

JAERI-M
85-033

真空系の圧力応答解析コードPRACの開発
(臨界プラズマ試験装置設計報告・152)

1985年3月

堀江 知義・川崎 幸三・能代谷 彰二*・小泉 淳一**

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
刷 山田軽印刷所

真空系の圧力応答解析コードPRACの開発
(臨界プラズマ試験装置設計報告・152)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部
堀江知義・川崎幸三・能代谷彰二*・小泉淳一**

(1985年1月31日受理)

本報告では、核融合装置内の圧力応答の解析コードについて述べる。核融合装置は、多くの真空機器によって複雑な真空系を構成しているため、これらの排気系の設計および性能評価の際には、系内の任意の場所の圧力応答を知ることがしばしば要求される。そのためには理論解に基づく式だけでは不十分であり、差分法などによって数値的に解析するコードが必要である。

本解析コードPRAC (Pressure Responce Analysis Code) では、真空系内の各点における流量のつり合い式より得られる圧力の時間微分項を含む連立常微分方程式を数値的に解析し、各点の圧力応答を求める。粘性流および分子流を考慮するため、コンダクタンスには圧力依存があり、非定常非線形方程式となるが、この非線形性は時間増分内で線形として処理する。

本解析コードの妥当性を検証するため、例題を与えて解析したが、厳密解との良好な一致が見られた。さらに、実形状に近い複雑なモデルの解析を行ない、実測結果と比較したが、十分実用に耐え得る結果が得られた。

本解析コードは、真空機器の設計、評価を行なう上で、有力な手段になり得る。

* 外来研究員 (日本真空技術K.K.)

** 原子力データセンター

Development of the Vacuum System Pressure Response
Analysis Code PRAC

Tomoyoshi HORIE, Kouzou KAWASAKI, Shyoji NOSHIROYA and *Jun-ichi KOIZUMI**

Department of Large Tokamak Development
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 31, 1985)

In this report, we show the method and numerical results of the vacuum system pressure response analysis code. Since fusion apparatus is made up of many vacuum components, it is required to analyze pressure response at any points of the system when vacuum system is designed or evaluated. For that purpose evaluating by theoretical solution is insufficient. Numerical analysis procedure such as finite difference method is useful.

In the PRAC code (Pressure Response Analysis Code), pressure response is obtained solving derivative equations which is obtained from the equilibrium relation of throughputs and contain the time derivative of pressure. As it considers both molecular and viscous flows, the coefficients of the equation depend on the pressure and the equations become non-linear. This non-linearity is treated as piece-wise linear within each time step.

Verification of the code is performed for the simple problems. The agreement between numerical and theoretical solutions is good. To compare with the measured results, complicated model of gas puffing system is analyzed. The agreement is well for practical use.

This code will be a useful analytical tool for designing and evaluating vacuum systems such as fusion apparatus.

Keywords: Vacuum System, Pressure Response Analysis, Transient Analysis,
Finite Difference Method, Molecular Flow, Viscous Flow,
Fusion Apparatus, JT-60 Gas Injection System, Vacuum Design,
Analytical Tool

* ULVAC Co.

** Nuclear Energy Data Center

目 次

1. はじめに	1
2. 圧力応答の解析方法	1
2.1 解析の基礎式	1
2.2 構成機器のモデル化	3
2.3 方程式の解法	10
3. プログラムの概要	13
3.1 基本事項	13
3.2 処理フロー	15
3.3 データ入力	17
4. 解析例	21
4.1 厳密解との比較	21
4.2 測定結果との比較	21
5. おわりに	32
参考文献	32

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Analysis method of Pressure response	1
2.1 Basic equations	1
2.2 Modeling of vacuum components	3
2.3 Solution procedure of equations	10
3. Description of the PRAC code	13
3.1 Remarks	13
3.2 Process of the PRAC	15
3.3 Structure of input data	17
4. Example analysis	21
4.1 Comparison between numerical and theoretical solutions	21
4.2 Comparison between numerical solution and experimental result	21
5. Conclusion	32
References	32

1. はじめに

核融合装置は、真空容器、真空ポンプ、それらをつなぐダクト、ゲートバルブ、バッフル、ガス注入弁などの数多くの真空機器によって、複雑な真空系を構成している。こうした装置の真空排気系の設計および性能評価の際には、非常に単純化したモデルを考え、到達圧力や排気時間などを公式に従って求めているのが現状である。しかし、その様な方法では、複雑な系内のある特定の部分の圧力過渡現象に伴う応答まで考慮することはできない。そのため、差分法などによって数値的に圧力応答を解析する解析コードが必要となる。こうした解析コードとしては、Sredniawski⁽¹⁾によって開発されたVSTSがあり、TFTRにおけるトリチウムガスの流入現象を解析し、設計の評価に役立てている。しかし、他の核融合装置をはじめとする真空装置において解析した例は、筆者らの知る限り見当たらない。

ガス注入弁から水素ガスを注入した際の圧力応答、真空ポンプが故障した際の排気系内の圧力変動、計測装置への圧力変動の影響などを知ることが、核融合装置の設計および運転、保守にとって、非常に重要なことである。上記の目的で、圧力応答解析コードPRAC (Pressure Responce Analysis Code)を開発した。本コードは非線形、非定常の連立微分方程式を解くものであるが、設計・評価用の解析ツールとしての使い易さを考慮してある。

第2章では、本コードで使用している解析方法、第3章ではコードの構成、第4章では妥当性を検証するために行なった解析例について述べる。

2. 圧力応答の解析方法

2.1 解析の基礎式

容積 V 、表面積 A の容器内の圧力変化は、容器からの流出量 Q と壁面からの放出ガス量によって決まる。すなわち、

$$V \frac{dp}{dt} = -Q + qA \quad (1)$$

ここに、 p は圧力、 t は時間、 q は容器壁面から単位時間、単位面積当りに放出するガス量であり、この(1)式を解くことにより、真空系の圧力応答が求まる。

一般に、真空系は数多くの構成機器すなわち、ダクト、ポンプ、ゲートバルブ、トラップ、ガスバフなどから成っているが、その簡単な例をFig. 2.1に示す。

1. はじめに

核融合装置は、真空容器、真空ポンプ、それらをつなぐダクト、ゲートバルブ、バッフル、ガス注入弁などの数多くの真空機器によって、複雑な真空系を構成している。こうした装置の真空排気系の設計および性能評価の際には、非常に単純化したモデルを考え、到達圧力や排気時間などを公式に従って求めているのが現状である。しかし、その様な方法では、複雑な系内のある特定の部分の圧力過渡現象に伴う応答まで考慮することはできない。そのため、差分法などによって数値的に圧力応答を解析する解析コードが必要となる。こうした解析コードとしては、Sredniawski⁽¹⁾によって開発されたVSTSがあり、TFTRにおけるトリチウムガスの流入現象を解析し、設計の評価に役立てている。しかし、他の核融合装置をはじめとする真空装置において解析した例は、筆者らの知る限り見当たらない。

ガス注入弁から水素ガスを注入した際の圧力応答、真空ポンプが故障した際の排気系内の圧力変動、計測装置への圧力変動の影響などを知ることが、核融合装置の設計および運転、保守にとって、非常に重要なことである。上記の目的で、圧力応答解析コードPRAC (Pressure Responce Analysis Code)を開発した。本コードは非線形、非定常の連立微分方程式を解くものであるが、設計・評価用の解析ツールとしての使い易さを考慮してある。

第2章では、本コードで使用している解析方法、第3章ではコードの構成、第4章では妥当性を検証するために行なった解析例について述べる。

2. 圧力応答の解析方法

2.1 解析の基礎式

容積V、表面積Aの容器内の圧力変化は、容器からの流出量Qと壁面からの放出ガス量によって決まる。すなわち、

$$V \frac{dp}{dt} = -Q + qA \quad (1)$$

ここに、pは圧力、tは時間、qは容器壁面から単位時間、単位面積当りに放出するガス量であり、この(1)式を解くことにより、真空系の圧力応答が求まる。

一般に、真空系は数多くの構成機器すなわち、ダクト、ポンプ、ゲートバルブ、トラップ、ガスパフなどから成っているが、その簡単な例をFig. 2.1に示す。

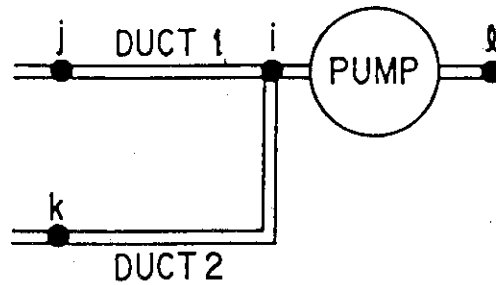


Fig. 2.1 Nodal basic model.

各構成機器の両端に節点を考え、この点上で圧力値を評価することにする。節点 i は DUCT 1, DUCT 2, PUMP の 3 つの構成機器で共有しているため、節点 i に(1)式を適用すると以下の様になる。

$$V_i \frac{dp_i}{dt} = -Q_i + qA_i \quad (2)$$

ここで、 V_i 、 A_i は、それぞれ DUCT 1, DUCT 2, PUMP の体積、および表面積の半分を足し合わせたもので、点 i の体積および、表面積とも言うべきものである。一方、 Q_i は DUCT 1 からの流量 Q_{ij} 、DUCT 2 からの流量 Q_{ik} 、PUMP の排気量 Q_{il} の和である。すなわち

$$Q_i = \sum_n Q_{in} = Q_{ij} + Q_{ik} + Q_{il} \quad (3)$$

である。

ダクトの流量 Q_{ij} 、 Q_{ik} は

$$Q_{ij} = Z \cdot C_{mij} (P_i - P_j) + f \cdot C_{vij} (P_i - P_j) \quad (4)$$

$$Q_{ik} = Z \cdot C_{mik} (P_i - P_k) + f \cdot C_{mik} (P_i - P_k) \quad (5)$$

C_m : 分子流のコンダクタンス

C_v : 粘性流のコンダクタンス

p : 分圧

P : 全圧 $\left(P = \sum_{g=1}^n p^{(g)} \right)$

Z, f : 係数 (後述)

ポンプの排気量 Q_{il} は、排気速度を S_{ij} として、

$$Q_{il} = S_{ij} P_i \quad (6)$$

と書き表わせる。

以上の(2)~(6)式は節点 i における関係式であったが、真空系の全節点に対して同様の式が成り立ち、マトリックス表示すれば、

$$\{\dot{P}\} = [K] \{P\} + \{F\} \quad (7)$$

の形の連立一階常微分方程式系が得られる。ここに・は時間微分を、{ }はベクトルを、[]はマトリックスを表わすものとする。マトリックス [K] は、コンダクタンスから成るマトリックスであり、圧力 p に依存するため、(7)式は非線形方程式となる。

2.2 構成機器のモデル化

2.2.1 ダクトモデル

コンダクタンスの値は圧力に対する依存性があるため、時間ステップを何回か繰り返すごとに、コンダクタンスを計算し直す必要がある。

(1) 粘性流のコンダクタンス (円管)

Poiseuille の式⁽²⁾より、粘性流のコンダクタンスは

$$C_v = \frac{\pi}{128} \frac{D^4}{\eta L} \bar{P} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (8)$$

D : 直径 [m]

L : 長さ [m]

η : 粘性係数

\bar{P} : 平均全圧

平均全圧は

$$\bar{P} = \frac{P_i + P_j}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (9)$$

