMENSIONLESS		
2500,	746,	197,	179,	376,	218,	594,	0,3447	0,4984	0,6833	0,6258	1,3014
2650,	779,	208,	188,	396,	340,	736,	0,3461	0,5681	0,6803	0,6011	1,3384
2800,	812,	220,	197,	417,	497,	913,	0,3471	0,6446	0,6762	0,5726	1,3925

TEMP	DENSITY	ENTHALPY	ENTROPY	MOLE	GAMMA S	GAMMA	SONIC
DEG K	G/CC	CAL/G	CAL/(G)(K)	WEIGHT			VELOCITY
							M/SEC
2500,	0,20066E+02	69,7	2,1132	28,743	1,1882	1,1916	926,9
2650,	0,18818E+02	149,6	2,1442	28,579	1,1750	1,1806	951,8
2800,	0,17662E+02	240,5	2,1775	28,352	1,1654	1,1738	978,2

図 28 ラインプリンタ出力例

参 考 文 献

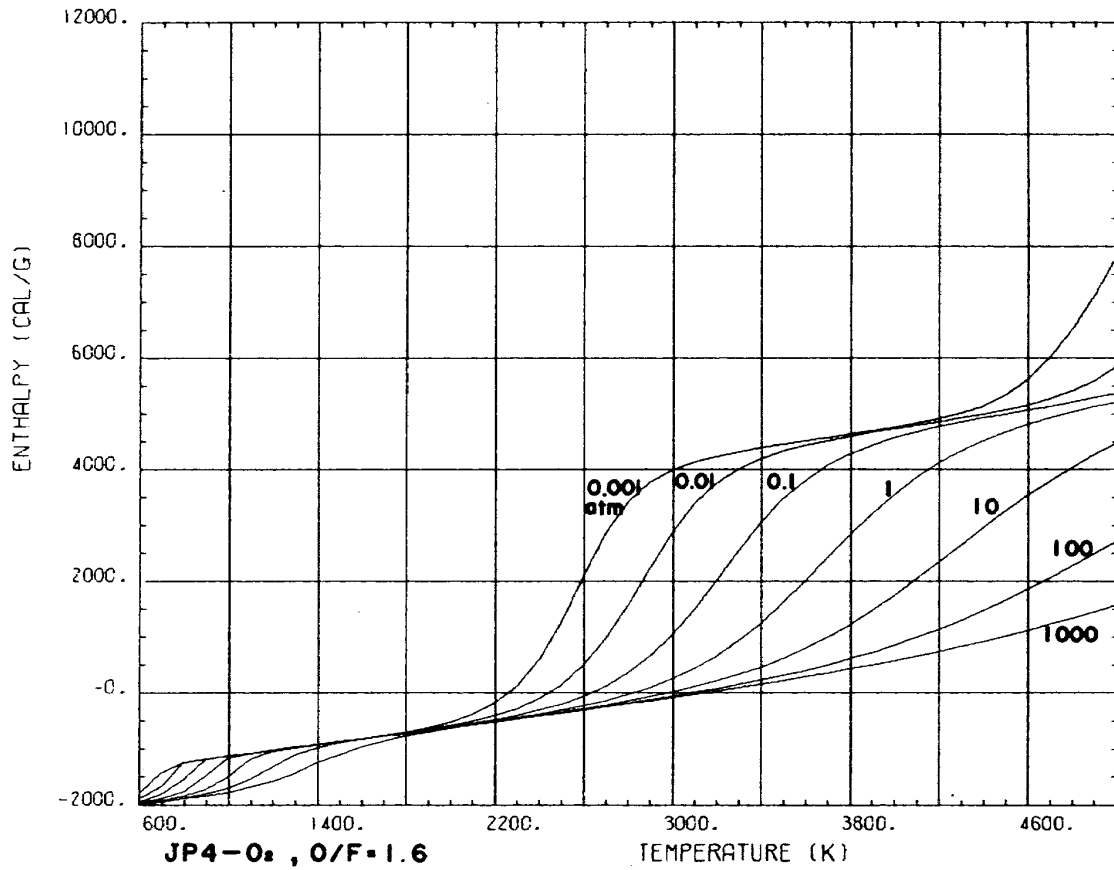
- 1) J. A. Mellish; Advanced Engine Study for Mixed-Mode Orbit-Transfer Vehicles, NASA CR-159491 (1979)
- 2) J. W. Frankenfeld, T. W. Hastings, M. Lieberman & W. F. Tayler; High Performance, High Density Hydrocarbon Fuels, NASA CR-159480 (1979)
- 3) S. Gordon & B. J. McBride; Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations, NASA SP-273 (1971)
- 4) 豊川, 鈴木, 毛呂; 水素-酸素-空気系燃焼生成ガスの物性値, 航技研資料 TM-381 (1979).
- 5) 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).
- 6) 毛呂, 鈴木; ロケットプロペラント燃焼生成ガスの輸送特性値, 第21回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp. 218~221 (1977).
- 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 IV Computer Program for Calculation of Thermodynamic and Transport Properties of Complex Chemical Systems, NASA TN D-7056 (1973)
- 9) G. F. Klich; Thermodynamic, Transport, and Flow Properties of Gaseous Products Resulting from Combustion of Methane-Air-Oxygen Mixtures, NASA TN D-8153 (1976)
- 10) 毛呂, 鈴木; C-H-N-O系燃焼生成ガスの輸送特性, 第15回燃焼シンポジウム前刷集, pp. 216~217 (1977).
- 11) R. A. Svehla & R. S. Brokaw; Heat Capacity and the Lewis Number of a Reacting Gas, AIAA Journal Vol. 4, Nov. 1966, pp. 182~184.

付録1 JP4-O₂系

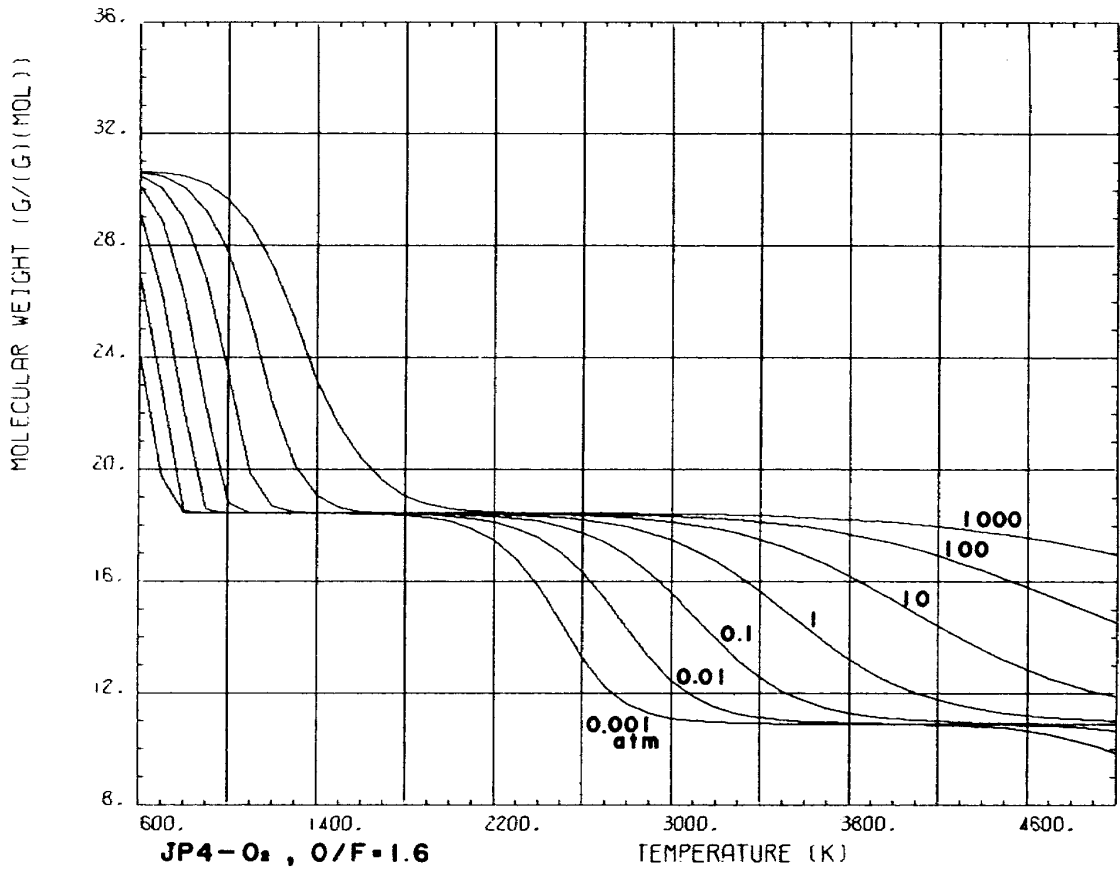
ページ	図番号	物性値	混合比 (O/F)	ページ	図番号	物性値	混合比 (O/F)
44	B-1-2-1	H	1.6	54	B-1-10-3	μ	3.4
"	B-1-4-1	\bar{M}	"	"	B-1-15-3	$\lambda_{eq.}$	"
45	B-1-6-1	$C_{p,eq.}$	"	55	B-1-16-3	$Pr, fro.$	"
"	B-1-8-1	γ	"	"	B-1-17-3	$Pr, eq.$	"
46	B-1-10-1	μ	"	56	B-1-2-4	H	4.8
"	B-1-15-1	$\lambda_{eq.}$	"	"	B-1-4-4	\bar{M}	"
47	B-1-16-1	$Pr, fro.$	"	57	B-1-6-4	$C_{p,eq.}$	"
"	B-1-17-1	$Pr, eq.$	"	"	B-1-8-4	γ	"
48	B-1-2-2	H	2.4	58	B-1-10-4	μ	"
"	B-1-4-2	\bar{M}	"	"	B-1-15-4	$\lambda_{eq.}$	"
49	B-1-6-2	$C_{p,eq.}$	"	59	B-1-16-4	$Pr, fro.$	"
"	B-1-8-2	γ	"	"	B-1-17-4	$Pr, eq.$	"
50	B-1-10-2	μ	"	60	B-1-2-5	H	8.0
"	B-1-15-2	$\lambda_{eq.}$	"	"	B-1-4-5	\bar{M}	"
51	B-1-16-2	$Pr, fro.$	"	61	B-1-6-5	$C_{p,eq.}$	"
"	B-1-17-2	$Pr, eq.$	"	"	B-1-8-5	γ	"
52	B-1-2-3	H	3.4	62	B-1-10-5	μ	"
"	B-1-4-3	\bar{M}	"	"	B-1-15-5	$\lambda_{eq.}$	"
53	B-1-6-3	$C_{p,eq.}$	"	63	B-1-16-5	$Pr, fro.$	"
"	B-1-8-3	γ	"	"	B-1-17-5	$Pr, eq.$	"

ページ	図番号	混合比 (O/F)	圧力 (atm)
64	C-1-1	1.6	0.01
"	C-1-2	"	1
"	C-1-3	"	100
65	C-1-4	2.4	0.01
"	C-1-5	"	1
"	C-1-6	"	100
66	C-1-7	3.4	0.01
"	C-1-8	"	1
"	C-1-9	"	100
67	C-1-10	4.8	0.01
"	C-1-11	"	1
"	C-1-12	"	100
68	C-1-13	8.0	0.01
"	C-1-14	"	1
"	C-1-15	"	100

JP4-O₂

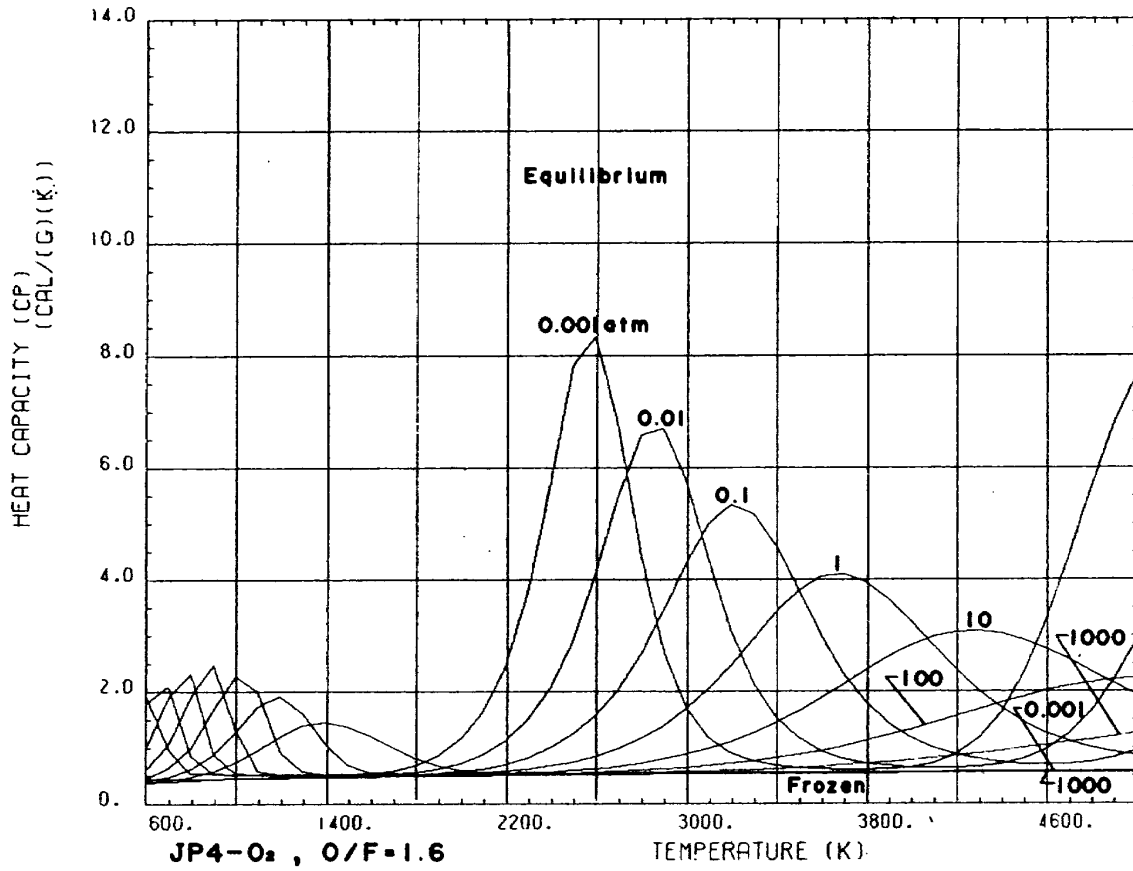


☒ B-1-2-1

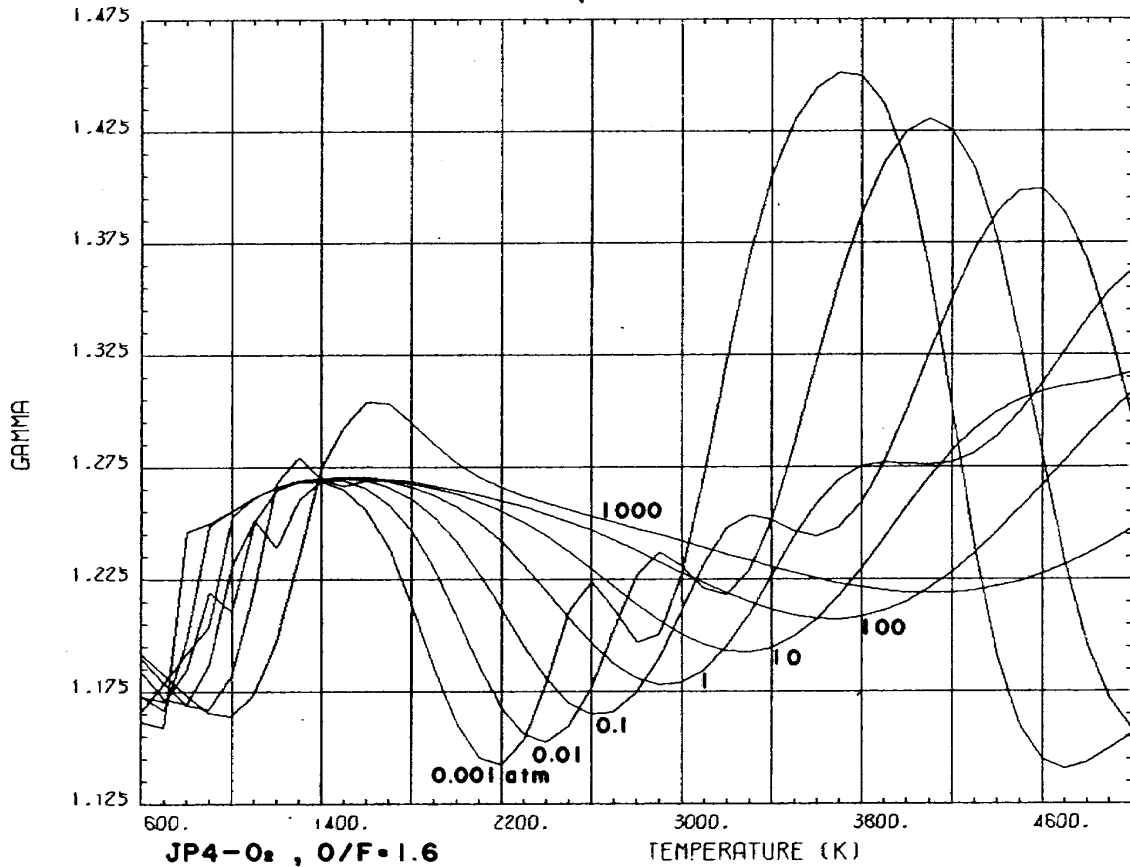


☒ B-1-4-1

JP4-O₂

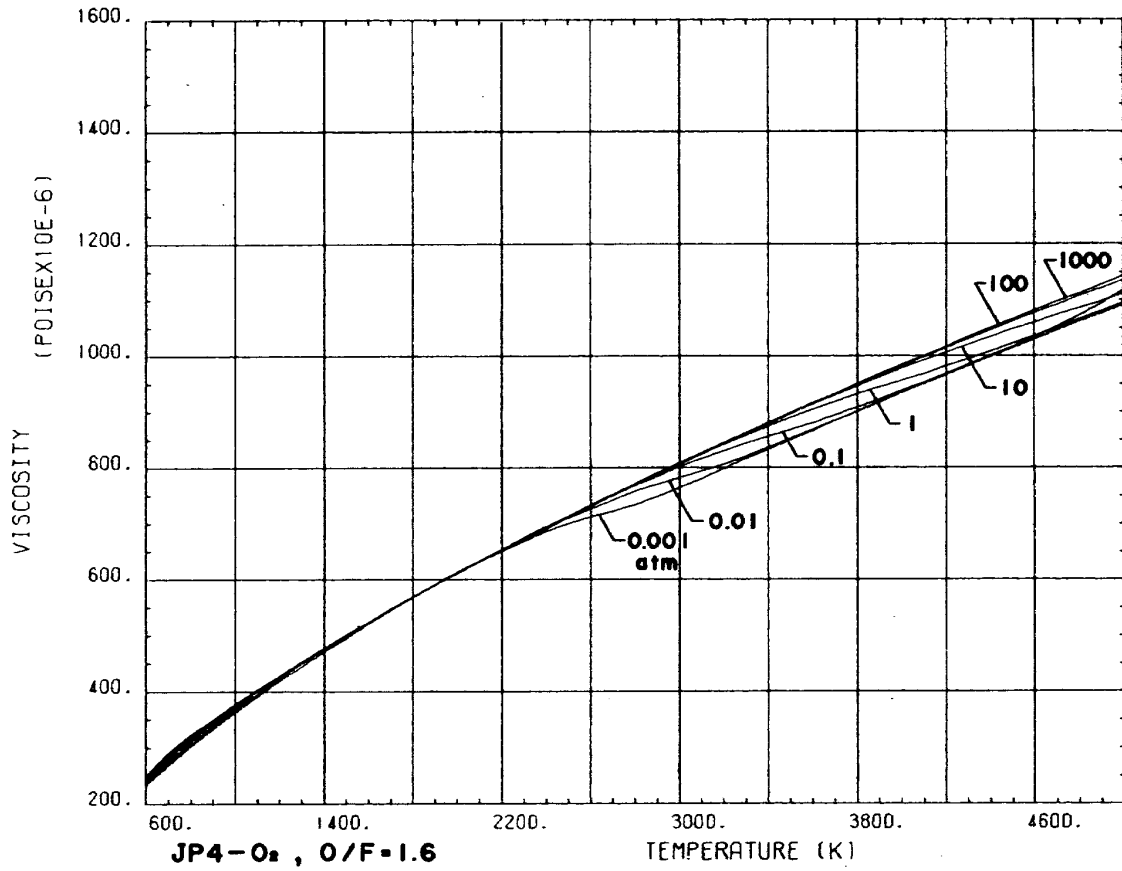


☒ B-1-6-1

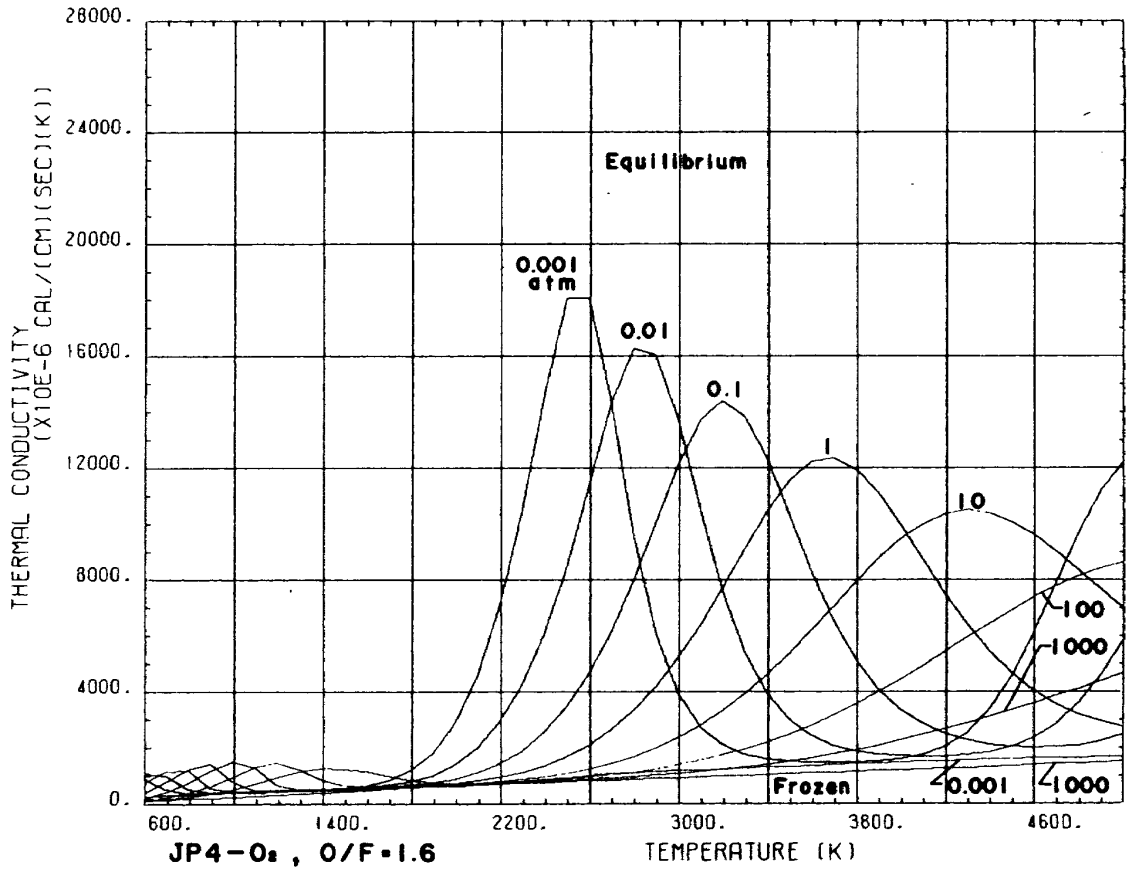


☒ B-1-8-1

JP4-O₂

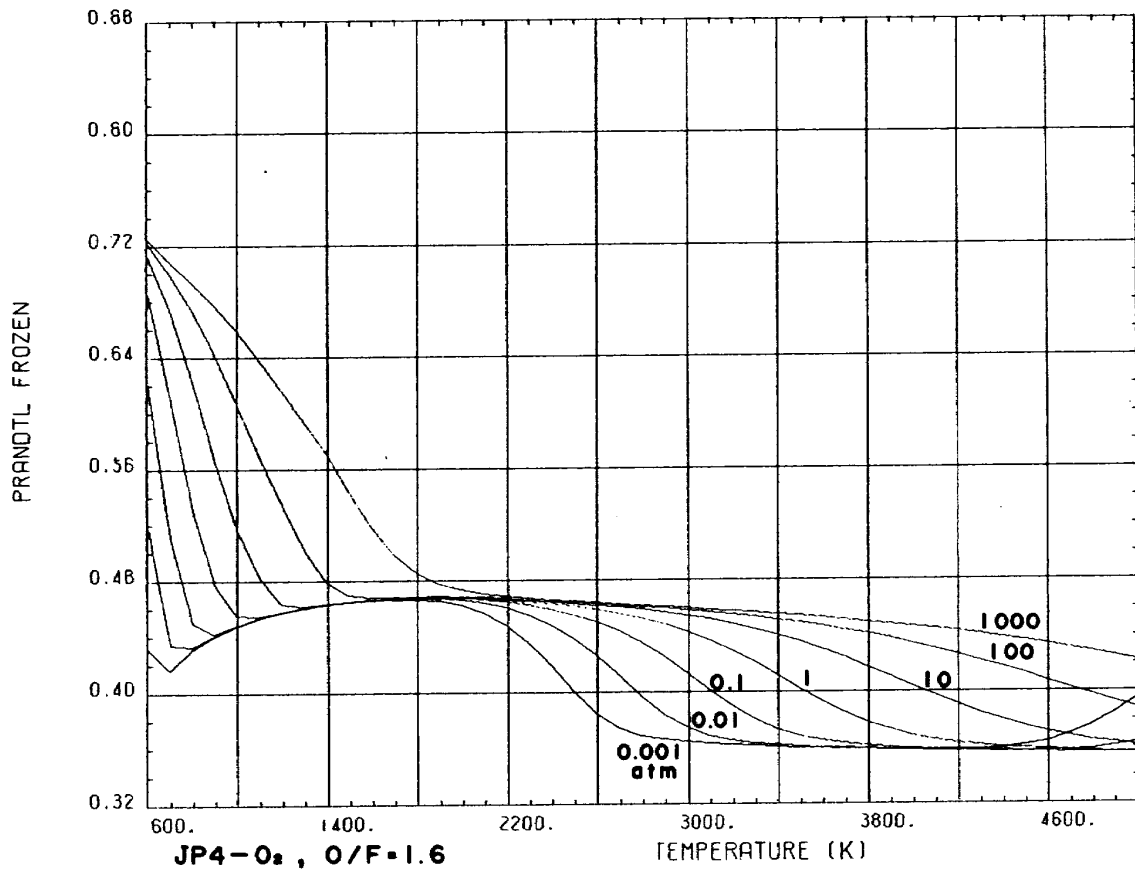


☒ B-1-10-1

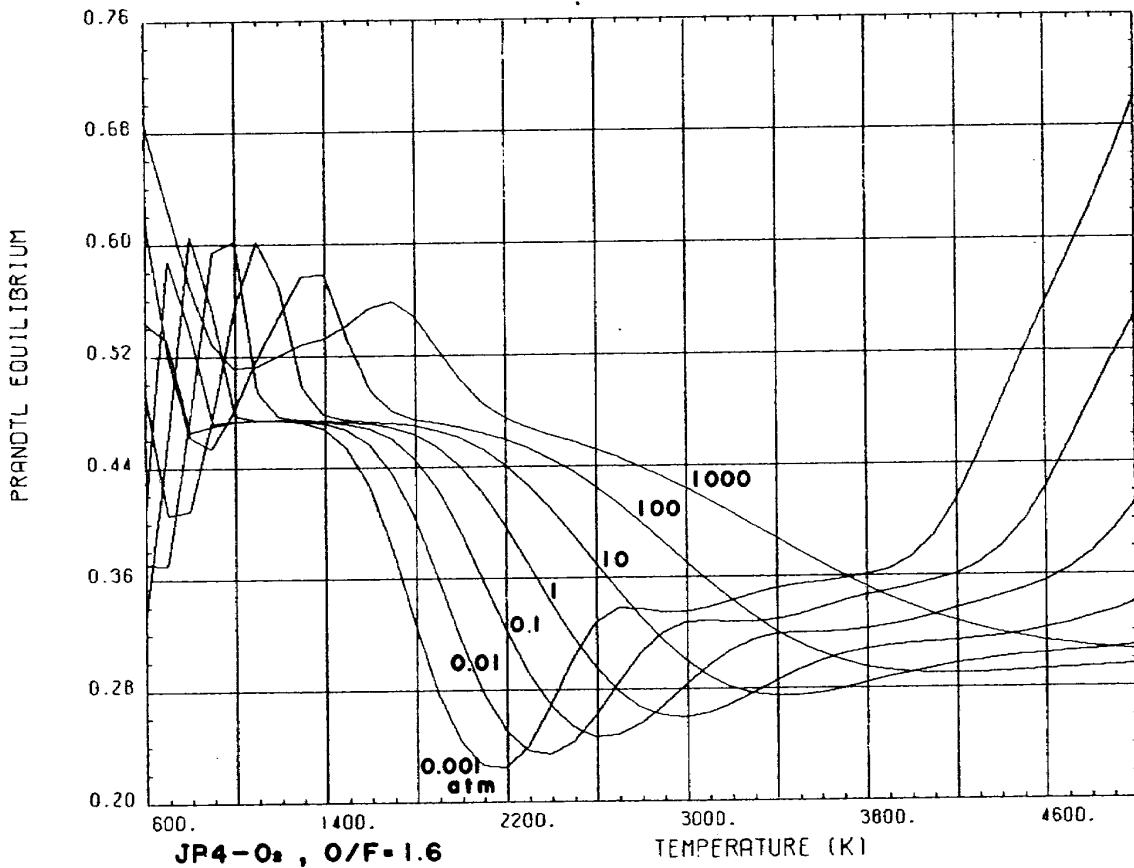


☒ B-1-15-1

JP4-O₂

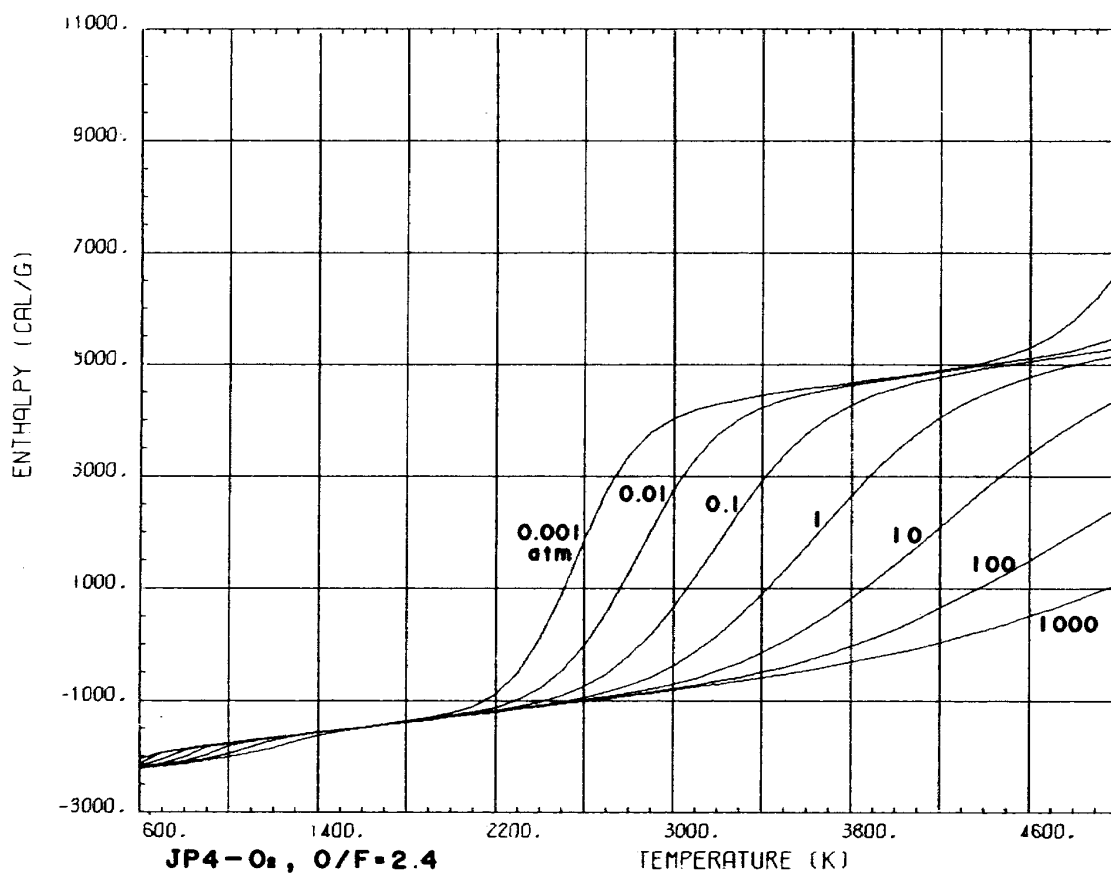


☒ B-1-16-1

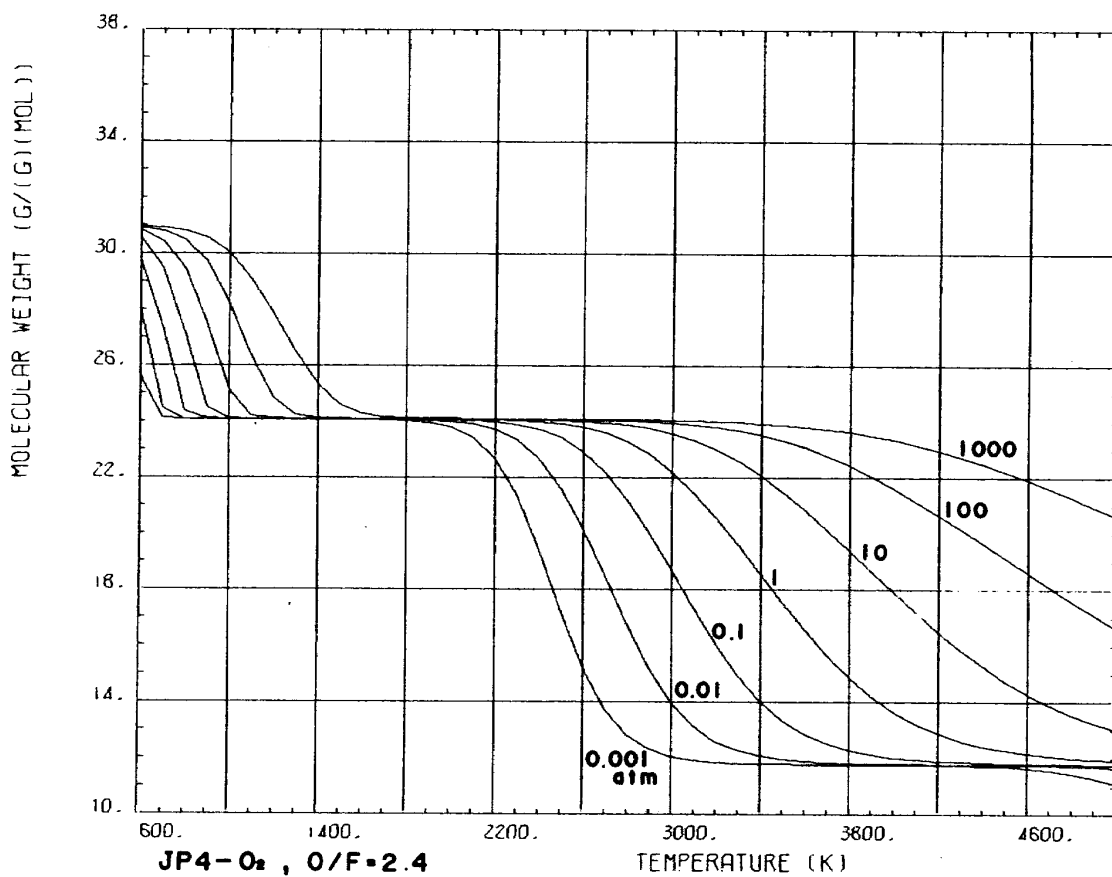


☒ B-1-17-1

JP4-O₂



☒ B-1-2-2



☒ B-1-4-2

JP4-O₂

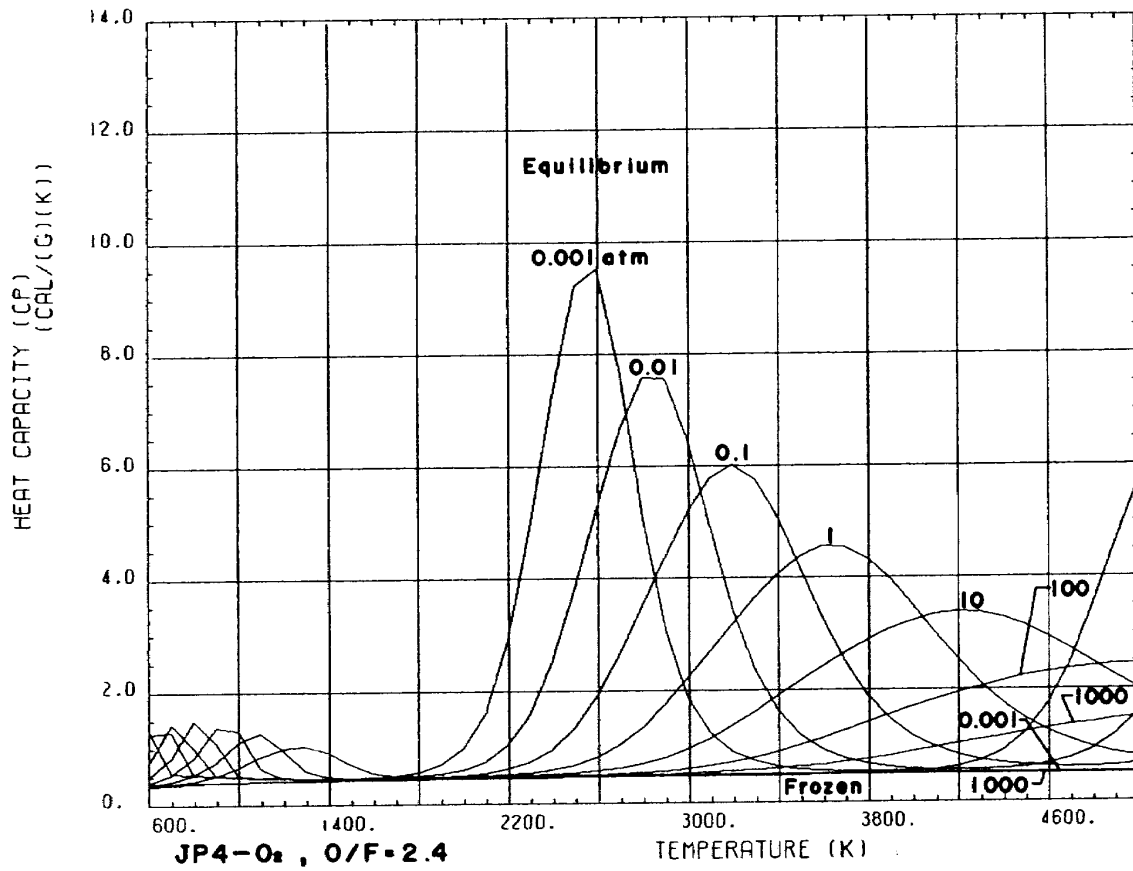


図 B-1-6-2

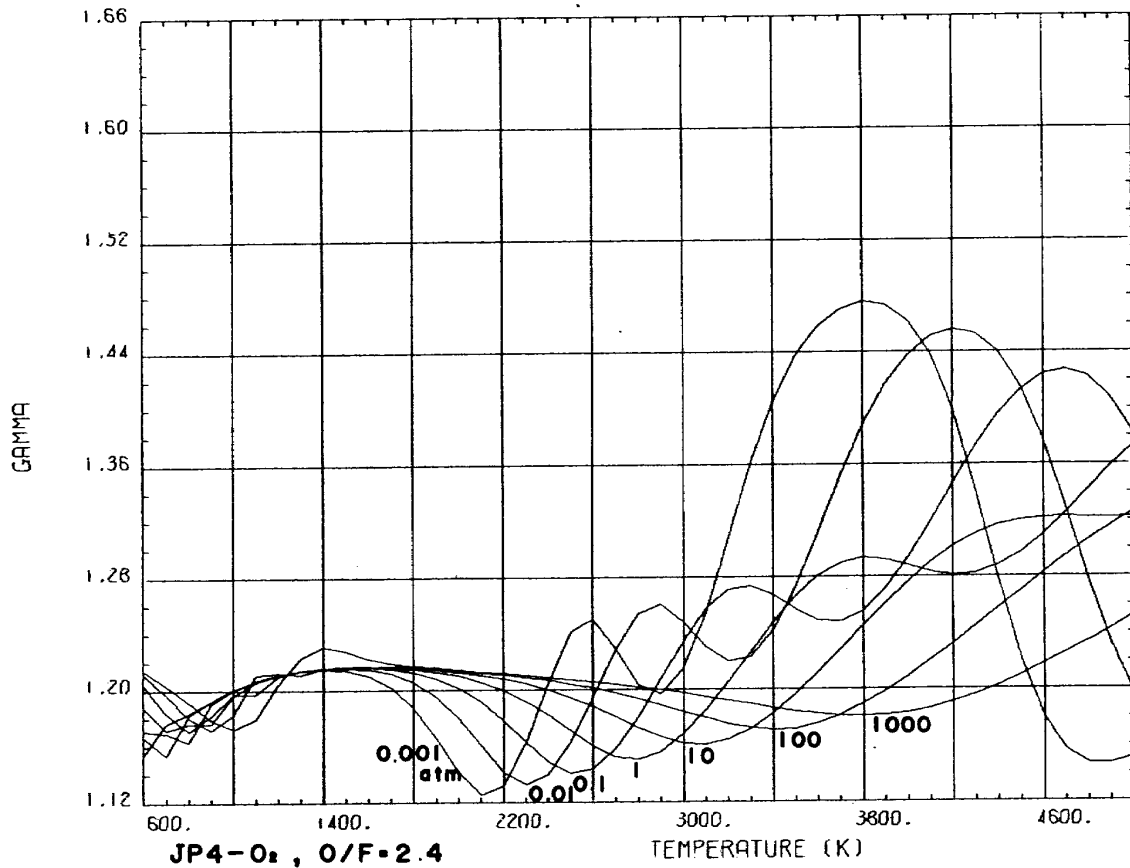
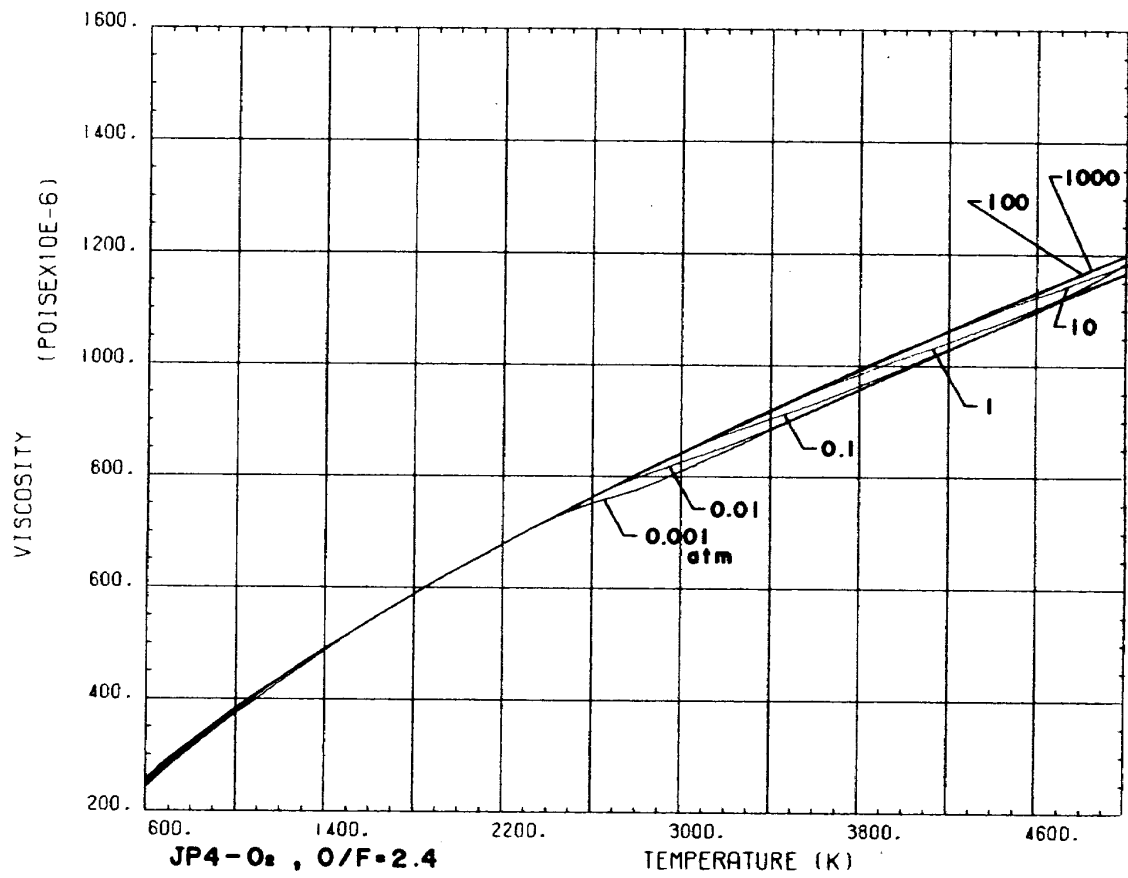
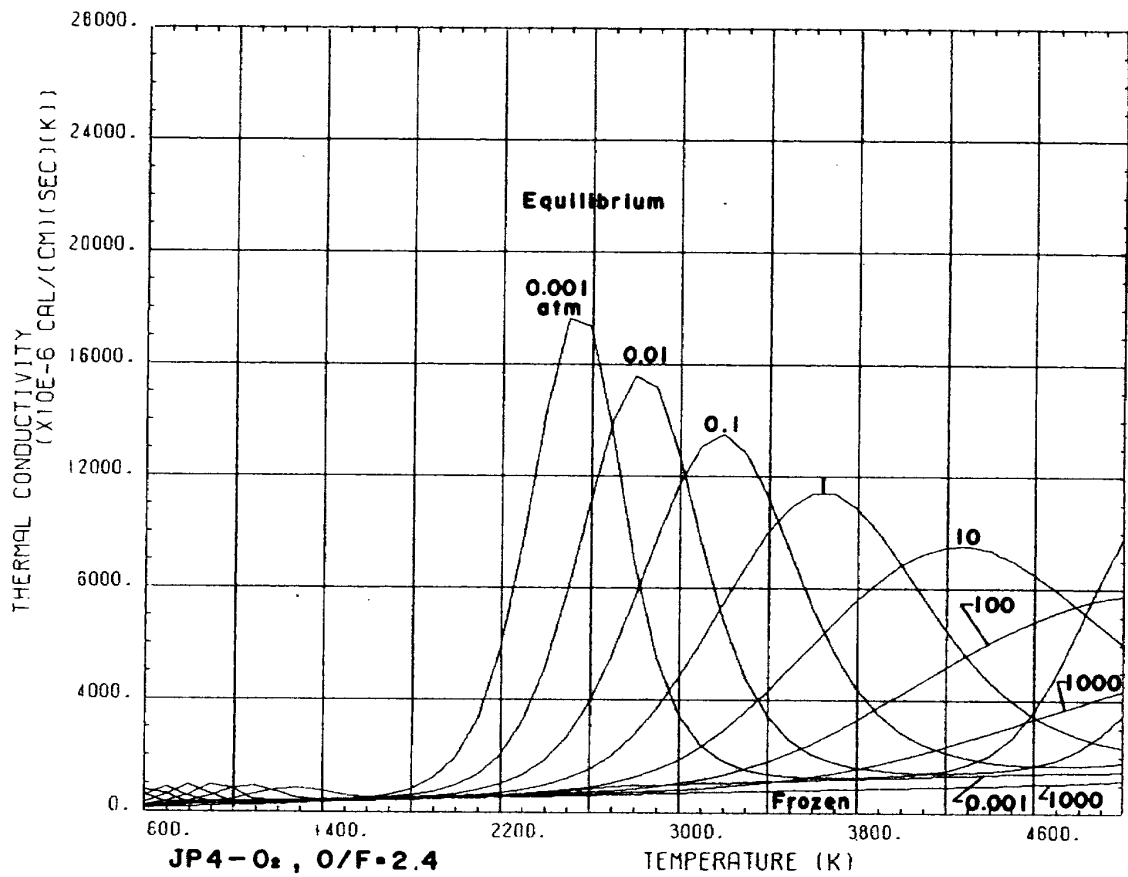


