

JAERI - M  
87-121

米国電力研究所コードによる  
漏洩率評価解析

1987年8月

磯崎 敏邦・橋口 一生・加藤 潔・宮園昭八郎

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

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。  
入手の間合わせは、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, 1987

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 山 田 軽 印 刷 所

米国電力研究所コードによる漏洩率評価解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

磯崎 敏邦・橋口 一生・加藤 潔

宮園 昭八郎

(1987年7月21日受理)

構造強度研究室では62年度より、BWRもしくはPWR運転条件のもとで、き裂を有する配管からの漏洩率に関する研究を開始する。本報は米国電力研究所(EPRI)が作成した漏洩率解析コードを導入し原研機FACOM M-380に変換したのち sample 問題でこれを検証した。このコードでは臨界流モデルとしてHenryのモデルを使用した。

試験研究立案のためにこのコードを用いてき裂長さ $2c$ 、き裂開口変位CODおよび配管口径をパラメータとしてBWRおよびPWR運転条件下のき裂からの漏洩率を求めた。計算結果の一例によれば、漏洩検出限界である5gpmを与えるCODは、16B配管 $2c=100\text{mm}$ として、 $\text{COD}=0.22\text{mm}$ (BWRの場合)、 $\text{COD}=0.21\text{mm}$ (PWRの場合)であった。なお付録としてコードリストを掲げた。

Evaluation of leak rate by EPRI code

Toshikuni ISOZAKI, Issei HASHIGUCHI, Kiyoshi KATO  
and Shohachiro MIYAZONO

Department of Reactor Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 21, 1987)

From 1987, a research on the leak rate from a cracked pipe under BWR or PWR operating condition is going to be carried out at the authors' laboratory. This report describes the computed results by EPRI's leak rate code which was mounted on JAERI FACOM-M380 machine. Henry's critical flow model is used in this program.

For the planning of an experimental research, the leak rate from a crack under BWR or PWR operating condition is computed, varying a crack length  $2c$ , crack opening diameter COD and pipe diameter. The COD value under which the minimum detectable leak rate of 5gpm is given is 0.22 mm or 0.21 mm under the BWR or PWR condition with  $2c = 100$  mm and 16B pipe geometry. The entire lists are shown in the appendix.

Keywords: Leak Rate, Crack, Critical Flow, EPRI Code

## 目 次

はじめに .....	1
1. 基礎理論 .....	1
1.1 質量保存則 .....	2
1.2 運動量保存則 .....	2
1.3 き裂に沿った圧力損失 .....	3
1.4 出口圧力と臨界質量速度との関係 .....	5
2. 2相臨界質量速度 $G_c$ .....	6
3. 考察 .....	8
3.1 臨界質量速度 $G_c$ とき裂形状との関係 .....	8
3.2 臨界質量流量 $W_c$ とき裂形状との関係 .....	8
3.3 1, 3, 5 gpmを与えるき裂寸法 .....	9
4. 結論 .....	9
謝辞 .....	9
参考文献 .....	10
付録A Henryの臨界流モデル .....	21
付録B プログラムリスト .....	23

## Contents

Introduction .....	1
1. Basic theory .....	1
1.1 conservation of mass .....	2
1.2 conservation of momentum .....	2
1.3 pressure loss along crack .....	3
1.4 relations between exit pressure and critical mass velocity .....	5
2. Two-phase critical mass velocity $G_c$ .....	6
3. Discussion .....	8
3.1 relations between critical mass velocity $G_c$ and crack configuration .....	8
3.2 relations between critical mass flow rate $W_c$ and crack configuration .....	8
3.3 crack configuration at leak rate of 1, 3 and 5gpm .....	9
4. Conclusion .....	9
Acknowledgement .....	9
Reference .....	10
Appendix A Henry's critical flow model .....	21
Appendix B Program List .....	23

## 図 表 一 覧

表 1 計算条件

図 1	するどい角を過ぎる飽和水もしくはサークル水のき裂内流動型式
図 2	$L/D_h = 12$ なる場合のき裂内流動型式
図 3	き裂寸法
図 4	BWR 運転条件下の質量速度 $G_c$ と COD との関係 ( $2c = 100$ mm)
図 5	"                  "                  ( $2c = 50$ mm)
図 6	BWR 運転条件下の質量速度 $G_c$ と COD との関係 ( $2c = 100$ mm)
図 7	"                  "                  ( $2c = 20$ mm)
図 8	BWR 運転条件下の質量流量 $W_c$ と COD との関係 ( $2c = 100$ mm)
図 9	"                  "                  ( $2c = 50$ mm)
図 10	"                  "                  ( $2c = 20$ mm)
図 11	PWR 運転条件下の質量流量 $W_c$ と COD との関係 ( $2c = 100$ mm)
図 12	"                  "                  ( $2c = 50$ mm)
図 13	"                  "                  ( $2c = 20$ mm)
図 14	BWR 運転条件下の質量流量 $W_c$ と $2c$ との関係 (4 B, 8 B 配管)
図 15	"                  "                  (12 B, 16 B 配管)
図 16	PWR 運転条件下の質量流量 $W_c$ と $2c$ との関係 (4 B, 8 B 配管)
図 17	"                  "                  (12 B, 16 B 配管)
図 18	BWR 運転条件下で $W_c = 1, 3, 5$ gpm を与える COD と $2c$
図 19	PWR 運転条件下で $W_c = 1, 3, 5$ gpm を与える COD と $2c$

## 付録

表 B. 1	入力データ FORMAT
表 B. 2	入力データの意味と入力単位
表 B. 3	EPR I コードによる例題解析結果
表 B. 4	JCL リスト
表 B. 5	原研版プログラムリスト
表 B. 6	原研版コードによる EPR I 例題解析結果

## 記号一覧

A	=き裂面積〔m <sup>2</sup> 〕
A <sub>c</sub>	=き裂出口面積〔m <sup>2</sup> 〕
A <sub>i</sub>	=z=12D <sub>h</sub> におけるき裂面積〔m <sup>2</sup> 〕
A <sub>o</sub>	=き裂入口面積〔m <sup>2</sup> 〕
2c	=き裂長さ〔m〕
C	= orifice 縮流係数 (=0.61)
COD	=き裂開口変位〔m〕
D <sub>h</sub>	=水力学直径〔m〕
f	=管摩擦係数
G	=2相流質量速度 (=ρu)〔kg/m <sup>2</sup> /s〕
$\bar{G}$	=平均質量速度〔kg/m <sup>2</sup> /s〕
G <sub>c</sub>	=出口における臨界質量速度〔kg/m <sup>2</sup> /s〕
G <sub>o</sub>	=入口における臨界質量速度〔kg/m <sup>2</sup> /s〕
k	=表面粗さ〔m〕
k	=すべり比 (=u <sub>g</sub> /u <sub>l</sub> )
L	=き裂深さ〔m〕
p <sub>c</sub>	=出口圧力〔Pa〕
p <sub>o</sub>	=よどみ点圧力〔Pa〕
Δp <sub>acc</sub>	=加速度項による圧力損失のうち、密度変化による損失項〔Pa〕
Δp <sub>area</sub>	= " " " " , 面積変化 " " " "〔Pa〕
Δp <sub>f</sub>	=管摩擦による圧力損失〔Pa〕
Δp <sub>i</sub>	=入口圧力損失〔Pa〕
Δp <sub>total</sub>	=Δp <sub>acc</sub> + Δp <sub>area</sub> + Δp <sub>f</sub> + Δp <sub>i</sub>
R <sub>h</sub>	=水力学半径 (=D <sub>h</sub> /2)〔m〕
S	=比エントロピ (kJ/kg/K)
$\bar{U}$	=平均速度
v	=2相混相比容積 (=1/ρ=xv <sub>g</sub> +(1-x)v <sub>l</sub> )〔m <sup>3</sup> /kg〕
v <sub>gc</sub>	=出口における蒸気相比容積〔m <sup>3</sup> /kg〕
v <sub>gi</sub>	=z=12D <sub>h</sub> における蒸気相比容積〔m <sup>3</sup> /kg〕
v <sub>lc</sub>	=出口における液相比容積〔m <sup>3</sup> /kg〕
v <sub>li</sub>	=入口における液相比容積〔m <sup>3</sup> /kg〕
x	=クオリティ (=W <sub>g</sub> /(W <sub>g</sub> +W <sub>l</sub> ))
x <sub>c</sub>	=出口におけるクオリティ
W <sub>c</sub>	=質量流量 (=G <sub>c</sub> ・2c・COD)〔kg/s〕
W <sub>g</sub>	=蒸気相質量流量〔kg/s〕
W <sub>l</sub>	=液相質量流量〔kg/s〕
z	=き裂深さ方向座標〔m〕



- $\alpha$  = ボイド率  
 $\gamma$  = ポリトロップ指数 ( $= c_p / c_v = 1.33$ )  
 $\rho$  = 2相流密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\tau$  = 壁面のせん断応力

## はじめに

構造強度研究室では62年度より、BWRもしくはPWR運転条件のもとで、き裂を有する配管からの漏洩率に関する研究を開始する。本報は米国電力研究所(EPR I)が作成した漏洩率解析コード〔1〕を原研機FACOM M-380にマウントさせ検証し、解説と考察を加えたものである。

漏洩率研究は米国で発展した〔1, 2, 3〕。NRCは漏洩率検出感度として1 gpm ( $\equiv 4 \ell/\text{min}$ )を要求しており、未特定位置からの最大許容漏洩率を5 gpm ( $\equiv 20 \ell/\text{min}$ )としている〔1〕。日本ではIHIの矢野らの研究がある〔4, 5〕。原研では配管破断試験が終了したので、この設備を用いてき裂を有する配管からの漏洩率研究に着手するのである。この試験の目的は、

- (A) 機械加工によるき裂もしくは疲労き裂を有する配管からの漏洩率 (kg/s) を計測する。その結果き裂寸法と漏洩率との関係が得られる。
- (B) 配管にき裂が存在した場合、それが原因で配管の不安定破壊が生じるか否かを明らかにする。
- (C) (A), (B) の知見をもとに配管からの漏洩率を既知として、配管に不安定破壊が生じるか否かの判断基準を与える。別の見方をすれば、配管の不安定破壊が生じる時の限界漏洩量を明らかにする。

(B)の研究についてはすでに構造強度研究室の柴田ら〔6, 7, 8〕, 金子ら〔9〕, 安田ら〔10〕による精力的な研究がある。そこで(A)の研究を新たに開始すればその結果を(B)と結合させることによって(C)の目的が達成されることが予想される。漏洩率は当然ながら臨界流理論と密接な関係があり、〔1〕では臨界モデルとしてHenryのモデル〔11〕, 〔12〕を使用している。本報では原研版コードを用いてBWR, PWR運転条件における飽和水もしくはサブクール水による漏洩率について報告してある。

## 1. 基礎理論〔1, 2, 3〕

き裂を流れる流体は2相流となるが、配管に存在する初期流体はサブクール水もしくは飽和水とする。水力学的直径  $D_h$  を

$$D_h = \frac{4 \times \text{き裂面積}}{\text{き裂周長}} \quad (1)$$

で定義する。漏洩率研究では  $L/D_h$  が重要なパラメータとなる。また、き裂表面粗さは漏洩率に影響を与えること大である。

図1, 2にき裂を通過する二相流の状態を模式的に示す。き裂に沿って以下に示す3個の領域を定める。

領域1 :  $0 \leq L/D_h \leq 3$

この領域では液体ジェットが形成され、その囲りを蒸気がとり囲む。

## は じ め に

構造強度研究室では62年度より、BWR もしくは PWR 運転条件のもとで、き裂を有する配管からの漏洩率に関する研究を開始する。本報は米国電力研究所 (EPRI) が作成した漏洩率解析コード〔1〕を原研機 FACOM M-380 にマウントさせ検証し、解説と考察を加えたものである。

漏洩率研究は米国で発展した〔1, 2, 3〕。NRC は漏洩率検出感度として 1 gpm ( $\equiv 4 \ell/\text{min}$ ) を要求しており、未特定位置からの最大許容漏洩率を 5 gpm ( $\equiv 20 \ell/\text{min}$ ) としている〔1〕。日本では IHI の矢野らの研究がある〔4, 5〕。原研では配管破断試験が終了したので、この設備を用いてき裂を有する配管からの漏洩率研究に着手するのである。この試験の目的は、

- (A) 機械加工によるき裂もしくは疲労き裂を有する配管からの漏洩率 (kg/s) を計測する。その結果き裂寸法と漏洩率との関係が得られる。
- (B) 配管にき裂が存在した場合、それが原因で配管の不安定破壊が生じるか否かを明らかにする。
- (C) (A), (B) の知見をもとに配管からの漏洩率を既知として、配管に不安定破壊が生じるか否かの判断基準を与える。別の見方をすれば、配管の不安定破壊が生じる時の限界漏洩量を明らかにする。

(B) の研究についてはすでに構造強度研究室の柴田ら〔6, 7, 8〕、金子ら〔9〕、安田ら〔10〕による精力的な研究がある。そこで(A)の研究を新たに開始すればその結果を(B)と結合させることによって(C)の目的が達成されることが予想される。漏洩率は当然ながら臨界流理論と密接な関係があり、〔1〕では臨界モデルとして Henry のモデル〔11〕、〔12〕を使用している。本報では原研版コードを用いて BWR, PWR 運転条件における飽和水もしくはサブクール水による漏洩率について報告してある。

## 1. 基礎理論〔1, 2, 3〕

き裂を流れる流体は 2 相流となるが、配管に存在する初期流体はサブクール水もしくは飽和水とする。水力学的直径  $D_h$  を

$$D_h = \frac{4 \times \text{き裂面積}}{\text{き裂周長}} \quad (1)$$

で定義する。漏洩率研究では  $L/D_h$  が重要なパラメータとなる。また、き裂表面粗さは漏洩率に影響を与えること大である。

図 1, 2 にき裂を通過する二相流の状態を模式的に示す。き裂に沿って以下に示す 3 個の領域を定める。

領域 1 :  $0 \leq L/D_h \leq 3$

この領域では液体ジェットが形成され、その囲りを蒸気がとり囲む。

領域 2 :  $3 \leq L/D_h \leq 12$

この領域では蒸気泡が形成される。  $L/D_h \leq 12$  まではき裂に沿っての圧力は一定である。

領域 3 :  $L/D_h \geq 12$

液体ジェットは二相混相流になる。き裂に沿って圧力は  $p_e$  に向かって減少する。

図 3 に本報で考察する所のすぼまりき裂 (convergent crack) の寸法を示す。き裂については以下の仮定を設ける。

- (1) COD は  $L$  や  $2c$  と比較して小さい。
- (2) き裂面積は流れに沿ってゆるやかに減少していく。
- (3) 液体ジェットは  $L/D_h = 12$  で完全に崩壊し、この点までは圧力分布は平坦である。
- (4) 液相は非圧縮性流体とする。
- (5)  $0 \leq z \leq 12 D_h$  では相変化はなく、 $x = 0$  とする。

### 1.1 質量保存則

流路面積が変化するき裂を流れる 2 相流の質量保存則は

$$GA = \text{const} \quad (2)$$

もしくは  $z$  で微分して

$$\frac{\partial G}{\partial z} + \frac{G}{A} \frac{\partial A}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