P_i, P_j : 管の両端の全圧

粘性係数は Sutherland の式⁽³⁾より

$$\eta^{(g)} = \frac{KT^{3/2}}{C+T} \times 10^{-1} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (10)$$

T : 絶対温度

$\eta^{(g)}$: ガス g に対する η

C, K : 係数 (Table 2.1 参照)

各ガス成分ごとに $\eta^{(g)}$ を求めたら、混合ガスの合成

粘性係数 η は

$$\eta = \sum_{g=1}^n f^{(g)} \eta^{(g)} \quad (11)$$

$$f^{(g)} = \frac{\bar{p}^{(g)}}{\bar{P}} \quad : \text{ガス } g \text{ の成分比} \quad (12)$$

$\bar{p}^{(g)}$: ガス g の管内平均分圧

Table 2.1 Sutherland Coefficient ⁽³⁾

Substance	Temperature Range(°C)	Sutherland Equation		
		C	10 ⁶ K	10 ⁵ η ₂₅
Ammonia	- 77 -441	472	15.42	10.30
Argon	- 183 -827	133	19.00	22.67
Benzene	0 -313	403	10.33	7.58
Carbon dioxide	- 98 -1052	233	15.52	15.03
Helium	- 258 -817	97.6	15.13	19.66
Hydrogen	- 258 -825	70.6	6.48	9.04
Mercury	218 -610	996	63.00	25.03
Methane	18 -499	155	9.82	11.14
Nitrogen	- 191 -825	102	13.85	17.80
Oxygen	- 191 -829	110	16.49	20.78
Water vapor	0 -407	659	18.31	9.84

(2) 分子流のコンダクタンス (円形短管)

$$C_m^{(g)} = 36.4 \times kA \left(\frac{T}{M^{(g)}} \right)^{1/2} \quad [m^3 / s] \quad (13)$$

A = π a² : 断面積

M : 分子量

k : Clausing 係数 (Table 2.2 参照)

(3) 分子流・粘性流の両者を考慮した流量

Fig. 2.2 の様に, 節点 i, j からなるダクトを考える。

ダクト内を i から j に流れるガス g の流量は



Fig. 2.2 Duct model

$$Q_{ij}^{(g)} = Z^{(g)} C_m^{(g)} (p_i^{(g)} - p_j^{(g)}) + f^{(g)} C_v (P_i - P_j) \quad (14)$$

$$Z^{(g)} = \frac{1 + 2.507 \cdot a / \lambda^{(g)}}{1 + 3.095 \cdot a / \lambda^{(g)}} \quad (15)$$

λ^(g) は平均自由行程で,

$$\lambda^{(g)} = 114.51 \frac{\eta^{(g)}}{p^{(g)}} \left(\frac{T}{M^{(g)}} \right)^{1/2} \quad [m] \quad (16)$$

Table 2.2 Values of Clausing's Factor $K^{(3)}$

L/a	K	L/a	K
0	1	3.2	0.4062
0.1	0.9524	3.4	0.3931
0.2	0.9092	3.6	0.3809
0.3	0.8699	3.8	0.3695
0.4	0.8341	4.0	0.3589
0.5	0.8013	5	0.3146
0.6	0.7711	6	0.2807
0.7	0.7434	7	0.2537
0.8	0.7177	8	0.2316
0.9	0.6940	9	0.2131
1.0	0.6720	10	0.1973
1.1	0.6514	12	0.1719
1.2	0.6320	14	0.1523
1.3	0.6139	16	0.1367
1.4	0.5970	18	0.1240
1.5	0.5810	20	0.1135
1.6	0.5659	30	0.0797
1.7	0.5518	40	0.0613
1.8	0.5384	50	0.0499
1.9	0.5256	60	0.0420
2.0	0.5136	70	0.0363
2.2	0.4914	80	0.0319
2.4	0.4711	90	0.0285
2.6	0.4527	100	0.0258
2.8	0.4359	1000	0.002658
3.0	0.4205		$8a/(3\ell)$

(14)式を $g = 1 \sim 3$ の場合書き下すと、

$$\begin{Bmatrix} Q_{ij}^{(1)} \\ Q_{ij}^{(2)} \\ Q_{ij}^{(3)} \\ Q_{ji}^{(1)} \\ Q_{ji}^{(2)} \\ Q_{ji}^{(3)} \end{Bmatrix} = \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} Z^{(1)}C_m^{(1)} + f^{(1)}C_v & f^{(1)}C_v & f^{(1)}C_v \\ f^{(2)}C_v & Z^{(2)}C_m^{(2)} + f^{(2)}C_v & f^{(2)}C_v \\ f^{(3)}C_v & f^{(3)}C_v & Z^{(3)}C_m + f^{(3)}C_v \end{bmatrix}}^M \\ \hline \begin{bmatrix} & & & -M \\ & & & \\ & & -M & \\ & & & M \end{bmatrix} \end{array} \begin{Bmatrix} p_i^{(1)} \\ p_i^{(2)} \\ p_i^{(3)} \\ p_j^{(1)} \\ p_j^{(2)} \\ p_j^{(3)} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

2.2.2 ポンプ

(1) 流量と排気速度の関係

Fig. 2.3 の様に、吸入口 i ，排気口を o とするポンプを考える。

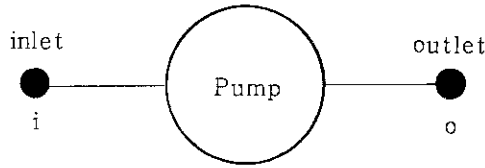


Fig. 2.3 Pump model

i) 分子流の場合 ($\min \lambda^{(g)} > D/2$, D : ポンプ入口直径, $\lambda^{(g)}$: ポンプ入口の平均自由行程), 排気流量は各ガス毎に

$$Q_{i_j}^{(g)} = S^{(g)} P_i^{(g)} \quad (18)$$

$S^{(g)}$: 排気速度 (データとして与えられる)

ターボ分子ポンプとターボ以外のポンプの場合で計算方法が異なる。

ii) 粘性流の場合 ($\min \lambda^{(g)} \leq D/2$)

$$Q_{i_o}^{(g)} = S'^{(g)} P_i \quad (19)$$

$$S'^{(g)} = \left(\frac{P_i^{(g)}}{P_i} \right) \bar{S} \quad (20)$$

\bar{S} : 入口における各ガスの平均分子量 \bar{M} に対応する排気速度 $S^{(g)}$ を内挿して求める。

$$\bar{M} = \sum_g \frac{P_i^{(g)}}{P_i} M^{(g)} \quad (21)$$

(18)式を $g = 1 \sim 3$ の場合書き下すと

$$\begin{Bmatrix} Q_{i_o}^{(1)} \\ Q_{i_o}^{(2)} \\ Q_{i_o}^{(3)} \\ Q_{oi}^{(1)} \\ Q_{oi}^{(2)} \\ Q_{oi}^{(3)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & S^{(2)} & 0 \\ 0 & 0 & S^{(3)} \\ -S^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & -S^{(2)} & 0 \\ 0 & 0 & -S^{(3)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_i^{(1)} \\ P_i^{(2)} \\ P_i^{(3)} \\ P_o^{(1)} \\ P_o^{(2)} \\ P_o^{(3)} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

19式を $g = 1 \sim 3$ の場合書き下す

$$\begin{Bmatrix} Q_{i_o}(1) \\ Q_{i_o}(2) \\ Q_{i_o}(3) \\ Q_{o_i}(1) \\ Q_{o_i}(2) \\ Q_{o_i}(3) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S'(1) & S'(1) & S'(1) \\ S'(2) & S'(2) & S'(2) \\ S'(3) & S'(3) & S'(3) \\ -S'(1) & -S'(1) & -S'(1) \\ -S'(2) & -S'(2) & -S'(2) \\ -S'(3) & -S'(3) & -S'(3) \end{bmatrix} \begin{matrix} \\ \\ \\ 0 \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{Bmatrix} p_i(1) \\ p_i(2) \\ p_i(3) \\ p_o(1) \\ p_o(2) \\ p_o(3) \end{Bmatrix} \quad (23)$$

(2) ポンプの排気速度

排気速度とポンプ入口圧力の関係は、各ガス毎に Fig. 2.4 の様に与えられる。

各曲線を 7~8 点で近似し、データとして与えるので、その間は線形補間して 18 式の $S^{(g)}$ を求める (圧力は分圧)。

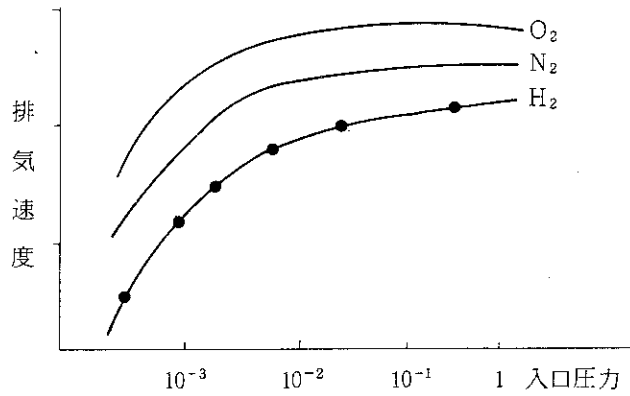


Fig. 2.4

20 式の \bar{S} を求めるには、さらに、平均分子量の値に

応じて、曲線と曲線の間を補間することになる (圧力は全圧)。

(3) ターボ分子ポンプの排気速度

ターボ分子ポンプの場合は Fig. 2.5 の様なデータが与えられるので、入口圧力から最大排気速度 $S_{max}^{(g)}$ を上記と同様に求める。

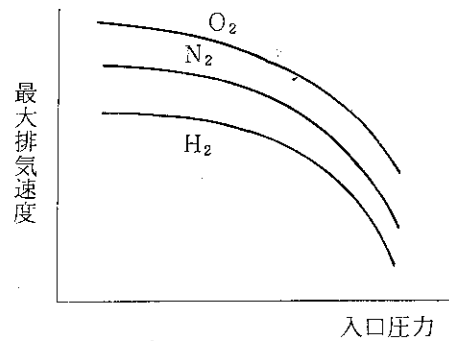


Fig. 2.5

さらに、Fig. 2.6 に与えられる出口圧力から同様に最大圧縮比 $H_{max}^{(g)}$ を求める。

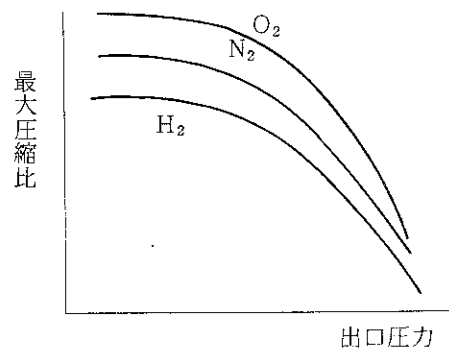


Fig. 2.6

粘性流のときは \bar{M} に対応した \bar{S}_{max} , \bar{H}_{max} を求める。

排気速度は分子流のとき、(18式)の $S^{(g)}$ は次式で求める⁽¹⁾。

$$S^{(g)} = S_{\max}^{(g)} \times \frac{H_{\max}^{(g)} - H^{(g)}}{H_{\max}^{(g)} - 1} \quad (24)$$

$$H^{(g)} = \frac{p_o^{(g)}}{p_i^{(g)}} \quad ; \text{圧縮比}$$

(24)式は線形補間によって、最大排気速度の値から実際の圧縮比に対する排気速度を求めるものである。

粘性流の場合も全く同様に

$$\bar{S} = \bar{S}_{\max} \times \frac{\bar{H}_{\max} - H}{\bar{H}_{\max} - 1} \quad (25)$$

$$H = \frac{P_o}{P_i}$$

である。

(4) 起動・停止機能

データによって、任意の時刻に排気ポンプを起動・停止できる。

2.2.3 ゲート・バルブ

ゲート・バルブはダクトと組み合わせて一つの構成機器として扱う。これは、時間積分法として、陽解法の一つである前進差分法を使用するため、その時間幅 Δt を、気体が一つの機器内を通過するのに要する時間 V/C より小さくしなければならないが、ゲート・バルブの場合、体積 V は小さく、コンダクタンス C は大きく、従って Δt は極めて小さくなり計算効率が落ちるので、それを防ぐためである。

(1) ダクト部分のコンダクタンス

2.2.1の(1)~(3)と同様に求める。

(2) ゲート・バルブ部分のコンダクタンス

$$C_G^{(g)} = 36.4 A_G \left(\frac{T}{M^{(g)}} \right)^{1/2} \quad [\text{m}^3 / \text{s}]$$

A_G : ゲート部分の開口面積

$$A_G = f_G A$$

A : 全開時の面積

f_G : 開口割合

開閉に要する動作時間を t_G 、動作開始からの時間を t_e とすると

$$f_G = t_e / t_G \quad (\text{開く時})$$

$$f_G = 1 - \frac{t_e}{t_G} \quad (\text{閉じる時})$$

従って $0 \leq f_G \leq 1$.

