

UDC 662.614.2:
662.75:
621.454.2.015.4

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-295

液体ロケット推進薬の性能特性図

檜崎 哲二・荻原 綾千男・吉原 正一

1975 年 3 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

液体ロケット推進薬の性能特性図*

檜 崎 哲 二** 荻 原 装 千 男**

吉 原 正 一**

Graphs Showing Characteristic of Liquid Rocket Propellants Performance

Tetsuji NARASAKI, Sachio OGIWARA & Shōichi YOSHIHARA

Abstract

Graphs showing characteristic curves of rocket propellants performance (I_{sp} , C^* , T , etc.), are available to assist the design or investigation of rocket engines.

As the most practical or most used liquid rocket propellants, four propellants (LOX-LH₂, N₂O₄-A・50, LOX-RP・1, LOX-C₂H₅OH) were selected, and the extent of practical usage performance of the propellants were computed (ϵ , P_c , O/F). The results are shown in the respective graphs.

1 ま え が き

比推力, 特性排気速度および排気ガス温度などロケット推進薬の性能は推進薬および燃焼圧, 推進薬混合比, ノズル膨張比, 大気圧等のエンジンの使用条件によって異なる。したがってロケットエンジンの設計またはシステムの検討を行なう場合には, あらかじめ推進薬の性能の概略について知っておく必要があり, 各種の推進薬について性能特性を具体的に図で表わして参考とするのが便利である。推進薬の性能計算に関してはすでに幾つかの報告がなされているが, それぞれの計算方法については本質的な差はない¹⁾。GordonおよびMcBride²⁾の電子計算機プログラムおよびこのプログラムより計算される結果から Sea Level における比推力を求める電子計算機プログラムを, 当所の電子計算機 (FACOM ー 230-60/75) に使用し, 液体ロケットに多く使用される実用的推進薬の性能計算を行なった。このプログラムでは熱力データ, 反応物質量の比率, 反応物質のエンタルピーおよび燃焼圧力などを与えて, Gibbsの自由エネルギーが最小になるようにして, 燃焼室における温度 T , 比熱比 γ , 化学組成などを求める。比推力等は, 燃

焼室内の化学平衡組成がノズル内の膨張過程においても変化しない凍結流 (Frozen flow) と, 膨張過程において化学平衡が瞬間的に達成される平衡流 (Equilibrium flow) の2種類の状態について計算される。

ここでは, 液体ロケット・エンジン設計の初期段階の検討に用いるため, D・K・Huzel等による液体ロケット・エンジン設計³⁾において計算されているように, Frozen flow の条件で計算し, その結果を図に示す。図 5.2. a ~ 図 5.2. d に Frozen flow および Equilibrium flow によって計算したそれぞれの比推力の一部を比較し参考とした。その他の計算条件は以下の通りである。

- (1) 燃焼ガスのエネルギーおよび運動量に関する連続方程式は一次元の式で表わされる。
- (2) 燃焼室における燃焼ガス速度は 0 である。
- (3) 燃焼は断熱および完全燃焼である。
- (4) 燃焼ガスは理想気体である。
- (5) ノズル部における燃焼ガスは等エントロピー膨張とする。
- (6) ノズル内の剝離はないものとする。したがって SL (Sea Level) における比推力の計算において燃焼圧 P_c が小さく膨張比が大きい場合には計算値と実際の値との間に大きな差が生じるので, SL におけ

* 昭和50年12月23日受付

** 宇宙研究グループ

る比推力の計算では、膨張比 ϵ が大きい場合については計算を行わない。

記号

C^*	: 特性排気速度	m/sec
C_p	: 比熱	cal/g $^{\circ}$ K
I_{sp}	: 比推力	sec
MW	: 混合燃焼ガスのモル重量	g-mol
O/F	: 混合比	
P	: 圧力	atm
P_A	: 大気圧	atm
P_C	: 燃焼圧	atm
T	: 燃焼ガス温度 (燃焼室)	$^{\circ}$ K
T_e	: 燃焼ガス温度 (ノズル出口)	$^{\circ}$ K
γ	: 比熱比	
ρ	: 燃焼ガス密度	g/cc
ϵ	: ノズル膨張比	
SL	: Sea Level	
VAC.	: Vacuum	

2 計算内容

液体ロケットに使用される多くの液体推進薬の中で現在良く用いられているものおよび将来性のあるものに絞って2液式推進薬 LOX-LH₂, N₂O₄-A・50, LOX-RP・1, LOX-C₂H₅・OH の4種類についてそれぞれ性能計算を行った。LOX-LH₂ は酸化剤が液体酸素であり、燃料が液体水素の極低温の推進剤である。比推力が大きく、また燃焼ガスに有毒成分を含まないため今後最も多く使用される推進薬の一つである。N₂O₄-A・50 は過酸化窒素の酸化剤に、Hydrazine(N₂H₄) が50%およびUDMH ((CH₃)₂NNH₂) が50%の燃料の組合わせであり、有毒成分を含むが比推力が大きくまた自発点火性であり着火性能が良いため多く用いられている。LOX-RP・1 は液体酸素とクロシン (CH_{1.94}) の組合わせであり、取り扱いが容易であり大型ロケットに用いられる。

LOX-C₂H₅・OH は液体酸素とエチルアルコールの組合わせであり有毒成分を含まず取り扱いが容易であり各種の実験用として便利である。以上の4種類の推進薬について推進薬混合比 O/F , 燃焼圧 P_C およびノズル膨張比 ϵ を変えて比推力 I_{sp} , 特性排気速度 C^* , 燃焼室における燃焼ガス温度 T , ノズルにおける燃焼ガス温度 T_e , 比熱比 γ , 比熱 C_p , 密度 ρ およびモル重量 MW. などを求めた。また I_{sp} については VAC. (Vacuum) および SL. (Sea Level) のそれぞれの状態について計算した。

3 計算結果

計算結果を推進薬の種類および計算内容によって分類し図 1.1. a ~ 図 4.10. a にそれぞれ示した。

3.1 図面番号の表示方法

図面番号の第1番目に1から5までの数字を与えて4種類の推進薬および其他について分類した。第2番目の数字は T , T_e , γ , C_p など計算の種類を表わし、第3番目にアルファベット a, b, c, を記し計算条件 (変数区間, 定数, SL., VAC.) による違いを表わし、続く () 内に計算条件の数値および其他を示した。第1番目および第2番目の数字による分類は以下の通りである。

1 番目の数字

- 1 : LOX-LH₂
- 2 : N₂O₄-A・50
- 3 : LOX-RP・1
- 4 : LOX-C₂H₅・OH
- 5 : 実際のエンジンの値との比較

2 番目の数字

- 1 : T 燃焼ガス温度 (燃焼室)
- 2 : T_e 燃焼ガス温度 (ノズル出口)
- 3 : γ 比熱比 (燃焼室)
- 4 : C_p 比熱 (燃焼室)
- 5 : MW. モル重量
- 6 : C^* 特性排気速度
- 7 : ρ 密度 (ノズル出口)
- 8 : I_{sp} 比推力 (SL.)
- 9 : I_{sp} 比推力 (VAC.)
- 10 : ノズル圧力比 ノズル圧力 P / 燃焼圧 P_C

例 図 1・9・C ($P_C = 4.0$ atm)

LOX-LH₂ I_{sp} (VAC.)

3.2 図面の内容

図の内容を図面番号, 計算の種類, 変数, 計算条件, 其他で表わし、さらに頁を記して図面選択の便宜を計った。

図 番 号	面 号	計算の 種類	変 数	計 算 条 件	備 考	頁
図1.1.a		T	$OF=0.7\sim 7.0$	$P_C=10\sim 200\text{atm}$		7
図1.1.b		T	$OF=0.7\sim 3.0$	$P_C=10\sim 200\text{atm}$	拡大図 (拡大図)	8
図1.1.c		T	$OF=3.4\sim 7.0$	$P_C=10\sim 200\text{atm}$		8
図1.2.a		T_s	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=10\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$		8
図1.2.b		T_s	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=60\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$		9
図1.2.c		T_s	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=100\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$		9
図1.2.d		T_s	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=200\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$		10
図1.2.e		T_s	$\epsilon=3\sim 100$	$P_C=10\sim 200\text{atm}, OF=4.0$		10
図1.2.f		T_s	$\epsilon=3\sim 100$	$P_C=10\sim 200\text{atm}, OF=5.0$		10
図1.2.g		T_s	$\epsilon=3\sim 100$	$P_C=10\sim 200\text{atm}, OF=6.0$		11
図1.3.a		γ	$OF=0.6\sim 7.0$	$P_C=10\sim 200\text{atm}$		11
図1.3.b		γ	$OF=0.7\sim 2.2$	$P_C=10\sim 200\text{atm}$	拡大	11
図1.3.c		γ	$OF=3.4\sim 5.5$	$P_C=10\sim 200\text{atm}$	拡大	12
図1.4.a		C_p	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=10\sim 200\text{atm}$		12
図1.5.a		MW	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=10\sim 200\text{atm}$		13
図1.5.b		MW	$OF=0.6\sim 2.0$	$P_C=10\sim 200\text{atm}$	拡大	14
図1.5.c		MW	$OF=3.4\sim 5.6$	$P_C=10\sim 200\text{atm}$	拡大	15
図1.6.a		C^*	$P_C=10\sim 200\text{atm}, OF=1.0\sim 7.0\text{atm}$			14
図1.7.a		ρ	$\epsilon=3\sim 100$	$P_C=10\sim 200\text{atm}, OF=4.0$		16
図1.7.b		ρ	$\epsilon=3\sim 100$	$P_C=10\sim 200\text{atm}, OF=5.0$		16
図1.7.c		ρ	$\epsilon=3\sim 100$	$P_C=10\sim 200\text{atm}, OF=6.0$		16
図1.8.a		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=10\text{atm}, \epsilon=3\sim 8$	SL.	17
図1.8.b		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=20\text{atm}, \epsilon=3\sim 20$	SL.	17
図1.8.c		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=40\text{atm}, \epsilon=3\sim 40$	SL.	18
図1.8.d		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=60\text{atm}, \epsilon=3\sim 60$	SL.	18
図1.8.e		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=80\text{atm}, \epsilon=3\sim 60$	SL.	19
図1.8.f		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=100\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$	SL.	19
図1.8.g		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=140\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$	SL.	20
図1.8.h		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=200\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$	SL.	20
図1.9.a		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=10\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$	VAC.	21
図1.9.b		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=20\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$	VAC.	21
図1.9.c		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=40\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$	VAC.	22
図1.9.d		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=60\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$	VAC.	22
図1.9.e		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=80\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$	VAC.	23
図1.9.f		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=100\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$	VAC.	23
図1.9.g		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=140\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$	VAC.	24
図1.9.h		I_{sp}	$OF=1.0\sim 7.0$	$P_C=200\text{atm}, \epsilon=3\sim 100$	VAC.	24
図1.9.i		I_{sp}	$P_C=10\sim 200\text{atm}, \epsilon=3\sim 100, OF=4.0$		VAC.	25
図1.9.j		I_{sp}	$P_C=10\sim 200\text{atm}, \epsilon=3\sim 100, OF=5.0$		VAC.	25
図1.9.k		I_{sp}	$P_C=10\sim 200\text{atm}, \epsilon=3\sim 100, OF=6.0$		VAC.	26
図1.10.a		P/P_C	$\epsilon=3\sim 100$	$P_C=100\text{atm}$	ノルズ圧力比	26
図2.1.a		T	$OF=0.1\sim 7.0$	$P_C=10\sim 100\text{atm}$		27
図2.1.b		T	$OF=0.05\sim 2.0$	$P_C=10\sim 100\text{atm}$	拡大	27

図面計算の 番号種類	変数	計算条件	備考	頁
図2.2.a	T_e	$\varepsilon=3\sim100$ $P_c=10\sim100\text{atm}, OF=1.0$		28
図2.2.b	T_e	$\varepsilon=3\sim100$ $P_c=10\sim100\text{atm}, OF=1.5$		28
図2.2.c	T_e	$\varepsilon=3\sim100$ $P_c=10\sim100\text{atm}, OF=2.0$		28
図2.3.a	γ	$OF=0.1\sim7.0$ $P_c=10\sim100\text{atm}$		29
図2.3.b	γ	$OF=0.05\sim2.0$ $P_c=10\sim100\text{atm}$	拡	29
図2.4.a	C_p	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=10\sim100\text{atm}$		30
図2.5.a	MW	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=10\sim100\text{atm}$		31
図2.5.b	MW	$OF=0.05\sim2.0$ $P_c=10\sim100\text{atm}$	拡	30
図2.6.a	C^*	$P_c=10\sim100\text{atm}$ $OF=1.0\sim7.0$		32
図2.7.a	ρ	$\varepsilon=3\sim100$ $P_c=10\sim100\text{atm}, OF=1.5$		32
図2.7.b	ρ	$\varepsilon=3\sim100$ $P_c=10\sim100\text{atm}, OF=2.0$		32
図2.8.a	I_{sp}	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=10\text{atm}, \varepsilon=3\sim8$	SL.	33
図2.8.b	I_{sp}	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=20\text{atm}, \varepsilon=3\sim10$	SL.	33
図2.8.c	I_{sp}	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=40\text{atm}, \varepsilon=3\sim40$	SL.	34
図2.8.d	I_{sp}	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=60\text{atm}, \varepsilon=3\sim60$	SL.	34
図2.8.e	I_{sp}	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=80\text{atm}, \varepsilon=3\sim80$	SL.	35
図2.8.f	I_{sp}	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=100\text{atm}, \varepsilon=3\sim100$	SL.	35
図2.9.a	I_{sp}	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=10\text{atm}, \varepsilon=3\sim100$	VAC.	36
図2.9.b	I_{sp}	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=20\text{atm}, \varepsilon=3\sim100$	VAC.	36
図2.9.c	I_{sp}	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=40\text{atm}, \varepsilon=3\sim100$	VAC.	37
図2.9.d	I_{sp}	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=60\text{atm}, \varepsilon=3\sim100$	VAC.	37
図2.9.e	I_{sp}	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=80\text{atm}, \varepsilon=3\sim100$	VAC.	38
図2.9.f	I_{sp}	$OF=1.0\sim7.0$ $P_c=100\text{atm}, \varepsilon=3\sim100$	VAC.	38
図3.1.a	T	$OF=0.2\sim7.0$ $P_c=10\sim100\text{atm}$		39
図3.1.b	T	$OF=0.1\sim1.6$ $P_c=10\sim100\text{atm}$	拡	39
図3.1.c	T	$OF=1.4\sim4.0$ $P_c=10\sim100\text{atm}$	拡	40
図3.2.a	T_e	$\varepsilon=3\sim100$ $P_c=10\sim100\text{atm}, OF=1.5$		40
図3.3.a	γ	$OF=0.1\sim3.0$ $P_c=10\sim100\text{atm}$		41
図3.4.a	C_p	$OF=0.1\sim3.0$ $P_c=10\sim100\text{atm}$		42
図3.5.a	MW	$OF=0.1\sim3.0$ $P_c=10\sim100\text{atm}$		43
図3.6.a	C^*	$P_c=10\sim100\text{atm}$ $OF=1.0\sim4.0$		44
図3.7.a	ρ	$P_c=10\sim100\text{atm}$ $OF=2.0$		44
図3.8.a	I_{sp}	$OF=1.0\sim4.0$ $P_c=10\text{atm}, \varepsilon=3\sim10$	SL.	44
図3.8.b	I_{sp}	$OF=1.0\sim4.0$ $P_c=20\text{atm}, \varepsilon=3\sim20$	SL.	45
図3.8.c	I_{sp}	$OF=1.0\sim4.0$ $P_c=40\text{atm}, \varepsilon=3\sim40$	SL.	45
図3.8.d	I_{sp}	$OF=1.0\sim4.0$ $P_c=60\text{atm}, \varepsilon=3\sim60$	SL.	46
図3.8.e	I_{sp}	$OF=1.0\sim4.0$ $P_c=80\text{atm}, \varepsilon=3\sim80$	SL.	46
図3.8.f	I_{sp}	$OF=1.0\sim4.0$ $P_c=100\text{atm}, \varepsilon=3\sim100$	SL.	47
図3.9.a	I_{sp}	$OF=1.0\sim4.0$ $P_c=10\text{atm}, \varepsilon=3\sim100$	VAC.	47
図3.9.b	I_{sp}	$OF=1.0\sim4.0$ $P_c=20\text{atm}, \varepsilon=3\sim100$	VAC.	48
図3.9.c	I_{sp}	$OF=1.0\sim4.0$ $P_c=40\text{atm}, \varepsilon=3\sim100$	VAC.	48
図3.9.d	I_{sp}	$OF=1.0\sim4.0$ $P_c=60\text{atm}, \varepsilon=3\sim100$	VAC.	49
図3.9.e	I_{sp}	$OF=1.0\sim4.0$ $P_c=80\text{atm}, \varepsilon=3\sim100$	VAC.	49

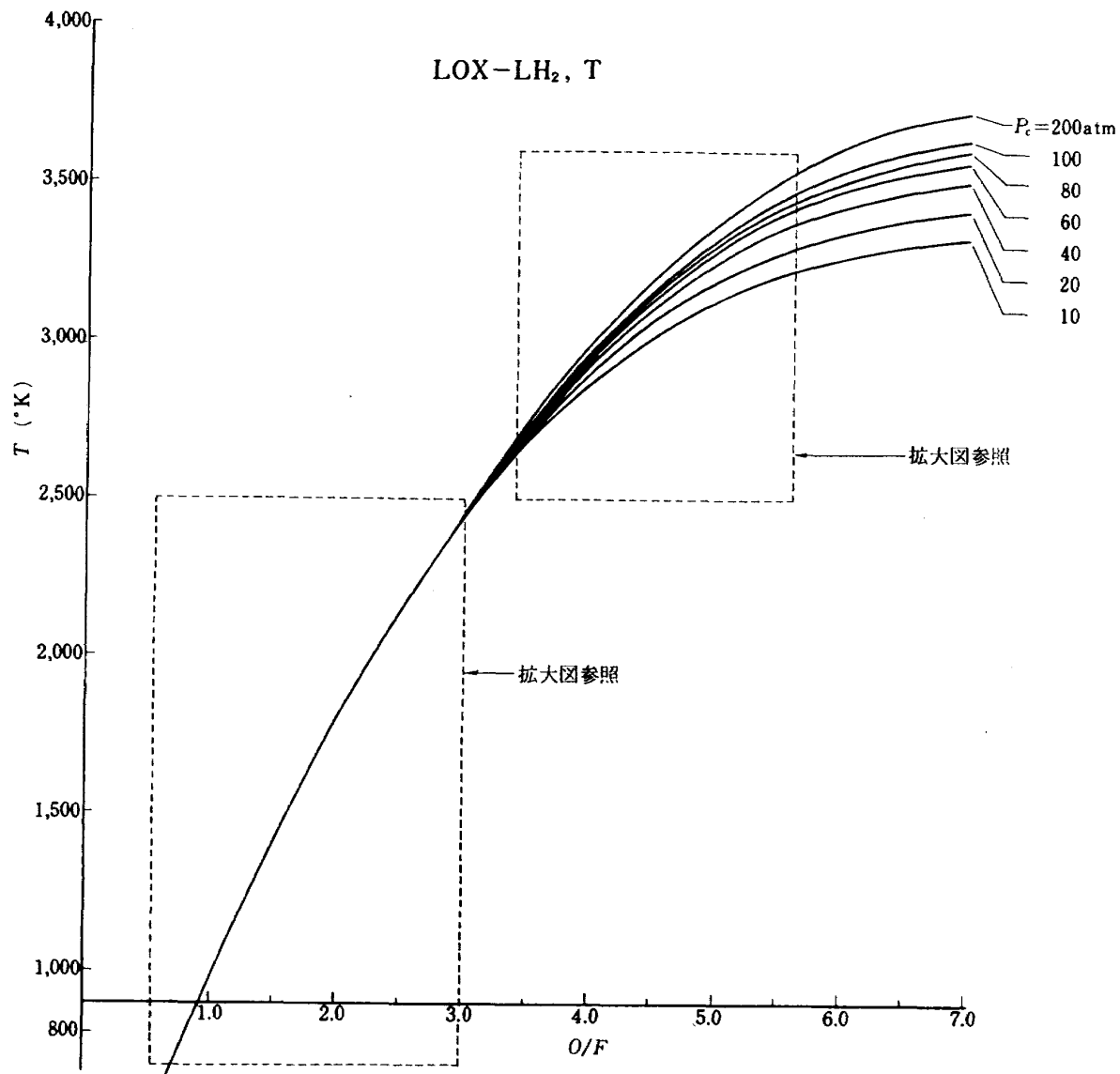
図面 番号	計算の 種類	変数	計算条件	備考	頁
図3.9.f	I_{sp}	$O/F=1.0\sim4.0$	$P_c=100\text{atm}, \epsilon=3\sim100$	VAC.	50
図4.1.a	T	$O/F=0.1\sim7.0$	$P_c=10\sim100\text{atm}$		50
図4.1.b	T	$O/F=1.0\sim2.0$	$P_c=10\sim100\text{atm}$	拡	51
図4.2.a	T_c	$\epsilon=3\sim100$	$P_c=10\sim100\text{atm}, O/F=1.0$		51
図4.2.b	T_c	$\epsilon=3\sim100$	$P_c=10\sim100\text{atm}, O/F=1.0$		51
図4.2.c	T_c	$\epsilon=3\sim100$	$P_c=10\sim100\text{atm}, O/F=1.5$		51
図4.3.a	γ	$O/F=0.1\sim7.0$	$P_c=10\sim100\text{atm}, O/F=2.0$		52
図4.4.a	C_p	$O/F=0.1\sim7.0$	$P_c=10\sim100\text{atm}$		52
図4.5.a	MW	$O/F=0.1\sim7.0$	$P_c=10\sim100\text{atm}$		53
図4.5.b	MW	$O/F=0.1\sim2.0$	$P_c=10\sim100\text{atm}$	拡	53
図4.6.a	C^*	$P_c=10\sim100\text{atm}$	$O/F=1.0\sim7.0$		53
図4.7.a	ρ	$\epsilon=3\sim100$	$P_c=10\sim100\text{atm}, O/F=1.0$		54
図4.7.b	ρ	$\epsilon=3\sim100$	$P_c=10\sim100\text{atm}, O/F=1.5$		54
図4.7.c	ρ	$\epsilon=3\sim100$	$P_c=10\sim100\text{atm}, O/F=2.0$		54
図4.8.a	I_{sp}	$O/F=1.0\sim4.0$	$P_c=10\text{atm}, \epsilon=3\sim10$	SL.	55
図4.8.b	I_{sp}	$O/F=1.0\sim4.0$	$P_c=20\text{atm}, \epsilon=3\sim20$	SL.	55
図4.8.c	I_{sp}	$O/F=1.0\sim4.0$	$P_c=40\text{atm}, \epsilon=3\sim40$	SL.	56
図4.8.d	I_{sp}	$O/F=1.0\sim4.0$	$P_c=60\text{atm}, \epsilon=3\sim60$	SL.	56
図4.8.e	I_{sp}	$O/F=1.0\sim4.0$	$P_c=80\text{atm}, \epsilon=3\sim80$	SL.	57
図4.8.f	I_{sp}	$O/F=1.0\sim4.0$	$P_c=100\text{atm}, \epsilon=3\sim100$	SL.	57
図4.9.a	I_{sp}	$O/F=1.0\sim4.0$	$P_c=10\text{atm}, \epsilon=3\sim100$	VAC.	58
図4.9.b	I_{sp}	$O/F=1.0\sim4.0$	$P_c=20\text{atm}, \epsilon=3\sim100$	VAC.	58
図4.9.c	I_{sp}	$O/F=1.0\sim4.0$	$P_c=40\text{atm}, \epsilon=3\sim100$	VAC.	59
図4.9.d	I_{sp}	$O/F=1.0\sim4.0$	$P_c=60\text{atm}, \epsilon=3\sim100$	VAC.	59
図4.9.e	I_{sp}	$O/F=1.0\sim4.0$	$P_c=80\text{atm}, \epsilon=3\sim100$	VAC.	60
図4.9.f	I_{sp}	$O/F=1.0\sim4.0$	$P_c=100\text{atm}, \epsilon=3\sim100$	VAC.	60
図4.10.a	P/P_c	$\epsilon=3\sim100$	$P_c=20\text{atm}, O/F=1.0\sim2.0$	ノズル圧力比	61
図5.1.a	LOX-LH ₂ の I_{sp} の計算値と実際のエンジンの値との比較図				62
図5.1.b	LOX-RP・1の I_{sp} の計算値と実際のエンジンの値との比較図				62
図5.2.a	FrozenおよびEquilibriumによる I_{sp} の計算値の比較図 LOX-LH ₂				63
図5.2.b	FrozenおよびEquilibriumによる I_{sp} の計算値の比較図 N ₂ O ₄ -A.50				63
図5.2.c	FrozenおよびEquilibriumによる I_{sp} の計算値の比較図 LOX-RP・1				64
図5.2.d	FrozenおよびEquilibriumによる I_{sp} の計算値の比較図 LOX-C ₂ H ₅ -OH				64

4 む す び

実用的なロケット推進薬について、比推力、特性排気速度、排気温度、比熱比などの性能計算を行ない、その結果を内容によって分類しそれぞれ図に示した。これらの計算は完全燃焼、理想気体、等エントロピー膨張、Frozen flowなどの諸条件のもとで行なった。したがってエンジンの性能を厳密に求める場合には図で示した値にこれらの諸条件の影響を考慮しなければならない。図5.1. a および図5.1. b に LOX-LH₂ および LOX-RP-1 の比推力について計算値と実際のエンジンの値との比較を示し参考とした。

参 考 文 献

1. Stanley F. Sarnier, Propellant Chemistry, Reinhold Publishing Corp., New York, (1966), pp. 35
2. Gordon and McBride, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket performance, Incident and Reflected shocks, and Chapman-Jouguet Detonations, NASA SP-273, (1971)
3. Dieter K. Huzel and David H. Huang, Design of Liquid Propellant Rocket Engines, NASA SP-125



☒ 1・1・a

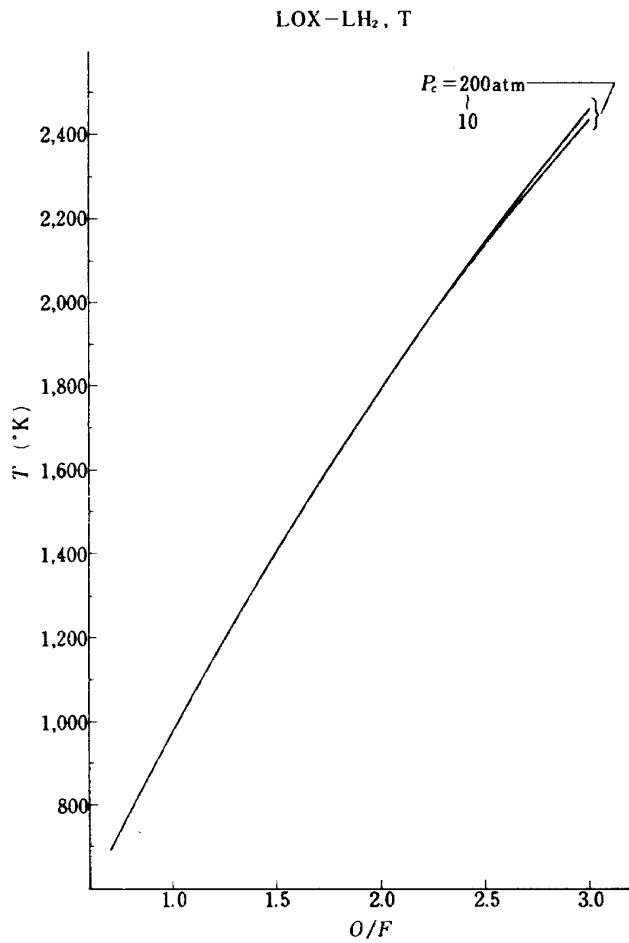


図 1・1・b (括)

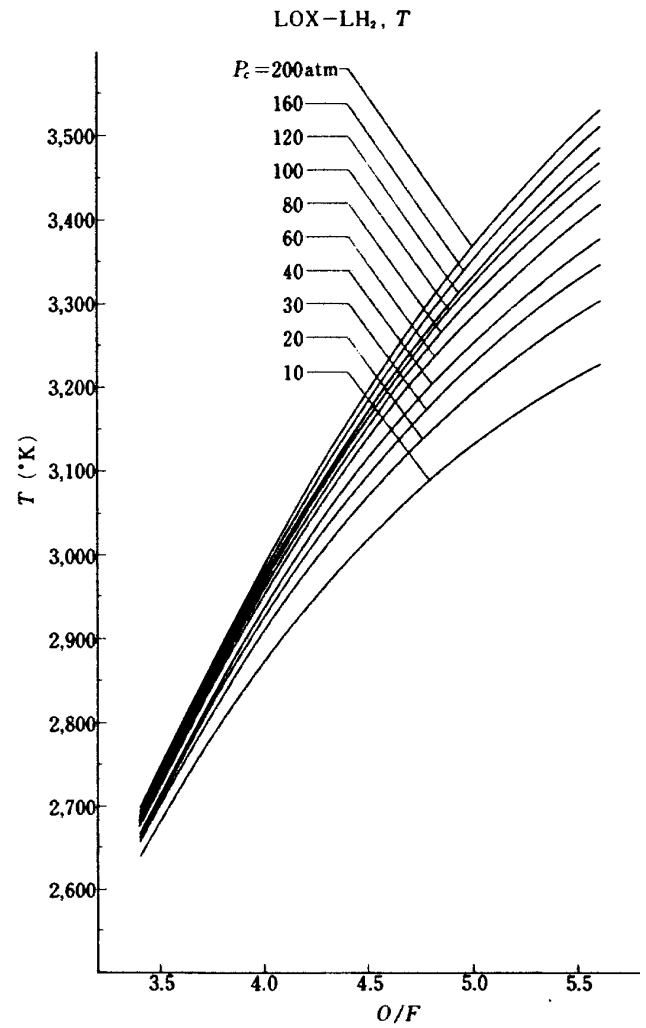
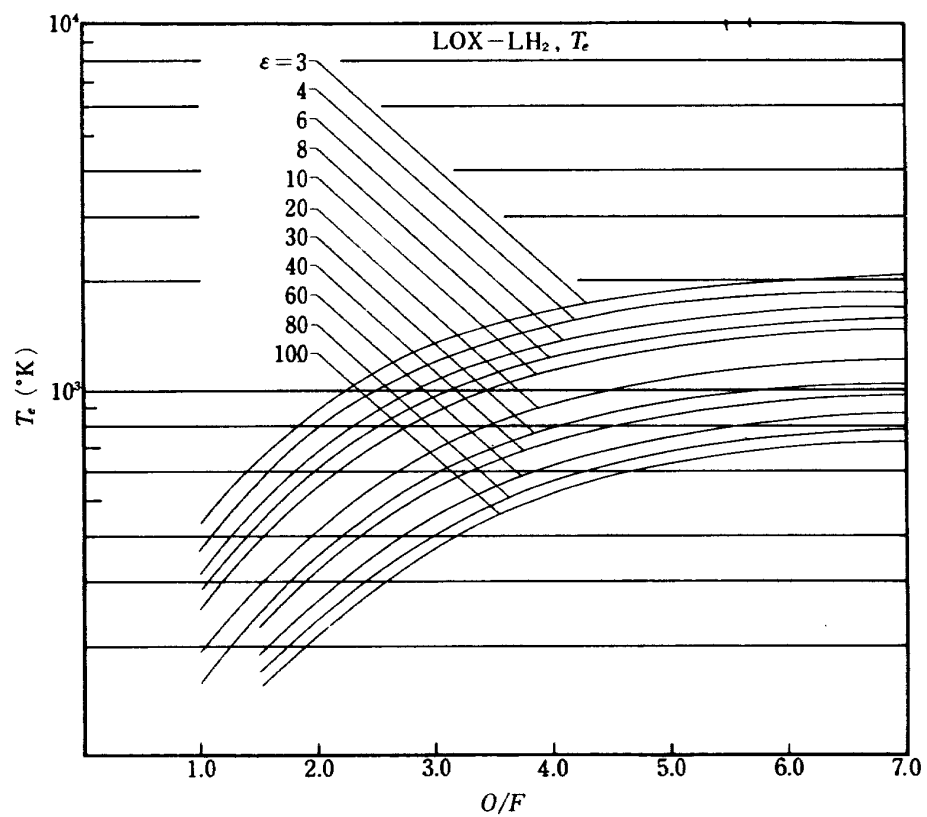


図 1・1・c (括)

図 1・2・a ($P_c = 10 \text{ atm}$)

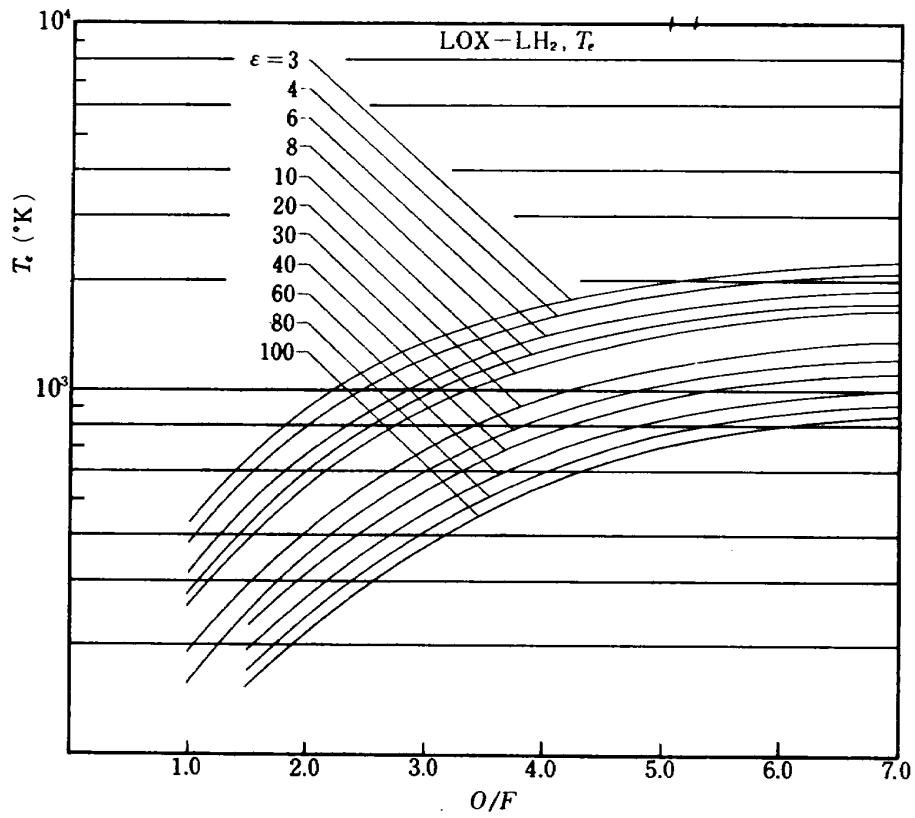


図 1・2・b ($P_c = 60 \text{ atm}$)