図 B-1-8-2

JP4-O₂

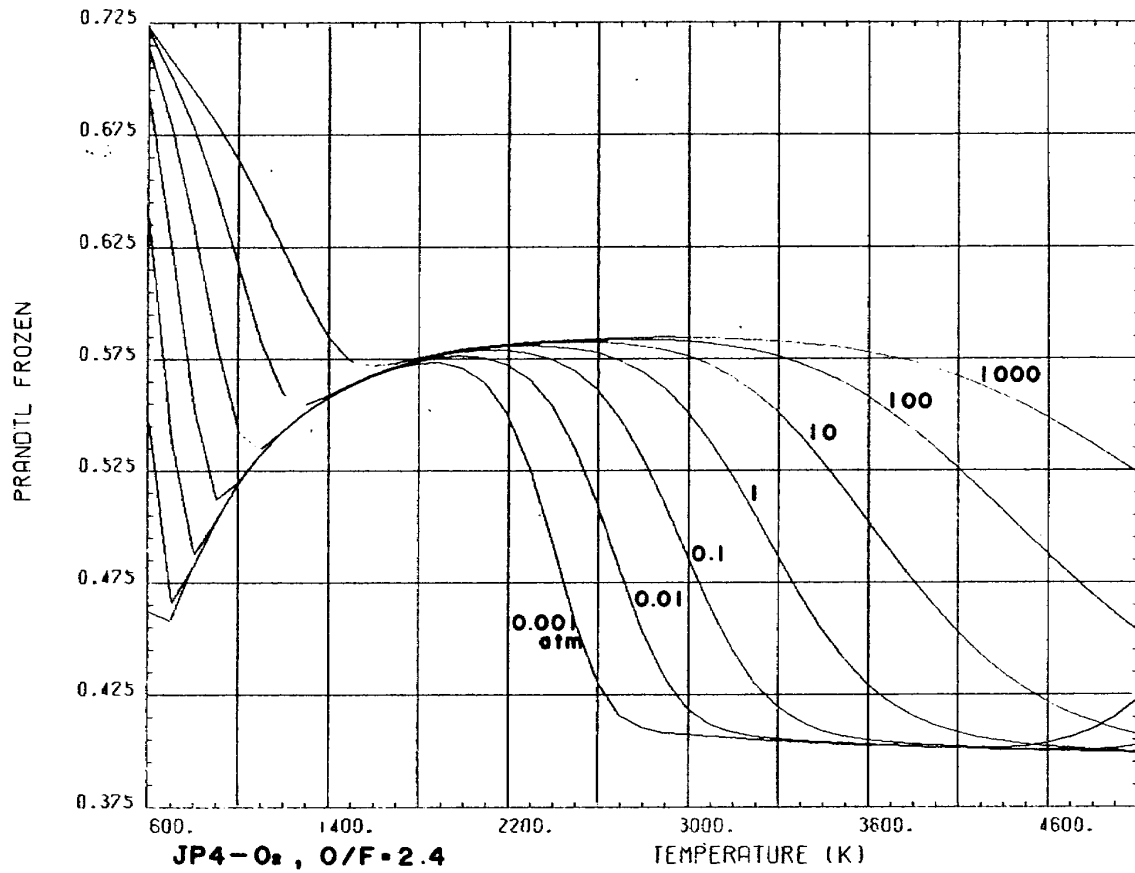


☒ B-1-10-2

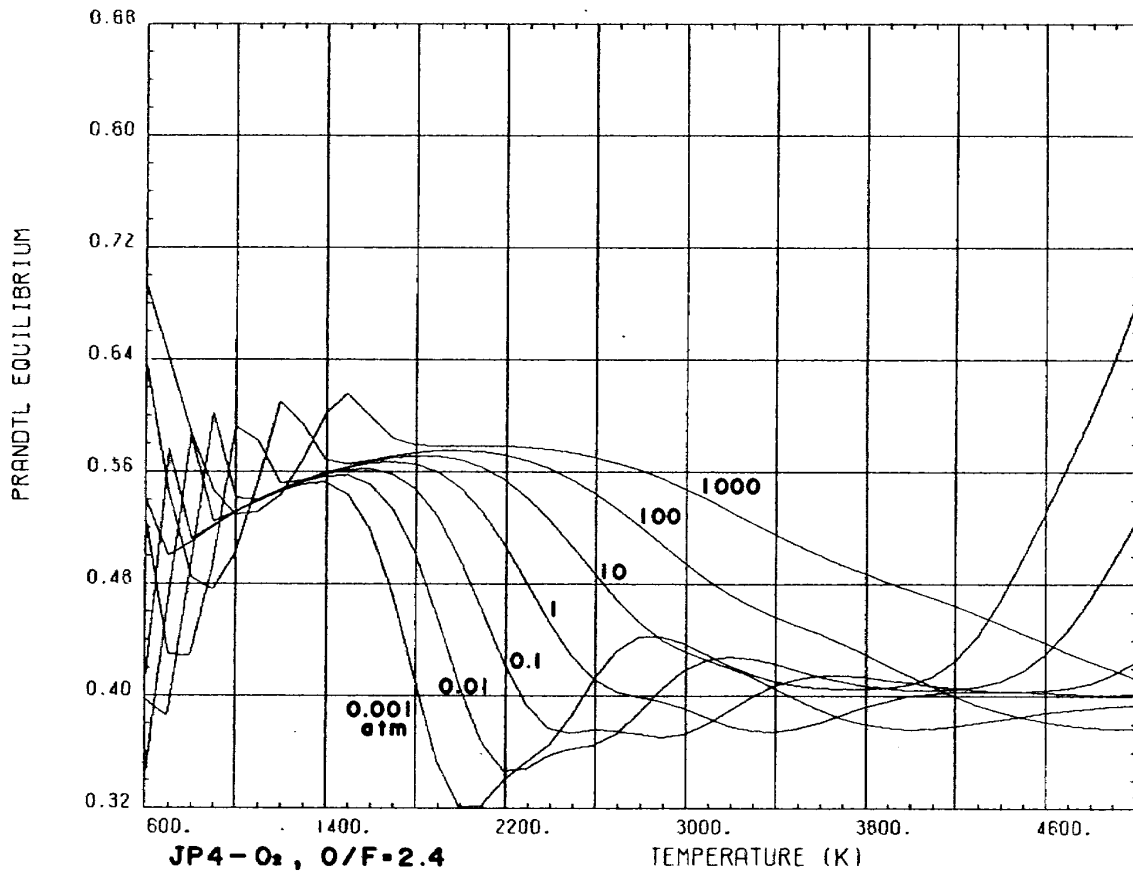


☒ B-1-15-2

JP4-O₂

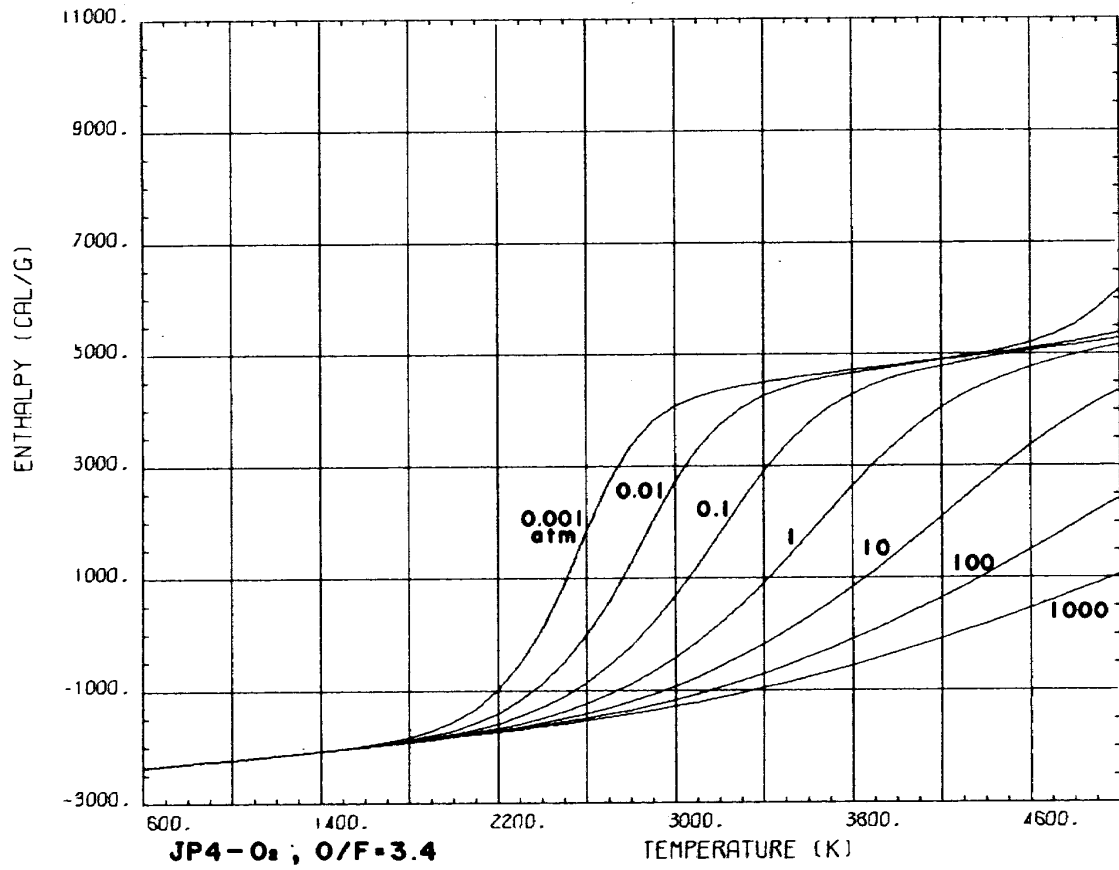


☒ B-1-16-2

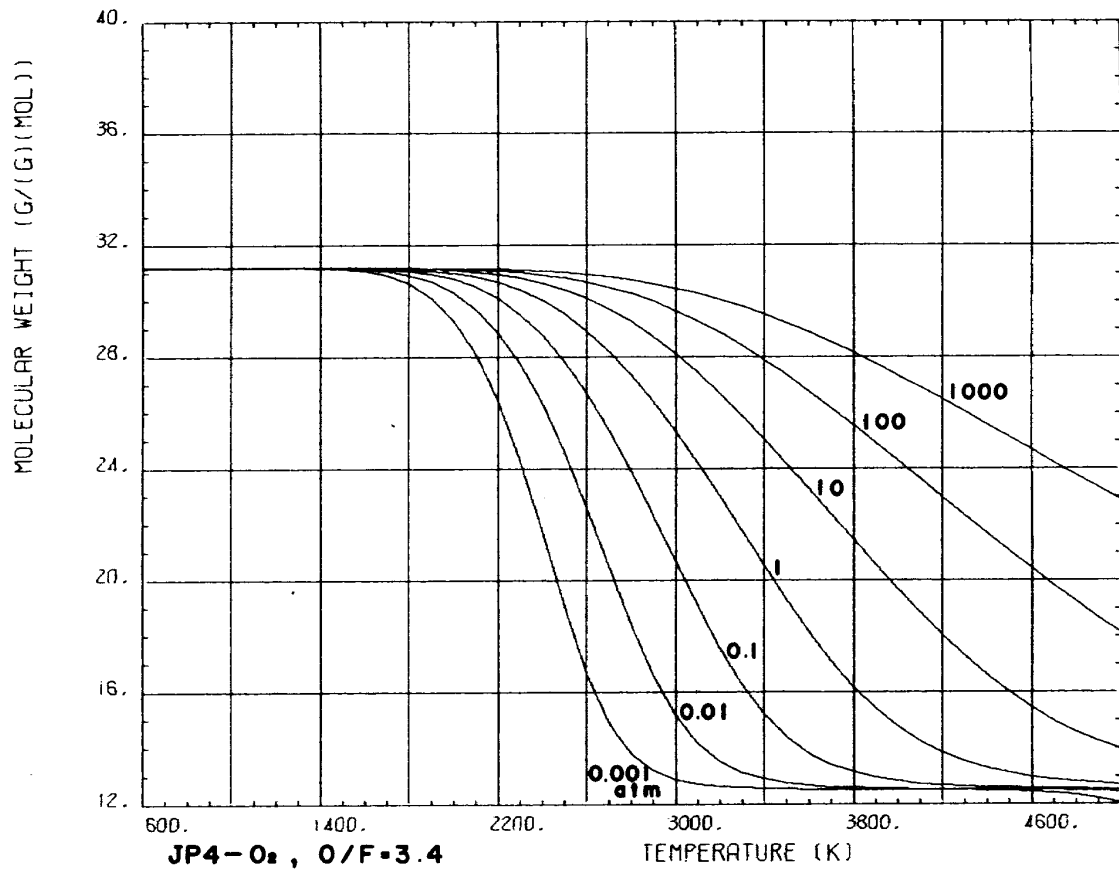


☒ B-1-17-2

JP4-O₂

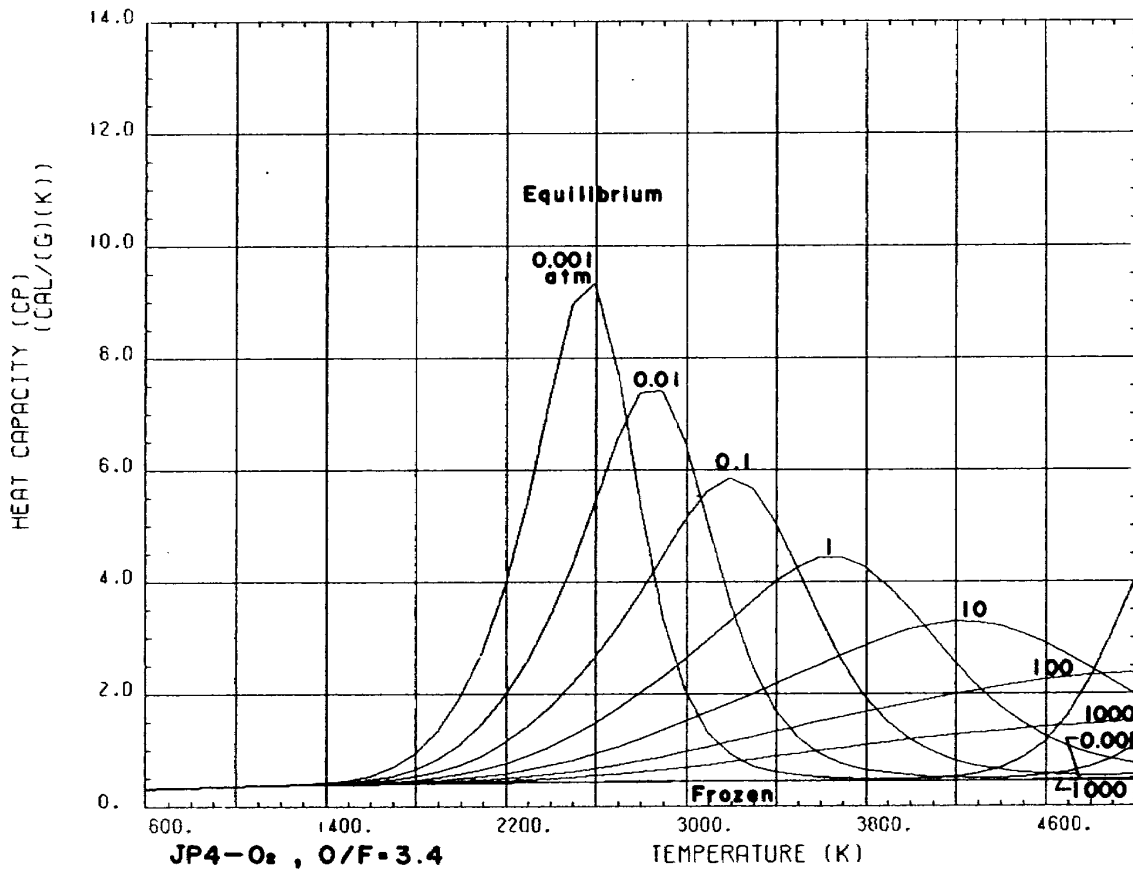


☒ B-1-2-3

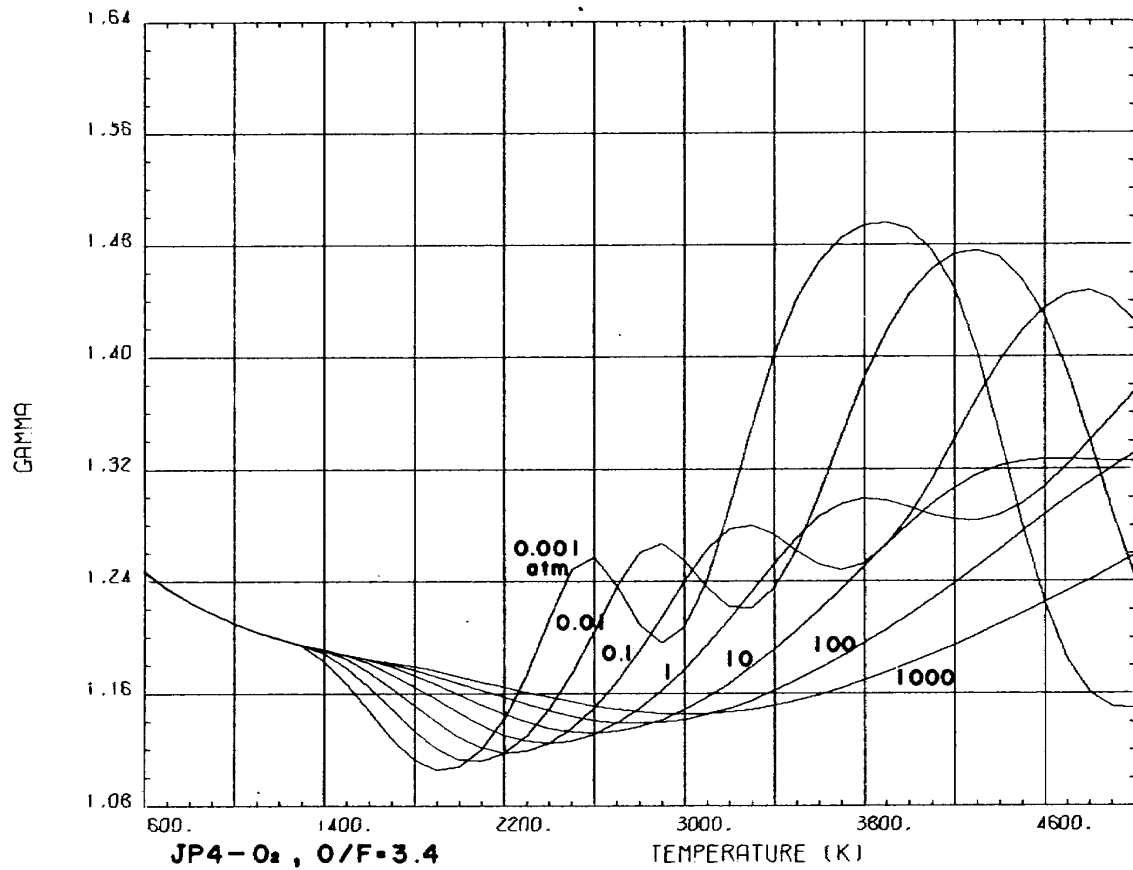


☒ B-1-4-3

JP4-O₂

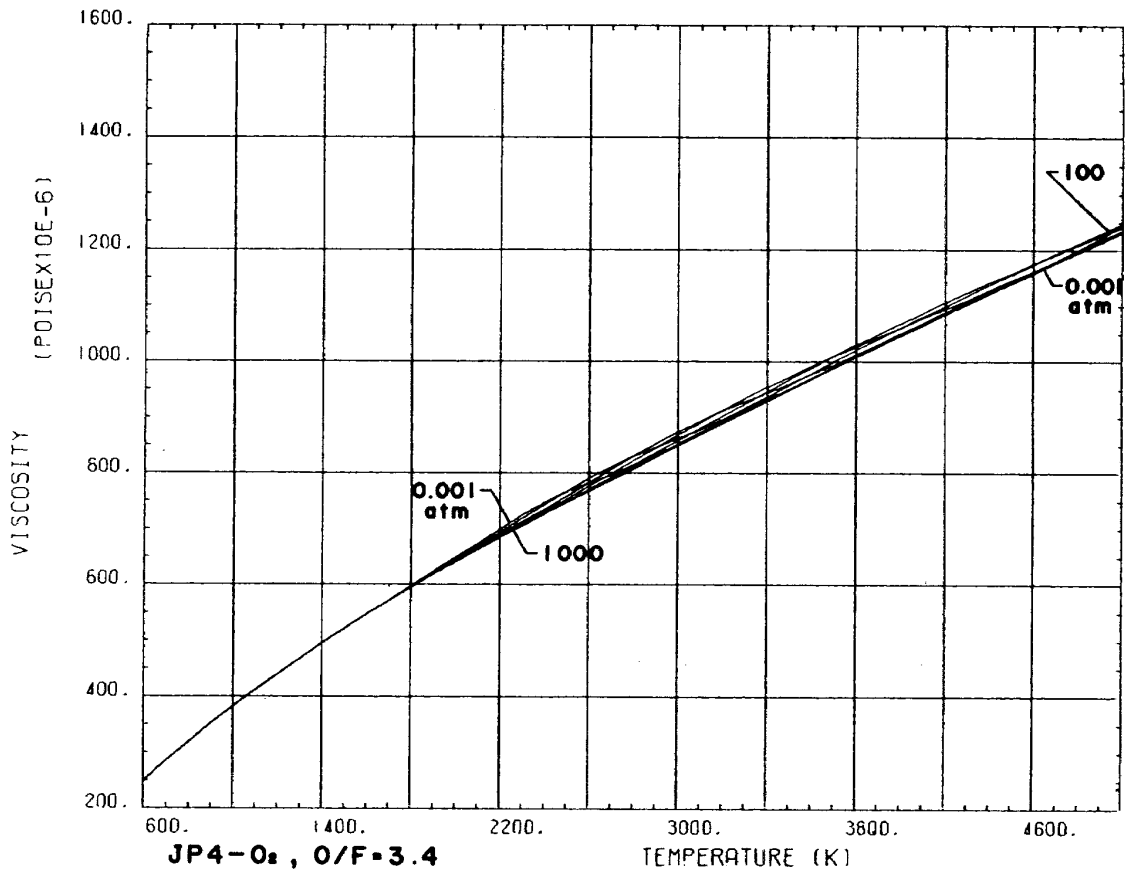


☒ B-1-6-3

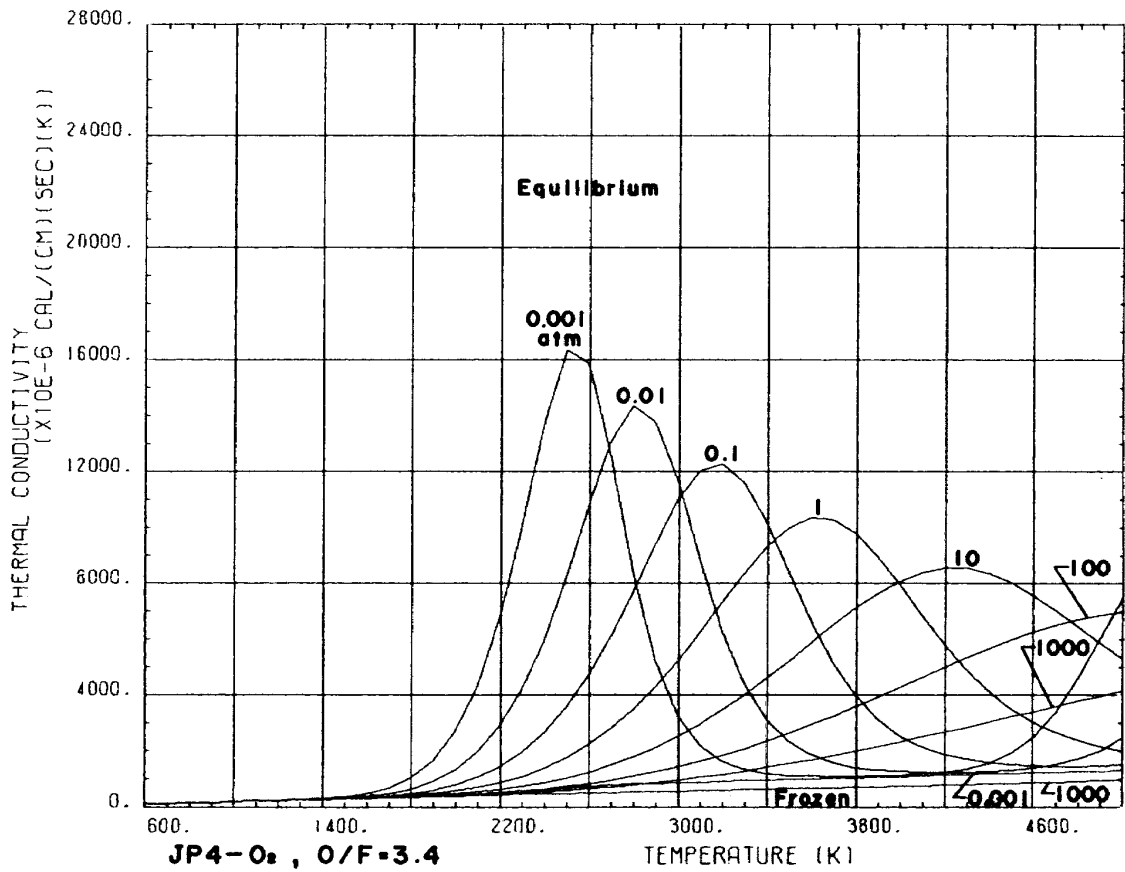


☒ B-1-8-3

JP4-O₂

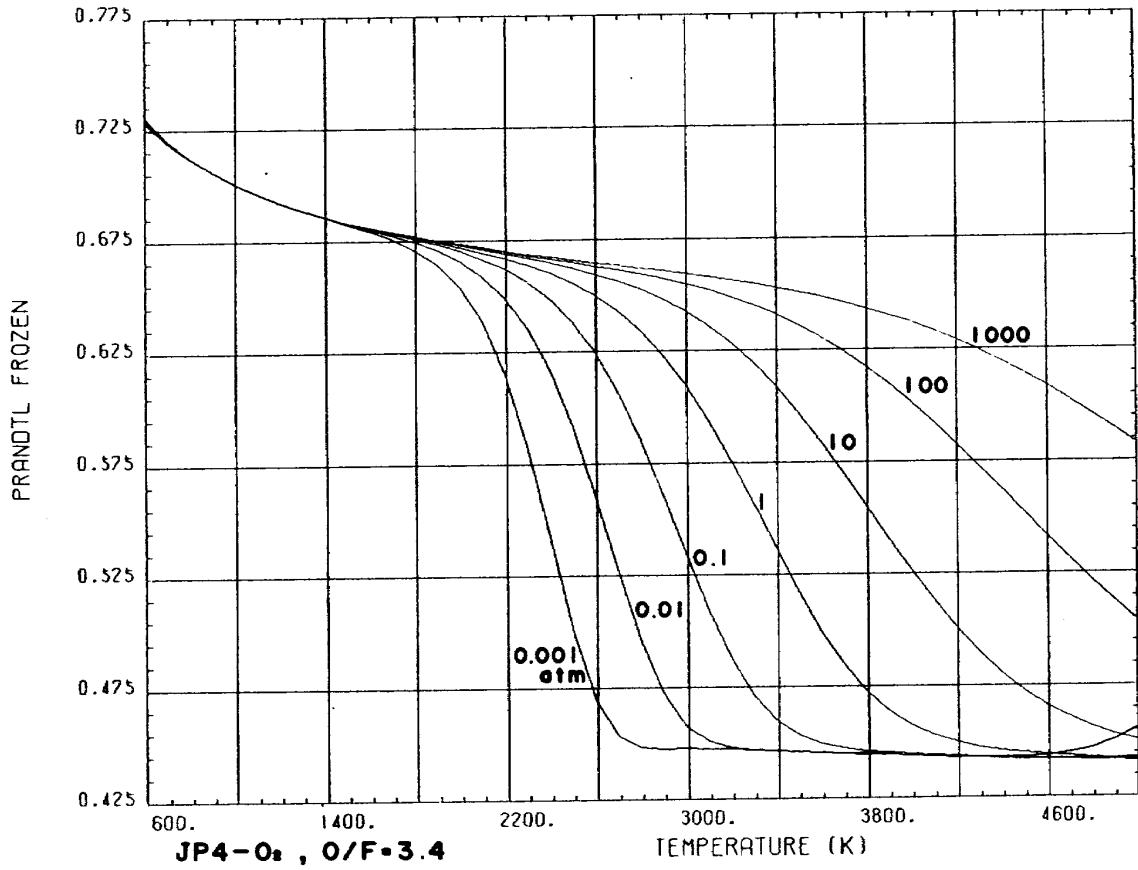


☒ B-1-10-3

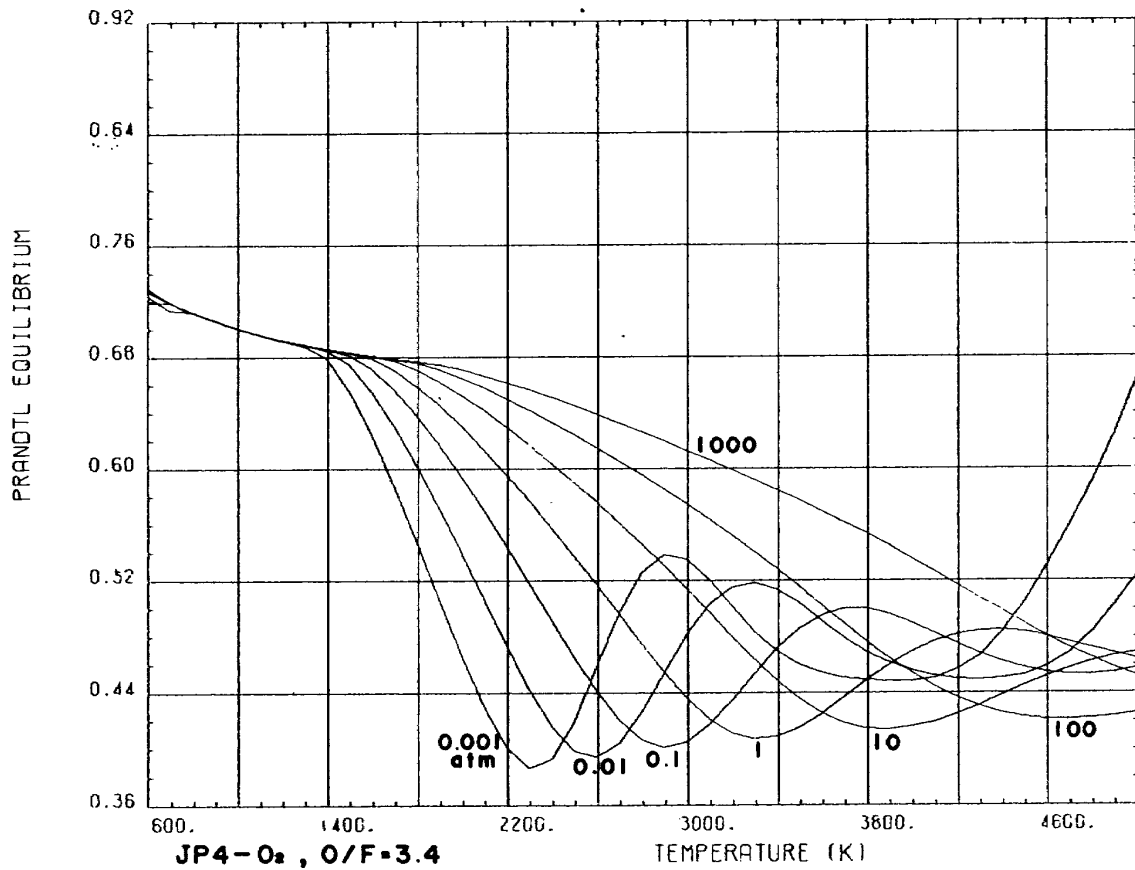


☒ B-1-15-3

JP4-O₂

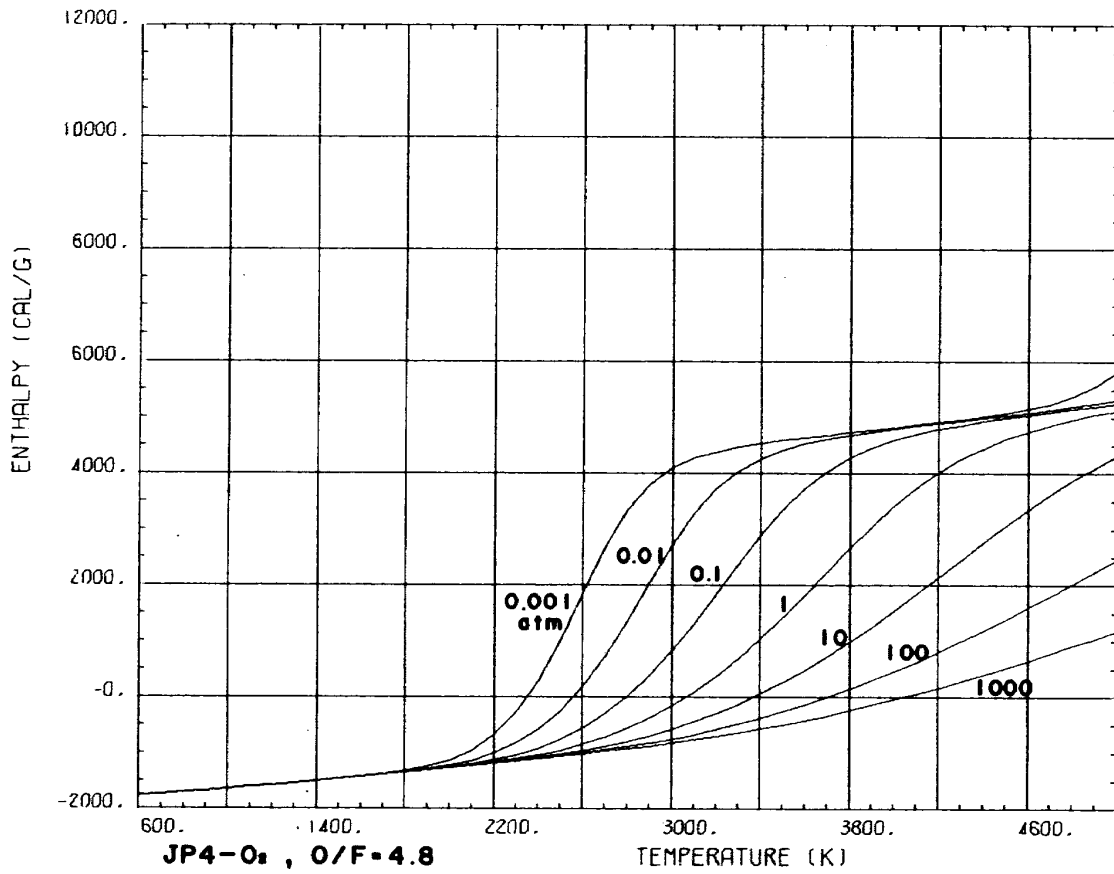


☒ B-1-16-3

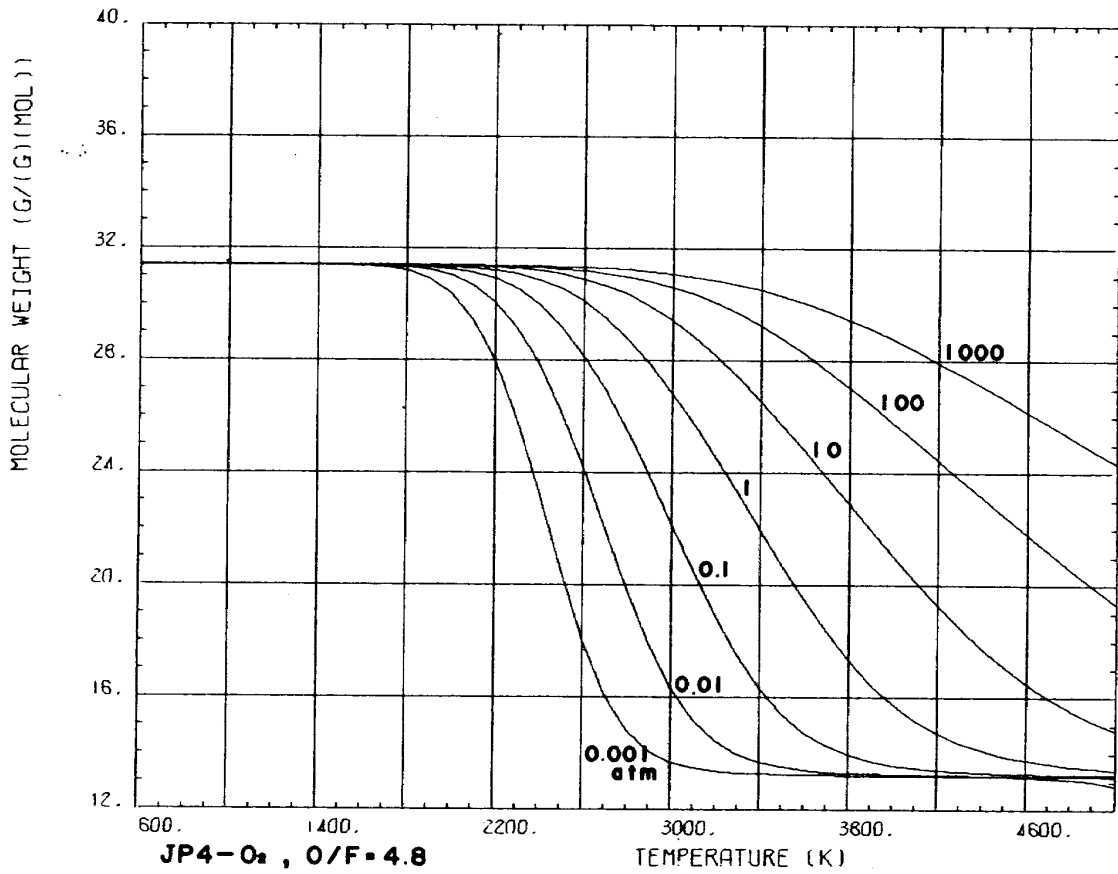


☒ B-1-17-3

JP4-O₂

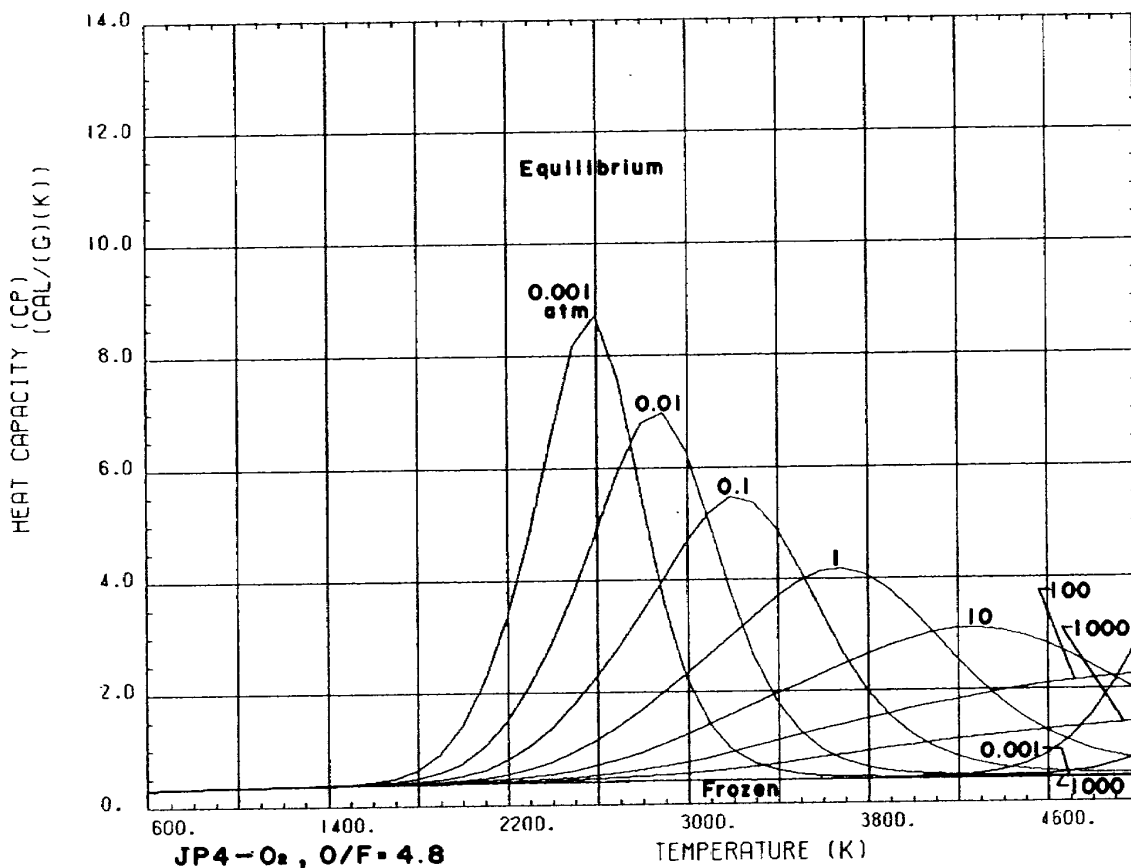


☒ B-1-2-4

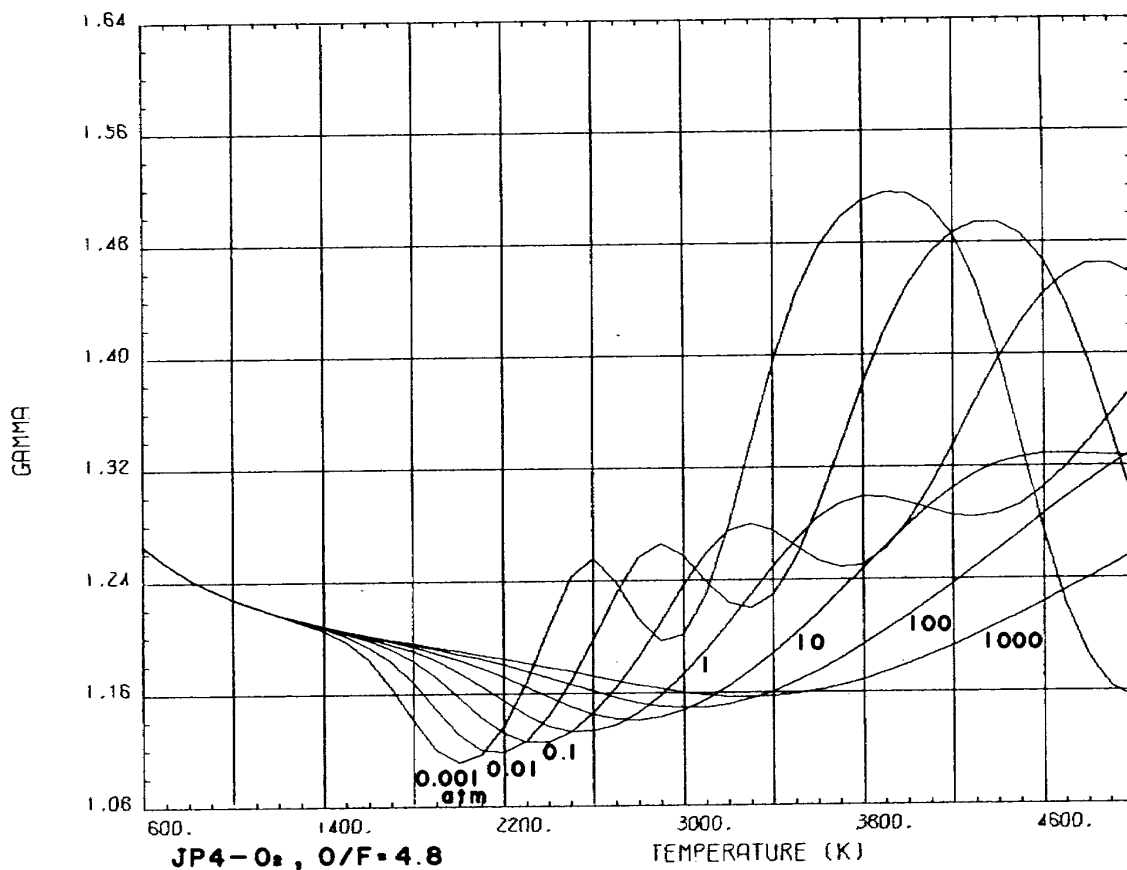


☒ B-1-4-4

JP4-O₂

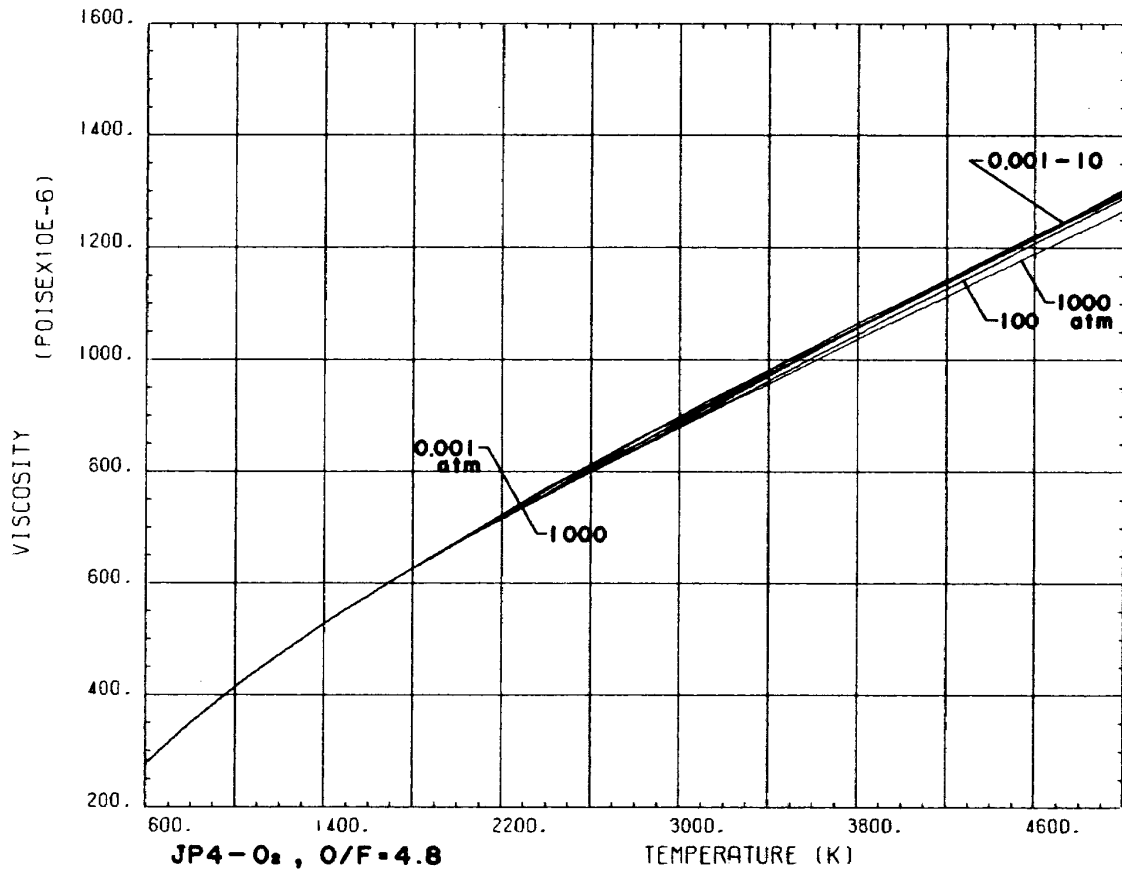


☒ B-1-6-4

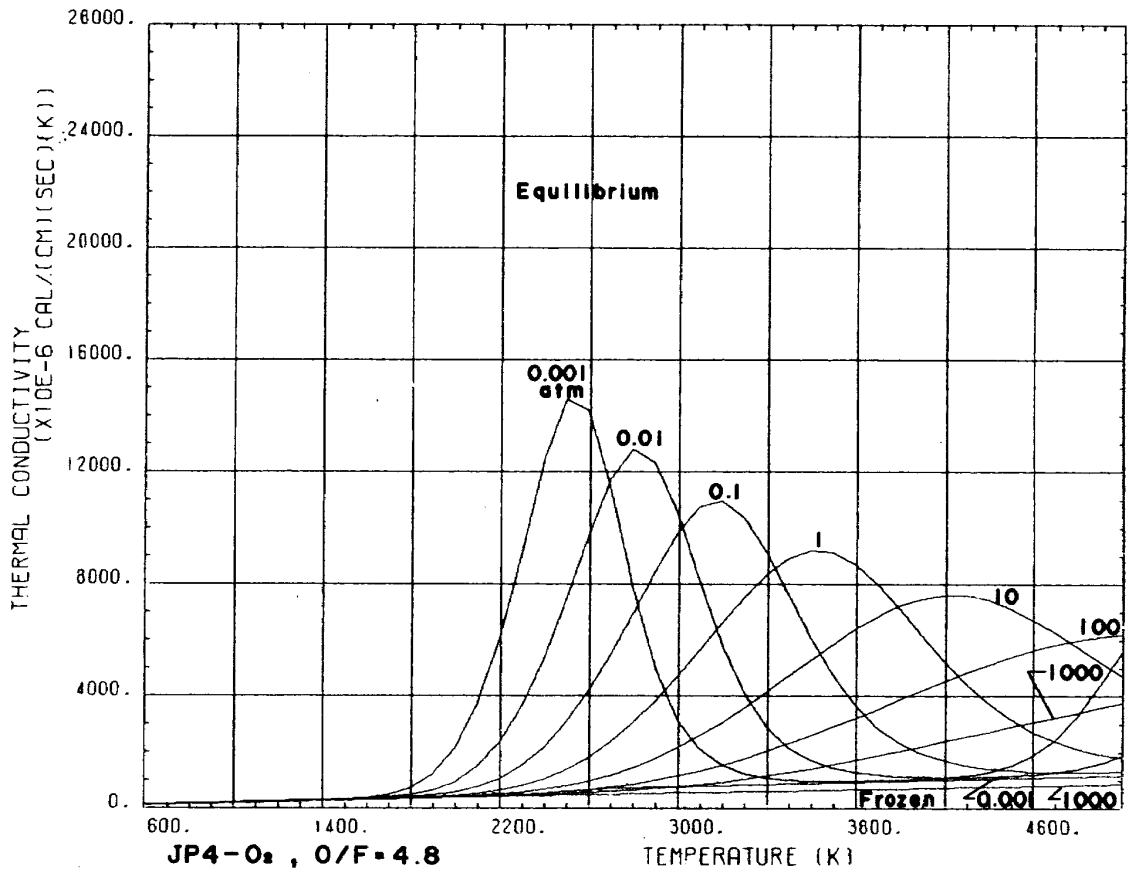


☒ B-1-8-4

JP4-O₂

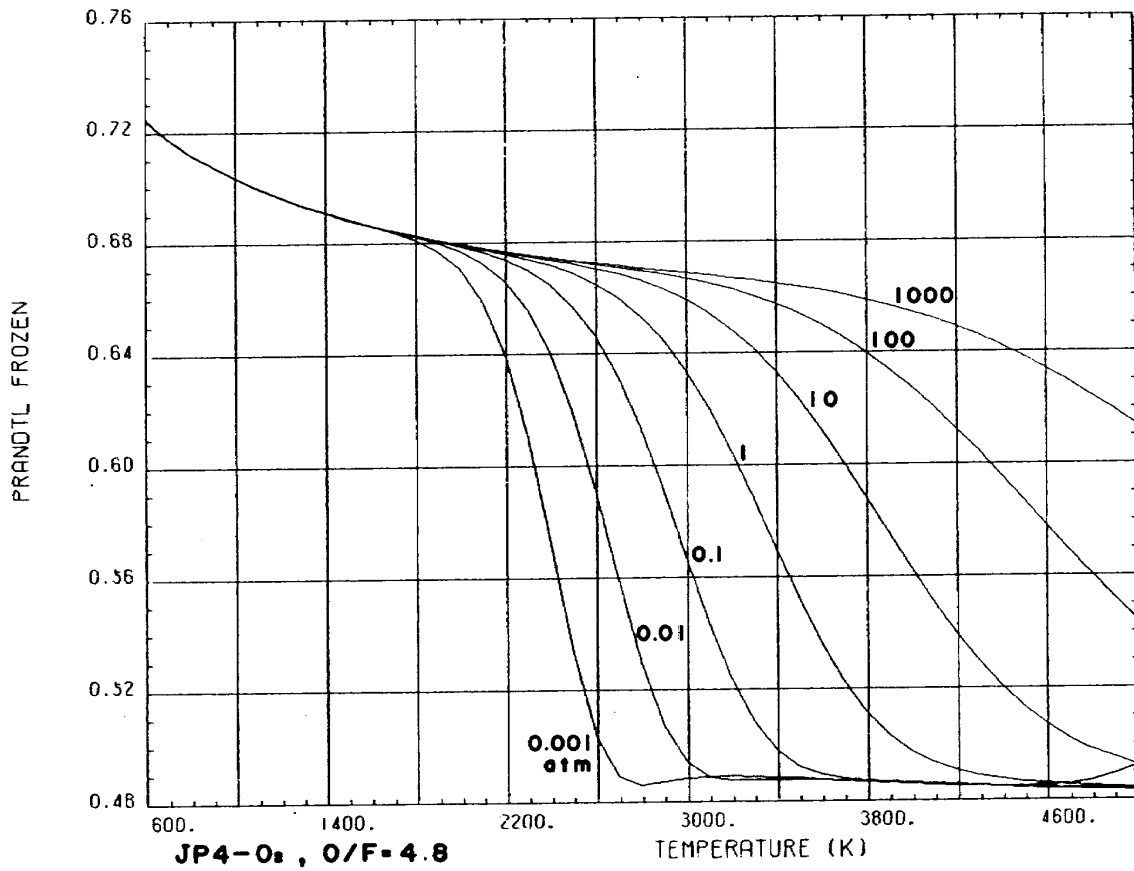