### 1.2 運動量保存則

運動量保存の式は

$$G^2 \frac{d}{dz} (1/\rho) - \frac{G^2}{\rho A} \frac{dA}{dz} = - \frac{d(pA)}{Adz} - \frac{(f/\rho)G^2}{2D_h} \quad (4)$$

(4) は以下のようにして求まる。き裂に沿って単位長さ当り運動量を考えると、流れが定常流であるから

$$\frac{\partial (\rho u A)}{\partial t} = 0 \text{ として}$$

$$\frac{d(\rho u^2 A)}{dz} = - \frac{d(pA)}{dz} - Af \frac{\rho u^2}{2D_h} \quad (5)$$

となる。(5) の左辺は密度変化と面積変化によって生じる加速度項、右辺は外力項であって第一項は圧力勾配、第二項は摩擦損失である。摩擦損失の実験式として管長  $\ell$  における圧力損失を

$$\Delta p = f \frac{1}{2D_h} \rho u^2 \quad (6)$$

で与えれば、単位長さについて生じる摩擦力は  $\frac{Af}{2D_h} \rho u^2$  で与えられる。これが右辺第2項である。(5)を  $G = \rho u$  を用いて書き変えると加速度項は

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho u^2 A)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{G^2 A}{\rho} \right) \\ &= G^2 A \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \right) + \frac{2GA}{\rho} \frac{\partial G}{\partial z} + \frac{G^2}{\rho} \frac{\partial A}{\partial z} \end{aligned} \quad (7)$$

(3)を(7)に代入すると

$$\frac{\partial (\rho u^2 A)}{\partial z} = G^2 A \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \right) - \frac{G^2}{\rho} \frac{\partial A}{\partial z} \quad (8)$$

これが(4)の左辺となる。質量速度  $G$  は  $A$  の関数として質量保存則より

$$G = G_c A_c / A \quad (9)$$

で与えられ  $G_c$  は後に定める。

### 1.3 き裂に沿った圧力損失

(4)を出口 ( $z=L$ ) から入口 ( $z=0$ ) まで  $z$  について積分し、き裂に沿った圧力損失を定める。

$$\Delta p_{\text{total}} = \Delta p_1 + \Delta p_{\text{acc}} + \Delta p_{\text{area}} + \Delta p_f \quad (10)$$

と書いて右辺の各成分を順次定めてみる。まず  $\Delta p_1$  は、入口損失であって(2)を用いれば

$$\Delta p_1 = \frac{G_0^2 v_{10}}{2 C^2} = \frac{G_c^2 v_{10}}{2 C^2} \left( \frac{A_c}{A_0} \right) \quad (11)$$

となる。

加速度項のうち密度変化による圧力降下は(4)の第1項で表示される。

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{acc}} &= \int_0^L G^2 \frac{d}{dz} (1/\rho) dz \\ &= \int_0^L G^2 \frac{d}{dz} \{ (1-x) v_1 + x v_g \} dz \end{aligned} \quad (12)$$

(12)において仮定(4)を考慮すれば  $dv_{10}/dz=0$  となるので

$$\Delta p_{\text{acc}} = \int_0^{12D} G^2 \frac{dv_{10}}{dz} dz + \int_{12D}^L G^2 \frac{d}{dz} \{ (1-x) v_{10} + x v_g \} dz$$

$$\begin{aligned}
 &= \bar{G}^2 [(1-x) v_{10} + x v_g] v_{10}^{(L)} \\
 &= \bar{G}^2 [(1-x_c) v_{1c} + x_c v_{gc} - v_{10}] \\
 &= \bar{G}^2 [x_c (v_{gc} - v_{10})] \tag{13}
 \end{aligned}$$

(13)において  $x(z=12D)=0$  および  $v_{1c}=v_{10}$  (非圧縮性) を使用した。 $\bar{G}$  は平均値であって

$$\bar{G}^2 = \frac{G_i^2 + G_c^2}{2} = \frac{G_c^2}{2} [1 + (A_c/A_i)^2] \tag{14}$$

よって(13)は最終的に

$$\Delta P_{acc} = \frac{G_c^2}{2} [1 + (A_c/A_i)^2] [x_c (v_{gc} - v_{10})] \tag{15}$$

となる。

次に加速度項のうち面積変化による圧力降下を求める(4)の第2項より

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{area} &= \int_0^L \frac{G^2}{\rho A} \frac{dA}{dz} dz \\
 &= \int_{A_0}^{A_c} \frac{G^2 v}{A} dA \\
 &= G_c^2 A_c^2 \int_{A_0}^{A_c} \frac{v}{A^3} dA \\
 &= \frac{G_c^2}{2} \left[ v_{10} \left\{ -1 + \left( \frac{A_c}{A_0} \right)^2 \right\} + \bar{x} (\bar{v}_g - v_{10}) \left\{ -1 + \left( \frac{A_c}{A_i} \right)^2 \right\} \right] \tag{16}
 \end{aligned}$$

(16)の第3式において

$$\int_{A_0}^{A_c} \frac{v}{A^3} dA = \int_{A_0}^{A_i} \frac{v_{10}}{A^3} dA + \int_{A_i}^{A_c} \frac{v_{10} + x(v_g - v_{10})}{A^3} dA$$

とし、右辺第2項の積分計算において  $v_g(A)$ ,  $x(A)$  のままでは積分不能なので

$$\bar{x} = \frac{\int_{12D}^L x dz}{\int_{12D}^L dz}$$

および

$$\bar{v}_g = \frac{v_{gc} + v_{gi}}{2} \tag{17}$$

なる平均的値を使用して  $x(v_g - v_{10})$  の項を積分の外に出した。

最後に管摩擦による圧力降下は(4)の第4項で表示され、

$$\begin{aligned}
 \Delta p_f &= \int_0^L \frac{f}{\rho} \frac{G^2}{2D_h} dz \\
 &= \frac{f}{2D_h} \int_0^L G^2 v dz \\
 &= \frac{f}{2D_h} \int_0^L G^2 [xv_g + (1-x)v_{10}] dz \\
 &= \frac{f\bar{G}^2}{2} [ \{ \bar{x}\bar{v}_g + (1-\bar{x})v_{10} \} (L/D_h - 12) ] \quad (18)
 \end{aligned}$$

となる。\$D\_h\$ は \$z\$ に依存せず一定とみなしているので積分の外に出してある。

管摩擦係数 \$f\$ は

$$f = \tau / \left( \frac{1}{8} \rho U^2 \right) \quad (19)$$

で与えられる。き裂の表面は十分荒いと考えられるので Nikradse の式を用いて \$f\$ を

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 21 \log (R_h/k) + 1.74 \quad (20)$$

で評価する。

#### 1.4 出口圧力と臨界質量速度との関係

以上で(10)で定義した4個の圧力損失項が定まった。き裂出口における圧力は出口における質量速度の関数であるから

$$\begin{aligned}
 p_c &= p_0 - \Delta p_{total} = F(G_c) \\
 &= p_0 - \frac{G_c^2}{2} \left[ \frac{v_{10}}{C^2} \left( \frac{A_c}{A_0} \right)^2 + \left\{ 1 + \left( \frac{A_c}{A_i} \right)^2 \right\} \{ x_c (v_{gc} - v_{10}) \} \right. \\
 &\quad \left. + v_{10} \left\{ 1 - \left( \frac{A_c}{A_0} \right)^2 \right\} + \bar{x} (\bar{v}_g - v_{10}) \left\{ 1 - \left( \frac{A_c}{A_i} \right)^2 \right\} \right. \\
 &\quad \left. + f \{ \bar{x}\bar{v}_g + (1-\bar{x})v_{10} \} (L/D_h - 12) \right] \quad (21)
 \end{aligned}$$

となる。(21)において \$p\_c\$ を求めるには \$G\_c\$ が既知でなくてはならない。次章でこの \$G\_c\$ を求める。

## 2. 2相臨界質量速度 $G_c$ [1,2,3]

$G_c$ を求めるに当って以下の仮定を設ける。

- (1) き裂中の流れは低クオリティ, 高圧とする。
- (2) その結果, 流れは均質となり  $u_g/u_l = 1$  となる。
- (3)  $0 \leq L/D_h \leq 12$  では  $x = 0$

この仮定のもとに  $G_c$  は

$$G_c^2 = - \left[ x \frac{dv_g}{dp} + (v_g - v_l) \frac{dx}{dp} \right]_e^{-1} \quad (22)$$

と表わせる。(11)をもとに(22)を導入した結果を付録Aに示した。下添字 e は出口における状態量を示している。

$L/D_h \geq 12$  の領域では相間質量移行率が無視できなくなる。かつ図1, 図2に示したように圧力が急激に降下してくるようになる。Henry は一定面積流路内における1成分臨界流の相間質量移行率に関する実験式を提示した[11]。これを用いれば  $L/D_h \geq 12$  の領域において

$$\frac{dx}{dp} = N \frac{dx_E}{dp} \quad (23)$$

となる。ここに

$$N = 20.0 x_E \quad x_E < 0.05$$

$$N = 1.0 \quad x_E \geq 0.05$$

$$x_E = \left[ \frac{S_0 - S_E}{S_g - S_l} \right]_E$$

これを微分して

$$\frac{dx_E}{dp} = - \left[ \frac{(1-x) \frac{ds_l}{dp} + x \frac{ds_g}{dp}}{S_g - S_l} \right]_E \quad (24)$$

であって添字 E は熱力学的平衡状態を示しており, すべての状態量やその微分値は, 上流側よどみ点状態を固定したままで熱力学的平衡条件から定まることを示している。

さらに蒸気相の圧縮性は等温変化のもとで

$$\frac{dv_g}{dp} = - \frac{v_g}{p\gamma} \quad (25)$$

$$\gamma = c_p / c_v$$



で与えられる。(23)と(25)を(22)に代入すれば

$$G_c^2 = \left[ x \frac{v_g}{p\gamma} - (v_g - v_{10}) N \frac{dx_E}{dp} \right]^{-1} \quad (26)$$

となる。

混相体のクオリティ  $x$  は指数関数的に緩和するとして

$$x = B (x_{LT} - x) d (z / D_h - 12) \quad (27)$$

としてみる。ここに

$$B = 0.0523$$

$$x_{LT} = N x_E \quad (28)$$

である。(27)を  $z = 12 D_h$  ( $x = 0$ ) と  $z = L$  ( $x = x_e$ ) との間で積分すると

$$x = x_{LT} \left[ 1 - \exp \left\{ -\frac{B}{D_h} (z - L) \right\} \right] + x_e \exp \left[ -\frac{B}{D_h} (z - L) \right] \quad (29)$$

となり、 $z = 12 D_h$  で  $x = 0$  なる条件を(29)に代入すれば

$$x_e = x_{LT} \left[ 1 - \exp \left\{ -B(L/D_h - 12) \right\} \right] \quad (30)$$

が得られる。また(29)を  $z = 12 D_h$  と  $z = L$  の間で積分してこの区間における平均クオリティを求めると

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{L - 12D} \int_{12D_h}^L x dz \\ &= x_{LT} - \frac{x_e}{B} \frac{1}{L/D_h - 12} \end{aligned} \quad (31)$$

が得られる。

最終的に(21)と(26)とを同時に満足する  $G_c$  を見い出せばよい。それには出口圧力を変化させてくり返し計算で  $G_c$  をもとめる。必要となるデータはき裂形状とよどみ点圧力、温度である。

また流れが臨界流に達していない場合は单相流非圧縮性流れの式から

$$p_0 - p_B = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (32)$$

$$G = \rho u \text{ ゆえ}$$

$$G = \sqrt{2 \rho (p_0 - p_B)} \quad (33)$$

となる。<sup>\*</sup>

---

\*〔2〕では、 $G = 2g \sqrt{\rho (p_0 - p_B)}$  となっているが間違いだと思う。EPRIプログラムでは(33)を使用しているので問題はない。

### 3. 考 察

原研版漏洩率解析コードを用いて、

- (1) BWR 運転条件
- (2) PWR 運転条件

における sch 80 および sch 160 相当肉厚からの漏洩率を求めた。計算条件を表 1 に示す。この計算ではき裂長さ  $2c$ 、き裂開口変位 COD と、き裂深さ  $L$  をパラメータとした。 $2c=20, 50, 100$  mm, COD = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 mm,  $L$  は 4 B, 8 B, 12 B, 16 B の sch 80 および sch 160 配管の肉厚とした。

コードの出力としては臨界質量速度  $G_c$  ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ ) が得られるがこの値をもとに以下のように単位換算をして  $G_c$  ( $\text{gpm}/\text{mm}^2$ ) を求めた。

$$\begin{aligned} 1 \text{ kg}/\text{m}^2/\text{s} &= 11 / \text{m}^2/\text{s} = (1/3.78543) \text{ gallon} / 10^6 \text{ mm}^2 / (1/60) \text{ min} \\ &= 15.85 \times 10^{-6} \text{ gpm}/\text{mm}^2 \end{aligned} \quad (34)$$

$D_h$  は(1)から求めた。また質量流量  $W_c$  は

$$W_c = G_c * 2c * \text{COD} \quad (35)$$

から求めた。

#### 3.1 臨界質量速度 $G_c$ とき裂形状との関係

図 4 から図 7 に  $G_c$  と COD との関係を示す。このうち図 4 と図 5 は BWR 運転条件において  $2c=100$  mm, 50 mm とした時の  $G_c$  値を示している。2つの図を比較すると両者は全く重なっていることが分かる。 $2c=20$  mm の図は示してはいるが図 4, 図 5 と全く同一であった。つぎに図 6 と図 7 は  $2c=100$  mm, 20 mm の時の PWR 運転条件の  $G_c$  を示す。やはり両者は一致している。 $2c=50$  mm の図は示してはいるが、この 2 枚の図と全く一致していた。これが臨界流の特徴である。

以上のことからき裂形状と  $G_c$  との関係は  $2c$  には依存せず COD と  $L$  にのみ依存することが分る。そして配管口径が大となる程配管肉厚すなわちき裂深さ  $L$  が大となるため管摩擦が大となるので  $G_c$  が小となるのである。

#### 3.2 臨界質量流量 $W_c$ とき裂形状との関係

つぎに  $W_c$  とき裂形状との関係を求める。現実の漏洩量は  $G_c$  ではなく、 $W_c$  [ $\text{gpm}$ ] を使用しているのでこの値の方が有用である。図 8 から図 13 までに、(35)による  $W_c$  を示す。図 8 には 5 gpm 限界線と 1 gpm 限界線が示してある。この図を用いることによって、たとえば  $2c=100$  mm を有す

る 16 インチ sch 80 配管から 5 gpm の漏洩を与える COD の値を容易に定めることが出来る。今の例では  $COD = 0.22 \text{ mm}$  と読みとれる。BWR / PWR の差で見ると図 8 と図 11 とを比較することによって PWR 時の  $W_c$  の方が BWR 時の  $W_c$  よりも大であることが分る。これは  $G_c$  の値が PWR 時の方が BWR 時よりも大であるからである。

