

JAERI-M

7232

HIGHTEX:核熱利用メタン・スチーム改質器  
特性解析コード

1977年8月

田所 啓弘・瀬谷 東光

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

HIGHTEX：核熱利用メタジ・スチーム改質器  
特性解析コード

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部  
田所啓弘・瀬谷東光

( 1 9 7 7 年 8 月 2 日受理 )

本報告書は、多目的高温ガス炉の熱利用系に設けられる改質器の特性を解析するための計算コードHIGHTEX の内容と使用方法についてまとめたものである。解析の対象は改質器内の 1 本の反応管であり、反応管内の触媒充填層は一相系 2 次元モデルで取扱った。

本コードにより、触媒充填層内の径方向の温度と組成分布、充填層の圧力損失、反応管に生ずる応力、反応管における水素透過量、反応熱量、および伝熱量等を計算することができる。計算時間(cpu)は、9 m のバイオネット型反応管の場合、FACOM-230/75 で約 12 分である。

HIGHTEX: A computer program for the steady-state simulation  
of steam-methane reformers used in a nuclear process  
heat plant

Yoshihiro TADOKORO, Toko SEYA

Division of Power Reactor Projects, JAERI

(Received August 2, 1977)

This report describes a computational model and the input procedure of HIGHTEX, a computer program for steady-state simulation of the steam-methane reformers used in a nuclear process heat plant. The HIGHTEX program simulates rapidly a single reformer tube, and treats the reactant single-phase in the two-dimensional catalyst bed.

Output of the computer program is radial distributions of temperature and reaction products in the catalyst-packed bed, pressure loss of the packed bed, stress in the reformer tube, hydrogen permeation rate through the reformer tube, heat rate of reaction, and heat-transfer rate between helium and process gas. The running time (cpu) for a 9m-long bayonet type reformer tube is 12 min with FACOM-230/75.

Keywords: Computer Program, Steady State Simulation, Steam-Methane Reformer, Nuclear Process Heat Plant, Reformer Tube, Two-Dimensional Catalyst Bed.

## 目 次

1.はじめ	1
2.計算モデル	5
2.1 固定層触媒反応	5
2.2 管壁における熱収支	7
2.3 水素透過	9
2.4 反応管に生ずる応力	9
3.計算式	11
3.1 溫度と組成の微分方程式	11
3.2 流体の圧力分布	13
3.3 水素透過量	14
3.4 膜応力および熱応力	15
3.5 混合ガスの物性値	16
4.計算コード	18
4.1 構成	18
4.2 流れ図	19
4.3 入力量	22
4.4 出力量	24
5.まとめ	33
謝辞	34
参考文献	34
出入力量リスト	35
付録	47
A 1 水素、一酸化炭素、メタン及び過熱蒸気の物性値計算式	47

## 1. はじめに

本報告書は、多目的高温ガス炉の熱利用系に設置される核熱利用メタン・スチーム改質器の特性を解析するために開発された、計算コードHIGHTEX の内容と使用方法について述べたものである。この改質器は複数本の同一の反応管から構成されており、そのため、解析の対象範囲は 1 本の反応管とした。

メタン・スチーム改質反応を解析する計算コードは、燃焼ガス加熱法による改質器に対しては、その操作条件、触媒活性および熱流束などの相関関係を定量的に把握するため、既に化学プラントメーカーなどによって開発されており、計算結果と実験データとの比較、計算モデルの検証などが行われている。しかし、計算コードの内容、実験データなどは、ほとんど公表されておらず、計算モデルの概略がわずかに報告されている程度である。このなかで、一般に広く用いられているモデルについて述べてみる。先ず、充填層の伝熱モデルは、触媒と反応ガスが区別されない一相系<sup>(注)</sup>で取扱われる場合と、区別される二相系で取扱われる場合とが考えられるが、一相系で充分に反応ガスの組成を予測することができるため、伝熱モデルは一相系が採用されている。次に、充填層の体系は 1 次元モデルの場合と 2 次元モデルの場合とがある。前者は、任意断面における熱および物質の拡散が流れ方向に沿った軸方向輸送の効果と比較して無視できる場合に用いられている。後者は、管径をあまり細くすることができないために、径方向温度分布の反応へ及ぼす影響を考慮する必要がある場合に用いられる。したがって、2 次元モデルが 1 次元モデルと異なる点は、充填層における径方向の熱伝導率と拡散係数が考慮されていることである。

本コードの計算モデルとしては、核熱利用ヘリウムガス加熱法による改質反応を対象として、一相系 2 次元モデルを採用した。主な特徴としては、以下に示す 5 項目が挙げられる。

- (i) 反応管の形状は単管、バイオネット管の両方が考慮されている。
- (ii) 反応管に生ずる膜応力および熱応力の計算が可能である。
- (iii) 反応管における水素透過量の計算が可能である。
- (iv) 反応ガスの温度・組成に関する多元連立常微分方程式の数値解法に、Runge-Kutta-Gill 法が使用されている。
- (v) 混合ガスの物性値を求める際に必要な純成分ガスの物性値が、温度と圧力の 2 変数多项式で内蔵されている。

本コードの開発目的は、次の 2 点である。

- (i) システム設計に必要な情報を提供する。
- (ii) 改質器の設計に必要な情報を提供する。

項目(i)が必要な理由は、多目的炉の設計手順が従来の発電炉の場合と異なることによる。発電炉においては、原子炉とその熱利用系である発電タービン系統を分離して設計することが可能である。しかし、多目的炉の場合は以下の 3 項目がシステム設計の前提条件として要求される。  
・核熱エネルギーの高利用率の達成

(注) 触媒と反応ガス間の温度差は考慮されない。

。ヘリウムガスの高温部領域の利用

。将来の方向として、熱利用系の原子炉への接近と組み込み

このため、原子炉と熱利用系としての改質器を分離して設計することは、多目的高温ガス炉プラントの整合性が損われることになる。したがって、原子炉と主として改質器を分離しないで、結合システムとして、多目的高温ガス炉プラントを設計することが肝要である。次に、項目(iii)が必要な理由は、核熱利用ヘリウムガス加熱法による改質器が、従来の燃焼ガス加熱法による場合と異なることによる。その相違をTable 1に示す。

上記の目的を達成するため、計算コードを検証後、本コードを用いて次に示す特性解析を実施することが必要である。

- 。各種の操作条件下における改質反応特性
- 。ヘリウムガス加熱による伝熱流動特性
- 。水素透過特性
- 。反応管応力特性

Fig. 1に改質器構造図(原研・第2次予備設計)を示す。圧力容器は上部と下部に分かれ、上部は一重の容器、下部は二重の容器である。管板はこの上部と下部の容器間にフランジで固定されている。また、スリーブの管板は内容器内側にボルトで固定されている。反応管は上端を管板に溶接して取付けられており、下端は固定されていないため、容器との熱膨張差は吸収できる構造になっている。高温ヘリウムはAノズルから内容器に入り、スリーブ下部のオリフィスで流量を調整され、スリーブ内を通過する際に反応管を介して原料ガスに熱を与える、Bノズルから出る。原料ガスはCノズルから入り、ヘッダーから個々の反応管へ分かれ、二重管である反応管と内管からなる還状部に充填された触媒層で吸熱反応を起こす。反応を終えたガスは内管を通り、熱を回収されてDノズルから出る。二重の容器のジャケットには均圧用窒素ガスが循環しており、容器の温度が一定値を越えないように冷却している。内容器の内壁は高温ヘリウムが容器へ直接触れないようにするために、断熱材が取付けられている。

Table 1 燃焼ガス加熱法とヘリウムガス加熱法による改質器の相違

比較項目	燃焼ガス加熱法	ヘリウムガス加熱法
1. 伝熱流動 ( 加熱側 )		
ガス入口温度	1200~1500°C	900~1000°C
ガス出口温度	1000°C	750~850°C
有効利用温度差	200~500°C	~150°C
ガス圧力	-5 mmH <sub>2</sub> O	40 kg/cm <sup>2</sup>
伝熱機構	主として輻射伝熱	主として対流伝熱
ガスの流れ	平流又は向流	向流
( 被加熱側 )		
ガス入口温度	400~600°C	400~600°C
ガス出口温度	800~900°C	750~850°C*
ガス圧力	10~30 kg/cm <sup>2</sup>	10~30 kg/cm <sup>2</sup>
伝熱機構	対流, 伝導	対流, 伝導
ガスの流れ	平流又は向流	向流
2. 反応管		
形 式	単管又はバイオネット管	主としてバイオネット管
肉厚計算	内圧支配	外圧支配
3. 改質器		
構 造	円筒又は箱型の炉型で, バーナーと反応管の間に大きな距離をとる必要がある。	純然たる熱交換器である。
断熱材	耐熱レンガ又はキャスタブル	カオウール
4. 水素透過		
評 価	無視できる。	無視できない。

\* 反応管の触媒層出口における温度

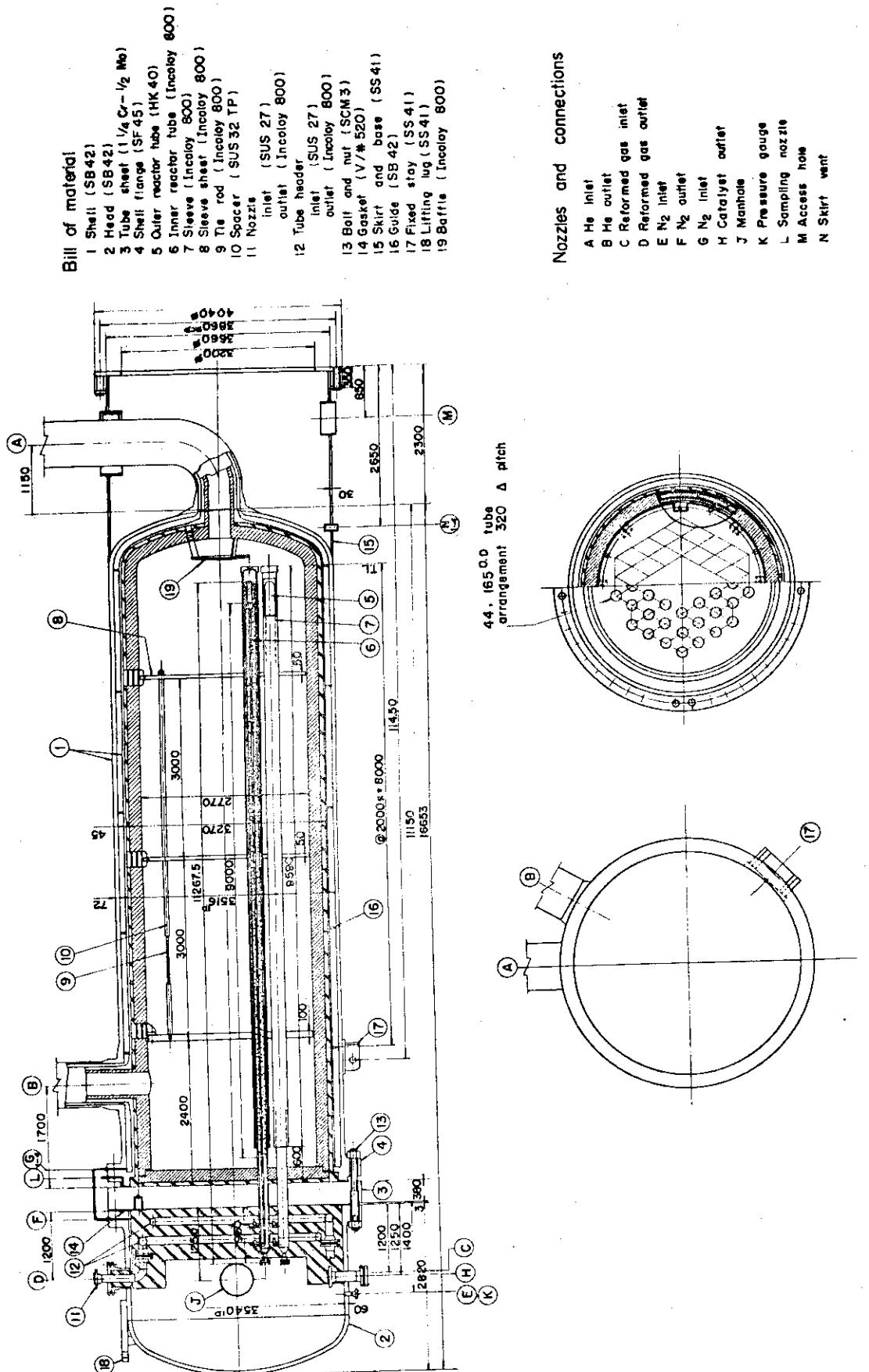


Fig. 1 Steam reformer

## 2. 計算モデル

### 2.1 固定層触媒反応

#### 2.1.1 反応と反応速度式

スチームによるメタンの改質反応では、次に示すような反応が主として同時に進行する。



これらの反応はニッケル触媒で進行し、通常の工業的操作条件下では、反応(3)は非常に小さく無視することができる。反応(1)は吸熱反応であり、この反応速度  $r_c$ <sup>1)</sup> は、触媒単位重量、単位時間あたりのメタン反応モル数で示すことができる。

$$r_c = k_r \left( P_{\text{CH}_4} - \frac{P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{H}_2}^3}{P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot K_1(T)} \right) \quad (\text{kmol}/\text{kg}\cdot\text{h}) \quad (4)$$

反応速度定数  $k_r$  については、Arrhenius の式が成り立つものとする。

$$k_r = \beta \cdot \exp \left[ -\frac{E}{RT} \right] \quad (\text{kmol}/\text{kg}\cdot\text{h} \cdot (\text{kg}/\text{cm}^2)) \quad (5)$$

$\beta$  : 触媒形状ならびに活性に依存する頻度因子 ( $\text{kmol}/\text{kg}\cdot\text{h} \cdot (\text{kg}/\text{cm}^2)$ )

$E$  : 改質反応の活性化エネルギー ( $\text{kcal}/\text{kmol}$ )

$R$  : 気体定数 ( $\text{kcal}/\text{kmol}\cdot^\circ\text{K}$ )

$T$  : 絶対温度 ( $^\circ\text{K}$ )

メタンの分圧  $P_{\text{CH}_4}$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )、一酸化炭素の分圧  $P_{\text{CO}}$ 、水素の分圧  $P_{\text{H}_2}$ 、およびスチームの分圧  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  は各成分のモル分率と全圧の関係から求められる。また反応(1)の平衡定数  $K_1$  ( $(\text{kg}/\text{cm}^2)^2$ ) は反応温度に依存する定数である。

反応(2)は発熱反応であり、500°C以上の範囲では反応速度は大きく、速やかに平衡状態へ達する。供給流中の  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、および  $\text{H}_2\text{O}$  の各モル数を  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ 、および  $f_5$  とし、また反応(1)における改質反応率を  $x_1$ 、反応(2)における水性ガス交換反応率を  $x_2$  とすれば、反応後の  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、および  $\text{H}_2\text{O}$  の各モル数  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、 $n_4$ 、および  $n_5$  は次式<sup>1)</sup>で与えられる。なお、F は供給流中全モル数である。

$$n_1 = f_1 - x_1 F \quad (\text{kmol}/\text{h}) \quad (6)$$

$$n_2 = f_2 - (x_2 - x_1) F \quad (\text{kmol}/\text{h}) \quad (7)$$

$$n_3 = f_3 + x_2 F \quad (\text{kmol}/\text{h}) \quad (8)$$

$$n_4 = f_4 + (3x_1 + x_2) F \quad (\text{kmol}/\text{h}) \quad (9)$$

$$n_5 = f_5 - (x_1 + x_2) F \quad (\text{kmol}/\text{h}) \quad (10)$$

また、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、および  $\text{H}_2\text{O}$  の組成は平衡状態にあるため、反応(2)の平衡定数  $K_2$ <sup>2)</sup> と次の関係式が成立する。

$$K_2(T) = \frac{n_3 \cdot n_4}{n_2 \cdot n_5} \quad (11)$$

## 2.1.2 連続方程式

定常時における総括収支は、円筒座標<sup>(注)</sup>では次式で示される。

$$\partial G_z / \partial z + (1/r) \partial (r G_r) / \partial r = 0 \quad (12)$$

$r$  : 径方向位置 (m)     $z$  : 軸方向位置 (m)

充填層内では、充填物の効果により径方向の速度分布は栓流で表わされる理相状態に近づく。従って、径方向質量速度  $G_r$  は存在しないものと仮定し、流れ方向に直角な断面における軸方向質量速度  $G_z$  を一定とする。

$$\partial G_z / \partial z = 0 \quad (13)$$

## 2.1.3 物質移動式

$j$  成分の定常時の物質移動式は反応に伴うモル数変化を考慮して、円筒座標では次式で表わせる。

$$\frac{\partial v_z c_j}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r v_r c_j)}{\partial r} - \frac{\partial^2 D_{ez} c_j}{\partial z^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (D_{er} \cdot r \frac{\partial c_j}{\partial r}) - \rho_c r_j = 0 \quad (14)$$

$c_j$  : 濃度 (kmol/m<sup>3</sup>)     $D_{ez}$  : 軸方向拡散係数 (m<sup>2</sup>/h)

$v_z$  : 軸方向速度 (m/h)     $D_{er}$  : 径方向拡散係数 (m<sup>2</sup>/h)

$v_r$  : 径方向速度 (m/h)     $\rho_c$  : 触媒充填密度 (kg/m<sup>3</sup>)

反応管のモデル化に伴う仮定としては、径方向質量速度の存在は考慮しないこと、軸方向拡散の存在は考慮しないこと、および径方向拡散係数<sup>6)</sup>は径方向に一定であることなどとした。このなかで、軸方向拡散に関する仮定が成立するためには、反応管の長さ／直径の比が極端に小さくないこと、および充填層内の流れが層流でないことなどの条件が必要である。これらの仮定のもので、(14)式は次式のように簡略化される。

$$\frac{\partial v_z c_j}{\partial z} - D_{er} \left( \frac{\partial^2 c_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c_j}{\partial r} \right) - \rho_c r_j = 0 \quad (15)$$

$j$  成分の濃度  $c_j$  を改質反応率  $x_1$  に関して書きかえると(15)式は次のとくなる。

$$\frac{\partial x_1}{\partial z} = \frac{D_{er}}{v_z} \left( \frac{\partial^2 x_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial x_1}{\partial r} \right) + \frac{\rho_c r_c}{(G_z / M_{av_0})} \quad (16)$$

$M_{av_0}$  : 供給流中平均分子量 (kg/kmol)

## 2.1.4 熱移動式

粒子と流体間の温度差および機械的エネルギー変化、ならびに粒子間隙における流体混合による拡散質量速度の影響を無視すると、温度  $T$  における熱移動式<sup>8)</sup>は円筒座標で表現すると次のとくなる。

$$\frac{\partial c_p G_z T}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r c_p G_r T)}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial z} \cdot \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \cdot \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} + \sum_j \Delta H_j^T \rho_c r_j = 0 \quad (17)$$

$c_p$  : 定圧比熱 (kcal/kg°C)

$\Delta H_j^T$  : 温度  $T$  における化学反応に基づく生成モルエンタルピー (kcal/kg)

$\lambda_z$  : 軸方向熱伝導率 (kcal/mh°C)     $\lambda_r$  : 径方向熱伝導率 (kcal/mh°C)