☒ B-1-10-4

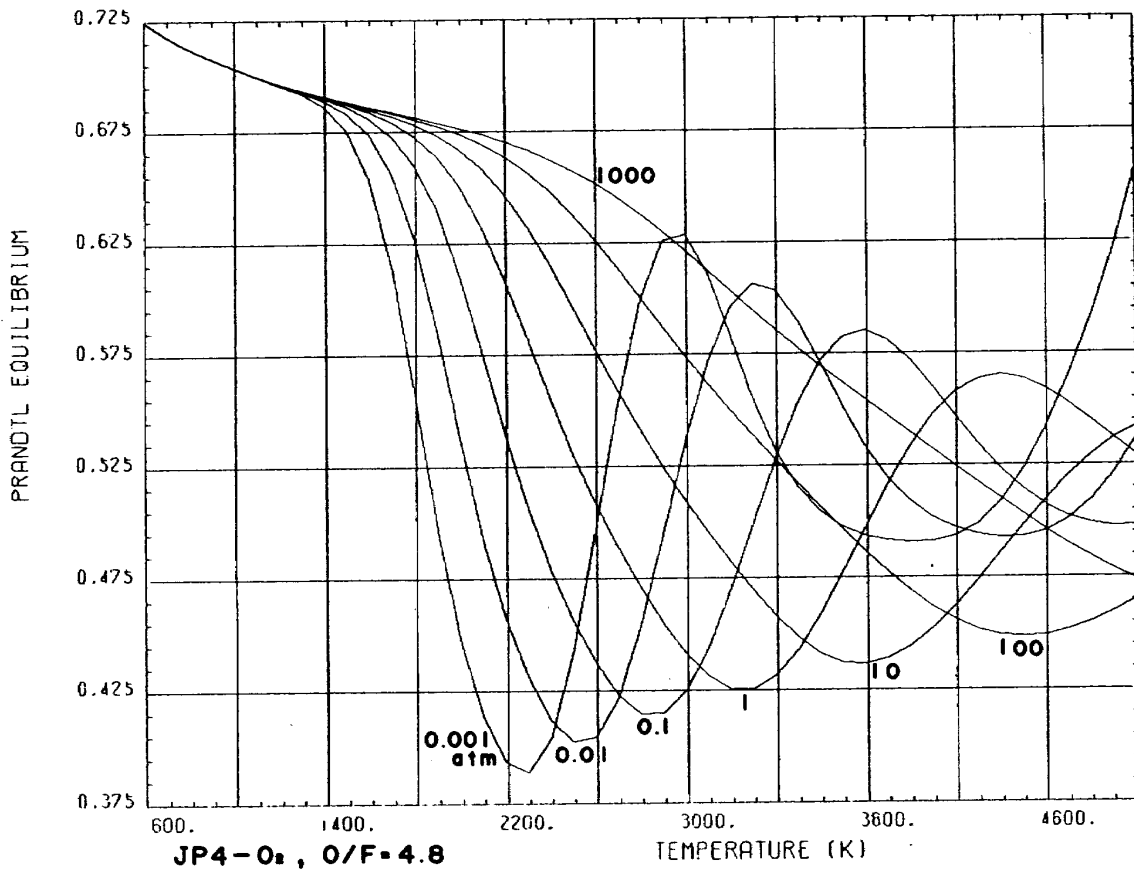


☒ B-1-15-4

JP4-O₂

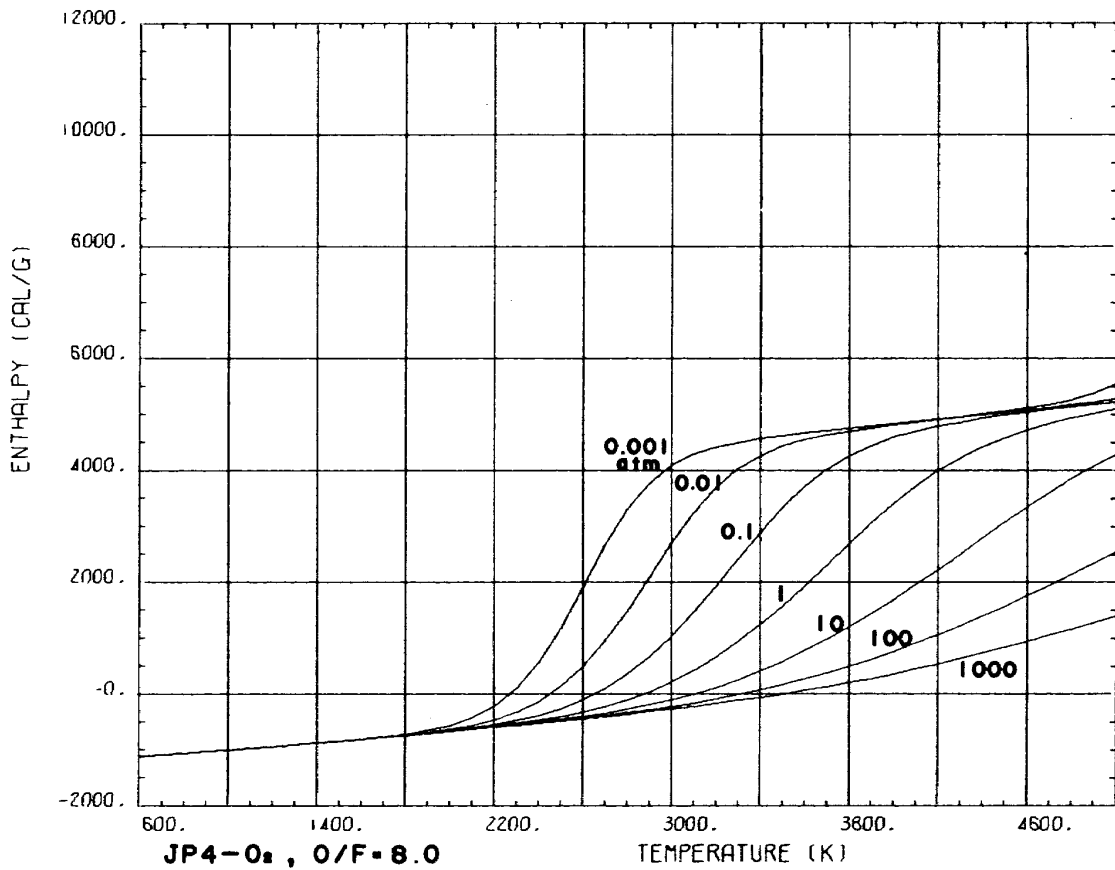


☒ B-1-16-4

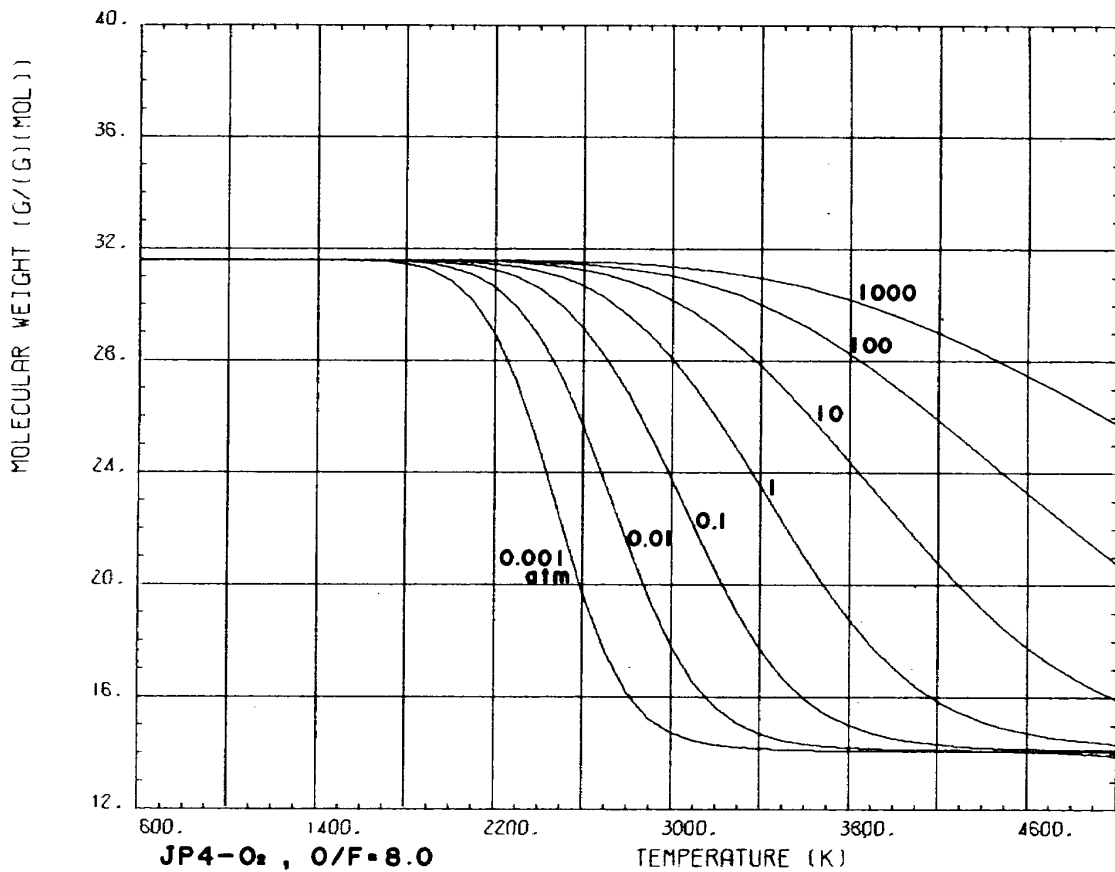


☒ B-1-17-4

JP4-O₂

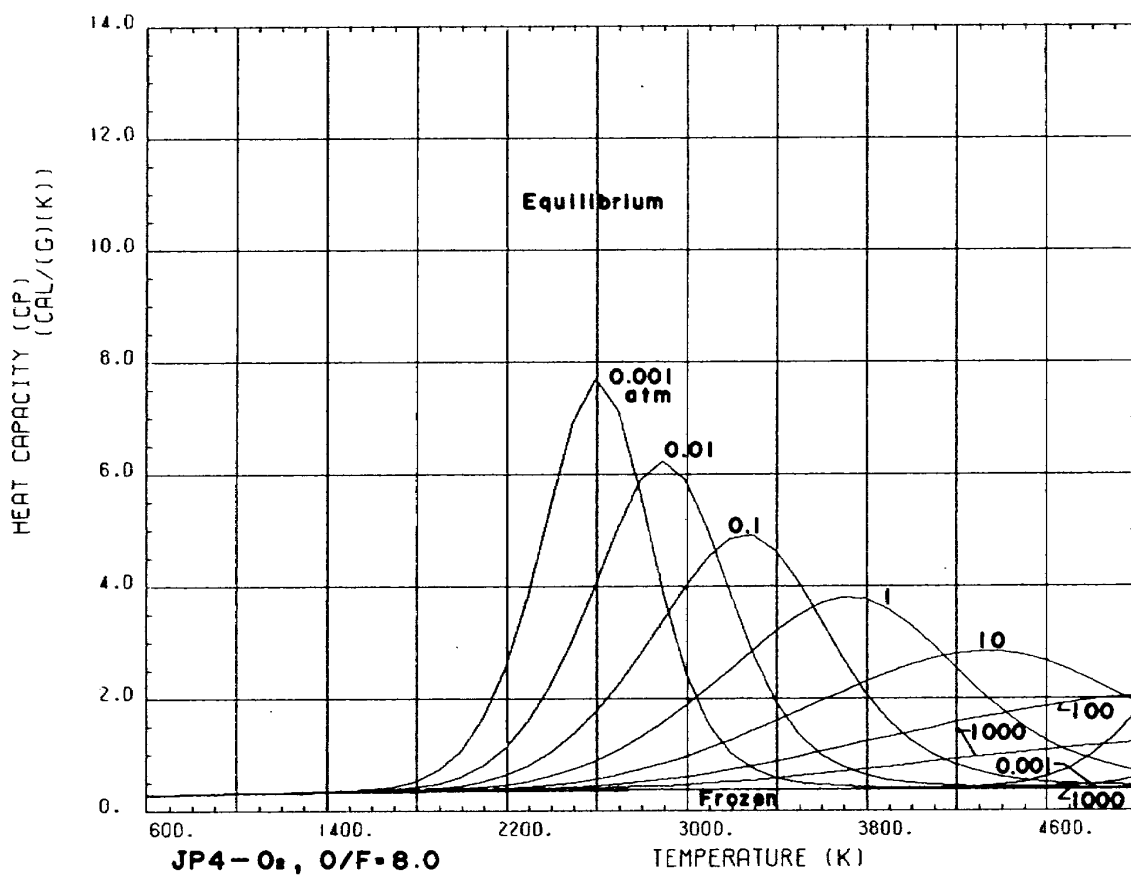


☒ B-1-2-5

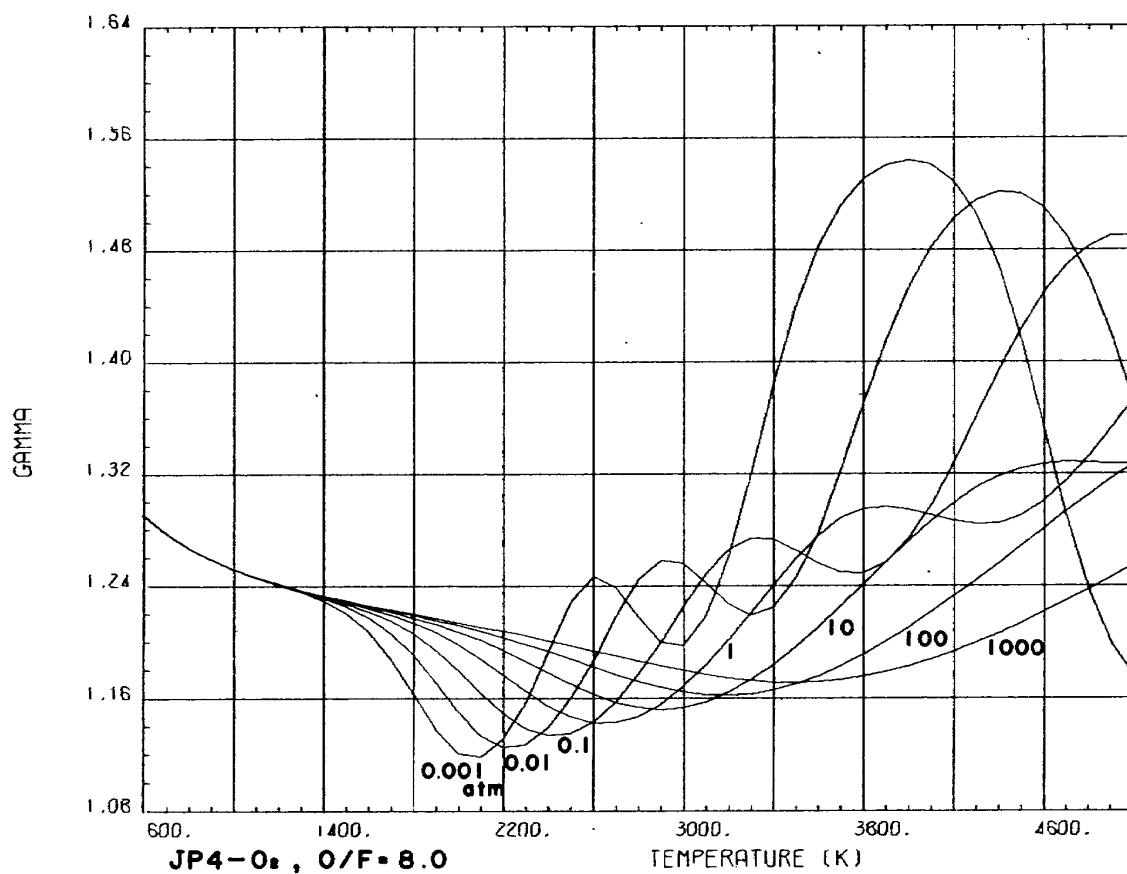


☒ B-1-4-5

JP4-O₂

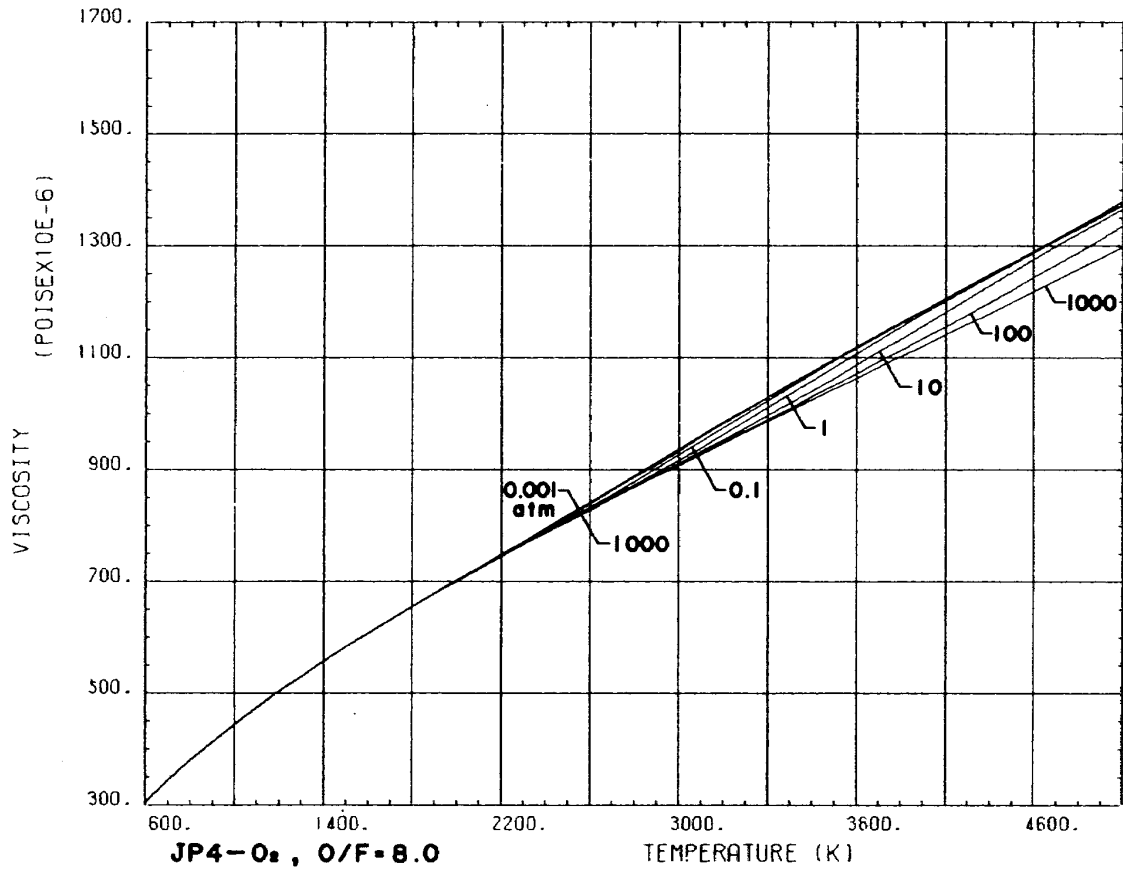


☒ B-1-6-5

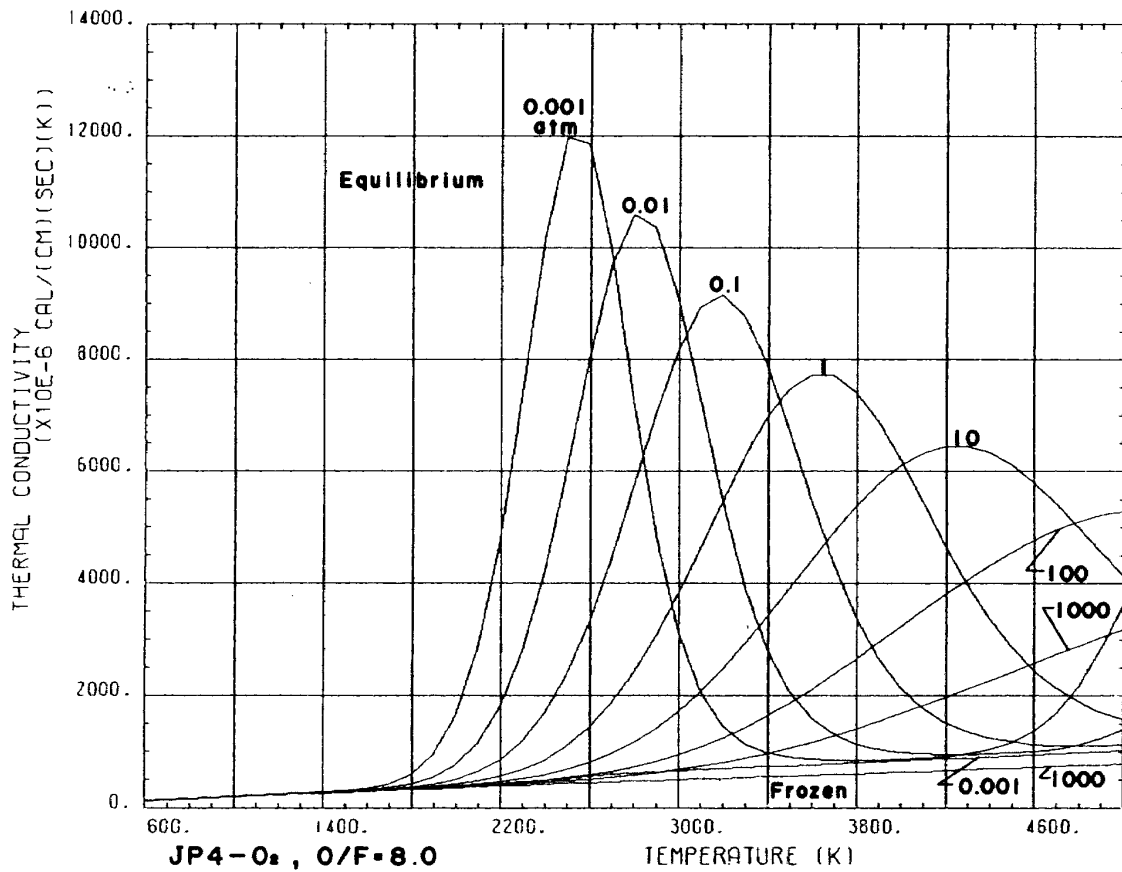


☒ B-1-8-5

JP4-O₂

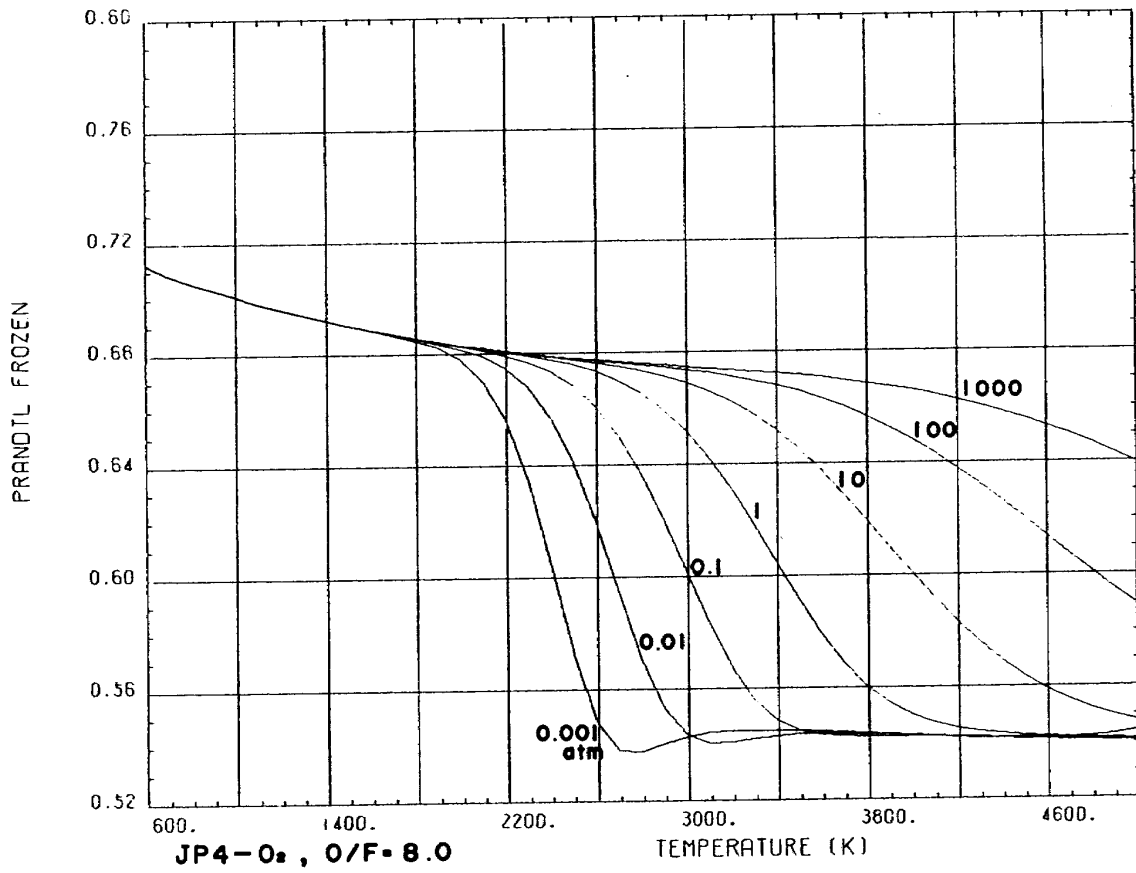


☒ B-1-10-5

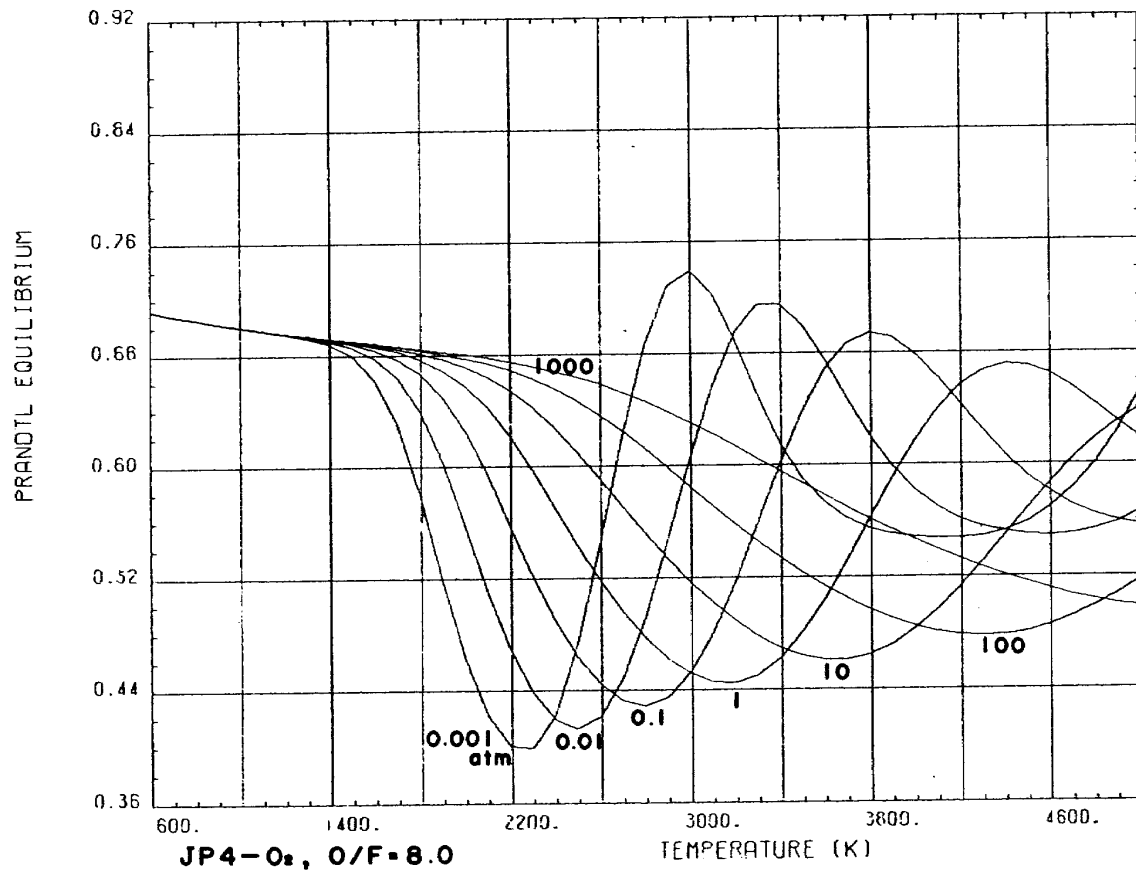


☒ B-1-15-5

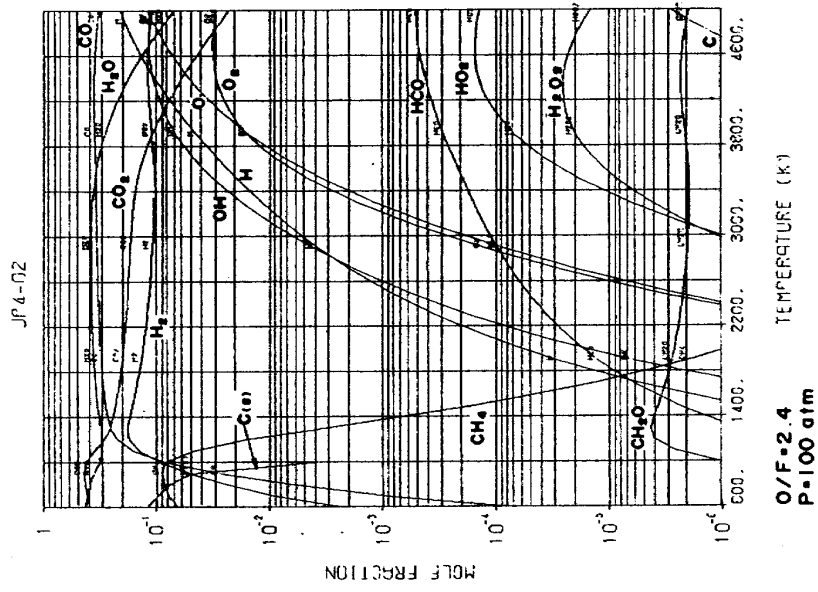
JP4-O₂



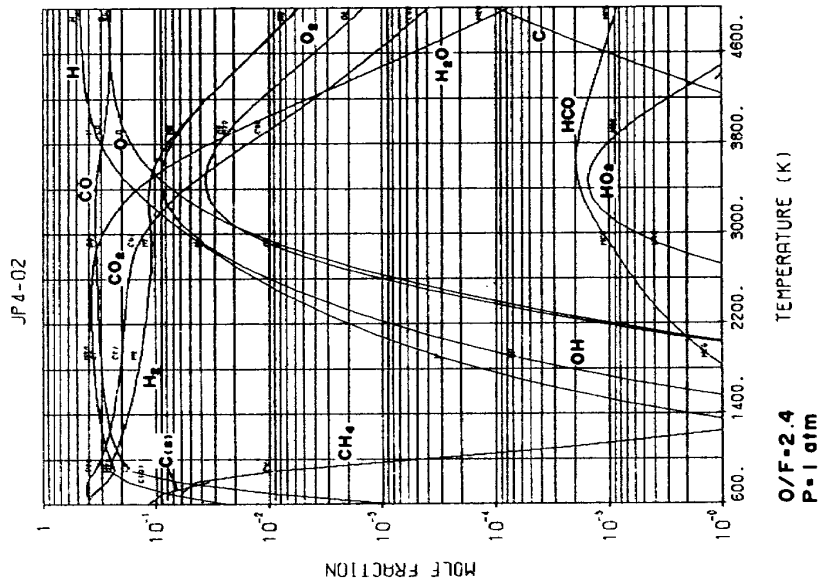
☒ B-1-16-5



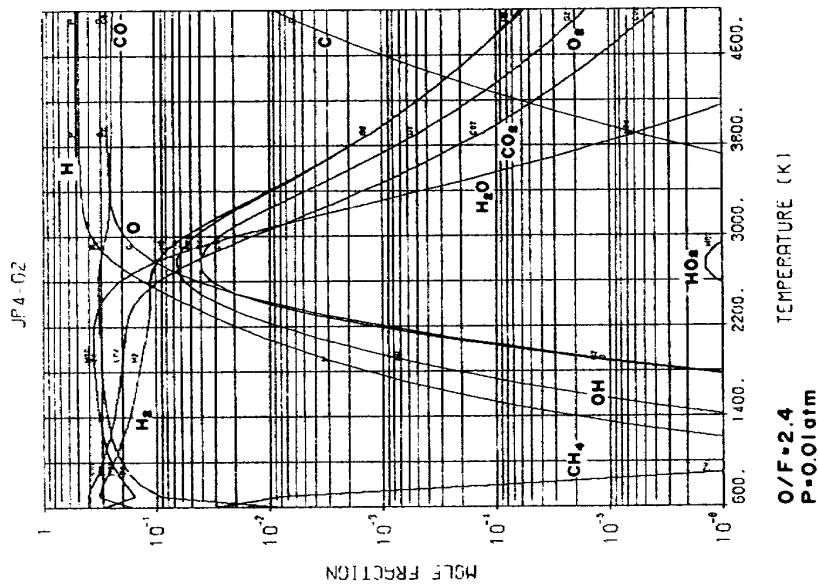
☒ B-1-17-5



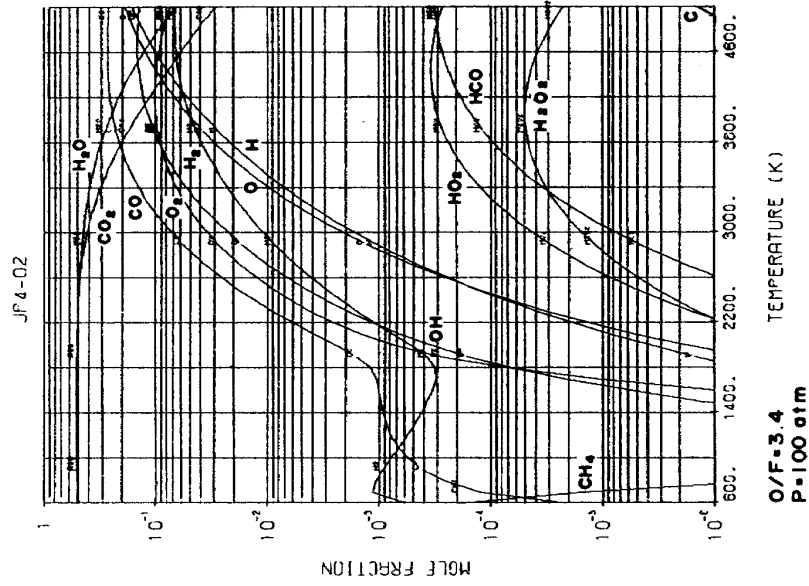
☒ C-1-6



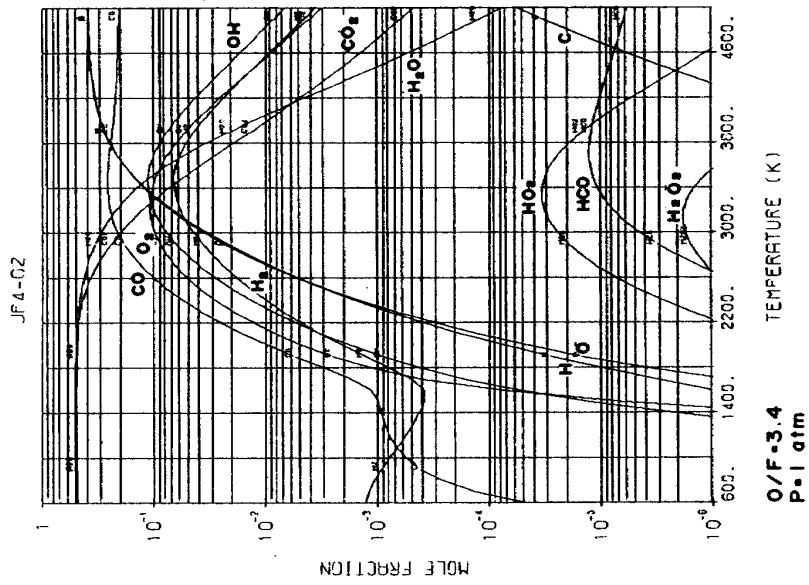
☒ C-1-5



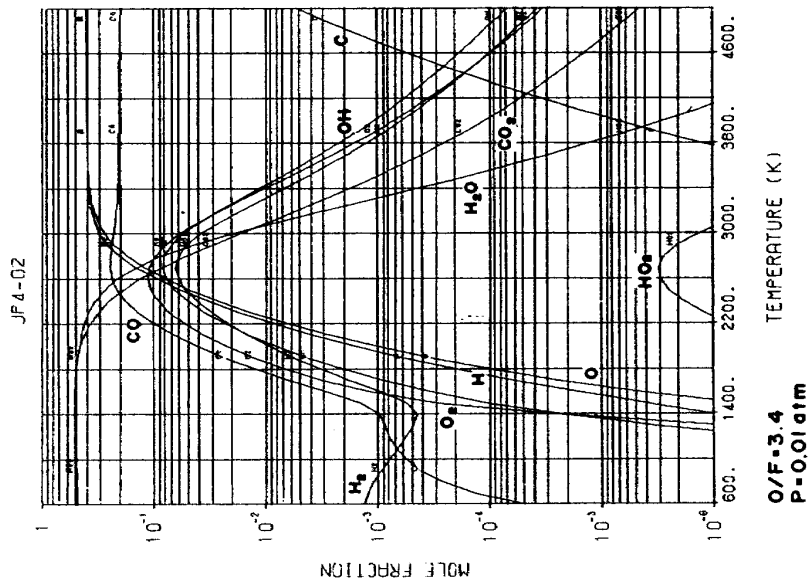
☒ C-1-4



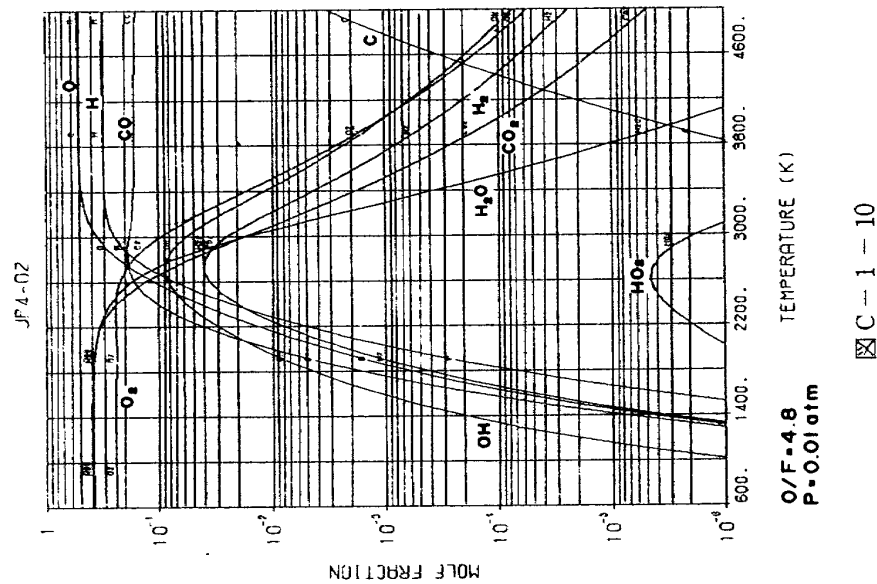
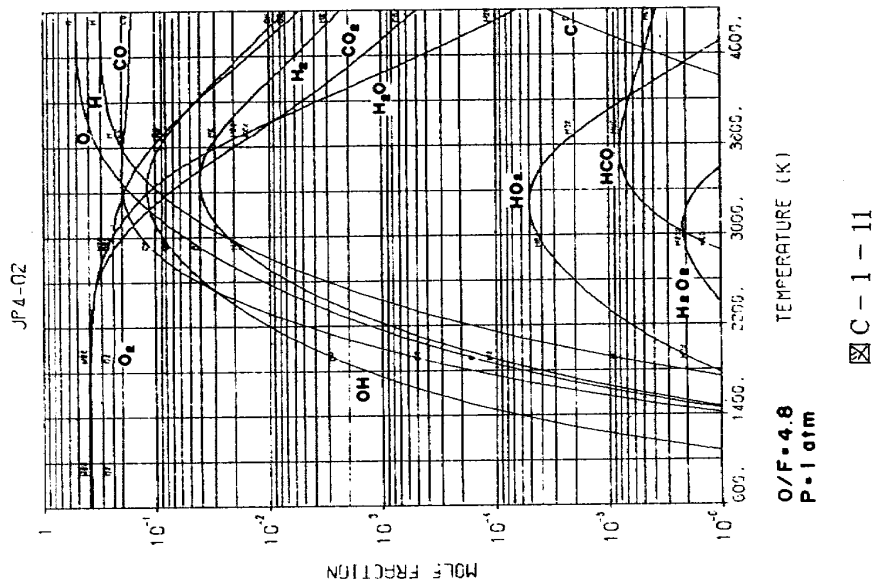
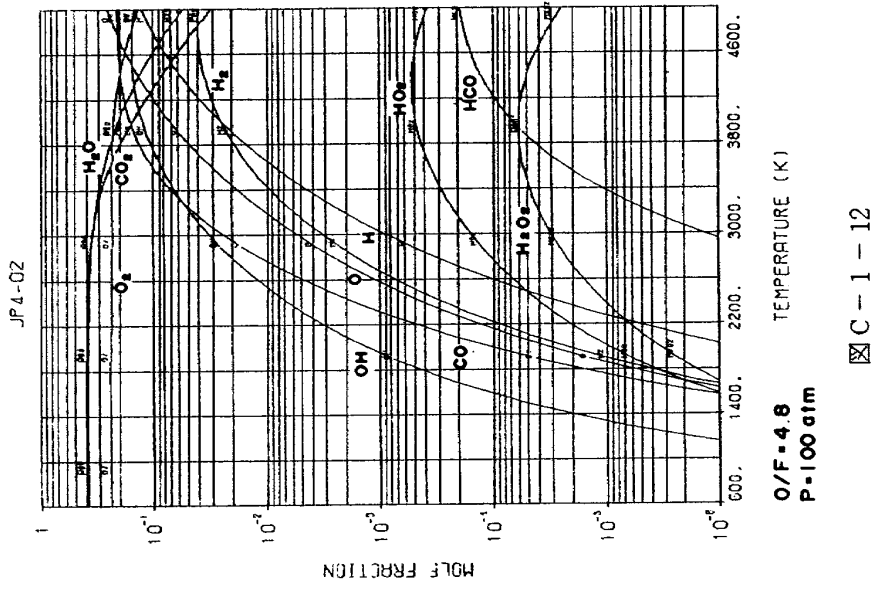
☒ C-1-9