図 14 から図 17 には横軸に  $2c$  を採って COD と  $L$  とをパラメータとした時の  $W_c$  を示す。この図から  $2c$  および COD が小となれば当然ではあるが  $W_c$  が減少することがよく分る。また  $W_c$  は  $2c$  に対し直線で変化する。

### 3.3 1, 3, 5 gpm を与えるき裂寸法

図 8 から図 13 を用いて  $W_c = 1, 3, 5 \text{ gpm}$  を生ぜしむる所の COD を読みとって、これらの  $W_c$  を与える  $2c$  との関係を開きらかにしたのが図 18 と図 19 である。 $2c$  の値としては 20, 50, 100 mm の 3 点のみをパラメータとしたので少々雑ではあるが  $W_c$  を一定とする  $2c$  と COD の値の組み合わせ状態がこの図から得られる。なお図 18, 19 において  $W_c = 3, 5 \text{ gpm}$  を与えるデータ点がそれぞれ 2 点および 1 点しか与えられていない理由は  $2c = 20 \text{ mm}$  では  $COD > 0.25 \text{ mm}$  になってしまうからである。計算では  $0.05 \leq COD \leq 0.25 \text{ mm}$  まで変化させ、 $COD > 0.25 \text{ mm}$  については計算していないためである。

## 4. 結 論

米国電力研究所が作成したき裂からの漏洩量を求める計算コードを原研機にマウントさせた。初期流体は飽和水かサブクール水であって、臨界流モデルとしては Henry のモデルを使用している。このコードを用いて質量流量を

- (1) き裂長さ
- (2) き裂開口変位
- (3) き裂深さ

をパラメータとして BWR / PWR 運転条件で求めた。その結果以下のことが分った。

- (1) 質量速度  $G_c$  はき裂開口変位とき裂深さに依存し、き裂長さには依存しない。そしてき裂開口変位が小なる程またき裂深さが大なる程  $G_c$  は低下する。
- (2) 1, 3, 5 gpm を与えるき裂開口変位とき裂長さの関係を図示した。

## 謝 辞

本報をまとめるにあたっては構造強度研究室柴田勝之博士よりまたプログラム編成にあたっては CSK 関谷秀郎氏より有益なコメントを受けました。

る 16 インチ sch 80 配管から 5 gpm の漏洩を与える COD の値を容易に定めることが出来る。今の例では  $COD = 0.22 \text{ mm}$  と読みとれる。BWR / PWR の差で見ると図 8 と図 11 とを比較することによって PWR 時の  $W_c$  の方が BWR 時の  $W_c$  よりも大であることが分る。これは  $G_c$  の値が PWR 時の方が BWR 時よりも大であるからである。

図 14 から図 17 には横軸に  $2c$  を採って COD と  $L$  とをパラメータとした時の  $W_c$  を示す。この図から  $2c$  および COD が小となれば当然ではあるが  $W_c$  が減少することがよく分る。また  $W_c$  は  $2c$  に対し直線で変化する。

### 3.3 1, 3, 5 gpm を与えるき裂寸法

図 8 から図 13 を用いて  $W_c = 1, 3, 5 \text{ gpm}$  を生ぜしむる所の COD を読みとって、これらの  $W_c$  を与える  $2c$  との関係を開きらかにしたのが図 18 と図 19 である。 $2c$  の値としては 20, 50, 100 mm の 3 点のみをパラメータとしたので少々雑ではあるが  $W_c$  を一定とする  $2c$  と COD の値の組み合わせ状態がこの図から得られる。なお図 18, 19 において  $W_c = 3, 5 \text{ gpm}$  を与えるデータ点がそれぞれ 2 点および 1 点しか与えられていない理由は  $2c = 20 \text{ mm}$  では  $COD > 0.25 \text{ mm}$  になってしまうからである。計算では  $0.05 \leq COD \leq 0.25 \text{ mm}$  まで変化させ、 $COD > 0.25 \text{ mm}$  については計算していないためである。

## 4. 結 論

米国電力研究所が作成したき裂からの漏洩量を求める計算コードを原研機にマウントさせた。初期流体は飽和水かサブクール水であって、臨界流モデルとしては Henry のモデルを使用している。このコードを用いて質量流量を

- (1) き裂長さ
- (2) き裂開口変位
- (3) き裂深さ

をパラメータとして BWR / PWR 運転条件で求めた。その結果以下のことが分った。

- (1) 質量速度  $G_c$  はき裂開口変位とき裂深さに依存し、き裂長さには依存しない。そしてき裂開口変位が小なる程またき裂深さが大なる程  $G_c$  は低下する。
- (2) 1, 3, 5 gpm を与えるき裂開口変位とき裂長さの関係を図示した。

## 謝 辞

本報をまとめるにあたっては構造強度研究室柴田勝之博士よりまたプログラム編成にあたっては CSK 関谷秀郎氏より有益なコメントを受けました。

る 16 インチ sch 80 配管から 5 gpm の漏洩を与える COD の値を容易に定めることが出来る。今の例では  $COD = 0.22$  mm と読みとれる。BWR / PWR の差で見ると図 8 と図 11 とを比較することによって PWR 時の  $W_c$  の方が BWR 時の  $W_c$  よりも大であることが分る。これは  $G_c$  の値が PWR 時の方が BWR 時よりも大であるからである。

図 14 から図 17 には横軸に  $2c$  を採って COD と  $L$  とをパラメータとした時の  $W_c$  を示す。この図から  $2c$  および COD が小となれば当然ではあるが  $W_c$  が減少することがよく分る。また  $W_c$  は  $2c$  に対し直線で変化する。

### 3.3 1, 3, 5 gpm を与えるき裂寸法

図 8 から図 13 を用いて  $W_c = 1, 3, 5$  gpm を生ぜしむる所の COD を読みとって、これらの  $W_c$  を与える  $2c$  との関係を開きらかにしたのが図 18 と図 19 である。 $2c$  の値としては 20, 50, 100 mm の 3 点のみをパラメータとしたので少々雑ではあるが  $W_c$  を一定とする  $2c$  と COD の値の組み合わせ状態がこの図から得られる。なお図 18, 19 において  $W_c = 3, 5$  gpm を与えるデータ点がそれぞれ 2 点および 1 点しか与えられていない理由は  $2c = 20$  mm では  $COD > 0.25$  mm となってしまうからである。計算では  $0.05 \leq COD \leq 0.25$  mm まで変化させ、 $COD > 0.25$  mm については計算していないためである。

## 4. 結 論

米国電力研究所が作成したき裂からの漏洩量を求める計算コードを原研機にマウントさせた。初期流体は飽和水かサブクール水であって、臨界流モデルとしては Henry のモデルを使用している。このコードを用いて質量流量を

- (1) き裂長さ
- (2) き裂開口変位
- (3) き裂深さ

をパラメータとして BWR / PWR 運転条件で求めた。その結果以下のことが分った。

- (1) 質量速度  $G_c$  はき裂開口変位とき裂深さに依存し、き裂長さには依存しない。そしてき裂開口変位が小なる程またき裂深さが大なる程  $G_c$  は低下する。
- (2) 1, 3, 5 gpm を与えるき裂開口変位とき裂長さの関係を図示した。

## 謝 辞

本報をまとめるにあたっては構造強度研究室柴田勝之博士よりまたプログラム編成にあたっては CSK 関谷秀郎氏より有益なコメントを受けました。

## 参 考 文 献

- [1] R.P. Collier, et al. Two-Phase Flow through Intergranular Stress Corrosion Cracks and Resulting Acoustic Emission, NP-3540-LD, April (1984).
- [2] D. Abdollahian, B. Chexal, Calculation of Leak Rates through Cracks in Pipes and Tubes, NP-3395, December (1983).
- [3] M. E. Mayfield, et al. Cold Leg Integrity Evaluation, NUREG/CR-1319 R 5, February (1980).
- [4] 矢野, 松島, 岡本, 配管貫通欠陥からの流出流量, 第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集, B313 (1986).
- [5] T. Yano, E. Matsushima, A. Okamoto, Leak Flow Rate from Through-Wall Crack in Pipe, 2nd ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Hawaii, March (1987)
- [6] K. Shibata, S. Miyazono, T. Kaneko, N. Yokoyama, Ductile Fracture Behavior of Circumferentially Cracked TYPE304 Stainless Steel Piping under Bending Load, Nuclear Engineering and Design vol. 94 (1986).
- [7] 柴田, 金子, 横山ほか, 周方向欠陥を有する SUS 304 鋼配管の延性破壊挙動と LBB 評価, 圧力技術 24 巻 5 号 (1986).
- [8] 柴田, 大場, 川村ほか, 貫通または未貫通欠陥を有する 6 インチ口径 SUS 304 鋼配管および STS 42 炭素鋼配管の延性破壊挙動, JAERI-M 86-078 (1986).
- [9] 金子, 柴田, 大場, ほか, 軽水炉配管材の延性破壊に関する研究, JAERI-M 85-064 (1986).
- [10] 安田, 柴田, 大場, ほか, 軽水炉配管材の延性破壊に関する研究 (第 2 報), JAERI-M 86-098 (1986).
- [11] R. E. Henry, The Two-Phase Critical Discharge of Initially Saturated or Sub-cooled Liquid, Nuclear Science and Engineering, 41 (1970).
- [12] R. E. Henry, H.K. Fauske, The Two-Phase Critical Flow of One-Component Mixtures in Nozzles, Orifices, and Short Tubes, J. of Heat Transfer, Trans. of the ASME, May (1971).

なお本稿の校正時 (1 sep., 1987) において以下に示す最新の文献を得たので追加しておく。

- [A] T. Yano, et al., Leak flow rate from through-wall crack in pipe, JSME Tuternational Journal, to be appeared.
- [B] T. Yano, et al., Evaluation of leak flow rate and jet impingement related to leak before break, Nucl. Eng. Design, to be appeared.
- [C] H. John et al., Kritische Leckströmung aus rauhen Rissen in Druckbehältern, kfk 4192, to be appeared.

表1 計算条件

	圧力 $P_0$	温度 $T_0$	き裂長さ $2c$	き裂開口変位 COD	き裂深さ $L$	表面粗さ $k$	図番
	kPa	°C	mm	mm	mm	cm	
BWR	6865	284.5	20	0.05	8.6*	0.003	
				0.10	12.7		
				0.15	17.4		
				0.20	21.4		
				0.25			
PWR	15651	324.9	20	0.05	13.5**	0.003	
				0.10	23.0		
				0.15	33.3		
				0.20	40.5		
				0.25			