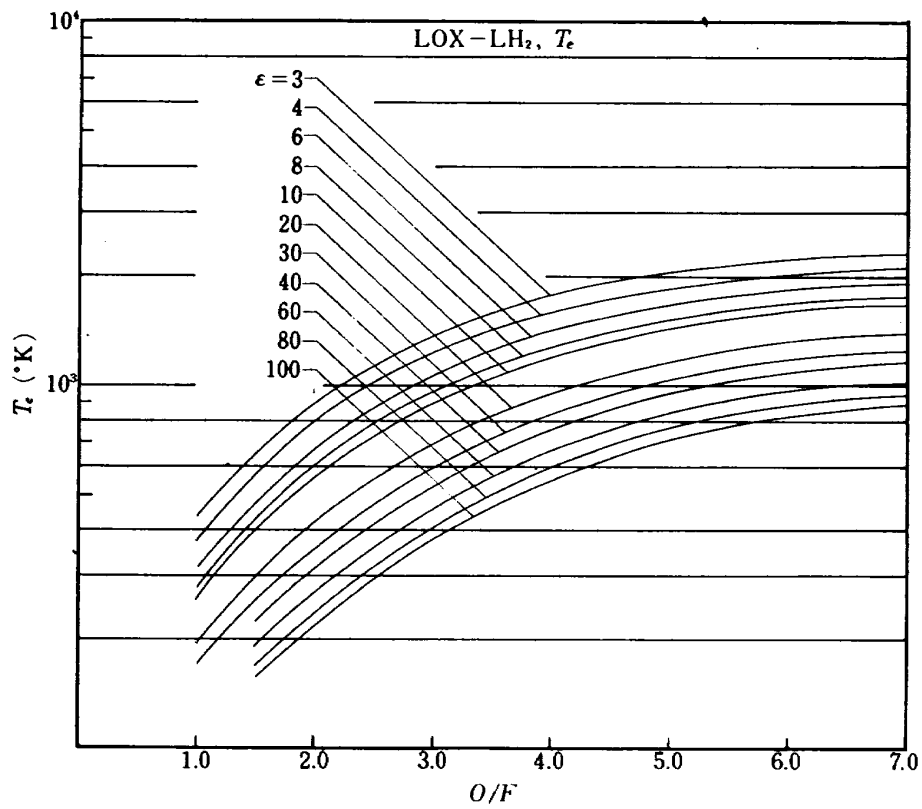
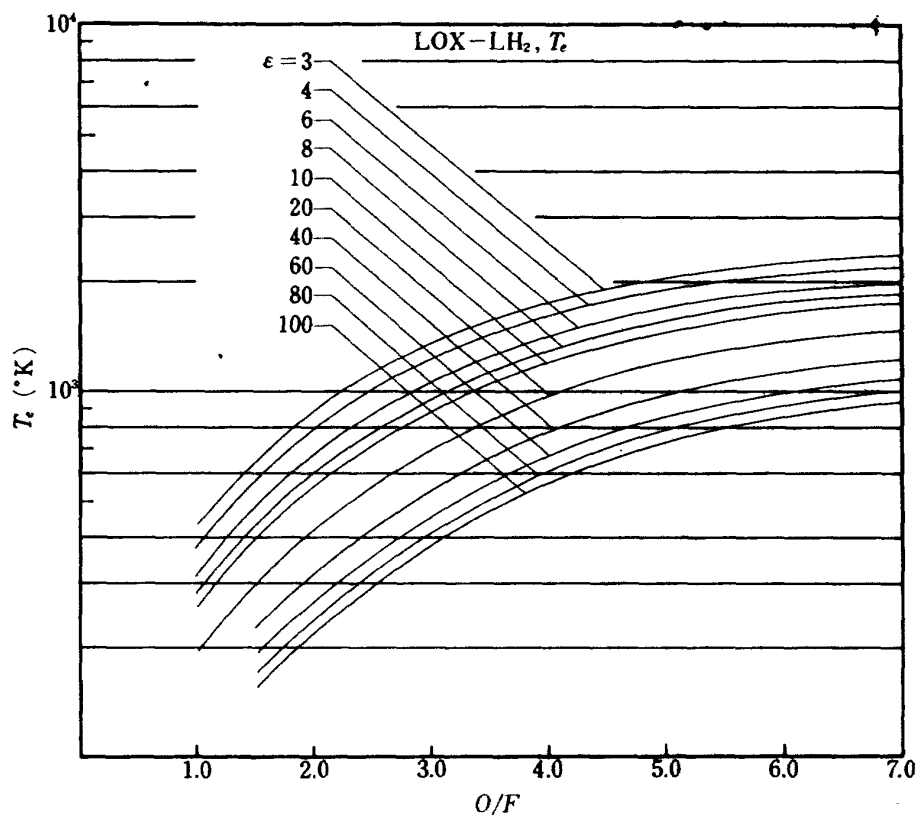
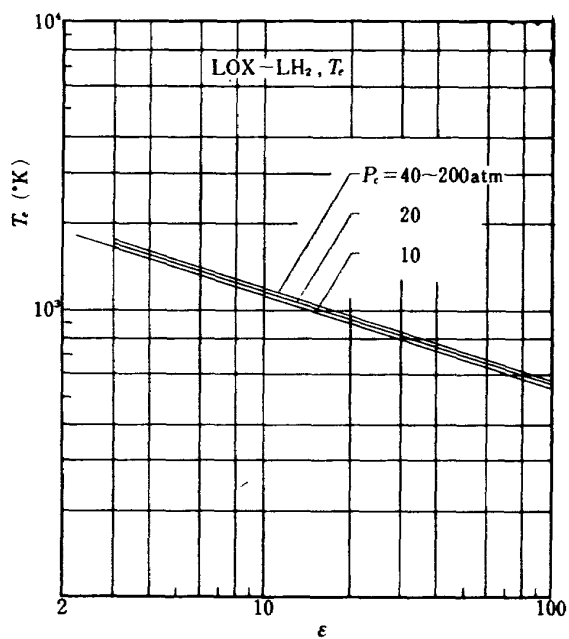
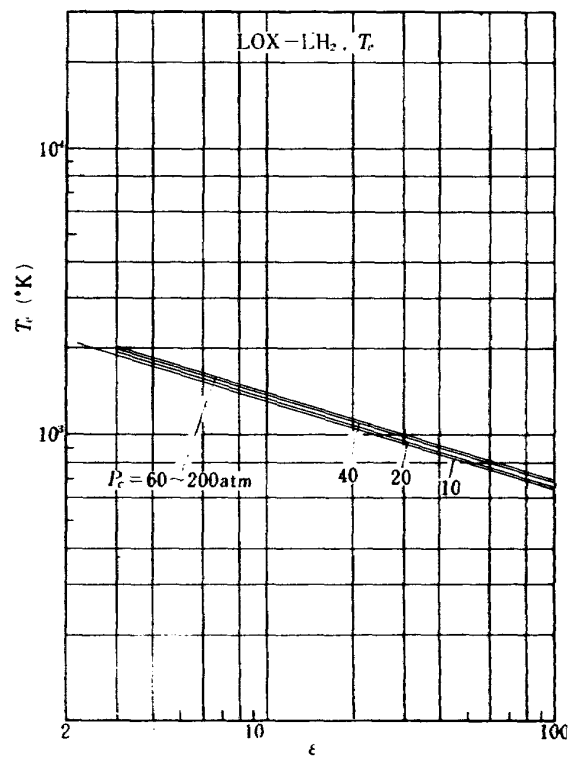


図 1・2・c ($P_c = 100 \text{ atm}$)

図 1・2・d ($P_c = 200 \text{ atm}$)図 1・2・e ($O/F = 4.0$)図 1・2・f ($O/F = 5.0$)

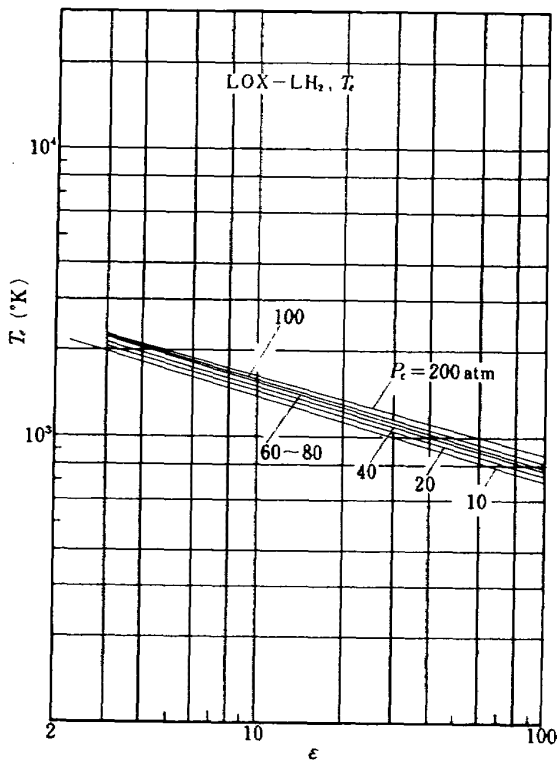


図 1・2・g ($O/F = 6.0$)

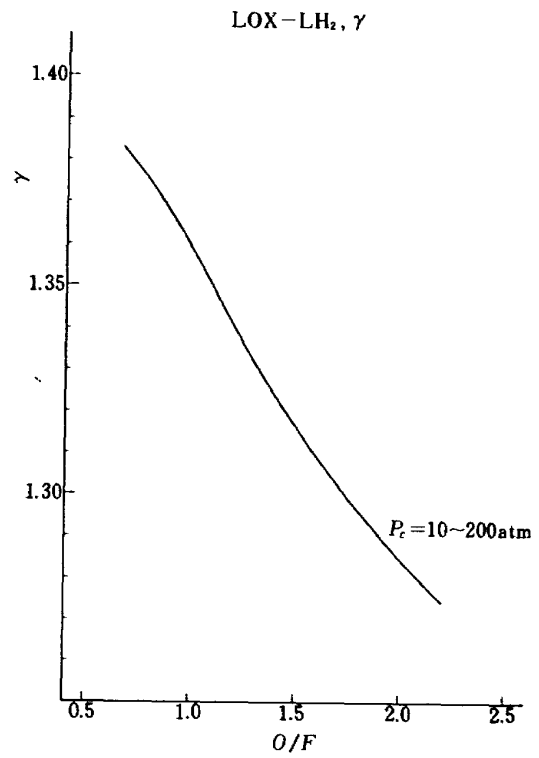


図 1・3・b (拡)

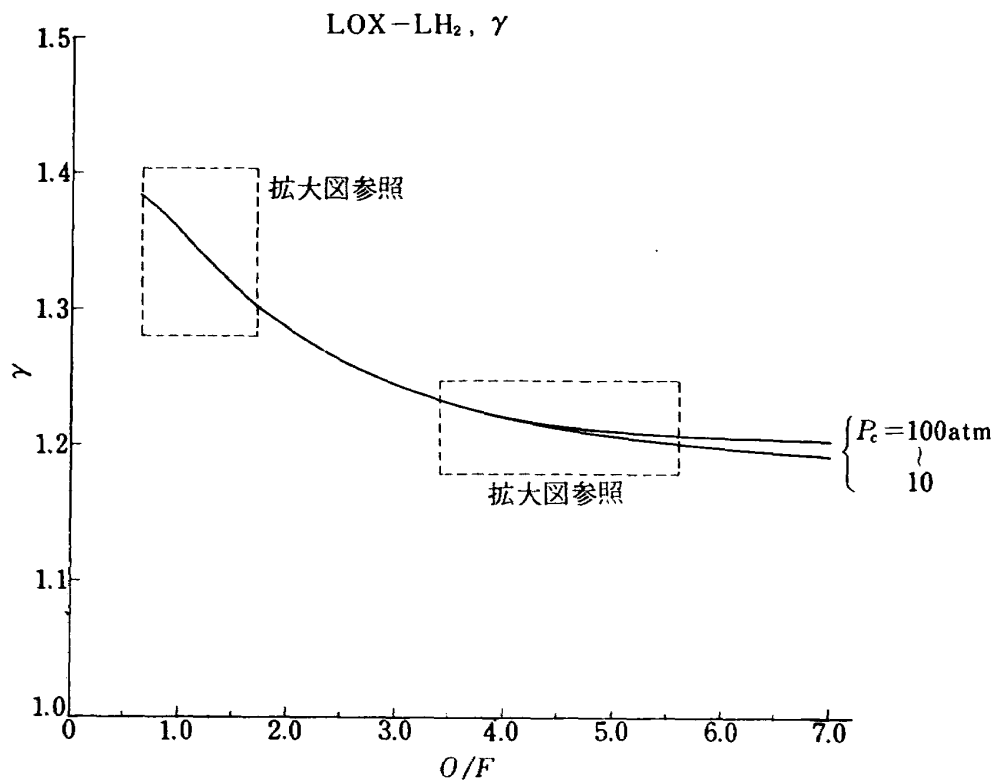


図 1・3・a

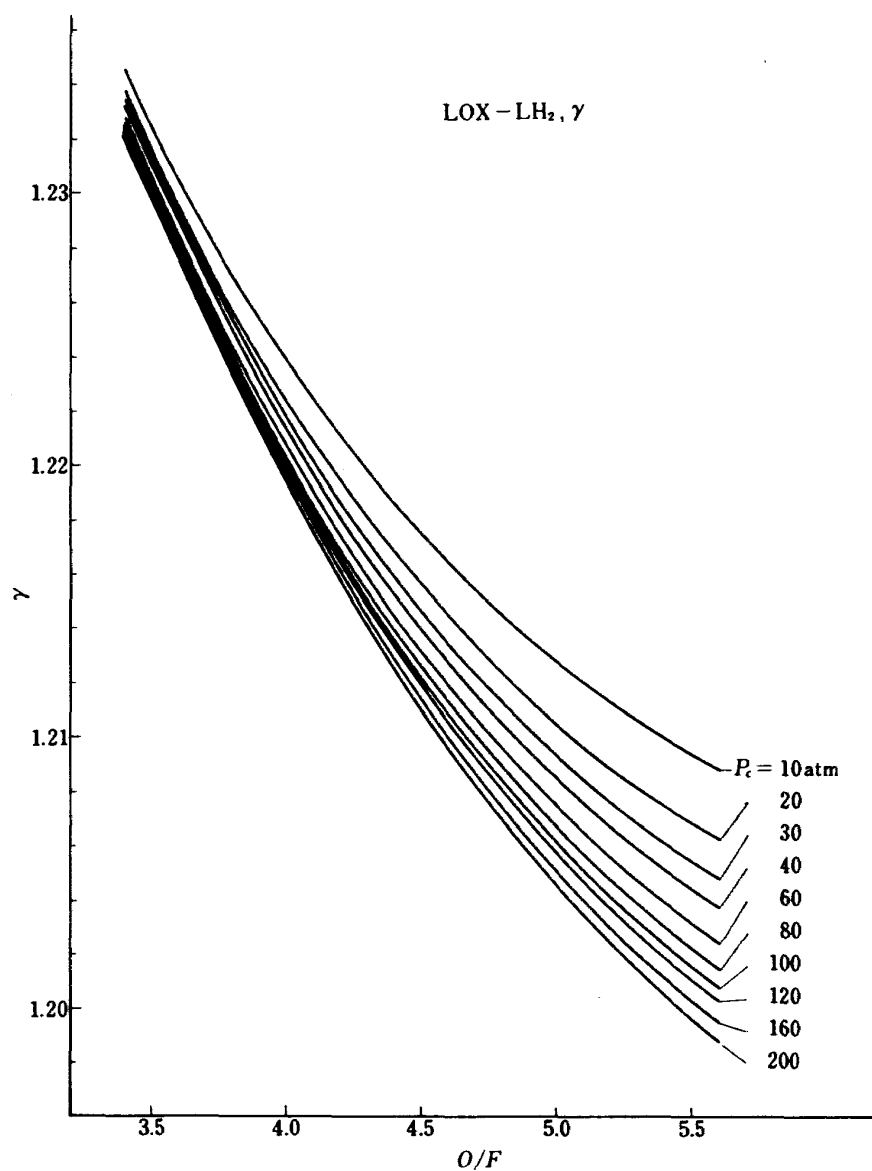


図 1・3・c (括)

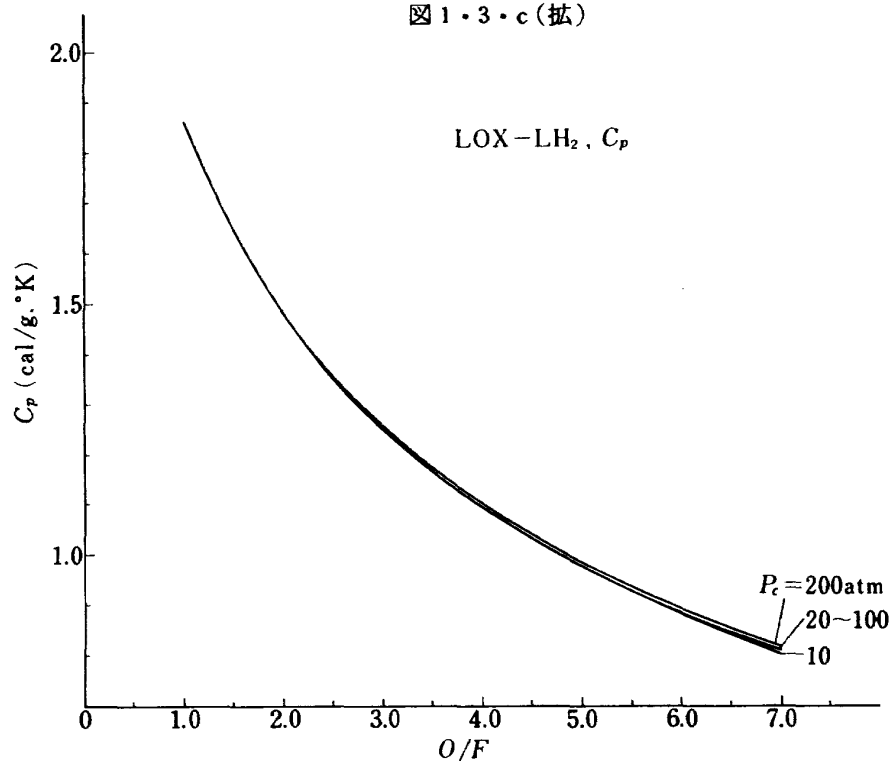


図 1・4・a

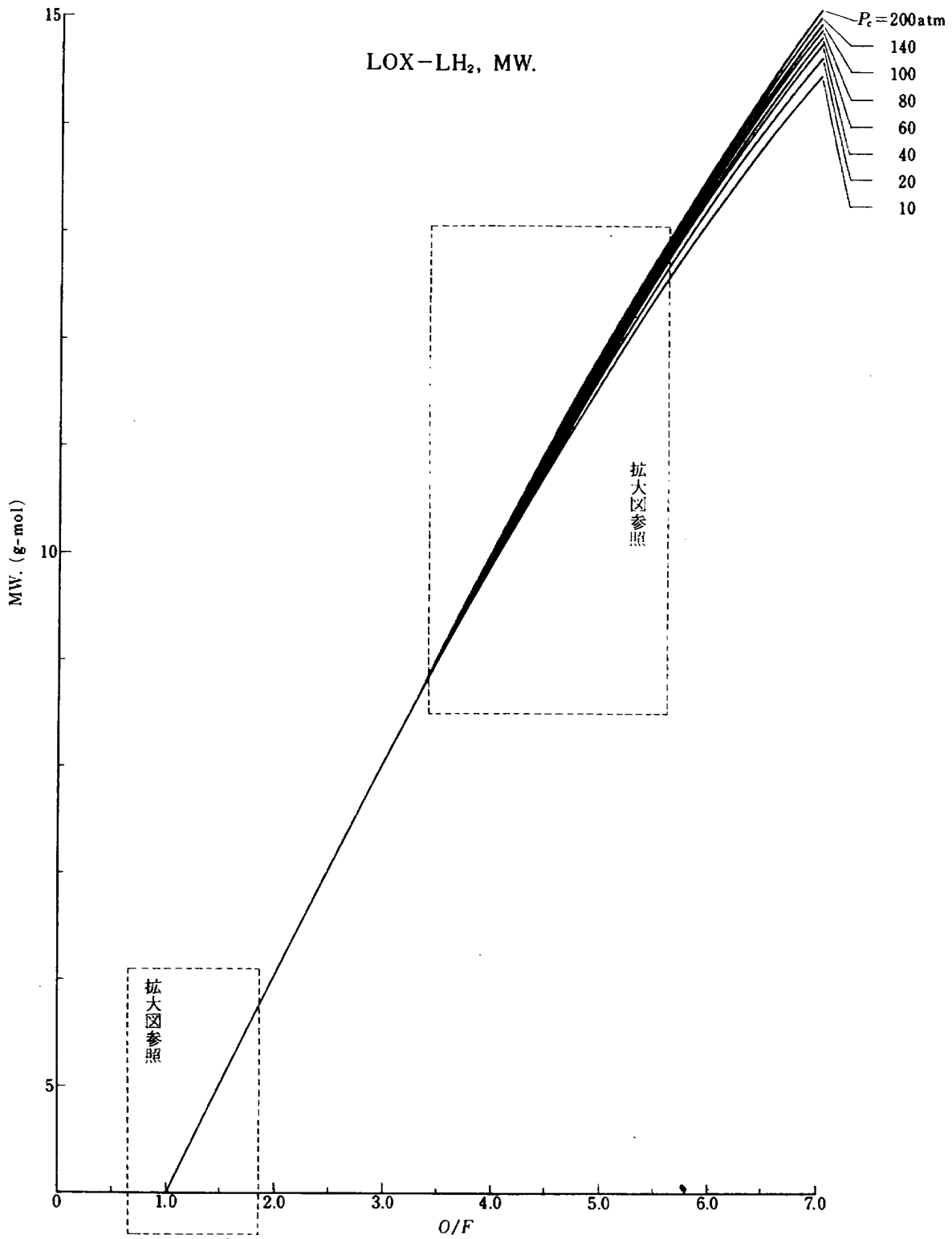


図 1・5・a

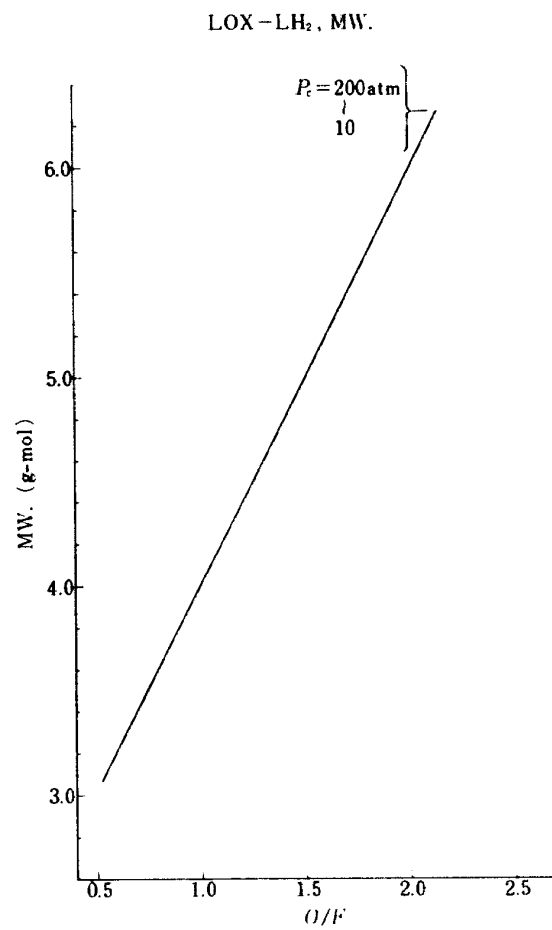


図 1・5・b (括)

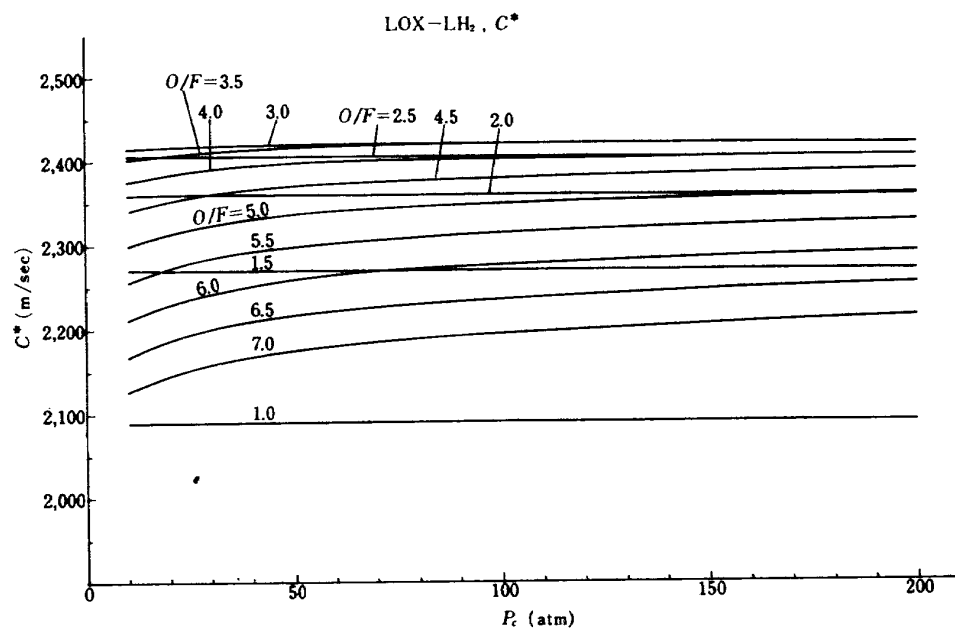


図 1・6・a

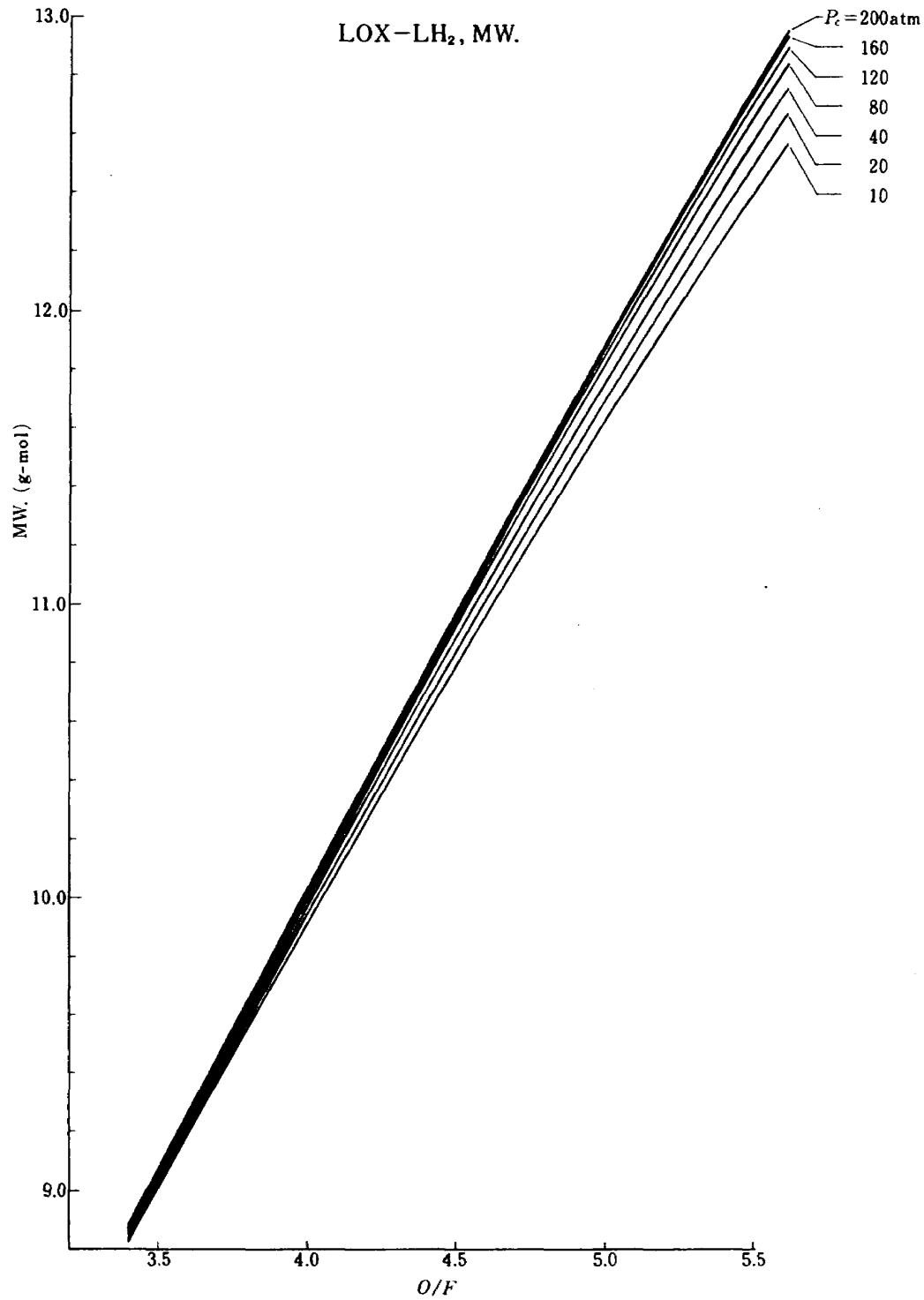


図 1・5・c (括)

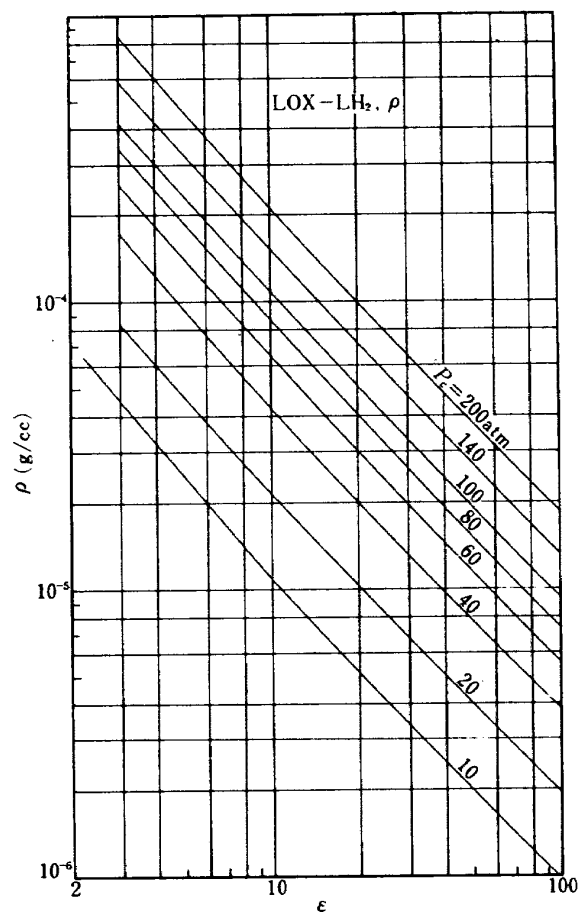


図 1.7・a (O/F = 4.0)

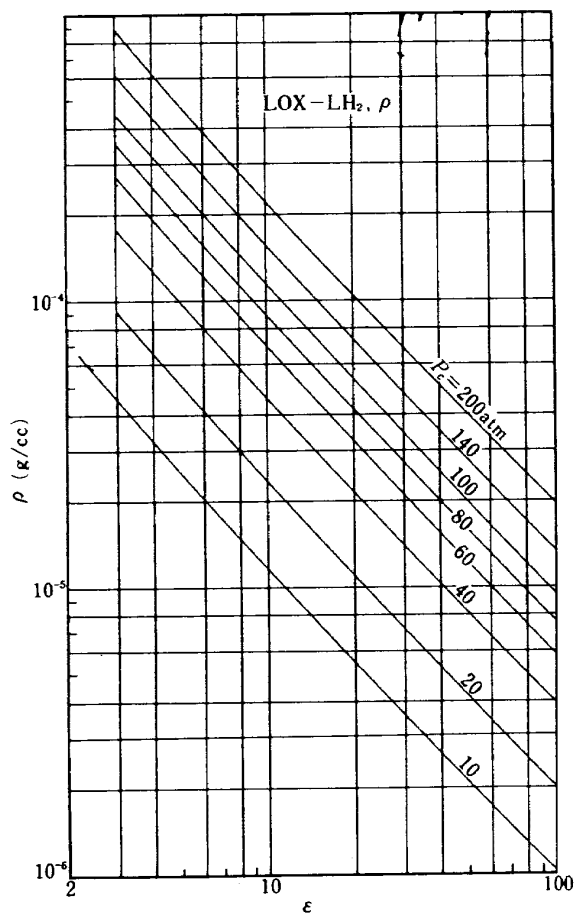


図 1.7・b (O/F = 5.0)

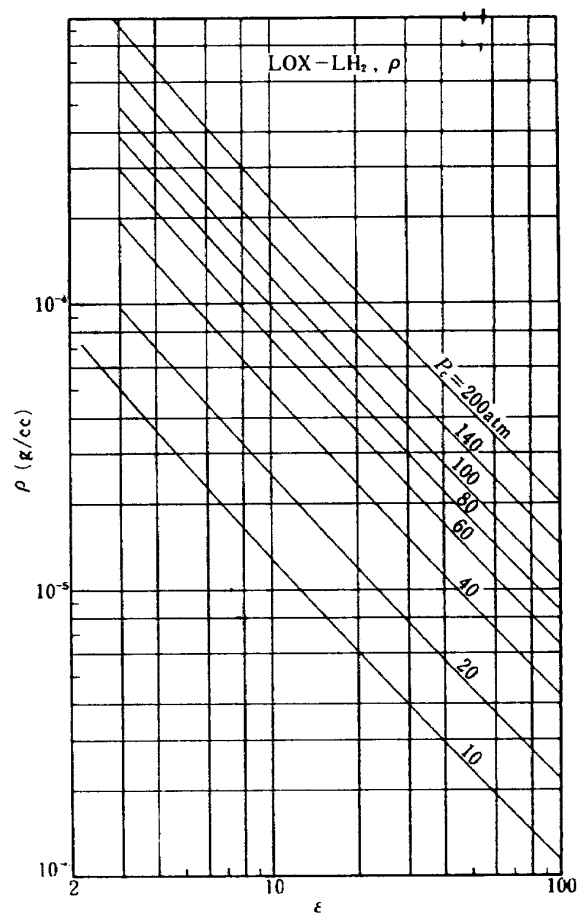


図 1.7・c (O/F = 6.0)