(注) 軸対称モデルとする。

上式において、径方向質量速度と軸方向熱伝導率を無視し、且つ径方向熱伝導率を径方向に対して一定と仮定し、熱移動式を次のごとく簡略化する。

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda_r}{G_z c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{G_z c_p} \sum_j \Delta H_j^T \rho_e r_j \quad (18)$$

### 2.1.5 運動量移動式

粒子層を流通する流体運動量変化は、厳密には Navier-Stokes の方程式を基本にして考えなければならないが、流体の粒子間隙における摩擦損失を  $F_1$ 、静圧項を  $F_2$  とすれば、定常時では次式で示される。

$$\rho G v - e \rho P + F_1 + F_2 = 0 \quad (19)$$

$P$  : 圧力 (kg/cm<sup>2</sup>)

$e$  : 空隙率

本計算モデルでは反応管の軸心を  $z$  軸にとり、運動方程式の  $z$  軸方向のみを考慮し、更に  $v_r = 0$ ,  $v_\theta = 0$  として、運動方程式を次式のごとく簡略化する。<sup>10)</sup>

$$G_z \frac{\partial v_z}{\partial z} - e \frac{\partial P}{\partial z} + F_1 + F_2 = 0 \quad (20)$$

## 2.2 管壁における熱収支

スリーブ内の反応管の形式は、単管である場合と、バイオネット管のように2重管である場合とがあり、単管の場合には、管壁とは反応管の内壁と外壁のことを指し、2重管の場合には、更に内管の内壁と外壁が追加される。これらの管壁において、熱流束は管壁に垂直な径方向のみに存在するものと仮定し、軸方向に対しては考慮しない。また、スリーブは断熱層として取扱い、そのためスリーブの外側への熱損失はなく、すべてスリーブの内側へ輻射伝熱されるものと仮定する。したがって半径  $r_w$  における径方向の熱流束を  $\phi_w$  とすると、軸方向単位長さ当たりの径方向伝熱量は一定であり、次式で示される。

$$2\pi r_w \phi_w = \text{const.} \quad (21)$$

以下に、流体のバルク領域、境膜領域、および伝熱管における熱流束と温度の関係式について述べる。

### 2.2.1 バルク領域

流体の流路は、反応管が単管の場合には、スリーブと反応管で形成される環状流路（流路1）と反応管の内側における管内流路（流路21）から構成される。また、反応管が2重管の場合には、前述の管内流路が内管により環状流路（流路21）となり、更に内管の内部における管内流路（流路22）が追加される。これらの流路のバルク領域では、流体の保有するエンタルピーが強制対流によって移動し、反応管または内管などの伝熱管を介して熱の授受が行われる。そのときの熱流束は次式で示される。

$$\phi_w = \frac{1}{2\pi r_w} \cdot G \cdot c_p \cdot \frac{\partial T_b}{\partial z} \quad (\text{kcal}/\text{m}^2 \text{h}) \quad (22)$$

$G$  : 流量 (kg/h)       $c_p$  : 定圧比熱 (kcal/kg°C)

$\partial T_b / \partial z$  : 軸方向バルク温度変化 (°C/m)

但し、触媒が充填されている場合には、充填層の径方向温度分布の影響を考慮しなければならないため、(22)式を適用することはできない。この場合には 2.1.4 節の(18)式が適用される。

## 2.2.2 境膜領域

### (1) 充填物がない場合

伝熱管壁における熱流束は、(23)式のごとく第1項の強制対流熱伝達による伝熱、第2項の流体と管壁との輻射伝熱、第3項の相対する管壁間の輻射伝熱の和として表示される。

$$\phi_w = \alpha (T_w - T_b) + 4.88 \phi_{cG} \left\{ \left(\frac{T_w}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_b}{100}\right)^4 \right\} + 4.88 \phi'_{cG} \left\{ \left(\frac{T_w}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_s}{100}\right)^4 \right\} \quad (23)$$

$\alpha$  : 境膜熱伝達率 (kcal/m² h °C)       $T_b$  : 流体のバルク温度 (°K)

$T_w, T_s$  : 管壁温度 (°K)       $\phi_{cG}, \phi'_{cG}$  : 到達率

なお、境膜領域の伝熱機構は対流伝熱が支配的となるため、輻射伝熱に関しては、到達率を一定値と仮定し式の簡略化を図る。

### (2) 充填物がある場合

反応管内の管壁近傍では、充填物の配列状態が管内中央部と異なるため、空隙率が中央部より高くなる。そのため管壁近傍の有効熱伝導率  $k_w$  は管内中央部における触媒層の熱伝導率  $\lambda_r$  より低下し、管壁近傍に温度勾配を生じることになる。この変化を管壁における見掛けの伝熱係数  $h_w$  で表わすと次式のごとくなる。

$$h_w = \frac{2 k_w \cdot \lambda_r}{D_p (\lambda_r - k_w)} \quad (kcal/m^2 h °C) \quad (24)$$

但し、上式における管壁近傍とは管壁から充填物の代表粒径  $D_p$  の半分までの距離に含まれる範囲を指す。また  $\lambda_r$  および  $k_w$  に関しては、矢木・国井の理論式<sup>3), 4), 5)</sup>を適用する。したがって充填物がある場合の伝熱管壁における熱流束は、(25)式で示される。

$$\phi_w = h_w (T_w - T) \quad (kcal/m^2 h) \quad (25)$$

.  $T_w$  : 管壁温度 (°C)       $T$  : 管壁近傍の温度 (°C)

## 2.2.3 伝熱管領域

伝熱管領域を構成する反応管および内管において、それらの管壁の半径  $r_w$  における温度を  $T_w$ 、熱流束を  $\phi_w$  とすれば、管肉厚内部の半径  $r$  における温度  $T$  との関係は、次式で示される。

$$\phi_w = \frac{\int_{T_w}^T \lambda_s dT}{r_w \ell_n \left( \frac{r_w}{r} \right)} \quad (kcal/m^2 h) \quad (26)$$

熱流束  $\phi_w$  は、伝熱管の管肉厚に対する径方向の熱流束であり、管肉厚軸方向の熱流束は微少であるため無視されている。伝熱管の熱伝導率  $\lambda_s$  は伝熱管の肉厚内部の温度に依存するため、(26)式に示すような積分型熱伝導率が適用されている。

### 2.3 水素透過

反応管または内管を水素が透過する過程は以下に示すような段階<sup>9)</sup>からなる。

- (i) 管壁への水素分子の拡散と物理的吸着。
- (ii) 管壁における吸着分子の活性化と水素原子への解離、および金属結晶格子内への水素原子の浸入による管肉厚内部への透過開始。
- (iii) 管肉厚内部への水素原子の拡散移行。
- (iv) 管肉厚内部から低分圧側の管壁への水素原子の拡散移行。
- (v) 低分圧側の管壁における水素原子の脱着と水素分子への再結合。
- (vi) 管壁からの水素分子の拡散移行。

この段階のうち、最も抵抗の大きい過程は(iii)であり、これを律速段階と定める。管肉厚内部への水素原子の拡散は、管肉厚の径方向への移行のみを考慮すると、次式で示される。

$$-\frac{\partial}{\partial r} \left\{ D \cdot r \frac{\partial c}{\partial r} \right\} = 0 \quad (27)$$

c : 水素濃度

Dは金属中の水素原子の拡散係数であり、次式で示される。

$$D = D_0 \exp \left( -\frac{E_D}{RT} \right) \quad (m^2/h) \quad (28)$$

$D_0$  : 定数 (m<sup>2</sup>/h)

$E_D$  : 水素透過の活性化エネルギー (kcal/kmol)

一方、金属中の水素原子の溶解度は、温度一定では水素の分圧 P の  $\frac{1}{2}$ 乗に比例して増加し、圧力一定では温度の上昇とともに増加する。したがって、溶解度 S は圧力と温度の関数として表わされる。

$$S = S_0 \cdot P^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left( -\frac{E_s}{2RT} \right) \quad (m^3/m^3) \quad (29)$$

$S_0$  : 定数

$E_s$  : 気体の溶解熱

管壁に沿って形成される水素の濃度境界層の影響を無視すれば、(27)式の境界条件である両管壁の水素濃度は、溶解度から求められる。

### 2.4 反応管に生ずる応力

反応管を厚肉半無限円筒とし、内外圧および径方向温度差によって生ずる応力を二次元問題として解く。主応力は径方向の応力  $\sigma_r$ 、円周方向の応力  $\sigma_\theta$ 、軸方向の応力  $\sigma_z$  からなり、応力のつりあい条件は、円周方向に関しては左右対称であるから、径方向のみを考慮し次式の如くなる。

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (30)$$

円筒の内半径  $r_{w1}$  における内圧を  $P_1$ 、外半径  $r_{w2}$  における外圧を  $P_{21}$  とすれば、境界条件は次式で示される。

$$r = r_{w1} \text{ のとき } \sigma_r = -P_1 \quad (31)$$

$$r = r_{w2} \text{ のとき } \sigma_r = -P_{21} \quad (32)$$

$$z \text{ 軸端部条件 } 2\pi \int_{r_{w2}}^{r_{w1}} \sigma_z r dr = \pi r_{w2}^2 \cdot P_{21} - \pi r_{w1}^2 \cdot P_1 \quad (33)$$

ここで考慮されている応力は、1次応力としては一般膜応力、2次応力としては一般熱応力である。反応管に生ずるその他の応力としては、反応管の形状にもよるが、管端部における局部膜応力、反応管の軸方向温度差による曲げ応力、重力による応力などが存在する。これらの各応力は、反応管に生ずる応力のなかで支配的である一般熱応力と比較して、非常に小さいため本コードでは考慮はしていない。また、通常状態以外の熱応力、地震による応力などに関しても、本コードでは取扱っていない。

## 3. 計 算 式

## 3.1 温度と組成の微分方程式

加熱源としてのヘリウムガスの温度，反応管の壁温，反応ガスの温度と組成などに関する反応管軸( $z$ )方向の微分値は，以下に示す(34)式から(34)'式までの11個の常微分方程式にまとめられる。

スリーブと反応管の間を流れるガス温度

充填層に触媒がある場合

$$\frac{dT_{b1}}{dz} = \theta_{cp} \cdot \frac{2\pi r_{w2}}{G_1 C_{p1}} \cdot h_{w2} (T_{w2} - T_n) \quad (34)$$

充填層に触媒がない場合

$$\frac{dT_{b1}}{dz} = \theta_{cp} \cdot \frac{2\pi r_{w2}}{G_1 C_{p1}} (B + B') \quad (34)'$$

$$B = \alpha_2 (T_{w2} - T_{b21}) + 4.88 \phi_{cG2} \left\{ \left(\frac{T_{w2}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{b21}}{100}\right)^4 \right\}$$

$$B' = 4.88 \phi_{cG7} \left\{ \left(\frac{T_{w2}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{w3}}{100}\right)^4 \right\}$$

内管を流れるガス温度

充填層に触媒がある場合

$$\frac{dT_{b22}}{dz} = -\frac{2\pi r_{w3}}{G_2 C_{p3}} \cdot h_{w3} (T_0 - T_{w3}) \quad (35)$$

充填層に触媒がない場合

$$\frac{dT_{b22}}{dz} = -\frac{2\pi r_{w3}}{G_2 C_{p3}} (A + A') \quad (35)'$$

$$A = \alpha_3 (T_{b21} - T_{w3}) + 4.88 \phi_{cG3} \left\{ \left(\frac{T_{b21}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{w3}}{100}\right)^4 \right\}$$

$$A' = 4.88 \phi_{cG7} \left\{ \left(\frac{T_{w2}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{w3}}{100}\right)^4 \right\}$$

充填層を流れるガス温度

充填層に触媒がある場合

$$\frac{dT_0}{dz} = \frac{1}{G_m C_{p2}} \left[ \frac{\lambda_r}{(4r)^2} \{ D - E (T_0 - T_1) \} + F \right] \quad (36)$$

$$D = \left( \frac{4r}{2r_{w3}} - 1 \right) \frac{2h_{w3} 4r}{\lambda_r} (T_0 - T_{w3})$$

$$E = 2$$

$$F = \rho_c r_c (4H_1 + k 4H_2)$$

$$\frac{dT_i}{dz} = \frac{1}{G_m C_p 2} \left[ \frac{\lambda_r}{(4r)^2} \left\{ \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2(i+G)} + T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1} \right\} + F \right] \quad (37)$$

$$G = \frac{r_w 3}{4r}$$

i = 1 ~ (n - 1)

$$\frac{dT_n}{dz} = \frac{1}{G_m C_p 2} \left[ \frac{\lambda_r}{(4r)^2} \left\{ \left( \frac{1}{2(n+G)} + 1 \right) \frac{2h_{w2} 4r}{\lambda_r} (T_{w2} - T_n) - 2(T_n - T_{n-1}) \right\} + F \right] \quad (38)$$

充填層に触媒がない場合

$$\frac{dT_{b21}}{dz} = \frac{2\pi}{G_2 C_p 2} \left\{ r_{w2} (B + B') - r_{w3} (A + A') \right\} \quad (39)$$

充填層を流れるガス組成

$$\frac{dx_{10}}{dz} = \frac{E D_{er}}{u (4r)^2} (x_{11} - x_{10}) + C \quad (40)$$

$$C = \frac{\rho_c r_c}{G_m / M_{avo}}$$

$$\frac{dx_{1i}}{dz} = \frac{D_{er}}{u (4r)^2} \left( \frac{x_{1i+1} - x_{1i-1}}{2(i+G)} + x_{1i+1} - 2x_{1i} + x_{1i-1} \right) + C \quad (41)$$

i = 1 ~ (n - 1)

$$\frac{dx_{1n}}{dz} = \frac{2D_{er}}{u (4r)^2} (x_{1n-1} - x_{1n}) + C \quad (42)$$

反応管の内壁温度

$$\frac{dT_{w2}}{dz} = \frac{T_{w2,j} - T_{w2,j-1}}{4z} \quad (43)$$

内管の外壁温度

$$\frac{dT_{w3}}{dz} = \frac{T_{w3,j} - T_{w3,j-1}}{4z} \quad (44)$$

これらの常微分方程式は、連立させて Runge-Kutta-Gill 法で解くことができる。この場合、充填層における触媒の有無、固定層触媒反応の有無、反応管が単管か 2 重管（バイオネット管）か、などの組合せによって、連立させる微分方程式は 6 個のタイプにわけられる。

- (i) 触媒無し、反応無し、単管 : (34'), (39), (43) 式
  - (ii) 触媒無し、反応無し、2 重管 : (34'), (35)', (39), (43), (44) 式
  - (iii) 触媒有り、反応無し、単管 : (34), (36)~(38), (43) 式
  - (iv) 触媒有り、反応無し、2 重管 : (34), (35), (36)~(38), (43), (44) 式
  - (v) 触媒有り、反応有り、単管<sup>7)</sup> : (34), (36)~(38), (40)~(42), (43) 式
  - (vi) 触媒有り、反応有り、2 重管 : (34), (35), (36)~(38), (40)~(42), (43), (44) 式
- また上式において、単管の場合は、(34'), (36)~(40) 式では、A = 0, A' = 0, B' = 0, D = 0, E = 4, G = 0 である。固定層触媒反応がない場合は、F = 0 である。以下に上式に使用した主な記号を列挙する。

$T_{b1}, T_{b21}, T_{b22}$  : 流路 1, 21, 22 における各バルク温度  
 $T_0, T_1, \dots T_i \dots T_n$  : 流路 21 の充填層を径方向に n 等分したときの温度分布  
 $T_{w2}, T_{w3}$  : 反応管内壁温度, および内管外壁温度  
 $G_1, G_2$  : 流路 1, 22 における各流量  
 $G_m, u$  : 流路 21 の充填層空塔質量速度, および空塔速度  
 $C_{p1}, C_{p2}, C_{p3}$  : 流路 1, 21, 22 における流体の定圧比熱  
 $h_{w2}, h_{w3}$  : 充填物がある場合の反応管内壁近傍の熱伝達係数, および内管外壁近傍の熱伝達係数  
 $\alpha_2, \alpha_3$  : 充填物がない場合の反応管内壁側の境膜熱伝達率, および内管外壁側の境膜熱伝達率  
 $\theta_{cp}$  : 流路 1 と 21 が向流の場合は正, 並流の場合は負となる符号  
 $k$  : 水性ガス交換反応による転化割合  
 $x_{10}, x_{11} \dots x_{1i} \dots x_{1n}$  : 流路 21 の充填層を径方向に n 等分したときの改質反応率の分布  
 $r_{w2}, r_{w3}$  : 反応管内半径, および内管外半径  
 $\phi_{cG2}, \phi_{cG3}, \phi_{cG7}$  : 輻射伝熱における到達率  
 $\Delta r$  : 充填層分割巾,  $\Delta r = (r_{w2} - r_{w3}) / n$   
 $\Delta z$  : 軸方向分割巾,  $\Delta z = (\text{管の長さ}) / m$   
 $i$  : 充填層分割点,  $i = 0, 1, 2 \dots i \dots n$   
 $j$  : 軸方向分割点,  $j = 0, 1, 2 \dots j \dots m$

### 3.2 流体の圧力分布

管内および充填層を流れる気体の圧力は、流れ方向に沿って降下するが、とくに充填層では圧力降下が大きいため、その影響を無視することはできない。そこで流路を流れ方向に幾つかに分割し、反応が起こるために生ずる気体の比重  $\gamma$ 、静粘性係数  $\mu$ などの変化を同時に考慮して、分割区間における圧力降下を以下に示す式から求める。したがって、流れに沿った圧力分布は、入口圧力から分割区間の圧力降下を順次差し引くことによって求められる。

#### (1) 摩擦損失

流路に触媒が充填されている場合

$$\Delta P_f = \frac{(G_2 / A_2)^2}{g \cdot \gamma} \cdot f \cdot \Delta z \cdot \frac{a_t}{e^3} \cdot (10^{-4}) \quad (kg/cm^2) \quad (45)$$

$f$  : 摩擦係数  $A_2$  : 流路断面積  $e$  : 空隙率

$a_t$  : 単位充填容積当たりの充填物表面積

流路に触媒がない場合

$$\Delta P_f = \frac{(G / A)^2}{2 g \gamma} \cdot 4 f \cdot \frac{\Delta z}{D} \cdot (10^{-4}) \quad (kg/cm^2) \quad (46)$$

$D$  : 等価直径  $G$  :  $G_1$  または  $G_2$

$A$  : 流路断面積  $A_1, A_2, A_3$

なお、上式において、摩擦係数  $f$  は実験値との比較を考慮して次の如く整理式で示される。

$$f = a_0 + a_1 \cdot R_e^b + a_2 \cdot R_e^c \quad (47)$$

ここで、 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ は係数、 $b$ 、 $c$ は指数である。 $R_e$  はレイノルズ数であり、流路に触媒が充填されている場合は次式で示される。

$$R_e = \frac{(G_2 / A_2)}{\mu \cdot a_t} \cdot \frac{1}{360} \quad (48)$$

## (2) 静圧差

$$\Delta P_h = \theta \cdot r \cdot \Delta z (10^{-4}) \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (49)$$

$\theta$  : 流れ方向で決まる符号

## (3) 動圧差

$$\Delta P_v = \frac{1}{e^2} \cdot \frac{(G/A)^2}{g} \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) (10^{-4}) \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (50)$$