\* 上から順次 sch 80配管 4, 8, 12, 16 B板厚に相当している。

\*\* 上から順次 sch 160配管 4, 8, 12, 16 B板厚に相当している。

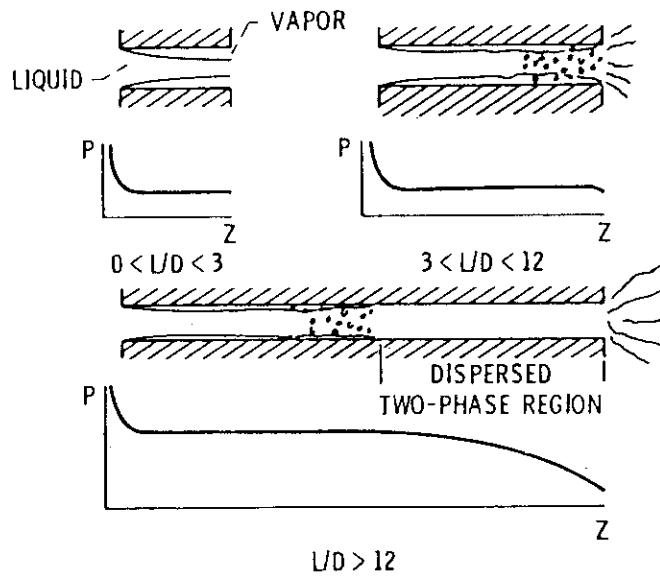


図1 するどい角を過ぎる飽和水もしくはサークル水のき裂内流動型式

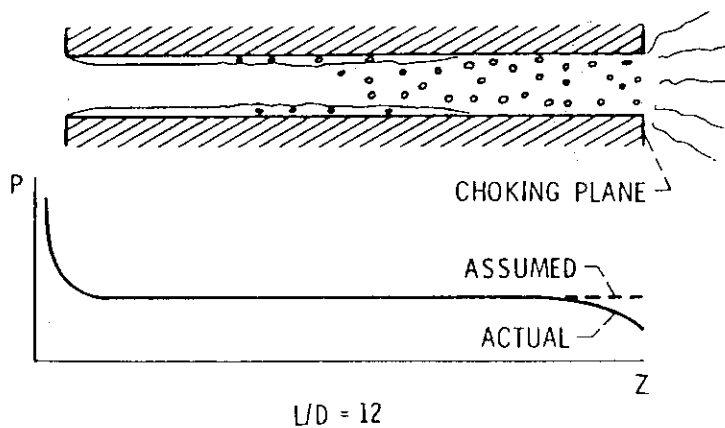
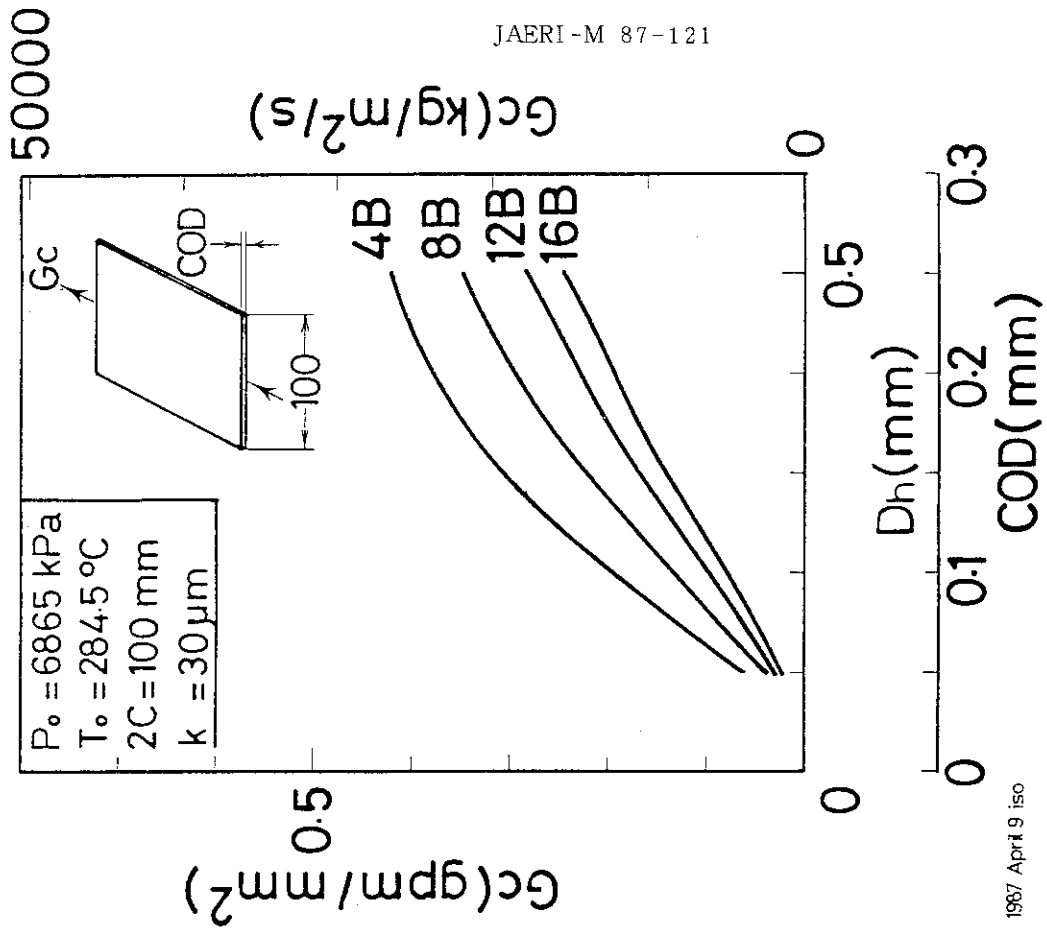
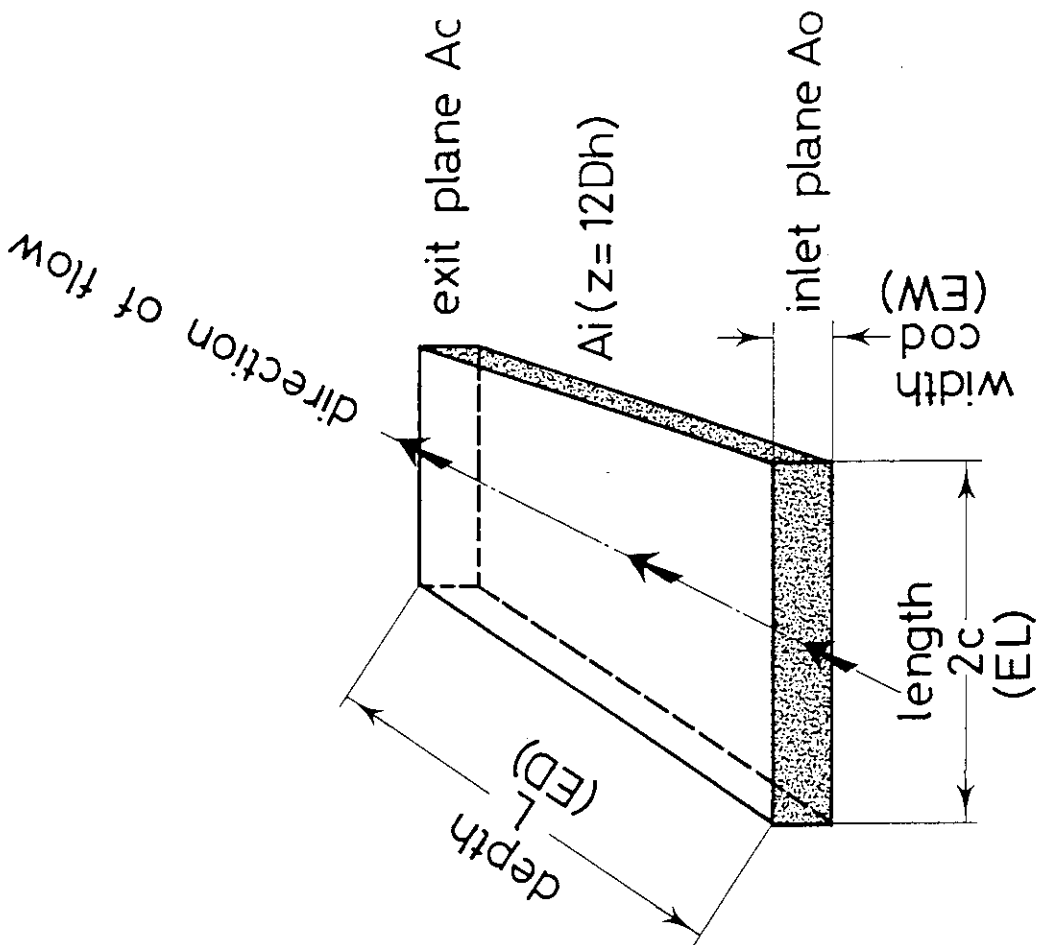


図2  $L/D_n = 12$  なる場合のき裂内流動型式 [11]



1987 April 9 iso



1987 March 11

図 4 BWR 運転条件下の質量速度  $G_c$  と COD との関係 ( $2c = 100 \text{ mm}$ )

図 3 き裂寸法 (1)



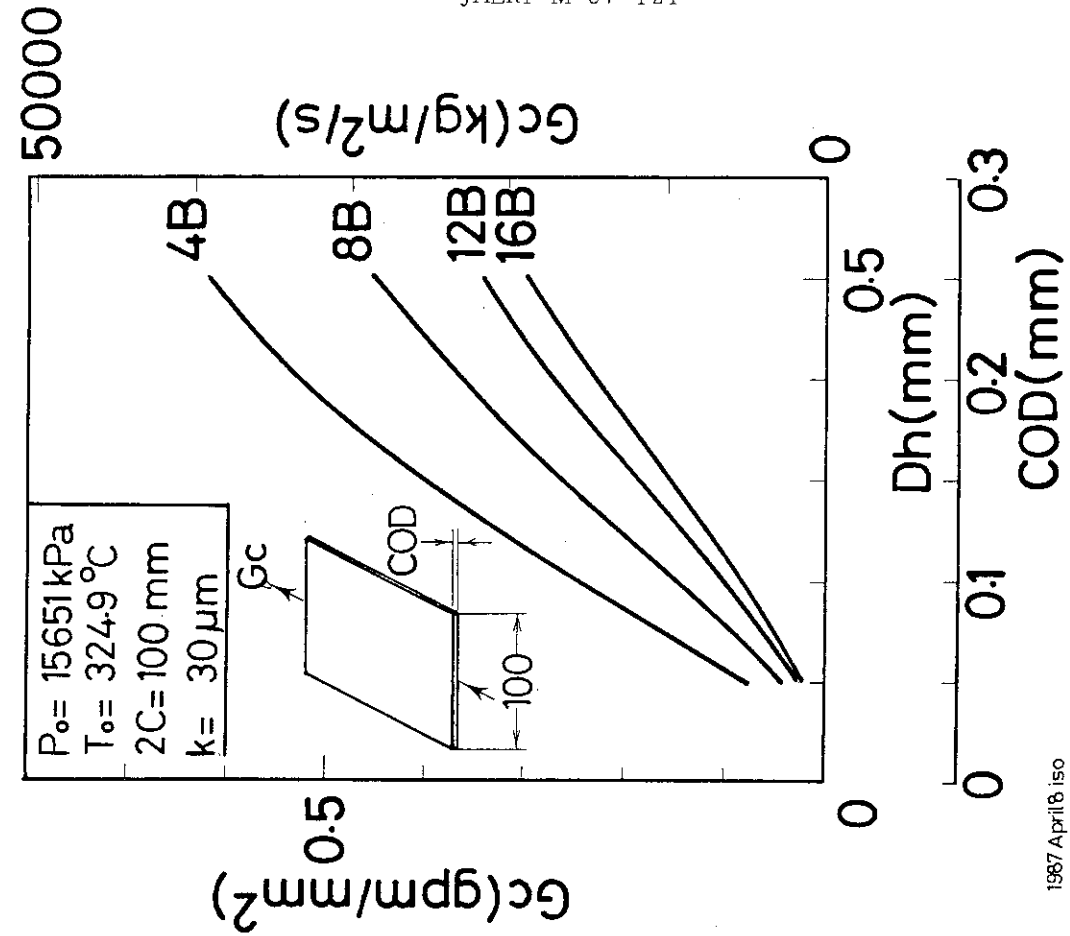


図6 PWR運転条件下の質量速度 $G_c$ とCODとの関係  
( $2c = 100 \text{ mm}$ )

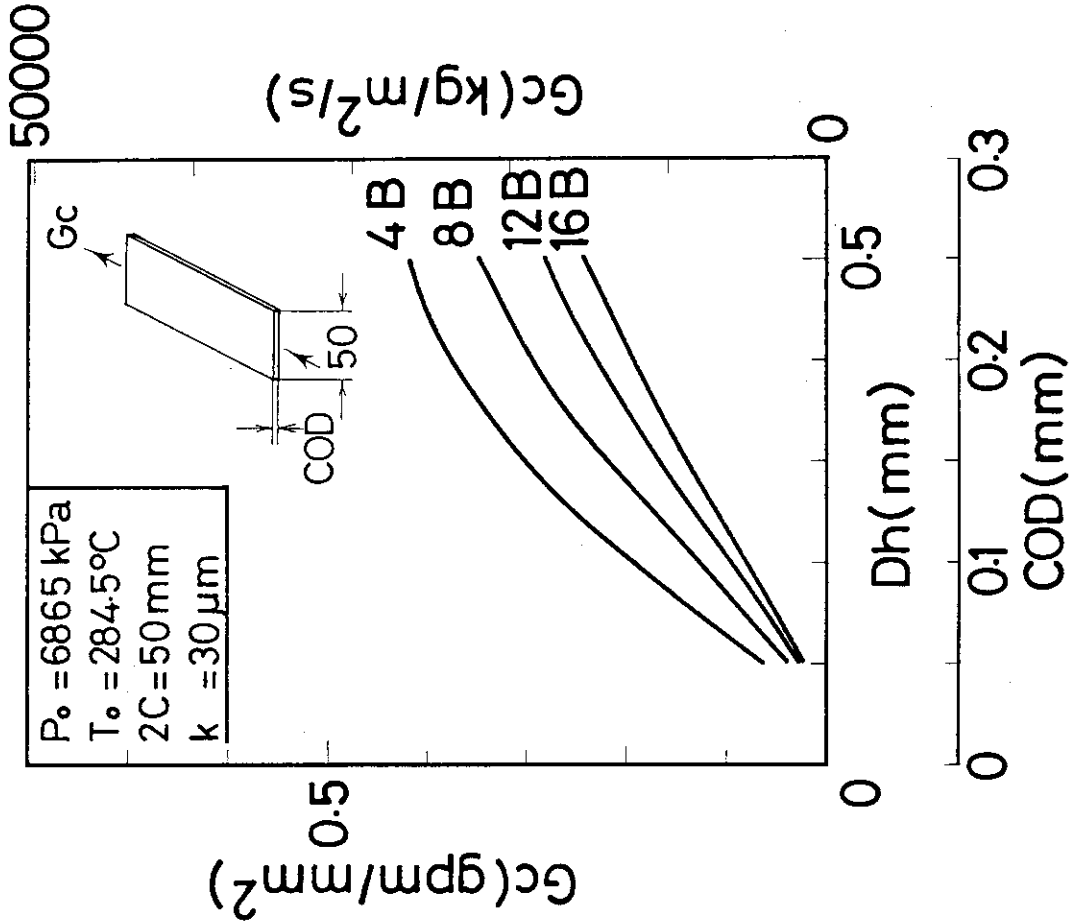
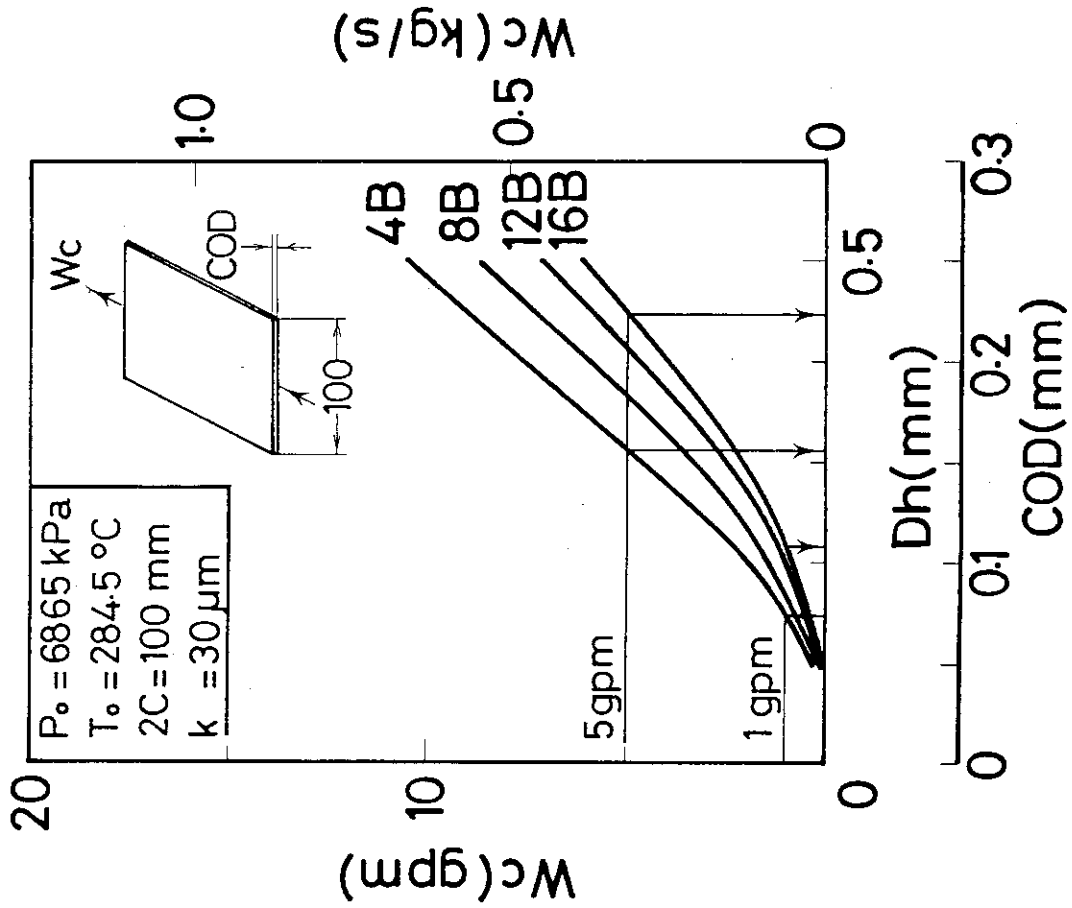
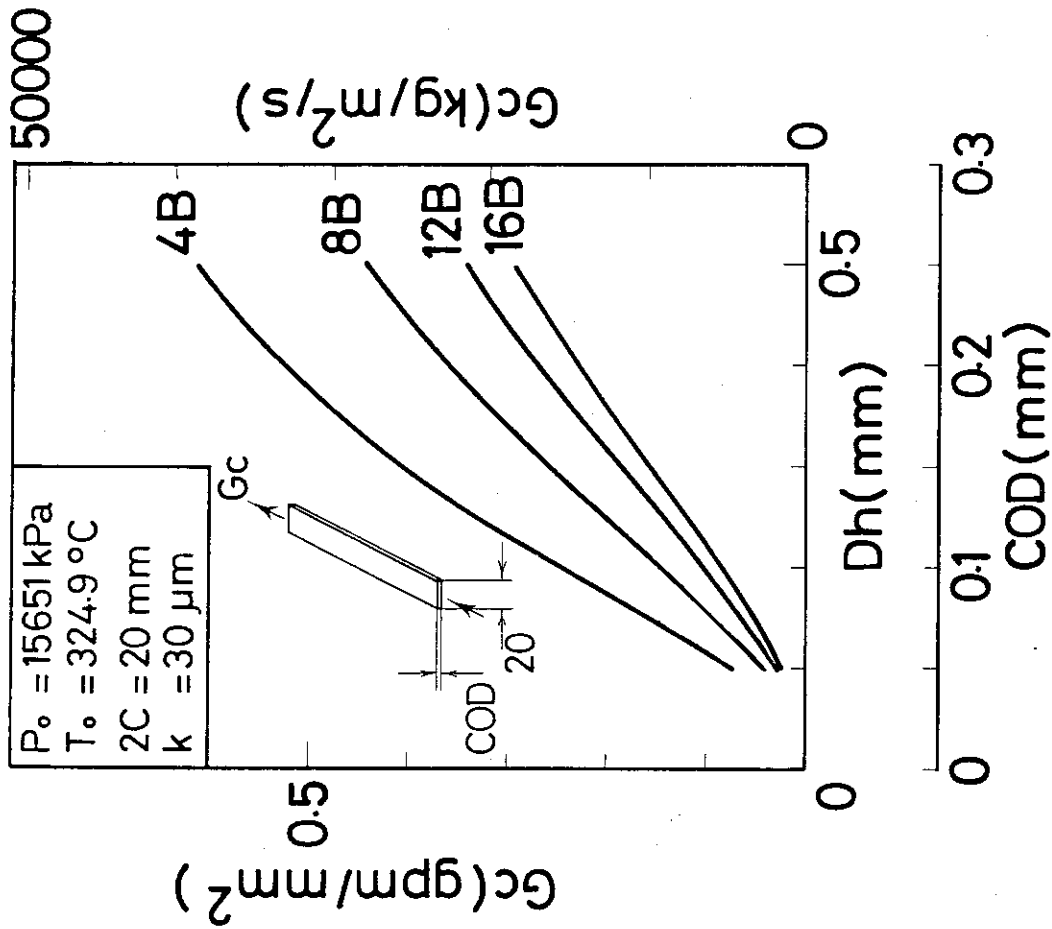