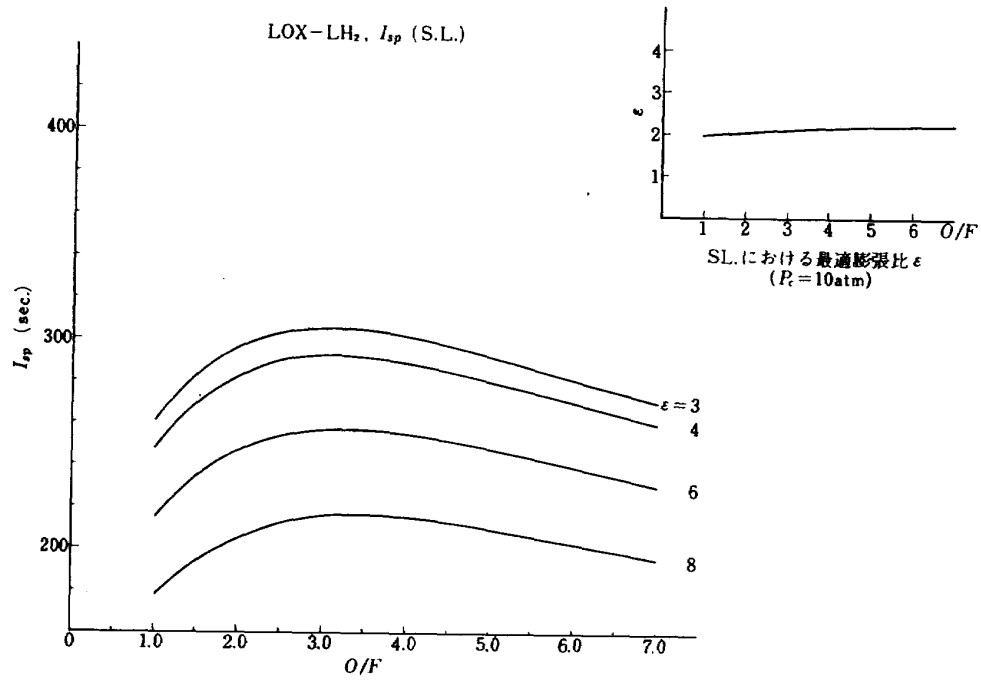


図 1・8・a ($P_c = 10 \text{ atm}$)

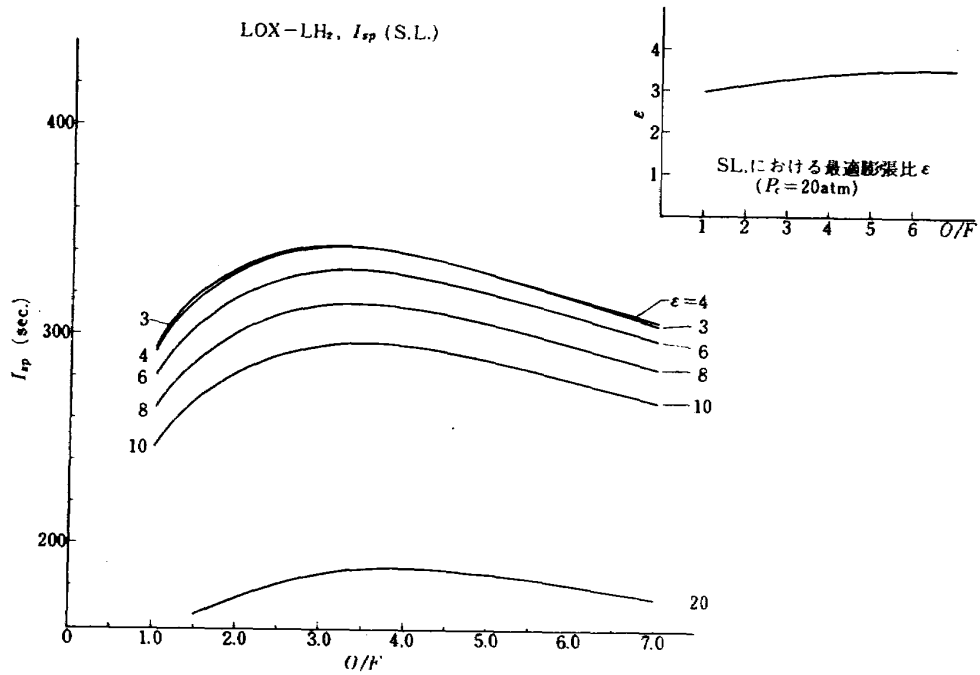
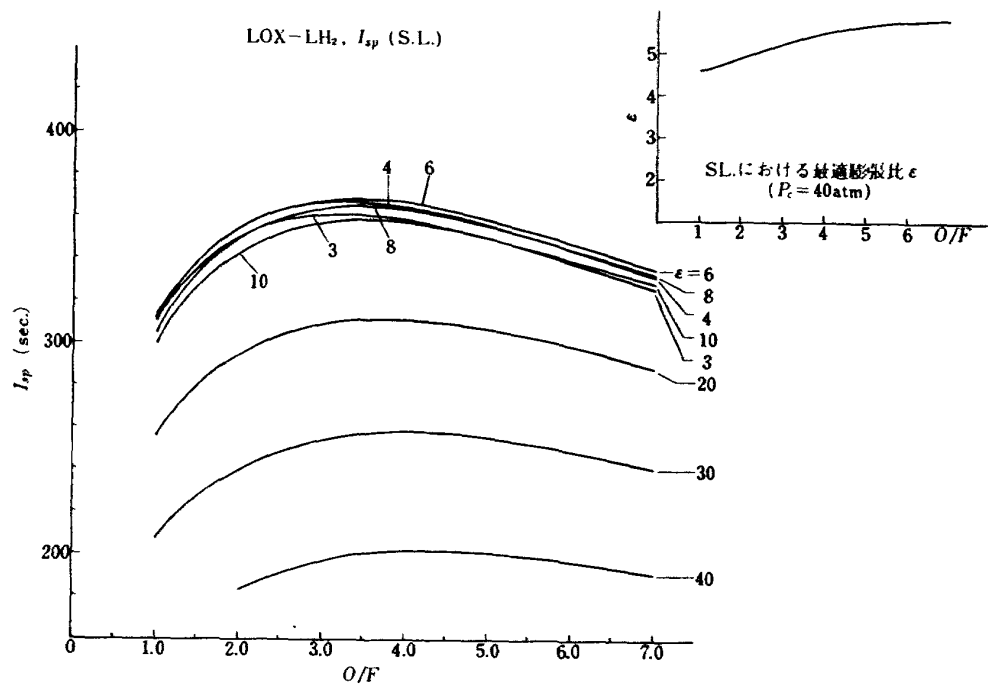
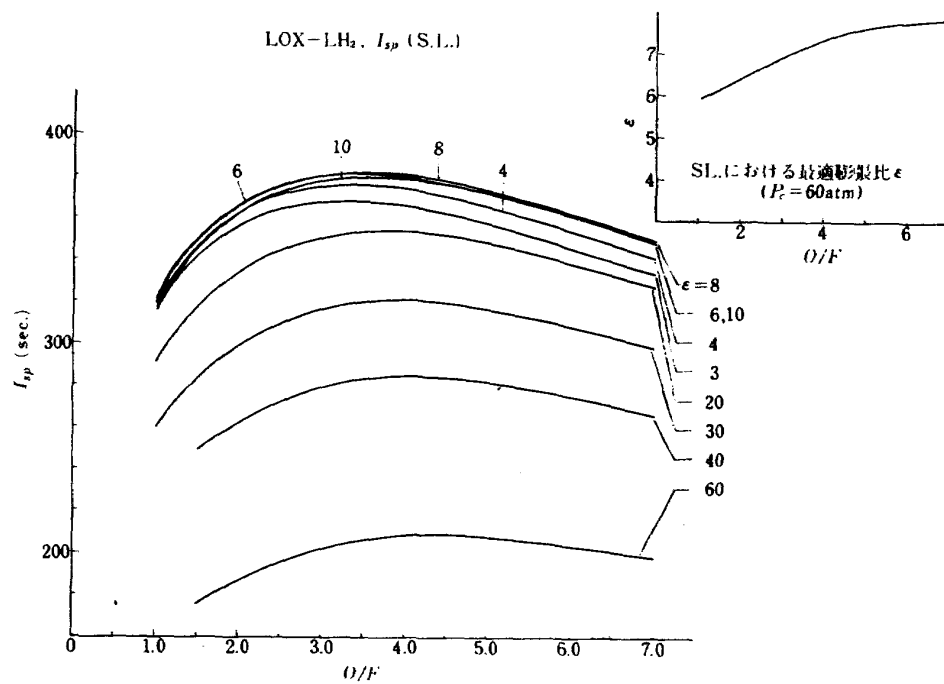


図 1・8・b ($P_c = 20 \text{ atm}$)

図 1・8・c ($P_c = 40 \text{ atm}$)図 1・8・d ($P_c = 60 \text{ atm}$)

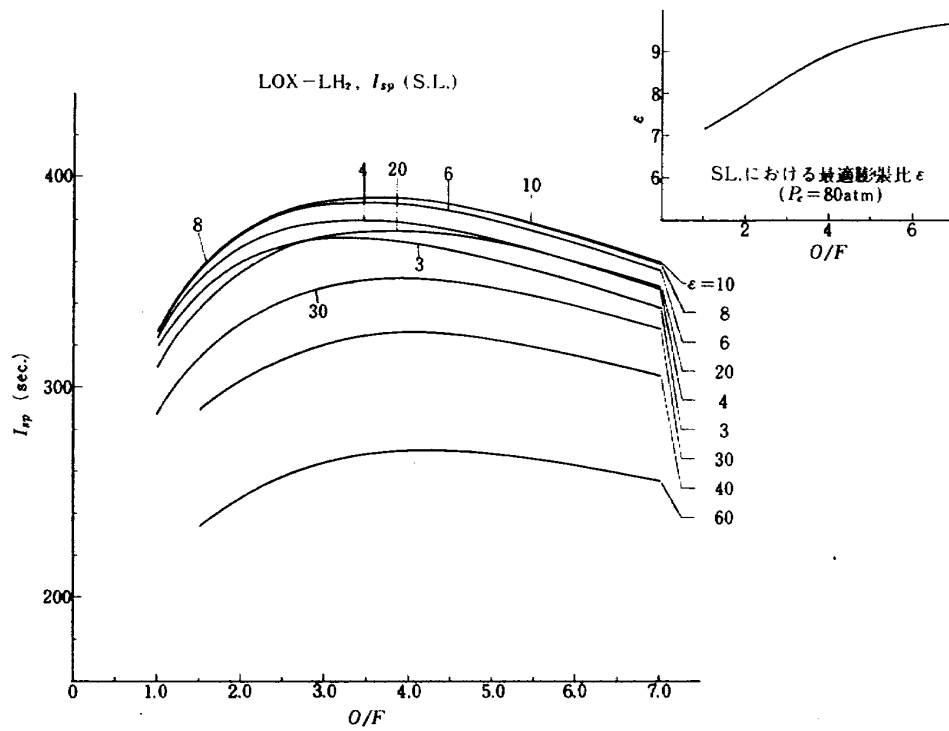


図 1・8・e ($P_c = 80 \text{ atm}$)

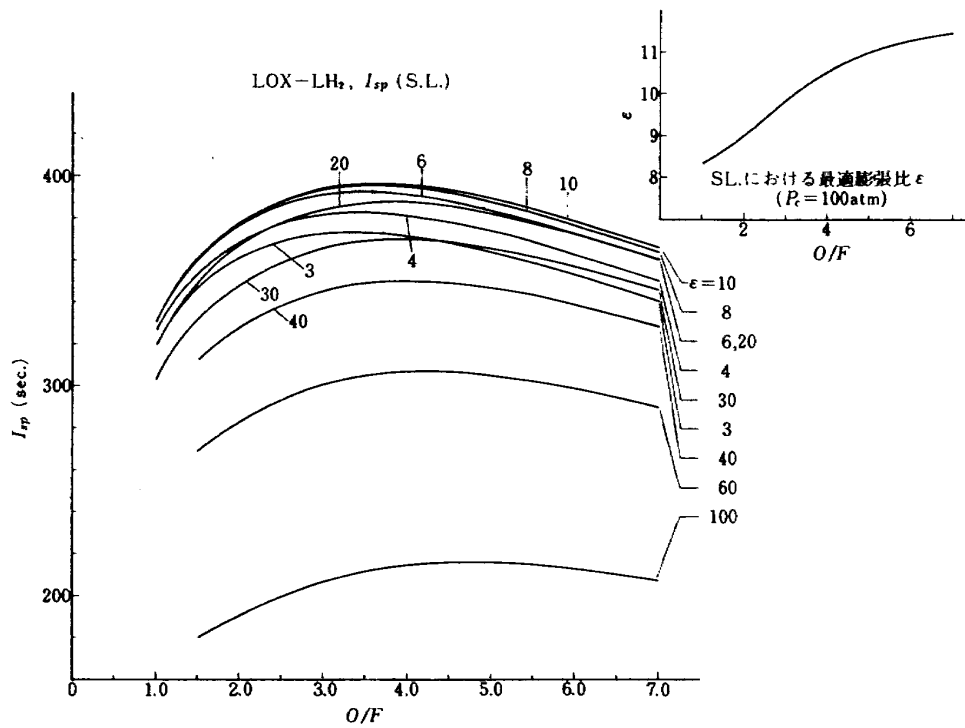
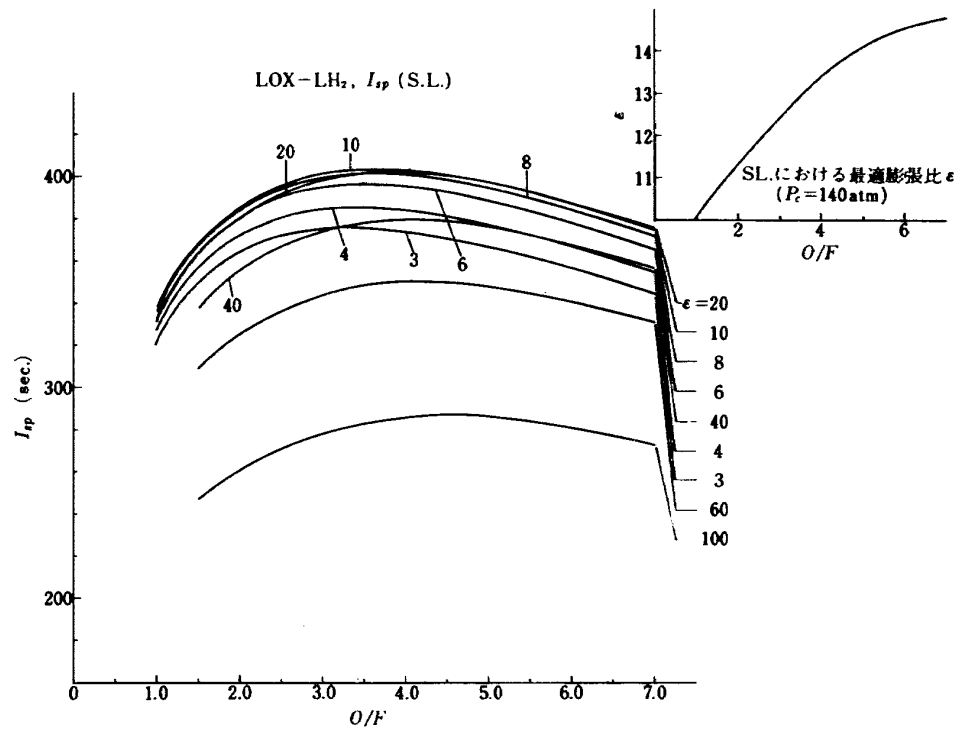
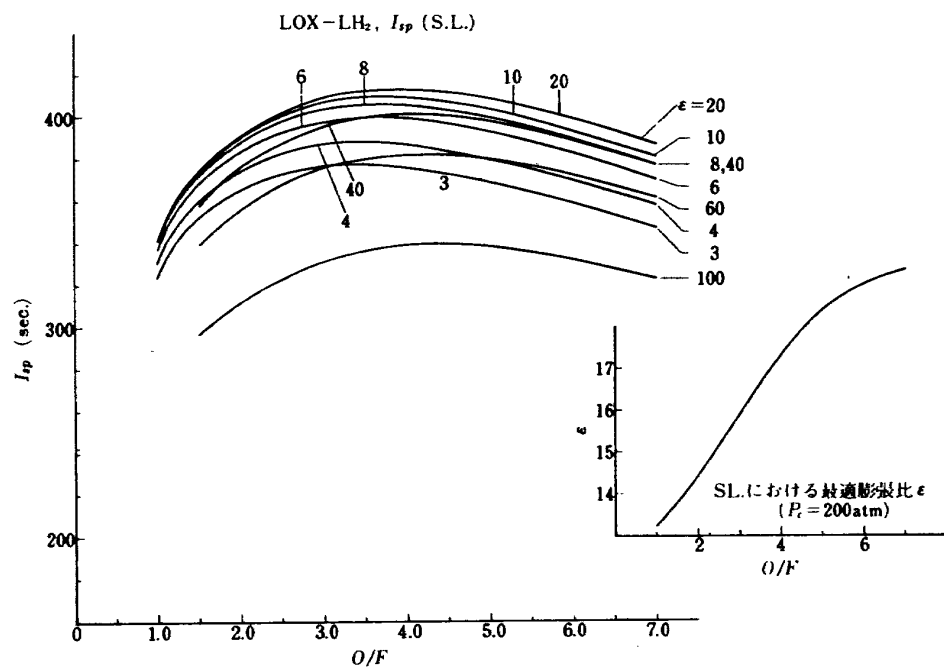


図 1・8・f ($P_c = 100 \text{ atm}$)

図 1・8・g ($P_c = 140 \text{ atm}$)図 1・8・h ($P_c = 200 \text{ atm}$)

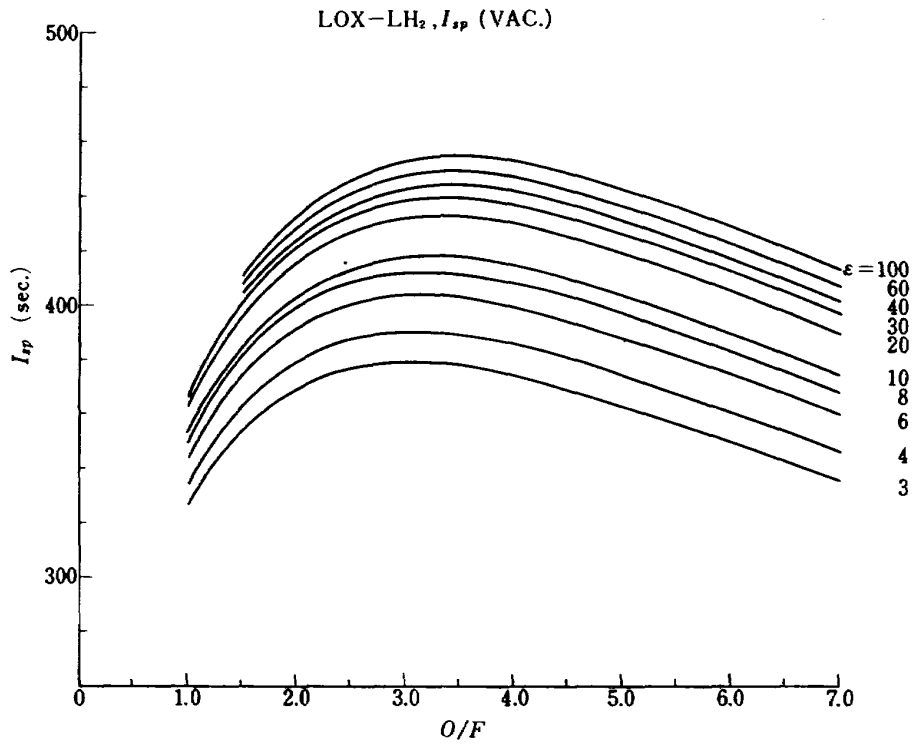


図 1・9・a ($P_c = 10 \text{ atm}$)

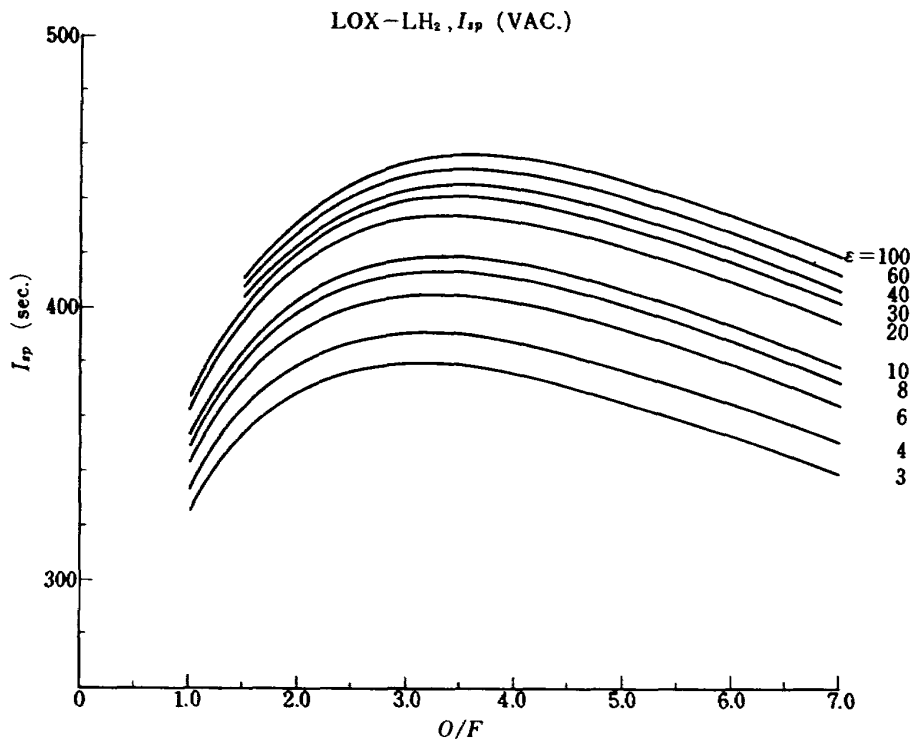
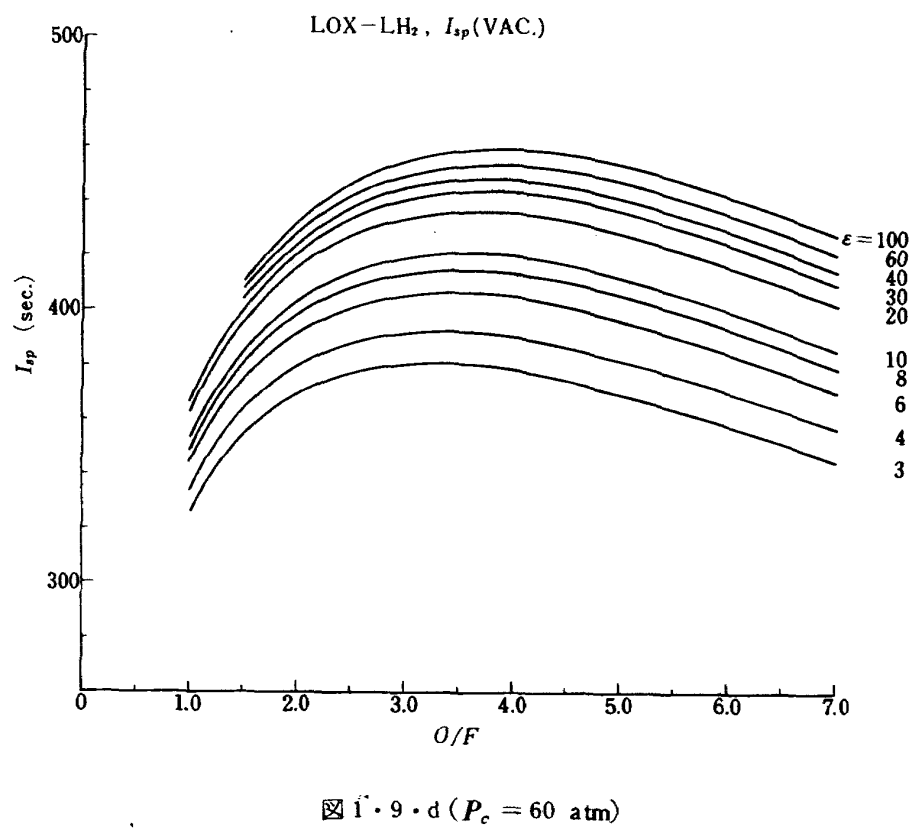
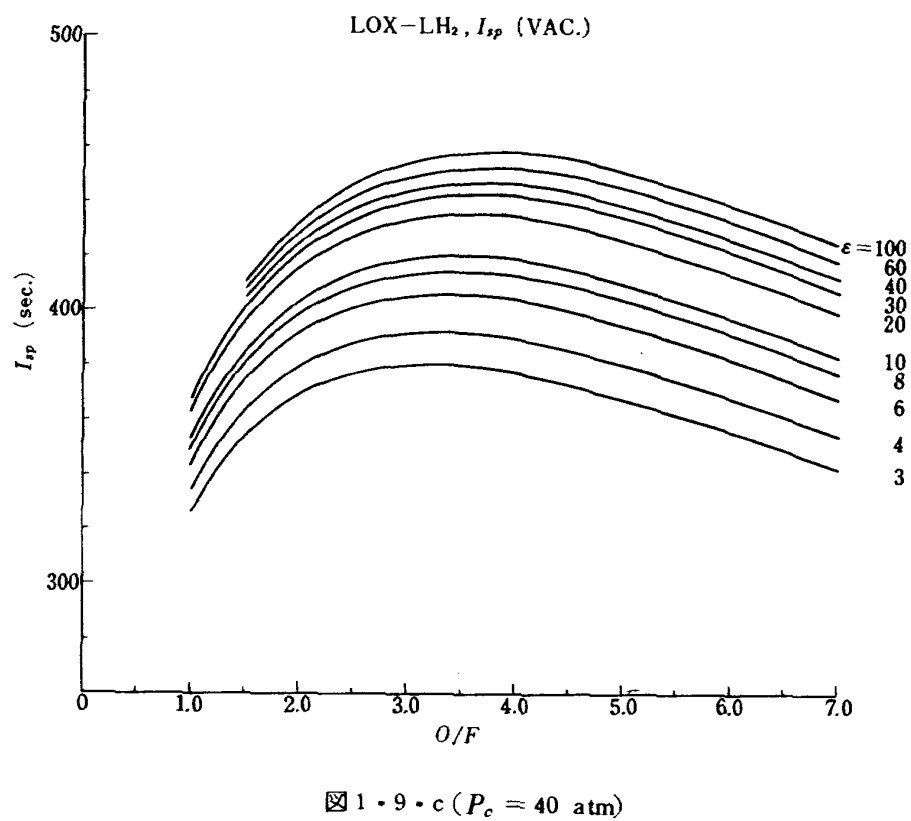


図 1・9・b ($P_c = 20 \text{ atm}$)



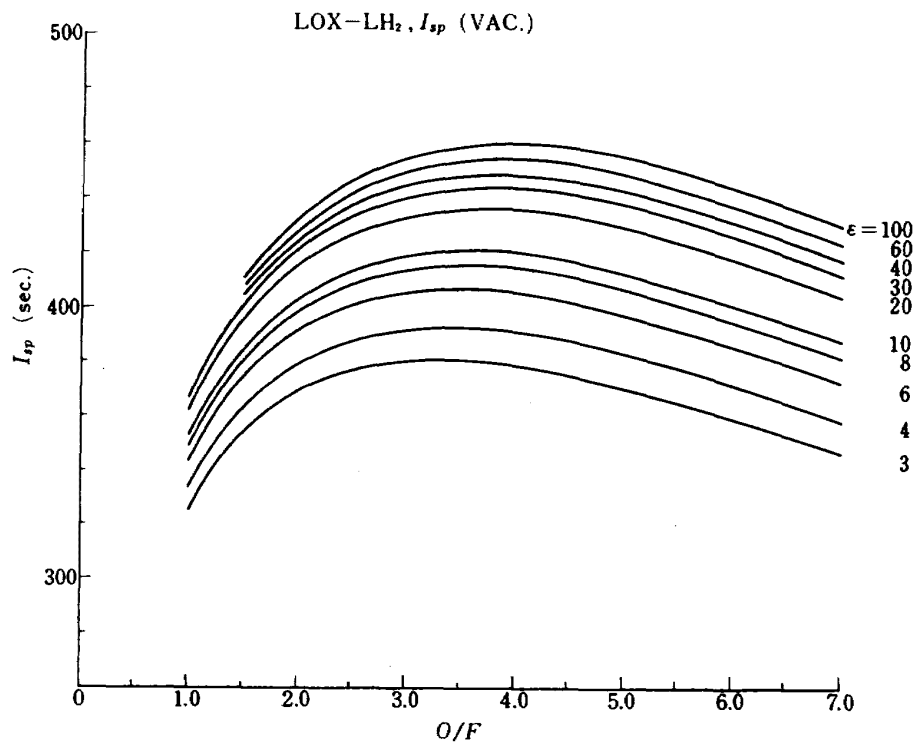


図 1・9・e ($P_c = 80 \text{ atm}$)

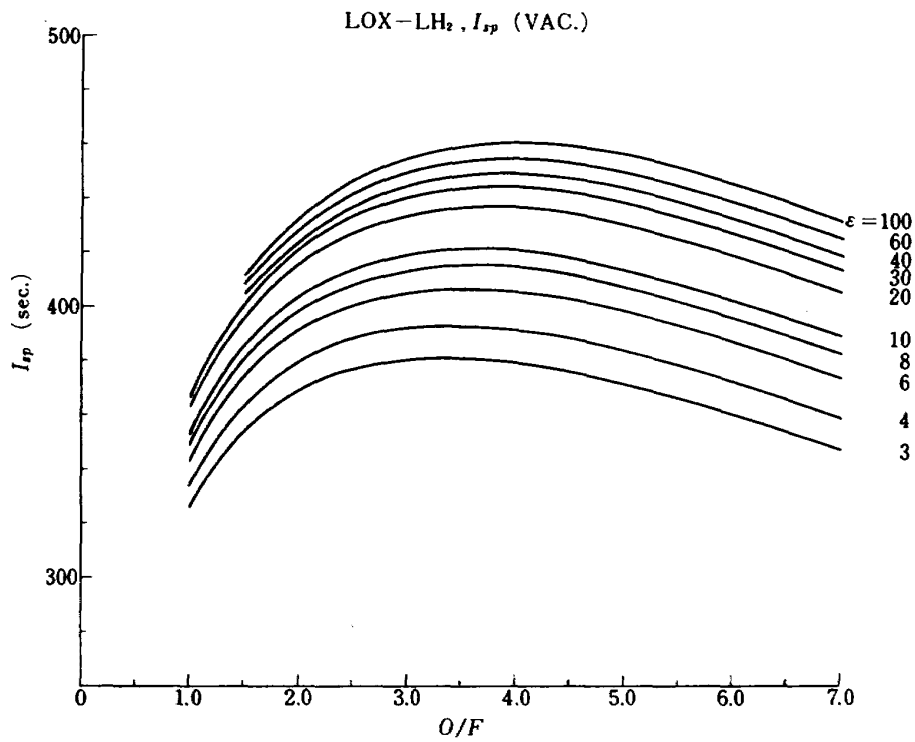
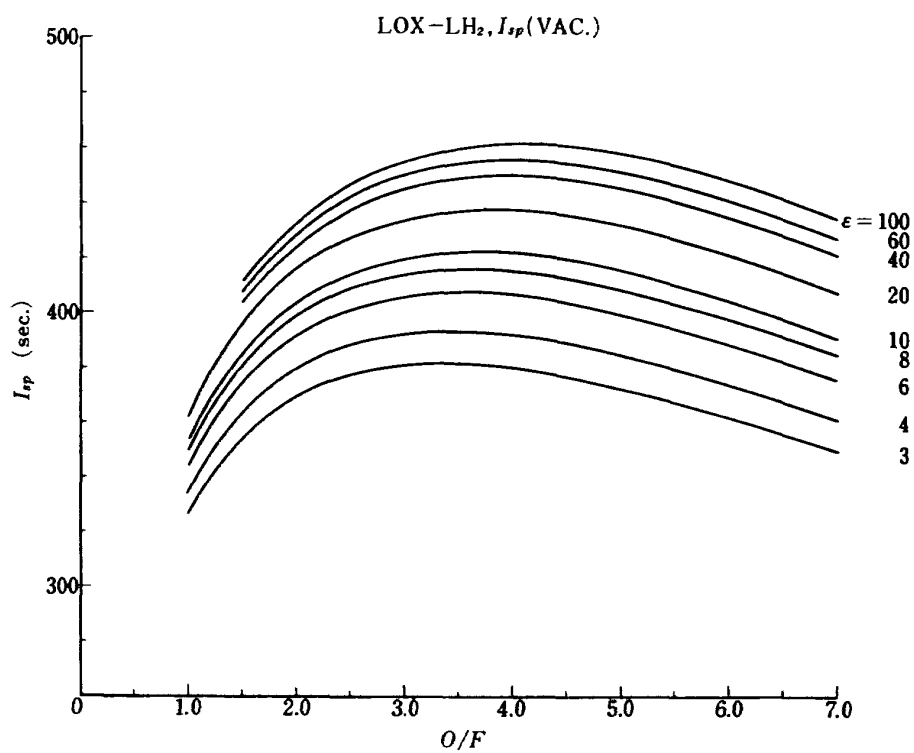
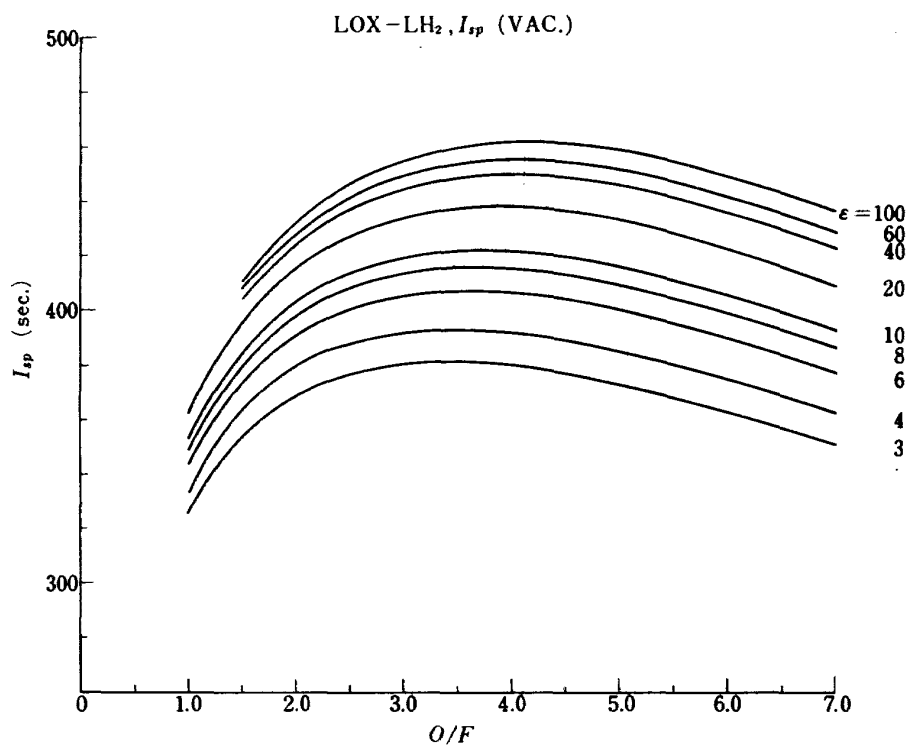