$r_1$ 、 $r_2$  : 分割区間の両端における気体の比重

## 3.3 水素透過量

### (1) 溶解度分布

$$S(r) = S_2 + (S_2 - S_1) \frac{\ell_n(r/r_{w2})}{\ell_n(r_{w2}/r_{w1})} \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (51)$$

### (2) 透過速度分布

$$Q(r) = -D(T) \frac{S_1 - S_2}{r \cdot \ell_n(r_{w1}/r_{w2})} \quad (\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}) \quad (52)$$

### (3) $S_1$ および $S_2$ と圧力の関係

$$S_1 = S_t(T) \cdot P_{H1}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (53)$$

$P_{H1}$  :  $r = r_{w1}$  における水素の分圧

$$S_2 = S_t(T) \cdot P_{H2}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{m}^3/\text{m}^3) \quad (54)$$

$P_{H2}$  :  $r = r_{w2}$  における水素の分圧

### (4) 常圧における溶解度の整理式

$$S_t(T) = S_0 \cdot \exp \left\{ C_1 \left( \frac{1}{T} \right) + C_2 \left( \frac{1}{T} \right)^2 \right\} \quad (55)$$

### (5) 拡散係数の整理式

$$D(T) = D_0 \cdot \exp \left\{ D_1 \left( \frac{1}{T} \right) + D_2 \left( \frac{1}{T} \right)^2 \right\} \quad (56)$$

### (6) 全透過量

$S_2 \geq S_1$  のとき

$$Q_t = 2\pi r_{w1} \int_{z=0}^{z=L} Q(r_{w1}) dz \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (57)$$

$S_2 < S_1$  のとき

$$Q_t = 2\pi r_{w2} \int_{z=0}^{z=L} Q(r_{w2}) dz \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (58)$$

$r_{w1}$  : 反応管外半径       $r_{w2}$  : 反応管内半径

T : 反応管の温度

$S_0, C_1, D_0, D_1$  : 定数

### 3.4 膜応力および熱応力

#### (1) 一般膜応力

$$P_{mr}(r) = -\frac{r_{w2}^2(r_{w1}^2 - r^2)}{r^2(r_{w1}^2 - r_{w2}^2)} P_{21} - \frac{r_{w1}^2(r^2 - r_{w2}^2)}{r^2(r_{w1}^2 - r_{w2}^2)} P_1 \quad (\text{kg}/\text{cm}^2) \quad (59)$$

$$P_{m\theta}(r) = -\frac{r_{w2}^2(r_{w1}^2 + r^2)}{r^2(r_{w1}^2 - r_{w2}^2)} P_{21} - \frac{r_{w1}^2(r_{w2}^2 + r^2)}{r^2(r_{w1}^2 - r_{w2}^2)} P_1 \quad (\text{kg}/\text{cm}^2) \quad (60)$$

$$P_{mz}(r) = \frac{r_{w2}^2}{r_{w1}^2 - r_{w2}^2} P_{21} - \frac{r_{w1}^2}{r_{w1}^2 - r_{w2}^2} P_1 \quad (\text{kg}/\text{cm}^2) \quad (61)$$

#### (2) 一般熱応力

$$Q_r(r) = \frac{E}{(1-\nu)r^2} \left[ \frac{r^2 - r_{w2}^2}{r_{w1}^2 - r_{w2}^2} A(r_{w1}) - A(r) \right] \quad (\text{kg}/\text{cm}^2) \quad (62)$$

$$Q_\theta(r) = \frac{E}{(1-\nu)r^2} \left[ \frac{r^2 + r_{w2}^2}{r_{w1}^2 - r_{w2}^2} A(r_{w1}) + A(r) - r^2 B(r) \right] \quad (\text{kg}/\text{cm}^2) \quad (63)$$

$$Q_z(r) = \frac{E}{(1-\nu)r^2} \left[ \frac{2r^2}{r_{w1}^2 - r_{w2}^2} A(r_{w1}) - r^2 B(r) \right] \quad (\text{kg}/\text{cm}^2) \quad (64)$$

#### (3) 反応管に生ずる応力

$$\sigma_r(r) = P_{mr}(r) + Q_r(r) \quad (65)$$

$$\sigma_\theta(r) = P_{m\theta}(r) + Q_\theta(r) \quad (66)$$

$$\sigma_z(r) = P_{mz} + Q_z(r) \quad (67)$$

#### (4) A および B

$$A(r_{w1}) = \int_{r_{w2}}^{r_{w1}} \alpha \cdot dT \cdot r dr \quad (68)$$

$$A(r) = \int_{r_{w2}}^r \alpha \cdot dT \cdot r dr \quad (69)$$

$$B(r) = \alpha \cdot dT \quad (70)$$

ここで、 $E$ は縦弾性係数、 $\alpha$ は線膨張係数であり、共に温度に関する2次式で表示される。また $P_1$ は流路1の流体の圧力、 $P_{21}$ は流路2 1の流体の圧力である。

### 3.5 混合ガスの物性値

$\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ , および $\text{H}_2\text{O}$ などの組成からなる混合ガスの比重、定圧比熱、静粘性係数、熱伝導率などの物性値は次式より求められる。

#### (1) 比重量

$$\gamma = \sum_{i=1}^5 \{ y_i \cdot \gamma_i \} \quad (\text{kg/cm}^3) \quad (71)$$

$y_i$  : モル分率

添字*i*と純成分ガスとの対応は以下のとおりである。

i	1	2	3	4	5
純成分ガス	$\text{CH}_4$	$\text{CO}$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O}$

#### (2) 定圧比熱

$$C_p = \sum_{i=1}^5 \{ y_i \cdot M_i \cdot C_{pi} \} / \sum_{i=1}^5 \{ y_i \cdot M_i \} \quad (\text{kcal/kg°C}) \quad (72)$$

#### (3) 静粘性係数

$$\mu = \sum_{i=1}^5 \{ y_i \cdot \mu_i / \sum_{j=1}^5 \{ y_j \cdot \phi_{ij} \} \} \quad (\text{g/cm·s}) \quad (73)$$

$$\phi_{ij} = \frac{[1 + (\mu_i / \mu_j)^{\frac{1}{2}} \cdot (M_j / M_i)^{\frac{1}{4}}]^2}{(4 / \sqrt{2}) [1 + (M_i / M_j)]^{\frac{1}{2}}} \quad (74)$$

#### (4) 热伝導率

$$\lambda = \sum_{i=1}^5 \left\{ \frac{y_i \cdot \lambda_{ci}}{\sum_{j=1}^5 \{ y_j \cdot \phi_{ij} \cdot (M_{ij} / M_i)^{\frac{1}{8}} \}} + \frac{y_i \cdot \lambda_{di}}{\sum_{j=1}^5 \{ y_j \cdot \phi_{ij} \}} \right\} (\text{kcal/mh°C}) \quad (75)$$

(75)式において、 $\lambda_{ci}$ は分子衝突による熱伝導率、 $\lambda_{di}$ は分子拡散による熱伝導率であり、各々次式で示される。

$$\lambda_{ci} = \sigma_i \lambda_i / (1.32 C_{pi} \cdot M_i + \tau_i) \quad (76)$$

$$\lambda_{di} = \lambda_i - \lambda_{ci} \quad (77)$$

(76)式において、 $i = 1, 5$ の場合は $\sigma_i = 1.05$ ,  $\tau_i = -0.06$ であり、 $i = 2, 3, 4$ の場合は $\sigma_i = 9.5$ ,  $\tau_i = 0.26$ である。 $\lambda_i$ は*i*番目の純成分ガスの熱伝導率である。 $M_i$ ,  $M_j$ は純成分ガスの分子量である。また(75)式中の $M_{ij}$ は次式で示される。

$$M_{ij} = (M_i + M_j) / 2 \quad (78)$$

純成分ガスの物性値<sup>(注)</sup>は、すべて温度と圧力に関する多項式としてまとめた。なお、付録A 1章に本コードの開発と併せて作成された水素、一酸化炭素、メタン及び過熱蒸気の物性値計算式を示す。

---

(注) 田所啓弘、瀬谷東光：メタン、水素、一酸化炭素の物性値、(1974)

沢井 定、田所啓弘、瀬谷東光、岡本芳三：炭酸ガスの物性値、(1965)

村田秀男：ヘリウムガスの諸物性値、(1965)

## 4. 計 算 コ ー ド

## 4.1 構 成

本コードのソース・カード枚数は約4000枚であり、使用記憶容量はFACOM 230/75において約120K wordである。使用計算コードがFACOM 230/75の場合、各サブルーチンの構成およびその機能は次に示すとおりである。

MAIN	プログラムの logic flow のコントロールを行う。
SUBROUTINE	下記の27ヶから構成される。
CALPRS	流体の圧力分布を計算する。
CALTEM	流体、充填層、および反応管などの温度分布を計算する。
CHECK	check 用の印刷のコントロールを行う。
CHEM	水性ガス交換反応率、モル数、モル分率、および分圧などを求める。
EXCHNG	反応管内壁温度、および内管外壁温度の値を store する。
FUNCT	温度と組成の常微分方程式を計算する。
INHEAD	ヘッディング印刷を行う。
INPUT	入力量の読み込みと印刷を行う。
MATER	混合ガスの物性値の計算、および純成分ガスの物性値を計算するサブルーチンのコントロールを行う。
MATCH4	メタンの物性値を計算する。
MATCO	一酸化炭素の物性値を計算する。
MATCO2	炭酸ガスの物性値を計算する。
MATH2	水素の物性値を計算する。
MATH2O	過熱蒸気の物性値を計算する。
MATHE	ヘリウムの物性値を計算する。
OUTPUT	出力量の印刷を行う。
PRCNST	各計算式における定数項の check 印刷を行う。
PRDIF	常微分方程式の微分項の check 印刷を行う。
PRDUMP	サブルーチン PRTPY, PRPHYS, PRDIF をコントロールする。
PREPAR	各計算式における定数項を予め計算する。
PRHEAD	ヘッディング、タイトル文の印刷を行う。
PROPN0	入力カードの番号を印刷する。
PRPHYS	混合ガスおよび純成分ガスの物性値の check 印刷を行う。
PRTPY	温度、圧力、および組成の check 印刷を行う。
RKG	1次常微分方程式を Runge-Kutta-Gill Method で解く。
STRESS	反応管の応力と水素透過量を計算する。
TILOCK	計算時間が設定された時間を超えた場合に自動的に出力量が印刷される。

FUNCTION	下記の 21 ケから構成される。
ALPHA	境膜の熱伝達率を求める。
ALPHAB	充填層の熱伝導率を計算する際に必要な関数を求める。
DX2DX1	改質反応率に対する水性ガス交換反応率の微分値を求める。
FCONR	充填層の熱伝導率を求める。
FF	流体の摩擦係数を求める。
FHW	充填層の管壁における見掛けの伝熱係数を求める。
FK1	改質反応の平衡定数を求める。
FK2	水性ガス交換反応の平衡定数を求める。
FKR	反応速度定数を求める。
FPW	管壁における熱流束を求める。
FRE	流体のレイノルズ数を求める。
FRV	反対速度を求める。
FTS	スリーブの壁温を求める。
FU	空塔速度を求める。
FSG	サブルーチン MATER から比重を定める。
FCP	サブルーチン MATER から定圧比熱を定める。
FVIS	サブルーチン MATER から静粘性係数を定める。
FCON	サブルーチン MATER から熱伝導率を定める。
FPR	サブルーチン MATER からプラントル数を定める。
PHAI	充填層の熱伝導率を計算する際に必要な関数を求める。
SIMPSON	Simpson Method で数値積分を行う。

#### 4.2 流れ図

Fig. 2 と Fig. 3 に本コードの流れ図の概略を示す。Fig. 2 は本コードの MAIN の流れ図であり、温度・組成分布と圧力分布が収束するまで、反復計算が行われることが示されている。また、水素透過量と応力の計算は、この反復計算の終了後に実行される。Fig. 3 はサブルーチン CALTEM の流れ図であり、温度・組成分布の計算手順が示されている。

流れ図に使用されている記号の説明を以下に示す。

JO	反応管の軸方向分割点
J END	反応管の軸方向分割点における終点
I END	計算の中止または終了を指示する記号
I P	圧力分布に関する計算の実行を指示する記号
ITP	圧力分布の反復計算回数
ITB	軸方向温度分布の反復計算回数
NB	軸方向温度分布の反復計算打切り回数
ERR1	流路 1 の圧力分布反復計算における相対誤差
ERR2	流路 2 の圧力分布反復計算における相対誤差

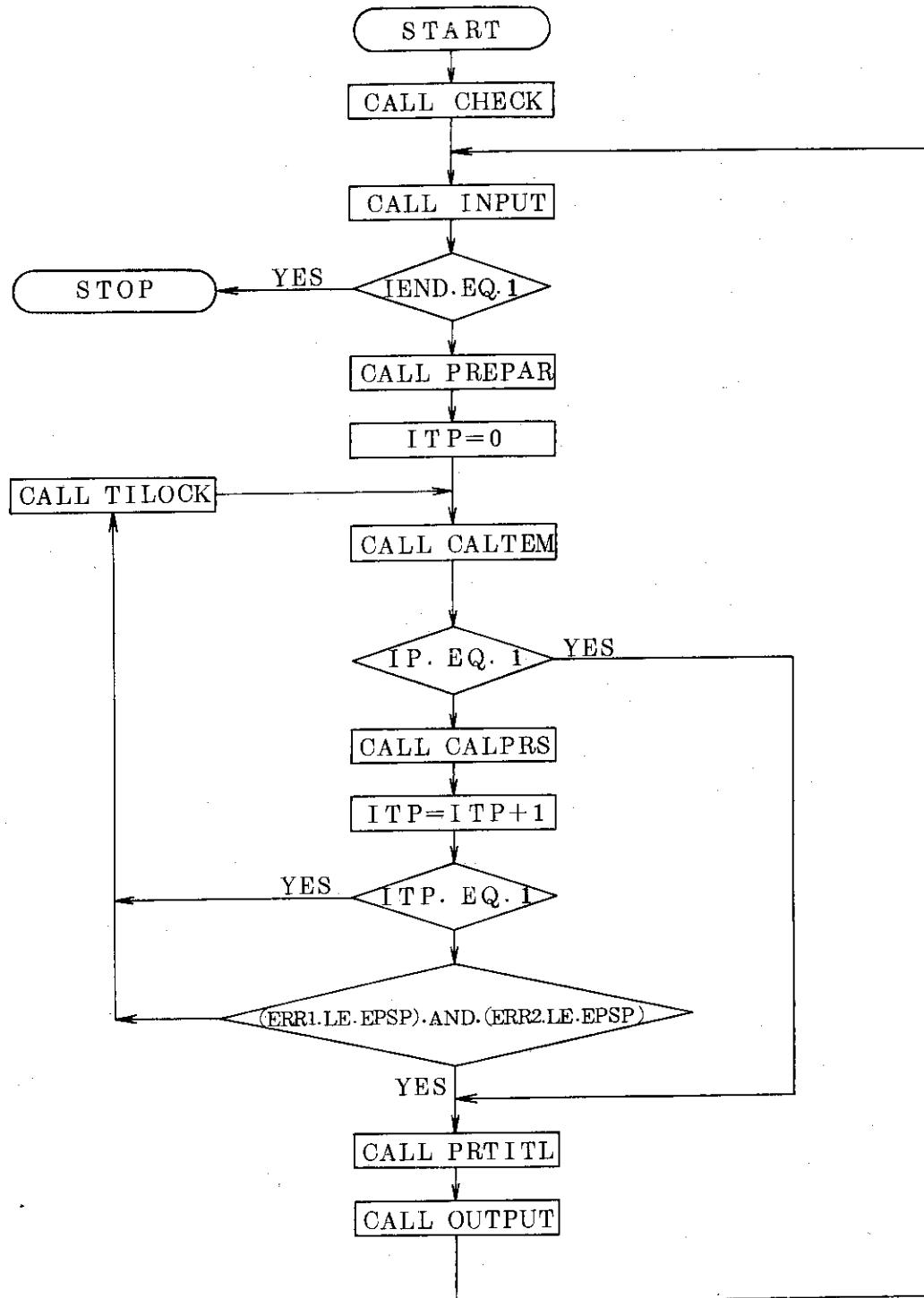


Fig. 2 Main routine flow chart

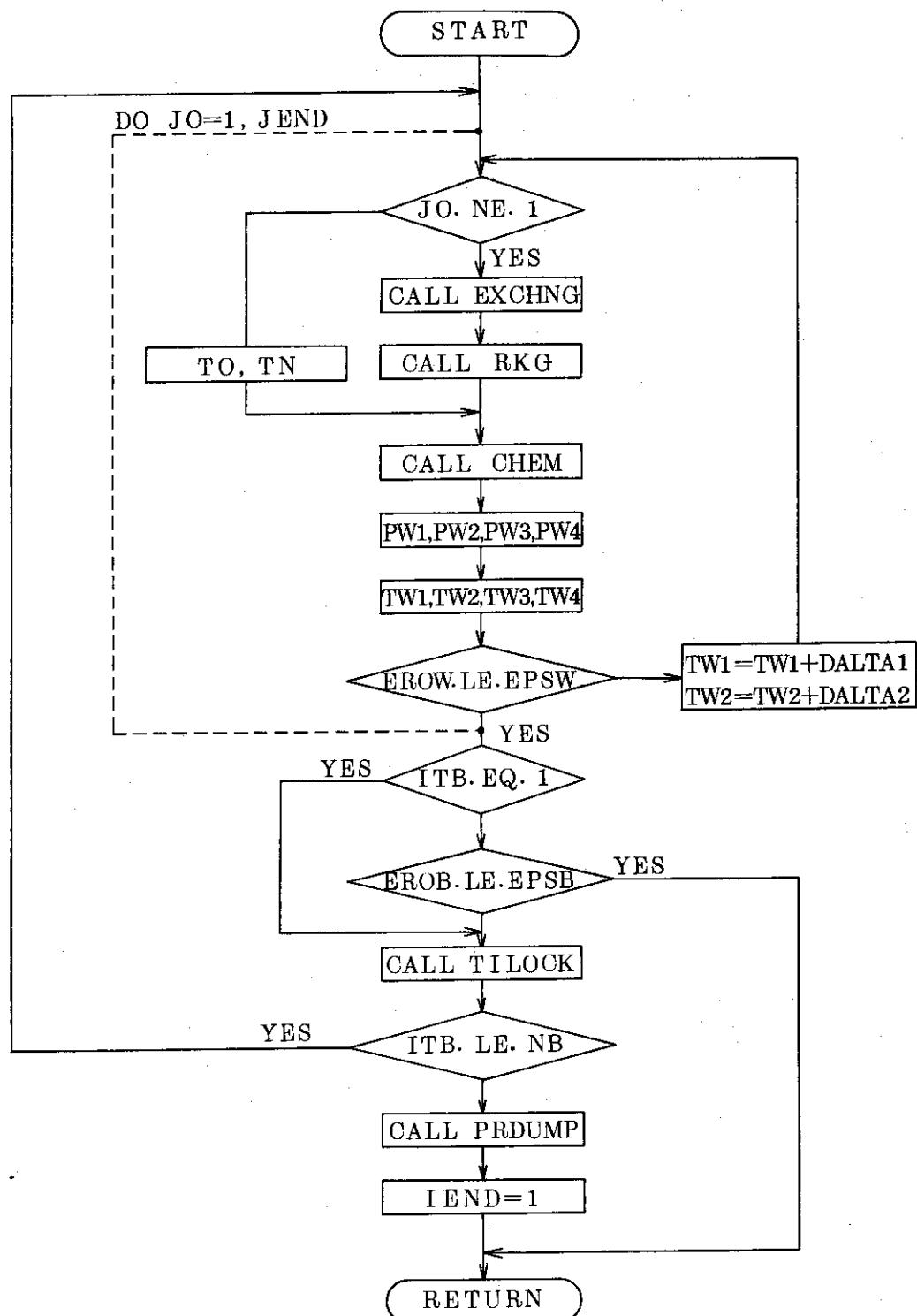


Fig. 3 CALTEM subroutine flow chart

EROW	壁温反復計算における相対誤差
EROB	軸方向温度・組成分布反復計算における相対誤差
EPSP	圧力分布反復計算の許容誤差
EPSW	壁温反復計算の許容誤差
EPSB	軸方向温度・組成分布反復計算の許容誤差
TO, TN	充填層径方向温度分布のなかの両端の温度
PW1 ~ 4	壁面1~4における各々の熱流束
TW1 ~ 4	壁面1~4における各々の温度
DALTA1	壁温TW1を収束させるための補正温度差
DALTA2	壁温TW2を収束させるための補正温度差
また、本計算コードにおける反復計算の個所は、Fig. 4に示すような関係に位置づけられており、外側にある反復計算ほど大きな計算ループである。計算時間(CPU)は9mのバイオネット型反応管に対して約12分である。	