26式も27式同様に書き下すと

$$[C_G] = \left[\begin{array}{ccc|c} \overbrace{C_G^{(1)} \quad C_G^{(1)} \quad C_G^{(1)}}^M & & & \\ C_G^{(2)} \quad C_G^{(2)} \quad C_G^{(2)} & & -M & \\ C_G^{(3)} \quad C_G^{(3)} \quad C_G^{(3)} & & & \\ \hline & -M & & M \end{array} \right] \quad (27)$$

(3) ゲート・バルブ部とダクト部のコンダクタンスの合成

27式のマトリックスを $C_{D,kl}$, 27式のマトリックスを $C_{G,kl}$ とすると合成のコンダクタンスマトリックスは

$$C_{kl} = \frac{1}{\frac{1}{C_{D,kl}} + \frac{1}{C_{G,kl}}} \quad (28)$$

バルブが全開時は $C_{G,kl} = 0$ なので, $C_{kl} = 0$ となる。

2.2.4 バッフル

バッフルのコンダクタンスは N_2 の分子流に対するデータが数値として与えられる。これを C^{N_2} とすると

$$C^{(g)} = \sqrt{\frac{M^{N_2}}{M^{(g)}}} C^{N_2} \quad (29)$$

によって各ガスのコンダクタンスを求める。粘性流のコンダクタンスは無視するため, 27式と同様のマトリックスになる。

2.2.5 真空容器

真空容器 (Fig. 2.7 参照) はコンダクタンスは考慮せず, その体積, および表面積 (放出ガス) のみが寄与するものとする。

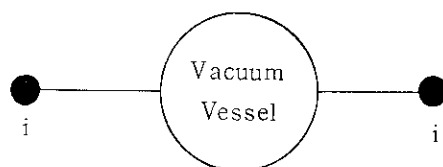


Fig. 2.7 Vacuum Vessel model

2.2.6 ガスパフ

ガスパフ (Fig. 2.8 参照) では i 側で圧力値を o 側で流量をデータとして与える。

$$\frac{A}{2} \begin{Bmatrix} q(1) \\ q(2) \\ q(1) \\ q(2) \end{Bmatrix} \quad (31)$$

この2gのベクトルを全体のngのベクトル{B}の対応する部分に組み込む。

ガスパフに関しては、放出側の節点のそのガス種類に対応する{B}の位置に、その放出量を足し込む。

(iii) [V]の組み込み

[V]は対角行列なので、ベクトル{V}の形に書く。これも(ii)と同様に各機器から得られる

$$\frac{V}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (32)$$

を{V}に足し込む。

(iv) すべてのベクトル、マトリックスが完成したら

[V]が対角であることを利用し、各行を対応するVの成分で割って

$$\{\dot{p}\} = -[K] \{p\} + \{F\} \quad (33)$$

但し、

$$K_{ij} = C_{ij} / V_i \quad (34)$$

$$F_i = B_i / V_i \quad (35)$$

2.3.2 非定常解析方法

(1) Euler法

33式に前進差分を適用する。すなわち、

$$\{\dot{p}\} \simeq (\{p\}_{n+1} - \{p\}_n) / \Delta t \quad (36)$$

$$\{p\} \simeq \{p\}_n \quad (37)$$

$$\{F\} \simeq \{F\}_n \quad (38)$$

を代入すると、

$$\{p\}_{n+1} = \{p\}_n + \Delta t (-[K] \{p\}_n + \{F\}_n) \quad (39)$$

が得られる。すなわち、初期値が与えられれば、時間 Δt 経過後の値が求まる。これを繰り返す。

(ii) 拘束条件

ガスパフの入口など、特に、分圧値を拘束したい node については、89 式を計算するごとに、得られた $\{ p \}$ の対応する成分をその値に置き換える。

(iii) 時間幅

時間幅は固定ではなく可変とする。すなわち $t_1 \leq t < t_2$ のときは Δt_1 、 $t_2 \leq t < t_3$ のときは Δt_2 の様な形で Δt が与えられる。

また、時間幅 Δt は解の安定性の条件を満足しなければならない。80 式のマトリックスを計算した直後に、Courant 条件

$$\Delta t < \frac{V_i}{\sum_j C_{ij}} \quad (40)$$

を満足していない時は

$$\Delta t = f \times \frac{V_i}{\sum_j C_{ij}} \quad (41)$$

に修正する。f は 0 から 1 までの値をとる。

(iv) コンダクタンスの再計算

時間ステップを n 回計算するごとに、コンダクタンスを計算し直す。これは、コンダクタンスの圧力依存性（非線形性）を考慮するためである。

(v) その他の解法

本コードでは、他に 2 種類の解法を選択できる。一つは、Euler 法を予測子、台形側を修正子とする予測子-修正子法、もう一つは 4 次の Runge - Kutta 法である。解くべき問題の種類によっては、計算の精度、速度が向上する可能性がある。

2.3.3 定常解析方法

(i) 定常解析の方程式

到達圧力などを求める際には、定常解析を行なうことになる。

83 式は

$$[K] \{ p \} = \{ F \} \quad (42)$$

の形になる。このマトリックス方程式を解く。

(ii) 拘束条件

ある node におけるあるガスの分圧を p_i に拘束するには、その分圧に対応する $[K]$ の対角項に 1×10^{20} を、対応する $\{ F \}$ の項に $p_i \times 10^{20}$ を足し込む。

(iii) マトリックス方程式の解法

非対称マトリックスを Gauss - Jordan 法（消去法）で解く。

3. プログラムの概要

3.1 基本事項

PRAC プログラムに関する基本事項について示す。

(1) 整合配列の使用

配列の扱いを容易にするため、整合配列を使用している。配列サイズはMAINプログラムのNAMAXにより与えられている。

(2) restart 機能

解くべき問題によっては、計算時間が多大になることも考えられるので、一度計算したあと、別なジョブでその続きの計算を行なう restart 機能を持たせている。

(3) プロッター出力

PRAC ではプロッター出力用プログラムPRACPに受け渡すデータの作成までを行う。

(4) 単位系

入出力ともS I 単位系とする。すなわち、

{	圧力… Pa
	温度… K
	長さ… m
	時間… s

(5) 構成機器と略記号

PRAC で取扱う構成機器は以下の7種数である

機器名	略記号
・ダクト	DU
・ガスパフ	PU
・ゲートバルブ	GV
・ポンプ	GP
・ターボ分子ポンプ	TP
・バッフル	BA
・真空容器	VC

(6) 気体の種類

取り扱う気体は次の14種数である。

H_2 , He , D_2 , T_2 , CH_4 , NH_3 , H_2O , CO , N_2 , O_2 , Ar , CO_2 , C_6H_6 , Hg

上記以外の気体を取り扱う場合は、その気体の物性定数も与える必要がある。

(7) ポンプ

PRAC で性能曲線の与えられているポンプは以下の通りである。

i) ターボ分子ポンプ

- TURBO 3500 (L/H社TMP-3500相当)
- TURBO 450 (L/H社TMP-450相当)
- TURBO 150 (L/H社TMP-150相当)

ii) ターボ以外のポンプ

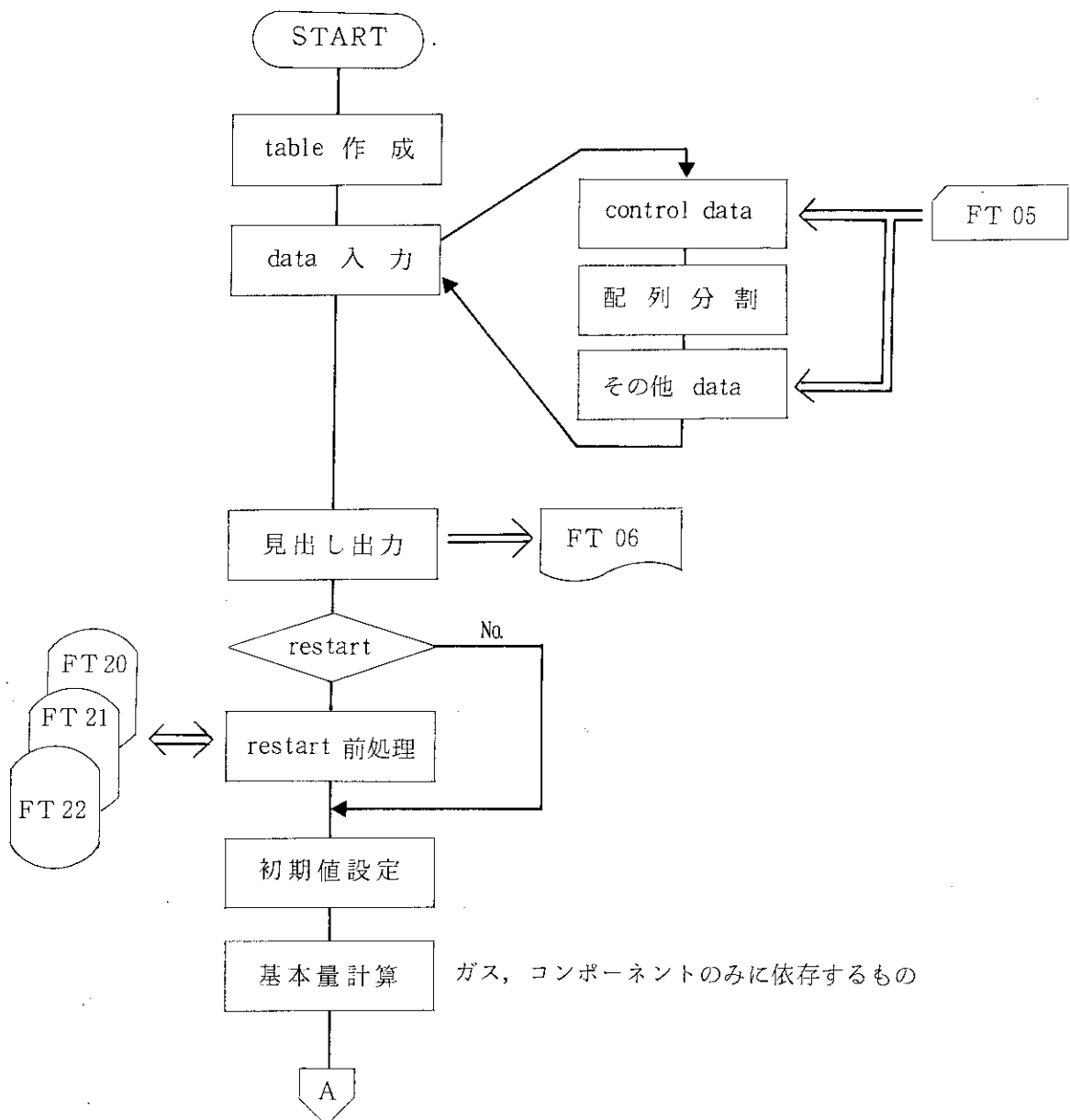
- MBP 006 A
- PUMP 2
- PUMP 3 (debug 用, 排気速度 = $\pi \text{ m}^3 / \text{s}$ 一定)