図 1・9・f ($P_c = 100 \text{ atm}$)



☒ $1 \cdot 9 \cdot g (P_c = 140 \text{ atm})$



☒ $1 \cdot 9 \cdot h (P_c = 200 \text{ atm})$

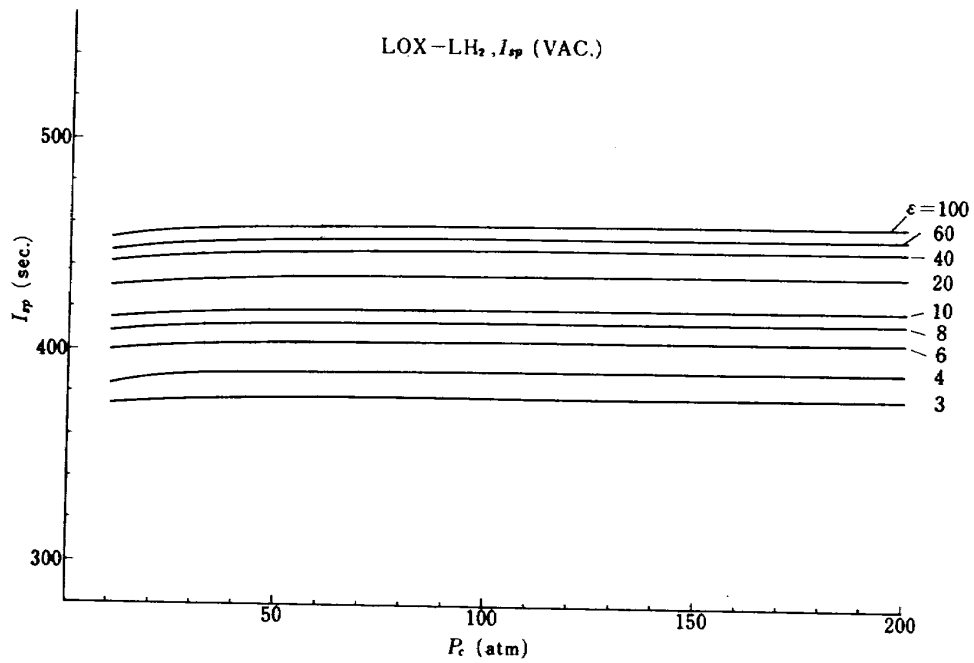


図 1・9・i (O/F = 4.0)

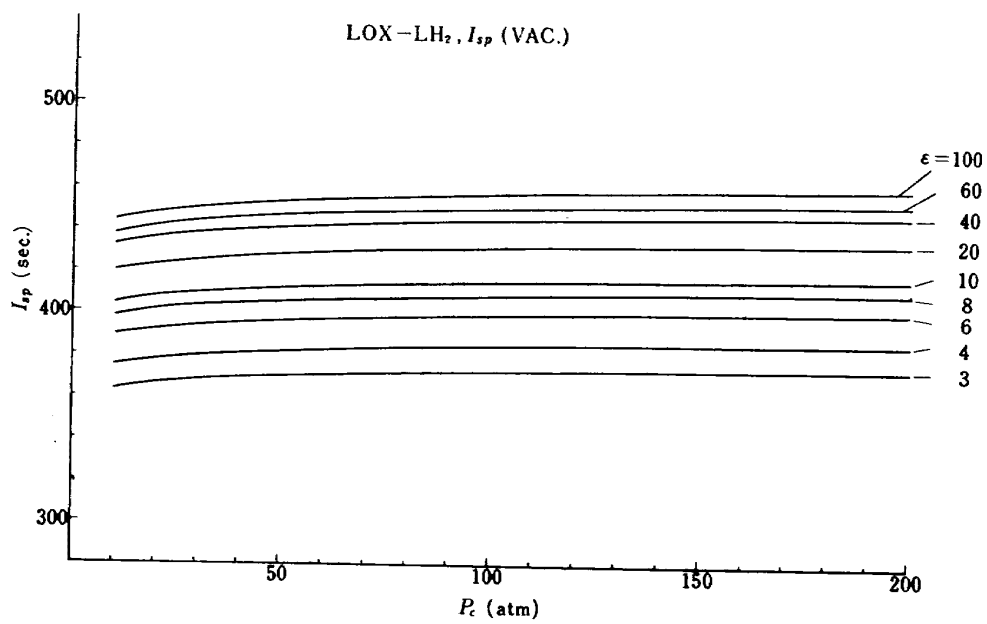


図 1・9・j (O/F = 5.0)

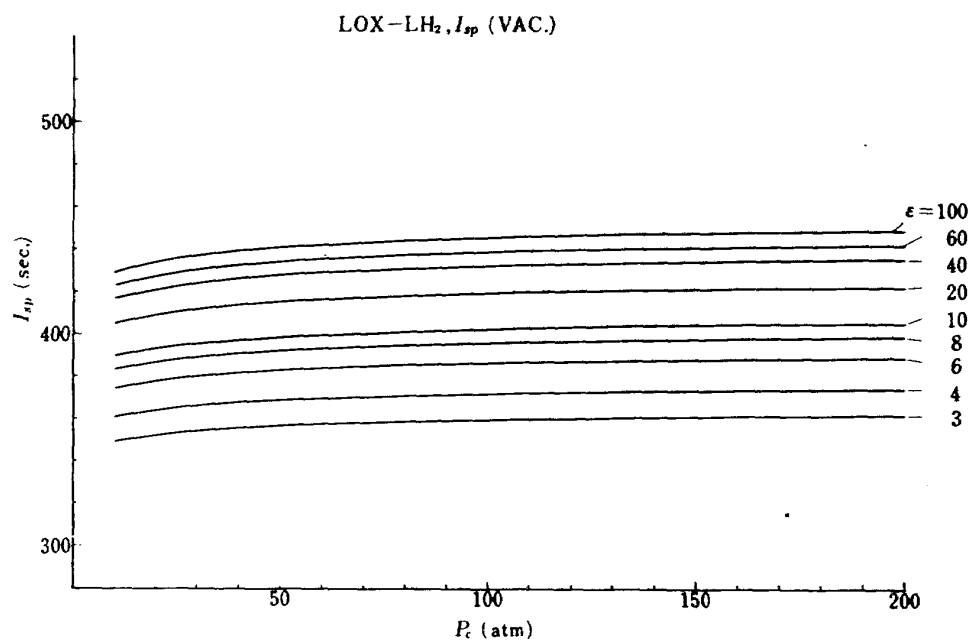


図 1・9・k ($O/F = 6.0$)

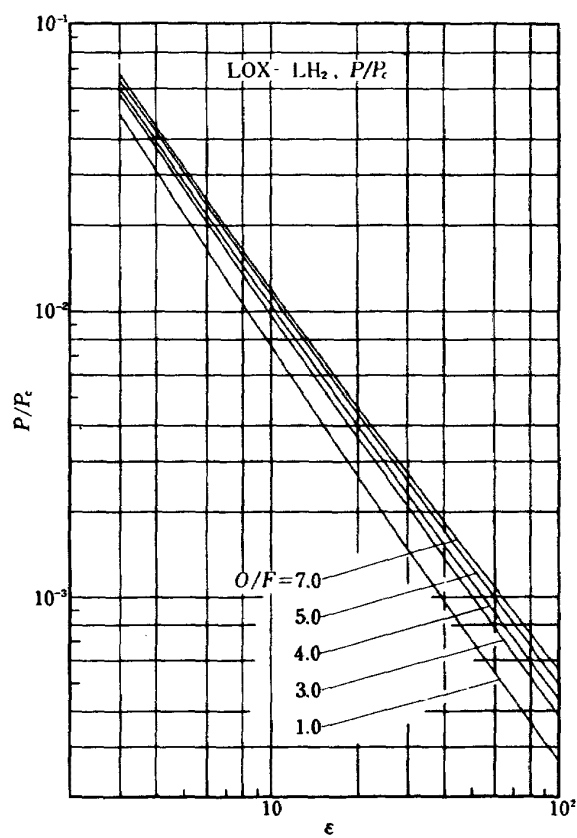


図 1・10・a ($P_c = 100$ atm)

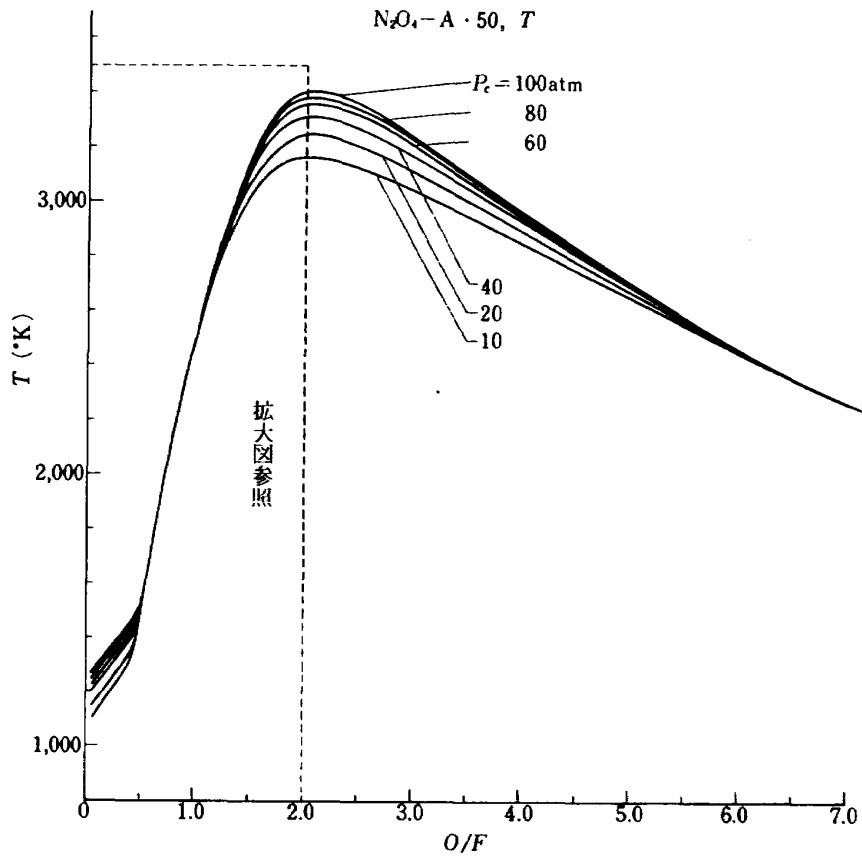


図 2・1・a

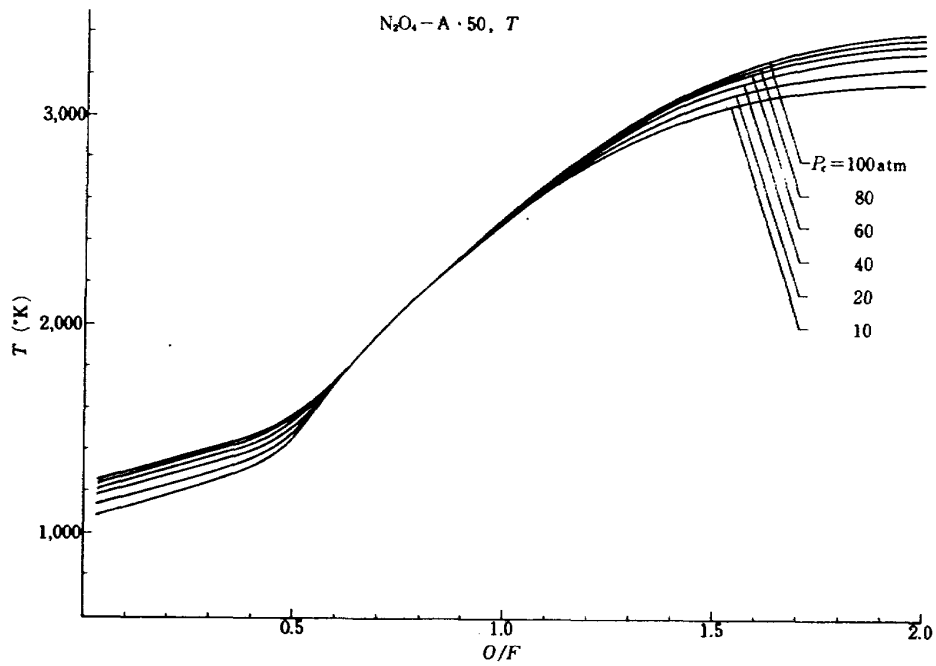
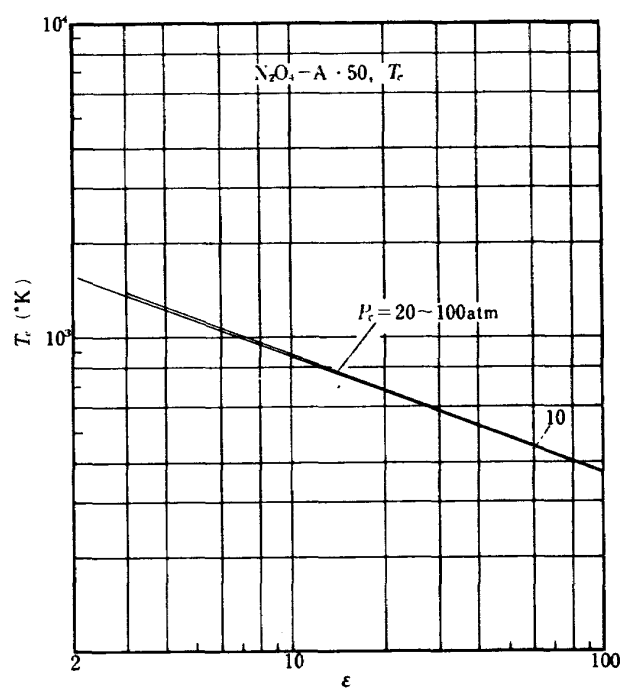
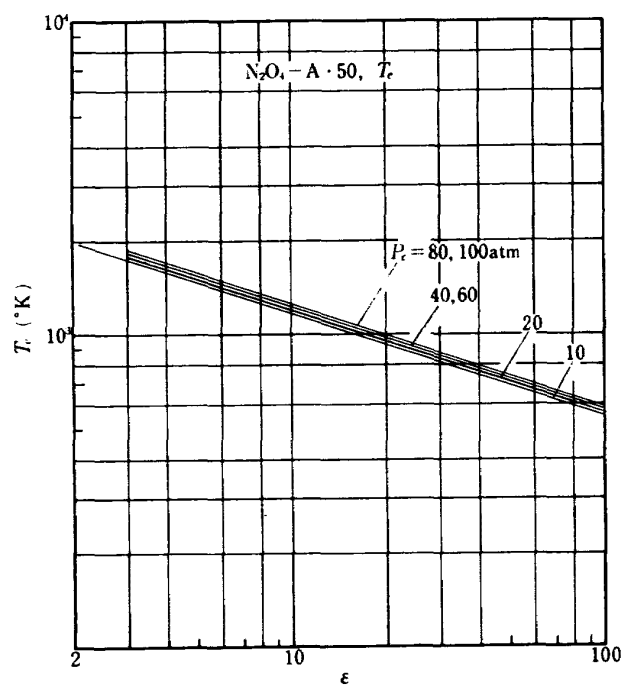
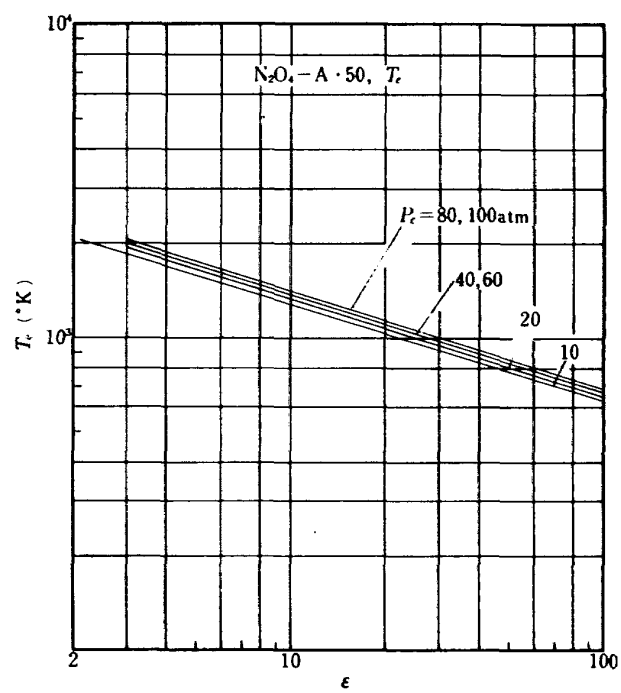


図 2・1・b (拡)

図 2・2・a ($O/F = 1.0$)図 2・2・b ($O/F = 1.5$)図 2・2・c ($O/F = 2.0$)

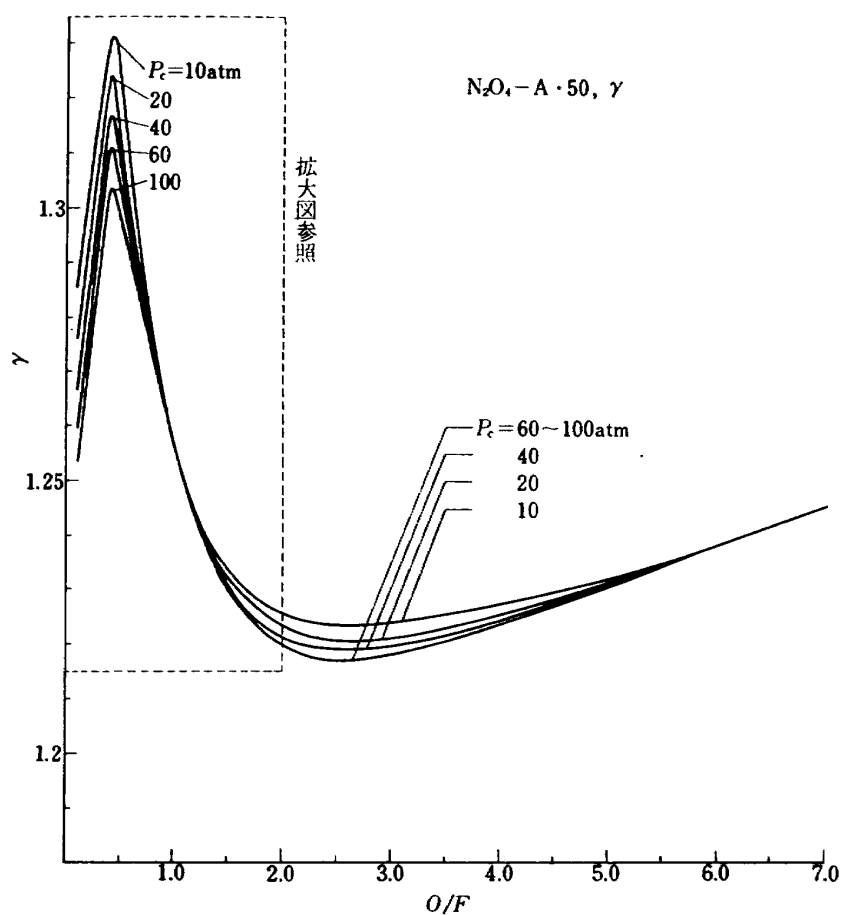


図 2・3・a

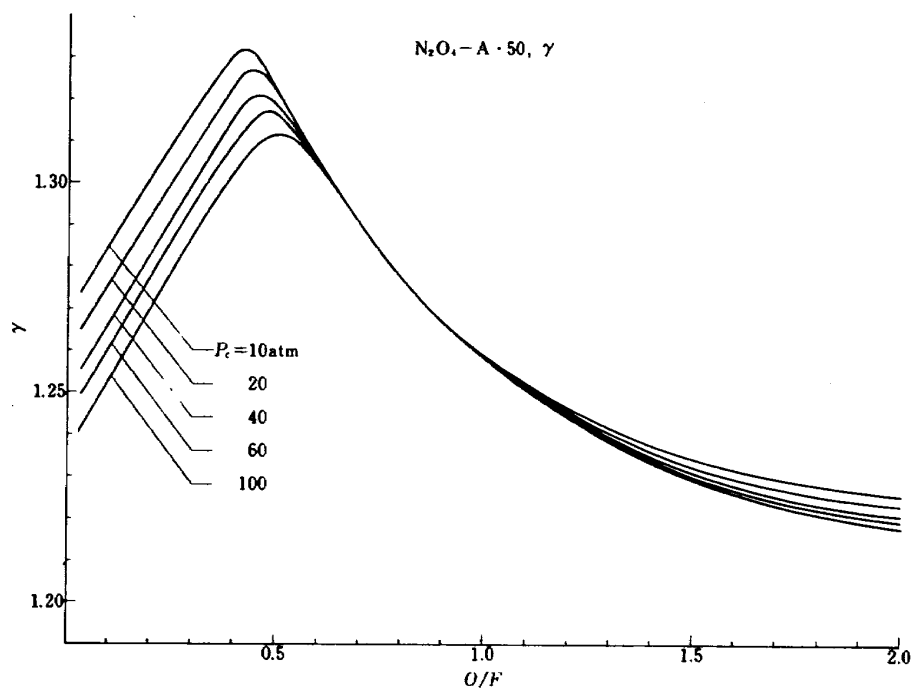


図 2・3・b (拡)

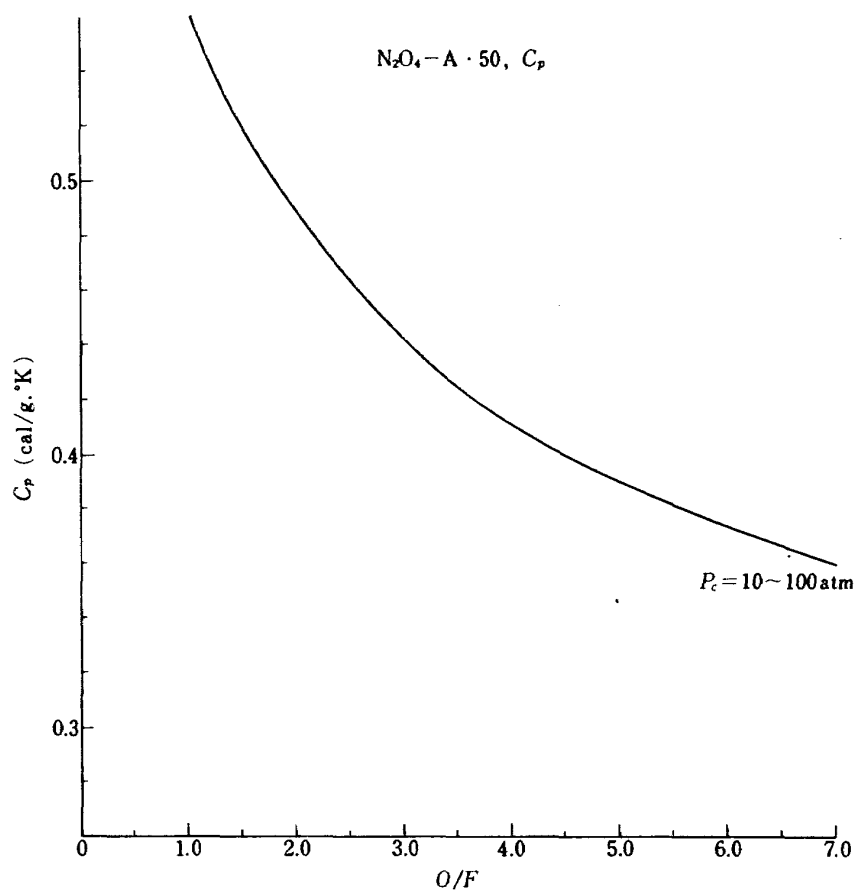


図 2・4・a

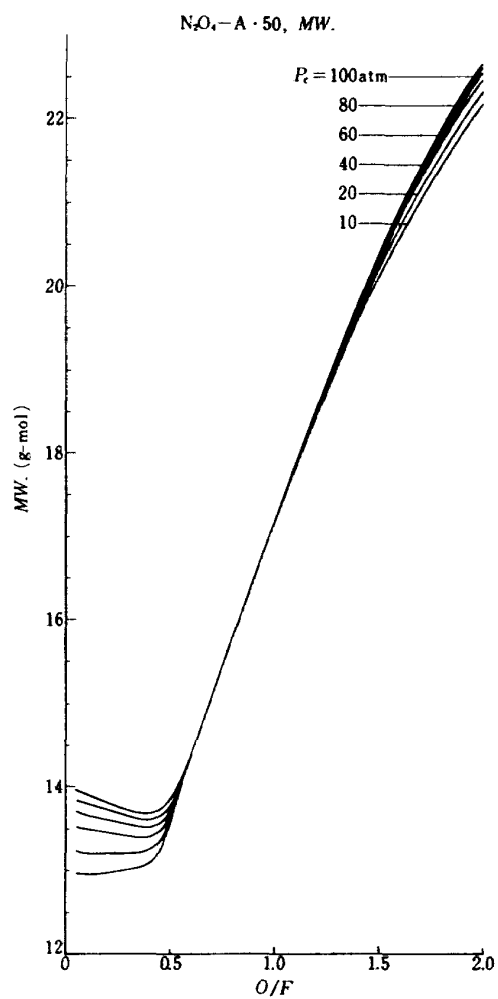


図 2・5・b (括)

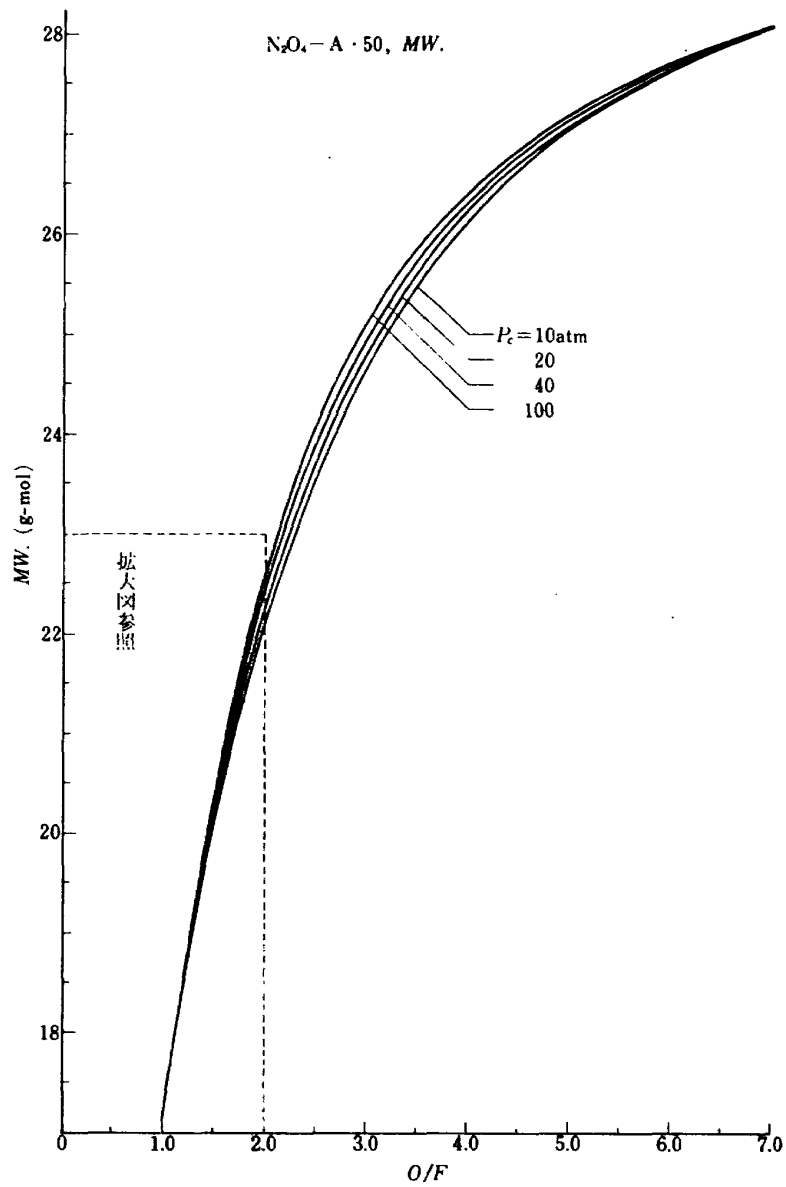


図 2・5・a

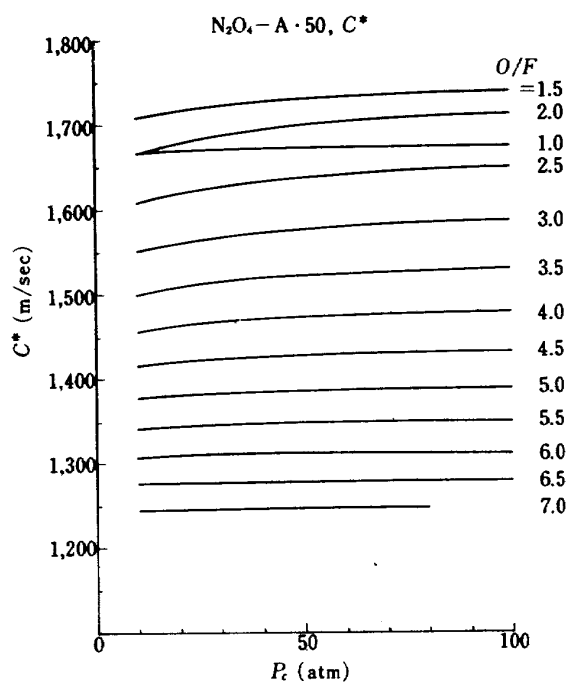
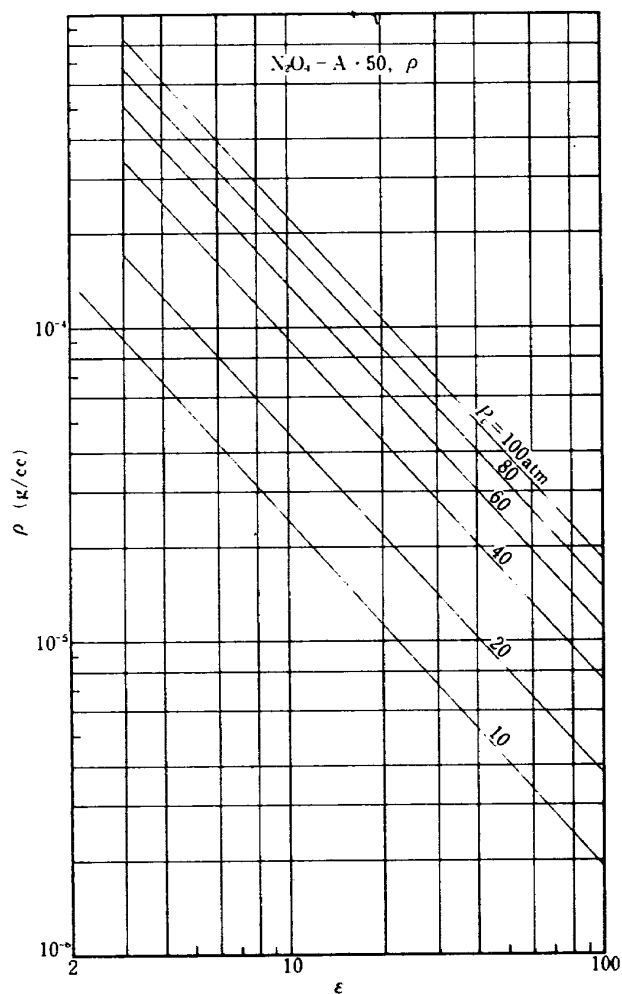
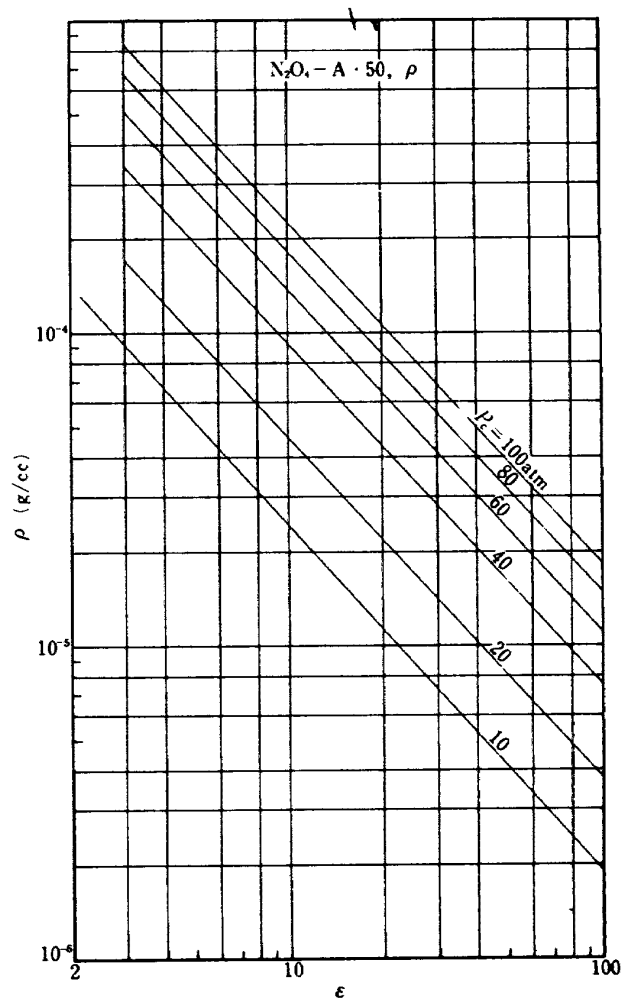


