

アナコンによる東海発電所
原子炉ダクト破損事故の解析

研究報告 No. 16

1961年1月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

アナコンによる東海発電所原子炉ダクト 破損事故の解析

要 旨

東海原子力発電所（コールドターホール改良型天然ウランガス冷却炉）の最も苛酷な事故としては、原子炉のダクト破損が考えられる。本研究では、ダクト破損事故時におけるガス回路内部の圧力、流量の変化の模様をアナコンを用いて解析し、さらにこの解析結果より、破損ダクトの検出方法も検討した。

破損の大きさとしては、ダクトにつながる配管類が破損した場合に相当する破損等価断面積 100, 300, 1,000 cm² の 3 種を考えた。

また、破損場所としては、上部ダクト、下部ダクトにおのおの 4 箇所を想定し、破損場所による影響を考慮することとした。解析に使用したアナコンは、低速度型アナコン PACE A である。

(1960 年 9 月 19 日受理)

都 甲 泰 正* 杉 本 宏**

* 日本原子力研究所
** 日本原子力発電株式会社

Analysis of the Duct Rupture Accident at the TOKAI ATOMIC POWER STATION,* by an Analogue Computer

Abstract

The maximum credible accident at the TOKAI POWER STATION (a Calder Hall type, natural uranium gas-cooled reactor) is considered to be an accident associated with the gas duct rupture. In this report, variations in pressures and flow rates of gas coolant loops are analyzed by means of a d. c. analogue computer, and various methods of detecting a ruptured duct are compared, based on the analysis.

As for the magnitude of the ruptured parts, three equivalent rupture areas, 100, 300 and 1,000 cm², which correspond to the ruptures of connection pipings to the main duct, are assumed.

The d. c. analogue computer used in this computation is PACE A.

(Manuscript was received on Sept. 19, 1960.)

YASUMASA TOGO, HIROSHI SUGIMOTO

* JAPAN ATOMIC POWER CO.

目 次

1. 東海発電所の概要	1
2. 解 析	2
2-1 解析の仮定	2
2-2 ガス回路から電気回路への変換	2
2-3 方程式の求め方	3
2-4 下部ダクト破損時の方程式	5
2-5 上部ダクト破損時の方程式	6
3. 解析項目	8
4. 解析結果およびその検討	10
4-1 各部の圧力変化量について	11
4-2 循環機における圧力上昇	12
4-3 炉心を流れる流量 δW_{12}	12
4-4 ダクトを流れるガス流量	13
4-5 差 圧	14
4-6 破損ダクトの検出法について	15
5. 結 論	21
Appendix I 回路定数	22
Appendix II アナコン計算式	22

Contents

1. Summary of Tokai Atomic Power Station.....	1
2. Analysis	2
2.1 Assumptions	2
2.2 Conversion from Gas Circuit to Electrical Circuit.....	2
2.3 Equations	3
2.4 Equations for Lower Duct Rupture	5
2.5 Equations for Upper Duct Rupture	6
3. Items Analysed.....	8
4. Results and Discussions	10
4.1 Pressure Variations at Various Points.....	11
4.2 Effect of Pressure Rise at Circulator	12
4.3 Mass Flow through the Core δW_{12}	12
4.4 Mass Flow through Ducts	13
4.5 Differential Pressure	14
4.6 Detection Methods of Ruptured Duct	15
5. Conclusion	21
Appendix I Circuit Constants	22
Appendix II Analogue Computer Equations.....	22

Table List

Table 1. Design and Performance Data of Tokai Atomic Power Station.....	1
Table 2. List of Run Numbers	8
Table 3. List of Parameters Recorded	8
Table 4. Time Required for 10% Pressure Decrease	11
Table 5. Deviation of Pressure Rise of the Circulator	11
Table 6. Decrease of Pressure and Mass Flow.....	13
Table 7. Deviation of Mass Flow in the Duct from the Rated Value	13
Table 8. Difference of Mass Flow	18
Table 9. Comparison of Rupture Detection Methods by Pressure Difference Measurement	19

Figure List

Fig. 2.1 Simulated Circuit for Upper Duct Rupture	2
Fig. 2.2 Circulator Characteristic	3
Fig. 2.3 Gas Flow through Rupture Part	4
Fig. 2.4 SRU Circuit Simulated by Distributed Capacitances	4
Fig. 2.5 SRU Circuit Simulated by Lumped Capacitance	4
Fig. 2.6 Simulated Circuit for Lower Duct Rupture	5
Fig. 2.7 Simulated Circuit for Upper Duct Rupture	6

Fig. 4.1	$\partial P_1, \partial P_3, \partial P_4$ and ∂P_5 for RUN U-4.....	10
Fig. 4.2	$\partial P_1, \partial P_3, \partial P_4$ and ∂P_5 for RUN L-3.....	10
Fig. 4.3	∂P_1 for RUN U-4, 5, 6 (rupture size variable)	10
Fig. 4.4	∂P_5 for RUN U-4, 5, 6 (rupture size variable)	10
Fig. 4.5	∂P_5 for RUN L-1, 5 (rupture size variable).....	10
Fig. 4.6	∂e_1 and ∂e_2 for RUN U-4 and RUN L-3	12
Fig. 4.7	$\partial W's$ for RUN L-3	12
Fig. 4.8	$\partial W's$ for RUN U-4	12
Fig. 4.9	$\partial W's$ for U-4, 5, 6 (rupture size variable)	13
Fig. 4.10	∂W_{52} and ∂W_5 for RUN L-1, 5 (rupture size variable)	14
Fig. 4.11	∂W_{14} for RUN L-1, 2 (rupture size variable)	14
Fig. 4.12	∂W_{15} for RUN U-4, 5, 6 (rupture size variable)	14
Fig. 4.13	∂W_{12} for RUN U-4, 5, 6 (rupture size variable)	14
Fig. 4.14	$\partial P_1-\partial P_9$ and $\partial P_1-\partial P_8$ for RUN U-1, 2, 3, 4 (rupture location variable).....	15
Fig. 4.15	$\partial P_1-\partial P_9$ and $\partial P_1-\partial P_8$ for RUN U-4, 5, 6 (rupture size variable).....	15
Fig. 4.16	Transient Peak Values of Pressure Difference for Upper Duct Rupture ...	15
Fig. 4.17	$\partial P_7-\partial P_2$ and $\partial P_6-\partial P_2$ for RUN L-2, 3, 4, 5 (rupture location variable).....	16
Fig. 4.18	$\partial P_7-\partial P_2$ and $\partial P_6-\partial P_2$ for RUN-1, 2 (rupture size variable)	16
Fig. 4.19	Transient Peak Values of Pressure Difference for Lower Duct Rupture...16	
Fig. 4.20	$\partial P_9-\partial P_2$ for RUN U-2, 3, 4 and RUN U-5, 6 (rupture location and size variable)	16
Fig. 4.21	$\partial P_7-\partial P_2$ for RUN U-1, 2, 3, 4 and U-5, 6 (rupture location and size variable)16	
Fig. 4.22	$\partial P_6-\partial P_8$ and $\partial P_7-\partial P_9$ for RUN U-2, 4 (rupture location variable)	17
Ffg. 4.23	$\partial P_6-\partial P_8$ and $\partial P_7-\partial P_9$ for RUN U-4, 5, 6 (rupture size variable).....	17
Fig. 4.24	$\partial P_6-\partial P_8$ and $\partial P_7-\partial P_9$ for RUN L-1, 2, 3, 4, 5 (rupture location and size variable)	17
Fig. 4.25	$\partial P_9-\partial P_8$ for RUN U-1, 2, 3, 4, 5, 6 (rupture location and size variable)...17	
Fig. 4.26	$\partial P_7-\partial P_6$ for RUN L-1, 2, 3, 4, 5 (rupture location and size variable)	17
Fig. 4.27	Change of Pressure Difference with Time	19
Fig. A-I-1	Pressure of Various Points at Initial Condition.....	22
Fig. A-II-1	Analogue Computer Block Diagram for Lower Duct Rupture	23
Fig. A-II-3	Aanlogue Computer Block Diagram for Upper Duct Rupture	24
Fig. A-II-3	Function Simulated by Function Generator F(x).....	25

Nomenclature

<i>A</i>	cross sectional area	m^2
<i>C</i>	mass of coolant per 1 kg/cm^2	$kg/kg/cm^2$
<i>D_e</i>	equivalent diameter	m
<i>e₁</i>	electro-motive force (simulated circulator pressure) in the ruptured duct	kg/cm^2
<i>e₂</i>	electro-motive force (simulated circulator pressure)	kg/cm^2
<i>f</i>	friction factor	
<i>H</i>	hydrodynamic head	m
<i>I</i>	current (simulated mass flow)	kg/sec
<i>K</i>	proportional constant of frictional pressure drop	$sec^2/cm^2 \cdot m^3$
<i>k</i>	critical pressure ratio	
<i>M</i>	mass of coolant	kg
<i>P</i>	absolute pressure of coolant	kg/cm^2
<i>q</i>	volume flow multiplied by ρ_0	cm^2/sec
<i>Re</i>	Reynold's number	
<i>R₅</i>	proportional constant of discharging mass flow through the ruptured point	sec/cm^2
<i>S</i>	contraction coefficient	
<i>V</i>	voltage (simulated pressure)	kg/cm^2
<i>v</i>	velocity	m/sec
<i>W</i>	mass flow	kg/sec
<i>X</i>	normalized distance	
ρ	density of coolant	kg/m^3
ρ_0	density of coolant at 303°C and 1 kg/cm^2	$kg/m^3/kg/cm^2$
$\delta_*, \delta_I \dots$	deviation from normal value	
μ	viscosity	$kg/m-sec.$
Suffix		
1, 2, 3...	representing respective point	
O	initial condition	
R	reactor	
S	SRU (steam raising unit)	
C	circulator	
23, 32	current or voltage between two points	

1 東海発電所の概要

東海発電所は英国のコールダホール発電所を原型とし、それに改良を加えた実用規模の原子力発電所で、わが国情に適するように種々の改善が加えられている。この発電所の炉心は約 25,000 個の正六角柱状の黒鉛ブロックを 10 層に積み重ねた黒鉛の塊りで、各ブロックの中心には円柱形の穴が貫通し、燃料棒および制御棒などが挿入されている。

この炉心は内径 18 m の球形の圧力容器内に収められている。

一次冷却材の炭酸ガスは炉心中で加熱され、圧力容器の上部より 4 系統に分れ、上部ガスダクトを経て蒸気発生器に入る。ここで熱を水蒸気に与え、冷却されたガスはガス循環機により下部ガスダクトを経て圧力容器内に送り返される。ガス循環機は堅型遠心式で、蒸気発生器内におさまられている。

東海発電所の諸元を示すと Table. 1 のとおりである。

Table. 1 Design and Performance Data of Tokai Atomic Power Station

Fuel Element	
Fuel rod I. D.	2.37 cm. (0.934 in.)
Fuel rod O. D.	4.08 cm. (1.606 in.)
Nominal can thickness	0.17 cm. (0.067 in.)
Type of extended surface	Longitudinal fins and helical splitters.
Fin O. D.	6.604 cm. (2.6 in.)
No. of longitudinal fins	64
Centre channel diameter	10.16 cm. (4.0 in.)
Outer channel diameter	9.65 cm. (3.8 in.)
Element overall effective length.	0.845 m. (33.25 in.)
Element uranium length (unirradiated)	71.4 cm. (28 in.)
Reactor Core	
Diameter (excluding reflector)	11.72 m. (38.46 ft.)
Length (excluding reflector)	6.63 m. (21.75 ft.)
Reflector thickness (top, bottom and sides)	0.762 m. (2.5 ft.)
No. of control channels	181
No. of fuel channels	2,052
No. of channels containing fuel	2,048
No. of fuel elements per channel	8
Reactor Pressure vessel	
Normal working pressure	14.41 kgm/cm ² (205 p. s. i. g.)
Maximum working pressure	14.69 kgm/cm ² (209 p. s. i. g.)
Vessel outside diameter	18.5 m. (60.7 ft.)
Gas Circuits and SRU's	
No. of gas circuits and SRU's	4
Duct I. D.	1,320 mm. (5.97 ft.)
S. R. U. internal diameter	6,250 mm. (20.5 ft.)
Type of gas circulator	Centrifugal. vertical shaft
Reactor Performance	
Total mass flow through core	2,876 kg/s (6,340 lb./s)
Inlet gas temperature	203.3°C (398°F)
Outlet gas temperature	392.8°C (739.1°F)
CO ₂ pressure at channel inlet	14.34 kgm/cm ² (204 p. s. i. g.)

2 解 析

2.1 解析の仮定

- i) ガス温度は、定常時の炉心内のガス平均温度 (303°C) で代表させる。
- ii) ガス密度は圧力に比例する。そして、圧力 1 kg/cm²、温度 303°C に対応する密度 ρ_0 は、0.9200 kg/m³/kg/m² とする。
 $\rho = \rho_0 P = 0.9200 P$
- iii) 压力容器内ガス回路は、容量のみをもつ上下プレナム室と、抵抗のみをもつ炉心部とから構成される。
- iv) 熱交換器は、容量と抵抗から構成される。
- v) ダクトは抵抗のみから構成され、ダクトのもつ容量は、プレナム室と熱交換器の容量に配分した。
- vi) 炉内の圧力降下は流量の二乗に比例する。また摩擦係数は、流量の如何に関せず一定である。
- vii) 容量の大きさはその点の体積ではなく、そこに貯えられるガス重量で求め、上下プレナム室、各熱交換器に集中定数として与える。

- viii) ダクト破損時の循環機速度は一定とする。
- ix) 破損箇所より流出するガスの流れは断熱的であり、内部圧力が臨界圧力の 1.9 kg/cm² に下がるまで、臨界速度をもつものとする。
- x) ダクト破損時におけるガスの運動量変化は小さいので無視した。

2.2 ガス回路から電気回路への変換

ガス回路を次のような電気回路に対応させる

ガス流量	kg/sec	→ 電流
ガス圧力	kg/cm ²	→ 電圧
循環機	kg/cm ²	→ 起電力
回路に保有するガス量	kg	→ コンデンサの電荷
ガス回路抵抗		→ 非線型抵抗

ここでは1本のダクト系が破損し、残り3本のダクト系は破損しなかった場合について考えた。破損しなかった3本のダクト系を一緒にして、これを等価回路で表わし、ガス回路を電気回路に模擬すると Fig. 2-1 のようになる。

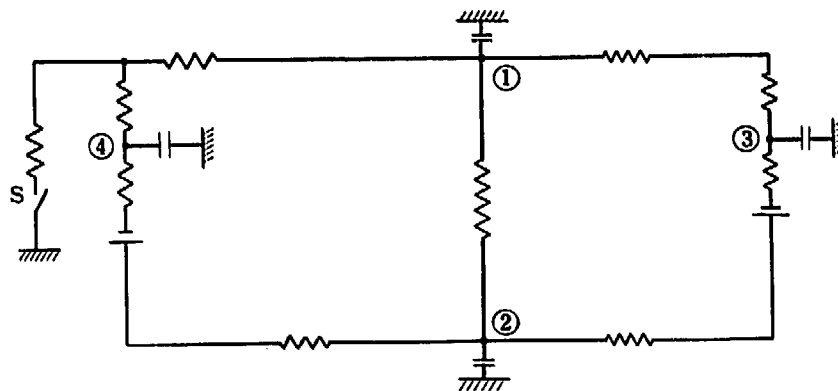


Fig. 2-1 Simulated Circuit for Upper Duct Rupture

- | | |
|------------------------|---|
| ① Upper plenum chamber | ③ Center of SRU in the unruptured circuit |
| ② Lower plenum chamber | ④ Center of SRU in the ruptured circuit |

Three unruptured circuits are combined into one.

