

UDC 621.452.32.034.001.1:
681.3.06

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-275

ガスタービン燃焼器の設計プログラム(I)

鈴木邦男・相波哲朗

田丸卓

1975 年 4 月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

項 目	担 当 者
プログラミング	森 建二 ^{**} , 北嶋潤一 ^{**} , 五井正明 [*]
チェックおよび 修正	外山郁子 [*]

* 原動機部アルバイト

** 川崎重工業(株)

ガスタービン燃焼器の設計プログラム(I) *

鈴木 邦 男**

相 波 哲 朗**

田 丸

卓**

概 要

著者らが採用しているガスタービン燃焼器の設計法を電算機によって処理するように考え、プログラムを作成した。このプログラムでは、大部分が実例のデータをもとにしているため、特殊な高性能形への適用には不向きなところもあるが、現用燃焼器の水準程度の性能をもつものの設計が可能である。

基本設計としては噴霧形燃焼器を対象にしたものであるが、蒸発形燃焼器に対しても、燃焼器の主要寸法を噴霧形と同一として、燃料蒸発管の設計を行なうプログラムを付加した。

なお、プログラムはフォトラン(JIS 7000)で書かれている。

1. ま え が き

ガスタービン燃焼器内部で起きる諸現象は、きわめて複雑で、まだ十分に解明されていない状態である。このため、燃焼器の設計方法についてもまだ確立されたものがないが、近年多くの研究者たちの努力によって、特に燃焼器の空力、伝熱特性についての研究が進み、これらの面を重視した基本設計は、比較的簡単に行なえるようになった。

これは、既に発表したガスタービン燃焼器の設計法¹⁾をもとに、資料の一部修正、追加を行ない、電算機プログラムにまとめたものである。このプログラムの作成過程において現行の設計法を見直し、その問題点を明らかにすることも目的としている。

燃焼器の細部にわたる設計は、現状では、プログラム化するところまでの資料がなく、経験や実験に頼らなければならないが、逐次充実していく予定である。

2. 燃焼器設計の内容

2.1 設計方針

ガスタービン燃焼器の基本設計として、燃焼器の形式

は、資料のもっとも揃っているうず巻噴射弁とスワローを組合せたもの：噴霧形燃焼器とする。蒸発形燃焼器に対しては、燃焼器の主要寸法を噴霧形のそれと同一とし、燃料蒸発管の設計を行なう。

- (1) エンジンの用途、燃焼器の形式による区別を行なう。
- (2) 燃焼器外形寸法を、実例をもとに全圧損失係数や燃焼性能のパラメータを与えて算出する。
- (3) ライナ断面積、ライナ空気孔面積などの最適値を理論計算結果から選定する。
- (4) 燃焼器内部を一次燃焼領域、二次燃焼領域および希釈混合領域に分割し、それぞれの領域について、実例の解析結果や実験データを用い、空気流量配分や各領域の寸法を求める。
- (5) 実例などから、出力数値の総合判定を行なう。

設計プログラムのメインフローチャートを図1に示す。今後、新しい資料を導入することによって、表現または数値の変更が見込まれるものについては、容易に変更できるように配慮した。

2.2 基本設計におけるおもな仮定や条件

ガスタービン燃焼器の基本設計に際し、次のような仮定や条件をおいた。

- (1) 燃焼器ケーシングやライナ直径は、軸方向に一定とする。
- (2) ライナ空気孔は、すべてドリル孔とする。ライナ開口面積には、ライナ壁面冷却空気孔面積も含めて考える。
- (3) ライナの設計において、スワローからの流入空気量を考慮し、ライナ断面積比の最適値(全圧損失が最小となる条件)を選定する。
- (4) ライナ空気孔の面積配分については、流入空気量が空気孔面積比に比例すると仮定する。
- (5) 燃焼領域においては、ライナ壁面冷却空気も燃焼空気として利用されると仮定する。
- (6) スワローの旋回角は、45°付近とする。
- (7) アニュラ形式の場合に、オプションとして蒸発管の採用を検討できるようにしてある。即ち、うず巻

* 昭和49年12月27日受付

** 原動機部

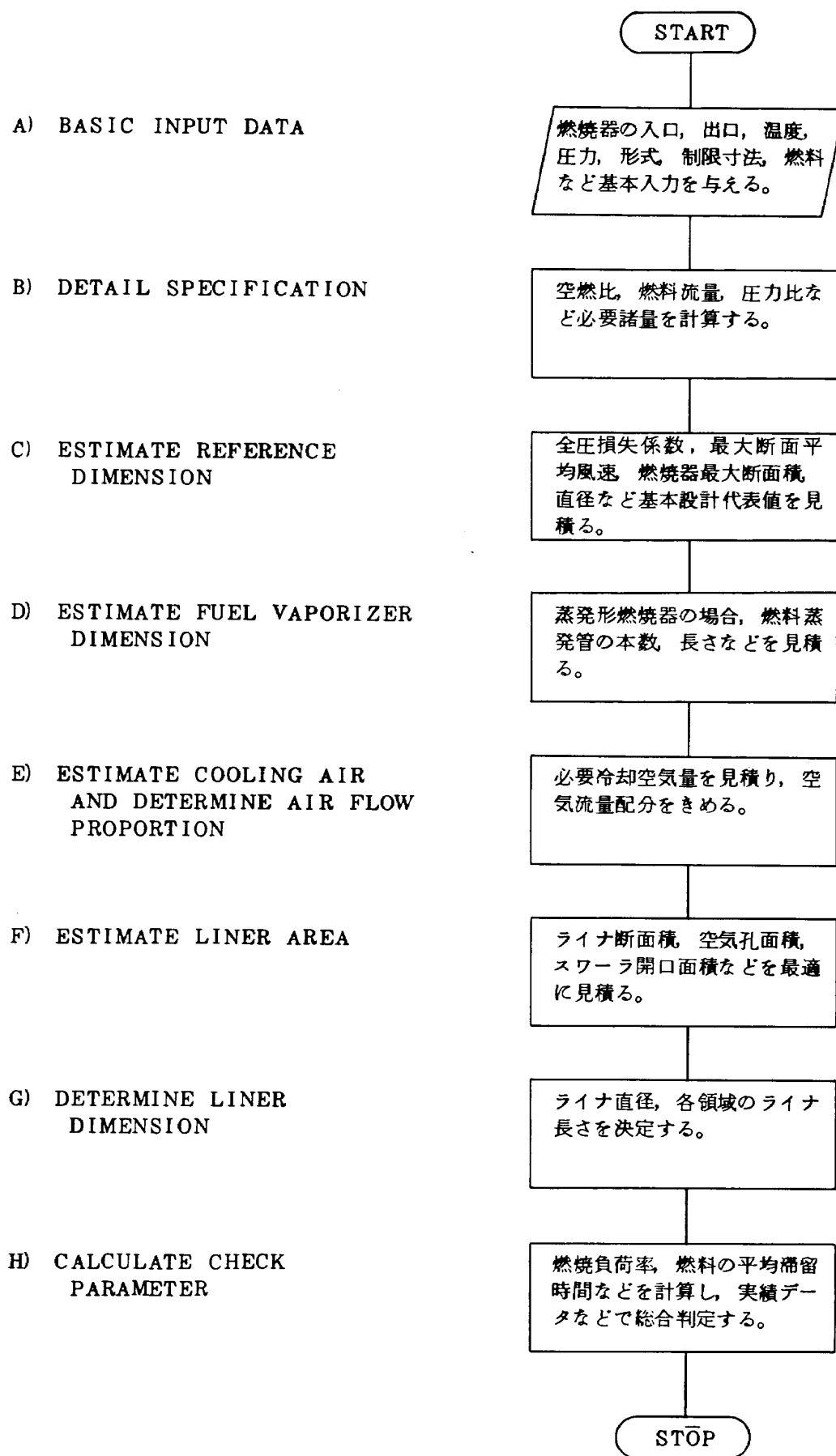


図 1 燃焼器基本設計プログラム・メイン・フローチャート

噴射弁とスワローを基本形式として設計した諸寸法の燃焼器に最適の管寸法、本数などを算出できるようにした。

- (8) 燃料蒸発管を用いるとき、スワローは使用しないで、別の方法により一次空気を流入させる。
- (9) 燃料蒸発管の全長は、ライナ幅またはライナ直径の3倍以下とする。

2.3 所要入力データ

ガスタービン燃焼器の基本設計に必要な入力データを表1に示す。表1中の寸法余裕率 SL は、燃焼器直径の燃焼器許容最大径との比で、燃焼器直径の最小値を制限するための係数である。 $SL = 0.5 \sim 0.9$ としてよい。 $SL = 1$ のとき燃焼器は最大寸法そのままとなる。計算上は許容最大径をなるべく大きくとり、 SL を小さめにするのがよい。表1中の燃焼器形式の区別を表2に、また、用途別記号を表3に示す。表2の説明を図2に示す。

2.4 入力データの適用範囲

入力データの範囲は、おおよそ次の通りとする。

- (1) 圧縮機の圧力比は3~30程度。
- (2) 燃焼器入口空気温度は273~800°K。
- (3) 燃焼器出口/入口温度比は2~4。
- (4) 出口温度不均一率は0.3~0.1。
- (5) 燃料はJP-4からJet A-1、灯油、軽油程度まで。
- (6) 燃焼器入口空気条件および燃焼器全長は、デフューザ出口部分を基準にしている。デフューザ部分の長さは、燃焼器全長の(0.22~0.33)倍または燃焼器ケーシング幅の(0.78~1.4)倍程度あり²⁾、デフューザ部分の圧力損失は、高流速形では、本計算値の30%にも達するので注意を要する。
- (7) 燃焼器全長には、出口トランジション部分を含んでいない。

2.5 主要出力データ

この基本設計プログラムによって得られる主要出力データを表4に示す。

2.6 プログラム使用上の注意

このプログラムを使用して設計を行なうとき、次の点に注意する必要がある。

- (1) 燃料霧化機構、保炎機構にうず巻噴射弁とスワローを使用しない場合にも、このプログラムから燃焼器主要寸法を求めることができる。ただし、一次燃焼領域については、空気負荷率などの点から再調整が必要になろう。
- (2) 燃焼効率について、設計点(定格条件)のみを考慮しているので、部分負荷条件について、別途確認

表1 所要入力データ

記号	項目	単位
P_0	圧縮機入口圧力	kg/cm ² abs
P_1	燃焼器入口全圧	kg/cm ² abs
P_2	燃焼器出口全圧(平均値)	kg/cm ² abs
T_1	燃焼器入口空気温度	°K
T_2	燃焼器出口ガス温(平均値)	°K
δ_t	出口温度不均一率	—
w_a	空気流量	kg/s
H_u	燃料低位発熱量	kcal/kg
η_b	燃焼効率	—
$D_{0 \max}$	燃焼器最大直径	m
$D_{i \min}$	燃焼器最小直径	m
$L_{r \max}$	燃焼器最大長さ	m
SL	寸法余裕率	—
T_{ype}	燃焼器形式 (表2)	(1~10)
U_{se}	用途 (表3)	(1~2)
V_{ap}	燃料蒸発管形 (表3)	(0, 1)

表2 燃焼器形式記号

記号	燃 焼 器 形 式
1	直流環形
2	逆流環形
3	直流缶状環形
4	逆流缶状環形(逆頭)
5	逆流缶状環形(直頭)
6	直流多缶形
7	逆流多缶形(逆頭)
8	逆流多缶形(直頭)
9	直流缶形
10	逆流缶形

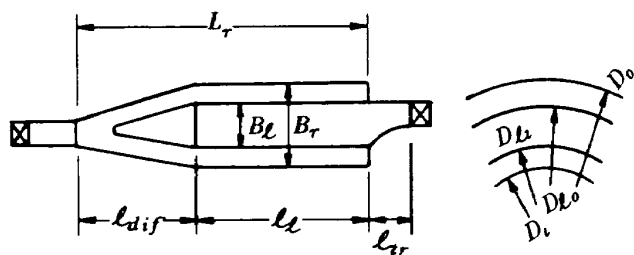
直頭: 噴射弁が圧縮機側にあるもの

逆頭: 噴射弁がタービン側にあるもの

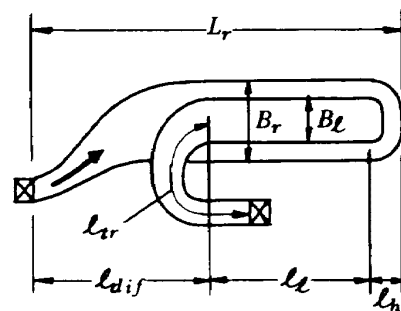
表3 燃焼器の用途および燃料噴射形式記号

記号	燃 焼 器 用 途
1	産 業 (汎) 用
2	航 空 用
	燃 料 噴 射 形 式
0	噴 霧 形
1	蒸 発 形

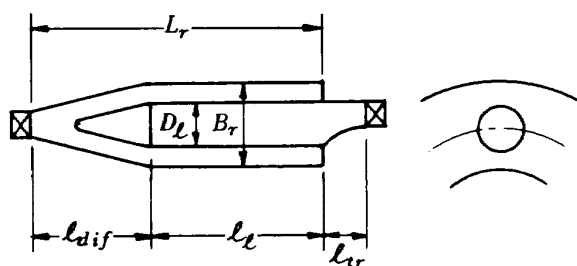
1. 直流環形



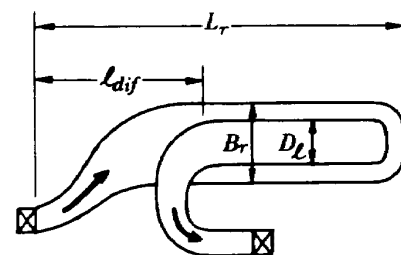
2. 逆流環形



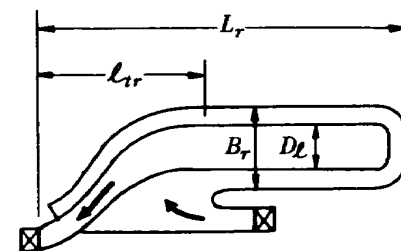
3. 直流缶状環形



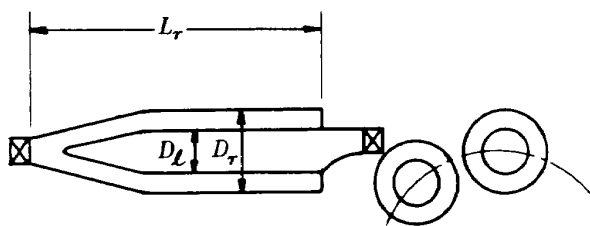
4. 逆流缶状環形 (逆頭)



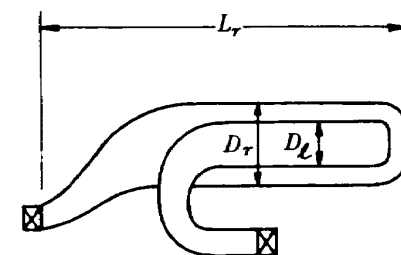
5. 逆流缶状環形 (直頭)



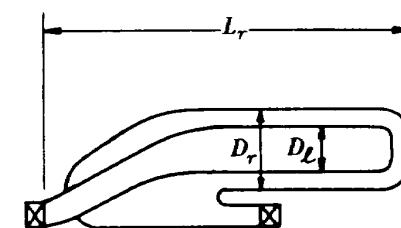
6. 直流多缶形



7. 逆流多缶形 (逆頭)



8. 逆流多缶形 (直頭)



9. 直流缶形 } 図省略
10. 逆流缶形 }

図 2 燃焼器の形式

表4 主要出力データ

記号	項目	単位	記号	項目	単位
n	空燃比	—	D_{si}	スワロー内径	m
n_p	一次燃焼領域の空燃比	—	D_{sB}	スワロー盲リング外径	m
n_s	二次燃焼領域の空燃比	—	D_d	希釈空気孔直径	m
w_f	燃料流量	kg/s	n_d	希釈空気孔数	—
w_{ac}	ライナ冷却空気流量	kg/s	l_p	一次燃焼領域のライナ長さ	m
w_{ap}	一次燃焼領域の空気流量	kg/s	l_s	二次燃焼領域のライナ長さ	m
w_{as}	二次燃焼領域の空気流量	kg/s	l_d	希釈混合領域のライナ長さ	m
w_{ad}	希釈混合領域の空気流量	kg/s	l_l	ライナ全長	m
m_t	缶形ライナ数	—	V_l	全ライナ容積	m ³
m_s	スワローの数	—	ϕ	全圧損失係数	—
A_r	燃焼器最大断面積	m ²	U_r	最大断面平均風速	m/s
A_l	ライナ断面積	m ²	τ	平均滞留時間	ms
A_h	ライナ空気孔面積	m ²	L_b	ライナの燃焼負荷率	kcal/m ³ h atm
A_s	スワロー開口面積	m ²	L_c	ライナ断面積あたりの負荷率	kcal/m ² h atm
A_{lp}	一次燃焼領域の開口面積	m ²		(蒸発管形式の場合)	
A_{lph}	一次燃焼領域の空気孔面積	m ²	ϵ	一次燃焼領域火炎輻射率	—
A_{ls}	二次燃焼領域の空気孔面積	m ²	l	蒸発管長さ	m
A_{ld}	希釈混合領域の空気孔面積	m ²	l_t	” ピッチ円上間隔	m
D_r	燃焼器直径 (缶形)	m	N	蒸発管本数	
B_r	燃焼器幅 (環形)	m	n_i	” 内空燃比	
D_0	燃焼器外径 (環形)	m	T_p	一次燃焼領域温度	°K
D_i	燃焼器内径 (環形)	m	u_{ai}	蒸発管内気流速度	m/s
D_l	ライナ直径 (缶形)	m	w_{ai}	” 空気流量	kg/s・本
B_l	ライナ幅 (環形)	m	w_{fi}	” 燃料流量	kg/s・本
D_{l0}	ライナ外径 (環形)	m	w_{ac}	蒸発管外一次燃焼空気	kg/s・本
D_{li}	ライナ内径 (環形)	m			
D_{s0}	スワロー外径	m			

する必要がある。

- (3) ライナ全体の燃焼負荷率値では、ライナ容積の制限を行っていない。
- (4) この設計に用いた基礎データは、ジェットエンジン燃焼器のものが多く、産業用ガスタービン燃焼器へ適用する場合、高負荷形になる傾向がある。
- (5) このプログラムは、FORTRAN (JIS 7000) で書いてある。プログラムサイズは23,228W, 計算所要時間は、FACOM 230-60を使用し、入力5データのとき34秒 (CPU時間) であった。
- (6) 入力の数値を少しかえて計算し、これによって燃焼器各部の寸法がどのように変化するか調べるとよい。

3. 計算例

軽量ジェットエンジン JR100の燃焼器の計算結果を表5および図3に示す。なお、表5には、実際の設計値³⁾との比較も示した。

ターボファンエンジン FJR 710 / 10 の燃焼器の計算結果を表6および図4に示す。表6には、実際の設計値との比較⁴⁾および蒸発形燃料噴射弁を考えたときの計算結果も合せて示した。燃料蒸発管は、管内部で全燃料を蒸発させるには、0.81mの長さが必要であるが、これは実用的でなく、蒸発管による燃料の気流微粒化を考慮することを「蒸発/微粒化の区別」の項で示している。

表5および表6の本プログラムによる計算値と実際の

設計値とのずれは、「燃焼効率パラメータ」(付図2)および全圧損失係数と希釈混合領域長さの関係(付図6)によるところが大きい。したがって、これらのデータは計算上きわめて重要なものとなり、また、両図とも精度

の点での不足が感じられるが、現在のところ、これ以外の具体的なデータがないので、第I報として、これを用いた。

表5 JR100 燃焼器の結果

入力データ

項 目	数 値
燃 焼 器 入 口 圧 力	4.03 kg/cm ² abs
" 出 口 圧 力	3.71 kg/cm ² abs
" 入 口 温 度	450.15 °K
" 出 口 温 度	1123.15 °K
出口温度不均一率	0.28
空 気 流 量	27.5 kg/s
燃 料 低 位 発 熱 量	10230 kcal/kg
燃 焼 効 率	0.95
燃 焼 器 最 大 径	0.7 m 以下
" 最 小 径	0.23 m 以上
" 最 大 長 さ	0.5 m 以下
" 形 式	直流アニュラ形
" 用 途	航 空 用
燃 料 噴 射 形 式	噴 霧 形

主要出力データ

項 目	出力データ	設 計 値
空 燃 比	52.1	(54.5)
全 圧 損 失 係 数	27.3	18.4*
最大断面平均風速	27.4 m/s	33.4 m/s
最大断面積	0.328 m ²	0.269 m ²
最大径 (外径)	690 mm	630 mm
最小径 (内径)	240 mm	232 mm
ライナ断面積比	0.64	0.694
ライナ全長	278 mm	306 mm
ライナ容積	0.0583 m ³	0.052 m ³
スワラ数	11	16
スワラ直径	75 mm	55 mm (58)
スワラ PCD	465 mm	434 mm
ライナ冷却空気量	12.9 %	(12.5 %)
ライナ空気孔面積	1214 cm ²	1336 cm ²
希釈孔直径	25 mm	17 φ, 25 × 75 **
燃焼負荷率	8.1 × 10 ⁷	8.7 × 10 ⁷ kcal/m ² · h · atm

()内の値はKeenan-Kayeの数表から読みとったもの
*計算による推定値

()内の値は開口面積からの推定値

** 代表空気孔径25φ

表6 FJR 710/10 燃焼器の結果

入 力 デ ー タ

項 目	数 値
燃 焼 器 入 力 圧 力	17.1 kg/cm ² abs
” 出 口 圧 力	16.4 kg/cm ² abs
” 入 口 温 度	702.75 °K
” 出 口 温 度	1353.15 °K
出 口 温 度 不 均 一 率	0.2
空 気 流 量	25.1 kg/s
燃 料 低 位 発 熱 量	10230 kcal / kg
燃 焼 効 率	0.98
燃 焼 器 最 大 径	0.6 m 以下
” 最 小 径	0.3 m 以上
” 最 大 長 さ	0.3 m 以下
” 形 式	直 流 ア ニ ュ ラ 形
” 用 途	航 空 用
燃 料 噴 射 形 式	噴 霧 形

主要出力データ (0)

項 目	出 力 デ ー タ	設 計 値
空 燃 比	52.3	(55.4)
全 圧 損 失 係 数	55.4*/40**	45*/34**
最 大 断 面 平 均 風 速	17.3 m/s	18.9 m/s
最 大 断 面 積	0.175 m ²	0.149
最 大 径 (外 径)	574 mm	564 mm
最 小 径 (内 径)	326 mm	296 mm
ラ イ ナ 断 面 積 比	0.636	0.69
ラ イ ナ 全 長	148 mm	250 mm
ラ イ ナ 容 積	0.0165 m ³	0.0252
ス ワ ー ラ 数	19	16
ス ワ ー ラ 直 径	42 mm	54 mm
ス ワ ー ラ PCD	450 mm	409 mm
ラ イ ナ 冷 却 空 気 量	22.9 %	(30 %)
ラ イ ナ 空 気 孔 面 積	461 cm ²	340 cm ²
希 釈 孔 直 径	14 mm	13 mm
燃 焼 負 荷 率	6.3 × 10 ⁷	3.9 × 10 ⁷ kcal/m ² · h · atm

() 内の値は Keenan-Kaye の数表から読みとったもの

* ケーシング形状について用いた値
** ライナ空気孔について用いた値

() 内の値は、開口面積からの推定値

主要出力データ (1, 入力データとして蒸発形を入れたとき)

項 目	出 力 デ ー タ	項 目	出 力 デ ー タ
燃 料 蒸 発 管 本 数	19 本	管 内 空 気 量	0.051 kg/s · 本
蒸 発 管 全 長	0.81 m	一 次 燃 焼 領 域 ガ ス 温	1795 K
管 内 空 燃 比	2.0	火 炎 ふ く 射 率	0.442
管 内 風 速	41.3 m/s	蒸 発 / 微 粒 化 の 区 別	微 粒 化 形
管 外 の 一 次 燃 焼 空 気	0.252 kg/s · 本		

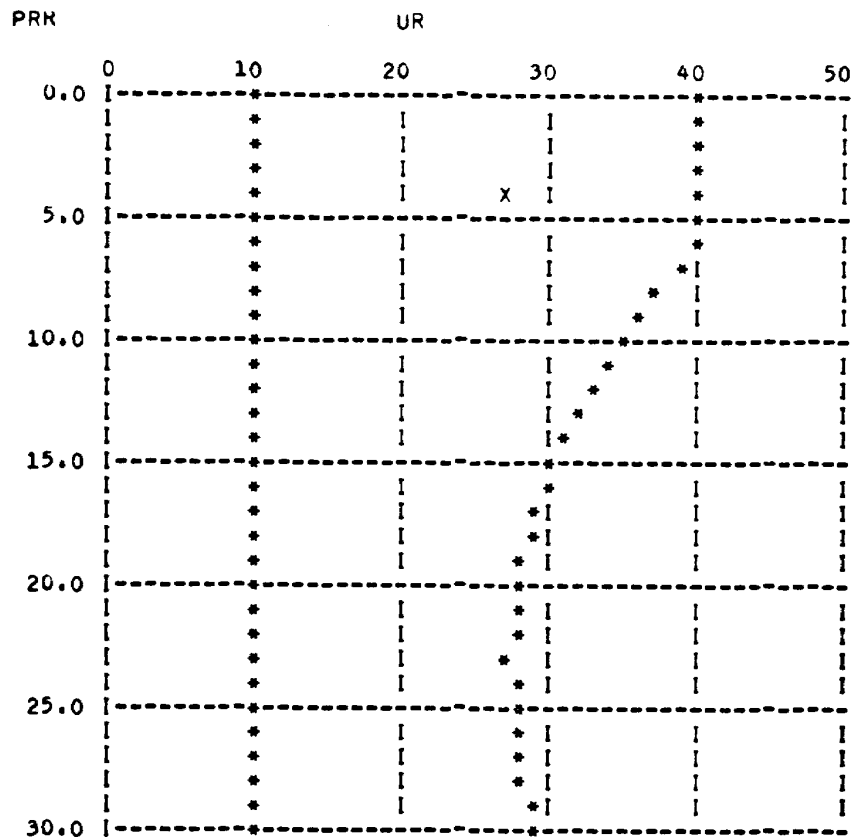


図 3(a) JR 100 燃焼器の最大断面平均風速の計算結果 (×印が計算値, PRR: 圧力比, UR: 最大断面平均風速 [m/s])

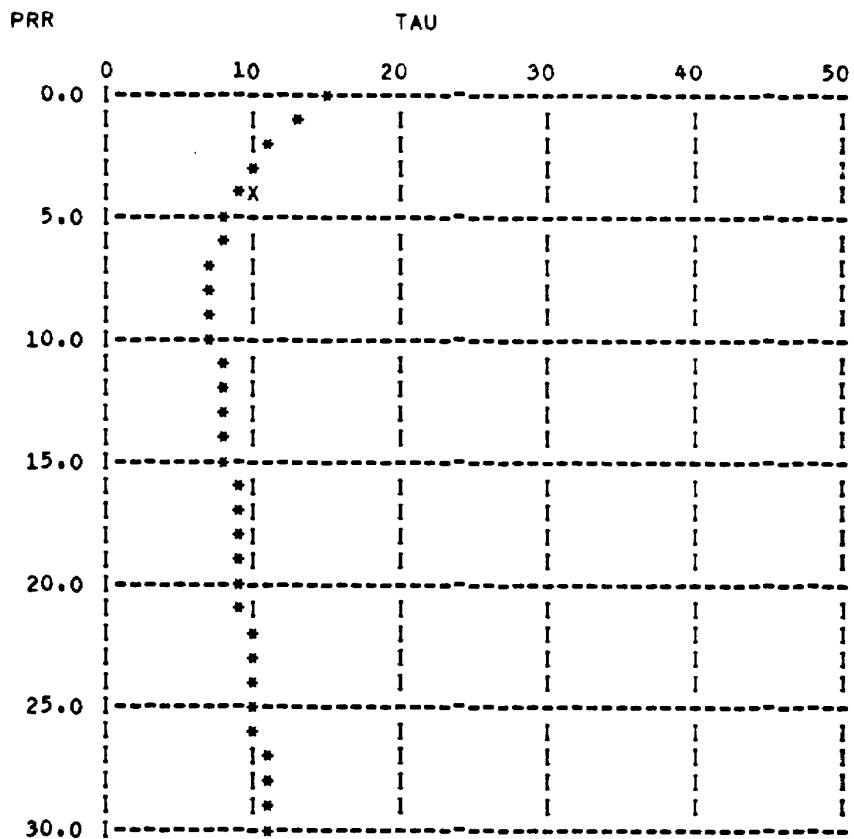


図 3(b) JR 100 燃焼器の平均滞留時間の計算結果 (×印が計算値, PRR: 圧力比, TAU: 滞留時間 [ms])

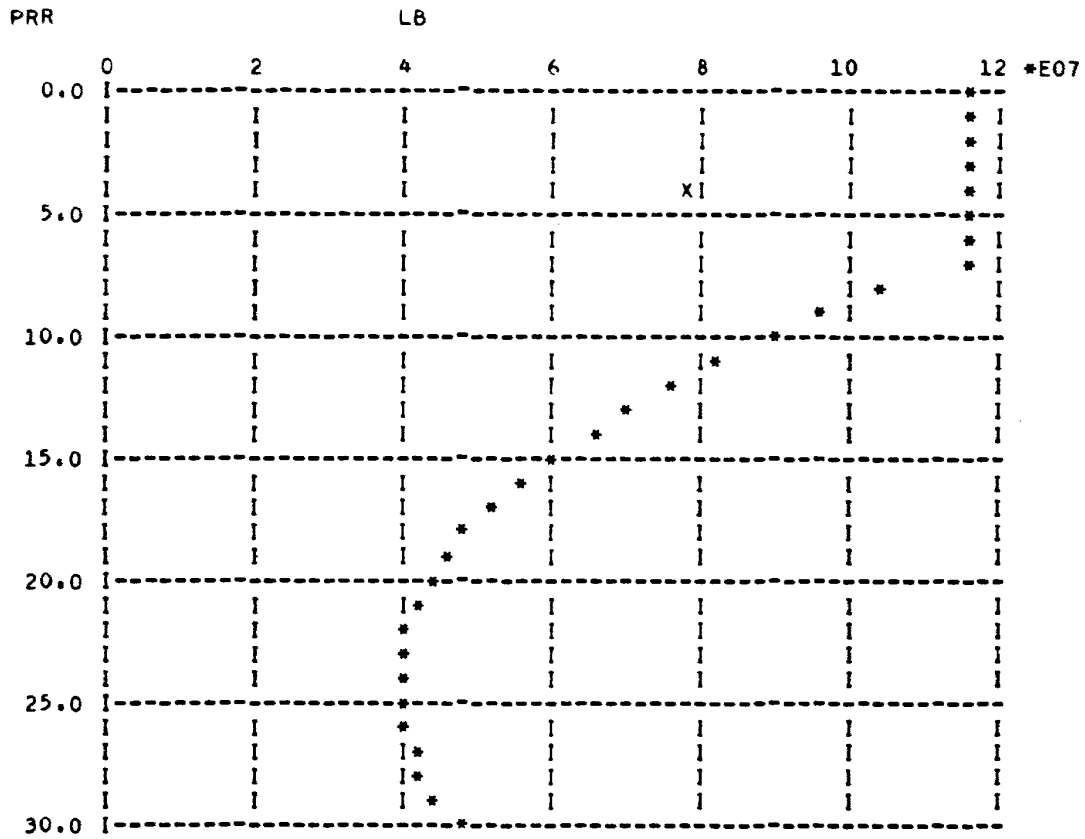


図 3(c) JR 100 燃焼器の燃焼負荷率の計算結果 (×印が計算値, PRR: 圧力比, LB: 燃焼負荷率
〔kcal/m³・h・atm〕)

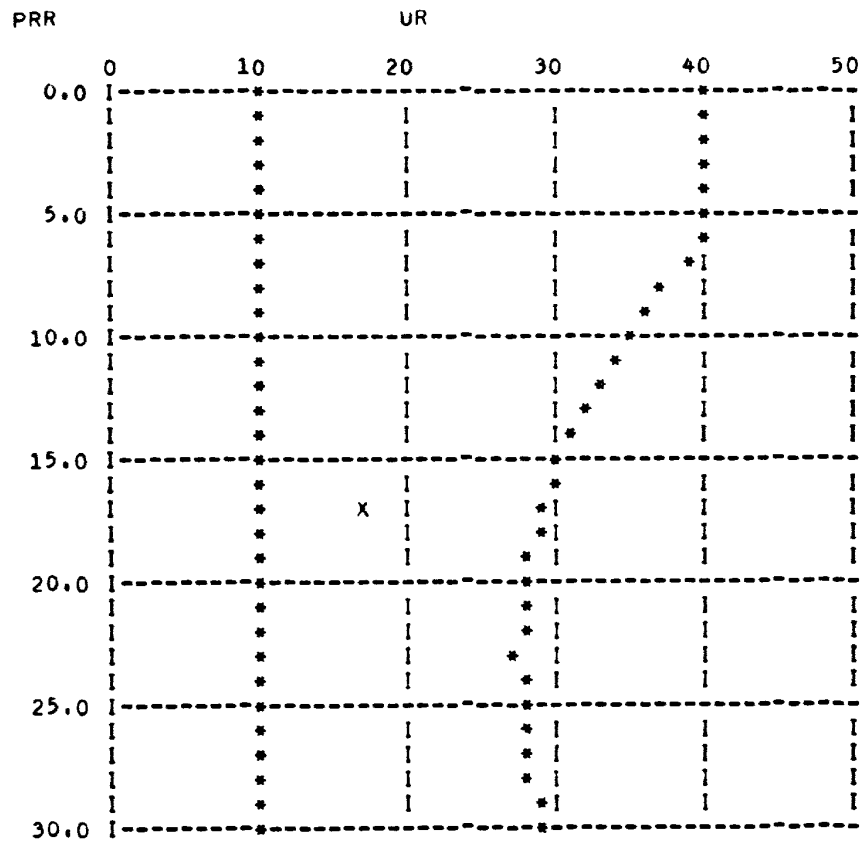


図 4(a) FJR 710 燃焼器の最大断面平均風速の計算結果 (×印が計算値, PRR: 圧力比, UR: 最大断面平均風速
〔m/s〕)