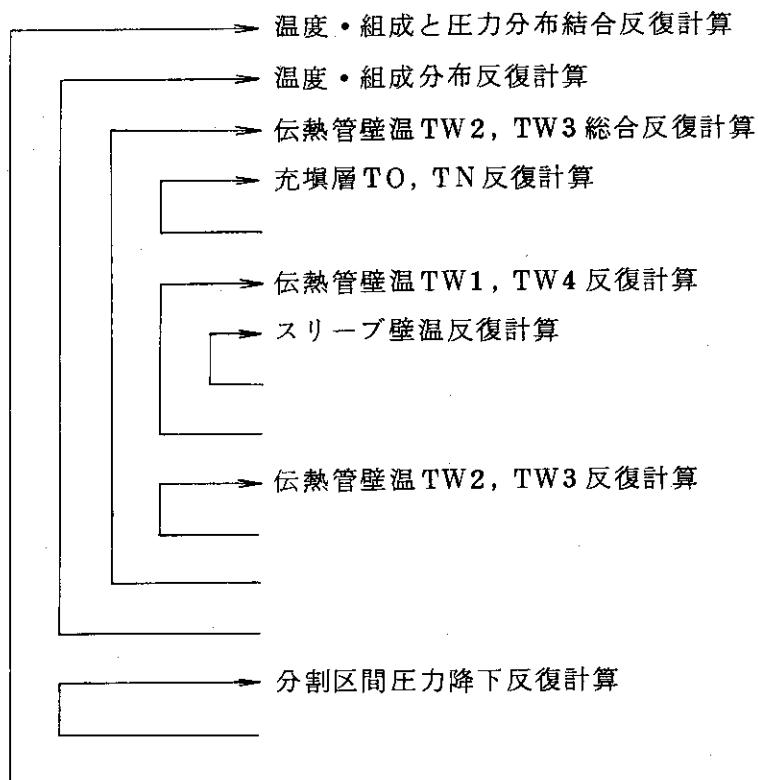


Fig. 4 反復計算の個所

### 4.3 入力量

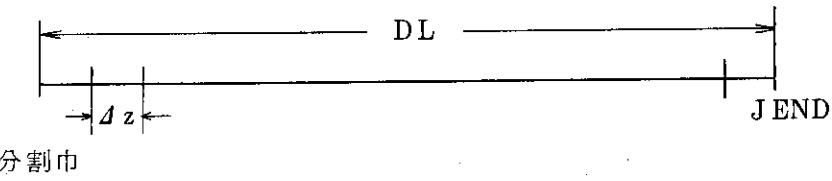
入力量はタイトルカード、入力群カード、および終了カードから構成される。すなわち各ケースにはこれらのカードが必要であるが、連続ケースの場合には、後のケースの入力群カードは前のケースの入力群カードと同一のものは省略でき、必要なカードのみを読み込ませればよ

い。入力群カードの内容は Card N別に説明すると次のとおりである。

1. オプションカード
2. 反復計算カード
3. 分割カード
4. 尺寸カード
5. 流体カード
6. 実験整理式カード(流体)
7. 実験整理式カード(伝熱管)
8. 辐射到達率カード
9. 触媒カード
10. 反応カード
11. 壁面仮定温度カード
12. 流体温度カード
13. 応力カード
14. 水素透過量カード

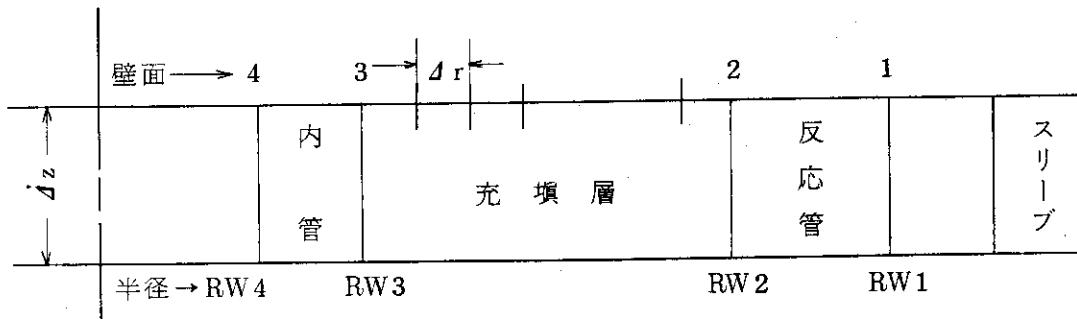
Table 2 に各カードの入力形式を示す。なお、Table 2において更に説明を必要とする項目について以下に示す。

(1) 反応管軸方向分割巾数



$$\Delta z = DL / M$$

(2) 充填層径方向分割巾数



IM = 1 の場合(内管あり)

$$\Delta r = (RW2 - RW3) / N$$

IM = 2 の場合(内管なし)

$$\Delta r = RW2 / N$$

(3)  $\alpha \beta$  に使用する組番号

充填層の熱伝導率を求めるときに必要な関数  $\alpha \beta$  は、触媒の形状によって異なる。

NAB = 1 円筒。 NAB = 2 球。 NAB = 3 破碎体。 NAB = 4 ベールくら型。

NAB = 5 ラシヒリング。

## 4.4 出力量

出力量は入力値の印刷と計算結果の印刷から構成される。入力値に関しては、先ずはじめに INPUT DATA CHECK LIST が入力カードの順に全ケースに渡って印刷され、次に 1 ケース目の入力値が入力群毎に印刷される。その後に計算結果の印刷が続き、1 ケース目の出力量の印刷は終了する。計算結果の印刷の型式は全部で 7 種類であり、その内訳は印刷する順序で示すと以下のとおりである。

1 種類目 温度分布、熱流束

2 種類目 圧力分布、流速

3 種類目 充填層温度分布 [ 但し、IC=1 の場合のみ印刷 ]

4 種類目 組成分布、転化率、反応速度 [ 但し、IR=1 の場合のみ印刷 ]

5 種類目 4 種類目の径方向平均値 [ 但し、IR=1 の場合のみ印刷 ]

6 種類目 応力、水素透過量

7 種類目 圧力降下、熱収支、その他

## (1) 1 種類目

軸方向分割点に対して印刷

J 軸方向分割点

Z 軸方向位置 (m)

TB22 流路におけるバルク温度 (°C)

TW4 内管内壁温度 (°C)

TW3 内管外壁温度 (°C)

TB21 流路 21 におけるバルク温度 (°C)

TW2 反応管内壁温度 (°C)

TW1 反応管外壁温度 (°C)

TB1 流路 1 におけるバルク温度 (°C)

PHAIW4 内管内壁熱流束 (kcal/m<sup>2</sup> h)

PHAIW3 内管外壁熱流束 (kcal/m<sup>2</sup> h)

PHAIW2 反応管内壁熱流束 (kcal/m<sup>2</sup> h)

PHAIW1 反応管外壁熱流束 (kcal/m<sup>2</sup> h)

## (2) 2 種類目

軸方向分割点に対して印刷

J 軸方向分割点

Z 軸方向位置 (m)

P22 流路 22 における圧力分布 (kg/cm<sup>2</sup>)

P21	流路 21 における圧力分布 ( kg/cm <sup>2</sup> )
P1	流路 1 における圧力分布 ( kg/cm <sup>2</sup> )
U22	流路 22 における流束 ( m/s )
U21	流路 21 における流束 ( m/s )
U1	流路 1 における流束 ( m/s )

## (3) 3 種類目

軸方向と径方向の各分割点に対して印刷	
CATALYST TEMPERATURE 充填層温度分布 ( °C )	
I	径方向分割点
R	径方向位置 ( cm )
J	軸方向分割点
Z	軸方向位置 ( m )

## (4) 4 種類目

軸方向と径方向の各分割点に対して印刷	
Y1	メタンのモル分率
Y2	一酸化炭素のモル分率
Y3	炭酸ガスのモル分率
Y4	水素のモル分率
Y5	蒸気のモル分率
X1	改質反応率
X2	水性ガス交換反応率
RV	反応速度 ( kmol/kg h )

## (5) 5 種類目

軸方向分割点に対して印刷	
J	軸方向分割点
Z	軸方向位置 ( m )
Y1	メタンのモル分率, ドライモル分率
Y2	一酸化炭素のモル分率, ドライモル分率
Y3	炭酸ガスのモル分率, ドライモル分率
Y4	水素のモル分率, ドライモル分率
Y5	蒸気のモル分率
X1	改質反応率
X2	水性ガス交換反応率
VC	反応速度 ( kmol/kg h )

## (6) 6 種類目

軸方向と径方向の各分割点に対して印刷	
J	軸方向分割点
Z	軸方向位置 ( m )

PL-R	径方向膜応力 ( kg/cm <sup>2</sup> )
PL-H	接線方向膜応力 ( kg/cm <sup>2</sup> )
PL-Z	軸方向膜応力 ( kg/cm <sup>2</sup> )
F-R	径方向熱応力 ( kg/cm <sup>2</sup> )
F-TH	接線方向熱応力 ( kg/cm <sup>2</sup> )
F-Z	軸方向熱応力 ( kg/cm <sup>2</sup> )
SIGMA-R	径方向応力 ( kg/cm <sup>2</sup> )
SIGMA-TH	接線方向応力 ( kg/cm <sup>2</sup> )
SIGMA-Z	軸方向応力 ( kg/cm <sup>2</sup> )
S	溶解度分布 ( m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
Q	透過速度分布 ( m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h )

1 ケース毎に印刷

TOTAL PERMEABILITY 全透過量 ( m<sup>3</sup>/h )

#### (7) 7種類目

軸方向分割点に対して印刷

J	軸方向分割点
DELTA-PF	軸方向分割区間における摩擦損失 ( kg/cm <sup>2</sup> )
DELTA-PH	軸方向分割区間における静圧差 ( kg/cm <sup>2</sup> )
DELTA-PV	軸方向分割区間における動圧差 ( kg/cm <sup>2</sup> )
TW2-1	反応管内壁温度 ( °C )
TW4-1	内管外壁温度 ( °C )

1 ケース毎に印刷

QQ	流路 1 における流体の伝熱量 ( kcal/h )
Q21	流路 2 1 における流体の伝熱量 ( kcal/h )
Q22	流路 2 2 における流体の伝熱量 ( kcal/h )
QR	流路 2 における流体の伝熱量 ( kcal/h )
QR/QQ	QR と QQ の比
HT	流路 2 1 における流体の見掛け伝熱量 ( kcal/h )
HR	流路 2 1 における流体の反応熱 ( kcal/h )
HR/Q21	流路 2 1 における流体の伝熱量に占める反応熱量の割合
HR/QR	流路 2 における流体の伝熱量に占める反応熱量の割合

Table 2 Input specification

Card #	Input symbol	Column	Notes
	CARD	4-40 41-60 61-80	作業名 日付 担当者名
1	I	1- 2	01
	IM	11	IM=1 バイオネット型。 IM=2 平行流型。
	IC	12	IC=1 触媒有り。 IC=2 触媒無し。
	IR	13	IR=1 反応有り。 IR=2 反応無し。
	ID	14	ID=1 流路2の流れ方向が流路21→22。 ID=2 流路22→21
	IF	15	IF=1 流路1と21の流体が向流。 IF=2 流路1と21の流体が並流。
	IP	16	IP=1 圧力分布の計算を実行しない。 IP=2 圧力分布の計算を実行する。
	ITHETA	17	ITHETA=1 流路1が上向流。 ITHETA=2 水平流。 ITHETA=3 下向流。
2	I	1- 2	02
	NW	11-13	壁温反復計算打切り回数
	EPSW	14-20	壁温反復計算許容誤差
	NB	21-23	温度・組成分布反復計算打切り回数
	EPSB	24-30	温度・組成分布反復計算許容誤差
	NK	31-33	分割区間圧力降下反復計算打切り回数
	EPSK	34-40	分割区間圧力降下反復計算許容誤差
	NP	41-43	圧力分布反復計算打切り回数
	EPSP	44-50	圧力分布反復計算許容誤差
	NPP	51-80	圧力分布反復計算 i 回目を印刷したい時、カード上の(50+i)カラムに1をたてる。
3	I	1- 2	03
	M	11-13	反応管軸方向分割巾数 (Max. 500) [1]
	N	14-15	充填層径方向分割巾数 (Max. 10) [2]
	ND1	16	充填層外側伝熱管層数 (Max. 5)
	ND2	17	充填層内側伝熱管層数 (Max. 5)
	M1	18-20	温度、圧力、平均組成の計算結果をM1点間隔毎に印刷する。
	M2	21-23	反応率、組成、反応速度の計算結果をM2点間隔毎に印刷する。
	M3	24-26	応力の計算結果をM3点間隔毎に印刷する。
4	I	1- 2	04
	J	3	1
	DL	11-20	反応管の長さ (m)
	RW	21-30	壁面1の半径 (m)

Card #	Input symbol	Column	Notes
	RW	31-40 41-50 51-60	壁面2の半径(m) 壁面3の半径(m) 但し, IM=2の時, RW=0.0 壁面4の半径(m) 但し, IM=2の時, RW=0.0
	I	1-2	0.4
	J	3	2
	D	11-20 21-30 31-40	流路1の等価直径(m) 流路2 1の等価直径(m) 流路2 2の等価直径(m) 但し, IM=1の時のみ必要。
	A	41-50 51-60 61-70	流路1の断面積(m <sup>2</sup> ) 流路2 1の断面積(m <sup>2</sup> ) 流路2 2の断面積(m <sup>2</sup> ) 但し, IM=1の時のみ必要。
	I	1-2	0.4 [本カードはND=1の場合は不要]
	J	3	3
	DEL1	11-20 21-30 31-40 41-50 51-60	充填層外側伝熱管の各層の厚さ(m) ○層数だけ内側から記入する。
	I	1-2	0.4 [本カードはIM=2またはND2=1の場合は不要]
	J	3	4
	DEL2	11-20 21-30 31-40 41-50 51-60	充填層内側伝熱管の各層の厚さ(m) ○層数だけ内側から記入する。
5	I	1-2	0.5
	J	3	1
	NF1	11	流体1の番号 [番号:(1)CH <sub>4</sub> (2)CO (3)CO <sub>2</sub> (4)H <sub>2</sub> (5)H <sub>2</sub> O]
	NF2	12	流体2の番号 [(6)混合ガス (7)He]
	G1	21-30	流体1の流量(kg/h)
	G2	31-40	流体2の流量(kg/h)
	PB1 IN	41-50	流体1の入口圧力(kg/cm <sup>2</sup> )
	PB2 IN	51-60	流体2の入口圧力(kg/cm <sup>2</sup> )
	I	1-2	0.5 [本カードは流体1が純成分ガスの場合は不要]
	J	3	2
	F1	11-20 21-30	流体1のCH <sub>4</sub> 供給量(kmol/h) " CO "

Card #	Input symbol	Column	Notes
	F1	31-40 41-50 51-60	流体1のCO <sub>2</sub> 供給量 ( kmol/h ) " H <sub>2</sub> " " H <sub>2</sub> O "
	I	1-2	0 5 [本カードは流体2が純成分ガスの場合は不要]
	J	3	3
	F2	11-20 21-30 31-40 41-50 51-60	流体2のCH <sub>4</sub> 供給量 ( kmol/h ) " CO " " CO <sub>2</sub> " " H <sub>2</sub> " " H <sub>2</sub> O "
	I	1-2	0 5 [本カードは流体が純成分ガスの場合は不要]
	J	3	4
	F3	11-20 21-30 31-40 41-50 51-60	流体2のCH <sub>4</sub> 反応モル分率 " CO " " CO <sub>2</sub> " " H <sub>2</sub> " " H <sub>2</sub> O "
6	I	1-2	0 6
	J	3	1
	NM	11	境膜熱伝達率実験整理式の数 ( Max. 8 )
	N1	21	境膜1に使用する組番号。
	N2	22	" 2 "
	N3	23	" 3 "
	N4	24	" 4 "
	I	1-2	0 6 [本カードはNM枚必要]
	J	3	2
	AN(IEX2)	11-20	
	BN(IEX2)	21-30	境膜熱伝達率: $\alpha = AN \cdot Re^{BN} \cdot Pr^{CN} \cdot \frac{\lambda}{D}$ ( kcal/m <sup>2</sup> h C )
	CN(IEX2)	31-40	
	I	1-2	0 6
	J	3	3
	NCM	11	摩擦係数実験整理式の数 ( Max. 8 )
	NC1	21	流路1に使用する組番号。
	NC2	22	" 21 "
	NC3	23	" 22 "
	FR	31-40	折返し点における圧力損失の損失係数。但し、IM=2の場合は不要。
	I	1-2	0 6 [本カードはNCM枚必要]

Card #	Input symbol	Column	Notes
	J AL(IEX4) AT0(IEX4) AT1(IEX4) AT2(IEX4) BT(IEX4) CT(IEX4) REC(IEX4)	3 11-20 21-30 31-40 41-50 51-60 61-70 71-80	4 層流: $f_e = AL / R_e$ 乱流: $f_t = AT0 + AT1 \cdot R_e^{BT} + AT2 \cdot R_e^{CT}$ 臨界レイノルズ数
7	I J NSM NS1 NS2 I J E0(IPIC) E1(IPIC) E2(IPIC)	1-2 3 11-12 21-22 23-24 25-26 27-28 29-30 31-32 33-34 35-36 37-38 39-40 1-2 33 11-20 21-30 31-40	07 1 伝熱管の熱伝導率実験整理式の数 (Max. 20) 充填層外側伝熱管の各層に使用する組番号 層数だけ内側から記入する。 充填層内側伝熱管の各層に使用する組番号 層数だけ内側から記入する。 〔本カードはNSM枚必要〕
	PCG1 PCG2 PCG3 PCG4 PCG5 PCG6 PCG7	11-20 21-30 31-40 41-50 51-60 61-70 71-80	熱伝導率 $\lambda_s = E0 + E1 \cdot T + E2 T^2$ (kcal/mh°C)
8	I PCG1 PCG2 PCG3 PCG4 PCG5 PCG6 PCG7	1-2 11-20 21-30 31-40 41-50 51-60 61-70 71-80	08 流体1と壁面1の輻射到達率 壁面2と流体21 流体21と壁面3 壁面4と流体22 流体1とスリーブ スリーブと壁面1 壁面2と壁面3
9	I J PC	1-2 3 11-20	09 触媒充填密度 (kg/m³)