右側の回路は破損しない3回路を等価回路で示したものであり、中央の回路は炉心を、左側の回路は破損回路を示す。まず、回路はアースに対してその圧力に

相当する電圧までコンデンサを充電しており、さらに循環機の圧力上昇に相当する起電力によってガス流量に相当する電流を流している。そのような状態におい

てガスダクトが破損することは、その破損点より抵抗を通してコンデンサの電荷を放電することに相当する。すなわち Fig. 2.1 のスイッチ S を閉じることに相当する。

2.3 方程式の求め方

2.3.1 回路の抵抗

(i) 炉心中の圧力降下は次式で与えられる。

$$\Delta P_R = \frac{K_R W_R^2}{\rho_R} = \frac{K_R W_R^2}{\rho_0 P_R} \dots\dots\dots (2.3.1)$$

(ii) 熱交換器およびダクト中の圧力降下は、炉心の場合と同様に

$$\Delta P_S = \frac{K_S W_S^2}{\rho_S} = \frac{K_S W_S^2}{\rho_0 P_S} \dots\dots\dots (2.3.2)$$

で表わされる。

なお、ここで流量が負になった場合には（逆流の場

合）圧力降下が逆になることに充分注意しなければならない。

2.3.2 循環機の特 性

循環機における圧力上昇は

$$\Delta P = \rho_c H \dots\dots\dots (2.3.4)$$

したがって、ヘッド H が決まれば圧力が決まる。

H は循環機速度、体積流量、蒸気回路入力、ガス回路などによって非常に複雑な変化をするので、簡単に決まらない。

しかし、定格流量に対し 20~30% の増減をする本解析の場合には循環機速度は一定と仮定してもよい。すなわち、この程度の破損がおきていくぶん流量が変わっても、循環機の慣性と調速機の作用および遠心式送風機の特性を考えるとき、速度一定の特性曲線上を動くと考えても大きな間違いはない。

回転数一定の場合の循環機の特性を Fig. 2.2 に示してある。

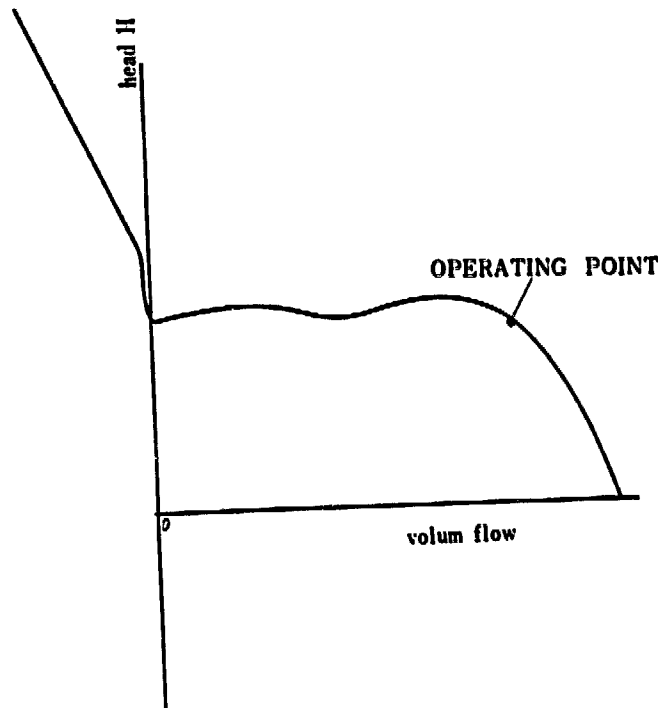


Fig. 2.2 Circulator Characteristic

2.3.3 破損箇所の抵抗

ダクトに破損がおこった場合、ガス圧力は大気に対し臨界圧力 1.9 kg/cm² 以上であれば、その点からガスは音速 (303°C において 375 m/sec) で噴出する。その噴出部分を詳細に考えると Fig. 2.3 のように

しぼられて、そのもっともしぼられた部分で音速になる。

いま、もっともしぼられた部分の断面積を $A\text{m}^2$ とすると、流量は $375 \text{ m/sec} \times A$ にその点における密度を掛けたものになる。しかるに、そのもっともしぼられた箇所の圧力は、回路の破損箇所の圧力に対し臨

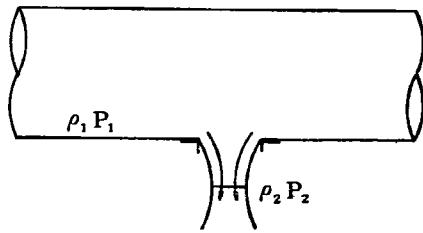


Fig. 2-3 Gas Flow through Rupture Part.

界圧力比になっている。

したがって

$$\rho_2 = k\rho_1 \dots\dots\dots (2-3-4)$$

ここで $k=0.545$ であるので、破損箇所の流量は

$$W = 375 A\rho_2 = 375 A \times 0.545 \rho_1 = 204.37 \rho_0 A P_1 \dots\dots\dots (2-3-5)$$

$$A = S A_0 \dots\dots\dots (2-3-6)$$

ここで S は、縮流係数で、これは破損部分の破損の型によって非常に変わり、その大きさは $0.5 \sim 0.8$ といわれる。なお、 S は回路内の圧力が変わるといふん変わるが、ここでは一定と考えると、あらゆる破損は等価断面積で表わすことができる。

すなわち、破損の大きさは、破損部分の圧力と流量の比例定数を変えることによって変えることができる。

2-3-4 コンデンサ

回路中のガス量は電気的には電荷に相当する。原子炉は最初約 14 気圧に加圧されているが、破損とともにこれら加圧貯蔵されていたガスが放出して圧力を低下する。これはコンデンサの電荷が放電することに相当する。

圧力と貯蔵ガスの間には次の関係がある。

$$P = \frac{1}{C} M \dots\dots\dots (2-3-7)$$

したがって、その点の圧力と貯蔵ガス量から、コンデンサの容量を求めることができる。

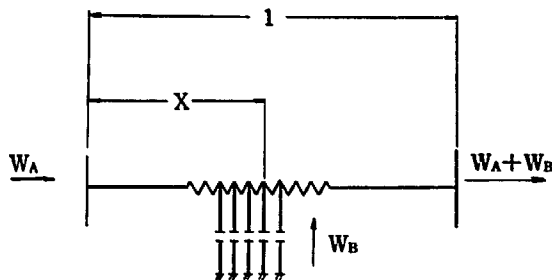


Fig. 2-4 SRU Circuit Simulated by Distributed Capacitances.

次に Fig. 2-1 の ③, ④ 点について考える。熱交換器のコンデンサは分布容量であるが、この解析では集中定数 C_3, C_4 で示した。オームの法則で示される場合には分布容量の midpoint でよいが、流量の 2 乗に比例する場合には、正確には midpoint にならない。いま、ダクト破損によって熱交換器に貯えられたガス W_B が出てくる場合を考える。

W_B が熱交換器全体から均一に出てくると仮定すると、 X なる点における dX なる長さの間でおこる圧力降下は、熱交換器にダクトから入ってくる流量を W_A とすると、

$$K(W_A + W_B X)^2 dX \dots\dots\dots (2-3-8)$$

に比例する。したがって熱交換器全体にわたっての圧力降下は次のようになる。

$$\Delta P_1 = \int_0^1 K(W_A + W_B X)^2 dX = K \left(W_A^2 + \frac{2 W_A W_B}{2} + \frac{W_B^2}{3} \right) \dots\dots\dots (2-3-9)$$

次に X 点にコンデンサを入れ、このコンデンサより W_B のガスが出ていくときの電圧降下は、

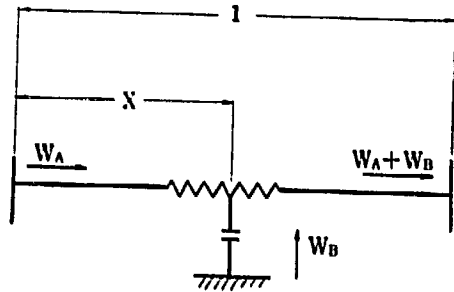


Fig. 2-5 SRU Circuit Simulated by Lumped Capacitance.

$$\Delta P_2 = K X W_A^2 + K(1-X)(W_A + W_B)^2 \dots\dots\dots (2-3-10)$$

に比例する

$\Delta P_1 = \Delta P_2$ とおくと

$$W_A^2 + W_A W_B + \frac{W_B^2}{3} = X W_A^2 + (1-X)(W_A + W_B)^2$$

$$\therefore X = \frac{W_A + \frac{2W_B}{3}}{2W_A W_B} \dots\dots\dots (2-3-11)$$

ここで $W_A \gg W_B$ ならば $X = \frac{1}{2}$

$W_A \ll W_B$ ならば $X = \frac{2}{3}$

したがって X としては $\frac{1}{2}$ と $\frac{2}{3}$ の間にある。いま考えている程度の破損の場合には $W_A \gg W_B$ であるので $X = \frac{1}{2}$ にとればよい。

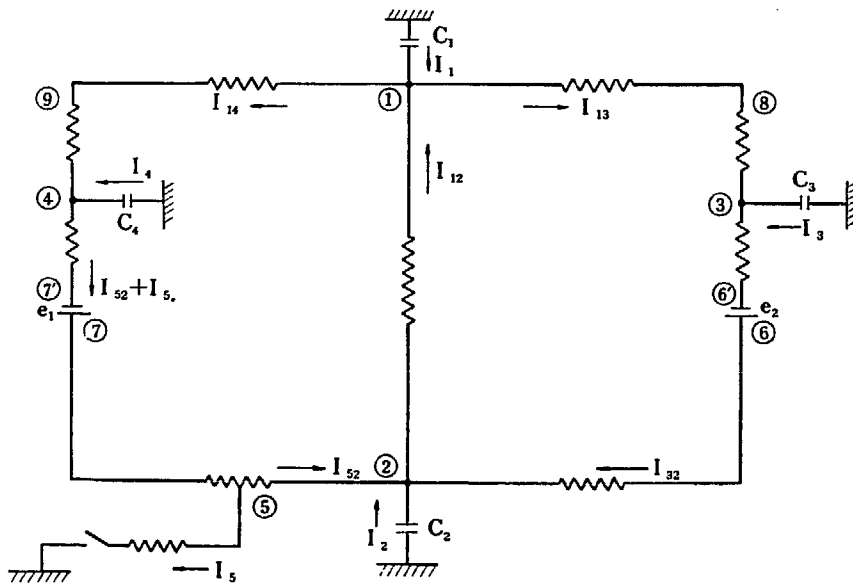


Fig. 2.6 Simulated Circuit for Lower Duct Rupture.

- ① Upper plenum chamber
- ② Lower plenum chamber.
- ③ Center of SRU in the unruptured circuit.
- ④ Center of SRU in the ruptured circuit.
- ⑤ Rupture point.
- ⑥ Inlet of blower in the unruptured circuit.
- ⑦ Inlet of blower in the ruptured circuit.
- ⑧ Inlet of SRU in the unruptured circuit.
- ⑨ Inlet of SRU in the ruptured SRU