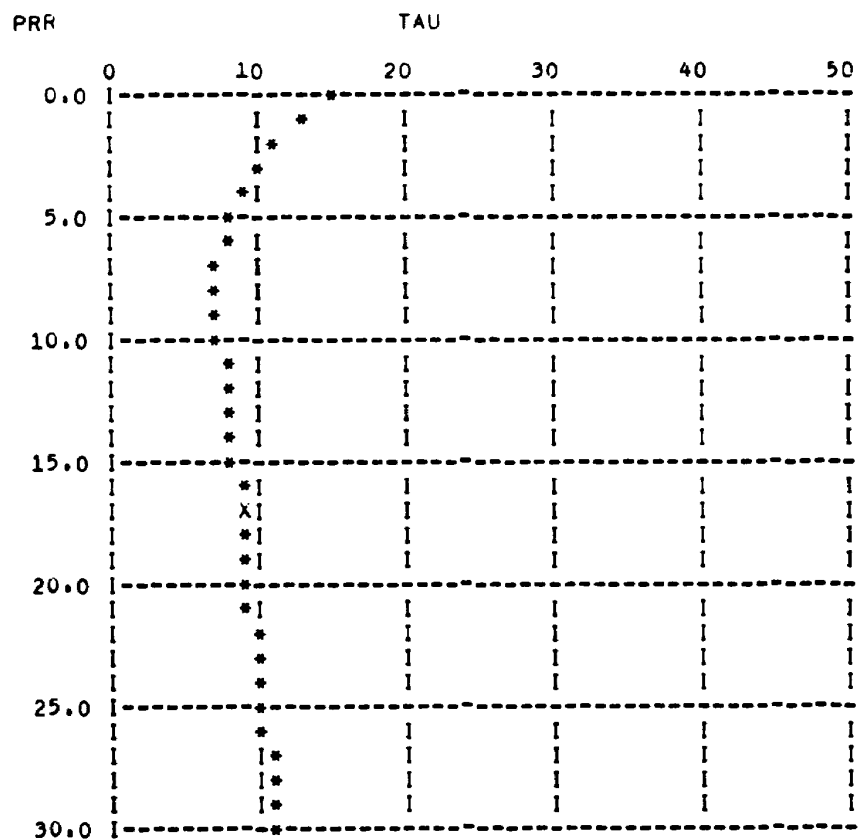


図 4(b) FJR 710 燃焼器の平均滞留時間の計算結果 (×印が計算値, PRR: 圧力比, TAU: 滞留時間〔ms〕)

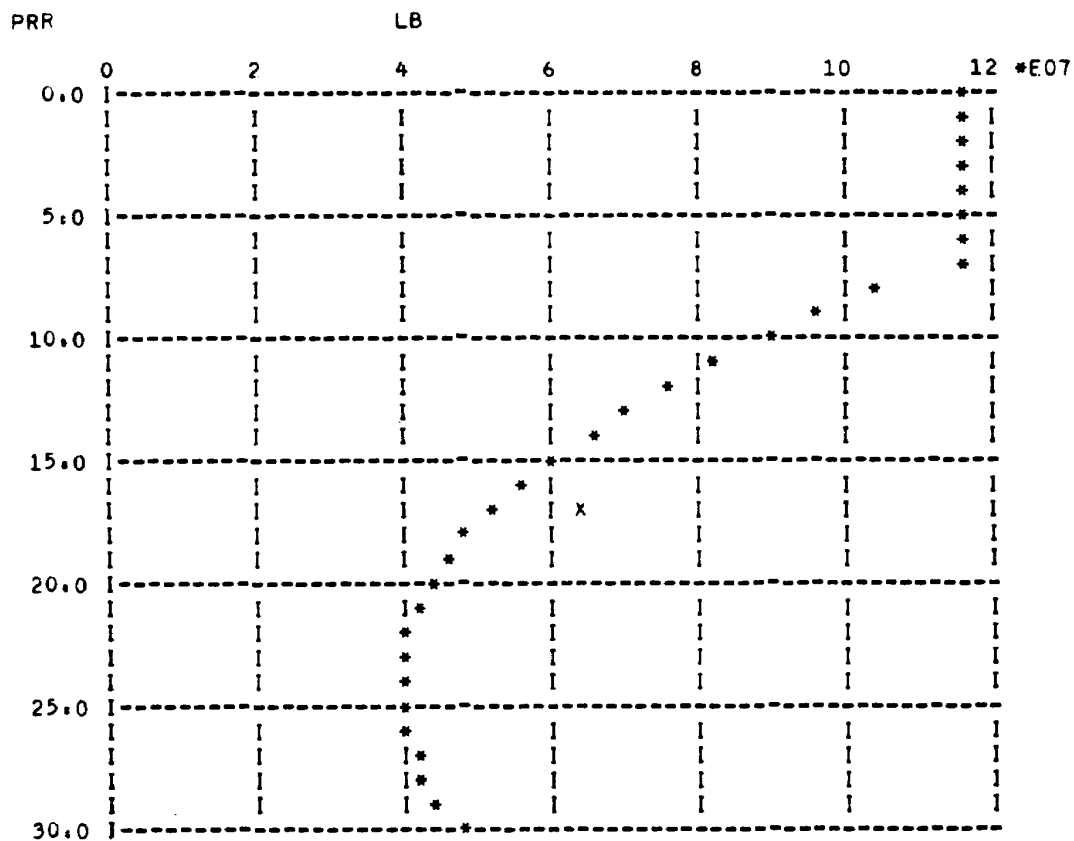


図 4(c) FJR 710 燃焼器の燃焼負荷率の計算結果 (×印が計算値, PRR: 圧力比, LB: 燃焼負荷率〔kcal/m³・h・atm〕)

4. あとがき

本報告のガスタービン燃焼器基本設計プログラムはあくまでも燃焼器設計の基礎となる基本寸法を与えるものとして考えた。したがって、このプログラムによって燃焼器外形、ライナ空気孔寸法、配置などまで求めたのち、次の段階として、詳細設計を行ない、値を修正して設計精度の向上をはかることが望ましい。詳細設計のできない箇所は、燃焼実験から求める必要がある。

実例について計算した結果、およびこれに基いて設計した燃焼器の実験結果から判断すると、算出された値はきわめて興味深いものであるが、実際にこの数値を採用してよいかどうか、一応検討する必要がある。

今後、このプログラムに取り入れていきたい資料は、次のようなものである。

- (1) 二次燃焼領域の流入空気混合距離を求める資料。
- (2) 希釈混合領域長さを求める資料。
- (3) ライナ冷却空気量見積りに関する式；ライナ材質、ライナ表面積、圧力比、冷却方式を含めて考えたものの。
- (4) 逆流形に対する全圧損失係数の理論計算結果。
- (5) 入口デフューザ部分の長さ、圧力損失の見積り。
- (6) ライナ空気孔からの空気流入量に対し、ライナ内外の静圧差を考慮すること。
- (7) ライナ空気孔直径の決定に、空気噴流の貫通距離から求める方法の採用。
- (8) Lefebvreの「燃焼効率パラメータ」の修正。
- (9) 排ガス制御を考慮した燃焼器の設計資料。

このように、まだ多くの修正、改良箇所が考えられるが、これらを取入れた結果は、第Ⅱ報にて報告する予定である。

文 献

- 1) 鈴木邦男, 田丸 卓, 堀内正司, 斎藤 隆: ガスタービン燃焼器, 航技研報告 TR-208 (1970-9)
- 2) Н. Ф. ДУБОВКИН, А. П. ГОРШЕНИН: ОСНОВНЫЕ БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ КАМЕР СГОРАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, Технические заметки, (1970) 167-169.
- 3) 大塚貞吉, 鈴木邦男, 石井浅五郎, 山中国彦: 超軽量ジェットエンジン試作1号機(JR100)の燃焼器(I), 航技研資料 TM-68 (1965-11)

- 4) 鈴木邦男, 石井浅五郎: 高圧燃焼器の研究(I) — 先行試験用アニュラ形燃焼器の設計 —, 航技研資料 TM-254 (1974-4) 「配布先限定」
- 5) 日本機械学会: 伝熱工学資料
- 6) 大塚貞吉, 鈴木邦男, 田丸 卓, 乙幡安雄: 燃料蒸発管に関する研究(I) — 直管内における二相流 —, 航技研資料 TM-115 (1967-9)
- 7) J. Marsland, J. Odgers and J. Winter; The Effects of Flame Radiation on Flame-Tube Metal Temperatures, 12th Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1969, pp.1265-1275.
- 8) H.C. Hottel and A.F. Sarofim; Radiative Transfer, McGraw-Hill Book Company 1967, p.277.
- 9) 一色尙次; Theoretical and Experimental Study on Atomization of Liquid Drop in High Speed Gas Stream, Report of Transportation Technical Research Institute, No. 35 (1959-7).
- 10) W.R. Hawthorne and W.T. Olson; Design and Performance of Gas Turbine Power Plants, Princeton (1960).

付録 計算プログラムの内容

1. 空燃比その他の計算

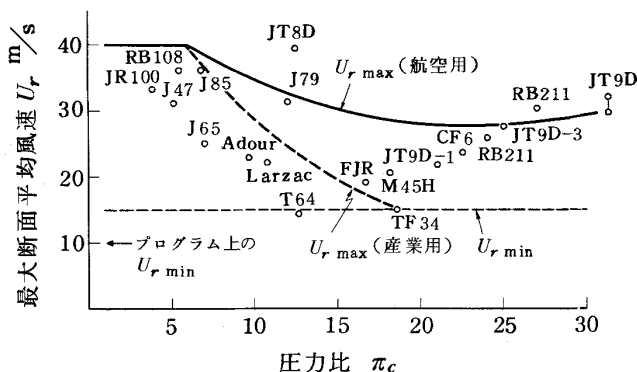
燃焼器入口、出口条件から全体空燃比、燃料流量、空気密度、全圧損失、全圧損失率、圧縮機圧力比、燃焼器出口／入口温度比など設計に必要な諸量を計算する。なお、空気および燃焼ガスの温度－エンタルピの関係は、機械学会の数表⁵⁾によった。

2. 燃焼器の寸法計算

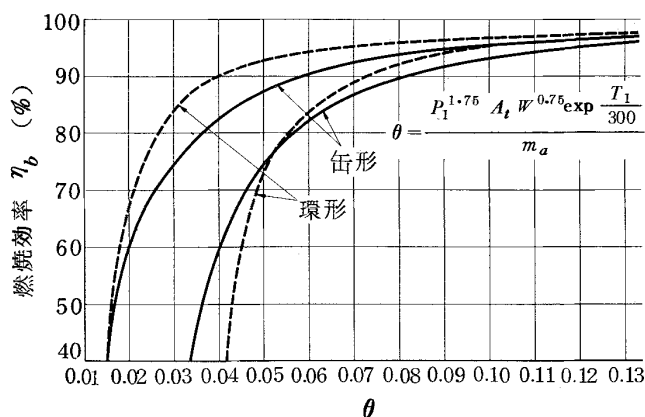
与えられた燃焼器の許容最大径、寸法余裕率をもとに、計算を行なうが、多缶形の場合は、まず缶の数を決定して、缶1本あたりの寸法、流量などを求め、以下、単缶のときと同一の計算を行なう。

3. 圧力損失係数の決定

燃焼器最大断面平均風速の適当な範囲(付図1)、燃焼器の寸法制限、燃焼効率を高く保つための制限(付図2)、および燃料滞留時間の実例からの制限(付図3)

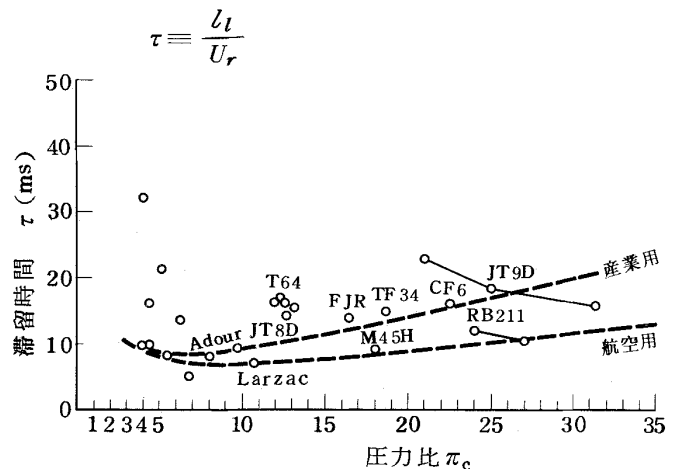


付図1 航空エンジンの最大断面平均風速の実例



付図2 燃焼効率パラメータ (Lefebvre)

から各条件を満足する全圧損失係数の範囲を求め、燃焼器の形式、用途による代表値(付表1)にもっとも近い値に決定する。



付図3 最小滞留時間の見積り

付表1 全圧損失係数の代表値

燃焼器形式	ϕ (産業用)	ϕ (航空用)
直流環型	25	18
逆流環型	(30)	25
直流缶状環型	30	20
逆流缶状環型 (逆頭)	50	45
" (直頭)	40	35
直流多缶形	30	25
逆流多缶型 (逆頭)	50	(50)
" (直頭)	45	40
直流単缶型	40	(30)
逆流単缶型	50	(40)

() はまず使用されないもの

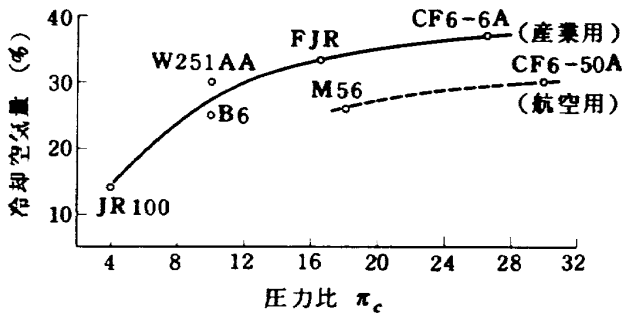
4. 燃焼器直径などの計算

全圧損失係数および全圧損失率、入口状態の空気密度から燃焼器最大断面平均風速、最大断面積、燃焼器直径など基本設計代表値を求める。

5. ライナ冷却空気量および空気流量配分の決定

5.1 必要冷却空気量の決定

エンジン圧力比からライナ冷却空気量割合を、実例を基にした付図4から見積る。



付図4 ライナ冷却空気量の見積り

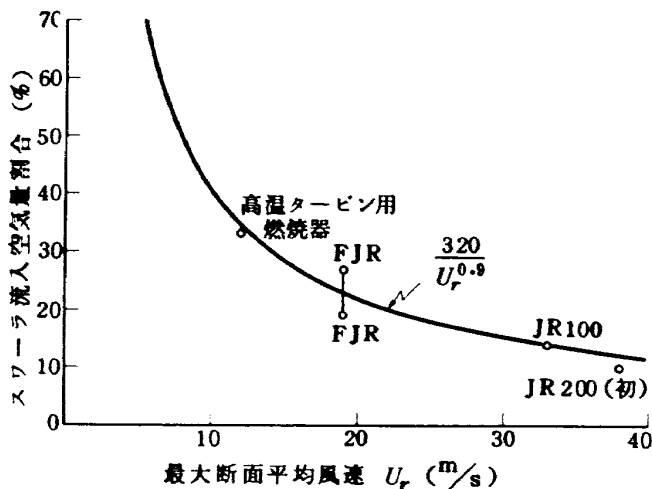
5.2 空気流量配分の決定

実験結果を基に、燃焼性能の点を重視して、一次燃焼領域の空燃比を $n_p = 12$ 、二次燃焼領域の空燃比を $n_s = 25$ として各領域の空気流量配分を決定する。二次燃焼領域出口のガス温度が 1600°C 以下になる場合には、二次燃焼領域の空燃比をかえ、 1600°C 以上に保つ操作を行なう。

6. ライナ断面積などの決定

6.1 スワラ開口面積比の決定

最大断面平均風速から付図5によってスワラ流入空気量割合を決定し、スワラ開口面積比を求める。空気



付図5 スワラ流入空気量割合の見積り

は、開口面積比に比例して流入すると仮定している。スワラ開口面積は、一次燃焼領域の空燃比が $n_p > 12$ とならぬよう制限する。

6.2 最適ライナ断面積比の決定

スワラ開口面積比、燃焼器出口／入口温度比から文献1の図5.10などをもとに、同一空気孔面積比に対し、

全圧損失係数が最小となるよう最適ライナ断面積比を求める。

6.3 ライナ空気孔面積比の決定

全圧損失係数、燃焼器出口／入口温度比から文献1の図4.13などをもとにライナ空気孔面積比を求める。ただし、スワラ開口面積比を0.1とした場合の計算結果を採用している。

6.4 ライナ断面積、ライナ直径などの計算

燃焼器最大断面積、ライナ断面積比、空気孔面積比などからライナ断面積、ライナ直径、空気孔面積、スワラ開口面積などを求める。

6.5 スワラ形状の決定

スワラの内径は外径の0.7倍、盲リング径は開口面積比にして23%として、スワラ開口面積からスワラ外径、内径、盲リング径を求める。なおスワラ旋回角は、軸方向に対し 45° とした。

6.6 スワラ外径によるライナ形状の修正

スワラ外径がライナ直径の $1/4 \sim 1/2$ (缶、缶状環形するとき)、またはライナ幅の $2/5 \sim 7/10$ (環形するとき) の範囲に入らないときは、スワラ開口面積比を修正して再計算し、この範囲に入るようにする。

6.7 各領域毎の開口面積の決定

空気が空気孔面積に比例して流入するとして、ライナ空気孔面積および空気流量配分から各領域の開口面積を求め、希釈空気孔の参考直径をライナ直径またはライナ幅の0.18倍として求める。

7. ライナ寸法の決定

7.1 一次燃焼領域のライナ長さの決定

一次燃焼領域の空気負荷率を $L_{ap} = 80 \text{ kg/m}^2 \text{ s atm}$ として一次燃焼領域の容積を求め、ライナ長さを算出する。また、スワラ循環流領域の長さから、一次燃焼領域の長さをスワラ外径の0.8倍以上とする。

7.2 二次燃焼領域のライナ長さの決定

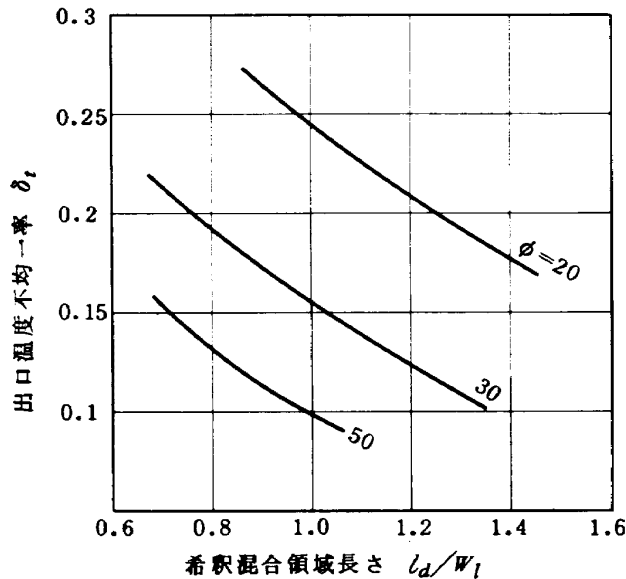
均質攪拌燃焼器 (Stirred reactor) の資料から得た文献1の図5.18を基に、二次燃焼領域の燃焼負荷率を求め、必要ライナ容積からライナ長さを求める。さらに、流入空気の混合に必要な長さとしてライナ直径またはライナ幅の0.6倍を加え、二次燃焼領域の長さとする。

7.3 希釈混合領域のライナ長さの決定

出口温度不均一率と全圧損失係数から付図6により希釈混合領域の長さを求める。

7.4 ライナ全長の計算

一次燃焼領域、二次燃焼領域および希釈混合領域の各ライナ長さを加えてライナ全長を求める。もし、全長が



付図6 希釈混合領域長さの推定

制限寸法をこえるときは、希釈混合領域長さで調整する。また、燃料の平均滞留時間が不足するときは全長の制限内で希釈混合領域を長くする。

8. 燃焼負荷率などのチェック

8.1 燃料の平均滞留時間、燃焼負荷率などのチェック

前項までの内容で決定した寸法から、燃料の平均滞留時間、燃焼負荷率などを計算し、実例と比較する。

8.2 出口温度不均一率のチェック

上記 7.4 項の修正を行なうため、決定寸法に比し、希釈混合領域の長さとお全圧損失係数から付図 6 を基に出口温度不均一率を予想する。

9. ガスタービン燃焼器用燃料蒸発管の設計

9.1 設計基本概念

燃料蒸発管の設計については、公表されているものがないため、ここで詳細に述べる。

燃料蒸発管内の液体燃料の流動様式は、次の 3 種に大別できる⁶⁾。

- i) 環状液膜流
- ii) 噴霧流
- iii) 蒸気流

実際の管内流は、多くの場合、これらの混在した状態と考えられる。もはや気化させる必要のない iii) の状態以外の管内熱伝達は、管外のそれと比較して十分に大きい。したがって、燃料気化に要する熱量は、管外熱伝達で制限され、これが蒸発管寸法決定の基本となる。燃焼器の形式としては、環形を対象にしている。

9.2 入力データ

入力データとして表 1 に示すもの、および噴霧形として計算した結果の一部を用いる。

- w_f : 全燃料流量 [kg/s]
- P_1 : 燃焼器入口全圧 [kg/cm² abs]
- T_1 : 燃焼器入口温度 [K]
- n : 全体空燃比 w_a/w_f
- D_{l0} : ライナ外径 [m]
- D_{li} : ライナ内径 [m]
- w_{ap} : 一次燃焼領域流入空気量 [kg/s]
- d_0 : 蒸発管外径 [m]

9.3 設計方針

(1) 管内燃料に蒸発に必要な熱量を与える、または燃料の気流微粒化で管内液滴粒径を 100 μ 以下とする。

(2) 燃料の管内クラッキング等の防止のため、管内空燃比は 2 以上とする。

(3) 管の取付空間の制限から、

$$2d_0 \leq l_i \leq B_l$$

とする。ここで l_i 、 B_l はそれぞれ管配置間隔およびライナ幅である。

(4) 管全長 l は、ライナ全長の点から、次のように制限する。

$$0 < l \leq 3 B_l$$

(5) 管内空燃比は、できるだけ小さくする。

9.4 計算式

(1) 燃料蒸発管 1 本あたりの燃料負荷

$$w_{fi} = w_f / N \quad [\text{kg/s}]$$

ここで、 N は蒸発管本数で指定可能である。

(2) 管内空燃比

$$n_i = w_{ai} / w_{fi}$$

ここで、 w_{ai} は蒸発管 1 本あたりの空気流量で、燃料微粒化特性 (後述) から求める。

(3) 蒸発管内気流速度

$$U_{ai} = \frac{4 w_{ai}}{r_a \cdot \pi \cdot d_i^2} \quad [\text{m/s}]$$

ここで $d_i = d_0 - 0.002$ [m]

$$r_a = \frac{273.2 \times 1.251 \times P_1}{T_1} \quad [\text{kg/m}^3]$$

(4) 管外ふく射熱伝達

$$q_r = \epsilon \sigma T_p^4 \quad [\text{W/m}^2]$$

ここで σ : Stefan - Boltzmann 定数

ϵ : 火炎ふく射率

火炎ふく射率 ϵ は、Marsland ら⁷⁾の次式によって求める。

$$\epsilon = 1 - \exp \left[-3.65 \times 10^4 \left(\frac{L_0}{n} \right)^{0.5} P_1 \cdot T_p^{-1.5} \right]$$

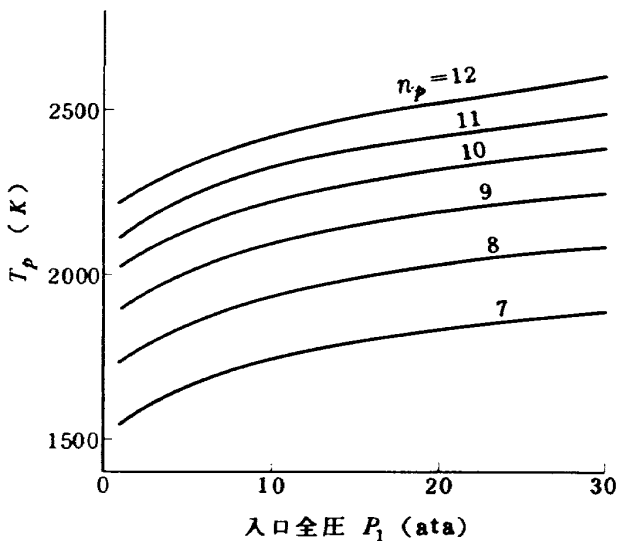
この式で l_0 は、蒸発管間隔 l_i を基にした平均光路長で、Hottel ら⁸⁾の千鳥管列の形態係数を採用する。

$$l_0 = 3.5 \times l_i \quad [\text{m}]$$

$$l_i = \pi (D_{i0} + D_{ii}) / (2N) \quad [\text{m}]$$

また、 T_p は、空燃比 n_p における断熱平衡火炎温度で、付図7に示す値のものである。これは理論的に到達可能な最高値であるが、実測例⁷⁾から安全をみて700℃低い値を用いる。計算では、これを多項式で近似した。

$$T_p = T_p(n_p, P_1) \quad [\text{K}]$$



付図7 炭化水素燃料の断熱平衡火炎温度

(5) 対流熱伝達

蒸発管壁温度 t_0 を1000℃、または、一次燃焼領域ガス温度とする。これは、管材料の耐熱温度、管内のドライアウト状態、過渡時の状態変化などを考慮し、安全側に仮定したものである。蒸発管周囲の気体粘性係数は、当量比1の灯油燃焼ガスの値とし、文献5によった。

$$\nu = \frac{\eta g}{\gamma_{\text{gas}}} \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

ここで、

$$\gamma_{\text{gas}} = \frac{273.2 \times 1.299 \times P_1}{T} \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

$$T = (273.2 + t_0 + T_p) / 2 \quad [\text{K}]$$

熱伝導率 λ は、上記 T の値に対するもので、文献5によった。次に、

$$R_e = \frac{B_l \cdot u}{\nu}$$

ここで、

$$u = \frac{2 w_{ap}}{\gamma_{\text{gas}} B_l \pi (D_{i0} + D_{ii})} \quad [\text{m}/\text{s}]$$

$$\text{また、} P_r = \nu / a$$

ここで、 a は温度伝導率で

$$a = \lambda / (c_p \cdot \gamma_{\text{gas}}) \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

比熱 c_p は、当量比1の灯油燃焼ガスの値とし、文献5によった。

以上のことから

$$N_u = A(R_e) \cdot B(P_r)$$

ここで、 $A(R_e) = C(R_e)^m$

この C と m も文献5によった。また、

$$B(P_r) = (P_r / 0.72)^{0.25}$$

対流熱伝達の熱流束は、

$$q_c = a(t_p - t_0) = \frac{N_u \cdot \lambda}{d_0} (t_p - t_0) \quad [\text{W}]$$

上式は、管がガス流に垂直に位置する場合である。今回の場合、流れは必ずしも垂直にならないので、安全係数 k_2 を乗ずる。すなわち、

$$q_c = \frac{N_u \cdot \lambda}{2 d_0} (t_p - t_0) \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

(6) 全熱伝達量は、次のようになる。

$$q = q_r + q_c \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

(7) 全供給燃料を気化させるに要する熱量 Q は、次式で与えられる。

$$Q = w_f \{ (C_p)_{fl} (t_s - t_{f1}) + H_L \} \quad [\text{W}]$$

ここで、 t_s : 燃料の沸点、あるいは沸点相当温度[℃]

$$= 232^\circ\text{C} \quad (\text{Jet A-1 の 50\%, 溜出温度})$$

$$t_{f1} : \text{燃料の初期温度} \quad [^\circ\text{C}]$$

$$(C_p)_{fl} : \text{燃料の } t_s \text{ と } t_{f1} \text{ 間での平均比熱}$$

$$= 3.767 \{ (t_s + t_{f1}) / 2 \} + 1884$$

$$[\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}]$$

$$H_L : \text{燃料の気化潜熱(付図8)} \quad [\text{J}/\text{kg}]$$

(8) 必要蒸発管長さ l は、次式から求める。

$$l = Q / (N \cdot \pi d_0 \cdot q) \quad [\text{m}]$$

(9) 蒸発管配置のピッチ l_i は、次式で求める。

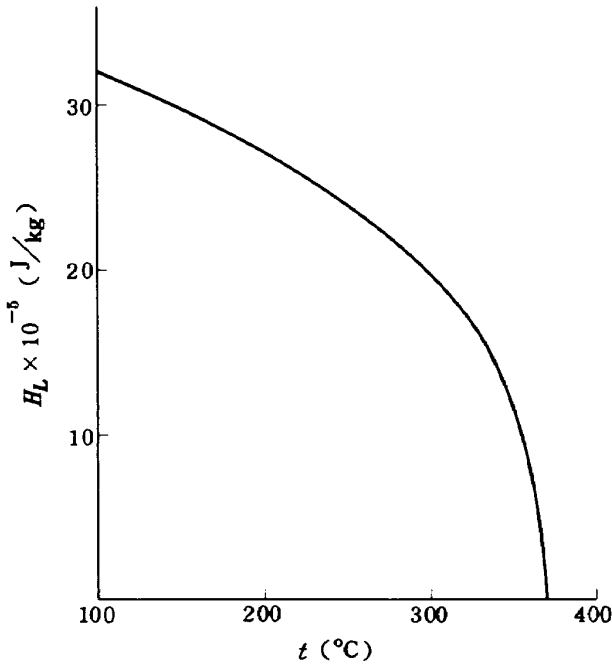
$$l_i = \pi (D_{i0} + D_{ii}) / (2N) \quad [\text{m}]$$

(10) 蒸発管1本あたりの管外面局所冷却空気量、または空気筒からの空気量の許容値は、次のようになる。

$$w_{ac} = (n_p - n_i) \frac{w_f}{N} \quad [\text{kg}/\text{s}]$$

(11) 管内燃料液滴粒径 \bar{x}_f は、次式による⁹⁾

$$\left(\frac{\bar{x}_f}{x_0} \right)^{0.25} = \frac{1.6}{W_e^{0.25}} + 0.72 \left(\frac{\gamma_a}{\gamma_e} \right)^{0.5} \left(1 + \frac{1}{n_i} \right) \times \left\{ \ln \left(\frac{x_0}{\bar{x}_f} \right)^{0.25} \right\} W_e^{0.125}$$