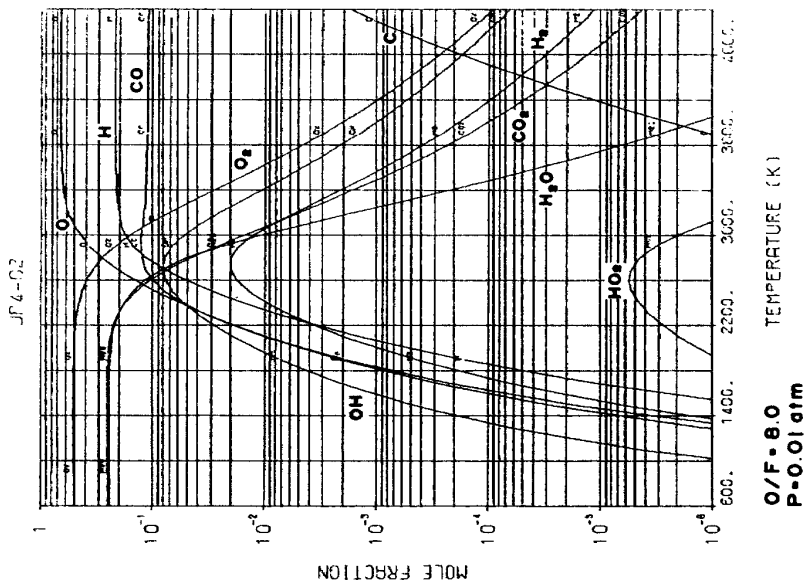


☒ C-1-8

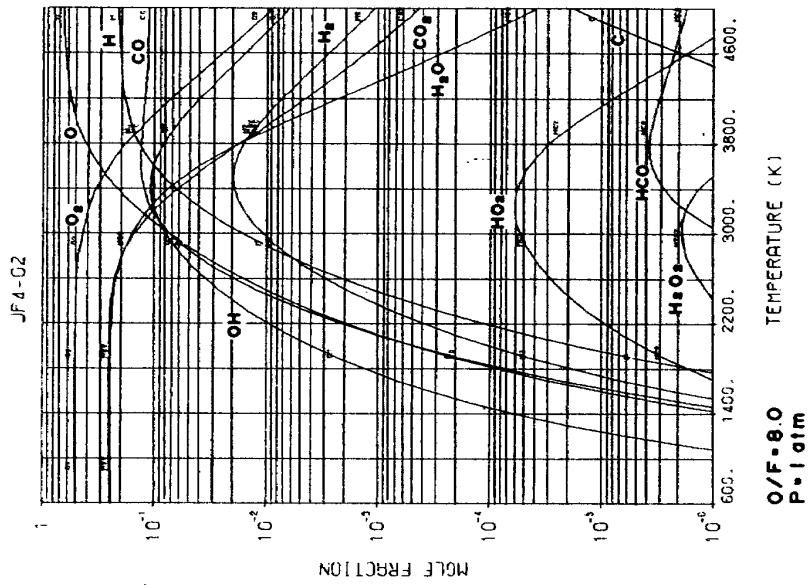


☒ C-1-7

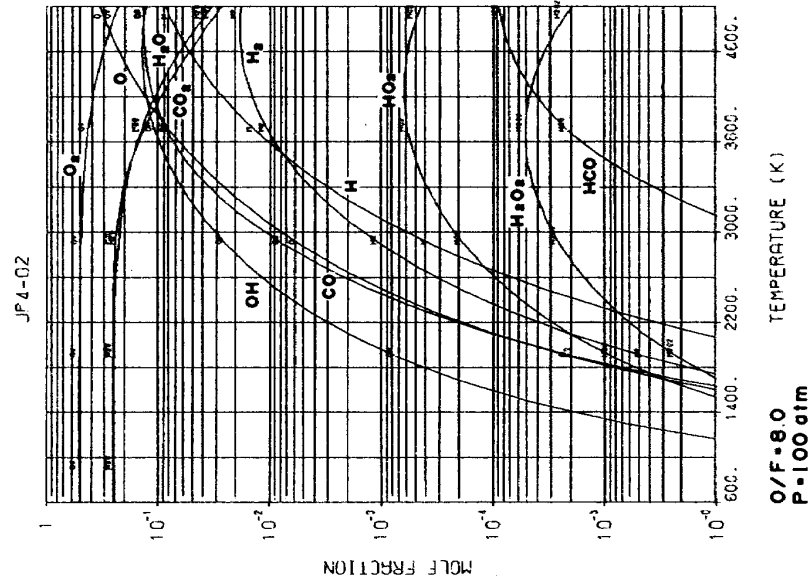




☒ C-1-13



☒ C-1-14



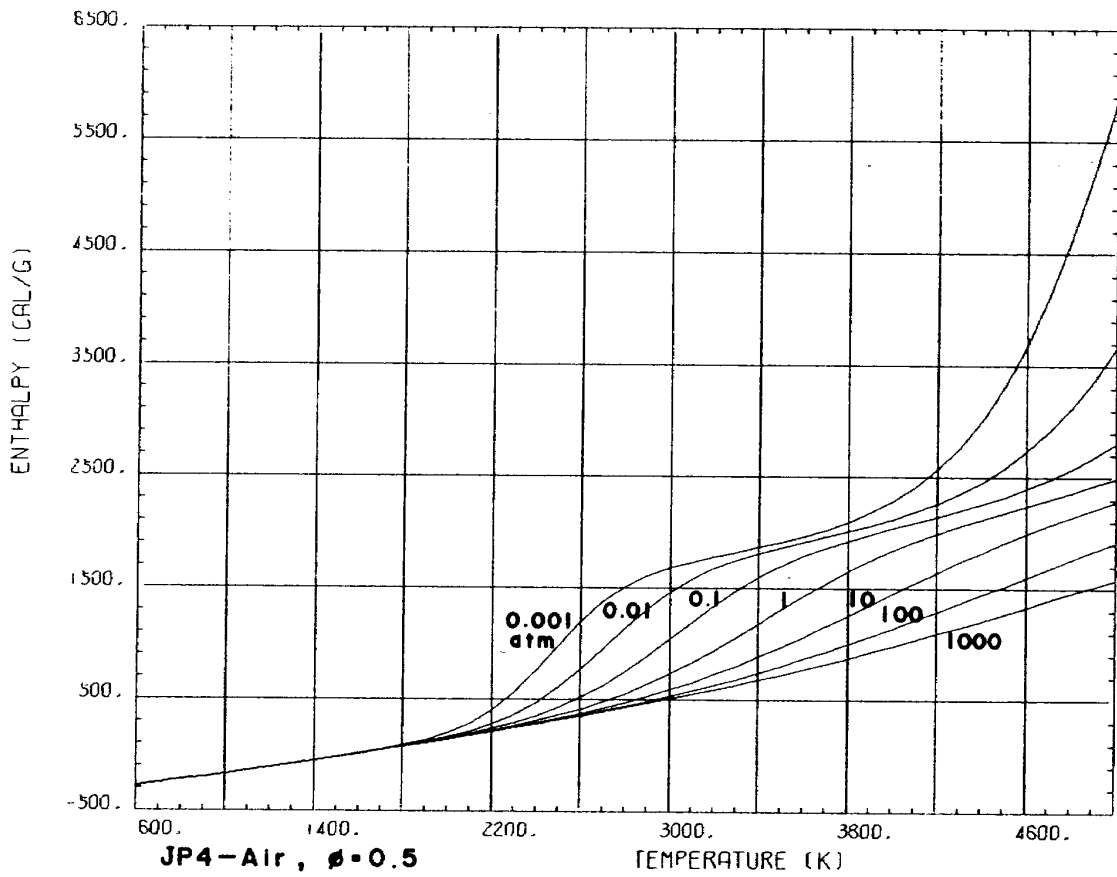
☒ C-1-15

付録2 JP4-Air系

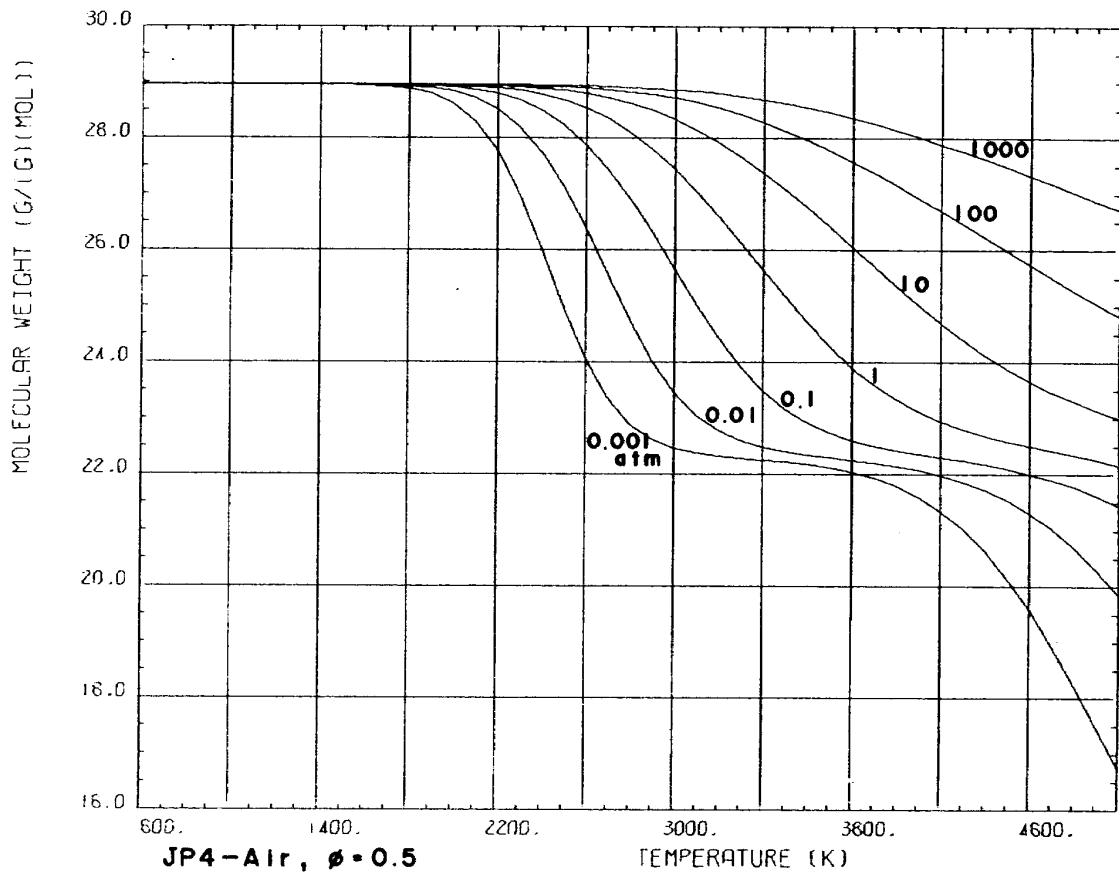
ページ	図番号	物性値	当量比 (ϕ)	ページ	図番号	物性値	当量比 (ϕ)
70	B-2-2-1	H	0.5	78	B-2-2-3	H	1.5
"	B-2-4-1	\bar{M}	"	"	B-2-4-3	\bar{M}	"
71	B-2-6-1	$C_{p,eq.}$	"	79	B-2-6-3	$C_{p,eq.}$	"
"	B-2-8-1	γ	"	"	B-2-8-3	γ	"
72	B-2-10-1	μ	"	80	B-2-10-3	μ	"
"	B-2-15-1	$\lambda_{eq.}$	"	"	B-2-15-3	$\lambda_{eq.}$	"
73	B-2-16-1	$Pr, fro.$	"	81	B-2-16-3	$Pr, fro.$	"
"	B-2-17-1	$Pr, eq.$	"	"	B-2-17-3	$Pr, eq.$	"
74	B-2-2-2	H	1.0	82	B-2-2-4	H	2.0
"	B-2-4-2	\bar{M}	"	"	B-2-4-4	\bar{M}	"
75	B-2-6-2	$C_{p,eq.}$	"	83	B-2-6-4	$C_{p,eq.}$	"
"	B-2-8-2	γ	"	"	B-2-8-4	γ	"
76	B-2-10-2	μ	"	84	B-2-10-4	μ	"
"	B-2-15-2	$\lambda_{eq.}$	"	"	B-2-15-4	$\lambda_{eq.}$	"
77	B-2-16-2	$Pr, fro.$	"	85	B-2-16-4	$Pr, fro.$	"
"	B-2-17-2	$Pr, eq.$	"	"	B-2-17-4	$Pr, eq.$	"

ページ	図番号	当量比 (ϕ)	圧力 (atm)
86	C-2-1	0.5	0.01
"	C-2-2	"	1
"	C-2-3	"	100
87	C-2-4	1.0	0.01
"	C-2-5	"	1
"	C-2-6	"	100
88	C-2-7	1.5	0.01
"	C-2-8	"	1
"	C-2-9	"	100
89	C-2-10	2.0	0.01
"	C-2-11	"	1
"	C-2-12	"	100