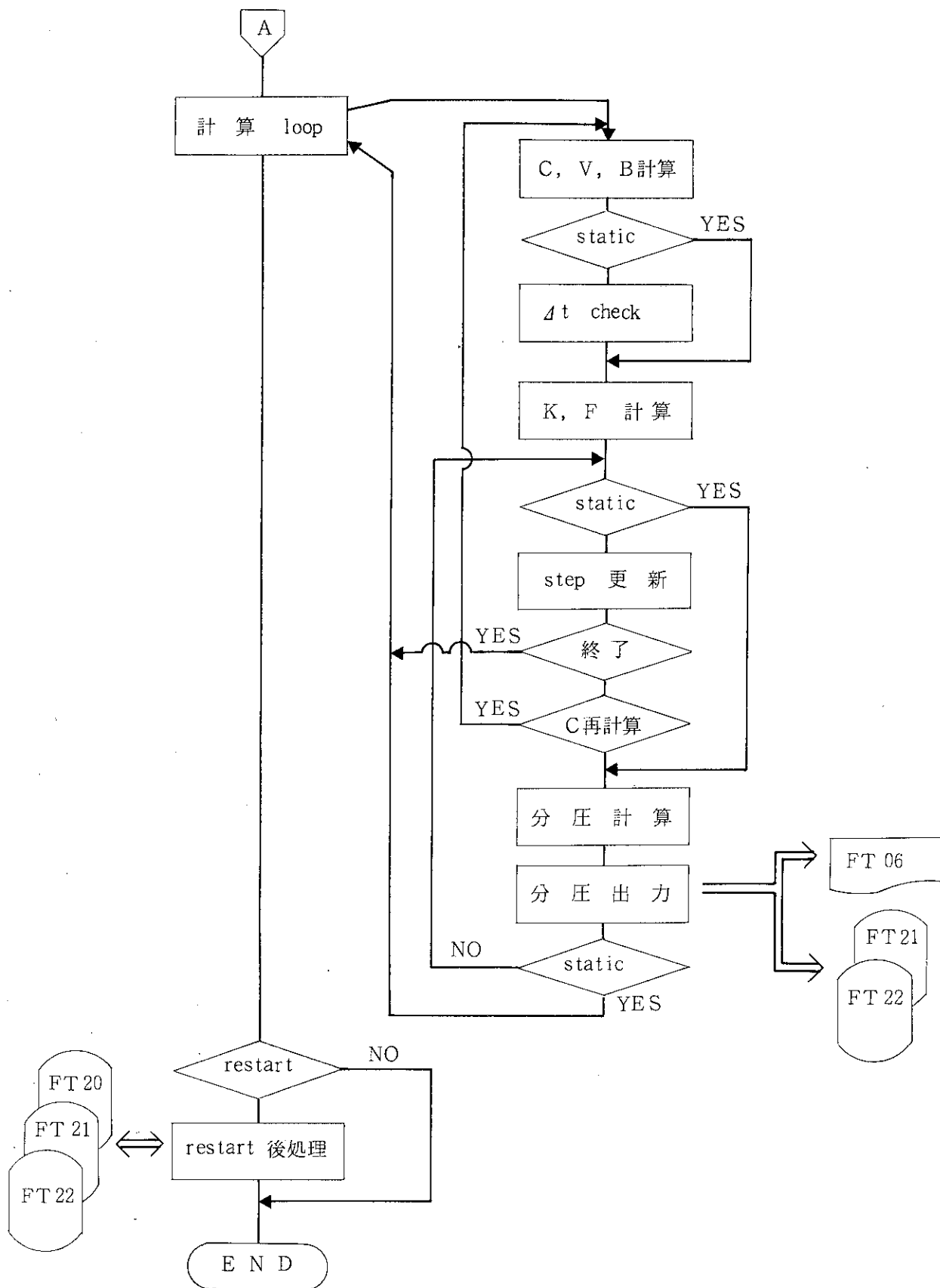
上記のポンプで H_2 , N_2 以外の気体を扱う場合, および上記以外のポンプを使用したい場合は, その排気データを与える必要がある。

3.2 処理フロー

以下に PRAC の処理フローを示す。

- | | | |
|----------------------|------|-----------------------------|
| { C : コンダクタンス matrix | file | |
| { V : 体積 vector | | { FT 20 : restart file |
| { B : 放出ガス vector | | { FT 21 : plot 用 file |
| { K : C/V | | { FT 22 : restart work file |
| { F : B/V | | |