付図8 JP-1の蒸発潜熱

ここに,

$$W_e = \frac{\rho_a U_{ai}^2 x_0}{2 \sigma}$$

r_l : 燃料の比重量 [kg/m³]

x_0 : 液滴初期粒径
= 0.001 m

σ : 燃料表面張力
= 2.3×10^{-3} kg/m

10. エラーリスト

(1) ERROR IN AFRDET

サブルーチン AFRDET が収束せず、全体空燃比 n が計算できない。

(2) ERROR PHUMIN=XX, PHDMIN=XX,
PHBMIN=XX, PHTMIN=XX,
PHUMAX=XX, PHDMAX=XX

全圧損失係数 ϕ の各条件を満足する範囲がない。

ϕ_{\min} または $\phi_{t \min}$ の制限をはずしても満足できない。

(3) TAU MAY BE LESS THAN TMIN

平均滞留時間 τ が τ_{\min} より小さくならう。 $\phi_{t \min}$ の制限を満足していない。

(4) THETA, LT, 0.2

燃焼効率のパラメータ θ が 0.2 より小さい。 ϕ_b の制限を満足していない。

(5) ERROR IN SEC AFRDET

サブルーチン AFRDET が収束せず、二次燃焼領域最大空燃比 $n_{s \max}$ を計算できない。

(6) ERROR IN AHR

ライナ空気孔面積比 A_h/A_r が計算できない。 ϕ が小さすぎるか、 T_2/T_1 が大きすぎる。

(7) ERROR DL, GT, DLMAX

ALR=XX, ALRA=XX

缶状環形するとき、ライナがアニュラ部の幅いっぱいになって、最適ライナ断面積比をとれない。 ϕ が適当でない。

(8) II=XX, ASR=XX, DL=XX, DSO=XX

缶形(缶状環形)のとき、条件を満足するスワラ開口面積比に対し、スワラ外径がライナ直径の 0.25 ~ 0.6 倍の範囲に入らない。 ϕ が適当でない。

(9) ERROR IN ASR

缶形(缶状環形)のとき、スワラ外径をライナ直径の 0.25 ~ 0.6 倍に入れようとすると発散する。

(10) ERROR DSO, LT, 0.25DL

スワラからの流入空気量を振動燃焼の起きない限界値まで増しても、スワラ外径がライナ直径の 0.25 倍以下になる。

(11) ISS=XX,

MS=XX, ASR=XX, BL=XX, DSO=XX,

DLI=XX, DLO=XX, DLMEAN=XX

環形のとき、条件を満足するスワラ開口面積比に対し、スワラ外径がライナ幅の 0.4 ~ 0.7 にならない。 ϕ が適当でない。

(12) ERROR IN ASR

環形のとき,

i) スワラからの流入空気量を振動燃焼の起きない限界値まで増し、スワラ数を最小にしてもスワラ外径がライナ幅の 0.4 倍以下になる。

ii) スワラ外径をライナ幅の 0.4 ~ 0.7 倍に入れようとすると発散する。

(13) ERROR XLL, GT, XLRMAX

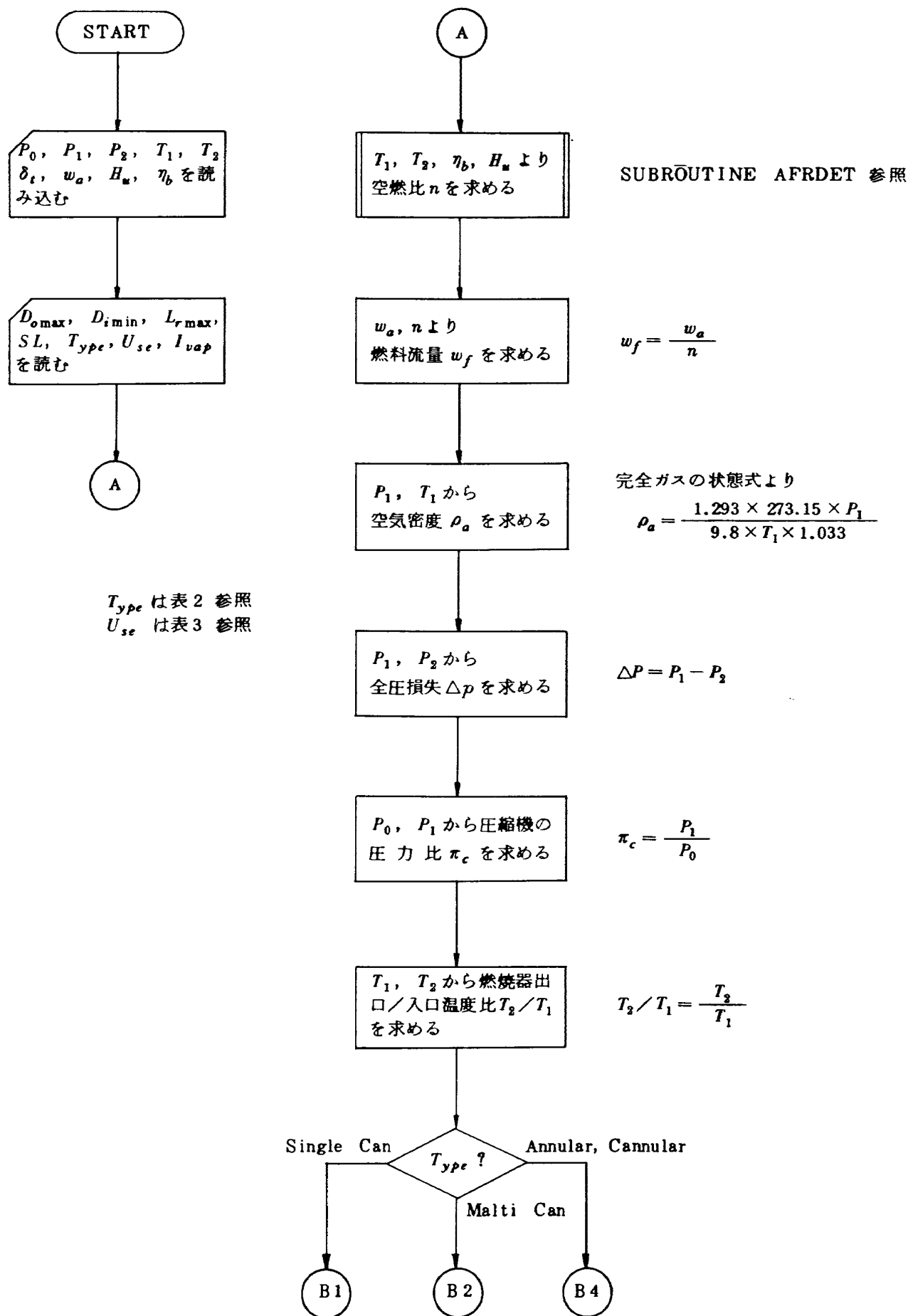
ライナ全長の制限内では、必要な平均滞留時間を満足できない。

(14) DELTA IS TOO LARGE

ライナ全長を制限内におさめようとすると出口温度不均一率 δ_t が $\delta_t > 0.3$ になる。

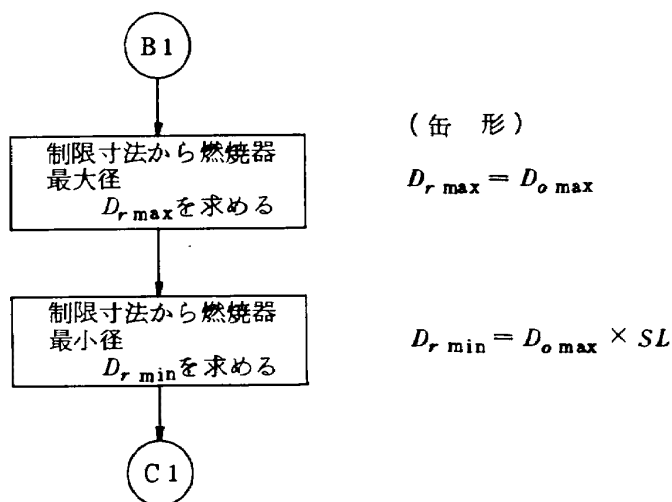
11. フローチャート

このプログラムのフローチャートを次に示す。



フローチャート (A-1)

フローチャート (B-1)

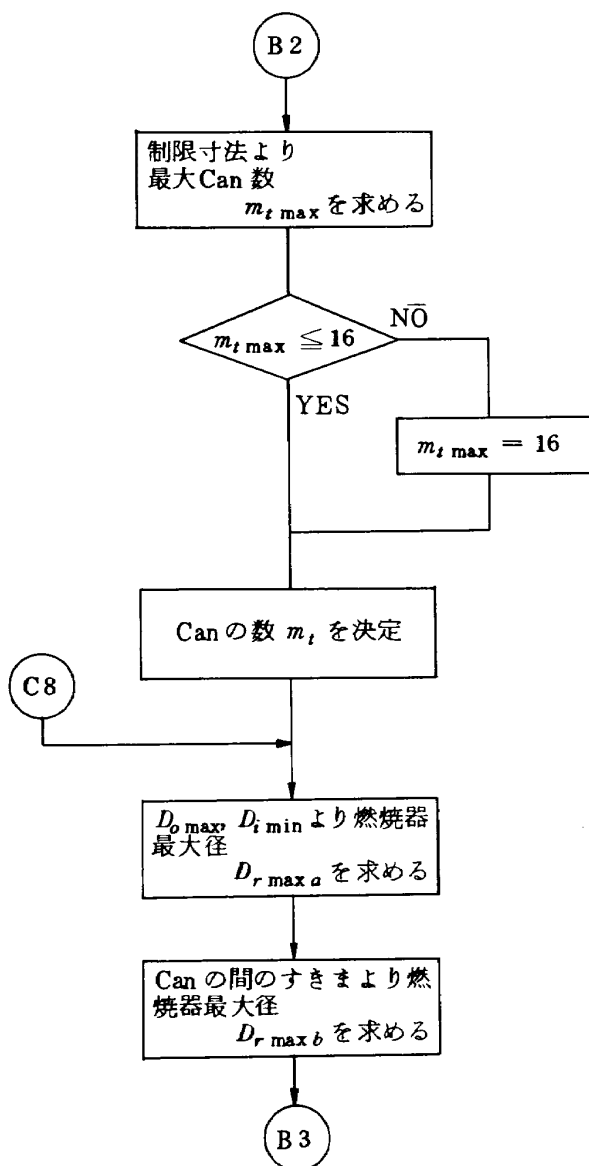


(缶 形)

$$D_{r \max} = D_{o \max}$$

$$D_{r \min} = D_{o \max} \times SL$$

フローチャート (B - 2)



(多角形)

文献10を参考にして
Canの間のすきまを $C \geq 0.025 D_{o \max}$ として
 $D_i = D_{i \min} + (1 - SL) D_{o \max}$ とすると

$$m_{t \max} = \frac{360}{2 \sin^{-1} \left(\frac{1.1 D_{o \max} - \{D_{i \min} + (1 - SL) D_{o \max}\}}{D_{o \max} + D_{i \min} + (1 - SL) D_{o \max}} \right)}$$

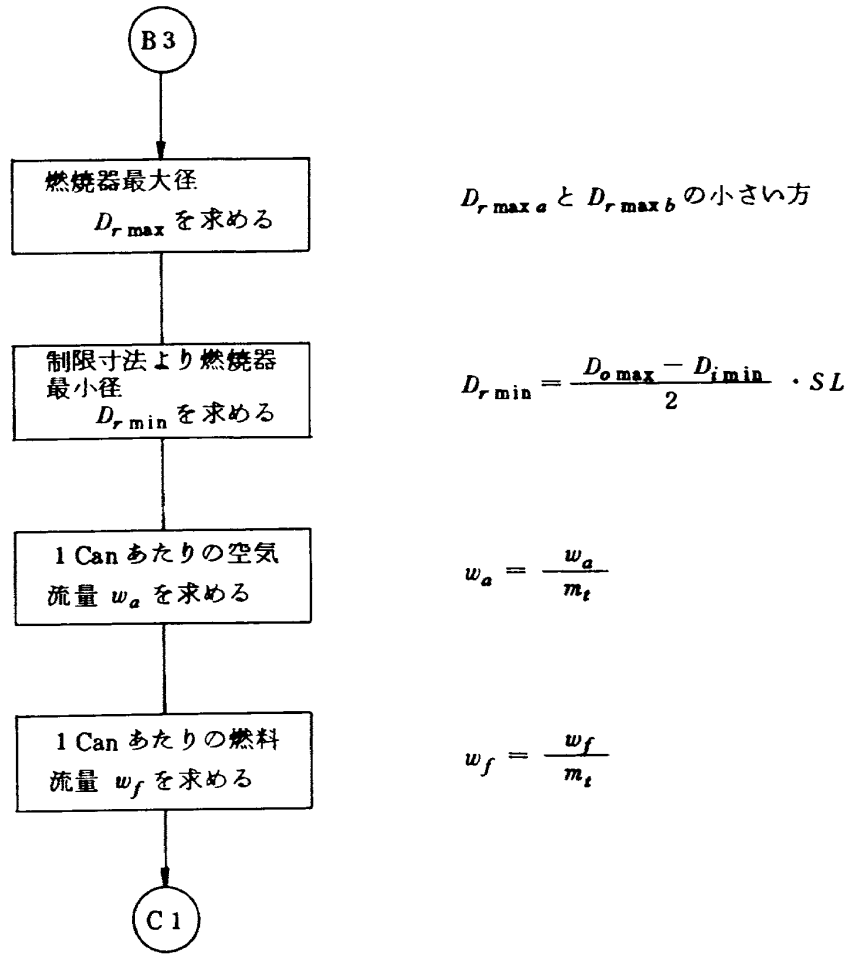
Can の数は最大16個とする

$$m_t = m_{t \max}$$

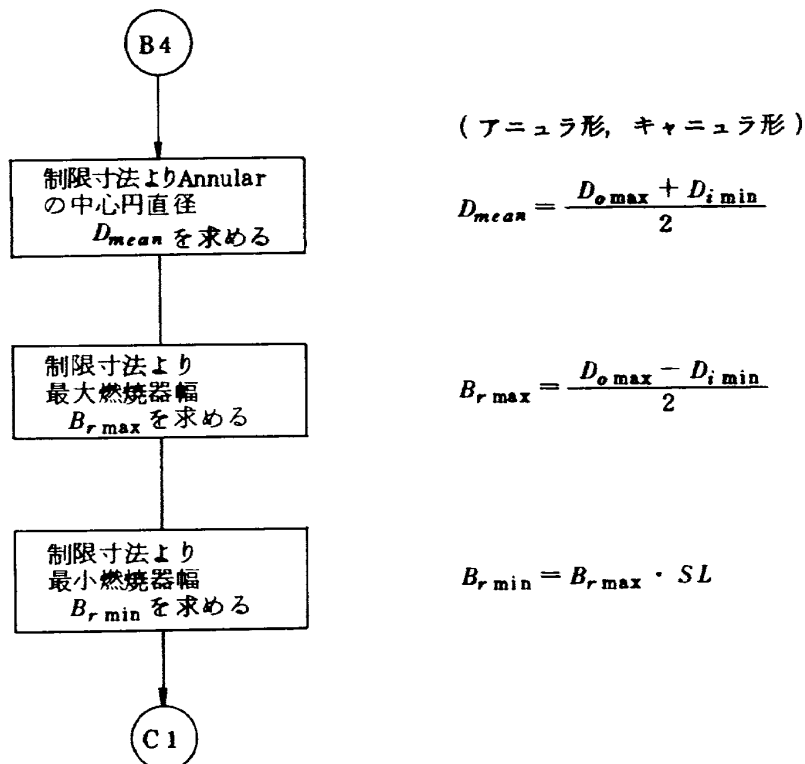
$$D_{r \max a} = \frac{D_{o \max} - D_{i \min}}{2}$$

$$D_{r \max b} = \frac{\sin\left(\frac{360}{2m_t}\right) - 0.025}{1 + \sin\left(\frac{360}{2m_t}\right)} D_{o \max}$$

フローチャート (B - 3)

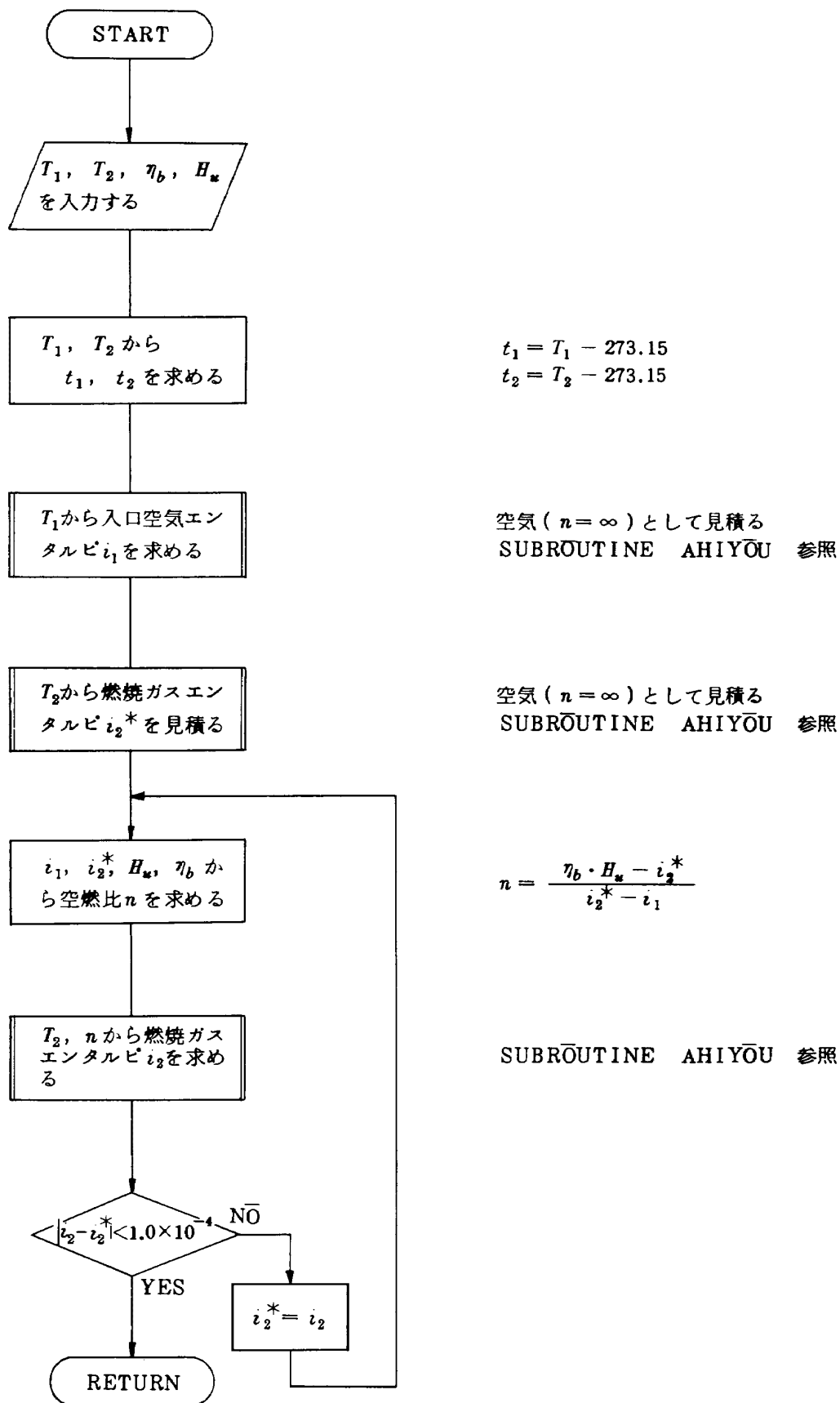


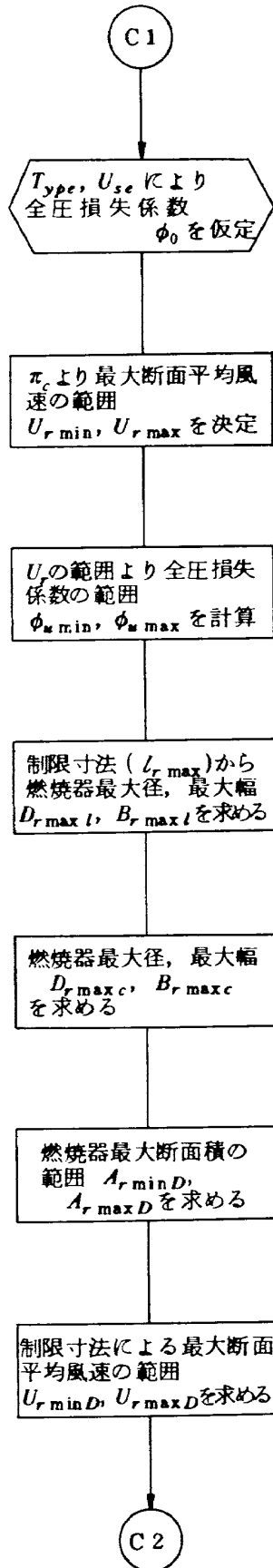
フローチャート (B - 4)



フローチャート (B - 5)

SUBROUTINE AFRDET





付表1 参照

付図1より

$$U_{r \min} = 10 \text{ m/s}$$

$$U_{r \max} = 40 \text{ m/s 又は, } \pi_c \text{ の 3 次式で近似}$$

$$\phi_u = \frac{\Delta P \times 10000}{\frac{1}{2} \rho_a U_r^2}$$

燃焼器直径と長さの比 l/D (付表2)より

$$D_{r \max l} = \frac{l_{r \max}}{l/D}, \quad B_{r \max l} = \frac{l_{r \max}}{l/D}$$

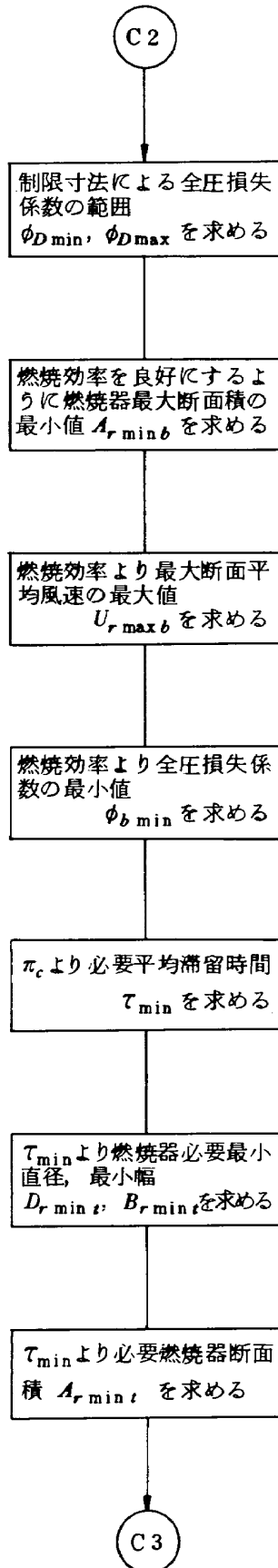
$D_{r \max c}$ は $D_{r \max l}$ と $D_{r \max}$ の小さい方

$B_{r \max c}$ は $B_{r \max l}$ と $B_{r \max}$ の小さい方

$$A_{rB} = \frac{\pi}{4} D_r^2, \text{ or } A_{rD} = \pi D_{mean}$$

$$u_{r\theta} = \frac{w_a}{9.8 \rho_a A_{rD}}$$

フローチャート (C-1)



$$\phi_D = \frac{\Delta P \times 10000}{\frac{1}{2} \rho_a U_{rD}^2}$$

付図 2 より燃焼効率のパラメータを $\theta \geq 0.2$ として

$$A_{r \min b} = \left(\frac{w_a \times 0.2}{P_1^{1.75} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{0.375} e^{\pi/300}} \right)^{\frac{1}{1.375}} \quad [\text{Can}]$$

$$A_{r \min b} = \left(\frac{w_a \times 0.2}{P_1^{1.75} \left(\frac{1}{\pi D_{mean}} \right)^{0.75} e^{\pi/300}} \right)^{\frac{1}{1.75}} \quad [\text{Annular Cannular}]$$

$$U_{r \max b} = \frac{w_a}{9.8 \rho_a A_{r \min b}}$$

$$\phi_{b \min} = \frac{\Delta P \times 10000}{\frac{1}{2} \rho_a U_{r \max b}^2}$$

付図 3 より π_c の 2 次式で近似

ライナ長さが直径幅の 2 倍, ライナ断面積が燃焼器断面積の 0.6 倍として

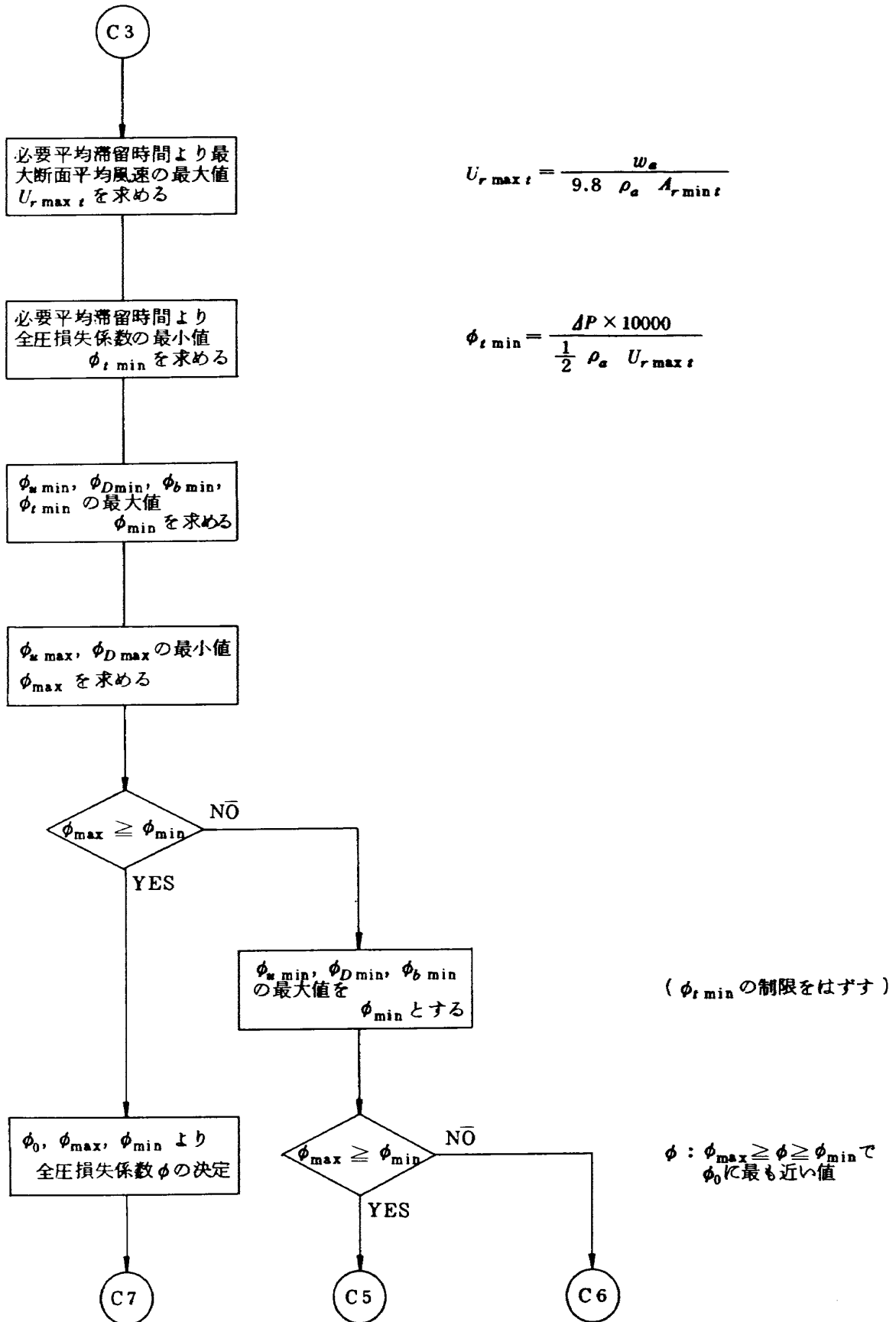
$$D_{r \min t} = \left(\frac{w_a \tau_{\min}}{2.0 \times \sqrt{0.6} \times 9.8 \times \rho_a \times \frac{\pi}{4}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [\text{Can}]$$

$$B_{r \min t} = \sqrt{\frac{w_a \tau_{\min}}{2.0 \times 0.6 \times 9.8 \times \rho_a \times \pi D_{mean}}} \quad [\text{Annular Cannular}]$$

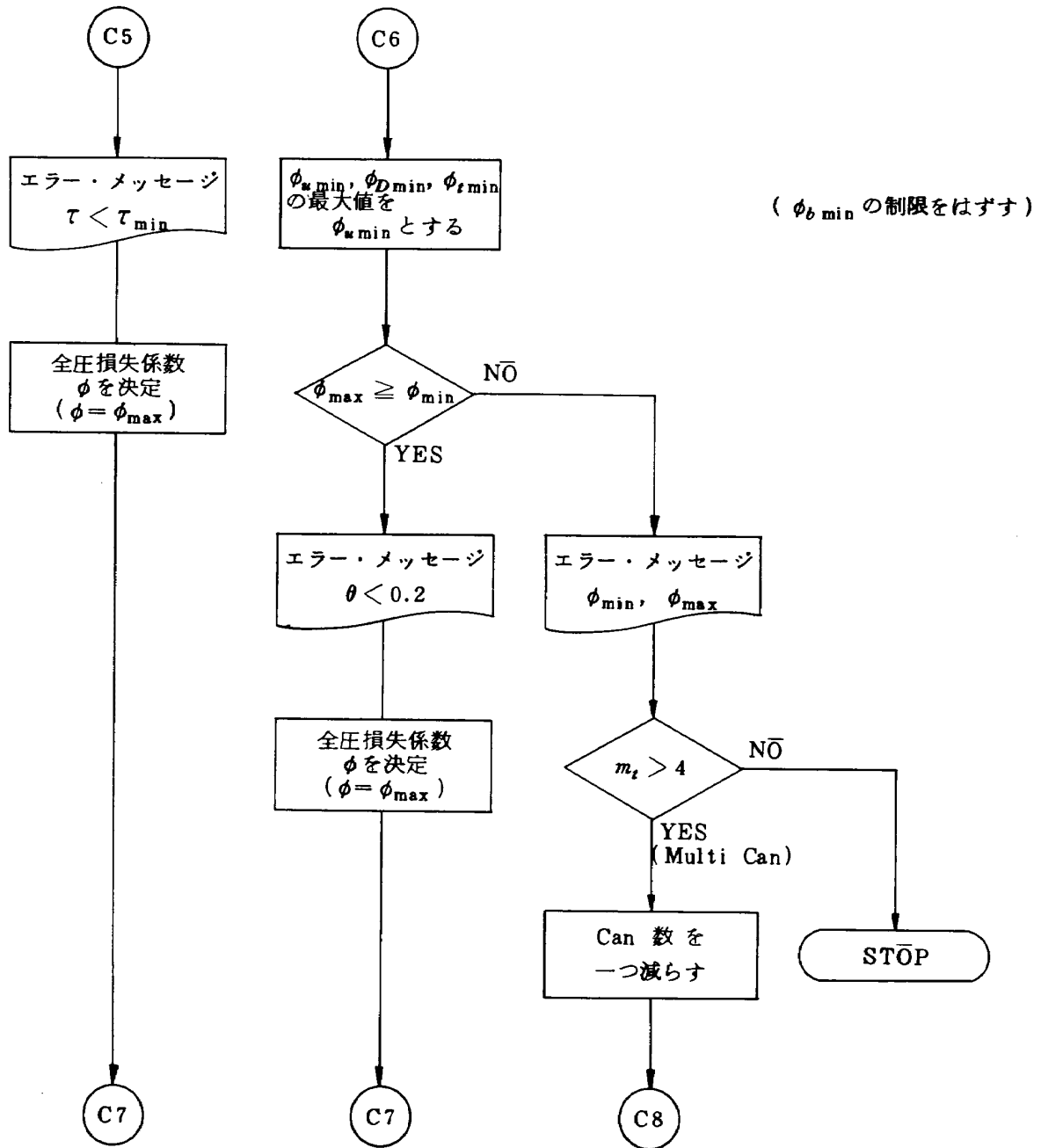
$$A_{r \min t} = \frac{\pi}{4} D_{r \min t}^2 \quad [\text{Can}]$$

$$A_{r \min t} = \pi D_{mean} \cdot B_{r \min t} \quad [\text{Annular Cannular}]$$

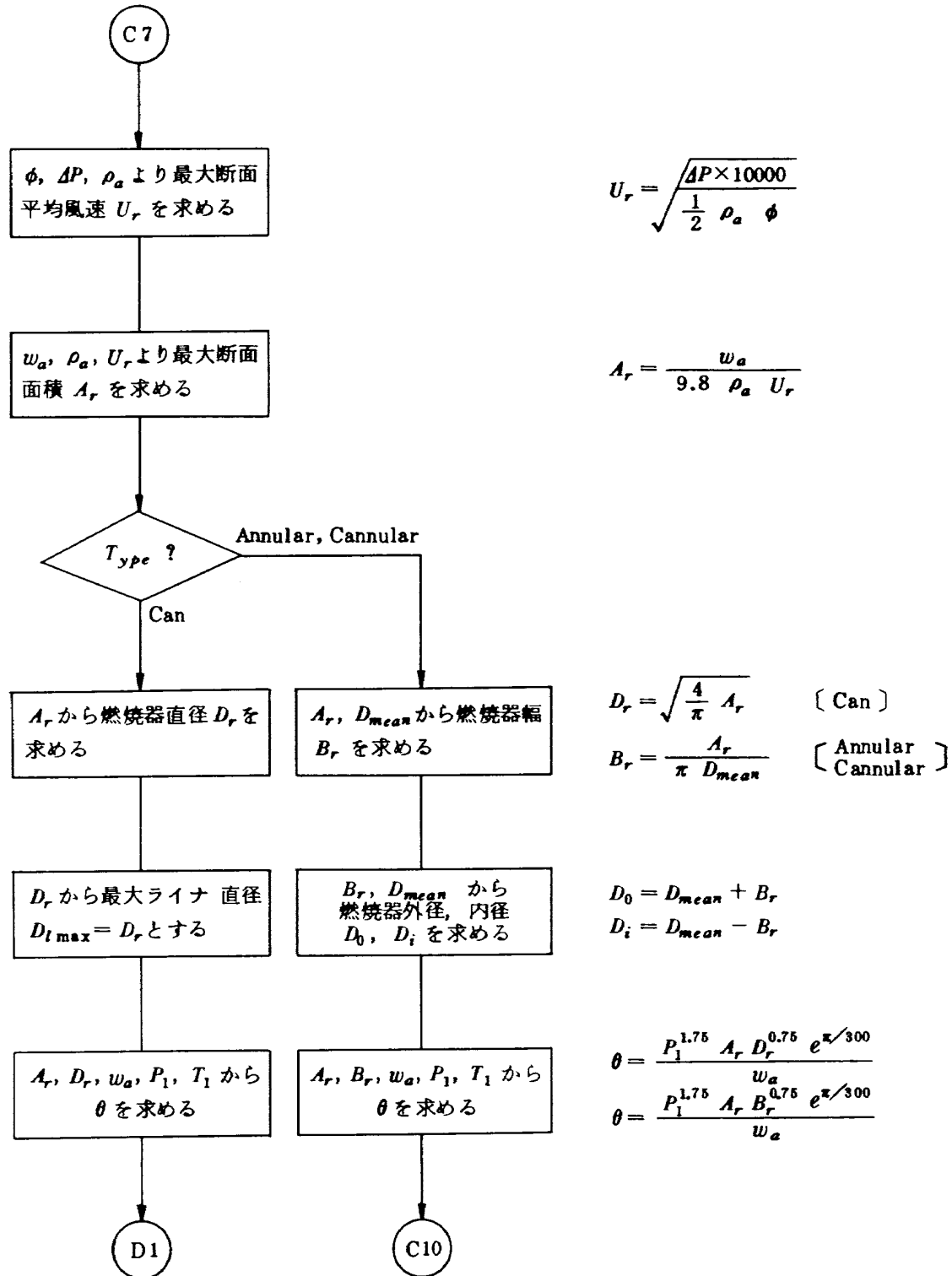
フローチャート (C-2)