2.4 下部ダクト破損時の方程式

下部ダクト破損時の模擬回路は Fig. 2.6 のように変わされ、その方程式は次のように表わされる。ただしここで $f_1(q_{12})$ は循環機のヘッドで回転数を一定とすると循環機流速の関数である。

$$V_1 = V_{10} - \frac{1}{C_1} \int (I_{14} + I_{13} - I_{12}) dt \dots\dots\dots (2.4.1)$$

$$V_2 = V_{20} - \frac{1}{C_2} \int (I_{12} - I_{32} - I_{52}) dt \dots\dots\dots (2.4.2)$$

$$V_3 = V_{30} = \frac{1}{C_3} \int (I_{32} - I_{13}) dt \dots\dots\dots (2.4.2)$$

$$V_4 = V_{40} - \frac{1}{C_4} \int (I_{52} + I_5 - I_{14}) dt \dots\dots\dots (2.4.4)$$

$$V_5 - 1.033 = R_5 I_5 \dots\dots\dots (2.4.5)$$

$$V_2 - V_1 = \frac{a_{12} I_{12}^2}{V_2 + V_1} \dots\dots\dots (2.4.6)$$

$$V_1 - V_3 = \frac{a_{12} I_{12}^2}{V_1 + V_3} \dots\dots\dots (2.4.7)$$

$$V_3 - V_6' = \frac{a_{36} I_{32}^2}{V_3 + V_6'} \dots\dots\dots (2.4.8)$$

$$V_6' + e_1 = V_6 \dots\dots\dots (2.4.9)$$

$$V_6 - V_2 = \frac{a_{62} I_{32}^2}{V_6 + V_2} \dots\dots\dots (2.4.10)$$

$$V_1 - V_4 = \frac{a_{14} I_{14}^2}{V_1 + V_4} \dots\dots\dots (2.4.11)$$

$$V_4 - V_7' = \frac{a_{47} (I_{52} + I_5)^2}{V_4 + V_7'} \dots\dots\dots (2.4.12)$$

$$V_7' + e_2 = V_7 \dots\dots\dots (2.4.13)$$

$$V_7 - V_5 = \frac{a_{75} (I_{52} + I_5)^2}{V_7 + V_5} \dots\dots\dots (2.4.14)$$

$$V_5 - V_2 = \frac{a_{52} I_{52}^2}{V_5 + V_2} \dots\dots\dots (2.4.15)$$

$$e_1 = V_6' H_1 \dots\dots\dots (2.4.16)$$

$$e_2 = V_7' H_2 \dots\dots\dots (2.4.17)$$

$$H_1 = f_1\left(\frac{q_{32}}{3}\right) \dots\dots\dots (2.4.18)$$

$$H_2 = f_2(q_{42}) \dots\dots\dots (2.4.19)$$

$$q_{32} = \frac{I_{32}}{V_5'} \dots\dots\dots (2.4.20)$$

$$q_{42} = \frac{I_{52} + I_5}{V_7'} \dots\dots\dots (2.4.21)$$

アナコンの計算を簡易にするため、初期値からの偏差で表わし、偏差の2乗の項を無視すると次のように

表わすことができる。

$$\begin{aligned} \partial V_1 &= -\frac{1}{C_1} \int (\partial I_{14} + \partial I_{13} - \partial I_{12}) dt \dots\dots(2.4.1') \\ \partial V_2 &= -\frac{1}{C_3} \int (\partial I_{12} - \partial I_{32} - \partial I_{52}) dt \dots\dots(2.4.2') \\ \partial V_3 &= -\frac{1}{C_3} \int (\partial I_{32} - \partial I_{13}) dt \dots\dots(2.4.3') \\ \partial V_4 &= -\frac{1}{C_4} \int (\partial I_{52} + \partial I_5 - \partial I_{14}) dt \dots\dots(2.4.4') \\ \partial V_5 &= \frac{V_{50} - 1.033}{R_5} + \frac{\partial V_5}{R_5} \dots\dots(2.4.5') \\ \partial I_{12} &= \frac{V_{20}}{2a_{12}I_{120}} \partial V_2 - \frac{V_{10}}{2a_{12}I_{120}} \partial V_1 \dots\dots(2.4.6') \\ \partial I_{13} &= \frac{V_{10}}{2a_{13}I_{130}} \partial V_1 - \frac{V_{30}}{2a_{13}I_{130}} \partial V_3 \dots\dots(2.4.7') \\ 2a_{36}I_{320}\partial I_{32} &= V_{30} \cdot \partial V_3 - V_6' \partial V_6' \dots\dots(2.4.8') \\ \partial V_6' + \partial e_1 \partial V_6 &\dots\dots(2.4.9') \\ 2a_{62}I_{320}\partial I_{32} &= V_{60} \partial V_6 - V_{20} \partial V_2 \dots\dots(2.4.10') \\ \partial I_{14} &= \frac{V_{10}}{2a_{14}I_{140}} \partial V_1 - \frac{V_{40}}{2a_{14}I_{140}} \dots\dots(2.4.11') \\ \partial I_{52} + \partial I_5 &= \frac{V_{40}}{2a_{47}I_{520}} \partial V_4 - \frac{V_7'0}{2a_{47}I_{520}} \partial V_7' \dots\dots(2.4.12') \\ \partial V_7' + \partial e_2 &= \gamma V_7 \dots\dots(2.4.13') \\ \partial I_{52} + \partial I_5 &= \frac{V_{70}}{2a_{75}I_{520}} \partial V_7 - \frac{V_{50}}{2a_{75}I_{520}} \partial V_5 \dots\dots(2.4.14') \\ \partial V_5 &= \frac{V_{20}}{V_{50}} \partial V_2 + \frac{2a_{25}I_{420}}{V_{50}} \partial I_{52} \dots\dots(2.4.15') \\ \partial e_1 &= V_6'0 \partial H_1 + H_{10} \partial V_6' \dots\dots(2.4.16') \end{aligned}$$

$$\partial e_2 = V_7'0 \partial H_2 + H_{20} \partial V_7' \dots\dots(2.4.17')$$

$$\partial q_{32} = \frac{\partial I_{32}}{V_6'0} - \frac{I_{320}}{(V_6'0)^2} \partial V_6' \dots\dots(2.4.20')$$

$$\partial q_{42} = \frac{(\partial I_{52} + \partial I_5)}{V_7'0} - \frac{I_{420}}{(V_7'0)^2} \partial V_7' \dots\dots(2.4.21')$$

2.5 上部ダクト破損時の方程式

上部ダクト破損時の模擬回路は Fig. 2.7 のように表わされ、その方程式は次のように表わされる。

$$V_1 = V_{10} - \frac{1}{C_1} \int (I_{15} + I_{13} - I_{12}) dt \dots\dots(2.5.1)$$

$$V_2 = V_{20} - \frac{1}{C_2} \int (I_{12} - I_{32} - I_{42}) dt \dots\dots(2.5.2)$$

$$V_3 = V_{30} - \frac{1}{C_3} \int (I_{32} - I_{13}) dt \dots\dots(2.5.3)$$

$$V_4 = V_{40} - \frac{1}{C_4} \int (I_{42} + I_5 - I_{15}) dt \dots\dots(2.5.4)$$

$$V_5 - 1.033 = R_5 I_5 \dots\dots(2.5.5)$$

$$V_2 - V_1 = \frac{a_{12}I_{12}^2}{V_2 + V_1} \dots\dots(2.5.6)$$

$$V_3 - V_6' = \frac{a_{36}I_{32}^2}{V_3 + V_6'} \dots\dots(2.5.8)$$

$$V' + e_1 = V_6 \dots\dots(2.5.9)$$

$$V_6 - V_2 = \frac{a_{62}I_{32}^2}{V_6 + V_2} \dots\dots(2.5.10)$$

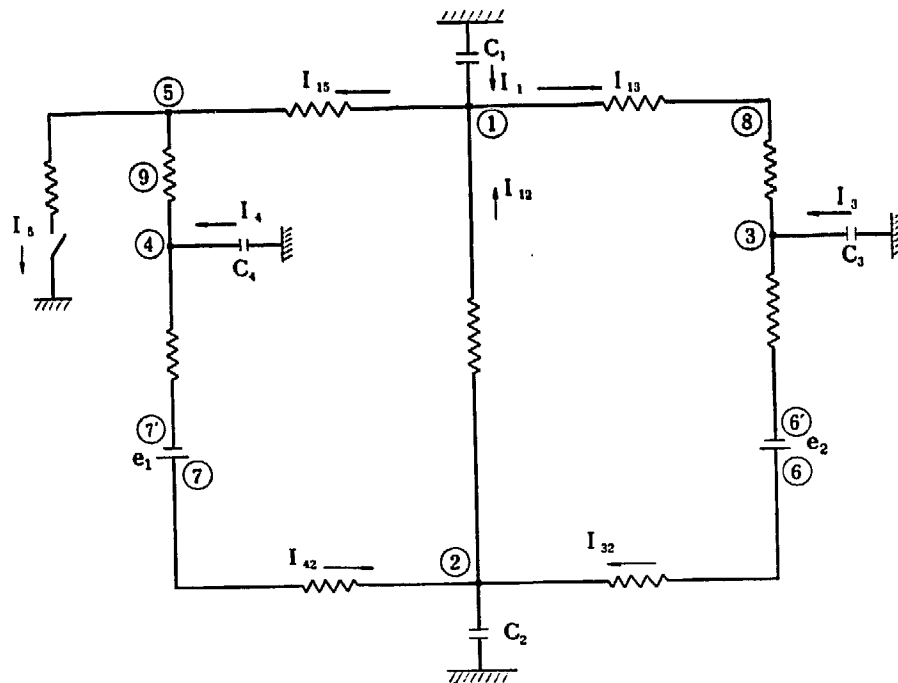


Fig. 2.7 Simulated Circuit for Upper Duct Rupture.

$$V_1 - V_5 = \frac{a_{15} I_{15}^2}{V_1 + V_5} \dots\dots\dots (2.5.11)$$

$$V_5 - V_4 = \frac{a_{54} (I_{15} - I_5)^2}{V_4 + V_5} \dots\dots\dots (2.5.12)$$

$$V_4 - V_7' = \frac{a_{47} I_{42}^2}{V_4 + V_7'} \dots\dots\dots (2.5.13)$$

$$V_7' + e_2 = V_7 \dots\dots\dots (2.5.14)$$

$$V_7 - V_2 = \frac{a_{72} I_{42}^2}{V_7 + V_2} \dots\dots\dots (2.4.15)$$

$$e_1 = V_6' H_1 \dots\dots\dots (2.4.16)$$

$$e_2 = V_7' H_2 \dots\dots\dots (2.4.17)$$

$$H_1 = f_1 \left(\frac{q_{32}}{3} \right) \dots\dots\dots (2.4.18)$$

$$H_2 = f_1(q_{42}) \dots\dots\dots (2.4.19)$$

$$q_{32} = \frac{I_{32}}{V_6'} \dots\dots\dots (2.4.20)$$

$$q_{42} = \frac{I_{42}}{V_7'} \dots\dots\dots (2.4.21)$$

アナコンの計算を簡易にするため初期値からの偏差で表わし、偏差の2乗の項を無視すると次のように表わすことができる。

$$\partial V_1 = -\frac{1}{C_1} \int (\partial I_{15} + \partial I_{13} - \partial I_{12}) dt \dots\dots (2.5.1')$$

$$\partial V_2 = -\frac{1}{C_2} \int (\partial I_{12} - \partial I_{32} - \partial I_{32}) dt \dots\dots (2.5.2')$$

$$\partial V_3 = -\frac{1}{C_3} \int (\partial I_{32} - \partial I_{13}) dt \dots\dots\dots (2.5.3')$$

$$\partial V_4 = -\frac{1}{C_4} \int (\partial I_{42} + \partial I_5 - \partial I_{15}) dt \dots\dots (2.5.4')$$

$$\partial I_5 = \frac{V_{50} - 1.033}{R_5} + \frac{\partial V_5}{R_5} \dots\dots\dots (2.5.5')$$

$$\partial I_{12} = \frac{V_{20}}{2a_{12} I_{120}} V_2 \partial - \frac{V_{10}}{2a_{12} I_{120}} \partial V_1 \dots\dots\dots (2.5.6')$$

$$\partial I_{12} = \frac{V_{10}}{2a_{13} I_{130}} \partial V_1 - \frac{V_{30}}{2a_{13} I_{130}} \partial V_3 \dots\dots\dots (2.5.7')$$

$$2a_{36} I_{320} \partial I_{32} = V_{30} \partial V_3 - V_6' \partial V_6' \dots\dots\dots (2.5.8')$$

$$\partial V_6' + \partial e_1 = \partial V_6 \dots\dots\dots (2.5.9')$$

$$2a_{62} I_{320} \partial I_{32} = V_{60} \partial V_6 - V_{20} \partial V_2 \dots\dots (2.5.10')$$

$$\partial I_{15} = \frac{V_{10}}{2a_{14} I_{150}} \partial V_1 - \frac{V_{50}}{2a_{15} I_{150}} \dots\dots\dots (2.5.11')$$

$$(\partial I_{15} - \partial I_5) = \frac{V_{50}}{2a_{54} I_{150}} \partial V_5 - \frac{V_{40}}{2a_{54} I_{150}} \dots\dots (2.5.12')$$

$$\partial I_{32} = \frac{V_{40}}{2a_{47} I_{420}} \partial V_4 - \frac{V_7' \partial}{2a_{47} I_{420}} \partial V_7' \dots\dots\dots (2.5.12')$$

$$\partial V_7' + \partial e_2 = \partial V_7 \dots\dots\dots (2.5.14')$$

$$\partial I_{32} = \frac{V_{70}}{2a_{72} I_{420}} \partial V_7 - \frac{V_{20}}{2a_{72} I_{420}} \partial V_2 \dots\dots\dots (2.5.15')$$

$$\partial e_1 = V_6' \partial H_1 + H_{10} \partial V_6' \dots\dots\dots (2.5.16')$$

$$\partial e_2 = V_7' \partial H_2 + H_{20} \partial V_7' \dots\dots\dots (2.5.17')$$

$$\partial q_{32} = \frac{\partial I_{32}}{V_6' \partial} - \frac{I_{320}}{(V_6' \partial)^2} \partial V_6' \dots\dots\dots (2.5.20')$$

$$\partial q_{42} = \frac{\partial I_{42}}{V_7' \partial} - \frac{I_{420}}{(V_7' \partial)^2} \partial V_7' \dots\dots\dots (2.5.21')$$

3 解 析 項 目

解析をおこなった項目は Table. 2 のとおりである。
 おのおのの計算番号 (Run Number) に対して、6
 ペンレコーダーを 3 回切替えることになつて、計 18

このパラメータの時間的変化を求めた。

実際に記録したパラメータは Table. 3 のとおりである。

Table. 2 List of Run Numbers

Run Numbers	Equivalent Rupture	Location of Rupture
Run U-1*	1,000 cm ²	1/4 distance from vessel outlet to SRU
Run U-2	"	center of vessel outlet and SRU
Run U-3	"	3/4 distance from vessel outlet to SRU
Run U-4	"	inlet of SRU
Run U-5	300	do.
Run U-6	100	do.
Run L-1**	300	outlet of circulator
Run L-2	1,000	3/4 distance from circulator outlet to vessel
Run L-3	"	center of circulator outlet and vessel
Run L-4	"	1/4 distance from circulator outlet to vessel inlet.
Run L-5	"	outlet of circulator

* U: designates upper duct rupture

** L: designates lower duct rupture

Table. 3 List of Parameters Recorded

1. Pressure
 - (1) δP_1 Deviation of pressure from the rated value at the upper plenum of the reactor vessel.
 - (2) δP_3 Deviation of pressure from the rated value at the center of the unruptured SRU.
 - (3) δP_4 Deviation of pressure from the rated value at the center of the ruptured SRU.
 - (4) δP_5 Deviation of pressure at the ruptured point from the rated value.
 - (5) δe_1 Deviation of pressure rise from the rated value the circulator in the unruptured duct.
 - (6) δe_2 Deviation of pressure rise from the rated value at the circulator in the ruptured duct.
2. Mass flow
 - (7) δW_{12} Deviation of mass flow through the core from the rated value.
 - (8) $\delta W_{12/3}$ Deviation of mass flow from the rated value at the core outlet of the unruptured duct.
 - (9) δW_{15} Deviation of mass flow from the rated value at the core outlet of the ruptured duct.
 - (10) $\delta W_{32/3}$ Deviation of mass flow from the rated value at the core inlet of the unruptured duct.
 - (11) δW_{42} Deviation of mass flow from the rated value at the core inlet of the ruptured duct.
 - (12) δW_4 Mass flow discharged through the ruptured point.