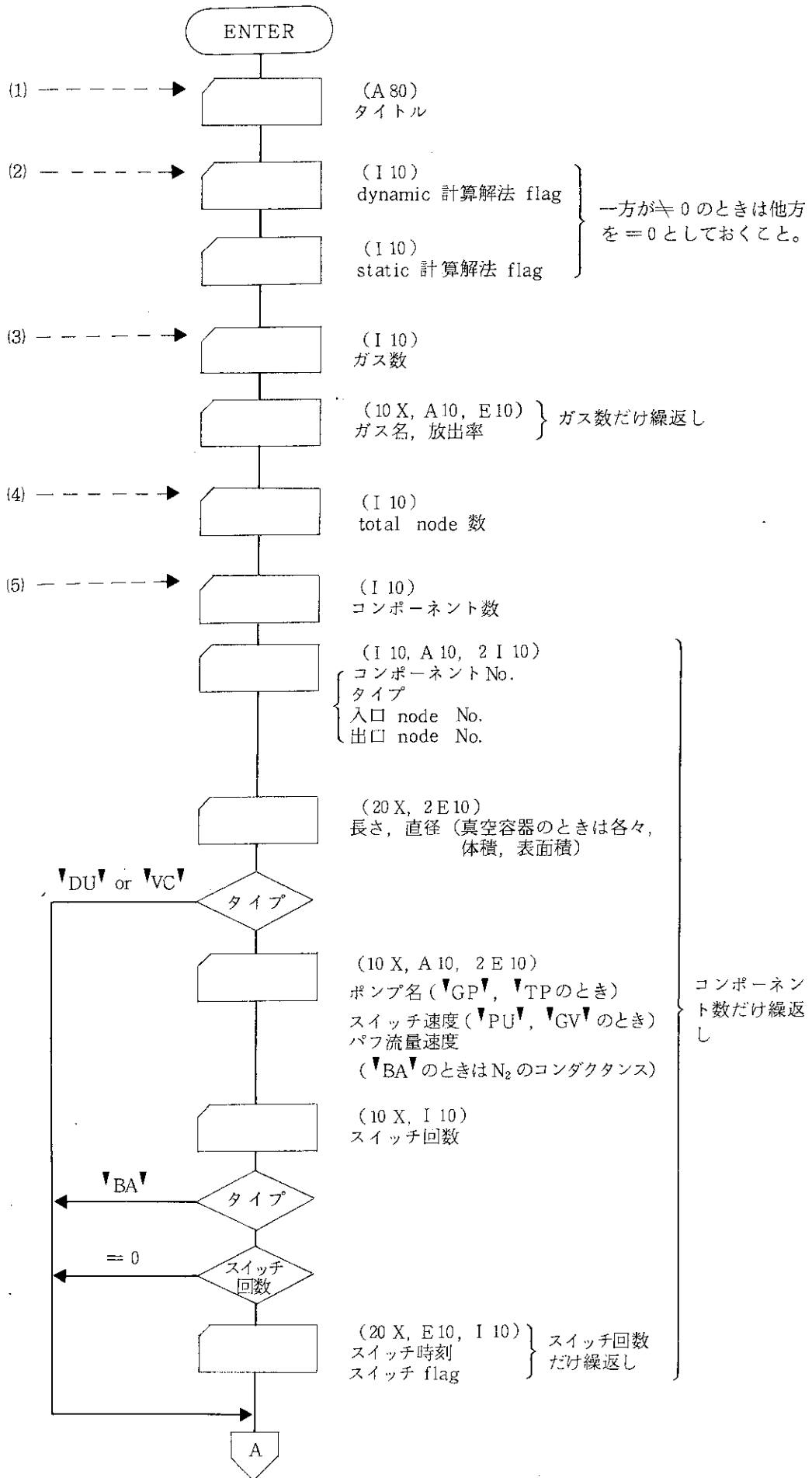
3.3 データ入力

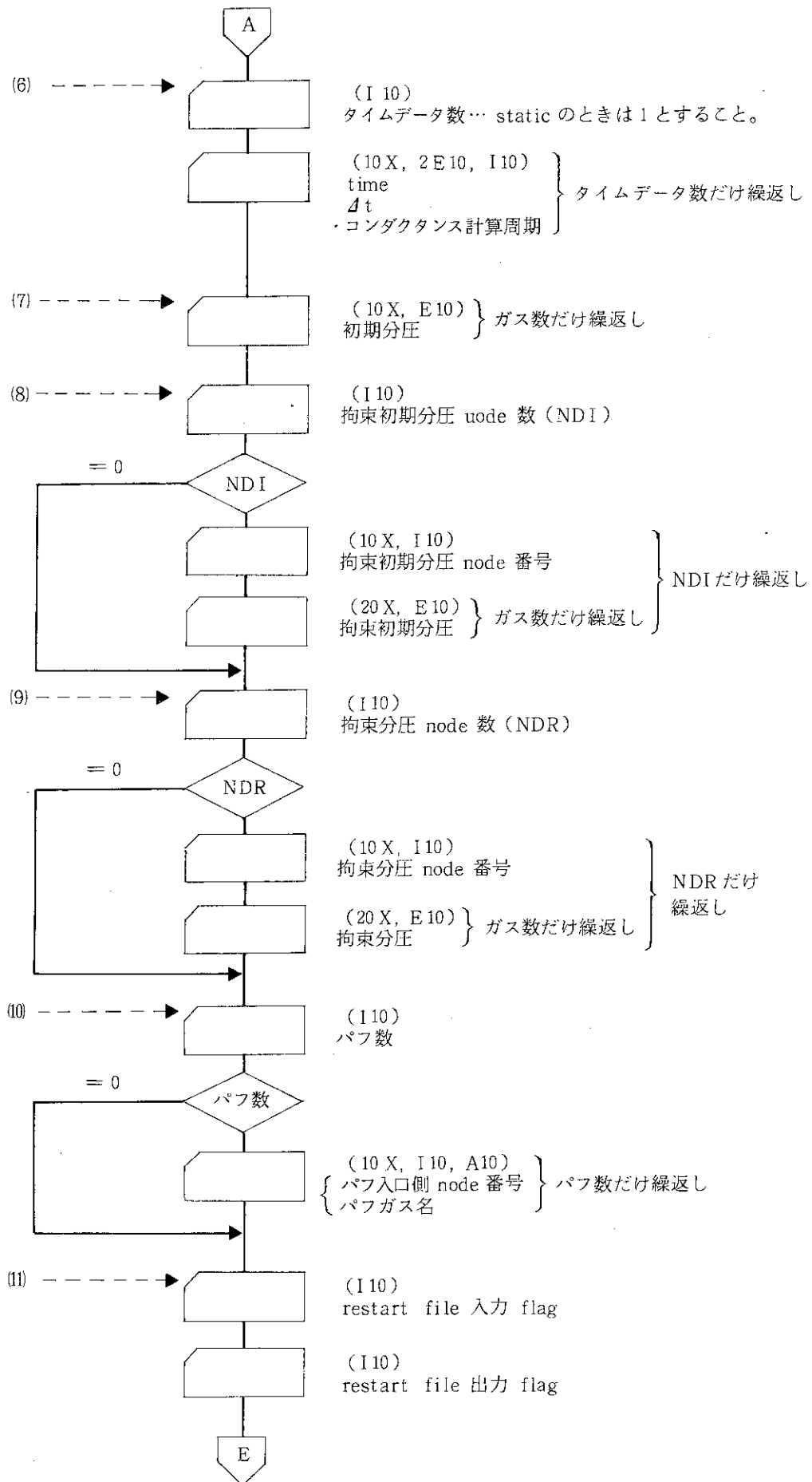
この節では、データの入力方法について示す。

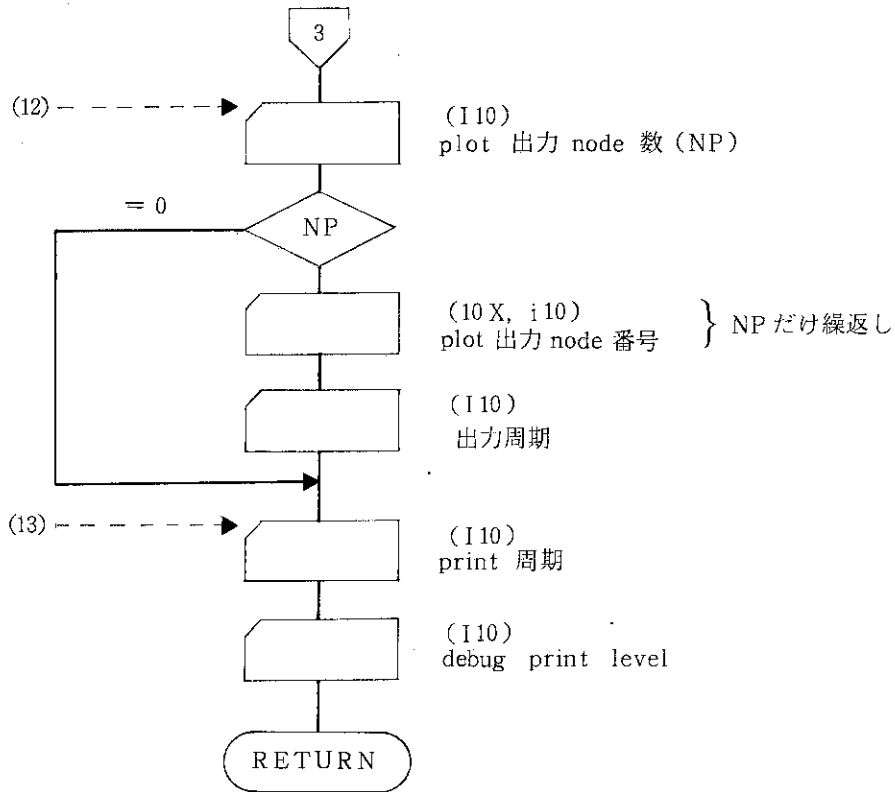
データは次の13の section に分けられる。

- (1) タイトル
- (2) 解法データ
- (3) ガスデータ
- (4) 節点データ
- (5) コンポーネントデータ
- (6) time データ
- (7) 初期分圧データ
- (8) 拘束初期分圧データ
- (9) 拘束分圧データ
- (10) パフデータ
- (11) リスタートデータ
- (12) プロットデータ
- (13) プリンター出力データ

以下にデータの入力 flow と for mat を示す。







注意事項

i) 解法 flag データ

- a. dynamic 計算のときは, static 計算 flag=0 とすること。
- b. static 計算のときは, dynamic 計算 flag = 0 とすること。

ii) static 計算のときの transient データ

- a. タイムデータ数は必ず 1 とすること
- b. time を必ず入力すること。
(Δt , コンダクタンス計算周期は不必要)

iii) section の区切り

- a. 各 section の先頭は必ず $\nabla = = \dots = = \nabla$ を入れること。
- b. 上記に続いて必ず $\nabla <<< \text{section 説明} >>> \nabla$ を入れること。
- c. print データ section の後 (データの最後) には $\nabla = = = \dots = = = \nabla$ を入ること。

4. 解 析 例

4.1 厳密解との比較

PRACコードの妥当性を検証するため、厳密解の求まる単純なモデルで解析し、解を比較する。

(1) 例題 1

Fig. 4. 1 に解析モデルを示す。0. 1 秒間ガスを注入し、注入後の到達圧力を求める。厳密解は

$$P = \frac{F \cdot T}{V} = 0. 066666 \dots \dots \dots \text{ [Pa]}$$

である。PRACの非定常解析による結果をFig. 4. 2 に示したが、注入終了後の到達圧力は0. 066628 [Pa] と、良く一致している。

(2) 例題 2

Fig. 4. 3 に解析モデルを示す。ダクトをポンプによって排気するモデルである。非定常解析による排気曲線の傾き及び到達圧力、定常解析で得られた到達圧力を厳密解と比較する。

厳密解は

$$P(t) = (998. 5 e^{-2. 66666t} + 1. 5) \times 10^{-5} \text{ [Pa]}$$

である。従って排気曲線の傾きは $-2. 66666$ 、到達圧力は $1. 5 \times 10^{-5}$ Pa である。一方、PRACの非定常解析による解析結果をFig. 4. 4 に示す。排気曲線の傾きは、 $-2. 657$ 、到達圧力は $1. 50004 \times 10^{-5}$ Paであった。PRACの定常解析による到達圧力は $1. 50000 \times 10^{-5}$ Paであり、良く一致している。

(3) 例題 3

Fig. 4. 5 に解析モデルを示す。ダクトをターボ分子ポンプと通常のポンプによって排気するモデルである。PRACによる非定常解析結果をFig. 4. 6 に示す。到達圧力は $4. 182 \times 10^{-4}$ Paであった。そのときの圧縮比は16. 6であったので排気速度は $0. 113 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ であり、厳密解は $4. 17 \times 10^{-4}$ Paとなる。従って、良い一致といえる。

4.2 測定結果との比較⁽⁴⁾

4.2.1 試験装置と解析モデル

Fig. 4. 7 に試験装置を示す。ガス注入を行ない、圧力応答を求める。Fig. 4. 8 に解析モデル、Table 4. 1 に各構成機器形状を示す。ガス注入弁 (PEV) は節点20、圧力の測定点は枝管中央部の節点3とする。排気ポンプの特性はFig. 4. 9 およびFig. 4. 10 のものを使用する。初期

条件として、大気以外の全節点に 0.1 Pa の値を与え、十分な時間が経過して到達圧力値に十分収束したのち、ガスを注入した。

4.2.2 解析結果

PRACの非定常解析で得られた節点3および7の圧力応答をFig. 4.11に示す。水素ガスを流量 $53.3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ で 100 m sec 間注入した。同図中には測定結果も示してある。解析結果の方が全般に大きめであり、とくに、ガス注入中に差が大きく出ているが、傾向、値ともまずまずの一致といえる。Fig. 4.12, Fig. 4.13には、流量を $1.33 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ ($10 \text{ Torr} \cdot \ell / \text{s}$) から $53.3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ ($400 \text{ Torr} \cdot \ell / \text{s}$) まで7種類の値にとったときの到達圧力を示す。流量が小さいうちは解析値と実測値は良い一致を示すが、流量が $26.6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ ($200 \text{ Torr} \cdot \ell / \text{s}$) 以上では差が大きくなる。

解析結果と測定結果に差が生じた原因として、

- (1) 解析に用いたコンダクタンスの非線形モデル化が実際の試験時の気体挙動と対応していなかったことが考えられる。とくに、圧力が約 10 Pa 程度と、分子流と粘性流の遷移領域付近にあったため、わずかな圧力の違いで、実測結果は分子流なのに、解析では粘性流として扱ってしまった可能性がある
- (2) ダクトどうしの接合部において、解析モデルでは接合角度や、断面積変化時のオリフィス補正を考慮していない
- (3) 解析に使用した試験装置のモデル化において、各構成機器の体積、表面積が正確でなかった
- (4) 放出ガス率のデータが、実際とは異なっていた
などが考えられる。しかし、実用上は、とくに問題ないと思われる。

なお、本解析では、時間ステップ幅を $1 \times 10^{-5} \text{ sec}$ にとり、20000 ステップの非定常解析を行なったが、CPU時間はFACOM M-380 で約19秒であった。

Table 4.1 Dimensions of the system

Component number	Nodal points		Component	Dimension (cm)	
				Length	Diameter
1	2	20	PEV	2	3.9
2	2	3	Duct	8	2.9
3	3	5	Duct	8	2.9
4	4	5	Duct	66	13.4
5	5	6	Duct	20	13.4
6	7	6	Duct	8	2.9
7	8	7	Duct	8	2.9
8	6	9	Duct	129	13.4
9	10	9	Duct	20	15.0
10	9	11	Duct	80	15.0
11	12	11	Duct	113	9.8
12	11	13	Duct	80	15.0
13	14	13	Duct	215	13.4
14	13	15	Duct	80	15.0
15	16	15	Duct	113	9.8
16	15	17	Duct	151	9.8
17	17	18	Gate valve	5	9.8
18	18	19	PUMP 1	25	9.8
19	19	20	PUMP 2	25	9.8