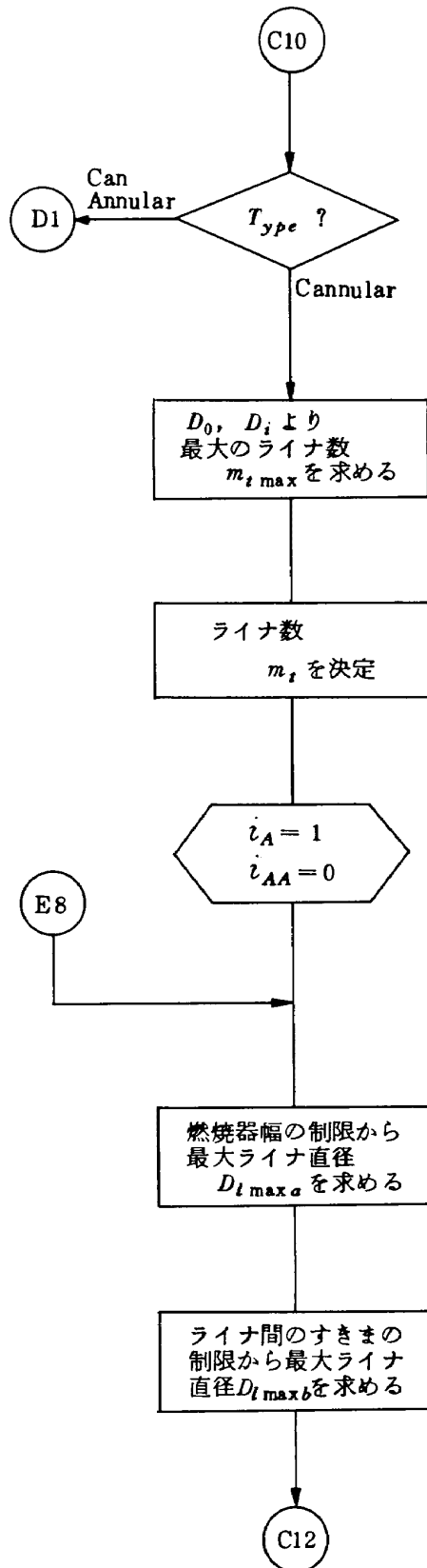
フローチャート (C - 3)



フローチャート (C - 4)



フローチャート (C - 5)



ライナ間のすきま $C \geq 0.025 D_0$ として

$$m_{t \max} = \frac{360}{2 \sin^{-1} \left(\frac{1.1 D_0 - D_i}{D_0 + D_i} \right)}$$

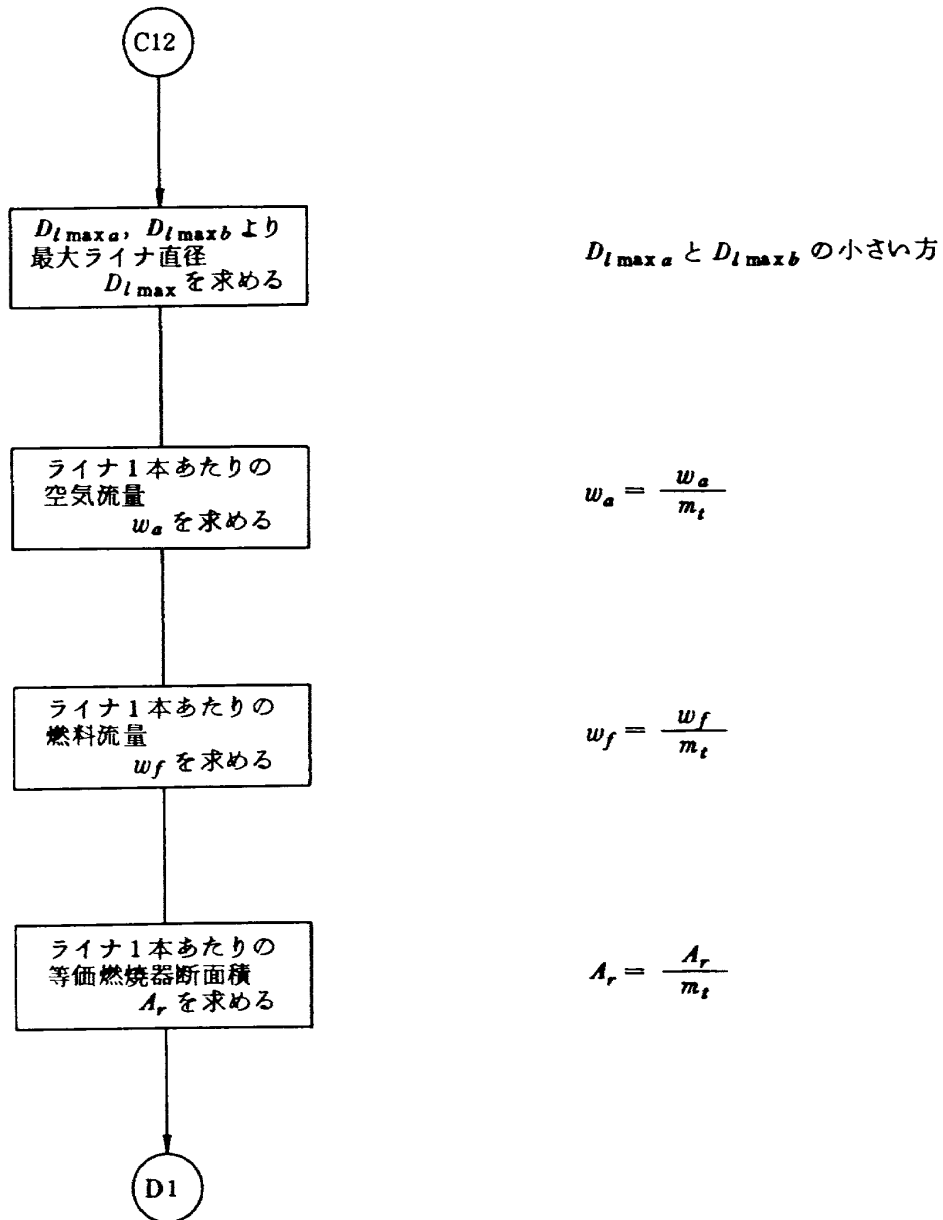
$$m_t = m_{t \max}$$

ライナが燃焼器内に入るように

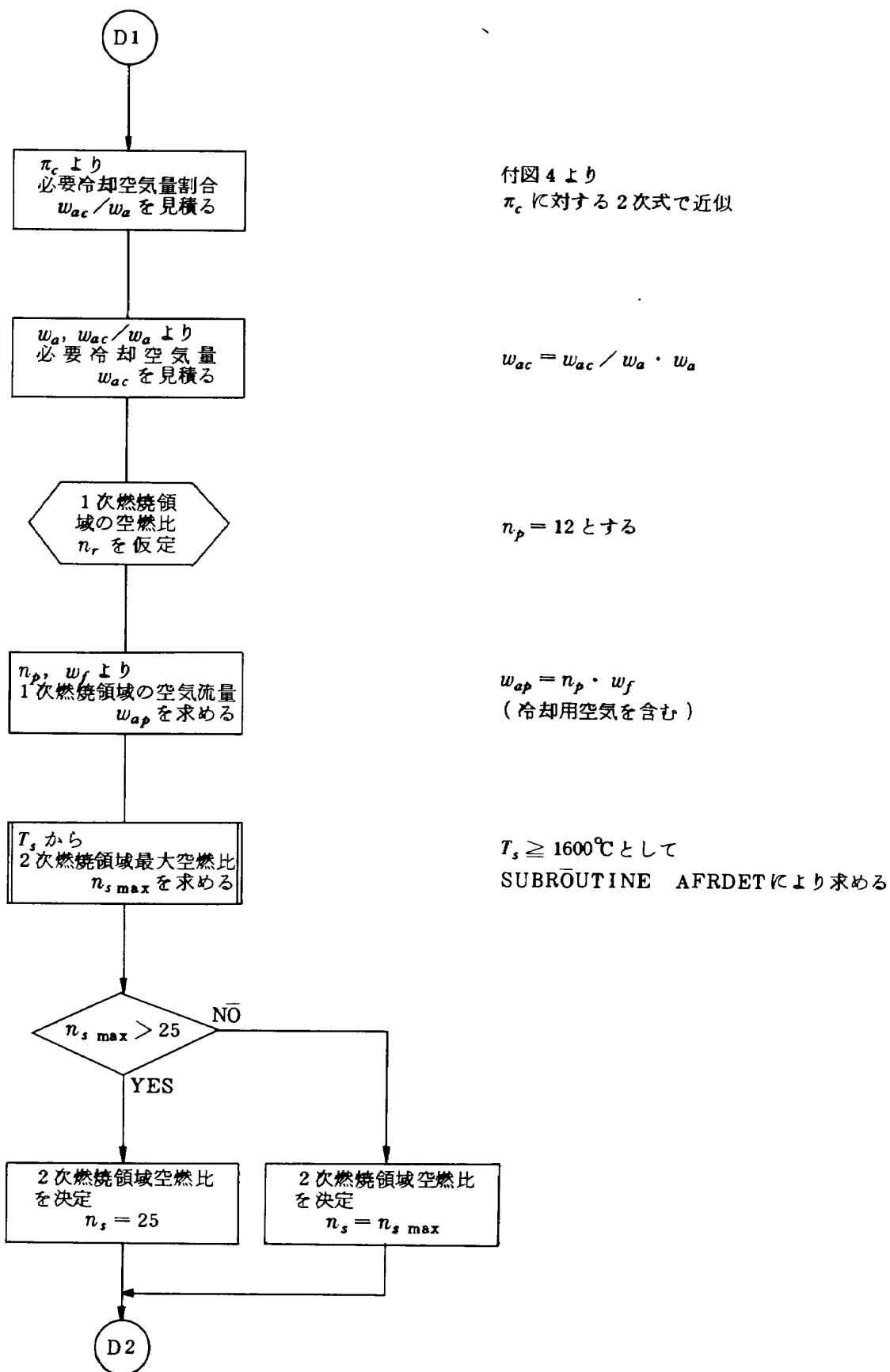
$$D_{l \max a} = \frac{1}{2} (D_0 - D_i) \times 0.95$$

$$D_{l \max b} = \frac{\sin \left(\frac{360}{2 m_t} \right) - 0.025}{1 + \sin \left(\frac{360}{2 m_t} \right)} \times D_0$$

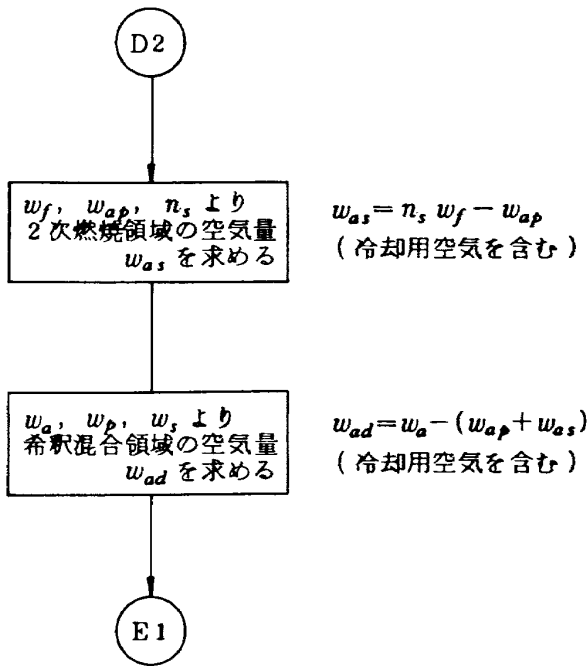
フローチャート (C-6)



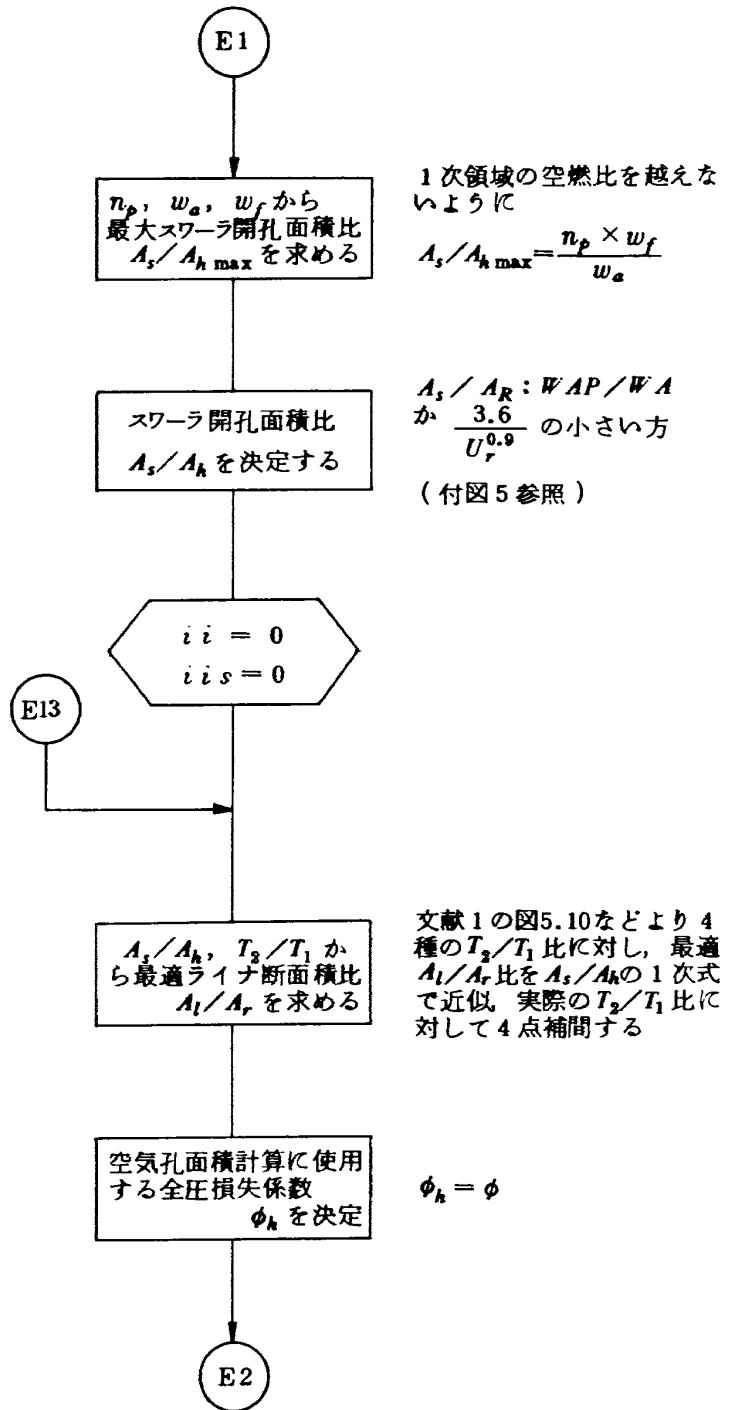
フローチャート (C - 7)



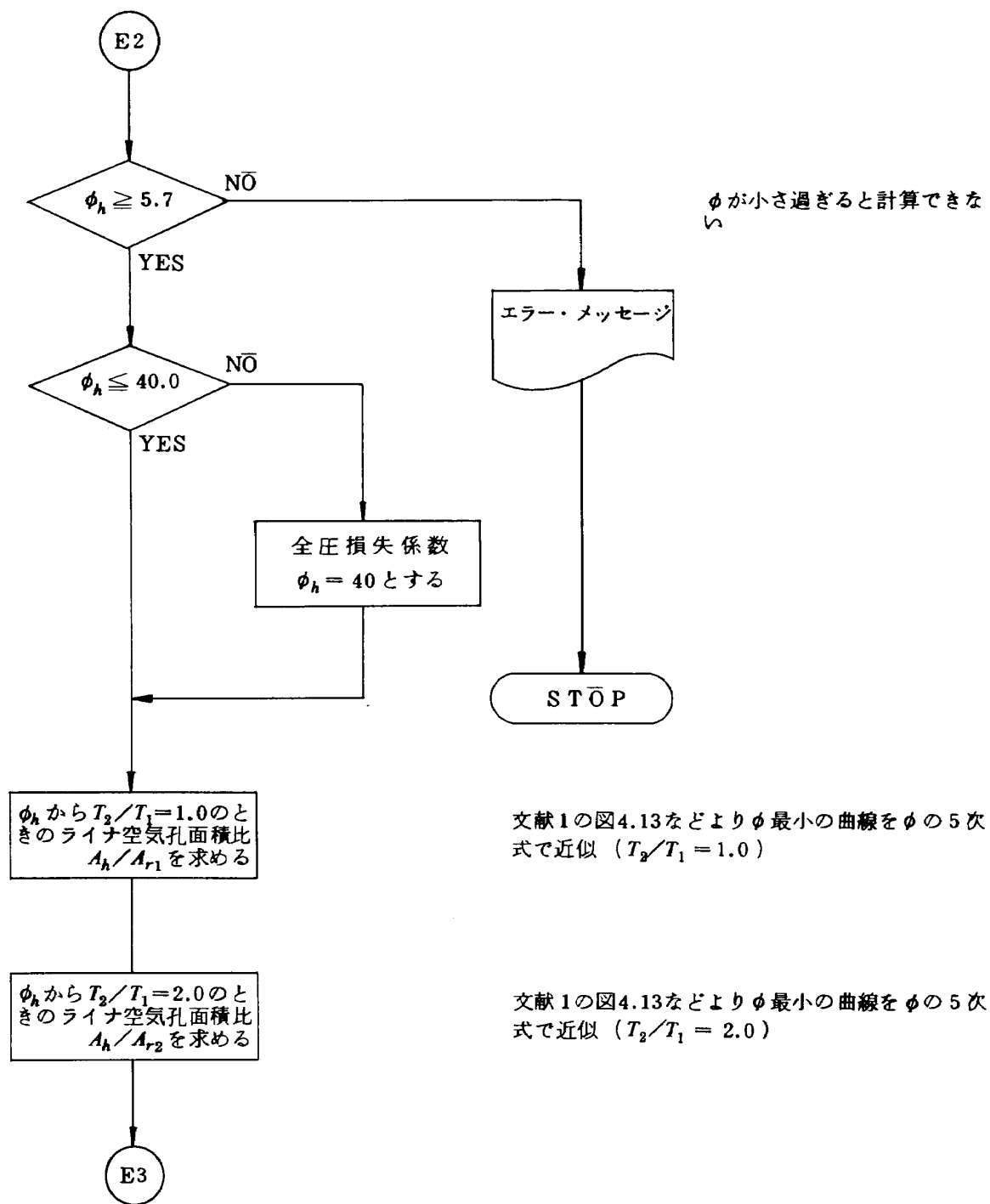
フローチャート (D - 1)



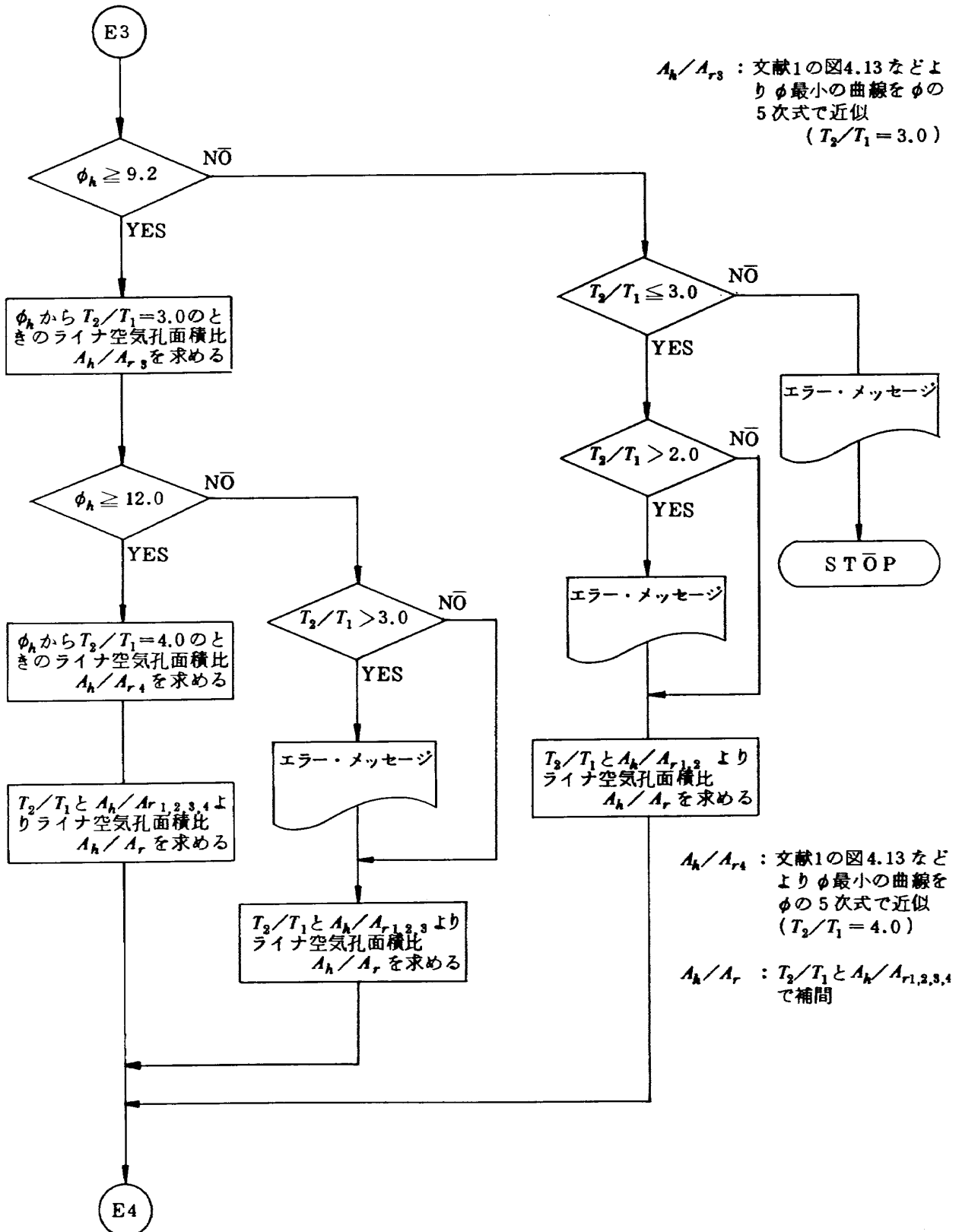
フローチャート (D - 2)



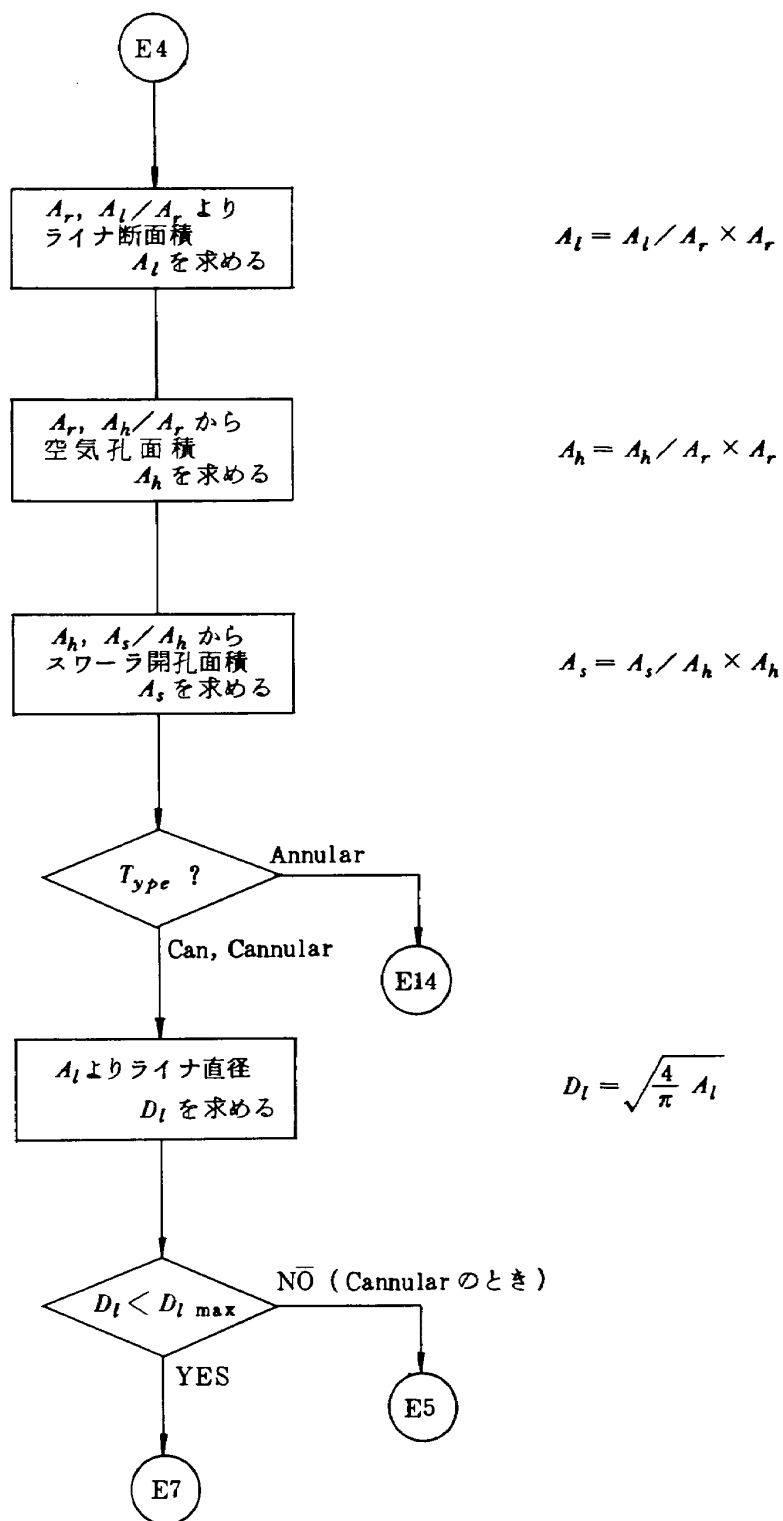
フローチャート (E - 1)



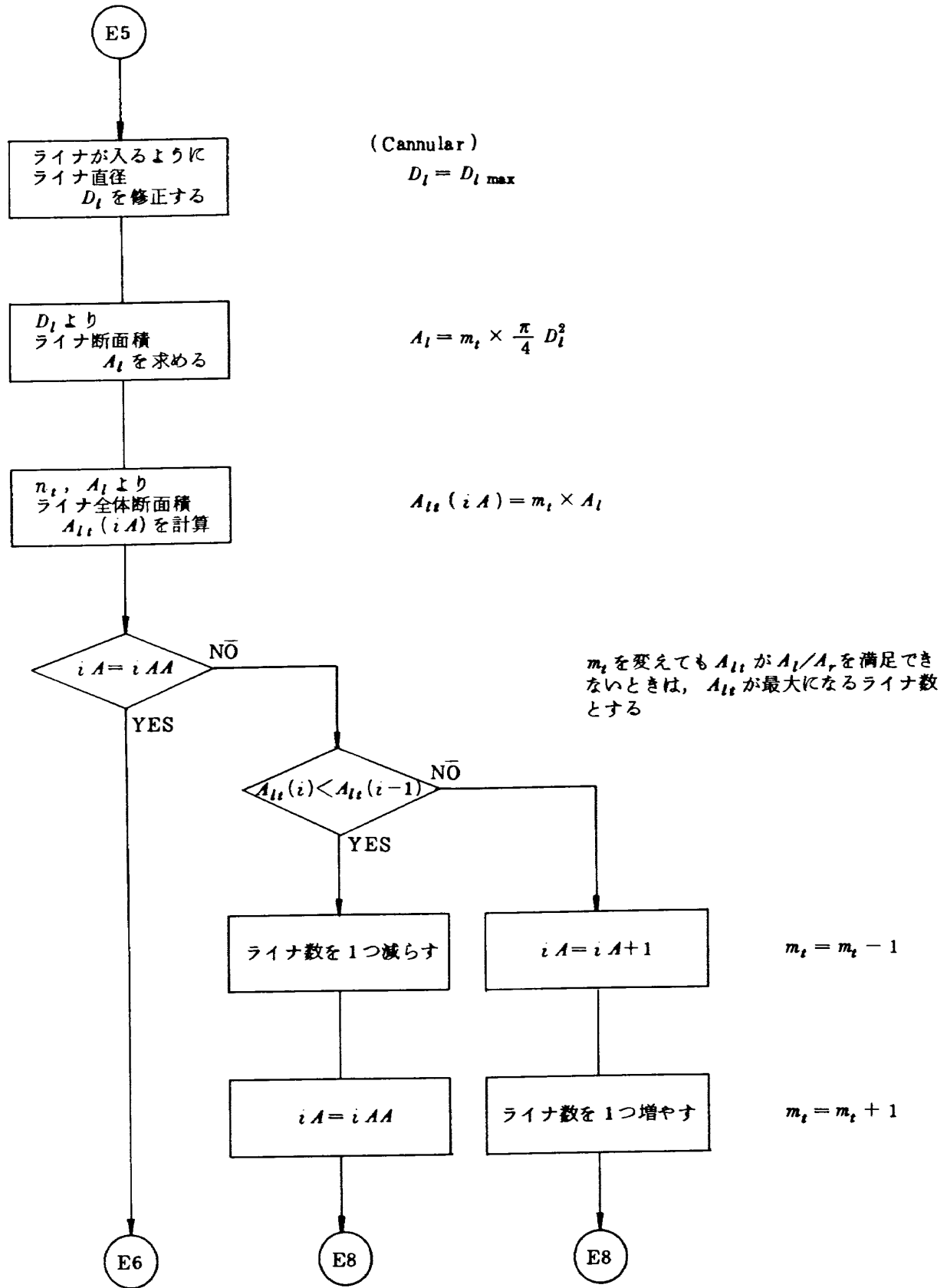
フローチャート (E - 2)



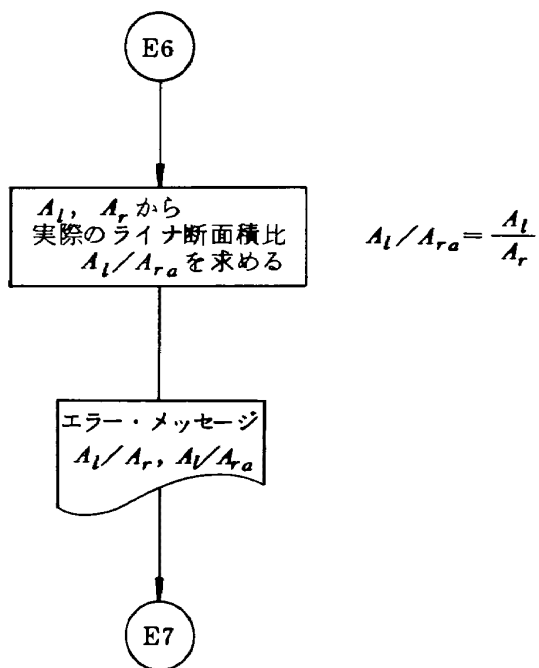
フローチャート (E-3)



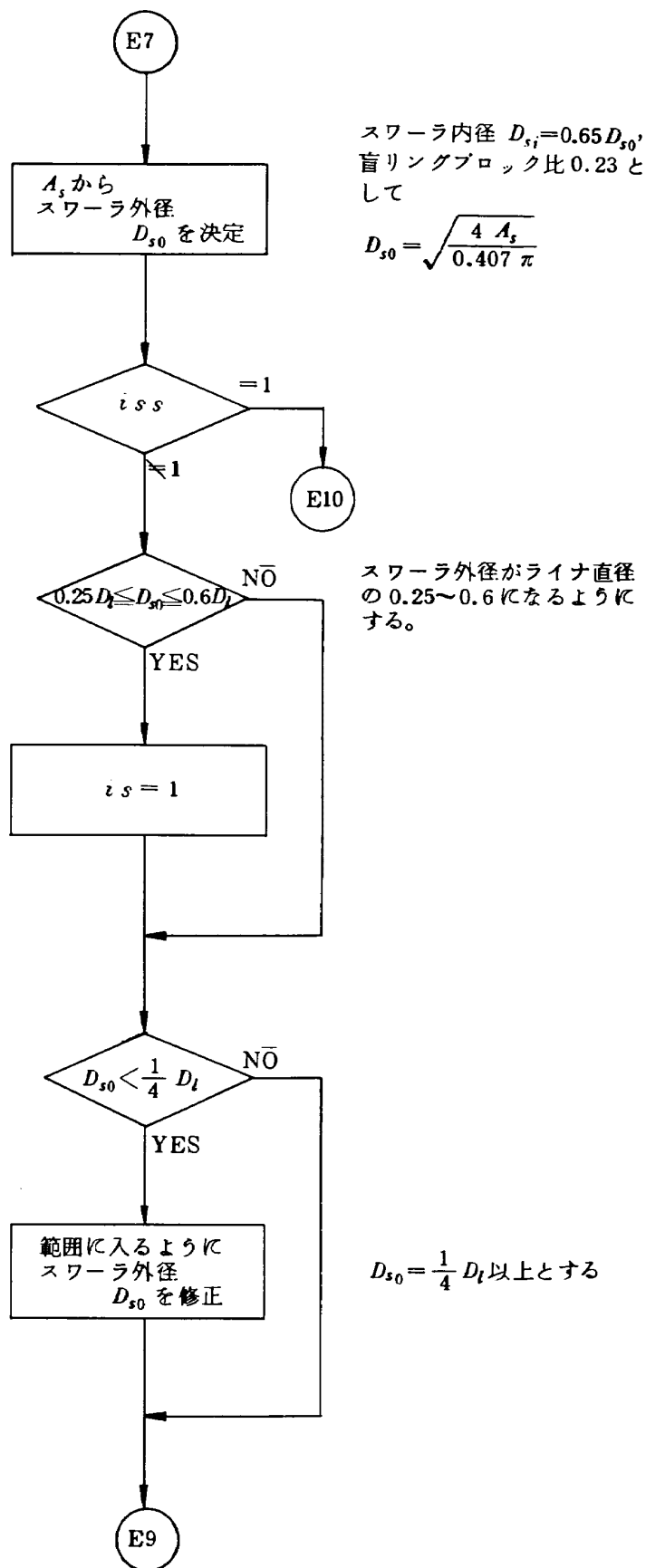
フローチャート (E - 4)