3. Pressure difference

- (13) $\delta p_9 - \delta P_1$ Deviation of pressure difference from the rated value between the top of SRU in the ruptured duct and the upper plenum of the reactor vessel.
 - (14) $\delta P_8 - \delta P_1$ Deviation of pressure difference from the rated value between the top of SRU in the unruptured duct and the upper plenum of the reactor vessel.
 - (15) $\delta P_7 - \delta P_2$ Deviation of pressure difference from the rated value between the bottom of SRU in the ruptured duct and the lower plenum of the reactor vessel.
 - (16) $\delta P_6 - \delta P_2$ Deviation of pressure difference from the rated value between the bottom of SRU in the unruptured duct and the lower plenum of the reactor vessel.
 - (17) $\delta P_6 - \delta P_8$ Deviation of pressure difference from the rated value between the top and bottom of SRU in the unruptured duct.
 - (18) $\delta P_7 - \delta P_9$ Deviation of pressure difference from the rated value between the top and bottom of SRU in the ruptured duct.
-

4 解析結果およびその検討

4.1 各部の圧力変化量について

上部および下部ダクト破損時におけるおもなる点の圧力の定格値からの変化を Fig.4.1~Fig. 4.5 に示してある。これより明らかなように各部の圧力はほとんど直線的に低下し、その低下の速度がほとんど一定である。

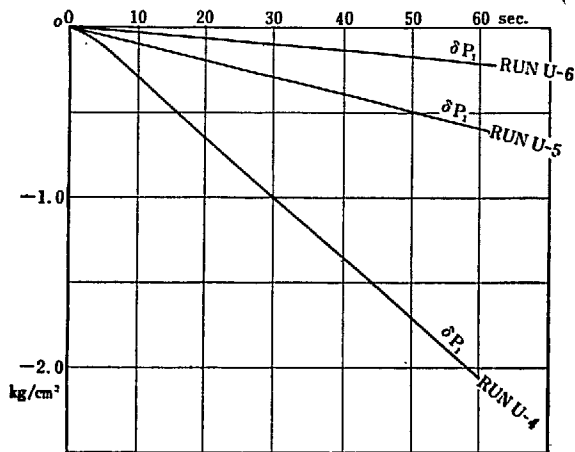


Fig. 4.3 ΔP_1 for RUN U-4, 5, 6 (rupture size variable)

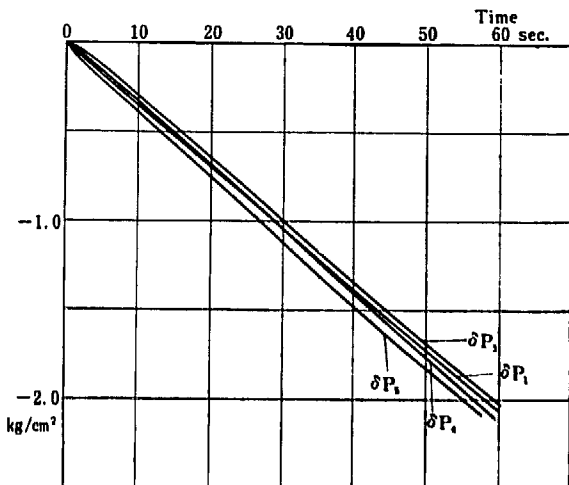


Fig. 4.1 ΔP_1 , ΔP_3 , ΔP_4 and ΔP_5 for RUN U-4

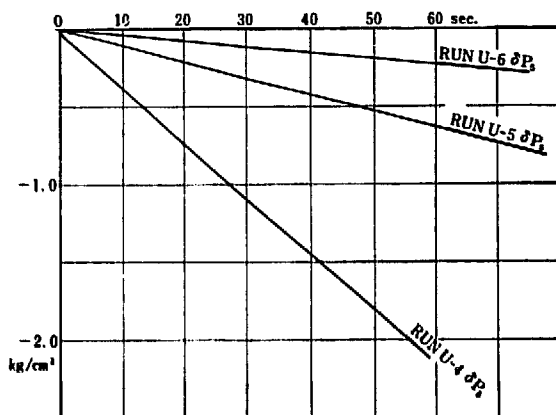


Fig. 4.4 ΔP_5 for RUN U-4, 5, 6 (rupture size variable)

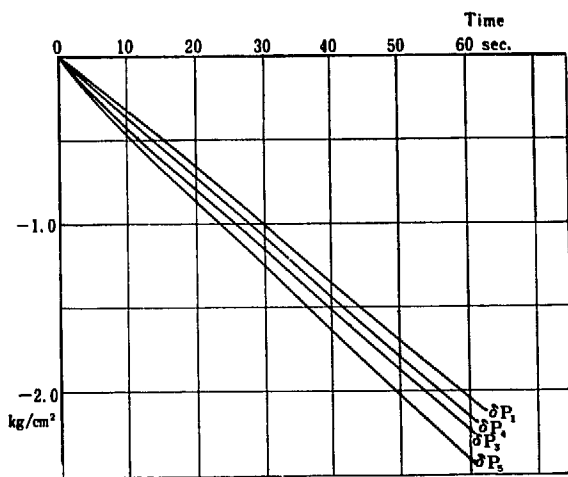


Fig. 4.2 ΔP_1 , ΔP_3 , ΔP_4 and ΔP_5 for RUN L-3

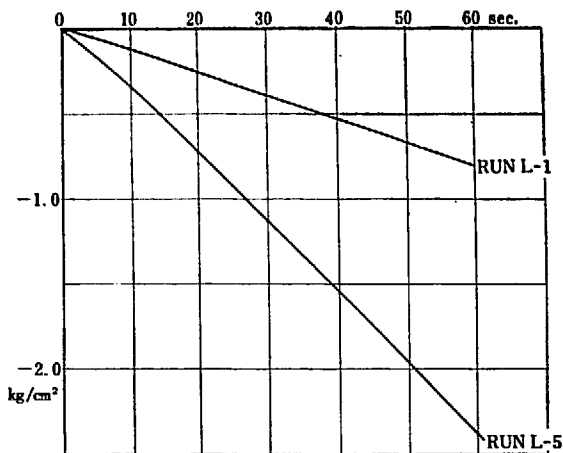


Fig. 4.5 ΔP_5 for RUN L-1, 5 (rupture size variable)

Table. 4 Time Required for 10% Pressure Decrease (in sec.)

Run No.	Run U-1	Run U-2	Run U-3	Run U-4	Run U-5	Run U-6
P_1	37.5	38.5	38.0	38.0	123	360
P_2	37.0	37.5	37.0	36.5	123	356
P_3	36.0	37.0	36.0	36.0	120	342
P_4	36.5	36.0	35.5	35.0	118.5	332

Run No.	Run L-1	Run L-2	Run L-3	Run L-4	Run L-5	
P_1	110	—	37.0	—	—	
P_2	109	35.0	34.5	35.0	35.0	
P_4	108	35.5	35.0	35.0	38.0	
P_5	104	34.5	34.0	34.0	35.0	

Table. 5 Deviation of Pressure Rise of the Circulator (kg/cm²)

Run No.	Run U-1		Run U-2		Run U-3		Run U-4		Run U-5		Run U-6	
	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2
30 sec.	0.088	0.082	0.084	0.078	0.086	0.080	0.089	0.083	0.026	0.017	0.009	0.007
60 sec.	0.170	0.167	0.166	0.163	0.170	0.164	0.170	0.166	0.051	0.050	0.018	0.0165

Run No.	Run L-1		Run L-2		Run L-3		Run L-4		Run L-5			
	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2	e_1	e_2		
30 sec.	0.034	0.035	0.090	0.095	0.093	0.096	0.094	0.098	0.094	0.100		
60 sec.	0.059	0.060	0.180	0.185	0.180	0.187	0.180	0.190	0.180	0.190		

圧力低下の割合を評価する目安として、圧力が10%低下するに要する時間を求めると Table. 4 のようになる。

Table. 5 からわかるように大まかにいえることは、この程度のダクト破損の場合には、事故とともに均一に密度が低下し、場所による圧力変化の差はあまり大きくでてこないということである。すなわち同じ1,000 cm² の破損の場合には、どの点も30数秒で10% 圧力が低下している。

さらに詳細に比較すると次のようなことがいえる。

(i) 上部ダクト破損の場合には下部ダクト破損の場合に比べると10% 圧力低下するに要する時間が長い、これは下部ダクトの圧力のほうが高いためである。実際にはさらにガス密度の温度効果が加わるので下部ダクト破損の場合は14% 程度短くなることが予想され、逆に上部ダクト破損の場合は14% 程度長く

なることが予想される*。

(ii) 圧力低下の傾向

圧力低下を P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_5 について比較すると、破損箇所 (P_5) の変化量が最大であるが、その他の点については予想したほど、差は出なかった。

(iii) 破損の大きさの影響 (Fig. 4-3~Fig. 4-5)

破損の大きさと10% 低下する時間はほぼ反比例の関係にある。

例えば、破損の大きさが10倍になると圧力が10% 低下する時間はほぼ1/10で、厳密には1/10よりわずかに大きい値に出ている。これは破損によっておこる回路流量の変化が定格値に比して小さいような破損の場合には、回路の抵抗はそれほど変わらないが、定格値の数十% 程度以上の変化が回路におこると抵抗が変ってくるためガスの放出を阻止するように働き、したがって10% 低下する時間をわずかながら長くするように働く。すなわち破損の大きくなった場合に安全側に働く因子となる。

* この解析は303°Cのガス密度を用いたが、上部ダクトのガスは393°Cで密度は303°Cのガスの約0.86倍、下部ダクトのガスは203°Cで密度は303°Cのガスに比し約1.21倍であることに基因する。

4.2 循環機における圧力上昇

各 Run について破損した回路の循環機における圧力上昇の定格値からのずれ (δe_1) と破損した回路の循環機におけるそれ (δe_2) とを記録した。その一例を示したのが Fig. 4-6 である。また 30 秒, 1 分における各値を求めると Table. 5 のようになる。

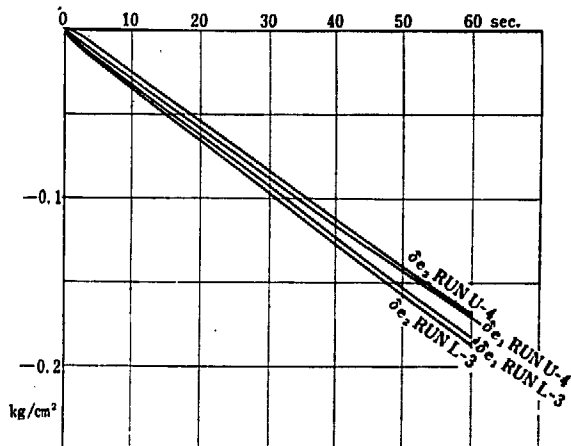


Fig. 4-6 δe_1 and δe_2 for RUN U-4 and RUN L-3

これより次のようなことがわかる。

(i) δe_1 と δe_2 (Fig. 4-6 参照)

δe_1 と δe_2 はほとんど同じような傾向を示して減少している。このように破損したダクト系の循環機も破損しない系の循環機もほとんど同じようになるということは注目すべきことである。すなわち 1,000 cm² 程度の破損の場合には、循環機が回路の動特性に強く影響を及ぼさず、主として密度の影響のみが作用しているのである。

しかし、詳細に見ると最初の数秒間は循環機が圧力上昇に影響することが、 δe_1 , δe_2 の曲線からうかがうことができる。

(ii) 上部ダクト破損と下部ダクト破損の比較

上部ダクト破損の場合には、循環機を流れるガスの流速がおちるのでヘッドが上昇し圧力上昇をもたらすが、一方ガス密度の減少による循環機の加圧力低下が加わるので、最初の数秒間 δe_2 は横這い状態であるがその後密度の減少の効果が強くなるので、 δe_1 とほぼ平行して低下するようになる。一方、下部ダクト破損の場合には破損と同時に循環機を流れるガスの流速が増加するのでヘッドが低下し、これにガス密度の減少による循環機の加圧力低下が加わるので、 δe_1 よりも急峻な減少を示している。

したがって

上部ダクト破損の場合は $\delta e_1 < \delta e_2$

下部ダクト破損の場合は $\delta e_1 > \delta e_2$

(iii) 破損場所による効果は小さくてその傾向は認められない。

4.3 炉心を流れる流量 δW_{12}

炉心を流れる流量は上部ダクト破損の場合はわずかながら増加し、その後減少し下部ダクト破損の場合には最初から減少する (Fig. 4-7, Fig. 4-8 参照)。

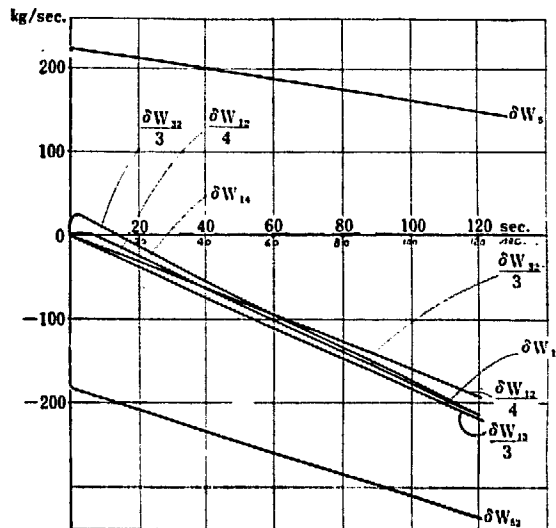


Fig. 4-7 δW_s for RUN L-3

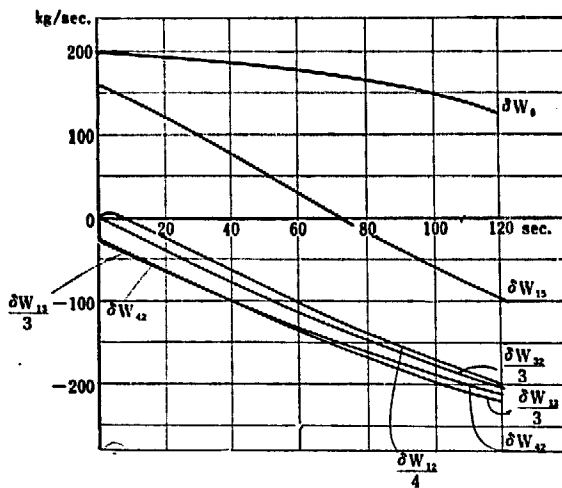


Fig. 4-8 δW_s for RUN U-4

上部ダクトで 1,000 cm² 破損した場合には、最初破損と同時に 5~10 秒後に定格の約 1% 程度増加する。この値は破損位置が圧力容器に近いほどわずかながら大きいようであるが、1,000 cm² 程度の破損では、ガス回路から大気をみた抵抗がダクト中の抵抗に