JP4-Air

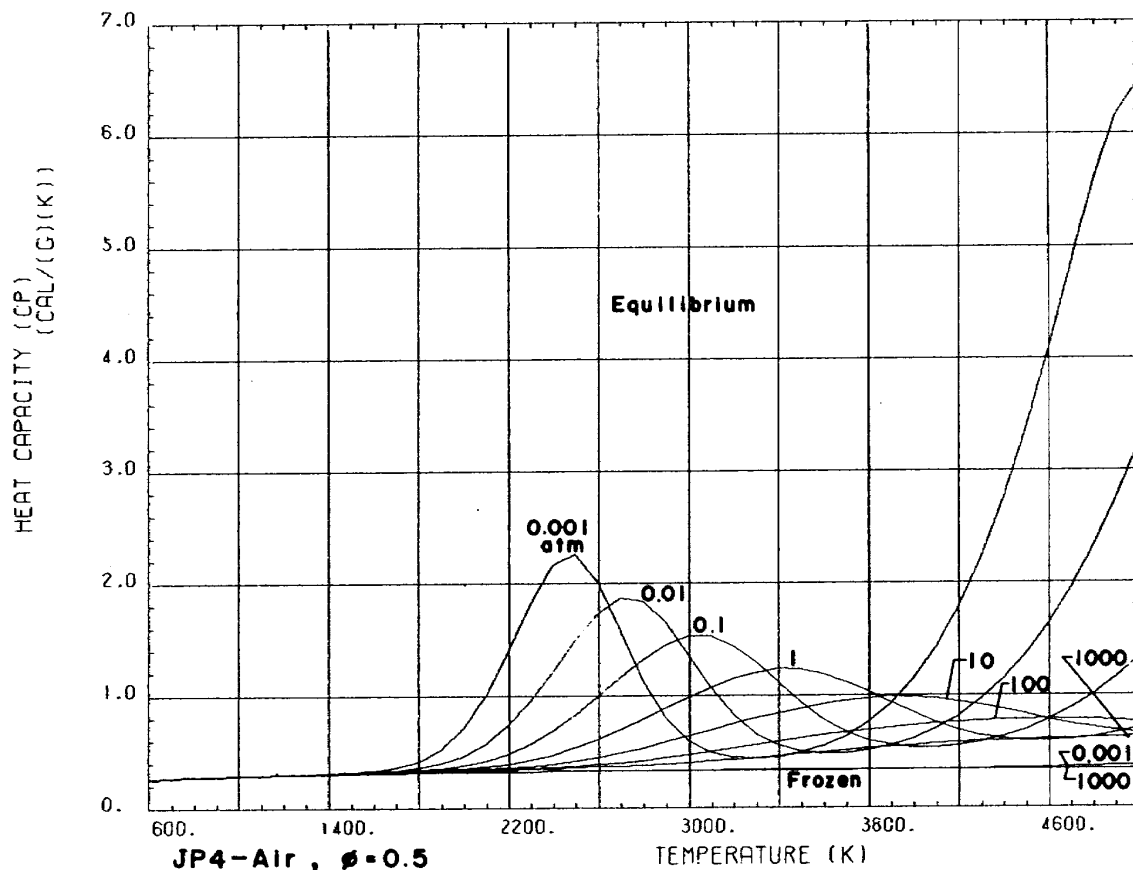


☒ B-2-2-1

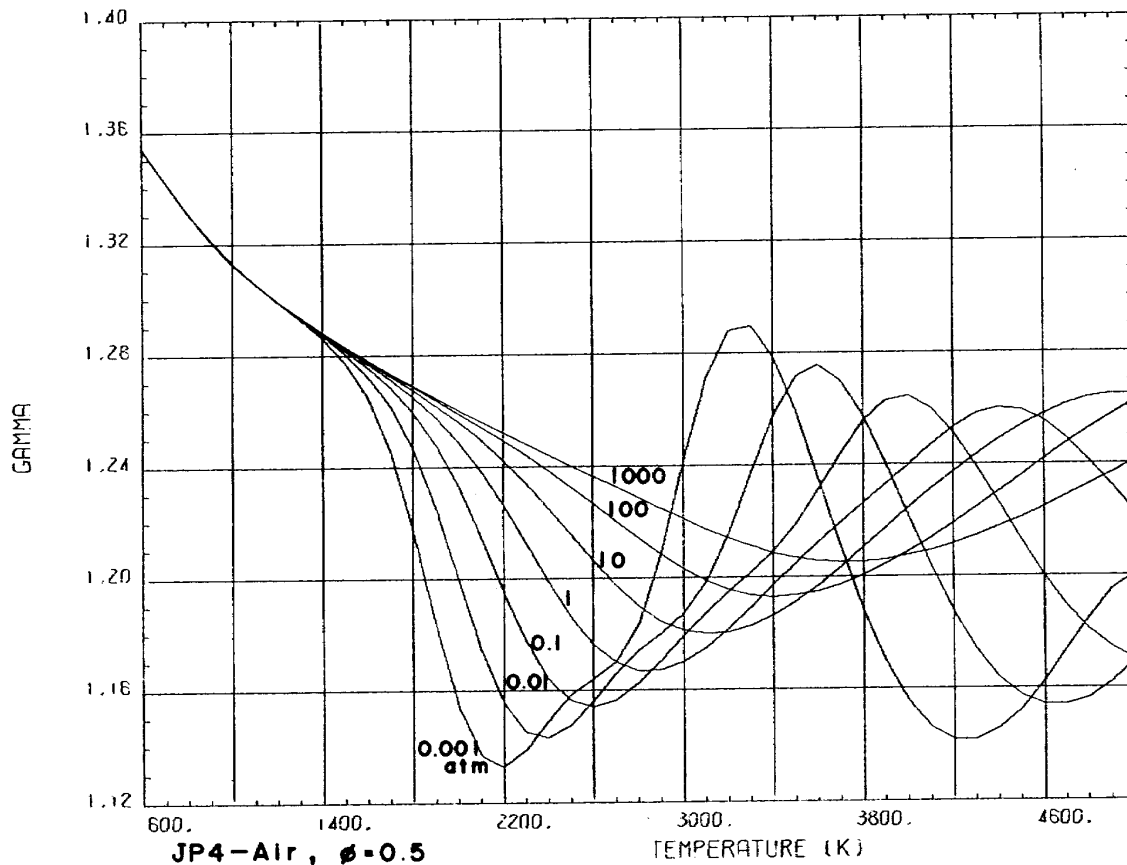


☒ B-2-4 1

JP4-Air

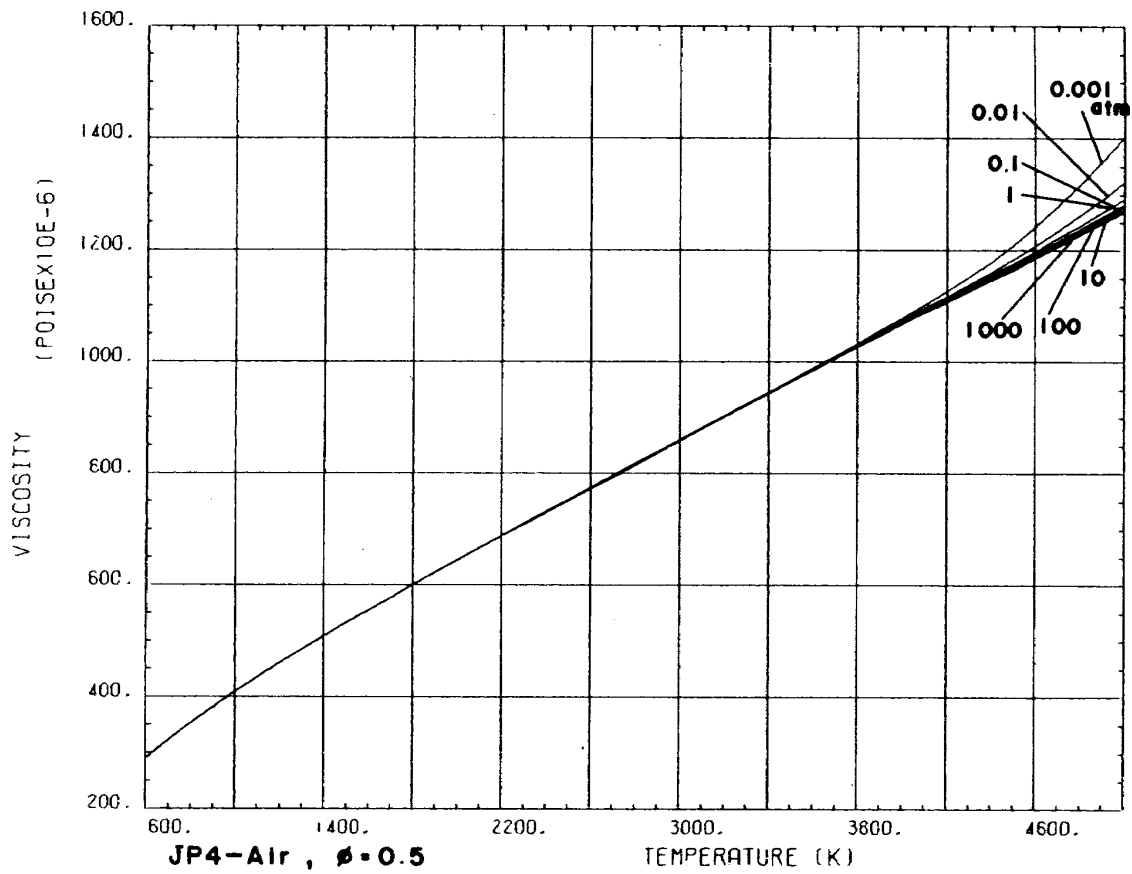


☒ B-2-6-1

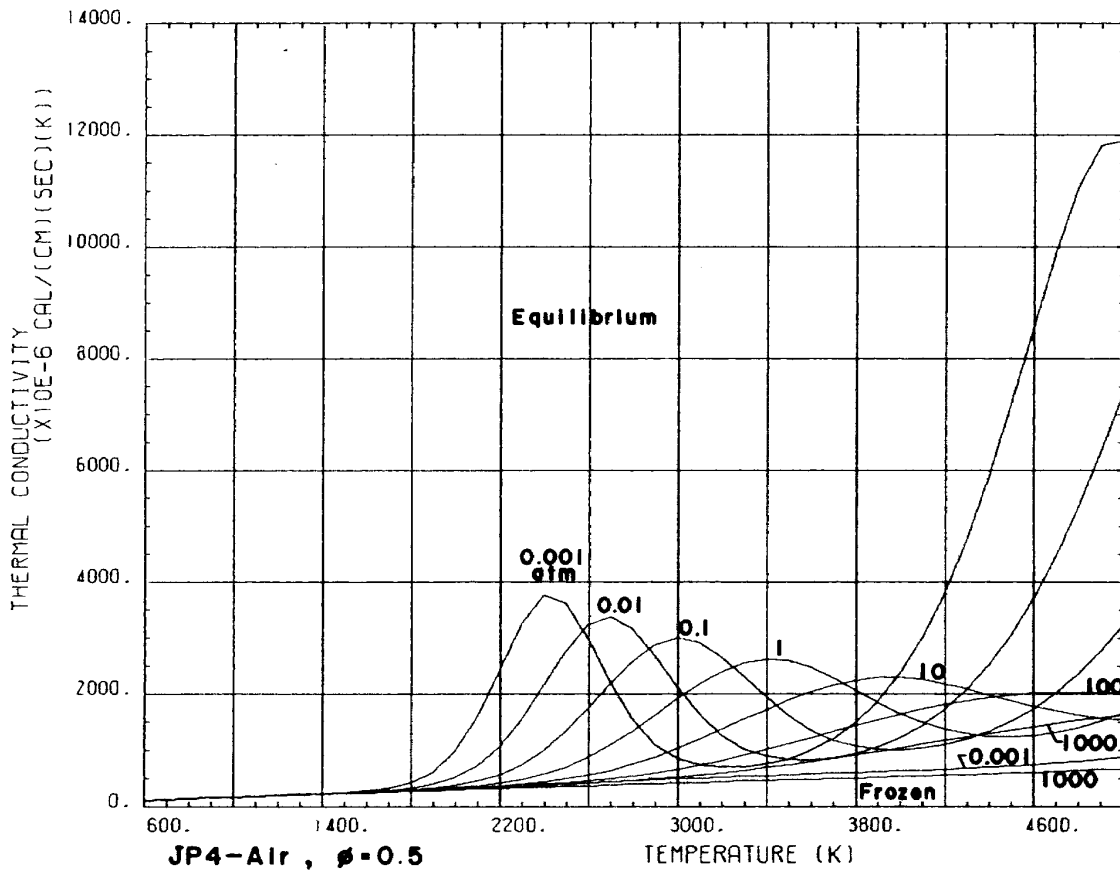


☒ B-2-8-1

JP4 - Air

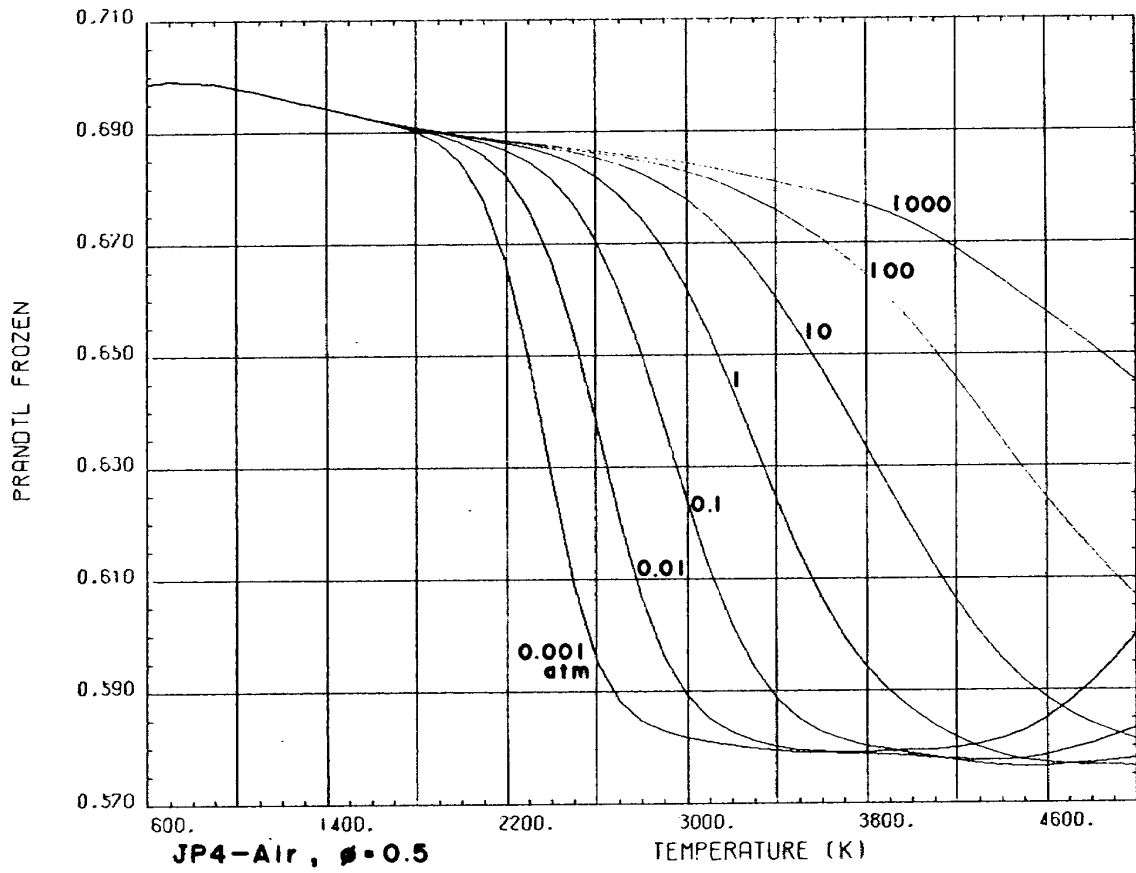


☒ B - 2 - 10 - 1

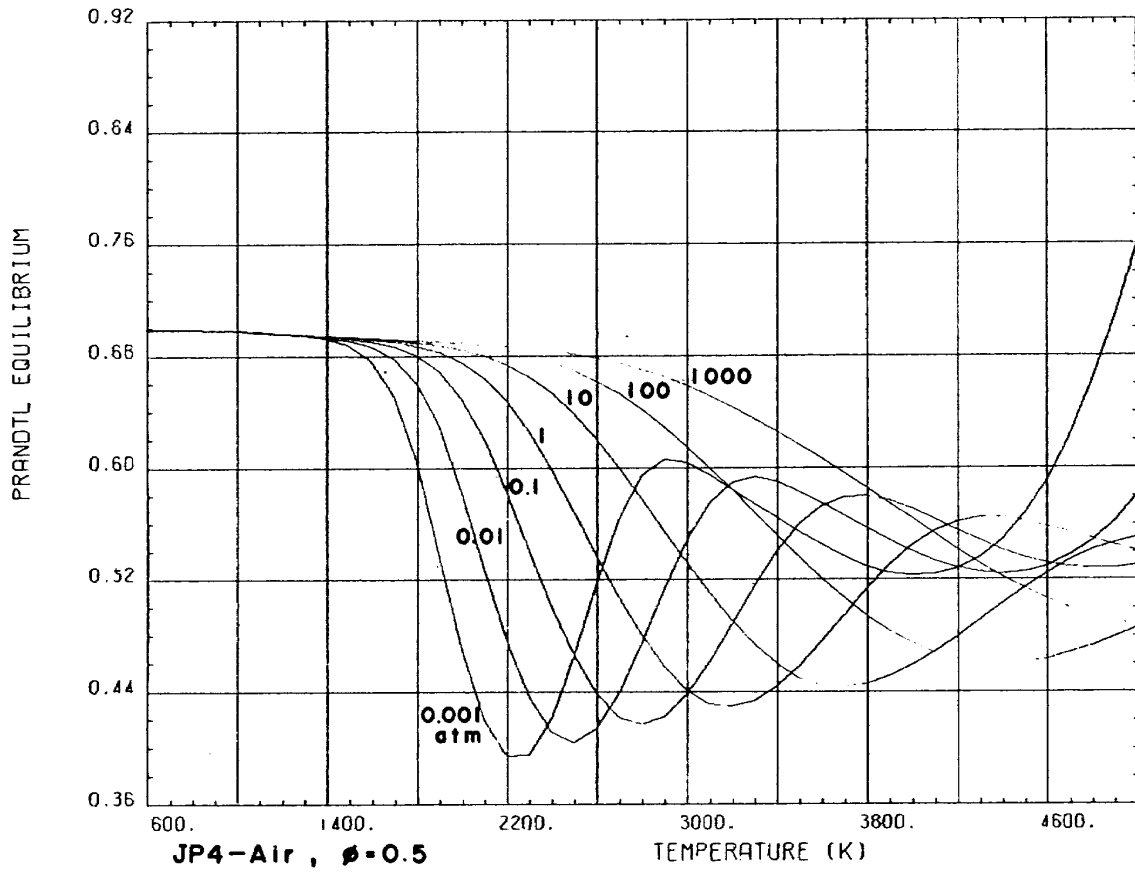


☒ B - 2 - 15 - 1

JP4-Air

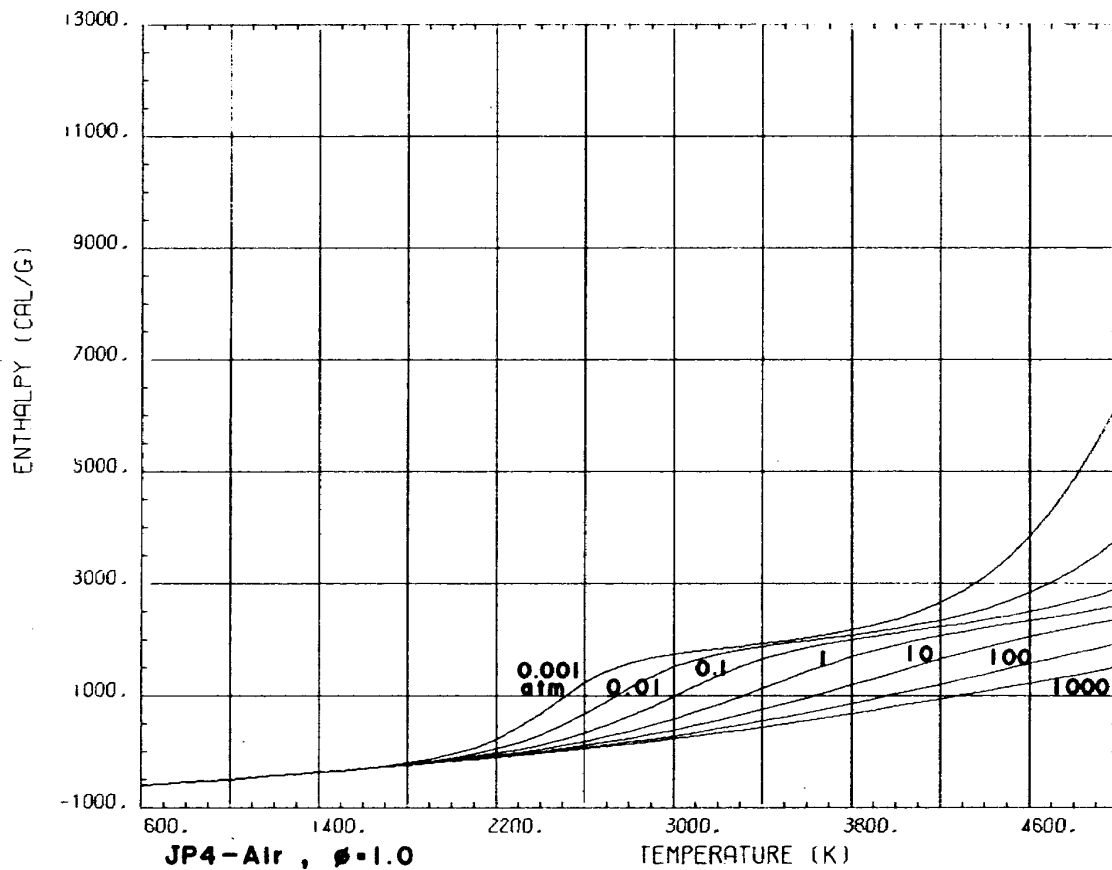


☒ B-2-16-1

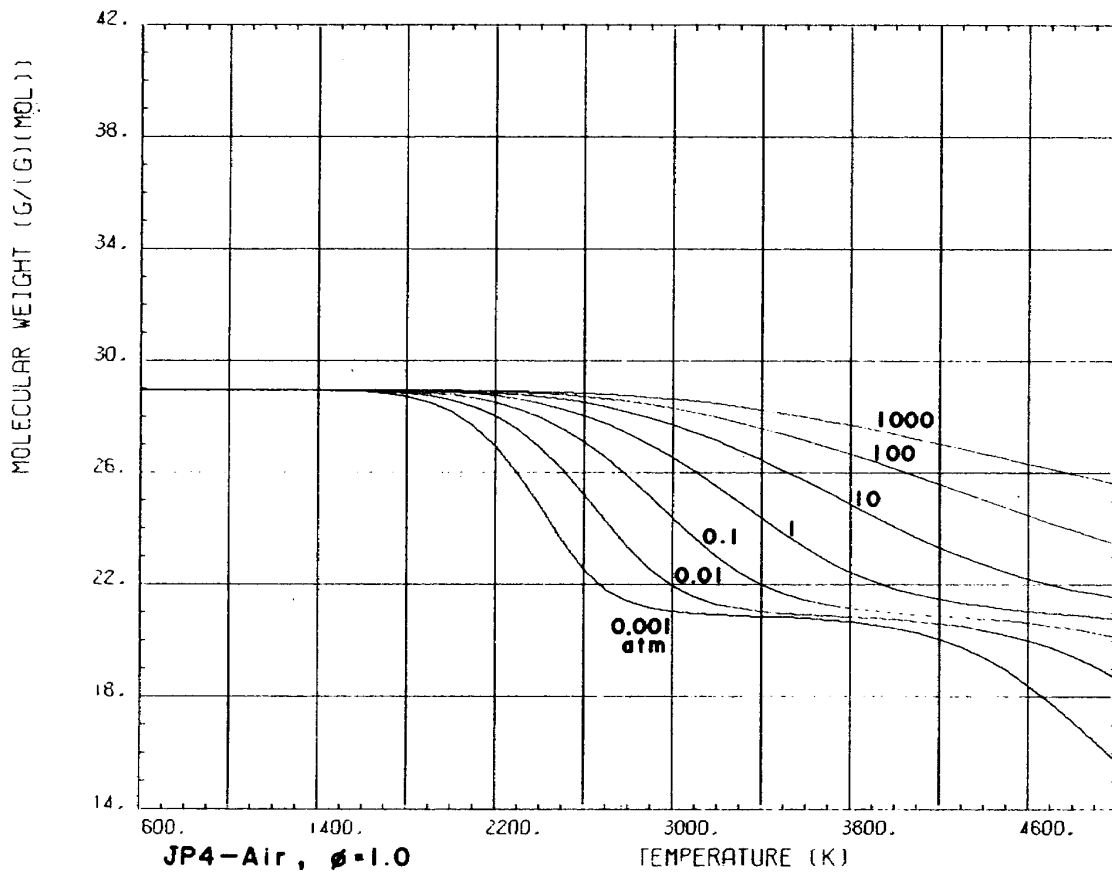


☒ B-2-17-1

JP4-Air

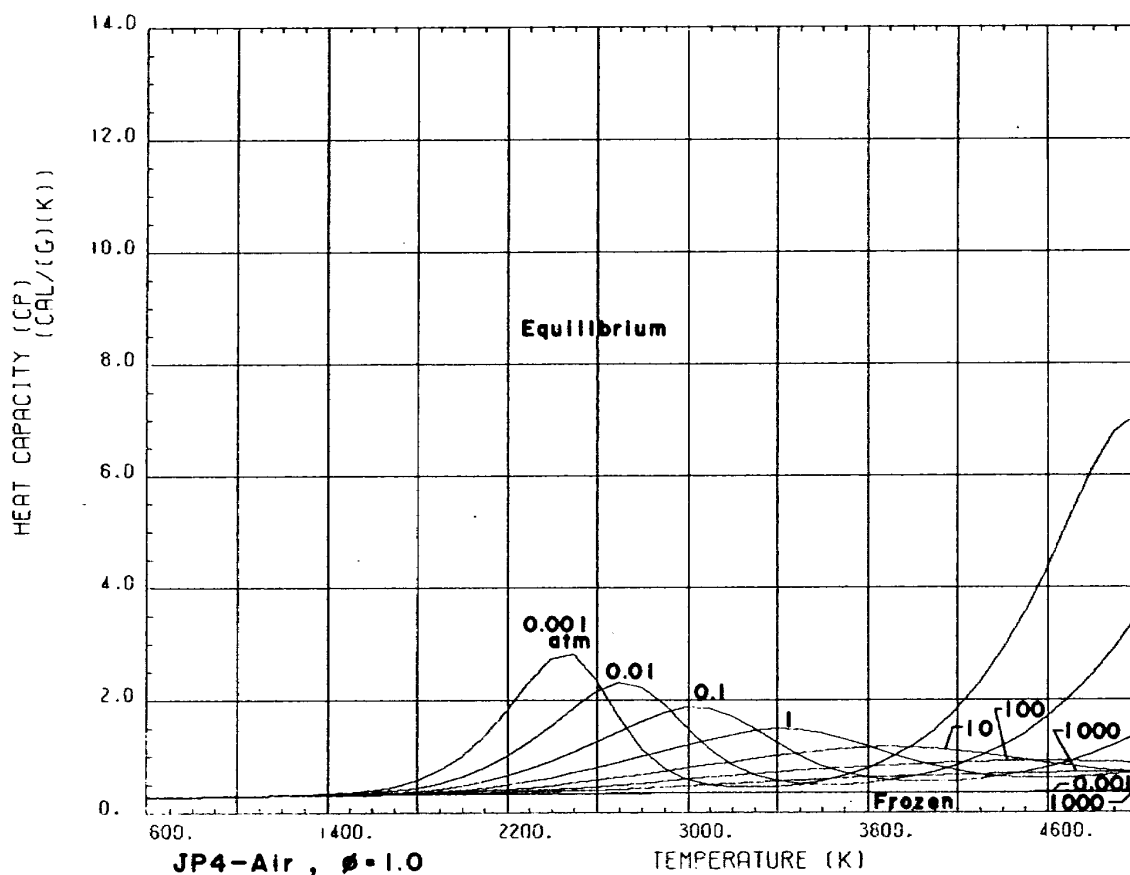


☒ B-2-2-2

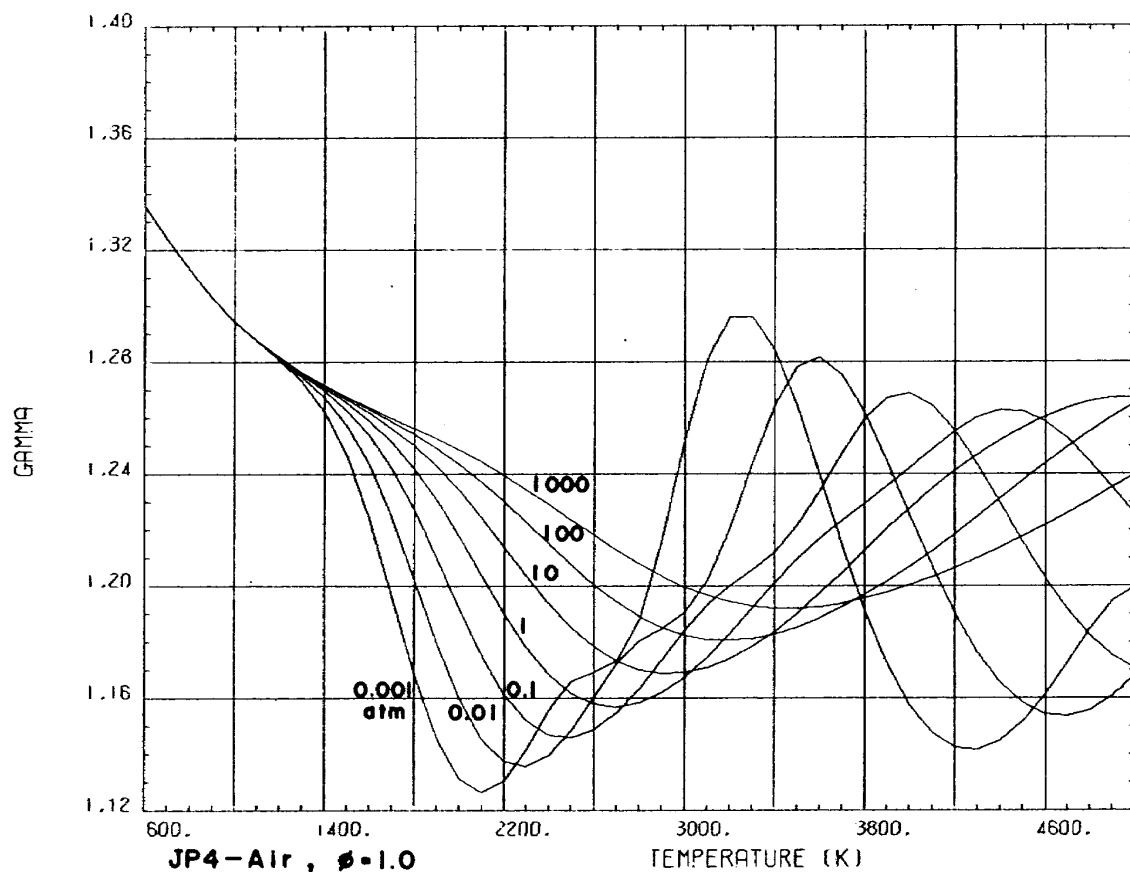


☒ B-2-4-2

JP4-Air

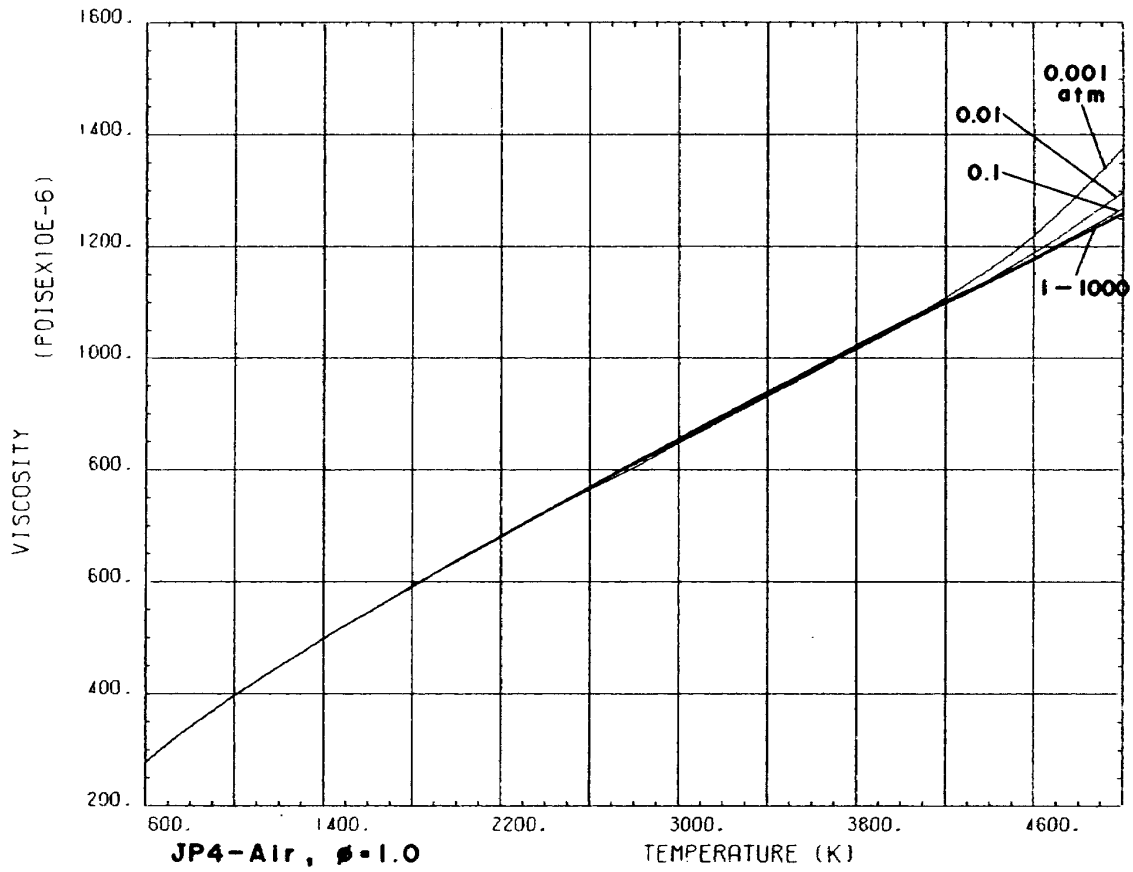


☒ B-2-6-2

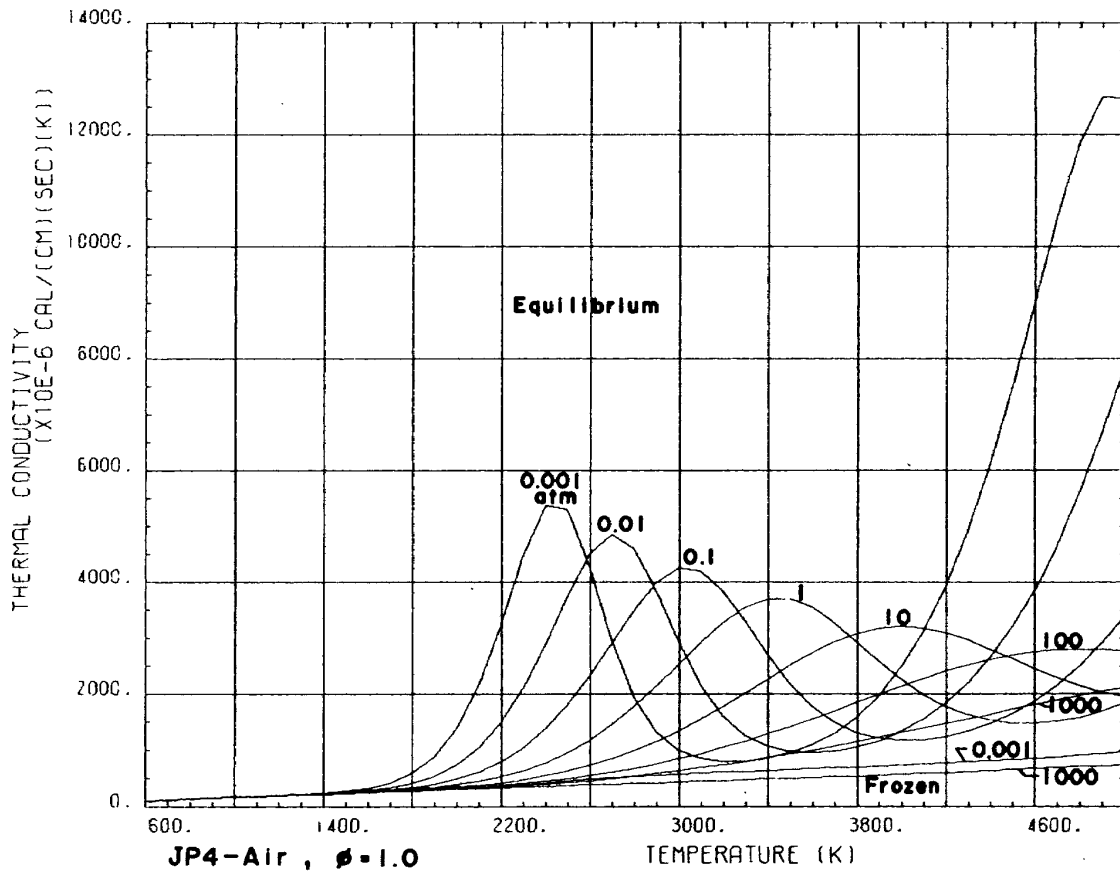


☒ B-2-8-2

JP4 - Air

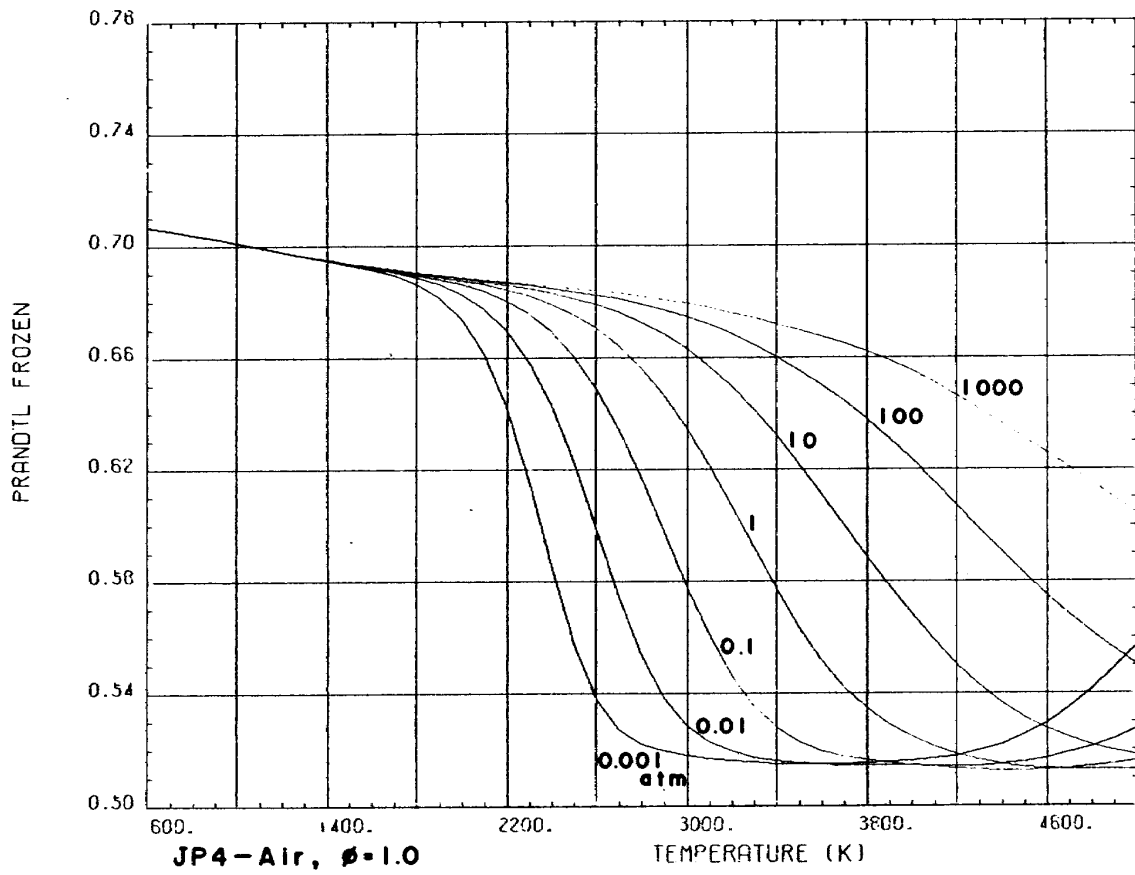


☒ B - 2 - 10 - 2

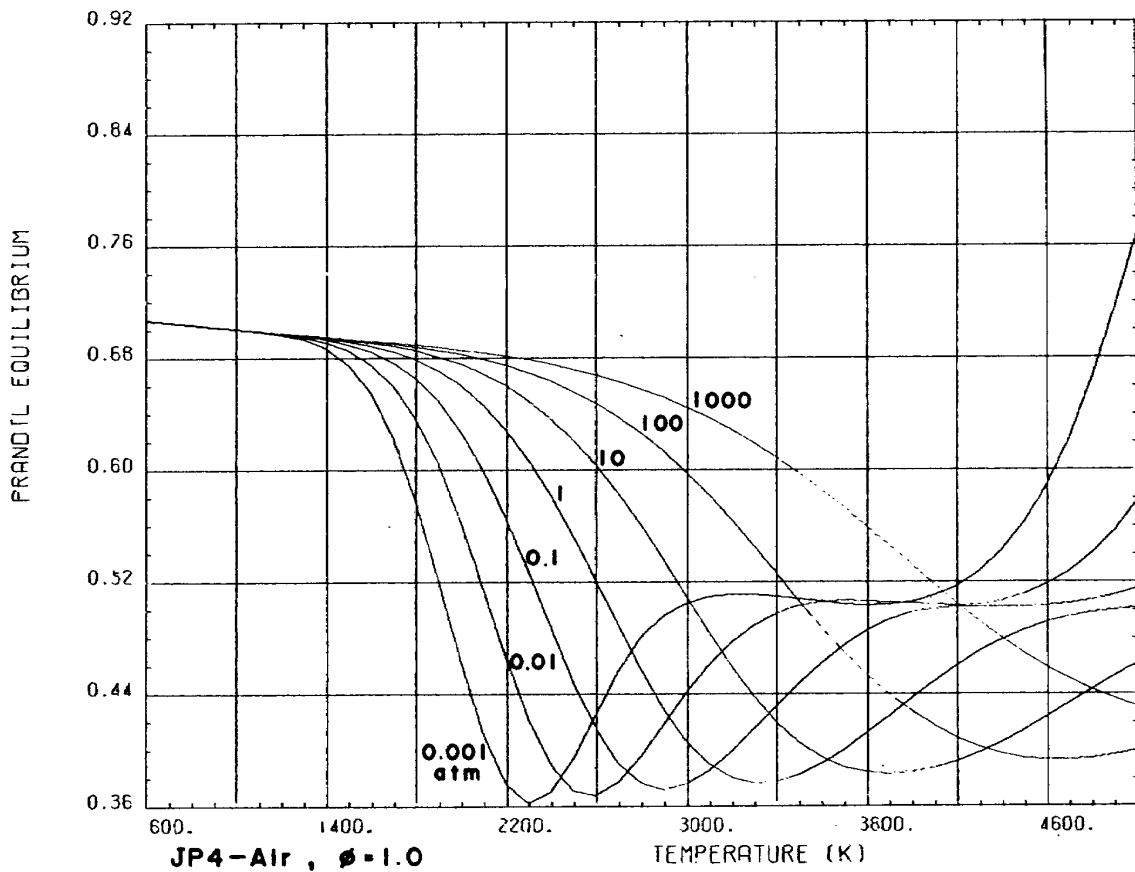


☒ B - 2 - 15 - 2

JP4-Air

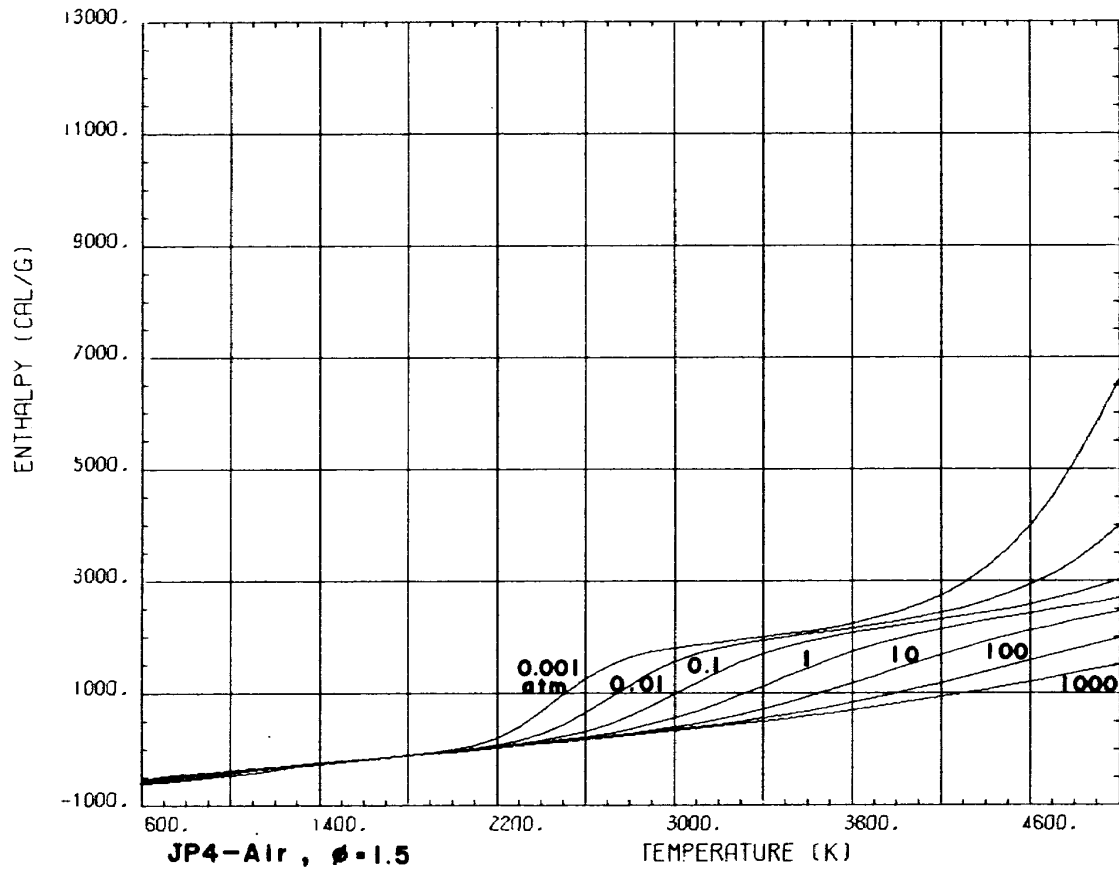


☒ B-2-16-2

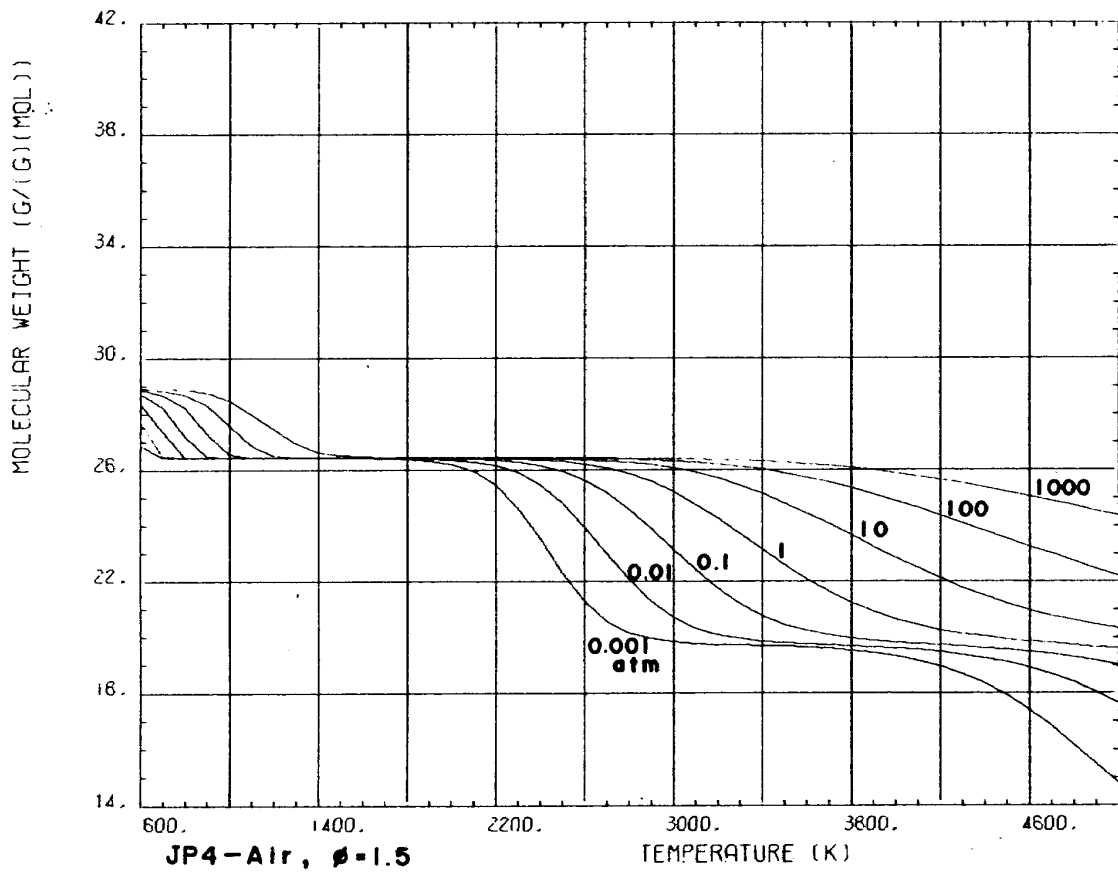


☒ B-2-17-2

JP4-Air

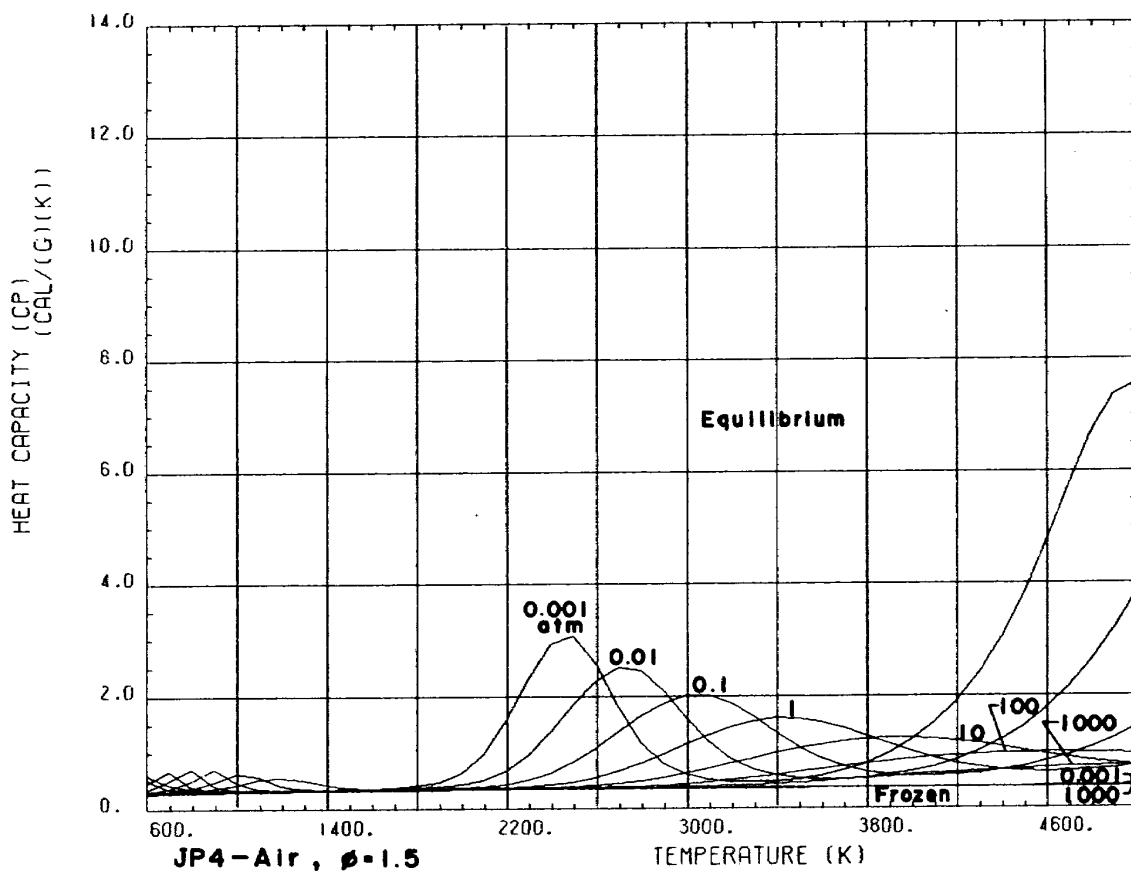


☒ B-2-2-3

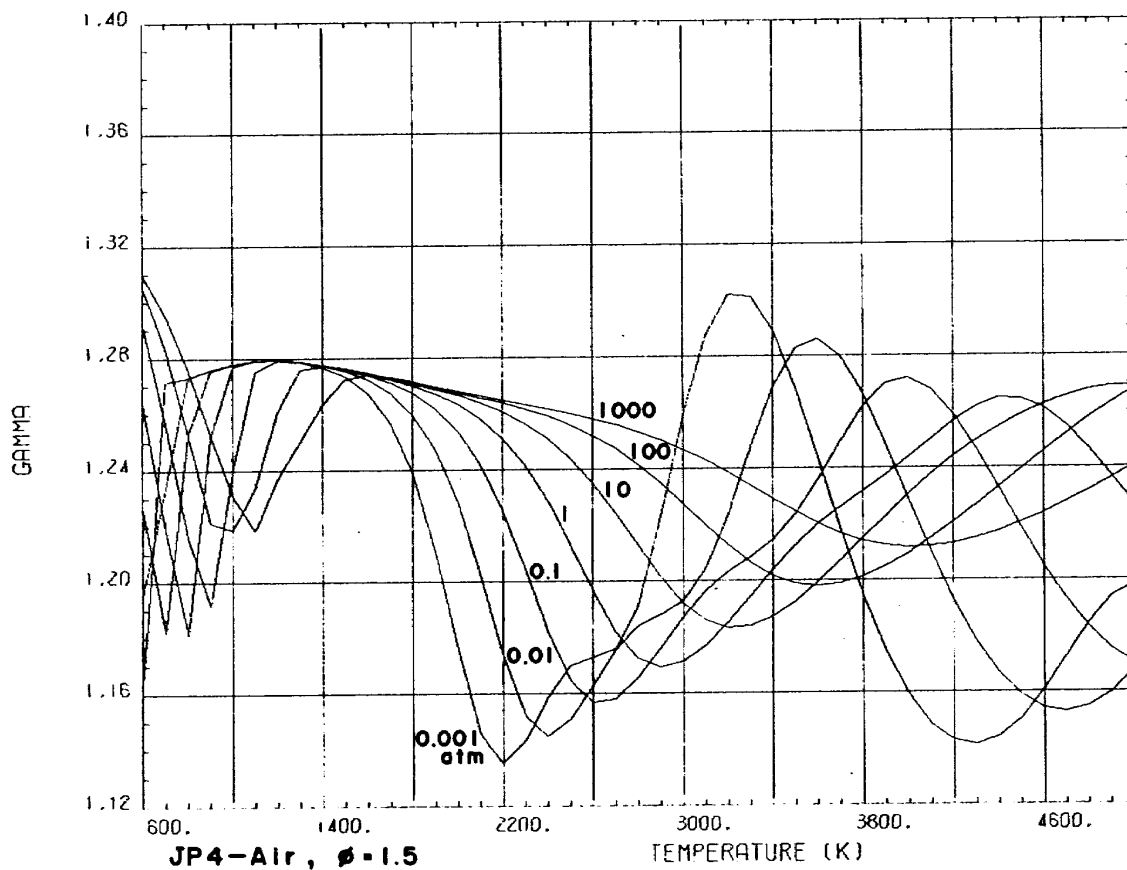


☒ B-2-4-3

JP4-Air

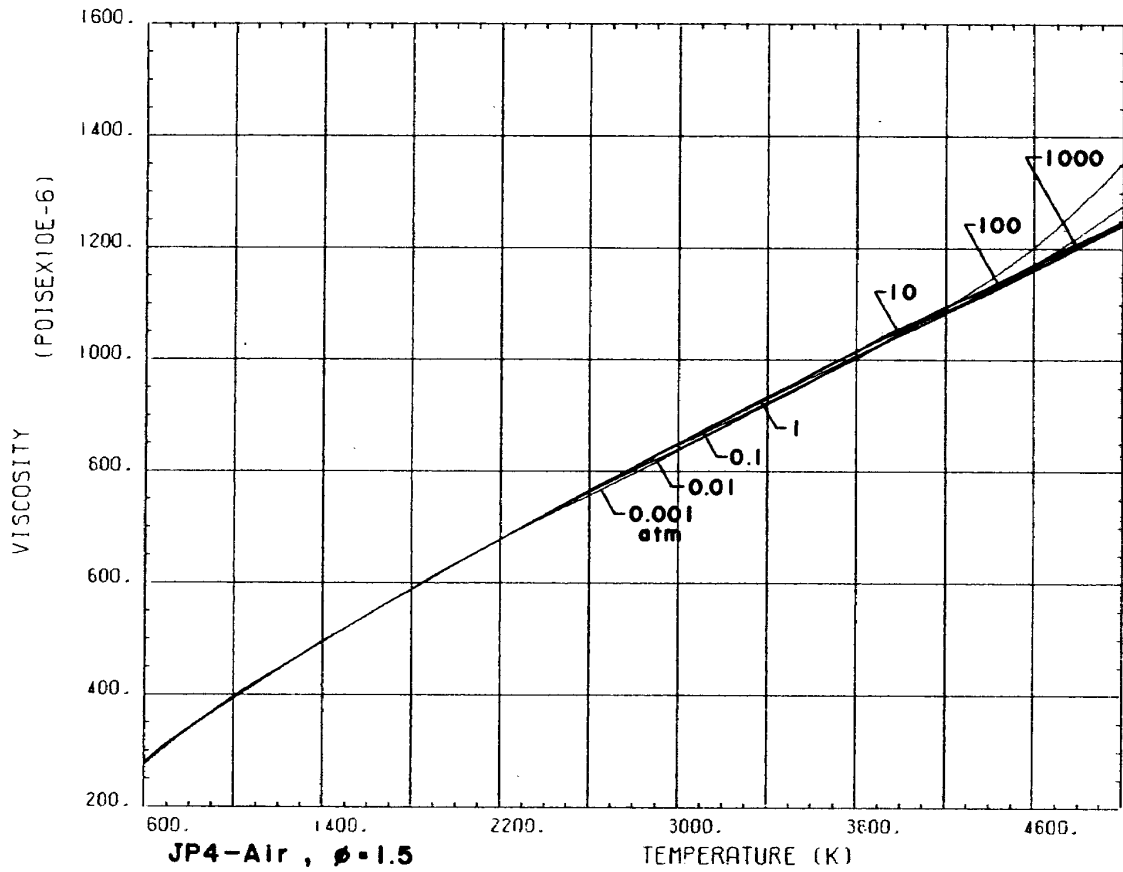


☒ B-2-6-3

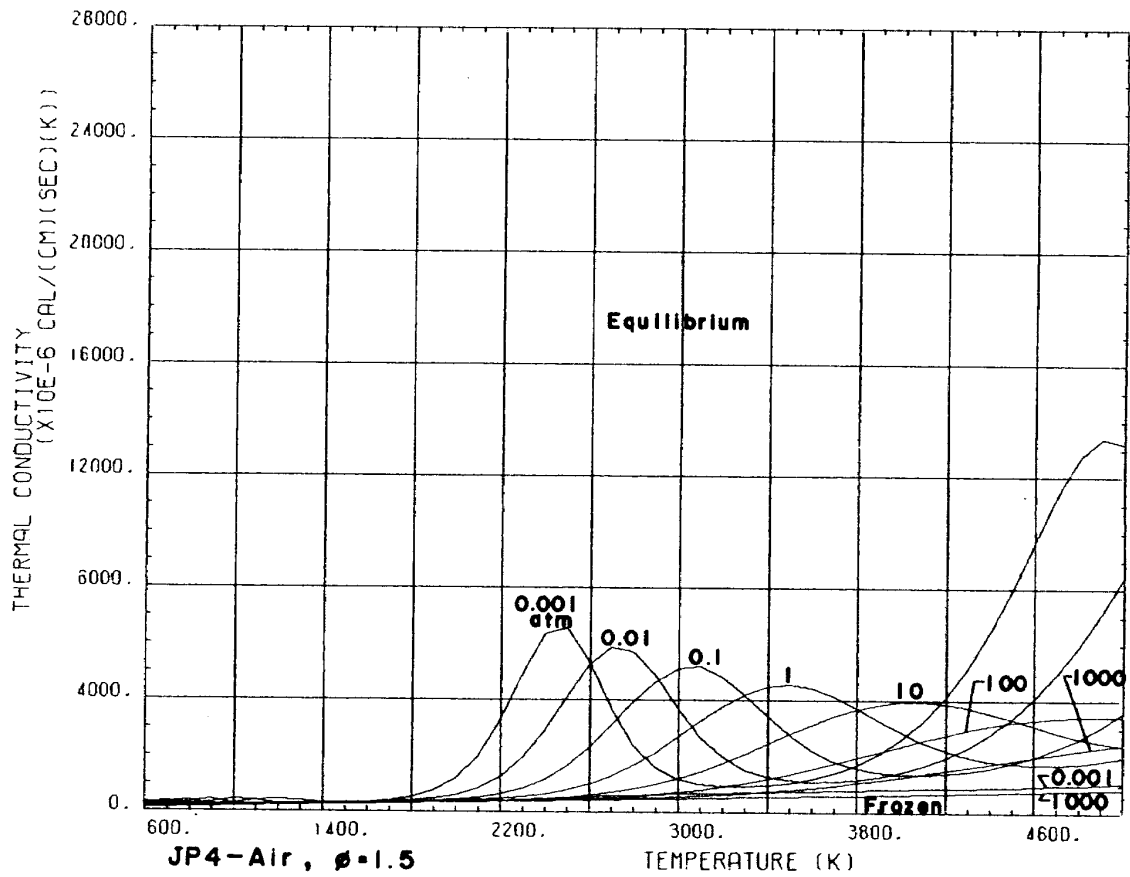


☒ B-2-8-3

JP4-Air

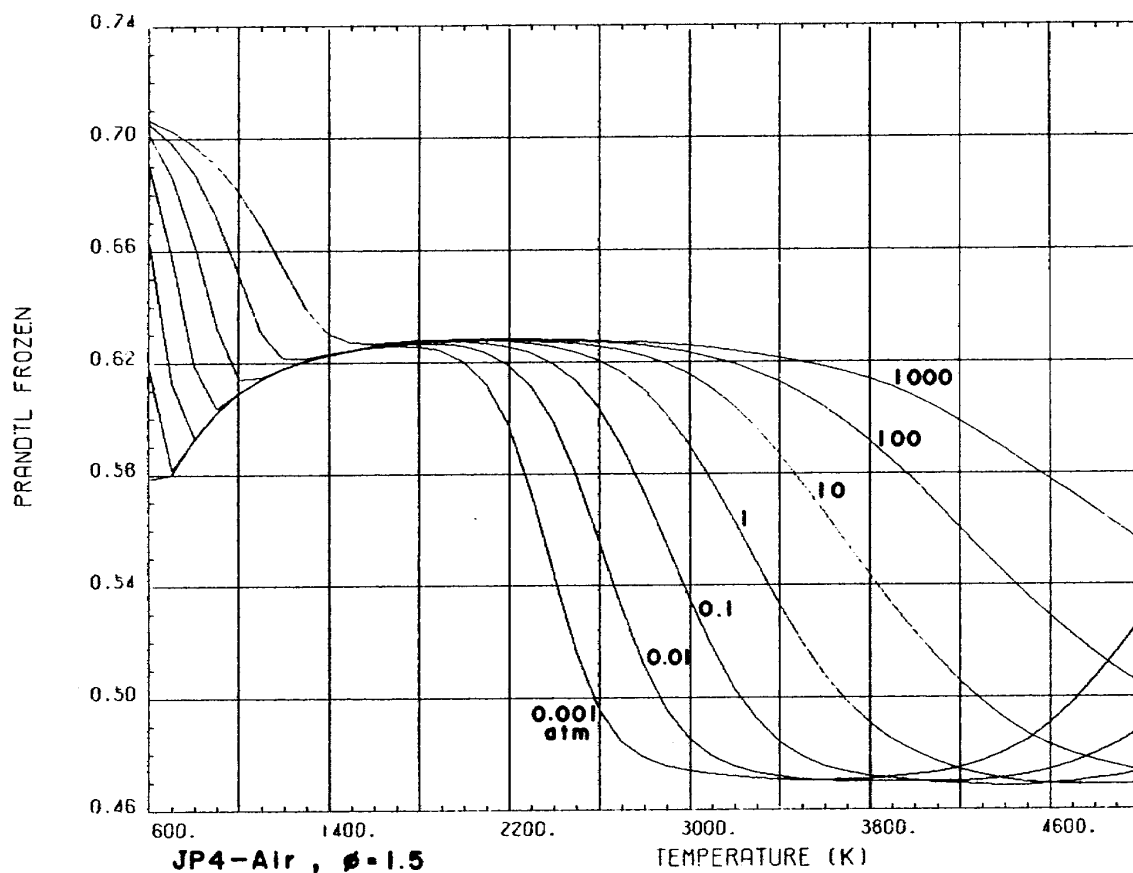


☒ B-2-10-3

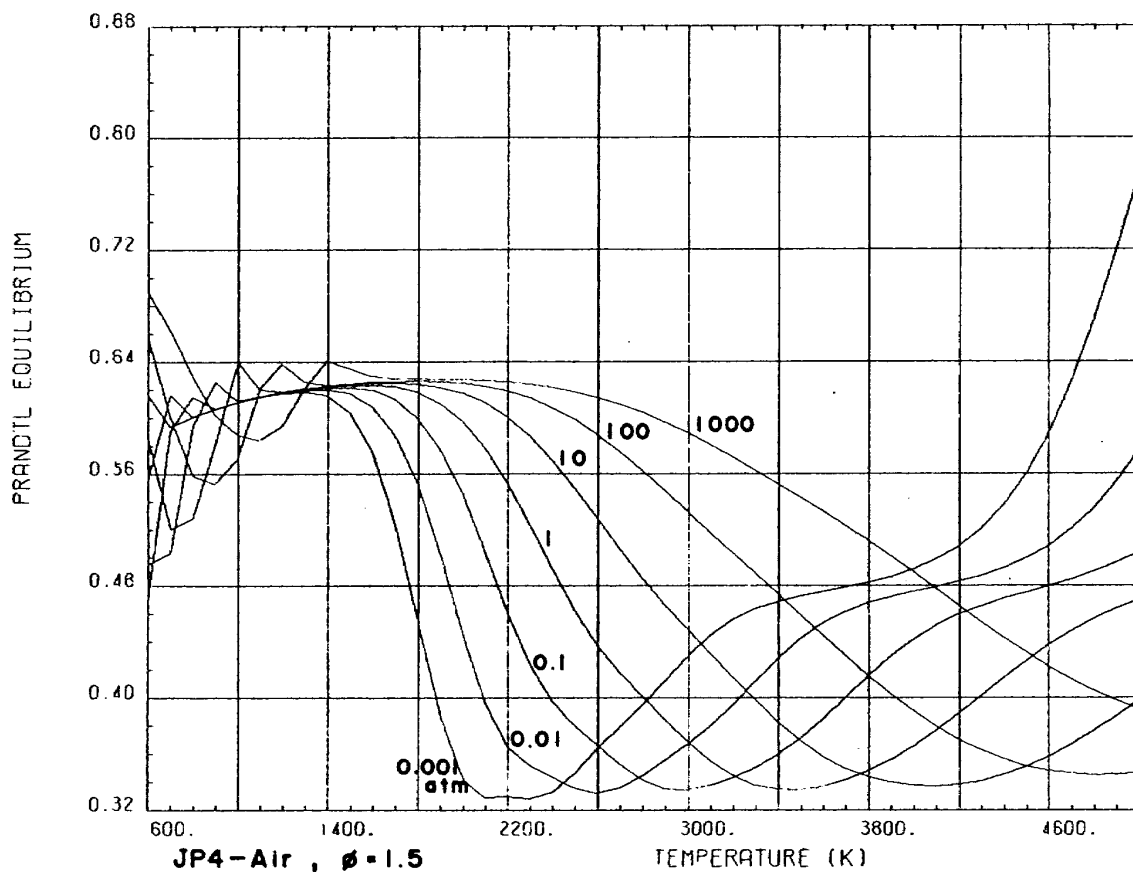


☒ B-2-15-3

JP4-Air

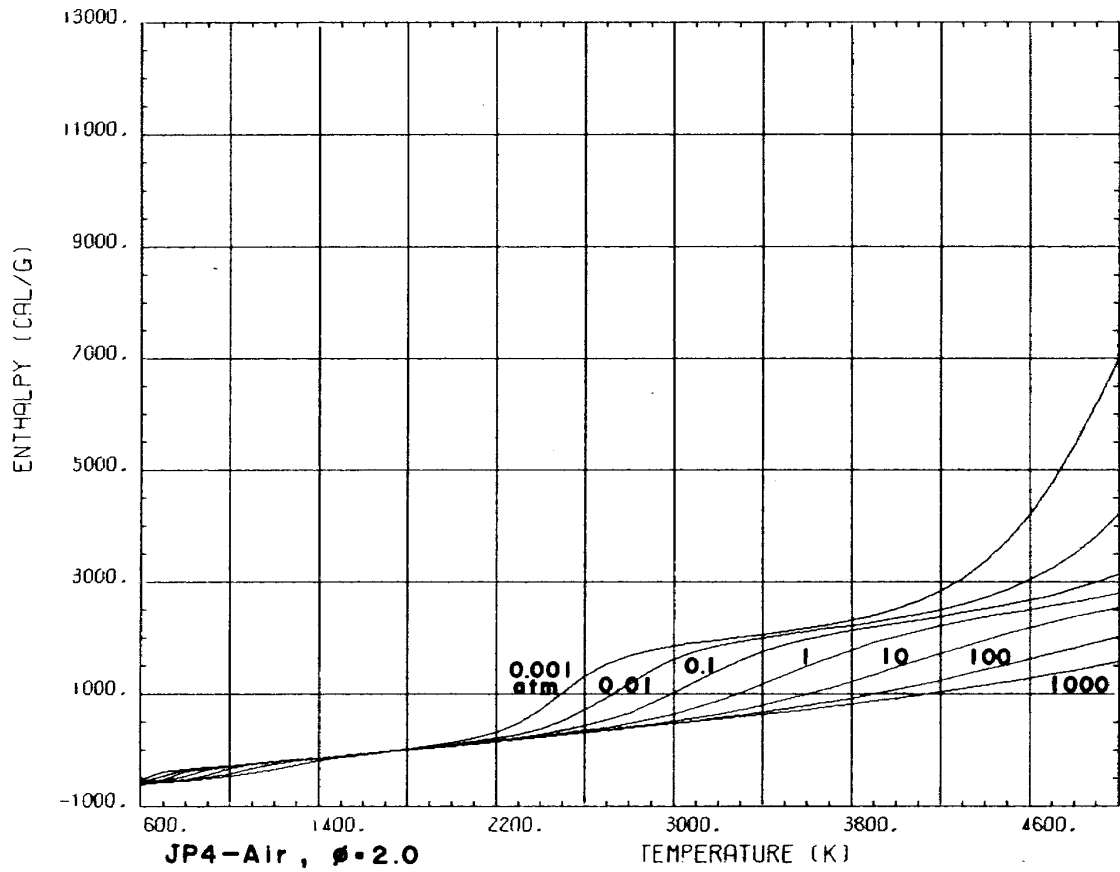


☒ B-2-16-3

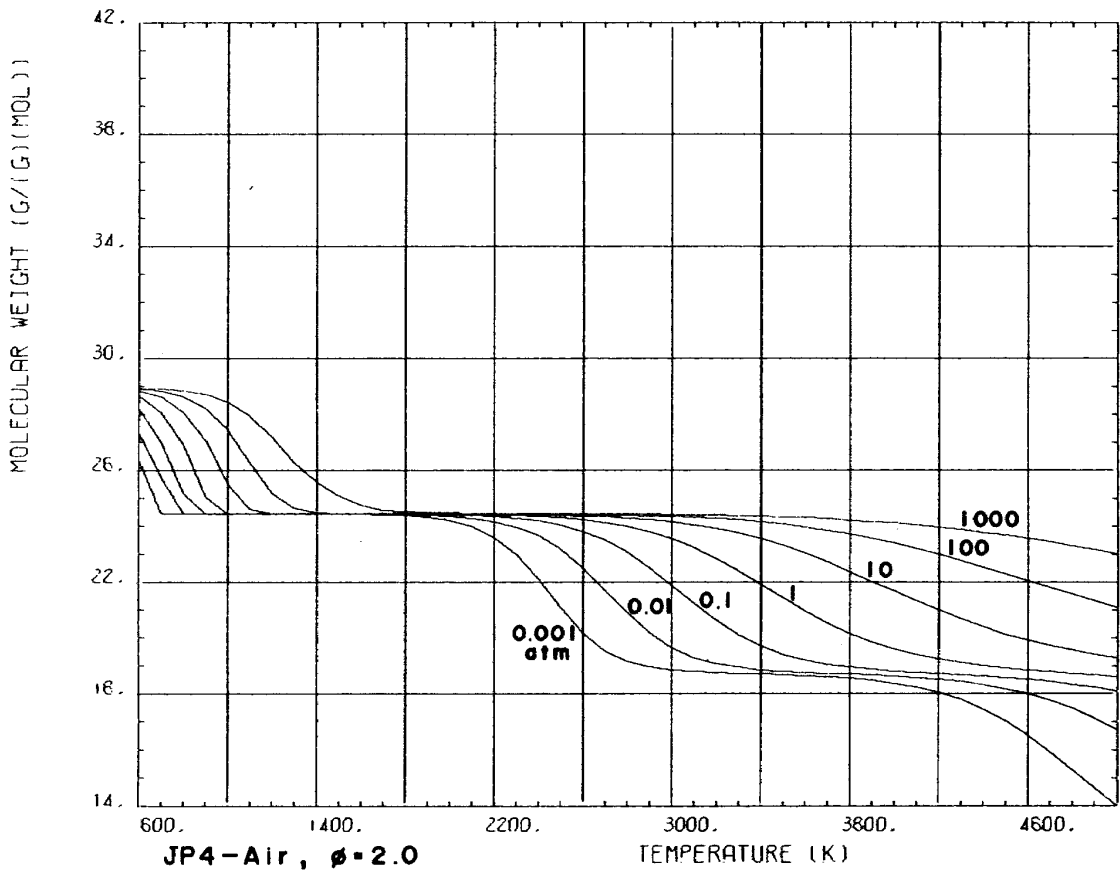


☒ B-2-17-3

JP4-Air

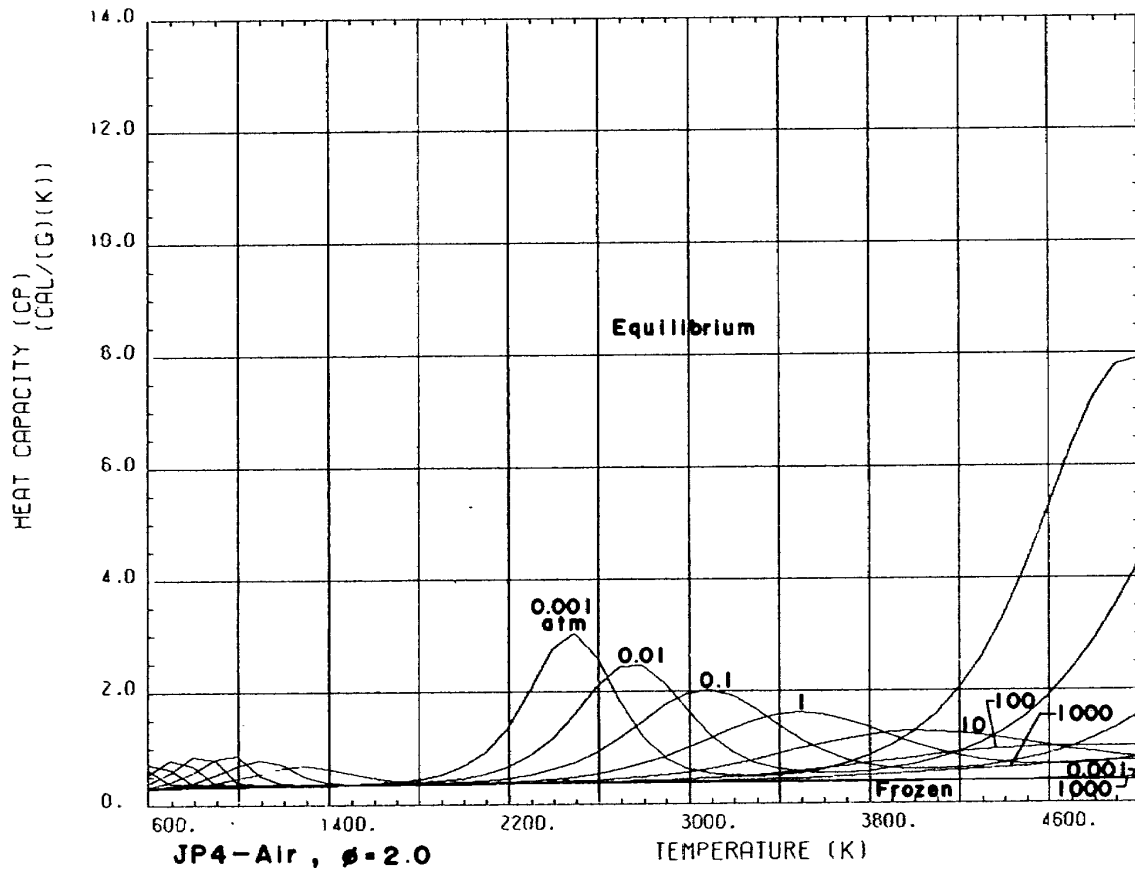


☒ B - 2 - 2 - 4

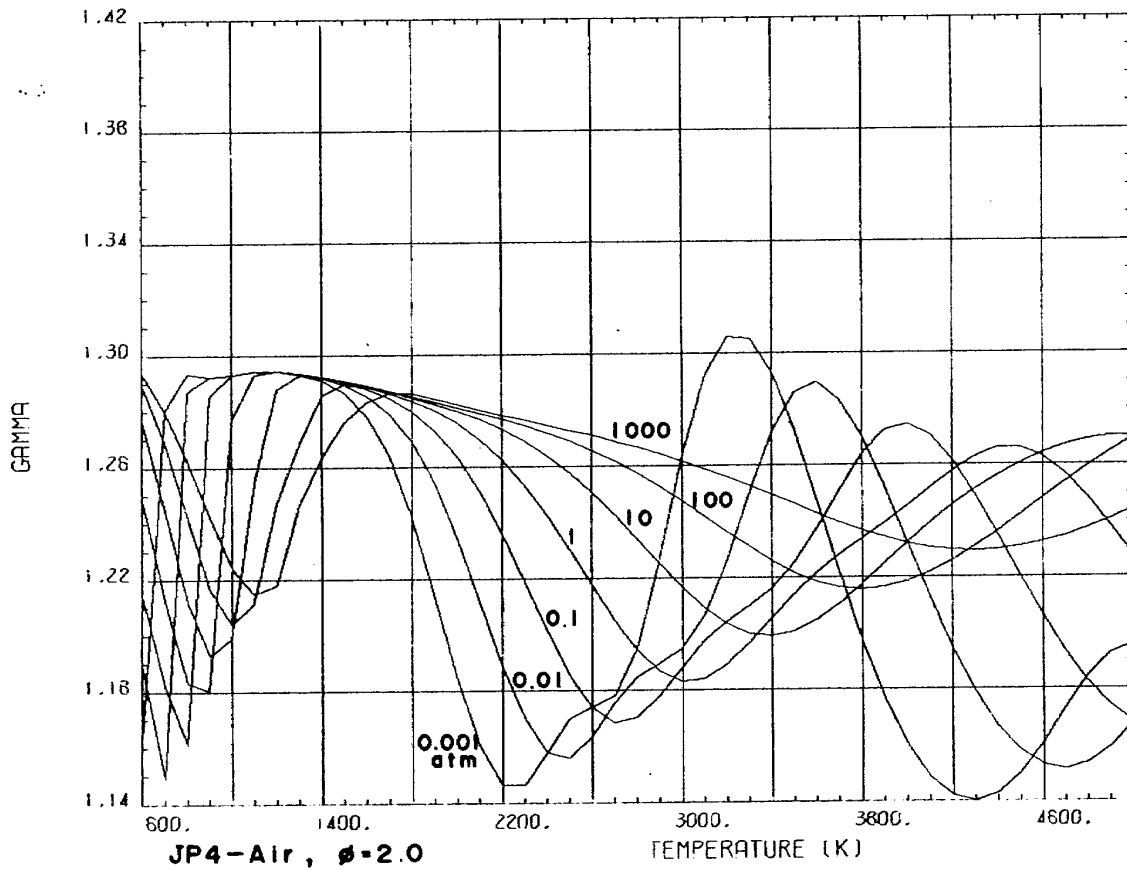


☒ B - 2 - 4 - 4

JP4-Air

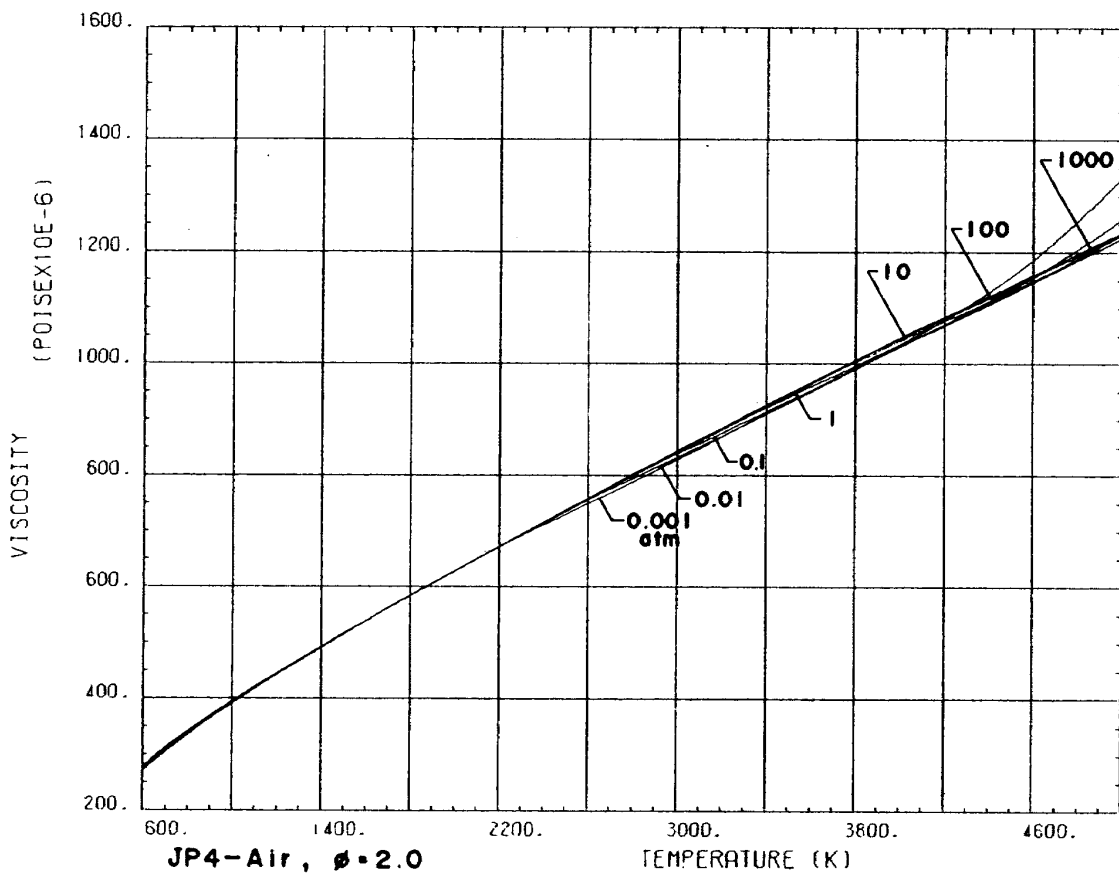


☒ B-2-6-4

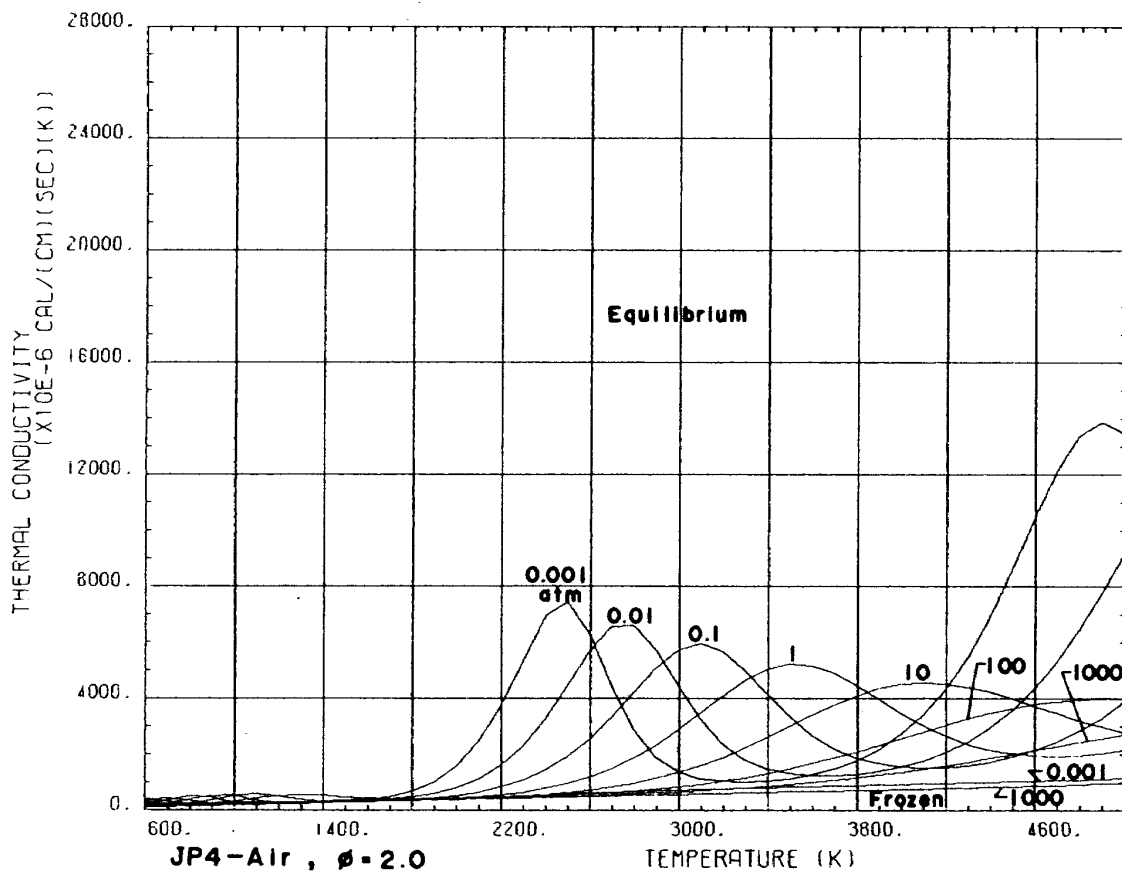


☒ B-2-8-4

JP4 - Air

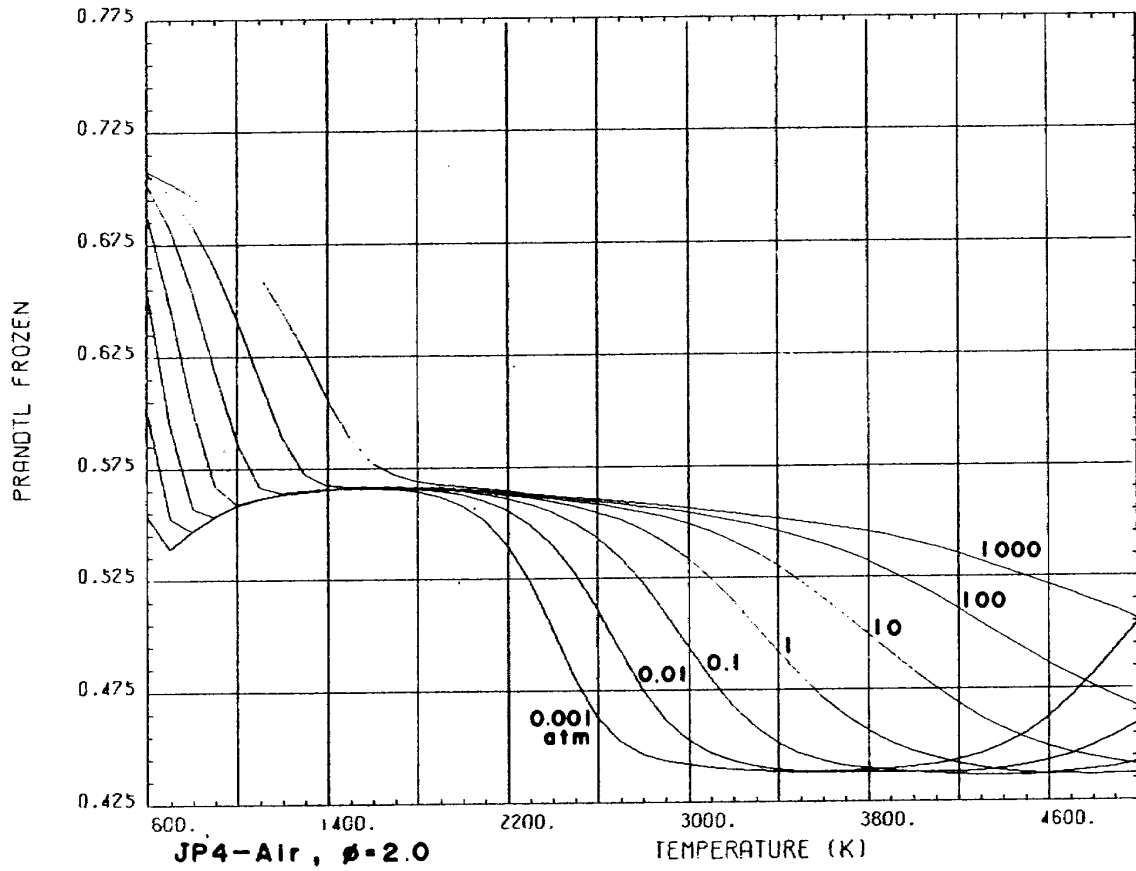


☒ B - 2 - 10 - 4

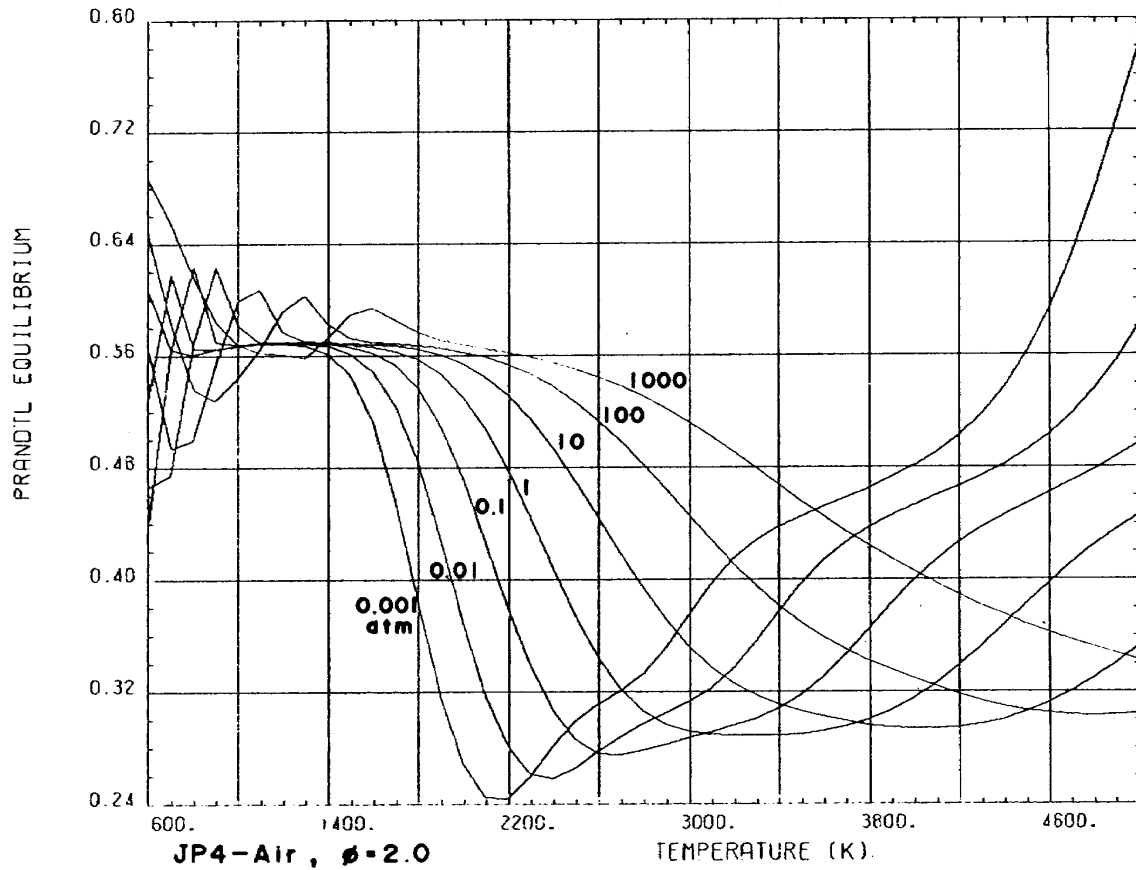