図 2・6・a

図 2・7・a ($O/F = 1.5$)図 2・7・b ($O/F = 2.0$)

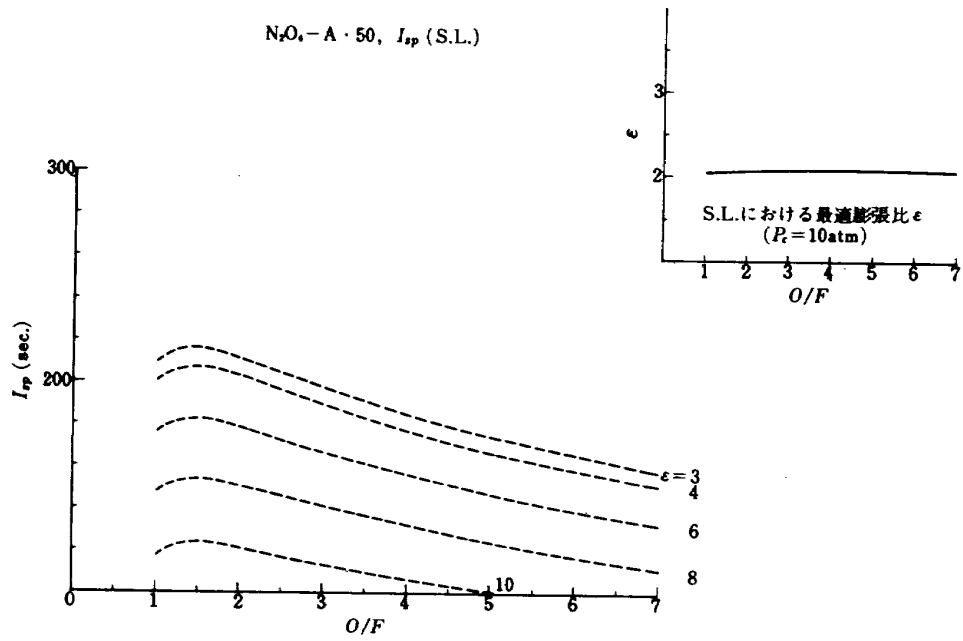


図 2・8・a ($P_c = 10 \text{ atm}$)

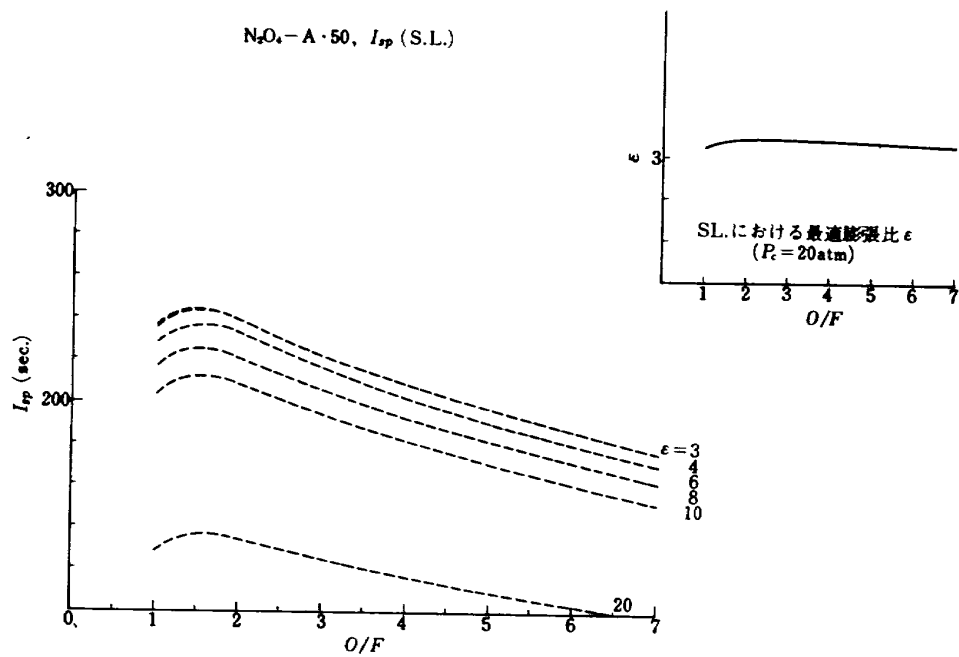
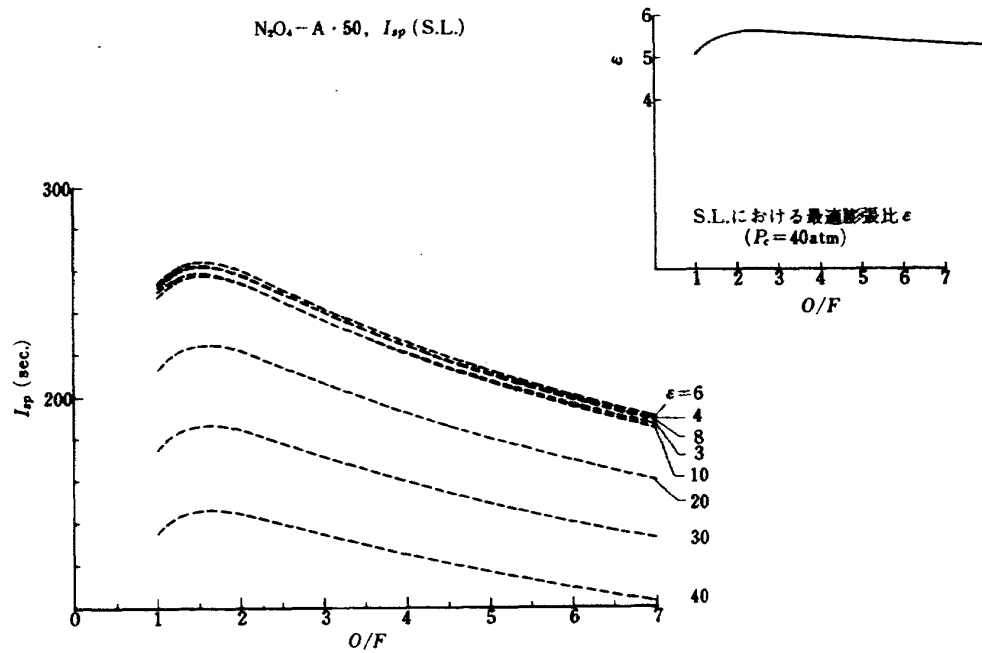
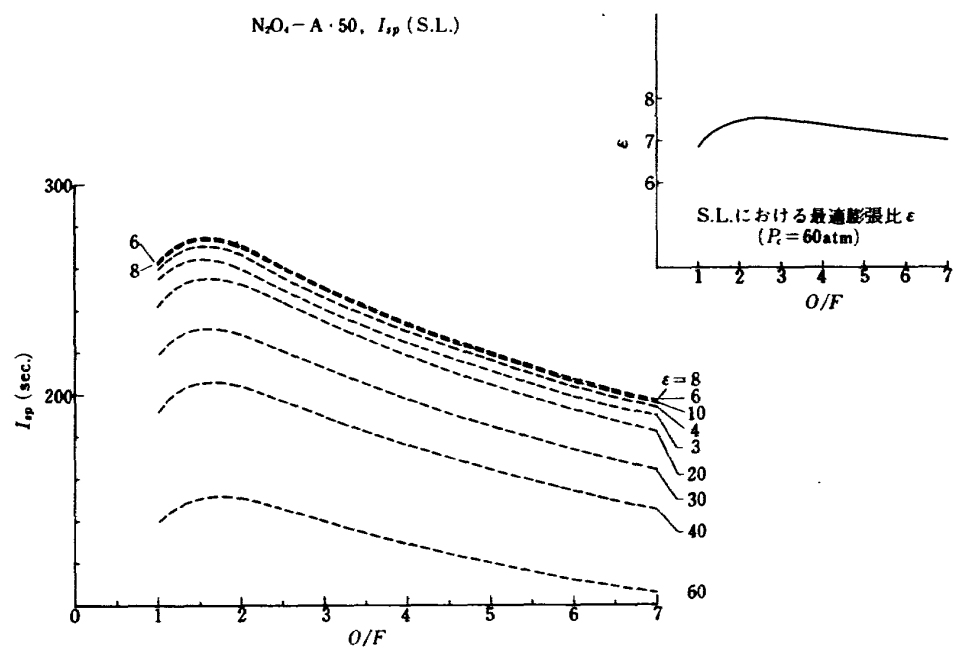


図 2・8・b ($P_c = 20 \text{ atm}$)

図 2・8・c ($P_c = 40 \text{ atm}$)図 2・8・d ($P_c = 60 \text{ atm}$)

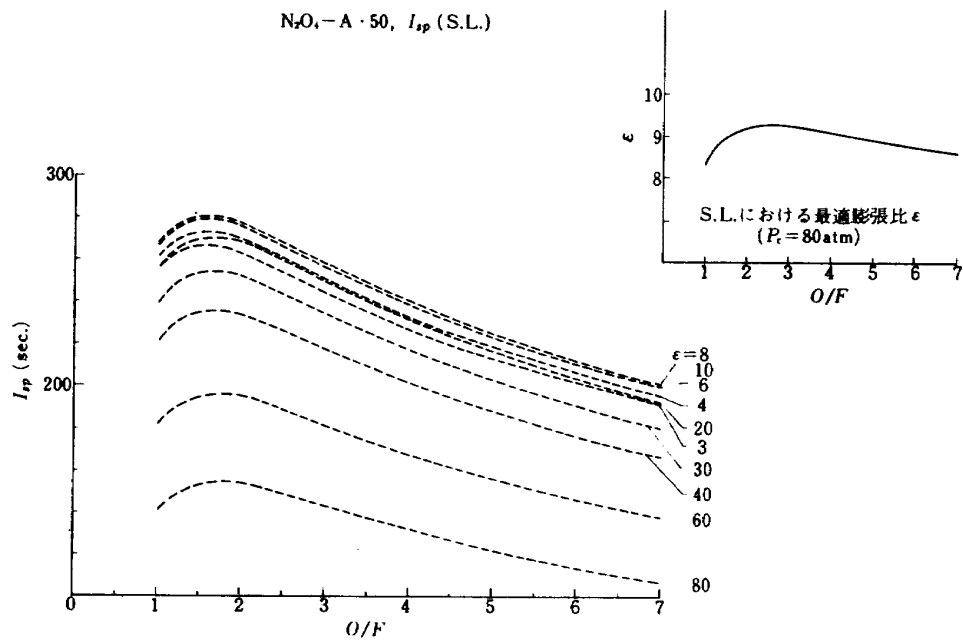


図 2・8・e ($P_c = 80 \text{ atm}$)

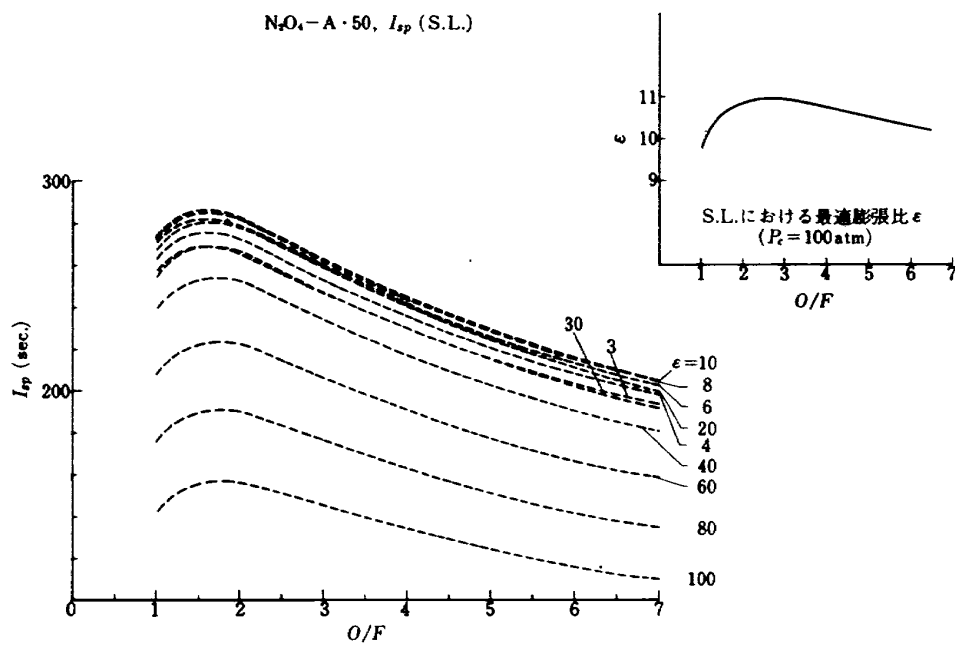
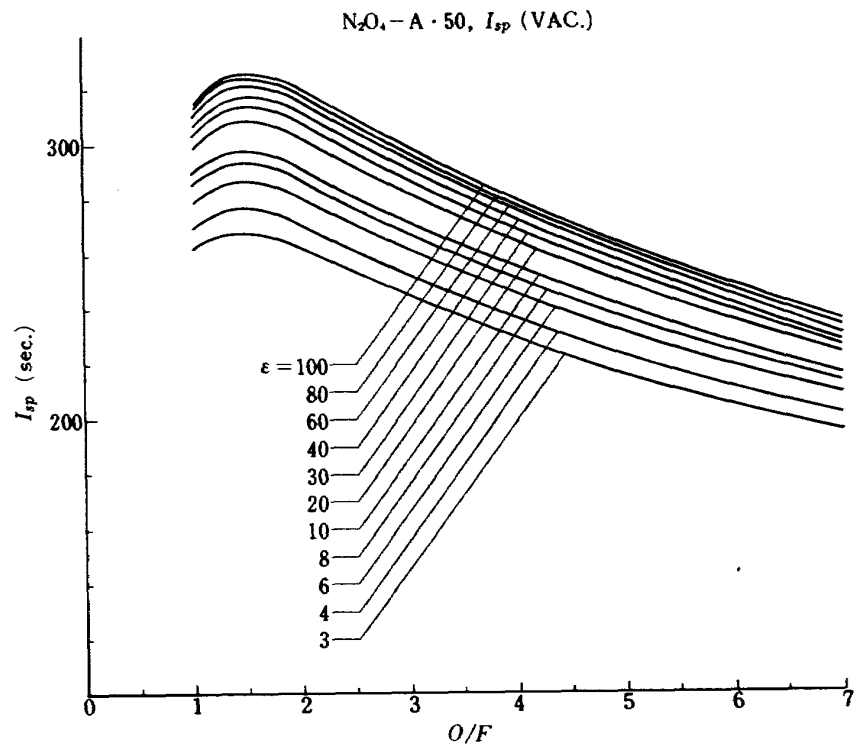
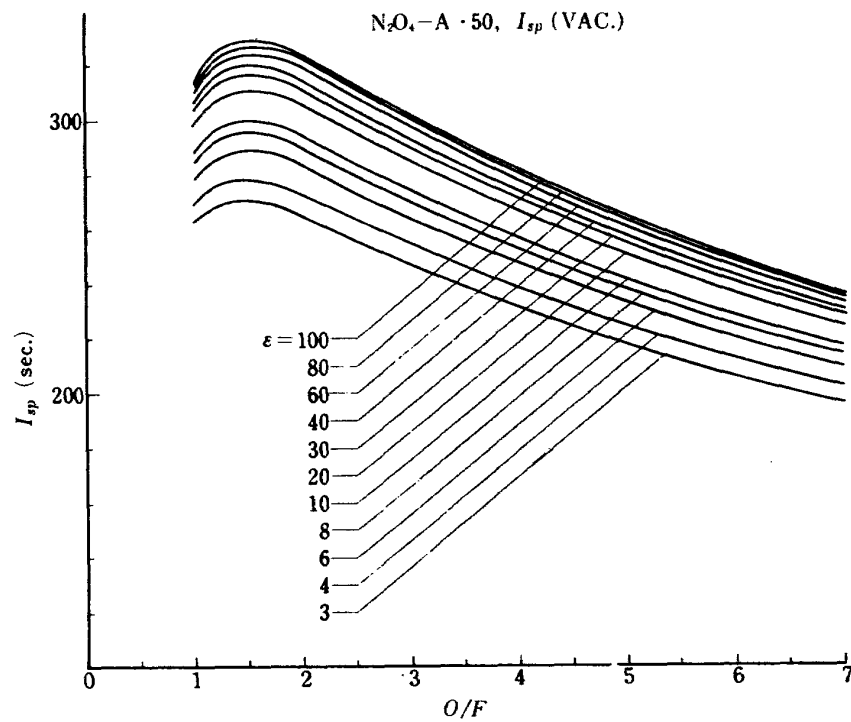
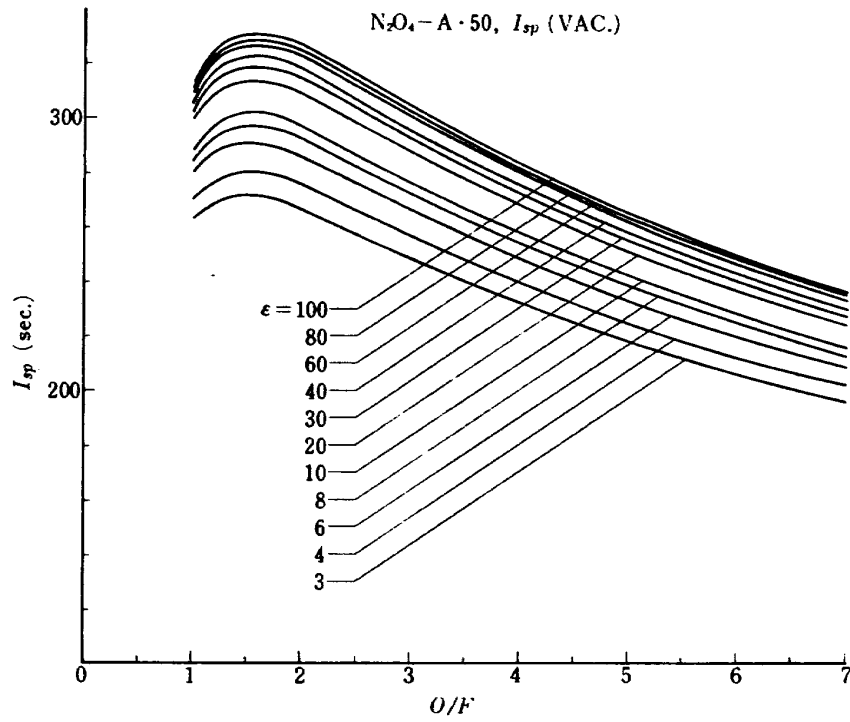
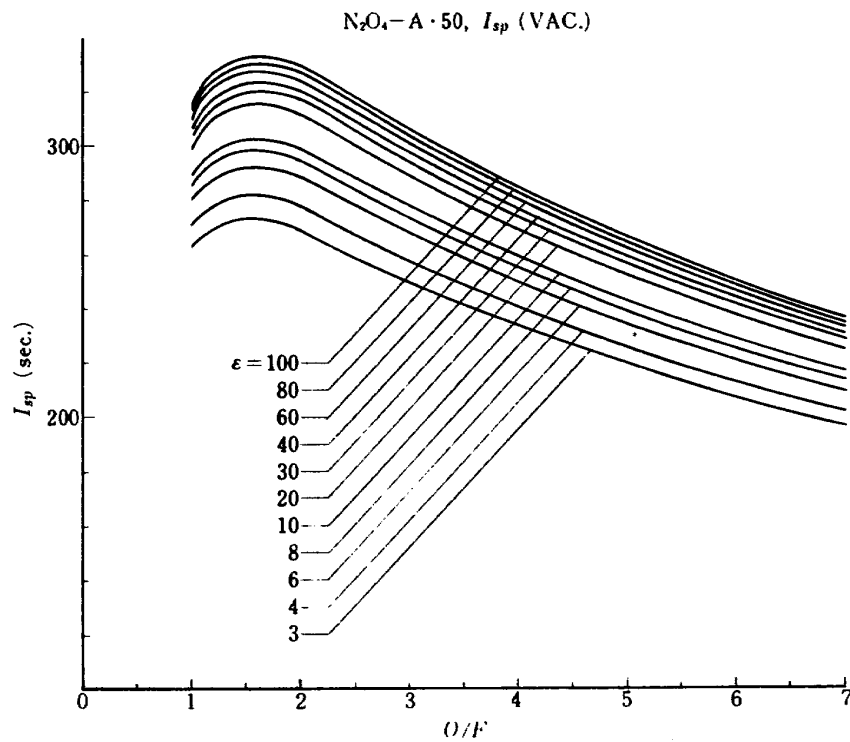
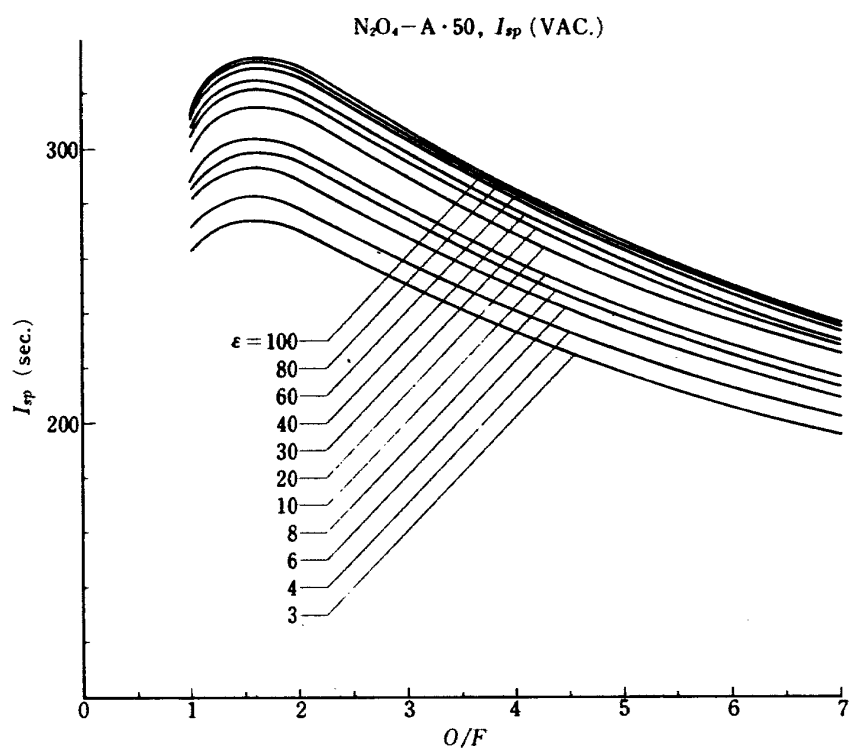
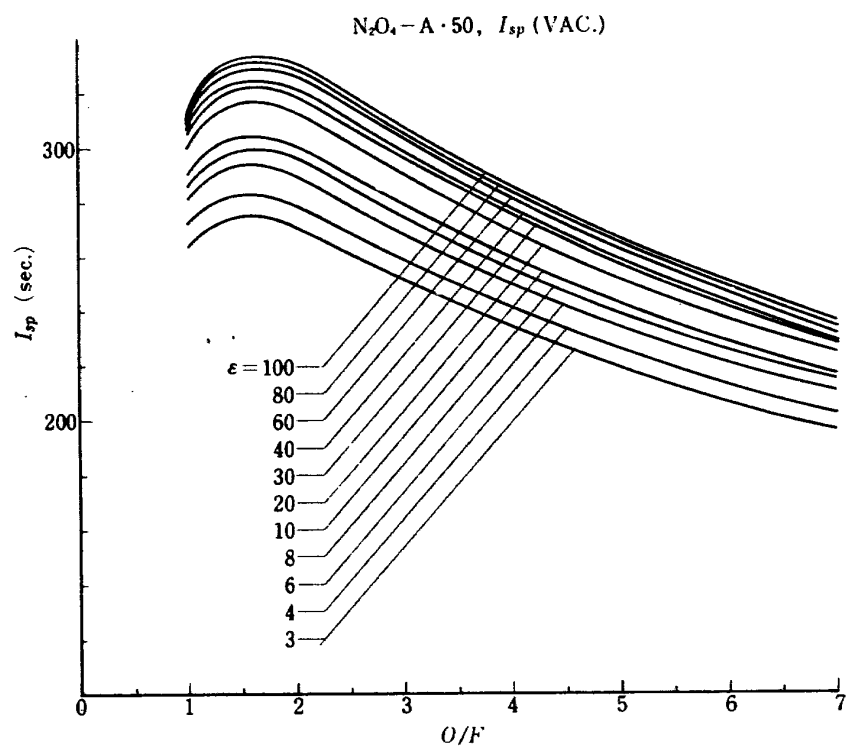


図 2・8・f ($P_c = 100 \text{ atm}$)

図 2・9・a ($P_c = 10 \text{ atm}$)図 2・9・b ($P_c = 20 \text{ atm}$)

図 2・9・c ($P_c = 40 \text{ atm}$)図 2・9・d ($P_c = 60 \text{ atm}$)

図 2・9・e ($P_c = 80 \text{ atm}$)図 2・9・f ($P_c = 100 \text{ atm}$)

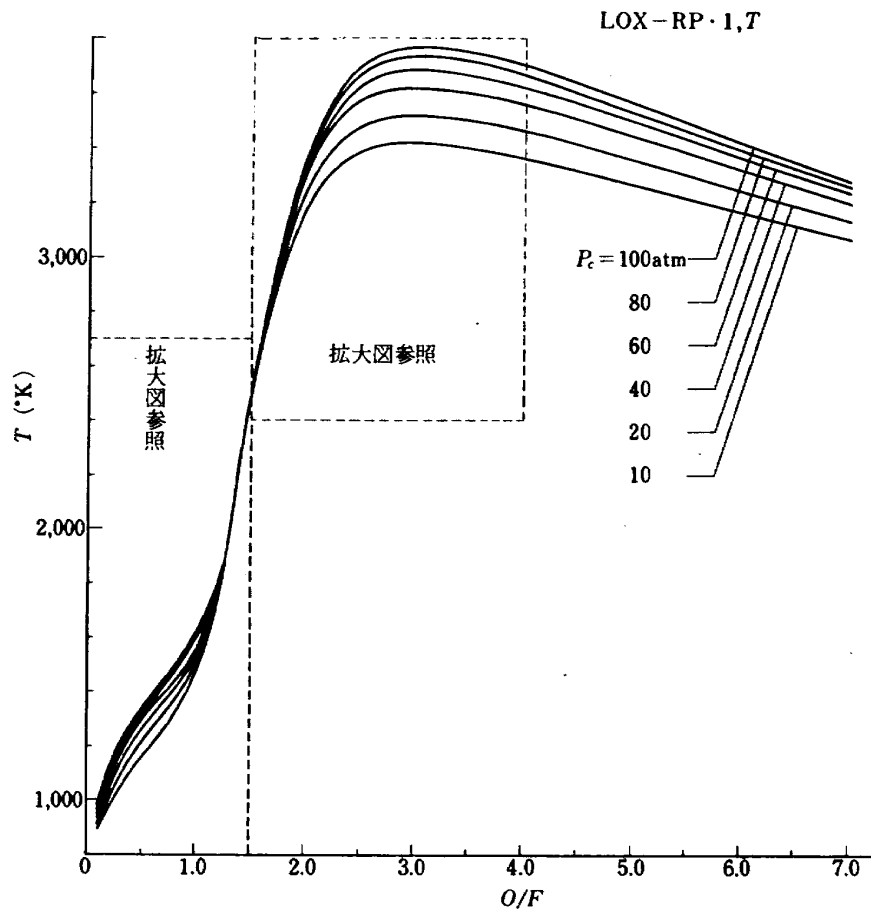


図 3・1・a

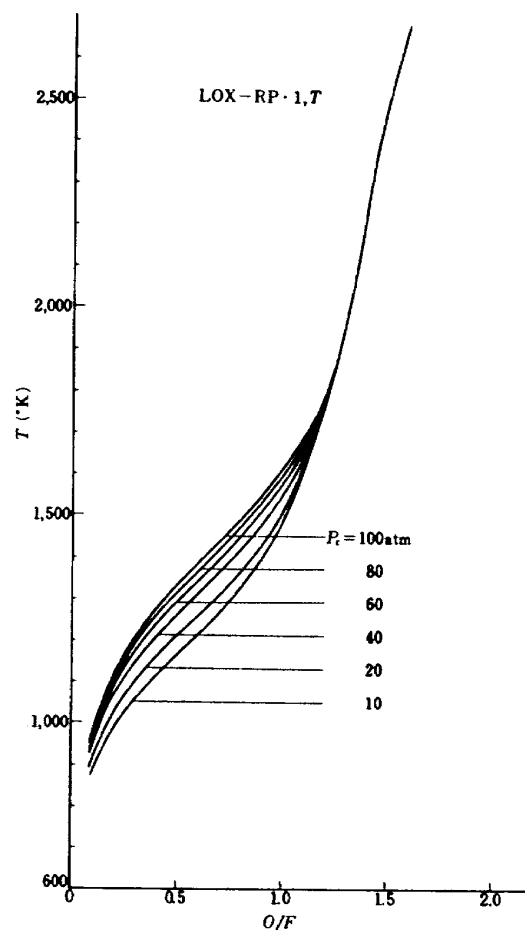


図 3・1・b (拡大)

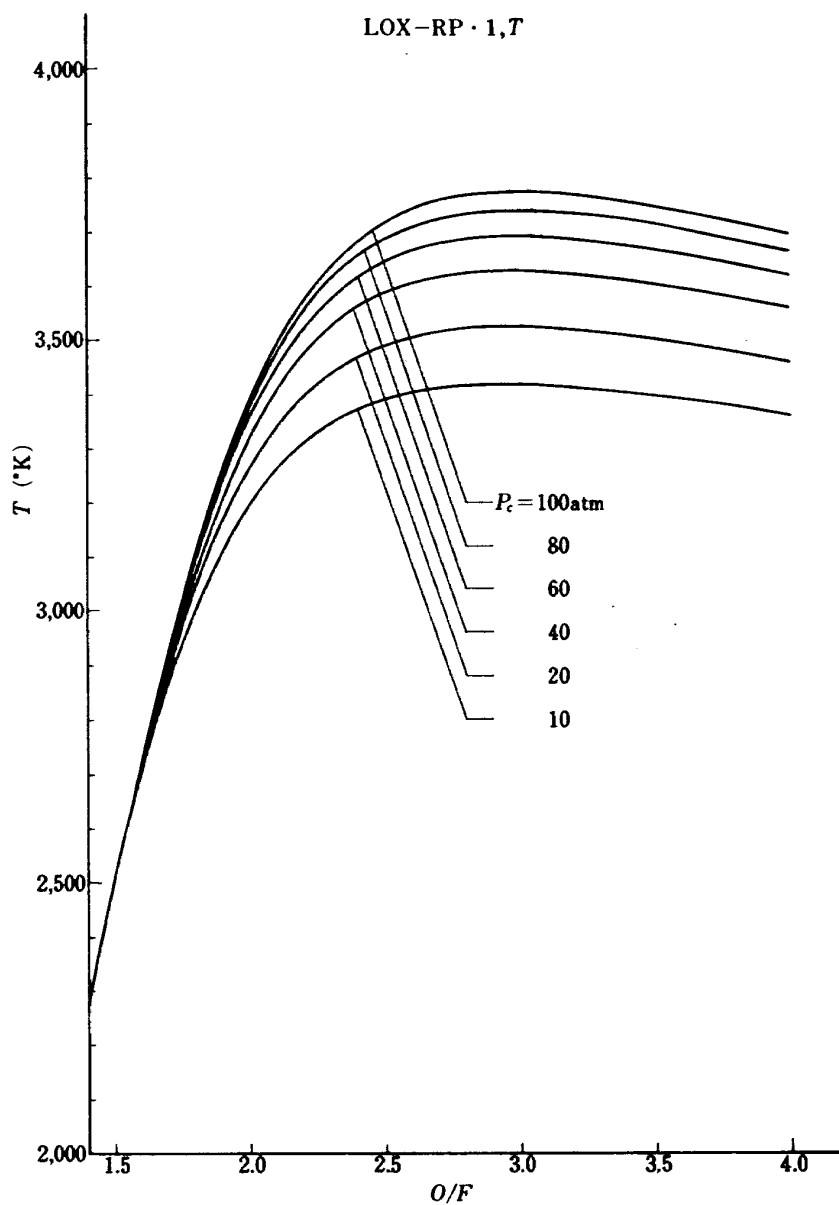
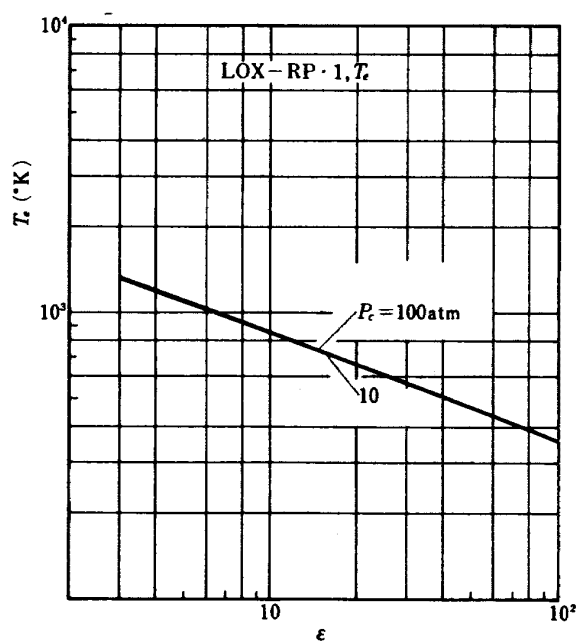


図 3・1・c (抜)

図 3・2・a ($O/F = 1.5$)