Card #	Input symbol	Column	Notes
	E EW EPS CG DP	21-30 31-40 41-50 51-60 61-70	充填層の空隙率 充填層壁近傍の空隙率 黒度 $CG = 4.0$ ガス系。 $CG = 2.6$ 液系。 触媒の代表粒径 (m)
	I J NAB DK0 DK1 DK2	1- 2 3 11 21-30 31-40 41-50	0 9 2 $\alpha \beta$ に使用する組番号 触媒の熱伝導率: $k_s = DK0 + DK1 \cdot T + DK2 \cdot T^2$ (kcal/m h °C) (3)
10	I J DH1 DH2 BETA DE	1- 2 3 11-20 21-30 31-40 41-50	1 0 [本カードは IR=2 または IC=2 の場合は不要] 1 改質反応における標準反応熱 (kcal / kmol) 水性ガス交換反応における標準反応熱 (kcal / kmol) 頻度因子 (kmol / kg · h · (kg / cm²)) 改質反応の活性化エネルギー (kcal / kmol)
	I J A11 A12 A13 A21 A22 A23	1- 2 3 11-20 21-30 31-40 41-50 51-60 61-70	1 0 [本カードは IR=2 または IC=2 の場合は不要] 2 改質反応における平衡定数 $K_1(T) = \exp(A11 / (T + A12) + A13)$ 水性ガス交換反応における平衡定数 $K_2(T) = \exp(A21 / (T + A22) + A23)$
11	I TW20 TW30 DTW2 DTW3	1- 2 11-20 21-30 31-40 41-50	1 1 壁面 2 の仮定温度 壁面 3 の仮定温度 壁面 2 の修正温度差 壁面 3 の修正温度差
12	I Q1 T21U Q2 T21D Q3 T22U	1- 2 11 12-21 22 23-32 33 34-43	1 2 ◦ Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 G : 確定量として与える時に記入する。 A : 仮定量として与える時に記入する。 ◦ T21U, T21D, T22U, T1U, T1D は次の図による温度

Card #	Input symbol	Column	Notes					
	Q 4 T 1 U Q 5 T 1 D	4 4 4 5-5 4 5 5 5 6-6 5	T22U 流路 22 伝熱管 (内管)	T21U 流路 21 伝熱管 (反応管)	T1U 流路 1			スリーブ
						T21D	T1D	
13	I VE0 VE1 VE2 VALP0 VALP1 VALP2 FNYU	1- 2 11-20 21-30 31-40 41-50 51-60 61-70 71-80	1 3 縦弾性係数: $E = VE0 + VE1 \cdot T + VE2 \cdot T^2$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 線膨張係数: $\alpha = VALP0 + VALP1 \cdot T + VALP2 \cdot T^2$ (1/°C) ボアン比					
14	I VS0 VC1 VC2 VD0 VD1 VD2 I CARD	1- 2 11-20 21-30 31-40 41-50 51-60 61-70 11-30	1 4 常圧における溶解度 $S_t(T) = VS0 \cdot \exp \{ VC1 \left( \frac{1}{T} \right) + VC2 \left( \frac{1}{T} \right)^2 \}$ 水素の拡散係数 $D(T) = VD0 \cdot \exp \{ VD1 \left( \frac{1}{T} \right) + VD2 \left( \frac{1}{T} \right)^2 \}$ 9 9 END OF DATA CARDS					

## 5. ま と め

多目的高温ガス炉の熱利用系に設置される核熱利用メタン・スチーム改質器の特性を解析するための計算コードHIGHTEXを開発し、その計算モデルとコードの使用方法が本報告書にまとめられた。

計算モデルに関しては、以下の基本事項に基づきコードを開発した。

- (i) 解析の対象範囲は1本の反応管であり、その形式は単管とバイオネット管の両方を考慮した。
- (ii) 触媒充填層の取扱いは一相系2次元モデルであり、この場合、反応ガスの温度・組成は、多元連立常微分方程式で表示され、Runge-Kutta-Gill法で求めることができる。
- (iii) 核熱利用による高温高圧のヘリウムガスで加熱される反応管の健全性、ヘリウム中への不純物発生源としての反応管からの透過水素に対するヘリウム純度管理、などの新たな課題を検討するため、反応管に生ずる応力、水素透過量などの計算モデルを考慮した。
- (iv) 計算に必要な物性値と実験データのなかで、その値が一般に認められ、かつ広く使用されているものに対しては、そのデータをコードに内蔵することによって、入力量の簡便化を図ることができる。とくに、本コードでは、混合ガスの物性値を求める際に必要な純成分ガスの物性値は、温度と圧力の2変数多項式で内蔵されている。

その結果、本コードを用いて、以下に示す特性解析を実施することができる。

- (i) 各種の操作条件下における改質反応特性
- (ii) ヘリウムガス加熱による伝熱流動特性
- (iii) 水素透過特性
- (iv) 反応管応力特性

これらの特性解析から得られた結果は、システム設計、改質器の設計などに資することができる。なお、代表的な計算時間(cpu)は、9mのバイオネット型反応管に対して、FACOM-230/75で約12分である。また、本コードのソース・カード枚数は約4000枚であり、使用記憶容量は約120K wordである。

最後に、本コードでは、計算に必要な実験データまたは実験式が不確定であるものに対しては、これらのデータを内蔵せずに、一般的な整理式として取扱い、かつ、その整理式の係数と指数を入力量で与えることにした。したがって、計算モデルと実験結果との整合は、入力量で調整され、また逆に整理式の係数と指数を決定することができる。今後、実験データを広く収集し、計算コードを検証し、併せて設計に資するデータを提供するために、前述した特性解析を実施する予定である。

## 謝 詞

本コードの開発に際し、プログラムの作成を日本アイ・ビー・エム株式会社に外注した。計算仕様書の作業分析は藤井秀夫氏が担当し、プログラム設計、コーディングおよびテストは中川亜人氏が実施した。ここに深甚なる謝意を表したい。

## 参 考 文 献

- 1) Shamsher S. Grover : Hydrocarbon Processing, 49, № 4, 109 (1970)
- 2) M. H. Hyman : Hydrocarbon Processing, 47, № 7, 131 (1968)
- 3) Yagi S., Kunii D. : A. I. ch. E. J., 6, 97 (1960)
- 4) Yagi S., Kunii D., Wakao N. : "Int. Developments in Heat Transfer", ASME & IME, 742 (1961)
- 5) Yagi S., Kunii D. : "Int. Developments in Heat Transfer", ASME & IME, 750 (1961)
- 6) J. M. Smith : "Chemical Engineering Kinetics", McGraw-Hill, 504 (1970)
- 7) Kubota H., Akehata T. : Kagaku Kogaku, 28, 284 (1964)
- 8) Tone S. : "Kagaku Kogaku", Kagaku Dozin, 201 (1968)
- 9) M. Smialowski : "Hydrogen in steel", Pergamon Press, 66 (1962)
- 10) K. Denbigh : "Chemical Reactor Theory", Cambridge at the university press, 62 (1965)

## 謝 詞

本コードの開発に際し、プログラムの作成を日本アイ・ビー・エム株式会社に外注した。計算仕様書の作業分析は藤井秀夫氏が担当し、プログラム設計、コーディングおよびテストは中川亜人氏が実施した。ここに深甚なる謝意を表したい。

## 参 考 文 献

- 1) Shamsher S. Grover : Hydrocarbon Processing, 49, № 4, 109 (1970)
- 2) M. H. Hyman : Hydrocarbon Processing, 47, № 7, 131 (1968)
- 3) Yagi S., Kunii D. : A. I. ch. E. J., 6, 97 (1960)
- 4) Yagi S., Kunii D., Wakao N. : " Int. Developments in Heat Transfer ", ASME & IME, 742 (1961)
- 5) Yagi S., Kunii D. : " Int. Developments in Heat Transfer ", ASME & IME, 750 (1961)
- 6) J. M. Smith : " Chemical Engineering Kinetics ", McGraw-Hill, 504 (1970)
- 7) Kubota H., Akehata T. : Kagaku Kogaku, 28, 284 (1964)
- 8) Tone S. : " Kagaku Kogaku ", Kagaku Dozin, 201 (1968)
- 9) M. Smialowski : " Hydrogen in steel ", Pergamon Press, 66 (1962)
- 10) K. Denbigh : " Chemical Reactor Theory ", Cambridge at the university press, 62 (1965)

出入力量リスト

\*\* INITIATE CHECKLIST \*\*

YADOKARI

1913, 04, 28

01 11111121  
02 20 1 0 -3 20 1 0 -3 20 1 0 -3 20 1 0 -3 20 1 0 -3

100 311 5 10 10

9.0	8.25	-2	6.25	-2	1.7	-2	1.36	-2	
3.0	-2	9.1	-2	2.72	-2	8.482	-3	1.136	-2

76 647.7 535.9 40.0 34.0

2,805	0,0	0,0	0,0	27,25
0,0069	0,0205	0,0523	0,2708	0,6495

0.023 0.8 0.4

121	16.0	0.0	-	0.0791
122	16.0	0.0	-	0.0

5.0 0.0 5.0 1.0 -1.0 -0.1 0.25

2 2 1 2

11:2 0:0083 0:08 0:0

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

1080.0 0.4 0.7 0.1 4.0 16.51 -3

1      0.6      0.0      0.0

-49270.0 9840.0 5646.5 22.8 +3

-274463.9 0.6 30.737 40844.02 0.0 -31,762

G 500.0 A 716.0 A 760.0 G 988.0

2.2 +6 -1.167 +3 0.0 16.6 -6 1.0 -9 0.0 0.3

END OF DATA CARDS

JAERI-M 7232



2

Y. TADOKORO

1975.04.28

TEST RUN TYPE = 1

\*\* EXISTENCE OF CARD \*\*

## \*\*\* CONTENTS OF ERRORS \*\*\*

1

\*\*\*\*\* TEST RUN \*\*\*\*\*

TEST RUN TYPE = 1

Y.TADOKORO

1975.04.28

PAGE

\*\*\*\*\* LIST \*\*\*\*\*

J	L	TB22	TW4	TW3	TB21	TW2	TW1	PHAIW1	PHAIW2	PHAIW3	PHAIW4	PHAIW5
1	0.0	694.8	633.4	617.9	504.8	600.3	628.8	760.4	9.2053E+04	7.3642E+04	-6.2516E+04	-4.7360E+04
6	0.45	705.5	647.1	632.6	542.7	630.5	682.1	773.1	8.7803E+04	7.0242E+04	-5.6405E+04	-4.2731E+04
11	0.90	715.1	662.3	649.3	570.0	651.5	699.5	784.9	6.3879E+04	5.3216E+04	-5.3216E+04	-4.0361E+04
16	1.35	724.0	674.6	662.6	590.7	667.6	713.7	796.2	7.9848E+04	5.9979E+04	-5.1786E+04	-3.9232E+04
21	1.80	732.5	684.8	673.4	605.6	680.4	725.7	807.3	7.4974E+04	5.8012E+04	-5.1422E+04	-3.8971E+04
26	2.25	740.8	693.9	682.7	617.5	691.4	736.7	816.4	7.2514E+04	5.7193E+04	-5.1794E+04	-3.9238E+04
31	2.70	749.0	702.5	691.5	628.0	701.7	747.3	829.7	7.1492E+04	5.6871E+04	-5.2419E+04	-3.9757E+04
36	3.15	757.1	711.1	700.1	638.4	712.0	757.8	841.1	7.0727E+04	5.6581E+04	-5.3266E+04	-4.0352E+04
41	3.60	765.2	719.7	709.0	649.2	722.8	768.7	852.6	7.0017E+04	5.6013E+04	-5.3941E+04	-4.0869E+04
46	4.05	773.1	728.7	716.3	661.0	734.1	780.1	864.3	6.8597E+04	5.4878E+04	-5.4405E+04	-4.1216E+04
51	4.50	780.8	737.9	726.0	673.8	746.3	792.0	876.1	6.6458E+04	5.3167E+04	-5.4644E+04	-4.1397E+04
56	4.95	788.3	747.3	737.9	667.5	759.0	804.2	887.8	6.3549E+04	5.0039E+04	-5.4622E+04	-4.1380E+04
61	5.40	795.3	756.8	746.0	701.3	772.1	816.8	899.6	5.9990E+04	4.7992E+04	-5.4407E+04	-4.1218E+04
66	5.85	801.9	766.1	758.0	716.5	785.7	829.5	911.3	5.5759E+04	4.4607E+04	-5.4009E+04	-4.0916E+04
71	6.30	807.9	775.4	768.0	731.6	799.4	842.4	922.9	5.0921E+04	4.0137E+04	-5.3442E+04	-4.0487E+04
76	6.75	813.4	784.4	777.5	747.0	813.4	855.4	934.3	4.5538E+04	3.6431E+04	-5.2669E+04	-3.9916E+04
81	7.20	818.2	793.1	787.5	762.8	827.7	868.4	945.6	3.9421E+04	3.1536E+04	-5.1766E+04	-3.9217E+04
86	7.65	822.3	801.6	797.0	778.9	842.2	881.6	956.7	3.2019E+04	2.6095E+04	-5.0639E+04	-3.8363E+04
91	8.10	825.6	809.7	806.2	795.4	826.9	894.8	967.4	2.4941E+04	1.9953E+04	-4.9270E+04	-3.7326E+04
96	8.55	827.9	817.4	815.2	812.2	871.7	908.0	977.9	1.6333E+04	1.3226E+04	-4.7654E+04	-3.6102E+04
101	9.00	829.3	824.7	823.7	829.3	886.6	921.1	988.0	7.1936E+03	5.7549E+03	-4.5829E+04	-3.4719E+04

PAGE 2

\*\*\*\*\* MIGHTEX OUTPUT LIST \*\*\*\*\*

TEST RUN TYPE = 1

1975.04.28

Y.TADOKORO

J	Z	P22	P21	P1	U22	U21	U1	ITEM
1	0.0	2.9394E+01	3.4000E+01	3.9987E+01	4.7024E+01	1.3926E+00	1.1675E+01	2
6	0.45	2.9408E+01	3.3836E+01	3.9987E+01	4.7534E+01	1.4735E+00	1.1817E+01	2
11	0.90	2.9423E+01	3.3664E+01	3.9988E+01	4.7993E+01	1.5513E+00	1.1949E+01	2
16	1.35	2.9438E+01	3.3485E+01	3.9989E+01	4.8414E+01	1.6142E+00	1.2072E+01	2
21	1.80	2.9454E+01	3.3301E+01	3.9939E+01	4.8811E+01	1.6710E+00	1.2199E+01	2
26	2.25	2.9469E+01	3.3112E+01	3.9990E+01	4.9197E+01	1.7220E+00	1.2323E+01	2
31	2.70	2.9485E+01	3.2920E+01	3.9990E+01	4.9577E+01	1.7765E+00	1.2448E+01	2
36	3.15	2.9500E+01	3.2724E+01	3.9991E+01	4.9955E+01	1.8331E+00	1.2572E+01	2
41	3.60	2.9517E+01	3.2524E+01	3.9992E+01	5.037L+01	1.8898E+00	1.2704E+01	2
46	4.05	2.9533E+01	3.2319E+01	3.9993E+01	5.0689E+01	1.9490E+00	1.2835E+01	2
51	4.50	2.9549E+01	3.2111E+01	3.9994E+01	5.1077E+01	2.0109E+00	1.2966E+01	2
56	4.95	2.9566E+01	3.1868E+01	3.9994E+01	5.1385E+01	2.0750E+00	1.3097E+01	2
61	5.40	2.9582E+01	3.1679E+01	3.9994E+01	5.1703E+01	2.1412E+00	1.3228E+01	2
66	5.85	2.9599E+01	3.1455E+01	3.9995E+01	5.1998L+01	2.2090E+00	1.3358E+01	2
71	6.30	2.9616E+01	3.1226E+01	3.9996E+01	5.2266E+01	2.2782E+00	1.3487E+01	2
76	6.75	2.9634E+01	3.0911E+01	3.9996E+01	5.2507E+01	2.3487E+00	1.3615E+01	2
81	7.20	2.9651E+01	3.0720E+01	3.9997E+01	5.2714E+01	2.4204E+00	1.3740E+01	2
86	7.65	2.9669E+01	3.0530E+01	3.9998E+01	5.2883E+01	2.4934E+00	1.3863E+01	2
91	8.10	2.9686E+01	3.0230E+01	3.9999E+01	5.3012E+01	2.5673E+00	1.3983E+01	2
96	8.55	2.9704E+01	2.9990E+01	3.9999E+01	5.3096L+01	2.6422E+00	1.4100E+01	2
101	9.00	2.9722E+01	2.9722E+01	4.0000E+01	5.3130L+01	2.7175E+00	1.4212E+01	2

PAGE

3

Y,TADOKORO

\*\*\*\*\* HIGHTEX OUTPUT LIST \*\*\*\*\*  
 TEST RUN TYPE = 1 1975.04.28

* CATALYST	TEMPERATURE *	1TEP=	2, 1TEB=	4
1	0.0	521.7	500.0	518.4
6	0.45	543.0	534.0	559.9
11	0.90	570.2	562.4	586.6
16	1.35	590.1	583.0	589.4
21	1.80	604.9	598.1	604.3
26	2.25	616.6	610.0	616.2
31	2.70	626.9	620.5	626.7
36	3.15	637.0	630.8	637.0
41	3.60	647.7	641.6	647.9
46	4.05	659.2	653.4	659.8
51	4.50	671.6	666.1	672.6
56	4.95	684.9	679.8	686.3
61	5.40	698.7	694.1	700.7
66	5.85	712.8	708.9	715.5
71	6.30	727.3	723.9	730.7
76	6.75	741.9	739.3	746.3
81	7.20	756.8	755.0	762.2
86	7.65	771.9	771.0	778.5
91	8.10	787.2	787.4	795.2
96	8.55	802.8	804.1	812.3
101	9.00	816.4	821.0	829.6

PAGE 4

\*\*\*\*\* HIGHTEX OUTPUT LIST \*\*\*\*\*

TEST RUN TYPE = 1

1975.04.28

Y.TADOKORO

\* PRODUCT COMPOSITION \* CONVERSION AND REACTION RATE \*

1TEP= 2, 1TEB= 4

I	0	1	2	3
R	1.7	3.2	4.7	6.3
J	2			

J= 1 L= 0,0

Y1	9.333E-02	9.333E-02	9.333E-02	9.333E-02
Y2	0.0	0.0	0.0	0.0
Y3	0.0	0.0	0.0	0.0
Y4	0.0	0.0	0.0	0.0
Y5	9.067E-01	9.067E-01	9.067E-01	9.067E-01
X1	0.0	0.0	0.0	0.0
X2	0.0	0.0	0.0	0.0
RV	9.628E-03	6.423E-03	6.423E-03	4.071E-03