☒ B - 2 - 15 - 4

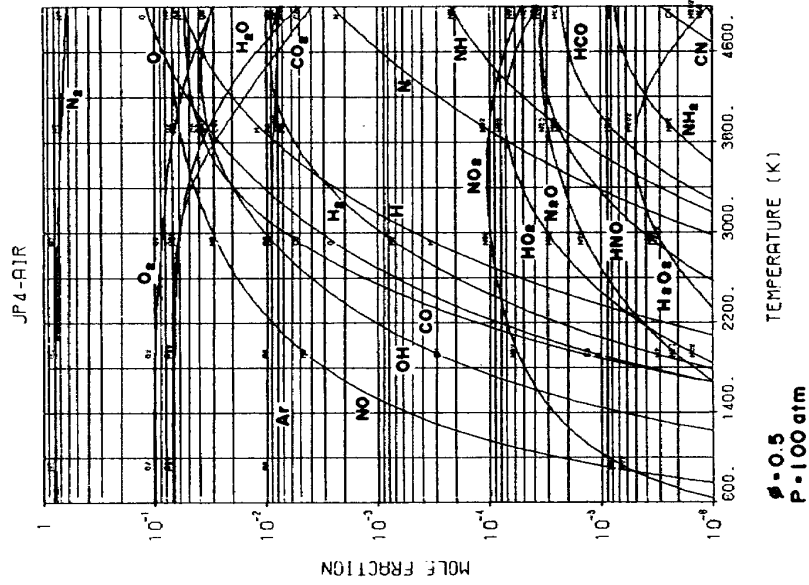
JP4-Air



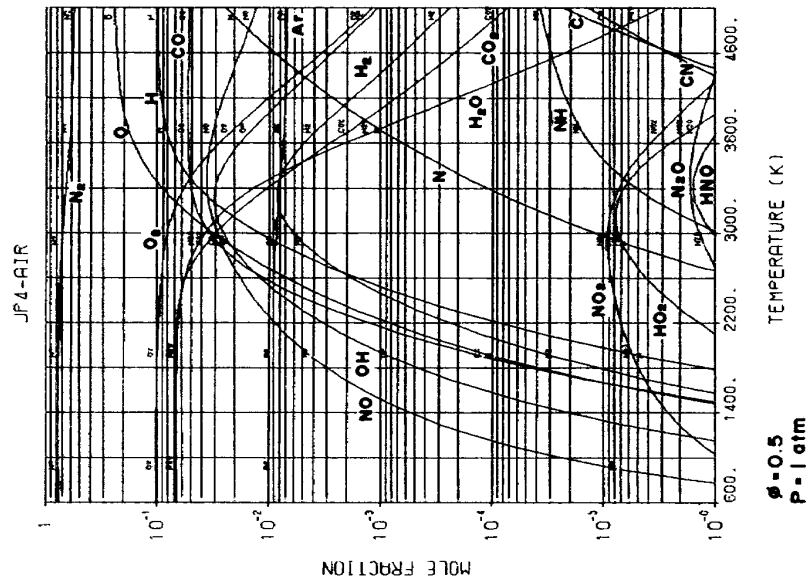
☒ B-2-16-4



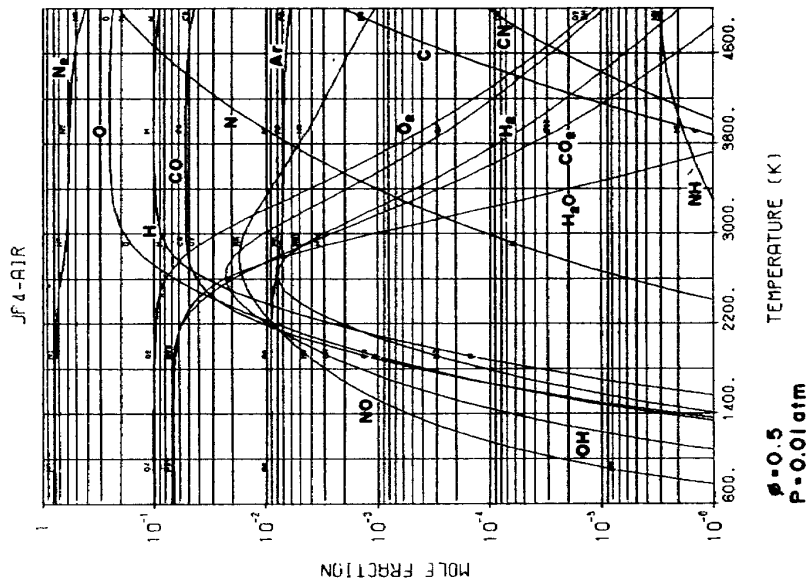
☒ B-2-17-4



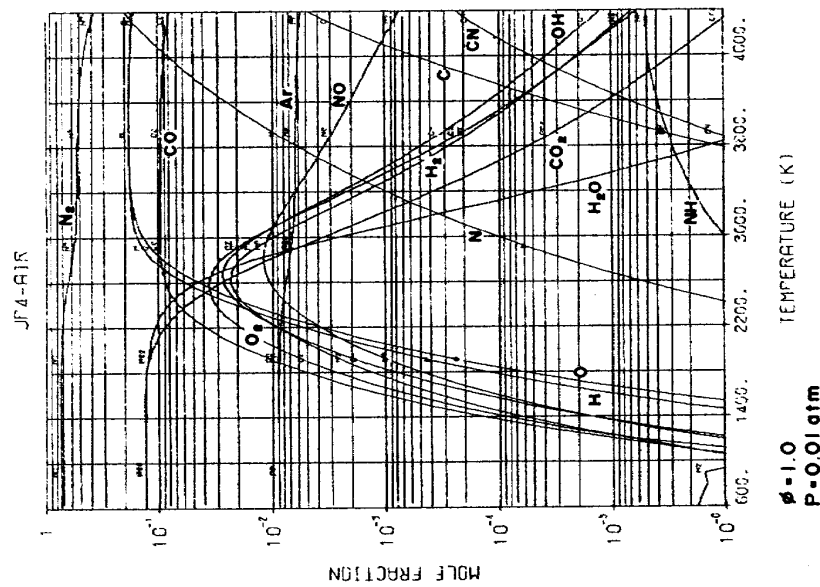
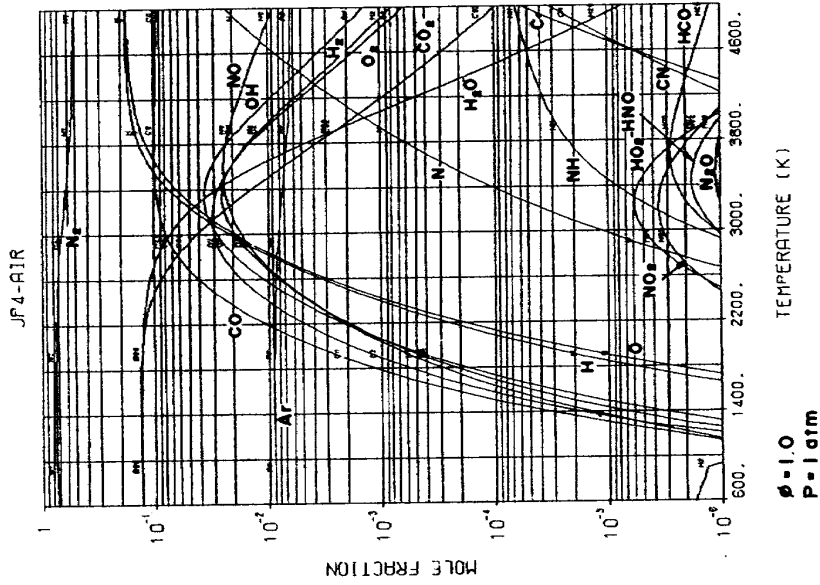
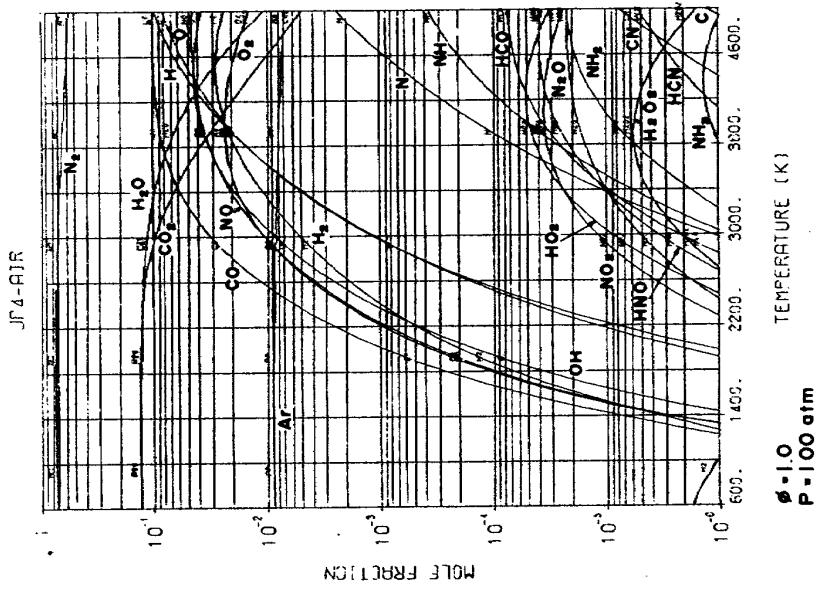
☒ C-2-3



☒ C-2-2



☒ C-2-1



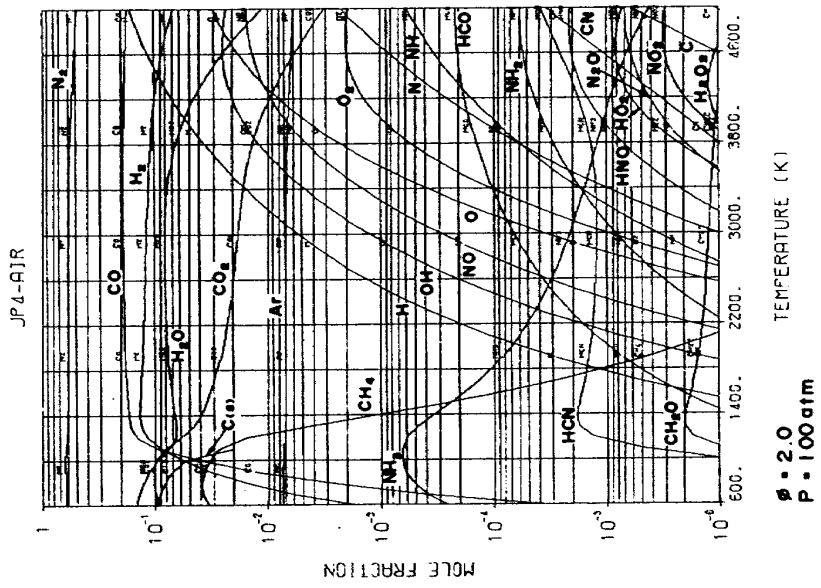


図 - 2 - 12

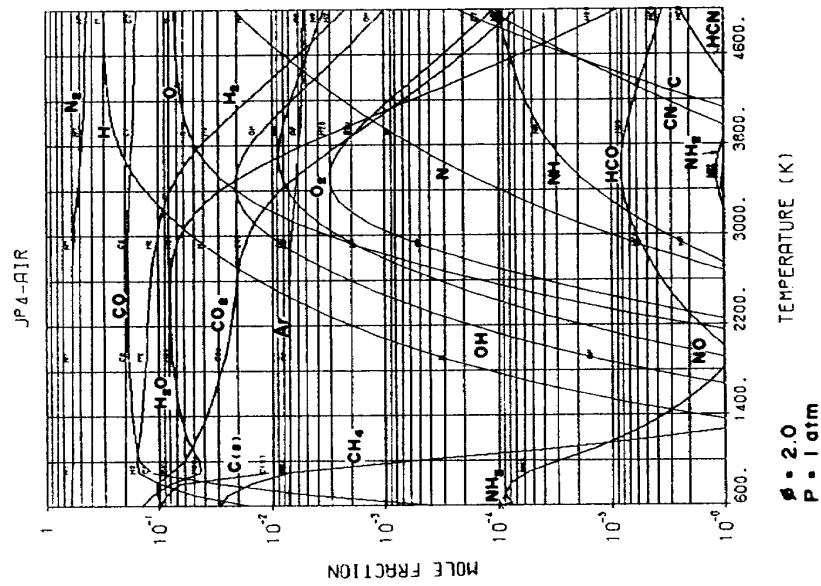


図 - 2 - 11

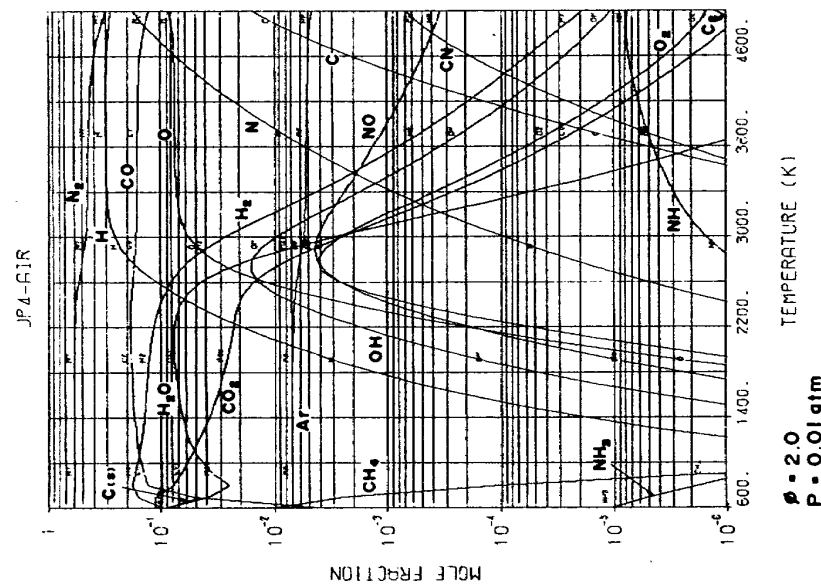


図 - 2 - 10

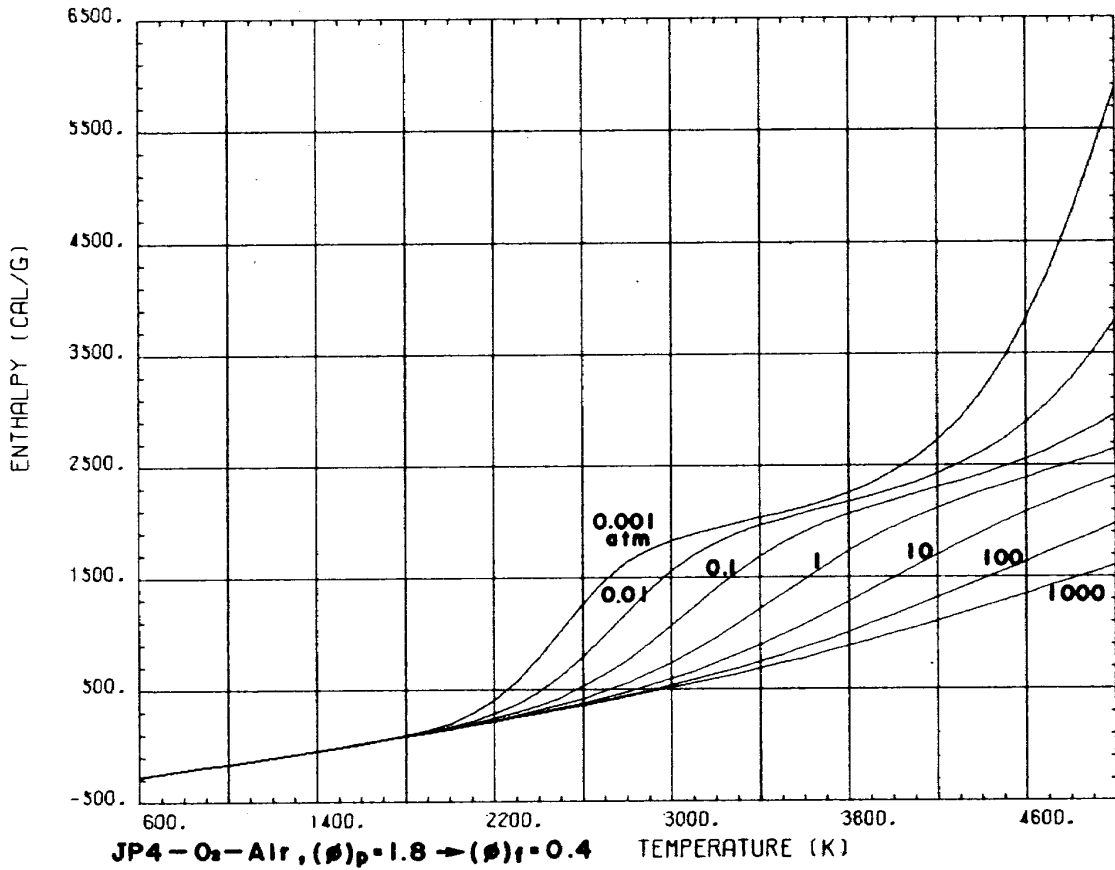
付録3 JP4-O₂-Air系

ページ	図番号	物性値	当量比 (ϕ) _p →(ϕ) _f
92	B-3-2-1	H	1.8→0.4
"	B-3-4-1	\bar{M}	"
93	B-3-6-1	C _{p,eq.}	"
"	B-3-8-1	γ	"
94	B-3-10-1	μ	"
"	B-3-15-1	$\lambda_{eq.}$	"
95	B-3-16-1	Pr, fro.	"
"	B-3-17-1	Pr, eq.	"
96	B-3-2-2	H	1.8→0.8
"	B-3-4-2	\bar{M}	"
97	B-3-6-2	C _{p,eq.}	"
"	B-3-8-2	γ	"
98	B-3-10-2	μ	"
"	B-3-15-2	$\lambda_{eq.}$	"
99	B-3-16-2	Pr, fro.	"
"	B-3-17-2	Pr, eq.	"

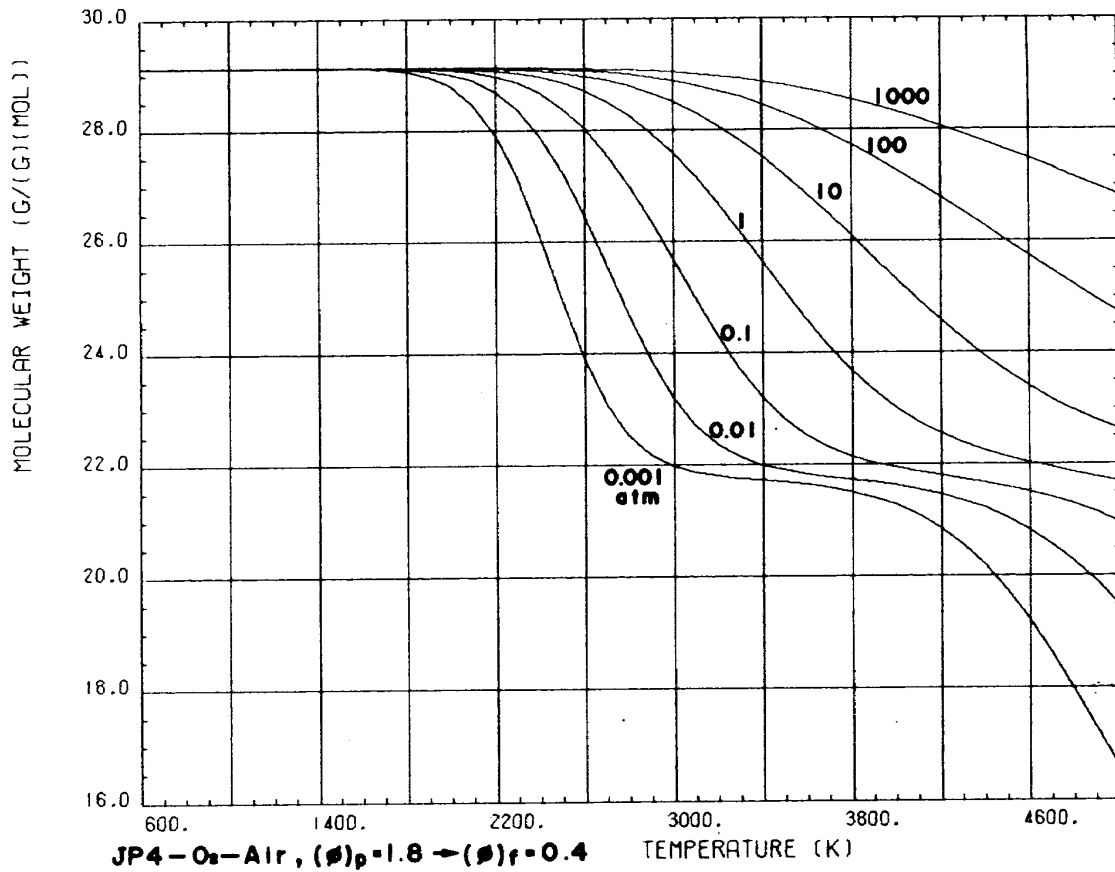
ページ	図番号	物性値	当量比 (ϕ) _p →(ϕ) _f
100	B-3-2-3	H	1.8→1.0
"	B-3-4-3	\bar{M}	"
101	B-3-6-3	C _{p,eq.}	"
"	B-3-8-3	γ	"
102	B-3-10-3	μ	"
"	B-3-15-3	$\lambda_{eq.}$	"
103	B-3-16-3	Pr, fro.	"
"	B-3-17-3	Pr, eq.	"
104	B-3-2-4	H	1.8→1.4
"	B-3-4-4	\bar{M}	"
105	B-3-6-4	C _{p,eq.}	"
"	B-3-8-4	γ	"
106	B-3-10-4	μ	"
"	B-3-15-4	$\lambda_{eq.}$	"
107	B-3-16-4	Pr, fro.	"
"	B-3-17-4	Pr, eq.	"

ページ	図番号	当量比 (ϕ) _p →(ϕ) _f	圧力 (atm)
108	C-3-1	1.8→0.4	0.01
"	C-3-2	"	1
"	C-3-3	"	100
109	C-3-4	1.8→0.8	0.01
"	C-3-5	"	1
"	C-3-6	"	100
110	C-3-7	1.8→1.0	0.01
"	C-3-8	"	1
"	C-3-9	"	100
111	C-3-10	1.8→1.4	0.01
"	C-3-11	"	1
"	C-3-12	"	100

JP4-O₂-Air



☒ B-3-2-1



☒ B-3-4-1

JP4-O₂-Air

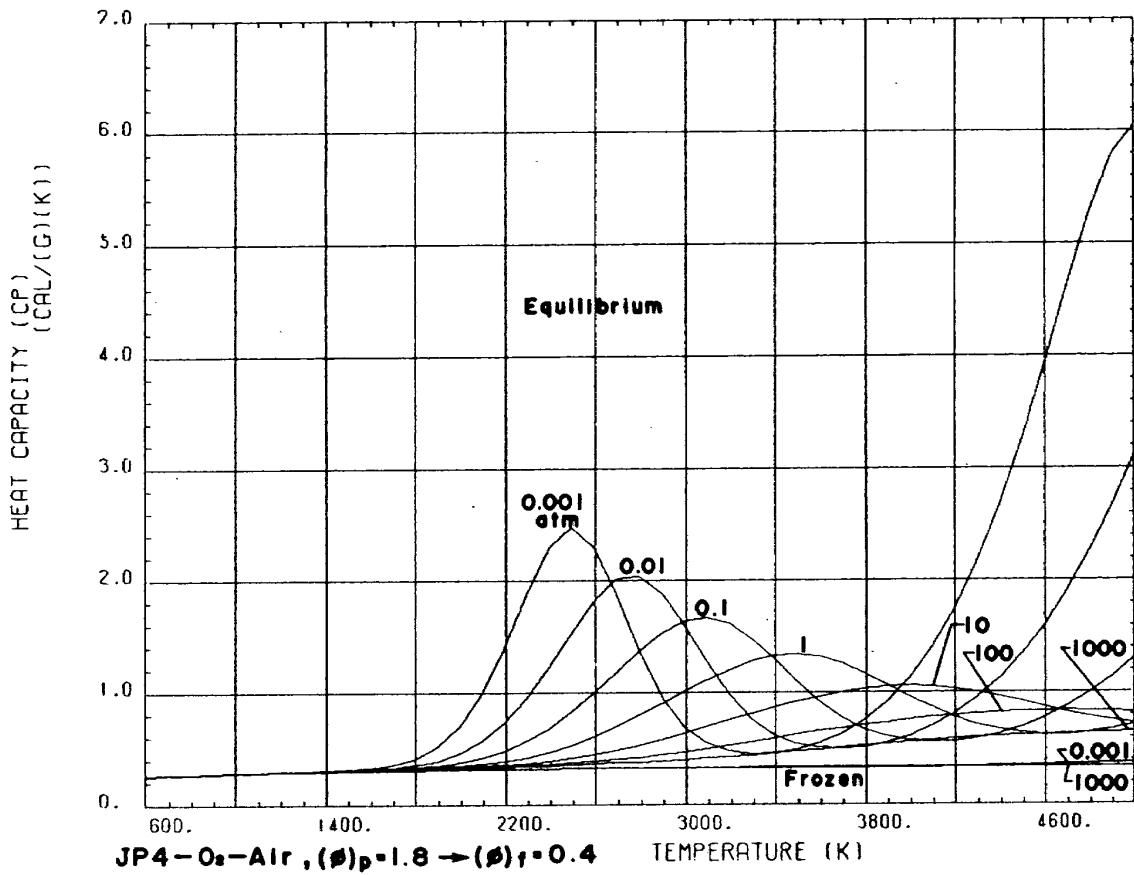


図 B-3-6-1

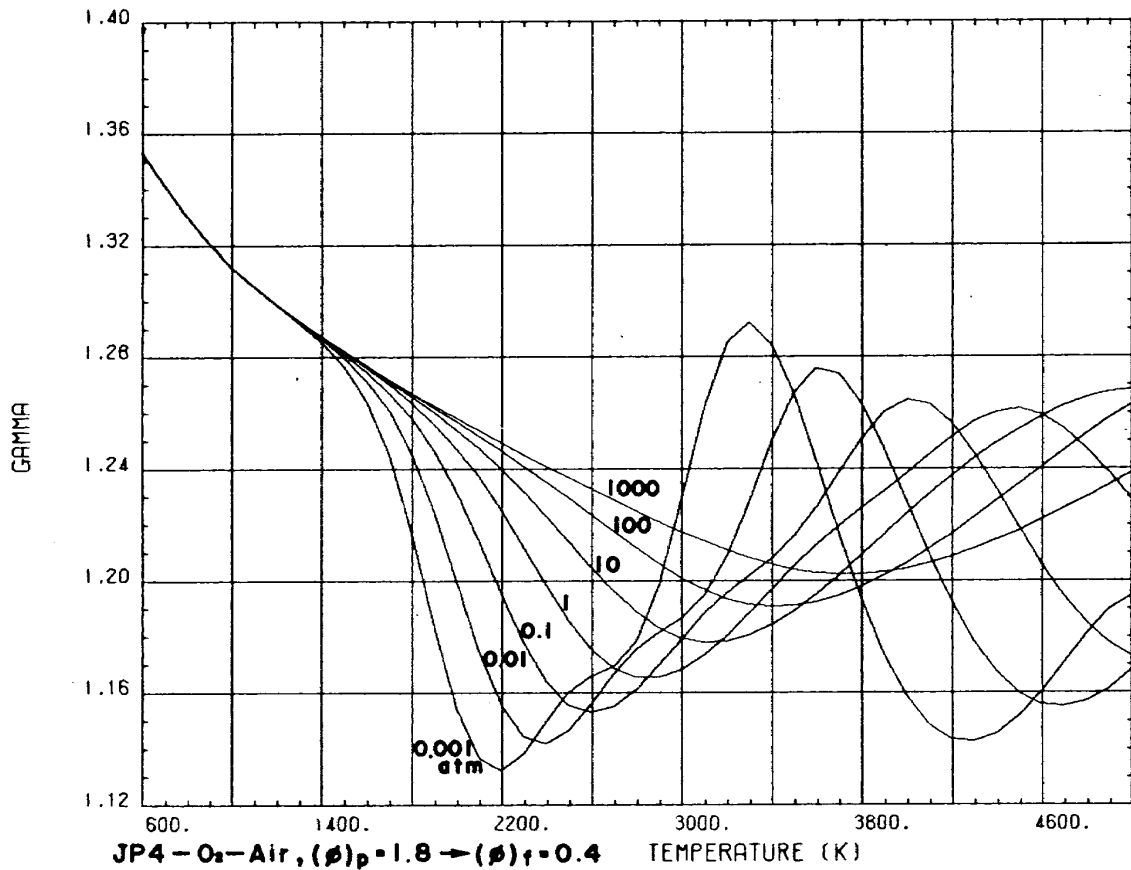
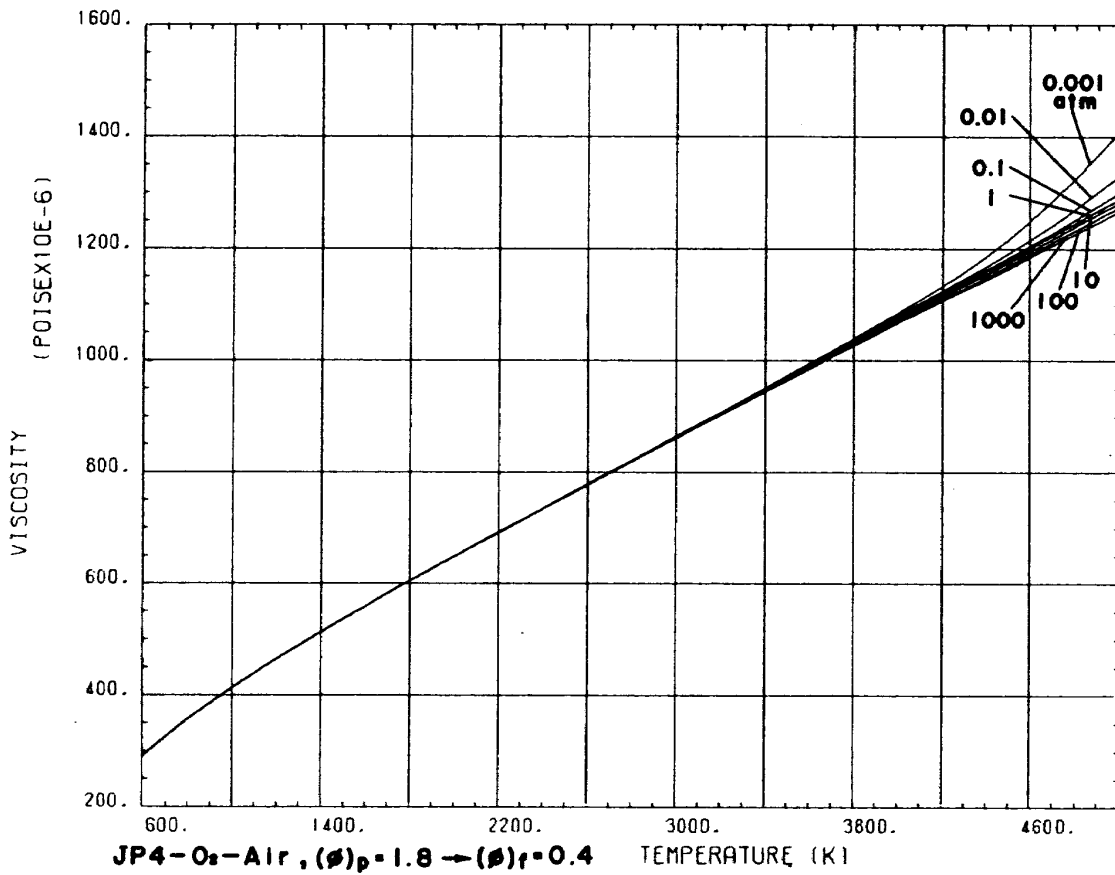
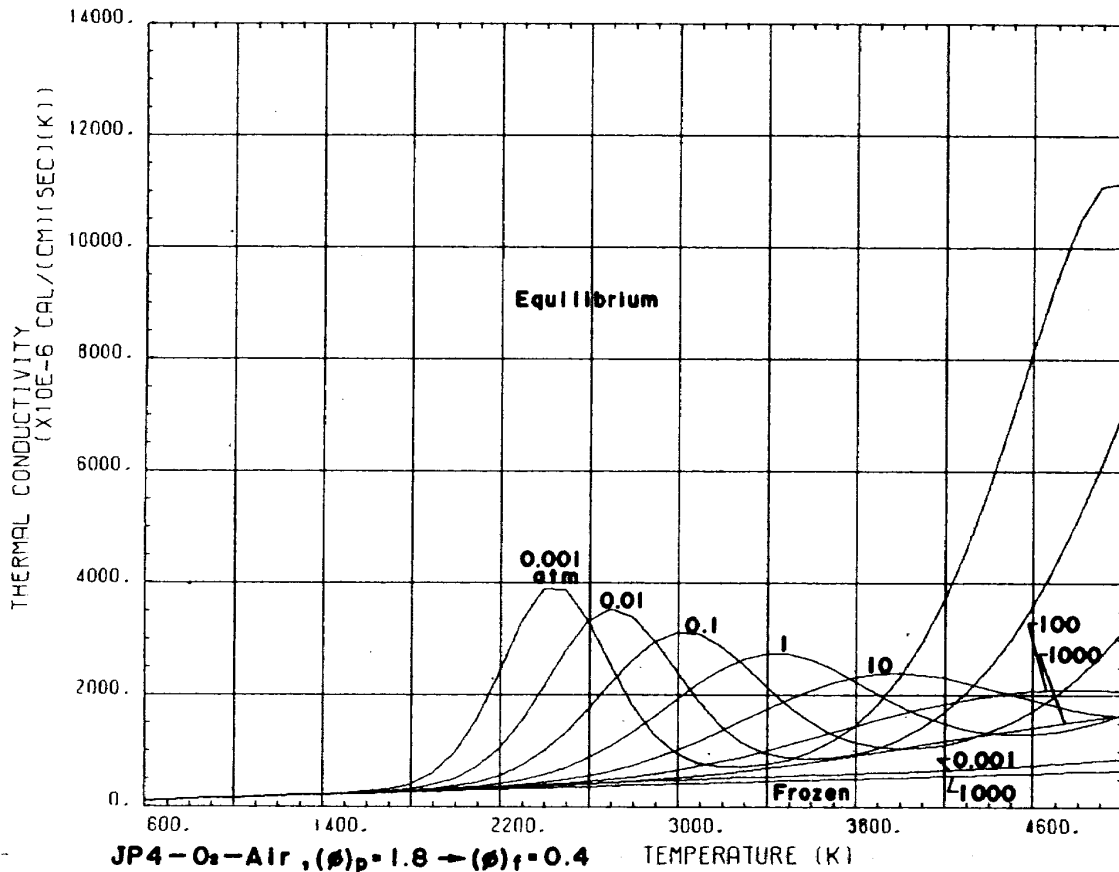