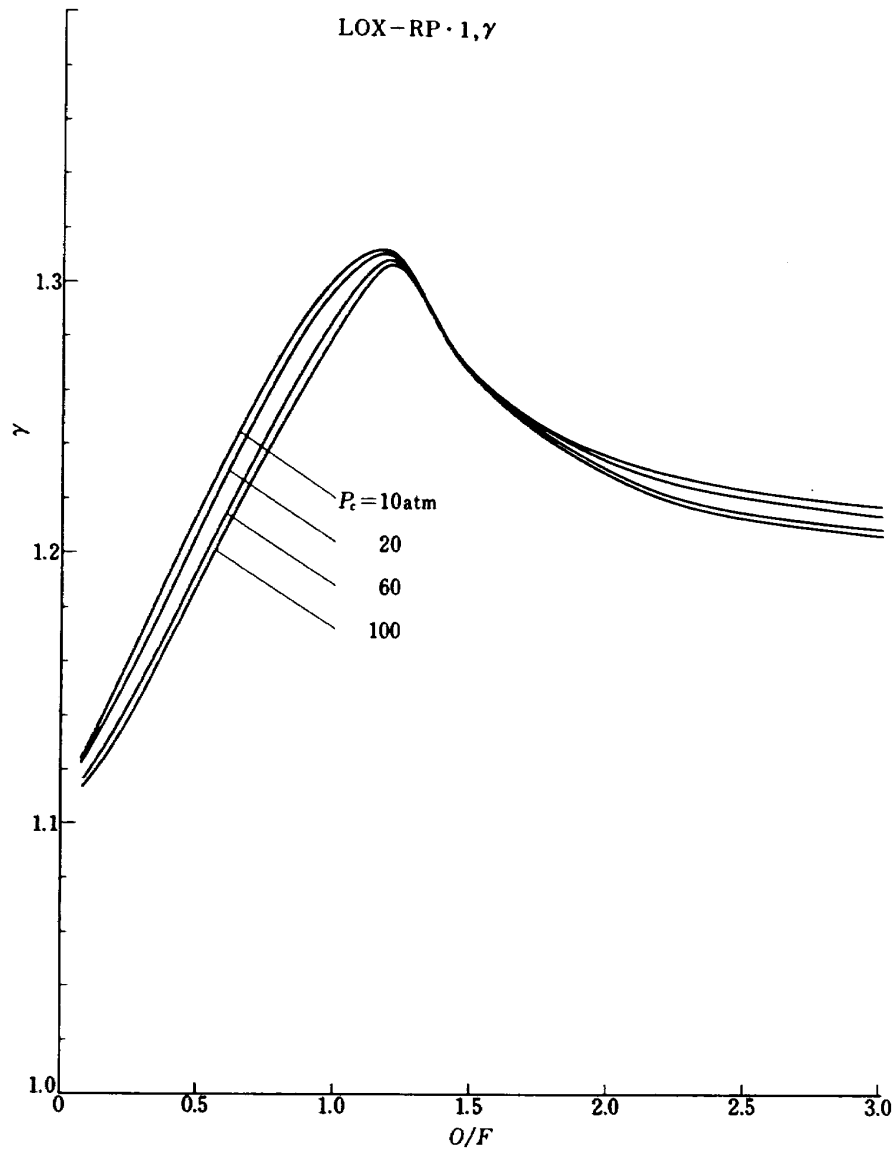


図 3・3・a

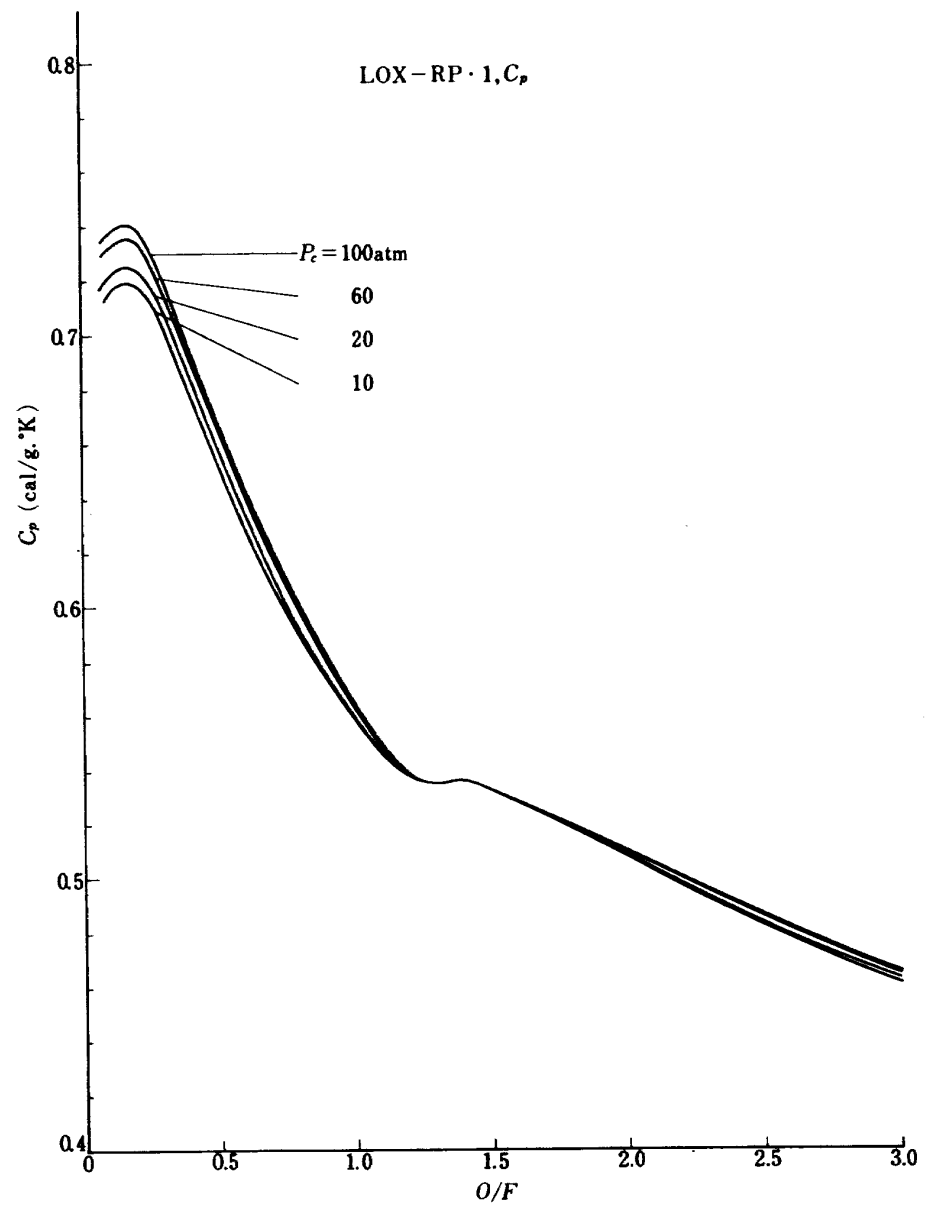


図 3・4・a

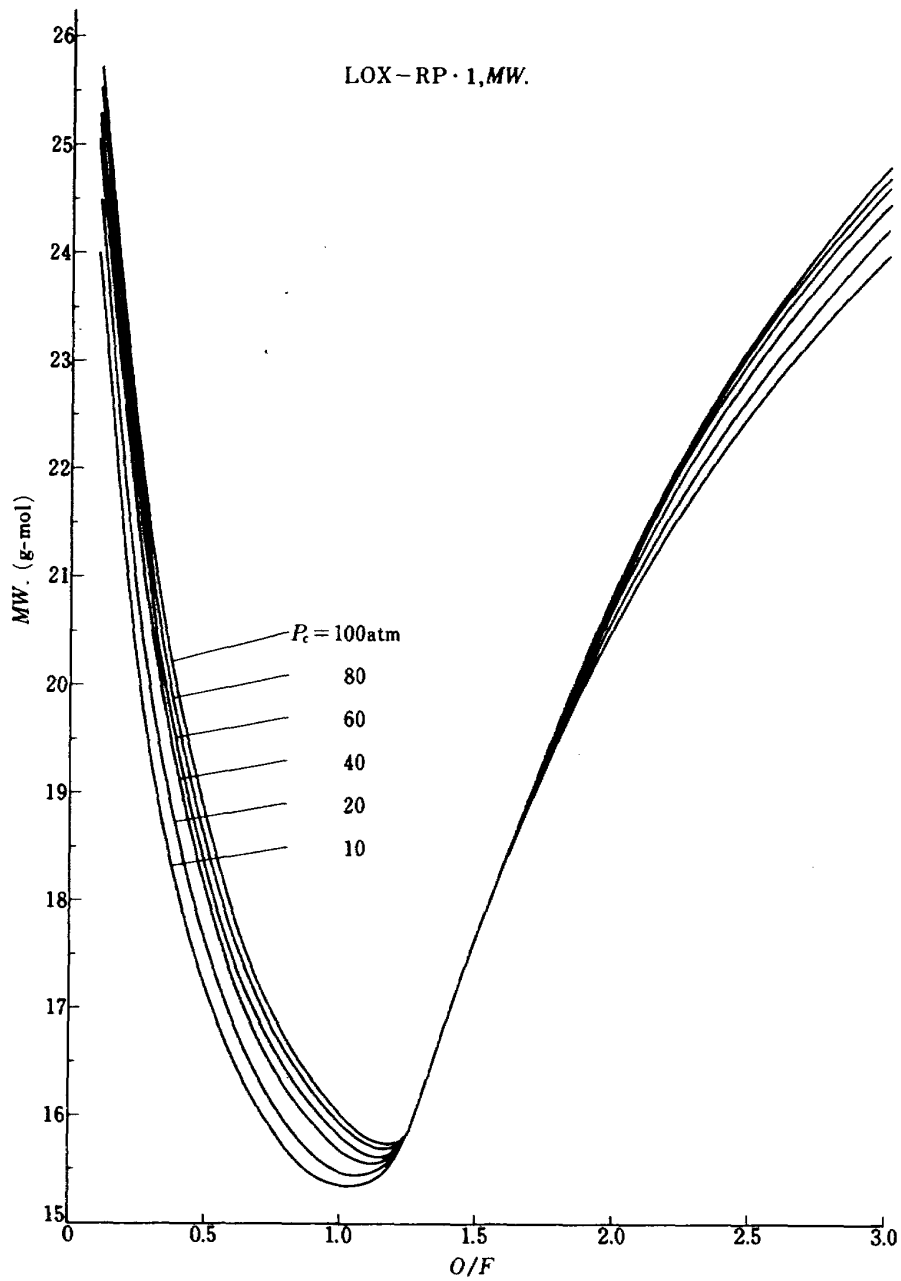


図 3・5・a

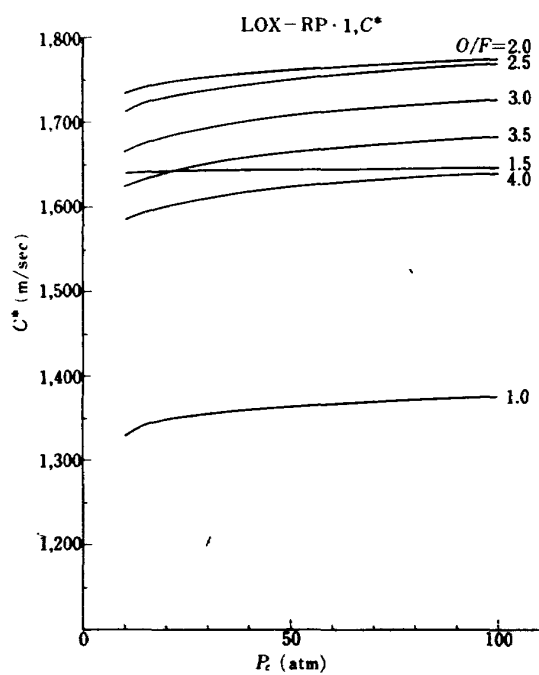
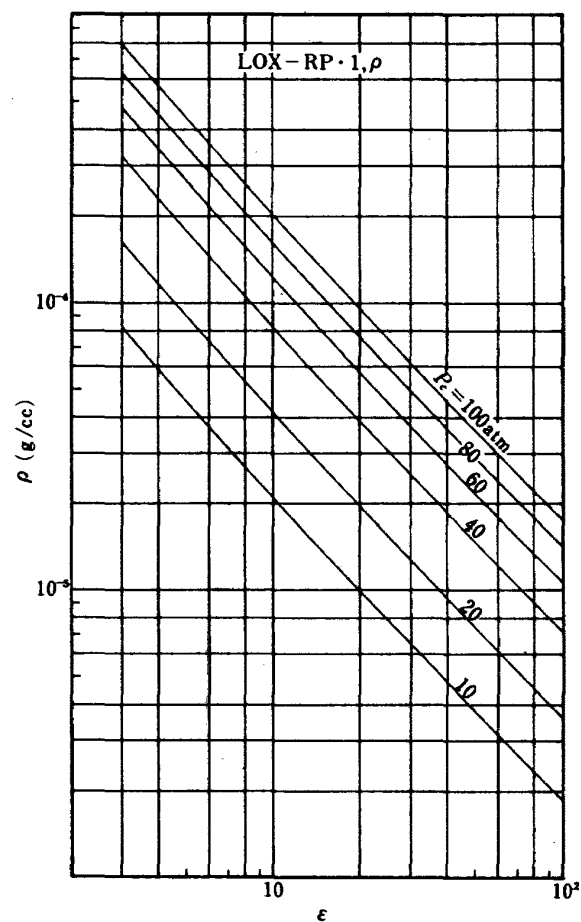
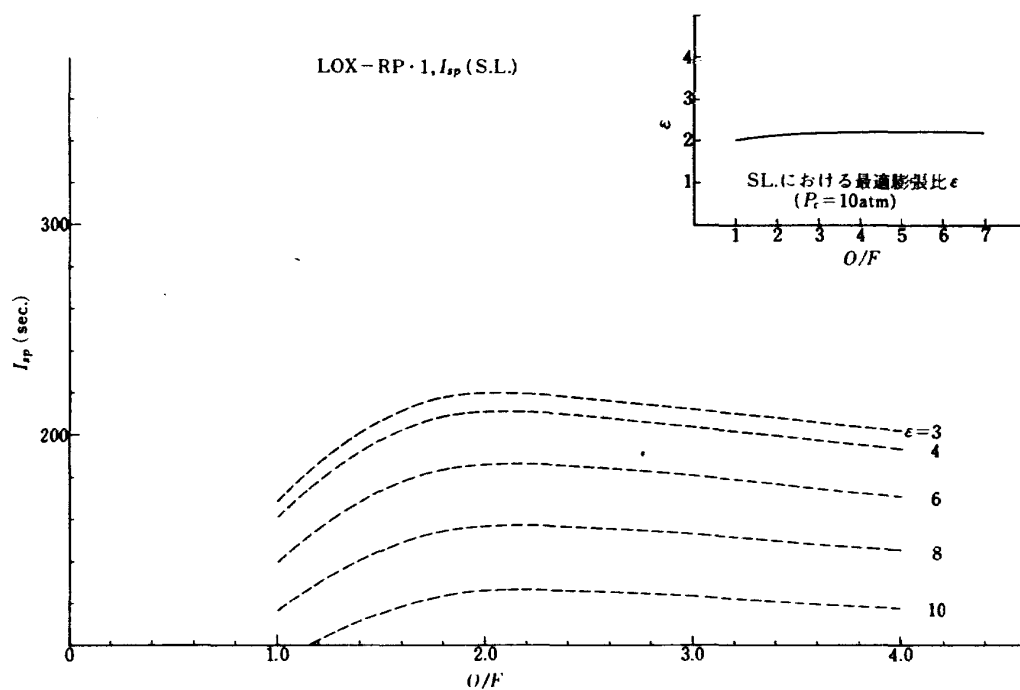


図 3・6・a

図 3・7・a ($O/F = 2.0$)図 3・8・a ($P_c = 10 \text{ atm}$)

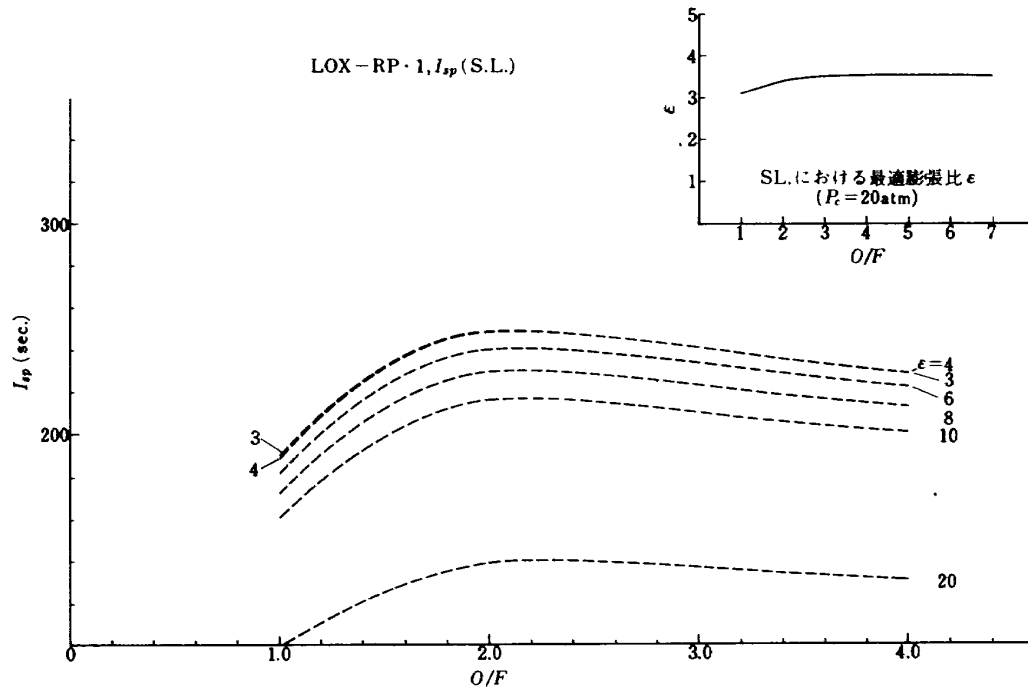


図 3・8・b ($P_c = 20 \text{ atm}$)

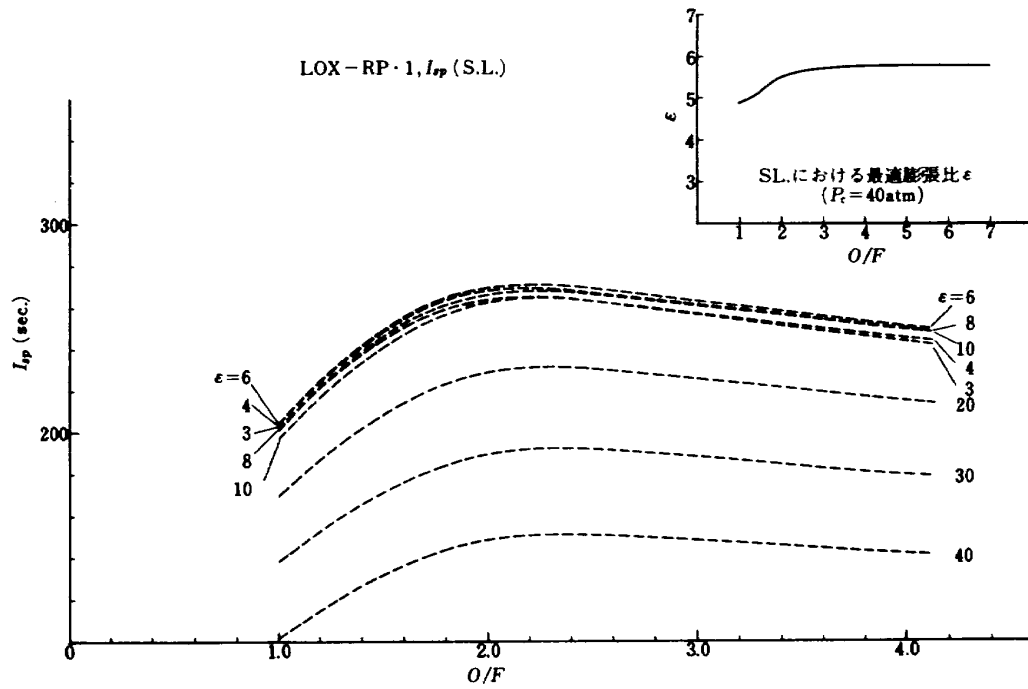
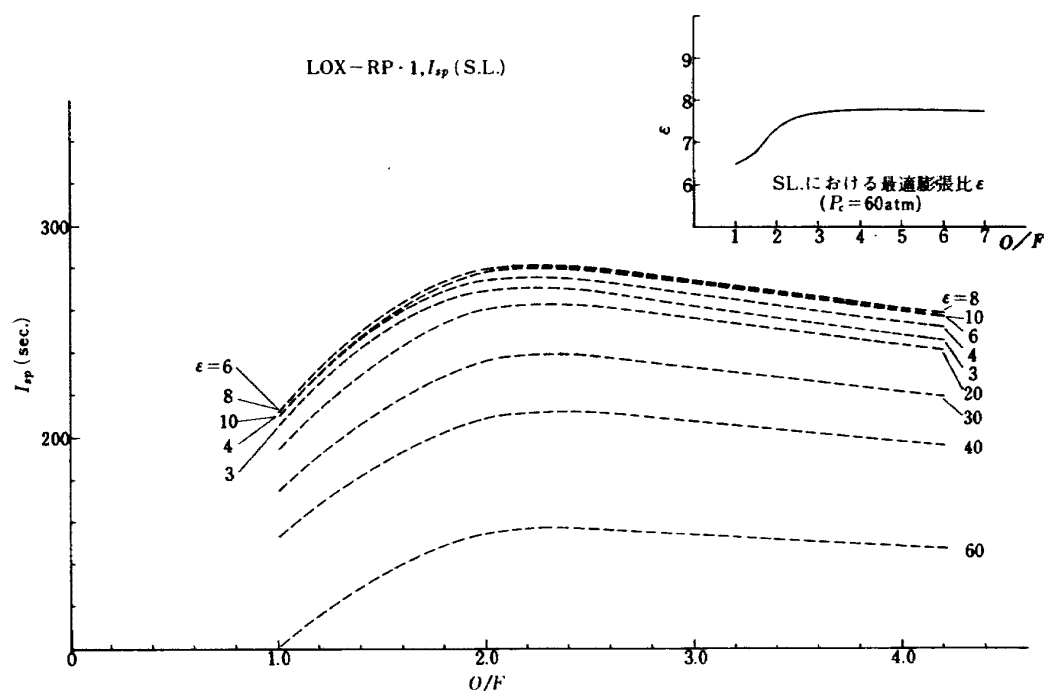
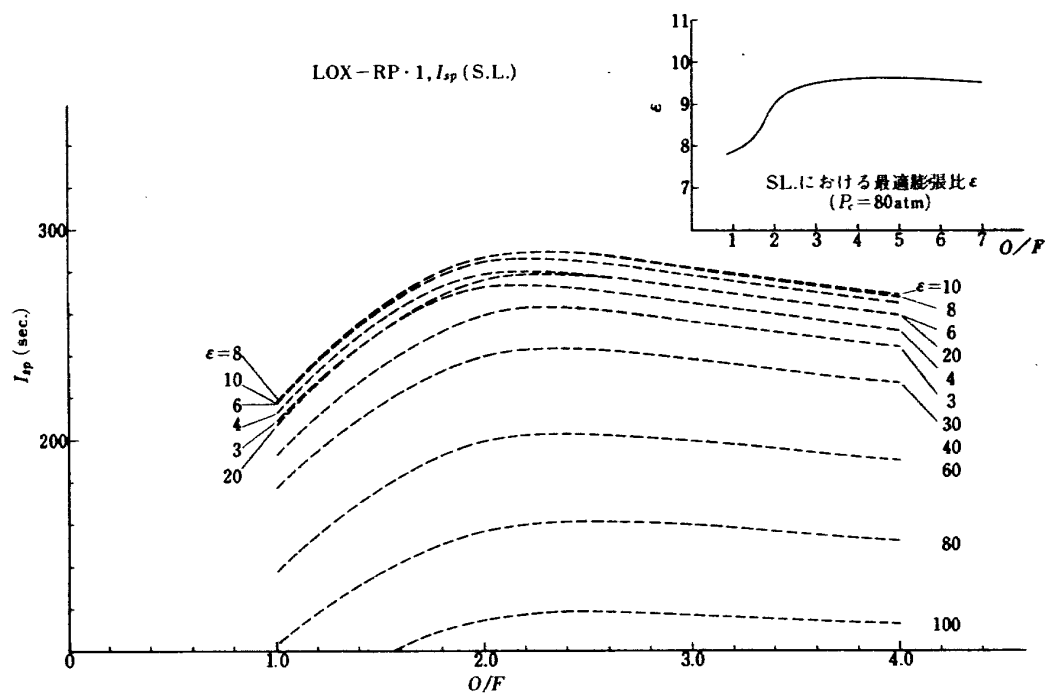


図 3・8・c ($P_c = 40 \text{ atm}$)

図 3・8・d ($P_c = 60 \text{ atm}$)図 3・8・e ($P_c = 80 \text{ atm}$)

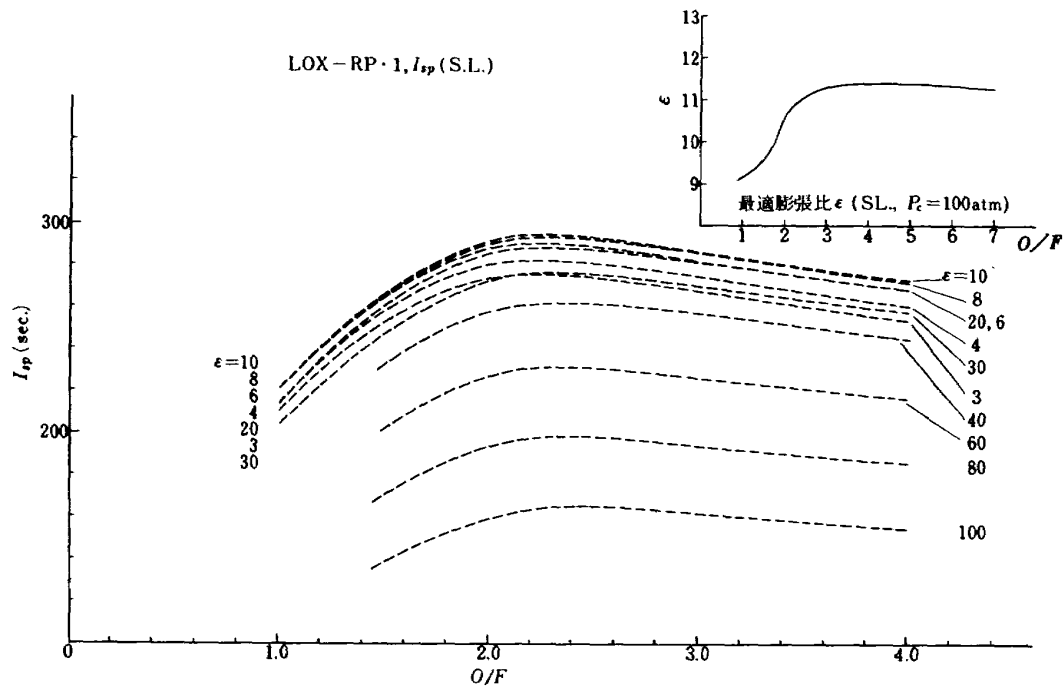


図 3・8・f ($P_c = 100 \text{ atm}$)

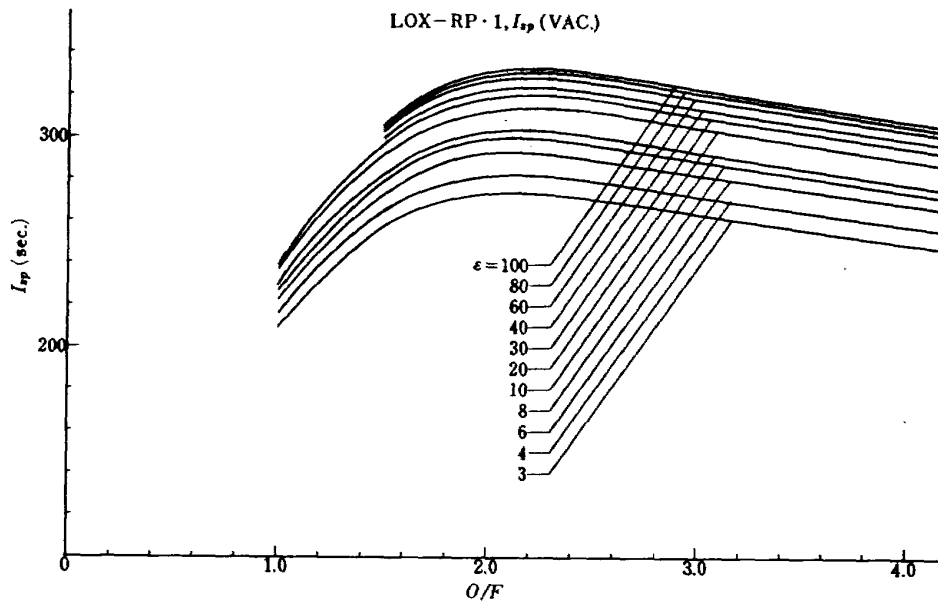
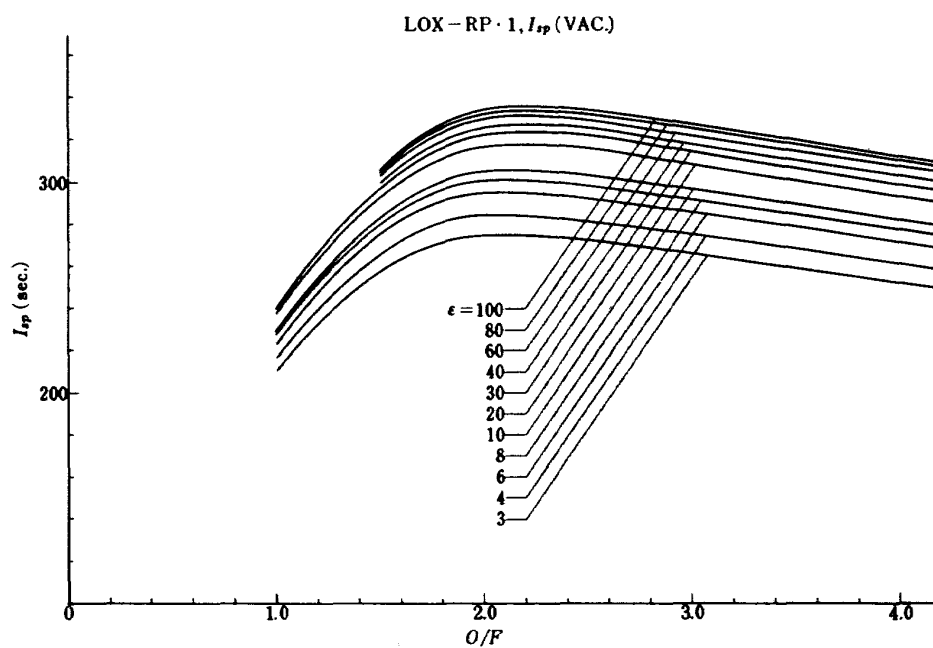
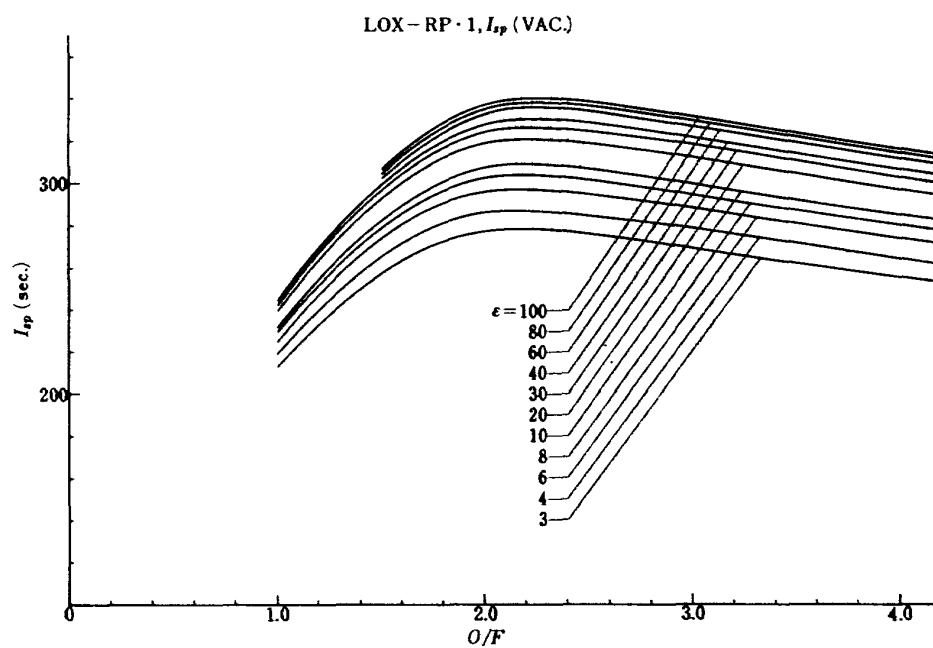


図 3・9・a ($P_c = 10 \text{ atm}$)

図 3・9・b ($P_c = 20$ atm)図 3・9・c ($P_c = 40$ atm)

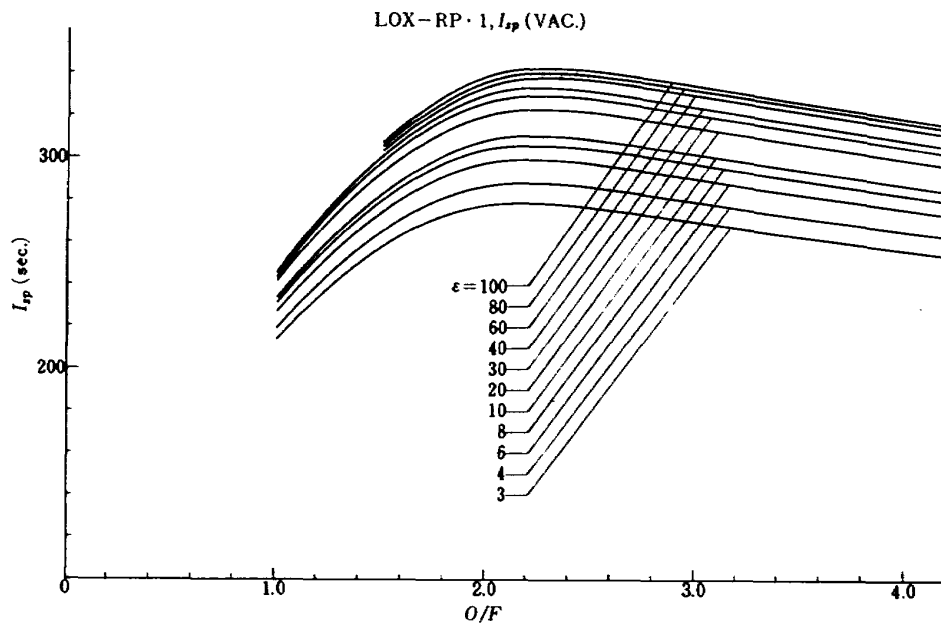


図 3・9・d ($P_c = 60 \text{ atm}$)