Table. 6 Decrease of Pressure and Mass Flow (%)

Run No. Time	Run U-1		Run U-2		Run U-3		Run U-4		Run U-5		Run U-6	
	δP_1	δP_{12}	δP_1	δP_{12}	δP_1	δP_{12}	δP_1	δP_{12}	δP_1	δP_{12}	δP_1	δP_{12}
30 sec.	7.70	6.4	7.65	6.4	7.70	6.4	7.75	6.4	2.4	1.8	0.8	0.7
60 sec.	15.6	15.0	15.5	15.0	15.6	15.0	15.7	15.0	4.8	4.4	1.6	1.5
90 sec.	—	22.0	—	22.0	—	22.0	—	22.0	—	7.0	—	2.5

比べてかなり大きい。位置の影響は顕著でない。10秒を過ぎるといずれも密度の減少がきいてくるので、流量は減少する一方である。Table. 6 は上部ダクト破損時の圧力と流量の減少率を示す。これからわかるように、圧力減少率が流量減少率よりも小さいのは、上部ダクト破損によって炉心を流れるガスが加速されているためである。

逆に下部ダクト破損の場合には、炉心を流れるガスが減速されることによって圧力減少率が流量減少率よ

りも大きい。

いずれの場合にも時間が経つにつれて、流量減少率は圧力減少率（密度減少率）に近づく。

4.4 ダクトを流れるガス流量

(Fig. 4.7~Fig. 4.13 参照)

Table. 7 は破損箇所を流れる流量と各ダクトを流れる流量の瞬時値と1分後の値を示す。これより次のようなことがわかる。

Table. 7 Deviation of Mass Flow in the Duct from the Rated Value 677 kg/sec. (kg/sec.)

Run No. Mass Flow	Run U-1		Run U-2		Run U-3		Run U-4		Run U-5		Run U-6	
	Peak Value	1 min. Value	Peak Value	1 min. Value	Peak Value	1 min. Value	Peak Value	1 min. Value	Peak Value	1 min. Value	Peak Value	1 min. Value
δW_{15}	-180	-30	-175	-35	-170	-30	-160	-25	-55	-10	-4	-4
δW_{42}	-20	-125	-20	-125	-30	-130	-35	-135	-10	-43	-14	-14
$1/3 \delta W_{13}$	-35	-140	-35	-138	-35	-135	-30	-135	-10	-45	-15	-15
$1/3 \delta W_{32}$	-10	-125	-10	-115	-5	-120	0	-115	0	-40	-14	-14
W_5	-205	-168	-208	-175	-200	-165	-205	-178	-65	-60	-20	-20

Run No. Mass Flow	Run L-1		Run L-2		Run L-3		Run L-4		Run L-5			
	Peak Value	1 min. Value	Peak Value	1 min. Value	Peak Value	1 min. Value	Peak Value	1 min. Value	Peak Value	1 min. Value		
δW_{14}	-5	-35	-8	-110	-10	-110	-10	-105	-15	-100		
δW_{52}	-57	-90	-190	-270	-185	-260	-180	-260	-175	-255		
$1/3 \delta W_{13}$	0	-38	0	-115	0	-130	0	-135	0	-140		
$1/3 \delta W_{32}$	-5	-30	-30	-105	-25	-100	-25	-100	-20	-100		
W_5	-68	-64	-225	-183	-225	-185	-223	-185	-220	-180		

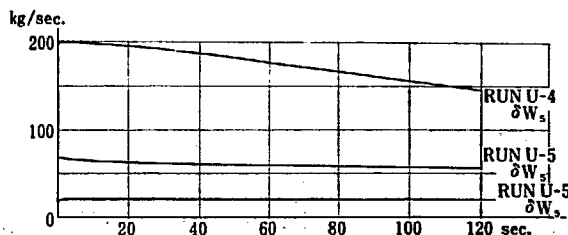


Fig. 4.9 δW_5 for RUN U-4, 5, 6 (rupture size variable)

(i) ガス放出量 W_5 (Fig. 4.9, Fig. 4.10 参照)
同一大きさの破損の場合には、下部ダクト破損のほうが上部ダクト破損よりもガス放出量が多い。これは下部ダクトの方が圧力が高いからである。しかし実際には、温度によるガス密度を考慮すれば、さらにこの差は大きくなるだろう。

放出量は時間とともに低下するが、これは圧力の低下によるガス密度の減少にもとづく、時間に対する放

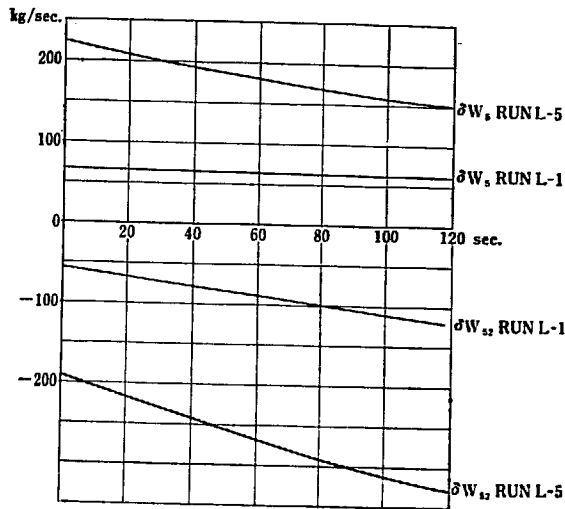


Fig. 4.10 δW_{52} and δW_5 for RUN L-1, 5 (rupture size variable)

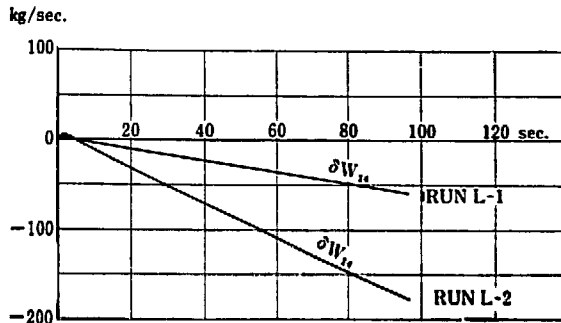


Fig. 4.11 δW_{13} for RUN L-1, 2 (rupture size variable)

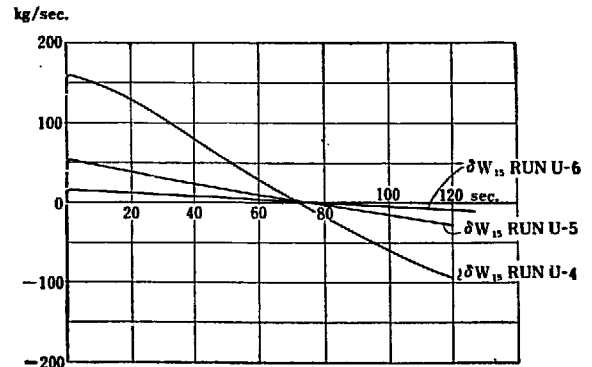


Fig. 4.12 δV_{15} for RUN U-4, 5, 6 (rupture size variable)

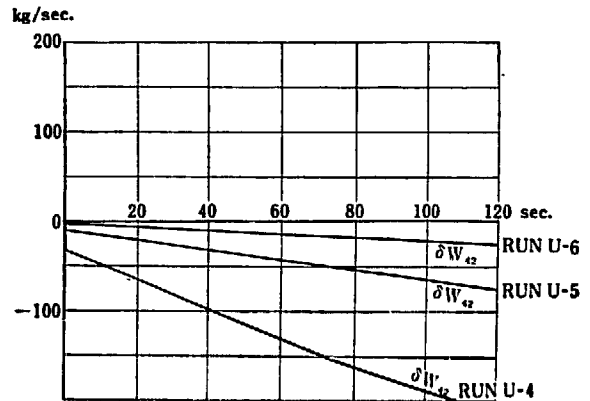


Fig. 4.13 δW_{42} for RUN U-4, 5, 6 (rupture size variable)

出量の減少率は破損が大きいほど大きい。

場所による効果はこの程度の破損ではきいてこない。

(ii) ダクトを流れる流量 (Fig. 4.7, Fig. 4.8, Fig. 4.11~Fig. 4.13 参照)

1,000 cm² のダクト破損によって効出されるガス流量はダクトを流れる定格流量の約 30% に相当する。このような事故の場合には、破損と同時に瞬間的に流量分布が変わり、その後は密度の効果で、一樣に流量が減少することは、他のパラメータと同じである。

まず、上部ダクトが破損した場合には、 δW_{15} は瞬間的にガス放出量のほぼ 90% の流量だけ増加するが、この影響によって破損しない系の上部ダクトの流量は減少する。また、 δW_{32} 、 δW_{42} も瞬間的に減少する (Fig. 4.8 参照)。

下部ダクトが破損した場合には δW_{52} が瞬間的に減少し、一時的に δW_{32} 、 δW_{14} が増加するが、上部ダクト破損の場合に比べると他回路への影響は少ない。これはガスの流れの方向を考えれば、明らかである

(Fig. 4.7 参照)。

4.5 差 圧

ここでは実際の差圧でなく、それぞれの定格値からの変化値の差圧 $\delta P_i - \delta P_j$ を記録した。

例えば

$$\begin{aligned} P_i - P_j &= P_{i0} + \delta P_i - (P_{j0} + \delta P_j) \\ &= (P_{i0} - P_{j0}) + (\delta P_i - \delta P_j) \end{aligned}$$

したがって、実際の差圧はこの記録値に最初から存在する差圧 $P_{i0} - P_{j0}$ を加えなければならない。

(i) 压力容器上部と SRU 上部の差圧の変化 ($\delta P_1 - \delta P_8$, $\delta P_1 - \delta P_9$)

上部ダクトが破損したときには破損ダクト系の差圧は、破損しないダクト系の差圧に比べるとはるかに大きな変化をしている (Fig. 4.14, Fig. 4.15 参照)。

Run U-1~Run U-4 は同じ 1,000 cm² の破損した場合で、場所を変えたものであるが、破損場所が圧

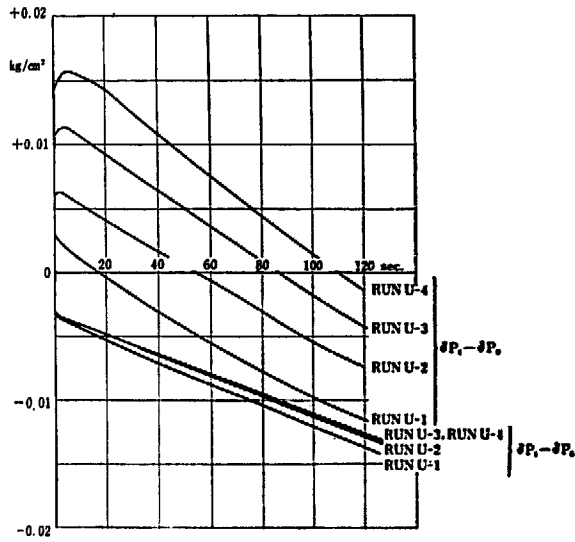


Fig. 4-14 $\Delta P_1 - \Delta P_3$ and $\Delta P_1 - \Delta P_8$ for RUN U-1, 2, 3, 4 (rupture location variable)

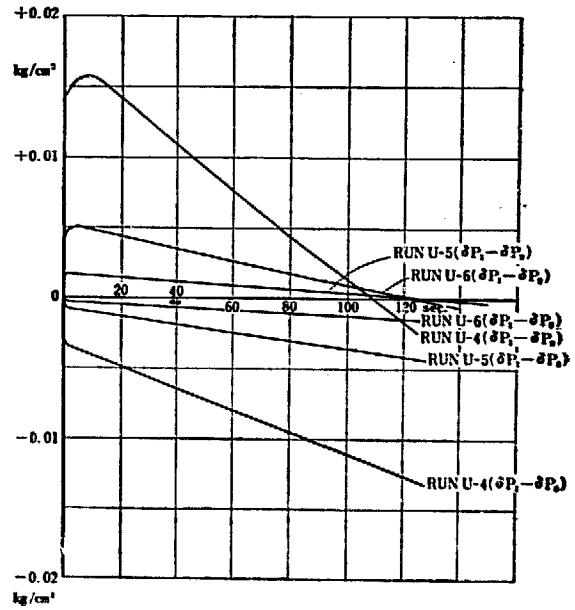


Fig. 4-15 $\Delta P_1 - \Delta P_3$ and $\Delta P_1 - \Delta P_8$ for RUN U-4, 5, 6 (rupture size variable)

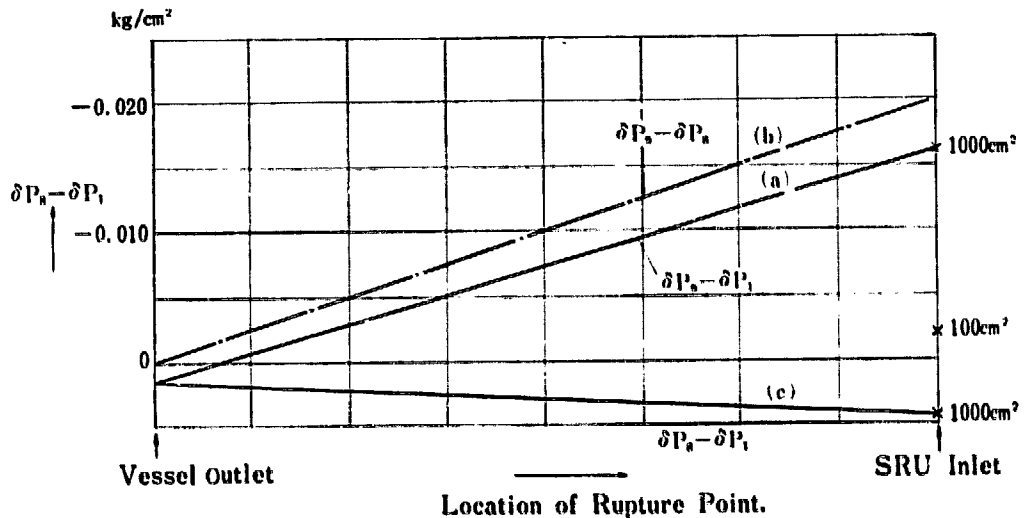


Fig. 4-16 Transient Peak Values of Pressure Difference for Upper Duct Rupture.