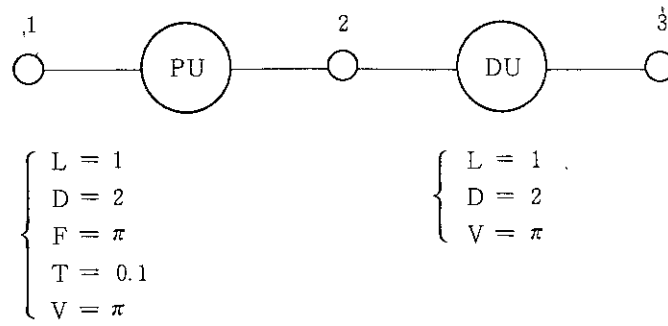


Fig. 4.1 Gas puff model

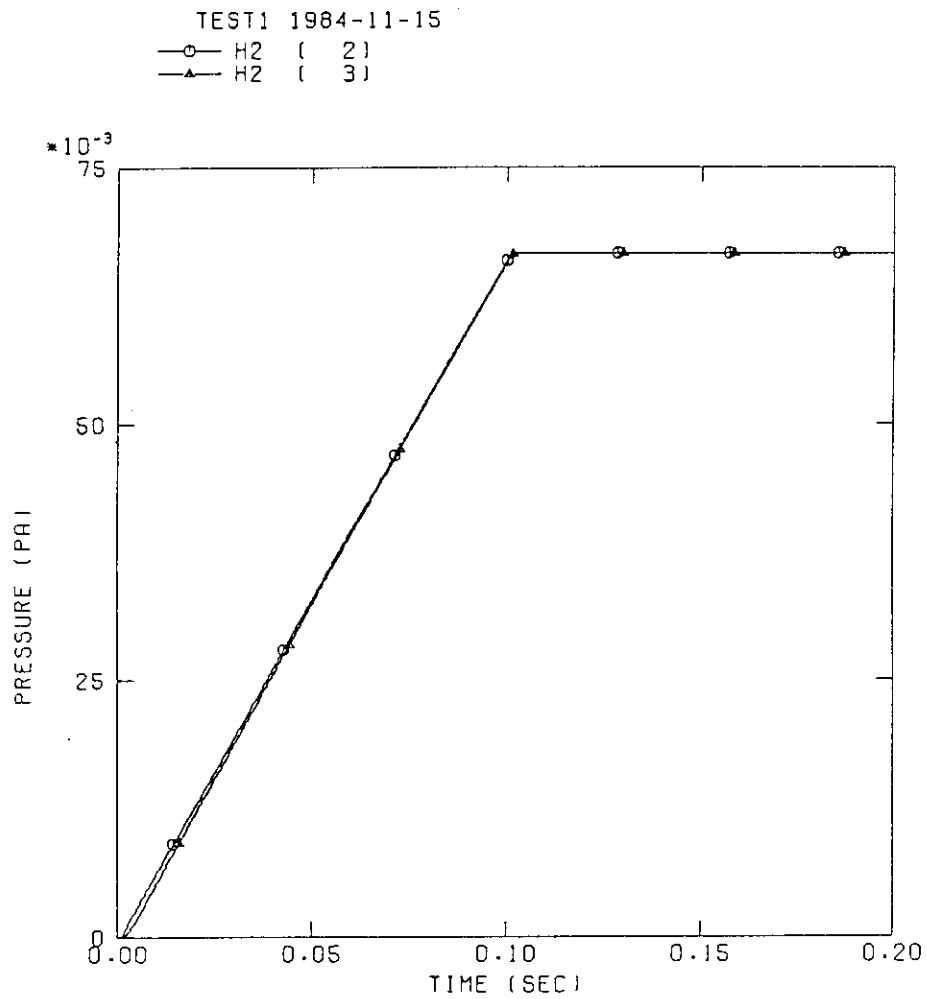


Fig. 4.2 Pressure response of gas puff model

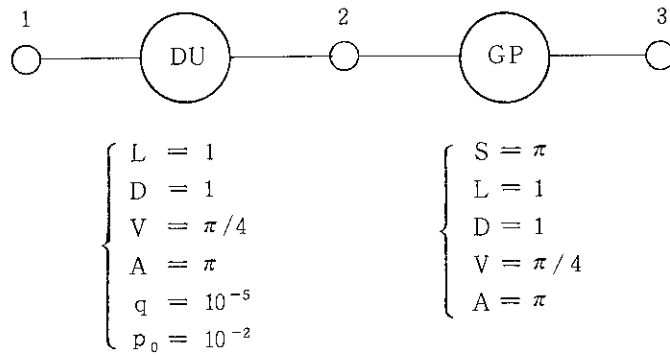


Fig. 4.3 Vacuum pumping model

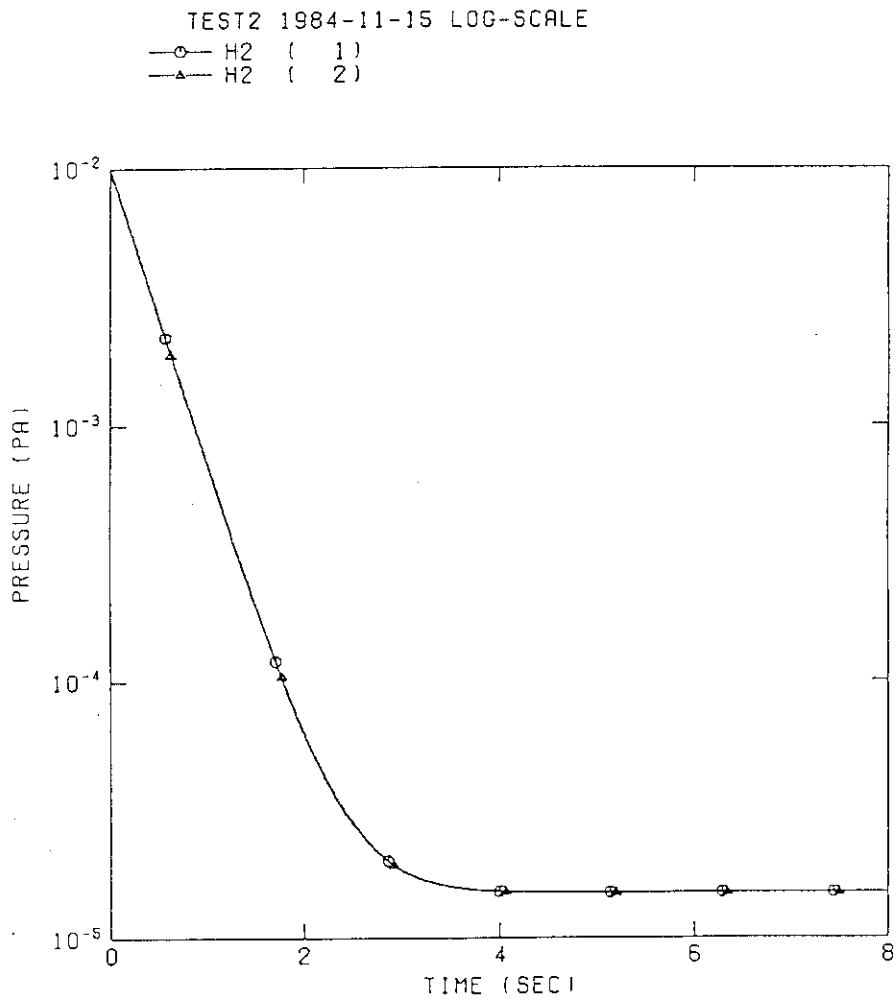


Fig. 4.4 Pressure response of vacuum pumping model

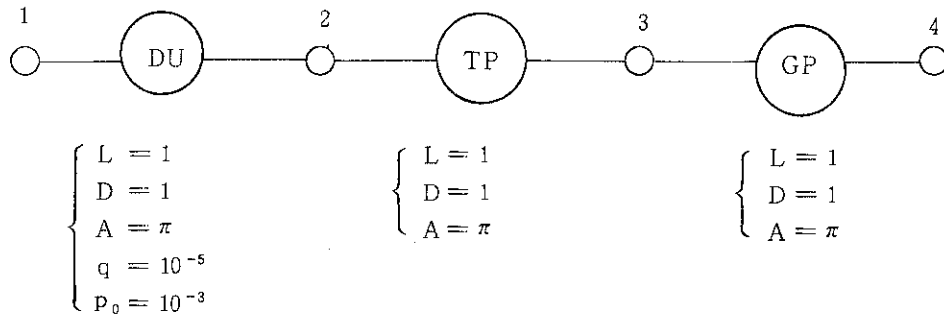


Fig. 4.5 Vacuum pumping model

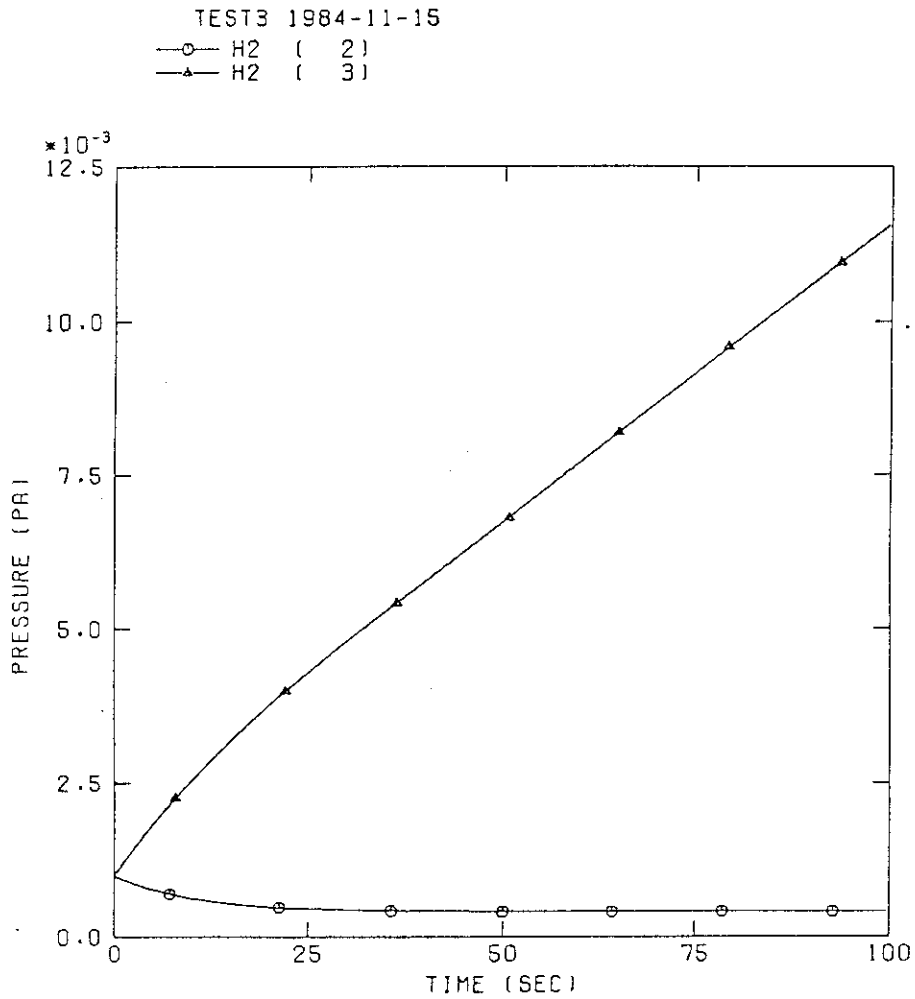
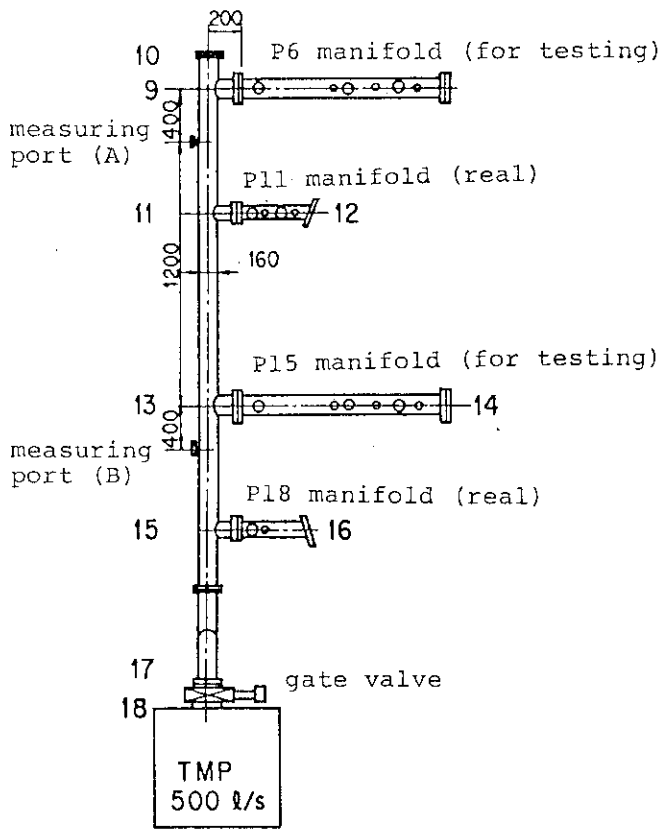
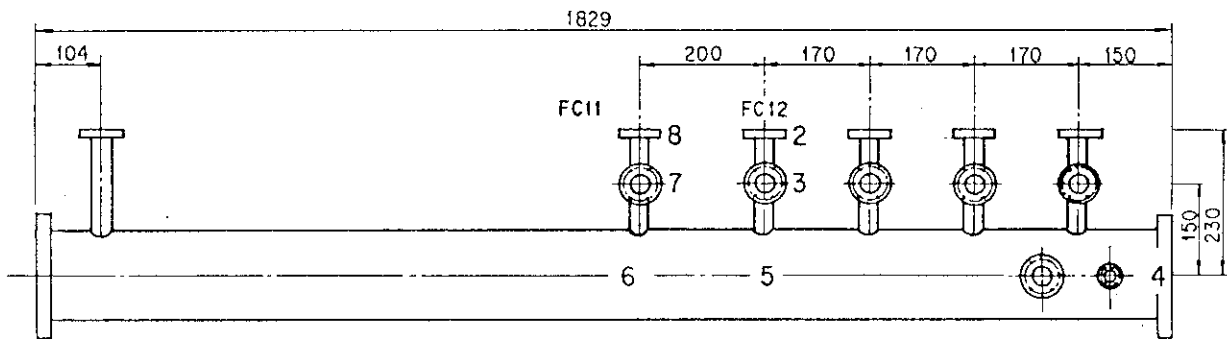