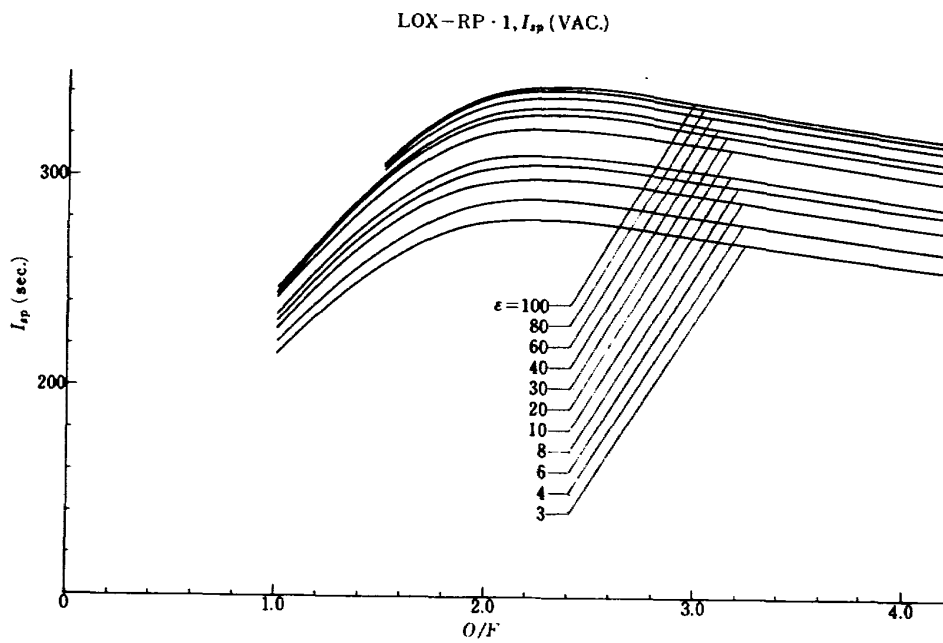


図 3・9・e ($P_c = 80 \text{ atm}$)

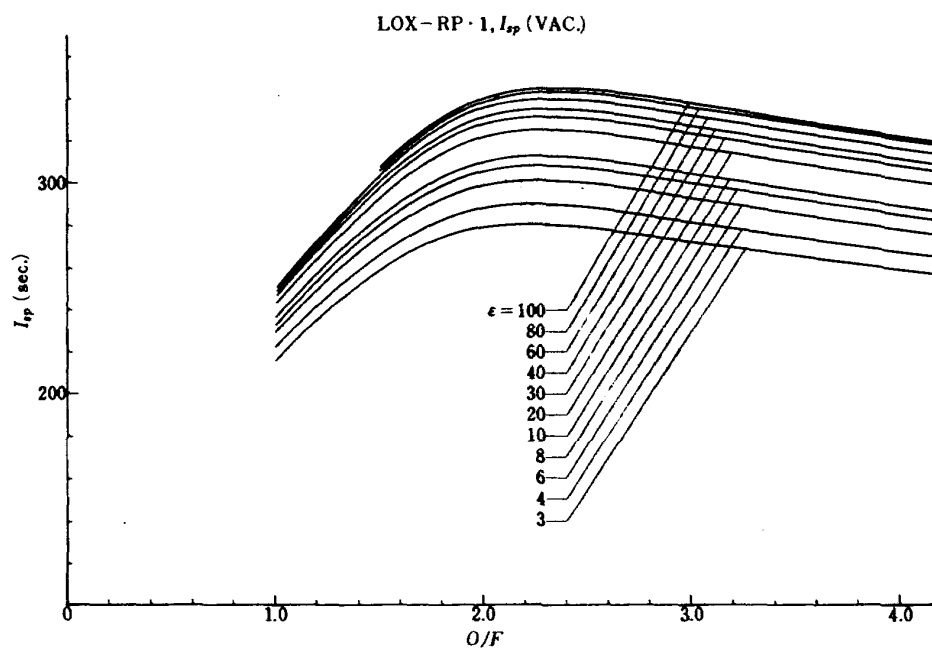
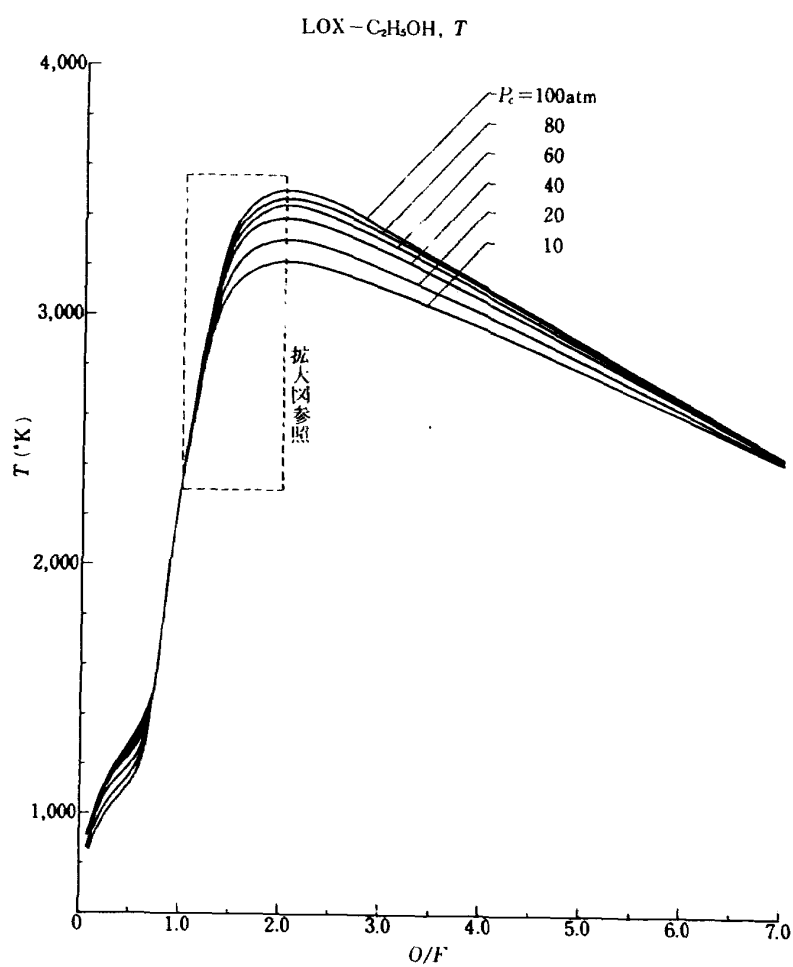
図 3・9・f ($P_c = 100$ atm)

図 4・1・a

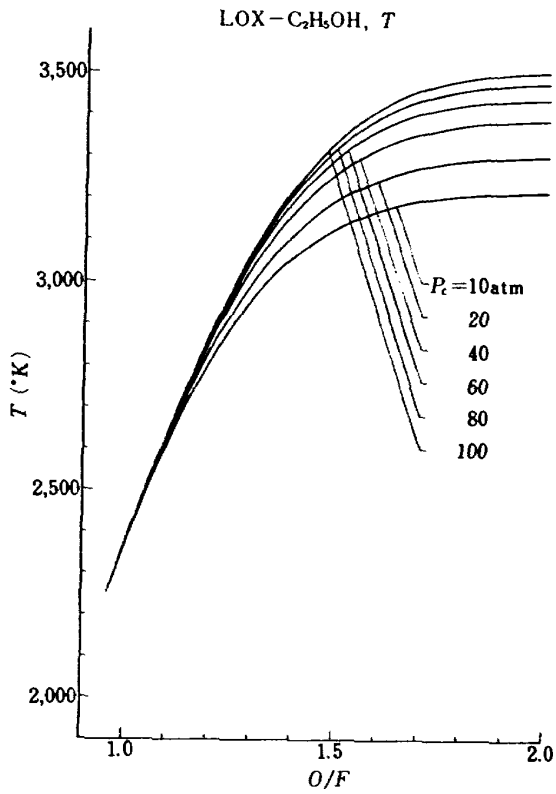


図 4・1・b (括)

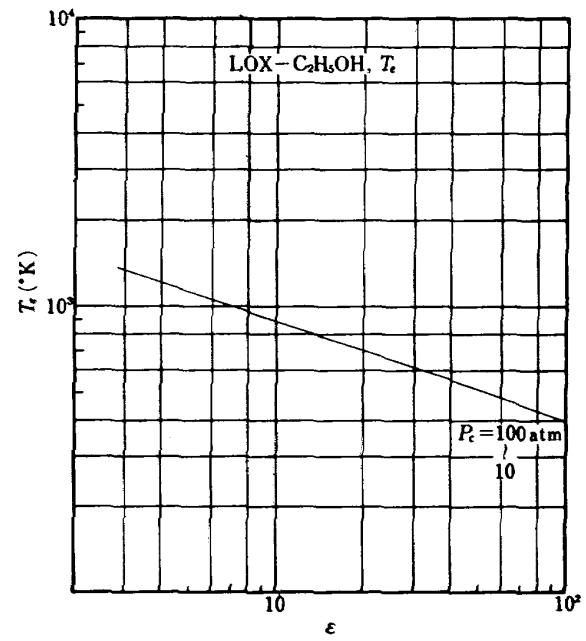


図 4・2・a ($O/F = 1.0$)

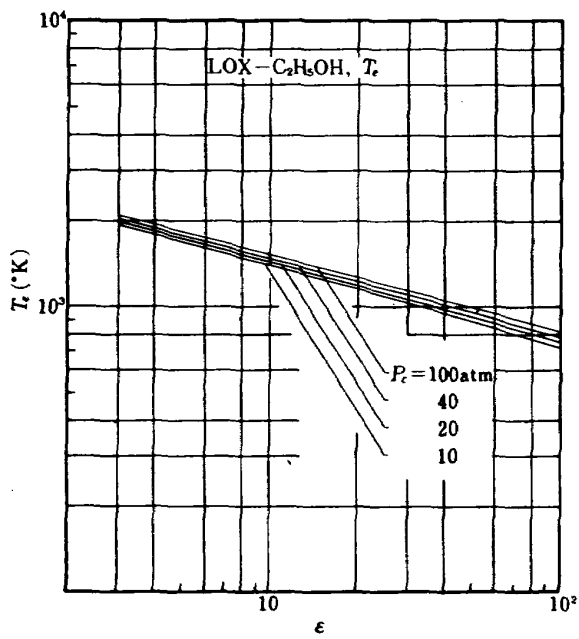


図 4・2・b ($O/F = 1.5$)

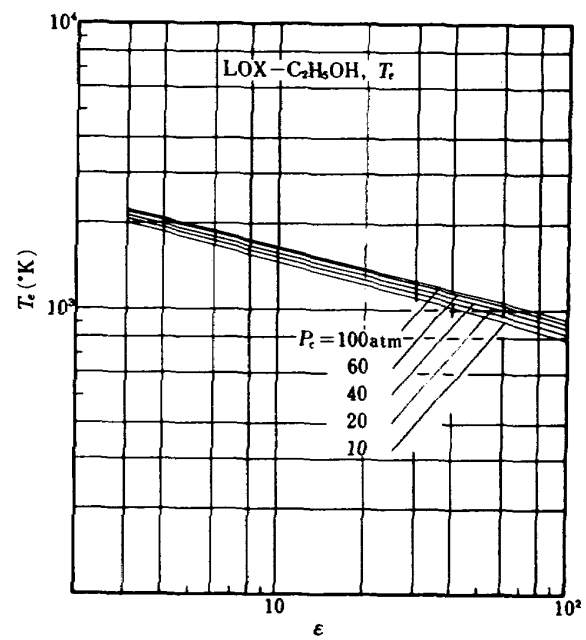


図 4・2・c ($O/F = 2.0$)

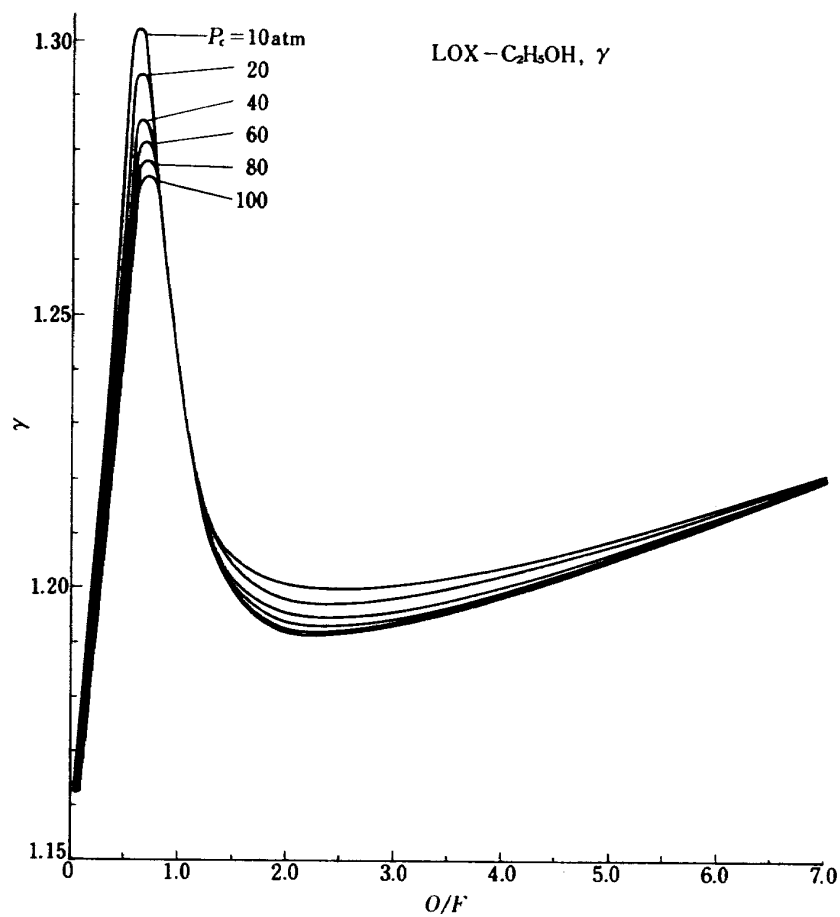


図 4・3・a

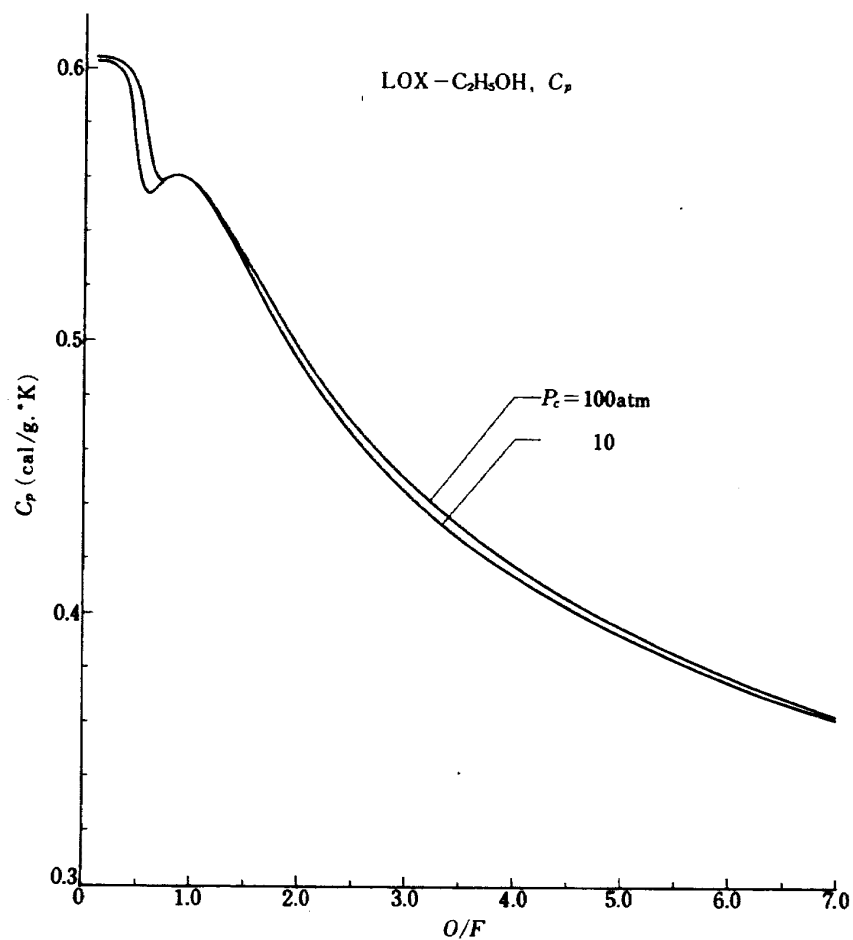


図 4・4・a

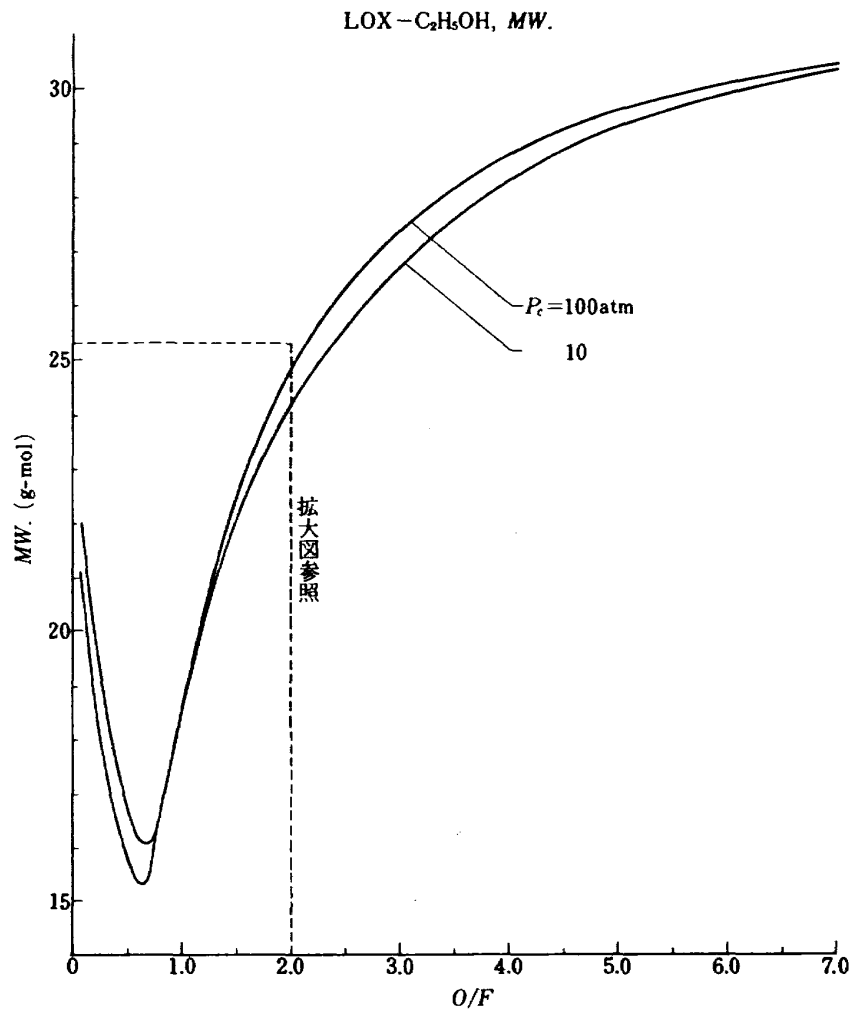


図 4・5・a

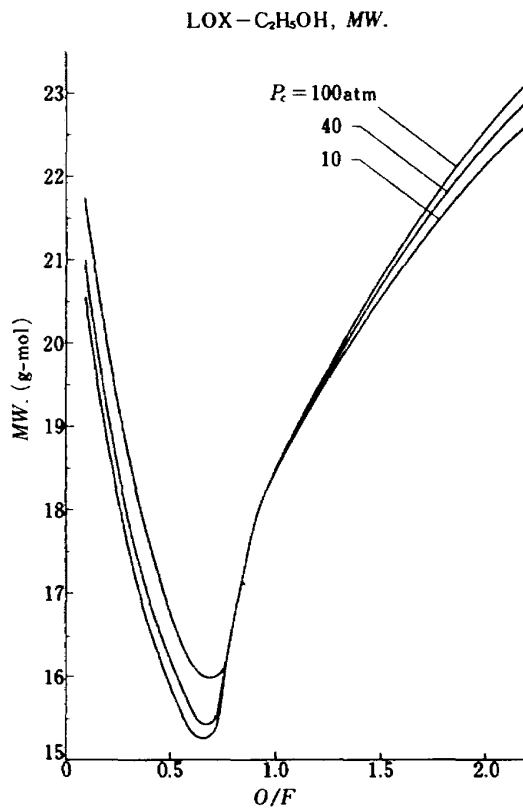


図 4・5・b (拡大)

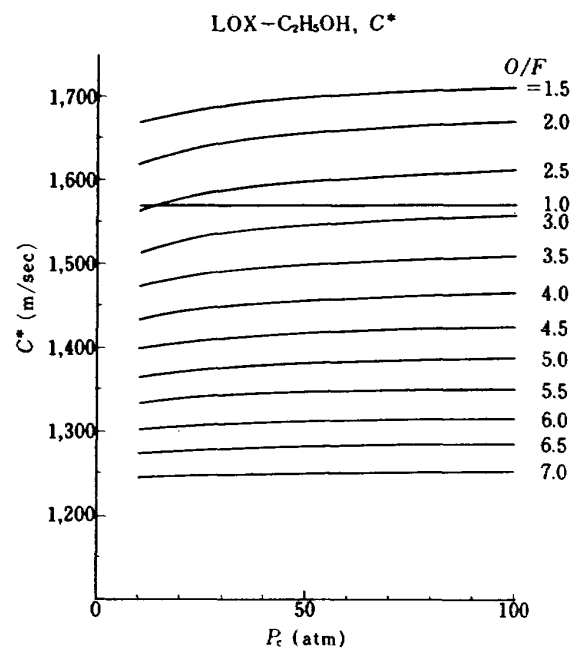
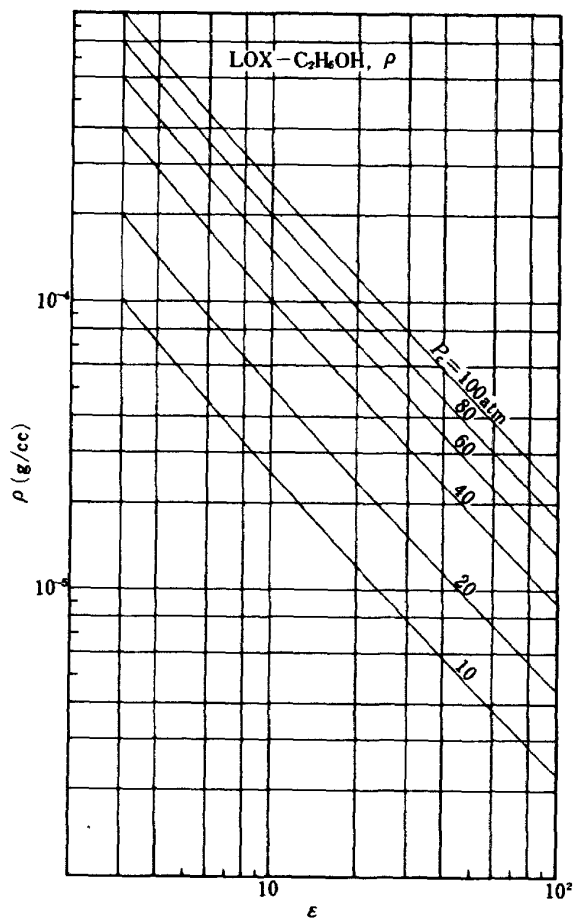
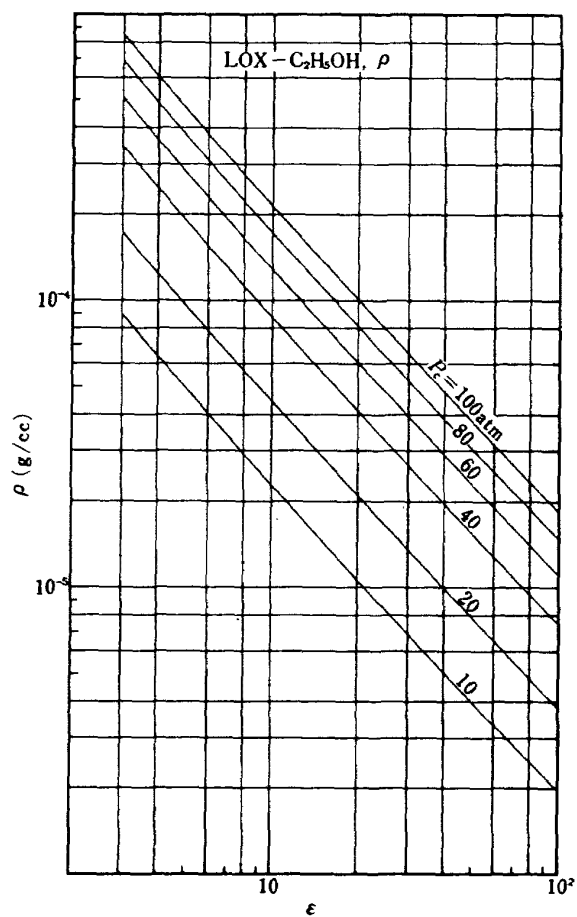
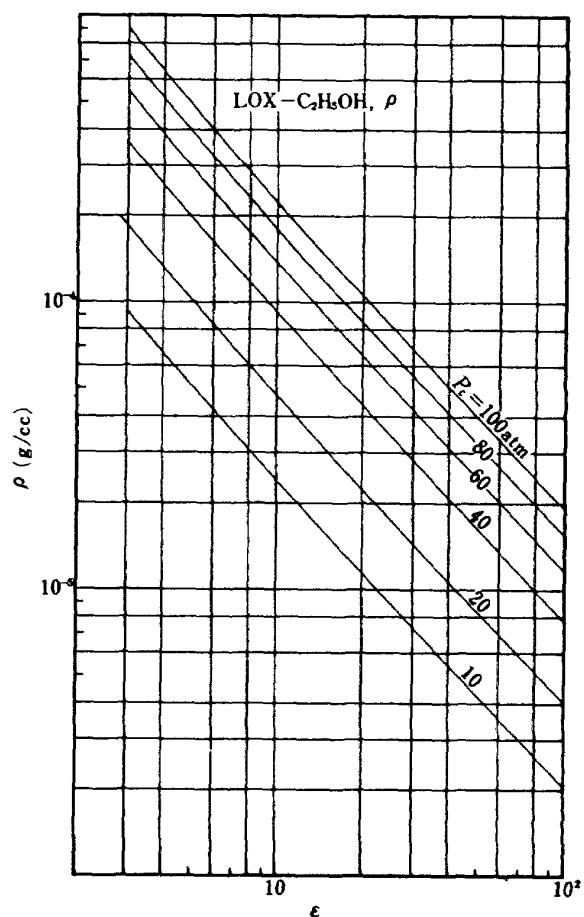
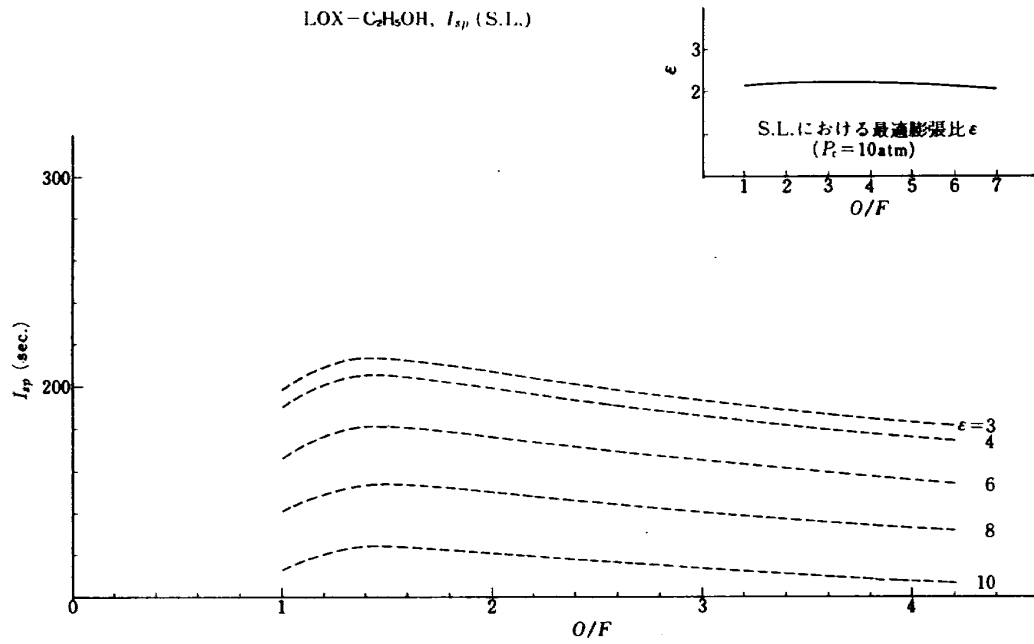
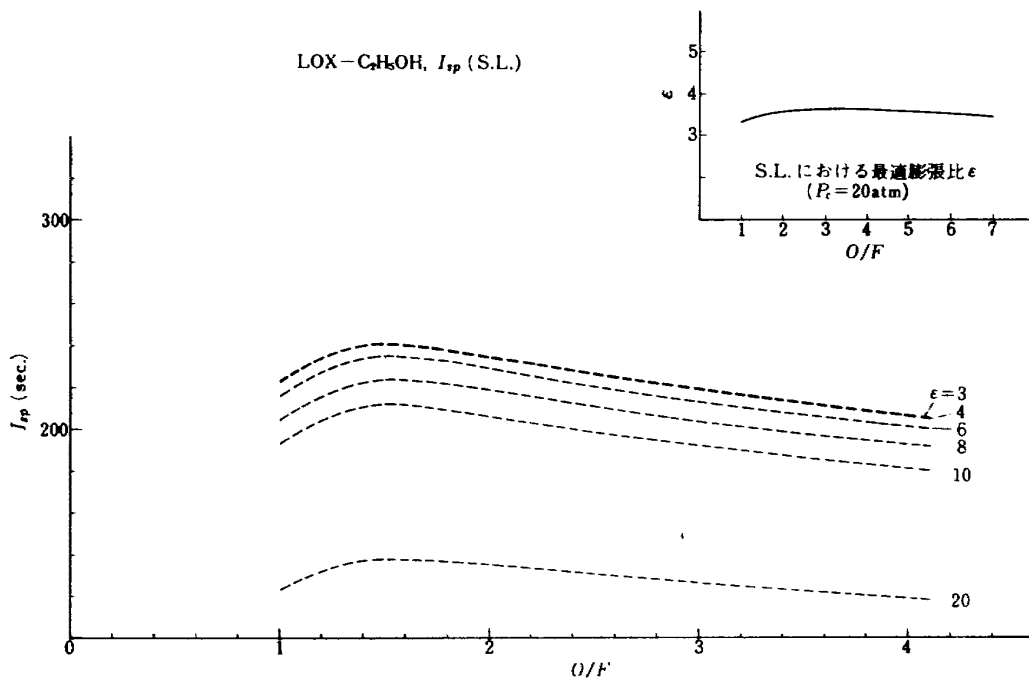
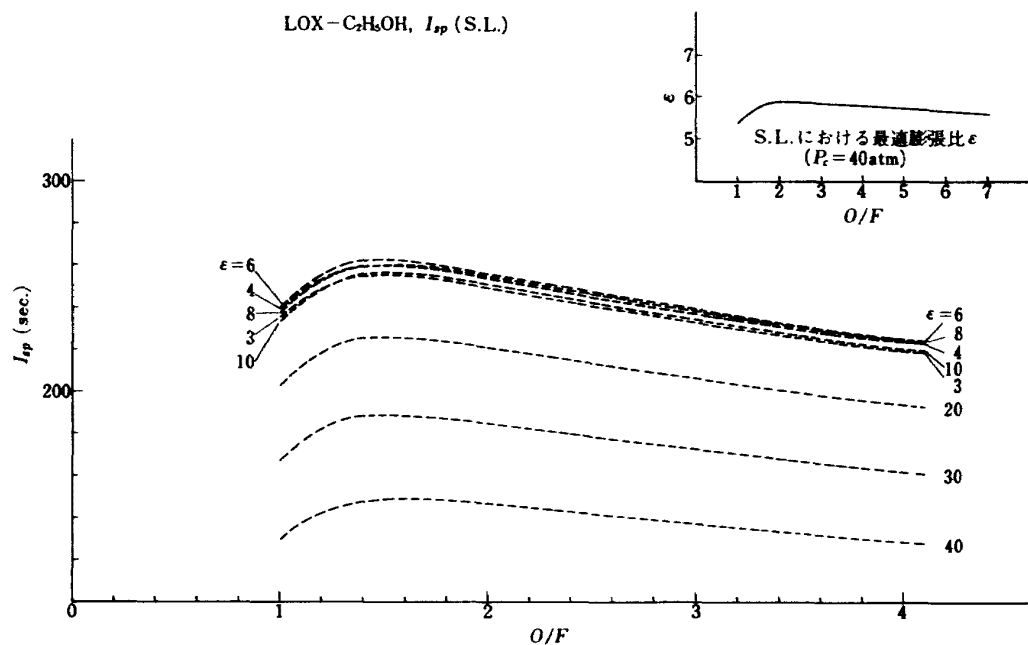
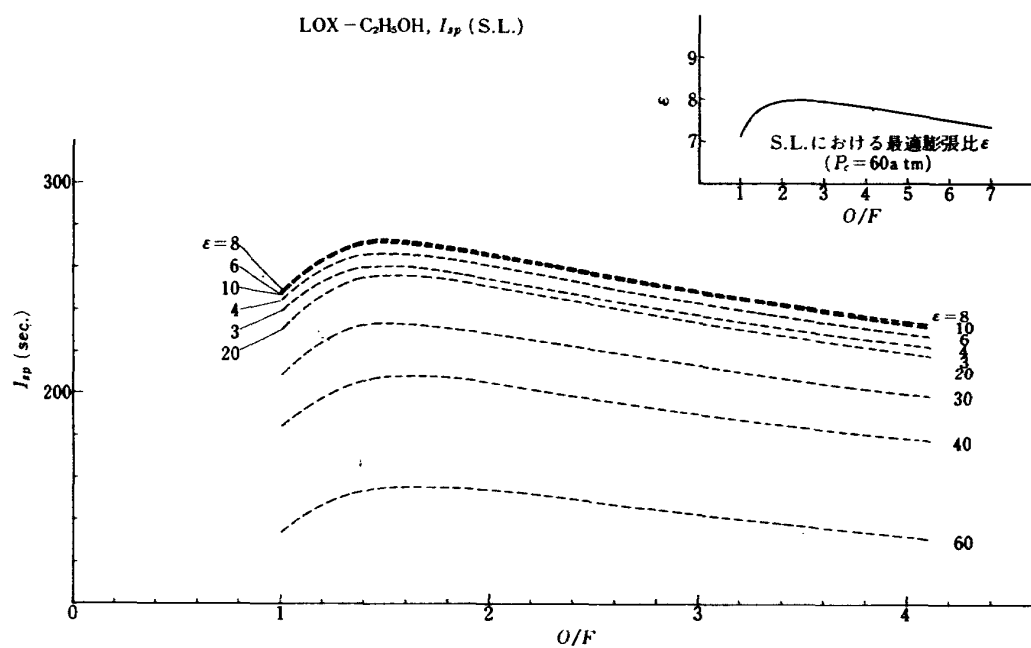