図5 BWR運転条件下の質量速度 $G_c$ とCODとの関係  
( $2c = 50 \text{ mm}$ )



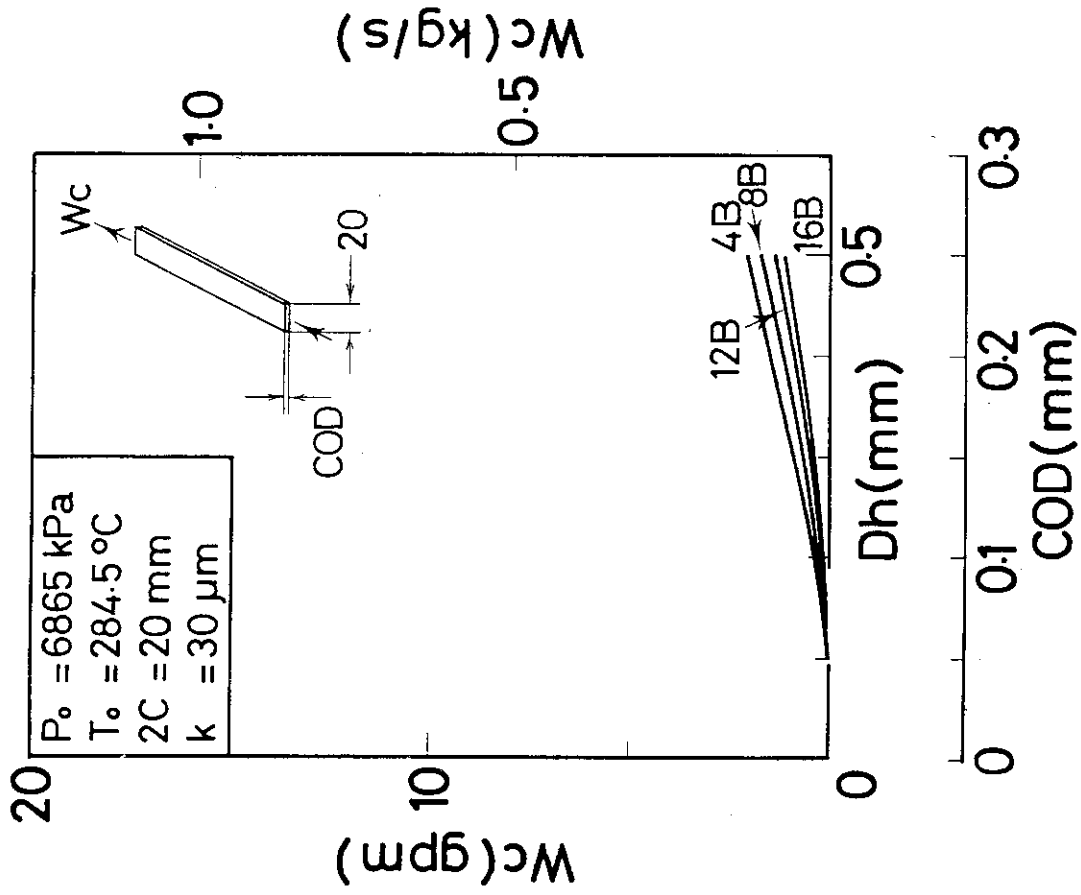
1987 April 10 iso

図8 BWR運転条件下の質量流量 $W_c$ とCODとの関係 ( $2c = 100 \text{ mm}$ )



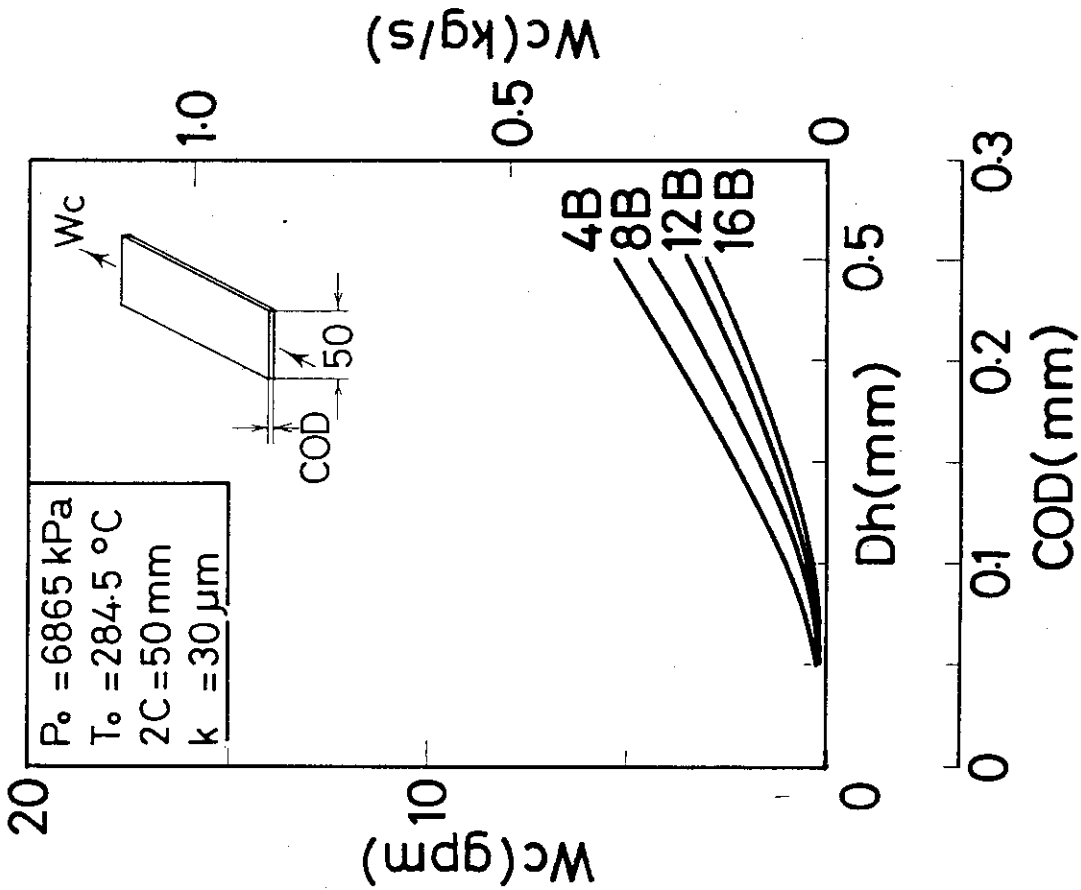
1987 May 7 iso

図7 PWR運転条件下の質量速度 $G_c$ とCODとの関係 ( $2c = 20 \text{ mm}$ )



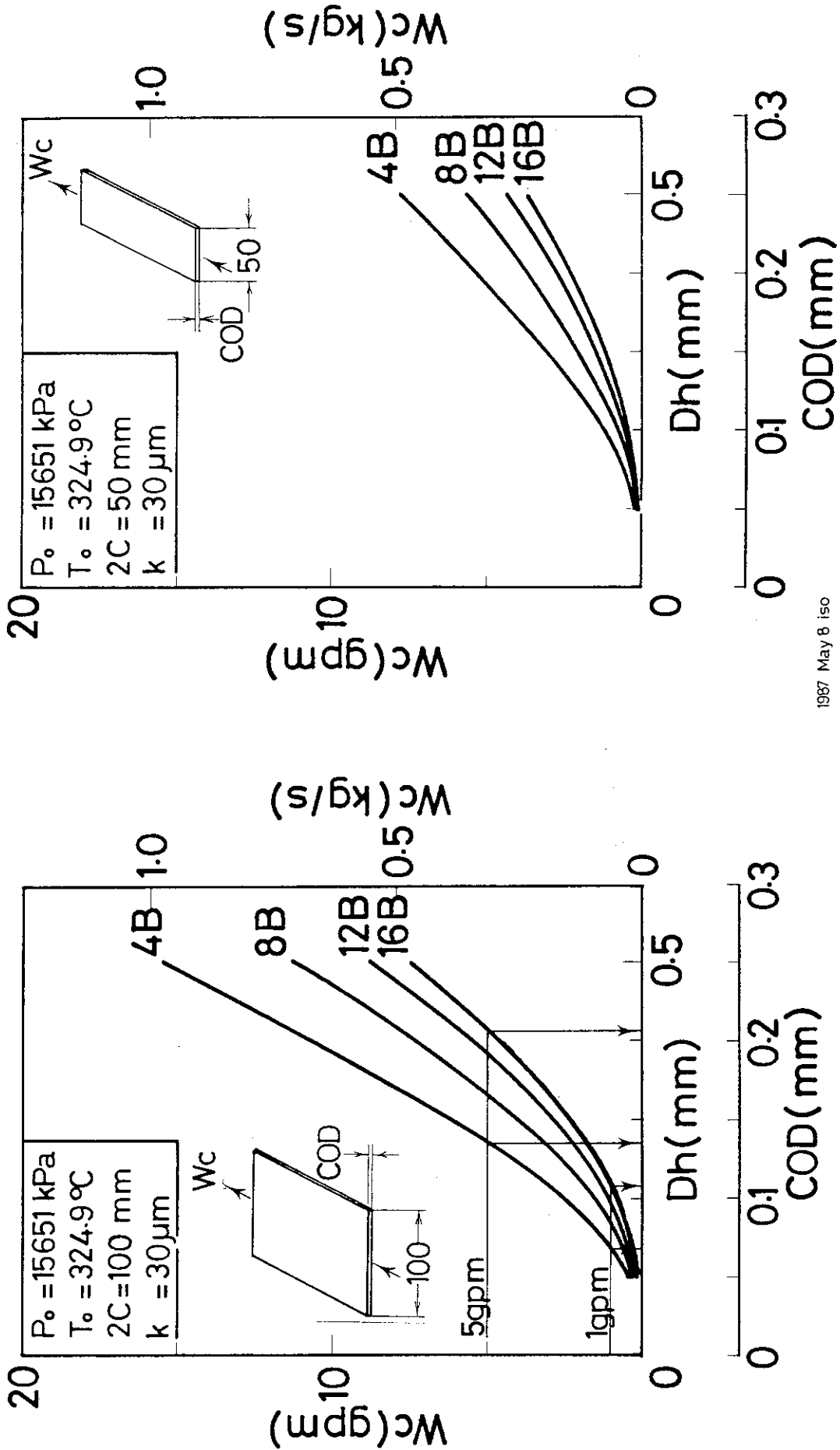
1987 May 8 iso

図 10 BWR運転条件下の質量流量 $W_c$ とCODとの関係 ( $2c = 20 \text{ mm}$ )



1987 May 7 iso

図 9 BWR運転条件下の質量流量 $W_c$ とCODとの関係 ( $2c = 50 \text{ mm}$ )

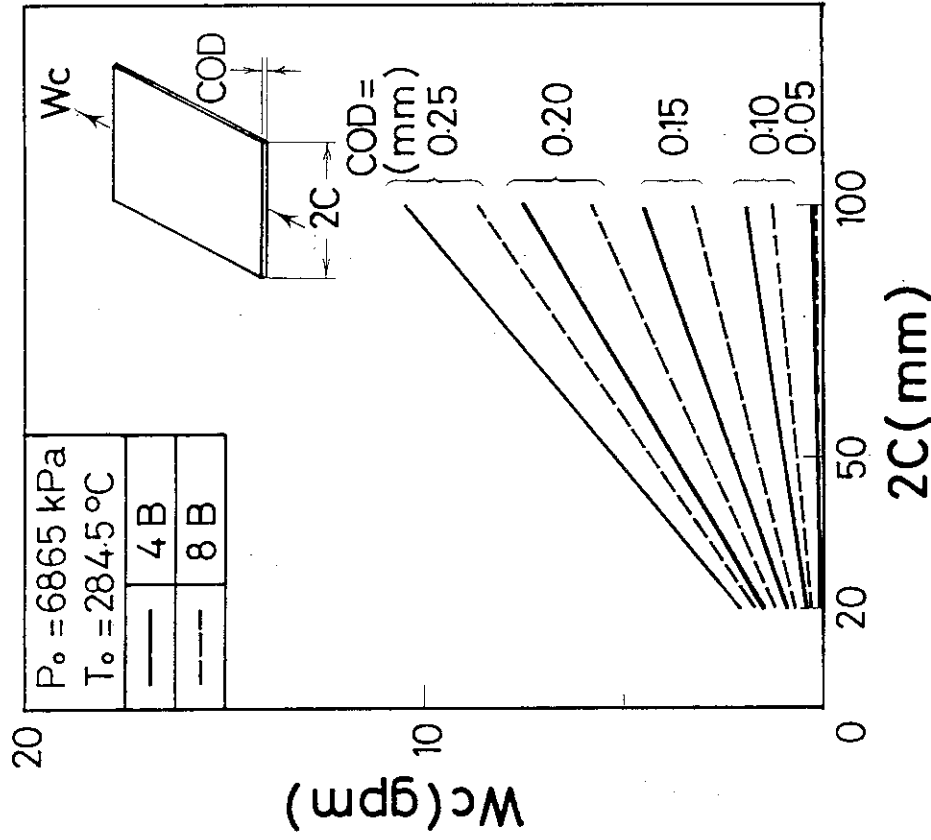


1987 April 10 iso

図 11 PWR 運転条件下の質量流量  $W_c$  と COD との関係 ( $2c = 100 \text{ mm}$ )