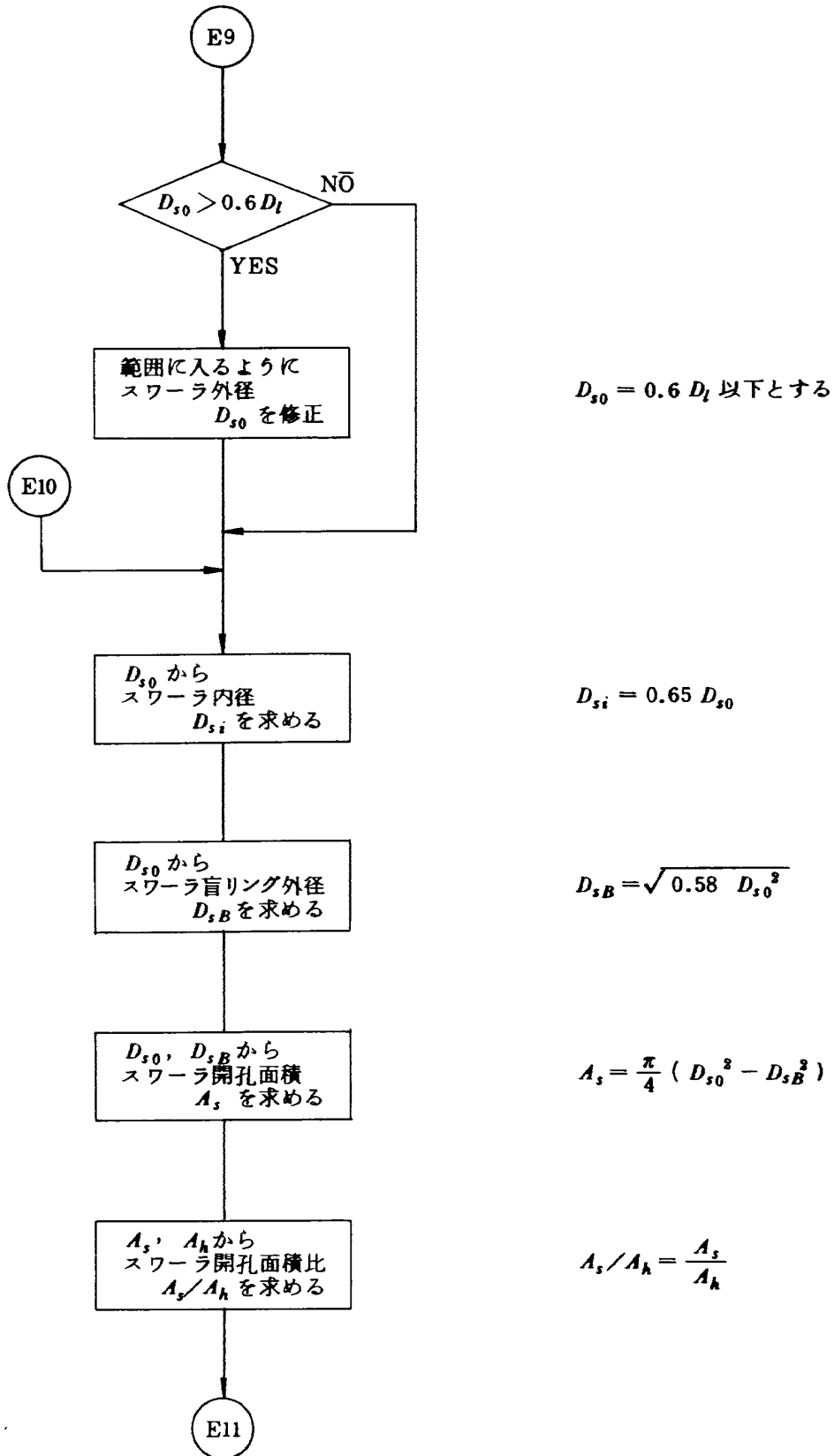
フローチャート (E - 5)



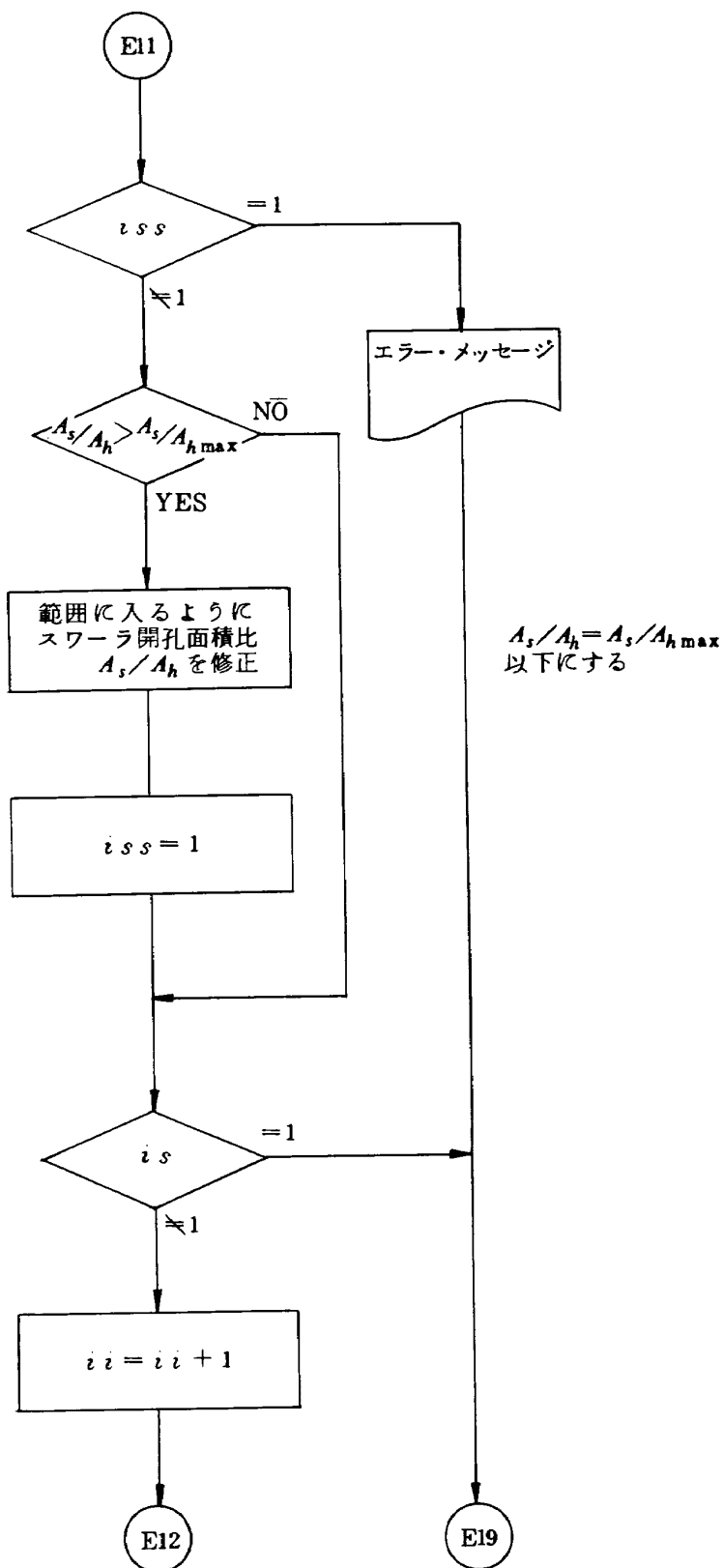
フローチャート (E - 6)



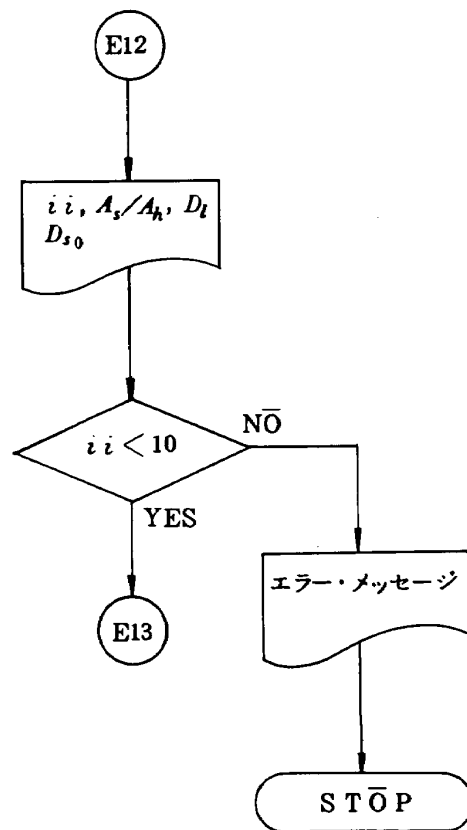
フローチャート (E - 7)



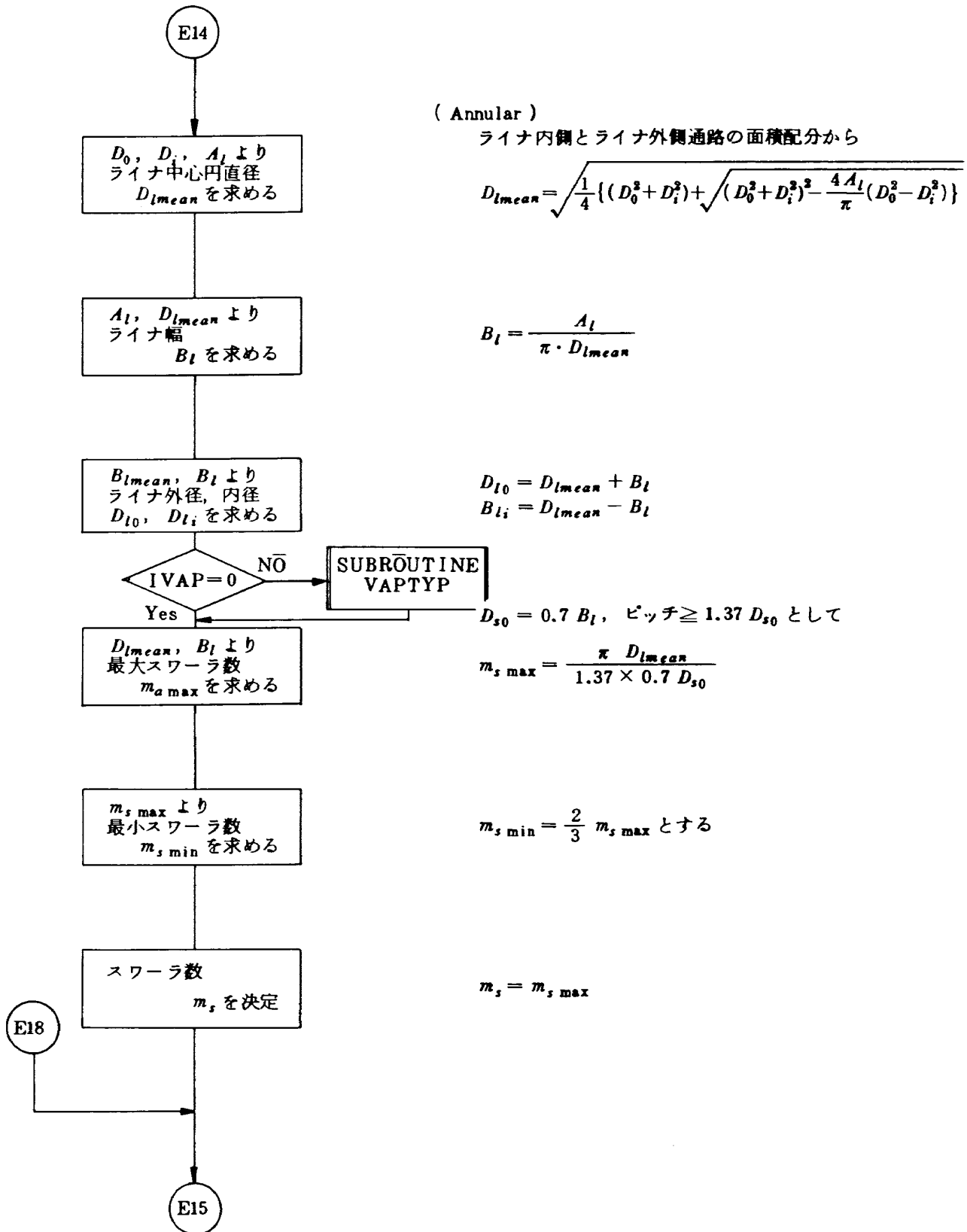
フローチャート (E-8)



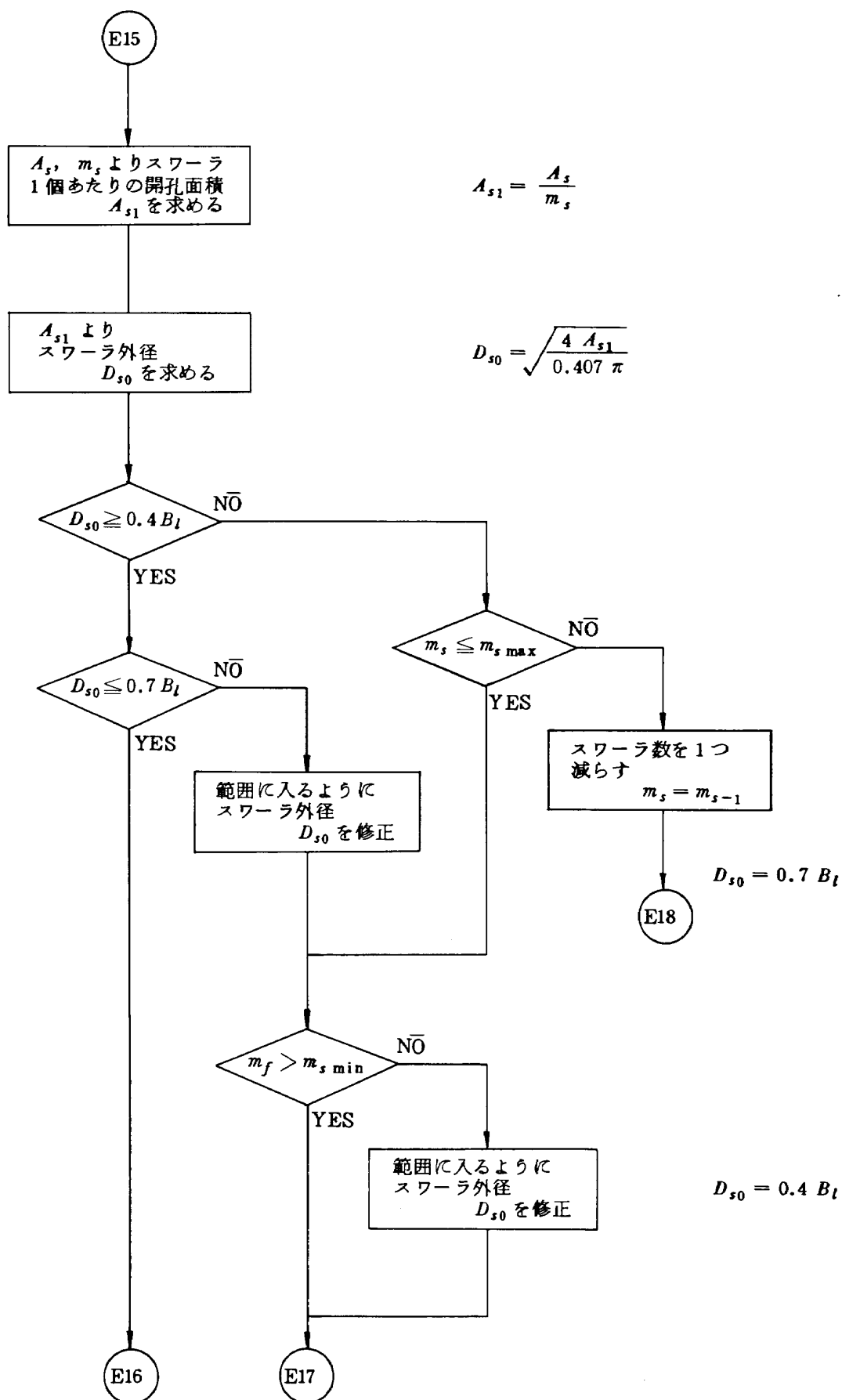
フローチャート (E - 9)



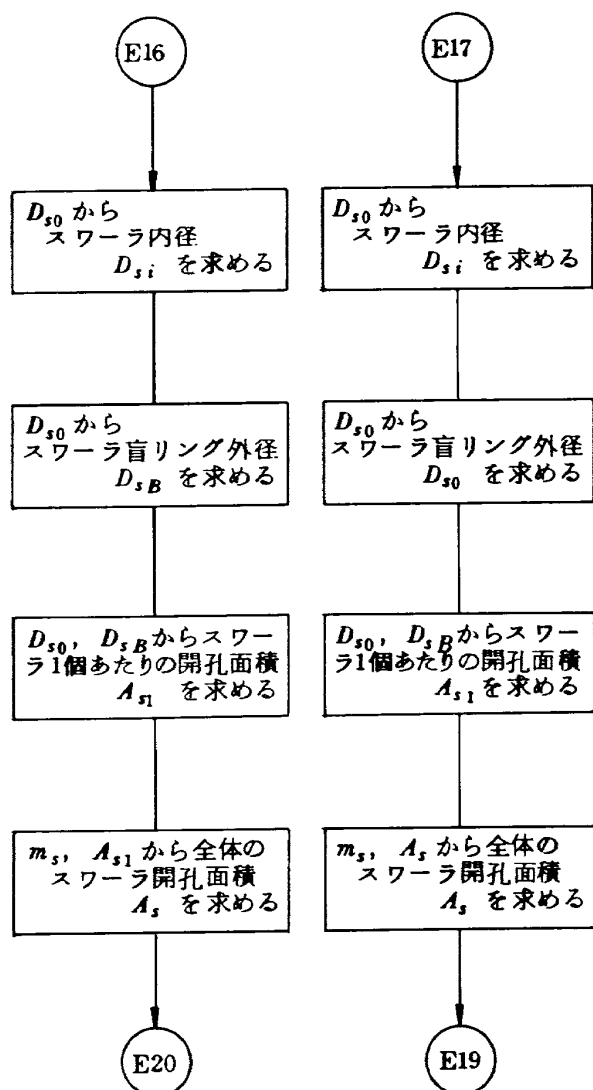
フローチャート (E - 10)



フローチャート (E-11)



フローチャート (E-12)



フローチャート (E-13)

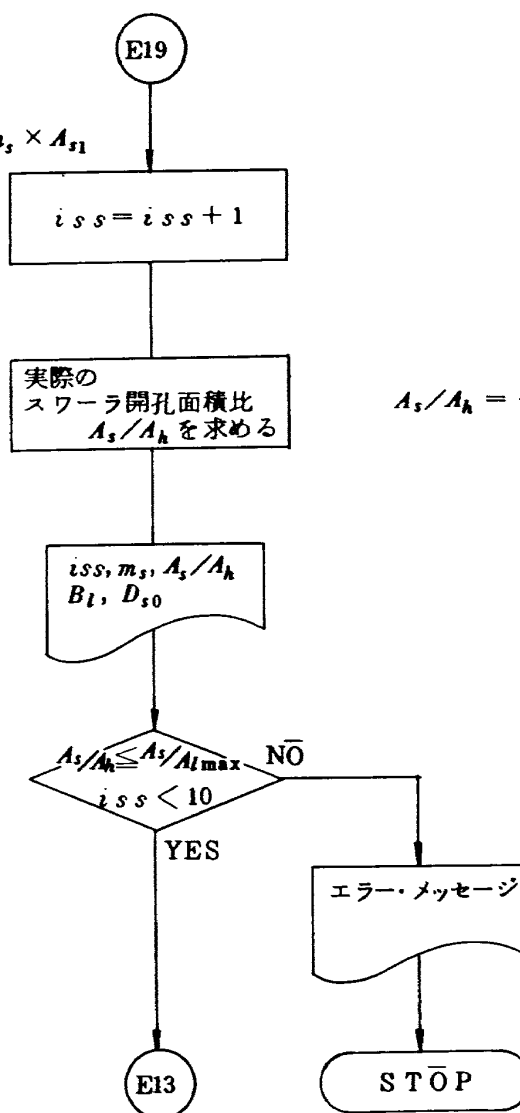
$$D_{si} = 0.65 D_{s0}$$

$$D_{sB} = \sqrt{0.58 D_{s0}^2}$$

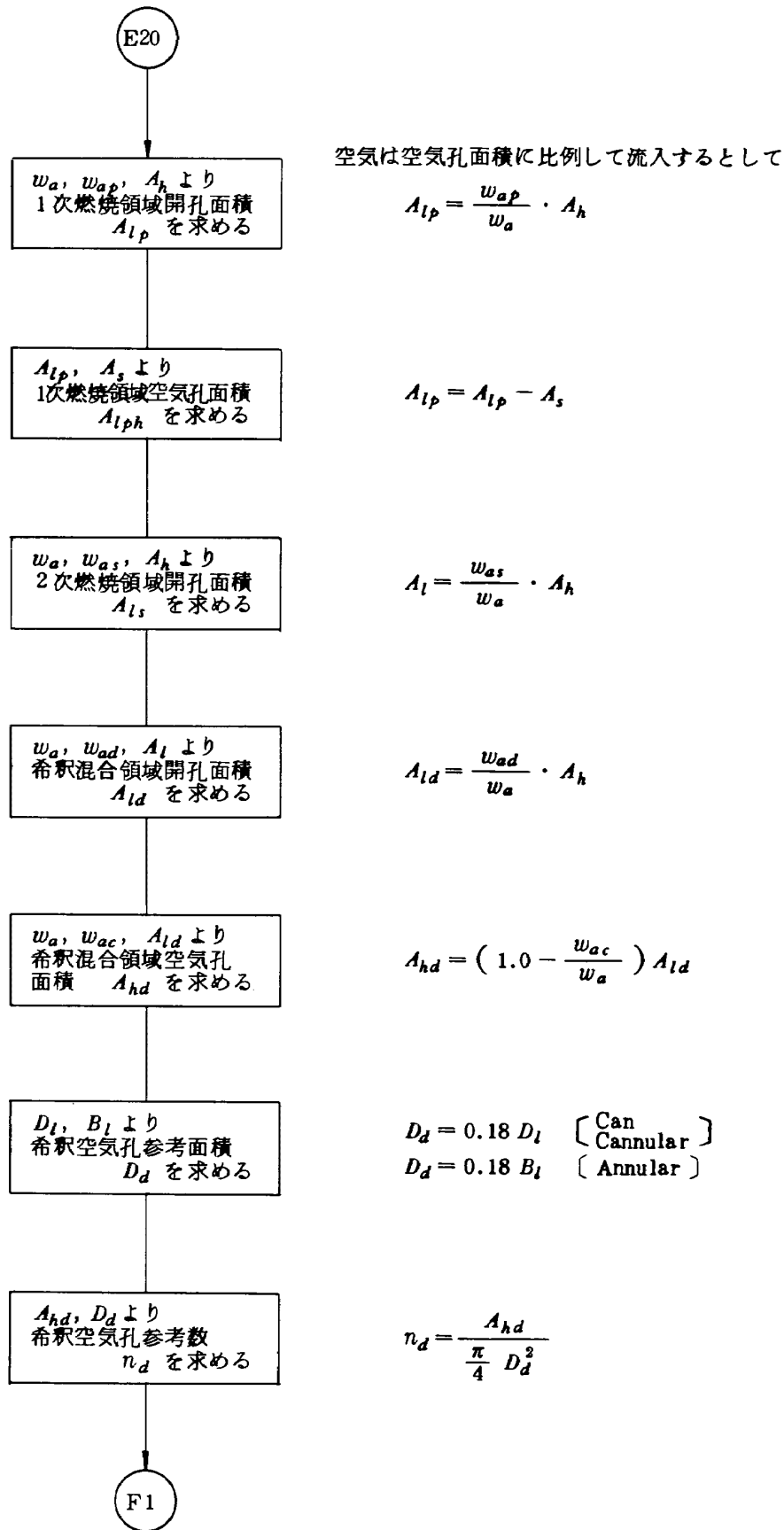
$$A_{s1} = \frac{\pi}{4} (D_{s0}^2 - D_{sB}^2)$$

$$A_s = m_s \times A_{s1}$$

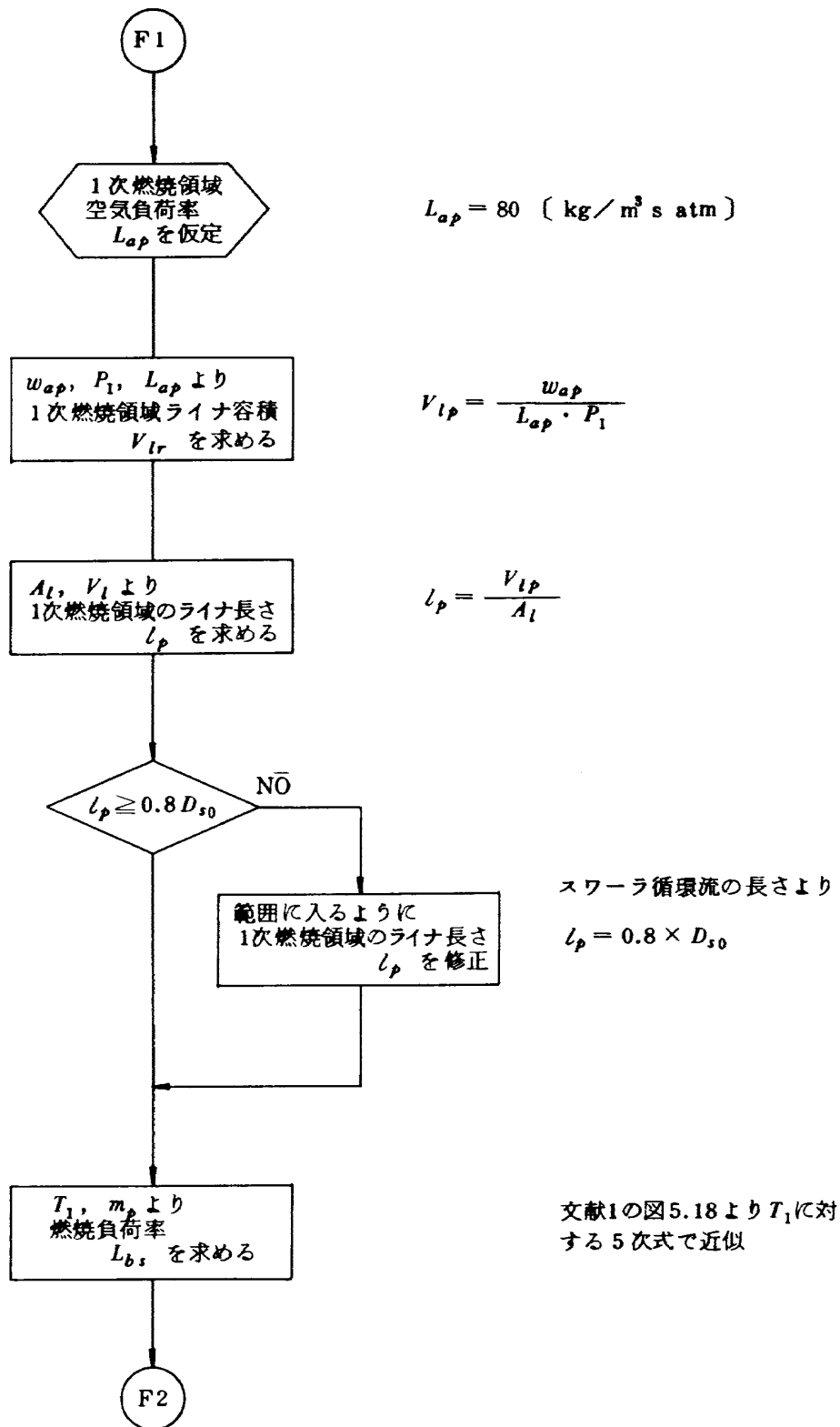
$$A_s/A_h = \frac{A_s}{A_h}$$



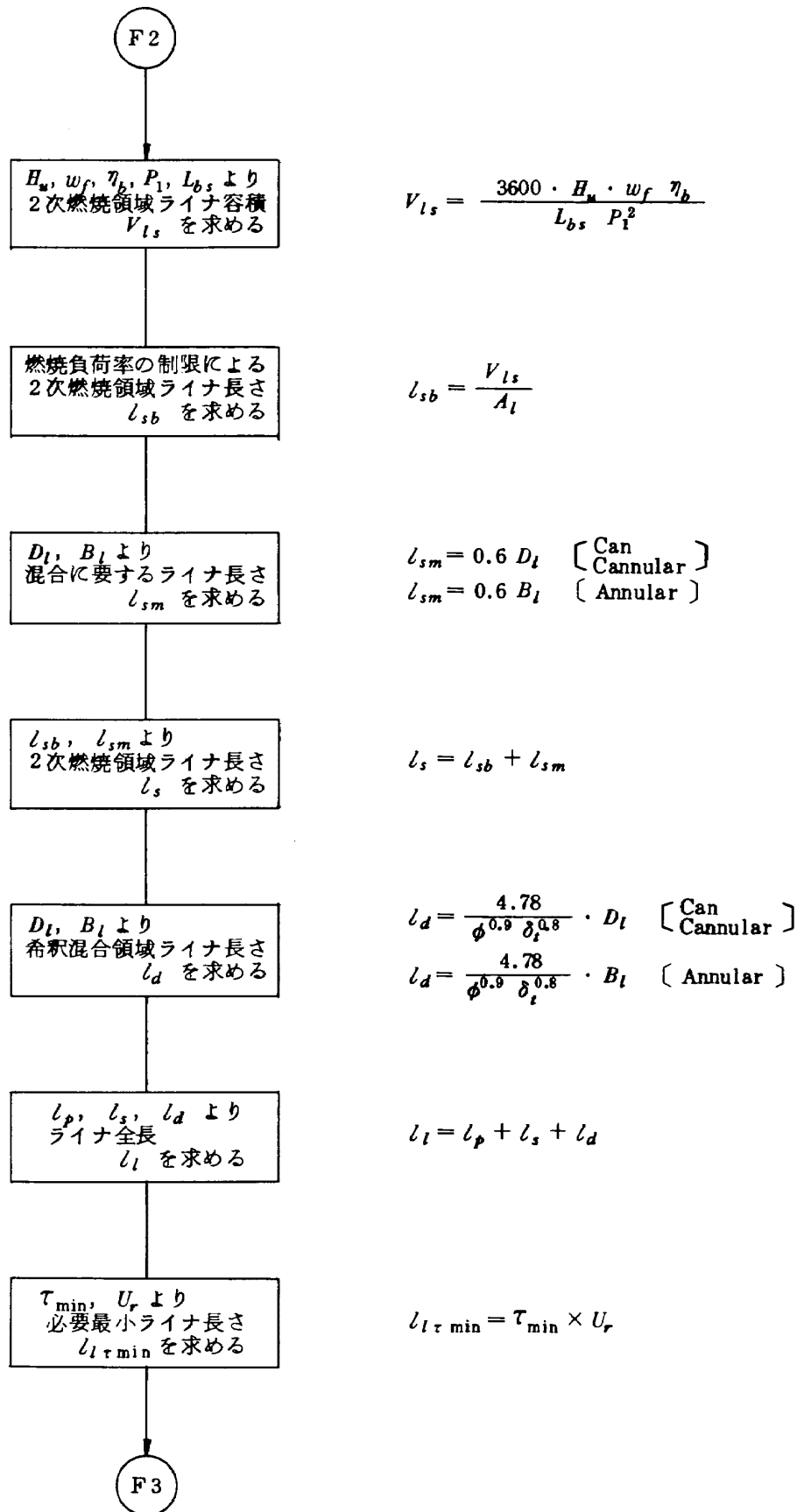
フローチャート (E-14)