力容器に近くなるほど差圧の変化値は少なくなり、破損位置を横軸にとり差圧の最大過渡値をプロットすると Fig. 4-16 の曲線(a)のようになる。これより明かなように、上部ダクトで圧力容器から約 1/12 の点より圧力容器側で破損した場合には、圧力容器上部の圧力低下が各 SRU 上部の圧力低下より大きくなるので、破損したダクト系の差圧も、破損しないダクト系の差圧もすべて正となって、しかもその小さくなって識別しにくくなる。一方、破損が SRU に近づけば近づくほど破損ダクト系の差圧の過渡値が大きくなり識別しやすくなる。しかし、この値も適渡的なもので、時間

とともに宿度の影響が出てくるので、減少していくことはいうまでもない。

なお、はじめにのべたように、初期値の差圧 (約 -0.035 kg/cm^2) を加味すると SRU の上部で $1,000 \text{ cm}^2$ の破損の場合には、破損ダクト系の差圧は -0.051 kg/cm^2 、一方の破損しないダクト系の差圧は -0.031 kg/cm^2 となるが、時間とともに密度の効果がきいてくるので両者とも次第に 0 に近づき識別しにくくなる。

下部ダクトの破損の場合には、これらの量は小さくて問題にはならない。

(ii) 圧力容器下部と SRU 下部の差圧の変化

$$(\delta P_7 - \delta P_2, \delta P_6 - \delta P_2)$$

Fig. 4-17, Fig. 4-18 に、下部ダクトに破損が起こった場合の破損ダクト系と破損しないダクトなどの差圧の変化値を記録してある。これより下部ダクト破損の場合には破損したダクト系の差圧が破損しないダクト系よりもはるかに大きい変化をしている。

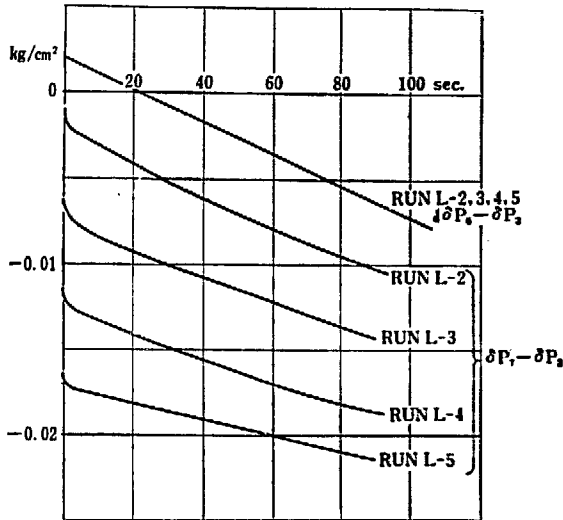


Fig. 4-17 $\delta P_7 - \delta P_2$ and $\delta P_6 - \delta P_2$ for RUN L-2, 3, 4, 5 (rupture location variable)

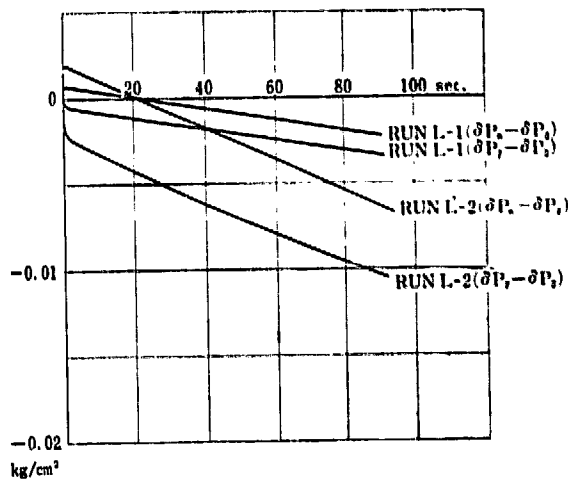


Fig. 4-18 $\delta P_7 - \delta P_2$ and $\delta P_6 - \delta P_2$ for RUN L-1, 2 (rupture size variable)

Run L-2 から Run L-5 までは同じ $1,000 \text{ cm}^2$ の破損が起こった場合における場所による影響を示したもので、破損場所が圧力容器に近づくにつれてこの差圧の変化値は小さくなり、これをプロットすると Fig. 4-19 の曲線(a)のようになる。これより明かなように、下部ダクトで圧力容器から約 $1/12$ の点で破損が起こった場合には、破損したダクト系も破損しないダ

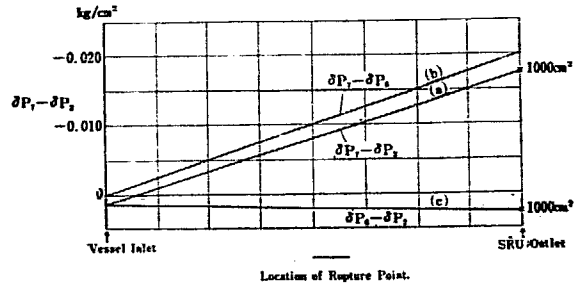


Fig. 4-19 Transient Peak Values of Pressure Difference for Lower Duct Rupture.

クト系もともに変化値が正となって、しかもそれらの間の差が小さくなるので識別が困難になる。一方、SRU の近くで破損するほど差圧の変化は大きくなる。初期値の差圧を加味すると、循環機出口で $1,000 \text{ cm}^2$ の破損が生じた場合、破損ダクト系の差圧は $+0.018 \text{ kg/cm}^2$ 、一方破損しないダクト系の差圧は $+0.037 \text{ kg/cm}^2$ となるが、時間とともに密度減少の効果がきいてくるので 0 に近づく。上部ダクト破損の場合にはこれらの値は小さい (Fig. 4-20, Fig. 4-21)。

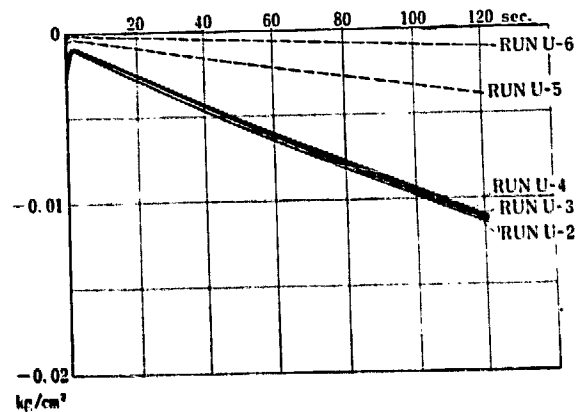


Fig. 4-20 $\delta P_6 - \delta P_2$ for RUN U-2, 3, 4 and RUN U-5, 6 (rupture location and size variable)

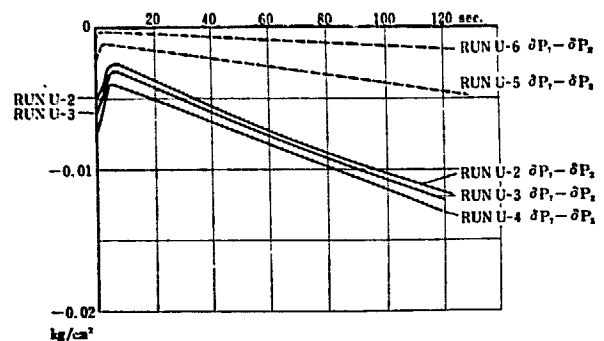


Fig. 4-21 $\delta P_7 - \delta P_2$ for RUN U-1, 2, 3, 4 and RUN U-5, 6 (rupture location and size variable)

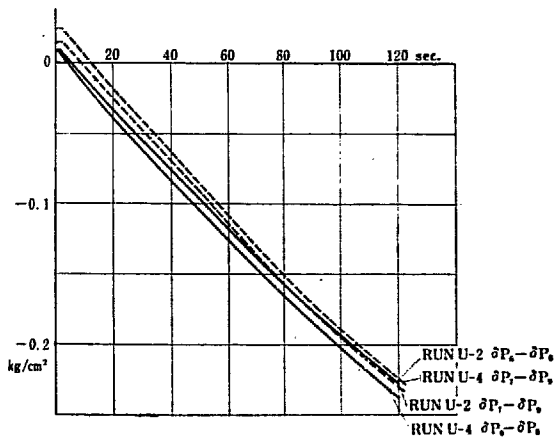


Fig. 4.22 $\Delta P_6 - \Delta P_8$ and $\Delta P_7 - \Delta P_9$ for RUN U-2, 4 (rupture location variable)

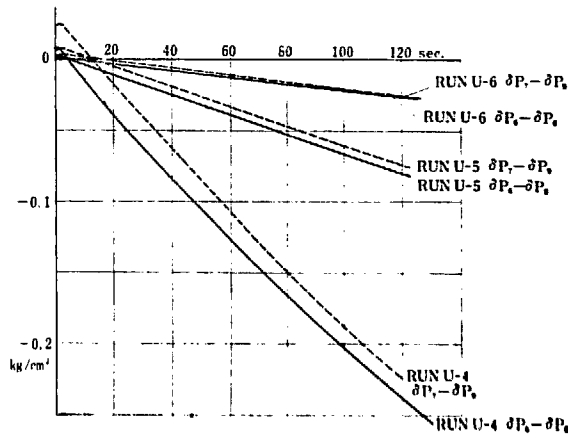


Fig. 4.23 $\Delta P_6 - \Delta P_8$ and $\Delta P_7 - \Delta P_9$ for RUN U-4, 5, 6 (rupture size variable)

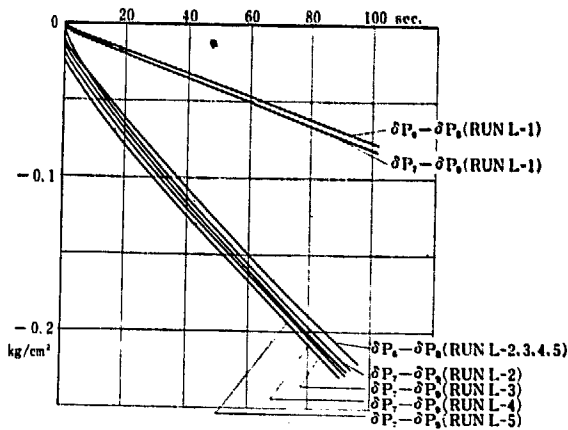


Fig. 4.24 $\Delta P_6 - \Delta P_8$ and $\Delta P_7 - \Delta P_9$ for RUN L-1, 2, 3, 4, 5 (rupture location and size variable)

(iii) SRU 上部, 下部の差圧の変化
($\Delta P_6 - \Delta P_8$, $\Delta P_7 - \Delta P_9$)

破損ダクト系の SRU 上下の差圧の変化値および破損しないダクト系の SRU 上下部の差圧の変化値を

Fig. 4.22~Fig. 4.24 に示す。

これよりわかるように破損しないダクト系も破損したダクト系もほとんど同じように変化しており、破損ダクトの検出には利用できない。これは、SRU 内の抵抗がダクト中の抵抗に比して非常に大きいため、1,000 cm² 程度の破損の場合にはどの SRU もほとんど密度によって差圧が変化するためである。

(iv) 各 SRU 上部同志および循環機出口同志の差圧

上部ダクト破損時における破損ダクト系の、SRU 上部と、破損しないダクト系の SRU 上部の間の差圧を Fig. 4.26 に示す。破損位置を横軸にとって、その差圧の過渡最大値を示したのが Fig. 4.16 の曲線 (b) である。下部ダクト破損時における、破損ダクト系の循環機出口と、破損しないダクト系の循環機出口

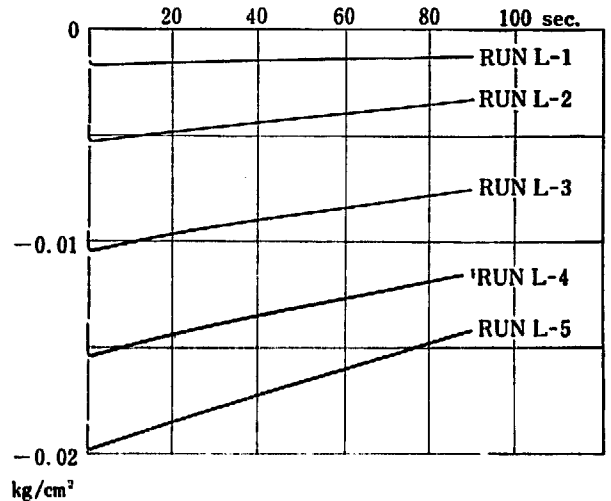


Fig. 4.25 $\Delta P_9 - \Delta P_8$ for RUN U-1, 2, 3, 4, 5 (rupture location and size variable)

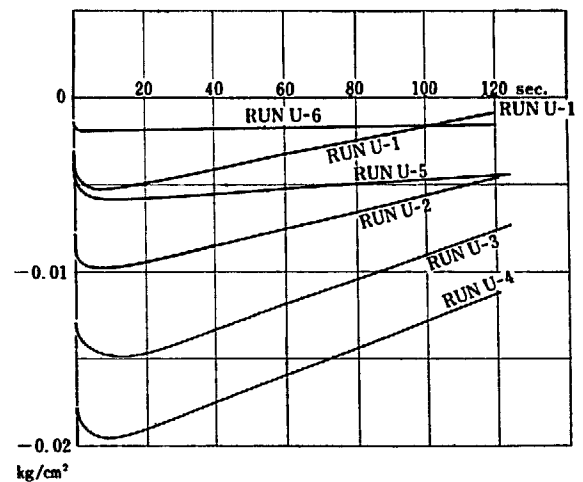


Fig. 4.26 $\Delta P_7 - \Delta P_6$ for RUN L-1, 2, 3, 4, 5 (rupture location and size variable)