図 B-3-8-1

JP4-O₂-Air

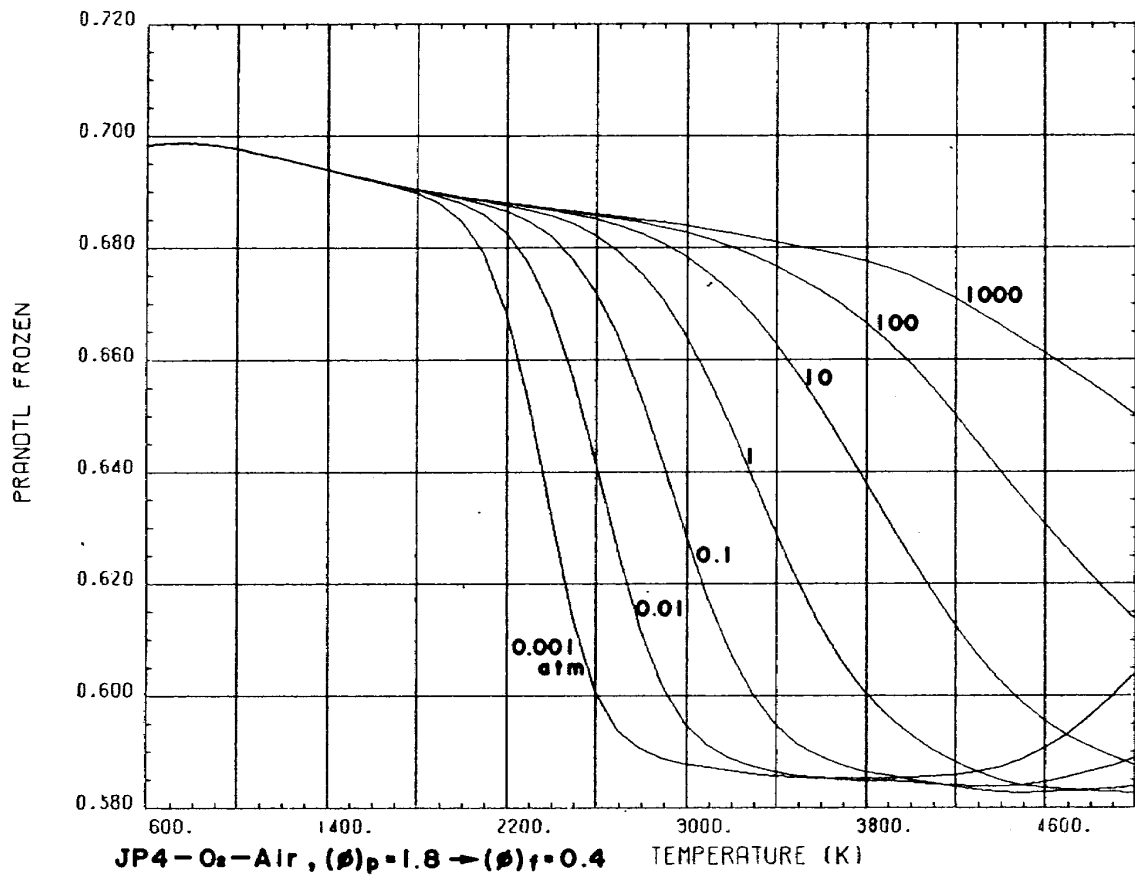


☒ B-3-10-1



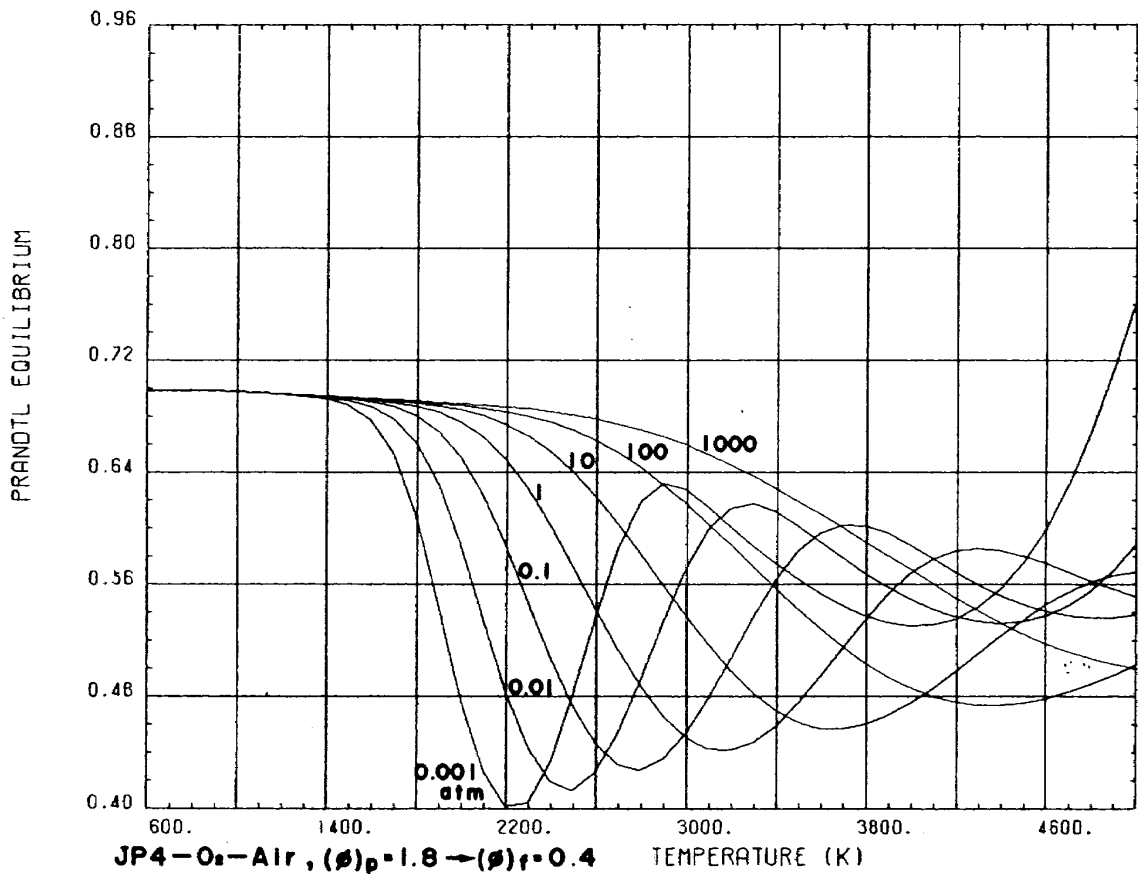
☒ B-3-15-1

JP4-O₂-Air



JP4-O₂-Air, (β)_p=1.8 → (β)_f=0.4

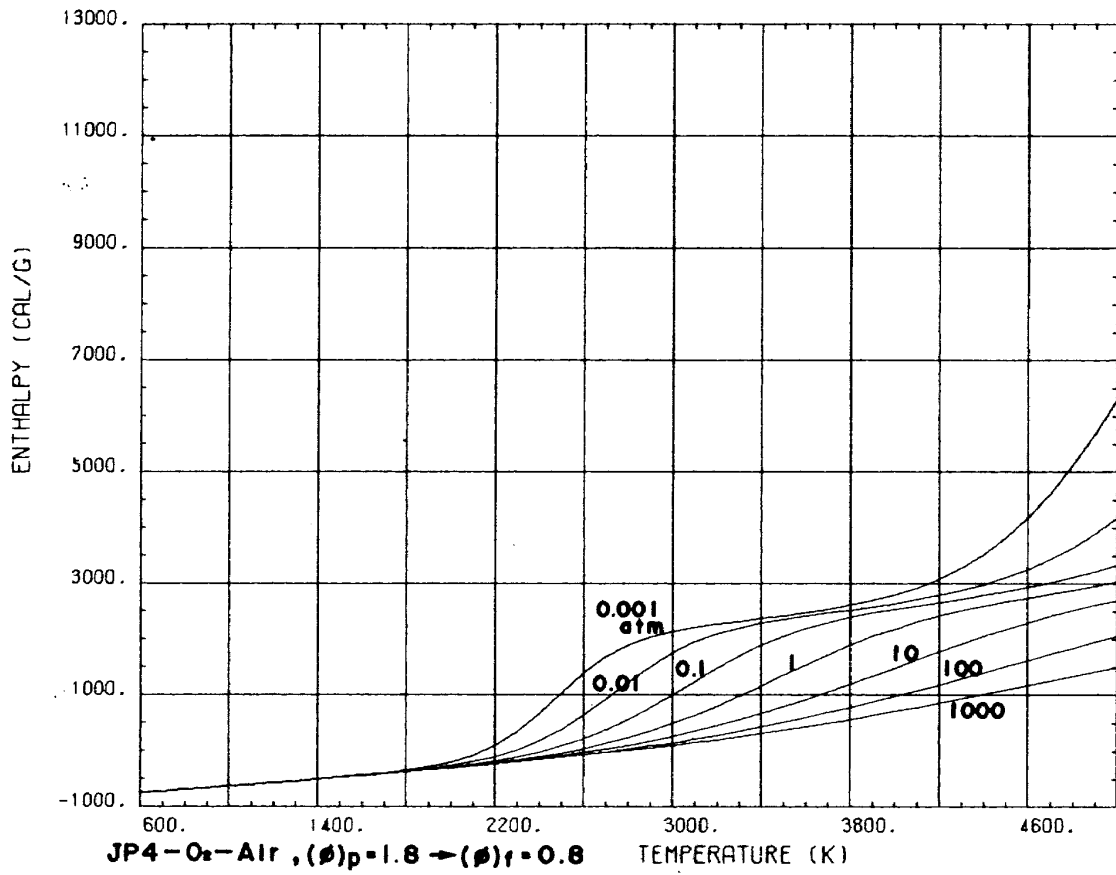
☒ B-3-16-1



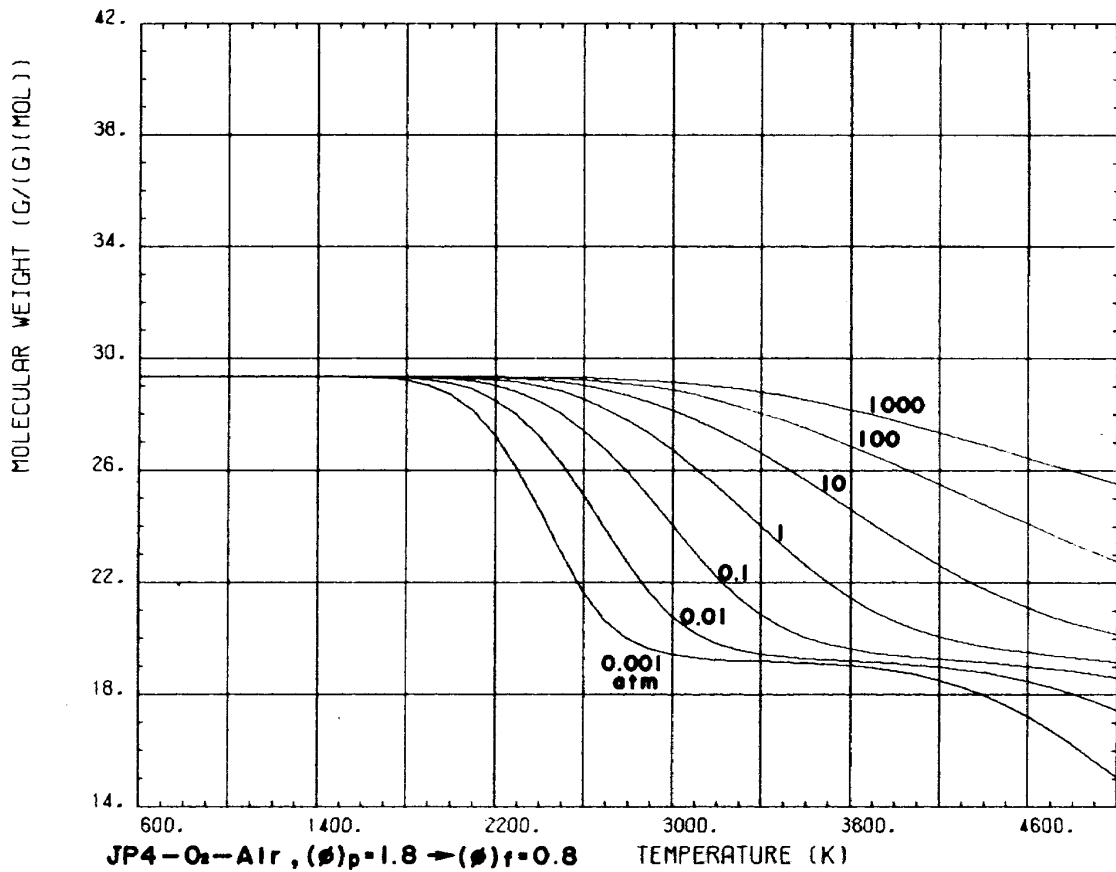
JP4-O₂-Air, (β)_p=1.8 → (β)_f=0.4

☒ B-3-17-1

JP4-O₂-Air

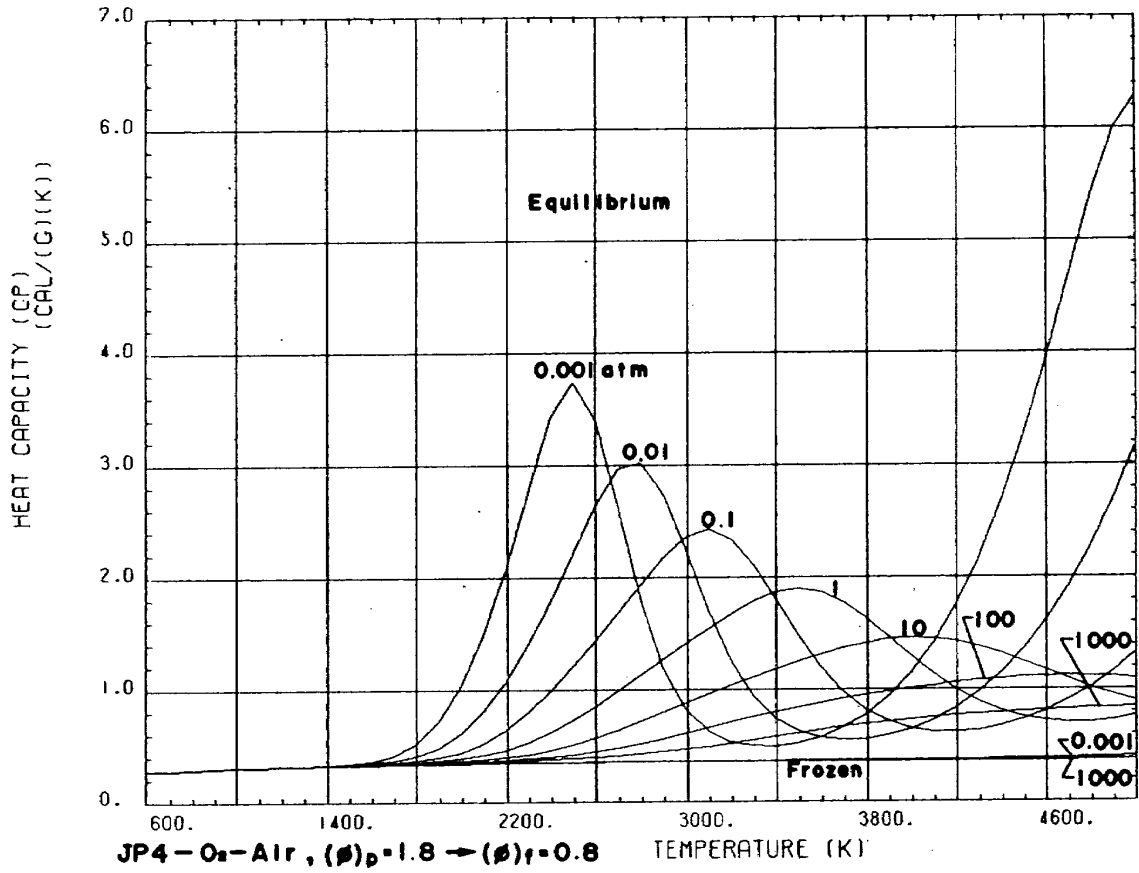


☒ B-3-2-2

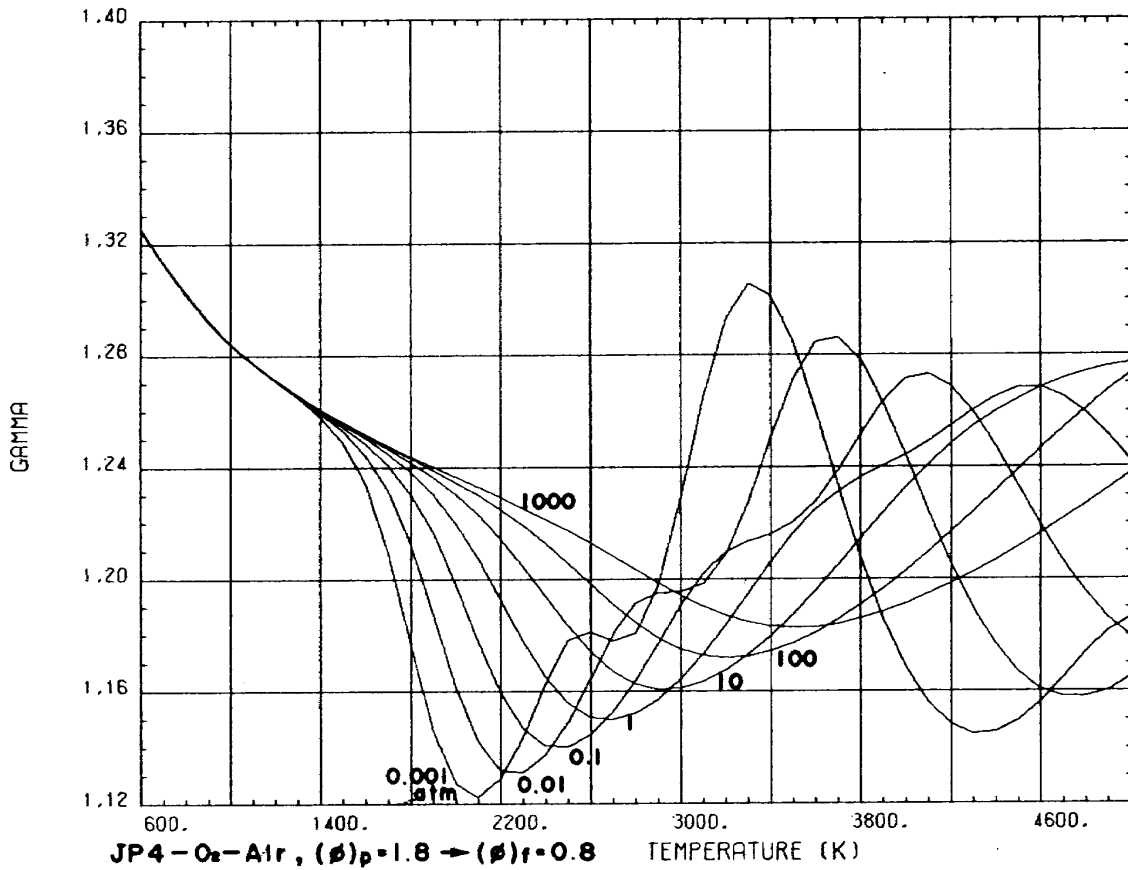


☒ B-3-4-2

JP4-O₂-Air

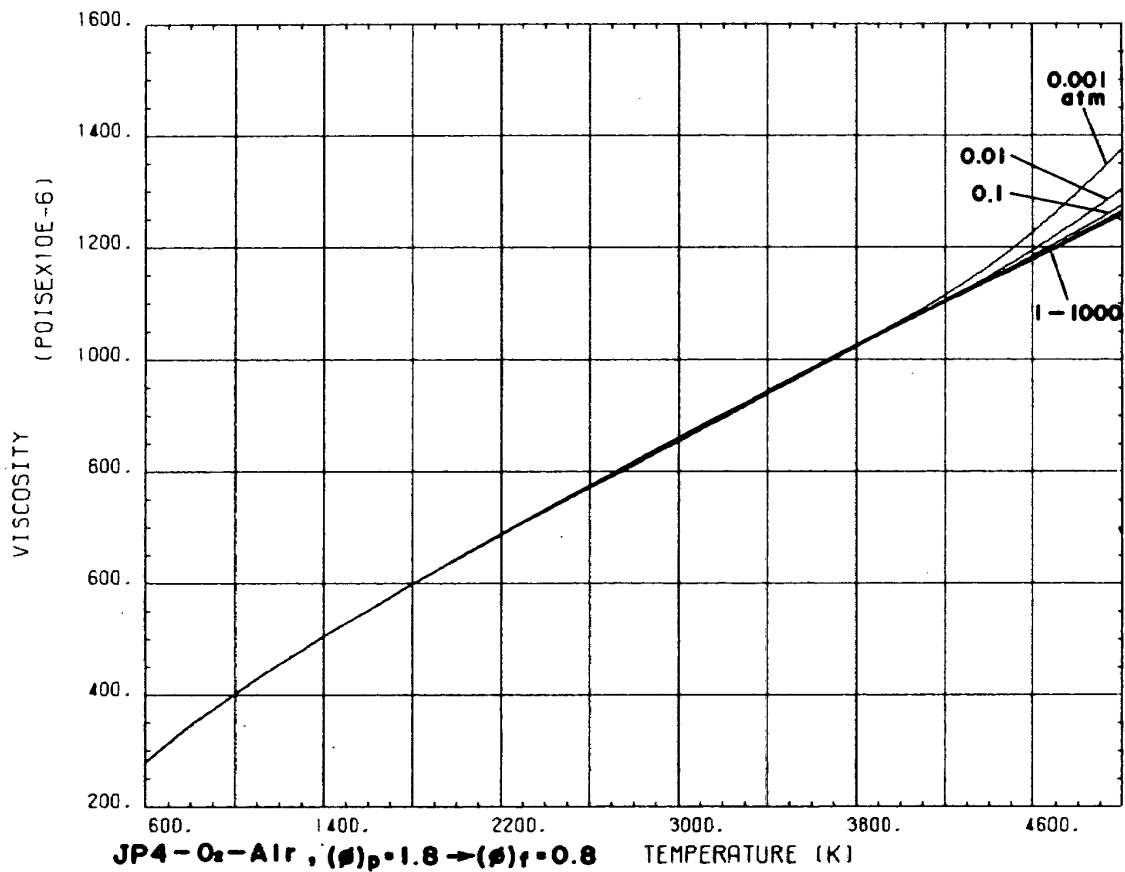


☒ B-3-6-2

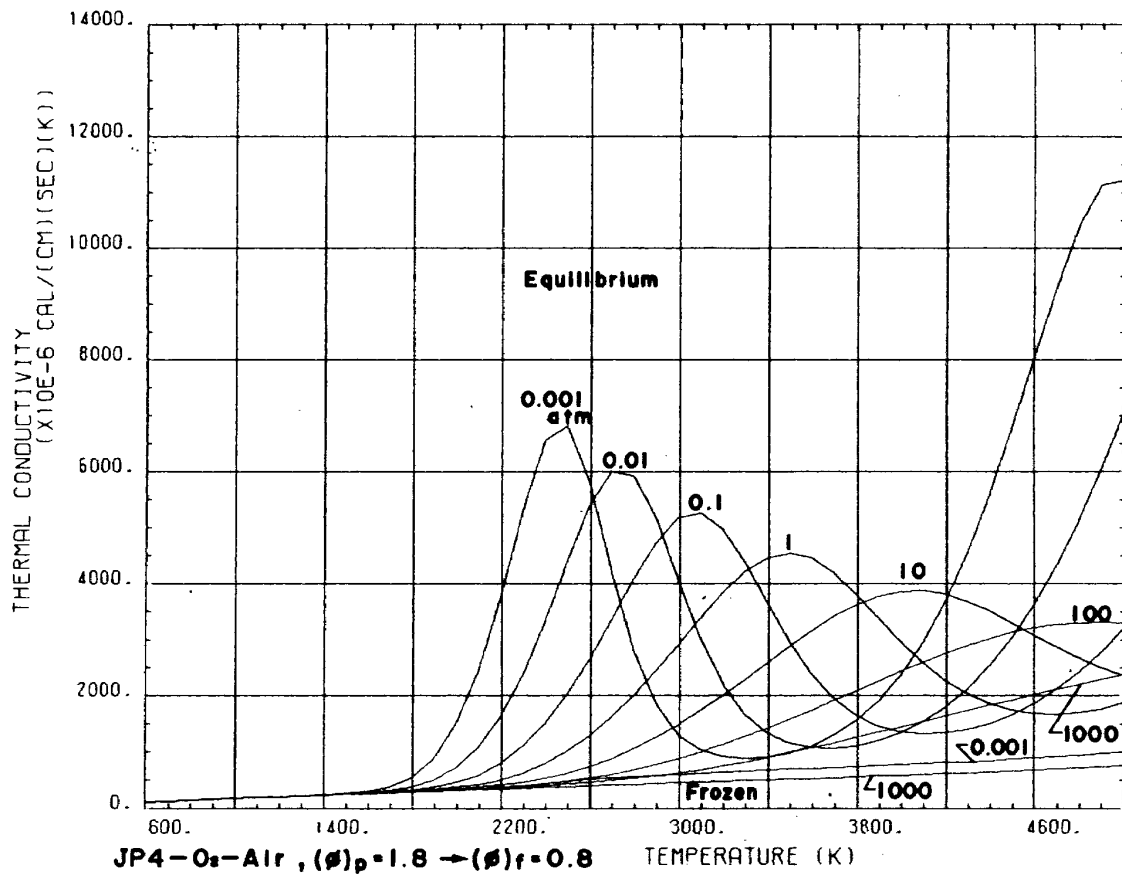


☒ B-3-8-2

JP4-O₂-Air

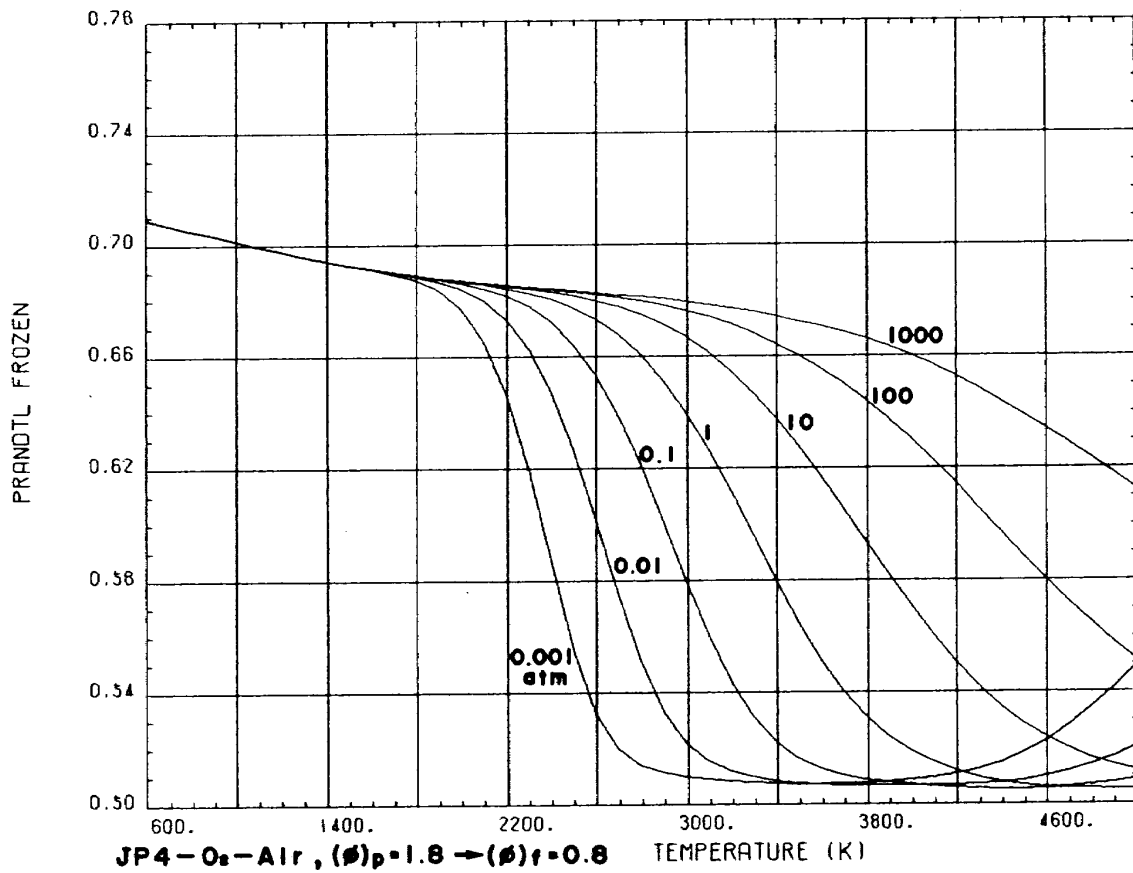


☒ B-3-10-2



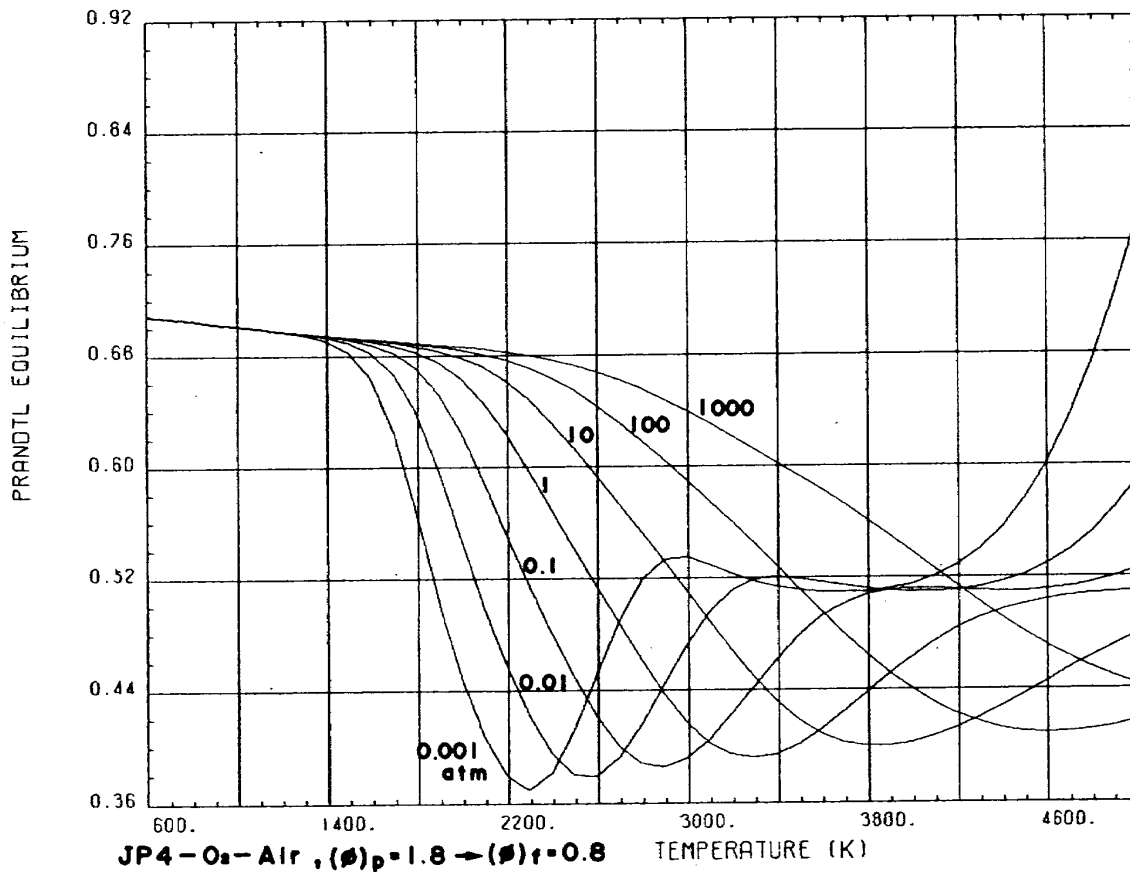
☒ B-3-15-2

JP4-O₂-Air



JP4-O₂-Air, (ϕ)_p=1.8 → (ϕ)_f=0.8

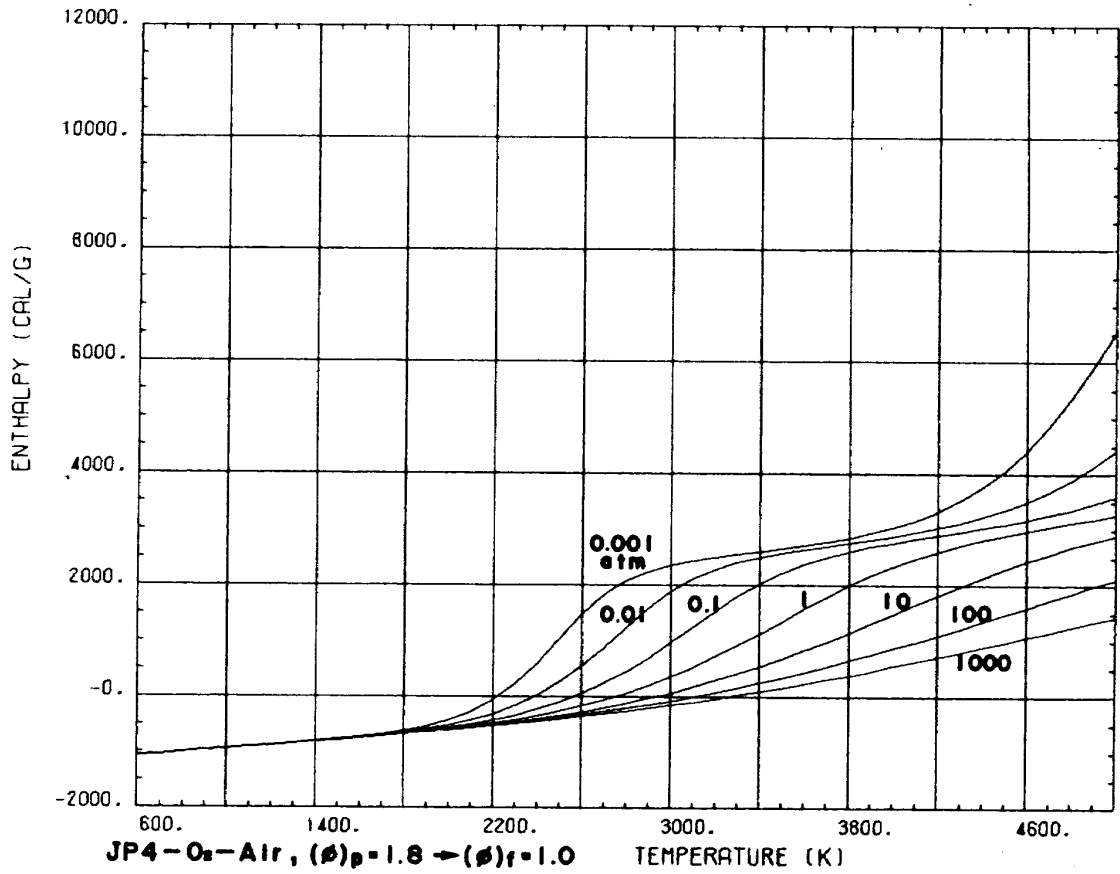
☒ B-3-16-2



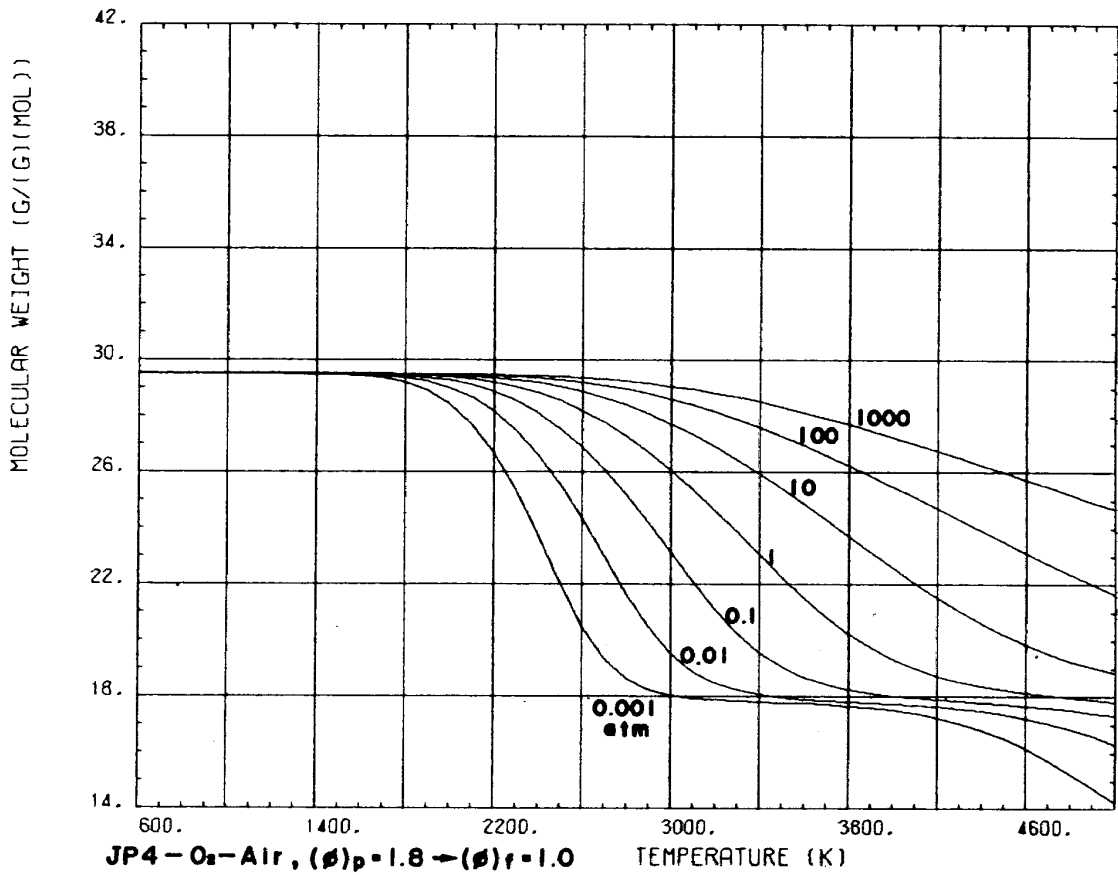
JP4-O₂-Air, (ϕ)_p=1.8 → (ϕ)_f=0.8

☒ B-3-17-2

JP4-O₂-Air



☒ B - 3 - 2 - 3



☒ B - 3 - 4 - 3

JP4-O₂-Air

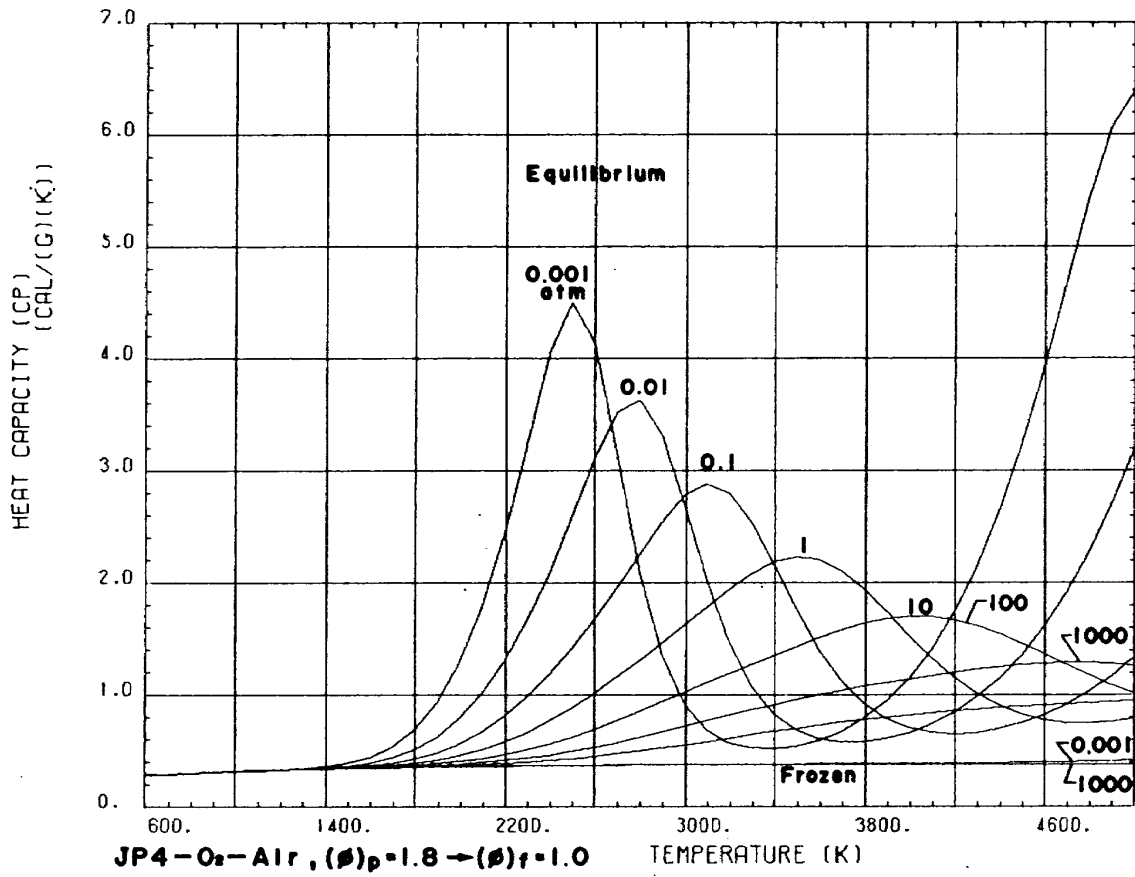


図 B-3-6-3

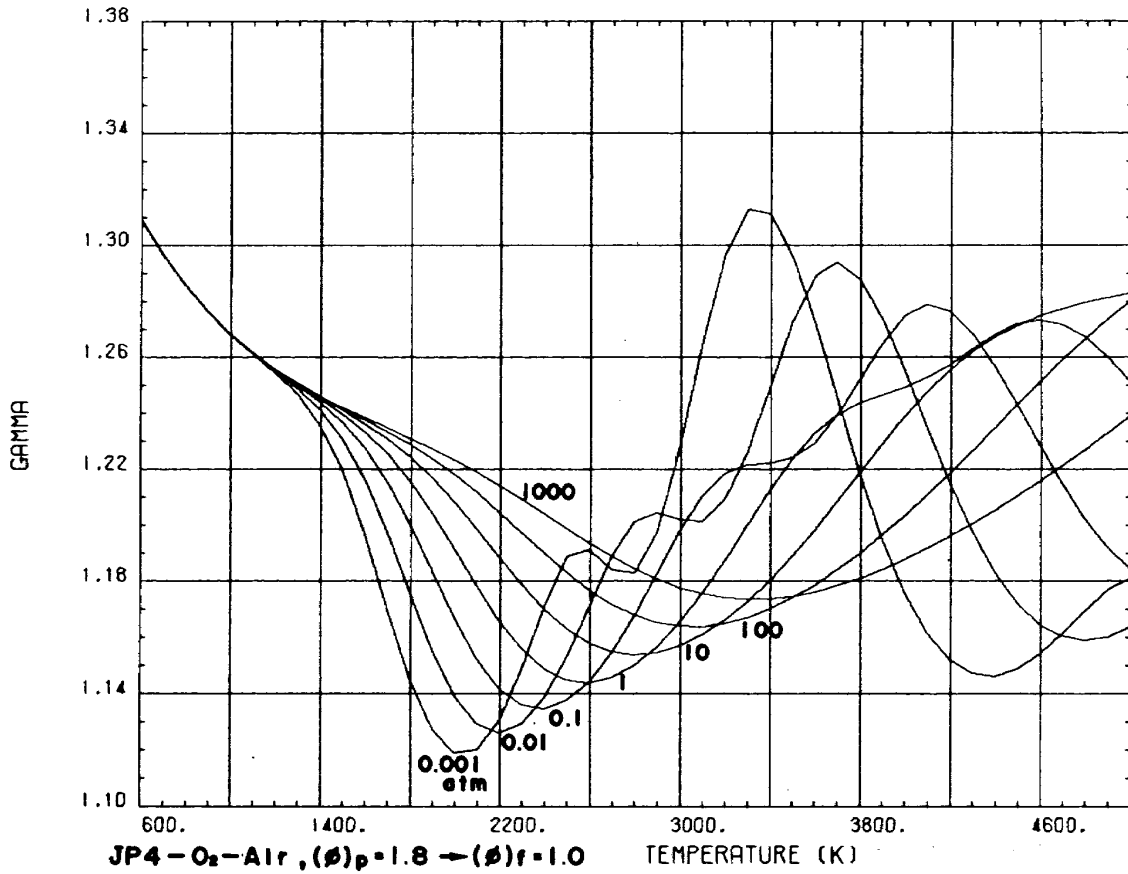
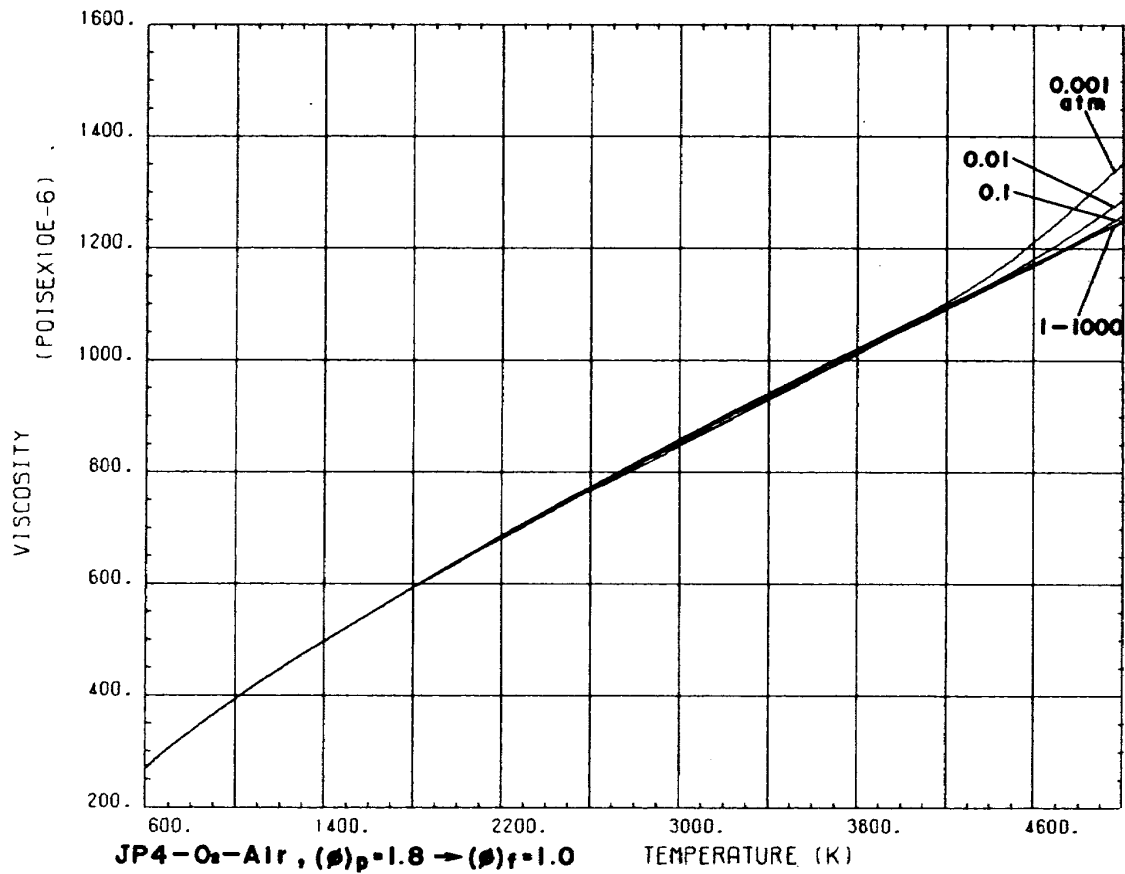