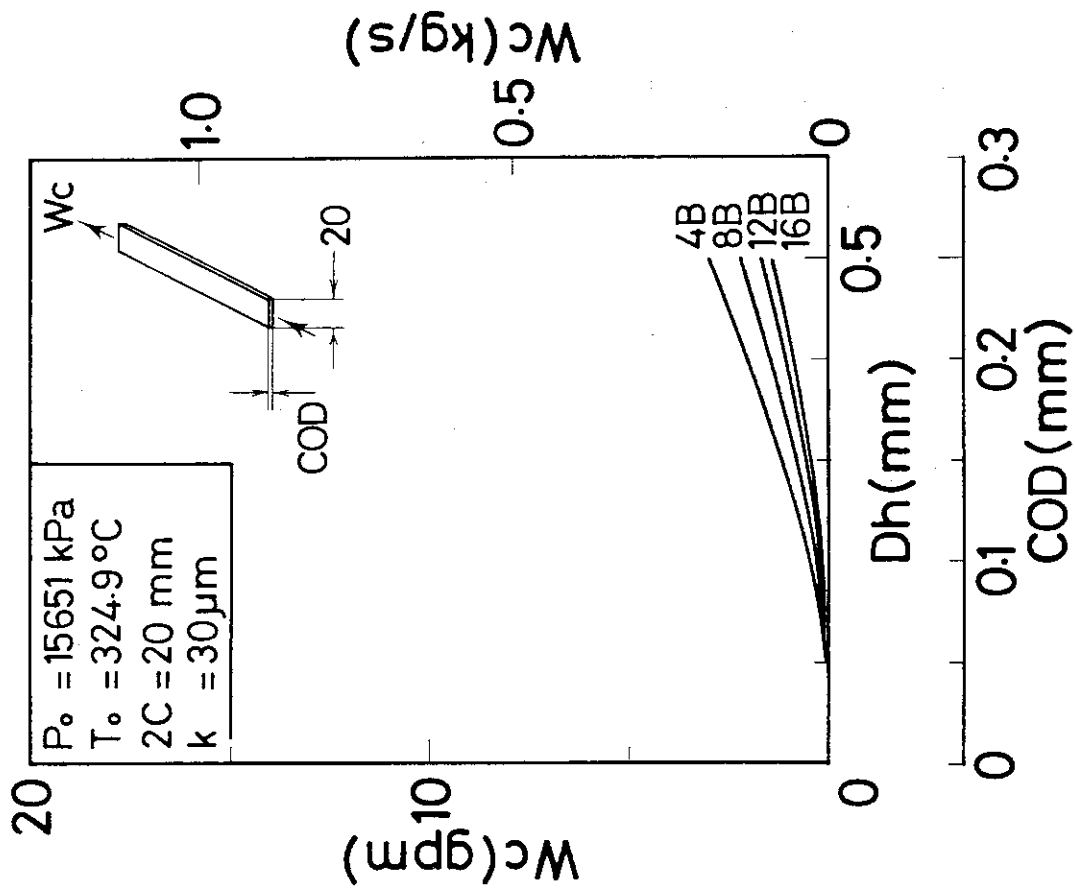
1987 May 8 iso

図 12 PWR 運転条件下の質量流量  $W_c$  と COD との関係 ( $2c = 50 \text{ mm}$ )



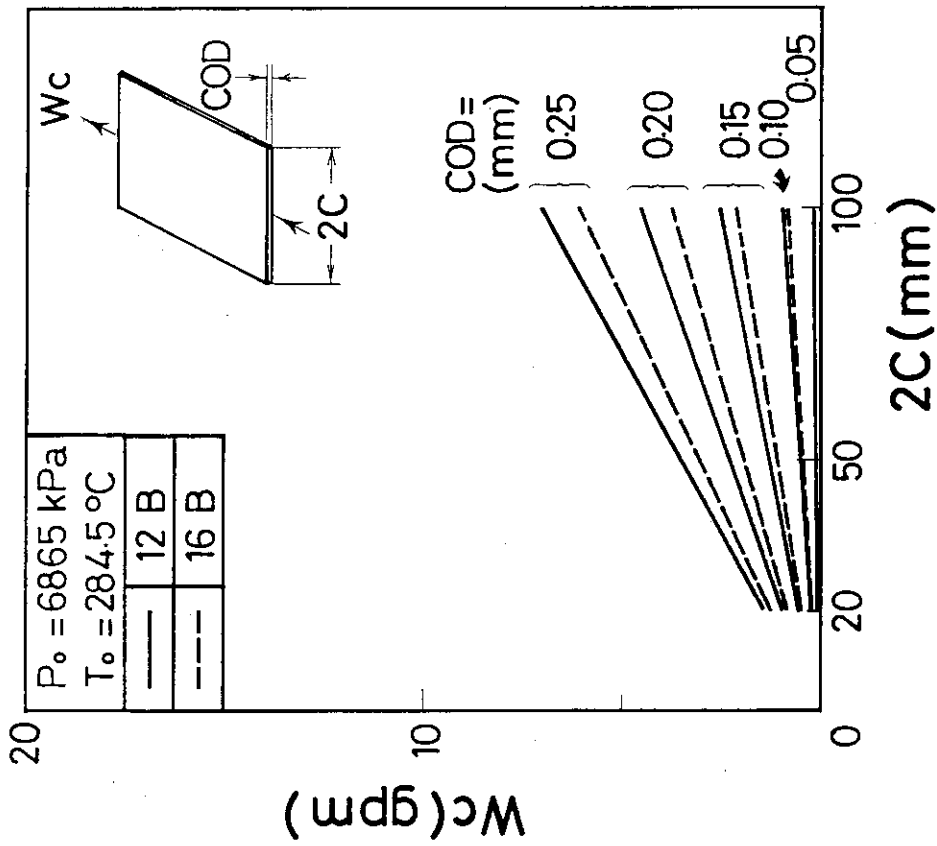
1987 May 12 iso

図 14 BWR 運転条件下の質量流量  $W_c$  と COD との関係 (4 B, 8 B 配管)



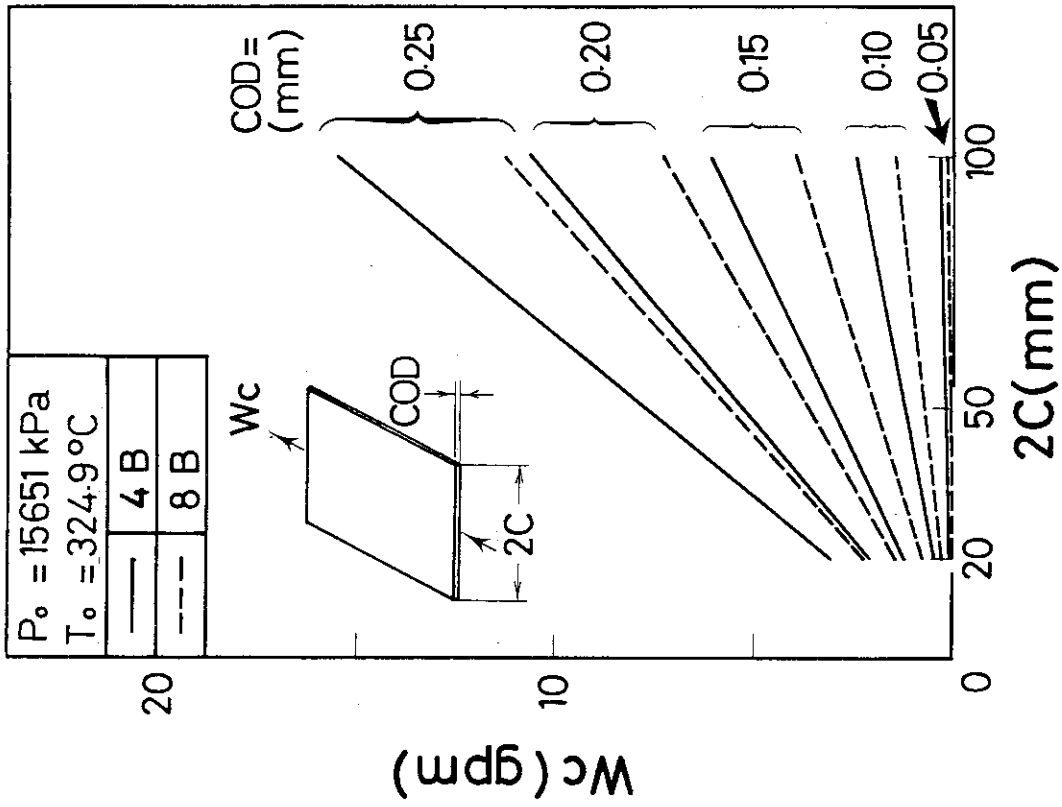
1987 May 7 iso

図 13 PWR 運転条件下の質量流量  $W_c$  と COD との関係 ( $2c = 20 \text{ mm}$ )



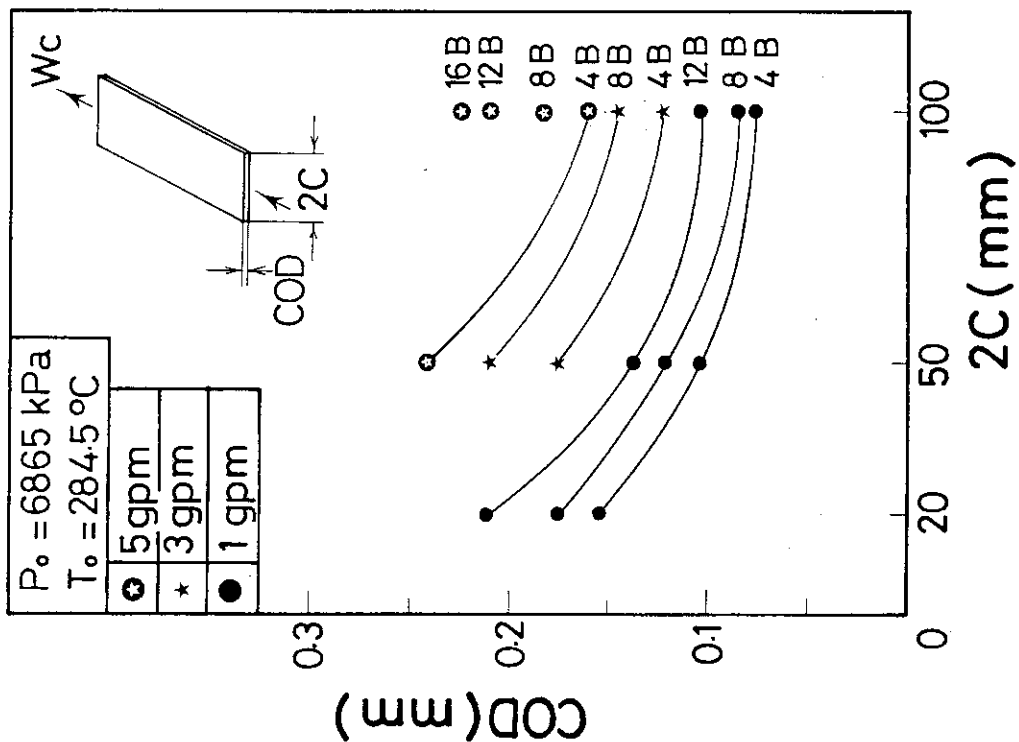
1987 May 12 iso

図 15 BWR運転条件下の質量流量 $W_c$ と $2c$ との関係 (12B, 16B配管)



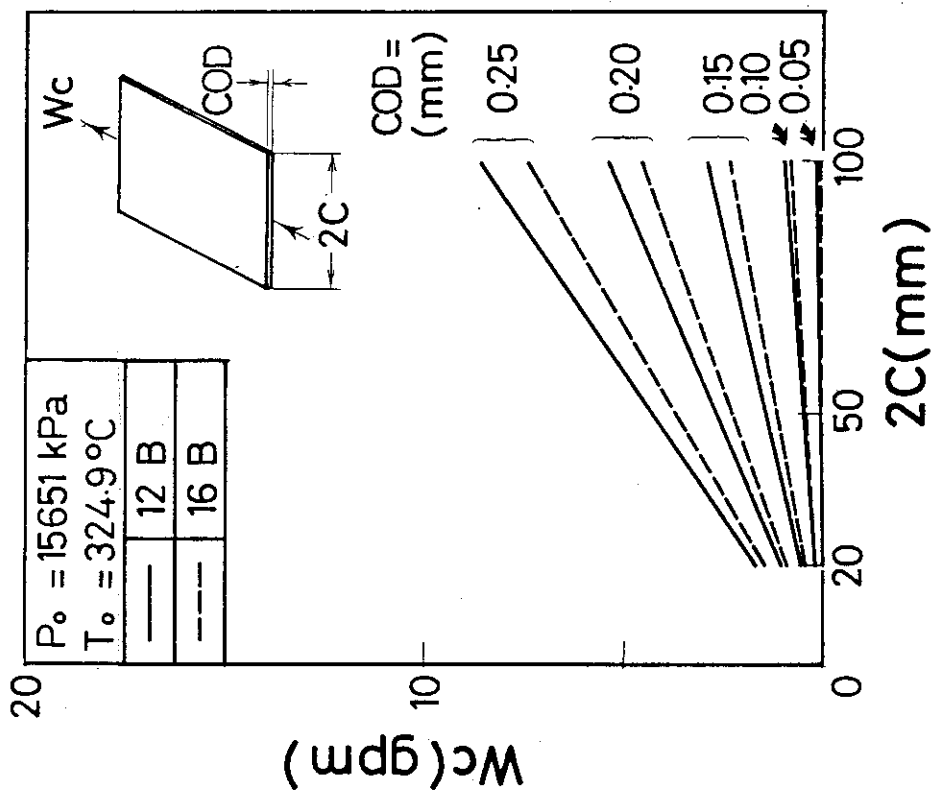
1987 May 15 iso

図 16 PWR運転条件下の質量流量 $W_c$ と $2c$ との関係 (4B, 8B配管)