の間の差圧を Fig. 4-26 に示す。破損位置を横軸にとり、その差圧の過渡最大値を示したのが Fig. 4-19 の曲線(b)である。

4-6 破損ダクトの検出法について

以上の結果より破損ダクトの検出法としては次の2通りの方法が考えられる。

流量差測定による方法

差圧測定による方法

4-6-1 流量差測定による方法

圧力容器出入口に流量計を取り付け、これによって流量差を検出するもので、Table. 8 に破損したダクト系の流量差と破損しないダクト系の流量差を示す。このように破損したダクトは必ず + の変化をするので、これより検出することができる。流量計の精度を ±3% とすれば、流量差より出てくる精度は、

$$\epsilon = \pm \sqrt{3^2 + 3^2} = \pm \sqrt{18} = \pm 4.2\%$$

したがって検出感度は

$$698 \text{ kg/sec} \times 0.042 \approx 30 \text{ kg/sec}$$

破損時の流量差はほぼ破損の大きさに比例すると仮定すれば、流量差測定により検出できる破損の大きさを求めることができる。Table. 9 より、1,000 cm² の破損時の流量差は 200 kg/sec であるので、検出可能な破損の大きさは

$$1,000 \text{ cm}^2 \times \frac{30}{200} = 150 \text{ cm}^2$$

150 cm²程度の穴まで検出することができる。150 cm²

の破損の場合の圧力降下の時定数は約 30 分であることを考えれば、150 cm² よりも小さい破損の場合には別の方法で、破損位置を検出し対策を講じても充分間に合う。

さて、この方法の欠点としては次の2つをあげることができる。

(a) 流量測定用しぼりの導入による回路の永久圧力損失

(b) しぼりの導入による耐震強度の低下

結局、起こることの考えられないようなダクト破損時に備えるために、このような大きな欠点を有する検出器を設けることは好ましくない。

4-6-2 差圧測定による方法

ガス回路の中で抵抗の大きいのは、炉心と SRU 内部で、ダクト中は小さいのでダクト破損時における回路の圧力の変化は、圧力容器上部と上部ダクトが一体となり、圧力容器下部と下部ダクトが一体となって、変化する。それゆえ SRU の上部と下部の差圧あるいは炉心の上部下部の差圧をとっても、破損ダクト検出には有効ではない。したがって、一体となって変化する部分の任意の2点の差圧をとることによって異常部分を検出するより方法がない。

よって、差圧による検出方法としては、

(a) 圧力容器上部と SRU の上部の差圧により上部ダクトの破損を検出し、圧力容器下部と SRU 下部の差圧により下部ダクト破損を検出する方法

(b) 隣接する SRU の上部同志の差圧により上部ダクトの破損を検出し、隣接する SRU の下部同志

Table. 8 Difference of Mass Flow (kg/sec.)

Run No.	Run U-1		Run U-2		Run U-3		Run U-4		Run U-5		Run U-6	
	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)
Value												
Instantaneous Value	-200	-30	-200	-30	-190	-30	-190	-30	-65	-10	-19	-3
1 min. Value	-150	-20	-160	-20	-160	-20	-160	-20	-55	-5	-18	-3

Run No.	Run L-1		Run L-2		Run L-3		Run L-4		Run L-5			
	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)	(A)	(B)		
Value												
Instantaneous Value	-60	-5	-185	-25	-200	-25	-180	-40	-205	-25		
1 min. Value	-60	-5	-160	-10	-160	-20	-155	-15	-160	-15		

(A) Difference of mass flow in the ruptured duct ($W_{13} - W_{42}$)

(B) Difference of mass flow in the unruptured duct ($1/3 W_{13} - 1/3 W_{32}$)

Table. 9 Comparison of Rupture Detection Methods by Pressure Difference Measurement

(kg/cm²)

Transient Peak Value for Run L-5

	(a) method	(b) method
Initial Value	-0.035	0
Pressure difference between SRU outlet and vessel inlet in the ruptured duct	-0.018	—
Pressure difference between SRU outlet and vessel inlet in the unruptured duct	-0.037	—
Pressure difference between neighboring SRU outlets in the ruptured and unruptured ducts.....	—	-0.019
Pressure difference between neighboring SRU outlets in the unruptured ducts.....	—	0

Transient Peak Value for Run U-4

	(a) method	(b) method
Initial value	-0.035	0
Pressure difference between SRU outlet and vessel inlet in the ruptured duct	-0.051	—
Pressure difference between SRU outlet and vessel inlet in the unruptured duct	-0.031	—
Pressure difference between neighboring SRU outlets in the ruptured and unruptured ducts.....	—	-0.020
Pressure difference between neighboring SRU outlets in the unruptured ducts.....	—	0

の差圧により下部ダクトの破損を検出する方法 (もちろん SRU の上部下部に限定しなくても、相対的位置関係の等しい2点の差圧をとって破損部分を検出する方法でもよい)。

の2つにしぼられる。

したがってここで両者について比較検討する。

(i) 定常値における差圧と検出感度

(a)の方法では、ダクト中の圧力降下に相当する差圧が最初から存在するので、これが検出感度を制限する。

(b)の方法によれば同一圧力の点の差圧をとっているため、定常状態においては差圧が存在せず、したがって零点法になるので検出感度を上げることができる。

たとえば、これを Run L-5 と Run U-4 に求めれば、Table. 9 のようになる。

これよりわかるように(a)の場合には、事故前より差圧が存在し、この値は負荷が変われば変化する不便がある。一方(b)のほうは事故前に差圧が存在せず、かつ事故時に破損したダクト系につらなる差圧計のみが指

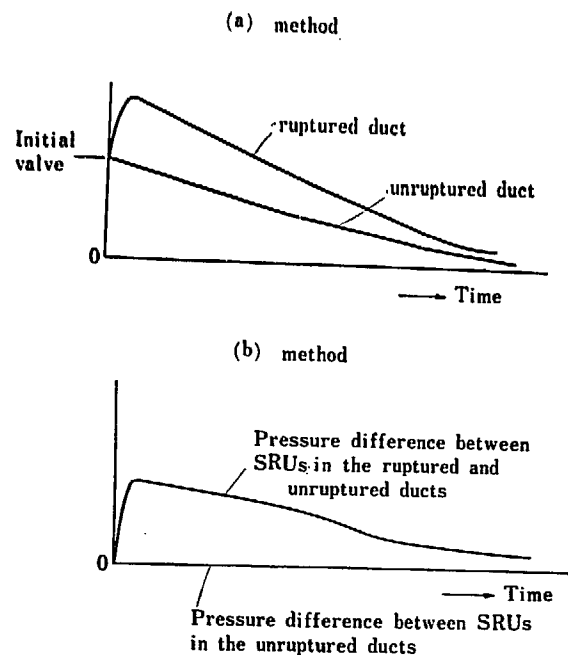


Fig. 4.27 Change of Pressure Difference with Time.

示を示すので、破損ダクトの識別が容易である。この場合の検出感度は、各 SRU ダクト循環機的设计上の不均衡、負荷変動時の過渡現象にもとづく誤信号によって制限されるが、(a)の場合に比し、かなり検出感度をあげることができる。

(ii) 差圧の経時変化とダクト破損検出可能時間

Fig. 4-27 は差圧の変化の様態を定性的に示したものである。(a)の方法では破損ダクト系の差圧がもっとも大きくなるので、これにより破損ダクトを決めることができるが、破損の小さいときには、破損ダクト系と完全ダクト系の差圧の差が小さく、かつ時間とともに小さくなるので識別が難かしくなる。また最初より存在する差圧のため差圧計の精度がわるいので、破損ダクトを識別できる時間も制限される。

しかし(b)の方法では、破損ダクトにつらなるものみに差圧を生じ、かつ初期差圧がないため差圧計の精度を高くできるので、破損ダクト系を識別できる時間も(a)に比し長くなる。

(iii) 配管の問題

(a)の方法では圧力容器上部と SRU とをパイプで結んでいるが、この場合には、パイプの長さがかなり長く、これに耐震性をもたせることは非常に難しい。

(b)の方法の場合にはとなりあう SRU の上部同志、下部同志の差圧をとればよいので、パイプの長さもずいぶん短かくすることができる。

(iv) 破損位置の影響

(a)の方法では、圧力容器に非常に近いところで破損がおこった場合には識別しにくい。たとえば上部プレナム近くのダクトで破損が起これば、圧力容器上部と SRU 上部の差圧は健全ダクト系も破損ダクト系も通常運転時に存在している差圧よりも小さくなるので、どのダクトが破損したかを識別することがむずかしくなる。

(b)の方法では、破損位置が圧力容器に近づくほど差圧信号が小さくなり、検出感度はにぶるが破損ダクト

系の圧力が健全ダクト系の圧力よりも低くなるので(a)に比べると、はるかに識別がしやすい。

(v) 部分負荷で運転している場合

(a)の方法では部分負荷で運転しているときは流量が低く、かつ最初から存在する差圧が負荷によって変化するので不便である。

(b)の方法では部分負荷の場合差圧信号が小さくなるので検出感度は、(a)同様いくぶん落ちるが初期差圧の変化による影響は受けない。

(vi) SRU が一台修理その他で回路から分離しているとき

(a)の場合ではまったく支障がない。

(b)の場合では修理している側の差圧計は使用できない。このように、一台修理の場合の後備として隣接する上部ダクト主弁の圧力容器側同志の差圧により、上部ダクト破損を、同様隣接する下部ダクト主弁の圧力容器側同志の差圧により下部ダクト破損を検出する方法を併用すればこのような欠点は除かれる。

(vii) ダクトが2カ所以上で破損した場合

(a)の方法ではまったく支障がない。

(b)の場合には検出できなくなることがある。

(viii) 製作上の問題

(b)のほうが初期差圧がないので、製作上も容易で、検出感度も高いものを作ることが可能である。

以上のことからダクト破損検出法としては、2つのガス回路を組として、それぞれの組の SRU の上部および下部同志、また、主弁の圧力容器側同志に差圧検器をつけることである。東海発電所のダクトはどの部出分よりも強固な設計になっているので、破損するようなことがないと思われるが、万一起こったとしても同時に2カ所以上で起るとは考えられない。また SRU 2台を修理したまま運転することはないので、検出に支障をきたすこともない。このような観点より(b)の方法がもっとも実用的であると結論することができる。

5 結 論

1) ダクト破損時における各点の圧力は、破損の大きさが $1,000 \text{ cm}^2$ 程度のときは、時間とともにほぼ直線的に下降する。10% 圧力が降下するに要する時間は 30 数秒である。

2) 破損の大きさと、圧力が 10% 降下するに要する時間は、ほぼ反比例の関係がある。

3) 循環機による圧力上昇は、破損ダクトも破損しないダクトも大差ない。

4) 炉心を流れる流量は、上部ダクト破損の場合はわずかながら増加しその後減少する。一方、下部ダクト破損の場合には最初から減少する。

時間が経つにつれ、流量減少率は圧力減少率（密度減少率）に近づく。

5) 破損箇所よりのガス放出量は、下部ダクト破損時のほうが上部ダクト破損時より大きい。

6) ダクト破損検出の最良の方法としては、二つのガス回路を組として、それぞれの組の SRU（蒸気発生器）上部同志および下部同志、主弁の圧力容器側同志に差圧検出器を設けることである。

謝 辞

本研究をおこなうに当って、日本原子力発電株式会社の豊田、西川、森岡、迫、黒見各氏および当研究所の三井田、望月、原、須田、石塚各研究員に解析方法の検討ならびに実際の解析計算の段階において、それぞれ適切なる援助をいただいたことを深謝する。

Appendix I 回路定数

I-1 Initial condition における圧力分布



	Vessel inlet	Vessel outlet	S. R. U inlet	S. R. U center	S. R. U outlet	Circulator outlet	Vessel inlet
gauge press	12,799	12,025	11,990	11,874	11,758	12,834	12,799
abs. press	13,832	13,058	13,023	12,907	12,791	13,867	13,832

Fig. A-1-1 Pressure of Various Points at Initial Condition

I-2 初期条件における流量

$$W_{140} = W_{420} = 698 \text{ kg/sec}$$

$$W_{120} = 2,790 \text{ kg/sec}$$

$$W_{130} = W_{320} = 2,092 \text{ kg/sec}$$

I-3

$$a_{ij} = k/\rho_0$$

$$a_{12} = 1.338 \times 10^{-6}$$

$$a_{13} = 0.4630 \times 10^{-6}$$

$$a_{36} = 0.3557 \times 10^{-6}$$

$$a_{02} = 0.1037 \times 10^{-6}$$

$$a_{14} = 4.166 \times 10^{-6}$$

$$a_{17} = 3.201 \times 10^{-6}$$

$$a_{72} = 0.9659 \times 10^{-6}$$

I-4 Capacity C

	Vessel 上部	Vessel 下部	Upper duct	Lower duct	SRU
ガス重量トン	12.4	18.6	1.35	2.02	7.64
C kg/kg/cm ²	886	1,329	96	114	546

$$C_1 = 886 + 4 \times \frac{96}{2} = 1,078 \text{ kg/kg/cm}^2$$

$$C_2 = 1,329 + 4 \times 144 = 1,905 \text{ kg/kg/cm}^2$$

$$C_3 = \left(546 + \frac{96}{2}\right) = 1,782 \text{ kg/kg/cm}^2$$

$$C_4 = 546 + \frac{96}{2} = 594 \text{ kg/kg/cm}^2$$

Appendix II アナコン計算式

II-1 下部ダクト破損時の計算式

方程式 (2.4.1) ~ (2.4.21) をアナコンで計算するため、 $35 \partial V_i = \partial I_i$, $\frac{1}{10} \partial I_{ij} = \partial I'_{ij}$ として ' をとり数値を代入し、これを整理すると

$$\partial V_1 = -0.3245 \int (\partial I_{14} + \partial I_{13} - \partial I_{12}) dt \quad \text{..... (A-II-1.1)}$$

$$\partial V_2 = -0.1837 \int (\partial I_{12} - \partial V_{I_{31}} - \partial V_{52}) dt \quad \text{..... (A-II-1.2)}$$

$$\partial V_3 = -0.5892 \int \left(\frac{\partial I_{32}}{3} - \frac{\partial I_{13}}{3} \right) dt \quad \text{..... (A-II-1.3)}$$

$$\partial V_4 = -0.5892 \int (\partial I_{52} + \partial I_5 - \partial I_{14}) dt \quad \text{..... (A-II-1.4)}$$

$$\partial I_5 = \frac{V_{50} - 36.155}{R_5} + \frac{\partial V_5}{R_5} \quad \text{..... (A-II-1.5)}$$

$$\partial I_{12} = 5.294 \partial V_2 - 4.998 \partial V_1 \quad \text{..... (A-II-1.6)}$$

$$\frac{\partial I_{13}}{3} = 6.419 \partial V_1 - 6.345 \partial V_3 \quad \text{..... (A-II-1.7)}$$

$$\frac{\partial I_{32}}{3} = 6.345 \partial V_3 + 0.5289 \partial V_6' + 0.06816 \partial e_1 - 6.799 \partial V_2 \quad \text{..... (A-II-1.8)}$$

$$\partial V_6' = 1.090 \partial V - 0.1222 \frac{\partial I_{32}}{3} \quad \text{..... (A-II-1.9)}$$