Fig. 4.6 Pressure response of Vacuum pumping model



(A) Test apparatus



(B) P6 manifold for testing

Fig. 4.7 Test apparatus of the gas feed system.

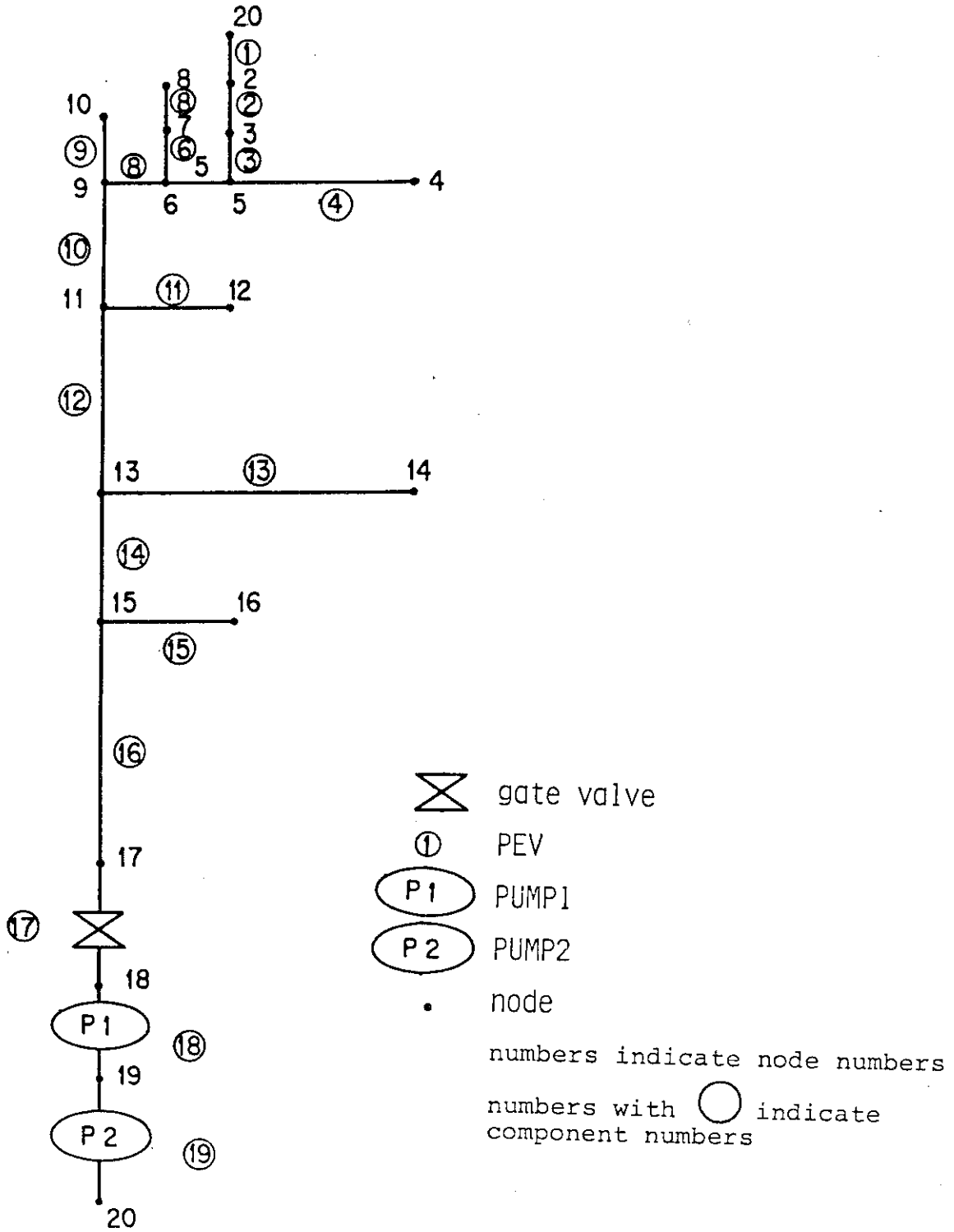


Fig. 4.8 Nodal idealization model of the system.

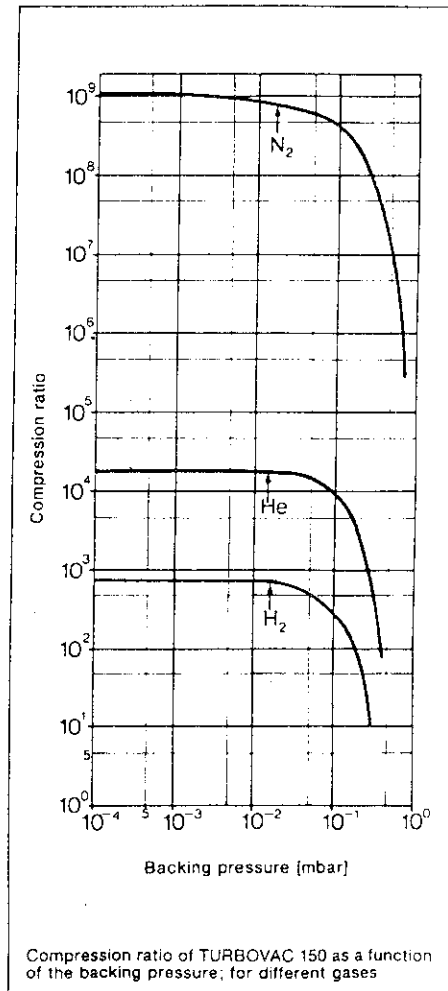
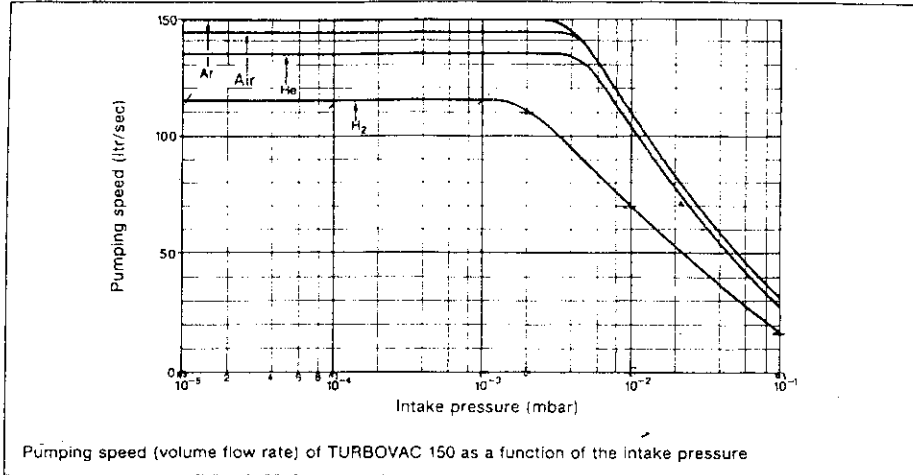


Fig. 4.9 Specification of the PUMR 1 (cited from reference (5)).

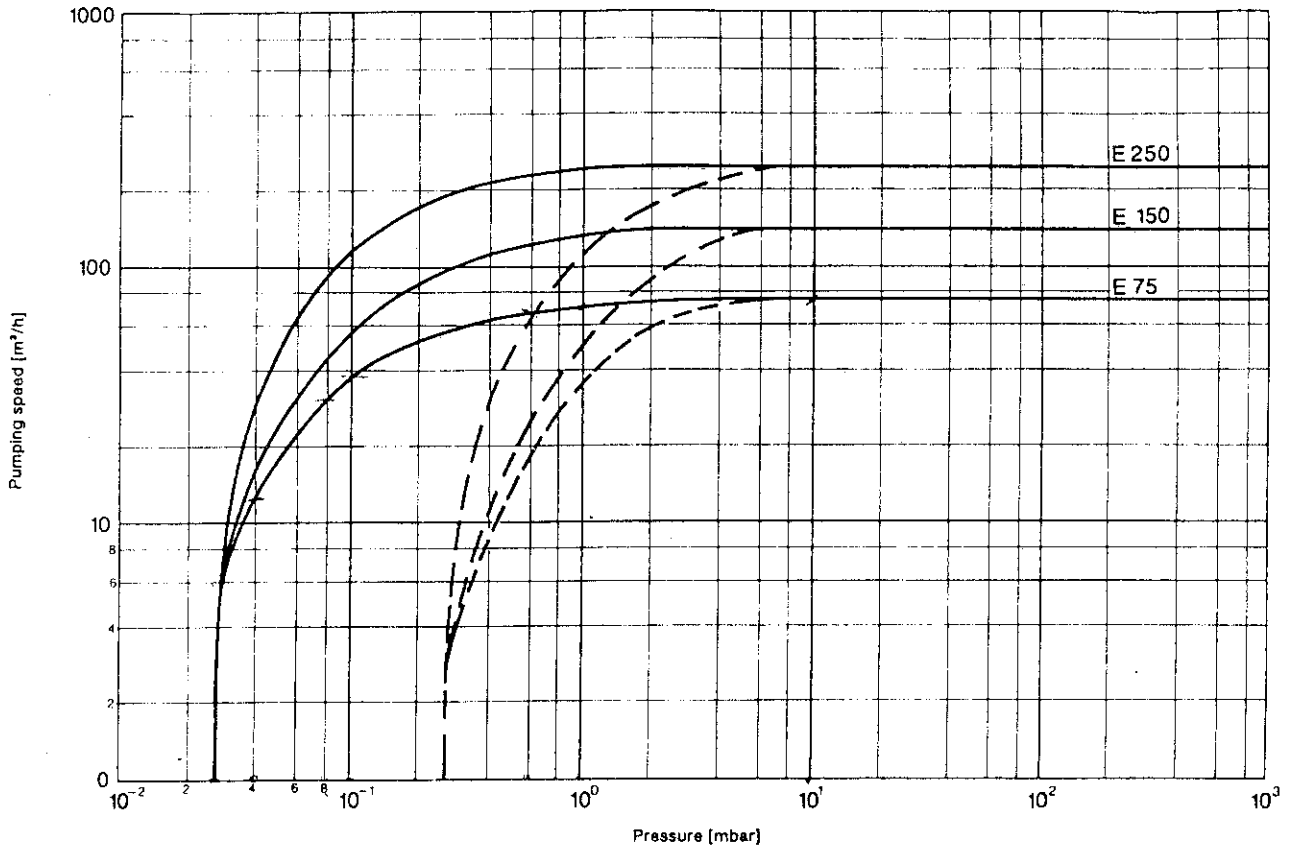


Fig. 4.10 Specification of the PUMP 2 (cited from reference (5)).