J= 11 L= 0,90

Y1	8.750E-02	8.749E-02	8.726E-02	8.701E-02
Y2	3.659E-05	3.510E-05	3.493E-05	4.705E-05
Y3	4.877E-03	4.888E-03	5.074E-03	5.272E-03
Y4	1.962E-02	1.966E-02	2.041E-02	2.124E-02
Y5	3.880E-01	8.879E-01	8.872E-01	8.864E-01
X1	4.962E-03	4.972E-03	5.166E-03	5.380E-03
X2	4.926E-03	4.936E-03	5.126E-03	5.332E-03
RV	2.036E-02	1.791E-02	1.990E-02	2.620E-02

J= 21 L= 1,80

Y1	7.641E-02	7.638E-02	7.608E-02	7.576E-02
Y2	3.790E-04	3.674E-04	3.931E-04	4.426E-04
Y3	1.388E-02	1.392E-02	1.415E-02	1.436E-02
Y4	5.864E-02	5.677E-02	5.777E-02	5.878E-02
Y5	8.522E-01	8.526E-01	8.516E-01	8.507E-01
X1	1.467E-02	1.470E-02	1.498E-02	1.526E-02
X2	1.428E-02	1.433E-02	1.457E-02	1.480E-02
RV	3.006E-02	2.711E-02	2.961E-02	3.746E-02

J= 31 L= 2,70

Y1	6.314E-02	6.310E-02	6.277E-02	6.243E-02
Y2	1.372E-03	1.335E-03	1.406E-03	1.550E-03
Y3	2.406E-02	2.414E-02	2.455E-02	2.449E-02
Y4	1.004E-01	1.006E-01	1.016E-01	1.026E-01
Y5	8.110E-01	8.109E-01	8.099E-01	8.089E-01
X1	2.680E-02	2.684E-02	2.715E-02	2.744E-02
X2	2.535E-02	2.544E-02	2.567E-02	2.583E-02
RV	3.307E-02	2.998E-02	3.268E-02	4.117E-02

PAGE 5

\*\*\*\*\* HIGHTEX OUTPUT LIST \*\*\*\*\*

TEST RUN TYPE = 1

Y, TADOKORO

\* PRODUCT COMPOSITION , CONVERSION AND REACTION RATE \*

1973.04.28 2, 1TEB= 4

1	0	1	2	3
R	1.7	3.2	4.7	6.3
J	Z			

J= 41 Z= 3.60

Y1	5.018E-02	5.013E-02	4.977E-02	4.941E-02
Y2	3.131E-03	3.057E-03	3.196E-03	3.483E-03
Y3	3.323E-02	3.335E-02	3.351E-02	3.352E-02
Y4	1.423E-01	1.426E-01	1.436E-01	1.445E-01
Y5	7.711E-01	7.709E-01	7.699E-01	7.690E-01
X1	3.921E-02	3.927E-02	3.962E-02	3.996E-02
X2	3.583E-02	3.597E-02	3.617E-02	3.620E-02
RV	3.183E-02	2.858E-02	3.147E-02	4.033E-02

J= 51 Z= 4.50

Y1	3.870E-02	3.863E-02	3.823E-02	3.785E-02
Y2	5.601E-03	5.496E-03	5.720E-03	6.174E-03
Y3	4.043E-02	4.060E-02	4.071E-02	4.058E-02
Y4	1.785E-01	1.789E-01	1.800E-01	1.808E-01
Y5	7.367E-01	7.364E-01	7.353E-01	7.346E-01
X1	5.070E-02	5.077E-02	5.118E-02	5.157E-02
X2	4.453E-02	4.472E-02	4.488E-02	4.476E-02
RV	2.872E-02	2.533E-02	2.844E-02	3.812E-02

J= 61 Z= 5.40

Y1	2.887E-02	2.877E-02	2.834E-02	2.794E-02
Y2	8.671E-03	8.560E-03	6.876E-03	9.492E-03
Y3	4.265E-02	4.584E-02	4.569E-02	4.561E-02
Y4	2.086E-01	2.091E-01	2.102E-01	2.109E-01
Y5	7.082E-01	7.078E-01	7.067E-01	7.060E-01
X1	6.094E-02	6.105E-02	6.150E-02	6.193E-02
X2	5.121E-02	5.144E-02	5.153E-02	5.126E-02
RV	2.540E-02	2.222E-02	2.541E-02	3.525E-02

J= 71 Z= 6.30

Y1	2.049E-02	2.036E-02	1.992E-02	1.954E-02
Y2	1.219E-02	1.211E-02	1.251E-02	1.326E-02
Y3	4.919E-02	4.932E-02	4.934E-02	4.892E-02
Y4	2.333E-01	2.339E-01	2.349E-01	2.355E-01
Y5	6.848E-01	6.643E-01	6.833E-01	6.828E-01
X1	6.997E-02	7.011E-02	7.059E-02	7.101E-02
X2	5.608E-02	5.631E-02	5.631E-02	5.587E-02
RV	2.187E-02	1.934E-02	2.241E-02	3.159E-02

PAGE 6

Y.TADOKORO

\*\*\*\*\*  
TEST RUN TYPE = 1  
\*\*\*\*\*  
HIGHTEX OUTPUT LIST  
\*\*\*\*\*

\* PRODUCT COMPOSITION \* CONVERSION AND REACTION RATE \*

ITEP= 4

2, ITEB=

1975.04.28

I	0	1	2	3
R	1.7	3.2	4.7	6.3
J	2			

J= 81 L= 7.20

Y1	1.353E-02	1.338E-02	1.297E-02	1.263E-02
Y2	1.594E-02	1.592E-02	1.640E-02	1.723E-02
Y3	5.131E-02	5.146E-02	5.132E-02	5.077E-02
Y4	2.531E-01	2.536E-01	2.545E-01	2.548E-01
Y5	6.662E-01	6.657E-01	6.648E-01	6.646E-01
X1	7.770E-02	7.787E-02	7.833E-02	7.871E-02
X2	5.928E-02	5.947E-02	5.936E-02	5.876E-02
RV	1.772E-02	1.614E-02	1.882E-02	2.1649E-02

J= 91 L= 8.10

Y1	8.120E-03	7.963E-03	7.617E-03	7.351E-03
Y2	1.962E-02	1.970E-02	2.023E-02	2.109E-02
Y3	5.219E-02	5.224E-02	5.200E-02	5.136E-02
Y4	2.676E-01	2.681E-01	2.687E-01	2.687E-01
Y5	6.525E-01	6.520E-01	6.515E-01	6.515E-01
X1	8.385E-02	8.403E-02	8.443E-02	8.473E-02
X2	6.094E-02	6.102E-02	6.076E-02	6.007E-02
RV	1.293E-02	1.233E-02	1.438E-02	1.995E-02

J=101 L= 9.00

Y1	4.383E-03	4.239E-03	3.973E-03	3.787E-03
Y2	2.291E-02	2.312E-02	2.368E-02	2.451E-02
Y3	5.204E-02	5.196E-02	5.162E-02	5.095E-02
Y4	2.769E-01	2.772E-01	2.775E-01	2.773E-01
Y5	6.438E-01	6.435E-01	6.432E-01	6.434E-01
X1	8.817E-02	8.836E-02	8.855E-02	8.887E-02
X2	6.122E-02	6.114E-02	6.077E-02	6.000E-02
RV	8.090E-03	8.195E-03	9.493E-03	1.292E-02

TEST RUN TYPE = 1 1975.04.28 Y.TADOKORO

* RADIAL MEAN VALUE OF PRODUCT COMPOSITION, CONVERSION AND REACTION RATE *							1TEP=	2, 1TEB=	4
J	Z	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	X1	X2	VC
1	0.0	9.333E-02	0.0	0.0	0.0	9.067E-01	0.0	0.0	7.115E-03
6	0.45	9.105E-02	4.734E-06	1.912E-03	7.662E-03	8.994E-01	1.924E-03	1.919E-03	1.356E-02
11	0.90	8.729E-02	3.943E-05	5.046E-03	2.038E-02	8.873E-01	5.138E-03	5.098E-03	2.056E-02
16	1.35	8.218E-02	1.516E-04	9.241E-03	3.742E-02	8.710E-01	9.573E-03	9.418E-03	2.642E-02
21	1.80	7.612E-02	3.943E-04	1.410E-02	5.760E-02	8.518E-01	1.493E-02	1.453E-02	3.042E-02
26	2.25	6.955E-02	8.070E-04	1.923E-02	7.934E-02	8.311E-01	2.087E-02	2.003E-02	3.267E-02
31	2.70	6.417E-02	1.411E-03	2.430E-02	1.014E-01	8.101E-01	2.710E-02	2.561E-02	3.355E-02
36	3.15	5.619E-02	0.3307344	0.0074278	0.1279109	0.5339269	1.230E-01	7.895E-01	3.339E-02
41	3.60	0.2669718	0.0105103	0.138194	0.5843205	0.4695296	1.434E-01	7.701E-01	3.956E-02
46	4.05	4.386E-02	4.385E-03	3.731E-02	1.624E-01	7.521E-01	4.548E-02	4.070E-02	3.098E-02
51	4.50	3.30E-02	0.1768865	0.017869	0.1504732	0.6549534	1.797E-01	7.356E-01	4.479E-02
56	4.95	3.317E-02	3.201E-03	3.343E-02	1.434E-01	7.206E-01	5.642E-02	4.836E-02	2.787E-02
61	5.40	2.642E-02	4.386E-02	8.890E-03	4.581E-02	0.999E-01	7.070E-01	6.142E-02	5.143E-02
66	5.85	2.404E-02	1.066E-02	4.773E-02	0.7163364	0.7163364	6.947E-01	6.611E-02	5.404E-02
71	6.30	2.001E-02	1.252E-02	4.926E-02	2.229E-01	0.6495293	0.6495293	5.642E-02	5.621E-02
76	6.75	1.635E-02	1.444E-02	5.043E-02	2.451E-01	6.737E-01	7.455E-02	5.795E-02	2.146E-02
81	7.20	1.306E-02	0.0442692	0.1545646	0.7510660	0.7510660	6.947E-01	6.611E-02	4.487E-02
86	7.65	1.017E-02	1.833E-02	5.175E-02	2.620E-01	6.578E-01	8.150E-02	6.019E-02	1.721E-02
91	8.10	7.696E-03	2.021E-02	5.196E-02	2.684E-01	6.517E-01	8.433E-02	6.072E-02	1.477E-02
96	8.55	0.0220969	0.0580156	0.1491681	0.7707193	0.7707193	6.452E-01	6.921E-02	1.946E-02
101	9.00	4.039E-03	2.363E-02	5.161E-02	2.713E-01	6.434E-01	8.857E-02	6.076E-02	9.698E-03

\*\*\*\*\* MIGHTEX OUTPUT LIST \*\*\*\*\*  
TEST RUN TYPE = 1 1975.04.28  
PAGE 8  
Y.TADOKORO

\* STRESS OF TUBE, SOLUBILITY AND PERMEABILITY OF HYDROGEN \*

	J	L	PL=R	PL=H	PL=Z	F=R	F=H	F=Z	SIGMA=R	SIGMA=H	SIGMA=Z	S	Q
1	0.0	-34.00	-62.10	-48.05	0.0	1270.26	1270.26	-34.00	1208.16	1222.21	0.0	0.0	0.0
11	0.90	-39.99	-56.11	-48.05	0.0	-918.56	-918.56	-39.99	-974.67	-966.61	0.0	0.0	0.0
21	1.80	-33.66	-63.35	-48.51	0.0	1007.03	1007.03	-33.66	943.68	958.52	1.1285E-01	6.3108E-06	6.5427E-06
31	2.70	-33.30	-64.70	-49.00	0.0	931.88	931.88	-33.30	867.18	882.88	2.2163E-01	1.5027E-05	1.5060E-05
41	3.60	-32.92	-66.11	-49.51	0.0	920.96	920.96	-32.92	854.85	871.45	3.2562E-01	2.52269E-05	2.5050E-05
51	4.50	-32.52	-67.58	-50.09	0.0	915.90	915.90	-32.52	848.32	865.85	4.2476E-01	3.7436E-05	3.6798E-05
61	5.40	-31.68	-60.11	-50.05	0.0	-666.43	-666.43	-39.99	-726.54	-716.48	0.0	0.0	0.0
71	6.30	-32.11	-69.11	-50.61	0.0	894.72	894.72	-32.11	825.62	844.11	5.2335E-01	5.2846E-05	5.1277E-05
81	7.20	-31.11	-61.23	-50.61	0.0	-650.62	-650.62	-39.99	-711.84	-701.23	0.0	0.0	0.0
91	8.10	-31.23	-72.39	-51.81	0.0	805.71	805.71	-31.23	733.32	753.90	7.2341E-01	9.7229E-05	9.0958E-05
101	9.00	-30.75	-74.15	-52.45	0.0	747.19	747.19	-30.75	673.04	694.74	8.2199E-01	1.2716E-04	1.1657E-04
		-40.00	-64.91	-52.45	0.0	-544.24	-544.24	-40.00	-609.14	-596.69	0.0	0.0	0.0
		-40.00	-76.01	-53.13	0.0	677.64	677.64	-30.25	601.83	624.71	9.1685E-01	1.6280E-04	1.4603E-04
		-40.00	-66.26	-53.13	0.0	-494.58	-494.58	-40.00	-560.85	-547.71	0.0	0.0	0.0
		-40.00	-29.72	-53.84	0.0	601.36	601.36	-29.72	523.39	547.51	1.0047E+00	2.0383E-04	1.7879E-04
		-40.00	-67.69	-53.84	0.0	-439.82	-439.82	-40.00	-507.51	-493.67	0.0	0.0	0.0

\* TOTAL PERMEABILITY(S2.6E,S1).... 3.0077E-04

\* TOTAL PERMEABILITY(S2.LT.S1).... 0.0

\*\*\*\*\*  
TEST RUN TYPE = 1  
\*\*\*\*\*  
HIGHTEX OUTPUT LIST  
\*\*\*\*\*  
PAGE 9

Y.TADOKORO

\* OTHRS \* ITEP= 2. ITES= 4  
GM= 47177.5 F= 30.1 MAVO= 17+8  
J 1 12 23 34 45 57 68 79 90 101

BULK1

DELTA-PF 1.0920E-04 1.1244E-04 1.1543E-04 1.1846E-04 1.2160E-04 1.2508E-04 1.2826E-04 1.3138E-04 1.3439E-04  
DELTA-PH 1.6333E-05 1.5928E-05 1.5572E-05 1.5229E-05 1.4891E-05 1.4534E-05 1.4223E-05 1.3932E-05 1.3664E-05  
DELTA-PV -6.4492E-06 -5.4691E-06 -5.3696E-06 -5.5229E-06 -5.6615E-06 -5.6816E-06 -5.5945E-06 -5.4211E-06 -5.1448E-06

BULK21

DELTA-PF 3.1905E-02 3.5658E-02 3.7774E-02 3.9431E-02 4.1220E-02 4.3521E-02 4.5890E-02 4.8466E-02 5.1273E-02  
DELTA-PH -7.1089E-05 -6.4167E-05 -6.0817E-05 -5.8418E-05 -5.6036E-05 -5.3257E-05 -5.0679E-05 -4.8151E-05 -4.5674E-05  
DELTA-PV 1.6891E-05 1.6469E-06 1.6578E-06 2.0422E-06 2.2537E-06 2.5406E-06 2.8564E-06 3.2258E-06 3.6601E-06

BULK22

DELTA-PF 3.0775E-03 3.1633E-03 3.2362E-03 3.3059E-03 3.3740E-03 3.4421E-03 3.4977E-03 3.5423E-03 3.5726E-03  
DELTA-PH 4.8992E-05 4.7925E-05 4.7660E-05 4.6267E-05 4.5521E-05 4.4806E-05 4.4239E-05 4.3798E-05 4.3507E-05  
DELTA-PV -2.3519E-04 -2.1499E-04 -2.1079E-04 -2.0336E-04 -1.8380E-04 -1.5624E-04 -1.2062E-04 -7.4828E-05

OUTSIDE HEAT CONDUCTOR

TW2=1 6.0033E+02 6.5506E+02 6.8496E+02 7.0789E+02 7.3182E+02 7.6156E+02 7.9114E+02 8.2199E+02 8.5390E+02 8.8655E+02

INSIDE HEAT CONDUCTOR

TW4=1 6.1794E+02 6.5224E+02 6.7724E+02 6.9669E+02 7.1642E+02 7.3994E+02 7.6200E+02 7.8370E+02 8.0437E+02 8.2372E+02

HEAT BALANCE

QG(KCAL/H)	Q21(KCAL/H) Q22(KCAL/H) QR(KCAL/H)	QR/QG	HT(KCAL/H)	HR(KCAL/H)	HR/Q21	HR/QR
1.8579E+05	2.3168E+05 4.4975E+04	1.8671E+05 1.0049E+00	1.0448E+05 1.2721E+05	5.4906E-01 6.8132E-01		

## 付 錄

## A 1. 水素、一酸化炭素、メタン及び過熱蒸気の物性値計算式

## A 1.1 使用記号

P : 壓 力	$\text{Kg}/\text{cm}^2$
T : 絶対温度	$^\circ\text{K}$
$t(t_s)$ : 温度(飽和温度)	$^\circ\text{C}$
Z : 圧縮係数	-
R : ガス定数	$\text{Kg} \cdot \text{m}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{Kmol} \cdot {}^\circ\text{K}$
$R_c = R/M_{\text{gas}}$	$\text{m}^3/\text{cm}^2 \cdot {}^\circ\text{K}$
$M_{\text{gas}}$ : 分子量	$\text{Kg}/\text{Kmol}$
$\gamma(v)$ : 比重量(比体積)	$\text{Kg}/\text{m}^3 (\text{m}^3/\text{Kg})$
$C_p(C_{p0}, \Delta C_p)$ : 定圧比熱	$\text{Kcal}/\text{Kg} \cdot {}^\circ\text{C}$
$\mu(\mu_1, \Delta \mu)$ : 粘性係数	$\text{gr}/\text{cm} \cdot \text{sec} (= \text{Poise})$
$\lambda(\lambda_1, \Delta \lambda)$ : 热伝導率	$\text{Kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot {}^\circ\text{C}$
A, B, C, D, E : 壓力又は温度に関する多項式から求められる係数	
$P_{\text{fac}}$ : 壓力により求まる係数	

## A 1.2 物性値計算式

物性値計算式はすべて温度と圧力の2変数多項式で表示した。とくに、比重に関しては、理想気体の状態式に補正係数を乗じた式を使用した。この補正係数は圧縮係数であり、同様に温度と圧力の2変数多項式で表示されている。

A 1.2.1 水素( $\text{H}_2$ )

## (1) 比重

$$\begin{aligned}\gamma &= P/Z \cdot R_c \cdot T \\ Z &= f(P, T) \\ &= 1.0 + (A+B \cdot P+C \cdot P^2) \\ (R &= 8.4782 \times 10^{-2}, M_{\text{gas}} = 2.016)\end{aligned}$$

## (i) A 値

$$\circ T = 200 \sim 600 {}^\circ\text{K}$$

$$A = 10^{-6} [47.5 - 7.5 \left( \frac{T}{100} \right)]$$

○  $T = 600 \sim 1400^{\circ}\text{K}$

$$A = 10^{-6} \left[ -24.80 + 4.55 \left( \frac{T}{100} \right) \right]$$

(ii) B 値

○  $T = 200 \sim 300^{\circ}\text{K}$

$$B = 10^{-4} \left[ 7.0782 + 0.0978 \left( \frac{T}{100} \right) - 0.1924 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \right]$$