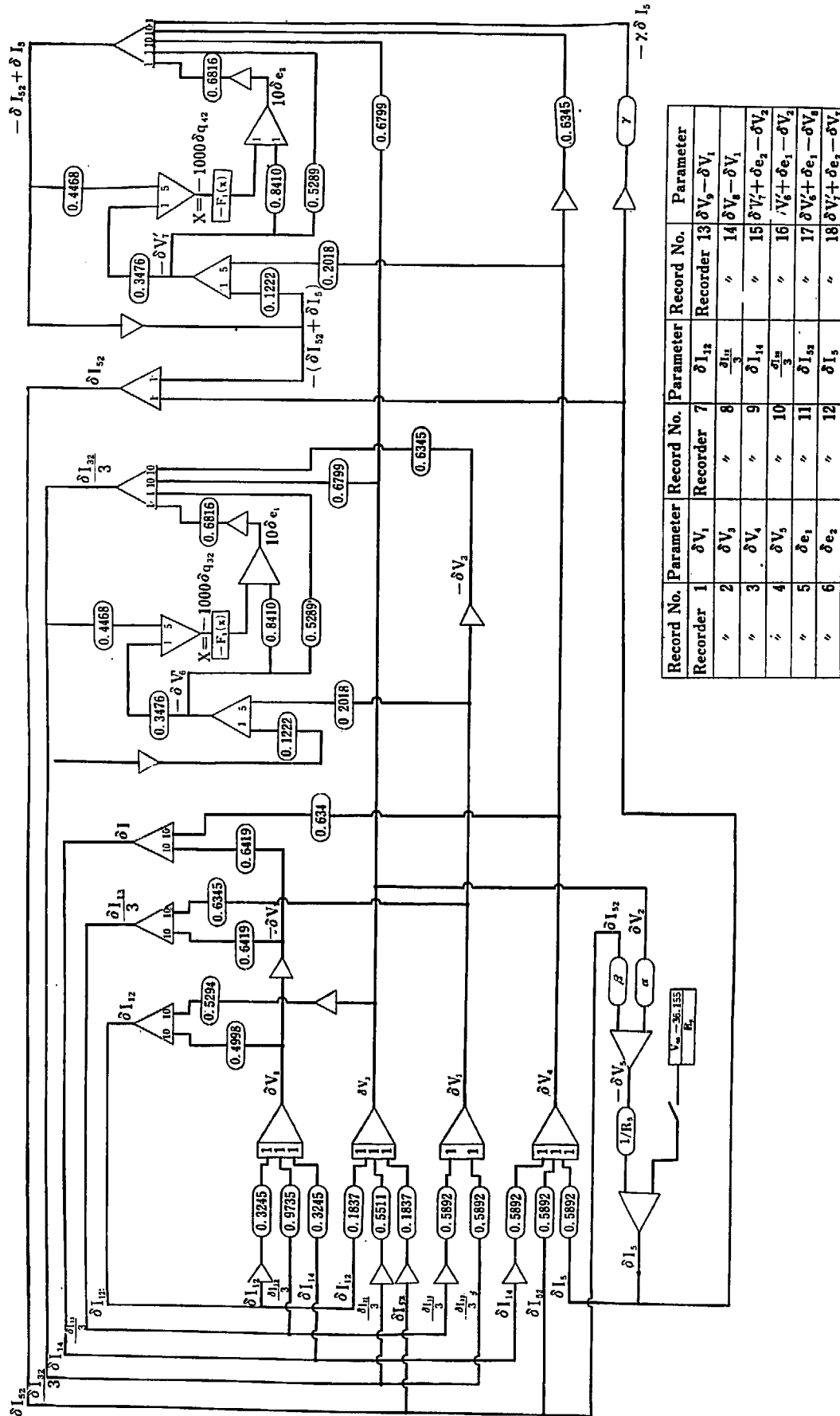
$$\partial I_{14} = 6.419 \partial V_1 - 6.345 \partial V_4 \quad \text{..... (A-II-1.10)}$$

$$\partial I_{52} + \partial I_5 = \gamma \partial I_5 + 6.345 \partial V_4 + 0.06816 \partial e_2 + 0.5289 \partial V_7' - 6.799 \partial V_2 \quad \text{..... (A-II-1.11)}$$

$$\partial V_7' = 1.009 \partial V_4 - 0.1222 (\partial I_{52} + I_5) \quad \text{..... (A-II-1.12)}$$

$$\partial V_5 = \alpha \partial V_2 + \beta \partial I_{52} \quad \text{..... (A-II-1.13)}$$

$$10 \partial e_1 + F_1 \left(\frac{\partial q_{32}}{3} \right) + 0.8410 \partial V_6' \quad \text{..... (A-II-1.14)}$$



Record No.	Parameter	Record No.	Parameter	Record No.	Parameter
Recorder 1	δV_s	Recorder 7	δI_{s2}	Recorder 13	$\delta V_s - \delta V_s$
"	δV_s	"	$\frac{\delta I_{s2}}{3}$	"	$\delta V_s - \delta V_s$
"	δV_s	"	δI_{s1}	"	$\delta V_s + \delta e_s - \delta V_s$
"	δV_s	"	$\frac{\delta I_{s1}}{3}$	"	$\delta V_s + \delta e_s - \delta V_s$
"	δe_s	"	δI_{s2}	"	$\delta V_s + \delta e_s - \delta V_s$
"	δe_s	"	δI_{s1}	"	$\delta V_s + \delta e_s - \delta V_s$

Fig. A-II-1 Analogue Computer Block Diagram for Lower Duct Runtime

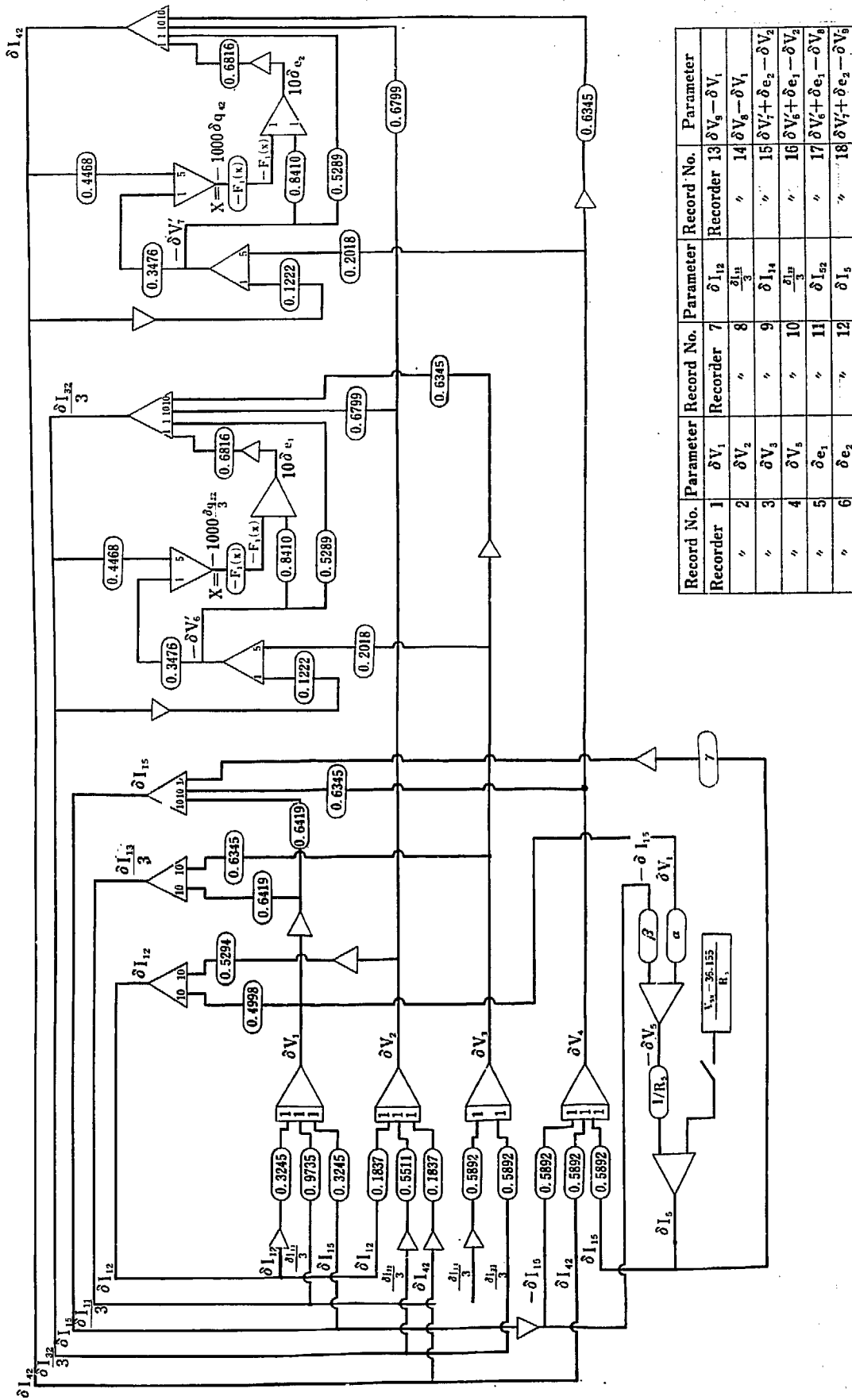


Fig. A-11-2 Analogue Computer Block Diagram for Upper Duct Rupture

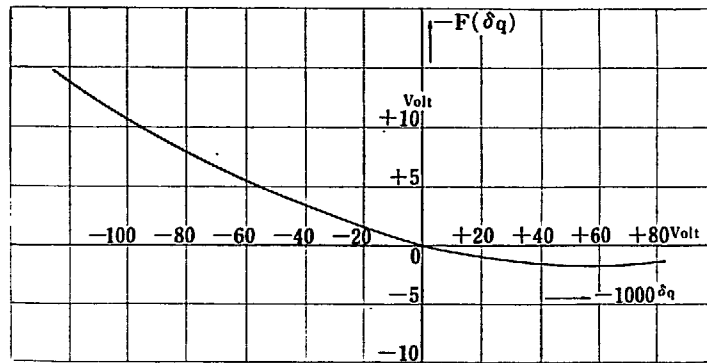


Fig. A-II-3 Function Simulated by Function Generator F (x)

$$10 \partial e_2 = F_2(\partial q_{42}) + 0.8410 \partial V_7' \dots\dots (A-II-1.15)$$

$$1,000 \partial q_{32} = 2.234 \frac{\partial I_{32}}{3} - 0.3476 \partial V_6' \dots\dots (A-II-1.16)$$

$$1,000 \partial q_{42} = 2.234(\partial I_{52} + \partial I_5) - 0.3476 \partial V_7' \dots\dots (A-II-1.17)$$

ここで $F_1(\partial q) = V_6' \partial H(\partial q)$ で関数発生器にて模擬した (Fig. A-II-3 参照)。 α, β, γ は破損場所破損の大きさによって変わる定数である。

以上の方程式をアナコンに組んだのが Fig. A-II-1 である。

II-2 上部ダクト破損時の計算式

方程式 (2.5.1') ~ (2.5.21') をアナコンで計算するため $35 \partial V_i = \partial V_i', \frac{1}{10} \partial I_{i,j} = \partial I_{i,j}'$ として ' を取り数値を代入しこれを整理すると

$$\partial V_1 = -0.3245 \int (\partial I_{15} + \partial I_{13} - \partial I_{12}) dt \dots\dots (A-II-2.1)$$

$$\partial V_2 = -0.1837 \int (\partial I_{12} - \partial I_{32} - \partial I_{42}) dt$$

$$\partial V_3 = -0.5892 \int \left(\frac{\partial I_{32}}{3} - \frac{\partial I_{13}}{3} \right) \dots\dots (A-II-2.3)$$

$$\partial V_4 = -0.5892 \int (\partial I_{42} + \partial I_5 - \partial I_{15}) dt \dots\dots (A-II-2.4)$$

$$\partial I_5 = \frac{V_{50} - 36.155}{R_5} + \frac{\partial V_5}{R_5} \dots\dots (A-II-2.5)$$

$$\partial I_{12} = 5.294 \partial V_2 - 4.998 \partial V_1 \dots\dots (A-II-2.6)$$

$$\frac{\partial I_{13}}{3} = 6.419 \partial V_1 - 6.345 \partial V_3 \dots\dots (A-II-2.7)$$

$$\frac{\partial I_{32}}{3} = 6.345 \partial V_3 + 0.5289 \partial V_6' + 0.06816 e_1 - 6.799 \partial V_2 \dots\dots (A-II-2.8)$$

$$\partial V_6' = 1.009 \partial V_3 - 0.1222 \frac{\partial I_{32}}{3} \dots\dots (A-II-2.9)$$

$$\partial V_5 = \alpha \partial V_1 - \beta \partial I_{15} \dots\dots (A-II-2.10)$$

$$\partial I_{15} = 6.419 \partial V_1 - 6.345 \partial V_4 + \gamma \partial I_5 \dots\dots (A-II-2.11)$$

$$\partial I_{42} = 6.345 \partial V_4 + 0.5289 \partial V_7' + 0.6816 \partial e_2 - 6.799 \partial V_2 \dots\dots (A-II-2.12)$$

$$\partial V_7' = 1.009 \partial V_4 - 0.1222 \partial I_{42} \dots\dots (A-II-2.13)$$

$$10 \partial e_1 = F_1 \frac{(\partial q_{32})}{3} + 0.8410 \partial V_6' \dots\dots (A-II-2.14)$$

$$10 \partial e_2 = F_2(\partial q_{42}) + 0.8410 \partial V_7' \dots\dots (A-II-2.15)$$

$$1,000 \partial q_{32} = 2.234 \frac{\partial I_{32}}{3} - 0.3476 \partial V_6' \dots\dots (A-II-2.16)$$

$$1,000 \partial q_{42} = 2.234 \frac{\partial I_{42}}{3} - 0.3476 \partial V_7' \dots\dots (A-II-2.17)$$

以上の方程式をアナコンに組んだのが Fig. A-II-2 である。