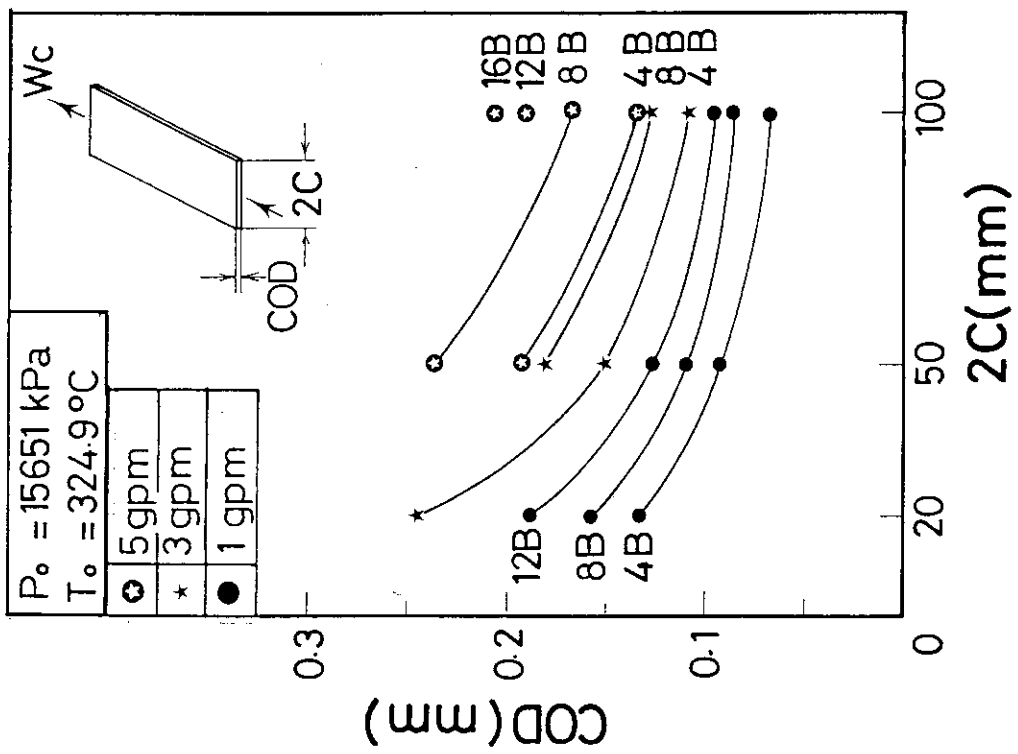
1987 May 9 iso

図 18 BWR 運転条件下で  $W_c = 1, 3, 5 \text{ gpm}$  を与える COD と  $2c$



1987 May 15 iso

図 17 PWR 運転条件下の質量流量  $W_c$  と  $2c$  との関係 (12 B, 16 B 配管)



1987 May 11 iso

図 19 PWR 運転条件下で  $W_c = 1, 3, 5 \text{ gpm}$  を与える COD と  $2c$



## 付録A Henryの臨界流モデル〔12〕

ここでは(2)を導入しておく。

Moodyは1成分2相混相流の質量速度を熱的平衡のもとで求めた。ここでは非平衡モデルを用いてよどみ点状態量のみを既知として質量速度を求める。

(1) 連続の式

$$\begin{aligned} \text{液相} \quad W_l &= \rho_l u_l A_l \\ \text{蒸気相} \quad W_g &= \rho_g u_g A_g \end{aligned} \quad (\text{A1})$$

(2) 運動量の式

$$d(W_g u_g + W_l u_l) = -A dp + dF_w \quad (\text{A2})$$

圧力勾配による外力と運動量による外力は摩擦力より大であるとして摩擦力を無視すると (A2) は  $W_g = xW$ ,  $W_l = (1-x)W$ ,  $G = AW$  を用いて

$$dp = -d[G\{xu_g + (1-x)u_l\}] \quad (\text{A3})$$

臨界流では  $dG = 0$  であるから (A3) は

$$dp = -Gd\{xu_g + (1-x)u_l\} \quad (\text{A4})$$

となる。臨界状態は throat 部で生じることから

$$G_t^{-1} = -\left[\frac{d\{xu_g + (1-x)u_l\}}{dp}\right]_t = -\left[\frac{d\{xk + (1-x)\}u_l}{dp}\right]_t \quad (\text{A5})$$

臨界条件は throat 部において

$$\frac{dG}{dp} \Big|_t = 0 \quad (\text{A6})$$

である。(A5)において  $u_l$  を  $x$  と  $k$  で表現してみる。

$$\begin{aligned} xG &= \rho_g u_g \alpha \\ (1-x)G &= \rho_l u_l (1-\alpha) \\ u_g &= k u_l \end{aligned} \quad (\text{A7})$$

より  $\alpha$  と  $u_g$  を消去すると

$$u_l = \frac{xv_g + k(1-x)v_l}{k} G \quad (\text{A8})$$

となる。これを (A5) に代入すれば  $\frac{dG}{dp} = 0$  を考慮して

$$\begin{aligned}
 -G^{-1} &= \frac{d}{dp} \left[ \{ xk + (1-x) \} \left\{ \frac{xv_g + k(1-x)v_l}{k} \right\} G \right] \\
 &= G \frac{d}{dp} \left[ \{ xk + (1-x) \} \left\{ \frac{xv_g + k(1-x)v_l}{k} \right\} \right] \quad (A9)
 \end{aligned}$$

よって

$$G_c^2 = - \left[ \frac{d}{dp} \left[ \{ xk + (1-x) \} \left\{ \frac{xv_g + k(1-x)v_l}{k} \right\} \right] \right]^{-1} \quad (A10)$$

微分を実行すると

$$\begin{aligned}
 G_c^2 &= - \left[ \frac{x}{k} \{ 1+x(k-1) \} \frac{dv_g}{dp} + \frac{v_g}{k} \{ 1+2x(k-1) \} + v_l \{ 2(x-1) + k(1-2x) \} \frac{dx}{dp} \right. \\
 &\quad \left. + \{ 1+x(k-2) - x^2(k-1) \} \frac{dv_l}{dp} + x(1-x) \left( v_l - \frac{v_g}{k^2} \right) \frac{dk}{dp} \right]^{-1} \quad (A11)
 \end{aligned}$$

ここで次の仮定を設ける。

- (1) 液相は非圧縮性とする。すなわち  $\frac{dv_l}{dp} = 0$
- (2) 流れは低クオリティもしくは高圧とする。この場合  $k \doteq 1$  としてよい。

以上の仮定を (A11) に適用すると

$$G_c^2 = - \left[ x \frac{dv_g}{dp} + (v_g - v_l) \frac{dx}{dp} \right]^{-1} \quad (A12)$$

が求まる。これが(22)である。

## 付録B プログラムリスト

以下に〔1〕に記載されている漏洩率解析プログラムを原研機にマウントさせたリストを示す。原プログラムとの変更点を以下に示す。

- (1) EPRI 版蒸気表サブルーチンを原研版蒸気表サブルーチン STEAMZ に置き変えた。
- (2) EPRI 版蒸気表サブルーチンと原研版蒸気表サブルーチン間の単位換算のために新たにサブルーチン JAERI を作成しこの中で単位換算をして STEAMZ を呼んだ。
- (3) くり返し計算のしきい値 (THRESH) を入力データにした。計算が発散した場合はこの値を大にしてやる。original 版では THRESH=1. E-3 であった。

表 B. 1 に入力データ FORMAT を示す。表 B. 2 に入力データの意味と単位を示す。表 B. 3 に〔1〕に記載されている計算結果を示す。表 B. 4 に JCL を示す。この中に入力データが定義されている。表 B. 5 に原研版プログラムリストを示す。表 B. 6 に計算結果が出力されている。この値と表 B. 3 の値とを比較すると両者は一致しているのでマウントは成功したとみなした。



表B.3 EPRIコードによる例題解析結果〔1〕

\*\*\*\*\* STAGNATION PROPERTIES \*\*\*\*\*

PO= 15500. KPA  
 TO= 267.8 C  
 IN= 3  
 PB= 101.4 KPA

\*\*\*\*\* CRACK GEOMETRY \*\*\*\*\*

AREA= .2096 CM\*CM  
 PERIMETER= 12.77 CM  
 DEPTH= 5.72 CM  
 ROUGHNESS HEIGHT= .6200E-03 CM  
 AREA RATIO= 1.00  
 NO. OF 90 DEGREE TURN= 0  
 NO. OF 45 DEGREE TURN= 0  
 DEPTH/(HYDR.DIA.)= 67.0

\*\*\*\*\* OUTPUT \*\*\*\*\*

CRITICAL MASS FLUX = .4424E-05 KG/M2/SEC  
 LEAK RATE= .5271E+00 KG/SEC  
 PRESSURE AT EXIT PLANE= 6187.3 KPA  
 QUALITY AT EXIT PLANE= .0104  
 QUALITY AT BACK PRESSURE= .3639

表B.4 JCLリスト

```

E20 V10L20 <<< JCL STATEMENTS LIST >>> DATE 04/08/87 TIME 15:54
1 //F9215097 JOB ('207292150958.01', JOB 2836
// 'T.OGW.00C.011.02E.00', 'SRP',
// 'S.HASHIGUCH', CLASS=B, PRTY=00, TIME=(0000,05),
// MSGCLASS=S, MSGLEVEL=(2,0,1),
// USER=J9215, GROUP=G0958, PASSWORD=
***JOBPARM S=ANY, R=9215, L=0002, C=0000000
*****
*** LIST OF PRIVATE PROC *
*****
*** LIST OF USER JCL *
*****
2 // EXEC FORT77,
// SO='J9215.LEAK',
// Q='FORT',
// A='ELM(JAERI1),SOURCE,DEBUG(SUBCHK)'
11 // EXEC LKED77
28 // EXEC GD
35 //FT06F001 DD SYSOUT=* 00111011
36 //FT09F001 DD * 00111111
***** LEAK.CNTL(EPRI) 62. 4. 6. EXERCISE ***** 00112650
*** IN PO(KSI) TO(C) PB(KSI) THRESH * 00113641
*** 3 15500.0 288.0 101.4 0.01 * 00113755
*** 2C(CM) COD(CM) DEPTH(CM) ROUGH(CM) AE/AO 90 TURN 45 TURN * 00114645
*** 6.35 0.033 5.715 0.00062 1.0 0 0 * 00115644
***** LEAK.CNTL(EPRI) 61. 4. 6. EXERCISE ***** 00116650
//
    
```

表B.5 原研版プログラムリスト

```

FORTRAN 77      V10L31      DATE 87.04.08 TIME 15.59.47

C      EPRI'S PROGRAMM FOR LEAK RATE THROUGH CRACKS
C      COPIED FROM EPRI NP3540-LD APRIL 1984 ON 1986.03.04 ISO
C      LEAK.FORT(HAS8704) COMPLETED ON 1987. 4. 8. BY HASH
C      *****
C      *** COMPLETED ON 62. 4. 8. ***
C      *****
C      *** THE INPUT TO THE PROGRAM ***
C
C FIRST CARD
C IN=1 --> INITIALLY SATURATED LIQUID,INPUT TEMERATURE ONLY
C IN=2 --> INITIALLY SATURATED LIQUID,INPUT PRESSURE  ONLY
C IN=3 --> INITIALLY SUBCOOLED LIQUID,INPUT BOTH TEMERATURE AND PRESSURE
C PO = STAGNATION PRESSURE (KPA)
C TO = STAGNATION TEMPERATURE (C)
C PB = BACK PRESSURE (KPA)
C THRESH = THERSHHOLD VALUE, ORIGINAL VALUE = 1.E-3
C
C SECOND CARD
C EL = CRACK LENGTH, 2C (CM)
C EW = CRACK-OPENING DISPLACEMENT, COD (CM)
C ED = CRACK DEPTH, L (CM)
C EK = THE HEIGHT OF PROTRUSION OF THE ROUGHNESS GRAIN FROM THE MEAN
C      SURFACE (CM)
C AR = AREA RATIO = AE/AO
C N1 = NUMBER OF 90 DEGREES TURNS IN THE CRACK PATH
C N2 = NUMBER OF 45 DEGREES TURNS IN THE CRACK PATH
C
C      *** JAERI'S STEAM TABLE ***
C
C STEAMZ(P,T,V,H,S,INDEX)
C INDEX=0 --> SUBCOOLED WATER OR SUPERHEATED STEAM, INPUT BOTH PRESSURE
C      AND TEMPERATURE
C INDEX=1 --> SATURATED STEAM, INPUT TEMPERATURE
C INDEX=2 --> SATURATED STEAM, INPUT PRESSURE
C INDEX=3 --> SATURATED WATER, INPUT TEMPERATURE
C INDEX=4 --> SATURATED WATER, INPUT PRESSURE
C
000001      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
000002      COMMON /PP/ PO,TO,XLD,FF,AR,IN,CD,DH,THETA
C
000003      CD      = 0.61
000004      PA1     = 3.141592654
000005      THETA   = 0.5*PA1
C
C      1KPA= 1000N/M**2= 1000KG/H/S**2= 1000/9.8*E-4 KGF/CM**2
C      = 1000*E-4/9.8/0.07031 LBF/IN**2= 1000/6890.4 LBF/IN**2
C
000006      PCV     = 6.894757E+3
000007      NSTEP  = 200
C
000008      1 READ (9,10,END=1000) IN,PO,TO,PB,THRESH
000009      READ(9,15) EL,EW,ED,EK,AR,N1,N2
C
000010      PO = 1.E3*PO/PCV
000011      TO = 1.8*TO+32.
000012      PB = 1.E3*PB/PCV
000013      EL = EL/2.54
000014      EW = EW/2.54
000015      ED = ED/2.54
000016      EK = EK/2.54
000017      IK = 0
000018      AREA = EW*EL
000019      PER = 2.*(EW+EL)
000020      AREA = AREA/144.
000021      PER = PER/12.
000022      ED = ED/12.
000023      EK = EK/12.
000024      DH = 4.*AREA/PER
000025      XLD = ED/DH+50.*N1+26.*N2
000026      IF(XLD.LE.12.) GO TO 400
000027      RK = DH/4./EK
000028      FF = 1.0/(2.*DLOG10(RK)+1.74)**2
C
C
000029      IF(IN.EQ.1) THEN
000030      TEMP = TO
000031      TEMP= (TEMP-32.0)*0.555556

```

```

000032     PRESS = PSAT(TEMP)
000033     PO = PRESS*14.223133
000034     ENDIF
C
000035     DP = (PO-PB)/FLOAT(NSTEP)
000036     PL = PB
000037     30 CALL PR(PL,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
000038     IF(IC.EQ.2) GO TO 55
000039     IF(IC.NE.3) GO TO 40
000040     IK = IK+1
000041     PL = PL+DP
000042     IF(IK.LT.NSTEP) GO TO 30
000043     GO TO 55
000044     40 PD1 = PL-PCC
000045     NM2 = NSTEP-IK
C
000046     DO 50 I=1,NM2
000047     PH = PL+DP
000048     CALL PR(PH,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
000049     IF(IC.EQ.2) GO TO 55
000050     PD2 = PH-PCC
000051     IF((PD1*PD2).LT.0.) GO TO 100
000052     PL = PH
000053     PD1 = PD2
000054     50 CONTINUE
C
000055     55 PRINT 75,PO,TO,PB
000056     GO TO 400
000057     100 CONTINUE
000058     PDL = PD1
000059     PDH = PD2
C
000060     DO 200 I=1,50
000061     PX = (PH*PDL-PL*PDH)/(PDL-PDH)
000062     CALL PR(PX,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
000063     PDX = PX-PCC
C
000064     IF(ABS(PDX).LT.THRESH) GO TO 300
C *** THRESHOLD VALUE WAS CHANGED BY HASH ***
C *** THRESHOLD VALUE WAS CHANGED BY ISO 62.02.06 ***
C     IF(ABS(PDX).LT.1.E-3) GO TO 300
C     IF(ABS(PDX).LT.5.E-3) GO TO 300
C     IF(ABS(PDX).LT.1.E-2) GO TO 300
C
000065     IF((PDX*PDH).GT.0.) GO TO 250
C
000066     PDL = PDX
000067     PL = PX
000068     GO TO 200
000069     250 PDH = PDX
000070     PH = PX
000071     200 CONTINUE
C
000072     PRINT 220,PL,PH,PDL,PDH
000073     GO TO 1000
000074     300 CONTINUE
000075     EN = PCC/PO
000076     GM = AREA*GC
000077     AREA = 144.*AREA
000078     PER = 12.*PER
000079     ED = 12.*ED
000080     EK = 12.*EK
C
C
000081     PRESS = PCC
C
000082     CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,ENTOG,2)
000083     CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,4)
C
000084     PCC = PRESS
000085     TS2 = TEMP
000086     H1 = ENAF
000087     H2 = ENTAG
000088     HHE = XT*H2+(1.-XT)*H1
000089     GO TO 500
000090     400 CONTINUE
C
000091     PRESS = PO
000092     TEMP = TO
000093     GO TO (11,12,13),IN