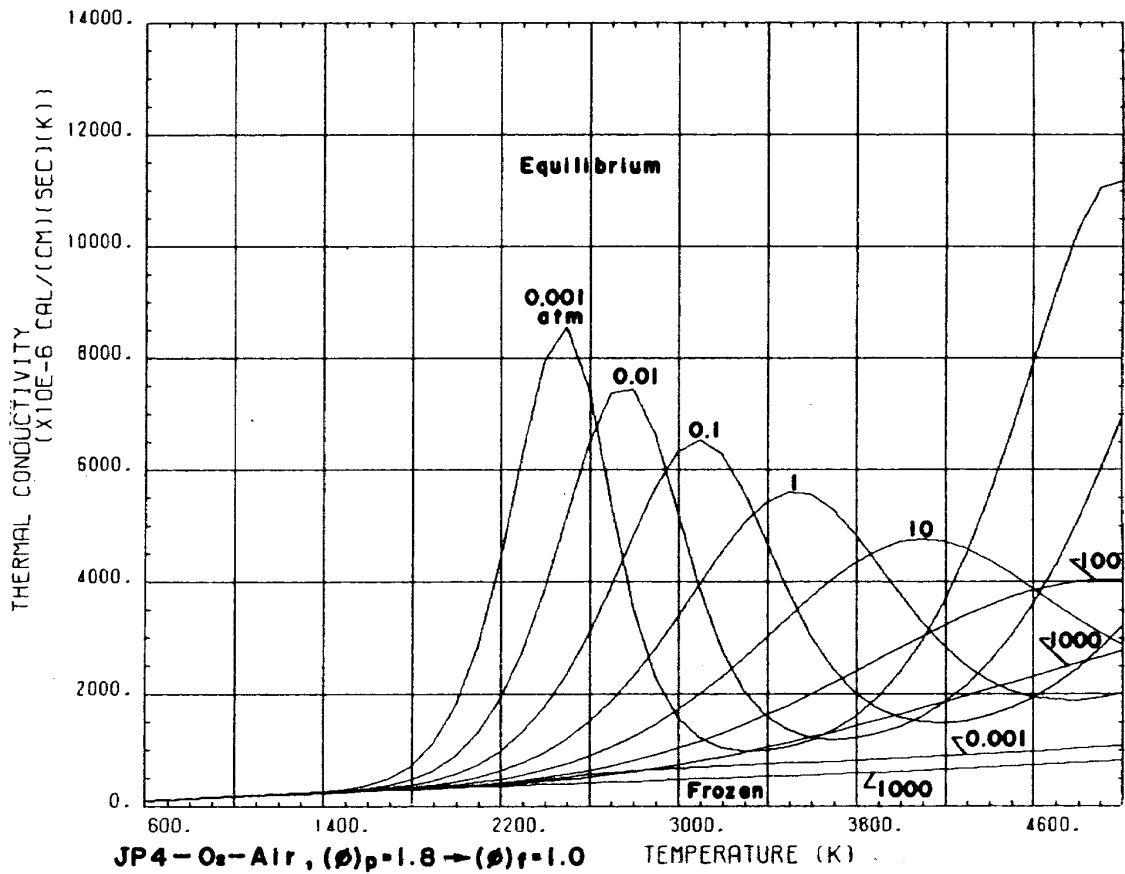
図 B-3-8-3

JP4-O₂-Air



JP4-O₂-Air, (φ)_p=1.8 → (φ)_f=1.0

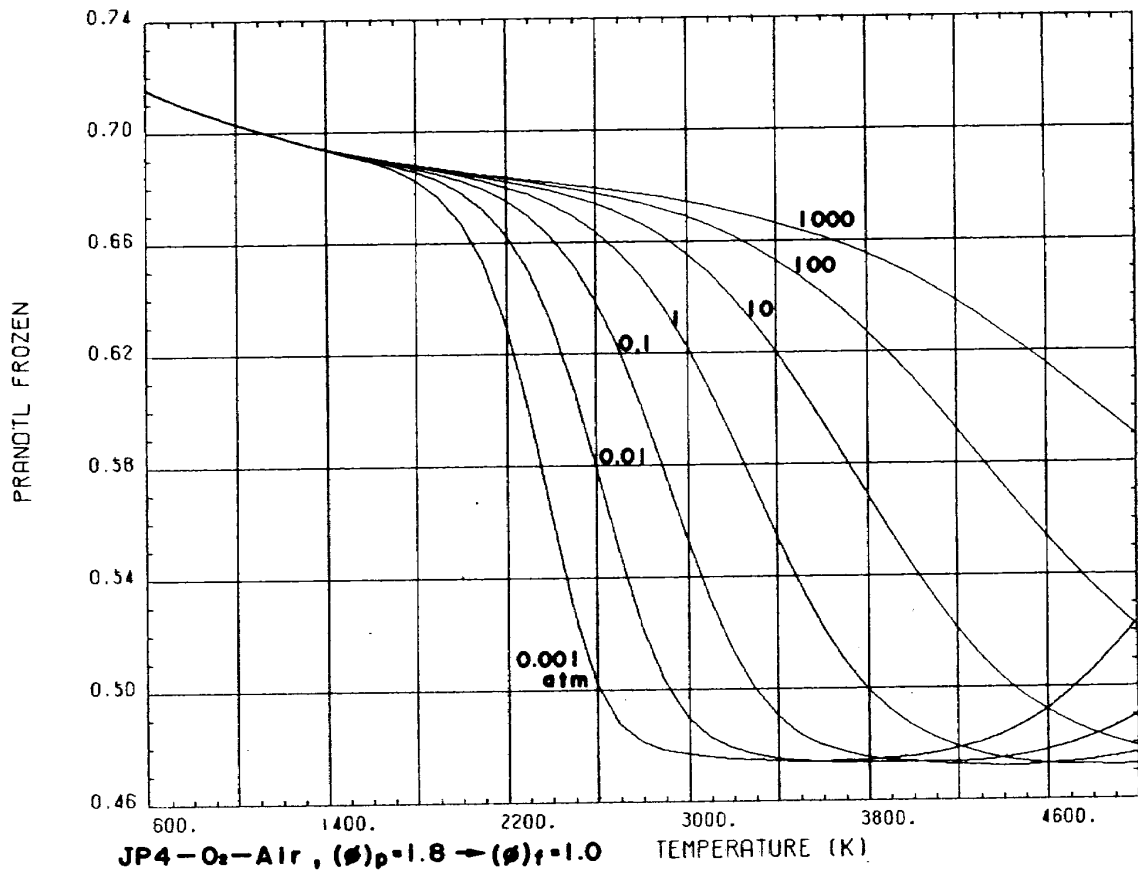
☒ B-3-10-3



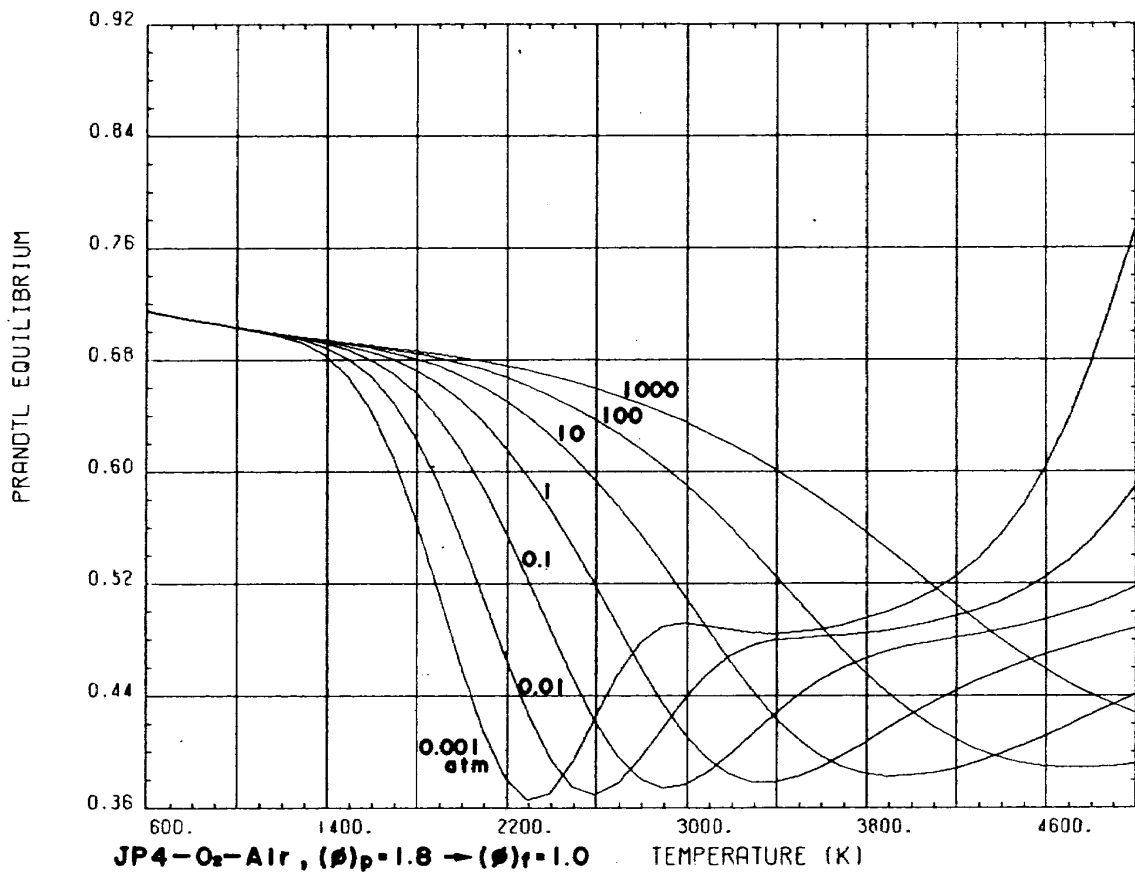
JP4-O₂-Air, (φ)_p=1.8 → (φ)_f=1.0

☒ B-3-15-3

JP4-O₂-Air



☒ B-3-16-3



☒ B-3-17-3

JP4-O₂-Air

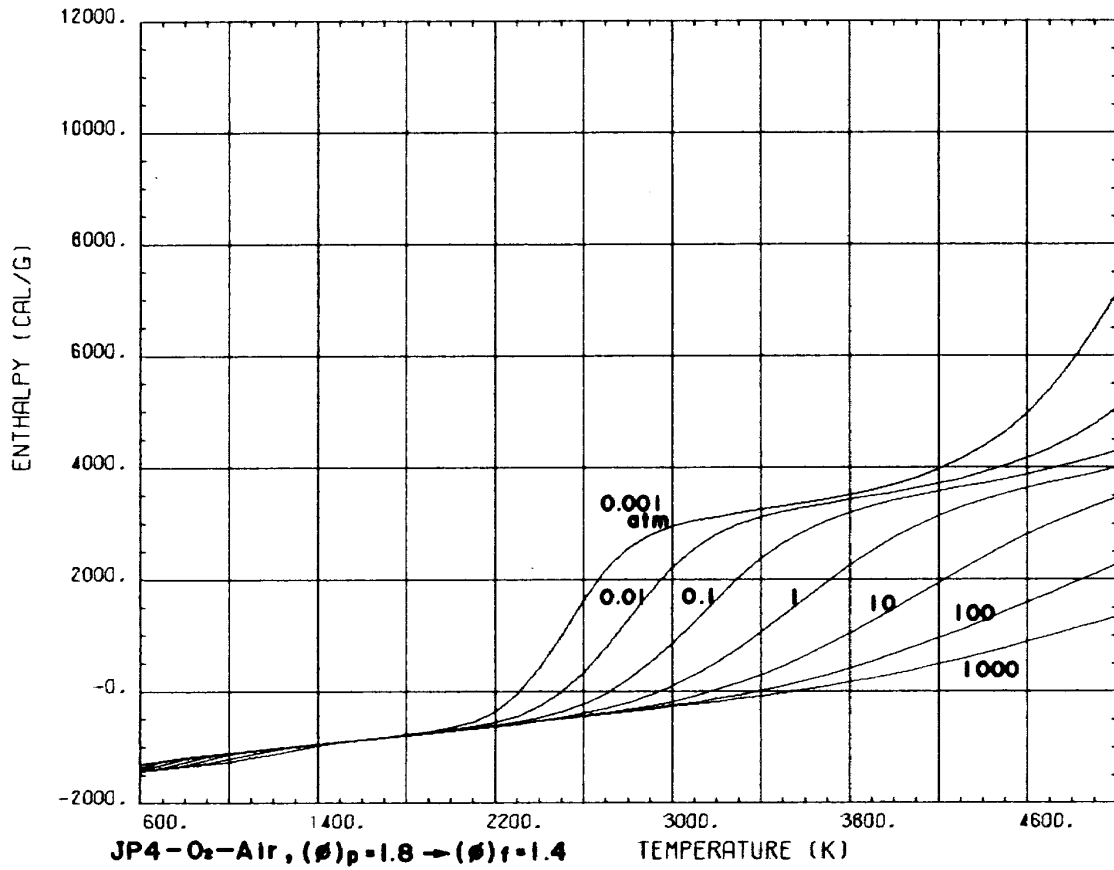


図 B-3-2-4

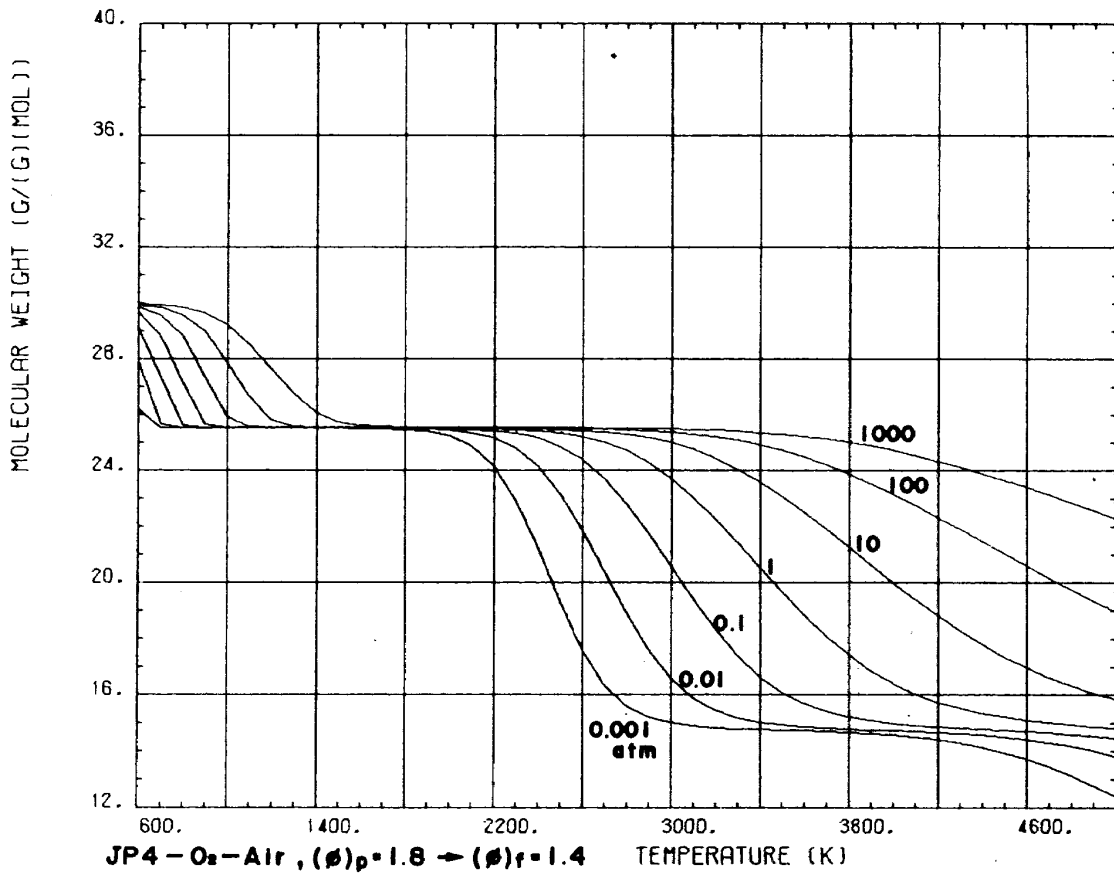


図 B-3-4-4

JP4-O₂-Air

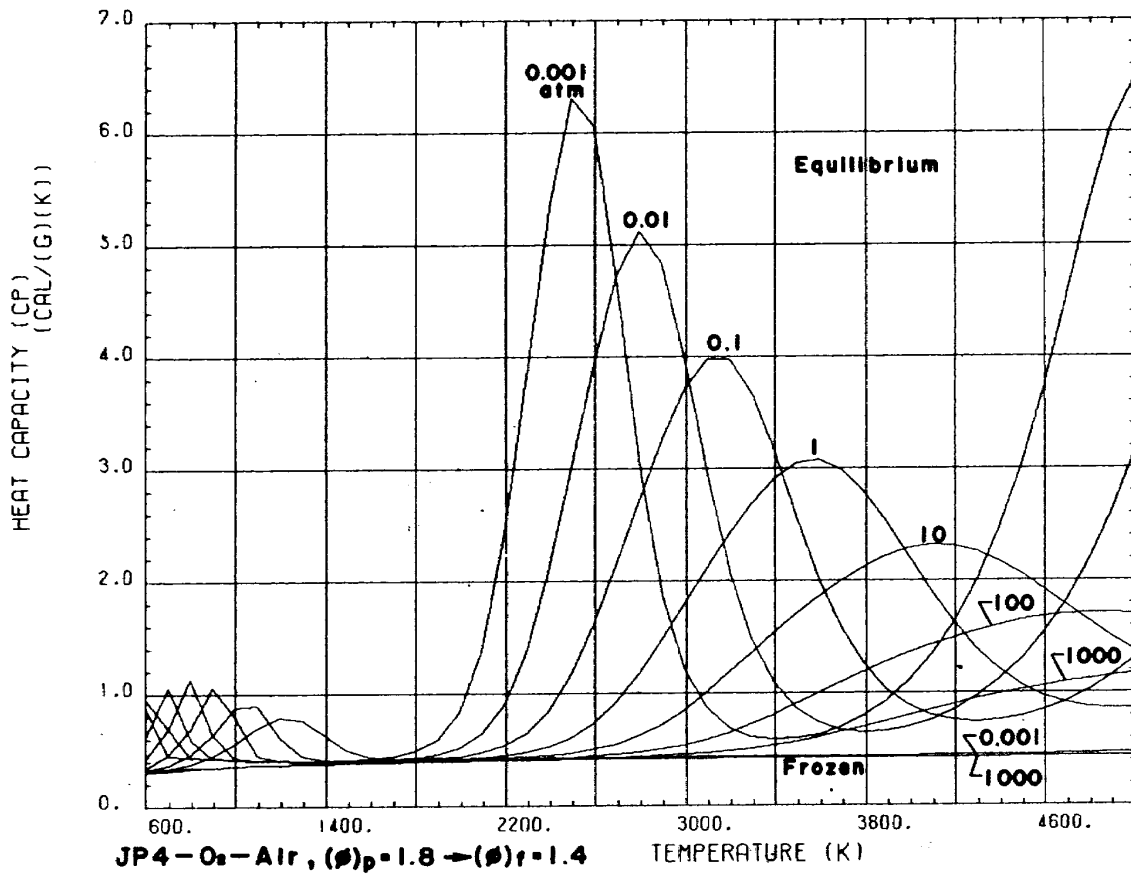


図 B-3-6-4

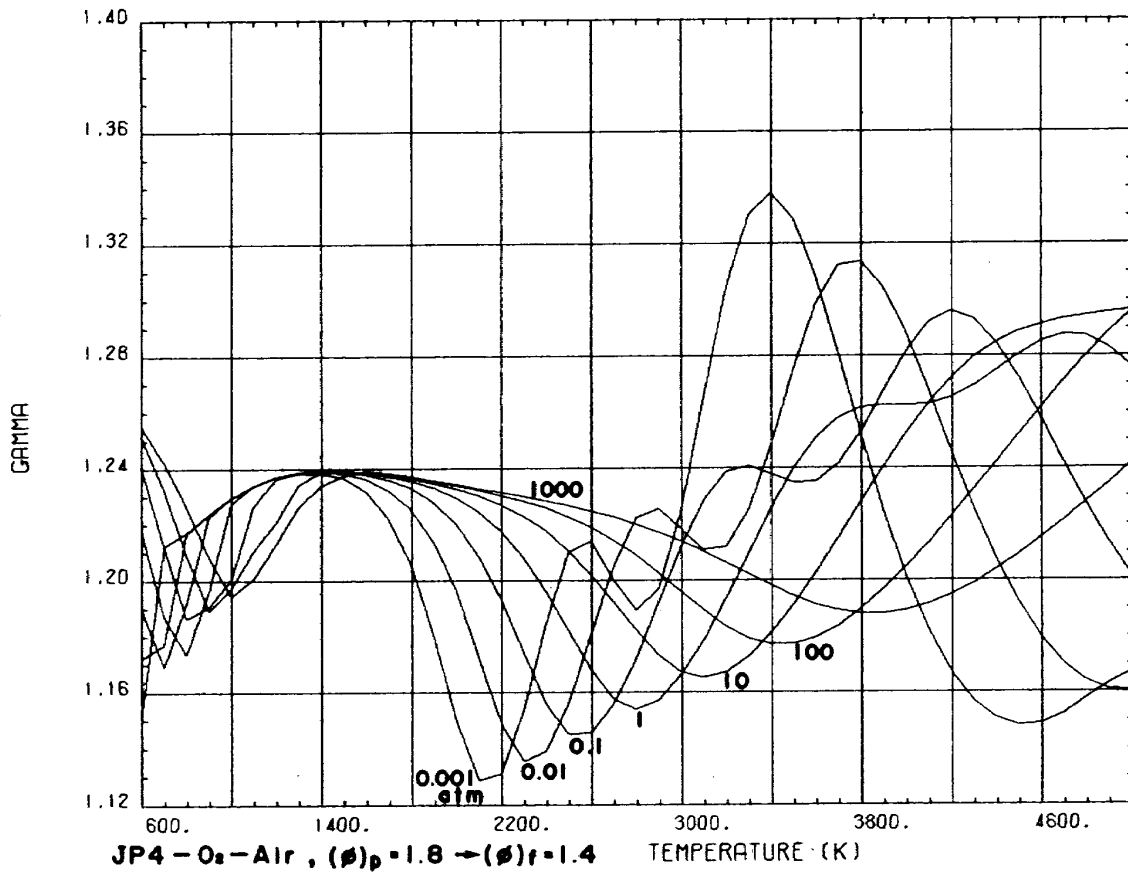


図 B-3-8-4

JP4-O₂-Air

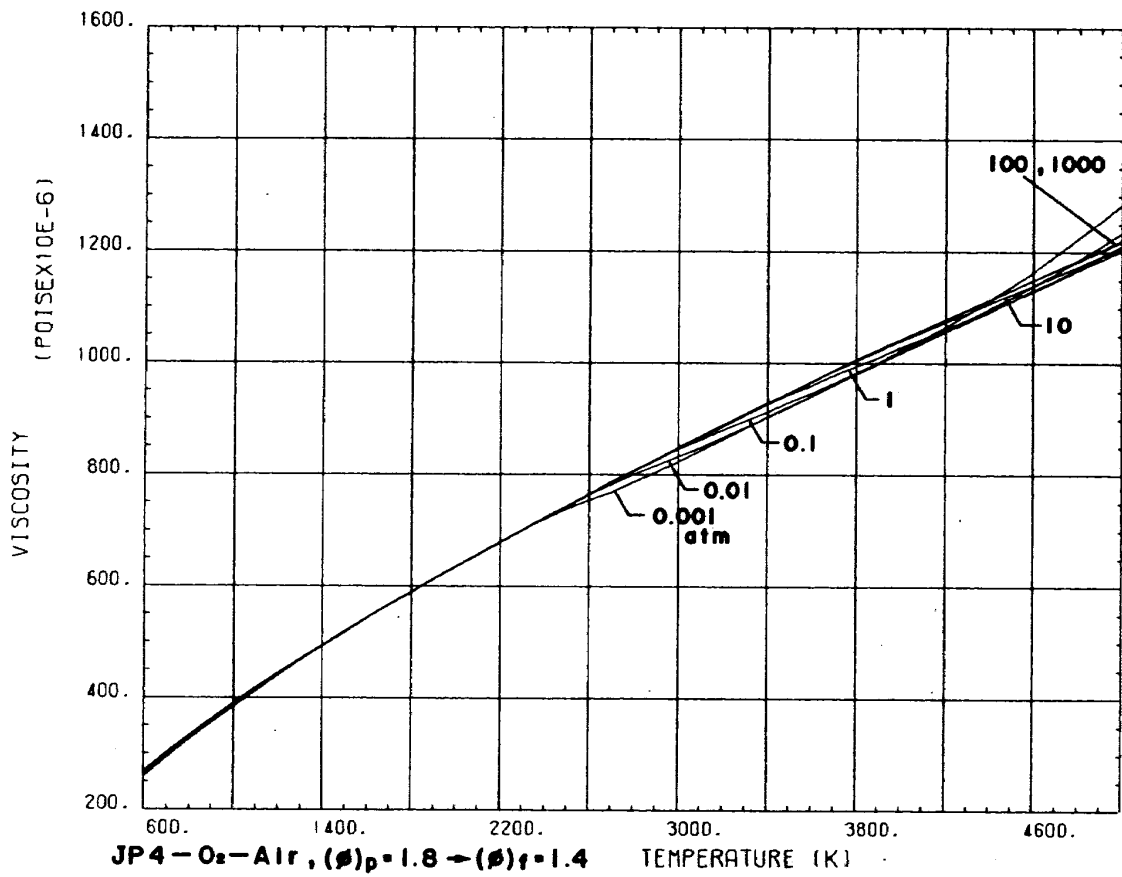


図 B-3-10-4

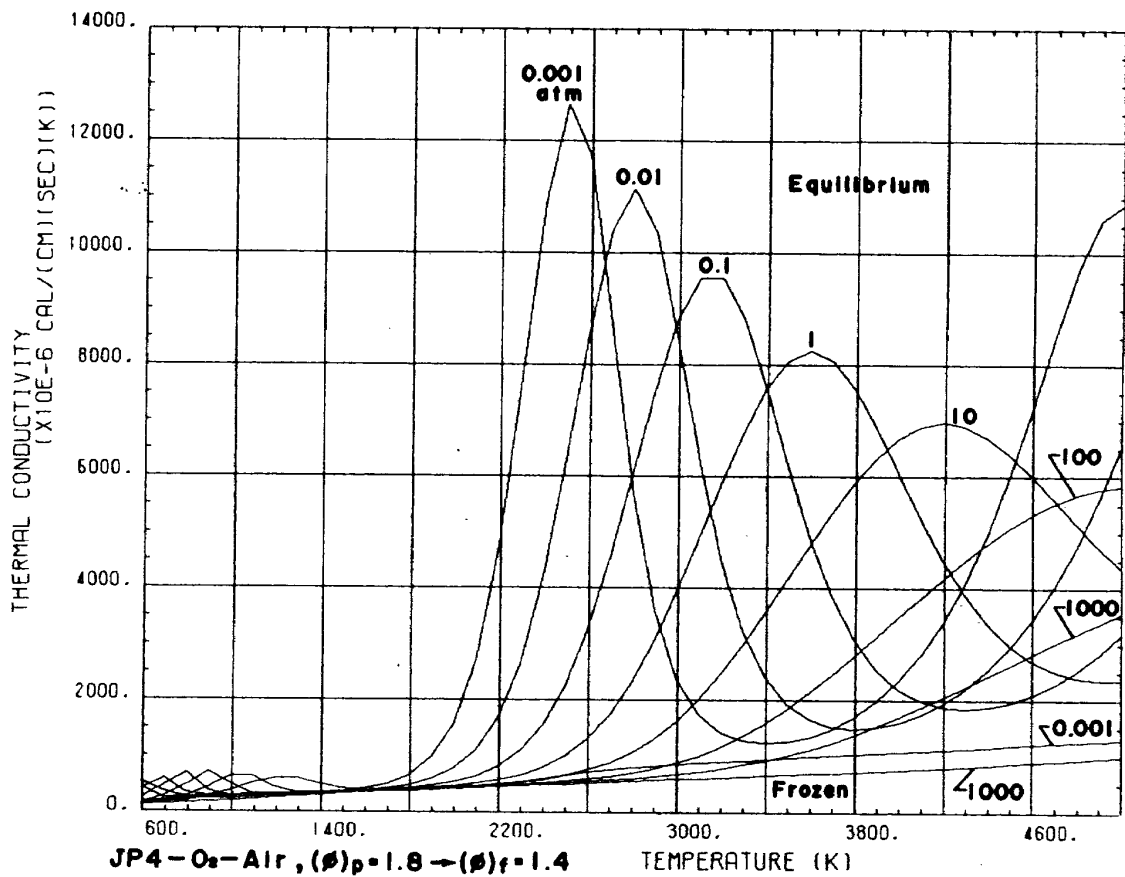
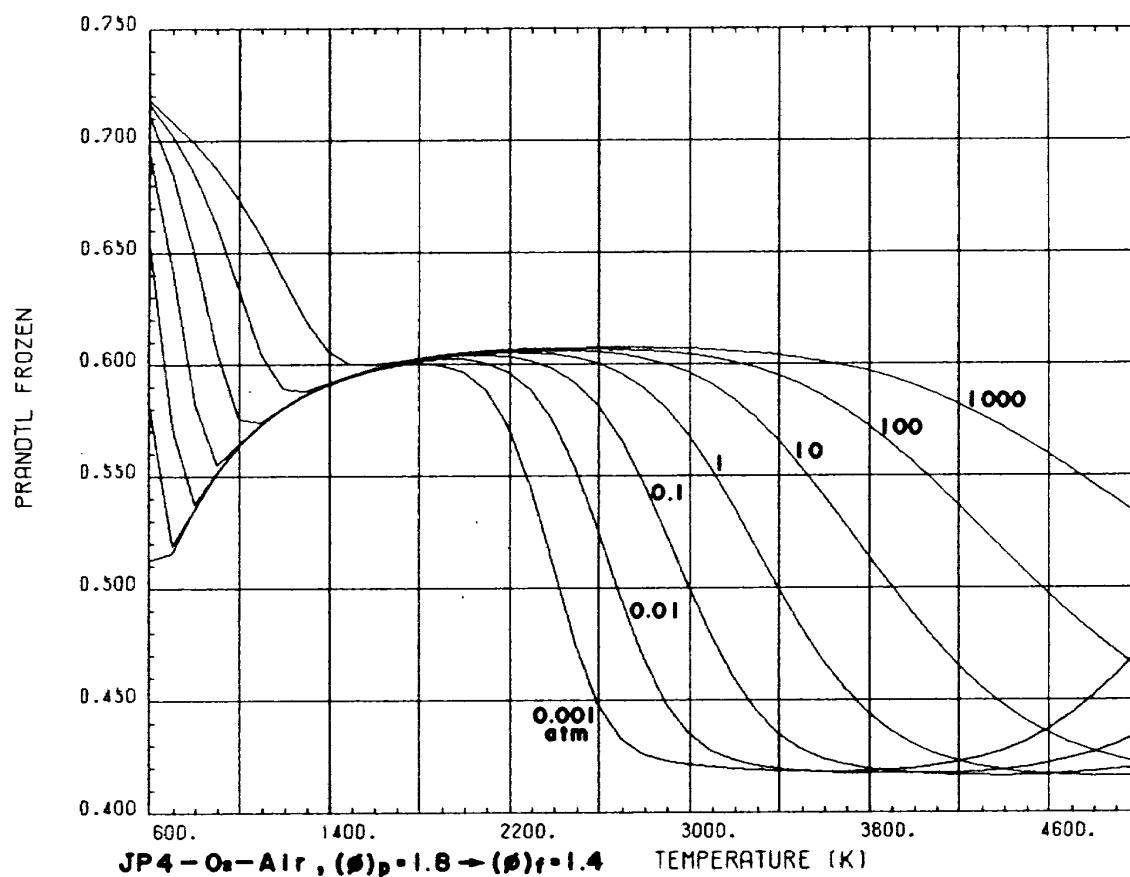


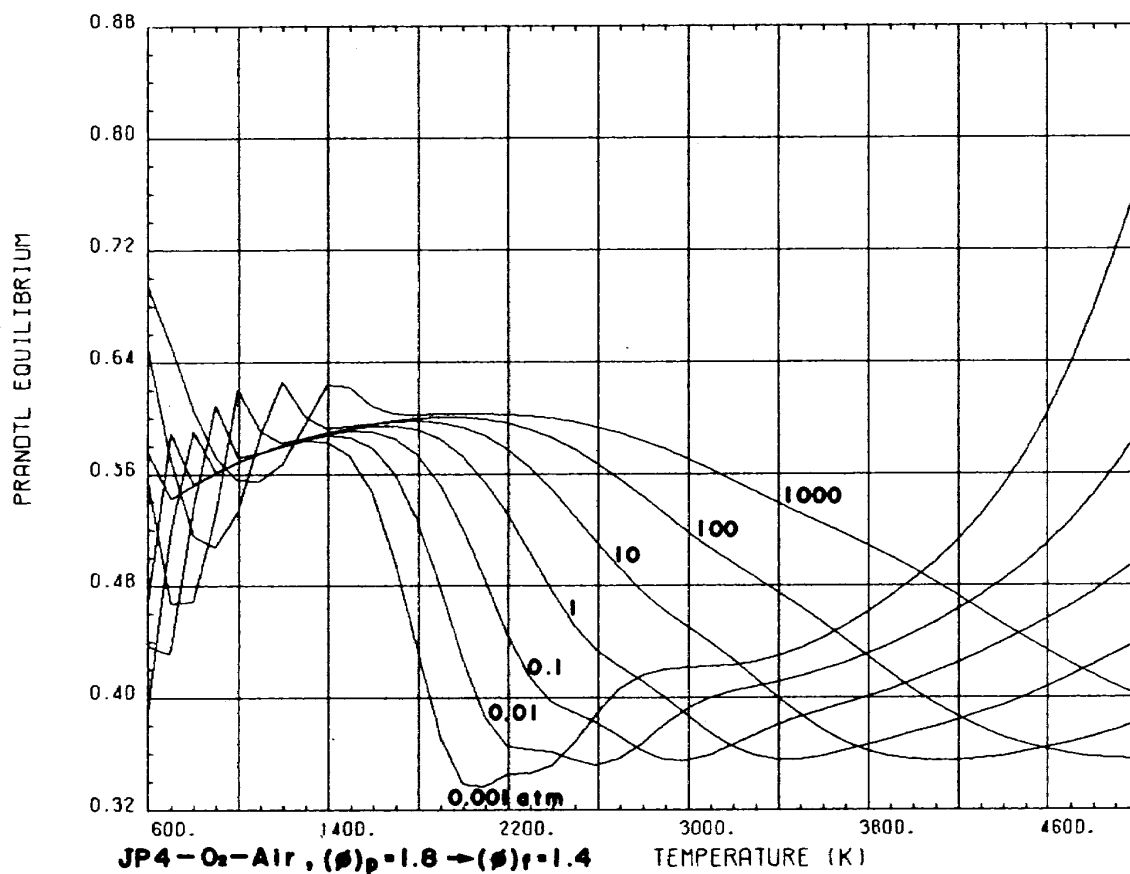
図 B-3-15-4

JP4-O₂-Air



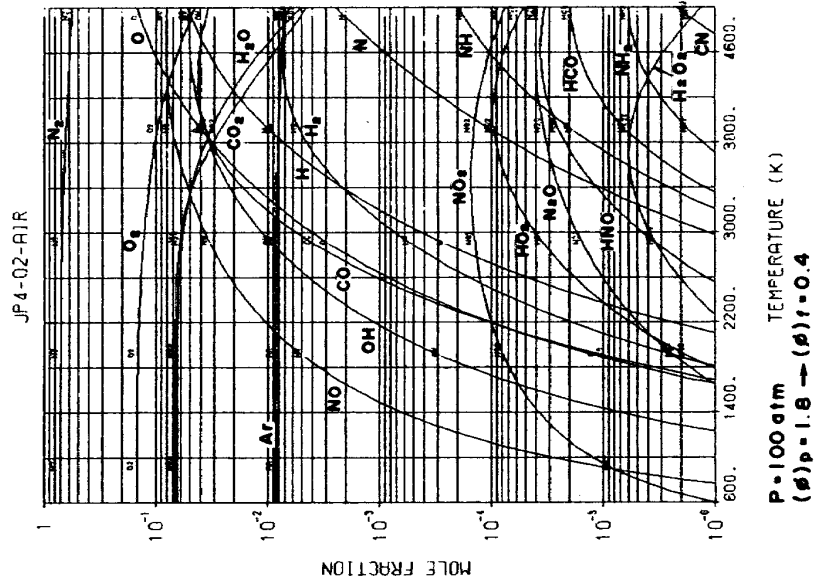
JP4-O₂-Air, (ϕ)_p=1.8 → (ϕ)_f=1.4

☒ B-3-16-4

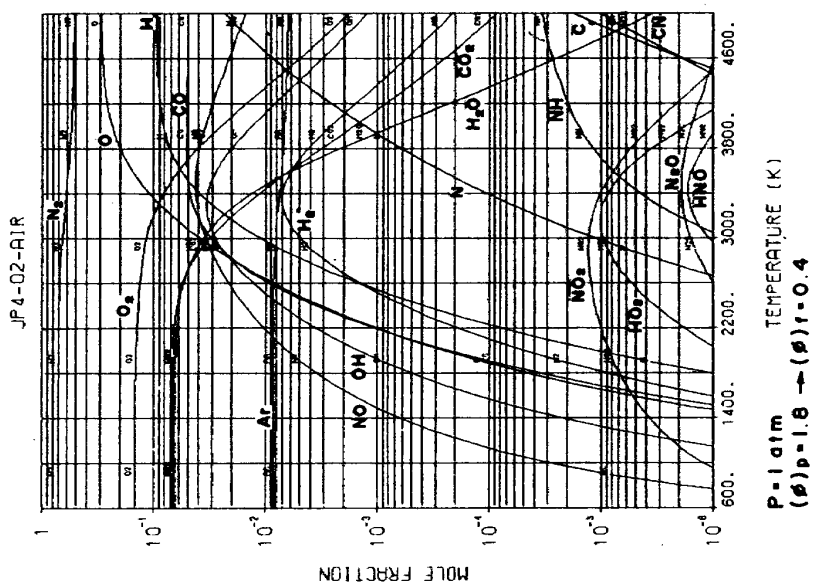


JP4-O₂-Air, (ϕ)_p=1.8 → (ϕ)_f=1.4

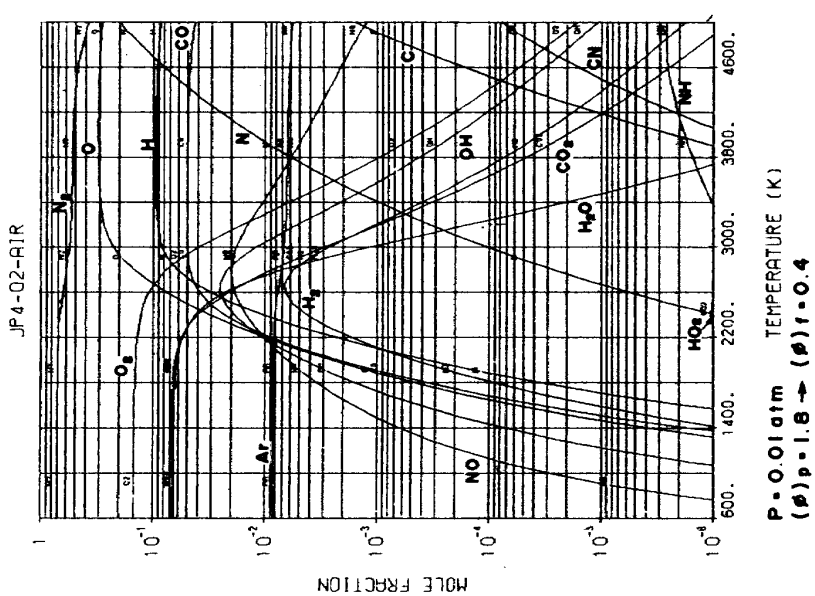
☒ B-3-17-4



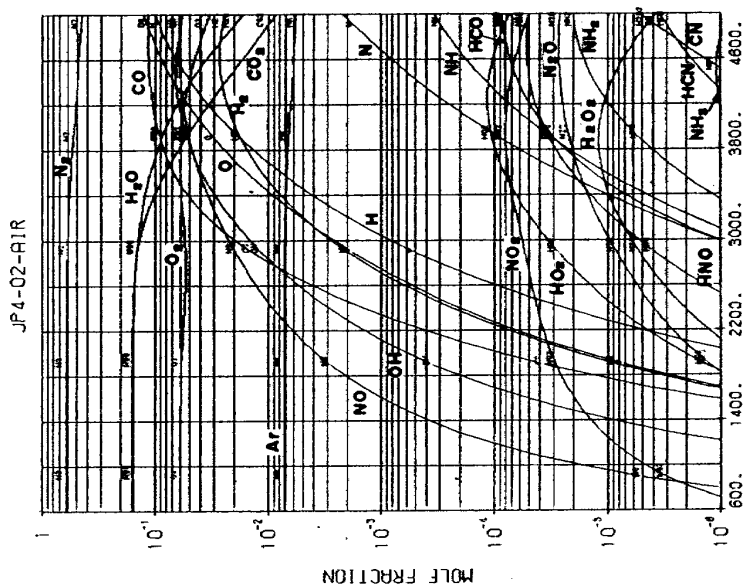
☒ C-3-3



☒ C-3-2

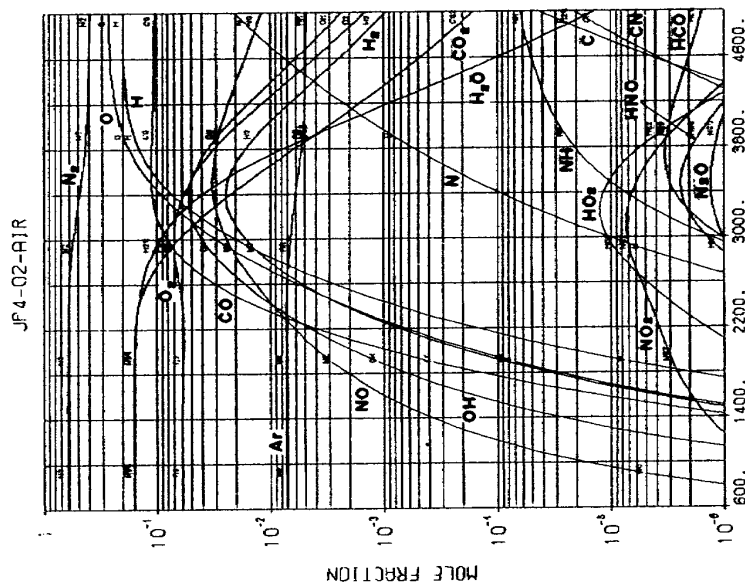


☒ C-3-1



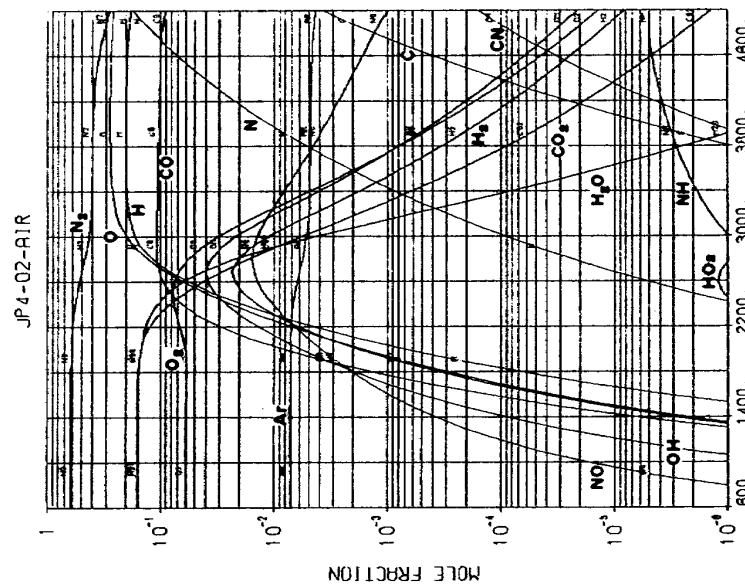
JP4-02-AIR
 P = 100 atm TEMPERATURE (K)
 (φ)_{p=1.8} → (φ)_{r=0.8}

☒ C-3-6



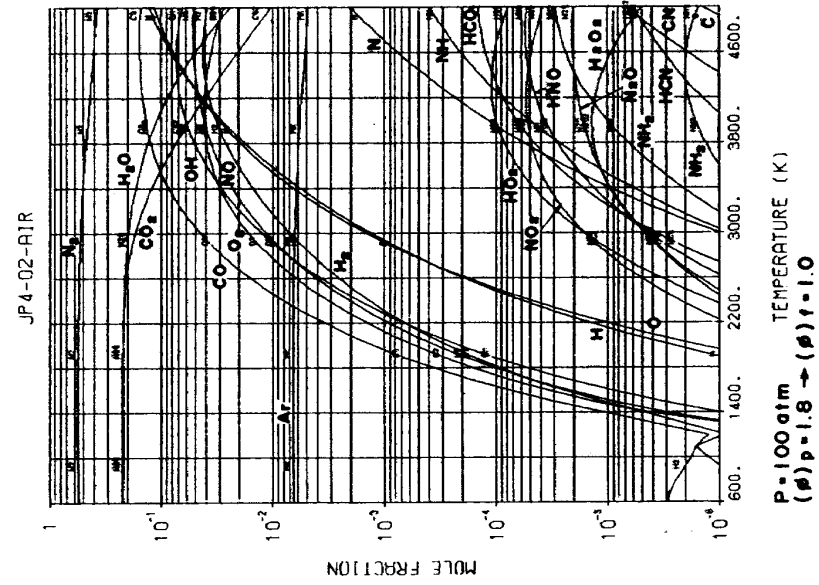
JP4-02-AIR
 P = 1 atm TEMPERATURE (K)
 (φ)_{p=1.8} → (φ)_{r=0.8}

☒ C-3-5

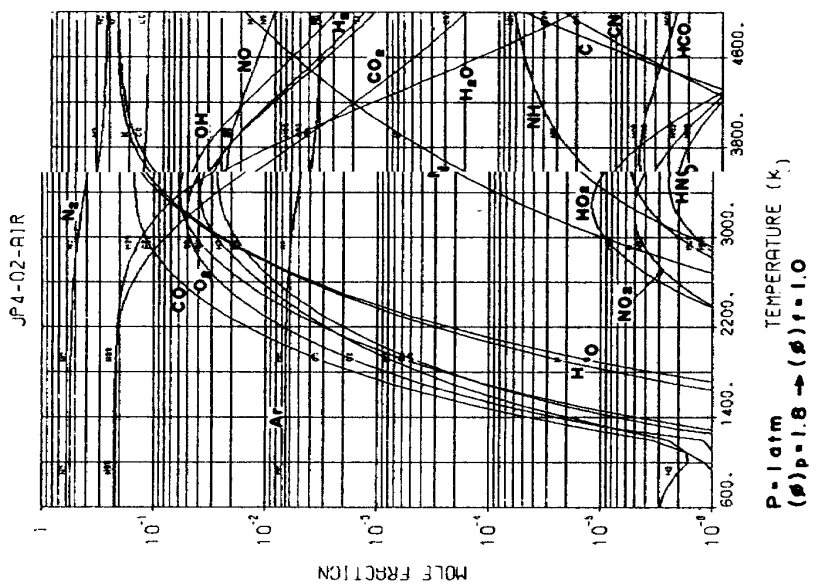


JP4-02-AIR
 P = 0.01 atm TEMPERATURE (K)
 (φ)_{p=1.8} → (φ)_{r=0.8}

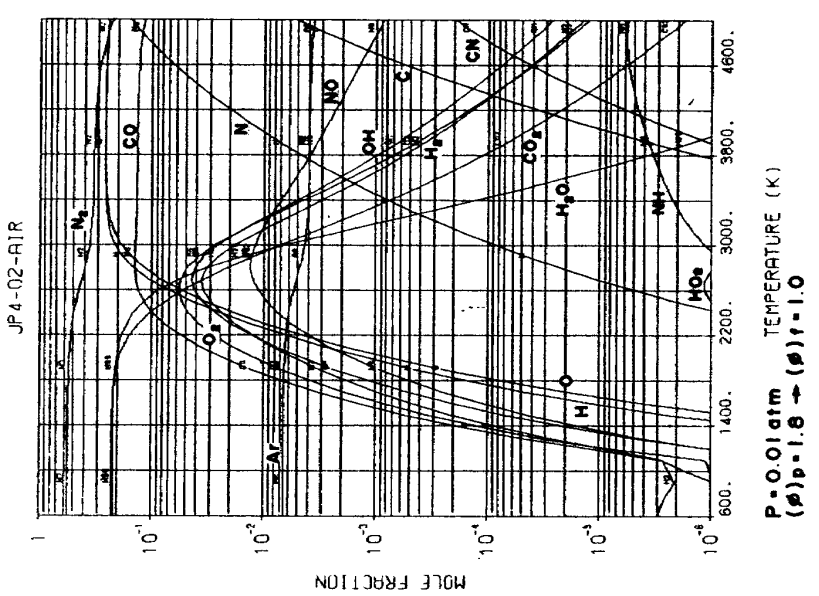
☒ C-3-4



☒ C-3-9



☒ C-3-8



☒ C-3-7

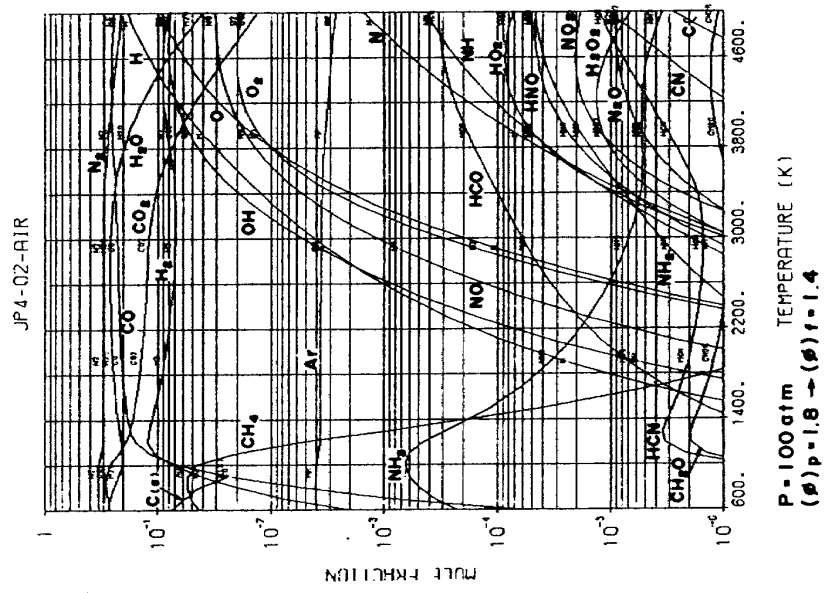


図-3-12

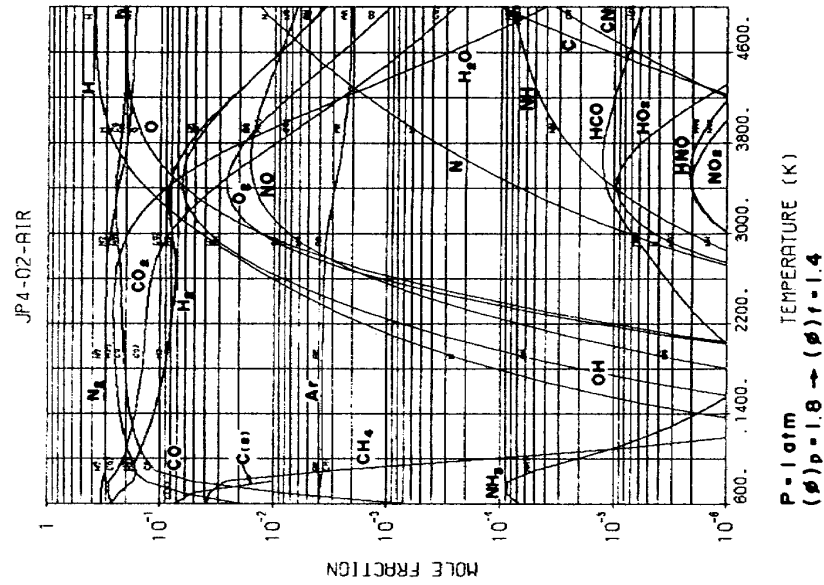


図-3-11

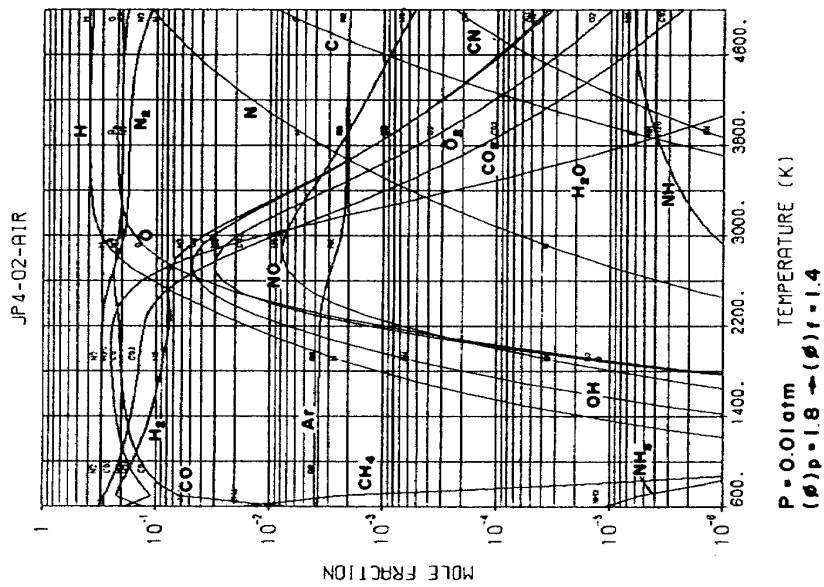


図-3-10

航空宇宙技術研究所資料421号

昭和55年9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 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12