○  $T = 300 \sim 600^{\circ}\text{K}$

$$B = 10^{-4} \left[ 13.1740 - 3.9828 \left( \frac{T}{100} \right) + 0.5900 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \right.$$

$$\left. - 0.03317 \left( \frac{T}{100} \right)^3 \right]$$

○  $T = 600 \sim 1400^{\circ}\text{K}$

$$B = 10^{-4} \left[ 9.63774 - 1.90938 \left( \frac{T}{100} \right) + 0.19767 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \right.$$

$$\left. - 1.0274 \times 10^{-2} \left( \frac{T}{100} \right)^3 + 2.115 \times 10^{-4} \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right]$$

(iii) C 値

○  $T = 200 \sim 300^{\circ}\text{K}$

$$C = 10^{-7} \left[ 34.1598 - 17.696 \left( \frac{T}{100} \right) + 2.350 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \right]$$

○  $T = 300 \sim 600^{\circ}\text{K}$

$$C = 10^{-7} \left[ 4.9668 - 0.6684 \left( \frac{T}{100} \right) - 0.11565 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \right.$$

$$\left. + 0.011150 \left( \frac{T}{100} \right)^3 \right]$$

○  $T = 600 \sim 1400^{\circ}\text{K}$

$$C = 10^{-7} \left[ 3.0864 - 0.69640 \left( \frac{T}{100} \right) - 1.9210 \times 10^{-2} \left( \frac{T}{100} \right)^2 \right.$$

$$\left. + 5.844 \times 10^{-3} \left( \frac{T}{100} \right)^3 - 2.140 \times 10^{-4} \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right]$$

適用範囲

圧 力  $1.0 \sim 105 \text{ Kg/cm}^2$

温 度  $200 \sim 1400^{\circ}\text{K}$

(2) 定 壓 比 熱

$$C_p = A + B \cdot P + C \cdot P^2$$

(i) A 値

○  $T = 200 \sim 500^{\circ}\text{K}$

$$A = 1.30152 + 1.8962 \times 10^{-2} T - 6.3460 \times 10^{-5} T^2 + 9.570 \times 10^{-8} T^3 \\ - 5.458 \times 10^{-11} T^4$$

○  $T = 500 \sim 1300^{\circ}\text{K}$

$$A = 3.37742 + 5.9210 \times 10^{-4} T - 1.4948 \times 10^{-6} T^2 + 1.5985 \times 10^{-9} T^3 - 4.930 \times 10^{-13} T^4$$

## (ii) B 値

○  $T = 200 \sim 500 \text{ }^\circ\text{K}$ 

$$B = 10^{-3} [ 5.71155 - 3.2403 \times 10^{-2} T + 6.5078 \times 10^{-5} T^2 - 4.451 \times 10^{-8} T^3 ]$$

○  $T = 500 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{K}$ 

$$B = 10^{-3} [ 1.30835 - 4.2996 \times 10^{-3} T + 5.830 \times 10^{-6} T^2 - 3.632 \times 10^{-9} T^3 + 8.600 \times 10^{-13} T^4 ]$$

## (iii) C 値

○  $T = 200 \sim 700 \text{ }^\circ\text{K}$ 

$$C = 10^{-6} [ -8.3846 + 5.1846 \times 10^{-2} T - 1.2651 \times 10^{-4} T^2 + 1.3956 \times 10^{-7} T^3 - 5.820 \times 10^{-11} T^4 ]$$

○  $T = 700 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{K}$ 

$$C = -1.8704 \times 10^{-7} \text{ (Constant)}$$

適用範囲

圧 力  $1.0 \sim 105 \text{ Kg/cm}^2$ 温 度  $200 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{K}$ 

## (3) 粘 性 係 数

$$\mu = \mu_1 + \Delta \mu$$

$$(i) \mu_1 = 10^{-6} [ -5.4670 + 3.7408 T^{0.5} + 1.15982 \times 10^{-1} T^{1.0} - 8.8700 \times 10^{-4} T^{1.5} + 4.7804 \times 10^{-7} T^{2.0} ]$$

 $(T = 200 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{K})$ 

$$(ii) \Delta \mu = 10^{-8} [ A \cdot P_{fac.} ]$$

$$A = 0.24900 - 3.7892 \times 10^2 \left( \frac{1}{T} \right) + 2.9678 \times 10^5 \left( \frac{1}{T} \right)^2 - 1.7105 \times 10^7 \left( \frac{1}{T} \right)^3$$

$$P_{fac} = [ P - 1.03323 ]$$

$$\begin{cases} T = 200 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{K} \\ P = 1.0 \sim 120 \text{ Kg/cm}^2 \end{cases}$$

適用範囲

圧 力  $1.0 \sim 120 \text{ Kg/cm}^2$ 温 度  $200 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{K}$ 

## (4) 热 伝 導 率

$$\lambda = \lambda_1 + \Delta \lambda$$

$$(i) \lambda_1 = -0.18825 + 2.8258 \times 10^{-2} T^{0.5} - 6.1854 \times 10^{-4} T^{1.0} \\ + 7.0774 \times 10^{-6} T^{1.5} + 5.6990 \times 10^{-8} T^{2.0}$$

(T = 200~1250 °K)

$$(ii) \Delta\lambda = 10^{-4} [A \cdot P_{fac}]$$

$$A = 8.0323 - 7.9882 \times 10^{-1} T^{0.5} + 3.7718 \times 10^{-2} T^{1.0} \\ - 8.9760 \times 10^{-4} T^{1.5} + 8.4080 \times 10^{-6} T^{2.0}$$

$$P_{fac} = [P - 1.03323]$$

$$\left( \begin{array}{l} T = 200 \sim 1250 \text{ °K} \\ P = 1.0 \sim 130 \text{ Kg/cm}^2 \end{array} \right)$$

適用範囲

$$\text{压 力} \quad 1.0 \sim 130 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\text{温 度} \quad 200 \sim 1275 \text{ °K}$$

### A 1.2.2 一酸化炭素 (CO)

#### (1) 比 重 量

$$r = P / Z \cdot R_c \cdot T$$

$$Z = 1.0 + (A + B \cdot P + C \cdot P^2)$$

$$(R = 8.4782 \times 10^{-2}, M_{gas} = 28.010)$$

##### (i) A 値

$$\circ T = 270 \sim 1400 \text{ °K}$$

$$A = 3.0 \times 10^{-5}$$

##### (ii) B 値

$$\circ T = 270 \sim 500 \text{ °K}$$

$$B = 10^{-4} [2.8868 + 2.2839 (\frac{100}{T}) + 1.9020 \times 10^2 (\frac{100}{T})^2 \\ - 1.0664 \times 10^3 (\frac{100}{T})^3 + 9.212 \times 10^2 (\frac{100}{T})^4]$$

$$\circ T = 500 \sim 900 \text{ °K}$$

$$B = 10^{-4} [-3.08887 + 1.83026 (\frac{T}{100}) - 3.55545 (\frac{T}{100})^2 \\ + 0.3075 (\frac{T}{100})^3 - 0.01005 (\frac{T}{100})^4]$$

$$\circ T = 900 \sim 1400 \text{ °K}$$

$$B = 10^{-4} [-27.69595 + 1.25330 (\frac{T}{100}) - 1.7784 (\frac{T}{100})^2 \\ + 0.1085 (\frac{T}{100})^3 - 0.00245 (\frac{T}{100})^4]$$

## (iii) C 値

$$\circ T = 270 \sim 500 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$C = 10^{-6} [ -4.44804 + 75.672 (\frac{100}{T}) - 470.20 (\frac{100}{T})^2 \\ + 1352.0 (\frac{100}{T})^3 - 1294.6 (\frac{100}{T})^4 ]$$

$$\circ T = 500 \sim 900 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$C = 10^{-8} [ 939.55 - 454.175 (\frac{T}{100}) + 90.595 (\frac{T}{100})^2 - 8.495 (\frac{T}{100})^3 \\ + 0.3050 (\frac{T}{100})^4 ]$$

$$\circ T = 900 \sim 1400 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$C = 10^{-8} [ -1399.28 + 513.131 (\frac{T}{100}) - 69.918 (\frac{T}{100})^2 \\ + 4.179 (\frac{T}{100})^3 - 0.0920 (\frac{T}{100})^4 ]$$

適用範囲

圧 力 1.0 ~ 105 kg/cm<sup>2</sup>

温 度 270 ~ 1400 °K

## (2) 定 壓 比 热

$$C_p = A + B \cdot P + C \cdot P^2$$

## (i) A 値

$$\circ T = 250 \sim 500 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$A = 0.25348 - 0.00365 (\frac{T}{100}) + 0.00056 (\frac{T}{100})^2 + 0.000040 (\frac{T}{100})^3$$

$$\circ T = 500 \sim 900 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$A = 0.28103 - 0.02266 (\frac{T}{100}) + 0.005135 (\frac{T}{100})^2 \\ - 0.000385 (\frac{T}{100})^3 + 0.00001 (\frac{T}{100})^4$$

$$\circ T = 900 \sim 1400 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$A = 0.192578 + 0.014285 (\frac{T}{100}) - 0.000623 (\frac{T}{100})^2 \\ + 0.000010 (\frac{T}{100})^3$$

## (ii) B 値

$$\circ T = 250 \sim 500 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$B = 10^{-4} [ 2.3547 - 36.792 (\frac{100}{T}) + 237.50 (\frac{100}{T})^2 - 489.55 (\frac{100}{T})^3 \\ + 479.00 (\frac{100}{T})^4 ]$$

○  $T = 500 \sim 900 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

$$B = 10^{-4} [ 13.2328 - 5.4673 \left( \frac{T}{100} \right) + 0.9335 \left( \frac{T}{100} \right)^2 - 0.0746 \left( \frac{T}{100} \right)^3 \\ + 0.0023 \left( \frac{T}{100} \right)^4 ]$$

○  $T = 900 \sim 1400 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

$$B = 10^{-4} [ 3.06199 - 0.61265 \left( \frac{T}{100} \right) + 0.044865 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \\ - 0.001145 \left( \frac{T}{100} \right)^3 ]$$

## (iii) C 値

○  $T = 250 \sim 450 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

$$C = 10^{-7} [ -6.1562 + 27.452 \left( \frac{T}{100} \right) - 3.120 \left( \frac{T}{100} \right)^2 ]$$

○  $T = 450 \sim 900 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

$$C = 10^{-7} [ -2.7605 + 0.4035 \left( \frac{T}{100} \right) - 0.0130 \left( \frac{T}{100} \right)^2 ]$$

○  $T = 900 \sim 1400 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

$$C = -1.82 \times 10^{-8}$$

## 適用範囲

圧 力  $1.0 \sim 105 \text{ Kg/cm}^2$ 温 度  $250 \sim 1400 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

## (3) 粘 性 係 数

$\mu = \mu_1 + \Delta\mu$

$$(i) \quad \mu_1 = 10^{-4} [ -0.88633 + 0.142357 T^{0.5} + 1.06619 \times 10^{-3} T^{1.0} \\ - 2.9053 \times 10^{-5} T^{1.5} + 4.1048 \times 10^{-7} T^{2.0} ] \\ (T = 200 \sim 1300 \text{ }^{\circ}\text{K})$$

$$(ii) \quad \Delta\mu = 5.50 \times 10^{-7} [ A + B \cdot P + C \cdot P^2 + D \cdot P^3 ]$$

## (iii) A 値

○  $T = 240 \sim 400 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

$$A = -0.24573 - 1.25875 \left( \frac{T}{100} \right)^1 + 0.59723 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \\ - 0.072535 \left( \frac{T}{100} \right)^3$$

○  $T = 400 \sim 1300 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

$$A = -0.816315 + 0.16188 \left( \frac{T}{100} \right)^1 - 0.014370 \left( \frac{T}{100} \right)^2 \\ + 0.0004910 \left( \frac{T}{100} \right)^3$$

## (V) B 値

○  $T = 240 \sim 400 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

$$B = 0.42245 + 1.07454 (\frac{T}{100})^1 - 0.53938 (\frac{T}{100})^2 \\ + 0.066684 (\frac{T}{100})^3$$

○  $T = 400 \sim 1300 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

$$B = 0.79855 - 0.15881 (\frac{T}{100})^1 + 0.014116 (\frac{T}{100})^2 \\ - 0.0004822 (\frac{T}{100})^3$$

## (VI) C 値

○  $T = 240 \sim 400 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

$$C = 10^{-3} [-174.150 + 134.440 (\frac{T}{100})^1 - 35.869 (\frac{T}{100})^2 \\ + 3.2412 (\frac{T}{100})^3]$$

○  $T = 400 \sim 1300 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

$$C = 10^{-3} [-8.4291 + 2.1123 (\frac{T}{100})^1 - 0.20878 (\frac{T}{100})^2 \\ + 0.007237 (\frac{T}{100})^3]$$

## (VI) D 値

○  $T = 240 \sim 400 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

$$D = 10^{-6} [195.9634 - 160.571 (\frac{T}{100})^1 + 44.684 (\frac{T}{100})^2 \\ - 4.1740 (\frac{T}{100})^3]$$

○  $T = 400 \sim 1300 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

$$D = 10^{-6} [55.7169 - 15.700 (\frac{T}{100})^1 + 1.59072 (\frac{T}{100})^2 \\ - 0.05460 (\frac{T}{100})^3]$$

## 適用範囲

圧 力  $1.0 \sim 110 \text{ Kg/cm}^2$ 温 度  $240 \sim 1300 \text{ }^{\circ}\text{K}$ 

## (4) 热 伝 導 率

$\lambda = \lambda_1 + \Delta \lambda$

$$(i) \lambda_1 = 10^{-2} [-1.06820 + 1.57228 \times 10^{-1} T^{0.5} + 1.64008 \times 10^{-3} T^{1.0} \\ + 3.4382 \times 10^{-6} T^{1.5} + 6.8826 \times 10^{-8} T^{2.0}]$$

(T = 200~1350 °K)

$$(ii) \Delta \lambda = 10^{-2} [A + B \cdot P + C \cdot P^2]$$

(iii) A 値

○ T = 200~354 °K

$$A = 10^{-3} [4.19845 - 1.38798 \times 10^{-1} T + 5.7329 \times 10^{-4} T^2 \\ - 6.7668 \times 10^{-7} T^3]$$

○ T = 354~1350 °K

$$A = 10^{-3} [-5.8682 + 1.21048 \times 10^{-2} T^1 - 1.52875 \times 10^{-5} T^2 \\ + 9.5200 \times 10^{-9} T^3 - 2.2855 \times 10^{-12} T^4]$$

(iv) B 値

○ T = 200~354 °K

$$B = 10^{-3} [-4.45655 + 1.37428 \times 10^{-1} T - 5.6290 \times 10^{-4} T^2 \\ + 6.6180 \times 10^{-7} T^3]$$

○ T = 354~1350 °K

$$B = 10^{-3} [5.6710 - 1.16775 \times 10^{-2} T + 1.47335 \times 10^{-5} T^2 \\ - 9.1700 \times 10^{-9} T^3 + 2.2008 \times 10^{-12} T^4]$$

(v) C 値

$$C = 2.6228 \times 10^9 (T)^{-6.0}$$

適用範囲

圧 力 1.0~150 Kg/cm<sup>2</sup>

温 度 200~1350 °K

### A 1.2.3 メ タ ネ (CH<sub>4</sub>)

(1) 比 重 量

$r = P / Z \cdot R_c \cdot T$
$Z = 1.0 + (A + B \cdot P + C \cdot P^2 + D \cdot P^3)$
(R = 8.4782 × 10 <sup>-2</sup> , M <sub>gas</sub> = 16.043)

(i) A 値

○ t = 0~150 °C

$$A = 10^{-5} [-1.050 + 1.100 (\frac{t}{100})]$$

○  $t = 150 \sim 400^\circ\text{C}$

$$A = 10^{-5} [ 1050 - 3.00 (\frac{t}{100}) ]$$

○  $t = 400 \sim 1000^\circ\text{C}$

$$A = -1.50 \times 10^{-5}$$

### (ii) B 値

○  $t = 0 \sim 150^\circ\text{C}$

$$B = 10^{-4} [-22.625 + 26.031 (\frac{t}{100}) - 12.732 (\frac{t}{100})^2 + 2.660 (\frac{t}{100})^3]$$

○  $t = 150 \sim 400^\circ\text{C}$

$$B = 10^{-4} [-16.1984 + 12.650 (\frac{t}{100}) - 3.082 (\frac{t}{100})^2 + 0.2696 (\frac{t}{100})^3]$$

○  $t = 400 \sim 1000^\circ\text{C}$

$$B = 10^{-4} [-2.8630 + 2.20375 (\frac{t}{100}) - 0.2661 (\frac{t}{100})^2 + 0.010150 (\frac{t}{100})^3]$$

### (iii) C 値

○  $t = 0 \sim 150^\circ\text{C}$

$$C = 10^{-6} [-2.4177 + 12.0692 (\frac{t}{100}) - 11.734 (\frac{t}{100})^2 + 3.5976 (\frac{t}{100})^3]$$

○  $t = 150 \sim 400^\circ\text{C}$

$$C = 10^{-6} [ 3.4245 - 1.8178 (\frac{t}{100}) + 0.3648 (\frac{t}{100})^2 - 0.0264 (\frac{t}{100})^3 ]$$

○  $t = 400 \sim 1000^\circ\text{C}$

$$C = 10^{-6} [ 2.01864 - 0.760735 (\frac{t}{100}) + 0.098364 (\frac{t}{100})^2 - 0.003891 (\frac{t}{100})^3 ]$$

### (iv) D 値

○  $t = 0 \sim 150^\circ\text{C}$

$$D = 10^{-8} [ 3.7974 - 8.2826 (\frac{t}{100}) + 6.7704 (\frac{t}{100})^2 - 1.9576 (\frac{t}{100})^3 ]$$

○  $t = 150 \sim 1000^\circ\text{C}$

D = 0.0

適用範囲

圧 力 1.0 ~ 110 Kg/cm<sup>2</sup>

温 度 0.0 ~ 1000 °C

## (2) 定 壓 比 热

$$C_p = A + B \cdot P + C \cdot P^2 + D \cdot P^3$$

## (i) A 値

○ T = 270 ~ 300 °K

$$A = 2.73143 - 2.4155 \left(\frac{T}{100}\right) + 0.8610 \left(\frac{T}{100}\right)^2 - 0.10 \left(\frac{T}{100}\right)^3$$

○ T = 300 ~ 500 °K

$$A = 0.60395 - 0.15630 \left(\frac{T}{100}\right) + 0.06352 \left(\frac{T}{100}\right)^2 - 0.00736 \left(\frac{T}{100}\right)^3 \\ + 0.00032 \left(\frac{T}{100}\right)^4$$

○ T = 500 ~ 800 °K

$$A = 0.44195 - 0.01880 \left(\frac{T}{100}\right) + 0.01965 \left(\frac{T}{100}\right)^2 - 0.001190 \left(\frac{T}{100}\right)^3$$

○ T = 800 ~ 1400 °K

$$A = 0.027822 + 0.16015 \left(\frac{T}{100}\right) - 6.600 \times 10^{-3} \left(\frac{T}{100}\right)^2 \\ + 1.040 \times 10^{-4} \left(\frac{T}{100}\right)^3$$