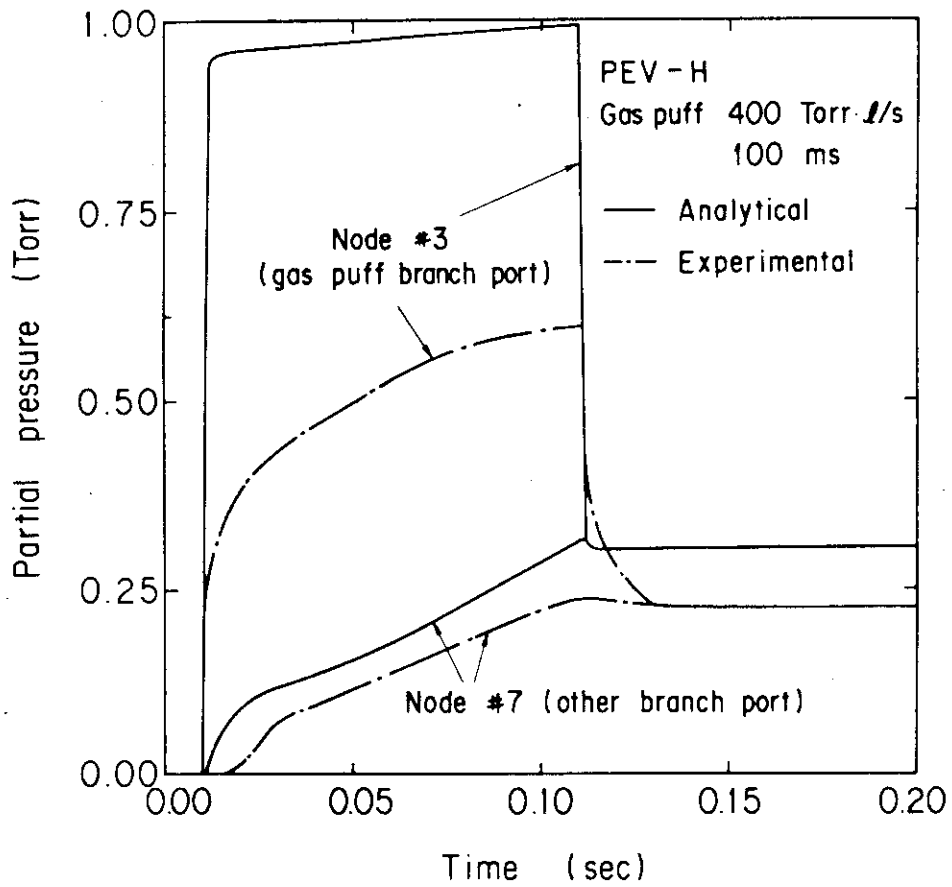


Fig. 4.11 Comparison of pressure responses between analytical and experimental results.

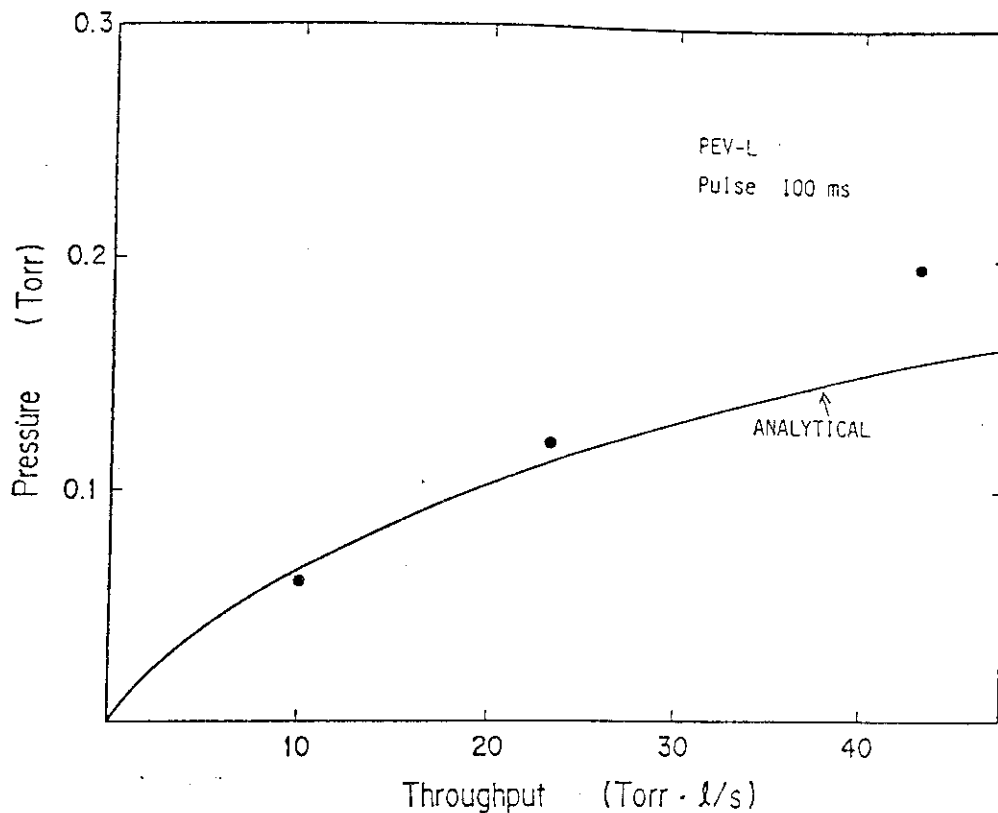


Fig. 4.12 Dependency of pressure rise on the throughput (PEV-L).

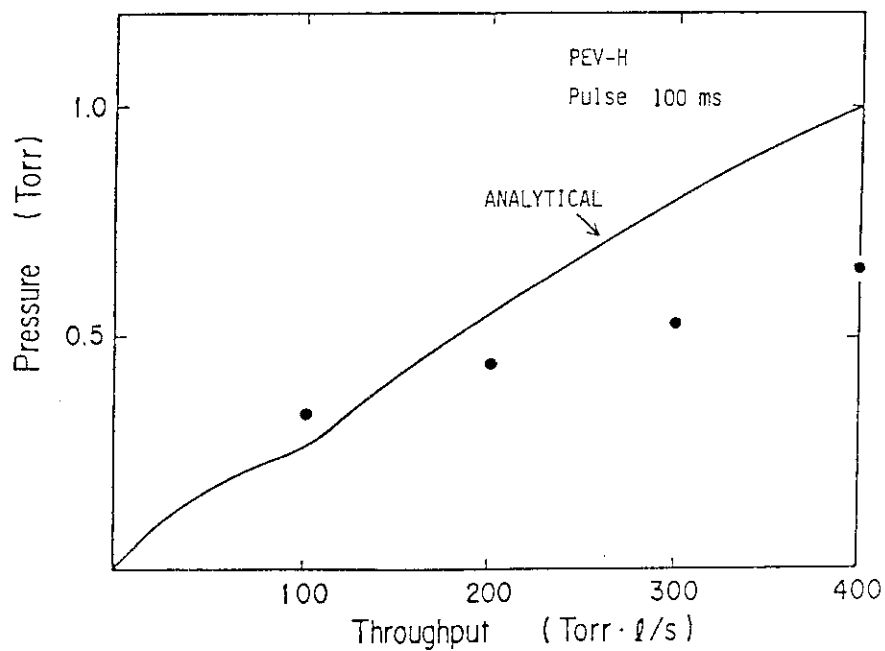


Fig. 4.13 Dependency of pressure rise on the throughput (PEV-H).

5. おわりに

真空系の圧力応答解析コードPRACを開発した。本解析コードの妥当性を検証するため、例題を与えて解析を行ったが、厳密解との間に良好な一致が見られた。さらに、ガス注入試験装置の複雑なモデルに対して解析し、実測結果と比較したが、十分実用に耐え得る良好な結果が得られた。

本解析コードは、真空機器の設計、性能評価を行なう上で有力な解析ツールになり得ると思われる。

さいごに、本コードの開発にあたり、有益な御意見、御鞭撻を頂いた吉川允二大型トカマク開発部長、飯島勉同次長、太田充 J T-60 第 1 開発室長に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) J. Sredniawski, " The Vacuum System Transient Simulator and Its Application to TFTR ", 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, Knoxville, P. 1806, 1977.
- (2) L. Holland, et al., " Vacuum Manual ", chap. 1, 1974, E. & F. N. SPON, London.
- (3) S. Dushman, " Scientific Foundation of Vacuum Technique ", Chap. 2, 1962, Wiley and Sons, New York.
- (4) 堀江, 川崎, 平塚, 安光, " JT-60 圧電素子弁の流量較正方法に関する検討 ", JAERI-M 84-097, 1984.
- (5) Leybold-Heraeus, " Vacuum Components Standard Systems ", Catalogue HV 250.

5. おわりに

真空系の圧力応答解析コードPRACを開発した。本解析コードの妥当性を検証するため、例題を与えて解析を行ったが、厳密解との間に良好な一致が見られた。さらに、ガス注入試験装置の複雑なモデルに対して解析し、実測結果と比較したが、十分実用に耐え得る良好な結果が得られた。

本解析コードは、真空機器の設計、性能評価を行なう上で有力な解析ツールになり得ると思われる。

さいごに、本コードの開発にあたり、有益な御意見、御鞭撻を頂いた吉川允二大型トカマク開発部長、飯島勉同次長、太田充 J T-60 第 1 開発室長に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) J. Sredniawski, " The Vacuum System Transient Simulator and Its Application to TFTR ", 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, Knoxville, P. 1806, 1977.
- (2) L. Holland, et al., " Vacuum Manual ", chap. 1, 1974, E. & F. N. SPON, London.
- (3) S. Dushman, " Scientific Foundation of Vacuum Technique ", Chap. 2, 1962, Wiley and Sons, New York.
- (4) 堀江, 川崎, 平塚, 安光, " JT-60 圧電素子弁の流量較正方法に関する検討 ", JAERI-M 84-097, 1984.
- (5) Leybold-Heraeus, " Vacuum Components Standard Systems ", Catalogue HV 250.