```

```

C
000094 11 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,3)
000095 GO TO 2000
000096 12 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,4)
000097 GO TO 2000
000098 13 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,0)
000099 2000 CONTINUE

C
000100 PO = PRESS
000101 TO = TEMP
000102 VLO = VOLF

C
C !!!!! NO CHOKING !!!!!
C G**2 = 2*RO*(PO-PB) = 2*(LBM/FT**3)*LBF/IN**2
C = 2*LBM/FT**3*(32.15LBM*FT/S**2)/IN**2
C = 2*32.15*LBM**2/(FT/12)**2/S**2
C = 2*32.15*144*(LBM*S/FT**2)**2
C = 9264.96*(LBM*S/FT**2)**2

C
000103 GC2 = 9266.112*(PO-PB)/VLO
000104 GC = SQRT(GC2)
000105 GM = AREA*GC
000106 PCC = PB
000107 XT = 0.
000108 XA = 0.
000109 AREA = 144.*AREA
000110 PER = 12.*PER
000111 ED = 12.*ED
000112 EK = 12.*EK
000113 GO TO 510

C
000114 500 CONTINUE

C
000115 PRESS = PB

C
000116 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,ENTOG,2)
000117 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,ENTOF,4)

C
000118 PB = PRESS
000119 TSA = TEMP
000120 H1 = ENTAF
000121 H2 = ENTAG
000122 XA = (H2-H1)/(H2-H1)

C
000123 510 PRINT 600
000124 PO = PO*PCV*1.E-3
000125 PRINT 605,PO
000126 TO = (TO-32.)/1.8
000127 PRINT 610,TO
000128 GO TO (520,530,540),IN
000129 520 PRINT 615,IN
000130 GO TO 550
000131 530 PRINT 616,IN
000132 GO TO 550
000133 540 PRINT 617,IN
000134 550 PB = PB*PCV*1.E-3
000135 PRINT 620,PB
000136 PRINT 650
000137 EL = 2.54*EL
000138 PRINT 710,EL
000139 EW = 2.54*EW
000140 PRINT 720,EW
000141 ED = ED*2.54
000142 PRINT 670,ED
000143 DH = DH*2.54*12.
000144 PRINT 730,DH
000145 PRINT 695,XLD
000146 EK = EK*2.54
000147 PRINT 675,EK
000148 AREA = AREA*2.54**2
000149 PRINT 660,AREA
000150 PER = PER*2.54
000151 PRINT 665,PER
000152 PRINT 680,AR
000153 PRINT 685,N1
000154 PRINT 690,N2
000155 PRINT 700,THRESH
000156 PRINT 750

C
C 1 LBM/(FT**2*S) = 4.88243 KG/(M**2*S)

```



```

C
000157 GC = GC*4.8825
000158 PRINT 770,GC
000159 GM = GM*0.4536
000160 PRINT 800,GM
000161 PCC = PCC*PCV*1.E-3
000162 PRINT 850,PCC
000163 PRINT 900,XT
000164 PRINT 950,XA
000165 GO TO 1

C
000166 10 FORMAT(110,4F10.0)
000167 15 FORMAT(5F10.0,2I10)
000168 75 FORMAT('-',10X,'*** FLOW IS NOT CHOKED FOR THIS CASE ***',
13F10.2)
000169 220 FORMAT('-',*** FAIL TO CONVERGENCE. ***// *** TRY TO INPUT MUCH
*LARGER THRESHOLD VALUE ***,4F15.4)
000170 600 FORMAT('1',*** STAGNATION PROPERTIES ***,//)
000171 605 FORMAT('0','PRESSURE(PO)=' ,F10.0,2X,'KPA')
000172 610 FORMAT('0','TEMPERATURE(TO)=' ,F10.1,2X,'C')
000173 615 FORMAT('0','INPUT INDICATOR(IN)=' ,I5,' ---> INITIALLY SATURATED LI
*QUID,INPUT TEMPERATURE ONLY')
000174 616 FORMAT('0','INPUT INDICATOR(IN)=' ,I5,' ---> INITIALLY SATURATED LI
*QUID,INPUT PRESSURE ONLY')
000175 617 FORMAT('0','INPUT INDICATOR(IN)=' ,I5,' ---> INITIALLY SUBCOOLED LI
*QUID,INPUT BOTH TEMPERATURE AND PRESSURE')
000176 620 FORMAT('0','BACK PRESSURE(PB)=' ,F10.1,2X,'KPA',//)
000177 650 FORMAT('0',***** CRACK GEOMETRY *****,//)
000178 660 FORMAT('0','AREA=' ,F10.4,2X,'CM**2')
000179 665 FORMAT('0','PERIMETER=' ,F10.2,2X,'CM')
000180 670 FORMAT('0','DEPTH=' ,F10.2,2X,'CM')
000181 675 FORMAT('0','ROUGHNESS HEIGHT=' ,E12.4,2X,'CM')
000182 680 FORMAT('0','AREA RATIO(AE/A0)=' ,F10.2)
000183 685 FORMAT('0','NO. OF 90 DEGREE TURN=' ,I10)
000184 690 FORMAT('0','NO. OF 45 DEGREE TURN=' ,I10)
000185 695 FORMAT('0','DEPTH/HYDR. DIA.=' ,F10.1,)
000186 700 FORMAT('0','THRESHOLD VALUE =',F10.5,//)
000187 710 FORMAT('0',' 2C=' ,F10.5,2X,'CM')
000188 720 FORMAT('0','COD=' ,F10.5,2X,'CM')
000189 730 FORMAT('0','HYDR. DIA.=' ,F10.5,2X,'CM')
000190 750 FORMAT('0',***** OUTPUT *****,//)
000191 770 FORMAT('0','CRITICAL MASS FLUX =' , E15.4,2X,'KG/M**2/SEC')
000192 800 FORMAT('0','LEAK RATE =' , E15.4,2X,'KG/SEC')
000193 850 FORMAT('0','PRESSURE AT EXIT PLANE =' ,F10.1,2X,'KPA')
000194 900 FORMAT('0','QUALITY AT EXIT PLANE =' ,F10.4)
000195 950 FORMAT('0','QUALITY AT BACK PRESSURE =' ,F10.4)

C
000196 1000 STOP
000197 END
FORTRAN 77 ERROR MESSAGES: PROGRAM NAME(NAIN ),FLAG(I),OPTIMIZE(2)
JZK500I-1 NAM:PP NAM:CD THE COMMON BLOCK HAS THE ELEMENT ALLOCATED ON AN INVALID BOUNDAR
JZK500I-1 NAM:PP NAM:DH THE COMMON BLOCK HAS THE ELEMENT ALLOCATED ON AN INVALID BOUNDAR
JZK500I-1 NAM:PP NAM:THETA THE COMMON BLOCK HAS THE ELEMENT ALLOCATED ON AN INVALID BOUNDAR

C
C
C
C
000001 SUBROUTINE PR(PCK,PCC,PT,GC,XE,XT,IC)
C
C IN=1 --> INITIALLY SATURATED LIQUID,INPUT TEMPERATURE ONLY
C IN=2 --> INITIALLY SATURATED LIQUID,INPUT PRESSURE ONLY
C IN=3 --> INITIALLY SUBCOOLED LIQUID,INPUT BOTH TEMPERATURE AND PRESSURE
C
000002 IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
000003 COMMON /PP/ PO,TO,XLD,FF,AR,IN,CD,DH,THETA

C
000004 IC = 1
C
C KAPPA=CP/CV
C
000005 AKAPPA = 1.33
000006 B = 0.0523
C
000007 PRESS = PO
000008 TEMP = TO
000009 GO TO (1,2,3),IN

C
C INPUT TEMPERATURE ONLY !!!
C
000010 1 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLO,3)

```

```

000011      PD = PRESS
000012      VLO = VOLF
000013      GO TO 1000
      C
      C      INPUT PRESSURE ONLY !!!
      C
000014      2 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLO,4)
000015      TO = TEMP
000016      VLO = VOLF
000017      GO TO 1000
      C
      C      INPUT BOTH PRESSURE AND TEMPERATURE !!!
      C
000018      3 CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLO,0)
000019      VLO = VOLF
      C
000020      1000 CONTINUE
      C
000021      PRESS = PCK
      C
000022      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,SGC,2)
000023      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SLC,4)
      C
000024      PCK = PRESS
000025      TS = TEMP
000026      VGC = VOLG
000027      XE = (SLO-SLC)/(SGC-SLC)
000028      CN = 1.0
000029      IF(XE.LT.0.05) CN=20.*XE
000030      XT = CN*XE*(1.-EXP(-B*(XLD-12.)))
000031      XM = CN*XE-XT/B/(XLD-12.)
000032      200 PC1 = PCK-0.5
000033      PC2 = PCK+0.5
      C
000034      PRESS = PC1
      C
000035      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,SG1,2)
000036      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SL1,4)
      C
000037      PRESS = PC2
      C
000038      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,SG2,2)
000039      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLF,ENTAF,SL2,4)
000040      TS = TEMP
000041      DSL = SL2-SL1
000042      DSG = SG2-SG1
000043      DXE = -((1.-XE)*DSL+XE*DSG)/(SGC-SLC)
000044      GC2 = (XT*VGC/PCK/AKAPPA-(VGC-VLO)*CN*DXE)/32.174/144.
000045      GC2 = 1./GC2
000046      IF (GC2.GT.0.) GO TO 50
000047      IC = 3
000048      RETURN
      C
000049      50 GC=SQRT(GC2)
000050      DPT = GC2*VLD/2./CD**2/32.174/144.*AR**2
000051      PT = PD-DPT
000052      IF (PT.GT.3.) GO TO 100
000053      IC = 2
000054      RETURN
      C
000055      100 CONTINUE
      C
000056      PRESS = PT
      C
000057      CALL JAERI(PRESS,TEMP,VOLG,ENTAG,S,2)
      C
000058      PT = PRESS
000059      TS = TEMP
000060      VGT = VOLG
000061      VGM = (VGT+VGC)/2.
000062      AI = (1.-12.*(1.-AR)/XLD)/AR
000063      GM2 = GC2*(1.+1./AI**2)/2.
      C
      C      ACCELERATIONAL PRESSURE DROP
000064      DPA = GM2*XT*(VGC-VLO)
      C
      C      FRICTIONAL PRESSURE DROP
000065      DPF = FF*(XLD-12.)*GM2*((1.-XM)*VLO+XM*VGM)/2.
      C
      C      PRESSURE DROP DUE TO AREA CHANGE

```

```

000066      DPAA = GC2*(VLO*(1.-AR**2)+XM*(VGM-VLO)*(1.-1./AI**2))/2.
C
C      ?????????????? NICHT VERSTEHEN  ??????????????
000067      DPG = 0.5*(1./VLO+1./(XT*VGC+(1.-XT)*VLO))*XLO*DH*SIN(THETA)/144.
C
C      ?????????????? NICHT VERSTEHEN  ??????????????
C
C      TOTAL PRESSURE DROP THROUGH CRACK
000068      PCC = PT-(DPA+DPF+DPAA)/32.174/144.-DPG
C
000069      RETURN
000070      END
FORTRAN 77 ERROR MESSAGES: PROGRAM NAME( PR      ),FLAG(1),OPTIMIZE(2)
JZK5001-I NAM:PP      NAM:CD      THE COMMON BLOCK HAS THE ELEMENT ALLOCATED ON AN INVALID BOUNDAR
JZK5001-I NAM:PP      NAM:DH      THE COMMON BLOCK HAS THE ELEMENT ALLOCATED ON AN INVALID BOUNDAR
JZK5001-I NAM:PP      NAM:THETA    THE COMMON BLOCK HAS THE ELEMENT ALLOCATED ON AN INVALID BOUNDAR
C
000001      SUBROUTINE JAERI(PUSA,TUSA,VUSA,HUSA,SUSA,INDEX)
000002      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C
C      JAPAN <---- USA
C
000003      PJAP = 0.070308*PUSA
000004      TJAP = 0.555556*(TUSA-32.)
000005      VJAP = 0.062427*VUSA
000006      HJAP = 0.555556*HUSA
000007      SJAP = 0.555556*SUSA
C
000008      CALL STEAM2(PJAP,TJAP,VJAP,HJAP,SJAP,INDEX)
C
C      USA <---- JAPAN
C
000009      PUSA = 14.223133*PJAP
000010      TUSA = 1.8*TJAP+32.
000011      VUSA = 16.0187*VJAP
000012      HUSA = 1.8*HJAP
000013      SUSA = 1.8*SJAP
C
000014      RETURN
000015      END
SPECIFIED OPTIONS: OPTIMIZE(2),LINECOUNT(0),NOS,ELM(JAERI1),SOURCE,DEBUG(SUBCHK),NOMAP
END OF COMPILATION

```

表B. 6 原研版コードによるEPRI例題解析結果

```

*** STAGNATION PROPERTIES ***

PRESSURE(PO)= 15500. KPA
TEMPERATURE(TO)= 288.0 C
INPUT INDICATOR(IN)= 3 ---> INITIALLY SUBCOOLED LIQUID, INPUT BOTH TEMPERATURE AND PRESSURE
BACK PRESSURE(PB)= 101.4 KPA

-
***** CRACK GEOMETRY *****

2C= 6.35000 CM
COD= 0.03300 CM
DEPTH= 5.71 CM
HYDR. DIA.= 0.06566 CM
DEPTH/HYDR. DIA.= 87.0
ROUGHNESS HEIGHT= 0.6200D-03 CM
AREA= 0.2095 CM**2
PERIMETER= 12.77 CM
AREA RATIO(AE/A0)= 1.00
NO. OF 90 DEGREE TURN= 0
NO. OF 45 DEGREE TURN= 0
THRESHOLD VALUE = 0.01000

***** OUTPUT *****

CRITICAL MASS FLUX = 0.4390D+05 KG/M**2/SEC
LEAK RATE = 0.9199D+00 KG/SEC
PRESSURE AT EXIT PLANE = 6181.6 KPA
QUALITY AT EXIT PLANE = 0.0112
QUALITY AT BACK PRESSURE = 0.3643

```