## (ii) B 値

○ T = 270 ~ 300 °K

$$B = 10^{-4} [ 9.7312 - 0.54210 \left(\frac{300-T}{10}\right) - 0.30970 \left(\frac{300-T}{10}\right)^2 \\ - 0.01150 \left(\frac{300-T}{10}\right)^3 ]$$

○ T = 300 ~ 500 °K

$$B = 10^{-4} [ 83.1202 - 10.0273 \left(\frac{T}{100}\right) + 46.768 \left(\frac{T}{100}\right)^2 - 8.981 \left(\frac{T}{100}\right)^3 \\ + 0.605 \left(\frac{T}{100}\right)^4 ]$$

○ T = 500 ~ 800 °K

$$B = 10^{-4} [ 59.1652 - 19.5695 \left(\frac{T}{100}\right) + 22.505 \left(\frac{T}{100}\right)^2 \\ - 0.0890 \left(\frac{T}{100}\right)^3 ]$$

○ T = 800~1400 °K

$$B = 10^{-4} [ 1.51660 - 3.4336 (\frac{T}{100}) + 0.2634 (\frac{T}{100})^2 - 0.00680 (\frac{T}{100})^3 ]$$

## (iii) C 値

○ T = 270~300 °K

$$C = 10^{-6} [ 6.6034 + 4.3482 (\frac{300-T}{10}) + 0.6652 (\frac{300-T}{10})^2 + 0.3400 (\frac{300-T}{10})^3 ]$$

○ T = 300~500 °K

$$C = 10^{-6} [ 3907672 - 299159 (\frac{T}{100}) + 82218 (\frac{T}{100})^2 - 9.565 (\frac{T}{100})^3 + 0.3902 (\frac{T}{100})^4 ]$$

○ T = 500~800 °K

$$C = 10^{-6} [ -217538 + 8.2002 (\frac{T}{100}) - 1.0515 (\frac{T}{100})^2 + 0.0457 (\frac{T}{100})^3 ]$$

○ T = 800~1400 °K

$$C = 10^{-8} [ -163.98 + 39.043 (\frac{T}{100}) - 3.004 (\frac{T}{100})^2 + 0.0760 (\frac{T}{100})^3 ]$$

## (iv) D 値

○ T = 270~300 °K

$$D = 10^{-8} [ -1.5732 (\frac{300-T}{10}) + 0.3416 (\frac{300-T}{10})^2 - 0.3626 (\frac{300-T}{10})^3 ]$$

○ T = 300~1400 °K

$$D = 0.0$$

適用範囲

压 力 1.0~ 125 Kg/cm<sup>2</sup>

温 度 270~1400 °K

## (3) 粘 性 係 数

$$\mu = \mu_1 + \Delta \mu$$

$$(i) \mu_1 = 10^{-4} [ -0.49045 + 6.4319 \times 10^{-2} T^{0.5} + 2.5367 \times 10^{-3} T^{1.0} - 6.0770 \times 10^{-5} T^{1.5} + 5.8460 \times 10^{-7} T^{2.0} ]$$

(T = 200~1400 °K)

(ii)  $\Delta \mu = 10^{-6} [A + B \cdot P + C \cdot P^2]$

(iii) A 値

○ T = 250~400 °K

$$A = -0.28657 + 4.3590 \left(\frac{100}{T}\right) - 22.900 \left(\frac{100}{T}\right)^2 + 34.224 \left(\frac{T}{100}\right)^3$$

○ T = 400~1400 °K

$$A = -0.002575 - 0.48688 \left(\frac{100}{T}\right) + 2.5764 \left(\frac{100}{T}\right)^2 - 8.3232 \left(\frac{100}{T}\right)^3$$

(iv) B 値

○ T = 250~400 °K

$$B = -0.50548 + 3.6962 \left(\frac{100}{T}\right) - 4.2124 \left(\frac{100}{T}\right)^2 - 4.1968 \left(\frac{100}{T}\right)^3$$

○ T = 400~1400 °K

$$B = 0.002510 + 0.46724 \left(\frac{100}{T}\right) - 2.4712 \left(\frac{100}{T}\right)^2 + 7.9904 \left(\frac{100}{T}\right)^3$$

(v) C 値

○ T = 250~400 °K

$$C = -0.023752 + 0.26160 \left(\frac{100}{T}\right) - 0.95780 \left(\frac{100}{T}\right)^2 + 1.2032 \left(\frac{100}{T}\right)^3$$

○ T = 400~1400 °K

$$C = 10^{-4} [-0.15025 + 3.7202 \left(\frac{100}{T}\right) - 21.250 \left(\frac{100}{T}\right)^2 + 63.9104 \left(\frac{100}{T}\right)^3]$$

適用範囲

圧 力 1.0~120 Kg/cm<sup>2</sup>

温 度 250~1425 °K

(4) 热 伝 導 度

$$\lambda = \lambda_1 + \Delta \lambda$$

(i) 
$$\lambda_1 = 0.018415 - 3.9376 \times 10^{-4} T^{0.5} - 1.30010 \times 10^{-4} T^{1.0}$$
  
$$+ 1.4320 \times 10^{-5} T^{1.5} - 1.83830 \times 10^{-7} T^{2.0}$$

(T = 200~1400 °K)

(ii) 
$$\Delta \lambda = A + B \cdot P + C \cdot P^2 + D \cdot P^3$$

(iii) A 値

○ T = 250~400 °K

$$A = 10^{-5} [ 69.6742 - 0.62277T + 1.7130 \times 10^{-3} T^2 - 1.53915 \times 10^{-6} T^3 ]$$

○  $T = 400 \sim 600 \text{ } ^\circ\text{K}$

$$A = 10^{-5} [ -22.6834 + 9.1900 \times 10^{-2} T - 1.42180 \times 10^{-4} T^2 + 7.5450 \times 10^{-8} T^3 ]$$

○  $T = 600 \sim 800 \text{ } ^\circ\text{K}$

$$A = 10^{-5} [ -0.6472 - 1.4610 \times 10^{-2} T + 2.8125 \times 10^{-5} T^2 - 1.4550 \times 10^{-8} T^3 ]$$

○  $T = 800 \sim 1400 \text{ } ^\circ\text{K}$

$$A = 10^{-5} [ -7.0832 + 1.15670 \times 10^{-2} T - 7.600 \times 10^{-6} T^2 + 1.7750 \times 10^{-9} T^3 ]$$

#### (v) B 値

○  $T = 250 \sim 400 \text{ } ^\circ\text{K}$

$$B = 10^{-5} [ -68.5308 + 0.609975T - 1.67428 \times 10^{-3} T^2 + 1.50205 \times 10^{-6} T^3 ]$$

○  $T = 400 \sim 600 \text{ } ^\circ\text{K}$

$$B = 10^{-5} [ 21.6672 - 8.7512 \times 10^{-2} T + 1.35170 \times 10^{-4} T^2 - 7.1625 \times 10^{-8} T^3 ]$$

○  $T = 600 \sim 800 \text{ } ^\circ\text{K}$

$$B = 10^{-5} [ 1.0098 + 1.2446 \times 10^{-2} T - 2.4760 \times 10^{-5} T^2 + 1.2900 \times 10^{-8} T^3 ]$$

○  $T = 800 \sim 1400 \text{ } ^\circ\text{K}$

$$B = 10^{-5} [ 6.83268 - 1.11390 \times 10^{-2} T + 7.305 \times 10^{-6} T^2 - 1.7025 \times 10^{-9} T^3 ]$$

#### (v) C 值

○  $T = 250 \sim 400 \text{ } ^\circ\text{K}$

$$C = 10^{-8} [ 994.614 - 6.3556T + 1.37850 \times 10^{-2} T^2 - 1.00540 \times 10^{-5} T^3 ]$$

○  $T = 400 \sim 600 \text{ } ^\circ\text{K}$

$$C = 10^{-8} [ 212.662 - 1.00080T + 1.62320 \times 10^{-3} T^2 - 8.990 \times 10^{-7} T^3 ]$$

○  $T = 600 \sim 800 \text{ } ^\circ\text{K}$

$$C = 10^{-8} [ 37.3120 - 0.125590T + 1.4730 \times 10^{-4} T^2 - 5.850 \times 10^{-8} T^3 ]$$

○  $T = 800 \sim 1400^{\circ}\text{K}$

$$C = 10^{-8} [ 27020 - 1.71230 \times 10^{-3} T - 7.130 \times 10^{-7} T^2 + 5.550 \times 10^{-10} T^3 ]$$

## (vi) D 値

○  $T = 250 \sim 400^{\circ}\text{K}$

$$D = 10^{-10} [ -53.516 + 2.850 \times 10^{-4} T + 9.418 \times 10^{-4} T^2 - 1.5540 \times 10^{-6} T^3 ]$$

○  $T = 400 \sim 600^{\circ}\text{K}$

$$D = 10^{-10} [ -15.630 + 4.8850 \times 10^{-2} T - 3.800 \times 10^{-5} T^2 ]$$

○  $T = 600 \sim 1400^{\circ}\text{K}$

$$D = 0.0$$

## 適用範囲

$$\text{圧 力} \quad 1.0 \sim 140 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\text{温 度} \quad 250 \sim 1425^{\circ}\text{K}$$

A 1.2.4 過熱蒸気 ( $\text{H}_2\text{O}$ )

## (1) 比重

$$\begin{aligned} r &= P/Z \cdot R_c \cdot T \\ Z &= 1.0 + A \left( \frac{P}{10} \right) + B \left( \frac{P}{10} \right)^2 + C \left( \frac{P}{10} \right)^3 \\ (R &= 8.4810 \times 10^{-2}, M_{\text{gas}} = 18.016) \end{aligned}$$

## (i) A 値

○  $t = t_s (100^{\circ}\text{C以上}) \sim 300^{\circ}\text{C}$

$$\begin{aligned} A &= -10^{-3} [ 20.885 - 3.215 \left( \frac{350-t}{50} \right) + 8.268 \left( \frac{350-t}{50} \right)^2 \\ &\quad - 2.424 \left( \frac{350-t}{50} \right)^3 + 0.380 \left( \frac{350-t}{50} \right)^4 ] \end{aligned}$$

○  $t = 300 \sim 500^{\circ}\text{C}$

$$\begin{aligned} A &= -10^{-3} [ 5.6865 + 2.4670 \left( \frac{550-t}{50} \right) - 0.4576 \left( \frac{550-t}{50} \right)^2 \\ &\quad + 0.17010 \left( \frac{550-t}{50} \right)^3 - 0.00632 \left( \frac{550-t}{50} \right)^4 ] \end{aligned}$$

○  $t = 500 \sim 800^\circ\text{C}$

$$A = -10^{-3} [ 1.380 + 0.79352 (\frac{900-t}{100}) - 0.1000 (\frac{900-t}{100})^2 \\ + 0.07665 (\frac{900-t}{100})^3 ]$$

(ii) B 値

○  $t = t_s (100^\circ\text{C以上}) \sim 300^\circ\text{C}$

$$B = -10^{-6} \{ 15.238 + 6.954 (\frac{350-t}{50}) - 1.050 (\frac{350-t}{50})^2 \\ + 1.1240 (\frac{350-t}{50})^3 + 0.0950 (\frac{350-t}{50})^4 \ }^2$$

○  $t = 300 \sim 500^\circ\text{C}$

$$B = -10^{-5} [ 9.505 - 17.491 (\frac{550-t}{50}) + 13.453 (\frac{550-t}{50})^2 \\ - 3.667 (\frac{550-t}{50})^3 + 0.400 (\frac{550-t}{50})^4 ]$$

○  $t = 500 \sim 800^\circ\text{C}$

$$B = -10^{-5} [ -3.800 + 2.1672 (\frac{900-t}{100}) - 1.100 (\frac{900-t}{100})^2 \\ + 0.2333 (\frac{900-t}{100})^3 ]$$

(iii) C 値

○  $t = t_s (100^\circ\text{C以上}) \sim 300^\circ\text{C}$

$$C = - \{ 0.05923 + 0.03360 (\frac{350-t}{50}) - 0.00293 (\frac{350-t}{50})^2 \\ + 0.00130 (\frac{350-t}{50})^3 \ }^4$$

○  $t = 300 \sim 500^\circ\text{C}$

$$C = - \{ -0.02080 + 0.02145 (\frac{550-t}{50}) - 0.00086 (\frac{550-t}{50})^2 \\ + 0.00021 (\frac{550-t}{50})^3 \ }^4$$

○  $t = 500 \sim 800^\circ\text{C}$

$$C = 0.0$$

適用範囲

圧 力  $1.0 \sim 100 \text{ Kg/cm}^2$

温 度  $t_s (100^\circ\text{C以上}) \sim 800^\circ\text{C}$

## (2) 定圧比熱

$$C_p + C_{p0} + \Delta C_p$$

(i)  $C_{p0}$ 

$$C_{p0} = 0.44754 + 4.438 \times 10^{-5} t + 2.216 \times 10^{-7} t^2 - 1.3315 \times 10^{-10} t^3$$

(ii)  $\Delta C_p$ 

$$\Delta C_p = 10^{-4} [10^6]$$

$$G = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot t^3 + E \cdot t^4$$

(iii) A 値

$$\circ P = 1 \sim 20 \text{ Kg/cm}^2$$

$$A = 2.89759 + 0.35483P - 2.32768 \times 10^{-2} P^2 + 5.8680 \times 10^{-4} P^3$$

$$\circ P = 20 \sim 50 \text{ Kg/cm}^2$$

$$A = 3.74459 + 0.105496P - 1.36480 \times 10^{-3} P^2 + 8.660 \times 10^{-6} P^3$$

$$\circ P = 50 \sim 70 \text{ Kg/cm}^2$$

$$A = -6.989236 + 3.5487P - 5.4196 \times 10^{-2} P^2 + 2.7710 \times 10^{-4} P^3$$

$$\circ P = 70 \sim 100 \text{ Kg/cm}^2$$

$$A = -14.55834 + 0.706626P - 7.8889 \times 10^{-3} P^2 + 3.4260 \times 10^{-5} P^3$$

(iv) B 値

$$\circ P = 1 \sim 20 \text{ Kg/cm}^2$$

$$B = 10^{-2} [-0.872205 + 4.3472 \times 10^{-3} P - 2.9804 \times 10^{-3} P^2 + 9.5570 \times 10^{-5} P^3]$$

$$\circ P = 20 \sim 50 \text{ Kg/cm}^2$$

$$B = 10^{-2} [-0.668515 - 3.51937 \times 10^{-2} P + 4.4994 \times 10^{-4} P^2 - 2.5660 \times 10^{-6} P^3]$$

$$\circ P = 50 \sim 70 \text{ Kg/cm}^2$$

$$B = 10^{-2} [6.05064 - 2.896145P + 4.43912 \times 10^{-2} P^2 - 2.2640 \times 10^{-4} P^3]$$

$$\circ P = 70 \sim 100 \text{ Kg/cm}^2$$

$$B = 10^{-2} [4.601019 - 0.186265P + 1.93268 \times 10^{-3} P^2 - 9.8970 \times 10^{-6} P^3]$$

## (v) C 値

$$\circ P = 1 \sim 20 \text{ Kg/cm}^2$$

$$C = 10^{-5} [ 1.259928 - 0.121434P + 1.59730 \times 10^{-2} P^2 \\ - 4.6763 \times 10^{-4} P^3 ]$$

$$\circ P = 20 \sim 50 \text{ Kg/cm}^2$$

$$C = 10^{-5} [ 0.55556 + 5.9091 \times 10^{-2} P - 7.0187 \times 10^{-4} P^2 \\ + 2.8470 \times 10^{-6} P^3 ]$$

$$\circ P = 50 \sim 70 \text{ Kg/cm}^2$$

$$C = 10^{-5} [ -18231394 + 8.60208P - 0.131769P^2 + 6.6995 \times 10^{-4} P^3 ]$$

$$\circ P = 70 \sim 100 \text{ Kg/cm}^2$$

$$C = 10^{-5} [ 1086408 - 0.418308P + 5.7442 \times 10^{-3} P^2 \\ - 1.68300 \times 10^{-5} P^3 ]$$

## (vi) D 値

$$\circ P = 1 \sim 20 \text{ Kg/cm}^2$$

$$D = 10^{-9} [ -7.50441 + 1.255628P - 0.139210P^2 + 3.9439 \times 10^{-3} P^3 ]$$

$$\circ P = 20 \sim 50 \text{ Kg/cm}^2$$

$$D = 10^{-9} [ -1.45205 - 0.314336P + 3.0965 \times 10^{-3} P^2 \\ - 3.0600 \times 10^{-6} P^3 ]$$

$$\circ P = 50 \sim 70 \text{ Kg/cm}^2$$

$$D = 10^{-9} [ 2.3365949 \times 10^3 - 1.094091 \times 10^2 P + 1.67402P^2 \\ - 8.4880 \times 10^{-3} P^3 ]$$

$$\circ P = 70 \sim 100 \text{ Kg/cm}^2$$

$$D = 10^{-9} [ -4.204902 \times 10^2 + 1.602904P - 0.20013P^2 \\ + 7.2410 \times 10^{-4} P^3 ]$$

## (vii) E 値

$$\circ P = 1 \sim 50 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E = 0.0$$

$$\circ P = 50 \sim 70 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E = 10^{-12} [ -1.07688 \times 10^3 + 5.01801P - 0.76680P^2 \\ + 3.8790 \times 10^{-3} P^3 ]$$

○  $P = 70 \sim 100 \text{ Kg/cm}^2$

$$E = 10^{-12} [ 3.088743 \times 10^2 - 11.67155P + 0.143150P^2 \\ - 5.3760 \times 10^{-4} P^3 ]$$

適用範囲

圧 力  $1.0 \sim 100 \text{ Kg/cm}^2$

温 度  $100 \sim 800^\circ\text{C}$

### (3) 粘 性 係 数

$$\mu = \mu_1 + \Delta \mu$$

(i)  $\mu_1 = f(t)$

(ii)  $\Delta \mu = f(t, r)$

$\mu_1$  は圧力が 1 bar,  $\Delta \mu$  は  $1 \sim 800 \text{ bar}$  で, 温度が  $100 \sim 700^\circ\text{C}$  の表示式で,  
JSME STEAM TABLES(1968)の式を採用する。

適用範囲

圧 力  $1.0 \sim 815.8 \text{ Kg/cm}^2$  ( $1.0 \sim 800 \text{ bar}$ )

温 度  $100 \sim 800^\circ\text{C}$  (注)

### (4) 热 伝 導 率

$$\lambda = \lambda_1 + \Delta \lambda$$

(i)  $\lambda_1 = f(t)$

(ii)  $\Delta \lambda = f(t, r)$

$\lambda_1$  は圧力が 1 bar,  $\Delta \lambda$  は  $1 \sim 500 \text{ bar}$  で, 温度が  $100(t_s) \sim 700^\circ\text{C}$  における表  
示式で, JSME STEAM TABLES(1968)の式を採用する。

適用範囲

圧 力  $1.0 \sim 509.9 \text{ Kg/cm}^2$  ( $1 \sim 500 \text{ bar}$ )

温 度  $100 \sim 800^\circ\text{C}$  (注)

---

注 JSME STEAM TABLESにおける適用範囲は  $700^\circ\text{C}$  までであるが, 本コードでは  $800^\circ\text{C}$  まで外  
挿して使用する。