図 4・6・a

図 4・7・a ($O/F = 1.0$)図 4・7・b ($O/F = 1.5$)図 4・7・c ($O/F = 2.0$)

図 4・8・a ($P_c = 10 \text{ atm}$)図 4・8・b ($P_c = 20 \text{ atm}$)

図 4・8・c ($P_c = 40 \text{ atm}$)図 4・8・d ($P_c = 60 \text{ atm}$)

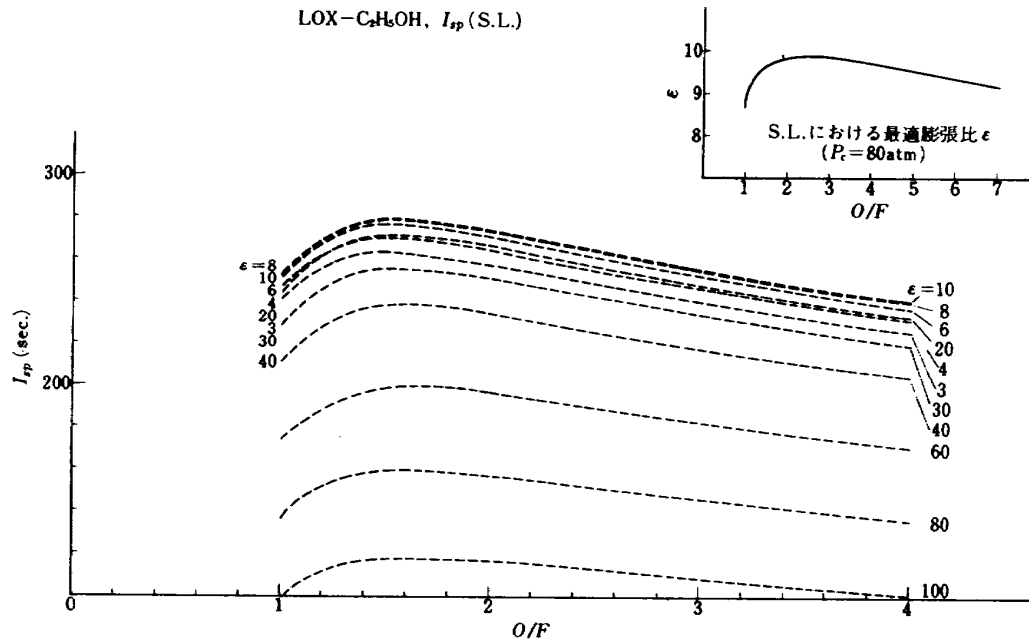


図 4・8・e ($P_c = 80 \text{ atm}$)

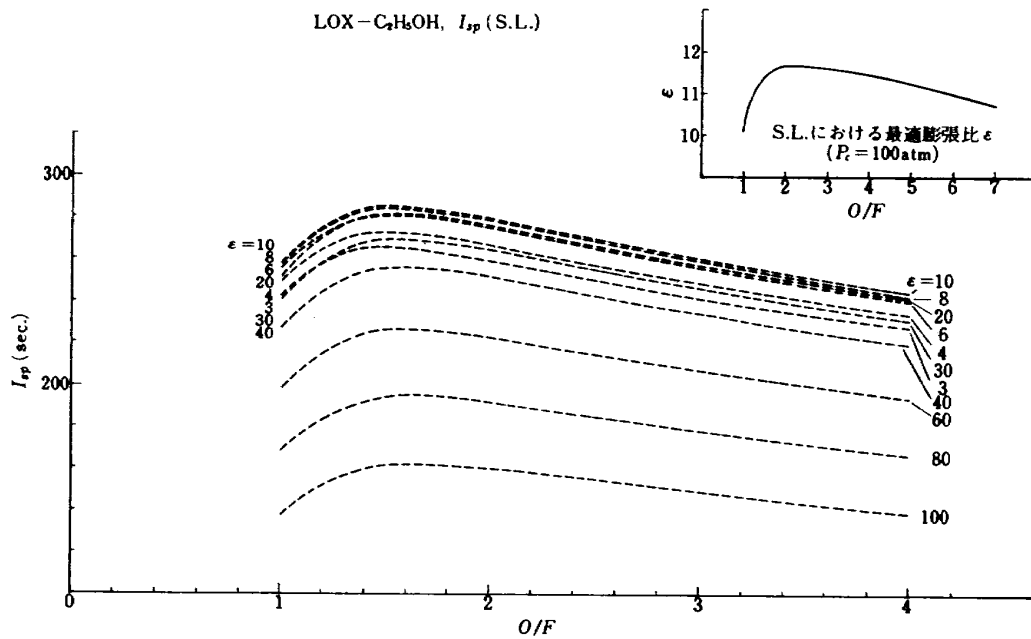
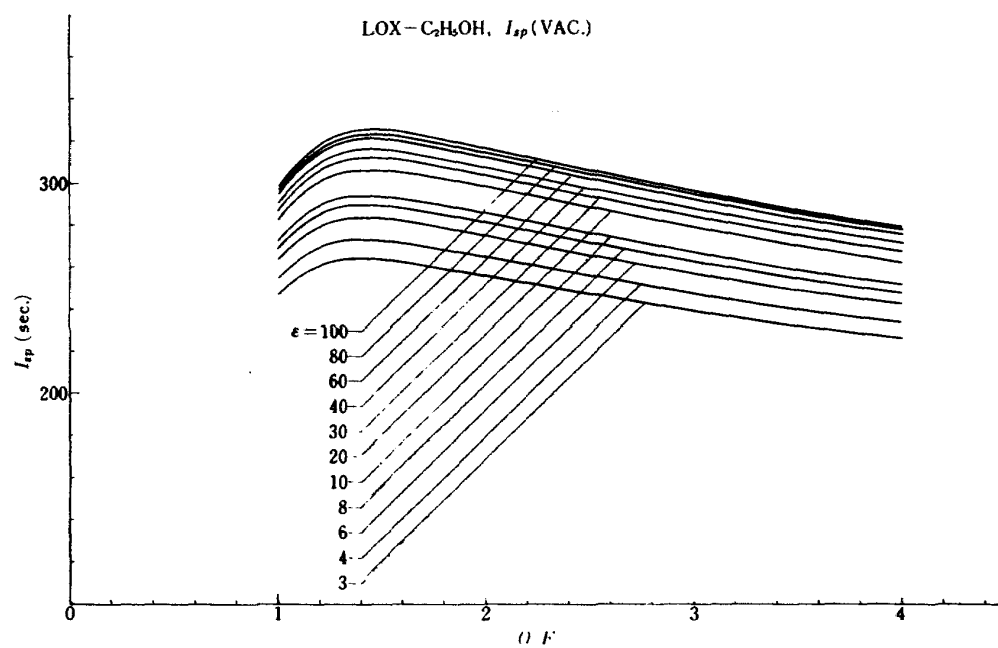
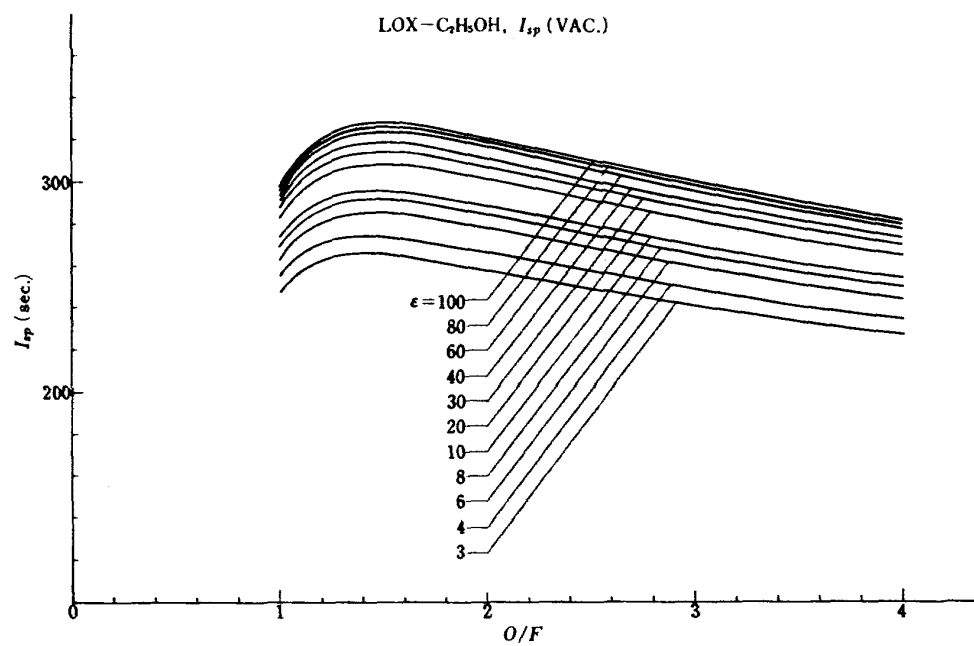


図 4・8・f ($P_c = 100 \text{ atm}$)

図 4・9・a ($P_c = 10$ atm)図 4・9・b ($P_c = 20$ atm)

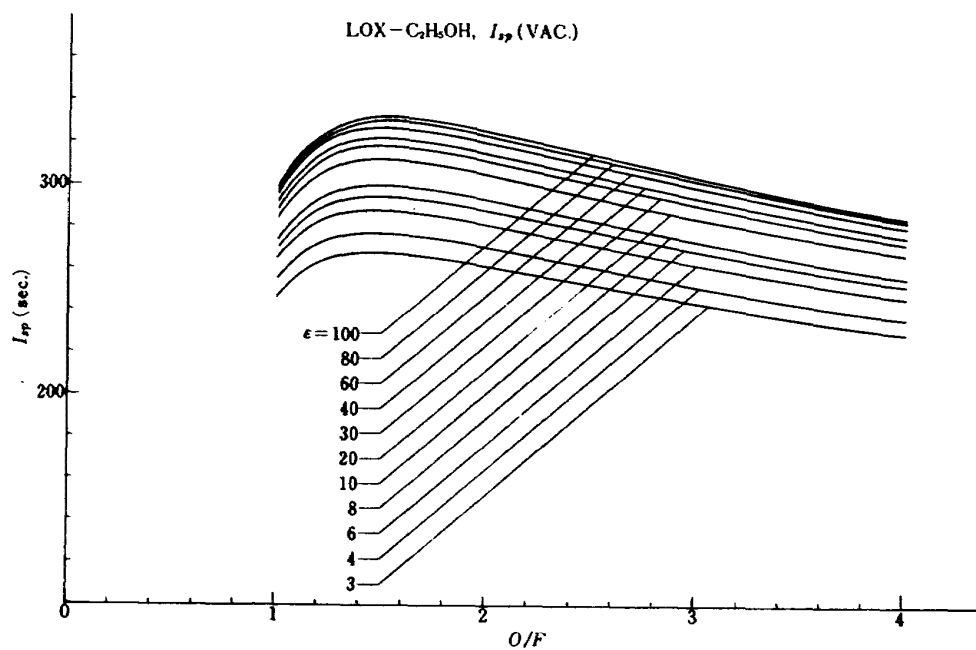


図 4・9・c ($P_c = 40$ atm)

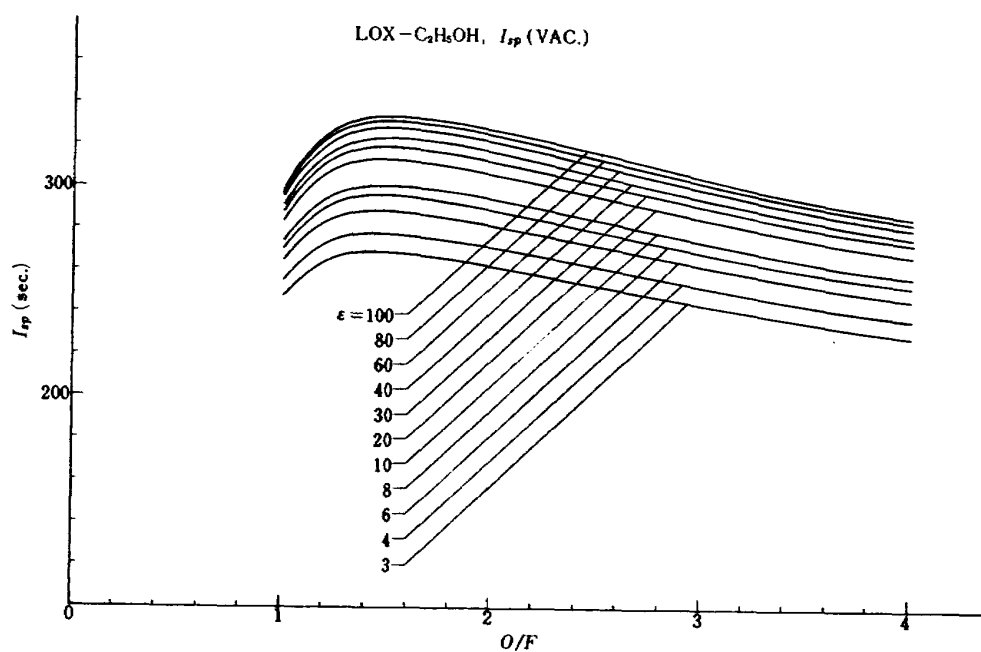
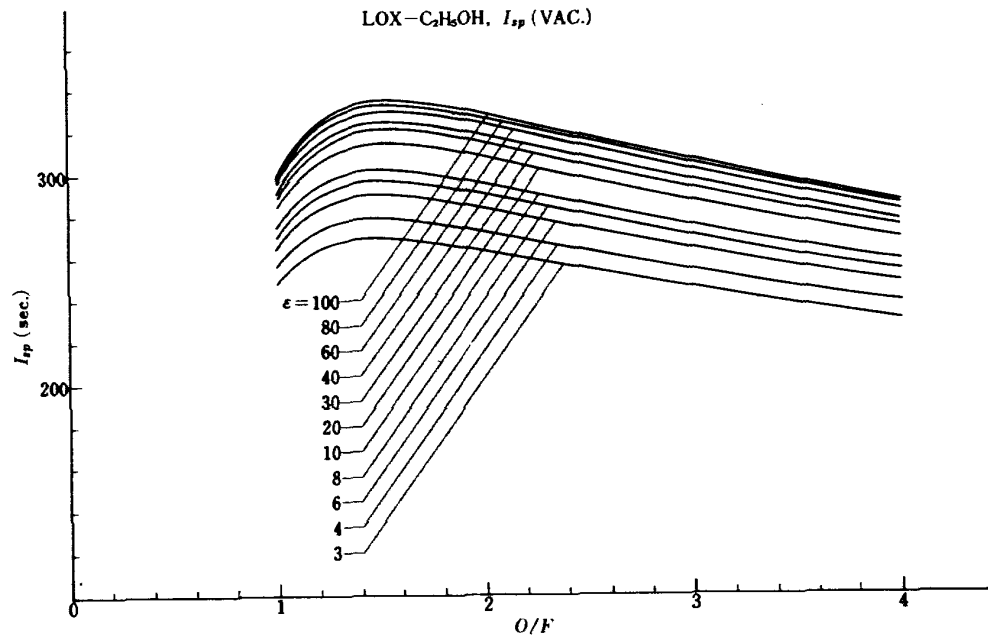
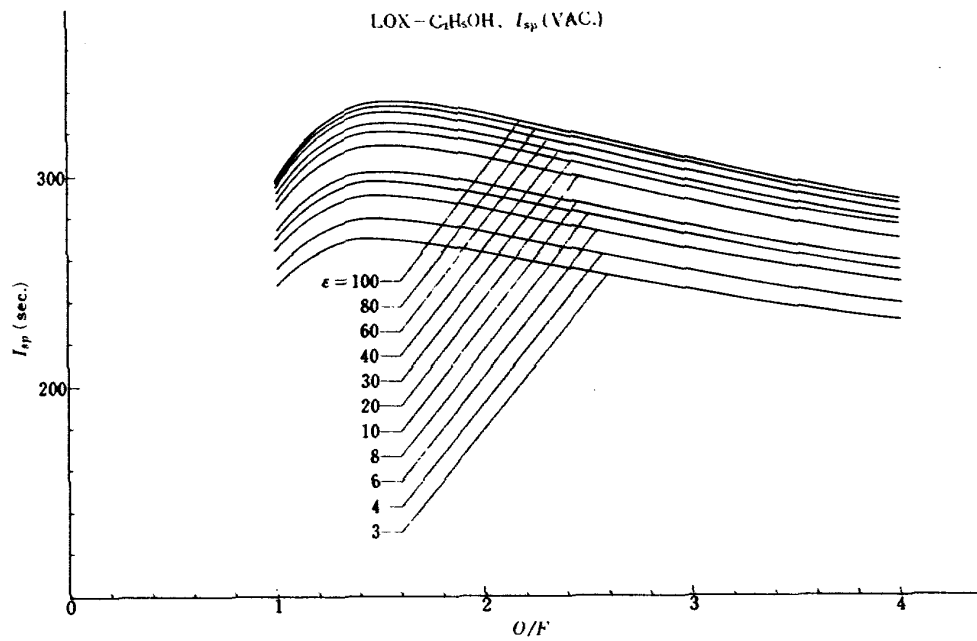


図 4・9・d ($P_c = 60$ atm)

図 4・9・e ($P_c = 80$ atm)図 4・9・f ($P_c = 100$ atm)

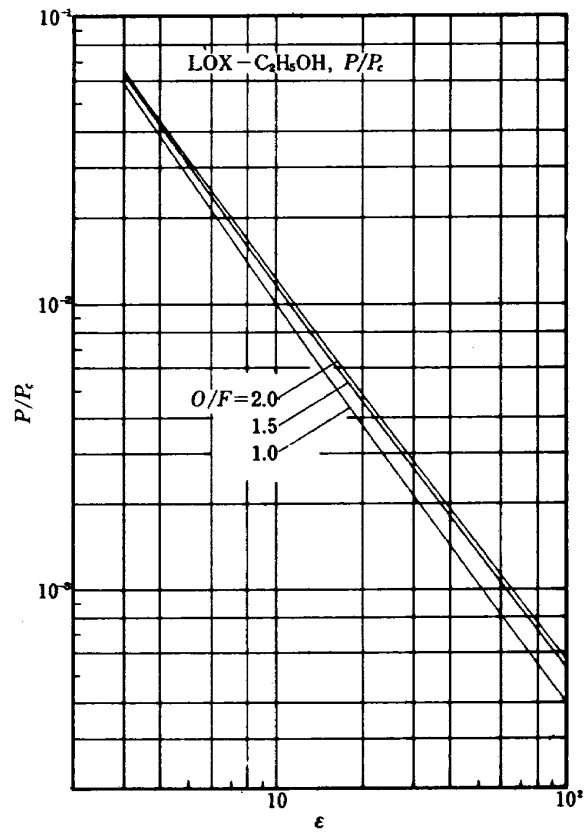
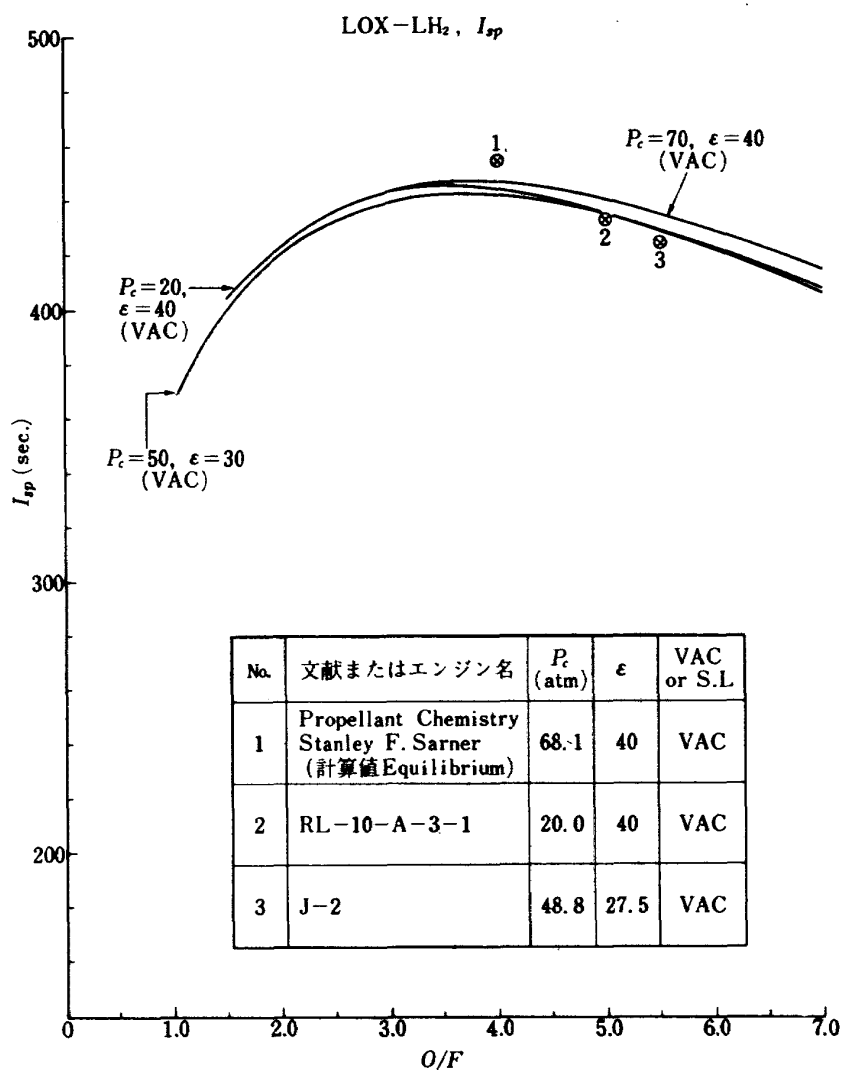
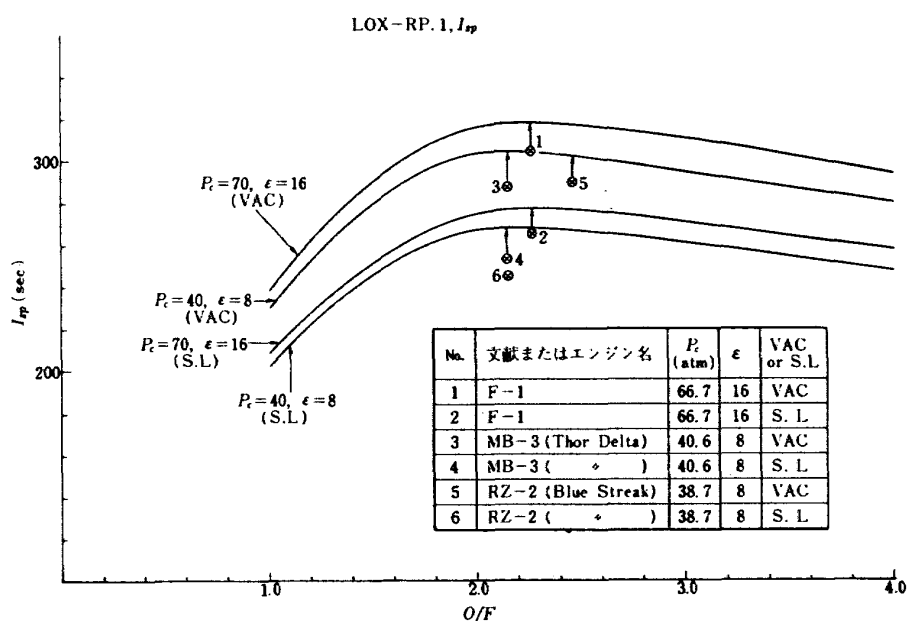


図 4・10・a ($P_c = 20 \text{ atm}$)

図 5・1・a (LOX-LH₂ の I_{sp} の計算値と実際のエンジンの値との比較)図 5・1・b (LOX-RP.1 の I_{sp} の計算値と実際のエンジンの値との比較)

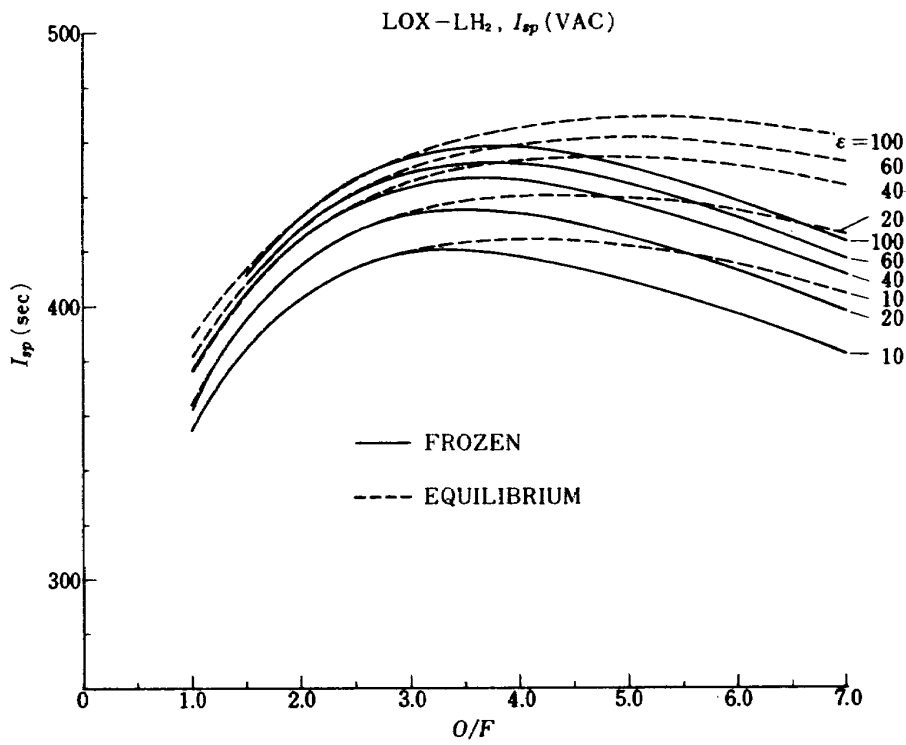


図 5・2・a ($P_c = 40$ atm)

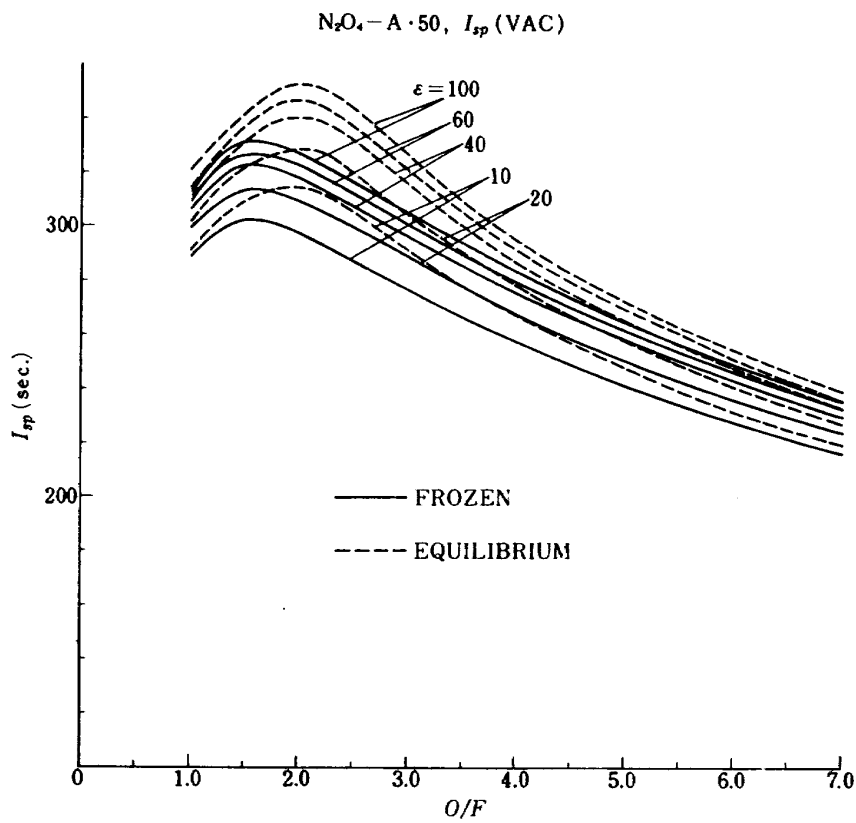
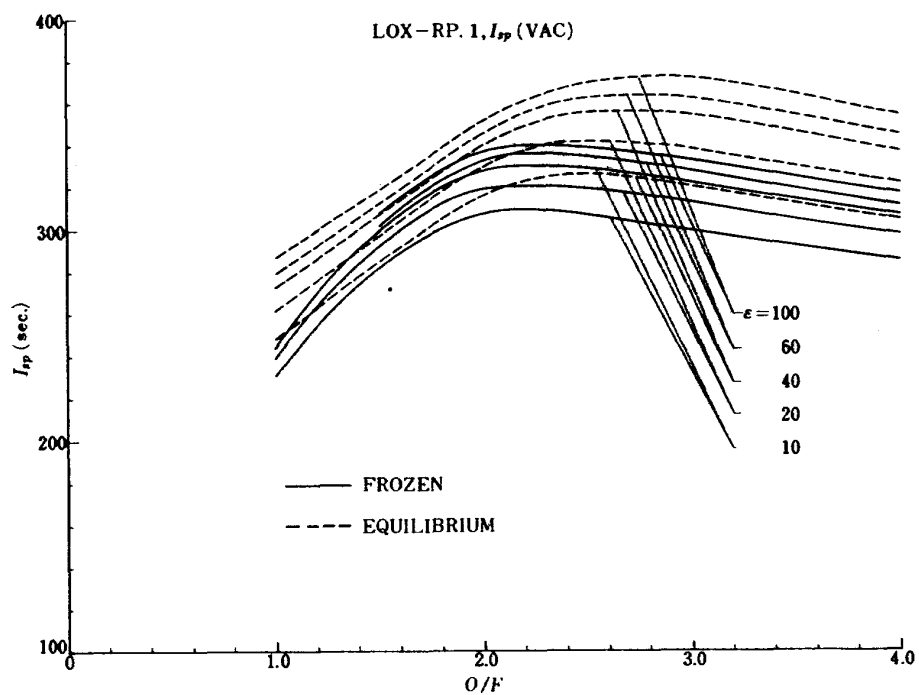
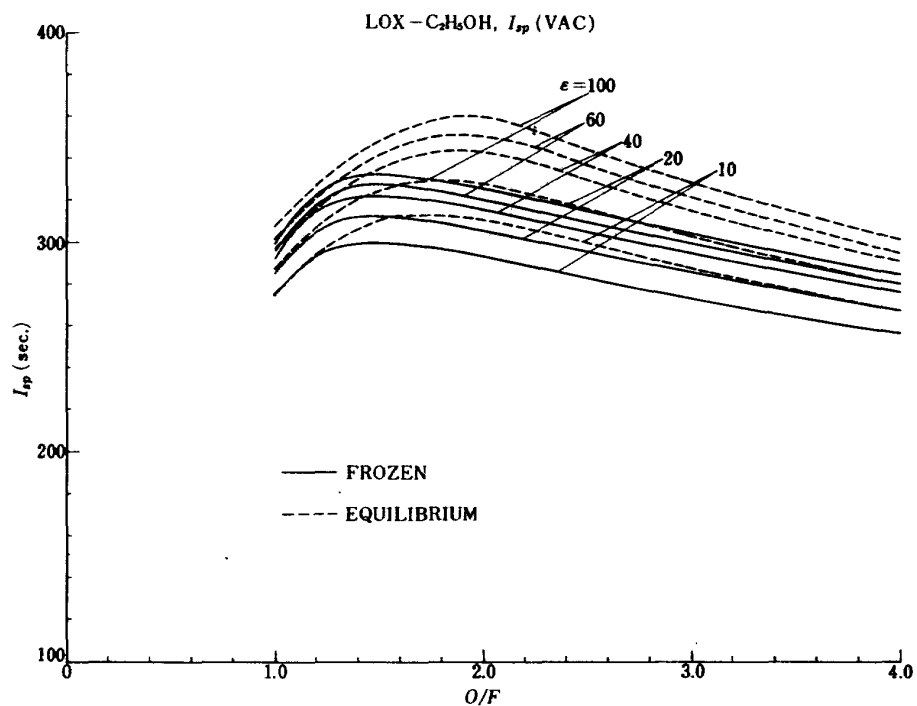


図 5・2・b ($P_c = 40$ atm)

図 5・2・c ($P_c = 40$ atm)図 5・2・d ($P_c = 40$ atm)

航空宇宙技術研究所資料295号

昭和51年3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