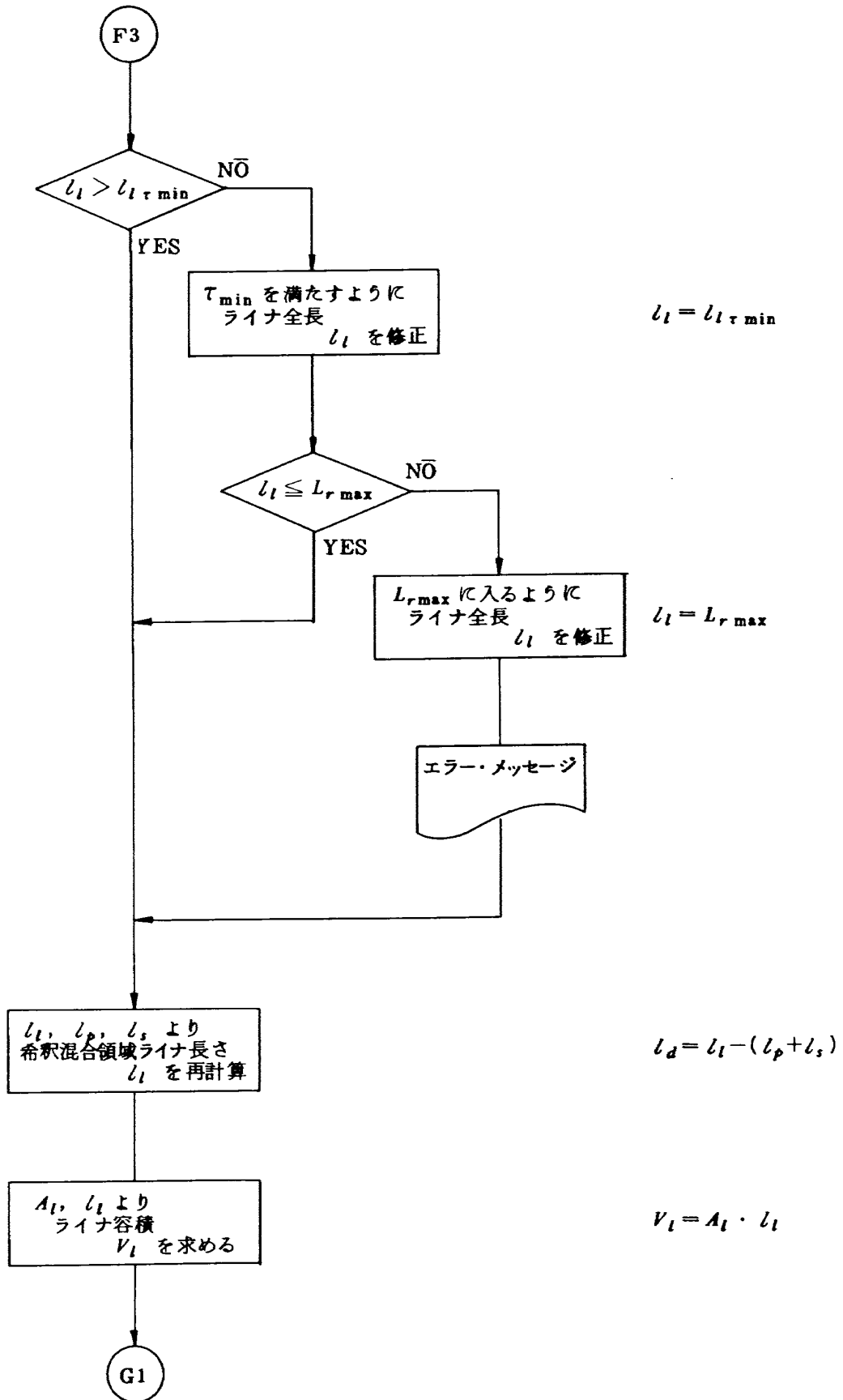
フローチャート (E-15)



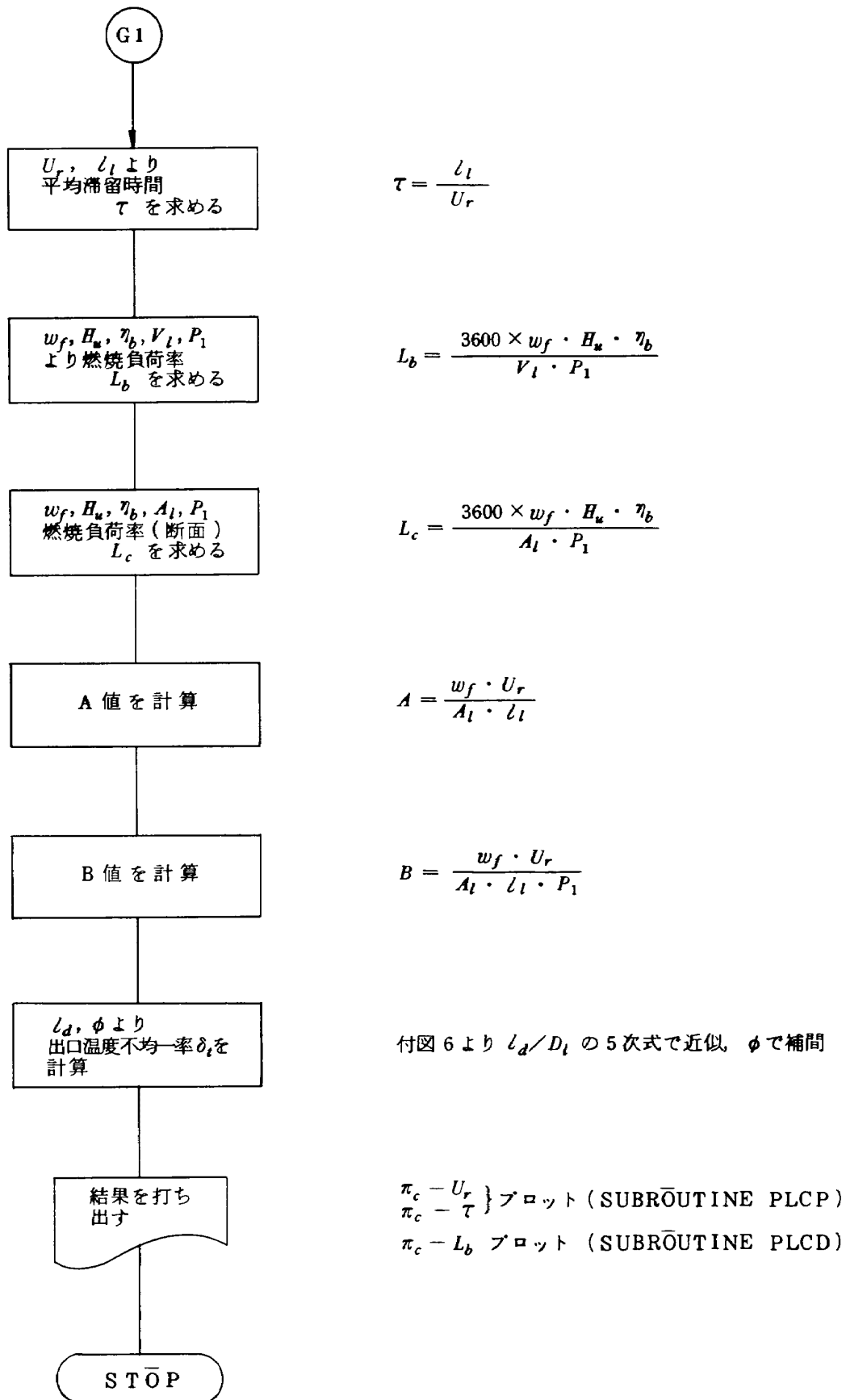
フローチャート (F - 1)



フローチャート (F-2)

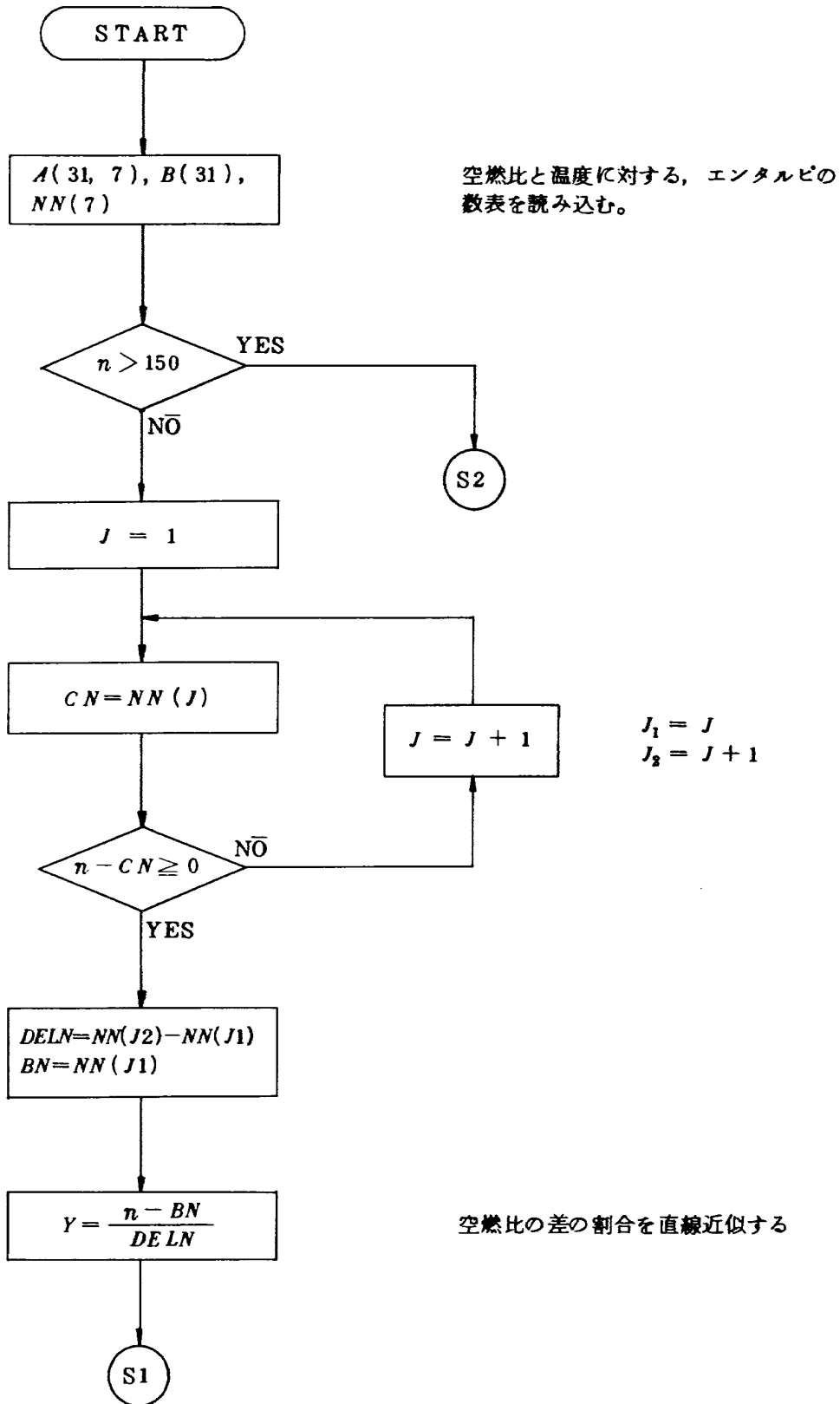


フローチャート (F - 3)

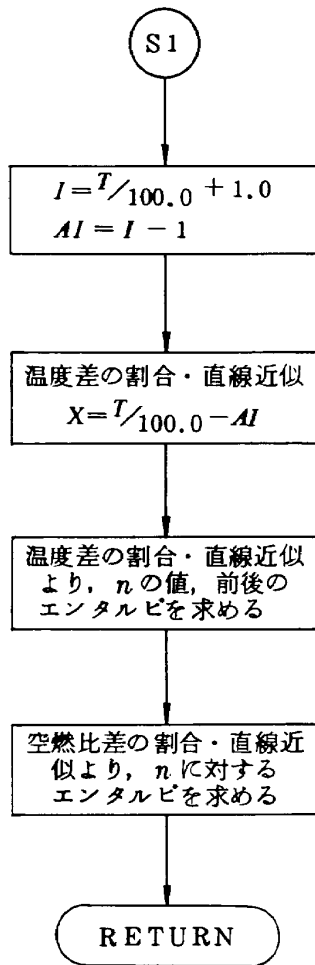


フローチャート (G - 1)

SUBROUTINE AHYŌU (AN, T, Z)



フローチャート (S-1)

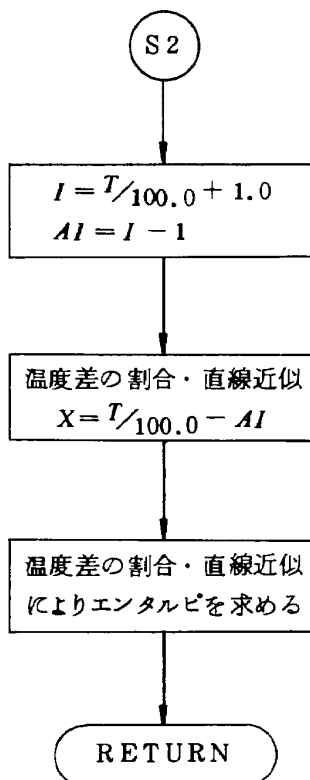


$$C = A(I, J1) + (A(I+1, J1) - A(I, J1)) * X$$

$$D = A(I, J2) + (A(I+1, J2) - A(I, J2)) * X$$

$$Z = C - (C - D) * Y$$

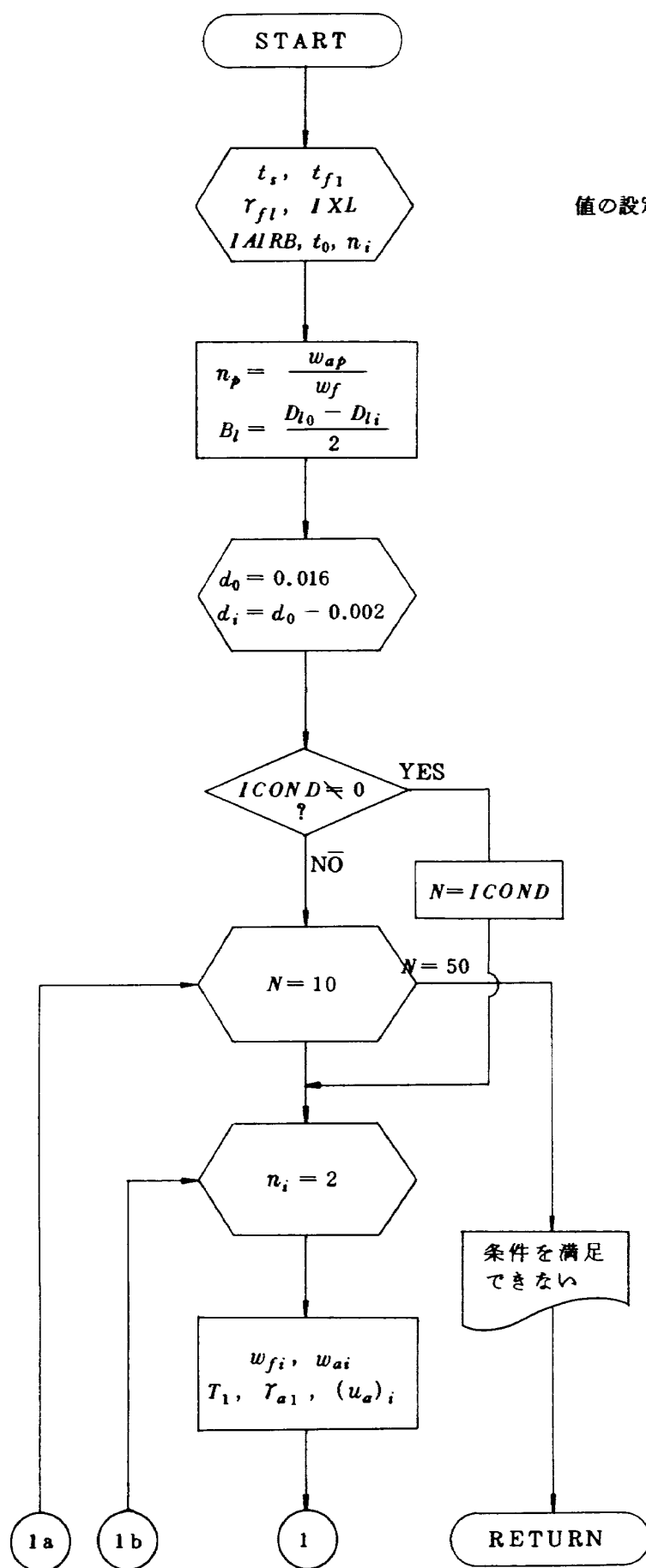
フローチャート (S - 2)



n が無限大 空気の時の計算

$$Z = B(I) + (B(I+1) - B(I)) * X$$

フローチャート (S - 3)



SUBROUTINE VAPTYP

(WAP, WF, P1, T1, AFR, DL0,
値の設定 DL1, RN, XL, SLT, SNI, UAI,
WAC, WAI, WFI, TP, EPSILN,
ICOND, IXL)

管の外/内径の設定

管本数の指定はあるか

管の本数を10から50まで変化させる。

管内空燃比を2から21まで変える。

管1本に関する諸量

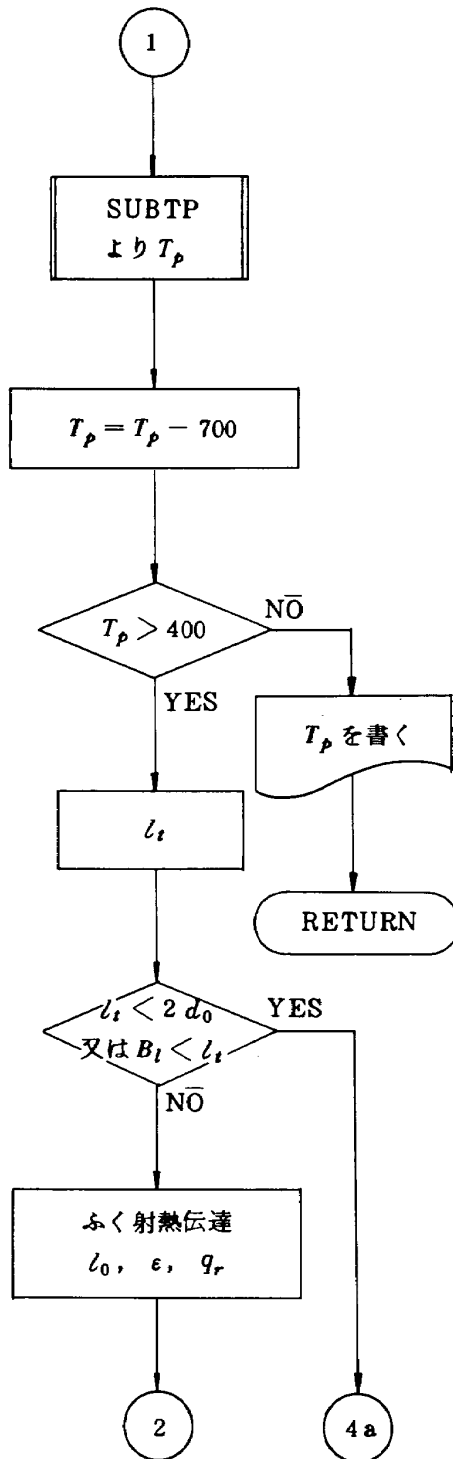
$$w_{fi} = w_f / N$$

$$w_{ai} = n_i \cdot w_{fi} \frac{K-1}{K}$$

$$T_1 = \frac{T_0}{\eta_c} \left\{ \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right\} + T_0$$

$$\tau_{a1} = 341.8 \frac{P_1}{T_1}$$

$$(u_a)_i = \frac{4 w_{ai}}{\tau_{a1} \cdot \pi d_i^2}$$



SUBROUTINE SUBTP より n_p , P_1 に
応じた一次燃焼領域断熱平衡火炎温度を算出

経験値に合わせる。

管のピッチ円上間隔

$$l_t = \frac{\pi (D_{l0} + D_{li})}{2N}$$

l_0 = (ふく射平均光路長)

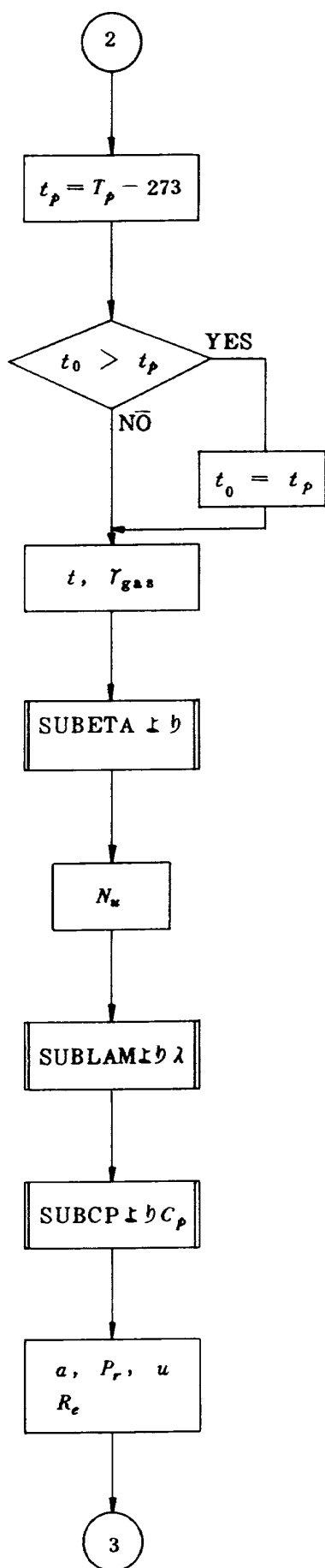
$$= 3.5 l_t$$

ϵ = (火炎ふく射率)

$$= 1 - \exp \left(-3.65 \times 10^4 \sqrt{\frac{l_0}{n}} P_1 T_p^{-1.5} \right)$$

q_r = (ふく射熱伝達量)

$$= \epsilon \sigma T_p^4$$



管温度を $t_0 = 1000^{\circ}\text{C}$, あるいは周囲ガス温度がそれ以下なら, その温度とする。

t = (管表面膜温度)

$$= \frac{t_0 + t_p}{2}$$

γ_{gas} = (燃焼ガス比重量)

$$= 1.299 \times \frac{273.2 P_1}{(273.2 + t)}$$

ν = (燃焼ガス動粘性係数)

$$= \frac{9.8 \eta}{\gamma_{\text{gas}}}$$

SUBROUTINE によって燃焼ガスの物性値を求める。

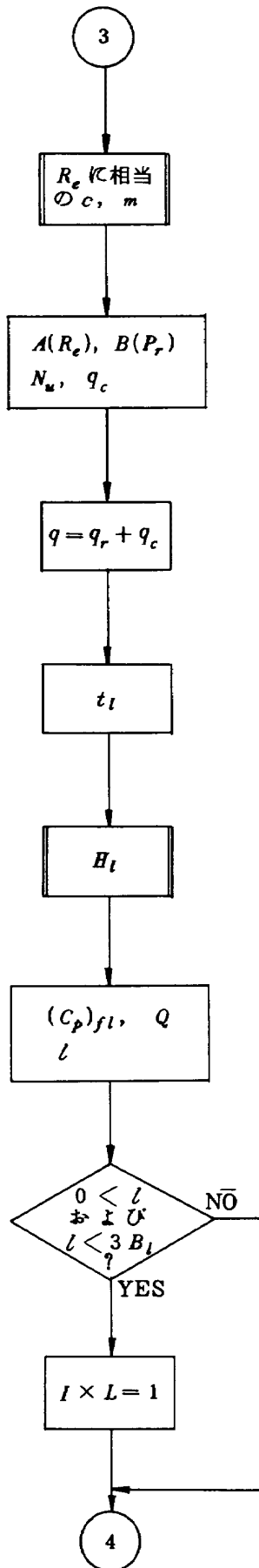
a = (温度伝導率)

$$= \lambda / (C_p \cdot \gamma_{\text{gas}})$$

$$P_r = \nu / a$$

$$u = \frac{2.0 w_{ap}}{\pi \gamma_{\text{gas}} \cdot B_l (D_{l0} + D_{li})}$$

$$R_e = \frac{B_e u}{\nu}$$



以下の式により対流熱伝達量を求める。

$$A(R_e) = c R_e^m$$

$$B(P_r) = \left(\frac{P_r}{0.72}\right)^{0.31}$$

$$N_u = A(R_e) \cdot B(P_r)$$

$$q_c = \frac{N_u \cdot \lambda \cdot (t_p - t_0)}{2 d_0}$$

q : 管への総伝熱量

$$t_l = \text{燃料平均温度} \\ = (t_s + t_{f1}) / 2$$

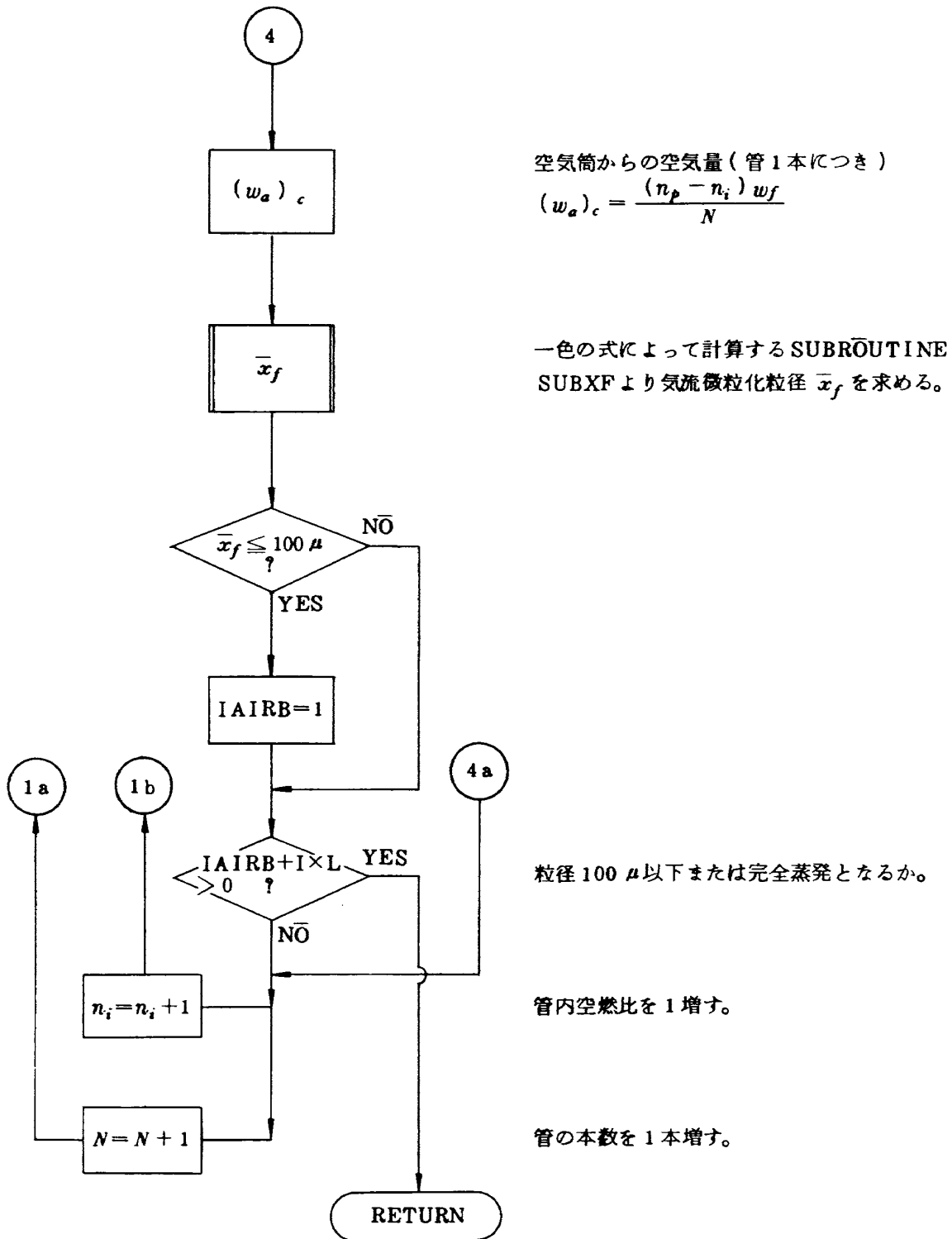
SUBROUTINE SUBHL によって
燃料蒸発潜熱を求める。

$$(C_p)_{fl} = \text{燃料液体の比熱} \\ = 3.767 t_l + 1884$$

$$Q = \text{燃料蒸発に要する全熱量} \\ = w_f \{ (C_p)_{fl} (t_s - t_{fl}) + H_l \}$$

l = 必要管長さ

$$= \frac{Q}{N \cdot \pi d_0 \cdot q}$$



付表2 燃焼器全長と直径(幅)
との比の代表値

燃焼器形式	全長と直径(幅)の比 $l_l/D_r, l_l/B_r$
直 流 環 形	2.0
逆 流 環 形	2.5
直流缶状環形	2.5
逆流缶状環形(逆頭)	3.0
逆流缶状環形(直頭)	3.0
直 流 多 缶 形	2.5
逆流多缶形(逆頭)	3.0
逆流多缶形(直頭)	3.0
直 流 缶 形	2.2
逆 流 缶 形	3.0

12. 記 号

このプログラムに用いた記号をまとめて付表3(a)および(b)に示す。

付表3(a) 記 号 表

記 号 (A)	記 号 (B)	項 目	単 位
A	A	A 値	$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}^2$
AFR	n	空燃比 (オーバーオール)	—
AFRMAX	$n_{s \text{ max}}$	二次燃焼領域の空燃比(最大)	—
AFRP	n_p	一次燃焼領域の空燃比	—
AFRS	n_s	二次燃焼領域の空燃比	—
AH	A_h	ライナ空気孔面積	m^2
AHD	A_{hd}	希釈混合領域の空気孔面積	m^2
AHR	A_h/A_r	ライナ空気孔面積比	—
AL	A_l	ライナ断面積	m^2
ALD	A_{ld}	希釈混合領域の開口面積	m^2
ALP	A_{lp}	一次燃焼領域の開口面積	m^2
ALPH	A_{lph}	一次燃焼領域の空気孔面積	m^2
ALR	A_l/A_r	ライナ断面積比(最適値)	—
ALRA	A_l/A_r	ライナ断面積比(実際値)	—
ALS	A_{ls}	二次燃焼領域の開口面積	m^2
AR	A_r	燃焼器最大断面積	m^2
ARMAX	$A_{r \text{ max}}$	燃焼器最大断面積(最大値)	m^2
ARMIN	$A_{r \text{ min}}$	燃焼器最大断面積(最小値)	m^2
AS	A_s	スワラ開口面積	m^2
AS1	A_{s1}	スワラ開口面積(スワラ1個あたり)	m^2
ASR	A_s/A_h	スワラ開口面積比	—
ASRMAX	$(A_s/A_h)_{\text{max}}$	スワラ開口面積比(最大値)	—
B	B	B 値	$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}^2 \text{ atm}$
BL	B_l	ライナ幅	m
BR	B_r	燃焼器幅	m

付表3(a) 記号表 (続き)

記号 (A)	記号 (B)	項 目	単 位
BRMAX	$B_{r \max}$	燃焼器 (最大値)	m
BRMAXC	$B_{r \max c}$	燃焼器 (最大値)	m
BRMAXL	$B_{r \max l}$	燃焼器 (最大値)	m
BRMIN	$B_{r \min}$	燃焼器 (最小値)	m
BRMINT	$B_{r \min t}$	燃焼器 (最小値)	m
CAR	w_{ac}/w_a	ライナ冷却空気量割合 (所要値)	
DD	D_d	希釈空気孔直径	m
DENS	ρ	入口空気密度	kg s ² /m ⁴
DET	δ_t	出口温度不均一率	—
DI	D_i	燃焼器内径	m
DIMIN	$D_{i \min}$	燃焼器内径 (最小値)	m
DL	D_l	ライナ直径	m
DLI	D_{li}	ライナ内径	m
DLMAX	$D_{l \max}$	ライナ直径 (最大値)	m
DLMEAN	$D_{l \text{mean}}$	ライナ中心円直径	m
DLO	D_{lo}	ライナ外径	m
DLR	l_l/D_r	燃焼器全長と直径 (幅) との比	—
DMEAN	D_{mean}	燃焼器中心円直径	m
DÖ(DÖÖ)	D_o	燃焼器外径	m
DÖMAX	$D_{o \max}$	燃焼器外径 (最大値)	m
DR	D_r	燃焼器直径	m
DRMAX	$D_{r \max}$	燃焼器直径 (最大値)	m
DRMAXC	$D_{r \max c}$	燃焼器直径 (最大値)	m
DRMAXL	$D_{r \max l}$	燃焼器直径 (最大値)	m
DRMIN	$D_{r \min}$	燃焼器直径 (最小値)	m
DRMINT	$D_{r \min t}$	燃焼器直径 (最小値)	m
DSB	D_{sB}	スワラ盲リング外径	m
DSI	D_{si}	スワラ内径	m
DSÖ	D_{sO}	スワラ外径	m
EC	η_b	燃焼効率	—
FHU	H_u	燃料低位発熱量	kcal/kg
H1	i_1	入口空気のエンタルピ	kcal/kg
H2	i_2	出口燃焼ガスのエンタルピ	kcal/kg
ITYPE	T_{type}	燃焼器形式	(1 ~ 10)
IUSE	U_{se}	燃焼器用途	(1 ~ 2)

付表 3(a) 記号表 (続き)

記号 (A)	記号 (B)	項 目	単 位
MS	m_s	スワール数	—
MSMAX	$m_{s \max}$	スワール数 (最大)	—
MT	m_t	缶ライナ数	—
MTMAX	$m_{t \max}$	缶ライナ数 (最大)	—
ND	n_d	希釈空気孔数	—
P0	P_0	圧縮機入口圧力	kg/cm ² abs
P1	P_1	燃焼器入口全圧	kg/cm ² abs
P2	P_2	燃焼器出口全圧 (平均値)	kg/cm ² abs
PHBMIN	$\phi_{b \min}$	全圧損失係数 (最小値)	—
PHDMAX	$\phi_{D \max}$	全圧損失係数 (最大値)	—
PHDMIN	$\phi_{D \min}$	全圧損失係数 (最小値)	—
PHH	ϕ_h	全圧損失係数	—
PHI	ϕ	全圧損失係数	—
PHI0	ϕ_0	全圧損失係数 (代表値)	—
PHIMAX	ϕ_{\max}	全圧損失係数 (最大値)	—
PHIMIN	ϕ_{\min}	全圧損失係数 (最小値)	—
PHTMIN	$\phi_{r \min}$	全圧損失係数 (最小値)	—
PHUMAX	$\phi_{U \max}$	全圧損失係数 (最大値)	—
PHUMIN	$\phi_{U \min}$	全圧損失係数 (最小値)	—
PRR		エンジン圧力比	—
SL	SL	寸法余裕率	—
T1	T_1	入口空気温度	°K
T2	T_2	出口燃焼ガス温度 (平均値)	°K
TAU	τ	平均滞留時間	ms
THETA	θ	燃焼効率のパラメータ	—
TMIN	τ_{\min}	必要平均滞留時間	ms
TRR	T_2/T_1	出口/入口温度比	—
TS	T_s	二次燃焼領域の温度	°K
UR	U_r	最大断面平均風速	m/s
URMAX	$U_{r \max}$	最大断面平均風速 (最大値)	m/s
URMIN	$U_{r \min}$	最大断面平均風速 (最小値)	m/s
VL	V_l	全ライナ容積	m ³
VLP	V_{lp}	一次燃焼領域のライナ容積	m ³
VLS	V_{ls}	二次燃焼領域のライナ容積	m ³
WA	w_a	空気流量 (オーバオール)	kg/s
WAC	w_{ac}	ライナ冷却空気流量	kg/s

付表 3(a) 記 号 表 (続 き)

記 号 (A)	記 号 (B)	項 目	単 位
WAD	w_{ad}	希釈混合領域の流入空気量	kg/s
WAP	w_{ap}	一次燃焼領域の流入空気量	kg/s
WAS	w_{as}	二次燃焼領域の流入空気量	kg/s
WF	w_f	燃料流量	kg/s
XLAP	L_{ap}	一次燃焼領域の空気負荷率	kcal/m ³ h atm
XLB	L_b	ライナの燃焼負荷率	kcal/m ³ h atm
XLBS	L_{bs}	二次燃焼領域の燃焼負荷率	kcal/m ³ h atm ²
XLC	L_c	ライナ断面積あたりの負荷率	kcal/m ² h atm
XLD	l_d	ライナ希釈混合領域長さ	m
XLL	l_l	ライナ全長	m
XLLT	$l_{l \tau \min}$	ライナ全長 (最小値)	m
XLP	l_p	ライナ一次燃焼領域長さ	m
XLPSW	l_{psW}	ライナ一次燃焼領域長さ	m
XLS	l_s	ライナ二次燃焼領域長さ	m
XLSB	l_{sb}	ライナ二次燃焼領域長さ	m
XLSM	l_{sm}	ライナ二次燃焼領域長さ	m
XLRMAX	$L_{r \max}$	燃焼器全長 (最大値)	m

付表3(b) サブルーチン VAPTYP 用記号表

記号 (A)	記号 (B)	項 目	単 位
AFR	n	空燃比 (オーバーオール)	
ANUSLT	N_u	Nusselt 数	
ARE	$A(R_e)$	対流熱伝達計算用関数	
BL	B_l	ライナ巾	m
BPR	$B(P_r)$	対流熱伝達計算用関数	
CD	CD_0	気流微粒化算定用係数	
CP	C_p	燃焼ガス比熱	J/kg °C
CPFL	$(C_p)_{fl}$	燃料液体比熱	
D \bar{O}	d_0	蒸発管外径	m
DI	d_i	" 内径	m
DL	Dl_0	ライナ外径	m
DLI	Dl_i	" 内径	m
EPSILN	ϵ	一次燃焼領域火炎輻射率	
ETAC	η_c	圧縮機断熱効率	
GAMMA	γ_{gas}	燃焼ガス比重量	kg/m ³
GAMMAA	γ_a	空気比重量	kg/m ³
GAMMAL	γ_l	液体燃料比重量	kg/m ³
HL	H_L	燃料の気化潜熱	J/kg
IAIRB		計算指数, 1 : $\bar{x}_f < 100 \mu m$	
ICOND		蒸発管指定本数	
IXL		計算指数, 1 : 燃料完全気化	
P1	P_1	燃焼器入口圧力	kg/cm ²
P0	P_0	大気圧	kg/cm ²
PR	P_r	燃焼ガスプラントル数	
Q	q	蒸発管への全伝熱量	W/m ²
QC	q_c	" 対流熱伝達量	W/m ²
QR	q_r	" 輻射 "	W/m ²
RE	R_e	蒸発管外の燃焼ガスレイノルズ数	
RH \bar{O} A	ρ_a	空気の密度	kg·s ² /m ⁴
RN	N	蒸発管本数	
RQ	Q	燃料蒸発に要する熱量	W
SIGMA	σ_l	燃料表面張力	kg/m
SIGMR	σ	ステファーン ボルツマン係数	W/m ² K ⁴
SL0	l_0	平均光路長	m
SLT	l_t	蒸発管ピッチ円上間隔	m
SNI	n_i	蒸発管内空燃比	
SNP	n_p	一次燃焼領域空燃比	
ST0	t_0	蒸発管壁温度	°C
ST	t	蒸発管外面膜温度	°C
STL	t_l	管内燃料平均温度	°C
STF1	t_{f1}	燃料流入温度	°C
STS	t_s	燃料飽和温度	°C

付表 3(b) サブルーチン VAPTYP 用記号表 (続き)

記 号 (A)	記 号 (B)	項 目	単 位
T0	T_0	大気温度	°K
T1	T_1	燃焼器入口温度	°K
TP	T_p	一次燃焼領域温度	°K
U	u	蒸発管外燃焼ガス流速	m/s
UAI	u_{ai}	蒸発管内空気流速	m/s
WAC	w_{ac}	蒸発管外一次燃焼用空気	kg/s・本
WAI	w_{ai}	蒸発管内空気	kg/s・本
WAP	w_{ap}	一次燃焼領域用空気	kg/s・本
WE0	W_{e0}	ウェバー数	
WF	w_f	全燃料流量	kg/s
WFI	w_{fi}	蒸発管あたりの燃料流量	kg/s 本
X0	\bar{x}_0	初期燃料粒径	m
XFBAR	\bar{x}_f	気流微粒化平均粒径	m, μm
XK	κ	断熱係数	
XL	l	蒸発管長さ	m
XLAMDA	λ	燃焼ガス熱伝導率	J/m・s・°C
XNU	ν	燃焼ガス動粘性係数	kg・s/m ²

13. プログラムリスト

```

C      MAIN
C      GT COMBUSTOR DESIGN PROGRAM    (GTMA)
C
C      GT COMBUSTOR DESIGN PROGRAM
C
1      DIMENSION PHITU(10,2),DLR(10)
2      DIMENSION ALL(10)
3      DATA PHITU/25.0,2*30.0,50.0,40.0,30.0,50.0,45.0,40.0,50.0,
1      18.0,25.0,20.0,45.0,35.0,25.0,50.0,40.0,30.0,40.0/
4      DATA DLR/2.0,2*2.5,2*3.0,2.5,2*3.0,2.2,3.0/
C
C      A) BASIC INPUT DATA
C
C      DESCRIPTION OF PARAMETERS
C      P0      - COMPRESSOR INLET PRESSURE
C      P1      - COMBUSTOR INLET TOTAL PRESSURE
C      P2      - COMBUSTOR OUT   TOTAL PRESSURE
C      T1      - COMBUSTOR INLET TEMPERATURE
C      T2      - COMBUSTOR OUT   TEMPERATURE
C      DET     - OUT TEMPERATURE PATTERN FACTOR
C      WA      - AIR MASS FLOW RATE
C      FHU     - FUEL HEAT OF COMBUSTION
C      EC      - COMBUSTION EFFICIENCY
C      DOMAX   - COMBUSTOR OUTER DIAMETER (MAXIMUM)
C      DIMIN   - COMBUSTOR INNER DIAMETER (MINIMUM)
C      XLRMAX  - COMBUSTOR LENGTH (MAXIMUM)
C      SL      - SPACE UTILITY
C      ITYPE   - COMBUSTOR TYPE
C      IUSE    - COMBUSTOR USE
C      IVAP    - VAPORIZER TYPE
C
5      CALL DIMENS
6      READ(5,810) ICOND
7      810  FORMAT(I2)
8      READ(5,1800) INN
9      1800 FORMAT(I3)
10     DO 1100 IN=1,INN
11         READ(5,800) P0,P1,P2,T1,T2,DET,WA,FHU,EC
12         READ(5,805) DOMAX,DIMIN,XLRMAX,SL,ITYPE,IUSE,IVAP
13         800  FORMAT(8F10.4)
14         805  FORMAT(4F10.4,3I3)
15         WRITE(6,900)
16         WRITE(6,1920) IN
17         1920 FORMAT(1H0,3HNO.,I3)
18         WRITE(6,905) P0,P1,P2,T1,T2,DET,WA,FHU,EC
19         WRITE(6,910) DOMAX,DIMIN,XLRMAX,SL,ITYPE,IUSE,IVAP
20         900  FORMAT(1H1,/1H ,19HA) BASIC INPUT DATA)
21         905  FORMAT(1H0,7HP0= ,F10.4,/1H ,7HP1= ,F10.4,/1H ,7HP2=
1         1 F10.4,/1H ,7HT1= ,F10.4,/1H ,7HT2= ,F10.4,/1H ,
2         2 7HDET= ,F10.4,/1H ,
3         3 7HWA= ,F10.4,/1H ,7HFHU= ,F10.4,/1H ,7HEC= ,F10.4)
22         910  FORMAT(1H ,7HDOMAX= ,F10.4,/1H ,7HDIMIN= ,F10.4,/1H ,7HXLRMAX=,
1         1 F10.4,/1H ,7HSL= ,F10.4,/1H ,7HITYPE= ,I3,/1H ,7HIUSE=
2         2 ,I3,/1H ,7HIVAP= ,I3)
C
C      B) DETAIL SPECIFIC

```

```

C
C      REQUIRED SUBROUTINES
C      AFRDET(T1,T2,EC,FHU,AFR,ILL)
C      REQUIRED INPUT DATA
C      P0,P1,P2,T1,T2,WA,FHU,EC,DOMAX,DIMIN,XLRMAX,SL,ITYPE,IUSE
C      ,IVAP
C
23      WRITE(6,911)
24      911 FORMAT(1H0,18HB) DETAIL SPECIFIC)
25      CALL AFRDET(T1,T2,EC,FHU,AFR,ILL)
26      IF (ILL.EQ.0) GO TO 100
27      WRITE(6,990)
28      990 FORMAT(1H1,15HERROR IN AFRDET)
29      GO TO 1000
30      100 Wf=WA/AFR
31      DENS=1.293*273.15*P1/(9.8*T1*1.0332).
32      PL=P1-P2
33      PRR=P1/P0
34      TRR=T2/T1
35      WAA=WA
36      WFF=Wf
37      WRITE(6,913) AFR,WA,Wf,DENS,PL,PRR,TRR
38      913 FORMAT(1H0,7HAFR= ,F10.6,/1H ,7HWAT= ,F10.6,/1H ,7HWFT= ,
1          F10.6,/1H ,7HDENS= ,F10.6,/1H ,7HPL= ,F10.6,/1H ,
2          7HPRR= ,F10.6,/1H ,7HTRR= ,F10.6)
39      MT=1
40      IF (ITYPE.LE.2) GO TO 115
41      IF (ITYPE.GE.3.AND.ITYPE.LE.5) GO TO 115
C      CAN
42      IF (ITYPE.EQ.9.OR.ITYPE.EQ.10) GO TO 105
43      DMTA=1.1*DOMAX-(DIMIN*SL+(1.0-SL)*DOMAX)
44      DMTB=DOMAX+DIMIN*SL+(1.0-SL)*DOMAX
45      DMT=DMTA/DMTB
46      IF (DMT.GE.1.0) DMT=1.0
47      MTMAX=3.14159/ARSIN(DMT)+0.5
48      IF (MTMAX.GT.16) MTMAX=16
49      MT=MTMAX
50      102 XMT=MT
51      XMTA=3.14159/XMT
52      DRMAXA=0.5*(DOMAX-DIMIN)
53      DRMAXB=(SIN(XMTA)-0.025)/(1+SIN(XMTA))*DOMAX
54      DRMAX=AMIN1(DRMAXA,DRMAXB)
55      DRMIN=DRMAXA*SL
56      WA=WAA/XMT
57      Wf=WFF/XMT
58      GO TO 110
59      105 DRMAX=DOMAX
60      DRMIN=DOMAX*SL
61      110 CONTINUE
62      WRITE(6,915) MT,WA,Wf,DRMAX,DRMIN
63      915 FORMAT(1H0,7HMT= ,13,/1H ,7HWA1= ,F10.6,/1H ,7HWF1= ,F10.6,
1          /1H ,7HDRMAX= ,F10.6,/1H ,7HDRMIN= ,F10.6)
64      GO TO 120
C      ANNULAR
65      115 DMEAN=(DOMAX+DIMIN)*0.5

```

```

66      BRMAX=(DOMAX-DIMIN)*0.5
67      BRMIN=BRMAX*SL
68      WRITE(6,917)DMEAN,BRMAX,BRMIN
69      917 FORMAT(1H0,7HDMEAN= ,F10.6/1H ,7HBRMAX= ,F10.6,/1H ,7HBRMIN= ,
1        F10.6)
70      120 CONTINUE
C
C      C) ESTIMATE REFERENCE DIMENSION
C
C      REQUIRED STATEMENTS
C      DIMENSION PHITU(10,2),DLR(10)
C      DATA PHITU(1,1)
C      DATA PHITU(1,2)
C      DATA DLR
C      REQUIRED DATA
C      ITYPE,IUSE
C      P1,T1,WA,DRMAX,DRMIN,XLRMAX,PRR,PL,DENS
71      WRITE(6,921)
72      921 FORMAT(1H0,/1H ,31HC) ESTIMATE REFERENCE DIMENSION)
C      PHI (INITIAL)
73      PHIO=PHITU(ITYPE,IUSE)
C      PHI (FROM URMAX)
74      IF (IUSE.EQ.1) GO TO 971
75      URMAX=40.0-1.5*(PRR-6.0)+0.048*(PRR-6.0)**2-1.8*10.0**(-4)*(PRR
1 -6)**3
76      GO TO 972
77      971 URMAX=0.5354004E-04*PRR**5-0.328738E-02*PRR**4+0.7052861E-01*PRR**
1 3-0.5127657*PRR**2-0.2566545E01*PRR+0.6171420E02
78      IF (PRR.GE.23.0) URMAX=14.0
79      972 IF (PRR.LT.6.0) URMAX=40.0
80      URMIN=10.0
81      PHUMIN=PL*10000.0/(0.5*DENS*URMAX*URMAX)
82      PHUMAX=PL*10000.0/(0.5*DENS*URMIN*URMIN)
C      PHI (FROM DIMENSION)
83      IF (ITYPE.LE.2) GO TO 215
84      IF (ITYPE.GE.3.AND.ITYPE.LE.5) GO TO 215
85      DRMAXL=XLRMAX/DLR(ITYPE)
86      DRMAXC=AMIN1(DRMAXL,DRMAX)
87      ARMIN=3.14159*0.25*DRMIN*DRMIN
88      ARMAX=3.14159*0.25*DRMAXC*DRMAXC
89      GO TO 220
C      ANNULAR
90      215 BRMAXL=XLRMAX/DLR(ITYPE)
91      BRMAXC=AMIN1(BRMAXL,BRMAX)
92      ARMIN=3.14159*DMEAN*BRMIN
93      ARMAX=3.14159*DMEAN*BRMAXC
94      220 CONTINUE
95      URMIN=WA/(9.8*DENS*ARMAX)
96      URMAX=WA/(9.8*DENS*ARMIN)
97      PHDMIN=PL*10000.0/(0.5*DENS*URMAX*URMAX)
98      PHDMAX=PL*10000.0/(0.5*DENS*URMIN*URMIN)
C      PHI (FOR HIGH COMBUSTION EFFICIENCY)
99      ARMIN=(WA*0.2/(P1**1.75*(4.0/3.14159)**0.375*EXP(T1/300.0)))**
1 (1.0/1.375)
C      ANNULAR

```

```

100      IF (ITYPE.LE.2) ARMIN=(WA*0.2/(P1**1.75*(1.0/(3.14159*DMEAN))**
1 0.75*EXP(T1/300.0)))*(1.0/1.75)
101      IF (ITYPE.GE.3.AND.ITYPE.LE.5) ARMIN=(WA*0.2/(P1**1.75*(1.0/
1(3.14159*DMEAN))**0.75*EXP(T1/300.0)))*(1.0/1.75)
102      URMX=WA/(9.8*DENS*ARMIN)
103      PHBMIN=PL*10000.0/(0.5*DENS*URMX*URMX)
C      PHI (FROM RESIDENCE TIME)
104      IF (IUSE.EQ.2) GO TO 30
105      IF (PRR.GE.8.0) GO TO 40
106      TMIN=(PRR**2-18.0*PRR+208.0)/16.0
107      GO TO 50
108      40 TMIN=(9.0*PRR+64.0)/17.0
109      GO TO 50
110      30 IF (PRR.GE.8.0) GO TO 60
111      TMIN=(7.0*PRR**2-113.0*PRR+876.0)/60.0
112      GO TO 50
113      60 TMIN=(3.0*PRR+88.0)/16.0
114      50 IF (ITYPE.LE.2) GO TO 225
115      IF (ITYPE.GE.3.AND.ITYPE.LE.5) GO TO 225
116      DRMINT=(WA*TMIN/1000.0
1 1/(2.0*SQRT(0.6)*9.8*DENS*3.14159/4.0))*(1.0/3.0)
117      ARMIN=3.14159/4.0*DRMINT*DRMINT
118      GO TO 230
C      ANNULAR
119      245 BRMINT=SQRT(WA*TMIN/1000.0/(2.0*0.6*9.8*DENS*3.14159*DMEAN))
120      IF (ITYPE.GE.3.AND.ITYPE.LE.5) BRMINT=SQRT(WA*TMIN/1000.0
1 1/(2.0*0.9*9.8*DENS*3.14159*DMEAN))
121      ARMIN=3.14159*DMEAN*BRMINT
122      230 CONTINUE
123      URMX=WA/(9.8*DENS*ARMIN)
124      PHTMIN=PL*10000.0/(0.5*DENS*URMX*URMX)
C      PHI (LIMIT)
125      PHIMIN=AMAX1(PHUMIN,PHDMIN,PHBMIN,PHTMIN)
126      PHIMAX=AMIN1(PHUMAX,PHDMAX)
C      PHI (CONDITION CHECK)
127      IF (PHIMIN.LE.PHIMAX) GO TO 200
128      PHIMIN=AMAX1(PHUMIN,PHDMIN,PHBMIN)
129      IF (PHIMIN.LE.PHIMAX) GO TO 204
130      PHIMIN=AMAX1(PHUMIN,PHDMIN,PHTMIN)
131      IF (PHIMIN.LE.PHIMAX) GO TO 205
132      WRITE(6,992) PHUMIN,PHDMIN,PHBMIN,PHTMIN,PHUMAX,PHDMAX
133      992 FORMAT(1H0,/1H ,5HERROR,/1H ,7HPHUMIN=,F10.3,10X,7HPHDMIN=,F10.3,
1 10X,7HPHBMIN=,F10.3,10X,7HPHTMIN=,F10.3,/1H ,7HPHUMAX=,
2 F10.3,10X,7HPHDMAX=,F10.3)
134      IF (DRMAXB.GE.DRMAXA.OR.DRMAXB.GE.DRMAXL) GO TO 202
135      IF (MT.LE.4) GO TO 202
136      MT=MT-1
137      GO TO 102
138      202 GO TO 1000
139      204 WRITE(6,923)
140      923 FORMAT(1H0,/1H ,25HTAU MAY BE LESS THAN TMIN)
141      PHI=PHIMAX
142      GO TO 210
143      205 WRITE(6,920)
144      920 FORMAT(1H0,/1H ,12HTHETA.LT.0.2)

```

```

145      PHI=PHIMAX
146      GO TO 210
147      200 PHI=AMAX1(PHIMIN,PHI0)
148      PHI=AMIN1(PHIMAX,PHI)
149      210 CONTINUE
C      CALCULATE REFERENCE DIMENSION
150      UR=SQRT(PL*10000.0/(0.5*DENS*PHI))
151      AR=WA/(9.8*DENS*UR)
152      ARR=AR
153      IF (ITYPE.LE.2) GO TO 235
154      IF (ITYPE.GE.3.AND.ITYPE.LE.5) GO TO 235
155      DR=SQRT(4.0/3.14159*AR)
156      DLMAX=DR
157      THETA=P1**1.75*AR*DR**0.75*EXP(T1/300.0)/WA
158      WRITE(6,925) PHI,UR,AR,DR,THETA
159      925 FORMAT(1H0,7HPHI= ,F10.6,/1H ,7HUR= ,F10.6,/1H ,7HAR1= ,
1      1 F10.6,/1H ,7HDR= ,F10.6,/1H ,7HTHETA= ,F10.6)
160      GO TO 240
C      ANNULAR
161      235 BR=AR/(3.14159*DMEAN)
162      DOO=DMEAN+BR
163      DI=DMEAN-BR
164      THETA=P1**1.75*AR*BR**0.75*EXP(T1/300.0)/WA
165      WRITE(6,927) PHI,UR,AR,BR,DOO,DI,THETA
166      927 FORMAT(1H0,7HPHI= ,F10.6,/1H ,7HUR= ,F10.6,/1H ,7HAR= ,
1      1 F10.6,/1H ,7HBR= ,F10.6,/1H ,7HDO= ,F10.6,/1H ,7HDI= ,
2      2 F10.6,/1H ,7HTHETA= ,F10.6)
167      IF (ITYPE.LE.2) GO TO 240
C      CANNULAR
168      DMTA=1.1*DOO-DI
169      DMTB=DOO+DI
170      DMT=DMTA/DMTB
171      IF (DMT.GE.1.0) DMT=1.0
172      MTMAX=3.14159/ARSIN(DMT)+0.5
173      MT=MTMAX
174      IAA=0
175      IA=1
176      243 CONTINUE
177      XMT=MT
178      DLMAXA=0.5*(DOO-DI)*0.95
179      DLMAXB=(SIN(3.14159/XMT)-0.025)/(1+SIN(3.14159/XMT))*DOO
180      DLMAX=AMIN1(DLMAXA,DLMAXB)
181      WA=WAA/XMT
182      WF=WFF/XMT
183      AR=ARR/XMT
184      WRITE(6,929) MT,WA,WF,DLMAX,AR
185      929 FORMAT(1H0,7HMT= ,13,/1H ,7HWA1= ,F10.6,/1H ,7HWF1= ,F10.6,
1      1 /1H ,7HDLMAX= ,F10.6,/1H ,7HAR1= ,F10.6)
C
186      240 CONTINUE
C
C      D) ESTIMATE COOLING AIR REW. AND DETERMINE AIR FLOW PROP.
C
C      REQUIRED SUBROUTINES
C      AFRDET(T1,T2,EC,FHU,AFR,ILL)

```



```

C      REQUIRED INPUT DATA
C      T1,EC,FHU,WA,WF,PRR
187    WRITE(6,931)
188    931 FORMAT(1H0,/1H ,28HD) ESTIMATE COOLING AIR REQ./1H ,2X,
      1 27HAND DETERMINE AIR FLOW PROP)
C      COOLING AIR RATIO
189    IF (IUSE.EQ.2) GO TO 10
190    CAR=(-3.0*PRR**2+213.0*PRR+568.0)/98.0
191    GO TO 20
192    10 CAR=(-99.0*PRR**2+6406.0*PRR+30040.0)/4160.0
193    20 WAC=CAR*WA/100.0
C      PRIMARY ZONE AIR
194    AFRP=12.0
195    WAP=AFRP*WF
C      SECONDARY ZONE AIR
196    TS=1873.0
197    CALL AFRDET(T1,TS,EC,FHU,AFRMAX,ILL)
198    IF (ILL.EQ.0) GO TO 300
199    WRITE(6,993)
200    993 FORMAT(1H0,19HERROR IN SEC AFRDET)
201    GO TO 1000
202    300 AFRS=25.0
203    IF (AFRMAX.LT.AFRS) AFRS=AFRMAX
204    WAS=AFRS*WF-WAP
C      DILUTION ZONE AIR
205    WAD=WA-(WAP+WAS)
206    WRITE(6,930) WAC,CAR,WAP,AFRP,WAS,AFRS,WAD,AFR
207    930 FORMAT(1H0,7HWAC= ,F10.6,10X,7HCAR= ,F10.6,/1H0,7HWAP= ,
      1 F10.6,10X,7HAFRP= ,F10.6,/1H ,7HWAS= ,F10.6,10X,7HAFRS= ,
      2 F10.6,/1H ,7HWAD= ,F10.6,10X,7HAFR= ,F10.6)
C
C      E) ESTIMATE LINER AREA
C
C      REQUIRED DATA
C      AFRP,WA,WF,TRR,PHI,AR,WAP,WAS,WAD,WAC
C      TRR MUST LESS THAN 4.0
208    WRITE(6,2941)
209    2941 FORMAT(1H0,/1H ,22HE) ESTIMATE LINER AREA)
C
210    ASR=WAP/WA
211    418 ASRMAX=3.2/UR**0.9
212    ASR=AMIN1(WAP/WA,ASRMAX)
213    419 CONTINUE
C
214    II=0
215    ISS=0
216    420 CONTINUE
C      ALR
217    ALR1=0.35*ASR+0.5
218    ALR2=0.35*ASR+0.56
219    ALR3=0.35*ASR+0.6
220    ALR4=0.21*ASR+0.63
221    ALR=ALR1*(TRR-2.0)*(THK-3.0)*(TRR-4.0)/(-6.0)
      1 +ALR2*(TRR-1.0)*(TRR-3.0)*(TRR-4.0)/2.0
      2 +ALR3*(TRR-1.0)*(TRR-2.0)*(TRR-4.0)/(-2.0)

```

```

      3 +ALR4*(TRR-1.0)*(TRR-2.0)*(TRR-3.0)/6.0
C      AHR
222     PHH=PHI
223     IF (PHH.LT.5.7) GO TO 415
224     IF (PHH.GT.40.0) PHH=40.0
225     AHR1=0.2306442E-06*PHH**5-0.2918759E-04*PHH**4+0.1372759E-02*PHH
1     **3-0.3140063E-01*PHH**2+0.4707581*PHH-0.8568183
226     AHR2=0.1459184E-06*PHH**5-0.2192943E-04*PHH**4+0.1259893E-02*PHH
1     **3-0.3603336E-01*PHH**2+0.5932135*PHH-0.1834511E01
227     IF (PHH.LT.9.2) GO TO 410
228     AHR3=0.2415771E-06*PHH**5-0.3859481E-04*PHH**4+0.2430191E-02*PHH
1     **3-0.768793E-01*PHH**2+0.1282301E01*PHH-0.640977E01
229     IF (PHH.LT.12.0) GO TO 400
230     AHR4=-0.3719251E-06*PHH**5+0.4055015E-04*PHH**4-0.1425299E-02*PHH
1     **3+0.9300721E-02*PHH**2+0.4555431*PHH-0.4489397E01
231     AHR=AHR1*(TRR-2.0)*(TRR-3.0)*(TRR-4.0)/(-6.0)
1     +AHR2*(TRR-1.0)*(TRR-3.0)*(TRR-4.0)/2.0
2     +AHR3*(TRR-1.0)*(TRR-2.0)*(TRR-4.0)/(-2.0)
3     +AHR4*(TRR-1.0)*(TRR-2.0)*(TRR-3.0)/2.0
232     GO TO 405
233     400 IF (TRR.LE.3.0) GO TO 402
234     WRITE(6,994)
235     402 AHR=AHR1*(TRR-2.0)*(TRR-3.0)/2.0
1     +AHR2*(TRR-1.0)*(TRR-3.0)/(-1.0)
2     +AHR3*(TRR-1.0)*(TRR-2.0)/2.0
236     GO TO 405
237     410 IF (TRR.GT.3.0) GO TO 415
238     IF (TRR.LE.2.0) GO TO 412
239     WRITE(6,994)
240     412 AHR=AHR1*(TRR-2.0)/(-1.0)+AHR2*(TRR-1.0)/(1.0)
241     GO TO 405
242     415 WRITE(6,994)
243     994 FORMAT(1H0,12HERROR IN AHR)
244     GO TO 1000
245     405 CONTINUE
246     AHR=1.0/AHR
C      LINER AREA
247     AL=ALR*AR
248     AH=AHK*AR
249     AS=ASR*AH
250     DL=SQRT(4.0*AL/3.14159)
251     IF (ITYPE.LE.2) GO TO 445
252     IF (DL.LE.DLMAX) GO TO 422
253     DL=DLMAX
254     AL=0.25*3.14159*DL*DL
255     ALL(IA)=AL*XMT
256     IF (IAA.EQ.1A) GO TO 427
257     IF (IA.LT.2) GO TO 421
258     IF (ALL(IA).LE.ALL(IA-1)) GO TO 423
259     421 IA=IA+1
260     MT=MTMAX+IA-1
261     IF (IA.GE.10) GO TO 1000
262     GO TO 243
263     423 IAA=IA-1
264     IA=IAA

```

```

265      MT=MTMAX+1A-1
266      GO TO 243
267  427 CONTINUE
268      ALRA=AL/AK
269      WRITE(6,949) ALR,ALRA
270  949 FORMAT(1H0,17HERROR DL.GT.DLMAX,/1H ,7HALR=      ,F10.6,/1H ,
      1 7HALKA=      ,F10.6)
271  422 CONTINUE
C      SWIRLER
272  424 DSO=SWRT(4.0*AS/(0.407*3.14159))
273      IS=0
274      IF (ISS.EQ.1) GO TO 425
275      IF (DSO.GE.0.25*DL.AND.DSO.LE.0.6*DL) IS=1
276      IF (DSO.LT.0.25*DL) DSO=0.251*DL
277      IF (DSO.GT.0.6*DL) DSO=0.599*DL
278  425 CONTINUE
279      DSI=0.65*DSO
280      DSB=SWRT(0.58*DSO*DSO)
281      AS=0.25*3.14159*(DSO*DSO-DSB*DSB)
282      ASK=AS/AH
283      IF (ISS.EQ.1) GO TO 430
284      IF (ASK.LE.ASKMAX) GO TO 435
285      ASK=ASKMAX
286      ISS=1
287  435 IF (IS.EQ.1) GO TO 440
288      II=II+1
289      IF (IVAP-1) 1939,1941,1941
290  1939 WRITE(6,1940) II,ASK,DL,DSO
291  1940 FORMAT(1H0,3HII=,I3,10X,4HASR=,F12.6,10X,3HDL=,F12.6,10X,4HDSO=,
      1 F12.6)
292      GO TO 1943
293  1941 WRITE(6,1942) II,DL
294  1942 FORMAT(1H0,3HII=,I3,10X,3HDL=,F12.6)
295  1943 IF (II.LT.10) GO TO 420
296      WRITE(6,997)
297      GO TO 1000
298  430 WRITE(6,995)
299  995 FORMAT(1H0,19HERROR DSO.LT.0.25DL)
300  440 CONTINUE
301      IF (IVAP-1) 939,941,941
302  939 WRITE(6,940) AS,ASK,AH,AK,AL,ALR,DL,DSO,DSI,DSB,PHH
303  940 FORMAT(1H0,7HAS=      ,F10.6,10X,7HASR=      ,F10.6,/1H ,7HAH=      ,
      1 F10.6,10X,7HAHR=      ,F10.6,/1H ,7HAL=      ,F10.6,10X,7HALR=      ,
      2 F10.6,/1H ,7HDL=      ,F10.6,/1H ,7HDSO=      ,F10.6,/1H ,7HDSI=      ,
      3 F10.6,/1H ,7HDSB=      ,F10.6,/1H ,7HPHH=      ,F10.6)
304      GO TO 450
305  941 WRITE(6,942) AH,AK,AL,ALK,DL,PHH
306  942 FORMAT(1H0,7HAH=      ,F10.6,10X,7HAHR=      ,F10.6,/1H ,7HAL=      ,F10.
      1 6,10X,7HALR=      ,F10.6,/1H ,7HDL=      ,F10.6,/1H ,7HPHH=      ,F10.6)
307      GO TO 450
C      ANNULAR
308  445 CONTINUE
309      DLMEAN=SWRT(0.25*((DOO*DOO+DI*DI)+SQRT((DOO*DOO+DI*DI)**2-4.0*AL/
      1 3.14159*(DOO*DOO-DI*DI))))
310      BL=AL/(3.14159*DLMEAN)

```

```

311      DLO=DLMEAN+BL
312      DLI=DLMEAN-BL
313      DSO=0.7*BL
314      MSMAX=3.14159*DLMEAN/(1.37*DSO)
315      MSMIN=2*MSMAX/3
316      MS=MSMAX
317      465 XMS=MS
318          AS1=AS/XMS
319          DSO=SQRT(4.0*AS1/(0.407*3.14159))
320          IF (DSO.GE.0.4*BL) GO TO 455
321          IF (MS.LE.MSMIN) GO TO 460
322          MS=MS-1
323          GO TO 465
324      455 IF (DSO.LE.0.7*BL) GO TO 470
325          DSO=0.7*BL
326      460 IF (MS.LE.MSMIN) DSO=0.401*BL
327          DSI=0.65*DSO
328          DSB=SQRT(0.58*DSO*DSO)
329          AS1=0.25*3.14159*(DSO**2-DSB**2)
330          XMS=MS
331          AS=XMS*AS1
332          ISS=ISS+1
333          ASR=AS/AH
334          WRITE(6,1910) ISS
335      1910 FORMAT(1H,4HISS=,I3)
336          IF (IVAP=1) 1902,1904,1904
337      1902 WRITE(6,1900) MS,ASR,BL,DSO,DLI,DLO,DLMEAN
338      1900 FORMAT(1H0,7HMS=,I3,17X,7HASR=,F10.6,10X,7HBL=,F10.6,
1 10X,7HDSO=,F10.6,/1H,7HDLI=,F10.6,10X,7HDLO=,F10.6,10X,
2 7HDLMEAN=,F10.6)
339          GO TO 1906
340      1904 WRITE(6,1905) BL,DLI,DLO,DLMEAN
341      1905 FORMAT(1H0,7HBL=,F10.6,/1H,7HDLI=,F10.6,10X,7HDLO=
1 ,F10.6,7HDLMEAN=,F10.6)
342      1906 IF (ASR.LE.ASRMAX.AND.ISS.LT.10) GO TO 420
343          WRITE(6,997)
344      997 FORMAT(1H0,12HERROR IN ASR)
345          GO TO 1000
C
346      470 DSI=0.7*DSO
347          DSB=SQRT(0.608*DSO**2)
348          AS1=0.25*3.14159*(DSO**2-DSB**2)
349          AS=XMS*AS1
350          IF (IVAP.LT.1) GO TO 946
351          CALL VAPTOP(WAP,WFP,P1,T1,AFR,DLO,DLI,XN,XL,SLT,SN1,UAI,WACI,
1 WAI,WFI,TP,EPSILN,ICOND,IXL)
352          GO TO 1448
353      946 WRITE(6,947) MS
354      947 FORMAT(1H0,7HMS=,I3)
355          WRITE(6,943) AS,ASR,AH,AHR,AL,ALR,BL,DLO,DLI,DLMEAN,DSO,DSI,DSB,PHH
356      943 FORMAT(1H0,7HAS=,F10.6,10X,7HASR=,F10.6,/1H,7HAH=,
1 F10.6,10X,7HAHR=,F10.6,/1H,7HAL=,F10.6,10X,7HALR=,
2 F10.6,/1H,7HBL=,F10.6,/1H,7HDLO=,F10.6,/1H,7HDLI=,
3 F10.6,/1H,7HDLMEAN=,F10.6,/1H,7HDSO=,F10.6,/1H,7HDSI=,
4 F10.6,/1H,7HDSB=,F10.6,/1H,7HPPH=,F10.6)

```

```

357      GO TO 450
C
358      1448 WRITE(6,449) AH,AHR,AL,ALR,BL,DLO,DLI,DLMEAN,PHH,XN,XL,
          1 SLT,SNL,UAI,WACI,WAI,WFI,TP,EPSILN,IXL
359      449 FORMAT(1H0,7HAH= ,F10.6,10X,7HAHR= ,F10.6,/1H ,
          1 7HAL= ,F10.6,10X,7HALR= ,F10.6/1H ,7HBL= ,
          2 F10.6,/1H ,7HDLO= ,F10.6,/1H ,7HDLI= ,F10.6,/1H ,
          3 7HDLMEAN=,F10.6,/1H ,7HPPH= ,F10.6,/1H0,7HXXN= ,
          4 F10.6/1H ,7HXL= ,F10.6,/1H ,7HSLT= ,F10.6/1H ,
          5 7HSNI= ,F10.6,/1H ,7HUAL= ,F10.6,/1H ,7HWACI= ,
          6 F10.6,/1H ,7HWAI= ,F10.6,/1H ,7HWFI= ,F10.6,/1H ,
          7 7HTP= ,F10.1,/1H ,7HEPSILN=,F10.6,/1H ,6HIXL= ,I3)
360      450 CONTINUE
C          LINER HOLE AREA
361      ALP=WAP/WA*AH
362      ALPH=ALP-AS
363      IF (ALPH.LT.0.0) ALPH=0.0
364      ALS=WAS/WA*AH
365      ALD=WAD/WA*AH
366      AHD=(1.0-WAC/WA)*ALD
367      DD=0.18*DL
368      IF (ITYPE.LE.2) DD=0.18*BL
369      ND=AHD/(0.25*3.14159*DD*DD)+0.5
370      XND=ND
371      DD=SQRT(AHD/(0.25*3.14159*XND))
C
372      WRITE(6,945) ALPH,ALS,ALD,AHD,DD,ND
373      945 FORMAT(1H0,7HALPH= ,F10.6,/1H ,7HALS= ,F10.6,/1H ,7HALD= ,
          1F10.6,/1H ,7HAHD= ,F10.6,/1H ,7HDD= ,F10.6,/1H ,7HND= ,I3)
C
C          F) DETERMINE LINER DIMENSION
C
C          REQUIRED DATA
C          WAP,P1,AL,DSO,EC,T1,FHU,DL,XLRMAX
374      WRITE(6,951)
375      951 FORMAT(1H0,/1H ,28MF) DETERMINE LINER DIMENSION)
C          XLP
376      XLAP=80.0
377      P1M=P1/1.033
378      VLP=WAP/(XLAP*P1M)
379      XLP=VLP/AL
380      IF (IVAP.EQ.1) GO TO 955
381      XLPSW=0.8*DSO
382      IF (XLP.LT.XLPSW) XLP=XLPSW
C          XLS
383      955 XLBS=(1.0-EC)/(1.0-0.95)*(0.9916409E-04*T1**5-0.2262029*T1**4
          1+0.2000623E03*T1**3-0.7805621E05*T1**2+0.1506610E08*T1
          2-0.7879778E09)
384      VLS=(3600.0*FHU*WF*EC)/(XLBS*P1M**1.3)
385      XLSB=VLS/AL
386      XLSM=0.6*DL
387      IF (ITYPE.LE.2) XLSM=0.6*BL
388      XLS=XLSB+XLSM
389      XLD=4.78*DL/PHI**0.9/DET**0.8
390      IF (ITYPE.LE.2) XLD=4.78*BL/PHI**0.9/DET**0.8

```

```

391      XLL=XLP+XLS+XLD
392      XLLT=TMIN*UR/1000.0
393      IF (XLL.LT.XLLT) XLL=XLLT
394      IF (XLL.LE.XLRMAX) GO TO 500
395      WRITE(6,996)
396 996  FORMAT(1H0,19HERROR XLL.GT.XLRMAX)
397      XLL=XLRMAX
398 500  CONTINUE
399      XLD=XLL-XLP-XLS
400      VL=AL*XLL
401      WRITE(6,950) XLP,XLSB,XLSM,XLS,XLD,XLL,VL
402 950  FORMAT(1H0,7HXLP= ,F10.6,/1H ,7HXLBS= ,F10.6,/1H ,7HXLSM= ,
      1F10.6,/1H ,7HXLS= ,F10.6,/1H ,7HXLD= ,F10.6,/1H ,7HXLL= ,
      2F10.6,/1H ,7HVL= ,F10.6)

C
C      G) CALCULATE CHECK PARAMETER
C
C      REQUIRED DATA
C      XLL,UR,WF,FHU,EC,VL,P1,FHU
403      WRITE(6,961)
404 961  FORMAT(1H0,/1H ,28HG) CALCULATE CHECK PARAMETER)
405      P1M=P1/1.033
406      TAU=XLL/UR*1000.0
407      XLB=(3600.0*WF*FHU*EC)/(VL*P1M)
408      XLC=(3600.0*WF*FHU*EC)/(AL*P1M)
409      A=WF*UR/(AL*XLL)
410      B=A/P1M
411      WRITE(6,960) TAU,XLB,XLC,A,B
412 960  FORMAT(1H0,7HTAU= ,F7.3,/1H ,7HXLB= ,E15.7,/1H ,7HXLC= ,
      1E15.7,/1H ,7HA= ,E15.7,/1H ,7HB= ,E15.7)
413      RLD=XLD/DL
414      IF (ITYPE.LE.2) RLD=XLD/BL
415      DEL15=0.1105521E01*RLD**5-0.9569519E01*RLD**4+0.3283602E02*RLD**3
      1 -0.5438607E02*RLD**2+0.4517102E02*RLD-0.1195538E02
416      DEL20=0.3314734E01*RLD**5-0.2149877E02*RLD**4+0.5589976E02
      1 *RLD**3-0.7036542E02*RLD**2+0.4550162E02*RLD-0.8756209E01
417      DEL25=0.1149743E02*RLD**5-0.6393205E02*RLD**4+0.1411849E03
      1 *RLD**3-0.1507816E03*RLD**2+0.8137571E02*RLD-0.1414454E02
418      DEL30=0.1493561E02*RLD**5-0.7280043E02*RLD**4+0.1436275E03
      1 *RLD**3-0.1384443E03*RLD**2+0.6974101E02*RLD-0.1057480E02
419      DEL40=0.2387706E02*RLD**5-0.1047863E03*RLD**4+0.1878653E03
      1 *RLD**3-0.1669005E03*RLD**2+0.8077387E02*RLD-0.1241715E02
420      DEL50=0.2254824E02*RLD**5-0.9713285E02*RLD**4+0.1753690E03
      1 *RLD**3-0.1585098E03*RLD**2+0.8067923E02*RLD-0.1285332E02
421      DEL60=0.2767323E02*RLD**5-0.1185821E03*RLD**4+0.2126032E03
      1 *RLD**3-0.1900090E03*RLD**2+0.9343582E02*RLD-0.1454171E02
422      DEL15=1.0/DEL15
423      DEL20=1.0/DEL20
424      DEL25=1.0/DEL25
425      DEL30=1.0/DEL30
426      DEL40=1.0/DEL40
427      DEL50=1.0/DEL50
428      DEL60=1.0/DEL60
429      IF (PHI.LE.20.0) DEL=DEL15*(PHI-20.0)/(-5.0)+DEL20*(PHI-15.0)/5.0
430      IF (PHI.GT.20.0.AND.PHI.LE.25.0) DEL=DEL20*(PHI-25.0)/(-5.0)

```

```
1 +DEL25*(PHI-20.0)/5.0
431 IF (PHI.GT.25.0.AND.PHI.LE.30.0) DEL=DEL25*(PHI-30.0)/(-5.0)
1 +DEL30*(PHI-25.0)/5.0
432 IF (PHI.GT.30.0.AND.PHI.LE.40.0) DEL=DEL30*(PHI-40.0)/(-10.0)
1 +DEL40*(PHI-30.0)/10.0
433 IF (PHI.GT.40.0.AND.PHI.LE.50.0) DEL=DEL40*(PHI-50.0)/(-10.0)
1 +DEL50*(PHI-40.0)/10.0
434 IF (PHI.GT.50.0) DEL=DEL50*(PHI-60.0)/(-10.0)+DEL60*(PHI-50.0)
1 /10.0
435 IF (RLD.LE.0.3) DEL=30000.0
436 IF (PHI.LE.20.0.AND.RLD.LE.0.5) DEL=30000.0
437 IF (DEL.LE.0.0.OR.DEL.GE.0.35) DEL=30000.0
438 IF (DEL.GT.0.30) WRITE (6,969)
439 969 FORMAT(1H0,18HDELTA IS TOO LARGE)
440 WRITE (6,965) DEL
441 965 FORMAT(1H ,7HDELTA=,F6.2)
442 CALL PLCP(PRR,UR,1,IUSE)
443 CALL PLCP(PRR,TAU,2,IUSE)
444 CALL PLCD(PRR,XLB,IUSE)
445 1000 CONTINUE
446 1100 CONTINUE
447 STOP
448 END
```

```
1      SUBROUTINE DIMENS
2      COMMON /DD/A(31,7),B(31),NN(7)
3      COMMON /A1/TPX(7),TPY(6,7)/A2/ETAX(6),ETAY(6)
4      COMMON /A3/XLAM(5),YLAM(5)/A4/CPX(5),CPY(5)/A5/HLX(7),HLY(7)
5      DOUBLE PRECISION TPX,TPY,ETAX,ETAY,XLAM,YLAM,CPX,CPY,HLX,HLY
6      READ(5,1000) ((A(I,J),J=1,7),I=1,31)
7      1000 FORMAT(7F10.0)
8      READ(5,2000) (B(I),I=1,31)
9      2000 FORMAT(5F10.0)
10     READ(5,3000) (NN(J),J=1,7)
11     3000 FORMAT(7I5)
12     5000 FORMAT(5F10.0)
13     6000 FORMAT(6F10.0)
14     7000 FORMAT(7F10.0)
15     READ(5,7000) TPX
16     DO 100 I=1,6
17     READ(5,7000) (TPY(I,J),J=1,7)
18     100 CONTINUE
19     READ(5,6000) ETAX,ETAY
20     READ(5,5000) XLAM,YLAM,CPX,CPY
21     READ(5,7000) HLX,HLY
22     RETURN
23     END
```



```
1      SUBROUTINE AHIYOU(AN,T,Z)
2      COMMON /DD/A(31,7),B(31),NN(7)
3      IF (AN.GT.150.0) GO TO 100
4      DO 10 J=1,7
5      CN=NN(J)
6      IF (AN-CN) 20,30,30
7      30 J1=J
8      J2=J+1
9      10 CONTINUE
10     20 DELN=NN(J2)-NN(J1)
11     BN=NN(J1)
12     Y=(AN-BN)/DELN
13     I=T/100.0+1.0
14     AI=I-1
15     X=T/100.0-AI
16     C=A(I,J1)+(A(I+1,J1)-A(I,J1))*X
17     D=A(I,J2)+(A(I+1,J2)-A(I,J2))*X
18     Z=C-(C-D)*Y
19     GO TO 200
20     100 I=T/100.0+1.0
21     AI=I-1
22     X=T/100.0-AI
23     Z=B(I)+(B(I+1)-B(I))*X
24     200 RETURN
25     END
```

```
1      SUBROUTINE AFRDET(T1K,T2K,EC,FHU,AFR,ILL)
C      DETERMINE AIR - FUEL RATIO
C      FROM T1K,T2K,EC(COMBUSTION EFFICIENCY) AND FHU (T=DEG.K)
C      ILL=0      NORMAL
C      ILL=30000  ABNORMAL
2      T1=T1K-273.15
3      T2=T2K-273.15
4      AFR=10000.0
5      CALL AHIYOU (AFR,T1,H1)
6      CALL AHIYOU (AFR,T2,H2)
7      H2E=H2
8      I=1
9      100 AFR=(EC*FHU-H2)/(H2-H1)
10     IF (AFR.LE.0.0) GO TO 190
11     CALL AHIYOU (AFR,T2,H2)
12     IF (ABS(H2-H2E).LT.1.0E-04) GO TO 110
13     H2E=H2
14     I=I+1
15     IF (I.GT.100) GO TO 190
16     GO TO 100
17     190 ILL=30000
18     RETURN
19     110 ILL=0
20     RETURN
21     END
```

```

1      SUBROUTINE VAPTYP(WAP,WF,P1,T1,AFR,DLO,DLI,RN,XL,SLT,SN1,UAI,WAC
1      ,WAI,WFI,TP,EPSILN,IXL)
      *** DESIGN OF FUEL VAPORIZING TUBES ***

      * NOMENCLATURE
      AFR      = TOTAL AIR/FUEL RATIO
      BL       = (DLO-DLI)/2
      CDO      = COEFF. IN ISSHIKI'S EQ.
      DO       = OUTER DIA. OF THE TUBE (M)
      DI       = INNER DIA. OF THE TUBE (M)
      DLO,DLI  = OUTER,INNER DIA. OF THE LINER (M)
      EPSILN   = EMISSIVITY OF THE FLAME
      ETAC     = COMP. EFFICIENCY
      GAMMA    = SPECIFIC WEIGHT OF BURNED GAS
      GAMMAA   = SPECIFIC WEIGHT OF AIR (KG/M**3)
      GAMMAL   = SPECIFIC WEIGHT OF FUEL (KG/M**3)
      IXL      = NUL INDICATES UNSUFFICIENT CONDITION OF FUEL VAPORIZATION
                  IN THE TUBE
      P1       = COMBUSTOR INLET PRESS. (KG/CM*CM)
      P0       = INLET AIR PRESS. (ATA)
      QC       = CONVECTIVE HEAT FLUX (W/M*M)
      QR       = RADIATIVE HEAT FLUX (W/M*M)
      RN       = NUMBER OF TUBES
      SIGMA    = SURFACE TENSION OF FUEL (KG/M)
      SIGMR    = STEFAN-BOLTZMANN CONST. (W/M*M*K**4)
      SLO      = OPTICAL LENGTH (M)
      SLT      = PITCH LENGTH OF TUBES (M)
      SN1      = A/F RATIO IN A TUBE
      SNP      = F/A RATIO IN PRY. ZONE
      ST0      = TUBE TEMP. (C)
      STF1     = INITIAL TEMP. OF FUEL (C)
      STS      = SATURATION TEMP. OF FUEL (C)
      T1       = COMBUSTOR INLET TEMP. (K)
      T0       = INLET AIR TEMP.
      TP       = TEMP. IN PRY. ZONE (C)
      WAC      = DILUTION AIR IN PRY. ZONE FOR ATUBE (KG/S)
      WAI      = AIR FLOW RATE IN THE TUBE (KG/S)
      WAP      = AIR FLOW RATE IN PRY. ZONE (KG/S)
      WF       = TOTAL FUEL FLOW RATE (KG/S)
      WFI      = FUEL FLOW RATE IN THE TUBE (KG/S)
      X0       = INITIAL DROPLET DIA. (MM)
      XFBAR    = DROPLET MEAN DIA. (MICRON)
      XK       = ADIABATIC COEFF.
      XL       = TUBE LENGTH (M)
      XNU      = NUSSELT NO.

      * REQUIRED DATA
      WAP,WF,P1,T1,AFR,DLO,DLI
      * INITIAL DATA
      STS=232.0
      STF1=27.0
      GAMMAL=800.0
      SNP=WAP/WF
      IXL=0

```

```

7      IAIRB=0
8      ST0=1000.0
9      SNI=4.0
10     BL=(DL0-DLI)/2.0
11     C * DETERMINATION OF TUBE SIZE
12     D0=0.016
13     DI=D0-0.002
14     C
15     IF (ICOND.NE.0) GO TO 400
16     JNS=10
17     JNE=50
18     GO TO 300
19     400 JNS=ICOND
20     JNE=ICOND
21     300 CONTINUE
22     DO 500 JN=JNS,JNE
23     RN=JN
24     DO 600 JN1=2,12
25     SNI=JN1
26     C * FLOW RATE IN THE TUBE
27     WFI=WF/RN
28     WAI=SNI*WFI
29     C * INLET AIR TEMP. AND AIR VEL. IN A TUBE
30     ETAC=0.85
31     T0=298.0
32     P0=1.0
33     XK=1.4
34     T1=T0*((P1/P0)**((XK-1.0)/XK)-1.0)/ETAC+T0
35     GAMMAA=341.8*P1/T1
36     UAI=4.0*WAI/(GAMMAA*3.14159*DI*DI)
37     C * RADIATION H.T.
38     SIGMR=5.7E-08
39     CALL SUBTP(SNP,P1,TP)
40     TP=TP-700.0
41     IF (TP.GT.400.0) GO TO 700
42     WRITE(6,710) TP
43     710 FORMAT(1H,13HTP IS TOO LOW,5X,3HTP=,F5.1)
44     GO TO 100
45     700 SLT=3.14159*(DL0+DLI)/(2.0*RN)
46     IF (SLT.LT.2.0*D0.OR.SLT.GT.BL) GO TO 600
47     SLO=3.5*SLT
48     EPSILN=1.0-EXP(-3.65*10.0**4*SQRT(SLO/AFR)*P1*TP**(-1.5))
49     QR=EPSILN*SIGMR*TP**4
50     C * CONVECTIVE H.T.
51     STP=TP-273.2
52     IF (ST0.GT.STP) ST0=STP
53     ST=(ST0+STP)/2.0
54     GAMMA=273.2*P1*1.299/(273.2+ST)
55     CALL SUBETA(ST,ETA)
56     XNU=ETA*9.8/GAMMA
57     CALL SUBLAM(ST,XLAMDA)
58     CALL SUBCP(ST,CP)
59     A=XLAMDA/(CP*GAMMA)
60     PR=XNU/A
61     U=2.0*WAI/(GAMMAA*BL*(DL0+DLI)*3.1416)

```

```

56      RE=BL*U/XNU
57      CALL SUBRE(RE,C,XM)
58      ARE=C*RE**XM
59      BPR=(PR/0.72)**0.31
60      ANUSLT=ARE*BPR
61      QC=ANUSLT*XLAMDA/D0*(STP-ST0)*0.5
C  * TOTAL H.T.
62      Q=QR+QC
C  * REQUIRED ENERGY TO VAPORIZE FUEL
63      STL=(STS+STF1)/2.0
64      CALL SUBHL(STS,HL)
65      CPFL=3.767*STL+1884.0
66      RQ=WF*(CPFL*(STS-STF1)+HL)
C  * NECESSARY TUBE LENGTH
67      XL=RQ/(RN*3.14159*D0*W)
68      IF (XL.GT.0.0.AND.XL.LT.3.0*BL) IXL=1
C  * AIR FROM AN AIR PORT
69      WAC=(SNP-SN1)*WF/RN
C  * AIR ATOMIZATION
70      CD0=0.48
71      X0=0.001
72      SIGMA=2.3E-03
73      RHOA=GAMMAA/9.8
74      WEO=RHOA*UAI*UAI*X0/(2.0*SIGMA)
75      CALL SUBXF(CD0,X0,WEO,GAMMAA,GAMMAL,SN1,XFBAR)
76      XFBAR=XFBAR*10.0**6
77      IF (XFBAR.LE.100.0) IAIRB=1
78      IF ((IXL+IAIRB).GT.0) GO TO 100
79      600 CONTINUE
80      500 CONTINUE
81      WRITE(6,5000)
82      5000 FORMAT(1H ,33HTHE CONDITIONS ARE NOT SATISFIED.)
83      100 RETURN
84      END

```

```
1      SUBROUTINE SUBTP(SN,P,T)
2      COMMON /A1/X(7),Z(6,7)
3      DOUBLE PRECISION X,Y,DP,DT,A,B,C,D,SA2,SA3,SA4,Z
4      DIMENSION SA2(7),SA3(7),SA4(7),Y(7)
5      N=SN
6      N=N-6
7      M=N-5
8      IF (SN.LE.12.0.OR.SN.GE.7.0) GO TO 200
9      WRITE(6,2000)
10     2000 FORMAT(1H ,18H$N.GT.12 .OR. LT.7)
11     RETURN
12     200 XN=AINT(SN)
13     DO 400 J=1,7
14     Y(J)=Z(N,J)+(Z(M,J)-Z(N,J))*(SN-XN)
15     400 CONTINUE
16     DP=P
17     CALL BSTAPD(X,Y,7,7,1.0D-04,DP,DT,A,B,C,D,SA2,SA3,SA4,K,ILL)
18     T=DT*100.0
19     IF (ILL.EQ.0) GO TO 300
20     WRITE(6,3000) ILL
21     3000 FORMAT(1H ,11H$ERROR SUBTP,5X,4HILL=,I8)
22     300 RETURN
23     END
```

```
1      SUBROUTINE SUBETA(T,ETA)
2      COMMON /A2/X(6),Y(6)
3      DOUBLE PRECISION X,Y,DT,DETA,A,B,C,D,SA2,SA3,SA4
4      DIMENSION SA2(6),SA3(6),SA4(6)
5      DT=T/1000.0
6      CALL BSTAPD(X,Y,6,6,1.0D-05,DT,DETA,A,B,C,D,SA2,SA3,SA4,K,ILL)
7      ETA=DETA*10.0**(-6)
8      IF (ILL.EQ.0) GO TO 100
9      WRITE(6,2000) ILL
10     2000 FORMAT(1H ,12HERROR SUBETA,5X,4HILL=,I8)
11     100 RETURN
12     END
```

```
1      SUBROUTINE SUBLAM(T,XL)
2      COMMON /A3/X(5),Y(5)
3      DOUBLE PRECISION X,Y,DT,DLAM,A,B,C,D,SA2,SA3,SA4
4      DIMENSION SA2(5),SA3(5),SA4(5)
5      DT=T/1000.0
6      CALL BSTAPD(X,Y,5,5,1.0D-04,DT,DLAM,A,B,C,D,SA2,SA3,SA4,K,ILL)
7      XL=DLAM*0.1
8      IF (ILL.EQ.0) GO TO 100
9      WRITE(6,2000) ILL
10     2000 FORMAT(1H ,12HERROR SUBLAM,5X,4HILL=,18)
11     100 RETURN
12     END
```



```
1      SUBROUTINE SUBCP(T,CP)
2      COMMON /A4/X(5),Y(5)
3      DOUBLE PRECISION X,Y,DT,DCP,A,B,C,D,SA2,SA3,SA4
4      DIMENSION SA2(5),SA3(5),SA4(5)
5      DT=T/1000.0
6      CALL BSTAPD(X,Y,5,5,1.0D-03,DT,DCP,A,B,C,D,SA2,SA3,SA4,K,ILL)
7      CP=DCP*1000.0
8      IF (ILL.EQ.0) GO TO 100
9      WRITE(6,2000) ILL
10     2000 FORMAT(1H ,11HERROR SUBCP,5X,4HILL=,18)
11     100 RETURN
12     END
```

```
1      SUBROUTINE SUBRE(RE,C,X)
2      IF (RE.GE.0.4) GO TO 100
3      WRITE(6,1000)
4      1000 FORMAT(1H ,9HRE.LT.0.4)
5      GO TO 700
6      100 IF (RE.GE.4.0) GO TO 200
7      C=0.891
8      X=0.38
9      RETURN
10     200 IF (RE.GE.40.0) GO TO 300
11     C=0.821
12     X=0.385
13     RETURN
14     300 IF (RE.GE.4000.0) GO TO 400
15     C=0.615
16     X=0.466
17     RETURN
18     400 IF (RE.GE.40000.0) GO TO 500
19     C=0.174
20     X=0.618
21     RETURN
22     500 IF (RE.GT.400000.0) GO TO 600
23     C=0.0239
24     X=0.805
25     RETURN
26     600 WRITE(6,2000)
27     2000 FORMAT(1H ,12HRE.GT.400000)
28     700 RETURN
29     END
```

```
1      SUBROUTINE SUBHL(T,HL)
2      COMMON /A5/X(7),Y(7)
3      DOUBLE PRECISION X,Y,DT,DH,A,B,C,D,SA2,SA3,SA4
4      DIMENSION SA2(7),SA3(7),SA4(7)
5      DT=T/100.0
6      CALL BSTAPD(X,Y,7,7,1.0D-03,DT,DH,A,B,C,D,SA2,SA3,SA4,K,ILL)
7      HL=DH*10.0**5
8      IF (ILL.EQ.0) GO TO 100
9      WRITE(6,2000) ILL
10     2000 FORMAT(1H ,11HERROR SUBHL,5X,4HILL=,I8)
11     100 RETURN
12     END
```

```
1      SUBROUTINE SUBXF(CD0,X0,WEO,GA,GL,SN,XF)
2      A=1.6/WEO**0.25
3      B=1.5*SQRT(GA/GL)*(1.0+1.0/SN)*CD0*WEO**0.125
4      Y1=1.0
5      N=0
6      500 X1=Y1**4*X0
7          XF=X1
8          Y2=A+B*0.25*ALOG(X0/X1)
9          IF (ABS((Y1-Y2)/Y2).LE.0.001) GO TO 600
10         Y1=Y2
11         N=N+1
12         IF (N.LE.80) GO TO 500
13         WRITE(6,1000)
14 1000 FORMAT(1H ,11HERROR SUBXF)
15         600 RETURN
16         END
```

```

1      SUBROUTINE PLCP(XX,YY,IT,IU)
C      PLOT UR(IT=1)
C      AND TAU(IT=2)
C      XX=PRR
C      YY=UR (IT=1)
C      YY=TAU (IT=2)
2      DIMENSION A(51)
3      DATA B,C,D,E,F/1H ,1H1,1H*,1H-,1HX/
4      IF (IT.EQ.2) GO TO 710
5      WRITE(6,890)
6      890 FORMAT(1H1,/,1H ,4X,3HPRR,3X,20X,2HUR,/,1H ,10X,1H0,8X,2H10,
18X,2H20,8X,2H30,8X,2H40,8X,2H50)
7      GO TO 715
8      710 WRITE(6,790)
9      790 FORMAT(1H1,/,1H ,4X,3HPRR,3X,20X,3HTAU,/,1H ,10X,1H0,8X,2H10,8X,
12H20,8X,2H30,8X,2H40,8X,2H50)
10     715 CONTINUE
11     IXX=XX+1.5
12     IYY=YY+1.5
13     X=0.0
14     DX=1.0
15     DO 811 J=1,31
16     IF (IT.EQ.2) GO TO 720
17     IF (IU.EQ.2) GO TO 718
18     Y=0.5354004E-04*X**5-0.328738E-02*X**4+0.7052861E-01*X**3
1 -0.5127657*X**2-0.2566545E01*X+0.6171420E02
19     IF (X.GE.23.0) Y=14.0
20     GO TO 716
21     718 Y=40.0-1.5*(X-6.0)+0.048*(X-6.0)**2-1.8*10.0**(-4)*(X-6.0)**3
22     716 N=Y+1.5
23     IF (J.LE.7) N=41
24     GO TO 725
25     720 CONTINUE
26     IF (IU.EQ.2) GO TO 10
27     IF (X.GE.8.0) GO TO 20
28     Y=(X**2-18.0*X+208.0)/16.0
29     GO TO 30
30     20 Y=(9.0*X+64.0)/17.0
31     GO TO 30
32     10 IF (X.GE.8.0) GO TO 40
33     Y=(7.0*X**2-113.0*X+876.0)/60.0
34     GO TO 30
35     40 Y=(3.0*X+88.0)/16.0
36     30 N=Y+1.5
37     725 CONTINUE
38     IF (N.GT.51) N=51
39     IF (N.LT.1) N=1
40     DO 810 I=1,51
41     810 A(I)=B
42     A(1)=C
43     A(11)=C
44     A(21)=C
45     A(31)=C
46     A(41)=C
47     A(51)=C

```

```
48      AJ=J+4
49      XAJ=AJ/5.0
50      XJ=(J+4)/5
51      IF ((XAJ-XJ).NE.0.0) GO TO 815
52      DO 805 I=2,51
53      805 A(I)=E
54      815 A(N)=D
55          IF (IT.EQ.1) A(11)=D
56          IF (IYY.GT.51.OR.IYY.LT.1) GO TO 830
57          IF (IXX.EQ.J) A(IYY)=F
58      830 CONTINUE
59          IF ((XAJ-XJ).EQ.0.0) GO TO 820
60          WRITE(6,891) A
61      891 FORMAT(1H ,10X,51A1)
62          GO TO 825
63      840 WRITE(6,895) X,A
64      895 FORMAT(1H ,F9.1,1X,51A1)
65      825 X=X+DX
66      811 CONTINUE
67      RETURN
68      END
```

```

1      SUBROUTINE PLCD(XX,YY,IU)
      C      PLOT XLB
      C      XX = PRR
      C      YY = XLB
      C      AY=XLB*1.0E-07
2      DIMENSION A(61)
3      DATA B,C,D,E,F/1H ,1H1,1H*,1H-,1HX/
      C
4      WRITE(6,900)
5      900 FORMAT(1H1,/,1H ,4X,3HPRR,3X,20X,2HLB,/,1H ,10X,1H0,9X,1H2,9X,
6      11H4,9X,1H6,9X,1H8,8X,2H10,8X,2H12,1X,4H*E07)
7      IXX=XX+1.5
8      IYY=YY*5.0E-07+1.5
9      X=0.0
      DX=1.0
      C
10     DO 111 J=1,31
11     IF (IU.EQ.2) GO TO 10
12     Y=(7.0*X**2-377.0*X+6080.0)/460.0
13     IF (X.LE.5.0) Y=9.5
14     GO TO 20
15     10 Y=(7.1*X**2-343.8*X+5279.2)/285.0
16     IF (X.LE.7.0) Y=11.5
17     20 N=Y*5.0+1.5
18     IF (N.GT.61) N=61
19     IF (N.LT.1) N=1
20     DO 110 I=1,61
21     110 A(I)=B
22     A(1)=C
23     A(11)=C
24     A(21)=C
25     A(31)=C
26     A(41)=C
27     A(51)=C
28     A(61)=C
29     X=J-1
30     AJ=J+4
31     XAJ=AJ/5.0
32     XJ=(J+4)/5
33     IF ((XAJ-XJ).NE.0.0) GO TO 115
34     DO 105 I=2,61
35     105 A(I)=E
36     115 A(N)=D
      C
37     IF (IYY.GT.61.OR.IYY.LT.1) GO TO 130
38     IF (IXX.EQ.J) A(IYY)=F
39     130 CONTINUE
40     IF ((XAJ-XJ).EQ.0.0) GO TO 120
41     WRITE(6,910) A
42     910 FORMAT(1H ,10X,61A1)
43     GO TO 125
44     120 WRITE(6,950) X,A
45     950 FORMAT(1H ,F9.1,1X,61A1)
46     125 X=X+DX
47     111 CONTINUE
48     RETURN
49     END

```

航空宇宙技術研究所資料275号

昭和50年4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 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
